

JAERI - M
88-053

改良船用炉の試設計の評価(5)
— 格納特性 —

1988年3月

今村 義明・横村 武宣

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

改良船用炉の試設計の評価(5)

— 格納特性 —

日本原子力研究所原子力船研究開発室

今村 義明・横村 武宣

(1988年2月3日受理)

将来の実用化を目指して開発する船用炉の炉型を明らかにし、開発に必要な研究開発課題を抽出するために、半一体型、一体型および自己加圧一体型の3炉型について試設計を実施した。

本報告では、これら試設計について格納特性の面からの検討を行った。検討は船用炉プラントの一つの設計概念である船体構造と一体化した圧力抑制型格納容器について、もう一つの格納方式である全圧型格納容器との構造比較を行なうとともに、軽量化、小型化、経済性、健全性の観点から評価を加えたものである。

評価の結果、船体構造と一体化した圧力抑制型格納容器の採用が十分可能であることが明らかになった。

Evaluation of the Trial Design Studies for
an Advanced Marine Reactor (5)

- containment -

Yoshiaki IMAMURA and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Toranomon, Minato-ku, Tokyo

(Received February 3, 1988)

The trial design of three type reactors, semi-integrated, integrated and integrated (self-pressurized) type, was carried out in order to clarify the reactor type for the advanced marine reactor that would be developed for its realization in future and in order to extract its research and development theme.

In this report, a comparison and evaluation of the containment vessel types for the above trial design are described. Two containment vessel types, pressure suppression type integrated with the hull and dry type, are compared and evaluated from the following points of view, light in weight, small in size, high in safety and reliability, and economic.

As the results, it becomes clear that the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull is feasible.

Keywords: Marine Reactor, Containment Vessel

目 次

1. 序 言	1
2. 一体化压力抑制型格納容器と全圧式格納容器との構造比較	2
2.1 一体化压力抑制型格納容器の機能と特徴	2
2.2 一体化压力抑制型格納容器と全圧式格納容器との構造比較	3
3. 一体化压力抑制型格納容器と全圧式格納容器との比較評価	7
4. 压力抑制型格納容器の規制に対する対応	14
5. 結 論	16
別添 波浪荷重が一体化压力抑制型格納容器の健全性に及ぼす影響評価の概要	17

Contents

1. Preface	1
2. Structural comparison between the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull and the dry type containment vessel	2
2.1 Function and characteristic of the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull	2
2.2 Structural comparison between the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull and the dry type containment vessel	3
3. Comparative evaluation of the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull and the dry type containment vessel	7
4. Investigation on the rule of the pressure suppression type containment vessel	14
5. Conclusion	16
Attachment Evaluation of the structural strength of the pressure suppression type containment vessel integrated with the hull under the influence of wave load	17

1. 序 言

原子力船研究開発室は、昭和58年から60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性の優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴、性能等を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型炉（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉及び自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれわが国固有の技術及びフランス、西ドイツの提携技術を基盤技術としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性 (I) 丸棒燃料
 " (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能 (I) 遮蔽設計の妥当性
 " (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本研究報告は、これら一連の設計評価研究のうち、(5)格納特性に関するものであり、船用炉プラントでの一つの設計概念である船体構造と一体化した圧力抑制型格容器について、もう一つの格納方式である全圧型格納容器との構造比較を行なうとともに、軽量化、小型化、経済性、健全性の観点から評価を加えたものである。

また、圧力抑制型格納容器の規制に対する対応および波浪荷重が一体化圧力抑制型格納容器の健全性に及ぼす影響についての検討を行った。

2. 一体化圧力抑制型格納容器と全圧式格納容器との構造比較

2.1 一体化圧力抑制型格納容器の機能と特徴

(1) 機能

格納容器の機能は、一次冷却水喪失事故（LOCA）時に放射性物質の船外への放出を許容値以下に抑えることである。このため格納容器は通常運転時の他、LOCA及びその他の事故（沈没事故）時に生ずる静的及び動的荷重に耐えるよう設計される。

船体構造と一体化した圧力抑制型格納容器は、LOCA時に格納容器に放出された高温、高圧の一次冷却水を凝縮させるウェットウェルに導き、格納容器の圧力上昇を膨脹室に逃がし、格納容器内の最高圧力を低く抑えるようになっている。これにより格納容器の境界部の平板構造の一部は船体構造と一体化されている。

ウェットウェルは一次遮蔽体の役割を兼ねており、ウェットウェル高さの3/4の位置まで水が蓄えられている。膨脹室はウェットウェルの前方に位置する箱型容器になっており、空間の有効利用として原子炉補助系の一部機器類が配置されている。

(2) 特徴

格納容器は、従来の原子力船では全圧方式の容器が実用化されてきた。西独ではオットハーン号に搭載した一体型原子炉（FDR）の開発成果をとり入れ、商業用船用炉として、EFDR型の開発が進められた。

EFDRでは炉出力の増加により原子炉圧力容器が大きくなり、それを収納するための格納容器も全圧式では板厚が増加、重量等が増加、経済性が失われるとして、圧力抑制方式の格納容器が採用された。

このような経緯で開発された一体化圧力抑制型格納容器は次に示す特徴を有している。

1) 格納容器のバウンダリー

一次冷却水喪失事故時においても格納容器最高圧力を低く抑え、格納容器バウンダリーの健全性を維持している。

2) 遮蔽体

ウェットウェル水が一次遮蔽体として兼用でき、原子炉圧力容器とウェットウェル水との水面境界部に一部遮蔽体を要するのみである。また大規模な二次遮蔽が不要であり、遮蔽重量はかなり小さくなる。

