



JP0150254

JAERI-Research
2000-063



原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討(1)
－浮体式原子力発電施設の概念検討－
(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.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討（1）

— 浮体式原子力発電施設の概念検討 —

（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）

原子炉施設の海上立地方式は、浮体式、着定式及び埋立式に分類することができる。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。）は、免震性、設計標準化、工期短縮など多くの特長を有している反面、陸上原子力発電所とは異なる安全体系の確立が必要であるとされている。しかしながら、これらの検討はこれまで必ずしも十分行われていない現状にある。

本報告書では、浮体式原子力発電施設の安全を設計上どのように考慮すべきかを検討するために、検討対象とする浮体式原子力発電施設の概念検討及び浮体構造物の安定性評価に関する調査を行った結果を述べている。

前提として、日本の外洋に面した水深20m程度の沖合で、防波堤により得られる静穏海域に、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係留することを想定した。

調査検討の結果、浮体構造物は長さ300m×幅80m×高さ35m、総排水量約30万トンの規模となり、既存の造船所のドックで十分建造し得ることがわかった。また、波浪等による浮体構造物の運動シミュレーションを実施した結果、防波堤に防護された浮体構造物は、原子炉施設を搭載するのに十分な安定性を有していることが確認された。

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 (1)
— Conceptual Design Study of FNPP —
(Contract Research)

Noriaki YABUUCHI, 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)

Offshore siting methods for a nuclear power plant are classified into three types as a floating type, a settled type and a land reclamation type. The floating nuclear power plant (FNPP) has a number of advantages, such as seismic isolation, standardization of design and manufacturing, and reduction of construction period. It is, however, required for FNPP to establish the safety standards, which are different from ones for land based nuclear power plant. Investigations for this subject have not been conducted sufficiently.

In this report, design study on a concept for FNPP and a review on stability evaluation for the floating platform, which were performed in order to study the safety concept of the FNPP are described.

The basic concept for FNPP is as follows: The FNPP is sited approximately 1 ~ 2km off the sea coast on the open sea with water depth of about 20m and it is moored on protected sea by the breakwater, it provide a floating platform for a 1,100MWe class PWR plant.

The results of design study show that the floating platform for 1,100MWe class PWR plant of 300m(L)×80m(W)×35m(H), and displacement of approximately 300,000 ton can be constructed in a dockyard. This floating platform guarded by the breakwater is found to be stable enough to install the nuclear power plant from the analysis simulating the movement of the platform due to sea wave or wind.

Keywords: Offshore Siting, Floating Nuclear Power Plant, Conceptual Design,
Floating Platform

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及び特長	1
2.1 浮体式の分類	1
2.2 施設の概念	2
2.3 施設の特長	3
3. 浮体式原子力発電施設の概念設計例	4
3.1 基本条件	4
3.2 浮体構造物の検討例	4
3.3 係留装置の検討例	5
3.4 防波堤の検討例	6
3.5 全体配置の検討例	7
4. 浮体運動のシミュレーション	9
4.1 波浪、風による浮体運動シミュレーション	9
4.2 海震による浮体運動シミュレーション	13
5. まとめ	14
謝 辞	15
参考文献	16
付録Ⅰ 浮上式原子力発電プラント AGS の概要	56
付録Ⅱ 波浪、風による浮体運動シミュレーションの詳細結果	59
付録Ⅲ 海震について	67

Contents

1 . Introduction	1
2 . Concept and Feature of Floating Nuclear Power Plant (FNPP)	1
2.1 Classification of Floating Type	1
2.2 Concept of FNPP	2
2.3 Advantages of FNPP	3
3 . Example of Conceptual Design of FNPP	4
3.1 Design Condition	4
3.2 Floating Platform	4
3.3 Mooring Equipment	5
3.4 Breakwater	6
3.5 FNPP Layout	7
4 . Simulation of Platform Motions	9
4.1 Platform Motions due to Wave and Wind	9
4.2 Platform Response to Seaquake	13
5 . Conclusion	14
Acknowledgements	15
References	16
Appendix I Description of the Atlantic Generating Station (AGS)	56
Appendix II Simulation Data of Platform Motions	59
Appendix III Seaquake	67

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、浮体式原子力発電施設特有の設計思想及び設計方針を明確にするために、まず、検討対象とする浮体式原子力発電施設の概念を検討したものである。

2. 浮体式原子力発電施設の概念及び特長

2.1 浮体式の分類

浮体式は一般的に浮上式、半潜水式及び潜水式に分類することができ、浮体構造物の鉛直方向は浮力によって、また、水平方向は係留装置によって支持される。浮体式海上立地方式の具体的な分類例をTable2.1.1に示す。なお、表中の実用水深範囲については、技術的に可能と判断される範囲を目安として示したもので、必ずしも実績があるということではない。

Table2.1.1から、浮体式は水深によって概ね2つのグループに分けられる。1つは最大水深が数百mにもなる大水深、もう1つは深くても100m程度の小水深のグループである。大水深の場合の代表的方式は、波力等に対する低減効果のあるアンカー係留半潜水式である。小水深の場合の代表的方式は浮上式であり、それをどのように係留するかで方式が分かれる。浮上式の係留方式に関しては、概ね以下のようにまとめられる。

- ① 岸壁に隣接して浮体構造物が設置される場合は、岸壁側からヨーク、ブリッジ、スライディングガイド、トラスブーム、緊張ワイヤー、チェーンなどの方法で係留が可能となる。ただし、海象が静穏な場所に限られる。
- ② 陸地から離れた沖合に浮体構造物が設置される場合は、防波堤による波浪等に対する防護を前提に考えるのが一般的である。係留装置には、暴風雨等によって浮体構造物が大きく変位することで堤内構造物等と接触することがないように水平方向変位を許容範囲に押さえること、潮位変動に対応可能であることが要求される。

2.2 施設の概念

本検討で対象とする浮体式原子力発電施設の基本的な概念を以下に述べる。なお、浮体式原子力発電施設のより具体的な概念については、第3章において概念設計例として提示する。

(1) 設置海域

浮体式原子力発電施設は、経済性、施設へのアクセスの容易さ等の観点から、浅海域に設置する方が合理的と考えられる。したがって、設置海域は日本の沿岸海域を前提とし、立地拡大、施設と公衆との離隔などの観点から、外洋でかつ1～2kmの沖合を想定する。

日本の沿岸海域に設置された大型浮体式海洋構造物の例として北九州市の白島石油備蓄基地があるが、この場合Fig.2.2.1に示すように、波の主たる来襲方向に防波堤を設けて、その内側に石油貯蔵船を並べ、さらにその周囲を防油堤で囲っている。また、メガフロート技術研究組合により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。）の設計方針では、潮流、波浪等による浮体構造物への過度の負荷を回避するために防波堤を設置することとしている。したがって、これらの事例、原子力発電施設の安全上の重要度などを考え合わせ、沖合に浮体式原子力発電施設を設置する場合は、防波堤の設置を前提とする。

設置海域の水深は、防波堤の設置を前提にした場合、築堤可能な水深としてわが国の防波堤の最深設置水深約60mを限度と考えるが、経済性の観点から水深20m以下を想定する。

(2) 浮体構造物

浮体構造物は浮上式とし、洋上接合作業を削減するため、造船所のドック内での建造を前提とする。ただし、遮蔽コンクリートの打設は、造船所のドック、岸壁等の水深を考慮し、現地で施工するものとする。浮体構造物の材料としては、鋼材、コンクリートが有力であり、どちらとも建造可能である。

(3) 原子力発電施設

浮体構造物に搭載する原子力発電施設（以下、「搭載原子力発電施設」という。）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（110万kW級）を前提とするが、浮体式の場合はその特性上、小型化及び軽量化を図る必要があるため、在来施設に比べてコンパクトなものでなくてはならない。また、本施設の浮体構造物への搭載方法については、浮体構造物の上に施設を上載する、もしくは、浮体構造物の中に施設を搭載する方法が考えられる。ここでは、軽量化、コストダウン及び低重心化による合理的設計という観点から、施設を浮体構造物の中に搭載し、浮体構造物の一部を原子炉建家などの建家に活用することを考える。

(4) 係留装置

係留装置はサイトの自然条件、搭載する施設からの要求事項などに応じて、固定係留、弛緩係留、緊張係留等の係留方式を適切に選定する必要がある。浮体式原子力発電施設の係留装置についても同様に、サイトの自然環境（風、波浪、流れ、地震、津波、高潮等）、搭載原子力発電施設の健全性確保に必要となる安全上の機能などを考慮して、その方式を適切に選定することが重

要となる。ここでは、搭載原子力発電施設の健全性確保の観点から、基本的に浮体構造物の水平移動量を極力小さくするとともに、津波や高潮などの潮位変動に安全に応答できる係留方式を選定する。

以上、(1)～(4)で述べた基本概念を有する浮体式原子力発電施設は、概ねFig.2.2.2に示すようなイメージとなる。

2.3 施設の特長

浮体式原子力発電施設は一般的に次のような特長を有している。

- ① 浮体構造物は水平地震動に対し十分な免震効果を有する。このため、在来原子力発電所で耐震性確保などの理由から付加されてきた構造部分を軽減できるとともに、機器及び配管は大幅な合理化設計が可能となる。
- ② 地震に対する免震性、防波堤の設置による地震以外の自然外力条件の緩和、地形及び地盤に関する制約条件からの解放等によって、大幅な設計標準化を図ることが可能となる。標準設計を取り入れることにより型式認可などの許認可手続きの簡素化が期待できる。
- ③ 標準設計のプラントを既存の造船所等の工場で一貫建造することで、信頼性の向上、建設工期の短縮、コストダウンなどが期待できる。

AGS (Atlantic Generating Station) を含む米国OPS (Offshore Power System) 社の浮上式原子力発電所計画では、浮上式を選択した最大の理由として、原子力発電プラント仕様の標準化などによる経済性向上を挙げている。同社では、浮上式の基本的特長に基づく経済的利点を以下のように捉えている¹⁾。なお、参考として、AGSの概要を付録Iにまとめた。

- ① 浮上式原子力発電プラントは加工や組立設備の整ったいわゆる専用工場で作成・建造され、発電所のサイトまで曳航した後に据え付けられるので、サイトにおける工事量は少なくなる。浮上式の場合、総建設費のうち不確定要素の多いサイト工事費の占める割合は、陸上式の場合の80%に比べて少なく20%程度と見積られる。このことは建設価格の決定に際してリスクを減らすことができるという利点がある。
- ② 浮上式の場合、計画開始から営業運転開始までに要する期間を短くすることができる。従来の陸上式の場合、運転開始までに約11年を要するのに対して、浮上式の場合は8年程度ですむ。その理由として、浮上式原子力発電プラントの製造認可をあらかじめ取得しておけること、本プラントの建造とサイト工事を並行して行うことが可能なことなどが挙げられる。
- ③ 浮上式の場合、陸上式に比べて立地場所の選択の自由度が大きい。浮上式原子力発電プラントは、洋上、河口、河岸または沿岸に設置できるので、地盤や取排水などの立地条件が整った場所のみ立地が限定されている陸上式に比べて立地場所が容易に選べ、用地取得のための費用負担が少ない。
- ④ 浮上式原子力発電プラントは専用工場で計画的に生産できるので、工程管理や品質管理を徹底でき、納期の遅延や製品の欠陥などによる無駄なコストを省くことができる。

3. 浮体式原子力発電施設の概念設計例

3.1 基本条件

前章で述べた浮体式原子力発電施設の基本的な概念に加えて、具体的な条件を以下のように想定する。

- ① 設置海域の水深については、防波堤の設置の観点から20m以下が望ましいが、一方で水深は浮体構造物の沈没に対する安全性などに大きく関与するものと考えられたため、現段階で根拠ある具体的な数値を設定するのは困難である。ここでは、本設計例で得られた浮体構造物の喫水12.4mを考慮して、水深20mを想定する。
- ② 搭載原子力発電施設のコンパクト化については、一つは必要面積であり、在来原子力発電所における各建家の必要面積を確保することを基本とするが、各建家の配置についてはコンパクト化を図る。もう一つは全体重量であり、在来原子力発電所の建屋及び機器を含む総重量の3分の1程度まで軽量化を図るものとする。
- ③ 浮体構造物は既存の造船所のドックで一括建造する前提から幅は80mとし、搭載原子力発電施設の必要面積は浮体構造物の長さ方向で調整する。浮体構造物はTable3.1.1に示す構造材料の特性比較を見てもわかるように、鋼材、コンクリートとも建造可能であるが、コンパクト化という観点から、ここでは鋼製の浮体構造物を想定する。また、浮体構造物、原子炉建屋などの建物・構築物は構造的には独立とし、浮体構造物自身は独立して強度を有するものとする。
- ④ 係留方式はTable3.1.2に示す代表的係留方式の概念及び特徴より、固定係留であるドルフィン係留方式とする。
- ⑤ 防波堤は混成堤形式とし、当該施設によって堤内の静穏度が十分に確保でき、船舶衝突に対する防護に適した形状とする。
- ⑥ 搭載原子力発電施設、浮体構造物などの施設の点検及び保守は、基本的に設置サイトで実施するものとする。また、原子力発電施設を廃炉にする際は、防波堤の一部を撤去して、浮体構造物を引き出すものとする。

3.2 浮体構造物の検討例

(1) 搭載原子力発電施設の必要面積及び概略重量

搭載原子力発電施設の必要面積及び概略重量の検討結果を以下に示す。

建 屋	面 積	重量 (万トン)
原子炉建屋 (R/B)	60m× 60m× (高さ55m)	10
タービン建屋 (T/B)	50m×110m× (高さ50m)	8
廃棄物建屋 (Rw/B)	60m× 30m× (高さ40m)	原子炉建屋に含む
海水熱交建屋 (Hx/B)	30m× 80m× (高さ35m)	
サービス建屋 (S/B)	35m× 40m× (高さ30m)	7
コントロール建屋 (C/B)	35m× 40m× (高さ30m)	
合 計	16,100m ²	25万トン

建屋面積は、在来原子力発電所（110万kW級）の施設に基づいた数値である。なお、搭載重量25万トンは、耐震性確保などの理由から付加されたコンクリート構造部分の軽量化を予想し、単に設計目標として在来原子力発電所の建屋、機器を含む総重量の3分の1程度の重量を想定したものであり、技術的なつめは今後の課題とする。

(2) 浮体構造物の構造様式

浮体構造物の構造に関する考慮事項を以下に示す。

- ① 構造については鋼船規則P編「海洋構造物及び作業船」⁴⁾を準用する。
- ② 幅は既存の造船所のドックで一括建造する前提から80mとし、長さは搭載原子力発電施設の建屋寸法及び必要面積から300mとする。
- ③ 浮体構造物の構造は独立して強度を有するものとする。また、二重殻構造とする。
- ④ 各建屋の必要なスペースのみを浮体構造物内部に配置する。ただし、建屋同士が接する横隔壁は、浮体構造物構造としても十分な強度を有するものが設置されるものとする。

以上の考慮事項に基づき、浮体構造物の主要な構造寸法及び構造配置について検討した結果をそれぞれTable3.2.1、Fig.3.2.1に示す。なお、これらの検討に際しては、鋼船規則の要求する縦強度及び波浪（有義波高1m）による縦曲げモーメントも考慮した。

(3) 部分浸水の検討

浮体構造物の連続2区画への浸水に関して、浮体構造物の傾斜量の概略計算を行った。その結果、浮体構造物の横傾斜は最大0.94度、縦方向の傾斜は最大0.25度であった。なお、計算に際して、区画分割に関しては、基本的に1建屋につき2区画を仮定したが、タービン建屋のように長い建屋では、他の区画と長さが等しくなるようにさらに分割した。浮体構造物の重心計算に関しては、各建屋の重心を建屋高さの1/3の位置にあるとした。区画浸水量計算に関しては、浸水区画内には骨組み構造、配管等の内容物が存在しないとした。

3.3 係留装置の検討例

(1) 係留方式及び構造様式

基本条件で述べたように、係留方式はドルフィン係留方式とし、特に津波、高潮などの潮位変動に対応可能な形式を想定する。ここでは、ドルフィン係留方式のうち特に異常潮位への対応に適する係留方式及びその概略構造様式を明らかにする。

ドルフィン係留方式の中で、潮位等の変位を考慮した代表例としては、ガイドフレーム・フェンダー方式（Fig.3.3.1）、ケーブル・フェンダー方式（Fig.3.3.2）、ロッド・フェンダー方式（Fig.3.3.3）、ガイドフレーム・流体圧方式（Fig.3.3.4）等がある。地震及び津波に対する適応性を勘案した場合、Table3.3.1に示す特性の比較から、ガイドフレーム・フェンダー方式が優れていることがわかる。これらから、係留装置はガイドフレーム・フェンダー方式とし、Fig.3.3.5に示す構造様式とした。構造様式に関する要点を以下に示す。

- ① 係留装置の主要構成要素はドルフィン（支柱型）、有脚式ドルフィン基礎、ガイドフレーム、フェンダー及びストッパである。

- ② 支柱型ドルフィンには、鋼製の有脚（ジャケット）に支持される。フェンダーとの接触面にスライディング材としてステンレス鋼が張られている。ドルフィンの高さについては、基本的に最大干満差並びに高潮及び津波による潮位変動による浮体構造物の上下変位に対して、ガイドフレームがドルフィンから抜け出さないようにするとともに、浮体構造物の下方向変位に対して十分追従するよう考慮して決定されなければならない。本構造様式では、ドルフィン高さを14.6mに設定しているが、その内訳は、浮体構造物上方向変位4m（最大満潮時水位1m + 高潮又は津波時異常高潮位3m）及び下方変位-7.6m（浮体構造物着底想定時追従-7.6m）である。なお、このドルフィン高さは、ガイドフレームの幅を3mとして計算したものである。
- ③ ガイドフレームは、ドルフィンを囲み浮体構造物に取り付けられる。ガイドフレームにはフェンダー及びストッパが取り付けられる。ガイドフレームのフェンダー軸方向（Fig.3.3.5の方向1）の長さは、主としてドルフィン及びフェンダーの大きさによって決定されるが、浮体方向（Fig.3.3.5の方向2）の長さは、特に浮体構造物の長辺側に設置される係留装置の場合、浮体構造物の温度変化、他のフェンダーの圧縮による接触面の横方向のずれ等を十分考慮して決定されなければならない。
- ④ フェンダーはゴム製で、ドルフィンをはさんでガイドフレーム両側に取り付けられ、浮体構造物がドルフィンに近づく方向あるいは離れる方向に対しても拘束力が得られるようになっている。
- ⑤ ストッパは、フェンダーに発生する歪みを許容値内に抑えることを目的として設置されており、フェンダーの許容耐力以上の係留力が発生した場合、ストッパを作用させ、ストッパを介してドルフィンに直接荷重を伝達する。

(2) 係留計算及び係留装置の配置

係留装置の必要基数を決定するために係留計算を実施した。定常外力として風圧力（想定平均風速70m/s）及び波漂流力（想定有義波高1m、周期14秒）を同一方向から10度刻みに作用させて、浮体構造物の長辺及び短辺に作用する係留力を計算した。Fig.3.3.6に示す計算結果から、浮体構造物を安全に係留するために最低限必要となる係留力は、浮体構造物の長辺（Y方向）に対して約4,300トン、短辺（X方向）に対して約3,000トンである。なお、今回行った係留計算では定常外力のみを考慮し、波力等による浮体構造物の運動に起因する変動外力については考慮していない。

係留装置の配置については、浮体構造物の前後動、水平動及び船首回転の運動を確実に抑えるために、2方向（長辺及び短辺）かつ両側に複数基配置することを基本とするが、温度変化による伸縮を考慮して短辺側は片側のみに複数基配置する。長辺側及び短辺側係留装置の耐力をそれぞれ800トン/基、1,200トン/基と想定し安全余裕を考慮して、Fig.3.3.7に示すように長辺側に6基、短編側に3基配置する。

3.4 防波堤の検討例

原子力発電施設を防護する外郭施設を対象として技術的検討が詳細に行われた代表的事例に、

土木学会による「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」⁶⁾がある。この検討事例では、岩盤を基礎地盤とする直接支持埋立式人工島における防波護岸の合理的な耐震・耐波設計法の確立を目的として、以下に示す項目についての検討が詳細に行われている。

- ① 防波護岸の設計上の重要度及び要求機能並びに重要度に基づく地震、波浪などの設計外力の設定法及びその組合せ
- ② 防波護岸の耐震安定性及び耐波安定性評価技術並びに安全評価基準
- ③ 防波護岸の構造様式の基本的設計手順及び耐震・耐波性を考慮した防波護岸の設計例示
- ④ 防波護岸の耐波・耐震設計の体系化原案

浮体式原子力発電施設における防波堤の設計について技術的検討を行う際には、上記の検討結果が非常に参考となる。

ここでは、防波堤の断面について概略の検討を行った。Fig.3.4.1に示す断面は、コンクリート製ケーソンを消波ブロックで覆う消波ブロック被覆堤について、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁷⁾に基づき、以下に示す自然条件を想定し、主としてケーソン幅、天端高さ、消波ブロック所用重量について検討した結果を反映したものである。なお、波浪条件の再現期間100年は、洋上石油備蓄施設などの重要な海洋構造物や在来原子力発電所の専用港湾で採用されているものである。

自然条件		
潮 位	朔望平均満潮位	H. W. L D. L. +1.5m
	朔望平均干潮位	L. W. L D. L. +0.0m
高 潮	高潮偏差	1.0m
波 浪	換算沖波	10.0m ^{注)}
	周 期	16秒
地 震	水平震度	0.2
	鉛直震度	0
津 波	津波偏差	3.5m

注) 換算沖波10.0mは、100年確率波を想定した値である。

浮体式原子力発電施設における防波堤は、在来原子力発電所の専用港湾で採用されている自然条件よりも大きな規模を考慮した場合でも、搭載原子力発電施設の健全性に影響を与えないよう設計する必要があると思われる。その意味から、当該施設の断面検討では、既存の防波堤設計における自然外力条件を上回る外力に対して要求機能を満足するよう断面の決定を行う必要であるが、ここでは、この自然外力を定量的に示すことができないため、上記自然条件に基づき、現行法による耐波・耐震性検討により断面の決定を行った。

3.5 全体配置の検討例

浮体式原子力発電施設の概念設計例のまとめとして、これまでの主要構成要素の検討結果に基づき、当該施設の全体配置に関する検討を行い、鳥瞰図を作成した。

(1) 全体配置

浮体式原子力発電施設の全体配置をFig.3.5.1に示す。各施設の配置にあたり考慮した事項を以下に示す。

- ① 防波堤の形状及び配置に関しては、防波堤によって堤内の静穏度が十分に確保でき、船舶

衝突に対する防護に適した配置を基本に考える。具体的には、主防波堤を沖側に、物揚場を浮体構造物に近接した海岸側に設置し、浮体構造物を包囲する形式とする。

- ② 冷却水の取水及び排水は直接浮体構造物から行うこととする。取水口は浮体構造物のタービン建屋区画の浮体構造物長辺面、排水口は海水熱交建屋区画の浮体構造物長辺面に設けることとし、冷却水の大量取排水（毎秒数十トンのオーダー）による推力、モーメントの作用を相殺するため、両側配置とする。
- ③ 冷却水の排水に関しては、温排水が主防波堤外にスムーズに排出され、温排水を再び取水することがないように設備を配置する。具体的には、温排水を直接堤外に排出するために、排水口のある浮体構造物部分を主防波堤開口部の堤外側に配置する。また、主防波堤開口部に、在来原子力発電所の取水口にも使用されているコンクリート製のカーテンウォールを設置し、堤内水面と堤外水面を分離することにより、温排水の再取水を防止する。
- ④ 冷却水の取水に関しては、取水により堤内流速が増し他の設備等に悪影響を及ぼすことがないようにする。具体的には、冷却水取水はカーテンウォール下部開口部または必要に応じて冷却水導水管を敷設し堤外から取水する。
- ⑤ 浮体構造物の配置は、防波堤配置及び冷却水の取排水方法の前提から、縦型配置（浮体構造物短辺が沖側と海岸側を向く配置）とする。その場合、給電設備のある開閉所建屋を海岸側に配置する。なお、先に述べたように、排水口のある浮体構造物部分は主防波堤開口部の堤外側に配置する。
- ⑥ 在来原子力発電所では専用港湾を利用して、船舶による使用済み燃料輸送、廃棄物輸送、大型資材輸送などが行われている。浮体式原子力発電施設の場合も船舶による物資等の輸送を考慮する。具体的には、浮体構造物に船舶を直接接舷させることを避けるため、係船岸壁を有する物揚場を設置する。係船岸壁は、在来原子力発電所における最大級の船舶（3,000D.W.T.クラス）を係船できる規模とする。物揚場の規模は、係船岸壁及び在来原子力発電所の物揚場の規模を参考に150m×80mとする。物揚場は埋立式人工島を想定するが、条件次第では浮体構造物（ポンツーン）にすることも可能である。物揚場の配置は、浮体構造物に近接した海岸側に設置する。
- ⑦ 物揚場と陸地を結ぶアクセス道路は、片道一車線の標準道路とし連続桁橋とする。この形式は、水深20m以浅では最も経済的で、関西国際空港連絡橋にも採用されている。
- ⑧ 送電設備に関しては、陸域から物揚場の間はアクセス道路桁下に設けた鋼管中に送電線を配置する形式、物揚場内は地中管路内に送電線を配置する形式、物揚場と浮体構造物の間は基本的に浮体構造物の動揺、変位に対応できるよう十分な冗長性を有する形式を想定する。ただし、送電設備については、全体配置図及び鳥瞰図には記載していない。

