

本研究は、モーターボート競走公益資金による（財）日本船舶振興会の補助金を受けて実施したものである。

研究資料No.387

関係者限り

## 第198研究部会

### 放射性物質等の海上輸送における 事故処理技術に関する調査研究

#### 報 告 書

昭和61年3月

社団法人  
日本造船研究協会

## はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和60年度補助事業として、日本造船研究協会第198研究部会において実施した「放射性物質等の海上輸送における事故処理技術に関する調査研究」の研究成果をとりまとめたものである。

### 第198研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	青木成文(東京工業大学名誉教授)	糸山直之(三菱重工業)
	新井義男(原電事業)	刈込敏(神戸製鋼所)
	入野光博(三菱重工業) (井上康)	(玉村忠雄)
	河井保彦(三井造船) (菅野和雄)	斎藤茂(深田サルベージ)
	城子立夫(日本海事協会)	高橋義信(日本原子力発電) (井上守)
	南後文彬(関西電力) (杉原精二)	平野始幸(エヌ・ティー・エス)
	布施卓嘉(船舶技術研究所)	細野昭(日本海運)
	松本敏博(辰巳商会)	満木泰郎(電力中央研究所)
	森本弘正(石川島播磨重工業)	山田三郎(東京電力)
	山田信行(日立造船)	
関係官庁	守佑一(運輸省海上技術安全局技術課原子力技術調査室長)	
	仲田光男(運輸省海上技術安全局技術課原子力技術調査室調査係長) (関元貴至)	

### 第198研究部会作業分科会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	布施卓嘉(船舶技術研究所)	糸山直之(三菱重工業)
	青木元也(船舶技術研究所)	植木紘太郎(船舶技術研究所)
	入野光博(三菱重工業) (井上康)	刈込敏(神戸製鋼所) (玉村忠雄)
	大西恒二(日本原子力発電) (中園隆一)	斎藤大樹(石川島播磨重工業)
	河井保彦(三井造船) (菅野和雄)	南後文彬(関西電力) (杉原精二)
	清水信夫(深田サルベージ)	細野昭(日本海運)
	平野始幸(エヌ・ティー・エス) 満木泰郎(電力中央研究所)	本橋孝之(原電事業) (中川憲一)
	山田信行(日立造船)	
関係官庁	守佑一(運輸省海上技術安全局技術課原子力技術調査室長)	
	仲田光男(運輸省海上技術安全局技術課原子力技術調査室調査係長) (関元貴至)	

( ) 内前任者

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
1.1 調査研究の目的 .....	1
1.2 調査研究の概要 .....	1
2. 沈船引き揚げ技術の検討 .....	2
2.1 水深 500m 以下からの引き揚げ .....	2
2.1.1 はじめに .....	2
2.1.2 A D S ( 大気圧潜水服 ) .....	2
2.1.3 沈船からのキャスクの回収 .....	4
2.1.4 「日の浦丸」の場合の検討 .....	6
2.1.5 結 び .....	7
2.2 水深 500m 以上 2,000 m 以下の引き揚げ .....	13
2.2.1 基本概要 .....	13
2.2.2 作業母船 .....	24
2.2.3 作業バージ .....	33
2.2.4 沈船の船体強度 .....	38
3. 冷却水漏洩キャスクの放射線量率及び伝熱計算 .....	42
3.1 線量率分布計算 .....	42
3.1.1 概 要 .....	42
3.1.2 計算条件 .....	42
3.1.3 計算方法 .....	43
3.1.4 計算結果 .....	43
3.1.5 検 討 .....	44
3.1.6 被曝線量の推定 .....	45
3.2 伝熱計算 .....	74
3.2.1 湿式キャスク .....	74
3.2.2 乾式キャスク .....	90
4. 結 言 .....	97

# 1. 緒 言

## 1.1 調査研究の目的

近年の原子力発電の増大に伴い、放射性物質等の輸送対策は核燃料サイクルの確立の観点から重要な問題になっており、従来からその安全性については、技術、規制、体制等種々検討が行われ、現段階においては十分安全であると考えられる。しかしながら、このような安全対策の充実にもかかわらず、万一事故が起った場合にも対処出来るよう、技術、体制等における整備をしておくことも必要であるとの認識から、各方面において緊急時対策等について検討が始まられている。

また、昭和59年8月には、六フッ化ウランを積載した貨物船「モン・ルイ」が衝突により、放射線災害に至らなかつたものの、社会的に多大な影響を及ぼしたこととも記憶に新しく、無視できない事実である。

以上のような情勢に鑑み、本研究部会においては、昭和59年度より2年計画で、放射性物質の海上輸送に関する安全性のより一層の向上を図り、社会的理解を深めるため、使用済燃料の海上輸送中の事故を対象として、放射線の影響を防護しつつ輸送物を回収し、速やかに事故を終結するための事故処理技術について、技術的観点から検討を行うこととした。

前年度は、水深200mからの沈船引き揚げ技術の検討を行いその可能性を確認したが、なお、我が国周辺には水深が200mを超える海域が多く存在しているので、今年度はこのような海域における事故処理技術について検討することとした。

## 1.2 調査研究の概要

本研究部会は作業部会を設け、次の調査研究を行った。

### 1.2.1 沈船引き揚げ技術

前年度に行った水深200mまでの事故処理技術の検討に引き続き、さらに、水深200mを超えて2000mまでの事故処理技術につき、事故の前提条件を設定し、以下の項目の検討を行った。

- (1) 水深500m以下からの引き揚げ方法の検討
- (2) 水深500m以上2000m以下からの引き揚げ方法の検討
- (3) 引き揚げに必要な機器の概念設計

### 1.2.2 冷却水漏洩キャスクの放射線量率及び伝熱計算

事故時のキャスクの前提条件を設定し、以下の項目の検討を行った。

- (1) 冷却水漏洩キャスクの放射線量率計算
- (2) 乾式及び湿式キャスクの伝熱計算

## 2. 沈船引き揚げ技術の検討

### 2.1 水深 500 以下からの引き揚げ

#### 2.1.1 はじめに

遭難沈没した輸送船からキャスクを回収する方法としては、(1)沈船ごと引き上げる方法(沈船の引き揚げ), (2)キャスク単体を引き揚げる方法(キャスクの回収)の二方法が考えられる。

水深 200m までは、環境圧有人潜水が可能であるので、沈船の沈没状況により、いずれの方法も技術的に可能である。しかし、200m 以上の水深では、現在、有人環境圧潜水が不可能であるので、潜水艇のごとく水圧を直接、人間が受けない潜水方法をもちいる必要がある。この様な潜水深度相当の圧力を受けないで潜水する方法は、一般に大気圧潜水法と呼ばれている。

大気圧潜水は近年従来の海底観察を主とする単純な機能から種々のマニュピュレータを装備し海中での作業性向上させたものが開発されてきた。また、その形状も人間のそれに近いものになり、潜水士の作業を行えるものも現われてきた。これらの装置は、ADS (Armored Diving Suit), または、JIM と呼ばれている。

本検討は、このADSを使用して水深 200m 以上 500 m 以下に沈没した輸送船からキャスクを回収すべく検討したものである。

#### 2.1.2 ADS (大気圧潜水服)

現在、欧米では種々のADSが開発実用化され主として海洋石油開発現場にて使用されているが、我が国では、今日のところ未だ一台も無く、今後の開発課題となっている。ADSは、環境圧潜水法と異なり大水深に潜水しても、大気圧環境下に復帰するときに長時間にわたる減圧を必要としない事、また潜水装備や要員が比較的小規模ですむこと、潜水訓練が簡単なこと、肉体的、生理的条件に特別な制約が無いこと等の多くの長所をもっている。しかし、その作業性については、潜水士に比較し未だ、多くの制約がある。

ADSには、現在「JIM」(ジム), 「JAMES」(ジェイムス), 「WASP」(ワスプ), 「SPIDER」(スパイダー), 「HORNET」(ホーネット)等と呼ばれるものがあり、その動力源は船上の母船からアンビリカル・ラインを介しておこなわれる有索方式の潜水である。海底での移動は、「JIM」, 「JAMES」では、人間のように歩行して移動するが、「WASP」「SPIDER」「HORNET」は、スラスターを用いて移動する。

##### (1) 種類と主要目及び形状

- ① 「JIM」(ジム)(図 2.1-1 及び図 2.1-2 参照)

###### 主要目

全 長	1.98 m
最 大 幅	1.04 m
空 中 重 量	414 kg
水 中 重 量	27 kg
最 大 深 度	450 m
ラ イ フ サ ポ ー ト	72 時間
通 信	有線、無線

② 「JAMES」( ジェームス ) ( 図 2.1 - 3 参照 )

主要目

空中重量	545 kg
最大深度	610 m
ライフサポート	80 時間
通信	有線, 無線

③ 「WASP」( ワスプ ) ( 図 2.1 - 4 参照 )

主要目

全長	2.6 m
最大幅	0.92 m
空中重量	454 kg
水中重量	0 ± 13.6 kg
最大深度	610 m
ライフサポート	86 時間
通信	有線, 無線
速度	1.8 kt
ペイロード	30 kg

④ 「SPIDER」( スパイダー ) ( 図 2.1 - 5 参照 )

主要目

全長	1.5 m
最大幅	1.3 m
高さ	2.2 m
空中重量	1.025 kg
水中重量	0 kg ( 中立 )
最大深度	610 m
ライフサポート	80 時間
通信	有線, 無線
速度	2 kt

⑤ 「HORNET」( ホーネット ) ( 図 2.1 - 6 参照 )

主要目

最大幅	1.2 m
高さ	2.1 m
空中重量	600 kg
水中重量	0 kg ( 中立 )
最大深度	700 m
ライフサポート	80 時間
速度	1 kt

## (2) 作業性

ADSは、専ら、海上で行うRIG(リグ)の海底石油掘削に付帯するダイビング・サービス用に開発、実用化されたので今日、報告されている潜水作業の実績を見る限りでは、沈船の引き揚げや、単体重量100トンに及ぶキャスクのごとさ重量物の回収に使用された記録は見当たらない。通常、行なわれている主な作業は、概ね、以下の通りである。

- イ. 掘削井戸の探索(LOCATION), 調査(INSPECTION)
- ロ. アンカー・チェンの回収
- ハ. 油圧ホースの接続
- ニ. 高圧ジェット水を用いた海中機器の清掃
- ホ. 水中テレビ撮影
- ヘ. ヘリコプターの探索と引き揚げ
- ト. シャックルの取り付け、取り外し
- チ. 油圧カッターを使用したワイヤーの切断

### 2.1.3 沈船からのキャスクの回収

ADSを使用した場合を想定して、キャスクの回収方法について検討をする。

#### (1) 前提条件

- 1) 沈船は右舷を海底に接して、横転している。
- 2) 沈船の船体には、損傷はなく、航海時のままとする。
- 3) 現場海域の気象、海象は海上作業に支障がないものとする。
- 4) 海流及び海中透明度は、ADSの作業に影響がないものとする。
- 5) 作業水深は500mとする。
- 6) 陸岸からの支援が容易な海域とする。

#### (2) 作業船団の構成と配置

##### 1) 船団構成

沈没位置が探査され、潜水艇その他の海中探査機器により、沈没状況が確認されたのちに、ADSを搭載した作業船、キャスクの引き揚げを行うウインチ・バージとそのタグ・ボート、其の他、交通・連絡船を中心とする作業船団が現場海域に入る。なお、これらの船団の作業に先行して、現場海域には、作業船が係留出来るよう予め、係留ブイやアンカーを設置しておく。また、ADSの作業を確実、且つ、迅速に行うため、ADSと同能力の潜水深度を持つ潜水艇も用意する。本作業に必要な作業船の構成をまとめると、概略、以下のとくとなる。

##### 作業船団の構成

タグ・ボート	5,000馬力	1隻	係留作業用
外洋型バージ	5,000総トン	1隻	"
アンカー・ボート	巻き能力30トン	1隻	"

ADS 作業母船	500 総トン	1 隻	潜水作業用
潜水艇母船	500 総トン	1 隻	"
ADS		3 組	"
潜水艇		1 隻	"
ワインチ・バージ	3,000 総トン	1 隻	キャスク引揚用
タグ・ボート	5,000 馬力	1 隻	"
交通船	500 総トン	1 隻	陸岸との連絡用
警戒船	500 総トン	2 隻	他船の侵入防止

## 2) 配置

潜水艇により、沈船の状況を調査した後に、ADSが海中にて、作業を行う場所を選定し、その付近にADSの潜航用ガイド・ワイヤー用シンカーを投入する。シンカーの投入位置の誘導、確認は、潜水艇にておこなう。

ADSは、ガイド・ワイヤーに沿って潜り、所定の作業位置に到達する。ADSが用いる作業用機器は全て母船から油圧、または、電力の供給を受けて作動する水中機器なので、それらは、ADSが潜航するときに、ADSに携行させるか、または、潜水艇を使用して、予め、作業現場に輸送、設置しておく。図2.1～7に作業船の配置概要を示した。

## 3) 水中切断

沈船の船倉からキャスクを取り出すには、ハッチ・ボードの解放とキャスクのラッシング解除を行う必要がある。これらの作業は、船体の損傷を考慮しなければ、水中切断法によって可能と思われる。水中切断には、今日酸素 - アーク切断、水中発破、油圧カッター等の装置が用いられている。何れも、水深500m(50気圧)で本質的に作動不可能になる機構は見当たらないので基本的に使用可能と思われる。ただし、酸素 - アーク切断と油圧カッターでは、酸素及び油圧の送気圧を昇圧させたり、水中発破では火薬を耐圧性の容器にいれる等の配慮が必要である。

## 4) 船体切断箇所

船倉からキャスクを取り出す場合には、先に述べたように、ハッチ・ボードの解放とキャスク本体のラッシング解除が主な作業となる。

ハッチ・ボードの解放には、ハッチ・コーミングを全周にわたり水中切断する事が最も基本的な作業法と思われる。ハッチはキャスクから離れているので、水中発破を用いても問題は無いようと思われる。本方法は極めて効率の良い切断法である。

キャスクのラッシングの解除は、キャスク本体または、キャスク及びスキットと船体の床面とのボルト(直径80mm前後)・ナットによる結合を解除すればよい。この場合には、酸素 - アーク切断かもしくは、油圧カッターを用いることになる。切断機の能力は特に問題は無いが、予想されることとは、船倉が狭く、ADSを装着した状態で作業場所まで船内を進入出来るかどうかが問題である。直接進入出来ない場合は、障害物の撤去から作業を開始する事になり、作業工期が著しく延びる事が予想される。

## 5) 台付ワイヤーの取付

キャスクを引き揚げるためにキャスク本体に取り付けるワイヤーを一般に台付ワイヤーと呼ぶ。

キャスクのラッシングが解除されない内に、あらかじめ台付ワイヤーは取り付けておく。さらに、状況によつては、ラッシングが解除されても荷崩れが起きないように代替の固縛を予め考えておく。

#### 6) 吊揚げ回収

台付ワイヤーをキャスクに取つけた後は、支援船上の揚収用ワインチにて除々に海面上に引揚げる。引揚げたキャスクはコンテナ容器の如き専用格納箱におさめ陸岸の処理施設に運搬する。

#### 2.1.4 「日の浦丸」の場合の検討

ADSを用いてキャスク単体を回収する基本的手順について検討して来たが本項では、実際にキャスクを運搬している「日の浦丸」を例にとり、キャスク単体の回収について検討する。

##### (1) ADSと船倉の大きさ

ADSは一種の耐水圧服であるのでその寸法は、通常の潜水士の水中作業時の寸法より大きく、また、その作業性も潜水士よりは劣るが、潜水時間が長く取れるという利点がある。図2.1-8はキャスクが格納されている船倉とADSの相対的大きさ及び寸法を図示したものである。これにより、ADSが船倉内に入りキャスクに接近可能であることが分る。キャスクに接近するために必要な作業は、①ハッチカバーの除去、②キャスクカバーの撤去である。これらは各カバーの止め金具部を水中切断で解除し、カバー本体に台付ワイヤーを取り付け作業船のワインチにてワイヤーを巻き、カバーを船外に撤去する。図2.1-9は船倉内のキャスクの側面図と平面図である。

キャスクは船倉の甲板とキャスクのスキットを介して、スキット止め金具により、船体と固定されている。キャスクを回収するには、このスキット止め金具を解除することになるが、その位置周辺の広さは、図2.1-9より、概略1.5m～2.6mであるので、ADSはスキット止め金具の位置まで到達出来る。

##### (2) キャスク固定金具の撤去と台付ワイヤーの取付け

キャスクは、図2.1-9の上図の如く、スキット上に固定されている。スキットは甲板とスキット止め金具により、片側3ヶ所づつ計6ヶ所で固定されている。また、スキットの四隅はウェッジが差し込まれ、正常姿勢での水平的な移動を防止する機構となっている。

###### ① ウェッジの解除

ウェッジの解除は、図2.1-10の如く、ウェッジの頭部にあるアイピースにウェッジ引抜き用のワイヤーを取り付け、このワイヤーを作業船のワインチにて巻き込み、ウェッジを引き抜く、図の底部のウェッジは、キャスクの自重がかかっているので、その除去は本方法では不可能であり、また、上部ウェッジの除去を行えば、スキットの取り出しが可能と思われるが、底部のウェッジの除去は行わない。従ってウェッジは上部の4ヶの引き抜きを行う。

###### ② スキット止め金具の解除

スキットと船体甲板を固定しているスキット止め金具は、スキットの両側に計6ヶ所あり、キャスク回収時にはこれらを全て解除しなければならない。図2.1-11はスキット止め金具の詳細図である。スキット本体と止め金具は、板厚75mmのフックにて固定されている。フック自体は、フック頭部に差し込まれたピン径75mmΦのボルトにて船体固定部の止め金具と固定されている。従って、スキット止め金具を解除するには、(1)フックのスキット底部の接触部の切断、(2)フックの固定ボルトの解除、の二方法のうちいずれかを行うことになる。いずれの方法も少量の火薬を用いた水中発破を数回行えばボルト又はフックの解除は可能と思われる。

### ③ 台付ワイヤーの取付

スキット止め金具を解除する前に、あらかじめキャスク吊揚げ用ワイヤーを取付ける。キャスク側のワイヤーの取付位置はキャスクの一般運搬用の専用アイピースを利用し、片側2本、両側で計4本のワイヤーを取付ける。

図2.1-1～2はキャスクに台付ワイヤーを取付けた時の図である。台付ワイヤーの一部は船倉の一部と接触することになるので、その部分はあらかじめ、チェンを用いるようにする。

### (3) キャスクの吊揚げ

キャスクに台付ワイヤーを取付けた後に、ウェッジの撤去、スキット止め金具の解除を行うと、キャスクは、図2.1-1～2の如く一度、海底と平行な姿勢で船体側面上に位置する。その後、吊り揚げ用フックをウインチにて巻き揚げれば、キャスクは船倉外に出ると同時に、図2.1-1～4の如く吊り揚がり作業船上に回収される。

#### 2.1.5 結び

ADSを使用してキャスク単体の回収方法について検討した。その結果、キャスクが格納されている船倉の広さやキャスクの配置等が「日の浦丸」程度であれば、ADSが利用出来るとの結論を得た。しかしADSの作業性や水中火薬、水中切断用機器等については今後とも更に調査研究し、より安全で効率的な作業方法を検討する必要があると思われる。



図2.1-1 JIM外観図  
(JANEによる)

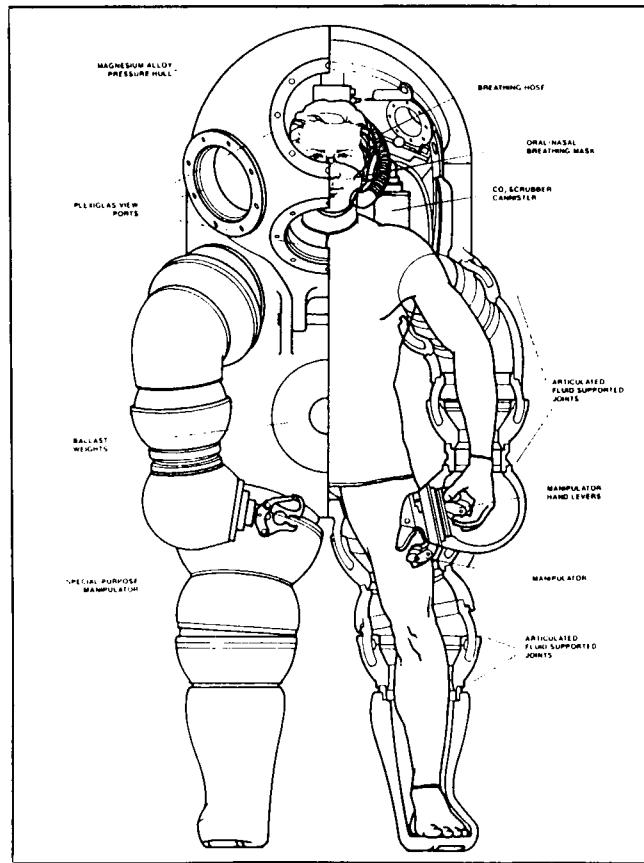


図2.1-2 JIM内外部主要構造

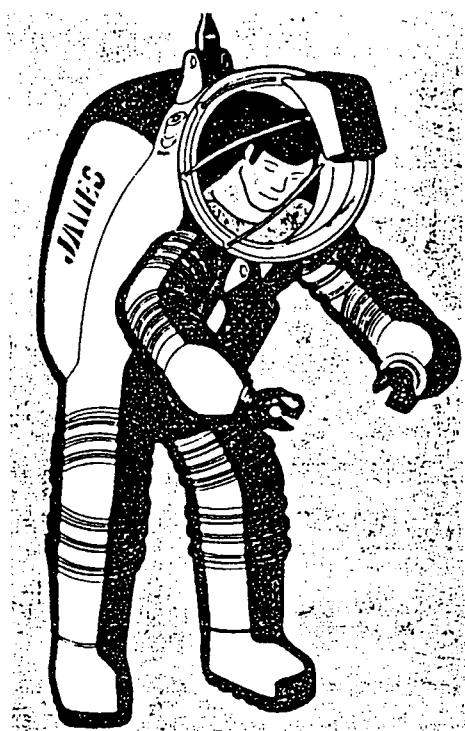


図 2.1-3 JAMES 外観図  
( SLINGSBY ENG による )

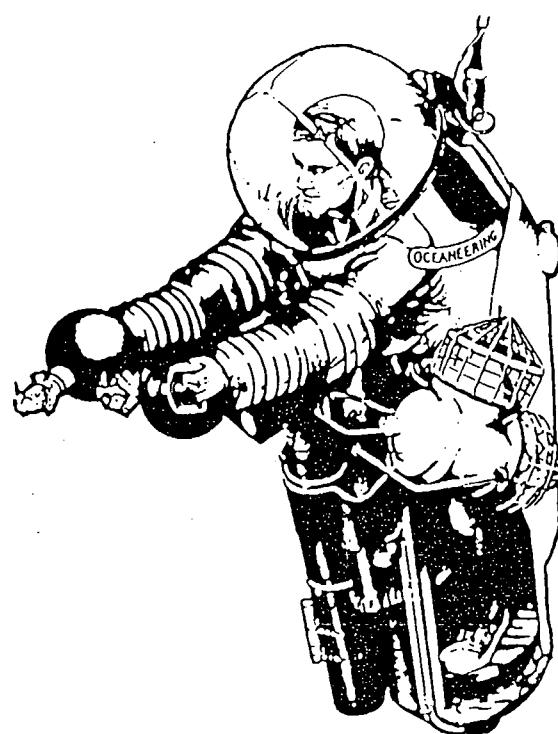


図 2.1-4 WASP 外観図  
( OSEL による )

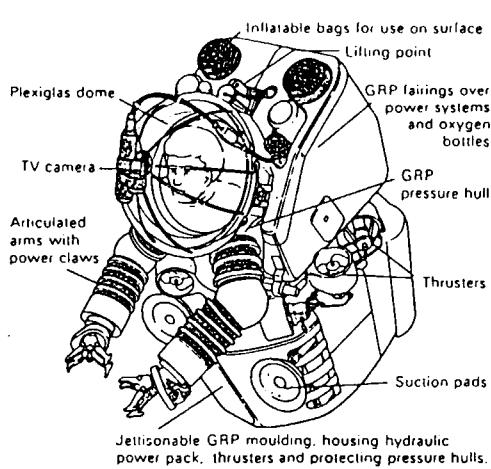


図 2.1-5 SPIDER 外観図  
( SUBMEX による )

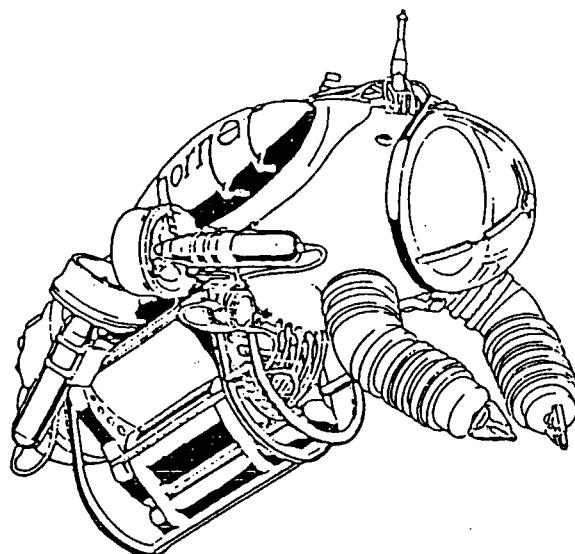


図 2.1-6 HORNET 外観図  
( OSEL による )

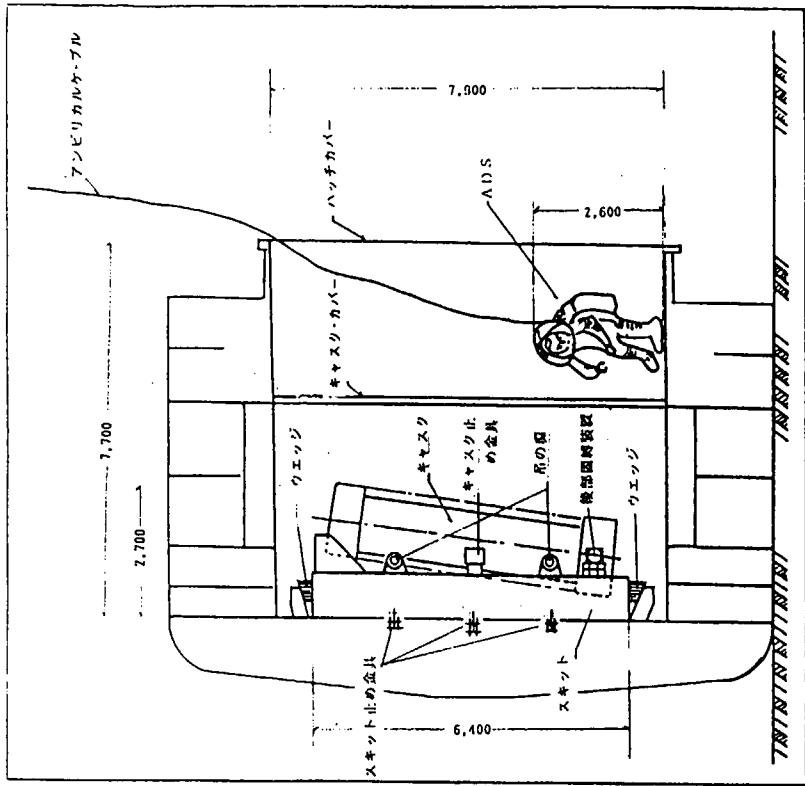


図 2.1-8 キャスクと ADS

表 2.1-1 ADS の種類と主要諸元

No.	ADS	原 元	最大水深處	高さ	最大幅	ライフボート
1	JIM	(ジム)	450m	1.98m	1.07m	72 吨
2	JAMES (ジェームズ)	610m	2.6 m	0.9 m	80 吨	
3	WASP (ワスプ)	610m	2.6 m	0.9 m	86 吨	
4	SPIDER (スパイダー)	610m	2.2 m	1.3 m	80 吨	
5	HORNET (ホーネット)	700m	2.1 m	1.2 m	80 吨	

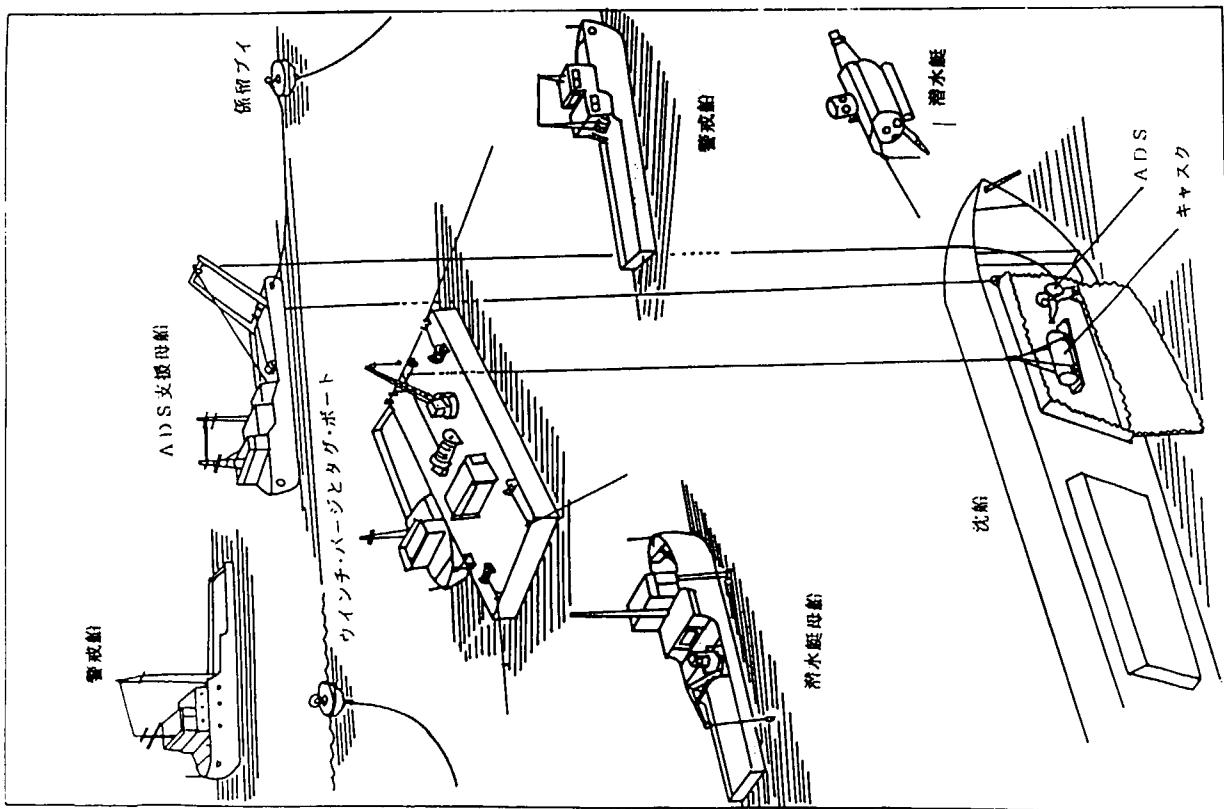


図 2.1-7 作業船の配置図

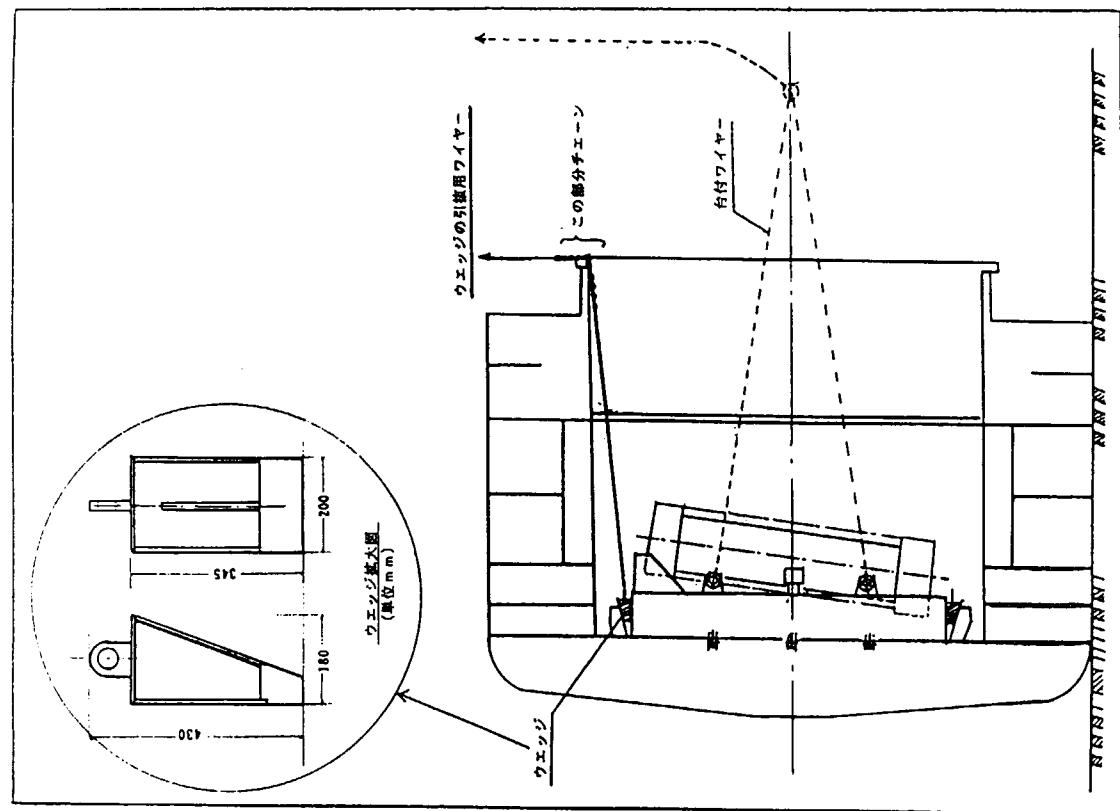


図 2.1-10 ウェッジ引抜きと台付ワイヤの取付

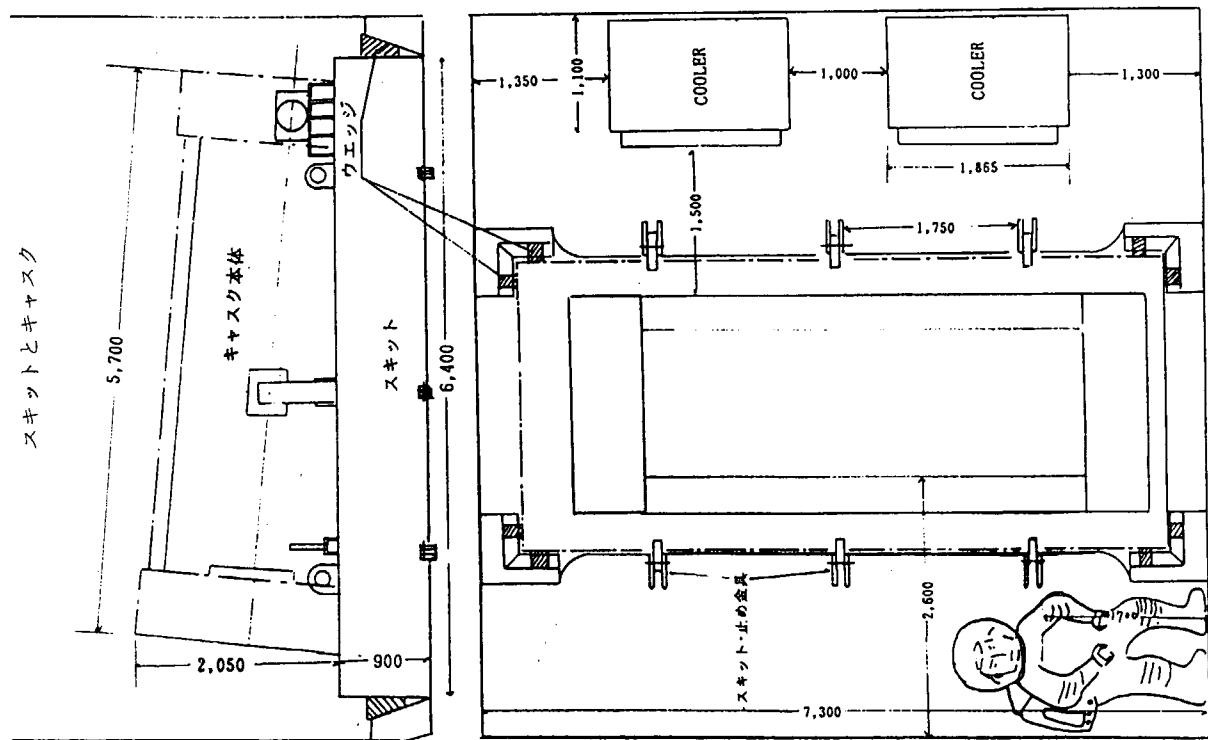


図 2.1-9 船艤内塔載図

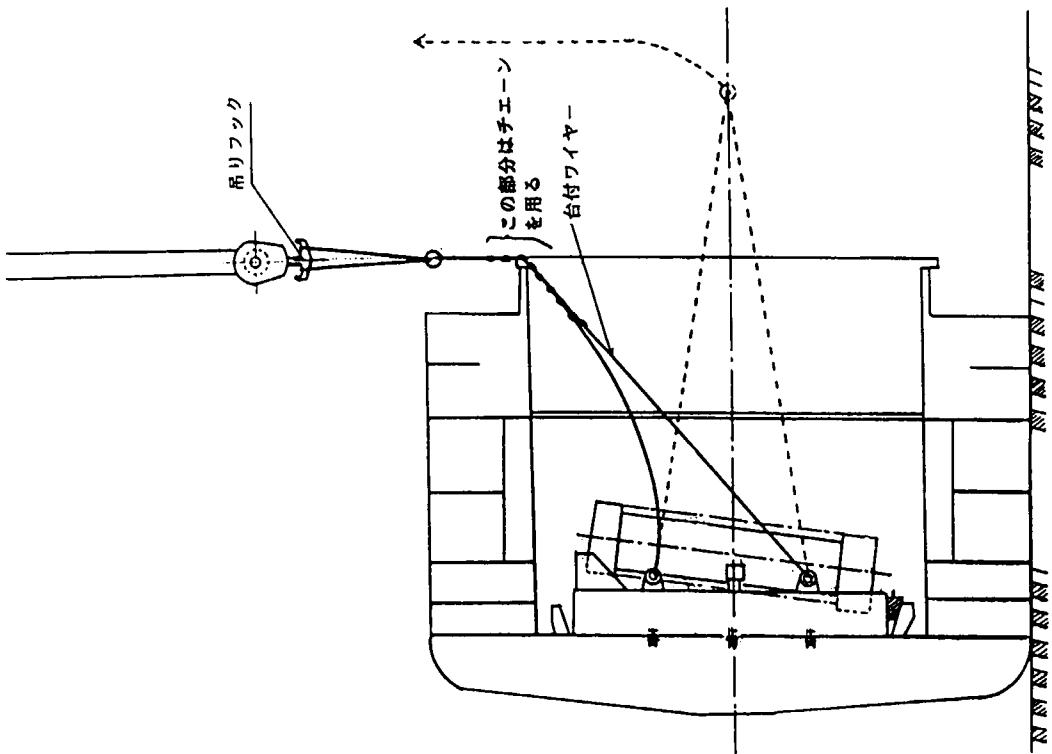


図 2.1-1-2 合付ワイヤーの取付

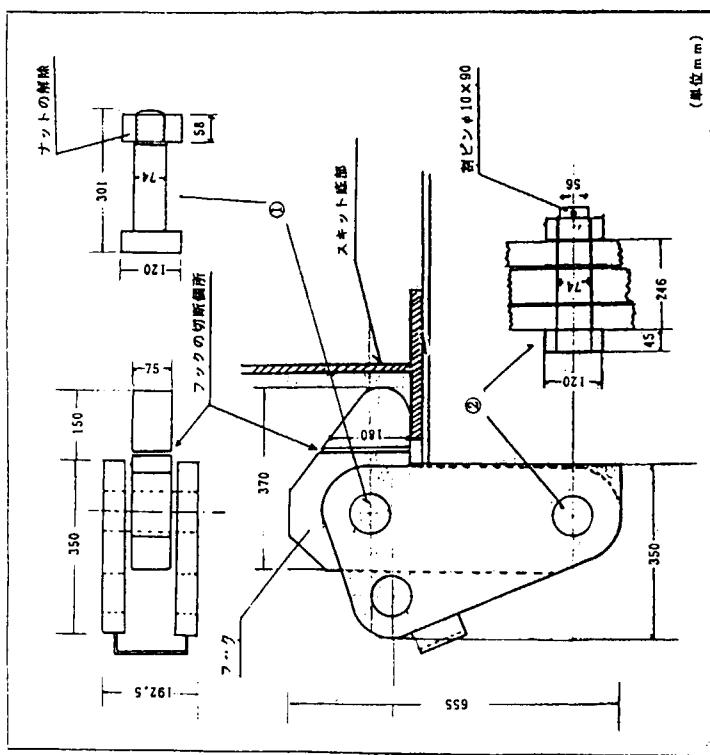


図 2.1-1-1 スキット止め金具の詳細

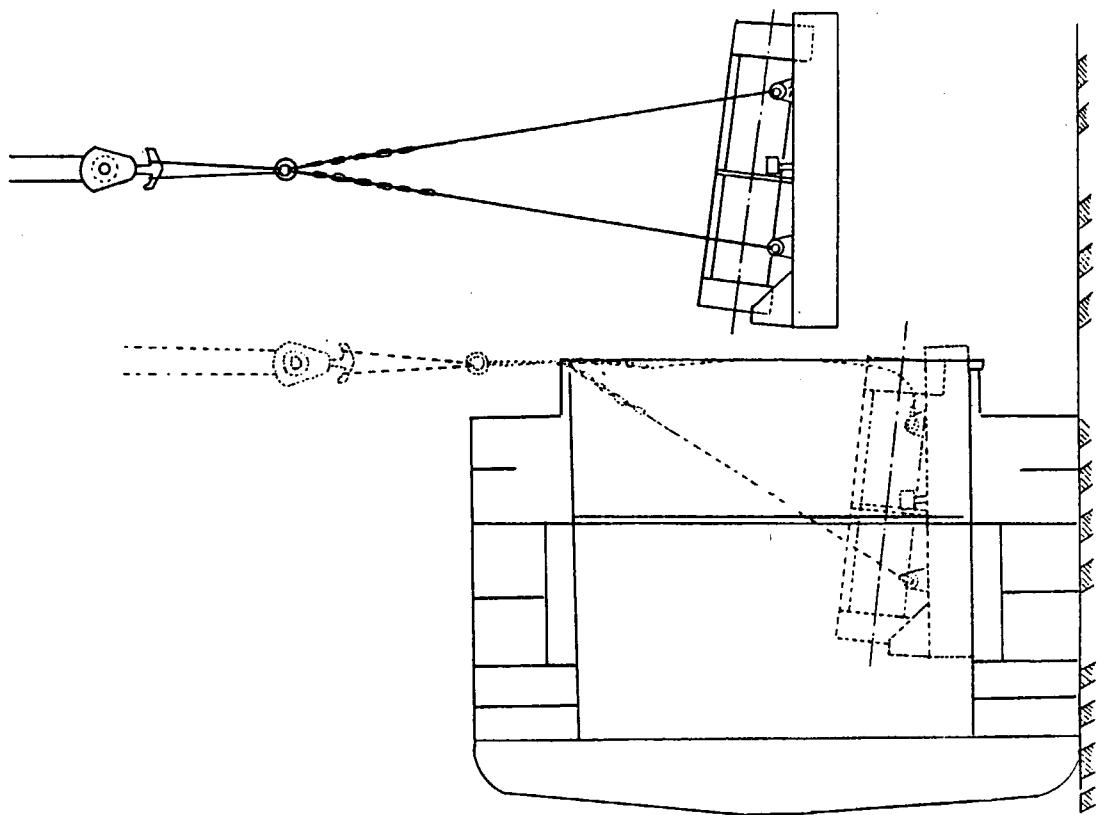


図 2.1-14 キヤスクの引揚

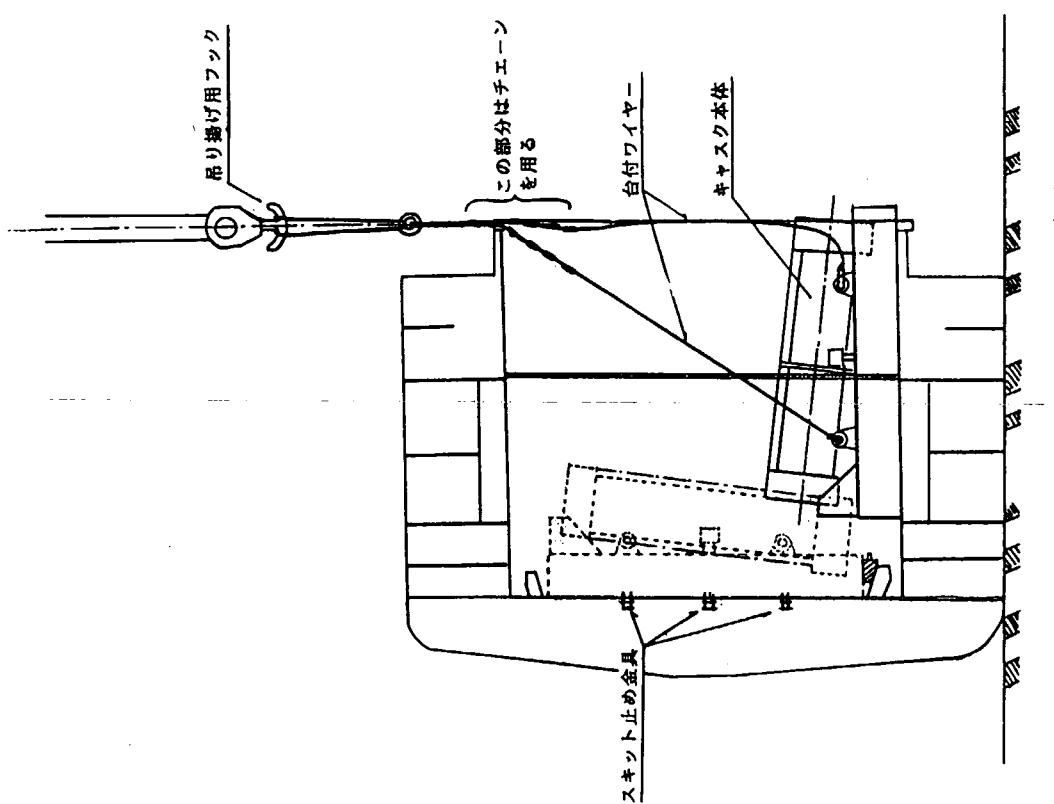


図 2.1-13 スナップ止め金具の解除

## 2.2 水深 500m 以上 2000m 以下の引き揚げ

### 2.2.1 基本概要

#### (1) はじめに

本検討は水深 500m 以上 2,000m 以下に沈没した水中重量 4,000 トンの船舶を引き揚げる場合について検討したものである。水深の点からは勿論の事、重量的に云ってもこのような大深度、大重量のサルベージが行なわれたという実績は、国内外を問わず見あたらない。また、このような検討が行なわれたという記録も無い。但し、水中探査技術は近年、著しく発展し、1985年9月には水深約3,700mに沈没した「タイタニック号」を発見し、その詳細な水中写真やテレビ撮影を、米国では行っており、またこれを受け海外のサルベージ会社がその引揚を計画しているということが報道されている。

ここでは、従来のサルベージ技術を前提にして、主として水中重量 4,000 トンの船体の回収を検討の主体にし、回収システムの一アイディアを提案することにする。

#### (2) 前提条件

検討を行なう上で設定した沈船、積載荷物、沈没状況等の条件は以下の通りである。

##### ① 引揚対象船舶

全 長	;	100m
船 幅	;	16m
深 さ	;	10m
総トン数	;	4,700 トン
満載排水量	;	7,000 トン
載荷重量トン	;	3,700 トン
純トン数	;	2,200 トン
船 型	;	船尾船樓型貨物船
沈船の水中重量	;	4,000 トン(キャスク 20ヶを含む)

