

8 フラジリティ解析

8.1 諸 言

本章では、原子力施設の有するフラジリティ解析法についての標準的な実施事項、解析手順や技法について述べた後、それらの問題点についても言及する。

なお、津波襲来事象には、近傍での地震による津波の他に、きわめて遠方の地震による津波や氷河の崩壊などがある。これらは、津波発生から襲来までの時間的余裕があるので、近傍地震による津波に比して、対応が容易で有り、かつ、事前の炉心・格納容器およびサポート施設の健全性などの予条件は、近傍地震による津波フラジリティ解析の技術をそのまま適用可能である。

津波発生原因としては、隕石の落下や海底火山の爆発なども考えられるが、これらのハザードは、事故発生確率の許容値に比して、十分に小さいものと思われる。

よって、ここでは近傍地震に伴う津波フラジリティ解析についてのみ記述する。

8.2 本章の用語

- (1) 炉心フラジリティ：沖合津波の確定的与条件に対して、炉心が過酷事故、もしくは事故事象状態となる確率
- (2) 放射性物質保管施設フラジリティ：炉心以外の放射性物質保管施設（例えば、使用済み燃料棒保管室）が損傷し放射性物質が放出される事象のフラジリティ
- (3) システムフラジリティ：要素の機能喪失確率を故障木分析と組み合わせて、ある特定の機能をもつシステムの機能喪失に至るフラジティ
- (4) 要素機能喪失確率：沖合津波を確定条件とする場合の、ある要素の機能喪失確率。要素の機能喪失に複数の作用が関係する場合には、それらの組み合わせによるシステム事象確率をいう。
- (5) 要素作用のハザード：沖合津波を確定条件として、津波の遡上传播に伴う不確定性の増幅によって生ずる、ある地点に存在する要素に対する作用のハザード
- (6) 要素のフラジリティ：要素を機能喪失に至らしめる、特定の作用を与条件としたときの要素の機能喪失確率。もしくは、作用と機能喪失確率との関係（曲線）。
- (7) サイト外郭施設・構造：8.6.2 参照
- (8) 建造物外郭施設または構造：8.6.2 参照
- (9) 建造物内領域水密化施設または構造：8.6.2 参照
- (10) ハザード線：ハザードとフラジリティとを同調させるために設定されたサイト前面の海面上の線（8.8.1 参照）
- (11) ハザードの代表値（H）：ハザードとフラジリティとを同調させるために設定された物理量、通常は津波の波高（8.8.1 参照）。
- (12) 地点津波：フラジリティ解析における任意の要素の存在する地点での津波、ハザード線から該地点までの津波解析法に依存するものの、津波波高（湛水の水深）、流速などの物理量から構成される（8.8.1 参照）
- (13) サイト外津波：地点津波の一種で、ハザード線から防潮堤などのサイト外郭施設までの津波をいう（8.8.1 参照）

8.3 津波フラジリティ解析の定義、与条件

津波フラジリティ解析とは、津波によってもたらされる原子力施設のリスク評価を行うための、一過程として、津波ハザードをもとに導き出される、ある沖合津波を与条件として、原子力施設の「条件付き事故発生確率 (Accident Management Occurrence Probability with a Tsunami Hazard Condition: 以後 P_{Am-H} と表す)」、および「条件付き過酷事故発生確率 (Sever Accident Management Occurrence Probability with a Tsunami Hazard Condition: 以後 P_{Sam-H} と表す)」を求める。その際、与条件を逐次に変化させることによって、各条件付き事故発生確率と与条件との関係をハザード曲線として求めることである。

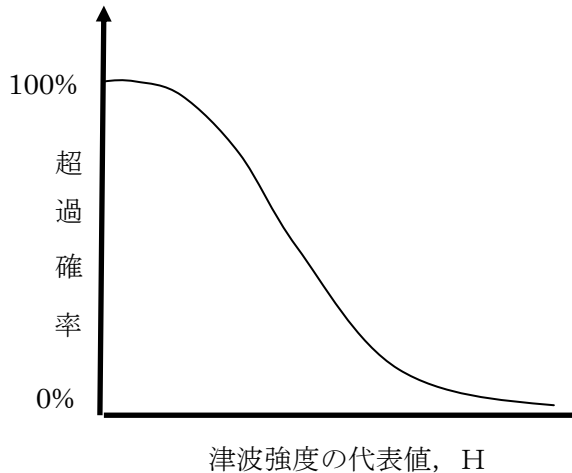


図 8.1 津波ハザード (余条件)

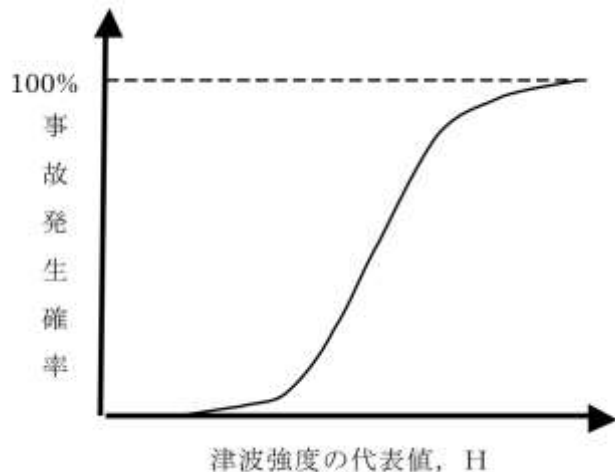


図 8.2 津波フラジリティ

8.4 津波フラジリティの特徴

原子力発電施設の事故状態、もしくは過酷事故状態の定義は、外的事象の代表である地震フラジリティと基本的に同じであるが、同じ外的事象であっても、津波は原子力発電施設の外部から、迫ってくるものであるため、地震のように内部に直接損傷が発生する事象は、生じづらく、むしろ冷却水の取水口などの炉心から離れたサポート施設から順次に損傷もしくは不調となる。つまり、津波の波力が直接炉心や格納容器に作用して損傷させることは考えづらく、末端から徐々に損傷に至る。このため、代替施設・器材への円滑・迅速な切り替えを行うことが重要であるが、代替施設が沿岸からの位置関係における類似性が高いと破壊事象の相関性が高まる。このことは、地震においては、原子炉発電施設敷地内でのハザードの相関性が高いことと異なる。

津波フラジリティを低下させるための施策は、津波の海水が炉心などの重要機器へ接近することを防止、または抑止・抑制することである。代表的な対策施設として防潮堤があるが、防潮堤の高さが増すにつれて、進入防止可能な津波の大きさ (防潮堤前面での水深) が増加するものの、防潮堤前面と背面の水頭差が大きくなるため、仮に破堤した場合の影響も大きくなる。このように、リスク低減に有効なはずの対策が、副次的なリスクを高めることは深慮すべきことである。

津波作用の継続時間は数十分から小一時間におよび繰り返し襲来する。このため、一端敷地内に海水の浸入を許すと海水がはけることを期待しづらく、その間、事故対応 (Accident Management) に必要な人や車両の移動を阻害し続ける。また、浮遊する物体が衝突して施設を破壊したり、油脂類が拡散して火災原因となったりするなどの副次的なリスク要因となる。これらは、軽微な事故事象から過酷事故事象への移行を促進することにつながるが、その定量化は困難である。

8.5 地震リスク評価との相互関係と分析シナリオの棄却

前述のように、津波襲来前の原子力施設は地震動による損傷を受けている可能性がある。損傷状態は、津波襲来に伴って、復元することはないことを考慮すると、フラジリティ解析の区分と前提損傷の組み合わせによるシナリオ区分は、表 8.2 のようになる。

まず、津波フラジリティ解析を事故発生確率に対して行う際に、地震後にすでに事故発生状態であるならば、事故発生事象内における地震による事故発生事象の余事象とならないため、不要な重複によるリスク評価の煩雑性を回避するために、フラジリティ解析は行わない。ただし、事故対応 (Accident Management) に必要な人的活動を津波が阻害すると、過酷事故への進展が促進される、すなわちシステムの脆弱性を高めることになる。よって、脆弱性を弱める頑健性が確保されているかについての分析はフラジリティ解析とは別に行う必要がある。

表 8.2 津波フラジリティ解析区分と地震後の予条件シナリオ区分

区分記号	津波フラジリティ解析区分	予条件記号	地震後の状態の予条件	備考
I	事故発生フラジリティ解析	A	制御棒を正常に挿入し、施設全体が健全	
		B	炉心もしくはサポートシステムに異常があり、事故発生状態	フラジリティ解析不要、ただしその他の頑健性分析が必要
		C	過酷事故発生状態	
II	過酷事故発生フラジリティ解析	A	制御棒を正常に挿入し、施設全体が健全	
		B	炉心もしくはサポートシステムに異常があり、事故発生状態	細部事象の区分とその発生確率に応じて、フラジリティ解析を棄却
		C	過酷事故発生状態	フラジリティ解析不要、ただしその他の頑健性分析が必要

続いて、過酷事故発生フラジリティ解析における地震後の状態がすでに過酷事故発生状態であるばあいについても、前述の I-B と同じことになる。

しかし、予条件が事故発生状態 (B) の場合には、余事象であるので、基本的にはフラジリティ解析が必要である。この場合、事象 B については、通常代替電源系統や代替冷却水系統があるので、その部分的な損傷事象の組み合わせによって、細かく事象が分けられることになり、随分と複雑な分析をする必要が生ずることになる。

よって、事象 II-B については、前述の事故発生確率の許容値 ($P_{Sam-a-Tunan}$) との比較による事前棄却を行うことができる。一般的に、地震によって生き残った電源系統や冷却水系統の個々のフラジリティは予条件が健全時 (事象 A) のものと変わらないものと仮定できる。その上で、地震による事象 B の発生確率が $P_{s \text{ 事象 B}}$ とほぼ同等程度に小さい場合 (リスク評価がクリアできる施設では、通常そのようになる) には、事象 B の発生確率と津波による過酷事故への進展確率との積事象確率となるので、II-A のシナリオに基づく過酷事故発生確率計算内の部分的な事象発生確率から、津波による過酷事故への進展確率を概算し、 $P_{s \text{ 事象 B}}$ に比して十分に小さな確率 (例えば 1/1000 など) となる場合には、詳細計算は略することが妥当な場合がある。この省略することに対する対応は、8.10 で述べる。

8.6 津波フラジリティ解析のための施設・機器・構造の機能区分

津波フラジリティ解析の対象となる施設・機器・構造は、総じて原子力発電施設の敷地内および近傍海域における全てのものが対象となるといっても過言ではないほどに、多種多様である。ここでは、解析において、当該施設・機器・構造物のフラジリティ解析上の視点に於いて、いくつかの区分原理に基づく呼称区分や機体性能について述べる。

