

日本原子力学会標準

原子力発電所に対する津波を起因とした 確率論的リスク評価に関する実施基準：201*

201*年*月

一般社団法人 日本原子力学会

入 参 保 租 民

まえがき

原子力発電所の津波を起因とした確率論的リスク評価実施基準：201*（仮称）は、日本原子力学会が標準委員会・リスク専門部会の下に津波 PRA 分科会を設けて検討し、リスク専門部会、標準委員会での審議を経て策定・発行したものです。原子力発電所の出力運転状態における津波を起因として発生する事故に関する確率論的リスク評価（津波 PRA）の有すべき要件及びそれを満たす具体的方法を、PRA 実施の手順を踏まえて実施基準として規定したものです。

標準を策定することを使命とする標準委員会、原子力事故に伴うリスク評価の実施基準策定を使命とするリスク専門部会にとって、2011 年 3 月 11 日は銘記すべき日となりました。同日 14 時 46 分に東北地方太平洋沖地震が発生しました。およそ 40 分後から津波が相次いで来襲し、福島第一原子力発電所では全交流電源喪失と最終ヒートシンクの喪失が発生する事態になりました。その後、交流電源が復旧することなく炉心損傷、燃料溶融、放射性物質の放出に至りました。さらに、この事故の対処に大きな影響を及ぼしたのは、原子炉建屋の水素爆発でした。原子炉のみでなく、原子炉建屋内の燃料プールも冷却が十分にできない事態に陥りました。

日本原子力学会標準委員会ならびにリスク専門部会では、このような深刻な事故を踏まえ、津波 PRA 分科会を設置して津波 PRA 実施基準を作成する声明を発表しました。標準委員会ならびにリスク専門部会の、津波リスクを評価することが喫緊の課題であるとの判断を示すものです。日本の原子力施設では外的事象、特に地震とそれに随伴する事象のリスクが支配的であること、それに起因する包括的なリスク評価を求めるべきであることを改めて認識するところです。

これらの議論を受けて、日本原子力学会では、津波単独の影響に対応するリスク評価実施基準として“AESJ-SC-RK004:2011 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2011”を策定しました。また、標準発行後の最新の研究知見の集約として“AESJ-SC-TR006：2012 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準の評価適用事例集：2012”を発行しています。

原子力発電所の PRA は、確率論を用いて原子力発電所のリスクを総合的かつ定量的に評価する手法で、事故の発端となる事象の特性に応じて、発電所の内部で起きる機器故障及び人的過誤など内的事象に起因する PRA と、地震又は火災などの外的事象に起因する PRA に大別されます。炉心又は燃料が損傷に至る事象に着目して、事故シナリオ及び損傷後の事象進展を同定し、その発生頻度及び影響を分析することによって、安全設計・運転管理・安全規制などの広い分野における意思決定プロセスを支援する効果的な手段と認識されています。

我が国は世界でも有数の地震国であることから、地震に関する研究が早期から精力的に行われてきました。関連して、津波の発生及び被害に関しても研究成果が積み重ねられて

きました。原子力発電所の地震 PRA においては、地震に関する研究成果及び耐震技術開発の実態を踏まえて、研究機関及び産業界において評価手法の整備検討が進められ、日本原子力学会では、地震重畳を対象としたリスク評価手法に拡張すべく段階的に検討を進めてきており、地震 PRA 標準につき、他の外部事象との重畳を考慮した”AESJ-SC-P006:2015 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015”として改定を行いました。津波 PRA 標準については、地震 PRA 標準の改定内容と整合性を取るとともに、地震と津波の重畳に加え他の要因によって発生する津波に対応する標準としました。

ここに述べた状況を踏まえ、津波 PRA を実施する場合の考え方、満足すべき要件及び具体的な方法について調査検討を行い、関連する分野の専門家の意見を踏まえ、津波 PRA の実施基準を規定することにしたものです。

FOREWORD

A standard for Procedure of Tsunami Probabilistic Risk Assessment (PRA) for nuclear power plants 201* has been established and issued by the Atomic Energy Society of Japan (AESJ) through the discussion at the Tsunami PRA Subcommittee under the Risk Technical Committee of the Standards Committee. The standard defines the procedure which specifies the requirement and the concrete method of the PRA regarding incidents resulting from tsunamis as the initiating events at nuclear power plants during power operation.

The mission of the Standards Committee (SC) and the Risk Technical Committee (RTC) is the establishment and publication of criteria/guidelines with regard to probabilistic assessment of the risk caused by incidents. In this respect, March 11 of 2011 is the day that should be engraved in the heart of the committee members. The 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku occurred at 14:46:18 Japan Standard Time on March 11. Approximately in 40 minutes, the first tsunami struck the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (NPS). Consecutively, other tsunamis rushed one after another, which resulted in the station black out and loss of ultimate heat sink in the units 1-4 of the Fukushima Dai-ichi NPS. Without recovery of the AC power, the reactor cores were seriously damaged and the nuclear fuel melted which lead to the radioactive material release to environment. To make the matter worse, the hydrogen detonation in the reactor building took place which provoked the continuous loss of cooling capability and controllability in the reactor core as well as the spent fuel pool.

The SC and the RTC of the AESJ has announced the press release in light of the serious accident to establish the Tsunami PRA Subcommittee and to develop a standard for Tsunami PRA procedures. It indicates the understanding of the SC and the RTC that the tsunami risk should be emphasized and developed with the highest priority. Japanese nuclear facilities are subject to the external hazard risk such as an earthquake and associated incidents with the earthquake. It is noticed that a comprehensive risk assessment related to both the internal and external events should be required.

In response to these discussions, the AESJ formulated "AESJ-SC-RK004: Implementation Standard Concerning the Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants: 2011" as a risk evaluation implementation standard corresponding to the impact of only the tsunami. In addition, "AESJ-SC-TR006: Case Studies of Implementation Standard Concerning the Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants: 2012" is issued as the aggregate of the latest research findings after the standard issuance.

The PRA for nuclear power plants evaluates the safety of a nuclear power plant in a comprehensive and quantitative manner using the probabilistic methodology. As mentioned above, the PRA for nuclear power plants can be roughly classified into two groups according to the characteristics of the initiating events; one for internal events, which result from equipment failure occurring inside of the power generation system and human errors and the other for external events, which result from earthquakes and fires, etc. The PRA focuses on the events which lead to core damage or large amount of fuel failure, identifies the accident scenarios which result in failure and development of events following the failure, and estimates frequencies of each event and its effect. The PRA methodology has been recognized as the effective mean which can support the decision making process in the fields of safety design, operation management and safety regulations.

As Japan is one of the countries with frequent earthquakes, a great deal of efforts has been made in the field of seismic research since the early stage. By association, researches on the tsunami generation, propagation and induced damage have been published. The accumulation of seismic research results has been incorporated in the seismic design of nuclear power plants and analytical methods have been improved accordingly, AESJ has been studying step by step to expand it to the risk assessment method for other hazards overlapping with the seismic, and AESJ revised seismic PRA standard "AESJ-SC-P006:2015 A standard for Procedure of Seismic Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants 2015". This tsunami PRA standard is consistent with the revised contents of the new seismic PRA standard, and it has also covered corresponding to tsunamis caused by factors other than earthquake.

Accordingly, we hereby institute a standard to specify the standardized procedure for tsunami PRA considering the results of investigation into the concept, the requirements which should have and the concrete methods regarding tsunami PRA referring the opinions of experts in the associated fields.

制定：201X年X月X日

この標準についての意見又は質問は、一般社団法人 日本原子力学会事務局標準委員会担当
(〒105-0004 東京都港区新橋2-3-7 TEL 03-3508-1263) にご連絡ください。

免責条項

この標準は、審議の公正、中立、透明性を確保することを基本方針とした標準委員会規約に従って、所属業種のバランスに配慮して選出された委員で構成された委員会にて、専門知識及び関心を有する人々が参加できるように配慮しながら審議され、さらにその草案に対して産業界、学界、規制当局を含め広く社会から意見を求める公衆審査の手続きを経て制定されました。

一般社団法人 日本原子力学会は、この標準に関する説明責任を有しますが、この標準に基づく設備の建設、維持、廃止などの活動に起因する損害に対しては責任を有しません。また、この標準に関連して主張される特許権及び著作権の有効性を判断する責任もそれらの利用によって生じた特許権及び著作権の侵害に係る損害賠償請求に応ずる責任もありません。そうした責任はすべてこの標準の利用者にあります。

なお、この標準の審議に規制当局、産業界の委員が参加していますが、このことはこの標準が規制当局及び産業界によって承認されたことを意味するものではありません。

Disclaimer

This standard was developed and approved by the Standards Committee of AESJ in accordance with the Standards Committee Rules, which assure fairness, impartiality and transparency in the process of deliberating on a standard. The Committee was composed of individuals who were competent or interested in the subject and elected, keeping the balance of organizations they belong as specified in the Rules, although any interested person was provided the opportunity to participate in the deliberation. Furthermore, the standard proposed by the Committee was made available for public review and comment, providing an opportunity for additional input from industry, academia, regulatory agencies and the public-at-large.

AESJ accepts responsibility for interpreting this standard but does not accept responsibility for detriment caused by any actions based on this standard during construction, operation or decommissioning of facilities. AESJ does not endorse or approve any item, construction, device or activity based on this standard. In addition,

AESJ does not take any position with respect to the validity of any patent right or copyright claimed in relation to any items mentioned in this document, nor assume any liability for the infringement of patent right or copyright resulting from the use of this standard. The risk of infringement of such rights is entirely the users' responsibility.

Participation by regulatory agency representative(s), and by industry-affiliated representative(s) or person(s), is not to be interpreted that government or industry has endorsed this standard.

著作権

文書による出版者の事前了解なしに、この標準のいかなる形の複写・転載も行つてはなりません。
この標準の著作権は、全て一般社団法人 日本原子力学会に帰属します。

Copyright

No part of this document may be reproduced in any form, without the prior written permission of the publisher.

Copyright © 2015 Atomic Energy Society of Japan All Right Reserved

一般社団法人 日本原子力学会における原子力標準の策定について

“原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準”は、1999年9月22日に設置された一般社団法人 日本原子力学会標準委員会（Standards Committee of AESJ）が、原子力施設の安全性と信頼性を確保してその技術水準の維持・向上を図る観点から、原子力施設の設計・建設・運転・廃止措置などの活動において実現すべき技術のあり方を、原子力技術の提供者、利用者、専門家の有する最新の知見を踏まえ、影響を受ける可能性のある関係者の意見をパブリックコメントをも通じて聴取するなど公平、公正、公開の原則を遵守しながら審議し、合意したところを文書化した原子力標準の一つです。

この委員会は、産業界と学界が共同して我が国の経済的、社会的環境、国民性、産業構造、技術の発達などを十分勘案し、市場における健全な製品を識別する基準を消費者に提供することを目指して、合意できるところを原子力標準として随時制定し、それを最新の知見を反映して改定していくことを使命にしています。これにより、消費者が当該技術についての最新の知見を迅速に利用することが可能になる一方、市場競争に参加している生産者は、当該技術が標準化されたことを前提として、比較優位性を生み出す技術領域の開発に努力を集中することが可能になります。

また、我が国においてはこれまで、国民の生活の質を確保し、経済社会の安定な発展を支えるため、国が規制行政活動の一部として所要の標準を国家標準として制定し、行政判断に使用してきましたが、技術革新のスピードが速く、新技術の利用範囲が連続的に拡大していく今日にあっては、技術の変化に合わせて国家標準を適正化していく作業が追いつかないため、国民が最新の技術知見の利益を享受するのに遅れを生じるおそれが指摘されていました。しかしながら、このような委員会の活動が活発になされ、そこで国民の合意を得て制定されたいわゆるコンセンサス標準を国が行政ニーズに応じて利用していくことになれば、小さい行政コストで新しい技術的知見を迅速に国民の利用に供する環境が整備されることになります。さらに、これを国際標準化していく努力を行うことも学会でこそ可能であり、これの実現は我が国の国際技術戦略上重要な貢献となるでしょう。

標準委員会は、専門家集団の果たすべきこのような役割と責任を意識しながら、ボランティア精神を基盤に、原子力施設において今後予想される上記のニーズに対応する標準策定活動を行うために、公平、公正、公開の原則に則って運営規約を定め、発電炉、原子燃料サイクル、研究炉の3分野で部会を設置して活動を行ってきましたが、この度専門部会組織を見直し、新たにリスク、システム安全、基盤・応用技術、原子燃料サイクルの4専門部会で活動の充実を図ることとしました。因みにこの標準は発電炉専門部会にて原案作成を開始し、その後リスク専門部会にて審議しました。この標準が上の趣旨を踏まえて各方面で活用されることを期待します。なお、この内容については原則として5年ごとに改定することとしておりますので、本委員会はこの標準の利用に際してのご質問や改定に向けてのご提案をいつでも歓迎します。

201*年*月

標準委員会
委員長 宮野 廣

リスク専門部会の活動について

リスク専門部会（以下、本専門部会）は、標準委員会の専門部会構成の見直しに伴い、リスク情報活用の為の考え方、各原子力施設における PRA（Probabilistic Risk Assessment）の手法及びそれから得られるリスク情報を各分野に於いて活用する為の具体的方法などに関連した標準の整備を行う専門部会として、2008 年 12 月以来、活動を行っています。

PRA は 1960 年代に米国において研究開発が進められ、1975 年の WASH-1400、さらに 1991 年の NUREG-1150 に至り、その後の PRA の礎が築かれました。PRA には、原子力施設からの定量的リスクに加え、リスクに寄与する要因やその寄与の程度などのリスク情報を把握できるという利点があり、このことを踏まえて、欧米では PRA から得られるリスク情報の活用が進んできています。我が国においても、安全評価としての利用を経て、リスク情報を規制や安全確保活動に活用する動きが活発化し、原子力安全委員会あるいは原子力安全・保安院から、安全規制の合理性・整合性・透明性を向上し、安全規制活動のための資源の適正配分を図るため、リスク情報を活用した安全規制を導入していく、との基本的考え方が示されています。原子力学会標準委員会は、これらに先駆け、2002 年に“原子力発電所の停止状態を対象とした確率論的安全評価手順”を制定していましたが、我が国におけるリスク情報活用が本格的な活用の段階に入ろうとしていることから、標準整備の一層の充実と促進を図ることとしました。

本専門部会としては、既に整備してきた標準について、PRA 技術の進歩に加え、活用事例の増加に伴う評価経験の蓄積などに基づき、より合理的で使いやすいものに見直し行くとともに、さらに新たな PRA 手法あるいは活用分野の拡大に備え、整備していく標準の範囲を拡張していくことが必要と考えています。また、リスク情報活用の活性化を促すことが延いては合理的効率的な標準策定につながると考え、傘下に戦略タスクを設け、リスク情報活用への関連する組織における取組みが円滑に進むように、標準策定の視点からの意見交換の場を提供し、そこから標準策定のロードマップ検討を経て、時宜を得て必要な標準を策定することとしています。

本専門部会は公開で行われていますので、事前に連絡頂ければ傍聴することができます。また審議過程は議事録として残し、ホームページにも掲載されますので、活動状況を確認いただくことも可能です。

標準は、新技術の開発状況や新たに得られた知見に基づいて適切に改定されていくことによって、その利用価値が維持できるものです。そのため、少なくとも年に一度は本専門部会で改定の必要性について検討を行い、原則として 5 年ごとに改定版を作成していくこととしてその原案を作成していきたいと考えています。

201*年*月

標準委員会
リスク専門部会
部会長 山口 彰

標準委員会，専門部会，分科会 委員名簿

標準委員会

(順不同，敬称略)
(2011 年 月 日現在)

委員長	宮野 廣	法政大学	委員	谷本 亮二	三菱マテリアル(株)
副委員長	有富 正憲	東京工業大学	委員	千種 直樹	関西電力(株)
副委員長	関村 直人	東京大学	委員	常松 睦生	原子燃料工業(株)
幹事	岡本 孝司	東京大学	委員	津山 雅樹	(社)日本電機工業会
幹事	山口 彰	大阪大学	委員	鶴来 俊弘	中部電力(株)
委員	青柳 春樹	日本原燃(株)	委員	中井 良大	(独)日本原子力研究開発機構
委員	井口 哲夫	名古屋大学	委員	西岡 周二	日本原子力保険プール
委員	伊藤 裕之	(社)日本原子力技術協会	委員	西脇 由弘	東京大学
委員	岩田 修一	東京大学	委員	林 大作	日揮(株)
委員	岡本 太志	富士電機システムズ(株)	委員	平野 雅司	(独)日本原子力研究開発機構
委員	小原 徹	東京工業大学	委員	古川 雄二	三菱重工業(株)
委員	加藤 正美	(独)原子力安全基盤機構	委員	牧 眞一郎	経済産業省
委員	喜多尾 憲助	ISO/TC85・IEC/TC45 国内委員会	委員	水繰 浩一	九州電力(株)
委員	三枝 利有	(財)電力中央研究所	委員	山下 和彦	東京電力(株)
委員	谷川 尚司	日立 GE ニュークリア ・エナジー (株)			

常時参加者

(発行時に改訂)

リスク専門部会

(順不同，敬称略)
(2011 年 月 日現在)

部会長	山口 彰	大阪大学	委員	野中 信之	(独)日本原子力研究開発機構
副部会長	山下 正弘	(独)原子力安全基盤機構	委員	橋本 和典	(株)東芝
幹事	成宮 祥介	関西電力(株)	委員	馬場 厚視	三菱原子燃料(株)
委員	岡本 孝司	東京大学	委員	日野 裕司	経済産業省
委員	梶本 光廣	(独)原子力安全基盤機構			原子力安全・保安院
委員	河合 勝則	三菱重工業(株)	委員	福山 智	日本原子力発電(株)
委員	喜多 利亘	(株)テプコシステムズ	委員	本間 俊充	(独)日本原子力研究開発機構
委員	北村 豊	(株)三菱総研	委員	松本 精二	日本エヌ・ユー・エス(株)
委員	桐本 順広	(財)電力中央研究所	委員	宮田 浩一	東京電力(株)
委員	倉本 孝弘	(株)原子力エンジニアリング	委員	村田 尚之	(社)日本原子力技術協会
委員	越塚 誠一	東京大学	委員	守屋 公三明	(株)日立GE・ニュークリア・
委員	佐々木 憲明	(独)原子力安全基盤機構			エネルギー
委員	関根 啓二	日本原燃(株)	委員	山本 章夫	名古屋大学
委員	高田 毅士	東京大学	委員	吉田 一雄	(独)日本原子力研究開発機構
委員	竹山 弘恭	中部電力(株)			

常時参加者

安田 宗浩 関西電力(株)

旧委員

小野 祐二 経済産業省 原子力安全・保安院
(発行時に改訂)

津波 PRA 分科会

(順不同，敬称略)
(2016 年 月 日現在)

主査	山口 彰	東京大学	委員	高田 毅士	東京大学
副主査	蛭沢 勝三	(財)電力中央研究所	委員	西野 裕之	(国研)日本原子力研究開発機構
幹事	桐本 順広	(財)電力中央研究所	委員	成宮 祥介	関西電力(株)
委員	秋山 伸一	伊藤忠テクノソリューションズ(株)	委員	平野 光将	(財)電力中央研究所
委員	阿部 博	(株)テプコシステムズ	委員	藤井 正彦	(株)東芝
委員	安中 正	東電設計株式会社	委員	松山 昌史	(財)電力中央研究所
委員	倉本 孝弘	(株)原子力エンジニアリング	委員	美原 義徳	鹿島建設(株)
委員	黒岩 克也	三菱重工業(株)	委員	三宅 基寛	(株)日立 GE ニュークリア・エナジー
委員	鈴木 義和	(社)日本原子力安全推進協会			
委員	関沢 和広	中部電力(株)			

旧委員

喜多 利亘	(株)テプコシステムズ
木下 智之	原子力規制庁(旧 原子力安全・保安院)
佐竹 健治	東京大学
杉野 英治	(独)原子力安全基盤機構
西尾 正英	(独)原子力安全基盤機構
藤本 春生	(独)原子力安全基盤機構

常時参加者

河井 忠比古	(社)日本原子力技術協会	嶋崎 昭夫	原子力規制庁
菅原 淳	関西電力(株)	杉野 英治	原子力規制庁
高橋 容之	鹿島建設(株)	竹内 雅憲	東京電力(株)
西尾 正英	原子力規制庁	根岸 孝行	原電情報システム(株)
橋本 和典	(社)原子力安全推進協会	林 建太郎	関西電力(株)
増谷 貴志	(株)テプコシステムズ	溝上 暢人	東京電力(株)
渡邊 真也	四国電力(株)		

(発行時にも改訂)

標準の利用に当たって

標準は対象とする技術，活動あるいは結果の仕様についての関係者のコンセンサスを規定しているものです。標準にはこうあるべきという義務的事項の他，こうあってもよいとして合意された非義務的な事項も含まれています。しかし，標準は，対象としている技術，活動あるいは結果の仕様について，規定している以外のものを排除するものではありません。

また，標準が規定のために引用している他規格・標準は，記載された年度版のものに限定されます。標準は全体として利用されることを前提に作成されており，公式な解釈は標準委員会が行ないます。標準委員会はそれ以外の解釈については責任を持ちません。標準を使用するにあたってはこれらのことを踏まえて下さい。

なお，標準委員会では，技術の進歩に対応するため，定期的に標準を見直しています。利用にあたっては，標準が最新版であることを確認して下さい。

目 次

1.	適用範囲	1
2.	引用規格	1
3.	用語及び定義, 略語	2
4.	津波 PRA の実施手順	4
4.1	津波 PRA の実施作業及び手順	4
4.2	レベル 2PRA との関係	4
4.3	津波 PRA の品質を確保するための方策	4
5.	プラント構成・特性及びサイト状況の調査	6
5.1	サイト・プラント情報の収集・分析	6
5.1.1	一般事項	6
5.1.2	津波ハザード評価関連情報の収集・分析	6
5.1.3	フラジリティ評価関連情報の収集・分析	7
5.1.4	事故シーケンス評価関連情報の収集・分析	8
5.2	サイト・プラントウォークダウンの実施	8
5.2.1	実施チームの編成	8
5.2.2	実施範囲の設定	8
5.2.3	対象とする SSCs の選定	9
5.2.4	サイト・プラントウォークダウンの実施における着眼点	9
6.	事故シナリオの同定	10
6.1	津波による事故シナリオの広範な分析・選定	10
6.2	自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定	11
6.2.1	地震による津波	11
6.2.2	その他の自然現象による津波	11
6.3	広範な事故シナリオのスクリーニング	11
6.4	事故シナリオの明確化	11
6.5	起因事象の分析	12
6.6	建屋・機器リストの作成	12
7.	津波ハザード評価	14
7.1	津波ハザード評価の流れ	14
7.2	津波ハザード評価における不確実さ要因の取り扱い	18
7.3	津波発生モデルの設定	19
7.3.1	実施手順	19
7.3.2	津波発生領域の設定	19
7.3.3	断層モデルの設定	20

7.3.4	マグニチュード範囲の設定	20
7.3.5	地震の発生確率（平均発生間隔とばらつき）の設定.....	20
7.3.6	連動に関するモデルの設定	20
7.3.7	津波発生モデルにおいてロジックツリーの分岐として考慮する 項目の設定	20
7.3.8	地震以外の要因の津波	21
7.4	津波発生・伝播数値モデルの設定	21
7.4.1	実施手順	21
7.4.2	海底地殻変動モデルの選択	21
7.4.3	津波発生・伝播の数値モデルの選択	21
7.4.4	津波発生・伝播数値モデルにおいてロジックツリーの分岐として 考慮する項目の設定	22
7.4.5	地震以外の要因の津波	23
7.5	ロジックツリーの分岐項目のスクリーニング	23
7.6	ロジックツリーの作成	23
7.6.1	実施手順	23
7.6.2	ロジックツリーで考慮すべき不確実さ要因の選定.....	23
7.6.3	ロジックツリー作成における技術的難易度及び専門家活用水準の設定.....	23
7.6.4	専門家活用水準ごとのロジックツリー作成.....	24
7.6.5	TI, TFI, 専門家の選定基準.....	26
7.7	津波ハザードの評価	27
7.7.1	津波発生モデルの設定	27
7.7.2	津波発生・伝播の数値モデルの設定及び数値計算.....	27
7.7.3	津波ハザード曲線の作成	28
7.7.4	フラクタイルハザード曲線の作成	28
7.7.5	地震動と津波の結合確率の評価	28
7.8	フラジリティ評価のための津波パラメータの算定.....	29
7.8.1	一般事項	29
7.8.2	津波パラメータの算定手順	31
7.8.3	算定手法の選択	31
8.	建屋・機器フラジリティ評価	32
8.1	建屋・機器フラジリティ評価の流れ	32
8.2	評価対象と損傷モードの設定	35
8.2.1	一般事項	35
8.2.2	評価対象物の選定	35
8.2.3	損傷モード及び部位の抽出	35

8.2.4	損傷評価の指標の選定	37
8.2.5	機器カテゴリの作成及びカテゴリごとの現実的耐力評価.....	38
8.2.6	不確かさ要因の分析	38
8.3	評価手法の選択	38
8.4	現実的耐力の評価	38
8.4.1	現実的耐力評価における一般事項	39
8.4.2	現実的耐力の評価方法	41
8.5	現実的応答の評価	42
8.5.1	現実的応答評価における一般事項	42
8.5.2	現実的応答の評価方法	42
8.6	フラジリティの評価	44
8.6.1	一般事項	44
8.6.2	損傷確率の評価	44
8.6.3	現実的耐力の評価	44
8.6.4	現実的応答の評価	44
8.6.5	フラジリティ曲線の算定	44
9.	事故シーケンス評価	49
9.1	事故シーケンス評価の流れ	49
9.2	起因事象の設定	51
9.2.1	津波によって誘発される起因事象の同定.....	51
9.2.2	起因事象をもたらす SSCs の設定.....	51
9.3	事故シーケンスのモデル化	51
9.3.1	一般事項	51
9.3.2	安全機能の設定	51
9.3.3	成功基準の設定	51
9.3.4	イベントツリーの作成	52
9.3.5	事故シーケンスのモデル化における留意事項.....	53
9.4	システムのモデル化	54
9.4.1	一般事項	54
9.4.2	モデル化の前提条件の設定	54
9.4.3	基事象のスクリーニング	55
9.4.4	フォールトツリーの頂上事象の設定	55
9.4.5	フォールトツリーの作成	55
9.5	事故シーケンスの定量化	57
9.5.1	炉心損傷頻度の算出	57
9.5.2	事故シーケンスの条件付発生確率の評価.....	58

9.5.3 重要度解析	59
9.5.4 感度解析	60
9.5.5 不確かさ解析	60
10. 文書化	61
10.1 一般事項	61
10.2 目的・範囲・結果及び手法などの文書化	61
10.3 規定への適合性の文書化	61
附属書 A(規定)事故シナリオの同定における実施手順	62
附属書 B(規定)津波の波力及び海底砂移動に対する現実的応答の評価方法	68
附属書 C(規定)事故シーケンスの定量化手法	71
附属書 D(参考)津波 PRA における専門家判断の活用に関する留意事項	72
附属書 E(参考)評価に必要な情報及び主な情報源	73
附属書 F(参考)地震単独 PRA, 津波単独 PRA を併用する場合の留意事項	75
附属書 G(参考)津波ハザード評価	77
附属書 H(参考)地震動と津波の結合確率評価方法	98
附属書 I(参考)ハザード再分解に基づくフラジリティ評価用津波群の設定方法	103
附属書 J(参考)評価対象物と配置状況の例	113
附属書 K(参考)津波による被害事例	115
附属書 L(参考)損傷モード及び部位の抽出例	117
附属書 M(参考)フラジリティ評価の一般的な不確かさ要因	121
附属書 N(参考)シビアアクシデント対策に基づく浸水対策の例	123
附属書 O(参考)フラジリティ評価の不確かさ解析手法の選定	125
附属書 P(参考)津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法	128
附属書 Q(参考)洗掘解析例	130
附属書 R(参考)建屋の浸水解析例	131
附属書 S(参考)屋外重要土木構造物の溢水・浸水解析例	132
附属書 T(参考)起因事象の設定に係わる留意事項	133
附属書 U(参考)津波に対する緩和策の時間余裕の設定例	135
附属書 V(参考)小イベントツリー法と大イベントツリー法	136
附属書 W(参考)損傷モードの検討時の作業フロー	137
附属書 X(参考)水密扉の状態によるモデル化の考え方の例	138
附属書 Y(参考)条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの 作成の例	140
附属書 Z(参考)代表的な重要度指標	142

附属書 AA(参考)事故シーケンス評価項目の例	143
附属書 AB(参考)文書化項目の例	147
附属書 AC(参考)参考文献	151

解説

1 制改定の趣旨及び主要な改訂点	解 1
2 適用範囲について	解 3
3 津波高さについて	解 4
4 複数基立地サイトにおけるリスク、及び複数サイトにおける リスクの取扱い	解 6
5 事故シナリオの同定における各種津波対策の取扱い	解 7
6 建屋・機器フラジリティ評価における今後の課題	解 8
7 複数の津波及び余震による影響の重ね合わせについての考え方	解 9

入
参
保
租
民

日本原子力学会標準

原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：201*

Implementation Standard Concerning the Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants : 201*

1. 適用範囲

この標準は、出力運転状態にある軽水型原子力発電所を対象とする確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment：PRA）のうち、地震によって発生する津波に起因して炉心損傷に至る事故シーケンスに着目し、それらの発生頻度を求めるレベル1PRAの有すべき要件及びそれを満たす具体的方法を、実施基準として規定する。この標準は、地震以外の要因による津波に起因するPRAにも適用できる。【解説2.1適用範囲とする津波について 参照】【解説2.2地震による影響の考慮について 参照】【解説2.3レベル1PRAのみを対象としたことについて 参照】

なお、本標準は、高速増殖炉に対しても適用可能である。その場合には、高速増殖炉に固有の安全設計上の特徴、建物・構築物、機器・配管系の配置などを十分に考慮しなければならない。【解説2.4高速増殖炉への適用 参照】

2. 引用規格

次に示す規格は、この標準に引用されることによって、この標準の規定の一部を構成する。引用規格とこの標準の規定に相違がある場合は、この標準の規定を優先する。これらの引用規格は、その最新版(追補を含む)を適用する。

AESJ-SC-RK003:2014 原子力発電所の確率論的リスク評価標準で共通に使用される用語の定義：2014

AESJ-SC-RK001:2010 原子力発電所の確率論的安全評価用のパラメータ推定に関する実施基準：2010

AESJ-SC-P006:2015 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015

AESJ-SC-P008:2013 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準(レベル 1PRA 編)：2013

AESJ-SC-RK006:2013 原子力発電所の確率論的リスク評価の品質確保に関する実施基準：2013

3. 用語及び定義, 略語

この実施基準で用いる主な用語の定義は, **2.引用規格**に示した規格によるほか, 次による。また, 略語の定義は, **2.引用規格**の **AESJ-SC-RK003:2014** に示した規格によるほか, **表 3.1** による。

3.1

痕跡高

遡上高と浸水高のどちらか。もしくは両方のこと。

3.2

コントロールポイント

津波ハザードの評価における津波ハザード曲線の津波高さを示すための定義点。

3.3

地震地体構造

地震規模, 震源深さ, 発震機構, 地震発生頻度に着目するとき, 地震の発生の仕方に共通の性質をもっているある広がりをもった一定の地域の地質構造。

3.4

浸水高

陸上において, 津波が這い上がる途中での水面高さ。もしくは建屋などの閉鎖空間に溢れた水の水面高さ。

3.5

浸水深

浸水高における, 固定面からの水面高さ。もしくは水の厚さ。

3.6

遡上高

陸上において, 津波が這い上がった地点の地盤高。

3.7

津波作用パラメータ

SSCs の各損傷モードに対応した構造的損傷, 機能的損傷又は累積的損傷の評価のための SSCs 評価地点における津波強さを表すパラメータであり, 津波遡上解析などから求められる。例えば, 津波作用パラメータとして, 津波による浸水高, 波力・浮力, 流速, 漂流物の衝撃荷重及び海底砂の移動量・範囲などが挙げられる。

3.8

津波水位

津波が発生しない場合の水面に対して, ある時刻における津波による水面変動量のこと。もしくは, 水面の時間変動のこと。

3.9

津波高さ

津波水位において，ある場所での最大水位上昇量及び最大水位低下量。“津波高”と表記することもある。

注記 【解説 3 津波高さについて 参照】

3.10

津波波源

津波を発生させる原因となる事象。地震津波においては，地震，断層モデル，もしくは地震時の海底地殻変動によって発生した海底面の沈降・隆起の分布形状を示す。

3.11

SSCs

構築物，系統及び機器（Structures, Systems and Components）のこと。本標準では，建物・構築物，機器・配管系を総称するものとして使用する。

4. 津波 PRA の実施手順

4.1 津波 PRA の実施作業及び手順

津波 PRA は、図 4-1 に示す評価手順に従い、プラント構成・特性及びサイト状況の調査、事故シナリオの同定、津波ハザード評価、建屋・機器フラジリティ評価及び事故シーケンス評価を実施する。

各箇条で求める調査・評価の結果のうちで、一連の作業の中で相互に調整し利用すべきものは、必要に応じてフィードバックを行う。

また、調査及び評価の内容及び結果については文書化を行う。

4.2 レベル 2PRA との関係

レベル1PRAに引き続いてレベル2PRAを実施する場合には、格納容器健全性又はソースターム評価に必要な建屋・機器フラジリティ評価結果を、レベル1PRAよりレベル2PRAに引き継ぐ。また、レベル1PRAの事故シーケンスの最終状態をレベル2PRAへのインターフェイスとなるプラント損傷状態ごとに分類し、それらの状態に応じて発生頻度を設定できるように、格納容器健全性又はソースターム評価結果に重要な影響を与える因子のモデル化を行う。

レベル1PRAに引き続きレベル2PRAを実施する場合のレベル2PRAへの入力項目を図4-1に示す。

4.3 津波 PRA の品質を確保するための方策

品質を確保するために実施する、品質保証活動、専門家判断の活用及びピアレビューについては、AESJ-SC-RK006:2013 による。【附属書 D（参考）津波 PRA における専門家判断の活用に関する留意事項 参照】

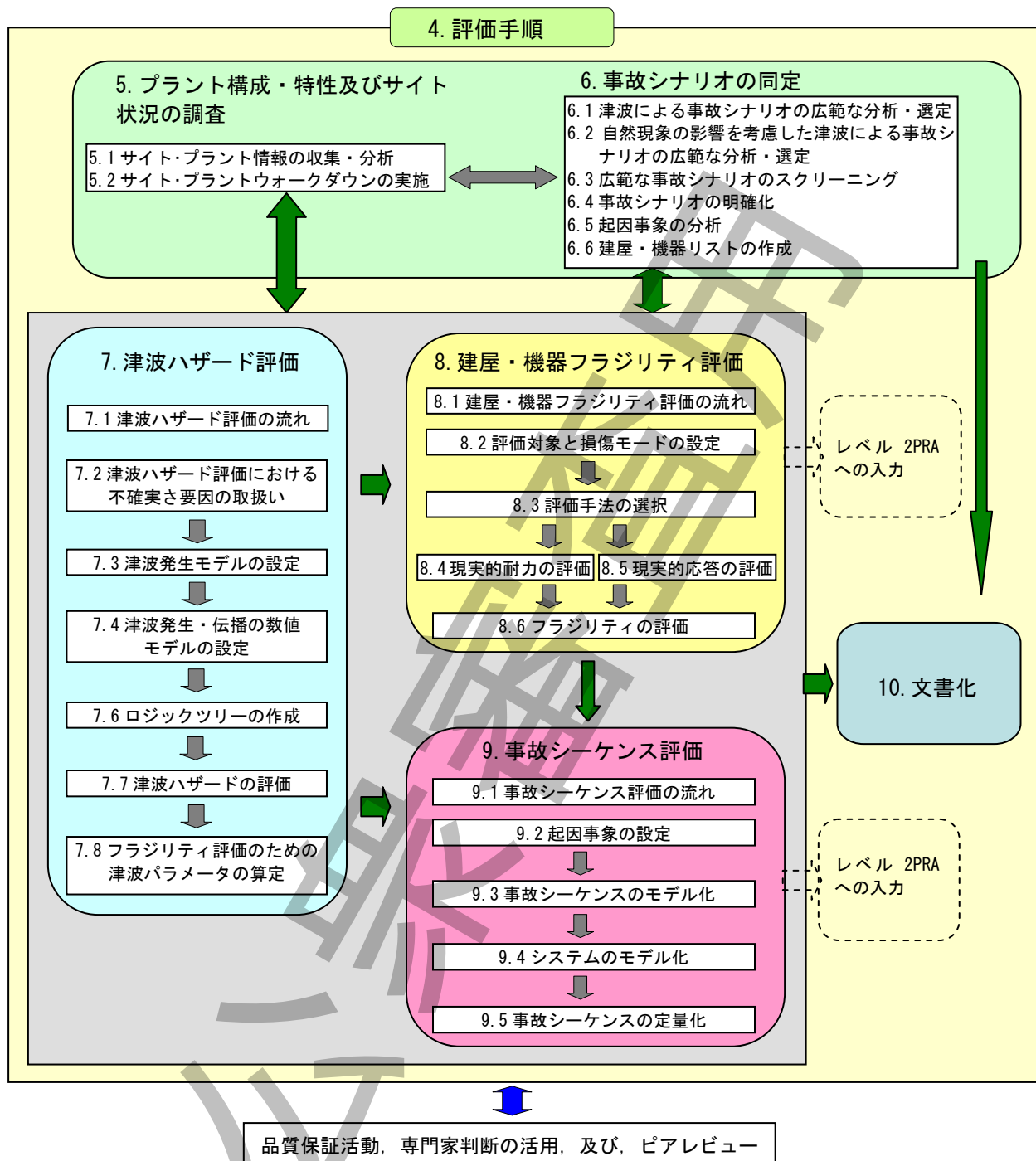


図 4-1 津波 PRA の流れ

5. プラント構成・特性及びサイト状況の調査

5.1 サイト・プラント情報の収集・分析

5.1.1 一般事項

津波 PRA を実施するにあたり必要となる表 5.1 に示すようなサイトの最新の状況, 設計, 運転管理などプラント及びサイト関連の固有の情報を幅広く収集する。また, 同一サイト内の電源融通などの複数のプラントで共用, 融通する設備に関する情報も収集する。【附属書 E (参考) 評価に必要な情報及び主な情報源 参照】

それらに加え, 既存の津波 PRA に関する情報, 国内外の津波災害事例, 関連する文献などの情報も収集する。ただし, プラント固有でない情報を評価に用いる場合には, 当該プラントとの類似点及び相違点を分析し, それらの PRA から得られる情報が当該プラントに適用できることを説明する。

地震による影響を考慮する際には, AESJ-SC-P006:2015 箇条 5.2 に準じて, 情報を収集する。

収集した情報に不足が認められる場合には, 必要に応じて追加の調査などを実施する。

表 5.1 津波 PRA の評価に必要な情報

PRA の評価作業		必要な情報
1	プラントの設計・運転の把握	PRA 実施にあたり必要とされる設計, 運転管理に関する情報 ・基本仕様 ・系統設備の構成特性 ・設備設計上の特徴 ・プラントの配置上の特徴
2	津波ハザード評価	・対象サイトに影響を与え得る津波を発生させる波源の様式に関する情報
3	建屋・機器 fragility 評価	プラント固有の建屋・機器の耐力評価ならびに応答評価に関連する情報
4	事故シーケンス評価	・津波時に想定されるプラント状態
	a) 事故シナリオの分析と起因事象の分類	
	b) 事故シーケンスの分析 ・成功基準の設定 ・イベントツリーの作成	・安全系などのシステム使用条件 ・システムの現実的な性能 ・運転員による緩和操作
	c) システムのモデル化	・対象プラントに則した機器故障モード, 運転形態
	d) 事故シーケンスの定量化	・評価結果の妥当性を確認する際に参考となる情報

5.1.2 津波ハザード評価関連情報の収集・分析

a) 津波ハザード評価関連情報の収集

1) 広範な津波ハザード評価関連情報を対象として, 対象サイトに影響を与え得る津波を発生させる波源の様式(活断層データ, 過去の地震データ, 及び地震以外の波源のデータなど)に関する情報を収集する。津波のモデル化では, 専門家の意見の相違をロジックツリ

ーとして表すために、異なる見解を持つ複数の専門家から情報を収集する。

津波ハザード評価に非常に大きな影響を及ぼす可能性のある最新知見などが公開された場合には、各種調査を実施し最新情報を入手する。

2) 地震による影響を考慮する際には、**5.1.2a)1)**で収集した情報に加えて、**AESJ-SC-P006:2015** 箇条 5.2 に準じて、地震ハザード評価関連情報も収集する。

b) 津波ハザード評価関連情報の分析

6.事故シナリオの同定及び 7.津波ハザード評価を行う上で、**5.1.2a)津波ハザード評価関連情報の収集**で収集した情報が必要十分であるかについて分析する。

5.1.3 フラジリティ評価関連情報の収集・分析

a) フラジリティ評価関連情報の収集

1) プラント固有の SSCs の津波に対する現実的耐力及び現実的応答評価に関連する情報を収集する。特に、サイトの状況、建屋開口部（扉、機器搬入口など）の位置・高さ・大きさ、建屋貫通部の状態、区画の壁・堰の状況、溢水時の機器の没水・被水の状況などを把握する。既往の津波関連試験結果、津波災害事例がある場合には、それらに関する情報を収集する。

2) 地震による影響を考慮する際には、**5.1.3a)1)**で収集した情報に加えて、**AESJ-SC-P006:2015** 箇条 5.2 に準じて、プラント固有の SSCs 及び地盤の地震に対する現実的耐力及び現実的応答評価に関連する情報も収集する。

b) フラジリティ評価関連情報の分析

6.事故シナリオの同定及び 8.建屋・機器フラジリティ評価を行う上で、上記 **5.1.3a) フラジリティ評価関連情報の収集**で収集した情報が必要十分であるかについて分析する。

1) 現実的耐力評価に係る情報の分析

5.1.3a) フラジリティ評価関連情報の収集で収集した情報を対象として、評価対象とする SSCs の津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による、損傷モードに対応した現実的耐力評価に係る項目（対象物の設置高さ、防水対策の有無、材料強度及び関連する既往の試験結果及び評価方法など）について、対象プラント固有の情報に着目して分析する。特に、現実的耐力評価における不確実さ要因の分析については、材料強度のばらつき、既往の試験結果の統計的不足及び評価方法の適用範囲などを分析する。

2) 現実的応答評価に係る情報の分析

5.1.3a) フラジリティ評価関連情報の収集で収集した情報を対象として、評価対象とする SSCs の津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による損傷モード・損傷部位に対応した現実的応答評価に係る項目（海底及び陸上地形データ、屋内浸水経路、材料物性、漂流物諸元及び関連する既往の試験結果及び評価方法など）について、プラント固有の情報に着目して分析する。また、現実的応答評価に係わる不確実さ要因(地形データの空間変動、材料物性のばらつき、漂流物の出現頻度、既往の試験結果

の統計的不足及び評価方法の適用範囲など)を分析する。

5.1.4 事故シーケンス評価関連情報の収集・分析

a) 事故シーケンス評価関連情報の収集

1) 事故シーケンス評価関連情報の収集は、原子炉設置許可申請書、配管計装線図、電気系統図、プラント機器配置図、保安規定、運転手順書などプラントの設計及び運転管理に関する情報を対象とする。また、内的事象 PRA 情報及びそれに関する報告書、既往の津波 PRA 報告書などから、対象プラントへの適用情報として収集し、評価上の留意点として整理する。

2) 地震による影響を考慮する際には、5.1.4a)1) で収集した情報に加えて、AESJ-SC-P006:2015 箇条 5.2 に準じて、既往の地震 PRA 報告書などからも、対象プラントへ適用するために関連情報を収集する。

b) 事故シーケンス評価関連情報の分析

6.事故シナリオの同定及び 9.事故シーケンス評価を行う上で、5.1.4a) 事故シーケンス評価関連情報の収集で収集した情報が必要十分であるかについて分析する。

5.2 サイト・プラントウォークダウンの実施

5.2.1 実施チームの編成

品質確保の観点から、専門的知識及び技術を有する複数の専門家からなるチームを編成する。チーム構成員に求められる能力、経験を次に示す。ただし、一人が次の要件全てを満足する必要はない。

- ・ 対象プラントのシステム、安全設計、耐震設計、耐津波設計、運転操作、機器設計、配置設計に関する専門的な知識、技術及び経験。特に事故時のシステム挙動あるいは対応操作などに関するものを含む
- ・ 地震動下での設備の挙動と損傷部位・損傷モードとに係わる振動試験及び震害調査に関する専門的な知識、技術及び経験
- ・ 津波の挙動と津波災害調査とに関する専門的な知識、技術及び経験
- ・ 地震 PRA 及び津波 PRA における地震ハザード評価、津波ハザード評価、脆弱性評価 (SSCs, 地盤)、並びに事故シーケンス評価、に関する専門的知識、技術及び経験

5.2.2 実施範囲の設定

次の事項に留意して、実施範囲を設定する。

- ・ 5.1 サイト・プラント情報の収集・分析で収集した対象プラント固有情報（地震・津波ハザード、地震動・波力に対する建屋・機器の耐力及びプラントシステムの配置など）では十分ではないと判断した SSCs を実施範囲に含める。特に、屋外に設置されているエレベーションの低い SSCs について実施範囲に含める。その際、津波災害事例などを参照する。

注記 エレベーションとは、ある基準面からの高さのこと。例えば、標高。

- ・ 既往地震または津波 PRA 結果などから、評価上機能を期待しない設備は、ウォークダ

ウンの対象から除外してもよい。

5.2.3 対象とする SSCs の選定

5.2.2 実施範囲の設定に従いリストを作成する。リストには、機器名称・番号、設置位置・高さなどに関するデータも集約する。

5.2.4 サイト・プラントウォークダウンの実施における着眼点

次の着眼点を持って、サイト・プラントウォークダウンを行う。a), b), f)に示した地震影響に関する着眼点の具体的な視点については、AESJ-SC-P006:2015 箇条 5.3 を参照する。なお、地震による影響を考慮する必要がない場合には、c)から f)に示す着眼点をもって実施すればよい。

a) 耐震安全性の確認

設計図書から十分に得られない情報について確認する。対象設備の基礎部分を中心に確認することとし、特に、構築物についてはその周辺環境も含め、潜在的に構築物の耐力を大きく低減させるような問題点の有無を確認する。津波の影響を受ける SSCs についても対象に含める。また、次の項目のように、対象とする SSCs にアクセスすることが困難な場合には、写真などの情報による確認で代替してもよい。

- ・高線量エリア、汚染の程度が著しいエリアにある SSCs
- ・確認する場合に通電部位へ接触するおそれがある SSCs
- ・高所や狭隘部にある SSCs

b) 地震による設備間の相互干渉と二次的影響の確認

地震動による機器の相互干渉、系統間の相互干渉、系統間の従属性などプラント固有の特徴を確認するとともに、大地震時の対象設備などの変形、離脱、移動などに起因して生じる干渉及び衝突、並びに地盤変形によるアクセス性への影響などの二次的影響を中心に確認する。

c) 津波影響の確認

建屋の開口部の高さ・大きさ、対象設備の高さなどを中心に確認することとし、特に、屋外の SSCs については、確認の着眼点として、その周辺環境も含め、潜在的に波力に対する耐力を大きく低減させるような問題点の有無を確認する。a)と同様に、写真などの情報による確認で代替してもよい。

d) 間接的な被害の可能性の確認

津波の波力による建屋外部にある設備の離脱、移動などに起因して生じる干渉及び衝突などの間接的な被害の可能性を確認する。

e) 建屋の区画の確認

設計図書に示される建屋内の区画が適切に分離されているか否かを、特に、建屋などへ流入した水の伝播経路に着眼して確認する。特に複数区画へ伝播し同時に没水・被水する可能性などを中心に確認する。

f) 地震・津波後のアクセス可能性の確認

地震・津波の被害状況に応じて、次に示すような対象設備への操作又は作業が可能かどうかなどのアクセスの可能性を確認する。

- ・ 起動・停止を設備の近傍で行うような設計，又は行うことのできる設計となっている設備
- ・ 地震または津波による一時的な機能喪失に対して，隔離操作，予備品の使用又は応急的な修繕措置によって機能の回復が期待できる設備

6. 事故シナリオの同定

6.1 津波による事故シナリオの広範な分析・選定

津波による事故シナリオを見落としなく抽出・選定する。事故シナリオの選定にあたっては，津波起因の直接的な被災による事故シナリオだけでなく，間接的な被災による事故シナリオについても考慮する。【附属書 A.1（規定）津波による事故シナリオの広範な分析・選定 参照】

直接的な被災による事故シナリオとしては，表 6.1-1 に示す津波による次の影響を考慮する。河川，陸域を遡上する可能性も考慮する。サイト・プラント情報，最新の知見などから，その他の影響が考えられる場合には，合わせて抽出・選定する。

表 6.1-1 直接的な被災による事故シナリオとして考慮すべき影響

津波の影響	SSCs への影響
浸水による設備の没水，被水	設備の動的機能喪失，電気設備の発電/送電機能喪失
津波波力，流体力，浮力	SSCs の構造的損傷
海底砂移動	海水取水設備の機能喪失
引き波による水位低下	海水取水設備の機能喪失

間接的な被災による事故シナリオとしては，津波によって発電所内の施設から流出した漂流物，あるいは発電所周辺の漁港又は貯木場などから流出した漁船又は木材などの漂流物が発電所施設に衝突する場合などを，サイト条件に応じて考慮する。

また，津波後の運転員による操作において，津波による高ストレスを受けた条件下で引き起こされる操作失敗，又は作業環境に係る設備の支障，アクセス性の劣化などに伴う運転員の回復操作の遅延によって，炉心損傷に間接的に繋がる可能性のあるような事故シナリオを分析・選定する。遡上時の土砂移動は，このような間接的な被災の要因の一つとして考慮する。

サイトに複数のプラントを設置している場合には，プラント間で共有する設備が損傷するなど，従属的な影響を及ぼす事故シナリオの可能性も考慮する。【附属書 A.2（規定）複数基立地サイトにおいて留意する事故シナリオ 参照】【解説 4 複数基立地サイトにお

けるリスク、及び複数サイトにおけるリスクの取扱い 参照】

評価の目的に応じて、上記主要因による事故シナリオを対象として分析・選定する。レベル 1PRA に引き続いてレベル 2PRA を実施する場合には、AESJ-P008:2013 に準じて、レベル 2PRA へのインターフェイスのため、格納容器健全性もしくはソースタームへの津波による影響を適切に考慮する。

6.2 自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定**6.2.1 地震による津波**

6.1 津波による事故シナリオの広範な分析・選定及び AESJ-P006:2015 箇条 5.4.1 への対応結果に基づき、地震の影響を考慮した津波による事故シナリオを分析、選定する。【**附属書 A.3（規定）地震の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定 参照**】

レベル 1PRA に引き続いてレベル 2PRA を実施する場合には、AESJ-P006:2015 に準じて、地震に起因して格納容器機能が喪失する事故シナリオを含め、地震の影響を考慮した津波による格納容器健全性もしくはソースタームへの影響についても考慮する。

6.2.2 その他の自然現象による津波

陸上の山体崩壊物（斜面崩壊含む）の海中突入、海底地すべり、火山現象（山体崩壊またはカルデラ陥没）など、その他の自然現象に起因して発生する津波について評価する場合には、当該の自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオを分析、選定する。

6.3 広範な事故シナリオのスクリーニング

6.1 津波による事故シナリオの広範な分析・選定及び **6.2 自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定**で選定した事故シナリオのスクリーニングを行う。スクリーニングで除外されない事故シナリオが **9.事故シーケンス評価**における有用情報となる。

炉心損傷に至るまでの事象進展が不明確、あるいは評価技術が十分でないと判断される事故シナリオについては、定性的なスクリーニングに比重をおいて判断せざるを得ないことに留意する。

スクリーニングで除外されない事故シナリオを、**9.事故シーケンス評価**の対象とするか、又は、留意事項として報告書に記載するなど、評価技術の成熟度を考慮した取扱いとする。

【**附属書 A.4（規定）広範な事故シナリオのスクリーニング 参照**】

6.4 事故シナリオの明確化

自然現象の影響を考慮した津波が起こす原因によって炉心損傷に至る事故シナリオを同定するとともに、内的事象 PRA で考慮している事故シナリオとの関係を整理し、津波 PRA で対象とする事故シナリオの見落とし、内的事象 PRA との重複がないようにする。

AESJ-P006:2015 に基づく地震単独の PRA を別途実施している場合には、評価結果の一部が重複する可能性に留意する。また、自然現象の影響を考慮しない津波単独の PRA を合わせて利用する場合にも、同様に評価結果の一部が重複する可能性に留意する。【**附属書 F**

【参考】地震単独 PRA，津波単独 PRA を併用する場合の留意事項 参照】

自然現象の影響を考慮した津波による安全機能への重大で広範な影響を及ぼす機器などの機能喪失を明確化する。安全機能への重大で広範な影響を及ぼす機器などの損傷として、計装・制御系，非常用電源系，原子炉補機冷却水系，海水系の機能喪失などを考慮する。

これらの機能喪失は、炉心損傷事故の起因となると同時に、緩和設備の広範な喪失に繋がるため、炉心損傷に至る可能性がある。これらの損傷は、起因事象としてモデル化するか、又は緩和設備としてモデル化する。どちらの場合でも、起因事象と緩和設備、及び緩和設備間の従属性を適切に考慮する。

津波の影響を考慮したシビアアクシデント評価、及び津波に有効なアクシデントマネジメント策などが適切に取り扱えるよう留意する。【解説 5 事故シナリオの同定における各種津波対策の取扱い 参照】

6.5 起因事象の分析

明確化した事故シナリオを対象に、自然現象の影響を考慮した津波を起因として炉心損傷に至る起因事象を分析する。

起因事象の分析では、津波による事故シナリオの特性を考慮して、起因事象を分類するとともに、起因事象に係る SSCs 及び緩和設備を分析する。【附属書 A.5（規定）起因事象の分析 参照】

6.6 建屋・機器リストの作成

6.4 事故シナリオの明確化と 6.5 起因事象の分析に基づき、**9.事故シーケンス評価**に必要な建屋・機器リストを作成する。このリストは、**図 6.6-1** に示す津波 PRA の一連の作業の中で調整・利用される。建屋・機器リストの作成に関連する作業項目には、**5.プラント構成・特性及びサイト状況の調査**、**6.事故シナリオの同定**、**8.建屋・機器フラジリティ評価**、**9.事故シーケンス評価**がある。

