

JAERI-Research

JP0150255

2000-064



原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討(2)
－浮体式原子力発電施設の安全設計の検討－
(受託研究)

2001年2月

藪内 典明・高橋 政男^{*}・中澤 利雄
佐藤 和夫^{*}・島崎 潤也・落合 政昭

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討（2）
— 浮体式原子力発電施設の安全設計の検討 —
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
藪内 典明・高橋 政男*・中澤 利雄+・佐藤 和夫**・島崎 潤也・落合 政昭

(2000年11月22日受理)

浮体式海上立地方式による原子力発電施設（以下、「浮体式原子力発電施設」という。）について、前報では、モデルとして110万kW級の発電用加圧水型原子炉施設を搭載する浮体構造物を水深20m程度の冲合に係留することを想定した概念検討を行い、また、波浪等に対する応答解析を行って、浮体構造物の運動が安定したものであることを示した。

本報告書では、浮体式原子力発電施設の安全に関し、基本的な設計方針、設計で考慮する自然現象の設定の考え方、安全上の機能について検討した。加えて、大型浮体構造物の運動特性解析技術の現状に関する調査を行った。

調査検討の結果、浮体構造物の安定性の確保が浮体式原子力発電施設の健全性確保の基本となること、また、浮体構造物の安定性評価では、S1及びS2地震に加え、S1及びS2暴風雨のような規模の暴風雨を考慮する必要があること、さらに、設計で考慮する暴風雨の規模の設定が浮体式原子力発電施設の実現に向けた主要な課題の1つであることを明らかにした。

本調査研究は、特別会計による科学技術庁からの受託研究（平成7年度～平成10年度）として実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

* 新潟鐵工株

** 石川島播磨重工業株

Feasibility Study on Floating Nuclear Power Plant (2)
– Safety Design Study of FNPP –
(Contract Research)

Noriaki YABUCHI, Masao TAKAHASHI*, Toshio NAKAZAWA†, Kazuo SATO**
Junya SHIMAZAKI and Masaaki OCHIAI

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 22, 2000)

In the previous report of "Conceptual Design Study of FNPP", a design study on a concept for FNPP, which is sited off the sea coast on the open sea with water depth of 20m and it is moored on protected sea by the breakwater was conducted and the floating platform guarded by the breakwater was found to be stable enough to install the nuclear power plant from analysis simulating the movement of the platform due to sea wave or wind.

In this report, studies on a basic safety design concept of the FNPP, setting natural phenomena for design condition, required safety functions and a review on dynamic analysis of the large floating structure are presented.

The studies revealed that the stability of the floating platform is an essential issue for the FNPP soundness, and the design base natural phenomena such as S1 and S2-class storm including S1 and S2-class earthquake should be considered in evaluation of the stability of the floating platform, and it is one of key technical subjects how to set the magnitude of these storm in application of design evaluation on each FNPP case.

Keywords: Offshore Siting, Floating Nuclear Power Plant, Safety Design,
Floating Platform, Storm, Stability Evaluation

This study was conducted during 1995 through 1998 under contract with Science and Technology Agency of Japan.

+ Department of HTTR Project Oarai Research Establishment
* Niigata Engineering Co.Ltd.
** Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2.浮体式原子力発電施設の概念	1
3.浮体式原子力発電施設の安全設計	1
3.1 安全設計の基本方針	1
3.1.1 関連各種施設	2
3.1.2 浮体式原子力発電施設	5
3.2 自然現象の設定の考え方	8
3.2.1 重点的に考慮する自然現象	8
3.2.2 自然現象の規模	10
3.3 安全上の機能	12
4.浮体式支持基盤の安定性評価	15
4.1 安定性評価の中心的技術課題	15
4.2 運動特性等の予測に必要となる要素技術の抽出	16
4.3 大型浮体構造物の運動特性等予測技術の現状	16
5.まとめ	19
謝 辞	21
参考文献	22
付録Ⅰ 浮上式原子力発電プラント AGS の設計方針	39
付録Ⅱ 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針	49
付録Ⅲ 重要度分類の具体例	54
付録Ⅳ 浮体構造物の運動特性等予測技術に関する調査文献の要約	62

Contents

1 . Introduction	1
2 . Concept of Floating Nuclear Power Plant (FNPP)	1
3 . Safety Design of FNPP	1
3.1 Basic Concept of Safety Design	1
3.1.1 Relative Structure to FNPP ; Existing Nuclear Power Plant, Nuclear Ship and Mega-Float Offshore Structure	2
3.1.2 FNPP	5
3.2 Setting Natural Phenomena for Design Condition	8
3.2.1 Selection of Natural Phenomena	8
3.2.2 Scale of Natural Phenomena	10
3.3 Safety Functions of Floating Platform, Mooring Equipment and Breakwater	12
4 . Stability Evaluation of Floating Platform	15
4.1 Technical Requirements for Stability Evaluation	15
4.2 Technologies for Stability Evaluating	16
4.3 An Example of Dynamic Analysis of Large Floating Structure	16
5 . Conclusions	19
Acknowledgements	21
References	22
Appendix I The Safety Design in the Atlantic Generating Station (AGS) Plan	39
Appendix II Regulatory Guide Review for Seismic Design of Light Water Type Nuclear Facility for Electrical Generation	49
Appendix III Examples for Seismic Design Classification	54
Appendix IV Summary of the Report of Dynamic Analysis of Large Floating Structure	62

1. はじめに

発電用原子炉施設の立地については、わが国における原子力発電供給力の増強等を考慮し、立地選択の幅を拡大する必要がある。具体的には、岩盤の露出した広大な平坦地を必要とする現行の立地方式（以下、「在来立地」という。）に加え、在来立地以上に広範囲な条件に対応しうる第四紀層立地、海上立地及び地下立地の新規立地方式の技術開発に取り組んでおくことが重要である。この技術開発については、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（平成6年6月24日 原子力委員会決定）においても、「中長期的観点から、第四紀層、海上立地、地下立地等の新規立地方式の研究や耐震設計高度化による立地技術の高度化に取り組んでいきます。」と、積極的な姿勢が示されている。このような状況を受け、科学技術庁は、海上立地に係る技術調査を企画し、その調査を日本原子力研究所（以下、「原研」という。）に委託した。

本報告書は、原研が受託した調査研究の成果のうち、主として、浮体式原子力発電施設の基本的な設計方針、自然現象の設定の考え方、安全上の機能、自然外力による大型浮体構造物の運動特性等を予測する技術の現状水準についての調査検討結果を取りまとめたものである。

2. 浮体式原子力発電施設の概念

検討対象とする浮体式原子力発電施設は、出力110万kW級の発電用軽水型原子炉施設を搭載する浮体構造物を既存の造船所のドックで一括建造する前提に立ち、日本の外洋でかつ防波堤を合理的に築堤できる沖合1~2kmで水深20m前後のサイトに、長さ300m×幅80m×高さ35m、総排水量30万トン規模の浮体構造物をドルフィン係留するものである。本施設は防波堤の設置を前提にしており、Fig.2.1及びFig.2.2に示すように原子力発電施設、浮体構造物、係留装置、防波堤等から構成される。なお、本施設に関しては、浮体運動のシミュレーションによって、波浪、風に対して十分な安定性を有していることが確認されている¹⁾。

3. 浮体式原子力発電施設の安全設計

3.1 安全設計の基本方針

ここでは、浮体式原子力発電施設と技術的共通点の多い在来原子力発電所、原子力船及びメガフロート技術研究組合を中心として研究開発が進められている超大型浮体式海洋構造物（以下、「メガフロート」という。）を対象として、施設の安全を確保するための設計上の基本方針について調査し、これらを参考として、浮体式原子力発電施設の安全設計の考え方を検討した。

3.1.1 関連各種施設

(1) 原子力発電所

一般に産業施設における安全とは、当該施設の運転により公衆及び運転員の健康を損ねる事態が発生しないことを言う²⁾。原子力発電所では、一般産業施設の安全確保に加えて原子炉施設固有の安全を確保する必要がある。原子炉施設固有の安全確保とは、「どのような場合にも放射性物質の危険性から公衆の安全を確保する」ことであり、次の2つに集約することができる。

- ① 平常運転時に公衆及び従業員の放射線安全に関する基準を十分に満足すること。
- ② 万一の事故発生時にも、公衆及び従業員の安全を確保すること。

原子炉施設固有の安全確保の基本的方策は、Fig.3.1.1に示すように、第1に異常な事態が起こらないようにすることであり、そして仮に異常事態が発生したとしても事態の拡大を防止し、周辺へ放射性物質を放出して環境へ影響を与えることがないようにするために、原子炉を止める（止める）、燃料の熱を除去するために冷やす（冷やす）、放射性物質を閉じ込める（閉じ込む）、ことである。原子炉施設ではこの基本的方策を実現するために、多重防護という考え方に基づき何段階もの安全対策が講じられている。多重防護は3つの防護レベルから成り立っており、その考え方は以下のとおりである。

a) 第1の防護

第1の防護は、機器等の故障など事故につながる異常事態の発生防止という観点から、次のような安全対策が講じられる。

- ① 個々の機器、系統等は十分余裕を有するように設計する。
- ② 原子炉は固有安全を有するように設計する。
- ③ 誤操作や誤動作を防止するように設計する。
- ④ 厳重な品質管理及び入念な点検・検査を行う。
- ⑤ 運転及び保修要員の資質の向上を図る。

b) 第2の防護

第2の防護は、異常事態の拡大防止という観点から、第1の防護にも拘わらず故障や異常が発生した際に、十分安全な段階で対策を講じることである。安全対策は故障や異常の早期検知、原子炉の自動停止等である。

c) 第3の防護

原子力発電所では、大量の放射線物質が外部に漏れるような事故はまず考えられないが、万一に備えた対策として第3の防護があり、次のような安全対策が講じられる。

- ① 放射性物質の異常な放出の防止という観点から、事故が起きた場合、非常用炉心冷却装置(ECCS)により自動的に原子炉に大量の水を注入し、燃料を冷却する。
- ② 放射性物質の異常な放出がなされた場合、その影響の緩和という観点から、放出された放射性物質を格納容器や原子炉建家で封じ込め、さらにその放出を少しでも緩和させるため放射性物質の除去、回収を行う。

在来原子力発電所では、この安全確保の考え方に基づいて、以下の示す基本方針のもとに安全設計が行われている。

- ① 平常運転時には、発電所周辺の一般公衆、放射線業務従事者等（以下、「従事者等」とい

う。)に対し、原子炉等の規制に関する法律³⁾に基づき定められている線量当量限度を越える放射線被ばくを与えないよう設計する。さらに、設計に当たっては、発電所周辺の一般公衆に対し、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」⁴⁾に定められている線量目標値を越える放射線被ばくを与えないように努める。

- ② 原子炉施設は、設計、製作、建設、試験、検査を通じて信頼性の高いものとし、運転員の誤操作等による異常事態に対しては、警報等により運転員が認識し適切な措置を講じ得るようにするとともに、これらの修正動作が行われない場合にも、原子炉固有の安全性及び安全保護系等の作動により、重大な事故に発展することができないように設計する。
- ③ 燃料から放出される核分裂生成物が発電所周辺に放出されるのを防ぐ多重の防壁を設け、万一事故が起こった場合にも発電所周辺の一般公衆の安全を確保する。
- ④ 原子炉施設は、地震、台風、積雪、高潮、津波等の自然現象によっても安全性が損なわれることのない構造及び配置とする。

原子炉の設置許可申請に対するわが国の安全審査において、安全設計の妥当性確認のよりどころとなるものに、発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針⁴⁾（以下、「安全設計審査指針」という。）等の審査指針類がある。安全設計審査指針では、基本的に自然現象を含む種々の設計条件を考慮した場合にも、一般公衆及び従事者等に過度の放射線被ばくを与えないよう原子炉施設を設計することを要求している。特に地震に対する耐震設計に関しては、発電用軽水型原子炉施設に関する耐震設計審査指針⁴⁾（以下、「耐震設計審査指針」という。）によりその妥当性が評価される。

(2) 原子力船

原子力船の安全を確保するためには、原子炉施設の安全確保に加えて、船舶としての安全を確保することが必要不可欠である。原子力船に搭載される原子炉施設の安全確保の考え方は、前述の原子力発電所における原子炉施設固有の安全確保の考え方と基本的に変わることはないが、以下の点が特徴的である。

- ① 原子力発電所では、故障や異常が発生した際に十分安全な段階で対策を講じる。この考え方は原子力船に搭載される原子炉施設でも同様であるが、原子力船全体の安全確保という観点から、原子炉の運転が必要となることもありうる。例えば、原子力船「むつ」の場合、1台の一次冷却水ポンプが異常停止した時でも、原子炉停止が衝突、転覆等の大きな災害を引き起こすおそれがあるので、必ずしも原子炉停止とはしない。
- ② 事故が発生した際に周辺への放射性物質の異常な放出の防止という観点から行われる安全対策は、原子力発電所と基本的に変わることはないが、原子力船では、岸壁係留中、放射性物質の異常な放出を伴うような事故が発生した場合、必要により曳船を用いて曳航し、周辺公衆との離隔距離を十分に確保するという安全対策を講じる。

原子力船に搭載される原子炉施設の安全設計の基本方針⁵⁾についても、前述の原子力発電所の場合と基本的に変わることはないが、以下の点が特徴的である。

- ① 船体構造は衝突、座礁等の船体事故時にも原子炉格納容器に損傷を与えぬように設計する。

- ② 航行中に通常遭遇するあらゆる船体条件の下でも、安全に運転できるよう機器の作動条件、設計強度等を十分考慮して設計する。

上記①の要求に対する設計方針は、原子力船「むつ」の場合以下のとおりである⁵⁾。

- ① 衝突に対しては、原子炉区画側部に耐衝突構造を設け、衝突エネルギーを耐衝突構造により吸収し得るよう設計し、格納容器に損傷を及ぼさないようにする。
- ② 座礁に対しては、原子炉区画下部の二重底構造を強化し、万一座礁しても格納容器に損傷が及ばないようにする。
- ③ 浸水に対しては、船体構造を2区画可浸性^{注)}に設計し、連続2区画に浸水しても沈没しないようにする。
- ④ 浸水あるいは沈没した場合でも転覆しない設計とする。また、沈没時の外圧で格納容器が破壊することのないよう圧力平衡弁を設けるとともに、水圧に耐えうるように設計する。

注) 2区画可浸性とは、いかなる連続した2区画に浸水したとしても、船舶が十分な復元性を有することを言う。

(3) メガフロート

メガフロートの用途としては、空港、港湾施設、物流基地などが考えられているが、現在メガフロート技術研究組合を中心とした研究開発では、最も要求性能の厳しい浮体空港を想定し、実用化に向けた技術開発が行われている。

空港のような公共性の高い重要な社会資産を上載するメガフロートの究極の安全目標は、不特定多数の利用者に対する安全の確保である。設計においては、この安全目標を合理的に達成することが要求されるが、このうち災害に対する安全設計の目標は概ね以下のとおりである⁶⁾。

- ① 極めて希な気象・海象条件や航空機墜落などの不測の事態が発生しても、浮体構造物本体に致命的なダメージが発生したり、空港としての機能が喪失したりすることのないようとする。なお、致命的なダメージとして具体的には浮体の漂流及び沈没を考える。
- ② 災害に対して、避難路、避難区画の確保、陸上及び海上からの支援可能度等を考慮した合理的な防災対策を講じる。

メガフロートは浮体構造物、係留施設、防波堤、連絡橋等から構成されるシステムであるため、上記①に示すような自然現象などの外的要因に対する安全上の方策は、防波堤の設置の有無及び消波レベル、要素構造物の構造形式などの組合せによって異なってくる。そのため、基本設計段階では、安全性及び機能性並びに設置環境条件、コスト等を総合的に考慮して、適切に全体システムを構成することが重要とされている。また、要素構造物の安全設計では、システム全体の安全確保に必須な役割分担及びその役割分担に応じた要求性能を明確にし、与えられた設計条件の下で要求性能を満足していることを確認することが必要とされている。

メガフロートは、他に例を見ない超大型浮体構造物であるため、個々の要素構造物の安全設計に加えて、システム全体としての総合的な安全性の確認が必要不可欠となる。システム全体としての安全性の評価は概ね以下のとおりである。

- ① メガフロートの付帯施設である防波堤、上載施設、交通アクセス施設等が浮体構造物及び係留装置の安全性に及ぼす影響度を評価する。
- ② さらに、①を反映させて浮体構造物の安全性を定量的に評価することにより、メガフロートの全体システムとしての総合的な安全性を確認する。

上記②の評価は、主として浮体が致命的なダメージ（漂流及び沈没）を受けないことを定量的に評価することであり、Fig.3.1.2に示すような崩壊シナリオの作成、シミュレーションによる被災確率算出を経て定量的評価が行われる。判断の基準は、社会的に許容できる安全性を有するかどうかということである。

3.1.2 浮体式原子力発電施設

先に述べたように、浮体式原子力発電施設は原子力発電施設、浮体構造物、係留装置、防波堤等から構成される。なお、これ以降、浮体構造物及び係留装置を合わせて浮体式支持基盤、浮体式支持基盤に搭載する原子力発電施設を搭載原子力発電施設と呼ぶこととする。

システム全体の安全を確保するためには、搭載原子力発電施設の安全確保に加えて、浮体式支持基盤が自然現象等に対する安定性を有することが必要不可欠である。その意味から、ここでは搭載原子力発電施設と浮体式支持基盤に分けて安全設計の方針を検討する。

(1) 搭載原子力発電施設の安全設計の方針

搭載原子力発電施設は、在来原子力発電所において実用化されている発電用軽水型原子炉施設をベースに考えているため、その安全確保の考え方及び安全設計の方針は、在来原子力発電所の場合と基本的に変わることはないが、具体的には以下に述べるような特徴的な点が挙げられる。

在来原子力発電所では、安全審査に係る原子炉設置許可申請において、概ね以下の項目を掲げ安全設計の方針を述べている。

- ① 基本方針
- ② 核分裂生成物放散の防止・抑制対策
- ③ 原子炉固有の安全性
- ④ 核設計及び熱水力設計の基本方針
- ⑤ 热水力設計の基本方針
- ⑥ 安全保護系設計の基本方針
- ⑦ 原子炉停止系設計の基本方針
- ⑧ 工学的安全施設設計の基本方針
- ⑨ 強度設計の基本方針
- ⑩ 火災防護の基本方針
- ⑪ 品質保証の基本方針

搭載原子力発電施設の安全設計の方針を考える場合も、上記の項目及びその内容は、基本的には在来原子力発電所の場合と変わることはないが、さらに原子力船「むつ」の場合には、「船体事故（衝突、座礁等）に対する原子炉の防護」が安全設計の方針の1項目に挙げられている⁵⁾ように、搭載原子力発電施設の場合もそれと対応した形で、「浮体事故に対する原子炉の防

護」が安全設計の方針の1項目として加わると考えられる。その考え方で重要となる点は以下のとおりである。

- ① 大型船舶との衝突に対しては、防波堤等の外郭施設によって間接的に防護することが考えられる。この場合、大型船舶の衝突によって、外郭施設が有する安全上の機能が壊滅的に喪失されない設計であること。
- ② 堤内水域におけるサービス用船舶と浮体構造物の衝突に対しては、原子炉区画側部に耐衝突構造を設けるなどの対策を講じ、原子炉建屋にその機能喪失を起こすような損傷を与えない設計であること。
- ③ 想定される沈没による重要機器の没水等の影響によって、原子炉の安全が損なわれない設計であること。
- ④ 想定される浸水に対しては、浮体構造を2区画可侵性構造、二重底構造にするなどの対策を講じ、致命的な浸水が生じない設計であること。
- ⑤ 浸水あるいは沈没した場合でも、転覆しない設計であること。
- ⑥ 漂流に対しては、その発生を極力防止し、想定される漂流から生じるおそれのある影響によって原子炉の安全が損なわれない設計であること。

発電用軽水型原子炉施設の安全設計は、安全設計審査指針に定められている基本指針（指針1～59）を十分満足したものでなければならない。その意味から、ここでは、現行の安全設計審査指針に示されている各指針の内容が、搭載原子力発電施設の安全設計に適用できるかどうかについて検討してみた。その結果、Table3.1.1に示すように、備考欄に示す検討事項はあるものの、概ね適用できることが確認された。

ただし、「（指針2）自然現象に対する設計上の考慮」は適用外であり、以下に示す内容に変更することが妥当と考えられる。すなわち、以下に示す指針2の1の内容

指針2の1：

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び地震によって機能喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用地震動に十分耐えられること。」

を以下のように変更することが妥当と考えられる。

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び浮体構造物の運動をもたらす自然現象によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、自然現象に対する設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用自然外力に十分耐えられる設計であること。」

また、以下に示す指針2の2の内容

指針2の2：

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、地震以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、予想される自然現象のうち最も過酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。」

を以下のように変更することが妥当と考えられる。

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、浮体運動をもたらすもの以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、上記自然現象のうち最も過酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。」

上記変更の要点は、現行の「(指針2) 自然現象に対する設計上の考慮」では自然現象として特に地震を取り上げ、設計用地震力に十分耐えることを規定しているのに対して、搭載原子力発電施設を含めた浮体式原子力発電施設の場合には、重点的に考慮する自然現象は地震のみでなく、波浪、風など、浮体式支持基盤の運動を誘起させる自然現象を重要視し、設計用自然外力に十分耐えることを求めるところにある。この方針を具体化する場合、当然、自然現象をどのように設定するかが非常に重要となり、これについては3.2節自然現象の設定の考え方で述べることとする。

なお、自然現象に対する設計方針に関しては、米国で計画されたが実現には至らなかった浮上式原子力発電プラントAGS (Atlantic Generating Station) の検討例が特に参考となるので、その調査結果を付録Ⅰに掲載した。

(2) 浮体式支持基盤の安全設計の方針

在来原子力発電所の原子炉建屋は、放射線遮蔽及び耐震性の要求から、一般の建築物と比較して極めて剛強な鉄筋コンクリート造となっているため必然的に重量が大きくなり、原子炉建屋基礎地盤には大きな許容耐力が要求される。したがって、耐震設計審査指針では、「発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対しても、これが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない。また、建築物・構築物は原則として剛構造にするとともに、重要な建物・構築物は岩盤に支持させなければならない。」としており、わが国の原子炉建屋は原則として岩盤に原子炉建屋基礎（コンクリート製の基礎マット）を直接載せるいわゆる岩着となっている。なお、耐震設計審査指針では「岩盤」の定義は明確にされていないが、一般的に第三紀層またはそれ以前の堅牢な地盤と解釈されている。

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」⁷⁾（以下、「JEAG耐震指針」という。）では、岩盤はAsクラスを含む建物・構築物を支持するので、間接支持構造物に準じた取扱いをすることが適当であると述べられており、岩盤に要求されるところは、想定されるいかなる地震力に対しても安全上重要な施設を支持する機能が失われたり、あるいはこれらの施設の機能保持に波及的な影響を及ぼしたりするような異常な状況が生じないこと、と考えてよい。

一方、浮体式支持基盤は岩盤に比べて次のような特徴を有する。

- ① 人工物である。
- ② 浮体構造物は岩盤と比較して柔な構造である。
- ③ 免震効果を有する。
- ④ 浮体構造物は地震以外に波浪等によって常時運動する。
- ⑤ 浮体式支持基盤は船舶衝突、浸水、漂流、転覆等の安全に関する固有の事象を考慮する必要がある。

特に支持基盤として両者の力学的特性がかなり異なっていることは、今後最も注意を払わなければならないことであるが、搭載原子力発電施設の安全確保のための要求事項は本質的に同様である。すなわち、浮体式支持基盤には、想定されるいかなる外力に対しても安全上重要な施設を支持する機能が失われないようにし、これらの施設の機能保持に波及的な影響を及ぼしたりするような異常な状況が生じないようにすること、が要求されることとなり、これが浮体式支持基盤の安全設計の方針となる。この方針を具体化する場合、浮体式支持基盤に安全上の機能を明確することが重要となり、これについては3.3節安全上の機能で述べることとする。