##### ② 積載貨物

品 名	;	キャスク
数 量	;	20ヶ
形 状	;	円筒形
寸 法	;	3 m φ × 6 m
重 量	;	100 トン／ヶ(空中重量)

##### ③ 沈没状況

水 深	;	500~2,000m
位 置	;	日本沿海域
沈没原因	;	不明
船体損傷	;	無傷
船首方向	;	ほぼ真西
船体傾斜	;	左舷側に 90 度(横転)
着底状況	;	全面にわたり約 30 cm 埋没

浸水の程度 ; 全面区画浸水  
艤口及び艤内 ; 損傷及び異常なし  
積荷の状況 ; 異常なし  
漏油の状況 ; 船首D.Oタンクより若干の漏油あり  
その他 ; 鎖、錨鎖とも異常なし

④ 作業海域の条件

離岸距離 ; 20マイル  
航行船舶 ; 比較的少ない  
海上視程 ; 10km以上

⑤ 作業海域の気象及び海象条件

a) 海上条件

風 ; ほぼ無風  
気温 ; 25°C前後  
波高 ; 1m未満  
潮流 ; 1.5ノット(最大)未満

b) 海中条件

水温 ; 15°C前後  
水中視程 ; 5m~7m  
潮流 ; 1.5ノット(最大)未満

c) 海底条件

潮流 ; 0.5ノット(最大)未満  
海底面 ; ほぼ平坦  
海底質 ; 砂泥(海底面下3m以上)

(3) 引揚方法の検討

沈船を海底から海面まで引揚げるには、沈船自体に浮力を持たせる方法(自力浮上)と外部から引揚力を与えて引揚げる方法及び両者を併用する方法等がある。一般に通常行なわれているのは、小型船(水中重量3,000トン以下)の場合は起重機船を用いた外部から引揚力を加える方法である。それ以上の場合、又は、起重機船が使用出来ない海域は前者の自力浮上法を用いている。本項では前提条件に従って上記各方法について検討し、最も実現性が期待出来ると思われる方法について提案する事とする。

1) 沈船自体に浮力を与える方法

沈没時に浸水し浮力を失った船内の各区画に対し、浮力となる空気又は浮力材を送り浮力を附加する方法であるが、この方法は、浮力として空気を用いた場合は、該当区画を完全気密にするための水中作業が必要である。水深2,000mでの潜水は現在、深海潜水艇又は無人有索式探査ロボット(ROV)等の船舶・機器はあるが、その作業性は、本作業を行うには全く不可能と思われる。浮力材を空気に代り注入する方法は、空気の場合のような精確な気密作業を必要としないが、その技術的難易性は空気の場合とほぼ同様である。なお浮力材を使用しての検討は前年度の報告書に詳述したので参照されたい。従って本方法は水深2,000mでの潜水作業が確立されていない現況では技術的に不可能に近い。

## 2) 外部から引揚力を加える方法

本方法は前年度検討し報告した通り、引揚力となる起重機船やウインチの能力は現有のものを性能的に向上させれば設備可能であるが、引揚力を伝達するワイヤーを如何に沈船に取つけるかが問題である。引揚索の沈船への取付けは、通常入手可能なワイヤーを考えると使用荷重100トンではその直径は100mm～120mmである。

このワイヤーを使用した場合は沈船の片舷に20本ずつ計40本以上取付ける必要がある。通常の船舶ではこのような荷重を受けられる設備・機構は無いので、水深が浅くダイバー作業が可能な場合は、沈船下の海底面を掘削しトンネルを貫通させ、船体に大廻しにワイヤーを掛ける方法を取る。水深2,000mではこのような作業は先の1)の場合と同様に不可能に近い。

## 3) 併用方法

ダイバー作業が可能な水深では、沈船のバラストタンク+気密にしやすい区域を一部気密にするか、又は、浮力タンクを沈船に取つけ、沈船自体の水中重量を一部軽減して、残りの引揚必要力を起重機船を利用して引揚げる。水深2,000mの場合は、いずれもダイバー作業を必要とするため本方法も用いることは不可能に近い。

従って、いずれの場合も、ダイバー作業を必要とする現在のサルベージ方法では引揚は不可能に近いと云える。

またダイバーの代りとなる程の作業性のある潜水艇は現在見あたらないので、潜水艇を使用して沈船に到達しても引揚作業を進める源動力とはならない。

## (4) 水深2,000mからの引揚方案

以上の結果、2,000mからの沈船の引揚は新たな発想のもとで検討することにした。検討する上で設定した条件は以下の通りである。

### ① 無人方式であること

沈船への引揚索の取付け作業をダイバーを必要としない無人方式とし、海面上の支援船からリモート・コントロールにて行なえること。

### ② 船内内部での作業を必要としない事

船体の船倉内部へ入ることは障害物が多く困難が多いので、基本的に考えないこととした。

### ③ 浮力は開放式の浮力タンクにて与える

浮船自重4,000トンを引揚船のウインチにて直接引揚げるにはウインチの能力と台数が非常に多くなり製作上及び設備上の問題が出てくる。

例えば、直巻能力100トン(現状では超大型の部類)巻取ワイヤー100mm×2,200mmの場合には40台、50トンの場合には80台となる。

### ④ 専用の沈船揚収支援船を用意する

浮力タンクの吊揚、吊降し、海中での誘導、コントロールは専用の沈船揚収支援船により行なう方式とする。

### ⑤ 海中での作業の確認は別途の有人潜水艇を用いることとする。

### ⑥ 沈船は無傷で充分な強度を有している事とする。

以上の前提条件に基づき案出したのが、浮体を沈船の外部に取つけて行なう沈船引揚方式である。

## (5) 作業バージ方式による沈船の引揚方法

本方法は、沈船の外部に浮力調節(0～4,000トン)の出来る浮体を機械的に取付け沈船を引揚げる方法である。

浮体は沈船の長さ、巾に合せた箱型の形状であること、また水中で沈船を保持する機構を有する所から、その名

称を「作業バージ」とすることにした。

### 1) 引揚浮力

沈船の水中重量4,000トンに対抗しうる浮力を発生させるには、沈船の長さに合せた箱型の台船型の浮力タンクを使用し、海面から沈船までは浮力タンク内を注水して浮力を無くし、これを母船上のウインチで吊降す。

沈船の横転時の長さと巾に合せた場合の概略寸法と浮力は図2.2.1-1の如くなる。深さは $4,000 \div (100 \times 16)$ = 2.5m程度であり、沈船引揚用浮力、作業バージ自体の水中重量をコントロールする浮力等に対して、充分な余裕を持つ。

### 2) 引揚索の取つけ方法

上記で発生させた浮力を沈船に持たせるには、作業バージを船体に取つける必要がある。従来、この作業は、沈船が海底と接触している海底部を掘削し、台付ワイヤーを船体に大廻しに取付けるが、水深2,000mではダイバー作業は行なえないので、この作業は作業バージに取つけた沈船保持用アームにて、図2.2.1-2の如く機械的に取つける機構とする。この場合、沈船を二点で支持するので船体の強度について別途検討する必要がある。

( 2.2.4 項参照 )

### 3) その他の主要設備

本作業バージを沈船に取つけ、沈船を海面近くまで引揚げるに必要な基本的所要設備について概説する。

#### ① 注排水設備

作業バージの沈降・浮揚には、作業バージの充気区画への注水及び排水のための送気(充気)が必要である。

沈降時には充気区画にある空気を海水の注水により排気し、作業バージ自体の自重にて沈降させる。沈降速度は作業バージの支援母船のウインチにてコントロールする。図2.2.1-3は作業バージの沈降・引揚時の注排水の状況を示したものである。図2.2.1-4は作業バージの浮力調整の過程を示した。

#### ② 着底用脚

沈船保持アームで作業バージを保持するには、アームを複数回作動させ、沈船の船底下に差しこむことになる。この作業を安定した状態で行うには、作業バージを一度、アームの沈船の最適位置に誘導し、着底させるための脚が必要となる。脚の形状は概略図2.2.1-5の如くなるものと思われる。

#### ③ 作業バージの誘導

沈船位置に、作業バージを海上の作業バージ支援母船より吊り降すためには、支援母船側で作業バージの水深及び沈船との相対位置を正確に把握する必要がある。このため、ポジショニング装置として音響測位システムを利用する。即ち、超音波発信体であるトランスポンダーを図2.2.1-6の如く、作業バージと沈船もしくは附近の海底上の適当な位置にそれぞれ設置する。トランスポンダーの設置作業は潜水艇にて行なう。これらトランスポンダーの受信は支援母船側で行ない、モニターTVの画面に沈船、作業バージの各々のトランスポンダーの相対位置を表示させ、これより支援母船、作業バージの位置制御を行なう。

#### ④ 卷揚げ用ウインチ

沈船の自重より作業バージの充気区画、即ち浮力を大きくすれば、卷揚げウインチを使用せず、沈船を保持したまま作業バージを海面まで自力で浮上させることが出来るが、この場合は、浮上速度の調節が出来ない。

また作業バージが浮上中の姿勢・運動方向も予測が困難であり、海面上のどの位置に浮上するかは成り行きとなるため、極めて危険である。従って、本ウインチを使用して吊揚げるようあらかじめ浮力は巻き揚げウインチの能力を考慮してその容量を決める。

##### (5) モニタリング装置

作業バージの水中での傾斜は、アームの作動、注水、排水、排気等の状況、ワイヤーやアンピリカルケーブルの状況等を監視する水中TV、各種センサー等を作業バージの各所に設置しておく。

##### (6) システム構成と操作手順

作業バージ方式による沈船の引揚システムを構成する所要設備は概ね表2.2.1-1の如くなる。

また、システム構成の概要は図2.2.1-7にまとめた。

引揚作業の手順は次の如く想定した。

###### 引揚げ作業

###### 1. 作業母船の回航

引揚用作業母船（作業バージ）を作業海域に回航する。

###### 2. 音響測位装置（発信器）の設置

有人潜水艇により音響測位装置の発信器、ビンガー或いはビーコンを、沈船の船首、船尾及び浮カタンク設置位置に取り付ける。

###### 3. 作業母船の位置設定

海上作業母船は、ダイナミック・ポジショニング方式により作業海域の所定位置を決定し、その位置を保持する。

###### 4. 作業バージの設置

作業母船内作業バージに注水して、マイナス浮力（500トン程度）とし、作業母船上の各ウインチを作動させ、浮力バージを徐々に吊り下げる。

音響測位装置の位置解析結果により、作業バージの位置微調整を行ないつつ、沈船上に作業バージの脚が沈船をはさみ込むような形にて、海底に着底させ設置する。

###### 5. 沈船引揚げ用アームの作動、固定

作業バージに取付けてある沈船引揚げ用アームを、油圧装置により徐々に降ろし、アーム下部に取り付けてある高圧ジェット装置を使用して海底面を掘削しつつ、アームを沈船船体下部まで入れ込み固定させる。

###### 6. 引揚げ作業

作業バージの各区画にバランスを考慮しながら空気を充填し、浮力が3,500トン程度になった後、母船上の引揚げ用ウインチを巻き込む。（ウインチの巻揚力は合計500トン）

その後、沈没船が海底を離れるまで注意深く空気を充填、その負荷に応じて引揚げ用ウインチを作動させる。沈没船が海底を離れた後、作業バージの浮力を3,500トンに保持した状態で、母船上ウインチを巻き、徐々に母船近くまで揚収する。

###### 7. 戻 航

沈没船を水面近くまで引揚げ、作業バージを作業母船内に揚収し、沈没船の振れ止め等、ラッシングを行なって固定した後、水深20m程度の浅い水深で比較的平らな海底で、沈船の巻き起し作業等ができる作業海域まで曳航する。

###### 8. 巻き起し作業

曳航後、沈没船を海底に仮置きした後、作業母船、作業バージを離す。

起重機船を使用して、沈船を回転させるのに必要な偶力を与えることにより、正立状態まで約90度回転

させ沈船を正立させる。

#### 9. 荷取り作業

起重機船にてキャスク 100トン／個×20個を揚収し、他の運搬船に搭載し安全所定港まで運搬する。

この場合のキャスク揚収作業に必要な潜水作業は、潜水士が直接海水に潜水することにより実施する。

沈船が比較的容易に防水及び排水することにより浮力を回復することができれば、自力で浮揚させ応急の防水処置を行ない、安全港まで曳航した後、岸壁にて荷取り作業を実施する。

図 2.2.1-8 はこの手順の概要図である。

#### (7) 結び

水深 2,000mから水中重量 4,000トンの沈船を引揚げる一手法として、沈船保持用アーム及び調整可能な浮力機構を有する「作業バージ」を主体としたサルベージ方法を提案した。沈船引揚用専用設備として全く新たな構想に基づくものである。

沈船の探索や調査の点から云えば、今日、水深 2,000mは現有の深海探査技術や潜水艇で充分対応出来るものと思われる。しかし、水中重量 4,000トンの沈船の引揚げは、現行のサルベージ方法を踏襲した場合には、潜水作業の点で難点が多く、今日では不可能に近い。今回の「作業バージ方式」を起案するにいたったのもこの理由による。

一方、深海での海中作業機器は、マンガンノジュールや熱水鉱床と云った深海鉱物資源の開発に伴い、研究・開発が進んでいる。従ってこれらの研究とあいまって深海サルベージに転用・利用出来る機器もあらわれ、サルベージ技術も今後、一層進展するものと思われる。また、今回の検討が沈船側に沈船時の引揚げに対する対策が皆無との前提で進めたが、今後はこの点も検討する余地があるものと思われる。

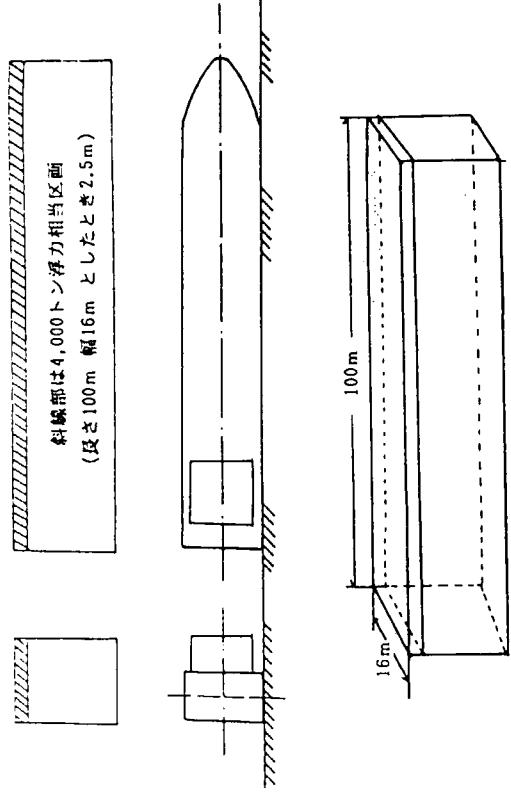


図 2.2.1-1 作業バージ基本外形図

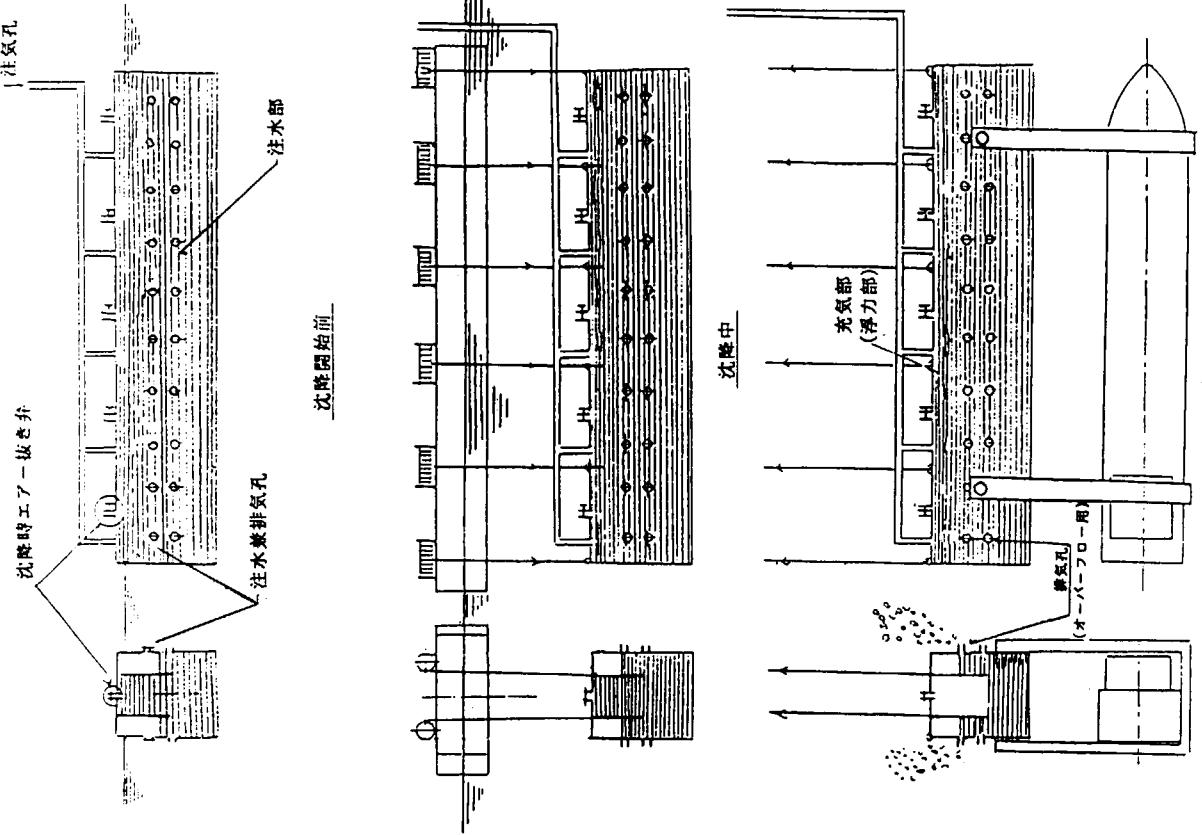


図 2.2.1-3 浮力バージの注排水状況

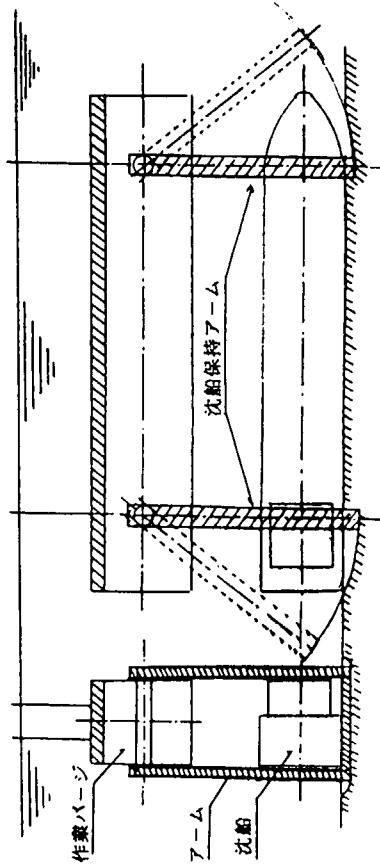


図 2.2.1-2 沈船保持アーム

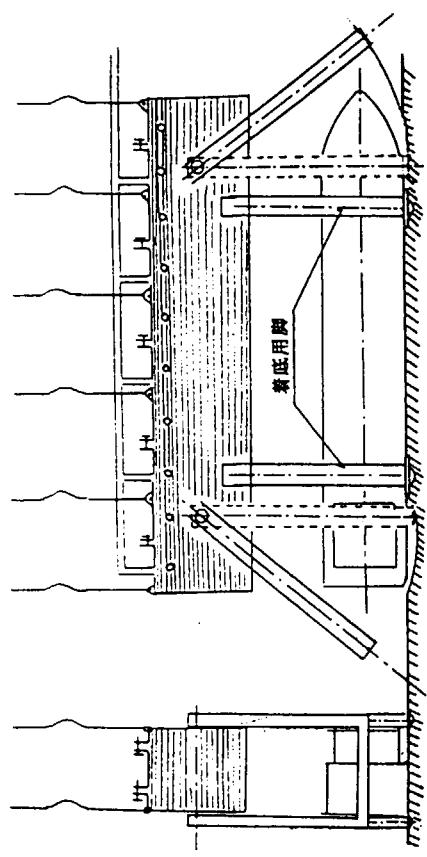


図 2.2.1-5 作業バージ着底状況

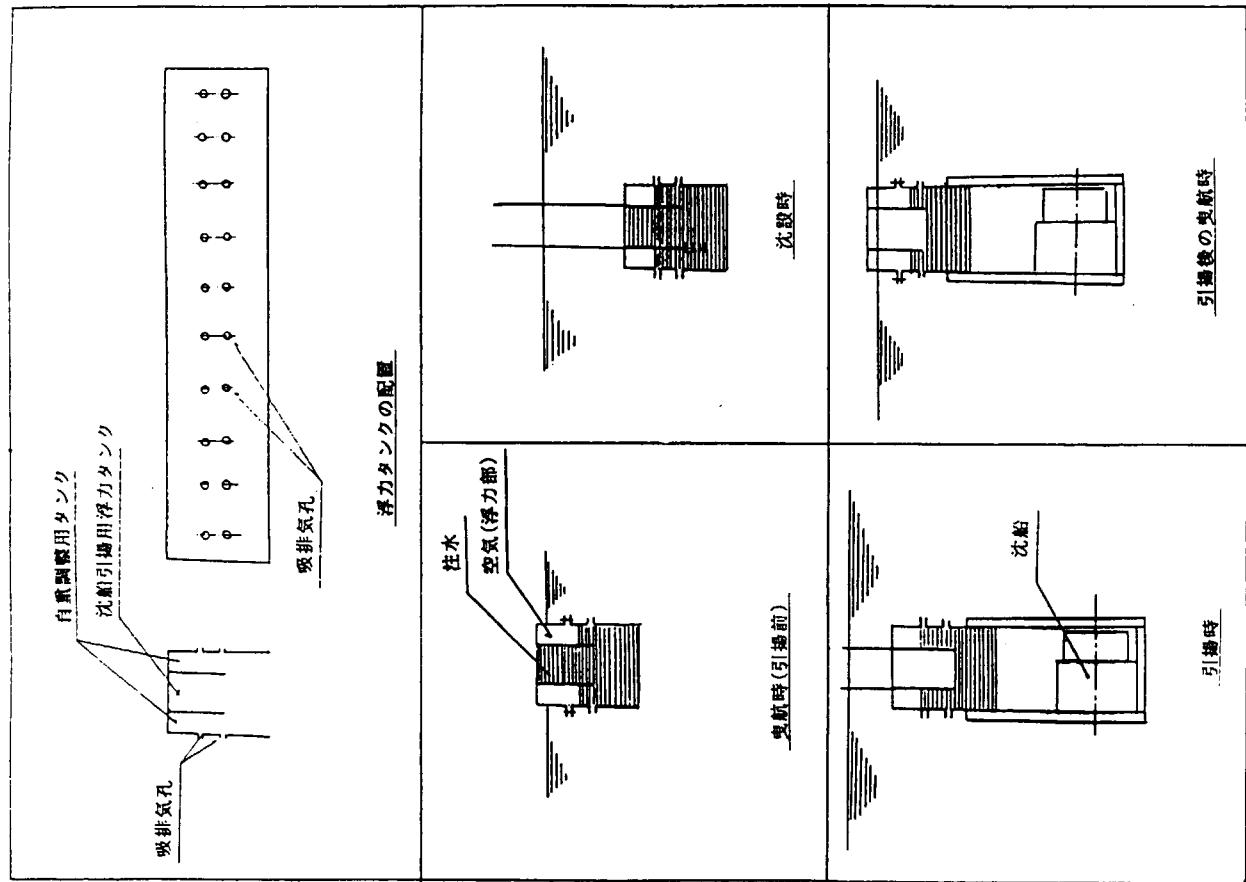


図 2.2.1-4 浮力の調整

表2.2.1-1 沈船引揚システムの構成

作業母船	全長 船舶深さ 引揚用ワインチ 居住設備 音響測位装置 スラスター 高圧空気圧縮機	160 m 50 m 10 m 200トン巻×8台 約30名 位置確認用 8基（前後左右の姿勢制御） 浮力附加用（300気圧以上）
工作船	全長 船舶深さ 沈船保持アーム 着底用脚 水中照明装置 音響測位装置 揚取アイブレット 注水、排気装置 モニタリング装置	100 m 30 m 10 m 門型×2対（掘削装置付） 30 m×4本 沈船周辺の照明用 位置誘導用 100トン/ケ×8ヶ所 浮力コントロール用 各部作動部のチェック用

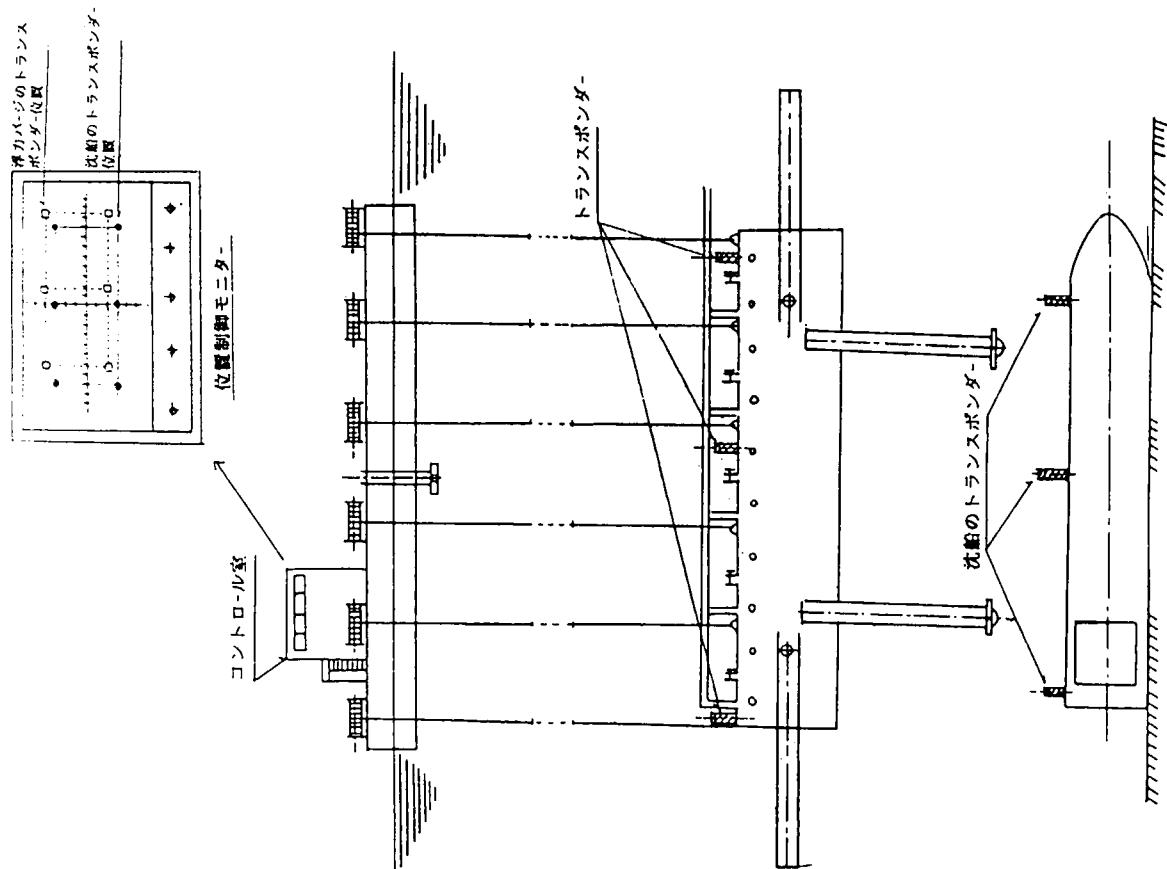


図2.2.1-6 浮力バーの誘導

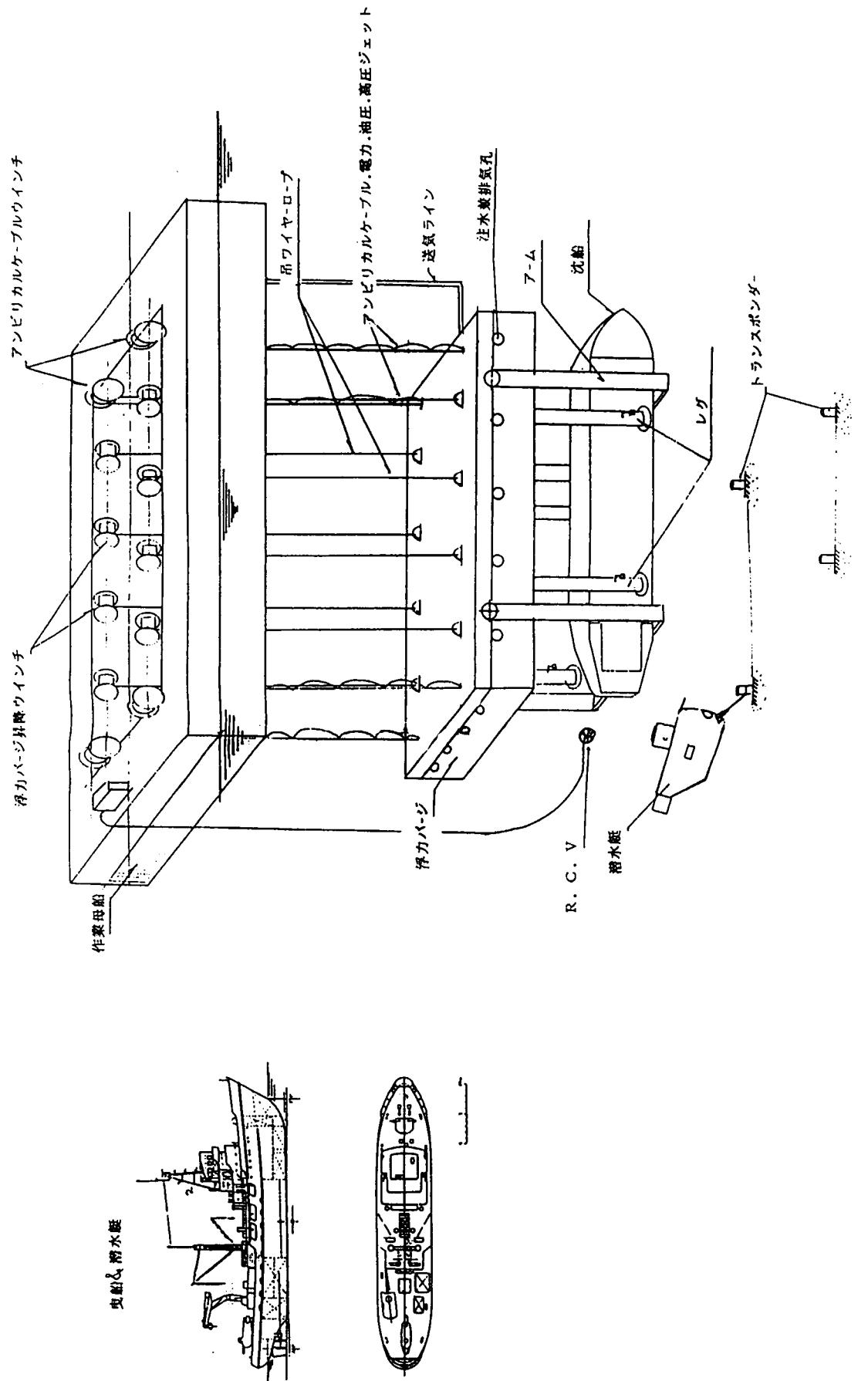


图 2.2.1-7 沈船引揚作業基本構成図

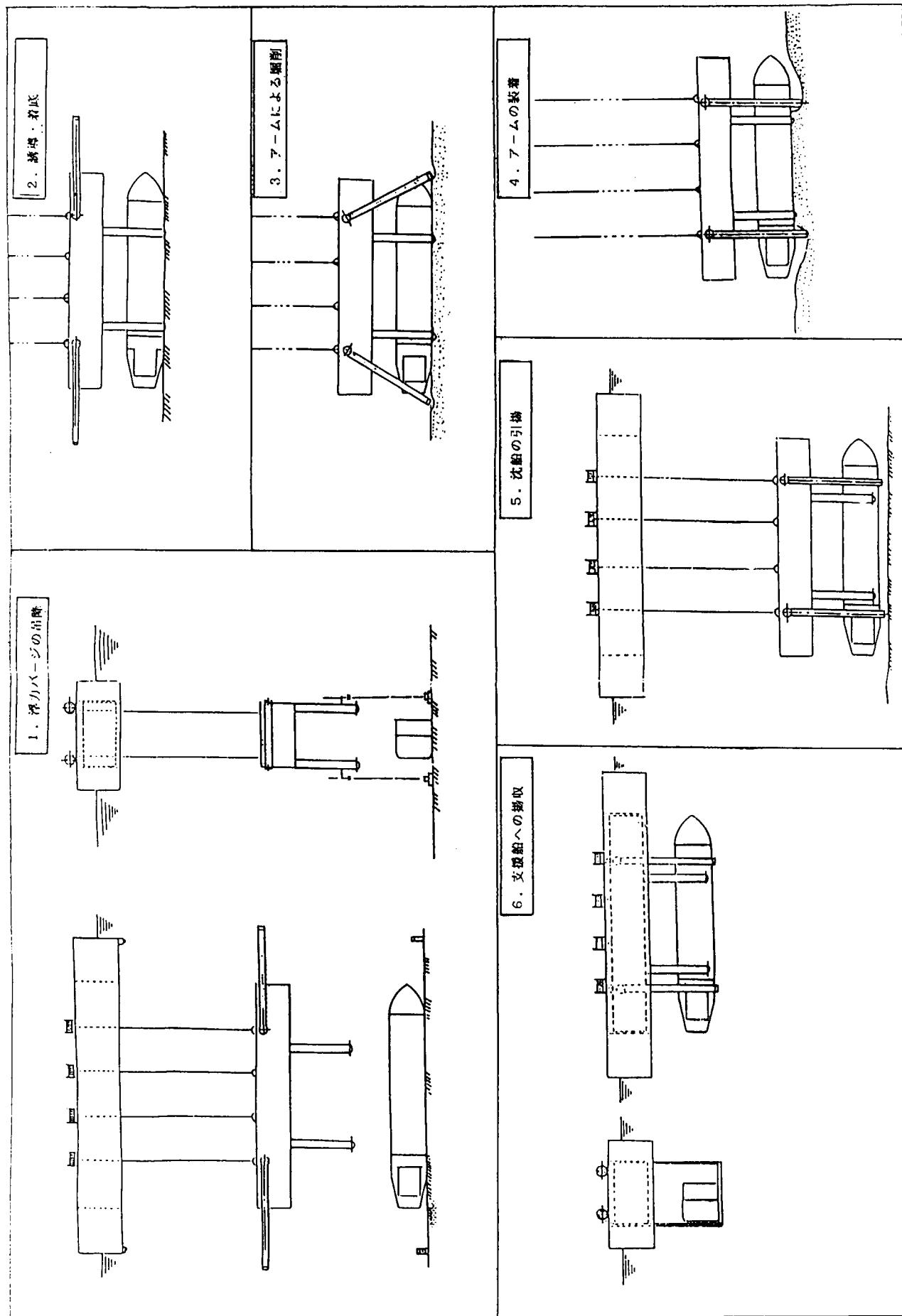


図 2.2.1-8 沈船引揚の手順概要図

## 2.2.2 作業母船

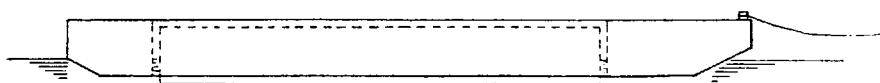
### (1) 基本的機能

- 1) 作業バージを海底に降下させるとともに、沈船と作業バージを海上に吊り揚げる。
- 2) 沈船回収作業に必要な動力等を作業バージへ供給する。
- 3) 前記の一連の作業中、作業の監視・指令センターとなる。
- 4) 作業バージの現地への回航時及び沈船と作業バージの帰港時に被曳航体全体の母船となる。

### (2) 作業条件の検討

#### 1) 現地への回航時

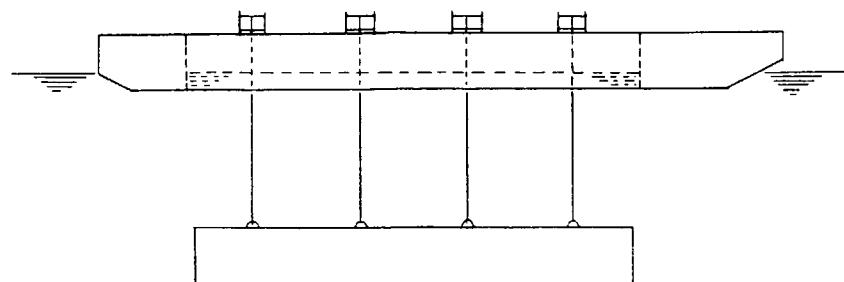
作業バージの重量はすべて作業バージ自身の浮力でもつとし、作業母船は作業バージを中心部の開口部位置に浮かべた状態でタグにより曳航される。



#### 2) 作業バージの降下時

現地での作業バージの降下は作業バージに海水を注入して吊下げ荷重が500トン程度になるようにし、8本のワイヤーロープで吊りながらワイヤーロープをゆるめて降下させる。

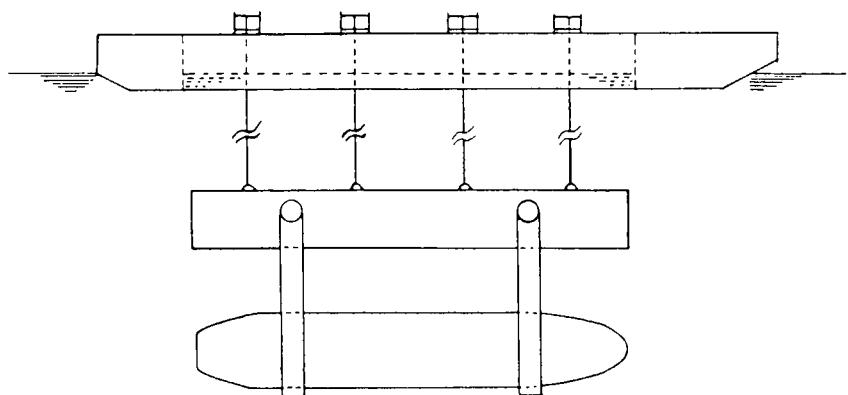
作業バージのタンク部へは降下中の水深に見合ったタンク内圧になるよう母船から圧縮空気を送りこむ。



#### 3) 沈船引き揚げ時

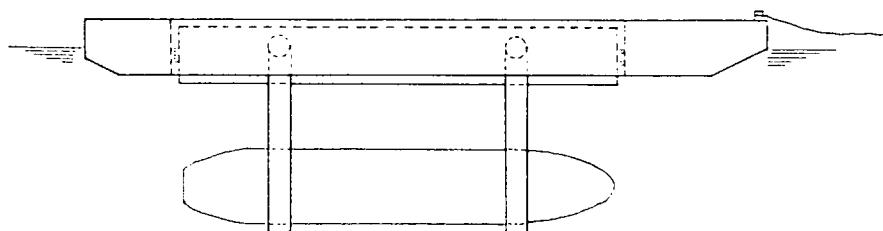
沈船の水中重量に見合った浮力を作業バージに発生するよう作業バージの海水を排水し、母船に働く吊り下げ荷重を約500トンとする。8本のワイヤーロープを巻きこみながら沈船+作業バージを上昇させる。その際作業バージの浮力タンクの内圧が水深に応じた水圧とバランスするよう、母船から圧縮空気を調節して送りこむ。

作業バージの上面が海面に達したら作業バージの海水を更に排水して作業バージの浮力で浮くようにし、できるだけ吃水が小さくなるまで浮上させる。



#### 4) 帰港時

作業バージは沈船を収納しているため回航時よりも吃水が増加している。そのため作業母船にバラストを注入して吃水を増加させ、作業バージと母船の相対的位置関係を曳航に適したものに調節する。その状態でタグにより曳航する。



#### (3) 主要目的検討

##### 1) 主要寸法

$$L \times B \times D = 155\text{M} \times 50\text{M} \times 10\text{M}$$

吃水  $d$  = (回航時及び沈船揚収作業時) 約 3.0 M

(帰港時) 約 4.5 M

##### 2) 重量

船殻	5,700 トン
----	----------

##### 機器

引揚げ用ウインチ及びリール	各 8 本	800 トン
---------------	-------	--------

同上用ワイヤロープ $100\text{mm} \phi$	2200 M 長	8 本	800
-------------------------------	----------	-----	-----

アンピリカルケーブルウインチ	2 台	200
----------------	-----	-----

アンピリカルケーブル		400
------------	--	-----

サイドスラスター	8 台	400
----------	-----	-----

その他(居住設備, 発電機, 油圧ポンプ, バラストポンプ,

ジェットポンプ, 空気圧縮機, 甲板機械, 係留金物,

制御装置, その他)	2,000
------------	-------

機器重量	計	4,600 トン
------	---	----------

燃料, 水, コンスタント	1,000
バラスト その他	500
合 計 重 量	11,800トン

### 3) 概略配置図

作業母船の概略配置図を図 2.2.2-1 に示す。

### (4) 構造強度の概略検討

#### 1) 中央横断面図

中央横断面図を図 2.2.2-2 に示す。

#### 2) 中央横断面断面係数

$$\text{部材断面積} \quad A = 7,065.4 \times 2 = 14,131 \text{ cm}^2$$

$$\text{断面2次モーメント} \quad I = 126,071 \times 2 = 252,143 \text{ cm}^4 \cdot \text{m}^2$$

$$\text{断面係数} (Z = I / Y)$$

$$\text{上甲板} : Z_D = 252,143 / 4,987 = 50,560 \text{ cm} \cdot \text{m}$$

$$(= 5.06 \times 10^6 \text{ cm}^3)$$

$$\text{船 底} : Z_B = 252,143 / 5,013 = 50,298 \text{ cm} \cdot \text{m}$$

$$(= 5.03 \times 10^6 \text{ cm}^3)$$

#### 3) 縦 強 度

##### (a) 縦曲げ応力

- 縦曲げ許容応力を次のように仮定する。

$$\text{平水中: } \sigma_{all} = 8.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{波浪中: } \sigma_{all} = 16.0 \text{ kg/cm}^2$$

- 最大縦曲げモーメントは次のようにになる。

$$\text{平水中: } M_{max} B M_t = \text{約 } 19,500 \text{ t-m}$$

$$\text{波浪中: } M_{max} B M_t = \text{約 } 80,000 \text{ t-m}$$

( 波高 3.5 m, 波長 140 m, Sagging Wave の時 )

- 中央横断面係数 (Z)

$$\text{上甲板} : Z_D = 5.06 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

$$\text{船 底} : Z_B = 5.03 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

- 縦曲げ応力

$$\sigma_w = B M_t / Z (\text{kg/cm}^2)$$

	縦曲げ応力		許容応力
	上甲板	船底	
平水中	3.9	3.9	8.0
波浪中	15.8	15.9	16.0

(b) 剪断応力

- 剪断許容応力を次のように仮定する。

$$\text{平水中} : \tau_{all} = 4.6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{波浪中} : \tau_{all} = 9.2 \text{ kg/mm}^2$$

- 最大剪断力は次のようになる。

$$\text{平水中} : S.F = \text{約 } 590 \text{ ton}$$

$$\text{波浪中} : S.F = \text{約 } 1,850 \text{ ton}$$

- 有効断面積

船側外板のみ有効とする(深さ: 10.0m, 板厚: 11.0mm)。

$$a = 4,400 \text{ cm}^2 (\text{両舷分})$$

- 剪断応力

$$\tau_w = S.F / a (\text{kg/mm}^2)$$

	剪断応力	許容応力
平水中	1.34	4.6
波浪中	4.20	9.2

4) 振り強度

本検討は平水中での沈船引き揚げ時を対象とする。

(a) 荷重(ワインチ1ヶ所当り)

沈船荷重+ワイヤーロープ自重とし, 200tとする。

(b) 最大振りモーメント

$$M_{max} \cdot M_t = 200 \text{ t} \times 9 \text{ m} \times 2 = 3,600 \text{ t-m}$$

荷重の作用点および回転中心を図2.2.2-3に示す。

(c) 剪断応力

$$\tau = T / 2 A t$$

T : 振りモーメント

$$A : \text{断面積} (= 10.0 \times 10^5 \text{ cm}^2)$$

t : 板厚

	振りモーメント(t-m)	板厚(mm)	剪断応力(kg/mm <sup>2</sup> )
上甲板		18.5	1.0
船側	3,600	11.0	1.6
船底		15.5	1.2

(d) 平水中での沈船引き揚げ時座屈強度

検討箇所は、沈船引き揚げ時最大振りモーメントが生じる箇所とする。なお、平水中では船底側は引張り応力が生じるが、圧縮応力として同時に検討を行なう。

(イ) 沈船引き揚時発生応力(平水時)

	平 水 中		捩りモーメント による剪断応力	沈 船 引 き 揚 時	
	圧縮応力	剪断応力		圧縮応力	剪断応力
上甲板	3.9	—	1.0	3.9	1.0
船 側	3.9	1.3	1.6	3.9	2.9
船 底	3.9	—	1.2	3.9	1.2

(ロ) 組合せ応力に対する検討

平水中での縦曲げモーメントによる圧縮応力を基とし、沈船引き揚げ時に発生する捩りモーメントによる座屈強度を検討する。

$\sigma_{cr}^*$ ,  $\tau_{cr}^*$  : 単独に作用する時の許容座屈応力

$\sigma_{cr}$  : 組合せ応力時の発生応力

$\tau_{cr}$  : 組合せ応力時の許容剪断応力

組合せ応力下での許容剪断応力は、次のようになる。

	圧縮応力比	剪断座屈降下率	許容剪断応力	単位: 応力 (kg/mm²)				
				$\sigma_{cr}/\sigma_{cr}^*$	$\alpha$	$\tau_{cr} = \alpha \times \tau_{cr}^*$	沈船引き揚げ 時の剪断応力	安 全 率 (S.F.)
上甲板	$3.9/8.0=0.488$						1.0	3.4
船 側	$3.9/8.0=0.488$						2.9	1.2
船 底	$3.9/8.0=0.488$						1.2	2.8

5) まとめ

作業母船の平水時沈船引き揚げに対する強度検討の結果、沈船引き揚げ荷重に対し最大捩りモーメントが生じる箇所において、最大剪断応力は上甲板  $\tau = 1.0 \text{ kg/mm}^2$ 、船底  $\tau = 1.2 \text{ kg/mm}^2$ 、また、船側外板  $\tau = 1.6 \text{ kg/mm}^2$  程度しか生じない。

船側外板に対し、平水時での剪断応力  $\tau_w = 1.3 \text{ kg/mm}^2$  を加えた時には、 $\tau_w = 2.9 \text{ kg/mm}^2$  となり、圧縮と剪断が同時に作用した場合の許容剪断応力  $\sigma_{all} = 3.4 \text{ kg/mm}^2$  に對し、安全率 S.F. = 1.2 となる。

また、上甲板、船底に対しては安全率 S.F. = 2.8 以上である。したがって、平水中での沈船引き揚げ時に對して、図 2.2.2-2 に示した中央横断面構造は十分な強度を有している。

(5) 主要機器の検討

1) 引揚げ用ウインチ

作業母船甲板上には、図 2.2.2-4 に示す引揚げ用ウインチを設置する。

主要目を下記に示す。

設置台数 8 台

引揚げ最大荷重 約 200t/台

ワイヤーロープ容量

100φ×2,200m

機器重量

約100t/台

引揚げ用ウインチは、トーウィングウインチ及びリールウインチより構成される。作業バージ、ワイヤーロープの重量は、トーウィングウインチが負担する。リールウインチは引揚げられたワイヤーロープを単にリールに巻き取るのみの機能を有する。