(2) 鳥瞰図

本調査において検討対象とした浮体式原子力発電施設の鳥瞰図をFig.3.5.2～Fig.3.5.4に示す。それぞれ、陸上からの概観、アクセス道路上の接近した位置からの概観及び海上側上空からの概観を示している。

4. 浮体運動のシミュレーション

検討対象としている浮体式原子力発電施設の物理モデルを作成し、波浪、風による浮体運動及び海震による浮体運動のシミュレーションを行った。

4.1 波浪、風による浮体運動シミュレーション

4.1.1 シミュレーションの概要

本シミュレーションは、防波堤で囲まれた半閉鎖水域内の係留浮体の運動を解析するもので、Fig.4.1.1に示すように自然条件の設定、計算モデルの作成、防波堤内の波浪計算及び浮体構造物の運動計算で構成される。防波堤内の波浪計算では、波浪の条件に基づいて、防波堤内への越波及び透過波の計算並びに回折波の計算が行われ、この結果を合成して防波堤内の波浪が計算される。

(1) 自然条件の設定

自然条件については波浪及び風を考慮する。波浪に関しては、有義波高及び有義波周期を設定する。有義波高はTable4.1.1に示す観測値に基づく再現期間100年の有義波高の推定値より、再現期間100年の有義波高を10mと仮定し、その1.5倍の15mに設定した。有義波周期は重力波として一般的な値である14秒とした。

風はTable4.1.2に示すわが国に來襲した大規模台風の実測値より、最大級の値として平均風速70m/secに設定した。なお、風は定常風及びDavenport型の変動風として取り扱った。

(2) 計算モデルの作成

a. 浮体構造物のモデル化

浮体構造物及び建屋のモデル化では、Fig.4.1.2に示す検討結果に基づき、Fig.4.1.3に示すように、重量分布が均一な直方体形状の剛体として取り扱った。モデルは長さ300m、幅80m、重量30.5万トン、重心高さ15.8m、喫水12.4m、受圧面積(長辺側) 11,000m²、受圧面積(短辺側) 3,400 m²とした。

b. 係留装置のモデル化

係留装置のモデル化では、Fig.4.1.4に示す検討結果に基づき、Fig.4.1.5に示すように、バネ系として取り扱った。モデルの設定に当たり考慮した事項を以下に示す。

- ① 海底地盤及び有脚式ドルフィン基礎は剛体とし、変形しないものとする。
- ② 係留バネはドルフィンをはさんでガイドフレーム両側に取り付けられており、浮体構造物がドルフィンに近づく方向あるいは離れる方向のいずれの方向に対しても拘束力が得られる。
- ③ 係留装置の設計耐力は浮体構造物長辺側を800トン/基、短辺側を1200トン/基とする。
- ④ 係留バネ1個の最大反力は、浮体構造物長辺側を400トン、短辺側を600トンとし、Fig.4.1.6に示す反力特性を有するものとする。

- ⑤ ガイドフレーム片側に装備される係留バネの個数は、係留装置の耐力を係留バネの最大反力で除した数とする。すなわち、浮体構造物長辺側の係留装置1基当たり、最大反力400トンの係留バネがガイドフレーム片側2個で合計は4個、浮体構造物短辺側の係留装置1基当たり、最大反力600トンの係留バネがガイドフレーム片側2個で合計は4個とする。

c. 防波堤のモデル化

防波堤のモデル化では、Fig.4.1.7に示す検討結果に基づき、沖側に設置する主防波堤をFig.4.1.8、海岸側に設置する直線形防波堤をFig.4.1.9に示すように単純な断面モデルとして取り扱った。モデルの設定に当たり考慮した事項を以下に示す。

- ① 主防波堤の断面モデルは堤体（ケーソン）及び消波ブロックを考慮する。堤体の断面は、幅26m、天端高さ16.5mの直方形とし、消波ブロックの断面は、天端幅7.5m、底面の幅70.0m、消波ブロックの勾配1:2を有するものとする。反射率（入射波高と反射波高の比）は、水理実験から得られた結果¹⁰から、堤体の反射率を0.75、消波ブロックの反射率を0.3とする。
- ② 直線形防波堤の断面モデルは堤体のみを考慮する。堤体の断面は、幅26m、天端高さ16.5mの直方形とし、堤体の反射率は0.75とする。

d. 計算の基本モデル

3.5節全体配置の検討例、構成要素のモデル化等に基づき、Fig.4.1.10に示すような全体システムのモデル（以下、「基本モデル」という。）を設定した。基本モデルの設定に当たり考慮した事項を以下に示す。

- ① 浮体構造物は海岸から約1km離れた水深20mの沖合に設置する。
- ② 浮体構造物は風による影響の最も少ない配置とする。具体的には、卓越する風は沖から海岸に向かって吹くものとし、浮体構造物の短辺が沖側と海岸側を向いた配置とする。
- ③ 浮体構造物長辺側に最大反力400トンの係留バネをそれぞれ12個、浮体構造物短辺側に最大反力600トンの係留バネをそれぞれ6個配置する。
- ④ 防波堤は当該施設によって堤内の静穏度が十分に確保でき、船舶衝突に対する防護に適した配置を基本に考える。具体的には主防波堤を沖側に、直線形防波堤を海岸側に設置し、浮体構造物を防波堤により包囲する形式とする。また、冷却水の取水を浮体構造物から直接行う前提から、主防波堤と直線形防波堤の間に開口部を設ける。
- ⑤ 主防波堤の長さ及び幅は、浮体構造物を主防波堤の中心部に設置するよう考慮して定める。具体的には、主防波堤の幅（海岸線に平行方向の長さ）は、浮体構造物の長辺から防波堤までの距離をそれぞれ100mとすることにより332mとする。浮体構造物の長辺から防波堤までの距離100mは、Fig.4.1.4に示す浮体構造物からの係留装置の張出し量約20m及びFig.4.1.7に示す防波堤からの堤内側消波ブロックの張出し量約40mを考慮したものである。

主防波堤の長さ（海岸線に垂直方向の長さ）は、浮体構造物の短辺（沖側）から防波堤までの距離を50mとすることにより426mとする。なお、浮体構造物の短辺（沖側）か

ら防波堤までの距離50mは、防波堤からの堤内側消波ブロックの張出し量を考慮したものである。

- ⑥ 直線形防波堤の長さは主防波堤の幅に合わせて332mとする。
- ⑦ 主防波堤と直線形防波堤間の開口部の大きさは、両防波堤からの消波ブロックの張出し量約40mを考慮し80mとする。
- ⑧ 海岸形態は海浜を想定し、海浜における波の反射を考慮する。海浜の反射率は天然海浜で0.05～0.2¹¹⁾とされていることから、最大値 0.2とする。

(3) 越波及び透過波の計算

本計算では、防波堤を越波及び透過により伝達する波(伝達波)の波高及び周期を求める。伝達波の計算方法に関しては、消波ブロック被覆堤を対象とした伝達波の水理模型実験の結果¹⁰⁾を用いる。具体的には、伝達波の有義波高は、主防波堤の断面モデルの寸法を用いて、Fig.4.1.11より求まる波高伝達率に伝達前の波の有義波高15mを乗じて求める。伝達波の周期は、波高伝達率を用いて、Fig.4.1.12より求まる周期伝達率に伝達前の波の周期14秒を乗じて求める。計算の結果、波高伝達率0.06、伝達波波高0.9m、周期伝達率1.0、伝達波周期14秒となった。

(4) 回折波の計算

本計算には、増田により開発された沖合人工島周辺における回折波分布のシミュレーション法¹²⁾を用いた。本計算手法は、固定の構造物に作用する流体をポテンシャル流れとして取り扱うポテンシャル理論に基づき、任意形状の構造物における回折波高の分布を、例えばFig.4.1.13に示すように、回折波の入射波に対する波高増幅率の分布として計算するもので、単一周期規則波の回折のほか、周期の異なる規則波の非線形干渉により発生する長周期波の回折についても計算することができる。計算結果の1例として、基本モデルにおける回折波の波高増幅率の分布例をFig.4.1.14に示す。なお、計算の基本的な仮定を以下に示す。

- ① 流体は非粘性、非圧縮性の完全流体とし、非回転のポテンシャル流れとする。
- ② 流体は単一周期の運動をするものとし、時間が十分経過したあとの定常状態を取り扱う。
- ③ 構造物は入射波及び散乱波による振動や変形はないものとする。

(5) 防波堤内の波高等の計算

防波堤内の有義波高及び周期は、越波、透過波及び回折波の計算で求められた伝達波及び回折波の有義波高を合成して求める。具体的には、堤内の有義波高は伝達波、回折波それぞれの有義波高の2乗の和の平方根に等しいとした。伝達波及び回折波の有義波周期は約14秒であることから、堤内の有義波周期も14秒とした。

次項の浮体構造物の運動計算への入力としては、合成波の有義波高及び周期に基づく不規則波スペクトルより計算された波面の上下運動に関する時系列データを用いた。なお、不規則波スペクトルの型はBretschneider—光易型を採用した。

(6) 浮体構造物の運動計算

本計算には、大澤により開発された浅海域における係留浮体の運動及び係留力の応答シミュレーション法^{13),14)}を用いた。本計算手法は、索鎖によるカテナリー係留方式またはドルフィン係留方式により係留された箱型浮体について、任意方向から入射する変動風や不規則波に対する浮体の6自由度運動の応答時系列を計算するもので、流体力、係留力などに含まれる非線形性を考慮することが可能であるほか、浮体近傍に岸壁や他の浮体が存在する場合についても計算することができる。本計算手法の妥当性は水槽実験により確認されている。なお、流体力計算等の基本的な仮定を以下に示す。

- ① 流体は非粘性、非圧縮性の完全流体とし、非回転のポテンシャル流れとする。
- ② 流体力は、浮体構造物に作用する流体をポテンシャル流れとして取り扱うポテンシャル理論による算定式から計算する。
- ③ 流体の粘性による浮体に働く抗力は無視することができないので、箱型浮体に対する実験式を適用して計算に取り入れる。
- ④ 浮体は剛体であるとし、変形はないものとする。

4.1.2 シミュレーション計算のケース

シミュレーション計算はTable 4.1.3に示す3ケースについて行った。

ケース1では、防波堤の配置の違いによる浮体構造物の運動への影響を確認した。モデル①～④における防波堤の配置を以下に示す。

モデル①：堤内静穏度、船舶衝突に対する防護、冷却水の取水を考慮した基本配置である。

主防波堤及び直線形防波堤により、開口部を有する半閉鎖水域を作る。

モデル②：基本配置から直線形防波堤を取り除いた配置である。

モデル③：基本配置から主防波堤及び直線形防波堤の間の開口部を取り除いた配置である。

浮体構造物は主防波堤及び直線形防波堤により完全包囲される。

モデル④：基本配置から直線形防波堤を取り除き、さらにモデル①における主防波堤の長さを半分程度まで短縮した形状の防波堤を沖側に設置した配置である。

ケース2では、変動風と定常風の違いによる浮体構造物の運動への影響を確認した。ケース3では、浮体構造物の配置の違いによる浮体構造物の運動への影響を確認した。

4.1.3 シミュレーション計算の結果

浮体運動の時系列データを計算ケース毎に整理し、付録Ⅱに掲載した。ここでは、得られた時系列データに基づく結果の整理及び考察を行った。

(1) ケース1

ケース1では、防波堤の配置の違いによる浮体構造物の運動への影響を比較した。計算結果をTable 4.1.4に示す。ケース1A（基本モデル）のシミュレーションの結果、浮体構造物の縦揺れによる最大傾斜は約 0.1° である。浮上式原子力発電プラントAGSの場合には、傾斜許容値が 2° （操業時基準）と設定されており、その意味から、基本モデルは十分な安定性を有しているといえる。また、回折波の影響が大きくなるケース1Dについても最大傾斜は約 0.1° であり、これ

もまた十分な安定性を有しているといえる。築堤の経済性の観点から考えると、一般的にケース1Dの防波堤配置が適していると考えられるが、防波堤の配置に関しては、築堤の経済性の他に船舶等の浮体構造物への衝突防護性、長周期波の侵入防止性等を考慮し、最適な配置を決定する必要がある。

(2) ケース 2

ケース 2 では、変動風と定常風の違いによる浮体構造物の運動を比較した。計算結果を Table 4.1.5 に示す。基本モデルによる計算では、風を変動風または定常風として取り扱っても浮体構造物の運動に大きな違いは見られなかった。その理由として、変動風の主成分の周期（十数秒～50秒）とドルフィン係留された浮体構造物の動揺固有周期（8～13秒）が同調しなかったためと考えられる。

(3) ケース 3

ケース 3 では、浮体構造物の配置の違いによる浮体構造物の運動を比較した。計算結果を Table 4.1.6 に示す。ケース 3B は浮体構造物を海岸と平行に配置し、風及び波を横から受けるような場合であり、シミュレーションの結果、特に浮体構造物の縦揺れによる最大傾斜は 2.6° となり、ケース 3A の場合と比較するとかなり大きな揺れを生じた。この縦揺れは主として波によって生じたものであり、風に起因する縦揺れは 0.4° 程度であった。大きな縦揺れが生じた主な理由としては、ケース 3A の場合と比較すると、波の波長（周期 14 秒での波長 180m）に対して浮体幅（80m）が小さくなり、波による浮体構造物の静的傾斜が約 10 倍の 1° となったこと、加えて縦揺れの固有周期（13 秒）が波の周期（14 秒）に近く、同調に近い現象が発生したことが挙げられる。

以上のシミュレーションの計算を通じて、特に浮体構造物の配置に関しては、堤内の波高及び周期の分布を十分に把握するとともに、傾斜、変位等を引き起こす外力を低減し、同調現象を起こさないよう考慮して浮体構造物の配置及び構造を決定することが重要となること、また、風の方向依存性を詳細に把握するとともに、風に対する施設の受圧面積を小さくするよう考慮して浮体構造物の配置及び構造を決定することも重要となることが明確となった。

4.2 海震による浮体運動シミュレーション

4.2.1 シミュレーションの概要

本シミュレーションは、浮体構造物直下における海底地盤の地震時上下動に起因する海震による浮体構造物の挙動を解析するもので、Fig. 4.2.1 に示すように、自然条件の設定、海震荷重の数値計算及び浮体構造物の応答計算で構成される。なお、海震という自然現象については、一般になじみが少ないと思われ、付録Ⅲに海震の解説を掲載した。

(1) 自然条件の設定

自然条件としては、Fig. 4.2.2 に示す十勝沖地震の上下加速度（最大加速度約 150gal）を海底地盤の表面に入力する。なお、振動する海底地盤の幅は、浮体構造物の幅（80m）に比べ非常に大

きなものであると考え、無限大の幅で振動するものとする。

(2) 海震荷重の数値計算

本計算には、増田により開発された浅海域における浅喫水の超大型浮体に働く海震荷重のシミュレーション法¹⁵⁾を用いた。本計算手法は、海震現象を海底面の振動による海水中の圧力波の伝播として捉え、Fig.4.2.3に示す座標系から境界積分方程式を用いて浮体底面に働く海震荷重を計算するものである。本計算手法の妥当性は水槽実験により確認されている。なお、計算の基本的な仮定を以下に示す。

- ① 水深一定の海底面と自由表面の間の流体領域は無限遠方まで広がっているとする。
- ② 海水は圧縮性を有する。
- ③ 地震動の周波数は比較的高周波数であるので、流体内を疎密波だけが伝播し、自由表面は変動しないものとする。
- ④ 水中での海震による疎密波の吸収・散乱による波動エネルギーの減衰はないものとする。
- ⑤ 海底面は剛体で、場所的に位相差のない様な上下運動をする。

(3) 浮体構造物の応答計算

浮体構造物の応答計算は、通常浮体運動解析と同様な手法によって計算が可能である。本シミュレーションは、前項の海震荷重の数値計算で求めた海震荷重を入力とし、Fig.4.2.4に示す1自由度の振動モデルを用いて浮体構造物の上下加速度等を計算するものである。なお、流体力である付加質量係数及び減衰力係数については、浮体構造物と同じ断面の2次元角柱に対する値を用いている。

(4) シミュレーション計算の結果

計算結果として、十勝沖地震の上下加速度、海震荷重及び浮体構造物の上下加速度に関する時系列データをFig.4.2.5に示す。計算結果から、浮体構造物の上下加速度の最大値は、最大入力加速度とほぼ同じ約150galとなった。また、海震荷重は最大で0.35トン/m²であった。地震動上下成分の伝達特性に関しては、上下地震動はそのまま浮体構造物に伝達されるという、従来どおりの知見が得られた。

5. まとめ

本報告書は、浮体式原子力発電施設特有の設計思想及び設計方針を明確にすることを目的として、検討対象とする浮体式原子力発電施設の概念検討の結果について取りまとめたものである。

本検討では、主として設置海域、浮体構造物の構造様式、建屋配置、防波堤の構造様式、係留装置の方式及び構造様式並びに施設の全体配置を明らかにした。さらに、これらの検討結果を反映した物理モデルを作成し、波浪、風及び海震による浮体運動のシミュレーション解析を行った。

その結果、出力110万kWクラス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、防波堤を合理的に築堤できるサイト（日本の外洋に面した沖合1～2km程度、水深20m前後）に、長さ300m×幅80m×深さ35m、総排水量30万トンの規模の浮体構造物をドルフィン係留するという施設の概念を構築し、現在の技術で十分建造し得る見通しを得ることができた。さらに、浮体運動のシミュレーションによって、この施設が波浪、風に対して十分な安定性を有していることも確認でき、実現可能性に対する1つの技術的根拠を得ることができた。ただし、本論で述べたとおり、浮体式であるがゆえに問題となる搭載重量に関しては、単に設計目標として、在来原子力発電所の建屋、機器を含む総重量の3分の1程度の搭載重量を想定しただけであり、在来原子力発電所における耐震性確保などの理由から付加されたコンクリート構造部分の軽量化等の技術的検討については、今後の課題として提起するに止まった。

原子力発電施設を海上に立地する方式では、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、一般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。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。浮体式の場合は、免震性、設計標準化等の優れた特長を有する反面、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る。

そこで、原子炉施設の浮体式海上立地に関する調査検討の第2報として、本浮体式原子力発電施設を念頭に置きながら、「原子炉施設の浮体式海上立地に関する調査検討(2)－浮体式原子力発電施設の安全設計の検討－」の中で、当該施設における安全設計の考え方を検討するとともに、設計に係る基盤技術の現状水準を明らかにする。

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蔦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) 運輸省, (社)経団連海洋開発推進委員会, (社)鋼材倶楽部: 新しい国土の創造—沖合人工島に関する調査結果(Ⅲ)—, (1983).
- 2) 電力中央研究所: 浮揚式原子力発電所の成立性評価—プラントの概略設計と経済性評価のための基本条件検討—, 調査報告 A85004, 28, (1985).
- 3) (財)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).
- 4) 日本海事協会: 鋼船規則 P編 海洋構造物及び作業船等, (1996).
- 5) メガフロート技術研究組合: 超大型浮体式海洋構造物(メガフロート) 平成8年度研究成果報告書—概要—, (1997).
- 6) 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).
- 7) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版, (1989).
- 8) 山口: わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定, (1994).
- 9) 防災ハンドブック編集委員会: 防災ハンドブック 第3編耐風, 技報堂, (1964).
- 10) 谷本勝利ほか: 防波堤の構造と水理特性—日本における防波堤設計の現状—, 港湾技術研究所報告, 26, (1987).
- 11) 合田良寛: 港湾構造物の耐波設計, (1990).
- 12) 増田光一ほか: 沖合人工島周辺の2次長周期波に関する研究, 海岸工学論文集, 38, (1991).
- 13) 大澤弘敬: 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, 日本大学博士論文, (1996).
- 14) 増田光一, 大澤弘敬: 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式建築物の運動及び係留索張力の予測法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 464, 129-138 (1994).
- 15) 増田光一ほか: 海震時における超大型浮体式構造物の応答推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 45, (1998).

Table 2.1.1 浮体式の分類(その1)

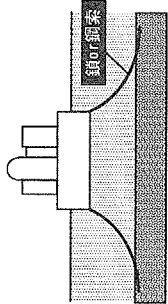
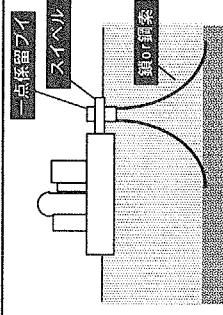
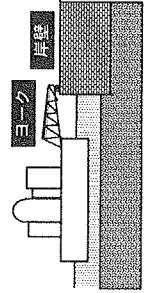
基本方式名	方式名称	支持	浮体構造	位置保持	実用設置水深範囲 (m)	スケッチ	ハリエーション	特徴
浮体式 (浮上式)	アンカー係留浮上式	浮力	箱型又は船型	索・鎖	50 - 700		係留の方法として ・鋼索又は鎖の単独 ・鋼索と鎖の併用 ・鋼索+中間シンカー ・鋼索+中間ブイ 等がある。	比較的深い水深にも適用可能であり、実績も多い。地震動による構造的な制約を受けにくい。 箱型であるため、波浪の影響を大きく受ける。係留索等の展張のため、海域占有面積が大きい。
	一点係留ブイ・タレット係留浮上式	浮力	箱型又は船型	一点係留ブイへの回転自由な結合	50 - 700		係留の方法として、スイベルの代わりに鎖または鋼索を用いる場合もある。	ブイを中心に浮体が回転するため、風圧力・潮流力を軽減できる。 浮体の回転のために広い海面が必要となる。回転機構が複雑となる。ブイのメンテナンスが必要となる。
	岸壁接続浮上式	浮力	箱型又は船型	岸壁への係留	10 - 30		岸壁への係留方法として ・ヨーク ・トラスブーム ・ブリッジ ・緊張ワイヤ+チェーン 等がある。	陸上からのアクセスが容易である。構造がシンプルである。 設置箇所が海象のきわめて穏やかな場所に限定される。

Table 2.1.1 浮体式の分類(その2)

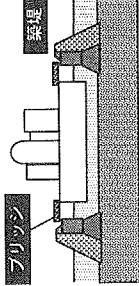
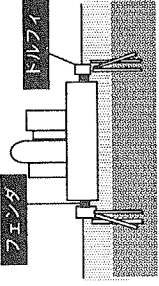
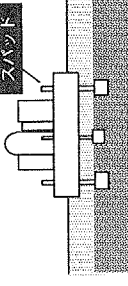
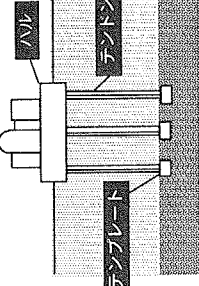
基本方式名	方式名称	支持	浮体構造	位置保持	実用設置水深範囲(m)	スケッチ	バリエーション	特徴
浮体式 (浮上式)	築堤内設置 浮上式	浮力	箱型	固定部 (築堤) への係留	10 - 60		築堤への係留方法として ・フェンダー ・リンクロッド ・中間浮体・チェーン ・ガイドレール・クラン プ 等がある。	波浪の影響を直接受けず、動揺・移動量が小さい。 水深が大きくなるほど、築堤に工事費がかかる。
	ドルフィン係留 浮上式	浮力	箱型	ドルフィン	10 - 100		ドルフィンへの係留方法としてフェンダーの他に ・リンクロッド ・ガイドレールクランプ ・アーム 等がある。 消波構造物を設ける場合もある。	築堤式に比べて、工事が容易。水平移動量は少ない。 水深が深くなるほど、ドルフィンの構造強度が必要になる。消波構造がない場合は、波浪の影響を直接受けるので、ある程度静穏な海域に設置場所が限定される。
	スパッド係留 浮上式	浮力	箱型	スパッド	10 - 50		スパッドを海底に貫入させることもある。 消波構造物を設ける場合もある。	水平移動量は少なく、動揺もある程度抑える事ができる。 スパッド本体および浮体との取合い部にかかる力が大さい。スパッド本体は水深が深くなるほど、構造強度が必要。海底工事が必要となる。
	テンションレグ 浮上式	浮力	箱型	テンションレグ	50 - 700		テンション： 鋼管，P Cケーブル 基礎(プレート)： 重力式又は杭式	波浪・潮流が作用しても、動揺・移動量が小さい。海域占有面積も、アンカー係留浮上式に比べて小さい。 海底工事が必要となり、据え付け工事でもアンカー係留浮上式に比べ手数がかかるので、アンカー係留浮上式よりはコスト高となる。

Table 2.1.1 浮体式の分類(その3)