3.2 自然現象の設定の考え方

3.2.1 重点的に考慮する自然現象

先に述べたように、現行の安全設計審査指針における「(指針2) 自然現象に対する設計上の考慮」では、原子炉施設の設計上考慮すべき自然現象を地震とその他の自然現象というように大別している。すなわち、支持基盤である岩盤を揺らす地震を特に重要視し、他の自然現象と区別していると考えてよい。なお、他の自然現象は、敷地の自然環境に基づいて設定されることとなるが、洪水、津波、風、凍結、積雪、地滑り等が考えられる。

一方、浮体式原子力発電施設では、在来原子力発電所で考慮される自然現象のほか、支持基盤が浮遊するという特性から、さらに波浪、潮流等の流れ、海震などが加わる。そのかわり地滑りや洪水については対象外となる。したがって、当該施設の安全設計上考慮する自然現象は一般的に次のものが対象となる。

気象——風、気圧、気温、降雨、積雪、着氷、雷

海象——波浪、流れ、津波、高潮、潮汐、海水、冰山等

地震——地震、海震

浮体式原子力発電施設の安全設計で重点的に考慮する自然現象としては、在来原子力発電所と同様の思想で考えれば、浮体構造物の運動を誘起させるものを特に重要視すべきであり、その意味から、風、波浪、流れ、地震、海震、津波及び高潮の7つが選定される。これらの自然現象を安全設計上どのように考慮するかについて以下に述べる。

① 風

風は浮体構造物の運動を誘起させる主要因の1つとなるため重要となる。風の取扱いに関しては、風の変動が浮体構造物の運動に影響を及ぼすという観点から、非定常荷重として取扱うことが必要となる。

② 波浪

波浪も浮体構造物の運動を誘起する主要因の1つとなるため重要となるが、その重要度は防波堤の形式によって変わる。

a) 施設が完全に防波堤によって囲まれている場合：

主として防波堤を越波する波について考慮すればよい。

b) 防波堤の一部に開口部がある場合：

越波に加えて開口部から侵入する回折波などについても考慮する必要がある。

③ 流れ

流れは主として係留装置の設計で重要なが、流れに起因する外力は防波堤の設置によりその軽減が期待できる。例えば、施設を完全に防波堤によって囲んだ場合、流れは特に重要な自然現象とはならない。流れの取扱いに関しては、一般海洋構造物で考慮されている海流、潮流、吹送流、海浜流に加えて、津波、高潮等に起因する水面変位に伴う流れについても考慮することが必要となる。

④ 地震

地震は、例えば固定式係留装置や防波堤自身の安定性検討において最も重要な自然現象となると考えられることから、浮体式原子力発電施設の安全設計において重要な自然現象の一つであることは間違いない。しがしながら、浮体式支持基盤が特に海底地盤の水平震動に対して顕著な免震性を備えていることは在来原子力発電所の支持基盤と大きく異なるところであり、地震が最も重要な自然現象であるとは限らない。

海底地盤の震動の浮体構造物への影響に関しては、海水を媒体とした直接的な伝播に加えて、係留装置を介した間接的な伝播、堤壁の地震応答で生じる密度波振動の伝播、堤内水面のスロッシングによる浮体構造物の長周期運動の誘起などについても考慮することが必要となる。

⑤ 海震

海震という自然現象については一般になじみが少ないが、海震とは広い意味で、海底または沿岸域に発生した地震、あるいは海底火山の爆発等によって生じた振動が海水を媒体として伝播し、船舶や浮体構造物に運動や衝撃を与える現象及び海底の断層のずれによって生じた海面変化によって船舶や浮体構造物が運動する現象と考えてよい¹⁾。

この海震に関しては、従来の海洋構造物の設計ではほとんど考慮されていないが、洋上を航行中の船舶が甚大な被害を受けた例もいくつか報告されており、海洋構造物への潜在的脅威となるとの見解もある。また、メガフロートの研究開発でも海震に対する浮体構造物の応答を把握するための技術開発が積極的に行われるなど、海震に関する研究が進んでいる。これらの現況から、浮体式原子力発電施設の安全設計にとって重要な自然現象となる可能性がある。

⑥ 津波

津波は一般的に設置水深がある程度深ければその影響度は小さく、浅海域に達するにつれて波高は増大し水粒子速度も大きくなるなど、その影響度が大きい。その意味から、浅海域に設置する浮体式原子力発電施設において重要な自然現象となるが、その重要度は防波堤の形式によって変わる。

a) 施設が完全に防波堤によって囲まれる場合：

主として防波堤を越波する津波について考慮すればよい。仮に、津波の影響を極力小さくことのできる天端高さ等を備えた防波堤を合理的に築堤できれば、津波は特に重要な自然現象とはならない。

b) 防波堤の一部に開口部がある場合：

津波による水位の異常上昇（低下）は、浮体式支持基盤にとって重要な事象であ

り、特に係留装置の設計で重要となる。また、開口部から侵入する津波とそれが引き起こす流れは、浮体構造物の運動を誘起させるため重要となる。また、津波に伴う流れは、開口部において縮流により速度が大きくなるため、防波堤基礎が洗掘されやすく、これによって堤体が変形する可能性があるため、防波堤の設計でも考慮する必要がある。

⑦ 高潮

高潮による影響は一般的に水面上昇であり、その重要度は防波堤の形式によって変わる。

a) 施設が完全に防波堤によって囲まれている場合：

主として防波堤を越波する高潮について考慮すればよい。仮に、高潮の影響を極力小さくことのできる天端高さ等を備えた防波堤を合理的に築堤できれば、高潮は特に重要な自然現象とはならない。

b) 防波堤の一部に開口部がある場合：

水面上昇については津波の場合と同様で、特に係留装置の設計で重要となる。

3.2.2 自然現象の規模

(1) 本検討における自然現象の取扱い

重点的に考慮する自然現象、すなわち風、波浪、流れ、地震、海震、津波及び高潮は、その発生原因から互いに密接に関連するグループに分けることができる。例えば、はげしい風と波浪、高潮等は、台風や低気圧の接近による暴風雨に伴うものであり、また、地震、海震及び津波は、主に海底の断層のずれ（破壊）に伴うものである。したがって、浮体式原子力発電施設の安全設計において重点的に考慮する自然現象は、Table3.2.1に示すように、概ね2つの自然現象、すなわち暴風雨と地震現象に大きく集約して取扱うことができる。

(2) 自然現象の規模

在来原子力発電所において想定する地震の規模については、耐震設計審査指針の記述するところ（付録II参照）によって、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、地震に対する重要度を施設ごとに定め、その重要度クラス別（耐震A s、A、B、及びCクラス）にその規模を設定している。浮体式原子力発電施設において想定する自然現象の規模についても在来原子力発電所の設計方針に準じて考えるとすれば、自然現象により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、自然現象に対する重要度を施設ごとに定め、その重要度クラス別（耐自然現象A s、A、B、及びCクラス）にその規模を設定することとなる。

在来原子力発電所では、例えば建屋において考慮する地震力は、Bクラスでは $1.5 C_1$ (C_1 :層せん断力係数)、Cクラスでは $1.0 C_1$ となっており、このCクラスに適用される地震力は、建築基準法で決められている地震力に相当し、一般建築物に適用する地震力と同等である。すなわち、B及びCクラスの施設に適用される地震力は、一般の建物・構築物に作用させる地震力に基づき設定されていると考えることができる。この考え方を取り入れれば、浮体式原子力発電施設の安全設計における耐自然現象B及びCクラスの施設に対して適用する自然現象の規模は、海洋構造物に関する現行の設計指針、技術基準に基づき設定することが可能と考えられる。

在来原子力発電所の耐震設計の基本方針では、耐震Aクラスの施設は、設計用最強地震（以下、「S1地震」という。）による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐え、さらに耐震A s クラスの各施設は、設計用限界地震（以下、「S2地震」という。）による地震力に対してその安全機能が保持できるよう設計することを求めている。この考え方を取り入れれば、浮体式原子力発電施設の耐自然現象A s 及びAクラスの施設に対する安全設計の基本方針は、以下に示す内容

「耐自然現象Aクラスの施設は、設計用最強自然現象（以下、「S1自然現象」という。）による外力に耐えること。さらに耐自然現象A s クラスの各施設は、設計用限界自然現象（以下、「S2自然現象」という。）による外力に対してその安全機能が保持できること。」

のように設定することが妥当と考えられる。

上記の安全設計の基本方針で示されているS1及びS2自然現象の規模について、その考え方を以下に示す。なお、ここでは、S1(S2)自然現象をS1(S2)暴風雨とS1(S2)地震現象に分けて考える。

- ① S1(S2)地震現象の規模は、基本的には在来原子力発電所におけるS1(S2)地震の設定の考え方方に従い設定すべきである。
- ② S1暴風雨は、以下に示すS1地震の設定の考え方

「S1地震としては、歴史的資料から過去において敷地またはその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起り、敷地及びその周辺に同様の影響を与える恐れのある地震及び近い将来に敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きいものを想定する。」

を参考にして、以下のように定義するのが妥当と考えられる。

「過去において、サイトまたは海岸部に影響を与えたと考えられる暴風雨が再び発生し、サイト及び海岸部に同様の影響を与えるおそれのある暴風雨及び近い将来に発生することを予期することが適切と考えられる暴風雨のうちから最も影響の大きいものを想定する。」

- ③ S1暴風雨の規模の具体的設定に関しては2つの考え方がある。第1の考え方とは、同程度の頻度で発生する過酷な事象に対して同程度の安全を担保すべきとの観点から、S1地震現象の再現期間を仮に1,000年と設定したならば、S1暴風雨の再現期間も1,000年に設定するという考え方である。例えば、日本建築学会では、海洋建築物に対する風荷重、波荷重、地震荷重などの再現期間を等しく100年とすることを標準としている⁸⁾。

他の考え方とは、S1地震は、サイトで経験された歴史上知られている最大規模（以下、「既往最大」という。）の地震を上回る地震として設定されているのであるから、S1暴風雨も既往最大の暴風雨を上回る暴風雨として設定するという考え方である。この場合には、S1地震とS1暴風雨の再現期間は必ずしも一致しない。

既往最大の地震は過去の記録から設定することができる。一方、暴風雨の場合は観測記録が過去100年程度までであり痕跡も残らないため、既往最大の暴風雨は確率論的な想定をベースとして推定する必要がある。しかしながら、例えば1,000年あるいはそれ以上の超長期の再現期間を有する暴風雨による極大波を推定するには、波浪観測データ及び気象デ

ータの過去の蓄積が少なく推定誤差等に関する根本的な問題を有しており、地震の場合に比べて推定方法が確立されていない。

④ S2暴風雨は、以下に示すS2地震の設定の考え方

「S2地震としては、地震学的見地に立脚し、S1地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地から検討を加え、最も大きいものを想定する。」

を参考にして、以下のように定義するのが妥当と考えられる。

「気象学・海洋学的見地に立脚し、S1暴風雨を上回る暴風雨について、工学的見地から検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。」

⑤ S2暴風雨は、S1暴風雨を上回る規模で、発生限界的な性質を持ったものと考えてよい。現段階で発生限界値を明確に定めることは困難であるが、その具体的設定に関しては例えば、波浪の発生限界値については有義波高 15~20mの波が物理的にも限界ではないかと考えられる⁹⁾こと、また、サイトでの波高評価には、碎波による物理的な限界も存在する⁹⁾こと、などを考慮して設定することも考えられるが、今後さらなる検討が必要である。

(3) 自然現象の組合せ

「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984」¹⁰⁾（以下、「JEAG重要度分類・許容応力編」という。）では、地震と運転状況の組合せについて、Table3.2.2に示すような例を挙げ、確率論的な取扱いをすることが妥当であると述べられている。Table3.2.2では、基準地震動S1及びS2と運転状態I~IVとの同時発生確率の範囲を示したものであるが、運転状態と地震動との組合せに関する確率的評価として、しきい値を 10^{-7} (1/年)に設定している。

この考え方を浮体式原子力発電施設の自然現象間の組合せに適用して考えれば、同時に発生することが極めて希な自然現象の組合せは、考慮の対象から除外することができる。言い換えれば、異なる自然現象の同時発生確率に関するしきい値を想定し、同時発生確率がそのしきい値よりも小さい自然現象の組合せは、考慮の対象から除外することができる。

暴風雨と地震現象を組み合わせる場合に留意しなければならないのは、両者の継続時間が大きく異なっていることである。地震の主要動の継続時間が高々数十秒であることに比較して、暴風雨がサイトを襲うのは、短くて数時間オーダー、長い場合は数日オーダーになる場合もある。したがって、両者の同時発生確率の評価は、暴風雨の継続時間を例えば24時間に設定するなど、代表された継続時間を設定して考えることになるであろう。

3.3 安全上の機能

3.1節において、搭載原子力発電施設の浮体構造物の運動をもたらす自然現象に対する設計上の考慮は、以下のように設定した。

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、浮体構造物の運動をもたらす自然現象に対して、その安全機能の重要度及び機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、自然現象に対する設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用自然外力に

十分耐えられる設計であること」

この設計方針はこれまでの検討結果から具体的に次のように考えてよい。

- ① 「安全機能の重要度」に関しては、在来原子力発電所の場合と何ら変わることはない。すなわち、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」⁴⁾に従って安全機能の重要度分類が行われ、原子炉施設の全体としての安全性に対して、構築物、系統及び機器が果たすべき機能が明確にされる。
- ② 「浮体構造物の運動をもたらす自然事象」に関しては、風、波浪、流れ、地震、海震、津波及び高潮が重要となり、集約して暴風雨及び地震現象の2つの自然現象を考慮する。
- ③ 「自然現象に対する設計上の区分」に関しては、ここでは、「耐自然現象設計上の重要度分類」と呼ぶこととし、この重要度分類の考え方は、基本的には在来原子力発電所における耐震設計上の重要度分類の考え方と変わることではなく、同様の考え方に基づき分類を行い得ると考えられる。
- ④ 「適切と考えられる設計用自然外力に十分耐えられる設計であること」に関しては、耐自然現象Aクラスの施設では、S1暴風雨及びS1地震現象による外力に耐えられる設計であること、さらに耐自然現象A s クラスの施設では、S1暴風雨及びS1地震現象による外力に耐えるとともに、S2暴風雨及びS2地震現象による外力に対してその安全上の機能が保持できる設計であること、が要求される。

本節では、浮体式原子力発電施設固有の施設である浮体式支持基盤（浮体構造物及び係留装置）及び防波堤を対象として、上記③の耐自然現象設計上の重要度分類及び上記④の安全上の機能について検討した。

(1) 固有施設の耐自然現象設計上の重要度分類

原子力発電所が大地震に遭遇した場合にも、一般公衆及び従事者等に過度の放射線被ばくを与えないように施設を設計するという、原子力発電所の耐震設計の目的を合理的に達成するために、JEAG 重要度分類・許容応力編では、安全上の観点から各施設の機能に応じた耐震重要度分類の定義等について規定されており、付録Ⅲに示す具体的な分類例が示されている。この分類例では、機能別の分類によって発電用原子炉施設に要求される安全上の機能が明確にされ、当該施設は以下の定義に基づき主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物及び設備相互間の影響を考慮すべき設備に区分（以下、「設備区分」という。）されている。

主要設備：

当該機能に直接的に関連する系統設備をいう。

補助設備：

当該機能に間接的に関連し、主要設備の補助的役割をもつものをいう。

直接支持構造物：

主要設備、補助設備に直接取り付けられている支持構造物、若しくはこれらの設備の荷重を直接的に受ける支持構造物をいう。

間接支持構造物：

直接支持構造物から伝達される荷重を受ける鉄筋コンクリート、鉄骨等の構造物（建物、構築物）をいう。

設備相互間の影響を考慮すべき設備：

下位の耐震クラスに属するものの破損によって上位の分類に属するものに波及的影響を及ぼすおそれのある設備をいう。

これらの設備のうち、主要設備、補助設備及び直接支持構造物は、同一の安全上の機能に分類され、同一の耐震重要度とされている。間接支持構造物及び設備相互間の影響を考慮すべき設備は、安全上の機能からの耐震重要度は規定されていないが、その健全性は当該施設の安全上の機能維持に必要不可欠であるため、設計評価において被支持設備に適用される地震動（以下、「検討用地震動」という。）に対して安全上支障のないことが確認（以下、「機能維持確認」という。）されている。

浮体式原子力発電施設固有の施設について、JEAG重要度分類・許容応力編の耐震重要度分類の考え方に基づき、耐自然現象設計上の重要度分類を考える。浮体構造物は、基本的には間接支持構造物に設備区分されると考えられるが、浮体構造物の一部を原子炉建屋と供用する場合は、当該部分は原子炉建屋と同様の取扱いとなる（付録Ⅲ参照）。係留装置は、基本的には浮体構造物を支持するという観点から間接支持構造物に設備区分されると考えられる。したがって、浮体式支持基盤は基本的に間接支持構造物に設備区分され、機能維持確認に適用される検討用自然外力は、例えば耐自然現象A s クラスの施設を間接的に支持する場合には、S2暴風雨及びS2地震現象により発生する自然外力となる。一方、防波堤は当該施設が被害を受けることによって浮体式支持基盤に及ぼす自然外力を増大させ、搭載原子力発電施設に波及的影響を及ぼす可能性があるという観点から、設備相互間の影響を考慮すべき設備に設備区分されると考えられる。機能維持確認に適用される検討用自然外力は、例えば耐自然現象A s クラスの施設に波及的影響を及ぼす可能性のある場合には、S2暴風雨及びS2地震現象により発生する自然外力となる。

(2) 浮体式支持基盤に要求される安全上の機能

浮体式支持基盤（浮体構造物及び係留装置）に要求される基本的な安全上の機能は、例えばS2 暴風雨またはS2 地震現象により発生する自然外力のような、想定されるいかなる自然外力に対しても、安全上重要な施設を支持する機能が失われないようにし、これらの施設の機能保持に波及的影響を及ぼしたりするような異常な状況が生じないようにすることである。

具体的に考えてみると、浮体構造物に対して要求される安全上の機能は、原子力発電施設の搭載方法によって若干変わる。原子力発電施設を浮体構造物の上に上載するような場合、浮体構造物は主としてFig.3.3.1に示す在来原子力発電所の原子炉建屋基礎マットと同等の機能をもつと判断されることから、要求される機能は支持機能となる。一方、原子力発電施設を浮体構造物の中に搭載するような場合、浮体構造物は在来原子力発電所の原子炉建屋基礎マットに加えて、原子炉建屋と同等の機能をもつ場合があると判断されることから、要求される機能は支持機能及び波及事故防止機能である。なお、支持機能及び波及事故防止機能については、JEAG耐震指針で次のように定義されている。

支持機能：

機器が転倒したり移動したりしない、つまり本来の支持位置からの移動量が許容範囲内であること、あるいは、機器・配管の支持が相対的にずれて損傷を起こしたりしないこと。

波及事故防止機能：

下位の耐震クラスに相当する建物・構築物が落下または転倒することにより、上位のクラスの設備の安全機能を阻害しないこと。

係留装置に対して要求される安全上の機能は支持機能である。係留装置の支持機能は以下のように定義するのが妥当と考えられる。

係留装置の支持機能：

浮体構造物が防波堤または堤内構造物と衝突しない、つまり浮体構造物の本来の支持位置からの移動量（主として水平移動量）が許容範囲内であること。

(3) 防波堤に要求される安全上の機能

先に述べたように、防波堤は設備相互間の影響を考慮すべき設備に設備区分され、要求される機能は波及事故防止機能である。浮体式原子力発電施設の防波堤は、堤内を静穏状態に保ち、原子力発電施設へ加わる外力を抑制する重要な施設である。防波堤が被災することによりその消波性能が過度に低下すれば、浮体構造物は過度の運動を生じることとなり、搭載原子力発電施設の健全性に重大な影響を及ぼすことが予想される。その意味から、防波堤の波及事故防止機能は以下のように定義するのが妥当と考えられる。

防波堤の波及事故防止機能：

防波堤が崩壊または喪失し、波の遮断機能を喪失することにより、搭載原子力発電施設の安全機能を阻害しないこと。

4. 浮体式支持基盤の安定性評価

4.1 安定性評価の中心的技術課題

在来原子力発電所の原子炉建屋基礎地盤の安定性評価では、想定されるいかなる地震力に対しても、安全上重要な施設を支持する機能が失われたり、あるいはこれらの施設の機能保持に波及的な影響を及ぼしたりするような異常な状態が基礎地盤に生じないことを確認するために、各種の地質・地盤の調査・試験を行い、その結果をもとに基礎地盤の支持力、すべり及び沈下・変形を詳細に検討し安定性の評価を行うことを基本としている。

一方、浮体式支持基盤の安定性評価では、例えばS2暴風雨またはS2地震現象により発生する自然外力に対しても、浮体式支持基盤に要求される安全上の機能を維持していることを確認するために、自然外力による浮体式支持基盤の応答特性や浮体式支持基盤の応答による搭載原子力発電施設への影響の度合いを詳細に解析評価し、搭載原子力発電施設の健全性確保の観点から要求される加速度限界等の制限に対する評価を行うことが基本となると考えられる。

その意味から安定性評価の技術的中心は、自然外力による浮体式支持基盤の応答特性、浮体式支持基盤の応答による搭載原子力発電施設への影響の度合いの解析評価と考えられる。後者の技術に関しては、その代表例として、スロッシングによる重要タンク、液体内蔵設備等への影響を評価する技術、傾きによる機器（制御棒駆動装置、液位制御装置、タービン発電機軸受け装置等）への影響を評価する技術などがある。スロッシングに関する影響評価技術に関しては、在来原子力発電所において、例えば非常用ディーゼル発電機用潤滑油サンプタンクのスロッシングの評価が行われており、実績を有する技術であると考えられる。また、傾きによる液位制御装置、タービン発電機軸受け装置等に対する影響評価技術に関しては、すでに船舶工学の分野で多くの知見が蓄積され、信頼性ある技術が確立していると考えられる。また、傾きによる制御棒駆動装置に対する影響評価技術に関しては、原子力船「むつ」の設計及び実績によって実証された技術と考えられる。一方、前者の技術に関しては、メガフロートの研究開発でも主要な研究開発項目に挙げられているように現在のところ研究開発段階にあるものもあり、また著しく進歩している分野もある。

以上から、自然外力による大型浮体構造物の応答特性を解析評価する技術、具体的にはFig.4.1.1に示すような運動特性等を予測するための技術（以下、「運動特性等予測技術」という。）が安定性評価の中心的技術課題として位置付けられる。

4.2 運動特性等の予測に必要となる要素技術の抽出

ここでは、運動特性等予測技術に関して、予測に必要となる要素技術の体系的な整理を試みた。まず、重点的に考慮する自然現象を中心として、自然外力による浮体式支持基盤の運動特性等に関わる予測事象をTable4.2.1に示す事象抽出リストとして抽出した。次に事象抽出リストで抽出された予測事象を評価する過程で必要となる技術要素をTable4.2.2に示す技術要素マップとして抽出・整理し、予測に必要な要素技術を明らかにした。なお、技術要素マップにおける技術要素抽出の着眼点は以下のとおりである。

- ① 外的要因の特性：
自然現象に関して評価事象に関連の深い特性を抽出する。
- ② 評価対象物の設計的特性：
評価事象の対象物に関して評価事象に関連の深い設計的特性を抽出する。
- ③ 評価事象のメカニズム：
評価事象を工学的に把握しモデル化するために必要な技術要素を抽出する。
- ④ 評価事象の定量的把握：
解析、実験等による事象の評価結果として何を定量的に把握すべきかを抽出する。
- ⑤ 中心となる技術
①～④までの抽出の結果から重要となる技術を抽出する。

4.3 大型浮体構造物の運動特性等予測技術の現状

ここでは、大型浮体構造物の運動特性等予測技術に関して関連文献の調査を行い、技術の現状把握を試みた。文献調査では、主として浮上式大型浮体構造物の波浪応答、地震・海震応答、津

波応答及び海震伝播特性を予測するための解析評価技術に関する文献を、船舶工学、海洋工学、土木工学、建築学の分野を中心として抽出し、以下の点に着目して、付録IVに示す文献要約として整理した。なお、抽出した文献は1980年から現在までのものである。

