

「しんかい 6 5 0 0」の信頼性解析について

高橋 憲二^{*1} 木内 大助^{*1} 渡辺 昶彦^{*2}

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・システムに対し、バウンダリー解析を実施し、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^{*3} Daisuke KIUCHI^{*3}
Nobuhiko WATANABE^{*4}

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-

^{*1} 深海開発技術部

^{*2} 三菱重工(株)神戸造船所

^{*3} Deep sea Technology Department

^{*4} Mitsubishi Heavy Industries, Inc.

ectiveness 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, safety 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の設計手法を導入し、対策として落ちのこない、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。²⁾ 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・システム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、このように統計的な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。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」¹⁾

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上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—
(人命の安全) | — | (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 |

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	高圧気蓄器		垂直スラスト	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) 影響度の大きな装置、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あると考えられるので、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十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

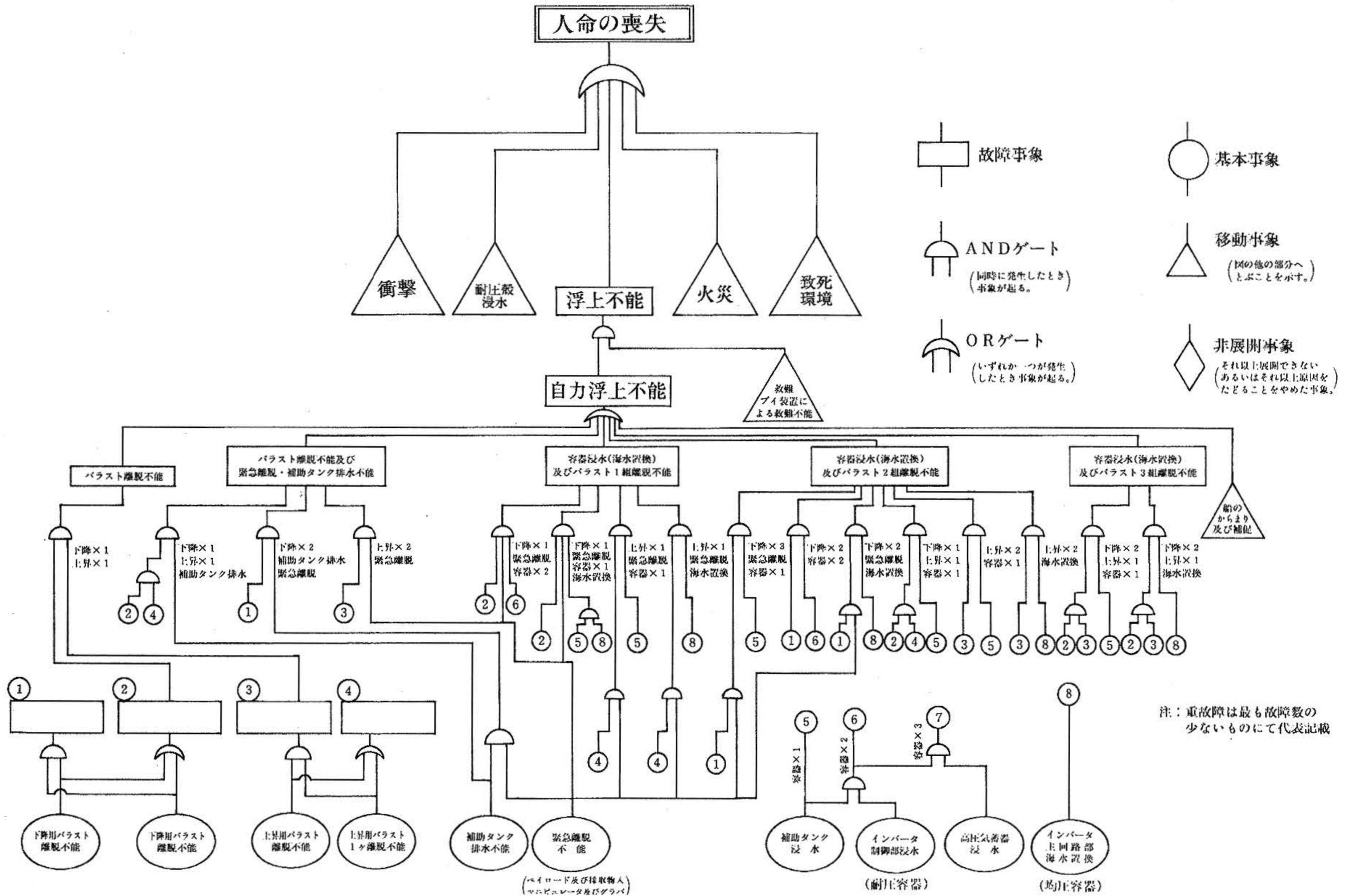
2.3.1 バウンダリー解析の概要

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種類の考え方に基ずき記述分析された。

(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部品について、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。



