

JAERI-Tech

JP0150741

2001-049



原子動力海中航行観測船の運航条件及び運航システムの検討、  
海洋調査への超小型炉の活用検討ワーキンググループ報告

2001年 7月

浦 環\*・賞雅 寛而\*・西村 一\*・青木 太郎\*・上野 道雄\*・前田 俊夫\*  
中村 容透\*・島津 俊介\*・徳永 三伍\*・柴田 陽三\*・外川 織彦  
石田 紀久・島崎 潤也\*・小田野 直光・高橋 照雄\*・楠 剛・頼経 勉

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。  
入手の問合せは、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、お申し越しください。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おこなっ  
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

原子動力海中航行観測船の運航条件及び運航システムの検討、  
海洋調査への超小型炉の活用検討ワーキンググループ報告

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

浦 環<sup>\*1</sup>・賞雅 寛而<sup>\*2</sup>・西村 一<sup>\*3</sup>・青木 太郎<sup>\*3</sup>・上野 道雄<sup>\*4</sup>・前田 俊夫<sup>\*5</sup>  
中村 容透<sup>\*6</sup>・島津 俊介<sup>\*7</sup>・徳永 三伍<sup>\*8</sup>・柴田 陽三<sup>\*6</sup>・外川 織彦<sup>\*1</sup>  
石田 紀久・島崎 潤也<sup>\*9</sup>・小田野 直光・高橋 照雄<sup>\*10</sup>・楠 剛・頬経 勉

(2001年6月6日受理)

原研では、改良船用炉の設計研究の一環として、北極海を主な調査海域とする原子動力海中航行観測船の検討及び搭載する超小型原子炉SCRの検討を行っている。本報告書は、船体設計、音響測位、船体運動、海洋調査等の専門家による原子動力海中航行観測船の運航条件及び運航システムの検討結果を示したものである。我が国の潜水船の船体運動に関する設計条件を調査するとともに、北極海における調査活動を想定して水中航行時及び水上航行時の船体運動を推定した。また、想定した船体運動が超小型原子炉SCRの出力に与える影響を評価した。運航システムとしては氷の下での活動を想定して、海底トランスポンダ方式及び氷上通信ブイ方式による測位及び通信方法を検討し、トランスポンダまたは通信ブイの設置間隔を130kmと定めた。また、船体及び原子炉の事故象を整理して、安全確保の方法を検討した。これらの検討は原子動力海中航行船の概念に反映され、今後の検討課題が明らかとなった。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\*1 むつ事業所施設部

\*1 東京大学

\*2 東京商船大学

\*3 海洋科学技術センター

\*4 運輸省船舶技術研究所（現 海上技術安全研究所）

\*5 三菱重工業（株）

\*6 川崎重工業（株）

\*7 沖電気（株）

\*8 日本深海技術協会

\*9 現 放射線利用振興協会

\*10 現 エナジス（株）

Study on Operation conditions and an Operation System of a Nuclear  
Powered Submersible Research Vessel, "Report of Working Group on  
Application of a Very Small Nuclear Reactor to an Ocean Research"

Tamaki URA<sup>\*1</sup>, Tomoji TAKAMASA<sup>\*2</sup>, Hajime NISHIMURA<sup>\*3</sup>, Taro AOKI<sup>\*3</sup>, Michio UENO<sup>\*4</sup>,  
Toshio MAEDA<sup>\*5</sup>, Masatoh NAKAMURA<sup>\*6</sup>, Syunsuke SHIMAZU<sup>\*7</sup>, Sango TOKUNAGA<sup>\*8</sup>  
Yozo SHIBATA<sup>\*6</sup>, Orihiko TOGAWA<sup>\*1</sup>, Toshihisa ISHIDA, Jyunya SHIMAZAKI<sup>\*9</sup>,  
Naoteru ODANO, Teruo TAKAHASHI<sup>\*10</sup>, Tuyoshi KUSUNOKI and Tsutomu YORITSUNE

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

(Received June 6, 2001)

JAERI has studied on design of a nuclear powered submersible research vessel, which will navigate under sea mainly in the Arctic Ocean, as a part of the design activity of advanced marine reactors. This report describes operation conditions and an operating system of the vessel, which were discussed by the specialists of hull design, sound positioning, ship motions and oceanography, etc. The design conditions on ship motions for submersible vessels were surveyed considering regulations in our country, and ship motions were evaluated in the cases of underwater and surface navigations taking account of observation activities in the Arctic Ocean. The effect of ship motions on the compact nuclear reactor SCR was assessed. A submarine transponder system and an on-ice communication buoy system were examined as a positioning and communication system, supposing the activity under ice. The interval between transponders or communication buoys was recommended as 130km. Procedures to secure safety of nuclear powered submersible research vessel were discussed according to accidents on the hull or the nuclear reactor. These results were reflected to the concept of the nuclear powered submersible research vessel, and subjects to be settled in the next step were clarified.

Keywords: Submersible Research Vessel, Advanced Marine Reactor, Arctic Ocean, Ocean Research, Compact Nuclear Reactor, SCR, Operating System

---

\*1 Department of Facilities, Mutsu Establishment

\*1 Tokyo University

\*2 Tokyo Univ. of Mercantile Marine

\*3 Japan Marine Science and Technology Center

\*4 Ship Research Institute ( at present, National Maritime Research Institute)

\*5 Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

\*6 Kawasaki Heavy Industries, LTD.

\*7 Oki Electric Industry Co, LTD.

\*8 Japan Deep Sea Technology Association

\*9 at present, Radiation Application Development Association

\*10 at present, Energis, LTD.

## 目 次

まえがき	1
1. はじめに	3
1.1 経緯	3
1.2 原子動力海中航行観測船の概念	5
2. 海中航行観測船の運航概念	13
2.1 観測の概要	13
2.2 自然条件	19
2.3 運航形態及び要求される設備の想定	19
3. 船体運動条件と氷の条件	25
3.1 船体動揺	25
3.2 船体動揺に対する原子炉の応答	34
3.3 氷の条件	40
4. 運航システム	44
4.1 海中航行観測船の測位/航法/通信	44
4.2 支援船(随伴船)	59
5. 運航時の安全確保	60
5.1 対象とする想定事象	60
5.2 安全確保の方策	63
6. おわりに	81
参考文献	82
添付資料	85

## Contents

Preface -----	1
1. Introduction -----	3
1.1 Background -----	3
1.2 Concept of a Nuclear Powered Submersible Research Vessel -----	5
2. Operation Concept of the Submersible Research Vessel -----	13
2.1 Needs of Observation by the Submersible Research Vessel -----	13
2.2 Environmental Conditions -----	19
2.3 Patterns of Vessel Operation -----	19
3. Conditions of Ship Motions and Icy Conditions -----	25
3.1 Ship Motions -----	25
3.2 Response of Nuclear Reactor to Ship Motions -----	34
3.3 Icy Conditions -----	40
4. Operation System -----	44
4.1 Positioning/Navigation/Communication of the Submersible Research Vessel	44
4.2 Functions of a Support Vessel for the Submersible Research Vessel -----	59
5. Safety Securing in the Operation -----	60
5.1 Phenomenon to be Assumed -----	60
5.2 Scheme of Safety Securing -----	63
6. Conclusion -----	81
References -----	82
Appendix -----	85

## まえがき

近年、地球温暖化、異常気象等の地球環境変動メカニズムを解明し、変動を予測するために、海洋調査・観測の需要性がクローズアップされている。しかし、地球環境変動への影響が大きい海洋に関する基礎的データは、調査範囲が広く観測手段が限られているため、十分とは言えない状況にある。

日本原子力研究所（以下、原研という）では、改良船用炉の研究開発として、一般商船への適用以外に、地球環境問題の解決等への寄与を目指し、長時間連続運転できる動力源としての原子炉の特徴を活かし、船用炉を動力源とした海中航行観測船の概念検討を進めている。

この概念検討と併行して、船用炉委員会・超小型船用炉専門部会の下に「海洋調査への超小型船用炉の活用検討ワーキンググループ」を設け、これまで海洋調査、地球物理学者等の専門家を委員として、海洋調査におけるニーズ調査、海中航行観測船の仕様及び搭載原子炉への要求事項の明確化の検討を実施してきた。この検討結果をもとに、海洋調査ニーズの緊急性が高く、また原子炉の特長が生かされるという観点から、調査海域を北極海に絞り、原子炉を動力源とする海中航行観測船を検討対象とすることとした。

本ワーキング・グループは、この結果を受けて、調査船の船体設計、音響測位、船体運動、海洋調査等の専門家のもとに、海中航行観測船による北極海域の調査を想定した運航システムについて、より詳細に検討し概念検討へ反映させるとともに、今後の開発課題を明らかにするためのものである。

## 「海洋調査への超小型炉の活用」ワーキンググループ委員名簿

主 査	浦 環	東京大学生産技術研究所第2部教授
委 員	賞雅 寛而	東京商船大学商船学部動力システム工学講座教授
	徳永 三伍	日本深海技術協会事業統括部長
	西村 一	海洋科学技術センターフロンティア研究推進室事業課長
	青木 太郎	海洋科学技術センター海洋技術研究部研究主幹
	上野 道雄	運輸省船舶技術研究所運動性能部主任研究官 (現在は国土交通省海上安全技術研究所)
	中村 容透	川崎重工(株)船舶事業本部技術統括部長
	嶋津 俊介	沖電気(株)測機事業部市場開発室担当課長
	前田 俊夫	三菱重工業(株)神戸造船所潜水艦部次長
	外川 織彦	日本原子力研究所むつ事業所海洋調査研究室長
	石田 紀久	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室舶用炉設計研究室長
	島崎 潤也	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室原子力船システム研究室長 (現 放射線利用振興協会)
常時参加者	柴田 陽三	川崎重工(株)船舶事業本部潜水艦設計部海洋開発グループ長
	小田野 直光	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室舶用炉設計研究室
幹 事	高橋 照雄 (平成12年度)	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室 (現 エナジス(株))
	楠 剛	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室舶用炉設計研究室
	賴経 勉 (平成13年度)	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部 原子力船研究開発室舶用炉設計研究室

## 1. はじめに

### 1.1 経緯

#### (1) 本検討ワーキング・グループの設置

船用炉研究委員会のもとで、改良船用炉の研究開発に関する技術検討が行われ、特にD R X（深海科学調査船用原子炉）については同委員会の下に深海炉専門部会を設け、平成8年度まで検討を進めてきた。同専門部会において、「D R Xの研究開発計画をニーズに対応させるものとするため、深海を含む海洋調査に係るニーズを調査・整理することが極めて重要である」との提言がなされ、これに対応して同専門部会の下に「深海・海洋調査へのD R Xの活用」検討ワーキンググループが、次の趣旨で設置された（平成7年7月）。

「深海を含む海洋調査には大出力で長時間維持できる動力源を有する深海・海洋調査船あるいは深海作業船の開発が望まれる。原研では、改良船用炉の一環として、深海調査船用原子炉D R Xの設計研究を進めている。D R Xを海洋調査・開発に活用すれば飛躍的な発展が期待できると考えられる。

しかしながら、原子動力を海洋調査・開発に活用するのはこれまで実用化された例がなく、導入にあたっては要求事項等について充分な検討が必要である。そのため、D R Xの実用化を目指して、下記事項について検討するためのワーキンググループを設置した。

- ① 深海・海洋調査及び開発の動向と観測設備に対する要求事項の整理、  
(現状及び近未来の見通しを含む)
- ② 深海・海洋調査船のイメージの明確化、
- ③ D R Xへの要求事項など

である。」

なお、海底資源探査及び開発については、一時期、民間レベルで計画・調査検討がなされていたものの現時点ではニーズがない状況を考慮し、上記の調査対象には含めていない。

#### (2) 平成8年度の活動

平成7年度に「深海・海洋調査へのD R Xの活用」検討ワーキンググループが設置されたのを受けて、平成8年度には、4回のワーキング・グループ、1回の深海炉専門部会及び1回の船用炉研究委員会を開催し検討を行った。主な成果は以下の通りである。

- ① 深海を含む海洋調査は、地球環境問題の解決のために不可欠である。調査の期間は長時間をするものが多いことから原子動力源の利用が有利である。
- ② 深海・海洋調査のニーズを、地球環境変動の解明、地球内部メカニズムの解明、深海生物・微生物生態系の解明の三種に大別し、各々の特徴、必要動力源（大きさ、運転期間等）を明らかにした。
- ③ 上記の調査を実現するため、D R Xを搭載した海中航行観測船、深海滞在型調査船、海中動力ステーションの概念を検討した。

これらの成果は、当初の「深海・海洋調査へのD R Xの活用」ワーキング・グループによる検討の目的に概ね沿ったものである。しかしながら、「D R Xへの要求事項」については未

検討であり、さらに具体的な調査内容に対応した調査船としての機能・性能及びそれに基づく原子動力への要求等については、次の「海洋調査への超小型舶用炉の活用」ワーキング・グループにおいて検討することとした。

### (3) 「海洋調査への超小型舶用炉の活用ワーキング・グループ」の設置及び活動

平成9年度から、舶用炉の設計研究において工学設計の完了後、超小型舶用炉の設計を中心据えて進めることになったため、設計に係る技術専門部会を「MRX設計専門部会」及び「深海炉専門部会」から「超小型舶用炉専門部会」へと一本化し、同時にワーキング・グループを「深海・海洋調査へのDRXの活用」から「海洋調査への超小型舶用炉の活用ワーキング・グループ」へ変更した。但し、ワーキング・グループの活動は平成8年度の活動内容を引継いだものである。

主な検討事項は以下の通りである。

- i) 今後の詳細検討対象とする調査船の選定
- ii) 要求事項の明確化
- iii) 調査船のイメージ及び基本概念案の作成

平成9年度から10年度にかけて、7回のワーキング・グループ、4回の超小型舶用炉専門部会、2回の舶用炉研究委員会を開催し、検討を行った。その結果、以下の成果を得た。

- ① 海洋調査ニーズの緊急性及び舶用炉の必要性の観点から、北極海中の深度600mまでの海域を調査対象とする、海中航行観測船を選定した。
- ② 水中航行最大速度12ノット、水中重量500t、2ヶ月以上の連続航行可能、最大電気出力500kW等の設計条件の設定を行った。
- ③ 海中航行観測船のイメージ及びDRXをベースとした超小型原子炉SCRの概念を構築した。

以上の活動内容については、別途報告書（JAERI-Techとして公刊予定）にまとめられている。

### (4) 平成11年度～12年度の活動

2年間にわたって、ワーキンググループ6回、2回の超小型舶用炉専門部会、2回の舶用炉研究委員会を開催し、運航システムについて以下の検討を行った。

- ① 外的条件、設計外力の明確化
- ② 航行時の安全性及び安全確保の検討
- ③ 運行システムの検討

本報告書は、本検討ワーキンググループの平成11年度～12年度における活動成果を取り纏めたものである。

## 1.2 原子動力海中航行観測船の概念

平成 10 年度までに得られた海中航行観測船および搭載する超小型炉 S C R の概念を、読者の理解に役立てるために 1.2.1 節に示す。また、動力ユニット配置の検討を 1.2.2 節に示す。

### 1.2.1 原子動力海中航行船の主要目と概念図

平成 10 年度までのワーキンググループ活動を通じて得られた原子動力海中航行観測船の主要目を表 1.1 に、概念図を図 1.1 に示す。また、本海中航行観測船に搭載する超小型原子炉発電ユニット SCR250 の主要目を表 1.2 に、概念図を図 1.2 に示す。これら検討結果の一部は、原子力学会等<sup>1),2),3),4),5),6)</sup>に報告された。

表 1.1 海中航行観測船の主要目

船体胴部全長×巾×高	約 38×5.5×5.5 m
全高	約 10 m
排水量	約 500 ton
居住耐圧容器	約 4m φ × 22m
動力ユニット	超小型原子炉発電ユニット SCR250×2
非常用蓄電池	360 kWh (2.5 ノット航続 20 時間)
船速 原子炉 2 基運転	約 12 ノット (約 22km/h)
原子炉 1 基運転	約 8.5 ノット (約 16km/h)

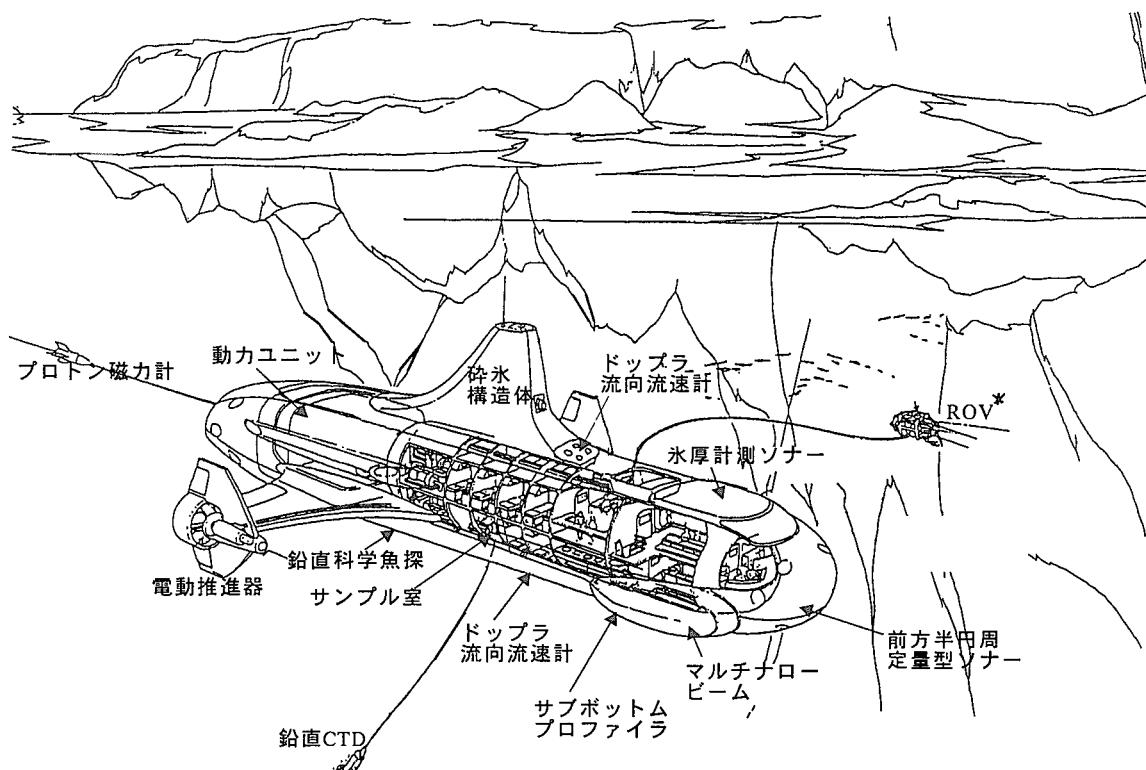
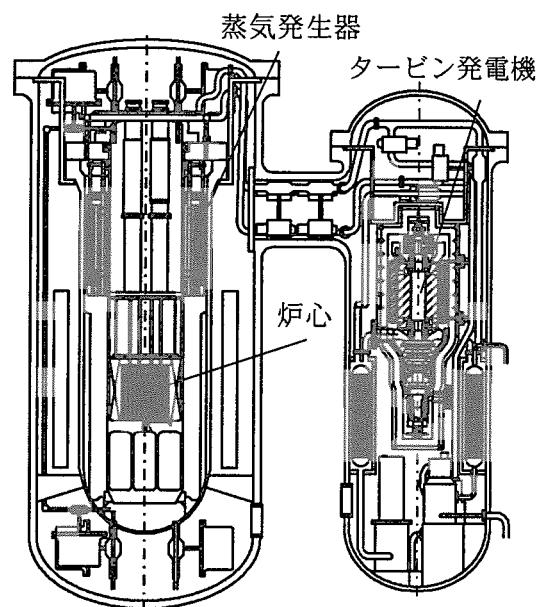


図 1.1 原子動力海中航行観測船の概念図

\* ROV : Remotely Operated Vehicle, 遠隔操作無人潜水機

表 1.2 超小型原子炉発電ユニット SCR の主要目

項目	SCR 設計値
原子炉出力/電気出力	1250kWt / 250kWe
炉型式	一体型炉
一次冷却系統 壓 力 炉心出口/入口温度	8.4MPa 約 298°C/約 280°C(定格)
流 量	約 13 kg/s
循環方式/加圧方式	自然循環/自己加圧方式
炉心等価直径/有効高さ サイクル日数	約 45cm / 約 42cm 約 470 日
制御棒 制御棒要素型式 駆動装置型式	ロッドクラスタ型 原子炉容器内装型
蒸気発生器圧力/温度 流 量	3Mpa / 約 242°C 約 0.49kg/s
型 式	ヘリカルコイル型貫流式
原子炉容器 設計圧力	10MPa
格納容器及びタービン発電機用容器 設計圧力	内圧 10MPa 外圧 6MPa

図 1.2 超小型原子炉発電ユニット  
SCR の概念図

### 1.2.2 動力ユニットの配置に関する検討

#### (1) 一般的な項目による配置に関する検討

動力ユニットは、原子炉プラント、タービン発電機、付属設備で構成される。動力ユニットを居住耐圧容器とは別置きの耐圧容器に収納する場合と居住耐圧容器内に収納する場合では設備の配置等が異なるため、動力ユニット配置の影響比較を行った。図 1.3(1)には動力ユニットを別置きの耐圧容器に収納した場合（別置方式）を、同図(2)には居住耐圧容器を延長して船尾に動力ユニットを配置した場合（船尾配置方式）を、同図(3)には居住耐圧容器の中央部に動力ユニットを配置した場合（船体中央配置方式）を示す。表 1.3 及び表 1.4 に比較の結果を示す。

表 1.3 には、動力ユニットを居住耐圧容器内に配置した場合と居住耐圧容器外に配置した場合に動力ユニット部に許容される重量及び容積を示す。動力ユニットを別置容器とする(1)の場合の居住区長さは、乗組員数及び搭載設備の概略検討の結果より最小限必要な 22m とした。動力ユニットを居住用耐圧容器に収容する(2),(3)の場合は浮力を極力稼ぐために、500ton 規模の最大限として 36m とした。居住設備、観測設備等の搭載物の重量は約 22ton と仮定した。動力ユニットを別置容器とする(1)の場合は、動力ユニット、耐圧容器（格納容器兼用）、浮力体の合計重量が約 206 トン、合計容積が約 196m<sup>3</sup> となる。このうち、耐圧容器を兼ねた原子炉格納容器と浮力体の重量を除いた約 130 トンを動力ユニットに割り当てることができる。一方、動力ユニットを居住用耐圧容器に収容する(2),(3)の場合は、動力

ユニットに割り当てられる重量は約 44 トンとなる。重量の観点からは、動力ユニットを居住用耐圧容器に収容する方式は、許容される重量が極めて制限される。但し、船体規模及び出力規模が大きくなれば、原子炉用の耐圧容器も大きくなるため、居住耐圧容器内に配置する方式が有利になると考えられる。

次に船体が衝突した場合の影響については、表 1.4 に示すように、静止物への船首からの衝突に対しては方式間の差はない。他船が側面より衝突した場合、動力ユニットを別置きの耐圧容器に収納する方式がやや不利であると考えられる。あらゆる条件の衝突に耐える耐衝突構造を備える潜水船の船体設計は非現実的なものとなるため、ここでは、衝突回避を徹底し衝突想定条件を緩和することを前提に、一般的な潜水船構造を想定している。

沈没時の原子炉の冷却については、いずれの方式も十分な安全が確保できる設計にしなければならないが、格納容器の表面から直接、別置方式は海水に放熱する方式が採用できるため受動的な安全性を得る上で利点がある。

船体の重量バランスの観点からは、別置方式の場合は浮力体の配置により船首尾方向の重量バランスを取りやすい。浮力体を用いない船尾配置方式は、原子炉を配置した船尾部が重いために、重量バランスをとることが困難であると予想される。船体中央配置方式は、重量バランスの点からは理想的である。

しかし、遮蔽の観点から船体中央配置方式では原子炉の両側及び側面通路に遮蔽を要し、重量増加の要因となる。可能な限りの遮蔽を講じても、原子炉の側面通路を通る場合には、時間制限を行う等の措置が必要となり運用上の制限が大きくなる。遮蔽の観点からは、動力ユニットを別容器に収納する方式が最も有利である。

基地および母港での整備性については、直径 4 m の狭い船内に収納された原子炉の作業は困難が予想される。各項目を概略、評価すると表 1.4 のとおりとなるため、これらの総合的に判断して、原子炉プラントは別置とする方式で検討を進めることとする。この配置について次節で概略の遮蔽評価を行い、成立性を検討する。

同規模の原子力潜水船として計画された S A G A - N<sup>7),8)</sup>の設計例では、原子炉プラントは居住耐圧容器とはフランジで接続された別の耐圧容器に収められている。また、アメリカ海軍が所有する同規模の潜水艦 N R - 1<sup>9),10)</sup>も原子炉は船尾に配置され、居住器とは水による遮蔽で隔離されているとのことである。

## (2) 選定した配置の場合の遮蔽評価

ここで動力ユニットを別置きとして船尾方向に配置した場合について、原子炉の通常運転時、停止直後における居住区画での線量当量を評価をする。放射線遮蔽設備は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、事故、原子炉停止時において、本船周辺の一般公衆、船内の乗組員の放射線被曝を低減する目的で設置される。主要な遮蔽設備としては、原子炉容器と原子炉格納容器の間に鉄遮蔽体が設置される。また、原子炉容器、居住区耐圧容器は遮蔽体として機能する。

原子炉等規制法により、外部放射線の量が  $300 \mu\text{Sv}/\text{週}$  を越える区域は放射線管理区域とすることが規定されている。放射線防護の観点からは、居住区画を管理区域外とすることが

望ましい。海中航行観測船の居住区画には、24 時間乗組員が常駐しており、居住区画を管理区域外に設定するためには、外部放射線による線量当量率を  $1.7 \mu\text{Sv/h}$  以下にする必要がある。図 1.4 に居住耐圧容器内の配置案を示す。

評価には、一次元放射線輸送計算コード ANISN<sup>11)</sup>を使用し、原子炉からの放射線を遮蔽するための主な構造物として、原子炉容器（鉄：9.5 cm）、鉄遮蔽体（17 cm）、格納容器（鉄：7.0 cm）、耐圧容器（Ti（遮蔽評価上は鉄と仮定）、11.5 cm）を居住区画方向に配置したモデル（図 1.5）に対する線量評価を行った。評価結果を表 1.5 に示す。

原子炉通常運転時（100%出力）において、居住区画の中で最も原子炉に近い機械室での線量当量率は、 $14 \mu\text{Sv/h}$  である。居住区画を放射線管理区域外に設定するには、線量当量率を 1/8 程度にする必要があり、厚さ約 10 cm の鉄の追加遮蔽が必要となると考えられる。本評価では、居住区画内の各室の間仕切は無視した。機械室と寝室の間に厚さ約 10cm の鉄製間仕切を設けることで、遮蔽設計基準を満足させることができる。なお、居住区画での線量当量率を  $1.7 \mu\text{Sv}$  とし、海中航行観測船の運用を 1 回につき 60 日間と想定すると、1 運用期間中の被曝線量は  $2.4 \text{ mSv}$  に相当する。一般公衆に対する線量当量限度は年間  $1 \text{ mSv}$  であるので、放射線管理上、乗組員は全員放射線業務従事者とする必要がある。また、機械室は乗組員が常駐する場所ではないので、乗組員が週 48 時間立入ることを想定する管理区域（比較的線量当量率の低い区域）として管理すればよい。なお、原子炉運転時の原子炉格納外側での線量当量率は  $10^3 \text{ Sv/h}$  以下であり、原子炉運転中に乗組員が原子炉区画に立入ることは不可能である。

原子炉停止時は、居住区画では、原子炉停止直後の線量当量は  $10^{-3} \mu\text{Sv/h}$  と非常に低くなっている。一方、原子炉真横方向の船体外表面での線量当量率は、原子炉停止直後において  $77 \text{ mSv/h}$  となり、支援船への近接時においては、適切な放射線管理が必要となる。

原子炉事故時における線量評価として、100%出力で 2200 日連続運転した後に炉心に蓄積される核分裂生成物(FP)のうち、希ガス 100%、ハロゲン 50%、その他の FP 1% が格納容器内に放出されると仮定し（仮想事故）、居住区画での線量当量率を評価した。ガンマ線線源は ORIGEN2<sup>11)</sup>により評価し、線量当量率の計算は QAD-CGGP2<sup>12)</sup>を用いた。居住区画における事故後 30 日間の積算線量当量は、仮想事故時の評価においても  $1 \text{ mSv}$  を下回る。

以上のように遮蔽上、最も有利であると考えられる原子炉プラント別置き（ケース 3）の場合であれば、原子炉に最も近い機械室のみを管理区域として、機械室と居住区の間に、厚さ約 10 cm の鉄の追加遮蔽により居住区画を放射線管理区域外に設定することが可能である。このように動力ユニットを別置きの圧力容器に収納する場合については、500ton 規模で原子動力を用いた海中航行観測船が成立する見通しが得られた。

表 1.3 動力ユニットに許容される質量

	動力ユニットを別置きの 耐圧容器に配置する場合	動力ユニットを居住耐圧 容器内に配置する場合
居住耐圧容器 材質/密度	HT80 / 7.8 kg/ m <sup>3</sup>	HT80 / 7.8 kg/ m <sup>3</sup>
内径	4 m	4 m
厚さ	0.115 m	0.115 m
長さ	22 m	36 m
全容積	約 310 m <sup>3</sup>	約 506 m <sup>3</sup>
構造材容積	約 36 m <sup>3</sup>	約 56 m <sup>3</sup>
質量	約 278 ton	約 440 ton
居住耐圧容器内搭載物重量	約 22 ton	約 22 ton
動力ユニットに許容される全容積 質量	約 196 m <sup>3</sup> 約 131 ton (耐圧容器約 29ton、浮力 体約 46ton を除く)	約 196 m <sup>3</sup> 約 44 ton

表 1.4 は次ページ

表 1.5 海中航行観測船の各場所における線量当量率

評価場所	線量当量率 (mSv/h)			
	原子炉運転時			原子炉停止直後
	中性子	ガンマ線	合計	ガンマ線
居住区画				
機械室	$2.83 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-2}$	$6.96 \times 10^{-7}$
寝室	$1.79 \times 10^{-3}$	$6.06 \times 10^{-3}$	$7.85 \times 10^{-3}$	$3.86 \times 10^{-7}$
食堂	$1.35 \times 10^{-3}$	$3.45 \times 10^{-3}$	$4.80 \times 10^{-3}$	$2.21 \times 10^{-7}$
観測室	$1.21 \times 10^{-3}$	$2.58 \times 10^{-3}$	$3.79 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-7}$
船体外表面				
原子炉上部	$6.26 \times 10^{-12}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$7.24 \times 10^{-18}$
原子炉下部	$2.06 \times 10^{-1}$	$1.19 \times 10^2$	$1.19 \times 10^2$	$6.16 \times 10^{-1}$
原子炉真横	$1.80 \times 10^2$	$8.18 \times 10^3$	$8.36 \times 10^3$	$7.70 \times 10^1$

表 1.4 原子炉配置の影響比較

	原子炉プラントを別置きの耐圧容器に収納（ケース 1：別置方式）	居住耐圧容器船尾に原子炉プラント配置（ケース 2：船尾配置方式）	居住耐圧容器中央部に原子炉プラント配置（ケース 3：船体中央配置方式）
衝突 静止物への船首からの衝突	原子炉への影響は小さい。	原子炉への影響は小さい。	原子炉への影響は小さい。
他船の側部への衝突	衝突船首により原子炉格納容器が損傷する恐れがある。	居住耐圧殻が損傷しても原子炉格納容器が損傷を免れる可能性がある。	居住耐圧殻が損傷しても原子炉格納容器が損傷を免れる可能性がある。
沈没時の熱除去	格納容器表面より自然放熱。	原子炉室注水により自然放熱。	原子炉室注水により自然放熱。
船体重量バランス	原子炉プラント周囲に浮力体配置で概ねバランスが取れる。	船尾部が極端に重く、重量バランスは悪い。	重量バランスは良い。
遮蔽	原子炉格納容器、海水、居住耐圧容器が遮蔽機能を補助。居住耐圧容器は管理区域外とできる可能性有。	居住区側に遮蔽を要する。重量増加大。居住区画は管理区域とできる可能性あり。	原子炉室両側に遮蔽を要する。重量増加大。原子炉脇の通路は時間制限が必要。居住区画が管理区域となる可能性が大。
母港、基地での保守性	船体外板の取り外し、原子炉プラントの一括撤去で作業は容易。	原則的に狭い船内作業となり制約が多い。	原則的に狭い船内作業となり制約が多い。
安全設備	受動的安全設備の採用が容易。設備の構成機器は少なく、非常用の電源は小容量蓄電池で可。	初期の崩壊熱除去に能動的設備をする。設備の構成機器が多い。注水ポンプ等の動的機器用の電源要。	初期の崩壊熱除去に能動的設備を要する。設備の構成機器が多い。注水ポンプ等の動的機器用の電源要。

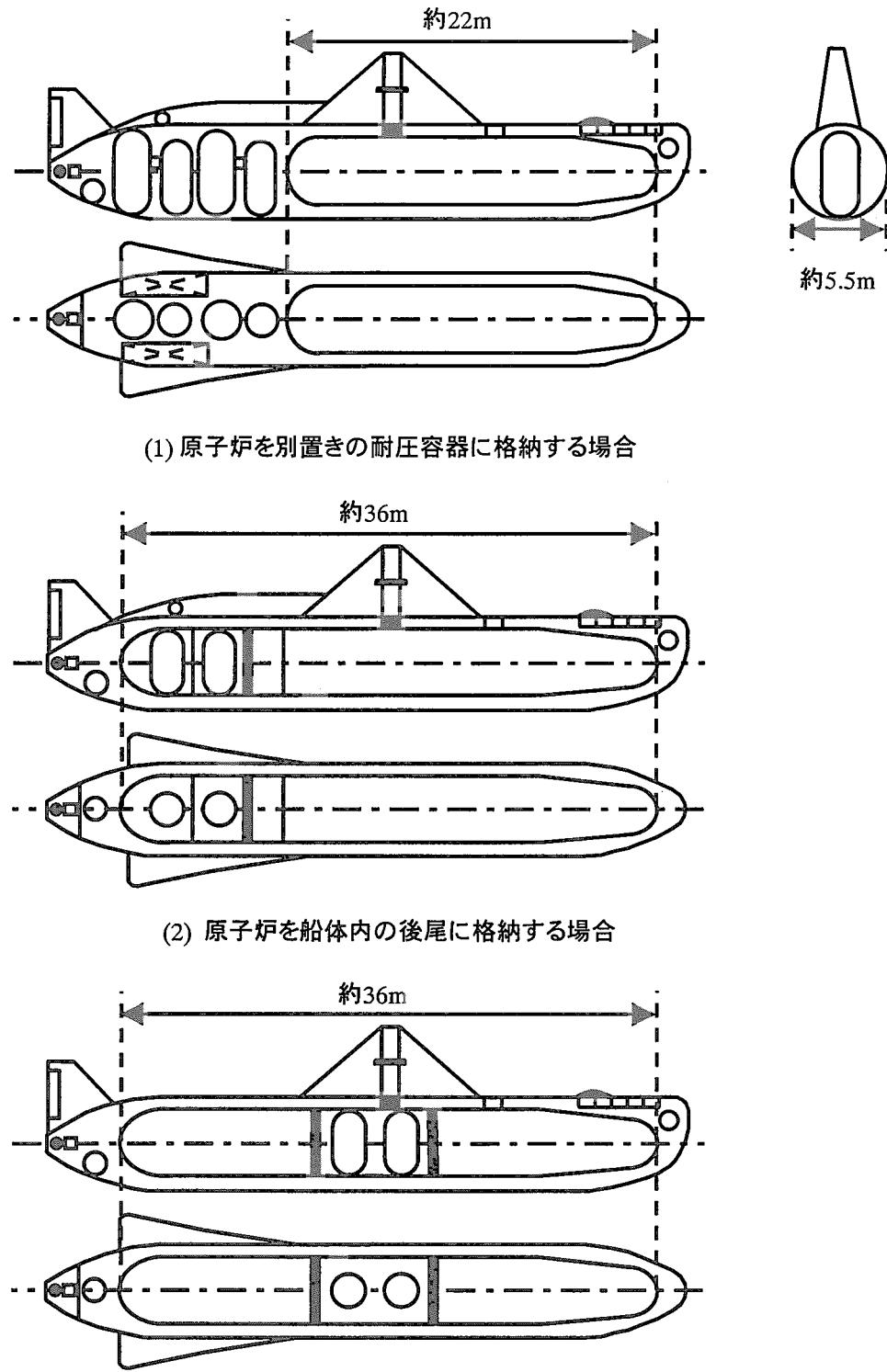


図1.3 原子炉プラント配置の比較

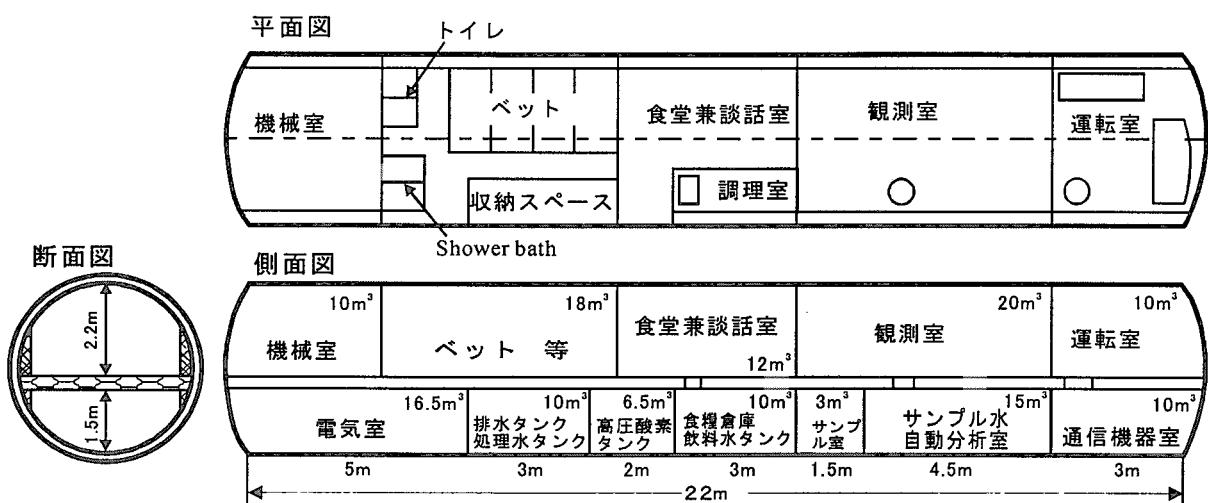
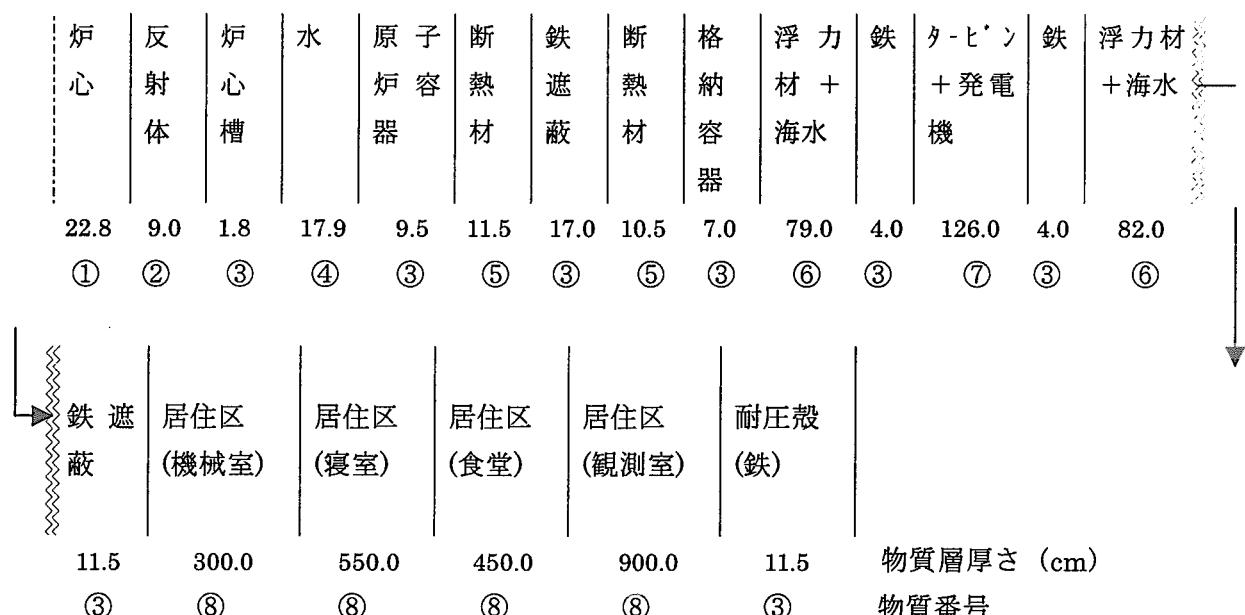


図 1.4 海中航行観測船の居住耐圧容器内のレイアウト案



物質番号	名前	物質番号	名前	物質番号	名前	物質番号	名前
①	炉心	②	反射体	③	鉄	④	水
⑤	断熱材	⑥	浮力材 + 海水	⑦	タービン + 発電機	⑧	空気

図 1.5 原子炉横（居住区画）方向の遮蔽計算モデル図（一次元円柱体系）

## 2. 海中航行観測船の運航概念

### 2.1 観測の概要

#### (1) 地球科学と社会的ニーズ

21世紀の科学は、地球科学と生命科学という2つの複雑系科学が中心的役割を果たすと予想されている。とりわけ、人間活動の急速な拡大に伴う地球温暖化、人口と消費の爆発、土壌の喪失と劣化などの地球規模の環境問題は、もはや仮説ではなく国際政治経済が直面する現実の問題と認識されるようになってきた。これらの問題を乗り越えるためには、炭素排出規制の国際的合意の形成、温暖化影響に対する防止・適応策の長期計画的な実施、環境コストの市場メカニズムへの組み込みなどリサイクル・省エネを徹底した循環型社会の実現などを進めいく必要がある。

その科学的基礎として、人間活動が気候と生態系に与えるインパクトとそれによるフィードバックに関する予測精度を向上させるため、不確実性を減らし、空間解像度を高めることが必要である。これが可能となることによって、初めて対策コストと被害額の合計が最小となるように最適な政策を選択することができる。同時に、西南極大陸氷床の崩壊、海洋深層循環コンベアベルトの停止、CO<sub>2</sub>を吸収する珪藻類からCO<sub>2</sub>を放出する円石藻類への種構成の遷移などといったカタストロフィー的な気候ジャンプの解明が不可欠である。このように、生態系を含む気候システムに関するグローバルな研究の重要性がいっそう高まると考えられる。

すでに、日本では地球科学技術分野の目覚しい強化が図られている。地球規模の気候変動研究への重点的運用を目的として、冬季の高緯度荒天海域での観測能力を強化した海洋地球研究船「みらい」の建造、10 kmという水平解像度を目指とした超並列ベクトル・コンピュータである「地球シミュレータ」の開発、ADEOS「みどり」、TRMM、ADEOS-IIなどの地球観測衛星の開発、モデル研究と観測研究の体制を強化する「地球フロンティア研究システム」及び「地球観測フロンティア研究システム」の発足、海底堆積物から過去の環境変動を復元する「地球深部探査船」の開発などが進められている。

国際的にも、次世代の地球観測衛星として、米国のEOS-Terra、EOS-Aqua、Jason-1、欧州のENVISAT-1などが次々と打ち上げられつつあり、マイクロ波海面高度計、ジオイド観測衛星による海洋循環観測、マイクロ波散乱計による海面風応力観測の能力が飛躍的に向上しようとしている。また、自律浮沈型漂流フロート（プロファイル・フロート）を世界の海洋に約3,000本投入し（平均空間分解能300km）、水深2000mまでの水温・塩分プロファイルを10日毎に得るARGO計画が国際協力のもとに開始されている。これらのデータの同化によって、気象の中期予報精度の大幅な向上が期待されている。

このような飛躍的な地球科学の進歩の中で、残された重要な観測空白域は、北極海の海氷下の領域と台風などの暴風圏下の領域である。

## (2) 北極海での観測課題

## a) 北極海における研究課題

地球は太陽からの光（短波放射）を受け、一部は雲や雪氷で反射し（反射率＝アルベド）、大気、陸域、海洋が暖められ、長波放射（黒体輻射）で宇宙に熱が放出される。低緯度地域では太陽からの入射が宇宙への放射を上回って暖かくなり（熱源）、高緯度では逆に宇宙への放射が太陽からの入射を上回って寒くなる（冷源）。

この温度差（ヒートエンジン）によって、大気と海洋に循環が生まれ、低緯度から高緯度へと熱を運び気温差を平均化しようとする。このうち、海洋は大気に比べて、温まりにくく冷えにくいため、タイムラグを持って熱を輸送する。途中で中層に潜り込んだりすると、さらにタイムラグが生じる。

冷源である北極圏では、海氷や雪氷が太陽からの短波放射を反射するだけでなく、海氷が海にフタをすることによって大気への熱放出を妨げ、いっそう、気候を寒冷化する。

北極海では、大陸河川から流入する淡水による特殊な海洋の成層構造（塩分躍層）が対流を妨げ、海氷を作りやすくする。もし、北極圏陸域の降水量が減れば海氷ができにくくなつて開水面積が増え、海洋から放出される熱が増大し、温暖化を促進することになる。

このように、海氷の存在は北極圏の気候変動をより不安定にする役割を果たす。

北極海の海洋構造を詳述すると、以下のような成層構造を持つ。

- ① まずロシアのレナ川、エニセイ川、カナダのマッケンジー川などの大河川から供給される淡水によって低塩分層が海表面に広がっている。このおかげで海氷が生成しやすくなっている。
- ② そのすぐ下の層には、ベーリング海峡から流入した太平洋水の層が有光層内に形成されている。この太平洋水は、太平洋北部で湧昇した深層水によって栄養塩が豊富であり、これがベーリング海でアラスカのユーコン川の淡水と混合して低塩分化したもので、北極海の生物生産を支えている。
- ③ さらにその下の深いところの海盆には、大西洋の暖かい高塩分水が流入している。暖かい大西洋水は、フラム海峡で冷やされて深層循環ベルトコンベアとなるとともに、バレンツ海の緩やかに傾斜する大陸棚で混合しながら、上記の冷たい低塩分層の下に潜り込んでいく。
- ④ 最深層には、海氷生成時に排出される高塩分水（ブライン）が存在する。

これらの成層構造は通常の状態では上下混合しにくいが、北極海の中を循環する間、海盆斜面で上下混合することで成層構造が崩れると海氷が生成されにくくなる。この移流・混合過程をシミュレーションできるようにすることが、目下の緊急課題となっている。

北極海の気候は、海水のアルベド変化と開水面変動だけでなく、北極海に特徴的な低層の雲（北極層雲、Arctic Stratums Cloud）の変動に大きく左右される。北極層雲は、凝結核となるエアロゾルの原因物質である海洋生物起源のDMS（硫化ジメチル）に左右されている。北極海の開水面及び海水下の生物生産は、全体量としては日本東方の亜寒帯に比べてずっと低

いはずだが、亜寒帯と比べて生産されたDMS（硫化ジメチル）が海中で消費されずに大気中に放出される割合が大きい可能性があり、かつ、北極海では大気循環による拡散が不活発なため、海洋生物生産が雲の生成を大きく左右している可能性がある。

大西洋水は栄養塩の消費された表層水が北極海に流入し、低塩分水の下に沈降するため、生物生産にはあまり貢献しない。一方、河川水は栄養塩が豊富であり、太平洋水も量的には河川水や大西洋水に遠く及ばないが、太平洋から湧昇した深層水がベーリング海を経て供給され、かつ、ユーコン川の淡水で低塩分化されることによって有光層に存在するため、植物プランクトンのブルーミングを左右する重要な要因となっている。

太平洋水の移流・拡散過程については、カナダのマッケンジー川からの淡水の影響を受けながら、アラスカ沿岸のポーフォート海、チュクチ海からロシアのレナ川河口沖のラプテフ海あたりまでの海域の大陸棚及び海盆斜面での観測研究が重要である。

一方、大西洋水については、大西洋北部で冷却されて沈降することで海洋深層循環ベルトコンベアを駆動し、これによって高緯度と低緯度の気温差を緩和している。この海域で温暖化の進行により降水等の淡水供給が増加して塩分躍層が形成されると、沈降しにくくなり、ベルトコンベアの動きが弱まると、ヨーロッパが寒冷化すると言われている。これに関する研究、並びに、北極海に流入した暖かい高塩分水が上層の冷たい低塩分水と混合する問題が重要である。

#### b) 北極海の観測システム

冷戦時代には、原子力潜水艦及び水上設営基地による観測データが存在したが、ソ連崩壊後の水上設営基地の廃止、氷海浮上能力のある米国原潜スタージョン級の退役等により、データが得られにくくなっている。

スタージョン級による北極海科学観測計画SCICEX (SCience ICe EXPeditions、1993～1999) は北極海における原子動力利用の大きな可能性を示したが、同級退役後は米原潜の総数が80隻から50隻に縮小されたこともあり、科学者の乗船機会はなくなった。NSF (米科学財団)において同計画の継続についてのフィージビリティ・スタディーが行われており、また、ロサンジェルス級による塩分・水温等のデータ提供は継続されている。

観測期間	艦名
1993年8月～9月	Pargo
1995年3月～5月	Cavalla
1996年9月～10月	Pogy
1997年8月～9月	Archerfish
1998年6月～8月	Hawkbill
1999年3月～5月	Hawkbill

その他の現場データとしては、塩分・水温プロファイルの観測可能な氷海漂流ブイはJAMSTECが配備しているJ-CAD（現在3基）のみである。JAMSTECではこのほか氷海下の採水、氷厚観測などの可能な自律型無人機（AUV）の開発を進めている。

各国の砕氷船のうち北極海で科学観測に供されているものは、米コーストガードのヒーリー、ドイツのポーラー・シュテルン、スウェーデンのオーディンなどがあるが、その行動範囲、行動時期の制約が大きく乗船機会が限られている。「みらい」はチェクチ海、ボーフォート海での観測実績はあるが、耐氷能力のみであって砕氷能力がないため、本格的な氷海観測は他の砕氷船の支援によって初めて可能となるに過ぎない。日本の「しらせ」はもっぱら南極観測での輸送に従事し、北極観測にも使われる目処は立っていない。

それに対し、衛星のマイクロ波放射計及び合成開口レーダーによる海水観測の充実が著しい。

衛星名	センサー名	状態
DSDP衛星（NOAA他）	SSM/I	継続中
Aqua衛星（EOS-AM1、NASA）	MODIS、AMSR-E	2001年打上予定
RADARSAT-1衛星（カナダ）	C band SAR	1995年打上済み
JERS-1衛星（日本）	L band SAR	終了
ERS-1,-2衛星（ESA）	C band AMI	打上済み
Quick SCAT衛星（NASA）	Sea Winds	1999年打上済み
ADES-II衛星（日本）	AMSR	2002年打上予定
ENVISAT-1衛星（ESA）	C band ASARE	2001年打上予定
ICESAT衛星（NASA）		2001年打上予定
HY-1衛星（中国）		2001年打上予定
ALOS衛星（日本）	PALSAR（L band）	2002年打上予定
COSMO-SKYMED衛星		2003年打上予定
CRYOSAT衛星（ESA）		2003年打上予定
RADARSAT-3衛星（カナダ）	C band SAR	2004年打上予定
TERRASAR衛星	X+L band SAR	2004年打上予定
NPOES衛星（NOAAほか）	CMIS	2009年打上予定

### c) 海中航行型観測船のミッション

上記の衛星、氷海ブイ、砕氷船、AUVなどによる観測の現状及び限界に対して、海中航行観測船では次の観測が強く期待される。

#### ① 海洋物理・気象観測

##### ・ 氷厚分布

リッジ（山脈状の海氷）、リード（割れ目）、ポリニア（氷中湖）などの非一様性を持つ海氷の厚さ分布を広域にわたって評価するには、海中航行観測船からの上向きマルチ・

ナロービーム音響測深機による観測や、アイス・コア・ドリリングによるドリリング孔内計測が有効と考えられる。コア・サンプリングについては船内への取り込みや保存方法の検討が必要。

- ・ 海面フラックス

開水面、ポリニア、リードを通じて交換される大気・海洋間の水・エネルギー・フラックスを評価するため、海中から水面上に数mのマストを立てて、気温、湿度、気圧、風速、日照、アルベドなどを測定する。碎氷船では船体が気流を大きく乱すため、このような観測は困難。

- ・ 海洋混合過程

海氷生成に大きな影響を与える河川水、太平洋水、大西洋水の陸棚・海盆斜面での移流・混合過程を解明するため、多段式音響流向流速計（ADCP）観測、高精度の塩分水温計測、乱流成分の観測を行う。また、化学トレーサーを使って混合過程を解析するための採水を行う。成層構造の搅乱を最小限とし、かつ、塩分躍層や海盆斜面など選択的に位置を定めて計測・採水を行うことは碎氷船やAUV（自律型無人機）では困難。

## ② 物質循環・海洋生態系観測

- ・ 化学分析

氷海域における物質循環及び生態系の解明のため、成層構造の各所からの採水を行う。サンプルからは、塩分、溶存酸素、溶存二酸化炭素、全炭酸、pH、アルカリ度、栄養塩（硝酸塩、リン酸塩ほか）、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、DMSなどの分析を行う。自動連続計測が可能な項目については船内での分析が望まれる。複雑な処理の必要な分析については支援船（随伴船）で行う。