8.6.1 運転機能からの区分

通常運転の機能から見た施設や機器等は、①炉心、②サポート施設、③放射性物質格納施設、④2次サポート施設、⑤通常施設に区分される。これらの区分に基づく代表的施設・機器と、津波フラジリティ解析上の特徴を表8.3に示す。

まず、炉心については、その損傷が苛酷事象とされることは、耐震フラジリティ解析と定性的には異ならない。しかし、津波によってこれらの施設が直接損傷するには、施設内部に莫大な海水が流入し、大きな水圧を与える状況が必要であり、生起確率は極めて小さく、定量性において耐震フラジリティとは異なる。続いての、サポート施設については、逆に津波に対して弱点となる可能性が高い。

津波フラジリティ解析において、特徴的なものの第一は、運転機能から見て通常施設に区分されるものである。例えば、防潮堤は、通常時において損傷していても何ら支障がないものであり、後述するように津波来襲時においても、その構造が損傷しても、サポート施設や炉心への津波（海水）の接近を防止するバックアップ施設・機器が機能すれば、苛酷事象となる可能性は小さい。また、広報に使用される施設のように、単なる構造物は、耐震フラジリティに対する寄与は、無視できるが、津波フラジリティ解析においては、破壊した浮遊物が漂流して、フラジリティに寄与する構造物や機器を損傷させたり、炉心やサポート施設の運転に無関係の油脂であっても、流出して発火すると広範囲に広がって火災リスクを高めたりする。これらのことは、津波フラジリティ解析のシナリオ依存性や関数の非線形性を極端に強くするため、その対策と評価手法に関する慎重な配慮が求められる。

表 8.3 運転機能による施設・機器・構造の区分

機能区分	該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の特徴
(Ⅰ) 炉心	圧力容器、格納容器、ベントなどに関するその周辺機器	<ul style="list-style-type: none"> a. 発電機能に直接寄与している部分で有り、危機状態において、確実に「止める、冷やす」状態へ移行し、「閉じ込められ続けなければならない。 b. この機能損傷は、直接過酷事故状態となる。 c. 代替性がない。
(Ⅱ) サポート施設・機器	電源施設 炉心制御機器 冷却施設設備 非常用炉心冷却設備? など	<ul style="list-style-type: none"> a. 危機状態に於いて炉心・格納容器の「冷やす・閉じ込める」機能を維持する。 b. 個別の系統や個々の機器ごとに代替性がある。 c. 代替機能全てを失うと、「過酷事故事象」となる。 d. 代替機能で過酷事故に至らない範囲で、一部の機能が失われていると、「事故事象」となる。
(Ⅲ) 放射性物質格納施設	使用済み燃料貯蔵施設	<ul style="list-style-type: none"> a. 通常時において、「冷やす」状態にあるが、冷やす機能(サポート機能)が失われると過酷事故となる。 b. 容器の破損は、直接的に過酷事故となる。
(Ⅳ) 2次サポート施設・機器	燃料貯蔵庫 バックアップ電池 消防水タンク 緊急車両・器材など	<ul style="list-style-type: none"> a. I～Ⅲの機能が、代替機能の範囲で保持されている場合には、これらの施設・器材の損傷は、「事故」「過酷事故」に寄与することはない。 b. ただし、「冷やす・閉じ込める」機能の継続性に対する性能を左右する。
(Ⅴ) 通常施設	防波堤、防潮堤、防水壁 道路、通常油脂庫 駐車場、単なる建造物(広報など)、	<ul style="list-style-type: none"> a. I～Ⅲの機能が代替機能の範囲で保持されている場合には、これらの施設・器材の損傷は、「事故」「過酷事故」に寄与することはない、Ⅳの機能が保たれていれば、「冷やす・閉じ込める」機能の継続性についても、問題は無い。 b. 防波堤、防潮堤、防水壁のように、I～Ⅳの機能を津波から防護するための施設については、フラジリティ解析の視点では、重要施設である。 c. 道路は、機器対応時の緊急車両の移動を阻害する場合があります、津波フラジリティの増大に結びつく。 d. 油脂庫は、通常の油脂であっても、流出すると延焼火災のリスクを高め、津波フラジリティの増大に結びつく。 e. 駐車場や単なる建造物などは、それ自体の破壊は、問題ではないが、漂流物として重要構造を破壊したりすることは、津波フラジリティの増大に結びつく。

8.6.2 防護域による区分と施設の呼称

津波による原子力発電施設への作用は、海域から炉心施設へと順番に近づく、この空間的な段階は、時間的な順序でも有るとともに、津波ハザードの大きさに依存する影響域の広がりとも密接に関係している。一方で、仮に発電施設の敷地内に津波の海水が浸入していても、炉心の冷却水が正常に供給循環され、その制御に必要な機器（主として電気系統）が正常に働いているならば、燃料棒の「閉じ込める」機能維持のみならず、改めて発電を再開することも可能であるかもしれない。つまり、心象風景としての被害と放射性物質の拡散事象のリスク評価との間において大きな乖離が生じうるところに、地震リスク評価との違いがある。

心象と実際の津波フラジリティとの高い相関性を有する施策が、ドライサイト化である。ドライサイト化は、防潮堤によって津波のサイト内への進入を防ぐとともに、取水や排水施設のように防潮堤外において海域と接続している施設からのサイト内への海水進入を防ぐための防水壁などを使って行われる。これらの施設を総称して、「サイト外郭施設または構造」と呼ぶものとする。なお、サイト外からの漂流物の進入を防ぐための漂流物止の構造や仕組みについても、サイト外郭施設・構造に含まれる。

ドライサイト化は、一聞すると海水の浸入を全く許さない施策のように思われ心象的な安心感を得られるが、地盤内には事前に検知不可能で、津波が遡上したことによって初めて明らかになる水道（みずみち）があるものと思われる。このため、サイト内に海水が浸入したとしても、防護すべき機器がある施設（ビルなど）を、津波の進入から防ぐために設置することが必要である。このための防水壁やビル出入り口の防水扉などを総称して、「建造物外郭施設または構造」と呼ぶものとする。なお、サイト内への海水浸入に伴って生ずる漂流物の衝突によって建造物内に海水進入が始まることも有り、この対策施設や構造も建造物外郭施設・構造に含まれるものとする。

建造物外郭施設・構造を抜けて進入した海水に対して、重要な機器（例えば配電盤）を有する部屋を水密扉等によって隔離するための方策がとられるが、これらを総称して、「建造物内領域水密化施設または構造」と呼ぶものとする。

以上は、防護すべき機器や構造物への津波もしくは海水の接近を阻止・抑制する方策であるが、海水に浸水した場合に、機能を保持するための防水処置を行うこともある。また、ある機器の機能喪失のメカニズムには、津波や海水に触れることによって機器の機能が喪失することだけでなく、送電鉄塔と送電線の関係のように、鉄塔の部分的な破壊は好ましからぬ事象であるが、仮に送電線の送電機能が保たれることもある。このような構造を、「基礎・支保構造」と呼ぶものとする。

以上の区分について、表 8.4 に呼称、防護域、該当施設・機器・構造、および補足説明を示す。

表 8.4 防護域（対象）による施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の補足
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水、排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は、津波のエネルギーを減衰させる効果がある。ただし、反射によって悪影響を及ぼすこともある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は、出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり、一般用語として、ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに、重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり、サイト外郭施設の補完施設であり、もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり、地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して、重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水剤 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること、もしくはその材料をいう。この効果によって、機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は、炉心機能の低下には直接影響しないが、無視しえないものである。例えば、送電鉄塔の損傷は、送電線の送電能力の喪失に影響しない限り、フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表-8.3 中の I ～ III の機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は、炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

8.7 津波侵入状態のレベル区分とサイトの設計ポリシー

8.7.1 ハザードレベルの区分

前項(8.6)における施設や構造物の区分に基づく、津波ハザードの大きさとの関係において、フラジリティ解析のレベルは、概して次の3区分になる。

(1) ハザードレベル I : 津波がサイト外郭施設・構造を超えない状態

ハザードレベル I における津波とサイト外郭施設・構造との関係は、図-8.3 のようになる。ハザードのレベルを徐々に大きくすると、まずは、防波堤などの前面海域内施設・構造を越流するような状態が生ずるが、この状態では、前面海域に設けられている取水や排水設備の機能喪失が起こらない限り、炉心の機能喪失は起こりえない。

続いて、ハザードを大きくすると、図 8.3 のように遡上した津波が防潮堤に達するようになる。防潮堤によって反射される時、津波は直前の水深の2~3倍になる。つまり、津波の有する水頭は、防潮堤とほぼ同じ高さになるため、前面海域に設けられている取水や排水設備等の管路を通じて、海水がサイト内に逆流する状態になる。この逆流圧を逃がすために、サージタンク施設を設けるが、そのタンクからの漏水が起こらないように、防水壁等が設置される。このような予測シナリオ通りに事象が進み、サイト内地表面が津波による浸水を全く起こさない状態を「狭義のドライサイト」と呼ぶ。

しかし、常時には作用しない海面側からの水圧を受ける状態に対して、サイト内地盤と防潮堤前面の地盤との間に、予測不能な水道（みずみち）が存在したり、広域に3次元空間に存在するサイト外郭施設を完全に塞ぐことの合理的でなかったりすることもあり得る。その場合には、緩速に海水がサイト内に浸入し、湛水することが考えられる。サイト内の地表面は、必ずしも水平ではなく凹凸もあるため、湛水深が浅ければ、炉心のフラジリティに影響しない。このような状態を、ドライサイトと呼ぶものとする。

