

## 第1回専門家フォーラム

日時：平成25年11月23日（土）13時～17時

場所：東京大学 農学部キャンパス 弥生講堂アネックス セイホクギャラリー

テーマ：**原子力発電所はどのような地震にどのように備えているのか？**

### 内容

話題提供① システム安全の考え方と耐震設計について .....	2
1. システム安全の考え方 .....	2
2. 原子力発電所の地震リスクをどう評価しているか .....	3
3. まとめ .....	6
<質疑応答> .....	6
話題提供②：原子力施設は地盤の変位にどう備えているのか .....	9
はじめに .....	9
1. 用語の説明 .....	9
2. 基準類の変遷と問題点 .....	10
3. 照査の考え方 .....	11
4. 工学的な対応と性能照査 .....	14
5. まとめ .....	16
<質疑応答> .....	16
<全体討議> .....	18
耐震設計の余裕とは？ .....	18
地盤はどう影響するか .....	18
Unknownは何か .....	19
裕度の考え方 .....	19
専門家の見落としの可能性をどう考えればよいのか .....	20
どこまでのシステムを考えるべきか .....	22
地盤から設備はどうつながっているのか、つながっていないのか .....	23
地震をどこまで理解しているのか .....	24
福島事故の問題は何か .....	25
地震学からの反省 .....	27
想定外に対応できるか .....	29
技術はつながっているか .....	30
原子力システムはどこまで考えればよいのか .....	31

## 話題提供① システム安全の考え方と耐震設計について

### 1. システム安全の考え方

#### 1. 1 システムとは

原子力発電所は、電気系統、計装（制御や計測）系統だけでできているのではなくて、配管や機器のハードの構成やその中を流れる流体の制御などのソフトも含めて、広い分野にわたる技術が非常に複雑につながってできているものです。そういう様々な技術が結びついてできている構成がシステムであり、構成する様々な技術分野をどう統合するか、が重要になります。なお、システムというのは、ハードのつながりだけではありません。様々な技術に関わるそれぞれの人や仕事をいかにうまくつなげていくかということがキーポイントです。

最近では情報処理技術が進んで、個々の機器の健全性だけでなく、構造物全体に対して地震動の影響を解析できるようになってきました。

#### 1. 2 原子力発電所システムの安全確保の基本～深層防護

複雑な原子力発電所システムの安全を確保するための基本的な考え方が「深層防護」による安全設計です。「深層防護」とは、「設計の限界」があって異常が発生をするという前提で、異常が発生した場合に対応するという前段否定の考え方です。まず第1層として異常の発生を未然に防ぐ、第2層では異常の発生を捉えて事故への進展を防ぎ、通常の仕組み（設備）により原子炉を停止することができるようにする、第3層は事故になっても想定内の事故にとどめ、非常用の安全系により原子炉を停止することです。第4層は、事前に備えていたものではない設備も使って事故の拡大を防ぐ、それでも過酷事故（放射性物質の大量放出）となった場合には第5層として発電所外の住民に被害を及ぼさないための備え、防災対策をする。

今回の事故では、残念ながら、この第4層の防護壁、要するに、事故が起きたらどうやってシビアアクシデント対策を用いて事故の拡大を防ぐかがうまくいかなかったということであり、さらに第5層の実際に放射性物質が大量に放出された時に、どのように避難をして、どのように危機管理をするかということが問題でした。

例えば、地震という事象を考えてみると、地震のレベル（大きさ）がどれだけのものまでは、プラントのすべての機器が、多少壊れたとしても求められる機能としては働いて、例えば通常のシステムの外から電気を供給するなりして、原子炉の冷温停止まで持っていくという考え方でできているのが第3層までです。地震動の大きさが設計のレベルを超え、設備の多くが機能を喪失してしまい、事故が起きたときにどういう対応するかというマネジメント（設備の運用と人の活動を差配して対応すること）と、可搬型の設備などを準備しておくというのが第4層です。そして、これがさらに破れたときには第5層の防災です。ここにおいても、周辺に及ぼす影響をなるべく小さくしようということで、フィルタードベント設備を設置するよう求められています。

#### 1. 3 設計とは

設計というのは、モノ（プラント）を建設してプラントが動くまでだけでなく、動かした後も、いかにきちんと運転できているか、いかに事故の対応ができているか、常にこれを確認し

ていくことまでを含みます。事故は起きないように作っているから関係ありませんではなく、起きたらどうするかを考えた設計をしなければいけないということです。

### 1. 4原子力のリスクをどう捉えるか

台風や船舶事故のリスクとして、しばしば死亡者数が用いられます。原子力でも、これをリスクと考え、死亡事故がどれだけ起きるか、その確率を小さくしようではないかということで、様々に手を打っています。

ところが、今回の事故を考えてみると、重要なのは死亡事故というだけではなく、原子力の事故は人の生活環境に影響を及ぼすのだと実感したわけです。これまでのリスクの考え方を今私たちは見直しをして、どういうリスクの値を取っていくのかを考えようとしています。

リスクというのは、単にその状態が危害を受ける可能性があるという問題だけではなくて、ベネフィット（便益）を得るということと一体です。ですから、ベネフィットを得るために、リスク（危害を受ける可能性）をどこまで我慢するかという問題として、多くの人に受容される領域、多くの人を受容できない領域、人によって異なる領域として、捉えようと考えています。

## 2. 原子力発電所の地震リスクをどう評価しているか

原子力発電所にとって、日本では地震が一番大きなリスク要因であるという考えで活動してきました。原子力発電所の地震リスク評価では、地震により大きな加速度が発生したときに、どこの部分がどう壊れるかというのを組み立てて、そこで必要な機能の喪失確率を出して、炉心損傷に至る確率を評価するという仕組みを作っています。その中で、分からない領域、分かった領域で、どれだけの確率で損傷が起きるかという評価を入れる形になっていますから、信頼性の幅も大きなものになります。かなり作り上げてきているのですが、まだまだ分からないところがたくさんあって、信頼性の幅（unknownな幅）、不確定性は大きなものになっています。これまでの評価の経験と新たな知見を反映して、今、見直しをかけているところです。さらに充実していかなければいけないと考えています。

### 2. 1 耐震設計とプラントの健全性評価

耐震設計の目的は、大きな地震が来た時に備え、“原子力施設の放射線の影響から公衆の健康と安全及び環境を守る”ことです。地震の大きさ（地震動）を想定し、どれぐらいの荷重がかかるかを与え、耐震重要度を考慮しながら耐震評価を行って、この地震荷重をかけて、もう一度構造設計に戻し、地震荷重が加わっても壊れないという構造を得るわけです。（「壊れない」と言うのは、弾性範囲に留まり、「変形をしない」ということです。）

#### ①構造設計

構造設計で考慮するものには、通常運転時や異常な運転に伴い加わる圧力だとか、温度だとか、それから自重だとか、いろいろな荷重要素があります。そういったものを加えた状態で十分に健全性が維持される設計において、この耐震設計で地震荷重が加わった状態で構造健全性が十分満足するかどうかという評価をするわけです。地震荷重は、多くの機器、設備に対して

は通常の運転状態で加わる荷重に比べて大きなものではなく、通常の運転状態の健全性確保の構造設計で十分にその構造健全性を確保できるものとなっています。

## ②地震荷重・振動スペクトル

地震動は、歴史地震や活断層データを使って基準地震動を決めて、それに基づいて、それぞれの設備がどれぐらい発電所のハザードになるか、振動荷重として働くのかというのを計算します。地震の振動スペクトルは様々に評価されています。それらを包絡するスペクトルを使って、私たちは耐震評価をしています。包絡した波ですから、通常は実際の波よりかなり大きな波を入れていることとなります。これを地震の評価スペクトルとして与えて、構造物がどういう応答を示すかということの評価します。

## ③確率論的リスク評価

通常の設計では決定論で評価をするわけですが、地震による安全評価、原子炉の健全性評価では確率論的リスク評価（PRA）を行います。設備の破損、機能損傷の確率を見ながら基準地震動（設計基準地震動  $S_s$ ）を超えるような大きな地震があったとしたら、どれぐらいの確率で機器の損傷、破壊、炉心の溶融を受けるかを求め、安全評価を行っているわけです。

規制基準において、設計基準の地震動を超えた場合にどうなるか、対策をとることでリスクはどれだけ小さくなるかを「残余のリスク」として評価することが示されましたが、まだ本格的に取り組まれていない状況です。

## ④建屋～機器の振動

地震の評価では、振動が伝わることによって、建屋が揺れて、重要な機器がどれだけ応答するかという議論をしていきます。解析では、建屋を串だんごのモデルとして作ります。それぞれの串だんごの応答のところは建物の床になっていて、この床でどれだけ振動するか（床応答スペクトル）を評価します。そのデータを用いて、ここに置いてある機器がどういう応答を示すのかという振動特性（スペクトル）を求め、それで全体の健全性を求めます。最終的には、こういう安全を確保する設備が壊れないということ、炉心を冷却する設備の健全性が確保されることや放射性物質は閉じ込められることを確認します。

## ⑤耐震重要度の考慮

今回の福島事故では、原子炉建屋の中にある重要機器は、ほとんど問題ありませんでした。気になるのは、重要機器をサポートする機器、設備です。こういった重要なシステムを構成する機器の中にも、耐震重要度を C だとか B にクラス分けにしているものもあり、これら全体から原子力発電所はできているわけです。耐震重要度が B や C クラスのものは、通常の設計をしていますから、壊れてしまうことは十分に考えられるわけです。福島事故で実際に壊れたものはほとんどありませんが、事故時には、やはりこういう機器、設備も時として重要な役割を持つため、健全性が確保されなければいけない場合もあります。構造物だけを評価すればいいというわけではなく、事故時に働くシステムとしての役割も重要だということです。

## ⑥手法の進展と規制

建屋のモデルがどの程度現実とあっているのか、どの程度整合性が取れているかというのは、実際に、耐震実証試験だとか、地震での実機での応答データを捉えながら検証をしています。

最近、建屋の CAD 情報を用いて、もっと現実的なモデルを作って、全体を揺らしてと、どんどん進歩しており、いろいろなことができると思います。しかし、まだまだ考えなければならないことはたくさんあります。一方、規制評価においては、これまでと同じような串だんごのモデルで評価をしています。

機器・設備に荷重をかけていくと、だんだん歪んでギュウっと伸びて、プツンと切れて壊れます。ものが壊れるときの荷重が破損限界です。荷重を加えて発生する応力に対して、許容値というものをを用いて、それに更に余裕を与えて、発生する応力が下回るように形状を決めたり、サポートを強化したりしています。つまり、実際にかかる力、設計に用いている許容値と、変形や破壊までの応力との間に大きな差、余裕があります。また、振動というのは交番応力、土の応力がかかるということで、常に引っ張っているわけではありませんから、ここにも余裕があるということです。

