

JAERI-Tech

JP0150731

2001-045



原子動力海中航行船及び搭載超小型原子炉の概念検討

2001年7月

楠 剛・高橋 照雄*・西村 一*・徳永 三伍*

小田野 直光・頬経 勉・石田 紀久

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, Nakagun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

原子動力海中航行船及び搭載超小型原子炉の概念検討

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

楠 剛・高橋 照雄^{*1}・西村 一^{*2}・徳永 三伍^{*3}

小田野 直光・頼経 勉・石田 紀久

(2001年5月15日受理)

海洋調査への原子力利用の拡大を目的として、潜航深度600m級の海中航行観測船の概念検討ならびに同船に搭載する超小型原子炉の概念検討を行った。海中航行観測船は、地球の環境変動を予測するための環境変動メカニズム解明の研究に用いられる。本船の主な活動域は、地球環境変動の大きな影響があるにも係わらず、通常の船舶が活動し難い北極内及び高緯度の荒天海域である。観測活動の要求に基づき、海中航行観測船の基本性能を、船体規模500ton級、潜水深度600m、最大船速12ノット（約22.2km/h）、乗員数16名とした。また、動力源への要求を明らかにした。原子動力は海中で長期間にわたり大出力を供給できる点で優れている。海中航行観測船の概念検討を通じて得られた動力源への要求に基づき、500kWの電気を供給するために、小型、軽量で安全性に優れた潜水船用超小型炉SCR2基を調査船に搭載することとした。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

^{*1} (株)エナジス

^{*2} 海洋科学技術センター

^{*3} (社)日本深海技術協会

Concept of a Nuclear Powered Submersible Research Vessel
and a Compact Reactor

Tsuyoshi KUSUNOKI, Teruo TAKAHASHI^{*1},
Hajime NISHIMURA^{*2}, Sango TOKUNAGA^{*3},
Naoteru ODANO, Tsutomu YORITSUNE and Toshihisa ISHIDA

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

(Received May 15,2001)

A conceptual design study of a submersible research vessel navigating in 600 m depth and a compact nuclear reactor were carried out for the expansion of the nuclear power utilization. The mission of the vessel is the research of mechanism of the climate change to predict the global environment. Through conditions of the Arctic Ocean and the sea at high latitude have significant impacts on the global environmental change, it is difficult to investigate those areas by ordinary ships because of thick ice or storm. Therefore the research vessel is mainly utilized in the Arctic Ocean and the sea at high latitude. By taking account of the research mission, the basic specifications of the vessel are decided; the total weight is 500 t, the submersible depth is 600 m, the maximum speed is 12 knots (22.2km/h), and the number of crews is 16. Nuclear power has an advantage in supplying large power of electricity in the sea for long period. Based on the requirements, it has been decided that two sets of submersible compact reactor, SCR, which is light-weighted and of enhanced safety characteristics to supply the total electricity of 500 kW.

Keywords : Power Source, SCR, Light Water Reactor, Research Vessel,
Conceptual Design

^{*1} Energis, Co.

^{*2} Japan Marine Science and Technology Center

^{*3} Japan Deep Sea Technology Association

目 次

1. 序	1
2. 海洋調査の動向及び技術的課題	3
2.1 国内、国際的な調査動向	3
2.2 各研究分野における主要課題	4
2.3 観測技術上の課題	8
2.4 開発が期待される観測設備	10
3. 対象船種の選定	18
4. 海中航行観測船の概念検討	21
4.1 「地球環境変動の解明」における海中航行船のミッション	21
4.2 有人海中航行観測船の必要性	22
4.3 海中航行船の基本仕様	23
5. 潜水船用超小型炉 SCR の概念検討	37
5.1 原子炉プラントの設計方針	37
5.2 原子炉プラントの概念	37
5.3 安全設備の概念及び事故解析	39
5.4 海中航行観測船用動力源への要求に対する対応	43
5.5 他の海中動力源との比較検討	44
6.まとめ	64
 謝辞	64
参考文献	65
付録 略語一覧	67

Contents

1. Introduction -----	1
2. The Trend and the Technical Subject of Investigations of the Ocean -----	3
2.1 Domestic and International Trend of Investigations -----	3
2.2 Major Subjects in Each Research Field -----	4
2.3 Subjects on the Observation Technology -----	8
2.4 Expected Observation Equipments -----	10
3. Selection of the Research Vessel -----	18
4. Conceptual Study of the Submersible Research Vessel -----	21
4.1 Missions of the Submersible Research Vessel for the Study of the Global Environment Change -----	21
4.2 Necessity of a Manned Research Vessel -----	22
4.3 Basic Specifications of the Submersible Research Vessel -----	23
5. Conceptual Study of the Compact Nuclear Reactor SCR -----	37
5.1 Design Principles of the Nuclear Reactor Plant -----	37
5.2 Concepts of the Nuclear Reactor Plant -----	37
5.3 Concepts of Safety System and Accident Analyses -----	39
5.4 Satisfaction to Requirements for the Power Source of the Submersible Research Vessel -----	43
5.5 Comparison with Other Under Sea Power Sources -----	44
6. Conclusion -----	64
 Acknowledgement -----	64
References -----	65
Appendix Collection of abbreviations -----	67

1. 序

近年、地球温暖化、気候変動などの地球環境の諸問題が顕在化しており、地球環境変動のメカニズムを解明し、その予測精度を向上させることが強く望まれている。海洋は地球環境変動に対して極めて大きな影響を与えており、重要な観測対象であるが、その広さと深さ故に十分な観測が行われていない。海洋の観測活動とりわけ海中での観測活動において、酸素を必要とせず長期間に渡り大出力を供給できる原子力の有用性は明らかであるが、1993年から1999年にかけて行われた米国海軍の原子力潜水艦による北極海科学観測¹⁾以外に、原子力船が活用された例は知られていない。原研では、海洋の観測研究に原子動力を活用するための調査活動を行い、有望な活用方法として原子炉を動力源とした海中航行観測船を想定するととともに、これに搭載する超小型原子炉の概念検討を行った。

海中における動力源としての原子力の潜在的優位性は以前より指摘されている。平成元年度及び2年度には、海中における原子動力利用研究専門委員会²⁾が日本原子力学会に設けられ、学術調査のための観測、地震予知のための観測、海底資源の探査及び採鉱の3つの目的について広く調査が行われるとともに、将来の原子力の利用形態及び技術的課題が検討された。研究専門委員会は、原子力が海中、とりわけ深海域での学術調査、海洋開発、地震予知等のための動力源として、極めて有効であり、その早期実現が望ましいと結論づけている。

しかしながら、現在も海洋調査において原子力が活用されるには至っていない。そこで、原研はより具体的な海洋における原子動力の利用を提案するために、平成8年度から10年度にかけて、舶用炉研究委員会 超小型専門部会内にワーキンググループ（各年度の委員を表1.1～1.2に示す）を設け、海洋における研究及び経済活動の起点となる海洋調査に焦点を絞り、最近の海洋調査の動向と期待される観測設備の調査検討を行った。このワーキンググループの検討に基づき、海洋調査のニーズと原子力を導入することの意義を本報告書の2章にまとめた。3章では対象船種を、地球環境変動のメカニズム解明等の研究に活躍が期待される海中航行観測船とした考え方を示した。第4章では、ワーキンググループでの検討結果を踏まえて、主要目、観測設備等を設定した海洋航行観測船の概念ならびに動力源への要求を整理した。5章では、調査船に搭載する原子炉の概念を示し、他の動力源との比較を行った。6章にはまとめを示した。

表 1.1 平成 8 年度深海・海洋調査への DRX の活用検討ワーキンググループ委員名簿
(敬称略、所属等は当時)

主査	堀田 宏	海洋科学技術センター 特任参事
委員	瀬川 爾朗	東京大学 海洋研究所海底物理学部門教授
	太田 透	東京大学 海洋研究所海洋生物生態部門教授
	西村 一	海洋科学技術センター深海開発技術部第 1 研究グループ研究副主幹
	徳永 三伍	三菱重工業(株) 船舶・海洋事業本部船舶技術部計画主査
	山本 忠利	日本原子力研究所 海洋調査研究室長
	石田 紀久	日本原子力研究所 舶用炉設計研究室長
幹事	高橋 照雄	日本原子力研究所 原子力船研究開発室参事
	楠 剛	日本原子力研究所 舶用炉設計研究室
検討参加者		
	星 薫雄	日本原子力研究所 原子力船研究開発室長
	中沢 利雄	日本原子力研究所 原子力船研究開発室
	佐藤 和男	日本原子力研究所 原子力船システム研究室

表 1.2 平成 9、10 年度海洋調査への超小型船の活用検討ワーキンググループ委員名簿
(敬称略、所属等は当時)

主査	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
委員	太田 透	東京大学 海洋研究所海洋生物生態部門教授
	藤本 博巳	東京大学 海洋研究所海底物理学部門助教授
	西田 周平	東京大学 海洋研究所プランクトン部門助教授
	永田 豊	(財) 日本水路協会海洋情報研究センター所長
	滝沢 隆俊	海洋科学技術センター 海洋観測研究部主任研究員
	西村 一	海洋科学技術センター フロンティア研究推進室調査役
	徳永 三伍	三菱重工業(株) 船舶・海洋事業本部船舶技術部計画主査
	山本 忠利	日本原子力研究所 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舶用炉設計研究室長
	中沢 利雄	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課長
幹事	高橋 照雄	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参事
	楠 剛	日本原子力研究所 エネルギーシステム研究部舶用炉設計研究室
検討参加者		
	武藤 栄一	運輸省 海洋技術安全局技術課新技術推進室原子力技術係長
	村田 佑幸	運輸省 船舶技術研究所原子力技術部安全性研究室長

2. 海洋調査の動向及び技術的課題

2.1 国内、国際的な調査動向

地震、火山、異常気象などによる自然災害の被害額や飢餓の発生は年々増える傾向にある。また、人類の社会経済活動の爆発的な拡大の結果、未曾有の急激な大気中炭酸ガスの増加や森林の減少などを生じ、気候変動、水資源問題、地球温暖化などの地球環境の諸問題が顕在化してきている。この50年間で世界の人口は倍増、経済規模は5倍に成長しており、今後ますます拡大化する社会経済活動の影響により人類の存亡がかかった深刻な事態を迎えることが懸念されている。

この地球環境変動を解明し、その予測精度を向上できれば、自然災害や農業被害などの損害を最小限に抑えるのみならず、人類が自然と共に持続的発展を続けるための国際的な施策の立案が可能となる。特に、貿易立国である我が国は、国際貢献の面からも、また、資源の海外依存の大きいことに対する安全保障の面からも世界に率先して取り組む必要がある。

基礎科学的な面から見ても、過去の地球環境の変動を解明すること、マントルや核を含む地球内部の状況を明らかにすること、あるいは、生命誕生の起源や繰り返される種の大絶滅の原因を解明することなどは、自然災害の予測ということに留まらず、人類がなぜ存在するのかという根元的な問いにも迫るものであり、計り知れない多くの知見をもたらすものである。

このような背景から、科学技術基本計画(平成8年7月2日閣議決定)において、地球・自然との共存及び持続的発展のため、人口の大幅な増加等に伴い顕在化しつつある地球環境、食料、エネルギー・資源等の地球規模の諸問題解決に資する科学技術の重要性を指摘している。また、災害の防止などの諸課題の解決に資する科学技術は、安心して暮らせる潤いのある社会を構築するためにも重要としている。さらに、自然と人間に對する深い理解は、人類が自然との調和を維持しつつ発展を続けるための大前提でもあるとしている。

これを受け、航空・電子等技術審議会報告書(地球科学技術部会報告書「地球変動予測の実現に向けて」(平成8年7月9日)、以下「地球部会報告書」と言う)では、地球環境問題への対応、自然災害の防止、資源の有効活用等の地球規模の諸問題の解決は、人類の存亡が懸かった重要かつ喫緊の課題であるとし、「気候変動予測」、「水循環予測」、「地球温暖化予測」、「大気組成変動予測」、「生態系変動予測」、「地球内部変動評価」の6つの戦略プログラムを提言している。

国際的には「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」や気候変動枠組み条約締結国会議において炭酸ガス排出量削減目標などが話し合われている。

海洋・大気の熱循環については「世界気候研究計画 (WCRP)」のもとで「世界海洋循環実験 (WOCE)」、「気候変動及びその予測可能性に関する研究 (CLIVAR)」、「全球エネルギー水循環観測研究計画 (GEWEX)」などが進められている。

地球温暖化と生態系(炭素循環)については「地球圏-生物圏国際共同研究 (IGBP)」、

「世界海洋フラックス研究（JGOFS）」、「沿岸域における陸と海の相互作用の研究（LOICZ）」、「海洋生態系の地球規模変動（GLOBEC）」などが進められている。

これら地球規模現象の観測システムの構築については、「地球観測衛星計画（EOS 計画）」、「熱帯太平洋域における観測ブイの展開計画（TRITON/TOA-ARRAY 計画）」、「全球海面水位観測システム（GLOSS）」、「統合地球観測戦略（IGOS）」、「世界海洋観測システム（GOOS）」などが進められている。

地球内部変動については「国際海嶺研究計画（Inter Ridge）」、「国際深海掘削計画（ODP）」、「固体地球力学計画（DOSE）」などが進められている。

我が国の地球科学技術については、科学技術庁の科学技術振興調整費、環境庁の地球環境研究総合推進費などによって国立試験研究機関等が協力して実施しており、また、文部省の科学研究費補助金によって大学等が取り組んでいる。

また、海洋科学技術センターでは潜水調査船「しんかい6500」、1万m級無人探査機「かいこう」、海洋地球研究船「みらい」などの大型海洋調査設備が開発されており、宇宙開発事業団では地球観測技術試験衛星「ADEOS-II」などの地球観測衛星の開発が進められている。さらに、宇宙開発事業団、日本原子力研究所及び海洋科学技術センターにおいて、水平解像度 10km の気候予測モデルを動かすことができる「地球シミュレータ」の開発が進められている。

我が国これらの取り組みは、上記の国際共同研究において重要な役割を果たしている。

2.2 各研究分野における主要課題

海洋調査の研究分野は、1) 地球環境変動の解明、2) 地球内部変動の解明、3) 深海生態系の解明 の三種類に大別することができる。以下に各研究分野における現在の主要課題を概説する。

2.2.1 地球環境変動の解明

(1) 氷海域における熱・炭素循環の解明

極域では大気・海洋・海水の相互作用、海氷変動のモデリング、植物プランクトンによる炭素固定、深層循環などが重要とされている^{3),4)}。

海洋は全球的にみれば、低緯度海域で吸熱し、高緯度海域で放熱する熱機関を構成している。地球上の気候はこの海洋大循環の影響を受けており、海洋の循環力が低下することや、循環経路が変わることは地球の気候に大きな影響を及ぼす。海洋大循環において北極海は、大西洋を北上してきた循環表流層が深海に沈み込む場所であり、その循環経路において重要なポイントとなっている。北極海における大気、海氷および海洋表層の構造を概念的に図 2.1 に示す。北極海の海洋表層は大きく 3 つの層からなる。上層部は混合層と呼ばれ、シベリアなどの大河川やベーリング海から供給される低塩分かつ海氷を通して寒冷な大気により冷却され低温である。下層部は北極海に流れ込んだ高温で高塩分の大西

洋水である。その中間層として低温で塩分濃度が急変する塩分躍層がある。このように、北極海の海洋表層部の構造は、海氷と塩分躍層の2つの覆いにより維持されているが、上層部の温度が低く、下層部の温度が高い熱的に不安定な状態にある。この構造が何らかの影響で崩れると、海氷の急激な溶解に至る恐れがあるため、北極海の混合過程の解明と大気・海洋・海氷の相互作用のモデリングが急がれている。

観測としては、まず、海氷中に現れるポリニア（冰湖）やリード（開水路）における海洋・大気間の海面フラックスの観測が重要である。極域の気候は海氷の変動によって不安定に変動する。このうち海氷野面積の変動については大口径のマイクロ波放射計(AMSRなど)や合成開口レーダを搭載した極軌道衛星によって常時監視可能となった。これと氷海観測船や無人機技術との組み合わせによって研究の大きな進展が望まれる。

また、河川水、太平洋水及び大西洋水が、陸棚または会本斜面で移流、混合する過程については、海氷生成に大きな影響を与えるが、解明はほとんど進んでいない。氷厚分布の季節変動、数年にわたる変動については氷海ブイの観測データなどごくわずかなデータしか得られていないのが実状である。

さらに、こうした氷縁域では植物プランクトンのブルーミング（パッチ状の大増殖）あるいは海氷下のアイスアルビーと呼ばれる生体系が生産する硫化ジメチル(DMS)を起源とするエアロゾルが北極海に特徴的に存在する北極層雲の放射収支に大きな影響を与えている。

(2) 大気・海洋間の熱・炭素循環の解明

第一に、エルニーニョなどの数年変動については、熱帯の大気と海洋表層混合層との間の相互作用、熱帯のスーパークラウドクラスタのモデリングなどが重要である。赤道太平洋西岸では南赤道海流、北赤道海流、赤道反流、赤道潜流、インドネシア通過流、ミンダナオ海流からなる極めて複雑な海洋構造によって暖水プールが形成されており、降水などによる塩分変化も影響を及ぼしている。

第二に、最近、北太平洋亜熱帯、亜寒帯において数年一十数年のオーダーの海面水温及び海上風の変動が注目されるようになり、いわゆる「十年変動」と呼ばれている。エルニーニョ現象が高緯度地域に与える影響などを予測するうえで、この十年変動は大きな影響を与えている。これは、亜寒帯冬季の沿岸水や降雨による低温低塩分水の沈降による中層低塩分水の形成、並びに、黒潮流域南方の沈み込みによるモード水の形成などが大きな役割を果たしていると考えられている。

第三に、地球温暖化（数十年変動）については、大気中で増加した炭酸ガスが大気－波浪現象－植物プランクトンによって固定され、中層・深層循環によって海洋に貯蔵され、深層水の湧昇によって供給される栄養塩による植物プランクトンを増殖させる過程を解明する必要がある。海洋が蓄えている炭素量は膨大で、大気中の約50倍に達するため、その影響の大きさが懸念される。特に、中層・深層循環については、吸収した炭酸ガスや気温上昇の影響を中層に送り込むとともに、栄養塩を湧昇させ植物プランクトンを増

やして炭素固定を促進するなど、数十年のオーダーの気候変動に影響を及ぼすため、その駆動力である高塩分水や低温低塩分水の沈降のモデリングが重要である。コンピュータの発達によって中規模渦までも海洋大循環モデルの中で陽に表現できるようになってきたが、このような沈降（二重拡散対流）については冬季亜寒帯や氷縁域での観測結果をモデルに組み込むしかない。また、強波浪域での炭酸ガスの吸収と植物プランクトンの役割などについても、やはり冬季荒天時の観測が重要である。

(3) 古気候・古環境の精密復元

現在進行している温室効果ガスやオゾン層破壊ガスの大気中濃度の上昇は有史以来経験したことのないものである。この急激な上昇がいったいどのような結果をもたらすかは、有史以前に遡り、火山活動が活発で炭酸ガス濃度が異常に上昇した時代に学ばざるを得ない。また、別の例として、約1万年前を境として、急激な温暖化と寒冷化が繰り返された時代から「異常に安定」した時代へと移行し、現在に至っていることが知られている。この「異常に安定」な気候が何によってもたらされたのか、言い換えれば、この「異常な安定」が何をきっかけとして崩れるのかを知ることは人類の生存に係わる問題であり、決してかけ離れた遠い未来の問題ではない。最近の研究では、氷床コアによれば「異常に安定」していた間氷期においても千年のオーダーの気候ジャンプがあったことが知られるようになり、その解明が急がれる。

こうしたことから、ピストンコアサンプラーや深海掘削船によって海底堆積物コアを採取し、古気候・古環境を精密復元することが極めて重要である。

このような目的から、国際深海掘削計画（ODP）の長期計画ではジョイデスレゾリューション号タイプによる掘削の継続に加えて、我が国が提唱するライザー掘削船（OD21）による掘削が長期構想の中に位置付けられている。

2.2.2 地球内部変動の解明

(1) 地震・火山噴火メカニズムの解明

これまでの海域における地震・火山予知研究は、プレートテクトニクス理論をベースに進められてきたが、海溝型巨大地震の予測精度を上げるためにには、まず第一に、海洋プレートの沈み込みという単純なモデルではなく、付加体の形成（付加体テクトニクス）やマントルプリームの上昇（プリームテクトニクス）なども含めた島弧／海溝系の理解が必要であり、同時に、プレート駆動力に迫るために全球的なプレートの相対運動と深部のマントル運動の理解も必要である。

このような地球内部変動を解明することは、地磁気逆転やスーパープリームなど過去の地球に大異変を引き起こした原因を解明することにもつながる。陸域と比べて、海域で発生する巨大地震が圧倒的に多いにもかかわらず、海域の観測網は圧倒的に少ない。このため、後述のとおり、水上船舶や衛星からの地形図作成、地震探査、重力・磁力異常図などの作成、潜水船などによる深海生態系を地殻活動の指標とした近接調査のほか、

海底地震計などによる長期観測、深海掘削による深層からのサンプリング及び孔内計測などによる総合的な研究が進められている。

(2) プレート境界における熱・物質循環

長大な中央海嶺などのプレート境界から供給される熱・物質フラックス(リッジ・フラックス)は河川からの供給に匹敵するオーダーであることが知られるようになってきている。それらが海洋の熱循環・物質循環にどのような影響を与えるかを解明する必要がある。

リッジ・フラックスを全地球的に定量的に評価する必要があることから、「国際海嶺研究計画 (Inter Ridge)」のように国際協力のもとで世界の観測船を相互利用した効率的な海嶺、海溝調査が計画されている。しかしながら、調査エリアが広大なことに加えて、熱水サイト噴出あるいは熱水プリュームは海域がわずかにずれるだけで捉えることが困難となる。また、リッジ・フラックスの過去の変動にまで迫るためにには、リッジの拡大速度の変動について、リッジ(拡大軸)でのマントル物質の貫入、海溝でのプレート重量、マントルの対流、プレートの相対運動のギャップなどの総和として理解する必要がある。

同時に、南緯60度～65度の暴風圏のためこれまで十分な調査が行われてこなかった環南極海嶺や氷海に阻まれた北極海嶺での調査をどのようにして実施していくかという問題がある。

このように、リッジフラックスは地球環境変動の理解のために重要であるが、定性的な研究から定量的な研究へと飛躍させるためには観測技術上の課題が多いといえる。

2.2.3 深海生態系の解明

(1) 深海生物

地球を代表する生物は、その表面の約7割を占める海洋の世界に存在する生物たちである。その海洋の大部分は太陽光も季節変動の影響もあまり受けない深海であり、そこに存在する深海生物についての人類の知識はあまりに少ない。

沿岸部の表層(有光層)で生産された有機物がどのようにして底層に輸送され、そこでは日周鉛直移動する動物プランクトンはどのような役割を果たしているのか。沈降してきた有機物に対して深海生物はどのような捕食行動によって生産性を維持しているか。死んだ海洋生物は深海生態系に対してどのような役割を果たしているのかなど、多くの問題が残されている。