事故シナリオの同定では、広範な事故シナリオの分析・設定を行なうと共に、事故シナリオのスクリーニングを行い、スクリーニングで残った事故シナリオを対象として、事故シナリオの明確化と起因事象の分析を行う。この分析結果に基づき、津波 PRA で対象とする建屋・機器リストを作成する。

一方、建屋・機器フラジリティ評価では、評価対象の設定における機器・配管系のカテゴリ化、又は、損傷確率が十分に小さい、あるいは他施設の評価に集約できる、などの分析に基づくスクリーニングを行い、これらの情報をフラジリティ評価の対象として過不足がないように上記建屋・機器リストの調整に反映する。調整した建屋・機器リストは、フラジリティ評価対象のリストとして利用する。

事故シーケンス評価では、まず、起因事象を設定し、これらの起因事象に基づき、事故シーケンスのモデル化に必要なイベントツリーを作成する。次いで、イベントツリー内のシステムのモデル化に必要なフォールトツリーを作成する。作成に当たっては、フォールトツリーの作成範囲、及びフォールトツリーで考慮すべき SSCs などを選定する。選定し

トとして利用する。【附属書 A.6（規定）建屋・機器リストの作成 参照】

べきものであることに留意し、必要に応じてフィードバックを行う。

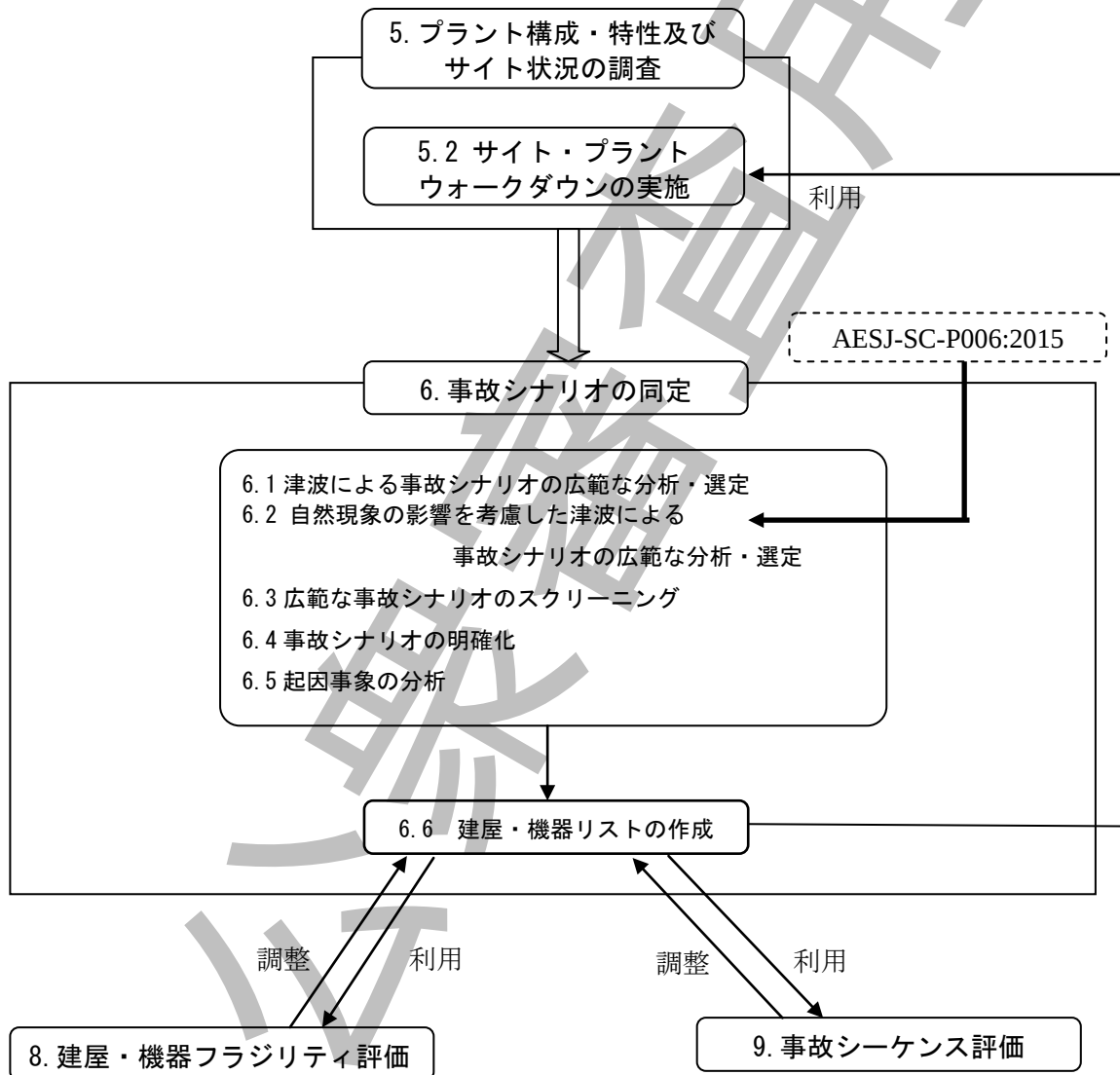


図 6.6-1 建屋・機器リストの調整・利用の流れ

7. 津波ハザード評価

7.1 津波ハザード評価の流れ

評価対象サイト周辺における活断層データ及び過去の地震データなどに基づき、津波発生モデル及び津波発生・伝播の数値モデルの不確実さを考慮して津波高さなどの津波ハザードを評価する。また、津波の発生要因(波源)として、地震以外の要因(陸上の山体崩壊物(斜面崩壊含む)の海中突入、海底地すべり、火山現象(山体崩壊またはカルデラ陥没))を必要に応じて考慮する。さらに、地震及びこれらの要因による津波の組合せについて、必要に応じて選定する。津波ハザード評価は、次の手順に従って実施する。(図 7.1-1 参照)

a) 津波ハザード評価における不確実さ要因の取扱い

5.1.2 津波ハザード評価関連情報の収集・分析で収集・分析した津波ハザード評価関連情報に基づき、津波ハザード評価における対象サイト周辺の津波による水位・浸水及び関連した現象の取扱い方を決定する。また、津波ハザード評価における不確実さ要因を偶然的要因と認識論的要因に大別し、それぞれの内容を示す。

b) 津波発生モデルの設定

対象サイト周辺の津波発生モデルの検討を行う。5.1.2 津波ハザード評価関連情報の収集・分析で収集した情報を基に、地震発生様式に応じて分類された各津波発生領域における、各地震のマグニチュード範囲、発生確率、運動、さらに断層モデルを設定する。さらに、対象サイトに到達する津波を発生させる可能性のある遠方の地域についても津波発生モデルの検討を行い、必要に応じて津波発生モデルを設定する。【7.3.2 津波発生領域の設定 参照】

地震以外の要因について、その規模と運動メカニズムを必要に応じて設定する。また、異なる要因による津波の組み合わせについて、必要に応じて設定する。

津波発生モデルにおける偶然的な不確実さは、特定規模の地震により引き起こされる津波高さの確率分布として表現する。一方、マグニチュード範囲などの認識論的な不確実さ要因をロジックツリーの分岐として選定する。

c) 津波発生・伝播の数値モデルの設定

津波発生領域の断層特性及び津波伝播特性を考慮して、特定位置で特定規模の地震が発生した場合に評価対象サイトで生じる津波高さの確率分布を評価するための数値モデルを設定する。数値モデルは海底地殻変動モデルと津波海域伝播モデルから構成され、前者の発生モデルでは、ある断層モデルにおける海底地殻変動を算出する。伝播モデルでは、それを入力条件として海域の津波挙動が再現され、評価対象サイトの津波高さを得ることができる。地震以外の要因による津波については、海底地殻変動モデルの代わりに、その要因に応じた津波発生・伝播の数値モデルを設定する。

津波発生・伝播の数値モデルにおける偶然的な不確実さは、特定規模の地震の津波高さの確率分布として表現する。一方、津波水位評価結果に関する誤差などに関する認識論的な不確実さ要因をロジックツリーの分岐として選定する。

d) ロジックツリーの分岐項目のスクリーニング

感度解析によって津波ハザードに及ぼす影響が小さいと判断される不確実さ要因については、その変動幅を削減する。

e) ロジックツリーの作成

7.1b) 津波発生モデルの設定及び 7.1c) 津波発生・伝播の数値モデルの設定において選定した認識論的不確実さ要因から、津波ハザード評価の不確実さに大きな影響を及ぼす要因を選定する。次いで、選定した要因を対象として、技術的な難易度を判断し、作業手順の異なる 3 段階の専門家活用水準のいずれかを設定する。それぞれの専門家活用水準における作成手順に従い、ロジックツリーを作成する。

f) コントロールポイントの設定

次の g) で評価される津波ハザード曲線の定義点（コントロールポイント 図 7.1-4 参照）は、以下を満足するように設定する。

- 1) 線形長波理論で近似できる。
- 2) 代表的なシナリオにおいて、コントロールポイントにおける津波水位変化もしくは最大水位や最低水位が、施設の有無による差異が小さい。

g) 津波ハザードの評価

津波ハザードの評価は、次の活用目的について、必要に応じてそれぞれ実施する。

- 1) 炉心損傷頻度（CDF）評価のための津波高さとその年超過発生頻度の関係を示す津波ハザード
- 2) 対象とする SSCs のフラジリティ評価のための津波高さとその年超過発生確率の関係を示す津波ハザード

津波ハザード評価では、7.1e) ロジックツリーの作成で作成したロジックツリーを用いて、図 7.1-2 に示すようなフラクタイル津波ハザード曲線群を求める。この津波ハザード曲線群内の 1 つの曲線は、図 7.1-3 に示すように、着目する地点での津波高さと、ある期間(n 年)にそれを超える津波が発生する確率(超過確率)、または頻度(超過頻度)の関係を表す。1 年の期間に対応した超過確率を年超過確率、超過頻度を年超過頻度とする。超過確率と超過頻度の変換は AESJ-SC-P006:2015 に基づくものとする。

1) の評価では、上記津波ハザード曲線群のうち年超過頻度で整理したものを 9.事故シナリオ評価で用いる。

2) の評価では、上記津波ハザード曲線群のうち年超過確率で整理したものを 8.建屋・機器フラジリティ評価で用いる。

h) フラジリティ評価のための津波パラメータの算定

津波ハザード曲線で示される津波高さは、f) で選定されたコントロールポイントで定義されるが、具体的な損傷評価を行うためには対象とする SSC の場所（SSC 評価地点と呼ぶ。図 7.1-4 参照。）での浸水高及び浸水深を津波遡上計算によって評価する。津波が取放水設

備を介して侵入する場合には、取放水設備内の水位変動計算を実施して、取放水設備内の水位や取放水設備上部からの溢水を評価する。

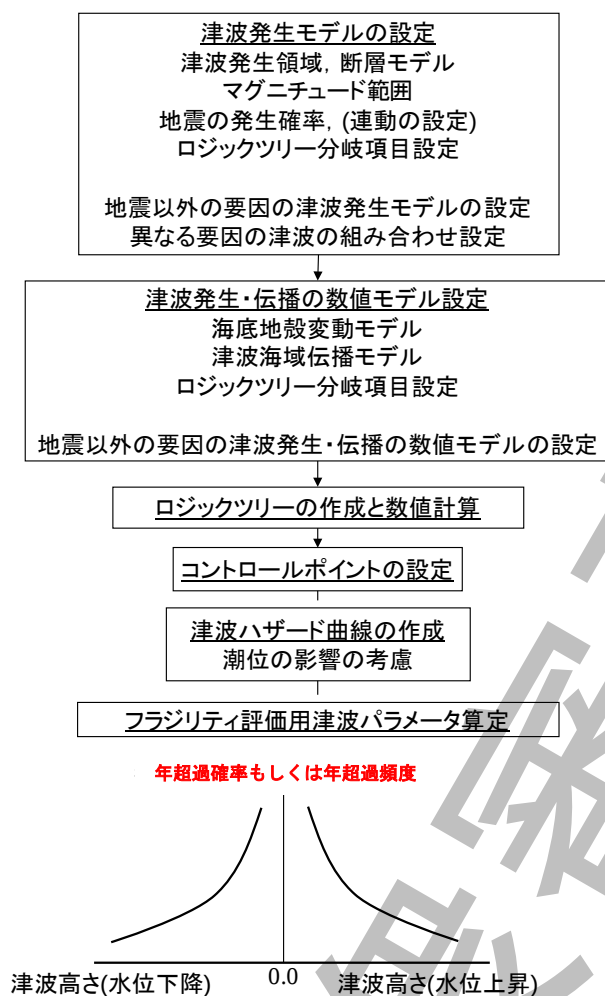


図 7.1-1 津波ハザード評価手順

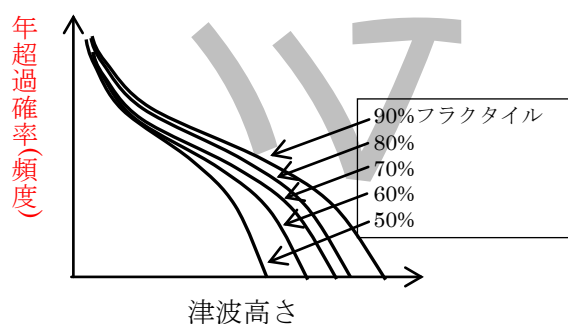


図 7.1-2 フラクタル津波
ハザード曲線群(模式図)

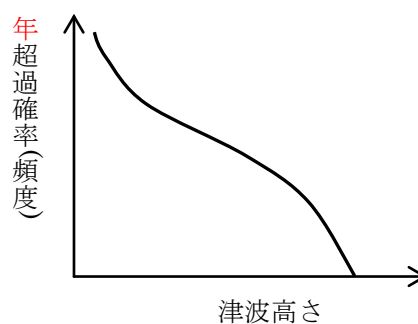


図 7.1-3 津波ハザード曲線
の表し方(模式図)

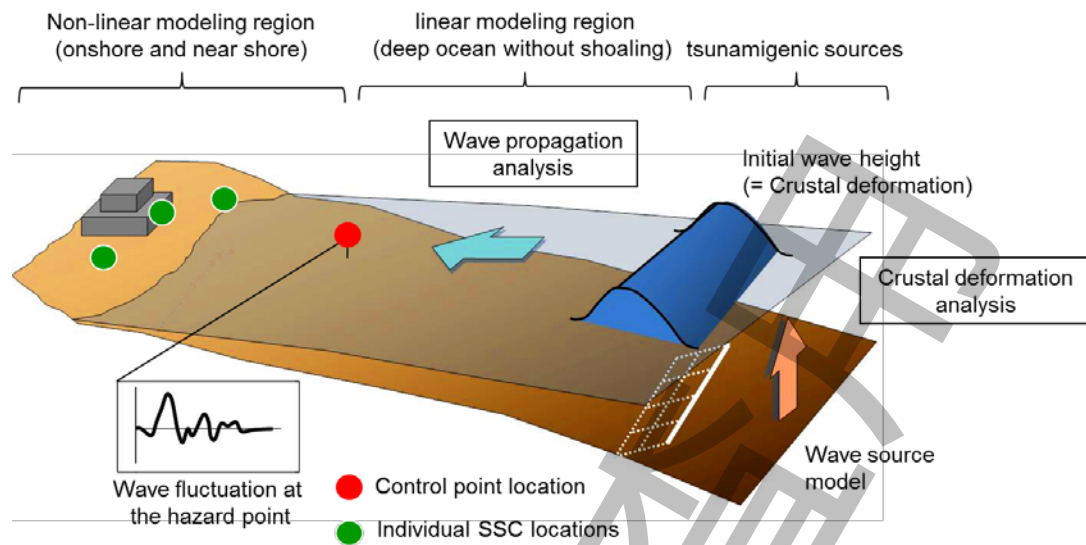


図 7.1-4 コントロールポイント及び SSCs 評価地点の概念図

7.2 津波ハザード評価における不確実さ要因の取扱い

a) 不確実さ要因の分類

津波ハザード評価において、津波発生モデル及び津波発生・伝播の数値モデルに存在する偶然的な不確実さ要因と認識論的不確実さ要因を考慮する。

b) 不確実さ要因の取扱い

図 7.2-1 に示すように、偶然的な不確実さ要因は 1 本の津波ハザード曲線の中で考慮する。また、認識論的不確実さ要因は、ロジックツリーの分岐として考慮し、複数の津波ハザード曲線で表現する。

実際には、断層モデル、及び津波高さの推定値に関する誤差といった地震・津波に関する不確実さを科学的な根拠に基づき、厳密に“偶然的な不確実さ要因”と“認識論的不確実さ要因”に分類することが難しい場合も想定されるが、評価に当たって、上記の取扱いを基本とし、対象サイトにおける地震関連情報の内容に応じて不確実さの扱いを決定する。

また、考慮する不確実さ要因は、感度解析などによって津波ハザード評価に大きな影響を及ぼすと判断されたものを対象とする。

1) 偶然的な不確実さ要因の取扱い

1 本の津波ハザード曲線の中で考慮される偶然的な不確実さ要因の取扱いとしては、図 7.2-2 に示すように、断層モデル内の各種パラメータの評価上生じる不確実さを津波高さの不確実さとして表し、それらを組み合わせて 1 本の曲線に反映する。具体的なパラメータの取扱いは、7.3 津波発生モデルの設定、7.4 津波発生・伝播数値モデル設定に従う。

2) 認識論的不確実さ要因の取扱い

複数の津波ハザード曲線で表現する認識論的不確実さ要因の取扱いとしては津波発生モデル及び津波高さ分布評価モデルにおける各種パラメータで偶然的な不確実さ要因としては取扱えないもの、例えば専門家で意見の違いが生じるような場合がある。これらはロジックツリーの分岐として考慮する。具体的なパラメータの取扱いは、7.3 津波発生モデルの設定、7.4 津波発生・伝播数値モデル設定に従う。

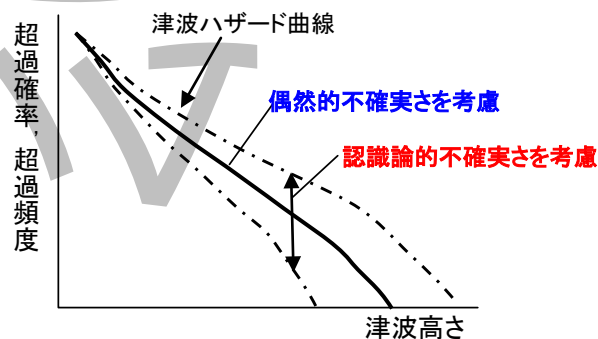


図 7.2-1 津波ハザード評価における偶然的な不確実さと認識論的不確実さの取り扱い(模式図)

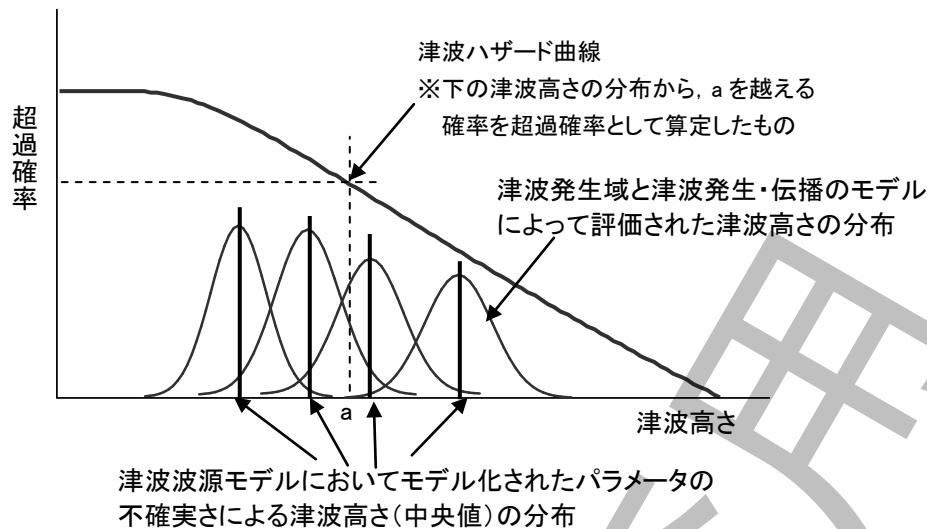


図 7.2-2 1本の津波ハザード評価に考慮される偶然的不確実さの概念(模式図)

7.3 津波発生モデルの設定

7.3.1 実施手順

津波発生モデルの設定は、次の手順に従い実施する。この手順によって、津波の発生から海岸への到達までを対象に多くのシナリオを構築し、さらに各シナリオの確率を算出した結果を用いて、津波ハザードを評価する。

- a) 津波発生領域の設定
- b) 断層モデルの設定
- c) マグニチュード範囲
- d) 地震の発生確率の設定
- e) 連動に関する設定

地震以外の要因による津波については、7.3.8 地震以外の要因の津波に示す。

7.3.2 津波発生領域の設定

津波発生領域の設定で対象とする領域の範囲については、サイトへの影響を考慮して、適切に設定する。地震ハザード評価用の地震発生モデルが別途設定されている場合、津波と地震動をできるだけ統一的に評価することが望ましいので、津波ハザード評価用モデルの設定に当たっては地震動ハザード評価用モデルを参考とする。なお、中小地震では大規模に地殻が変動しないので大きな津波は発生しない。よって、津波ハザード評価用のモデルは大地震のみを検討の対象とすることが可能である。津波については、対象サイトから“遠地”の地震による津波の影響も無視できない場合が多いことから、津波評価用として考慮する必要がある“遠地”の地震を追加する。津波の発生領域は、5.1.2 津波ハザード評価関連情報の収集・分析で収集した知見及び過去の地震情報から、地震の発生様式に応じて、適切に分類する。【附属書G(参考)G.1 津波発生領域の設定 参照】

7.3.3 断層モデルの設定

断層モデルは、津波をもたらす地震の特性を踏まえて断層運動を適切にモデル化する。文献調査などに基づき、評価地点に影響を及ぼすと考えられる断層モデルを設定する。公的機関などから提案された断層モデルを参考に設定することも可能である。なお、近年歴史地震データによるもの以外に、液状化の痕跡又は津波堆積物の検討など地質学的成果にも留意する。【附属書 G(参考)G.2 各海域の既往地震津波 参照】

7.3.4 マグニチュード範囲の設定

各津波発生域の固有地震のマグニチュードについては、1つの値に限定されないと考えられること、また津波の最大水位や最小水位に対してマグニチュードの影響が大きいことから、想定最大規模を決定しそれに対してマグニチュードの分布幅を考える。マグニチュードの分布幅を適切に設定し、確率分布は一様分布とする。

7.3.5 地震の発生確率（平均発生間隔とばらつき）の設定

地震発生のモデル化として、長期間の平均的なハザードを評価する場合と現時点でのハザードを評価する場合のそれぞれについて発生確率に関するモデルを設定する。

a) 長期間の平均的なハザードを評価する場合には、大地震の発生が定常ポアソン過程に従うとし、大地震の単位時間あたりの平均発生回数をパラメータとして、ある期間内に大地震が発生する確率を評価する。

b) 現時点のハザードを評価する場合には、BPT (Brownian Passage Time)分布を用いた評価を行う。BPT分布は、最後に地震が発生してから次に地震が発生するまでの経過時間の分布関数を与え、パラメータとしては地震の平均発生間隔 μ と α を設定する。 α はばらつきを与えるパラメータで、BPT分布の分散は $(\mu\alpha)^2$ となる。【附属書G(参考)G.3 マグニチュード頻度分布に関するモデル 参照】

7.3.6 連動に関するモデルの設定

プレート境界型の地震においては、複数の地震が連動する場合がある。連動については、対象とする地震の過去のデータを用いて、連動する確率を設定する。【附属書G(参考)G.4 特性化波源モデル 参照】また、複数の断層の地震発生時間間隔によっては、津波ハザードが変化する場合がありますので、適切に複数断層の地震発生時間間隔を考慮してモデルを設定する。

7.3.7 津波発生モデルにおいてロジックツリーの分岐として考慮する項目の設定

以下の項目については、認識論的不確実性をロジックツリーの分岐として考慮する。分岐とする項目については、津波発生領域の特徴に応じて、下記のものから適切に選択する。

a) マグニチュード範囲

各津波発生域の固有地震について、マグニチュード範囲は、ロジックツリーの分岐とする。分岐項目は 7.3.3 断層モデルの設定 に示した断層モデルを参考に設定する。

b) 平均発生間隔、BPT 分布の α

平均発生間隔は固有地震等の考え方にに基づき設定する。【附属書 G(参考)G.3 マグニチュ

ード頻度分布に関するモデル】

現時点のハザードを評価する場合には、BPT 分布を用いるが、そのばらつき α をロジックツリーの分岐として考慮する。

c) 断層モデルの種別

断層モデルとして、1 枚の矩形面が一様にすべるとした矩形一様モデル以外に、アスペリティなどのすべり量の不均一性を考慮した不均質モデルが提案されていることがある。例えば、小断層の集合で構成される不均質モデルである。このような場合、この 2 つの断層モデルのどちらが適切かを、ロジックツリーの分岐とする。

d) スケーリング則

地震断層の長さ、幅、すべり量間の関係（スケーリング則）については、海溝型地震・連動型地震・活断層地震などによって幾つかの考え方があり、ロジックツリーの分岐とする。【附属書 G(参考)G.5 スケーリング則 参照】

e) 連動モデル

連動の確率についても幾つかの考え方があり、ロジックツリーの分岐で考慮する。

7.3.8 地震以外の要因の津波

地震以外の要因については、その要因に応じて、その発生領域、規模の範囲、運動メカニズムとそのばらつき、発生確率、これらをサイトへの影響を考慮して適切に設定する。規模の範囲は、山体崩壊、海底地すべり、及び陥没の体積である。運動メカニズムは、これらの移動速度や海面突入角度などである。発生領域、規模の範囲、運動メカニズムとそのばらつき、及び発生確率をロジックツリーの分岐として考慮する。

7.4 津波発生・伝播数値モデルの設定

7.4.1 実施手順

モデルの設定では、次の手順に従い実施する。

- a) 海底地殻変動モデルの選択
- b) 津波伝播モデル（数値シミュレーション）の選択
- c) 津波高さ分布評価モデルにおいてロジックツリーの分岐として考慮する項目の設定

7.4.2 海底地殻変動モデルの選択

津波ハザード評価では、地震による地殻変動を求めめるため、地震時の海底地殻変動モデルを設定する。設定した海底地殻変動モデルを用いて、地震による海底地殻変動を評価する。この地殻変動による海底面の隆起・沈降の分布形状が、津波発生の入力条件(津波波源)となる。また、津波ハザードについて対象サイトの地盤高への海底地殻変動の影響が無視できない場合があるので、対象サイトの地盤高の変化を評価する。なお、海底地殻の剛性率については、津波発生域の特性に応じて適切に設定するものとする。【附属書 G(参考)G.6

海底地殻変動モデルの選択 参照】

7.4.3 津波発生・伝播の数値モデルの選択

津波発生・伝播の数値モデルについて、評価地点における津波による水位変動を精度よ

く計算できる適切な基礎方程式を選択する。数値モデルでは、再現すべき現象に関する計算精度と計算に要する時間などを考慮して、適切な数値計算方法を用いることとする。

数値モデルに用いる地形データは、最新の海底地形図、陸上地形図などをもとに作成する。数値モデルの津波入力条件は、断層モデルを基に、**7.4.2 海底地殻変動モデルの選択**で設定した手法によって得られる隆起・沈降の分布形状を用いる。計算領域及び空間格子間隔については、津波波源の大きさ、津波の空間波形、海底・海岸地形の特徴、評価地点周辺の構造物などを考慮して、適切に設定する。領域、海底・海岸地形、構造物などを考慮して、沖側境界条件、陸側境界条件、越流境界条件を適切に設定するものとする。陸側境界条件については、フラジリティ評価において必要な情報として、陸上遡上計算の実施の有無及び遡上計算を実施した場合にはその手法を明確にする。時間格子間隔については、計算の安定性などを考慮して適切に設定するものとする。数値モデルに用いる摩擦係数、渦動粘性係数などは文献などを参照して適切に設定する。数値モデルの再現時間については、津波の特性、地形条件などを考慮して適切に設定する。

津波発生・伝播の数値モデル及び数値計算方法については、既往津波の痕跡高と比較することによって妥当性を確認する。**【附属書 G(参考)G.7 津波発生・伝播の数値モデルの選択 参照】**

7.4.4 津波発生・伝播数値モデルにおいてロジックツリーの分岐として考慮する項目の設定

数値モデルによる津波高さに関する評価結果と痕跡高は完全に一致することは少なく、ばらつきが存在する。よって、**7.4.3 津波発生・伝播の数値モデルの選択**で選択された数値モデルによる評価結果についてもばらつきを考慮する。そのばらつきをどの程度考慮するかについては議論があり不確実性が小さくないので、以下の項目についてロジックツリーの分岐で考慮する。

a) 断層モデルにおけるばらつきの有無

7.3.3 断層モデルの設定で設定した断層モデルについて、その断層モデルのみによって津波高さを推定する方法と、断層による地震の発生メカニズムを表すパラメータにばらつきが存在するとして、パラメータの変動を考慮して推定する方法の、2つの方法をロジックツリーの分岐として考慮する。

b) 津波高さの推定値のばらつきに関する対数標準偏差の大きさ

7.4.3 津波発生・伝播の数値モデルの選択で選択された数値モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきの大きさを示す対数標準偏差については、ロジックツリーの分岐として考慮する。**【附属書 G(参考)G.8 津波高さの評価結果の真値に対するばらつき 参照】**

c) 津波高さの推定値に対する対数正規分布の打ち切り範囲

7.4.3 津波発生・伝播の数値モデルの選択で選択された数値モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきが対数正規分布に従うとした場合に、対数正規分布の打ち切りに

について、ロジックツリーの分岐として考慮する。

【附属書 G(参考)G.8 津波高さの評価結果の真値に対するばらつき 参照】

7.4.5 地震以外の要因の津波

地震以外の要因については、その要因に応じて、津波波源モデルと津波発生・伝播の数値モデルを適切に選択する。

津波伝播の数値計算モデルについては、7.4.3 津波発生・伝播の数値モデルの選択の記載と同様に、適切な基礎方程式と数値計算手法を選択し、最新の地形データを用いて、適切な計算領域、空間格子間隔、境界条件、時間格子間隔、諸係数、再現時間を設定する。地震による津波と同様に、津波高さの推定値に対するばらつきに関する標準偏差の大きさ、津波高さの推定値に対する対数正規分布の打ち切り誤差をロジックツリーの分岐として考慮する。

7.5 ロジックツリーの分岐項目のスクリーニング

津波ハザード評価のシナリオの分岐となる不確かさ要因について、感度解析によって津波ハザードに及ぼす影響が小さいと判断される場合、その変動幅を考慮しなくてもよい。

7.6 ロジックツリーの作成

7.6.1 実施手順

ロジックツリーの作成は、次の手順に従い実施する。

- a) ロジックツリーで考慮すべき不確かさ要因の選定
- b) ロジックツリー作成における技術的難易度及び専門家活用水準の設定
- c) 専門家活用水準ごとのロジックツリー作成
- d) TI(Technical Integrator), TFI(Technical Facilitator/Integrator), 専門家の選定基準

7.6.2 ロジックツリーで考慮すべき不確かさ要因の選定

津波ハザード評価者は、7.3 津波発生モデルの設定及び 7.4 津波発生・伝播数値モデルの設定においてそれぞれ選定した認識論的不確かさ要因を対象として、ロジックツリーを作成しなければならない。

対象とする認識論的不確かさ要因は、津波発生モデルを設定する過程で判断が分かれる項目、及び津波高さ評価に対して評価方法が複数存在する項目などとし、感度解析を適宜実施して、津波ハザードに大きな影響を及ぼす項目を認識論的不確かさ要因として選定する。

7.6.3 ロジックツリー作成における技術的難易度及び専門家活用水準の設定

ロジックツリーの作成に当たっては、対象とする認識論的不確かさ要因の技術的な難易度を判断し、次の 3 段階の専門家活用水準のいずれかを設定する。専門家活用水準ごとに作業手順が大きく異なるので、作成するロジックツリーに関する信頼性・説明性に留意して、その水準を設定する。

a) 専門家活用水準 1

津波ハザードの不確かさへの影響が比較的小さい水準を想定し、TI が文献レビュー及び自らの経験に基づきコミュニティ分布(科学者集団が総合的に評価する時点での不確かさ

の客観的分布)を評価し、ロジックツリーを作成する。

b) 専門家活用水準 2

津波ハザードの不確実さへの影響が比較的大きく、重要項目に対する専門家意見が分かれることを想定し、TI がモデル提案者及び関連する専門家と接触してその見解及び根拠を聴取するか、又はそれらの専門家を一同に集めて討論などを通じて、モデルの改善及び絞り込みを行い、コミュニティ分布を評価して、ロジックツリーを作成する。

c) 専門家活用水準 3

津波ハザードの不確実さの要因が広範囲で多岐に渉り、重要かつ複雑と判断され、その評価に関して多大な時間・費用・人的資源を要し、場合によっては各種調査が必要となることを想定して、TFI が専門家によるパネルを編成し、専門家をモデル提案者でなく不確実さの客観的評価者として活用し、パネルが評価したコミュニティ分布を公平に集約して、ロジックツリーを作成する。

なお、専門家活用水準 1 及び専門家活用水準 2 における TI の役割を、津波ハザード評価者自らが担ってもよい。

7.6.4 専門家活用水準ごとのロジックツリー作成

a) 専門家活用水準 1 での作成手順

専門家活用水準 1 のロジックツリーを次の手順で作成する。

1) ロジックツリーの技術的な纏め役(TI)の選出

津波ハザード評価者は、ロジックツリーで対象とする項目の技術的内容に応じて、ロジックツリーを纏める役割を担う TI を 7.6.5 TI, TFI, 専門家の選定基準に従い選定する。

2) ロジックツリーで対象とする項目の選定

TI は、津波発生モデル及び津波高さ分布評価モデル設定における認識論的不確実さ要因のうち、ロジックツリーで対象とする項目を選定する。対象項目の選定に当たっては、我が国における過去の地震の収録期間（約千年）及び活断層データの有する数十万年の時間情報に対応する超過頻度 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 程度(回/年)のハザードレベルに着目し、感度解析を適宜実施して津波ハザードに大きく影響する重要な項目を選択する。

3) ロジックツリーの作成

TI は、図 7.6.4-1 に示すように、対象項目ごとに不確実さを分岐とその重みで表し、それらを組み合わせてロジックツリーを作成する。

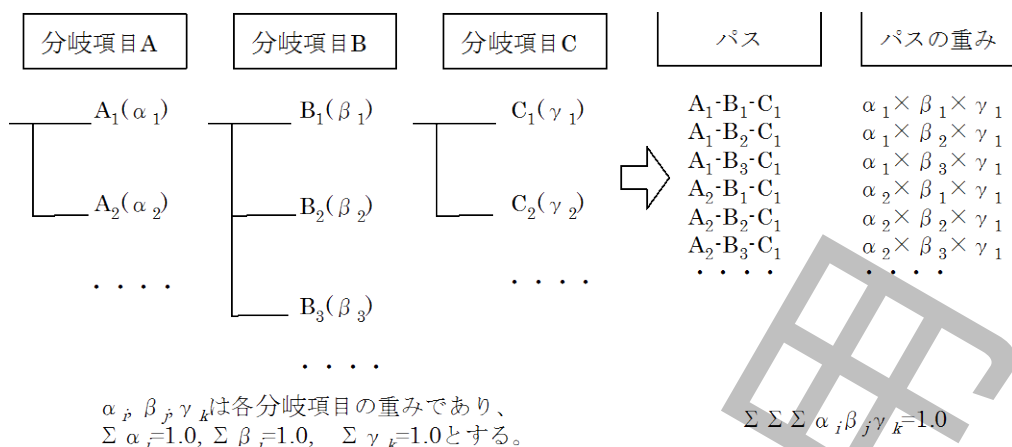


図 7.6.4-1 ロジックツリーの対象項目の組み合わせと各パスの重み付けの例（模式図）

b) 専門家活用水準 2 での作成手順

専門家活用水準 2 のロジックツリー作成手順を次に示す。

1) TI の選出

津波ハザード評価者は、ロジックツリーで対象とする項目の技術的内容に応じて、専門家の意見を抽出・統合し、ロジックツリーを纏める役割を担う TI を選出する。

2) ロジックツリーで対象とする項目の選定

専門家活用水準 1 と同じ取扱いを行う。

3) モデル提案者及び関連する専門家の選定と情報の収集

TI は、対象項目に関する分野の専門家を 7.6.5 TI, TFI, 専門家の選定基準に従って選定し、専門家の意見を抽出することによって関連情報を収集する。専門家の意見を抽出する方法は、アンケート、インタビュー、専門家間の意見交換又はこれらを併用する方法とする。

4) 関連情報の絞込み

TI は、7.6.4b)3)モデル提案者及び関連する専門家の選定と情報の収集で収集した情報に基づき、モデルの改善及び絞込みを行う。

5) ロジックツリーの作成

TI は、7.6.4b)4)関連情報の絞込みで絞込んだ結果に基づき、モデル提案者及び関連する専門家からの意見を反映して、対象項目ごとに不確かさを分岐とその重みで表した暫定ロジックツリーを作成する。そして、その暫定ロジックツリーに関して専門家によるレビューを受けロジックツリーを完成する。また、対象項目の難易度が高く、分岐の重み付けが困難な場合には、重みを等しくしてもよい。

c) 専門家活用水準 3 での作成手順

専門家活用水準 3 のロジックツリー作成手順を次に示す。

1) ロジックツリーの総合的な纏め役(TFI)の選出

津波ハザード評価者は、ロジックツリーで対象とする項目の技術的内容に応じて、専門家間の相互交流及び意見統合を手助けし、ロジックツリーを纏める役割を担う TFI を **7.6.5 TI, TFI, 専門家の選定基準**に従い選定する。

2) ロジックツリーで対象とする項目の選定

専門家活用水準 1 と同じ取扱いを行う。

3) 専門家の選定とパネルの編成

TFI は、対象とする項目に関して客観的評価を行う専門家を選定し、それら専門家からなるパネルを編成する。課題が極めて複雑で難易度が高い場合は複数の専門家パネルを編成しなければならない。

4) 対象項目に関する専門家の意見の抽出

TFI は、専門家パネルでの意見の抽出に当たって、専門家が評価に必要な情報及びデータを共有し共通認識を持った上で、専門家意見を抽出するよう配慮する。また、専門家の相互交流を促進し幅広く意見を抽出することが望ましい。

5) 対象項目に関する専門家の意見の統合

TFI は、**7.6.4c)4)対象項目に関する専門家の意見の抽出**で抽出した対象項目に関する専門家の意見が十分かつ正確に収集されていることを確認するとともに、専門家パネルの多様な情報を意思決定に活用できる形式に統合する。

6) ロジックツリーの作成

TFI は、専門家パネルによって提示された不確実さの各分岐とその重みについて、その時点における科学者集団の情報及び見解が網羅され正確に反映されているかを確認し、それらを集約して暫定ロジックツリーを作成する。そして、その暫定ロジックツリーに関して専門家によるレビューを受けロジックツリーを完成する。

7.6.5 TI, TFI, 専門家の選定基準

a) TI の選定基準

TI は、不確実さ評価の過程において次に示す役割を担わなくてはならないので、対象とする技術課題に関する専門的技術・知識を有していなければならない。

- 1)技術課題の抽出及び選定
- 2)検証者及び専門家の選定
- 3)技術課題に関する情報の収集とコミュニティ分布の作成
- 4)専門家による検証への対応
- 5)文書作成

b) TFI の選定基準

TFI は、不確実さ評価の過程において次に示す役割を担わなくてはならないので、対象とする技術課題に関する専門的知識、確率論的津波ハザード解析に関する知識、意見の抽

出方法に関する専門知識を有していなければならない。したがって、TFI は個人ではなく一つのチームとして、対象とする技術的課題の分野における専門家で編成する。

- 1) 技術課題の抽出及び選定
- 2) 専門家の選定
- 3) 技術課題に関する討論と焦点の絞込み
- 4) 確率論的アプローチに関する専門家の訓練
- 5) 専門家パネルの討議の促進及び個別意見の抽出
- 6) 専門家意見の集約及び不一致点の解消
- 7) 文書作成

c) 専門家の選定基準

専門家は、次に示す資質を有する。

- 1) 専門家としての学識、経験、発表論文などによって評価される高い専門性
- 2) 特定のモデル、仮説、理論の提案者としてではなく、すべての仮説及び理論を客観的に検討する専門家として、データに基づいてそれらの相対的な信頼性を評価する能力
- 3) 技術課題を評価する時間の確保
- 4) 対象地域に関する震源特性、又は津波特性に関する具体的な知識
- 5) 討論に参加して真摯に評価及び解釈を披露し、プロジェクトに参加する他の専門家との情報交換において、技術的な立場を公に説明かつ擁護する能力
- 6) 高いコミュニケーション能力、対人能力、融通性、中立性を有し、解釈及び技術的な立場について明確かつ簡潔に説明する能力

これらの個人的な能力に加え、組織としての見解の範囲を超えて科学的な意見の多様性を確保することができるような専門家が選ばれることが望ましい。

7.7 津波ハザードの評価

7.7.1 津波発生モデルの設定

津波発生領域、マグニチュード範囲、断層モデル、また必要に応じて連動に関するモデル化、これらを設定し、津波発生シナリオを作成する。次に、各地震の発生確率を計算する。また、ロジックツリーの分岐として考慮する項目を設定し、ロジックツリーを作成する。

地震以外の要因による津波については、要因に応じた津波発生領域、規模の範囲、運動メカニズム、発生確率、これらを設定し、津波発生シナリオを作成する。次に、各要因の発生確率を計算する。また、ロジックツリーの分岐として考慮する項目を設定し、ロジックツリーを作成する。

共通の要因により発生する可能性が高い津波については、必要に応じて地震及び地震以外の要因の組み合わせのシナリオを作成する。

7.7.2 津波発生・伝播の数値モデルの設定及び数値計算

7.7.1 津波発生モデルの設定で作成した各シナリオについて、数値モデルを用いて対象

地点海岸の津波高さを計算する。この時に、必要であれば、**7.4.2 海底地殻変動モデルの選択**で選択した方法で対象サイトにおける地震時の地盤高の変動を考慮する。さらに、各計算結果に数値計算の誤差を考慮し、各計算結果を中央値とした津波高さ確率分布への変換を行う。なお、シナリオの総数が多くなり、全シナリオの計算・統計処理が困難な場合には、モンテカルロ手法によって必要な数のハザード曲線を作成してもよい。また、ロジックツリーの分岐として考慮する項目を設定し、ロジックツリーを作成する。

7.7.3 津波ハザード曲線の作成

上で求めた津波高さの確率分布に **7.6.2 ロジックツリーで考慮すべき不確実さ要因の選定**の地震の発生確率を反映して、ここのシナリオに対する津波高さの年超過確率を表す多数の津波ハザード曲線を作成する。津波ハザード曲線を作成する場合には、潮位の影響を適切に考慮する。

7.7.4 フラクタイルハザード曲線の作成

7.6.2 ロジックツリーで考慮すべき不確実さ要因の選定及び **7.6.3 ロジックツリー作成における技術的難易度及び専門家活用水準の設定**で作成したロジックツリーにおける重みを算出する。次に、各地点の津波ハザード曲線群に、個々のシナリオに対応するロジック分岐の重みを考慮し、津波高さに対して与えられる超過確率を超えないとみなす専門家のコンセンサスがどれくらいの割合で得られるかを表すフラクタイルハザード曲線を作成する。**【附属書 G(参考)G.9 津波ハザード評価におけるフラクタイル曲線の作成 参照】**。

7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価

地震動ハザードと津波ハザードとの重畳評価は、**AESJ-SC-P006:2015 箇条 6.10.2**に基づき実施する。結果は、地震動強さと津波高さの2次元での確率分布（結合確率）で表現する。結合確率は、津波に対する脆弱性評価及び事故シーケンス評価がコントロールポイントにおける津波高さに基づき実施されることから、コントロールポイントにおける津波高さを条件とした地震動強さの確率分布で表現する。結合確率は、同一地震に対する地震動強さと津波高さのバラツキに相関がないと仮定し、下記の式に基づき評価する。

地震活動域*i*でマグニチュード*m_j*の地震が発生した場合に対象地点で生じる津波高さと地震動強さの中央値を*t_{ij}*と*a_{ij}*とする。中央値のまわりのバラツキは次式のように対数正規分布で表現される。

$$f_{i,j}(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln a}a} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln a - \ln a_{i,j}}{\sigma_{\ln a}}\right)^2\right]$$

$$g_{i,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln t}t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \ln t_{i,j}}{\sigma_{\ln t}}\right)^2\right]$$

津波と地震動のばらつきの間に相関がない場合、津波高さが*t₀*の時の地震動強さの条件付確率密度関数は次の式で表現される。

$$p(a|t=t_0) = \frac{\sum_i \sum_j f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t=t_0) v_i \beta_i(m_j)}{\sum_i \sum_j g_{i,j}(t=t_0) v_i \beta_i(m_j)}$$

ここで、 v_i は地震活動域*i*の年地震発生数、 $\beta_i(m)$ は地震活動域*i*のマグニチュード分布であり、 $v_i \beta_i(m)$ は、地震活動域*i*におけるマグニチュード m_j の地震 e_{ij} の年発生数を表す。【**附属書H 地震動と津波の結合確率評価方法** 参照】

7.8 フラジリティ評価のための津波パラメータの算定

7.8.1 一般事項

- a) フラジリティ評価のための津波パラメータの算定手順の概念を図 7.8-1 に示す。
- b) 留意事項
 - 1) 近地津波では地震との重畳に留意する。遠地津波では必要に応じて津波到達時間を算定し、シビアアクシデント対策設備の使命時間に考慮する。
 - 2) 津波による SSCs の損傷モードは直接的及び間接的を含めて多数考えられるために、津波伝播解析に加えて、津波遡上評価を実施し、SSCs 評価地点における複数の津波パラメータ（浸水深、流速など）を算定し、さらに事故シーケンス評価のためには各パラメータの関係に留意する。
 - 3) 7.1 に示す津波ハザード曲線の定義点（コントロールポイント）から SSCs 評価地点までの遡上評価においては、複数の津波防護施設（防潮堤及び防潮壁）及び浸水防止設備（水密扉など）の構造的及び機能的損傷を考慮する。
 - 4) 津波パラメータの算定に際しては、不確実さを適切に考慮する。
 - 5) 取水路を介した対象プラントへの浸水を検討する場合には、取水路応答シミュレーションなどで必要な情報を得てもよい。
 - 6) 津波による海底砂の移動が海水取水設備に及ぼす影響を確認する場合には、代表的なシナリオを選択する。

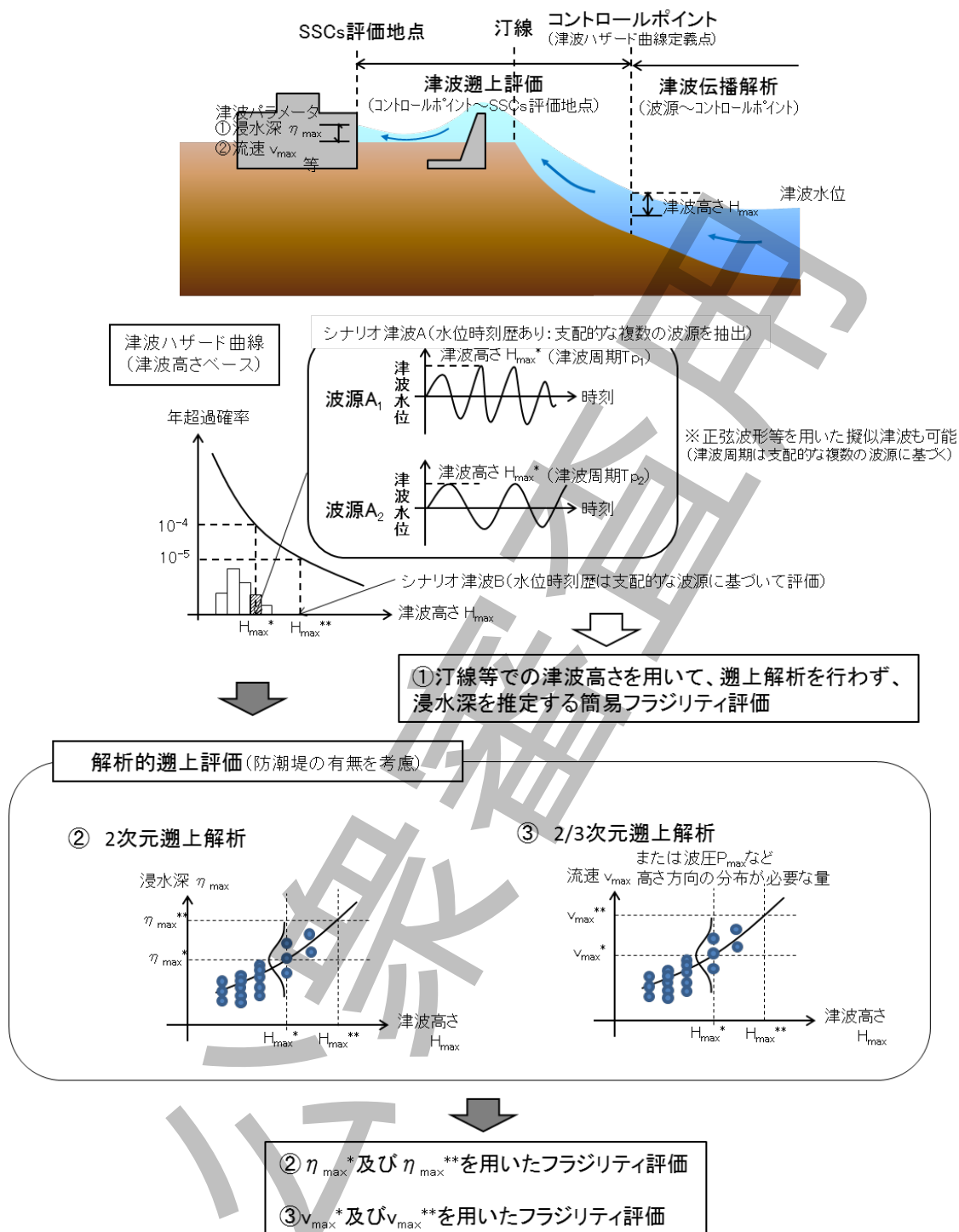


図 7.8-1 フラジリティ評価のための津波パラメータの算定手順の概念

7.8.2 津波パラメータの算定手順

a) コントロールポイントにおける算定手順

- 1) コントロールポイントにおいては、津波パラメータ算定のための遡上評価に必要なデータが津波ハザード曲線と対応していなければならない。
- 2) ハザード再分解から求められるサイトに支配的な津波群（シナリオ津波）を用いた遡上解析などによって津波パラメータを求める。**【附属書Ⅰ（参考） ハザード再分解に基づくフラジリティ評価用津波群の設定方法 参照】**
- 3) シナリオ津波の作成に際しては、既往知見^{(1),(2)}を参考に、津波ハザード曲線の該当の年超過確率における津波高さに寄与する波源を分析し、支配的な波源情報に基づきフラジリティ評価用の津波水位時刻歴を評価する。ここで、津波高さを大きくする場合波源のすべり量を大きくするなどとしてもよい。また、津波水位時刻歴は正弦波形などを用いて模擬してもよい。

b) コントロールポイントから SSCs 評価地点における算定手順

- 1) サイト地形及び構造物を適切に反映した2次元もしくは3次元の遡上解析を実施し、コントロールポイントから SSCs 評価地点での津波パラメータを算定することが望ましい。
- 2) コントロールポイントから各 SSCs 評価地点までの遡上解析においては、以下に示す方法などを用いて、複数の津波防護施設（防潮堤及び防潮壁）及び浸水防止設備（水密扉など）の構造的及び機能的損傷を考慮する。

①完全連成

流体と構造物の連成解析に基づき津波パラメータを算定する方法

②非連成

- ・津波防護施設などの有無を考慮した遡上解析結果及び個々の津波防護施設などの損傷確率に基づき津波パラメータを算定する方法
- ・津波防護施設などの有無を考慮した遡上解析結果のみに対して津波パラメータを評価し、事故シーケンス解析の不確実さとして考慮する方法

- 3) 地震に起因する地盤の隆起・沈降に留意する。

c) 津波パラメータの関係に係わる算定手順

- 1) SSCs の各損傷モードが複合した場合のフラジリティ評価のために、構造物形状などを適切に反映した2次元もしくは3次元の遡上解析を実施し、SSCs 評価地点での津波パラメータ間の関係を適切に考慮することが望ましい。
- 2) 必要に応じて、地震などによる影響を考慮する。

7.8.3 算定手法の選択

求められている評価用途及び精度に応じて、表 7.8-1 を参考に、フラジリティ評価のための津波パラメータの算定手法を選択する。ただし、選択した算定手法の精度に応じて、認識論的不確実さを専門家による判断などに基づき適切に考慮する。なお、ここに示され

ていない新たな手法を選択してもよいが、その場合には、その手法の妥当性を示す必要がある。

表 7.8-1 フラジリティ評価のための津波パラメータの算定手法の例

算定手法	検討モデル				遡上解析用 津波諸元
	津波伝播解析		津波遡上解析		
	中央値	ばらつき	中央値	ばらつき	
A	2 次元		設計評価 係数倍	工学的 判断	基準津波
B	2 次元（一貫解析）			工学的 判断	シナリオ津波
C	2 次元（一貫解析）				シナリオ津波
D	2 次元（一貫解析）＋部分 3 次元				シナリオ津波
E	3 次元（一貫解析）				シナリオ津波

8. 建屋・機器フラジリティ評価

8.1 建屋・機器フラジリティ評価の流れ

建屋・機器フラジリティ評価は、次の手順に従って実施する。（図 8.1-1 参照）。図 8.1-1 に示すように、8.2 評価対象と損傷モードの設定、8.4 現実的耐力の評価、及び 8.6 フラジリティの評価では、対象とする SSCs のうち、建屋、建物及び土木構造物を含む構築物を建物・構築物、系統を構成する機器及び配管等を機器・配管系と分類する。

a) 評価対象と損傷モードの設定

5.1.3 フラジリティ評価関連情報の収集・分析で得られた建屋・機器フラジリティ評価関連情報と 6.6 建屋・機器リストの作成で抽出された建屋・機器リストに基づき、起因事象及び緩和設備に着目し、対象とする SSCs を設定する。次いで、対象とする SSCs ごとに、津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による機能喪失に至る損傷モード及び部位を抽出し、損傷モードに係わる損傷の指標を設定する。

ただし、対象とする SSCs の構造、寸法、形状、動作機構、水密性、設置位置などを考慮して、それらをカテゴリに分類してもよい。そして、評価対象物・各カテゴリ別に、不確かさ要因を分析し、偶然的な不確かさ要因と認識論的な不確かさ要因に大別する。また、7.8