### ⑦加振試験

ポンプや弁などの動的機器の機能維持においては、たくさんの機器が対象となります。こういう動的機器については、実際に外力を加えて保つかどうかという試験をすることが有効です。昭和 55 年から多くの加振試験が行われてきました。格納容器、炉内構造物、一次系の冷却の配管、非常用ディーゼル発電機、計算機システム、停止時冷却系や主蒸気系の配管、制振サポート機器など、ほぼ実物大の試験で確認をするということをやってきました。

これまで、壊れるまでの加振試験やったことはほとんどありません。実際の揺れの何倍もの加速度を加えて健全性を見ているのですが、ほとんどの場合壊れないということが確認されています。十分に壊れないことを確認しているのですが、どこまで振れば壊れるのかということがはっきり分からないのです。

## 2. 2 過去の地震の経験

### ①中越沖地震

中越沖地震では、設計時の加速度が 200 ガル程度でしたが、観測データでは 700 ガルというものが見つかっています。被災後どれくらい余裕があったのかを解析した結果です。許容限界に対して、地震以外の力、例えば熱とか、圧力だとか、自重だとかに、地震力が加わって、それぞれの設備の許容限界に対して余裕があったということを示しています。

例えば、配管というのはサポートがありますから、サポート内で滑る、それから配管自身が揺れる、中に液体が入っていますから、揺れることによってエネルギーが散逸することになります。原始的ですが、今の配管設計では、地震で揺らされる振動数の幅を 10% 拡幅して与え、この時に減衰率を小さな値（1%）で与えて応答を求めています。また、配管で応力が高いのは曲がっている所です。もっとも応力が高い所で評価していますので、この辺も過大な評価になっています。

試験による耐震設計の余裕の確認も行っています。大きな加速度を与えて、応答を測定して余裕がどれくらいあるかを評価しています。また、1 回の地震で疲労破損は起こりませんが、それほど大きな荷重でなくても、何回も繰り返し応力が加わると壊れてしまいます。ある部分

の構造（例えば、弱い部分）に対して1回で壊れるとした時の地震力と設計用地震力を比較して、どれぐらい余裕があって、何回揺れると壊れるかという評価をしているのです。

## ②東北地方太平洋沖地震

東北地方太平洋沖地震ではどうなったのか。東通、女川、福島第1、第2、東海の中で、福島と女川で基準地震動を超えたところがあります。福島第一では、基準地震動の1.2倍ぐらいの加速度を観測しています。他のプラントのデータから見て、この程度の加速度では問題ないと評価しています。特に女川では、何回もこの程度の基準地震動を上回る加速度の地震がこれまで発生していて、機器の健全性は十分確認されています。

## 3. まとめ

耐震評価において不確実な要素として考えられるものをすべて挙げてみました。こういうところを一つずつつぶして、問題ないのかどうか、問題あるのはどの程度の不確定要因があって、これをどの程度考えていかないといけないのかということ示しています。これらを明確にすることで、私たちは、さらに設計の精度を上げていこうと考えているわけです。これらが耐震評価上の大きな課題です。

事故前から深層防護が必要だとか、リスクを指標としてトータルプロセスマネジメントをしようとか、を考えていました。これは柏崎（の被災）から私たちが学んだことで、それぞれ解決の取り組み、研究開発に取り組んできたはずなのですが、やはりなかなか難しい問題が多いことから、十分には対応されていませんでした。私たちは、今後これらの余裕や不確実性に対してどういう研究をしていったらいいのか、どういうふうにものを作ったらいいのかということを考えなければならないと思っています。

**P：話題提供者    E：専門家フォーラムメンバー    A：プロジェクトメンバー**

### <質疑応答>

- E1** 強度を調べるときに、引っ張りを扱っていますが、地震動の場合、せん断が問題ですね。それに関しては、どのような評価がなされているのでしょうか。
- P1** 基本的には、材料の引っ張り強度が問題です。引っ張りによるせん断は評価式を与えて、それで是正しているというのが今の形です。ですから、どちらかといえば引っ張り強度で、基本的に評価しています。
- E1** もう1点、今回の地震では、結局、最大加速度はそれほど大きくなかったんですけど、継続時間はすごく長かったですね。その影響というのは、かなり大きかったのではないかと思いますのですが、その辺はいかがですか。
- P1** それには二つ要素があります。一つは、ダンピングということで、どれぐらい振動が成長するか、もう一つは、大きな荷重が（繰り返し）加わった場合の疲労です。この二つの要素で、どれぐらいの問題なのかですが、中越沖地震の評価も、基本的には今まで私たちがやっているようにスタティック（静的）な場合ですので、継続時間が長いことで荷重は多少大きくなったということかもしれない。交番荷重に関しては、今までと同様に評価でき

ていると思います。ただ、（応答荷重が）伸びていくかどうかどうにかについては、ダンピングが小さいものは、いわゆる三波で伸びてしまうので、時間が長くてもそれほど問題はないというふうに思っております。ダンピングが大きなものではどれくらい伸びるかははっきりわかっていませんが、基本的には5パーセントを超えるものはほとんどないと思います。ダンピングは数パーセントじゃないかなと思っております。ですから、これまでやっているものと、それほど大きな差異がなくて、静的な評価で十分カバーできるんじゃないかなと思っております。

**E2** 中越沖の事実確認ですけど、非常に大きな、基準地震動の2.5倍という観測データが得られたけれども、大丈夫だと説明され、その理由が余裕があったということでした。余裕がたくさんあって限界を超えないような設計をしていたから大丈夫だという話なんですけど、実際は、それ（限界を超える状態）が起こった気がするんですね。つまり、世の中には、ちょっと限界を超えても大丈夫なんだというようなことを思っている方もいらっしゃると思うんです。その理由として、機器の設計も、建屋のほうも、多分、安全裕度ありますね。そういうことが功を奏したのか、そうではなくて、もっと基本的な部分で余裕があるものなのか。実際は基準地震動の3倍も超えていたような部分もあったと思うんですけど、それでも大丈夫だったことに対する事実関係としてはいかがでしょうか。

**P1** 私も記憶で申し上げるわけですけど、壊れた所と疑われたのは、確か一次系の配管の周りだったと思います。それも、最終的には塑性変形まではいかないという評価でした。塑性変形してもどれくらいかという評価をすればいいんですけど、要するに分からない程度で、壊れた（弾性領域を超えた）ということだと聞いております。

それですから、3次元解析でどれくらいかっているのが、それもなかなか難しいのです。解析ですから実際に測定しているのと、かなり違うところがあるかもしれない。それでも、地震動を大きく見積もっている解析で問題ないということなので、実際にそういう評価をしなくても問題ないと理解しています。

**E2** 構造物は解析によって健全性を評価することもあると思いますが、機器の健全性は外見的にも少し歪んでいるとか、見れば、当然壊れているのは分かるでしょうが、そういうものは解析によってしか評価できないのでしょうか？何がどういう力でどうなっているかということ、何らかの、もう少しビジュアルに示す手法はないのでしょうか？

**P1** 大きく変形するのなら、マーキングをすればできるでしょう。実験的には何でもできると思うのですが、やってみると振動しているものが多いと分かります。それでも壊れていないのです。静的に変化している（僅かなひずみ）ものは、今は解析でしかわからないと思っています。ですから、中越沖のときも解析評価でした。もちろん目でも見えますけど、目で見て確認できるほどの変化じゃありません。

**E3** システムの話を改めて聞かせていただいて、重要だなと思いました。特に、システムの相互作用というか、いろんなシステムがつながって相互依存の状況になっています。説明されたシステムは、割合、狭いシステムのような感じがしたんですね。プラントもひとつのシステムですが、敷地内には道路のようなインフラ系や、冷却水の供給、電気の供給、情報

の供給、そういうネットワークがあって、原子力発電所の安全運転が維持されている。システムというのは、どのくらい広い意味で考えたほうがいいのか。いろんな考え方ができると思うんですけど、ちょっとその辺りでご意見を聞かせていただけますか。

**P1** 全くおっしゃるとおりで、発電所のプラントという限られた領域のシステムで、基本的には話をしているのですね。お話し申し上げた中には、人との関係だとか、情報だとかっていうのがあるんですけど、プラント全体としては、今、そういったことを考えてないというのが一つの問題だと思うのです。例えば、（深層防護の）第5層で、防災ということを考えて、プラントの中だけの防災じゃなくて、中と外の問題なので、そこにどういうシステムを考えるかということが重要だと思います。プラントのシステムとしても、送電線は入っているんですけど、送電網や、山だとか地形だとか、それから周りの人だとか、情報がどう流れているということ、そういうシステムというのは全然考えていませんでした。これはこれからの課題です。

**土屋** どこまでのシステムを考えるかというのは後半の議論でも扱いたいと思います。

**A1** 今のシステムの話ですけど、システムは、さまざまな要素や、さまざまなものをつないだり、あるいは、組み合わせたりして、できているわけですね。そこでは、実に、多様な要素、あるいは性質の異なっているものが組み合わせられ、積み重ねられていきますよね。私に分からなくて心配だったのは、つないだり、組み合わせるとき、随分性質が違うものがたくさんあるんじゃないかということなんです。お話の中では、それが、つなぐとか組み合わせるといふ言葉で済んでいた気がするんですが、そういうつなぎ方、あるいは、組み合わせ方についての研究っていうのは、システム研究の中ではあるんでしょうか。

**P1** 私たちも今、トライアルしているところもあるわけですけど、何を目的にするかということによって違ってきます。例えば、リスクというのは非常に便利な言葉なのです。リスクというのは、目標とするものに確率を持ってきて、アウトプットを共通化すると、それでつなげることができる。要するに、結び付けられる定量的な数値にしていくということが必要なのだろうと思うのです。例えば、求めている機能を得るために、機能が働く確率はどうだというようなことで、物理的なものについては、そういうふうにしてやろうとしている。それが、例えば、情報だとか、違う分野のものをつなぐにはどうしたらいいかという問題は、多分同じようなところではあるんじゃないかと思いますが、まだトライアルしておりません。物理的なもの、必要なものを、機能という形で置いて、評価をしていこうと考えているところです。

**土屋** まだご質問がごありかと思いますが、次の話を聞いてからで、よろしいでしょうか。予定時間をオーバーしていますが、5分くらい休憩をして再開したいと思います。



## 話題提供②：原子力施設は地盤の変位にどう備えているのか

### はじめに

初めに、活断層、地表地震断層、断層破碎帯等の重要な用語を説明します。それから、断層問題との関連において基礎地盤の安定性に関わる基準類の変遷と、照査の考え方を説明します。照査とは、地盤工学では基礎地盤や斜面が地震や豪雨に対して安全かどうかチェックするという意味です。工学的な対応である対策の考え方やその性能照査についてもお話しします。