- ・ 生物

開水域の植物プランクトンの大増殖（ブルーミング）、海水下の生態系（アイスアルジー）などの役割を理解するためのサンプリングを行う。船内にはクロロフィル、植物色素測定のための分光吸光光度計、採取した植物プランクトン、動物プランクトンを自動固定するための設備を設ける。

## ③ 地球物理観測

北極海での碎氷船による地球物理観測は行動範囲がごく限定されてしまう。海中航行型観測船からのマルチ・ナロービーム音響測深機による海底地形観測、サイドスキャン・ソナー及びサブボトム・プロファイラによる海底微地形・底質観測、重力・磁力計測が期待される。また、海中航行観測船から後方にストリーマー・ケーブルを曳航できれば、地震探査法による海底下構造観測が可能となる。

### (3) 暴風圏下のミッション

台風直下など暴風圏での強風、強波浪中での大気と海洋の間の熱・エネルギーの交換、炭素などの物質交換などの相互作用はほとんど解明されていない。「みらい」は観測船として

は優れた耐航性能を有しているが、CTD（塩分水温深度計測）採水が可能なのはシーステート5（有義波高<sup>\*</sup>2.5～4.0m程度）の上限までであり、シーステート6（有義波高4.0～6.0m程度）以上の海象条件では現場海域に留まって船体固定観測機器による観測を行うのが限度である。荒天状態での大気海洋相互作用は、10年規模の気候変動や海洋における二酸化炭素吸収能力などの解明にとって非常に重要である。

このような荒天状態における新しい観測手段として、衛星マイクロ波散乱計による海上風観測（海面応力）及び波浪モデルによるHind Casting（波浪追算）があるが、強風下での検証もまだ確立していない。

海中航行観測船からの観測方法として、波高10～30mもの強波浪に対し安全な深度からポップアップ式測器を上げるなどの方法が考えられる。

#### (4) 広域表層海洋生態系

海洋における植物プランクトンの増殖は、海面から約30～50mの水深を中心とし100～200mの水深までの「有光層」のうち、窒素、リンなどの栄養塩が深層から供給される湧昇域、あるいは、高緯度の荒天海域で上下混合が活発な海域において特に活発に行われる。

地球温暖化の予測に必要な海洋炭素循環を解明するうえで最も重要なプロセスであるが、その時系列観測にはまだあまり成功していない。それは、まず、高緯度荒天海域で係留系を海面下わずか30mに設置することは強度面及び漁業活動からの被害を受けやすいことがある。また、こうした係留系を設置しても、プランクトンの増殖の空間的不均一性が高く（パッチネス）、点としての観測結果により面的な炭素フラックスを得ることが難しい。面的には衛星の海色計（SeaWiFSセンサーなど）が有効であるが、高緯度海域は雲が多いため、晴天海域での画像を合成する方法によっておおよそ1ヶ月の頻度でしか画像データが得られない。

このように空間的・時間的な広がりをもって有光層における生物プロセスを解明する有効な手段がなく、長期にわたって有光層に留まって観測が可能な海中航行観測船が期待される。現在、注目されている現象として、最近、ベーリング海で発生が確認されているコッコリス・ブルーミングがある。通常、珪藻類などが優勢種となっている海域では、珪酸塩の殻を作る際に効率的に溶存二酸化炭素を有機炭素に変換して深海に輸送しているが、円石藻類（コッコリス）が優勢種となると、炭酸塩の殻を作る際に二酸化炭素を放出するため、海洋での二酸化炭素吸収能力が低下する。このような優勢種の遷移が海洋で大規模に生じると、地球温暖化を急速に進行させる恐れがある。このコッコリス・ブルーミングは、高緯度海域が雲に覆われていることが多いために衛星海色計による観測データがあまり集まっていないなど、発生の実態がまだ十分分かっていない。また、その発生メカニズムも解明されていない。

海中航行観測船による観測手段としては、北極海での物質循環・海洋生態系観測の項で述べたとおりであるが、船内及び支援船での分析能力及び分析精度の向上を図る必要がある。

---

\* 有義波高：原波高を高い順から並びかえて、高いほうから全体の1/3の波高を選び、その平均値を取ったもの。有義波高は目視波高に近いといわれている。

### (5) 亜表層・中層水形成メカニズム

海洋表層の海水が亜表層・中層に潜り込むことによって、10年規模の気候変動を引き起こすとともに、吸収された二酸化炭素を効率的に深層に運ぶ役割も果たしている。この潜り込みについては、現在の高解像度海洋大循環モデルでもまだ直接数値計算することができず、パラメタリゼーションに頼っている。黒潮続流域の沈み込みのように風成線形理論である程度説明の付くものもあるが、中規模渦の影響の強い続流域南方のモード水形成域ではまだ十分なモデルがなく、高緯度荒天域での上下混合やオホーツク海からの低温低塩分水の潜り込みについても、どの海域からどのようにして潜り込むかがまだ解明されていない。

海中航行観測船は、こうした潜り込みプロセスの現場を直接的に観測する手段として期待される。観測手法としては、北極海の海洋混合過程の項で述べたとおり。

### (6) 高精度重力測定

揺れの少ない海中航行観測船では、洋上船に比べて一桁以上精度のよい重力測定が可能となるため、地球内部変動や海底圧力場の変動(海流変動)などの解明に貢献することが期待される。

海中の重力測定についてはすでに過去に実績がある。

## 2.2 自然条件

海中航行観測船及び動力源の検討にあたり、主たる観測海域である北極海および暴雨風域の気象、海象等の自然条件を考慮する必要がある。北極海域及び暴雨風域の代表例とした冬季の北太平洋海域について、考慮すべき項目とその影響及び観測値<sup>14),15),16)</sup>を表2.1に整理した。

北極海の風速は、高緯度になるにつれて弱くなり、1月の平均風速を見ると、グリーンランド海で20m/secに及ぶが、結氷域では10~16m/secである。

海氷厚さについては、大雑把に言って、夏期においては、厚さ1~2mの氷盤の所々に風応力で折り重なってできた「リッジ」という山脈状に厚い部分(3~4m)がある。氷山に遭遇するのは、氷河が崩壊して流出するグリーンランド側に限られるが、その他の結氷域の周辺でも厚さ3~4mの海氷が離散集合している状態も見られる。「みらい」の北極海航海でも、厚さ数mの氷塊に遭遇している。

公開されている潜水艦ソナーによる冬期平均の海氷厚さ分布を図2.1に示す(Bourke & Garrett, 1987)。カナダとグリーンランド北部沿岸では7m以上に達している。北極海の気温は、1月の平均気温でマイナス36度に及ぶが、7月の平均気温で0度までである。

北極海における海氷状況に関するより詳しいデータは添付資料・1に示す。

## 2.3 運航形態及び要求される設備の想定

### (1) 母港及び基地

海中航行観測船の母港は日本を想定する。母港では、海中航行観測船の大規模な整備を実施する。母港に設けられたメンテナンス工場にて、動力部分は船体から取り外され、原子炉格納容器

及び原子炉圧力容器の蓋が開放され、燃料交換、供用期間中検査等が行われる。北極海域の調査等に際しては、観測活動の拠点として基地を設ける。基地では、海中航行観測船の簡単な整備を行う。原子炉プラントは、発電機タービン耐圧容器の機器についてのみ点検及び整備を実施する。原子炉プラントに故障が生じた場合には母港へ回航して修理を行う。

図 2.2 に想定した運航の形態を示す。母港から基地への移動ならびに観測航海は潜水航走を原則とする。原子炉は母港にて起動し、随伴船の監視のもとに出港する。出港後は、安全な場所にて速やかに潜水航走に移行する。海中航行観測船は、独立自航が可能であり、支援船は必要に応じて随伴することとする。基地に近くなれば、随伴した支援船または現地の支援船の監視のもとに浮上して入港し、点検、整備、食料等の補給、乗組員の交代、観測員の乗船を行う。

#### (2) 観測航海

海中航行観測船は、図 2.2 に示すように母港または基地にて原子炉を起動して出港し、必要に応じて浮上を行いながら約 1 ヶ月間の観測航海を行う。出入港は支援船の監視のもとに行う。北極海では氷の下での活動が中心となり、支援船の随伴を受けることが困難であるため独立自航を想定する。また、暴風雨圏である高緯度海域においては、可能な限り支援船の援助を受けることとする。海中航行船の役割については 4.2 章に示す。

#### (3) 運転制限

一般に、潜水船は潜水状態では極めて安定しているのに対して、浮上時には船体運動が大きい。このため、乗組員の安全を考慮して、特段の必要がない限り、本海中航行船の浮上は、有義波高が 2m 以下の時に制限することとする。本船の動力として採用されている自然循環型の原子炉は一次冷却水の流動が船体運動の影響を受けるため、浮上時には海象状況に応じて出力が制限される。しかし、原則として水上航走は行わないため、必要な原子炉出力は小さく運航上の問題は生じないと考えられる。海洋環境下における船体運動が原子炉プラントに与える影響については 3.2 章に検討結果を示す。

氷海においては、水上での氷塊との衝突を防止するために、水上航走は行わない。氷海下の潜水航走という条件を含めて船体の安全確保の考え方は 5.2.1 節に示す。

現在、我が国では、潜水船の航行に対し設計潜行深度を超えた海域の航行を避けるべしとの監督官庁の指示があるが、本海中航行船は観測目的より設計潜行深度を超えた海域の航行が必須であるため、海域の水深による運転制限は設けずに検討を行う。

#### (4) 運航システム

運航システムは、支援船ならびに本船自身が装備する測位設備及び通信設備より構成される。支援船の主な役割は、出入港時の監視、食料等の補給、乗組員の交代、通信及び測位の支援である。北極海域及び暴風雨域において、独立自航を行う本船は、陸上基地等との定時及び臨時の通信、取得データの転送、海象情報等の外部情報入手を行うための通信設備を備える必要がある。

測位システムは、G P S、慣性航法装置、音響測位装置等を組み合わせて構成する。これら運航システムの詳細は、5章運航システムに記す。

#### (5) 居住環境

居住区には環境制御システムを備え、空気制御と湿度制御を行う。閉鎖空間での空気制御は、消費された酸素を補給し、排出された炭酸ガスを取り除くことにより、空気の状態を人間の生活に適したレベルに保つために行われる。酸素は液体酸素の状態で貯蔵し、炭酸ガスは化学的除去装置を使って吸収した後、圧縮して液化して船外に排出することとする。湿度制御は、豊富な動力と周囲の低温の海水を利用して行う。

#### (6) 運航の継続性の確保

本船は30日間の観測航海の継続性を確保するために、設備に多重性を持たせるとともに、信頼性の高い機器でプラントを構成することとする。動力源としては、原子力発電プラント2基及びバッテリ1基を搭載し、バッテリは本船を2.5kn(約1.6km/h)で約20時間航行させることができる容量を備えることとする。原子炉プラントは航海中は水中にあり、メンテナンス作業を行うことができない。そこで、プラントを構成する機器の部品には、腐食、摩耗、疲労強度に優れた信頼性の高いものを使用する。ポンプ、タービン、発電機は、耐久性の確認されたものを用いる。将来的に、プラント全体の信頼性は総合的な信頼性解析により確認することとする。信頼性解析は、陸上原子力設備に適用されている手法や、原子力設備の運用経験を取り入れたものとし、計画、設計、建造の各ステップで実施し、メインテナンスフリー運転での運航の継続性を確保する。

表 2.1 觀測船及び原子炉プラントへの影響

影響を与える項目	海中観測船及び原子炉プラントへの影響	北極海	北太平洋
水温	船体：空調用機器等の出力変化 原子炉プラント：プラントの効率の変化、 格納容器水温度の変化	最高水温 4°C (7月平均) <sup>14)</sup> 最低水温 -2°C (1月平均) <sup>14)</sup>	最高水温 25°C
気温	船体：(浮上時) 氷着による船体安定性減少 原子炉プラント：影響なし	最高気温 4°C (7月平均) <sup>14)</sup> 最低気温 -36°C (1月平均) <sup>14)</sup>	
風(風速)	船体：(浮上時)動搖及び傾斜 原子炉プラント：(浮上時)動搖及び傾斜	平均 5~ 6m/s <sup>14)</sup> 暴風雨時 20~25m/s <sup>14)</sup>	1月平均 26.4m/s <sup>16)</sup> 暴風雨時 30~35m/s <sup>14)</sup> 東経 170~180 度 北緯 35~ 40 度
波 (波高、波周期)	船体：(浮上時)動搖及び傾斜 原子炉プラント：(浮上時)動搖及び傾斜	平均値 0.5~1.0 m <sup>14)</sup>	1月平均 4.4m <sup>16)</sup> 瞬時観測値 10m <sup>16)</sup> 東経 170~180 度 北緯 35~ 40 度
海流、潮流	船体：船体推進及び操縦性に影響 原子炉プラント：影響なし	北極海 1kn 程度 <sup>14)</sup> ペーリング海 4 ノット( <sup>14)</sup> (約 7.4km/h)	
水(水下)	船体：衝突による船体損傷 原子炉プラント：衝突によるプラント損傷	水面上水厚さ 5m <sup>15)</sup> 水面下水厚さ 30~40m	
塩分	船体：浮力への影響 原子炉プラント：影響なし	最大濃度 35.5 最小濃度 31.0	
海底地震	船体：地殻変動による海水の急激な動きに 伴う動搖及び傾斜 原子炉プラント：動搖及び傾斜		

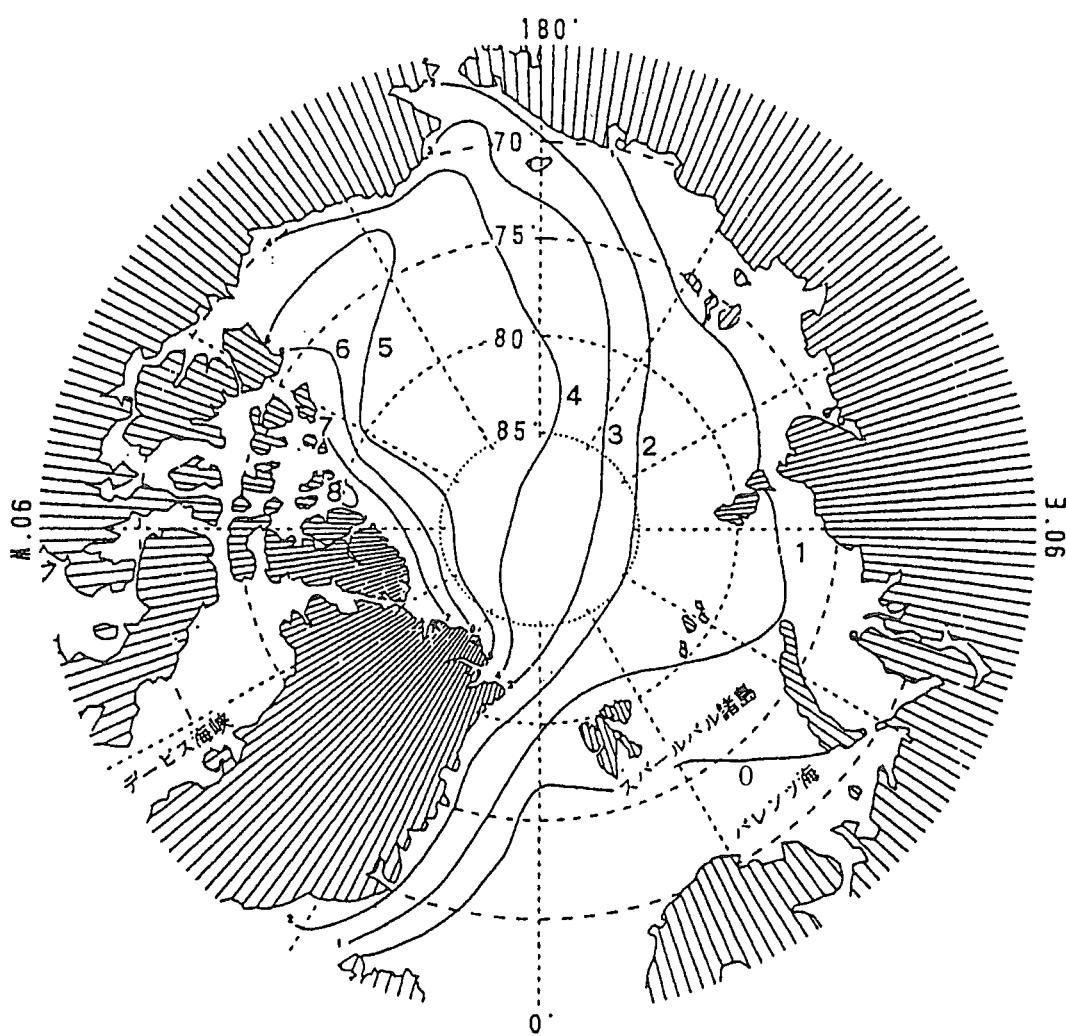


図 2.1 北極海と北大西洋における冬季の平均的な海氷の厚さ

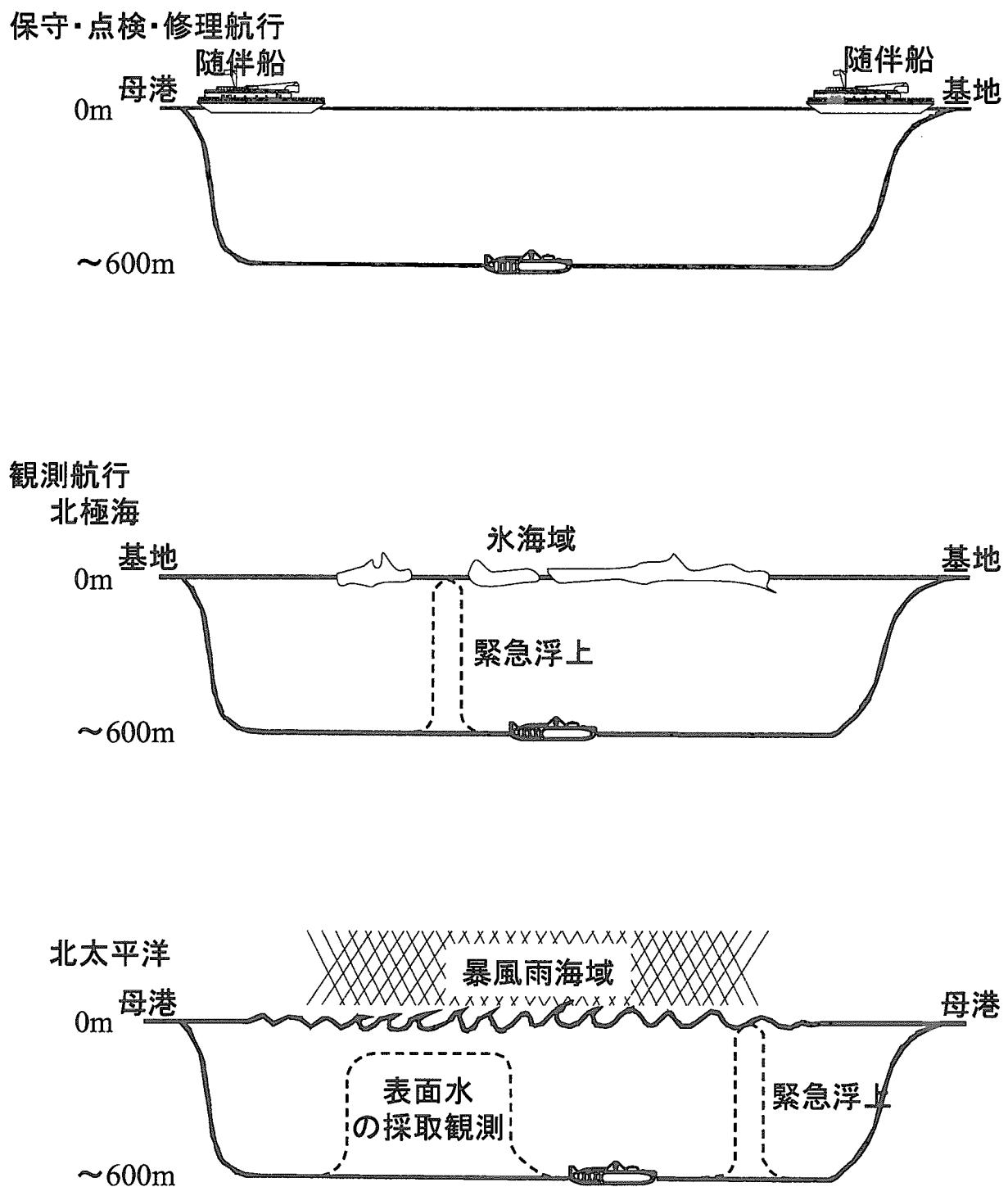


図2.2 海中航行観測船の航行形式(計画案)

### 3. 船体運動条件と氷の条件

#### 3.1 船体動揺

海中航行観測船の想定される行動範囲の特徴として、通常の観測調査船や潜水調査船では到達困難な氷海域や荒れた海象となる冬季の北方海域を考える必要がある。

参考に図 3.1～4 にオホーツク海域、ベーリング海域の夏・冬期の波浪分布を示す。

これらの図からわかる様に、冬期では波高 4 m 以上の波の発生確率は、オホーツク海域で 15%、ベーリング海域では 26% と非常に高く、冬期は當時荒天であると考えてよい。

海中航行観測船の通常運航時では、潜水航走が主であり充分な潜航深度をとっている場合には、冬期のオホーツク海域、ベーリング海域といえども、波浪による動揺は少ないが、入出港時やトランシット時には水上航走を行うため波浪による動揺を考慮する必要がある。

また緊急時には、海域や海象条件にかかわらず浮上を余儀なくされる場合もあり、荒天時の船体動揺が船体および原子炉に与える影響を検討しておく必要がある。

##### (1) 潜航時の波浪による動揺

平成 11 年度までの海中航行観測船の船体コンセプトを用い、通常航行中でも衛星電波などによる測位・通信や潜望鏡による外界観測を想定したマスト露頂状態での、波浪動揺の推定計算（計算モデル及び計算結果）を図 3.5～6 に示す。全長は約 40m と近似し、海面付近での航行を想定して、速力は 4 ノット（約 7.4km/h）と仮定した。

計算条件は下表の通り。

全長	4 0 m
最大直径	Φ 5. 5 m (幅 5. 5 m 高さ 5. 5 m)
排水量	5 0 0 t
前進速力	4 ノット（約 7.4km/h）
航走深度	1 1. 5 m および 1 3. 5 m の 2 種類（海面～キールの深度）
波の条件	
波高	2. 7 5 m (片振巾)
波長	7 6. 4 m
波周期	7 秒
出会い角度	0 deg (船首向い波) ~ 1 8 0 deg (船尾追い波)

図 3.6 より、荒天時では、潜航（露頂）状態といえども、ヒービングは ±50~60cm、ピッティングは最大 ±7.5~8.5deg 程度の動揺が発生することがわかる。

この程度の動揺では原子炉や船体装備機器への安全上での影響は少ないと考えられるが、マストを一定の高度に露頂させて航走することはかなり困難であると予想される。

## (3) 海象データ (参考)

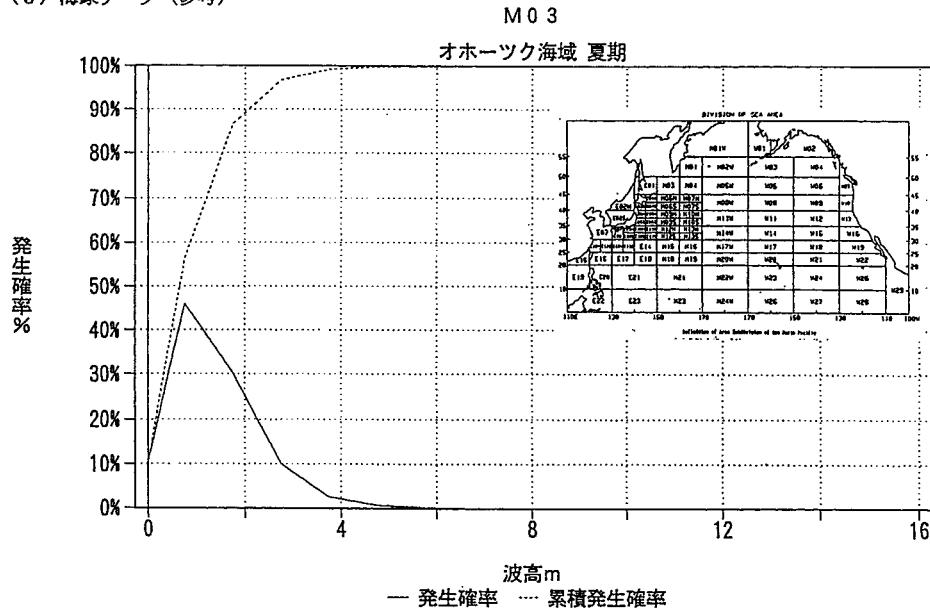


図 3.1 オホーツク海域夏期波浪分布

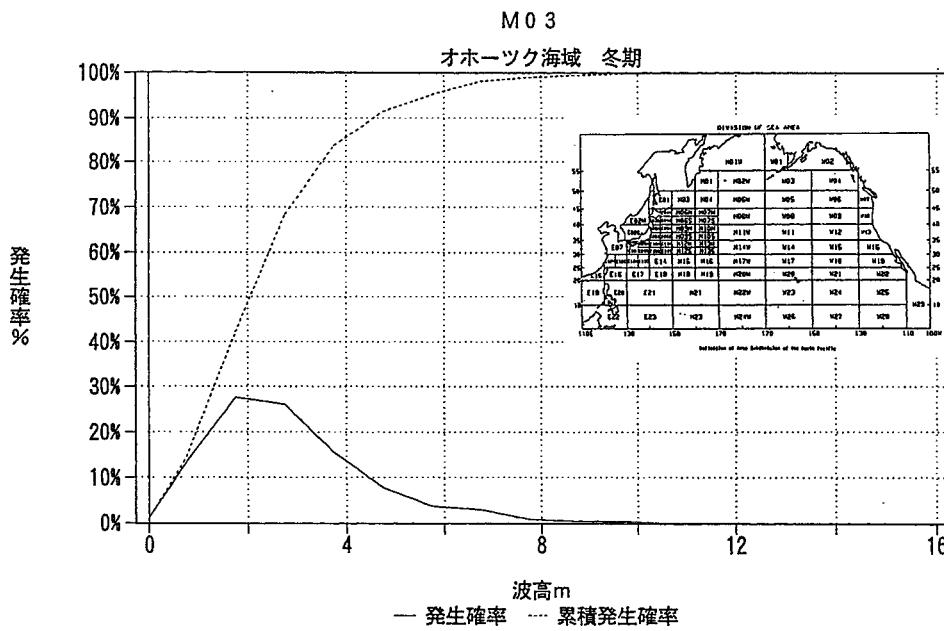


図 3.2 オホーツク海域冬期波浪分布

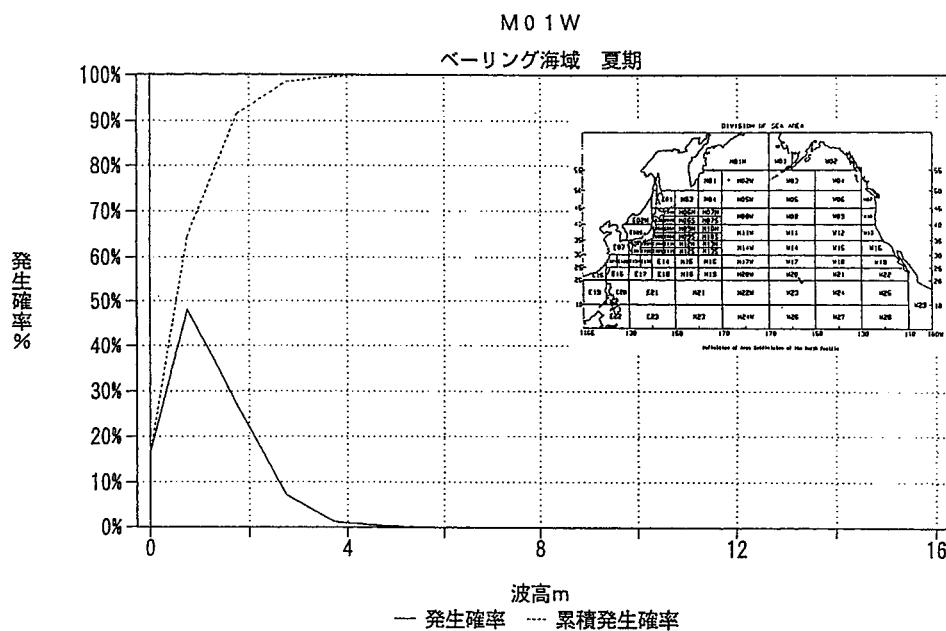


図 3.3 ベーリング海域夏期波浪分布

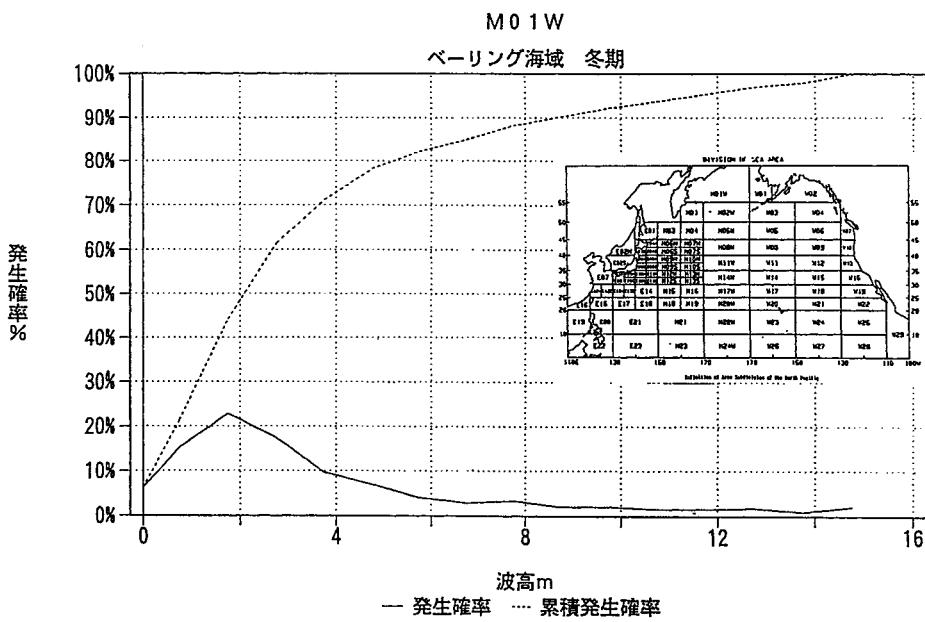


図 3.4 ベーリング海域冬期波浪分布

## (1) 計算モデル

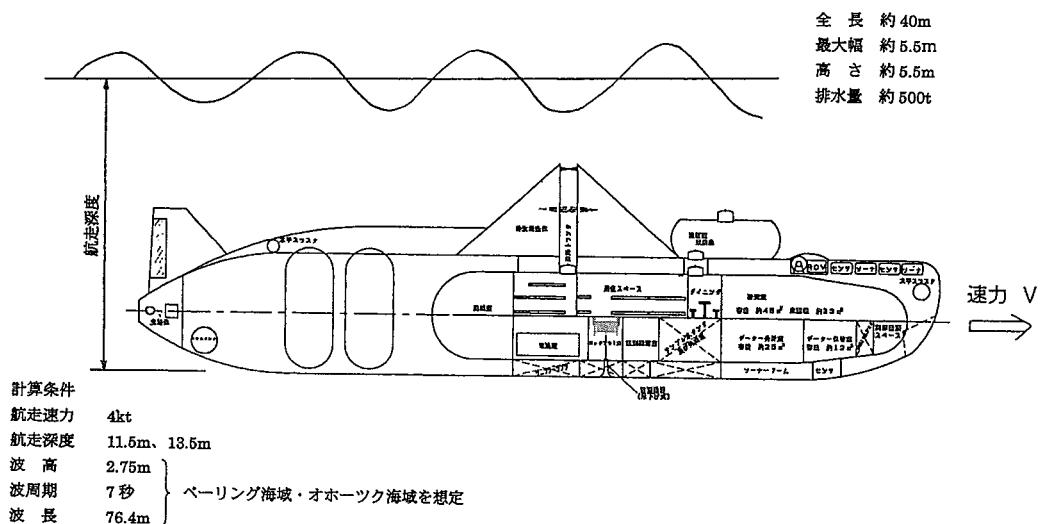


図 3.5 波浪動揺推定計算 計算モデル

## (2) 計算結果

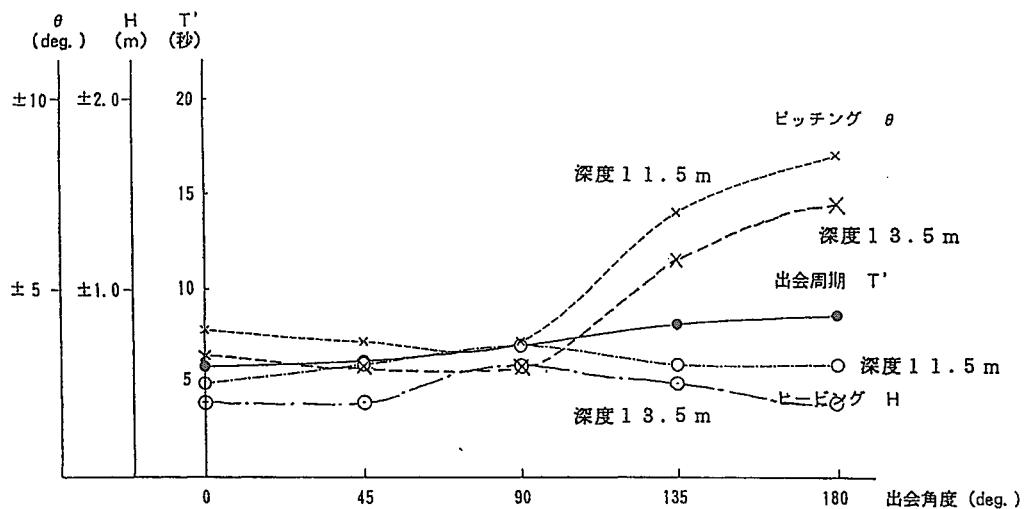


図 3.6 波浪動揺推定計算 計算結果

## (2) 水上航走時の波浪による動揺

### a) 肥大船の波浪中模型実験と推定計算結果

海中航行観測船の浮上時波浪中運動の参考とするために肥大船の波浪中船体運動に関する模型実験および計算例を示す。模型船はタンカ一船型で、その主要寸法は表 3.1 に示すとおりである。

実験および対応する計算は、模型船が停止した状態で、波長船長比( $\lambda/L$ )が 0.2 から 2.0 まで、波との出会い角( $\chi$ )が 0 度から 180 度まで範囲を対象としている。なお、ここで、波との出会い角は 180 度が船首に波が向かってくる場合、0 度が船尾に波が向かってくる場合に対応する。船体運動には前後揺れ(Surge)と左右揺れ(Sway)、上下揺れ(Heave)、横揺れ(Roll)、縦揺れ(Pitch)、船首揺れ(Yaw)の 6 つに分けて、それぞれの運動振幅( $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ )を波振幅( $k a$ )あるいは波傾斜振幅( $k \bar{a}$ ;  $k$  は波数)との比で示している。図 3.7 は、波との出会い角が 30 度、90 度、150 度の場合について横軸に波長船長比をとった図であり、図 3.8 は波長船長比 0.6、1.2、2.0 の場合について横軸に波との出会い角をとった図である。

### b) 海中航行観測船との対応

表 3.2 に実験および計算で対象とした肥大船と海中航行観測船との形状比較を示す。表 3.2 の「模型船」の列が実験および計算対象とした船の寸法等であり、「実船」の列が対応する実船の寸法等である。「海中航行観測船」の列は本委員会で考えている潜水艇の主要寸法等である。喫水は不明のため空欄としている。「排水量 500ton 相当船」とは「模型船」あるいは「実船」と形状が相似で排水量が 500ton となる船の寸法等を示している。また、「船長 38m 相当船」とは「模型船」あるいは「実船」と形状が相似で船長が 38m となる船の寸法等を示している。

「排水量 500ton 相当船」も「船長 38m 相当船」も長さと排水量の関係は海中航行観測船とほぼ等しい寸法となっている。肥大度を表す係数である  $\Delta/(\rho g L \pi B^2/4)$  や  $\Delta/(\rho g L \pi d^2)$  あるいは  $L/B$  の値には相当船と海中航行観測船でやや差が見られるが、幅  $B$  が本来喫水位置で定義されるべき値であるため、海中航行観測船の喫水が不明である現時点での比較は明確にはできない。

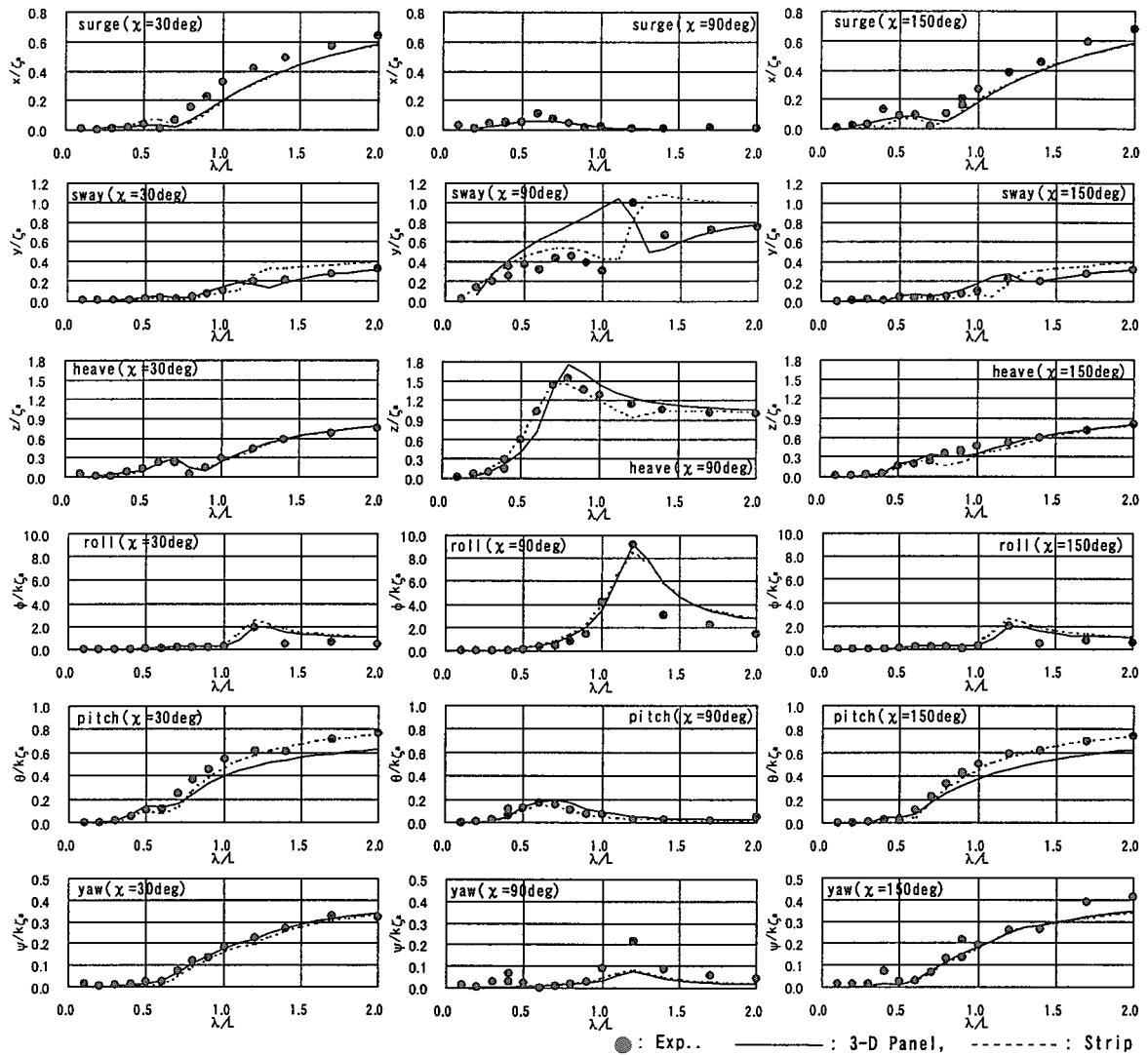
以上、相当船と海中航行観測船の形状には当然ながら差が見られるものの、排水量と長さの関係では比較的よい対応を見せていることから、図 3.7 あるいは図 3.8 に示した肥大船のデータは海中航行観測船の波浪中船体運動の傾向を考える上で参考になるものと考えられる。ただし、横揺れ運動については他の運動成分よりも横揺れの固有周期と横揺れ減衰力等に大きく依存するため、これらが異なる場合は定性的にもかなり異なった傾向を示すことに注意する必要がある。

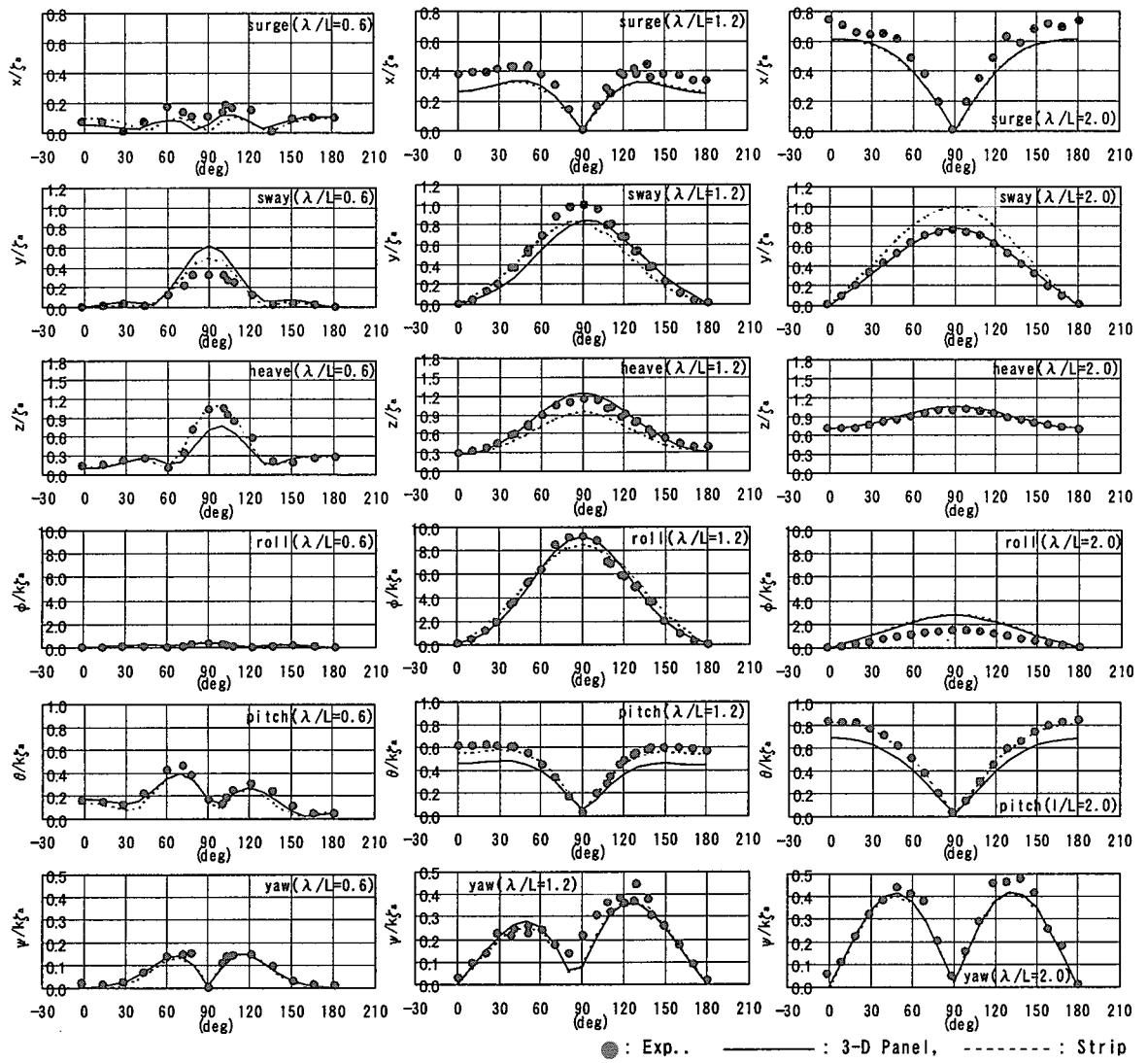
表 3.1 タンカ一型模型船の主要寸法

Length (L)	2.970(m)
Breadth	0.5383(m)
Draft	0.1791(m)
Displaced volume	0.23215(m <sup>3</sup> )
Transverse metacenter height	0.060(m)
Yaw gyration radius	0.240×L
Center of buoyancy (fore from midship)	0.0253×L

表 3.2 計算対象である線型と海中航行観測船の形状比較

	模型船	実船	排水量 500ton 相当船	船長 38m 相当船	海中航行 観測船
長さ; L (m)	2.9700	320.00	38.08	38.00	38.00
幅; B (m)	0.5383	58.00	6.90	6.89	5.50
喫水; d (m)	0.1791	19.30	2.30	2.29	
排水量; $\Delta$ (ton)	0.2373	296794.23	500.00	497.00	500.00
L/B	5.5174	5.52	5.52	5.52	6.91
$\Delta/(\rho g L \pi B^2/4)$	0.3425	0.3425	0.3425	0.3425	0.5403
$\Delta/(\rho g L \pi d^2)$	0.7735	0.7735	0.7735	0.7735	

図 3.7 Ship motion amplitude ratio ( $\chi = 30, 90, 150$  deg.)