- ① 概 要：目的及び内容の要旨を示す。
- ② 対象モデル：浮体構造物、係留装置、防波堤等の主要構造物モデルの寸法及び自然条件を示す。
- ③ 解析手法：解析するために必要となる手法を示す。
- ④ 解析値の種類：シミュレーションによって得られる解析値の種類を示す。
- ⑤ 結 果 等：解析データから得られた知見等を示す。

以上の文献調査から、各解析評価技術の現状は概ね以下のとおりである。

(1) 波浪応答解析評価技術

浮体構造物の波浪中応答の予測では、一般的に6自由度の剛体運動を考慮するが、メガフロートのように平面的で剛性の低い構造物では、剛体運動とともに弾性応答を考慮する必要がある。大型浮体構造物の剛体運動を予測するための数値シミュレーションについては、洋上石油備蓄基地における石油貯蔵船等の設計及び実績を通じてその妥当性が確認されており、高度化のための研究開発が進められている。大型浮体構造物の弾性応答を予測するための数値シミュレーションについては、メガフロートの研究開発の一環として、波浪中弾性応答解析手法の開発が進められている。例えばメガフロート技術研究組合では、詳細3次元解析法を用いた防波堤、岸壁などを含む閉水域における規則波中弾性応答解析が行われており¹¹⁾、メガフロートの弾性応答の基本特性を解明するまでに至っている。また、原子力発電施設を搭載する大型浮体構造物の波浪中応答の予測では、防波堤によって包囲された半閉鎖水域内に浮体構造物を設置するような配置や同水域内に浮体構造物を並列に設置するような配置における浮体構造物と防波堤、両浮体構造物の相互作用等を精度良く解析する手法の確立の必要性が指摘されている¹²⁾。

(2) 地震・海震応答解析評価技術

海洋建築物構造設計指針（浮遊式）・同解説など^{8),13),14)}では、剛結合方式や緊張係留方式を採用した係留装置を用いる場合以外、基本的には係留装置を介して作用する地震動による浮体応答の解析評価は要求されていない。また、海震による浮体応答の解析評価についても同様である。ただし、過去に類例の少ない浮体構造物や対象構造物の重要度が特に高い場合などでは、地震・海震応答解析評価によって構造物の地震時の挙動をより正確に把握することが望ましいとされている。一方、研究開発の面からは、海震伝播特性、海震浮体応答及び地震浮体応答に関する解析評価手法の開発が進められており、着実に進歩している。これまでの成果の一部を以下に紹介する。

① 海震伝播特性解析評価技術

海震伝播特性に関して、例えば清川は数値計算による3次元海震伝播特性¹⁵⁾及び浅海域における海震伝播特性¹⁶⁾の検討を行っている。検討結果として、海震は大水深海水中を水平方向には放射状に伝播し波源から遠ざかるにつれて減衰すること、数値計算によれば、

幅 1km、長さ 20km の波源によって発生した海震は数百キロメートル以上伝播し得ること、大水深海水中を数十キロメートル以上伝播する海震はそのほとんどが比較的高振動数の水中音波として伝播すること、水深が浅くなればなるほど水中音波として伝播し得るのはより高振動成分のみとなること、などの知見が得られている。

② 海震浮体応答解析評価技術

メガフロートの研究開発を契機に、海震浮体応答の基本特性に関する解析評価が数多く行われるようになってきている。解析では自由浮体を剛体または弾性体と仮定し、その応答（加速度、変位等）を解析評価している。例えばメガフロート技術研究組合では、地震による疎密波の伝播を地盤→水中→浮体底面という過程で考え、2次元モデルを用いた解析手法の開発¹⁰⁾が行われている。解析結果として、浮体が震源の直上にある場合、浮体上の上下加速度は海底地盤における値とほぼ同一であることが示されている。

③ 地震浮体応答解析評価技術

浮体-係留系の振動モデルを用いて、地震浮体応答の解析が可能な解析手法の開発が行われている。例えばメガフロート技術研究組合では、複数のドルフィンに係留された浮体構造物全体の地震時動的解析が可能な解析プログラムの開発¹¹⁾が行われている。解析結果として、係留装置を介して伝達される水平地震動による浮体構造物の水平加速度は、兵庫県南部地震クラスでも約 0.2gal と小さいことが示されている。

(3) 津波応答解析評価技術

津波は周期及び波長が極めて長い波で、水平スケールの卓越する現象であることから、津波自信の挙動の予測に関しては、模型実験によって再現するのは問題が多く、数値シミュレーションによる予測が一般的である。数値シミュレーションは、波源モデルを設定（震源域での断層パラメータ設定）し、津波の伝播・変形計算を行うもので、津波の再現性がよくない場合には波源モデルの修正などを繰り返すことによって再現性を高めるなど、現在ではかなりの精度に達していると言える。一方、浮体構造物の津波応答の予測に関しては、津波を長周期規則波として取り扱うなどの単純化手法を用いた数値シミュレーションによる予測が行われている。

浮体構造物の津波応答解析に関するごく最近の研究事例として、例えば電力中央研究所では、非線形ポテンシャルモデル（境界要素法）に基づき、半閉鎖水域内における係留浮体の断面2次元運動解析手法の開発¹²⁾が行われている。この解析手法を用いて津波襲来時の係留浮体の応答や週上高等の予測が行われており、半閉鎖水域内係留浮体の津波による基本応答特性の解明が可能となっている。

5. まとめ

本報告書は、原子炉施設の浮体式海上立地に関する調査検討において、「原子炉施設の浮体式海上立地に関する調査検討(1)－浮体式原子力発電施設の概念検討－」に引き続く第2報として、浮体式原子力発電施設の基本的な設計方針、自然現象の設定の考え方、安全上の機能に関する調査検討結果及び設計ツールとして極めて重要となる自然外力による大型浮体構造物の運動特性等を予測する技術の現状水準についての調査結果を取りまとめたものである。なお、浮体式原子力発電施設は、原子力発電施設、浮体構造物、係留装置、防波堤等から構成されるシステムであり、本報告書では、浮体構造物及び係留装置を合わせて浮体式支持基盤、浮体式支持基盤に搭載する原子力発電施設を搭載原子力発電施設と呼んでいる。

浮体式原子力発電施設の設計方針に関する調査検討では、在来原子力発電所、原子力船及びメガフロートにおける安全設計の方針を調査し、これらを参考として、搭載原子力発電施設、浮体式支持基盤それぞれについて安全設計の方針を検討した。

搭載原子力発電施設の安全設計の方針検討では、以下に示す事項を明らかにした。

- a) 基本的には在来原子力発電所の場合と変わることはないが、さらに「浮体事故に対する原子炉の防護」が安全設計の方針の1項目として加わると考えられる。
- b) 現行の安全設計審査指針との比較において、特に「指針2 自然現象に対する設計上の考慮」について、現行指針が自然現象として特に地震を取り上げ、設計用地震力に十分耐えることを規定しているのに対して、搭載原子力発電施設を含めた浮体式原子力発電施設の場合には、重点的に考慮する自然現象は地震のみでなく、波浪、風など浮体式支持基盤を運動させる可能性のある自然外力に関連する自然現象を特に重要視し、それらの自然現象から発生する自然外力に十分耐えることを求める必要がある。

一方、浮体式支持基盤の安全設計の方針検討では、浮体式支持基盤に要求される事項は在来原子力発電所の支持基盤である岩盤の場合と本質的に同様で、想定されるいかなる外力に対しても安全上重要な施設を支持する機能が失われないようにし、これらの施設の機能保持に波及的な影響を及ぼしたりするような異常な状況が生じないようにすることが安全設計の基本方針となることを明らかにした。

自然現象の設定の考え方に関する調査検討では、重点的に考慮する自然現象として風、波浪、流れ、地震、海震、津波及び高潮を選定し、これらの自然現象を2つの自然現象、すなわち暴風雨と地震現象に集約し、在来原子力発電所の設計方針に準じて、その規模について検討した。特に本文中に述べた浮体式原子力発電施設の耐自然現象A s 及びA クラスの施設に対する安全設計の基本方針で示されているS1及びS2自然現象の規模については、以下の検討結果を得た。

- a) S1(S2)地震現象の規模は、基本的には在来原子力発電所におけるS1(S2)地震の設定の考え方方に従い設定すべきである。
- b) S1暴風雨は、S1地震の設定の考え方を参考にして、以下のように定義するのが妥当と考えられる。

「過去において、サイトまたは海岸部に影響を与えたと考えられる暴風雨が再び発生し、サイト及び海岸部に同様の影響を与えるおそれのある暴風雨及び近い将来に発生することを予期することが適切と考えられる暴風雨のうちから最も影響の大きいものを想定する。」

- c) S1暴風雨の規模の具体的設定に関しては2つの考え方がある。第1の考え方とは、同程度の頻度で発生する過酷な事象に対して同程度の安全を担保すべきとの観点から、S1地震現象の再現期間を仮に1,000年と設定したならば、S1暴風雨の再現期間も1,000年に設定するという考え方である。例えば、日本建築学会では、海洋建築物に対する風荷重、波荷重、地震荷重などの再現期間を等しく100年とすることを標準としている⁸⁾。

他の考え方とは、S1地震は、サイトで経験された歴史上知られている最大規模（以下、「既往最大」という。）の地震を上回る地震として設定されているのであるから、S1暴風雨も既往最大の暴風雨を上回る暴風雨として設定するという考え方である。この場合には、S1地震とS1暴風雨の再現期間は必ずしも一致しない。

既往最大の地震は、過去の記録から設定することができる。一方、暴風雨の場合は、観測記録が過去100年程度までであり痕跡も残らないため、既往最大の暴風雨は確率論的な想定をベースとして推定する必要がある。しかしながら、例えば1,000年あるいはそれ以上の超長期の再現期間を有する暴風雨による極大波を推定するには、波浪観測データ及び気象データの過去の蓄積が少なく信頼性に関する根本的な問題を有しており、地震の場合に比べて設定方法が確立されていない。

- d) S2暴風雨は、S2地震の設定の考え方を参考にして、以下のように定義するのが妥当と考えられる。

「気象学・海洋学的見地に立脚し、S1暴風雨を上回る暴風雨について、工学的見地から検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。」

- c) S2暴風雨は、S1暴風雨を上回る規模で、発生限界値的な性質を持ったものと考えてよい。現段階で発生限界値を明確に定めることは困難であるが、その具体的設定に関しては例えば、波浪の発生限界値については有義波高15～20mの波が物理的にも限界ではないかと考えられること、また、サイトでの波高評価には、碎波による物理的な限界も存在すること、などを考慮して設定することも考えられるが、今後さらなる検討が必要である。

安全上の機能に関する調査検討では、主として浮体式原子力発電施設固有の施設である浮体式支持基盤及び防波堤を対象に、搭載原子力発電施設の健全性確保のために要求される機能について検討し、以下に示す事項を明らかにした。

- a) JEAG 重要度分類・許容応力編の耐震重要度分類の考え方によれば、浮体式支持基盤は基本的に間接支持構造物に設備区分され、要求される機能は支持機能であること。防波堤は当該施設が被害を受けることによって浮体式支持基盤に及ぼす自然外力を増大させ、搭載原子力発電施設に波及的影響を及ぼす可能性があるという観点から、設備相互間の影響を考慮すべき設備に設備区分され、要求される機能は波及事故防止機能である。
- b) 係留装置の支持機能は、「浮体構造物が防波堤または堤内構造物と衝突しない、つまり浮体構造物の本来の支持位置からの移動量（主として水平移動量）が許容範囲内であること。」

と定義するのが妥当と考えられる。

- c) 防波堤の波及事故防止機能は、「防波堤が崩壊または喪失し、波の遮断機能を喪失することにより、搭載原子力発電施設の安全機能を阻害しないこと。」と定義するのが妥当と考えられる。

自然外力による大型浮体構造物の運動特性等予測技術に関する現状水準の調査では、以下に示す事項を明らかにした。

- a) 浮体式支持基盤の安定性評価の中心的技術課題である。
- b) メガフロートの研究開発でも主要な研究開発項目に挙げられているように現在研究開発段階にあり、また著しく進歩している技術である。
- c) 大型浮体構造物の自然外力による応答の基本特性を解析する技術についてはすでに確立している。

原子力発電施設の海上立地方式では、在来原子力発電所の安全設計の範疇を越えて新たに設計で考慮する必要のある技術的要件は、基本的に浮体式の場合が最も多く、浮体式よりは着底式が、着底式よりは埋立式が技術的に在来立地方式により近いと考えられる。特に直接支持埋立式人工島は、海底の浅部に岩盤が得られるサイト条件であれば、在来立地方式に極めて近い立地方式であり、安全性評価、設計技術、建造技術等の面からみても現時点で実現のための技術的条件がほぼ整っていると考えられ、早期の実現が可能と判断される。反面、浮体式は在来立地方式と異なる安全評価体系の確立や安全設計上の考慮が必要となると予想され、その意味から本調査検討により、安全設計思想に関する1つの考え方を明確にすることで、浮体式原子力発電施設の実現に向けた技術的検討の1つの方向を示すことができたと考えている。

謝　　辞

本報告書は、科学技術庁から原研へ受託研究として実施された、「革新的支持基盤安定性評価技術調査」の調査研究成果の一部を取りまとめたものである。平成7年度から平成10年度までの4年間にわたった調査研究では、大学、公的研究機関、電力業界、建設業界、海洋構造物メーカー、原子力機器メーカー等専門家等、多くの方々の多大な協力を頂いた。厚くお礼申し上げます。特に、調査の計画、方針及び総括については、前　革新的支持基盤安定性評価技術調査専門部会長の前田久明東京大学教授、前　原子力船研究開発室の星薫雄室長に貴重な助言を頂いた。また、実際の調査活動については、前　革新的支持基盤安定性評価技術調査専門部会ワーキンググループ主査の影本浩東京大学助教授から指導を頂いた。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 蔡内典明ほか:原子炉施設の浮体式海上立地に関する調査検討(1)－浮体式原子力発電施設の概略検討－, JAERI-Research, (2000).
- 2) 近藤俊介:原子力の安全性, 同文書院, (1990).
- 3) 科学技術庁原子力安全局監修:原子力規制関係法令集, 大成出版社
- 4) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室監修:原子力安全委員会安全審査指針集 改訂9版, 大成出版社, (1998).
- 5) 日本原子力研究所:原子力第1船 原子炉設置許可申請書, (1987).
- 6) (社)日本鋼構造協会, メガフロート技術研究組合:大規模浮体構造物(メガフロート)の設計信頼性の評価に関する研究報告書, (1998).
- 7) 電気技術基準調査委員会:原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, (1987).
- 8) 日本建築学会:海洋建築物構造設計指針(浮遊式)・同解説, (1990).
- 9) 土木学会:原子力発電所の立地多様化技術 第4編 人工島式海上立地技術, (1996).
- 10) 電気技術基準調査委員会:原子力発電所耐震設計技術指針 1991 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984, (1984).
- 11) メガフロート技術研究組合:超大型浮体構造物(メガフロート) 平成9年度研究成果報告書－概要－, (1998).
- 12) 池野政明, 鹿島遼一:浮揚式発電所の不規則波浪による動搖と係留の安定性評価 3－複数浮体間の相互干渉を考慮した3次元動搖解析法－, 電力中央研究所 U92043, (1993).
- 13) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, (1989).
- 14) 沿岸開発技術研究センター:浮体構造物技術マニュアル, (1991).
- 15) 清川哲志:海震の3次元伝播特性, 海岸工学論文集(第42巻), (1995).
- 16) 清川哲志:浅海域における海震について, 土木学会海岸工学論文集(第43巻), (1996).
- 17) メガフロート技術研究組合:超大型浮体構造物(メガフロート) 平成8年度研究成果報告書－概要－, (1997).
- 18) 池野正明, 松山昌史:津波作用下における浮体構造物の2次元非線形挙動解析, 電力中央研究所 U95043, (1996).

Table 3.1.1 搭載原子力発電施設における安全設計の基本指針（その1）

現行の安全設計審査指針における安全設計の基本指針	搭載原子力発電施設における安全設計の基本指針の考え方	備考
（指針1）準規格及び基準 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、設計、材料の選定、製作及び検査について、それらが果たすべき安全機能の重要度を考慮して適切と認められる規格及び基準によるものであること。	変わることではない。	浮体構造物、係留装置に適用される規格・基準を明確にする必要がある。
（指針2）自然現象に対する設計上の考慮 (1) 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び地震によって機能喪失を起した場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされたるとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること。	(1) 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び浮体構造物の運動をもたらす自然現象によって機能喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震現象設計上の区分がなされたとともに、適切と考えられる設計用自然外力に十分耐えられる設計であること。	(2) 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、浮体運動をもたらすもの以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれないこと。 重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、上記自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。
（2）安全機能を有する構築物、系統及び機器は、地震以外の想定される自然現象による設計であること。 重複度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。	変わることではない。	(指針3) 外部人為事象に対する設計上の考慮 (1) 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、想定される外部人為事象によって、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。 (2) 原子炉施設は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近に対し、これを防御するため、適切な措置を講じた設計であること。

Table3.1.1 搭載原子力発電施設における安全設計の基本指針（その2）

現行の安全設計審査指針における安全設計の基本指針	搭載原子力発電施設における安全設計の基本方針の考え方	備考
(指針4) 内部発生飛来物に対する設計上の考慮 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、原子炉施設内部で発生が想定される飛来物に対し、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること。	変わることろはない。	内部飛来物の浮体構造物への影響の有無の確認が必要となる。
(指針5) 火災に対する設計上の考慮 原子炉施設は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の3方策を適切に組み合わせて、火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。	変わることろはない。	防火対策、火災検知、消防設備の強化が必要となる。 消防活動の陸上と異なることによる設計上の考慮が必要となる。
(指針6) 環境条件に対する設計上の考慮 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能が期待されているすべての環境条件下に適合できる設計であること。	変わることろはない。	海上環境における対策として、例えば塗装対策、防錆対策等の強化により、陸上レベルの建屋内環境条件の確保が必要となる。
(指針7) 共用に関する設計上の考慮 安全機能を有する構築物、系統及び機器が、2基以上の原子炉施設間で共用される場合には、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること。	変わることろはない。	浮体構造物を間接支持構造物として取り扱う前提に立つ場合、共用に関する概念に在来との差はない。
(指針8) 運転員操作に対する設計上の考慮 (指針9) 信頼性に関する設計上の考慮 (指針10) 試験可能性に関する設計上の考慮	変わることろはない。	
原子炉及び原子炉停止系(指針11～18)	変わることろはない。	
原子炉冷却系	変わることろはない。	

Table3.1.1 搭載原子力発電施設における安全設計の基本設計の基本指針（その3）

現行の安全設計審査指針における安全設計の基本指針	搭載原子力発電施設における安全設計の基準指針の考え方	備考
原子炉格納容器（指針28～33）	変わることろはない。	
安全保護系（指針34～40）	変わることろはない。 (指針46) 避難通路に関する設計上の考慮	指針36（安全保護系の過渡時の機能）： 浮体構造物の運動が過渡時の発生確率に影響がない、 か確認が必要となる。
制御室及び緊急時施設（指針41～45）	変わることろはない。	避難通路計画の中で、建屋外避難通路及び海上側より陸上部への避難通路の検討が必要となる。
計測制御系及び電気系統（指針47, 48）	変わることろはない。	指針48（電源系統）： 外部電源系（送電系）に関して、浮体構造物と地盤固定部の連絡ケーブル送電系統確保及び浮体構造物と固定部との相対移動量規制の検討が必要となる。
燃料取扱・放射性廃棄物処理施設・放射線管理（指針49～59）	変わることろはない。	指針59（放射線監視）： 放射線監視の有無、方法等を含め、周辺監視区域の設定に関する検討が必要となる。

Table 3.2.1 浮体式原子力発電施設の安全設計において重点的に考慮する自然現象

本検討で取扱う自然現象	暴風雨	地震現象
重点的に考慮する自然現象		
風	◎	
波浪	◎	
流れ	◎	
地震		◎
海潮		◎
津波		◎*
高潮	◎	

* 遠地津波も考慮する

Table 3.2.2 運転状態と地震動との組合せの確率的評価

発生確率		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}		
運転状態の発生確率 (1/年)		I	II	III		IV							
基準地震動の発生確率 (1/年)				S_1	S_2								
基準地震動 S_1 と の組合せ	従属事象		S_1 従属										
	独立事象	1分以内									S_1+II		
		1時間以内									S_1+III		
		1日以内									S_1+IV		
		1年以内									S_1+IV		
基準地震動 S_2 と の組合せ	従属事象		S_2 従属										
	独立事象	1分以内	(S_2+II は 10^{-9} 以下となる)										
		1時間以内									S_2+II		
		1日以内									S_2+III		
		1年以内									S_2+IV		

注：(1) 発生確率から見て

←→組合せが必要なもの。

←→発生確率が 10^{-7} 以下となり組合せが不要となるもの。

(2) 基準地震動 S_2 の発生確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ /サイト・年と推定されるが、ここでは $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /サイト・年を用いた。

(3) 表に示す発生確率は現在の知見によるものである。

(4) 運転状態 I ~ IV の分類の考え方

運転状態 I : 計画的な運転状態、若しくはこれらの間の計画的移行をいう。

運転状態 II : プラントの運転状態において、プラントの寿命程度の期間中に予想される設備の単一故障、又は運転員の単一誤操作等によって、原子炉が通常運転をはずれるような状態をいう。

運転状態 III : 発生頻度が十分に低い事象によって引き起こされる状態であって、運転状態 II で考慮する単一故障等の範囲からはずれるが、設備の設計の妥当性を評価すること必要と考えられるものをいう。

運転状態 IV : 発生頻度が極めて低く、プラント寿命中には起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態であるが、万一発生した場合の設計の妥当性を評価するために特に考慮するものをいう。

Table 4.2.1 事象抽出リスト

外的要因	評価事象	備考
風	浮体構造物の水平・回転運動	単独で考慮されるよりも、組合わせ外力の一つとして取り扱われることが多い。
潮流	防波堤への流体力	単独で考慮されるよりも、組合わせ外力の一つとして取り扱われることが多い。
波	堤内水面への波の伝播	
	防波堤からの越波	
	浮体構造物の波浪中運動	
異常潮位 (高潮等)	浮体構造物の鉛直変位	築堤には開口部があるので、築堤内外の潮位は同じ。
津波	津波の築堤内への侵入	浮体への週上も考える。
	浮体構造物の水平・鉛直運動	引き波の影響も重要である。
	係留装置への大系留力負荷	
地震・海震	地震の圧力波の海中伝播	
	係留装置の大系留力変動	
	堤内水面のスロッシング	
	浮体構造物の地震・海震応答	コネクションブリッジの挙動も考慮する。
積雪・着水	浮体構造物の質量変化	
上記の要因	浮体構造物及び係留装置の上記外部事象の組合わせ外力による変形・疲労・破壊	
雷	落雷による高電圧大電流(迷走電流)落雷ノイズによる電磁波障害	陸上施設より落雷の可能性は高いが、対策は陸上で行っている方法(避雷針など)で説明対策、ノイズ対策等)と同様である。

Table 4.2.2 技術要素マップ(その1)