すなわち、ハザードレベル I とは、ドライサイト状態とも換言できる。

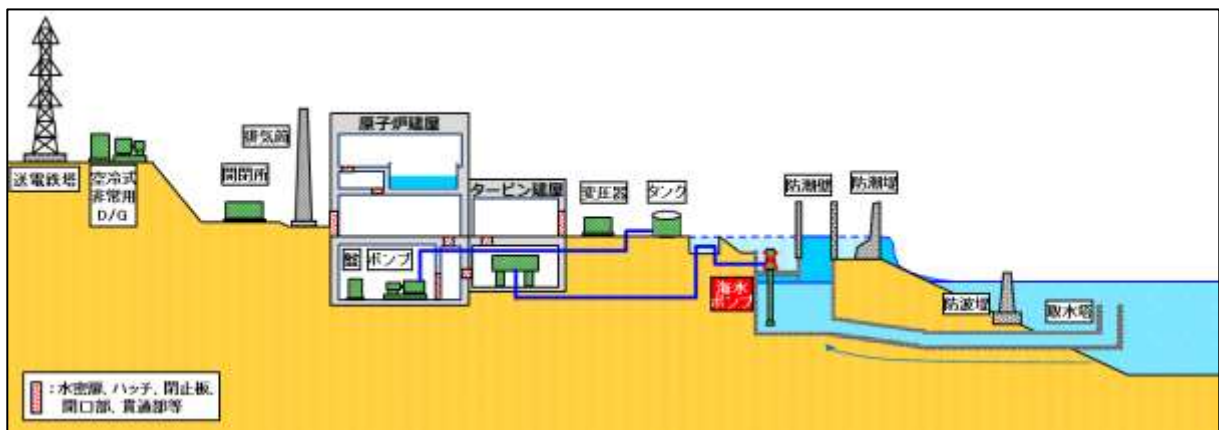


図 8.3 ハザードレベル I の津波等浸水状態

(2) ハザードレベルⅡ：津波がサイト外郭施設・構造を超えるが、建造物外郭施設・構造を超えて進入しない状態

ハザードレベルⅡにおける津波と建造物外郭施設・構造との関係は、図 8.4 のようになる。津波は、防潮堤などのサイト外郭施設を超えて越流し、サイト内に侵入している。しかし、重要な機材の入っている建屋などの周囲に作られた防水壁や水密扉などの建造物外郭施設・構造によって、基本的に建屋内への海水の浸入はしていない。この場合には、防護されている建屋以外のサイトは、海水に覆われており、その海水も波や流れを伴う状態となっている。このため、建屋に海水が入らないといっても、車や木材などの漂流物が生起することや、建造物外郭施設・構造を有しない建屋内においては、海水が侵入するため、不用意な保管状態では、油脂の流出に伴う火災が生ずることなどが、フラジリティ解析の評価要因となる。

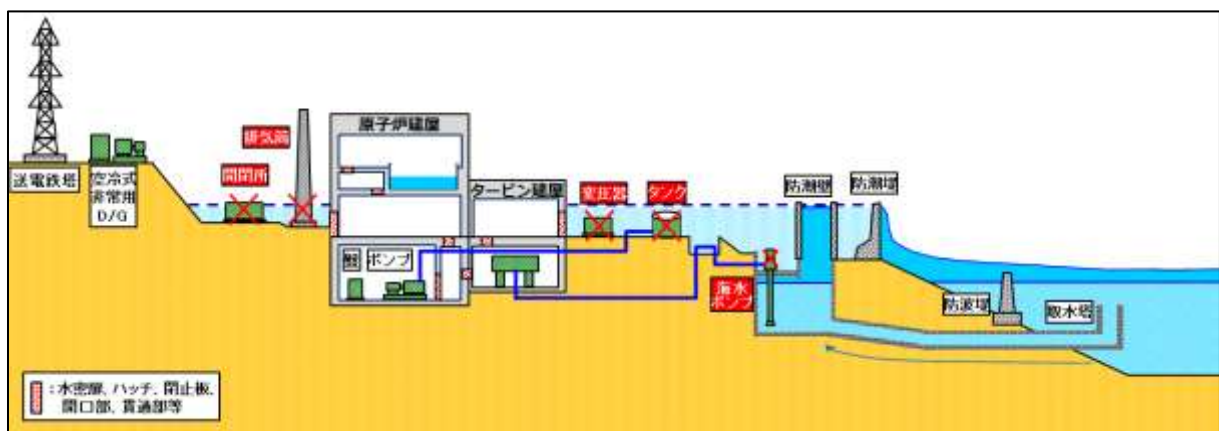


図 8.4 ハザードレベルⅡの津波等浸水状態

(3) ハザードレベルⅢ：津波が建造物外郭施設・構造を超えて建造物内に進入する状態

ハザードレベルⅢにおいては、図 8.5 に示すように建造物外郭施設・構造の機能を超えてサイト内津波（海水）が建屋内に入り込んでいる。建屋内へ海水が浸入するシナリオは、建造物外郭施設としての防水壁を乗り越えた海水が、建屋の防水処置をしていない扉や窓を破壊して侵入する事象のように、比較的明瞭に推定可能なものもあるが、推定が困難な事象も含まざるを得ない。例えば、サイト内地盤には、通常時から地下水の流れる水道（みずみち）が存在するが、ハザードレベルⅢでは、地表面を覆う津波の水頭が極めて大きいため、これらの水道と接続する可能性がある。その上で、地下に通ずる管路にこれらの水が入り込む状態（例えば、地震で損傷しているなど）になると、建屋内は海水や地下水が侵入し湛水する。

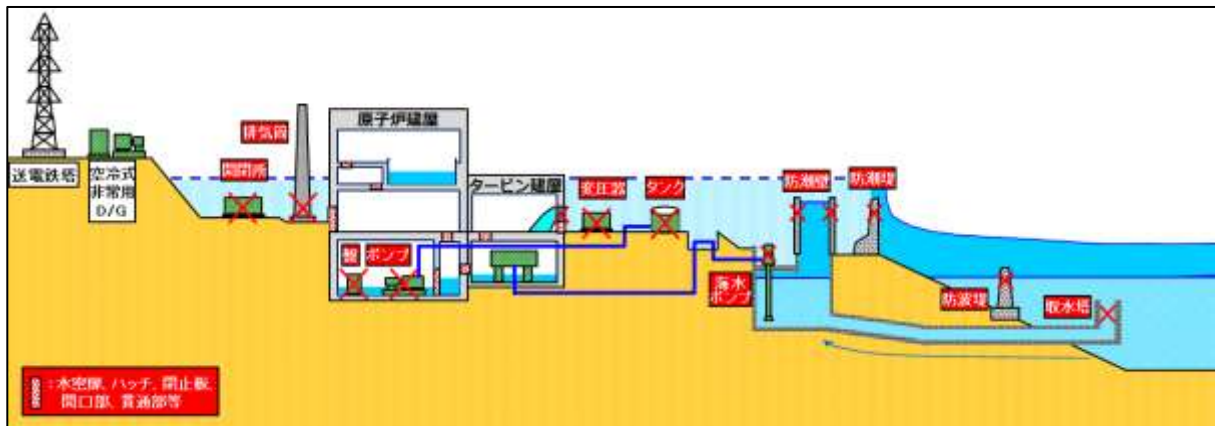


図 8.5 ハザードレベルⅢの浸水状態

8.7.2 サイト設計ポリシー

前述のハザードレベル区分に基づく、適正に設計されたサイトにおけるフラジリティ曲線は、図 8.6 のように区分できる。

ハザードレベルⅠの段階では、フラジリティはゼロではないが、極めて小さい。レベルⅡにおいては、フラジリティは増加傾向を示すであろうが、あまり大きなものではない。レベルⅢの段階に入るとフラジリティは、急激に増加する。

このような前提に基づくとき、確定論に基づく設計において、基準津波（確定論による最大級の津波）をハザードレベルⅠに納める設計思想を、ドライサイトコンセプトによる設計という。一方、基準津波をハザードレベルⅡ（防潮堤の高さを低くしたまま、もしくは、防潮堤を設けない）におく設計思想を、ウェットサイトコンセプトによる設計という。

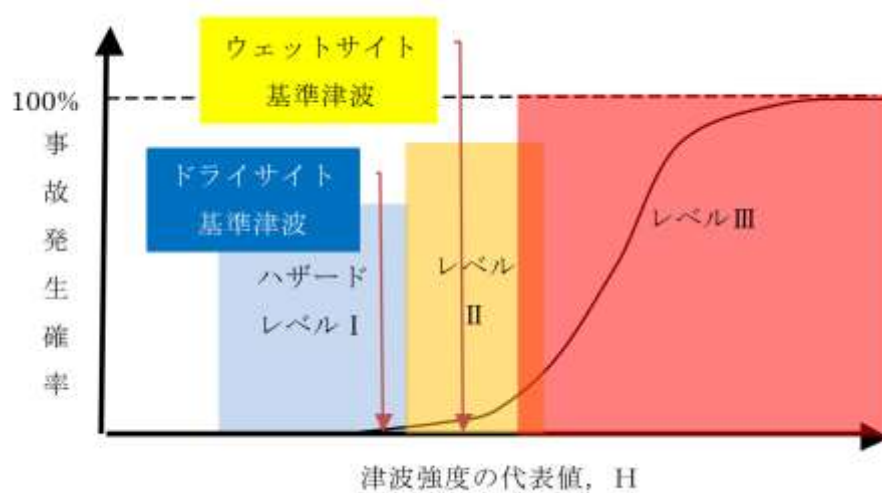


図 8.6 ハザードレベルとフラジリティ
ドライサイト設計とウェットサイト設計

8.8 津波フラジリティ解析の手順

ここでは、一つのハザード条件に対応する一連のフラジリティ解析の手順について記述する。なお、本記述では、後述する計算処理負担の問題は考慮せず、精密な数値解析などを駆使して実施すべき事項を記述するものとする。

8.8.1 地点津波状態の解析

地点津波とは、任意の要素の機能喪失確率を算定するために必要な、当該要素の存在する地点における津波、もしくは湛水のことである。地点津波は、図 8.8 に示すように、サイト外殻施設と建屋外殻施設の内外によって、①サイト外津波、②サイト内・建屋外津波（湛水）、