図 3.8 Ship motion amplitude ratio ( $\lambda/L=0.6, 1.2, 2.0$ )

## (3) 水上航走時の動揺に関する我が国の法規・基準

我が国に於いて、一般の潜水船を対象としたものとして「運輸省潜水船特殊基準」<sup>17)</sup>と「NK（日本船級協会）鋼船規則」<sup>18)</sup>がある。これらは、潜水船が水上状態にある場合を想定したもので、安全確保の観点から船体構造及び機器の設計・製作上義務付けられているルールである。原文抜粋を添付資料2, 3に示す。

これらの規定内容は以下のとおりである。

(水上状態)		運輸省 潜水船特殊基準	NK 鋼船規則 T編 潜水船
動揺角	縦	± 60度	—
	横		± 60度
傾斜角	縦	± 30度	± 30度
	横	± 15度	± 15度

上表より、動揺角度としては、横方向 最大± 60度までを考慮しておく必要があると考えられる。

縦方向は潜水船特殊基準には縦横の表現はなく± 60度と規定されているが、通常の水上船舶を考慮すると縦方向に60度動揺することは考えにくいので、± 10度程度の動揺を考慮し、水中での潜入・浮上時の定常的トリム角（縦傾斜）は最大± 30度を考慮しておくことが妥当と考えられる。

### 3.2 船体動揺に対する原子炉の応答

#### (1) 概要

海中航行観測船用原子炉 S C R は加圧水型原子炉であるが、小型・軽量化のために一次系には自己加圧、自然循環方式を採用している。炉心出口の流体は、低クオリティの二相流である。海中航行観測船が水上航行する場合、ヒービング（上下方向運動）等の船体動揺があるため、一次系循環流は直接この外力の影響を受ける。原子炉の安定した運転を確保するために、船体動揺による外力の影響を明らかにしておく必要がある。そのため、船体動揺を模擬できるよう改良した RETRAN-02/GRAV コード<sup>19),20)</sup>を用いて、船体運動に対する原子炉の応答特性を解析的に調べた。

#### (2) 解析モデル及び解析条件

本解析に使用した RETRAN-02/GRAV コードは、ヒービング、ローリング、傾斜といった 3 次元の船体動揺を模擬できるように改良を行い、船体動揺を模擬した幾つかの実験結果及び原子力船「むつ」実験航海の結果により検証したものである。

本解析モデルは、原子炉容器内部を模擬しており、炉心は縦方向に 5 分割、蒸気発生器は縦方向に 9 分割した。

また、本解析ではヒービングについて以下に示す 6 ケースの解析を行った。ここで、ヒービング加速度 =  $\pm 0.2g$  という大きさについては、3.1 項に記載された船体動揺条件を基に算出した値（添付資料-5 を参照）であり、海中航行観測船の運航時に想定される船体動揺を十分満足していると考えられる。ローリングについても、ヒービングとほぼ同じ傾向となる。

解析条件

ケース No.	外 力	ヒービング周期	上下加速度
1	ヒービング	3 秒	0.2g
2	"	5 秒	"
3	"	10 秒	"
4	"	20 秒	"
5	"	30 秒	"
6	"	10 秒	0.3g

#### (3) 解析結果

##### a) ヒービングの影響

解析では、ヒービングを单一正弦波の加速度変化に単純化して系に加える。加速度の振幅及び周期は、海中航行観測船の大きさ、波との出会い周期、波高に依存する。ここでは荒海域での洋上航行を想定して振幅及び周期の範囲を定めた。代表例として、定格運転状態に振幅 ± 0.2g、周期 5 秒の加速度が加わった場合の結果を図 3.10 に示す。

炉心流量は自然循環ヘッドが直接影響を受けるため、出入口とも加速度とほぼ同位相で変化している。炉出力もほぼ同位相で変化している。これは、炉心のボイド率が流量と逆位相で変

化するため減速材密度の反応度添加が流量変化と同位相になるためである。なお、系の圧力の変動は無視できる程度である。

本解析の結果、ヒービングの影響として以下のことことが明らかとなった。

- 1) 加速度振幅の影響：振幅にほぼ比例して、循環流量及び炉出力が変動する。
- 2) 加速度周期の影響：流量変動などへの周期の影響は大きい（図 3.11 参照）。加速度周期が 5 秒の場合に、炉心流量及び炉出力の変動のピークが見られる。この振動は本流動系の固有周期と加速度周期が一致し共振したためである。この現象は、一次系に  $N_2$  ガス等の非凝縮ガスを入れて加圧するか、炉出力を低下させるか等の対応により回避できることを確認した。

#### b) ローリングの影響

SCR については、今回はローリングの計算は実施しなかったので、参考として以前実施した深海調査船用原子炉 D R X でのローリング時の解析結果の一例を図 3.12 に示す。本解析では、定格運転状態に周期 5 秒、片側 60 度の動搖が加わった場合である。結果は、ヒービングの場合と概ね同様の傾向が得られた。

ここで、D R X は出力が 0.75MW (SCR は 1.25MW) であり、SCR よりさらに小型の原子炉であるが、一体型 PWR、自然循環及び自己加圧方式等の特徴は SCR と同様であるので、基本的な計算結果は同じ傾向にあると考えられる。

#### (4) 評価

本解析の結果、船体動搖による原子炉出力の変動幅が 10% 以下になるヒービング加速度は約 0.16g (周期=5 秒)、ローリング角度は約 60 度 (周期=5 秒) である。

一方、500ton 程度の海中航行観測船が浮上航行する場合の船体運動条件の大きさは 3.1 項よりヒービング加速度=0.1g 程度（添付資料-1 参照）である。一方、ローリングに対しては（法規）角度=60 度である。従って、海中航行観測船浮上して航行する場合、炉出力を 90% に下げることによって炉出力が 100% 以上になることなく安全な運転が可能である。

本海中航行船は、潜水航走を原則としており、高出力での水上航走は想定しないため、上記の出力制限は運航上の問題とはならないものと考えられる。

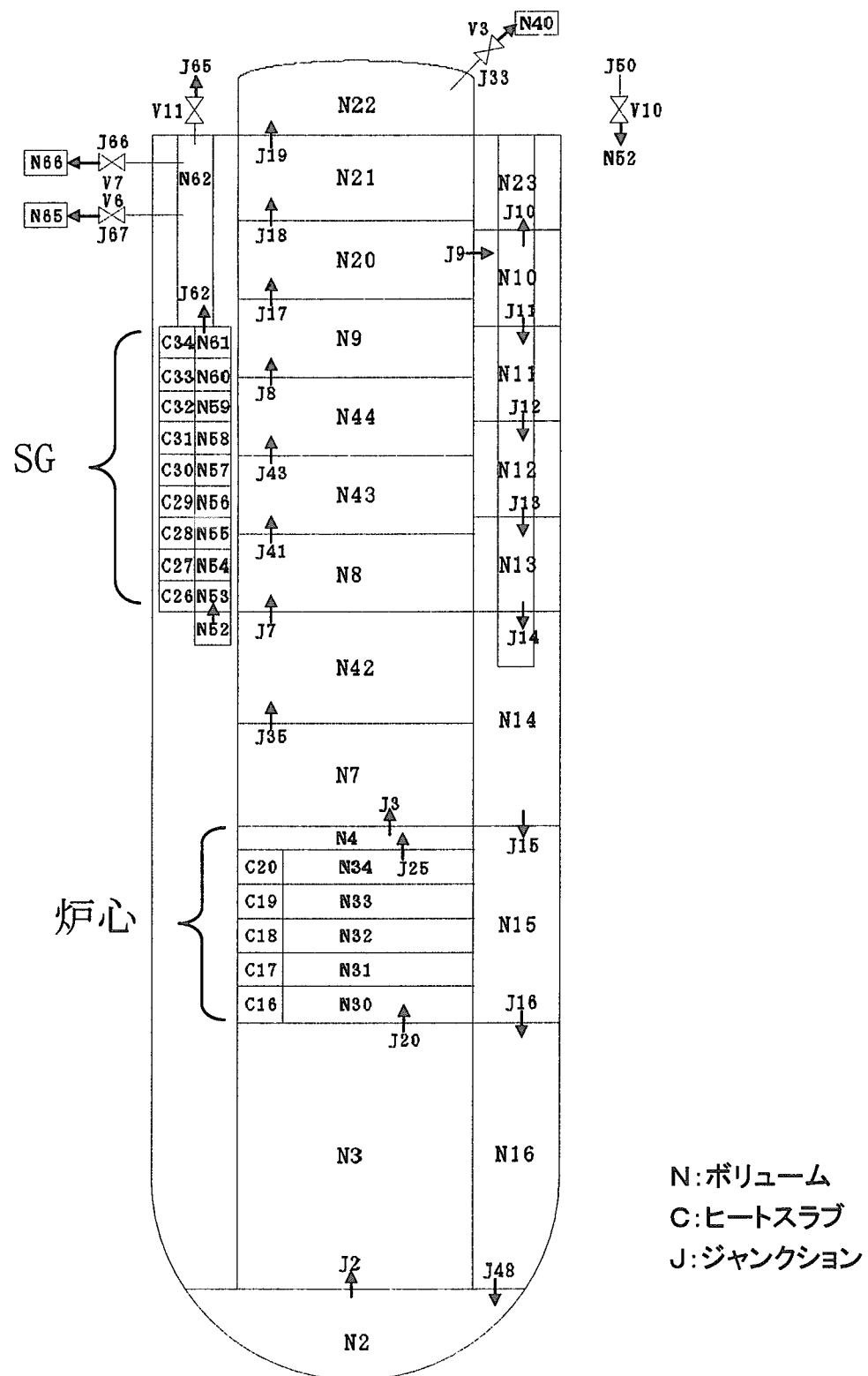


図3.9 解析モデル

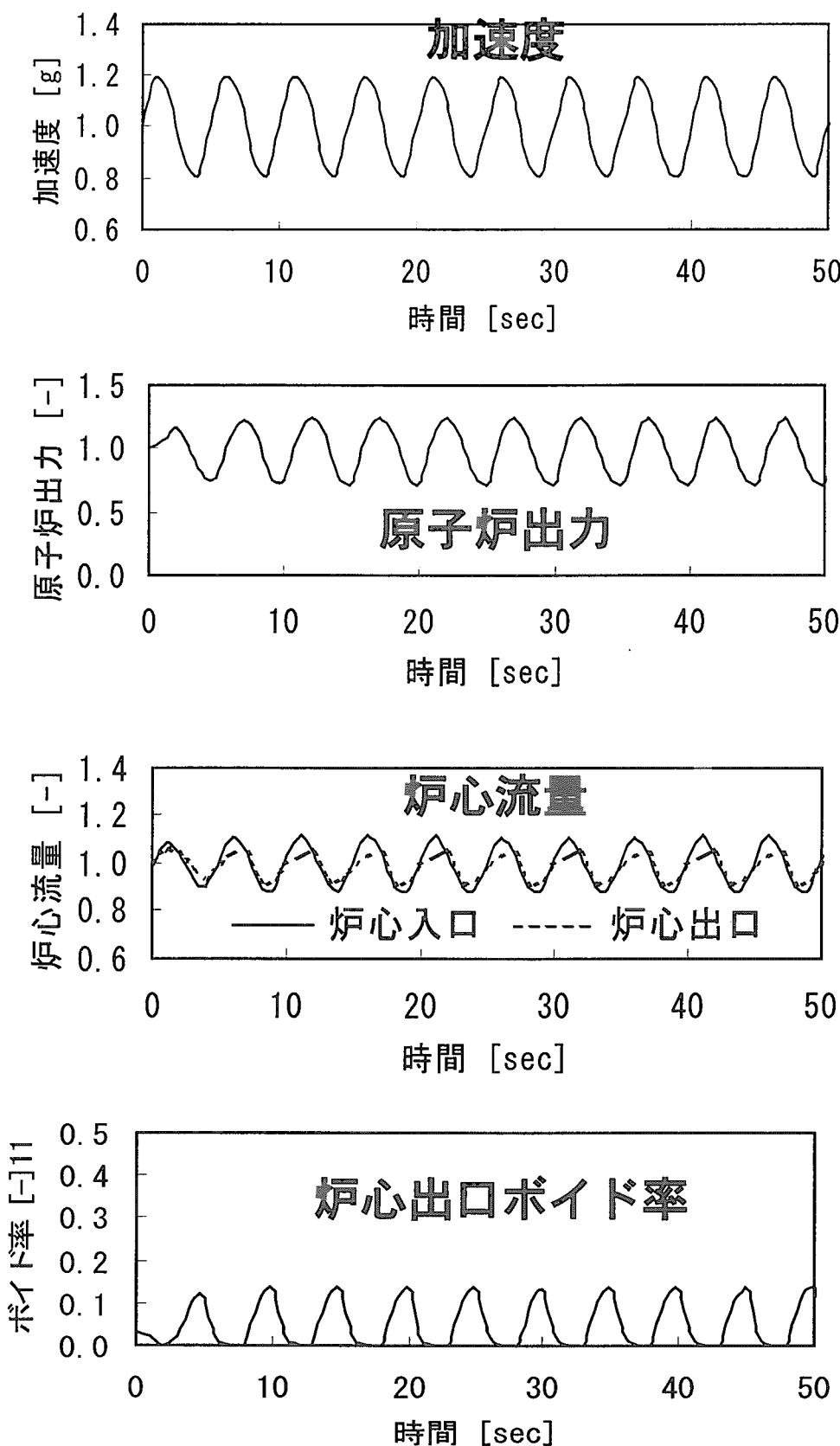


図3.10 ヒービング時の代表例（ケース2）  
(周期=5秒, 上下加速度=±0.2g)

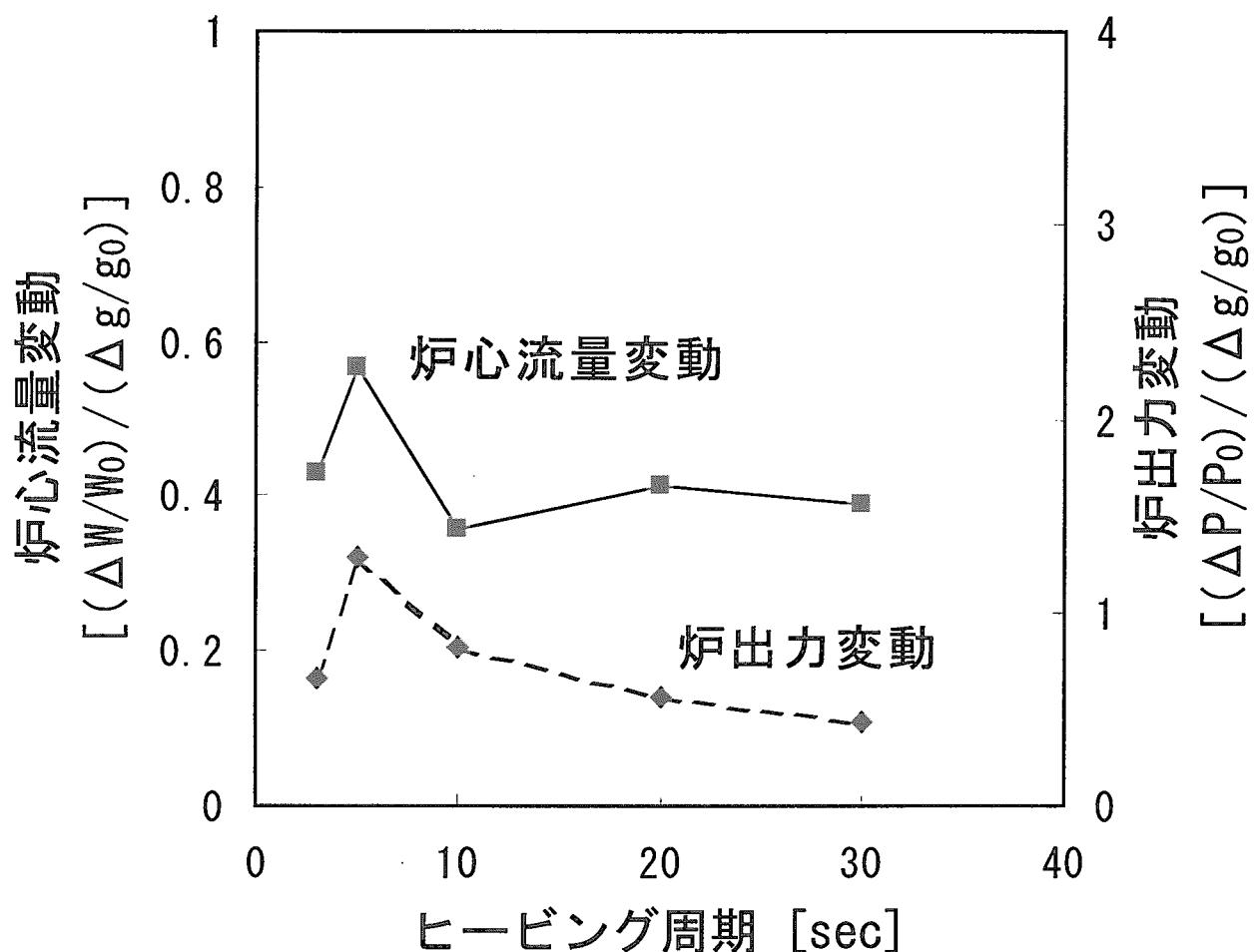


図3.11 ヒービング時周期が炉心流量  
及び炉出力に及ぼす影響

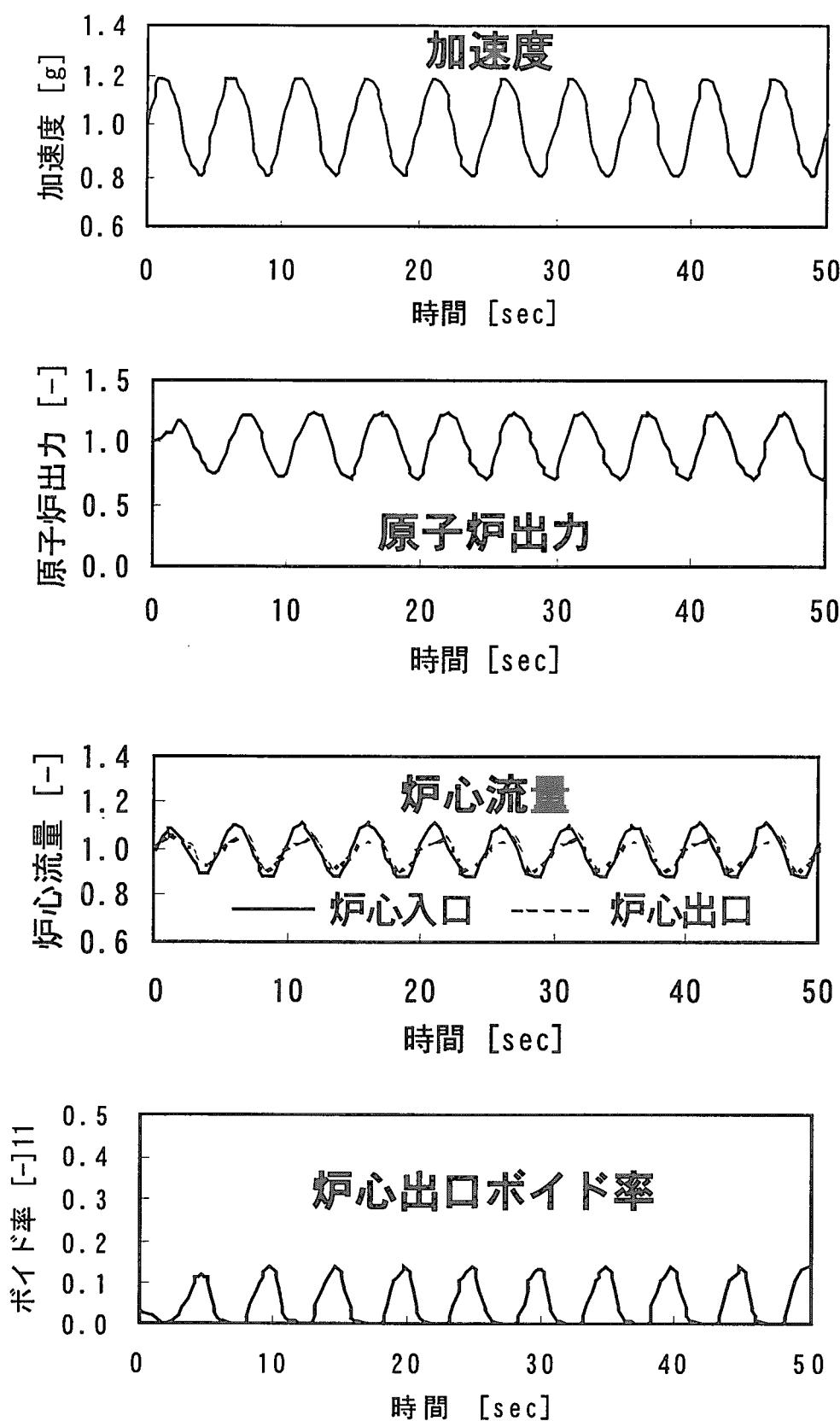


図3.12 ローリング時の代表例 (D R X)  
(周期=5秒, 動搖角度=±60度)

### 3.3 氷の条件

海中航行観測船が上部の碎氷構造体で氷を曲げて破壊し氷上に出ることのできる氷の厚さを評価する場合、氷の条件として検討すべき事項は氷の強度である。ここでは、氷の厚さとその破壊強度との関係を調査した結果について述べる。

#### (1) 弹性理論による荷重推定

弾性理論<sup>21)</sup>によれば、氷の載荷力(氷にクラックが入るまでの強度) $P_a(\text{kg})$ は、次式によって推定できる。

$$P_a = 0.381 \left(1 + 7.90 \frac{\sqrt[4]{K}}{\sqrt[4]{Eh^3}} a\right) h^2 \sigma_a \quad (\text{式 3.1})$$

ここで、 $h$  は氷の厚さ(cm)、 $a$  は載荷半径(cm)を表す。また、 $K$ 、 $E$  は海水の常数であり、次の値をとる。

$$K = \frac{0.92}{1000} (\text{kgtf/cm}^2), \quad E = 5000 (\text{kgtf/cm}^2) \quad (\text{式 3.2})$$

また、 $\sigma_a$  は海水の曲げ強度を表す。便宜上この海水の曲げ強度 $\sigma_a$  として  $10 \text{kgtf/cm}^2$  を用いると氷の載荷力は次式となる。

$$P_a = 3.81 \left(1 + 0.1636 \frac{a}{\sqrt[4]{h^3}}\right) h^2 \quad (\text{式 3.3})$$

この式から計算される載荷力は表 3.3<sup>21)</sup>、図 3.13<sup>21)</sup>に示すとおりであり、たとえば、載荷半径 $a=100\text{cm}$  で  $100\text{ton}$  の荷重がかかった場合、厚さ  $136\text{cm}$  程度の氷にクラックが入ることになる。

この計算例はあくまで、 $K$ 、 $E$ 、 $\sigma_a$  等に上述の値を使った場合であって、対象としている氷の表面温度等によって係数の値が変わってくると考えられることに注意する必要がある。ただし、オーダーとしては大きな間違いではないと考えられる。たとえば氷の曲げ強度 $\sigma_a$  の塩分濃度との関係は図 3.14<sup>22)</sup>に示されているとおりである。この図 3.14<sup>22)</sup>中の印の違いは表 3.4<sup>22)</sup>に示すように氷の採取場所の違いを表す。

以上が弾性理論によって氷にクラックが入るまでの推定加重(載荷力)である。注意すべきことは、この推定載荷力が最終的な破壊荷重ではないことである。

#### (2) Plastic limit theory による推定荷重

最終的な破壊荷重の推定式および計測値は Plastic limit theory<sup>23)</sup>によって示されている。その結果は図 3.15<sup>23)</sup>に示すとおりである。この理論によれば、氷の厚さとその破壊荷重との対応は次式で推定できる。

$$P = 1934 h^2 \quad (\text{式 3.4})$$

ここで、 $P$  は氷の破壊加重(kN)を表し、 $h$  は氷の厚さ(m)を表す。上式によれば、たとえば  $100\text{ton}$  で約  $71\text{cm}$  の氷が破壊できることになる。上述の弾性理論による推定載荷力と比較すると、海水の曲げ強度等の係数の推定値にも依存するが、約 52%程度の薄い氷しか破壊できないことにな

る。

なお、図 3.15<sup>23)</sup>中の ICEX のデータは氷への上向きの荷重がかかった場合のデータと考えられる。場所の記述はないが、カナダ北極海と推測される。

以上、海洋調査船が海中から浮力を使って氷を破壊して浮上しようとする場合の破壊しうる氷の厚さの推定式としては式(3.4)が適当と考えられる。

表 3.3 海氷の載荷力(参考文献 21)より)

(h=10-140cm)

$a$ (cm) \\ $h$ (cm)	50	100	150	200	250	300	400	500
10	0.94	—	—	—	—	—	—	—
20	2.8	4.2	—	—	—	—	—	—
30	5.6	7.8	10.0	—	—	—	—	—
40	9.2	12.4	15.5	18.6	—	—	—	—
60	18.9	24.1	29.3	34.5	39.8	45.0	—	—
80	31.8	39.3	46.8	54.2	61.7	69.1	—	—
100	—	57.8	67.7	77.5	87.4	97.2	117	—
120	—	79.6	92.0	104	117	129	154	179
140	—	105	120	135	150	165	195	225
160	—	133	151	169	186	204	240	275

表 3.4 氷データの種類(参考文献 22)より)

Investigator	Symbol	No. of data points	Test date	Location	Test type	Beam size	Ice type
Frankenstein (1959)	○	541	1955-56	Lake Anne Portage Lake Garrison Res. Lake Bemidji	Cant Simp	Large Small	Field
Frankenstein (1961)	▽	274	1958	Chassell Bay Keweenaw Bay	Cant Simp	Large	Field
Lavrov (1969)	□ ■	3 18	1960-61	Lake Ladoga Laboratory	Simp Cant Simp	Large Large Small	Field Lab.
Timco and Frederking (1982)	►	43	1981	Laboratory	Cant Simp	Small	Lab.
Gow et al. (1988)	☒	677	1983	Laboratory	Cant Simp	Large Small	Lab.

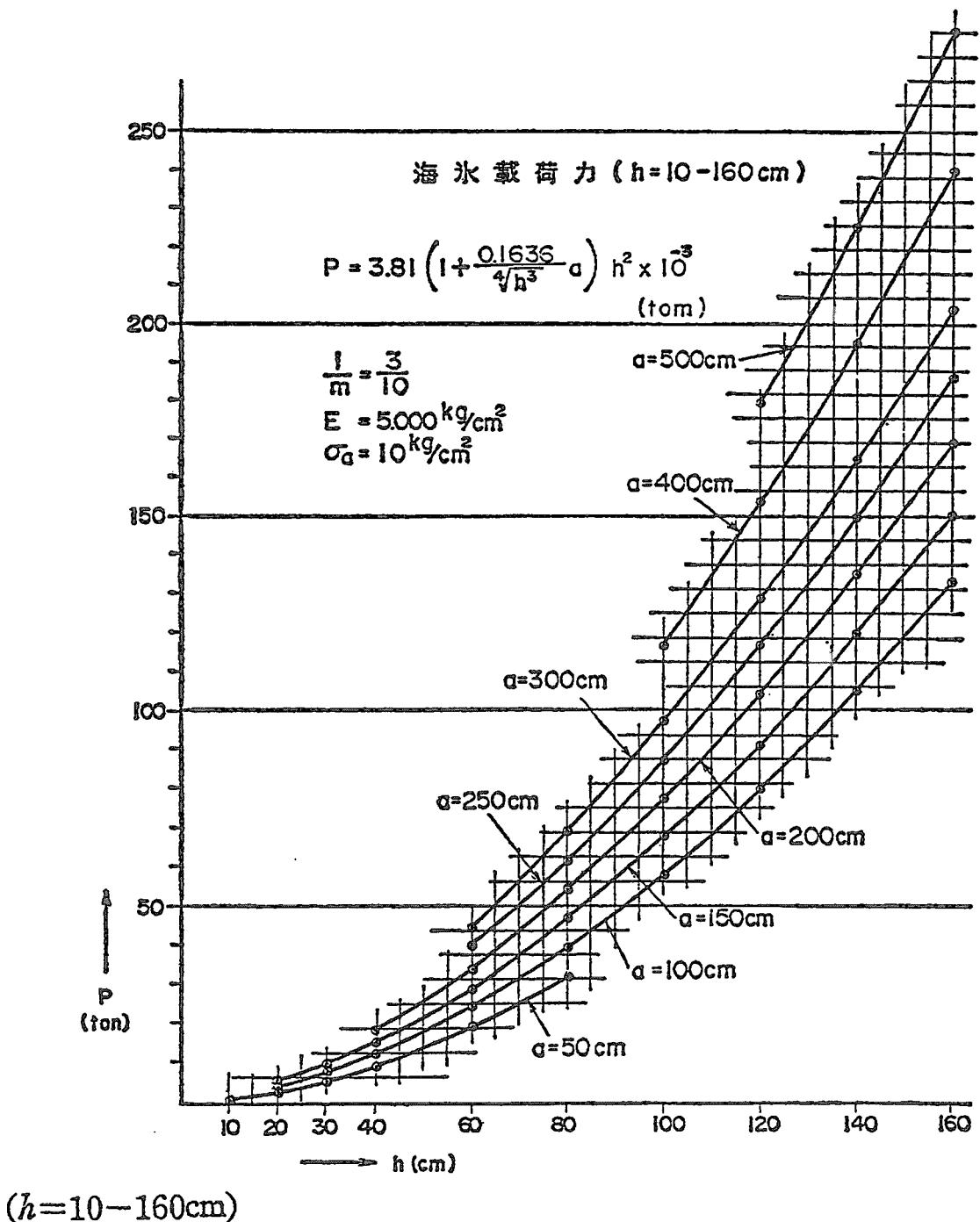


図 3.13 海水の載荷力(参考文献 21)より)

a : 載荷半径

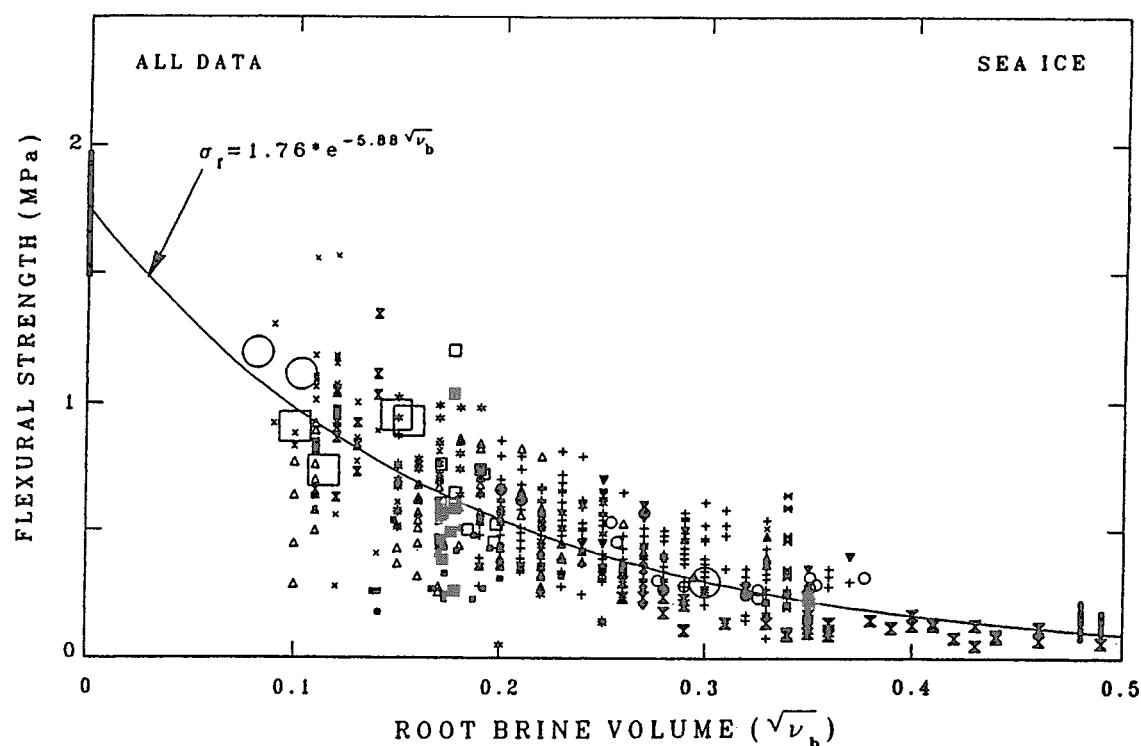
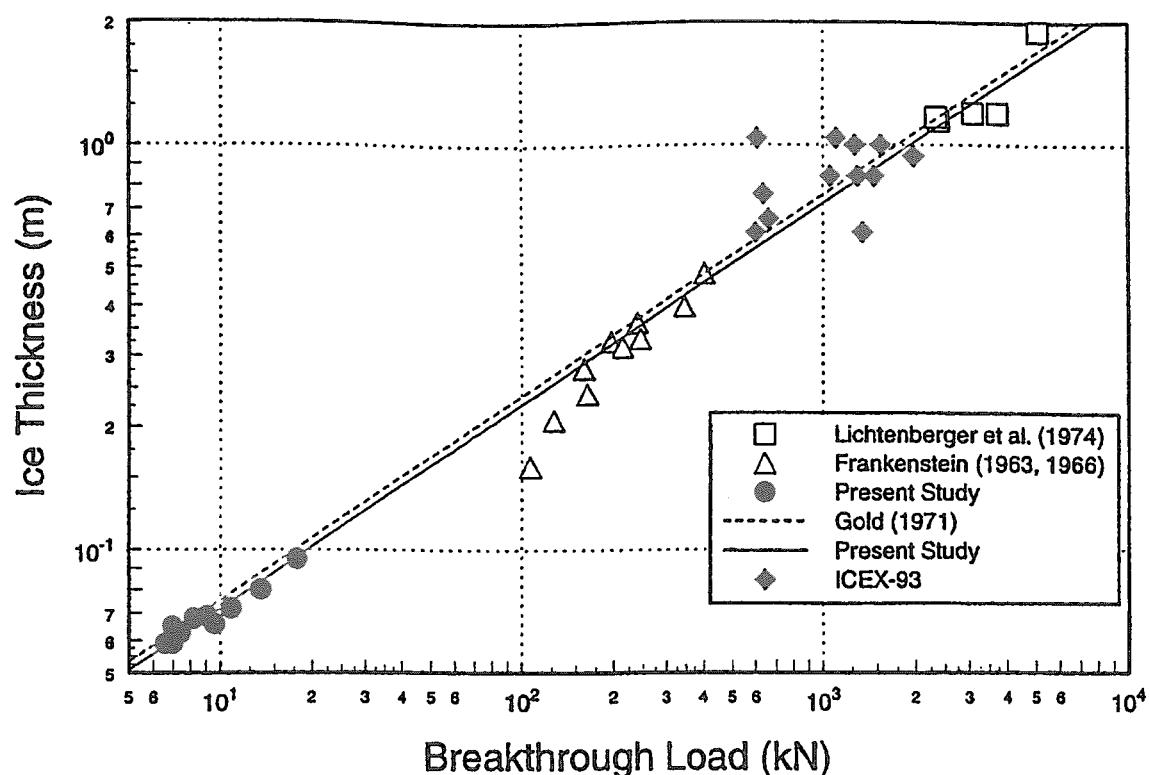


図 3.14 塩水容積と海水の曲げ強度の関係(参考文献 22)より)

図 3.15 氷の破壊荷重と厚さの関係, 破線:  $P=1750h^2$ , 実線:  $P=1934h^2$ 

(参考文献 23)より)

## 4. 運航システム

### 4.1 海中航行観測船の測位/航法/通信

#### 4.1.1 はじめに

本海中航行観測船の測位/航法/通信システムは、その運用方法により大きく異なる。一般的に、測位システムはG P S (Global Positioning System)衛星による電波測位と海中での音響測位とで構成され、海中航行観測船の海中での座標位置(緯度、経度)検知を行う。一方、航法システムは各種の航法機器や航法センサー及びこれらの取得データを統合/管理する演算処理装置等からなり、取得データを総合化し海中航行観測船自らの航行を遂行すると共に各種の計測/航行履歴及び制御データを蓄積/提供する。また通信システムは電波通信と水中音響通信とに大別される。前者は通信衛星を介した陸上監視局等との通信及び碎氷支援母船/航空機等との衛星を経由しない近距離電波通信が考えられ、後者は海中航行観測船と碎氷支援母船あるいは氷上通信ブイ(水中部には音響送受波器を備える)との音響による各種データ(観測データ、航行履歴データ、位置・時間情報、ステータス情報、コマンド信号等)の双方向情報伝送を目的とした水中通信システムで構成される。

現状、北極域での海中航行観測船の長距離連続航行(約30日間、数百km～数千km)を、また船体事故時などの緊急事態への対応を考慮した場合、上記に示したいづれのシステム技術も海中航行観測船の備えるべき機能として不可欠である。考えられる運用構想方式案を以下に示す。

- (1) 海底トランスポンダー設置方式(以下A案)
- (2) 氷上通信ブイ設置方式(以下B案)
- (3) 上記A、B案の折中方式

これら以外にも、「碎氷母船随伴方式」また「強力な碎氷能力を持った海中航行観測船の建造」等も考えられるが、各方式の実現性・運用性・経済性・安全性・技術課題等々の利害得失を評価し概念設計する事が重要である。いま、構想段階での代表例を上記A案、B案とし、各々の評価を表4.1に示す。

#### 4.1.2 運用概念

海底トランスポンダー設置方式の運用概念を図4.1に示す。また、氷上通信ブイ設置方式の運用概念図を図4.2に示す。

#### 4.1.3 音波伝搬特性

解析条件として、図4.3に鉛直方向の音速プロファイル(V. A. Del Grossoの式適用)を示す。極域では鉛直方向の温度分布が殆ど一定(-1°C～+2°C)である事、また表層部は塩分濃度が極めて低いため本来の音速極小層が存在せず、水圧に大きく依存する特性を示す。

### (1) 海底トランスポンダー設置時

解析結果を図 4.4 (1/4~4/4) に示す。海底 3,000m にトランスポンダーを設置し、氷海下 400m に海中航行観測船が位置した場合の音線計算結果である。互いの水平距離が 30km 以上の場合、直接波での音波伝搬は不能となり、計算上は水平距離 20km 以下の運用が望ましい事となる。各種条件(海底の起伏、氷海下の水中雑音、海中航行観測船の発生雑音特性等)を考慮した場合、現状での実績値(半径約 10km)程度がトランスポンダーとの応答可能距離と考えられる。

### (2) 氷上通信ブイ設置時

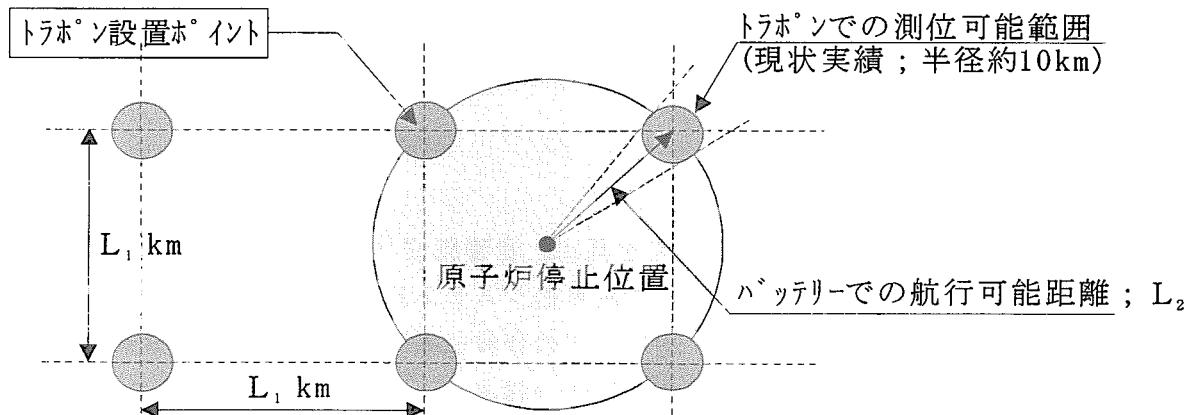
解析結果を図 4.5 (1/4~4/4) に示す。氷海下 各々 200m、400m に海中航行観測船と氷上通信ブイに付加された受波器アレイ/音源が位置した場合の音線計算結果である。直接波での通信を前提とした場合、水平方向最大 30km 程度の伝搬距離が計算上は期待できるものの、扱うデータ種類及ブイ使用周波数さらには海中航行観測船の運用条件等を考慮した場合、現実的には約 10~20km 程度が妥であると思われる。

#### 4.1.4 設置間隔等

海中航行観測船の平常航行時には、トランスポンダーあるいは氷上通信ブイとの応答可能範囲に到達した時点で定期的に自己位置確認を行う事になるが、火災/浸水/衝突/原子炉停止などの緊急事態発生時には先ず緊急浮上するか、あるいは位置確認が可能な領域に航行し、地上局等に救出要請(通信連絡)を行う事になる。いま、トランスポンダーあるいは氷上通信ブイの適正配置を検討する場合、一例として原子炉の停止緊急事態発生時を想定し以下に示す。

### (1) 海底トランスポンダーの場合

海底トランスポンダー設置方式の場合のトランスポンダー設置間隔の一例を下図に示す。間隔を  $L_1$ 、バッテリーでの航行可能距離を  $L_2$  とする。

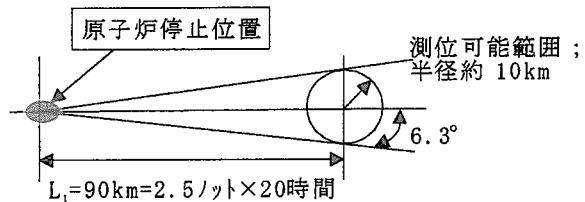


いま、図に示すトランスポンダーアレイのほぼ中心部で小型原子炉の故障が発生したと仮定し、バッテリー駆動で測位可能範囲の中心部に到着しなければならない事態を想定すると、その航行距離は約 90Km となる。

$$L_2 = 2.5 \text{ kt} \times 20 \text{ 時間} = \text{約 } 90 \text{ km}$$

$$\text{バッテリ駆動時の航行速度 : } 2.5 \text{ kt} \\ (\text{約 } 4.56 \text{ km/h})$$

$$\text{バッテリ航行時の航続可能時間 : } 20 \text{ 時間}$$



従って方形にトランスポンダーを設置した場合、その間隔  $L_1$  は約 130Km 程度となる。一方、航行方位許容誤差(上図)は約 6.3° となり、現状の慣性航法システム(ジャイロ精度； $0.025^\circ \sim 0.05^\circ$ )のアライメント作業を高緯度で実施し、且つジャイロのドリフト誤差( $0.005^\circ / \text{h}$ )を加算しても十分実現可能である。(以下、根拠を示す。)

- ・高緯度での方位誤差  $= 0.05^\circ \div \cos 80^\circ = 0.29^\circ$  (北緯  $80^\circ$  で、アライメント作業実施の場合)  
 $\div \cos 85^\circ = 0.57^\circ$  (北緯  $85^\circ$  で、アライメント作業実施の場合)
- ・ドリフト誤差  $= 0.005^\circ / \text{h} \times 20\text{h} = 0.1^\circ$  (原子炉停止後、約 20 時間の連続航行の場合)
- ・よって、高緯度での方位誤差+ドリフト誤差=約  $0.4^\circ \sim 0.7^\circ$  となり、本数値に緊急事態発生以前の累積誤差を加算したものが合計方位誤差となる。

海中航行観測船は測位可能範囲に到達するや、海底設置トランスポンダーを介し自己位置確認を行い緊急浮上の後、通信衛星経由で陸上局あるいは支援母船等に現在位置を連絡することになる。

## (2) 氷上通信ブイの場合

氷上通信ブイ設置時の設置間隔の検討は、ブイ設置時期/場所に対応した氷塊の移動量と方向に関する予測が不可欠である。

現在、米国の北極研究プロジェクト等(IABP; International Arctic Buoy Program)より北極海の氷塊移動観測データが公開されているが、データに基づく「氷塊移動予測ミューラー；仮称」の開発が望まれる。移動誤差によっては、4.1 項で挙げた「折中方式」も有力候補となりうる。

### 4.1.5 検討課題

与えられた海中航行観測船の基本性能を基に、音響測位/通信及び一部航法に関する要因も加味し運用上の概念検討を行った。これらのシステム技術開発を含め、多重反射波による音波エネルギーの減衰に関わる研究、氷海下での音波伝搬特性の研究、氷塊移動予測の研究、さらに音波応用技術として北極海海底地形の調査/データベース化なども欠かせない。

表 4.1 各方式の利害得失

航行海域	氷縁海域、多年氷海域			
方式名	海底トランスポンダー設置方式 (A案)		氷上通信ブイ設置方式(B案)	
1)概要	<p>・海中航行観測船の航行海域にトランスポンダーアレイネットワークを海底に構築し、海中航行観測船が測位可能レンジ内に到着するや海中航行観測船内の音響測位システムで適宜自己位置確認を可能とする方式。</p>		・海中航行観測船の航行が予想される氷海上に、各種衛星及び碎氷母船等との通信機器と海中航行観測船との水中通信を目的とした音響通信機能を持った氷上通信ブイをネットワーク化し、海中航行観測船が通信可能レンジ内に到着するや、適宜自己位置確認を可能とする方式。	
2)海上の測位と通信	<p>・海中航行観測船は浮上時のみGPSでの電波測位と衛星経由での観測データ、ステータス情報等の通信を可能とする。</p>		・時々刻々移動する氷上通信ブイ自らの位置情報と時刻情報をGPS衛星より受信し、海中航行観測船の位置情報及ブイ観測データ、ステータス情報等の情報通信を可能とする。	
3)海中の測位と音響通信	測位方式	海中航行観測船とトランスポンダー間;SSBL測位	測位方式	海中航行観測船とブイ間;SSBL測位 注1
	音響通信	—	音響通信	観測データ、ステータス情報等
4)利点	<p>・海中航行観測船に対する海底基準座標として最適。</p> <p>・碎氷母船でのトランスポンダー設置は、連続的に且つ比較的短時間で設置可能。</p> <p>・トランスポンダー数量が最小限度でネットワーク化が可能。</p>		・海中航行観測船が浮上する事なく、地上局あるいは碎氷支援母船上で観測データ、ステータス情報等を収集可能。	・漂流後、氷縁海域での氷上通信ブイ回収が容易。
5)欠点	<p>・多重反射により、測位精度がやや悪化する場合がある。</p> <p>・トランスポンダーの回収が極めて困難。</p> <p>・碎氷支援母船の航行可能氷海域にしか、トランスポンダー設置が出来ない。</p>		<p>・氷上通信ブイが刻々移動漂流(平均；数km～数十km/日)するため、海中航行観測船に対する絶対基準としては、やや難有り。</p> <p>・氷上通信ブイの移動履歴を監視し、場合によっては補間用氷上通信ブイを追加設置しなければならない。</p> <p>・ブイ設置に時間がかかり、ネットワーク化が所定時間内で可能かどうか疑問。(漂流に起因)</p> <p>・極寒での電子機器信頼性確保対策が必要。</p>	
6)適用条件	<p>・氷厚探査ソナーの装備</p> <p>・マッピングソナー/ドップラーログソナー等の装備</p> <p>・航行履歴の管理機能</p>		同左	
7)技術課題	<p>・極域仕様、航法システムの開発</p> <p>・氷海下での音響伝搬特性の研究</p>		<p>・極域仕様、航法システムの開発</p> <p>・氷海下での音響伝搬特性の研究</p> <p>・氷塊移動予測シミュレータの開発</p>	
8)総合評価	<p>氷縁海域；○</p> <p>多年氷海域；△</p>		<p>氷縁海域；△～×</p> <p>多年氷海域；○～△</p>	

注1. SSBL(Super Short Base Line)測位；1個の基準点(トランスポンダー)からの伝搬時間と位相差を検出し、その方位と斜距離を求める測位方法

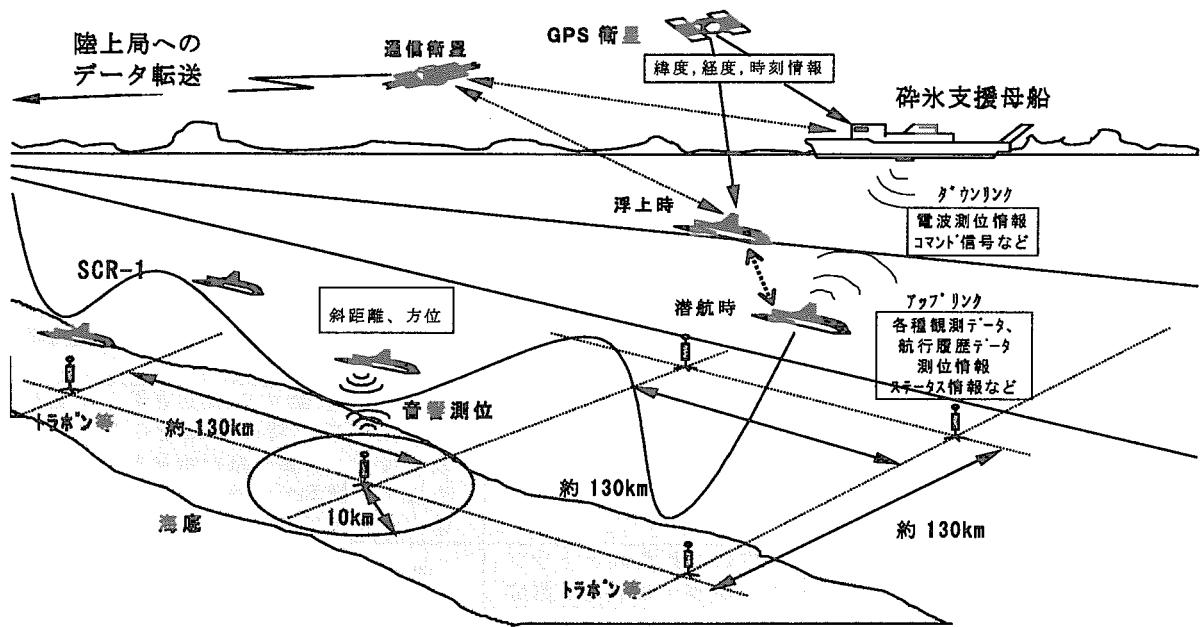


図 4.1 海底トランスポンダー設置方式

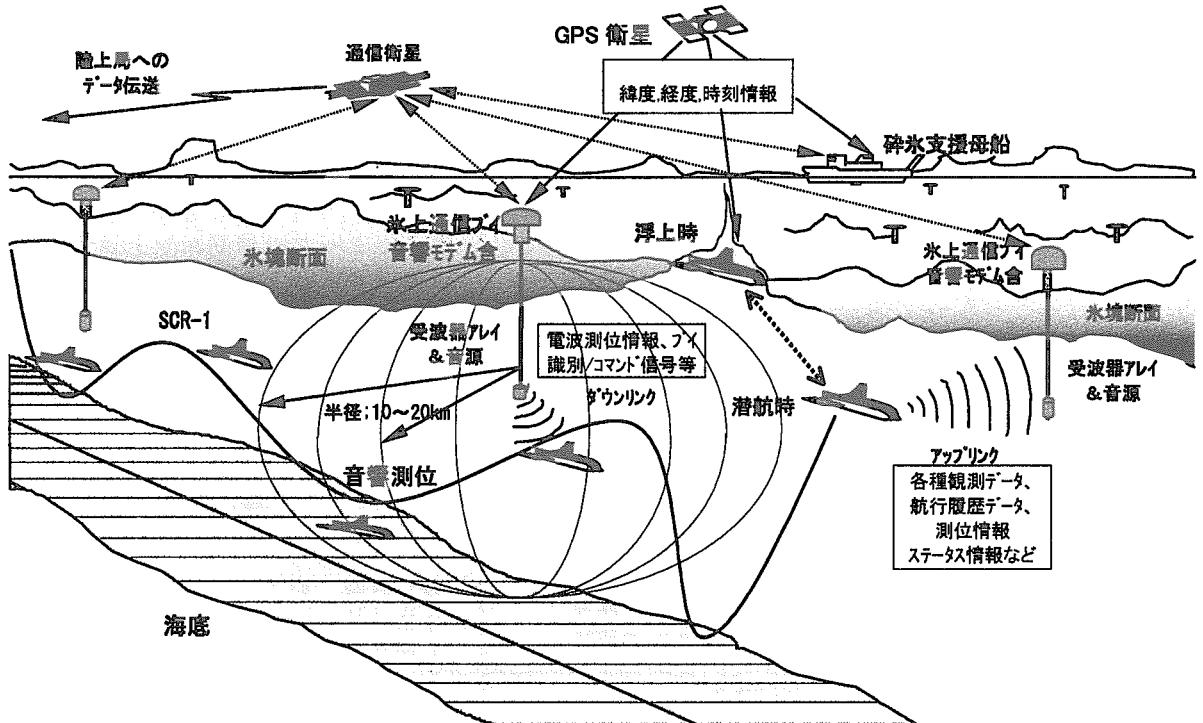


図 4.2 水上通信ペイ設置方式

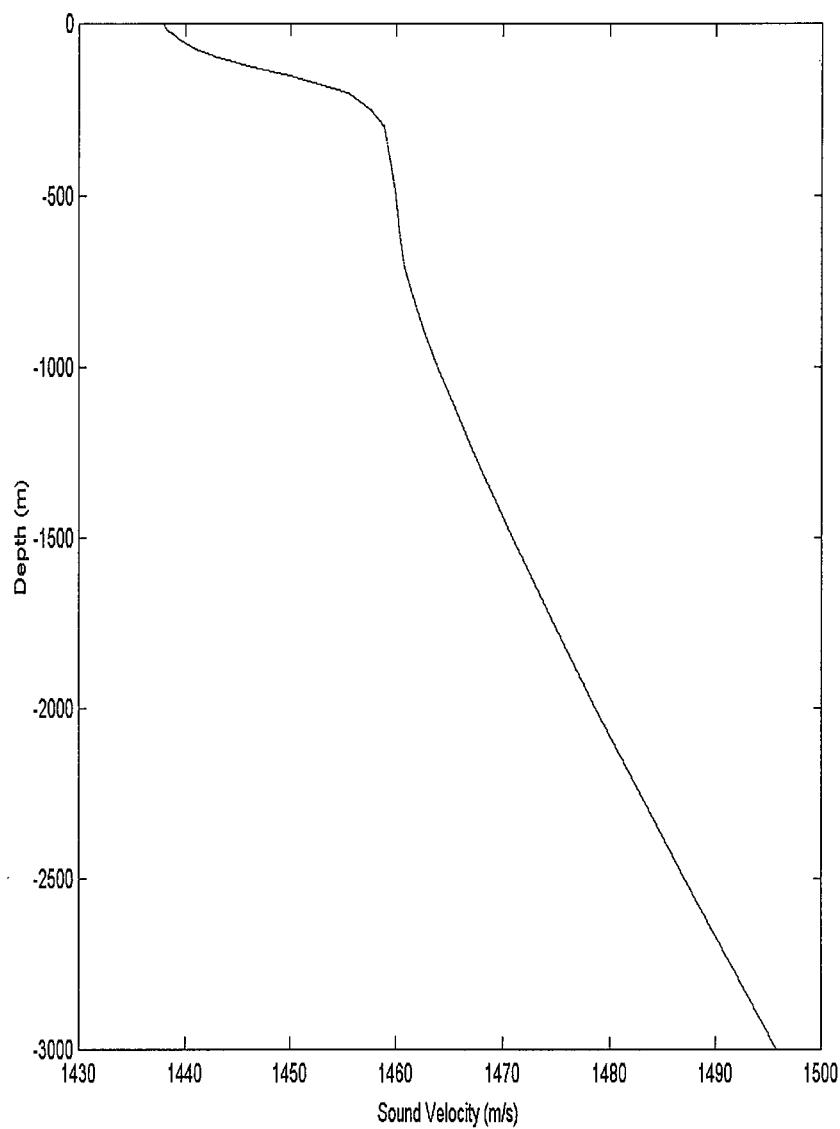


図 4.3. 北極海の音速プロファイル

出典；参考文献 24) V.A.Del Grosso, " New equation for the speed of sound in natural waters", Naval Research Laboratory, Washington,D.C.20375

This is a blank page.

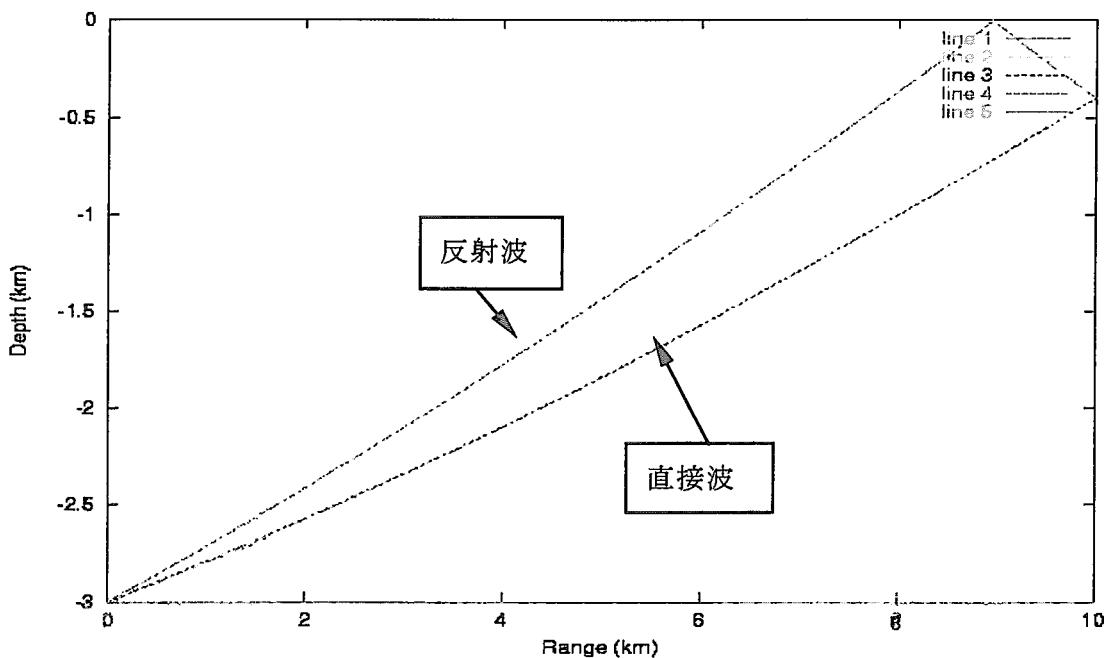


図 4.4 海底トランスポンダー設置時音線計算結果  
(1/4) 送受波器間 10Km の場合

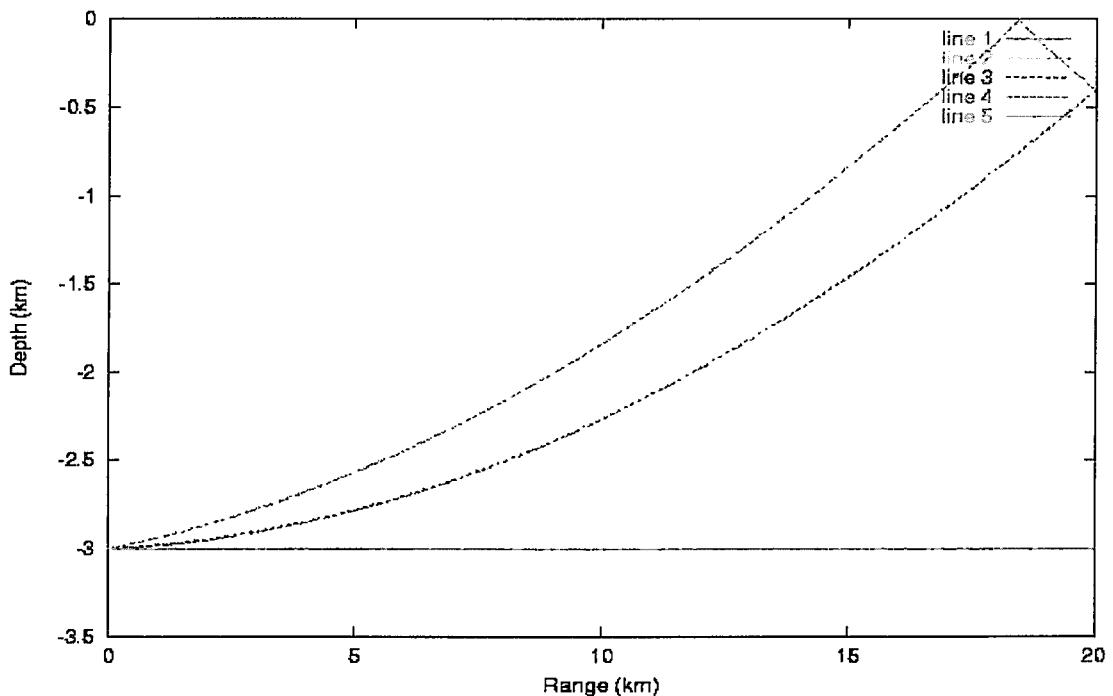


図 4.4 海底トランスポンダー設置時音線計算結果  
(2/4) 送受波器間 20Km の場合

This is a blank page.