	バラスト離脱装置	補助タンク排水装置	緊急離脱装置	耐圧容器	均圧容器
設計・製作上の対策	- 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ェールセーフシステムとする。 - バラスト離脱不能の場合には、保持部を含め離脱可能なよう緊急離脱装置を設ける。以上のように通常の離脱手段を含め、3重の離脱機構を設ける。 - 電源瞬断などによる意図せぬ離脱を防ぐため操作電源は主配電盤母線から直接とり、誤動作の可能性を少なくする。 - 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。	- 海水ポンプについては実機を用いて耐久性試験を行い実用性を確かめる。 - 海水浸漬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。 - 補助タンク注排水装置全システムを組み合わせて高圧下で性能を確認する。	- 離脱部には、使用実績のある離脱ボルトを使用する。 - 離脱ボルトは深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。 - 操作電気回路はスイッチより離脱ボルトまで独立な2系統とする。 - 操作電源は通常電源による他、応急電源をバックアップとする。 - 離脱ボルトは製造時、抜取試験で作動を確かめる。	3種の容器とも同一設計思想で設計する。なお、Ti合金製耐圧容器は設計手法が実験より確立されている。 - 各容器の開放は建屋内で行い、フランジ接合要領等の注意事項をマニュアル規定する。又、その他の貫通部も同様の扱いとし、閉鎖後には気密試験を行う。 - 補助タンク浸水に対しては液面計及び圧力計による監視警報を行う。 - 高圧気密器は船外に圧力センサーを設け、内圧の監視を行う。 - インバータ制御部は浸水に対し、電気的接断器による回路保護を行うと共に、浸水警報を設ける。	- 均圧容器は実績のある構造を採用する。 - インバータ容器、主配電盤容器には浸水警報を設けると共に、電気的接断器による回路保護を行う。 - 油圧ユニットに対しては内圧を立てて浸水を防ぐものとする。
運用上の対策	- バラスト搭載時、離脱作動確認を行う。 - 離脱ボルトは潜航前に導通チェックを行う。 - 離脱ボルトの定期的交換を行う。	潜航前に作動確認を行う。	- 潜航前に操作電気回路の導通チェックを行う。 - 離脱ボルトは定期的に交換を行う。	ふた閉鎖後の気密確認	- ふた閉鎖後の漏洩試験 - ふた締付トルクの管理

図 1 潜水艦のFTA解析 (一例)

Fig. 1 FTA Analysis for Submersible (exmpmle)

表 2 FMEA機能分析表

Table 2 Function Analysis by FMEA

潜 水 調 査 船

シ ス テ ム (機 能)	船 体 シ ス テ ム	電 源 シ ス テ ム	推 進 操 縦 シ ス テ ム	油 圧 シ ス テ ム	重量トリム調整 シ ス テ ム	航 海 通 信 シ ス テ ム	環 境 制 御 シ ス テ ム	応 急 安 全 シ ス テ ム	調 査 観 測 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。	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、保護及び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。	耐圧殻内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観測の手段である。
サ ブ シ ス テ ム	耐 圧 殻 外 殻 構 造	主蓄電池装置 主 配 電 盤 インバータ 電 路 通信配電盤 応急用蓄電池	主推進装置 主推進首振装置 垂直スラスト 水平スラスト コントロールボックス 安 定 ひ れ	油圧ポンプユニット 圧力コンベンサー 電磁弁ユニット 配 管	バラストタンク 注排水装置 補助タンク 注排水装置 水銀トリム装置 バラスト離脱装置 浮 力 材	高度ソーナー 同期ピンガー 音響測位装置 観測ソーナー ジャイロコンパス 深 度 計 流向流速計 水中通話機 無 線 機 表 示 装 置	酸素供給装置 炭酸ガス除去装置 通 風 装 置 計 測 装 置	緊急投棄装置 応急呼吸具 救難ブイ装置 消 火 器 救 命 胴 衣	マニピュレータ・グラバ 採取物入れ 投 光 器 TVカメラ スチルカメラ ペイロード機器
備 考	外皮を含む。				バラストタンク 補助タンク トリムタンク を含む。				