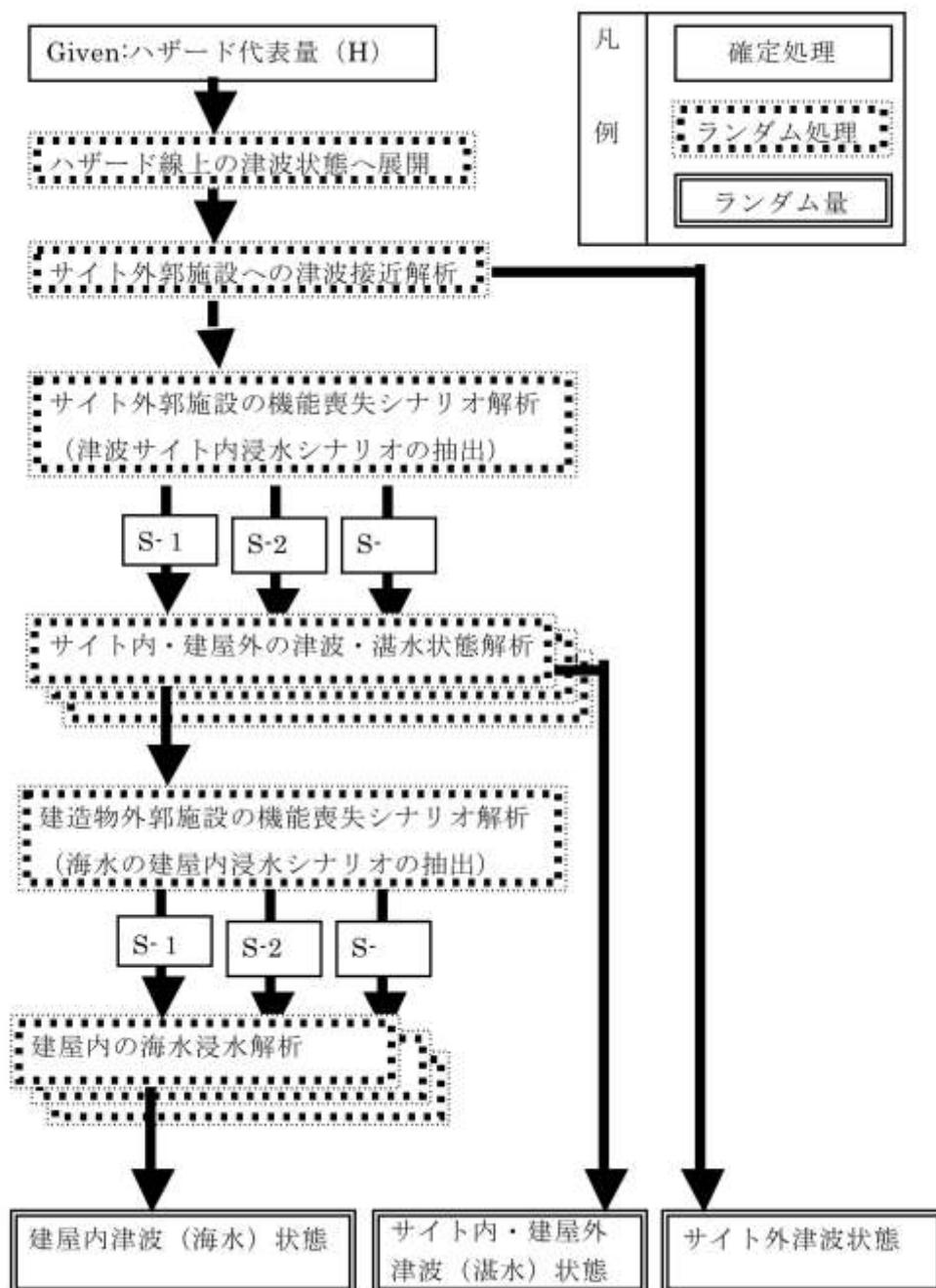
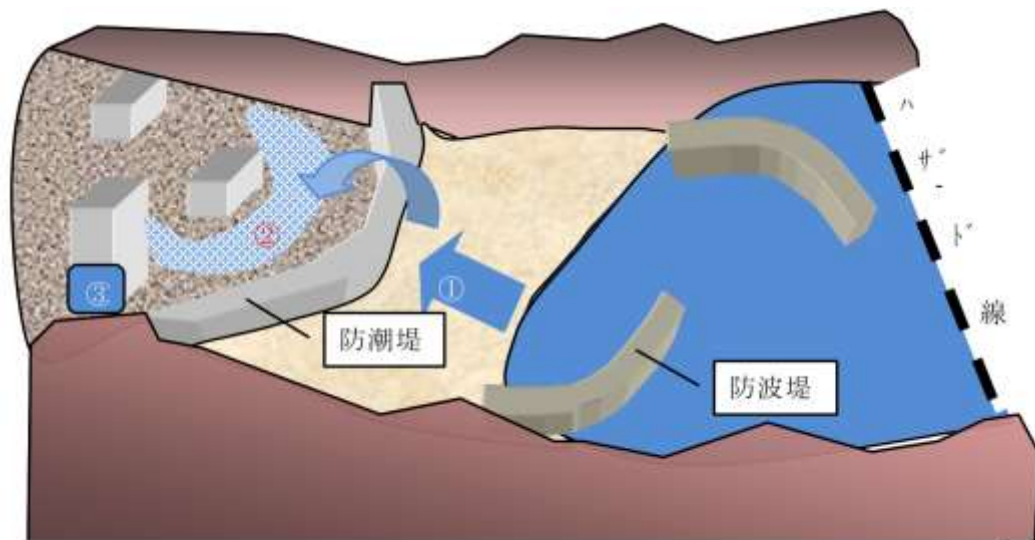


図 8.7 地点津波（海水）状態の解析手順



① サイト外津波 ② サイト内・建屋外津波（湛水） ③ 建屋内津波（海水）

図 8.8 地点津波の分類

および③建屋内海水（海水）に分けられる。その上で、図 8.7 に示す手順で解析が行われる。すなわち、

(1) 津波ハザード曲線で与えられる津波の破壊強度を示す代表値（H）

代表値Hは、ハザード曲線上の任意の値であるが、図 8.1 および図 8.2 によって説明したように、両者をリンクさせた積分を行うことになるので、通常はキリのよい離散値が適切な間隔で設定され、その一つを抽出する。

(2) 津波ハザード線上の状態設定

津波ハザードは、サイトから遠く離れた波源からの解析によって与えられるものであるが、サイト前面において設定されたハザード線上において、ある瞬間の値が一定であるという性質のものではない。よって、この代表値（H）を基に、ハザード線上の津波解析の初期値を設定する。この設定方法は、Hに対して確定的に与える方法もあり得るが、一般的にランダムな関係を基に設定される。

(3) サイト外郭施設への津波接近解析

図 8.8 で示すように、ハザード線で与えられた津波が、防波堤を乗り越え、汀線を超えて、防潮堤に達するまでの任意の地点津波（サイト外津波と呼ぶ）を求める。サイト外郭施設としては、防潮堤の裏側に設置されたサージタンク（施設）なども含まれるので、そこまでの解析も含まれる。解析においては、防潮堤前面の地表面の季節による変化や地形情報の不確定性などを考慮した解析を行うので、得られる地点津波はランダムな物理量を有する。ただし、ハザード線における津波状態とは基本的に連続性の強い物理関係にある。

サイト外津波を基に、サイト外にある取水・排水施設等の機能喪失確率を算定する。

(4) サイト外郭施設の機能喪失シナリオ解析およびサイト内・建屋外の津波・湛水状態解析

サイト外郭施設の代表施設である防潮堤が一部決壊すると、図-8.9 のように、その決壊部分に集中して津波が流れ込むことになる。その場合には、非決壊部分の津波水頭がこの流れ込む津波に集中するため、全面的な津波遡上における地点津波よりも、決壊部分、もしくは決壊部分直近

背後の地点津波は、その破壊ポテンシャルが大きくなる。これと同様なことは、他のサイト外郭施設でもいえるため、サイト外郭の機能喪失シナリオ解析を行う。その方法について防潮堤を代表として説明すると、以下ようになる。

- ①防潮堤を構成する要素としての防潮堤全面の地点津波を求める。
 - ②防潮堤の機能喪失限界（滑動、転倒、沈下、裏面破壊, etc.）に対応する作用確率に返還する。
 - ③防潮堤の各限界状態の抵抗確率分布を求め、機能喪失確率を算定する。
 - ④各要素防潮堤の機能喪失確率を用いて、防潮堤（システム）の機能喪失シナリオ（例えば、防潮堤 No. 3 が転倒して、その他は無事など）ごとの生起確率を求める。
 - ⑤シナリオによるサイト内への影響の相関性を考慮して、計算処理上の許容範囲において、相互に影響相関性の低いシナリオを抽出する。
 - ⑥各シナリオのサイト内への津波侵入解析を行う。
 - ⑦参考までに、全ての要素が健全であるシナリオに基づく、サイト内への海水の浸入
- 以上の結果、各シナリオに基づくサイト内の任意の地点津波が確率量として求められる。これらを積算して、サイト内・建屋外における地点津波が求められ、これを基に、屋外にある施設や器材の機能喪失確率算定がおこなわれる。

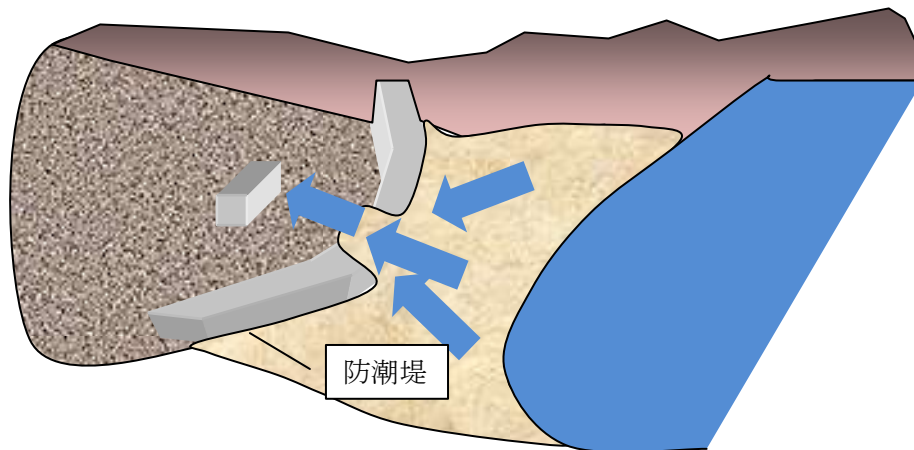


図 8.9 防波堤の一部決壊状態

(5) 建造物外郭施設の機能喪失シナリオ解析および建屋内の海水浸水解析

建造物外郭施設を抜けて、建屋内に侵入する海水状態を解析する。これらは、前述 4) 項のサイト外郭施設とサイト内津波を求める解析との関係と同様に、シナリオ分岐が発生する。特に、重要な機器については、部屋単位で水密化を図ることがあるなど、シナリオ分岐はより複雑である。

この解析を経て、建屋内の地点津波（海水）が確率量として求められる。一般的に、炉心の制御や放射性物質の保管場所は、建屋内に隔離されている。よって、これらの重要な機能を支える各種の機器への作用が、この建屋内地点津波によって求められる。

8.8.2 地点津波から作用の確率分布への変換

冷却系、電源供給系、もしくは制御系などの炉心の冷却・閉じ込めを継続するために必要な各要素の機能喪失を招く津波による作用は、水圧が代表的であるが、単なる浸水や、塩分や不純化合物の濃度、砂など物理的不純物の混入濃度、浸透圧や掘削力などがある。また、一つの要素であっても、支持物の転倒には水圧が影響し、電気的なショートには浸水（津波高さ）が影響するというような複数の作用を考慮する必要がある場合もある。

前述の地点津波の解析では、要素の機能喪失確率計算に必要な全ての種類の物理量を直接解析

することはできない。よって、地点津波状態の解析から得られた物理量 (w) の確率情報を要素への作用 (S) の確率情報へ変換する必要がある。その方法は、2 つの物理量の間で成立する数式関数であったり、改めて数値解析を行ったり、実験や統計的な手法を用いた推定を行ったりするが、概念的には図 8.10 のように、関係式 $P = f(w)$ を用いて変換することになる。