評価事象	外的要因の特性	評価対象物の設計的特性	評価事象のメカニズム	評価事象の定量的把握	中心となる技術
風・潮流による浮体構造物の水平・回転運動	風速 風向 潮流速 流向 方向	浮体構造物の水面上の形状 浮体構造物の水面下の形状 係留装置の特性	風圧力及び潮流力により浮体構造物が運動する ・風抵抗計算 ・風洞実験 ・潮流力計算	・風圧力・潮流力 ・水平移動力 ・回転モーメント	・流体力評価技術
堤内水面への波の伝播	波浪 波高 周期 方向 波スペクトル形状	防波堤の形状 ・防波堤の設置水深 ・堤内構造物形状	防波堤開口部より波が進入する。また一部が越える。 ・(場の)モデル化 ・港内波変形計算 ・モデル実験	・堤内水面での波高等 (防波堤による減衰)	・浮体構造物が存在する場での港内波予測技術
防波堤からの越波	波浪 波浪スペクトル	防波堤の断面形状	波が防波堤にあたり一部が越える ・越波のモデル化 ・消波ブロック等のエネルギー吸収評価 ・モデル実験	・越波の確率評価 ・時間平均越波量と瞬間越波量	・港湾工学 ・消波堤設計技術
浮体構造物の波浪中運動	波浪 波高 周期 方向スペクトル形状 (周波数と方向別の特性)	浮体構造物 形状 質量 重心 浮心 復原力 ・係留装置 ・係留方式 ・係留特性	波浪外力による浮体構造物の運動 ・波浪の標準スペクトル ・固有振動数 ・浮体応答計算 ・周波数領域 ・時間領域 ・長周期動揺	・波浪応答 変位 速度 加速度 ・係留力	・浮体運動理論 ・曲折・散乱、放射 ・付加質量・逆波減衰 ・粘性減衰 ・スロッシング解析技術 ・浮体構造物設計技術 ・係留装置設計技術 ・送電線の動的解析
異常潮位による浮体構造物の船底変位	高潮 潮位	・係留装置の特性	潮位上昇に伴い浮体構造物が鉛直に変位する	・浮体の鉛直変位量	・高潮計算技術 ・係留装置設計技術
津波の築堤への進入	津波 伝播速度 伝播方向 水位(寄せ・引き) 上記の時間変化	防波堤 天端高 断面形状 開口部形状	津波が防波堤にあたり、一部が越える ・津波計算 ・週上有/無 防波堤の開口部から津波が進入する	・堤内水域での水位変化、海水の運動	・津波計算技術 ・断層変位予測技術 ・防波堤設計技術 ・津波港内変形予測技術

Table 2.2 技術要素マップ(その2)

評価事象	外的要因の特性	評価対象物の設計的特性	評価事象のメカニズム	評価事象の定量的把握	中心となる技術
津波による浮体構造物の水平・鉛直運動	津波 伝播速度 伝播方向 水位(寄せ・引き) 上記の時間変化	・浮体構造物形状 ・係留装置特性	津波により浮体構造物が水平・鉛直に運動する。	・浮体にかかる流体力 ・浮体運動の加速度 ・浮体傾斜 ・係留力の過度変化	・浮体運動理論 ・流体力評価技術 ・浮体構造物強度評価技術 ・係留装置設計技術
地震の圧力波の海中伝播	地震動 マグニチュード 波形	・浮体構造物 設置水深	海底の上下動が圧力波として海中を伝わり、浮体構造物に作用する。	・圧力振幅・エネルギー ・持続時間	・海震解析技術
地震動による係留力変動	地震動 マグニチュード 地盤波	・係留装置 係留方式 係留特性 ・浮体構造物 形状 固有振動数	地震動による係留点の変位(係留装置と浮体構造物の相対変位) ・モデル化 ・応答解析	・係留装置の変位 ・浮体構造物の変位 ・係留力	・地震応答解析技術 ・浮体構造物の運動解析技術 ・係留装置の設計技術
堤内水面のスロッシング	地震動 マグニチュード 波形	・地盤・地質 ・防波堤の形状 堤体の反射率 ・内水面の固有振動数	防波堤の壁面からの内部水加振 ・スロッシング解析	・水面変動量 ・浮体構造物へ作用する流体力 ・浮体構造物への週上高さ ・堤体内壁週上高さ	・スロッシング解析技術
浮体構造物の地震応答	地震動 マグニチュード 地盤波	・地盤・地質 ・浮体構造物 形状 固有振動数 ・係留装置 係留方式 係留特性 ・防波堤の形状	地震の圧力波が海中を伝わり、浮体構造物に作用する。 係留装置を通じて地震動が浮体構造物に入力される。	・応答変位 ・応答速度 ・応答加速度	・耐震設計技術 ・浮体構造物の運動解析技術 ・連成スロッシング解析技術

Table 4.2.2 技術要素マップ(その3)

評価事象	外的要因の特性	評価対象物の設計的特性	評価事象のメカニズム	評価事象の定量的把握	中心となる技術
浮体構造物の質量変化	積雪 積雪量 着水 着水量 気温	・浮体構造物 形状 ・融雪・融氷設備 ・着氷量	積雪・着氷による浮体構造物特性の変化 ・積雪量予測 ・着氷量予測 ・浮体への影響予測	・積雪量 ・着氷量 ・重心・浮心の変化量 ・復原力の変化量	・積雪・着氷予測技術 ・融雪・融氷設備設計技術
環境荷重	環境荷重 風・潮流・波浪・積雪 津波 地震	・浮体構造物 ・外郭施設(防波堤)	環境荷重の組合せによる浮体構造物の 変形・破壊 ・現象の発生確率 ・荷重の組み合わせ技術 ・荷重の累積頻度	・変形量 ・部材応力 ・破壊箇所	・浮体構造物の設計技術 ・防波堤設計技術 ・信頼性設計技術
環境荷重の組合せ外力による浮体構造物の変形・破壊					

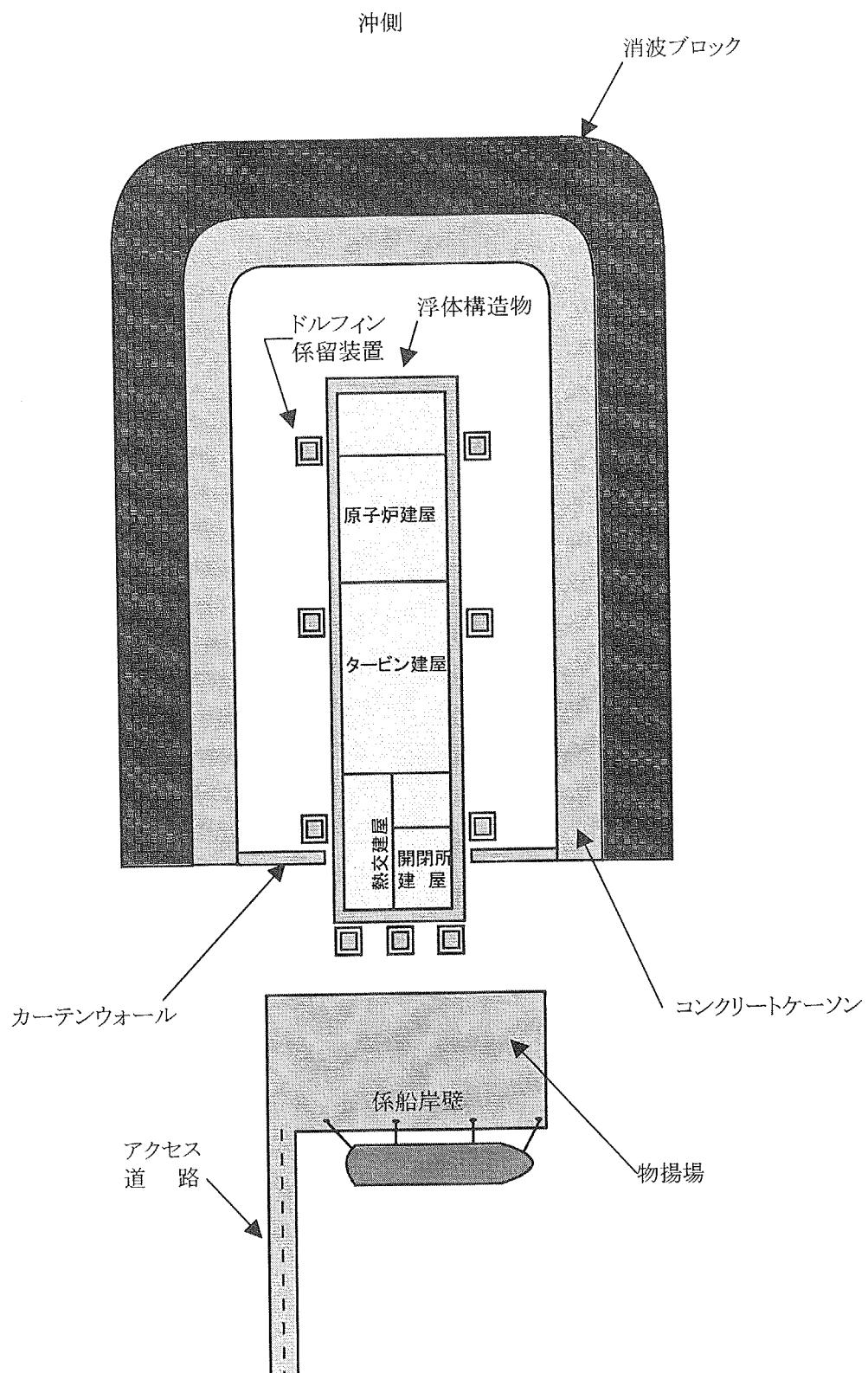


Fig.2.1 浮体式原子力発電施設の全体配置

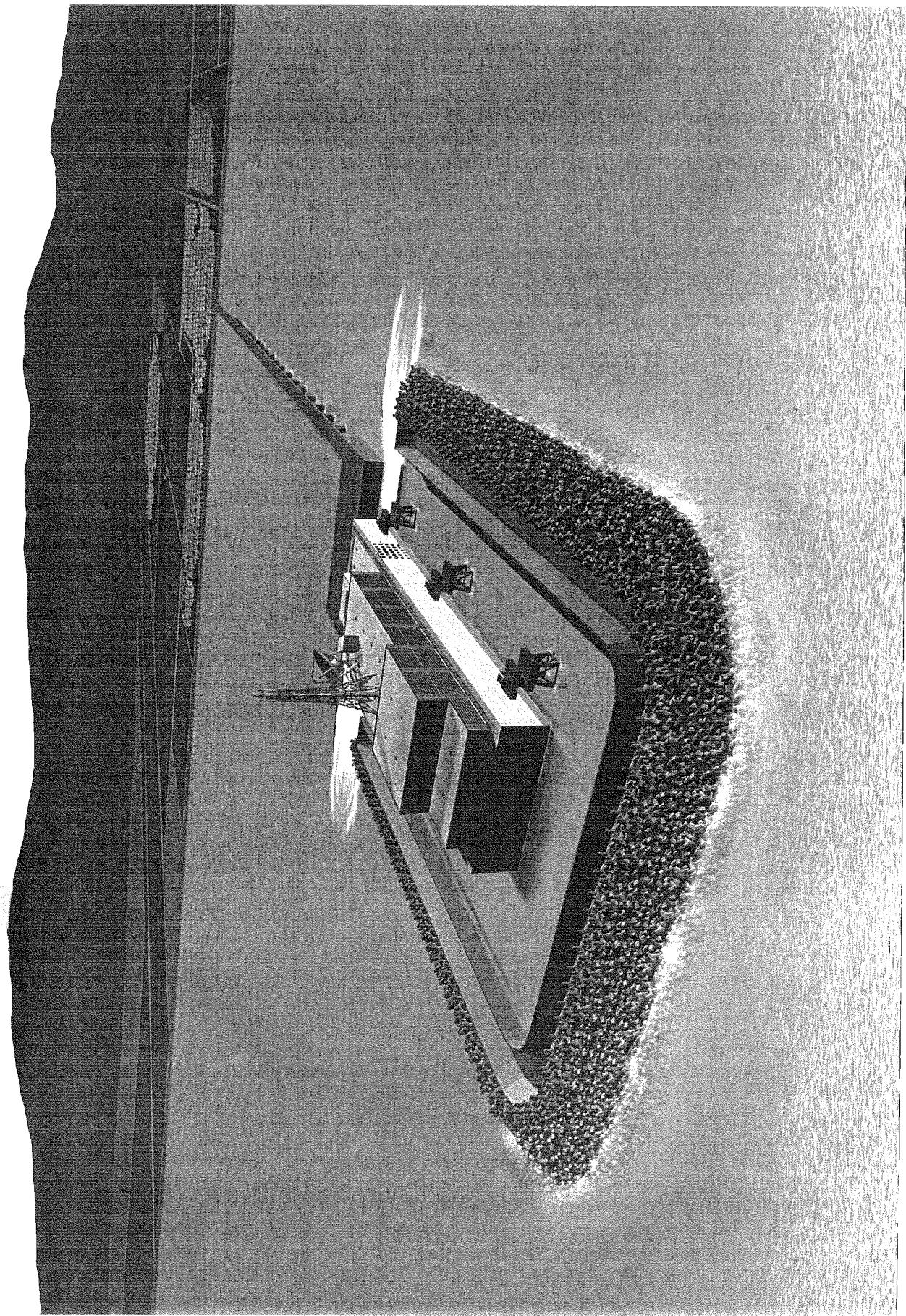


Fig2.2 烟団図

This is a blank page.

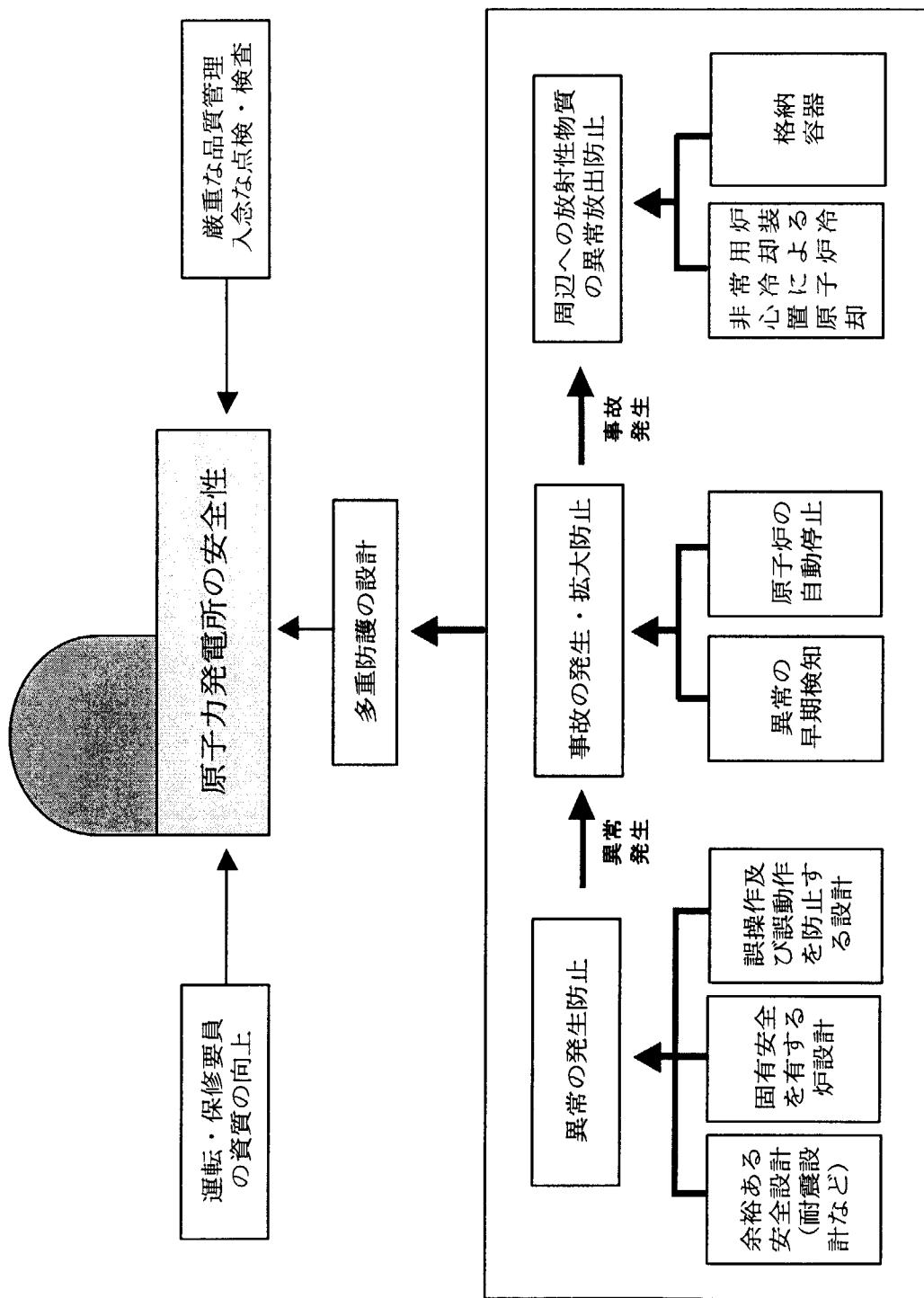


Fig.3.1.1 原子炉施設固有の安全確保の考え方

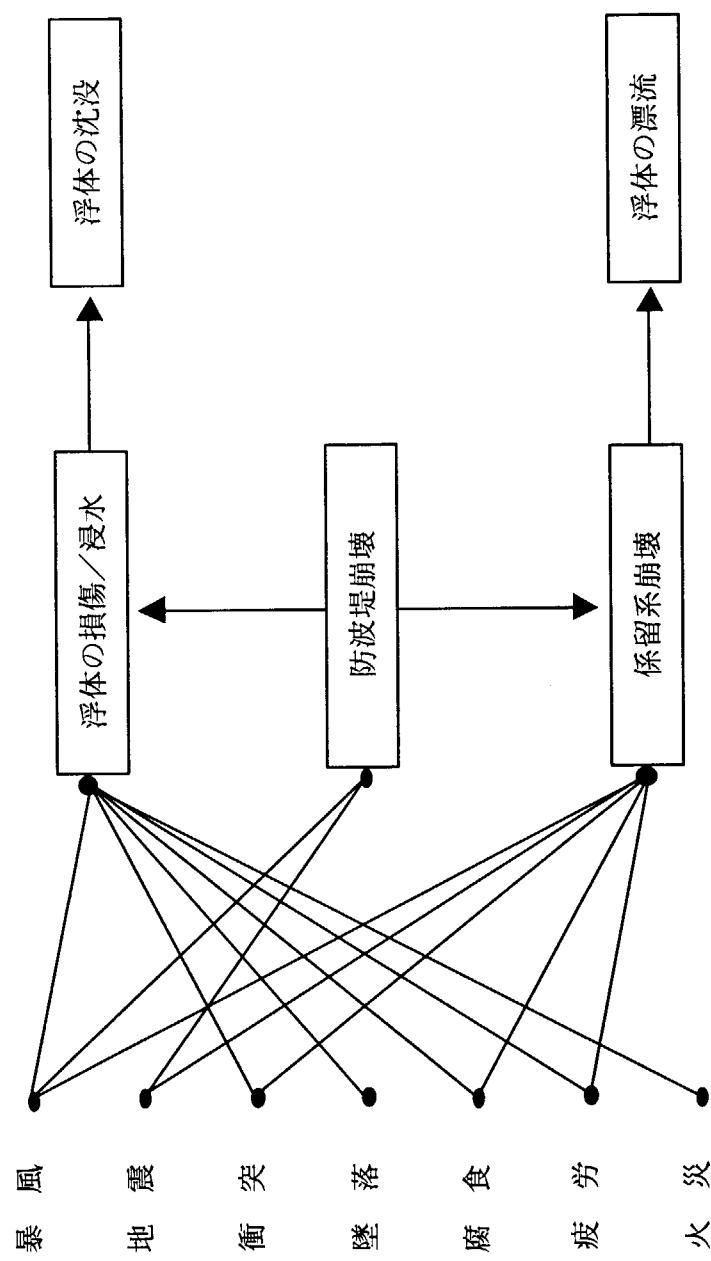


Fig.3.1.2 メガフロートの崩壊シナリオ

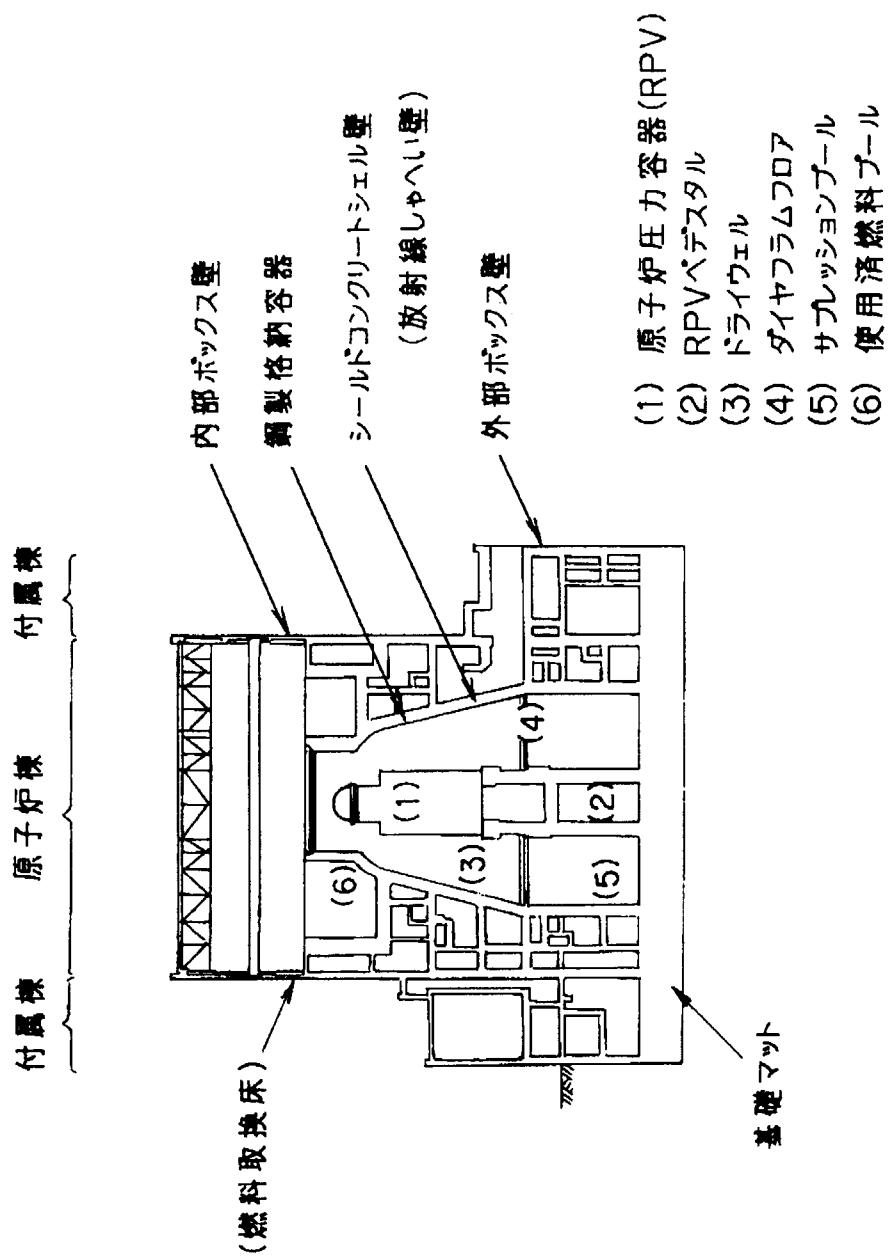


Fig. 3.3.1 BWR MARK-II型原子炉建屋断面

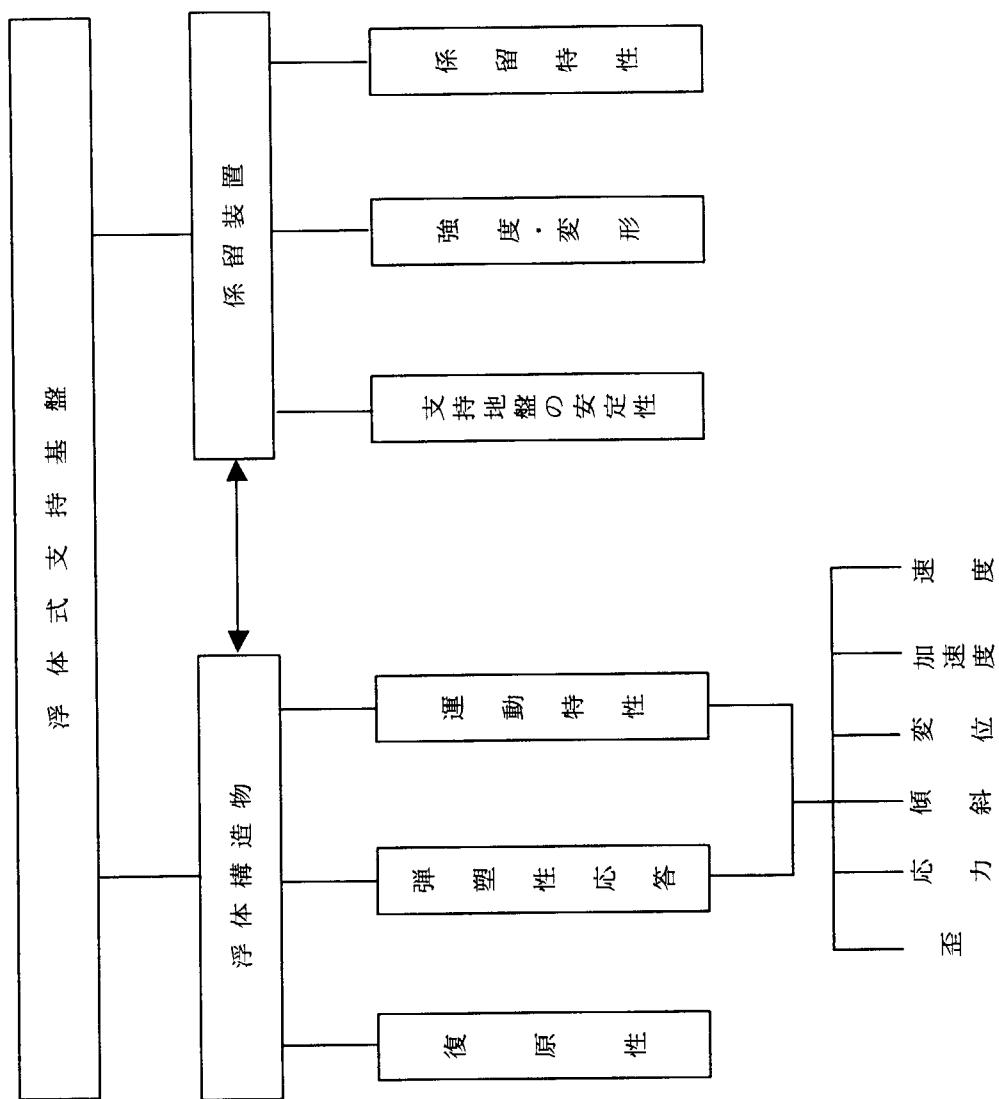


Fig. 4.1.1 浮体式支持基盤の応答の具体的な特性

付録 I 浮上式原子力発電プラント AGSの設計方針

(1) 施設の概要

AGS(Atlantic Generating Station)は、米国で計画された浮上式原子力発電プラントであり、本計画は種々の問題点を解決するために、その安全性や周辺環境への影響等に対する技術的検討が広く深くなされており、実際1970年後半に設計段階まで進展し製造許可も得ている。しかしながらオイルショック後の電力需要の落ち込み、原子力発電に対する住民の反対運動などにより実現するには至らなかった。