フラジリティ評価のための津波パラメータの算定で得られるフラジリティ評価用津波諸元に必要な情報を与える。

b) 評価手法の選択

求められている評価精度及び用途に応じて、対象とする SSCs の津波に対する現実的耐力及び現実的応答の評価手法を選択する。

c) 現実的耐力の評価

津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動によって生じた対象部位における構造的及び機能的損傷の限界を現実的耐力として評価する。確率分布としては、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対しては上下限値を有する確率分布を、津波の波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷モードに対しては対数正規分布を仮定してもよい。その不確実さは、偶然的な不確実さ要因と、認識論的不確実さ要因に係わるものに分けて設定する。現実的耐力の評価手法としては、実験を含む経験に基づく手法、解析を含む理論に基づく手法、経験及び理論を踏まえた工学的判断に基づく手法がある。なお、現実的耐力評価に際しては、浸水対策・排水対策の有無など、及び、必要に応じて、**AESJ-SC-P006:2015 箇条 7.5** より得られる地震による構造的損傷及び機能的損傷の影響を **7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価** から求まる地震と津波の結合確率を踏まえて考慮する。

d) 現実的応答の評価

津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷に至る損傷モードに対応した損傷部位における応力、ひずみ、及び津波の浸水高などの損傷指標を確率量として評価する。確率分布としては、一般的に対数正規分布を仮定する。その不確実さは、偶然的な不確実さ要因と、認識論的不確実さ要因に係わるものに分けて設定する。現実的応答の評価手法としては、現実的耐力の評価手法と同様に、実験を含む経験に基づく手法、解析を含む理論に基づく手法、経験及び理論を踏まえた工学的判断に基づく手法がある。現実的応答評価におけるコントロールポイントにおける津波高さは、**7.7 津波ハザードの評価** で定義されたものを用いる。なお、現実的応答評価に際しては、必要に応じて、**AESJ-SC-P006:2015 (地震 PRA 標準) 箇条 7.5** より得られる地震による構造的損傷及び機能的損傷の影響を **7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価** から求まる地震と津波の結合確率を踏まえて考慮する。

e) フラジリティの評価

8.1b) 評価手法の選択 で選択した現実的耐力及び現実的応答の評価手法によって、**8.1d) 現実的応答の評価** で求めた現実的応答が **8.1c) 現実的耐力の評価** で求めた現実的耐力を上回る損傷確率を算定し、対象とする SSCs のフラジリティ曲線を求める。ここで、選択した評価手法の精度などに対応するフラジリティ曲線の認識論的不確実さに関しては、専門家による判断などに基づき適切に設定する。なお、ここで評価した建屋・機器フラジリティ評価結果は、**9.事故シーケンス評価** で用いる。

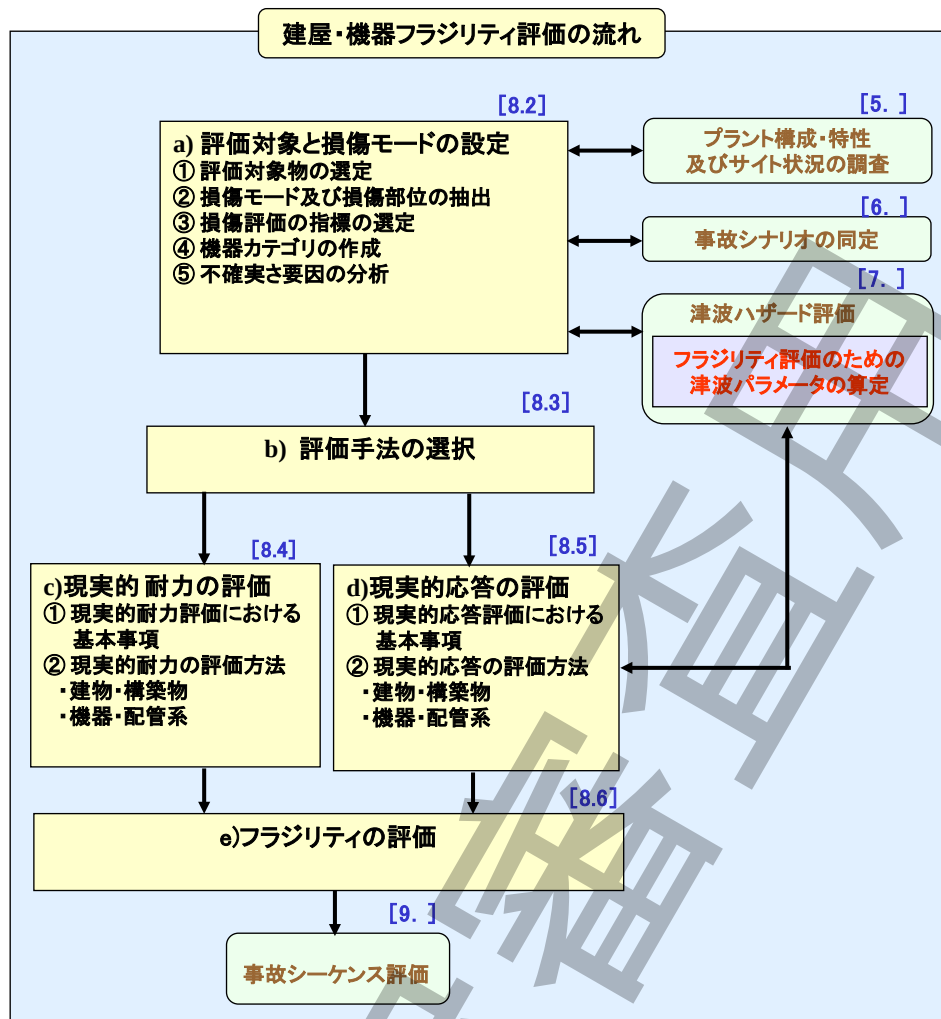


図 8.1-1 建屋・機器フラジリティ評価手順

8.2 評価対象と損傷モードの設定

8.2.1 一般事項

6.6 建屋・機器リストの作成で抽出された建屋・機器リストを踏まえてフラジリティ評価対象物を選定する。次に、選定された評価対象物に対して、支配的又は潜在的な損傷モード及び損傷部位を抽出する。また、抽出された損傷モード及び損傷部位に応じたフラジリティ評価のための損傷評価の指標を選定する。

ここで設定したフラジリティ評価条件は、津波ハザード評価及び事故シーケンス評価の実施者と調整及び共有する。

8.2.2 評価対象物の選定

フラジリティ評価の対象は、**6.6 建屋・機器リストの作成**で抽出された建屋・機器リストに記載されたものとする。さらに、評価対象物の選定に当たっては、炉心損傷に大きな影響を及ぼすもの、シビアアクシデント対策に関連する SSCs に留意する。また、津波経験後の余震によるフラジリティ評価も念頭において、津波経験後に損傷及び性能低下する施設・設備なども評価対象とする。

なお、次の点に着目し評価対象物のスクリーニング、代表評価を行ってもよい。ただし過去の津波 PRA で安全上重要な機器とされているもの、過去の津波による被害事例から損傷しやすいことが分かっている施設などは、評価対象事例と評価対象物の状況などを比較し、評価事例と同様の観点で問題ないことを確認した上でスクリーニングを行う。これらの検討に当たっては、事故シーケンス評価－フラジリティ評価間で相互に調整を行う。【**附属書 J (参考) 評価対象物と配置状況の例 参照**】【**附属書 K (参考) 津波による被害事例 参照**】

a) 既存の津波に対する評価結果などを参考に現実的耐力又は現実的応答の観点で十分な裕度を有し、損傷確率が小さいと予想されるものは評価対象外としてもよい。ただし、既存の津波に対する評価結果などとフラジリティ評価における津波高さの違いによる現実的応答の差異に留意する。

評価対象物から除外できる設備の現実的耐力の目安の設定は、その現実的応答及びばらつきの大きさとも関連し一律の値を設定することが難しいため、プラントごとに検討を行ってもよい。

b) 他施設に集約できるものは、代表施設以外は評価対象外としてもよい。例えば、同一のフォールトツリー上の施設であって、津波による損傷確率が他の施設に比べて明らかに大きい施設によって他の施設の津波による損傷確率を代表できる場合は、代表設備以外は評価対象外としてもよい。ただし、1つの施設が複数の機能を有する場合及び複数の系統で用いられる場合もあるため、施設の有する機能に留意して施設の除外又は統合を行う。

8.2.3 損傷モード及び部位の抽出

評価対象とする損傷モード及び損傷部位の抽出は、津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動などによって損傷が発生し、直接又は間接的に炉心若しく

は格納容器バウンダリの健全性に対して大きな影響を及ぼす可能性のあるものを対象とする。ここで、津波による洗掘、海底砂移動などによる構造的及び機能的損傷に至る損傷モード及び部位の抽出に当たっては、津波ハザード評価から得られるサイト周辺地域の隆起あるいは沈下に留意する。

評価対象物に応じて複数の損傷モード・部位が存在し得るが、これらの中から支配的な損傷モード及び部位のみ評価対象として選定してもよい。また、建物・構築物の局所的な機能喪失後に、屋内に設置された機器・配管系が被水・没水して機能喪失するような損傷シナリオのように、支配的損傷モード及び部位の選定が困難な場合及び、**AESJ-SC-P006:2015 箇条 7.2**に従って、津波 PRA への影響があるとして、地震 PRA などにおいて選定した評価対象物など、地震による構造的損傷及び機能的損傷の影響により支配的な損傷モードが変化する可能性がある場合は、幾つかの潜在的な損傷モード及び部位を選定する。**【附属書 L（参考）損傷モード及び部位の抽出例 参照】**

なお、津波による対象漂流物の選定に際しては、**5.1.3 フラジリティ評価関連情報の収集・分析**で得られる当該サイトに影響を与える可能性のある漂流物の諸元（位置・種類・頻度）に留意し、支配的な津波波源から当該サイトまでに存在する漂流物の発生頻度が炉心損傷頻度に比べて小さい場合、もしくは、当該サイトに接岸していない船舶に対しては対象から除外してもよい。

a) 屋外

1) 津波防護施設など

屋外に設置されている構造物である防波堤・防潮堤などは、津波の押し波及び引き波の波力・浮力によって損傷する可能性があるため、構造的及び機能的損傷モードとして必要に応じて考慮する。**【附属書 L（参考）損傷モード及び部位の抽出例 参照】**

例えば、これらの基礎周辺の地盤が洗掘によって傾いたり、転倒したりする可能性もあるので、これを安定性にかかる構造的損傷モードとして考慮する。また、これらの表面の覆工（岩、又は地盤からなる築堤をコンクリートなどで覆ったもの）部分が基礎部からの浸水によって引きはがされ、倒壊する可能性もあるので、これを安定性にかかる構造的損傷モードとして考慮する。

2) 建物・構築物など

津波の波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による建物・構築物など（浸水防止設備を含む）の直接的な崩壊（自重支持機能及び安定性の喪失限界）及び局所的な機能喪失（海底砂の閉塞による機能喪失）に対して支配的な構造的及び機能的損傷モードを抽出する。**【附属書 L（参考）損傷モード及び部位の抽出例 参照】**その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響に留意する。

3) 機器・配管系

評価対象物の要求機能を踏まえて損傷モード及び損傷部位を選定する。屋外に設置され

た機器・配管系に対しては、津波の被水・没水、波力・浮力及び漂流物衝突による構造的及び機能的損傷に着目した損傷モード及び部位を選定する。

b) 屋内

1) 建物・構築物など

津波の波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による建物・構築物など（浸水防止設備を含む）の直接的な崩壊（自重支持機能及び安定性の喪失限界）及び局所的な機能喪失（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よる機器の機能喪失、及び、取水設備などの開口部及び貫通部からの浸水による機器の機能喪失）に対して支配的な構造的及び機能的損傷モードを抽出する。【附属書L（参考）損傷モード及び部位の抽出例 参照】その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響に留意する。

2) 機器・配管系

評価対象物の要求機能を踏まえて損傷モード及び損傷部位を選定する。屋内に設置された機器・配管系に対しては、建物・構築物の局所的な機能喪失後の浸水経路及び複数の津波による累積効果を考慮し、津波の被水・没水による機能的及び累積的損傷に着目した損傷モード及び部位を選定する。なお、内部溢水 PRA を実施している場合には、その評価結果に留意して選定する。

8.2.4 損傷評価の指標の選定

a) 損傷評価の指標

対象とする損傷モードにおける損傷の程度を表すことができる現実的応答量を損傷評価の指標とする。損傷評価の指標は、建物・構築物及び機器・配管系に対する津波による被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動に伴う機能喪失を表す物理量の遡上高、浸水高、堆積高、応力、変位などから適切に選定する。これらの物理量の選定に当たっては、津波に対する現実的耐力評価に係る指標に対応したものであること、及び津波による機能喪失に至る様々な要因（例えば、時間依存性など）も考慮する。

ここで定義する建物・構築物、機器・配管系などの損傷評価の指標とは、フラジリティ曲線（当該サイト海岸線での津波水位とこの水位による機能喪失確率との関係曲線）の横軸を規定する津波水位とは異なり、この津波水位で規定された津波が対象建物・構築物の場所まで浸水あるいは遡上した場合に、それらが機能喪失する損傷確率を求めるための指標である。

1) 建物・構築物など

建物・構築物及び津波防護施設・浸水防止設備の損傷モード・損傷部位に留意し、津波の波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による建物・構築物の損傷評価のための適切な指標を選定する。

2) 機器・配管系

機器・配管系の損傷モード・損傷部位に留意し、津波の被水・没水、波力・浮力及び漂流物衝突による機器の損傷評価のための適切な指標を選定する。ここで、津波の被水・没水による機器の損傷評価の指標としては、屋内及び屋外にかかわらず、当該機器周辺における津波の浸水高を用いてもよい。

b) 津波高さの指標

津波ハザード評価及び事故シーケンス評価と共通な指標を選定する。また、フラジリティ評価においては、津波の遡上評価などを踏まえて、建物・構築物及び機器・配管系の損傷評価の指標との相関に留意する。

津波高さの指標としては、7.1f) コントロールポイントで設定したコントロールポイントでの津波水位とする。

8.2.5 機器カテゴリの作成及びカテゴリごとの現実的耐力評価

機器のフラジリティ評価では、個別機器ごとに現実的耐力及び現実的応答の評価を行うことが一般的であるが、機器の構造・寸法・形状、動作機構、水密性、設置位置などに応じてカテゴリ分類を行うことによって、分類ごとに共通の評価・検討が可能となる場合があるので、カテゴリ分類ごとに評価・検討を行ってもよい。

8.2.6 不確実さ要因の分析

現実的耐力及び現実的応答の評価に当たっては、現実的耐力及び現実的応答の確率量（中央値及び標準偏差）に影響を及ぼす要因（以下、これらを総称して、“不確実さ要因”という。）を分析・抽出する。

なお、不確実さは、データ又は現象が持つ固有のランダム性による不確実さ（偶然的不確実さ）と解析手法又はモデル化における知識及び認識に係る不確実さ（認識論的不確実さ）に可能な範囲で分離して、整理する。【附属書 M（参考）フラジリティ評価の一般的な不確実さ要因 参照】

不確実さ要因の中から、現実的耐力及び現実的応答に対して有意に影響する主要な要因を抽出し、これらの主要なもののみによって現実的耐力及び現実的応答の評価を行ってもよい。

8.3 評価手法の選択

求められている評価用途及び精度に応じて、対象とする建物・構築物、機器・配管系の現実的耐力及び現実的応答評価のための評価手法を選択する。ここで、現実的応答評価のための津波パラメータの算定手法は、7.8.3 算定手法の選択に示された手法から選択する。また、各評価手法の選択に際しては、いずれかの手法を選択して評価してもよいし、適宜組み合わせる評価を実施してもよい。ただし、選択した評価手法の精度に応じて、認識論的不確実さを専門家による判断などに基づき適切に考慮する。なお、公開されていない新たな手法を選択してもよいが、その場合には、その手法の科学的合理性を定量的に示す必要がある。

8.4 現実的耐力の評価

8.4.1 現実的耐力評価における一般事項

8.2.3 損傷モード及び部位の抽出及び 8.2.4 損傷評価の指標の選定で設定した損傷モード及び損傷評価の指標の内容を反映するとともに、8.2.6 不確実さ要因の分析で検討した不確実さ要因を考慮して建物・構築物及び機器・配管系の現実的耐力を評価する。

建物・構築物及び機器・配管系の津波に対する設計・評価では、設計用津波水位及び設計用物性値などに対応した現実的応答（設計現実的応答）と許容値（設計現実的耐力）を使用する。これに対して、建物・構築物及び機器・配管系の fragility 評価では、津波による被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による機能喪失に至る現実的耐力及び現実的応答の確率分布を評価して、fragility 曲線の算定を行う。ここで、現実的耐力評価に際しては、シビアアクシデント対策に基づく浸水対策などを必要に応じて考慮する。【附属書 N（参考）シビアアクシデント対策に基づく浸水対策の例 参照】なお、津波 PRA への影響があるとして、地震 PRA などにおいて選定した評価対象物がある場合には、AESJ-SC-P006:2015 箇条 7.5 より 得られる地震による構造的損傷及び機能的損傷の影響を考慮し、7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価から求まる地震と津波の結合確率を踏まえて現実的耐力の評価に反映する。

津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による各損傷モードに対する現実的耐力評価の一般的な概念を図 8.4.1-1 に示す。ここでは、偶然的不確実さ及び認識論的不確実さを考慮した現実的耐力評価の基本的な考え方を記載する。

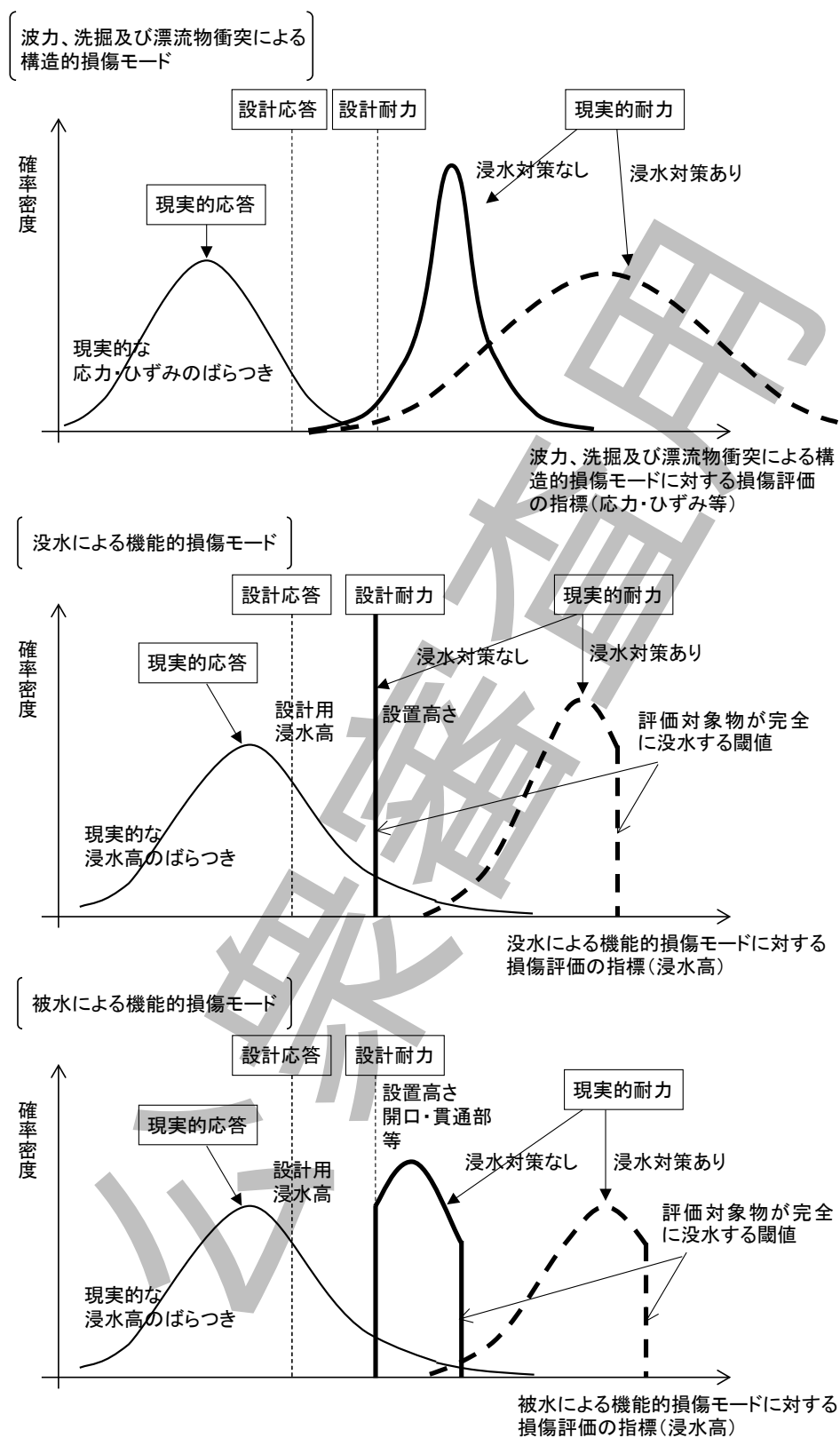


図 8.4.1-1 現実的耐力及び現実的応答の一般的な概念
(模式図, 現実的耐力: 太線, 現実的応答: 細線)

8.4.2 現実的耐力の評価方法

現実的耐力の評価には、各損傷モードに対応した対象部位における構造的損傷、機能的損傷又は累積的損傷に関する損傷限界を評価する。損傷限界の評価は次の方法による。

- 実験に基づく方法
- 実験を含む経験に基づく方法
- 解析を含む理論に基づく方法
- 工学的な判断に基づく方法

損傷限界は確率変数として評価されるため、いずれの方法によっても確定的な損傷限界しか与えられない場合には、材料物性値などを確率変数とした不確実さ解析手法を用いて損傷限界の不確実さを評価する。【附属書 O（参考）フラジリティ評価の不確実さ解析手法の選定 参照】ここで、材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、AESJ-SC-P006:2015 を参照してもよい。

特に複数の損傷モードに対して損傷限界を評価する場合には、使用する評価方法の精度、それぞれの損傷モードの重要性及び炉心損傷頻度に与える影響度に応じて、損傷限界の信頼度及び重要性は一律ではないことに留意する。また、現実的耐力に係る損傷限界の評価では、現実的応答評価の各要因との相関に留意する。なお、津波に対する現実的耐力の評価において、地震時の損傷モードと類似する場合には、AESJ-SC-P006:2015 に記載された現実的耐力の評価法を参照してもよい。

a) 建物・構築物など

8.2.3 損傷モード及び部位の抽出及び 8.2.4 損傷評価の指標の選定で抽出された損傷モード及び損傷評価の指標に対応した現実的耐力を評価する。その場合、8.2.6 不確実さ要因の分析で検討した現実的耐力評価に係わる不確実さ要因を考慮する。また、津波の押し波だけではなく、引き波による影響にも留意する。建物・構築物及び津波防護施設・浸水防止設備の現実的耐力の中央値及び標準偏差は、評価対象を適切に模擬した試験データを統計処理して評価する方法、数値解析を用いて評価する方法、及び各種基準類や既往知見などに記載された現実的耐力式を用いて評価する方法のいずれかの方法を用いて評価する。また、現実的耐力式の選定は、その適用範囲に留意する。上記に示すいずれによっても現実的耐力の評価方法がない損傷モードに対しては、工学的判断に基づき評価してもよい。ここで、現実的耐力の確率分布としては、津波の波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷モードに対しては対数正規分布を仮定してもよい。

b) 機器・配管系

機器・配管系に関して選定した損傷モード及び損傷評価の指標に対応した現実的耐力を評価する。屋外に設置された機器・配管系に対しては、津波の被水・没水による機能喪失に着目した機能的損傷モードに加えて、津波の波力・浮力及び漂流物衝突による機能喪失に着目した構造的損傷モードについて対象部位における現実的耐力を評価する。屋内に設置された機器・配管系に対しては、建物・構築物の局所的な構造損傷後の浸水経路及び複

数の津波による累積効果を考慮し、津波の被水・没水による機能的及び累積的損傷に着目した機能的及び累積的損傷モードについて、対象部位の設置位置に基づき現実的耐力を評価する。ここで、現実的耐力の確率分布としては、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対しては上下限値を有する確率分布を、津波の波力・浮力及び漂流物衝突による構造的損傷モードに対しては対数正規分布を仮定してもよい。なお、求められている評価用途及び精度などに応じて、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力をステップ関数として取り扱ってもよい。ただし、被水によるステップ関数の設定に関しては、浸水経路などを踏まえた保守性に留意する。

8.5 現実的応答の評価

8.5.1 現実的応答評価における一般事項

8.2.3 損傷モード及び部位の抽出及び 8.2.4 損傷評価の指標の選定で設定した損傷モード及び損傷評価の指標の内容を反映するとともに、8.2.6 不確実さ要因の分析で分析した不確実さ要因を考慮して建物・構築物及び機器・配管系の現実的応答を評価する。

建物・構築物及び機器・配管系の津波に対する設計・評価では、設計用津波水位及び設計用物性値などに対応した現実的応答を求める。一方、フラジリティ評価においては、津波による浸水高及び流速などの不確実さ並びに保守性を踏まえて、津波に対する現実的応答の確率分布を算定する。なお、津波 PRA への影響があるとして、地震 PRA などにおいて選定した評価対象物がある場合には、AESJ-SC-P006:2015 箇条 7.5 より得られる地震（本震及び津波経験前の余震）による構造的損傷及び機能的損傷の影響を考慮し、7.7.5 地震と津波の結合確率の評価から求まる地震と津波の結合確率を踏まえて現実的応答の評価に反映する。また、津波経験後の余震による現実的応答評価に資するため、津波による構造的損傷及び機能的損傷の影響を必要に応じて評価する。

津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による各損傷モードに対する現実的応答評価の一般的な概念を図 8.4.1-1 に示す。現実的応答の評価に当たっては、不確実さ要因の分析結果に基づき、現実的応答評価に有意な影響を与えるものを考慮する。

8.5.2 現実的応答の評価方法

各損傷モードに対応した対象部位における構造的損傷、機能的損傷又は累積的損傷を評価するために、7.8 で算定した津波による浸水高、波力・浮力、流速、漂流物の衝撃荷重及び海底砂の移動量・範囲などの津波作用パラメータに基づき、次の方法によって現実的応答を評価する。

- 実験に基づく方法
- 実験を含む経験に基づく方法
- 解析を含む理論に基づく方法
- 工学的な判断に基づく方法

津波による浸水高、波力・浮力及び流速などに関連する現実的応答は確率変数として評価されるため、いずれの方法によっても確定的な現実的応答値しか与えられない場合には、評価方法を構成する各因子を確率変数とした不確実さ解析によって現実的応答の不確実さを評価する。**【附属書 O（参考）フラジリティ評価の不確実さ解析手法の選定 参照】**ここで、材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、AESJ-SC-P006:2015 を参照してもよい。

特に複数の損傷モードに対して現実的応答を評価する場合には、使用する評価方法の精度、それぞれの損傷モードの重要性及び炉心損傷頻度に与える影響度に応じて、現実的応答の信頼度及び重要性は一律ではないことに留意する。また、現実的耐力と現実的応答との相関性が大きい場合には、その影響を適切に考慮する。

ここで、津波による浸水高、波力・浮力及び流速などに関連する現実的応答の評価に当たっては、サイト周辺地域の隆起あるいは沈下に留意する。さらに、漂流物の衝撃荷重の確率論的な評価に当たっては、5.1.3 フラジリティ評価関連情報の収集・分析で得られる当該サイトに影響を与える可能性のある漂流物の諸元（位置・種類・頻度）に留意する。

a) 建物・構築物など

建物・構築物及び津波防護施設・浸水防止設備に関して選定した損傷モード及び損傷評価の指標に対応した現実的応答を評価する。その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響に留意する。津波の波力・浮力による構造的損傷モードに対しては、津波による浸水高及び流速などの評価に基づき津波の波力・浮力を算定し、現実的応答を評価する。**【附属書 B.1（規定）津波の波力に対する現実的応答の評価方法 参照】**

漂流物衝突による構造的損傷モードに対しては、漂流物の衝撃荷重の評価に基づき現実的応答を評価する。ここで、漂流物の衝撃荷重の評価方法の選定に際しては、漂流物の重量、衝突面積及び衝突速度などの適用範囲に留意する。**【附属書 P（参考）津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法 参照】**

洗掘などの構造的損傷モードに対しては、津波による浸水高、流速などに基づき、周辺地盤の洗掘深さ・範囲を算定し、建物・構築物の安定性に係る現実的応答を評価する。ここで、周辺地盤の洗掘深さ・範囲の評価方法の選定に際しては、建物・構築物の形状、地盤変動、浸水高及び流速などの適用範囲に留意する。**【附属書 P（参考）津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法 参照】****【附属書 Q（参考）洗掘解析例 参照】**

また、海底砂移動による閉塞などの機能的損傷モードに対しては、津波による海底砂の移動量・範囲の評価に基づき現実的応答を評価する。**【附属書 B.2（規定）海底砂移動に対する現実的応答の評価方法 参照】**

b) 機器・配管系

機器・配管系に関して選定した損傷モード及び損傷評価の指標に対応した現実的応答を評価する。その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響に留意する。

屋外に設置された機器・配管系の津波の被水・没水による機能的損傷モードに対しては

津波による浸水高の評価に基づき現実的応答を評価する。

屋外に設置された機器・配管系の津波の波力・浮力による構造的損傷モードに対しては、津波による浸水高及び流速などの評価に基づき津波の波力・浮力を算定し、現実的応答を評価する。【附属書 B.1（規定）津波の波力に対する現実的応答の評価方法 参照】

屋外に設置された機器・配管系の漂流物衝突による構造的損傷モードに対しては、漂流物の衝撃荷重の評価に基づき現実的応答を評価する。ここで、漂流物の衝撃荷重の評価方法の選定に際しては、漂流物の重量、衝突面積及び衝突速度などの適用範囲に留意する。

【附属書 P（参考）津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法 参照】

屋内に設置された機器・配管系の被水・没水による機能的及び累積的損傷モードに対しては、建物・構築物の局所的な構造損傷後の浸水経路及び複数の津波による累積効果を考慮し、当該機器周辺における浸水高で現実的応答を評価する。【附属書 R（参考）建屋の浸水解析例 参照】【附属書 S（参考）屋外重要土木構造物の溢水・浸水解析例 参照】

8.6 フラジリティの評価

8.6.1 一般事項

8.4 現実的耐力の評価によって得られる現実的耐力及び 8.5 現実的応答の評価によって得られる現実的応答を用いてフラジリティ曲線を算定する。

8.6.2 損傷確率の評価

8.3 評価手法の選択で選択した評価手法に基づき算定した現実的応答と現実的耐力から、7.7 津波ハザードの評価で設定した津波高さに対して離散的に損傷確率を評価する。ただし、津波高さは、炉心損傷頻度に対して大きな影響を及ぼす範囲を考慮して設定する。

離散的に得られた損傷確率を用いて、最小 2 乗法などによって対数正規累積分布関数などで近似して連続的なフラジリティ曲線を算定してもよい。

8.6.3 現実的耐力の評価

8.4 現実的耐力の評価に記載された現実的耐力の評価手順に基づき、建物・構築物及び機器・配管系などそれぞれに対する現実的耐力の中央値及び標準偏差を評価する。

8.6.4 現実的応答の評価

8.5 現実的応答の評価に記載された現実的応答解析に基づく現実的応答の評価手順に基づき、建物・構築物及び機器・配管系などそれぞれに対する現実的応答の中央値及び標準偏差を評価する。

8.6.5 フラジリティ曲線の算定

a) 偶然的不確実さに対するフラジリティ曲線の算定

任意の津波高さ A に対する損傷確率 $F(A)$ の算定方法の概念を図 8.6.5-1 に示す。 $F(A)$ は、(8.6.5-1) 式に示すように津波高さがある値 A のときの現実的応答 $f_R(A, x)$ が現実的耐力 $f_S(x)$ を上回る条件付損傷確率として算定する。

$$F(A) = \int_0^{\infty} f_S(x_R) \left(\int_{x_R}^{\infty} f_R(A, x) dx \right) dx_R = \int_0^{\infty} f_R(A, x_R) \left(\int_0^{x_R} f_S(x) dx \right) dx_R \quad (8.6.5-1)$$

現実的応答 $f_R(A, x)$ は、中央値 $R_m(A)$ 、対数標準偏差 $\beta_R(A)$ の対数正規分布として次式で表される。

$$f_R(A, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_R(A) \cdot x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x/R_m(A))}{\beta_R(A)}\right)^2\right\} \quad (8.6.5-2)$$

一方、現実的耐力 $f_S(x)$ も中央値 S_m 、対数標準偏差 β_S の対数正規分布として次式で表される。

$$f_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_S \cdot x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x/S_m)}{\beta_S}\right)^2\right\} \quad (8.6.5-3)$$

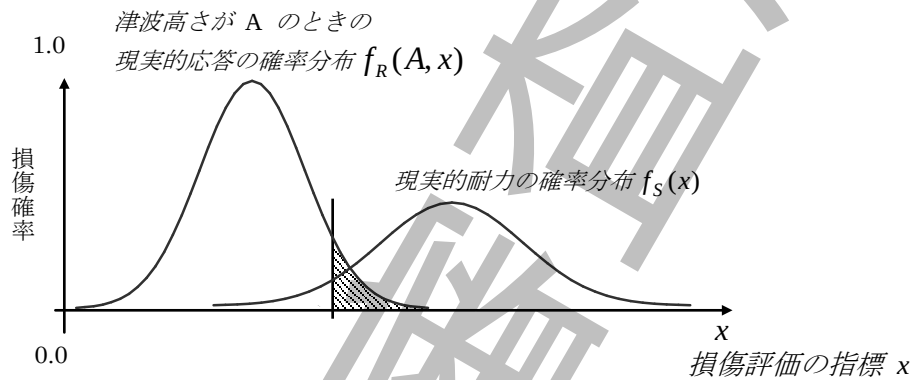


図 8.6.5-1 損傷確率 $F(A)$ の算定方法（模式図）

任意の津波高さ A を連続的に与えて損傷確率を求めると、結果としてフラジリティ曲線が得られるが、 A ごとの計算量が膨大となるので、図 8.6.5-2 に示すように離散的に得られた損傷確率を用いて最小 2 乗法などによって内挿してフラジリティ曲線を算定してもよい。

最小 2 乗法などによって対数正規累積分布関数などで近似して連続的なフラジリティ曲線を算定する場合、近似を仮定する分だけ、不確かさが増えることに留意する。

また、津波フラジリティ評価は、遡上及び浸水経路に大きく依存するため、7.8.2 津波パラメータの算定手順に従い、複数の津波防護施設（防潮堤及び防潮壁）及び浸水防止設備（水密扉等）の構造的及び機能的損傷が現実的応答に与える影響を、浸水区画を整理・分析することなどによって適切に考慮する。

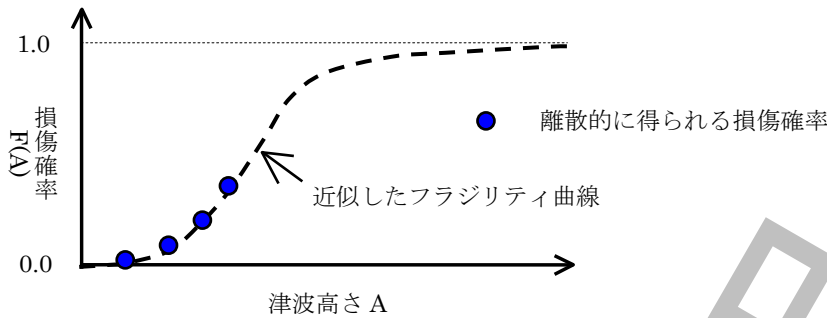


図 8.6.5-2 近似したフラジリティ曲線（模式図）

b) 認識論的不確実さに対するフラジリティ曲線の算定

8.6.5a) 偶然的な不確実さに対するフラジリティ曲線の算定で得られるフラジリティ曲線の不確実さは主として確率変数として考慮できる偶然的な不確実さであり、現実的耐力評価及び現実的応答評価において確率変数として考慮していない要因及び認識論的不確実さは、**8.6.5a) 偶然的な不確実さに対するフラジリティ曲線の算定**で得られる偶然的な不確実さに対するフラジリティ曲線に、以下に示す確率論的な考え方などを適用して信頼区間を含むフラジリティ曲線を算定する。ここで、選択した評価手法の精度などに対応するフラジリティ曲線の認識論的不確実さに関しては、専門家による判断などに基づきその値を適切に設定する。

現実的耐力の対数標準偏差 $c\beta_s$ は、偶然的な不確実さ要因を表す対数標準偏差 β_s^r と認識論的不確実さ要因 β_s^u が互いに独立であると仮定すると、次式で表される。

$$c\beta_s = \sqrt{(\beta_s^r)^2 + (\beta_s^u)^2} \quad (8.6.5-4)$$

同様に、現実的応答の対数標準偏差 $c\beta_R$ も、偶然的な不確実さ要因を表す対数標準偏差 β_R^r と認識論的不確実さ要因 β_R^u が互いに独立であると仮定すると、次式で表される。

$$c\beta_R = \sqrt{(\beta_R^r)^2 + (\beta_R^u)^2} \quad (8.6.5-5)$$

一方、偶然的な不確実さ要因及び認識論的不確実さ要因を考慮した損傷確率 $F(A)$ は、次式で表される。

$$F(A) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{A}{Am} \right) + c\beta^u \cdot X}{c\beta^r} \right) \quad (8.6.5-6)$$

また、 $c\beta^r$ は偶然的な不確実さ要因の対数標準偏差、 $c\beta^u$ は認識論的不確実さ要因の対数標準偏差を表し、 X はフラジリティ曲線の信頼度 p に対応する標準正規確率変量（ $=\Phi^{-1}(p)$ ）を表す。ここで、 $c\beta^r$ 及び $c\beta^u$ は次のように表される。

$$c\beta^r = \sqrt{(\beta_s^r)^2 + (\beta_R^r)^2}$$

$$c\beta^u = \sqrt{(\beta_s^u)^2 + (\beta_R^u)^2}$$

また、 X を例示する。

$p=5\%$ 信頼度のとき $X=-1.65$

$p=50\%$ 信頼度のとき $X=0$

$p=95\%$ 信頼度のとき $X=1.65$

p が 5, 50, 95%のときの fragility 曲線を図 8.6.5-3 に示す。図において、 $c\beta^r$ は fragility 曲線の傾きに寄与し、 $c\beta^u$ は fragility 曲線の信頼度の幅に寄与する。

一方、式 (8.6.5-6) による fragility 曲線は信頼度に応じた曲線を示しているが、その平均的な曲線は $c\beta^r$ と $c\beta^u$ の二乗和平方根 $c\beta$ を用いた (8.6.5-7) 式で表される。

$$F(A) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{A}{\bar{A}m} \right)}{c\beta} \right) \quad (8.6.5-7)$$

ここで、 $c\beta$ は次式で表される。

$$(c\beta)^2 = (c\beta^r)^2 + (c\beta^u)^2 \quad (= (c\beta_s)^2 + (c\beta_R)^2)$$

式 (8.6.5-7) による fragility 曲線を図 8.6.5-3 中に示す。この曲線は一般にコンポジット・fragility 曲線と呼ばれる。この曲線は認識論的不確実さ要因が含まれている分、曲線の傾きが 50%信頼度の曲線に比べ滑らかになっている。それは $c\beta^u$ の分だけ対数標準偏差が大きいためである。

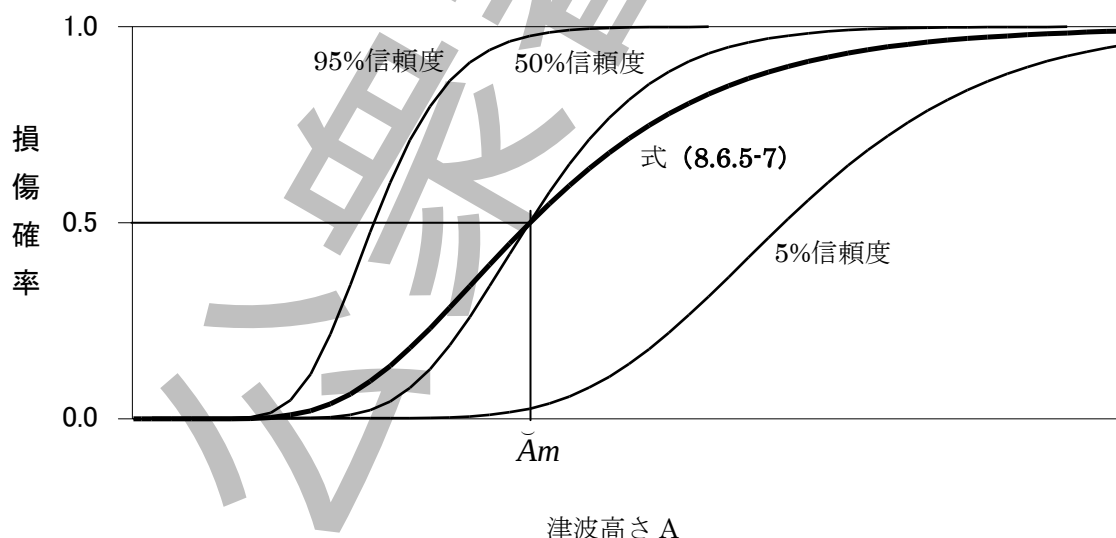


図 8.6.5-3 (8.6.5-6)及び(8.6.5-7)式による fragility 曲線の概念図 (模式図)

なお、現実的耐力評価で考慮した浸水対策の有無に着目した、津波の被水・没水、波力・浮力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による各損傷モードに対する fragility 曲線の一般的な概念を図 8.6.5-4 に示す。

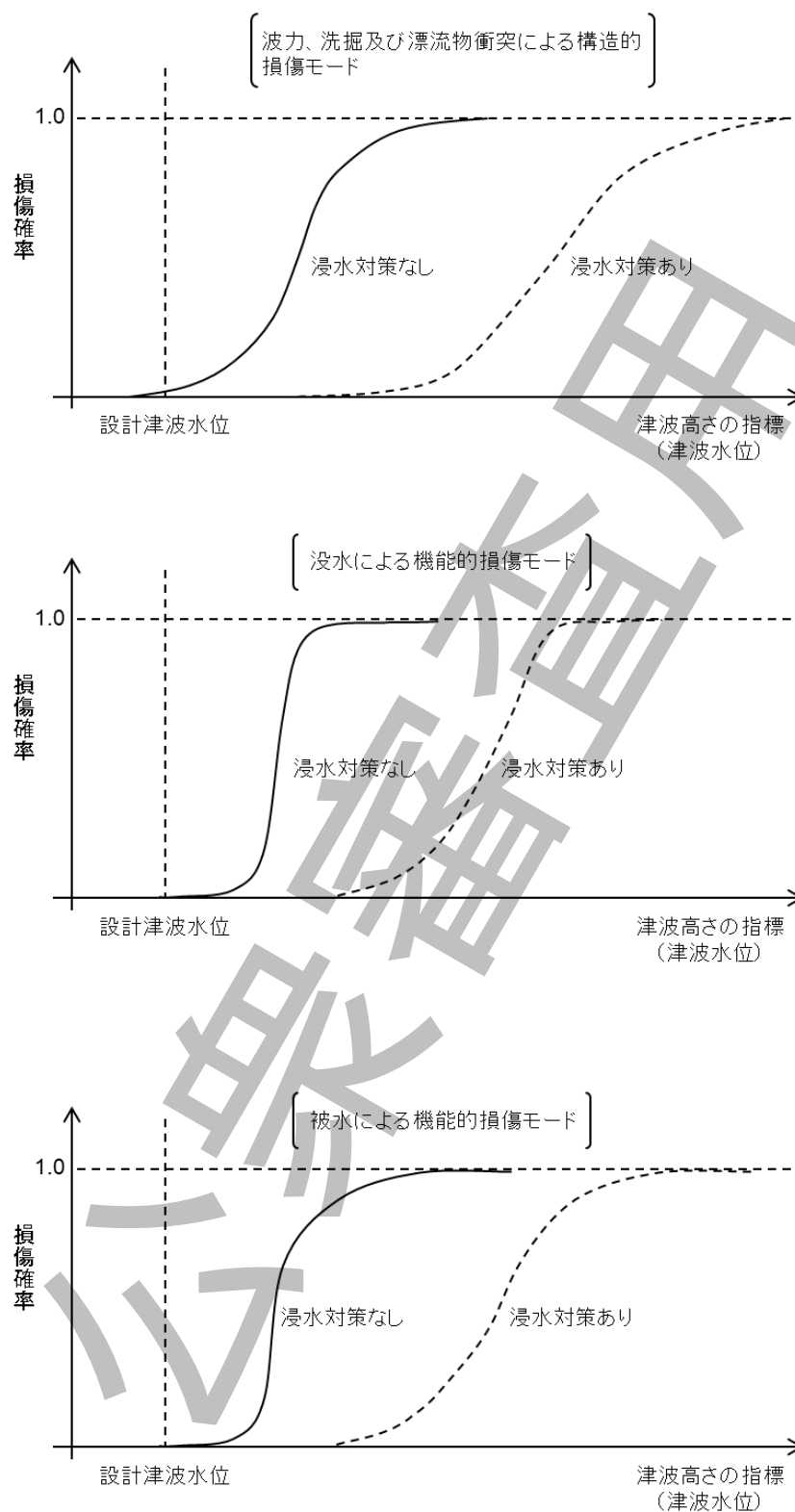


図 8.6.5-4 浸水対策の有無に着目したフラジリティ曲線の一般的な概念 (模式図)

9. 事故シーケンス評価

9.1 事故シーケンス評価の流れ

5.プラント構成・特性及びサイト状況の調査, 6.事故シナリオの同定, 7.津波ハザード評価, 及び 8.建屋・機器フラジリティ評価によって得られた情報を用い, 炉心損傷頻度上重要な事故シーケンス, SSCsなどを同定して, 起因事象の設定, 事故シーケンスのモデル化及びシステムのモデル化を行う。その際, 6.6 建屋・機器リストの作成で作成された建屋・機器リストを用いる。また, モデル化を行う過程において, 建屋・機器リストから追加又は不要となる機器などが生じた場合には建屋・機器フラジリティ評価との調整を実施し, 建屋・機器リストの見直しを行う。【附属書 A.6 (規定) 建屋・機器リストの作成 参照】このモデルを用いて, 事故シーケンスの定量化を実施し, プラントの津波による炉心損傷頻度などを算出すると共に, 主要結果に対する分析を実施する。さらに, 炉心損傷頻度などの不確実さと PRA の結果に影響する因子の感度を把握するため, 不確実さ解析及び感度解析を実施する。

事故シーケンス評価は, 次の手順に従って実施する。(図 9.1-1 参照)

a) 起因事象の設定

6.事故シナリオの同定で明確化した事故シナリオを分析して, 津波によって誘発される起因事象, 並びに, 起因事象をもたらす SSCs を設定する。

b) 事故シーケンスのモデル化

津波に起因して炉心損傷に至る事象の進展を評価するために, 事故シーケンスのモデル化を行い, 事故シーケンスをイベントツリーとしてモデル化する。モデル化に当たっては, まず, 9.1a)起因事象の設定で設定した起因事象に対し, 炉心損傷を防止するために必要な安全機能を選定する。次いで, 各機能に係る設備の組合せを成功基準として設定する。そして, これらを踏まえて炉心損傷防止に必要な機能に対応する設備の動作/不動作をモデル化してイベントツリーを作成する。イベントツリーの作成では, 系統間の従属性, 機器間の従属性を考慮しながら必要なフロントライン系及びサポート系をツリーのヘディングとする。

c) システムのモデル化

9.1b)事故シーケンスのモデル化において作成したイベントツリーのヘディングに含まれるシステムの津波時における信頼性(損傷確率)を評価するために, 各システムの論理モデルをフォールトツリー手法によって構築する。

以上の 9.1a)～c)の各評価作業においては, 既往の地震 PRA 結果及び津波 PRA 結果などで炉心損傷頻度に寄与すると判断される SSCs など, 及びサイト・プラントウォークダウンで得られた知見も適宜評価に反映するように留意する。

d) 事故シーケンスの定量化

イベントツリー及びフォールトツリーを用いて, 事故シーケンスの発生頻度及び炉心損傷頻度を不確実さも含めて評価する。評価では, 7. 津波ハザード評価の結果, 8.建屋・機

器フラジリティ評価の結果を事故シーケンス評価の入力情報として用いるため、それぞれの評価における重要なパラメータを感度解析によって求める。また、炉心損傷頻度に影響を与えるシステム及び機器それぞれの寄与割合などを重要度指標として評価する。さらに、評価上の重要な仮定及び前提条件などが炉心損傷頻度に与える影響の感度を感度解析によって求める。以上の評価、解析においては、損傷の相関性も考慮する。

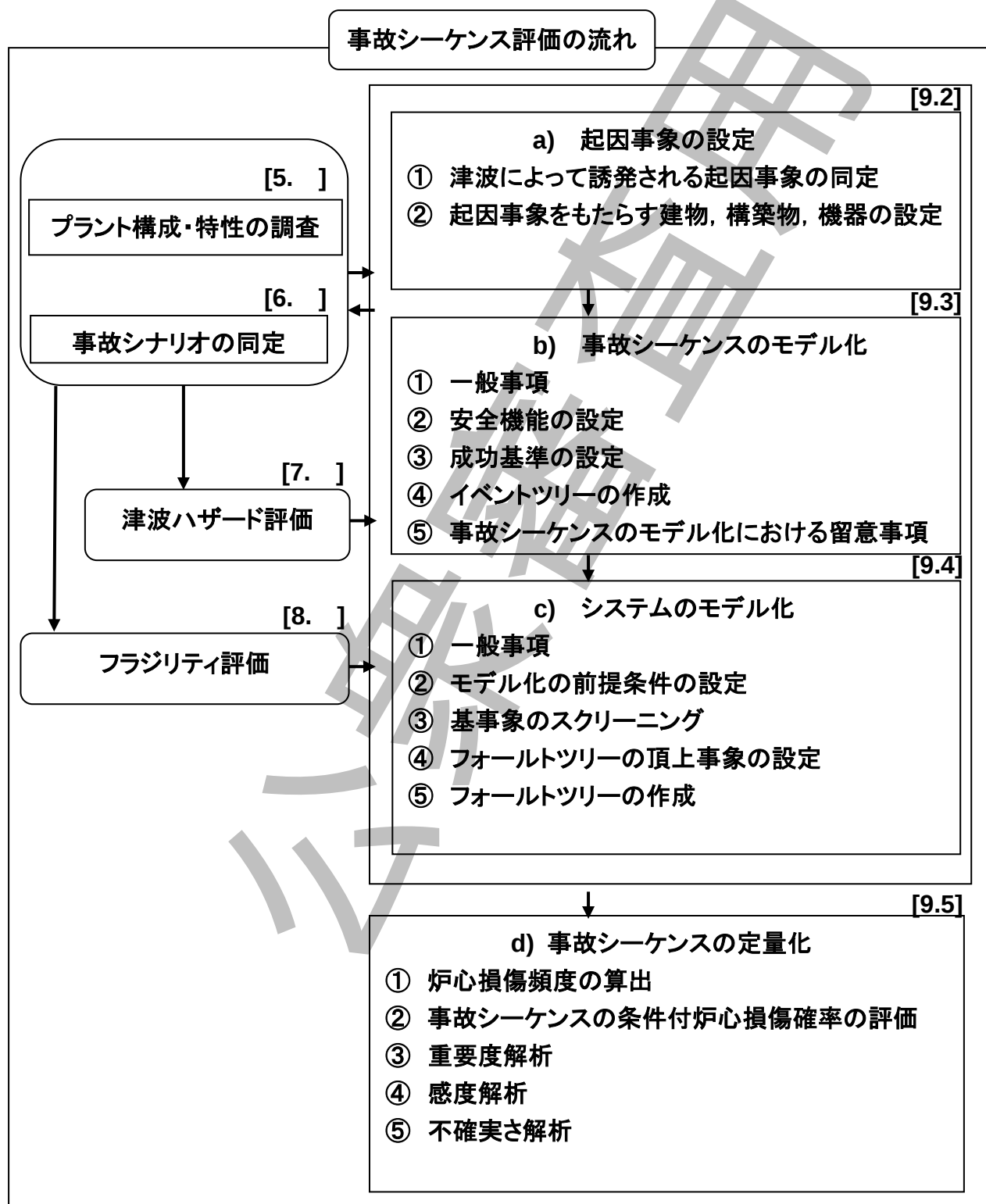


図 9.1-1 事故シーケンス評価フロー

9.2 起因事象の設定

9.2.1 津波によって誘発される起因事象の同定

6.5 起因事象の分析の結果から、津波による SSCs の損傷によって誘発される起因事象を設定する。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は、津波到達時に原子炉が停止しているものとしてもよい。その際、原子炉停止から津波到達までの時間を特定できない場合には、津波到達時に原子炉が停止するものとして、事故シナリオにおける時間余裕を設定する。【附属書 T.1（参考）津波到達時の原子炉の停止状態 参照】【附属書 T.2（参考）津波によって誘発される起因事象 参照】

9.2.2 起因事象をもたらす SSCs の設定

9.2.1 津波によって誘発される起因事象の同定で設定した起因事象を対象として、6.6 建屋・機器リストの作成で作成された建屋・機器リストを用い、これらの起因事象に係る SSCs を設定するとともに、これらの起因事象が発生した場合の緩和設備の状態などを明確にする。

他の起因事象との同時発生を組み合わせを絞り込む方法として、起因事象の階層化を行ってもよい。【附属書 T.3（参考）起因事象の階層化 参照】

9.3 事故シーケンスのモデル化

9.3.1 一般事項

事故シーケンスのモデル化では、まず、9.2 起因事象の設定で設定した起因事象ごとに、津波後に炉心損傷を防止するために必要な安全機能の選定を行う。次いで、6.6 建屋・機器リストの作成で作成された建屋・機器リストを用い、安全機能の確保に必要な設備及び設備数の組合せの成功基準の設定を行う。そして、これらを踏まえて安全機能を達成するための設備及び操作の成功・失敗をモデル化して、イベントツリーの作成を行う。モデル化を行う過程において、建屋・機器リストから追加又は不要となる機器などが生じた場合には建屋・機器フラジリティ評価との調整を実施し、建屋・機器リストの見直しを行う。

【附属書 A.6（規定）建屋・機器リストの作成 参照】

9.3.2 安全機能の設定

設定した起因事象に対し、評価対象プラントの設計、手順書及び運転方法に基づいて、炉心損傷を防止するために必要な安全機能として、“反応度制御機能”，“炉心冷却機能”，及び“格納容器除熱機能”を設定する。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は、原子炉が停止しているものとし，“反応度制御機能”を設定しなくてもよい。【附属書 T.1（参考）津波到達時の原子炉の停止状態 参照】【解説 2.2 地震による影響の考慮について 参照】