3) プラント配置

原子炉補助設備の体積制御系統の高圧の冷却及び浄化ループを膨脹室内に配置し、空間の有効利用がはかられる。

4) 製造

- ① LOCA時の格納容器の圧力が低くなるため耐圧部板厚を溶接後熱処理が不要となる38 mm板厚以下に抑えることができる。

- ② 格納容器の設計圧力を低く抑えることができるため、工事完了後の耐圧試験も低い水圧又は気圧で実施できる。

2.2 一体化圧力抑制型格納容器と全圧式格納容器との構造比較

一体化圧力抑制型格納容器（膨脹室あり及び膨脹室なし）及び全圧式格納容器の概略構造を図1に示す。

これら格納容器はドライウエル，ウェットウエル，膨脹室のスペースの大きさで，LOCA時のエネルギーの吸収により設計圧力に大きく相異している。

各様式の格納容器を比較評価するために図1に示すように一体型炉を搭載したときの構造比較を表1に示す。各種船用炉の格納容器の仕様の比較を表2に示す。

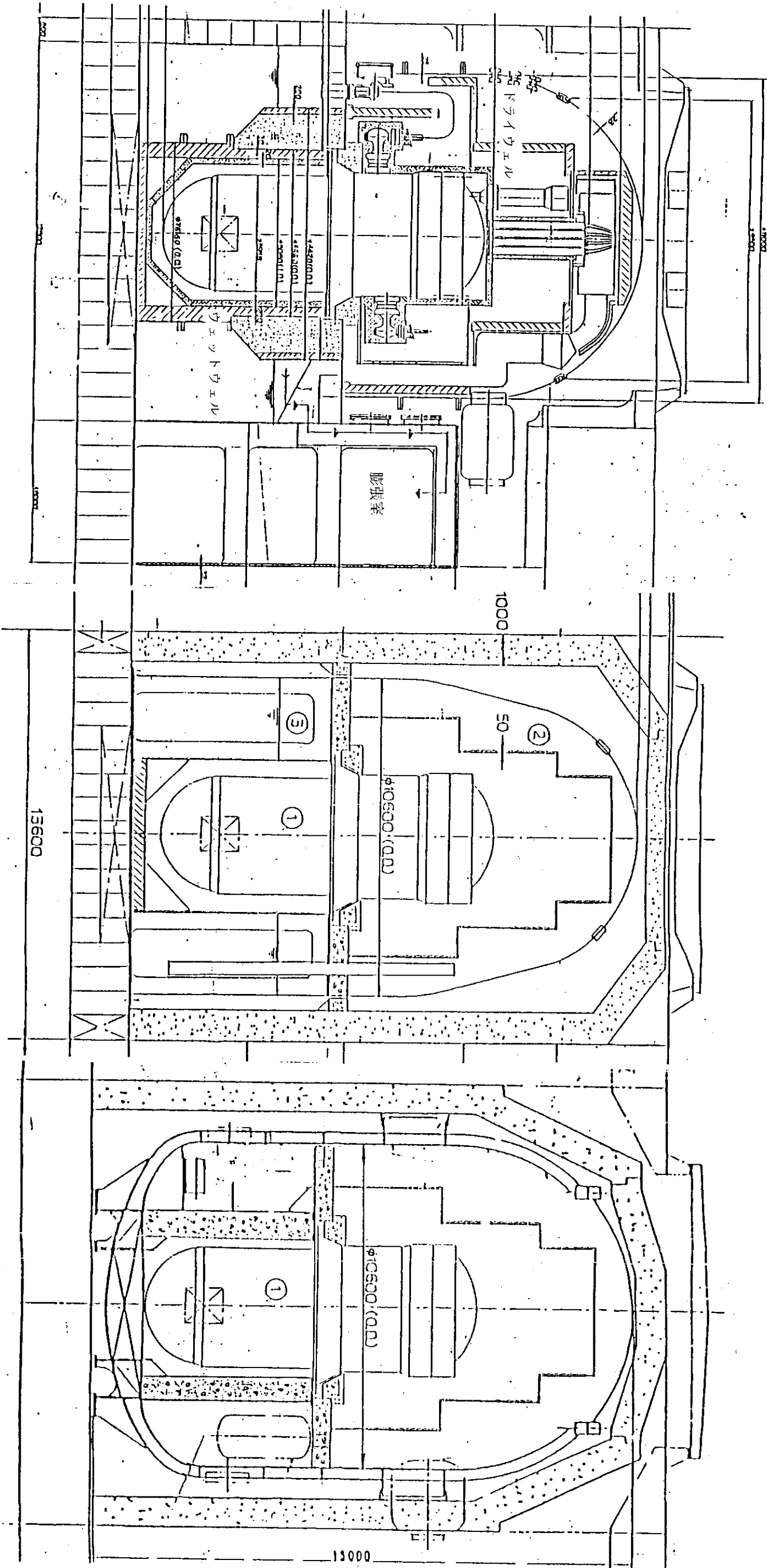
表1 概略構造比較

項 目	一体化圧力抑制型格納容器		全圧式格納容器
	膨脹室あり	膨脹室なし	
設 計 圧 力	4 kg/cm ² g	9 kg/cm ² g	22 kg/cm ² g
温 度	150 °C	150 °C	218 °C
耐 圧 部 板 厚	25 mm	35 mm	100 mm
格 納 容 器 内 体 積			
ド ラ イ ウ エ ル	765 m ³	535 m ³	900 m ³
ウ ェ ッ ト ウ エ ル	684 m ³	326 m ³	—
膨 脹 室	585 m ³	—	—

参考に原子力船「むつ」の格納容器の設計圧力，温度は12 kg/cm²，187 °C，オットハーンのそれは14 kg/cm²，200 °C，サバンナ13.1 kg/cm²，190 °Cになっている。

表2 格納容器仕様比較

	む	つ	オートハーン	サバンナ	NSR-7	NCS-80	改良船用炉
格納容器形式 原子炉形式 原子炉出力 (MW)	全圧型 (独立) 分離型 36	全圧型 (独立) 一体型 38	全圧型 (独立) 一体型 38	全圧型 (独立) 分離型 80	抑制型 (独立) 一体型 330	抑制型 (一体化) 一体型 220	抑制型 (一体化) 一体型 100
格納容器寸法 直径 (m) 高さ (m)	10.0 10.63	9.5 13.37	10.67 15.39	1,158	9.0 (7.6) 16.5 (16.9)	12.0 12.0	11.0 10.3
内容積 ドライウェル (m ³) ウェットウェル (m ³) 膨脹室 (m ³)	600 — —	760 — —	— —	— —	555 (600) 200 —	856 900 878	765 684 585
格納容器設計内圧 (kg/cm ²) " 温度 (°C) " 外圧 (kg/cm ²)	12 187 3.35	14 200	12.2 185 6.0	8.0 (50) 180	4.0 150 2.5	4.0 150 2.5	4.0 150 2.5
格納容器胴部板厚 (mm)	75	180	227	30 (160)	25	25	25
格納容器重量 (t)	280	180	227	303 (715)	105 (推定)	92	92
原子炉室寸法 (m)	12.4 × 11.0			18.2 × 15.5	13.175 × 15.05	13.6 × 13.6	
遮蔽体 一次遮蔽重量 (t) 二次遮蔽重量 (t)							



一体化圧力抑制型格納容器
(膨脹室あり)

一体化圧力抑制型格納容器
(膨脹室なし)

全圧式格納容器

図 1 格納容器の概略構造

3. 一体化圧力抑制型格納容器と 全圧式格納容器との比較評価

船体構造と一体化した圧力抑制型格納容器について、同程度の仕様を想定した全圧式格納容器との比較評価を低コスト、小型化、軽量化、健全性の観点で行った。この際、原子力船の実績（むつ、オットハーン、サバンナ）及び船用炉の試設計のデータを参考にして検討を加えた。低コスト、小型化、軽量化、健全性について比較評価するための基本項目を下表にまとめる。

評価項目	基本項目
軽量化	① 格納容器の径をできるだけ小さくすること。 ② サプレッションチャンバ水の利用により遮蔽体に兼用 ③ 格納容器の内圧を低くする。（板厚を薄くする）
低コスト	① 遮蔽体を少なくする。 ② 建造工程の簡素化
小型化	① 遮蔽体の形状をコンパクト化 ② プラントのシステムを簡素化
健全性	① 船体構造の一体化の部分の強度設計を船体動揺に対して行う。 （疲労解析、応力解析等） ② 独立型格納容器の船体との接合部の強度解析

(1) 軽量化

① 格納容器の大きさ

従来から試設計を進めてきた圧力抑制型格納容器とはほぼ類似の形状の全圧型で独立した格納容器とで比較を行うと図2、図3に示すとおりである。この図は、圧力抑制型でかつ膨脹室を有する格納容器と全圧型についてLOCAを対象とした条件で内圧を概略計算したものである。

全圧型はほぼ等しい容積を持つ圧力抑制型と比較し数倍の差がある。

例えば約900m³の内容積の全圧型では内圧が約22ataになり、胴部板厚が120mmにもなり、重量が約450tにもなる。

これでは船体構造一体化にするには、板厚が厚く溶接施工後の応力除去が不可能なため独立型にせざるを得ない。これを圧力抑制型でドライウェル部容積を同じにして、膨脹室を船体に持てば約4ata、膨脹室なしでも9ataとかなり低くすることができる。

② サプレッションチャンバ水の利用

図1に示す構造図で圧力抑制型のウェットウェル部の水を遮蔽体として利用し、一次遮蔽（コンクリート）をなくし、ウェットウェル部とドライウェル部の境界部に置くことで遮蔽重量を減少させることができる。

全圧型では図1に示すように圧力容器炉心部周囲に一次遮蔽（コンクリート）が必要になり、さらに格納容器の周囲に二次遮蔽（コンクリート）が必要となる。

③ 遮蔽体と格納容器を含めた重量

一体化圧力抑制型格納容器の重量は図4に示すごとく、全圧型に比較してかなり軽量化される。圧力抑制型と全圧型の一次遮蔽と二次遮蔽の配置は図1に示す構造で検討した。

特に圧力抑制型格納容器では、ウェットウェル水が遮蔽に利用されており、生体遮蔽（二次遮蔽）が簡素化されている。

改良船用炉の試設計結果で圧力抑制型格納容器のウェットウェル水の684 tが全圧式に比べて重量が付加されることになるが、一次遮蔽、二次遮蔽の全体重量を試算した結果、図4に示すように、全圧式の方が重量は重くなっている。

表3には、図4に示した各形式の全重量（格納容器、1次遮蔽、2次遮蔽、他）概算値を参考に示す。この重量は一体化圧力抑制型格納容器方式（西ドイツ方式）は改良船用炉の試設計で詳細に遮蔽計算をしているが、西ドイツ方式に日本の安全評価指針を考慮した一体化圧力抑制型格納容器及び全圧式に対しては、遮蔽体の配置も重量計算も概略検討のため、将来詳細設計すれば変わる可能性がある。

(2) 低コスト

① 遮蔽体を少なくする

図1に示す構造図で圧力抑制型ではサプレッションチャンバー水を利用することにより、炉心周りの一次遮蔽体（コンクリート）が省略、わずかな遮蔽体で機能を果たすため、重量低減及び遮蔽施工工事不要等でコストダウンが可能になる。

② 建造工程の簡素化

格納容器を圧力抑制型で船体一体構造にすれば重量が軽くなり船体建造時に、船台で同時に格納容器が建造可能となり、建造工程が簡素化され、かつ技術的にも確立した手順で建造が進めることができるため、低コストにすることができる。

全圧型であれば、重量が図3に示すような重さのため一体として船体に搭載するにも時間と労力を必要とする。場合によっては格納容器を分割組立てする必要があることも考えられる。

二次遮蔽体（コンクリート）を格納容器の周囲に配置する構造では、遮蔽体表面積が大きくなるため、建造時遮蔽施工の方法、健全性の確認等の手順を確立する必要がある。例えば健全性の確認のため、実験にかわるコンピュータによるシミュレーションの方法を確立しておかなければならない。