基本方式名	方式名称	支持	浮体構造	位置保持	実用設置水深範囲(m)	スケッチ	ハリエーション	特徴
浮体式 (半潜水式)	アンカー係留半潜水式	浮力	半潜水式	索・鎖	50 - 700		係留の方法として ・鋼索又は鎖の併用 ・鋼索と鎖の併用 ・鋼索+中間シンカー ・鋼索+中間ブイ 等がある。	アンカー係留浮上式に比べ、波浪中での動揺が小さい。 箱型浮体に比べ構造が複雑になり、その分コスト高になる。係留索等の展張のため海域占有面積が大きい。
	テンションレグ半潜水式	浮力	半潜水式	テンションレグ	50 - 700		アンドン; 鋼管, PCケーブル 基礎(アプレート); 重力式又は杭式	アンカー係留半潜水式に比べ、さらに動揺性能が優れている。 据え付け工事が大きく、コスト高となる。
浮体式 (潜水式)	係留・DPS併用型半潜水式	浮力	半潜水式	索・鎖とDPSの併用	50 - 700		係留の方法として ・鋼索又は鎖の併用 ・鋼索と鎖の併用 ・鋼索+中間シンカー ・鋼索+中間ブイ 等がある。	係留とDPSを併用する事によって、水平移動量を一定範囲内とする事ができ、係留索等の展張範囲も狭くできる。 スラストのための動力が必要であり、メンテナンスも増える。排水量が大きい場合は、巨大なスラスト力が必要になる。
	アンカー係留潜水式	浮力	潜水式	索・鎖	100-200			波浪の影響を受けにくく動揺は小さい。海面上に出ている部分が少ないので、景観上目立たない。 建設及びメンテナンス上、解決すべき技術的課題が多い。耐圧、耐蝕性に注意を要する。

Table3.1.1 鋼製及びコンクリート製浮体構造物の特性

出典：参考文献 2)

項目	鋼製	コンクリート製	備考
構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全て鋼板による溶接構造である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ プレストレスでコンクリートに引張応力が生じないようにする(PC/PCH製)。 ・ 鉄筋で引張応力に耐える(RC製)。 ・ 金網で引張応力に耐える(FC製)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ PC : Prestressed Concrete ・ PCH : Prestressed Concrete Hybrid ・ RC : Reinforced Concrete ・ FC : Ferro Cement
重量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造的に軽 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼製に比べて重い構造となる。 	コンクリート製は内部を鋼製とすることにより軽量化が図られる
吃水	<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート製よりも浅い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼製に 	
動揺	<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート製に比べて大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波に対する動揺固有周期が長くなり、動揺は小さい。 	
係留設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート製に比べ小規模で済む。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船体の慣性力が大きいため大規模となる。 	
耐久性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一般に低温脆性のため耐低温性は劣るが、耐火、低温に対する対策を行うことにより耐久性は維持できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐久性、耐低温性良好。 	
保守点検性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船底及び船側の海水暴露部の塗装は耐用に応じた保守が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐食性が良く、維持管理が容易である。 	
建設性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 施工管理の整った造船所等で建造したモジュールを海上輸送にて立地場所へ輸送することにより工期を短縮することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建設期間は長くなるが、ブロック工法の採用により短縮可能となる。 	

Table 3.1.2 代表的係留方式

出典:参考文献 3)

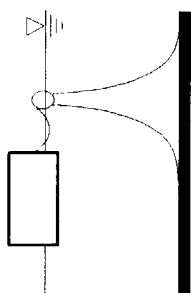
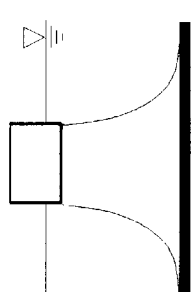
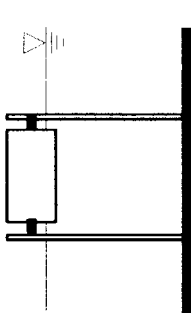
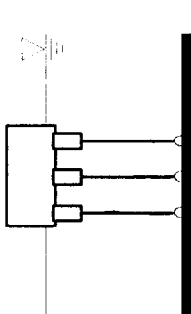
		係 留 方 式			
分 類		弛 緩 係 留	固 定 係 留	緊 張 係 留	
代表的 係留方式	一点係留	 <p>一点係留</p>	 <p>チェーンフイヤー 式多点係留</p>	 <p>ドルフィン係留</p>	 <p>緊張係留</p>
	特 徴	<p>浮体構造物が流れや波になびいたり、回転することにより、浮体構造物の波浪抵抗を軽減する</p>	<p>複数の索の自重を利用して浮体構造物の移動・旋回を軽減する</p>	<p>複数の独立した着底構造物に係留して、浮体構造物の横移動を軽減する</p>	<p>浮体構造物の浮力を利用して索に張力を持たせ主に鉛直方向の動揺を抑制する</p>

Table3.2.1 浮体建造物の主要寸法等

主要寸法等	
長さ (m)	300
幅 (m)	80
深さ (m)	35
喫水 (m)	12.4
排水量 (ton)	305,000
搭載原子力発電施設重量 (ton)	250,000
浮体建造物重量 (ton)	51,000
トリム調整用バラスト (ton)	4,000
重心高さ (m)	15.8

Table3.3.1 支柱型ドルフィン係留方式の特性等の比較

出典:参考文献 5)

ドルフィン係留方式	ガイドフレーム・フェンダー方式	ケーブル・フェンダー方式	ロッド・フェンダー方式	ガイドフレーム・流体圧方式
構造様式	係留装置と浮体建造物をガイドフレームで接続するフェンダー方式。	係留装置と浮体建造物をケーブルで接続するフェンダー方式。	係留装置と浮体建造物をロッドで接続するフェンダー方式。	係留装置と浮体建造物をガイドフレームで接続する油圧シリンダ方式。
異常時係留力の抑制	○	○	○	○
通常時変位の抑制	○	○	○	◎
潮位差への対応	○	△	△	○
地震への対応	○	○	○	△
津波への対応	○	△	△	○
信頼性/実績	○	○	△	△

Table4.1.1 観測値に基づく再現期間100年の有義波高の推定値

出典:参考文献 8)

観測地点 (観測期間)	再現期間100年の有義波高 (m)
福島沖 (25年)	8.08
石廊崎 (17年)	11.64
高知沖 (10年)	12.79
油津 (16年)	11.04
喜屋武岬 (10年)	10.18

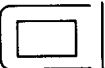




Table4.1.2 大規模台風の風速等の実測値

出典:参考文献 9)

台風の来襲年	台風の名称	上陸後における実測値			
		気圧		風速	
		場所	最低海面気圧 (mb)	場所	最大平均風速 (m/sec)
1934	室戸	室戸岬	911.9	大阪	48.4*
1945	阿久根	阿久根	963.6	細島	34.0
1948	アイオン	長津呂	948.3	富崎	46.7
1950	ジェーン	洲本	963.4	室戸岬	43.2
1951	ルース	枕崎	945.0	枕崎	42.5
1953	テス	潮ノ岬	947.9	洲本	37.0
1954	洞爺丸	寿都	959.2	寿都	42.0
1958	狩野川	長津呂	955.5	長津呂	37.8
1959	伊勢湾	潮ノ岬	929.5	伊良湖	45.4
1961	第2室戸	日和左	928.7	室戸岬	66.7

風速は、*印以外は10分間平均値である。(*印は20分間平均値)

Table4.1.3 シミュレーション計算のケース

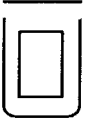

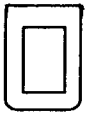
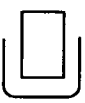
計算の ケース	ケース の内容	計算モデル	自然条件		
			波 浪		風
			有義波高(m)	有義波周期(s)	平均風速(m/s)
ケース1	A	モデル① (基本モデル) 	15	14	70 (変動風)
	B	モデル② 	15	14	70 (変動風)
	C	モデル③ 	15	14	70 (変動風)
	D	モデル④ 	15	14	70 (変動風)
ケース2	A	モデル① 	注:(1) 10	14	70 (変動風)
	B	モデル① 	注:(1) 10	14	70 (定常風)
ケース3	A	モデル② 	注:(2) 0.9	14	70 (変動風)
	B	注:(3) 	注:(2) 0.9	14	70 (変動風)

注:(1) 有義波高は10mと仮定した。

注:(2) 風による影響を確認するため防波堤内の有義波高は0.9mと仮定した。

注:(3) モデル②に対して浮体構造物の長手方向の向きを海岸と平行にした配置を示す。

Table4.1.4 ケース1の計算結果

計算結果の内容 計算のケース	防波堤の配置	防波堤内の波浪			浮体構造物の運動 注:(4)				
		伝達波 波高 (m) 注:(1)	回折波 波高 (m) 注:(2)	合成波 波高 (m) 注:(3)	前後揺れ		上下揺れ		縦揺れ
					変位 (m)	加速度 (m/s ²)	変位 (m)	加速度 (m/s ²)	傾斜 (deg)
A		0.9	0.4	1.0	0.85	0.12	0.09	0.014	0.09
B		0.9	0.3	0.9	0.85	0.12	0.11	0.013	0.07
C		0.9	—	0.9	0.75	0.12	0.09	0.013	0.08
D		0.9	0.8	1.2	1.00	0.18	0.13	0.015	0.09



注:(1) 伝達波の波高は、有義波高を示す。伝達波の周期は全て14秒である。
 注:(2) 回折波の波高は、シミュレーション計算①の波高増幅率の分布から得られた堤内の波高増幅率平均値に自然条件の有義波高15mを乗じたものである。
 注:(3) 合成波波高は、伝達波及び回折波の波高を合成したものである。
 注:(4) 時系列(2000秒間)のデータ(付録-2参照)から読み取った最大値を示す。なお、左右揺れ(変位, 加速度), 横揺れ(傾斜), 船首揺れ(傾斜)の時系列データの値は全てゼロである。

Table4.1.5 ケース2の計算結果

計算結果 の内容 計算の ケース		風 (m/s)	防波堤内の波浪			浮体構造物の運動 注(4)				
			伝達波 波高 (m) 注(1)	回折波 波高 (m) 注(2)	合成波 波高 (m) 注(3)	前後揺れ		上下揺れ		縦揺れ 傾斜 (deg)
						変位 (m)	加速度 (m/s ²)	変位 (m)	加速度 (m/s ²)	
ケース2	A	70 (変動風)	0.5	0.3	0.6	0.53	0.10	0.05	0.007	0.06
	B	70 (定常風)	0.5	0.3	0.6	0.47	0.09	0.05	0.007	0.05

注:(1) 伝達波の波高は、有義波高を示す。伝達波の周期は全て14秒である。
 注:(2) 回折波の波高は、シミュレーション計算①の波高増幅率の分布から得られた堤内の波高増幅率平均値に自然条件の有義波高10mを乗じたものである。
 注:(3) 合成波波高は、伝達波及び回折波の波高を合成したものである。
 注:(4) 時系列(2000秒間)のデータ(付録-2参照)から読み取った最大値を示す。なお、左右揺れ(変位, 加速度), 横揺れ(傾斜), 船首揺れ(傾斜)の時系列データの値は全てゼロである。

Table4.1.6 ケース3の計算結果

計算結果 の内容 計算の ケース		浮体構造物 の配置	堤内波の 波高 (m) 注:(1)	浮体構造物の運動 注:(2)				
				前後揺れ		上下揺れ		縦揺れ 傾斜 (deg)
				変位 (m)	加速度 (m/s ²)	変位 (m)	加速度 (m/s ²)	
ケース3	A		0.9	0.85	0.12	0.11	0.013	0.07
	B		0.9	0.87	0.70	0.52	0.088	2.6

注:(1) 堤内波の波高は、有義波高を示す。周期は全て14秒である。
 注:(2) 時系列(2000秒間)のデータ(付録-2参照)から読み取った最大値を示す。なお、左右揺れ(変位, 加速度), 横揺れ(傾斜), 船首揺れ(傾斜)の時系列データの値は全てゼロである。

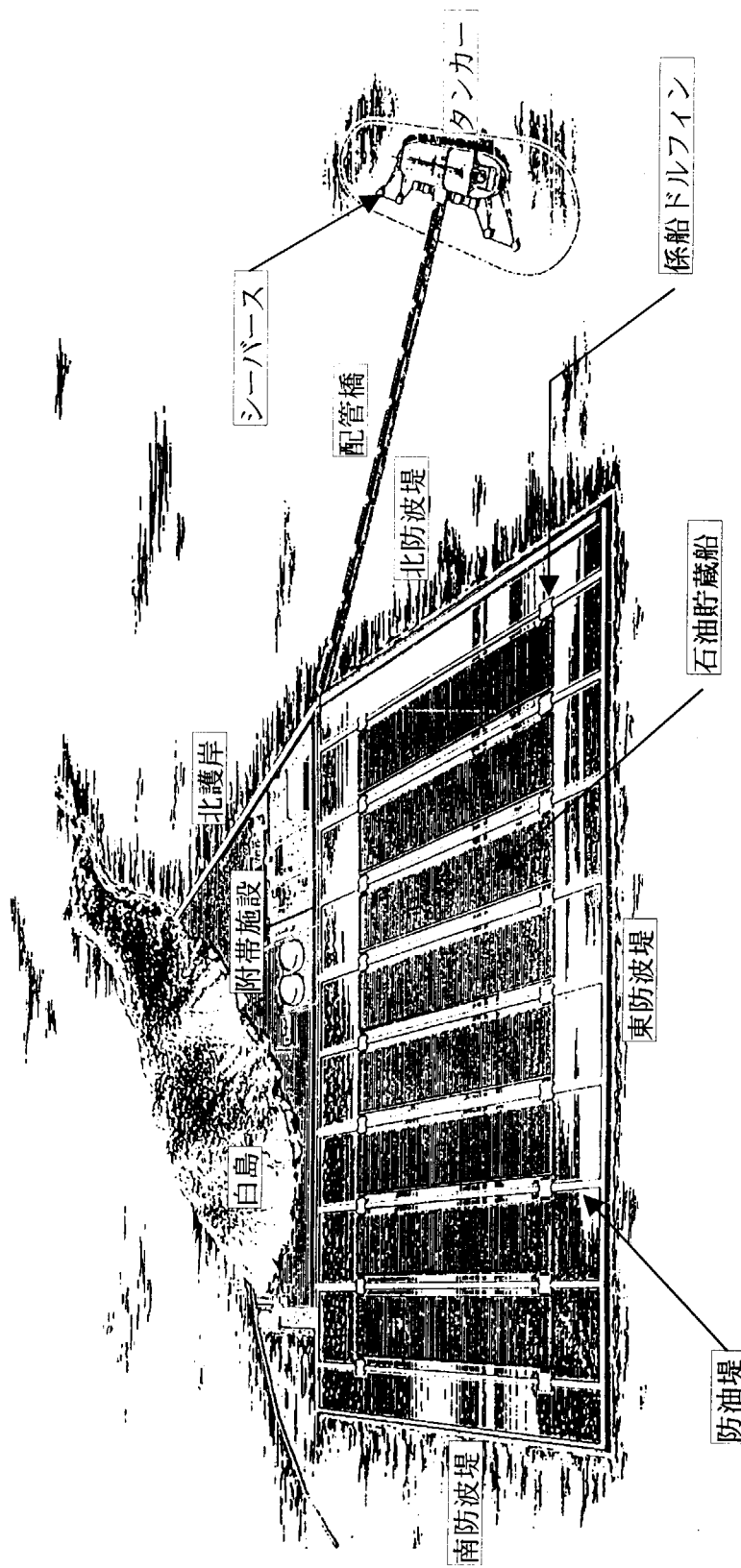


Fig.2.2.1 白島石油備蓄基地の外観図

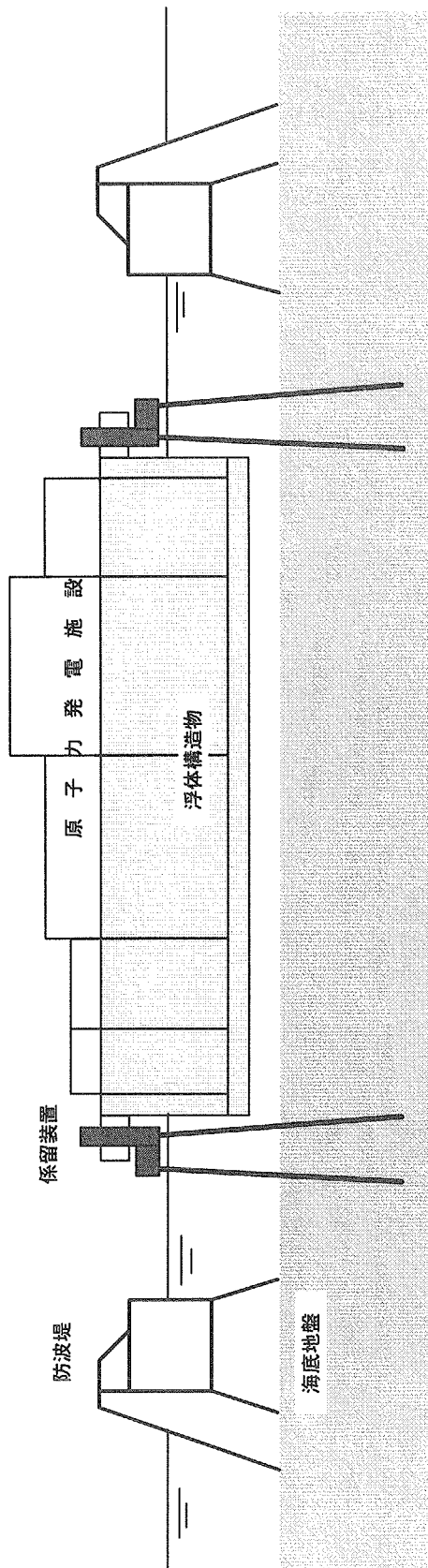
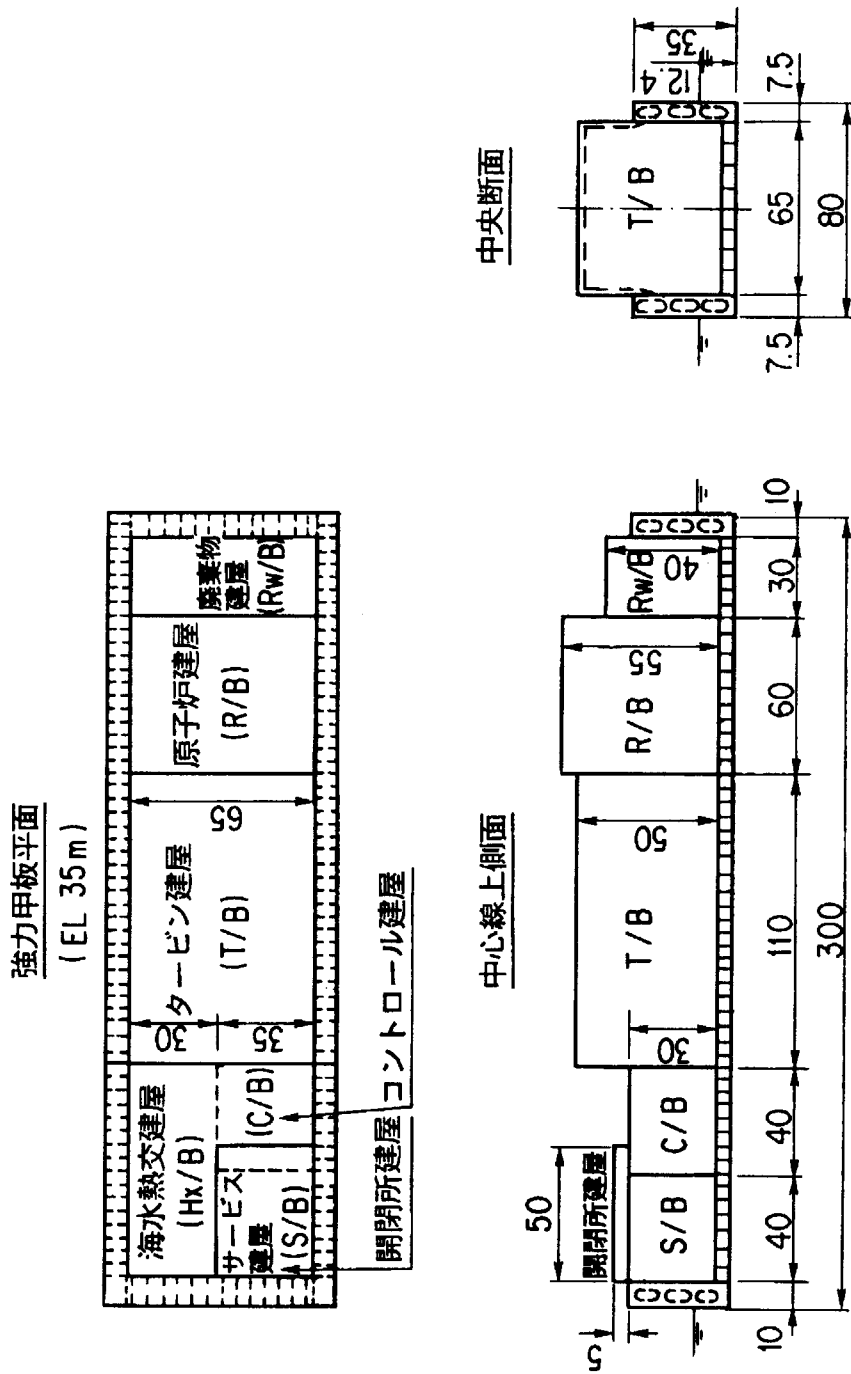