表 3 FMEAシート (一例)

Table 3 FMEA Sheet (Example)

システム名称：バラスト離脱装置

サブシステム名称：油圧アクチュエータ，2番電磁弁ユニット

コンポーネント			故 障				故 障 に よ る 影 響				致命度	行動中の 応 急 処 置	修 復 作 業	保管要領及 び出動前後 の点検整備	工事時及び 年修又は定 検時の点検 要 領	設計ヘフィ ードバック を要する 事 項	工作时・検 査時に注意 を要する 事 項	記 事
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	サブシステム	システム	本船機能	人 命								
TB01 TB04	油 圧 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 をクランク軸 を介して保持 又は離脱を油 圧により行う。	シャフトが 回転しない	潜水中 バラスト 離脱作動 時	(1) 作動油の 供給がない。 (2) アクチュ エータ内 の回転摺 動部品が破損 (3) 外部抵抗 が大きい (4) 異物のか み込み	バラストが離 脱しないので、 船体が傾く。	能力不能	重量調整 不 能	操船不能	なし	2	(1) 下降用の場合 上昇用を離脱 させて浮上す る。又は下降 用を緊急投棄 させて浮上す る。 (2) 上昇用の場合 緊急投棄させ て浮上する。 (緊急投棄さ せなくても 速度は遅い が浮上は可 能)	原因究明し 再製作又は 修理	出動前、着水 前に正常に作 動するか確認	年検 ○開放点検 ○パッキン 類交換 ○作動確認		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 う組立調整 する。	
HP105 HP106	電 磁 切換弁	電源断となっ た場合、電磁 弁 HP65、H P66が中立位 置となりバラ ストを自重落 下させる。こ のときアクチ ュエータ内に 圧油がこもり、 抵抗が大とな るのでこれを 極力小さくす るため本弁を 設けた。	弁が作動し ない。 (「開」のま まで閉じ ない。)	潜水中 電磁弁ス イッチを 操作した とき	(1) スプール に傷又は 異物のか み込み (2) スプリン グに異物 のかみ込 み	通常の場合 影響なし。 電源断とな ったときに バラスト自 重落下がし にくくなる。	通常の場合 影響なし	同 左	なし	5	—	分解点検後 不良部品交 換	出動前、着水 前に正常に作 動するか確認 する。 作動速度記録 作動範囲チェ ック	年検 ○作動チェ ック 4年毎 ○開放チェ ック ○Oリング 交換 ○耐圧作動 チェック	—	異物が混入 しないよう 特に注意。		
			弁が勝手に 切替わる。 (「開」で使 用中に勝 手に閉じ てしまっ た。)	潜水中 バラスト 保持状態	(1) 電磁コイ ルの断線 (2) 電圧低下 (3) 漏 電	バラストが自 重落下する。	能力不能	重量調整 不 能	操船不能 本船は浮 上、又は 潜入停止 となる。	なし	4	—						

表 4 重要品目一覧表

Table 4 Reliability Weightenning of Systm 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 波及防止機構	二重系又はバックアップシステム	応急措置
油圧 アクチュエータ	作動不能	・ 作動油の供給不能 ・ アクチュエータ内回転摺動部品破損 ・ 外部抵抗増 ・ 異物のかみ込み	バラスト離脱動作不能 ↓ 重量調整，操船不能	2	・ 同形式のアクチュエータによる試作試験で以下を確認 ・ 耐圧漏洩 ・ 常圧下性能作動 ・ 高圧下性能作動 ・ 耐久性 ・ 出動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 ・ 振動	深度変化（速度），傾きによる監視	緊急投棄装置	・ 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 ・ 上昇用の場合 緊急投棄させて浮上

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。

以上の各類型ごとの信頼性の評価確認により、重要な機器・システム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・システム、バウンダリー構成部品について、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部品、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) システム分離；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・システム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・システムとして、耐压殻、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。一例として耐压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) 焦点となる耐压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、これに対しては理論、実績評価及び実証試験によって対処することとした。

耐压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故事象「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・システム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