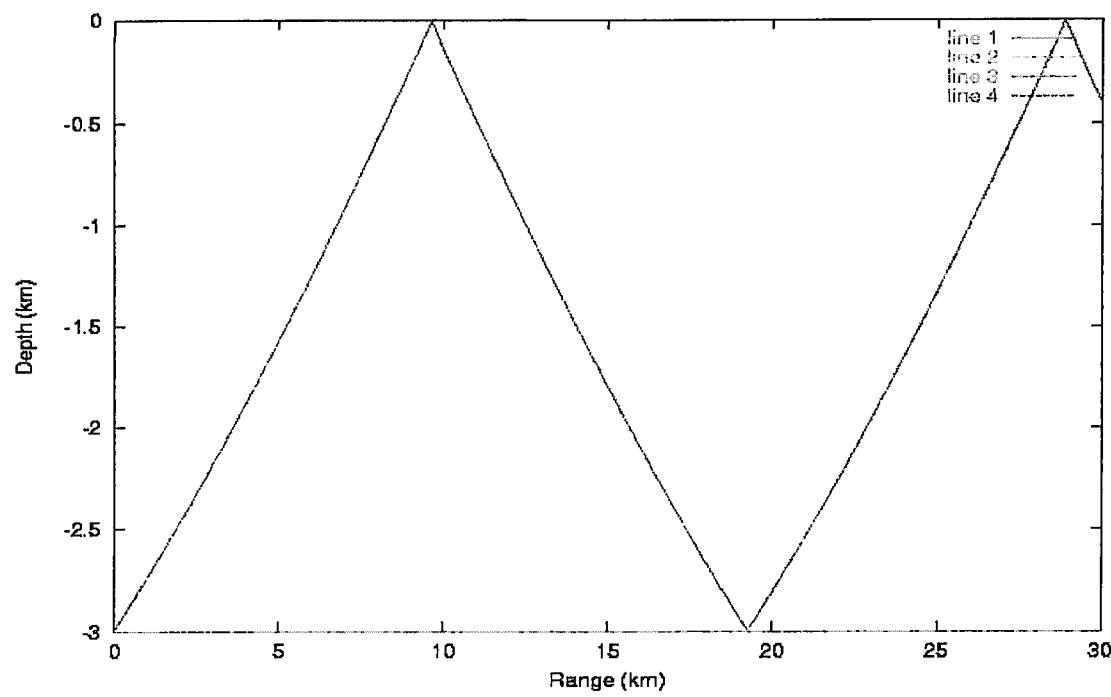


図 4.4 海底トランスポンダー設置時音線計算結果  
(3/4) 送受波器間 30Km の場合

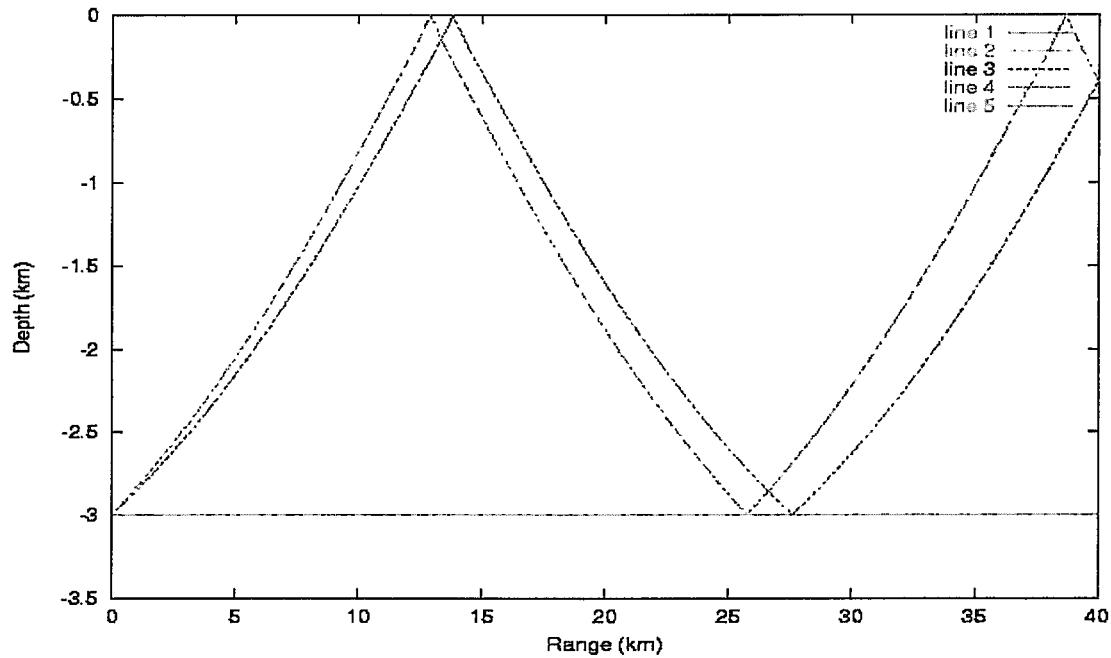


図 4.4 海底トランスポンダー設置時音線計算結果  
(4/4) 送受波器間 40Km の場合

This is a blank page.

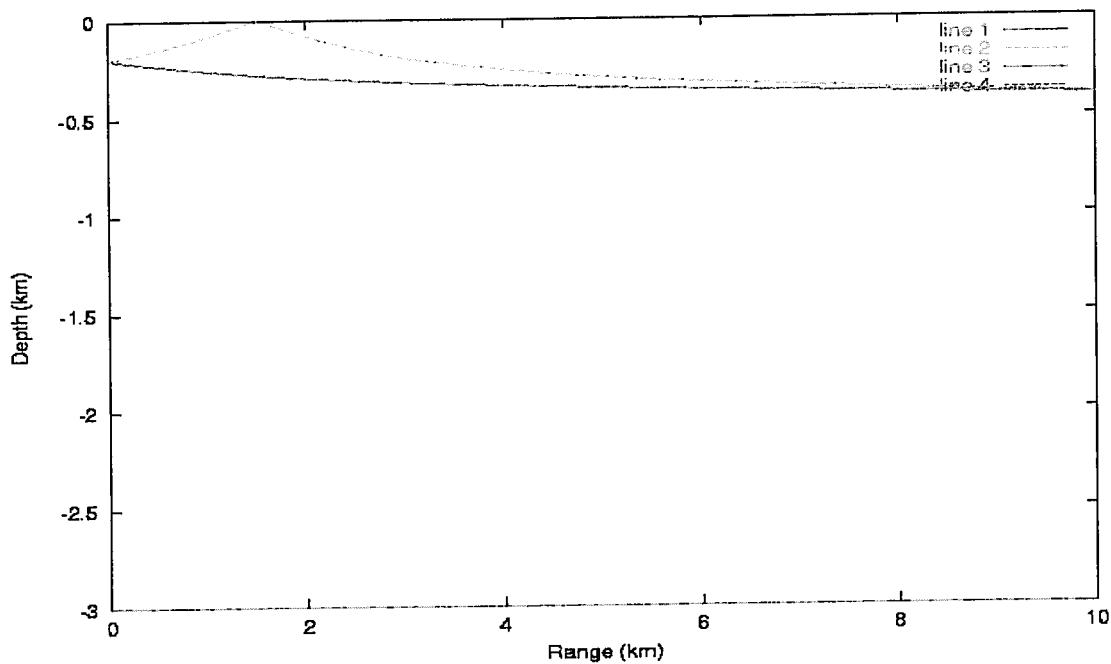


図 4.5 氷上ブイ設置時音線計算結果  
(1/4) 送受波器間 10Km の場合

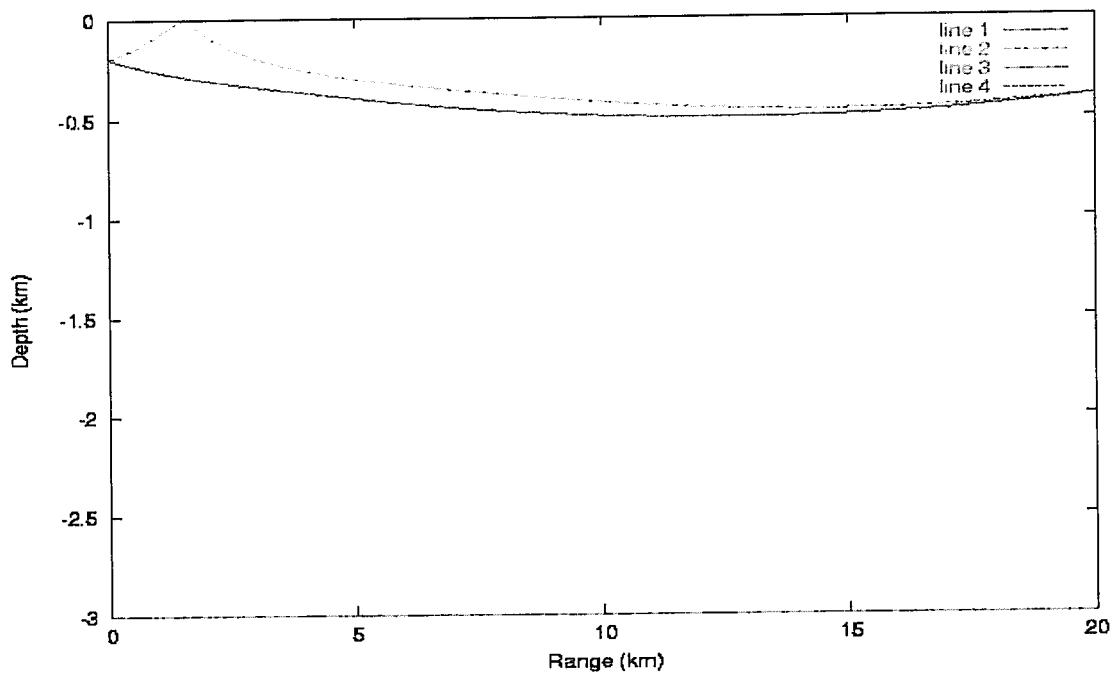


図 4.5 氷上ブイ設置時音線計算結果  
(2/4) 送受波器間 20Km の場合

This is a blank page.

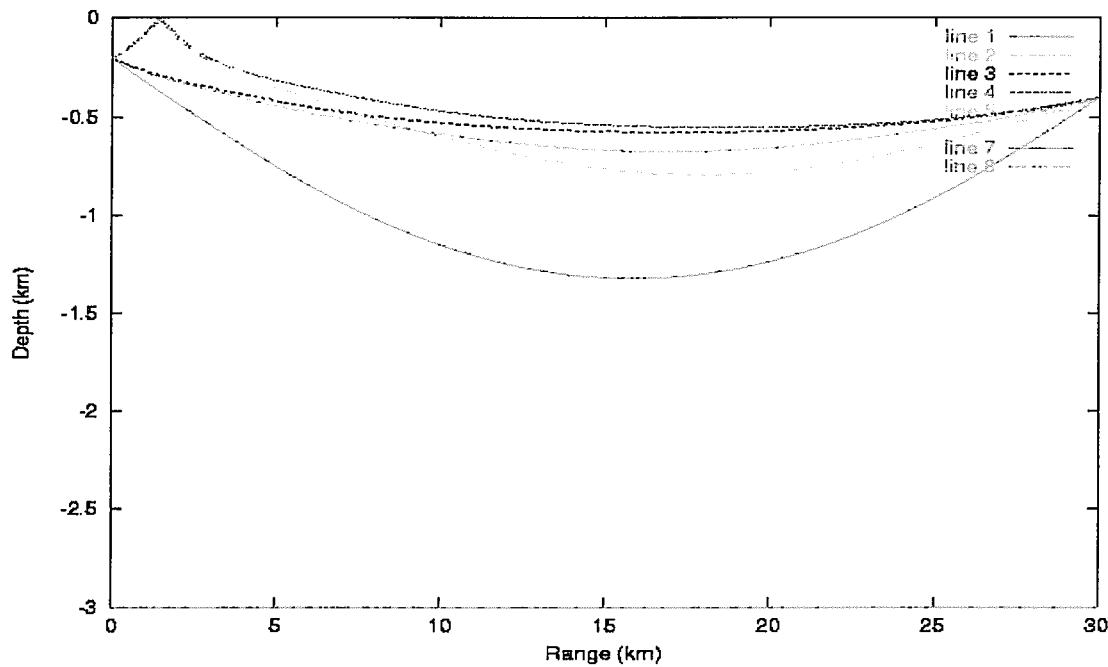


図 4.5 氷上ブイ設置時音線計算結果  
(3/4) 送受波器間 30Km の場合

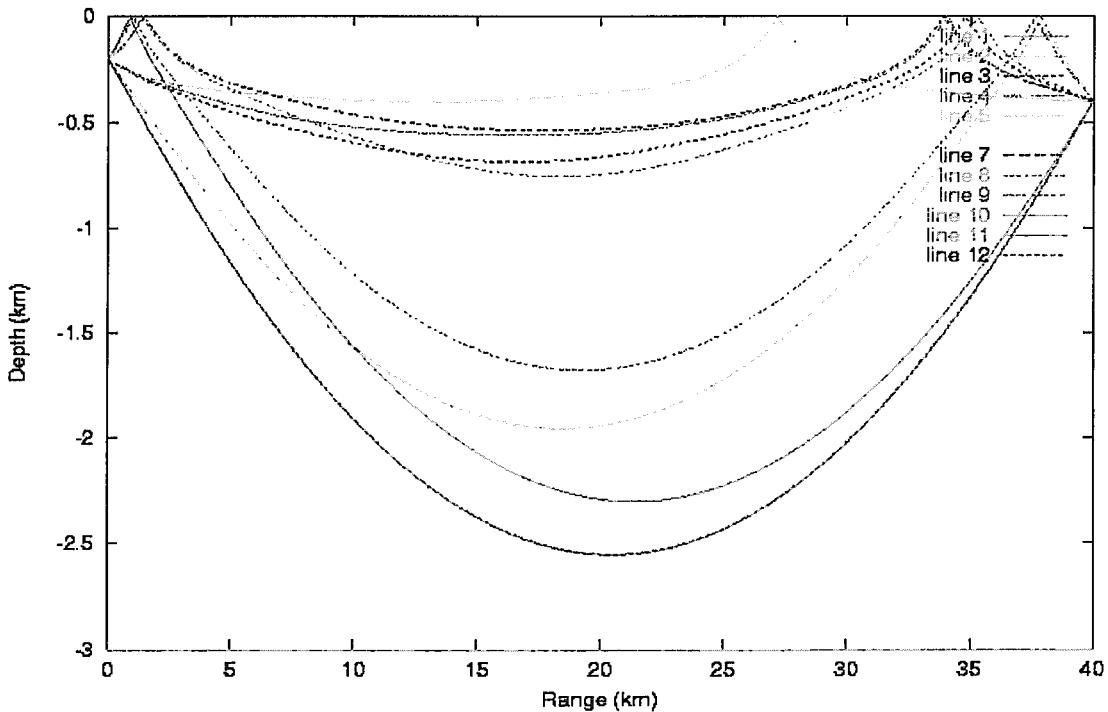


図 4.5 氷上ブイ設置時音線計算結果  
(4/4) 送受波器間 40Km の場合

This is a blank page.

#### 4.2 支援船（随伴船）

海中航行観測船は、独航機能を持つとはいえ、観測海域の近くの適当な港でメンテ、補給、船員・研究者の乗り込み等を行うとともに、以下の理由により支援船の随行が効率的・効果的観測のために不可欠である。

- (1) 海上航行時における他船との衝突を避けるための警戒船。
- (2) 海中航行観測船と地上との間の通信を中継（海中は音響通信、海上はインマルサット）。
- (3) 海中航行観測船の限られた船内スペースを有効利用するための、水サンプルなどの保管、船上分析、または、食料、水、観測消耗品等の補給。
- (4) 海中の閉鎖環境での長期観測はストレスが大きいため、乗船研究者等の交代要員の輸送。
- (5) 海中航行観測船の測位（随伴船はGPSで測位し、随伴船と海中航行観測船との間はSSBLで測位）
- (6) 海面からの広域観測（マルチ・ナロー・ビーム音響測深機など）、衛星データの受信（海色計による植物プランクトン分布、海水分布等）

特に北極海での観測においては、既存の砕氷船に随伴船としての機能をコンテナ等により搭載して、砕氷能力が許す限り随行することが望ましい。随伴にあたっては、海面フラックスの観測（2.1節(2)c 参照）のように随伴船の船体が気体を大きく乱す等の影響がある場合は、海中航行観測船との距離を数百m程度確保する等の配慮が必要となる。

## 5. 運航時の安全確保

### 5.1 対象とする想定事象

#### (1) 発生する可能性のある事象

海中航行観測船の安全確保を図るために、対象とする想定事象を検討する。船体側で発生する可能性のある事故の事象としては、衝突、沈没、座礁、火災等があり、事故状態に至らない通常運転を逸脱した状態として、航海システム、動力系等の主要機器の故障等が考えられる。また、船体設計では、上記のような状態が発生した場合の救難方法について検討を行う必要がある。原子炉プラント側では、船体側において上記の状態が発生した場合にも、原子炉の安全を確保する設計が要求される。

一方、原子炉側で発生する可能性のある重要な異常事象は、「発電用軽水炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づく事故事象及び異常な過渡変化が考えられる。原子炉プラントは、これらの事象が船体側に直接的に損傷を与えない設計としなければならないが、動力源の喪失のみは船体側で考慮する必要がある。

これら発生する可能性のある事象について想定事象の対象とすべき範囲及び条件を次に検討する。

#### (2) 対象とすべき船体の事故事象

##### ①衝突

本船は、潜水航走を原則とするが、港湾や浅い場所では、水面または水面直下まで浮上して航行するため、他船及び静止物との衝突の可能性がある。そこで、支援船を随伴させて、洋上の行合船や海洋構造物を監視し、通信を密にして安全に誘導航行させるとともに、本船にソーナー及びレーダーによる障害物探知設備を装備し監視することにより衝突を防止する。想定する他船との衝突は、現実的な問題である排水量 20 t o n、船速 10 ノット程度の遊漁船等との港内及びその付近での衝突に限定し、将来的に解析を実施することとする。

他船との水中での衝突については、潜水航走中に他船と行合う可能性は低いと考えられるため、水中での他船との衝突は想定外とする。

本船は海底観測等を目的として、海底地形に沿って航行する場合がある。本船には、前方、後方、上方、下方の全方位に障害物探知及びソーナーを備えており、これらの設備を用いて監視を行い、適切な操船により静止物との衝突を回避する。海底付近を航行する場合には、低速で航行するうえ、船体は中性浮力状態であるため、衝突および座礁に際しても衝撃は少ない。水中での静止物との衝突は、3 ノットでの船首での衝突を想定することとする。

##### ②沈没

海中航行船は下記の対応により極力、沈没を回避する設計としているが、沈没は船体事故の代表的な事象として対象とする。

海中航行船の設計では、沈没の危険が生じた際に、動力源及び推進装置に異常がない場合には、時間的に最も早く、かつ安定した状態で浮上できる通常の操船要領で浮上する。通常操船

による浮上が行えない場合には、離脱バラストの投棄により正浮力として自然上昇を試みる。

北極海の氷の下での活動中に沈没の危険があり、動力源及び推進装置に異常がない場合には、開氷域または薄氷域に浮上する。船体上部の碎氷構造を用いて氷を碎くことが可能な場合は、氷上に脱出することができる。離脱バラストの投棄及び乗員の脱出の場合には、開氷域に浮上する必要がある。このため、航海前に開氷海域および薄氷海域を調査しておくとともに、常に上方ソーナーにより氷厚を計測しつつ航行し、沈没の危険がある時には、可能な限り速やかに開氷部または薄氷部を探査して浮上することとする。

### ③座礁

本船が、港湾や浅い場所では、水面または水面直下まで浮上して航行する場合には、支援船により安全に誘導航行させることとする。座礁の可能性のある海域を航行する場合は、低速で航行するため、3ノット程度での航行中の座礁を想定する。

### ④装備機器の故障

潜水船の航行に必要な航海機器及び通信装置等の故障を想定し、その影響を軽減する方策を検討する。

### ⑤浸水

船内にて浸水が発生した場合及び耐水区画で浸水が発生した場合について検討を行う。

### ⑥火災

規則に基づき、海中航行船の耐圧殻を構成する材料は不燃性のものとし、耐圧殻内部に取り付ける材料は不燃性のものとするが、搭載する計測設備の全てを不燃性のものとすることは困難なため、火災を対象事象として想定する。

### ⑦有毒ガスの発生

長時間潜航による船内空気汚濁や火災などによる船内の空気汚濁が発生した場合を想定して検討を行う。

### ⑧動力源の喪失

電源系統（動力源である原子力発電プラントを含む）、油圧系統、空気系統等の動力源の喪失防止方法を検討する。

### ⑨運動能力の喪失

潜入・浮上、増減速、方位保持・変換、深度保持・変換などの運動能力が喪失することを防止する方法を検討する。

### ⑩通信能力の喪失

潜水船が運航している時に、電波通信、音響通信等を用いた通信が途絶えた場合は陸上基地などの支援サイドは事故発生と判断することとなるため、重要な能力である。従って、通信能力の喪失防止方法を検討する。

## （3）対象とすべき原子炉の異常事象

### 1) 事故

「発電用軽水炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づく事故事象のうち、SCR が分類さ

れる加圧水型原子炉（PWR）に適用される事象は 11 項目あるが、以下の項目については SCR では下記の理由により対象外とする。

- ①原子炉冷却材流量の喪失：本事象は、自然循環型を採用した SCR では発生しない。
- ②原子炉冷却材ポンプの軸固定：本事象は、自然循環型を採用した SCR では発生しない。
- ③制御棒飛出し：本事象は、制御棒駆動装置を原子炉容器に内装する SCR では発生しない。
- ④放射性気体廃棄物処理施設の破損：本施設は母港に設けるので、ここでは対象としない。
- ⑤燃料集合体の落下：原子炉の燃料交換設備は母港に設けるので、ここでは対象としない。

対象事象は次のとおりである。今後、検討の進捗に伴い、海中航行観測船用原子炉固有の事象が想定された場合には、その事象を含めることとする。

- ①原子炉冷却材喪失事故
- ②主給水管破断
- ③主蒸気管破断
- ④蒸気発生器伝熱管破損
- ⑤可燃性ガスの発生
- ⑥動荷重の発生

## 2) 異常な過渡変化

「発電用軽水炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づく異常な過渡変化事象のうち、PWR に適用される 13 項目あるが、以下の項目については対象外とする。

- ①原子炉冷却材流量の部分喪失：本事象は、自然循環型を採用した SCR では発生しない。
- ②給水加熱喪失：給水過熱を行わない SCR では発生しない。
- ③原子炉冷却系の異常な減圧：本事象は、一次冷却系の圧力制御系の故障等により原子圧力が低下する事象を想定するが、加圧器スプレイ及び加圧器逃がし弁を備えない SCR では発生しない。

対象事象は次のとおりとする。今後、検討の進捗に伴い、海中航行観測船用原子炉固有の事象が想定された場合には、その事象を含めることとする。

- ①原子炉起動時の制御棒の異常な引抜き
- ②出力運転中の制御棒の異常な引抜き
- ③制御棒の落下及び不整合
- ④外部電源喪失
- ⑤主給水流量喪失
- ⑥蒸気負荷の異常な増加
- ⑦二次冷却系の異常な減圧
- ⑧蒸気発生器への過剰給水
- ⑨負荷の喪失
- ⑩出力運転中の非常用炉心冷却系統の異常な誤起動

## 5.2 安全確保の方策

### 5.2.1 船体の安全確保の考え方

#### (1) 船体事故

船体自体の事故発生の形態は、図 5.1 のように分類できる。図に示すように、事故が発生する形態は、航行中か停泊中に大別され、さらに航行中の事故は水上航走か潜水航走かで対処の仕方が変わり、水中に船体がある場合では、浮上可能か否かが大きな差異となる。また、事故の要因も船体自体の故障などの内的要因と衝突や座礁などの外的要因で防災の初動が異なるが、波及する事象によっては対処の仕方は同様となる。これらの事故が航行に支障があるか否か、さらに船を安全な方向へ制御可能か否か、基地など外部へ連絡可能か否かで、自力復旧、或いは救助待機となるか、さらに遭難状態となり捜索待機となるかに分類されることになる。

事故の発生のケースは、あらゆる場合が想定できるが、一般的には下記の一次的事故が発生し、次に二次的事故に波及するものとして考えることができる。

- (A) 一次的事故
  - ・ 内的要因；船体及び装備機器の欠陥、機器故障及び寿命
  - ・ 外的要因；衝突、座礁、触雷
  - 動力源喪失、運動機能喪失、通信能力喪失など
- (B) 二次的事故
  - ・ 浸水、火災、有毒ガス発生
  - 沈没、人身事故など

この様な事故に対する潜水船の安全性を確保するためには、設計段階で下記に配慮することが必要である。

- ・ 潜航深度に対して充分な耐圧殻強度を持つこと。
- ・ 耐圧殻及び装備機器は耐衝撃性を持つこと。
- ・ 耐圧殻開口部の閉鎖機構は二重化すること。
- ・ 耐圧殻の貫通シールは二重化すること。
- ・ メインバラストタンクは高圧空気などで短時間（数秒）のうちにブローできること。  
或いは、緊急時に浮力を得るための手段（バラスト離脱装置等）を有すること。
- ・ メインバラストタンクの容量は浸水容積を考慮し充分な量を有すること。  
もしくは、船内を複数の防水区画で区切ること。
- ・ 潜水船のバランスを調整できるように調整用タンク類を配置すること。
- ・ 重要機器については冗長性を持たせること。
- ・ 船内空気の監視及び浄化装置については充分に配慮すること。

#### a) 装備機器の故障

潜水船の航行にとって動力源喪失及び運動機能喪失は水中で立ち往生することにつながり、これらにとってバイタルな電気・油圧・空気の確保は非常に重要である。また、長時間単独航行を行う潜水船にとって航海機器・通信装置も非常に重要な装備機器である。

潜水船の航行に必要な主要システム構成を図 5.2 に示す。これらのシステムは、フォールトマスキングもしくはフォールトトレランスなシステムであることが要求され、いずれも二重系化もしくは縮退運転可能なシステムであることが必要である。

従って、各システムの通常航行中の単純故障は、航行状態を維持しつつ船内修理が可能なものとなる様に配慮した構成とするが、衝突や座礁による外的要因による被害の場合などは、単一のシステムの故障にとどまらず二重三重の複合故障が考えられる。これらのシステム・装置の故障に対する補修要領のドキュメント化・対処訓練が重要である。また、対処に必要となる各装置の構成要素の予備品や修理要具の船内搭載が必要である。

更に、複合故障が発生した場合には、浸水や火災、有毒ガスの発生などの緊急事態へ波及する二次的被害の発生が考えられる。

### b) 浸水

衝突や座礁で考えられる浸水は、以下の 5 項目である。

- ① 舷外弁からの浸水
- ② 船内海水管の継手損傷による浸水
- ③ 船体貫通のマスト・観測装置などからの浸水
- ④ プロペラシャフト、舵軸貫通部からの浸水
- ⑤ 耐圧殻損傷による浸水

これらの内、①、②は第一弁・第二弁の閉鎖や緊急遮断弁の自動閉鎖などの適切な防水対策と緊急浮上処置を行うことにより、厚い氷海下でない限り、大事に至らず対処可能と考えられる。しかし、③～⑤の損傷を被った場合は、浸水速度が非常に大きいと考えられ、船内の区画浸水はまぬがれないと考えられる。この様な大浸水への対処としては、船内を耐圧横隔壁で区切り浸水区画を限定する設計配慮を行っておき、浸水時には防水扉及び隔壁弁の閉鎖を行うことが考えられる。また、この様な場合、メインバラストタンクへの非常ブロー、もしくは離脱バラスト投下による緊急浮上が唯一の手段となるが、厚い氷海下では氷に阻止され浮上は困難である。

各国の軍用潜水艦の大浸水に対する考え方は、Compartment または Ballast Tank(片舷) 浸水でも浮上可能な予備浮力(メインバラストタンク容量)を保有することが、古くから踏襲されてきたが、最近では、装備機器の要求や船体小型化の要求などから、予備浮力の少ない船型が主流となってきている。また、部分的に浸水した時の浮上状態であっても脱出ハッチが水上に出ること、船体の姿勢角が大きくなないことなどの条件を満足することが考え方であった。最近の考え方では、大浸水の被害にあった場合には舵と推力もしくはタンクブローにより水面付近もしくは水上に一旦浮上できれば、乗員脱出が可能で、最終的には、艦は沈没してもやむなしという考え方を採用している国々もある。

本潜水船の運用目的および原子炉沈没による海洋環境影響を考慮すれば、人命はもとより、船を失うことの可能性を局限した充分な予備浮力と緊急浮上手段(非常ブロー及び緊急バラスト)を有する船型を選択する必要があると考えられる。

### c) 火災

潜水船で発生する火災は、電気火災が最も可能性が高く、また対処が困難である。電気火災は、電源を断としないかぎり熱源を消滅できず、延焼や有毒ガスの発生、更には耐圧殻の溶断など大事故につながる。電気火災発生の緊急時に船の機能を全て失うことなく、当該ラインのみ断とできる様な電路系統になっていなければならない。

火災被害を予防するためには、上記の電路系統のほかに下記の配慮が必要である。

- ・不燃性、難燃性材料の使用
- ・可燃、支燃ガスセンサーの装備
- ・消防器材、設備の装備
- ・消防服、防火おの、応急酸素呼吸マスクなど消火作業器材の装備

防火消火作業としては、初期消火が重要であり、そのためには火災警報監視装置の装備が必要である。

潜水船内での火災に対しては、散水消火、砂消火、炭酸ガス消火、ハロン消火が考えられるが、防火砂以外は、浸水・重量増や船内空気汚染など波及影響があり、防火作業は十分に潜水船の状況を配慮した上で実施されねばならない。また可搬式の防火要具のほか、大きな火災に対する区画消火装置としてハロン消火装置の装備が有効である。

### d) 有毒ガス

長時間潜航による船内空気汚濁や火災などによる船内の空気汚染が発生した場合には、空気浄化装置による環境維持が必要である。特に有毒ガスの発生時には区画通風装置を有効に使用し、極力無人の区画へ煙を排除し、船体の一部を水面上に出した後プロアや緊急スノーケル装置により急速換気を行う必要がある。

船内で発生する可能性のある主な有毒ガスは以下のとおり。

- ・電池室浸水による海水電気分解の塩素ガス
- ・不完全燃焼による一酸化炭素
- ・観測に使用する薬剤から発生するガス
- ・火災時の船内の内装品から発生するガス

有毒ガス発生に対処するために、空気浄化システムとしては、以下の装備が必要と考えられる。

- ・炭酸ガス吸収装置
- ・船内通風装置（含む急速換気スノーケル装置）
- ・船内ガスセンサー
- ・酸素供給装置
- ・応急呼吸装置及び応急呼吸マスク
- ・可搬式応急用炭酸ガス吸収剤

### e) 動力源の喪失

潜水船に必須の動力源は、以下のシステムと考えられる。

- ・一次電源系統
- ・二次電源系統
- ・油圧系統
- ・空気系統（高圧系、タンクブロー系、サービス系）

これらは、要求機能・性能を満足するだけでなく、事故の被害を想定しても航行ができる様に二重化を図っておく必要がある。或いは、操舵装置などの専用応急油圧発生源や応急電源系統（応急電池、非常用発電機など）を装備する必要がある。

### f) 運動能力の喪失

潜水船の運動能力は、潜入・浮上、増減速、方位保持・変換、深度保持・変換、調整用タンク注排水・移水などであり、これらの能力を喪失することは、船を非常に危険な状態に導くものである。

これらは、電気が喪失してもアキュムレータの油圧で必要最小限の操舵及び弁操作が可能で、さらにサービス空気系で調整用タンクの移水・排水もしくはタンクブロー系でメインバラストタンク排水を行い、浮上を可能とする様に配慮されていなければならない。また、これらとは別に緊急離脱バラストを装備することも考えられる。

一方、運動能力の制御を司る制御卓・制御システムも装置の異常故障などにより、その機能を一度に失うことの無い様に、遠隔自動、遠隔機力、機側機力、機側人力など冗長性を持たせたシステム構成にしておく必要がある。更に、潜水船特有の運動能力に関する安全性の確保として、安全潜航深度を越えないための対策や、過度の姿勢角がつかないための対策も必要である。

また装置の故障対策として深度計、ジャイロなどの二重化も重要である。

### g) 通信能力の喪失

潜水船の装備すべき外部通信システムとしては、電波通信、音響通信であり、これらによる定時通信が途絶えた時点で、陸上基地などの支援サイドは事故発生と判断することになる。従って、通信システムの故障は事故発生の情報と等価となり、通信システムは通常航行時でも故障してはならないシステムである。また、緊急時の電力喪失状態でも通信系だけは作動状態維持できる様に配慮しておくことが必要である。

緊急時の外部通信手段として、水中状態で以下の装備が必要である。

- ・応急用水中通話機の装備
- ・応急用トランスポンダ、ピンガの装備
- ・信号発射筒の装備（信号弾、救難ラジオブイの発射）
- ・救難潜水艇用水中標識灯の装備

水上状態では以下の装備が必要である。

- ・応急無線通信装置の装備
- ・標識灯の装備
- ・ラジオビーコンの装備
- ・レーダリフレクタの装備

これらの応急通信装置は、潜水船固定装備のものや可搬式のものが考えられる。また、氷海下での緊急時もさることながら、通常航行中にも外部と連絡をとるための手段として、数mの氷に穴を明ける機能をもったブイを水中から打ち上げ、氷上でアンテナを展張し通信確立できる様なシステムの開発が必要と考えられる。

#### h) ライフサポート

通常状態では、空気浄化、空調、居住設備、トイレ、洗面・シャワー、洗濯、サニタリタンク、造水・給水、糧食保存・調理など乗員及び乗船研究者が所定の期間の船内生活に必要なライフサポートが配慮されているものとするが、緊急時に於いても、救助されるまでのライフサポートを配慮しておかねばならない。

緊急時のライフサポートとしては、

- ・応急用酸素ボンベの装備
- ・応急用炭酸ガス吸収装置の装備
- ・応急真水タンクの装備
- ・応急食の確保
- ・防寒器具、衣料の確保
- ・医療用品の確保

などが考えられ、救助までの時間の生命維持を図るものとする。

### (2) 我が国有人潜水船に於ける安全確保の例

我が国の大深度有人潜水船に於ける安全確保の例を表 5.1 に示す。(参考資料-26),27))

### (3) 救難

潜水船の安全性の確保は、前記の様に設計段階で配慮されるが、不幸にして事故が発生し、潜水船から自力脱出もしくは外部レスキューを要請する事態についても考慮しておく必要がある。

潜水艦の救難については、参考文献-25、26 に詳しく解説されており、これらを参考に作成した本潜水船での事故発生時の対処フローチャートを図 5.3 に示す。図からわかるように、メインバラストタンク・ブロー装置、舵装置、排水ポンプ等については事故時の安全性確保に直結する重要機器であることから、設計時に充分な検討を行なうことが必要である。

また、本潜水船は、氷海下という特殊な環境で運航されるため、上記に加えさらに、「乗員の脱出に必要な構造体を氷貫通させる能力」が乗員の安全（救出）に大きな影響を与えると考えられる。

本潜水船の予備浮力(=メインバラストタンク排水量)は多くとも 100ton 程度と考えられ、この程度の浮力で氷を確実に貫通出来るのは、図 3.15 から、せいぜい厚み 70 cm ではないかと考えられる。従って、氷を割ることが出来ない場合を想定すると、下表の条件が全てクリアされて初めて外部からの救助が可能となる。

項目	説明	備考
事故の連絡	潜水船から陸上基地或いは水上船舶に対し事故を連絡する手段の確立が必要。	
潜水船の位置特定	潜水船の正確な位置を特定させるためには、少なくとも 1 つ以上のトランスポンダからの相対位置・海底からの高度・海面からの深度が判明していることが必要である。	トランスポンダまでは非常用バッテリで航走出来るものとする。
現場へのアクセス	水上船舶で接近できるとは限らないので、現場海面への接近はヘリコプタや航空機を前提とせざるを得ない。	
潜水船への接近	現場周辺の海氷を何らかの手段で除去する必要がある。 (爆弾投下等による大量の熱発生が必要)	
乗員の救出	(1) 潜水船が浮力を有する場合は、氷を除去した部分に浮上させ、乗員を直接救出する。 誘導は水中通話器等による。 (2) 潜水船が海底にある場合は、救難潜水艇でピストン輸送を行なうか、潜水船自体を引き揚げる必要がある。 いづれの場合も現場まで重機を含む多量の器材を運搬する必要がある。	
乗員の運搬	現場へのアクセス手段と同じ。	

表 5.1 我が国の大深度有人潜水船における安全確保の例(参考資料-27、28)

	応急安全装置		しんかい 2000	しんかい 6500	備考
a)装備機器故障 f)運動能力喪失	緊急浮上装置	投棄機器 投棄装置	ドロップウェイト (318kg) ショットバラスト (390kg) 同上ホッパー ペイロード (70kg) ペイロードラック (147kg) マニピュレータ 採取物入れ ガス圧式離脱ボルト 1式 ガス圧式電線カッタ 1式	下降用バラスト (458kg) 上昇用バラスト (608kg) ペイロード (167kg) ペイロードラック マニピュレータ (72kg) グラブ (55kg) ガス圧式離脱ボルト 1式 ガス圧式電線カッタ 1式	() 内水中重量
b)浸水	救難ブイ ブイロープ 離脱装置	ブイ ブイロープ 離脱装置	浮力材 (浮力 67kg) ケブラー $\phi 3.4 \times 3300\text{m}$ ガス圧式 1式	浮力材 (浮力 73kg) 合纖ロープ $\phi 24 \times 50\text{m}$ ガス圧式 1式	
	外部 からみ索 救助 救助	曳航リヤ からみ索 ストックドラム ワインチ	— — —	$\phi 16 \times 8000\text{m}$ 1式 からみ索 1式 巻取荷重 200kgf 1式	母船搭載
c)火災	消火器	CO2 粉末消火器	1式	CO2 粉末消火器 1式	
d)有毒ガス	応急呼吸具	閉回路式酸素呼吸器 (全面マスク) 3式	集合型閉回路式 酸素呼吸器 (全面マスク) 1式		
e)動力源喪失	主蓄電池 応急用蓄電池	油漬酸化銀亜鉛 2群 密閉型 NiCd 1組	油漬酸化銀亜鉛 2群 密閉型 NiCd 1組	2群化	
g)通信能力喪失	応急用通話器 応急用ピンガ	UQC 1式 2次電池内蔵型 1式	UQC 1式 1次電池内蔵型 1式		
h)ライフサポート	酸素補給能力 酸素分圧計 酸素濃度計 CO2 吸收能力 CO2 分圧計 CO2 濃度系	3名 $\times$ (8H + 72*H)分 ボーラログラフ式 2式 ドレーゲル式 1式 3名 $\times$ (8H + 72*H)分 電気化学式 1式 ドレーゲル式 1式	3名 $\times$ (9H + 120*H)分 ボーラログラフ式 2式 ドレーゲル式 1式 3名 $\times$ (9H + 120*H)分 電気化学式 1式 ドレーゲル式 1式	*応急時 警報付	*応急時 警報付
i) その他	救命胴衣 警報表示盤 浸水警報盤	膨張式 3式 警報パネル 1面	膨張式 3式 警報表示盤 1面 浸水警報盤 1面		

## « 乗組員の対応 »

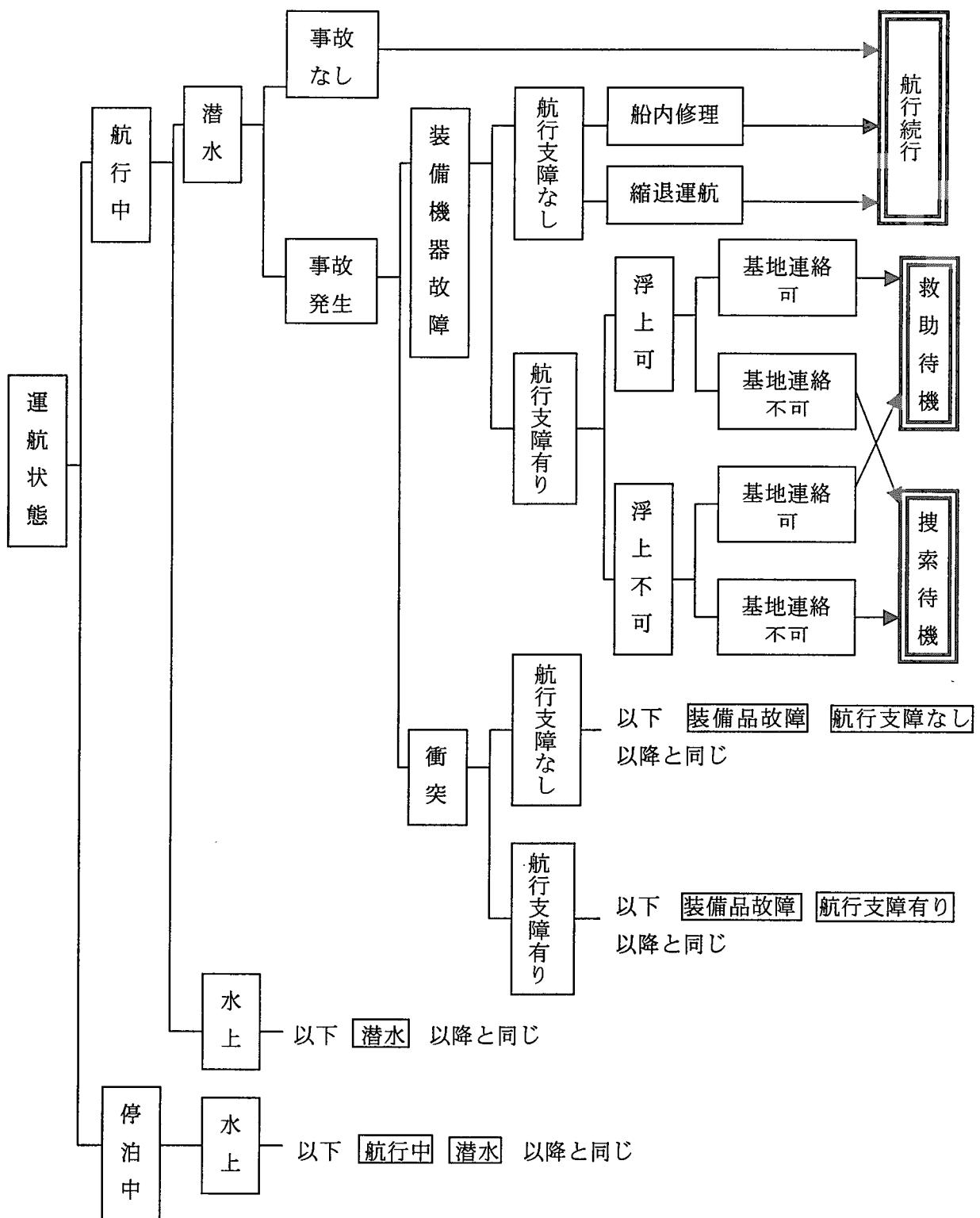


図 5.1 海中航行観測船の運航状態と乗組員の対応

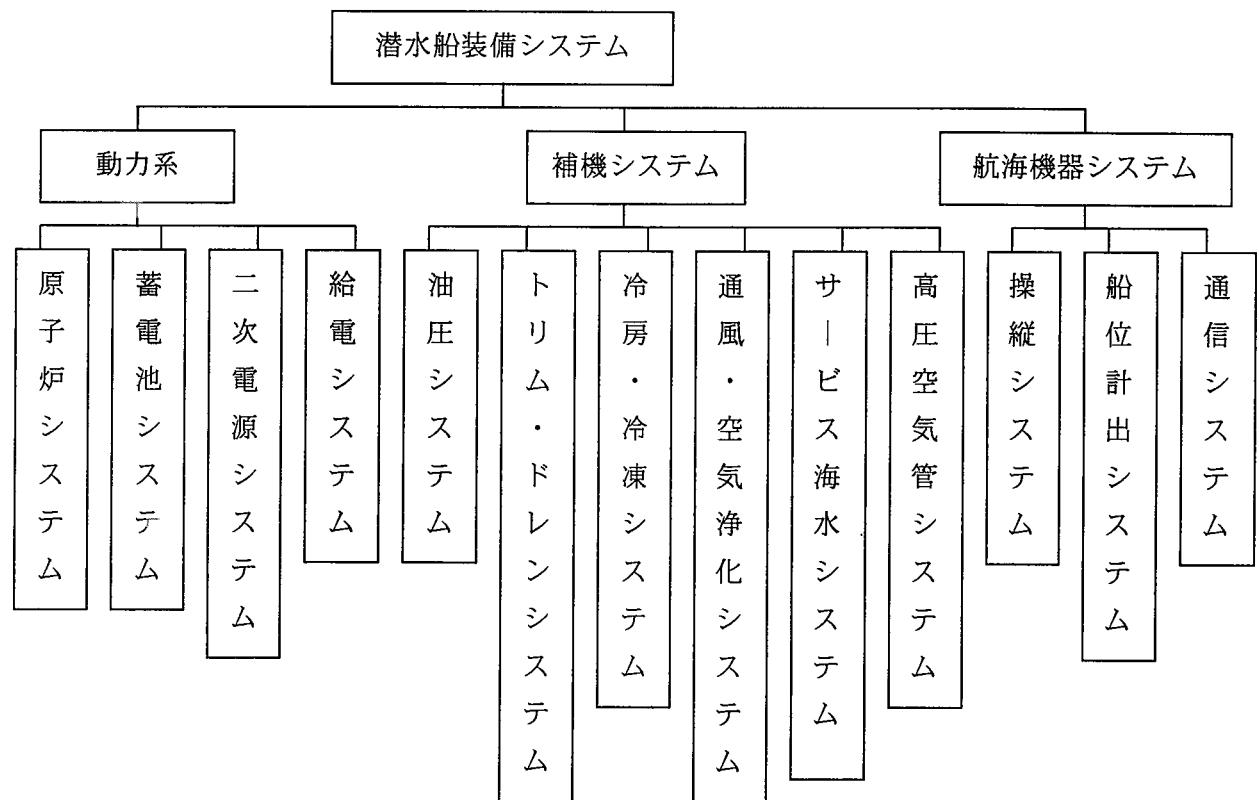


図 5.2 潜水船に必要な主要システム構成

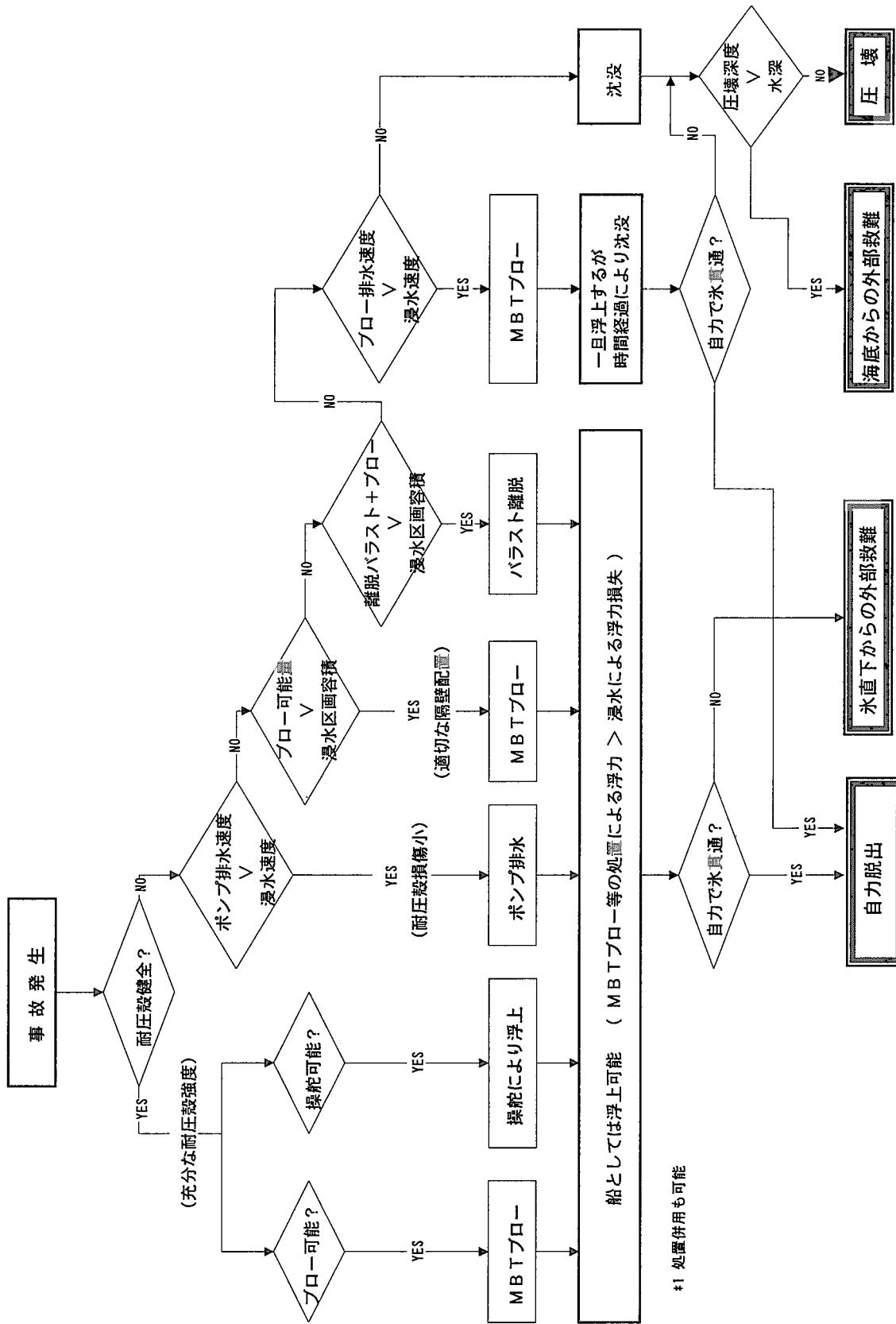


図 5.3 事故発生時の対処フロー

### 5.2.2 原子炉の安全確保の考え方

#### (1) 船体事故に起因して生じる事象に対する安全確保

##### ①衝突

原子炉プラント及びその関連設備は、想定される排水量 20 t o n、船速 10 ノット(約 18.5km/h)程度の遊漁船等との衝突、水中での静止物との船首からの衝突(3 ノット(約 5.6km/h)程度)に耐える構造とする。

##### ②沈没時の安全確保

原子炉プラント部分は、沈没する以前に原子炉を停止し、自然循環を用いた崩壊熱熱除去設備及び減圧注水系統を作動させる。本原子炉プラントは船体が転倒、横転等の姿勢となつても、受動的な安全設備により炉心の冠水と崩壊熱除去が行われ、原子炉プラントの安全が確保される。船体が設計深度を超えた深さに沈没した場合には、原子炉プラント耐圧容器及びタービン発電機耐圧容器に備えた圧力平衡弁により、海水圧力と耐圧殻内圧力を平衡させて耐圧殻が圧壊することを防ぐ。

##### ③乗上げ

乗上げ時の原子炉プラントの問題は、冷却能力の喪失である。プラントの取水口が水面下にあれば、バッテリーにより数日間の冷却が可能であるため、この間に必要な作業を行うことができると考えられる。船体が乗上げた場合の原子炉プラントの冷却能力については、船体構造等が明確になった時点で評価を行うこととする。

##### ④装備機器の故障、⑧動力源の喪失、⑨運動能力の喪失、⑩通信能力の喪失

動力源、運動能力、通信能力にかかる機器の单一故障が発生した場合、これにより船体が直ちに危険状態となることはないが、その後の観測活動を安全に継続することはできないので、直ちに基地または母港へ帰投することとする。自力での航行が困難な場合は、安全な海域で浮上して支援船等による救助を待つ。

原子炉プラント部分は、浮上時には原子炉の出力を下げる。乗員の脱出が想定される場合には、原子炉を停止し、自然循環を用いた崩壊熱熱除去設備及び減圧注水系統を作動させる。

##### ⑤浸水

浸水が発生した場合には、観測船は原則として緊急浮上し、直ちに脱出できるよう準備を行うとともに、排水等の活動を行う。浸水を最終的に抑えられない場合には、乗員は脱出筒より脱出する。

乗員の脱出が想定される場合には、原子炉を停止し、自然循環を用いた崩壊熱熱除去設備及び減圧注水系統を作動させる。

##### ⑥火災及び⑦有毒ガスの発生、

火災が発生した場合にも、観測船は原則として緊急浮上し、直ちに脱出できるよう準備を行うとともに消火活動を行う。消火活動に係わらず、鎮火できない場合には乗員は脱出筒より脱出する。有毒ガスの発生の場合も火災に準じる。

乗員の脱出が想定される場合には、原子炉を停止し、自然循環を用いた崩壊熱熱除去設備及

び減圧注水系統を作動させる。

## (2) 原子炉単独事故事象に対する安全確保

先に示したように、原子炉側で発生する可能性のある事故事象は、「発電用軽水炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づく事故事象と異常な過渡変化を対象として解析を行う必要がある。各事象時の安全確保の考え方を以下に示す。

### 1) 事故事象

#### ①原子炉冷却材喪失事故

原子炉冷却材圧力バウンダリの破損により、一次冷却材が系から格納容器に流出する。原子炉容器圧力は低下し、格納容器圧力は上昇して、両容器の圧力が平衡すると冷却材の流出は止まり、炉心が露出することはない。原子炉容器圧力低等の信号により、自動的に、原子炉は停止し、二次系は隔離され、EDRS（非常用崩壊熱除去設備）が作動して原子炉を冷却する。これらにより、原子炉の安全は確保され、外部への放射性物質の漏洩等は生じない見通しである。