Fig.2.2.2 浮体式原子力発電施設の模式図



単位:m

Fig.3.2.1 浮体構造配置

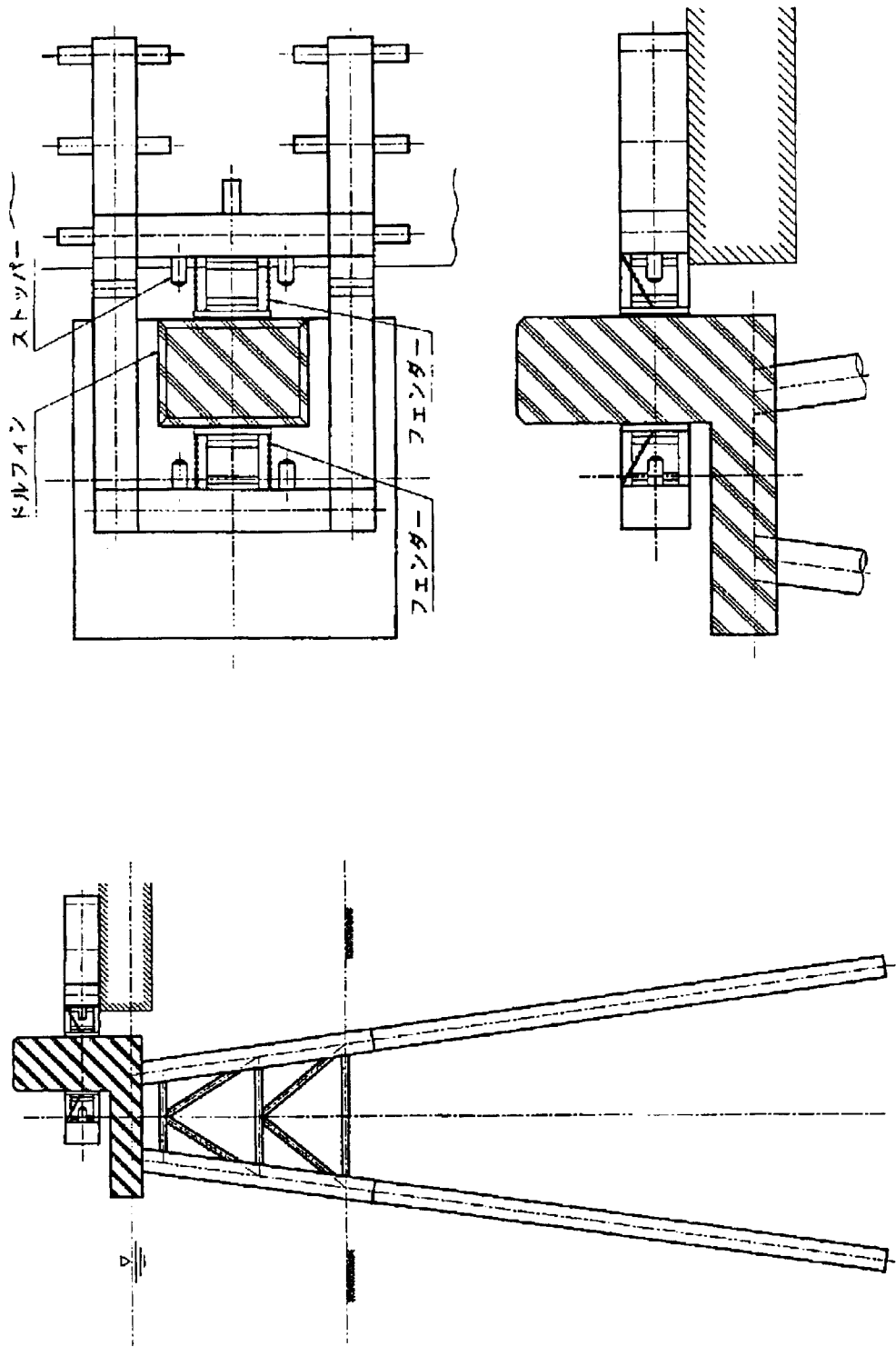


Fig. 3.3.1 ガイドフレーム・フインダー方式の構造様式例

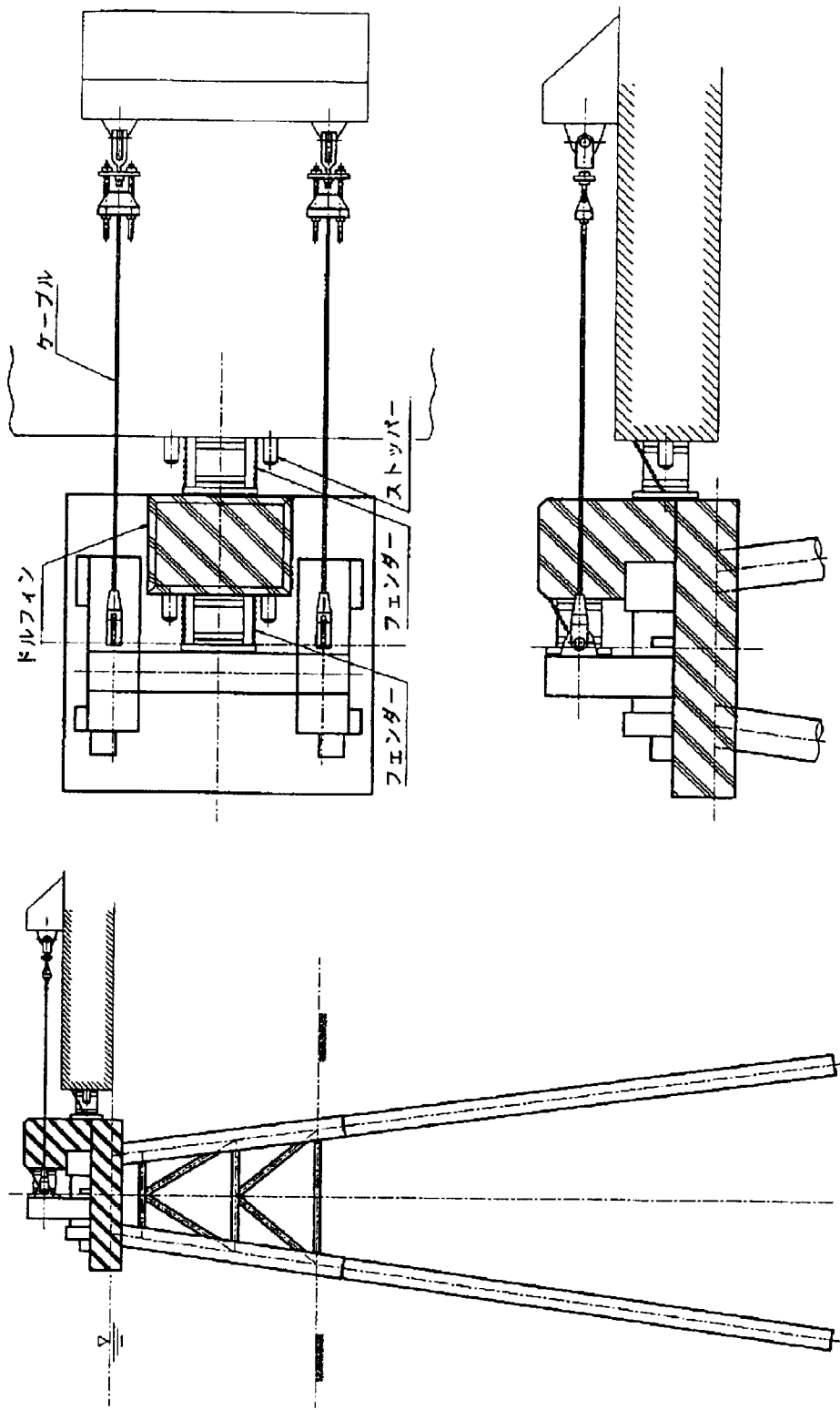


Fig. 3.3.2 ケーブル・フェンダー方式の構造様式例

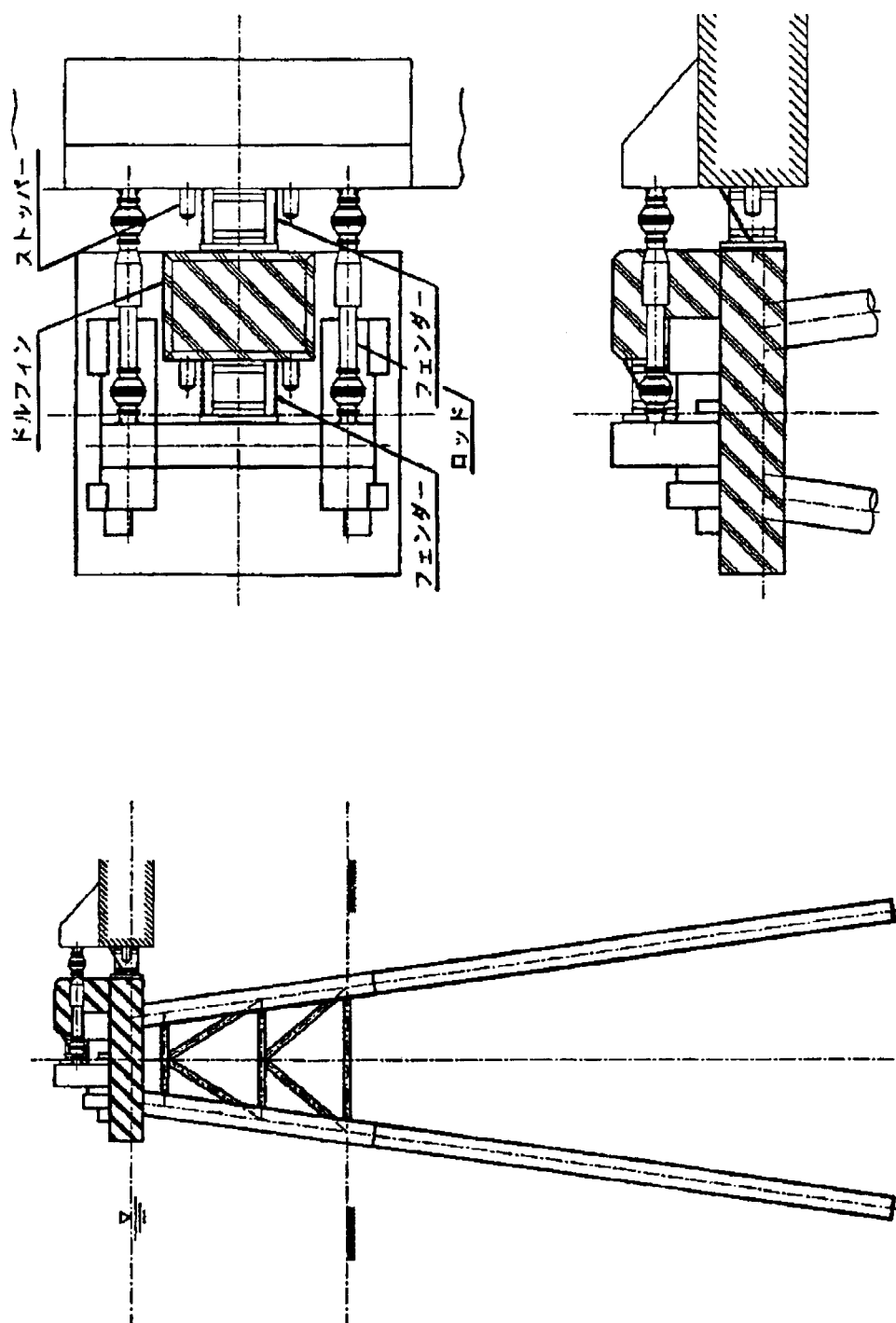


Fig. 3.3.3 ロッド・フェンダー方式の構造様式例

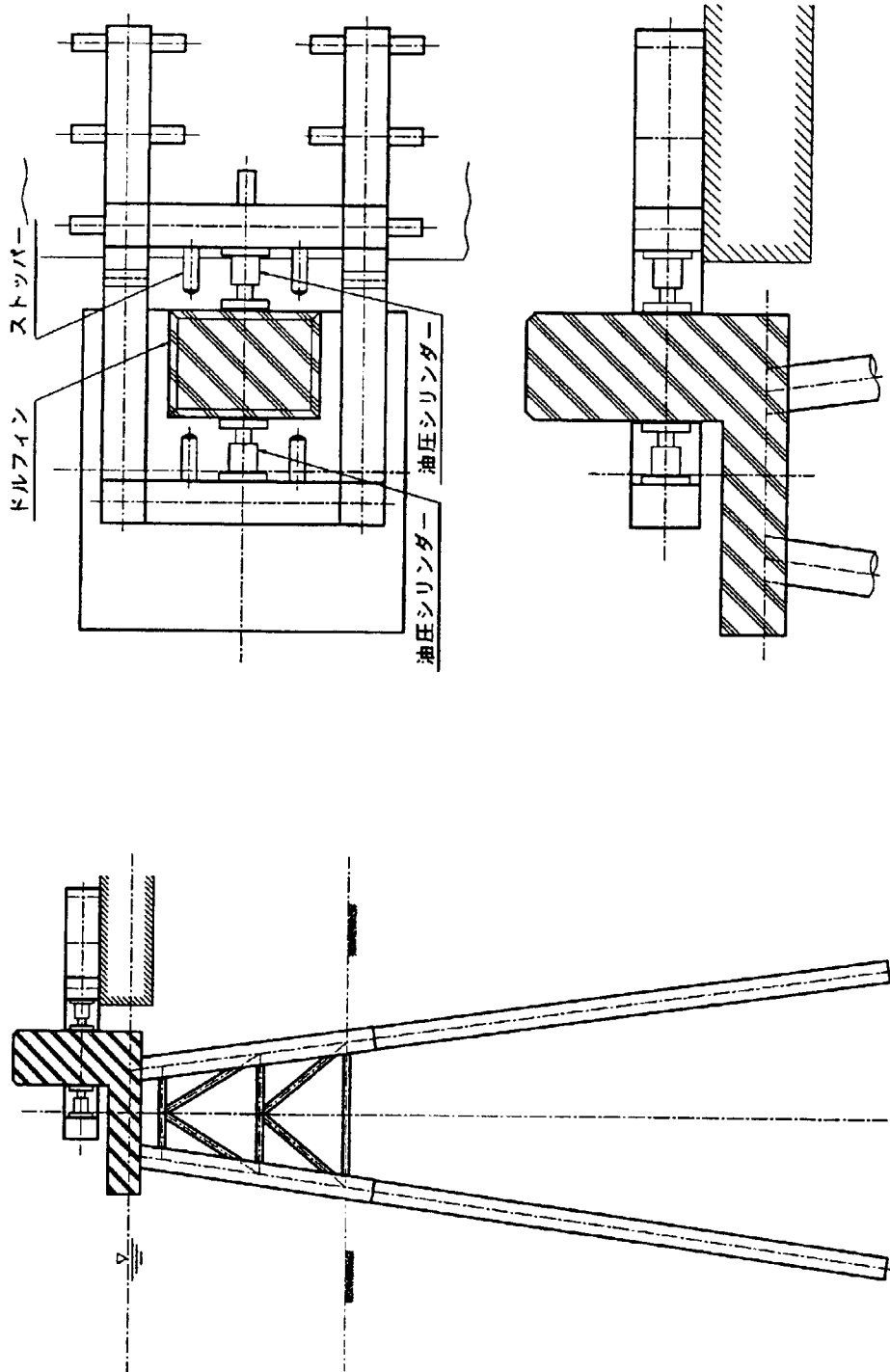


Fig. 3.3.4 ガイドフレーム・流体圧方式の構造様式例

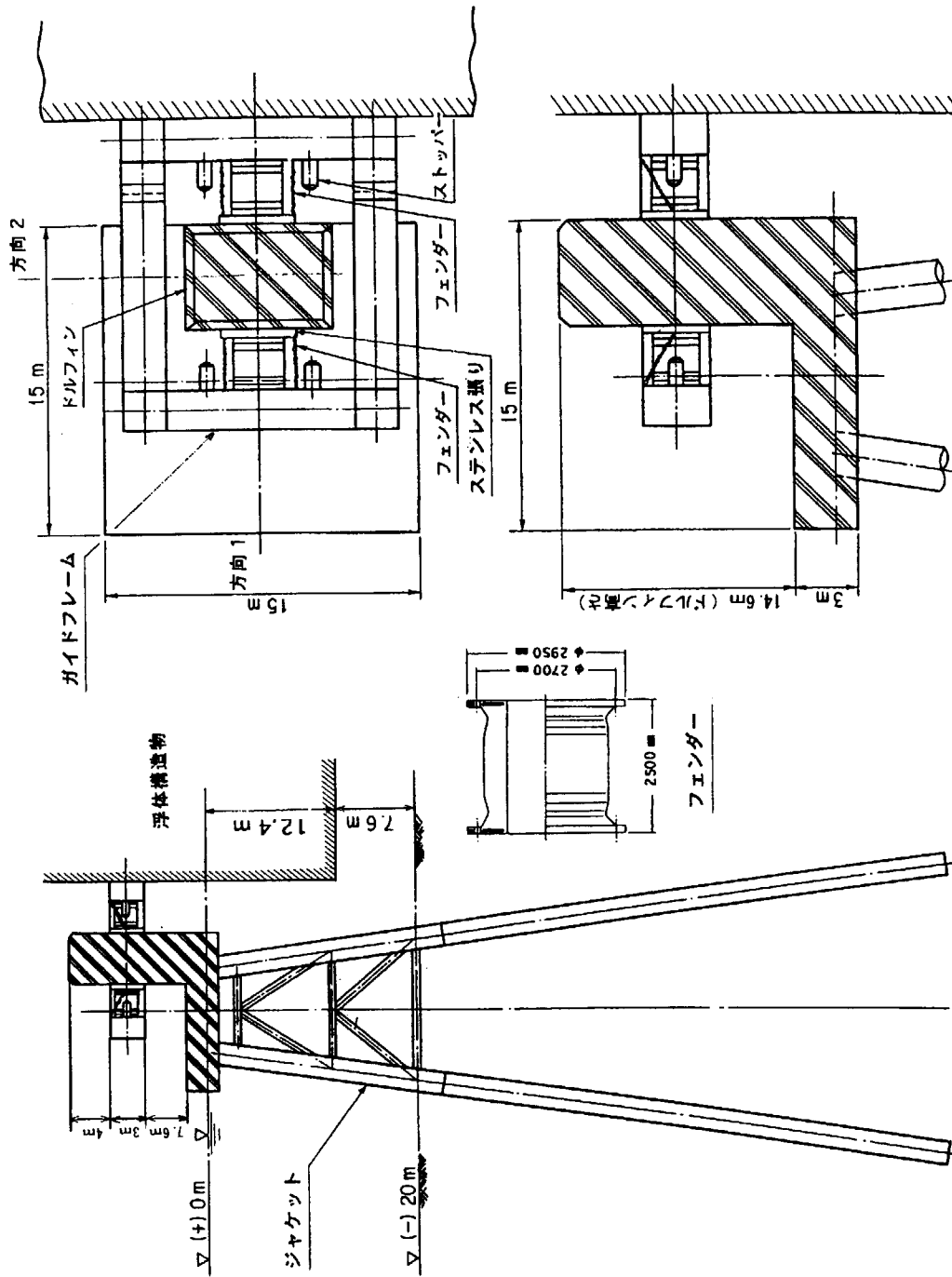


Fig. 3.3.5 概略設計における係留装置の構造様式

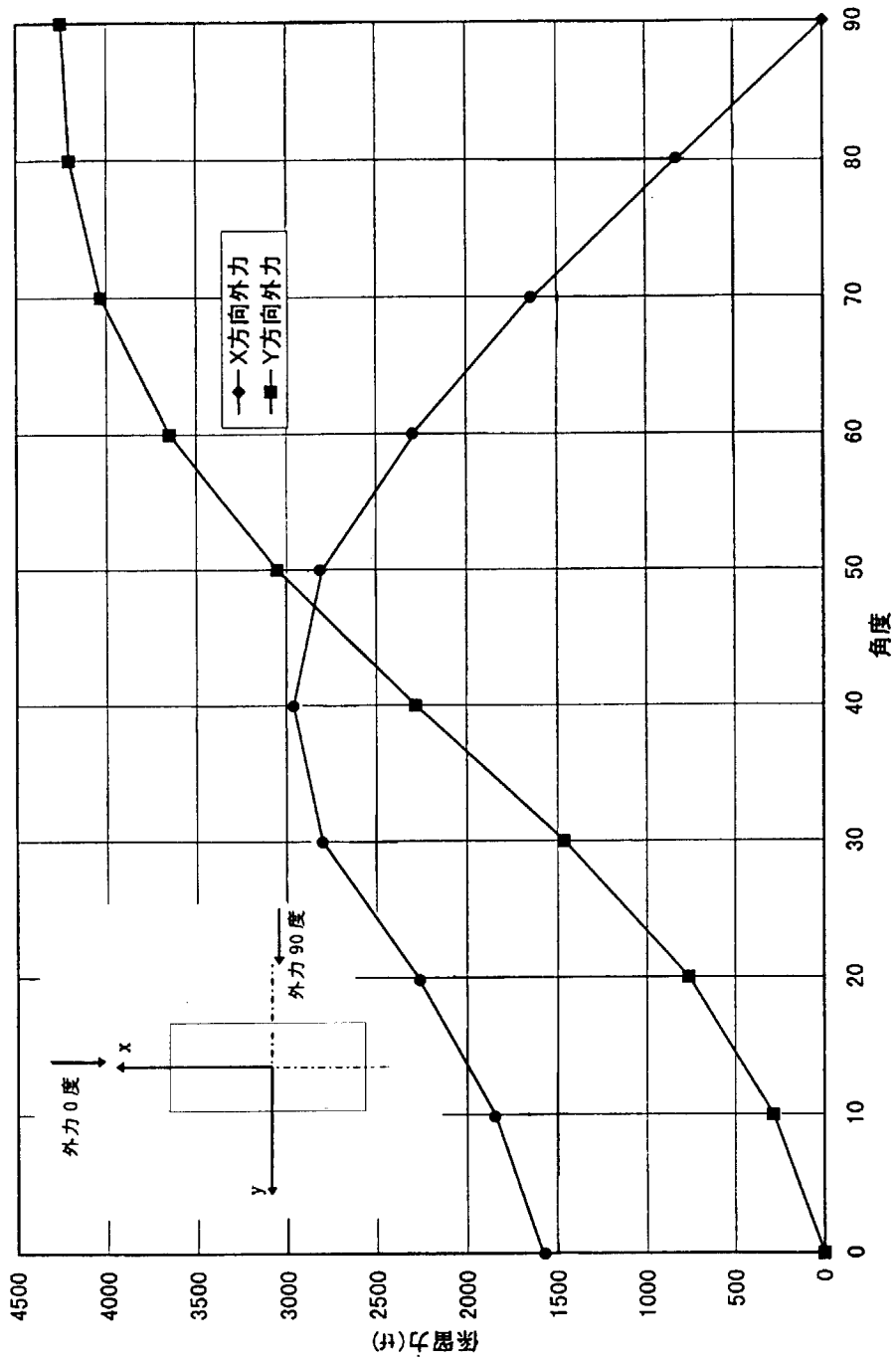