また、近年、光合成には依存せず、熱水湧出域又は冷水湧出域をエネルギー源とする化学合成生態系が深海のプレート境界域沿いに延々と分布することが知られるようになってきた。このことは、生物の進化と伝播について新しい謎を提示した。すなわち、海洋生物は有光層から深海へと進出し、熱水湧出域や冷水湧出域にたどり着いて化学合成生態系へと進化したのか。あるいは、逆に、熱水湧出域や冷水湧出域を追い出された生

物が次第に浅海の環境に適応し、光合成生態系へと進化したのかという謎である。後者については、最近、「しんかい 6500」によって鯨骨に群がる生態系が発見され、化学合成生態系の生物が遠方まで伝播するためのステッピングストーンではないかという仮説が出されている。

これらの謎を解明するためには、例えば、浅海の生物に特徴的な日周運動などのような生態リズムが深海生物にも見られるか。海洋微生物の高水圧環境又は低水圧環境への適応能力はどうか。相互に孤立しているはずの化学合成生態系の間に種の類似性があるのはなぜか。あるいは、地殻変動につれてエネルギー源の供給が絶たれた化学合成生態系がいかにして遠くのエネルギー源へと伝播するかといった問題の解明が必要とされている。

(2) 深海微生物

深海微生物については、これまで有用微生物の探索という経済的・産業的側面から注目されてきたが、最近、光合成に依存しない化学合成生態系が生命誕生の場所である可能性が指摘されている。すなわち、地球上で発見されている最古のバクテリア化石(ストロマライト)は35億年前の太古代の中央海嶺の熱水堆積物から発見されている。

現在、深海微生物は「しんかい 6500」などの保圧採泥器で採取し、陸上の高圧培養装置において希釀法による分離培養を行っている。この方法は特定の機能を持った有用微生物を探索するのに適した方法であるが、培地が深海環境に相当するものかの保証はなく、深海環境に特有の性質を明らかにするうえでは限界がある。

特に、熱水噴出孔が生命誕生の場であるかどうかを解明するためには、深海環境を反映した培地を見いだすなど、できるだけ現場環境に近い状態で大量培養を行い、DNAを抽出・解読して分子系統図を作成して古代微生物を探索することが必要である。

2.3 観測技術上の課題

2.3.1 地球環境変動の解明における観測技術上の課題

地球環境変動の解明のための研究を支える技術開発については次のものがあり、相互に図2.2に概念を示すように相互に補完しあう。

- ①プロセス研究(素過程の解明)のための観測手法：観測データを取得するための観測設備及び観測手法の開発が重要であり、今後開発が期待される設備として後述の海中航行観測船、極域碎氷観測船、無人潜水機等があげられる。
- ②地球観測ネットワーク：現象の解明がある程度進み、海洋・大気結合モデルが運用できるようになると、シミュレーションの精度を上げるために衛星やブイなどによる全球的なリアルタイム・データをシミュレーションに利用することが必要である。
- ③シミュレーション技術：エルニーニョ現象については一部シミュレーションが可能となってきたが、シミュレーションモデル自体の問題も多々ある。科学技術庁では、全地球を10km四方に分割し、現在の約1000倍の精度で地球変動のシミュレーション

を行う「地球シミュレータ」の開発を検討している。

- ④古気候の復元のための堆積物コアなどの採取技術：深海掘削は地殻の応力状態を直接計測できるとともに、地殻破壊のサンプル採取によって過去の地震の歴史を知ることができる。さらに掘削孔は地震計観測に理想的な場所であり、空間的にも観測範囲を飛躍的に拡大できる。

2.3.2 地球内部変動の解明における観測技術上の課題

地球内部変動の研究では次のアプローチが確立しつつあるが、これらの観測を高度化するためには、深海潜水調査船、無人潜水機等の開発、音響観測技術及び地球内部トモグラフィの高度化、長期観測ステーションの増設が望まれる。これらの課題の関係は図2.3に示す

- ①水上観測船のマルチナロービーム音響測深機、船上重力計、船上3成分磁力計、曳航式プロトン磁力計、マルチチャンネル反射法地震探査（反射法）などにより各種の異常図等を作成する。
- ②曳航体、潜水船、ROV を活用し、露頭や崩落崖におけるサンプル採取、湧出した間隙水の採取、海底に近接した磁力、重力測定等を行い、また、多数の海底地震計を設置して、より深部までの屈折法地震探査を行う。
- ③深海掘削及び孔内計測により岩石試料、地殻破壊履歴、応力状態その他様々なデータを直接的に取得する。
- ④長期変動を記録するための海底観測ステーションを設置し、潜水船等で定期的にメンテナンスする。

また、リッジフラックスの研究では広大なプレート境界が調査対象となるため、深海生態系の研究や地球内部変動の研究とリンクさせた効率的な取り組みが必要である。全球的なプレート境界域における深海調査課題を図2.4に示す。具体的には観測効率の向上のため、音響観測技術の解像度又は探査幅の飛躍的向上と、AUVによる海底探査、採水などの技術開発が必要である。また、リッジの拡大速度の変動を観測するために海底の変位を計測する技術や世界中の掘削孔を利用した地球内部トモグラフィ技術の開発が必要である。さらに、これまで十分な調査が行われてこなかった環南極海嶺（南緯60度～65度の暴風圏）や氷海に阻まれた北極海嶺で観測可能な手段を開発する必要がある。

2.3.3 深海生態系の解明における観測技術上の課題

深海生態系については、現状では深海トロールなどの間接的な手段でしか伺い知ることができず、潜水調査船を用いて初めて生きた状態での生態を観察することができる。現状の潜水調査船では、中層性生物の上下動、水平分布を調査も化学合成生態系が長大なプレート境界に沿って伝播し進化していく過程の研究も困難であり、将来的に研究者が長期間にわたって深海においてこのような研究を行うことができる滞在型の深海調査船が必要である。

2.4 開発が期待される観測設備

前節で示したような観測活動を展開するために、各研究分野ごとに、今後開発が期待される主な観測設備及び観測手法について検討する。ここでは、あわせて対象とする観測設備に原子動力を導入する利点があるかについても触ることとする。

(1) 地球環境変動の解明

- ①海中航行観測船
- ②無人潜水機
- ③極域碎氷観測船
- ④地球観測システム
- ⑤海洋観測ブイ・ネットワーク
- ⑥地球シミュレータ

(2) 地球内部変動の解明

- ⑦深海滞在型調査船
- ⑧音響観測技術
- ⑨深海掘削船
- ⑩地球内部トモグラフィ
- ⑪長期観測ステーション
- ⑫海中動力ステーション

(3) 深海生態系の解明

- ⑦深海滞在型調査船

①海中航行観測船

氷海及び暴風圏における観測手段として開発が強く期待される。氷海では、AUV や UROV では観測項目がごく一部に限られてしまうこと、氷海域でパッチ状に分布する植物プランクトンを採取するには AUV の自律的制御プログラムでは困難なこと、さらに、夏期を除いて氷海域の奥深くまで観測することは困難なことから、将来的には、多項目にわたる精緻な観測が可能な大型の海中航行観測船をプラットフォームとした ROV 観測などが必要と考えられる。このような用途の海中航行観測船は、潜水したままで、大出力を長期間にわたり供給する必要があることから、原子動力を導入する対象として有望である。

また、暴風圏での表層海洋混合、ソルトフィンガーに代表される二重拡散対流、海表面の冷却によるオーバーターニング、中規模渦の消長に伴う貫入といった現象について、将来的には、より精緻な観測が必要となると考えられるが、海洋構造上の特徴的な位置を確認しつつ観測するには、AUV の自律的制御プログラムでは限界がある。

海中航行型の潜水船を利用した海洋研究としては「BEN FRANKLIN」（排水量 134 トン、最大潜航深度 610m）によるメキシコ湾ガルフ・ストリームの研究が有名である。軍事用のものとしては米海軍の原子力海洋調査潜水艦N R- 1（排水量 700 トン、最大潜航深度 900m）が現役であるが観測内容は明らかにされていない。

北極海の海氷下を調査したものとしては、米海軍が防衛技術の海洋調査などの活用を呼びかけ、米軍の原子力潜水艦を用いた北極圏海洋観測航海¹⁾（SCICEX : Scientific Ice Expedition）が 1993 年から 1999 年にかけて実施された。軍艦を利用することから数々の制約はあったが、有益な成果を上げていた本活動は、米海軍の潜水艦削減に伴い終了した。

②無人潜水機

海洋観測研究船「みらい」はハイブリッド減揺装置、アクティブ型スエルコンベンセータなどを装備して荒天海域での CTD 採水能力アップを図っているが、シーステート 5 を越える海象条件での採水は困難である。投げ込み式の XCTD についても精度がかなり改善されてきたものの、塩分センサーに気泡が混入しやすい表層近くでの精度が十分でないなどの問題点がある。

このような連続観測又は荒天中での採水ニーズに対して、観測船から独立して航行し、採水等を行うことができる自律型無人機（AUV）の研究開発が進められている。ただし、荒天中での AUV の発進・回収のため、母船の着水揚収能力をいかに高めるかが問題である。

冰縁域においても、碎氷船を直接乗り入れたのでは成層構造を乱してしまうため、碎氷船を母船とした無人機の遠隔操縦による観測が期待されている。この場合、海水に近接したりポリニア／リードやプランクトンの位置を探知するだけの人工知能は当面望めないことから、使い捨て光ファイバー式無人機（UROV）が期待されている。また、中長期的には結氷域を横断して氷厚分布など観測するため、かなりの長距離を航行できる AUV とそれに必要な氷海音響技術を開発し、同時に、中層ブイや漂流ブイとも併用して氷厚変動等を観測することが検討されている。

熱水マウントなどを発見するには 10cm オーダーの解像度が必要だが、海面からのマルチナロービーム音響測深機などによる観測では解像度が 1m 弱に留まる。このため、サイドスキャンソナーを海底上 100m で曳航する方法がとられているが、この方法では探査幅が狭く、曳航速度も遅い。また、氷海中や荒天中の曳航も難しい。採水もこれまでのように観測船がいちいち停船して実施していたのでは観測効率が甚だしく悪い。このため、母船から独立して海嶺の拡大軸沿いに長距離航行できる AUV を開発して、サイドスキャンソナーによる観測ポイントを絞り込み、水中 TV 画像の水中音響伝送と音響コマンドによる操縦指令によって化学合成生態系の存在を探索し、最終的に熱水・冷水湧出サイトを確認して CTD 採水等を行えるようにすることが期待されている。

将来的には、結氷域での観測ニーズに対して、碎氷船ではソナードームの強度上の問題やプロトン磁力計の曳航などの点で観測が困難である。このため、理想的には氷海下を長期にわたって航行し、多項目にわたる観測が可能な大型の海中航行観測船の開発が期待される。

無人潜水機は、一般に小型であることから必要な推力も小さいので、燃料電池の改良により性能を向上させていくものと考えられ、原子力を導入する利点は小さいと判断される。

③極域碎氷観測船

氷海観測用 UROV の母船としては、当面は研究対象が冰縁域に多いことから、「みら

い」のような耐氷構造の観測船を碎氷船の支援のもとで活用する方が観測能力の点で有利であるが、次の段階としては夏期の北極点まで到達可能な碎氷能力を持つ極域碎氷観測船が要望されている。北極海で活動するロシアの碎氷船の多くが原子炉を搭載していることからも、碎氷船用動力源としての原子力の有用性は明らかであると考えられる。

④地球観測システム

衛星については静止軌道の気象衛星に加えて、極軌道の地球観測衛星による各種のマイクロ波センサー（放射計（海面水温等）、散乱計（海上風）、高度計（海流）、降雨レーダ（降雨）、合成開口レーダ（海水分布）等）が実用化すれば、雲の有無に係わらず海上気象関係の観測が可能となる。NASA、ESA、NASDA でこれらの計画が進められている。この設備は、直接的に原子力の導入対象となるものではない。

⑤海洋観測ブイ・ネットワーク

海中データ（水温、塩分、潮流分布）及び海上のトルース・データ（海上気象要素）を得るための海洋観測ブイ・ネットワークについては、未だ地球規模での青写真は明確になっていない。

低緯度及び亜熱帯用の海洋観測ブイ（TRITON ブイ）は、TAO-ARRAY（ATLAS/PROTEUS ブイ）に足りなかつた塩分計測等の機能を追加し、表層の熱循環に加えて西部赤道太平洋の温水プールで重要とされている降水などの影響もリアルタイムで観測できるブイとして実際の配備が待たれている。

高緯度では荒天や海水を避けるために中層ブイ化が望まれるが、衛星を経由したリアルタイム・データ伝送や海上気象要素の観測のために表層ブイを廃止することが難しい。特に、北太平洋亜寒帯についてはいわゆる「十年変動」という現象がエルニーニョ現象などとも関係していると考えられるようになっている。この海域では、冬期の沿岸水や冷たい降雨による淡水が沈降して低塩分中層水を生成し、これが気温上昇の影響を比較的短期間で吸収すると考えられることから、地球温暖化の面からも注目されている。しかしながら、ボランティアシップによる雨量計測が難しいことや、降雨レーダーを積んだTRMN衛星も観測密度の点で高緯度までカバーすることは困難なことから、降水を表層ブイで観測することが必須であり、その点が開発上の難点と考えられる。

これらの開発課題のほか、そのメンテナンス船の隻数、各国の分担まで含めた検討のため、GOOS（全球海洋観測システム）又は IGOS（統合地球観測戦略）への積極的参画が必要である。

本ネットワークで使用する海洋観測ブイの要求出力は、単体では数十 W と小出力であるが、他の計測設備とともに⑩に示す長期観測ステーションを構成する場合に、動力源として⑪海中動力ステーションが有用となってくると考えられる。

⑥地球シミュレータ

エルニーニョ現象については一部シミュレーションが可能となってきたが、入力データの問題はもとより、モデル自体の問題も多々ある。文部科学技術省では、全地球を10km四方に分割し、現在の約1000倍の精度で地球変動のシミュレーションを行う「地球シミュレータ」の開発を検討している。

⑦深海滞在型調査船

これまでに開発された「しんかい 6500」や「かいこう」は、いわば、深海底の汎用の近接観察手段である。これらの近接観察手段は、熱水・冷水湧出域での化学合成生態系の研究などに最も大きな威力を発揮してきた。固体地球物理の面では、潜水船は堆積物で覆われた海底では十分な調査能力が発揮できないが、海嶺・海山や海溝斜面に露出する岩石や地層、あるいは、湧水に依存する生態系などを指標として、海上からの観測結果の確認・検証などに資することができる。

今後、生態系や固体地球物理については、時間的な変動を観測したり、地球内部変動との関連までを明らかにしようという段階に来ている。このため、長期観測ステーションなどの設置・メンテナンス（ケーブル切断・接続、電池交換等）やより高度なサンプリングが可能な高度の運動能力を持つ有人潜水船又はUROVが必要とされている。

将来的には、長期間、海底に滞在して深海調査が可能な潜水調査船の開発が望まれる。

深海生態系については、現在の潜水調査船は数時間以内の海底滞在時間では深海生物の日周運動すらも観察することができない。また、潜水調査船はバラストの投棄によって海面と海底の間を沈降・上昇するだけのため、中層性生物の上下動、水平分布を調査することも困難である。

また、化学合成生態系が長大なプレート境界に沿って伝播し進化していくことを研究するには、今の潜水調査船の行動能力と海底滞在時間はあまりに不足している。初島沖の冷水湧出域の化学合成生態系には海底観測ステーションが設置され、TVカメラ等のデータが毎日海底ケーブルで送られてくる。地殻活動が放精行動などの生体リズムにどのような影響を与えるかなど、長期間にわたる観察は海底ケーブルの敷設によって初めて可能となったが、観察可能なエリアは照明の届く範囲に限られている。

このため、今後、長期間にわたって深海底に滞在し、いろいろな生態観察、広範囲にわたる分布調査、深海環境での各種の実験等を行うことができる滞在型の深海調査船が必要である。

また、深海微生物についても、熱水噴出孔など現場環境で微生物を培養したりDNAを抽出したりできるように、将来的に研究者が長期間にわたって深海においてこのような研究を行うことができる滞在型の深海調査船が必要である。

このように深海底において長期に単独で活動を行う有人の深海滞在型調査船の動力源としては、持続時間の観点から原子動力の導入が有望と考えられる。

⑧音響観測技術

リッジフラックス研究では観測海域が飛躍的に増大し、また、熱水プリュームの時間的・空間的非連続性に対応した解像度の高い観測手段が求められる。

船上からのC T D採水、地殻熱流量計測、深海曳航T Vカメラ等による試行錯誤に頼っていては観測効率が著しく低いため、熱水マウントなどの存在する可能性の高いポイントを絞り込めるように、マルチナロービーム音響測深機やサイドスキャンソナーの解像度又は探査幅を飛躍的に向上させるための技術開発が必要である。

⑨深海掘削船

深海掘削は地殻の応力状態を直接計測できるとともに、地殻破壊のサンプル採取によって過去の地震の歴史を知ることができる。さらに掘削孔は地震計観測に理想的な場所であり、空間的にも観測範囲を飛躍的に拡大できる。

こうしたニーズから海嶺（拡大軸）、付加体、ホットスポット周辺での大深度掘削能力が望まれている。また、古環境の精密復元の面から、急激な気候変動の影響が記録されている沿岸付近の高速堆積層の掘削ニーズが強いが、このような海域では炭化水素が存在することが多い。

ジョイディスレゾリューション号ではこのような炭化水素の賦存域での掘削や海底下数千メートルに及ぶ掘削ニーズには対応できない。このため海洋センターでは泥水循環及び防噴防止装置（BOD）により掘削孔内環境をコントロールできるライザー方式の深海底掘削船（OD21）の開発研究を実施している。ライザー掘削は海水循環による洗掘を最小限にし、リエントリすることなく最適なバイトに隨時交換できることにより硬くて脆いコアの回収率の向上も期待できる。

また、付帯技術として、ライザー制御についての新技術、迅速にリエントリーするためのROV、孔内計測のためのセンサー及び設置回収技術などの研究開発が必要である。

古環境の復元という観点からの技術的課題として、極域は気候変動の影響が極端に現れやすく、また、過去の地磁気変動の影響も顕著に記録されていると考えられるが、海水の存在と氷河から流入した粗粒物質の多さから深海掘削やピストンコアリングが難しい。また、堆積速度の速い浅海の堆積物コアは海水準の変動を示す意味でも重要であるが、DPSを用いた深海掘削船は数百m以浅の掘削を苦手としている。

このほか、黒潮など海流の流域でも定点保持が困難なため、南海トラフなど地震研究上の重要地点での掘削は困難である。このため、将来的には、海氷や海流の影響を受けずに海底に着底したまま深海掘削を行うことができるピストンコアシステムの開発が要望されている。

⑩地球内部トモグラフィ

マルチチャンネル反射法地震探査では、ある深度より深くを探査することはできない。

北大の島村らが多数のポップアップ式海底地震計による「屈折法地震探査」によっていろいろな成果を上げているが、自然の大地震を利用するには観測期間が短く、また、堆積物上に自然着底させるために感度が十分でない。このため、研究上の重要なエリアについて、潜水船等を用い、海底地震計をしっかりと海底に設置して長期にわたって観測する手法の確立が望まれる。

また、将来的には、地震計測に理想的な掘削孔を利用した地球規模の地震計網により「地球内部トモグラフィー」を行う構想がある。例えば、ホットスポットなどのマントルプリュームの上昇と地磁気反転との関係が注目されているが、このように地球環境予測の点からも大きな意義がある。こうして設置された海底地震計のメンテナンスに潜水船や ROV は欠かせない。

⑪長期観測ステーション

最近の国際共同潜水調査では、熱水湧出域や冷水湧出域に地震計、温度計、ハイドロフォン、地殻熱流量計、TV カメラなどの機器を海底に設置して長期観測を行うことがしばしば行われるようになってきた。

また、ウッズホール海洋研究所及び海洋センターの ABE(Autonomous Benthic Explore) 計画では AUV を長期観測システムの構成要素と考え、AUV 自身が海底に設置した動力ステーションで充電しつつ長期観測を行うシステムの国際共同研究が行われている。

今後の課題としては、最近、通常の地震計では計測できない直流成分の多い地殻変位(サイレント・アースクエイク)が注目されている。これはリッジフラックスの評価に不可欠であるとともに、地震の空白域とされている東海沖で蓄積されている地殻歪エネルギーの評価にも係わる問題でもある。

陸上の 2 点間の変位については V L B I や G P S 干渉計により高精度の計測が可能となっているが、海中の 2 点間の変位については、音響による方法、敷設した光ファイバの歪みによる方法、傾斜計や潮位計などによる方法などが試みられている段階であり、今後の重要な開発課題である。

ここで、長期観測ステーションへの動力供給を考えた場合に、有用な動力源のひとつが

⑫海中動力ステーションであると考えられる。

⑫海中動力ステーション

海洋・大気から全地球ダイナミクスに至る観測ネットワークを構築するにあたって、海面又は陸地から遠く離れた深海に設置された各種計測機器の動力源について、現在では装置自体をポップアップさせてリチウム 1 次電池を 1~2 年で交換する方法が主流と考えられる。

将来的には使用中止となった海底電線(同軸ケーブル)の利用、ROV による海底での電池交換などが考えられている。また、ABE 計画のように AUV に対する動力源の供給方法については、充電による方法のほか、燃料電池用の圧縮酸素及び圧縮水素を充填する

方法も考えられる。このような点から、将来的に深海底の拠点となるポイントに動力ステーションを設置して、そこから周辺に散在する観測システムに対して海底ケーブルやAUVなどにより動力源を供給するシステムを検討する必要があろう。