AGSは、米国ニュージャージー州沖合4.5 kmの大西洋上に建設予定であったもので、出力115万kWの加圧水型原子炉を搭載した浮体式プラットフォーム（以下、「FNP : Floating Nuclear Platform」という。）を2基並べて配置し、半円形の主防波堤と直線形防波堤で囲み、防波堤内水域に浮かぶFNPを係留システムで保持する方式を採用した浮上式原子力発電プラントである。AGSの外観図等をFig. I - 1及びFig. I - 2に示す。

原子炉にはWestinghouse社の加圧水型原子炉が使用されており、原子炉蒸気供給システム、タービン発電機、補助システム、安全設備などは、すでに陸上原子力発電プラントにおいて実用化されているシステムであり、プラントレイアウトも同水準（1基当たりの出力1,150MWe）の出力を有する陸上プラントと特に変わった点はなく、浮上式原子力発電プラントとしての特殊性は以下のよう一部の補助システムにみられるのみである。

- ① 船殻漏水システム：
水密構造区画内部への漏水探知システム
- ② 発電プラント内上水道システム：
フラッシュ海水蒸留装置を中心とした自給式上水道システム
- ③ 消火システム：
火災危険区画を対象とした化学フォーム、炭酸ガス、水の放散による消火システム
- ④ プラットフォーム・トリムシステム：
複数のトリムタンク間水移送により、保守作業時などのプラットフォーム重量分布の変化を補うシステム
- ⑤ 衛生システム：
発電プラント内で発生する汚水、汚物処理システム

Fig. I - 3に示す発電プラントを支持するプラットフォームは、長さ120m×幅113m×深さ12mという大きさの全溶接式鋼製構造物であり、American Bureau of Shippingの鋼製船舶建造・船級規格 (Rules for Building and Classing Steel Vessels and Barges) の要件を満たすよう設計されている。

(2) 安全設計の目標

AGS ではいかなる厳しい外力条件下でも運転操業ができ、極めて例外的な大荒天時でも発電所を安全な停止状態に保つようにしなければならないとしている。具体的には 2 つの設計目標（安全基準）が設定されている。第 1 は発電所の安全操業であり、他は安全な操業停止条件である。

安全な操業継続の要求するところは、百年確率ハリケーン程度の激しい嵐の時も、中位の強度の地震時にも安全に操業が継続できることとしている。また、安全な操業停止の要求するところは、起こり得る最大限のハリケーン（以下、「PMH : Probable Maximum Hurricane」という。）の時も、あるいは沖合い建設位置に起こるかもしれない竜巻または地震の時でさえも、この発電所は安全な操業停止条件の中に保たれることができることとしている。設計で考慮される自然現象は、Fig. I - 4 のように整理される。

(3) 自然現象等に対する設計ベース

AGS は陸上の原子力発電所と同様、米国 AEC (Atomic Energy Commission) の“標準設計基準”で要求されている以下の条項

「安全保持の面で重要な構築物、システム及び構成部分は、地震、竜巻、ハリケーン、洪水、津波、高潮などの自然現象の影響に対して、安全保持機能を損なうことなく耐え得るよう設計されなければならない。また、このための設計基準は、設置地点及び周辺地域において過去に発生した最も苛酷な自然現象とし、その適度の相乗効果と保持すべき安全の重要性を考慮しなければならない。」

を満たすことが絶対条件とされている。

AGS を含む米国 OPS(Offshore Power Systems)社の浮上式原子力発電所計画は、1982 年に NRC (Nuclear Regulatory Committee) から製造認可を受けている。この許認可申請の過程における予備的な設計報告書 (FNP の自然現象及び環境条件等に対する設計上の考慮に関する事項) 及びそれに対する AEC コメントを Table I - 1 に示す。

Table I - 1 に記述されている AEC のコメントにあるように、海上プラントの安全性確保は、基本的に防波堤及び係留装置に依存していると考えられる。AGS における外部事象に対する安全上の基本方策は概ね Fig. I - 5 のように整理される。

付録 II 参考文献

- 1) 宮下義夫：土木学会誌, 5, 48-52 (1975).
- 2) 原子力発電所の新立地方式及び耐震研究に関する海外調査団：原子力発電所の新立地方式及び耐震研究に関する米国における動向, (1983)
- 3) 海洋産業研究会：米国における沖合原子力プラントの開発動向, (1974)
- 4) E.H.Harloy&M.Kehnemuyi : Mooring System for Atlantic Generating Station , Offshore Technology Conference 2065, (1974)
- 5) 日本海洋開発産業界：昭和 49 年度海外海洋開発動向調査事業調査報告書－洋上原子力発電所計画における環境保全対策に関する調査, (1975)

- 6) 電力中央研究所：昭和57年度原子力発電所新立地方式検討に関する調査報告書－プラント技術関連の技術水準調査参考資料－，(1983)
- 7) 運輸省ほか：新しい国土の創造－沖合人工島に関する調査報告書Ⅲ－，(1983)

Table I - 1 予備設計報告書に対する AEC のコメント

出典：3)

(General Design Criteria) 指針 2. 自然現象に対する防護のための設計ベース	(予備設計報告書における適合の現状) <ol style="list-style-type: none"> 安全上重要な構造物・系統・機器は自然現象によっても安全上の機能喪失がないよう設計する。 原子炉の停止に重要な構造物・系統・機器は設計基準として採用した自然現象に対応し得るよう設計する。 海上プラントは種々の異なったサイト条件でも設置できるような標準化プラントであるため、いくつかの適当なサイト条件に対して決定された設計レベルと同等かまたはそれ以上のレベルの自然現象に対応できるよう設計する。 プラントの設計基準として採用した自然現象は下記の通り。 <ol style="list-style-type: none"> サイトの必要水位は 50ft(15.2m)。最低水位時にもプラットフォームは海底と接触しない。 潮位変動（平均低潮位よりの変動） <table border="0"> <tr><td>Operating Basis :</td><td>(注 1)</td></tr> <tr><td>+ 14ft(4.3m)～ - 6ft(1.8m)</td><td>(注 2)</td></tr> <tr><td>Design Basis :</td><td>(注 1)</td></tr> <tr><td>+ 20ft(6.1m)～ - 6ft(1.8m)</td><td>(注 2)</td></tr> </table> 常時のみに使用する Essential Raw Water System への取水（海水）最高温度は 29.4°C 防波堤内でのプラント最高傾斜角 ピッチ角 : 1°, ローリング角 : 0.7° 耐震設計 : <table border="0"> <tr><th></th><th>OBE^(注 3)</th><th>DBE^(注 4)</th></tr> <tr><td>・水平加速度（海底面）</td><td>0.15G</td><td>0.30G</td></tr> <tr><td>・垂直加速度（海底面）</td><td>0.10G</td><td>0.20G</td></tr> <tr><td>・水平加速度</td><td>0.05G</td><td>0.10G</td></tr> <tr><td colspan="3">(プラットフォーム上の一質点系, 1Hz 以上)</td></tr> <tr><td>・垂直加速度</td><td>0.10G</td><td>0.20G</td></tr> </table> ハリケーン風速 : <table border="0"> <tr><th>OBH^(注 5)</th><th>DBH^(注 6)</th></tr> <tr><td>190mph(85m/sec)</td><td>200mph(89m/sec)</td></tr> <tr><td colspan="2">(海水面より 600ft 上空)</td></tr> </table> 	Operating Basis :	(注 1)	+ 14ft(4.3m)～ - 6ft(1.8m)	(注 2)	Design Basis :	(注 1)	+ 20ft(6.1m)～ - 6ft(1.8m)	(注 2)		OBE ^(注 3)	DBE ^(注 4)	・水平加速度（海底面）	0.15G	0.30G	・垂直加速度（海底面）	0.10G	0.20G	・水平加速度	0.05G	0.10G	(プラットフォーム上の一質点系, 1Hz 以上)			・垂直加速度	0.10G	0.20G	OBH ^(注 5)	DBH ^(注 6)	190mph(85m/sec)	200mph(89m/sec)	(海水面より 600ft 上空)		(米国原子力委員会コメント) <p>コメント 1：海上サイトに関連する全ての設計パラメータに対し、防波堤ならびに係留装置を考慮した設計包絡線を作成する必要がある。</p> <p>コメント 2：個々の海上サイトにプラントを設置する場合は、そのサイト条件が上記すべての設計包絡線内にあることを証明する必要がある。</p> <p>コメント 3：海上プラントの採用を考えている電力会社に対し、例えば人口中心に接近し得る距離、船舶の航路、漁場、航空路並びに標準的気象観測計画のごとく、海上サイトに関連する設計包絡線で示されない事項も含めた敷地選定基準を示せ。</p> <p>(注 1) : 自然現象としての Operating Basis とは、100 年間に 1 回発生する程度のものをいう。自然現象としての Design Basis とは、1,000～10,000 年間に 1 回発生する程度のものをいう。</p> <p>(注 2) : 右記最大潮位は、それぞれ OB Storm、DB Storm を考慮したものである。</p> <p>(注 3) : OBE (Operating Basis Earthquake)</p> <p>(注 4) : DBE (Design Basis Earthquake)</p> <p>(注 5) : OBH (Operating Basis Hurricane)</p> <p>(注 6) : DBH (Design Basis Hurricane)</p>
Operating Basis :	(注 1)																																	
+ 14ft(4.3m)～ - 6ft(1.8m)	(注 2)																																	
Design Basis :	(注 1)																																	
+ 20ft(6.1m)～ - 6ft(1.8m)	(注 2)																																	
	OBE ^(注 3)	DBE ^(注 4)																																
・水平加速度（海底面）	0.15G	0.30G																																
・垂直加速度（海底面）	0.10G	0.20G																																
・水平加速度	0.05G	0.10G																																
(プラットフォーム上の一質点系, 1Hz 以上)																																		
・垂直加速度	0.10G	0.20G																																
OBH ^(注 5)	DBH ^(注 6)																																	
190mph(85m/sec)	200mph(89m/sec)																																	
(海水面より 600ft 上空)																																		

指針 4 . 環境条件及びミサイルに対する設計ベース

- ⑥ 竜巻
 - ・接線方向回転速度 300mph (134m/sec)
 - ・進行速度 60mph (27m/sec)
 - ・圧力降下 3psi, 3sec
- ⑦ 飛行機ミサイル対策 :

ミサイル防護対策の必要のないようなサイトを選定する。
- ⑧ 海底層土は防波堤の建設及び係留設備の据付に適当なものであること。
- ⑨ サイト環境はプラントによる影響を許容し得るものである。

- 1) 安全上重要な構築物、系統及び機器については平常運転、保修、試験並びに冷却材喪失事故を含む想定事故時の環境条件に対しうるよう配置上及び構造上考慮を払っている。
- 2) 一次冷却ループはループごとにコンクリートのコンパートメント内に設置され、原子炉容器、一次冷却水ポンプ、蒸気発生器及び加圧器は、コンクリート壁で囲まれている。
- 3) 格納容器上部には制御棒駆動装置のミサイル遮蔽が設けられている。
- 4) ミサイル防護に関しては、現在の PWR と同等であることを原則とする。
- 5) プラントの系統、機器を、①通常時のみ使用するもの、②事故時にのみ使用するもの、として完全に分離し、事故時にのみ使用する Safeguards System は、プラットフォームの Safeguard Area に固めて配置する。
- 6) Safeguard Area は二重の耐水構造とし、浸水事故がないよう特別な配慮がしてある。
- 7) 安全解析としては、現在の PWR で行っている解析の対象・解析方法と同じである。
- 8) 1,000 トン以上の船舶と防波堤との衝突の可能性は 1.1×10^{-3} / 年 (95% の信頼度において) であり、衝突の影響は設計に盛り込む必要がないほど低いものである。

コメント 1 : 防波堤内の沈没事故を設計基準の 1 つとして考える必要がある。

コメント 2 : 部分浸水及び沈没によるプラントへの影響を検討する必要がある。

コメント 3 : プラントは、LOCA または他の事故が沈没の原因となって発生しないよう設計せよ。

コメント 4 : 沈没時にも原子炉の安全停止が確実に行えるよう設計せよ。

コメント 5 : プラントの安全性確保は、防波堤ならびに係留装置に依存していると考えられるため、防波堤で考える事故として何があるか、またそれらの事故の影響はどうであるか等に特別な注意を払う必要がある。

コメント 6 : タービンミサイルにより派生する最悪事故の発生の確率や、もしこの確率が非常に高いものであれば、その防御手段について研究せよ。

コメント 7 : ミサイルによる構造物の貫通事故の確率を論じるベースとして、解析的及び実験的検討が必要である。

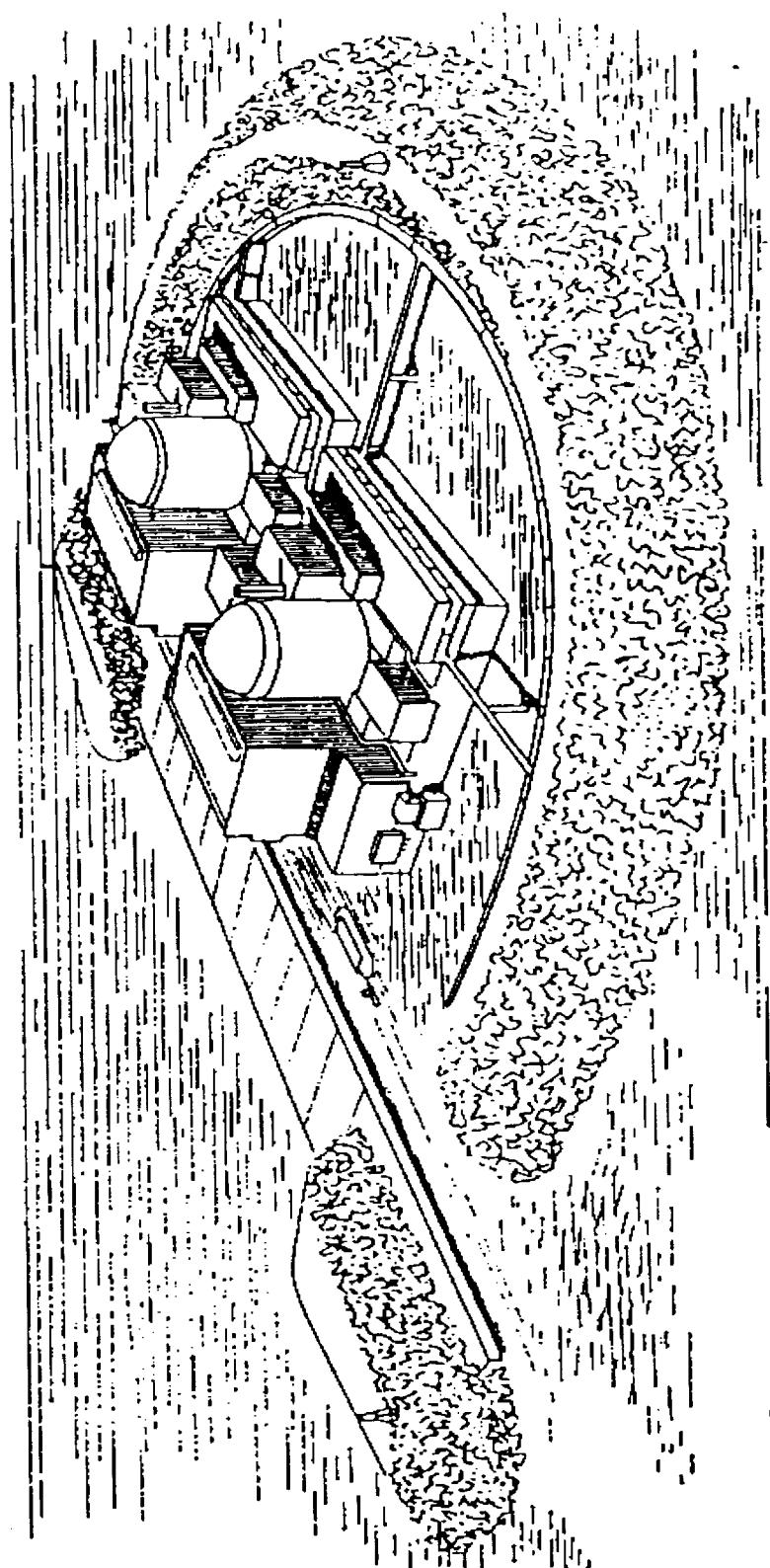
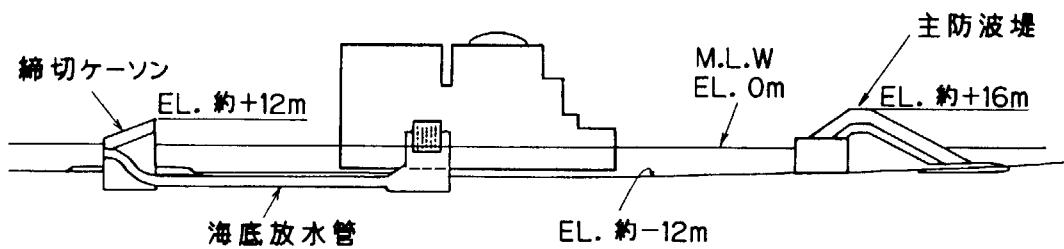
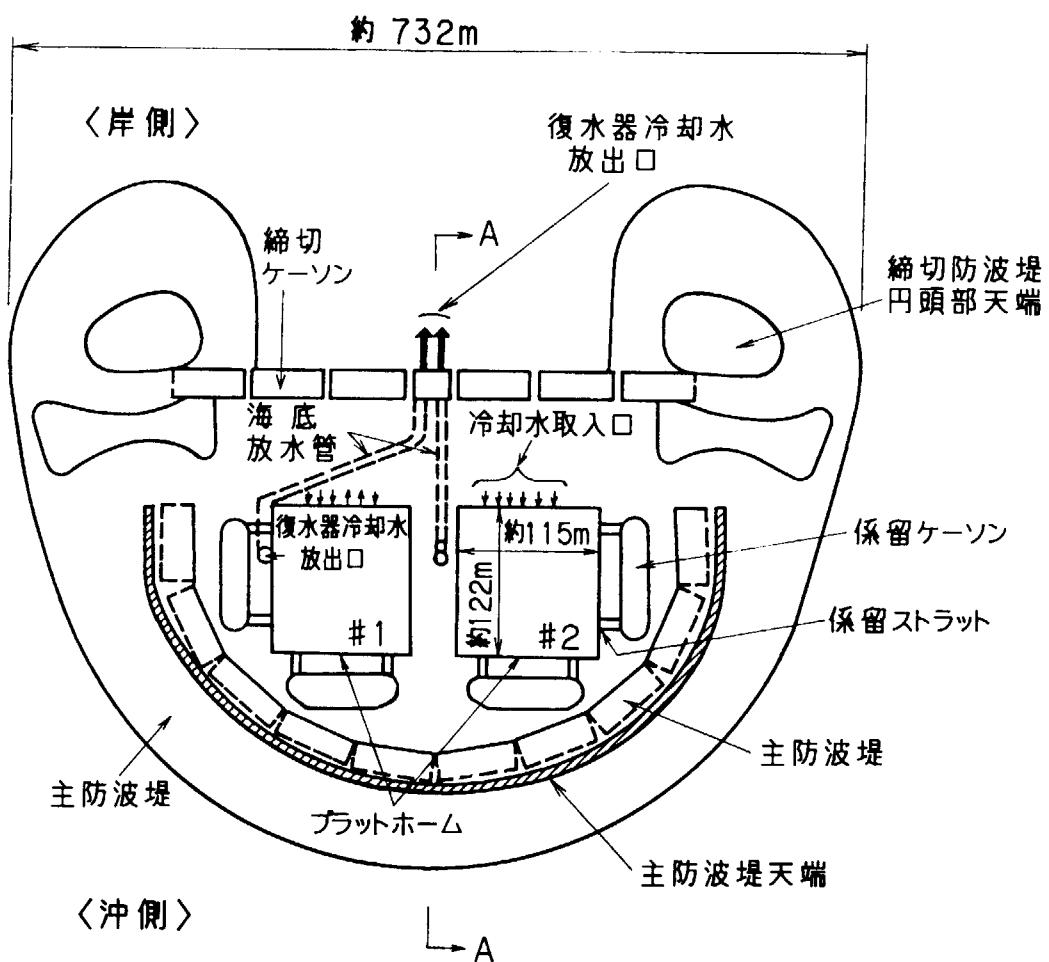