Fig. 3.3.6 係留計算結果

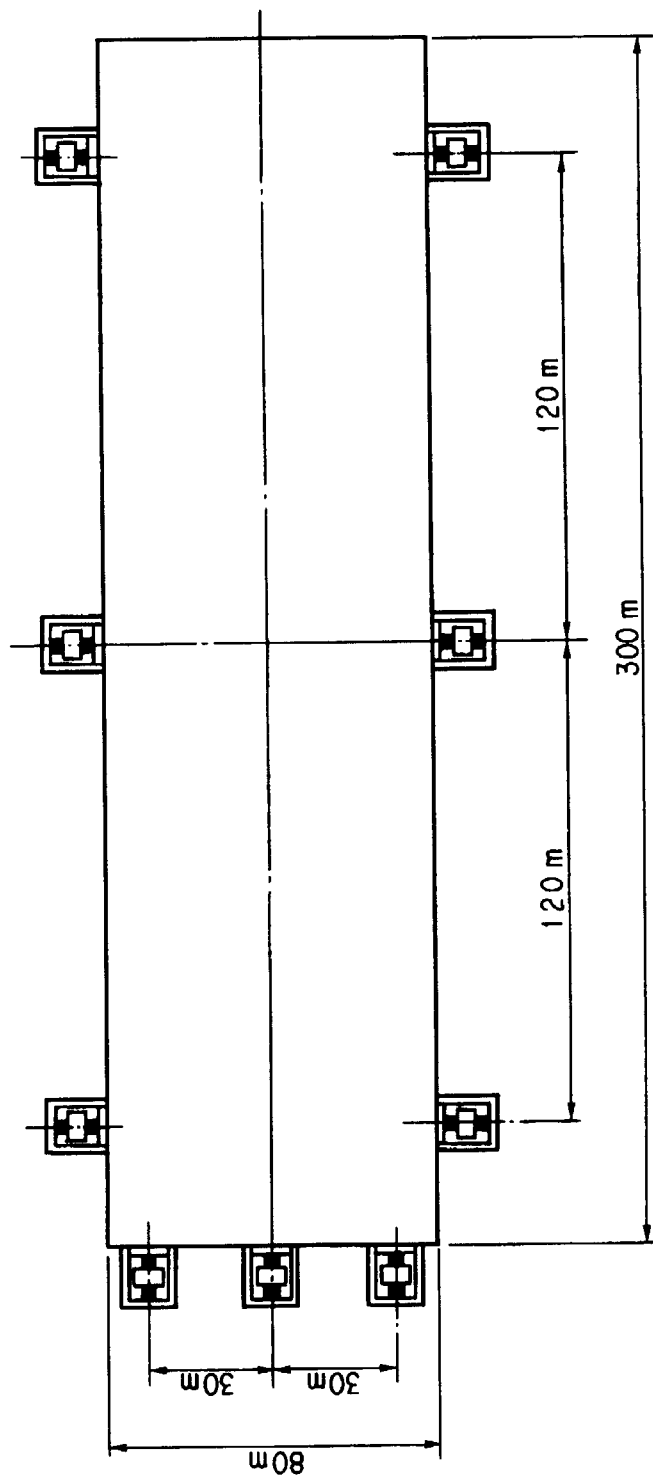


Fig. 3.3.7 係留装置の配置

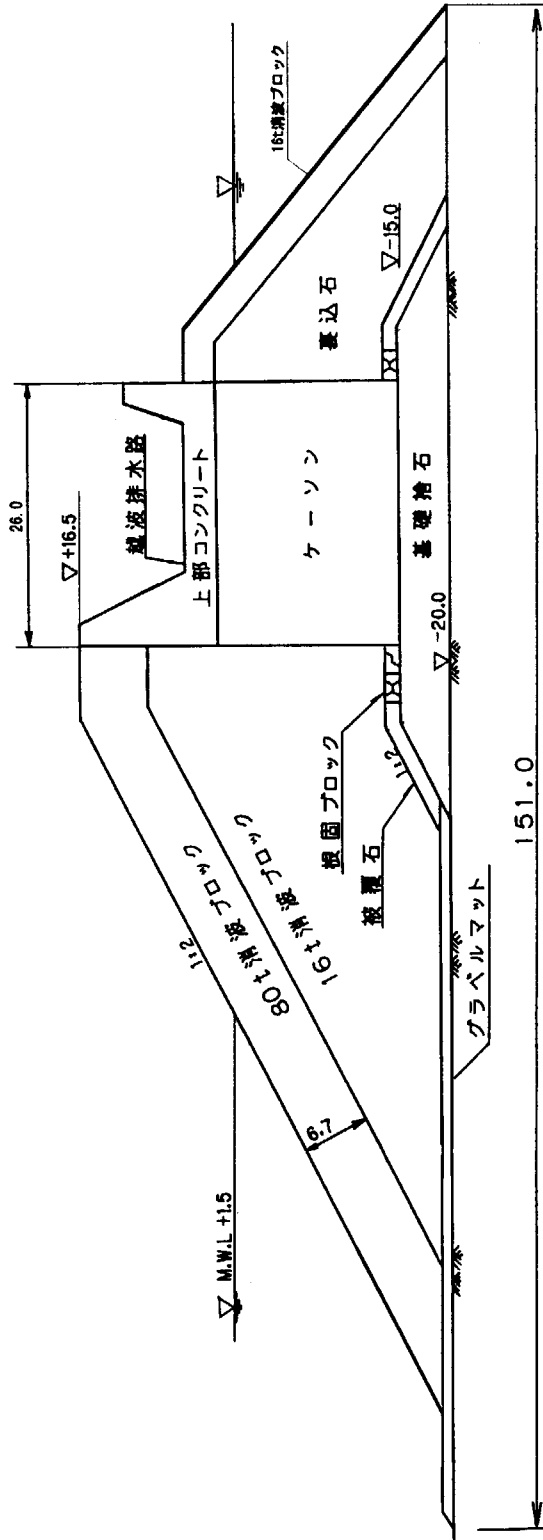


Fig. 3.4.1 防波堤の概略断面

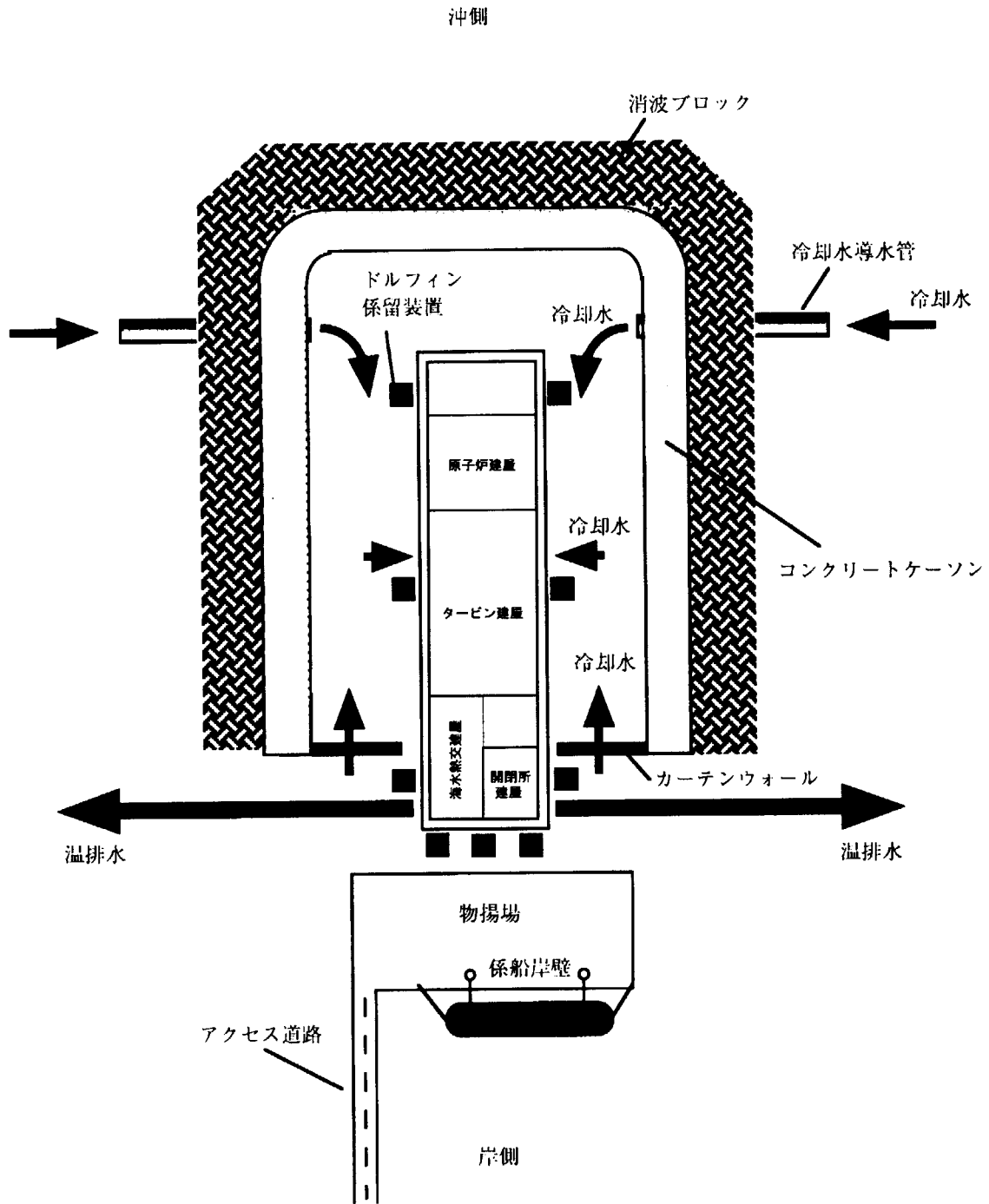


Fig. 3.5.1 浮体式原子力発電施設の全体配置

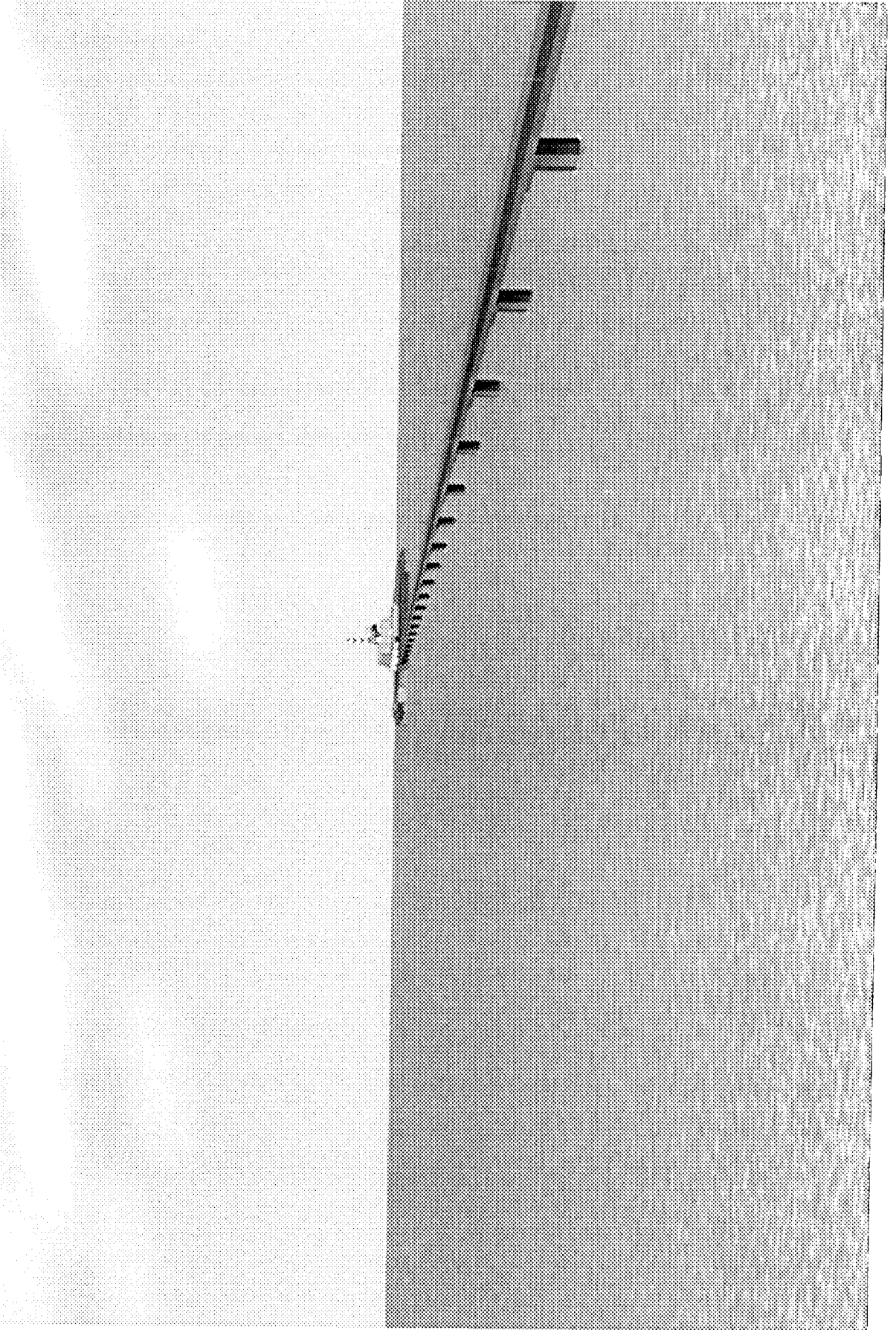


Fig. 3.5.2 鳥瞰図 (その1)

This is a blank page.

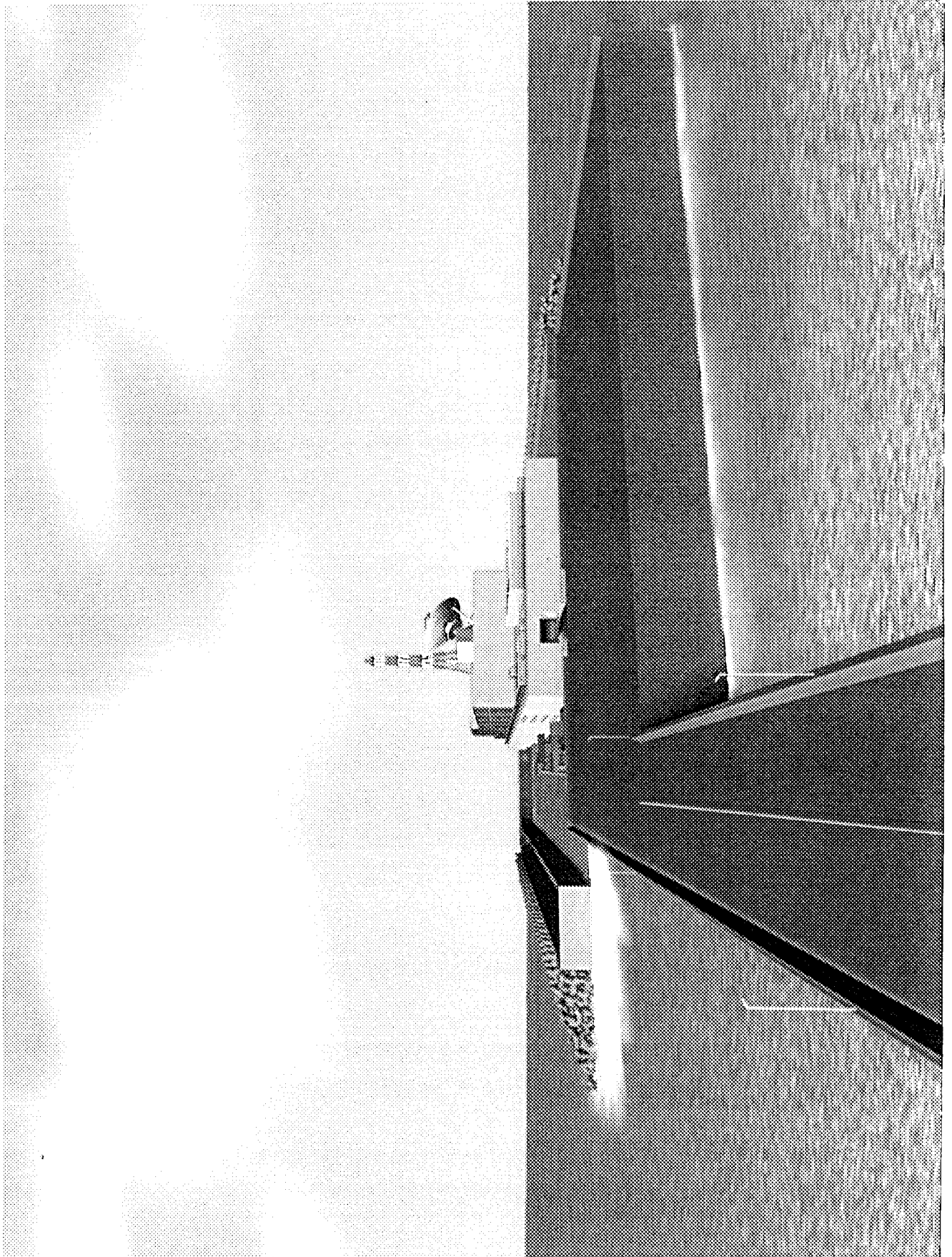


Fig. 3.5.3 鳥瞰図 (その2)

This is a blank page.

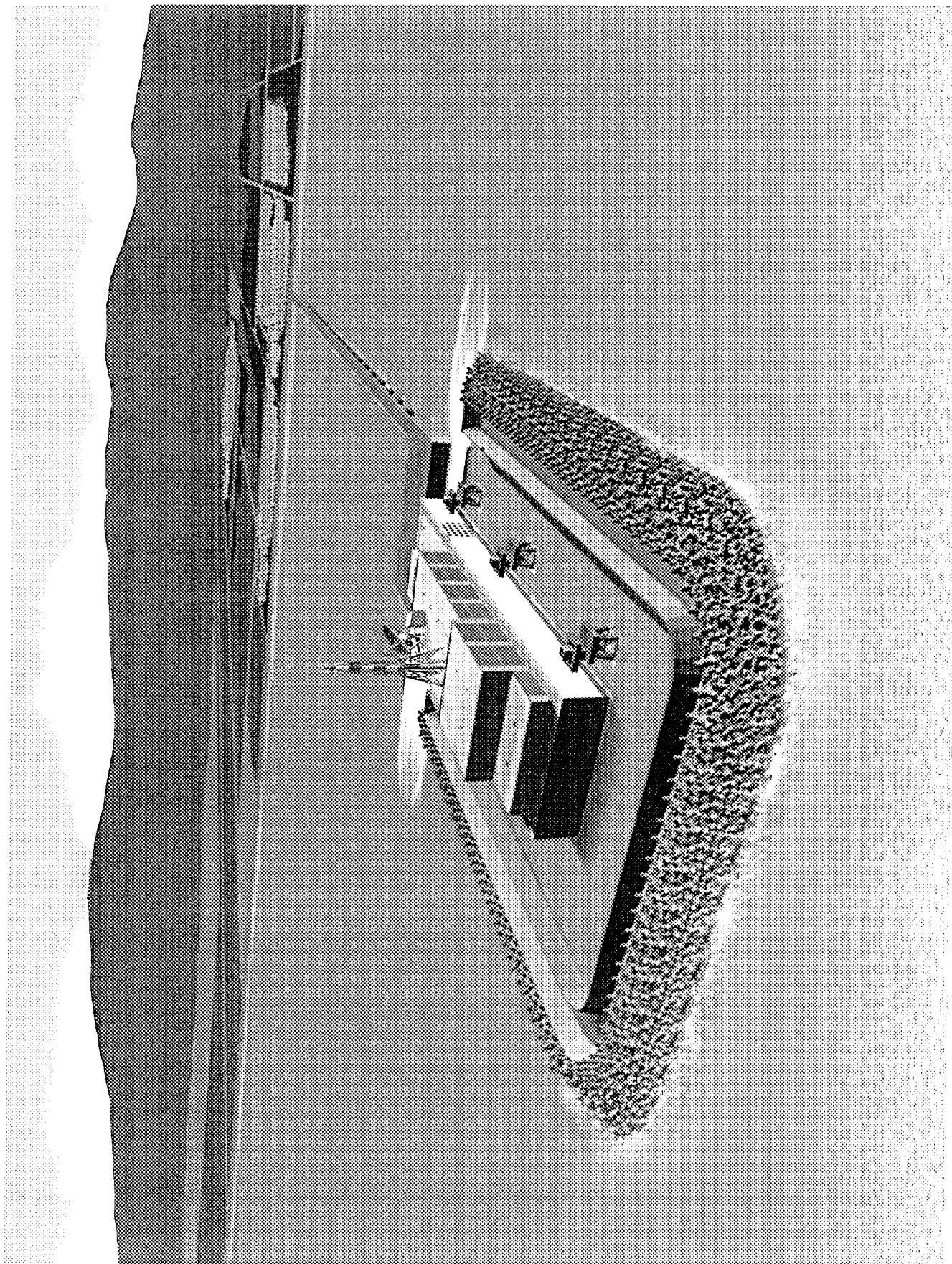


Fig. 3.5.4 鳥瞰図 (その3)

This is a blank page.