## 2) アンビリカルケーブルウインチ

作業母船甲板上、船、舵の2箇所に、図2.2.2-1に示すようなアンビリカルケーブルウインチを設置する。

アンビリカルケーブルは、下記より構成される。

圧縮空気用高圧ホース

電力ケーブル

計装用ケーブル

油圧用ホース

これら、ホース、ケーブルは一体化され、テンションメンバーである鉄線がい装等により被覆される。ケーブル、ホースの間隙には、浮力材としての機能を持つ、充填材を挿入する。

アンビリカルケーブルの重量を、浮力とほぼつり合うように設計することによりトーウィングウインチを省略している。

## 3) サイドスラスター

作業母船の位置制御を行うため、前、後及び左右の船体部に計8基のサイドスラスターを設置する。

## 4) 伸縮式フェンダー

作業バージの回航時においては、作業バージは作業母船内に収納される。この場合、作業バージの保持は、強固な取付金物等により作業母船と一体化することは避け、作業母船内側に設けた伸縮式フェンダーによるものとした。

伸縮式フェンダーの配置を図2.2.2-1に、構造の概念を図2.2.2-5に示す。

## (6) 今後の検討課題

技術課題の検討においては、作業母船、作業バージ、沈船探索機器等の一連のシステムを対象として考察する必要があるが、ここでは作業母船に限定して記述する。

- 1) 引揚げ用ウインチは、引揚げ物重量、ワイヤーロープ自重より200t容量×8台としたため過大な設備となっている。これを、作業バージの浮力を増加する等によりコンパクトな設備とする必要がある。
- 2) 作業母船が作業バージを引込んだ状態においては、作業バージの回収アームを水平に格納することはできない。従って、水深が浅い所では出入ができるないので、これを改良する必要がある。
- 3) 本船には、位置制御用に8基のサイドスラスターを設置しているが、2000mの深海で作業する作業バージに対して最適な位置を確保するためには、高度な技術が要求される。従って、この仕様を満す、D.P.S.を開発する必要がある。
- 4) (5) 2)に記述した機能を有するアンビリカルケーブルの開発が必要である。

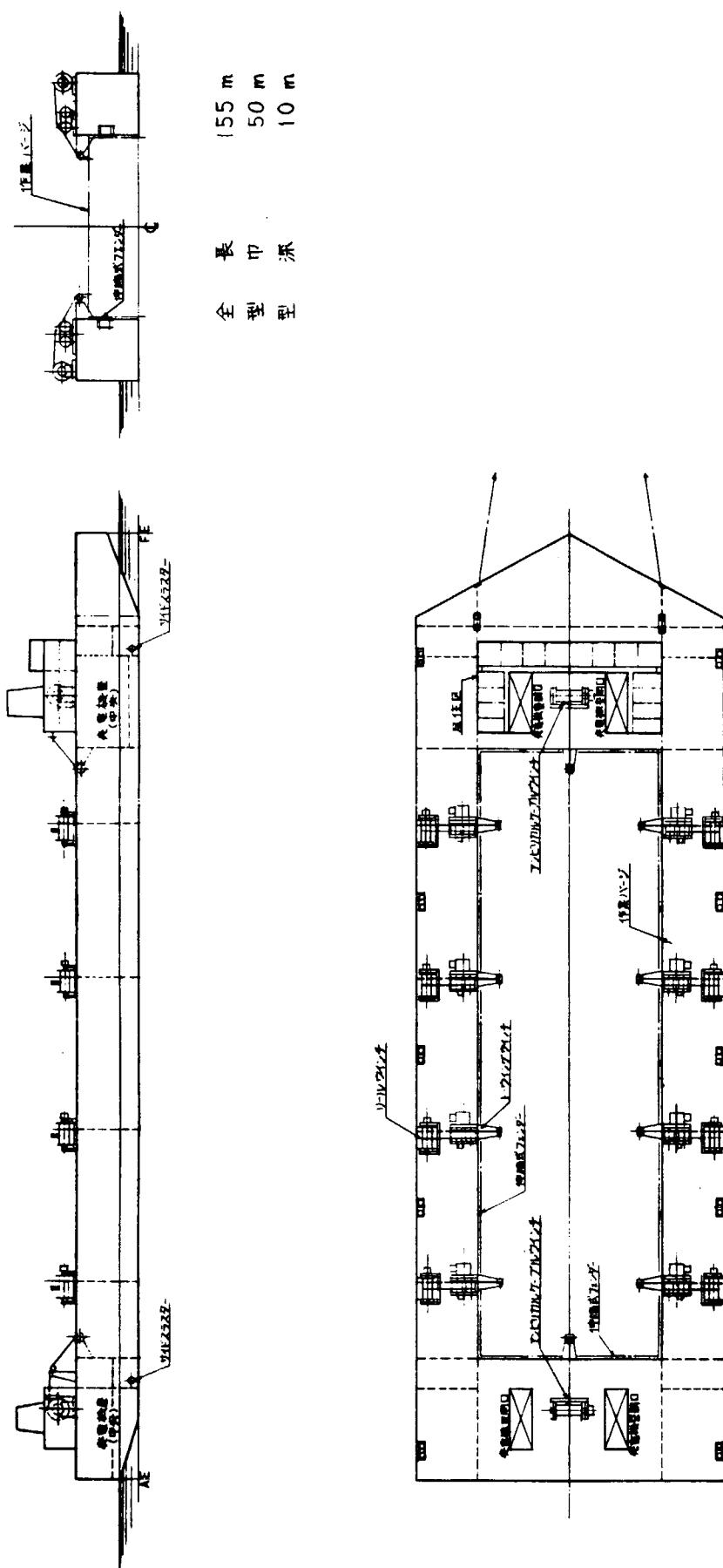


図 2.2-1 作業母船一般配置概念図

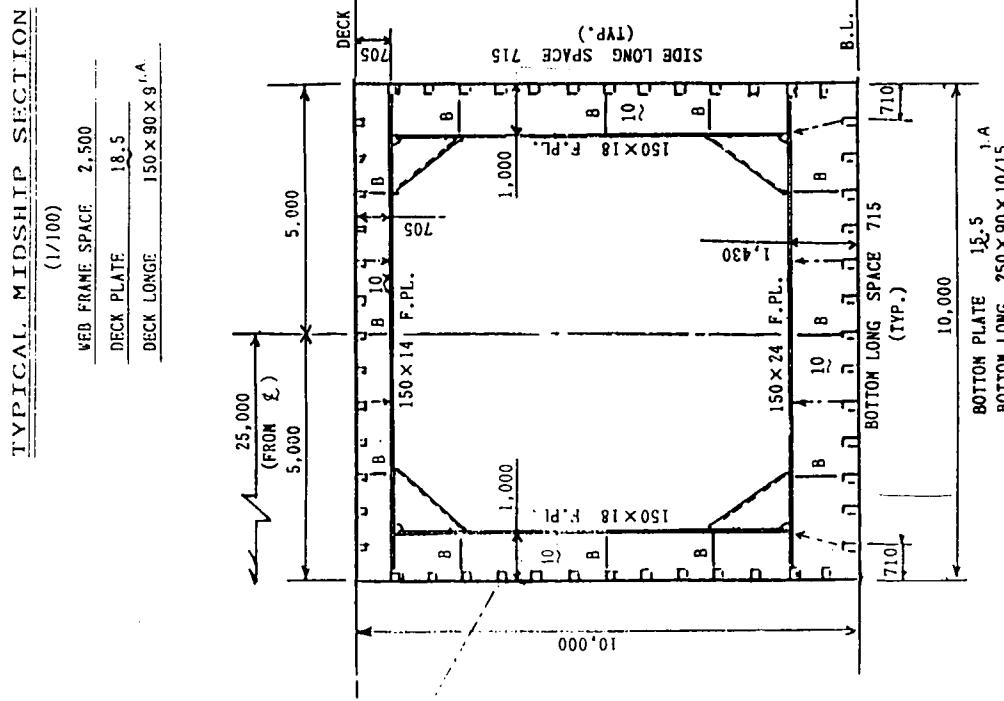


図 2.2.2—2 中央横断面図

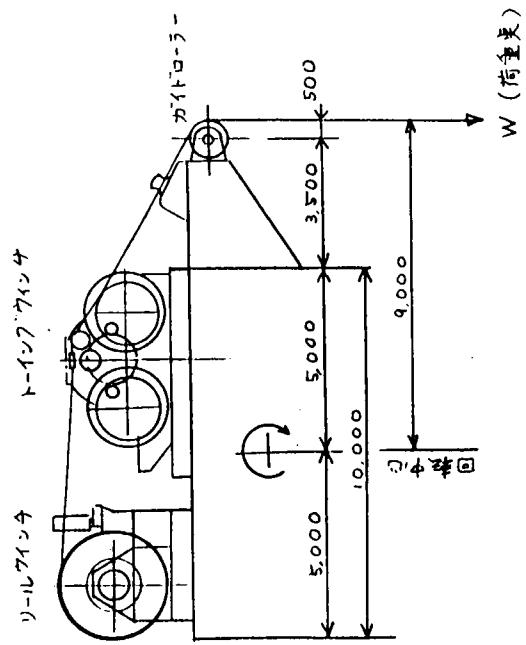
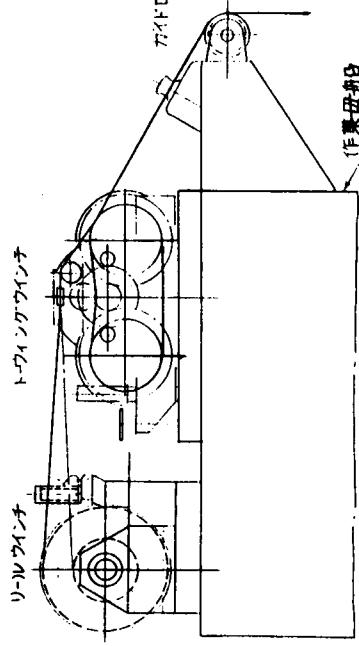
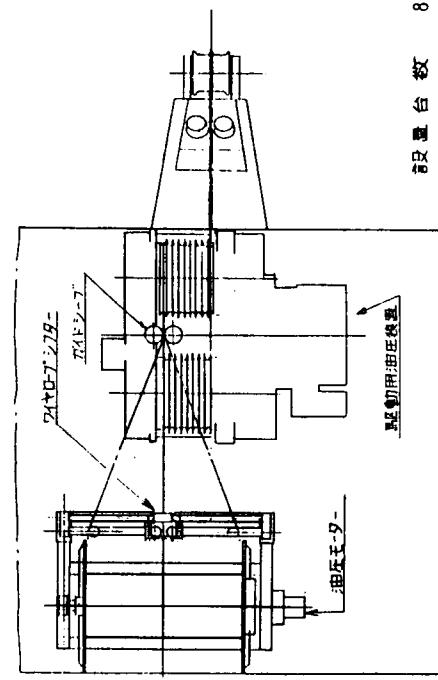


図 2.2.2—3 荷重点および回転中心



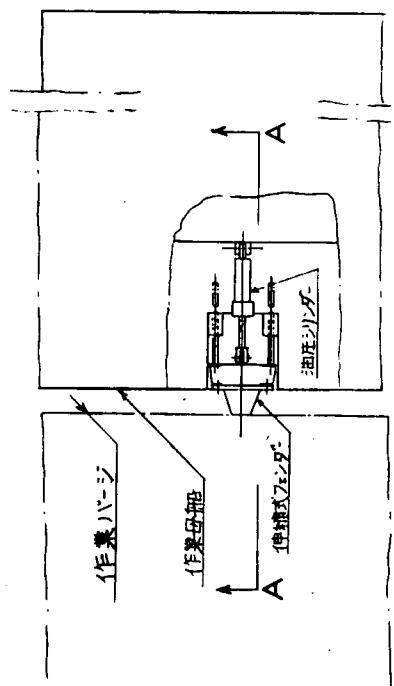
側面図



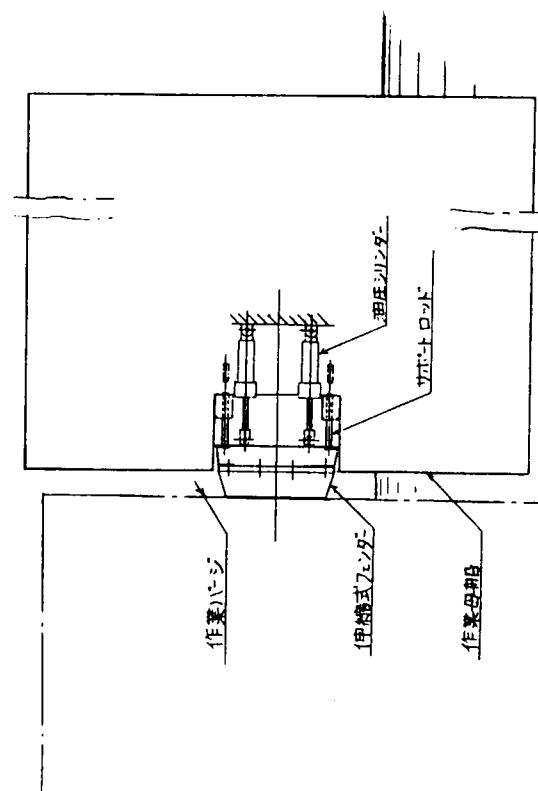
平面図

設置台数  
約 200 台/台  
引張最大荷重  
100t × 2,200 t  
リリフ・容量  
約 100t/台  
機器重量

図 2.2.2-4 引揚げ用ワインチ概念図



平面図



A-A 矢程

図 2.2.2-5 伸縮式フェンダ構造概念図

### 2.2.3 作業バージ

#### (1) 基本的機能

- 1) 作業母船より吊降ろされ、500～2,000mの深海に沈没した使用済燃料船を跨ぐ位置に着底する。
- 2) 門型回収アームを沈船の下に挿入する。
- 3) 沈船と作業バージを作業母船により引揚げる。

図2.2.3-1を参照のこと。

#### (2) 設計展開

1) 主要寸法：作業機能を満足するよう使用済燃料船の関連で決める。

2) 着底位置調整装置：サイドスラスター

3) 着底用脚：4脚

バージと沈船の相対位置調整のため伸縮可能とする。

4) 回収アーム：門型×2対

回転力により沈船の下にアーム下部を挿入する。

5) 付属設備：浮力タンク

注排水装置

引揚げ用アイ

音響測位装置

水中照明装置

6) 他船の支援：

(a) 作業母船：バージの吊降ろし、吊揚げ。

バージの油圧装置駆動用の油圧の供給

(b) 有人潜水艇：沈船状態の調査、連絡。

バージの作業監視、連絡。

引揚げワイヤックのアイへの取付け。

#### (3) 技術検討

1) バージ本体

(a) 深海圧の掛る大型バージの設計は実際的でないので、非耐圧型としてバージ内区画を開放型とし、バージ内外の圧力差が大きくならないように使用する。

(b) バージ吊降ろしはバージ自重によるものとする。

海中ではバージ内区画に海水が浸入する。

(c) バージ引揚げ時は、特定区画の上部バルブをクローズし（油圧開閉）、上部より空気圧入して下部開口より海水を排出して浮力を得る。

バージ内区画の3,500m<sup>3</sup>に空気圧入すれば、3,500tの浮力を得る。図2.2.3-2を参照のこと。

(d) バージ寸法等

・L×Bは沈船の寸法により100m×30mとする。

・Dは回収アームの回転機構、バージ自体の強度、浮力タンク容積等が関係する。

これらのうち回収アームの回転機構が最も重要であろうが、後述 4) のとおり回転のための所要動力が簡単に決まらず、D もまた不確定である。

今はバージをなるべくコンパクトにする趣旨より D=10m で計画を進めることとする。

$$L \times B \times D = 100\text{m} \times 30\text{m} \times 10\text{m}$$

- ・バージは引揚げ作業を通じて掛かる荷重に耐える強度とする。詳細設計には広範の検討が必要となるが、

バージ自重=約 3,500 t

## 2) 着底位置調整装置

(a) 沈船を跨ぐ位置にバージが正確に着底することが必要なので、次の方法を考える。

- ・有人潜水艇が沈船位置発信装置を設置。
- ・バージ側の受信装置、サイドスラスターの自動運転により位置決め。

(b) スラスターは前後方向に 1 個、左右方向に 2 個とする。

スラスターは油圧モータ駆動の可変ピッチプロペラが適当である。

図 2.2.3-3 を参照のこと。

## 3) 着底用脚

(a) 脚長 3.0 m とする。

(b) バージ自重を支持する強度を持たせる。

(c) 上下伸縮は油圧シリンダによる。

(d) 脚下端は位置決めが容易で、安全性のある形状寸法とする。

特に、沈船との相対位置保持の為に、下端にツバ、海底食込み部をつける等、考慮する。

図 2.2.3-4 を参照のこと。

## 4) 回収アーム

(a) 寸法 4.0 m 長 × 3.0 m 幅とする。

### (b) 回転機構

アーム自重がかなり大きくなること、また下記(c)の考えにより大きな回転力が必要となる。

このため油圧シリンダにより回転力を得る。

図 2.2.3-5 を参照のこと。

### (c) 掘削機構

海底質を平坦な砂泥と仮定しているので、油圧による回転力のみでアーム下部を沈船下に押し込むことをまず考える。(これが不可能の場合には水ジェット装置はかなり煩雑となろうから油圧掘削を第一案とする。)

この場合、アーム下部の機能的形状寸法の研究が必要となろう。例えば図 2.2.3-6 のとおり。

### (d) 引揚げ強度

沈船の重量のほかに、沈船と海底との密着力に対する強度も持たせる必要がある。

2 対の回収アームで沈船を引揚げる所以、かなり大きな強度が必要となる。

### (e) 設計まとめ

上記(a)～(d)は相互に密接な関係があり、十分の検討が必要である。

特に、アーム回転機構の所要動力は、実験を含むかなり広範の研究開発に基いて決める必要がある。

## 5) 油圧力

サイドスラスター、着底用脚、回収アームに必要な油圧力は一元化し、母船より油圧力を供給する。

すなわち、母船上の油圧ポンプで油圧力を作り、可撓式高圧パイプでこれらの油圧モータ、油圧シリンダを駆動する。

#### 6) その他

##### (a) 引揚げ用アイ

潜水艇のマニプレータでワイヤフック取付けを容易とする形状の工夫が必要である。

強度は当然必要。

##### (b) 音響測位装置、水中照明装置

内蔵電源による。

#### (4) 研究開発

上述の作業バージの開発、実用化のためには、

- ・作業船技術（バージ本体、着底用脚、回収アーム、位置調整装置、油圧装置等に対して）
- ・海洋構造物技術（着底用脚、位置調整装置、油圧装置、油圧・空気管等に対して）
- ・深海船技術（深海作業に関するハード、ソフトに対して）等

の分野における広範の研究開発が必要となる。

これらの技術分野は近年目覚しい進歩をとげているので、これらを有効活用するとともに、本作業バージ固有の技術問題を検討していくれば、実用化は不可能ではないであろう。

#### (5) 作業バージ主要目（まとめ）

作業バージには開発要素が多く、要目も確定しにくいが、取敢えず下記主要目とする。

$$L \times B \times D = 100\text{m} \times 30\text{m} \times 10\text{m}$$

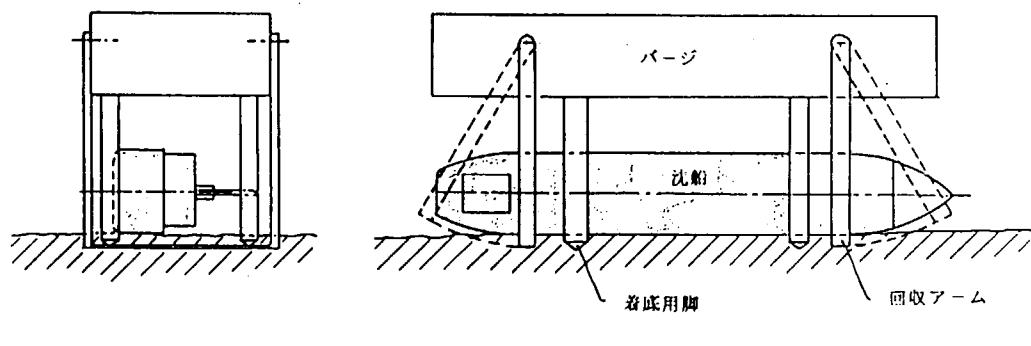
$$\text{着底用脚} = 30\text{m} \times 4 \text{脚}$$

$$\text{回収アーム} = \text{門型 } 40\text{m長} \times 30\text{m幅} \times 2 \text{対}$$

図 2.2.3-7 を参照のこと。

$$\text{バージ自重} = \text{約 } 3,500 \text{ t}$$

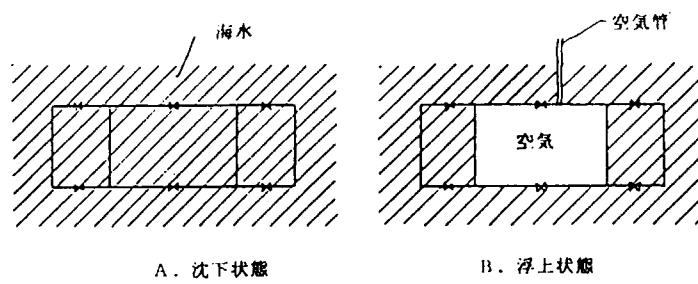
$$\text{浮力タンク} = \text{約 } 3,500 \text{ m}^3 (\text{浮力約 } 3,500 \text{ t})$$



A. 前後図

B. 側面図

図 2.2.3-1 作業バージ機能概念図



A. 沈下状態

B. 浮上状態

図 2.2.3-2 バージ内浮力タンク

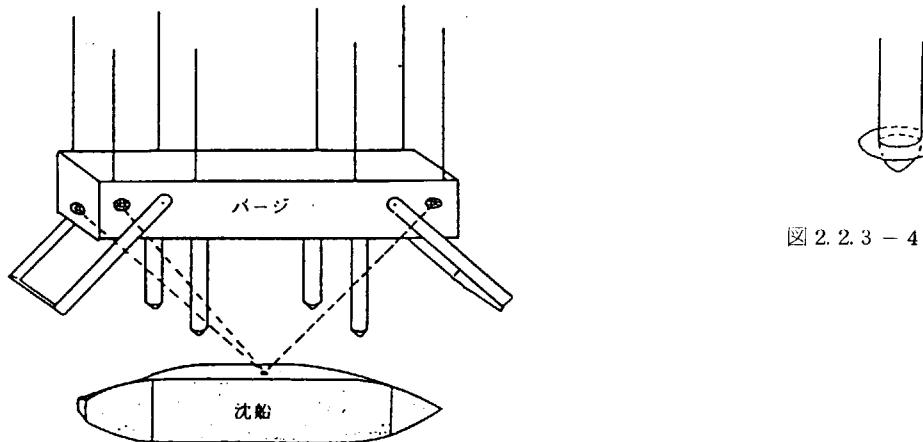


図 2.2.3-4 脚下端

図 2.2.3-3 着底図

(位置発信装置とスラスター)

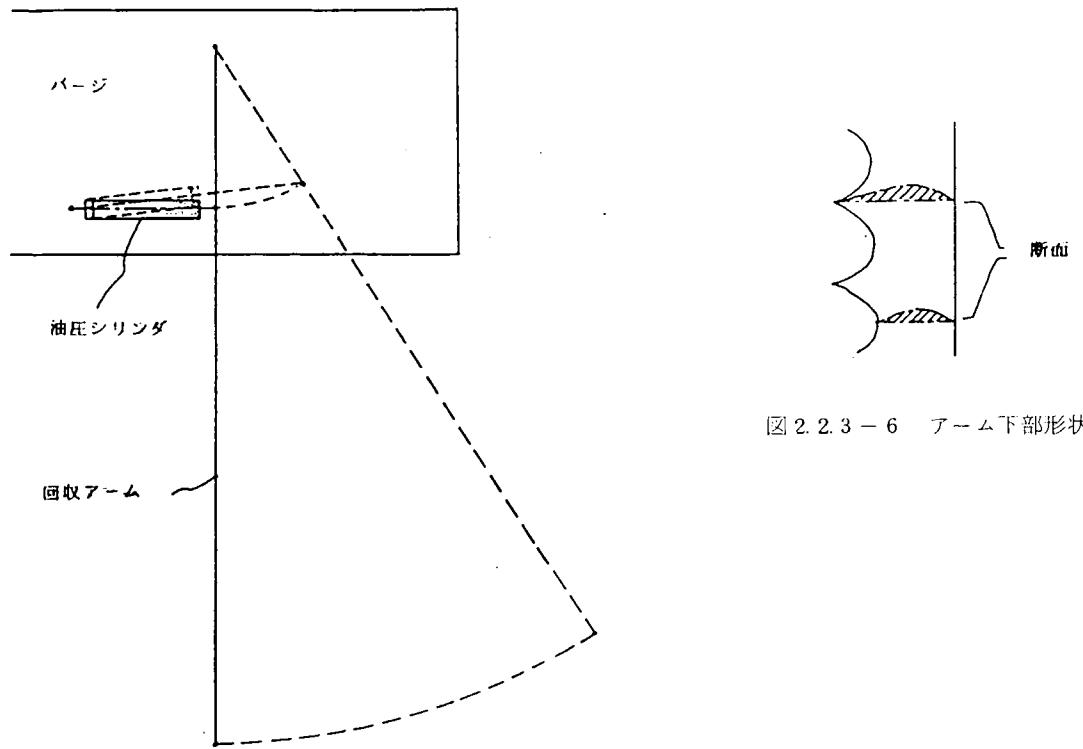


図 2.2.3-5 アーム回転機構(例)

図 2.2.3-6 アーム下部形状(例)

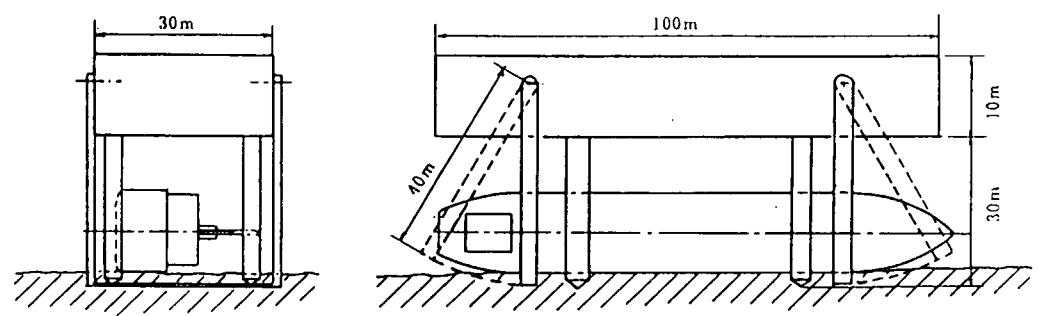


図 2.2.3-7 作業バージ主要寸法

## 2.2.4 沈船の船体強度

深海に沈没した船体を作業バージによって2本のアームで吊り上げて回収する時の船体強度を検討する。

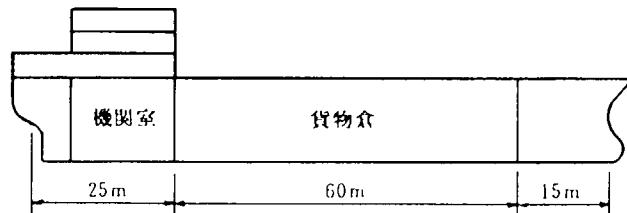
回収時において最も重要なことはアームによって吊り上げた時に船体が折損しないことである。そこで船体を1本の梁と考えて2点で吊り上げた時の強度を計算する。

### (1) 計算条件

#### 1) 引揚対象船舶の要目

- (a) 全長 : 100m
- (b) 船幅 : 16m
- (c) 深さ : 10m
- (d) 総トン数 : 4,700t
- (e) 満載排水量 : 7,000t
- (f) 載荷重量トン : 3,700t
- (g) 水中重量 : 4,000t (含キャスク 1,800t)
- (h) 船型 : 船尾船樓型貨物船

配置は下図の通りとする。なお船体は横転した状態で沈んでいると考える。



#### 2) 沈船の重量分布

本船の水中重量4,000トンのうちキャスクは1,800トンで残りの2,200トンは船体重量とする。

これを次のように分布させる。

- (a) キャスク : 1,800t ( $90\text{t} \times 20\text{個}$ )

貨物倉全体に等分布とする。

- (b) 主機等 : 440t

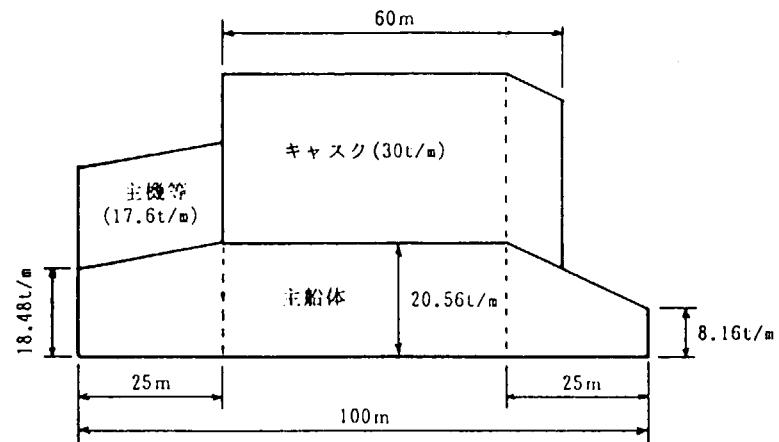
主機・居住区等の船尾部の重量は機関室より後方に等分布とする。

なお、この重量は船体重量の20%と仮定した。

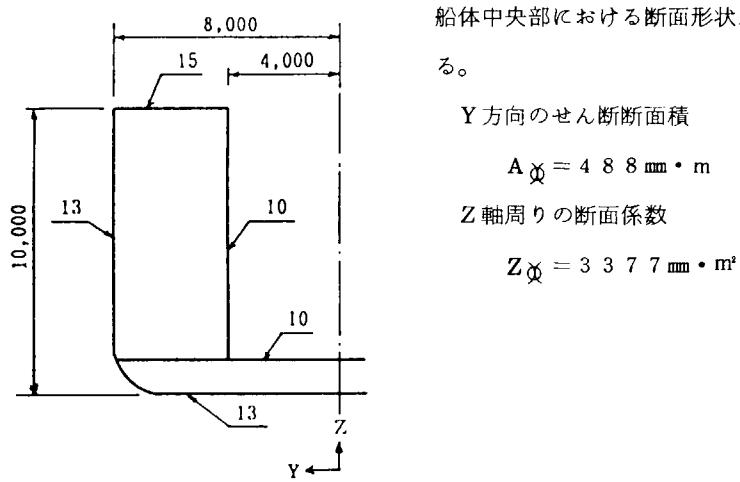
- (c) 主船体 : 1,760t

過去の実績に基づいて台形分布とする。

以上を総合すると下図の重量分布となる。



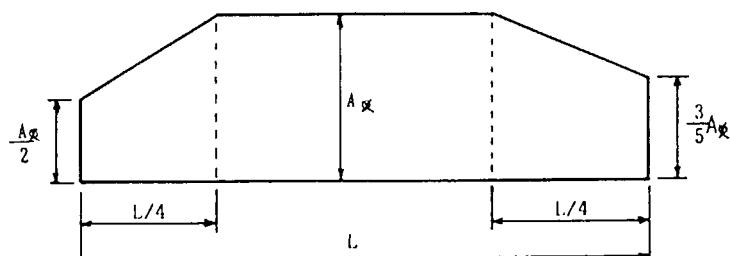
### 3) 沈船の部材寸法



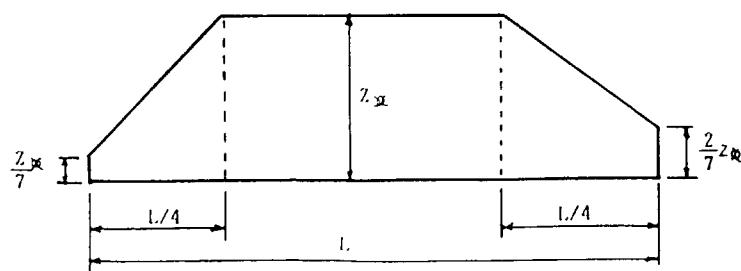
### 4) 断面性能の分布

これまでの実績に基づいてせん断断面積、断面係数の分布形状を下図の通り仮定する。

(a) せん断断面積

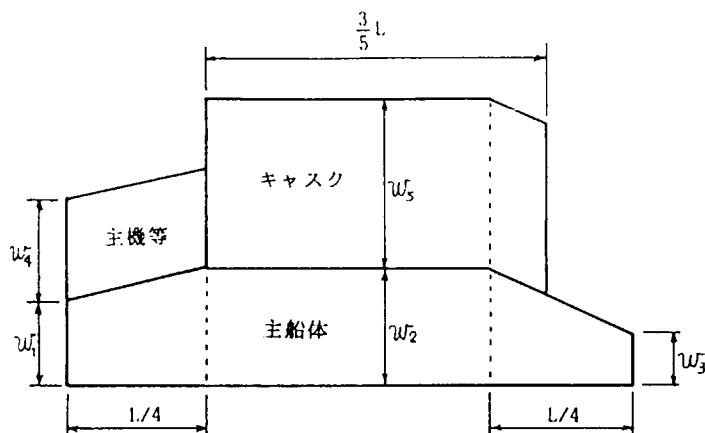


(b) 断面係数

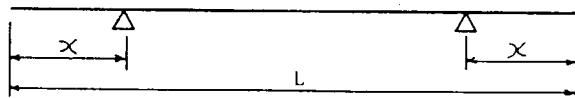


## (2) せん断力及び曲げモーメントの理論計算モデル

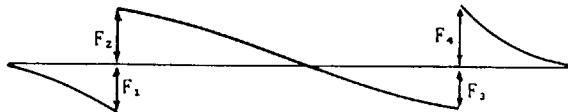
本船における水中重量の分布を下図のように仮定する。



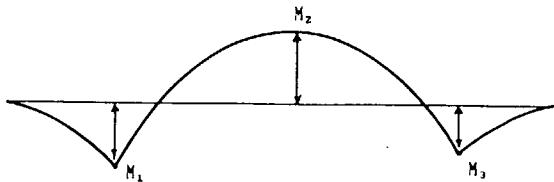
船体を下図のように吊り上げ位置で単純支持された梁と考えると、船体に作用するせん断力及び曲げモーメントは一般的には次のように表される。



せん断力



曲げモーメント



## (3) 数値計算

### 1) せん断力及び曲げモーメント

以上の理論計算に本船の実際の数値を代入した場合の吊り位置とせん断力及び曲げモーメントの関係を図2.2.4-1に示す。

単純支持梁であるので、両端で吊った時に( $x = 0$ )、せん断力及び曲げモーメントは最大となる。

### 2) 船体強度

極端な例として、両端で吊った場合( $x = 0$ )には、せん断力は端部で最大となり 2152 t である。一方、曲げモーメントは船体中央部で最大となり 58,665 t-m である。

この時、せん断応力及び曲げ応力は次のとおりとなる。

$$\tau = 2152 / 244 = 8.82 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma = 58665 / 3377 = 17.37 \text{ kg/mm}^2$$

### 3) 評価

一般の船では、縦強度上の軟鋼に対する降伏応力は通常  $24 \text{ kg/mm}^2$  であり、曲げ応力に対しては  $24 \text{ kg/mm}^2$ 、せん断応力に対しては  $14 \text{ kg/mm}^2$  で評価する。

上述のように、船体を両端で吊った場合においても発生する応力は基準値を下回る。

なお、端部から  $2.5\text{m}$  の点で吊れば、せん断応力  $2.82 \text{ kg/mm}^2$ 、曲げ応力  $3.22 \text{ kg/mm}^2$  まで低下するので、この付近で吊るのが強度上は良いと考えられる。

以上より、この程度の大きさの船の場合には、沈船を回収するために 2 点で吊り上げても船体強度上問題がない。

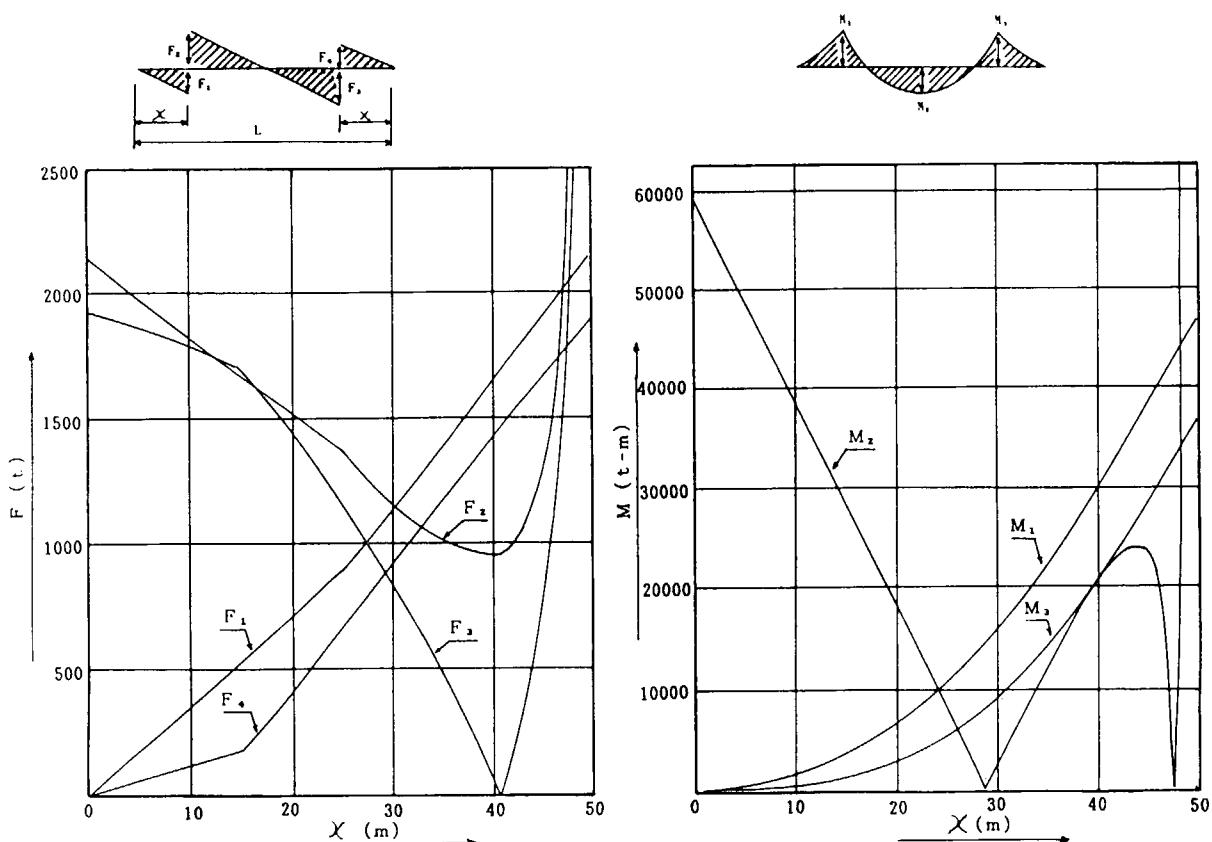


図 2.2.4-1 せん断力及び曲げモーメント

### 3. 冷却水漏洩キャスクの放射線量率および伝熱計算

#### 3.1 線量率分布計算

##### 3.1.1 概要

使用済燃料輸送容器（以下キャスクという）の事故時状態を想定して、キャスク回りの線量率分布を求めた。線源キャスクとしては、TN-12A型キャスク及びHZ-75T型キャスクの2つを選び、事故時状態を模擬して水、エチレングリコール、レジンなどは喪失するものとした。

計算は、2次元Sn計算コードDOT 3.5を用い、R-Z体系について計算した。断面積ライブラリーは、P<sub>5</sub> 50群ライブラリーを用いた。

計算の結果として、キャスク内外の線量率分布、キャスク内主要点でのエネルギースペクトルなどを本報告書本文中に掲載した。

##### 3.1.2 計算条件

###### (1) 使用計算コード及びライブラリー

キャスク回りの中性子束分布、ガンマ線束分布及び線量分布などの計算は、2次元輸送計算コードDOT 3.5<sup>1)</sup>を用いる。

使用的断面積ライブラリーは、22核種について吸收、核分裂などの各断面積の他、散乱断面積としてP<sub>5</sub>成分まで所有する。エネルギー群数は、50群である。50群のうち、初めの32群は中性子、残りの18群はガンマ線に関する断面積であり、併せて2次ガンマ線発生断面積も有する。

本計算においては、上記断面積ライブラリーに基づき、エネルギー50群、P<sub>f</sub>次数P5にて計算を実施する。

表3.1.1-1にライブラリーのエネルギー構造を示す。

###### (2) 計算体系

対象とするキャスクとしてTN-12A型キャスク及びHZ-75T型キャスクの2つを採り上げる。

DOT 3.5による計算モデルは、R-Z 2次元1/2体系とする。TN-12A型キャスク及びHZ-75T型キャスクの計算モデル図を図3.1.1-1及び図3.1.1-2に示す。軸方向については、表面線量率を高く評価すると考えられる中心から底方向を考える。

事故時条件を想定するため、TN-12A型キャスクの場合、中性子遮へい材であるレジンは喪失するものとする。

HZ-75T型キャスクの場合は、キャスク内部の線源領域にある水及び中性子遮へい材であるエチレングリコールは喪失するものと仮定する。

Snの分割については、S6とし、計算上の半球面上の角度分点数は30とする。

計算上の空間メッシュ分割に関しては、「3.1.3 計算方法」に示す。

###### (3) 物質組成及び原子個数密度

TN-12A型キャスク及びHZ-75T型キャスクの各領域の物質組成及び原子個数密度は、表3.1.1-2及び表3.1.1-3に示すとおりであり、表3.1.1-2及び表3.1.1-3に示す物質番号はそれぞれ図3.1.1-1及び図3.1.1-2に示した各種の物質番号に対応する。

使用的断面積ライブラリー内に断面積がない元素については、計算上それらを削除したが、その線量率への影響は小さいと考えられる。

#### (4) 線源強度

TN-12A型キャスク及びHZ-75T型キャスクについては、それぞれ線源仕様が異なるが、これらを表3.1.1-4及び表3.1.1-5に示す。本計算では、これらの値を断面積ライブラリーのエネルギー構造に合わせて作成し直したもの用いる。

#### (5) 線量率変換係数

線量率変換係数については、計算に使用する50群ライブラリー（中性子32群、ガンマ線18群）に内蔵されているものを用いる。それらの値を表3.1.1-6に示す。

### 3.1.3 計算方法

一般に良く知られているようにDOT3.5コードのような2次元Sn計算では、精度良く求めるために、 $P_\ell$ 、Sn、空間メッシュ数などの値を多くとることがあるが、その場合膨大な計算時間を要する場合がある。

一方、空間メッシュ数などを多くとることにより、体系によっては線束分布の収束状況が悪くなることがある。

以上の問題を防止するため、次のような手法を用いることとする。

1次計算として、キャスク内部の線束分布を計算し、キャスク外表面でのboundary angular fluxを求める。次にそれらを固定線源（interior boundary flux source）として繋ぎ計算である2次計算を実施し、キャスク回りの線量率分布などを求めることにする。

空間メッシュ分割数についてはTN-12A型キャスクの1次計算は図3.1.1-3、2次計算は図3.1.1-4に、HZ-75T型キャスクの1次計算は図3.1.1-5及び図3.1.1-6、2次計算は図3.1.1-7に示す。

### 3.1.4 計算結果

#### (1) TN-12A型キャスクを線源とした場合

##### (a) 線量率分布

###### i) キャスク回りの空气中での線量率分布（2次計算計算結果）

TN-12A型キャスク径方向の線量率分布を図3.1.1-8に、軸方向の線量率分布を図3.1.1-9に示す。

キャスク表面1m、10m及び100mでの線量率の値及びその内訳を表3.1.1-7に示す。

###### ii) キャスク内部の線量率分布（1次計算計算結果）

TN-12A型キャスク内部の線量率分布を図3.1.1-10～図3.1.1-11に示す。

図3.1.1-10はキャスク中心径方向、図3.1.1-11はキャスク中心軸方向の分布を図示したものである。

###### iii) 2次元線量率分布

TN-12A型キャスク内部の2次元線量率分布を中性子について図3.1.1-12、ガンマ線について図3.1.1-13に示す。

また、キャスク回りの2次元線量率分布については図3.1.1-14及び図3.1.1-15に示す。

##### (b) エネルギースペクトル

TN-12A型キャスクの中心部及び表面での中性子、ガンマ線のエネルギースペクトルを図3.1.1-16～図3.1.1-23に示す。図3.1.1-16及び図3.1.1-20はキャスク中心部、図3.1.1-17及び図3.1.1-21は胸部表面中心、図3.1.1-18及び図3.1.1-22は底部表面中心、図3.1.1-19及び図3.1.1-23は底部外周表面の中性子及びガンマ線のエネルギースペクトルをそれぞれ図示したものである。

## (2) HZ-75T型キャスクを線源とした場合

### (a) 線量率分布

#### i) キャスク回りの空気中での線量率分布（2次計算計算結果）

HZ-75T型キャスク径方向の線量率分布を図3.1.1-24に、軸方向の線量率分布を図3.1.1-25に示す。キャスク表面1m、10m及び100mでの線量率の値及びその内訳を表3.1.1-8に示す。

#### ii) キャスク内部の線量率分布（1次計算計算結果）

HZ-75T型キャスク内部の線量率分布を図3.1.1-26～図3.1.1-31に示す。

図3.1.1-26及び図3.1.1-27はキャスク中心径方向、図3.1.1-28及び図3.1.1-29はキャスク中心軸方向の中性子及びガンマ線の線量率分布を図示したものである。

#### iii) 2次元線量率分布

HZ-75T型キャスク内部の2次元線量率分布を中性子について図3.1.1-30、ガンマ線について図3.1.1-31に示す。

また、キャスク回りの2次元線量率分布については、図3.1.1-32及び図3.1.1-33に示す。

### (b) エネルギースペクトル

HZ-75T型キャスクの中心部及び表面での中性子、ガンマ線のエネルギースペクトルを図3.1.1-34及び図3.1.1-42に示す。図3.1.1-34及び図3.1.1-38はキャスク中心部、図3.1.1-35及び図3.1.1-39は胸部表面中心、図3.1.1-36及び図3.1.1-40は底部表面中心、図3.1.1-37及び図3.1.1-41は底部外周表面の中性子及びガンマ線のエネルギースペクトルをそれぞれ図示したものである。

図3.1.1-33のガンマ線2次元線量率分布から判るように、キャスク肩部からのガンマ線の漏洩が顕著であるので、図3.1.1-42にキャスク肩部の表面線量率最大点におけるガンマ線エネルギースペクトルを示した。

## 3.1.5 検討

### (1) 計算結果について

キャスク内部においては、図3.1.1-10、-11、-26～-29の計算結果に示すように、中心部においてはガンマ線による線量率の方が2桁から4桁程度高くなっている。しかしながら、図3.1.1-8、-9及び-24、-25あるいは表3.1.1-7、-8の線量率分布の計算結果から判るように、キャスク外部においては、線量率のうち約90%以上は中性子の寄与によるものである。

### (2) 2次元線量率分布について

TN-12A型キャスクについては図3.1.1-12～図3.1.1-15、HZ-75T型キャスクについては図3.1.1-30～図3.1.1-33に2次元線量率分布を示す。

2つのキャスクに共通した点として、底部外周表面部からの放射線の洩れが他の部分にくらべて大きいことが判る。この理由は次のように考えられる。TN-12A型キャスクについて見れば底部外周部はフィン領域にくらべて遮へいが薄くなっている。また、鋼製底板は十分な厚さを有している。したがって相対的に底部外周部からの放射線の洩れが他の部分にくらべて大きくなる。HZ-75T型キャスクについては、鉛の熱膨張を吸収するため底部に膨張室が作ってある。このため、膨張室部分からの放射線の洩れが他の部分に比べて大きくなると考えられる。さらに、モデル化において膨張室を過大に取り扱っており、漏洩放射線を過大に見積る結果となっている。