Fig. I-1 AGSの外観予想図



A-A 断面図

Fig. I -2 AGSの概要図

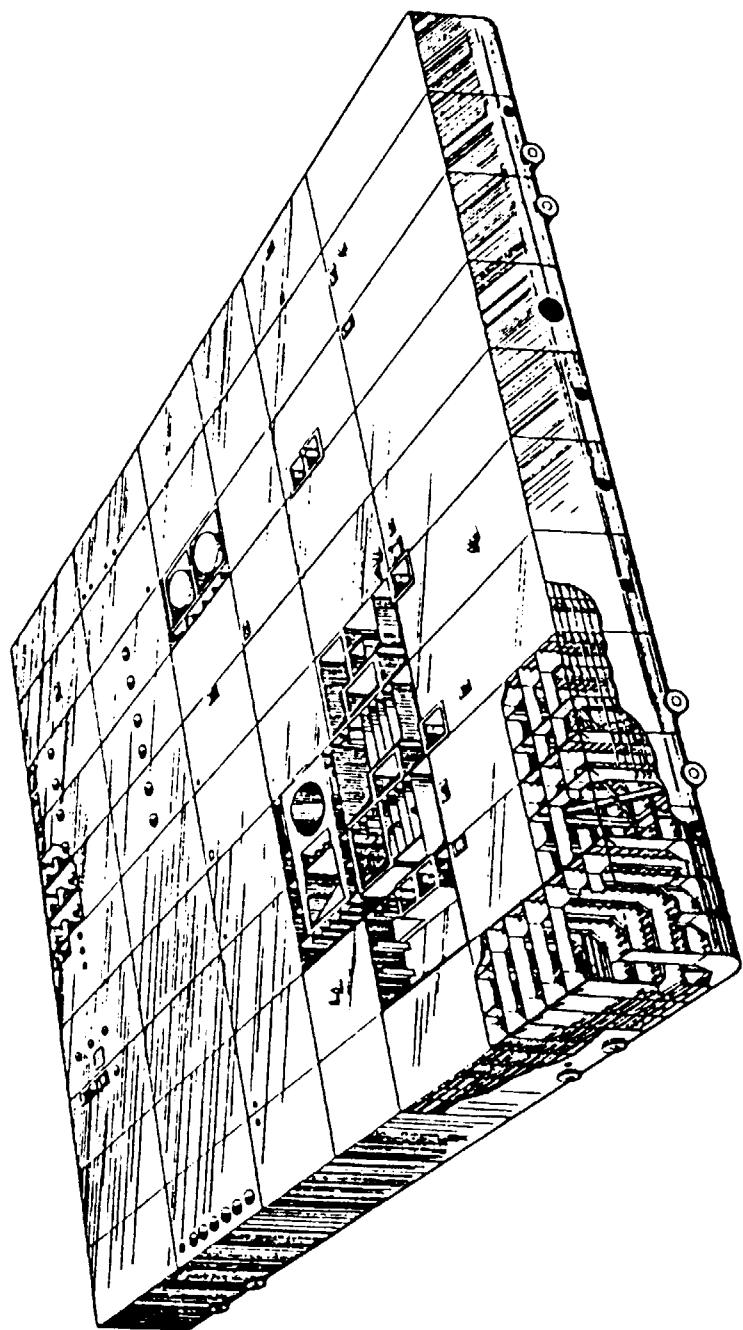


Fig. I-3 プレットフォーム

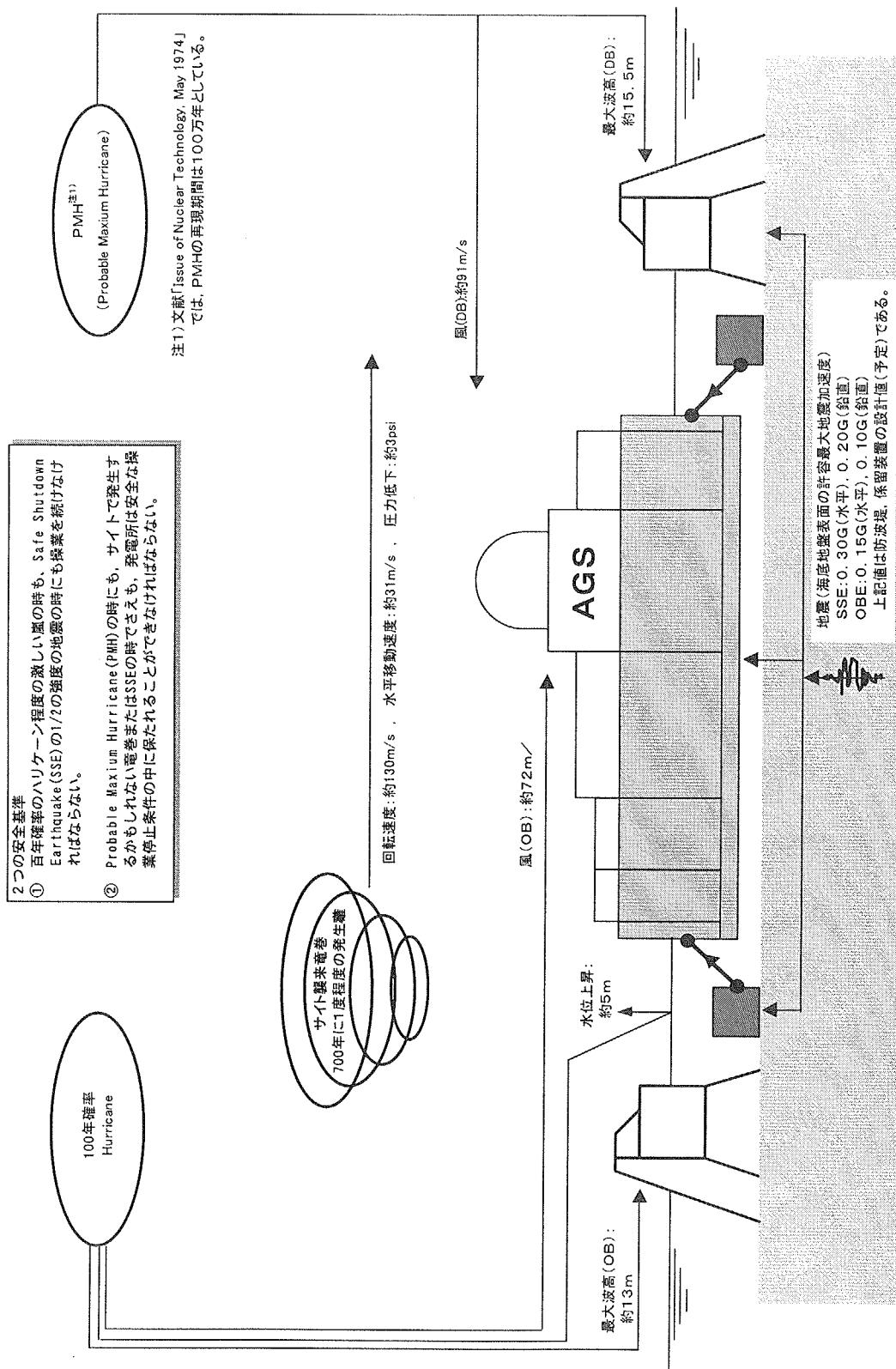
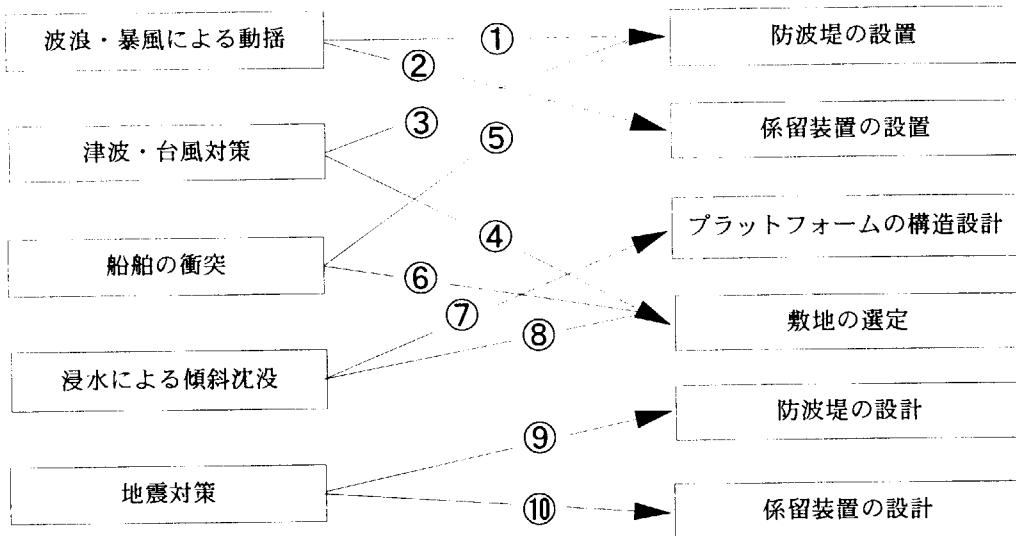


Fig. I-4 重点的に考慮する自然現象



- ①及び②：プラントの波浪・暴風（1回／1万年の大波浪等を想定）などによる動搖に対しては、防波堤及び係留装置の設置によりプラントの動搖を防止し、運転時にはその範囲をある一定値以下にするようプラントの動搖制限を行う。
- ③及び④：津波・台風による高潮位・高波浪に対しては、防波堤によって発電所を防護する。また、FNPの海底への着底防止などのため、ハリケーン・竜巻・津波・高潮並びに最高最低潮位との組合せを考慮して設置場所の水深を決定する。
- ⑤及び⑥：大型船舶とプラントとの衝突は防波堤で防ぎ、1万年に1度発生が予想される気象条件下においても大型船舶が防波堤を突き破り、または乗り越えて内部の発電プラントに被害を与えないようにする。また、敷地の選定の際には、設置水深、航路からの離れていることなどを考慮する。
- ⑦及び⑧：浮体自体の損傷などによるFNPの傾斜沈没は検討すべき重要課題とされているが、プラットフォーム構造設計での配慮（耐水圧構造、区画可浸設計、バラスト設備、漏洩検知設備等）、FNP沈没想定時の重要機器冠水防止のための水深選定、FNP沈没傾斜を防止するための海底面の選定（平坦であること）などの基本的対策が必要である。
- ⑨及び⑩：地震対策として、防波堤においては海底地盤の土質による振動特性の変化を考えて、動的解析に基づいて設計を行う必要がある。FNPにおいては、プラットフォームに直接地震力は作用しない。係留装置については、防波堤と同様の検討を行う必要がある。

(防波堤に要求される主要条件)

- ・ 百年に1回発生すると考えられるハリケーンに対して、高波浪時の越波を許さず、被覆層の損害は5%以下にとどめることができ、発電所操業を可能とする程度に波の乱れをとどめる能力。
- ・ 百万年に1回程度の割合で発生すると考えられるハリケーン(PMH)に対して、被覆層への損害は25%以下の修理可能なものに止めることができ、また、発電所に対しては損害を与えず、安全停止状態を保持できる能力。
- ・ 竜巻に対して被害はただ修理可能なものに止めることができ、発電所機能に損失を与えない能力。
- ・ 全特性によって地震に耐え、修理し得る程度の損害に止め、機能に損失を生じさせない能力。
- ・ 1万年に1回程度の割合で発生すると考えられる波浪及びサイト付近を航行できる最も大型の船舶との衝突においても発電プラントに被害を与えないこと。
- ・ 長周期のうねりを進入させず、魚を引き込まないよう十分な開口部をとること。

(係留システムに要求される主要条件)

- ・稼働時と設計時の荷重のもとで、プラントの挙動と加速度が指定された範囲を越えないこと。
- ・地震時、地盤の水平動の伝達を制限すること。
- ・稼働時の荷重による水平動のために送電線が過度に伸びないようにすること。
- ・稼働時の荷重による水平動のために排水ラインが過度に伸びないようにすること。
- ・設計荷重のもとでプラットフォームが他の構造物と衝突するような水平動を制限すること。
- ・係留システムはFNPの挙動により水面レベルの上下運動を許すこと。
- ・一本のストラットの破損を仮定しても、その機能を失わないこと。

Fig. I - 5 外部事象に対する基本方策

付録II 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針

(昭和56年7月20日 原子力安全委員会決定)

1. はしがき

本指針は、発電用原子炉施設の耐震設計に関する安全審査を行うに当たって、その設計方針の妥当性を評価するため、昭和53年9月、当時の原子力委員会が、安全審査の経験をふまえ、地震学、地質学等の知見を工学的に判断して定めたものである。

このたびは、静的地震力の算定法等について、新たな知見により見直すことが妥当であると考えられたため、静的地震力の算定法等について見直しを行ったものである。

なお、本指針は、今後さらに新たな知見と経験の蓄積によって、必要に応じて見直される必要がある。

2. 適用範囲

本指針は陸上の発電用原子炉施設に適用される。

しかし、これ以外の原子炉施設にも本指針の基本的な考え方は参考となるものである。

なお、本指針に適合しない場合があってもその理由が妥当であればこれを排除するものではない。

3. 基本方針

発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない。また、建物・構築物は原則として剛構造とともに、重要な建物・構築物は岩盤に支持させなければならない。

4. 耐震設計上の重要度分類

原子炉施設の耐震設計上の施設別重要度を、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、次のように分類する。

(1) 機能上の分類

Aクラス：自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの並びにこれらの事故発生の際に、外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響、効果の大きいもの

Bクラス：上記において、影響、効果が比較的小さいもの

Cクラス：Aクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

(2) クラス別施設

上記耐震設計上の重要度分類によるクラス別施設を以下に示す。

① A クラスの施設：

- i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」（軽水炉についての安全設計に関する審査指針について記載されている定義に同じ。）を構成する機器・配管系
- ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設
- iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設及び原子炉の停止状態を維持するための施設
- iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するために必要な施設
- vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力障壁となり放射性物質の拡散を直接防ぐための施設
- vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設で上記 vi) 以外の施設
なお、上記A クラスの施設中特に i)、 ii)、 iii)、 iv) 及び vi) に示す施設を限定して A_s クラスの施設と呼称する。

② B クラスの施設：

- i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵しうる施設
- ii) 放射性廃棄物を内蔵している施設、ただし内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が年間の周辺監視区域外の許容被爆線量に比べ十分小さいものは除く
- iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被爆を与える可能性のある施設
- iv) 使用済燃料を冷却するための施設
- v) 放射性物質の放出を伴うような場合、その外部放散を抑制するための施設で A クラスに属さない施設

③ C クラスの施設：上記A、B クラスに属さない施設

5. 耐震設計評価法

(1) 方針

発電用原子炉施設は各クラス別に次に示す耐震設計に関する基本的な方針を満足していかなければならない。

- ① A クラスの各施設は、以下に示す設計用最強地震による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐えること。さらに A_s クラスの各施設は、以下に示す設計用限界地震による地震力に対してその安全機能が保持できること。
- ② B クラスの各施設は、以下に示す静的地震力に耐えること。また共振のおそれのある施設

については、その影響の検討をも行うこと。

- ③ Cクラスの各施設は、以下に示す静的地震力に耐えること。
- ④ 上記各号において、上位の分類に属するものは、下位の分類に属するものの破損によって波及的破損が生じないこと。

(2) 地震力の算定法

5. (1)で述べた設計用最強地震及び設計用限界地震による地震力並びに静的地震力の算定は以下に示す方法によらなければならない。

① 設計用最強地震及び設計用限界地震による地震力

設計用最強地震及び設計用限界地震による水平地震力は5. (3) の「基準地震動の評価法」に定める基準地震動により算定するものとする。なお、水平地震力は、基準地震動の最大加速度振幅の1/2の値を鉛直震度として求めた鉛直地震力と同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

② 静的地震力

(i) 建物・構築物

水平地震力は、原子炉施設の重要度分類に応じて以下にのべる層せん断力係数に当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Aクラス	層せん断力係数	$3.0 C_1$
Bクラス	層せん断力係数	$1.5 C_1$
Cクラス	層せん断力係数	$1.0 C_1$

ここに、層せん断力係数の C_1 は、標準せん断力係数を0.2とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求められる値とする。Aクラスの施設については、鉛直地震力をも考慮することとし、水平地震力と鉛直地震力は、同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は、震度0.3を基準とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求めた鉛直震度より算定するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

(ii) 機器・配管系

各クラスの地震力は、上記(i)の層せん断力係数の値を水平震度とし、当該水平震度及び上記(i)の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。なお、水平地震力と鉛直地震力とは同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

(3) 基準地震動の評価法

原子炉施設の耐震設計に用いる地震動は、敷地の解放基盤表面における地震動に基づいて評価しなければならない。敷地の解放基盤表面において考慮する地震動(以下「基準地震動」という。)は、次の各号に定める考え方により策定されていなければならない。

① 地震動は、その強さの程度に応じ2種類の地震動 S_1 及び S_2 を選定するものとする。

(i) 上記基準地震動 S_1 をもたらす地震(「設計用最強地震」という。)としては、歴史的資料

から過去において敷地又はその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起り、敷地及びその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震及び近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きいものを想定する。

- (ii) 上記基準地震動 S_2 をもたらす地震（「設計用限界地震」という。）としては、地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。
- ② 基準地震動、 S_1 、 S_2 を生起する地震については、近距離及び遠距離地震を考慮するものとする。なお、基準地震動 S_2 には、直下地震によるものもこれに含む。
- ③ 基準地震動の策定に当っては以下の各項を十分に考慮するものとする。
 - (i) 敷地及びその周辺地域に影響を与えた過去の地震について、そのマグニチュード、震央、震源、余震域及びその時の地震動の最大強さ（またはその推定値）と震害状況（構造物の被害率、墓石の転倒等を含む。）
 - (ii) 過去の破壊的地震動の強さの統計的期待値
 - (iii) 地震のマグニチュード及びエネルギー放出の中心から敷地までの距離
 - (iv) 過去の観測例、敷地における観測結果及び基盤の岩質調査結果
- ④ 上記により、基準地震動は、次のそれが適切であると評価できるものでなければならない。
 - (i) 地震動の最大振幅
 - (ii) 地震動の周波数特性
 - (iii) 地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的变化

6. 荷重の組合せと許容限界

耐震安全性の設計方針の妥当性を評価するに際して検討すべき耐震設計に関する荷重の組合せと許容限界の基本的考え方は以下によらなければならない。

(1) 建物・構築物

- ① A_s クラスの建物・構築物
 - (i) 基準地震動 S_1 等との組合せと許容限界

常時作用している荷重及び運転時に施設に作用する荷重と、基準地震動 S_1 による地震力又は静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。
 - (ii) 基準地震動 S_2 との組合せと許容限界

常時作用している荷重及び運転時に施設に作用する荷重と基準地震動 S_2 による地震力との組合せに対して、当該建物・構築物が構造物全体として十分変形能力（ねばり）の余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していること。

② Aクラス (A_s クラスを除く。) の建物・構築物

上記①、(i)「基準地震動 S_1 等との組合せと許容限界」を適用する。

③ B, Cクラスの建物・構築物

常時作用している荷重及び運転時に施設に作用する荷重と、静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、上記①、(i)の許容応力度を許容限界とする。

(2) 機器・配管系

① A_s クラスの機器・配管

(i) 基準地震動 S_1 等との組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動 S_1 による地震力又は静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、降伏応力又はこれと同等な安全性を有する応力を許容限界とする。

(ii) 基準地震動 S_2 等との組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動 S_2 による地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、構造物の相当部分が降伏し、塑性変形する場合でも過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがないこと。

② Aクラス (A_s クラスを除く。) の機器・配管

上記①、(i)「基準地震動 S_1 等との組合せと許容限界」を適用する。

③ B, Cクラスの機器・配管

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時の荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、降伏応力又はこれと同等な安全性を有する応力を許容限界とする。

付録III 重要度分類の具体例

重要專題研究：許容应力編號 JEAG 601，梅-1984)

BWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その1）

機能別分類 耐震重要度分類及び定義	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		造物		相互通報を考慮すべき設備	
	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス
(i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」(「第Ⅱ用海水型原子炉施設に關する安全設計審査指針」に記載されている定義と同じ)を構成する配管及び機器	①原子炉圧力容器 ②原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ボンブ・弁	AS AS	隔壁弁を閉じとする に必要な電気及び 計装設備	AS AS	1) 原子炉圧力容 器スカート 2) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物	AS AS	1) 原子炉圧力容 器ベースタル 2) 原子炉建屋 3) 制御建屋	S ₂ S ₂ S ₂	原子炉壁 原子炉建屋 制御建屋	S ₂ S ₁ S ₂	原子炉運転 原子炉運転 原子炉運転	原子炉運転 原子炉運転 原子炉運転
(ii) 使用燃料を貯蔵するための設備	①使用済燃料プール ②使用済燃料貯蔵ラック	AS AS										
(iii) 原子炉の緊急停止のために危険に負の反応度を付加するための設備及び原子炉の停止状態を維持する設備	制御棒、制御棒駆動機構及び 制御棒駆動装置(スクラム 機能に關する部分)	AS	①炉心支持構造物 ②電気計装設備	AS AS	機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物	AS	1) 原子炉建屋 2) 海水ポン基 礎等の海水系を支 持する構造物(非 常用)	S ₂	原子炉建屋	S ₂ S ₂ S ₂	原子炉建屋 原子炉建屋 制御建屋	原子炉建屋 原子炉建屋 原子炉建屋
(iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための設備	①原子炉隔離時冷却系 ②高圧冷却水ブレイ系 ③残留熱除去系(停止時冷却 モード運転に必要な設備) ④冷却水源としてのサブレッ ションプール	AS AS AS AS	①残留熱除去海水 系 ②炉心支持構造物 ③非常用電源及び 計装設備	AS AS AS	機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物	AS	1) 原子炉建屋 2) 原子炉運転 3) 制御建屋	S ₂	原子炉建屋	S ₂	原子炉建屋 シールドプラグ	原子炉建屋 原子炉建屋
(v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力隔壁となり、放射性物質の拡散を直接防ぐための設備	注:(2) ①原子炉格納容器 ②原子炉格納容器ハウンダリに属する配管・弁	AS AS	隔壁弁を開じる に必要な電気及び 計装設備	A	機器・配管等の支 持構造物 電気計装設備等 の支持構造物	A	1) 制御建屋 2) 原子炉建屋	S ₁ S ₁	原子炉運転 原子炉運転	S ₂	原子炉運転 原子炉運転	原子炉運転 原子炉運転

(1) クレーンは通常時はブーム上ではなく、運転中に基準地盤S₀が発生してブームを損傷する可能性は少ないため、基準地盤S₀に対し落下しないことを確認する。

(2) 小不_レ苦_レ中_レ心_レ疾_レ病_レ不_レ可_レ治_レ也_レ。先生後_レに_レお_レして_レ獨_レ特_レ能_レを維持_レするものとする。

BWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その2）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備図		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		適用範囲	適用範囲	相互通報を考慮すべき設備
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス			
Aクラス	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から放熱熱を除去するため必要な設備	①常用用炉心冷却系 1) 高圧炉心スプレイ系 2) 低圧炉心スプレイ系 3) 留熱除去系(低圧炉心注水モード運転に必要な設備) 4) 自動減圧系 ②冷却水源としてのサブレッシュポンプ	A	①留熱除去海水系 ②常用電源及び計装設備 ③中央制御室の中やへいと空調設備	A A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	1) 原子炉建屋 2) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物(非常用) 3) 制御建屋	S ₁ S ₁ S ₁	S ₁	S ₁	機械用地盤
	(ii) 放射性物質の放出を生じないうる事故の際にその外部放散を抑制するための設備で耐震ASクラス(v)以外の設備	①留熱除去系(格納容器冷却及びスプレイモード運転に必要な設備) ②可燃性ガス遮断制御系(④) ③原子炉建屋 ④非常用ガス処理系及び排気口 ⑤原子炉格納容器圧力抑制装置(ダイヤフラムフロア、ベント管) ⑥主蒸気隔離弁遮断制御系 ⑦冷却水源としてのサブレッシュポンプ	A	①留熱除去海水系 ②常用電源及び計装設備	A A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	1) 原子炉建屋 2) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物(非常用) 3) 主排気口を支持する場合 4) 制御建屋	S ₁ S ₁ S ₁	S ₁	S ₁	機械用地盤
(iii) その他	①燃料ブール水補給設備(非常用) ②ほう酸水注入系	A	非常用電源及び計装設備	A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	原子炉建屋	S ₁				
	炉内構造物	A	原子炉圧力容器	A	1) 原子炉圧力容器 2) 原子炉建屋	A	S ₁ S ₁					

注：(4) CAD方式のものも含む。

BWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例(その3)