(3) 小型化

① 遮蔽体の形状をコンパクト化

格納容器の周囲に配置する二次遮蔽体（コンクリート）は船用炉で全プラント重量に対して遮蔽体重量の占める割合が大きいため、格納容器を小さくすることが重要なファクターになっている。

図1の各方式の構造図で示しているように一次遮蔽、二次遮蔽体の形状、配置がサプレッションチャンバー水を利用することによりコンパクトな遮蔽体にすることができる。

本設計で採用している一体型船用炉では、蒸気発生器を内蔵し、かつ炉心周囲をサプレッションチャンバー水配置することにより、格納容器周囲の二次遮蔽の厚さを薄くすることもできる。

格納容器の高さを低くすること、小型、軽量化に効果は大きいですが、一体型船用炉では限度があり、分離型と比較して低くすることは難しい面もある。

② システムの簡素化

格納容器に含まれる機器は一体型船用炉を採用しているため、かなりシンプルなシステムになっている。

全体として、一体化圧力抑制型と全圧式格納容器の小型化の比較は、全圧式は一次遮蔽体、二次遮蔽体を、一体化圧力抑制型ではサプレッションチャンバー水、膨脹室を持っているため、両者の間に極端な相違はないと思われる。ただ一体化圧力抑制型の方は膨脹室の空間に一次系の機器を入れることが可能である。

図5に示すドライウェルと膨脹室との内容積の関連で格納容器の内圧が変わるため、船体構造設計で最適化をはかり、小型化の検討する必要がある。

(4) 健全性

一体化圧力抑制型格納容器の健全性について、波浪荷重に対する強度解析を過去実施してきた試設計の船体条件を基本に一部船体仕様を決定し、実施した。(解析の概要は別添参照)

この解析の結果、ウェットウェル、膨脹室の船体との構造部材のところにおいて想定した船体が波浪中を航行するとき発生する応力は、大きくない結果が得られ健全性が証明されている。

船体構造と一体化による箱形の耐圧容器としては、十分補強リブを考慮すれば耐えうる。NKルールに従ってウェット深さを800mmにすれば応力の面でも十分成立する。

船体構造の耐圧部分での溶接は、突合せ溶接として、かつ非破壊検査で十分確認することができる。

船体構造と一体化した格納容器の建造にブロック建造を行い工程の短縮化をはかることは従来の造船建造技術の蓄積により、健全性において信頼性のある建造が可能である。

圧力抑制型の格納容器であるため、内圧を低くでき、胴板厚が38mm以下になり、溶接工事後の応力除去が必要でなくなり、健全性の確保がより可能になる。

全圧式格納容器の場合は、先に述べたように格納容器及び遮蔽を含めた重量が重く船体構造と固定するためには、船体動揺に対して強度を持たせるために補強を必要とする。

全圧式格納容器では、胴板厚が厚くなり、かつ高内圧のためその部分を貫通する配管、電線のペネトレーション部の密閉化に設計上の注意が必要である。

さらに漏洩試験、気密試験、圧力試験にも注意が払われなければならない。

表3 抑制型と全圧式の格納容器及び遮蔽の重量比較表

(単位：トン)

項目	む	つ	NSR-7	NSR-7	改良船用炉 (抑制型)	改良船用炉 (抑制型)	改良船用炉 (全圧式)
格納容器	280 (全圧式)		715 (全圧式)	303 (独立型) (抑制型)	92 (船体一体型) (抑制型) (膨脹室あり)	130 (船体一体型) (抑制型) (膨脹室なし)	425 (全圧式)
遮	252.2		680	125	ドライウエル部遮蔽 722 ウエットウエル部 鉄・コンクリート 688	ドライウエル部 200 ウエットウエル部 144 コンクリート 220	ドライウエル部 200 下部遮蔽付 180 コンクリート 220
2次	1950.0		コンクリート 2181 二重底内の水 76	コンクリート 2181 二重底内の水 76	圧力容器下部二重底遮蔽 97 ウエットウエル部外周遮蔽 67 膨脹室外周遮蔽(鉄) 275 二重底内の水 82	コンクリート 2226 二重底内の水 82	コンクリート 2226 圧力容器二重底下部(鉄) 51 二重底内の水 82
蔽	2		94	94	60	60	60
ウエットウエル水	*1 25.2		—	200	684	260	—
計	2509.4		3746	2938	2767	3102	3444
備考	*1 一次遮蔽タンク水		格納容器圧力 25 K 日本の安全評価指針	膨脹室を有していない 格納容器圧力 9 K 日本の安全評価指針	膨脹室を有しているため 格納容器圧力 4 K 西ドイッ方式	格納容器圧力 9 K 西ドイッ方式+日本の 安全評価指針	詳細設計(遮蔽構造等) していないため数値は 概算 日本の安全評価指針

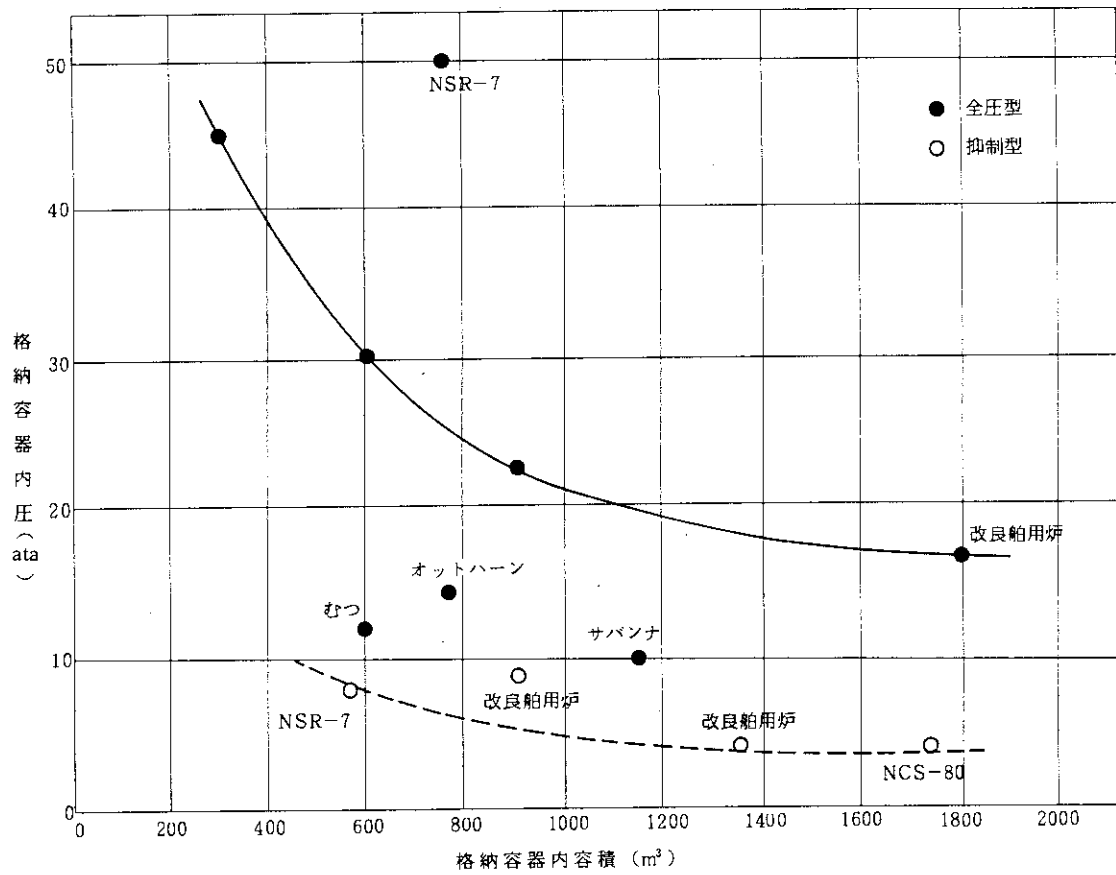


図2 格納容器内容積と内圧との関係 (LOCA時)