また、評価対象プラントの特性に応じて、個別にこれらと異なる安全機能を設定してもよい。

9.3.3 成功基準の設定

成功基準の設定においては、プラント応答解析を行うか、設計情報を適切に評価することによって、安全機能を達成するために必要とされる緩和設備又は緩和操作の組合せ並びに、緩和設備及び緩和操作がその機能を達成するために必要な条件を同定する。プラント応答解析としては、評価目的に応じて、原子炉設置許可申請書又は先行 PRA 報告書を参照するとともに、必要に応じて適用性が検証された解析コードによる詳細解析を実施する。成功基準の基本的な設定は次に従う。

- a) 事故シーケンスに関連する安全機能確保のためのフロントライン系、及びそれらに係るサポート系を選定する。
- b) 上記フロントライン系、及びそれらのサポート系の動作に必要な SSCs 数又はそれらの組合せを明記する。
- c) 起因事象発生時のプラント状態を考慮して、成功基準の中で同定した緩和設備が要求される安全機能を果たすために必要な運転時間である使命時間を次の 1) の観点から設定する。また、シビアアクシデント対策により安全機能を維持する必要がある場合には、使命時間に相当するシビアアクシデント対策の利用が有効となる時間を次の 2) の観点から設定する。
 - 1) 事故シナリオの特性及び緩和設備の能力に基づいて、安定したプラント状態をもたらす時間、又は必要な安全機能を果たすことができる時間
 - 2) 運転を継続している当該設備と同じ安全機能を有する設備（可搬設備を含む）の復旧、支援などにより、必要な安全機能を達成する手段の多様性に期待できるまでの時間
- d) 機器の作動に必要な運転操作を確認し、手動起動する機器については、プラント応答解析などによって時間余裕を設定する。特に、シビアアクシデント対策として整備された消防車又は電源車などに期待する場合には、作業員及び資機材の確保、現場へのアクセス性、現場操作時間を考慮する。また、津波による漂流物の影響や地震による構内通行道路の影響の他、可搬設備の繋ぎ込み先の耐震性などについても考慮する。【附属書 U（参考）津波に対する緩和策の時間余裕の設定例 参照】
- e) 津波到達後特有の復旧操作（代替手段による機能回復を含む）の要件として、次の点を満足するかどうかを分析し、どれかひとつでも満足しない場合は、復旧操作を成功基準として設定しないものとする。

- ・復旧のための作業員、作業用設備、及び／又は交換部品の確保
- ・評価対象設備へのアクセス性（物理的な影響又は作業員安全確保の観点）
- ・復旧完了の要求時間に対する復旧所要時間の確保
- ・電源融通など、複数のプラントで共用、融通する設備についての隣接プラントの健全性

9.3.4 イベントツリーの作成

イベントツリーの作成においては、ヘディングを選定し、ヘディングの成功又は失敗を組み合わせることによって、イベントツリーを展開する。^{3), 4)}

a) ヘディングの選定

ヘディングとしては、津波に引き続き発生する、プラントの事故に至る起因事象、緩和機能を達成するフロントライン系、並びに事象の進展に影響する設備の状態及び運転員操作などを選定する。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は、地震動による直接の緩和機能の機能喪失はないものとして、期待してもよい。

b) イベントツリーの展開

緩和機能の状態に基づいて、炉心損傷に至る事象シーケンスを起因事象ごとに網羅的に展開する。起因事象の階層イベントツリーを用いる場合には、各起因事象を引き継いでイベントツリーを展開する。【附属書 V（参考）小イベントツリー法と大イベントツリー法参照】

9.3.5 事故シーケンスのモデル化における留意事項

a) 津波の波力又は間接的な被災（漂流物の衝突など）などによって SSCs の損傷が発生する場合は、炉心損傷に直結すると想定することなく、最適評価並びに不確かさ評価を行うことが望ましい。ただし、例えば大型漂流物の衝突による大規模な原子炉建屋の損傷のように炉心損傷に至る事故シナリオを現実的に設定することが、著しく困難又は必要でない場合は保守的に炉心損傷に直結すると想定してもよい。また、この場合には、安全機能の確保に必要な緩和設備の同定も困難であり、省略してもよい。

b) 津波高さが低くても、機能喪失確率の高い SSCs 並びにこのような設備に依存する SSCs は、津波浸水深の範囲によって、使用不可能と仮定して緩和設備から省略してもよい。

c) シビアアクシデント対策として整備された緩和設備、運転員操作も、安全機能を達成するために必要な緩和設備として同定してもよい。その際には、時間余裕、津波到達後の漂流物などによる物理的な影響又は津波警報発令下での作業員安全確保の観点もしくは地震による構内通行道路への影響から、緩和機能を期待する機器又は制御装置への人員のアクセスが妨げられる可能性などについて考慮する。

d) 建屋内の同一区画にある同種機器のように、津波脆弱性がほとんど一致する場合には、簡略的な扱いとして、複数の同種の系統、機器を個別に設定しなくてもよい。この場合には、例えば A 系、B 系の 2 系列から構成される系統であっても、1 系列のみで構成される系統と同等の成功基準としてもよい。

e) 津波の浸水高が小さくても、海底砂移動または長時間の引き波継続によって十分な取水ができない場合があることを考慮する。

f) 建屋内部への浸水が発生し、溢水の伝播を考慮する場合には、津波時特有な伝播経路として、津波による空調ダクトの破損、トレンチからの浸水などがあることを考慮する。

g) 地震動により、耐震性が低い機器が損傷する可能性や水密扉などの水密性能が劣化する可能性、道路の地割れや斜面崩壊によりバックアップ操作に必要な設備の現場までのアクセス性が阻害される可能性など、損傷の形態に依存した組み合わせ及び損傷の時期に依存した組み合わせについて考慮する。【附属書 A.3（規定）地震の影響を考慮した津波による

事故シナリオの広範な分析・選定 参照】

h) レベル 2PRA を実施する場合には、プラント損傷状態及びその発生頻度がレベル 2PRA へのインターフェイスとなるため、レベル 1PRA の事故シーケンスの最終状態をプラント損傷状態ごとに分類し、それらの状態に応じて発生頻度を設定できるように、格納容器健全性又はソースターム評価結果に重要な影響を与える因子のモデル化を行う。地震の影響を考慮した津波の場合には地震に起因した格納容器機能喪失の事故シナリオを含め、AESJ-SC-P006:2015 箇条 8.6 に準じて、格納容器健全性又はソースタームへの影響について考慮し、地震による影響を考慮する必要がない場合には、AESJ-SC-P008:2013 箇条 8.4 に準じて、津波特有の格納容器健全性又はソースタームへの影響について考慮する。

9.4 システムのモデル化

9.4.1 一般事項

システムのモデル化手法の 1 つに、フォールトツリー手法があるが、図 9.4-1 に示す手順で実施する。

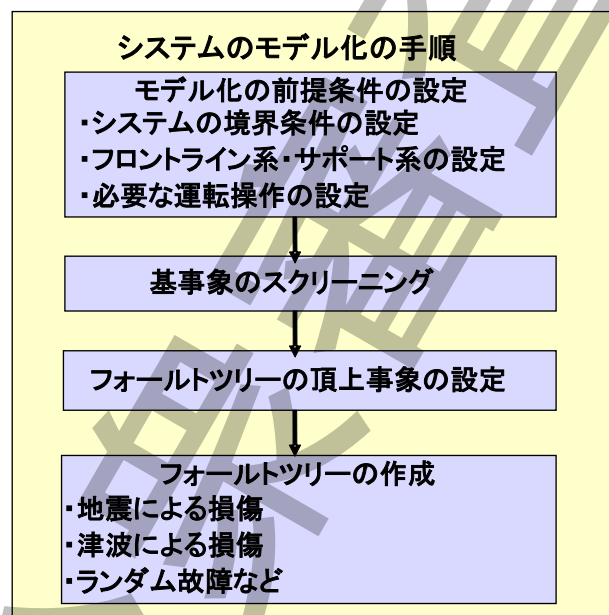


図 9.4-1 システムのモデル化の手順

9.4.2 モデル化の前提条件の設定

システムのモデル化においては、次の前提条件を設定する。その際、6.6 建屋・機器リストの作成で作成された建屋・機器リストを用いる。また、モデル化を行う過程において、建屋・機器リストから追加又は不要となる機器などが生じた場合には建屋・機器脆弱性評価との調整を実施し、建屋・機器リストの見直しを行う。【附属書 A.6 (規定) 建屋・機器リストの作成 参照】

a) システムの境界条件の設定 評価対象とするシステムの境界を設定し、他のシステムとの境界を明確にする。

b) フロントライン系・サポート系の設定 システムの機能確保のために、フロントライン系だけでなくサポート系も必要とする場合には、フロントライン系におけるサポート系との境界を明確にする。また、サポート系においても他のサポート系との境界を明確にする。

c) 必要な運転操作の設定 システムの作動に必要な運転操作を設定する。

9.4.3 基事象のスクリーニング

基事象の数が膨大になる場合には、次のスクリーニングの考え方に基づいて、基事象を定量化のプロセスから除外してもよい。

a) 評価対象機器の損傷確率が頂上事象に対して非常に小さい場合、その基事象は発生しないものとし、確率値を 0 とする。

b) “地震及び／又は津波による損傷確率が非常に高いと考えられる設備”と、“地震及び津波による損傷に関して現実的耐力が非常に大きい設備”との積事象の場合には、“地震及び／又は津波による損傷確率が非常に高いと考えられる設備”の確率値を 1 とし、地震及び／又は津波によって損傷するものとする。

9.4.4 フォールトツリーの頂上事象の設定

イベントツリーのヘディングごとに、対応するシステムの成功基準に基づいて、ヘディングが成立する条件を具体化し、頂上事象を設定する。フォールトツリーの頂上事象の設定にあたっては、次の事項を考慮する。

a) イベントツリーにおいて先行するヘディングにおけるシステムの成功・失敗に係る事故シーケンス上の前提条件（例：運転モードを変更する系統における先行の運転モードでの損傷の影響など）

b) イベントツリーで設定される分岐のシステム上の成立条件（サポート系の成功・失敗など）

c) システムの機能喪失に至る損傷の形態（系統数、機器数、運転操作など）及びシステムの運転状態

d) 損傷に関する時間条件（使命時間など）

9.4.5 フォールトツリーの作成

イベントツリーのヘディングに対応する各設備のフォールトツリーを、**9.4.2 モデル化の前提条件の設定**、及び **9.4.4 フォールトツリーの頂上事象の設定**に基づき作成する。既往の内的事象 PRA、地震 PRA などのフォールトツリーを参照してもよい。

フォールトツリーの要素として、地震による損傷、津波による損傷、ランダム故障などをモデル化する。なお、地震による損傷については、AESJ-SC-P006:2015 簡条 8.4.5 に準じてモデル化する。

a) 津波による損傷

対象となるシステムに関連する評価対象物について、**8.2.3 損傷モード及び部位の抽出**で検討した津波による損傷モードを基事象レベルで展開する。【附属書 W（参考）損傷モー

ドの検討時の作業フローの例 参照】

フォールトツリーでの津波による損傷のモデル化にあたっては、次の事項を考慮する。

- 1) 建屋の内部への浸水量に大きな影響を与える水密扉などの状態を考慮する。【**附属書 X（参考）水密扉の状態によるモデル化の考え方の例 参照**】
- 2) 建屋の水密扉の損傷によって建屋内への浸水量が大幅に増加することで複数の機器に影響が及ぶような場合には、フォールトツリー間での従属性を適切に取り扱う。【**附属書 X（参考）水密扉の状態によるモデル化の考え方の例 参照**】
- 3) 建屋内の同一区画にある同種機器など津波による損傷（脆弱性）に相関があるものとする場合にはどちらかの基事象でモデル化してもよい。
- 4) 津波による損傷の状況を考慮した上で、復旧操作をモデル化する場合には、9.4.5 b)1)～3)に関する項目を考慮する。

b) ランダム故障など

地震及び津波以外の機能喪失要因であるランダム故障などとして、次を考慮する。

- ・ 機器故障，試験，又は保守による待機除外
- ・ 人的過誤
- ・ 従属故障である共通原因故障

特に、人的過誤のモデル化については、次に示すように津波時特有の影響を考慮して適切に設定する。

機器の機能喪失に対して時間的な余裕が存在する場合には、運転員などによる機能復旧操作による対応を考慮する。人間信頼性解析手法としては THERP 手法を用いて、人的過誤の確率を体系的な方法で評価する。ただし、その適用性が説明できる場合には THERP 手法以外の手法を用いてもよい。津波が発生した場合の運転操作、復旧操作に関する事例及びデータはほとんどないことを踏まえ、次の点を考慮する。

1) **運転員操作** 津波後の混乱に伴う高ストレス状態は、中央制御室又は現場における運転員操作の阻害要因となることから、津波後の運転員操作の過誤確率の定量化において考慮する。

2) **復旧操作** 9.3.3 **成功基準の設定**で同定された復旧操作をモデル化する場合には、津波による、現場へのアクセス性（津波による漂流物の影響や地震による構内通行道路の影響など）、復旧作業員の確保、作業用設備の確保及び/又は交換部品の確保が妨げられる可能性を考慮する。

3) **ストレス因子の考慮** 一般に運転員操作の人的過誤確率（HEP）は、外的環境（温度、照明などの作業環境、タスクの特性、マンマシンインターフェースなど）、内的状態（経験、訓練などによって形成される知識及びスキル）、ストレスなどによって大きく影響される。津波時の運転員操作のストレスは通常時に比較して増加するため、HEP

の評価においては、この運転員のストレス増加を考慮する。また、津波時において運転員のストレス増加に与える要因としては、照明の有無などの不確実な要素が多く、HEP を過小評価、又は過大評価している可能性がある。過小な HEP が炉心損傷頻度などを過小評価していないか、また、ある因子の HEP を過大に評価したために、他の因子を過小評価したことが見過ごされていないかを確認するため、重要度解析の結果から重要度が高い運転員操作が存在する場合、HEP の上限値及び下限値に相当する仮定をおいた感度解析を実施して、HEP の影響を確認する。

9.5 事故シーケンスの定量化

9.5.1 炉心損傷頻度の算出

炉心損傷に至る事故シーケンス*i*の発生頻度 CDF_i は、津波ハザード曲線から求める津波高さ*h*における発生頻度 $h(h)$ 及び津波高さ*h*における地震動強さ*a*に対して炉心損傷に至る事故シーケンス*i*の条件付発生確率 $Q_i(h,a)$ を用い、次式によって求める。

$$CDF_i = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} h(h) \cdot P(h,a) \cdot Q_i(h,a) da dh \quad \dots\dots\dots (9.5.1-1)$$

$P(h,a)$ ：津波高さ *h* における地震動強さ *a* の結合確率

$h(h)$ は、津波ハザード曲線 $H(h)$ (津波高さ *h* を超える津波発生年の超過頻度)に基づき次式から求める。

$$h(h) = -\frac{dH(h)}{dh} \quad \dots\dots\dots (9.5.1-2)$$

(9.5.1-1)式の積分の上限、すなわち考慮する津波高さの上限 $h_{\max}$ は、津波ハザード曲線の傾向を踏まえ、炉心損傷頻度に対して大きな影響を及ぼさない津波高さを設定する。(9.5.1-1)式の積分の下限 $h_{\min}$ は原子炉施設に及ぼす津波の影響が無視できる津波高さ（安全に関連する機器の津波による損傷の下限など）とする。

また、引き波の評価を実施する場合には、(9.5.1-2)式の符号が正になること、(9.5.1-1)式の $h_{\max}$ と $h_{\min}$ の考え方が逆となることに留意する。

炉心損傷頻度 CDF_{Total} は炉心損傷に至るすべての事故シーケンス*i*の発生頻度 CDF_i の総和、すなわち次式によって求める。

$$CDF_{Total} = \sum_i CDF_i \quad \dots\dots\dots (9.5.1-3)$$

炉心損傷に至る事故シーケンス*i*の条件付発生確率 $Q_i(h,a)$ は 9.5.2 の手順で評価する。また、条件付炉心損傷確率（プラント脆弱性） $Q(h,a)$ を算出している場合には、(9.5.1-1)式において、 $Q_i(h,a)$ を $Q(h,a)$ と置き換えることで、直接炉心損傷頻度 CDF_{Total} を求める。

$$CDF_{Total} = \int_{h_{min}}^{h_{max}} \int_{a_{min}}^{a_{max}} h(h) \cdot P(h, a) \cdot Q(h, a) da dh \quad \dots\dots\dots (9.5.1-4)$$

地震による影響を考慮する必要がない場合には、(9.5.1-1) 式及び (9.5.1-4) 式は各々、津波高さ h に対する炉心損傷に至る事故シーケンス i の条件付発生確率 $Q_i(h)$ 、条件付炉心損傷確率（プラントフラジリティ） $Q(h)$ を用い、(9.5.1-5) 式及び (9.5.1-6) 式によって求める。

$$CDF_i = \int_{h_{min}}^{h_{max}} h(h) \cdot Q_i(h) dh \quad \dots\dots\dots (9.5.1-5)$$

$$CDF_{Total} = \int_{h_{min}}^{h_{max}} h(h) \cdot Q(h) dh \quad \dots\dots\dots (9.5.1-6)$$

9.5.2 事故シーケンスの条件付発生確率の評価

a) 事故シーケンスの定量化手法

炉心損傷に至る事故シーケンス i の条件付発生確率 $Q_i(h, a)$ は、8.建屋・機器フラジリティ評価の結果、9.4 システムのモデル化の津波時の人的過誤確率及び機器などのランダム故障確率などの評価結果、及び9.3 事故シーケンスのモデル化のイベントツリー、9.4 システムのモデル化のフォールトツリーを用いて評価する。また、対象とするすべての炉心損傷に至る事故シーケンスの条件付発生確率を統合することによって、条件付炉心損傷確率（プラントレベルのフラジリティ） $Q(h, a)$ を評価してもよい。

イベントツリー及びフォールトツリーで表現されるプラント損傷モデルに従い統合して事故シーケンスを定量化する手法には次のような方法があり、いずれかの手法を用いる。

【附属書 C（規定）事故シーケンスの定量化手法 参照】

- ・フォールトツリー結合法
- ・条件付分岐確率イベントツリー法

その適用性が説明できる場合には、これら以外の手法を用いてもよい。

b) 事故シーケンスのスクリーニング手法

種々のシビアアクシデント対策の有効性を評価するなどの、リスクの相対的な変化に着目する場合、炉心損傷頻度への影響の小さい事故シーケンスを除外し、主要な事故シーケンスのみに絞り込み、より効率的に事故シーケンス解析を実行してもよい。

この目的で事故シーケンスのスクリーニング解析を行う。スクリーニング解析は次の手順で実施する。

1) 起回事象ごとの主要シーケンスの選定

算出した最小カットセットの確率を単純加算することによって、炉心損傷に至る事故

シーケンスの発生確率を求め、各起因事象に対し約 10～30 程度の主要事故シーケンスを選定する。この段階では各起因事象に属する各事故シーケンス発生確率の相対的な大きさを求めるため、各起因事象の発生確率は 1 とする。次の **9.5.2b)2)詳細評価の対象とする寄与度の大きい事故シーケンスの選定**の段階で起因事象の発生確率を考慮する。

2) 詳細評価の対象とする寄与度の大きい事故シーケンスの選定

事故シーケンス全体での各シーケンスの発生確率による順位付けを行うため、**9.5.2b)1)起因事象ごとの主要シーケンスの選定**の起因事象別に選定した主要シーケンスに対して、選定した津波高さにおける階層ツリー処理後の各起因事象の発生確率を乗算する。この結果を用いて、上位 100 程度の事故シーケンスを詳細評価対象の事故シーケンスとして選定する。

c) 留意事項

津波事象の事故シーケンスの条件付発生確率の評価においては、次のような点に留意する。

- 1) 事故シーケンスの条件付損傷確率を求める際には、津波高さによって機器損傷確率が異なることに留意する。
- 2) 地震による損傷、津波による損傷及びランダム故障の機器損傷モードを考慮するため、事故シーケンス数が膨大になる。これを避けるため、炉心損傷頻度への影響が小さい事故シーケンスを評価対象から除外してもよい。この場合、スクリーニングの基準を明確にするとともに、津波による系統損傷・機器損傷の従属性及び損傷の相関性の情報が失われないように留意する。【附属書 Y（参考）条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの作成の例 参照】
- 3) 炉心損傷の事故シーケンスにおいて、一部の安全機能の成功を含み、かつ当該安全機能の成功確率を 1.0 で近似している場合には保守的な結果を与えることに留意する。
- 4) 津波高さが大きくなるにしたがって、機器の損傷確率が大きくなると、稀有事象近似（事象の発生確率を独立事象の確率の単純和で与える近似）が成り立たなくなる場合があることに留意する。
- 5) 上限近似（事象の発生確率を $1 - \prod(1 - \text{基事象の発生確率})$ で与える近似）を使用する場合には、損傷確率を過大評価する場合があることに留意する。

9.5.3 重要度解析

プラント又はシステムの、信頼性向上策又はリスクを低減するための方策を検討すること、現在のリスクレベルを維持するために重要な機器、システム、運転操作などを把握すること、並びにリスクに重要な影響を与える因子とその影響の程度を把握することなどの情報を得ることを目的に、重要度解析を実施する。

重要度解析では、機器の損傷又は故障、並びに人的過誤などの事象の生起確率を 1 又は 0 などの値に変更して、その変更が炉心損傷頻度又はシステムの機能喪失確率に及ぼす影

響の程度、リスクへの各事象の寄与度を算定する。

重要度の指標としては、リスク低減価値、リスク増加価値、Fussell-Vesely 指標などが提案されており、上記の目的に応じて、適切な指標を選択する。**【附属書 Z（参考）代表的な重要度指標 参照】**

津波 PRA において重要度解析を行う場合には、機器の損傷確率が津波高さに依存するため、リスクの指標とする炉心損傷頻度などのパラメータを評価する条件として、特定の津波高さにおける条件付炉心損傷頻度に対する評価であるか、又は全津波高さにわたる積分値の炉心損傷頻度に対する評価であることを明示する。

9.5.4 感度解析

津波 PRA で用いる種々の仮定、モデルの選択、データの選択などを対象として、それらとは異なる条件を用いた場合に炉心損傷頻度などの評価結果にどのように影響するかの感度を調べるために、感度解析を実施する。

感度解析の対象項目としては、重要と考えられる解析上の仮定、重要度解析の結果から重要度が高いと判明した機器損傷、計算結果として得られた支配的因子を含めて、評価結果に重要な影響を及ぼしうる仮定、モデル、データなどを選定する。**【附属書 AA.1（参考）感度解析項目の例 参照】**

感度解析の対象項目のうち、独立な解析によらなくても影響の程度を把握できる場合には、これらの対象項目が影響を及ぼす程度を炉心損傷頻度などの結果に合算するなどの簡略評価でもよく、詳細な定量的解析を行う必要はない。

感度解析は次の手順で実施する。

a) 感度解析項目の検討 基準ケースの仮定及び解析結果の検討に基づいて、感度解析項目及びその変更内容、変更値などを決定する。

b) 事故シーケンスの発生頻度の算定 各事故シーケンスのモデルを用いて、**9.5.4a)感度解析項目の検討**に対応する事故シーケンスの発生頻度を算定する。

なお、事故シーケンスのモデルを変更する必要がある場合には、事故シーケンスのモデルも含めて変更し、発生頻度を算定する。

c) 結果の検討 基準ケースの事故シーケンスの発生頻度との比較を行い、感度解析の対象とした項目が及ぼす影響を評価する。また、感度解析結果に基づいて、基準ケースで設定した仮定の妥当性及び事故シーケンスの発生頻度への寄与が大きい項目についての検討を行う。

9.5.5 不確実さ解析

津波ハザード、SSCs の現実的耐力、現実的応答などに含まれる不確実さ要因を対象として、不確実さの伝播を解析し、事故シーケンスの発生頻度及び炉心損傷頻度の分布、及び分布を表すパラメータ（平均値、中央値、5%信頼度値、95%信頼度値など）を求めるために、不確実さ解析を実施する。不確実さの伝播解析においては、次に示す手法を用いる。

【附属書 AA.2（参考）不確実さ解析の例 参照】

a) 事故シーケンスの条件付発生確率 $Q_i(h,a)$ 又は条件付炉心損傷確率 $Q(h,a)$ の不確かさは、機器などの損傷確率、津波時の人的過誤確率、及び機器などのランダム故障確率の不確かさを、プラント損傷モデルに従い統合することによって得られる確率分布として表す。

すなわち、認識論的不確かさ要因の対数標準偏差 $c\beta^u$ に関する信頼度別のフラジリティ曲線を準備し、基事象ごとにランダムにサンプリングした信頼度のフラジリティ曲線を用いてプラント損傷モデルに基づき事故シーケンスの条件付発生確率及び条件付炉心損傷確率を求め、この操作を繰り返すことによって事故シーケンスの条件付発生確率及び条件付炉心損傷確率の確率分布（信頼度分布）を求める。

b) 津波ハザード曲線の不確かさは、ハザード曲線群 $H(h)$ から（9.5.1-2）式を用いて求めた $h(h)$ の確率分布で表す。事故シーケンスの条件付発生確率 $Q_i(h,a)$ 又は条件付炉心損傷確率 $Q(h,a)$ の確率分布と津波の発生頻度 $h(h)$ の確率分布とのランダムな組合せに対し、津波高さについて畳み込み積分を行い、**9.5.1 炉心損傷頻度の算出**の手順にしたがい、炉心損傷頻度の確率分布を求める。

c) 得られた炉心損傷頻度又は事故シーケンス発生頻度の確率分布は、分布を表すパラメータ（平均値、中央値、5%信頼度値、95%信頼度値など）も合わせて求め整理する。

その適用性が説明できる場合には、これ以外の手法を用いてもよい。

10. 文書化

10.1 一般事項

津波 PRA の結果の利用、更新、専門家によるレビューにおいて、PRA の内容が容易に理解できるように文書化する。

また、品質を確保するために実施した、品質保証活動、専門家判断の活用及びピアレビューについて文書化する。【附属書 AB（参考）文書化項目の例 参照】

10.2 目的・範囲・結果及び手法などの文書化

津波 PRA 実施の目的、評価範囲、用いた手法、条件、モデル、パラメータ、評価結果などを追跡可能な詳細さで記述する。

10.3 規定への適合性の文書化

箇条4から箇条9に関して、実施した津波PRAがこの標準の具体的な規定を満足していることを示す。また、この標準の具体的な規定で許容されている除外事項又は例外事項を適用した場合には、その妥当性を示す。利用目的などに応じて複数の選択肢を示す項目については選択理由を、利用に際しての留意事項を記載している項目については、留意事項への対応を文書化する。

この標準に規定された以外のものを用いた場合はその妥当性について示す。

附属書 A (規定) 事故シナリオの同定における実施手順

序文

この附属書は、6. 事故シナリオの同定における実施手順を規定する。

A.1 津波による事故シナリオの広範な分析・選定

- 1) 津波による事故シナリオを見落としなく抽出・選定するために、まず、5. プラント構成・特性及びサイト状況の調査において収集する、既存の津波 PRA に関する情報、国内外の津波災害事例、関連する文献などの情報を利用する。
- 2) さらに、サイトの最新の状況、設計、運転管理などプラント及びサイト関連情報を元に、追加すべきサイト・プラント固有の影響の可能性を抽出する。
- 3) この標準にしたがって実施された先行津波 PRA に関する情報が利用できる場合には、抽出、整理した事故シナリオを比較し、妥当性を確認する。
- 4) レベル 1 PRA に引き続いてレベル 2 PRA を実施する場合には、格納容器健全性、ソースタームの観点で重要な事故シーケンスの見落としがないように留意する。

A.2 複数基立地サイトにおいて留意する事故シナリオ

複数基立地サイトでは、事故シナリオの同定に際して、以下のような可能性に留意する。

- a) サイト内の隣接する原子炉において SSCs が漂流物となるなどの間接的な津波影響が当該炉のリスク要因となる可能性
- b) 電源融通など、複数基で共用、融通するアクシデントマネジメント策が津波による従属的な影響のために利用できなくなる可能性
- c) 複数基で同時に運転員操作又はリカバリー対応が必要になった場合に、人的、物的資源の確保に支障をきたす可能性

このうち A.2.a) については、サイトの状況を踏まえて、その可能性を広範に選定、分析した上で、6.2 広範な事故シナリオのスクリーニングに示すスクリーニングを行う手順で対応する。スクリーニングで除外する場合は、漂流物の影響の有する大きな不確実さ要因の一部として取り扱うなど、工学的な判断が有効である。

A.2.b)、A.2.c) については、9. 事故シーケンス評価における人的過誤のモデル化の考え方と調整し、当該炉の対応操作を阻害する要因として考慮するか、スクリーニングで除外する場合は、影響の程度を感度解析などで明確にする。

A.3 地震の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定

地震の影響を考慮した津波による事故シナリオは、以下の観点から分析、選定する。

- ・地震による損傷と津波による損傷の組み合わせシナリオ
- ・損傷の形態に依存した組み合わせシナリオ
- ・損傷の時期に依存した組み合わせシナリオ

1)地震による損傷と津波による損傷の組み合わせシナリオ

地震による影響を考慮した津波による事故シナリオは、地震単独の PRA、津波単独の PRA に対して、図 A.1 に示す組合せシナリオのうちシナリオ 7、シナリオ 8、及びシナリオ 12 の 3 シナリオが追加となる。

レベル 1PRA に引き続いてレベル 2PRA を実施する場合には、格納容器健全性への影響に加え、ソースタームへの影響についても考慮し、これら 3 シナリオ以外にも地震による影響を考慮した津波において考慮すべきシナリオがないか（地震により炉心が損傷し格納容器機能も喪失するシナリオ 13~16 において、更に津波の影響によりソースタームに影響する場合など）を検討する。

2)損傷の形態に依存した組み合わせシナリオ

1)で選定した損傷の組み合わせには、損傷の形態によりさらに以下の 5 種類のシナリオが考えられることに留意して、事故シナリオを選定する。

- 2.1) 地震による機器などの損傷と、津波による別の機器などの損傷の組み合わせによるシナリオ
- 2.2) 地震による機器などの損傷に対して炉心損傷又は格納容器破損を防止するためのバックアップ操作を実施している場合に、津波によりそのバックアップ操作が阻害されるシナリオ
- 2.3) 津波による機器などの損傷に対して炉心損傷又は格納容器破損を防止するためのバックアップ操作を実施する際に、地震によりバックアップ操作に必要な機器などが既に損傷しているためにバックアップ操作が阻害されるシナリオ
- 2.4) 地震により水密扉などの水密性能が劣化するような影響が生じ、その後の津波到来時に水密性の機能が喪失する、或いは、地震により水密扉などが損傷し、その後の津波到来時に漂流物が衝突する、などによって炉心損傷、又は格納容器破損に至るシナリオ。
- 2.5) 地震による起因事象発生後の長期安定冷却のための対応を阻害するような中長期にわたる津波による影響シナリオ。レベル 1PRA に引き続いてレベル 2PRA を実施する場合には、放射性物質の環境への放出を抑制するための対応を阻害するような中長期にわたる津波による影響シナリオ

3)津波到来の時期に依存した組み合わせシナリオ

1)及び 2)の観点に加え、以下に示すような津波到来の時期に依存した組み合わせシナリオも考慮して事故シナリオを選定する。

- 3.1) 地震による損傷が発生し、炉心損傷防止、又は格納容器破損防止のための対応を行っている時期（比較的短時間経過後）に津波による損傷が発生し、対応が阻害されるシナリオ
- 3.2) 地震による損傷が発生し、炉心損傷防止、又は格納容器破損防止のための対応が成功してプラントが安定状態に至った時期（比較的長時間経過後）に津波による損傷

が発生し、炉心損傷又は格納容器破損に至るシナリオ

- 3.3) レベル 1PRA に引き続いてレベル 2PRA を実施する場合には、地震によりシビアアクシデントが発生し、放射性物質の環境への放出を抑制する対応の継続中（中長期経過後）に津波が発生して対応が阻害されるシナリオ
- 3.4) これらの地震による損傷後の津波による損傷に前後して、余震による損傷の影響が加わるシナリオ
- 3.5) さらに津波の繰り返し加わるシナリオ

A.4 広範な事故シナリオのスクリーニング

1) 炉心損傷に繋がる可能性の定量的判断

事故シナリオの発生及び炉心損傷に繋がる可能性を次の手法で判断する。

- 1.1) 対象設備の津波による機能喪失確率などを用いて、当該事故シナリオの発生の可能性を評価し、波及的な影響を及ぼす可能性がある設備の機能喪失確率又は炉心損傷確率などと比べて、スクリーニングで除外できるか否かを判断する。
- 1.2) スクリーニングで除外されない事故シナリオについては、炉心損傷頻度の評価まで可能かどうか着目し、次の取扱いとする。
 - 1.2.1) 炉心損傷頻度評価が実施可能な場合には、事故シーケンス評価の対象とする。
 - 1.2.2) 炉心損傷頻度評価が実施困難な場合には、感度解析で影響の度合いを確認し、当該事象がリスク要因となり得ることを報告書に留意事項として記載する。

2) 炉心損傷に繋がる可能性の工学的判断

炉心損傷に繋がる可能性を次の手法で工学的に判断する。

- 2.1) 決定論的に評価した情報に基づき判断する。
- 2.2) 運用面での対策・対応に関する情報に基づき判断する。
- 2.3) ウォークダウンによって得た情報に基づき判断する。
- 2.4) 炉心損傷頻度の定量評価が現行技術では難しいものの、工学的判断によって除外できない事故シナリオについては、リスク要因となり得ることを報告書に記載する。

A.5 起因事象の分析

1) 起因事象の分類

事象の進展が類似している複数の起因事象を一つの起因事象として分類する。起因事象の分類は以下の観点から行う。

- 1.1) 事象の展開が類似しており、同様な緩和設備を必要とする複数の起因事象を一つの起因事象に分類する。
- 1.2) 起因事象の発生による影響を厳密に考慮することが困難な場合、又は複数の起因事象を詳細に区別したとしても評価結果に有意な違いが生じないと判断できる場合には、この起因事象に対する緩和設備には期待しない、又はより厳しい条件となる起因事象に包含させるなど、保守的に簡略化してもよい。
- 1.3) SSCs の機能喪失の可能性が非常に小さく、起因事象の発生確率として無視できる

と判断する場合には、判断した考え方を報告書に記載した上で、起因事象として除外してもよい。

- 1.4) 起因事象の原因が複数あり、起因事象の発生確率への寄与が他の原因に比べ非常に小さく、起因事象の発生確率が無視できると判断する場合には除外してもよい。
- 1.5) 内的事象 PRA を行っている場合、考慮された起因事象の従属性については、津波 PRA でも留意する。

2) 起因事象に係る SSCs と緩和設備の分析

- 2.1) 起因事象の要因となる機器などの分類の考え方及び、起因事象が発生した場合の緩和設備又は格納容器などの状態を分析し、事故シーケンス評価に必要な SSCs などを明確にする。
- 2.2) 分析の結果、起因事象の要因となる SSCs などの状態を保守的に簡略化した場合、またはスクリーニングによって評価から除外した場合には、その考え方を建屋・機器リストを利用するなどによって明確にする。

A.6 建屋・機器リストの作成

1) 炉心損傷の防止達成のために必要な SSCs の選定

炉心損傷の防止に必要な機能を摘出し、この機能を達成するために必要な SSCs を選定する。その際、システム構成の特徴などを考慮して、暫定的に一部を評価から除外してもよい。

- 1.1) 直列的な構成となっているシステムでの耐力の大きな SSCs は除外する。
- 1.2) 並列的な構成となっているシステムでの耐力の小さな SSCs は除外する。

例えば地震による水密シールの機能低下により、津波が建屋内へ流入する高さ、流入量などが変化し、建屋内の機器が津波による没水、被水の影響を受ける可能性及びその範囲が変わってくるような地震による影響も考慮して、影響を与える水密扉などと影響を受ける建屋内の機器との関係、同等の影響を受ける区画の定義、当該区画に属する機器など、必要な情報が確認できるように整理した建屋・機器リストを作成する。

2) SSCs 間の相対的な重要性の把握

SSCs を耐力の弱い構成部位で代表させ、既往 PRA で用いているデータ、又は代表機器のデータなどに基づいて評価対象部位を暫定的に評価することで SSCs 間の相対的な重要性を把握しておくことも実効的な評価を行う観点から有効である。この場合、既往 PRA から準用されるデータ、代表機器のデータが非保守側の結果を与えないよう留意するとともに、後段の評価で必要な修正ができるように暫定的な評価であることを明記する。

3) 建屋・機器フラジリティ評価と事故シーケンス評価の間で以下に示すような場合を含む相互の調整を実施し、必要に応じてリストの見直しを実施する。

3.1) 建屋・機器フラジリティ評価からの情報に基づく調整

- ・ 1)に従い事故シーケンス評価から示された建屋・機器リストに対して、建屋・機器フラジリティ評価の対象部位に対応するようにリストを見直す必要がある。

る場合

- ・ 建屋・機器 fragility 評価において例えば余震の影響を考慮した結果、リストへの追加が必要になった場合

3.2) 事故シーケンス評価からの情報に基づく調整

- ・ 1)に従い合理的なモデル化を行う過程において、建屋・機器 fragility 評価の対象から除外可能と判断された SSCs を建屋・機器リストから更に削除する場合
- ・ 2)に示す手順の活用を含め、SSCs 間の相対的な重要性を考慮した結果、例えば代表化・簡略化した評価をより詳細に評価すべきと判断され、建屋・機器リストに追加する場合

4) 建屋・機器リストは、サイト・プラントウォークダウンにおいて活用することも可能であるので、サイト・プラントウォークダウンの反映事項及び留意事項を明記することを推奨する。

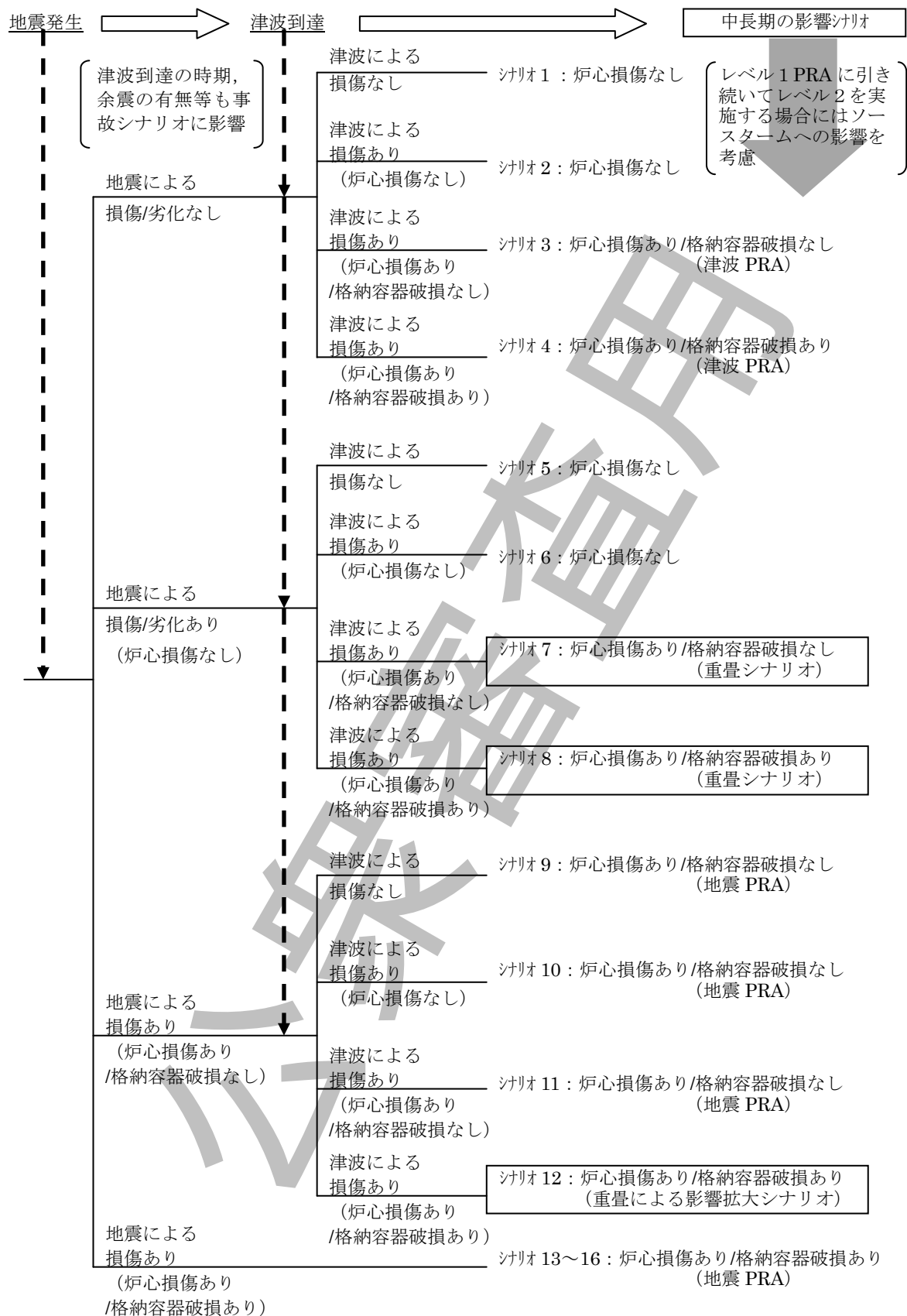


図 A.1 地震の影響を考慮した津波による損傷の組み合わせシナリオ

附属書 B (規定)

津波の波力及び海底砂移動に対する現実的応答の評価方法

序文

この附属書は、建屋・機器フラジリティ評価における津波の波力及び海底砂移動に対する現実的応答の評価方法を規定する。

B.1 津波の波力に対する現実的応答の評価方法

津波の波力に対する現実的応答評価に用いる津波の波圧及び波力算定式は、“原子力発電所の津波評価技術”（公益社団法人 土木学会）^{附B-1)}に記載された(B.1)～(B.5)式から、評価精度及び使途に応じて適切に選択する。なお、適用範囲が特に問題とならない場合には、ソリトン分裂しない津波の波圧及び波力算定式である朝倉らの式 ((B.1)及び(B.1')式)を用いてもよい。

B.1.1 朝倉らの式（非分裂）

直立護岸を越流する津波を想定した実験から得られた式である。実験は、波高、周期などの波条件、水路の斜面勾配、構造物の位置を変化させた 84 ケースについて行われており、ソリトン分裂する波が 3 波含まれている。ソリトン分裂とは、ある波長の波がより短い波長をもついくつかの波に分裂することをいう。(B.1)式は、ソリトン分裂しない波の波圧算定式である。

$$p_m(z) = (3\eta_{\max} - z) \rho g \quad (\text{B.1})$$

ここに

p_m : 最大津波波圧 z : 陸上地面を基準とした上向き正の座標 ($0 \leq z \leq 3\eta_{\max}$)

$\eta_{\max}$: 最大浸水深

ρ : 流体の密度 g : 重力加速度

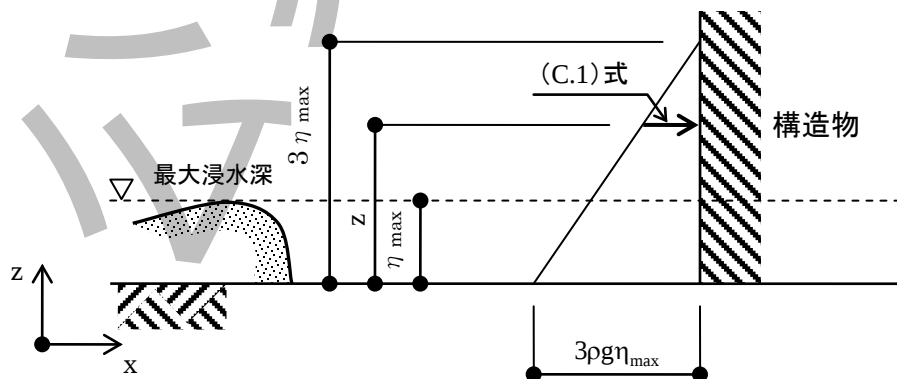


図 B.1 (B.1)式による最大津波波圧

図 B.1 に、(B.1)式による波圧分布を示す。津波の影響が浸水深の 3 倍まで及び、最深部

の $z=0$ で最大となり、浸水深を水頭とすると最大波圧は静水圧の 3 倍になる。実験値を包絡する式として、(1)式を積分した波力算定式(B.1')式も示す。

$$F_x = 4.5\rho g \eta_{\max}^2 \quad (\text{B.1}')$$

ここに

F_x : 構造物に働く水平波力

B.1.2 朝倉らの式（ソリトン分裂時）

(B.1)式と同じ文献で提案されており、ソリトン分裂する波の波圧算定式である。地面から $0.8\eta_{\max}$ より高い部分では(C.1)式と同じ値となり、低い部分では(B.1)式よりも大きくなる。

$$p_m(z) = \max(5.4\eta_{\max} - 4z, 3\eta_{\max} - z) \rho g \quad (\text{B.2})$$

ここに

p_m : 最大津波波圧 z : 陸上地面を基準とした上向き正の座標 ($0 \leq z \leq 3\eta_{\max}$)

$\eta_{\max}$: 最大浸水深

ρ : 流体の密度 g : 重力加速度

B.1.3 池野らの式

ソリトン分裂しない砕波段波津波を想定した実験から得られた波圧算定式である。実験は浅く水を張った状態で行われており、港湾水深部での津波と陸上遡上時の津波の中間的な特性を示すとされている。波圧算定式は、静水面下についても示されているが、ここでは静水面上のみを示している。静水面上では $\alpha=1.36$ とされており、(B.1)式の $\eta_{\max}$ を a_H に等しいとすれば、(B.1)式と(B.3)式はほぼ同じ値になる。

$$p_m(z) = 2.2 \left(a_H - \frac{z}{3} \right) \alpha \rho g \quad (\text{B.3})$$

ここに

p_m : 最大津波波圧 z : 陸上地面を基準とした上向き正の座標 a_H : 進行波時の津波段波振幅

ρ : 流体の密度 g : 重力加速度 α : 砕波による衝撃段波波圧の割増係数 ($\alpha=1.36$)

B.1.4 大森らの式

波力を計算する解析式で、(B.1)、(B.2)式を提案した実験結果の再現計算をしており、波力を時系列に評価できる。第 1 項が抗力項、第 2 項が慣性力項、第 3 項が衝撃力項、第 4 項が動水勾配力項である。ソリトン分裂しない波は概ね再現可能で、ソリトン分裂する波についても第 1 波目は概ね再現できるとされている。

$$F_H = \frac{1}{2} C_D \rho u |u| \eta + \rho C_M \dot{u} L \eta + \frac{1}{2} C_S(\theta) \rho u |u| \eta + \rho g L \eta \frac{d\eta}{dx} \quad (\text{B.4})$$

ここに

F_H : 陸上浸水津波の水平波力 C_D : 抗力係数 (=2.05) C_M : 質量係数 (=2.19)
 $C_s(\theta)$: 衝撃力係数 (=3.6tan(θ)) : θ は波面の角度 u : 津波進行波の水平速度 $\dot{u}$: 津波進行波の水平加速度 η : 津波進行波の浸水深 L : 構造物の長さ
 ρ : 流体の密度 g : 重力加速度

B.1.5 飯塚・松富式

津波先端通過後の定常部に関する抗力を求める式である。

$$F_{HD} = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 h_f B_h \quad (B.5)$$

ここに

F_{HD} : 家屋に作用する津波氾濫流による水平波力 C_D : 抗力係数 (=1.1~2.0)

u : 陸上での流速

h_f : 家屋前面浸水深 B_h : 構造物の浸水部分の幅 ρ : 流体の密度

松富・飯塚は、簡便な陸上流速推定式も提案している。(B.5)式に(B.5')式を代入すると、(B.1')式と似た形の式になり、(B.1')式と同様、津波の深さに関する変数の2乗に比例する。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq 1.1 \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (B.5')$$

ここに

R : 対象地点付近の津波高

B.2 海底砂移動に対する現実的応答の評価方法

津波による海底砂の移動量の不確かさ（中央値及び対数標準偏差）に関しては、実験結果との検証が行われている、“原子力発電所の津波評価技術” 公益社団法人 土木学会）^{附B-1}に記載されている高橋らの評価モデル（“掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発”，海岸工学論文集第46巻，1999），もしくは，池野らの評価モデル（“津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案”，土木学会論文集B2Vol.B2-65，No.1，2009）におけるパラメータを確率変数とした不確かさ解析によって海底砂の移動量の偶然的な不確かさを評価し，実験結果と評価モデルの誤差を認識論的不確かさとして評価する。

附属書 C (規定) 事故シーケンスの定量化手法

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の定量化手法を規定する。

C.1 事故シーケンスの定量化手法

定量化の手法として、以下の2つの手法の内容を規定する。

- ・フォールトツリー結合法
- ・条件付分岐確率イベントツリー法

1) フォールトツリー結合法 本手法では、安全機能及びフロントライン系の成功・失敗をヘディングとしてイベントツリーを設定し、事故シーケンス各々のイベントツリーのヘディングに対応する各フォールトツリーの頂上事象が同時に発生する場合に、評価対象事故シーケンスが発生するように結合した大フォールトツリーを設定する。この大フォールトツリーから事故シーケンスを表す最小カットセットを作成する。例えば、事故シーケンス TABC を例にとると、その事故シーケンスのフォールトツリーF(TABC)は(C.1)式で与えられる。

$$F(TABC)=F(T)\cap F(A)\cap F(B)\cap F(C)\cdots\cdots\cdots (C.1)$$

より厳密には、他の安全機能が成功していることを明示的にフォールトツリーに組み込むが、フォールトツリーがあまりにも巨大化するため、成功を省いた近似解を用いてもよい。

この方法では、サポート系とフロントライン系間などの従属関係はフォールトツリー内で明示的に表現される。一方で、フォールトツリーは巨大化し、単一のシーケンスに対しても膨大な数の最小カットセットが生成されるという特徴がある。事故シーケンスを小イベントツリー／大フォールトツリー法でモデル化した場合によく用いられる。

2) 条件付分岐確率イベントツリー法 本手法は、イベントツリー結合法とも呼ばれ、複数のイベントツリーを結合させて事故シーケンスを作成する。イベントツリーの各分岐確率は、フォールトツリー解析から求め、ヘディング間の相互依存性を考慮した条件付分岐確率を適用するように結合のロジックを作成する。条件付分岐確率は、あるヘディング以前の関連するヘディングの成否の組合せを条件として付加して評価する。【附属書 Y (参考) 条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの作成の例】

この方法には、複数のイベントツリーを結合することによって、膨大な数の事故シーケンスが生成されるという特徴がある。事故シーケンスを大イベントツリー／小フォールトツリー法でモデル化した場合によく用いられる。

附属書 D

(参考)

津波 PRA における専門家判断の活用に関する留意事項

序文

この附属書には、津波 PRA における専門家判断の活用に関する留意事項として、専門家判断が必要となり得る技術要素の例、及び、専門家の選定での留意事項について記載する。

D.1 専門家判断が必要となり得る技術要素の例

津波 PRA において専門家判断が必要となり得る技術要素の例は以下である。

- 1) 津波ハザード評価で用いる、津波発生域におけるマグニチュード、地震の発生確率、連動、断層モデルの設定、及びそれら情報を用い津波伝播特性を考慮して津波高さの確率分布を評価する数値モデル、ロジックツリー
- 2) 建屋・機器 fragility 評価で用いる津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による建屋・機器の損傷に係る実験を含む経験論に基づく手法及び解析を含む理論に基づく手法

D.2 専門家の選定での留意事項

津波 PRA において専門家判断を活用する場合には、地震動と津波の両方の事象にわたった判断がされるように、複数の専門家の選定を行うことが望ましい。

附属書 E
(参考)
評価に必要な情報及び主な情報源

序文

津波 PRA を実施するために必要な設計及び運転管理に関する情報及び主な情報源を示す。

E.1 評価に必要な情報及び主な情報源

津波 PRA を実施するために必要な情報及び主な情報源を表 E.1-評価に必要な情報及び主な情報源にまとめる。

表 E.1-評価に必要な情報及び主な情報源

	PRA の評価作業	必要な情報	主な情報源
1	プラントの設計・運転の把握	PRA 実施にあたり必要とされる設計、運転管理に関する情報 ・基本仕様 ・系統設備の構成特性 ・設備設計上の特徴 ・プラントの配置上の特徴	1)原子炉設置許可申請書 2)配管計装線図 3)電気系統図(送電系統一覧、所内単線結線図など) 4)プラント機器配置図 5)工事計画認可申請書 6)系統設計仕様書 7)機器設計仕様書 8)保安規定 9)プラント訪問 10)設計技術者、プラント職員との議論 11)構造図 12)緊急安全対策に関する資料※

	PRA の評価作業	必要な情報	主な情報源
2	津波ハザード評価	対象サイトに影響を与え得る津波を発生させる波源の様式に関する情報	1)原子炉設置許可申請書 2)活断層及び歴史地震カタログ 3)日本の地震断層パラメータ・ハンドブック 4)地震地体構造マップ 5)地震調査研究推進本部による長期評価結果 6)評価サイトにおける地震動観測記録 7)津波に関する痕跡高カタログ及び堆積物データベース 8)検潮記録 9)水位の変動記録 10)日本被害津波総覧[第2版] 11)海底地形図及び陸上地形図などの地形データ 12)中越沖地震、東北地方太平洋沖地震などの知見
3	建屋・機器フラジリティ評価	プラント固有の建屋・機器の耐力評価ならびに応答評価に関連する情報	1)原子炉設置許可申請書 2)工事計画認可申請書 3)設計・建設規格 4)機器の設計仕様書 5)構造図 6)機器配管図 7)電気協会 原子力発電所耐津波設計技術規程
4	事故シーケンス評価	a) 事故シナリオの分析と起因事象の分類 ・津波時に想定されるプラント状態 b) 事故シーケンスの分析 ・安全系などのシステム使用条件 ・システムの現実的な性能 ・運転員による緩和操作 ・成功基準の設定 c) システムのモデル化 ・対象プラントに則した機器故障モード、運転形態 d) 事故シーケンスの定量化 ・評価結果の妥当性を確認する際に参考となる情報	1)上記1の情報源 2)先行 PRA 報告書及びそれに関連する報告書 1)上記1の情報源 2) 成功基準に対するシステムの現実的な性能評価報告書 3)運転手順書(設備別操作手順書, 事故時操作手順書, サーベランス手順書) 4)定期検査要領書 5)運転員などの訓練プログラム 6)先行 PRA 報告書及びそれに関する報告書 7)津波後の対応手順