原子動力は、酸素を必要とせずに、長期間 P に渡り、大出力を供給することができるから、海中動力ステーションの動力源として有望であると考えられる。

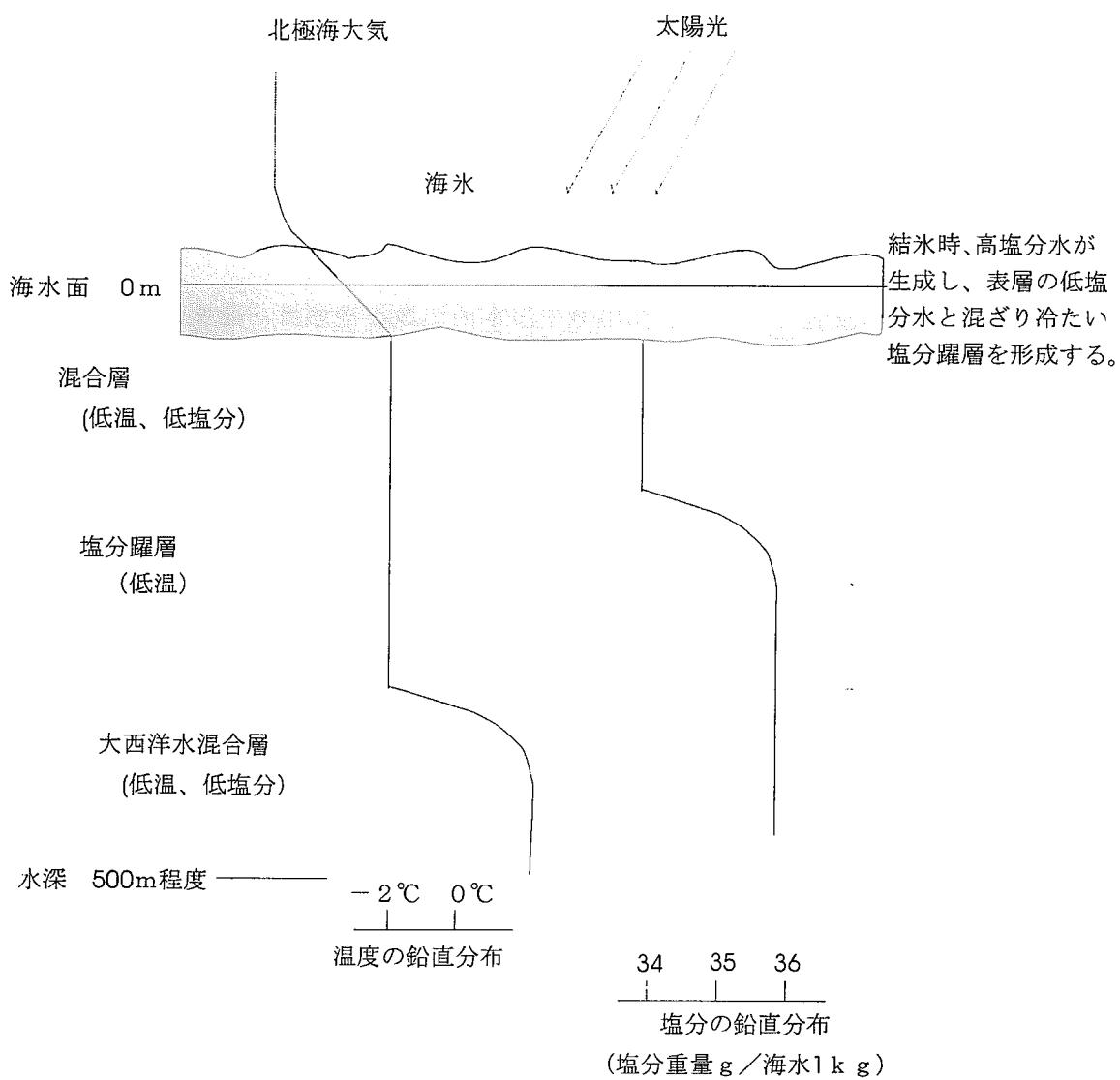


図 2.1 北極海表層の海洋構造の概念図

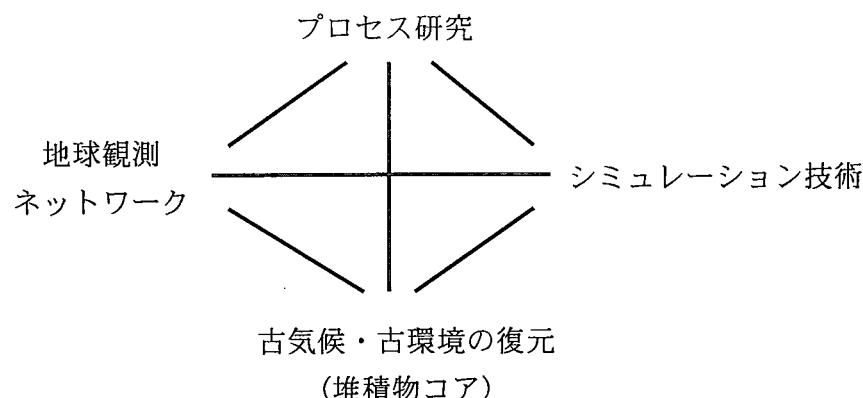


図 2.2 地球環境変動解明のための研究と技術の関係

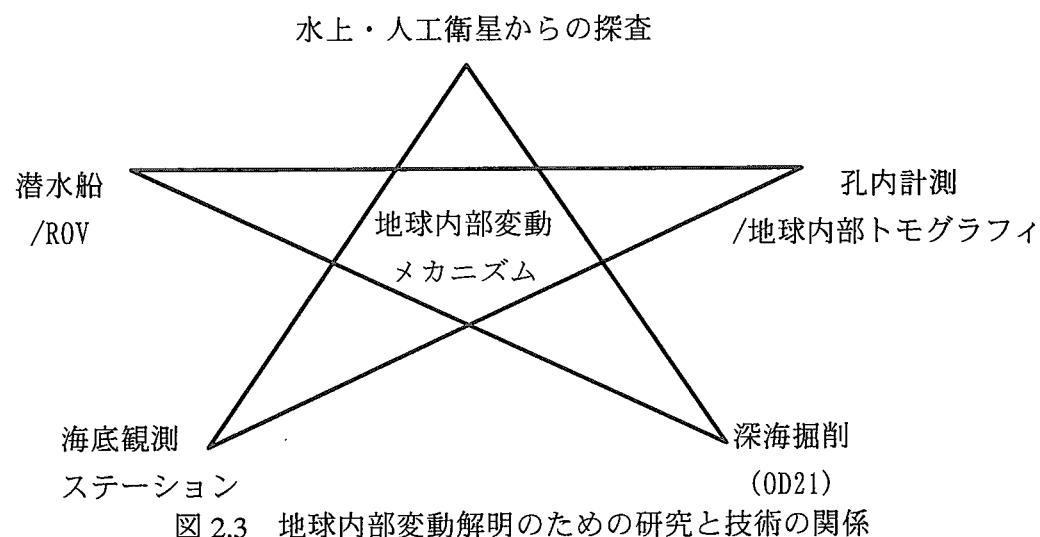


図 2.3 地球内部変動解明のための研究と技術の関係

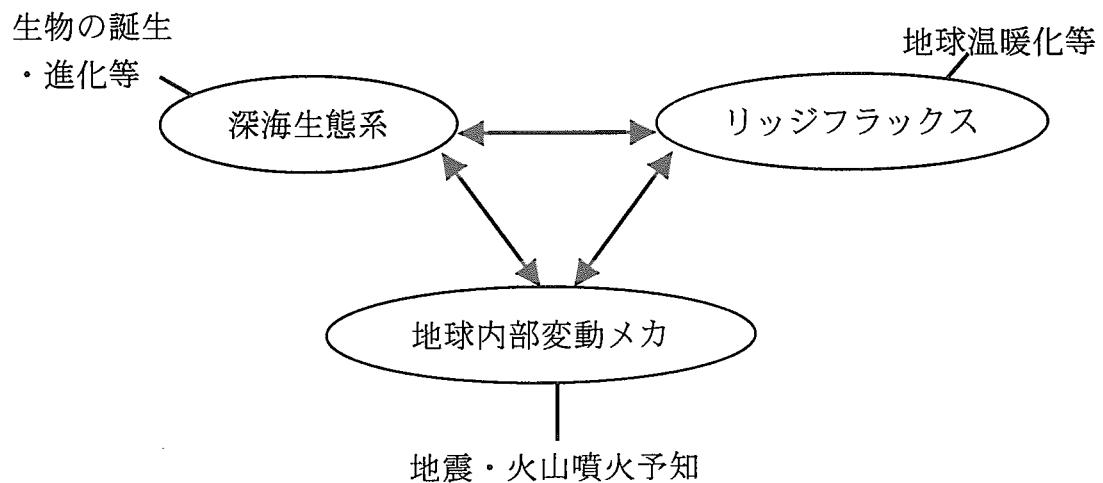


図 2.4 全地球的なプレート境界域における深海調査課題

3. 対象船種の選定

第 2.4 節に示したように、海洋調査に開発が期待されている設備のうち、動力源として原子力を用いることにより飛躍的に性能を向上させうる設備は、①海中航行観測船、③極域碎氷観測船、⑦深海滞在型調査船、⑫海中動力ステーションの 4 つの設備である。③極域碎氷観測船は既にロシアにおいて多くの碎氷船の実績があり、新たに検討を行う必要がないため、ここでは検討の対象としない。各船種と調査目的との関係を整理した表 3.1 に示されるように、海中航行観測船は地球環境変動の解明に特に有効であり、深海滞在型調査船と海中動力ステーションは地球内部変動メカニズムの解明と深海生態系の解明に有用である。対象線種としては、下記の理由により緊急性が高いと判断される「地球環境変動の解明」に最も適した海中航行観測船を選択した。

まず「地球環境変動の解明」の内容は、2.2 節に示したように(1)氷海における熱・炭素循環の解明、(2)大気・海洋間の熱・炭素循環、(3)古気候・古環境の精密復元が主要課題とされている。このうち、(1)及び(2)が直接的に地球温暖化など気候変動に係わっているものである。

このうち、特に(1)氷海における熱・炭素循環の解明については、以下の点から緊急性が非常に高い。北極域の泥炭地帯、北方針葉樹林帯及び永久凍土地帯は重要な温暖化ガスの潜在的供給地帯である。また、海水、氷河、ツンドラ、永久凍土、北方針葉樹林帯、泥炭地帯は、温暖化に伴う微妙な環境変化に感應し、その兆候を顕著に示す気候変動の高感度センサーである。このように、北極域は気候に対し非常に敏感な構造となっていると同時に、大気と海洋の大循環モデルを用いた 21 世紀の全球的気候予測によると、北極海とその周辺地域での気温上昇が最も大きいと言われている。そのため永久凍土の融解により温暖化ガスの大量放出や流氷野が縮小あるいは消失してしまうことが心配されている。特に、北極域は正のフィードバック機構を内在するため、その変動は劇的に起こり、北極海から瞬く間に海水が消滅することが考えられる。その結果、北極海の変動は地球規模の気候変動に重大な影響を与えるとされている。1990 年代に入って北極海の海洋構造は、温暖化に向かっていることが最新の観測結果から示唆されており、このような海洋構造の変動の実態把握のための現場観測には緊急に着手する必要がある。現在、調査・観測のための国際プロジェクトがいくつか立ち上がり、これに日本も参加している。特に、海面下での調査は非常に有効であり、退役直前の米国原子力潜水艦を利用して海面下の調査を行ってデータ蓄積に役立てている状況にある。しかし、必要とされる観測データは膨大な量であり、原子力潜水艦による観測には観測機器搭載の制限があること、また原子力潜水艦を使った観測は 1999 円をもって終了する見通しであること、さらに軍事上の機密の問題などを考慮すると、調査専用の海中航行観測船の実現が早急に望まれる状況にある。各国が協力してこのための観測船を造ることは、全人類的な課題を解決する上で極めて緊急性が高い。

また、(2)大気・海洋間の熱・炭素循環に対しても、異常気象などによる自然災害の被害が増大する傾向にあるなか、その調査の緊急性は高い。地球規模の気候変動は、中層水及

び深層水の海水循環も大きく影響していることが明らかになっているが、地球規模の気候変動予測には、定量的な解析のための観測データは不可欠である。しかし、これまでの観測データは必要とされるデータに比べて極めて少ない。そのため、まず行動範囲の広い観測船が必要である。特に、亜寒帯地方、冬季北太平洋海域、冬季日本海は海水循環の沈込みとなっており気候変動に重要な影響を及ぼしている場所であるが、荒天域となっているためにこれまでの観測船は近づけず、データがない状況である。平成9年10月に海洋地球研究船「みらい」が就航し、有義波高*5m程度まで（シーステート5）の採水、又はそれ以上の海象条件での表層海水及び大気ガスの連続分析が可能となった。しかし、荒天域で観測できる観測船は世界で「みらい」ただ一隻であって、他に暴風圏下でも採水作業などが行える観測船は存在しない。このため、海中からの観測は有効であり、行動範囲の広い海中航行観測船が切望されている。

熱・炭素循環は生物活動とも密接に関係しており、生物の組成変化は地球温暖化を促進する可能性が指摘されている。生物生産の活発な沿岸域を含めた数百m以浅に分布する海洋生態系は、二酸化炭素を吸収する生物ポンプとしての役割を果たし、また、雲の発達の原因となる硫化ジメチルなどの主要な発生源となっている。この海洋生態系が地球温暖化の進行によってどのような影響を受けるか、また、それによる海洋生態系の変化が気候にどのようなフィードバックを与えるかは社会的にも極めて重大な問題である。その主要な構成要素であるゼラチン質の浮遊生物は、洋上からのプランクトンネットなどの調査ではその生態や代謝等を知ることができない。また、現在の潜水調査船でも中層に留まって長時間かつ広域に調査する能力はない。一例として、二酸化炭素を固定する珪藻類から二酸化炭素放出の原因となる円石藻類へと植物プランクトンの組成が遷移すると、地球温暖化を促進する可能性が指摘されている。これらのことから、長期間の航行能力を持つ海中航行観測船による海洋生態系の解明は急務であると考えられる。

* 有義波高：原波形の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、その平均値をとったもの。有義波高は目視波高に近いといわれている。

表 3.1 海洋調査のニーズと各船種との関係

海洋調査の調査目的	①海中航行 観測船	⑦深海滯在 型調査船	⑫海中動力 ステーション
1. 地球環境変動の解明			
海面フラックス／氷海モデリング(ポリニア、リード)	○	×	?
海洋大循環（亜寒帯での低塩分中層水、氷海域のブラインの沈降）	○	×	?
物質循環（炭酸ガスの吸収、氷縁域のプランクトングルーミング、暴風雨圏での表層混合）	○	×	?
マイクロストラクチャ（二重拡散対流等）	○	×	?
海中・海底放射能調査	△	○	○
2. 地球内部変動メカニズムの解明			
海底地形	○(広域)	○(中域)	×
重力・磁力	○	○	○
地形・地殻の長期変動	○(広域)	○(中域)	○(當時)
北極テクトニクス	○	×	×
リッジフラックス	×	○	○
堆積物コア	△	○	×
地球ダイナミクス観測ネットワーク	×	△	○
3. 深海生態系の解明			
深海生物の生態リズム	×	○	○
化学合成生態系の分布・伝播	×	○	△
化学合成生態系の変動	×	○	○
実験的深海学	×	○	○
有用微生物・古微生物採取	×	○	○
中層性生物の上下動・水平分布	○	×	×

○ : 適

△ : 可

× : 不可

? : 要調査

4. 海中航行観測船の概念検討

4.1 「地球環境変動の解明」における海中航行船のミッション

「地球環境変動の解明」に必要な調査内容は、2章に示したとおりであり、とりわけ「北極海域での調査」及び「亜寒帯海域、荒天海域等の海中からの調査観測」の調査が急がれる。これらの海域は、物質循環面で重要な役割を果しているにもかかわらず、従来の洋上観測船では観測できない、あるいは観測しにくい海域の観測であり、海中航行観測船の導入が強く望まれる理由がここにある。以下に、海中航行観測船を用いて、これら海域で実施すべき観測の意義と概要を示す。表4.1には観測の目的、観測を行う海域、観測項目を整理する。

4.1.1 北極海域の観測

北極海は、地球の気候を左右する海洋循環過程において深層水の形成場所であると考えられており、北極海域の気候の変化は、海洋循環にも影響を与え、地球全体の気候に異変を起こすことにつながると考えられる。このため、海洋物理及び海洋化学の観点からは、北極海における大気・海水・海洋の相互作用を解明することを目的として、表層部の海洋構造を継続的に観測することが必要である。

地球物理の観点からは、北極海は複雑な海底地形を形成しており、その精密な地形図が求められている。ナンセン・ガッケル海嶺はその拡大速度が世界で最も遅いという特異な海嶺であるがその拡大過程はまだ明確でない。その近辺で起こる地震との関連、地殻構造や地殻変動状況を把握するため、地形調査とともに重力や地磁気データを観測する必要がある。これらは単に北極域の地殻情報にとどまらず地球全体の地殻構造・地殻変動解明に有効である。また、複雑な海底地形が北極海における海水の循環に影響を与えていていることもわかっており、その面からも地形調査が重要である。

海洋生物の観点からは、海面付近の大気中の二酸化炭素は高緯度海域で海洋に吸収され、低緯度海域で海洋から大気へ放出される現象が着目される。北極海における二酸化炭素吸収の主要なプロセスとして、春季のプランクトンの異常発生現象（ブルーミング）による海洋への二酸化炭素の固定がある。炭素循環のプロセスの一つとしてその解明が必要である。

4.1.2 暴風域の観測

冬季北太平洋海域に代表される暴風雨域については、二酸化炭素等の大気中の温室効果ガスを効率的に吸収している場所であることから、地球温暖化・気候変動の研究に重要である。従って、大気・海洋間の混合過程の観測が必要になるが、暴風雨下では海中航行観測船といえども、現段階では直接観測する方法が確立されている状態ではない。しかし、海中航行観測船は暴風雨海域の直下にアクセスできるので、例えば、海中航行観測船から遠隔操作機（ROV）を発射して近傍域での採水あるいは計測を行うことが可能と考えられる。また、大気・海洋の混合過程の例として台風等の移動性低気圧にアクセスし、その動きをフォローしつつ同様の観測を行うことも可能であろう。

4.1.3 その他の海域における特徴的な観測

さらに、海中航行観測船の特性として、洋上船に比し動搖が少なくまた海中にあってその場で諸現象を観測できることから、既に洋上観測船等により観測が実施されている海域の観測事項についても、より高精度の観測ができ、新たな知見の獲得が期待できる。そのような例として、海域の重力精密測定があげられる。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良い観測が期待できるので、地球内部変動の解明にも貢献することができる。

4.2 有人海中航行観測船の必要性

海中航行観測船は、いまだ海洋データが得られていない海域、具体的には北極海の氷海や冬季亜寒帯域の暴風雨海域での運用が期待されている。このような困難な海域については有人船に替えて、例えば自律的制御プログラムを使った自律型無人機（AUV）を使用することも考えられる。これらの海域については既存の観測データがほとんどない状態であり、その意味でまず導入が比較的容易な AUV により得られるデータを収集し、それから北極海の状況を分析することは意義があると考えられる。しかし、AUV の場合、現状の技術レベルではある限定された範囲を、母船等からの指示に基づいて、あるいは予めプログラムされた手順・方法に従って観測することが一般的である。後者のプログラム方式においても、現状の自律的制御プログラムでは、ある程度の最適性・柔軟性をプログラムに盛り込むことが可能であるが、研究者の直感に依存することが多い要因の関連付けや予期しない現象への対応までは言うまでもなく困難である。何れにしても、AUV では北極海のようなほとんど未知事項で占められる海域で必要とされる、柔軟でかつ精度の高い観測は難しい。

一方、有人の海中航行観測船は導入時の費用負担が大きいことおよび乗員の安全性を考慮しなければならないことはあるが、解明すべき現象を解きあかすという面での有用性が永田らにより指摘されており⁵⁾、今回検討した海中航行観測船では、次のようなことが期待できる。

- ①未知なことが多い観測環境下で、観測作業を通じて予期しない現象に遭遇した場合、それらの現象解明のためその場で関連データを新たに測定することができる。それらが、さらにつながる新たな現象の発見につながる可能性がある。
- ②現場での試行とその結果の評価を短期間に繰り返すことができるため、例えば最適な時間的・空間的測定間隔の設定が可能となり、広範な海域を効率的に観測する観測計画を立案することができる。また、必要に応じてよりよい観測計画に見直すことも可能である。
- ③北極海のような広範囲な海域を時間的・空間的に連続して観測できる。

以上、北極海の観測には、研究者・観測者を乗せてある期間、相当の距離を観測航行できる有人で自航式の海中航行観測船が不可欠であると考えられる。

4.3 海中航行船の基本仕様

(1) 観測海域、観測期間、航続距離

海中航行観測船に要求される基本仕様を明らかにするために、観測海域と観測期間を想定する。先に述べたように、本観測船の主要な観測対象海域は北極海及び北太平洋暴風域であるが、ここでは、観測期間及び航続距離の観点から厳しいと考えられる北極海を想定して検討を行う。

北極海の氷海下の片道距離は、米国のバローから北極点を通り、ロシアのムルマンスクまでの航路と想定すると約 2320 海里 (4297 km) である。船速を 12 kn(約 22.2 km/h) と仮定すると単純に往復するのに 16 日程度を要する。8 kn (約 14.6 km/h) とすれば 24 日程度が必要となる。実際の観測に際しては、ジグザグ航走、途中での減速・停止期間等を考慮する必要があるので、30 日間程度は燃料を補給せずに連続航行する能力が必要である。図 4.1 に、北極海を観測海域と想定した時の日本から北極海域までと北極海域の観測航行ルートとおおよその距離を示す。北極海域での観測活動にあたっては、表示のルート 2 往復分の距離を自由に航行できる航続距離が求められる。

(2) 潜行深度

海中航行観測船の潜航可能深度については 600m とする。潜航深度は大きい方が観測可能範囲は幅広くなるが、強固な耐圧構造が要求され、技術的にも経済的にも建造時の負担が大きい。

海洋物理面の観測内容は、大気- 海氷- 海水の相互作用に観測重点が置かれており、300m 程度までの深度が主対象と考えられる。一方、地球物理面では、海底に少しでも近づける方が望ましいが、観測対象とする海域の深度は 2000m 以上の深海であり、潜航可能深度が少々増加してもソナー等による観測能力に影響はない。また、海洋生物面ではプランクトン等の微生物が光合成を行う有光層は 150m 程度までである。したがって、300m 程度の潜航能力があれば基本的な使命は達せられる。

一方、船体設計の面から 600m 程度迄なら耐圧殻の形状として球殻よりスペースを有効に使える円筒殻を採用できるメリットもあり、潜航可能深度を 600m とする。

(3) 船速

一般に利用上、船速は大きい方がよい。しかし、一方で船速は主機出力に大きく影響するため、経済性の観点から必要最小限に抑える必要がある。

観測期間の項で示したように、北極海の往復距離の 2 倍を航行する場合、船速を 12 ノット(約 22.2 km/h) 仮定して約 32 日を要する。明確な基準が存在する訳ではないが、1 回の航海期間を約 1 ヶ月程度に抑制するために、船速は 12 ノット(約 22.2 km/h) 程度は必要と考えられる。

北太平洋暴風域の観測には、高速は要求されないが、大気・海洋間の熱・炭素循環の

解明の観点から、北太平洋暴風域とならんで台風等の暴風雨時の海洋観測がある。台風等の移動性低気圧を追跡する場合も、最低 12 ノット(約 22.2 km/h)の船速を必要とすると考えられる。

また、最大船速 12 ノットに設定することにより、必要に応じ海中航行観測船を支援する随伴船（海洋観測船 船速 16 ノット程度）と併走する上でも望ましい。

(4) 乗員数

海中航行観測船は、洋上船に比し動搖は少ないものの、船内居住環境は密室仕様である。限られた船内空間に、大気、採光等自然とは異なる人工的につくり出された環境下で、かなり長期間にわたり生活する必要があり、船内仕様設定にあたり居住性を考慮する必要がある。そのためには、船体規模を考慮の上で乗員数を最少人員に絞る必要がある。乗員は、乗船員と研究員からなるが、乗船員は全航海乗船し、研究員は観測基地から乗船するものとする。

通常時、操船は 1 人で行う（原子炉プラントの運転も 1 人）ことができるよう自動化がなされるものとする。研究員についても、最少人員に絞るため監視作業が主体となるよう観測作業およびデータ処理作業等は最大限自動化がなされるものとする。