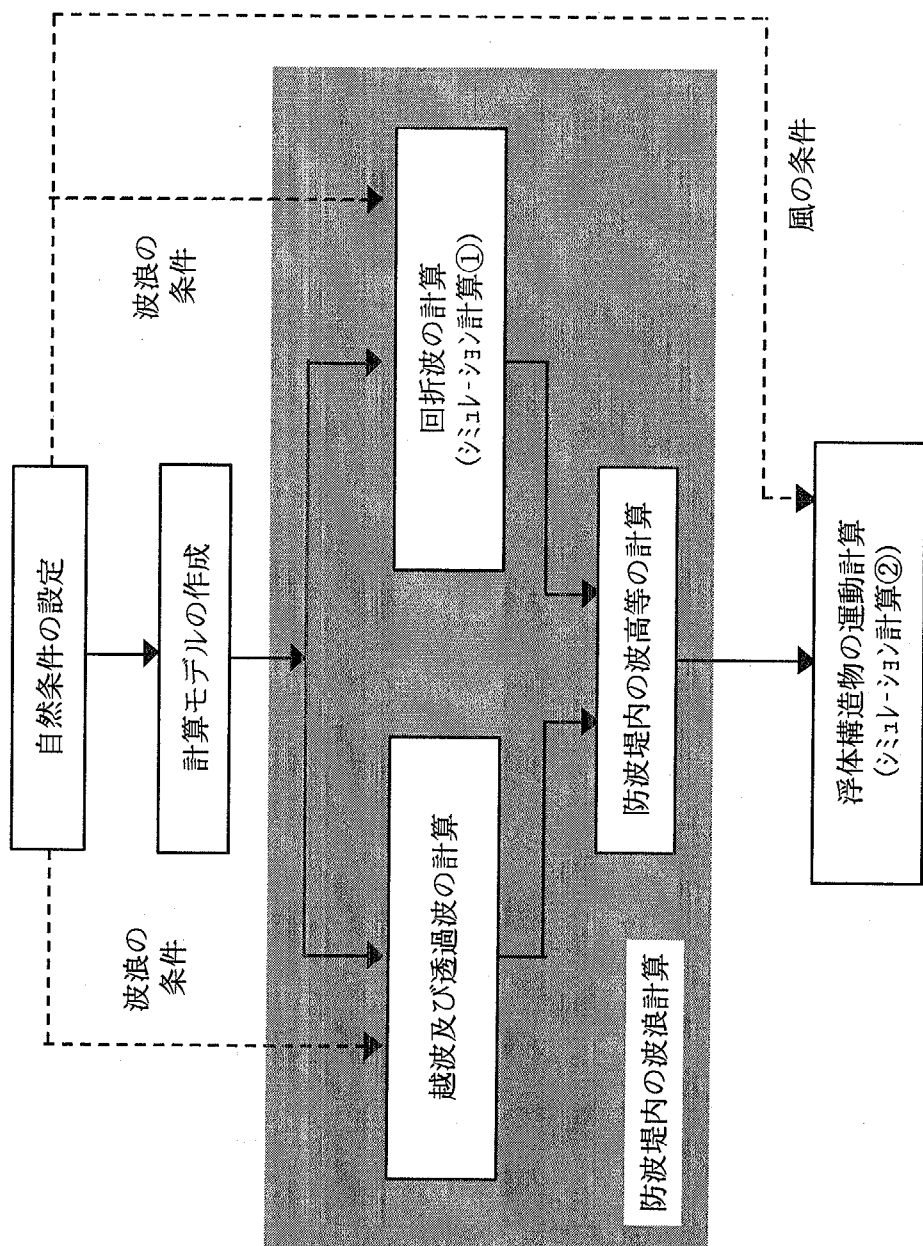


Fig. 4.1.1 シミュレーションの流れ

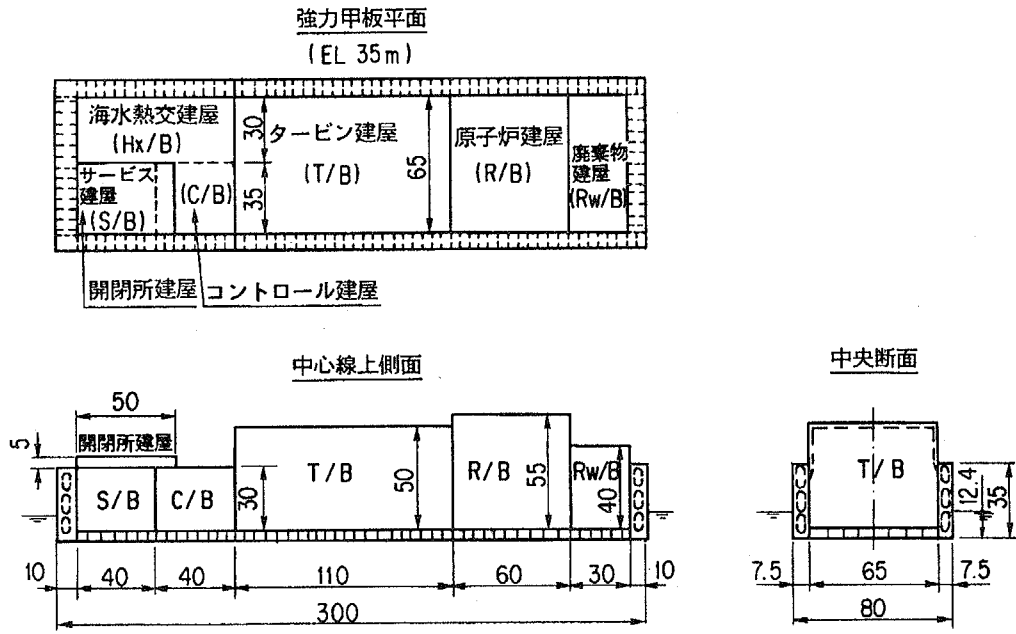


Fig. 4.1.2 浮体構造物及び建屋

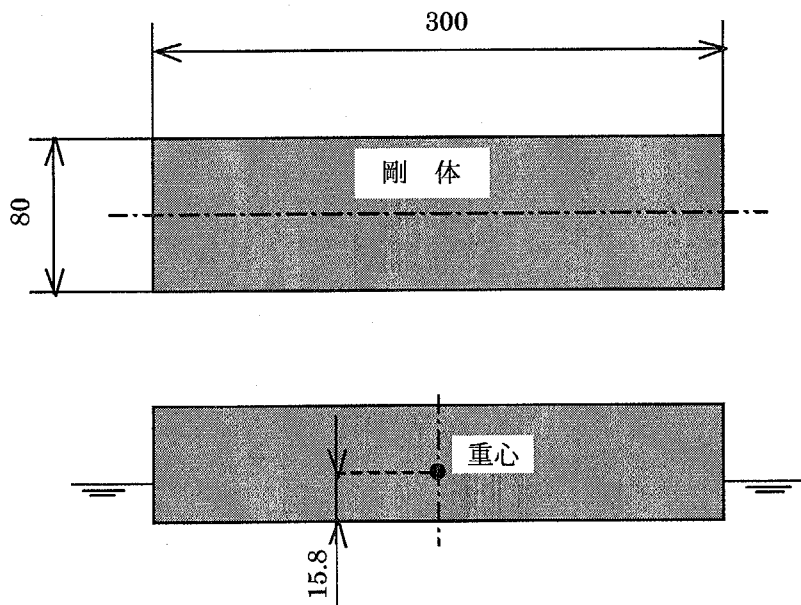


Fig. 4.1.3 浮体構造物のモデル

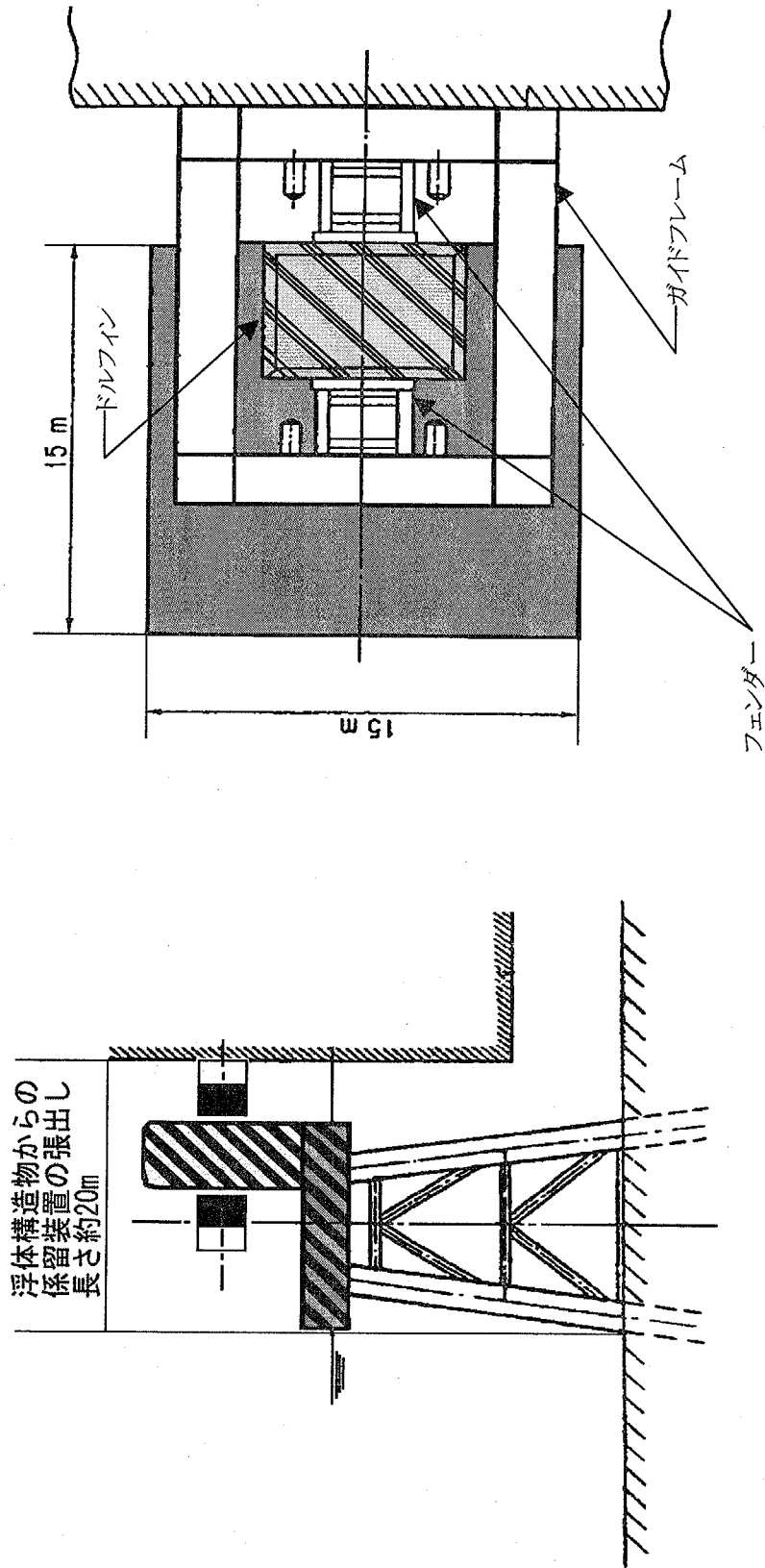


Fig. 4.1.4 係留装置の構造

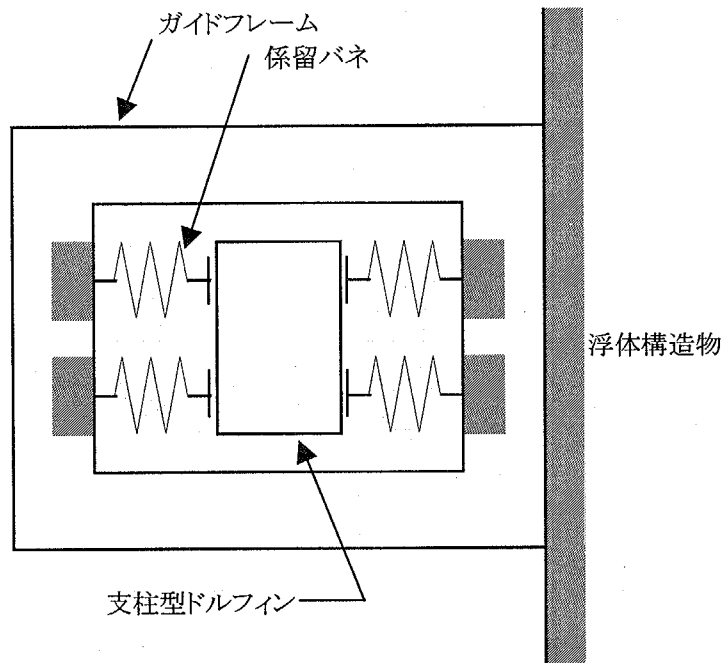


Fig. 4.1.5 係留装置のモデル

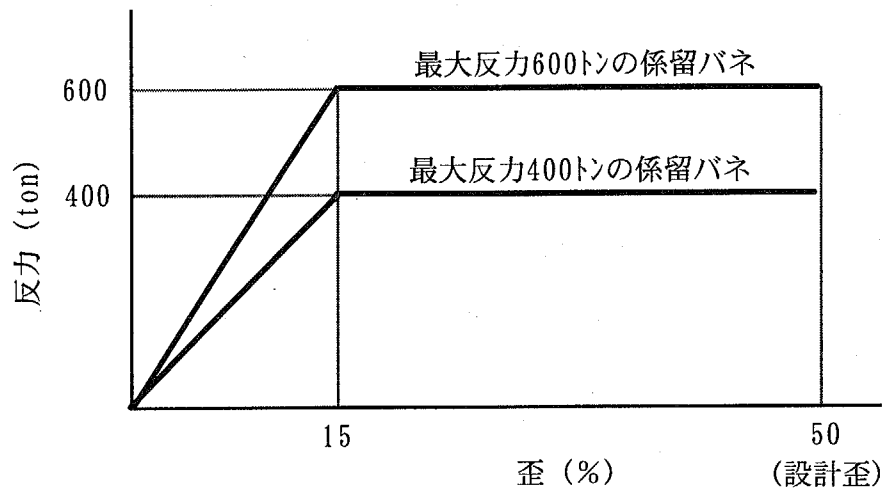


Fig. 4.1.6 係留バネの反力特性

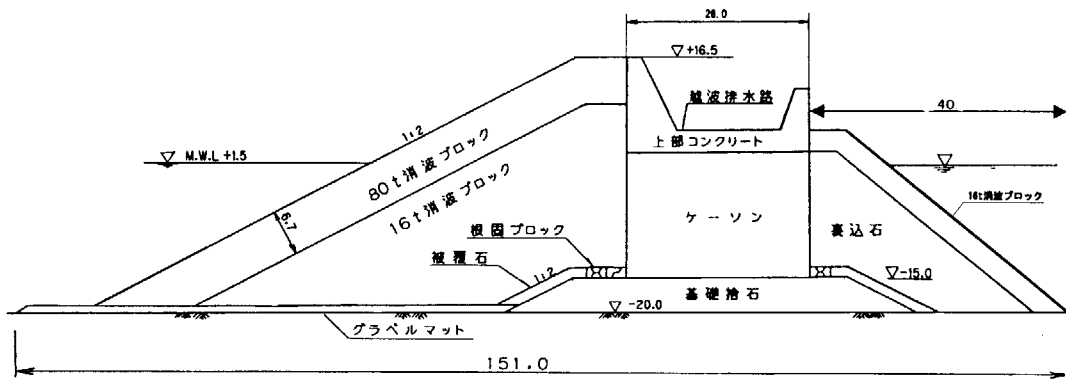


Fig. 4.1.7 防波堤の概略断面

単位：m

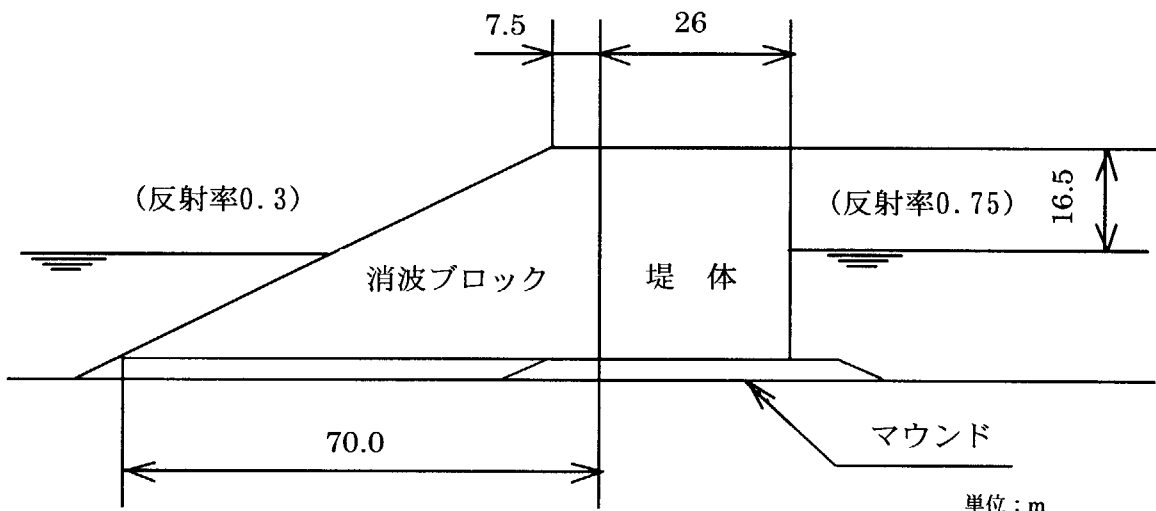


Fig. 4.1.8 主防波堤の断面モデル

単位：m

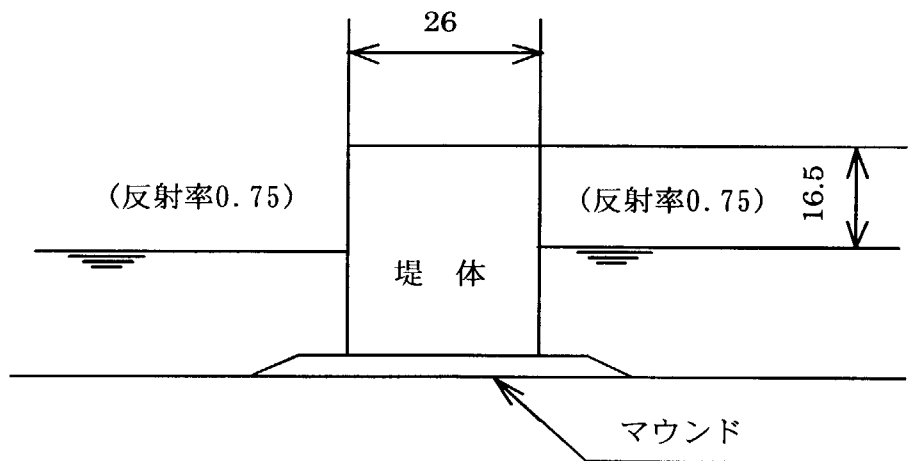


Fig. 4.1.9 直線防波堤の断面モデル

単位：m

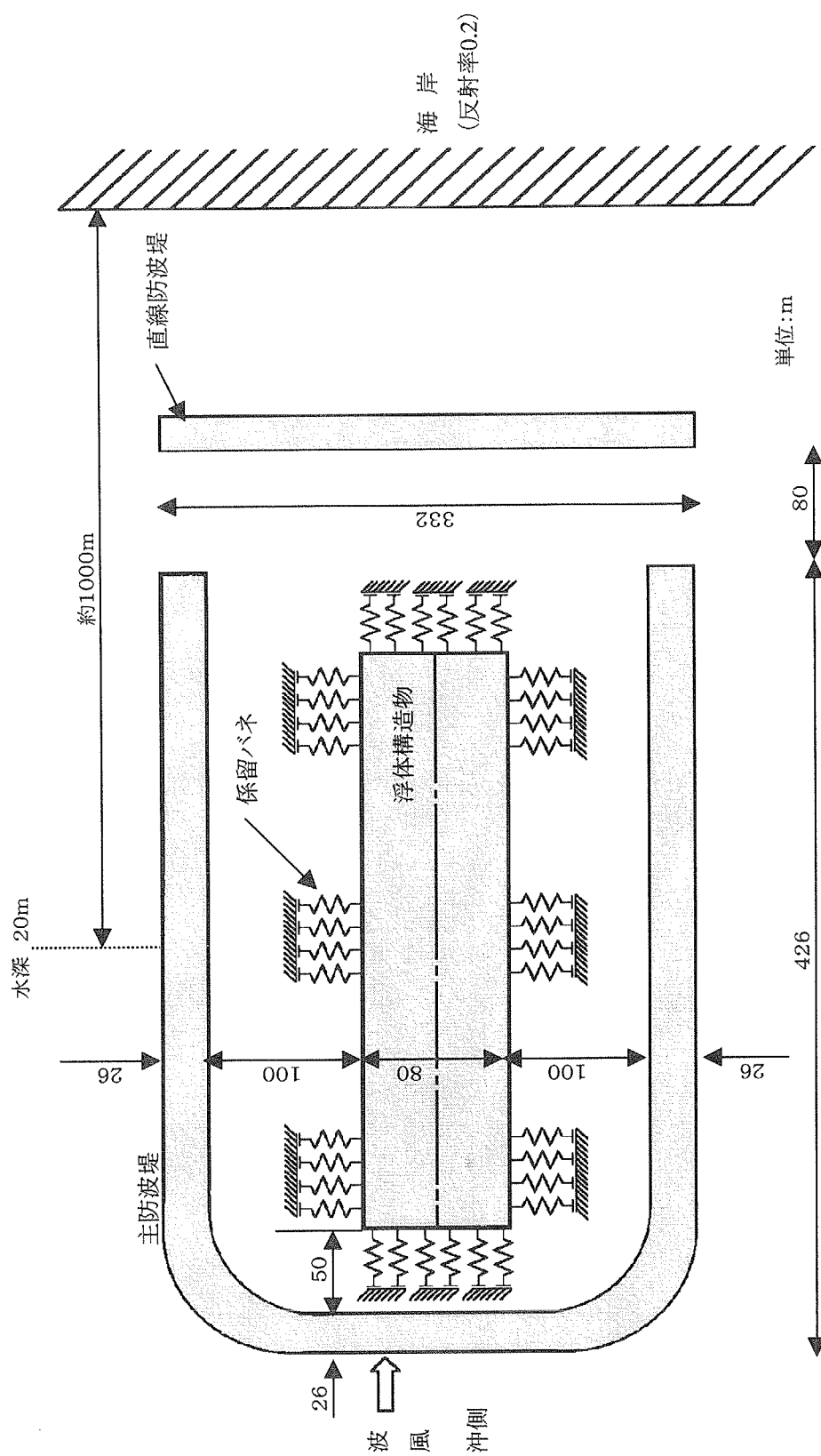


Fig. 4.1.10 基本モデル

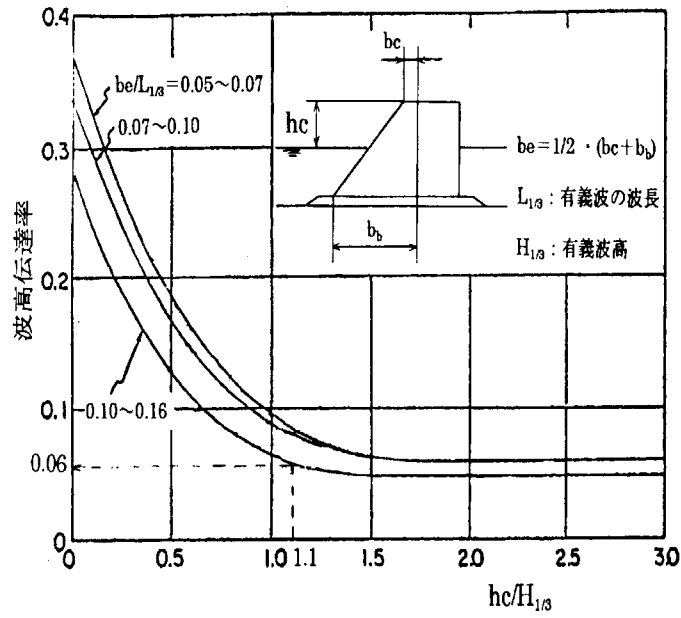


Fig. 4.1. 11 消波ブロック被覆堤の波高伝達率

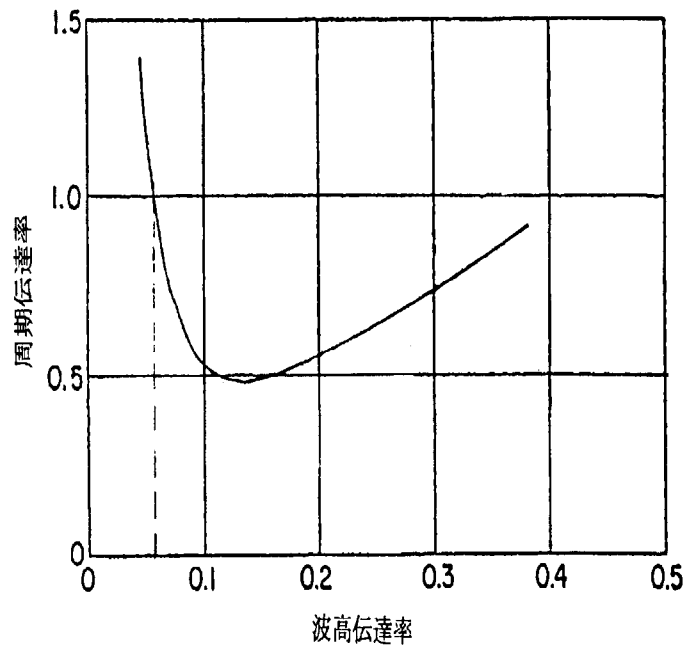


Fig. 4.1. 12 消波ブロック被覆堤の周期伝達率

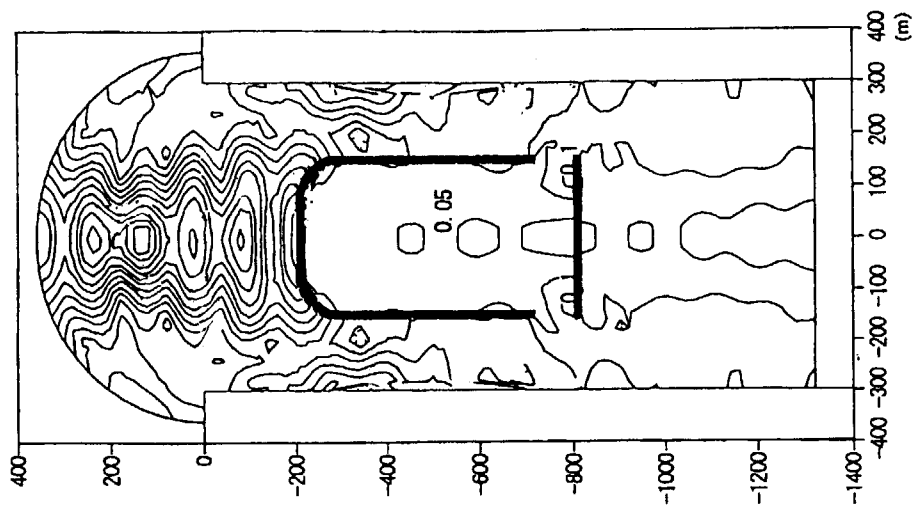


Fig. 4.1.14 基本モデルにおける
波高増幅率分布の計算例

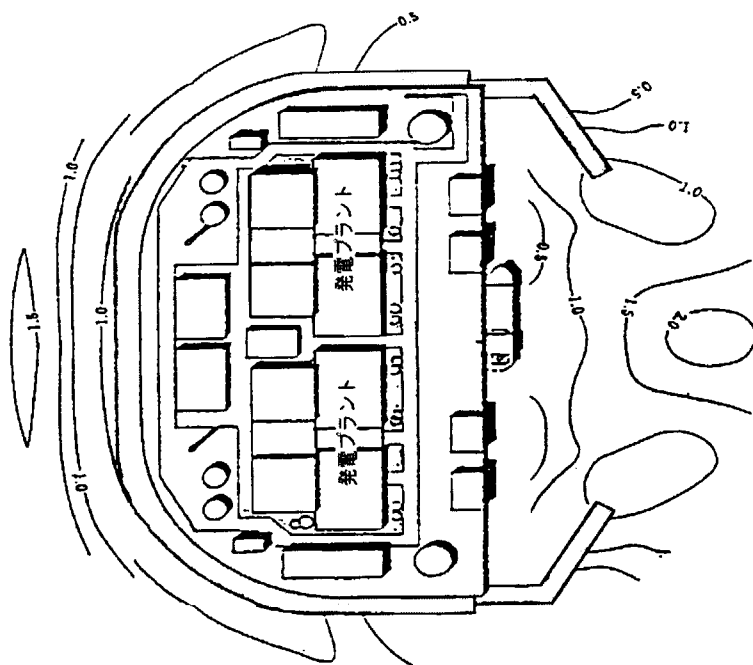


Fig. 4.1.13 波高増幅率の分布例

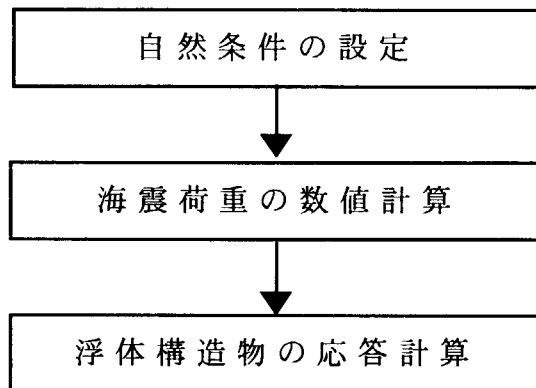


Fig. 4.2.1 海震による浮体運動シミュレーションの流れ

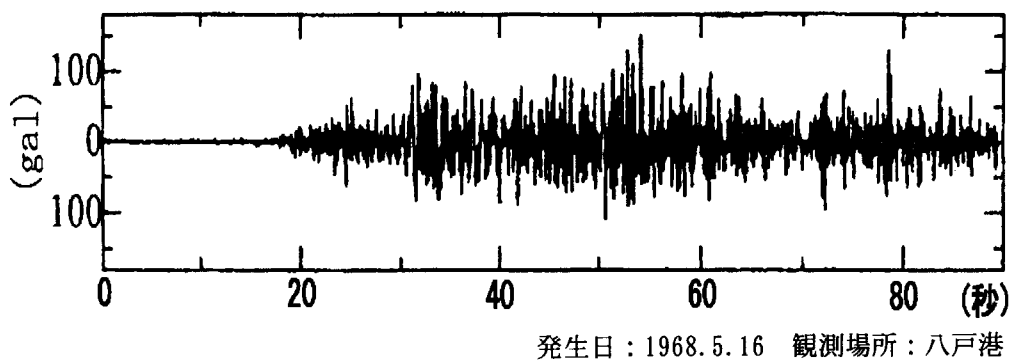


Fig. 4.2.2 十勝沖地震の上下加速度(時系列)

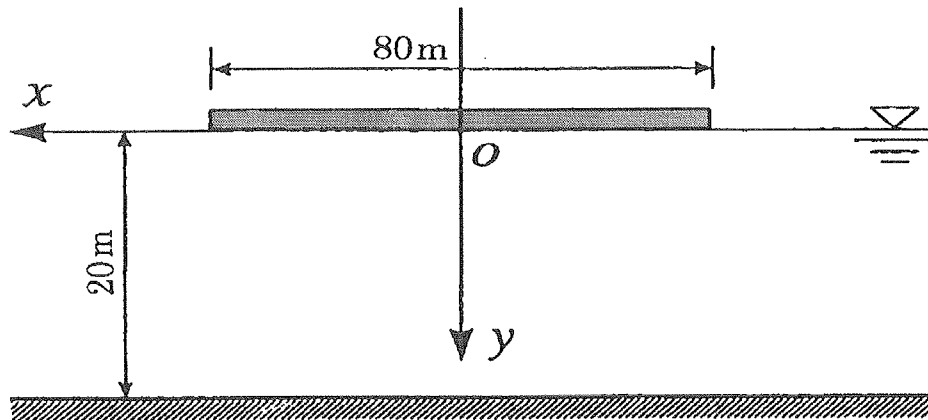


Fig. 4.2. 3 座標系

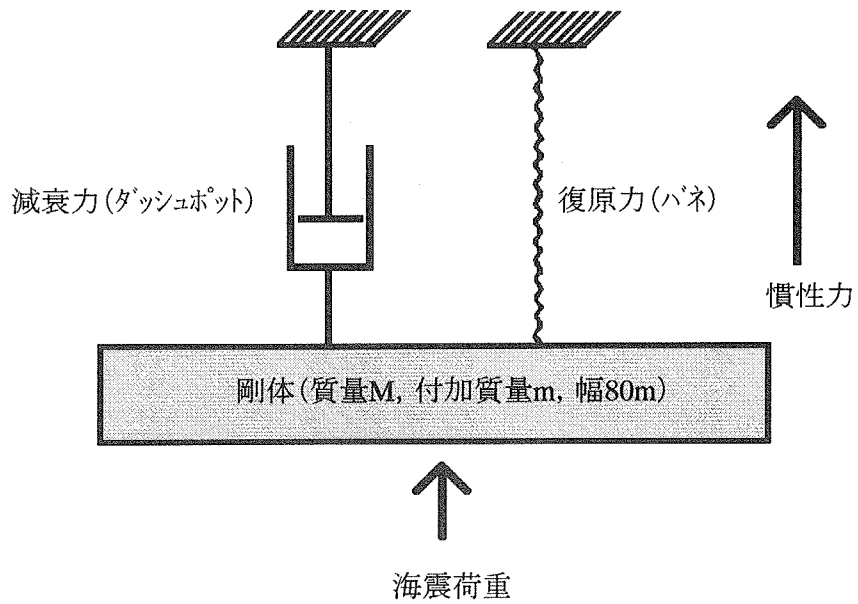
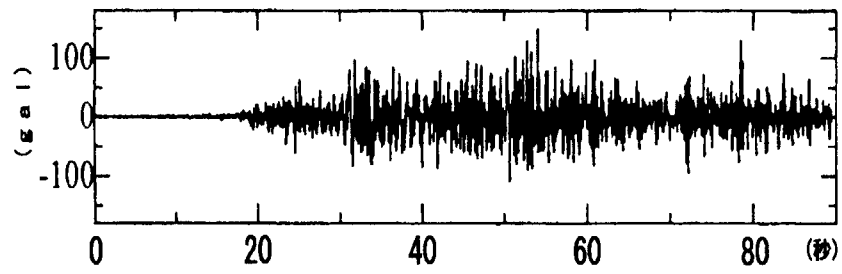
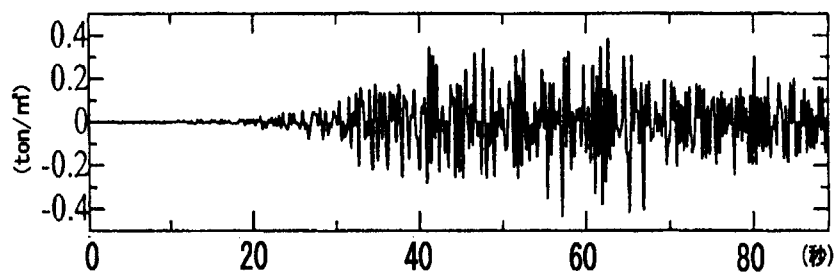