※福島第一・第二原子力発電所事故を踏まえた他の発電所の緊急安全対策の実施について（平成 23 年 3 月 30 日原子力安全・保安院）に関する資料

附属書 F

(参考)

地震単独 PRA, 津波単独 PRA を併用する場合の留意事項

序文

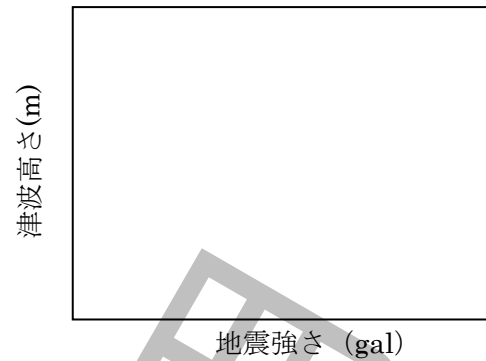
この附属書は、地震単独 PRA, 津波単独 PRA（地震による影響がないとした場合）を併用する場合の留意事項を示す。

F.1 地震単独 PRA, 津波単独 PRA を併用する場合の重複の可能性の考え方

AESJ-P006:2015 に基づく地震単独の PRA, 及び/或いは地震の影響を考慮しない津波単独の PRA を別途実施していて、PRA の目的に応じてこれらの PRA 結果を併用する場合、地震による影響を考慮した津波 PRA の結果は、地震単独, 津波単独の PRA 結果と部分的に重複する可能性があることに留意する。重複の可能性の考え方を図 F.1 に示す。PRA の目的に対して重複の影響が有意と判断される場合には、重複部分を除外するなど、適切に対処するためにこの考え方が利用できる。

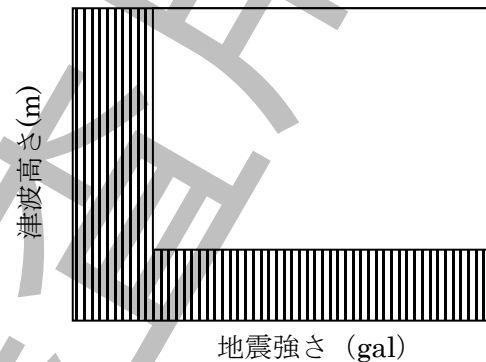
①地震・津波結合ハザードのイメージ

- ・・・地震単独 PRA で対象とする地震強さ，津波単独 PRA で対象とする津波高さが重複の可能性がある対象領域となる。



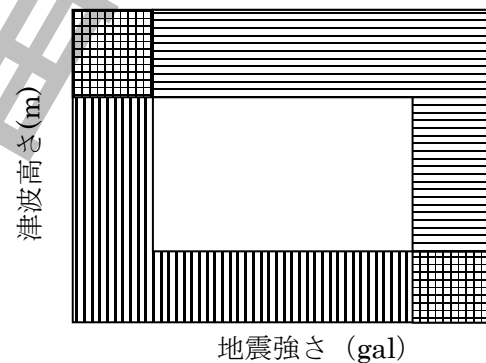
②地震単独 PRA，津波単独 PRA との重複の可能性が高い領域（地震，津波いずれかの影響が軽微）

- ・・・地震，津波いずれかの影響が軽微と判断できる領域（右図縦線部）は重複の可能性が高い。



③地震単独 PRA，津波単独 PRA との重複の可能性が高い領域（地震，津波いずれかの影響が重大）

- ・・・地震のみ，津波のみでも影響が重大で炉心損傷に到る（右図横線部）領域は，重複する可能性が高い。



④地震単独 PRA，津波単独 PRA との重複の可能性が低い領域

- ・・・残る対象領域は重複の可能性は低い。（グラディエーションの濃い領域ほど，地震の影響を考慮した津波の影響がより強く表れる。）

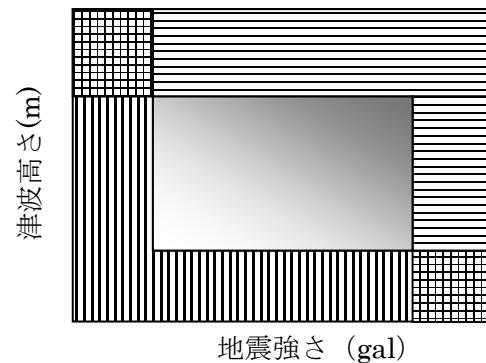


図 F.1 地震単独 PRA，津波単独 PRA との重複の可能性の考え

附属書 G

(参考)

津波ハザード評価

序文

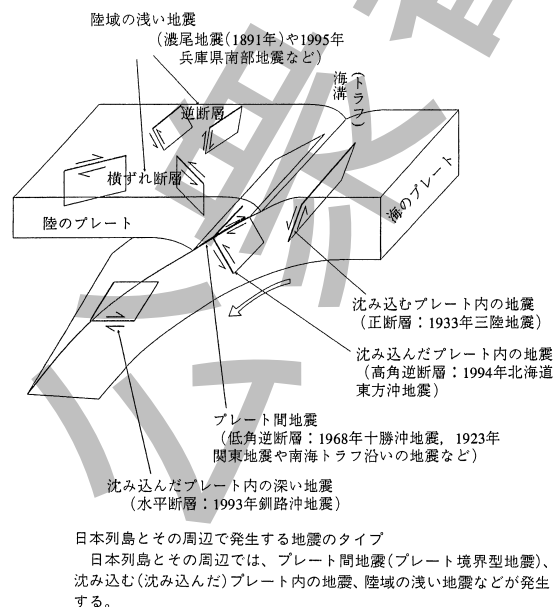
この附属書は、津波ハザード評価を行うために実施する手順において、参考とすべき項目について記載したものである。

2011 年東北地方太平洋沖地震については、その後の研究成果を踏まえた内容が、**G.1 津波発生領域の設定**、**G.3 マグニチュード頻度分布に関するモデル**、**G.4 特性化波源モデル**にそれぞれ書き加えられている。

なお、土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会において、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を踏まえて、“原子力発電所の津波評価技術 2016”が 2016 年 9 月に発行されているため、これも参考にする必要がある。

G.1 津波発生領域の設定

津波を伴う地震の発生様式について、日本列島周辺については、**図 G.1-1** に示すように分類される。プレート間地震は、典型的なプレート間逆断層地震と海溝沿いの津波地震に区別される。



（※）ここでいう「陸域の」とは、地殻構造的に大陸型の地殻がある地域であり、陸側のプレートのうちプレート境界やそのごく近くを除いた範囲を示している。地理的な陸・海の区分とは異なる。

図G.1-1 地震の発生様式^{附G-1)}

2011 年東北地方太平洋沖地震津波 ($M_w=9.0$) は、日本海溝沿いで、従来の領域区分^{附G-2)}

で想定していなかった広範な領域（長さ 400km以上、幅約 200km）を波源域として発生し、最大のすべり量は 50m以上あった。これを踏まえて、“基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド”（2013 年 6 月）では、日本列島周辺のプレート間地震に起因する津波波源の対象領域を図 G.1-2 に示すように例示している。地震規模の参考値として、千島海溝から日本海溝沿いの領域（最大Mw9.6 程度）、伊豆・小笠原海溝沿いの領域（最大Mw9.2 程度）、南海トラフから南西諸島海溝沿いの領域（最大Mw9.6 程度）と記載している。

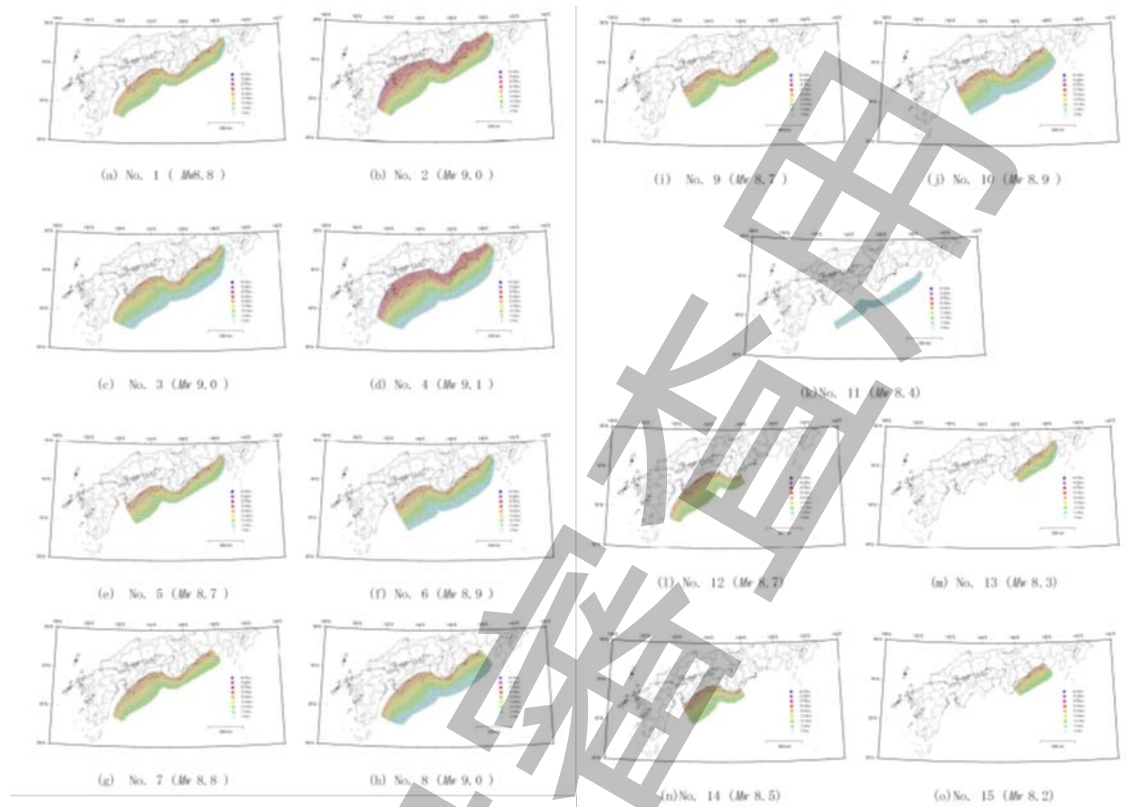


図 G.1-2 プレート間地震に起因する津波波源の対象領域^{附 G-3)}

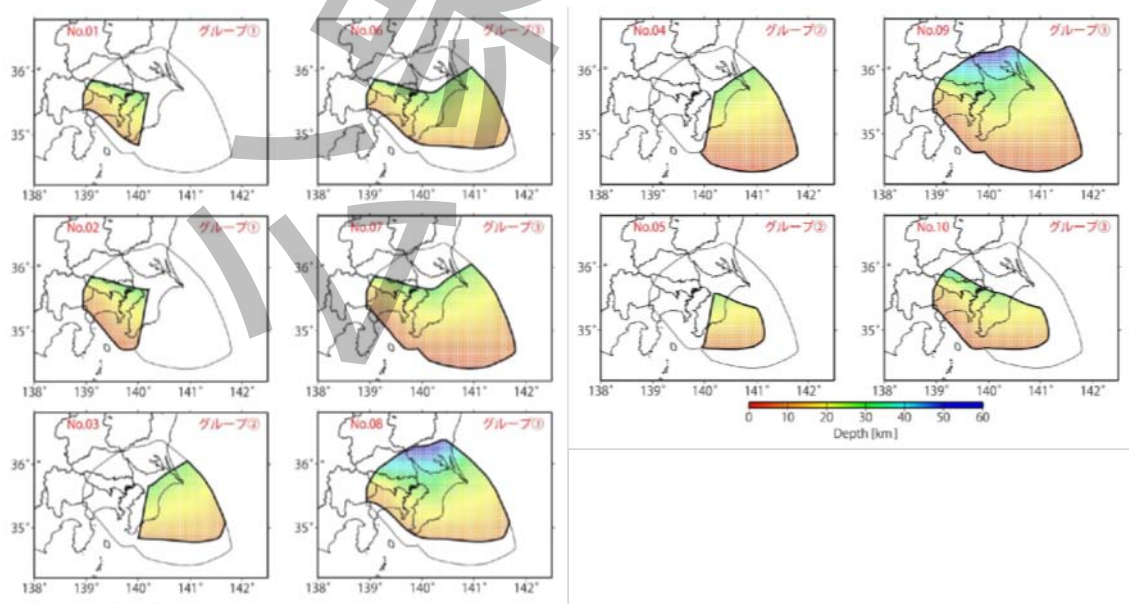
2011 年東北地方太平洋沖地震津波（Mw=9.0）の発生を踏まえた見直しとして、固有地震モデルに対する反省と地震の多様性の考慮がある。”南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）”（2013 年 5 月）では、“これまで考えられてきた固有地震モデルに基づく評価ではなく、発生しうる最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価を試みる。”と記載されている。”相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）”（2014 年 4 月）でも、“これまで考えられてきた固有地震モデルに固執することなく、発生しうる最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価を試みる。”と記載されている。

“地震動予測地図 2014 年版”（2014 年 12 月）では、図 G.1-3 に示すように、南海トラフについて 15 種類の震源断層を設定している。また、図 G.1-4 に示すように、相模トラフ沿いについて 10 種類の M8 クラスの震源域が設定されている。一方、日本海溝・千島海溝については、従来の延長で、十勝沖と根室沖の地震の連動、東北地方太平洋沖型の地震、三陸沖北部のプレート間地震が、図 G.1-5 に示すように設定されている。これら以外に、三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間地震（津波地震）や三陸沖北部から房総沖の海溝

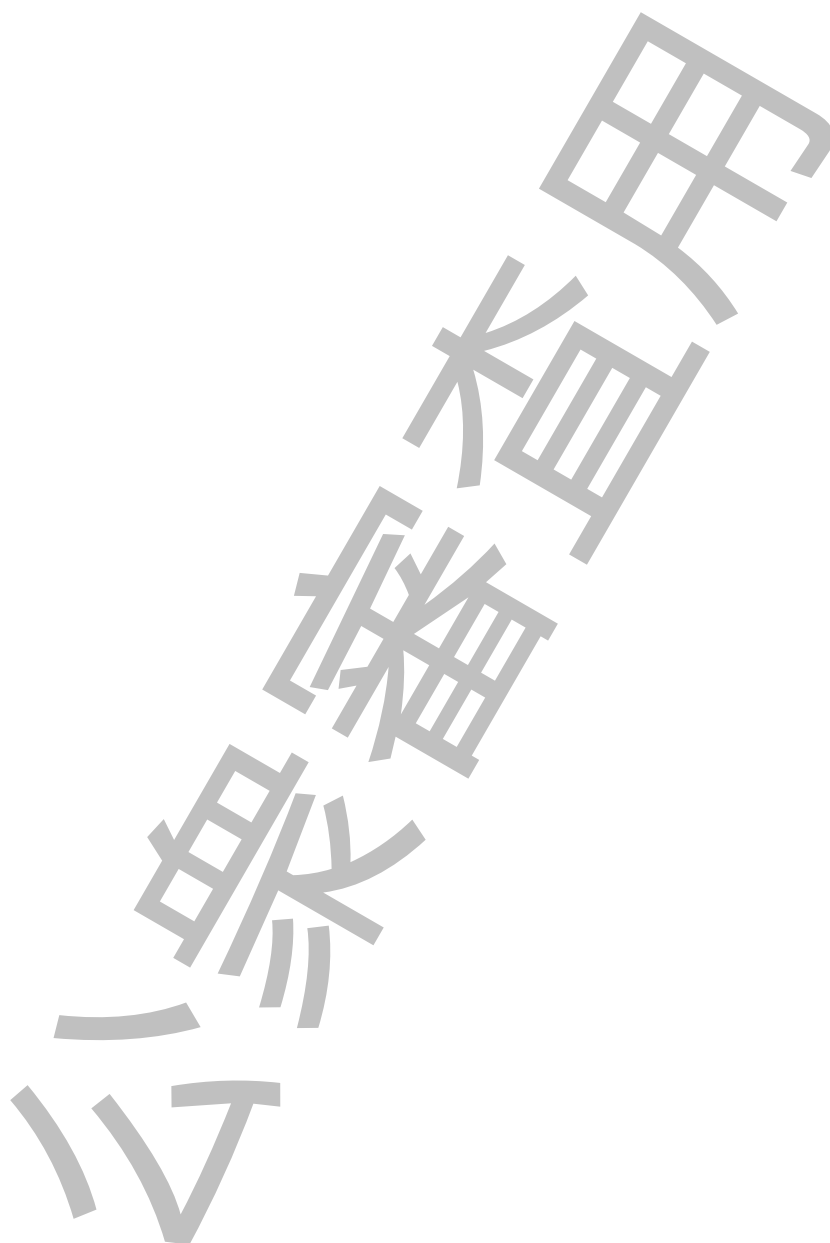
寄りのプレート内地震（正断層型）もこれまでとほぼ同様に設定されている。これは、“三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）”（2011 年 11 月）の公表時期が古いことが影響している可能性があり、今後の改訂版で見直される可能性がある。

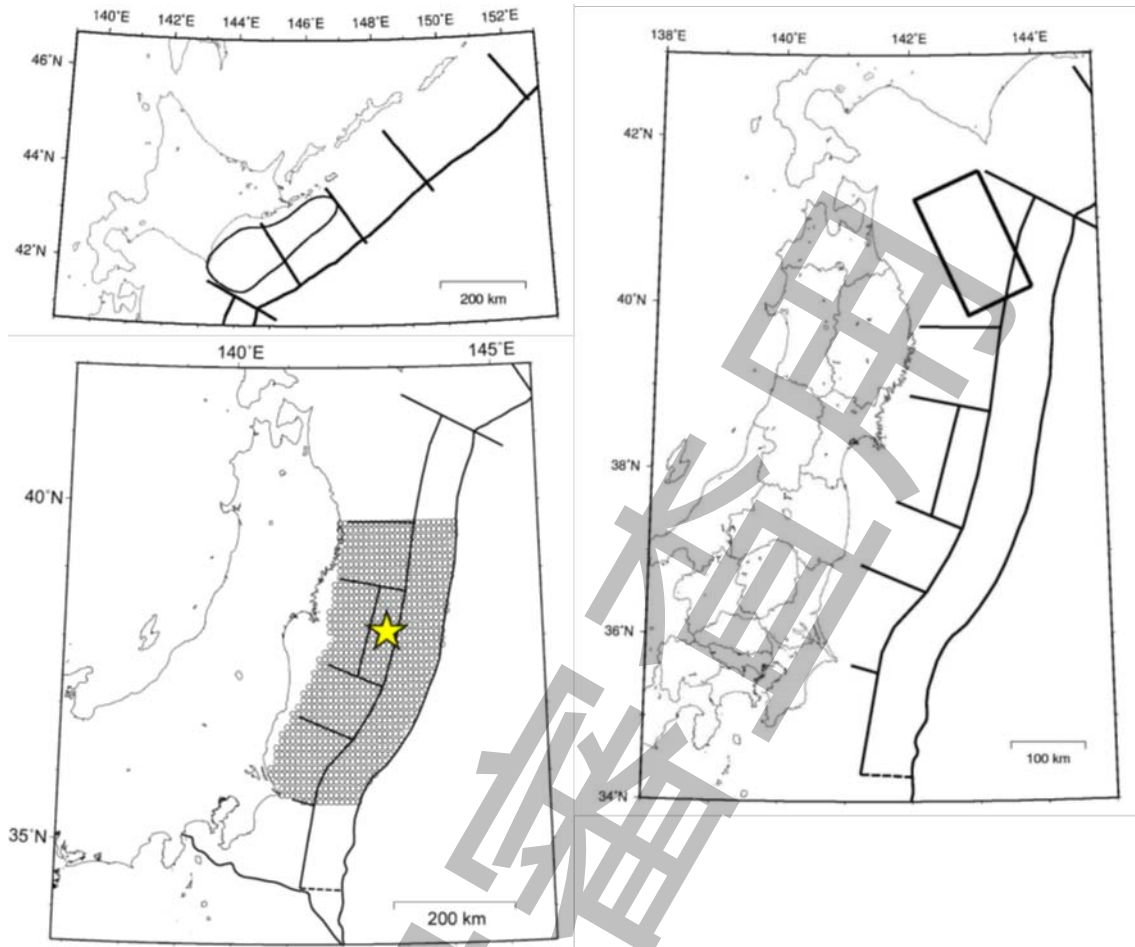


図G.1-3 南海トラフの地震の震源断層^{附G-6)}



図G.1-4 相模トラフ沿いで設定したM8 クラスの地震の震源域^{附G-6)}



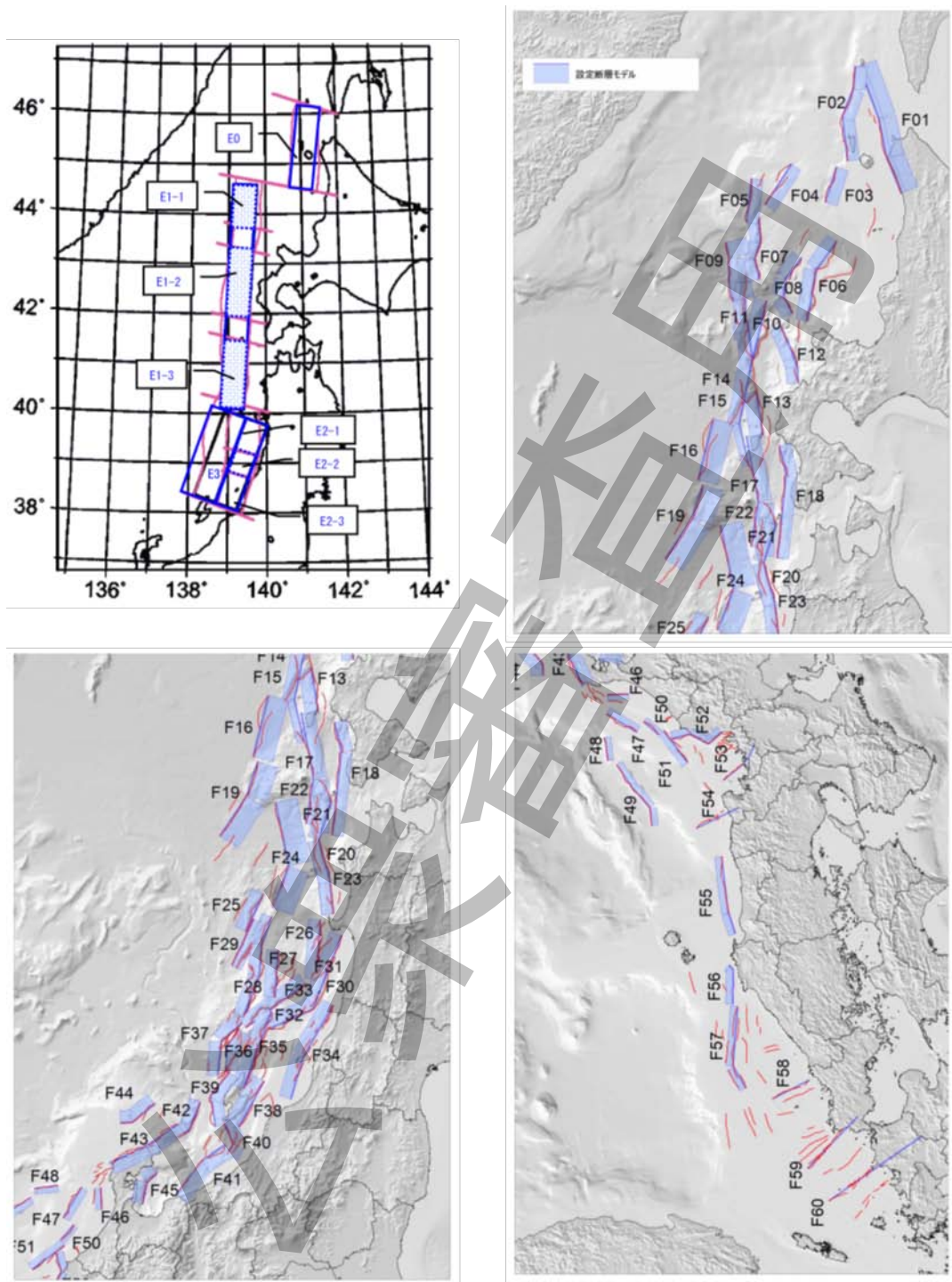


図G.1-5 日本海溝・千島海溝で設定されている大地震の震源域^{附G-6)}

日本海東縁部に関しては、“日本海における大規模地震に関する調査検討会”の報告書が2014年8月に公表され、津波評価のためのモデルが提案されている。従来のモデル^{附G-2)}とともに、検討会による津波波源モデルを図G.1-6に示す。検討会のモデルは海底活断層の評価に基づき設定されている。

遠地津波としては、1960年チリ地震津波のような南米沖の地震津波、1700年カスケード地震津波のような北米カスケード沈む込み帯の地震津波を考慮する必要がある^{附G-2)}。

なお、以上のような2011年東北地方太平洋沖地震津波(Mw=9.0)以後の動向を踏まえた津波発生領域の具体的設定事例については、前述した“原子力発電所の津波評価技術2016(仮称)”(2016年9月発行予定)を参照していただきたい。



図G.1-6 日本海東縁部の津波発生領域例(附G-2, 8)

G.2 各海域の既往地震津波

各海域の既往地震津波については、下記の文献を参照することができる。

- ・ 原子力発電所の津波評価技術（2002）
- ・ 確率論的津波ハザード解析の方法(2011)
- ・ 千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版）（2004）
- ・ 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）”（2011）
- ・ 日本海東縁部の地震活動の長期評価（2003）
- ・ 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）”（2014）
- ・ 南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）（2013）
- ・ 日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価（2004）

G.3 マグニチュード頻度分布に関するモデル

従来の方法^{附G-2)}では、津波を発生する地震を、大地震と背景的地震に区分し、大地震は固有地震モデルに基づきモデル化し、背景的地震は切断Gutenberg-Richter式（上限マグニチュードで打ち切られたGutenberg-Richter式）に基づきモデル化することを基本としていた。そして、複数の固有地震が連動する場合（南海トラフや十勝沖・根室沖など）を想定し、連動に関するモデルが設定されていた。

前述したように、2011年東北地方太平洋沖地震津波（ $M_w=9.0$ ）の発生を踏まえた見直しとして、“これまで考えられてきた固有地震モデルに基づく評価ではなく、発生しうる最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価を試みる。”、“これまで考えられてきた固有地震モデルに固執することなく、発生しうる最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価を試みる。”という方向が提案され、南海トラフや相模トラフ沿いの大地震について多様なモデルが想定されるようになっており、大地震のマグニチュード頻度分布においてもGutenberg-Richter式が適用される例がでてきている。ただし、南海トラフや相模トラフ沿いの大地震の場合、マグニチュードの多様性は考慮されるようになっているが、発生頻度や発生確率は固有地震的に評価されている。

背景的地震の場合と同様に、大地震まで含めて切断Gutenberg-Richter式でモデル化する場合には、対象としている海域のどこでも大地震が一樣に発生するというモデル化が考えられる。これは固有地震モデルとは全く反対のモデル化である。

現状では、固有地震モデルに基づくモデル、切断Gutenberg-Richter式に基づくモデル、両者の中間的なモデルをロジックツリーの分岐とすることが考えられる。

(1) 固有地震に基づくモデル

固有地震のマグニチュード範囲と分布、平均発生間隔とばらつきを設定する。ばらつきは現時点でのハザードを評価する場合に必要である。また、固有地震の連動の可能性について考慮する必要がある。これらの設定に関しては”確率論的津波ハザード解析の方法”

(2011)を参照することができる。

(2) 切断 Gutenberg-Richter 式に基づくモデル

考慮する最小マグニチュードとそれ以上のマグニチュードの地震の年発生数、 b 値、最大マグニチュードを設定する必要がある。通常、どのマグニチュードの地震も対象としている海域内のどこでも同じように発生すると仮定される。

(3) 中間的モデル

南海トラフと相模トラフ沿いのモデルの場合、全体としての発生頻度や発生確率は固有地震的に、1 つのサイクルで発生する可能性がある多様な地震の発生確率は Gutenberg-Richter 式など各種の仮定に基づき設定されている。確率の付与には各種の仮定があるので、現状で一義的に設定するのは不可能であることから、ロジックツリーの分岐により様々な可能性を考慮する必要がある。なお、中間的モデルは考え方が確定しているわけではないので、今後より現実的なモデルを提示していく必要がある。

G.4 特性化波源モデル

“南海トラフの巨大地震モデル検討会”の第一次報告（2012 年 3 月 31 日）、第二次報告（2012 年 8 月 29 日）では、2011 年の東北地方太平洋沖地震を含めた過去の地震の震源断層モデルの特徴などに基づき、津波断層モデルを設定し、津波高の推計結果を示している。津波断層モデルと強震断層モデルは別々の考え方で設定されている。

津波断層モデル設定の基礎となっている認識は下記の通りである。

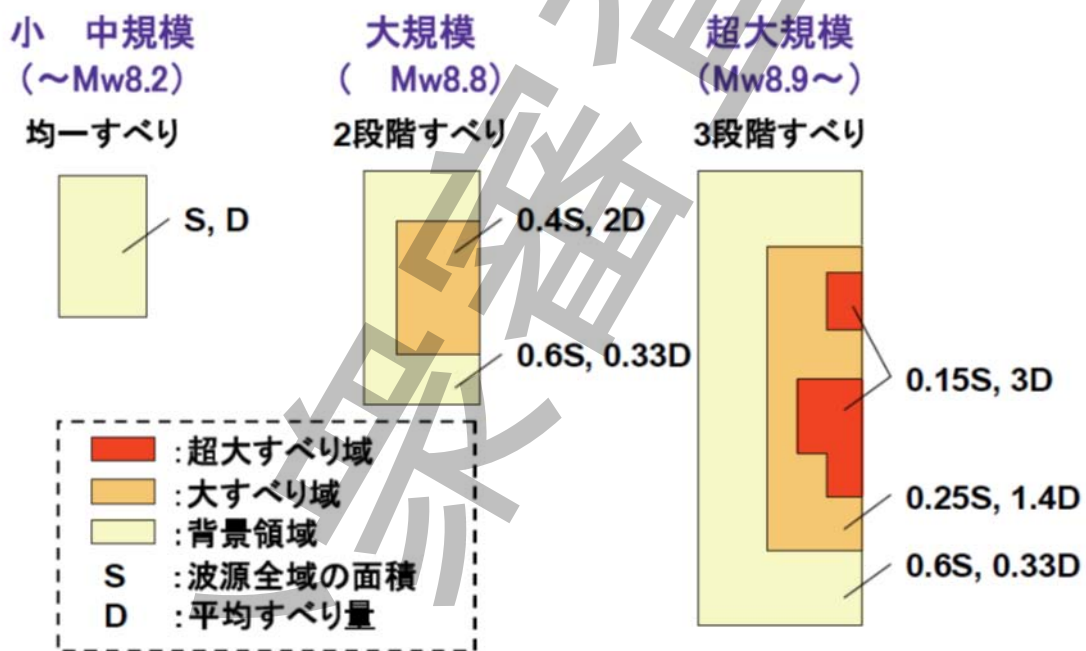
- ① 津波断層面上には、津波断層の平均すべり量の 2 倍以上のすべり量の”大すべり域”があり、2011 年東北地方太平洋沖地震では津波断層面の比較的浅い側に位置する。
- ② ”大すべり域”のなかの更に浅いトラフ沿い（或いは海溝沿い）の領域は、津波地震を発生させる可能性のある領域で、津波断層の平均すべり量の 4 倍程度のすべり量の”超大すべり域”となる場合がある。
- ③ ”大すべり域”の面積は、全体面積の 20%程度で、その数は 1～2 箇所である。
- ④ ”超大すべり域”の面積は、2011 年東北地方太平洋沖地震では、全体面積の約 5 % である。
- ⑤ 海溝型の津波断層モデルの断層全体の平均すべり量は、津波断層モデルの断層面の全域に対する相似則（スケーリング則）による平均すべり量と概ね一致する。
- ⑥ 解析対象とした地震は 6 例と少ないが、海溝型巨大地震の平均応力降下量の平均値は 1.2MPa、平均値に標準偏差を加えた値は 2.2MPa（平均値から標準偏差を引いた値は 0.7MPa）である。

“南海トラフの巨大地震モデル検討会”では、基本的に、大すべり域のすべり量を平均すべり量の 2 倍、超大すべり域のすべり量を平均すべり量の 4 倍とし、超大すべり域を含

む大すべり域の面積を断層全体の 20%程度としている。超大すべり域の面積は断層全体の約 5%としている。平均応力降下量は、” Mw8 よりも小さな地震も含めると、海溝型地震の平均応力降下量の平均値が 3.0MPa であること、中央防災会議ではこれまでの海溝型地震の津波の検討において、平均応力降下量は 3.0MPa を用いてきたことを踏まえ、南海トラフの巨大地震の津波断層モデルで用いる平均応力降下量は、3.0MPa とする” としている。

上記のように、” 大すべり域” と” 超大すべり域” を仮定し、単純化したすべり量分布とすべり域の形状を設定して津波を計算するモデルは” 特性化波源モデル” と呼ばれている。M9 級の津波波源ではこのような形で” 大すべり域”、” 超大すべり域” を考慮することは不可欠である。

JNES による特性化波源モデルの例を図 G.4-1 に示す。超大規模な場合、大すべり域（平均すべり量の 1.4 倍）と超大すべり域（平均すべり量の 3.0 倍）を設定し、超大すべり域の面積を断層全体の 15%、大すべり域と超大すべり域を合わせた面積を断層全体の 40%としている。



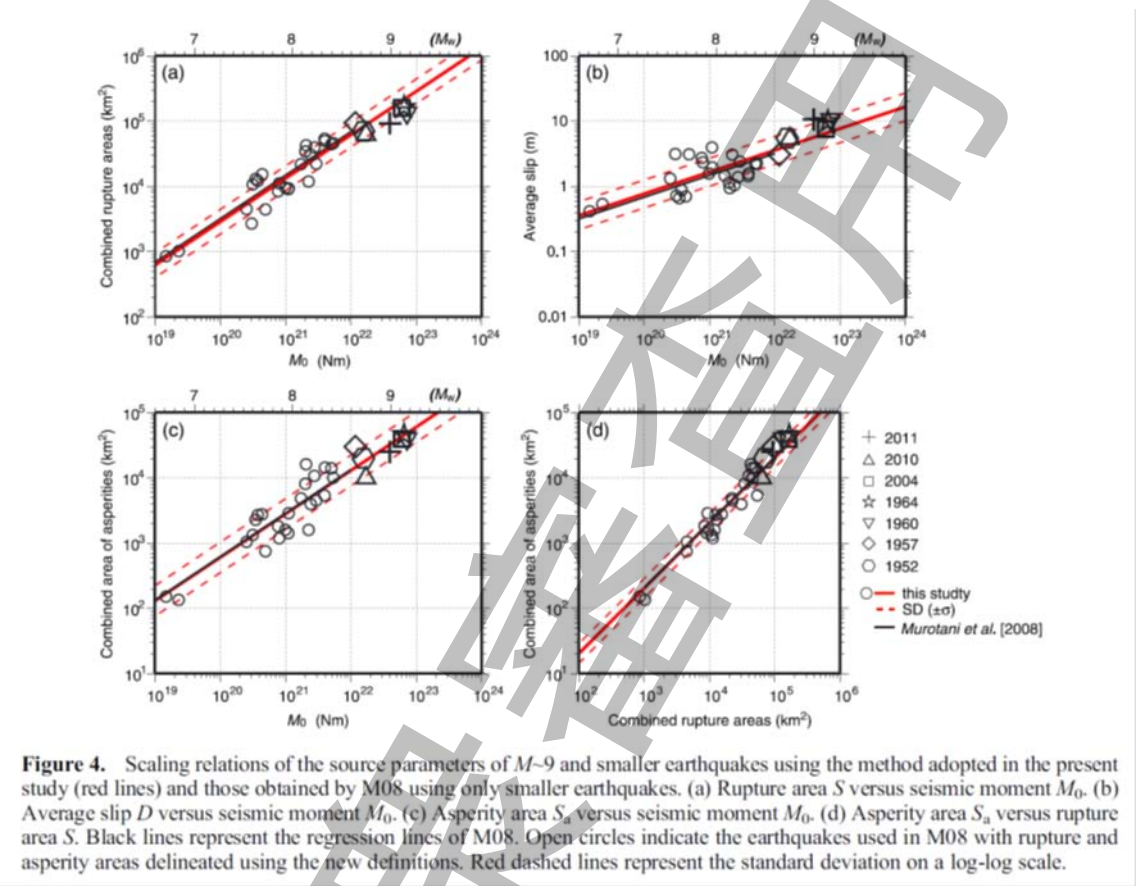
図G.4-1 特性化波源モデルの例^{附G-14)}

図 G.4-1 のモデルでは、大規模地震について、超大すべり域がないモデルを提案しており、大すべり域（平均すべり量の 2.0 倍）の面積を断層全体の 40%としている。

地震本部による” 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(“レシピ”)” では、海溝型地震について、” 最近の研究成果から、7 つの海溝型地震によるアスぺリティ総面積の占める割合は断層総面積の 35%±11%程度(石井・他, 2000)と得られており、拘束条件とはならないがこうした値も参照にしておく必要がある” と記述している。アスぺリティ全体の平

均すべり量は、震源断層全体の平均すべり量の 2 倍としている。

Murotani et al. (2013) は、図 G4-2(d) と表 G4-1 に示すように、海溝型の地震について、アスペリティの面積と断層面全体の面積の比が平均的に 0.2 であることを示している。アスペリティは平均すべり量の 1.5 倍以上のすべり量の領域と定義されている。



図G4-2 Murotani et al. (2013) による海溝型地震に対するスケーリング則^{附G-16)}

表G4-1 Murotani et al. (2013) による海溝型地震に対するスケーリング則^{附G-16)}

Table 2. Scaling Relations and Standard Deviations				
Original Regression of Murotani et al. [2008]	SD _M ^a	SD _{M32} ^b	New Regression of This Study	SD
$S = 1.48 \times 10^{-10} M_0^{2/3}$	1.61	1.55	$S = 1.34 \times 10^{-10} M_0^{2/3}$	1.54
$D = 1.48 \times 10^{-7} M_0^{1/3}$	1.72	1.66	$D = 1.66 \times 10^{-7} M_0^{1/3}$	1.64
$S_a = 2.89 \times 10^{-11} M_0^{2/3}$	1.78	1.72	$S_a = 2.81 \times 10^{-11} M_0^{2/3}$	1.72
$S_a/S = 0.2$	1.41	1.41	$S_a/S = 0.2$	1.41
Magnitude range, M_w	6.7–8.4	6.7–9.2	6.7–9.2	

^aStandard deviation of M08 used 26 earthquakes for M_0 - S and M_0 - D and 14 earthquakes for M_0 - S_a and S - S_a , respectively.
^bStandard deviation calculated for the 32 earthquakes (seven giant earthquakes in this paper and 25 earthquakes of M08 with definitions of this paper) with the fixed coefficients as those estimated by M08.

特性化波源モデルについては、上記 2 個以外にも各種のモデル化が可能であり、附属書 I (参考) にもそうした 1 例が示されている。

G.5 スケーリング則

各海域で計算に用いる津波波源断層モデルを設定するためには各種のスケーリング則を活用する必要がある。

“原子力発電所の津波評価技術”（2002）では、3つのスケーリング則を示している。

- ① 断層長さ L 、断層幅 W 、すべり量 D のいずれにも限界を設定しない方法
- ② 断層幅 W のみに限界を設定する方法
- ③ 断層長さ L と断層幅 W に限界を設定する方法

①の場合には、地震モーメント（モーメントマグニチュード）が変化すると、断層長さ L 、断層幅 W 、すべり量 D が比例して変化する。②の場合には、断層長さ L とすべり量 D が比例して変化する。③の場合にはすべり量 D のみが変わる。

図 G4-2(a) に示した Murotani et al. (2013) による地震モーメントと断層面積の平均的な関係は①を満足しており、平均応力降下量が一定になる。平均的な関係では平均応力降下量は 1.57MPa、標準偏差の範囲では 0.82MPa から 3.00MPa となる。前述した南海トラフの巨大地震の津波断層モデルでは 3.0MPa が用いられており、図 G4-2(a) の平均－標準偏差の線に対応している。

平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、地震モーメント M_0 、断層面積 S の関係は

$$\Delta\sigma = C \frac{M_0}{S^{3/2}}$$

であり、円形断層の場合は係数が

$$\frac{7}{16} \pi^{3/2} = 2.436$$

である。

上記の関係をいれれば、平均応力降下量を仮定することにより、地震モーメント（モーメントマグニチュード）から断層面積を設定することが可能である。また、平均応力降下量の変化により、同じ断層面積で発生する地震のマグニチュードが変化する。

②は、海底活断層の地震の場合などに適用される。従来の方法^{附G-2)}では、日本海東縁部海域と海底活断層に対して、2つのスケーリング則をロジックツリーの分岐とした。

1つは、武村(1998)に基づく断層長さ L とモーメントマグニチュード M_w の関係を用いる方法である。幅（地震発生層厚さ）に上限があり、 M_w が大きいとき

$$\log L(\text{km}) = 0.75M_w - 3.77,$$

$$L \propto D, W = \text{const.}$$

が、 M_w が小さいとき

$$W = \frac{2}{3}L, L \propto W \propto D$$

の関係が成り立ち、両者を連続的に接続させている。

もう1つは、地震本部の”レシピ”で用いられている断層面積と地震モーメントの関係(Wells and Coppersmith(1994)などのデータに基づく入倉・三宅(2001)の提案式, 地震モーメント $7.5 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ 以上の地震に適用する)

$$M_0[\text{N} \cdot \text{m}] = (S[\text{km}^2] / 4.24 \times 10^{-11})^2 \times 10^{-7}$$

を用いる方法である。

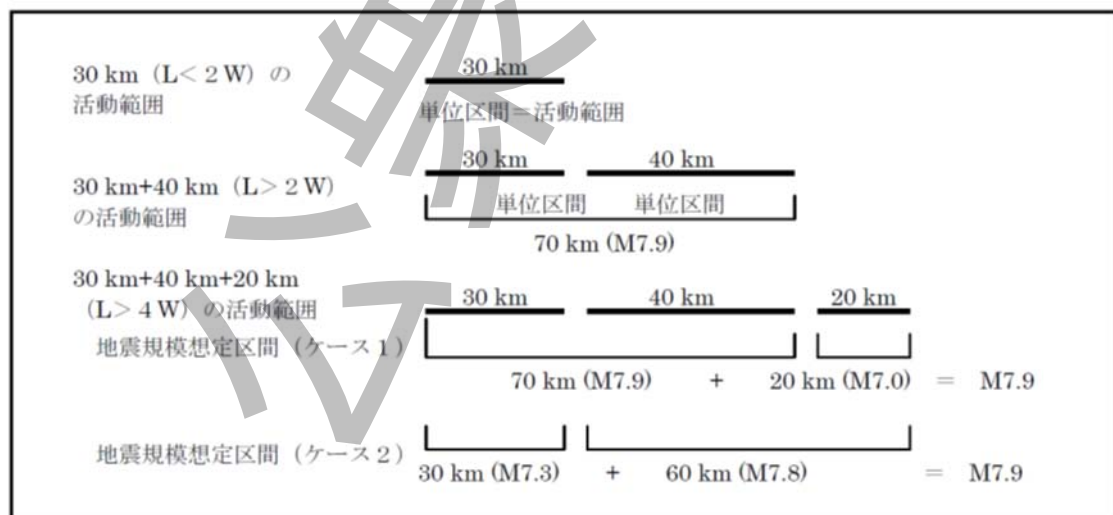
活断層による地震について、長大な活断層で発生する地震の規模を推定する方法が地震本部から提案されている(”活断層の長期評価手法(暫定版)”報告書)(2010年11月)。説明は下記の通りである。

- ① “活動範囲”の長さが断層幅の4倍を超える場合には、単一の長さが断層幅の4倍を超えない”地震規模想定区間”の組合せを設定し、それぞれから発生する地震の規模を個別に評価したうえで、それらの地震のモーメント量の和をもって当該”活動範囲”の地震の規模とする。
- ② “地震規模想定区間”で発生する地震の規模は、”地震規模想定区間”の長さ、断層幅及び1回のずれの量に基づき算出する。
- ③ 複数の”地震規模想定区間”の組合せが想定される場合には、地震のモーメント量の和が最大となるケースを採用する。

地震モーメントと気象庁マグニチュードの関係として、武村(1990)による

$$\log M_0 = 1.17M + 10.72$$

が用いられている。評価事例を図G.5-1に示す。



図G.5-1 長大な活断層範囲の地震規模算出（断層幅Wが20kmの場合） 附G-20)

ただし、”長大な活断層から発生する地震の規模を適切に評価する方法は必ずしも確立され

ておらず、算出方法については今後も検討する必要があることに留意する。”と記載されている。

活断層による地震については、断層が長くなるにつれて、スケーリング則が変化することが指摘されている。内陸地殻内地震に対するスケーリング則の変化を図 G.5-2 に示す。3 段階目ではすべり量が一定になる。

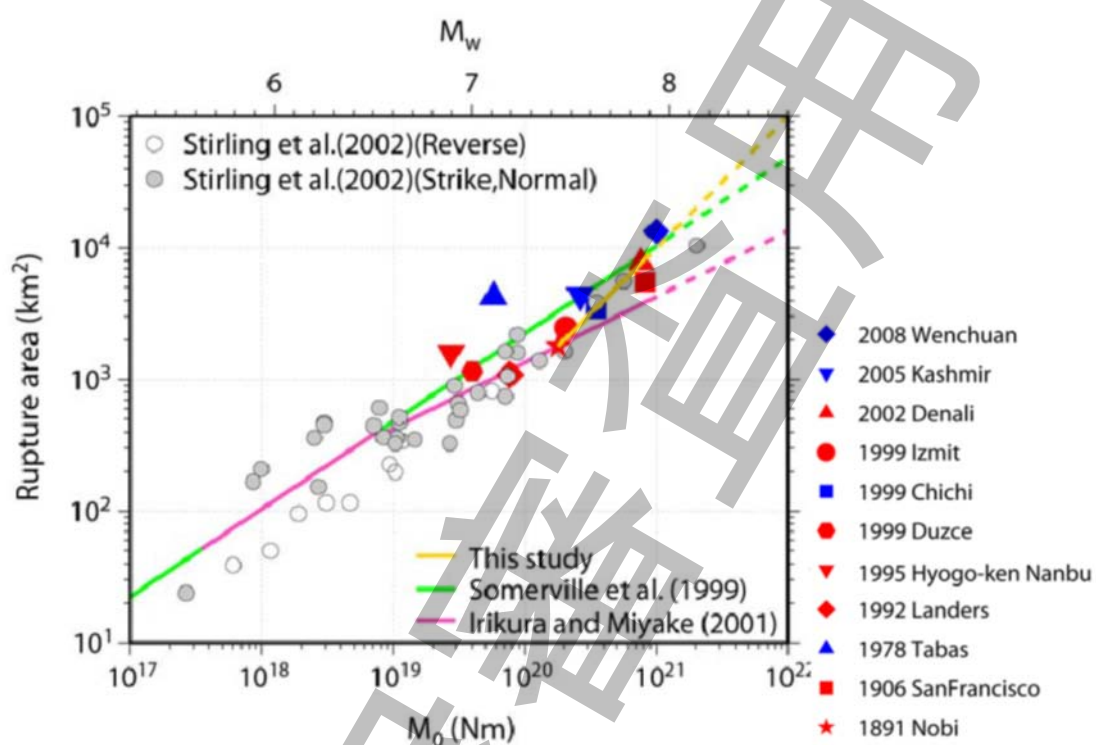


図 4.1 Murotani *et al.* (2010)で示された内陸地殻内地震の M_0 - S の関係 (3 stage scaling model)

- ・黄緑線: Somerville *et al.* (1999)で示された $S \propto M_0^{2/3}$ が成り立つと仮定した経験的関係 (7.5×10^{18} Nm 以下の地震: 円形クラックモデルが成り立つ)
- ・ピンク色線: 入倉・三宅(2001)で示された $S \propto M_0^{1/2}$ が成り立つと仮定した経験的関係 (7.5×10^{18} Nm 以上の地震: 断層幅の飽和)
- ・黄色線: Murotani *et al.* (2010)で示された $S \propto M_0^{1/1}$ が成り立つと仮定した経験的関係 (1.8×10^{20} Nm 以上の地震: すべり量の飽和)

図G.5-2 内陸地殻内地震の M_0 - S の関係 (3 段階スケーリングモデル) 附G-22)

プレート間地震については、図 G4-2(a)に示されているように、これまでの範囲ではそのような事例は指摘されていない。

G.6 海底地殻変動モデルの選択

a) Mansinha and Smylieの方法^{附G-23) 附G-1)}

地震発生時の海底面の鉛直変位分布については，地盤が等方で均質な弾性体であると仮定して地震断層運動に伴う周辺地盤の変位分布を計算するMansinha and Smylieの方法^{附G-23) 附G-1)}が広く用いられている。

Steketee^{附G-24)}によると，半無限弾性体の任意の閉曲面 Σ におけるくいちがい量 Δu_j を与えることによって生じる周辺の変位 u_i は(G.1)式で表される。

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\delta_{jk} \lambda \frac{\partial u_i^{\ell}}{\partial \xi_{\ell}} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k dS \quad (\text{G.1})$$

ここに， δ_{jk} はクロネッカーのデルタ， λ と μ はラメの定数， v_k は dS の法線方向余弦， u_i^j は点 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) における j 方向に働く単位力による点 (x_1, x_2, x_3) の i 方向変位を示す。

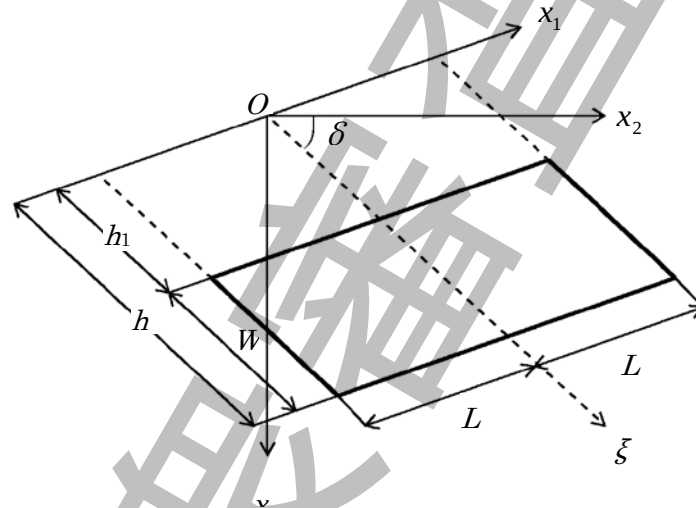


図 G6.1-1 断層モデルの local 座標系

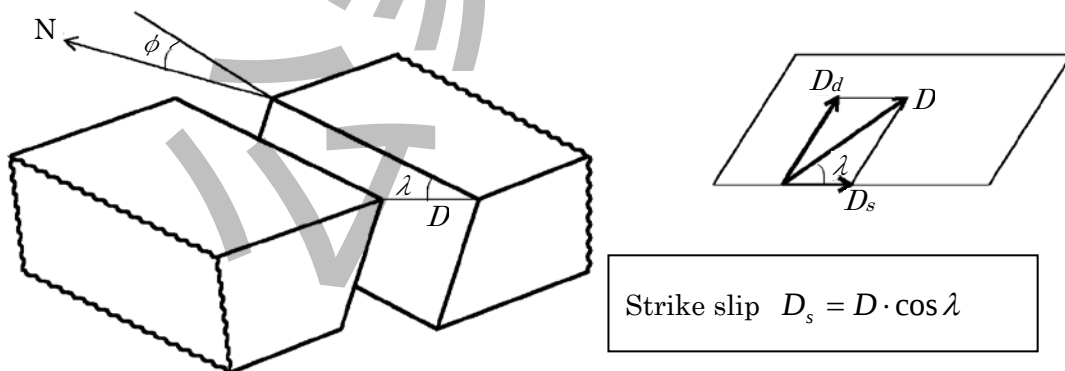


図 G6.1-2 断層すべりの定義

図 G6.1-1 に示す local 座標系で断層モデルを表すと、図 G6.1-2 に示す断層すべりに対する周辺地盤の変位は(G.1)式によって、次式で与えられる。

$$\text{Strike slip} : u_i = \mu D_s \int_{h_1}^{h_2} \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right] d\xi_1 d\xi \quad (\text{G.2})$$

$$\text{Dip slip} : u_i = \mu D_d \int_{h_1}^{h_2} \int_{-L}^L \left[2 \left(\sin \delta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} - \cos \delta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi \quad (\text{G.3})$$

以上によって、周辺地盤の変位は(G.2)式のStrike slip及び(G.3)式のDip slipによる変位の合計で与えられる。なお、Mansinha and Smylie^{附G-23) 附G-1)}では上記の積分が解析的に示されている。

G.7 津波発生・伝播の数値モデルの選択

a) 基礎方程式及び計算方法

津波は、水深に比べて波長が長いことから、長波の理論に基づき、三次元の基礎方程式を鉛直方向に積分した平面二次元場の方程式として記述される。

(連続式)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (\text{G.4})$$

(運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - K_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} &= 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - K_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{G.5})$$

ここに、 t : 時間, x, y : 平面座標, η : 静水面から鉛直上方にとった水位変動量, M : x 方向の線流量, N : y 方向の線流量, h : 静水深, D : 全水深 ($D = h + \eta$), g : 重力加速度, K_h : 水平渦動粘性係数, γ_b^2 : 摩擦係数 ($= gn^2 / D^{1/3}$, n : マニングの粗度係数) を示す。

長波の理論には以下の各理論があり、三次元の基礎方程式を鉛直方向に積分した平面二次元場を基本として再現すべき現象に応じて適切に使い分けることが重要である。

- ① 線形長波理論: 波高と水深の比が小さい (非線形性が無視できる) 場合に適用する。
運動方程式は(G.4)式における非定常項と圧力項 (静水圧分布) からなる。
- ② 非線形長波理論 (浅水理論): 波高と水深の比が小さくない (非線形性が無視できない) 場合に適用する。運動方程式は(G.4)式における非定常項, 圧力項 (静水圧分布)

及び移流項からなり、浅海域における波の前傾化が考慮できる。

- ③ 分散波理論：伝播に伴い津波波形の曲率が大きくなり水粒子の鉛直方向加速度が無視できず、波の分散性が現れる場合に適用する。①に分散項を加えたものを線形分散波理論、②に分散項を加えたものを非線形分散波理論といい、遠地津波の外洋伝播計算には線形分散波理論を適用する。なお、線形分散波理論は次式で示される。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{3} Q_1 \right) - \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{h^2}{2} Q_1 \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{3} Q_1 \right) - \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{h^2}{2} Q_1 \right)\end{aligned}\tag{G.6}$$