#### ③主給水管破断

原子炉運転中に、給水配管に破断を生じ、二次冷却水が喪失して、原子炉の冷却能力が低下する事象を想定する。給水管が破断した場合にも、原子炉冷却材喪失事故の場合と同様の対応により、原子炉の安全は確保され、外部への放射性物質の漏洩等は生じない見通しである。

#### ④主蒸気管破断

原子炉の高温停止時および出力運転中に、二次冷却系の破断等により、一次冷却材の温度が低下し、反応度が添加される事象を想定する。高温停止及び出力運転中に蒸気管が破断すると、原子炉保護系の信号により、原子炉がスクラムし、蒸気及び給水隔離弁が閉となる。本炉は最大反応度価値の制御棒クラスタが全引抜で固着した場合でも、制御棒の停止余裕は十分あり原子炉スクラム後再び臨界となることはないため、原子炉の安全は確保され、外部への放射性物質の漏洩等は生じない見通しである。

#### ⑤蒸気発生器伝熱管破損

原子炉運転中に、蒸気発生器の伝熱管が破損して、一次冷却材が原子炉格納容器外に放出される事象を想定する。本原子炉プラントでは、二次系がタービン発電機格納容器内で閉じているため、二次系に破損がない限り一次冷却材が環境へ放出されることはない。伝熱管破損が生じた場合にも、原子炉冷却材喪失事故の場合と同様の対応により、原子炉の安全は確保され、外部への放射性物質の漏洩等は生じない見通しである。

#### ⑥可燃性ガスの発生

原子炉冷却材喪失事故の際に、可燃性ガスが発生する事象を想定する。金属-水反応、水の放射線分解、減圧による一次水からの発生等によって水素ガスは発生する。事象発生後少なくとも 30 日間は、原子炉格納容器内雰囲気中の酸素又は水素の濃度のいずれかが、それぞれ 5% 又は 4% 以下であることが要求される。原子炉冷却材喪失事故時の水素濃度は 4% を上回る可能性がある。一方、酸素は、 $\gamma$ 線及び中性子により一次冷却水及び格納容器水が水分解する際

に、水素とともに発生する。この酸素は、水分解反応が不可逆反応であり、容器内で消費されないとすれば蓄積されるが、発生期の酸素は非常に活性が高いため、格納容器内及び原子炉容器内の遮蔽用鉄ブロックを酸化することに消費されると考えられる。将来的に、事故時の可燃性ガスの発生に関しては定量的な評価を行う必要がある。

#### ⑦動荷重の発生

水張格納容器において、原子炉冷却材喪失、安全弁作動、格納容器内の蒸気管破断、給水管破断等の際に、局部的な動過重が発生することを想定する。本原子炉プラントは、格納容器が極めて高い設計圧力であるため、動荷重を考慮しても格納容器が破損することはない見通しである。

#### 2) 異常な過渡変化

下記のいずれの異常な過渡変化事象時にも、固有の安全性及び安全設備の働きにより、原子炉の安全は確保される見通しである。

- ①原子炉起動時の制御棒の異常な引抜き
- ②出力運転中の制御棒の異常な引抜き
- ③制御棒の落下及び不整合
- ④外部電源喪失
- ⑤主給水流量喪失
- ⑥蒸気負荷の異常な増加
- ⑦二次冷却系の異常な減圧
- ⑧蒸気発生器への過剰給水
- ⑨負荷の喪失
- ⑩出力運転中の非常用炉心冷却系統の異常な誤起動

#### (3) 原子炉事故発生確率の概略検討

##### 1) 検討方針

海中航行観測船用超小型炉 SCR の事故及び故障発生確率の評価は、将来的に詳細に実施する必要がある。しかし、現時点では設計が十分に進捗していないため、既存の発電用原子炉のデータ（資源エネルギー庁ホームページ、原子力情報公開コーナー、<http://www.enecho.go.jp/index01.html>）に基づき、概略の事故発生確率について検討することとした。

##### 2) トラブルの発生状況の推移

わが国の原子力発電所におけるトラブル（電気事業法及び原子炉等規制法に基づく）の一炉年当りの発生件数は図 5.4 に示すように、1970 年頃から減少しており、1993 年以降は 0.3 件/炉年と安定している。過去に経験した大きなトラブルとしては、沸騰水型原子炉（BWR）プラントにおける 1976～1978 年頃のステンレス配管等の応力腐食割及び原子炉圧力

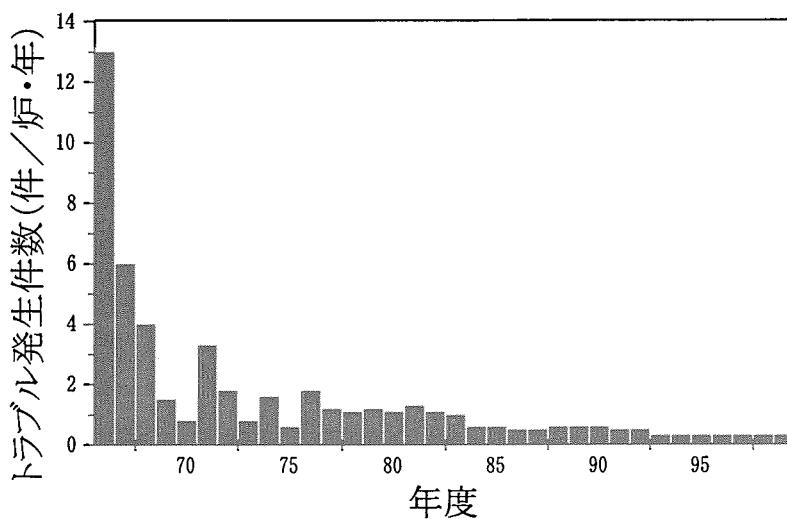


図 5.4 わが国における原子力発電所のトラブル発生状況

容器ノズル部の熱疲労割れならびに 1989 年の原子炉再循環ポンプ損傷、PWR プラントにおける 1978～1979 年頃の制御棒案内管支持ピン、たわみピンの応力腐食割れ及び蒸気発生器伝熱管損傷ならびに 1991 年の蒸気発生器伝熱管破断、共通のトラブルとして振動による小配管ノズル部のひび割れ等があるが、それぞれのトラブルについて再発防止対策等が実施されている。

### 3) 1993 年以降の原子炉自動停止回数と原因の分類

図 5.5 に 1993 年以降の原子炉  
プラント自動停止の発生頻度を  
示す。年度により若干のばらつ  
きがあるが、平均して 1.5 件/年  
(原子炉数 51 基：約 0.03 件/  
炉・年) である。

自動停止に至った原因及び原  
因となった機器を図 5.6 に示す。  
この 8 年間で最も多発した原因  
は落雷に伴う 4 件であり、主変  
圧器の故障、継電器の故障、原  
子炉制御設備の誤信号発生等を  
介して原子炉自動停止に至って  
いる。次に、操作ミスの 3 件が

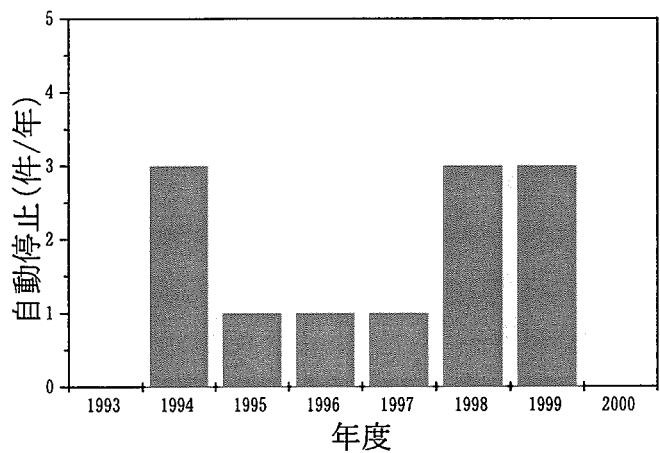


図 5.5 1993 年以降の自動停止頻度

続くが、これらは共通して、出力運転中の定期的な点検作業または整備作業の実施中に発生している。他の4件のうち、1件は複数ある発電機の電力変換器のうち1台を点検のために停止した際、監視プログラムの不備により複数の電力変換器が同時に停止したと判断され、原子炉自動停止に至ったものである。残りの3件は、機器の故障に起因した原子炉自動停止に分類される。

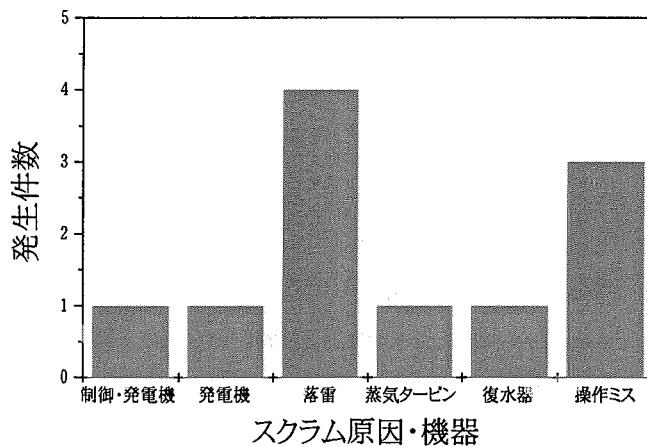


図 5.6 自動停止の原因または原因機器

#### 4) SCR の自動停止発生に関して

1993年以降に原子力発電所で発生した自動停止の原因のうち、落雷に起因した事象は、海中航行を原則とするSCRでは、遭遇する可能性が低い上に給電のための設備を有しないため発生確率は極めて低いと考えられる。次に、海中航行観測船の観測航海期間は約1ヶ月であるため、出力運転中に点検及び整備を行わないこととしている。陸上発電炉においても、点検及び操作を伴わない運転中には操作ミスに伴う原子炉の自動停止はこの8年間に発生していない。現実的に考えられる要因は、発電機、蒸気タービン、復水機等の故障に伴うものであり、この発生頻度は $7 \times 10^{-3}$ 件/炉・年程度と評価される。これらの設備は、SCRにおいては基地にて点検、整備が可能な機器であり、適切な整備計画により自動停止頻度をさらに低減できるものと考えられる。

定量的な信頼性評価は将来の重要な課題であり、船体部分の信頼性評価を含めて今後検討を進めていく必要がある。

#### (4) 事故発生時の公衆被曝の概略検討

##### 1) 検討の方針

海中航行観測船用超小型炉SCRの安全性評価の一貫として、仮想事故としてSCR搭載船が沈没し、原子炉容器の健全性が損なわれ、放射性物質が海中に放出される際の、長期にわたる公衆への放射線被ばく線量の評価が将来的に必要となる。

最終的には、航行域である日本沿岸、太平洋及び北極海の場合を想定しての放射線被ばく線量評価が必要であるが、第1ステップとして、日本沿岸の場合の評価を行う。ここでは、放射性物質運搬船及び原子力船「むつ」での放射性物質の海中放出による公衆の被ばく評価の例を参考にし、超小型炉SCR搭載船の安全性を環境影響の観点から定性的に検討した。

## 2) 環境影響評価手法の基本的な考え方

放射性物質の海中放出による環境への影響評価の基本的な考え方を、放射性物質運搬船の事故時の安全性評価を例にして示す。評価は、図 5.7（電中研編、「核燃料輸送工学」<sup>29)</sup> より）に示すようなフローチャートに基づいて行われる。運搬船の沈没地点を決定し、想定した事故シナリオにより海中への放射性物質の放出率を決定する。さらに、それらの放射性物質の海洋拡散モデルを海岸、地形、水深、沿岸流の特性を考慮して構築し、放射性物質の海中濃度を計算する。図 5.8 に沿岸モデルの概念を示す（電中研編、「核燃料輸送工学」より<sup>29)</sup>）。この結果より、公衆の内部及び外部被ばく線量を評価する。内部被ばくについては、海産物の経口摂取を考慮し、外部被ばくについては、海浜作業時の海浜に漂着した放射性物質からのガンマ線による線量当量を評価する。

## 3) 放射性物質運搬船の環境影響評価例

電力中央研究所と東京電力は使用済み核燃料輸送時の環境影響評価について、PATRAM'98<sup>30)</sup> で報告している。下北半島沿岸付近で輸送容器運搬船が沈没し、使用済み核燃料輸送容器 1 基が水深 200m の海底に沈むことを想定している。海底に沈没する輸送容器の内容物は、高燃焼度（44GWd/t）の PWR 使用済み燃料集合体 14 体（620 日冷却後）である。図 5.7 及び 5.8 に示す方法により、公衆の内部及び外部被ばくを、個人被ばく線量について評価した。その結果、1 つの輸送容器の沈没に対して、公衆への線量は最大で  $2.3 \times 10^{-3} \text{ mSv/年}$  で ICRP 勧告の公衆に対する被ばく限度(1mSv)の 1/400 以下である。なお、海産物の摂取が主要な被ばく経路である。

また、燃料集合体とは形態が異なるが、高レベル放射性廃棄物の海上輸送事故を対象とした電力中央研究所の津旨らによる環境影響評価<sup>31)</sup> 例がある。輸送容器 1 基に 28 体のガラス固化体が格納されていると仮定し、その輸送容器が東日本の太平洋側に沈没した場合を想定した。このときの公衆の被ばく線量当量は  $5.9 \times 10^{-4} \text{ mSv/年}$  となった。北太平洋の日本近海に沈没した場合については、公衆の被ばく線量当量は  $4.7 \times 10^{-9} \text{ mSv/年}$  となった。いずれの場合も ICRP 勧告の公衆に対する被ばく限度(1mSv)を大きく下回る。

## 4) 原子力船「むつ」の例

「むつ」の原子炉の安全評価のための想定事故としては、一次冷却水の喪失及び蒸気発生器伝熱管破損の 2 事象のみを考慮している。船体事故及び浸水事故については、以下の理由により、放射性物質が大量に放出される事態は発生しないとしている。まず、座礁及び衝突時の船体事故に対しては、二重底構造、耐衝突構造によって原子炉設備は保護されており、原子炉格納容器に損傷が及ぶことはないと考えられる。また、浸水事故に対しては「むつ」は二区画可浸構造となっており、いずれの二区画に浸水しても沈没に至らず、また、万一沈没する場合にも、格納容器に設けられた圧力平衡弁より格納容器内に海水が注

水され、圧力容器表面から崩壊熱除去が行われる。以上のことから、「むつ」の安全審査においては、沈没時の放射性物質の漏洩には想定外の事象として考慮していないが、1981年に当時の日本原子力船開発事業団は、沈没時の環境影響評価について検討している。

評価では、沈没を想定する海域を日本沿岸沖合 10km、水深 200m としている。沈没時の全燃料集合体中の放射性核種生成量は、定格運転出力の 103%で 9000 時間連続運転した場合（約 5.5GWd/t）について計算し、海中への放射性物質の放出を仮定した。さらに、それらの放射性物質の海洋拡散モデルにより、放射性物質の海中濃度を計算した。得られた海中濃度に基づき、公衆の内部及び外部被ばくを、個人被ばく線量及び集団被ばく線量について評価した。その結果を、表 5.2 に示す。個人被ばく線量については、全身被ばくが合計  $4.6\mu\text{Sv}/\text{年}$  で、ICRP 勧告の公衆に対する被ばく限度( $1\text{mSv}$ )の 1/200 以下であり、「原子力船運航指針を適用する際に必要な暫定的な判断のめやす」（以下「判断のめやす」）と比べても十分に小さい。また、集団線量については、「判断のめやす」は外国の例として 20000 人 Sv を集団線量の見地から受け入れられる程度に十分小さい値であることの判断のめやすとしているが、評価結果はその値と比較して、十分に小さい。また、沈没時の環境影響は、仮想及び重大事故として取り上げている、一次冷却水の喪失及び蒸気発生器伝熱管破損事故による環境影響よりも小さい。

##### 5) SCR の環境安全評価に関する予測

SCR の環境安全評価においても、安全審査に関わらず「むつ」と同様に、最高到達燃焼度まで全出力で連続運転した状態で、原子炉が水深 200m の海底に沈没するという、最悪の事故シナリオを想定した検討が望ましい。しかし、SCR の到達燃焼度は約 19.5GWd/t であり、「むつ」に比べて長期燃焼を図っているが、「むつ」と比較して出力が 1/30 程度であり、燃料装荷量も 1/20 程度なので、最高燃焼度到達時の放射性物質生成量は、「むつ」よりも小さくなる。その結果、SCR 沈没時の放射性物質の海中への放出による環境影響評価は、「むつ」の評価よりも小さくなるものと考えられる。

表 5.2 「むつ」沈没時に公衆が受ける被ばく線量

被ばく線量	内部被ばく（成人）		外部被ばく 海浜
	全身	骨	
個人被ばく線量 ( $\text{mSv}/\text{年}$ )	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-3}$
集団被ばく線量 (人 $\text{Sv}/\text{年}$ )	8.87	92.6	$4.5 \times 10^{-2}$

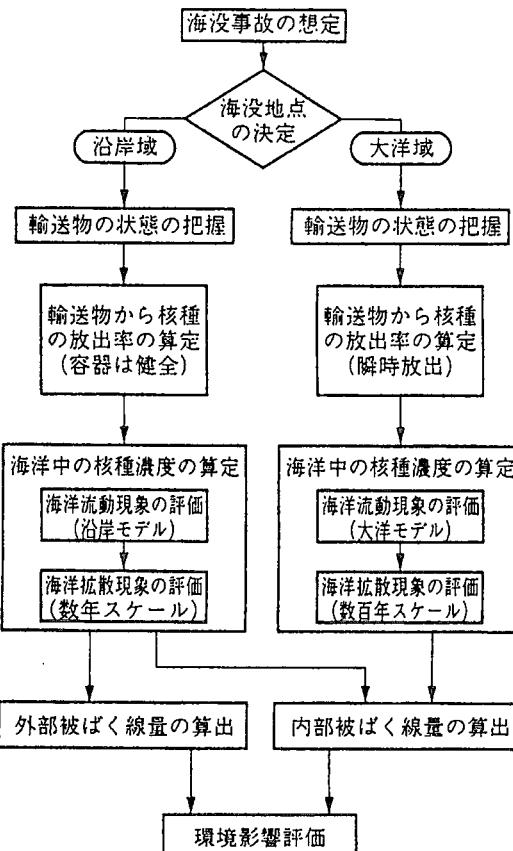
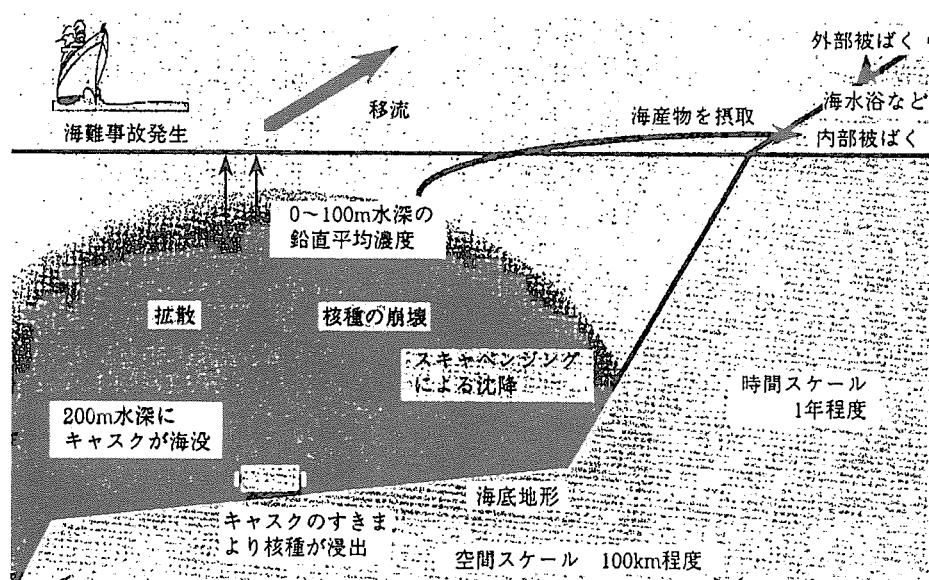
図 5.7 評価フローチャート<sup>29)</sup>

図 5.8 海洋拡散現象評価方法の模式図

## 6. おわりに

本検討ワーキンググループの当初の計画では、運航システムの検討を3年間にわたって実施し、その後、適用性の検討を1年間実施し終了することとしていた。しかしながら、平成13年度から新たに分散型小型炉システムの研究を実施するため、本ワーキンググループ活動も2年間しか活動できなかった。検討期間の短縮にも関わらず、各委員の誠意ある討議への参加及び資料作成により、当初予定していた検討課題の①外的条件、設計外力の明確化、②航行時の安全性及び安全確保、及び③運行システムの検討についてとりまとめることができた。

北極海の自然環境は厳しく、氷厚の季節変動等のデータから氷が夏場でも北極海の大部分を覆っていることが示され、海中航行観測船は長時間の安全航行が要求される。そのため、特に、船の測位及び航行不能時の乗組員の安全確保が最重要検討課題として取り上げられた。測位については海底設置又は氷へ設置する水中音響レーダーが提案された。運航時の安全性については、北極海の氷の下を航行する場合、機器の故障、事故発生により航行不能に陥らないための対策、航行不能になった場合の救難シナリオについて検討した。有人観測船で北極海中を調査することの困難さが示され、問題解決は容易でないがいくつかの解決の糸口が見いだされた。これらを含め救難シナリオの具体化などは今後の課題としている。

北極海を対象とする海洋調査に対するニーズは、地球環境の変動解明などの観点から緊急性を要することがこれまでのワーキンググループ活動を通して明らかにされている。原子炉を動力源とした海中航行観測船が北極海中を科学調査のため運航することが可能になれば、飛躍的な調査活動が出来、その成果は極めて大きいと言える。

この実現のためには、わが国のみで海中航行観測船を建造するやり方と多数国の国際協力によって進めるやり方があるが、グローバルな地球環境を対象とする調査であることを考慮すると、後者が適していると考えられる。日本がリーダーシップを取って進めることは望ましいが、いずれにせよ如何に国際的な認識を高めるかが鍵である。そのためにも、海洋研究者等のユーザー側から原子炉を動力源とした海中航行観測船の早期実現を目指す気運が高まるこことを期待したい。これまで検討してきた本検討ワーキンググループの成果を公表し、海洋研究者のそういう気運の高まりに役立つことを願うものである。

## 参考文献

- 1) 石田紀久 他、「海中調査船用超小型原子炉の設計研究(1)利用ニーズと設計概念」、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集, H-60 (1999)
- 2) 小田野直光 他、「海中調査船用超小型原子炉の設計研究(2)超小型炉 SCR 炉心の概念検討」、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集, H-61 (1999)
- 3) 楠剛 他、「海中調査船用超小型原子炉の設計研究(3)安全設備の概念検討」、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集, H-62 (1999)
- 4) Naoteru Odano et.al., "Submersible Compact Reactor SCR for Under-sea Research Vessel", Proc. of International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans, Tokyo, p.164~169 (2000)
- 5) Tsutsumu Yoritsune et.al., "Safety System of a Submersible Compact Reactor SCR for Under-sea Research Vessel", Proc. of 4<sup>th</sup> JSME-KSME Engineering Conference, A106, p.1-31~1-36, October 1-6, Kobe (2000)
- 6) 楠剛、藤本博巳、永田豊、高橋照雄、石田紀久、「海中航行観測船への超小型原子炉の利用」、海洋調査技術、12 (2) p.1~10, September (2000)
- 7) J. S. Hewitt, et. al., "A Nuclear-Powered Submarine Vehicle for Commercial Operation", pp.20-32-20.36, Proceedings Of the Sixth Annual Conference of the Canadian Nuclear Society, (1984)
- 8) 渡部一徳、「開発すすむ原子力海底探査潜水艇」、原子力工業、第 33 卷、第 5 号 (1987)
- 9) I. G. Babb et al., " Dual use of a Nuclear Powered Research Submersible the U.S. Navy's NR-1", Marine Technology Society Journal, Vol.27, No.4, p39, (1993-94)
- 10) C. ドルー、S. ソンタグ、「潜水艦諜報戦(上)(下)」、新潮文庫、(2000)
- 11) Engle, Jr., W.W.: K-1963 (1967).
- 12) Croff, A.G., ORNL/TM-7175 (1980).
- 13) Sakamoto, Y. and Tanaka, S., JAERI-M 90-110 (1990).
- 14) グローバルオーシャンディベロップメント、「平成 9 年度海洋地球研究船の高緯度海域運航業務に関する調査報告書」、JAMSTEC 委託 (1998)
- 15) 和達清夫、「海洋大事典」、東京堂出版 (1987)
- 16) 渡辺巖、富田宏、谷沢克治、「北太平洋の波と風」(1974~1988) ) 運輸省船舶技術研究所 (1992)
- 17) 運輸省船舶局、「潜水船特殊基準」、昭和 53 年 2 月 (添付資料-2)
- 18) 日本海事協会、「鋼船規則 T 編潜水船」、1996 (添付資料-3)
- 19) T.Ishida et.al., "Thermal-Hydraulic behavior of a marine reactor during oscillations", Nuclear Engineering and Design 120 p.213-225 (1990)
- 20) T.Ishida et.al., "Effects by sea wave on thermal hydraulics of marine reactor system", Journal of Nuclear Science and Technology", 32(8), p.740-751 (1995)
- 21) 久保義光 : 氷工学序説、氷工学刊行会、1980
- 22) G. W. Timco, S. O'Brien, "Flexural strength equation for sea ice", Cold regions science

- and technology 22, Elsevier Science B. V., 1994
- 23) Devinder S. Sodhi, "Vertical penetration of floating ice sheets", Int. J. Solids Structures, Vol. 35, Nos 31-32, 1998
- 24) V.A.Del Grosso, " New equation for the speed of sound in natural waters" , Naval Research Laboratory, Washington,D.C.20375
- 25) 米田憲弘、「潜水艦救難」、防衛技術ジャーナル,2000.11 p.22-29 (添付資料-5)
- 26) F.Abel, et. al., "The Pressure-Tight Bulkhead in the Submarine", RINA, Naval Submarine Symposium (1983) (添付資料-6)
- 27) 渡辺俊夫他：2000m 潜水船"しんかい 2 0 0 0 "の信頼性評価. 三菱重工技報, vol.18. No.3, (1981) (添付資料-7)
- 28) 高橋憲二他、「「しんかい 6 5 0 0 」の信頼性解析について」、海洋科学技術センター試験研究報告. JAMSTEC R23, Mar. p 43-59, (1990) (添付資料-8)
- 29) (財)電力中央研究所バックエンド研究会編、「核燃料輸送工学」、日刊工業新聞社
- 30) Asano, et al., Proc. PATRAM'98, pp. 961-968, (1998)
- 31) Tsumune, et al., Proc. PATRAM'95, pp. 41-48, (1996)

This is a blank page.

## 添付資料

下記の添付資料については、著者及び出版社の転載許諾を得て掲載している。

	タイトル	著者名	資料名、巻号頁数
添付資料-2	潜水船特殊基準	国土交通省 海事局安全基準課	潜水船特殊基準、P9
添付資料-3	鋼船規則 T 編潜水船	日本海事協会	鋼船規則 T 編潜水船、p5
添付資料-5	潜水船救難	米田憲弘	防衛技術ジャーナル、2000年11月号、p22-29
添付資料-6	The Pressure-Tight Bulkhead in the Submarine	F.Abelz 他	RINA, Naval Submarine Symposium (1983)
添付資料-7	2000m 潜水調査船“しんかい2000”の信頼性評価	渡辺俊夫 他	三菱重工技報、Vol.18, No.3
添付資料-8	「しんかい6500」の信頼性解析について	高橋憲二 他	海洋科学技術センター試験研究報告、JAMSTEC R23 (1990)

This is a blank page.

## 北極海における海水状況データについて

### 1. データベース

- ・ロシア AARI (Arctic and Antarctic Research Institute)  
1950~1992 年の密接度データ、10 年毎の統計データ、1997 年から現在までの 1 週間毎の  
海水状況図 [http://www.aari.nw.ru/clgmi/sea\\_charts/sea\\_charts\\_en.html](http://www.aari.nw.ru/clgmi/sea_charts/sea_charts_en.html) (図 1)
- ・アメリカ NIC (National Ice Center)  
1972~1994 年の密接度データ、海水状況図  
<http://www.natice.noaa.gov/index.htm> (図 2)
- ・イリノイ大 J.Walsh  
1901~1997 年の密接度率データ [http://www.aari.nw.ru/gdsidb/gdsidb\\_2.html](http://www.aari.nw.ru/gdsidb/gdsidb_2.html)
- ・アメリカ NASA、National Snow and Ice Data Center (NSIDC)  
<http://nsidc.org/NSIDC/CATALOG/ENTRIES/nsi-0051.html> (図 3)
- ・その他  
ノルウェー (Polar Environmental Centre)、SO 財団等

【密接度】海面に対する氷の占める面積の割合

### 2. 北極海における海水の概況

#### (1) AARI のデータ

図 1 に 1999 年の衛星からの画像に基づく氷の解析結果を示す。10 月から 4 月までは氷の発達段階の解析結果が 5 月から 9 月までは氷の密接度の解析結果が得られる。冬期においては、北極海の大部分の海域は夏季に融けずに残った古い氷で覆われ、その厚さは 2m 以上ある。一方、夏季については、大部分の海域で密接度 70~100% となっているが、密接度の段階の区分が 2 つしかないので、詳細な分布は判断できない。

#### (2) NIC のデータ (1996~97 年の観測)

NIC のデータは、北極海を海域毎に区分し、各海域における氷の状況を Egg Code により表記している。ここでは高緯度北極海のデータを示す。高緯度海域では夏季においても、密接度は 90~100% と高くなっているが、古い氷（氷厚 2m 以上）の密接度が 80% と高い。図 2 に示した NIC のデータの概要を表 1 に示す。

表 1 NIC のデータの概要

夏季			冬季		
当該海域の密接度 90~100%			当該海域の密接度 90~100%		
発達段階	厚さ	密接度	発達段階	厚さ	密接度
古い氷	2m 以上	80%	古い氷	2m 以上	80%
一年氷	30cm~2m	10%	一年氷	30cm~2m	10%
板状軟氷	—	—	板状軟氷	10~30cm	10%以下
新成氷	10cm 未満	10%以下	新成氷	10cm 未満	10%以下

(3) NASA 及び National Snow and Ice Data Center (NSIDC)のデータ

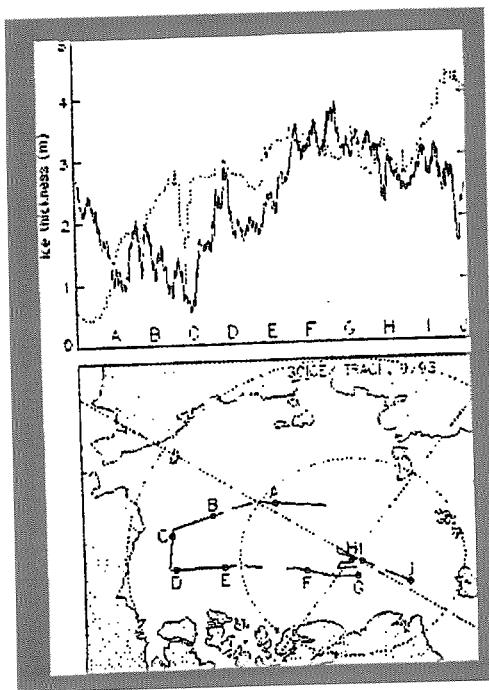
1978 年から 1996 年まで月ごとの密接度データが 23 段階表示で示されている。図 3 に 1993 のデータを示す。最も海氷域が縮小する 9 月において、北緯 85 度以上の海域では一部の海域で密接度はが 70%程度となっているが、大部分の海域で密接度が 80%以上となっている。一方、冬季における高緯度海域の密接度は 100%に近い。

(4) SCICEX における観測データ

1993 年 9 月に行われた SCICEX'93 における観測データを図 4 に示す (SCICEX 2000 Workshop のレポートより)。ボーフォート海のバーロー沖合付近で氷厚が 50cm 程度と最も薄くなるが、高緯度海域では 2m 以上の氷厚が観測されている。

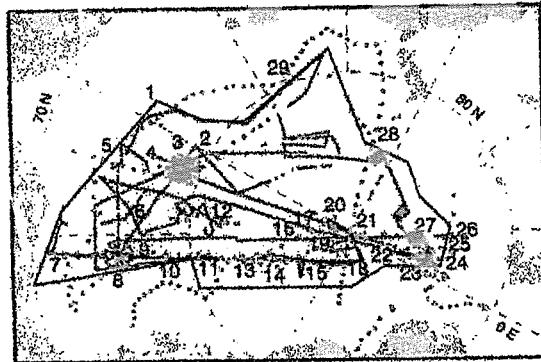
D.A.Rothrock らは、1993、96、97 年の SCICEX の観測データに基づき、北極海での氷厚データを示している (Geophys. Res. Lett., 26, 3469 (1999))。図 5 に青の実線で示したものが 1990 年代の航行の軌跡である。観測では平均 draft を計測している。図 6 に観測結果を示す。バーロー沖で draft が最も小さく 50cm 程度となっており、その他の海域では最低でも氷厚 1m はあり、高緯度海域では 2m~4m で分布している。氷厚及び draft の季節変化は図 7 に示すように計算することができ、9 月中旬に最も薄く、5 月初旬に最も厚くなる。

以上



**Fig. 6.** (upper) Comparison of modeled mean ice thickness (dotted line) and mean ice thickness measured during SCICEX '93 along the transect of USS *Pargo* (solid line). (lower) Map of cruise track showing locations. Because the model captures the major change in thickness from about B to H, the correlation between the model and the observations is fairly strong, 0.5. However, there are still many locations where the model and observations differ by over a meter, leaving a need for model improvement. (Courtesy of D. Rothrock, Y. Yu, and J. Zhang)

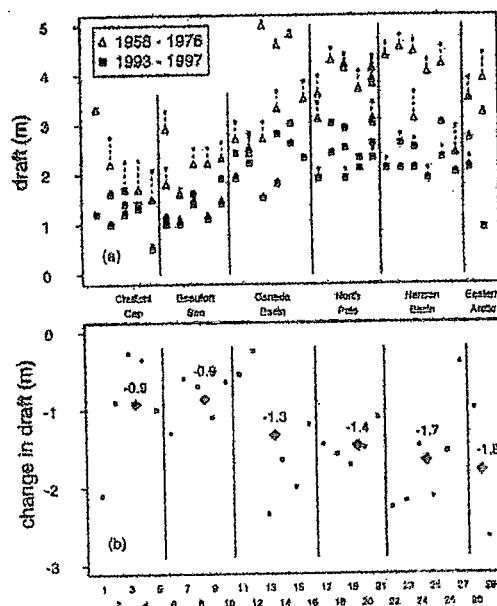
図4 SCICEX2000 Workshop のレポートより



**Fig. 1.** Submarine cruise tracks and comparison locations, indicated by location number. Tracks in the early cruises (1958-1976) are indicated by dotted red lines, and those in the 1990s by solid blue lines. The area from which SCICEX data could be released is the interior of the solid black polygon.

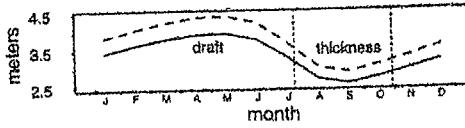
図5 D.A.Rothrock, et al, Geophys. Res.

Lett., 26, 3469 (1999)より



**Figure 3.** (a) Mean ice drafts at crossings of early cruises with cruises in the 1990s. Early data (1958-1976) are shown by open triangles and those from the 1990s by solid squares, both seasonally adjusted to September 15. The small dots show the original data before the seasonal adjustment. The crossings are grouped into six regions separated by the solid lines and named appropriately. (b) Changes in mean draft at cruise crossings (dots) from the early data to the 1990s. The change in the mean draft for all crossings in each region is shown by a large diamond. The abscissa gives the number of each crossing from Figure 1.

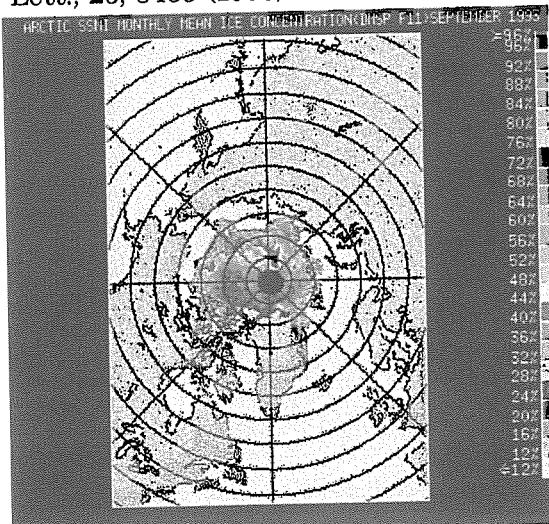
図6 D.A.Rothrock, et al, Geophys. Res. Lett., 26, 3469 (1999)より



**Figure 2.** Modeled seasonal cycle of ice thickness and draft used to correct observations to 15 September. Draft is computed as modeled thickness divided by 1.12. The observations all lie between late July and late October, as shown by the dotted vertical lines.

図7 D.A.Rothrock, et al, Geophys. Res.

Lett., 26, 3469 (1999)より



This is a blank page.

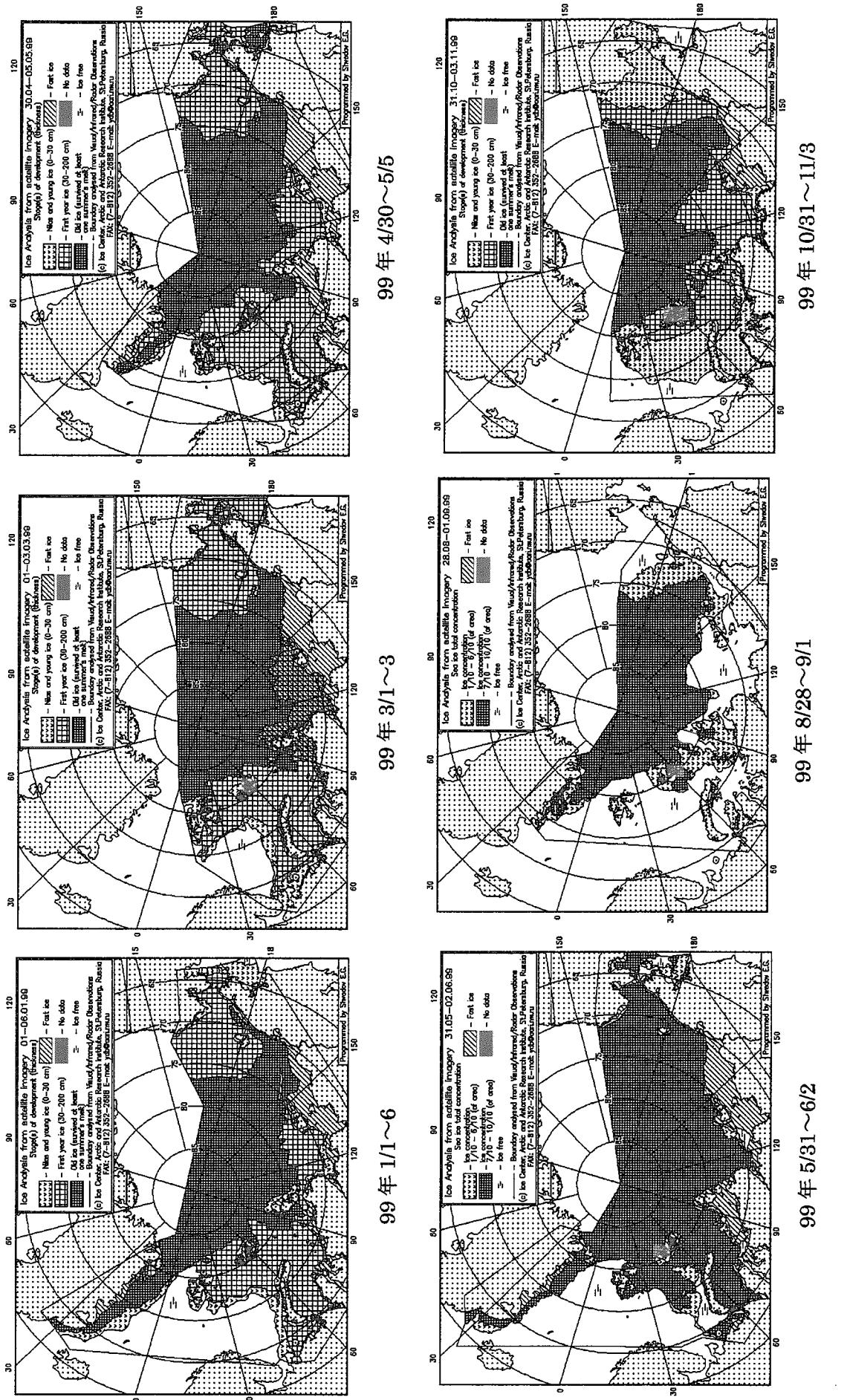


図 1 AARI のデータ (1999 年)

This is a blank page.

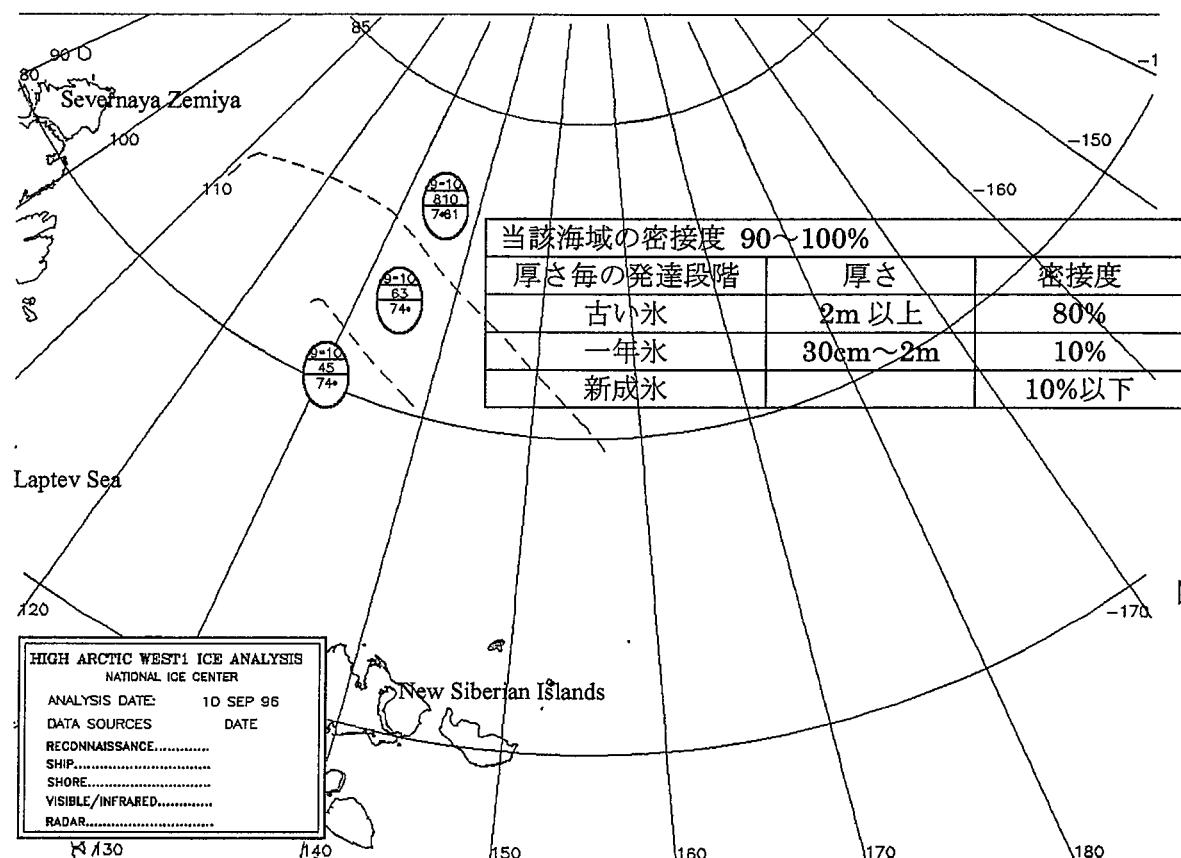


図 2-1

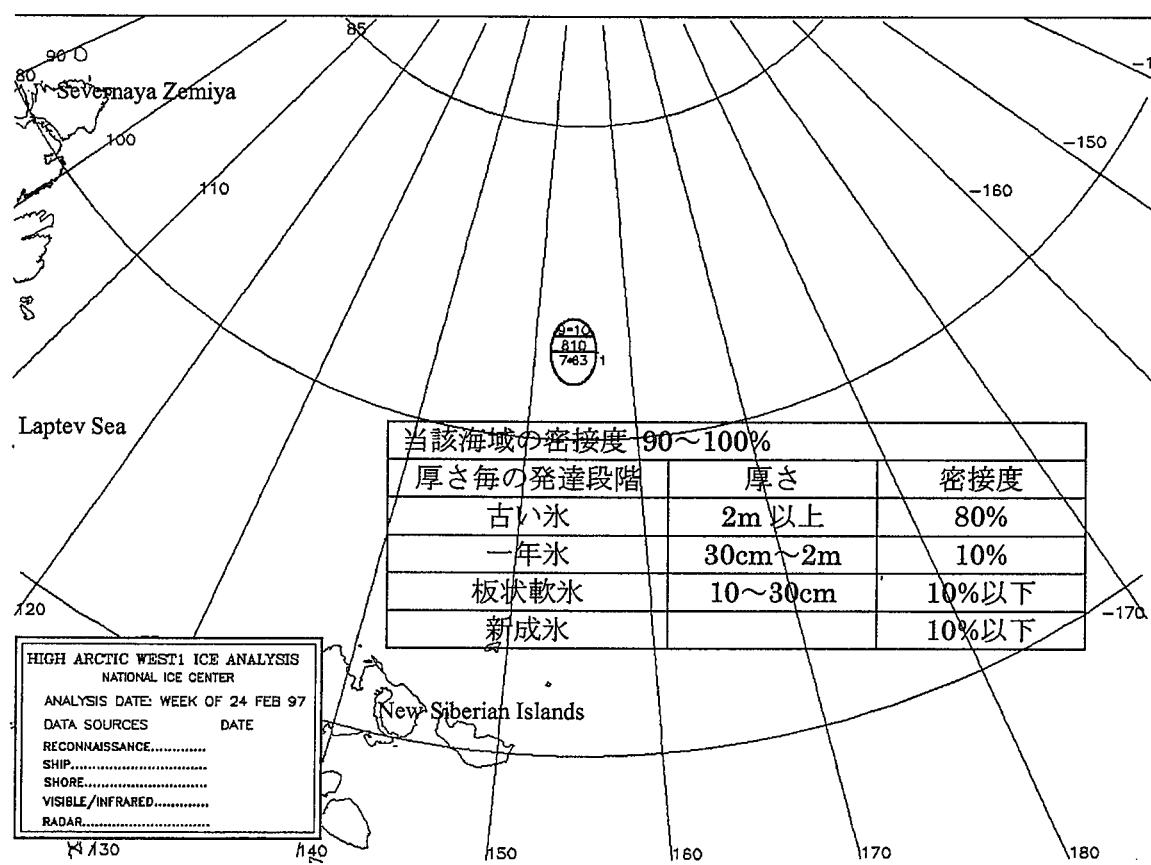


図 2-2

This is a blank page.

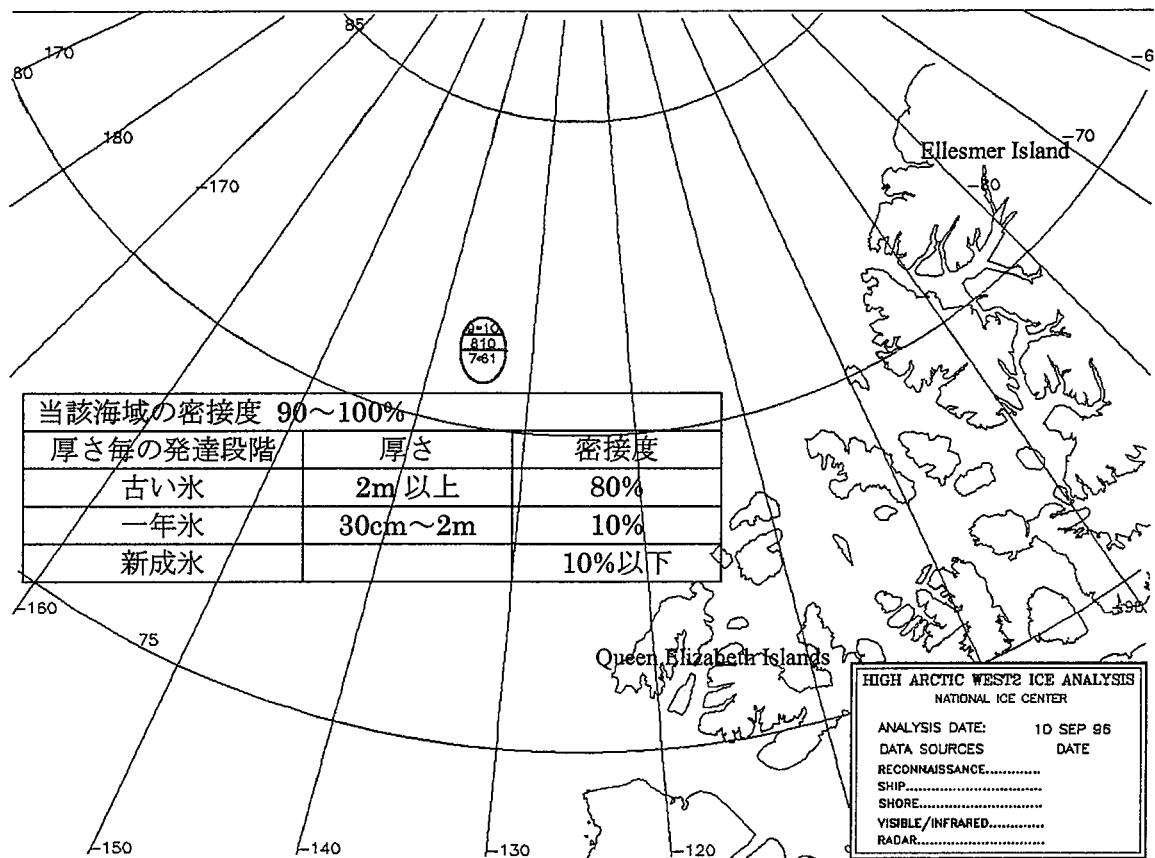


図 2-3

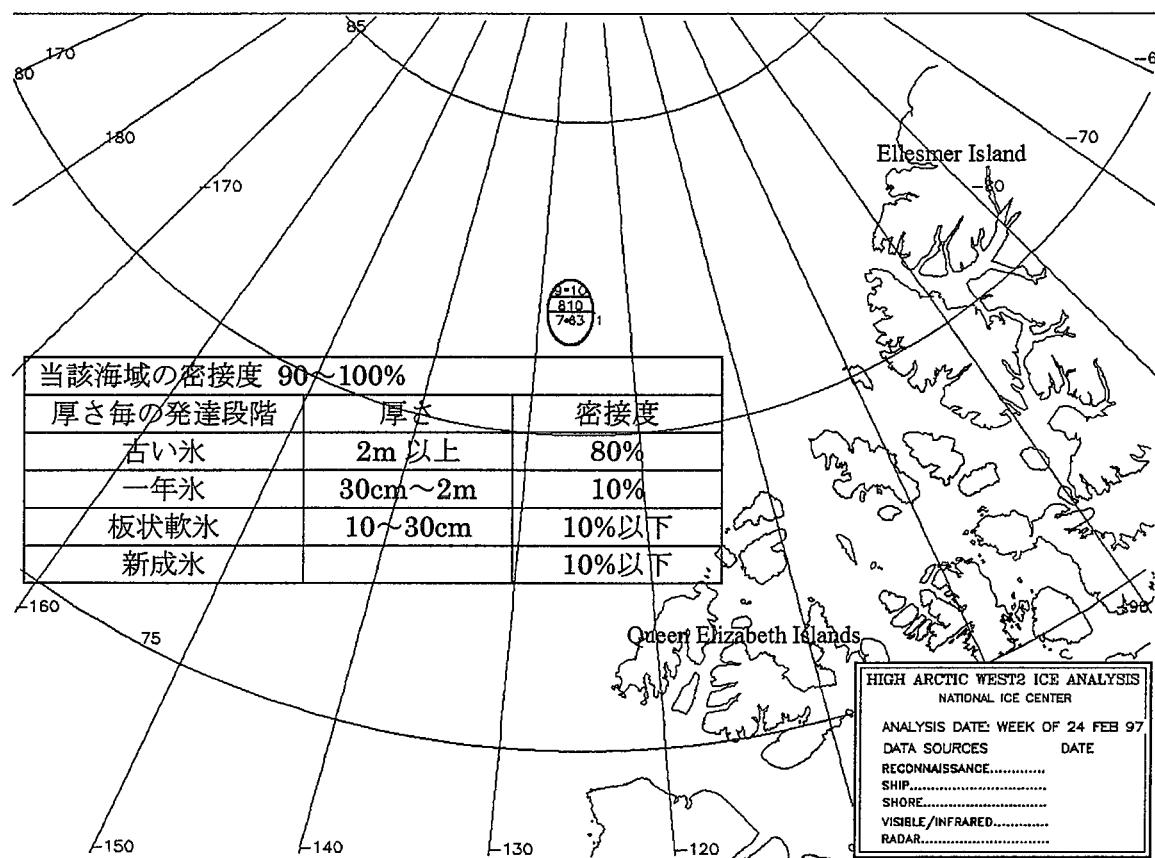


図 2-4

This is a blank page.