### 1. 用語の説明

#### ①岩盤の不連続面と断層

地質学の分野とは少し定義が違うかもしれませんが、私が専門とする岩盤工学の分野では、断層や節理等の岩盤が破壊した面状の構造を総称して「岩盤の不連続面」と言います。

この不連続面の中で特に重要なメンバーが「断層」です。地層が不連続面に沿ってずれている場合には「断層」と呼びます。

#### ②活断層(active fault)

この「断層」に「活」が付くと、第四紀の後期、つまり数十万年前から繰り返し活動し、将来も活動する可能性がある断層となります。

原子力の分野では「耐震設計上考慮する」という修飾語が前に付いて、12、3万年前以降の活動の有無で認定されます。手引きの段階でも基本的な定義は変わっていませんが、認定が容易でない場合にはさらに古い時代の地質も調べることになっています。

#### ③IAEAの基準類における断層の定義

活断層を訳すと active fault ですが、これは seismic activity、つまり地震動、揺れを起こす可能性がある断層という意味です。

日本の活断層とは少し違うのですが、IAEA では capable fault と surface faulting という用語も定義しています。capable fault は相対変位を生じる可能性がある断層を、surface faulting は地表に出現した亀裂や段差を意味します。

#### ④地表地震断層

内陸で発生する地震の場合には、大体、深さが3キロから24キロ位の地震発生層にある震源断層で岩盤が破壊します。その際に放出されるエネルギーが揺れとして伝わる地震動に対して設計するのが耐震設計です。

マグニチュードが6から6.5を超える地震ですと、震源断層におけるずれが大きくて、ずれが地表まで到達すると地表地震断層と呼びます。濃尾地震では、道路が数メートルも断ち切れています。断層のずれや表層の地盤によって地表地震断層の様相は大きく異なります。また、地表が撓むように変形する場合には「撓曲」と呼びます。

「地表地震断層」が、構造物を破壊する作用として強く認識されるようになったのは1999年ころからです。1999年の台湾の集集地震では、大きなダムや道路橋が破壊されました。

ずれが7、8メートルの逆断層です。橋の裏側の滝は、地震の時のずれが原因でできたものです。

同じ年にイズミット地震とかコジャエリ地震と呼ばれる地震が発生して、横ずれで鉄道のレールが曲がってしまいました。このように2メートル以上も狭い範囲でずれしてしまうと、軌道がZの字形に変形して脱線が懸念されます。

### ⑤断層破碎帯

原子力では、最近、「敷地内破碎帯」という言葉が良く使われます。断層を「岩盤の不連続面」の種類の1つと定義する場合には、厚さを持たない面状の構造として意識しています。断層のずれによって岩盤が帯状に破碎されている部分について幅を意識した場合には、「断層破碎帯」と言います。

石原裕次郎が出演した「黒部の太陽」でもトンネル掘削で「断層破碎帯」を突破することがテーマになっていました。工学的に非常に重要視される理由は、角礫から成る部分と粘土から成る部分が複雑に絡み合った不均質な内部構造に起因します。角礫層は隙間が多いので水が流れやすく、一方、粘土層は粒子が細かいので水が通らずに「断層シール」とも呼ばれます。トンネルが断層を掘り抜こうとすると、「黒部の太陽」のように大量の水が突然に噴出することがあります。

中央構造線の地表露頭は非常に幅が広くて、場所によっては30メートル程度もあります。視覚的にも非常に複雑な内部構造であることが分かります。地下の断層でも内部構造は複雑です。もんじゅの近くの白木・丹生断層のボーリングコアは、網目状の内部構造を呈しています。

## 2. 基準類の変遷と問題点

基礎の安定性に関する基準類の歴史をお話しします。

基本的には、建物・構築物は十分な支持性能を有する地盤に設置されていれば良い、とすることに尽きます。地盤は、人間が作るものではないので設計対象というより、上部構造を安全に支持できることを確認するだけの対象ということです。

断層変位に関しては、特に「断層変位に対して安全であることを確認しろ」とまでは書いてなかったのですが、バックチェックにおける安全審査ではきちんと確認をしていました。1999年の地震以降、断層変位による被災は知られていたからです。

2010年に安全審査の手引きが作成されました。「耐震設計上考慮する活断層の露頭」に初めて言及し、「本章に規定する事項については適用しない」ことが記載されました。これはとても分かり難い文章です。要するに、その際の議論の内容から推察すると、「大きな断層変位が懸念される所には重要な施設は作りません」ということです。ただし、活断層という言葉の前に「耐震設計上考慮する」が付いていますから、大物の活断層を対象としていたことは間違いありません。

東日本大震災後に作成された耐震設計審査指針（改訂案）では、もう少し分かり易い表現にして「地震発生に伴う地殻変動に対して、安全機能が損なわれることがないように設

計されなければならない」となりましたが、真意は変化していません。安全審査の手引き（改訂案）でも「地震発生に伴う地殻変動および断層変位を適切に設定し、解析により評価すること」が記載されており、工学的な観点から安全かどうかを照査することが規定されています。

規制庁が作った新安全基準（地震・津波）骨子案の、1章にある「断層等の露頭がないことを確認」という部分が非常に問題です。下の解説部分の「震源として考慮する活断層」は「耐震設計上考慮する活断層」と同義なので大物の活断層を対象としており、従前と変わらないと思います。しかし、次の「活動に伴って永久変位を生じる断層」、つまり規模に依らず、たとえどんなに小さいずれしか生じない断層であってもダメですと規定しています。これは非常識な立地制限だと思います。

5章になると、「地震動に対する弱面上のずれ等がないことを含め、基準地震動に対する支持性能が確保されていることを確認」と書いてありますが、小規模な弱面上のずれ等がないことは確認することは現実的に非常に困難です。現実を無視した非常識な文章だと思います。

### 3. 照査の考え方

#### 3. 1 食い違い弾性論

先ほどの話題提供によると、上部構造や設備については本当に壊れないかどうかを実際に振動台の上で揺らして十分な安全性を有することを確認してきた、ということでした。残念ながら、基礎地盤については同じようなレベルでは確認をすることができず、食い違い弾性論に基づく解析的な方法によって照査をしています。

食い違い弾性論では、地盤は線形・一様・均質・等方で、初期には水平・平坦な半無限弾性体と仮定します。こうすると、地下の微小面がずれた際の地表面の変形が計算できます。ずれを生じる微小面は分布させて解を重ね合わせるすることができますから、震源断層の形状は自由に設定することができます。最近、平行な多層地盤についても解けるようになっていますが、非常に単純化したモデルです。

#### 3. 2 食い違い弾性論の適用例

##### ①2011年 東北地方太平洋沖地震

GPSで地震前後のデータから推定した地表の変位分布に適合するように逆解析によって推定した震源断層のモデルです。

プレート境界上のすべり量の分布も逆解析できます。震源断層の位置やすべり量の分布を実際に計測することはできませんので、食い違い弾性論による逆解析の結果が正しいかどうかは確認することはできません。しかし、地表で観測された現象を相当に説明できているとは思います。

この食い違い弾性論を用いて、想定した地震が起きた際に施設でどのような地盤変形が生じるかを求めて、施設が安全かどうかを照査します。

## ②2007年 新潟県中越沖地震時の東京電力㈱ 柏崎刈羽原子力発電所の場合

柏崎刈羽原子力発電所では、1-4号機と5-7号機が少し離れて立地しています。それぞれ7センチと10センチ位隆起しました。地震によって施設が傾斜した様子が、日本の原子力発電所の中で、初めて計測された例になります。

地表の変位計測から国土地理院が求めたモデルでは、地下深部で2枚の断層が動いたと推定しています。計算結果を見ると、海では80センチぐらい隆起、陸地では40センチぐらい沈降しています。

新潟県中越沖地震で計測された各建屋の隆起量と傾斜です。計算では敷地全体では傾斜は同じ方向でほぼ一様ですが、100メートル程度しか離れていない各建屋の傾斜が様々な方向を向いています。値の大きさが近いかどうかの問題ではなく、逆向きに傾いているということです。この原因については東京電力が調査していますが、まだ解明していません。

私の考えはこうです。まだ、施設の正確な挙動を予測することは難しい。しかし、解析自体は広域の挙動を十分に説明できるので、不確かさを合理的に考慮して施設の安全性を照査すれば良いということです。

鉛直変位の解析値と実測値の関係をみると、傾きの傾向は合っていますが、解析値は50から60ミリも過小評価しています。この差56.8ミリは傾斜には無関係のオフセットと考えます。問題となるのは、解析値からのずれの程度です。ずれの平均（標準偏差）は8.8ミリで、これをこのサイトにおいて解析値に含まれる不確かさの特性であると考えます。しかし、このような流れで照査が可能なのは、近傍で地震が発生したサイトだけですから、柏崎刈羽に限定されます。

## ③2007年 能登半島地震時の北陸電力㈱志賀原子力発電所の場合

能登半島沖地震では、能登有料道路で数多くの盛土が崩壊しました。北陸電力の志賀原子力発電所が、震央から20キロ弱のところに立地しています。敷地内の変位はほとんど計測されていませんが、近傍の海岸道路に沿って最大は40センチ程度の地盤の変位量が計測されています。

耐震設計上考慮する活断層である笹波沖断層帯が震源断層としてモデル化されています。断層面内で一様の滑り量を仮定していますが、グラフに示すように、食い違い弾性論による計算結果は実測値をかなり上手に説明できます。

### 3.3 食い違い弾性論の課題

これまで説明したように、この解析方法は広域の地表面の挙動については、全体的な傾向を表現することはできます。しかしながら、実際には震源断層の位置や滑り量を確認しているわけではありません。震源断層の位置については余震の分布が重要な情報になりますが、滑り量の分布については確認が容易ではありません。

施設の安全性の照査と言う観点からいうと、2つの課題があります。先ほど説明しましたように、この解析では地盤について非常に単純なモデルを仮定しています。しかし、実

際には地表に近い浅い部分の現象は複雑です。表層の相対的に軟らかい地盤では、断層が1本そのまま真っ直ぐに発達するわけではなく、途中で分岐したり尖滅したり方向を変えたりしますが、解析ではモデル化されていません。

もう1つの課題は、局所的挙動の妥当性です。キロメートルオーダーの広域の変形については食い違い弾性論は巨力なツールと言えるかもしれませんが、施設の安全照査で関心があるのは百メートルオーダーのより狭い範囲の挙動で、その解析の妥当性があるかどうか重要です。

### 3. 4 照査の方法

食い違い弾性論を用いて、断層変位（震源断層の食い違い量）に関する不確かさを考慮するために非常に幅広いケースについて施設の最大傾斜が計算されます。1/8,200～1/1,210,000 という非常に小さい傾斜です。しかしながら、このサイトの地域特性を考慮した計算に関する不確かさに起因する傾斜 1/3,200～1/7,000の方がずっと大きいのです。新しい規制基準の検討において、建屋基礎の傾斜の基準値を 1/2,000 とすることに私が反対した理由の1つは、現在の設計計算の技術水準を無視した過大な要求性能だからです。