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備	補助設備	直接支持構造物	間接支持構造物	相互影響を考慮すべき設備
Bクラス	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されているが、又は内蔵部材に内蔵しているか、又は内蔵部材を支える設備	主燃氣系(外側主燃氣隔離弁よりタービン主塞止弁まで) ①主燃氣系及び給水系 ②原子炉冷却材浄化系	適用範囲 耐震クラス B 注:(5)	適用範囲 耐震クラス B 注:(5)	機器・配管等の支持構造物	B 1) 原子炉建屋 2) タービン建屋 (外側主蒸気隔壁弁より主塞止弁までの配管・弁を支持する部分)
	(ii) 放射性廃棄物を内蔵している設備、ただし内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその被覆によって公衆に与える放射線の影響が年間の周辺監視区域外の許容被ばく線量に比べて十分小さいものは除く	廃棄物処理設備、ただし、Cクラスに属するものは除く	B	機器・配管等の支持構造物	B 1) 原子炉建屋 2) タービン建屋	S _b 注:(6)
	(iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に限られた設備で、その被覆によって公衆に与える可能性のある設備	①蒸気タービン、復水器、給水加熱器及びその主要配管 ②復水加熱器 ③復水貯蔵タンク ④燃料ブール処理系 ⑤放封隔離低減効果の大きい ⑥制御機器動水圧系(放射性流体を内蔵する部分) ⑦原子炉建屋クレーン ⑧燃料取扱い設備 ⑨制御棒貯蔵ラック	B	機器・配管等の支持構造物	B 1) 原子炉建屋 2) タービン建屋 3) タービンペデスタル	S _b
	(iv) 使用済燃料を冷却するための設備	燃料ブール冷却系	B ①原子炉補機冷却却 ②原子炉補機冷却却 ③海水系 ④電気計装設備	機器・配管、電気、 計装設備等の支持構造物	B 原子炉建屋	S _b
	(v) 放射性物質の放出を伴なう場合に、その外部放散を抑制するための設備で耐震As及びクラスに属しない設備					

注：(5) 耐震Bクラスではあるが基準地盤動S_bに対し破壊しないことの検討を行うものとする。(6) S_bは耐震Bクラスの設備に適用される地盤入力(PWRについても同じ)

BWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その4）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互通報を考慮すべき設備	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス
Cクラス 放射性物質にかかわる施設で耐震A _S 、A及びBクラスに属しないもの、及び放射線安全に関する施設	(i) 原子炉の反応度を制御するための設備で耐震A _S 、A及びBクラスに属しない設備	①再循環流量制御装置 ②制御弹性駆動水圧系(A _S 、A及びBクラスに属しない部分)	C C					1) 原子炉建屋 2) 制御建屋	Sc Sc	注:(i) 地盤動	地盤動
	(ii) 放射性物質を内蔵しているか、又はこれに関連した設備で耐震A _S 、A及びBクラスに属しない設備	①試料採取系 ②床ドレン系、オイルドレン系、トームドレン系、ドレン系、シャンク系、ストームドレン系 ③洗浄液処理系 ④洗浄液処理装置より下流の固体廢棄物取扱い設備 ⑤固化処理装置(貯蔵庫を含む) ⑥洗浄固体・減容・圧縮設備(ペーリングマシン) ⑦放射性廃棄物処理系のうち廃液処理装置蒸留水側 ⑧新燃料貯蔵設備 ⑨その他	C C C C C C C C C		機器・配管、電気計装備等の支持構造物	C	1) 原子炉建屋 2) タービン建屋 3) 廃棄物処理建屋	Sc Sc Sc			
	(iii) 放射線安全に關係しない設備等	①循環水系 ②原子炉補機冷却系 ③タービン補機冷却系 ④補助ボイラー及び所内蒸気系 ⑤消火設備 ⑥生発電機・変圧器 ⑦空調設備 ⑧タービン建屋クレーン ⑨所内用空氣系、計装用空氣系 ⑩その他	C C C C C C C C C	機器・配管、電気計装備等の支持構造物	C	1) 海水ポンプ基盤等の海水系を支持する構造物(常用) 2) 原子炉建屋 3) タービン建屋 4) 制御建屋	Sc Sc Sc Sc				

注：(7) Scは耐震Cクラス設備に適用される地震入力(PWRについても同じ)

PWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その1）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	検討用範囲	検討用範囲
Asクラス	(i) 「原子炉容器 ①原子炉冷却却材圧力バウンダリ」、「[第1回用堅水型原子炉施設に關する安全設計審査指針]に記載されている定義と同じ)を構成する配管及び機器	AS AS	AS AS	AS AS	AS AS	1) 原子炉容器・ 蒸気発生器・ 冷却却材ボンブ・ 圧力容器の支持構造物 2) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物	AS AS	1) 内部コンク リート 2) 原子炉建屋 3) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物 4) 制御建屋	S ₁ S ₂ S ₂ S ₂	格納容器ボーラ クレーン	S ₁ S ₂
	(ii) 使用済燃料を貯蔵するための設備	AS AS	AS AS	AS AS	AS AS	①使用済燃料ビット ②使用済燃料ラック	AS AS	1) 原子炉建屋 2) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物 3) 燃料取扱建屋	S ₁ S ₂ S ₂	1) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物 2) 制御建屋 3) 燃料取扱建屋	S ₁ S ₂ S ₂
	(iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための設備及び原子炉の停止状態を維持する設備	AS AS	AS AS	AS AS	AS AS	①制御構造物 及び制御構造物 タネ内管 ②通常性入系(移送系)	AS AS	1) 原子炉構造物 2) 原子炉建屋 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋	S ₁ S ₂ S ₂ S ₂	1) 内部コンク リート 2) 原子炉建屋 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋	S ₁ S ₂ S ₂ S ₂
	(iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための設備	AS AS AS AS	AS AS AS AS	AS AS AS AS	AS AS AS AS	①主蒸気・主給水系(主給水逆止弁より蒸気発生器2次側を経て、主蒸気隔離弁まで) ②輔助給水系 ③復水タンク ④余熱除去系	AS AS AS AS	1) 原子炉構造物 2) 原子炉建屋 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋 5) 海水ポンプ基 礎等の海水系を支 持する構造物	S ₁ S ₂ S ₂ S ₂ S ₂	1) 内部コンク リート 2) 原子炉建屋 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋	S ₁ S ₂ S ₂ S ₂ S ₂
	(v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力隔壁となり、放射性物質の拡散を直接防ぐための設備	AS AS	AS AS	A A	A A	①原子炉格納容器 ②原子炉格納容器 に属する配管・弁	AS AS	1) 原子炉建屋 2) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋 5) 原子炉建屋	S ₁ S ₂ S ₁ S ₁ S ₁	1) 原子炉建屋 2) 機器・配管、電 気計装設備等の支 持構造物 3) 制御建屋 4) ティーゼル建 屋 5) 原子炉建屋	S ₁ S ₂ S ₁ S ₁ S ₁

注：(1) クレーンは、通常時ビット上にはなく、運転中に基準地盤S₁が発生してビットを損傷する可能性は少ないため、基準地盤S₁に対し落下しないことを確認する。

(2) 本来、基準地盤S₁で評価する必要はないが、放射性物質の放散に対する最終障壁であるので原子炉格納容器ハウジングとのみ耐震ASクラスとする。

ただし、隔壁弁については、基準地盤S₁発生後ににおいて隔壁状態を維持するものとする。

(3) 地震によるLOCA発生を考える必要はないが、LOCA後、基準地盤S₁が発生することを考慮して当該設備は耐震Aクラスとする。

PWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その2）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	
Aクラス	(i) 原子炉冷却材圧力パウンドアリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するため、必要な設備	①安全注入系 ②余熱除去系 ③燃料取替用水タンク	A A A	①原子炉補機冷却水系 ②原子炉補機冷却海水系 ③中央制御室のしゃへいと空調設備 ④非常用電源及び計装設備	A A A	A A	1) 原子炉建屋 2) 標助建屋 3) 制御建屋 4) ディーゼル建屋 5) 海水ポンプ基礎等の海水系を支待する構造物	S ₁ S ₁ S ₁ S ₁ S ₁		
	原子炉事故の際に放射線から公衆を守るために必要な機能喪失が公衆に放射線障害を及ぼすおそれのあるもので耐震性クラスのもの									
	(ii) 放射性物質の放出を伴なうようない事故の際にその外部放散を抑制するための設備で断層A:スラス(v)以外の設備	①格納容器スプレイ系 ②燃料取替用水タンク ③アニユラス空気淨化設備 ⑤格納容器排気管 ⑥安全補機室換気設備 (工学的安全施設に含まれるもの)	A A A A A	①原子炉補機冷却水系 ②原子炉補機冷却海水系 ③非常用電源及び計装設備	A A A	1) 原子炉建屋 2) 標助建屋 3) 原子炉格納容器 4) 外部しやへい 5) 制御建屋 6) ディーゼル建屋 7) 海水ポンプ基礎等の海水系を支待する構造物	S ₁ S ₁ S ₁ S ₁ S ₁ S ₁ S ₁			
	(iii) その他	使用済燃料ピット水補給設備 (非常用)	A	非常用電源及び計装設備	A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	1) 原子炉建屋 2) 標助建屋 3) 燃料取扱建屋	S ₁ S ₁	
		炉内構造物	A							

PWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その3）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	検討用地盤動	検討用地盤動
Bクラス 高放射性物質に関連する、耐震AS及びAクラスに属する以外のもの	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されているか、又は内蔵却材を内蔵しているか、又は内蔵しうる設備	化学体種制御系のうち抽出系と余剰抽出系	B			機器・配管等の支持構造物	B	1) 検討用建屋 2) 内部コックリート 3) 原子炉建屋	S _b S _b S _b		
	(ii) 放射性廃棄物を内蔵していいる設備、ただし内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が年間の周辺監視区外の許容被ばく線量に比べ十分小さいものは除く	廃棄物処理設備、ただし、Cクラスに属するものは除く	B			機器・配管等の支持構造物	B	1) 原子炉建屋 2) 検討用建屋 3) 廃棄物処理建屋	S _b S _b S _b		
	(iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した設備で、その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被ばくを与える可能性のある設備	①使用済ピット水浄化系 ②化學体種制御系のうちCクラスに属する以外のもの ③放射線低減効果の大きい ④検討用建屋クレーン ⑤使用済燃料ピットクレーン ⑥燃料取替クレーン ⑦燃料移送装置	B			機器・配管等の支持構造物	B	1) 原子炉建屋 2) 内部コックリート 3) 検討用建屋	S _b S _b S _b		
	(iv) 使用済燃料を冷却するための設備	使用済燃料ピット水冷却系	B	①原子炉補機冷却水系 ②原子炉補機冷却海水系 ③電気計装設備	B	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	B	1) 原子炉建屋 2) 検討用建屋 3) 燃料取扱建屋 4) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	S _b S _b S _b S _b		
	(v) 放射性物質の放出を伴なうようなるために、その外部放散を抑制するための設備AS及びAクラスに属さない設備										

PWR型原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例（その4）

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		相互影響を考慮すべき設備 機械物
		適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	適用範囲	耐震 クラス	
Cクラス 放射性物質にかかわる施設で耐震A ₃ 、A及びBクラスに属さない設備に属しないもの、及び放射線安全に關係しない施設	(i) 原子炉の反応度を制御するための設備で耐震A ₃ 、A及びBクラスに属しない設備	制御盤駆動装置(スクラム機能に関する部分を除く)	C			電気計装設備の支持構造物	C	1) 内部コントロール 2) 原子炉建屋 3) 機械物 4) 制御建屋	SC	
	(ii) 放射性物質を内臓しているか、又はこれに関連した設備で耐震A ₃ 、A及びBクラスに属しない設備	①試料採取系 ②床ドレン系 ③洗浄排水処理系 ④固液化処理装置より下流の固体廢棄物取扱い設備(貯蔵庫を含む) ⑤ペイラ ⑥半半体種植御系のうちほう ⑦回収装置蒸留水側及びびほう ⑧放射性廃棄物処理系のうち、蒸留水側 ⑨原子炉補給水系 ⑩新燃料貯蔵設備	C C C C C C C C C C			機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	C	1) 内部コントロール 2) 原子炉建屋 3) 機械物 4) 固体廃棄物貯蔵庫 5) 廃棄物処理建屋	SC	
	(iii) 放射線安全に關係しない設備等	①タービン設備 ②原子炉補給冷却水系 ③補助ボイラ及び補助蒸気系 ④消火設備 ⑤主送風機・変圧器 ⑥空調設備 ⑦蒸気発生器プローダウン系 ⑧所内用空気系 ⑨燃料容器ボーラクーン ⑩その他	C C C C C C C C C			機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	C	1) タービン建屋 2) 原子炉建屋 3) 機械物 4) 制御建屋 5) 内部コントロール 6) 廃棄物処理建屋	SC	

浮体構造物の運動特性等予測技術に関する調査文献の要約

No.	文献名	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
1	文献名:洋上備蓄基地における貯蔵船の運動シミュレーション 著者名:北沢 孝宗 他 出典:第27回海岸工学論文集 P298~301 発行年:1980	防波堤に囲まれた洋上石油備蓄基地において、浮油を予測するとともに作用する波浪に対する運動を実験手法によることで、防波堤外の水深による影響を考慮する。なお、防波堤による水深を変化させながら、浮体の運動及び反力を計算を行っている。	①浮体モデル(白島石油備蓄基地の石油貯蔵船) 長さ397m、幅82m、高さ25m、喫水22m (満載時)、4.5m (空載時) ②係留装置 ドリフィン係留 ③防波堤で固っている 自然条件 ④有義波高 3.97m 4.67m ・水深 基準+2.5m ・水深 基準+10m	①冲ね寄りが一定な規則波の重複を表現し、実験から得た伝達率を掛けて防波堤の伝達率を算定する。 ②流体力は領域分割法により計算し、冲波の中心周期を用する。 ③運動(2次元3自由度運動)はRunge-Kutta-Gill法を用いて運動方程式を解く。	・防波堤内の伝達率のスベクトル及び時系列のデータ ・浮体構造物の3自由度運動 ・フェンダー反力	防波堤内の伝達率が計算値よりは、長周期運動に対しては、実験値では、実験精度は良好である。 防波堤外の水深が低い場合は、長周期運動に対しては、実験値では、実験精度は良好である。 防波堤外の水深が低い場合は、長周期運動に対しては、実験値では、実験精度は良好である。	
2	文献名:任意反射率岸壁に非線形係留された船体の不規則運動解析 著者名:清川 哲志 他 出典:第32回海岸工学論文集 P657~661 発行年:1985	岸壁前面に係留された船体(船体)の運動は、岸壁と船体間の流体力の干渉の影響を受けた。浮体の運動計算に干渉の影響を含む流体力を用いて逐次積分法を適用し、遅延関数を用いた逐次積分法により流体力を求め、ニューマーク・ベータ法により時間領域で解く。	①10万トンタンカー 長さ270m ②係留ロープとフェンダー(岸壁前面係留) ③自然条件 有義波高2m、有義波周期10秒	・浮体構造物の3自由度運動	①不規則波はBretschneider光易型を用いる。 ②インパルス応答の量込み積分により周波数領域の流体力を時間領域に変換する。 ③運動(2次元船体運動)は、遅延関数を用いた逐次積分法により流体力を求め、ニューマーク・ベータ法により時間領域で解く。	岸壁反射率の低減は必ずしも運動の低減に結びつかない場合がある。	

波浪応答解析評価技術（その2）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
3	文献名：石油貯蔵船のドルフィン防舷材変型量の観測及びシミュレーション解析 著者名：熊野 厚 他 出典：日本海事協会誌 発行年：1989 P.71～91	上五島石油備蓄基地において、浮体に作用する風、波などの気象データと係留船の動揺、防舷材の変形などを観測する。係留浮体の運動とともに、レーシヨン手法をシミュレーション手法を開発したものである。	①浮体モデル（上五島石油備蓄基地の石油貯蔵船） 長さ390m、幅97m、 高さ27.6m ②係留装置 ドリフィン係留 ③防波堤 湾口側を含む2方向を防波堤で囲っている ④自然条件 1986年から1988年までの風、波などの気象データ	①波はBretschneiderのスペクトルにあてはめる。 ②風はDavenportのスペクトルをもつ風速の時系列を作成する。 ③漂流力（時刻歴）はHus & Blenkarnの方法で求められる。 ④周波数を固定し流体力系数を一定とする方法（FD法：Frequency Domain）と時間領域で時間毎の流体力係数を選択する方法（TD法：Time Domain）のうちから任意に選択する。時系列の浮体運動はRunge-Kutta-Gill法を用いて時系列で計算する。係留力はこの結果を用い係留特性のみを求めるシミュレーションを行う。	・浮体構造物の6自由度運動 ・フェンダーの変形量	前後搖れに関しては、FD法、TD法とも実測値に対する模擬精度は良好である。左右搖れに関しては、TD法に比べFD法の方が実測値に対する模擬精度は良い。
4	文献名：弾性変形を考慮した長大浮体の波浪中動搖特性の検討 著者名：白石 恒 他 出典：海岸工学論文集 第41巻 発行年：1994 P.890～900	弾性浮体の彈性変形を考慮した波浪中応答解析を行い、剛体モデルとの比較、剛性の変化による浮体応答の特性的違いを検討したものである。	①浮体モデル 長さ1000m、幅20m 高さ10m、奥水5m ・弾性体モデル、剛性100倍の弾性体モデル 及び剛体モデル ②自然条件 水深 50m	①鉛直方向の動搖解析は、板の振動理論を用い、有限要素法により運動方程式を解く。 ②水平方向の動搖解析は、構造物を単純支持梁と仮定し、有限要素法を用いて水平方向変位と断面力を求め	・浮体構造物の変位（上下、水平方向） ・浮体構造物の曲げモーメント ・浮体構造物の断面力	剛性100倍弾性体モデルの運動は、水平方向で振幅が大きくなり、上下揺れする。剛体モデルが卓越する。弾性体モデルよりも上下変位が大きくなる。

波浪応答解析評価技術（その3）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
5	文献名：多方向不規則波・変動風作用下における複数プランクと非線形係留力の予測 著者名：池野 正明 他 出典：海岸工学論文集 第42巻 発行年：P976～980	ドルフィン係留性に限らず、模型浮体の動揺特性を用いて、複数プランクトを配置した場合の係留力を算定を行つたものである。	①浮体モデル 長さ142m、幅142m ②係留装置 ドルフィン係留 ③自然条件 ・有義波高2m、有義波周期10秒 ・有義波高11m、有義波周期15秒 ・風(変動風)を考慮する。 ・水深 24m	①多方向不規則波は、周波数と波向の異なる成分波の重ね合わせと合わせて合算する。防波堤には位相遅れがあり存在する。場合に考慮する。場所によって追加する。 ②入射波の周波数スペクトルは、Bretschneider光易型スペクトルを用い、方向分布関数には光易型方向関数を用いる。 ③係留装置は非線形係留力の特性を2種類の線形バネの合成としてモデル化する。 ④流体力係数は、複数浮体の境界値を同時に満たすよう境界要素法を用いて求められる。 ⑤浮体の運動の影響を考慮して断面2次元運動を解く。	・2基ブランケットの並列配置(6モード)のデータ ・係留力	解析の結果、浮体を2基に相互干渉効果がある。ケースには頭著な非線形性を示した。
6	文献名：浅海域に設置された超大型浮体式海洋構造物に関する弹性応答の特性を把握するための計算手法の開発を行つたものである。 著者名：増田 光一 他 出典：海岸工学論文集 第43巻 発行年：P946～950	超大型浮体式海洋構造物について、浅海域における弹性応答の特性を把握するための計算手法の開発を行つたものである。	①浮体モデル ・長さ2000m、幅500m ・海水10m ・弹性体モデルと剛体モデル ②自然条件 ・水深50m、30m、15m	①浅奥水理論を適用し、浮体の奥水は無視する。水域は極めて狭いとし長波理論を適用する。 ②波漂流力は圧力分布法を用いて計算する。 ③流体力は長波理論に基づき、よりラクラクション問題を解く。発振波ボテンシャルから流体力を計算し、係留力は考慮しない。	・浮体構造物の弹性変形及び鉛直変位 ・定常波漂流力	弾性体モデルでは、波長と浮体長さの比率が彈性に大きく影響するが、水深によると浮体形状及び漂流力に影響する。 剛体モデルの漂流力は、水深が小さくなると大きく作用するという傾向が頭著である。

波浪応答解析評価技術（その4）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
7	文献名：沿岸域に係留された浮遊式建築物の数値シミュレーションと係留設計への応用に関する基礎的研究 著者名：大澤 弘敬 出典：日本大学博士論文 発行年：1996	カテナリ一係留及びドルフィン係留された浮体による風、波が作用した場合の浮体の運動及とどもに、それぞれの係留方式について外力条件を変化させて計算を行い、カテナリ一係留とドルフィン係留による運動応答特性の違いについて検討を行ったものである。	①浮体モデル ・長さ150m、幅50m、 ・奥水10m ②剛体モデル ③係留装置 カテナリ一係留及び ドルフィン係留 ④自然条件 ・有義波高2.0m、有義 波周期8.5秒 ・平均風速20m/s ・水深20m	①不規則波はBretschneider 光易型スペクトルを用いて表 現する。 ②流体力は三次元特異点分布 法により求めた結果を時々 刻々自動的に選択する。 ③係留力は修正カーテナリ一理 論及びフェンダーの反力特性 履歴を3つの領域に分割し、そ れぞれの部分を線形化する。 ④運動は6自由度運動方程式 小変位仮定のもと運動方程式 を解く。ニューマーク・ベ ータ法により時系列を計算す る。	・浮体構造物の3自由度運動 ・係留力	前後揺れに関しては、カ テナリ一係留では、カ テナリ一係留をするのに対 して、ドルフィン係留では 1次応答が支配的であ り、ドルフィン係留の変 位量はカーテナリ一係留の 半分以下である。
8	文献名：実海域における係 留浮体構造物の動 揺特性に関する実 証観測 著者名：巻幡 敏秋 他 出典：海岸工学論文集 第44巻 P 871～875 発行年：1997	白島石油備蓄基地の石油 貯蔵船の動揺及びドル フィン係留の防舷材の変 形、反力を測定し、数値 シミュレーション結果と の比較・検討を行ったも のである。	①浮体モデル（白島石油 備蓄基地の石油貯蔵船） 長さ397m、幅82m、 高さ25.4m、奥水4.1 m ②係留装置 ドルフィン係留 ③防波堤 防波堤で四方を囲って いる ④自然条件 波、風などの気象 データ	①防波堤内の波は防波堤外で 観測した波高から波高の多重 反射係数及び波周期の変換係 数により推算する。パワース ペクトリは光易型IIとする。 ②流体力係数は一定値と仮定 する。 ③係留力は防舷材反力の測定 結果を用いる。 ④運動（6自由度運動）はすべ て小変位と仮定し、Runge- Kutta-Gill法により時系列を 求める。	・貯蔵船の動揺量 ・防舷材の変形量 及び反力	防舷材の変形量及び反力 に関する模擬精度は±20%以 内であった。