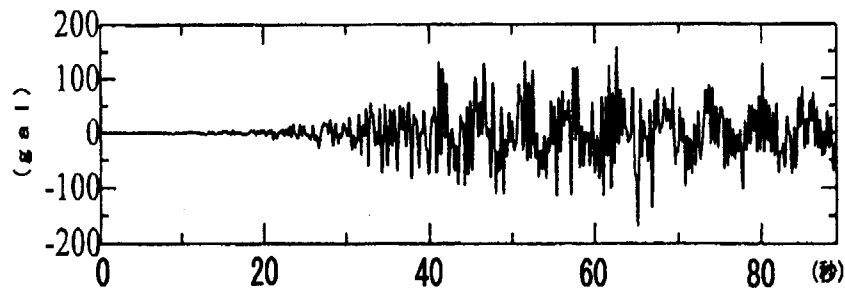
Fig. 4.2. 4 1自由度の振動モデル



十勝沖地震の上下加速度 (時系列)



浮体構造物底面の海震荷重 (時系列)



浮体構造物の上下加速度 (時系列)

Fig. 4.2. 5 シミュレーション計算結果

付録 I 浮上式原子力発電プラントAGS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した浮上式原子力発電プラントである。AGSの完成時予想外観図をFig. I -1に、概要図をFig. I -2に示す。

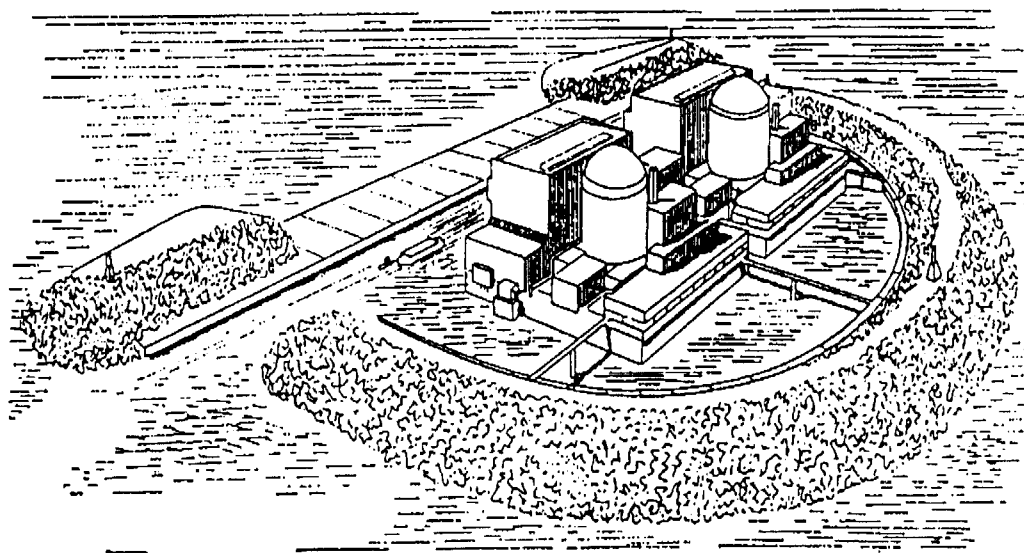
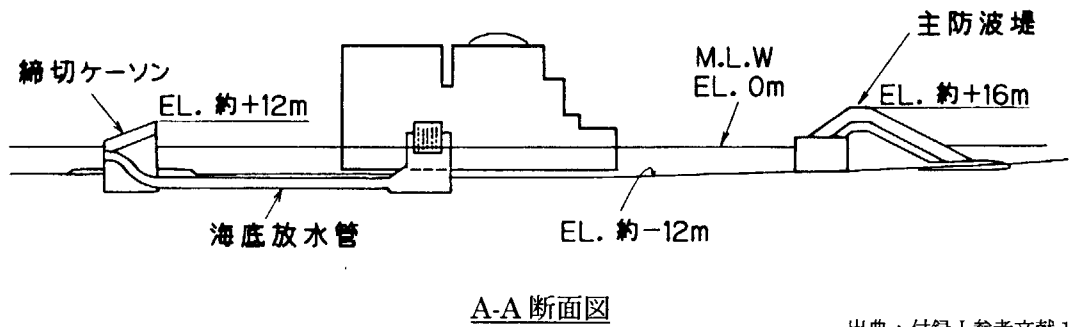
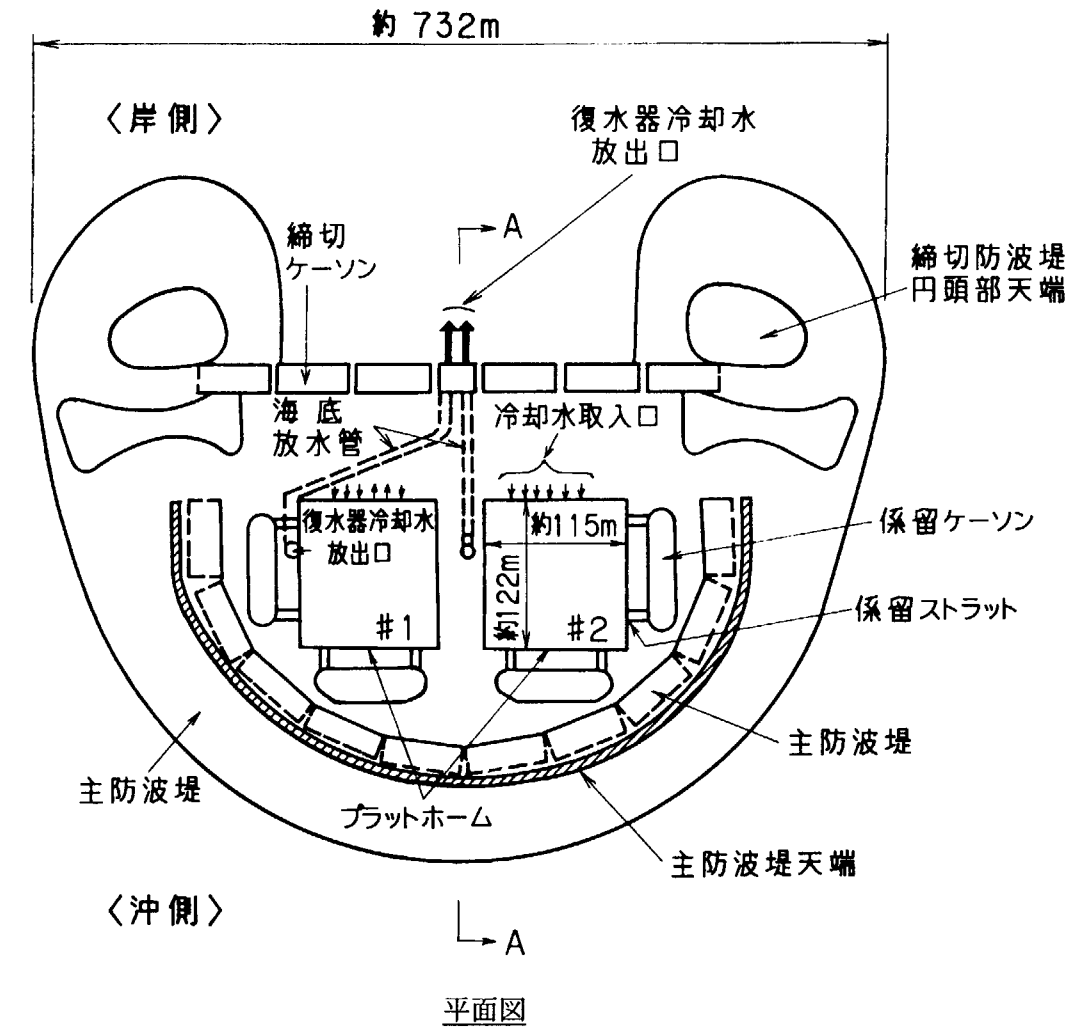


Fig. I -1 AGSの予想外観図



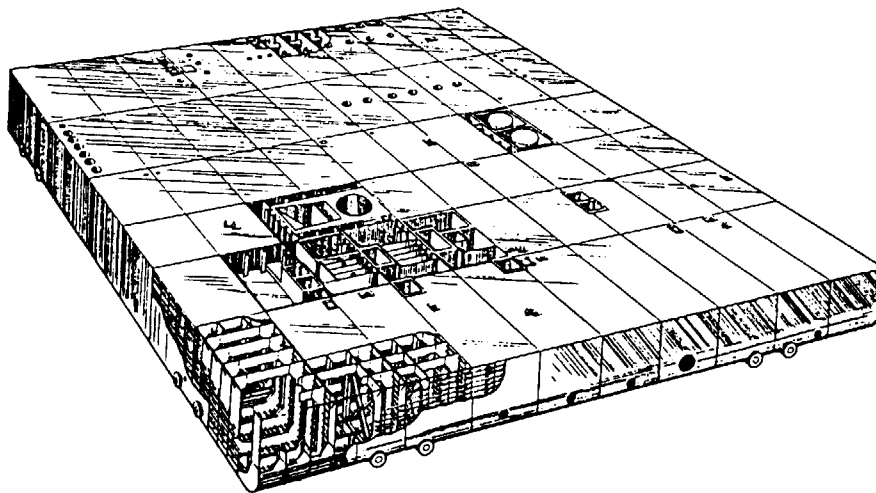
出典：付録I参考文献1)

Fig. I-2 AGSの概要図

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、浮上型原子力発電プラントとしての特殊性は以下のような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、113m（巾）×120m（長さ）×12m（深さ）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。



出典：付録I参考文献2)

Fig. I-3 AGSのプラットフォーム²⁾

付録I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).

付録II 波浪、風による浮体運動シミュレーションの詳細結果

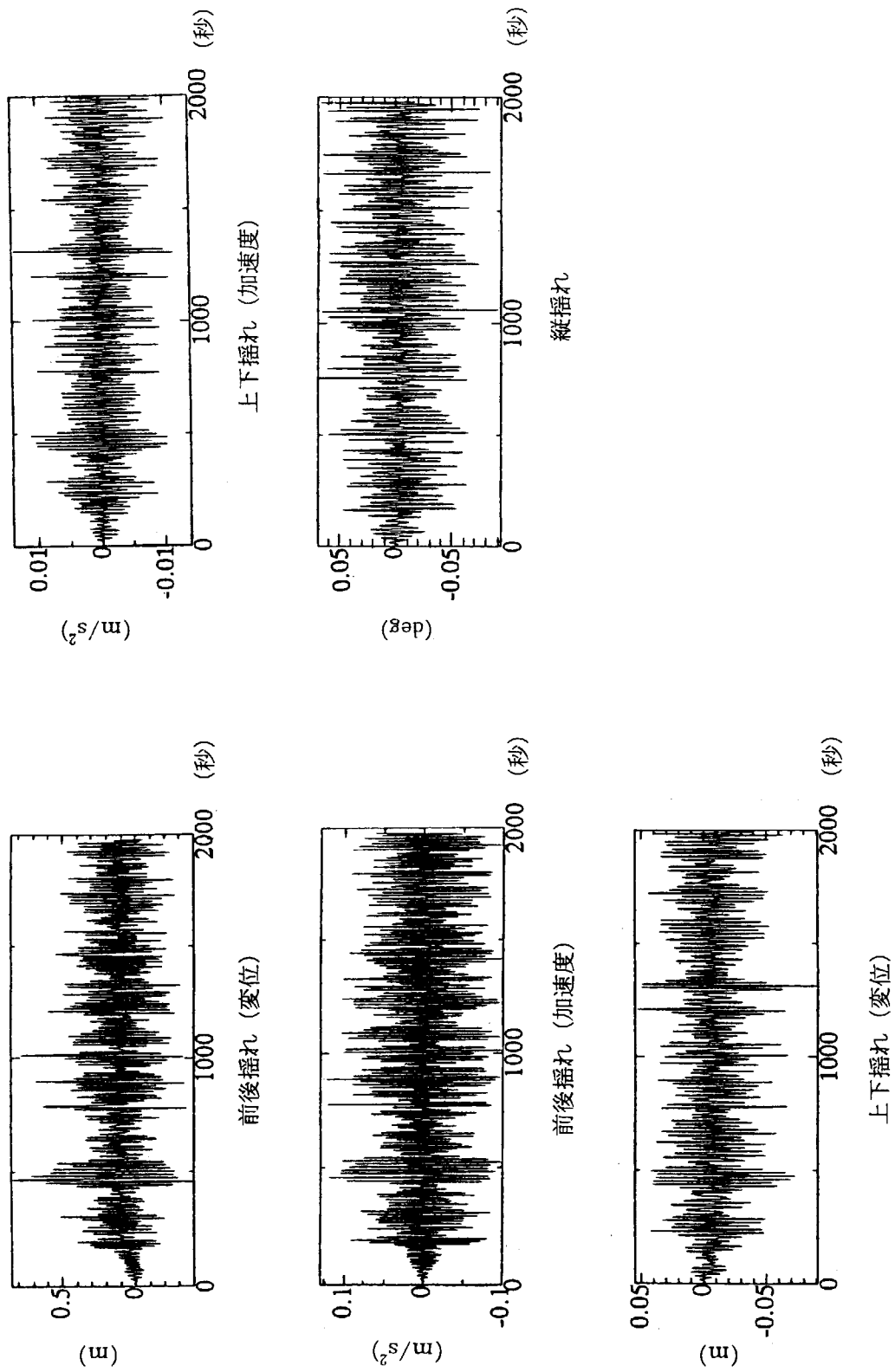


Fig. II - 1 浮体構造物の運動時系列データ (ケース1A)

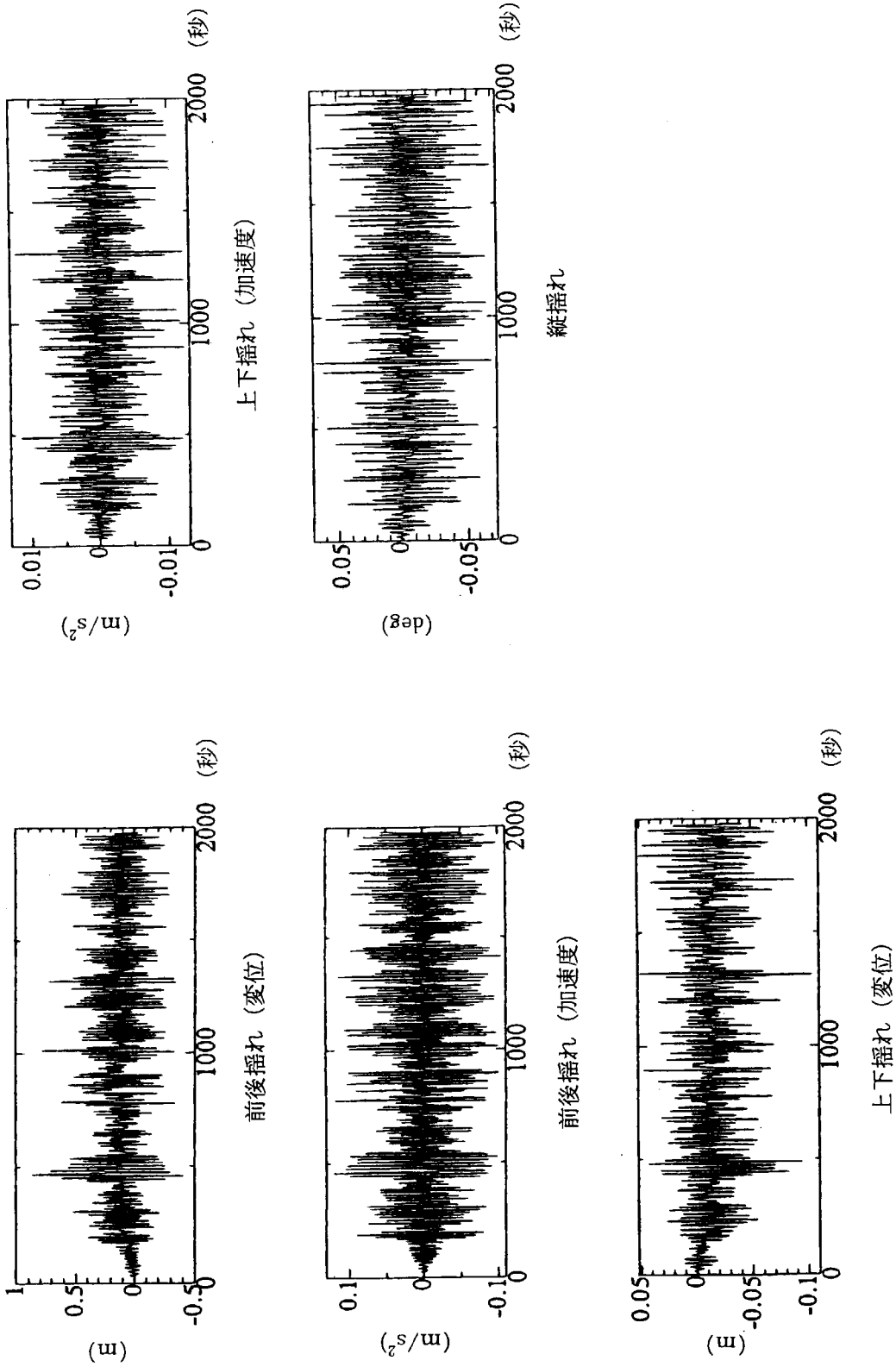


Fig. II-2 浮体構造物の運動時系列データ (ケース1B)

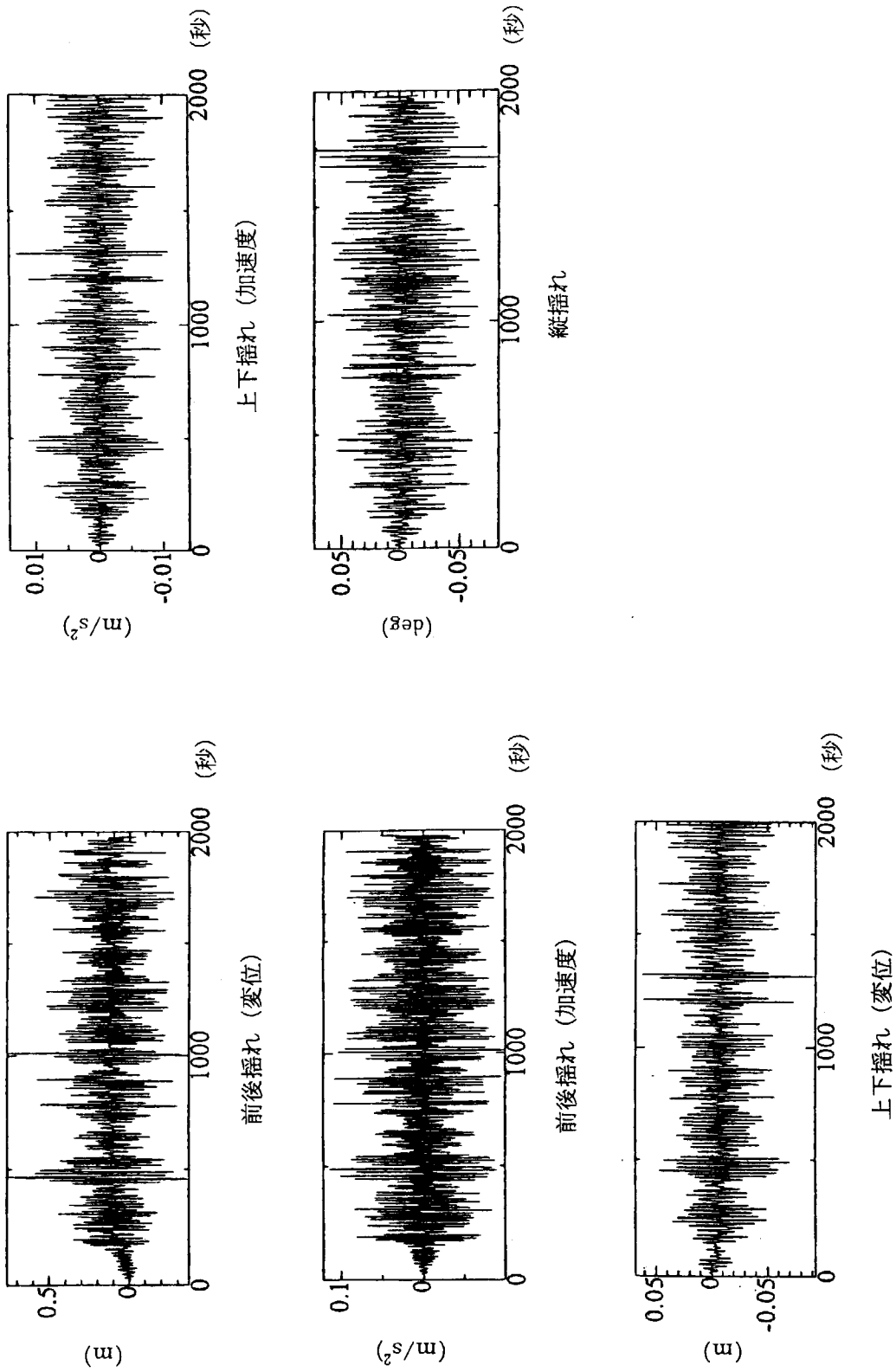


Fig. II - 3 浮体構造物の運動時系列データ (ケース 1 C)

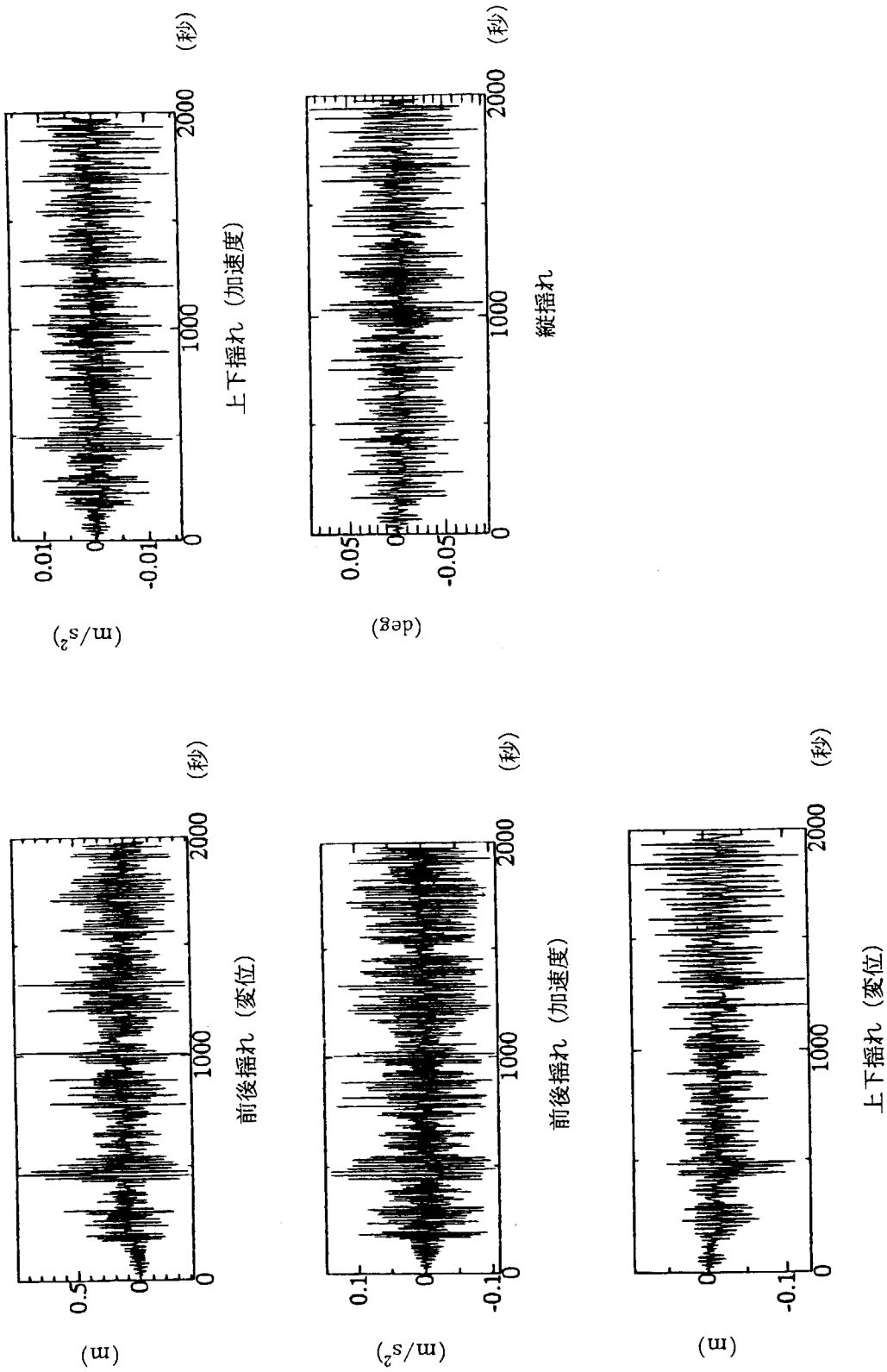


Fig. II - 4 浮体構造物の運動時系列データ (ケース1D)