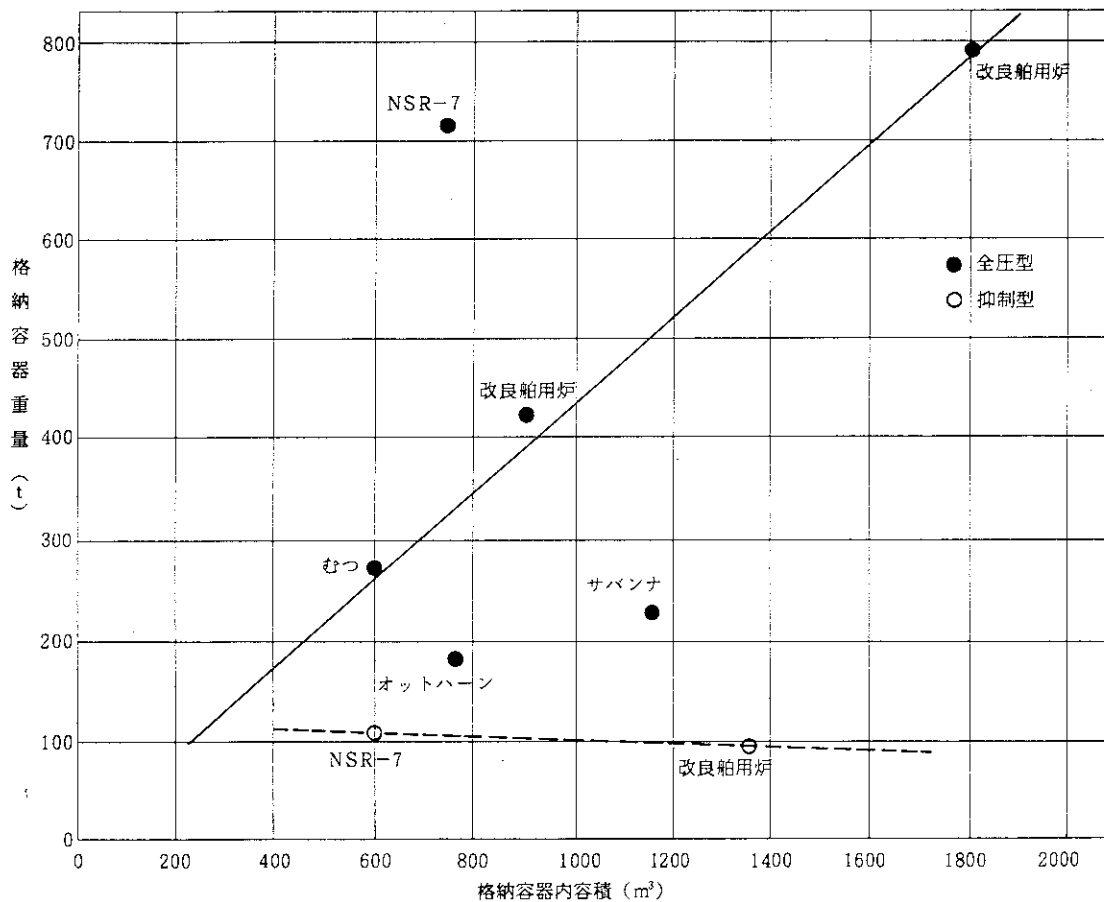


図3 格納容器重量

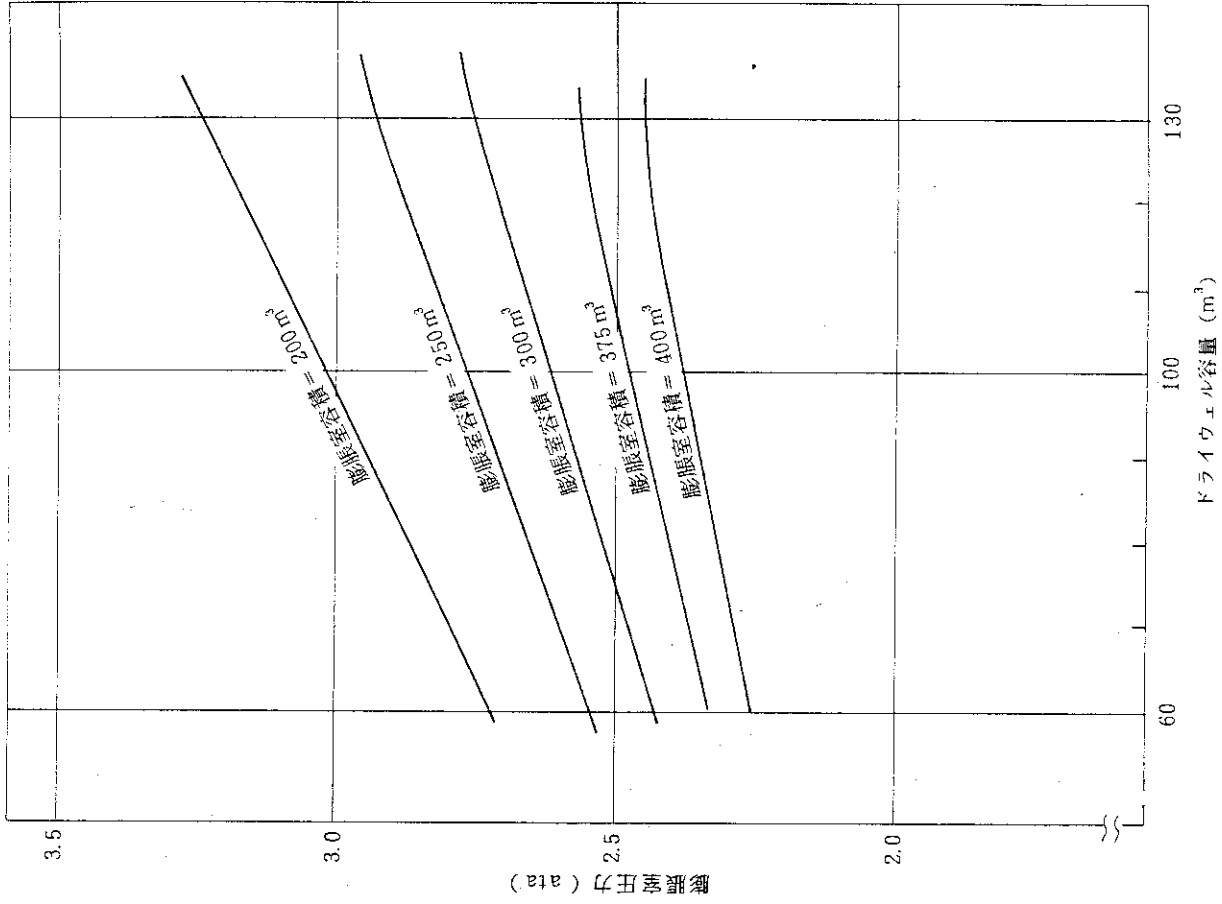


図5 ドライウェル容積に依存する膨張室最大圧力

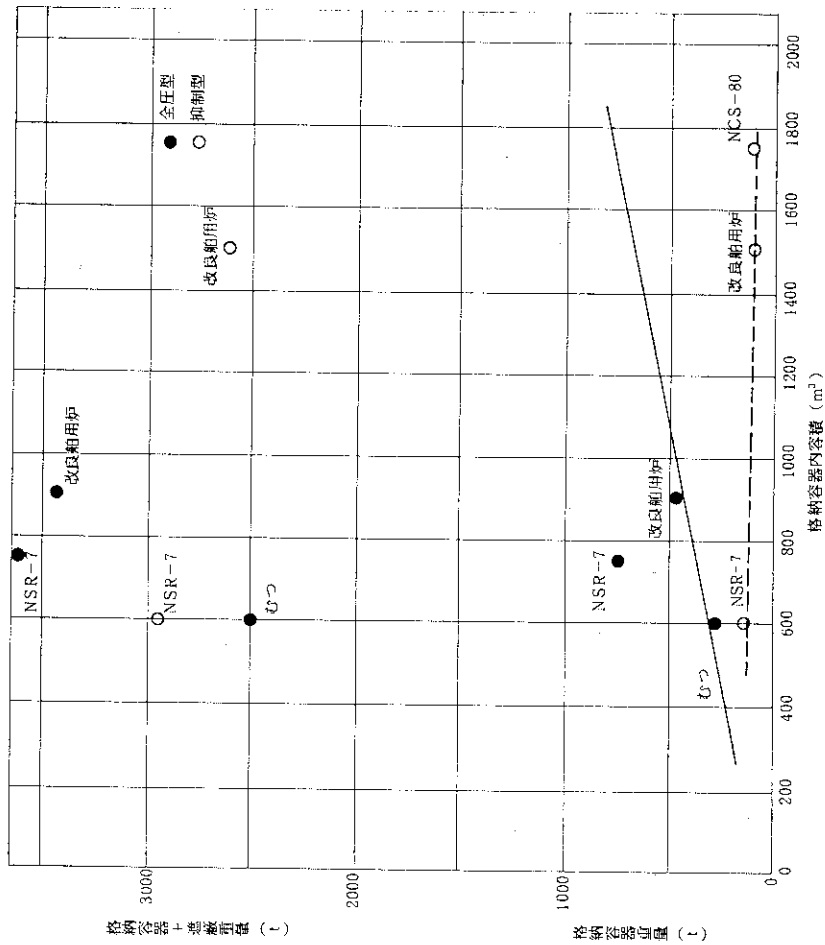


図4 抑制型と全圧式の重量比較

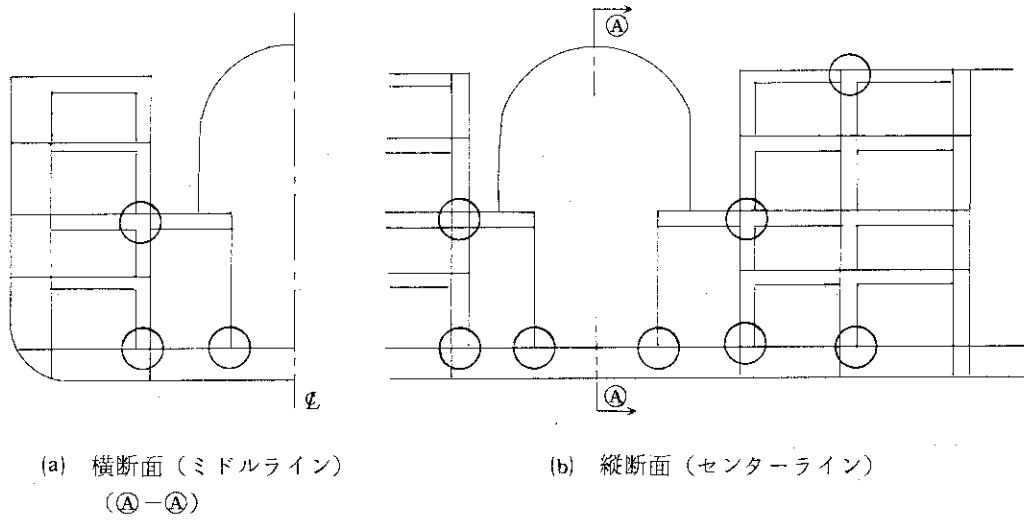


図6 厳しい応力状態となる箇所

4. 圧力抑制型格納容器の規制に対する対応

船体構造と一体化した圧力抑制式の格納容器は、規制上から使用できないというものはないものと考えられる。格納容器としての機能が満足されていれば、船体一体化であれ、独立型であれ、採用が可能である。現状の各種技術基準の規定に対して、船体構造一体化の圧力抑制型格納容器はどのように対処できるか、下記に述べる。

- (1) 圧力抑制型格納容器は安全閉閉として十分気密構造にし、機能上放射性物質を閉じ込めることは可能である。
- (2) SOLAS条約における防火構造により安全閉閉の気密・防火構造部の貫通部においても既存の技術により気密を維持することが可能である。
- (3) 圧力抑制型格納容器は小型化をはかり、船体配置上、船側から0.26 B(Bは船中)以内の位置の保守的な配置をすることにより、耐衝突構造を抵抗型耐衝突構造にして健全性が十分確保される。
- (4) 圧力抑制型格納容器に最大想定事故(LOCA)の際の内圧力による熱応力を考慮しても船体構造との一体化した重要な境界部での応力値は、十分満足する範囲内にあり、最高応力値においても補強することにより健全性が確保されている。
- (5) 船体構造一体化圧力抑制型格納容器の各主要構造部の応力集中の影響が考えられる高応力発生部においても、疲労強度は十分高い安全率を有していることが確認されている。
- (6) 格納容器の保守、検査のための接近性

船体構造と一体化の技術は在来船、特に高度な技術を有するタンク構造の建造実績から接近して精度の高い保守、検査の実施が可能である。

独立型は船体支持部の健全性の確認には非常に狭いつな場所であり、通常の手段を使うには困難な場所であり、容易に保守、点検がなしうるための治工具を使用する。

船体構造の健全性は、建造時に検査が可能な構造とし、すべて重要なところは検査を実施する。

(7) 建造後の検査

① 気圧試験

設計圧力を基準としてルールによる試験圧力(設計圧力の1.5倍)にて、試験シーケンスに従って実施する。試験により予想される応力集中部(図6に示す)に必要なひずみゲージを張り付けて計測を行う。

この結果は強度計算、応力解析により求められている値から評価する。

② 気密試験

数点の基準圧力のもとで全体としての漏洩率測定を行う。

なお、試験前に計測に必要な漏洩率試験用の計測装置、各区画へのマンメータ接続をしておく。各区画(ドライウェル、ウェットウェル、膨脹室)の温度、空気湿度、圧力の測定装置を均一なデータがとれる必要数設置する。

- ③ 貫通部の気密試験
承認された圧力（設計圧力を基準として）で漏洩率試験を実施する。
 - ④ 初回気圧試験後の非破壊検査
気圧試験後効応力溶接継手から抜き取り検査により非破壊検査を行う。