図3.1.1-14、-15及び3.1.1-32、-33の底部外周部からの放射線の洩れが大きいことの他に、それらの分布が2次元的に見て波状分布を示している。これは、いわゆるレイイフェクトであると考えられる。

### 3.1.6 被曝線量の推定

ディスクリートオーディネイトコードDOT-3.5による計算結果をもとに、HZ-75TおよびTN-12Aキャスクの特別条件下におけるキャスク周囲の線量率を推定する。

各キャスクに対し次のような事故条件を仮定した。

#### 1) HZ-75T キャスク

キャスクキャビティ中の水および中性子遮蔽のためのエチレングリコール水の喪失。

#### 2) TN-12A キャスク

中性子遮蔽のためのレジン層の喪失

各キャスクに収納される使用済核燃料はそれぞれのキャスク安全解析に用いられた値を使用した。また、キャスク構造材の組成、原子個数密度についても安全解析に用いられている値を採用した。

被曝線量についてはキャスクの半径方向および軸方向に対し、連続的な等高線分布として図示したが、主な評価点すなわち、キャスク表面、表面から1, 10, 100mにおける中性子及びガンマ線線量率をまとめると次のようになる。

#### 1) HZ-75T キャスク

距 離	半径方向線量率(mrem/h)			軸(底部)方向線量率(mrem/h)		
	中性子	ガンマ線	合 計	中性子	ガンマ線	合 計
表 面	$1.2 \times 10^3$	$4.9 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3$ (注1)	$6.4 \times 10^1$	$1.6 \times 10^1$	$8.0 \times 10^1$
1 m	$2.3 \times 10^2$	4.8	$2.3 \times 10^2$	$1.9 \times 10^1$	2.1	$2.1 \times 10^1$
10 m	4.6	$2.5 \times 10^{-1}$	4.9	1.3	$2.7 \times 10^{-2}$	1.3
100 m	$1.0 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$8.7 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$8.9 \times 10^{-2}$

注1. 中性子の最大線量率とガンマ線の最大線量率を示す位置が異なるため、合計の線量率が中性子+ガンマ線になっていない。

#### 2) TN-12A

距 離	半径方向線量率(mrem/h)			軸(底部)方向線量率(mrem/h)		
	中性子	ガンマ線	合 計	中性子	ガンマ線	合 計
表 面	$3.6 \times 10^1$	4.0	$4.0 \times 10^1$	$2.4 \times 10^1$	4.9	$2.9 \times 10^1$
1 m	12.9	1.0	14.5	2.4	$2.3 \times 10^{-1}$	2.6
10 m	$3.8 \times 10^{-1}$	$3.8 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-1}$
100 m	$8.5 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$7.6 \times 10^{-3}$

計算結果から被曝線量を推定する。例えばキャスク周辺における作業時間を10時間とすると、各キャスクの半径方向に対し中性子およびガンマ線の合計線量は次のようにまとめられる。

キャスク半径方向被曝線量推定値(10時間作業)

位 置	HZ-75T(rem)	TN-12A(rem)
表 面	1.2	0.4
1 m	2.3	0.15
10 m	0.5	$4.1 \times 10^{-3}$
100m	$1.0 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-5}$

以上の結果から、HZ-75T キャスクにあってはキャビティ中の冷却水および中性子遮蔽用エチレングリコール水、TN-12A キャスクでは中性子遮蔽材のレジン層が喪失するという事故条件下において、例えばキャスク表面から1mにおいて10時間連続作業したとしても、HZ-75T では最大 2.3 rem、TN-12A では最大 0.15 rem の被曝が予想される。しかし、上記のような線量率分布におけるキャスク周囲での作業に当っては、個人被曝線量計の着用、環境放射線量率測定器の使用等によって、例えば個人被曝線量を 100 mrem/h 以下に管理しながら作業を進めることが可能であるとも考えられる。

参 考 文 献

- (1) R.W.Roussin, DOT3.5: A TWO-DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES TRANSPORT CODE ,ORNL-TM-4280(1973)

表 3.1.1-1 ライブラリーエネルギー構造

BIN_NO.	LOWER LIMIT GROUP	LOWER ENERGY LIMIT	DELTA E
		1.492E+07	
1	1	1.221E+07	2.704E+06
2	2	1.000E+07	2.214E+06
3	3	8.187E+06	1.813E+06
4	4	6.703E+06	1.484E+06
5	5	4.493E+06	2.210E+06
6	6	3.679E+06	8.145E+05
7	7	3.012E+06	6.669E+05
8	8	2.466E+06	5.459E+05
9	9	2.019E+06	4.470E+05
10	10	1.653E+06	3.660E+05
11	11	1.353E+06	2.996E+05
12	12	1.108E+06	2.454E+05
13	13	9.072E+05	2.008E+05
14	14	7.427E+05	1.644E+05
15	15	6.081E+05	1.346E+05
16	16	4.979E+05	1.102E+05
17	17	4.076E+05	9.025E+04
18	18	2.732E+05	1.344E+05
19	19	1.832E+05	9.008E+04
20	20	1.228E+05	6.039E+04
21	21	8.652E+04	3.625E+04
22	22	5.248E+04	3.404E+04
23	23	3.183E+04	2.065E+04
24	24	1.503E+04	1.679E+04
25	25	7.102E+03	7.932E+03
26	26	2.613E+03	4.489E+03
27	27	9.611E+02	1.651E+03
28	28	2.144E+02	7.467E+02
29	29	4.785E+01	1.566E+02
30	30	5.043E+00	4.281E+01
31	31	4.140E-01	4.629E+00
32	32	2.500E-02	3.890E-01
		1.000E+07	
33	33	8.000E+06	2.000E+06
34	34	6.500E+06	1.500E+06
35	35	5.000E+06	1.500E+05
36	36	4.000E+06	1.000E+06
37	37	3.000E+06	1.000E+06
38	38	2.500E+06	5.000E+05
39	39	2.000E+06	5.000E+05
40	40	1.660E+06	3.400E+05
41	41	1.330E+06	3.300E+05
42	42	1.000E+06	3.300E+05
43	43	8.000E+05	2.000E+05
44	44	6.000E+05	2.000E+05
45	45	4.000E+05	2.000E+05
46	46	3.000E+05	1.000E+05
47	47	2.000E+05	1.000E+05
48	48	1.000E+05	1.000E+05
49	49	5.000E+04	5.000E+04
50	50	2.000E+04	3.000E+04

表3.1.1-2 TN12 キャススクの物質組成及び原子個数密度

( 単位 atoms/barn cm )

Mat No.	2	8	14	20	26	32	38	44	50	56	62	68	74	80	86
	線源領域 ハスケット 領域	鋼製 底板	レジン層 領域	フイ ン 領域	蓋板領域 領域	リングラ ンジ領域	蓋カバー 領域	前部・後部 吸収カバー 外板	鏡衝村	上部プレ ナム領域	下部 ノスル領域	燃料集合 体支材ス ペーサー 領域	空氣		
<sup>11</sup> Li			3.52×10 <sup>7</sup>						7.43×10 <sup>3</sup>						
<sup>19</sup> B	2.72×10 <sup>3</sup>	3.70×10 <sup>3</sup>		1.36×10 <sup>7</sup>					1.27×10 <sup>4</sup>			2.72×10 <sup>4</sup>	4.69×10 <sup>5</sup>		
<sup>6</sup> C	3.43×10 <sup>5</sup>	4.67×10 <sup>3</sup>		2.30×10 <sup>7</sup>				4.46×10 <sup>3</sup>	1.60×10 <sup>4</sup>		3.43×10 <sup>4</sup>	5.92×10 <sup>5</sup>	<sup>-1</sup> 3.902×10 <sup>-5</sup>		
<sup>6</sup> O	6.81×10 <sup>3</sup>			1.26×10 <sup>8</sup>	9.23×10 <sup>6</sup>			3.71×10 <sup>3</sup>						9.754×10 <sup>-6</sup>	
<sup>13</sup> Al	1.09×10 <sup>4</sup>	7.02×10 <sup>7</sup>		1.93×10 <sup>3</sup>		1.82×10 <sup>7</sup>	3.91×10 <sup>2</sup>		5.05×10 <sup>2</sup>			1.09×10 <sup>7</sup>	1.87×10 <sup>3</sup>		
<sup>14</sup> N i	1.42×10 <sup>3</sup>	9.19×10 <sup>3</sup>				5.11×10 <sup>4</sup>			6.62×10 <sup>4</sup>			1.42×10 <sup>4</sup>	2.45×10 <sup>4</sup>		
<sup>14</sup> C <sup>*2</sup>			2.51×10 <sup>3</sup>												
<sup>15</sup> Cr	1.96×10 <sup>5</sup>	2.09×10 <sup>3</sup>			1.47×10 <sup>7</sup>	5.46×10 <sup>3</sup>		1.65×10 <sup>7</sup>		8.12×10 <sup>4</sup>	1.35×10 <sup>3</sup>	1.38×10 <sup>3</sup>	1.89×10 <sup>3</sup>		
<sup>16</sup> F c	7.29×10 <sup>4</sup>	7.78×10 <sup>3</sup>	8.46×10 <sup>7</sup>		6.14×10 <sup>7</sup>	2.34×10 <sup>7</sup>		6.31×10 <sup>7</sup>		2.87×10 <sup>3</sup>	4.85×10 <sup>3</sup>	5.25×10 <sup>3</sup>	7.25×10 <sup>3</sup>		
<sup>16</sup> N i	9.63×10 <sup>-3</sup>	1.03×10 <sup>3</sup>			9.74×10 <sup>3</sup>	1.67×10 <sup>3</sup>		6.49×10 <sup>3</sup>		5.27×10 <sup>4</sup>	8.11×10 <sup>4</sup>	5.62×10 <sup>4</sup>	7.49×10 <sup>4</sup>		
<sup>16</sup> C u	5.47×10 <sup>7</sup>	7.44×10 <sup>3</sup>		1.21×10 <sup>7</sup>	1.04×10 <sup>7</sup>		9.04×10 <sup>4</sup>		2.55×10 <sup>4</sup>		5.47×10 <sup>4</sup>	9.43×10 <sup>3</sup>			
<sup>16</sup> Z n <sup>*2</sup>				2.28×10 <sup>7</sup>											
<sup>16</sup> Z r	2.02×10 <sup>7</sup>									2.44×10 <sup>3</sup>		1.07×10 <sup>3</sup>			
<sup>17</sup> S U	1.21×10 <sup>7</sup>														
<sup>17</sup> N U	3.28×10 <sup>7</sup>														

\* 1 <sup>17</sup>N (窒素)

\* 2 ライブライナー内に断面積データがないため、零とした。

表 3.1.1-3 HZ75 キャスクの物質組成及び原子個数密度

(単位:  $10^{24} \text{ atoms/cm}^3$ )

Mat No.	2	8	14	20	26	32	38	44	50
領域	上部	上部 ブレナム部	燃料領域	下部 タイプレート部	エチレン グリコール水	空気	内筒内水	ステンレス鋼	鉛
構成元素	タイプレート部								
水	累 計	$5.020 \times 10^{-2}$	$3.759 \times 10^{-2}$	$4.612 \times 10^{-2}$	$6.36 \times 10^{-2}$		$5.975 \times 10^{-2}$		
ボロン-10	累 計	$4.200 \times 10^{-5}$	$4.200 \times 10^{-6}$	$4.200 \times 10^{-6}$	$8.765 \times 10^{-5}$				
炭	累 計	$5.320 \times 10^{-5}$	$5.320 \times 10^{-5}$	$5.820 \times 10^{-5}$	$4.655 \times 10^{-5}$				
窒	累 計					$8.902 \times 10^{-3}$			
酸	累 計	$2.510 \times 10^{-4}$	$1.880 \times 10^{-2}$	$8.760 \times 10^{-3}$	$2.806 \times 10^{-2}$	$3.17 \times 10^{-2}$	$9.754 \times 10^{-4}$	$3.004 \times 10^{-2}$	
アルミニウム	累 計	$8.627 \times 10^{-4}$	$3.627 \times 10^{-4}$	$3.627 \times 10^{-4}$	$8.174 \times 10^{-4}$				
硅	累 計								
クロム	$2.848 \times 10^{-3}$	$1.835 \times 10^{-3}$	$1.505 \times 10^{-3}$	$3.389 \times 10^{-3}$			$1.646 \times 10^{-2}$		
マンガン									
鉄	$8.994 \times 10^{-3}$	$7.031 \times 10^{-3}$	$5.764 \times 10^{-3}$	$1.298 \times 10^{-2}$			$6.083 \times 10^{-2}$		
ニッケル	$9.248 \times 10^{-4}$	$7.225 \times 10^{-4}$	$5.924 \times 10^{-4}$	$1.334 \times 10^{-2}$			$6.510 \times 10^{-3}$		
ジルコニア	$6.010 \times 10^{-4}$	$3.848 \times 10^{-3}$	$3.134 \times 10^{-3}$	$6.010 \times 10^{-4}$					
鉛							$8.296 \times 10^{-2}$		
ウラン-235					$1.227 \times 10^{-4}$				
ウラン-238					$4.202 \times 10^{-3}$				

(注) 1. 内筒内水温は 170°C、エチレングリコール水温は 111°C で計算した。

表 3.1.1-4 TN12 キャスク線源データ

線源強度	$3.66+9 \text{ (n/sec)}$
エネルギー群	中性子スペクトル
1	2.4 8 0 - 4
2	1.1 5 1 - 3
3	3.9 2 3 - 3
4	1.1 4 1 - 2
5	5.8 4 8 - 2
6	5.5 7 9 - 2
7	6.6 7 1 - 2
8	8.3 6 0 - 2
9	9.1 2 3 - 2
10	8.8 9 4 - 2
11	8.6 1 2 - 2
12	8.5 6 6 - 2
13	5.8 3 7 - 2
14	5.8 4 1 - 2
15	5.8 3 7 - 2
16	3.8 3 3 - 2
17	1.8 1 3 - 2
18	3.6 2 5 - 2
19	3.6 2 1 - 2
20	3.6 2 4 - 2
21	1.0 4 3 - 2
22	2.5 6 6 - 3
23	2.5 5 7 - 3
24	3.8 3 7 - 3
25	3.8 3 3 - 3
26	3.8 9 5 - 3
27	5.2 7 4 - 5
28	3.0 1 8 - 5
29	3.1 2 3 - 6
30	2.3 6 7 - 7
31	8.6 7 8 - 9
32	1.0 3 3 - 1 0

表 3.1.1-5 HZ75 キャスク線源データ

線源強度	$5.3+9 \text{ (n/sec)}$
エネルギー群	中性子スペクトル
1	2.4 8 0 - 4
2	1.1 5 1 - 3
3	3.9 2 3 - 3
4	1.1 4 1 - 2
5	5.8 4 8 - 2
6	5.5 7 9 - 2
7	6.6 7 1 - 2
8	8.3 6 0 - 2
9	9.1 2 3 - 2
10	8.8 9 4 - 2
11	8.6 1 2 - 2
12	8.5 6 6 - 2
13	5.8 3 7 - 2
14	5.8 4 1 - 2
15	5.8 3 7 - 2
16	3.8 3 3 - 2
17	1.8 1 3 - 2
18	3.6 2 5 - 2
19	3.6 2 1 - 2
20	3.6 2 4 - 2
21	1.0 4 3 - 2
22	2.5 5 6 - 3
23	2.5 5 7 - 3
24	3.8 3 7 - 3
25	3.8 3 3 - 3
26	3.8 9 5 - 3
27	5.2 7 4 - 5
28	3.0 1 8 - 5
29	3.1 2 3 - 6
30	2.3 6 7 - 7
31	8.6 7 8 - 9
32	1.0 3 3 - 1 0

線源強度	$2.12+17 \text{ (\gamma/sec)}$
エネルギー群	ガンマ線スペクトル
3 3	0.0
3 4	0.0
3 5	0.0
3 6	0.0
3 7	1.2 5 6 - 6
3 8	1.6 2 5 - 4
3 9	2.7 2 5 - 3
4 0	5.6 0 3 - 3
4 1	8.9 1 3 - 3
4 2	2.2 3 4 - 2
4 3	1.2 5 8 - 1
4 4	2.8 7 1 - 1
4 5	4.0 4 7 - 1
4 6	5.9 1 8 - 2
4 7	8.3 4 1 - 2
4 8	0.0
4 9	0.0
5 0	0.0

線源強度	$2.58+17 \text{ (\gamma/sec)}$
エネルギー群	ガンマ線スペクトル
3 3	0.0
3 4	0.0
3 5	0.0
3 6	0.0
3 7	8.4 5 2 - 7
3 8	1.1 7 4 - 4
3 9	1.9 4 9 - 3
4 0	3.9 0 0 - 3
4 1	6.0 4 1 - 3
4 2	1.4 2 9 - 2
4 3	1.4 4 4 - 1
4 4	3.3 9 7 - 1
4 5	4.7 8 8 - 1
4 6	2.2 6 0 - 3
4 7	3.1 8 7 - 3
4 8	5.4 4 7 - 3
4 9	0.0
5 0	0.0

表 3.1.1-6 線量率変換係数

エネルギー群		変換係数 ( (mrem/hr) / (粒子/cm <sup>2</sup> ·S) )
中性子	1	2.1000E-01
	2	1.9000E-01
	3	1.5000E-01
	4	1.5000E-01
	5	1.5500E-01
	6	1.5000E-01
	7	1.3500E-01
	8	1.2500E-01
	9	1.2600E-01
	10	1.2700E-01
	11	1.2800E-01
	12	1.2900E-01
	13	1.2300E-01
	14	1.1500E-01
	15	1.0000E-01
	16	8.6000E-02
	17	6.7000E-02
	18	5.0000E-02
	19	3.3500E-02
	20	2.2000E-02
	21	1.7000E-02
	22	1.1000E-02
	23	7.2000E-03
	24	3.8000E-03
	25	3.5000E-03
	26	3.6000E-03
	27	3.8000E-03
	28	4.1500E-03
	29	4.4000E-03
	30	4.3000E-03
	31	4.0000E-03
	32	3.7000E-03
ガンマ線	33	9.7900E-03
	34	8.2800E-03
	35	6.8400E-03
	36	5.7600E-03
	37	4.7500E-03
	38	3.9600E-03
	39	3.4900E-03
	40	2.9900E-03
	41	2.4100E-03
	42	1.9100E-03
	43	1.6000E-03
	44	1.1600E-03
	45	9.2200E-04
	46	6.3700E-04
	47	4.3900E-04
	48	2.3800E-04
	49	1.4000E-04
	50	3.0200E-04

表 3.1.1-7 TN12 線量率計算結果

キャスク表面 からの距離	径方向線量率 (mRem/hr)			軸方向線量率 (mRem/hr)		
	中性子	ガンマ線	合 計	中性子	ガンマ線	合 計
表面	3.6	4.0	4.0	2.4	4.9	2.9
1 m	1.2.9	1.6	1.4.5	2.4	$2.3 \times 10^{-1}$	2.6
10 m	$3.8 \times 10^{-1}$	$3.8 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-1}$
100m	$8.5 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$7.7 \times 10^{-3}$

表 3.1.1-8 HZ75 線量率計算結果

キャスク表面 からの距離	径方向線量率 (mRem/hr)			軸方向線量率 (mRem/hr)		
	中性子	ガンマ線	合 計	中性子	ガンマ線	合 計
表面*	$1.2 \times 10^3$	$4.9 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3$	6.4	1.6	8.0
1 m	$2.3 \times 10^2$	4.8	$2.3 \times 10^2$	19.2	2.1	21.3
10 m	4.6	$2.5 \times 10^{-1}$	4.8	1.3	$2.7 \times 10^{-2}$	1.3
100m	$1.0 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$8.7 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$8.9 \times 10^{-2}$

\*表面における最大値を示す。径方向については、中性子、ガンマ線線量率の最大になる位置が異なるため、このような結果になった。

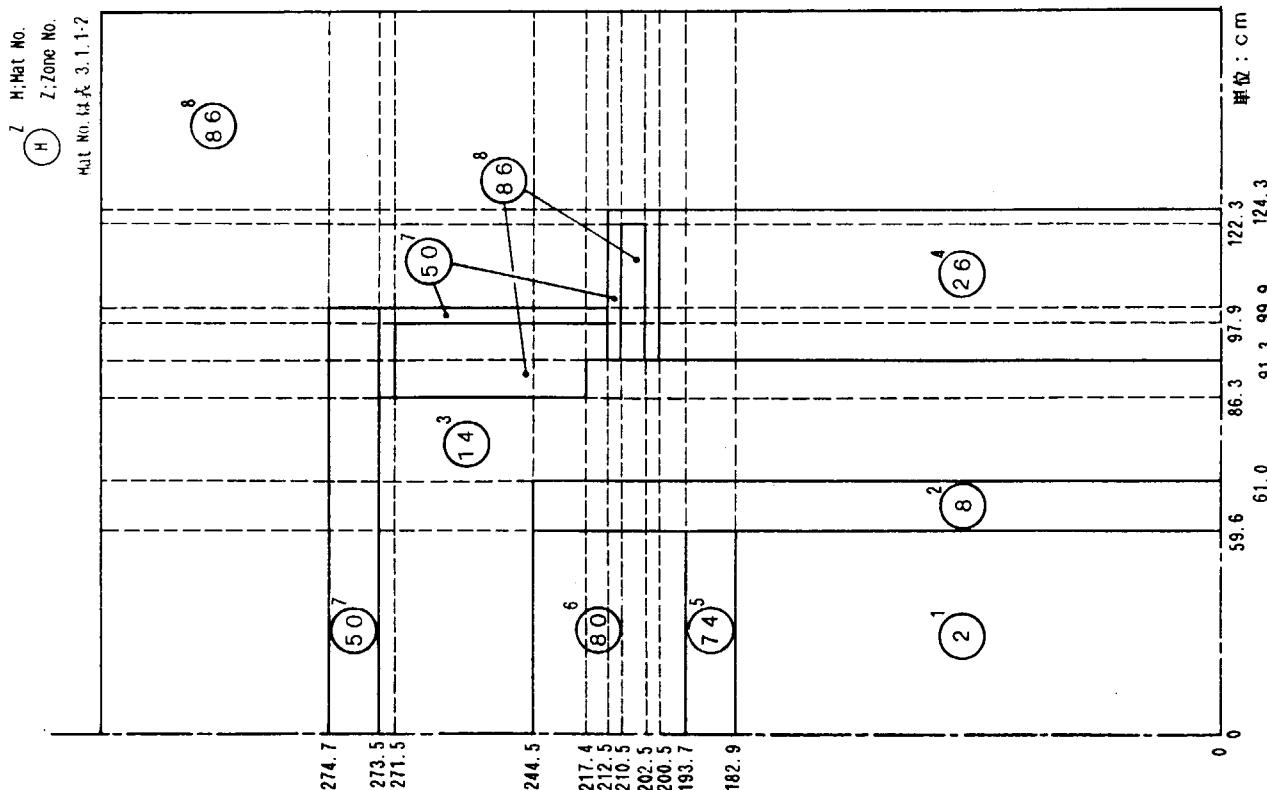


図 3.1.1-1 TN12計算モデル図

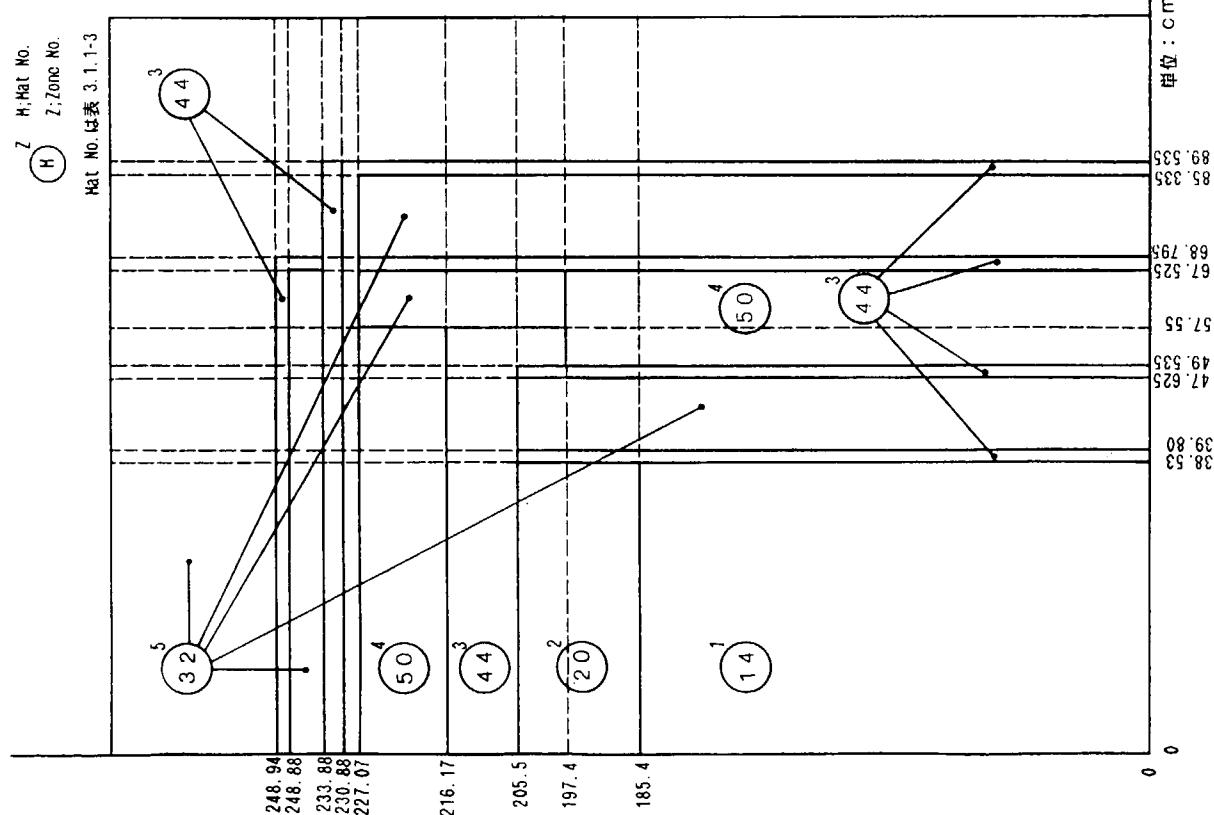


図 3.1.1-2 HZ5 計算モデル図

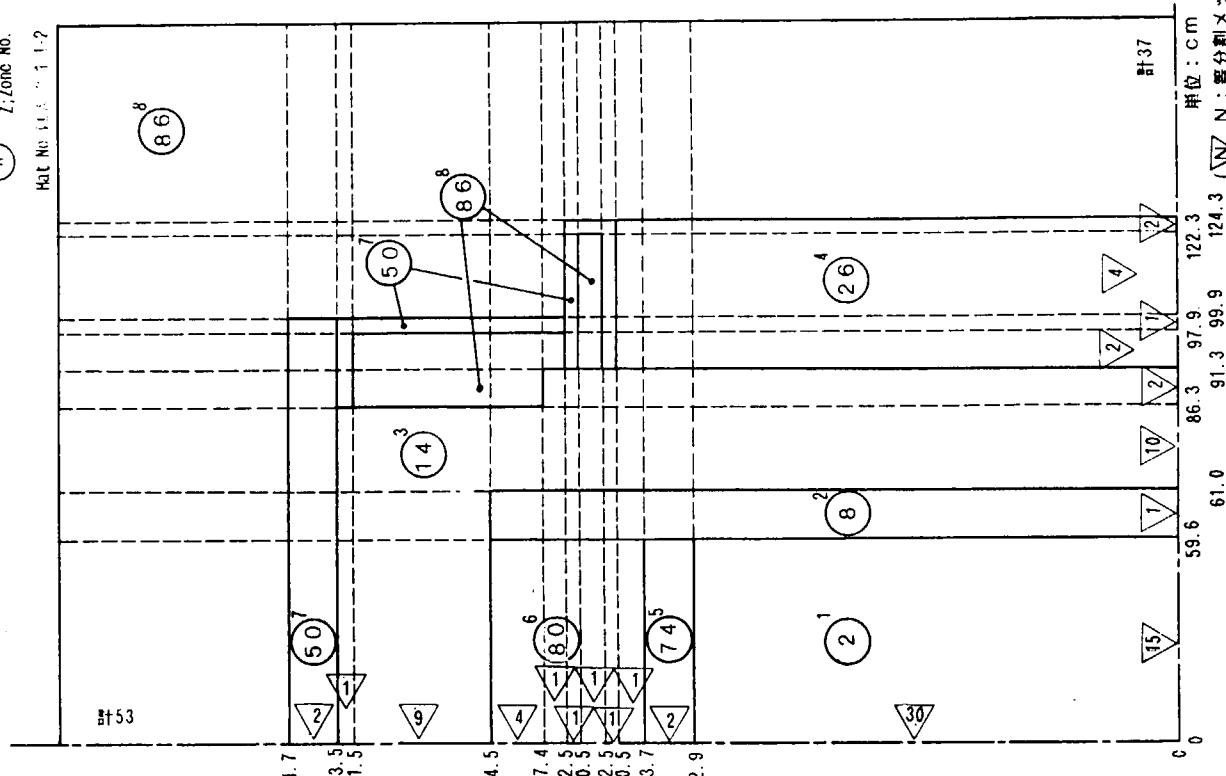
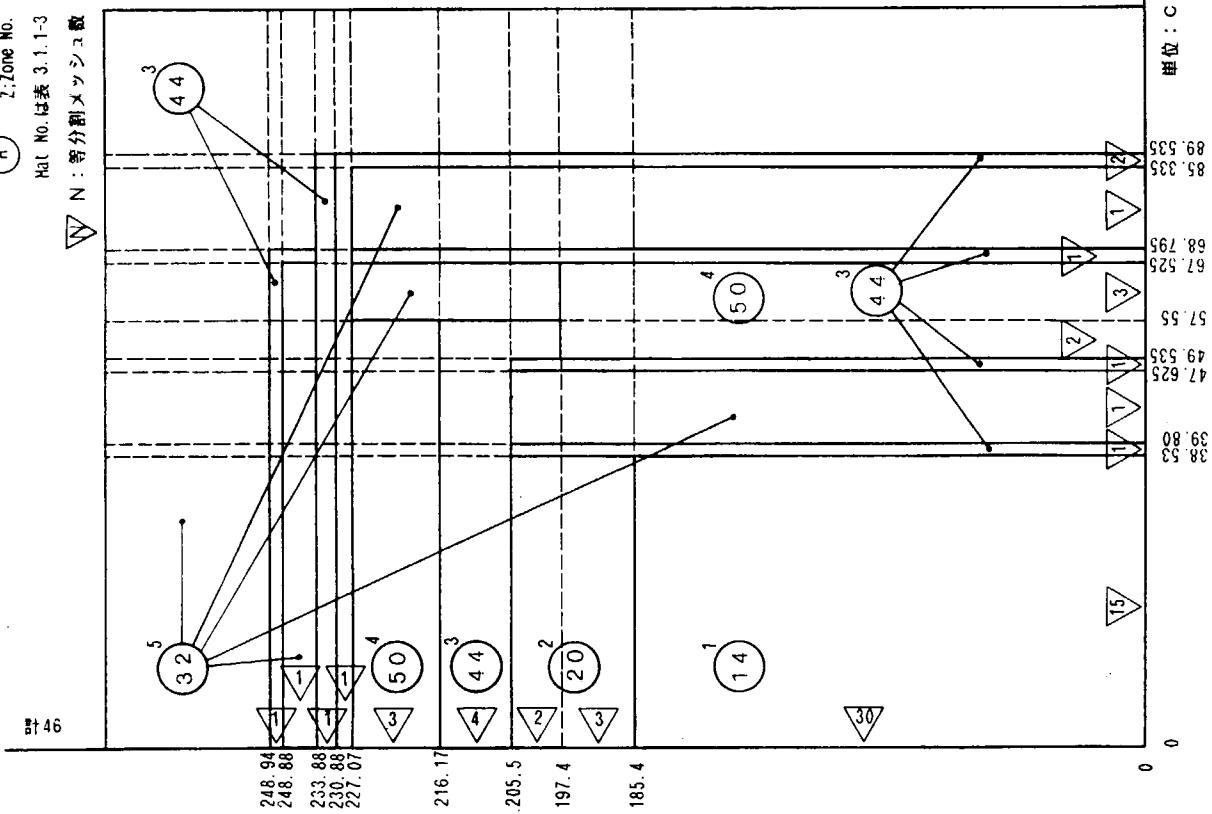
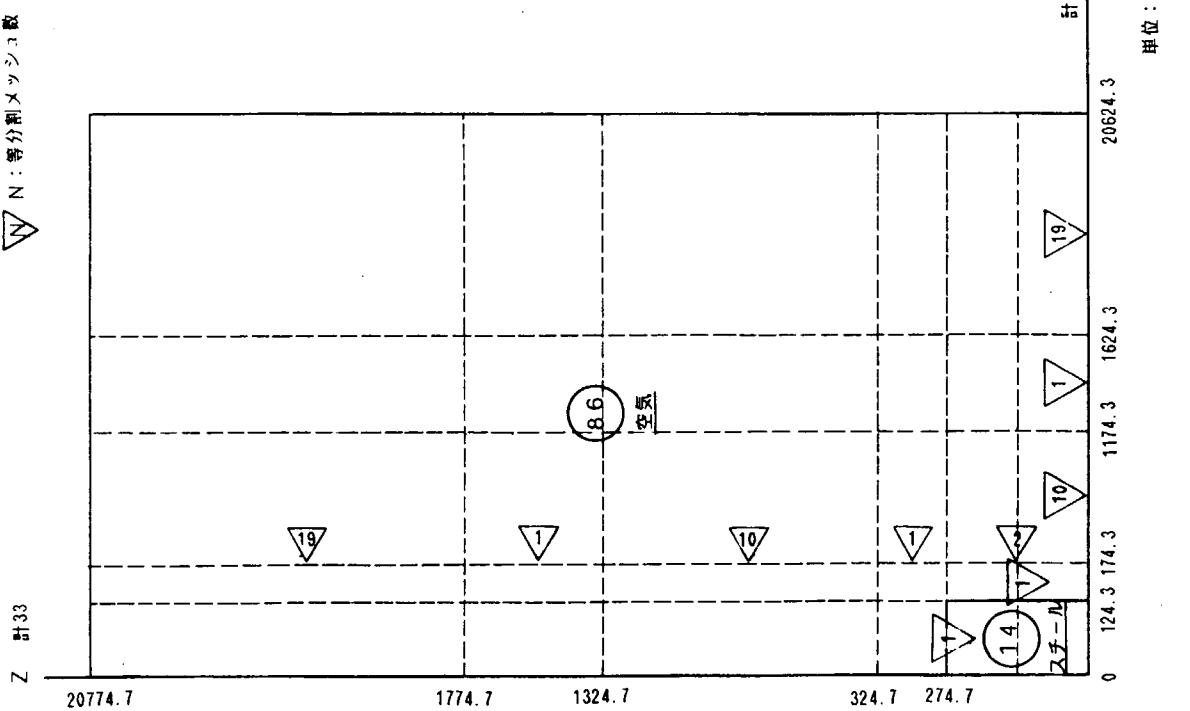


図 3.1.1-3 TN12 1次計算メッシュ分割図



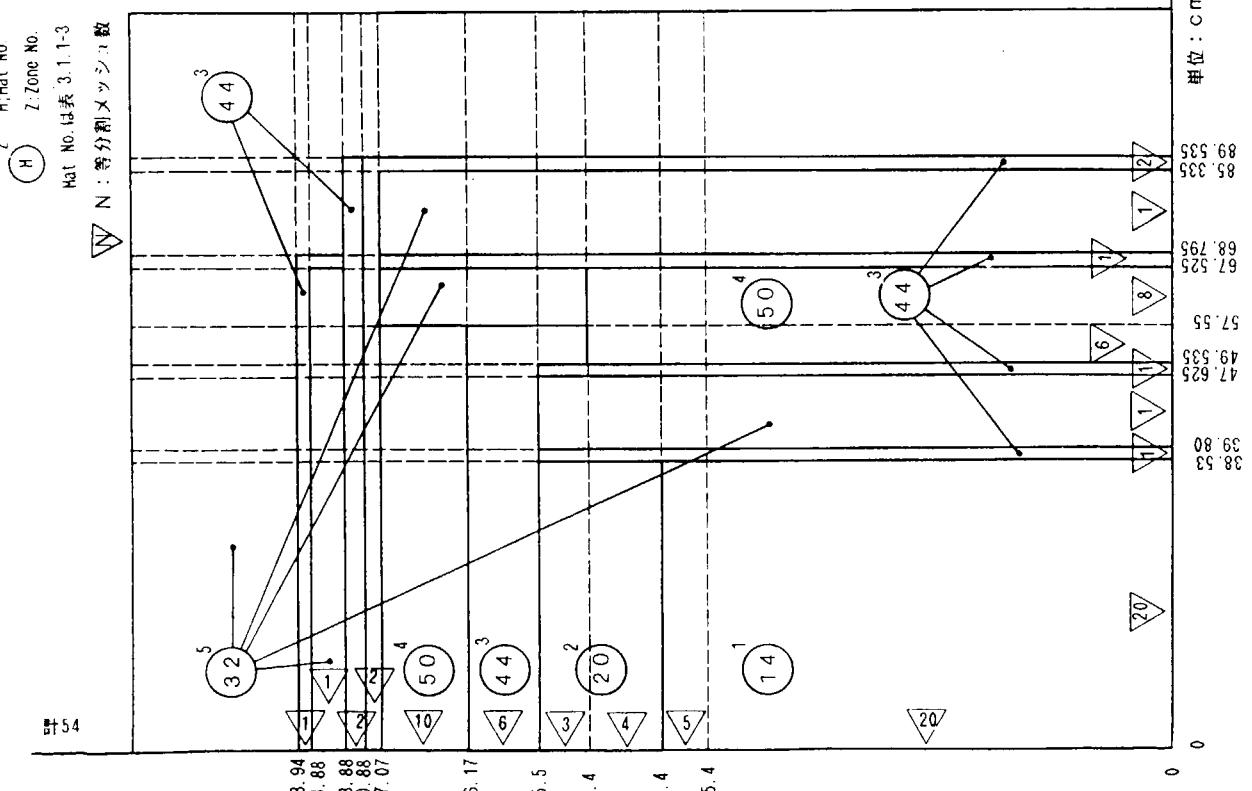


図 3.1.1-6 HZ75 1次計算メッシュ分佈図(ガンマ線)