基礎の傾斜の基準値（クライテリア）は本来どのように決めるかという点、施設内の機器類の性能によって議論をするべきだと思います。最も大事なことは制御棒の挿入性ですが、保安院の方に聞いた話では 1/300 の傾斜でも大丈夫だそうです。その他にも大事な機能を有する機器類がありますから、それらの全てが安全を担保する上で必要な機能を果たせるかどうかという観点から議論すべきです。建屋の構造的な健全性という観点からは、1/500でも十分過ぎるくらいです。

### 3. 5 活断層が施設の近傍にある場合の照査

敦賀原子力発電所では浦底断層が敷地内を通過しています。もんじゅと美浜原子力発電所の近くの断層が白木-丹生断層です。

#### ①日本原子力発電(株)敦賀原子力発電所の場合

敷地内の施設と浦底断層は、最も近い所で 250 メートル程度だそうです。照査に使える技術的に実績のあるツールは食い違い弾性論ですから、入力の変位だけでなく計算方法等のさまざまな項目に起因する不確かさを考慮するために、計算の条件を非常に幅広く振って評価しようという考えでやっています。

例えば、断層変位の分布する範囲、長さや上端の深さです。地震動を考えるならば震源断層の面積は大きいほど大きな揺れになります。しかし、地表面の傾斜を考えると、施設の近傍に断層面の終端がある場合が最も傾斜が大きくなります。合理的な範囲内で施設にとって最も不利となる計算条件を可能な限り考えて照査しようというのが私の考えです。まだ地震が起きていないサイトでは、地域特性を反映した不確かさに関する情報が得られていないからです。

断層が敦賀のように近傍に存在する場合には、地表地震断層の近傍の変状をもう少し詳細に予測しようとする研究的な取り組みも行われています。原子力発電所の幅が 500 メートル、深さが 150～200 メートルの範囲が地盤情報の密度が高い領域です。岩盤の不連続面の規模や力学特性は多様ですが、地盤情報が揃っている領域では高度な解析が可能です。代表的な計算結果では、変形が大きい領域は非常に狭い範囲で、100 メートル以上離れると、ほとんど変形しないとなっています。

## 4. 工学的な対応と性能照査

### 4. 1 対策の考え方

対策の考え方としては、4 つぐらいあるかと思います。

#### ①回避

まず回避、つまり立地制限をすることです。大規模な活断層の場合には重要構造物の単独基礎の立地を制限することは正しい判断だと思います。回避の例で有名なものはカリフォルニアの例で、San Fernando 地震のときに病院が被災したことがきっかけになりました。公共的な重要建築物を大規模な活断層の両側 15 メートルの範囲に建てることを禁止しています。我が国でも、横須賀とか、最近では徳島で類似の条例があります。

#### ②免変位

免変位は、ずれが施設に入っていないように可撓性のある部材を地盤と構造物の間に入れることです。免変位の例では、アラスカの Denali 断層が有名です。パイプラインをジグザグにして、その下に枕木状の滑り支承を配し基礎に固定していません。ここでは Denali 地震で数メートルもの断層変位がありましたが、破断や内容物の漏洩はなく十分な性能が発揮されています。このような工学的な対処は、コンクリートダムや地下鉄等でも実施されていますが、まだ実施例は多くはなく、設計方法も確立していません。

#### ③制変位

制変位は、ずれをコントロールする変形の性状変換です。表層の地盤が軟らかいと不連続な変形が連続な変形に変換し、これを座布団効果と呼んでいます。この座布団効果を利用して構造物の破壊を防止するのが制変位の技術です。

#### ④耐変位

耐変位はずれでも壊れないほど堅固にするということで、微小なずれ変位ならば耐えられますが、実際には難しい技術です。

### 4. 2 設計で考慮する作用としての特徴

設計の上では、断層変位は地震動・地震力と同じく外力ないし作用と見なされます。その特徴は 4 つです。1 つ目は、頻度が非常に低いことです。海溝型の地震と違って、内陸直下型地震は数千年から数万年に 1 回しか起きません。それから小規模な断層では活動に関する情報がほとんど得られません。

2つ目は、場所が極めて限定されることです。帯状の範囲で、最大でも百数十メートルを見れば良いと思います。なお、私は傾斜やせん断ひずみが 1/500 を超える範囲を断層変形帯と定義しています。断層変形帯は長いかもしれませんが、幅は 200 メートルを超えません。

3つ目は、作用の種類が局所的な永久せん断変形ということです。現在の設計体系は力・加速度・速度に基づいていますが、新しく変位に基づく設計体系を構築することが重要です。マグニチュードが 7 を越えると非常に大きな変位がありえますが、M5.5 以下なら考慮する必要はありません。

4つ目は、早期警戒が機能しないことです。海溝型の地震と異なり、内陸直下型では震源の真上に S 波とほぼ同時にずれが到達します。

#### 4. 3 性能照査のポイント

##### ①制変位の適用

私は不連続な変形を連続な変形（撓曲）に変換することが工学的に有効だと思っています。硬質な岩盤が露頭しているところでは段差が発達すると思いますが、その厚さが 20 ～30 メートルもあれば地表地震断層が発達することがないことが分かります。原子力発電所は硬質な岩盤に立地することが多いので、変位に対しては厳しい条件です。場合によっては構造的な対処を検討する必要があると思います。

##### ②構造的な対処

さまざまな対策が考えられます。私がトンネルのような横断構造物について検討していた多殻モルタルでは、ピンポン玉のような殻を密に詰めてモルタルで間隙を充填した材料で、普段は十分な剛性を持っていますが、断層が変位すれば体積を大きく減じてトンネルを軸方向に滑らかな S 字型に変形させようとする工法です。

##### ③安全性の判断基準

安全性の判断にはエンジニアの主観が関係しますが、立地の方針としては、1メートル以上動くことが想定される場合には立地を制限しても良いのではないかと思います。1メートル超えない場合には、構造的な対処も容認すべきだと思います。

評価の対象は、基礎と線状構造物に分けて考えるべきです。線状構造物とは、鉄道・道路。パイプライン等です。リニアモーターカーや新幹線、高速道路のような高速旅客輸送に係る線状インフラについて、人命の安全確保を要求性能とすると、硬岩中の山岳トンネルが現在の技術では設計できないので建設できません。コストと便益を考慮しながら社会がどのような安全性をインフラに求めるのかは、大事な問題だと思います。個人的な意見ですが、基本終局限界と特別終局限界という 2 段階の限界状態を設定して、後者として新たに壊滅的事故の防止という概念を導入したら良いと思っています。

#### 4. 4 不確かさに関する配慮

地盤の変位については、不確定性、不規則性、多様性が非常に大きいことが特徴です。被災事例も非常に少ないので知見が限定的です。そして断層毎の個性や地域性も大きいので、他の設計事象に比べて取り組むことが難しい問題です。

このような不確かさの大きい課題に対して、私は3つの考え方で望むべきだと考えています。1つ目は、計算や経験則においては、その条件を保守的・安全側に設定する。2つ目は、確率論的な評価手法を導入したり、確率論的な考え方と決定論的な考え方を組み合わせたりしても良いと思います。3つ目は、危機耐性の確保です。作用は想定しないと物は作れません。設計で想定した作用を超えた時の配慮が重要です。この3つの考え方を総合的に考慮して施設の安全性を照査するというのが正しい姿だと思います。

#### 4. 5 性能設計の概念：どこまでの安全を要求するのか

構造物の性能設計には2種類の概念があります。1つ目は性能規程型とか性能明示型と呼ばれる概念で、要求される性能と荷重の組み合わせで議論します。この終局限界を、想定される平均的な変位に対しては人命を守る、想定を超える場合には壊滅的な事故を防ぐという2段階にしようというのが私の提案です。社会の中で安全をどこまで要求するのかということを対象の重要度や費用・便益を考慮してよく議論すべきだと思います。

2つ目は性能照査型と呼ばれる概念です。安全を目的に何を要求性能とするのか、それは技術で表現するとどのような性能規定になるのか、照査はどのように行うのかということとを専門家は議論すべきです。

### 5. まとめ

最後に、私のような地盤技術者は、基礎や斜面の地震動に対する安全性の照査において何を重要視しているのかを説明します。性能設計という概念は、上部構造も地盤も一緒です。地盤が上部構造の設計と異なる点は、盛土や擁壁等を除けば地盤が自然のものであり、その構造や材料特性を調べる必要がある点です。ですから、地盤調査の計画、地盤データの合理的な解釈方法、地盤パラメータの決定、解析結果の合理的な解釈の4項目が非常に重要です。

平坦な岩盤基礎が地震で壊れた事例は1つもないのですが、原子炉建屋の基礎地盤の審査では、きちんと調査・解析・評価をした上で安全性を照査します。断層変位に対する照査も、地震動に対する照査と全く同じ手続きで実施すべきであると考えています。

#### <質疑応答>

- E1** 平坦な岩盤が壊れないというのは、活断層があっても壊れないということでしょうか。
- P2** 地震動によって支持力を失うことはないという意味です。基礎直下の断層がずれた場合は壊れます。



**E3** 食い違い弾性論ですけれども、そこで地震が起きて観測記録があると、それに合わせてチューニングする形で不確かさを考慮することはできると。そういうものがないものについては、一応食い違い弾性論を使うことはできても、非常に不確実性が大きいという話でした。観測記録が無い場合には、やはり不確かさが大きく、非常に精度の悪い評価しかできないということではないのでしょうか。

**P2** はい。そうですね。

**E3** もう1点は、食い違い弾性論を適用する場合、活断層の大きさを決めなきゃいけない。それが決まれば自動的にどれだけ変位するというのは分かるのでしょうか。その活断層のパラメータがどれくらい結果に影響を及ぼすか、その適用条件が、食い違い弾性論に関してどういうふうに求めるのか。要するに、その理論を適用するための条件のようなものはあるのでしょうか？

**P2** それは分かりません。現段階では、様々なケースを想定するしかありません。ただ、ある一定の法則性があることは分かっています。例えば、先ほどお話したように、サイトが断層の端部に近い条件が最も厳しいとか、断層の変位が上まで伸びてくるほど狭い領域にしか傾斜は出なくなります。ですから、明瞭な断層地形が露頭しているにも関わらず、地中で断層変位が止まると仮定して一番不利な計算条件を探します。

**土屋** 逆にそうなのですね。

**P2** 地表の変位は、弾性論ですから、地下の断層に与えるずれと変位の適合条件で決まってしまう。ですから、地震動のように地表で変位が増幅するようなことはありません。地下の断層に与えた変位が、地表のどの部分が分担して傾斜として表現するのかということになります。