ここに、

$$Q_1 = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial t \partial y}$$

近海伝播を対象とする場合、水深 200m 以浅の海域を目安に非線形長波理論を適用した基礎方程式を選定する。その場合の計算方法としては、スタグガード格子を用いた陽的差分法が採用されることが一般的である。

遠方海域から伝播する遠地津波に対しては、波高が水深に比べて小さいため線形理論が適用できる。ただし、初期波形が様々な周期成分を含んでいる場合、水深の深いところでは周波数ごとに波速が少しずつ異なるため、長時間伝播すると次第に短周期成分程遅れが生じてくることから、この効果を再現するためには分散項を含む運動方程式の適用が必要となる。さらに、遠地津波に対しては運動方程式中にコリオリ力を考慮する必要があることに加え、地球が球形である効果は無視できないため球座標系を採用する必要がある。計算スキームとしては、スタグガード格子で、かつ連続の式には陽的差分法、運動方程式には陰的差分法が採用されることが一般的である。

b) 初期条件及び境界条件

G.6 海底地殻変動モデルの選択で述べた海底面の鉛直変位分布をその直上の海面に与え、これを津波計算の初期水位条件とするのが一般的である。なお、海底地盤変動の時間変化を考慮する場合には、静水面を初期水位条件とする。

また、計算領域、海底・海岸地形、構造物などを考慮して、①沖側境界条件、②陸側境界条件及び③越流境界条件の適切な設定が重要である。すなわち、沖側境界条件については、津波が沖合に境界のない場合と同じ挙動を示すように適切に設定する必要がある。一方、陸側境界条件については、津波が陸上部に遡上する場合あるいはしない場合に分け、両者に対して適切に設定する必要がある。さらに、津波が防波堤、海岸堤防・護岸などの構造物を越流する際の越流境界条件も適切に設定する必要がある。

c) 地形データ

計算に用いる地形データは、最新の海底地形図、陸上地形図などをもとに作成することが重要である。

海底地形データとしては、海上保安庁水路部の海図、又は海の基本図、財団法人日本水路協会の日本周辺 1kmメッシュ海底地形デジタルデータなどが活用できる。さらに、評価地点周辺で深浅測量が既に実施されていれば、その測量データを用いることができる。一方、遠地津波など海洋の広範囲を対象とする場合はSmith and Sandwell^{附G-25)}による2分メッシュの地形データ、又はGebco^{附G-26)}による30秒メッシュの地形データが活用できる。

陸域地形データとしては、国土地理院、又は財団法人日本地図センターの数値地図を活用することができるが、海岸付近の地形精度は必ずしも十分ではないことに注意する必要がある。

d) 妥当性の検証

設定された数値モデル及び数値計算方法が良好な再現性をもたらすものであるかどうかについては、何らかの方法で確認する必要がある。日本沿岸は過去に数多くの津波を経験しており、一般的に比較するに十分な数の痕跡高があることから、既往津波の痕跡高は波源の断層モデルなどの妥当性確認用データとして適する。

相田^{附G-27)}は、痕跡高と計算値の空間的な適合度を表す指標 K 及び κ に基づきこれらを確認する方法を提案しており、相田の方法は最も広く認められた確認方法であることから、この考え方に従い妥当性を検証することが望ましい。なお、 K 及び κ の定義式は次のとおりである。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (\text{G.7})$$

n : 地点数

$K_i = R_i / H_i$

R_i : i 番目の地点での痕跡高

H_i : i 番目の地点での計算値

具体的には、広域の K 及び κ に関して下記条件を満たすことを目安として検証を行う。

$$0.95 < K < 1.05 \quad \text{かつ} \quad \kappa < 1.45$$

G.8 津波高さの評価結果の真値に対するばらつき

a) 誤差の標準偏差

津波ハザード解析で用いるばらつきは、同じ波源（特定の場所で特定の規模の地震（津波）が発生した場合）による特定地点の津波高さが時間的に推定値に対してどの程度ばら

ついているかを表現するものである。ここでは、空間的なばらつきと時間的なばらつきが同じというエルゴード仮定が成立するものとして、空間的なばらつきを示すパラメータ κ の値に対応した対数標準偏差を与える。

推定値のばらつきが対数正規分布で近似できることは土木学会津波評価部会報告「原子力発電所の津波評価技術」^{附G-1)} の付属編 1.1.6 に示されている。ばらつきの大きさ (κ の値) の根拠としたのは、既往津波に対する痕跡高と計算値の比のばらつきである。

b) 打ち切り誤差

推定値の不確定性は対数正規分布あるいは打ち切りのある対数正規分布で表現しており、パラメータとして対数標準偏差 (相田^{附G-27)} による κ で表現) と打ち切り範囲を設定する必要がある。

対数正規分布の打ち切りは、実際には存在すると考えられるが、データから設定することは簡単ではない。例えば、分岐として、1つの極限として打ち切りを考慮しない場合を設定し、もう1つの分岐として分布の両端の各1%に入る現象は実際には起こらないとした場合を設定することができる。1%である理由は特にないが、このような違いで差がでるような領域は結果の信頼性がかなり低いことを示すことが重要と考えられる。

G.9 津波ハザード評価におけるフラクタイル曲線の作成

ハザード解析において最終的に求めるのは、各地点においてある津波高さに達する頻度がどれくらいであるか (年超過確率) であり、これを超えないとみなす専門家のコンセンサスがどれくらいの割合で得られるかをパラメータとして整理する。(例えば、8割の人がこれより小さいと認めるような年超過確率を示した曲線を80%フラクタイルとよぶ。)

すなわち、フラクタイル曲線の横軸は津波高さ (最大波高または最小波高)、縦軸はその津波高さを越える年超過確率 (1/年) であり、この曲線がコンセンサスの割合 (%) をパラメータとして複数描かれることになる。

なお、各シナリオの重みつき平均を行うことによって、超過確率の算術平均の曲線を描くことも可能である。算術平均の場合、重みが非常に小さくても極端に大きな超過確率を生じるシナリオがある場合、そのシナリオが超過確率を大きく引き上げる場合がある。しかし、結果を直感的に理解しやすいこと、適切なコンセンサスの割合をどうするかという問題が避けられるという利点もあるため、通常、ハザード評価に際しては、フラクタイル曲線と算術平均の両方を計算することが望ましい。

ハザード曲線群からフラクタイル曲線を作成する概念は図G9-1のとおりであるが、実際には以下の手順で実施することができる。

- 着目する津波高さごとに、年超過確率の曲線 (ハザード曲線) 群を値の大きい順にならべかえる。
- 大きいほうから数えて、N%のところにあるハザード曲線の超過確率をN%フラクタイルとする。

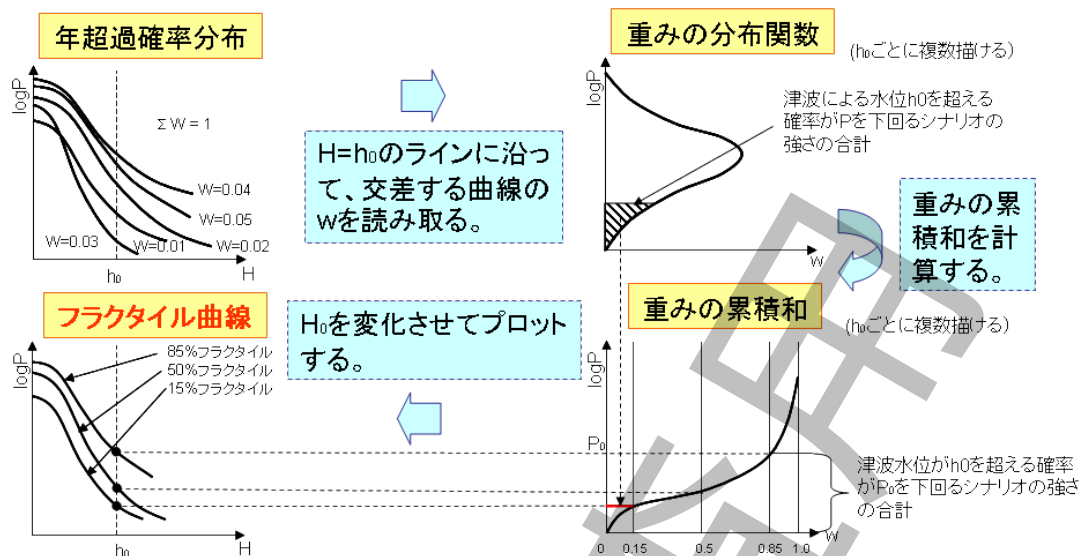


図 G.9-1 ハザード曲線群からフラクタイル曲線の作成方法

次に、分岐の全組み合わせに対してハザード曲線を計算する場合(総当たり法)と分岐の全組み合わせの中から分岐の重みに応じてサンプリングを行い、必要な数のハザード曲線を計算する場合(モンテカルロ法)に分けて、フラクタイル曲線の算定アルゴリズムを示す。

(1) 総あたり法

ある地点 k におけるすべての断層(L 個)に関する分岐の組み合わせ($j_1, j_2, \dots, j_L$)に対する年超過確率 $F_{(j_1, j_2, \dots, j_L), k}(H^{th})$ を値の小さい順に並べ替えたものを $F'_{j', k}(H^{th})$ とかき、分岐組合せ j' の重みを $v'_{j'} = \prod_l v_l, j'_l$ と書く。

$$\sum_{j'=1}^{J-1} v'_{j'} < V \leq \sum_{j'=1}^J v'_{j'}$$

を満たすように J をとる(図 G.9-2 参照)。

すると、 $V \times 100\%$ フラクタイル曲線 $G_k(H^{th})$ は、

$$G_k(H^{th}) = F'_{J, k}(H^{th})$$

で求められる。

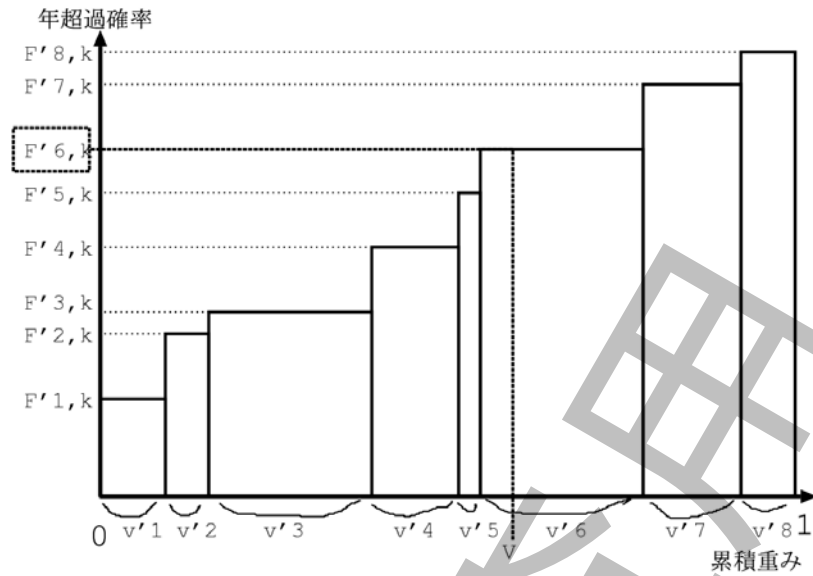


図 G.9-2 年超過確率からフラクタイルへの変換例

(2) モンテカルロ法

各断層 l に対して、一様乱数を発生して確率 v_{l,j_l} で分岐 j_l が生じるようにする。

($\sum_1^{j_l-1} v_{l,j} \leq \text{一様乱数} < \sum_1^{j_l} v_{l,j}$ ならば、分岐 j を採用)

これを、すべての断層に関して繰り返して、

$$F_{(j_1, j_2, \dots, j_L), k}(H^{\text{th}}) = \sum_l f_{l, j_l, k}(H^{\text{th}})$$

を算定する。

この操作を何度も行えば、段々 $F_{(j_1, j_2, \dots, j_L), k}(H^{\text{th}})$ の値が揃ってくる。もともと、発生さ

せた $(j_1, j_2, \dots, j_L)$ の組合せは、重みを考慮したものなので、できた $F_{(j_1, j_2, \dots, j_L), k}(H^{\text{th}})$ は均

等な重みを持っているとしてよい (図 G.9-3 参照)。だから、例えば $F_{(j_1, j_2, \dots, j_L), k}(H^{\text{th}})$ がモ

ンテカルロで 100 個求まっていたら、多い方から数えて 20 番目のところにある値が 80% フラクタイルの値になる。ただ、100%フラクタイルの場合は、すべての断層の最悪の場合を決定論的に選択していく。

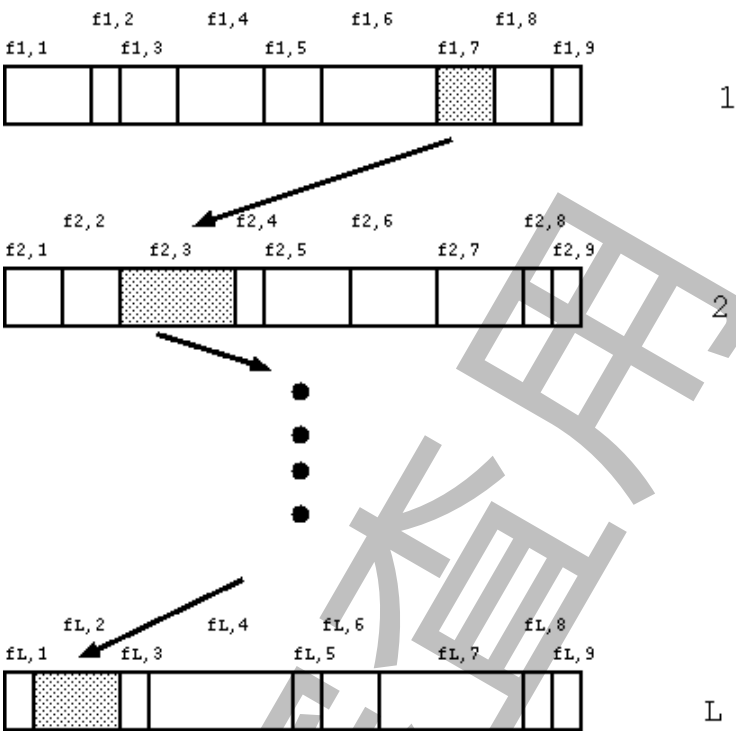


図 G.9-3 モンテカルロ法

附属書 H

(参考)

地震動と津波の結合確率評価方法

序文

この附属書は、7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価における地震動と津波の結合確率評価方法を記載する。

H.1 基本的考え方

津波高さが与えられた場合の地震動の条件付確率分布は、対象地点周辺の地震活動に関する確率モデル（地震活動域の区分及び各地震活動域のマグニチュード分布と年地震発生回数の設定）が与えられれば、以下のような方法で算定することができる。

地震活動域*i*でマグニチュード*m_j*の地震が発生した場合に対象地点で生じる津波高さ a と地震動強さの中央値を $t_{i,j}$ と $a_{i,j}$ とする。その際、津波高さは数値シミュレーションにより、地震動強さは距離減衰式により求めるものとする。中央値のまわりのばらつきは、一般に、次式のように対数正規分布で表現される。

$$f_{i,j}(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln a}a} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln a - \ln a_{i,j}}{\sigma_{\ln a}}\right)^2\right]$$

$$g_{i,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln t}t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \ln t_{i,j}}{\sigma_{\ln t}}\right)^2\right]$$

津波と地震動のばらつきの間に相関がない（ $f(a)$ と $g(t)$ は独立である）と仮定すると、地震動強さと津波高さの同時確率密度関数は次のように分離される。

$$h_{i,j}(a, t) = f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t)$$

そして、津波高さが t_0 の時の同時確率密度関数は

$$h_{i,j}(a, t = t_0) = f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t = t_0)$$

となる。そして、津波高さが t_0 の時の地震動強さの条件付確率密度関数は

$$h_{i,j}(a|t = t_0) = \frac{f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t = t_0)}{g_{i,j}(t = t_0)} = f_{i,j}(a)$$

であり、地震動強さの確率密度関数に等しい。

すべての地震を考慮した場合の同時確率密度関数は次のようになる。

$$h(a, t = t_0) = \sum_i \sum_j f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t = t_0) v_i \beta_i(m_j)$$

ここで、 v_i は地震活動域*i*の年地震発生数、 $\beta_i(m)$ は地震活動域*i*のマグニチュード分布である。従って、 $v_i \beta_i(m)$ は、地震活動域*i*におけるマグニチュード m_j の地震の年発生数を表す。そして、津波高さが t_0 の時の地震動強さの条件付確率密度関数は次のようになる。

$$p(a|t = t_0) = \frac{\sum_i \sum_j f_{i,j}(a) \cdot g_{i,j}(t = t_0) v_i \beta_i(m_j)}{\sum_i \sum_j g_{i,j}(t = t_0) v_i \beta_i(m_j)}$$

地震活動域の区分が行われ、各地震活動域のマグニチュード分布と年地震発生回数が設定され、津波高さと地震動強さの中央値が推定され、それぞれのばらつき（対数標準偏差）が設定されれば、上式を用い津波高さが与えられた場合の地震動の条件付確率分布を評価できる。

以上の内容を図H.1に模式的に示す。この図では、1つ1つの地震のレベルにまで分解しており、地震ごとに地震動強さ（最大加速度）の分布と津波高さの分布が決められる。上式で $v_i \beta_i(m)$ にあたるのが図では v_i 、 $g_{ij}(t=t_0)$ にあたるのが ρ_i である。津波高さを条件とした地震動強さの分布は確率密度あるいは超過確率分布で表現される。

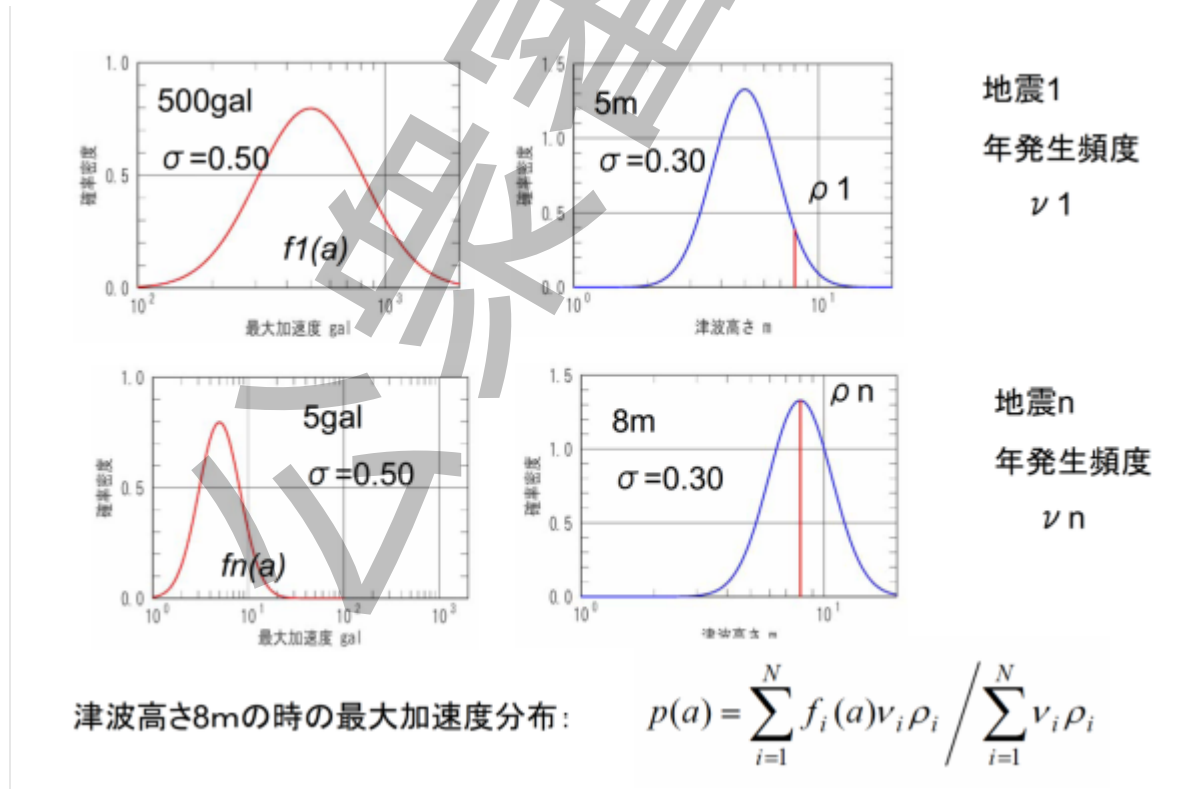


図 H.1 津波と地震動の結合確率評価のイメージ

H.2 結合確率の評価例

津波高さを条件とした場合の地震動分布を評価した。地震動の評価には原子力分野で用いられているスペクトル推定式（Nishimura et al. (2001) 附H-1）, Noda et al. (2002) 附H-2）を用いた。推定に用いているパラメータは気象庁マグニチュードと等価震源距離である。気象庁マグニチュードはモーメントマグニチュードより 0.3 小さいとし、上限を 8.3 とした。等価震源距離はすべり量の不均質性も考慮して断層面形状から設定した。

減衰 5%加速度応答スペクトルの計算例と津波高さと最大加速度の関係を図H.2 に示す。津波ハザードの評価事例と同じ事例の分岐の一つ（不均質モデル、 $M_C=8.5$ 、 $B_M=0.5$ 、 $T_r=82$ 年、 $\kappa=1.35$ 、 $\pm 2.3\beta$ ）について、津波高さが 7m の場合の地震動分布の評価手順を示す。最大加速度のばらつき（ β ）は自然対数で 0.5 とした。

津波高さ h が 7m、最大加速度 a が 100gal の場合の確率密度の評価例を表 H.1 に示す。津波高さに関する下から 2 行目の和が図 H.1 内の式の分母、最大加速度に関する下から 2 行目の和が式の分子である。なお、確率密度は横軸を自然対数とした場合の値である。

表 H.1 津波高さが 7m、最大加速度が 100gal の場合の確率密度の評価例

M	津波高さ 計算値(m)	正規分布 7m位置	7m の 確率密度	年発生頻度	最大加速度 計算値(gal)	正規分布 100gal 位置	100gal の 確率密度
8.3	3.637	2.18174	0.12303	$\times 0.2 \times 1/82$	46.7	1.52465	0.24956
8.4	5.069	1.07551	0.74552	$\times 0.2 \times 1/82$	52.4	1.29197	0.34632
8.5	7.051	-0.02419	1.32896	$\times 0.2 \times 1/82$	58.0	1.09077	0.44013
8.6	9.683	-1.08116	0.74099	$\times 0.2 \times 1/82$	63.1	0.91973	0.52271
8.7	13.404	-2.16472	0.12767	$\times 0.2 \times 1/82$	63.1	0.91973	0.52271
—	$\Sigma = 0.0074784364$			—	$\Sigma = 0.0032386933$		
$p(100) = 0.0032386933 / 0.0074784364 = 0.43307$							

表 H.1 と同じ手順を、最大加速度を変えて繰り返すと、図 H.3 に示すように、確率密度分布あるいは超過確率分布を求めることができる。

全分岐(360分岐)に対する津波高さを変えた場合の超過確率分布曲線の分布を図 H.4 に、津波高さ 3m の場合の超過確率分布に対するフラクタイル曲線と算術平均曲線を図 H.5(左)に、津波高さを変えた場合の 0.50 フラクタイル曲線の比較を図 H.5(右)に示す。

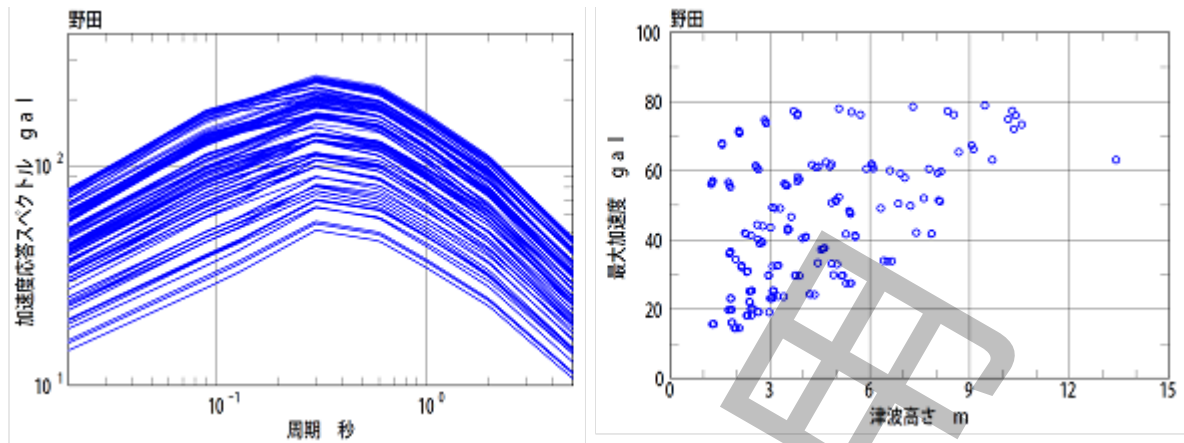


図 H.2 減衰 5% 加速度応答スペクトルの計算例と津波高さと最大加速度の関係

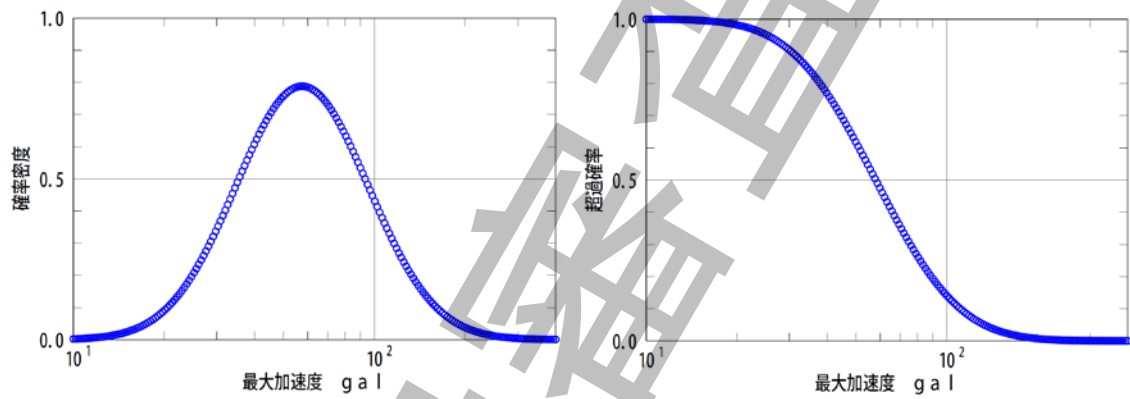


図 H.3 ひとつの分岐経路に対する最大加速度の確率密度分布(左)と超過確率分布(右)
(H=7m)

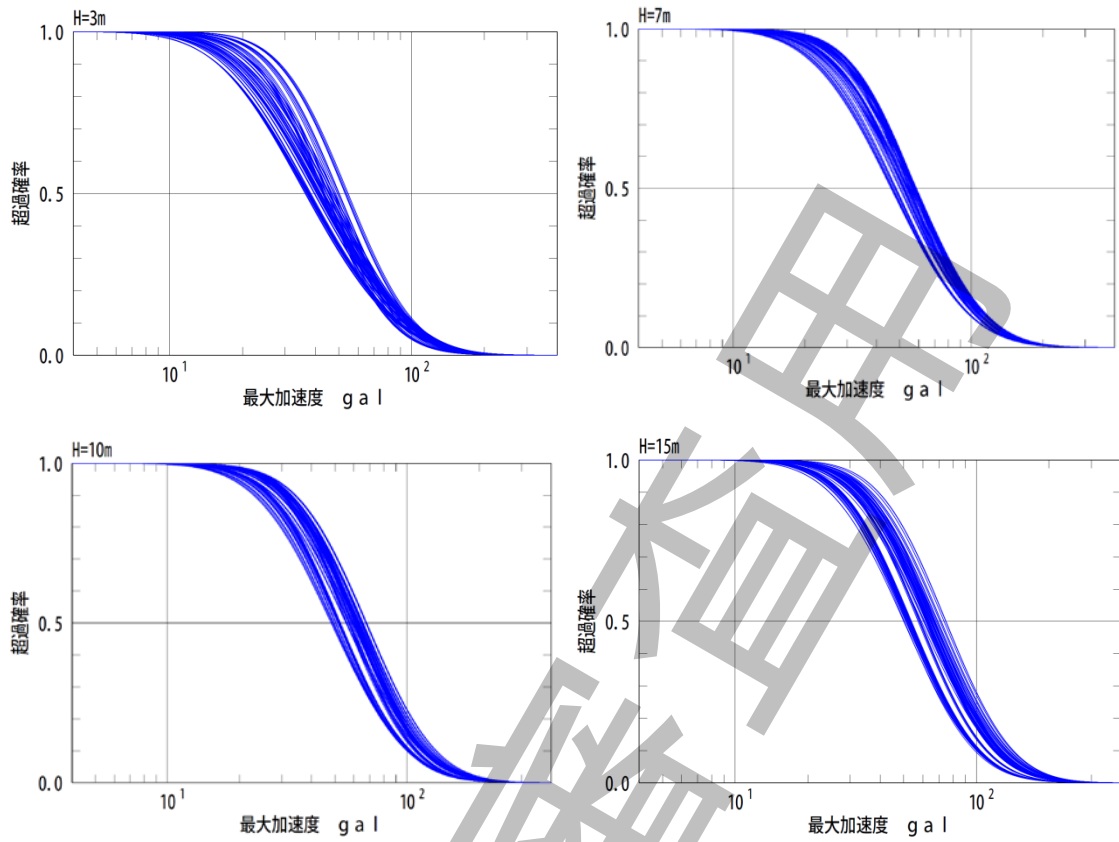


図 H.4 津波高さを変えた場合の超過確率分布曲線の分布

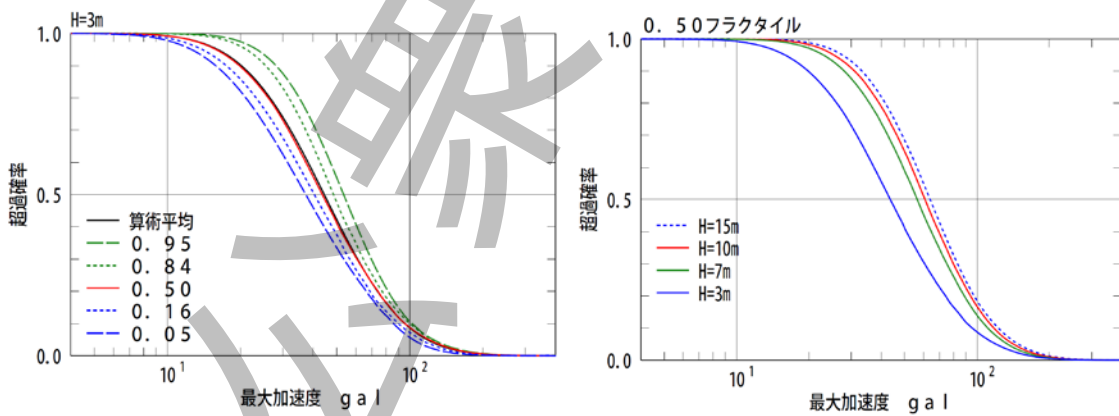


図 H.5 津波高さ 3m の場合の超過確率分布に対するフラクタイル曲線と算術平均曲線(左)及び津波高さを変えた場合の 0.50 フラクタイル曲線の比較(右)

附属書 I

(参考)

ハザード再分解に基づく fragility 評価用津波群の設定方法

序文

この附属書は、**箇条 7.8.2** における津波パラメータを求めるための津波群（シナリオ津波）の設定方法と設定例を記載する。

I.1 ハザードの再分解

ハザードの再分解（disaggregation）は地震動ハザードの分野で広く活用されており、Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) によるNUREG/CR-6372 (1997) ^{附I-1} やそれを受けたUSNRCによるNUREG-2117 (2012) ^{附I-2} などで、概念や役割の説明が行われている。ハザード評価が各種の不確定性を集約した結果であるのに対し、再分解はモデルの構成部分の相対的な貢献度を明らかにし、パラメータの感度を明らかにするものである。

地震動ハザードの再分解に基づき生起確率付地震動群（それぞれが年発生頻度を持つ地震動の集合）を設定する方法が安中・他(2005) ^{附I-3} で提案されており、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会による”経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討—経済性照査ワーキング活動報告書—”（2008年3月）^{附I-4} などにおいて評価に用いられている。津波ハザードにおいても同様な方法が適用できると考えられる。

津波ハザードの再分解に基づき生起確率付津波群を設定した例を以下に示す。ハザード再分解を単純にするために、ロジックツリーの分岐は設定せず、1本の津波ハザード曲線を評価するモデルとした。なお、ロジックツリーの分岐を考慮する場合には、算術平均ハザードを対象とすれば同様の方法が適用できると考えられる。

I.2 津波ハザードの評価

津波の計算領域と津波ハザードを評価した対象地域沖合のコントロールポイントを**図I.1**に示す。計算格子の大きさは外側から1440m、480m、160mで、対象地域を含む領域は最小5mである。対象地域沖合の水深30mから90mの7地点の中から、水深50mの地点をコントロールポイントとした。数値計算の基礎方程式及び計算スキームとして、非線形長波理論（浅水理論）に基づく後藤の方法（後藤・小川(1982) ^{附I-5}）を用いた。

津波ハザード評価で考慮した波源とパラメータを**表I.1**と**図I.2**に示す。

表I.1で海溝寄り津波地震の平均発生間隔は東北地方太平洋沖型地震を含め103年（単独では124年）とし、4回に1回は8.6~8.8の規模の地震が発生するとした。これは2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の際に津波地震領域で生じたすべりが単独の場合にも発生することを想定したものである。三陸沖北部プレート間地震の平均発生間隔は97年とし、6回に1回は津波地震領域を含む地震（M8.7）が発生するとした。

表 I.1 津波ハザード評価用モデル

	M の範囲	平均発生間隔	計算ケース	波源モデル
東北地方 太平洋沖型地震	9.1	600 年	6	特性化モデル
海溝寄り	8.1～8.5	165 年	41	確率論的津波ハザード解析の方法 ^{附I-6)}
津波地震	8.6～8.8	496 年	12	
海溝寄り 正断層型地震	8.2～8.6	400 年	43	確率論的津波ハザード解析の方法
北海道 500 年津波	8.6～9.0	500 年	5	伊尾木・谷岡(2013) ^{附I-7)}
三陸沖北部	8.3～8.5	116.4 年	16	確率論的津波ハザード解析の方法+特性化モデル
プレート間	8.7	582 年	3	
三陸沖南部 海溝寄り	8.1～8.3	200 年	10	確率論的津波ハザード解析の方法

図 I.2(1)の左側は矩形一様すべりモデルを用いたケースの断層面の分布であり、右側は特性化モデルの妥当性を検証した 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震津波の特性化波源モデルのすべり量分布である。

東北地方太平洋沖地震津波の特性化波源モデルでは、超大すべり域を含む大すべり域の面積を 27%、超大すべり域の面積を 9%とし、平均すべり量を 9.65m、大すべり域のすべり量を 19.3m、超大すべり域のすべり量を 38.6mとした。平均すべり量は、断層面積 124,432km²から、応力降下量を 3.0MPa、剛性率を 4.5×10^{10} N/m²として求めた。大すべり域の面積比、超大すべり域の面積比は東京電力(2014) ^{附I-8)} のL67 モデルなどを参照して設定した。痕跡高データ 3882 個との比較では $K=0.98$ 、 $\kappa=1.44$ である。痕跡データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ統一データセット (release20121229^{附I-9)}) によるものであり、海岸線から 500m以内のデータを用いた。また、痕跡高との比較では北海道から房総までの沿岸域を 50m格子で表現した計算格子 (Takao et al. (2012) ^{附I-10)}) を用いた。

図I.2(2)は東北地方太平洋沖型地震と三陸沖北部プレート間地震に対する特性化モデルであり、大すべり域の位置は変動するとした。三陸沖北部プレート間地震のマグニチュードなどのパラメータは断層面積 49,781km²から上記の東北地方太平洋沖地震津波の特性化波源モデルの場合と同様に設定した。

津波を計算した 136 ケースについて、水深 50m のコントロールポイントにおけるモーメントマグニチュードと津波高さの関係を図 I.3(左)に、全体及び波源別の津波ハザード曲線を図 I.3(右)に示す。計算による津波高さの最大値は 17.66m である。津波ハザード曲線の算

定で、推定値のばらつきは $\kappa = 1.35$ 、対数正規分布の打ち切りは $\pm 2.3\sigma$ とした。津波高さ15m程度までは複数の波源が影響しているが、それ以上の範囲では東北地方太平洋沖型のみで決まっている。

1.3 津波ハザードの再分解に基づく津波群

対数軸上で等間隔に区分した各区間について、区間別の頻度と波源別の貢献度(%)を表 I.2 に示す。区間中央値が16.60mまでは複数の波源が貢献しているが、区間中央値が18.20m以上では東北地方太平洋沖型の貢献度が100%になっている。表 I.2 のハザード再分解の結果に基づき、各区間の津波高さに対応する津波群(fragility 評価用津波群)を設定することができる。以下では、表に網掛けで示した2つの区間を例に津波群の作成例を示す。

区間中央値が5.50mの場合、区間頻度は 0.480×10^{-3} である。各波源において計算値が $5.50/2 = 2.75\text{m} \sim 5.50 \times 2 = 11.00\text{m}$ の中に入る波源を抽出すると下記ようになる。

- ・東北地方太平洋沖型：3個(貢献度6%)
- ・津波地震：16個(貢献度46%)
- ・正断層型地震：9個(貢献度7%)
- ・北海道：4個(貢献度24%)
- ・三陸北部：3個(貢献度17%)
- ・三陸南部：0個(貢献度0%)

貢献度が1%以上の5つの波源の代表例に対して、波源モデルを変更することにより水深50mのコントロールポイントの津波高さが5.50mになるように調整した。波形を図 I.4(左)に、浸水深分布を図 I.5(上、中)に示す。波源モデルについて、通常は断層モデルから計算される地殻変動を地形と水位に時間増分として同時に与えている。波源モデルの変更では、断層モデルのすべり量を調整する方法ではなく、水位の増分のみに倍率を掛ける方法を採用し、地形の変動が元々のモデルによるものと同じになるようにした。これは対象地域の地殻変動の大きさとコントロールポイントにおける津波水位のばらつきに相関がないと考えられることによる。単純に断層モデルのすべり量を調整する方法では地形の変動もそれに応じて変動してしまう。

区間中央値が9.55mの場合、区間頻度は 0.173×10^{-3} である。各波源において計算値が $9.55/2 = 4.775\text{m} \sim 9.55 \times 2 = 19.10\text{m}$ の中に入る波源を抽出すると下記ようになる。

- ・東北地方太平洋沖型：3個(貢献度37%)
- ・津波地震：9個(貢献度46%)
- ・正断層型地震：1個(貢献度0%)
- ・北海道：2個(貢献度17%)
- ・三陸北部：0個(貢献度0%)
- ・三陸南部：0個(貢献度0%)

貢献度が 1%以上の 3 つの波源の代表例に対して、波源モデルを変更することにより水深 50m のコントロールポイントの津波高さが 9.55m になるように調整した。波形を図 I.4(右)に、浸水深分布を図 I.5(下)に示す。波源モデルの変更は 5.50m の場合と同様に行った。

図 I.4 と図 I.5 が fragility 評価用津波群の例になる。図 I.4 の水深 50m のコントロールポイントにおける波形は波源により違いがある。また、北海道 500 年津波の波形は津波高さによりあまり違いがないが、東北地方太平洋沖型と津波地震は津波高さによっても変化している。図 I.5 の浸水深分布も、水深 50m のコントロールポイントの津波高さが同じであっても、波源によりかなりの違いが見られる。原子力発電所の実際の適用例では、こうした浸水領域の中に SSCs の場所 (SSCs 評価地点) が設定され、津波群のそれぞれに対して、浸水深や流速などの津波パラメータを評価することができる。

区間中央値 5.50m の場合、この例では 5 個の津波群を抽出しているが、実際の適用においては、貢献度が高い波源域 (例えば津波地震) について複数の津波群を抽出することが考えられる。そして、区間頻度にご貢献度を掛けた頻度が波源域ごとの頻度になり、複数の津波 (N 個) が設定されている波源域についてはその頻度の $1/N$ が津波 1 個当たりの頻度になる。年発生頻度を持った各津波に対して fragility が評価されれば、それらを合わせるにより区間中央値 5.50m に対する損傷頻度が評価される。

表 I.2 津波高さ区間別波源の貢献度(%)

津波高さ 区間中央値	区間 頻度	東北地方 太平洋沖	津波 地震	正断層 地震	北海道 500 年	三陸沖 北部	三陸沖 南部
1. 05	0. 123E-02	0	19	4	0	43	34
1. 15	0. 133E-02	0	17	4	0	49	30
1. 26	0. 140E-02	0	16	3	0	55	26
1. 38	0. 143E-02	0	15	3	0	60	22
1. 51	0. 140E-02	0	14	3	1	63	19
1. 66	0. 134E-02	1	15	3	2	64	15
1. 82	0. 125E-02	1	16	4	3	65	11
2. 00	0. 115E-02	3	17	4	6	62	8
2. 19	0. 105E-02	5	19	5	8	58	5
2. 40	0. 977E-03	7	21	6	11	52	3
2. 63	0. 914E-03	9	23	7	14	46	1
2. 88	0. 861E-03	10	25	8	16	41	0
3. 16	0. 826E-03	11	27	8	17	37	0
3. 47	0. 789E-03	11	28	9	18	34	0
3. 80	0. 744E-03	10	31	9	19	31	0
4. 17	0. 684E-03	9	34	9	20	28	0
4. 57	0. 618E-03	8	37	9	21	25	0
5. 01	0. 549E-03	7	42	8	22	21	0
5. 50	0. 480E-03	6	46	7	24	17	0
6. 03	0. 412E-03	6	50	6	26	12	0
6. 61	0. 353E-03	8	54	5	26	7	0
7. 24	0. 295E-03	12	56	3	26	3	0
7. 94	0. 246E-03	17	56	2	24	1	0
8. 71	0. 206E-03	26	52	1	21	0	0
9. 55	0. 173E-03	37	46	0	17	0	0
10. 47	0. 142E-03	50	39	0	11	0	0
11. 48	0. 118E-03	63	30	0	7	0	0
12. 59	0. 992E-04	75	21	0	4	0	0
13. 80	0. 818E-04	87	13	0	0	0	0
15. 14	0. 719E-04	92	8	0	0	0	0
16. 60	0. 613E-04	97	3	0	0	0	0
18. 20	0. 506E-04	100	0	0	0	0	0
19. 95	0. 407E-04	100	0	0	0	0	0
21. 88	0. 320E-04	100	0	0	0	0	0
23. 99	0. 224E-04	100	0	0	0	0	0
26. 30	0. 144E-04	100	0	0	0	0	0
28. 84	0. 919E-05	100	0	0	0	0	0
31. 62	0. 533E-05	100	0	0	0	0	0
34. 67	0. 208E-05	100	0	0	0	0	0

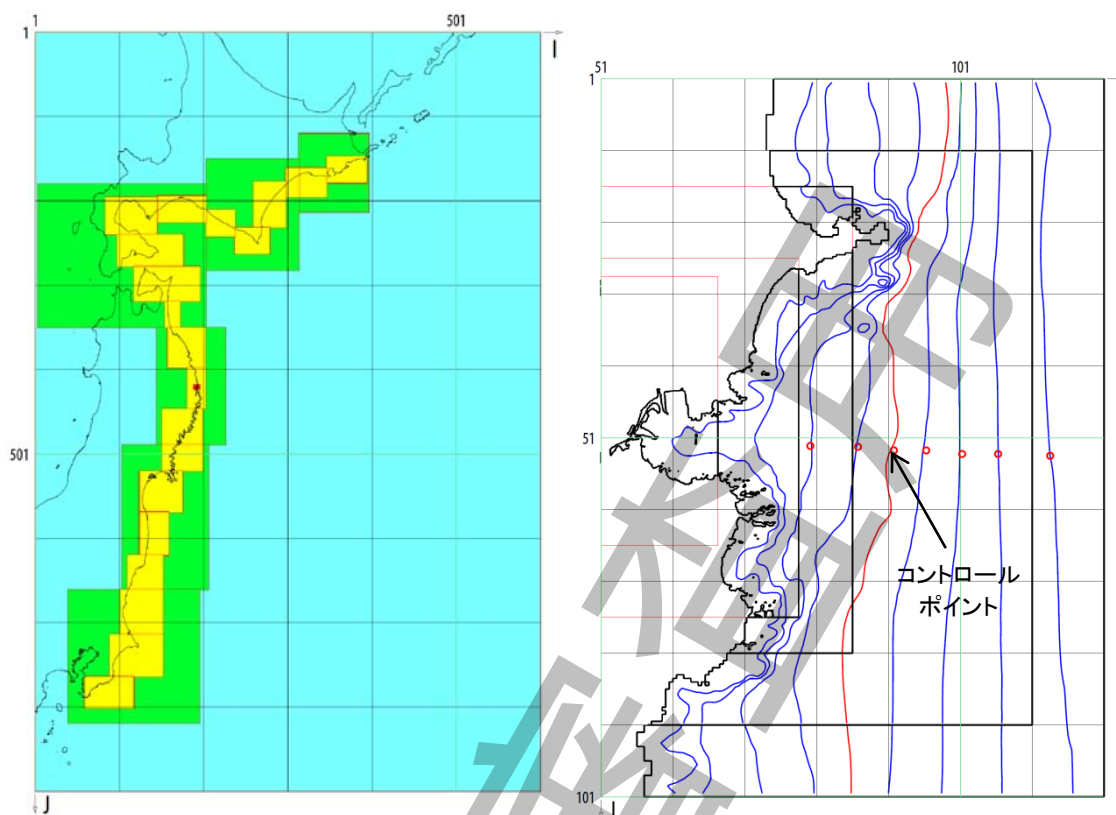


図 I.1 計算領域(左)と対象地域沖合のコントロールポイント

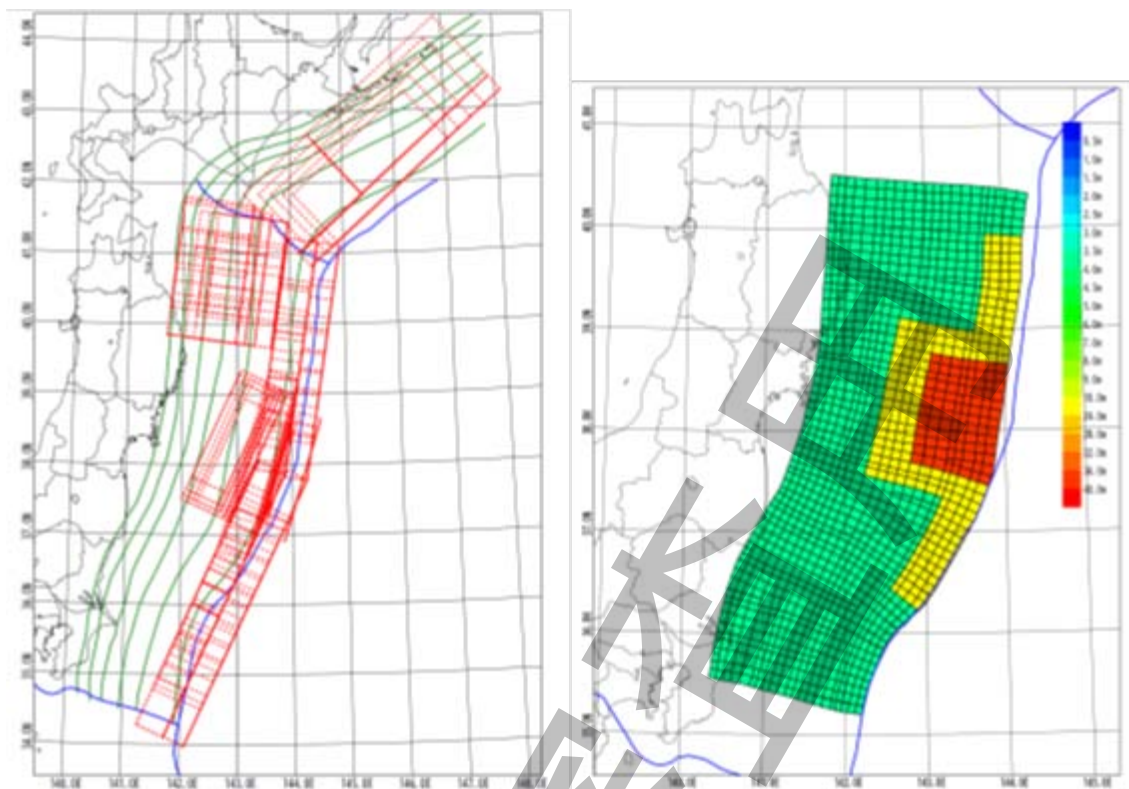


図 I.2(1) 矩形モデルの分布(左)と東北地方太平洋沖津波の特性化波源モデル (右)

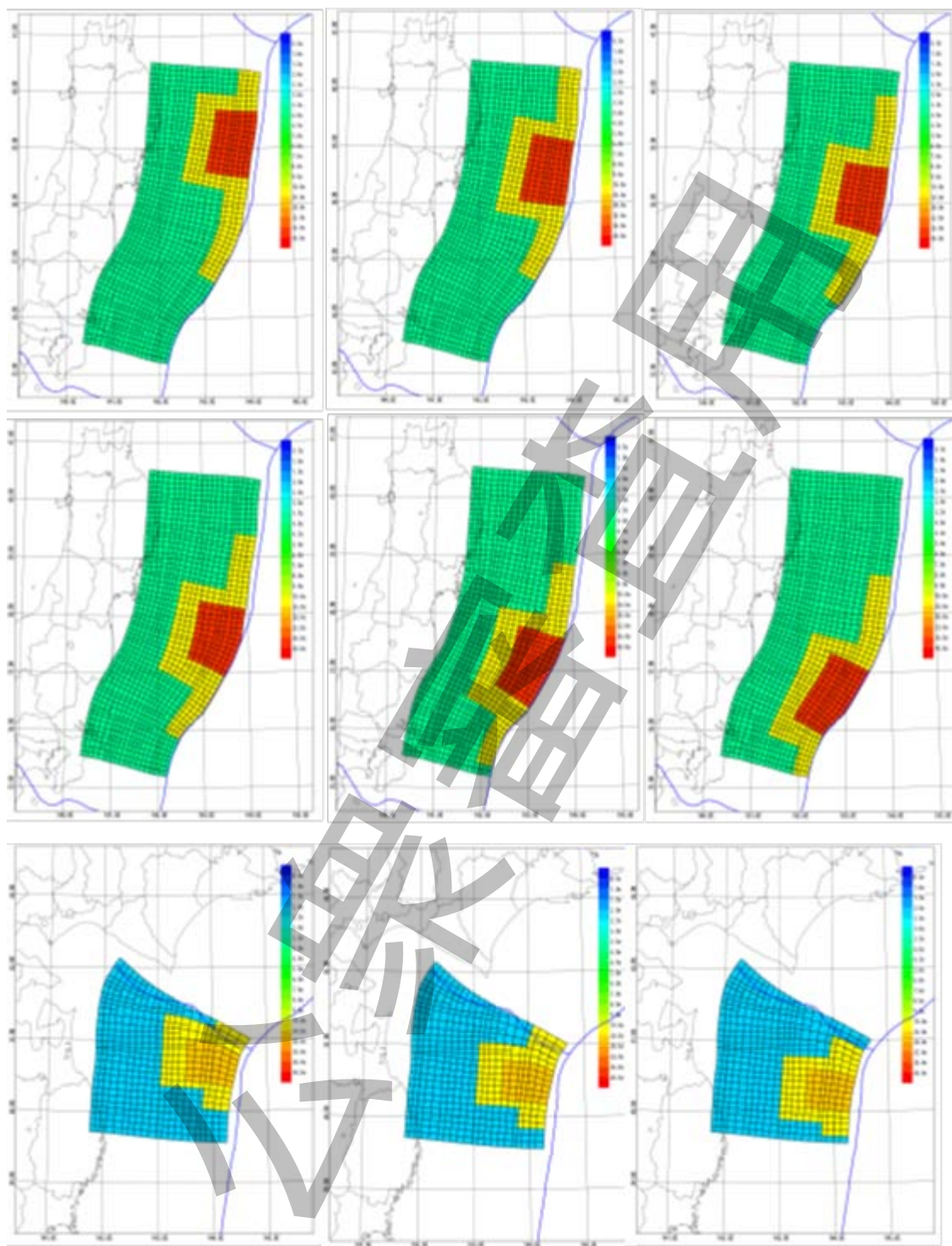


図 I.2(2) 東北地方太平洋沖型地震(上・中)と三陸沖北部プレート間地震(下)に対する特性化モデル

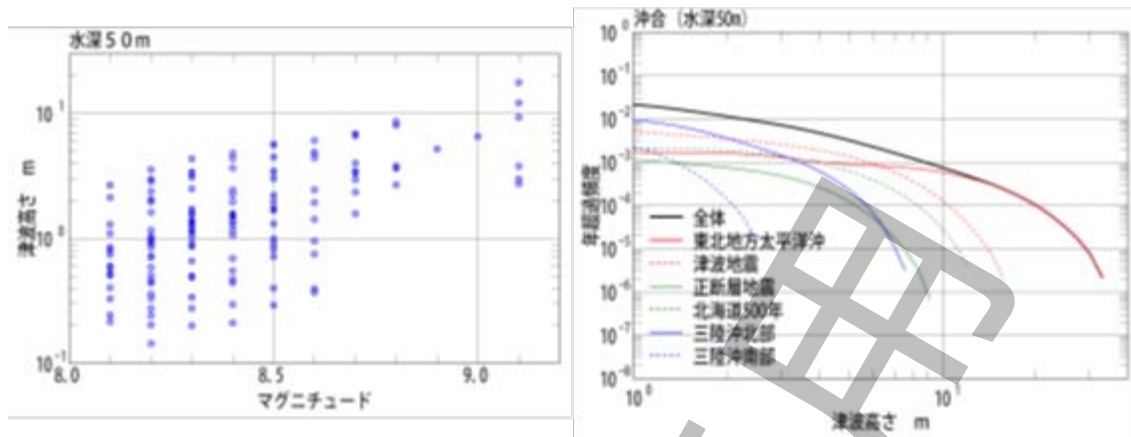


図 I.3 モーメントマグニチュードと津波高さの関係(左)並びに全体及び波源別の津波ハザード曲線(右)