- (8) 供用期間中の検査
- 格納容器周辺の船体構造について、下記の図 6 に示している厳しい応力状態の個所を主体として検査を実施する。
- ① 機能試験
 - ② 気密試験，全体としての漏洩率試験
 - ③ 肉眼検査
 - ④ 溶接継手検査

5. 結 論

改良船用炉試設計で実施した圧力抑制型格納容器に対し、既に実績のある全圧式格納容器と比較し、評価を加えた結果、次の通りとなった。

- (1) 船体構造との一体化による圧力抑制型格納容器では、ドライウェル、ウェットウェル、膨脹室の大きさ、形状、遮蔽体の考え方によりかなり自由度のある検討が可能になり、採用は十分に可能になった。
- (2) 圧力抑制型の採用により、格納容器の重量を軽量化でき、遮蔽体の形状配置により、原子炉プラントに占める重量の割合を軽減することが可能になった。
- (3) 格納容器の建造は船体構造と一体化するため、建造方式に従来からブロック建造方式が適用可能となり、船台で建造することにより工程管理が容易で信頼性の高い建造が可能となる。
- (4) スペース的には、圧力抑制型と全圧式では極端な相違が見出せなかった。

以上の結果、圧力抑制型と全圧式に対する評価として軽量化、小型化、コスト、健全性の各項目について評価を表4にまとめた。

表4 圧力抑制型と全圧式格納容器の比較評価

項 目	圧力抑制型格納容器	全 圧 式 格 納 容 器
軽量化	① 格納容器の重量が軽くなる。 ② LOCA時の格納容器内圧が低くなる。 ③ 遮蔽体(一次, 二次コンクリート遮蔽)が簡素化され, 重量軽減。	① 格納容器重量が大きくなる。 ② 格納容器板厚が厚くなる。 ③ LOCA時の格納容器内圧が高くなる。 ④ 遮蔽体(一次, 二次コンクリート遮蔽)が必要になる。
コスト	① 格納容器の建造が船体と一体で船台(ドッグ内)で可能となり工程が短縮できる。 ② 格納容器が船殻構造に含まれるため製造コストが安くなる。	① 船体建造と格納容器製作が独立して工程が進められる。 ② 格納容器, 二次遮蔽が建造時のクリティカルパスになる。
小型化	① 格納容器が小さく二次遮蔽がコンパクトになる。 ② 原子炉プラントのシステムが簡素になる。 ③ 膨脹室に一次系機器が配置できる。	① 二次遮蔽体配置によりスペースがとられる。 ② 格納容器の径を小さくすると, 内圧及び板厚が増加。
健全性	① 全体として応力は低く健全性が確保される。一部LOCA時の熱応力を受ける箇所で厳しい応力になる。 ② 格納容器の支持部は船体と一体構造で健全性の検査が容易。	① 板厚が厚くなるため, 熱処理を必要とする。 ② コンクリートの二次遮蔽の健全性確認のため, 施工法, コンクリート密度均一化の確証試験が必要。 ③ 格納容器の船体支持構造が複雑になる。

別添 波浪荷重が一体化圧力抑制型格納容器の健全性に及ぼす影響評価の概要

1. 評価内容

一体化圧力抑制型格納容器は、それを構成するドライウェル、ウエットウェルおよび膨脹室が船体構造の一部と共有あるいは直接結合されているため、船が波浪中を航行するときこれら格納容器の構成要素にも応力が発生する。原子力船が波浪中を通常航行する場合、および、波浪中にあって一次冷却水喪失事故（LOCA）が発生した場合に波浪荷重が一体化圧力抑制型格納容器の健全性に及ぼす影響を評価した。