**E2** 地表で変位が増える場合というのは、それがどの程度なのかを測るツールというのはいいのですか。

**P2** 地表地震断層の局所的な変状を構造物の設計レベルの精度で予測することは不可能に近いと思います。出現した断層に沿って歩いてみると、100メートルも離れると変位が10分の1になったり、2倍、3倍になっていたりします。ものすごく非一様です。ただし上限があるわけで、震源断層でずれる以上に大きくずれることはないと思います。それから、地表地震断層が地表に集中して出るほど、周辺への影響は小さくなります。真上だけが問題になります。だから、浦底断層も100メートルも離れているので、私はほとんど影響ないと思います。また、断層には成長プロセスがあって、最初は割れ目が周囲にたくさん形成されますが、繰返し動くうちに、局所化が進展します。ですから、巨大な断層ほど1カ所に集中していて、周辺への影響は小さい傾向があります。浦底断層もかなり大規模ですから、その周りに多くの割れ目あるかもしれませんが、立派な浦底断層に変形が集中すると推測します。

**土屋** 12月のフォーラムでは、その断層を見ておられる先生が、どんなふうに思っておられるか、またお聞きしたいと思います。

**P2** 私も先日見てきましたけども、大昔には動いたかもしれないけれども、浦底断層と方向が大きく異なるので、一緒に大きく動くようなことはないと思いました。

**土屋** では、コーヒーを用意しましたので、時間がもうだいぶたってしまいましたが、取りあえず10分休憩をいれます。すみません、30分ぐらい延長させていただくかもしれません。

## <全体討議>

### 耐震設計の余裕とは？

**A2** 耐震設計の余裕は随分あったという話でしたけど、これは柏崎刈羽だからだったのか、それとも他の原発ではそこまで期待できないのか。このS2とその後設けられた基準地震動で決まった違い、ちょっと性質が変わってくると思うんですけど、その辺はどうなんでしょうか。

**P1** 先ほど申し上げた基本的な考え方としては、いろんな要素の中で余裕があるということです。具体的にどれだけかというのは、それぞれ適用してみないと分かりませんが、どこも同じ程度にはそれぐらい余裕があります。

中越沖地震の際に建屋の一番上の所でどれぐらい加速度があったかというのと、2000ガル以上でした（3号機基盤面建屋地下5階で680ガル、タービン建屋1階で2058ガル）。要するに何トンもあるものが動くぐらいの加速度がありました。まあ、そういった所にある構造物も、別に重要な損傷もしていないわけです。解析して評価したのは、柏崎刈羽の事例で今回分かることになりましたけれども、そういう意味では、どれぐらい数値的に余裕があるかというのは、正確には解析結果とは違います。ただ、設備にはそれぞれ余裕があり、地震動に対してはだいたい数倍の余裕があるということが分かったのです。

### 地盤はどう影響するか

**A2** 傾向としては、やっぱりそれは新潟みたいに（地盤が）柔らかい所のほうが余裕は大きかったと考えていいのでしょうか。関電のサイトのように固い地盤では、ちょっと厳しいのかと。

**P1** おっしゃるとおりではあります。東のほうの地盤というのは、私はほとんど全部見てきたのですが、つかんでみるとバラバラッと落ちるぐらいの地盤ですけど、西のほう行くと（ハンマーでたたいてようやく割れるというぐらいの）固い岩盤が出てきています。それぐらい違います。固い所のほうは、地震動は高くなるので、構造物にとっては、機器の固有振動数に近く、振動応答が限界に近づいてくるというような厳しい条件にはあると思います。

**A2** 要素としては、いっぱいあるというのは、全国共通だけでも、地盤の影響となると、まあ若干の違いはあるかもしれないと。

**P1** はい。揺れがどれぐらい違うかというのは、大きくは地盤の影響を受けます。

**土屋** 電力会社などでは「原子力発電所は、固い岩盤の上に建てています」と、しきりにPRしていますが、さっきの話でも、特に固い地盤では大変だという話があり、設備も直接地震動が入力して影響が大きくなるということでしょうか？

**P1** 以前は柔らかい地盤に建設するというのは許されなかったのです。で、われわれも、「柔らかいところがいいのじゃないか」と、言ったのですが。最近では、免震だとか制震だとかで制御しようとしているのですが、昔は何しろ「固い所、固い所」。しかし、固い所が必ずしもいいわけではないところもあるのです。

(地盤が固いと入力の大きさは小さくなります。地盤が軟らかいと、大きな揺れが入力となります。固くというのは、振動入力を小さくするためです。)

## Unknown は何か

**A3** 聞いたかったのは、まとめのところに主題の中にある、地震動の評価、耐震設計での Unknown は何でしょうか。もちろん、known unknowns もあれば、unknown unknowns もあるでしょう。これは不確実性とは違うところを言っているだろうと思いますが、unknown unknowns は別にして、known unknowns とはどのようなものがありますか。

**P1** unknowns の中で大きいのは、先ほどデータを出しましたがけれども、例えばダンピングというのは、分かっている領域もあるけども、分からないところも結構ある。ですけど、データをとっているからもっと分かってくるのではないかと思います。要するに、まあ、これぐらいのことでいいのじゃないかとしてやっちゃっているところが結構あります。

**P2** かなりあると思います。さっきお見せしたように、地盤調査の範囲、詳細にモデル化しようとする範囲は、大体深さ 150~200m までで、幅は施設の両側に 300m 位です。この範囲については非常に高い密度で地盤調査をしていて、かなりのことが分かっています。しかし、その範囲外は情報量が少なくなります。

それから、詳細に調べた範囲にしても、しょせんボーリング調査、弾性波探査、試掘坑調査ですから、上物の機器に比べて、格段に情報量は少ないです。それから過去のこと、履歴を完全に把握することはできません。上物は自分達で新たに作るものですから、できたときからの経緯が分かっていますので、初期条件から情報が揃っています。しかしながら、地盤が生成されたのは大昔なので初期条件は良く分かりません。ただし、地盤材料の挙動には過去のプロセスが非常に重要ですし、しかも不連続面が含まれる岩盤は既に破壊されているのです。既に壊れたものが、さらにどのように壊れるのかということ予測することは、新品が破壊する場合に比べて、予測することが非常に難しい問題です。

別の見方でも分からないことが多いことを示せます。さきほどのお話を聞いて驚いたのですが、施設・設備の耐震性能については、ほとんどのものを振動台実験で検証しておられる。壊さないまでも、想定しているレベルの振動は与えています。このような検証を地盤に期待することは不可能です。だから、地盤の耐震性については、分からないことは相当にあると言えます。

## 裕度の考え方

**A3** unknowns が多いことから、結果として設計でも余裕が大きくなるというふうに言われたわけですが、実際、さっきの図の中で許容応力というのがありますね。図の中で、応力ひ

ずみ曲線の所の破壊応力の下だけが裕度と考えるのが合理的じゃないでしょうか。発生応力というのは全部が裕度と考えられているような絵だったと思うんですけど。

**P1** 先ほどのグラフは、許容応力を加えるところまでの応力と、それから設計で用いている設計上の応力との差だけで話していたつもりです。ただ、それも、材料によって違います。最初に設計するときは、基準に従って基本的にこの材料を使うというものを考えます。しかし、実際の材料は、材料試験をやって、破壊される限界のデータをとって、それであるデータを作るわけです。そこでまた余裕が出てくるのですが、設計のときには、一般論としてのデータを使っていくというので、そこで余裕をもたせるということをやっているわけです。

**A3** 図では、①（許容応力は設計引張強さに対して余裕をもつ）、②（基準運用上、発生応力は許容値に対して余裕をとる）、③（実際の材料の引張強さは設計値に対して余裕をもつ）ということで、全部この余裕になっているので、結局、発生応力から破壊応力までの差が、裕度というふうにこれは読み取れると思うんですよね。やっぱりそういう意味かなと思います。もうちょっと裕度というものの定義をきちんとやったほうがいいんじゃないかというふうに感じました。

**P1** はい、分かりました。それは、また考えてみます。

#### 専門家の見落としの可能性をどう考えればよいのか

**A4** 先ほど浦底断層と白木・丹生断層の話が出ましたけれども、実は、美浜原発や敦賀原発が出来てから、多分 40 年間、いずれも二つの断層を活断層としてこなかった。活断層だという認定になったのは 2008 年のバックチェックが初めてだと思うんです。質問したいのは、専門家はそれ以前から活断層だという認識をしていたのでしょうかということです。知っている、知らないということとも関係すると思うんですが、今、二つの断層は活断層になって、規制委員会で議論になっていますけれども、2008 年以前ってというのは、あれは活断層ではなかったんですよね。浦底断層は原発のサイトになっているから、一般の人は見ることでできないわけですが、白木・丹生断層というのは、敦賀半島へ行けば誰でも断層が見えるわけです。もんじゅと美浜の両方の発電所からせいぜい 500 メーターぐらいの位置だと思います。こういうものが、なぜ見落とされるのか。見落としとして、30 年、40 年放置されているのかってところが、疑問なんです。他に類似の見落としがないかという心配がありますので確認したいんです。

**P2** まず、活断層の認定については、私は専門家ではありません。2008 年より前に活断層として認識されていた方もいらっしゃるし、認識していなかった方もいらっしゃると思います。

私が重要だと思うことは、耐震設計上考慮する活断層かどうかです。原子力施設の安全審査の過程の中で、耐震設計上考慮する活断層に認定されていなかったものが、その後の調査で認定されるようになるものがあったということは事実です。その中で安全審査に対

する不信感が生まれてしまったというところが、不幸なところであるというのが、私の個人的な感想です。

**土屋** 活断層の認定は、多分来月しっかり議論できるかと思います。

**A4** 活断層がどうのこうのっていう話よりも、2008年のバックチェックで、9000年前に動いたとか、あんまり正確な数字は言えないけれども、そういうふうになった断層が再稼働審査の中にあるわけですし、白木-丹生断層というのは原発から500メートルの地点で、見ようとするれば誰もが見られるところにあるものさえ評価されないという、こういう構造をどのように考えたらいいのかっていう、そういう意味なんです。評価する前に、そういう見落としが現時点で何もないのか、それも含めて分からないことという範ちゅうで課題もっていなければならないのかではないか、そういう意味です。活断層認定の議論をしているつもりはない。

**土屋** 審査の体制とか、審査をどういうふうにするかとか、データの話とかですね。

**A4** 不信のもとには、ある事故調査委員長が言った言葉で、「見たくないものは見ないんだ」というようなことが結果として、こういうことに通じているんじゃないか、そういうようなことがあります。今では、みんなが認めているものさえ、評価されなかったということ、それも含めて専門家の見落としっていうのはあるものですかっていったようなことを聞きたいということです。