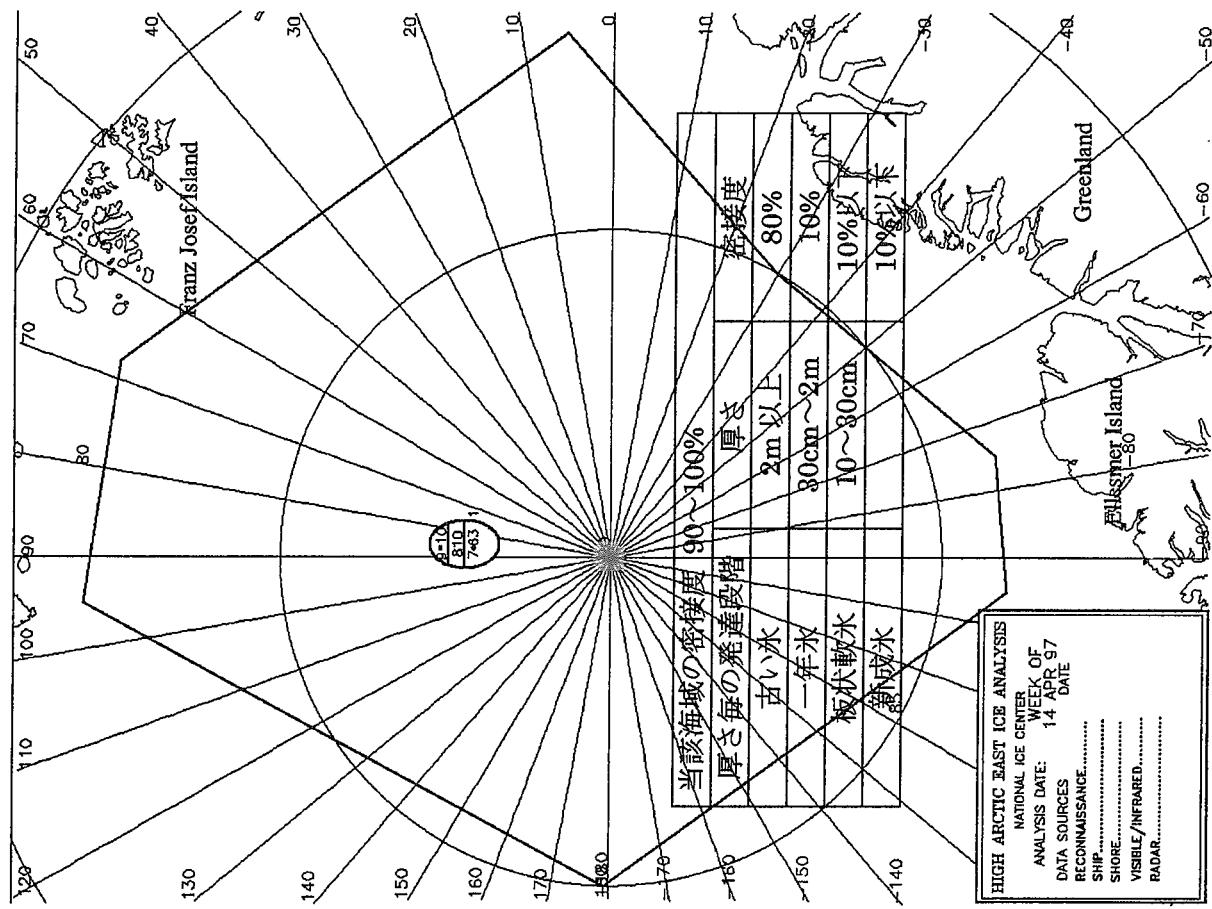


図 2-6

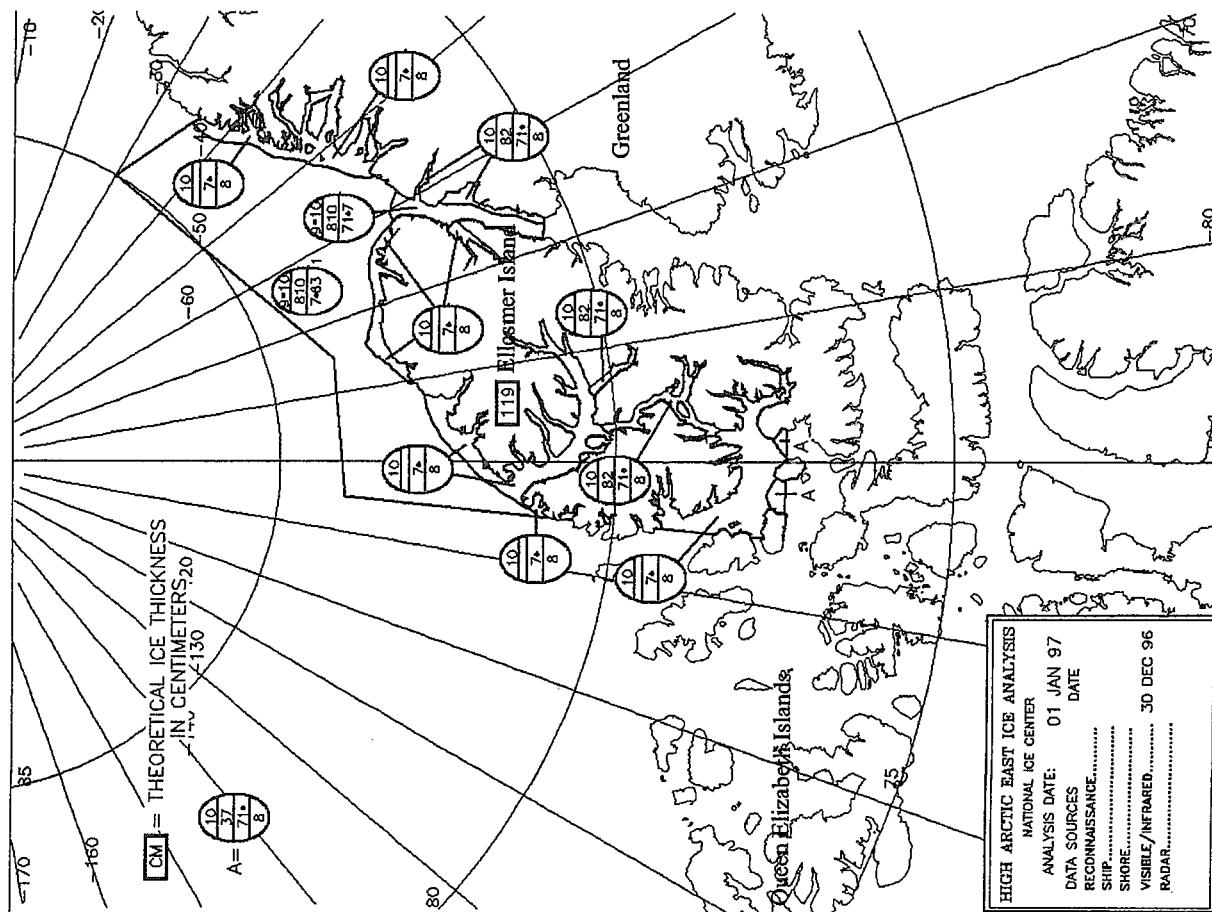


図 2-5

This is a blank page.

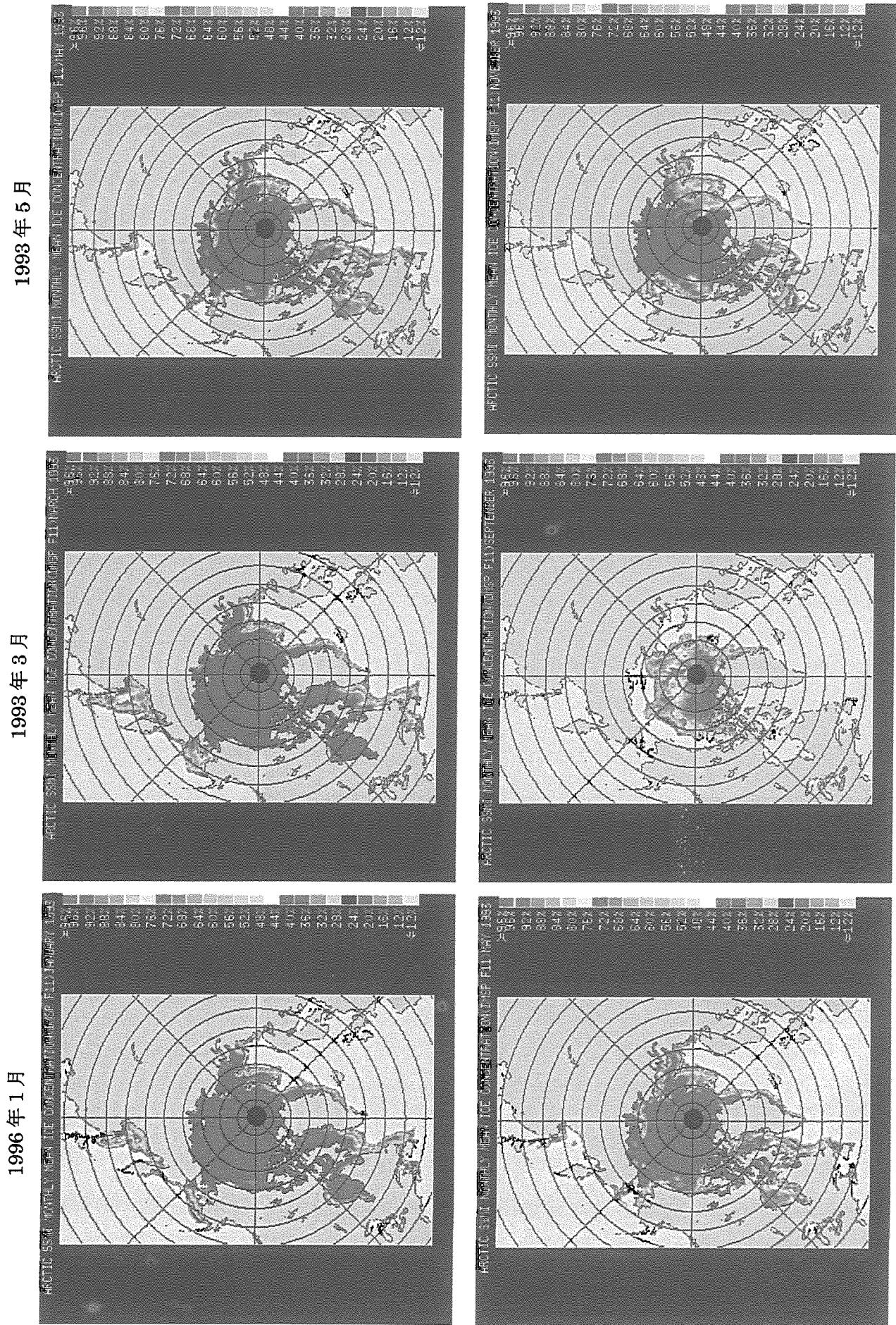
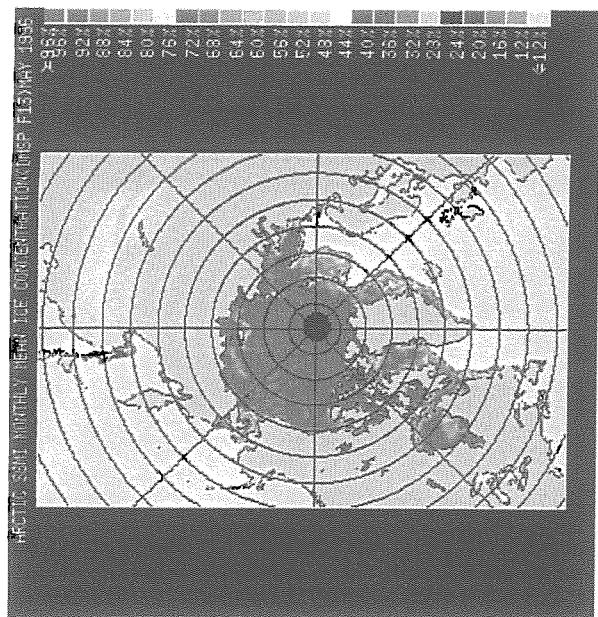


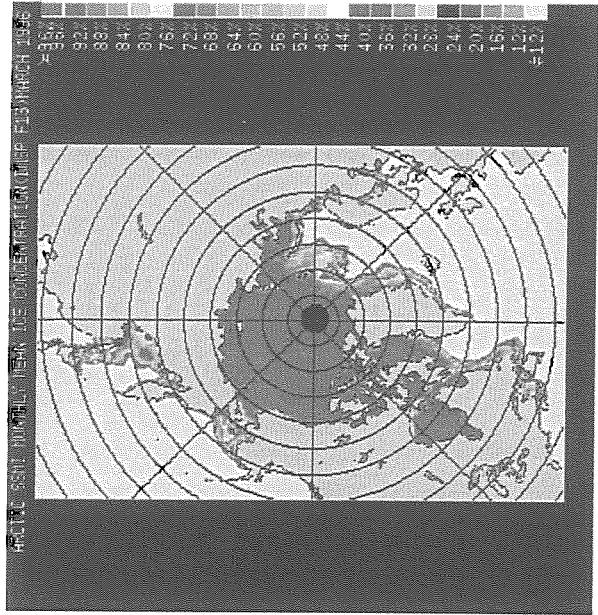
図3 National Snow and Ice Data Center (NSIDC)のデータ

This is a blank page.

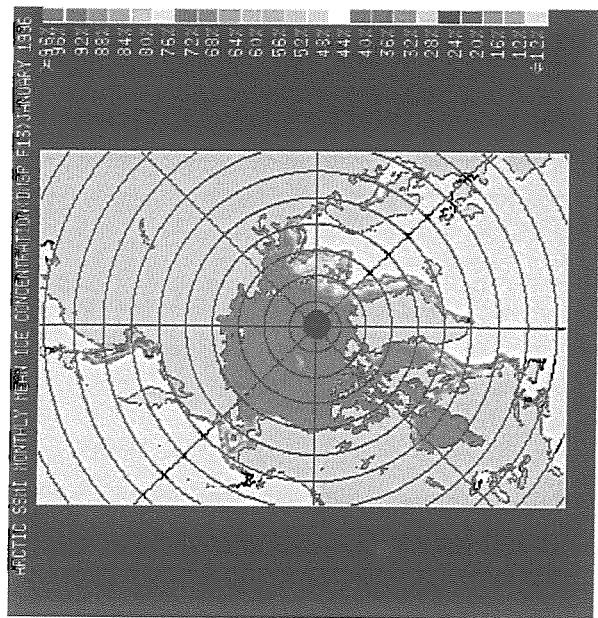
1996年5月



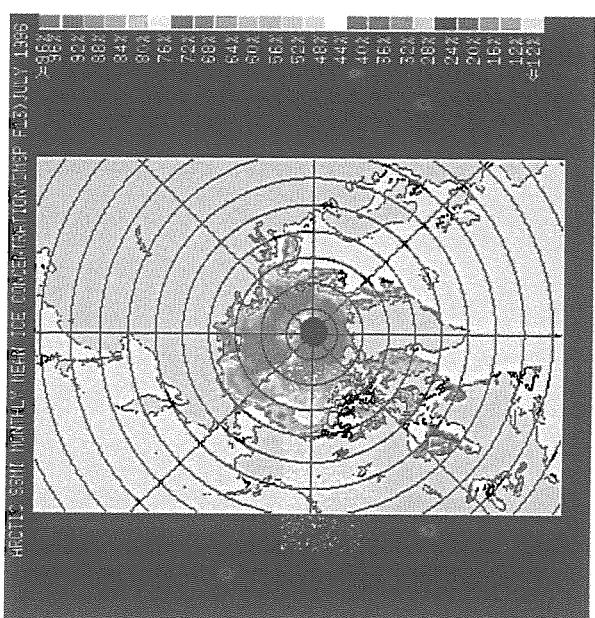
1996年3月



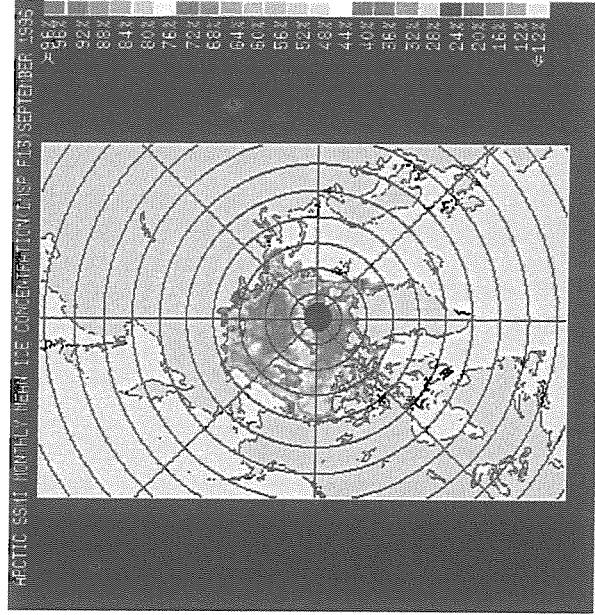
1996年1月



1996年7月



1996年9月



1996年11月

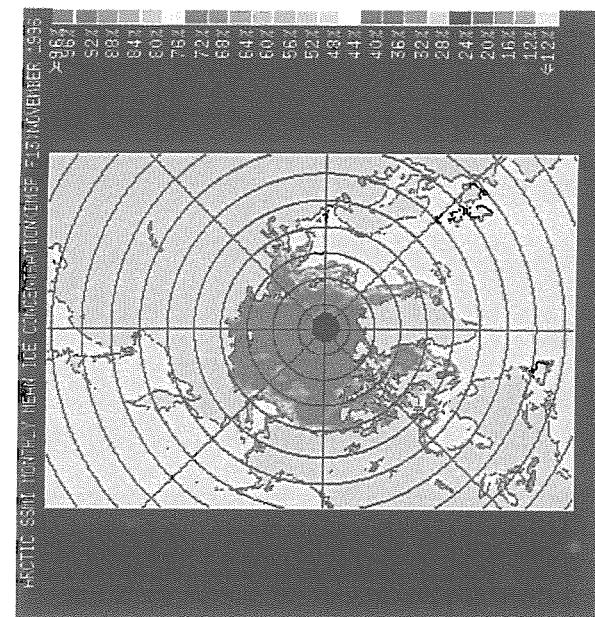


図3 National Snow and Ice Data Center (NSIDC)のデータ

This is a blank page.

# 潛水船特殊基準

昭和53年2月

運輸省船舶局

最大潜水深度及び浮上のための諸装置の効力等を考慮してさしつかえないと認められる場合にあっては、これを省略することができる。この場合にあっては意見を付して首席船舶検査官に伺出すること。

- (iv) 前号の耐圧救命装置は、最大とう載人員が移乗できるものであり、かつ、浮上したとき、この装置から出るためにさしつかえのない復原性を有するものであること。
- (v) 緊急浮上のために必要な装置に使用する電源及び回路は、独立の2系統とすること。
- (7) 浮上しているとき、潜水しようとするとき及び潜水しているとき、常に安定した航行ができるものであること。
- (8) ドロップキールを取りはずしたときを含めたすべての使用状態において、重心が浮心より低い位置にあること。

## 2. 操縦装置等

- (1) 水上（母船式潜水船であって水上を航行しないものを除く）及び水中において、有効な操縦ができるものであること。舵又はこれに相当する装置は、計画速力以下の低速力においても操縦できるものであること。
- (2) 確実に作動するものであり、かつ、容易に操作できるものであること。  
また、操縦のための計器は、安全な航行を妨げない範囲の誤差で作動するものであること。
- (3) 緊急停止をするための操作は、操船場所で行うことができるものであること。
- (4) 浮上しているとき、ハッチを閉めた状態で操縦するための水面上を監視できる構造又は装置を有するものであること。  
ただし、母船式潜水船であって水上を航行しないものにあってはこの限りでない。

## 3. 推進機関等

- (1) 推進機関等は、船舶機関規則によるの外、次に掲げる要件に適合するものであること。
- (2) 推進機関の出力は、操船上必要な速力を保持できるものであること。
- (3) 潜水中使用するものは、排氣を出さないものであること。
- (4) 60度までの動搖、縦30度及び横15度までの傾斜の状態において作動に支障のないものであること。

---

# 鋼船規則

下編 潛水船

規  
則

## 4章 操船装置等

## 4.1 操船装置等

## 4.1.1 一般

-1. 浮力調整装置、トリム調整装置及び操船装置（以下、本章において「操船装置等」という。）は、潜水船及び人命の総合的な安全を考慮したフェイルセイフの原則に基づいて、1の故障が他の故障へ拡大しないように設計されたものでなければならない。

-2. 操船装置等は、設置場所の環境条件及び計画使用条件のもとで有効に作動するものでなければならぬ。また、これらの装置は、潜水船が縦に30度若しくは横に15度傾斜している状態又は水上で横に60度動揺している状態においても支障なく作動するものであること。ただし、水上において使用しない装置については、動揺中の作動に対する考慮は必要としないが、少なくとも60度の動揺が与えられた後にも支障なく作動するものでなければならない。

-3. 潜水船には、操船装置等の作動を監視するための計器類及び表示装置を操縦場所の見やすい位置に設けなければならない。ただし、これらの装置の運転状態が操縦場所から直接監視できるように設備される場合にあっては、この限りでない。

## 4.1.2 浮力調整装置

## -1. 浮力タンク装置

潜水船には、水上において適当な乾舷を保持することができ、かつ、次に掲げる要件に適合する浮力タンク装置を備えなければならない。

(1) 次に掲げる構造及び機能を備えた浮力タンクを有すること。

(a) 水中において内外圧が均圧する構造であること。

(b) 適当に区画分けされた構造とし、その配置は 1.1.6に規定する性能を確保できるものであること。

(c) 区画分けされたタンク毎にタンク内の空気を閉塞又は排除するためのペント弁を有すること。

(d) 上昇中及び浮上状態において、過度に潜水船が傾斜しても浮力を維持するために必要な空気をタンク内に蓄えられるものであること。

(e) 潜水するときにはタンク内の空気を容易に排出できること。

(2) 浮力タンク内の水を排出するための高圧空気容器及び当該空気の供給管装置を有すること。

この場合、当該容器及び管装置の配置は、外部からの損傷に対して十分に保護されたものであること。

(3) 前(2)の高圧空気の圧力計は、耐圧殻内の操縦場所に設けること。

(4) 浮力タンクの注水及び排水に用いられる弁類は、潜水船の操縦場所において開閉操作ができるものであること。

## -2. 重量調整タンク装置

潜水船には、水中において重量を調整することができ、かつ、次に掲げる要件に適合する重量調整タンク装置を備えなければならない。

(1) 耐圧構造の重量調整タンクを有すること。

(2) 重量調整タンクの注水及び排水を行うための注排水ポンプを設けたものであること。

(3) 重量調整タンク内の水量は、潜水船の操縦場所において監視できるものであること。

## -3. ドロップウェイト

(1) 潜水船には、投棄することにより潜水船を浮上させることができるドロップウェイトを備えなければならない。なお、重量調整タンク及びトリム調整タンクの排水により浮上するための浮力を得る潜水船にあっては、ドロップウェイトの重量は次に掲げるいずれか大きいほうの重量以上であること。

(a) すべての重量調整タンク及びトリム調整タンクが計画水量から満水となった場合の重量。ただし、高圧空気によって重量調整タンクの排水が行える構造を有する潜水船にあっては、当該重量の1/2の重量とすることができる。

(b) 浸水するおそれのある最大の耐圧容器又は高圧ガス容器が満水となった場合の重量（内部に収容物がある場合にはその体積を差し引いたものとして差し支えない。）

(2) ドロップウェイトは、最大潜水分度において潜水船の内部から確実な2系統の手段により容易に投棄することができるものであること。ただし、本会が適当と認める他の浮上手段を有する場合には、1系統とすることができる。

## 4.1.3 トリム調整装置

潜水船には、次に掲げる規定を満足するトリム調整装置を備えなければならない。ただし、本会が適当と認める場合には、4.1.2-2に掲げる重量調整タンク装置と兼用するか、又は、他の適当な方式による調整装置とすることができる。

(1) 前後にトリムタンクを有すること。

(2) トリム調整用ポンプを設けて、タンク間の流体の移動によりトリムを調整するものであること。

## ヒービング加速度の算出方法

### 1.1 記号

- $A_s$  : 船体の運動振幅(m)
- $A_0$  : 波振幅 (m)
- T : 波周期 (秒)
- $\alpha_{\max}$  : ヒービング加速度 (g)
- $\lambda$  : 波長 (m)
- L : 船長 (m)
- H : 波高 (m)
- Z : 船が受ける上下方向運動振幅 (m)
- $\zeta_a$  : 波振幅 (m)

### 1.2 ヒービング加速度

海中航行観測船が図1に示すような波を受けたと仮定した場合は、以下のようなヒービング加速度を受ける。

$$\begin{aligned}\alpha_{\max} &= y'' = A_0 \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \text{ (m/s}^2\text{)} \\ &= \frac{A_0}{9.8} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \text{ (g)}\end{aligned}$$

4.1(1)節では、 $A_0 \approx 0.5$  (m)、 $T \approx 5$  (秒)の場合にヒービング加速度が最大となるので、上式に代入すると、

$$\alpha_{\max} = 0.08 \text{ (g)}$$

が得られる。

4.1(2)節では、 $\lambda/L = 0.8$  の場合にヒービング加速度が最大となる。ここで、海中観測船の船長(L)は  $L = 38$  (m)である。これより

$$\lambda = 30.4 \text{ (m)}$$

が得られる。

また、また波の周期と波長の関係式  $T \approx 0.80 \times \sqrt{\lambda}$  より

$$T \approx 4.41 \text{ (秒)}$$

が得られる。一方、大洋波の(波高(H)/波長( $\lambda$ ))には以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned}2A_0/\lambda &= 1/40 \quad (\text{一般の大西洋波の場合}) \\ &= 1/20 \quad (\text{荒い大洋波の場合})\end{aligned}$$

一般の大西洋波の場合を想定すると、

$$A_0 = 0.38 \text{ (m)}$$

が得られる。ここで、 $Z/\zeta = 1.7$  より、船が実際に受けるヒーピングの振幅は

$$A_S = 0.38 \times 1.7 = 0.65 \text{ (m)}$$

が得られる。よって、 $A_S=0.65 \text{ (m)}$ 、 $T=4.41 \text{ (秒)}$ を下式に代入すると、

$$\begin{aligned}\alpha_{\max} &= y'' = A_S \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \text{ (m/s}^2\text{)} \\ &= \frac{A_S}{9.8} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \text{ (g)}\end{aligned}$$

$$\alpha_{\max} = 0.13 \text{ (g)}$$

が得られる。

今回得られたヒーピング加速度は  $\alpha_{\max}=0.08$  or  $0.13$  であるが、解析では余裕を持たせて  $0.2g$  という値を用いた。

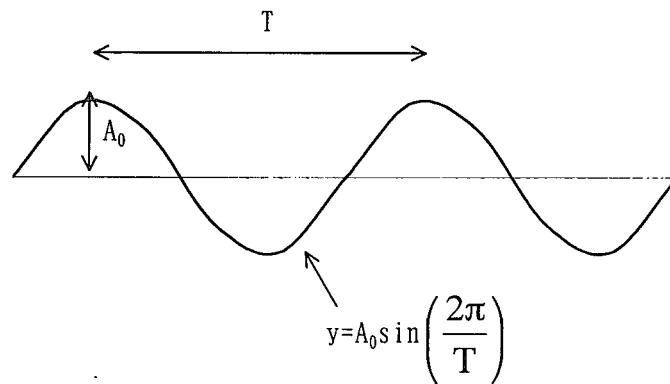


図 1

特別寄稿

# 潜水艦救難



米田 憲弘

株新星興業 横須賀営業所長、元潜水艦救難母艦AS「ちよだ」艦長、元海上自衛隊横須賀潜水艦基地隊司令

## はじめに

先の北極圏バレンツ海セベロモスク沖におけるロシア北方艦隊演習中の原子力ミサイル潜水艦SSGN「クルスク」の遭難は、108mと比較的浅い海域での沈没事故でありながら、潜水艦の損傷状況、および気象海象の悪影響により救出作業は難航した。ロシア海軍は、空母、巡洋艦など約15隻による捜索、小型潜水艇4隻およびサルベージ・救難艦による救出作業を試みたが失敗、英國およびノルウェーに救助支援要請を実施し、3カ国の合同救出作業にもかかわらず、痛ましい結果となった。偶然にもこの時期、潜水艦救難母艦AS「ちよだ」は10月2日から10月14日の間に実施される西太平洋潜水艦救難訓練(Pacific Reach 2000)に参加のため、シンガポールに向かう月15日横須賀を出港した。

## 潜水艦事故と救難

### 潜水艦救難の変遷

1900年を前後して各國海軍は相次いで潜水艦の導入を図った。1904年開戦の日露戦争において、帝国海軍は旅順港封鎖作戦における主力戦艦「初瀬」「八

島」の喪失をロシア海軍潜水艇からの襲撃によるものと判断し、同年米国からホランド型5隻を購入するとともに、ホllandの設計図を基に、国内においても2隻を建造した。この潜水艇7隻のうちの1隻が、佐久間艇長指揮する第6潜水艇であり、1910年の日本における最初の潜水艦事故となった。

帝國海軍はその後英國、フランス、ドイツの設計指導を得て、潜水艦建造技術は著しく向上し、潜水艦戦力は質量とともに強大化したが、第2次大戦までの平時における潜水艦遭難事故は、下記2例のみである。

1923年に第70潜水艦が淡路島沖の海面で潜航公試中に沈没し、全員死亡の事故があった。翌1924年の演習中に、佐世保港外において第43潜水艦が巡洋艦「龍田」と衝突沈没した。浅海面であり、遭難直後に生存者の確認ができたにもかかわらず、救出は不可能であった。

海上自衛隊における主な潜水艦事故は、停泊時ににおける配電盤火災、浅瀬への乗り上げ、釣り舟との衝突事故があるが、潜水艦救難に至っていない。

米海軍は1900年にホlland艇を正式に採用したが、1915年「F-4」の沈没事故以来、十数年の間に、潜水艇同士の衝突、試験潜航中における浸水、港内で整備中に浸水、陸岸に近い海面での衝突などの事故

が多発し、8隻を喪失した。

当時は、各國ともサルベージによる潜水艦救難が唯一の手段であり、潜水艦乗員を救出した実績もあったが、サルベージ作業が気象海象の影響に左右され、また多大の時間を要するため、有効な潜水艦救難について真剣に取り組まざるを得ない状況であった。

その後米海軍は、「マキャン・レスキューチャンバー」による救出方式を採用し、潜水艦救難艦ASR「ファルコン」は、1939年ニューハンプシャー沖で試験潜航中に浸水沈没したSS192「スクエラス」の乗員を水深75mから救出することができた。

米海軍はレスキューチャンバー（SRC）装備の潜水艦救難艦ASRを数隻建造し、1973年に深海救難艇（DSRV）およびSRCを搭載した双胴の大型潜水艦救難艦ASR「ビジョン」「オータラン」の2隻を揃って就役させたが、現在は、主として潜水艦上にDSRVを搭載したマザーサブ（MOSUB）による救難方式を採用している。

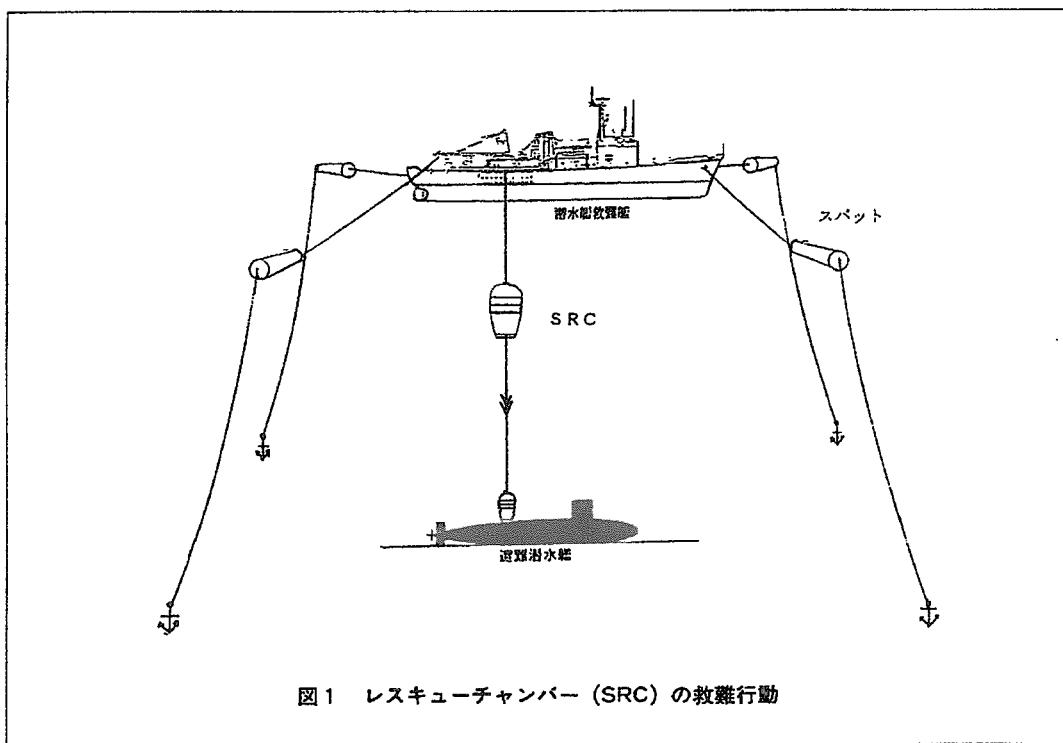
1985年になって、海上自衛隊もAS「ちよだ」の就役によりDSRVを保有することになった。

#### SRCによる救難方式

海上自衛隊における、初代潜水艦救難艦「ちはや」および平成11年度に除籍された潜水艦救難艦ASR「ふしみ」の潜水艦救難方式は、米海軍潜水艦救難艦ASRと同じSRCによるものであった。

救難艦搭載のSRCは、4点係留装置により遭難潜水艦の直上に艦を係留し、高張力鋼を使用した半球の耐圧構造からなるSRCを遭難潜水艦から位置表示のため浮上させた大型の救難ブイの救難ワイヤーに取り付け、SRC装備のエアモーターを操作して、潜水艦の脱出筒ハッチに密着し、潜水艦乗員がSRCに移乗後水面まで上昇する。一回に8人の救出が可能であり、遭難潜水艦と救難艦との間を往復する方式である（図1）。

しかし、SRCによる救出作業は、救難艦が4点係留を行い、常時遭難潜水艦の直上に位置を保持する必要がある。4点係留の可能深度に限度があり、風潮の影響や底質不良による走锚や艦の移動、または係留索切断等係留要具の損傷その他運用作業上気象



海象の影響を受けやすい方式である。救出作業中、救難艦、SRCおよび遭難潜水艦は、常時ワイヤーを介して接続されており、救出作業が実施できる条件も、遭難潜水艦が救難ブイおよび救難ワイヤーを放していること、遭難潜水艦の脱出筒頂板の傾斜が30度以内であること、多点係留ができる状況であることなどの制約がある。

米海軍、フランス海軍は、現在もSRCを保持している。

### 海上自衛隊の潜水艦救難態勢

#### 救難態勢

潜水艦の生命は、その隠密性にあり、単独で長期間の作戦が可能である。しかし、他の兵種にない利点を有する反面、特有の弱点を有している。特に船体構造上、水中では予備浮力が少ないため防御力が弱く、また潜水艦からの送信は、隠密性を自ら放棄する結果となり、その所在の確認は極めて困難である。

このため、潜水艦は、設定された潜水艦行動圏内を進出予定にしたがって行動し、規定の時間間隔以内に確認のための報告を実施している。上級司令部は、常時行動中の潜水艦の位置を把握し、潜水艦の

安全について疑わしい場合には、直ちに救難態勢に移行する手段がとられている。救難の段階には、不確実の段階、警戒の段階、遭難の段階、救出の段階とあり、各段階毎に必用な処置がとられる。

潜水艦の遭難発生を想定した指揮・通信訓練として、海上自衛隊全部隊による潜水艦救難通信図演、および実際の潜水艦を海底に沈没させて潜水艦乗員を救出する実潜水艦救難訓練が定期的に実施されている。

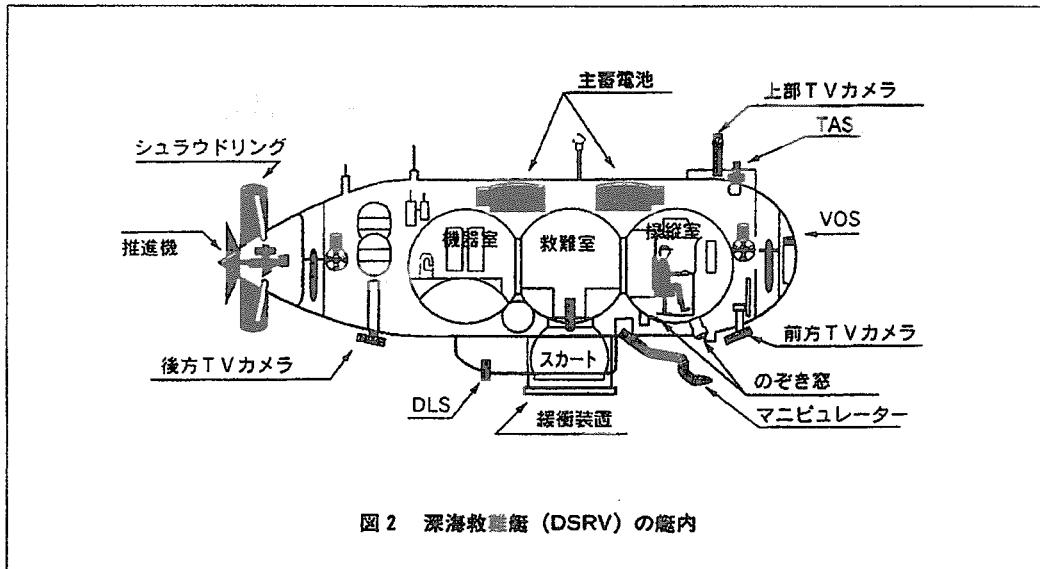
潜水艦建造後の水中公試、定期および年次検査工事後の確認運転においては、救難艦が警戒のため常時潜航海面において行動をともにしている。

#### 潜水艦救難（母）艦

海上自衛隊は、潜水艦救難艦ASR「ちはや」を吳の第1潜水隊群に、潜水艦救難母艦AS「ちよだ」を横須賀の第2潜水隊群に配置し、潜水艦救難態勢をとっている。

##### (1) AS「ちよだ」

AS「ちよだ」は、初代の潜水艦救難艦「ちはや」の代替艦として、昭和60年3月に就役し、基準排水量は3,650t、速力17ktであり、潜水艦救難装置として深海救難艇（DSRV）1隻と深海潜水装置（DDS）および無人潜水装置（ROV）を搭載している。



初代ASR「ちはや」、およびASR「ふしみ」の救難装置であるSRCに代わり、DSRVを導入したことにより、深深度における救出が可能となり、救難艦の位置を遭難潜水艦の直上に係留する必要もなく、大幅な救難能力の向上を図ることが可能となった。

#### (2) ASR「ちはや」

平成11年度に除籍されたASR「ふしみ」の代替艦として、平成12年3月に就役したASR「ちはや」は、基準排水量5,450tと大型化し、海上作業の効率化が図られた。速力も21ktと向上し、救難用装備品の用法についても、機能強化が図られ救難能力の大幅な向上となった。救難用装備品の用法については、基本的にはAS「ちよだ」と同じである。

#### (3) AS (ASR) の訓練

AS (ASR) の乗員は潜水艦遭難の緊急事態が発生した場合には、速やかに事故現場に進出し、遭難潜水艦乗員救出のため、平素から十分な訓練と、救難用装備品を完備状態に維持すべく整備にあたり、救難即応態勢の維持に努めている。

DSRVの潜航訓練、飽和潜水訓練およびROVの操作訓練が計画実施されている。

横須賀戦術訓練装置運用隊の深海救難艇訓練装置(DSRVT)により、DSRV関係員の要員養成および練成訓練がなされている。

DDSの機構については米海軍から、飽和潜水法については英海軍から導入し、深海潜水訓練装置が久里浜にある潜水医学実験隊に設置されている。

潜水医学実験隊は、潜水医学に関する調査研究および試験、潜水医学および飽和潜水に関する教育訓練、乗員に対する潜水医学および飽和潜水に関する訓練指導、訓練に対する協力などが任務である。

#### (4) 深海救難艇 (DSRV) (図2)

##### 主要目

操縦士；2名

救出可能人員；12名（1回）

装備；水平・垂直スラスター各2基

自動操縦装置、前方水平ソーナー、前方

垂直ソーナー、下方ソーナー、テレビカ

メラ×5台、覗き窓×2カ所

主要寸法；12.4×3.2×4.3 (m)

重量；40ton

材質；球殻＝超高張力鋼、外殻＝チタン合金

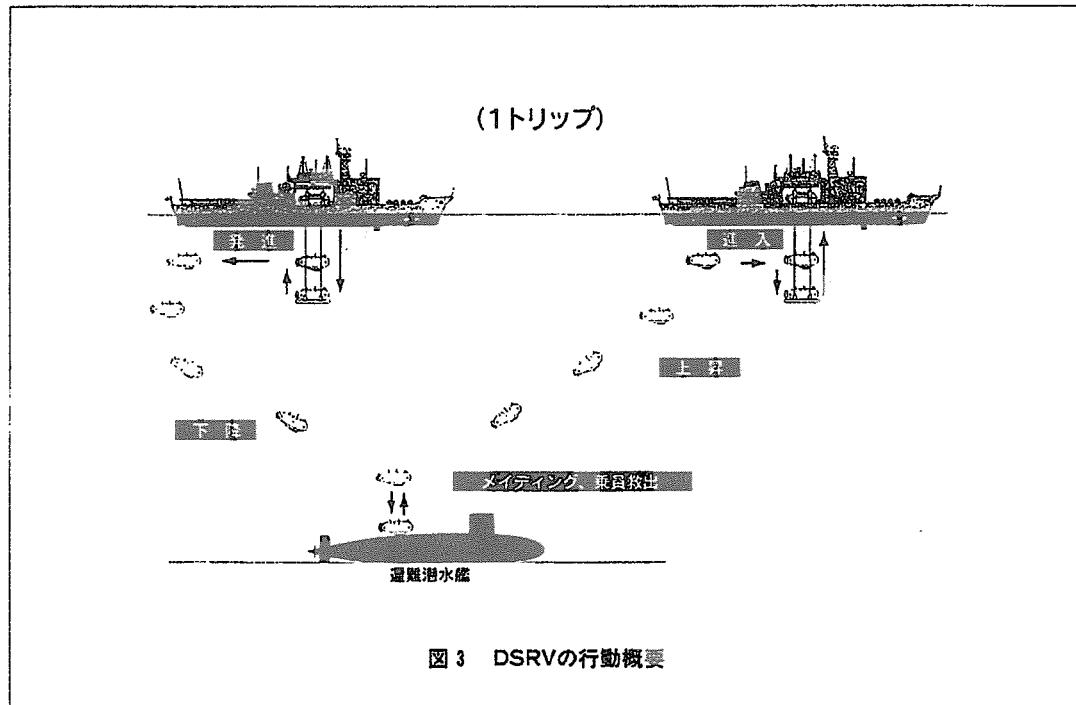
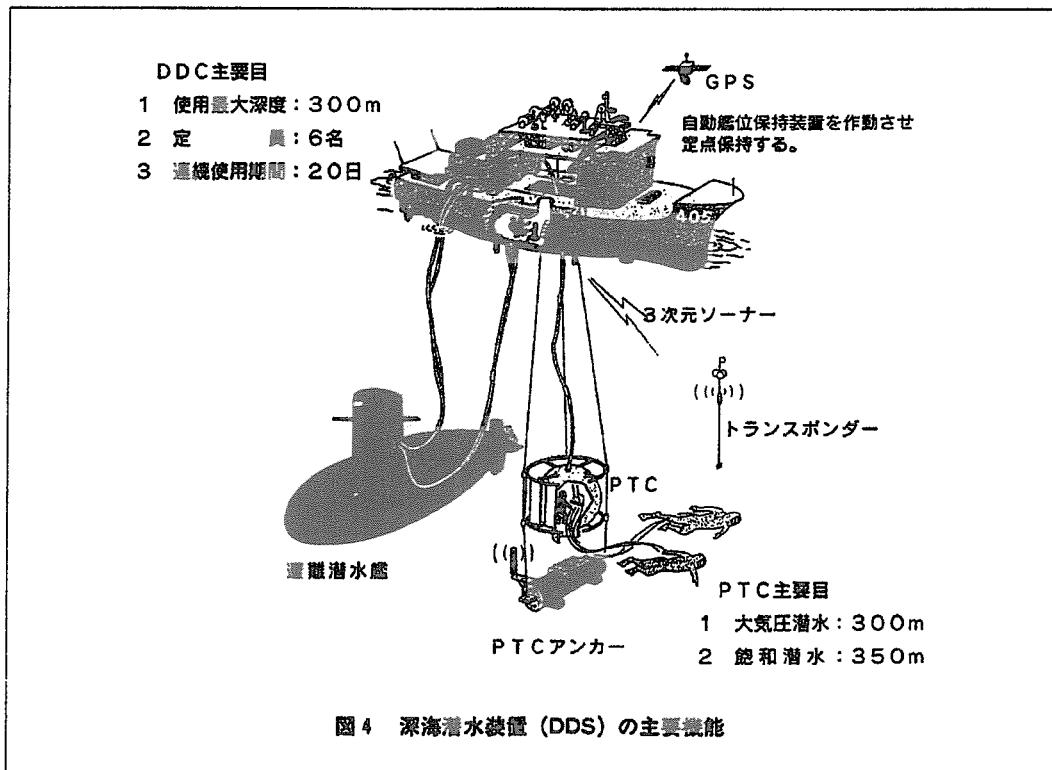


図3 DSRVの行動概要



- 水中速力: 4 Kt
- 機能**
- 自力航走し、遭難潜水艦の乗員を速やかに救出する。
- 観察撮影、捜索回収、海底環境調査などの救出作業以外の各種諸作業を行う。
- 構成**
- DSRVは、潜航中外圧を受ける耐圧殻と非水防の外殻から構成され、耐圧殻は、超高張力鋼を使用した球殻を3個結合した3球殻連結式で、それぞれの区画は、前部から操縦室、救難室および機器室になっており、各室間および救難室底部にハッチが取り付けられている。救難室下部には、半球殻のスカートがある。
- 外殻は、純チタン、チタン合金、強化プラスチック(FRP)およびアルミ合金を使用した立体骨組構造で、耐圧殻の支持、外殻装備品の取り付けおよび整流を目的としている。主推進器および艇をコントロールするスラスターは、主蓄電池を動力とし、関連装置として補給整備装置、海底観察、撮影、回収および海中調査を行うため、カメラ、ビデオテープレコーダー、計測用信号出力装置などを搭載可能である。
- (5) DSRVによる救出作業の概要
- 準備作業**
- 救難艇は、自艦または他の捜索艦艇などが確認した位置を基にして、遭難潜水艦の位置を局限とともに、海底調査を平行して実施する。
- 海底調査は、DSRVの運用法、自動艦位設定位置、トランスポンダーの投入計画を立案するために必要な資料を収集するとともに、水深、海底傾斜を測定して、海図との照合を行う。トランスポンダー航法を実施し、トランスポンダーを設置する。
- DSRV、揚降装置、DDSの準備を平行して行う。
- DSRVの行動**
- DSRVの救難行動は、発進、下降、メイティング、乗員救出、上昇、揚収の順序で実施される。救出作業の概要は図3のとおりである。

救難艦とDSRVとの連係は、通常、水中通話機による通信を行いつつ救出作業を実施する。

#### 救出条件等

DSRVによる救出作業が実施できる条件は、次のとおりである。

遭難潜水艦の脱出塔頂板の傾斜が45度以内であること。

遭難潜水艦の艦内気圧が絶対圧5気圧以下であること。

外力がDSRVの艇首方向から2Kt以下、または左右舷方向から1Kt以下であること。

風浪階級が3(ちはや4)以下であること。

#### (6) 深海潜水装置 (DDS)

##### 主要機能

図4のとおりである。

##### 機能

遭難潜水艦の乗員を救出するため、飽和潜水により深海での海中作業を行う。

絶対圧5気圧までの遭難潜水艦から救出した乗員を艦上減圧室に収容し、減圧をする。

遭難潜水艦の高圧空気管艦外送気装置および艦外救難空気管装置への送気を行う。

##### 構成

DDSは水中昇降室(PTC)、艦上減圧室(DDC)、主監視制御室(MCC)、生命維持装置(LSS)および支援装置から構成されている。

#### (7) 潜水作業

潜水艦遭難海面の状況が良く、潜水可能な水深の範囲であれば、必要に応じDSRVによる救出作業前に調査潜水と遭難潜水艦への補給作業を行う。

遭難潜水艦および周囲の状況などを調査し、ハッチ付近の状況、遭難潜水艦の状態を確認するとともに、障害物の除去を行う。

遭難潜水艦に対し補給作業を行う。サルベージ・エア・ホースを潜水艦の艦外空気管装置ホース総手金物に接続し送気する。また必要に応じ、貯水、流動食などを供給する。

救難艦からの高圧空気ホースを潜水艦の高圧空気管艦外送気装置口に接続し、高圧空気系縦通主管に送気する。

潜水艦スノーケル関係諸弁が開放されたままの状態の場合には、艦外から閉鎖する。

#### (8) 飽和潜水

飽和潜水は、潜水員が長期間高圧閉鎖環境下に居住し、必要な都度水中に出て作業を行うもので、潜水員の身体を深度圧で、環境ガス(ヘリウムと酸素)により飽和した状態で実施する潜水法のため、長時間、深い深度の潜水作業を行う場合に適する。

エクスカーション回数に制限がなく、無減圧潜水が可能であるため、潜水効率が良い。反面、長時間の減圧が必要であり、潜水員の身体的、生理的および心理的負担が大きい。

また潜水装置および支援装置が大がかりとなり、多数の支援要員を必要とする箇所もある。

潜水員が水中昇降室(PTC)からロックアウトし水中作業をする作業深度は、AS「ちよだ」は水深350m、ASR「ちはや」は水深450mまで可能である。

#### (9) 自動艦位保持装置 (DPS)

DSRV、PTCの運用中に、3DソーナーまたはGPSなどにより艦位を測定し、設定位置に対して艦を許容範囲内に占位するように、推進器およびスラスターを総合的に自動制御する。

#### 潜水艦の救難装置

##### (1) 救難用装備品

潜水艦の救難用装備品としては、艦外救難装置と艦内救難装置に大別され、艦外救難装置には、艦外救難空気管装置、高圧空気管艦外送気装置およびスノーケル関係諸弁艦外閉鎖装置がある。

##### 艦外救難空気管装置

各防水区画に1組ずつ装備され、艦外から呼吸用空気、飲料水および流動食を供給し、汚染空気、海水した海水を艦外に排除する。

##### 高圧空気管艦外送気装置

高圧空気蓄器に送気できる接続口が艦橋セール専用に装備され、艦外から高圧空気を送りし、メインバルストンタンクのブローを可能にし、艦内へのサービス空気として使用する。

##### スノーケル関係諸弁艦外閉鎖装置

上部構造物内に装備され、スノーケル関係諸弁を

上甲板から閉鎖することができる。

#### 艦内救難装置

艦内救難装置には、脱出筒、潜水艦救難ピンガー、潜水艦救難信号発生装置、応急用水中通話機、信号発射筒が装備されている。

脱出筒は、前後部の脱出区画に装備され、DSRVへの移乗および個人脱出用の区画として使用する。

#### (2) 空気清浄装置

艦内空気を清浄し、潜航時間の増大をはかるため、酸素放出装置、炭酸ガス吸収装置などが設けられている。これらの装置および高压空気を使用して、空気浄化を実施する。

#### (3) 避難潜水艦の措置

避難潜水艦は、信号弾、ラジオブイ、スロットブイなどの放出、ソナー、救難ピンガーの発進、水中電話、船体の打音、気泡、油紋などのあらゆる手段により避難を知らせる。

#### (4) 個人脱出

DSRVによる救出には、避難潜水艦の状況、水深および海上模様など四角の環境条件により制約があり、救難艦現場到着時間の遅れなどのため、救難艦による救出が不可能な場合、艦内空気の汚染が著しく、空気清浄ができない場合および救出される見込みが全くない場合には、乗員自らが直接艦外に脱出し海面に上昇する。

1851年米海軍避難潜水艦から、個人脱出に成功したのが初めてである。

潜水艦個人脱出訓練は、江田島の第1術科学校にある訓練水槽において、潜水艦課程学生および潜水艦乗員に対して実施されている。

#### フード上昇法

スタンキーフード（フード付救命胴衣）による上昇法で、救命胴衣は脱出区画にそれぞれ乗員数格納されている。

スタンキーフードは、顔面が海水に濡れることがないため心理的に安心感があり、上昇中フード内の空気は深度圧に維持され、呼吸が可能である。

個人脱出訓練の経験を積むことにより、深度60mからは危険なく脱出が可能である。

1988年8月にペルー海軍潜水艦「パコーチャ」が

日本漁船「第8共和丸」と衝突沈没し、水深52mから21人が脱出に成功した。

#### 浮力上昇法

スタンキーフードが使用できない場合、スタンキーフードのフードが破損した場合に、救命胴衣の浮力を上昇する方法である。

#### 自由上昇法

救命胴衣を装着することなく、脱出者自身の浮力を上昇する方法である。

### 諸外国の潜水艦救難態勢の現状

#### 救難装置

世界に展開する米海軍の救難態勢は、DSRVを救出現場に搬送し、MOSUBまたはDSRV支援船による救出を実施する。DSRVの救出人員は1回に24人である。また、各地にフライアウエイSRCを配備し、曳航・サルベージを主目的にする救難艦ATS、ARSに搬送し、救難可能な態勢を保持しているが、可搬式遠隔操縦の深海救難装置REMORAに移行される予定である。

英国海軍は、米海軍と潜水艦救難協定により、米海軍DSRVに依存し、そのためのMOSUBを保有しているが、自国でも潜航深度475m、救出人員10人、傾斜角60度まで可能な救難潜水艇LR 5を保有している。LR 5の運航管理を北海油田関係会社に委託している。韓国海軍潜水艦救難艦はLR 5を搭載している。

オーストラリア海軍は、深度547m、救出人員9人、最大傾斜角60度まで可能なREMORAを保有している。

ドイツ海軍潜水艦は、潜水艦上構内に収容人員40人の脱出球を装備している。

一部の東南アジア海軍では、脱出球を装備した潜水艦を保有している。

フランス海軍は米海軍DSRV用MOSUB、SRCおよび潜水艇を保持し、イタリア、スウェーデンなどの潜水艦保有国は、それぞれ深海救難艇による救難態勢を整えている。

#### 個人脱出

潜水艦行動海域の比較的浅いヨーロッパ諸国にお

いては、英國海軍とNATO加盟の一部海軍は個人脱出を重視し、全身型の耐寒耐水潜水艦個人脱出用救命胴衣イマージョン・スーツ(SEIS)を採用している。

海上自衛隊現用のフード付救命胴衣スタンキーフードは、脱出に成功しても直接海水および寒冷などに身体をさらすことになり残存性が低いが、イマージョン・スーツは全身を包むために、特に寒冷海面における残存性が高く、零下2度の海水温度でも5時間以上の生存が可能である。また、安全に脱出可能な深度は、スタンキーフードの60mに対し3倍の180mと深い。

### おわりに

日本は、深海域に囲まれており、潜水艦遭難の場合、救出作業の難航が予想される。

しかし、戦時はともかくとして、平時における過

去の潜水艦遭難事故は、船舶交通の輻輳する陸岸に近い海面での衝突、試験潜航中の浸水あるいは就役直後の練度不足によるものが多く、遭難潜水艦の救出深度も海上自衛隊の現有救難装備で十分救出可能な大陸棚である場合が大半である。

日本周辺海域は、米国、ロシア、中国、台湾、韓国、北朝鮮などの潜水艦が多数活動し、潜水艦を保有するアジア諸国も増加の傾向にある。日本近海においてロシア原潜のような事故が起きないとは限らない。

南シナ海での西太平洋潜水艦救難訓練に参加の日本、米国、シンガポール、韓国に加え、オブザーバーとしてカナダ、ロシア、中国、オーストラリア、チリ、インドネシア、英国の参加は、各国海軍の潜水艦救難に対する意識の高さを示すものであり、日本近海での潜水艦遭難の事態には、多国間協力による潜水艦救難が不可欠となる可能性が予想される。

PAPER NO. 5.