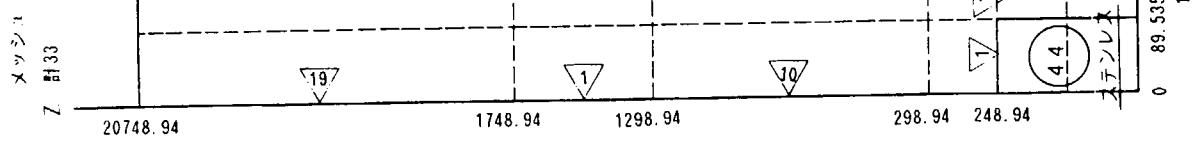


図 3.1.1-7 HZ75 2次計算メッシュ分佈図

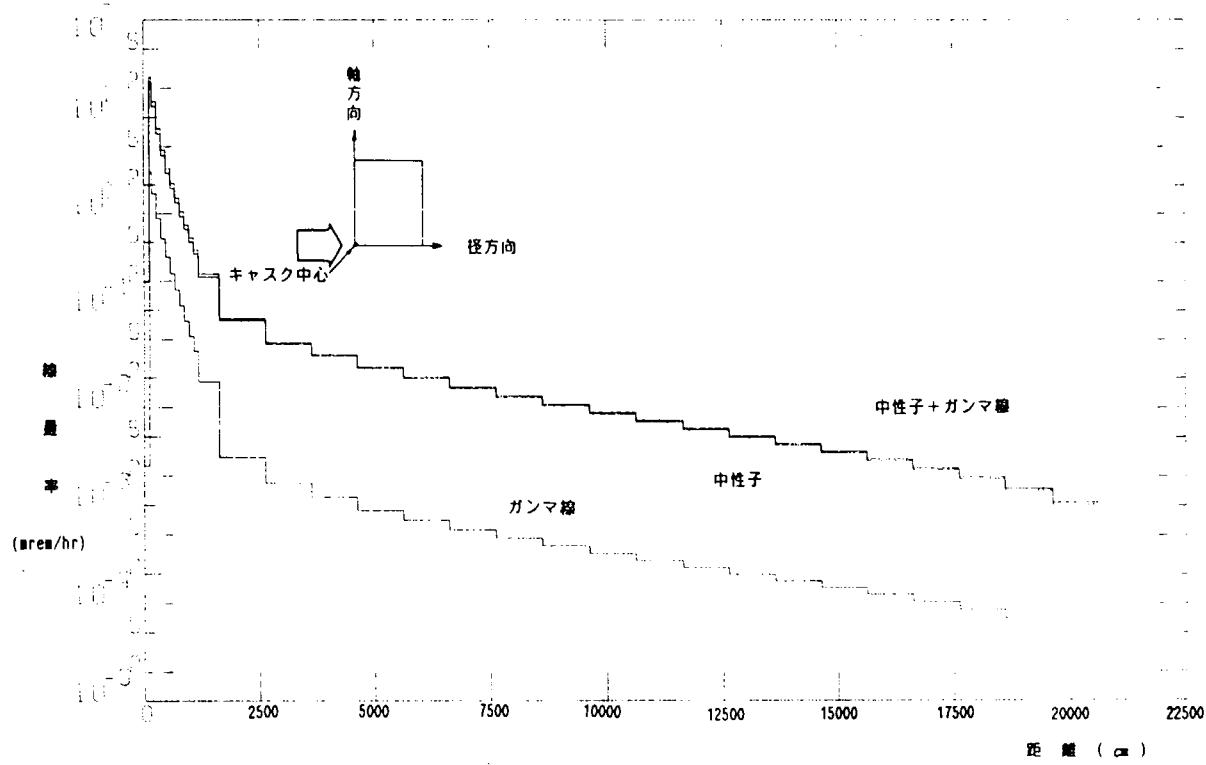


図 3.1.1-8 TN12 キャスク外部径方向線量率分布

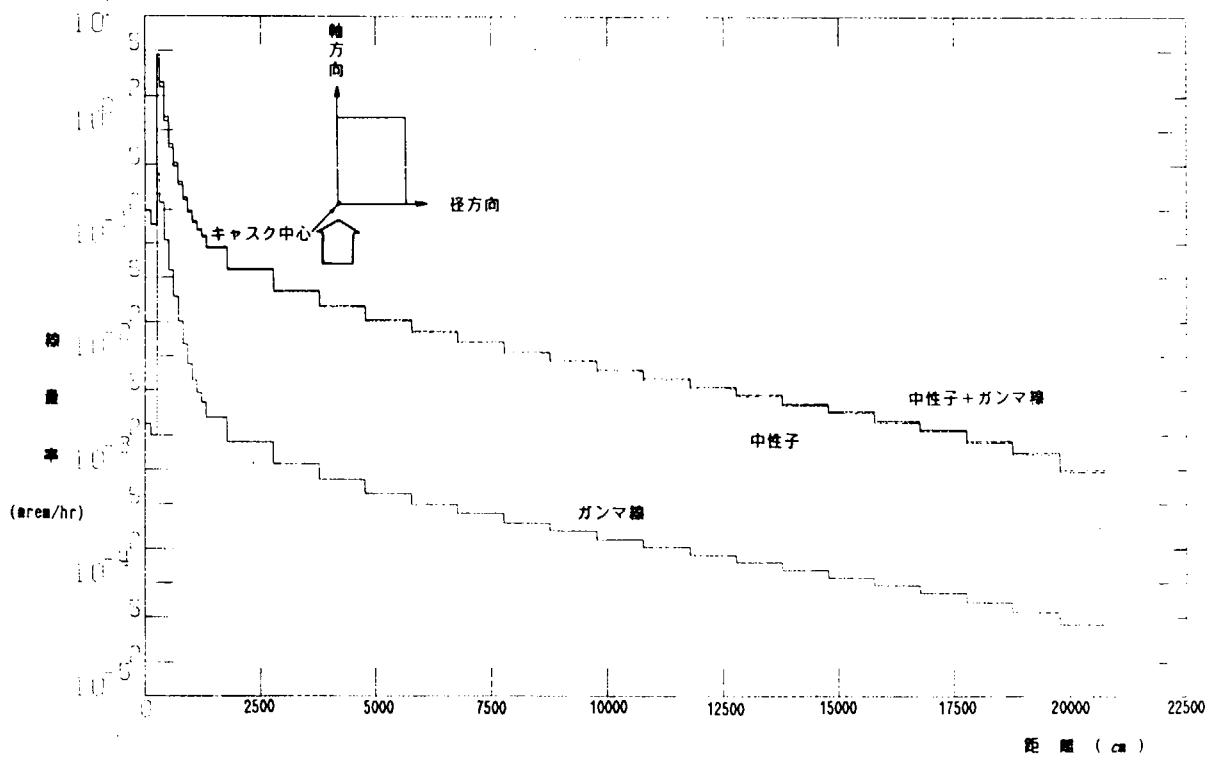


図 3.1.1-9 TN12 キャスク外部軸方向線量率分布

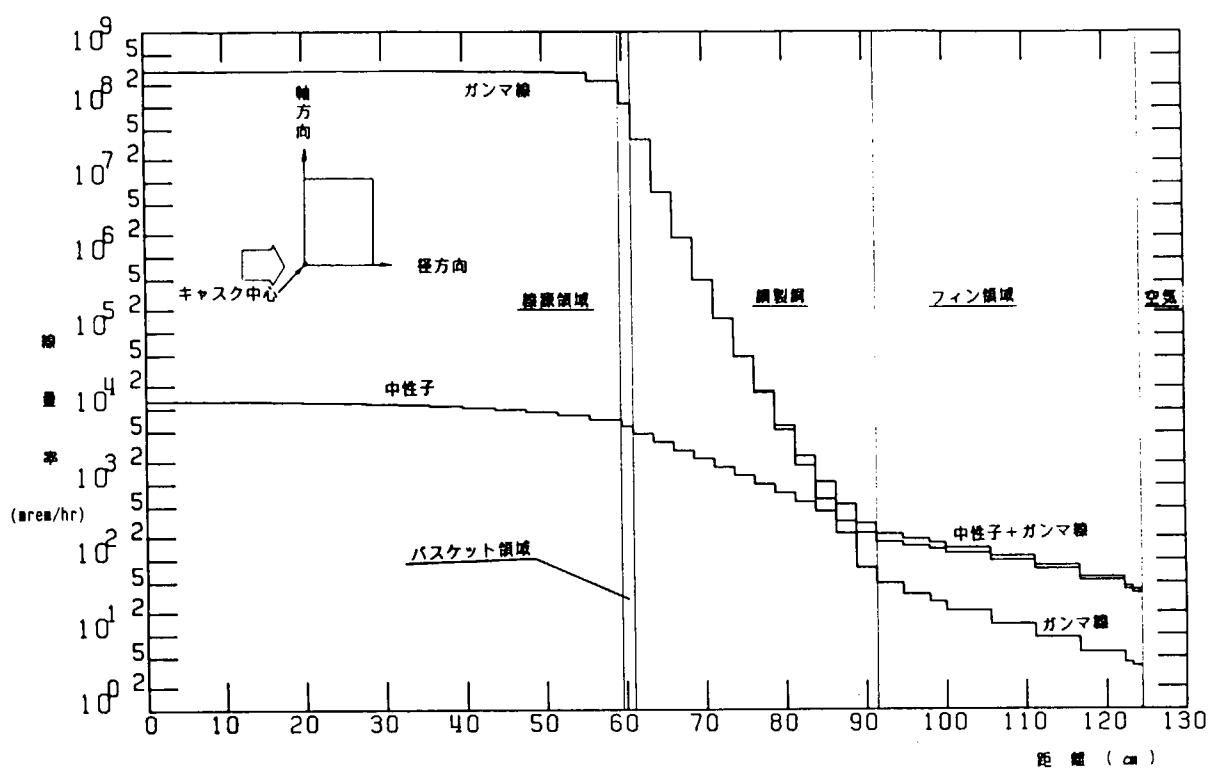


図 3.1.1-10 TN12 キャスク内部中心径方向線量率分布

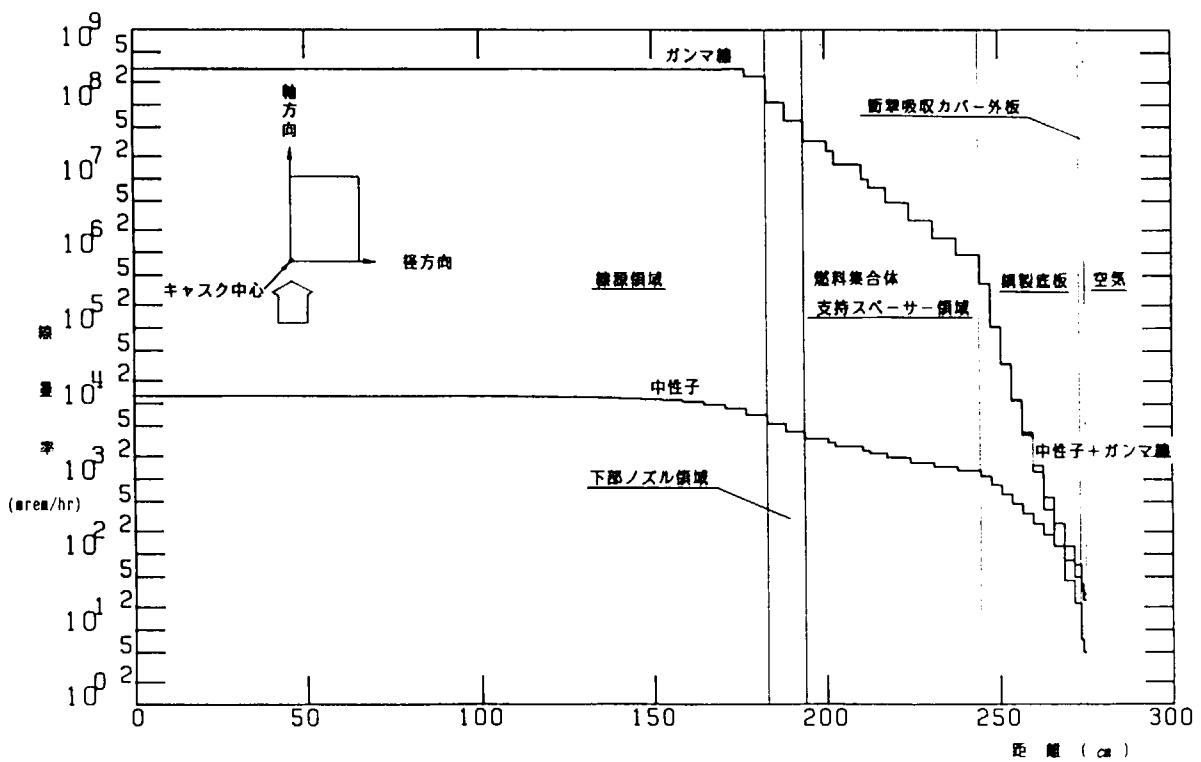


図 3.1.1-11 TN12 キャスク内部中心軸方向線量率分布

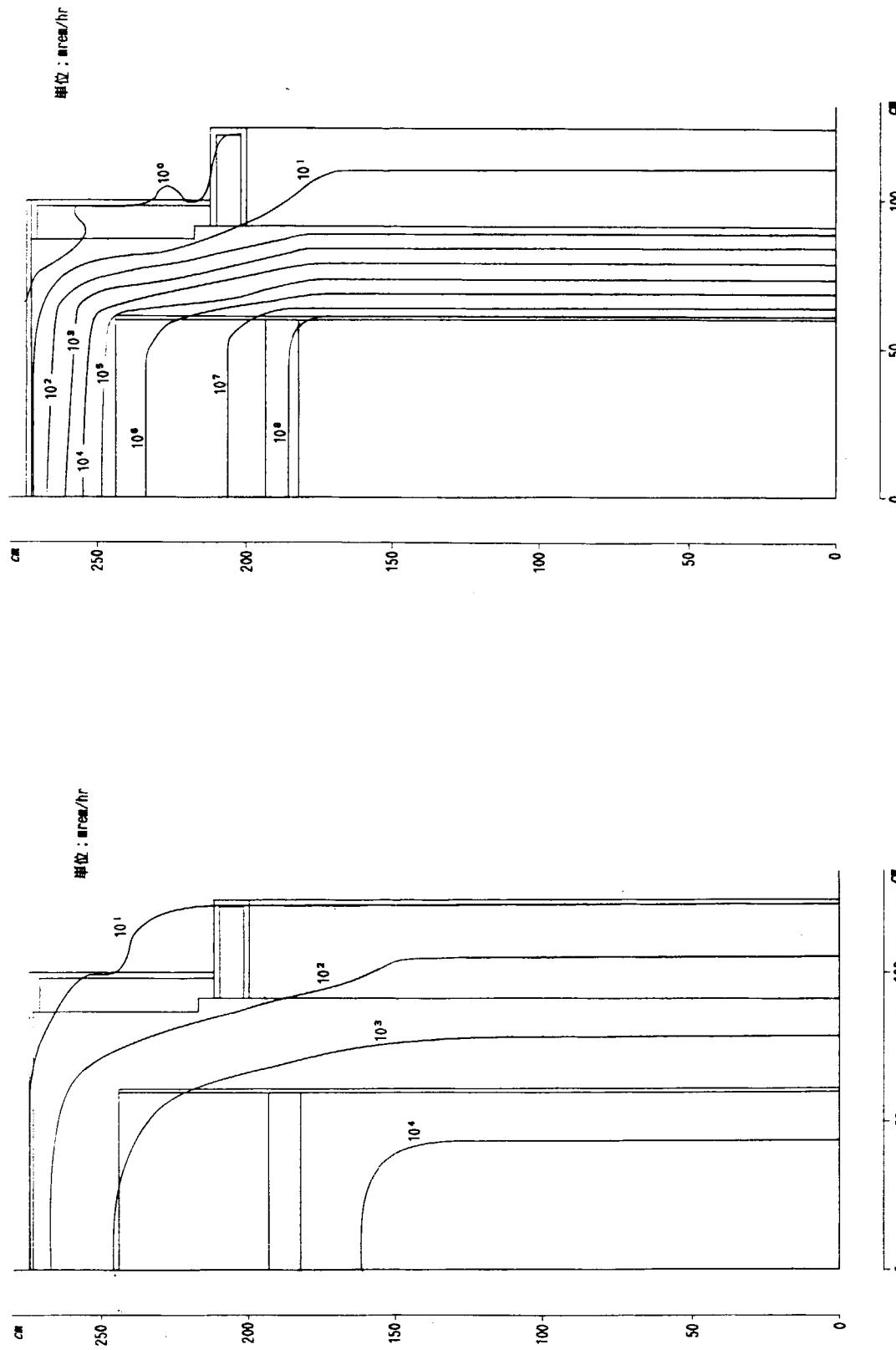


図 3.1.1-1 2 TN12 キャスク内部中性子 2 次元線量率分布

図 3.1.1-1 3 TN12 キャスク内部ガンマ線 2 次元線量率分布

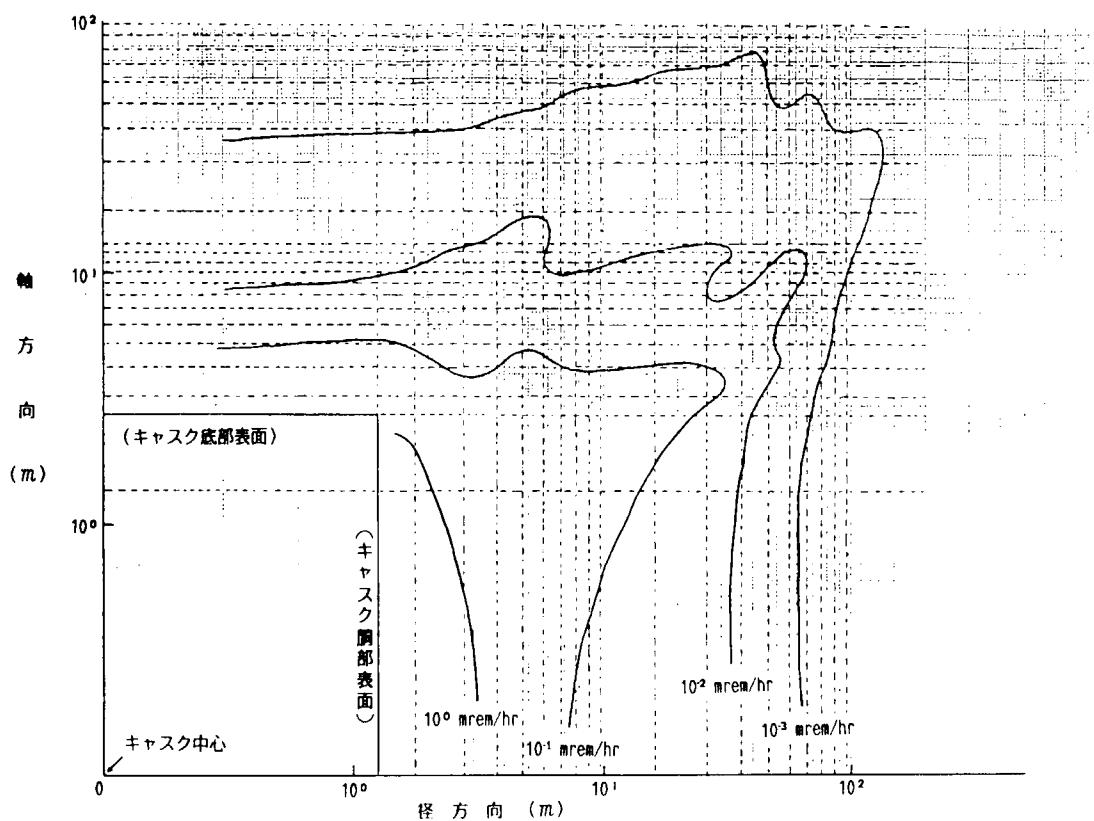


図 3.1.1-14 TN12 キャスク外部中性子 2 次元線量率分布

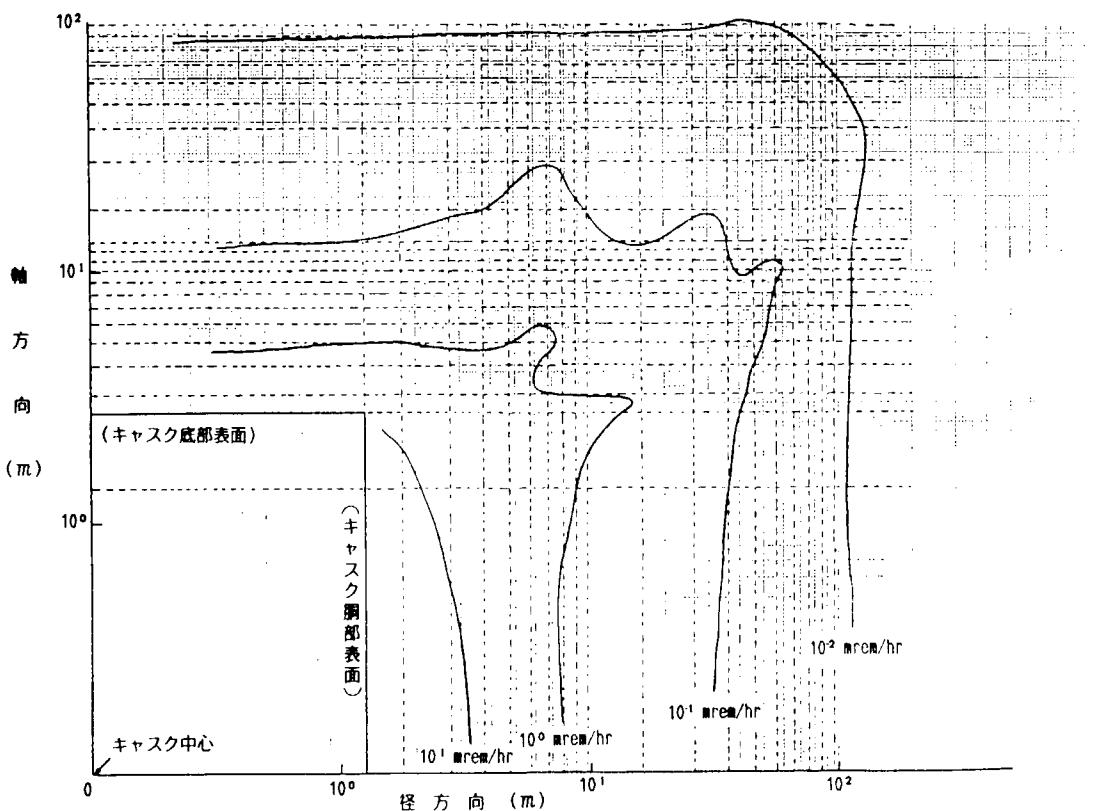


図 3.1.1-15 TN12 キャスク外部ガンマ線 2 次元線量率分布

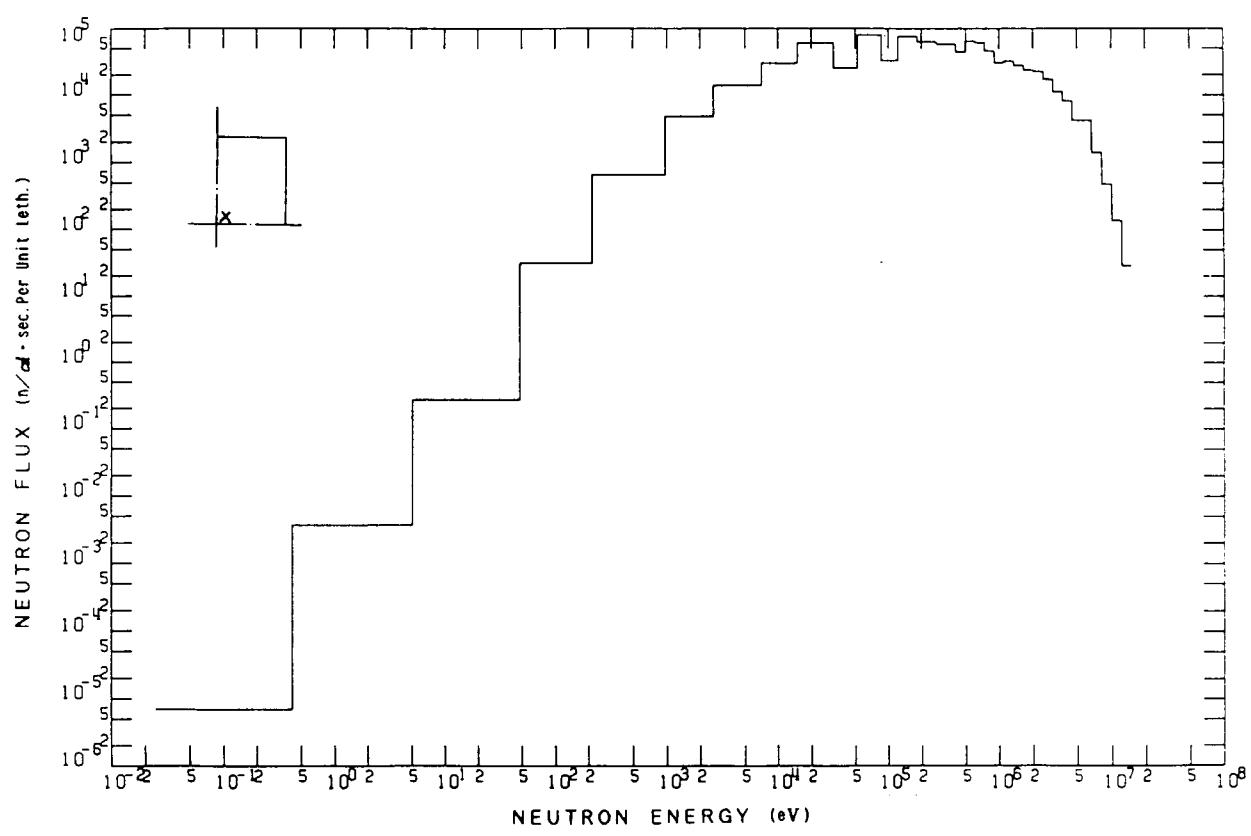


図 3.1.1-16 TN12 キャスク中心中性子エネルギースペクトル

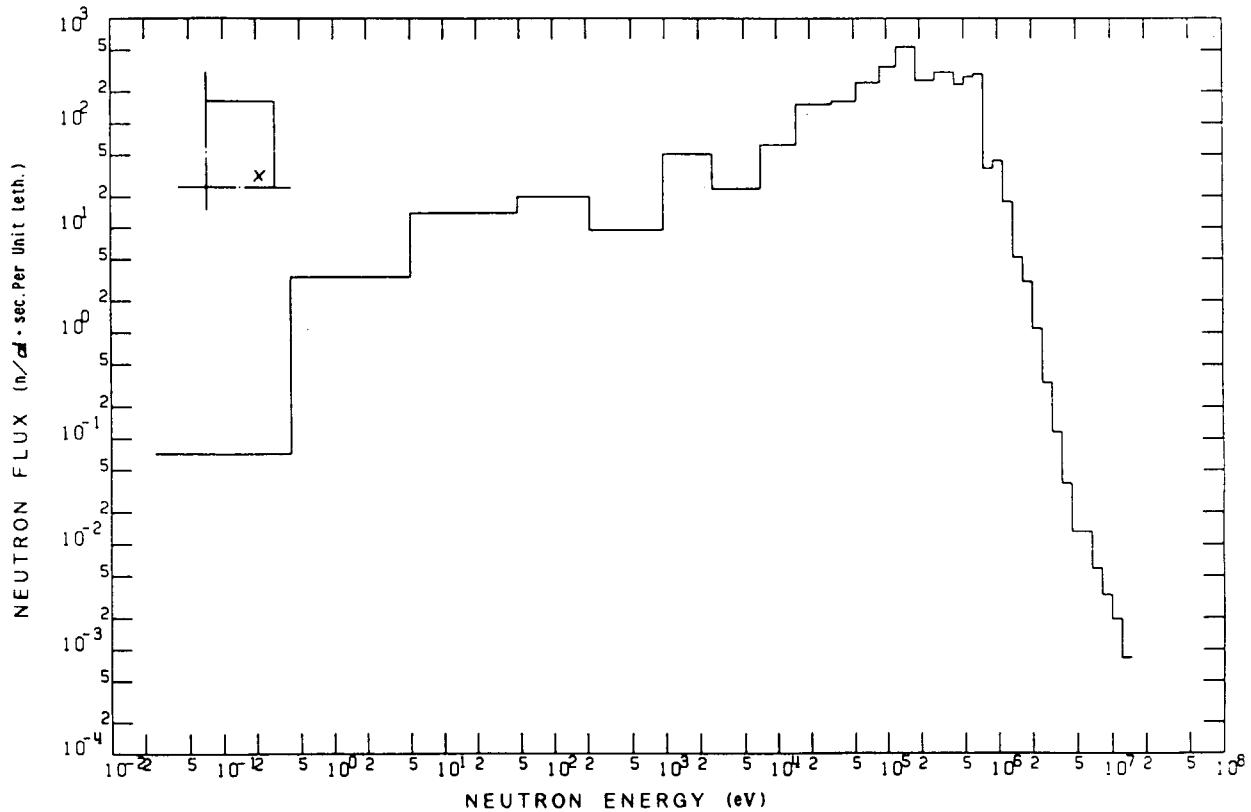


図 3.1.1-17 TN12 キャスク胸部表面中心

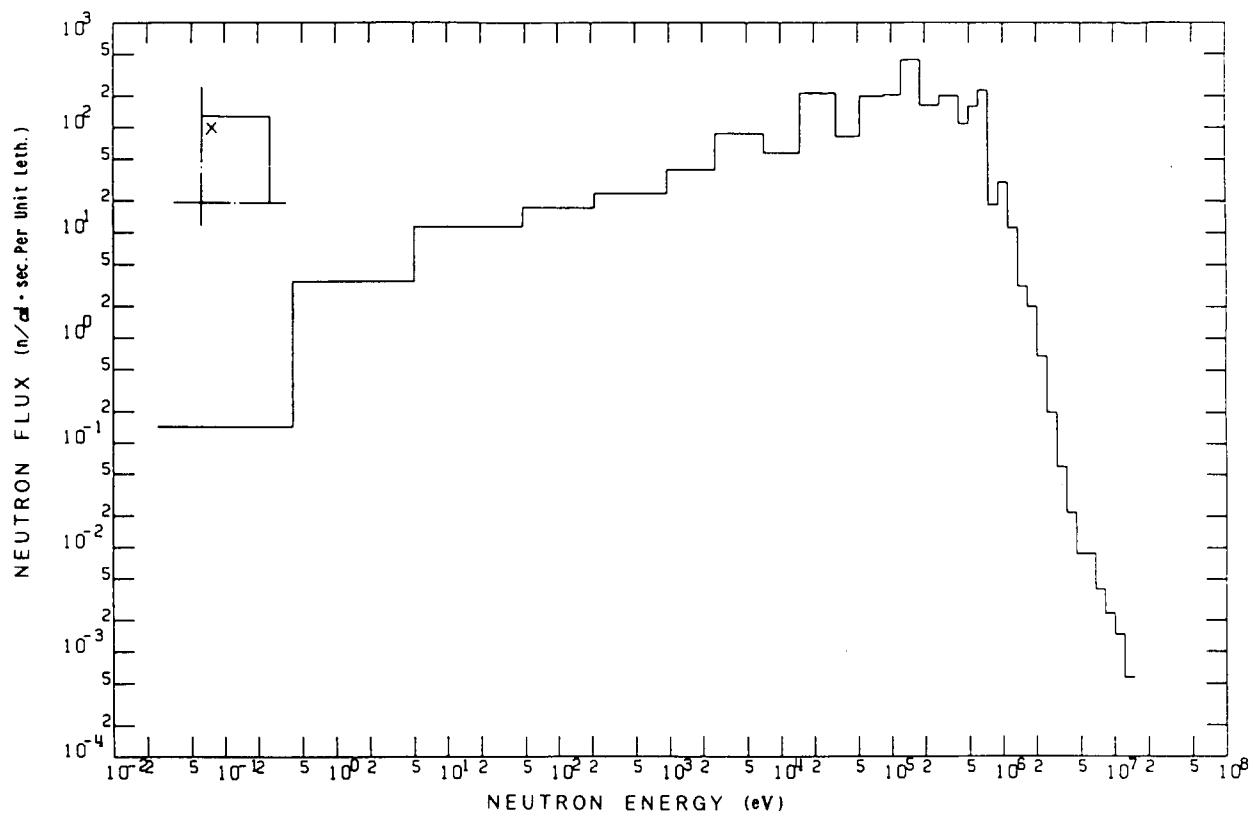


図 3.1.1-18 TN12 キャスク底部表面中心

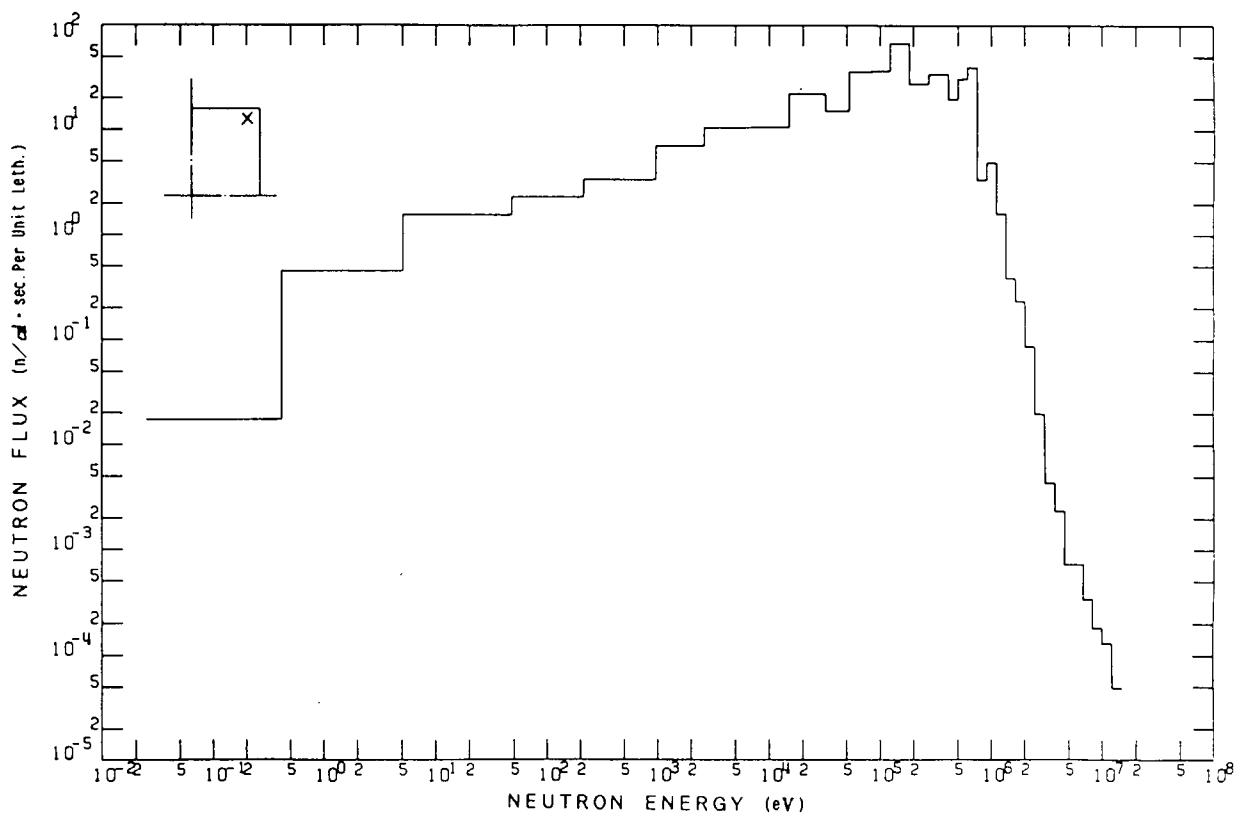


図 3.1.1-19 TN12 キャスク底部外周表面

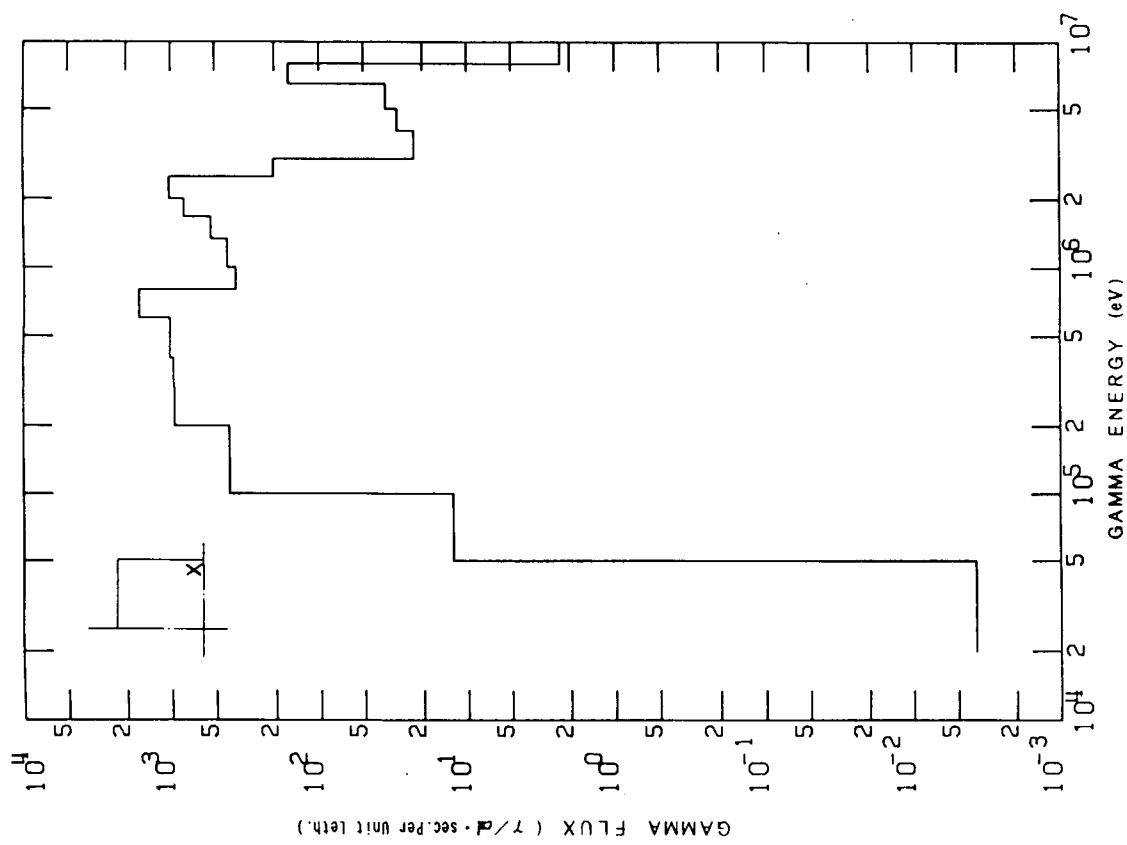


図 3.1.1 - 2 1 TN12 キャスク胸部表面中心

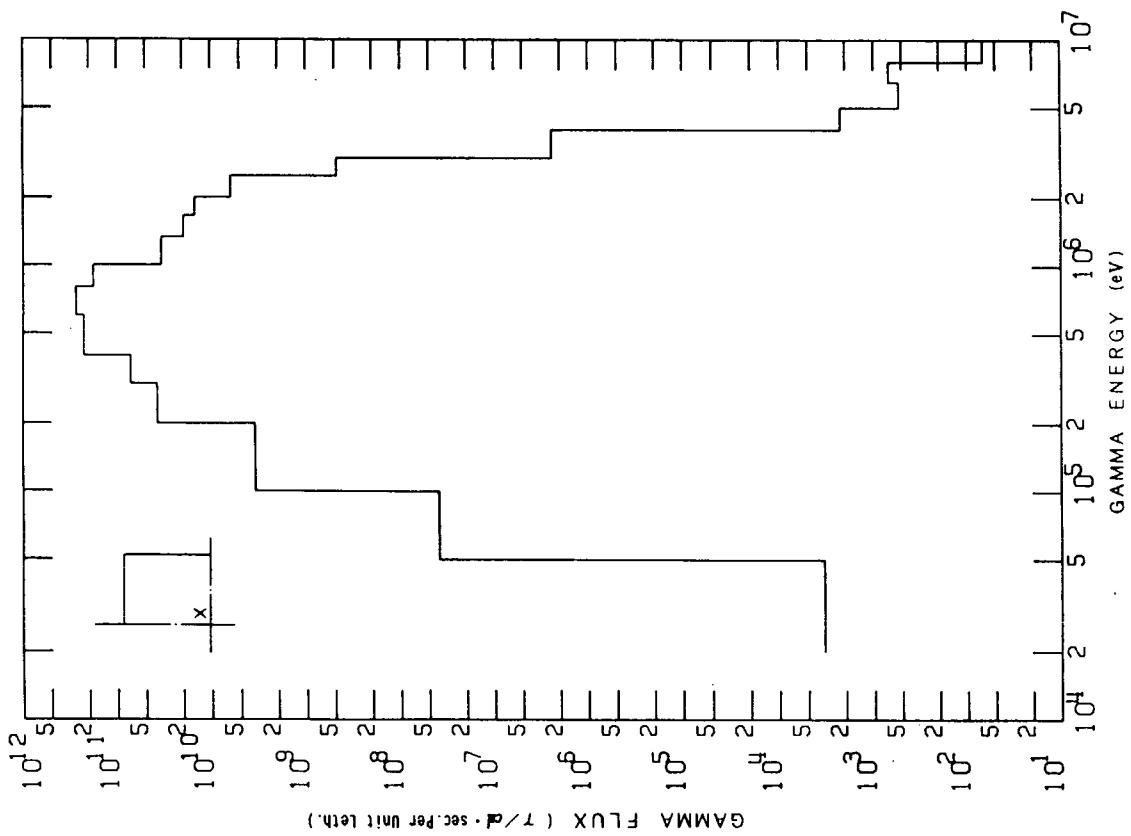


図 3.1.1 - 2 0 TN12 キャスク中心ガンマ線エネルギースペクトル

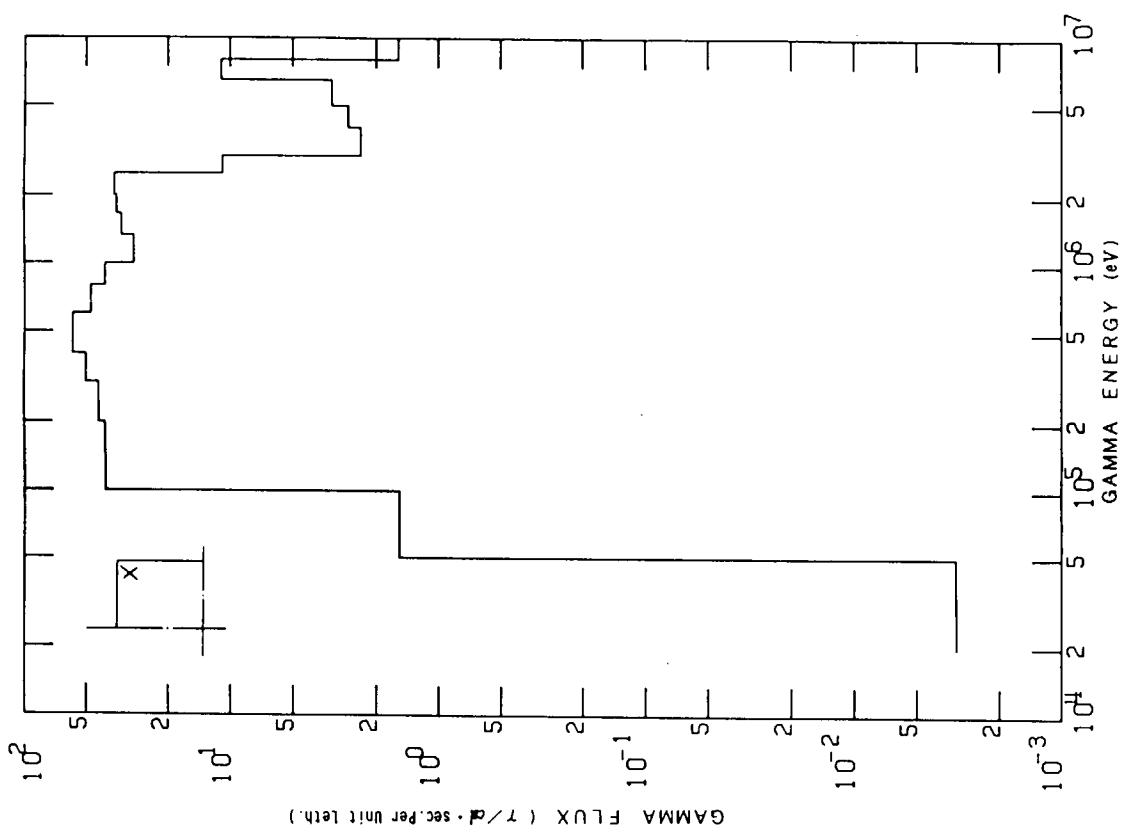


図 3.1.1-2 3 TN12 キャスク底部外周表面

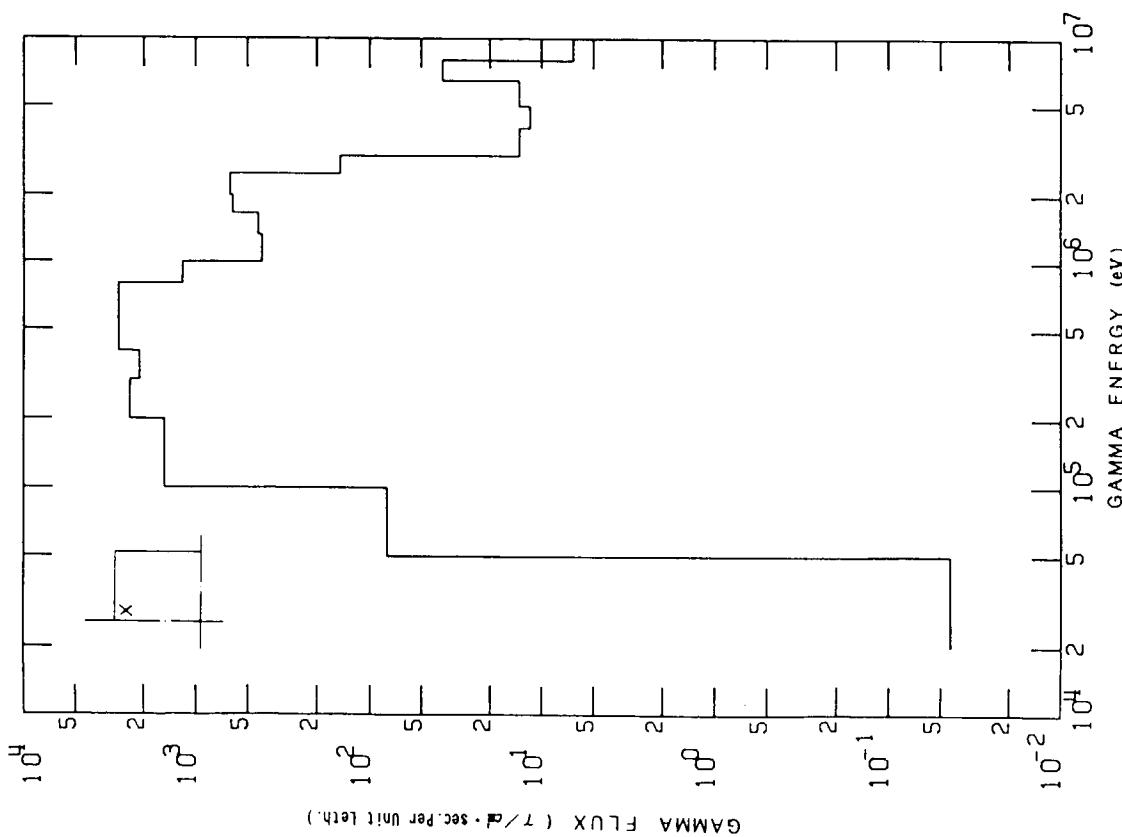


図 3.1.1-2 2 TN12 キャスク底部表面中心

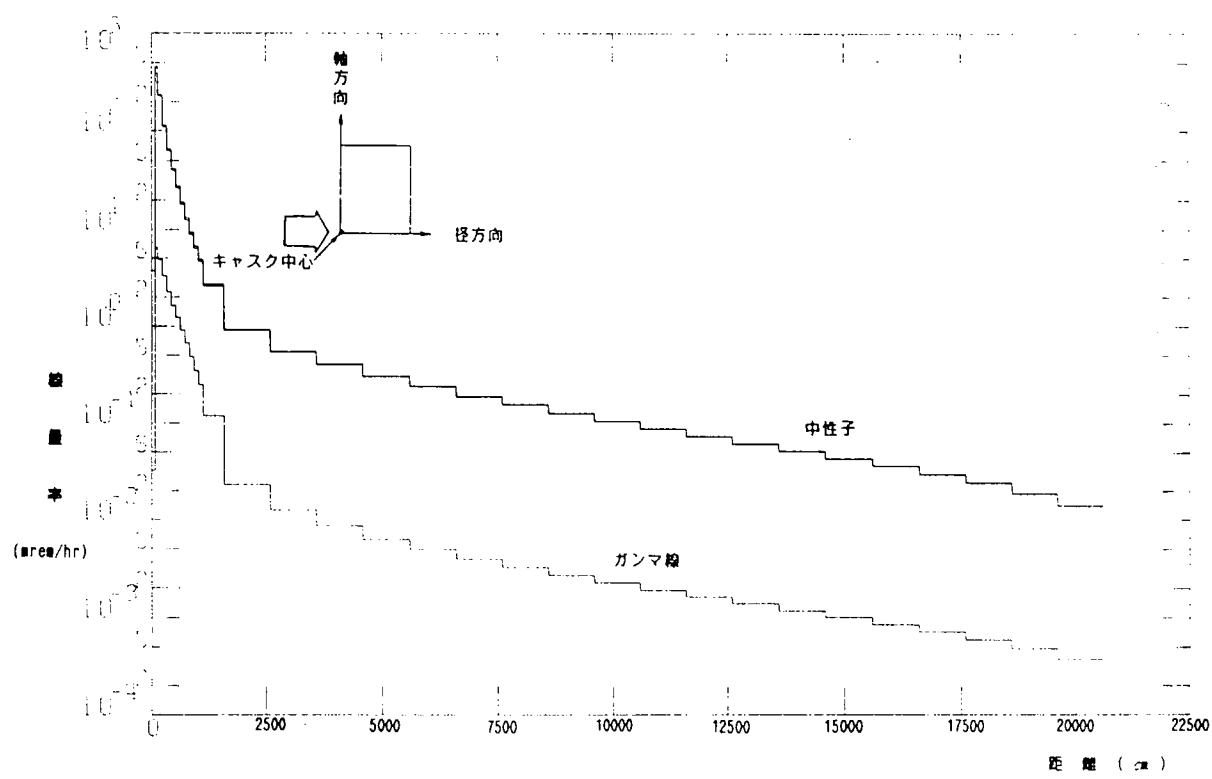


図 3.1.1 - 24 HZ 75 キャスク外部径方向線量率分布

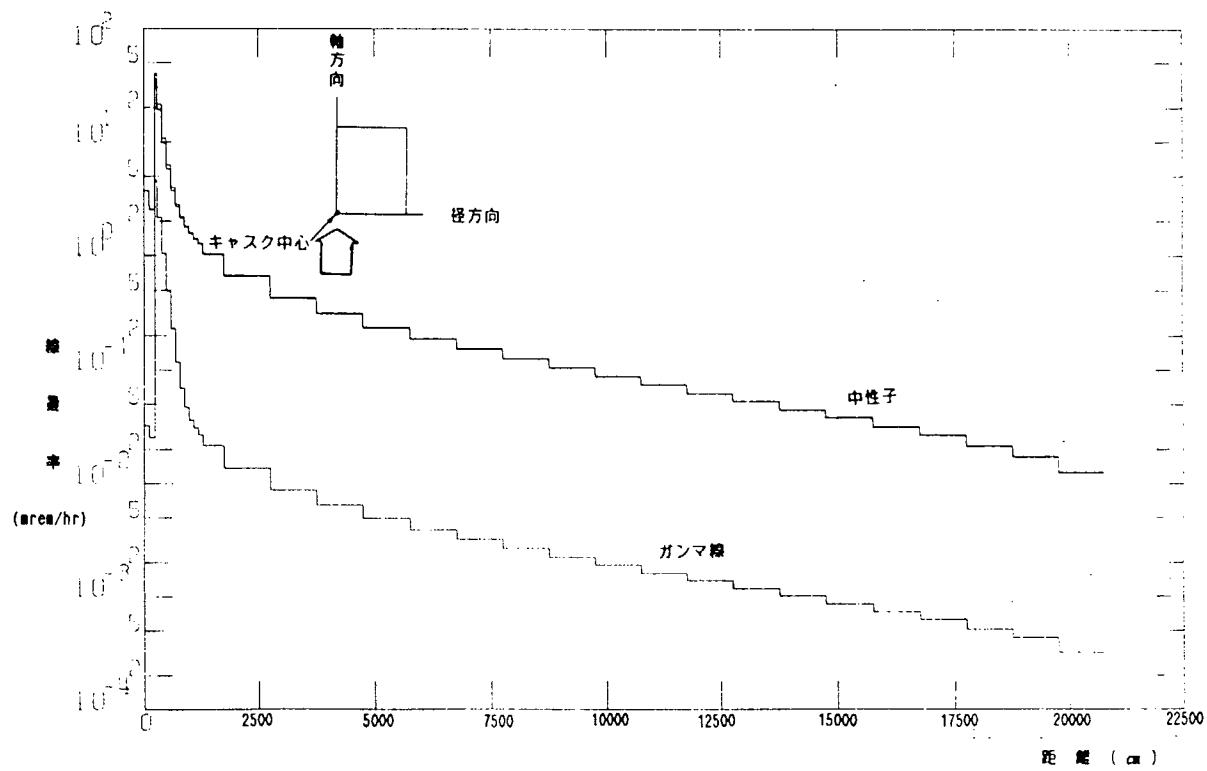


図 3.1.1 - 25 HZ 75 キャスク外部軸方向線量率分布

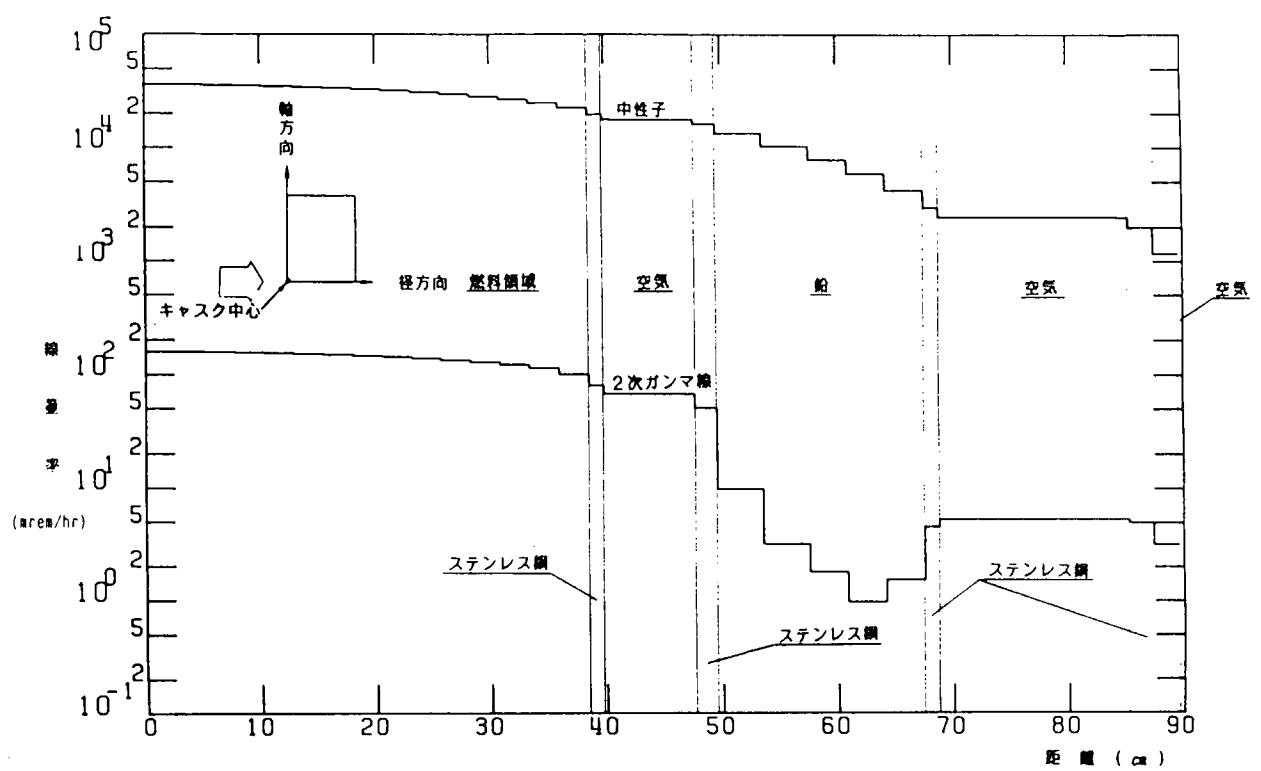


図 3.1.1-26 HZ 75 キャスク内部中心径方向線量率分布(中性子)