表 5 安全上特に重要な機器・システム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。
構成バウンダリー	◦ 耐圧殻 (貫通金物を含む) ◦ コニカルシートハッチ ◦ 電線貫通コネクタ (レセプタクル) バウンダリー図は図-2による
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	◦ 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) ◦ 形状を極力単純化し、設計の信頼性を高める。 ◦ 貫通部の数を極力減らす。 ◦ 開口部のシールは実績のある確実な方法とする。
システム設計での 防 御 の 手 法	◦ バックアップシステムの採用 (ア) ハッチのシート部は高圧シールとしてメタルシール, 低圧シールとしてオーリングシールを用い, 2重シールとする。 (イ) ハッチ開鎖軸シールはオーリングによる2重シールとする。 (ウ) 電線貫通コネクタシール部はオーリングによる2重シールとする。
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	◦ 水深 6500mを超える海域では潜航しない。(潜航海域の選定) ◦ 耐圧殻, 視窓及びコニカルシートハッチは出港時及び年検・定検時に有害な傷のないことを点検確認する。 ◦ コニカルシートハッチ蓋のシート面及びオーリングは潜航前に目視チェックする。 ◦ 視窓シート面についても潜航前に目視チェックする。 ◦ 各貫通部のシール類は原則としてオーバーホール時に新替える。 ◦ 視窓は定期的に交換する。

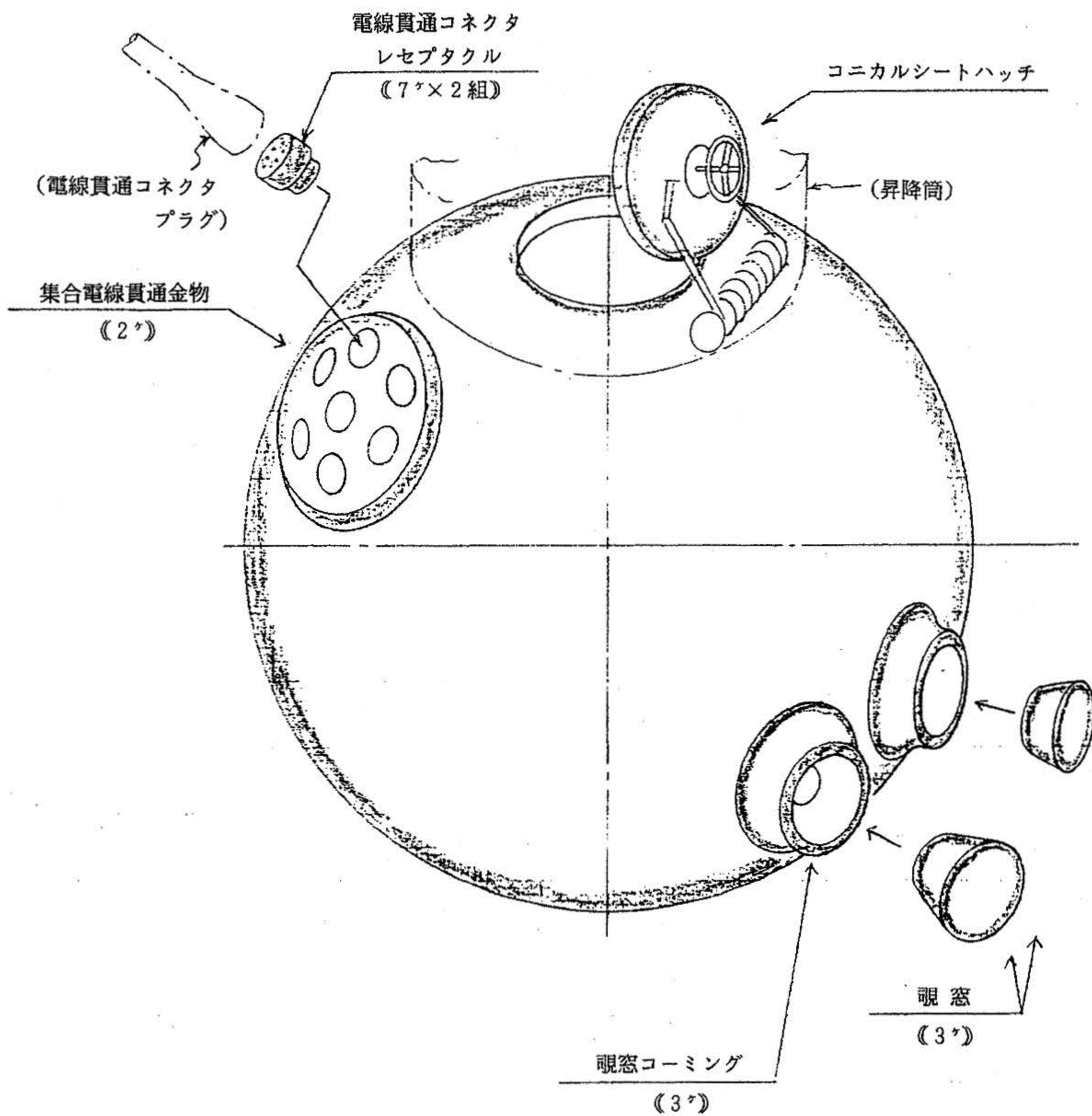


図 2 耐圧殻のバウンダリー

Fig. 2 Critical Boundary of Sphere Pressure Hull

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)