以上の想定に基づき乗員数を設定すると表 4.2 に示すように 16 人となる。

(5) 船体規模

海中航行観測船の性格上、乗員数の項で述べたように船内で長期間の生活が可能なよう居住性が重要である。居住性向上のためには、一人あたりの利用可能スペースをできるだけ大きくとることが必要である。それを実現するには、乗員数を最小限に抑えることが肝要であり、徹底した省人化のための自動化が必要である。すなわち、省人・省スペース化および安全性向上のため、高度な自動データ処理システムや自動分析システムの導入とともに、船体・動力源運転の自動化を進める必要がある。また、観測精度向上のためには水海下連続潜航時の高精度測位機能の向上が必須である。

以上の要求事項を考慮し、動力部を除いた居住区の必要面積及び体積を試算する。船体の外面は直径約 5.5m の円筒形状とした。機関部を除いた主要な機器についての体積積み上げ表を表 4.3 に、居住耐圧殻内のレイアウト図を図 4.2 に示す。居住区として必要な船体耐圧容器の大きさは概ね、内径 4m、内部長さ 22m の円筒形状となる。この時の内部容積は約 280m³、外部容積は約 310m³ となる。重量は計測設備等を含めて約 300ton と仮定する。ここで、動力源として 200m³、200ton 程度の容積のユニットを想定すれば船体規模は約 500 ton となる。

一方、これまでの低深度観測船の実績としては、下記の 3 例が挙げられる。

海中観測船 BEN FRANKLIN 排水量 134t 最大潜航深度 610m

原子力海調査潜水船 N R -1⁶⁾ 排水量 700t 最大潜航深度 724m

ダイバー支援潜水船 S A G A -1^{7),8)} 排水量 545t 最大潜航深度 600m

これらの潜水調査・観測船を参考にすると、まず 500 t 程度の船体規模で検討することが妥当であると考えられる。

(6) 運航時の原則

海中航行観測船のイメージをより具体化するために、その運航時の基本原則について以下のように設定する。

- ①出入港時には、随伴船の支援を受ける。
- ②目標海域までは潜水自航し、原則として随伴船の支援を受ける。
- ③緊急時は非常浮揚する。（氷海域では開水域あるいは薄氷域を自ら探査の上）
- ④海下での観測時の動力源事故の影響を小さくするため、原子炉プラントは必要出力を 2 基で分担し、多重性を持たせる。
- ⑤目標海域付近の基地または随伴船を利用して乗員の交替や糧食補給を行う。
- ⑥海中航行観測船の整備は母港（日本）で実施する。
- ⑦測位は慣性航法および音響測位を主体とし、随伴船から提供される GPS による測位情報を受信して補正する。氷海域や暴風雨域で随伴船の支援が受けられない場合、海面状況を判断した上で浮上して GPS による測位情報を直接受信する

4.4 海中航行船の安全性についての考え方

まず、海中航行観測船が北極海等の特定の海域を航行し特別な任務を帯びて観測にあたることから、観測に際しての安全の確保は特に重要な項目である。船体については、表 4.4 に示す現行の関連法令の要求を原則的に満足する設計とすべきであるが、潜水艦のような軍事目的船の実績は多々あるものの、海中航行観測船のような一般船についてはその特殊性故に法令等は明確になっていない。ここでは、海中航行観測船の概念の成立性に見通しを得るために必要な次の安全性上の課題について考え方を示す。

- ①衝突
- ②沈没
- ③設計深度(600m)以上の深度海域の航行
- ④氷海下航行

(1) 衝突

衝突とは本船が他の物体との物理的な接触により船体に損傷を受ける事象をいう。衝突対象は、他船および静止物（港湾施設や岩等の自然物）の 2 種類に分けられるが、潜水船の一般的な航行形態から判断して、他船との衝突については確率的に非常に低いと考えられるので、静止物との衝突のみを対象とする。衝突事象に対する安全性でまず考慮すべきことは、衝突をいかに回避するかである。衝突回避策としてはレーダー等の監視機器を装備し、事前に衝突を回避できるように自動操船システムの装備等が必要である。また、浮上途中あるいは潜水途中時のように海中航行観測船の回避能力が低下している

状態では随伴船による監視等の手段が必要である。また、想定しなければならない衝突事象に対しては、衝突しても居住耐圧殻および原子炉格納容器が健全な設計を行う必要がある。

(2) 沈没

沈没とは航行能力および浮上能力を喪失した事象をいう。沈没時の検討で重要なことは、乗員の安全確保と機器の安全性確保である。乗員の安全確保としては乗員が海中航行観測船より安全に脱出できることが設計条件である。一般に沈没の原因となる事象が発生してから沈没するまでには若干の時間があると考えられるので、海中航行観測船としては、非常用電源を使用して、氷海域であればポリニア・リード等の開水域を探して、まず浮上策をとる。浮上後は、救命艇等により速やかに船体より離脱する。もし、浮上が不可能な場合には、氷海下では同じく開水域に向け脱出塔より脱出・浮上する。氷海下での沈没では、何れにしても開水域あるいは薄氷域の発見が必要で、その可能性については確率的要素が含まれる。可能性をどのようにみるか設計時の検討課題である。

機器の安全性確保観点からは、機器の中で特に原子炉プラントの安全性確認が重要である。沈没時、原子炉が安全に停止し崩壊熱が除去されることが必要である。また、沈没場所が設計深度を超えた場合も、格納容器および原子炉容器が放射性物質の閉じ込め機能を維持しなければならない。

(3) 設計深度以上の深度海域の航行

本件は現行の航行ルールには規定されていないが、この種の潜水船の航行に対し、設計潜航深度を越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。しかし、海中航行観測船の役割上、設計潜航深度より深い海域を航行せざるを得ない。操船ミスによる場合を回避する方法として、例えば、設計潜航深度以上の深度に潜航しないよう操作器にインターロックを設けるのも一つの方法である。機器の故障により深度調整機能が損なわれた場合は、沈没時の乗員の安全確保と機器の安全性確認の項と同様である。

(4) 北極海域の氷海下航行

船体あるいは動力源に異常が発生した場合、開水域あるいは薄氷域を捜し出し、海面に急速浮上する。探索機能とともに、50cm程度の厚さの薄氷を破碎できるよう碎氷機能を船体に装備する必要がある。

4.5 動力源への要求

以上の検討に基づき、動力源への要求事項は以下の5項目に整理する。

- ① 要求船速に基づく定格出力
- ② 海中下長期連続運転に必要なエネルギー量
- ③ 動力源の軽量・小型化

- ④ 乗員数を最小限とするための運転操作自動化
- ⑤ 事故時等の安全性の確保

ここでは、必要出力〔①項〕、エネルギー量〔②項〕と海中航行観測船という特殊な用途で問題となる重量と体積〔③項〕について要求内容を定量化する。なお、上記④項および⑤項については、動力源の仕様にかかわるので5章で触ることにする。

(1) 定格出力

海中航行観測船の航行方法としては以下のケースを考えた。

- | | |
|-------------|-----------------------------------|
| ①目的海域までの航行時 | (a) 目的海域までの航行 12 ノット(約 22.2 km/h) |
| | (b) 潜入・浮上 |
| ②観測時 | (a) 高速航行観測 12 ノット(約 22.2 km/h) |
| | (b) 低速航行観測 8 ノット (約 14.8 km/h) |
| | (c) ホバリング観測 (船速=0kn) |
| | (d) 潜入・浮上 |

全負荷のうち推進用負荷がほとんどを占め、推進用負荷は船速によって決まる。したがって、必要出力およびエネルギーを算出するために、船速が大きい以下のケースを対象とする。目的海域までの航行および観測時高速航行観測時の船速を最大船速12 ノットとし、その場合の必要出力を表4.5に示す。

(2) 総エネルギー量

北極海の基地を出港し船速 12 ノットで氷海下を観航行し北極海の基地に戻る場合に必要なエネルギー量を求める。航続距離は、氷海下での自由な観測活動を保証するために、北極横断距離の2倍を想定した。この結果、必要な総エネルギー量は 185,000 kWh となる。

(3) 重量と体積

前述のように、居住区として必要な船体耐圧容器の大きさは外部容積は約 310m³となる。重量は計測設備等を備を約 300ton と仮定する。船体規模を約 500 ton と想定すれば、設備及び浮力体を適切に対から必要な観測置することにより、動力源の容積として約 190m³、重量として約 200ton が目標となる。以上の検討の概要を図4.3に示す。また、これらの検討結果に基づく海中航行観測船のイメージを一例として図4.4に、主要目を表4.6に示す。

表 4.1 海中航行観測船の観測目的、観測海域、観測項目

	観測目的	観測海域	観測項目	
海洋物理	・北極海氷塊量の把握(北極海気候指標の一つ)	・北極海	氷厚分布 氷形	
	・大気・海氷・海洋相互作用	・北極海	海洋 海氷温度 海水温度 塩分濃度	大気 風速 湿度 温度
	・海洋循環、塩分躍層の状態	・北極海 ・北太平洋暴風雨域 ・日本海	海水温度、塩分濃度分布 海水成分 ・溶存酸素 ・全炭素 ・二酸化炭素 ・栄養塩	
	・暴風雨域での大気・海洋混合過程	・北太平洋暴風雨域	海洋 波高、波周期 海水温度 塩分濃度	大気 風向、風速 湿度 温度
海洋化学	・水深・海底地形	・北極海	海水塩分 ・溶存酸素 ・全炭素 ・二酸化炭素 ・栄養塩	
	・重力異常	・北太平洋暴風雨域	精密海底地形	
	・海底地磁気異常	・日本海	重力 磁力	
地球物理	・マイクロネクトンの生態系	・全海域	生体分布構造及び保存量	
	・植物プランクトン、微細生物の生態系	特に ・北極海 ・北太平洋暴風雨域	生体分布構造及び保存量	
	・海洋基礎生産力		プランクトン種類及び成長速度	
海洋生物	・			
	・			
	・			

表 4.2 乗組員構成の設定

乗組員		研究員	
船長	1名	海洋物理・化学担当	
操船員	3名	地球物理担当	
機関運転員 (含む原子炉主任技術者)	3名	海洋生物担当	
医師	1名		計 7名
司厨員	1名		
合計 16名			

表 4.3 500t 規模の海中航行観測船の必要面積・体積積み上げ表－居住耐圧殻（その 1）

機能	機器区分	機器等の概略仕様	面積・体積計算 面積	高さ	体積	備考
用役	機械室	・二酸化炭素吸収装置 必要酸素量に対し吸収される二酸化炭素はその約 85%(吸収率 RQ)。 必要酸素量(30 日)は 648m^3 $648\text{m}^3 \times 0.85 = 551\text{m}^3$ $551,0001 \times 1.977\text{g/l} = 1089\text{kg}$ 吸収剤：水酸化リチウム（反応式） $\text{LiOH} + \text{CO}_2 = \text{LiHCO}_3$	44g の CO_2 吸収に 24g の LiOH が必要。 CO_2 1089g 吸収するのに必要な LiOH 量 594kg LiOH 必要容積（密度 2.54kg/m^3 ） $594 / 2.54 = 0.234\text{ m}^3$ 二酸化炭素分容積、装置容積を含め面積 $1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$	1.0m	1.0 m^3	・ CO_2 ・気体密度 1.977g/l
		・空気供給装置 ：活動スペース内酸素量及び二酸化炭素量を調整し供給する装置。	$1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$	2.0m	2.0 m^3	
		・生活用水造水装置及び一時保管タンク必要生活用水量使用量 500l/人・時 $0.5\text{ m}^3 \times 16\text{ 人} = 8\text{ m}^3 / \text{日}$	再生造水装置：フィルタ式 能力 $0.5\text{m}^3/\text{H}$ $1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$ 生活用水タンク占領面積 $13\text{m} \times 4\text{m} = 12\text{m}^2$ 造水ポンプ装置 $1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$	1.0m 1.3m 1.0m	造水装置 1.0m^3 タンク装置 15.6 m^3 ポンプ 1.0 m^3	
		・アクチュエータ用油圧ポンプ	$0.5\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.25\text{ m}^2$	0.5m	0.1 m^3	
		・バ'ラスト排水用高圧空気圧縮ポンプ（吐出量、Max 壓力 10MPa） ・バ'ラスト排水用高圧空気タンク（Max 10MPa） ・助バ'ラスト・トリム調整用海水ポンプ（吐出量、Max 壓力 10MPa）	$1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$ $2\text{m} \times 1\text{m} = 2\text{ m}^2$ $1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{ m}^2$	1.0m 1.0m 1.0m	1.0 m^3 2.0 m^3 1.0 m^3	
		・配電装置 ・変圧器 ・インバータ * 主スラスタインバータ * 左右・上下スラスタインバータ * 補機・ホルロード・精密電源 インバータ	$2\text{m} \times 2\text{m} = 4\text{ m}^2$ $2\text{m} \times 2\text{m} = 4\text{ m}^2$ $2\text{m} \times 1\text{m} = 2\text{ m}^2$ $1\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.5\text{m}^2$ $1\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.5\text{m}^2$	1.0m 1.0m 0.5m 0.5m	4.0 m^3 4.0 m^3 2.0 m^3 0.25 m^3 0.25 m^3	
		機械室・電気室 計	31.3m^2		35.2 m^3	
保管 ・ 貯 蔵	タンク 室 ・ 倉庫	・高圧酸素タンク必要酸素量：体重 60kg の人のほぼ静止状態での消費量は 0.5 l/分程度である。 $0.5 \times 60 \text{ 分} \times 24\text{H} \times 30 \text{ 日} \times 16 \text{ 人} \times 1.5$ (余裕率)= 518m^3	容積（高圧状態保有）： 約 4.3m^3 $518\text{m}^3 / 120 = 4.3\text{m}^3$ 高圧酸素タンク占有面積 $12\text{m} \times w2\text{m} = 4\text{m}^2$	1.5m	タンク装置 6.0m^3	<参考> ガスベンベ 圧 力 : 120 ~150kg/cm ² 重量：53kg 容積：471

表 4.3 500t 規模の海中航行観測船の必要面積・体積積み上げ表－居住耐圧殻（その 2）

機能	機器区分	機器等の概略仕様	面積・体積計算 面積	高さ	体積	備考
		・飲料水タンク 乗船員 16 人 $\times 30$ 日分 必要量 10l/人・日 計 16 人 $\times 30$ 日 \times 10l/人・日 = 4.8m ³	飲料水タンク占有面積 12m \times w2m $= 4m^2$	1.2m	タンク 4.8m ³	
		・食糧倉庫[冷蔵・冷蔵庫] 乗船員 16 人 $\times 30$ 日分 1.5kg/人・食 1.5kg \times 16 \times 3 \times 30 = 2.2ton	2m \times 2.5m = 5 m ²	1.2m	6.0m ³	
		タンク室・飲料水タンク・食糧倉庫 計	13.0m ²		16.8m ³	
排水処理室		・排水処理装置 一時貯蔵し浅場でプロ- 必要生活用水量 4m ³ /日 \times 5 日分 = 20m ³ ・サンプル水処理装置 サンプル水処理量 1m ³ /日 \times 5 日分 = 5m ³	排水タンク面積 5m \times 4m = 20 m ² 排水ポンプ装置面積 1m \times 1m = 1 m ² サンプル水処理タンク面積 2m \times 2.5m = 5 m ² サンプル水処理ポンプ面積 1m \times 1m = 1 m ²	1.0m 0.5m 1.0m 0.5m	タンク 20.0m ³ ポンプ 0.5m ³ タンク 5.0m ³ ポンプ 0.5m ³	
		排水・処理水タンク 計	27.0m ²		26.0m ³	
運転・操作	運転室	・観測船運転機器 ・プロペラ運転機器 ・観測機器操作用機器 ・空調装置小型エアコン船体環境温度 5°C 程度で船内の温度を 20°C に維持	1m \times 2m = 2 m ² 1m \times 2m = 2 m ² 1m \times 2m = 2 m ² 1m \times 1m = 1 m ²	1.5m 1.5m 1.5m 1.0m	3.0m ³ 3.0m ³ 3.0m ³ 1.0m ³	・運転員は 3人が 1 グル ・空調装置は 分散方式
		・高性能ワ-クステ-ション 一式 ・船内ネットワーク 通信機器 等	1m \times 1m = 1 m ² 1m \times 1m = 1 m ²	1.0m 1.0m	1.0 m ³ 1.0 m ³	
		・鉛蓄電池 要求: 30kW \times 10h = 300kWh 単体容量: 10HR 2500Ah、 2V 5kWh/個 必要数: 300kWh/(5kWh/個) = 60 個	配置例 6 個 \times 5 個 \times 2 段 = 60 個 (0.3m \times 6) \times (0.7m \times 5) $= 6.3m^2$	0.5 \times 2 段 1.0m		
		・空調装置小型エアコン	1m \times 1m = 1 m ²	1.0m	1.0 m ³	
	通信機器・電源室	運転室・通信機器・電源室 計	15.3m ²		19.3 m ³	
観測・採集・分析	観測室	・重量計と鉛直ジャイロ音響観測機器の船内搭載機器 ・以下の船内機 MNBS、ADCP、SBP、定量型リバ-、鉛直科学魚探、電子機器、データ処理機器 ・空調装置、パッケージエアコン	2m ² 16.0 m ² 2m ²	1.0m 1.5m 2.0m	2.0 m ³ 24.0 m ³ 4.0 m ³	・船体運動中心より 5m 以内にあること

表 4.3 500t 規模の海中航行観測船の必要面積・体積積み上げ表－居住耐圧殻（その 3）

機能	機器区分	機器等の概略仕様	面積・体積計算			備考
			面積	高さ	体積	
自動分析室	サンプル室	・サンプル水自動吸入、仕分け、貯蔵装置	$2m \times 1.5m = 3m^2$	1.2m	$3.6 m^3$	
	自動分析室	・生物環境モニタリング装置 (温度、塩分、懸濁度等)	$2.5m \times 1m = 2.5m^2$	1.0m	$2.5m^3$	・海洋調査船 「みらい」搭載機同様の 自動分析室を想定 ・定期的に試薬補充等の 作業が必要
		・二酸化炭素分圧測定装置	$2.5m \times 1m = 2.5m^2$	1.0m	$2.5m^3$	
		・全炭酸分析装置	$2m \times 1m = 2m^2$	1.0m	$2.0m^3$	
		・栄養塩分析装置	$2m \times 1m = 2m^2$	1.0m	$2.0m^3$	
		・空調装置パッケージエアコン	$2m \times 1m = 2m^2$	1.0m	$3.0m^3$	
観測室・サンプル室・自動分析室 計			$34.0m^2$		$45.6m^3$	
居住	食堂兼談話室	・食堂兼談話用テーブル 椅子席数：4 $1.2m^2/\text{席} \times 4 \text{ 席} = 4.8m^2$ ・空調装置パッケージエアコン (調理室兼用)	$6.0m^2$	2.0m	$12.0m^3$	
	調理室	・簡易調理設備	$3.0m^2$	2.0m	$6.0m^3$	
		・2段ベッド 8台(乗船員 16人) $1\text{ベッド } 1m \times 2m = 2m^2$ (8人/2段)= $4 \times 2m^2/\text{ベッド}$ ・収納棚(寝具等) ・空調装置パッケージエアコン ・トイレ・シャワ- トイレ $0.7m \times 0.8m \times 2$ セット シャワ- $0.8m \times 1.2m \times 2$ セット	$8.0m^2$ $4m \times 1m = 4m^2$ $2m \times 1m = 2m^2$	2.0m 2.0m 2.0m	$16.0m^3$ $8.0m^3$ $4.0m^3$	
	寝室	・トイレ・シャワ-	$3.2m^2$	2.0m	$6.4m^3$	
		食堂、調理室、寝室 計	$28.2m^2$		$55.4m^3$	
参考値 計			$148.8m^2$		$198.3m^3$	

表 4.4 船舶の建造及び運航に係わる現行法令等

法 令	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船舶法 ・ 船舶安全法 ・ 船舶職員法 ・ 海上衝突予防法 ・ 港則法 ・ 海上交通法海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律 ・ 海難審判法 ・ 損害賠償関連法 ・ 核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律、法令
規則等	・ 鋼船規則 (T 編潜水船)

表 4.5 必要出力

負荷の種類	航行時 (船速 12 kn)		
	負 荷 (kW)	インバータ効率	必要出力 (kW)
推進用負荷			
主推進	406	0.9	451
上下スラスタ	-	0.9	-
左右スラスタ	-	0.9	-
補機用負荷 (含む変動)	8.5	0.9	9.4
船内居住用負荷 (含む変動)	11	0.9	12.2
観測機器用負荷	2.5	0.5	5
			477.6

表 4.6 海中航行観測船の主要目

L×B×D	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
主動力源	電気出力 約 500kW
非常用蓄電池	360 kWh (2.5 ノット航続 20 時間)
船速	約 12 ノット (約 22km/h)
主要観測設備	マルチナロービーム, ドップラ流向流速計、表厚計測ソナー、前方半円周定量型ソナー、プロトン磁力計、鉛直CTD、採水システム等