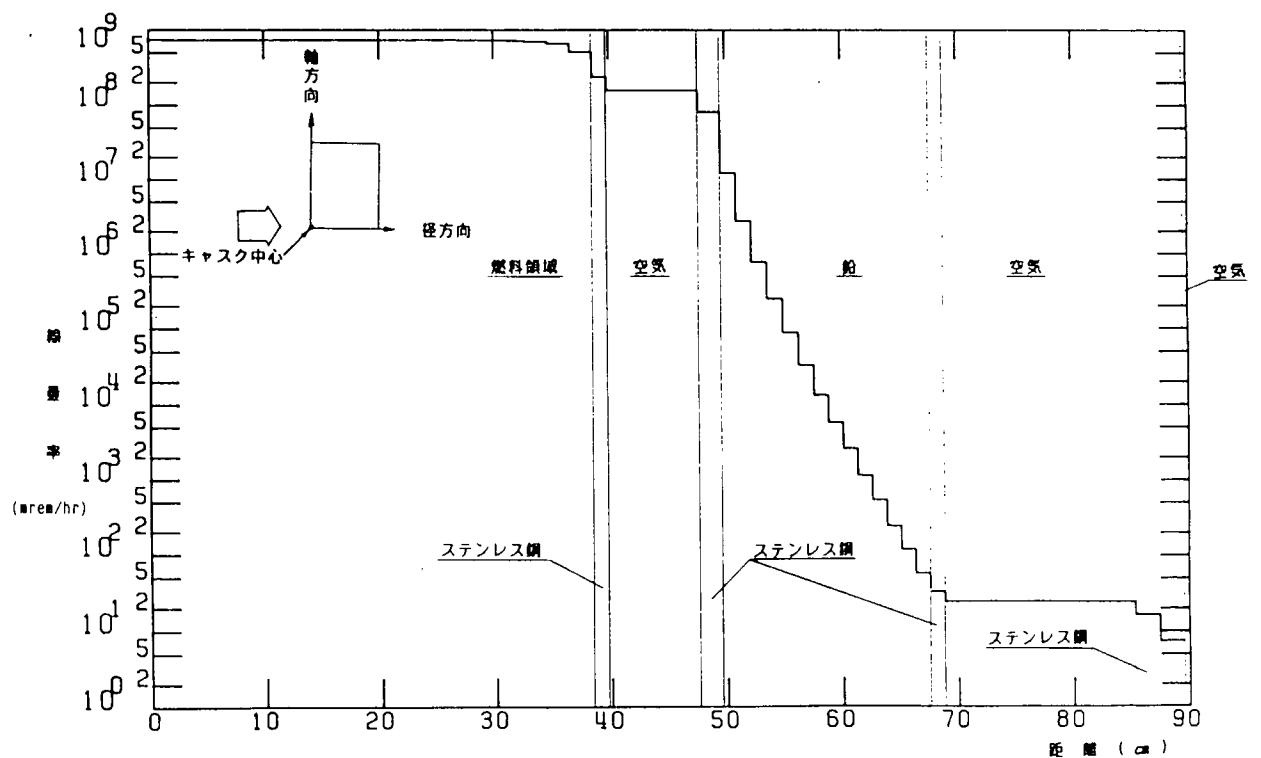


図 3.1.1-27 HZ 75 キャスク内部中心径方向線量率分布(ガンマ線)

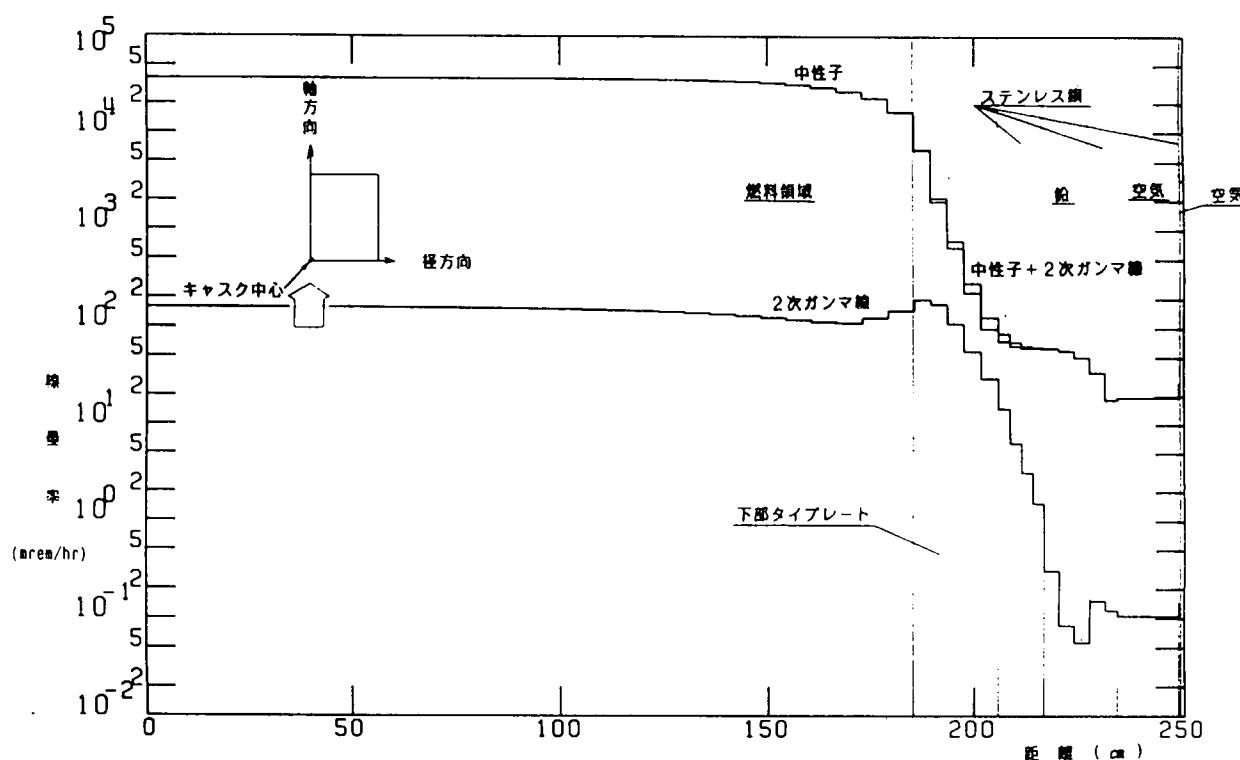


図 3.1.1-28 HZ 75 キャスク内部中心軸方向線量率分布(中性子)

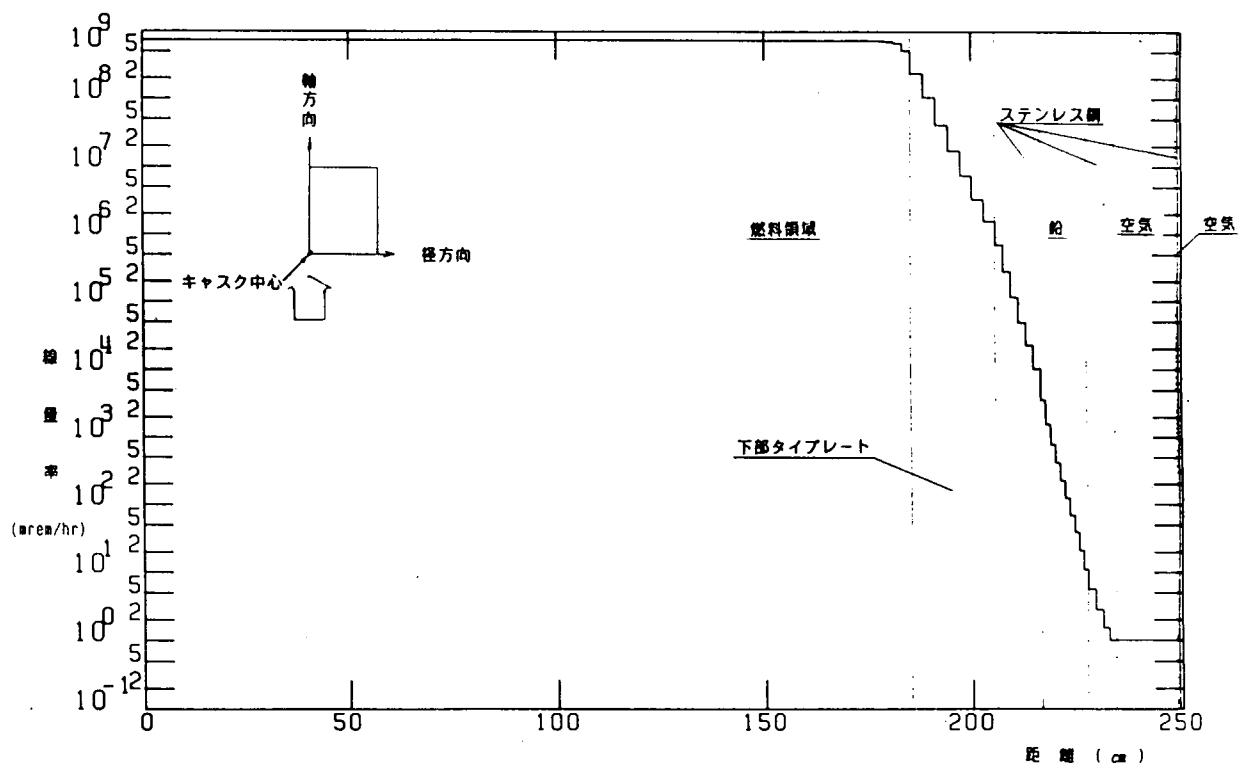
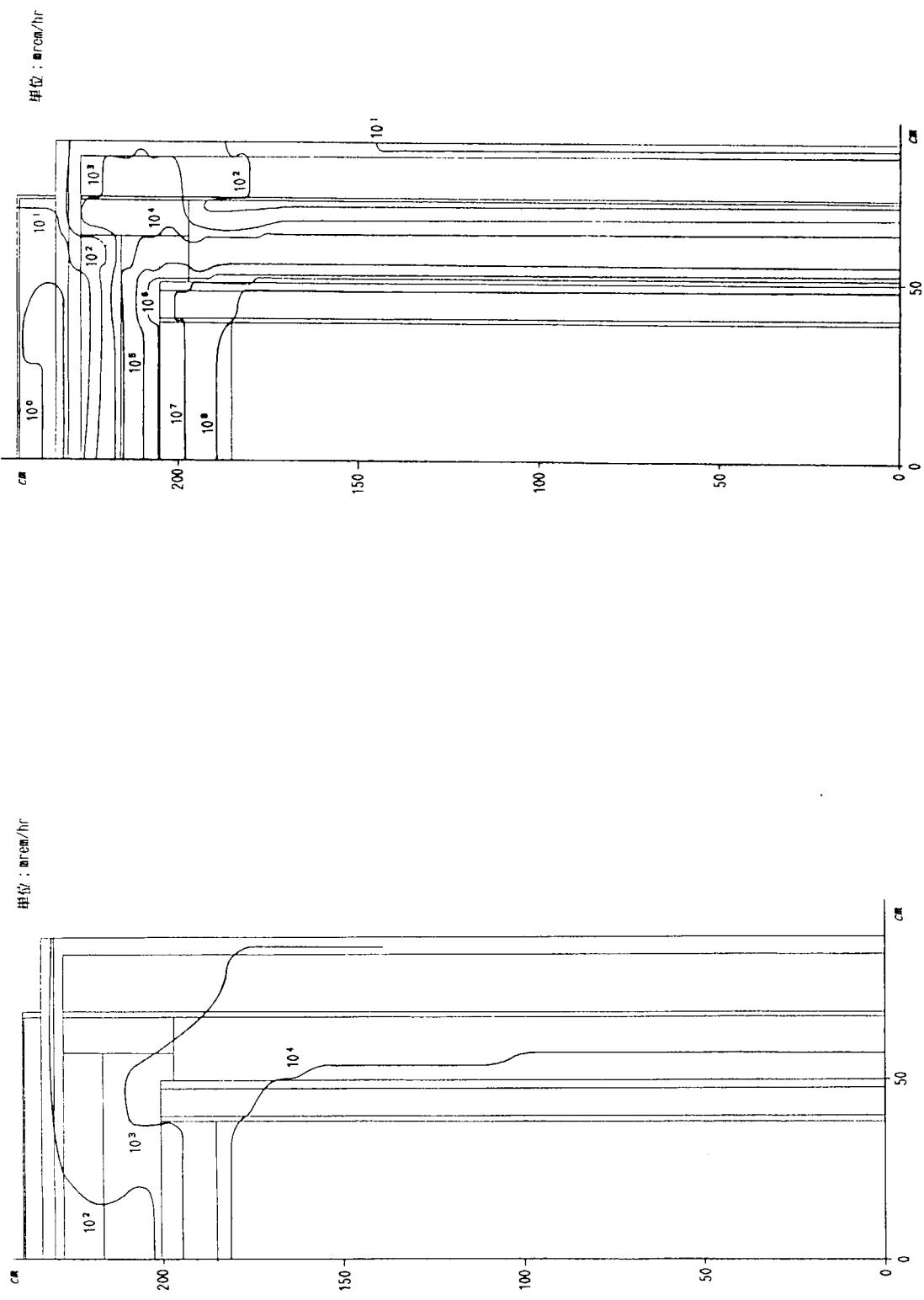


図 3.1.1-29 HZ 75 キャスク内部中心軸方向線量率分布(ガンマ線)

図 3.1.1-3 1 HZ 7 5 キャスク内部ガソーラン 2 次元線量率分布

図 3.1.1-3 0 HZ 7 5 キャスク内部中性子 2 次元線量率分布



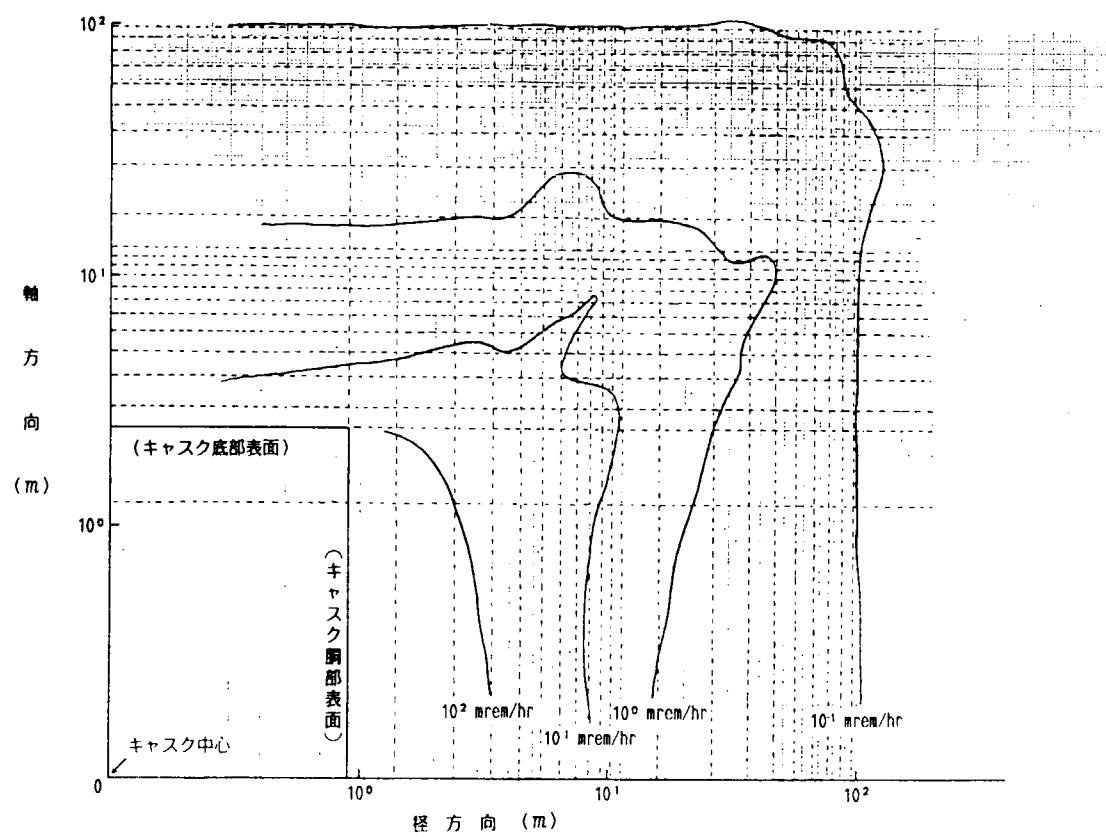


図 3.1.1-32 HZ 75 キャスク外部中性子 2 次元線量率分布

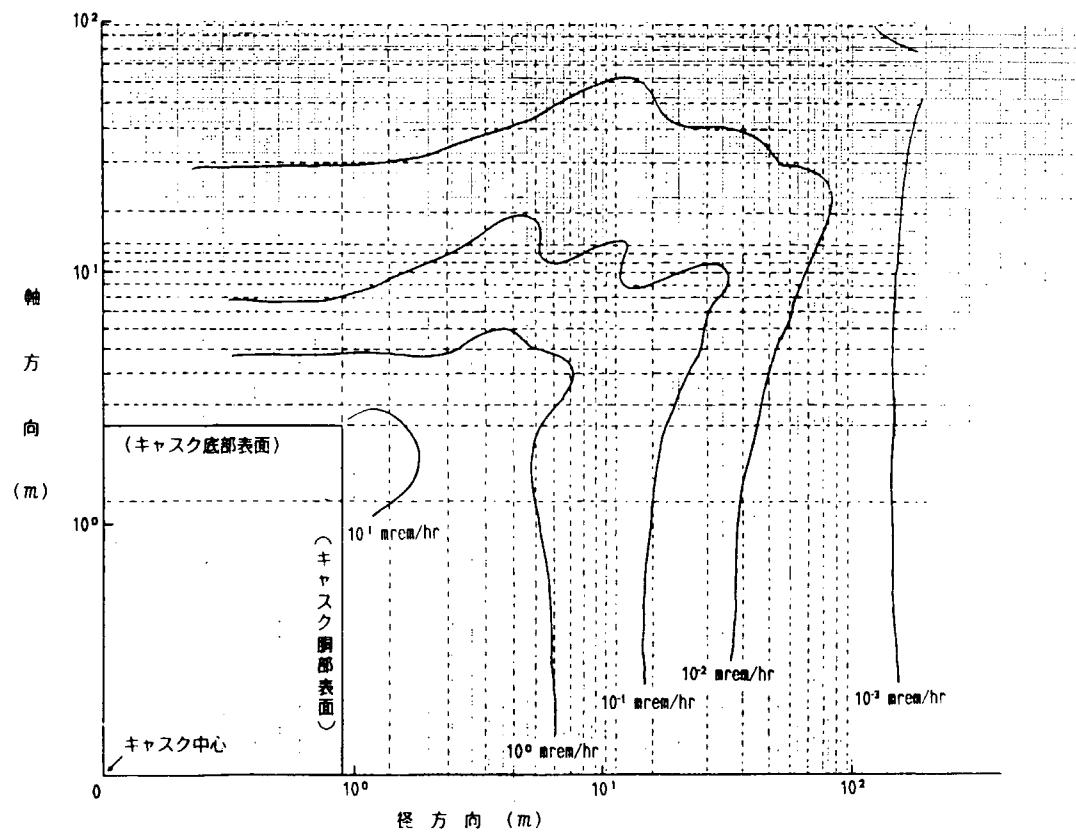


図 3.1.1-33 HZ 75 キャスク外部ガンマ線 2 次元線量率分布

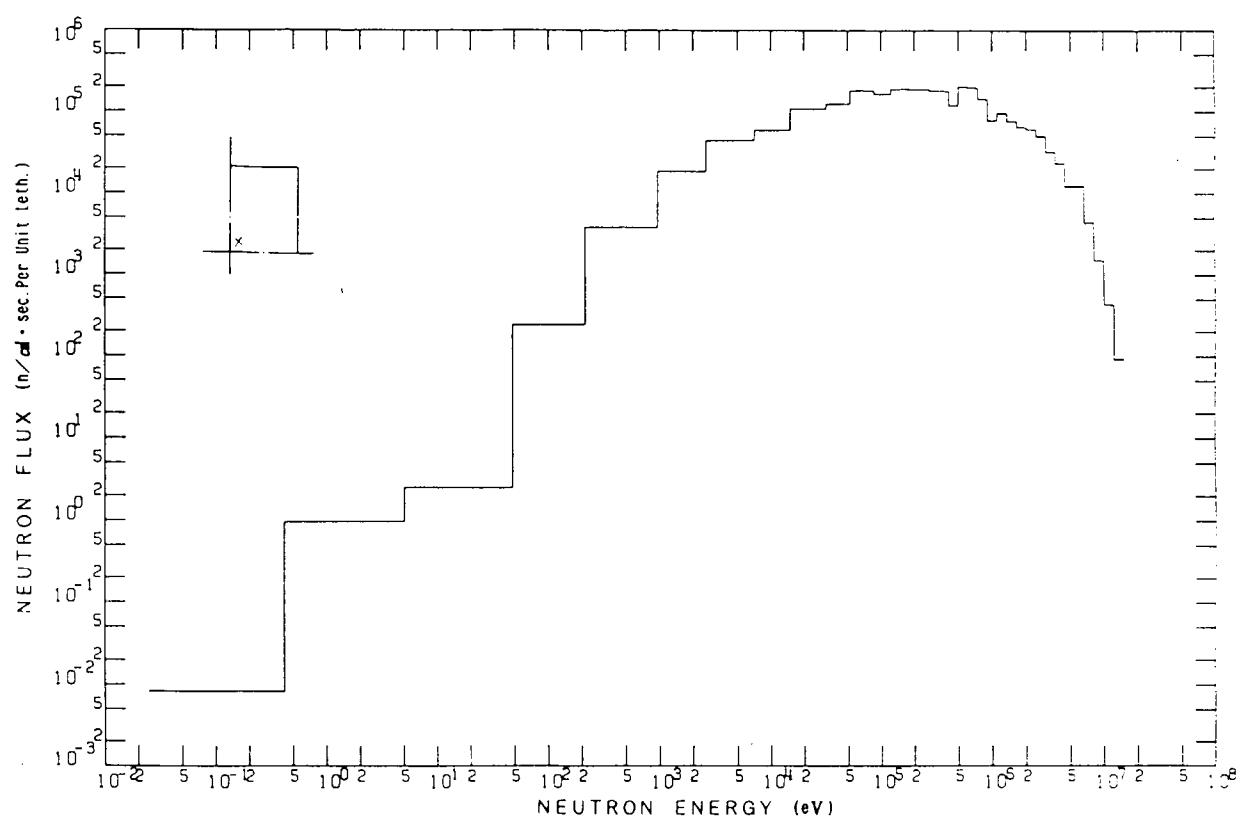


図 3.1.1-3.4 HZ 75 キャスク中心中性子エネルギースペクトル

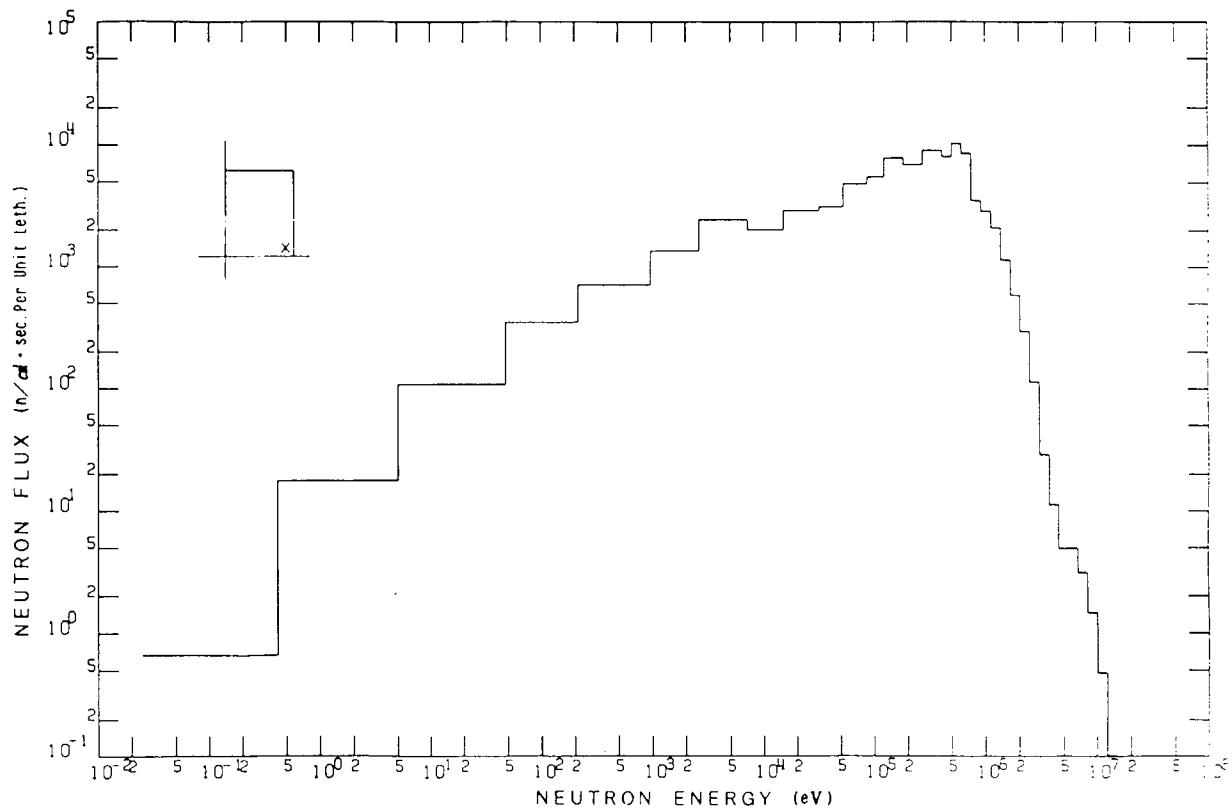


図 3.1.1-3.5 HZ 75 キャスク胴部表面中心

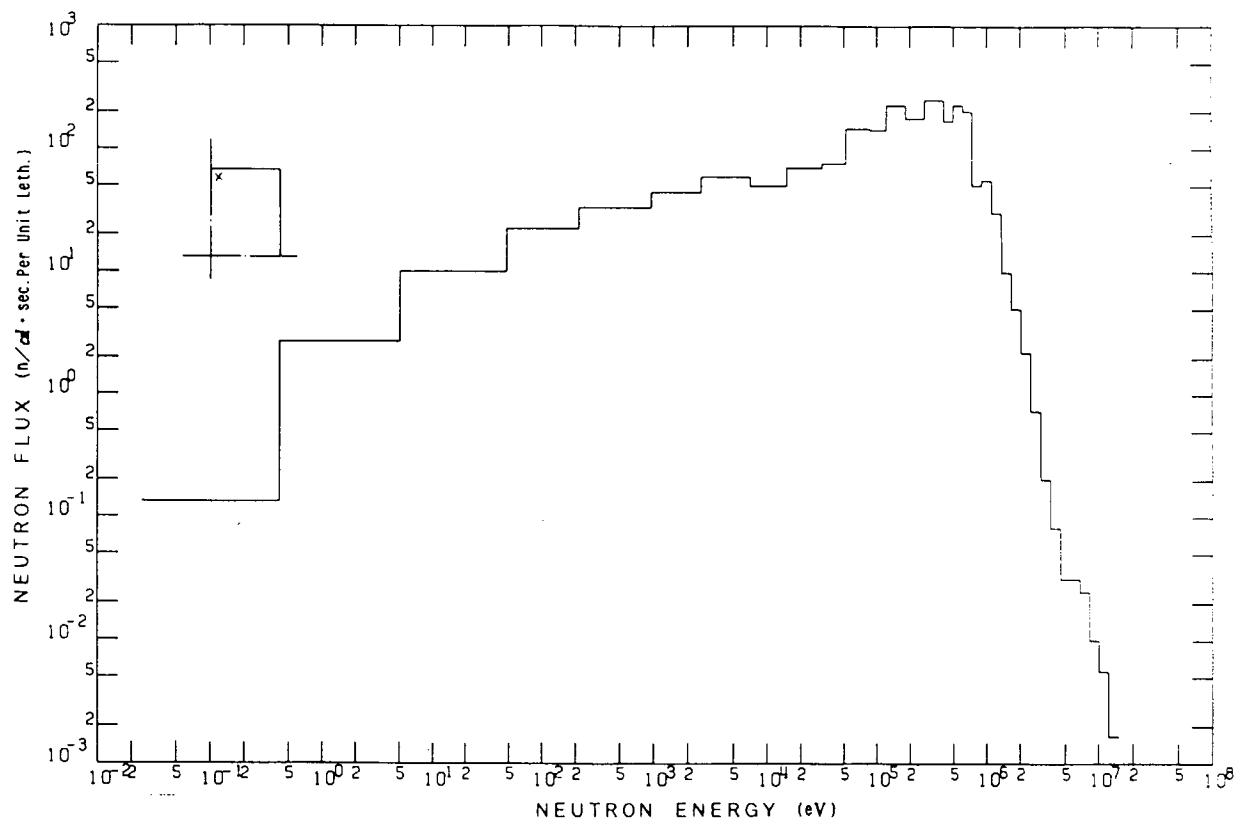


図 3.1.1-36 HZ 75 キャスク底部表面中心

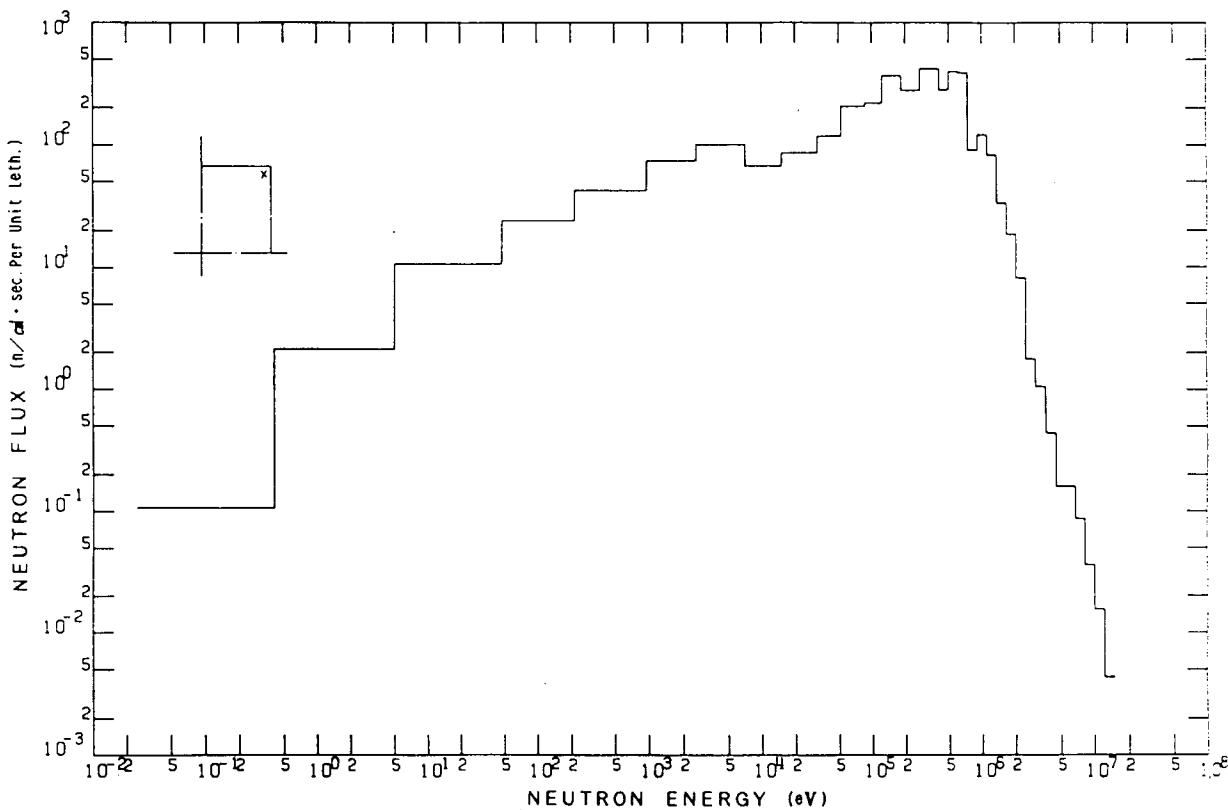


図 3.1.1-37 HZ 75 キャスク底部外周表面

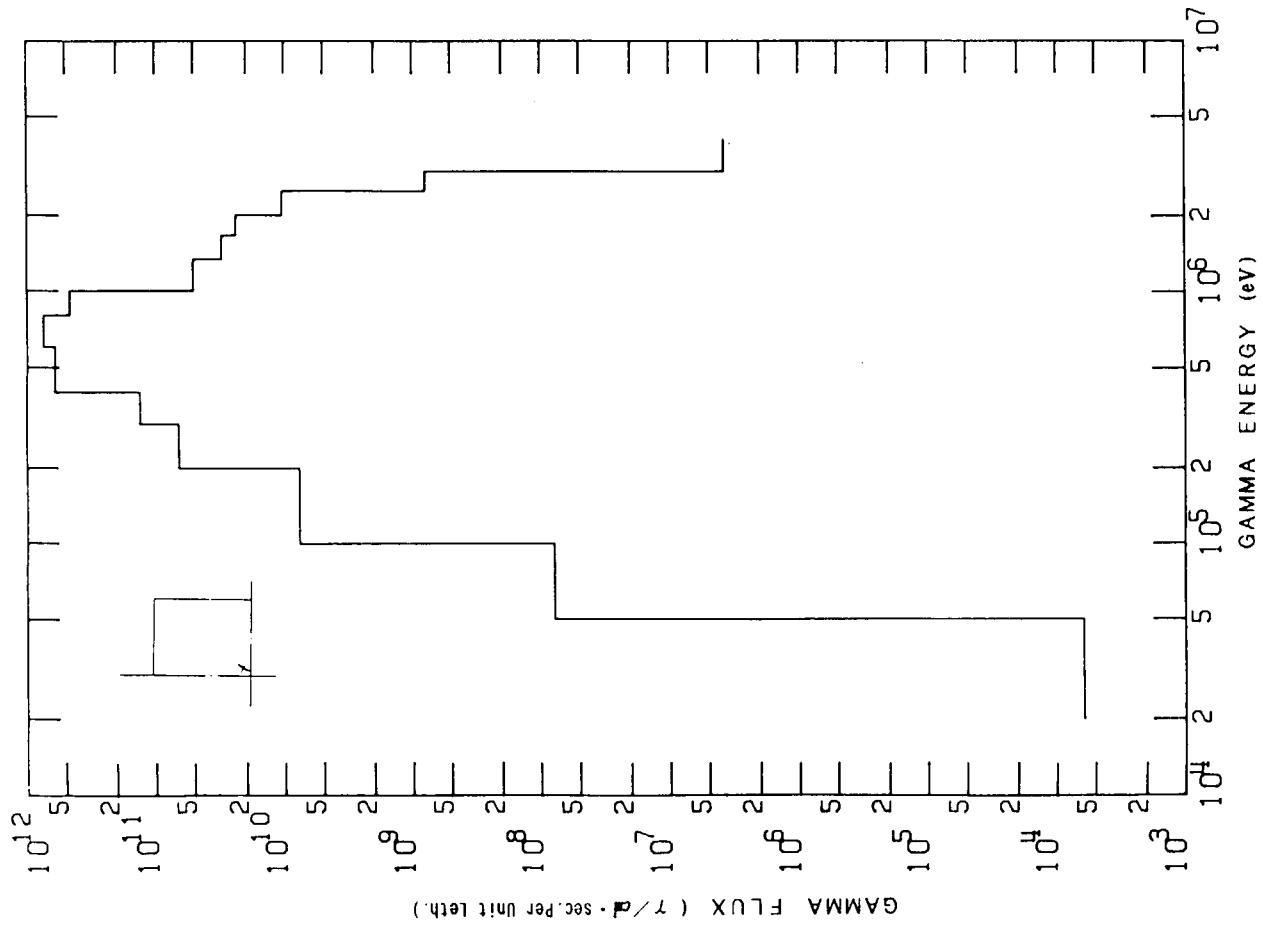


図 3.1.1-3.8 HZ 7.5 キャスク中心ガンマ線エネルギースペクトル

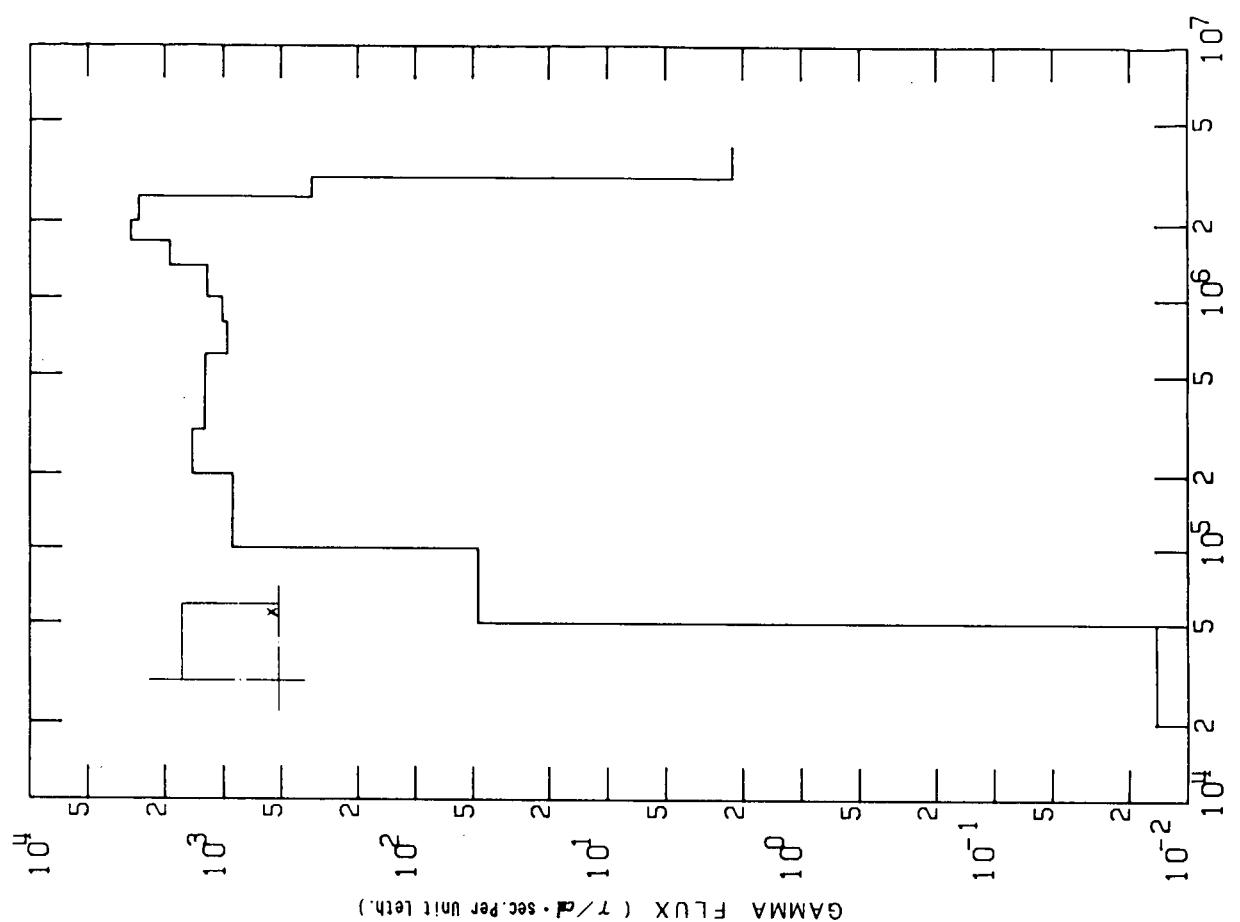


図 3.1.1-3.9 HZ 7.5 キャスク胸部表面中心

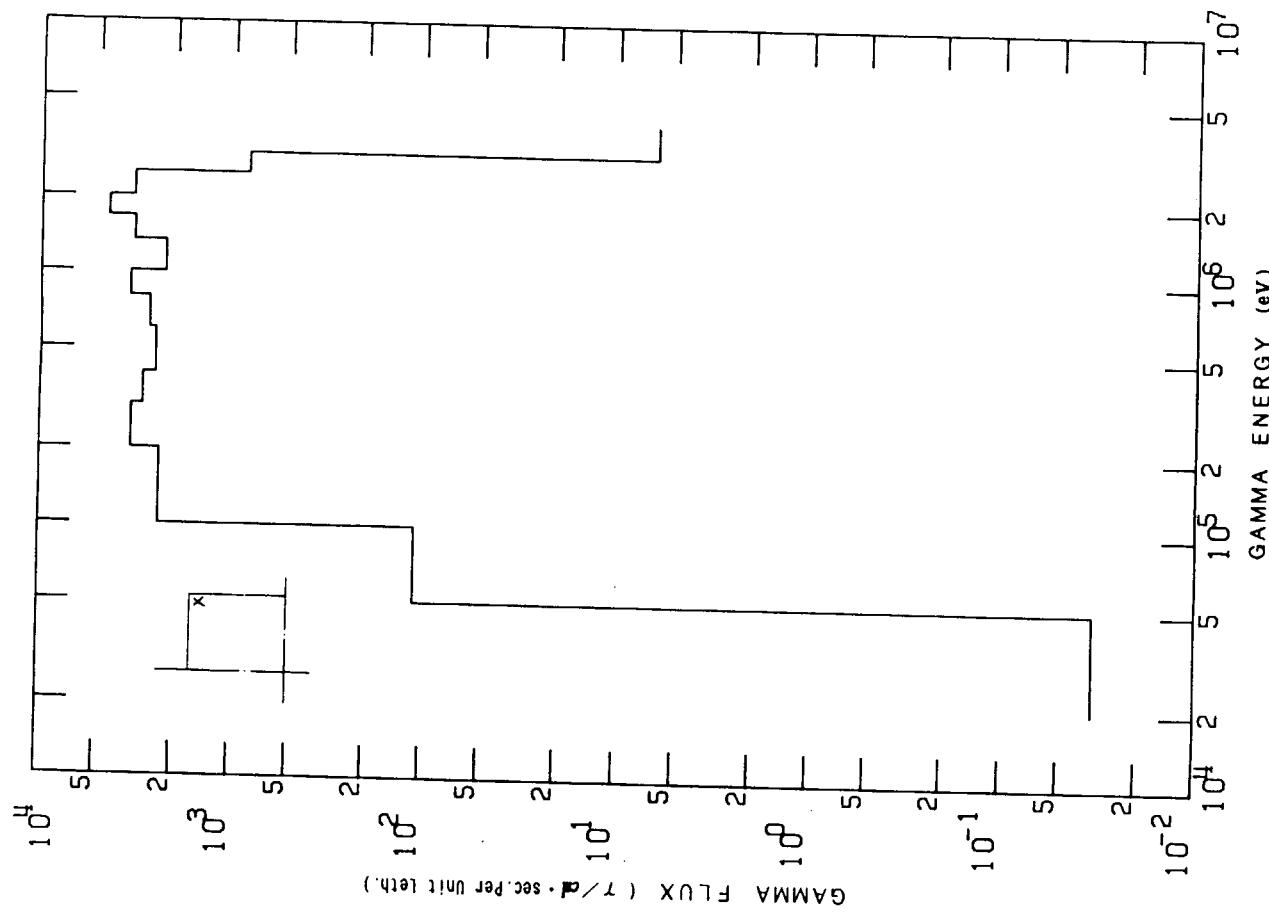


図 3.1.1-41 HZ75 キャスク底部表面中心

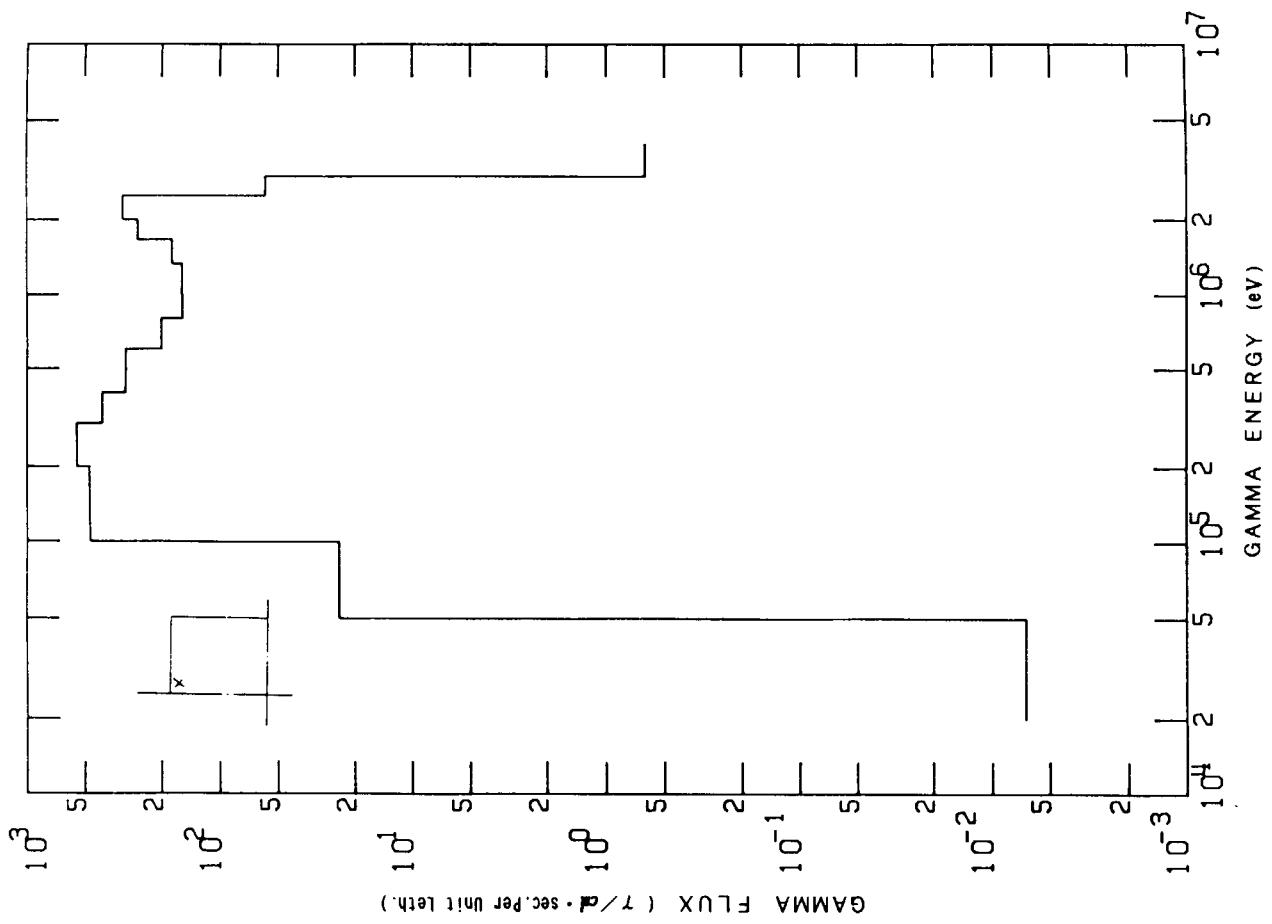


図 3.1.1-40 HZ75 キャスク底部表面中心

図 3.1.1-4.2 表面線量率最大点ガンマ線エネルギースペクトル

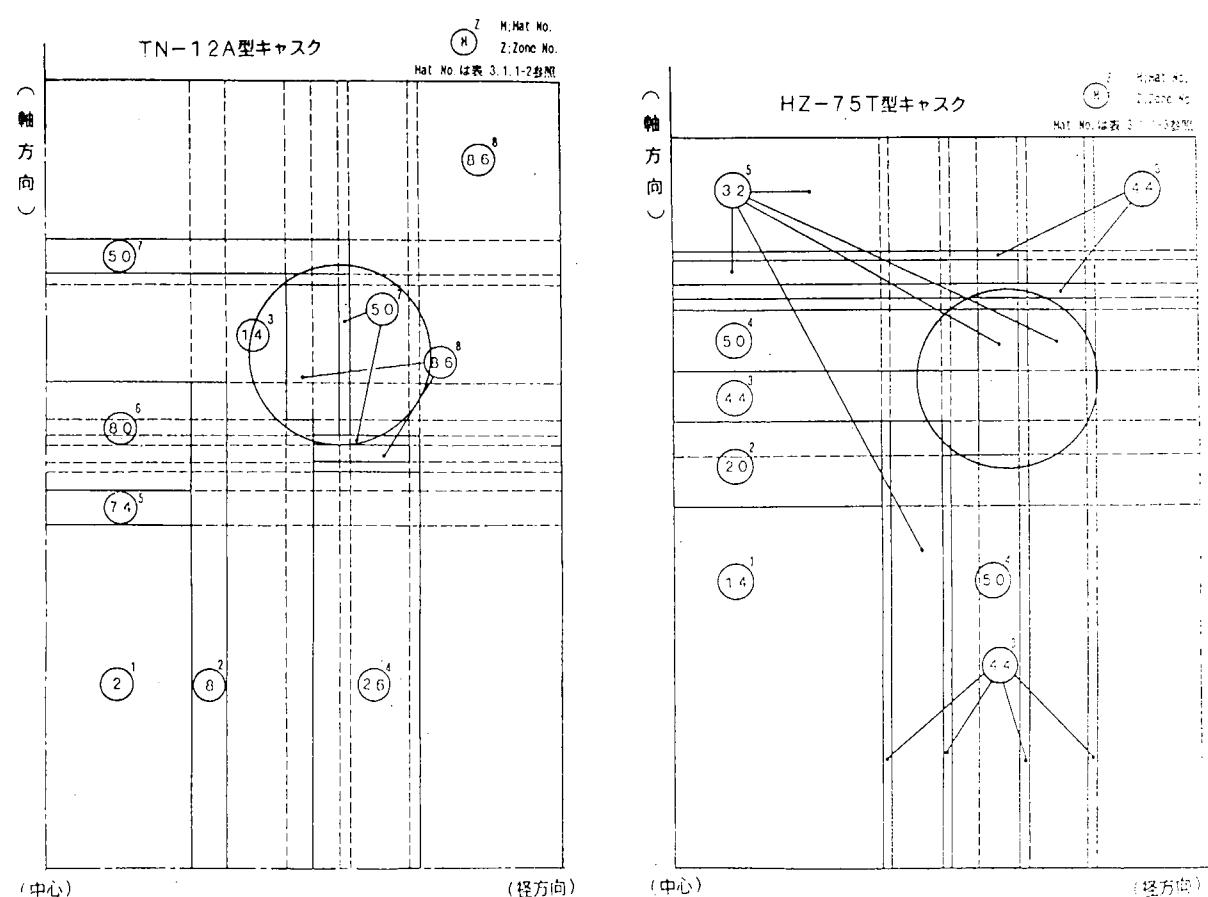
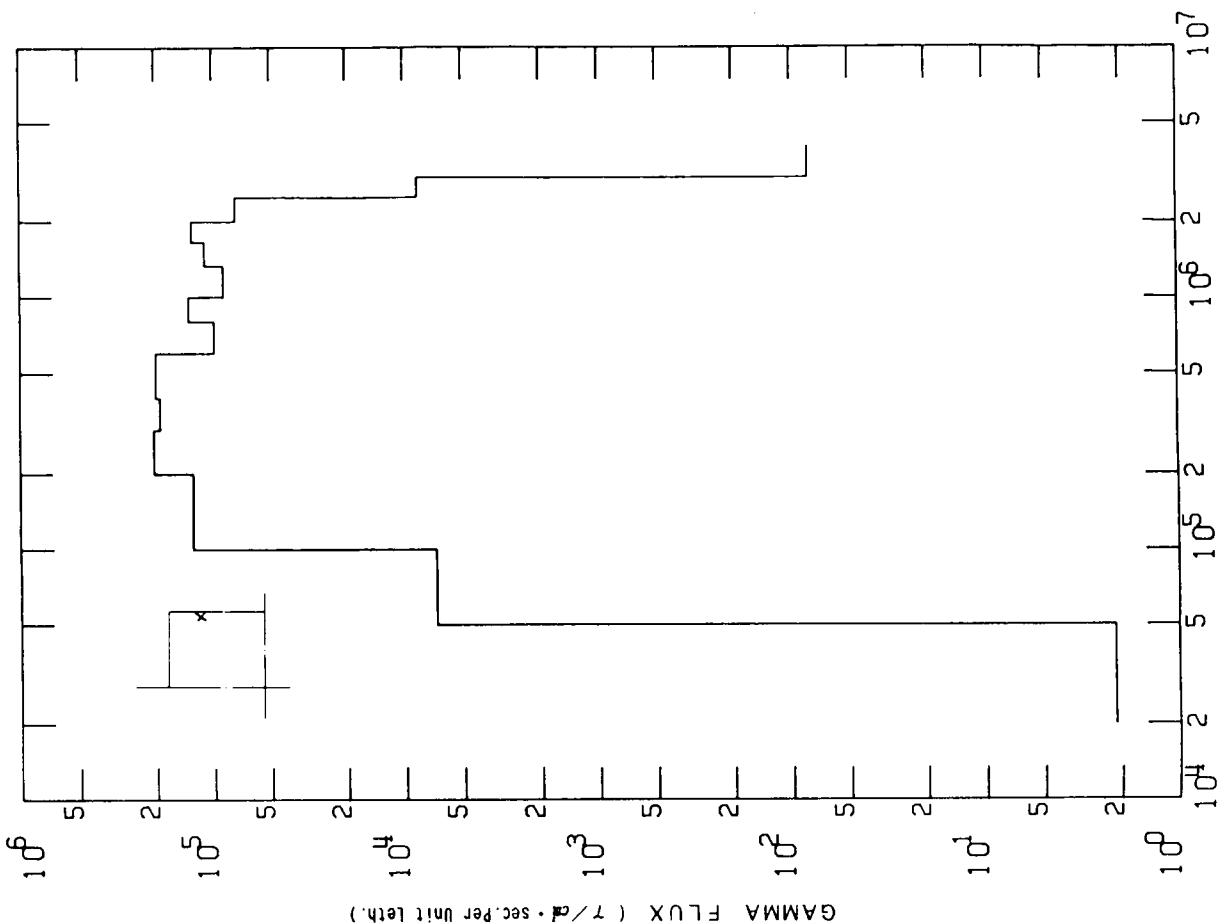