**P2** それはあります。人間には分からないことはたくさんありますし、間違いも起こします。

**土屋** 多分、きっと見落としに気が付いたら、それを修正していけばいいんですけど、修正がなかなかできなかつたりするかもしれないということがありますね。

**P1** 今のご質問で、昔分からなかった、いろいろ調べたけど見落とししてしまったっていうのは、ある程度私たちもそう思います。見落としはあることはある。だけど、それをどうやって修正するかっていうことは必ずしも決まっていませんでした。つまり、バックフィットということなんです。今は完全にバックフィットになりましたけれども、活断層をどう評価するかというのは非常に難しい問題があつて、議論があつたということだと思います。そのところはこれからきちっと議論していきたい。

**E1** きょうは活断層の専門家の方がいらっしゃらないのですが、断層は小さなものまで含めるとものすごい数あるんですね。そのうちのどれがこれからも動くのかどうかというのは非常に判断が難しいわけです。

断層認定は私は知らないので一般論として申し上げますけど、活断層があるかどうかを決め手になるのは、近い過去に動いたかどうかということなんですね。近い過去に動いたかどうかというのは、地層内に含まれる木のかけらなどの炭素の年代測定で調べるわけですけど、その木のかけらがたまたまなければ、調べようがないわけです。それが、最近はずごく小さいかけらでも調べられる技術が出てきたので、それをいろんな活断層で調べて、だんだん分かってきたという背景があります。今おっしゃられた話に結び付くかどうか分からないですけども、技術が進歩したという側面があります。

**A4** 断層認定の方法は知っているつもりですが、意図的に、専門家から批判されるようなことまでやって活断層ではないと電力会社が主張し、それが認められてきたのが2008年まで。今は、浦底断層も白木-丹生断層も、もう地震を起こすっていう評価になっているんです。そういうことがなぜ起こるのか。それが形を変えて今後いろんなとこに出て来ないか。そういう意味で、過去のことはみんなもうご破算にして、今分かったことだけでスタートした議論でいいのかっていう心配をして発言をしたつもりです。

#### どこまでのシステムを考えるべきか

**土屋** はい、分かりました。また来月にも聞いてみましょう。

少し議論を前のほうに戻させていただいて、先ほどシステム全体についてどこまで考えればいいのかという話があって、それについて地盤まで含めてどうお考えですか。

**P2** 福島第一で電源喪失という問題が起きました。外部電源のための送電鉄塔が立っていた地盤は問題なかったんですけど、近傍の斜面が崩壊して鉄塔を倒してしまいました。一般的には送電鉄塔は耐震重要度の観点からはCクラスです、しかし、外部電源のための鉄塔はシステム全体の安全性を考慮すると重要度がもっと高いものに考えるべきかもしれません。システム全体としての安全性に対するイメージーションは、少なくとも3.11以前には不十分だったと思います。工学は経験を積んで安全性を高めていくのが一般的ですが、我々はもっとイメージーションを豊かにして、経験が無くても全体の安全性を合理的に高められるようにしなければなりません。

**土屋** 他にご意見がありますか。

**E3** 先ほどからシステムということで、意見が出ていますが、現代のシステム、特に原子力発電所のシステムは、非常に複雑かつ巨大なシステムです。送電線の話だけじゃなくて、情報ネットワークとか、人間の移動の問題、例えば緊急時の道路網は大丈夫かとか、そういうインフラ系もあるわけですよ。それまで含めた形で今きつと議論をしなきゃいけないような状況になってきているんですよ。

先ほどのお話の中に、深層防護の考え方があって、「最後は防災だ」と言われたんですけど、防災ということになると、人ともものがタイムリーに反応しないと、防災というのは機能しません。そうすると、本当に「物資は送れるのか」「情報が伝わるのか」というところは極めて心配になってくるわけです。システム設計という意味だと、今までも非常に狭い意味でのシステムってということで、ある意味できると思うんですけども、非常に広い分野が関わってくる防災まで含めたシステムになると、巨大、複雑だけじゃなくて相互依存関係ということがあると思うんです。要するに、いろんなものに依存した、設計、あるいはシステムを、われわれは考えなければならない。例えば、皆さんのiPhoneとか、携帯電話とかは、どこかの基地局が壊れたり、どこかのネットワークが調子悪くなったりすると使えなくなるんですよ。そうすると、みんなもう途端にパニックになっちゃう。こういうふうな事態になるわけです。

つまり、一つ一つのシステムが相互に全部絡み合っている。それだけ非常に効率的な社会になっていることは間違いないんですが、いったん何かが起こって相互依存というのがつぶれてしまうと、いろんなものに頼れなくなる。今度は自律の問題が必要になってくるんですね。そういう意味でのシステムという捉え方をきちっとしておかないといけない。

今回、福島事故直後の、政府、あるいは保安院、それから電力の対応を見ていますと、それぞれの対応そのものも問題で議論しなければならないんですけども、その人たち全て入れた形で考えなければいけないのではないかと。物理的な意味でも非常に拡大したシステムの相互依存関係を考え、と同時に平常時のモードから緊急時のモードまで対応できるような、システム的な視点が多分必要になってくるんじゃないかなと思います。

**P1** おっしゃるとおりです。最近、トータルプロセス、トータルシステムがあつて、もう一つトータルマネジメントというのを加えて、トータルデザインをしなきゃいけないのじゃないかという議論を少し始めています。先ほど言われた、どうやってつなぐかという話は非常に難しい問題です。しかし、そういうことを考えていかないといけない。例えば、火力を使っていくと世界がどういうふうに動いていくか、どういうふうに変化していくのかということを含めて、トータルで考える必要がある。アメリカではこれらをコストでつないで考えている。

では、日本でそれができるかというとなかなか難しい問題があります。リスクというのはお金に相当するののかという非常に難しい問題があります。ですから、そこをどういうふうに定量化するかということ、今、私たちは考えようとしているところです。

### **地盤から設備はどうつながっているのか、つながっていないのか**

**土屋** 社会システムに広がってしまったので、少し原子力施設に戻したいと思います。今つなぐというお話がありましたが、地盤の話から設備のところにつながっているのかどうか、ちょっとお話を聞いていたときに若干分かりにくかったです。どうでしょうか。

**P1** 私がかつていたプラントメーカーでは、機器の全てをモデルで設計するのですが、評価はやりません。それは土建屋さん、地盤や建屋の設計をしている人たちが行います。「こういうふうにやりますよ」という全体のプランニングを作ると、「計算をしてください」って渡して、それをもらって入力データとして、建屋システム屋さんにご提供する。ですから、今までほとんどコミュニケーションは必要なかったのです。それをやはりつないでいかないといけない。地盤はつながっていますし、津波の場合、重なってきますから、リスク評価するときには、特につなげた議論をして、トータルのシステムとして評価しなければいけないというのが最近出てきている考え方です。それを具体的にどうするかというのは、これから設計する人たちは悩むんじゃないかというふうに思いますね。

**土屋** つながっていませんでしたね。

**P1** 今まで、まさしくつながってなかったのが、それである写真（送電線？）の結果をもたらしたのであり、そういう問題をこれからどうするかは一つの課題です。電力会社の中でも、機器屋さんや土建屋さんというのは、なかなかうまくコミュニケーションできてないのが

現実だと、私は理解しています。今回いろんなこともあったので、少し話し合いできるようになったと思います。

**P2** 地震動が定まってから私の分野である地盤の安定性評価が始まります。地震動は、地震や地質がご専門の方が担当し、解放基盤面から建屋の基礎までの所は我々、地盤工学の専門家が担当し、基礎スラブから上は、建築の領域になります。理想論からいうと、震源断層から建屋・設備まで系統的に同じモデルで調和的に説明できれば良いです。これは、将来の、目指すべき姿としてまず間違いないと思います。ところが、現状は理想とは異なり、各分野で異なるモデルが使われていて調和していません。将来的には全体システムを一つのモデルで説明できるように目指したいですね。

**E2** 電力事業者さんから想定される地震による地震動と変位の推定が出されますが、それらは建物に対する影響として扱われます。ただ、機器のほうは建物を介してしまうので、（地震動を評価する）われわれと機器屋さんが直接話すことはできないんです。そこは非常に大きな問題。その結果、それぞれのフィールドで評価が行われ、その対策が考えられてしまう。非常にこれは問題だと、つくづく最近思っています。

実際問題として、中越沖地震と、今回の福島第一の事故というのは、そういうところの問題ではなかったかと思っています。やっぱり機器や設備の耐震評価が地震動と少し間が空いて、間接的になっている。これはやはり問題ではないかと思っています。

最後のリスク評価は、当然断層認定から始まるので、トータルな話なんですけども、先ほど話したように現状ではつながっていないところがありますので、今後は少しこういうところを検討していかななくてはならない。

今日の話題の地震に戻すと、われわれの地震動では、ある震源を想定して、そこからどうやって地震動を評価するかという話になるのですが、やっぱり地震動って、震源像が重要なんですよね。今回の東北地方太平洋沖地震の特徴も想定できなかった。もっと難しいのはスラブ内地震。今後これをどう考えるのか。これまでわれわれは、少ないデータですけど、ある程度予測できるなと思っていたんですけど、スラブ内地震など、もぐりこんでいるプレート内で起こる地震の震源像をどう考えればよいのかよく分からない。東北地方太平洋沖地震は例のない地震ということでしょうが、それを想定できなかったで済ますんじゃないくて、そういう今回の経験も踏まえて、どういうふうな震源像を考えていくのかということに対して意見を伺いたい。

### 地震をどこまで理解しているのか

**E1** すみません。私のほうからもちよっとお聞きしたいんですけど、原発というのは、長周期の地震動に関しては大丈夫なものなんですか。

**P1** はい

**E1** そうであるならば、短周期で考えるのであれば、われわれの扱っている地殻構造と、地盤と建物と機械っていうのは、ある意味で切り分けてもいいと思いますが、長周期は多分全



部関連してくるので、それをちょっと心配していたんですけど、それは大丈夫なんですね。分かりました。

先ほどの質問に戻って、プレート境界型地震に関しては、先ほど申し上げたように、最大振幅は意外と大きくなれず、揺れの時間がすごく長い。少なくとも東北地方のプレート境界に関しては、もともと非常に不均質性が強いと考えられていたので、そういうことが起こるんじゃないかと思います。ただし、今回の経験が全てかどうか本当は分からないんですけど。問題は、東南海・南海で一体どういうことが起こるのかは、われわれも全然分かりません。本当に、地震の規模に比例して、短周期でも振幅が大きくなっていくかもしれないです。しかし、それに関しては、残念ながら私は今のところ分からないとしか言いようがありません。だから、今のところは最大の振幅を考えて、M7、8、9と比例させていって、大きくしていくのも一つの考え方でしょう。