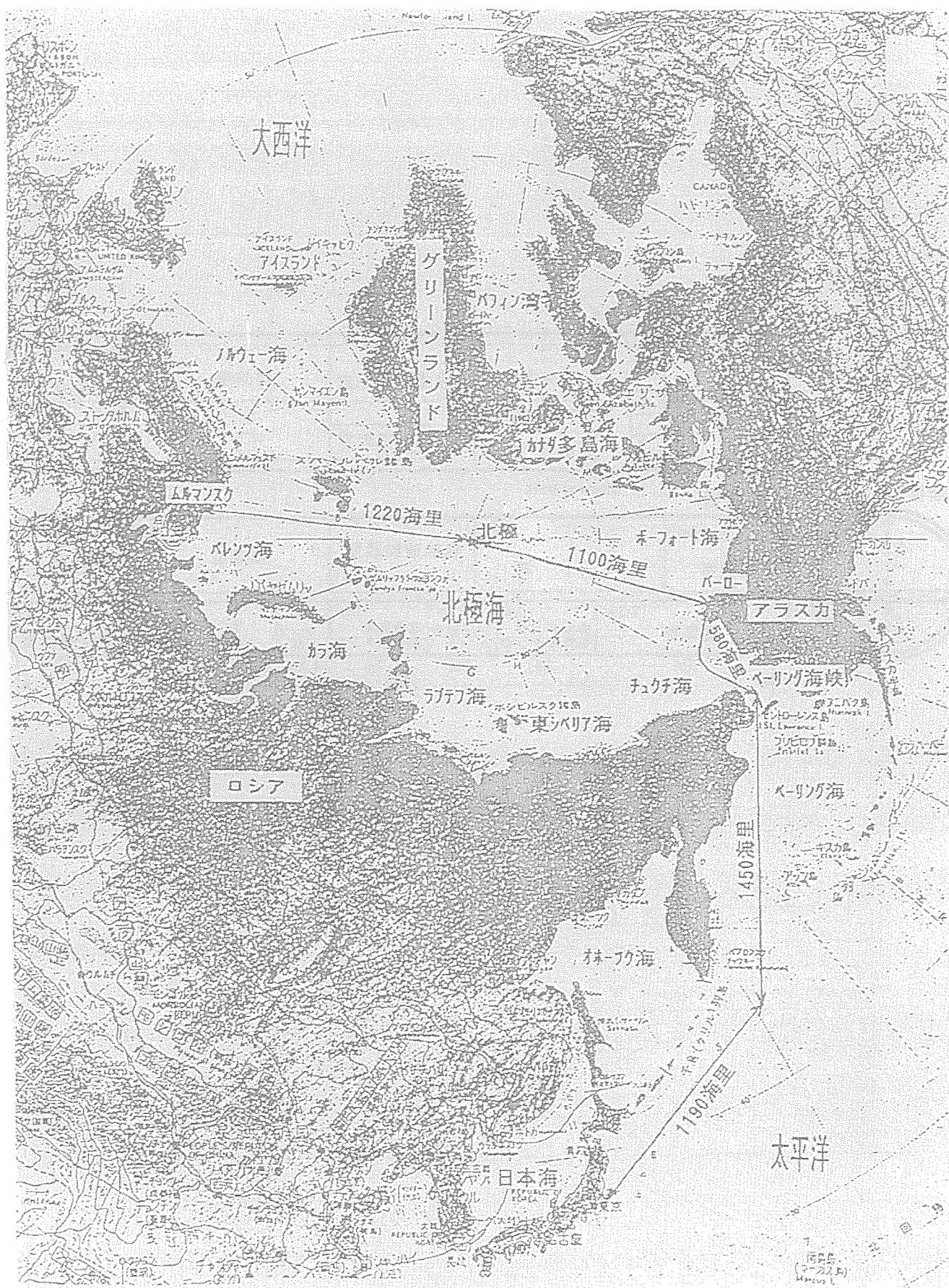


図 4.1 海中航行観測船の北極海への想定航路

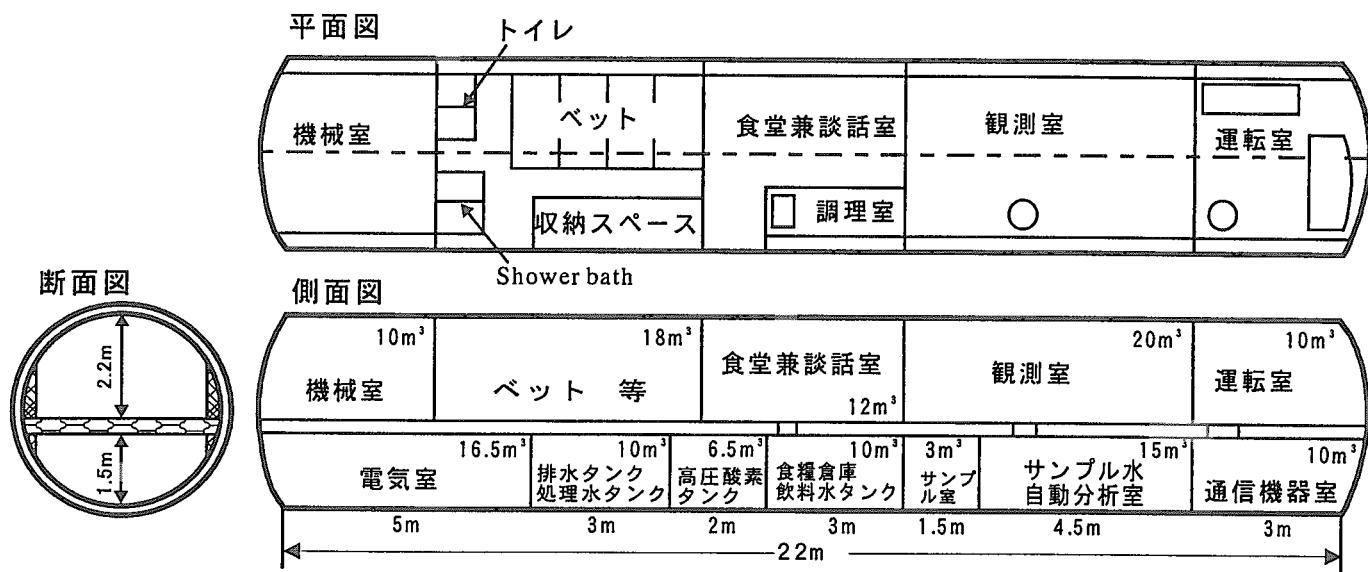


図4.2 海中航行観測船の居住耐圧殻内のレイアウト例

動力源（原子炉プラント）の概要	
<p>基本仕様</p> <p>電気出力 : 250 kW×2 原子炉熱出力 : 1250 kW×2 炉心寿命中総供給工ネルギー量 : 8,592,000 kWh (要求: 185,000 kWh)</p> <p>重量 : 210 ton 程度 体積 : 190 m³ 程度 直径 : 5.5m 以下 高度に自動化された運転システム</p>	
	
海中航行観測船の概要	
<p>基本仕様</p> <p>船体規模 : 500 ton 乗組員 : 16 最大潜航深度 : 600 m 航続期間(潜水) : 2 ヶ月 航続距離 : 4,360 海里 (8,594 km) 最大速力 : 12 knots (22.2 km/h) 動力源の多重性 : 2 基構成 操船性 : 垂直&水平スラスター</p>	
	
観測項目	
北極海	<p>大気・氷・海洋相互作用</p> <p>(1)氷の状態 氷厚分布 表面温度 等</p> <p>(2)海洋の状態 海水温度、塩分濃度、 二酸化炭素分圧、溶存酸素量 等</p>
北太平洋 (暴風雨域)	<p>大気・海洋の混合過程</p> <p>(1)海洋の状態 海水温度、塩分濃度、 二酸化炭素分圧、溶存酸素量 等</p> <p>(2)海洋表面の状態 波高、波周期、 風速、風向、気圧、 温度 等</p>
他の海域	<p>地球物理</p> <p>精密海底地形、 重力、 磁力 海洋生物 プランクトン、マイクロネクト ンの分布構造及び保存料 等</p>
安全確保	
<p>(1)環境汚染の防止 多重防護 格納容器への圧力平衡弁</p> <p>(2)受動的な安全システム 水張式格納容器 自然循環を利用した崩壊熱除去</p>	
	
設計要求	
<p>(1)衝突 衝突予防システム 耐圧殻の体衝突性能</p> <p>(2)沈没 乗員の安全確保 環境汚染の防止</p> <p>(3)設計深度以上への潜航 運転操作器にインターロック装置</p> <p>(4)水海下での事故対応 碎氷構造体</p> <p>(5)受動的な安全システム</p>	

図 4.3 海中航行観測船及び動力源への要求

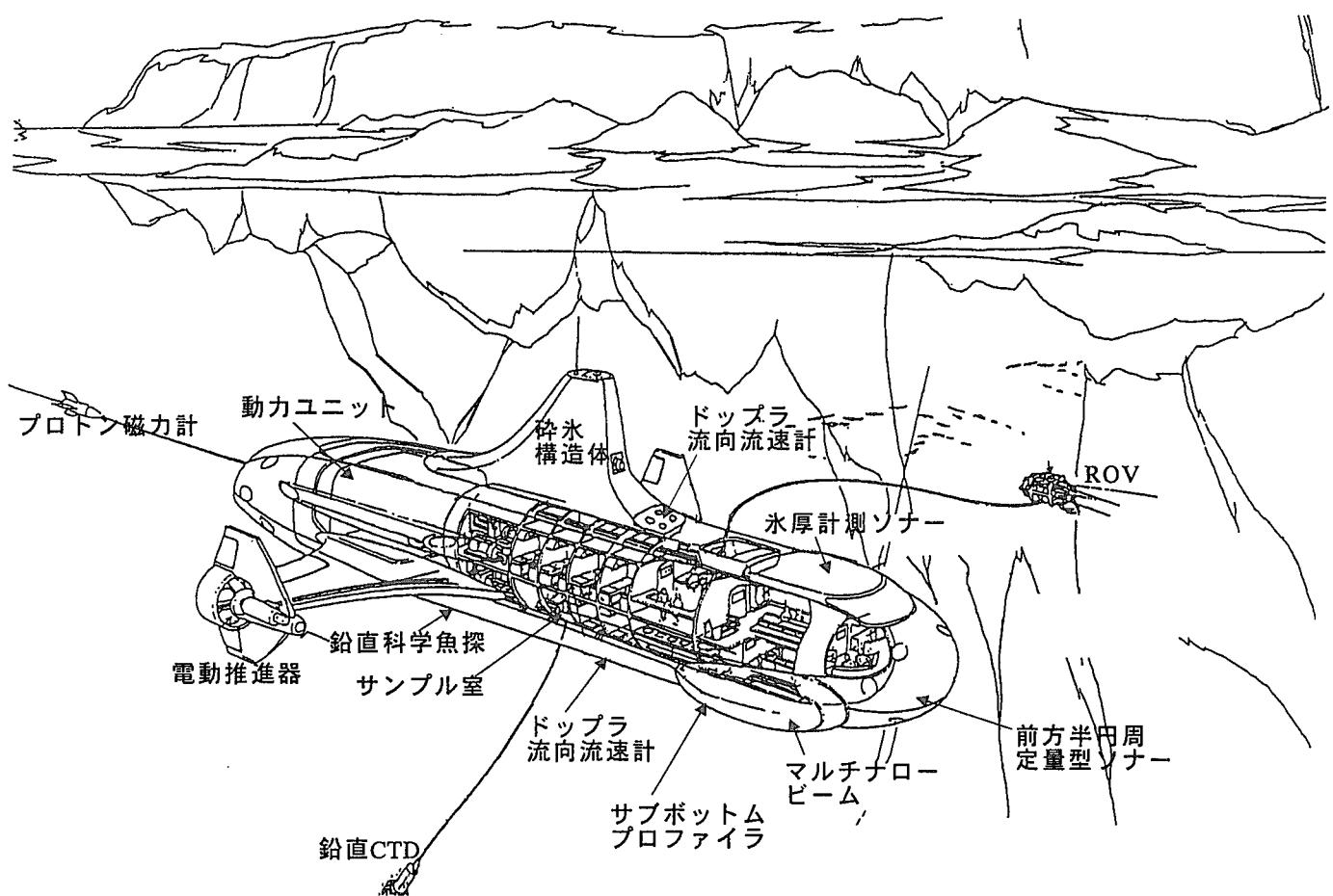


図4.4 500t級海中航行観測船の概念図

5. 潜水船用超小型炉 SCR の概念検討

5.1 原子炉プラントの設計方針

本原子炉への要求は4章で示したように以下のとおりである。

- (1) 要求船速に基づく定格出力（2基で500kWe）
- (2) 海中下長期連続運転に必要なエネルギー量(185,000kWh)
- (3) 動力源の体積及び重量（約190m³及び合計質量が約190t）
- (4) 乗員数を最小限とするための運転操作自動化
- (5) 事故時等の安全性の確保

これらの要求を満たすために、原子炉プラントの概念は、原研がこれまで設計研究を行ってきた超小型炉 DRX⁹⁾の概念を基本として、500t級の海中観測航行船に適した変更を施すこととした。DRX の概念図を図 5.1 に示す。また、主要目を超小型原子炉 SCR と合わせて表 5.1 に示す。設計方針は、DRX の考え方を踏襲し以下のとおりとした。

- ①一体型炉：蒸気発生器、制御棒駆動装置等を内蔵する一体型炉を採用し小型化を図る。
- ②単純な設備：一次冷却水ポンプ、加圧器、一次冷却水浄化系、給水加熱器等を用いない単純な構成の設備とする。
- ③受動的な安全確保：水張式格納容器、自然循環を利用した崩壊熱除去設備等の受動的な安全設備により、運転員の操作を必要とせずに原子炉の安全を確保する。

DRX からの主な変更点は次の 3 点である。発電機出力を 250kWe として、これに伴う設計変更を行った。超小型炉 DRX は深海科学調査船への搭載を想定した電気出力 150kWe の原子炉プラントであり、原子炉容器の上部にタービン発電機を備えている。図に示すように原子炉プラントを収納した格納容器の高さは船体寸法とほぼ同じであり、同形状を維持したまま 250kWe まで出力を増加させることは困難である。そこで、タービン発電機等の二次系設備は分離して別の耐圧容器に収めることとした。これに伴い DRX で採用していた蒸気発生器、二次系の凝縮器、ヒートパイプ等を用いた安全設備をそのまま用いることはできなくなったため、安全設備については設計の変更を行った。

適用する法律、規則、指針等は DRX と同様に表 5.2 に示す各指針類を対象と考え、これらの要求を原則的に満足する設計とした。

5.2 原子炉プラントの概念

5.2.1 プラント全体概念

SCR250 の主要目を表 5.2 に、概念図を図 5.2 に示す。原子炉プラントは徹底した系統の簡素化と動的機器の数を少なくすることで、小型軽量化と高い信頼性の確保を図った。一次冷却系は、一次冷却材循環ポンプを用いない自然循環方式を採用し、加圧器ヒータ及びスプレイ系統を用いない自己加圧型の設計とした。炉心、蒸気発生器、CRDM 等を内蔵した原子炉容器は水を張った原子炉格納容器内に収めた。原子炉格納容器は海水による外圧に耐えるための耐圧殻を兼ねている。タービン発電機、給水ポンプ等は別置きのタービン発電機格納容

器に収めた。超小型炉 SCR の全体系統概念を図 5.3 に示す。

一次冷却水は炉心で加熱されて原子炉容器内筒内を上昇したのち、蒸気発生器で冷却されてダウンカマを下降して炉心へ戻る。炉心の等価直径は約 450mm、有効高さは約 420mm であり、定格出力 1250kWt で約 470 日の運転が可能である。

蒸気発生器二次側で発生した蒸気は定格出力 250kWe の発電機タービンで仕事をした後に復水器で水となり給水タンクに貯留される。こののち、給水ポンプにより駆動され、発電機タービン等を冷却し蒸気発生器に戻る。流量調整のために、蒸気系統には蒸気制御弁、給水制御弁を設ける。復水器では冷却水として船外の海水を用いる。

安全設備としては、原子炉で発生する崩壊熱を格納容器水に伝える非常用崩壊熱除去系 (EDRS) を 3 系統備える。格納容器水は、格納容器表面から海水への放熱により冷却される。沈没時に横転状態となっても炉心冠水状態を維持し、冷却を確保するために減圧注水系 (PRMS) を備える。また、特殊なケースとして、船体の乗上事故時及びバラスト故障等により部分的に原子炉格納容器が空気中に露出する場合を考慮して、崩壊熱を大気に放熱できる非常用格納容器水冷却設備を備えることとする。

原子炉を一体型炉とし、設備の簡素化を徹底したことにより、SCR は小型のプラントとなった。潜水船用超小型原子炉の設計例として、フランスのダイバー支援潜水船 SAGA のために設計された AMPS^{7),8)}炉がある。AMPS 炉は、二次系の作動流体としてフレオンを用いることで、一次冷却系圧力を大気圧近傍として高い安全性を確保している。この AMPS 炉との比較では、SCR は電気出力が約 2.5 倍であり、大きさは図 5.4 に示すように小型である。図 5.5 には、この原子炉 2 基を船尾に別置きの格納容器に収めて搭載した場合の配置概念を示す。

5.2.2 遮蔽の概念検討

(1) 概要

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、居住区耐圧殻は遮蔽体としての機能もあわせ持つ。

(2) 設計方針

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 $1.7 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下にする必要がある。

(3) 評価

海中航行観測船の遮蔽設計を検討するための、SCR の通常運転時、停止直後における居住区画での線量当量の評価を行った。評価には、一次元放射線輸送計算コード ANISN¹⁰⁾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）、耐圧殻（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 5.6）に対する線量評価を行った。評価結果を表 5.3 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 mSv に相当する。一般公衆に対する線量当量限度は年間 1 mSv があるので、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 Sv/h 以上であり、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。

原子炉停止時については、居住区画においては、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 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、SCR を 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 ORIGEN2¹¹⁾により評価し、線量当量率の計算は QAD-CGGP2¹²⁾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 mSv を下回っている。

5.3 安全設備の概念及び事故解析

5.3.1 安全確保の考え方

超小型 SCR の安全設備は、水張式格納容器、非常用崩壊熱除去設備(EDRS)、減圧注水設備(PRMS)より構成される。原子炉の安全確保は、原子炉の停止、炉心冠水の維持、崩壊熱の除去、放射性物質の閉じ込めを自動的に、かつ自然力を利用して行われる。

原子炉は異常に自動的に制御棒が炉心に挿入されることにより停止する。SCR の制御棒は制御棒の切離し方式が異なる 2 つのグループに分かれており、どちらか一方のグループ

が挿入されれば原子炉を停止して低温で臨界未満を維持することができる。また、転覆状態でも制御棒が確実に挿入されるように、スプリングを用いた構造としている。

水張式格納容器は、格納容器と原子炉容器の間に水を入れる方式である。これにより、安全弁等の一次冷却水を内蔵する配管が破損した場合にも一次冷却水の流出を制限して、一次冷却材喪失事故に炉心の冠水を維持する。

非常用崩壊熱除去設備(EDRS)は、一次冷却水を直接循環させて崩壊熱を格納容器水に伝える設備で、格納容器内の熱交換器と隔離弁より構成され、格納容器圧力高等の信号により作動する。格納容器の外表面は海水に接しており、格納容器表面からの放熱により格納容器水が冷却される仕組みである。EDRS は 1 系統で崩壊熱を除去できる容量を有しているが、单一故障と EDRS 系統自身の配管破断を考慮して 3 系統が備えられている。

減圧注水設備(PRMS)は、船体を沈没させる時に作動させる設備で、手動操作、船体傾斜過大等の信号により原子炉容器の上下に設けられた隔離弁が開く。同弁の作動により、格納容器内の水を原子炉容器に導き、船体が横転状態等になった場合にも炉心の冠水と冷却が図られる。

非常用格納容器水冷却設備は、船体の乗上事故時及びバラスト故障等により部分的な原子炉格納容器の空気中への露出する特殊な場合を想定して、崩壊熱を大気に放熱するために備えているが、船体構造及び原子炉プラント据付方法が確定した時点で必要性を再検討することとしている。

放射性物質の閉じ込めは、一般的な原子炉と同様に、燃料被覆管、原子炉圧力容器、原子炉格納容器により多重に閉じ込めている。船体が設計深度以上の深海に沈没した場合を想定して、原子炉を収める格納容器には、格納容器内圧力と海水圧力を平衡させる圧力平衡弁を設けている。この弁により、格納容器が圧縮することを防ぎ、放射性物質の閉じ込め機能を維持する設計としている。

5.3.2 事故時のプラント応答解析

(1) 概要

安全設備を構成する水張式格納容器、非常用崩壊熱除去設備(EDRS)による炉心冠水維持機能と崩壊熱除去機能を確認するために代表的な事故事象である一次冷却材喪失及び蒸気発生器伝熱管破断事故時のプラント応答解析ならびに格納容器が部分的に海面上に露出した場合の除熱性能解析を行った。

(2) 解析条件

解析には、汎用プラント応答解析プログラム RELAP5mod3¹³⁾を用いた。RELAP5 は、原子炉容器、炉心、蒸気発生器等を含む一次冷却系全体を詳細に模擬し、6 群の遅発中性子及び反応度帰還効果を含む中性子動特性、燃料棒の熱的特性、一次冷却材の熱水力学的挙動及び蒸気発生器内での熱伝達を計算する。

解析に使用したノーディグを図 5.7 及び 5.8 に示す。原子炉容器は、図 5.7 に示すよう

に 14 分割として、さらに炉心部は 5 領域に、蒸気発生器は 8 領域に細分割した。原子炉容器の熱容量を模擬するために容器はヒートスラブとしてモデル化したが、SCR の原子炉容器は断熱材で覆われているため、原子炉容器から格納容器水への伝熱は無いものとした。

二次系は給水バルブから蒸気バルブまでが模擬されており、蒸気発生器内は一次側と同様に 8 分割されている。EDRS は、第 1 系統を破断する系統として、下部に両端破断を模擬するバルブを設けた。第 2 系統及び第 3 系統を健全な系統として、格納容器水との熱交換を模擬するためにヒートスラブを設けた。格納容器は、図 5.8 に示すように周方向に 6 分割、軸方向に 15 分割とした。周方向の分割グループは図中のボリューム番号の一の位が示しており、**1 は第 1 グループを示す。格納容器の第 1 グループには EDRS の第 1 系統が、第 3 グループには第 2 系統が、第 5 グループには第 3 系統が、それぞれ配置されている。EDRS の熱交換器は 1 系統あたり、外径 27.2mm、内径 19.8mm、長さ 3.4m の伝熱管 20 本で構成されることとした。格納容器の表面は 30°C の海水に直接接触しているものとした。

使用した減速材密度反応度係数を表 5.4 に、ドップラ反応度係数を表 5.5 に示す。また、原子炉スクラム時の時間と反応度添加の関係を表 5.6 に示す。

安全解析では、初期運転状態として、設計原子炉熱出力に定常運転出力を設計する際に生じる熱校正の誤差を加えた値を用いるべきであるが、設計が概念段階にある本解析では定格運転時の熱出力を初期状態として実施した。

(3) EDRS 機能確認解析

EDRS の除熱性能及び格納容器表面からの除熱の成立性を評価するために、2 系統の EDRS が作動した場合のプラント応答解析を実施した。設備の作動等の条件は表 5.7 に示す。

図 5.9 に解析結果の一部を示す。同図(1)に示す様に原子炉スクラム後、原子炉容器圧力は低下し、格納容器圧力は上昇する。これは同図(2)に示すように EDRS の働きにより、原子炉容器の熱が除去されて格納容器に伝えられるためである。図中には第 3 系統 EDRS の除熱量のみを示したが、第 2 系統の除熱量もほぼ同じであり、合計では図中の値を 2 倍すればよい。格納容器からの放熱は、EDRS により格納容器温度が上昇することにより増加する。約 50 分後には、EDRS からの合計熱移動量と格納容器からの放熱量がほぼ同じとなった。いずれの熱移動量も崩壊熱を十分に上回っており原子炉プラントは良好に冷却されていることがわかる。このことより EDRS 及び格納容器表面からの放熱により除熱方式は成立性があることが明らかとなった。

(4) 一次冷却材喪失事故解析

一次冷却系の配管が破断した場合の、水張式格納容器による炉心冠水維持機能及び崩壊熱の除去機能を確認するために解析を行った。破断箇所は第 1 系統 EDRS の原子炉容器と

の下部取り付け位置付近とし、破断配管数は1本、内径は19.8mm、形態は完全両端破断とした。事象の発生及び設備の作動等の条件を表5.8に示す。

図5.10に解析結果の一部を示す。同図(1)に示すように、EDRS配管の破断直後に原子炉容器圧力は低下し、一方、格納容器圧力は上昇して、両容器の圧力は平衡に達した後に、EDSR及び格納容器表面からの除熱により共に低下して、約50分後には大気圧程度まで低下している。同図(2)に示すように原子炉容器水位は、配管破断直後に急速に低下するが、両容器の圧力平衡によりほぼ一定となり、約25分以降は格納容器から原子炉容器への水の流入により上昇している。原子炉容器の最低水位は炉心の上端より約0.9m高く、炉心の冠水は十分な余裕をもって維持されている。同図(3)に示すように、EDRSの崩壊熱除去量は第3系統単独でも崩壊熱に対して十分な余裕があり、格納容器からの放熱により原子炉プラントは冷却されている。同図(3)には原子炉容器内の温度及び格納容器内の高さの異なる3点の温度を示す。原子炉容器の温度は、ほぼ単調に低下している。格納容器の温度は、配管破断直後に高温の一次水が流入するため、局所的に温度が上昇するが、混合されて温度が低下し、その後は、EDRSにより崩壊熱が伝えられるため、徐々に上昇する。格納容器の上部に比べて下部の温度上昇は小さく、温度の成層化が発生している。