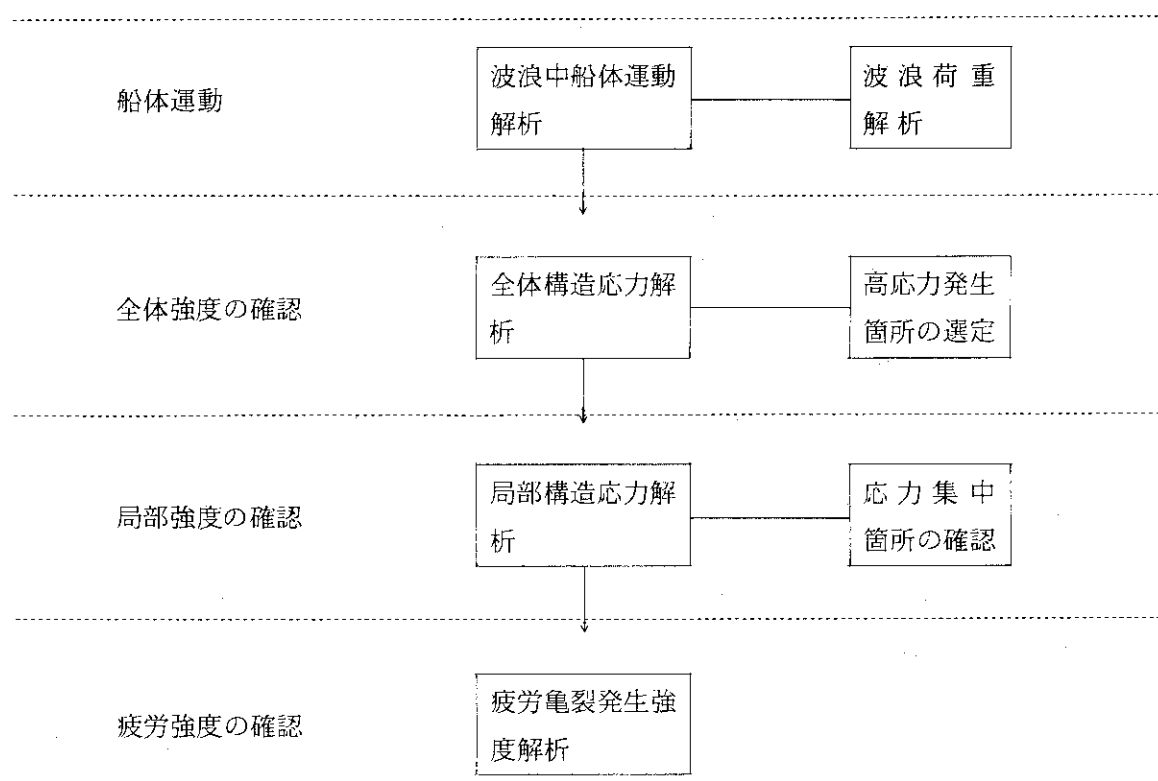
評価は次の項目について実施した。

- 最大波浪荷重に対する強度評価
- 波浪荷重と原子炉のLOCA事故との組み合わせに対する強度評価
- 就航後、耐用年数（20年間）にわたり繰り返し荷重が作用した場合の疲労強度評価

このために、次のような解析を行った。

- 波浪中船体運動 / 波浪荷重解析（OSM法による）
- 原子炉区画の立体構造有限要素法応力解析（粗メッシュモデルによる）
- 局部構造有限要素法応力解析（細メッシュモデルによる）
- 疲労亀裂発生解析（マイナー則による）

これらの解析をフローに示すと次のようになる。



2. 評価結果

(1) 船体運動

波浪中船体運動解析は、O. S. M. 法 (Ordinary Strip Method) に基づくプログラム GRAPES (Global Response Analysis of Probabilistic Evaluation System) を用いて行った。その結果による加速度 (α_y : 船の左右方向, α_z : の上下方向) を国際海事機関 (IMO) の簡易式と共に図 A. 1 (1/2 ~ 2/2) に示すが、両者に大きな差が見られないことから IMO 「原子力商船安全基準」の安全等級 SC-2 と比較して、全体構造応力解析に採用する加速度は以下のように設定する。

	上下方向 (α_z)	左右方向 (α_y)
SC-2	0.6 g	0.7 g
本解析	0.62 g	0.59 g
採用値	0.62 g	0.7 g

また、波浪中船体外圧振幅分布を図 A. 2 (1/2) に示すが、振幅が大きい程、外圧が大きくなることから、船体運動による変動外圧は、吃水線で最大となることが分かる。この時の船体外圧長期予測値分布を図 A. 2 (2/2) に示す。この値を以下の全体構造応力解析に用いる。

(2) 全体強度の確認

原子炉区画を解析対象とし、原子炉区画の前後構造である機関室と貨物倉の 1/2 長までを取出した立体 FEM 解析を実施した。(図 A. 3 に解析範囲を示す)

荷重条件として、航行時 (船体運動考慮)、LOCA 時 (内圧: 4 kg/cm^2) および熱荷重 (最大 150°C) を想定したときの作用応力は、熱荷重を除き船体縦曲げ応力を考慮しても十分低いレベルに留まっている。熱荷重については、最大熱荷重 (150°C) が作用するときの外的要因 (例えば、船体運動による加速度および外圧や、LOCA 内圧 4 kg/cm^2) の条件によって作用応力は影響を受ける。ここで、外的要因は静水中で (LOCA) を考慮しない状態において船体縦曲げ応力を考慮すると、材料を変更することによって、原子炉区画の船体構造の応力は許容値内となる。表 A. 1 ~ 3 に解析結果から各部材に作用する最大応力をまとめた結果を示す。

今後、熱荷重に対する詳細な設計条件 (外的要因) の検討が必要であると考えられる。

(3) 局部強度の確認

全体構造応力解析結果より選定された高応力発生箇所と主桁との取合い部、または主桁端ブラケットのコーナー部で応力集中が見られた。この部位はいわゆる構造不連続部であり、強度または、溶接法など設計する上で最も注意を要する箇所である。

局部構造応力解析の結果から、図 A. 4 に局部応力集中個所の二重底部モデルの熱荷重状態における主応力を示す。

また各部材に作用する最大応力を表 A. 4 にまとめたが、この値は原子炉区画にとって最も厳しい荷重条件である熱荷重状態の応力値である。

解析結果では、部材寸法を選定することによって、十分な強度を有することが確認された。しかし、主桁端ブラケットのコーナー部では部材寸法および材料強度を増すよりも、構造様式を一

部修正する方が、応力を低減する効果が大きいと考えられる場合がある。この部位は、今後、構造様式の詳細検討が必要であると考えられる。

(4) 疲労強度の確認

疲労強度の信頼性評価は、疲労強度 / 破壊力学による信頼性評価の手法により対応できる。この手法は次の3つのステップに分かれる。

ステップ1 ……疲労亀裂発生解析

ステップ2 ……疲労亀裂伝播解析

ステップ3 ……脆性破壊解析

ここでは、上記の3ステップのうち、疲労亀裂発生解析（ステップ1）による疲労強度を評価する。

原子炉区画の船体構造についてマイナー則による累積被害度計算を行った結果を表A. 5に示すが、応力集中部に対してIMOのIGCコードにおける高信頼性タンク（タイプB）の疲労強度判定基準による許容累積被害度0.5と比較して十分の安全率を有していることが分った。

(5) 今後の検討項目

上記の解析によりLOCA時の熱応力を緩和するための方策を講ずる必要のあることがわかった。このために次のような項目について詳細な検討が課題として残されている。

- ・ 熱荷重に対する詳細な設計条件
- ・ 二重底、桁等の応力集中を緩和する構造様式

このほかに、格納容器の内壁に防熱インシュレーションを施す方策なども考えられる。これらの検討を今後加えることによって熱応力の問題は解決可能である。

原子炉周辺はその機能上、甲板あるいは隔壁などは通常の船体構造より密に配置されており強度上大きな余裕が付与されている。このためこれらの構造を格納容器の一部として兼用させる一体化格納容器は独立型の格納容器とくらべて構造用鋼材を大幅に節約できるということは大きな利点となる。

表 A.1 最大等価膜応力

単位：kg/mm²

	材 料	ケース	全体構造	船体縦曲	ローカル	組合後	補強後	許容値
			応力解析	げ応力	曲げ応力			
			σ	σ_L	σ_B	σ'	σ''	σ_{all}
タンク・トップ	KE32	5	22.49	-7.12		25.99		27.2
船底外板	MS	5	17.79	2.82		19.68		20.4
センター ・ライン	ガード	KE32	5	14.14		25.99		27.2
	主桁	MS	5	23.79			16.69	20.4
ミドル ・ライン	フロア	KE32	5	4.73		20.78		27.2
	主桁	SM41B	5	17.73				20.4
第3甲板	KE32	5	13.28					27.2
C横隔壁	KE32	5	8.49					27.2
①縦隔壁	MS	5	12.95					20.4

表 A.2 最大等価板表面応力

単位：kg/mm²

	材 料	ケース	全体構造	船体縦曲	ローカル	組合後	補強後	許容値
			応力解析	げ応力	曲げ応力			
			σ	σ_L	σ_B	σ'	σ''	σ_{all}
ドライウェル	SGV49	3	5.21					27.0

表 A.3 最大直応力

単位：kg/mm²

	材 料	ケース	全体構造	船体縦曲	ローカル	組合後	補強後	許容値
			応力解析	げ応力	曲げ応力			
			σ_n	σ_L	σ_B	σ_n'	σ_n''	σ_{all}
センターライン 主桁面材	KE32	5	20.83					27.2
ミドルライン 主桁面材	SM41B	5	13.59					20.4

注) ケース3：組合せ荷重，LOCA+最小外水圧

ケース5：熱荷重

表A.4 各部材の最大応力 (ケース5)