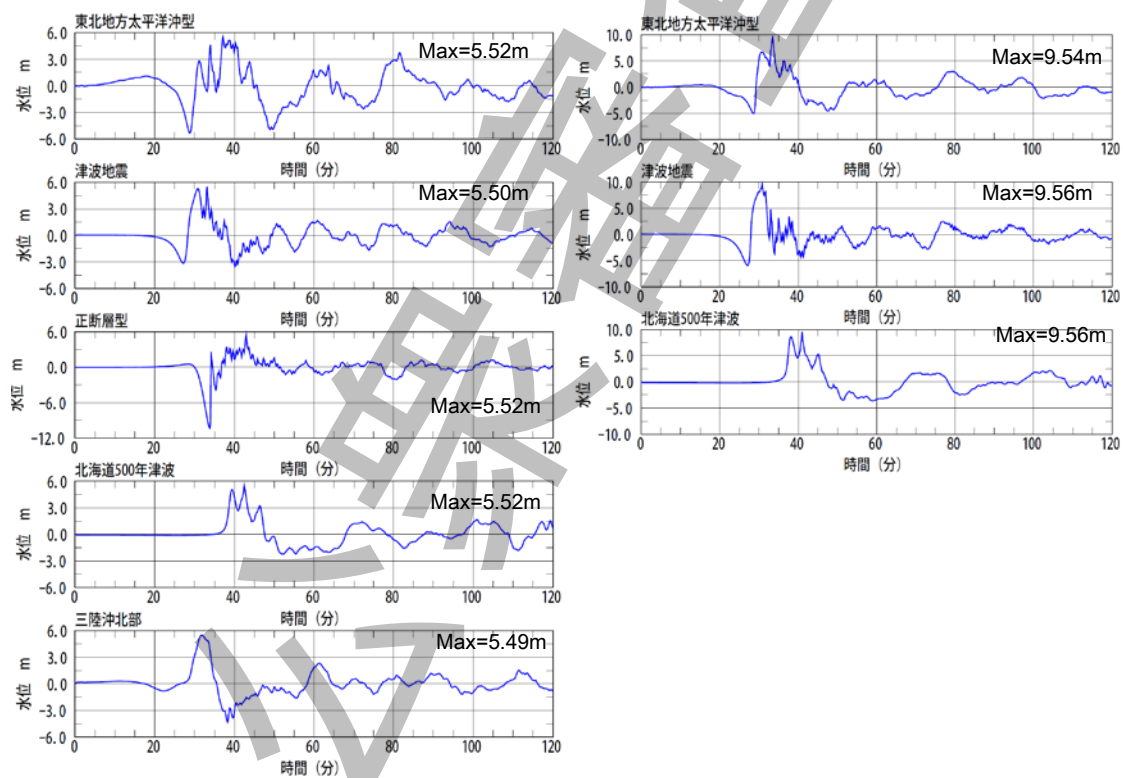


図 I.4 水深 50m のコントロールポイントにおける津波波形(左: 区間中央値 5.50m の場合、右: 区間中央値 9.55m の場合)

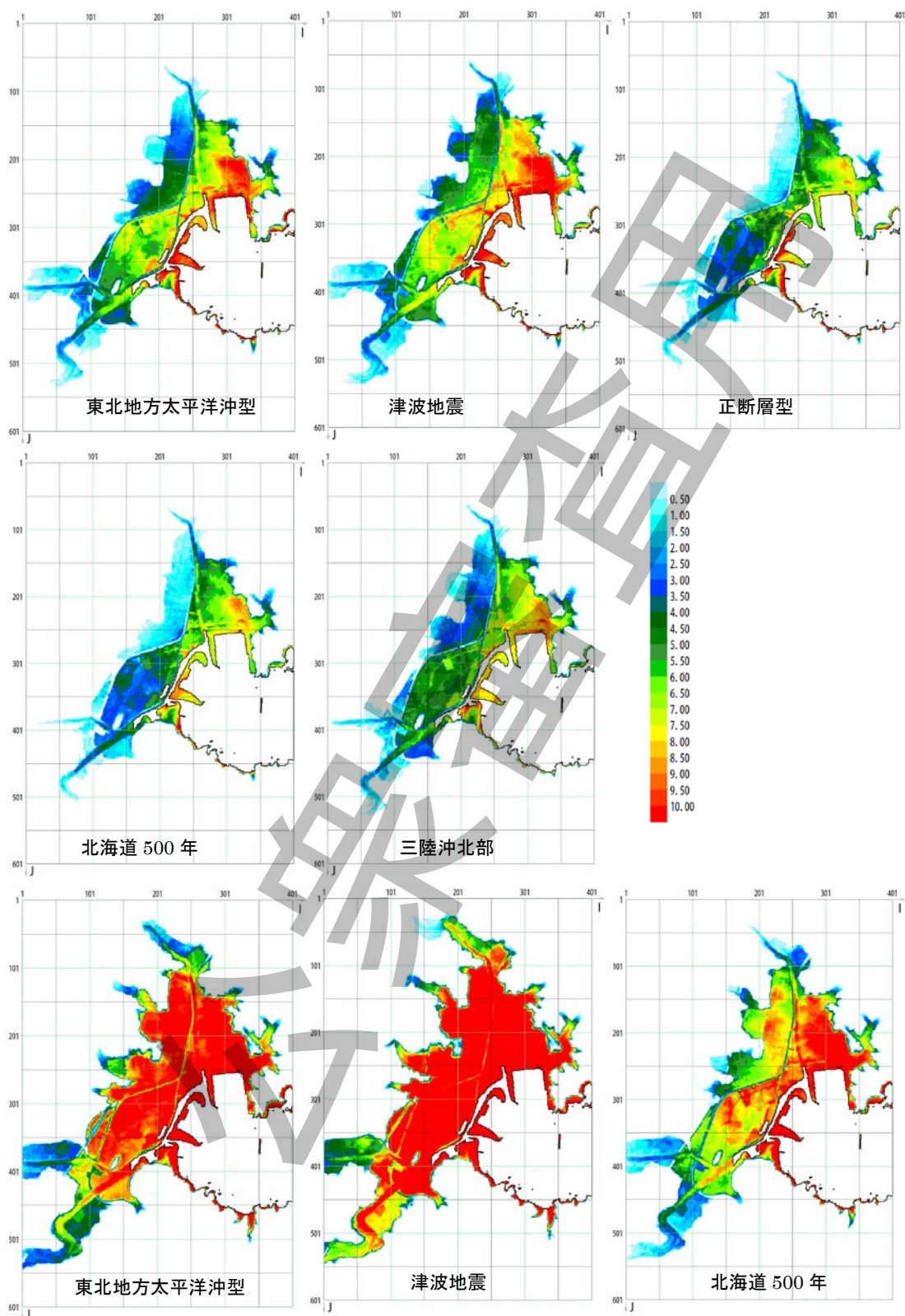


図 1.5 浸水深分布(上・中:区間中央値 5.50m の場合、下:区間中央値 9.55m の場合)

附属書 J
(参考)
評価対象物と配置状況の例

序文

この附属書は, 建屋・機器フラジリティ評価における評価対象物と配置状況の例を示す。

J.1 評価対象物と配置状況の例

津波 PRA の建屋・機器フラジリティ評価における評価対象物と配置状況の模式図を図 J.1 に示す。

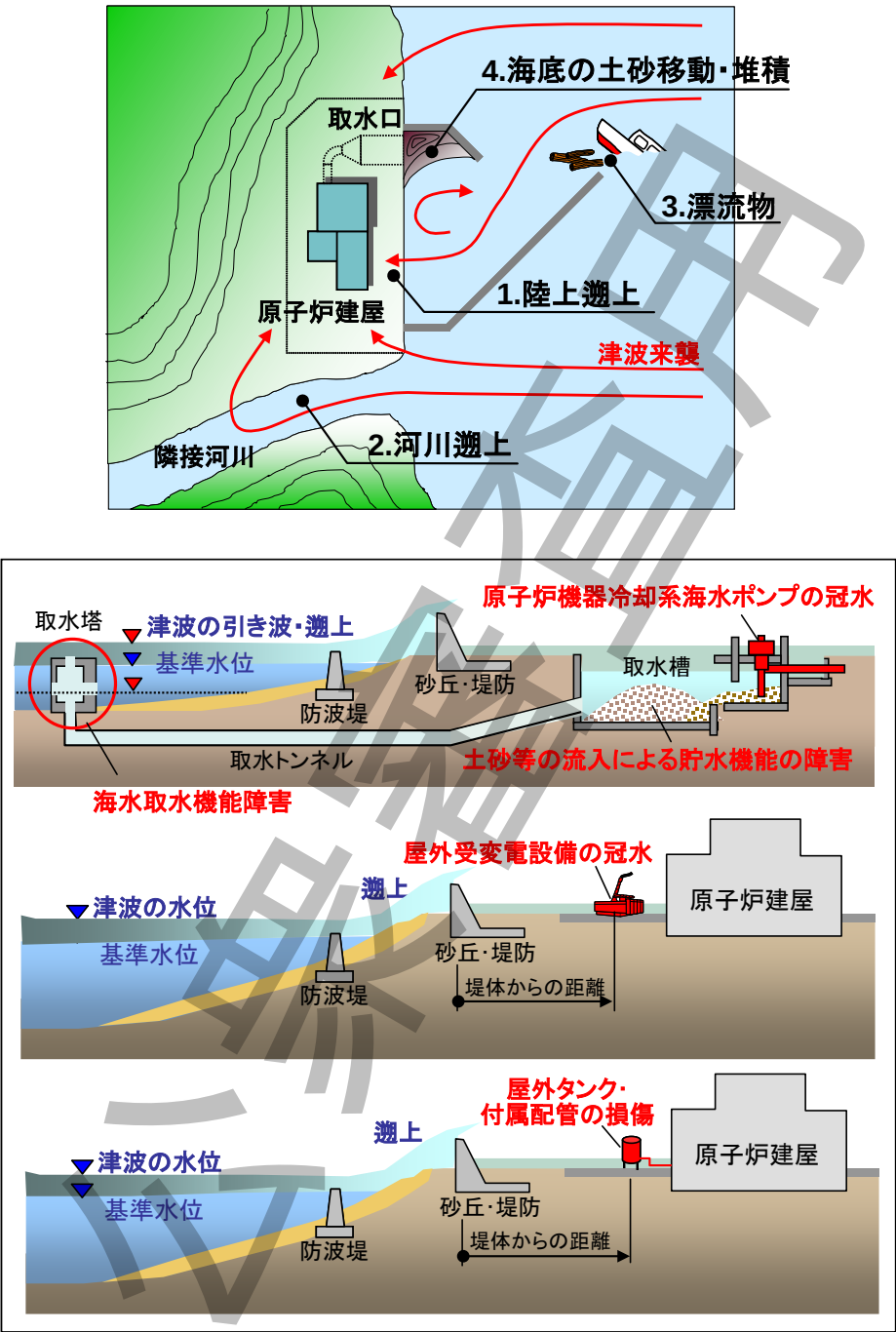


図 J.1 評価対象物と配置状況の模式図 附 J-1)

附属書 K (参考) 津波による被害事例

序文

この附属書では、東北地方太平洋沖地震などによる原子力施設や一般産業施設の津波被害事例について紹介する。

K.1 原子力施設の津波被害について

太平洋沿岸に位置する原子力施設が東北地方太平洋沖地震の津波による被害を受けており、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、女川原子力発電所、東海第二発電所では特に被害が大きかった。表K.1(a)^{附 K-1)}に示すように、波力・浮力、漂流物衝突及び建屋内浸水による構造的損傷や、被水・没水による機器・配管系の機能的損傷が見られる。

K.2 一般産業施設の津波被害について

一般産業施設においても、原子力施設と同様に津波被害を受けており、漂流物の衝突や洗掘が発生している。表K.1(b)^{附 K-1)}に示すように、建屋や土木構造物は、転倒・倒壊・浮上り・層崩壊などが多数発生しており、原子力施設に比較して大きな被害が多い。また、参考文献^{附 K-2)}では、東北地方太平洋沖地震により発生した火災のうち、4割超が津波（随伴）火災と推定されており、住宅地や一般産業施設における津波に伴う火災発生の可能性の高さが指摘されている。

表K.1 被害事例の例^{附 K-1)}

(a) 原子力施設

建物	
対象	破損モード
建屋	漂流物の衝突，波力による破損，建屋内浸水による破損
土木構造物	
対象	破損モード
—	—
機器・配管系	
対象	破損モード
屋外タンク	波力及び浮力
屋外ポンプ	屋外構築物内浸水による機能損傷
屋外クレーン	波力による倒壊
建屋内機器・配管	建屋内浸水による機能損傷
その他	
対象	破損モード
屋外施設	漂流物の衝突

(b) 一般産業施設

建物	
対象	破損モード
建屋	波力及び浮力，漂流物の衝突，流れ込み，洗掘，傾斜，浸水，柱脚の破断
土木構造物	
対象	破損モード
防潮堤	波力，漂流物の衝突，洗掘
橋梁	波力，漂流物の衝突，洗掘，橋脚の座屈
港湾設備	波力，漂流物の衝突，洗掘
機器・配管系	
対象	破損モード
屋外タンク	波力及び浮力，漂流物の衝突，基礎の洗掘
屋外クレーン	波力及び浮力，漂流物の衝突，
屋外ポンプ	波力，漂流物の衝突，建屋内浸水による機能損傷
その他	
対象	破損モード
屋外施設	土砂流入

附属書 L (参考) 損傷モード及び部位の抽出例

序文

この附属書では、損傷モード及び部位の抽出例について示す。

L.1 防潮堤及び防潮壁の損傷モード及び部位の例

防潮堤及び防潮壁の要求機能喪失に繋がる津波による損傷モードとして、安定性にかかる構造的損傷モード、全体崩壊にかかる構造的損傷モード、津波の越波にかかる機能的損傷モード、局部損傷に伴う機能的損傷モードなどが想定されている。防潮堤及び防潮壁の損傷モード及び部位の例を図L.1に示す。これらの損傷モードに対する現実的応答評価に際しては、必要に応じて地震による損傷の影響を考慮する。

具体的には、波力や洗掘などにより、防潮堤及び防潮壁が滑動、転倒、沈下、倒壊したり、杭基礎が損傷したり、基礎地盤の支持力が喪失したりするなどの安定性にかかる構造的損傷モードを評価する。

また、波力や漂流物衝突などにより、防潮堤及び防潮壁がせん断破壊したり、曲げ破壊したりするなどの全体崩壊にかかる構造的損傷モードを評価する。

さらに、防潮堤及び防潮壁は崩壊しないものの、津波高さが防潮堤や防潮壁の高さを越えて敷地内に海水が浸入し、機器・配管系などが損傷する津波の越波にかかる機能的損傷モードを評価する。

同様に、防潮堤及び防潮壁は崩壊しないものの、波力や漂流物衝突などにより、コンクリートが局部的に圧壊するなどして敷地内に海水が浸入し、機器・配管系などが損傷する局部損傷に伴う機能的損傷モードを評価する。

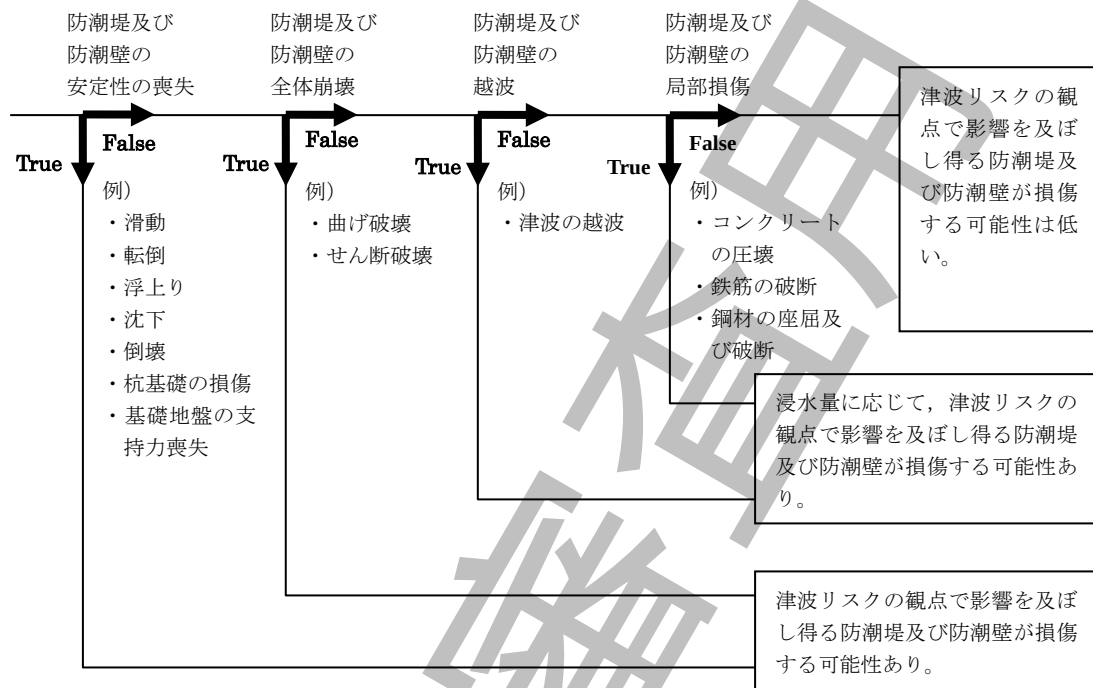


図 L.1 防潮堤及び防潮壁の損傷モード及び部位の例

L.2 浸水防止区画内への浸水シナリオを構成する損傷モードの例

浸水防止区画内への浸水シナリオを構成する損傷モードとしては、図L.2に示すように、津波防護施設の機能喪失、建屋の安定性の喪失、耐震壁の損傷、浸水防止設備の損傷、部材の局部損傷が挙げられる。これらの損傷モードに対する現実的応答評価に際しては、必要に応じて地震による損傷の影響を考慮する。

津波防護施設の機能喪失としては、図L.1に示すように、防潮堤及び防潮壁の安定性の喪失、全体崩壊、局部損傷及び津波の越波などが考えられる。防潮堤などの津波防護施設の構造的損傷がない場合でも、津波高さによっては津波防護施設を越波する可能性があるため、津波防護施設内の建屋に損傷がある場合には、越波した津波が浸水防止区画内へ浸入する可能性が生じる。

建屋の安定性の喪失は、耐震壁の損傷及び部材の局部損傷に先行して生じる可能性のある事象であり、波力などによる建屋の転倒及び滑りが挙げられる。ただし、原子炉建屋など、地盤に埋め込まれた建屋の転倒及び滑りの損傷モードは、耐震壁の損傷などの他の損傷モードと比べると支配的な損傷モードにはならないと考えられる。

耐震壁の損傷としては、波力などによる耐震壁のせん断破壊と曲げ破壊が考えられ、建屋全体若しくは部分崩壊の可能性がある。

浸水防止設備の機能喪失としては、水密扉又は配管・電路貫通部の止水構造などの損傷が考えられる。浸水防止設備の損傷の程度により浸水防止区画内への浸水量が大きく変化するため、安全上重要な機器の浸水シナリオに与える影響は大きいと考えられる。

部材の局部破壊としては、外壁・床、柱・梁などの構造部材の一部損傷（ひび割れを含む）や非構造部材の破壊に伴う波及的影響などが考えられる。これらの損傷によって、浸水量としては少ないと考えられるが、浸水防止区画内に浸水し、安全上重要な機器の機能喪失に至る浸水シナリオが考えられる。

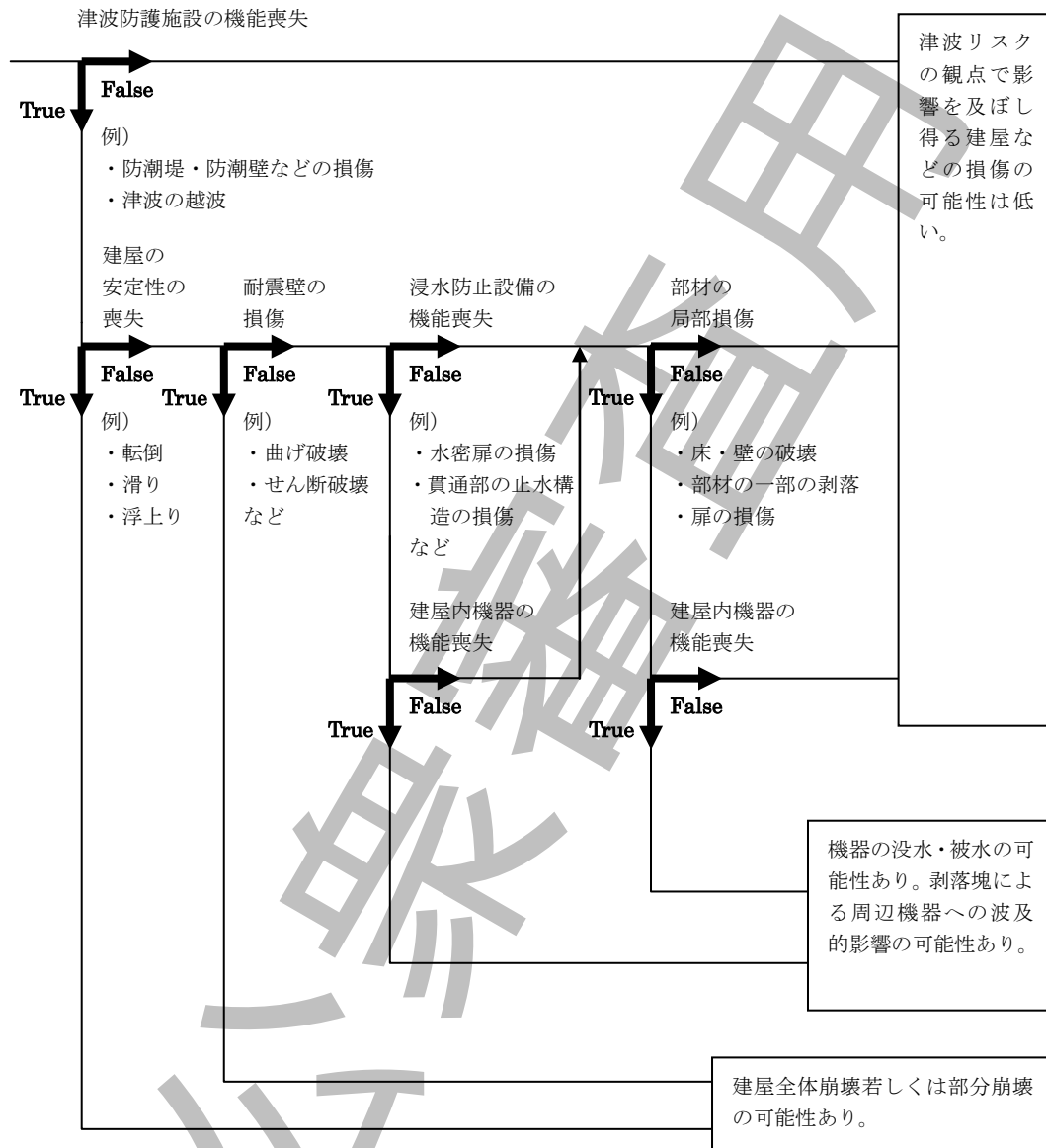


図 L.2 浸水防止区画内の浸水シナリオを構成する損傷モードの例

附属書 M

(参考)

フラジリティ評価の一般的な不確実さ要因

序文

この附属書は、建屋・機器フラジリティ評価における一般的な不確実さ要因を示す。

M.1 フラジリティ評価の一般的な不確実さ要因

津波 PRA のフラジリティ評価において、一般的に考えられる主要な不確実さ要因の一例としては表 M.1 に示される項目が考えられる。

表 M.1 一般的な不確実さ要因の例 (1)

損傷モード	評価項目	一般的な不確実さ要因	
		偶然的な不確実さ	認識論的な不確実さ
被水・没水	耐力評価	① 実験データに基づく耐水性に関する限界値 ② 複数の部品から構成された機器の設置高さ ③ 防水対策（シールなど）の効果	① 実験データの統計的不足 ② 複数の津波による累積損傷の影響 ③ 防水対策（シールなど）の施工誤差
	応答評価	① 潮位のばらつき ② 浸水高及び浸水深のばらつき ③ 遡上解析モデル（パラメータ） ④ 屋内での流入量評価（パラメータ） ⑤ 屋内での浸水経路評価（パラメータ）	① 遡上解析モデル（モデル化及び解析手法） ② 屋内での流入量評価（モデル化及び評価手法） ③ 屋内での浸水経路評価（モデル化及び評価手法）
波力	耐力評価	① 実験データに基づく限界値 ② 耐力評価モデル ・ 材料物性値 ・ 応答値	① 実験データの統計的不足 ② 耐力評価モデル ・ 統計処理、モデル化及び解析手法
	応答評価	① 潮位のばらつき ② 浸水高及び浸水深のばらつき ③ 遡上解析モデル（パラメータ） ④ 波力評価法（パラメータ） ⑤ 応答評価モデル ・ 材料物性値（剛性・減衰・強度など）	① 遡上解析モデル（モデル化及び解析手法） ② 波力評価法（評価式） ③ 応答評価モデル ・ 統計処理、モデル化及び解析手法

表 M.1 一般的な不確実さ要因の例 (2)

損傷モード	評価項目	一般的な不確実さ要因	
		偶然的な不確実さ	認識論的不確実さ
洗掘	耐力評価	① 実験データに基づく限界値 ② 耐力評価モデル - 材料物性値 - 津波の諸元（流速、波力など）	① 実験データの統計的不足 ② 耐力評価モデル 統計処理、モデル化及び解析手法
	応答評価	① 海底地形データ ② 洗掘深評価モデル（パラメータ） ③ 応答評価モデル 材料物性値（剛性・減衰・強度など）	① 洗掘深評価モデル（モデル化及び解析手法） ② 応答評価モデル 統計処理、モデル化及び解析手法
漂流物衝突	耐力評価	① 実験データに基づく限界値 ② 耐力評価モデル - 材料物性値 - 応答値	① 実験データの統計的不足 ② 耐力評価モデル 統計処理、モデル化及び解析手法
	応答評価	① 対象とする漂流物（重量分布、強度分布、形状、頻度） ② 漂流物の衝突速度・衝突角度 ③ 検討対象への衝突確率・衝突位置 ④ 衝撃荷重評価法（パラメータ） ⑤ 応答評価モデル 材料物性値（剛性・減衰・強度など）	① 対象とする漂流物（重量分布、強度分布、形状、頻度） ② 漂流物の衝突速度・衝突角度 ③ 検討対象への衝突確率・衝突位置 ④ 衝撃荷重評価法（評価式） ⑤ 応答評価モデル 統計処理、モデル化及び解析手法
海底砂移動による閉塞など	耐力評価	① 実験データに基づく限界値	① 実験データの統計的不足
	応答評価	① 海底地形データ ② 砂移動量解析モデル（パラメータ）	① 海底地形データ ② 砂移動量解析モデル（モデル化及び解析手法）

附属書 N
(参考)
シビアアクシデント対策に基づく浸水対策の例

序文

この附属書は、シビアアクシデント対策に基づく浸水対策の例を示す。

N.1 シビアアクシデント対策に基づく浸水対策の例

シビアアクシデント対策に基づく津波・浸水対策の例を図 N.1 に示す。

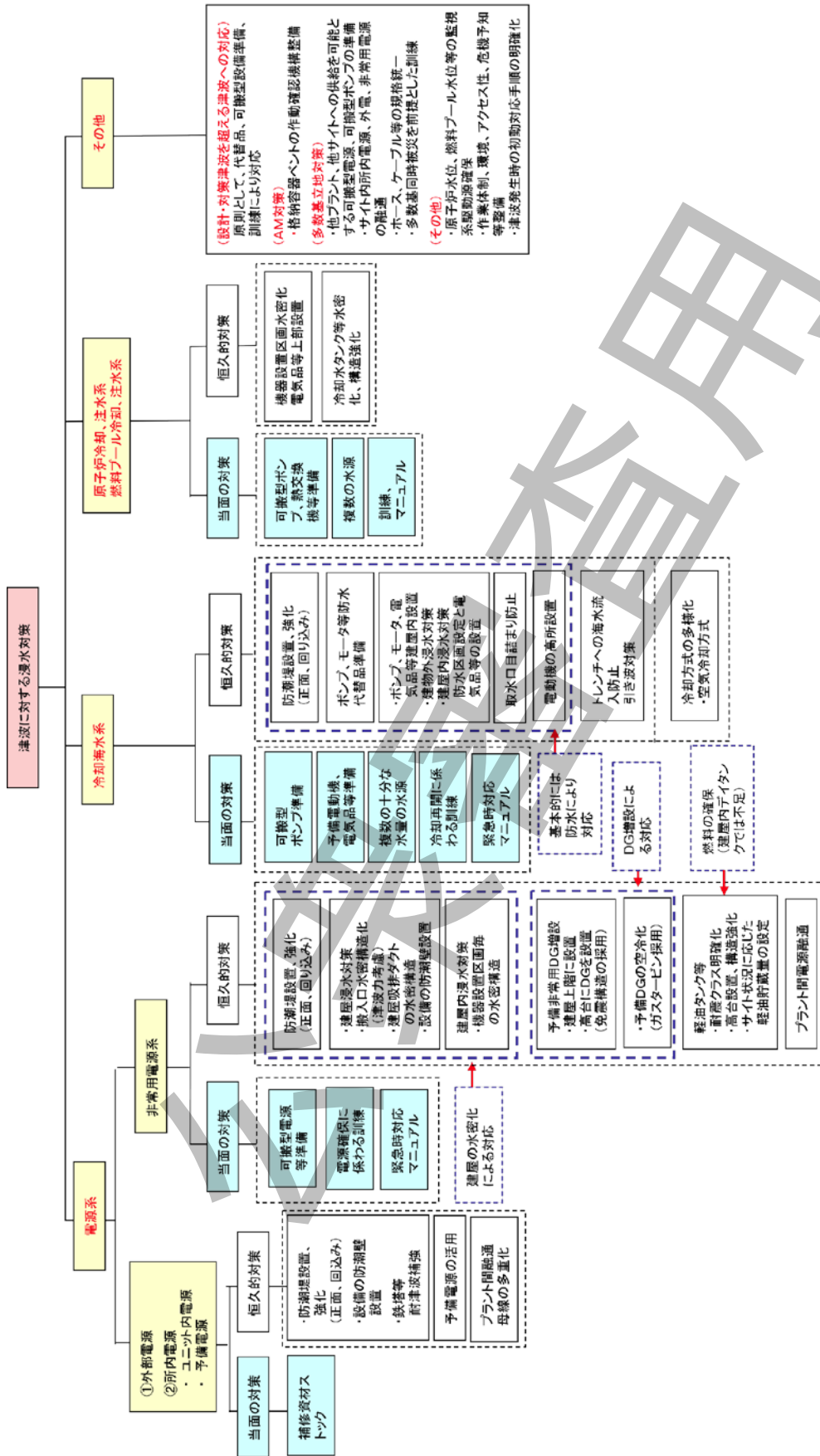


図 N.1 津波に対する津波・浸水対策の例

附属書 O (参考) フラジリティ評価の不確実さ解析手法の選定

序文

この附属書は、建屋・機器フラジリティ評価で選定することができる不確実さ解析手法を示す。

O.1 フラジリティ評価の不確実さ解析手法の選定

現実的耐力又は現実的応答のばらつきの伝播を評価する方法としては、地盤物性、又は材料定数などを確率変数として、確率論に基づき解析的に伝播を評価する手法と、サンプリング法を用いて試行計算によって評価する手法がある。主な手法は次の通りである。

- a) 1次近似2次モーメント法
- b) 2点推定法
- c) モンテカルロ法
- d) 実験計画法〔ラテン超方格法 (LHS)法、直交配列表〕

これらの手法の選択に当たっては、評価精度と取扱い程度との関係、確率変数とするパラメータの数、必要なサンプリング数、非線形性のレベル、評価モデルの規模及び評価手法、計算時間・コストなどを考慮して適切な手法を選定する必要がある。参考として、上記不確実さ伝播解析手法の比較を表 O.1 に、それらの概要を図 O.1～図 O.4 に示す。

表 O.1 不確実さ伝播解析手法の比較

手法	長所	短所
1次近似 2次モーメント法	・簡便で、適用性が高い。 ・入力パラメータの感度が分かる。	・適用限界がある。 ・平均まわりの展開を用いているため、確率分布の裾の評価は誤差がある。
2点推定法	・簡便で、適用性が高い。	・確率分布の仮定を必要とする。 ・入力パラメータの数が増えると試行解析の回数が増える。 ・誤差がある。
モンテカルロ法	・適用性が極めて高い。 ・詳細な確率分布を評価できる。	・ある程度の精度を得るためには、多くの試行解析が必要。
実験計画法 (ラテン超方格法、 直交配列表など)	・適用性が高い。 ・入力パラメータの感度が分かる。 ・モンテカルロ法又は2点推定法の試行回数を減らすことができる。	・入力と出力の関係に非線形性が強いと誤差が大きくなる場合がある。

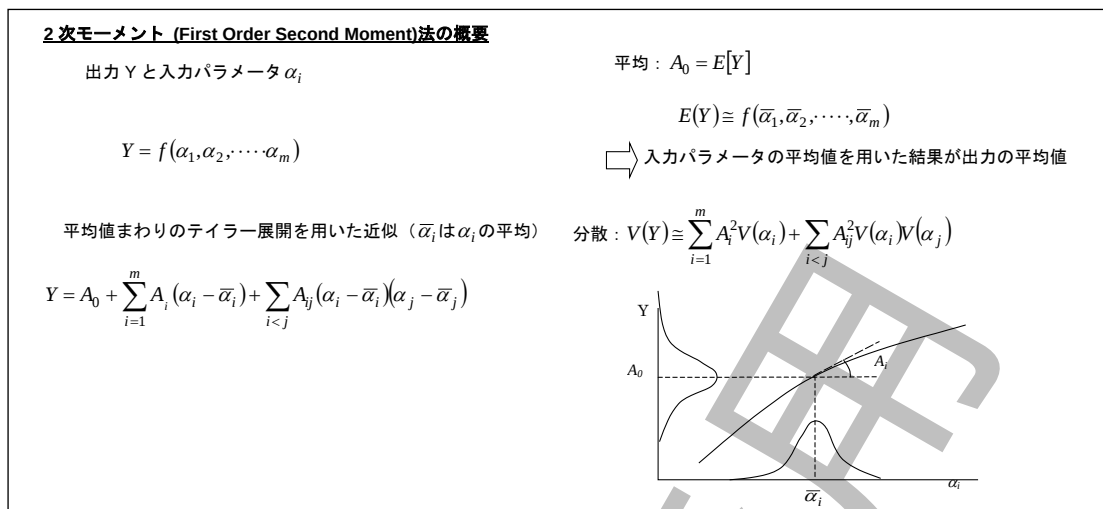


図 0.1 不確実さ伝播解析手法の概要 (1次近似 2次モーメント法)

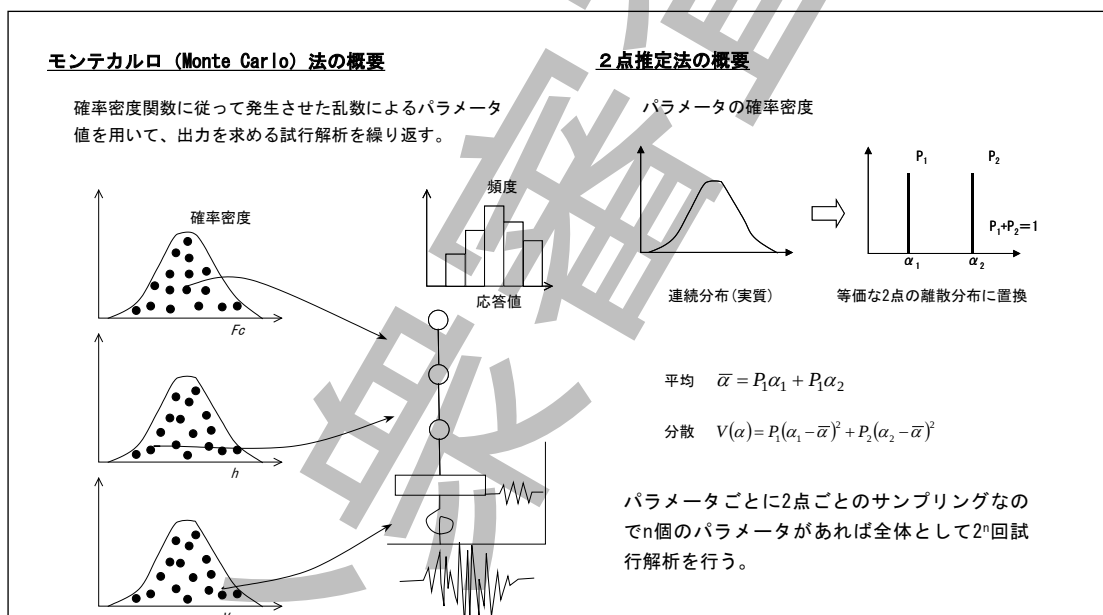


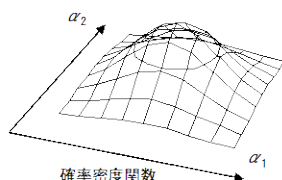
図 0.2 不確実さ伝播解析手法の概要 (モンテカルロ法, 2点推定法)

実験計画法の概要

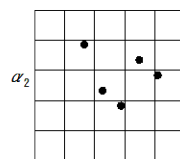
モンテカルロ法や2点推定法などの試行解析の回数を減らす効率化手法で、ラテン超方格法や直交配列法などがある。

ラテン超方格法 (Latin Hypercube Sampling) の概要

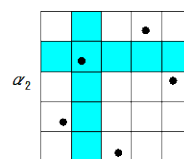
- 2つの入力パラメータ、モンテカルロ法の例



パラメータの値のとり得る範囲を格子状に分割し、その中で乱数を用いてサンプリングする。同じ行・列にサンプリングしないようにし、サンプリングの偏りを防ぎ、少ない試行回数で解を収斂させる。



モンテカルロ・サンプリング

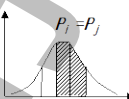


ラテン超方格サンプリング
(5回サンプリングの例)

サンプリング領域の区切り方

- ・確率Pが等しくなるようにサンプリング領域を分割
それぞれのサンプリングの重みは一定

確率Pは確率密度関数の区間積分値



- ・確率分布に関係なく等間隔にサンプリング領域を分割
それぞれのサンプリングの重みは確率値Pに比例

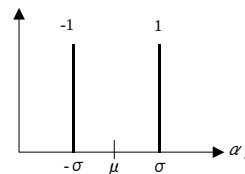


図 O.3 不確実さ伝播解析手法の概要（実験計画法（ラテン超方格法））

直交配列 (Orthogonal Array) 表の概要

直交配列表を用いると、試行解析の回数を減らせるとともに、それぞれの入力パラメータの主効果（感度）、交互作用（パラメータ間の相関）を評価できる。

- 3入力パラメータ、2水準（2点推定法、交互作用なし）の例
通常は $2^3 = 8$ 回試行が必要であるが $2^{3-1} = 4$ 回でよい。



実験計画法の直交配列表

試行	α_1	α_2	α_3	出力
1	1	1	1	Y_1
2	1	-1	-1	Y_2
3	-1	1	-1	Y_3
4	-1	-1	1	Y_4

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^m A_i (\alpha_i - \bar{\alpha}_i)$$

$$A_0 = (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)/4 \quad \text{平均}$$

$$A_1 = (Y_1 + Y_2 - Y_3 - Y_4)/4\sigma_1 \quad \text{パラメータ } \alpha_1 \text{ の主効果}$$

$$A_2 = (Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4)/4\sigma_2 \quad \text{パラメータ } \alpha_2 \text{ の主効果}$$

$$A_3 = (Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4)/4\sigma_3 \quad \text{パラメータ } \alpha_3 \text{ の主効果}$$

$$V(Y) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (Y_i - A_0)^2 \quad \text{分散}$$

図 O.4 不確実さ伝播解析手法の概要（実験計画法（直交配列表））

附属書 P**(参考)****津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法****序文**

この附属書は、建屋・機器フラジリティ評価における津波の漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方法を示す。なお、各評価方法の選定に際しては、その適用範囲に留意する。

P.1 一般事項

津波による漂流物衝突時の衝撃荷重の不確かさ、及び、津波による洗掘深の不確かさに関しては、以降に示す算定方法及び算定式におけるパラメータを確率変数とした不確かさ解析によって偶然的な不確かさを評価し、算定方法及び算定式の精度を工学的判断などに基づき認識論的不確かさとして評価する。

P.2 津波による漂流物衝突時の衝撃荷重の算定

”原子力発電所の津波評価技術”（公益社団法人 土木学会）^{附B-1)} 又は”津波漂流物対策施設設計ガイドライン（案）”（(社) 寒地港湾技術研究センター及び（財）沿岸技術研究センター）に従い、評価対象とする漂流物の衝突速度及び衝突エネルギーに基づき、衝撃荷重を算定する。

P.3 津波による洗掘深の算定

津波に対する洗掘深を求める **a) 野口らの評価式**（”津波遡上による護岸越波及び前面洗掘の大規模模型実験”，海岸工学論文集第 44 巻，1997），もしくは，河川での洗掘深を求める **b) 鉄道構造物等維持管理標準の評価式**（”鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）基礎構造物・抗土圧構造物”，国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編，平成 19 年 1 月）に基づき，周辺地盤の局所的な洗掘深を算定し，建物・構築物の安定性評価を行う。なお，岩着されている建物・構築物に対しては，洗掘によって表層もしくは埋戻土全てが喪失したと仮定して，建物・構築物の安定性評価を行ってもよい。

a) 野口らの評価式

洗掘深 Z を定在渦の直径 R から(P.1)式によって算定する。

$$Z=2.1R \quad (P.1)$$

ここに

$R \sim g^{-1/4} q^{1/2} z_f^{1/4}$ ， g は重力加速度， q は津波による落下水の流量， z_f は前面水面から建物・構築物の天端までの高さである。

b) 鉄道構造物等維持管理標準の評価式

洗掘深 Z を局所洗掘深 Z_s 、平均形状係数 K_{sm} 及びグラントシル効果の減少率 λ から(P.2)式によって算定する。

$$Z=Z_s \times K_{sm} \times (1-\lambda) \quad (P.2)$$

ここに

$$Z_s/D=1.45 \times (h_0/D) \quad \dots\dots\dots (h_0/D) < 1$$

$$Z_s/D=1.45 \quad \dots\dots\dots (h_0/D) \geq 1$$

h_0 は平均水深、 D は構造物の幅である。

なお、平均形状係数 K_{sm} 及びグラントシル効果の減少率 λ は、“鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）基礎構造物・抗土圧構造物”に記載されている図表によって求める。

附属書 Q (参考) 洗掘解析例

序文

この附属書では、建屋・機器フレンジィ評価の洗掘による現実的応答評価として、洗掘解析例を示す。

Q.1 流体－構造－地形変化連成モデルによる洗掘解析例

参考文献 附 Q-1)では、3次元流体－構造－地形変化連成モデルによる洗掘解析が紹介されている。実験室規模であるが、津波遡上時の構造物周辺の局所的な渦による洗掘現象の再現解析が行われている。一般的に使用されている津波流動解析手法では洗掘深を過小評価する傾向にあり、連成モデルによる本手法の実用化が期待されている。

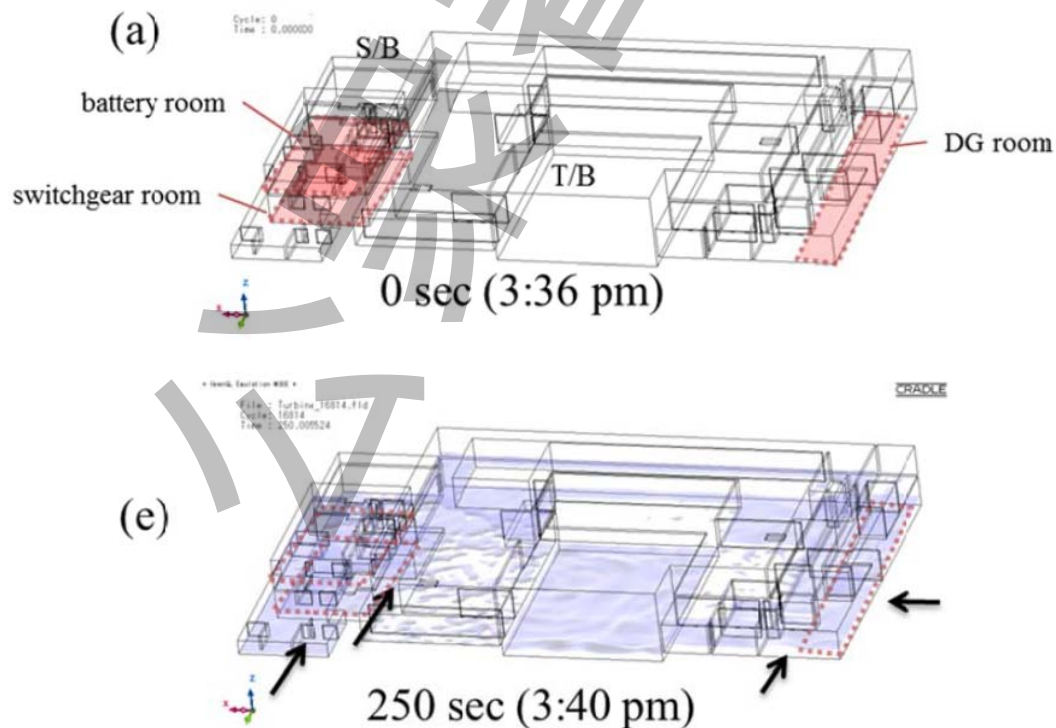
附属書 R (参考) 建屋の浸水解析例

序文

この附属書では、建屋・機器フラジリティ評価の被水・没水による現実的応答評価として、浸水解析例を示す。

R.1 3次元CFDによる建屋浸水解析例

参考文献 附 R-1)では、福島第一原子力発電所3号機のタービン建屋、コントロール建屋、サービス建屋を対象に、3次元CFDを用いて建屋浸水範囲、浸水量、浸水深を求めている。東北地方太平洋沖地震時の津波を模擬した津波を用いて、2次元遡上解析により建屋周辺の津波浸水深を算定し、建屋浸水解析の入力としている。浸水解析結果例を図R.1に示す。解析による建屋浸水状況と事故後の機器の機能喪失は対応していたことに言及しており、3次元CFDは浸水解析に有効な手法であると考えられる。



図R.1 建屋浸水解析結果例 附 R-1)

附属書 S
(参考)
屋外重要土木構造物の溢水・浸水解析例

序文

この附属書では、建屋・機器 fragility 評価の被水・没水による現実的応答評価として、溢水・浸水解析例を示す。

S.1 取放水路の溢水・浸水解析例

参考文献 附 S-1) では、取放水路などを介して陸域に溢水・浸水する場合を想定して、管路・開水路の解析手法を用いた水面応答計算による解析が紹介されている。津波による沿岸での水位変動を入力として、水路内部の溢水や配管に作用する圧力、水路から陸域への溢水量などが求められる。

附属書 T (参考) 起因事象の設定に係わる留意事項

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の起因事象の設定に係わる留意事項を記載する。

T.1 津波到達時の原子炉の停止状態

地震による影響を考慮する必要がない場合で対象とするような津波到達時には、以下の理由によって、原子炉が停止している可能性が高いものと考えられる。

- ・ 近地津波の場合、津波発生 の 起因となる地震動を原子炉施設が感知し、自動停止する可能性がある。
- ・ 原子炉施設に対して影響が発生する高さ以上の津波警報が発せられた場合、津波到達までに原子炉を手動停止する可能性がある。

一方、津波到達時には原子炉が停止していない可能性も否定できない。その場合には、引き波による取水制限、又は被水などによって海水系が機能喪失し、タービントリップなどが発生するものと考えられるが、信号の検知から数秒でその動作を完了する反応度制御系の故障確率が津波によって高まるとは考えにくい。

以上から、地震による影響を考慮する必要がない場合において、反応度制御失敗による全炉心損傷頻度への寄与は非常に小さくなるものと考えられることから、津波の到達時には原子炉が停止しているものとした。

T.2 津波によって誘発される起因事象

津波によって誘発される起因事象としては、津波による原子炉停止と、津波による施設の損傷がある。【附属書 T.1 (参考) 津波到達時の原子炉の停止状態】

起因事象となり得る津波による施設の損傷としては、次のようなものが挙げられる。

- ・ 建屋などの建物・構築物の大型静的機器の損傷
- ・ 非常用海水系などのサポート系の機能喪失

建屋などの建物・構築物の大型静的機器の損傷について、例えば、原子炉建屋が損傷すると、そこから多量の浸水が発生することから、多くの電源盤などが機能喪失する可能性があり、起因事象として選定することが考えられる。その場合、炉心冷却が不可能になるものとして直接炉心損傷に至る事象と仮定してもよい。

サポート系の機能喪失は、起因事象として独立に分類する方法と、起因事象とはせずにサポート系の損傷として緩和系にモデル化する方法がある。サポート系の機能喪失による事故シナリオ及び従属性を適切に考慮することによって、いずれの方法も適用可能であるが、当該サポート系の機能喪失が他の起因事象にも関連する場合には起因事象との従属性もモデル化することが重要となる。

なお、津波 PRA においては、原子炉施設に対して影響が発生する高さ以上の津波を対象とするため、原子炉施設に対して何ら影響が発生しなかったシナリオは内的事象評価に含まれると考え、津波 PRA の範疇とする必要がないものと考えられる。

T.3 起因事象の階層化

起因事象の階層化を行うことで、津波時特有の影響を合理的に評価することができる。起因事象の階層化とは、津波発生時の影響の大きさに着目して、他の起因事象との同時発生との組み合わせを絞り込む方法であり、次の手順で行う。

a) 階層イベントツリーの作成

階層化では階層イベントツリーを用いる。階層イベントツリーは一般に、起因事象が発生時の影響の大きい順に並べ、これらをヘディングとする。先行するヘディングの下では、後続のヘディングの起因事象はすべて発生しているものと仮定する。

b) 階層イベントツリーの定量化

階層化した各起因事象の発生確率は、それぞれ対象とする SSCs を設定し、その脆弱性を評価することで算出する。また、後続のヘディングで考慮する起因事象の発生確率は、先行のヘディングで設定した起因事象が発生しない条件付の確率として評価する。

附属書 U (参考) 津波に対する緩和策の時間余裕の設定例

序文

この附属書は、**9.事故シーケンス評価**の津波に対する緩和策の時間余裕の設定例を記載する。

U.1 津波に対する緩和策の時間余裕の設定例

ここでは、BWR プラントの事故シナリオを例として、消防車及び電源車のための時間余裕についての検討を示す。

消防車及び電源車はともに津波対策として高台に用意されており、ホース又はケーブルを接続箇所まで延ばし、接続作業をした上で、起動操作を行う設備である。

事故シナリオとしては、津波到達前にプラントは停止状態にあり、タービン駆動の原子炉隔離時冷却系にて注水が継続されているものとする。その後、津波の影響によって外部電源及び非常用ディーゼル発電機が喪失し、全交流電源喪失状態に至ったものとする。原子炉隔離時冷却系は、直流電源で制御されるため、しばらくは運転の継続が可能ではあるが、数時間で直流電源が枯渇するため、電源車で交流電源を回復させる必要がある。

電源車からの受電のための時間余裕

前提：手順書が整備されており、必要な訓練、設備及び要員の確保がなされている。

時間余裕：全交流電源喪失後から直流電源が枯渇するまでの 8 時間

必要な運転操作などの時間枠の設定：

- ・ 津波によって全交流電源喪失に至り、電源車の必要性の認知：津波到達直後
- ・ 津波警報解除：3 時間（その間に、”要員への連絡とケーブルの確保：1 時間”を含む）
- ・ ケーブルの接続作業（瓦礫撤去も含む）：4 時間
- ・ 合計：7 時間

したがって、想定した事故シナリオにおける時間余裕から電源車に期待できる。また、消防車についても同様に期待ができる。

ただし、津波警報解除までの時間、散乱した瓦礫の撤去及び地震影響に対する応急処置によるアクセス性の確保については、不確実さが伴うことから感度解析にて、その感度を確認する必要がある。

附属書 V (参考) 小イベントツリー法と大イベントツリー法

序文

この附属書は、**9.事故シーケンス評価**の小イベントツリー法と大イベントツリー法を記載する。

V.1 小イベントツリー法と大イベントツリー法

イベントツリーの展開方法としては、一般に小イベントツリー法と大イベントツリー法がある。小イベントツリー法と大イベントツリー法の違いは、緩和機能を達成するフロントライン系及びサポート系のうち、後者をツリーの対象としないものが小イベントツリー法であり、対象とするものが大イベントツリー法である。

a) 小イベントツリー／大フォールトツリー法 本手法では、緩和機能、緩和機能を達成するためのフロントライン系、事故シーケンスの展開上重要な設備の状態又は運転員操作などを対象ヘディングとして、イベントツリーを展開する。フロントライン系の動作の前提となるサポート系の作動状態については、原則としてヘディングごとにフォールトツリーにおいて考慮する。津波の場合には、複数の緩和機能に影響を及ぼす SSCs が同時に損傷する可能性が高いため、特に影響が大きい設備については、独立したヘディングとする。小イベントツリー法においては、ヘディングの並びから事故事象の推移の類推が比較的容易である。

b) 大イベントツリー／小フォールトツリー法 本手法では、緩和機能を達成するフロントライン系、サポート系、事故シーケンスの展開上重要な設備の状態及び運転員操作などを対象ヘディングとして、イベントツリーを展開する。フロントライン系イベントツリーとサポート系イベントツリーを別個に展開し、事象のイベントツリーとして両者を結合させる。大イベントツリー法においてはフロントライン系とサポート系との依存性が明快であり、複数の安全機能に同時に影響を及ぼすような SSCs の損傷状態を識別しやすいが、イベントツリーの構成が複雑になる。

附属書 W (参考) 損傷モードの検討時の作業フロー

序文

この附属書は、**9.事故シーケンス評価**の損傷モードの検討時の作業フローを記載する。

W.1 損傷モード検討時の作業フロー

津波による損傷について、損傷モードは、次のような過程を通して検討される。
システム解析においてフォールトツリーの作成範囲の検討、及び津波時に特有の静的機器などのモデル化を通して津波 PRA の評価対象機器を選定し、機器・構造物リストを作成して fragility 評価者へ提示する。この津波 PRA の評価対象機器に対し、機器類のカテゴリ化の検討、対象機器の損傷モードの検討などが実施され、fragility 評価結果とともにシステム解析者へ提示される。このような fragility 評価結果から、機器の損傷モードに基づきシステム的な影響を検討することが望ましい。