この解析により、一次系配管破断時にも、炉心の冠水が維持され、自然循環を利用した崩壊熱除去設備により、プラントが冷却できる見通しを得た。

(5) 蒸気発生器伝熱管破断事故解析

蒸気発生器の伝熱管が破断した場合の解析を行った。蒸気発生器の伝熱管破損の場合には、一次冷却水が格納容器ではなく二次系に流出するため、蒸気及び給水系統の隔離弁により一次水の流出を制限する。この時の炉心冠水維持と及び崩壊熱の除去機能を確認する。破断箇所は蒸気発生器の伝熱管とし、破断配管数は1本、内径は16.0mm、形態は完全両端破断とした。事象の発生及び設備の作動等の条件を表5.9に示す。

図5.11に解析結果の一部を示す。同図(1)に示すように、伝熱管の破断に伴い原子炉容器圧力は急速に低下する。約64秒後の給水系及び蒸気系の隔離後は、原子炉の停止とEDRSによる除熱のため、圧力が低下を続け約50分時点での0.9MPa程度となっている。格納容器圧力は、EDRSの働きにより格納容器温度が上昇するために徐々に上昇している。同図(2)に示すように原子炉容器水位は、配管破断直後に急速に低下するが、約64秒後の給水系及び蒸気系の隔離後は水位がほぼ一定となっている。原子炉容器の最低水位は炉心の上端より約1.1m高く、炉心の冠水は十分な余裕をもって維持されている。同図(3)に示すように、EDRSの崩壊熱除去量は第3系統単独でも崩壊熱に対して十分な余裕があり、格納容器からの放熱により原子炉プラントは冷却されている。同図(4)には原子炉容器内の温度及び格納容器内の高さの異なる3点の温度を示す。原子炉容器の温度は、ほぼ単調に低下している。格納容器の温度は、EDRSにより崩壊熱が伝えられるため徐々に上昇している。

この解析により、蒸気発生器伝熱管破断時にも、炉心の冠水が維持され、自然循環を利

用した崩壊熱除去設備により、プラントが冷却できる見通しを得た。

(6) 格納容器が部分的に海面上に露出した場合

船体乗り上げ事故時及び原子炉事故時にバラスト故障等により格納容器が部分的に海面上に露出した場合を想定した解析を行った。海面位置は図 5.12 に示す 6 通りとした。図 5.8 との対応では、格納容器 1 ノードの高さが 0.33m に相当する。海水温度は 30°C として、格納容器表面での自然対流を仮定した。格納容器の海面上への露出部分は断熱と仮定した。また、EDRS は 3 系統が作動することとした。

図 5.13 に格納容器頂部温度の解析結果を示す。図より、格納容器が全水没状態にあるケース 1 では格納容器表面から十分な除熱が期待できることがわかる。浮上時に想定される格納容器が 0.33m 海面より出るケース 2 でも十分な除熱が期待できる。バラスト故障等を想定した 0.99m 露出時には、ケース 1,2 に比べて除熱性能は低下するが、除熱量は十分に崩壊熱を上回るため、事故発生後の約 1 時間以降は格納容器頂部温度が低下を続ける。乗上げを想定して、格納容器の約 3 分の 1 にあたる 1.65m が海面上に露出するとした場合では、崩壊熱と除熱量がほぼ等しくなり格納容器温度の低下は小さくなる。約 3 分の 2 に相当する 3.3m 以上の露出では格納容器頂部温度は単調に増加する。現時点では、本解析結果に基づき、乗上げ時の格納容器水冷却のために非常用の冷却器を格納容器頂部に設けることとした。船体構造及び原子炉プラントの設置方法が確定した後に、空気による冷却効果も考慮して詳細な解析を実施して、設計の見直しを行うこととする。

5.4 海中航行観測船用動力源への要求に対する対応

海中船用超小型炉 SCR は、500 ton 級の海中航行観測船用の動力源に要求される下記の要求を満たした原子炉である。

(1) 要求船速に基づく定格出力

要求される定格出力を 250 kW_e の発電プラント 2 基により満たしている。

(2) 海中長期連続運転に必要なエネルギー量

炉心が寿命中に発生するエネルギーの総量は、14,100,000 kWh である。計画されている 1 ヶ月の連続定格運転時に、要求される 185,000 kWh を満たす。

(3) 動力源スペースを最小限とするための動力源の計量・小型化

SCR を 2 基搭載した場合で、500 ton 級の海中航行観測船を達成できる。原子炉プラントは耐圧容器を含めて、体積は 2 基で約 52m³、重量は 160 ton 程度とする。浮力体としては、最大使用深度 610m、比重 0.32 のマクロ・スフェア・シンタクチックフォームを想定すれば、表 5.10 に示すように動力部の体積が約 196m³、重量が約 206 トンとなり、要求をほぼ満足する原子炉プラントの概念となる。配置概念は図 5.5 に示すとおりである。

(4) 乗員数を最小限とするための運転操作自動化

SCR はプラント構成の簡素化が図られており、動的機器の数は少ない。また、今後、高度自動化研究の成果を反映させ、さらに運転員への負担を軽減する。

(5) 事故時等の安全性の確保

SCR は水張格納容器と自然循環を用いた崩壊熱除去設備という受動性の高い安全設備を採用しており、運転員の操作及びポンプ等の動的機器を用いずに事故時の安全を確保することができる。また、万一、観測船が沈没した場合にも、減圧注水設備(PRMS)により、船体姿勢に係わらず炉心冠水維持と崩壊熱の除去が確保される設計であり、安全性に優れた原子炉である。一次冷却材喪失事故、蒸気発生器伝熱管破断事故等の代表的な事故事象について解析を行い、受動的な安全設備により炉心冠水維持と崩壊熱除去が確保されることを確認した。

5.5 他の海中動力源との比較検討

5.5.1 その他の海中動力源

海中動力源の一般的な比較検討例は、日本深海技術協会による「水中動力源」講演会¹⁴⁾、日本原子力学会による「海中動力源としての原子力」、浦、高川編著による「海中ロボット総覧」¹⁵⁾等に示される。これらには、各動力源の原理、設計例、実用例等が示され、一般的は大出力で連続使用期間が長いほど原子力が有利であることが示されている。ここでは、今回、対象とした 500ton 級の潜水船に搭載する出力 500kWe 級、エネルギー量 185,000kWh 程度の海中動力源としての適用性について各種海中動力源の検討を行うこととする。

5.5.2 海中動力源の種類と 500ton 級海中航行観測船への適用性

(1) 海中動力源の種類

海中動力源は、空気（酸素）が微量にしか存在しない環境で使用される。また、連続的な燃料の補給が困難であり、深度が増した場合には、船外へのガスの排出が困難となる環境である。このような環境下で使用できる海中動力源は、大別すれば下記の 5 種類にわけることができる。

- ①原子力
- ②RI 発電
- ③蓄電池（二次電池）
- ④燃料電池
- ⑤熱機関（スターリングエンジン、CCDE）

(2) 海中動力源の特性調査

現時点における海中動力源の性能について調査^{2),7),9),14),15),18),19),20),21),22),23)}した結果を表 5.11 に示す。

海中動力源は、二次電池のように標準品として仕様が確定しているものもあるが、むしろ用途が特殊であることから個別に仕様が設定されることが多いこと、また性能については海中動力システム全体で捉える必要があることから、個々の適用事例(設計段階のものを含む)から特性値データを抽出した。取り上げた特性値は、出力、持続時間、総エネルギー労(=出力×持続時間)、重量、容積である。また、それらの比率として、出力密度(単位重量あたり及び単位体積あたりの出力)、エネルギー密度(単位重量あたり及び単位体積あたりのエネルギー量)を算出した。

このうち、最近、潜水艦の AIP(Air Independent Propulsion)動力として具体的な計画が進められているスターリング機関と燃料電池については、酸化剤、燃料の必要重量、必要容積およびタンクの重量、容積等を外力試算して表 5.12 に示す。

①原子力

海中を主たる活動域とする潜水艦では、原子炉は代表的な動力源である。小型のものとしては、米海軍が海洋調査用として運用している NR-1⁶⁾ がある。しかし、これらに関しては軍用であるため詳細な仕様に関する情報は入手できなかった。民生用としての海中動力源用原子炉の設計例は、過去にカナダの ECS による AMPS 炉^{7,8)}、アメリカのロスアラモス研究所による LASL 超小型炉¹⁶⁾、日本の原研による DRX⁹⁾等がある。また、宇宙用原子炉の計画としてアメリカの SP-100¹⁷⁾の設計例がある。これらの特性値データに基づけば、原子力は、大出力で長時間の使用に対して有利である。

出力的には概ね 100kWe 以上が計画の対象となっている。小型の原子炉プラントの重量あたりの出力は 1~3W/kg 程度と、他の海中動力源に比べ大きくはないが、単位重量あたりのエネルギー量は優れている。単位重量あたりのエネルギー量は連続航行期間を乗組員の身体的、精神的な負担を考慮して 1 ヶ月と仮定した場合の値であり、炉心の寿命は定格出力で約 470 日である。500kW の電力を得るために、先に示したように海中航行船用超小型原子炉 SCR2 基を用いた場合、合計で重量は約 160ton、体積は約 52m³ となる。

②RI 発電

RI 発電には、単位重量あたりの出力が小さく、実用的な出力規模は数 We から数 kWe 程度と考えられている。

③蓄電池（二次電池）

二次電池は単位セルを接続することにより必要な出力・エネルギーを確保でき、取扱も極めて簡単である。しかし、単位重量あたりのエネルギー密度が小さく、重量及び容積が必要な出力及びエネルギー量に比例して増加する。二次電池のなかではエネルギー密度の高いニッケル水素電池の場合でも、エネルギー密度は 70kWh/ton 程度であるため、185,000kWh のエネルギー量を確保するためには重量が 2500ton を超えてしまい、今回、対象とした潜水船には適さない。

④燃料電池

燃料電池は、近年、急速に実用が進められた動力源である。主に、電気事業用としてはリン酸型(PAFC)、溶融炭酸塩型(MCFC)、固体電解質型(SOFC)のものが、輸送用としては

固体高分子型(PEFC)、アルカリ型(AFC)の開発が進められている。電気事業用の代表であるリン酸燃料電池は、オンサイトコジェネレーションを狙った 50~200kW 機を中心に導入が進められおり、1999 年 12 月時点で国内における稼動中のプラント数は 73 で発電容量は 11,780kW である²⁴⁾。PAFC は技術的にはほぼ商品化段階に達しているといわれているが、燃料電池の中でも出力密度が小さく、200~1000kW 程度の大規模プラントに適している。

輸送用の代表は固体高分子型(PEFC)であり、ドイツ及びイタリアの AIP 潜水艦は、同種の燃料電池方式で計画されている²³⁾。また、宇宙用としては宇宙開発事業団が宇宙往還機の動力源として燃料電池システムの検討を進めている²⁴⁾。さらには、自動車用として国内外の自動車メーカーが活発な開発を行っている。自動車用の場合、使用環境としては海中及び宇宙のような特殊性はないが、信頼性の向上とコストダウンに大きな期待が掛けられる。

固体高分子形(PEFC)を用いた場合の燃料及び酸化剤の必要量及びこれらを収めるためタンクの重量を試算した。燃料消費量、酸化剤消費量は、海洋科学技術センターが海洋新動力の検討に使用した値を用いた。表 5.12 に示すように輸送用として最も適している固体高分子型(PEFC)を用いた場合でも、燃料及び酸化剤の確保に必要な重量だけで約 340ton に達してしまうため、今回、対象とした潜水船に対しては原子力が有利である。実際には、燃料電池及び補助設備の重量がこれに加わる。しかしながら、より低速であるか、より観測期間が短い用途に対しては非常に有望な動力源であり、今後の開発が期待される。

⑤熱機関（スターリングエンジン、CCDE）

スターリングエンジンは 1816 年に R. スターリングによって発明された外燃機関である。SAGA-1 には、スウェーデンのコックムス社が製造した 75 kW のスターリングエンジン(V4-275R)が 2 基搭載され、運用された実績があり、さらに同エンジンは 1996 年からゴトランド級潜水艦の動力源としてスウェーデン海軍に採用されている。

CCDE(Closed Circuit Diesel Engine)は、ディーゼル機関の排気側と吸気側をつないで系を閉じ、機関から排出される排気を浄化して酸素を加えた人工の吸気をつくり、再び機間に供給して燃料を燃焼させるシステムである。近年のコンピュータ及び各種センサー等の進歩により周辺技術の環境が整ったため、日本、ドイツ、英国、イタリア等で研究が急速に進められて始めた。

これらの熱機関は、いずれも原理的に燃料と酸化剤を必要とするため、エネルギー供給の持続時間は、それらの保有量に制限される。このため、機関本体が小型化しても、長期間の連続航行のためには巨大な燃料等のタンクを持たなければならない。

表 5.12 には、燃料電池と同様には、海洋科学技術センターが海洋新動力の検討に使用した燃料消費量、酸化剤消費量値を用いて、スターリングエンジンを用いた場合の必要な燃料及び酸化剤の必要量及びこれらを収めるためタンクの重量等を試算した結果を示す。スターリングエンジンを利用した場合には、本体及び補助設備を含まない燃料に係る重量だけで 670ton を超えてしまうため、今回、対象とした潜水船の動力源には適さないと考えら

れる。スターリングエンジン V4-275R を搭載したスウェーデンのゴトランド級は 5 ノット程度の低速での 19 日程度の活動が想定されている²³⁾と言われており、そのような運用に適していると考えられる。

表 5.1 超小型炉 SCR 及び DRX の主要目

項目	SCR 設計値	DRX 設計値
原子炉出力/電気出力	1250kWt / 250kWe	750kWt / 150kWe
炉型式	一体型炉	同左
一次冷却系統 圧力	8.4MPa	同左
炉心出口/入口温度	約 298°C/約 280°C(定格時)	同左
流 量	約 13 kg/s	約 8.5 kg/s
循環方式	自然循環方式	同左
加圧方式	自己加圧方式	同左
炉心 等価直径 / 有効高さ	約 45cm / 約 42cm	約 39cm / 約 34cm
燃料形式	Zry 被覆 Uo2 燃料	同左
サイクル日数	約 470 日	約 400 日
制御棒 制御棒要素型式	ロッドクラスタ型	同左
駆動装置型式	原子炉容器内装型	同左
蒸気発生器 蒸気圧力	3Mpa	同左
蒸気温度	約 242°C	同左
流 量	約 0.49kg/s	約 0.29kg/s
型 式	ヘリカルコイル型貫流式	同左
原子炉容器 設計圧力	10Mpa	10Mpa
格納容器及びタービン発電機用耐圧容器 設計圧力	内圧 10MPa 外圧 6MPa (水深 600m 相当)	内圧 10MPa 外圧 65MPa (水深 6500m 相当)

表 5.2 原子炉の設計に係る法令等；

法 律	・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律
指 針 等	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力船運航指針 ・発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 ・発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針 ・発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針 ・発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針 ・発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する指針 ・発電用軽水型原子炉の炉心熱設計評価指針 ・発電用軽水型原子炉施設における事故時の放射線計測に関する審査指針
基 準 等	・IMO Code of Safety for Nuclear Merchant Ships

表 5.3 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	2.83×10^{-3}	1.12×10^{-2}	1.40×10^{-2}	6.96×10^{-7}
寝室	1.79×10^{-3}	6.06×10^{-3}	7.85×10^{-3}	3.86×10^{-7}
食堂	1.35×10^{-3}	3.45×10^{-3}	4.80×10^{-3}	2.21×10^{-7}
観測室	1.21×10^{-3}	2.58×10^{-3}	3.79×10^{-3}	1.65×10^{-7}
船体外表面				
原子炉上部	6.26×10^{-12}	1.64×10^{-4}	1.64×10^{-4}	7.24×10^{-18}
原子炉上部	2.06×10^{-1}	1.19×10^2	1.19×10^2	6.16×10^{-1}
原子炉真横	1.80×10^2	8.18×10^3	8.36×10^3	7.70×10^1

表 5.4 減速材密度反応度係数

密度	反応度係数	反応度係数
	(EOL)	(EOL)
kg/m ³	% Δk/k	\$
75.07	-55.548	-68.770
150.1	-48.500	-60.045
225.2	-41.174	-50.975
300.3	-33.844	-41.900
375.2	-26.851	-33.242
450.4	-20.362	-25.209
525.5	-14.435	-17.871
600.5	-9.079	-11.240
675.6	-4.278	-5.296
750.7	0.000	0.000
825.7	3.800	4.705

表 5.5 ドップラー反応度

温度	反応度係数	反応度係数
	(EOL)	(EOL)
K	% Δk/k	\$
300	0.581	0.719
550	0.181	0.224
720	0.000	0.000
900	-0.193	-0.239
1200	-0.489	-0.605

表 5.6 原子炉スクラム時の添加反応度

時刻 秒	反応度 % $\Delta k/k$	反応 \$
-1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.4	-6.178	-7.645
0.8	-12.355	-15.290
1.2	-18.533	-22.935
1.6	-24.710	-30.580
1.0×10^6	-24.710	-30.580

表 5.7 EDRS 機能確認解析の設備作動等の条件

時 刻	事 象
0.0	定格出力運転
2.0	原子炉スクラム
4.0	給水隔離弁、蒸気隔離弁閉 EDRS 作動

表 5.8 一次冷却水喪失事故解析の設備作動等の条件

時 刻	事 象
0	定格運転 配管破断発生
3	格納容器圧力高
5	原子炉スクラム 給水隔離弁、蒸気隔離弁閉 EDRS 作動

表 5.9 蒸気発生器伝熱管破断事故解析の設備作動等の条件

時 刻	事 象
0	定格運転 伝熱管管破断発生
62	原子炉容器水位低信号発生
64	原子炉スクラム 給水隔離弁、蒸気隔離弁閉 EDRS 作動

表 5.10 動力源部分の重量の概算

	重 量	体 積
原子炉プラント 2基 (内訳) 1基あたり概算	約 160 ton	約 52 m ³
原子炉格納容器	28.7	
原子炉容器	5.2	
遮蔽体	3.6	
断熱材	8.4	
炉内一式	7.2	
格納容器内一式	8.2	
タービン格納容器	7.1	
タービン発電機	2.0	
ポンプ、配管、弁等	3.6	
構造材等	1.2	
容器外構造材	10.0	
浮力体 マクロ・スフェア・シンタクチックフォーム	約 46 ton	約 144 m ³
	約 206 ton	約 196 m ³

表 5.11 設計例にみる海中動力源の特性値データ

動力源	設計例	● 実績		○ 計画、研究、試設計段階		電気出力	持続時間	エネルギー量	重量	容積	出力密度	エネルギー密度	出典
		kW	H	kW・H	kg								
原子炉 小型原子炉	○ AMPS-Prototype (SAGA-N) [加]	100			70,000	110	1.4	0.91					7)
	○ AMPS-1000 [加]	1,700			514,000	439	3.2	3.87					2)
	○ SP-100(宇宙用) [米]	100	61,320	6.13e6	4,600	151	21.7	0.66	1,3e6	40,596	40,596	40,596	2)
	○ DRX [日]	150	720	1.08e5	70,000	21	2.1	7.32	1,543	5,268	5,268	5,268	9)
	○ SCR250	250	720	1.80e5	80,000	26							
	○ 热電気発電(三菱重工) [日]	8			4,000	8	2.0	1.00					19)
R I 発電	● SNAP7A [米]	0.01	17,520	175	770		0.01				230	230	18)
	● SNAP7B [米]	0.06	17,520	1051.	2,088		0.03				500	500	18)
	○ 热電子発電(三菱重工) [日]	7			900	0.3	7.8	23.33					19)
	代表電池(2.0V, 8000 Ah)	1.6	10	16	709	0.336	2.3	4.76	23	48	48	48	15)
	● ALVIN [米]	7	10	70									2)
	● NAUTILE [米]	0.24	10	2.4	116	0.046	2.1	5.17	21	51.7	51.7	51.7	15)
蓄電池(二次電池)	ニッケル・カドミウム電池	● NAUTILE [米]	3.8	13	50								2)
	酸化銀・亜鉛電池	代表電池(1.5V, 650 Ah)	0.1	10	1	11	0.006	9.3	16.9	93	169	169	15)
	● しんかい 6500(108V400Ah×2)[日]	10.8	8	86	1,310	0.6	7.9	18.0	63	63	144	144	12)
	ニッケル・水素電池	● 自動車用(1.2V×10, 100 Ah)	0.4	3	1.2	17	0.008	23.2	50.6	70	152	152	
	リチウムイオン電池	○ UROV7000	2.5	2.4	6.0	78	0.045	32.1	55.6	77	133	133	
	燃料電池	● DEEP QUEST [米]	30			177	0.204	169	147				12)
燃料電池	固体電解質型	○ 無素無人潜水機の電源	27	140	3,780	5,000	21.0	5.4	1.29	760	180	180	11)
	固体高分子型	● JAMSTEC AUV用電源	1.5			70	0.48	21	3.13				
	ドライ海軍 212型潜水艦用	● ドイツ海軍 212型潜水艦用	30										
	スターリングエンジン	● V4-275R(SAGA-1) [スウェーデン]	40.8	240	9,800	21,400	23	1.9	1.77	460	426	426	16,
	CCDE (クローズドサイクル・ディーゼルエンジン)	● R1 [日]	5			2,800	3.0	1.8	1.67				17)
													11)

表 5.12 热機関・燃料電池での酸化剤及び燃料の必要重量及び容積の試算

動力源 方式	スターリング エンジン		燃料電池	備考
	直接排出方式	固体高分子形 (PEFC)		
所要エネルギー	185,000 kWh			
燃料 燃料重量 余裕 : 20%	燃料消費率 : 0.28kg/kWh $185,000 \times 0.28 \times 1.2 = 62,200 \text{ kg}$ ≒ 62.2 ton	燃料消費率 : 0.285kg/kWh $185,000 \times 0.285 \times 1.2 = 62,270 \text{ kg}$ ≒ 63.3 ton		タンクは、均圧方式。 タンク内径 2m。 タンク厚 0.02m。
燃料 燃料容量	軽油密度 : 830kg/m ³ $62,200 \div 830 = 74.9 \text{ m}^3$	メタノール密度 : 785kg/m ³ $63,270 \div 785 = 80.6 \text{ m}^3$		
燃料 燃料タンク構成	37.5 m ³ ×2 基	40.3 m ³ ×2 基		
燃料 燃料 + タンク重量 (計)	62.2 ton + 25.6 ton = 87.8 ton	25.6ton	27.6ton	
酸化剤 酸化剤重量 余裕 : 20%	酸化剤消費量 : 1.02kg/kWh $185,000 \times 1.02 \times 1.2 = 226,440 \text{ kg}$ ≒ 226.4 ton	酸化剤消費量 : 0.428kg/kWh $185,000 \times 0.428 \times 1.2 = 95,016 \text{ kg}$ ≒ 95.0 ton		断熱二重構造タンク 内タンク内径 2m 内タンク圧 0.02m 外タンク内径 2.24m 外タンク圧 0.072m
酸化剤 酸化剤容量	液体酸素 : 1,120kg/m ³ $226,440 \div 1,120 = 202.2 \text{ m}^3$	液体酸素 : 1,120kg/m ³ $95,016 \div 1,120 = 84.8 \text{ m}^3$		
酸化剤 酸化剤タンク構成	50.5 m ³ ×4 基	42.4 m ³ ×2 基		
酸化剤 酸化剤タンク重量	356.7 ton	152.0 ton		
酸化剤 + タンク重量	226.4 ton + 356.7 ton = 583.1 ton	95.0 ton + 152.0 ton = 247.0 ton		
全 体 重 量	87.8 ton + 583.1 ton = 670.9 ton	90.9 ton + 247.0 ton = 337.9 ton		