[illegible]

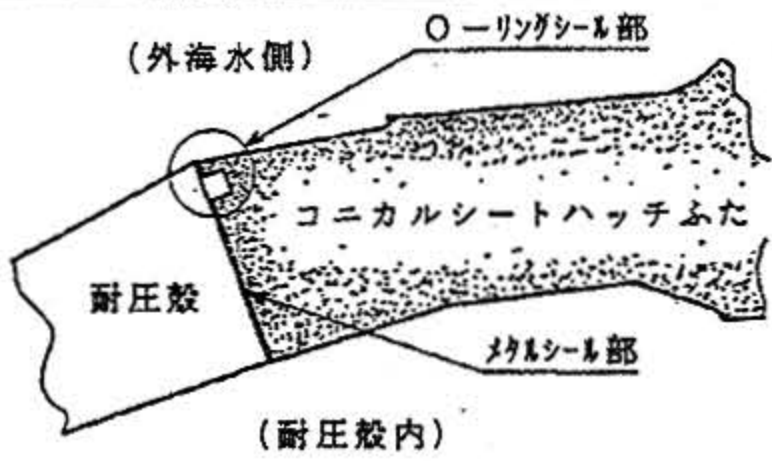
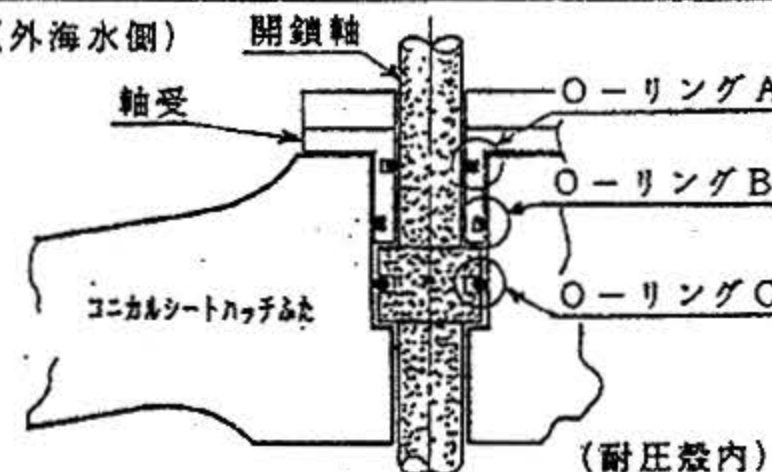
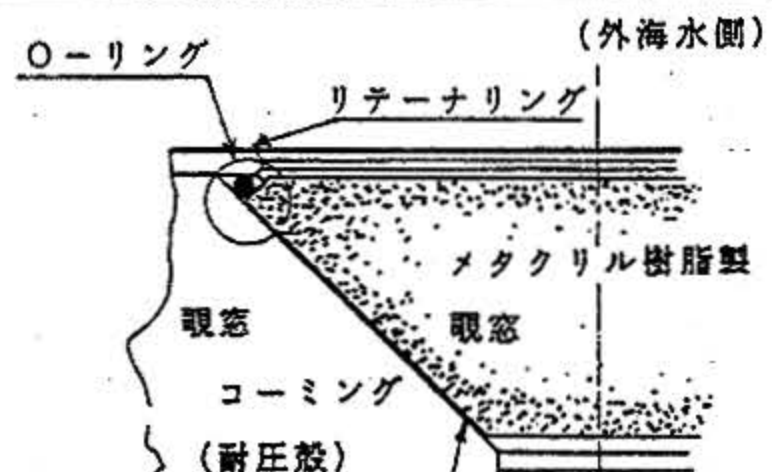
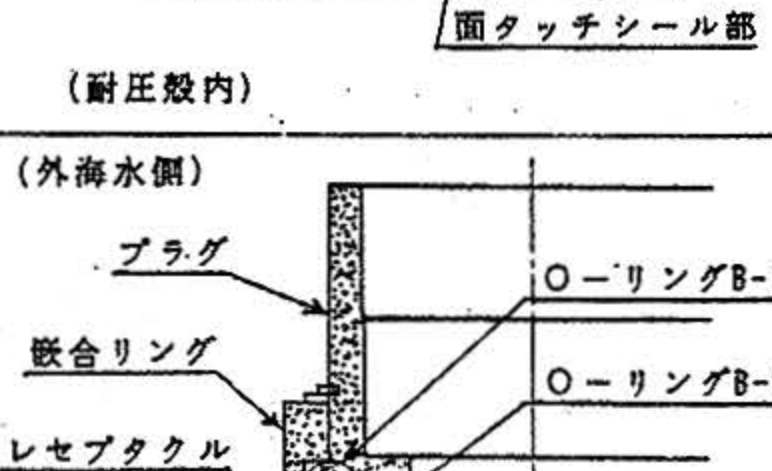
表 6-2 ハードウェアの信頼性確保の考え方 (その1 耐圧殻)