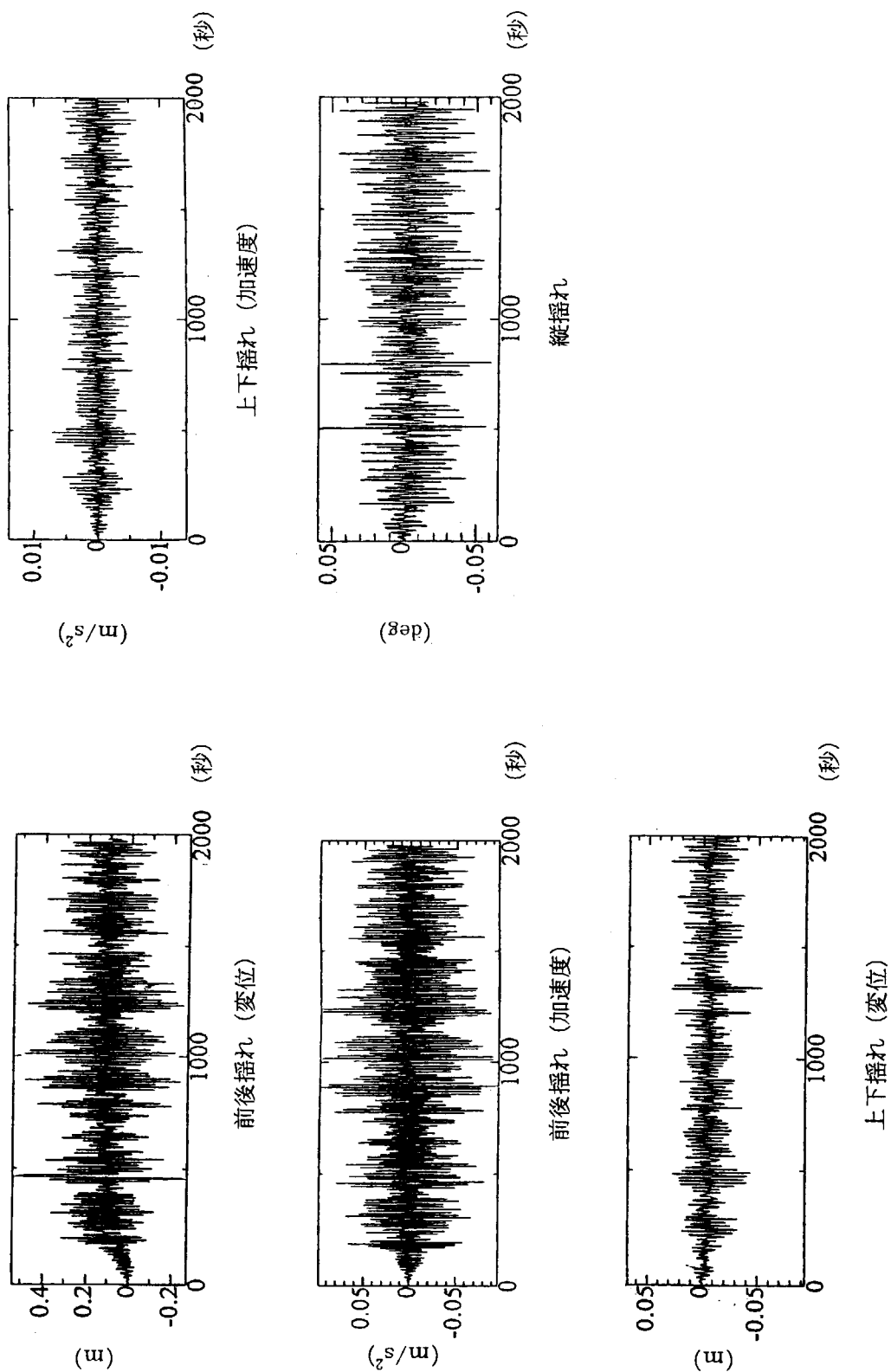


Fig. II - 5 浮体構造物の運動時系列データ (ケース 2 A)

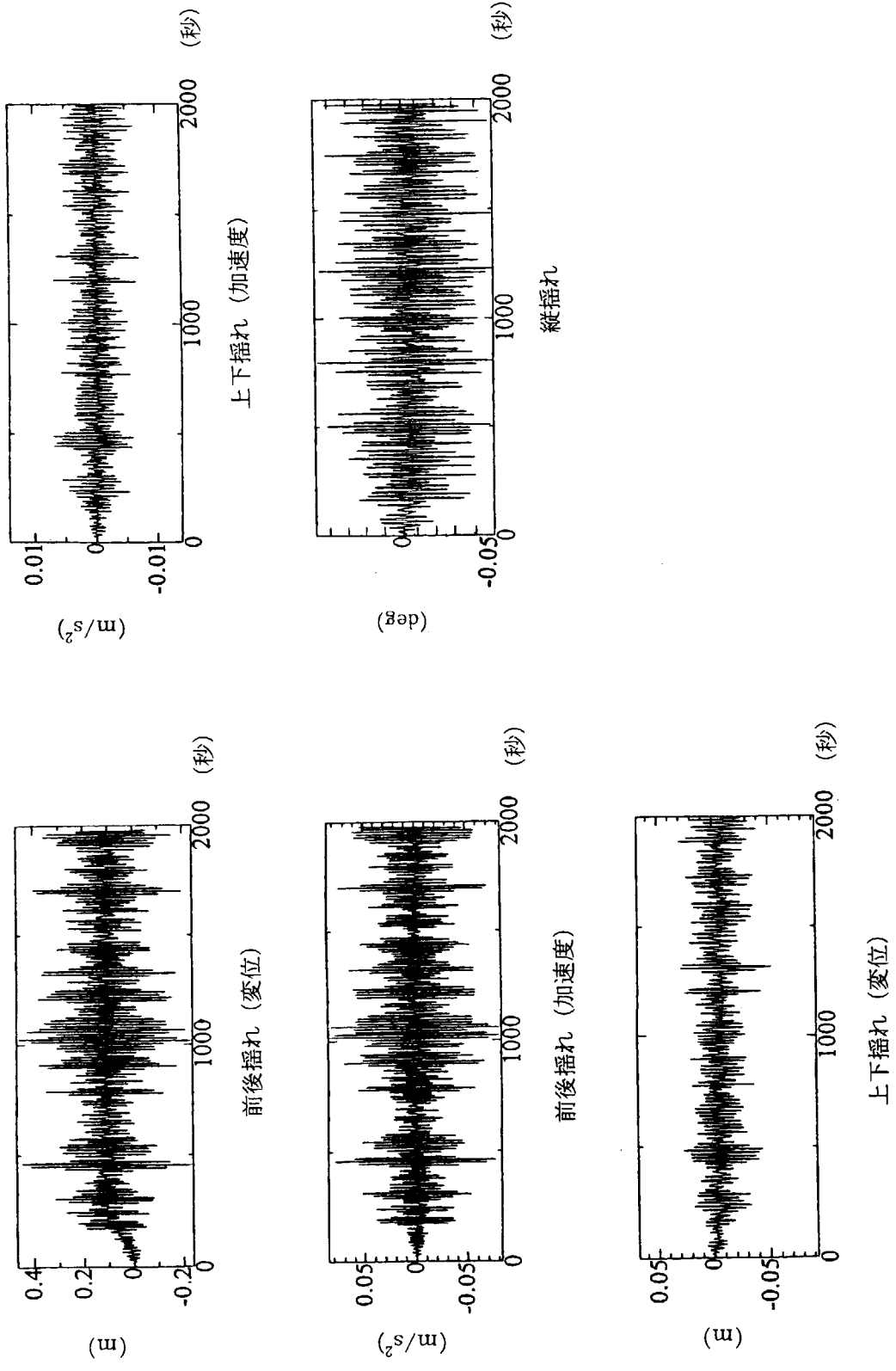


Fig. II - 6 浮体構造物の運動時系列データ (ケース 2 B)

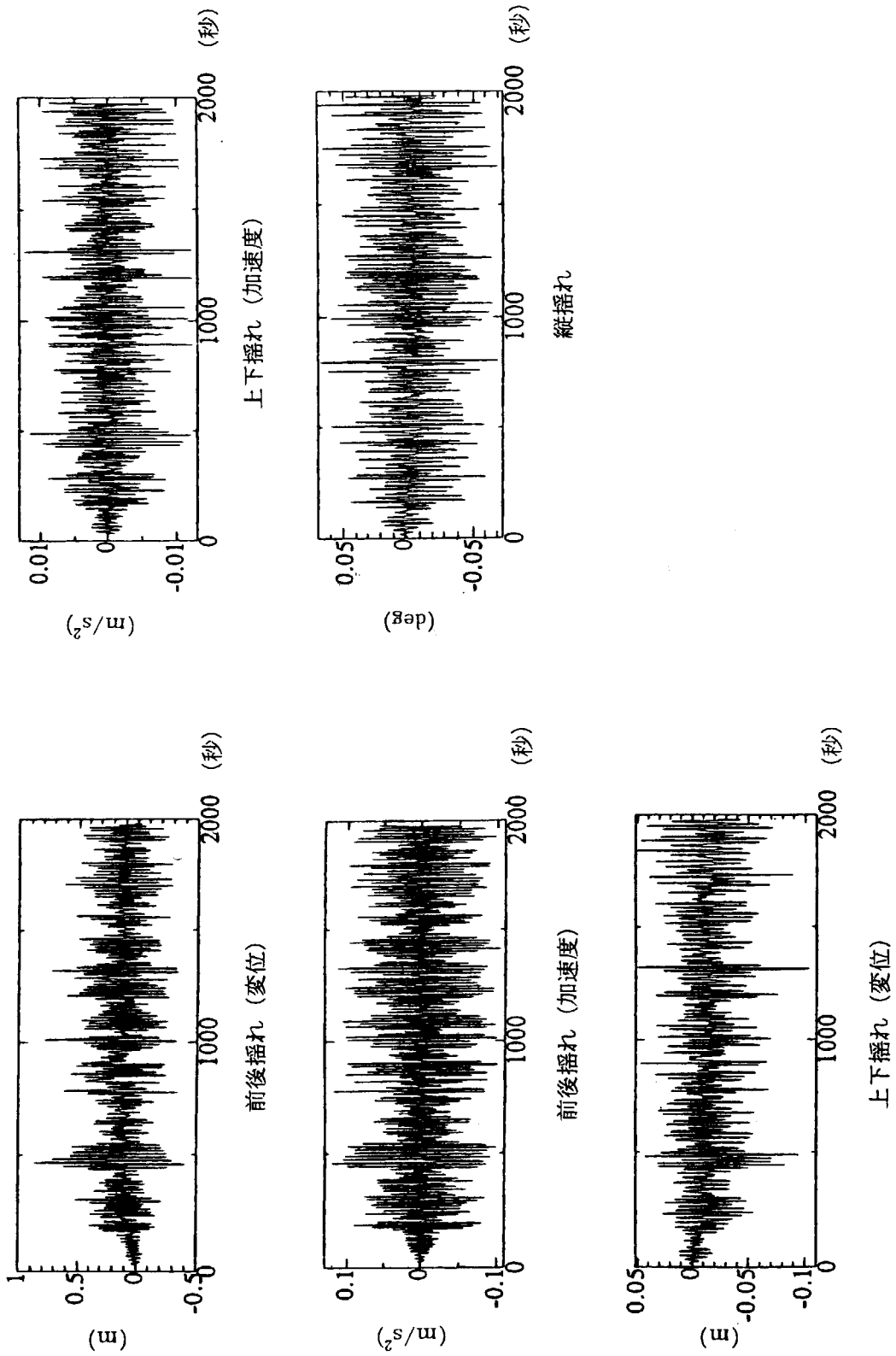


Fig. II-7 浮体構造物の運動時系列データ (ケース 3 A)

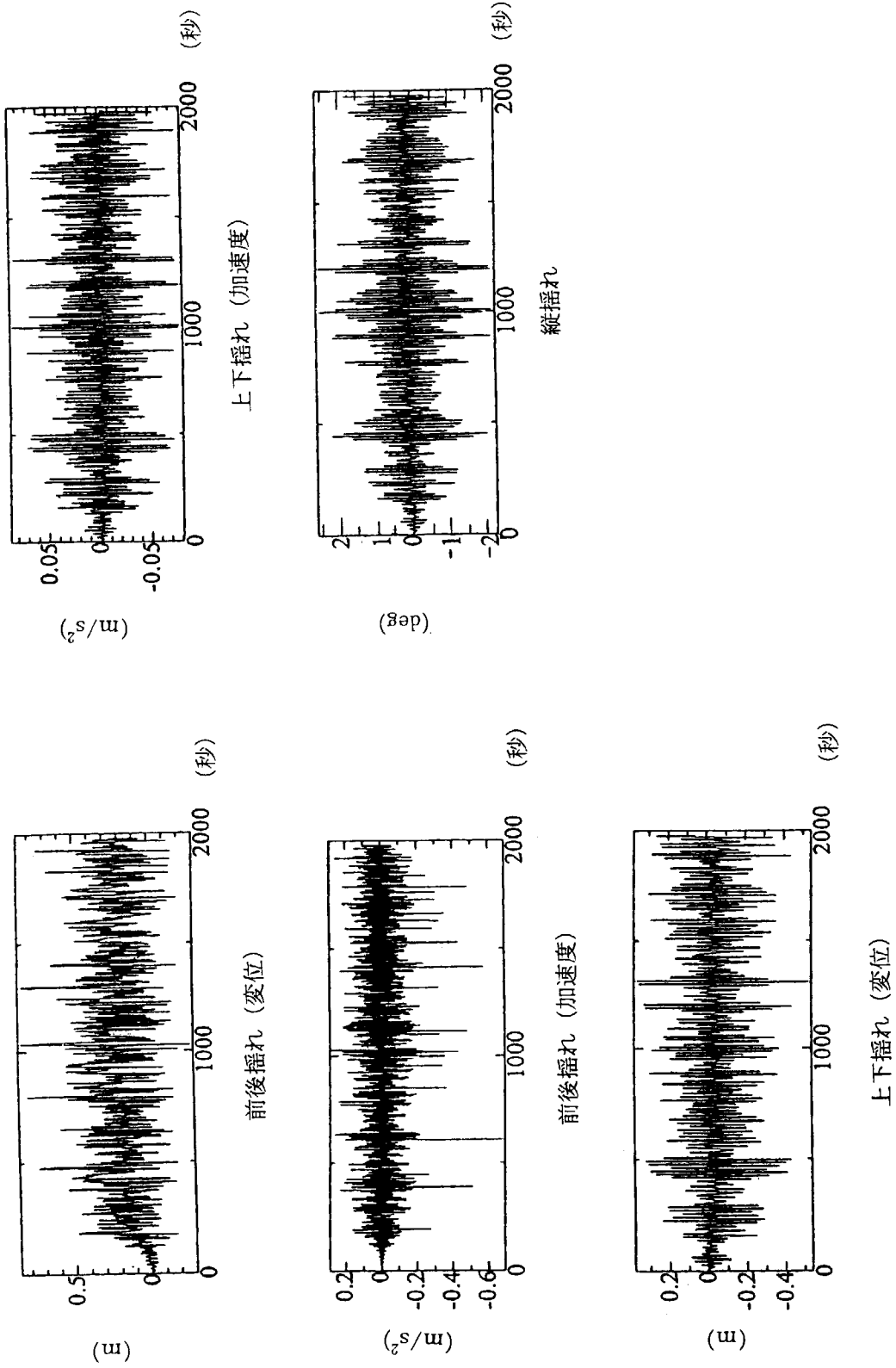


Fig. II - 8 浮体構造物の運動時系列データ (ケース 3 B)

付録Ⅲ 海震について

海震という自然現象は、船員には古くから知られており、Haveら(1983)¹⁾によって指摘されている。このHaveらによって紹介されている海震の被害状況について、松岡²⁾が要約したものを以下に示す。また、TableⅢ—1のような海震の被害も報告されている。

32,500トンのノルウェータンカーIda Knudsenは、1969年2月28日、北緯36.12度、西経10.70度、ジブラルタル西方450km、水深4900mの洋上でバラスト航行中に海震に遭遇した。

「GMT2:43に爆発を思わせる激しい揺れが始まった。下から爆風が船を通り抜けるように感じられた。船橋にいた当直航海士は、揺れは非常に強く、床から飛び上がるほどだったと述べている。舵輪についていたもうひとり、船首が初めはゆっくり、そして次第に速く持ち上がり、揺れが始まるにつれて落ちていったと述べている。機関室では乗組員は立っていることができなかった。」

と報告している。

ドック入りの調査では、全損状態 (total loss) と等級付けられ、船殻は強力な発破で爆破されたように見え、検査員は強い動水圧にさらされたもの、と報告している。

このときの損害を要約すると以下のものである。

通信、航法機器は全て壊れた。扉は蝶番で外れた。階段の手すりがとれた。家具、機器類が空中に投げ出された。アンカーボルトの損傷で外れた機器もあった。主機の枠は歪み、プロペラシャフトは曲がった。溶接継ぎ手は切れ、防携材は壊れ、隔壁と桁材は座屈した。隔壁が破れたタンクもあった。全てのウィングタンクは漏れた。しかし、1タンクを除き、外板の水密性は損なわれなかった。船底板及び下部側外板はほとんど縦通桁材から離れ、ギャップ量は最大50mmであった。

海震という用語については、地学や地震学の分野では記述はあるが、百科事典等には記載されていないようである。浜村によれば、海外の著名な百科事典 (Encyclopedia) にも全く記述がない、英和航海用語辞典には”sea shock” と ”sequake” があり、両方とも海震と訳しているということである。また、英単語としては”sequake”の方が本来の用語であるらしいとしている。

このように、海震そのものが一般になじみがないが、物理的な説明は以下のようにされている。

- 海底の地震動が海水中に音波となって伝わるもので、陸上の地震と異なり、上下振動が主である。(地学事典、平凡社)
- 海水中のP波速度は1500m/秒と小さいので、地震波はほとんど鉛直に近く屈折するため、上下動が主であると考えられる。(地震学、宇津徳治監修、共立出版)
- 海底の岩石を伝わってきた地震波が海底面で屈折して、鉛直に近い角度で縦波として上がってくるもの。(日本大百科全書、小学館)

Table III—1 船舶における海震の報告例³⁾

船名	発生日 (地震名)	震央 (本船位置)	状況
フランス船	明治33年3月12日 (金華山沖)	39.3° N×141.9° E (金華山北北東40km)	強い海震を感じた。
須磨丸	明治36年3月21日	39.75° N×132.25° E (33.44° N×132.18° E)	強い海震を感じた。
これや丸	大正12年9月1日 (関東大震災)	35.2° N×139.3° E (横浜港)	船体が数メートル跳ね上がり 左右に35°も揺れた。
喜田丸	昭和3年5月27日 (三陸沖)	39.95° N×143.25° E (震央付近)	航行中海震を感じ、甲板上で 自己の中心を失うほど。
もんでびでお丸	昭和8年3月3日 (三陸沖)	39.23° N×144.52° E (40.35° N×151.27° E)	強いエンジンレーシングのよ うな震動で4分間。
平安丸	同上	同上 (41.5° N×149.3° E)	5分間上下、激動でコンパス が飛び出すかと思われるほど。
黒潮丸	昭和28年11月26日 (房総半島沖)	33.98° N×141.72° E (33.9° N×141.27° E)	震度4に相当するほど。
じょうじあ丸	昭和34年2月17日 (アリューシャン)	51.03° N×171° W (51.2° N×171.22° W)	鳴動を伴う激しい上下震動約 1分、振幅小さく、焼玉の急 回転に類似。
第8あけぼの丸	昭和36年8月12日 (釧路沖)	42.51° N×145.34° E (42.7° N×145.6° E)	座礁したような激しいショック。
瑞洋丸	昭和58年5月26日 (日本海中部)	40.4° N×138.9° E (40.78° N×139.93° E)	軽い前震のあと、舗装してい ない凹凸道を車で飛ばした感 じが1分くらい。

海震の定義付けに関しては、これまで、海震の震動源は海底地震あるいは海底爆発であり、その振動が海水を媒体として、疎密波として伝播し、洋上の船舶に伝わるものが海震であるとされてきた。メガフロートの研究開発を契機に、近年、海震に関する研究が盛んに行われるようになってきており、清川は、従来の海震の定義を拡張し、流体運動（表面波成分、減衰散乱波成分、圧縮波進行波成分）による揺れは、広い意味で全て海震と呼ぶのが適切であり、海震は次のように定義するのが適切であると指摘している。

<海震の定義⁴⁾>

「海震とは、海底又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、船舶や浮体式構造物に動揺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式構造物が動揺する現象をいう。」

一方、海震の強さに関しては、陸上の地震の震度階級と同等な海震の震度階級が作成されている。例として、Table III—2 にジーベルグの6階級の海震階級を、この海震階級と陸上の地震で使われるメルカリの震度階級との対応関係をTable III—3 に示す。なお、海震震度階級に関しては、海震に遭遇した船舶からの報告を基にしているが、報告当時と現代とでは船体強度などにも大きな違いがあり震度階級をそのまま対応させることはできないと思われる。今後、現代の船舶や海洋構造物に適合した海震震度表の作成が望まれる⁵⁾。

Table III—2 ジーベルグの海震震度階級表

震 度	説 明
1 (軽震)	海が静かなとき、船室の中でわずかに振動し隔壁が軽くきしむ程度。
2 (弱震)	底触れまたは船体が岸壁をこするときのような、あるいは錨鎖を急速に繰出すときのような振動を感じる。船腹や構造物の振動がはっきりわかる。
3 (中震)	砂州、岩礁または暗礁に乗り上げたとき、または衝突したときのような激動、あたかも甲板上に重量物を投げ出し、または樽を転がすような、あるいはスクューの翼がおれたときのような衝撃を感じる。吊下物がはなはだしく揺れる。索具や船体構造物が鳴動する。
4 (強震)	前記の状況がさらに強くなり船は動揺し、操舵員は舵輪を握る手に衝撃を感じるようになり、帆桁、デリック棒が鳴動し、坐りの悪い器具は転倒転落する。
5 (烈震)	船上に立つことが困難となり、大きい物体も位置がずれたり転倒したり、台から飛び出したりする。マスト、甲板構造物等、全船鳴動し、構造の弱い部分はゆるんでぐらぐらするようになる。船の航行が困難になることもある。
6 (激震)	船体が海中から跳ね上げられることもあり、継ぎ口が離れたり、帆桁、マスト、甲板構造物に損害が起きる。このために浸水して、甚だしいときには沈没に至ることもある。

Table III—3 震度階級の対応

メルカリ	3	4	5	6	8	>8
ジーベルグ	1・弱	2・中	3・やや強	4・強	5	6・破壊的

付録Ⅲ参考文献

- 1) Have K.Selnes P.B and Bungum H.: Seaquakes:A potential threat to offshore structure, Behavior of Offshore Structure, Vol1.2, (1983).
- 2) 松岡一祥: 浮遊式構造物の免震性, 日本造船学会誌, No. 706 (1988).
- 3) 浜村健治: 海上は免震か? 海震の調査, 海上災害の一端を探る, 船の科学, Vol, 40 (1987).
- 4) 日本原子力研究所: 平成9年度 革新的支持基盤安定性評価技術調査 成果報告書, (1998).
- 5) (社)日本造船学会海洋工学委員会性能部会編: 超大型浮体構造物Mega-Float Offshore Structure, (1995).

This is a blank page.

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
工率, 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	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	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	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² 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, 1 eV および 1 u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
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

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

原子炉施設の浮体式海上立地に関する検討(1)

—浮体式原子力発電施設の概念検討—

(受託研究)