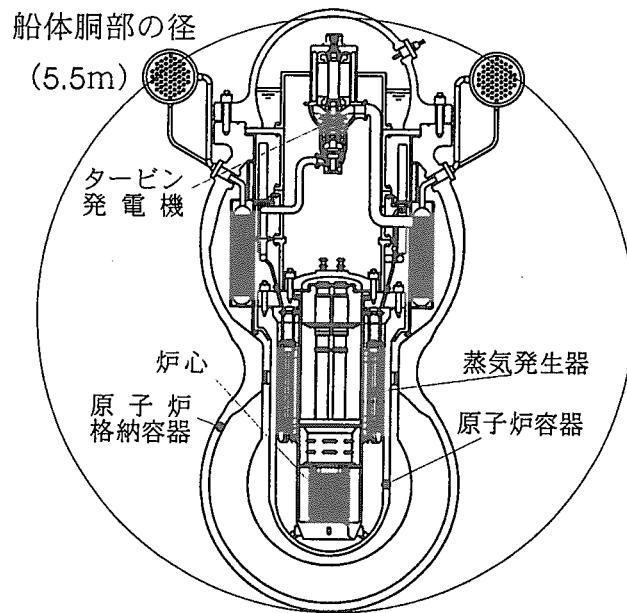


図5.1 超小型原子炉DRXの概念図

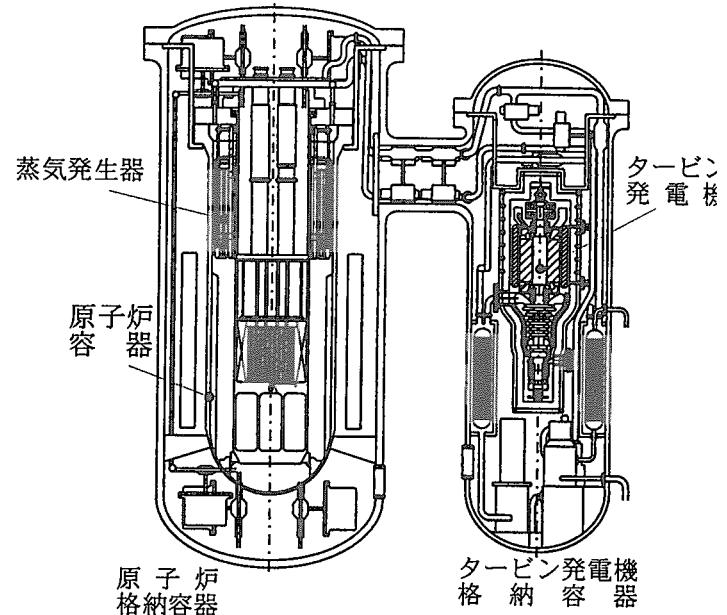


図5.2 超小型原子炉SCRの概念図

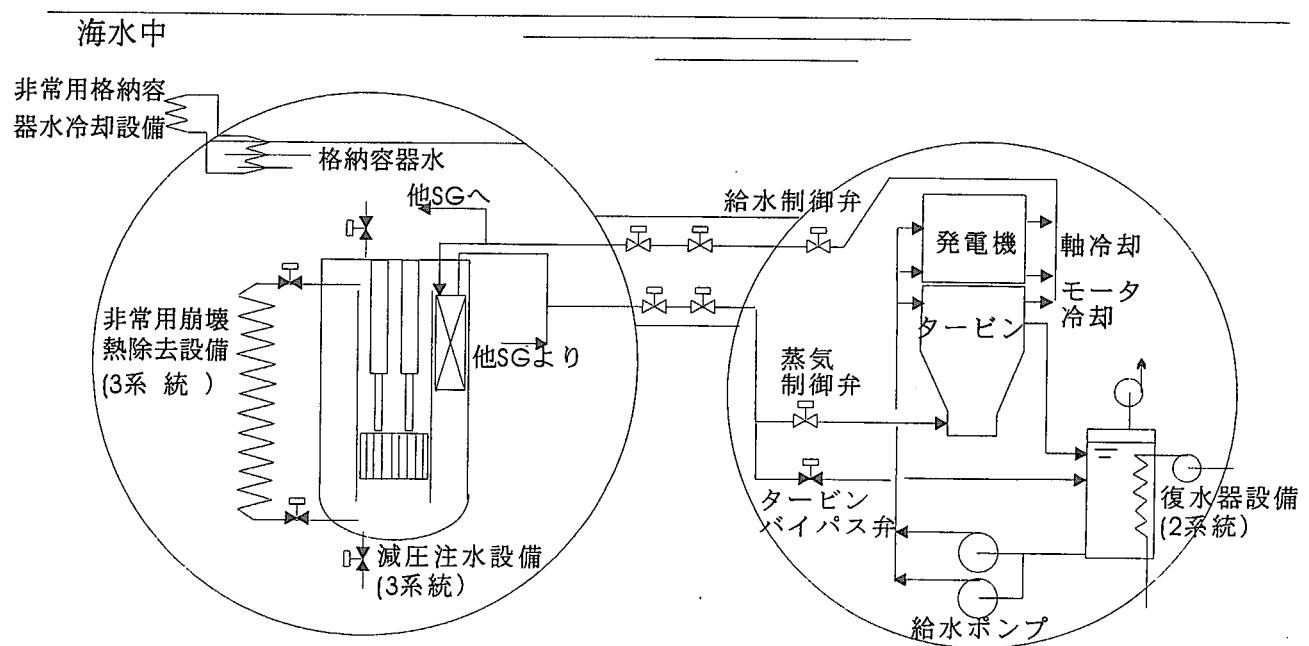


図5.3 超小型原子炉SCRの全体系統概念図

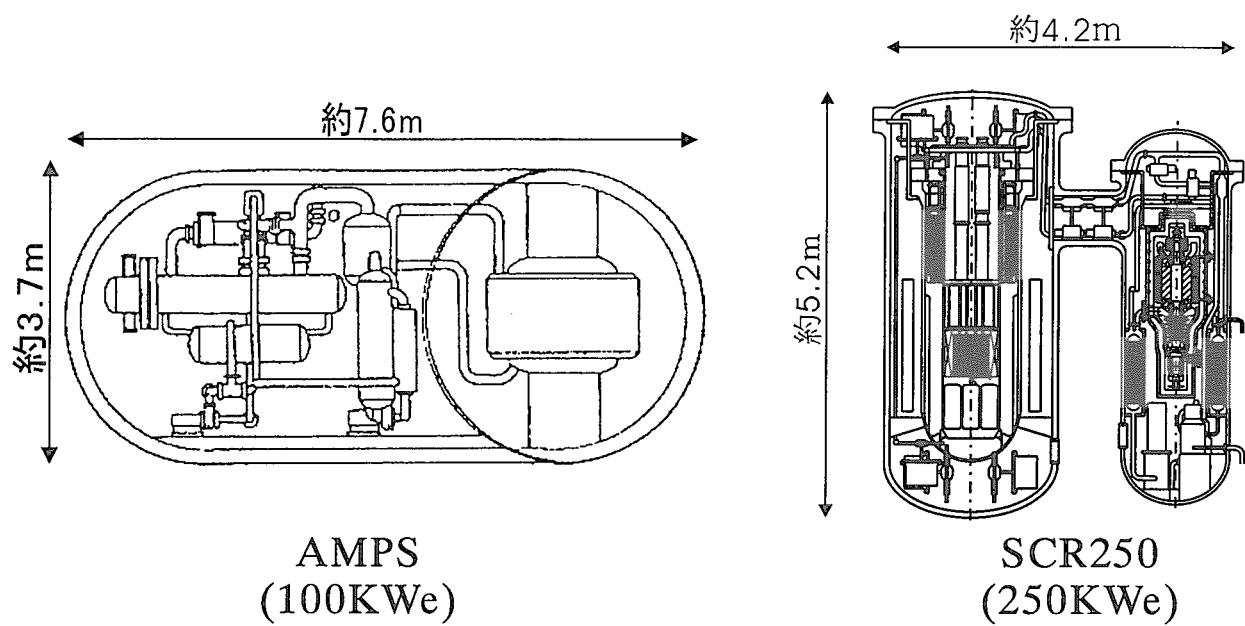


図5.4 SCRとAMPSとの大きさの比較

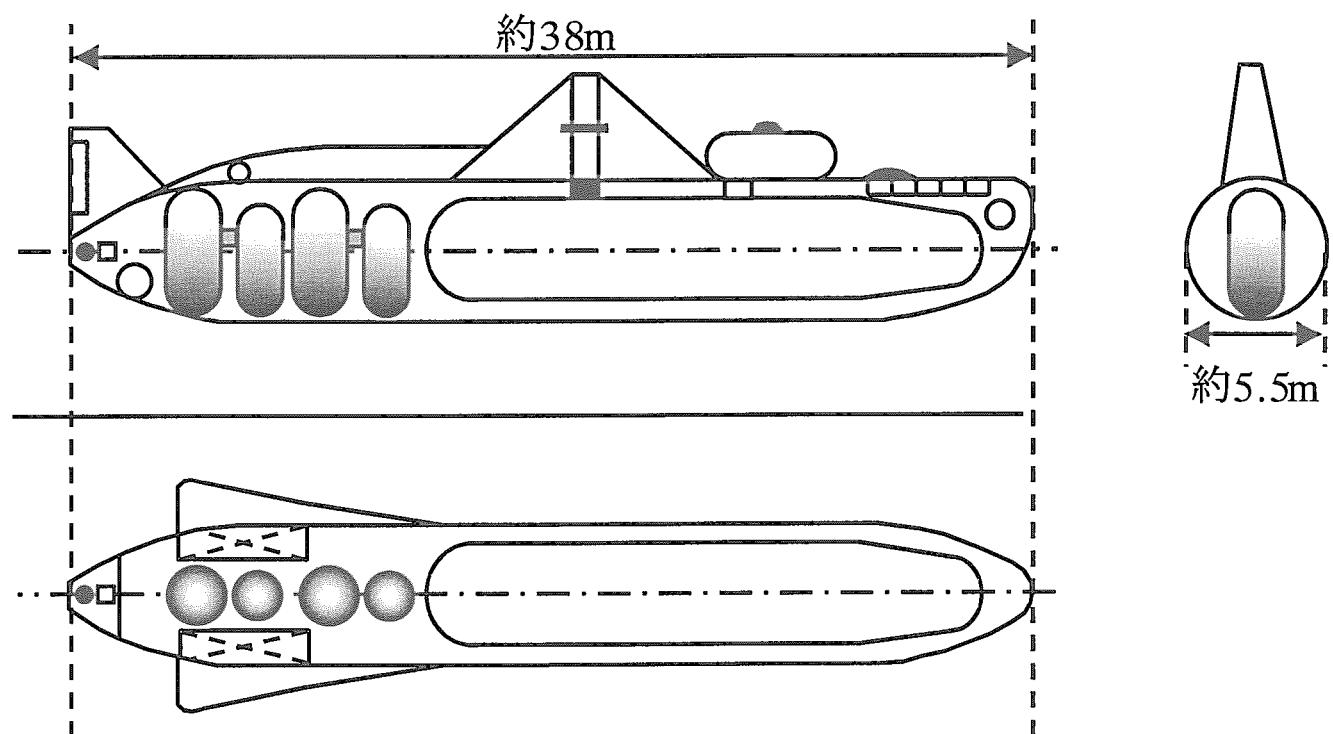


図5.5 原子炉ユニットの配置概念

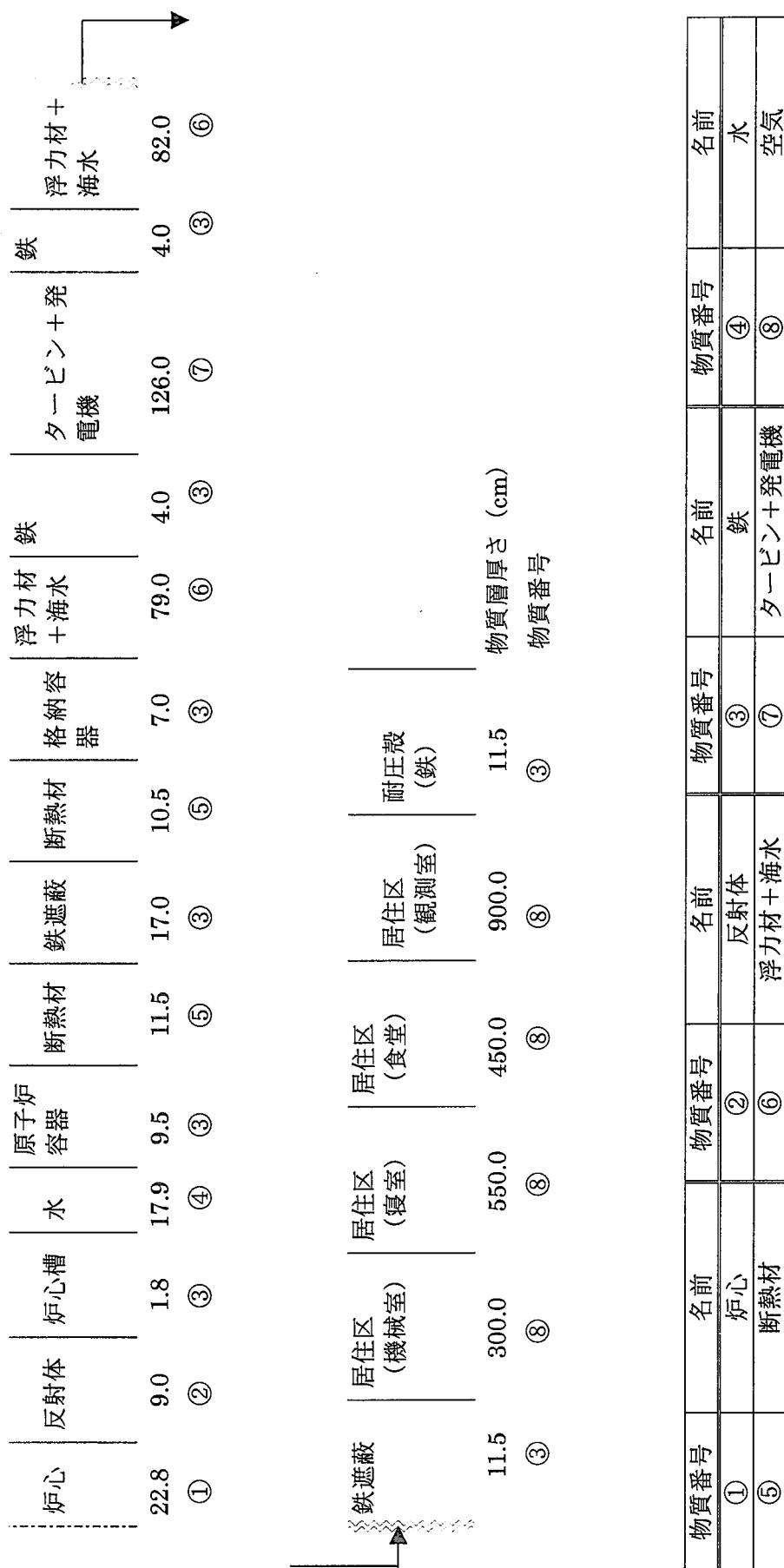


図 5.6 原子炉横（居住区画）方向の遮蔽計算モデル図（一次元円柱体系）

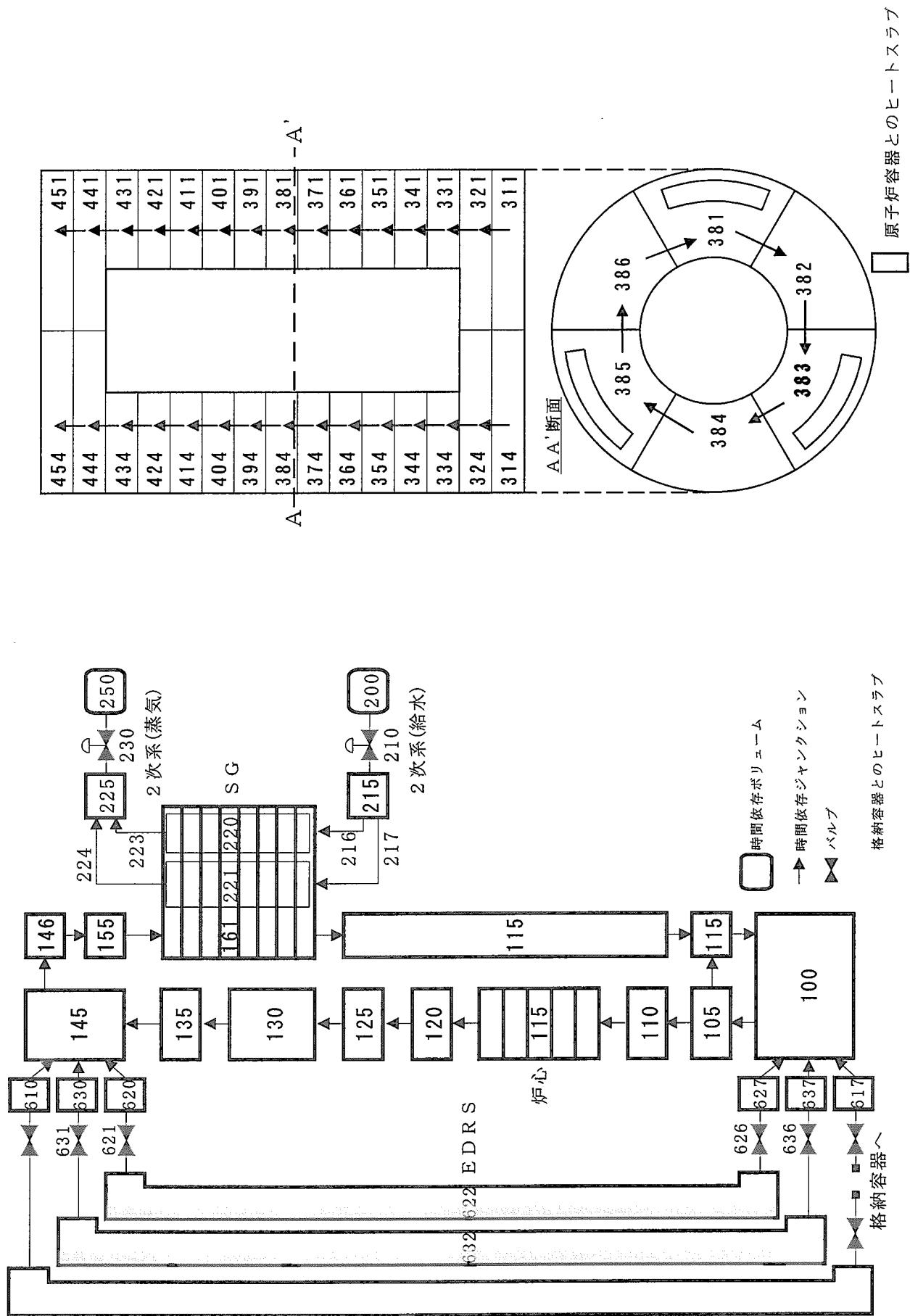
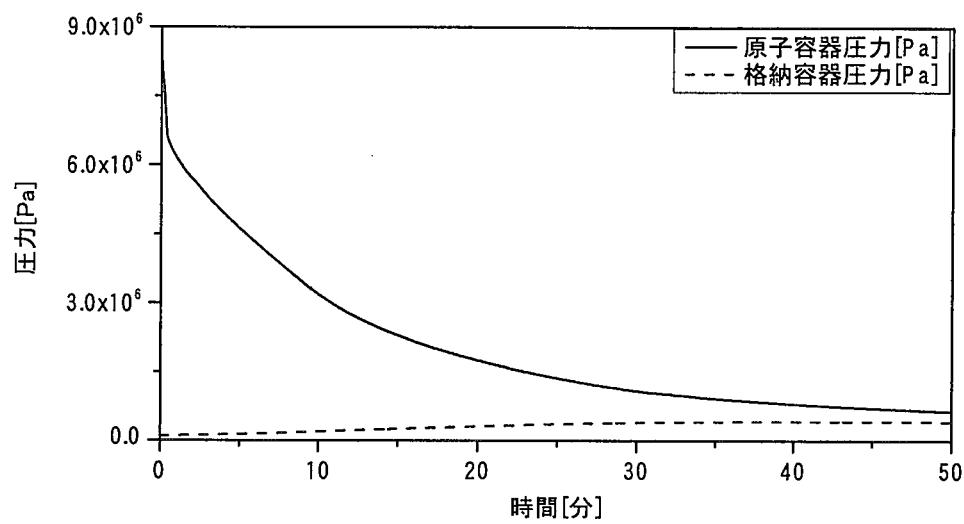
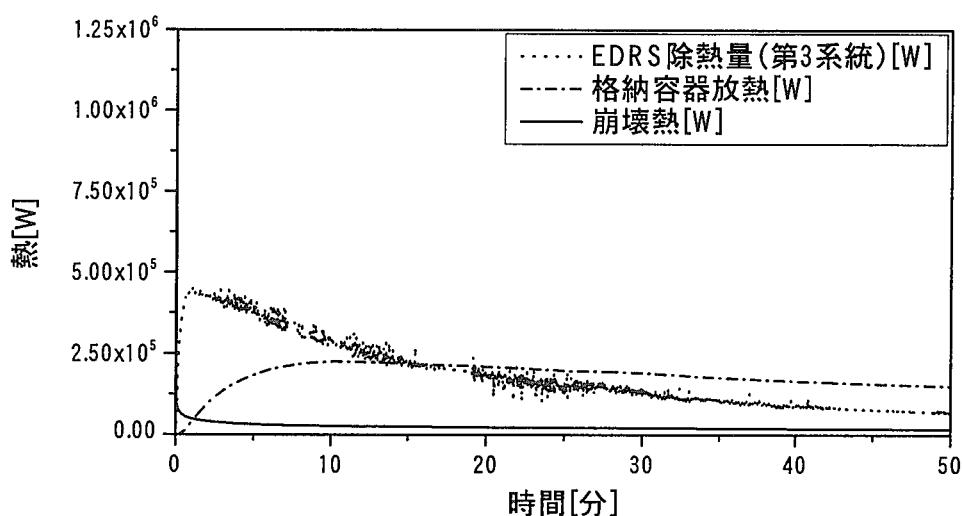