単位: kg/mm²

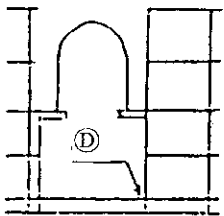
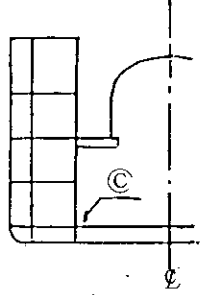
		材 料	局部構造 応力解析	組 合 せ 応 力	組合せ後 応 力	補 強 後 応 力	σ all	
M O	σ_e	ガーダ	KE36	26.6	-7.12	30.5	30.6	
		主桁ウェブ	KE32	19.0			27.2	
D E L	σ_n	タンクトップ	KE36	-22.7	-7.12	-29.82	30.6	
		船底外板	MS	15.2	2.82	18.02	20.4	
		隔 壁	KE32	-25.3			27.2	
-1		主桁付面材	KE32	9.9			27.2	
M O	σ_e	甲板付主桁ウェブ	KE32	21.7			27.2	
		隔壁付 "	KE32	31.8			31.5*	27.2
D E L	σ_n	甲 板	KE32	-6.1			27.2	
		隔 壁	KE32	10.0			27.2	
		甲板付主桁面材	SM41B	-18.8			20.4	
-2		隔壁付 "	KE32	32.1			10.3	27.2
備 考			σ_e : 等価膜応力 σ_n : 直応力 σ all : 許容応力 *……構造様式の検討が必要。又は材料を $\sigma_y = 40 \text{ kg/mm}^2$ 相当とする。					

注) ケース5: 熱荷重

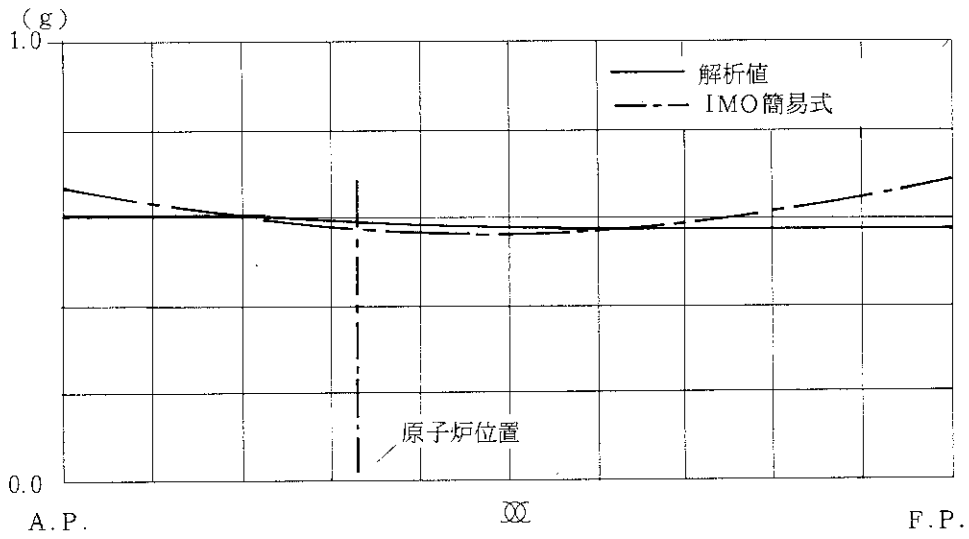
MODEL-1: 二重底部モデル

MODEL-2: 第3甲板部モデル

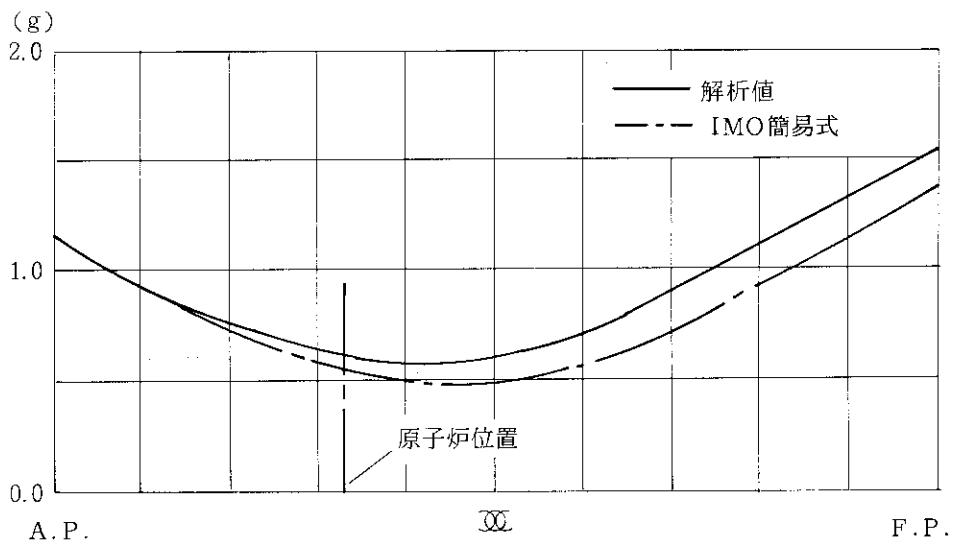
表A.5 累積被害度計算結果

	ブロック i	応力振幅 σ (kg/mm ²)	頻度 ni	繰返し数 Ni	被害度 ni/Ni	備考
二重 底板 縦 方向	1	6.223	9×10^0	8.32×10^4	1.08×10^{-4}	㊄ - SEC. 
	2	5.371	9×10^1	1.75×10^5	5.15×10^{-4}	
	3	4.518	9×10^2	4.19×10^5	2.14×10^{-3}	
	4	3.665	9×10^3	1.21×10^6	7.44×10^{-3}	
	5	2.813	9×10^4	8.97×10^6	1.00×10^{-2}	
	6	1.961	9×10^5	2.39×10^8	3.76×10^{-3}	
	7	1.101	9×10^6	4.57×10^{10}	1.97×10^{-4}	
	8	0.255	9×10^7	2.76×10^{16}	3.26×10^{-9}	
D	累積被害度 (D)				0.024	
二重 底板 横 方向	1	5.931	9×10^0	1.06×10^5	8.48×10^{-5}	TR - SEC. 
	2	5.119	9×10^1	2.32×10^5	3.90×10^{-4}	
	3	4.306	9×10^2	5.34×10^5	1.68×10^{-3}	
	4	3.494	9×10^3	1.54×10^6	5.86×10^{-3}	
	5	2.681	9×10^4	1.39×10^7	6.48×10^{-3}	
	6	1.869	9×10^5	3.70×10^8	2.43×10^{-3}	
	7	1.056	9×10^6	6.68×10^{10}	1.35×10^{-4}	
	8	0.244	9×10^7	4.12×10^{16}	2.18×10^{-9}	
C	累積被害度 (D)				0.017	

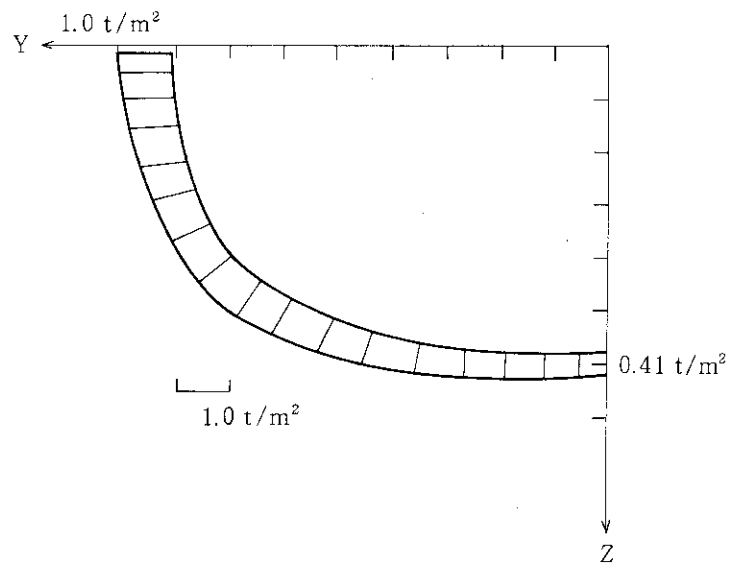
$$D = \sum_i \frac{ni}{Ni}$$



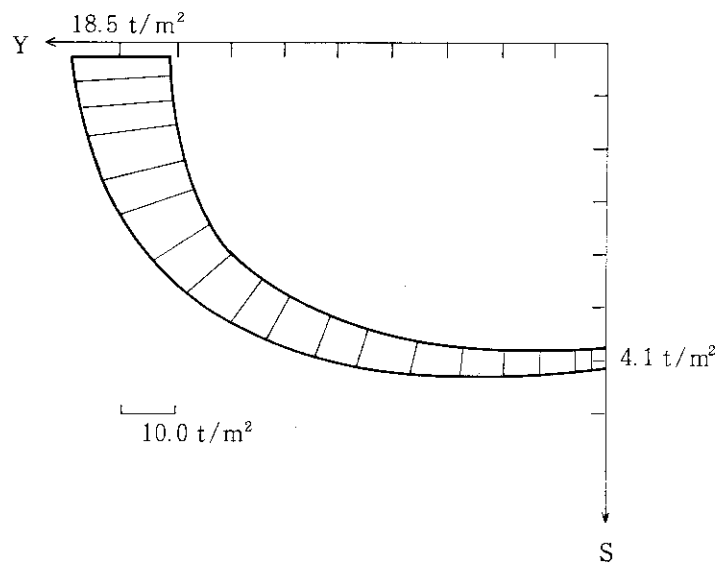
図A.1 αy 船長方向変化 (1/2)