THE PRESSURE-TIGHT BULKHEAD IN THE SUBMARINE

by F. Abels and E. Niessen, Ingenieurkontor, Lübeck, and  
B.E. Niessen of 'BWB' (Bundesamt für Wehrtechnik und  
Beschaffung), (Federal Republic of Germany)

Paper presented at the Symposium on  
**NAVAL SUBMARINES**  
MAY 17 18 19 20 1983 LONDON

## THE PRESSURE-TIGHT BULKHEAD IN THE SUBMARINE

by F. ABELS, Lübeck, and E. NIESSEN, Koblenz\*)

1 INTRODUCTION

Safety and rescue are important factors in the development objectives and design principles for submarines (1). In this connection, design and operation of a submarine are strongly influenced by the arrangement of pressure-tight transverse bulkheads within the pressure hull. On surface vessels, the transverse bulkheads are of decisive influence on the overall strength as well as on buoyancy and stability in damaged condition. However, submarines are not provided with bulkheads in every case. This is feasible as, on one hand, the pressure hull may be designed so that its pressure strength is obtained only by using normal transverse frames (2) and, on the other hand, it is not possible to find an appropriate arrangement of bulkheads for modern conventional submarines, which offers the same safety level concerning buoyancy and damaged stability as that achieved for surface vessels.

Now, which are the conclusive reasons for or against the arrangement of bulkheads on submarines with a view to safety and rescue and to the overall design? In the following, it is tried to contribute to this topic.

Modern submarines are fitted either with a pressure-tight bulkhead or without anyone as well. Small coastal submarines usually do not have a bulkhead. Larger ocean-going submarines may be arranged with a pressure-tight transverse division which, however, is not found in all cases, as the transition is fluid. The arrangement of a bulkhead results from the safety and rescue concept in connection with the mission area intended for the submarines. Enquiries into pressure-tight subdivision are already raised very early at the time of preliminary designs, or decision is even taken in the technical requirements. All aspects relating to an eventual arrangement of a bulkhead should carefully be observed in the overall design of a submarine. There are advantages and disadvantages as well. The decision in favour of or against a bulkhead should be taken with due regard to all demands on the submarine.

\*) The views expressed herein are the opinions of the authors and not necessarily those of the Federal German Office for Military Technology and Procurement (BWB) or German MoD (MBVg)

In the following, the pressure-tight bulkhead on conventionally driven submarines will be dealt with, based on the safety and rescue concept of the German Federal Navy and of those Navies who have submarines developed and built in the Federal Republic of Germany and/or are building them in their own countries. In this connection, more than a hundred submarines for 16 different countries are concerned, having a displacement between 500 tons and 2,000 tons (3, 4).

Safety and rescue considerations are applicable to any underwater vehicles, military ones and commercial ones as well. For this reason, they may be dealt with as "unclassified" matter if same applicable security regulations are observed, including the submarine tanker, which nowadays, is under repeated discussion.

2 SAFETY AND RESCUE

As submarine safety and rescue are directly influenced by the arrangement of a pressure-tight bulkhead, these should be looked into in brief in the first instance. Both the subjects - safety and rescue as well - are allied to each other to a certain extent and are just interdependent. Therefore, they are dealt with in common.

Safety means PREVENTION of accidents in case of impending danger, whereas rescue is necessary ON an accident having occurred. It may be derived that safety, as the more extensive feature, should have preference over rescue, i.e. by other words that all measures increasing safety should be given preference over life-saving means. A higher degree of safety is for the benefit of the submarine in all operating conditions and in all sea areas. However, there is no chance of a rescue in case of submarine accidents (in the course of which the submarine sinks to the sea bed) in sea regions having water depths larger than the collapse depth of the submarine. Nevertheless, stress should be laid upon further development of rescue appliances, in which particularly those Navies operating in shallow waters to a considerable extent, should be interested. A fair compromise is to be concluded between the expenditure for safety and rescue and that for the combat capability of the submarines.

### 2.1 Safety

Although the submarine offers three operating conditions (i.e. cruises in submerged condition, on the surface, and at snorkel depth), it should not be concluded that she is more endangered than a surface vessel. A submarine being well constructed is protected by the depth of ocean where she is cruising for most of the time; there is no influence of seaway, and the danger of collision is small.

The careful progresses made in the safety systems since practically 100 years, have finally resulted in the modern submarines that should be considered to be very safe. There is a great variety of means applied during design, construction, and operation, which contribute to the safety, the most important ones are indicated in brief, as follows:

- high pressure hull strength on operation diving depth with a safety factor of abt. 2 against collapse, which is of additional advantage in case of collisions on the surface and of grounding,
- high shock resistance of the pressure hull and of all systems being installed,
- double shutoffs for all pressure hull openings,
- arrangement of compensating and trim tanks facilitating static balancing measures,
- arrangement of main ballast tanks which - in case of danger - may be fully blown by means of gas generators or H.P. air within a short time,
- good dynamic behaviour and manoeuvrability,
- midship arrangement of bridge fin and hard-over position of the steering rudder result in the "squatting" behaviour in the turning circle which may serve as an emergency manoeuvre neutralizing sternplane jam,
- redundant systems and controls,
- extensive fire protection,
- considerable tests and trials during the construction period and during regular surveys in the commission period (pressure dock etc.).

### 2.2 Rescue

If none of the safety measures has been successful in causing the damaged submarine to surface, she will fall down onto the sea bottom, and rescue measures must be initiated. However, this is possible only if the depth of rescue is not greater than the collapse depth of pressure hull. Conditioned by the rescue depth, different rescue systems may be possible, which are shown in Fig. 1..

In case of a submarine, not only the kind of accident occurring, but also the depth of cruise at that time are important. This particularly concerns the accidents including a flooding casualty, such as collision, untight or torn-off outer pressure hull shut-

offs, as well as cracks in pressure hull due to shock loads.

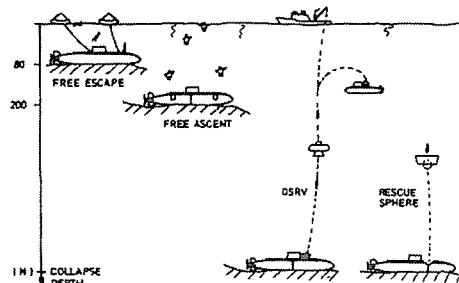
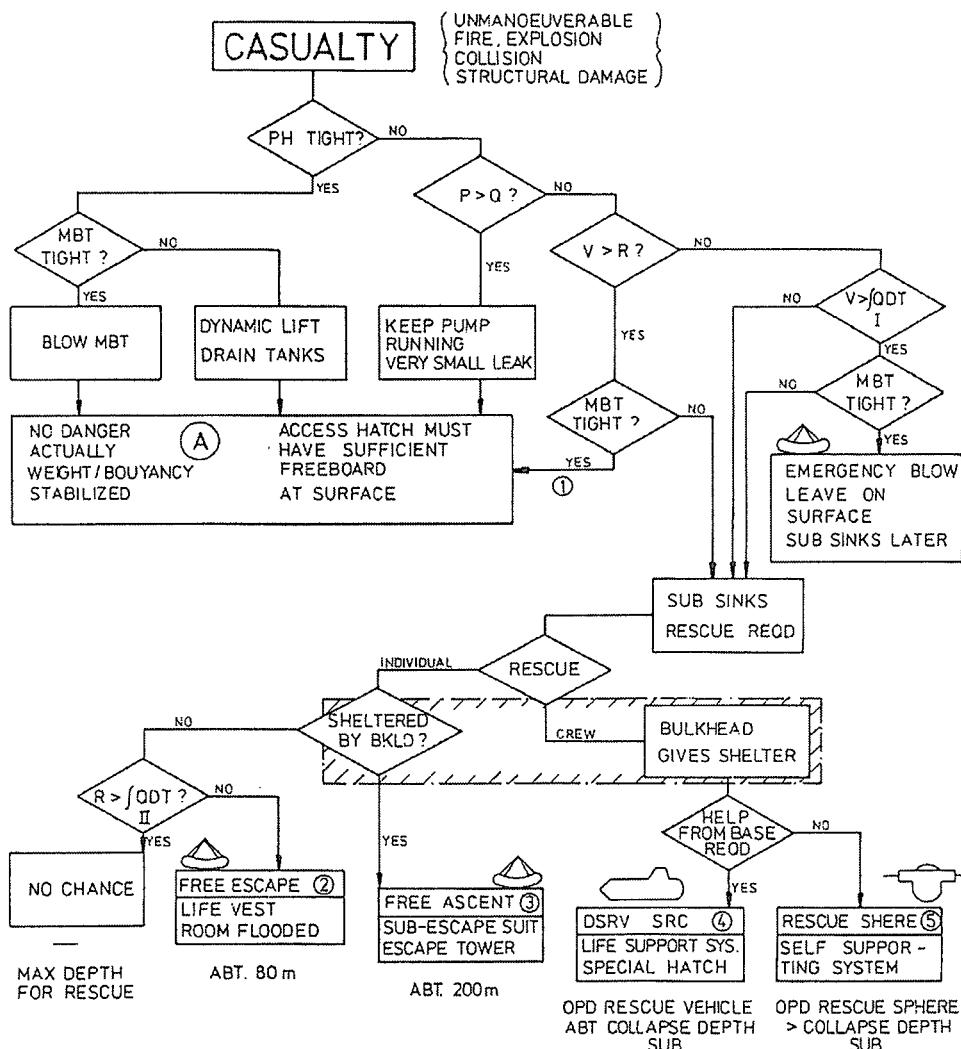


Fig. 1. Rescue systems

In connection with the pressure-tight bulkhead under consideration, the quantity of water entering and the ambient pressure are decisive for a valuation of danger to submarine and crew. The design figure of resistance to pressure to be chosen for the bulkhead should therefore be seen in close connection with the mission area of the submarine and the rescue concept for the crew. The systematics shown in Fig. 2 are intended to comment on these questions.

Condition ① comprises the possibilities during which any particular risk to the submarine will not arise after a damage. Surfacing will, at least, be possible to an extent that the bridge fin hatch will extend above the surface. During an intrush of water into the pressure hull, it will be decisive whether the pump capacity will be sufficient to reduce the quantity of water entering. If the pump capacity is not sufficient, the main ballast tank volume - according to condition ① - may be large enough and/or the spaces bounded by bulkheads may be small enough so that the volume of flooded space is smaller than the entire main ballast tank volume and, consequently, the floating condition of "lift being larger than weight" remains fulfilled. Because of the reserve of main ballast tank volume, floating means true floating on the surface, so that a pressure-resistance of 30 m W.G. seems to be sufficient unless depth and leak are so large that the surfacing time to a level of 30 m is longer than the time of flooding of the compartment by up to abt. 3/4 of its volume (5). The former submarines offered such a possibility. Such a large ballast tank capacity and such a narrow subdivision by bulkheads is not provided on the modern submarines.

Condition ② shows the system of "free escape". The crew rises to the surface without any life-saving means other than a life-jacket after the escape compartment was flooded until pressure equalization was reached, so that the hatch could be opened. The decisive



PH = Pressure hull  
 MBT = Main ballast tank  
 BLKO = Pressure tight bulkhead (one compartment tight)  
 SUB = Submarine  
 OPD = Operating depth  

 = Life Raft required

P = Pump capacity [ $m^3/s$ ]  
 Q = Quantity of water per second through leak  $Q = A\sqrt{2gh}$  [ $m^3/s$ ]  
 R = Room floodable by leak water [ $m^3$ ]  
 V = Volume of MBT [ $m^3$ ]  
 A = Effective area of leak [ $m^2$ ]  
 h = Depth of leak below surface [m]  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$   
 $\int Qdt$  = Quantity of water in SUB during period I, starting with leak, way to surface.  
 I ending with moment the last man left SUB  
 $\int Qdt$  = Quantity of water entering SUB during period II, starting with leak till pressure in SUB equals ambient pressure for opening access hatch.  
 II This period must be short enough for leaving subsequently the SUB and ascending to surface without harm from decompression sickness.

Fig. 2. Casualty and rescue

condition in this connection is that the flooding time for pressure hull or compartment and the periods for pressure equalization, opening of hatches, escape, and rise to the surface are shorter than the no-decompression time. No-decompression time means the period of time which (commencing with pressure rise and subsequent exposure to increased pressure and ending with drop of pressure to atmospheric level) may be endured by a man without any injury to the body. The admissible length of this period depends on the pressure head (e.g. about 30 minutes at 3 bars, about 5 minutes at 7 bars).

Subdivisions by bulkheads would provide small, quick-flooding compartments so that the abovementioned condition could be better fulfilled. These subdivisions for "free escape" were arranged in the former submarines. Influence on the no-decompression time may be effected by the breathing air mixture within small limits. But it should be stated, in general, that abt. 80 m are the limit so that the bulkheads need not withstand any larger pressure head for this system of rescue.

Condition ③ shows the system of "free ascent" requiring a rescue suit (e.g. SEIE MK 7) and an escape tower. This British system counting among the means of single rescue was successfully tested down to depths of 200 m (6). Consequently, the bulkhead should withstand such a pressure head.

The arrangement of a pressure-tight escape tower is also possible in submarines which are not provided with pressure-tight subdivision. In several submarines built in the Federal Republic of Germany for foreign navies, the pressure-tight access trunk in the bridge fin was arranged for free ascent. However, the pressure hull must remain intact for the escape by using this method.

Larger rescue depths are possible with collective rescue means only. Salvage of the crew by a DSRV (7) according to condition ④ may be effected out of depths equal to the collapse pressures of modern submarines. The escape compartment must withstand such a water pressure.

If rescue by means of the rescue sphere (1, 3, 8, 9) is envisaged according to condition ⑤, the maximum depth for its use is the collapse depth of the submarine and is adapted to the higher pressure in case of the collapse depth being increased. The rescue sphere is similar to a non-propelled life-boat for the entire crew, carried on the submarine. To a certain extent, it may be compared with a catapult seat in an airplane - with the reservation, however, that release from the sinking submarine is not possible.

The escape compartment shall be provided with a life support system which is appropri-

ate to the assumed period until rescue. In the case of the DSRV, a period of stay in the submarine of 4 to 6 days between the moments of accident and salvage is taken as a basis. In the other cases, the period until escape out of the submarine is by far shorter. In case of the rescue sphere, the crew may decide on the moment of escape out of the submarine. A small number of crew is an advantage for the escape compartment and life support system. There may be established relationships for the quantity of water entering. Fig. 3 shows the diameters of leakage which may just be endured if surfacing may be effected by instantaneous blowing of main ballast tanks and escape out of the submarine because of loss of buoyancy within a short period becomes necessary. The picture confirms a fact already known, namely that leakages equal to the cross-sections of cooling water line and of exhaust gas line are critical and scarcely endurable, respectively.

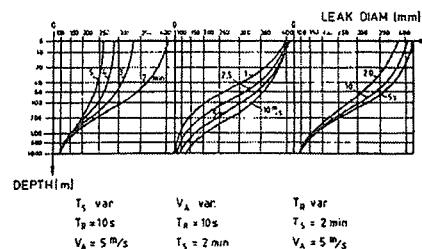
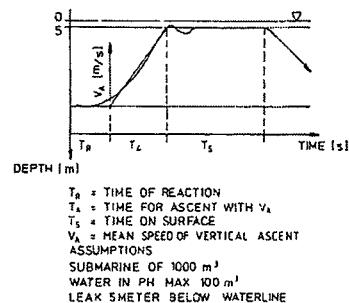


Fig. 3. Leak diameter endurable by quick blowing of MBTs

A leakage caused by a collision will always be larger and, thus, will require rescue out of the sunken submarine. However, the rescue concept should take the mission area into consideration. Only abt. 10 % of the sea bottom are found in depths of water less than 500 m. An 87 % of the ocean area are situated above water depths deeper than 1,000 m. However, when considering the risk, it should be borne in mind that shelf areas

with shallow water depths are usually found in the frequented areas, i.e. near the naval bases, where the submarine possibly operates for an essential part of its mission period.

### 3 ARRANGEMENT OF BULKHEADS

History of submarine development shows that the first submarines in the past century were not provided with bulkheads. During the first twenty years of the current century, after the submarines were introduced into various navies as a weapon of war, a comparatively great number of accidents occurred. Afterwards, safety and rescue means were improved. At that time, the submarines were of double-hull construction; they disposed of a large main ballast tank capacity of abt. 25 % of the surface displacement and of a small diving depth of 50 m. The chances of rescue could be improved by a subdivision of the pressure hull.

Techel (10) reported that the submarines of World War I were subdivided by bulkheads in such a way as guaranteeing buoyancy even if a compartment and the adjacent main ballast tanks had become leaky perhaps by a collision (Fig. 4). Bulkheads for such a surface accident could be of comparatively light construction as they had to withstand the water pressure ruling near the surface only. A pressure resistance figure of 30 m W.G. was sufficient.

Conditions during a flooding casualty in submerged operation were by far more unfavourable. If countermeasures failed to be successful, then the submarine fell down to the bottom of the sea. For such a case of submerged accident, pressure-tight bulkheads were arranged in order to provide escape compartments which could be used for the initiation of rescue measures. There were four bulkheads on the larger vessels, so that control room, bow torpedo space, and stern also served as escape compartments. These bulkheads could withstand a pressure of 50 m W.G.

At the time of World War II, a similar concept was applied to the pressure bulkheads which, however, were not designed for the maximum diving pressure. The German Type 21, for instance, was fitted with five bulkheads designed for 50 m W.G. with a safety factor of 1.5 and one additional bulkhead withstanding a water pressure of 2 m W.G. above top edge. But the pressure hull was designed for 135 m W.G. with a safety factor of 2.5. Four of the compartments formed by the bulkheads were provided with hatches to outside, which were fitted with air traps facilitating possible escape from the flooded vessel. Similar conditions were provided in the Type 7c vessels. It becomes obvious that the pressure-tight bulkhead should be considered to be part of the rescue concept and that the maximum depth of rescue determines the design pressure of the bulkhead.

Post-war submarine developments in the Federal Republic of Germany were conditioned by the tonnage limitations which resulted in small, but efficient submarines for which the arrangement of a bulkhead was excluded for several reasons. Built-in safety was considerably increased. Better pressure hull steels of higher static and dynamic strength and quick emergency blowing of intact main ballast tanks are protecting submarine and crew during submerged operations. Practically all mission areas of the German submarines allow free escape after a submerged accident, which is possible even if the pressure hull is not subdivided.

During development of the larger Class 209 submarines for foreign Navies in cooperation with the building yard HDW, tonnage limitations had also to be observed. The diving depth could considerably be increased. Some of these submarines provide escape by free ascent out of the access trunk in the bridge fin. As the tonnage figures within Class 209 were increasing, a pressure-tight transverse subdivision was discussed with several Navies, and a pressure-tight bulkhead with a rescue sphere was, for the first time, envisaged for the Type 1400 within Class 209. Now, this rescue system - i.e. pressure-tight bulkhead and rescue sphere - has been provided for the Type 1500 submarines ordered by the Indian Navy (Fig. 5). Down to the collapse depth of the pressure hull, the en-

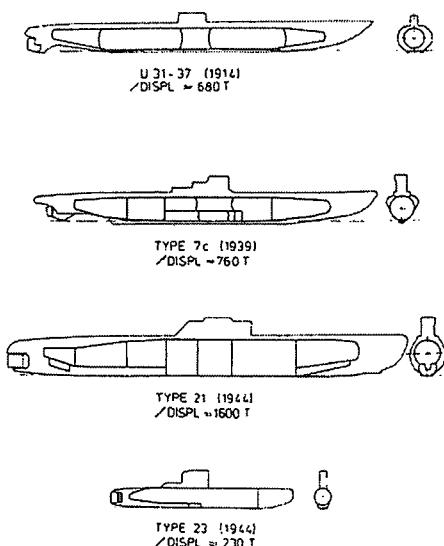


Fig. 4. Bulkhead arrangements until 1950

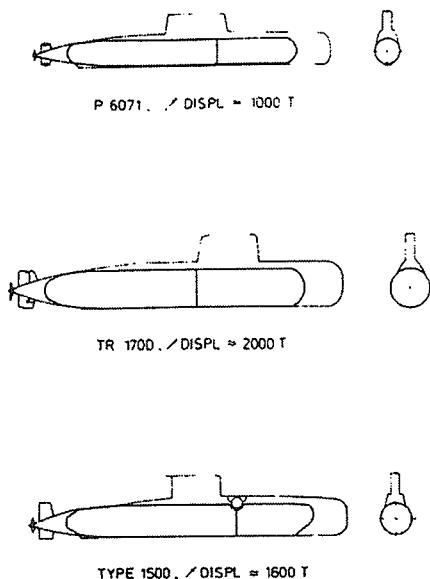


Fig. 5. Modern bulkhead arrangements

tire crew is enabled to save themselves from one of the two escape compartments into the rescue sphere and to surface at any moment according to their own decision. As such a pressure-tight transverse bulkhead must remain resistant and tight down to the collapse depth of the pressure hull, exacting requirements are set on its design, construction, and acceptance. For this reason, it is dealt with in more detail, as follows.

#### 4 DESIGN

##### 4.1 Design Requirements

Rescue of the crew from depths down to the collapse depth of pressure hull requires at least one pressure-tight bulkhead which withstands the pressure of collapse depth and, thus, provides an intact compartment from which rescue may be initiated if a submerged accident including a flooding casualty occurs.

In the following, the arrangement of such a pressure-tight bulkhead is dealt with only. In the overall design of a submarine, the bulkhead should split up crew quarters in such a way that about one half of the crew can be found in each of the two compartments under normal conditions of operation. In order to facilitate rescue by means of the rescue sphere, the bulkhead should be situated so that the rescue sphere with its buoyant body form part of the upper deck and get clear of bridge fin at the time of rise to

the surface.

The number of openings should be as small as possible, and the kind of opening and of its closing device is of different influence. It should be possible to close the bulkhead door and all openings very quickly, so that any excess pressure worth mentioning cannot be set up. For the case of damage, it is assumed that the pressure rise in the damaged part of pressure hull leaves time enough for closing all valves and fittings by hand. Fig. 6 shows the pressure rise in case of inrush of water into a cylinder as a function

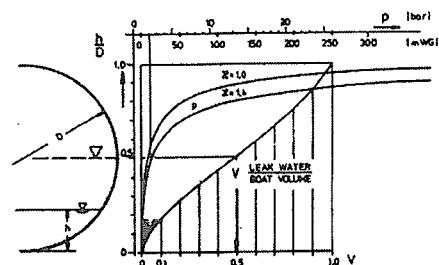


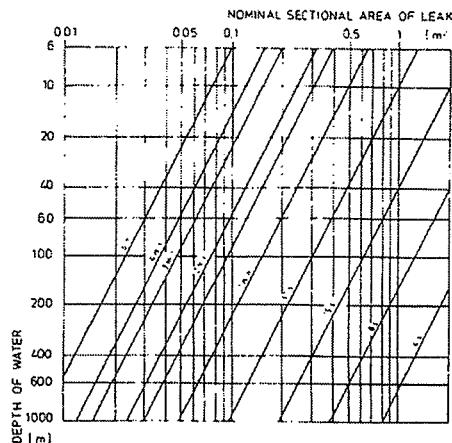
Fig. 6. Pressure rise depending upon filling level

of the degree of filling. It is obvious that the pressure rise is very small if already 0.1 ship volume = main ballast tank volume is filled with water. Any more considerable pressure rise is only possible if more than half the pressure hull is flooded. Approximately at this moment, the pressure bulkhead door should be closed so that access to the escape compartment then is rendered impossible. A guiding figure for the time available at given depth of water and sectional area of leak can be found in Fig. 7.

The configuration of the bulkhead and its openings should, as a matter of course, fulfill the demand for a possibility of inspection during the building phase and during the life of the submarine as well. If the inspection results in objections, then repair should be possible. This means, in particular, that accessibility should be ensured. This has a reactive effect on the possibility (which would, in fact, be a tempting feature for the design) of using the bulkhead, at the same time, as a tank wall for the high-pressure compensating tanks. Particularly, the possibility of "plasticity design" is not allowed to be utilized for this bulkhead region. On the contrary, the stresses should be limited in view of fatigue.

##### 4.2 Influence on the Overall Design

Although a pressure-tight bulkhead increases safety and improves chances of rescue, there are disadvantages when related to the over-

Fig. 7. Half flooding of a 500 m<sup>3</sup> space

case of the bulkhead with rescue sphere.

Taken all in all, a bulkhead will be expensive, Arentzen and Mandel (11) therefore have written the sentence: "Bulkheads are costly". This refers to the size of vessel with its influence on the performance data and to the cost of manufacture as well. The design shows that a pressure-tight bulkhead involves a practically balanced weight-to-displacement ratio. The additional weight and the additionally necessary displacement are of equal magnitude. There may be a plus or a minus in weight of up to abt.  $\pm 50\%$  of the additionally used volume of  $\frac{\pi}{4} D^2 L$  according to the kind of construction selected for the bulkhead and to the pressure head required. In case of a bulkhead being pressure-resistant down to the collapse depth, an enlargement of vessel by 4 % should be reckoned with for the submarines under consideration here, and the increase in price will be round about the same.

The above additional cost may be compared with the cost arising from a submarine acci-

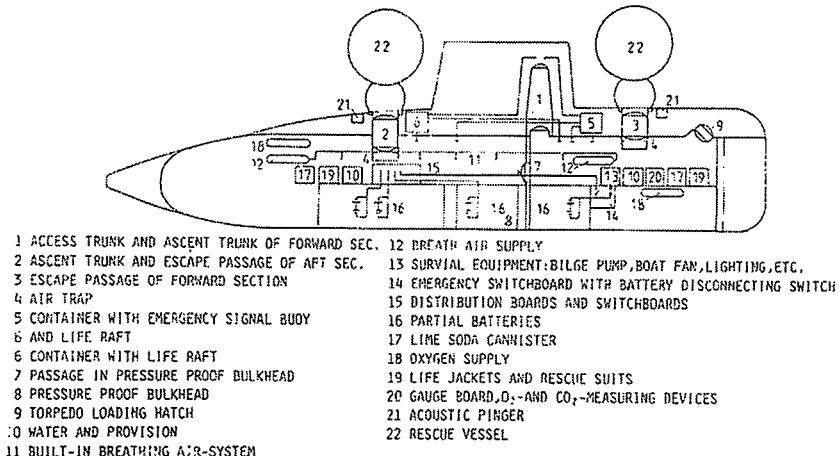


Fig. 8. Life support facilities for bulkhead with DSRV system

all design. The vessel's length is increased by 1.5 to 2.0 m resulting from the considerable space required and the important weights needed in this connection. Moreover, passageways are obstructed by the door in the pressure-tight bulkhead. In addition to the design expenditure for the bulkhead with its stiffeners as well as for the openings with closing devices, a considerably greater expenditure would arise for the life support means which must be provided for both the compartments. Fig. 8 and 9 give a summary of the expenditure, but it should be noted that this expenditure is considerably smaller in

dent including loss of crew (notwithstanding any humanitarian aspects): Cost of training was invested in each member of crew; furthermore, the family may expect to draw support from state funds. In total, cost may be roughly estimated to be 0.5 million U.S. Dollars for each person of crew. If the minimum number of crew is assumed to be 20 persons, at least 10 million U.S. Dollars of cost should be supposed. It is reported in the literature (12), that 7 accidents (out of 18 accidents having occurred during 25 years) happened in depths in which a pressure bulkhead would at least have provided an escape

添付資料-6 (9/9)

compartment. These accidents entailed loss of abt. 3/4 of the total complements of crew.

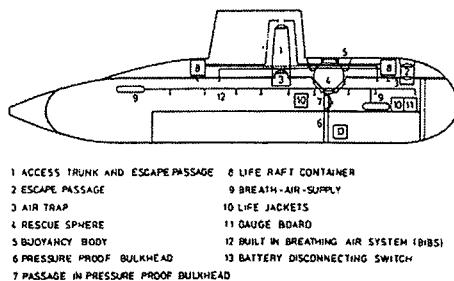


Fig. 9. Life support facilities for bulkhead with rescue sphere

#### REFERENCES

- (9) New Rescue System for Submarines. Bonn: Mönch Publishing Group, Naval Forces, International Forum for Maritime Power, No. V/1982 Vol III, P. 92 - 93.
- (10) Techel, H: Der Bau von Unterseebooten auf der Germaniawerft. 4. unveränderte Auflage. München: J.F. Lehmanns Verlag, 1969.
- (11) Arentzen, E.S.; Mandel, Ph.: Naval Architectural Aspects of Submarine Design. New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1960.
- (12) Somers, Ch.L.: Submarine Disasters in Peacetime, 1900-1971. Annapolis, Md. USA: United States Naval Institute Proceedings, Naval Review 1972, P. 322 - 329.
- (13) Comstock, J.P.: Principles of Naval Architecture. New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1967 (1977) P. 215 - 218.
- (1) Gabler, U.: Sicherheit und Rettungseinrichtungen von Unterseebooten. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 69. Vol. 1975, P. 9 - 17.
- (2) Nießen, E.: Wechselwirkung zwischen Berechnung, Werkstoff und Fertigung bei Druckkörpern. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 73. Vol. 1979, P. 181 - 193.
- (3) Abels, F.: New Developments in German Submarine Design. Geneva: Interavia SA, International Naval Technology Exposition 78, Conference Proceedings, June 1978, P. 175 - 188.
- (4) Flume, W.; Rohwer, J.: U-Bootsbau in Deutschland. München: Bernard u. Graefe Verlag, Marine-Rundschau, September 1982, No. 9, P. 474 - 484.
- (5) Heggstad, K.M.: Submarine safety. London: Eldon Publications Ltd. Maritime Defence, October 1980, P. 339 - 341.
- (6) Marriott, J.: Submarine rescue methods. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, Meerestechnik, Marine Technology, Vol. 3, 1972, No. 3, P. 115 - 120.
- (7) Disabled Submarine, Requirements for Employment of US Navy Submarine Rescue Systems, June 1978. Washington: Department of the Navy, Naval Sea Systems Command, NAVSEA 0994 - LP-013-90/0.
- (8) Abels, F.: Aufstiegskugel als Rettungssystem für U-Boote. Koblenz, Bonn: Wehr und Wissen Verlagsgesellschaft mbH, Wehrtechnik, Juli 7/82, P. 82 - 83.

This is a blank page.

## 2 000 m 潜水調査船“しんかい 2 000”の信頼性評価

Reliability Analysis of Deep Submergence  
Research Vehicle “SHINKAI 2 000”

(三菱重工技報 Vol. 18 No. 3 技術)

1981 - 5



三菱重工業株式会社  
東京都千代田区丸の内2丁目5番1号

## 2 000 m 潜水調査船“しんかい 2 000”の信頼性評価

神戸造船所 渡辺俊夫\*  
 浜田馨\*\*  
 新形仁志\*\*

### Reliability Analysis of Deep Submergence Research Vehicle "SHINKAI 2 000"

A deep submergence research vehicle "SHINKAI 2 000" which has depth capability of 2 000 m is under construction as the first Japan-built manned deep-sea submersible and it is expected on its successful development.

It depends entirely upon the safety operation of the submersible whether this program succeed or not. Therefore, all equipments and all systems which are composed in the submersible must have a sufficient reliability.

In this paper, the results of evaluation of the reliability of the submersible, using FMEA and FTA methods are introduced, centering on its characteristic points.

#### 1. まえがき

現在建造中の深海潜水調査船“しんかい 2 000”は、先般無事進水も終わり、いよいよ海上試運転による性能確認試験を迎える段階となった。この潜水船は、海洋科学技術センターより発注されたもので、昭和 52 年度の基本設計に引き続いて、昭和 53 年度から約 3 年を費して設計・建造されてきたものである。この潜水船は我が国では初めての本格的深海潜水船（潜航深度 2 000 m）であり、その成否は我が国海洋開発発展のための重要な鍵を握るものとして、大きな期待が寄せられている。

潜水船は通常の水上船舶等とは異なり、未知の極めて厳しい環境の下で運用され、しかも、万一の場合乗員の救助も容易にはできないことから、安全な運航こそが潜水船にとって最も重要な管理ポイントであること等が設計・建造に当って留意された。

一方、この潜水船は洋上で支援母船上から着水させ、また再び母船上に揚収するほか、水中の運動性能の向上などのため、小形軽量とすることが極めて重要な条件であり、信頼性向上のために冗長性にのみ頼ることには限度があること、及び常に母船の支援下で運用することが義務づけられているので、機器等の故障が発生しても浮上することができれば、浮上した潜水船を母船に揚収し、乗員を安全に救助することができることを検討の条件として考慮しなければならない。

潜水船の安全性を確保するためには、個々の部品、機器及びシステムなどの信頼性を一層向上させる必要がある。通常、我々はそれぞれの固有技術の範囲で、従来の経験とか知識を駆使して最もと思われる方法を選択し、信頼性向上に努力しているが、更に高い信頼性を確保するためにには、確立された手法を導入し、落ちのない調和のとれた設計を行うことが重要である。そのため、この潜水船の場合には、まず設計段階で信頼性向上を図るための設計解析を実施した。信頼性向上のための設計解析にも、信頼性予測、保全性予測に始まり、ここで取上げた FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 及び FTA (Fault Tree Analysis)，更にはトレードオフ解析、設計審査、及び信頼性試験にまでつなげた解析等があると言われている。

一般にシステムや部品などの信頼性解析では、統計的なデータ

が用いられることが多いが、この潜水船のような新規に開発する機種のような場合には、十分な統計データが得られない場合が多く、解析手法としてはこのようなデータに比較的依存しないで実施できるものが望ましい。ここで取上げた FMEA 及び FTA は、このような統計的データが十分でない場合でも、定性的な解析を実施することにより、それらを構成する機器やシステムの重要性を十分把握して対処できるものであるので、潜水船に対する信頼性解析の手段として以下の検討に用いた。

FMEA はシステムの開発初期に予想される故障モードを識別し、それを含む上位レベル品目への影響を評価し、更に設計へのフィードバックを行うことが一つの目的であるとされている。この潜水船の場合には、詳細設計と並行して解析を実施し、設計の妥当性の評価を行うとともに、更に工事施工に対する注意点、完成後の保守・点検・整備、オペレーションに対する注意、定期検査時のチェックポイントなどの洗い出しのための資料を得ることをも目的とした点に特徴がある。

一方、FTA では人命の安全に対して重大な影響を与える装置を洗い出し、十分な対策が取られているかを確認することを目的とした。

このような信頼性解析が新しく開発されたシステムに適用された例はほとんどないため、以下にその適用方法の概要と検討結果を紹介する。

#### 2. FMEA 及び FTA の概要

##### 2. 1 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

FMEA は次に述べる FTA とともに、信頼性に対する定性的な評価として用いられている。特にこのケースのようにシステムを構成するサブシステムや要素などが、機械、電気など多岐にわたり、種類が多くなった場合にも有効な手段である。FMEA は、設計段階でシステムを適当なレベルのすべての構成要素（パートのレベル）にまでブレークダウンし、それらに対してあらかじめ予想される故障モードを漏れなくリストアップして、その故障がシステムの任務遂行に与える影響を検討することによって、潜在する設計上の問題点を明らかにするものである。すなわち、展開の方向は下位の部品から上位に向うボトムアップのタイプである。

1 \* 船鉄管理部長  
 \*\* 潜水艦部主務  
 \*\* 造船設計部電装設計課

## 添付資料-7 (3/7)

この適用に当っては、次のステップに従った。

(1) 対象システム(装置)の決定

対象となるシステムを選定し、これを機能によってサブシステムに分類する。

(2) 信頼性ブロックダイヤグラムの作成

各サブシステムの機能を分析し、機能相互の関連を表したブロックダイヤグラムを作成する。これにより、システムを構成する各機器の機能の相互関係が明らかになる。

(3) FMEA シートの作成

故障モードをリストアップし、それぞれに対して影響を解析する。

(4) 重要品目一覧表の作成

影響度の大なる品目をピックアップし、それに対する対策を検討する。

2. 2 FTA (Fault Tree Analysis)

FMEA が部品レベルからの故障モードの積み上げによる解析であるのに対し、FTA は重大事故の種類をはじめに想定し、これに至る原因の道筋をトップダウン式に解析する手法である。すなわち、故障の影響、相互の関連を図示的に展開し、視覚的に解析するもので、クリティカルな故障の経路を識別し、問題点や設計変更を要する点を把握し、修正処置を見つけることを目的としている。そのステップは次のとおりである。

(1) 解析しようとするシステムの故障を想定する。

(2) 故障の原因事象を求める、その間の関係を記号で結合する。

(3) 故障の原因事象について、更にそれを引き起す下位レベルの原因事象を求める、基本事象(これ以上分けられない事象)になるまで分解して、事象間の論理関係を Tree に表現する。

(4) 要すれば、基本事象の起る確率を推定し、重大事故の起る確率を定量的に評価する。

(5) 解析結果を評価し、不具合箇所を処置する。

FTA は FMEA と相互補完の関係にあり、故障原因の相互関

連が明らかにできること、及び FMEA が部品レベル、機器レベルの故障解析であるのに対し、FTA はトップレベルの故障事象から出発するため、FMEA で見落される故障モードとか、救難安全装置のようにそれ自体の故障が直接システムの機能を阻害しないものを検討できる点などに特徴がある。

### 3. FMEA, FTA 適用に当つての方針

#### 3. 1 解析結果に対する対処方針

FMEA や FTA の解析においては、事故の発生モードを推定し、その影響の度合を見きわめることを主眼としているが、更にその事故の生起確率を定量的に抑えることができれば、それに対する影響度などとともに数量的な解析を行うことが可能となる。しかし、1. 項で述べたように、この潜水船のように新しく開発されたシステムでは、故障に関する十分な統計的数据が得られないことから、むしろ数値的解析にこだわるよりも、抜けのない原因の洗い出しとそれに対する対策について明確なポリシーを定め、具体的な対応を考えておくことに意義を持たせることとした。

このような観点から、対処方針を次のように定めた。

(1) 基本的には重大事故に発展する可能性のある原因に対して、設計上どのような対策が取られているか、また運用面に反映すべき事項は何かなどを明らかにし、対策に抜けのないことを実証する。

(2) 耐圧殻の圧壊などのように本質的にバックアップが不可能なものについては、理論や実験などにより固有技術の向上を図って対処する。

(3) FMEA で分析し、ピックアップした重要品目については、故障防止対策と故障発生時対策に分類し、更に後者については故障監視、二重系やバックアップシステム、応急処置手段等の有無を明らかにする。

#### 3. 2 FMEA と FTA の使い分け

潜水船の機能を考慮して、両者の長所を生かした適用を図るこ

表 1 機能分析表  
Functional analysis

潜水調査船									
システム(機能)	船體構造	電源装置	推進機器装置	油圧装置	重量トリム調整装置	航海通信装置	環境制御装置	救難安全装置	錨泊装置
耐圧または非耐圧構造から成り、乗員及び機器を収容する	本船のエネルギー供給装置として、電気エネルギーの貯蔵、発生、分配、保護並びに供給電源の変換を行う	本船を推進させ、また方向を制御させるために電気及び油圧エネルギーを機械エネルギーに変換する	本船に使用するすべての油圧機器に油圧を供給するため電気エネルギーを油圧エネルギーに変換する	本船の重量浮量の調整及び前後トリムの調整を行う	本船が自力で航行するために必要な情報を入手し、また支援母船との連絡を行う	耐圧艤内での3人の乗員の生命維持に必要な環境を制御する	本船の通常装置による浮上が困難となった場合、自力及び他力による救出手段となる	本船の本来の目的である海中標測の手段となる	
耐圧構造外殻構造	主蓄電池装置 配電盤 主推進インバータ 補助推進インバータ 動力インバータ 通信インバータ 通信コンバータ 電路	主推進装置 補助推進装置 主推進 首振装置 補助推進 首振装置 補助装置 電源操作パネル 監視装置 安定ひれ	油圧ポンプユニット 圧力コンセンセータ 1,2番 電磁弁ユニット 配管	補助タンク 注排水装置 ショットパラスト 投棄装置 トリム調整装置 浮力材 パラストタンク 注排水装置	高度深度ソナー トランスポンダ CTFMソナー 音響方位探知機 水中通話機 無線機 ジャイロコンパス	酸素供給装置 炭酸ガス吸収装置 通風装置 計測装置	緊急離脱装置 応急呼吸具 救命ブイ装置 応急通信装置 その他の装置	マニピュレータ 照明灯 カメラ TV	
コニカルハッチふたのぞき窓、電線貫通金物、つり上げ・曳航金物、外皮を含む	船外受電盤、インバータ装置を含む			補助タンク トリムタンク パラストタンク を含む			FTAにより解析する		

添付資料-7 (4/7)

とした。すなわち、FTAではトップ事象として“人命の喪失”を取上げ、これに至る原因を系統的に分析して対策を定めるものとした。したがって、そのものが故障しても通常の機能には影響のない装置（例えば救難安全装置）や、船の機能よりも直接人命の安全にかかわる装置（例えば環境制御装置や耐圧殻構造）などはFTAでカバーするものとした。

一方、FMEAは機器・部品の故障が潜水船の正常な運用に支障を来すような装置を取り上げ、それを構成する機器・部品などを対象に検討し、故障原因と対策を明らかにすることとした。表1に潜水調査船の機能分析結果を示す。

#### 4. FMEA による解析

2.1 項で述べた手順に従い、機能分析表(表1)、論理ブロック図(図1)、FMEAシート(表2)、重要品目一覧表(表3)を作成した。ここでFMEAシートの特徴は、この解析終了後の利用を考慮して次のような事項を合せて検討したことである。すなわち、

### (1) 故障検知法

オペレーション中に故障が発生した場合、それを検知できないために重大事故に発展することも考えられるので、早期に故障を発見できる手段があるか否かを明らかにする。

## (2) 運航中の応急処置

運航中に発見された故障は、その与える影響の程度によっては、できるだけ速やかに除去または修正しなければならない。したがって、これらの手段の有無を検討し、あらかじめ計画された代替運用モードがあれば記入する。

### (3) 保管要領及び出勤前後の点検整備要領

事故の発生を未然に防止するためには、潜水船の運用の前後における十分な点検整備や日常の保守を必要とするので、これらの作業マニュアルの作成資料に供するものとした。

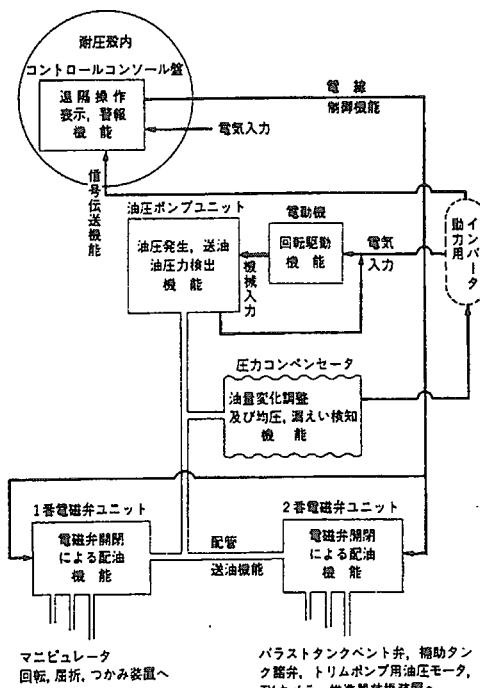


図1 標理ブロック図（油圧装置の場合）  
Logic block diagram (Hydraulic system)

## 添付資料-7 (5/7)

表 3 重要品目一覧表  
Critical item list

システム名称：重量トリム調整装置—ショットバラスト投棄装置

品目	故障モード	原 因	影 韵	重 要 度	故障防止対策	故 障 発 生 時 対 策		
						故障監視、自動停止及び波及防止機能	二重系またはバックアップシステム	応急措置
電磁錠及びホッパ	ショットバラストの詰まり	・盲栓外し忘れ ・ショットの固着 ・船体の過度傾斜 ・着底時泥等の詰まり	ショットバラスト投棄不能	2	・試作試験による性能確認 ・整備基準の完全実行 ・ショットバラストの当日搭載 ・母船上少量投棄確認 ・ホッパの真水洗浄、乾燥	ショットバラスト投棄量計及び深度計による	ショットバラストホッパ投棄装置	補助タンク排水 緊急浮上

システム名称：油圧装置—油圧ポンプユニット

品目	故障モード	原 因	影 韵	重 要 度	故障防止対策	故 障 発 生 時 対 策		
						故障監視、自動停止及び波及防止機能	二重系またはバックアップシステム	応急措置
油	油圧ポンプ作動不能または吐出不良	・ポンプシャフト破損 ・ポンプの回転、振動部品破損 ・ポンプの spring return assembly 破損 ・カップリング破損または外れ ・作動油汚染	油圧伝達不能 操船、調査測定不能	2	・同形式のポンプによる試作試験で耐久性確認 ・出勤前及び着水前作動点検の徹底 ・油圧力 ・アクチュエータの作動速度 ・異常回転音、振動 ・作動油の定期点検 ・フィルタエレメント交換 ・作動油交換	油圧計による監視	—	ポンプ停止 ↓ ショットバラスト投棄 緊急浮上
圧	油圧ポンプ吐出圧過大	・ポンプの可変吐出機構故障 ・管系リリーフ弁故障両故障が同時に発生した場合のみ	油圧管系破裂 操船、調査測定不能	2	同 上	同 上	油圧ポンプ吐出管系にリリーフ弁設置	同 上
ボン	油圧ポンプ弁閉鎖不良による漏えい	・スプリング破損 ・ボベットに異物込み込みまたは傷	漏えい量大の場合 油量、圧力不足 操船、調査測定不能	2	同 上	同 上	—	同 上

## (4) 工事時及び定期検査時の点検要領

建造中及び年次検査、定期検査工事で実施すべき項目や内容を把握する。

一方、重要品目一覧表は、実施した FMEA の結果に基づき、その故障が人命及び潜水船の使命に重大な影響を与えると考えられる構成部品を抽出した。この場合、重要度の分類は、次のとおり 4 段階として定義した。

重 要 度	故 障 の 潜 在 的 影 韵
1	人命あるいは潜水調査船の喪失等の重大事故
2	潜水調査船の機能喪失、緊急浮上装置により浮上可能
3	潜水調査船の機能一部喪失、通常の操作により浮上可能
4	通常の運航に支障なし

この分類に従い、FMEA シートに重要度を記入し、その中から重要度 1 及び 2 をピックアップして重要品目一覧表に取りまとめた。表 3 に実施結果の一例を示す。

この表では、推定される故障モードに対し、その予防対策並びに万一故障が発生したときの各種の対策を明確にし、安全確保のための配慮に抜けがないことを実証した点に特徴がある。

## 5. FTA による解析

2.2 項で述べたように、FTA はトップダウン式の解析手法であるので、まず最上位に乗員の“人命の喪失”という重大事象を

取上げ、以下これを展開し、また通常の Tree に加え○印で示した最終事象（図 2 参照）に対し、それぞれ設計上の対策及び運用上の対策を明らかにして信頼性に対する検討を行った。なお、次の点を考慮した。

(1) 救難安全装置のようなバックアップシステムは通常の運用状態では不要なものであり、したがってこれが故障しても、正規の装置が正常に作動していれば全体の機能を全く阻害しないものであることから、FMEA では解析することが困難であるので FTA で解析した。

(2) 機器の故障ではないが、外部要因により不具合が発生する可能性もあり、その場合には FMEA より FTA が適している。

(3) 環境制御装置は、その故障が潜水船の機能とは直接関係がなく、人命そのものに被害を与えるので FTA で検討し、バックアップシステムとの関連を明らかにした。

表 4 には、潜水船が海底で機器故障を起した場合の浮上手段を一覧表で示した。一般には FMEA は機器またはそれを構成する部品単位の故障に主眼をおくため、二重三重の故障の組合せに対する検討が困難であり、一方、FTA では Tree がふくそうして視覚的にとらえることが難しいことから、潜水船プロバーの重要な機器のみについて故障の影響と緊急浮上手段を明らかにしたものである。

図 2 に FTA の代表的な Tree の例を示す。

表 4 潜水船が海底で機器故障を起した場合の浮上手段  
Emergency operation for failure mode of equipment

(注) ×印：故障 △印：故障による作動不能 ○印：通常操作可能（◎印は補助的手順）

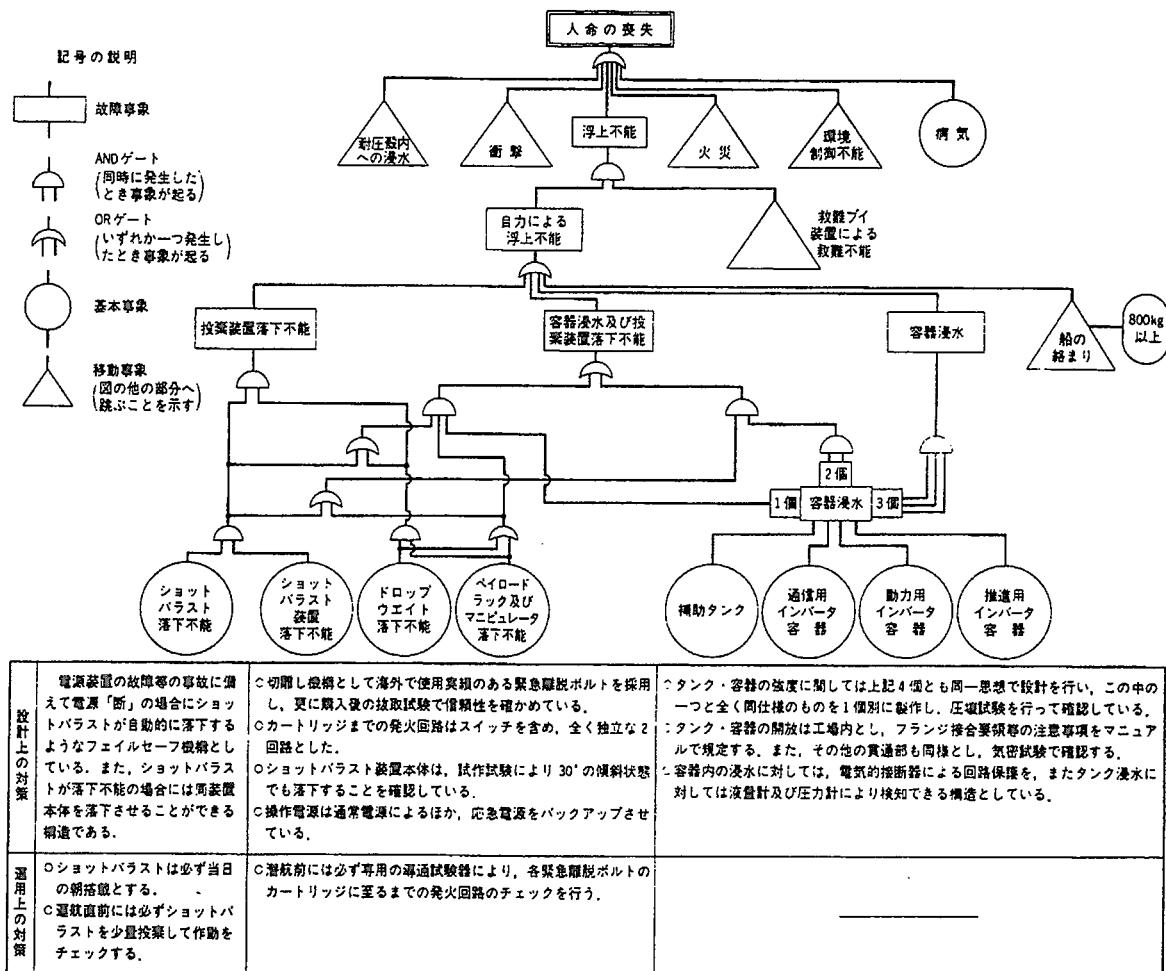


図2 潜水調査船のFTA (一例)  
Fault Tree Analysis for submersible (Example)

## 6. 解析結果と検討

### 6. 1 FMEAによる解析

- (1) 3.2項で選定した装置について実施し、重要品目一覧表にまとめた結果、重要度1、すなわち“人命あるいは潜水船の喪失等の重大事故”に発展する機器または部品ではなく、すべて重要度2、すなわち“潜水船の機能喪失、緊急浮上装置により浮上可能”以下の故障であることが明らかとなった。また、推定される故障モードに対しては、それぞれ十分な対策が取られていることが分かった。
- (2) この解析の実施時期は詳細設計及び建造の進展中ではあったが、設計へのフィードバック事項も比較的少なく、高い信頼性を内在した設計であることを実証することができた。
- (3) 潜水船の建造に当っての注意点をはじめ、運用に当っての故障修理、保守・点検・整備上の重要なチェックポイントが把握できた。

### 6. 2 FTAによる解析

- (1) “人命の喪失”を生命題として展開し、各々の最終事象に対して設計及び運用上の対策を検討した結果、人命事故に対する

安全対策上の重要なポイントを認識することができた。また、それに対して取られた対策に間違いがないことが実証できた。

- (2) 耐圧殻の漏水事故については二重系を持たないものであり、事故の発生が直接人命の安全に影響を与える重要な装置であるが、これに対しては、バックアップが不可能なことから、理論や実験による検証によって対処することとした。

## 7. む　　す　　び

潜水船の工事は既に完了し、船内試験、水槽内及び渠(きょ)中における単独試験も順調に終了した。今後は、いよいよ支援母船の支援下における海上試運転で性能確認を行う最終工程段階となってきた。

この潜水船が海上試運転及び引渡し後の運用に当って、十分な信頼性をもって所期の性能が発揮され、我が國海洋開発の強力な武器となることを期待して、今後もあらゆる努力を払っていかたい。そのためには、この検討結果を十分活用し、万全の対策をもって臨みたい。

最後に、この解析を実施するに当って御指導を頂いた大阪大学工学部産業機械工学科の赤木新介教授に厚く感謝の意を表する。

This is a blank page.