図5.7 SCR250原子炉容器部のノーテイシング図

図5.8 SCR250原子炉格納容器部のノーテイシング図

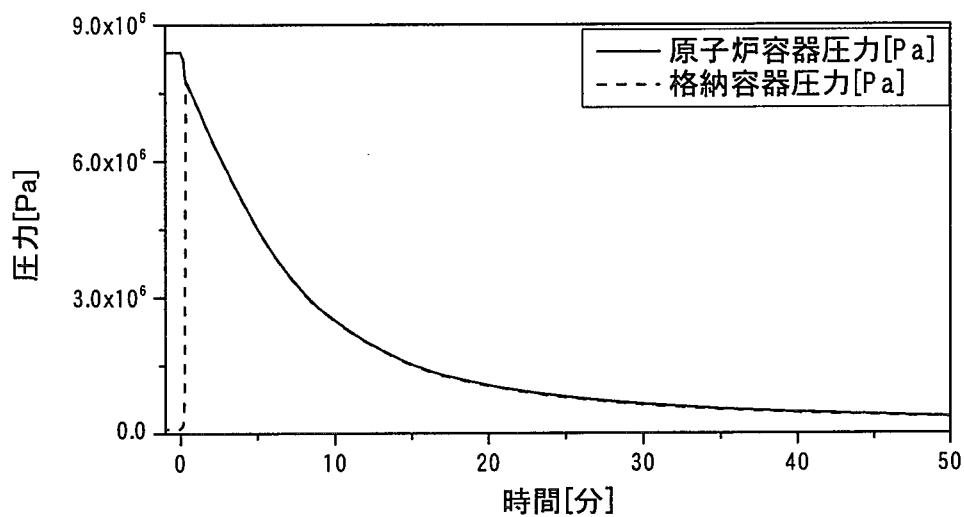


(1) 原子炉容器圧力及び各の容器圧力

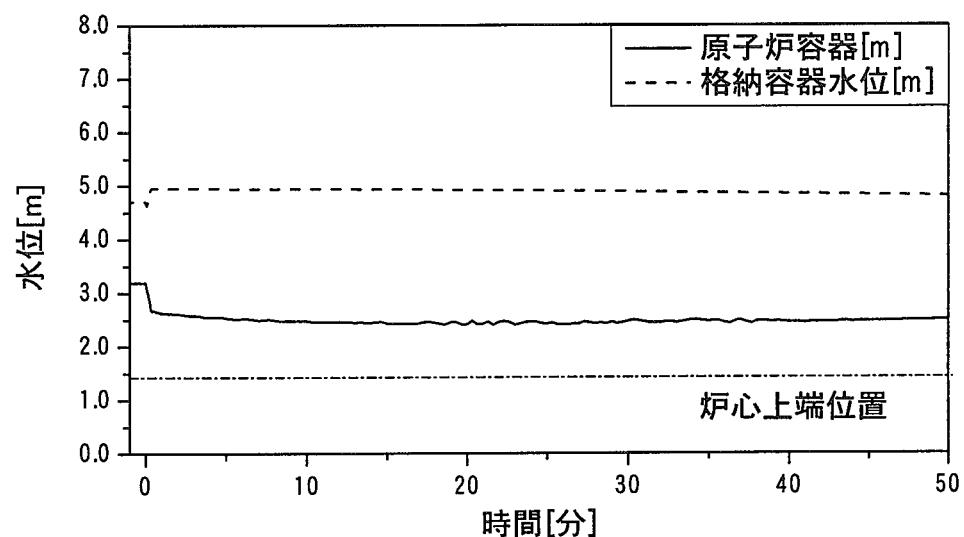


(2) 崩壊熱、1系統あたりの崩壊熱除熱量、格納容器表面からの放熱

図 5.9 EDRS 機能確解析の結果

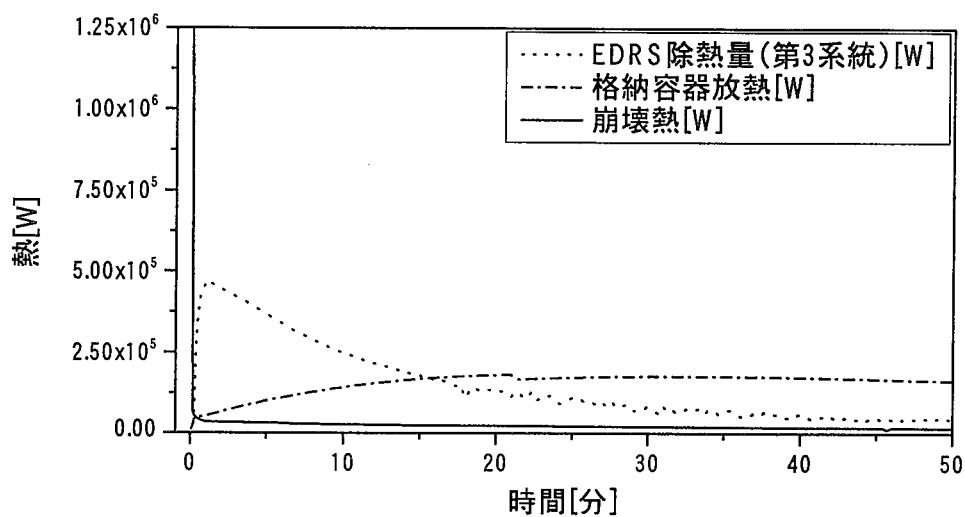


(1) 原子炉容器圧力及び各の容器圧力

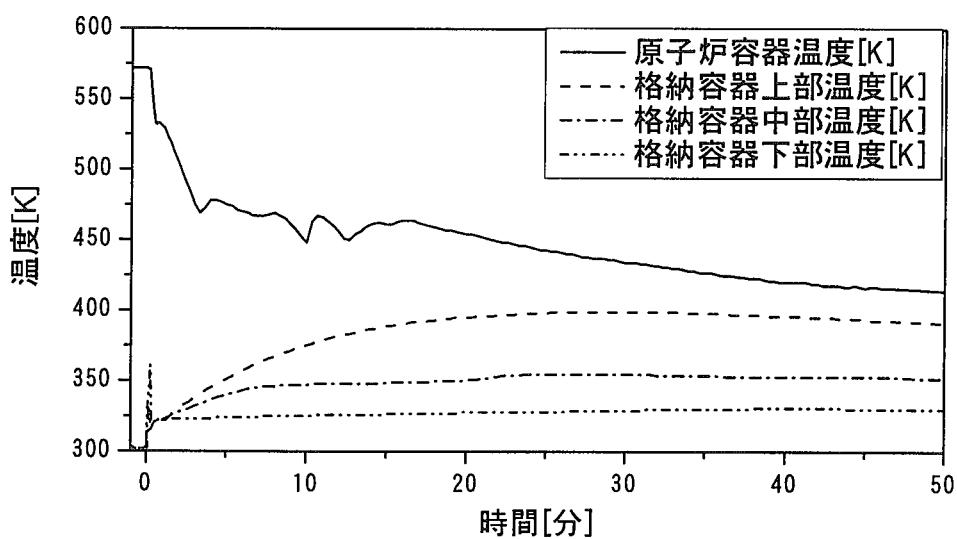


(2) 格納容器の水位、原子炉容器及び炉心上端位置

図 5.10 一次冷却材喪失事故解析の結果

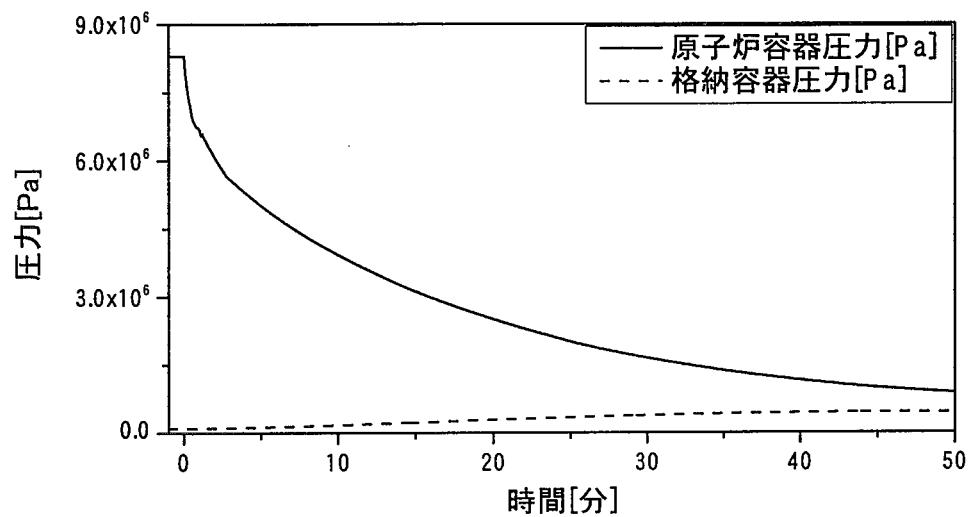


(3) 崩壊熱、1系統あたりの崩壊熱除熱量、格納容器表面からの放熱

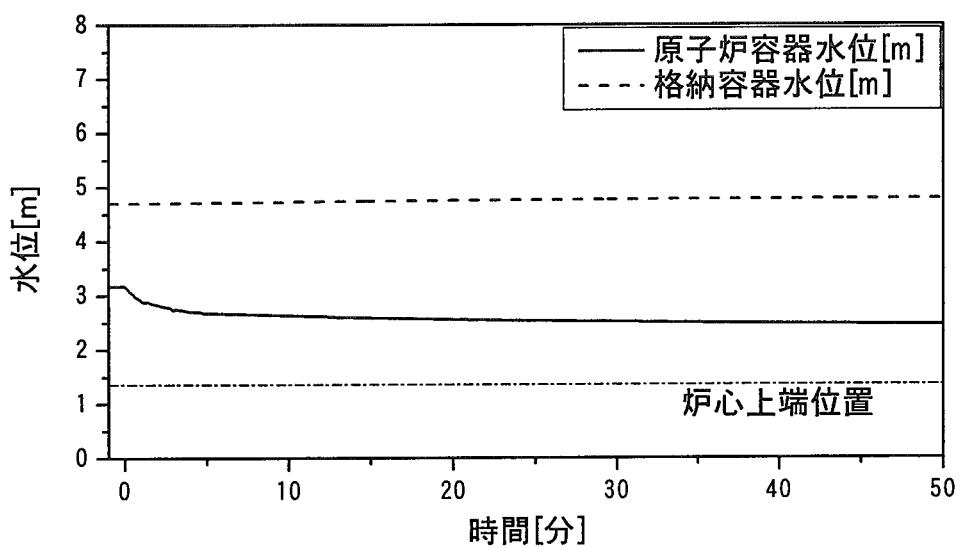


(4)原子炉容器及び格納容器内温度

図 5.10 一次冷却材喪失事故解析の結果

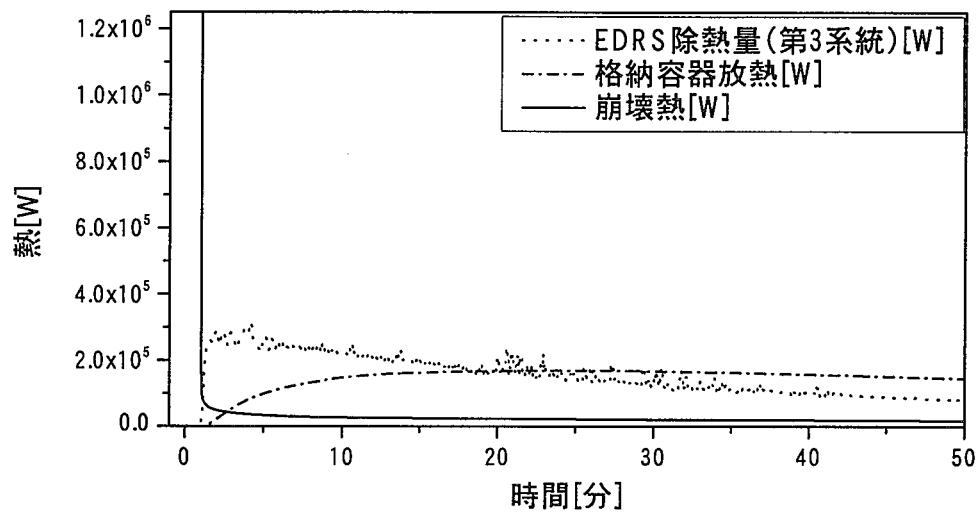


(1) 原子炉容器圧力及び各の容器圧力

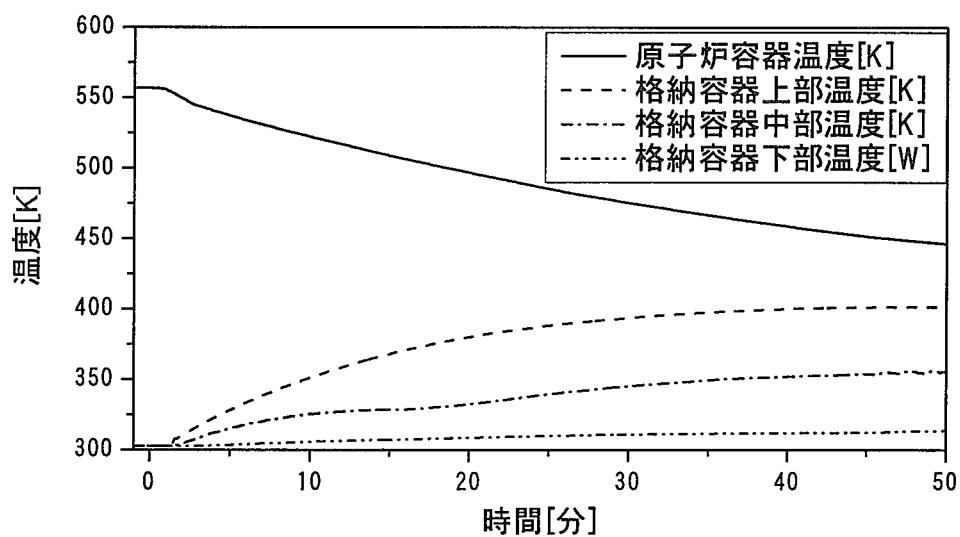


(2) 格納容器の水位、原子炉容器及び炉心上端位置

図 5.11 蒸気発生器伝熱管破損事故解析の結果



(3) 崩壊熱、1系統あたりの崩壊熱除熱量、格納容器表面からの放熱



(4)原子炉容器及び格納容器内温度

図 5.11 蒸気発生器伝熱管破損事故解析の結果

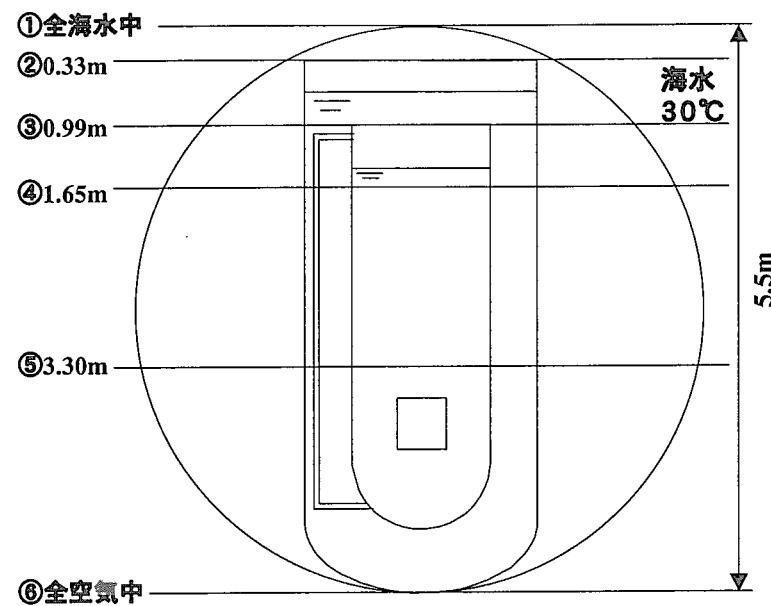


図 5.12 格納容器が海面上へ露出するケースの概念図

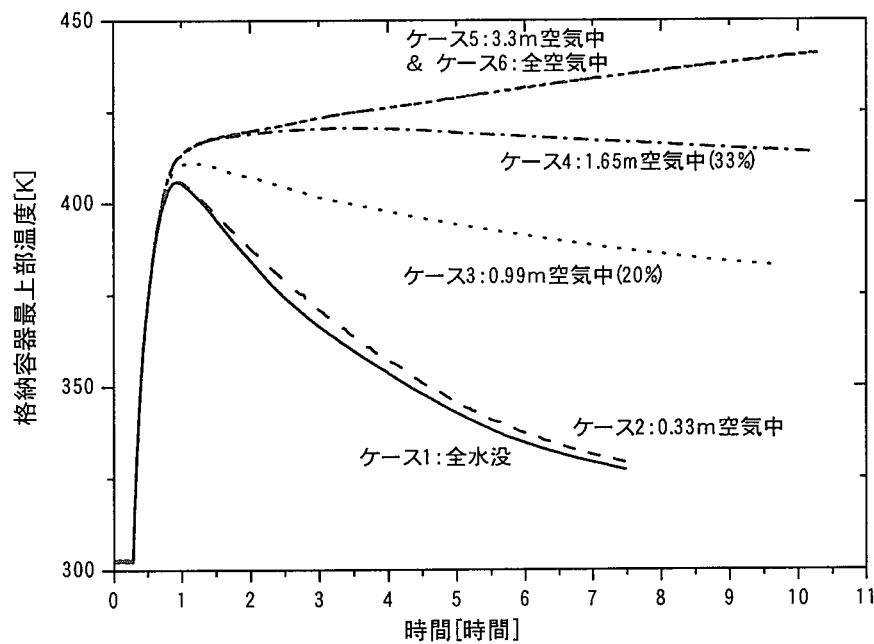


図 5.13 格納容器が海面上へ露出する場合の解析結果

6. まとめ

海洋調査への原子力利用の拡大を目的として、海洋調査の動向及び期待される観測設備の調査検討を行い、これに基づき地球環境変動の解明への利用を主目的とした海中航行観測船の概念検討ならびに同船に搭載する超小型原子炉の概念検討を行った。

海洋調査の研究分野は、地球環境変動の解明、地球内部変動の解明、深海生態系の解明に分類され、それぞれ重要な研究課題を抱えている。原子力の導入効果の観点からは、海中航行観測船、極域碎氷観測船、深海滞在型調査船、海中動力ステーション等がとくに有望であると考えられた。ここで、地異常気象などによる自然災害の被害が増大するなか、球環境変動の解明、とりわけ氷海における熱・炭素循環の解明及び大気・海洋間の熱・炭素循環の解明は、とくに緊急性が高いとの判断より、この用途に最も適した海中航行観測船を対象船種として選定した。

地球環境変動のために必要な観測活動、観測項目等の検討を行い、これに基づき船体規模 500ton 級、潜水深度 600m、最大船速 12 ノット（約 22.2km/h）、乗員数 16 名の海中航行観測船の概念を構築するとともに、動力源への要求を明らかにした。

海中航行観測船の概念検討を通じて得られた動力源への要求に基づき、これらの要求を満足する動力源である超小型原子炉 SCR の概念を構築した。超小型原子炉 SCR は、原研がこれまで設計研究を行ってきた超小型原子炉 DRX の成果を踏まえた原子炉であり、小型、軽量で設備を簡素化した設計となっている。

遮蔽解析により原子炉区画に最も近い機械室での線量等量率は $14 \mu \text{Sv}/\text{h}$ であり、居住区を放射線管理区域外にするためには、厚さ約 10 cm の鉄の追加遮蔽が必要であること、原子炉停止直後に原子炉真横方向の船体表面での線量当量は約 77mSv/h であり、支援船の近接には適切な放射線管理が必要なことを明らかにした。

事故時のプラント応答解析では、崩壊熱除去設備の機能を確認し、一次冷却材喪失事故及び蒸気発生器伝熱管破断事故時のプラント応答解析により、事故時にも炉心が露出することなく、崩壊熱が自然循環により除去されることを明らかにした。

さらに他の動力源を用いた場合の概略検討を行い、今回想定した海中航行観測船の動力源のなかでは、原子力が優れていることを明らかにした。

謝 辞

本検討は、原研が主催する船用炉研究委員会 超小型専門部会内に設けた海洋調査への超小型炉の活用検討ワーキンググループにて海洋科学の専門家の方々から貴重な情報、ご意見、コメントを頂いた。ここに、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) SCICEX 2000 Workshop Organizing Committee, "Arctic Ocean Science From Submarines A Report based on the Scicex 2000 Workshop", Held in Warrenton Virginia in 5·9 Oct. (1998), April (1999)
- 2) 日本原子力学会、「海中における原子力利用」研究専門委員会報告書」、平成 3 年 6 月
- 3) 滝沢隆俊、「凍る海」JAMSTEC Vol. 5, No. 2(18), 1993
- 4) 角田晋也、「北極研究の社会に対する貢献」、JAMSTEC Vol. 9, No. 1(33), 27, 1997
- 5) 永田豊、武隈克義、「潜航方海洋調査船の必要性と予想される利用法と成果」、海の研究, 53, 3, p173~183, (1996)
- 6) 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)
- 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「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) Iida. H., et. al., "Design study of the deep-sea reactor X", Nuclear Technology, Vol.107, July (1994)
- 10) Engle, Jr., W.W.: K-1963 (1967).
- 11) Croff, A.G., ORNL/TM-7175 (1980).
- 12) Sakamoto, Y. and Tanaka, S., JAERI-M 90-110 (1990).
- 13) The RELAP5 development team: RELAP5/mod3 code manual, NUREG/CR-5335, INEL-95/0174,(1995)
- 14) 日本深海技術協会、「水中動力源講演会·新しい各種動力源の有人潜水船及び無人潜水機への適用」、水中動力源講演会、東京、平成 5 年 10 月
- 15) 浦環、高川真一 編著、「海中ロボット総覧」、成山堂書店 (1994)
- 16) Robert I. Brasier and Carroll B. Mills, "Reactor Power Plant for Undersea applications", Nuclear Technology, vol.22, May(1974)
- 17) J. Angelo, Jr, and D. Buden, "Space nuclear Power-A strategy for Tomorrow", AIAA-81-0450, Proc. of 2nd AIAA Conference on Large Space Platforms, 2·4, San Diego, Calif , February (1981)
- 18) 日本電池株式会社、「最新実用二次電池」、日刊工業新聞社 (1995)
- 19) 海洋科学技術センター、「平成元年度海洋新動力システムの調査研究報告書」、3 月 (1990)
- 20) 海洋科学技術センター、「平成 3 年度海洋新動力システムの調査研究報告書」、3 月 (1992)
- 21) 海洋科学技術センター、「平成 4 年度海洋新動力システムの調査研究報告書」、3 月 (1993)
- 22) 日本造船協会、「潜水調時に用いる新動力源の調査研究」成果報告書、3 月 (1993)
- 23) 多田智彦、「AIP 潜水艦全タイプ」、世界の艦船、No.573, pp146~149 (2000)

- 24) 西原啓徳、「固体高分子形の開発進む」、月刊エネルギー、Vol.33, No.9, pp.132~147
(2000)
- 25) 宇宙開発事業団、「HOPE の燃料電池に関する検討（そのア）」、NASDA-CNT-970026

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 ドップラ流向流速計
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」
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」

付録

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C T D」

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	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5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	0.101972	0.224809			
9.80665	1	2.20462			
4.44822	0.453592	1			
粘度 1 Pa·s(N·s/m ²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))					
動粘度 1 m ² /s = 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)					
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876	
3.7 × 10 ¹⁹	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴		1	0.01

(86年12月26日現在)