図A.1 αZ 船長方向変化 (2/2)



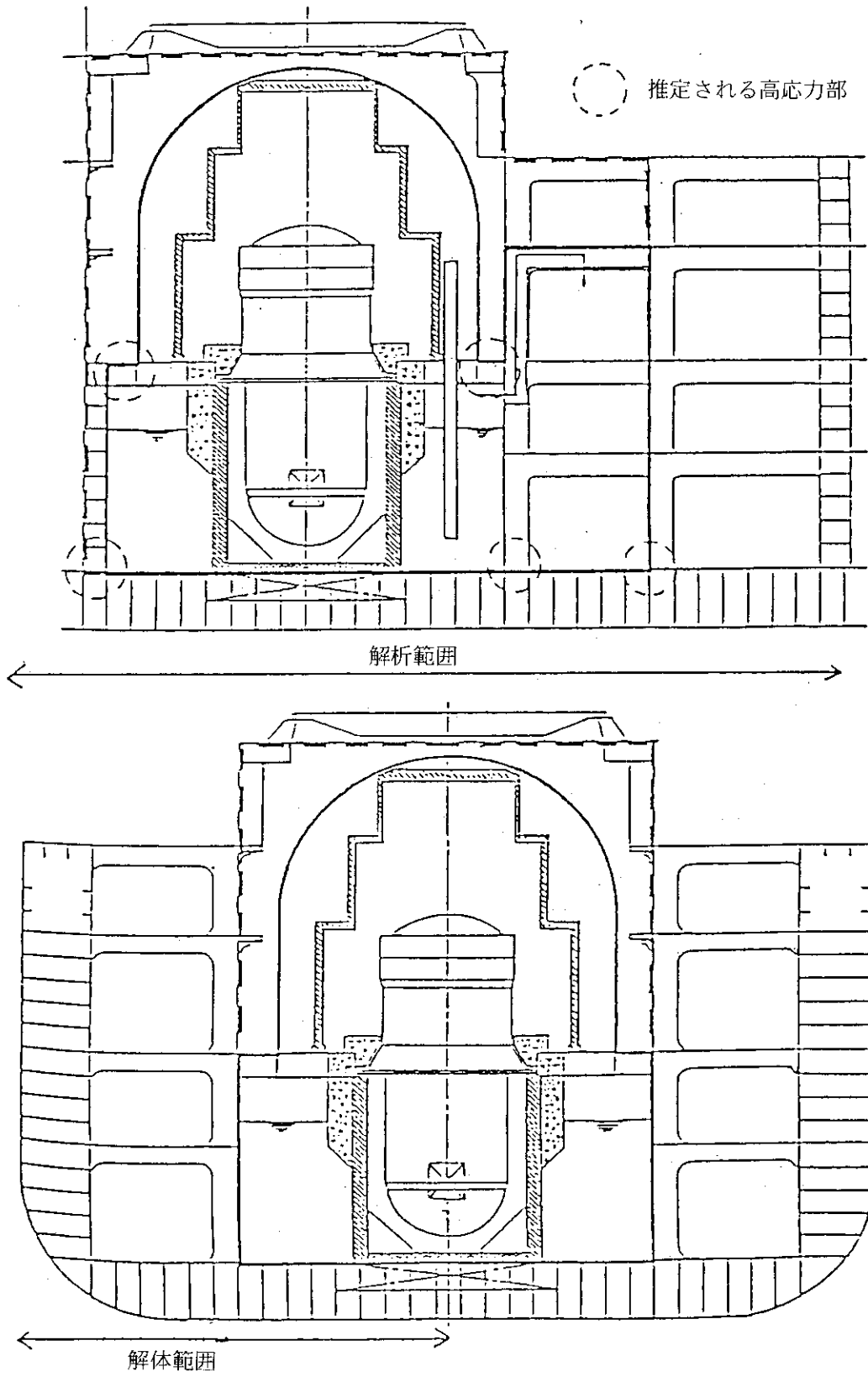
図A. 2 船体外圧振幅方向 (1 / 2)



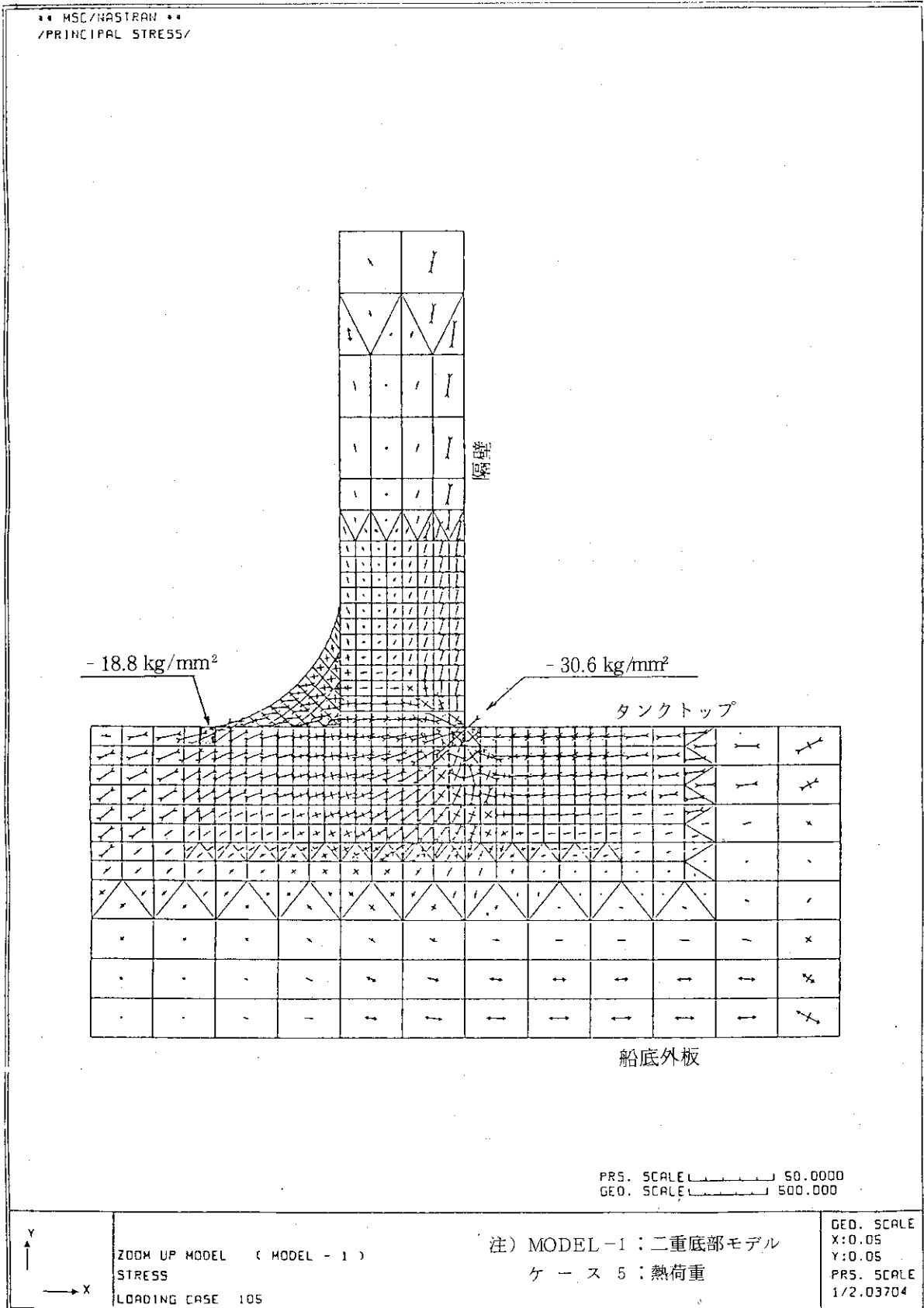
図A. 2 船体外圧長期予測値分布 (2 / 2)

--- 安全閉廂(原子炉室)境界
— 格納容器境界

○ 推定される高応力部



図A.3 船体構造解析範囲



図A.4 主応力 (MODEL - 1) ケース5