Table 6-2 Concept for Reliability Assurance of Hardware (System 1: Pressure Hull)

	機 能	構 成 (バウンダリー)	信 頼 性 確 保 の 考 え 方	対 応 す る 処 置
耐 圧 殻	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) 視窓 (4) 電線貫通コネクタ (レセプタクル) バウンダリーは図-2 による	(3) 視窓 (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績データが無いので、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を輸入し、使用するが、実績データが不十分であり、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。 ・全体システムとして、耐圧殻に実装品を装備した状態にて外圧試験により実機バウンダリーの評価・確認を行う。	・設計強度：実機と同一材料、同一寸法、同一シール法の視窓を用い、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年度船殻専門部会及び昭和60年度設計研究にて評価・確認済) ・耐圧強度・シール性：メーカー図を強度・シール性の面で他構成品と同等の信頼における手法にて評価し、適切な改造をおり込む。更に受入れ品全数について、強度・シール性を評価・確認する試験を実施する。電圧等の所要の試験を実施し、基本性能を評価・確認する。更に実装品を代表する供試体について、オープンフェース耐圧試験と浸水短絡試験を行い、信頼性を確かめる。 ・DTRCの大型タンクにより、実装品による最大使用深度1.1倍の圧力での耐圧試験及び漏洩試験を行い、強度及び水密性を有することを確認する。

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 績
コ ニ カ ル シ ー ト ハ ッ チ		(1)基本的考え方は、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出ない形状とすると共に、加工面では高当り率を確保するため、実物同士の摺り合わせを行い、高精度仕上げとしている。 (2)シート面圧の小さい浅深度域及び内圧負荷時のシール性確保及び上記メ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)米国潜水船Alvin も同一方式が採用されている。 仏 " Nautille 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して、耐圧殻を形成している。 (2)しんかい2000も同一方式としており、しんかい2000建造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)本船の建造に対しては、縮尺模型にて1500回のくり返し加圧を行い本シール構造の設計・製造法を評価確認した(昭和60年設計研究)。 (4)耐圧殻完成品に対して使用深度の1.1倍の外圧を負荷して、シール性の確認を行う。
		(1)ハッチ開鎖用ハンドル軸は開鎖の度に回転摺動する部分であり信頼性確保のため、(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。	(1)しんかい2000等多数の実績あり。 (2)上記(4)により実装品でシール性を確認する。
眼 窓		(1)コニカルシートハッチと同様に眼窓と眼窓コーミング接触面をコニカル形状とし、高圧負荷時は接触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摺り合わせ加工により表面精度を確保している。 (2)シート面圧の小さい浅深度域及び内圧負荷時のシール性確保のため眼窓高圧面(大径)側にO-リングを装備し、リテーナリングで押さえる構造としている。	(1) Alvin及びNautille も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。 しんかい2000も同一シール方式を採用しており、良好な運転実績が得られている。 本船の建造に対しては、耐圧殻縮尺模型にて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60年設計研究)。 実装品と同一寸法、材料の眼窓に対して、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。
電線貫通コネクタ		(1)レセプタクルと集合電線貫通金物間 (O-リングA-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)レセプタクルとプラグ間 (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, DSRV (防衛庁) にも採用されている。 (2)しんかい2000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)実装品との同一品で、MIL-C-24217 による耐水圧試験 (1.020kgf/cm²×1分×25サイクル+1.020kgf/cm²×24時間)を実施し、レセプタクルと耐圧殻間のシール性能を確認する。



ALVIN のコニカルシートハッチふた

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ー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 馨: 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)