図 3.1.1-4.3 表面線量率過大領域(○印)

### 3.2 伝熱計算

#### 3.2.1 湿式キャスク

湿式キャスクの冷却水喪失時におけるキャスク各部温度を計算プログラム「TRUMP」を用いて計算した。計算パラメータは冷却水の水位、キャスク外表面の放熱面積とした。

以下にその概要を示す。

##### (1) 対象キャスク

PWR燃料7体を収納したHZ-75T型キャスクを解析対象のキャスクとした。HZ-75T型キャスクの中央部断面を図3.2.1-1に示す。

##### (2) キャスクの伝熱システム

HZ-75T型キャスクの伝熱システムは、以下のとおりである。

燃料バスケット内に収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、内筒内に充填された水の自然対流、又は空気の自然対流及び熱輻射によって燃料バスケット及び内筒に伝えられる。

内筒に伝えられた熱は、ガンマ線しゃへい体である環状鉛層の熱伝導によって中間円筒に伝えられる。

中間円筒に伝えられた熱は、中性子しゃへい体であるエチレングリコール水溶液の自然対流によって外筒に伝えられる。

外筒に伝えられた熱は、外筒に溶接された環状フィン表面及び外筒表面から水中においては水の自然対流、空気中においては空気の自然対流及び熱輻射によって環境に放散される。

##### (3) 計算条件

###### 1) 計算コード

本計算には有限差分法に基づく3次元定常及び非定常温度分布計算プログラム「TRUMP」<sup>(1)</sup>を用いた。

###### 2) 計算モデル

本計算の計算モデルは、以下に示す2種類のモデルとし、軸方向の熱移動を無視した2次モデルとした。

###### (a) 輪切りモデル

輪切りモデルは、図3.2.1-1に示すキャスクの中央部断面に基づく2次元平板モデルで、燃料集合体を均質化領域としてモデル化し、キャスク各部の温度を求めるためのモデルである。境界条件は、環境温度とした。

モデル図を図3.2.1-2に示す。

###### (b) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、燃料棒及び燃料バスケットを実形状どおりモデル化したもので、各燃料棒温度を求めためのモデルである。対象燃料集合体は15×15配列PWR燃料とし、1/4断面をモデル化した。

境界条件は、輪切りモデルの燃料バスケット温度とした。モデル図を図3.2.1-3に示す。

###### 3) 計算条件

キャスクが25°Cの水中に放置され、定常温度に達した後、38°Cの空気中(太陽輻射熱考慮)に1週間放置されることを想定した。

また、内筒内水の水位及びキャスク外表面の放熱面積をパラメータとして5つのケースを計算した。各ケースの計算条件を表3.2.1-1及び図3.2.1-4から図3.2.1-8に示す。

#### (4) 計算結果

各部温度の計算結果を表 3.2.1-2 及び図 3.2.1-9 から図 3.2.1-18 に示す。

また、代表的な部位の温度の経時変化を図 3.2.1-19 から図 3.2.1-26 に示す。

図 3.2.1-19 から図 3.2.1-26 より、25°C の水中においてはほぼ 2 日でキャスク各部の温度は定常になる。

また、38°C の空気中においては 3 日から 4 日でキャスク各部の温度は定常になる。

キャスク構造部材の中でも最も融点が低いのはガンマ線しゃへい体の鉛の 327°C<sup>(3)</sup> である。表 3.2.1-2 よりこの部位の最高温度はケース 5 の 168°C であるので、冷却水喪失時においても鉛が溶融することはない。

燃料棒表面の最高温度は内筒内が水の場合はケース 3 の 270°C、内筒内が空気の場合はケース 4 の 500°C であり、それぞれ炉内での温度（約 320°C<sup>(4)</sup>）及び LOCA 時の ECCS 性能評価の指針温度（約 1200°C<sup>(4)</sup>）を下回るので、特に問題となることはないと考える。

#### 参考文献

- (1) Edwards, A.L., "TRUMP : A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems", LLL, UCRL-147.54 (1972)
- (2) IAEA SAFETY STANDARDS SAFETY SERIES No. 6,  
"Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material",  
1973.
- (3) 「鉛ハンドブック」，日本鉛亜鉛需要研究会，昭和 50 年
- (4) 「軽水炉燃料のふるまい（コンサイス版）」，財 原子力安全研究協会，NEN-ANSEN No. 13, 1981

図 3.2.1-1 計 算 条 件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	
燃料集合体の発熱量	5 kw／体 ( 35 kw／輸送物 )					
水 中	環 境 温 度	25 °C				
	物 質	静 止 水				
	輸 送 容 器 内筒内水の水位	すべて水	水平中心より +127 mm	水平中心より -127 mm	すべて空気	すべて水
	外表面からの 放熱方法	水の自然対流熱伝達				
	外表面の 放熱面積	全 表 面 積				全体の 1 / 2
	期 間	各部温度が定常温度に達するまで				
空 氣 中	環 境 温 度	38 °C				
	物 質	静 止 空 気				
	輻 射 率	1.0				
	太陽入熱	12 時間当り 400 cal/cm <sup>2</sup> (2)				( 放熱部分のみ )
	輸 送 容 器 内筒内水の水位	すべて水	水平中心より +127 mm	水平中心より -127 mm	すべて空気	すべて水
	外表面からの 放熱方法	空気の自然対流熱伝達及び熱輻射				
	外表面の 放熱面積	全 表 面 積				全体の 1 / 2
	輻 射 率	0.37				
参 考 図		図 3.2.1-4	図 3.2.1-5	図 3.2.1-6	図 3.2.1-7	図 3.2.1-8

表3.2.1-2 各部最高温度の計算結果

(単位:℃)

部位 環境	ケース		ケース1		(注1) ケース2		(注1) ケース3		(注1) ケース4		(注2) ケース5	
	25℃ 水中	38℃ 空気中	25℃ 水中	38℃ 空気中	25℃ 水中	38℃ 空気中	25℃ 水中	38℃ 空気中	25℃ 水中	38℃ 空気中	25℃ 水中	38℃ 空気中
フィン先端	25	75	25 (25)	75 (75)	25 (25)	75 (75)	(25)	(76)	(25)	(39)	27 (39)	108 (123)
外筒表面	30	96	30 (30)	96 (95)	30 (30)	97 (96)	(30)	(97)	(30)	(55)	32 (55)	129 (140)
中性子しゃへい体	43	107	44 (42)	109 (106)	43 (42)	108 (107)	(43)	(108)	(43)	(63)	50 (63)	141 (148)
中間円筒	57	119	59 (55)	121 (117)	57 (55)	120 (118)	(57)	(120)	(57)	(72)	66 (72)	154 (157)
ガンマ線しゃへい体	69	131	72 (64)	135 (127)	70 (65)	134 (129)	(68)	(132)	(68)	(82)	79 (82)	166 (168)
内筒	72	134	76 (66)	139 (128)	74 (67)	137 (131)	(71)	(135)	(71)	(84)	82 (84)	169 (170)
内筒内水	85	145	93 (147)	153 (195)	179 (189)	232 (246)	(247)	(285)	(247)	(96)	95 (96)	179 (181)
燃料バスケット	93	152	111 (262)	169 (289)	214 (286)	265 (321)	(401)	(421)	(401)	(102)	104 (102)	187 (185)
燃料棒表面	98	157	116 (388)	174 (410)	218 (416)	270 (443)	(483)	(500)	(483)	(107)	109 (107)	192 (190)
参考図	図3.2.1-9 図3.2.1-10		図3.2.1-11 図3.2.1-12		図3.2.1-13 図3.2.1-14		図3.2.1-15 図3.2.1-16		図3.2.1-17 図3.2.1-18			

(注1) ( )内の数値は内筒内空気層領域に相当する。

(注2) [ ]内の数値は外表面断熱領域に相当する。

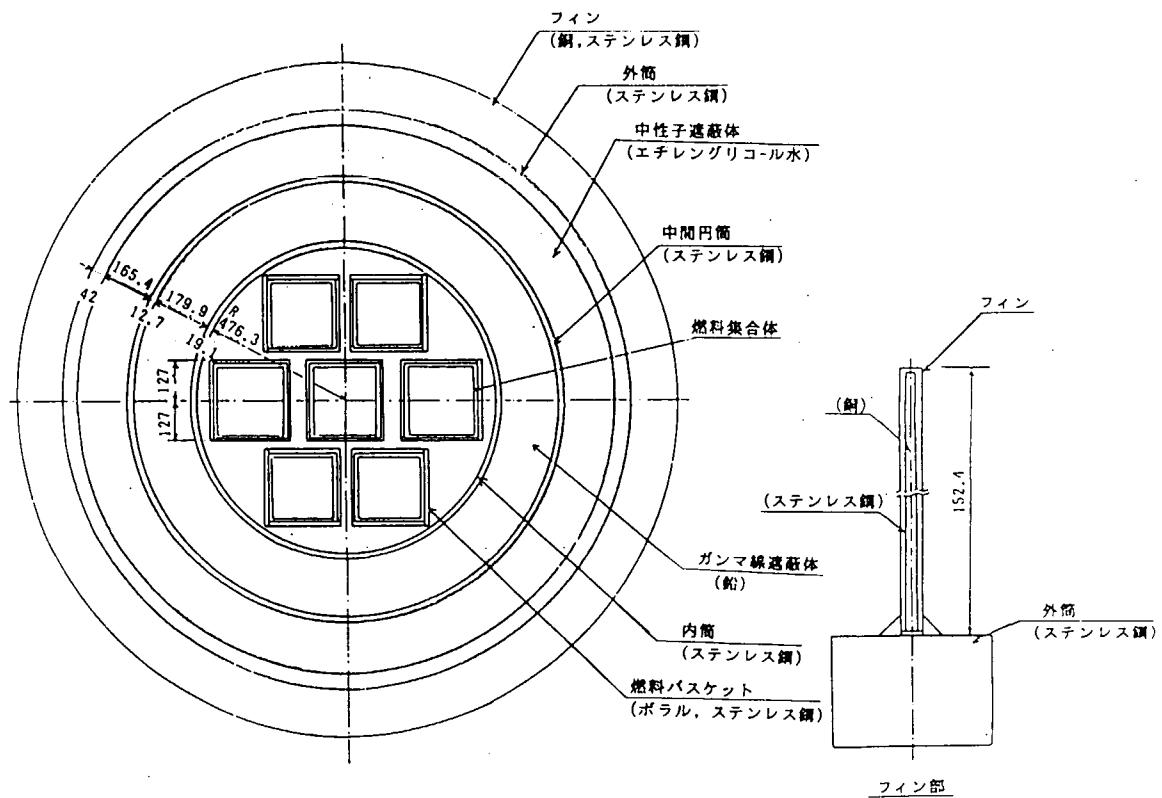


図 3.2.1-1 HZ-75T 型キャスクの中央部断面(単位:mm)

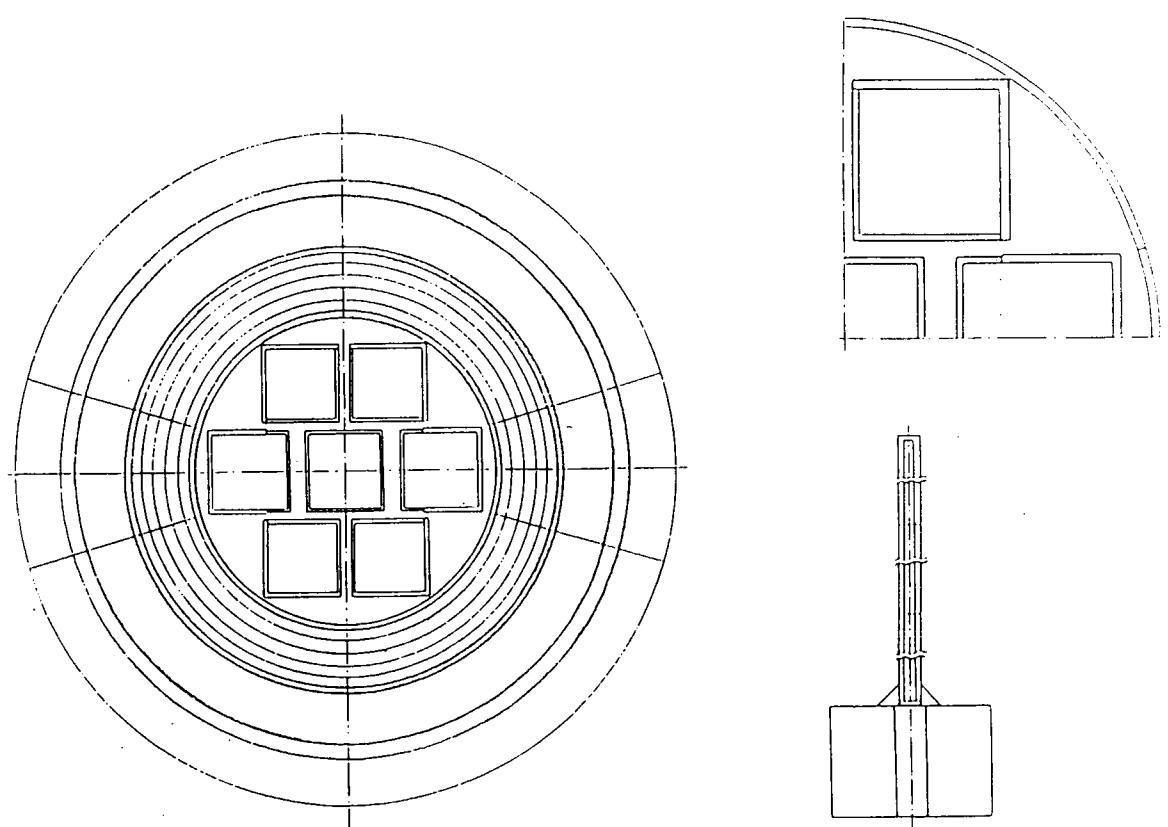
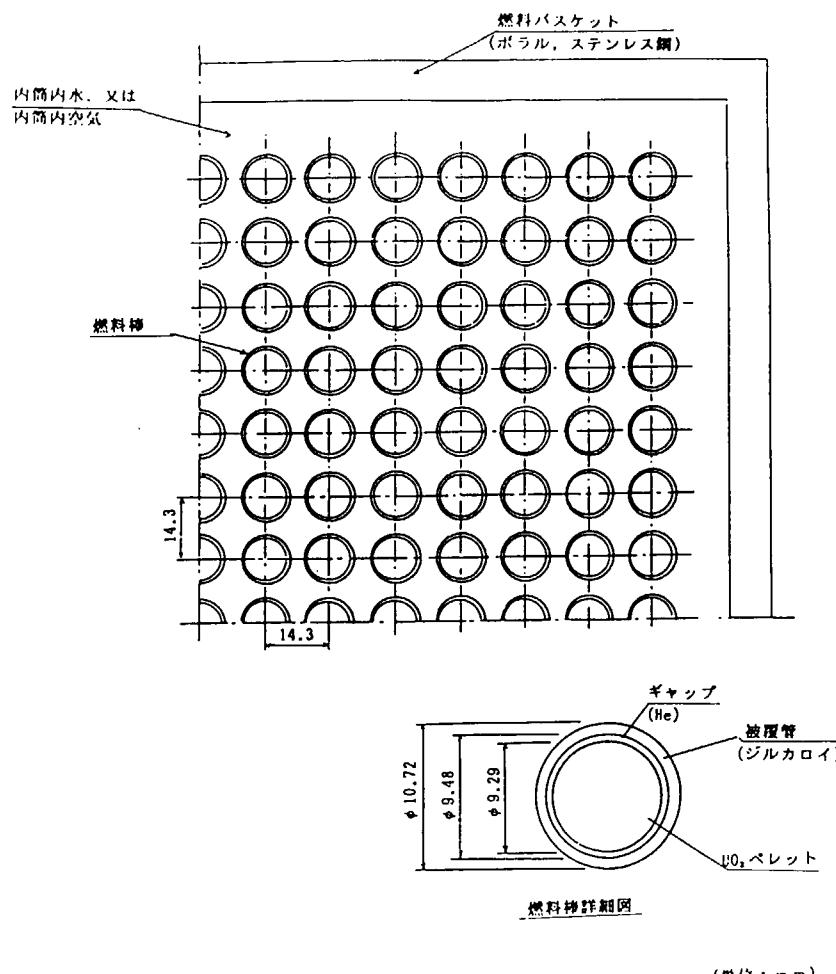


図 3.2.1-2 輪切りモデル



(単位: mm)

図 3.2.1-3 燃料集合体モデル

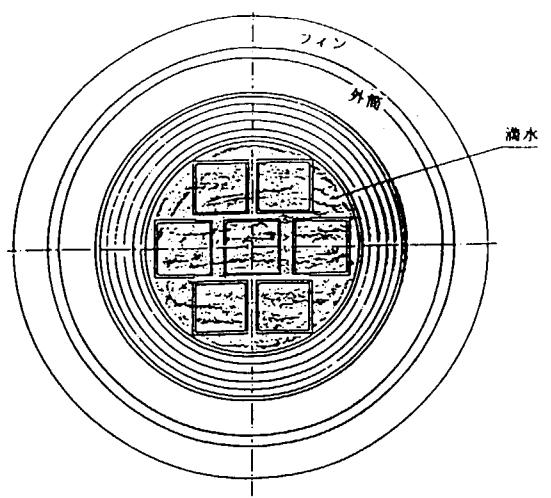


図 3.2.1-4 ケース 1

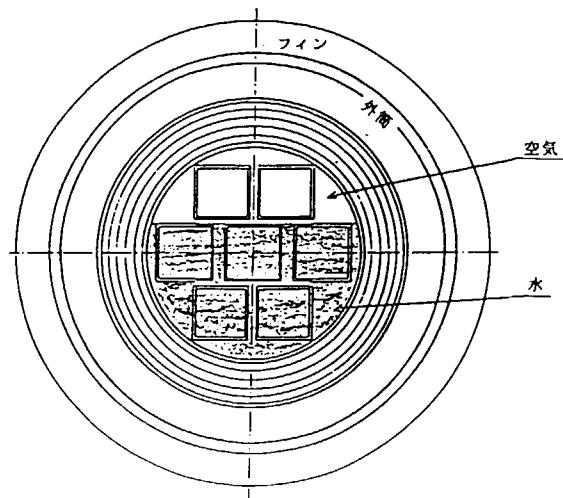


図 3.2.1-5 ケース 2

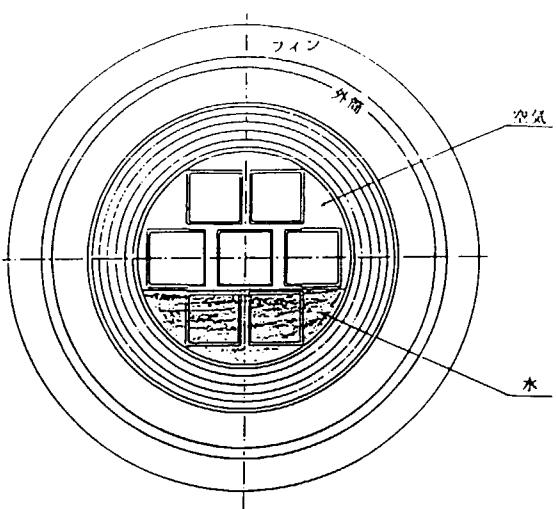


図 3.2.1-6 ケース3

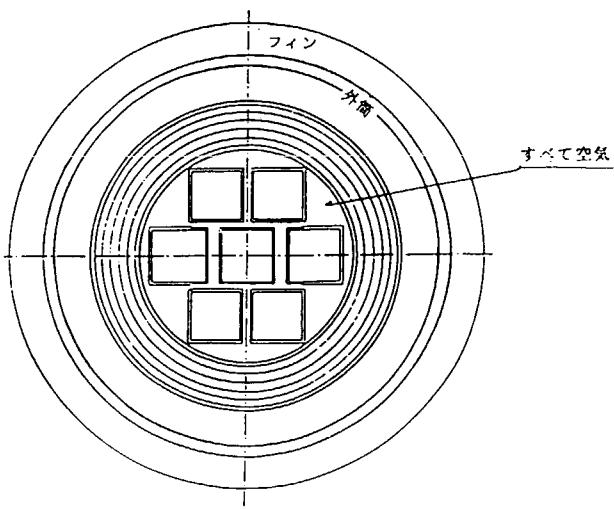


図 3.2.1-7 ケース4

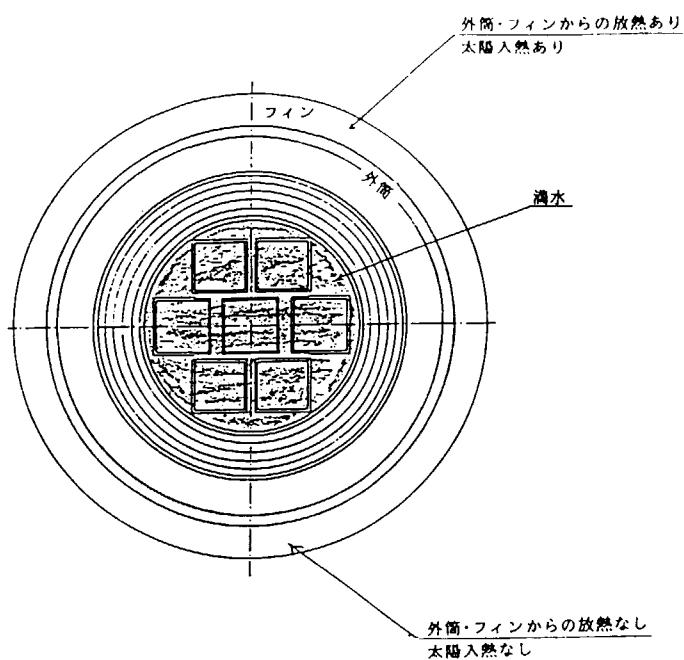


図 3.2.1-8 ケース5

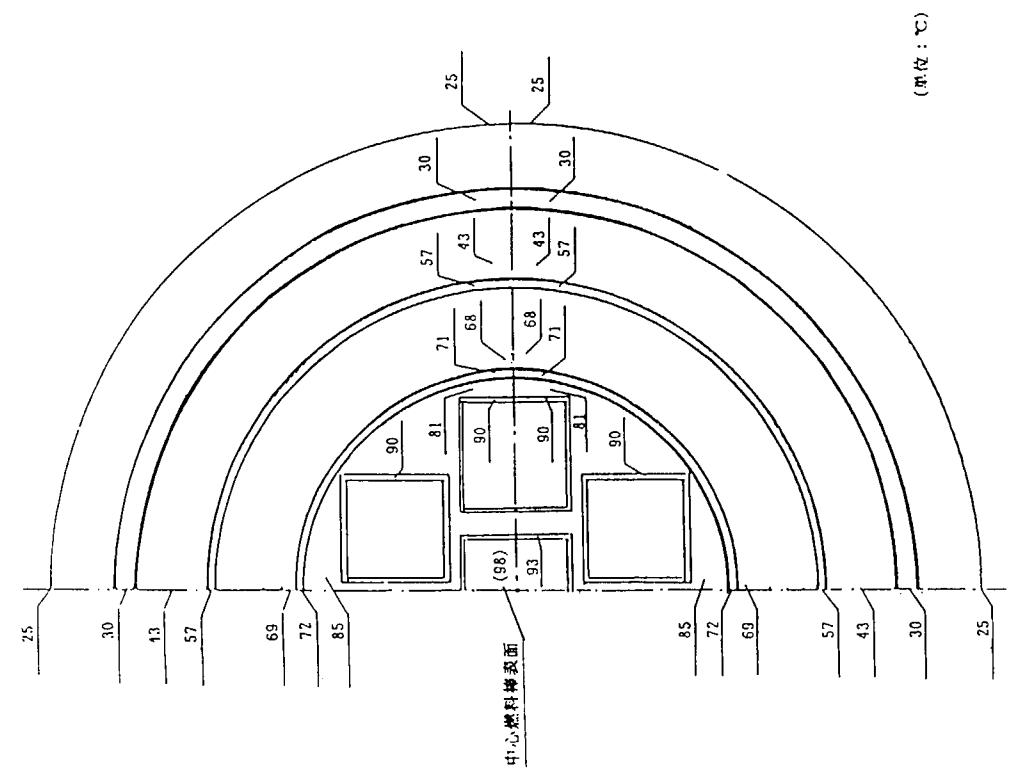


図 3.2.1-9 溫度計算結果(ケース1, 水中)

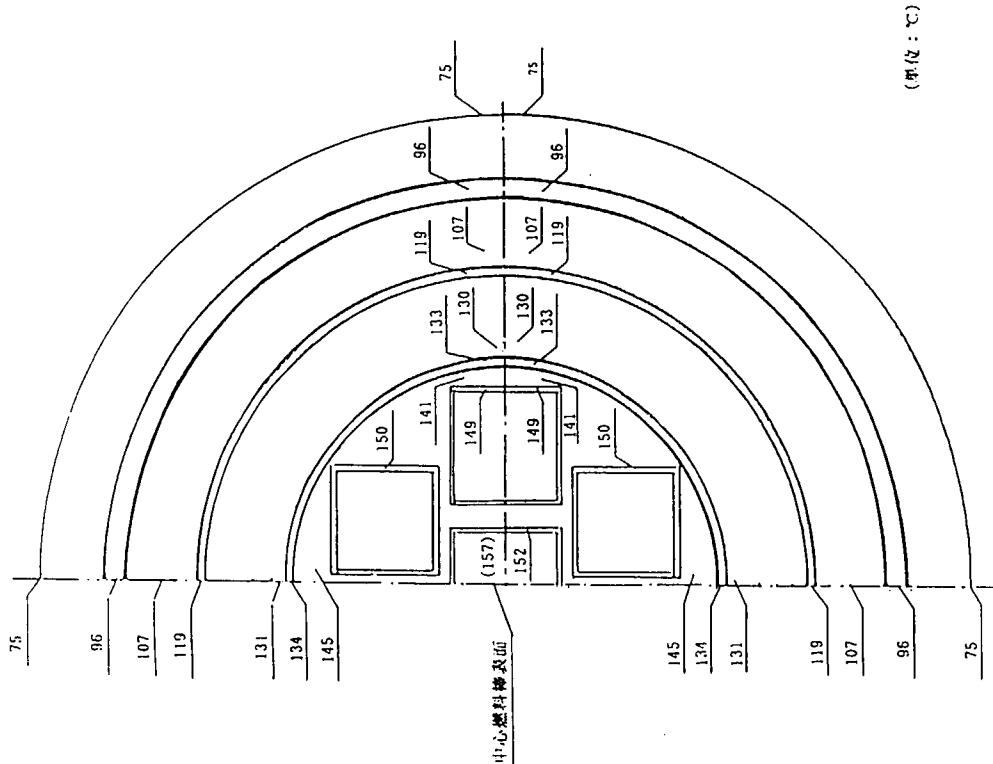


図 3.2.1-10 溫度計算結果(ケース1, 空気中)

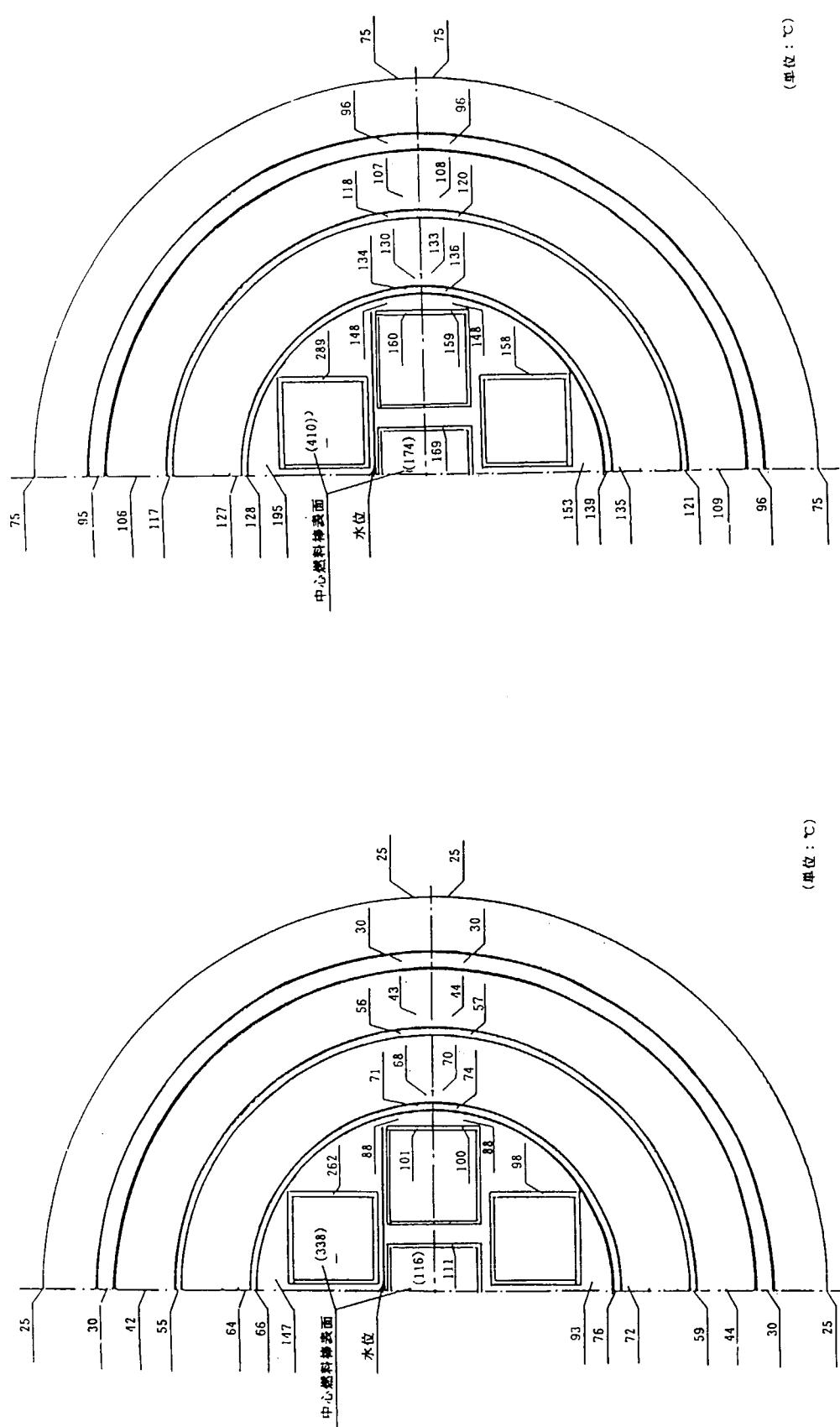


図 3.2-1 1 温度計算結果(ケース2, 水中)

図 3.2-1 2 温度計算結果(ケース2, 空気(中))

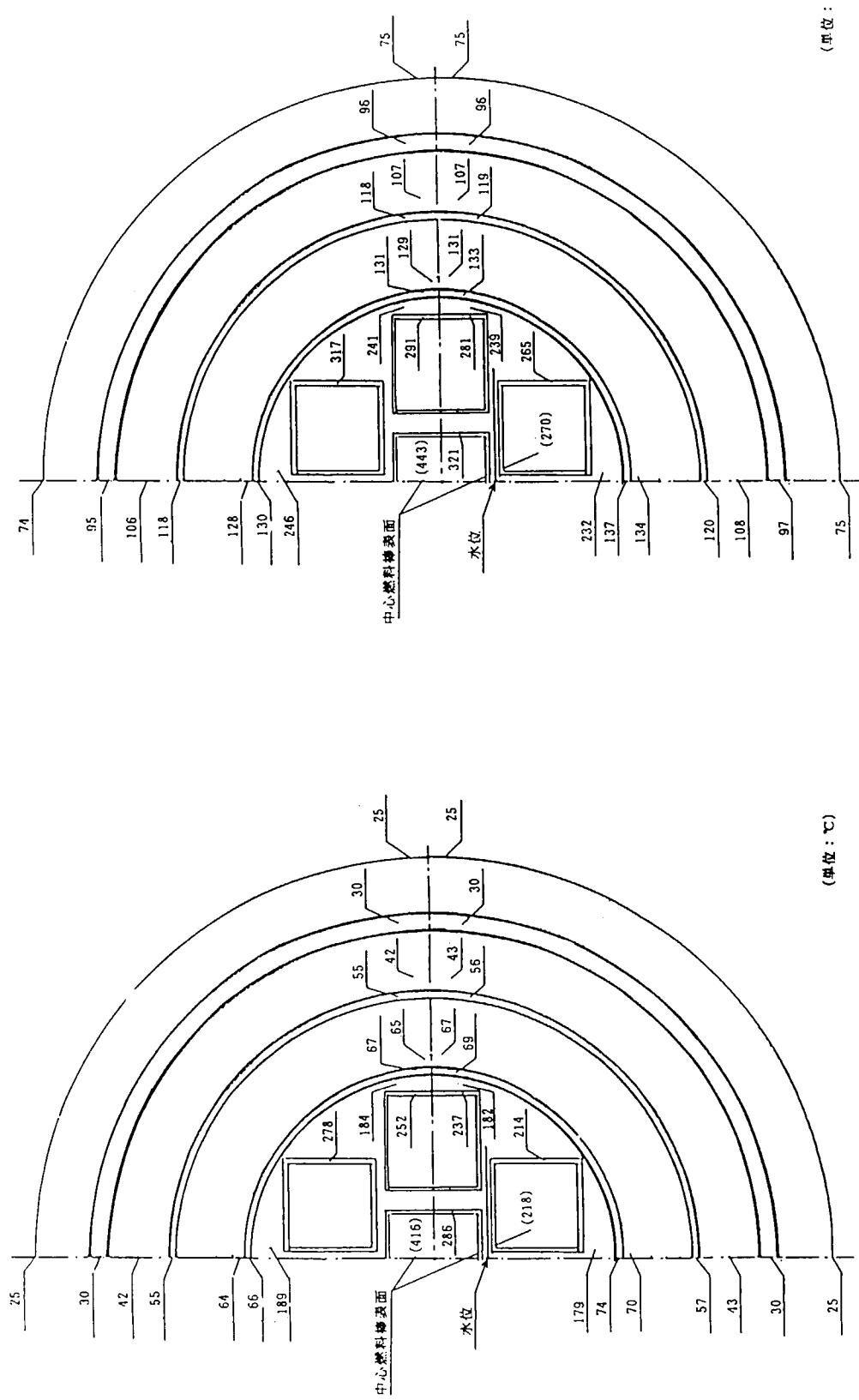


図 3.2.1-13 溫度計算結果(ケース3, 水中)

図 3.2.1-14 溫度計算結果(ケース3, 空気中)

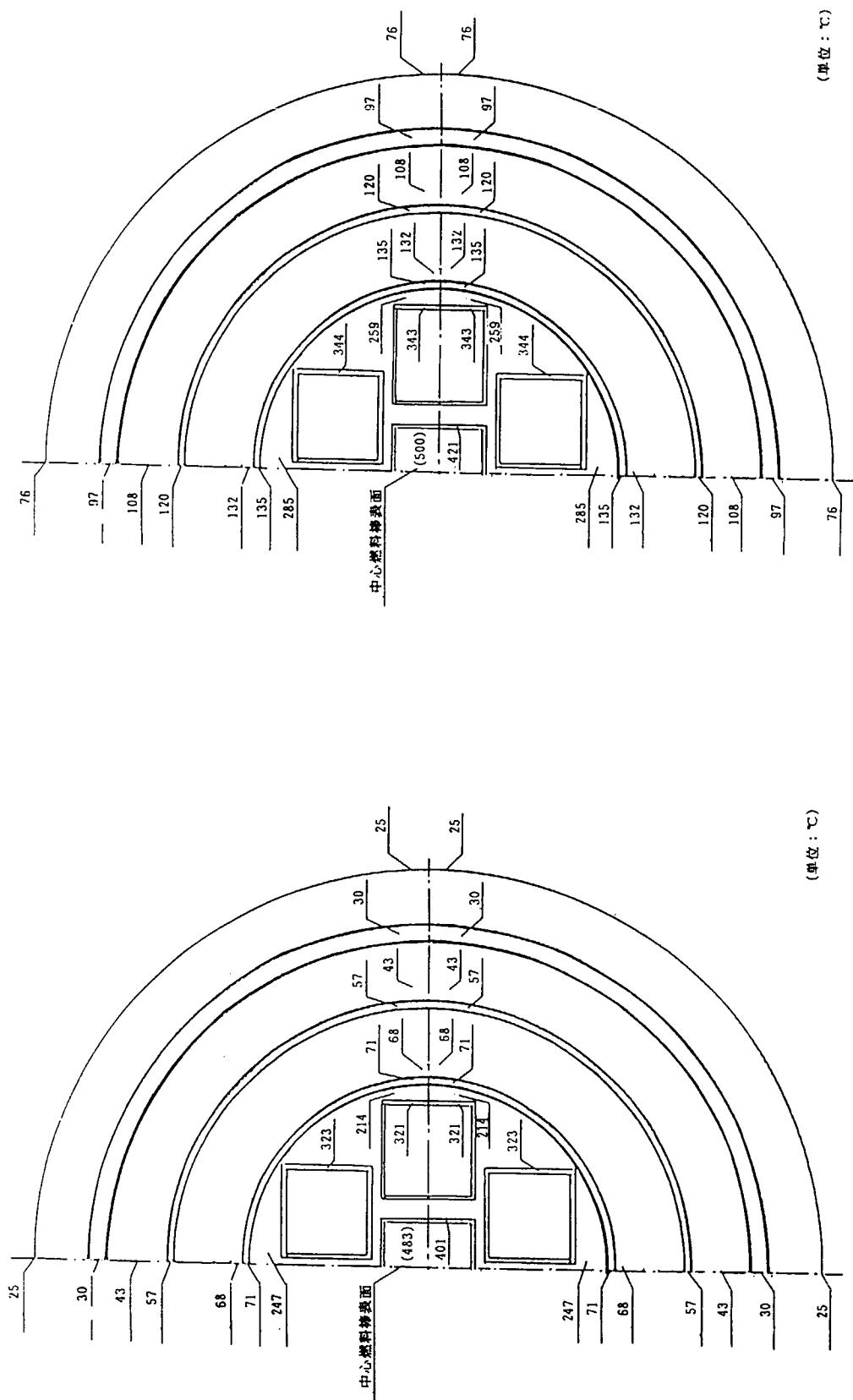


図 3.2-1-15 溫度計算結果(ケース4, 水中)  
図 3.2-1-16 溫度計算結果(ケース4, 空気中)