## 「しんかい6500」の信頼性解析について

高橋 憲二 木内 大助 渡辺 祥彦

海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC R23, (1990 Mar.), 43- 59 (刷刷)

添付資料-8(2/18)

海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC R 23 (1990 Mar.)

## 「しんかい6500」の信頼性解析について

高橋 憲二<sup>\*1</sup> 木内 大助<sup>\*1</sup> 渡辺 祥彦<sup>\*2</sup>

潜水船の安全性を確保するためには、個々の部品、機器及びシステムなどの信頼性を一層向上させる必要がある。設計、製造及び運用段階を通じて調和のとれた信頼性を確保するための信頼性評価手法として、まず確立された手法を導入した。ここで取り上げた FTA 及び FMEA は潜水船のような十分な統計的データが得られない場合も有効な方法で、解析の結果バランスの取れた十分な対策が取られていることが確認された。これに加えて、安全上特に重要な機器・系統に対し、バウンダリーアクセスを実施し、構成部品につき品質保証履歴、設計マージン、安全率等を含めた総合的な対策評価を行った。以上の結果、設計、製造、運用を通じての対策処理、監視警報システム、異常時の処理及び運航上の対策が整合性のある適切なものであることが確認された。今後も運用、保全面を中心にしてこれらの解析結果を十分に反映する事が重要と考えられる。

キーワード：信頼性、FTA、FMEA

## Reliability Analysis of Deep Research Submersible "SHINKAI 6500"

Kenji TAKAHASHI<sup>\*3</sup> Daisuke KIUCHI<sup>\*3</sup>  
Nobuhiko WATANABE<sup>\*4</sup>

The establishment of the safety of the deep research submersible "SHINKAI 6500" is the most important issue since the beginning of design of the vehicle. To attain this objective reduces to improvement of reliability of parts and components of her subsystems. In general reliability analysis, the lack of statistical data of failure modes and possible countermeasures of this kind of submersibles forces us to adapt well-established analysis procedures such as FTA(Fault Tree Analysis). The application of these procedures to her reliability analysis proved the validity and eff-

\*<sup>1</sup>深海開発技術部

\*<sup>2</sup>三菱重工業神戸造船所

\*<sup>3</sup>Deep sea Technology Department

\*<sup>4</sup>Mitsubishi Heavy Industries, Inc.

effectiveness of their Countermeasures allthrough the design, construction and operation stages.

In addition to these analyses, the boundary analysis procedure was introduced to the selected subsystems which strictly concern with the safety of her total function and performance. The degree of difficulty to attain their reliability was evaluated and classified on the basis of their original reliability characteristics. Accounting for their reliability careers, such as prototype tests conducted in advance to designing, safty margin of the boundary components, this analytical procedure can focus sufficient reliability which has already been designed and cataloged in operation manuals. And also the system redundancies and failsafe concept are proved to be adequate.

**Key word:** Reliability analysis, FTA, FMEA.

## 1 まえがき

昭和61年より建造を進めている6500m潜水調査船「しんかい6500」は、先般日本海溝において海上試運転の最終ステージである最大潜航深度潜航試験（6527m）を無事終了し、いよいよ完成引渡を迎える段階となった。この潜水調査船は昭和44年の海洋審議会答申にて提案され、中間段階である2000m潜水調査船「しんかい2000」の建造・運航経験を踏まえた世界でも最大深度で運用する近代潜水船であり、わが国海洋開発発展のための重要な手段として、その成果に大きな期待が寄せられている。

大深度潜水調査船は通常の水上船舶とは大いに異なり、極めて厳しい環境下で運用されるための耐水圧、上昇・下降速度への要求といった性能と併せて、機器システムの信頼性ひいては乗員・運航の安全性を確保することが最も重要な管理ポイントであることが、設計・建造に渡って留意された。

この潜水調査船の安全を確保するためには、個々の部品、機器システムなどの信頼性を一層向上させる必要がある。通常我々はそれぞれの機器システムの設計・製作において、従来の経験とか、知識を駆使して、最良と思われる方法を開発・選択し、信頼性の向上を実現するものであるが、更に高い信頼性を確保するためには、確立された信頼性評価手法及びシステム的な設計手法を導入し、対策として落ちのない、バランスのとれた設計を行う

事が重要である。この点、潜水調査船は、特異なシステムであるため、従来からの固有技術を展開する信頼性設計に加えて、航空機及び原子力の分野で実施されている解析法を導入して、新たな観点からの信頼性解析を試みた。<sup>2)</sup> このため以下の解析においては、用語の定義は厳密を欠いていることを敢えて付言しておきたい。

信頼性向上のための設計解析としては信頼性予測、保全性予測に始まり、ここで取り上げたFTA (Fault Tree Analysis)、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 及び信頼性試験などの品質保証履歴を含めて評価する重要機器・系統のバウンダリー解析、更にはトレードオフ解析などの解析法がある。

一般にシステムや部品などの信頼性解析では、統計的なデータが用いられることが多いが、「しんかい6500」のような開発機種の場合には、「しんかい2000」の建造・運航実績があるものの、十分な統計データが得られない場合が多く、解析方法としてはこのようなデータに比較的依存しないで実施できるものが望まれる。ここで取り上げたFTA、FMEA及びバウンダリー解析法は、このように統計的データが十分でない場合でも、定性的な解析を実施することにより、それらを構成する機器やシステムの重要性や影響度を把握し、対処できるものであるので、本潜水調査船に対する信頼性解析に手段として以下の検討に用いた。FTA、FMEAによる信頼性評価は「しんかい2000」<sup>3)</sup>

でも実施され、「しんかい6500」ではこれにバウンダリー解析を加えて実施することになる。

FTA では人命の安全に対して重大な影響を与える装置・機器を洗い出し、十分な対策が取られているかを確認することを目的とした。

一方 FMEA は、システムの開発初期に予想される故障モードを識別し、それを含む上位レベル品目へに影響を評価し、更に設計へのフィードバックを行うことが一つの目的で有るとされている。この潜水調査船の場合には、詳細設計と平行して解析を実施し、設計の妥当性の評価を行うとともに、更に工事施工に対する注意点、完成後の保守・点検・整備、オペレーションにおける留意点、検査時のチェックポイントなどの洗い出しのための資料を得ることをも目的としたことにその特徴がある。

また重要機器・系統のバウンダリー解析においては、前二者の解析を反映し品質保証の観点から、各機器システムの全体信頼性に与える影響度を評価した結果、安全上特に重要な機器・系統についてその構成バウンダリーを特定し、ハードウェアの信頼性確保のためのバランス、システム設計の基本方針、更にシステム設計での防護の手法、対策等について総合的に検討するものである。この中で、信頼性試験の評価等を含めた信頼性確保の考え方を整理し、対策を検証することは信頼性評価の上で特徴的な方法といえる。

以上、統計的データが得られない本潜水調査船システムに、上記解析手法を適用するまでの基本的な考え方・方針をつぎのように整理した。

(1) 基本的には重大事故に発展する可能性のある原因に対して、設計上どのような対策が取られているか、また運航面に反映すべき事項は何かなどを明らかにし、対策にぬけのないことを実証する。

(2) 耐圧殻の圧壊などのように本質的にバックアップが不可能なものについては、理論や実験等を含めた品質保証等による信頼性向上を図って対処する。

(3) FMEAで分析し、ピックアップした重要品目については、故障防止対策と故障発生時対策を分類整理し、また後者については故障監視、二重系やバックアップシステム、応急処置手段などのサポート状況を明らかにする。

(4) 品質保証の観点から、安全上特に重要な機器・系統について信頼性確保の考え方について纏めるとともに、他の方法によって取られた対応策、故障防護の手法等についてバウンダリーにおけるバランスがとれていることを検証する。これら信頼性解析手法の新潜水調査船システムへの適用の概要と解析、検討結果について紹介する。

## 2 FTA ,FMEA 及びバウンダリー解析法の概要と解析

### 2.1 FTA の概要と解析

#### 2.1.1 FTA の概要

FTA は、設計の初期の段階にシステム構成と並行して適用された。通常この解析法では、トップ事象として重大事故の種類をはじめに想定し、これに到る原因の道筋と発生の可能性をトップダウン式に解析する。すなわち重大事故に到る故障の影響、相互の関連、可能性に対する重み付けを図式的・確率的に展開し解析するもので、クリティカルな故障の経路を識別し、問題や設計変更を要する点を把握し、バランスのとれた修正処理を見出すことを目的としている。Fault tree、事象の定義等は専門書に譲るとして、本方式は、トップレベルの故障事象から出発するため、後述するFMEAで見落とされる故障モードとか、救難安全装置のようにそれ自体の故障が直接システムの機能を阻害しないものも含めて検討した。

#### 2.1.2 FTA による解析

FTA 解析では、最上位のトップ事象として「人命の喪失」という重大事象を取上げ、以下にこの原因となりうる 5 種の異常事象（以下に示す）をTreeに展開し、それぞれの最終事象に対し、設計・製作及び運用上の対策を明らかにして、安全上の信頼性に対する検討を行った。

- 人命の喪失 →
  - (1) 浮上不能
    - (1-1)下降操縦での海底への衝突
    - (1-2)海底からの自力浮上不能
  - (2) 耐圧殻浸水
  - (3) 衝撃
  - (4) 火災
  - (5) 致死環境

添付資料-8(5/18)

なお解析に当たっては、つぎの点に留意した。

- (1) 個々の異常事象の解析においては、自力浮上のための重量離脱可能範囲などの条件などについて、可能な限り定量的な解析を行った。また事故故障の多重性に対する検討を加えた。
- (2) 救難安全装置のようなバックアップシステムは通常の運用状態では不要なものであり、したがってこれが故障しても、正規の装置が正常に作動していれば全体の機能を全く阻害しないものであることから、他の手法FMEA等では解析することが困難であるのでFTAで解析した。
- (3) 機器の故障ではないが、外部要因により不具合が発生する可能性もあり、その場合の解析としてはFTAが適している。
- (4) 環境制御装置は、その故障が潜水船の機能とは直接関係がなく、人命そのものに被害を与えるのでFTAで検討し、バックアップシステムとの関連を明らかにした。

表1には、潜水船が潜航中機器故障（重大な故障とそれを補助する系での次に重大な故障が重なった二重故障までを考慮）を起こした場合の浮上能力のチェック例を示す。これは、浮上手段の検討

において、二重三重の故障の組合せに対する検討は、Treeがふくそうして視覚的にも困難なためによる。図1には潜水船機器の故障に起因する「自力浮上能力」に関するFTAの代表的なTreeの例及び対応する設計・製作また運用での対策の例を示す。

## 2.2 FMEAの概要と解析

### 2.2.1 FMEAの概要

FMEAは先に述べたFTAとともに信頼性に対する定性的な評価方法として用いられ、設計作業と並行して見直し検討されると共に、解析終了後の運航中の応急処置及び保全要領などにも結果が利用されることを特徴とする。特にこの潜水船のケースのようにシステムを構成するサブシステムや要素などが、機械、電気など多岐にわたり、種類が多くなった場合にも有効な手段である。FMEAは、設計段階でシステムを適当なレベルのすべての構成要素（パーツのレベル）にまでブレークダウンし、それらに対してあらかじめ予想される故障モードを漏れなくリストアップして、その故障がシステムの任務遂行に与える影響を検討することによって、潜在する設計上の問題点を明らか

表1 主要二重故障の場合の自力浮上能力のチェックシート

Table 1 Check of Surfacing Buoyancy in case of Double Major Failures

装 置  水中 重 量  (kgf)  故障	バラスト離脱不能				耐圧容器浸水			インバータ 主回路均圧 油海水置換	回復手段			浮量  △は正浮量
	下降用バラスト		上昇用バラスト		補助タンク	インバータ制御部	高圧気密器		垂直スラスター	補助タンク 排 水	緊急離脱	
	285	285	△350	△350	150	90	40		40	△100	△150	△308
バラスト1組離脱不能 + 耐圧容器1基浸水	×	×			×	×			×	×		△633 △825 △568 △758
バラスト1組離脱不能 + 他ノバラスト1組離脱不能	×	×	×									△688 △623 △558

\* 1 海面浮上まで必要な最低浮量は、340 kgf (海水比重差による浮量差のため)

にするものである。すなわち、展開の方向は下位の部品から上位に向かうボトムアップのタイプとなる。

### 2.2.2 FMEAによる解析

本方式の適用に当たって、次の手順に従いそれぞれ対応する資料を検討作成した。

- (1) 潜水船システムの機能分析を行い、対象とするシステムを選定し、サブシステムに分類した。(表2 機能分析表)
- (2) 論理ブロック図等により、システムを構成する各機器の機能の相関を明らかにしたうえで、選定したサブシステム機能単位で、故障モードをリストアップし、それぞれに対する影響を解析する。(表3 FMEAシートの例)
- (3) 影響度の大なる装置、品目をリストアップしそれに対し対策を検討する。(表4 重要品一覧表例)

以上のように、このFMEA解析によって、その故障が潜水船の運用に支障を来すような装置に対し、それを構成する機器部品などの故障原因と対策を、運航・保全の段階を含めて明らかにした。特に次ぎに示す検証が行われた。

#### (1) 故障検知法

オペレーション中に故障が発生した場合、それを検知できないため重大事故に発展することも考えられるので、早期に故障を発見するための手段があるかを明らかにする。

#### (2) 運航中の応急処置

運航中に発見された故障は、その与える影響の程度に応じて、出来るだけ速やかに除去または修正されなければならない。これら応急手段の有無を検討し、予め計画された代替運用モードがあれば準備し、その信頼性評価に勘案する。

(3) 保管要領及び運用前後の点検整備要領事故の発生を未然に防止するためには、潜水船の運用の前後における充分な点検整備や日常の保守が必要とされるので、これら作業マニュアルの作成資料に供するものとする。

#### (4) 工事時及び検査時の点検要領

建造中及中間検査、定期検査工事で実施すべき項目や内容、またそれらの適正な頻度を把握する。一方、重点項目一覧表は、実施したFMEAの結果に基づき、その故障が人命及び潜水船の

使命に重大な影響を与えると考えられる構成部品を抽出した。この場合、重要度の分類は、次のように5段階として定義、評価した。

重要度	故障の潜在的影響
1	人命あるいは潜水船の喪失等の重大事故
2	潜水船の機能喪失、緊急浮上装置により浮上可能
3	潜水船の機能一部喪失、通常の操作により浮上可能 (修理のため行動中止、帰港)
4	潜水船の機能一部喪失、通常の操作により浮上可能(母船上で修理後オペレーション再開)
5	通常の運航に支障なし

この分類に従い、FMEAシートに重要度を判定し、その中から重要度1及び2をピックアップして重要品目一覧表に取りまとめた。表4にその一例を示す。

この表では、推定される故障モードに対し、その予防対策並びに万一故障が発生したときの各種の対策を明確にし、安全確保の配慮に抜けがないことを実証した点に特徴がある。

### 2.3 バウンダリー解析の概要と解析

#### 2.3.1 バウンダリー解析の概要

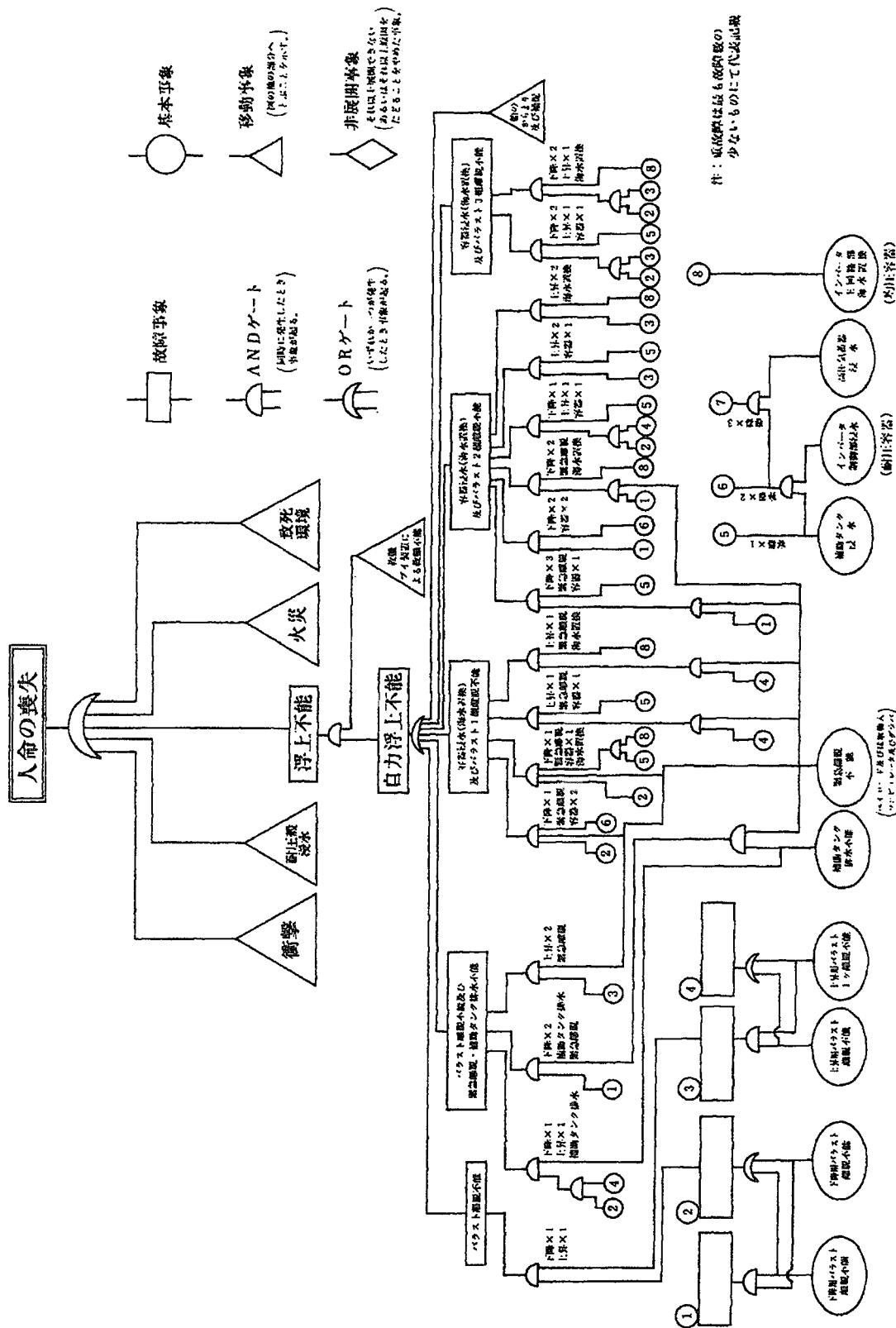
本解析法では、安全上特に重要な機器・系統について、信頼性のバウンダリーを明確にすると共に、担保試験などの品質保証履歴を勘案し、信頼性確保の考え方を中心とした評価解析を行う。信頼性確保の考え方は、次の(1)～(3)に示す3種類の考え方に基づき記述分析された。

#### (1) ハードウェアの信頼性確保

特定された機器系統のバウンダリー内の構成品について、ハードウェアとしての信頼性を確保する上での性格によって、次のように類別する。

A種：新しい材料、構造、方式などの採用により既知の設計方法・基準では十分な信頼性を確認又は担保できない設計要素で、事前に定められた試験を実施し、その結果を評価の上、設計に適用するもの。

添付資料-8(7/18)



バラスト電説装置	補助タンク母水装置	緊急脱出装置	耐圧容器	均圧容器
<p>○油圧の供給が停止しても離脱可能なシステムとする。又、電源「断」時にはバラストが自動離脱するフルセーフティシステムとする。</p> <p>○バラスト離脱不能の場合には、長押部を含め離脱可能なよう緊急脱出装置を設ける。以上のように通常の離脱手段を含め、3種の離脱手段を設ける。</p> <p>○電源離断などによる警報せぬ離脱を防ぐための操作部は主配電盤母線から直接とり、操作の可能性を少なくする。</p> <p>○離脱装置は実機と同程度のモデルを試作し、実用状態を模擬した作動試験を行う。</p>	<p>○海水ポンプには、使用実績のある離脱ボルトを使用する。</p> <p>○離脱ボルトは張度の影響を見るため試作を行い、高圧下で作動を確認する。</p> <p>○海水盤面弁については実機と同等品を試作し、その性能を確かめる。</p> <p>○補助タンク生排水装置</p> <p>○離脱ボルトまで垂直な2段底とする。</p> <p>○操作電気回路はスイッチより離脱ボルトまで垂直に接続する。</p> <p>○操作電圧は操作電壓は高圧電圧による全システムを組み合せて高圧下で生排水を確認する。</p> <p>○離脱ボルトは倒産時、抜取試験で作動を確かめる。</p>	<p>○3種の等間とも同一設計思想で設計する。なお,T;合金製耐圧等級は設計手法が実験より確立されている。</p> <p>○各等級の開口は容器内で行い、フランジ接合部等の生産等項をマニュアル規定する。又、その他の貫通部も同様の値といふ。</p> <p>○補助タンク浸水に対する液面計及び圧力計による監視を行う。</p> <p>○高圧容器部は船外に圧力センサーを駆け、内圧の監視を行う。</p> <p>○インバータ制御部は浸水に対し、電気的接続部による固端接続を行うと共に、浸水警報を設ける。</p>	<p>○均圧容器は実験のある構造を採用する。</p> <p>○インバータ装置、主配電盤等には浸水警報を設けると共に、電気的接続部による固端接続を行う。</p> <p>○油圧容器は内圧を立てて浸水を防ぐものとする。</p> <p>○油圧容器は内圧ニットに対しては内圧を立てて浸水を防ぐものとする。</p>	<p>○ムード開放後の開放試験</p> <p>○ムード遮断トルクの管理</p>
<p>○バラスト搭載時、離脱作動確認を行う。</p> <p>○離脱ボルトは滑床軸に導通チェックを行う。</p> <p>○離脱ボルトの定期的交換を行う。</p>	<p>○滑床軸に作動確認を行</p> <p>う。</p>	<p>○滑床軸に操作感度回路の導通チェックを行う。</p> <p>○ムード遮断の遮断確認</p>		

図 1 潜水艦のFTA解析（一例）  
Fig. 1 FTA Analysis for Submersible (example)

添付資料-8(9/18)

表 2 FMEA機能分析表  
Table 2 Function Analysis by FMEA

## 潜水調査船

船システム		耐圧又は非耐圧構造から成り、乗員及び機器を収容する。(機能)	電源システム	推進駆動システム	油システム	油圧システム	航洋通信システム	航洋トリム調整システム	耐圧船内の乗員の生存に必要な情報入力を入力し、また支援母船との連絡を行う。	環境制御システム	応急安全システム	開拓観測システム
サブシステム	耐圧外殻構造	本船のエネルギー供給装置として電気エネルギーの貯蔵量、光生、分配、保護及び供給電源の変換を行う。	主蓄電池 主配電盤 インバータ 電源 電池充電装置 応急用蓄電池	主推進装置 垂直スラスター 水平スラスター コントロールボックス 安定ひれ	油圧ポンプユニット 圧力コモンベンセータ 電磁弁ユニット 配管	油圧ポンプユニット 垂直スラスター 水平スラスター コントロールボックス 安定ひれ	バラストタンク 注排水装置 補助タンク 管	バラストタンク 注排水装置 水銀トリム装置 浮力材	高圧ソーナー 向避碰センサー 音響定位装置 視認ソーナー ジャイロコンパス 流流向流速計 水中通話装置 無線機 表示装置	舷梯扶手装置 舷梯ガス隔壁装置 通風装置 計測装置 深度計 航洋操縦装置 安全隔壁	緊急脱乗装置 緊急呼吸装置 救命ブイ装置 消火器 救命胴衣	ミニピュレータ・グラバ 採取物入れ 長光砲 丁Vカマラ スチルカラマ ペイロード機器
機器	外皮を含む。											

システム名称：バラスト離脱装置 サブシステム名称：サブアクチュエータ、2番電磁弁ユニット  
表3 FMEAシート（一例）  
Table 3 FMEA Sheet (Example)

コンボーネント 識別番号 名 称	機能・目的	想定される 故障モード	発生段階	原因	検出法	事故による影響			致命度	行動中の 応急処置	能役作業	保守要領及 び出動前後の 点検箇所	設計へフィードバックする要項	工作時・検査時における強調事項	記事
						システム	本起燃能	人命							
TB01 / TB04 油 壓 アクチ ュエー タ	バラストを支 えているロッ ク材の反対端 を介して保持 又は離脱を行 庄により行う。	ショートが不 固伝しない。	海水中に バラストが浮 していない。 底がなく。 底脱作動時	(1) 作動油の 供給がない。 底脱作動時	バラストが浮 していない。 底脱作動時	能力不能	直燃錠	燃錠不能	なし	2 (1) 下降用の場合 上昇用を離脱 させた際上す る。又は下降 用を緊急状況 で浮上する。	原因説明し 再製作高は 床に正常に作 動するか確認。 作動確認	出動前、海水 年燃能	油圧トルク アクチュエ ータと組合 せて無負荷 状態にてク ランク軸か ら回転させ て、外部トル クが1.4 kgf・m 以 下になるよ う組立確認 する。		
HP105 HP106 電磁弁 切換弁	電磁弁となっ た場合、電磁 弁 HP65, H P66が呼び立 替となりバラ ストを自重落 下させる。こ のときアクチ ュータ内に 圧油が入り、 抵抗が大きくな るのでこれを 極力小さくす るために本弁を 駆けた。	弁が作動し ない。(図のま で明記) (いい。)	海水中に 電磁弁ス プール に他の 機器のか み込み 操作したた とき	(1) イッチを 操作したた とき (2) スプリ ングに機器 のかみ込み み	通常の場合 燃錠なし。 燃錠折とな ったときに バラスト自 重落下がし にくくなる。	常 正	な し	5	-	分解点検後 不良部品交 換	出動前、海水 年燃能	-	異物が混入 しないよう 特に注意。		

表 4 重要品目一覧表  
Table 4 Reliability Weightening of System Components  
システム名称：バラスト離脱装置－油圧アクチュエータ

品目	故障モード	原因	影響	重要度	故障防止対策		故障発生時対策
					故障監視、自動停止及び防護機構	二重系又はバックアップシステム	
油圧アクチュエータ	作動不能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作動油の供給不能</li> <li>・アクチュエータ内回転摺動部品破損</li> <li>・外部抵抗増</li> <li>・異物のかみ込み</li> </ul>	<p>↓</p> <p>バラスト離脱動作不能 重圧調整、操船不能</p>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同形式のアクチュエータによる試作試験で以下を確認</li> <li>・耐圧漏洩</li> <li>・常圧下性能作動</li> <li>・高圧下性能作動</li> <li>・耐久性</li> <li>・出動前及び着水前作動点検の徹底</li> <li>・油圧力</li> <li>・アクチュエータの作動速度</li> <li>・振動</li> </ul>	<p>深度変化（速度）による監視</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急投棄装置</li> <li>・下降用の場合上昇用を離脱させて浮上、又は下降用を緊急投棄させて浮上</li> <li>・上昇用の場合緊急投棄させて浮上</li> </ul>

B種：基本的には既知の設計方法・基準でその信頼性を確認担保できる設計要素であるが、設計条件等が従来の実績から大きく離れているために事前に定められた試験を実施し、その結果を評価の上、設計に適用するもの。

C種：既知の方法・基準によって、その信頼性を確認担保できる設計要素で、実機部品での諸検査によりその性能を確認するもの。

以上の各類ごとの信頼性の評価確認により、重要な機器・系統のバウンダリー内部での信頼性がほぼ均等なものになるべく計画設計する。

(2) システム設計の基本方針、設計マージン安全率の確認重要機器・系統、バウンダリー構成品について、システム設計の基本方針、設計上設定されるマージン、安全率等について、またそれらの信頼性に及ぼす影響について確認する。

(3) システム設計での防護の手法の分類、評価採用する防護の手法を次の如く分類し、システム信頼性に与える影響及び構成品、システム間の信頼性バランスについて検討・評価する。

(ア) 二重系（多重系）；全く同種のものを二重（多重）に装備し、システム全体の信頼性を高める手法。

(イ) フェールセーフシステム；システムの構成要素の故障がそのシステムの基本機能の喪失に波及しないよう自動的対応をとることにより信頼性を高める手法。

(ウ) バックアップシステム；常用機器の他に異種の機器を装備し、常用機器の故障時に異種の機器をそのバックアップとして使用し、喪失機能を補わせることにより信頼性を高める手法。

(エ) 統系分離；同一機能の構成要素を細分化し、個々の要素の故障で機能全体を失わぬようにして信頼性を高める手法。

この他、これら機器・系統に対して監視警報システムと異常時の対応処置及び運航、運用上の対策について確認検証した。

### 2.3.2 バウンダリー法による解析

バウンダリー法の対象となる安全上特に重要な機器・系統として、耐圧殻、生命維持装置、電源装置及びバラスト離脱装置の4つのシステムを選定し解析を行った。一例として耐圧殻システムに関する信頼性確保の考え方を表5にまたそのバウン

ダリー図を図2に示す。また品質保証履歴における対応処置の見直しを含めた、ハードウェアの信頼性確保の考え方について纏めたものを表6.1、および6.2に示す。

## 3 解析結果

### 3.1 FTAによる解析結果

(1) 「人命の喪失」をトップ事象とし展開した各々の最終事象に対して設計及び運用上の対策を検討した結果、人命事故に関連する安全対策上の重要ポイントを認識することができた。また設計上及び運用上の対策に、一貫性・整合性があることまた対策のバランスという点で妥当であることが実証できた。

(2) 焦点となる耐圧殻の浸水事故については、異種方式による二重系を持つことが困難であり、事故の発生が直接人命の安全に影響を与える重要な装置であるため、これに対するは理論、実績評価及び実証試験によって対処することとした。

耐圧殻貫通部のシール方式の考え方と検証内容を表7に示す。

(3) 人的要因を多分に含む事事故象「下降操縦での海底への衝突」に対しては、「離脱操作遅れミス」を防ぐに十分な監視手段を設定していること、またハード的に浮上不能となる3重以上の「バラスト離脱不能」という事象が、確率的には極めて小さい事象であることが確認された。

### 3.2 FMEAによる解析結果

(1) 潜水調査船の機能分析に基づき解析を主要システムについて実施し、重要品目一覧表などにまとめた結果、考えられる故障はすべて重要度2、すなわち「潜水船の機能喪失、緊急浮上装置により浮上不能」以下の故障であることまた、これら推定された故障モードに対しては、それぞれ十分な対策がとられていることが確認された。

(2) 潜水船の詳細設計、建造に当たっての信頼性確保の上での注意点をはじめ、運用にあたっての故障修理、保守、点検整備上の重要なチェックポイントが重み付けをもって把握できた。

### 3.3 バウンダリー法による解析結果

(1) 安全上特に重要な機器・系統のバウンダリー内構成部品について信頼性確保の困難さを類別

添付資料-8(13/18)

表 5 安全上特に重要な機器・系統の信頼性確保の考え方（その1 耐圧殻）

Table 5 Reliability Concept With Especially Important Systems for Safety Assurance (System 1:Pressure Hull)

項目	内容
機能	水圧に耐え、潜水船の乗員の居住空間及び機器スペースを形成する。
構成パウンダー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐圧殻（貫通金物を含む）                   ・観窓</li> <li>・コニカルシートハッチ                           ・電線貫通コネクタ（レセプタクル）</li> </ul> <p>パウンダリー図は図-2による</p>
ハードウェアの信頼性確保	表-6.1, 6-2による
システム設計の基本方針、設計マージン、安全率等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐圧殻の設計圧壊圧力は使用深度に対して十分な余裕を持たせる。 (使用深度 6500m, 設計圧壊深度 10050m)</li> <li>・形状を極力単純化し、設計の信頼性を高める。</li> <li>・貫通部の数を極力減らす。</li> <li>・開口部のシールは実績のある確実な方法とする。</li> </ul>
システム設計での防護の手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バックアップシステムの採用</li> <li>(ア) ハッチのシート部は高圧シールとしてメタルシール、低圧シールとしてOーリングシールを用い、2重シールとする。</li> <li>(イ) ハッチ開閉軸シールはOーリングによる2重シールとする。</li> <li>(ウ) 電線貫通コネクタシール部はOーリングによる2重シールとする。</li> </ul>
監視・警報システム	・深度計2台及びCTDV1台で潜航深度を監視し、クロスチェックする。また、母船上でも潜水船の潜航深度を監視する。
運航上の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水深 6500mを超える海域では潜航しない。（潜航海域の選定）</li> <li>・耐圧殻、観窓及びコニカルシートハッチは出港時及び年換・定期時に有害な傷のないことを点検確認する。</li> <li>・コニカルシートハッチ蓋のシート面及びOーリングは潜航前に目視チェックする。</li> <li>・観窓シート面についても潜航前に目視チェックする。</li> <li>・各貫通部のシール類は原則としてオーバホール時に新替える。</li> <li>・観窓は定期的に交換する。</li> </ul>

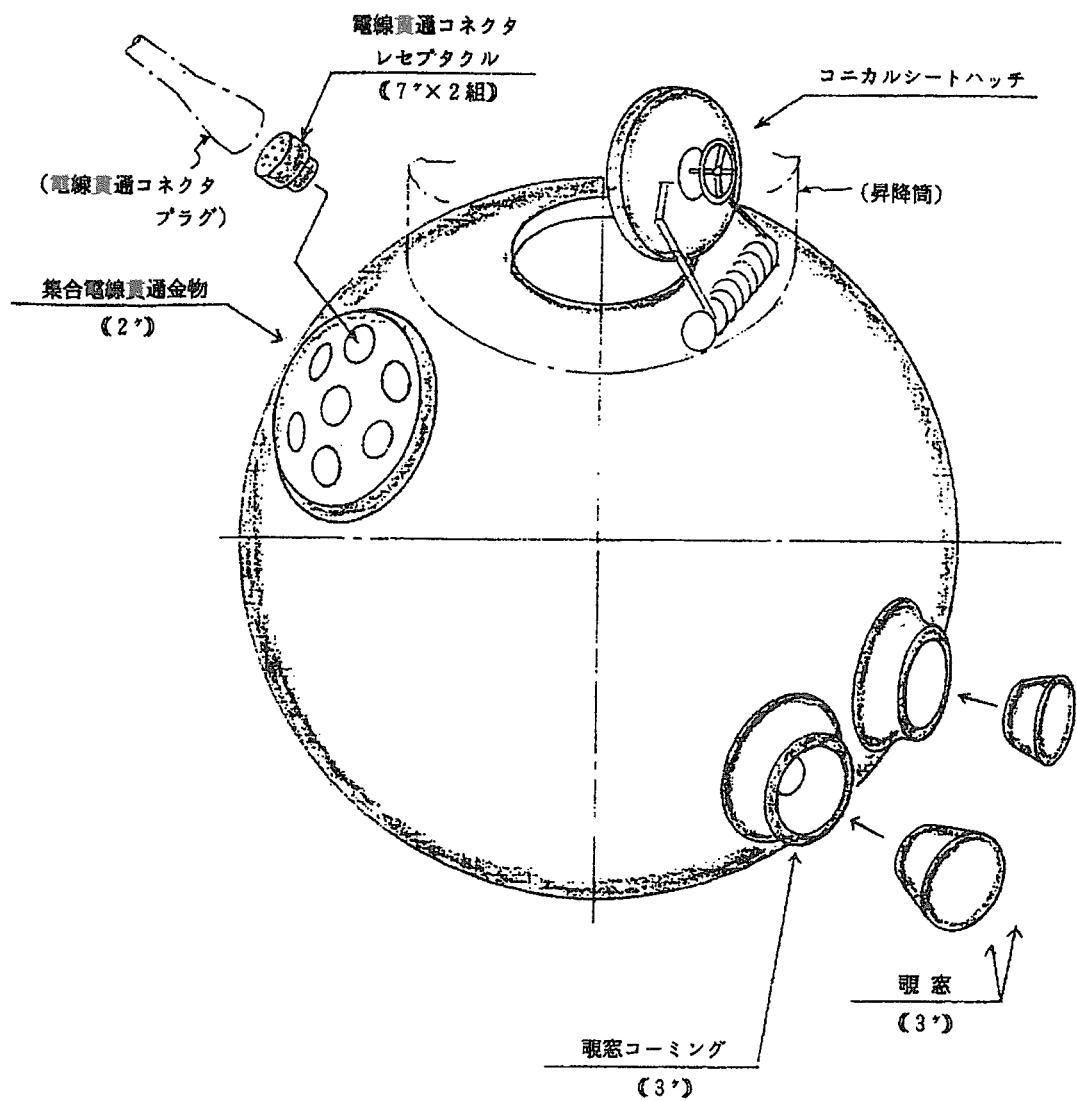


図 2 耐圧殻のバウンダリー  
Fig. 2 Critical Boundary of Sphere Pressure Hull

添付資料-8(15/18)

表 6-1 ハードウェアの信頼性確保の考え方（その 1 耐圧殻）

Table 6-1 Concept for Reliability Assurance of System Hardware ( System 1:Pressure Hull )

機能	構成 (パウンダー)	信頼性確保の考え方	対応する処置
耐水圧に耐え、潜水船の乗員の居住空間及び機器スペースを形成する	(1)耐圧殻 (貫通金物を含む) (2)コニカルシートハッチ (3)覗窓 (4)電線貫通コネクタ (レセプタクル)	(1)耐圧殻 (A種) : 新材料チタン合金を採用した大型構造物であり、材料・工作法・設計法の信頼性を事前に評価・確認し、実機製造に反映する。  パウンダーは図-2による	・材料及び工作法：実物大の模型を実機製造手順に従って制作し、更に解体試験を行い、材料・成型・熱処理・機械加工・溶接法全般にわたる工作法の評価・確認を行う。 (昭和59年度船殻専門部会にて審議し、評価・確認済) ・設計強度：同一材料による縮尺球殻模型 (正球、窓付、ハッチ付) 3個により圧壊試験、クリープ試験、及びクリープ試験後の圧壊試験を行い、チタン合金殻の設計法を評価・確認する。 (昭和59年度船殻専門部会にて審議し、評価・確認済) ・総合評価：ハッチ及び窓付の縮尺球殻模型を同一材料、同一設計法、同一工作法にて制作し、最大圧力での繰返し加圧及びその後の圧壊試験により設計・工作法の総合確認を行う。 (昭和60年度船殻専門部会にて評価・確認済)  (2)コニカルシートハッチ (B種) : 成型は“しなかい2000”と同じであるが、新しい材料であり、又設計応力も高いので、事前に設計法の評価・確認を行い、実機設計に反映する。

表 6-2 ハードウェアの信頼性確保の考え方（その 1 耐圧殻）  
Table 6-2 Concept for Reliability Assurance of Hardware ( System 1:Pressure Hull )

機能	構成 (パワンドライバー)	信頼性確保の方考え方	対応する処置
水圧に耐え、潜水船の乗員の居住空間及び機器スペースを形成する	(1)耐圧殻 (貫通金物を含む) (2)コニカルシートハッチ (3)観窓 (4)電線貫通コネクタ (レセプタクル)  パワンドライバーは図-2による	(3)観窓 (B種) : 材料・形式は "しんかい2000"と同じであり、ASMEによる設計基準もあるが、所要強度に対応する実機基準データが無いので、事前に設計・強度についての評価・確認を行い、実機設計に反映する。  (4)電線貫通コネクタ (B種) : 使用実績のあるコネクターを輸入し、使用するが、実機データが不充分であり、事前に評価・確認を行い、信頼して実用しうることを確認する。	・設計強度：実機と同一材料、同一寸法、同一シール法の観察を行い、強度・シール性の評価・確認と落重試験による衝撃強度の評価・確認を行う。 ・耐圧殻との取合い：(1)耐圧殻に示した縮尺模型 (窓付) の繰返し加圧試験により評価・確認する。  (昭和59年度船専門部会及び昭和60年度設計研究にて評価・確認済)

表 7 耐圧殻貫通部のシール方式の考え方

Table 7 Sealing Mechanism of Pressure Hull Penetrators

機器	シール形状	シール方式の考え方	実験
コニカルシートハッチ	O-リング部 (外海水側) シート面 (耐圧殻内)	(1)通常の考え方では、外圧負荷により発生するシート面でシール機能を発揮させるメタルシールの考え方を採用している。このため、設計上は、外圧作用時にシート面の変形による開き及び滑りのない形状とすることで、加工面では適切な密封を確保するため、実物同士の組合せを行い、高圧度仕上げをしている。  (2)シート面圧の小さい浸漬度域及び内圧負荷時のシール性能保証及び上記タルシールのバックアップとしてO-リングシールを追加し、二重シール構造となっている。	(1)米田溝水船Alvinも同一方式が採用されている。 ムーブルシートハッチのハッチの詳細は不明であるが、2分割耐圧殻の半球同士を1本のO-リングを介してボルト締めとして、耐圧殻を形成している。 (2)しかし2000回試験時に実施されたシール性能試験でも良好な結果が得られている。 (3)本船の遮音材に対しては、縮尺模型にて1500回のくり返し加圧を行い、製造法を評価確認した。(昭和50年設計研究)。  
閉鎖端	貫通部 (外海水側) シートハッチ (耐圧殻内)	(1)ハッチ開閉用ハンドル側は鋼側の間に回転運動する部分であり遮音性確保のため、(O-リングA+O-リングC) 及び (O-リングB+O-リングC) の二重シール構造としている。  (2)シートハッチハッヂとリーナーリングとの間にO-リングCを設けている。	(1)Alvin及びMote也同一シール方式を採用しているものと思われる。 (2)ASMEにも本シール方式が記載されている。 しかし2000回試験でも良好な遮音性が得られている。
窓	シートハッチ (外海水側) シートハッチ (耐圧殻内)	(1)コニカルシートハッチと同様に観察と観察コニカル装置面をコニカル形状とし、高圧面(外)側は接水面圧によるシール機能を持たせている。当り面は治具による組合せ加工により接水面圧度を確保している。  (2)シート面圧の小さい浸漬度域及び内圧負荷時のシール性能保証のため遮音室側面(外海水側)にO-リングAを設置し、リーナーリングで押さえられる構造としている。	(1)耐圧殻試験模型にて1500回のくり返し加圧を行い、シール機能を評価・確認した。(昭和56年設計研究)。 しかし2000回試験でも良好な遮音性が得られている。 また、材料の遮音材に対して、実施する耐圧強度試験の中でシール性能を確認する。 耐圧殻完成品に対して使用深度の1.1倍の外圧を負荷し、シール性の確認を行う。
電線貫通部	シール部 (外海水側) シール部 (耐圧殻内)	(1)セブタクルと混合電線金物間 (O-リングB-1)+(O-リングA-2)の2本のO-リングを挿入することにより二重シール構造としている。  (2)セブタクルとブラック間 (O-リングB-1)+(O-リングB-2)の2本のO-リングを挿入することにより二重シール構造としている。	(1)Sea cliff, ISRV(防衛府)にも採用されている。  (2)しかし2000回に対しても同一シール方式が採用されており、良好な結果が得られている。  (3)実船品との同一品で、MIL-C-24217による耐水圧試験(1.020kgf/cm <sup>2</sup> ×1分×254kgf + 1.020kgf/cm <sup>2</sup> ×24時間)を実施し、レセブタクルと耐圧殻のシール性能を確認する。

し、それに基づき品質保証履歴、設計マージン、安全率を考慮した対策の評価を行った。その結果バウンダリー構成要素に対してバランスのとれた的確な対策が採られていることを確認した。

(2) また各構成要素の設計製造における二重系及びフェイルセイフなどの対策処理が、適切であることを確認検証した。

(3) 以上の対策処理に対応して、監視、警報システム、異常時の対応処置及び運航上の対策が、整合性のある適切なものであることを確認した。

#### 4 むすび

6500m 潜水調査船の設計研究及び基本設計とほぼ同期して始められた、これら信頼性解析検討は、本潜水船の引渡しを控えたこの時点、纏められ総合的な評価が加えられている。解析の結果は、「しんかい2000」での信頼性評価がベースとなっていることもあり、詳細設計及び建造の段階での設計へのフィードバック事項も比較的少ない、高い信頼性をもつ計画設計であることが実証された。

引渡し後の慣熟訓練及び1991年から予定されている本格的な調査潜航において、本潜水船が十分な信頼性をもって所期の性能を発揮してゆくために、今後も運用・保全面においてこれら信頼性検討結果を十分に活用するため、各種規定、要領に反映することが重要と考えられる。

最後に、これら解析を実施するに当たって適切な指導をして戴いた海洋科学技術センター安全対策検討会及び6.5K信頼性検討部会に厚く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 渡辺俊夫、浜田 騒：2000m 潜水調査船「しんかい2000」の信頼性評価、三菱重工技報、Vol. 18, No. 3, (1981)
- 2) 米国原子力委員会（木原 博他訳）：原子力安全性ハンドブック、(1975)

(原稿受理：1989年12月6日)

## 略語一覧

- ABE : Autonomous Benthic Explorer 「自律型海底探査機（ウッズホール海洋研究所）」
- ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler 「多段式音響流向流速計」
- ADEOS : Advanced Earth Observing System 「地球観測技術試験衛星（NASDA）」
- AMPS : Autonomous Marine Power Source, 自律海洋動力源
- ASL : The Naval Undersea Warfare Center's Arctic Submarine Laboratory
- AUV : Autonomous Underwater Vehicle 「自律型無人機」
- BOD : Blow Out Preventer 「防噴防止装置」
- CCDE : Closed Cycle Diesel Engine 「密閉型ディーゼルエンジン」
- CLIVAR : Study of Climate Variability and Predictability 「気候変動及びその予測可能性に関する研究(WCRP)」
- CTD : Conductivity Temperature Depth Profiling Instruments 「塩分水温深度計」
- DOSE : Dynamics of Solid Earth 「固体地球力学計画(NASAほか)」
- DPS : Dynamic Positioning System 「自動船位保持装置」
- DRX : Deep-sea Reactor X, 深海科学調査船用原子炉
- EOS計画 : Earth Observing System 「地球観測衛星計画（NASA）」
- ESA : European Space Agency 「欧州宇宙機構」
- EDRS : Emergency Decay heat Removal System, 非常用崩壊熱除去設備
- GAME : GEWEX Asian Monsoon Experiment 「アジアモンスーン・水循環観測研究計画(WCRP)」
- GLOBEC : Global Ocean Ecosystem Dynamics 「海洋生態系の地球規模変動 (OSLR)」
- GLOSS : Global Sea-Level Observing System 「全球海面水位観測システム (IOC)」
- GOOS : Global Ocean Observing System 「世界海洋観測システム (IOC/WMO/UNEP)」
- GEWEX : Global Energy and Water Cycle Experiment 「全球エネルギー・水循環実験計画(WCRP)」
- ICSU : International Council of Scientific Union 「国際学術連合会議」
- IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme 「地球圏－生物圏国際共同研究 (ICSU)」
- IGOS : Integrated Global Observing Strategy 「統合地球観測戦略」
- InterRidge : International Ridge Interdisciplinary Global Experiment 「国際海嶺研究計画」
- IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission 「政府間海洋学委員会 (UNESCO)」
- IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 「気候変動に関する政府間パネル (WMO/UNEP)」
- JGOFS : Joint Global Ocean Flux Study 「世界海洋フラックス研究 (IGBP)」
- JAMSTEC : Japan Marine Science and Technology Center 「海洋科学技術センター」
- LOCA : Loss Of Coolant Accident, 原子炉冷却材喪失事故
- LOICZ : Land and Ocean Interaction in the Coastal Zone 「沿岸域における陸と海の相互作用の研究 (IGBP)」
- NASA : National Aeronautics and Space Administration 「米航空宇宙局」
- NASDA : National Space Development Agency of Japan 「宇宙開発事業団」
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administrator
- MBES : Multi-narrow Beam Echo Sounder, マルチナロービーム音響測深機
- MRX : Marine Reactor X、日本原子力研究所の大型船舶用原子炉
- OD21 : Ocean Drilling for 21st. Century 「21世紀の深海掘削計画」
- OPP : Ocean Drilling Program 「国際深海掘削計画」

OSLR	: Ocean Science in Relating to Living Resource 「生物資源に関する海洋科学事業 (IOC)」
RI	: Radioisotope, 放射性同位元素
ROV	: Remotely Operated Vehicle, 「遠隔操作無人潜水機」
PRMS	: Pressure Reduction and Make-up System, 減圧注水設備
SAGA	: フランスの運用する多目的潜水調査船
SBP	: Sub Bottom Profiler, 「サブボットムプロファイラ」
SCAMP	: The Seafloor Characterization and Mapping Pod
SCICEX	: Scientific Ice Expedition (The submarine arctic science cruise)
SCR	: Submersible Compact Reactor, 潜水船用超小型炉
SSS	: Side Scan Sonar, 「サイド・スキャン・ソナー」
TOA-ARRAY計画	: Tropical Atmosphere- Ocean Array, 「熱帯太平洋域における観測ブイの展開計画」
TRITON	: Triangle Trans- Ocean Buoy Network, 「海洋観測ブイ (JAMSTEC)」
TRMM	: Tropical Rainfall Measuring Mission, 「熱帯域降雨観測衛星開発計画 (NASA/NASDA)」
UNEP	: United Nations Environmental Programme, 「国連環境計画」
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, 「国連教育科学文化機関」
UROV	: Untethered Remotely Operated Vehicle, 「使い捨て光ケーブル式無人機」
VLBI	: Very Long Baseline Interferometer, 「超長基線電波干渉計」
WCRP	: World Climate Research Programme, 「世界気候研究計画 (WMO/ICSU)」
WMO	: World Meteorological Organization, 「国際気象機関」
WOCE	: World Ocean Circulation Experiment, 「世界海洋循環実験 (WCRP)」
XCTD	: Expendable Conductivity, Temperature, Depth Profiler, 「投下式 CTD」

# 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	$s^{-1}$
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$N/m^2$
工率、放射束	ジュール	J	$N \cdot m$
電気量、電荷	ワット	W	$J/s$
電位、電圧、起電力	クロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	$W/A$
電気抵抗	フーリード	F	$C/V$
コンダクタンス	オーム	$\Omega$	$V/A$
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
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	$cd \cdot sr$
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

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

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

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
バーアン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	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	$N (=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

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

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

圧力	$\text{MPa} (=10 \text{ bar})$	$\text{kgf/cm}^2$	atm	$\text{mmHg} (\text{Torr})$	$\text{lbf/in}^2 (\text{psi})$
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
$6.89476 \times 10^{-3}$	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
									= 4.184 J (熱化学)	
	$3.7 \times 10^{10}$	1	0.01	1	1	1	$2.58 \times 10^{-4}$	1		

線量当量	Sv	rem	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
			1	100
	0.01	1		