波浪応答解析評価技術（その5）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
9	文献名：弛緩系留された浮遊式構造物の非線形応答の極大値と係留設計に関する基礎的研究 著者名：山本 憲寿 他 著出 典：海岸工学論文集 第44巻 発行年：1997	カテナリー係留された浮体構造物の非線形応答特性を把握し、浮体構造物の応答及び係留索張力の最大値の定量的な推定法の検討を行ったものである。	①浮体モデル ・長さ130m、幅40m ・奥水1.83m ・剛体モデル ②係留装置 ③自然条件 水深5.7m	①不規則波はBretschneider光易型スペクトルを用いて表現する。 ②流体力は三次元特異点分布法により求め、時々刻々の係数を自動的に選択する。 ③係留力は修正カテナリーカーブを用いて求める。 ④運動は6自由度運動とともに運動方程式を解く。	・浮体構造物の左右揺れと係留索張力の最大値分布、超過確率分布、超過確率分布と係留索張力の正規分布の超過確率分布	左右揺れの最大値の超過確率分布は、ガウス分布、係留索張力分布は、対数正規分布となる。左右揺れと係留索張力の超過確率分布は、どちらもガウス分布となる。
10	文献名：超大型弾性浮体の係留設計に関する研究 著者名：佐野 和彦 他 著出 典：第14回海洋工学シンポジウム 発行年：1998	ドルフィン係留された超大型浮体に對して、弾性影響を考慮した係留力の計算を行なうとともに、数値シミュレーションによる浮体運動とフェンダーフラッシュ運動列を求め、統計的処理により最大値の超過確率分布を求めたものである。	①浮体モデル ・長さ1000m、幅200m ・剛体モデル及び弾性体モデル ②係留装置 ③自然条件 有義波高4m、有義波周期8秒	①1次波強制力は波振幅とインパルス応答関数の積分により求め、2次変動波漂流力を用いて求める。2次漂流力を用いてするところにより、弾性影響を考慮する。3次元特異点分布とモード展開法により自求め、時々刻々の係数を自動的に選択し運動方程式を解く。 ②流体力は三次元特異点分布と剛体モデルの超過確率分布は、ガウス分布となる。 ③係留力はフェンダーの反力特性履歴を3つの領域に分割し、それぞれの部分を線形化したモデルを用いる。 ④運動は6自由度運動とともに運動方程式を解く。	剛体モデルと弾性体モデルの Surge及びフェンダーの反力 上記の最大値 分布の超過確率分布	超大型浮体の係留力は、浮体に弹性の影響をとり入れると、剛体モデルの場合より減少する。場合大型浮体モデルを用いたときに重要な取り扱うためには、浮体モデルを用いた設計が過剰である。超過確率分布は、超大型浮体モデルと剛体モデルのどちらもワイル分布となる。 Surgeの最大値の超過確率分布は、弾性体モデルと剛体モデルどちらもガウス分布となる。

波浪応答解析評価技術（その6）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
11	文献名：大規模緊張係留浮遊式人工島の期待総費用最適化 著者名：濱本 卓司 他 出典：日本建築学会構造系論文集 第515号 発行年：P177~184 1999	緊張係留された弾性浮体は、波浪による浮体の変形が係留索による。そのため、浮体の剛性と係留索の強度との組合せを最大限に選ぶことにより、総費用（建造、修復）を最小化する設計法を提案したものである。	①浮体モデル ・半径1000m、高さ50m ②弹性体モデル ③係留装置 ④自然条件 ⑤不規則波 ・風速46.5m/s（再現期間200年） ・水深200m	①風速は再現期間200年に対する値として極値III型分布から求める。 ②不規則波はピアソン・モスコヴィッチ型を探り、短期の作用時間を20分と仮定する。 ③線形ボテンシャル理論と領域分割法により浮体動揺に伴う流体力を求める。 ④線形ボテンシャル理論と領域分割法により流体の動水圧成分を求める。 ⑤浮体の彈性変形（上下変位）はウエットモードを合成して求める。 ⑥浮体と係留索の応力限界を設定し、人工島上の位置に對する条件付き破壊確率を求める。	・浮体構造物と係留索の破壊確率	浮体高さと係留索断面をパラメータとして、その組合せに対する破壊確率、期待修復費、期待総費用を用いて、許容破壊確率率を以内外に計算を行う。

地震・海震応答解析評価技術（その1）

No.	文献名・著者名・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
1	文献名：浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性（その1） 著者名：萩原 豊 他 出典：電力中央研究所 研究報告:J85028 発行年：1986	浮体モデルを用いた振動台加振実験により防護堤内閉水域設置された無系留箱型浮体への地震動伝達特性についての定性的な見方が得られている。また、地盤動伝達特性を有限要素法により解析し、実験結果で検証が行われたものである。	①浮体モデル 浮体モデルとしては剛体モデルで、長さ1m、幅0.5mの剛体モデルであるが想定している浮体構造物の規模は当該モデルの100倍ないしは200倍のものである。 ②係留装置 無系留 ③防波堤 防波堤は浮体モデルを浮かべる水槽で模擬している	電中研ですでに開発してあるダムの地震応答による浮体の復元力を用いて時間領域で地盤動伝達特性（流体-構造物相互作用、流体力などを考慮）が行われている。	・浮体の上下加速度及びその応答倍率 ・浮体の水平加速度及びその応答倍率	実験により地盤動の水平短周期成分成しないこと、地盤動の水平長周期成分によれば、地盤動の上下浮体の振動が確認されることはほぼそのままと、地盤動はほぼそのまま離れることが確認される。浮体が防護堤から離れるほど免震性は高く、浮体の奥水が浅いほど免震性が高くなる。浮体が海上に上昇するほど、が確認された。解析結果は、実験結果に表された浮体の振動特性を水平・上下加振共に良く表している。
2	文献名：浮揚式原子力発電所浮体・建屋の地震応答解析手法の開発と実験による検証一 ¹⁾ 著者名：萩原 豊 他 出典：電力中央研究所 研究報告:J88050 発行年：1988	防護堤内閉水域設置された係留箱型浮体の周波数応答解析と時刻歴応答解析法を用いてより地盤動伝達特性を検証し、振動台加振実験により解析法の適用性を検証した結果について述べたものである。	①浮体モデル 浮体モデルとしては平面寸法140cm×140cm、奥水12cmのモデルであるが、想定している浮体構造物の規模は当該モデルの100倍のものである。 ②係留装置 ドルフィン係留（定反力型防舷材） ③防波堤 防波堤は浮体モデルを浮かべる水槽で模擬している	電中研ですでに開発してあるの地震応答解析手法に基づく地盤動の相互作用（流体と構造物の相互通じ）を拡張して、浮体構造物を考慮するが、特有な浮力の効果及び水表面波を考慮する。装置の非線形な復元力特性、閉鎖水域内に浮揚する浮体構造物の周波数応答解析と時刻歴応答解析を行っている。	・浮体の変位及び加速度 ・係留水域の波高	周波数応答解析法は、浮体動揺の卓越周期とモード形について実験結果をよく模擬できることが確認された。時刻歴応答解析法は、地震時の浮体の動態特性と免震効果（加速度の低減効果）に関する実験結果を精度良く再現できた。防舷材使用時の浮体の動搖特性についても、非線形時刻歴応答解析により再現できる見通しが得られた。

地震・海震応答解析評価技術（その2）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
3	文献名：浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性（その2）－底部に空気室を有する浮体の上下免震特性－ 著者名：萩原 豊 他 出 典：電力中央研究所 研究報告：J87011 発行年：1987	空気室を有する浮体の上下免震性を評価する簡単な理論用いた振動台加振実験により、浮体への把握さらには浮体の上下免震性について、その検証を行った。また、浮体構造物の検証を行った。	①浮体モデルとして浮体モデルは、平面寸法40cm×40cm、高さ9cmのモデルであるが、実機スケールとして想定している浮体構造物は、110万kW級の浮揚式原子力発電所で、平面寸法150m×150m（空気室平面寸法142m×142m）、奥行き15mのものである。 ②係留装置として白加振実験における無係留であるが、浮揚式原子力発電所を想定したモデルでは、ドルフィン係留をしている。	底部に空気室を有する浮体を、浮体変位と水面変位との関係を、静水圧による復元力、静水圧による運動方程式を導いており、以下のように、浮体構造物の仮定を設けている。 ①水は非圧縮性完全流体、浮体は剛体、運動は微小とする。 ②水域内の水量は一定とする。 したがって、空気室下面の水位の上下に伴い、浮体周辺の水面は、逆相で上下する。 ③水面は全て水平を保ち、表面波は生じないものとする。 ④慣性力は、浮体の質量によるもののはか、水の上下動による慣性力も近似的に考慮する。ただし、空気の慣性力は考慮しない。 ⑤復元力は、空気室を単なる線型なばねとして考えたときの反力と、静水圧による復元力を考慮する。	・浮体構造物の上下加速度の応答倍率 ・空気室水面の上下加速度の応答倍率	実験より浮体の上下加速度の応答倍率は、2次固有振動数で共振点が認められ、2次固有振動数より高い振動数では、1よりも小さいほぼ一定な値となる。 解析結果は、実験で観測された現象を再現でき、固有振動数、応答倍率も良好な傾向が確認された。 浮揚式原子力発電所を想定した解析では、空気室を設けることによる浮揚式プラントの上下動短周期成分の床応答を地上式プラントの1/4程度に低減できる見通しが得られた。

地震・海震応答解析評価技術（その3）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
4	文献名：海震を受ける浮遊式海洋人工島の応答挙動（浮遊弾性円板の浮体構造物相互作用解析その3） 著者名：濱本 卓司 他 出典：日本建築学会構造系論文集 第448号 発行年：1995	線形ボテンシャル理論に基づき領域分布法を適用して、海底面の応答として剛体運動と弾性変形の連成で応答するものである。	①浮体モデル ・半径1000m、厚さ50m ・コンクリート製バー ジ ②係留装置 ③自然条件 ・海中での疎密波速度 1500m/s ・水深200m	①海水は渦なし、非粘性、非圧縮性であるが、海底面の上下振動により生じる疎密波の伝播を扱う場合のみ圧縮性を考慮する。 ②浮体の下面に作用する動水圧は、浮体を釣り合い位置に固定した状態での海底面の上下動により生じる動水圧と、海底面の上下動が生じる動浮体の運動によつて生じる動水圧成分の和とする。 ③線形ボテンシャル理論に基づき領域分割法を用いて解析解を誘導する。	・浮体構造物の下面に作用する動水圧 ・浮体構造物の変位	浮体の応答は長周期成分を多く含む上向きになり、応答への各モードが支配的である。テンショングレグによる係留は上下地盤動に対するものは大幅な応答値の増加をもたらし逆効果である。
5	文献名：天現横浮遊式海洋人工島への風波と海震に対する大規模浮遊式人工島の応答解析を拡張し、確率論的アプローチにより両者の荷重効果を共通の土俵で合理的に評価する方法を示したものである。 著者名：濱本 卓司 他 出典：日本建築学会構造系論文集 第4481号 発行年：1996	風波と海震に対する大規模浮遊式人工島の応答解析を拡張し、確率論的アプローチにより両者の荷重効果を共通の土俵で合理的に評価する方法を示したものである。	①浮体モデル ・半径1000m、厚さ50m ・コンクリート製バー ジ ②係留装置 ③自然条件 ・地盤及び風波（再現期間：50, 100, 200, 500, 1000年） ・水深 200m	①海震 地盤波は本来、非定常過程であるが本研究では地盤波の定常部のみを対象として応答表現に分析を行う。荷重の短時間表示の上下動には海底面にオースベクトルの加速度として修正金井・多治見スベクトルを用いる。荷重の長時間表現においては地震ハザード曲線を用いる。 ②風波による短時間の海面の変動を定常確率過程とみなして解析し、計算ではPerson-Moskowitzの波高スペクトルを用いる。荷重の長期表現としてはWeibull分布を採用する。	・浮体構造物の変位 ・浮体構造物の加速度	風波と海震の荷重効果を評価した結果は、日本近海に大規模浮遊式人工島を設置するうちには風波の荷重効果が支配的であるが、再現期間が長くなる荷重につれて海震にようする効果が極めて大きくなる。

地震・海震応答解析評価技術（その4）

No.	文献名	著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
6	文献名：海震の3次元伝播性	著者名：清川 哲志 他 出典：海岸工学論文集 第42巻 P826～830 発行年：1995	3次元現象としての海震の特性について3次元理論を導き、数値計算に基づいて検討するとともに、海震によつて生じる動水圧を比較的簡便に求められたものである。	①自然条件 ・水深 1km ・海底の波源 長さ 20km, 幅 1km	①流体は非粘性、非回転の圧縮性流体であると仮定する。 ②流体運動は速度ボテンシャルによつて定義し、それを周波数領域で解析する。 ③速度ボテンシャルの境界値問題を解くにあたっては点源による解であるが、その際は圧縮性による進行波成分の他に表面波成分も考慮して導く。次に速度ボテンシャルに関する積分表示式を求める、速度ボテンシャルに關する近似式を算出する。	・動水圧	海震は鉛直方向には複雑な構造をもちながら水平方向には放射状に伝播し、波源から遠ざかるにつれて減衰する。長さ20km、幅1kmの波源によつて発生した海震は数百km以上伝播する。
7	文献名：浅海域における海震について	著者名：清川 哲志 他 出典：海岸工学論文集 第43巻 P966～970 発行年：1996	浮体の真下が震源である場合も考慮した海震ボテンシャルを示し、これによつて用いた数値計算にしたがい、浅海域での海震の特徴を明らかにしたのである。また、從来の深海域で発生する海震と比較しながらしてい、る。	①自然条件 ・水深 20m, 200m ・海底の波源 長さ 20km, 幅 1km	①流体を非粘性、非回転の圧縮性流体であると仮定し、しき速度ボテンシャル理論に基づく海震の速度ボテンシャルを導く。 ②支配方程式は3次元ヘルムホルツ方程式によつて定義し、境界値問題を解くにあたっては圧縮性流体中の点振数を用いている。	・動水圧	海震による動水圧分布を3次元的に解析できる。水深が深くなるにつれて圧縮性の影響が強くなる傾向がある。

地震・海震応答解析評価技術（その5）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
8	文献名：大型弾性浮体構造物の地震応答特性について 著者名：森田 知志 他 出 典：海岸工学論文集 第44巻 P1001～1005 発行年：1997	重複反射理論に基づいて浮体構造物の地震応答において外力となる水中圧力波のするふるまいをもとに、大型浮体を弾性床面上の梁理論によってモデル化し、モード解分析法とグリーン関数法を用いて振動応答の定式化を行ったものである。	①浮体モデル ・幅1000m、喫水8m ・弾性体モデル ②自然条件 水深 100m	①地震波は海底地盤中を斜め上方に向かって伝播し、海底に到達した入射初動波の一端部が屈折して地中に伝わり、水中圧力波として浮体構造物に作用する。 ②浮体構造物に水中圧力波が作用した状況下で発生する回折波の速度ボテンシャルの算定式は、著者によつて求められる。 ③海中ににおける波動運動は速度ボテンシャルで表わされるものとする。 ④振動方程式はラグランジユの方程式を利用して動圧力が作用している状況下での振動方程式を導く。	・浮体構造物の変位	地盤から海中へ伝播する直角入射の場合が最も大きく、従つて次第に減少する。浮体の振動応答値は海面での水粒子のそれにはば等しく、条件によっては地盤上での鉛直動の応答値を大きく上回る。
9	文献名：超大型浮体構造物における海震時間応答推定法に関する研究 著者名：清水 建一郎 他 出 典：海岸工学論文集 第44巻 P1021～1025 発行年：1997	超大型浮体構造物に働く海震荷重の数値計算法を開発し、その数値計算結果と境界積分方程による数値計算結果との比較を行う。 その有用性を確認したものである。	①浮体モデル ・幅710m、高さ2m、 ・弾性体モデル ②自然条件 兵庫県南部地震、宮城県沖地震、十勝沖地震	①流体是非粘性、非回転とするが圧縮性を考慮する。 ②超大型浮体構造物を想定するため、浮体構造物の幅に比べ十分小さなとし、浅喫水の仮定で計算を行う。 ③算出した直接フーリエ逆変換式を用いて時間領域での解析を行う。	・浮体構造物（剛体）底面の圧力 ・浮体構造物（弾性体）の上下変位	超大型浮体構造物の基本特性に働く海震荷重の計算による近似式による数値計算結果と比較するこにより、本近似式の有用性を確認できた。

地震・海震応答解析評価技術（その6）

No.	文献名 著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
10	文献名：風波と海震に対する荷重効果を評価する手法を拡張して、係留索剛性を規定する手法を提案したものです。 著者名：濱本 卓司 他 出典：日本建築学会構造系論文集 第498号 発行年：1997 P177～184	波浪と海震に対する荷重効果を評価する手法を拡張して、係留索剛性を規定する手法である。	①浮体モデル ・半径1000m, 厚さ50m ・コンクリート製バー ②係留装置 ・テンションレグ係留 ③自然条件 ・地震及び風波（再現期間：50, 100, 200, 500, 1000年） ・水深 200m	①海震 ・海震の荷重強さと発生確率は尾崎・北川・服部の地盤基盤における極値II型分布を用いる。 また、海震に関するパワースペクトル密度関数は修正正金井・田治見スベクトルを用いる。 ②風波 ・波浪の荷重強さと発生確率は牧野・渡壁の自由大気の最大平均風速によって算出する。また、ト波浪に関するパワースペクトル密度関数はPierson-Moskowitzを用いる。	・波浪及び海震のパワースペクトル ・係留索の引張応力 ・係留索の破壊確率	係留索は、海震に対しては係留索の破壊確率も小さく、係留索剛性の増加と共に破壊確率は増加するが、ある点をピークとして再び減少に転じる。
11	文献名：弾性浮体に作用する海震荷重 著者名：吉田 宏一郎 他 出典：第14回海洋工学シンポジウム 発行年：1998 P175～180	海震現象の把握及び弹性海震により生じる挙動の解析を行ったものである。また、弾性流体を考慮した周波数領域での振動実験により浮体の挙動の把握を行っている。	①浮体モデル ②弾性体モデル ③自然条件 ・水深 1500m ・地盤幅 1500m	重力を考慮した圧縮性流体を表わす式を解くことで表面の影響を考慮する。また、浮体部分をバネ値でおきかえ、運動学的条件と同様の形とする。	・浮体構造物の変位 ・海面変位	海震によって生じる疎密波では、浮体と海底地盤とが共振し、共振周波数では水深によって決まります。また、高周波数では、浮体底面は自由反発する。実験により局部の変形が浮体全体の動搖を引きおこす場合があることが確認された。

地震・海震応答解析評価技術（その7）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
12	文献名：時間領域数値解析法による海震特性に関する研究 著者名：肥後 靖 他 出典：第14回海洋工学シンポジウム P167～174 発行年：1998	海震現象のメカニズムを解明するために、二次元海波動場方程式に基づく時間領域直接解法を用いて海震特性を検討したものである。	①浮体モデル ・幅 5m ・弾性体モデル ②自然条件 ・水深 10m ・地盤振動幅 10m	①海底地盤を単位加速度振幅及び地盤上の速度ボテンシャルを解いた場合の浮体の運動方程式を解いて求められる。 ②積分方程式の妥当性を検証するためPoint source 及び Point doublet が自由波動場で周期的に振動した場合の解を求め、周波数領域の定常解との比較を行う。	・浮体構造物の加速度及び変位	海震特性としては、地盤が共振振幅が全般的に大きくなる。地盤が浮体に比例して、その荷重は全般的には瞬間に大きくなる。地盤が共振周波数以外で振動した場合、荷重は全般的には小さいが、過渡状態では瞬間に大きくなる。この場合、振動が長く継続すると、荷重は小さくなつて落ち着くと考えられる。
13	文献名：海震による超大型浮体式構造物の時刻歴応答推定法に関する研究 著者名：宮島 省吾 他 出典：第14回海洋工学シンポジウム P181～185 発行年：1998	海震による浮体幅方向の上下加速度や変位、曲げモーメントの大きさを推定するために、超大型浮体の時刻歴応答を考慮する簡便な方法について推定したものである。	①浮体モデル ・幅1710m, 奥水0m, ・弾性体モデル ②自然条件 ・水深 20m	①流体は非粘性、非回転であるが圧縮性を考慮する。 ②振動地盤は水平剛体であるとし、海震時の浮体の弹性応答をを支持した2次元計算して得られた浮体モーメントを浮性梁の応答に置き換えて計算して各方向の上下加速度や曲げモーメントを算出し、上下加速度と実験の成分等の地盤上下加速度に対する計測結果の相関性を考慮して掛け合わせた後、フーリエ逆変換を利用して各応答の時系列を作成する。	・浮体構造物の加速度、変位、及び曲げモーメント	海震による超大型浮体の上下変位、加速度は、ほぼ海底地盤と同じ変位、加速度で一様に上下し、ほとんどの彈性変形する。モーメントも非常に小さいことが予測される。

津波応答解析評価技術（その1）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
1	文献名：津波作用下における浮体構造物の非線形挙動解析 著者名：池野 正明 他 出典：海岸工学論文集 第43巻 P.951～955 発行年：1996	大型浮体構造物に津波が作用した場合の浮体の挙動解析を行っている。海底地震によつて発生した津波の伝播を用いて浮体運動解釈を行つたものである。	①浮体モデル ・長さ142m 奥行き15.5m ②係留装置 ・ドルフィン係留 ③自然条件 ・水深 24m ・マグニチュード8グラスの海底地震による津波	①津波外力は地盤までの津波の伝播から係留水城までに基づいて非線形長波理論に基づいて解く。 ②この結果を基に境界要素法を用いて波力を求める。 ③流体力は浮体の運動を考慮して外力項を解くことにより、外力項に取り込んでいる。 ④強非線形ボテンシャルモデルに基づき、浮体の運動の影響を考慮して断面2次元運動を解く。断面2次元運動として、3自由度運動を境界要素法により時間領域で解く。	・浮体構造物の3自由度運動	津波の伝播シミュレーションでは、水深20m程度の海域において最大水位上昇量が2m、最大水位下降量が-1m程度となつた。マグニチュード8クラスの地震の場合、浮体の鉛直上向き変位は4m程度であるのにに対し、水平変位は±0.4m、回転角度は±0.5°と小さい。
2	文献名：津波による沿岸域に係留された浮体構造物の運動ならびに係留索張力応答推定法に関する研究 著者名：増田 光一 他 出典：第14回海洋工学シンポジウム P.161～166 発行年：1998	沿岸域に押しあげられる津波の第一波を孤立波と仮定し、沿岸域にカーテナリーリー係留された浮体構造物に係留索が作用した場合に係留索張力の算定手法を実験適用する。浮体構造物の運動及び係留索張力の算定手法とともに、実験結果と計算結果との比較を行つたものである。	①浮体モデル ・長さ100m、幅48m、高さ10m、奥行き6m ②係留装置 ・カーテナリーリー係留 ③自然条件 ・水深 20m～30m	①津波を孤立波と仮定し、境界要素法を用いて波強制力を算定する。 ②流体力はCC法 (Equation of Motion with Constant Coefficient) を基本とし、減衰係数、付加質量を特異点分布法により求めめる。 ③係留索の伸びを考慮して修正カーテナリーリー理論により求めめる。 ④浮体構造物の運動は微少変位と仮定し、ニューマーク・ベータ法により時間領域で計算する。	・浮体構造物の3自由度運動 ・係留索張力	浮体構造物の運動及び係留索張力の解析結果は、実験結果に対して良い相関を示した。

津波応答解析評価技術（その2）

No.	文献名・著者名・出典・発行年	概要	対象モデル	解析手法	解析値の種類	結果等
3	文献名：大規模浮体の孤立波に対する係留力と上下応答の実験 著者名：関田 欣治 他 出典：第14回海洋工学シンポジウム 発行年：1998	大規模浮体を想定し、津波（孤立波）に対する上・下弹性応答及び係留力について、浮体前面に防波堤を置いていた実験を行った。津波に関する基本的な特徴を解明したものである。	①浮体モデル ・長さ500m ・弹性体モデル ②係留装置 ・係留索 ③防波堤 ・浮体前面に防波堤を設置	①津波（孤立波）を流れと考 えて流体抵抗力を算定する。 ②流れによる浮体の流体力抵抗は、前後面に作用する圧力抵抗と側面・底面に作用する 摩擦力から算定する。 ③圧力抗力係数は Schlichtingによるレイノズ ル数との関係により求める。 ④摩擦抗力係数は実験値を用 いて同定する。	・津波流速及び流 体抵抗力（防波 堤がある場合と ない場合） ・浮体構造物の上 下変位	防波堤を設置することに より、係留力を低下する 効果が確認された。 防波堤による流速が30%程度に減 じられる。 孤立波も正弦波と同様に 防波堤によつて波力が低 減されることが確認され た。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバー	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トント	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.48422	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	
3.7 × 10 ¹⁰	1	

吸収線量	Gy	rad
1	100	
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討(2)

—浮体式原子力発電施設の安全設計の検討— (受託研究)