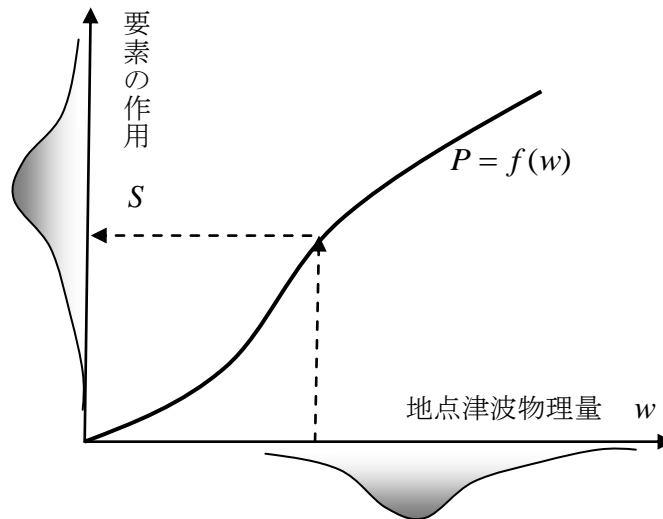


図 8.10 地点津波から作用への変換

8.8.3 要素の機能喪失確率計算

要素の機能喪失確率計算のためには、要素の限界状態の定義が重要である。例えば、電源系統にある鉄塔の場合には、鉄塔が破壊するのではなく、該当する鉄塔の傾斜などによって送電線が切断するなどして送電機能が失われることがチェックすべき限界状態である。しかし、これを直接照査することは困難であるので、そのような機能喪失を招く鉄塔の傾斜量などに限界値を設けて照査することになる。その場合、送電線の張り巡らせ方によって、各鉄塔の限界値も異なることになる。鉄塔の傾斜を招く作用としては、直接には動水圧が考えられるが、基礎の洗掘作用も重要である。

一方、配電や電氣的な制御機器のように、水に触れると機能喪失するものもある。同じ電気機器でも、ケーブルなどは防水機能の多寡によって水圧作用に対して耐えられる限界が異なり、ばらつきも考慮すべきものもある。

このように、要素ごとの限界状態を適切に定め、その機能喪失に影響する作用の種類を定義した後、各要素の抵抗力 (R) の確率分布を定める。確率分布については、実験・試験などによる統計処理に基づくことが望ましいが、鉄塔のような要素自体が構造物の場合には、数値計算による処理が必要である。また、過去の統計データが十分でない場合には、主観的な確率分布を設定することも必要である。さらに、水に接触することにより機能喪失することが自明なものについては、分布を無視して閾値設定により処理することもある。

このようにして得られた情報を元に、要素 i の機能喪失確率 P_i が次式の定義に従って求められる。

$$P_i = P(S > R) \quad (1)$$

ここで、 $P(S > R)$ は、作用が抵抗を上回る確率を表す。

8.8.4 故障木解析と原子力施設の事故・過酷事故発生確率計算

8.8.1 から 8.8.3 までの計算により、沖合にあるハザード線における確定的与条件Hに対応する原子力発電施設を構成する全要素の破壊確率が得られる。この情報を元にして、原子力発電施設が事故状態、または過酷事故状態に至る事象を総合化した故障木解析に対して、得られた要素破壊確率を代入し、原子力施設の事故・過酷事故発生確率計算を行う。

8.9 津波フラジリティ解析の手順

前項で述べた処理手順においても、誤差を伴うモデル化をせざるを得ない。また、ハザード曲線上における数値積分のための分割数を増やすと精度は向上するが、計算負担は莫大になり、実用上不可能となる。さらに、重畳現象をどの程度まで精緻に予測できるか、と言った問題もある。

このように、フラジリティ解析は出来る限り精緻で・正確な方法を選択し、実行する努力をするにしても、その予測値の信頼性や、予測できずに棄却した事象への対策が必要である。これらについては、事故発生確率の許容値に対して、予めモデル誤差や棄却誤差に対する余裕を持たせるため、その分の許容値を差し引いておくことが考えられる。

また、その配分された許容値の大きさに対応できる範囲で、モデル化誤差の判断や棄却判断をすることが重要である。

8.10 防潮堤の役割・評価（有川）

8.10.1 防潮堤の役割と倒壊の評価

防潮堤の役割は、サイト内への津波の浸水を防ぐものである。その役割を果たすためには、防潮堤が津波の力に対して傾倒しないことが必須である。傾倒するかどうかは、

- ・水圧による滑動，転倒，支持力破壊に対する安全性

により検討することが可能と考えられる。その際、

- ・防潮堤前後の水位差による浸透流による地盤支持力の低下
- ・越流水塊による背後地盤洗掘による地盤支持力および転倒に対する抵抗モーメントの低下

を考慮する必要がある。

浸水に対しては、

- ・津波の本体部が高さを超えた場合に生じる越流
- ・先端部の跳ね上がりによる越水
- ・防潮堤前後の水位差による原地盤のボイリングおよびパイピングの発生に伴う浸水
- ・防潮堤の目地からの漏水
- ・コンクリートのヒビ等からの漏水

の可能性を検討しなければならない。

8.10.2 防潮堤の越流阻止機能の評価

東日本大震災における津波に対する胸壁の被災率を、岩手県の久慈市から陸前高田市まで断面のわかる 60 施設を対象として調べた。対象とした施設の比高はところ図 8.11 に示すとおりである。このときの被災率を図 8.12 に示す。一部被災を含め、20%程度が被災をしていることがわかる。また、漁港区を対象とした場合、比高 4~5m のものが大半を占め、その場合においては、倒壊した場合においては、ほぼ全壊していることがわかる。

図 8.13 は、比高と被災率ならびに比高と天端水位を用いて計算される滑動および転倒の安全率の関係を出したものである。これを見ると、全体的には滑動安全率のほうが転倒安全率よりも低

く、また、比高が 3m を超えるあたりから、滑動安全率が 1.0 を下回ることがわかる。また、4.0m の比高を超えたあたりから被災率が 1 になっていることがわかる。

図 8.14 に、滑動安全率と被災率の関係ならびに、対数正規分布の累積分布関数曲線を示す。対数の変数としては安全率の逆数とした。曲線は防波堤における被災率から得られた曲線と同じパラメタにしたものと $\mu=0.01$ 、 $\sigma=0.1$ としたものを示す。被災しているものだけをみると、概ね曲線には乗っているものの、防波堤よりシャープな曲線であるように思われる。これは、倒壊する場合においては、ほぼすべて倒壊する可能性があることがわかる。以上のことから、一旦倒壊と判断されれば、その機能をゼロとして考えるべきである。

8.10.3 津波越流時の後背地への浸水評価

越流水塊が落水する際、背後に水が溜まるまでは、越流水塊は放物線を描き、位置エネルギーが運動エネルギーに変化する。そのため、先端部は、水位が大きくなっても、流速が大きくなっており、その評価を適切に行う必要がある。また、同様に狭さく部などでは、流速が大きくなることから、漂流物や配管などは注意が必要である。

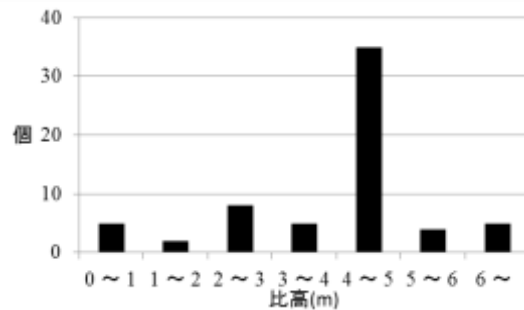


図8.11 検討対象施設の比高

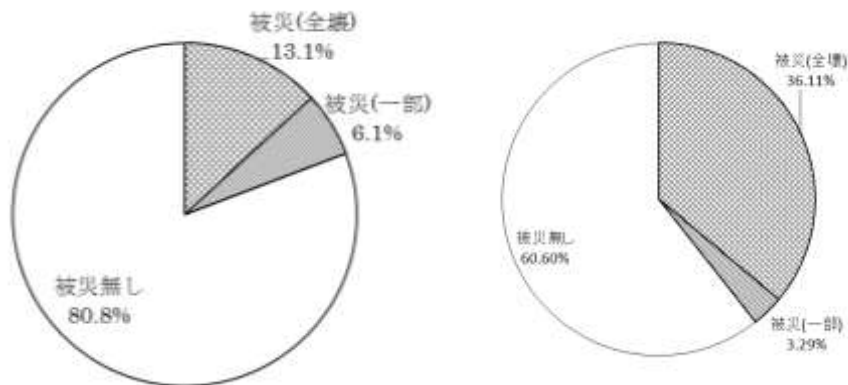


図8.12 検討対象施設の被災率(左：対象施設全体，右：漁港区対象)

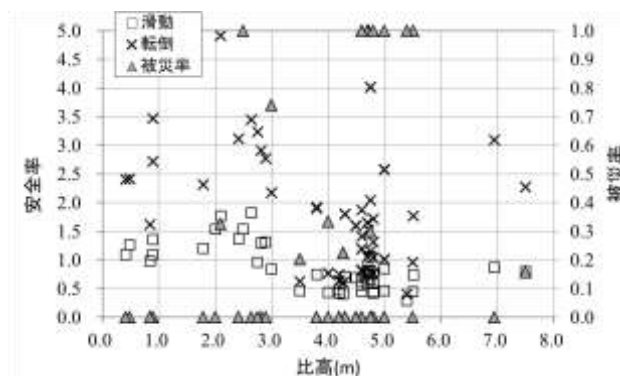


図8.13 比高と被災率および天端水位を用いた各種安全率の関係

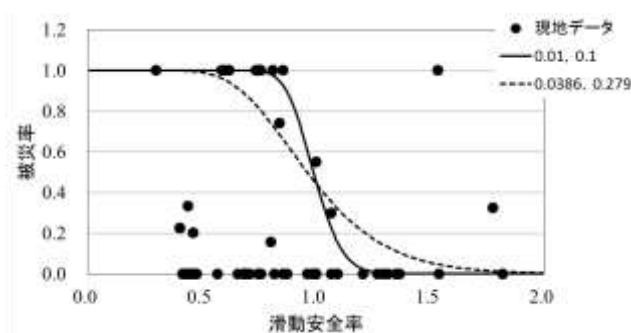


図8.14 滑動安全率と被災率の関係

参考文献

- 1) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港技術研究所資料, No.1269, 2013
- 2) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹: 津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, vol. 52, No.2, 2013