附属書 X
(参考)
水密扉の状態によるモデル化の考え方の例

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の水密扉の状態によるモデル化の考え方の例を記載する。

X.1 水密扉の状態によるモデル化の考え方の例

建屋外部との開口部となる水密扉が、ある津波高さで一定の確率値で損傷するものとする。その扉が損傷すると建屋内の対象機器が没水する可能性があるが、損傷しないと対象機器には津波の影響がない場合には、当該機器の損傷モードである没水及び水密扉の状態をフォールトツリーで図 X.1 のようにモデル化することが考えられる。

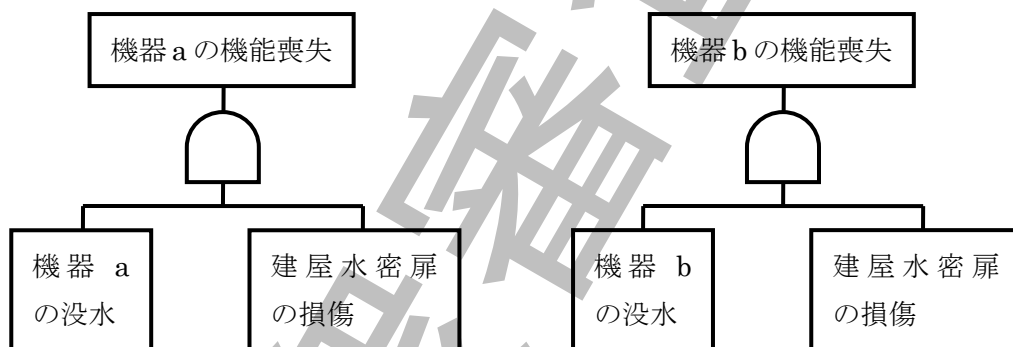
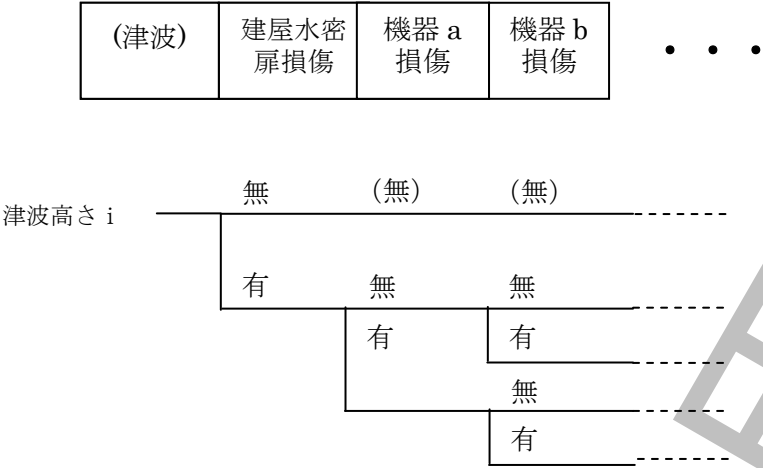


図 X.1 水密扉のフォールトツリーモデル化例

また、この水密扉の損傷によって、複数の機器が没水する場合には、図 X.1 のように異なるフォールトツリー間などにおいて当該基事象の従属性をモデル化することが必要である。なお、この従属性を図 X.2 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 X.2 水密扉のイベントツリーモデル化例

附属書 Y

(参考)

条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの作成の例

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの作成の例を記載する。

Y.1 条件付分岐確率イベントツリー法及び最小カットセットの作成の例

a) 条件付分岐確率イベントツリー法の例

図Y.1 に、炉心損傷シーケンスの例を示す。すなわち、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及びシステムBが失敗して炉心損傷に到るような炉心損傷シーケンスを考える。機器aが損傷するとシステムAが、機器bが損傷するとシステムBが機能喪失となる場合には、本シーケンスに対する津波高さごとの炉心損傷頻度 CDF_i は(Y.1)式で与えられる。(ここで、機器aと機器bの損傷に相関があるものとする場合には、損傷確率 $F(b)_i$ において相関を含めた数値を設定する。)

$$CDF_i = H_i \times [F(a)_i \times A \text{ (a損傷時)}] \times [F(b)_i \times B \text{ (b損傷時)}] \quad (Y.1)$$

ここに

H_i : 津波高さ i の津波の平均発生頻度

$F(a)_i$: 津波高さ i での機器aの損傷確率

$F(b)_i$: 津波高さ i での機器bの損傷確率

A (a 損傷時) : 機器 a が損傷した時のシステム A の失敗確率

B (b 損傷時) : 機器 b が損傷した時のシステム B の失敗確率

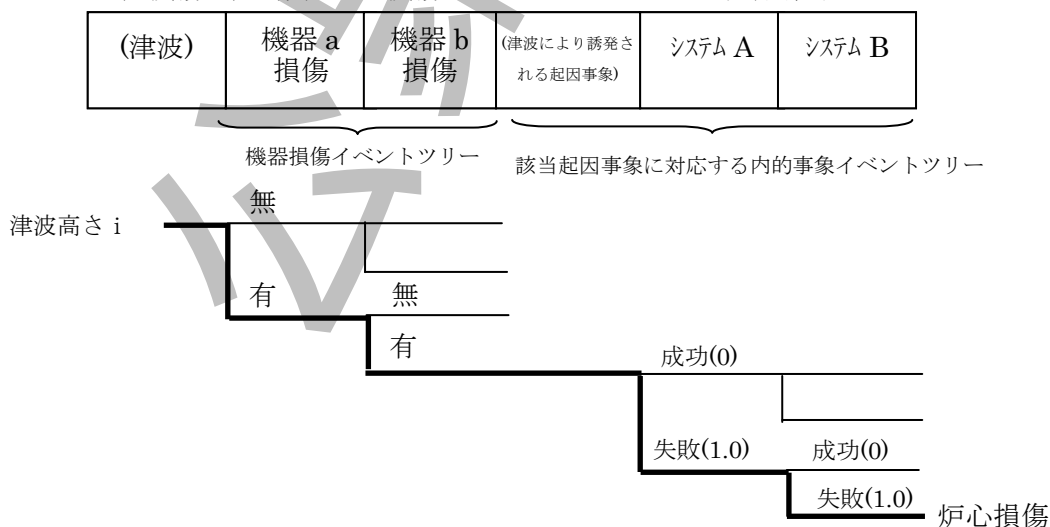


図 Y.1 条件付分岐確率イベントツリー法による事故シーケンスの例

b) 最小カットセットの生成方法の例

事故シーケンスは、最小カットセットで表現する場合が多い。精度のよい事故シーケンスの定量化を行うためには、条件付事故シーケンス発生確率の算出を行うすべての津波高さにおいて、各事故緩和系の最小カットセットを算出することが望ましいが、膨大な作業時間が必要となり、効率的、現実的ではない。従って、次のような観点で選定した津波高さにおいてのみ最小カットセットを算出するのが現実的である。

- ・ その津波高さにおいて作成した最小カットセットを用いて、他の津波高さにおける事故緩和系のアンアベイラビリティを精度よく評価できる。
- ・ その津波高さが炉心損傷頻度に及ぼす影響が相対的に大きいと予測される。

以上の観点で選定した津波高さにおいてのみ最小カットセットを生成する。

また、各事故シーケンスの最小カットセットの数は、事故シーケンスのシナリオ（イベントツリーのヘディング，すなわちどの緩和系の機能喪失の組合せによって炉心損傷に至るか）によって大きく異なる。最小カットセットの数が多いほど解析時間が増大するため、現状の計算コードなどの性能を考慮した最小カットセットの数の上限値（5000 程度）を設定して、最小カットセットを生成する。また、最小カットセット数が少ないものについては、最小カットセットの発生確率の切捨て値（ 10^{-10} 程度）を設定して、最小カットセットを生成する。

附属書 Z

(参考)

代表的な重要度指標

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の代表的な重要度指標を記載する。

Z.1 代表的な重要度指標

代表的な重要度指標について、その意味と評価式を次に示す。

1) リスク低減価値(Risk Reduction Worth) リスク低減価値は、ある機器の機能喪失確率を 0 としたときに、リスク（頂上事象発生確率）がどれだけ低減されるかを示す指標であり、(Z.1) 式で定義する。

$$\text{Risk Reduction Worth} = \frac{P(\text{top})}{P(\text{top} / A = 0)} \dots\dots\dots (\text{Z.1})$$

ここで、

$P(\text{top}/A=0)$: 機器 A の機能喪失確率（事象 A の発生確率）が 0 の場合の
頂上事象の発生確率

$P(\text{top})$: 頂上事象の発生確率

2) リスク増加価値 (Risk Achievement Worth) リスク増加価値は、ある機器が機能喪失した時に、リスクがどれだけ増加するかを表す指標で、(Z.2) 式で定義する。

$$\text{Risk Achievement Worth} = \frac{P(\text{top} / A = 1)}{P(\text{top})} \dots\dots\dots (\text{Z.2})$$

ここで、

$P(\text{top}/A=1)$: 機器 A の機能喪失確率（事象 A の発生確率）が 1 の場合の
頂上事象の発生確率

3) Fussell-Vesely 指標 Fussell-Vesely 指標は、頂上事象の発生を仮定したときに、評価対象機器の機能喪失が寄与している条件付確率を表すもので、(Z.3) 式で定義する。

$$\text{Fussell-Vesely 指標} = \frac{P_i(\text{top})}{P(\text{top})} = 1 - \frac{P(\text{top} / A = 0)}{P(\text{top})} \dots\dots\dots (\text{Z.3})$$

ここで、

$P_i(\text{top})$: 機器 i の機能喪失が寄与して発生する頂上事象の発生確率

$P(\text{top})$: 頂上事象の発生確率

附属書 AA (参考) 事故シーケンス評価項目の例

序文

この附属書は、9.事故シーケンス評価の感度解析項目及び不確実さ解析の例を記載する。

AA.1 感度解析項目の例

事故シーケンスの定量化においては、モデル上の仮定など解析者の判断に基づいた仮定が、解析結果にどの程度影響しうるかを評価することが重要である。このための感度解析の対象項目としては、結果に重要な影響を及ぼしうる仮定を選定する。

通常考慮される感度解析の対象項目は、重要と考えられる解析上の仮定、重要度評価の結果から重要と判明した機器損傷、故障確率、計算結果として得られた支配的因子を含めて、評価結果に重要な影響を及ぼしうる仮定、モデル、データなどを選定する。

津波 PRA の場合には、次のような項目が感度解析の例として考えられる。

- ・ 重要度解析の結果、事故シーケンスの発生頻度に大きな影響を与え得る機器損傷、故障などのパラメータ（特に耐力データ、応答データ）
- ・ 津波発生後の運転員の操作失敗確率とそのときに考慮する津波による運転員へのストレスレベル
- ・ 損傷又は故障した機器の復旧を評価する場合の復旧の条件又は確率

AA.2 不確実さ解析の例

ここでは、点推定解析によって求めた事故シーケンスの最小カットセットを用いて不確実さ解析の例を示す。図 AA.1 に示す不確実さ解析の手順の例に沿って、不確実さ解析の実施手順の概要を説明する。

a) 解析条件の設定

不確実さ解析における解析条件（信頼度区分数など）を設定し、事故シーケンス解析コードの入力データを作成する。

b) 信頼度別機器損傷確率の算定

評価対象機器の津波高さごとの応答データと耐力データから、応答値が耐力値を超える確率分布として信頼度別津波誘因損傷確率を算出する。

点推定解析では、機器応答及び機器耐力のモデル及び知識に係る対数標準偏差 β_R^u 、 β_S^u をランダムな不確実さに係る対数標準偏差 β_R^f 、 β_S^f と同様な取り扱いをした。しかし、不確実さ解析においては、信頼度というパラメータを導入し、信頼度に応じて機器応答及び機器耐力の中央値を変化させることによって機器損傷確率分布を算出する。

(AA.1) 式に、信頼度 N における機器損傷確率の算出式を示す。

$$P(a, N) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{M_R(a)}{M_C} \right) + \sqrt{\beta_{ru}^2(a) + \beta_{cu}^2} X(N)}{\sqrt{\beta_{rr}^2(a) + \beta_{cr}^2}} \right] \quad (\text{AA.1})$$

ここに

- a : 津波高さ
- N : 信頼度 (%)
- P(a,N) : 津波高さ a, 信頼度 N での機器損傷確率
- X(N) : 信頼度 N に対応した確率変量
- Φ : 標準正規確率関数
- $M_R(a)$: 津波高さ a での機器応答の中央値
- M_C : 機器耐力の中央値
- $c\beta^u$: モデル及び知識の不確実さに係る対数標準偏差
- $c\beta^r$: ランダムな不確実さに係る対数標準偏差

ここに

$$c\beta^u = \sqrt{\beta_{ru}^2(a) + \beta_{cu}^2}$$

$$c\beta^r = \sqrt{\beta_{rr}^2(a) + \beta_{cr}^2}$$

- $\beta_r(a)$: 津波高さ a での機器応答のランダムな不確実さに係る対数標準偏差
- $\beta_{ru}(a)$: 津波高さ a での機器応答のモデル及び知識の不確実さに係る対数標準偏差
- β_{cr} : 機器耐力のランダムな不確実さに係る対数標準偏差
- β_{cu} : 機器耐力のモデル及び知識の不確実さに係る対数標準偏差

(AA.1) 式における X(N)は信頼度 N に対応した確率変量であり、次に示す (AA.2) 式で表される。

$$X(N) = \Phi^{-1} \left[\frac{N}{100} \right] \quad (\text{AA.2})$$

(AA.1) 式に基づいて、点推定解析で生成した各事故シーケンスの最小カットセットに含まれる機器の信頼度別損傷確率を、各津波高さに対する機器応答値と耐力データを用いて算出する。

c) 信頼度別起因事象発生確率の算定

点推定解析で設定した起因事象発生確率モデルに現われる機器の信頼度別損傷確率に基づき、各起因事象の津波高さごとの信頼度別発生確率を算出する。さらに事象の厳しい順に階層ツリー処理を行うことによって、事故シーケンスの不確実さ解析で使用する信頼度別起因事象発生確率を算出する。ここで、各起因事象の信頼度別発生確率を算出する場合には、起因事象ごとに評価対象機器の信頼度別損傷確率の組合せをラテンハイパーキューブ法又はモンテカルロ法によってサンプリングして、起因事象発生確率を算出し、全サンプリングケースを整理して、信頼度別起因事象発生確率を求める。

d) 事故シーケンスの最小カットセットに含まれる基事象のサンプリング

評価対象とする事故シーケンスごとに、事故シーケンスを構成する基事象に対して、信頼度別基事象確率の組合せをラテンハイパーキューブ法又はモンテカルロ法によってサンプリングする。

e) 信頼度別条件付事故シーケンス発生確率の算出

b)～d)に基づき、事故シーケンスの最小カットセットに対し、サンプリングされた基事象確率の組合せを上限近似法によって解析し、津波高さごとの信頼度別条件付事故シーケンス発生確率（信頼度別条件付事故シーケンス発生確率曲線）を求める。

f) 事故シーケンス及び津波ハザード曲線のサンプリング

評価対象とする信頼度別条件付事故シーケンス発生確率曲線と信頼度別津波ハザード曲線に対して、信頼度の組合せをラテンハイパーキューブ法又はモンテカルロ法によってサンプリングする。

g) 炉心損傷頻度分布の算出

e)～f)に基づき、信頼度別条件付事故シーケンス発生確率曲線と信頼度別津波発生頻度曲線との合積をとり、評価対象とする事故シーケンスの発生頻度分布を算出し、その総和から炉心損傷頻度分布を算出する。また、炉心損傷頻度分布から、平均値、中央値、5%信頼度値及び95%信頼度値などを算出する。

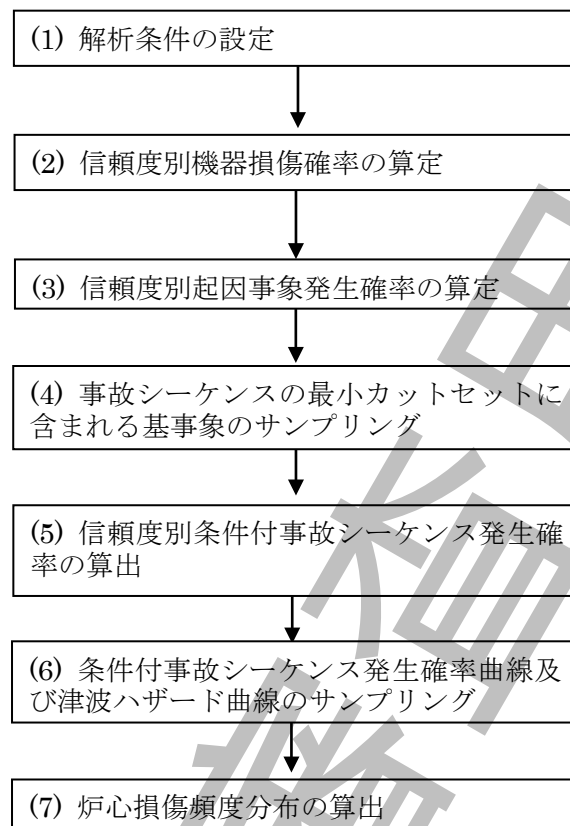


図 AA.1 不確かさ解析の手順

附属書 AB (参考) 文書化項目の例

序文

この附属書は、**箇条 10**における文書化項目の例を示したものである。

AB.1 一般事項

文書化において、PRA 実施の目的、評価範囲、用いた手法、条件、モデル、パラメータ、評価結果などの記述として含める項目の例を次に示す。以下の項目の b)から f)の記述については、この標準の**箇条 4**から**箇条 9**に示された規定に適合すること及び例外事項などの適用が妥当であることが理解できるように留意する。

AB.2 文書化項目の例

a) 目的、評価範囲及び評価結果の概要

- 1) 津波 PRA 実施の目的
- 2) 評価の対象範囲
- 3) 用いた手法
- 4) 評価結果

b) プラント構成・特性及びサイト状況の調査

- 1) 津波 PRA を評価する上で必要なプラント情報などの収集・分析
 - ー プラントの設計、運転管理に関する情報など
 - ー 対象サイトに影響を与え得る津波の波源様式などの情報の収集、情報の分析
 - ー プラント固有の津波に対する脆弱性関連の情報の収集、情報の分析
 - ー 事故シーケンス評価関連情報の収集、情報の分析
- 2) サイト・プラントウォークダウンの実施
 - ー 実施範囲の設定
 - ー 対象SSCsの選定

c) 事故シナリオの同定

- 1) 事故シナリオの同定
 - ー 分析対象とした広範な事故シナリオ
 - ー スクリーニングで除外した事故シナリオと除外した考え方
 - ー 事故シナリオの同定結果
- 2) 建屋・機器リストの作成

- ー 同定した事故シナリオに基づく建屋・機器リスト案の作成
- ー 建屋・機器フラジリティ評価、事故シーケンス評価との調整
- ー 調整した建屋・機器リスト

d) 津波ハザード評価

- 1) 津波ハザード評価の流れ
 - ー 対象とする津波波源
 - ー 評価手順概要(フロー)
 - ー 津波ハザード評価の定義点
- 2) 津波ハザード評価における不確実さ要因の取扱い
 - ー 不確実さの分類と取扱い
- 3) 津波発生モデルの設定
 - ー 対象となる地震発生領域とその発生様式
 - ー 地震ハザード評価の断層モデルとの対応
 - ー 断層モデルとそれに対応したマグニチュード範囲、発生確率
 - ー 津波発生モデルにおけるロジックツリー分岐項目
 - ー 地震以外の要因の津波波源とそのメカニズム、規模、発生確率
- 4) 津波発生・伝播数値モデルの設定
 - ー 地震による海底地殻変動モデル
 - ー 津波発生・伝播の数値モデル
 - ー 津波発生・伝播の数値モデルにおけるロジックツリー分岐項目
- 5) ロジックツリーの作成
 - ー 分岐項目のスクリーニング
 - ー 専門家活用基準ごとのロジックツリー
- 6) 津波ハザードの評価
 - ー 潮位の考慮方法
 - ー 津波ハザード曲線
- 7) フラジリティ評価のための津波パラメータ(浸水深、流速など)の算定
 - ー SSCs評価地点における津波パラメータの算定手順とその手法

e) 建屋・機器フラジリティ評価

- 1) 建屋・機器フラジリティ評価の評価手順
- 2) 評価対象と損傷モードの設定
 - ー 評価対象物の選定（建屋・機器リストに記載されたものに対して、評価対象物の追加、スクリーニング及び代表評価を行った場合の理由）
 - ー 損傷モード・部位の抽出（累積的損傷、地震による損傷の影響）
 - ー 損傷評価の指標の選定
 - ー 機器カテゴリ分類の作成

- － 不確実さ要因の分析（偶然的不確実さ及び認識論的不確実さ）
- 3) 評価手法の選択及びその理由
- 4) 評価に用いたデータ及びその根拠若しくは出典
 - － 現実的耐力評価に係わるデータ
 - － 現実的応答評価に係わるデータ
 - － 材料物性値などのデータ
- 5) 現実的耐力の評価（地震による損傷の影響）
 - － 中央値の評価
 - － 不確実さの評価（偶然的不確実さ及び認識論的不確実さ）
 - － 評価モデル，評価条件及び評価結果
- 6) 現実的応答の評価（地震による損傷の影響）
 - － 中央値の評価
 - － 不確実さの評価（偶然的不確実さ及び認識論的不確実さ）
 - － 評価モデル，評価条件及び評価結果
- 7) フラジリティの評価
 - － 中央値などの評価
 - － 不確実さの評価（偶然的不確実さ及び認識論的不確実さ）
 - － 評価手法，評価条件及び評価結果

f) 事故シーケンス評価

- 1) 事故シーケンス評価の流れ
- 2) 起回事象の設定
 - － 考慮すべき事故シナリオ
 - － 津波によって誘発される起回事象の同定
 - － 起回事象をもたらす SSCs の設定
- 3) 事故シーケンスのモデル化
 - － 安全機能の特定
 - － 成功基準の設定
 - － イベントツリーの作成
- 4) システムのモデル化
 - － フォールトツリーによるモデル化（頂上事象の定義，モデル化の基本ルール）
 - － フォールトツリーの作成（地震による損傷，津波による損傷，津波時の人的過誤，ランダム故障など）
 - － 基事象のスクリーニング
- 5) 事故シーケンスの定量化
 - － 条件付事故シーケンス発生確率

- － 事故シーケンス発生頻度の評価
- － 重要度解析
- － 不確実さ解析
- － 感度解析

g) 結論

h) 品質保証活動

i) 専門家判断の活用

j) ピアレビュー実施結果

k) 添付資料

附属書 AC

(参考)

参考文献

- [1] (独) 原子力安全基盤機構：確率論的手法に基づく基準津波策定手引き，JNES-RE-2013-2041，平成 26 年 2 月
- [2] 木原直人，松山昌史，藤井直樹：漂流物挙動解析による津波漂流物衝突に関する確率論的評価手法，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 69, No. 2, pp. I_341-I_345, 2013
- [3] 原子力安全基盤機構，“平成 21 年度 地震に係わる確率論的安全評価手法の改良=BWR の事故シーケンスの試解析=”，平成 22 年 12 月
- [4] 原子力安全基盤機構，“平成 21 年度 地震に係わる確率論的安全評価手法の改良 =最新 3 ループ PWR の事故シーケンスの試解析= に関する報告書”，平成 22 年 12 月
- [附B-1] 土木学会，原子力発電所の津波評価技術，平成 14 年 2 月，
<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5> (平成 23 年 8 月現在)
- [附 E-1] ASME, “Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications,” ASME/ANS RA-Sa-2009, February 2009
- [附 E-2] NEI, “Probabilistic Risk Assessment (PRA) Peer Review Process Guidance,” NEI 00-02, Rev. A3, March 2000
- [附 E-3] NEI, “Process for Performing Internal Events PRA Peer Reviews Using the ASME/ANS PRA Standard,” NEI 05-04, Rev. 2, November 2008
- [附G-1] 土木学会，原子力発電所の津波評価技術，平成 14 年 2 月，
<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>
- [附G-2] 土木学会，確率論的津波ハザードの解析方法，2011 年 9 月，
<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/39>
- [附G-3] 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，2013 年 6 月 19 日．
<https://www.nsr.go.jp/data/000069166.pdf>
- [附G-4] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，2013 年 5 月 24 日．
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf
- [附G-5] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）について，2014 年 4 月 25 日．
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sagami_2.pdf
- [附G-6] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，地震動予測地図 2014 年版～全国の地震動ハザードを概観して～，2014 年 12 月 19 日．
http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2014/

- [附G-7] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）について，2011年11月25日。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso_4.pdf
- [附G-8] 日本海における大規模地震に関する調査検討会．調査検討会最終報告，平成26年9月．http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- [附G-9] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版）について，2004年12月20日。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/chishima2.pdf
- [附 G-10] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，日本海東縁部の地震活動の長期評価について，2003年6月20日．http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nihonkai.pdf
- [附G-11] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価について，2004年2月27日。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/hyuganada.pdf
- [附G-12] 南海トラフの巨大地震モデル検討会，南海トラフの巨大地震による 震度分布・津波高について（第一次報告），2012年3月31日。
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st_report.pdf
- [附 G-13] 南海トラフの巨大地震モデル検討会，第二次報告，2012年8月29日．<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>
- [附G-14] 独立行政法人原子力安全基盤機構，確率論的手法に基づく基準津波策定手引き，JNES-RE-2013-2041，2014年2月．<http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000127184.pdf>
- [附G-15] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，震源断層を特定した地震の強震動予測手法（“レシビ”），2009年12月21日改訂。
http://jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf
- [附 G-16] Murotani, S., K. Satake, and Y. Fujii : Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~9 subduction-zone earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.40, 2013, pp.5070-5074.
- [附 G-17] 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響及び地震被害との関連—，地震第2輯，第51巻，pp.211-228, 1998.
- [附 G-18] 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌，110，849-875，2001.
- [附 G-19] Wells, D.L. and K.J. Coppersmith: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 974-1002, 1994.
- [附G-20] 地震調査研究推進本部，地震調査委員会，長期評価部会，“活断層の長期評価手法（暫定版）”報告書について，2010年11月25日。
http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/katsu_hyokashuho/

- [附 G-21] 武村雅之：日本列島及びその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震 2, 43, 257-265, 1990.
- [附 G-22] 構造計画研究所：内陸地殻内の長大断層による巨大地震とプレート間の巨大地震を対象とした震源パラメータのスケーリング則の比較検討業務成果報告書，2012
- [附 G-23] Mansinha, L., and Smylie, D.E., The displacement of the earthquake fault model, Bull. Seismol. Soc. Amer. 61, 1433-1400, 1972.
- [附 G-24] Steketee, J. A. On Volterra's dislocations in asemi-infinite elastic medium, Can. J. Phys. 36,192, 1958.
- [附 G-25] Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, v. 277, p. 1957-1962, 26 Sept., 1997.
- [附 G-26] Gebco, The General Bathymetric Chart of the Oceans , <http://www.gebco.net/>, 2011/08
- [附 G-27] 相田勇，三陸沖の古い津波のシミュレーション，東京大学地震研究所彙報，Vol.52, pp.71-101, 1977
- [附 H-1] Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Todo, and T. Watanabe: Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, SMiRT 16, No.1133, 2001.
- [附 H-2] Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Todo, and T. Watanabe,: Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, pp.399-408, 2002
- [附 I-1] Budnitz, R.J., G. Apostolakis, D.M. Boore, L.S. Cluff, K.J. Coppersmith, C.A. Cornell and P.A. Morris (1997). Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and the use of experts. NUREG/CR-6372, two volumes, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- [附 I-2] USNRC (2012). Practical implementation guidelines for SSHAC Level 3 and 4 hazard studies. NUREG-2117, US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
- [附 I-3] 安中正・香川敬生・石川裕・江尻譲嗣・西岡 勉:期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法，第 28 回地震工学研究発表会論文集，c00085r, 1-15, 2005.
- [附 I-4] 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法、2011 年 9 月
- [附 I-5] 後藤智明・小川由信(1982)：Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，52p.
- [附 I-6] 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討－経済性照査ワーキング活動報告書一、2008 年 3 月

- [附 I-7] 伊尾木圭衣・谷岡勇市郎：津波堆積物データから求めた北海道沖で発生した 17 世紀巨大地震の断層モデル、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、SSS31-P41
- [附 I-8] 東京電力：福島第一原子力発電所における基準津波の策定について（中間報告）、2014 年 2 月 5 日、<http://www.nsr.go.jp/data/000061068.pdf>
- [附 I-9] 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ統一データセット, release20121229, <http://www.coastal.jp/tjt/>
- [附 I-10] Takao, M., T. Tani, T. Kaneto, K. Yanagisawa, and T. Annaka: Tsunami Inversion Analysis of The Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 622-631, Tokyo, Japan, March 1-4, 2012
- [附 J-1] 平成 22 年度 原子力安全基盤機構年報, 平成 23 年 9 月
- [附 K-1] 一般社団法人日本電気協会：原子力発電所耐津波設計技術規定, JEAC 4629-2014, pp.199-223
- [附 K-2] 公益社団法人日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会：原子力安全のための耐津波工学－地震・津波防御の総合技術体系を目指して－, pp.165-166, 2015 年 3 月
- [附 M-1] H. Sugino, Y. Iwabuchi, M. Nishio, H. Tsutsumi, M. Sakagami and K. Ebisawa, “Development of Probabilistic Methodology for Evaluating Tsunami Risk on Nuclear Power Plants”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.(CD)
- [附 M-2] 杉野英治, 岩渕洋子, 坂上正治, 蛭沢勝三, “原子力発電所の津波 PSA 手法の開発その 3 津波に対する重要構造物の脆弱性評価手法の検討”, 日本原子力学会”2007 年秋の大会”予稿集, p439, 2007.
- [附 Q-1] 公益社団法人日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会：原子力安全のための耐津波工学－地震・津波防御の総合技術体系を目指して－, p.254, 2015 年 3 月
- [附 R-1] 独立行政法人原子力安全基盤機構（当時）：津波に対する構造設計・リスク評価手引き, JNES-RE-2013-2027, pp.199-205
- [附 S-1] 公益社団法人日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会：原子力安全のための耐津波工学－地震・津波防御の総合技術体系を目指して－, p.253, 2015 年 3 月

AESJ-SC-RK00*:201* 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リ スク評価に関する実施基準：201*

解説

この解説は、本体に規定・記載した事柄、及びこれらに関連した事柄を説明するものであり、実施基準の一部ではない。

この解説は、一般社団法人日本原子力学会が編集発行するものであり、この解説に関する問い合わせは、一般社団法人日本原子力学会へお願いします。

1 制改定の趣旨及び主要な改訂点

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに続く津波による福島第一原子力発電所事故からの教訓や知見は重要なものであり、積極的にそれらの知見を反映した標準とする必要がある。これ以前から、原子力発電所の安全性を客観的に且つ定量的に評価できる手段として、PRA をはじめとするリスク評価の活用は重要であるとの認識が高まっていたが、特に、福島第一原子力発電所事故を契機に外的事象のリスク評価の手法の必要性が高まった。これを背景に、リスク専門部会では、以前から策定していた地震 PRA に加えて外的事象単独の PRA 標準の策定を進め、津波単独の影響に対しては“原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 (津波 PRA 標準):2011”として策定している。さらに地震重畳を対象としたリスク評価手法に拡張すべく段階的に検討してきており、津波 PRA 標準については地震と津波の重畳に加え他の要因によって発生する津波に対応する標準とし、東北地方太平洋沖地震後に原子力学会の“地震 PRA 標準：2015 “との整合性に加え、最新の知見を反映した改定内容とすることを目指した。

以上の趣旨を踏まえて、考えうる新しい知見の反映、技術課題および構成の見直しを積極的に行なった。標準の規定に適合する評価方法等が、活用可能な一般的あるいは確立された手法及び例示として示せるものは附属書（参考）に加え、課題に対応する最新知見の研究技術に関しては、別冊の適用事例集に記載していくこととし、標準改定によらずに随時最新情報を反映する方針とした。

この標準における主要な改訂点を次に示す。

a) 適用範囲

2011 年東北地方太平洋沖地震はマグニチュード 9.0 以上の巨大地震であり、このような未経験の津波災害についても備える必要があることから、地震によって発生する津波、及び地震以外の要因（陸上の山体崩壊物（斜面崩壊含む）の海中突入、海底地すべり、火山現象（山体崩壊またはカルデラ陥没））に起因して発生する津波についても適用範囲とした。

地震以外の要因に起因して発生する津波については、**解説 2.1 適用範囲とする津波について**にも対象を記載する。また、これらの取扱いは、**7.3.8 地震以外の要因の津波**に規定した。

b) プラント構成・特性及びサイト状況の調査

5.2.3 対象構造物・機器の選定において、a) 耐震安全性の確認、b) 地震による設備間の相互干渉と二次的影響の確認、f) 地震・津波後のアクセス可能性の確認、等の記載内容に対し、地震による影響の考慮として地震 PRA 標準に準ずる実施の規定内容についての追加/改定を行った。

c) 事故シナリオの同定

6.2 自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定を追加し、地震及びその他の自然現象による津波を起因とした事故シナリオの考慮について追加/改定を行った。また、**附属書 A.3(規定) 地震の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定**において、地震及び津波の損傷の影響があるシナリオの組合せとスクリーニングについての内容の追加/改定を行った。

d) 津波ハザード評価

地震の発生モデル等における地震以外の要因の取扱いについて、追加/改定を行った。津波高さの定義点を、最新知見の結果より、海岸線からコントロールポイントに変更し、フラジリティ評価用の津波諸元に必要な情報を、津波パラメータとして整理して改定を行った。また規定として、**7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価**を追加した。

附属書 G(参考)津波ハザード評価に 2011 年東北地方太平洋沖地震の研究成果等の最新知見を踏まえた更新内容を反映した。

e) 建屋・機器フラジリティ評価

構造的損傷及び機能的損傷の影響による損傷モードの変化或いは部位の特定等の影響の考慮として地震 PRA 標準に準ずる実施の規定内容についての追加/改定を行った。また、津波防護施設・浸水防止設備の現実的応答の評価、海底砂移動による閉塞等の機能的損傷モードの評価、屋外設置の機器配管系の津波の波力・浮力、漂流物衝突、被水・没水の累積効果について附属書（参考）に各評価方法の解析例を追記した。

f) 事故シーケンス評価

全般にわたり、地震による影響の考慮として地震 PRA 標準に準ずる実施の規定内容についての追加/改定を行った。

9.3.2 安全機能の設定において“反応度制御機能”を追加した。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は除外する、と規定した。津波による漂流物の影響や地震による構内通行道路の影響の他、可搬設備の繋ぎ込み先の耐震性などについての考慮を追記し、**9.5.1 炉心損傷頻度の算出**において条件付発生確率に地震動強さ a の影響を追加した。

2 適用範囲について

2.1 適用範囲とする津波について

地震と津波，火災，溢水の影響を同時に被る状態での PRA 実施基準は，それぞれ単体の事象に起因する PRA 実施基準が策定された後に検討を開始することが適切であると考え，これらの PRA 実施基準の必要性についてはその発生頻度と重要度の観点から判断して，策定には段階的アプローチをとるものとして標準作成の検討が進められてきた。

本標準では，地震によって発生する津波，及び地震以外の要因（陸上の山体崩壊物（斜面崩壊含む）の海中突入，海底地すべり，火山現象（山体崩壊またはカルデラ陥没））に起因して発生する津波について適用範囲とする。

2.2 地震による影響の考慮について

地震によって発生する津波の PRA を実施する際には，地震動による作用及び影響を考える必要がある。地震によって機器・システム及び外部電源，通信設備などのインフラが損傷していること，アクセス性の劣化などを考慮することになる。

なお，この標準は，地震による影響を考慮する必要がないという場合にも適用可能である。地震による影響を考慮する必要がない場合とは，地震によって原子炉は停止し，原子炉の冷却，放射性物質の格納に関する安全機能は維持されている状態を言う。すなわち，原子炉停止に続き，原子炉が冷却されていることと格納機能が健全であることを前提とする場合である。

2011 年の東北地方太平洋沖地震津波では，太平洋沿岸において地震発生後に津波による大きな水位上昇に至る津波到達時刻は 20 分～60 分程度と比較的長かった。津波到達時刻が短い事例としては，1993 年北海道南西沖地震津波において，奥尻島南端部を地震後 2～3 分後に津波が到達・陸上遡上したことがあげられる。このように地震発生後，津波到達までには少なくとも数分以上の時間余裕がある場合が多い。地震時には数秒以下の短時間での制御棒挿入が要求されているので，原子炉停止には十分な時間余裕があると考えてよい。なお，地震によって原子炉停止に失敗する場合の事象進展は津波到達までの時間余裕に比べて速いので，このシーケンスは地震リスク評価にて考慮されている。冷却機能と格納機能は耐震重要度の高いシステムに拠るので，その機能は地震においても維持されていると仮定する。これらの機能の一部あるいは全部が損傷している状態においては，地震と津波の影響が相互に関連するリスクの評価が必要である。

地震による影響を考慮する必要がない場合には，初期条件（プラント状態及び操作可能性など）を決めるにあたって，以下の点が考慮すべき事項である。津波来襲に備えてのアクシデントマネジメント策あるいはその準備（例えば，代替電源，代替水源，水密性の確認など）を行う場合もある。従って，津波到達までの時間余裕を考えながら可能な対策を津波 PRA において考慮することが適切である。その場合において，津波警報発報に伴う従業員の避難なども考慮する必要がある。地震に続く津波によるリスク評価では，時間余裕の大小に応じてリスク低減のために実施できる方策及び準備は異なると考えられる。

大規模の地震時には，外部電源系統が損傷する可能性が小さくはない。従って，地震に

よる影響を考慮する必要がない場合においても、外部電源が利用できない場合のリスクとの比較によってその影響を評価する必要がある。地震に起因するリスク評価において、外部電源の脆弱性を地震パラメータに関して評価している。それを津波 PRA において、外部電源喪失確率として用いるべきとの意見もあるが、津波 PRA ではリスク評価パラメータは津波高さであり、地震の規模と津波の規模は一対一に対応しない。従って、外部電源の地震時脆弱性を地震による影響がないとした津波 PRA にて用いることはできない。よって、地震によって外部電源が既に喪失している条件でのリスク評価を、別途実施する必要がある。

2.3 レベル 1PRA のみを対象としたことについて

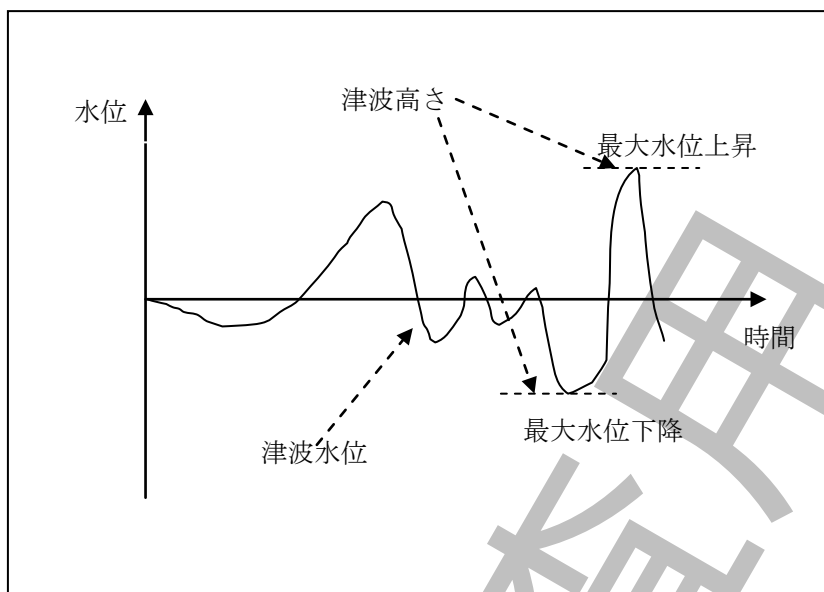
本標準では、出力運転状態のレベル 1 PRA を対象にするとした。レベル 2 PRA、レベル 3 PRA ならびに停止時 PRA は本標準の適用範囲外としたが、それらを実施する必要がないと述べているのではない。レベル 2 PRA とレベル 3 PRA については、AESJ-SC-P009:2008 と AESJ-SC-P010:2008 が、また、停止時 PRA については、AESJ-SC-P001:2010 が、それぞれ制定されている。これらを津波に起因するレベル 2、レベル 3 PRA、ならびに停止時 PRA にて引用規格とするか、あるいは津波に起因するレベル 2、レベル 3PRA 及び停止時 PRA の実施基準を新規に制定するべきかは今後判断する必要がある。よって、本標準では出力運転状態のレベル 1 PRA のみを対象とすることとした。

2.4 高速増殖炉への適用

津波 PRA における高速炉で考慮すべき特徴とは、ナトリウム冷却であること、自然循環崩壊熱除去が可能であり交流電源は必須でないこと、ヒートシンクが大気であり空間的に系統分離がなされていること、ナトリウムの凍結防止のための制御及び電源が必要であること、炉外燃料貯蔵槽があること、地階にナトリウムタンクがあることなどである。津波 PRA では、機器の配置と津波の影響伝搬経路によってシナリオが決まると考えれば高速炉にも適用できる。

3 津波高さについて

本標準においては、解説図 1 に示すように津波水位とは、津波が発生しない場合の水面に対して、津波による水面の変動量とする。津波高さとは、ある場所での最大水位上昇量及び最大水位低下量を表すものとする。なお、津波の高さに関連した用語の定義は、完全に統合されている状況ではない。本標準においては、“津波の事典” 附 G-22) による定義に準じて解説図 2 に示す定義を用いる。



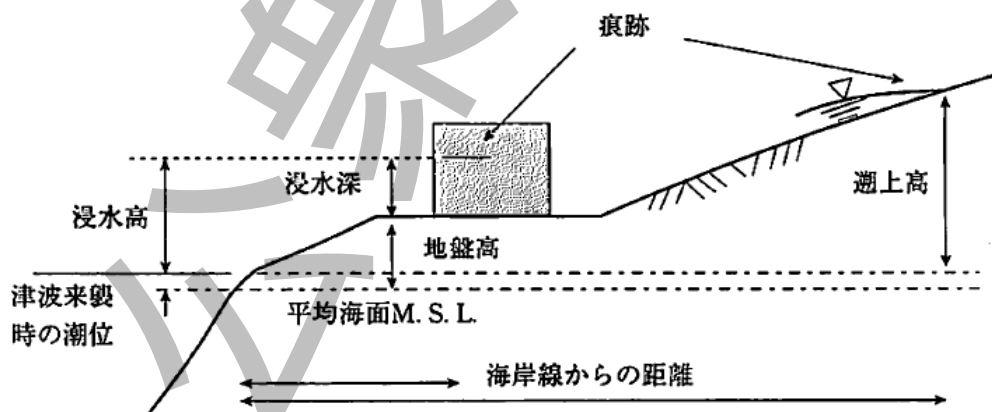
解説図 1 津波水位と津波高さの定義

[遡上高]: 陸上において、津波が這い上がった地点の地盤高。

[浸水高]: 陸上において、津波が這い上がる途中での水面高さ。もしくは建屋等の閉鎖空間に溢れた水の水面高さ。

[浸水深]: 浸水高における、固定面からの水面高さ、もしくは水の厚さ。

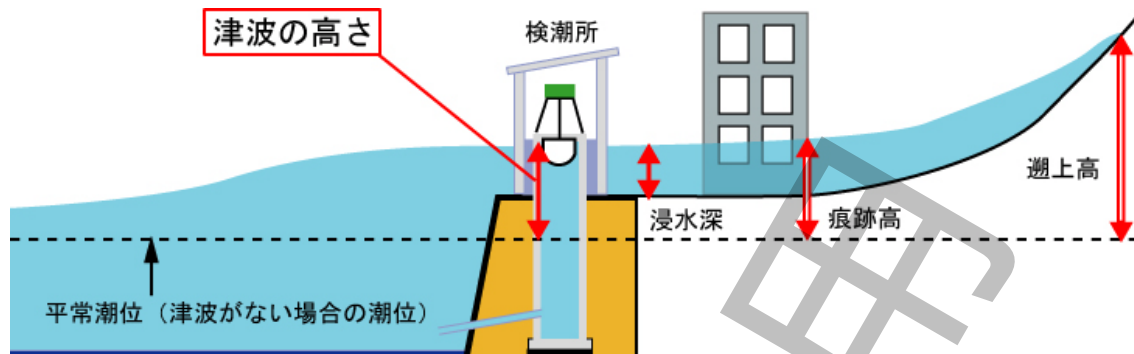
[痕跡高]: 遡上高と浸水高のどちらか。もしくは両方のこと。



解説図 2 津波の事典における津波の痕跡種別^{附G-22)}

参考に、気象庁における定義を解説図 3 に示す^{附G-23)}。これらは津波予警報及び検潮記録の観点から定義されたと考えられる。気象庁は“津波波高”という言葉を用いているが、日本被害津波総覧[第二版]^{附G-24)}では、検潮記録における全振幅を“最大波高”としており、

混乱する可能性がある。



※津波波高 (m)は、船舶、養殖筏など海上にあるものに対しては概ね海岸線における津波の高さ、家屋や防潮林など陸上にあるものに関しては地面から測った浸水深となっています。

<中略>

なお，“津波の高さ”とは、津波がない場合の潮位（平常潮位）から、津波によって海面が上昇したその高さの差を言います。

さらに、海岸から内陸へ津波がかけ上がる高さ（標高）を“遡上高（そじょうこう）”と呼んでいますが、“遡上高”は気象庁から発表される“予想される津波の高さ”と同程度から、高い場合には4倍程度までになることが知られています。

解説図 3 気象庁における津波の痕跡種別

4 複数基立地サイトにおけるリスク、及び複数サイトにおけるリスクの取扱い

津波時のリスクを考える場合に、その影響の広範さから、複数基立地サイトにおけるサイト内全体でのリスク、及び、近接する複数サイトを含めたより広範囲なリスク、といった議論も重要と考えられる。これらを評価するためには、例えば、津波の広範な影響によって複数の原子炉が同時に炉心損傷に到るリスクをどのように評価するか、複数の炉への影響を考慮した場合に津波の遡上解析手法及び結果にはどのように影響するか、隣接炉の間での機器損傷の相関性をどう扱うか、隣接炉でシビアアクシデントが発生した場合の当該炉の復旧操作などへの影響をどう考えるか、といった課題が考えられる。本標準では複数の原子炉が同時に炉心損傷に到るような場合に想定されるシナリオは対象外とし、これらは今後の課題とする。

5 事故シナリオの同定における各種津波対策の取扱い

種々の津波対策及び、外的ハザード対応にも有効なアクシデントマネジメント（AM）策の有効性を評価する目的で津波 PRA を利用する場合、これらの対策を、評価手順の中のどのステップでどのようにモデル化するかを検討が重要であるとともに、評価すべき事故シナリオを同定する際の取り扱いも重要である。そのイメージ例を以下に示す。

a. 防潮堤の強化

防潮堤の強化などの対策で、安全上重要な設備が影響を受ける津波水位、波圧などが変わる（より高く／強くなる）ことによって、例えば大型の漂流物の衝突など、想定すべき施設への影響が拡大する可能性がある。また、津波発生頻度の不確実さも増大する。このため、対策を考慮しない場合には定量的、工学的にスクリーニングアウトできるとされた事故シナリオのリスクが、対策を考慮した場合には、相対的に有意に影響し、不確実さも考えると、定量的にはスクリーニングアウトできなくなる可能性が増大する。

b. 水密化

水密化などの対策で、当該の SSCs が機能喪失する津波水位が変わる（より高くなる）とともに、波圧など別の影響によって機能喪失する可能性が相対的に増大する可能性も考えられる。このため、**解説 5.a. 防潮堤の強化**と同様に、想定すべき影響が拡大する可能性があるとともに、影響と頻度の観点で当該の SSCs で代表できるとしてスクリーニングアウトしていた他の SSCs の損傷が、相対的に有意に影響してくる可能性がある。

例えば、種々の対策を考慮した場合を想定して、津波シナリオの影響が予想されるような設備、影響については、広範囲に建屋・機器リストの候補としておき、フラジリティ評価の可否などを調整してスクリーニングするといった対応が考えられる。

c. 遠地（高台）の恒設／可搬設備の利用

遠地（高台）に設置した恒設／可搬設備の利用などによって、リスクに支配的な事故シナリオに対して多様な緩和策が期待できるため、事故シナリオの同定に結果も影響する可能性がある。

影響緩和に期待できる対策設備を含め、広範囲に建屋・機器リストに記載し、津波事故シーケンス評価の対象とするとともに、事故シナリオの同定においても、対策のための操作に対する影響、例えば、操作性、アクセスなどを阻害する津波の影響の可能性を考慮する必要がある。その際には、**9.事故シーケンス評価**における人的過誤のモデル化の考え方と調整し整合を図る。

なお、これらはいずれも、種々の対策を考慮した場合を想定して、事故シナリオをより広範に同定することを求められるが、同時に種々の不確実さが増大することにも繋がり、情報の不足などによって炉心損傷頻度を評価することが難しい場合も想定される。そのような場合には、例えば、津波水位など相対的に不確実さが小さく定量評価が可能な影響に限定した津波 PRA を実施して津波対策の有効性を分析、評価し、合わせて、**6.2 広範な事故シナリオのスクリーニング**に規定するように、津波水位以外の影響は別途感度解析として

取り扱うなど、目的に即した適切な取り扱いを検討することも有用である。

6 建屋・機器フラジリティ評価における今後の課題

6.1 津波に関する現実的耐力評価及び現実的応答評価

建屋・機器フラジリティ評価では、津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動などによる構造的、機能的及び累積的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答を評価することが必要であるが、特に以下に示す4項目に関しては、現状で考えられる評価法の認識論的不確実さが大きいために、精度の良い評価法に関する研究の進展が今後望まれる。

- ① 複数の津波による経時的な累積効果を考慮した、被水・没水による関連設備の累積的損傷に対する現実的耐力評価法及び現実的応答評価法を高度化するためには、建屋内の浸水評価及び取放水路からの溢水・浸水評価に関する研究の更なる進展が必要である。現状の評価法の例として、建屋内の浸水解析例を**附属書 R（参考）**に、取放水路などを介した溢水・浸水解析例を**附属書 S（参考）**に示した。今後は、同様な解析例が蓄積されることによって、数値的な信頼性の向上及び評価法に関する研究の更なる進展が望まれる。
- ② 津波の洗掘による建物・構築物の安定性に係る構造的損傷に対する現実的耐力評価法及び現実的応答評価法の例として、3次元流体－構造－地形変化連成モデルによる洗掘解析例を**附属書 Q（参考）**に示した。今後は、同様な解析例が蓄積されるとともに、被害事例のシミュレーション解析による評価法に係る認識論的不確実さの定量値を示していく必要がある。
- ③ 津波の漂流物衝突による関連設備の構造的及び機能的損傷に対する現実的耐力評価法及び現実的応答評価法のうち、津波による漂流物衝突時の衝撃荷重の算定方法の一例を**附属書 P（参考）**に示した。また、3次元流体・構造連成解析コードを用いた3次元流動場における津波漂流物の挙動シミュレーション解析に関しては、複数の学術機関等によって現在研究されている。今後は、それらの解析結果の比較すること等により、評価法に係る認識論的不確実さの定量値を示していく必要がある。
- ④ 各損傷モードが複合した場合の構造的、機能的及び累積的損傷に対する現実的耐力評価法及び現実的応答評価法に関しては、現時点では関連する技術的な知見が完全に不足しているのが実情である。上記の①～③の各要素技術に関する精度の良い評価法が成熟した後のステップで、このような複合的な損傷モードに対する評価事例の検討・蓄積を進めていくことが現実的であると考えられる。

6.2 火災に対する津波の影響評価

国内外の地震・津波被害に随伴して、多数の火災被害が報告されている。特に、東北地方太平洋沖地震では、発生した火災のうち、4割超が津波（随伴）火災と推定されており、

住宅地や一般産業施設における津波に伴う火災発生の可能性の高さが指摘されている。津波火災の発生・拡大の要因としては、津波による倒壊家屋の瓦礫や漂流した車両からの出火、漏洩油による延焼の助長と津波による延焼の拡散である。原子力施設に対しては、配電盤などの電気品の没水・被水やタンクからの油流出が津波火災の原因となる可能性が想定される。さらに、津波による損傷のない機器への火災による影響など、複数機器の相互影響も懸念される。これらの状況に鑑み、津波に起因する火災リスク評価においては、津波による損傷を適切に考慮した火災に対する影響評価や脆弱性評価の必要性が議論された。しかし、地震や津波による損傷を考慮した高温下での機器及び設備の現実的耐力及び現実的応答の評価に関する既往知見は極めて少なく、今後評価手法の開発が望まれる。

【参考文献】

日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会：原子力安全のための耐津波工学，pp.162-166，2015 年 3 月

7 複数の津波及び余震による影響の重ね合わせについての考え方

津波が原子力発電所に来襲するとき、第一波に続き、第二波、第三波と連なる可能性がある。複数の津波による影響は、地震PRAにおける余震と共通の特徴と課題を含んでいる。さらに、津波到達の間及び津波到達後に余震が発生する可能性もある。2011 年東北地方太平洋沖地震では、3 月 11 日 14 時 46 分にM_w9.0 の本震が発生し、同日 15 時 15 分に最大余震が発生するなど、震度 5 弱以上を観測する地震が同日中に 10 回発生している。また、東北地方太平洋沿岸部をはじめとして、本震により発生した津波が観測されており、10m を越える津波の痕跡が確認されている地点もある。これらの状況より、太平洋沿岸部の原子力発電所にも、大きな地震動と大きな津波が複数回来襲したことが分かる。

津波 PRA において複数の津波及び余震による影響の重ね合わせについての考え方を議論し、以下に整理した。

複数の津波による影響は、第一波、第二波などの内、最大の津波で代表できる。ただし累積型損傷については各波の合算影響を考慮する必要がある。

例えば、第一波で防潮堤や水密扉など防止機能に影響（損傷）があった場合（安全系を設置する区画の水密性は劣化したが没水はしていないなど）、第二波で直接安全系が没水するなど緩和機能に影響するシナリオが考えられる。さらに、この間に、余震により防潮堤や水密扉などの機能的損傷が進展する場合も考えられる。ただし、これは事象の重ね合わせであることから、地震と津波の相互作用を取り扱う今後のステップの中で検討する。

また、累積型損傷は、損傷モードに応じて取扱いを変える必要がある。損傷モードとしては、構造的損傷、機能的損傷、累積的損傷の三つを考える。津波 PRA での具体的な例は、構造的損傷は波力、機能的損傷は被水、累積的損傷は没水とみなすことができる。

なお、複数の津波及び余震による累積型損傷に対する現実的耐力評価法及び現実的応答評価法に係る現状と今後の課題に関しては、解説 6.1 の①にまとめているのでそちらを参照されたい。

【参考文献】

気象庁HP：【災害時地震・津波速報】平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201101/saigaiji_201101.pdf