次にスラブ内地震に関しては、残念ながら今のところわれわれはどこが危ないかということをはっきり言えません。ただ、沈み込んだ太平洋プレートの中の地震というのは、地震の活動域が二つの面に分かれるんです。その上と下がくっついているようなところが、結構大きい地震が起こるといふ例が多い、とだんだん分かってきました。それが本当であるならば、ある程度、ここは他に比べたら起こりやすそう、ここは他に比べたら起こりにくそうということは、少しは言えるようになるんじゃないかなと期待しています。それは活断層と同じで、「起こりやすそう」と言っているだけで、活断層のないところでは絶対地震が起こらないということと言えないのと同じぐらい、それ以上にまだ怪しげな話ですけども、今のところ前もって言えることとしてはその程度です。

**E2** スラブ内地震の規模というのはどの程度を考えれば良いんですか。

**E1** 地震の規模は大体、地震活動域の広がりから推測できているので、M7とか8ぐらいまではあるでしょう。M9はさすがにないと思うんですけど、場所によっては、M8クラスが起こるぐらい広がりがある場合も、多分、探せばあると思います。

## 福島事故の問題は何か

**A5** 先ほどのシステム安全のまとめで、福島第1原発についても、耐震健全性だけを見ていたことが問題だったというお話がありました。また、先ほどはシステムを、原子力発電所の敷地内だけではなくて、周辺も含めて考えるべきではないかと、いろんな話が出てきました。今回実際に放射性物質が外に出てしまって、大きな被害が今も残っているということから考えまして、実際にこのような放射性物質が外に出てしまったという中で、不確定要因として新たに考えなければいけないという具体的な要因が出ているのでしょうか。

もう一つ、やはり、今、福島の場合は、まだ地震によって壊れたか壊れないかという、その結論が出ていませんよね。実際には調べられないことですので。ですから、ここで十分に満足することが確認されたというふうにおっしゃっているのは、本当に今の状態から見ても、システムとしてはそういうふうにお考えなのかどうかということです。

**P1** すみません。舌足らずな部分があったかと思いますが、福島のことについては、地震に対する強度が全部確かめられたかどうかという問題は別にして、良かった点の一つは、地震の後もずっとデータをとっているんです。そのデータで地震によって安全に問題ということはないと推測できます。したがって、問題は、システムとしての安全上の問題であると考えています。

**A5** そのデータというのは何のデータですか。

**P1** 圧力や温度のデータなどです。地震の後、津波が来るまではきちんと全部データがとられています。その中で変化するのは、安全上問題のあるような変化をして問題のあるようなものはなかったということです。例えば、小さなリークはあったかもしれません。だけど、そういうものの中で安全上問題があるような例というのはなかったもので、そういう意味では、安全性という視点で問題はなかったという判断をしています。

ただ、もう一つ大きな問題は、先ほど少し申し上げましたけど、B、Cクラスの、小さな壊れた機器などは、そういうことで影響を受けたものはあったかもしれません。というのは、その後、安全対策をいろいろやって処置をしようとしたときにできなかったというのが幾つかあるわけで、そういうものは壊れていた可能性があります。B、Cクラスが壊れても重大な事態に至らないようにと、最初からそういうことをやってきたところができていなかったという課題がありました。

それから、この福島の問題で大きな問題は、なぜああいう事故になったのかということです。これは耐震上の問題というよりも、原子力プラントが、基準地震動や基準津波を超えたような状態のときに、安全に止められるような仕組みをちゃんと考えてこなかった。全く考えてなかったわけじゃないのですが、もっと「事故は起きる」という前提でいろんな手を打ってこなかった、できていなかったがために、重大事故に至った。そこが大きな反省点だったということでもあります。

ですから、地震のせいにするとか、津波のせいにするとか、そういうことではなく、想定を超える場合を考え、対策をしなければならなかったということです。津波の問題はもうちょっといろいろディスカッションしなきゃいけなかったのです。地震の場合は比較的こういう話ができていたのですが、津波の場合は、ほとんど話合いができていませんでした。ああいう津波があるということをもっと原子力屋さんのほうは考えなきゃいけなかったところはあるのですが、だからといって、津波が来た、いろいろな機器が使えない、駄目だという時に、どうするのかというのは全く知らなかったわけじゃないのに手を打ってこなかったのです。津波なんて来ないと思っていたところがあったわけですし、そういうことは反省をして、そういうものが来ても大丈夫な仕組みをきちんとするというのが先ほど申し上げた深層防護であり、深層防護を真剣に考えてこなかった点は大いに反省するところでもあります。

## 地震学からの反省

**A2** すみません、確認ですけど、今回の地震は M9 の割には短周期的にはプラントにラッキーな揺れだったということですか。

**E1** 振幅に関してはそうですが、継続時間が非常に長かったのも、そこは私のほうがむしろお聞きしたいのですけれど、そのような長時間の揺れに、耐えられるように造られているのかどうかを、私は気にしています。

もう一つ、震源域は、非常に大きくすべったところは海溝近くだったんですけど、短周期のものは陸に近い深い所で起こっています。そういう意味では、スラブ内地震に似たところで起きたところがありますね。長周期の地震動の発生源と短周期の地震動の発生源は異なる、ということも今回の研究で分かってきたことです。

さらに、津波に関してはわれわれ自身も非常に反省するところが多いんですけど、返す返すも残念だったのは貞観地震のことで、多くのメディアで、「貞観の地震のことが分かっていたのになぜ」という話があるんですけど、貞観の地震は M8.4 という震源モデルが作られていて、それで想定してシミュレーションをして福島県の海岸の津波の高さが 5m くらいとなり、それで津波堆積物のデータは説明できてしまいます。だから、貞観の地震のことは分かっていたけれども、福島でやってみたら 5m という結果になってしまって、私自身もそんなに深刻には考えてなかった。

一方で、今回の津波が大きかった理由は、海溝近くで大きくずれたからです。それに関しては推本（地震調査研究推進本部）のほうで、そういう可能性はあると出しました。しかし、三陸沖以外、南側で、そんな津波被害を起こした記録がなかったのです。可能性は否定できませんので、私たちは出しましたが、それに対して地震学界の中からもすごい批判がありました。可能性は否定できないというだけで、そんなことどんどん出せば、何だあってありになっちゃうじゃないかと。私はそのときの推本の委員でしたが、私自身はそういう批判があってもしょうがないかなと思うところがありました。だから、あのときもっと強く言っていれば、あそこでシミュレーションをやっていれば 15m の津波が出て来ていたので、それは返す返すも、いまだに忸怩たる思いはあります。

**A2** 推本 2002 年を出すときに、それをもっと強く出すべきだったと。

**E1** 今ならそう思います。

**A2** 当時としては、どこでもかしこでもっていうのは、ちょっと可能性を強調しすぎかなというお考えだった。

**E1** 個人的には思っていました、正直。

**A2** ああ。なるほど。

**E1** その辺が非常に難しいところです。それから、今回の M9 の地震というのは、地震学者の常識がかなり、もうガラガラと崩れ落ちた地震だった。私も入れて世界中の地震学者の誰も、あそこで M9 が起こるとは思ってなかったと思います。そのぐらい、われわれとしては本当に、ついつい「想定外」という言葉を使ってしまったんですけど、そのぐらい

考えてもいなかった。なぜそういうふうに思ったかっていうことは、後でもし機会があればご説明させていただきたいと思います。

**土屋** ぜひお願いします。工学の想像力というのも足りなかったというお話がありましたけれども、地震をどのくらい分かっているのかという不確かさのことについて、今まで経験したことがないことも起こるかもしれないという想像力をもつというのは、すごく難しいことですね。起きた後ならいくらでも何とでも言えるんですけども、起きる前に何か言えるかという・・・。

**E3** その辺りのところ、不確実性の幅はどれぐらいに考えておけばよいのかというようなことを言っていたきたい、われわれとしては。

**E1** 最近、地震の上限はどのくらいかということを問われるんですけど、本当の意味での上限は多分、マグニチュード 12 が地球全体を壊す規模なので、それはさすがにないだろう、マグニチュード 11 ぐらいはあるかもしれないということを言っています。しかしマグニチュード 11 のエネルギーを計算すると、あの恐竜を絶滅させたクレーターをつくった小惑星の衝突のエネルギーに匹敵します。だから、マグニチュード 11 なんて起こったならば、日本がどうのじゃなくて、世界中の人類が絶滅の危機に瀕する話なので、多分それを考えても意味はない。そうすると、マグニチュード 10 ぐらいまでは取りあえず考えるべきじゃないかと、私は最近主張しています。

マグニチュード 9 の地震というのは、過去 60 年間で、もう 7 回も起きているんですね。最高で 9.5 まで起こっている、1960 年のチリ地震で。そのことを考えると、われわれがやるべきことってというのは、過去最大地震プラスアルファぐらいまで考えるのが多分正解だろうと思うので、マグニチュード 10 ぐらいまでは起こると考える必要がある。ただし、対策を立てられるかどうかは別のことです。

それは、カルデラ噴火と同じで、1 万年に 1 回ぐらい巨大なカルデラ噴火を起こしていて、もしそれが噴火したら、日本列島の半分ぐらいは火山灰に埋もれてしまう。しかし、1 万年に 1 回起こるような現象でとてつもない被害が出るものに対してどのぐらいの対策をとるかということを考えるのは無理があります。

だけど、起こったら何が起きるかということは、ちゃんと考えて理解しておくべきだろうと。少なくとも、行政の関係者の方は理解しておくべきだろうと思います。そう考えていくと、何か起こったときに、初動態勢が全然変わってくるわけですね。

今回気象庁が、最初津波を過小評価してしまって、いろいろ批判されていますけども、あれは、当時の推本の評価が、そこで起こる地震は最大マグニチュード 8 と言っていたからなんですね。だから、M7.9 という最初の推定規模をすぐには変えなかった。われわれが最初から M9 の可能性もあると言っていれば、気象庁のほうも多分対応が変わったと思います。その辺はわれわれとしては非常に大きな反省点なので、今のところ取りあえずマグニチュード 10 が起こったら何が起きるかということ、気象庁や行政の担当者の方は検討しておいていただきたい。それに対して事前に対策を立てられるかどうかは別の

問題であり、まずは、何が起こるかということを理解するというのが、初動態勢に重要と云うことです。

### 想定外に対応できるか

**A6** 今お話があったことで、先ほどの **unknown unknowns** に関わると思うんですが、確かに想定していなかったことが想定以上の規模で起きるということで、当然想定外はあるんだと思うんですけれども、想定外を構造的につぶしていくようなやり方っていうのはないのでしょうか。今回の事故でも、予想していた事態に対する対策ができなかったのは、費用が掛かり過ぎたという話では多分なかったと思うんです。さっきおっしゃった想像力の欠如とか、努力しなきゃいけないとか、もちろんそうだと思うんですけど、それ以外に想定外をつぶしていけるような方法は何かあるのでしょうか？