8.11 防水壁、水密扉等（内郭防護）の役割・評価（有川・日高補足）

防水壁及び水密扉等（内郭防護設備）については、重要な安全機能を有する設備等を内包する建屋及び区画を防護重点化し、津波による浸水を防ぐ役割がある。

8.11.1 防水壁の役割・評価

防水壁は、その構造的特性は、防潮壁と同じであることが多いことから、その役割および評価は、防潮壁を参考とする。波力の評価については、防潮壁に近い場合には、静水圧だけでなく、運動エネルギーを加味する必要がある可能性がある。

8.11.1 水密扉の役割・評価

水密扉等は構造が防潮壁、防水壁と異なりヒンジ構造であることが多い。従って、水圧に対するヒンジの耐性を検討するなど、構造に応じて、それぞれの安全性を調べる必要がある。また、現段階では、設計外力以上が作用した場合におけるヒンジの変形特性などは不明瞭であり、水理模型実験等を行うなど評価に当たっては十分に検討する必要がある。

8.12 屋内の浸水評価（有川・日高？）

屋内における浸水過程については、不明瞭な点が多い。そのため、安全側の評価としては、落水による波力について、位置エネルギーを運動エネルギーに変換して評価し、また、水塊の跳ね上がりについては、浸水深の3倍程度までは飛沫まで含めて作用すると考えるべきである。もしくは、水理模型実験を行ったうえで、詳細は数値計算を行うなどとして評価すべきである。その場合においても、浸水深の1.5倍までは水が作用する可能性があると考えられるべきである。

8.13 一般的な津波による炉心損傷シーケンス解析（桐本）

図8-X1に、津波によって機器a及び機器bが損傷し、内的事象PRAで炉心損傷に至る可能性があるとしてイベントツリーでモデル化している起因事象が発生し、さらにシステムA及びシス

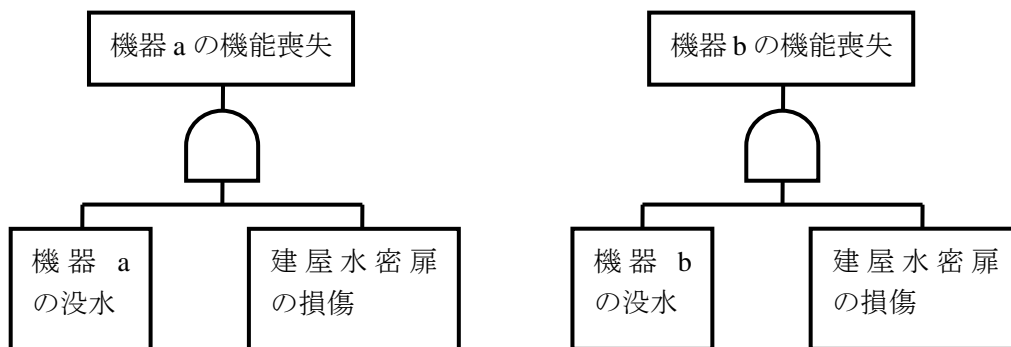
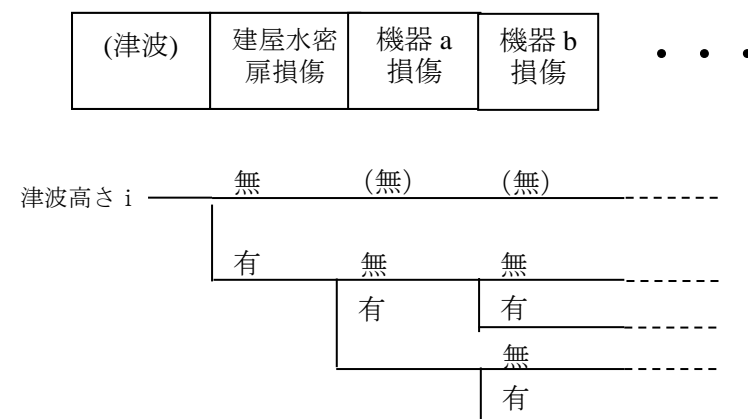


図 8-X2 水密扉のフォールトツリーモデル化例

なお、この従属性を図 8-X3 のようにイベントツリーにてモデル化することも可能である。



モデル化の内容

- ・ 建屋の水密扉が健全な場合には、機器 a 及び機器 b が設置された区画には浸水はなく、津波による影響が発生しない。
- ・ 建屋の水密扉が損傷した場合には、機器 a 及び機器 b が設置された区画には浸水する可能性が発生する。

図 8-X3 水密扉のイベントツリーモデル化例

8.14 電源システムの一般的フォールトツリー解析（桐本）

AC 電源喪失をフォールトツリーで用いる一般的な例を、図 8-X4 に示す。受電遮断器故障のトランスフェーゲート下にはさらに DC バッテリ、遮断器、母線故障などが展開されることになる。また、発電所外の設備の影響による外部電源喪失については起因事象として扱われるため、津波で誘発される起因事象として図 8-X1 で示しているようにイベントツリーで扱う。

これらの電源システムは、機器の設置高さ等によりその津波高さでの機器の全機能喪失は異なるため、それぞれのケースに合わせて基事象の故障確率を 1 として扱う、或いはシステムを期待

から除外するなどのスクリーニングを行うことになる。フラジリティ評価による防護領域への海水流入の評価などから、詳細に扱う場合は津波の建屋開口部からの浸水を溢水源とする、津波後の内部溢水 PRA 評価で取り扱われると考えられる。

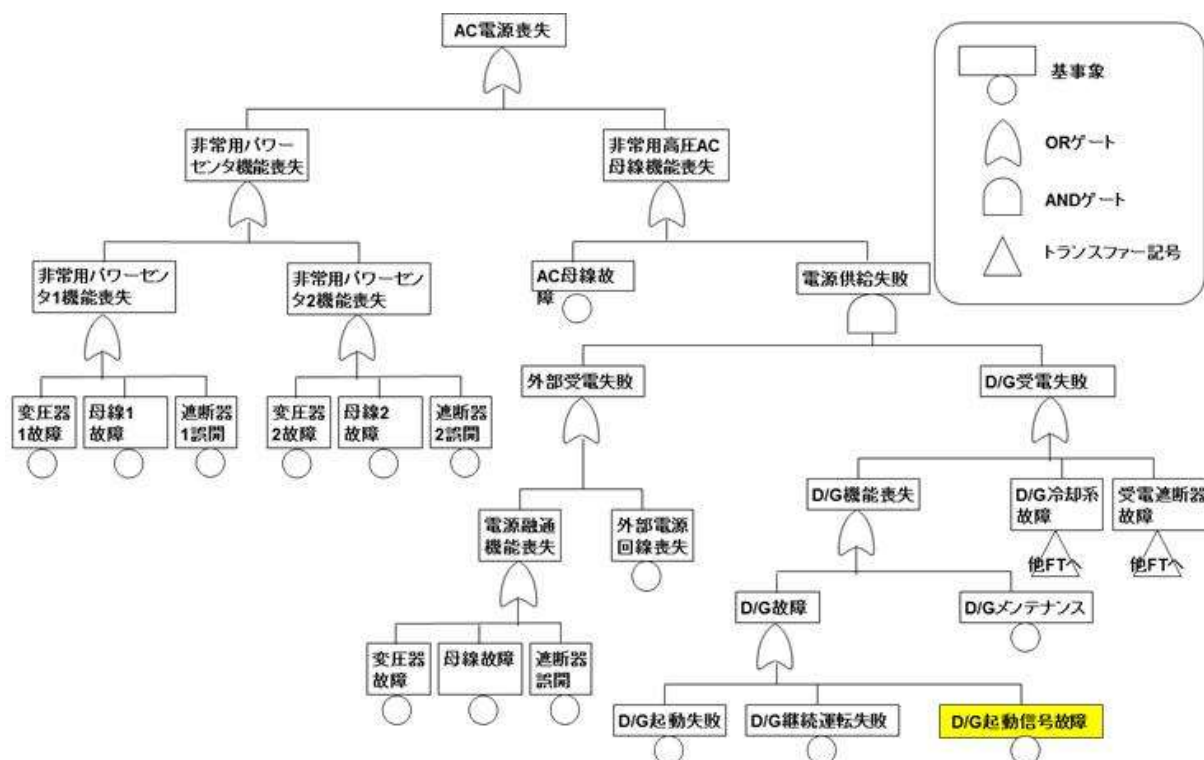


図 8-X4 AC 電源喪失のフォールトツリーの例

8.15 信号システムの一般的フォールトツリー解析（桐本）

機器の起動信号をフォールトツリーで用いる一般的な例として、図 8-X5 に冷却材注入システムの注入ラインの電動弁が起動信号により開動作する際のフォールトツリーと、その起動信号故障のフォールトツリー部分を示す。これらの信号系の基事象は、表 8.6 で分類される「防水材・防水機器」による被水・没水による耐水性の評価により故障確率を考慮してモデル化することが考えられるが、この評価も津波後の内部溢水 PRA 評価で取り扱われるものと考えられる。