**P1** 私たちは今、きょうの議論の中にもありますけど、リスク評価をきちっとしましょうということを申し上げているところです。リスク評価というのは、いろんな想定をするわけです。事故はどういうふうに進展していくのか。もしくは、どういう外乱があるのか。いろんな場合（自然事象とか、人為事象とか）を想定することが大切であって、それでリスク評価をして、それらをたくさん積み重ねることで、どれで対応したらいいのか、どんな対策をすれば効果的なのかを導き出してきて、それを 2、3 番目にやることまで検討していく。そうやっていくことが、想定外をなくすのに一番近い方法ではないかということを言っているところです。

今回の津波については、全く想定していなかったわけじゃないというのが非常に残念に思っていることです。2008 年ごろには、福島 1 号で水が来たら、要するに津波が来たらどうなるかというリスクを評価しているのです。その報告を出している。その報告によれば、水がきたら今のような事態になる確率というのは 10 のマイナス 2 乗です。そういうことをやっていたのに、どうしてその対応ができなかったのか、しなかったのかというのは、まだリスク評価をすることが認められていなかったからだと思います。リスクに対して目を向けていない。リスクに対してきちんと目を向けて、リスク評価をして、リスクに対応するにはどうしたらいいかということを考えていくという、そういう仕組みをつくるのが重要であると、今私たちは、そういう発言をずっとしているわけです。原子力規制委員会で（リスク評価を）「やる」と言っていますけど、具体的にまだ動いていないと思っています。

**E3** 想定外をなくすにはどうしたらいいかというご質問だったと思いますけれども、想定外をなくすことは無理だというふうにまず思わなきゃいけないですね。無い物ねだりをしているんだというふうなことだと思います。

われわれは、われわれの経験、知識、それからいろんな学問分野の進歩で得られた知見をベースにものごとを決めているのであって、それを超えるものについては、想像力を働かすということではできるとは思いますけれども、基本はわれわれが、今まで学んできたこと、経験してきたことだと思うんですよ。超高層ビルを建てていますが、超高層ビルが完

全に安全かどうかは、まだよく分からない。それから、ジェット機があたるとどうなるのか。9. 11のような経験をしてきて、できるだけそうならないように、あるいは、そうなった場合にどういう対処をしましょうかというところまでを考えてこれをやるんだけど、絶対想定外は残ります。

想定外の定義が難しいんですけども、想定外を想定するというのは、それはもう想定外ではないだろうということになります。知らない世界は絶対あるんですよね。われわれの知っていることは本当に限定的である。そういう中で、ある程度、知識や経験を延長して、ものごとを判断してきたというところだと思うんです。

だから、無い物ねだりをしちゃいけない。工学、ものづくりというのは、そういうものの中で、決められたお金の中でものを決めているんですよ。潤沢にお金をかけられれば、ものすごく強いものできるかもしれないけれども、そういうわけにはいかないということです。コスト・ベネフィットの話もありますし、最終的な経済活動との話も出て来ますので、そういうところと比べて議論しなきゃいけないと思うんです。まあ無い物ねだりはしないで、できるだけ想定外をなくすように努力するしかない。

### 技術はつながっているか

**A1** 繰り返し指摘したいことは、例えば、津波についての研究でもそうですが、いろいろな成果、立場、考え方を積み上げたり、重ねたりすることがあまりにもなされてないようだという事です。今、水処理、汚染水処理に非常に困っていますよね。ああいうのを見ていると、異なった分野の研究成果が繋がられていないんじゃないかと思います。もちろん、人とか情報にまでつなげるところまで考えると問題が広がりすぎてしまいますけれども、基礎となるべきテクノロジー、エンジニアリングにおいて、あるいは、学問としても、つながる、つなげるべきところが繋がっていないんじゃないかということです。

ここでの議論を聞いていて思うのは、手前にまだやらなきゃならないことをやっていないんじゃないかということなんです。

**P1** 全くおっしゃるとおりです。それで、学問とか、学会同士をつなぐことをやりましょう、コミュニケーションやりましょうということを、今、（原子力）学会では努力しているところです。これまでもある程度はそういう活動をしてきたのですが、やはりまだこれから努力しなければならないと思います。地震、津波によって事故が起きたのは、関係する物事が全く関連できていなかった、学問としてつなげてこなかったためであり、今後は“つなぐ”ことが必要だということです。

**土屋** いろいろなもので、つなげる努力が始まっていると。

**P1** ええ、きょうのこの場もそうですけども、それはようやく活発になってきたのが現状と言ってよいのではないのでしょうか。

**E3** つなぐ努力ということの一つのキーワードは、先ほど言われた性能設計、あるいは性能に基づくものづくりではないかと思うんですね。

耐震安全性の評価では、断層から地震動評価、地盤、構造物、機器の評価と進んでいきます。これは、説明のされ方そのものであり、実現象はこうなんです。断層がずれて、そこから揺れが生じて、建物が揺れて設備が壊れないようにしようとしていると。原子力もそうなんですけれども、どういう建物を造るか。どれぐらいの安全性のものをつくりたいのか、どういう機能のものをつくりたいのかというのは最初にあるべきなんです。そういうものを実現するためにはどういうことをシステムとしてつくるのかということを考えていけば、自然といろんな分野の人がつながり、考え方を伝えることができます。今はもう完全に細分化されてしまっているものですから、“隣は何するものぞ”で全然分からない。不確実な部分がどこかは知らずに余裕をとることで対応されている。それもある基準のものでしかやられてない。これはやはりいけないということで、やっぱり逆方向に行くような性能設計の考え方っていうものが、これから重要になっていくんじゃないかなと思います。

**土屋** 学問領域を越えて情報を渡すときに、不確実性のこともちゃんと伝えておかないけないのにできていない、ということですね。

### 原子力システムはどこまで考えればよいか

**A3** ちょっと話がずれて申し訳ないんですけど、システムとしての原子力発電所というのがすごく大事だと思いました。例えば、福島を経験してわれわれ知ったんだけど、使用済核燃料とか、原子力発電所の中にあるもの全体をやっぱりシステムと捉える必要性があるのではないかと。きょうの話の中では触れられなかったのですが、今後運転再開をするような原子力発電所での使用済核燃料の問題、特に六ヶ所（再処理工場）がもし動かないとなれば、使用済み核燃料はそれぞれの原子力発電所にためておくしかないだろう。そういうようなことまで含めたシステムというのを提案していただけるといいなと思いました。

**P1** おっしゃるとおりです。私たちは、燃料サイクルを考えていろいろやっているから、それはもっと議論をちゃんとしなきゃいけないところでもあります。

**土屋** すみません、4時半になってしまったので、最後に、来月の専門家フォーラムについて、こういう情報が、地盤構造とか、システムの耐震設計には必要なんだけど出してもらえないとか、こういう情報はないのかというような要望があれば、出していただければと思います。

**P2** 揺れが伝播する現象の話はよく聞くのですが、震源から破壊はどうやって伝わってくるのかを知りたいですね。

**E3** さっきの地震の上限の話なんですけれども、先ほど「M11はないよね」って言われるんですけども、それは地震学者個人の判断で、ある目安を持ってらっしゃるんですね。専門家が何となく、そうやって言われるんですよ。「これはないよね」「これぐらいならいいかな」と。そういう判断というのは、多分人によって違うはずなんですけれども、そういうと

ころで結構ものが決まっていくんです。定量的に言うことはできないだろうけれども、定性的にでも「このパラメーターはこのくらいですよ」と言われる根拠のようなところをお聞きしたい。

- P1** ぜひ、断層問題については、断層がどれぐらいずれるかを明確にする。それが、まあ非常に重要な問題だろうと思います。これは他の評価をするときにも重要です。もう一つは、断層がずれてきているという信号をどう捉えられるか。津波がやって来るとい話がありますが、来る津波を捉えられなければ対応がとれない。地震の場合は揺れ出すと感知して、すぐに止めるシステムが動き出します。そういう意味では、ズレが生じていることを捉えられるのかどうかという、その辺をぜひお伺いしたい。

原子炉はスクラムによって数秒の範囲で止められますから、そういう意味では時間の問題。今回の原子力事故では、時間が非常に重要でした。ですから、現象をいかに早く捉えて手を打てるか、これは重要な問題になるわけです。そういうところまで、データが出て、見通しが出てきて、津波対策も含めて、やっていくといいのじゃないかなと思います。

- E2** 次回のことなんですけど、多分断層がずれる、そのスピード感は、すべり量とともに当然すごく揺れにも影響するんですよね。今おっしゃったように、地震の揺れと変位は関連していますが、ただ断層破壊がどうなるかは私の専門じゃない。

先ほどの、固い地盤が危険というのは、ちょっと誤解があります。さっきから、固い地盤だとやられたりするといった話があって、固い方が不利なのではという議論になっていました。共振という意味では、当然、固ければ短周期が出るので、原子炉建屋にとって固い地盤に設置されるから、共振でやっぱり不利なように見える。でもそうではありません。地震動は当然、震源とパスとサイト特性のすべてで決まってくるのであり、どれをとっても絶対値ということはないんですね。みんな相対的な話で、トータルとして揺れがどうなるのか、ギャップ(変位)が出てくる。そうすると、今、現に、原子炉は岩盤に載せています。留萌の地震で揺れが大きくなったのは地表面の影響が大きかったことが分かってきました。原子炉を載せている岩盤は、関東平野とか大阪平野とか、そういう地盤と比べると固いので、揺れが大きく増幅することはない。多分固いということは、あまり非線形化しない。そうすると短周期の影響がでる。関東平野のように柔らかければ非線形化し、その最たるものは液状化ですね。原発サイトはそんな地盤にはありませんから、固いから危険というような話ではありません。

**土屋** 単純過ぎる・・・。

- E2** ええ、もう少し複雑なんで、次はそういうことも含めてお話します。それともう一つだけ。地震学の先生は **M10** を考えるべきとおっしゃっておられましたが、どのマグニチュードでおっしゃっているか分かりませんが、今回の **M9** っていうのは、モーメントマグニチュードとって、どれぐらい滑ったか、その滑り量が出てくるマグニチュードですね。今回地震動を出した所は内陸に近い所で、そのすべり量は大きくない。大きくすべったのは海溝付近で、それで巨大津波が発生した。マグニチュードだけで地震動の大きさは決まらない。今回もトータルすれば **M9** でしたけど、それぞれの揺れは、ほとんど前面海域で



M8.5 ぐらいが起こった地震なんですね。今回の地震では（地震動の）波形が分離したので、それぞれの揺れを出した地震規模がどれぐらいだったのかを計算できる。そうすると、M8.5 ぐらいのやつがボンボンボンと連続して起こり、それぞれがそれぞれのサイトに影響したということです。当然、トータルの継続時間が影響するとなれば、規模が大きくなれば継続時間も長くなるので地震の規模も影響しますが。そういうことについても詳しく話したいと思います。

**土屋** はい。丁寧にお話いただければと思います。きょうは3時間以上、どうもありがとうございました。

（了）