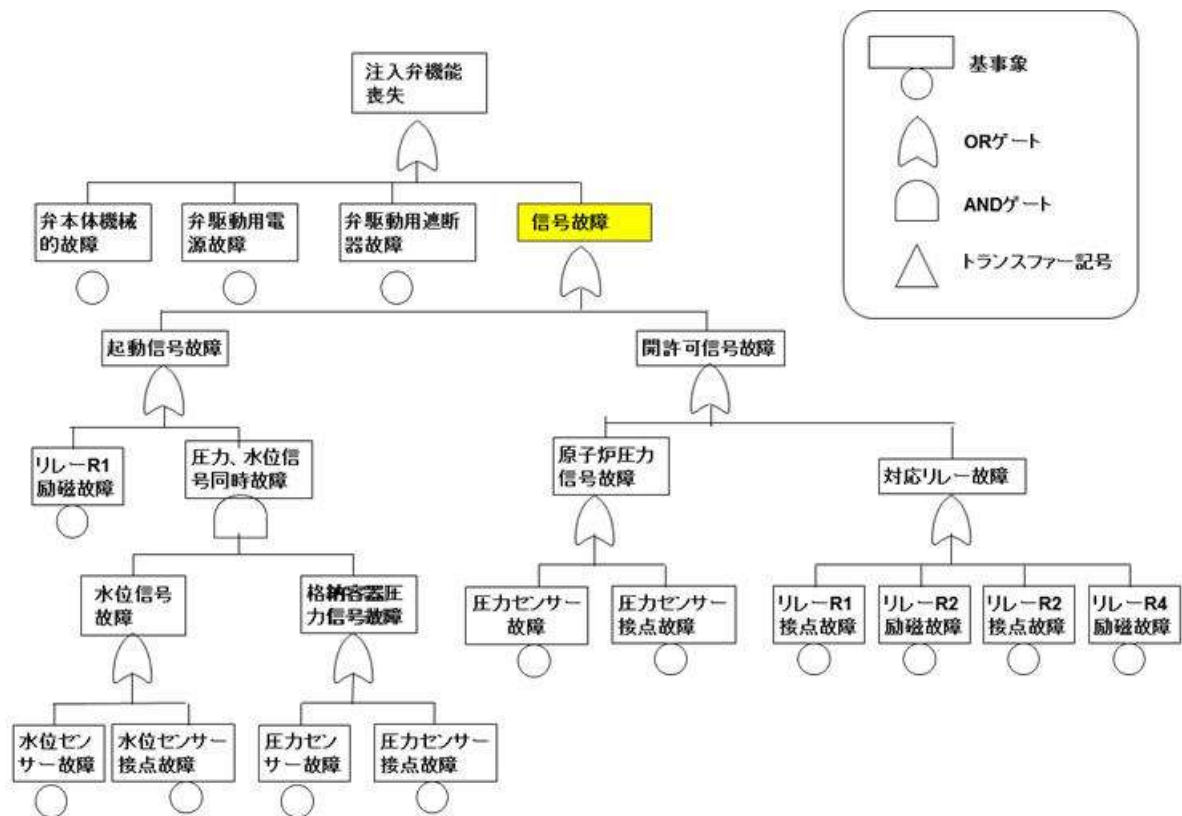


図 8-X5 信号故障のフォールトツリーの例

8.16 電源・冷却・信号等のシステム構成機器の機能喪失と機能喪失確率分布特性（奈良）

電源・冷却・信号等のシステム構成機器を抽出し、それぞれの構成部品が浸水又は被水することによりその様な故障モードにより機能喪失に至るかを考える

8.16.1 電気機器

原子炉の安全上重要な電気設備として、配電盤、直流電源設備、ディーゼル発電設備がある。

これらについて、津波により機能喪失に至る故障モードを考えると以下の通りとなる。

(1) 配電盤

配電盤は、母線、盤内配線、リレー類、遮断器などから構成される。

一般に屋内に設置される配電盤は密閉構造ではないため、盤の換気口から容易に浸水する。

盤内の母線や用品の端子部は充電部が露出しているために、被水することにより絶縁低下が起きるとともに、地絡・短絡又は漏えい電流の増加により遮断器が開放する等の事象に発展する。

又、遮断器は一般にリンク機構により動作するが、被水することによりグリースが漏

出して動作不良に至る可能性も考えられる。

この他に、全般的な問題として、電源室に設置される機材類がデブリとなって、配電盤に損傷を与える可能性やスイッチ類を誤動作させる可能性も考えられる。

(2) 直流電源設備

直流電源設備は、バッテリーと充電器から構成される。

これらの設備も配電盤と同様に端子部が露出していることから、

被水することにより絶縁低下が起きるとともに、地絡・短絡又は漏えい電流の増加により遮断器が開放する等の事象に発展する。

これ以外に、バッテリーについては、一般に鉛蓄電池が使用されていることから、電槽内に浸水すると電解液が希釈され、電池としての機能喪失に至る。

(3) ディーゼル発電設備

ディーゼル発電設備は、ディーゼル機関、燃料タンク、補助油ポンプ等の付帯設備、発電機、制御盤等から構成される。

ディーゼル機関は、オイルパン下部よりシリンダ内に浸水すると軸系の損傷に至る、また吸気系に浸水した場合も機能喪失に至る。

又、燃料タンクへの浸水により燃料の悪化、補助油ポンプ等の付帯設備の機能喪失に拠っても、ディーゼル機関の機能喪失に至る。

発電機、制御盤については、端子部は充電部が露出しているために、被水することにより絶縁低下が起きるとともに、地絡・短絡又は漏えい電流の増加により遮断器が開放する等の事象に発展する。

又、発電機については、機内に浸水すると回転子が水の抵抗を受けて過負荷となり、過負荷保護により停止に至る可能性がある。

8.17 建屋等の材料・部材・構造全体の機能喪失確率分布特性（美原）

ここでは、原子力関連施設で一般的に用いられてる鉄筋コンクリート造（以下、RC造という）建屋を対象に、構成する材料、部材及び構造物全体の現実的耐力にかかる機能喪失確率分布特性について述べる。また、津波の波力及び漂流物衝突による建屋の直接的な崩壊（自重支持機能及び安定性の喪失限界）及び局所的な損傷（構造部材及び非構造部材の損傷による建物・構築物内部への浸水）に対して支配的な構造的損傷モードを対象とする。

(1) 材料

1) コンクリート

原子力関連施設のRC造建屋に使用されているコンクリートの材料強度のばらつきに関しては、「AESJ-SC-P006 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」に標準的なデータベースが用意されている。そこでは、コンクリートの実強度は、強度管理時の変動に材齢、構造部位の影響も考慮したものとして、(8.17-1)式にて表現できるとしている

$$\text{構造部位の実強度} = \text{設計基準強度} \times C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (8.17-1)$$

ここで、

C_1 = 強度管理時シリンダー強度 / 設計基準強度

C_2 = 長期材齢シリンダー強度 / 強度管理時シリンダー強度

C_3 = 構造部位の実強度 / 長期材齢シリンダー強度

$C_1 \sim C_3$ までの 3 種類の要因に対して、原子力発電所施設を対象に分析しており、実機の 13 週管理コンクリートの実強度について調査・検討した結果を表 8.17-1 に示す。これより、打設 1 年後の実強度の平均値は設計基準強度の約 1.4 倍、変動係数は 0.13 であり、コンクリート実強度の統計値としてこの値を用いることができる。

表 8.17-1 コンクリート実強度の統計値

	統計値	
	平均値	変動係数
13週シリンダー強度/設計基準強度 (13週管理)	1.35	0.07
1年シリンダー強度/13週シリンダー 強度	1.1	—
実強度(1年)/1年シリンダー強度	0.95	0.11
実強度(1年)/設計基準強度(13週 管理)	1.40	0.13

2) 鉄筋

RC造建屋に使用されている鉄筋の材料強度のばらつきに関しては、(財)日本建築総合試験所が 1985 年度に実施した異形鋼棒の受託試験の集計結果によれば、D10～D38 における強度の平均値は SD295 および SD345 で $1.245 \sigma_y$ および $1.142 \sigma_y$ であり、その標準偏差は $0.07 \sigma_y$ 及び $0.06 \sigma_y$ となっている。ここに σ_y は規格最小降伏点である。これらの統計値を表 8.17-2 に示す。

表 8.17-2 異形鉄筋の降伏強度のばらつき

鋼種	呼び名 (径)	降伏点		
		n	\bar{x}	ν
SD295	D10	1 562	38	5.8
	D13	2 972	37	5.7
	D19	2 322	37	4.3
	D25	1 218	37	5.1
	D32	1 281	37	5.7
SD345	D13	81	38	3.7
	D19	314	40	6.5
	D25	327	39	5.6
	D32	54	41	4.1
異形 PC 鋼棒 SD1275相当	7.4mm	73	146.9	1.0
	9.2mm	57	145.1	0.8
	11mm	41	145.9	1.2
	13mm	46	145.2	0.8

n : データ数, \bar{x} : 平均値 (kgf/mm²), ν : 変動係数 (%)

(2) 部材

1) 構造部材

原子力関連施設のRC造建屋に津波の波力が作用した場合又は漂流物が衝突した場合には、耐震壁及び柱・梁部材が曲げ破壊又はせん断破壊することが想定される。これらの部材の破壊耐力評価式のばらつきは「日本建築学会 建築物の限界状態設計指針」で検討されており、例えば、曲げ終局強度の評価式の統計値としては、材料強度の変動、評価式による変動及び実構造物に対する変動を考慮した図 8.17-1 及び表 8.17-3 が示されている。

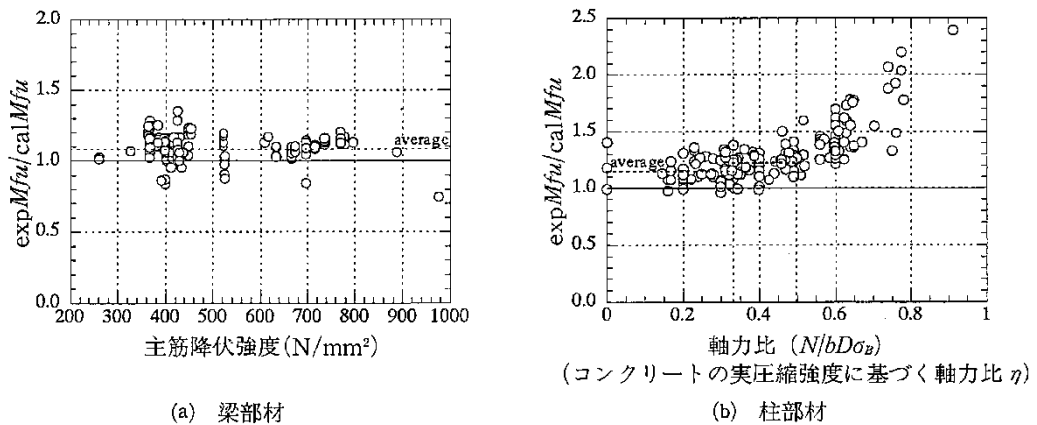


図 8.17-1 曲げ終局強度式の検証結果

表 8.17-3 曲げ終局強度の統計値

部材	軸力比の範囲	主筋種別	①材料強度による変動		②評価式による変動		③実構造物に対する変動		強度統計値	
			$\bar{\psi}_m$	$V_{\psi m}$	$\bar{\psi}_p$	$V_{\psi p}$	$\bar{\psi}_s$	$V_{\psi s}$	\bar{R}/R_n	V_R
梁	$\eta=0$	SD295	1.25	0.05	1.11	0.10	1.00	0.05	1.39	0.12
		SD345	1.15	0.05					1.28	
		SD390	1.15	0.03					1.28	
柱	$0 \leq \eta \leq 0.4$	SD295	1.13	0.03	1.06	0.15			1.19	0.16
		SD345	1.10	0.03					1.17	
		SD390	1.10	0.02					1.17	

$$\eta = N/bD\sigma_B$$

また、耐震壁の水密性にかかる機能喪失確率分布特性は、主としてプールやピット等を対象にしたコンクリート部分に内張りされた鋼製ライナ等が漏洩防止機能を担うことが一般的であるために、鋼製ライナがないコンクリート部に関してはデータがないのが実情である。なお、気密性に関するデータに関しては、様々な漏洩試験が行われており、耐震壁のせん断ひずみで表現すると 2.0×10^{-3} より大きいせん断ひずみが生じている状態が継続しても、負圧維持機能は保持される結果が得られている。

2) 非構造部材

原子力関連施設のRC造建屋に津波の波力が作用した場合又は漂流物が衝突した場合には、構造部材が損傷しなくても、非構造部材が損傷し、それによる波及的影響が考えられる。非構造部材としては、間仕切壁、天井、床、扉及びエキスパンション等が挙げられ、それらの非構造部材の損傷程度を推定するために「日本建築学会 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領」を用いることができる。例えば、実験結果に基づく層間変位をパラメータにした非構造部材の損傷程度の一例を表 8.17-4 に示す。

表 8.17-4 実験結果に基づく層間変位をパラメータにした非構造部材の損傷程度の一例

層間変位	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15
試験体	4	8	16	32	64	128 mm
コンクリートブロック	(外周はだ割かれ)	▲(12mm)▲ ブロックひび割れ, 同ひび割れ(大量)	(ひび割れ破壊)			
ガラスブロック	(外周はだ割かれ)		▲ ガラスブロック破壊 目地ひび割れ	▲ ブロック破片落下		
ALC版縦積み	(外周はだ割かれ)	▲ ALC版表面はく落	▲ 縦目地ひび割れ	▲ ALC版ひび割れ		▲(135mm) 縦目地鉄筋溶接部破断
ALC版横積み	(外周はだ割かれ)	▲(12mm)▲ 上横目地ひび割れ 中パネルひび割れ		▲(28.8mm) 下横目地ひび割れ		
アルミサッシはめ殺し	(サッシ枠接合部変形) (ガスケット外れ)				▲ ガラスひび割れ 取付け金物落下	▲ ガラスひび割れ ガラス全面破壊
アルミサッシ引違い	(サッシ枠接合部変形) (ガスケット外れ)				(取付け金物落下)	▲(114mm) クレセント破壊
軽量鉄骨下地 フレキシブルボード		▲(12mm)▲ 隅部ひび割れ 胴縁チャンネルの開き		▲(48mm)▲ ビスめり込み ボードひび割れ		
軽量鉄骨下地 ラスシートモルタル塗り		▲ 初期ひび割れ拡大 (胴縁チャンネルの開き)	▲ 胴縁とモルタルの離れ (ラスシートの引き裂き)	▲ ビスの頭抜け		
木造下地 石こうボード	(下地のゆるみ, くぎのゆるみ)	▲ 柱脚の浮き	▲ くぎの浮き, めり込み			▲ ボード倒壊
木造下地 ワイヤラスモルタル塗り		(ステーブルの抜け)		▲ ステーブルの抜け(上下で顕著) (木ずりにひび割れ)		

{ () 内は徐々に進行する破壊 }

(3) 構造物全体

1) 耐震壁の損傷による層崩壊

津波の波力及び漂流物衝突による建屋の直接的な崩壊に至る際の支配的な損傷モードは、一般的に層崩壊を伴う RC 造耐震壁のせん断破壊である。その損傷限界点は、偶然的不確実さ及び認識的不確実さを含む実験結果に基づく信頼度の高いデータベースが「AESJ-SC-P006 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」に示される表 8.17-5 に与えられている。ただし、これらの値は、実験データの蓄積によって今後変わり得る可能性があることから、実験データの妥当性を吟味して適宜更新することが望ましい。ここで、実験データに係る主な構造要因の範囲は、原子炉建屋を対象にした模型実験に基づいているために、鉄筋比(P_v 又は P_H)0.6~3.0%, シアスパン比(M/QD)0.24~1.2, 軸応力度(σ_y)0~23.4kgf/cm², コンクリート圧縮強度(F_c)175~650kgf/cm², 鉄筋降伏応力度(σ_y)3310~4200kgf/cm²であり、これらの構造要因の範囲を極端に逸脱しないように留意する。

$$\tau_u = \left(1 - \frac{\tau_s}{4.5\sqrt{F_c}}\right) \times \tau_0 + \tau_s \quad \tau_s \leq 4.5\sqrt{F_c} \quad (8.17-2)$$

$$\tau_u = 4.5\sqrt{F_c} \quad \tau_s > 4.5\sqrt{F_c} \quad (8.17-3)$$

$$\tau_0 = (3 - 1.8M/QD) \times \sqrt{F_c}$$

なお、 $M/QD > 1$ のとき $M/QD = 1$ とする。

$$\tau_s = 0.5 \times \{ (P_V + P_H) \times {}_s\sigma_y + (\sigma_V + \sigma_H) \}$$

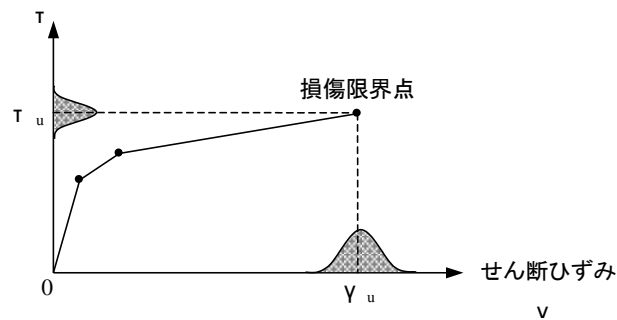
ただし,

- F_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)
- P_V, P_H : 縦, 横筋比 (実数)
- σ_V, σ_H : 縦, 横軸応力度 (kgf/cm²) (圧縮を正とする)
- ${}_s\sigma_y$: 鉄筋降伏応力度 (kgf/cm²)
- M/QD : シアスパン比

表 8.17-5 耐震壁の損傷限界点

損傷限界点の指標		平均値	変動係数 (偶然的不確かさ 及び認識論的不確か 実さの両者含む)
せん断応力 τ_u		(8.17-2)及び(8.17-3)式	0.15
せん断 ひずみ γ_u	ボックス壁	5.36×10^{-3}	0.24
	円筒壁	9.77×10^{-3}	0.33

せん断応力



[せん断ひずみとせん断応力の関係(概念図)]

2) 基礎部材の損傷による安定性の喪失

津波の波力及び漂流物衝突による建屋の直接的な崩壊に至る際の支配的な損傷モードの一つとして、基礎部材の損傷による安定性の喪失が挙げられる。「日本建築学会 建築物の限界状態設計指針」には、原子力関連施設の建屋で用いられている直接基礎及び杭基礎の様々な荷重状態に対する耐力係数が提示されている。

8.18 地震との重畳 (庄司)

- 津波接近前の地盤変状
- 引き波の影響
- 地震による建造物の事前損傷
- 津波の余震評価への影響

- 1) 浸水状況の反映
- 2) 津波損傷の反映

8.19 数値計算上の工夫（庄司）

またともにFEMを駆使すると、数年規模におよぶ解析の問題点と対策に関するコメントなど

8.20 補足事項

ここでは、いくつかの残された課題について、概略を記述する。いずれも、前述の8.8で述べた地点津波の推定精度を上げたとしても、作用への変換方法が曖昧であったり、抵抗の確率分布モデルの構築が困難であったりするものである。よって、工学的な対策としては、フラジリティ解析の精度向上ではなく、そのような事象が発生しないように、対策を行っているかについて、プラントウォークダウン（現地踏査）によって確認することの方が有効である。

(1) 漂流物（有川さん補足してください）（日高補足）

敷地外の漂流物については、船舶における「津波警報発令の運用（海上への避難）」を確認した上で、サイトに到達する確率が低く炉心損傷確率への影響が微小であれば必ずしも評価する必要はない。また、敷地内の漂流物についても、車両等の漂流物に成りえるものを高台に移動することで漂流物を少なくする努力をした上で、内郭防護（水密扉等）に影響を与える確率が低く炉心損傷確率への影響が微小であれば必ずしも評価する必要はない。

ただし、津波が越流した場合においては、サイト外の漂流物が乗り越える可能性が高いため、建屋の高い場所への衝突した場合の影響などを考慮しておく必要がある。

(2) プラントウォークダウン（日高補足）

1) 現場確認

机上検討で不十分な情報（システム間及び機器間の相互依存性、波及的影響等）については、プラントウォークダウンより耐震安全性、津波に対する発電所への影響予測及び回復力を維持するためのリカバリー操作性等の観点からプラントウォークダウン（現場踏査）により確認する必要がある。例として、下記にプラントウォークダウン（現場踏査）にて着目すべき点を記載する。

○耐震安全性

- ・対象施設が設計図面等と相違がなく、外見上腐食がないこと等の異常がないことを確認
- ・耐震性を評価する上で最重要である基礎部分に異常がないことを確認
- ・耐震クラスが低い機器等が倒壊することで波及的影響を及ぼすことがないことを確認

○津波に対する発電所への影響予測

- ・津波伝播経路の確認
- ・外郭防護、内郭防護における浸水性及び浸水経路の確認
- ・敷地外及び敷地内で想定される漂流物の確認

○リカバリー操作性

- ・アクセスルートが確保されることを確認
- ・想定される事象の中で現場での操作が可能であること等を確認

2) 耐津波工学委員会での取り組み

耐津波工学委員会では、原子力安全のための耐津波工学の体系化を築く一環として、机上のみ

で上記を検討するのではなく、考えられる事象（地震津波の重畳等）に対して十分な対策を採られているか、対策施設における効果の度合い等の観点から原子力サイトを視察する取り組みを行っている。平成25年度は、東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所、東北電力（株）女川原子力発電所、中部電力（株）浜岡原子力発電所及び関西電力（株）美浜原子力発電所の4サイトを訪れ、津波対策設備を中心に視察を行った。図8-3に各サイトにおける津波対策施設の視察状況を示す。



柏崎刈羽原子力発電所（水密扉）



女川原子力発電所（大容量電源装置）



浜岡原子力発電所（防波壁 T. P. 22m）

美浜原子力発電所（）

図8-＊ 各サイトにおける津波対策施設の視察状況

(3) 油脂漏出・火災

油脂が流れ出すと、その拡散範囲を推定することは難しい。また、拡散した後に火災に至る確率を求めることも難しい。しかし、一旦火災を発生させると、被害は激甚化する。このため、油脂の保管についても、場所やその区画の水密化などの対策を施していることの現地確認が有効である。

(4) 人員・車両の移動障害事象

事故事象から過酷事故へ進展を防止するためには、電源や冷却システムにおける代替システムへの切り替えが円滑に行われる必要がある。これらの切り替えは、電気操作で可能にできているが、人員を派遣せざるを得ない場合もある。また、前述の油脂漏出や浮遊物対処など、現場に人員や車両、場合によっては重機を派遣すること、それも迅速に派遣することが事象の遷移防止に有効である場合がある。このため、人員・車両の移動経路の確保、特に代替経路の確保などの手立てをしておくことが重要である。