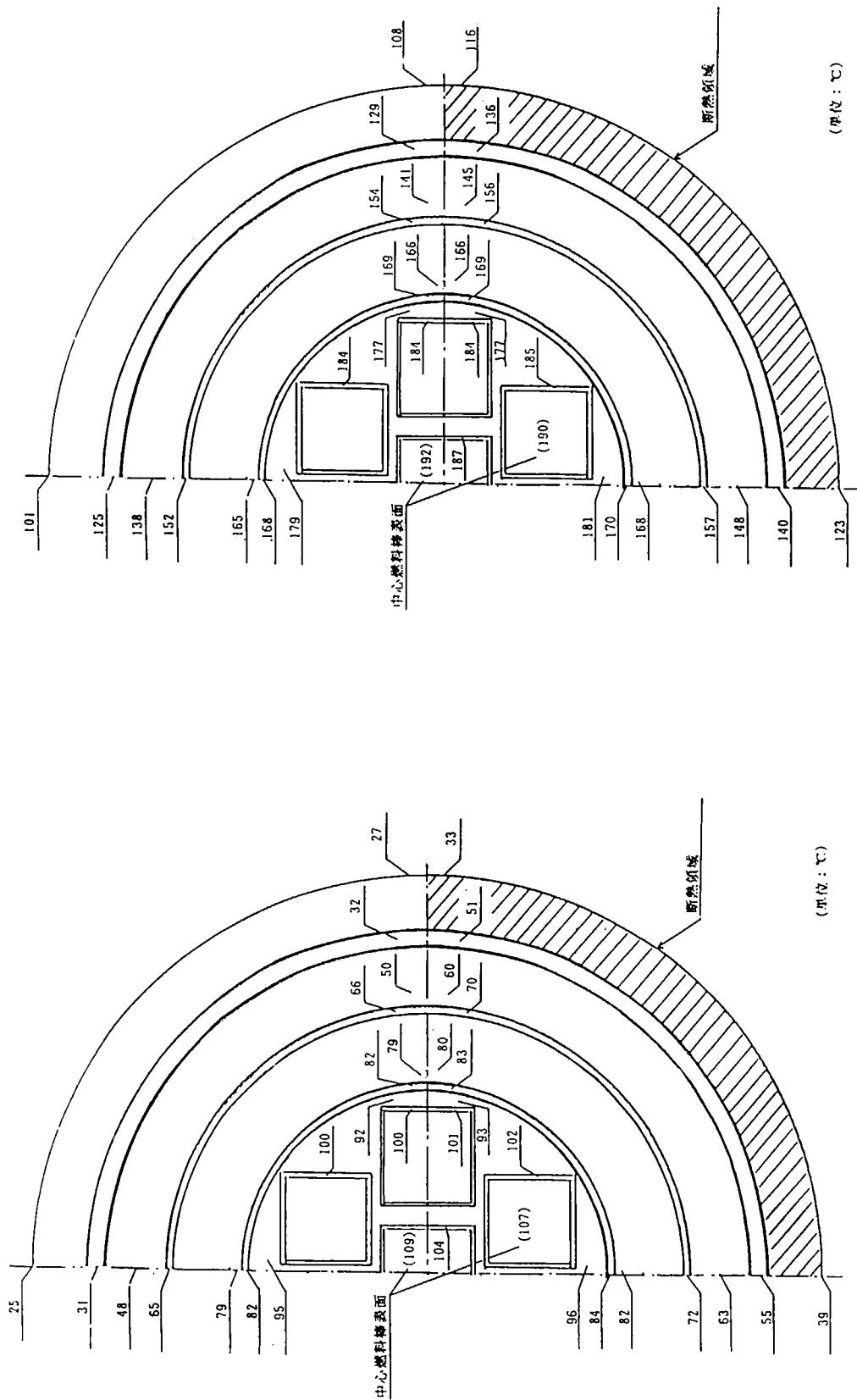
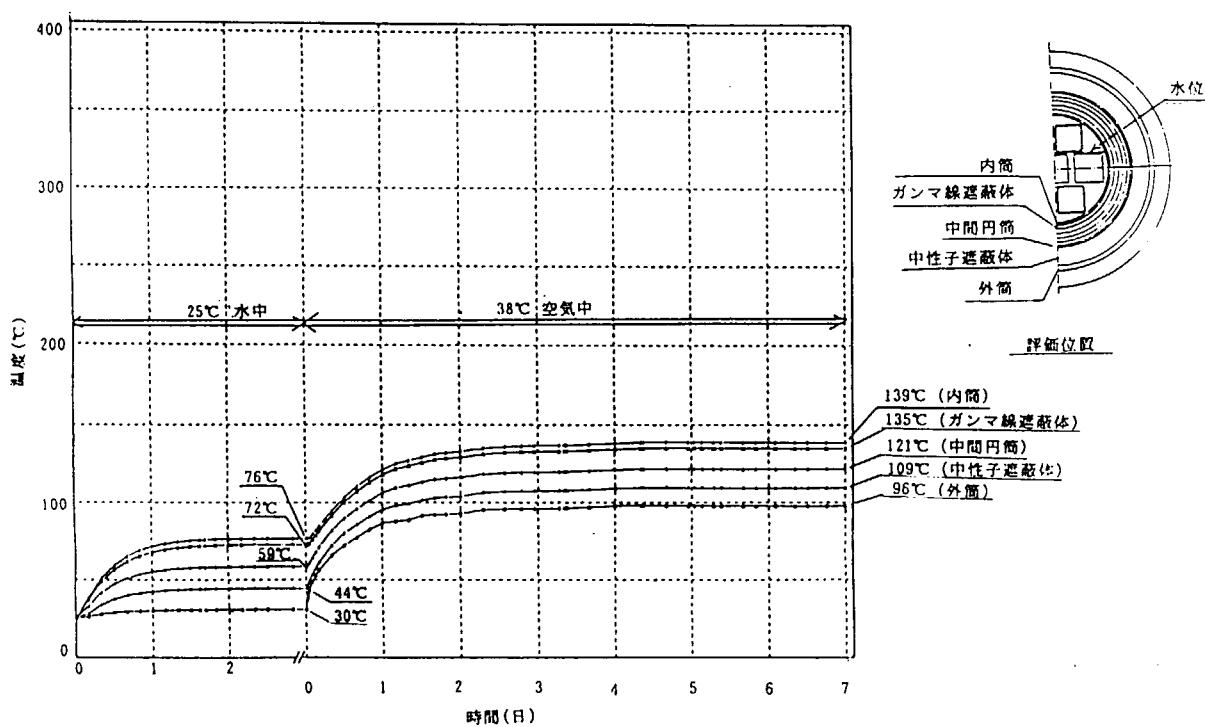
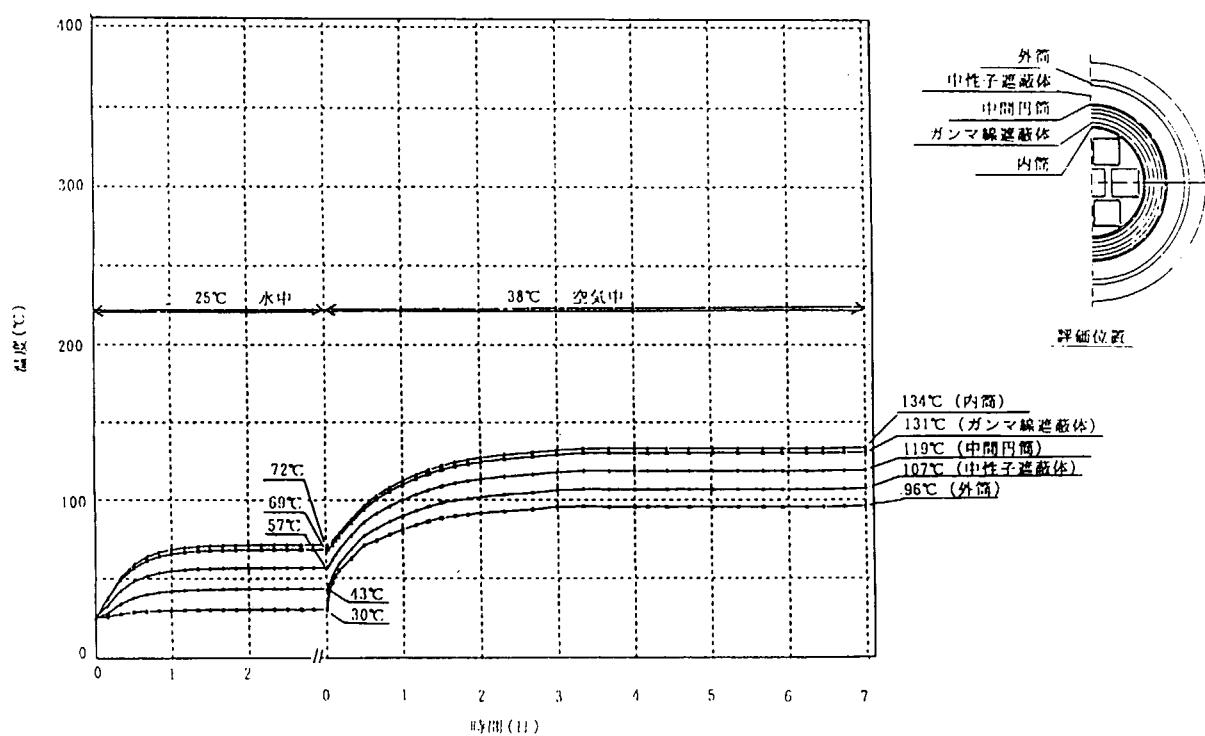
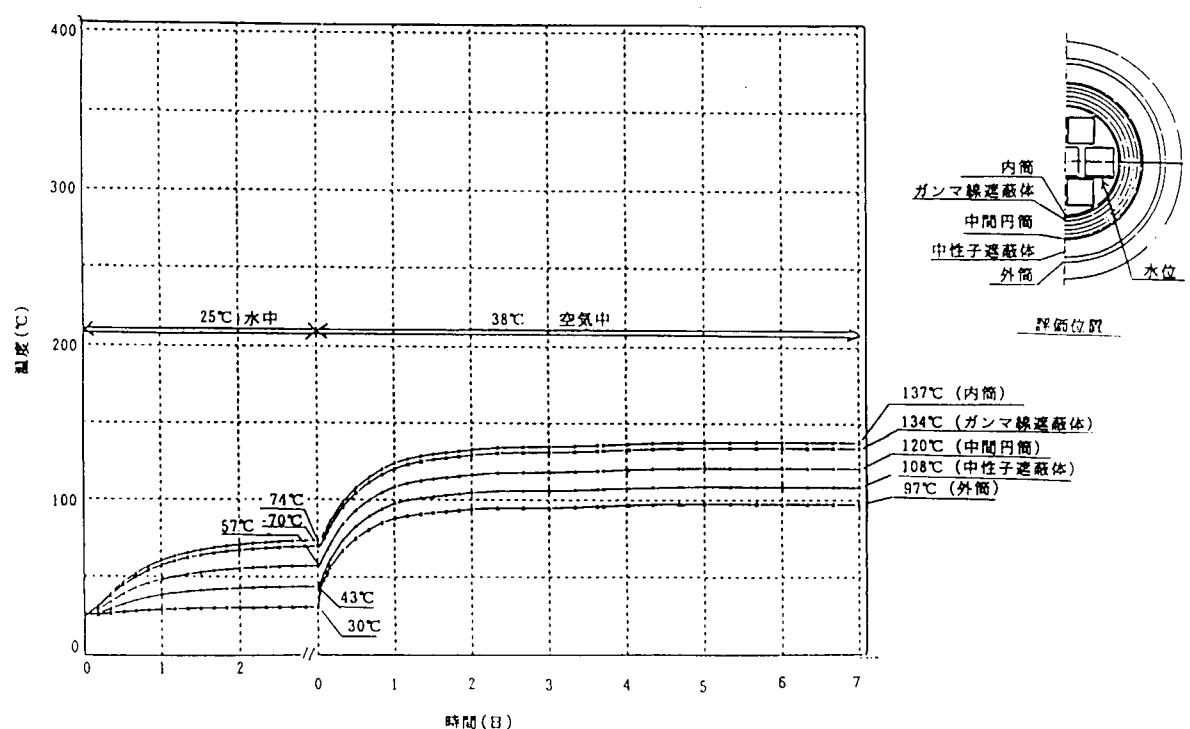
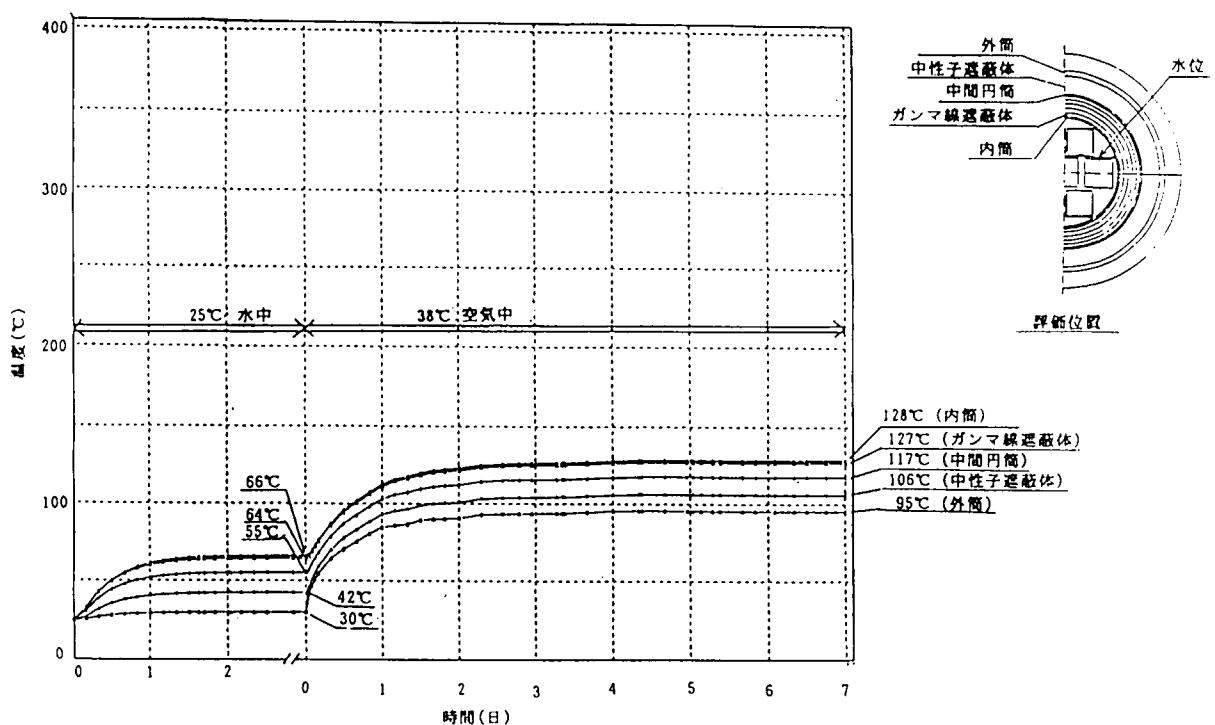


図 3.2-1-18 溫度計算結果(ケース5, 空気中)

図 3.2-1-17 溫度計算結果(ケース5, 水中)





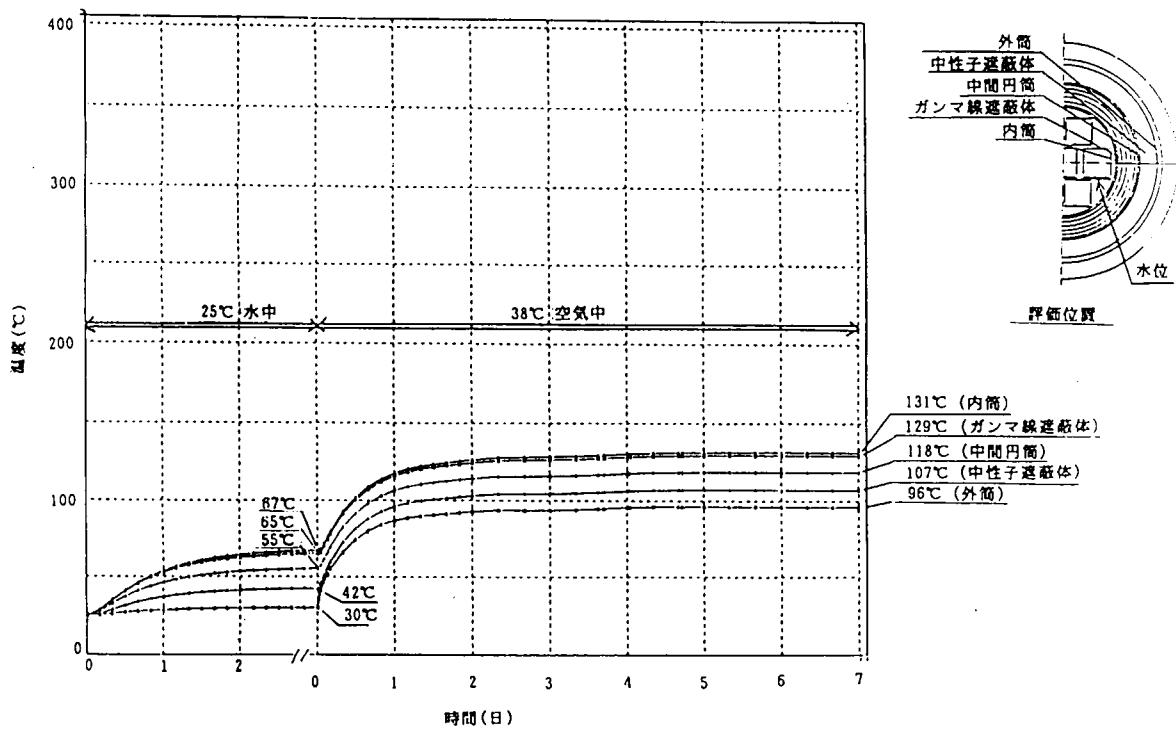


図 3.2.1-23 溫度の経時変化(ケース3, 内筒内空気層領域)

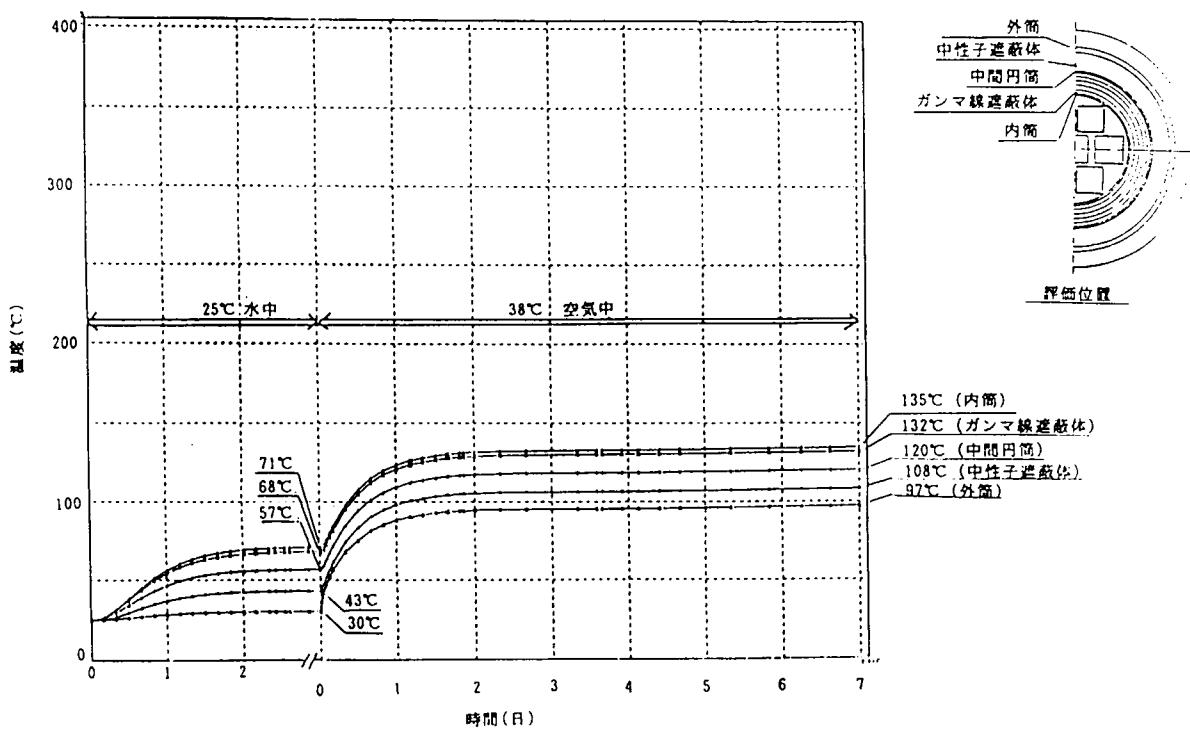


図 3.2.1-24 溫度の経時変化(ケース4)

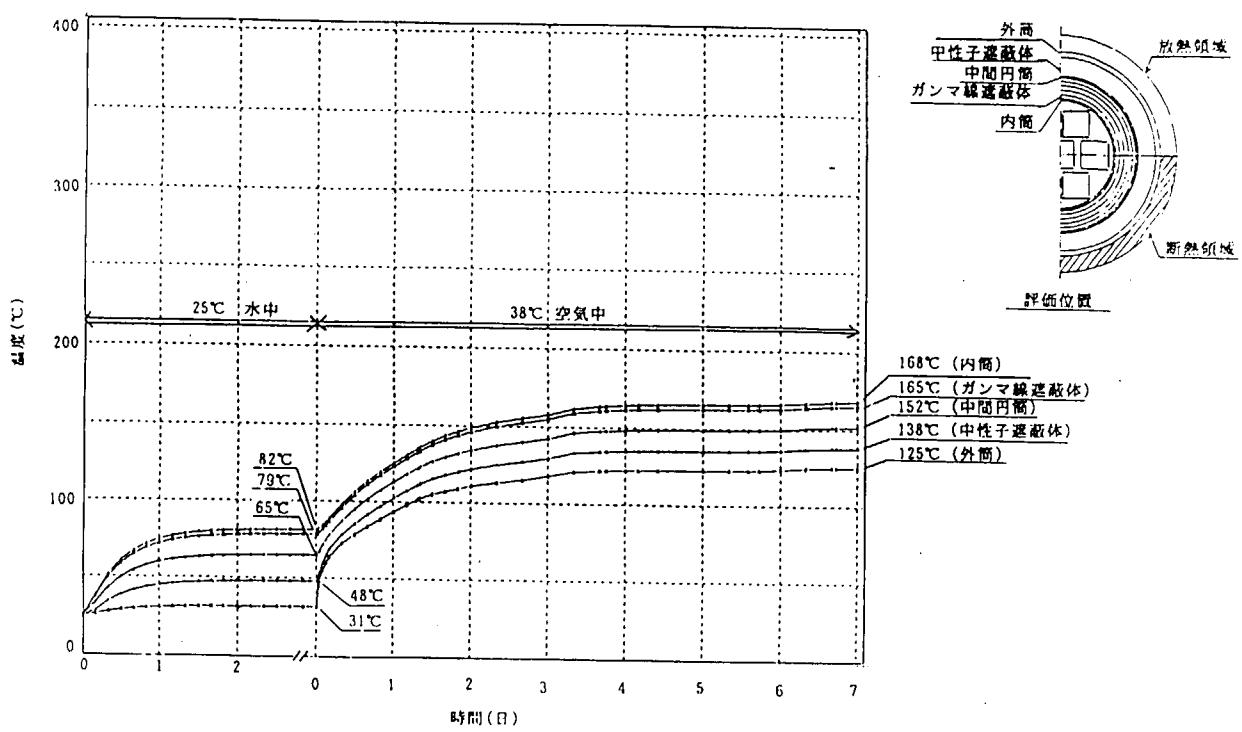


図 3.2.1-25 温度の経時変化(ケース5, 放熱領域)

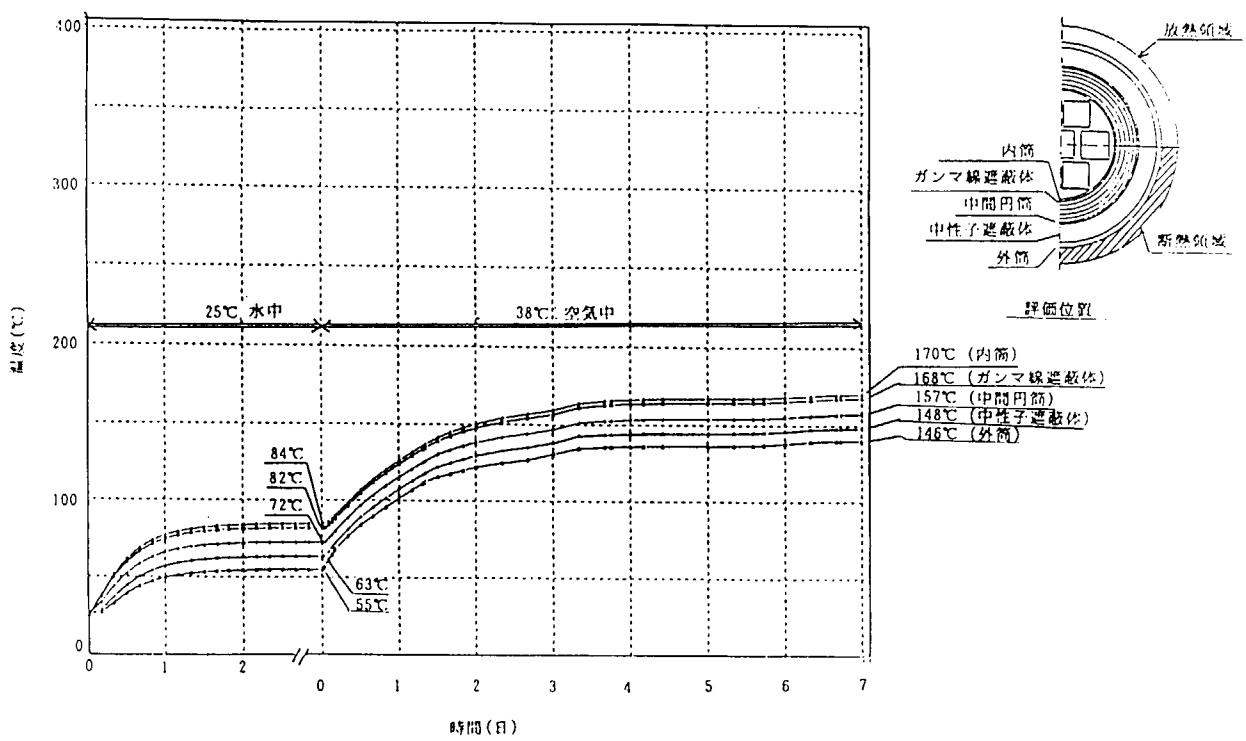


図 3.2.1-26 温度の経時変化(ケース5, 断熱領域)

### 3.2.2 乾式キャスク

乾式キャスクの海没時及び引揚げ後を想定してキャスクの各部温度を計算コード「TRUMP」を用いて計算した。以下にその概要を示す。

#### (1) 対象キャスク

計算の対象としたキャスクはPWR型燃料集合体を12体収納したTN-12A型キャスクである。

図3.2.2-1にキャスクのフィン領域断面を示す。

#### (2) キャスクの伝熱システム(図3.2.2-2参照)

収納物より発生する崩壊熱は内部気体(窒素)の熱伝導及び熱輻射によってバスケットに伝えられる。バスケットに伝えられた熱は、バスケット内を熱伝導によって伝えられ、バスケット外周面より内部気体(窒素)の熱伝導及び熱輻射によって容器本体に伝えられる。また、本計算では特にバスケット要素間に内部気体の自然対流による熱伝導を考慮している。

容器本体に伝えられた熱は容器本体及びフィン内を熱伝導により伝えられる。

外表面において熱は、フィン表面からの空気の自然対流及びレジン表面、フィン表面(先端のみ)からの熱輻射によって環境に放散される。

#### (3) 伝熱計算

##### 1) 計算コード

本計算には、有限差分法に基づく温度分布計算プログラムである「TRUMP」コードを用いた。

##### 2) 計算モデル

本計算の計算モデルは、キャスク全体モデル及び燃料集合体モデルの2種類より成っており、いずれも、2次元平面モデルであり、軸方向の熱移動はないものと仮定している。

###### (a) キャスク全体モデル(図3.2.2-1及び図3.2.2-2参照)

本モデルは、図3.2.2-1及び図3.2.2-2に示したキャスクのフィン領域断面の2次元平面モデルである。このモデルにおいて、収納物は発熱体として簡略にモデル化されている。

###### (b) 燃料集合体モデル(図3.2.2-3参照)

本モデルは、各燃料ビンの温度を求めるためのモデルである。燃料集合体は $15 \times 15$ 配列のPWR型燃料集合体とし、 $1/8$ 断面をモデル化している。

本モデルの境界条件は、キャスク全体モデルで計算されたバスケット孔壁の温度である。

本モデルでは、被覆管内の熱伝導、近接燃料ビン間及び外周燃料ビンとバスケット孔壁間の熱伝達(輻射及び内部気体の熱伝導)のみを考えており、実際には考えられる対流または熱伝導による内部気体間の熱移動を無視し、内部気体による熱伝達を全て熱伝導としているため安全側のモデルとなっている。

##### 3) 計算条件

基本的な計算条件は、キャスクが $25^{\circ}\text{C}$ の水中に定常温度に達するまで放置され、その後 $38^{\circ}\text{C}$ の空气中に太陽輻射熱を考慮して、1週間放置されるものである。

計算条件において、キャスク外表面の放熱面積のみを計算パラメータとし、2ケース計算した。

各ケースの計算条件を表3.2.2-1に示す。

表 3.2.2-1 計 算 条 件

			ケース 1	ケース 2		
収納物の発熱量			5 kw/体 ( 60 kw/体 )			
水 中	環 境	温 度	25 °C			
	物 質	静 止 水				
	輸送物	外表面からの放熱手段	水の自然対流熱伝達			
空 氣 中	外表面の放熱領域	全体の 1/2 ( 平均 )		全体の 1/2 ( 集中 )		
	期 間	各部温度が定常に達するまで				
	環 境	温 度	38 °C			
空 氣 中	物 質	静 止 空 気				
	輻 射 率	1				
	太陽輻射熱	12 時間当たり 400 cal/cm <sup>2</sup> ( 放熱部のみ )				
輸 送 物	外表面からの放熱手段	空気の自然対流熱伝達及び熱輻射				
	外表面の放熱領域	全体の 1/2 ( 平均 )	全体の 1/2 ( 集中 )			
	外表面の輻射率	レジン表面 0.95, フィン 0.08				
期 間			1 週 間			

## 備 考

- 各ケースの最終温度 ( バスケット孔壁 ) を境界条件として燃料ピンの解析を行なう。

## (4) 計算結果

本温度計算の結果を図 3.2.2-4 ~ 図 3.2.2-7 に示す。また、代表的な箇所を選んでその経時変化を図 3.2.2-8 及び図 3.2.2-9 に示す。

これから本キャスクは、水中においてケース 1 の場合、約 1 日、ケース 2 の場合 約 2 日で各部温度がほぼ定常に達し、空气中においては、いずれも約 3 日を要することがわかる。

また、ケース 1 ( 外表面積を均一に 1/2 とした場合 ) とケース 2 ( 外表面積を 180 °C に集中して 1/2 とした場合 ) を比較すると現実により近いと考えられるケース 2 の方がかなり温度が高くなっている。

キャスク各部の最高温度は、ケース 2 の空气中において生じているが、バスケット中心部でも 320 °C であり、キャスク構成部材として問題となるような温度に達している箇所はない。

燃料ピン表面温度については、第 3 項で述べたように内部気体間の熱移動及び対流の効果を無視した安全側の解析モデルにもかかわらず、最高温度がケース 1 で 50.9 °C, ケース 2 で 54.4 °C であり、特に問題はないと考えられる。

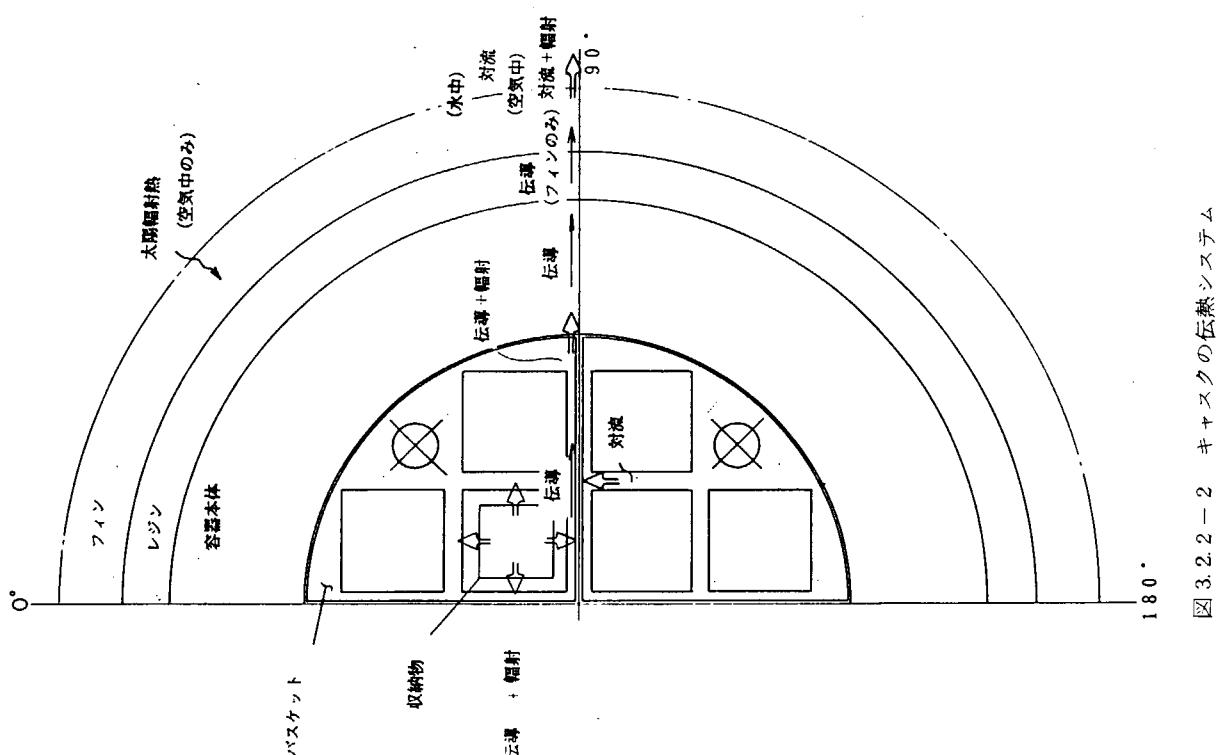


図 3.2.2-2 キャスクの伝熱システム

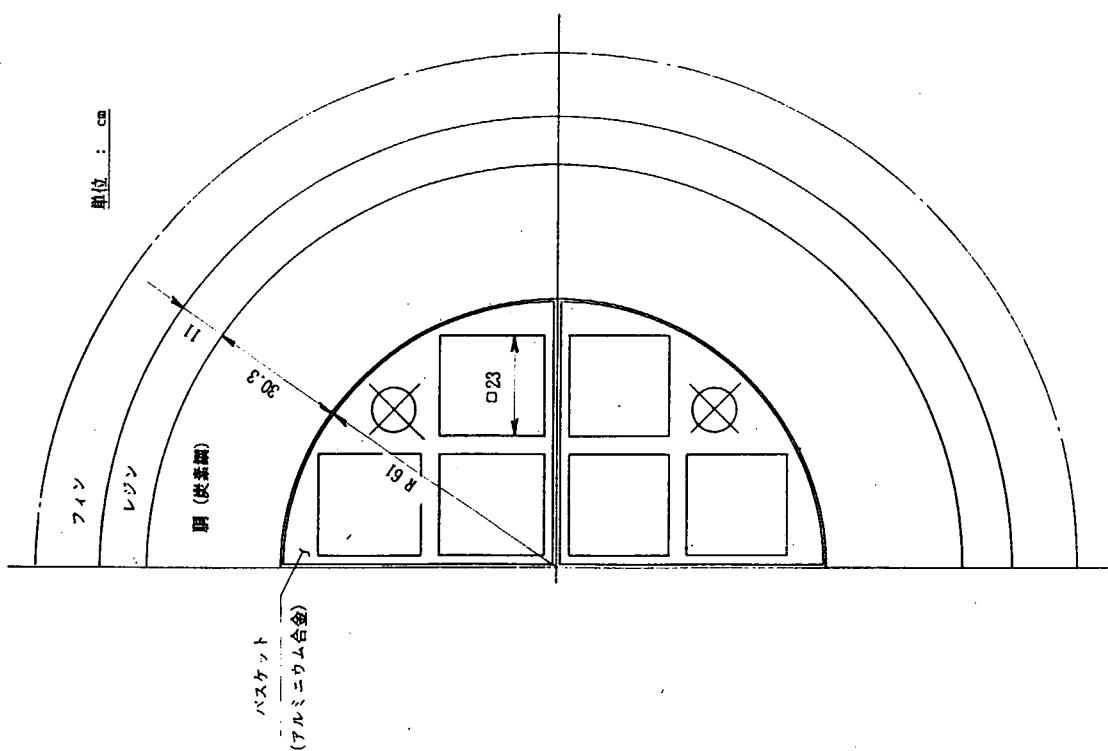


図 3.2.2-1 TN-12A 型キャスクのフィン領域断面

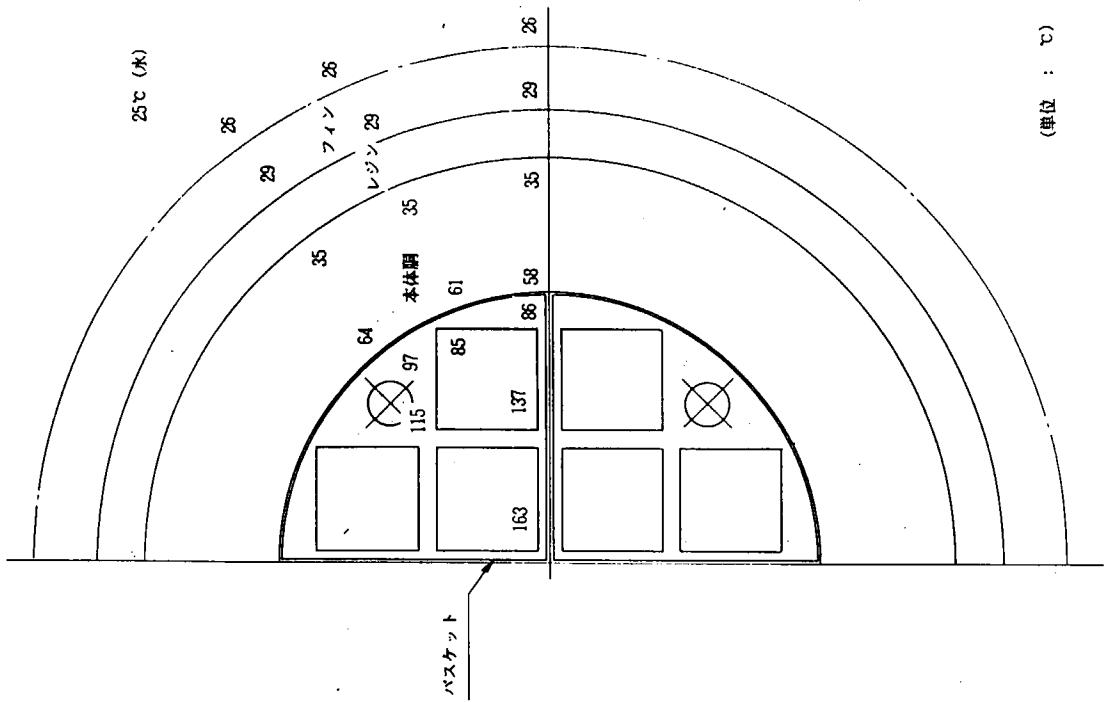


図 3.2.2-4 温度計算結果(ケース1, 水中)

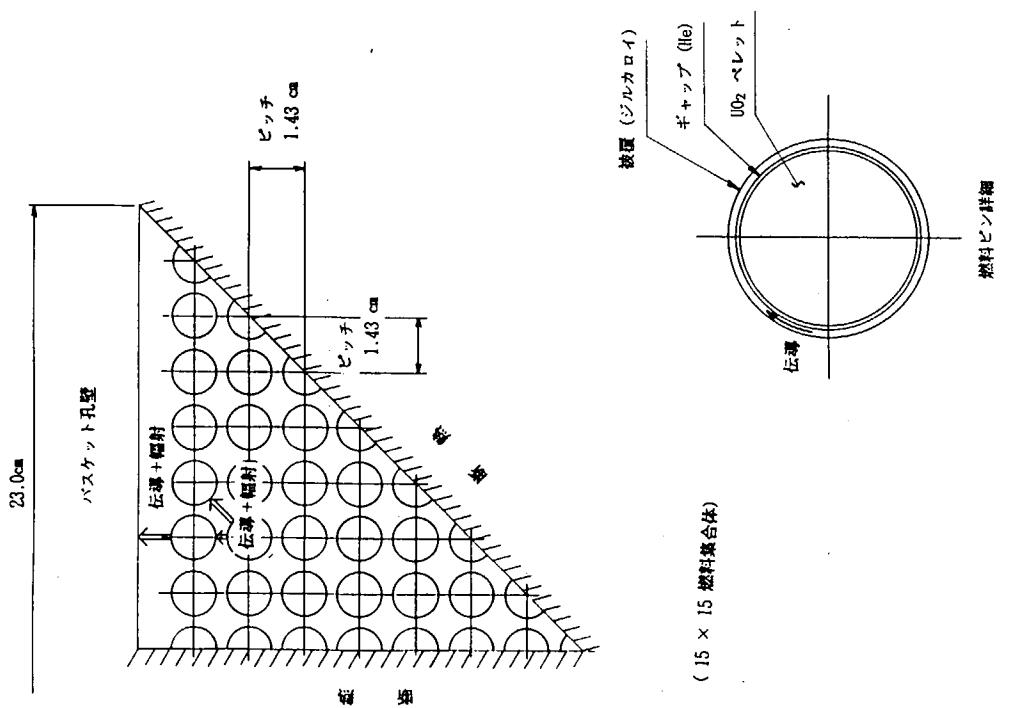


図 3.2.2-3 燃料集合体モデル

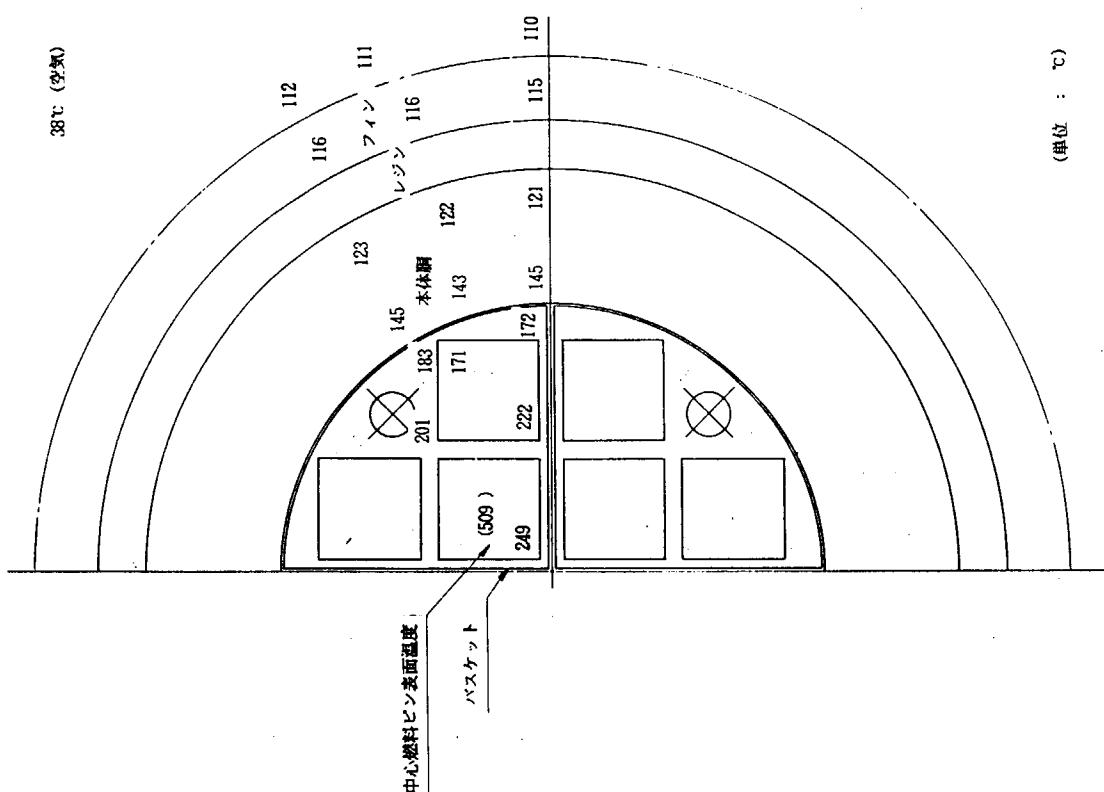


図 3.2.2-5 溫度計算結果(ケース1, 空気中)

図 3.2.2-6 溫度計算結果(ケース2, 水中)

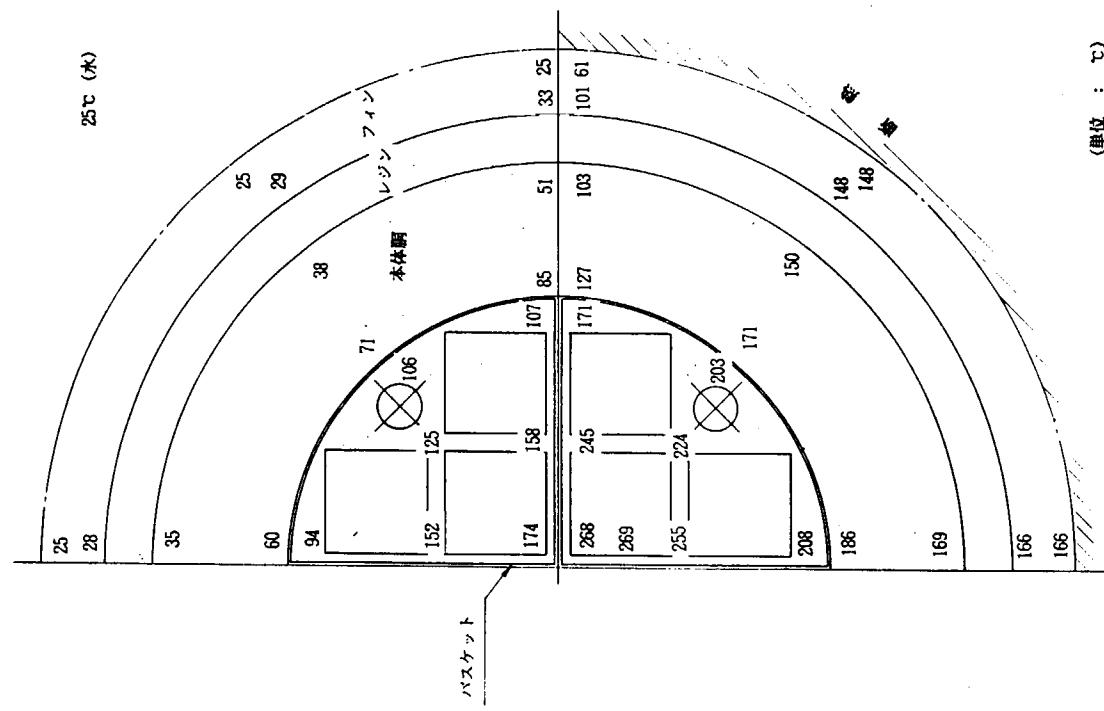


図 3.2.2-6 溫度計算結果(ケース2, 水中)

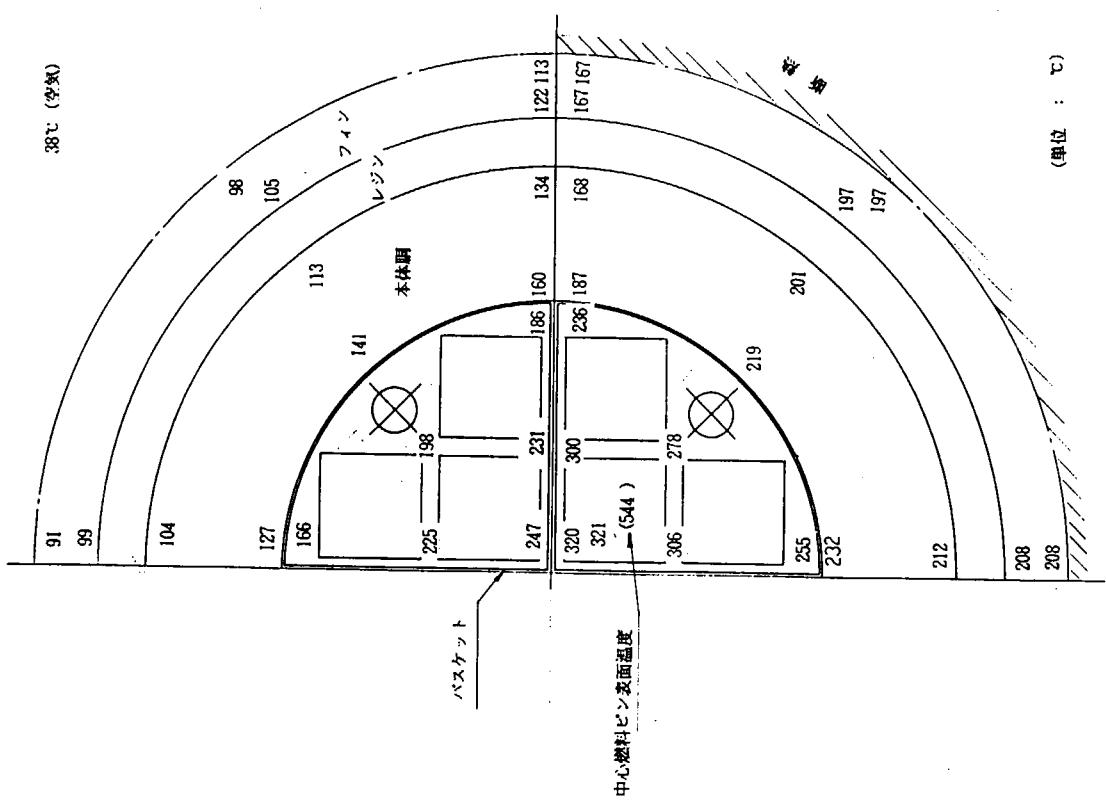


図 3.2.2-7 溫度計算結果(ケース2、空氣中)

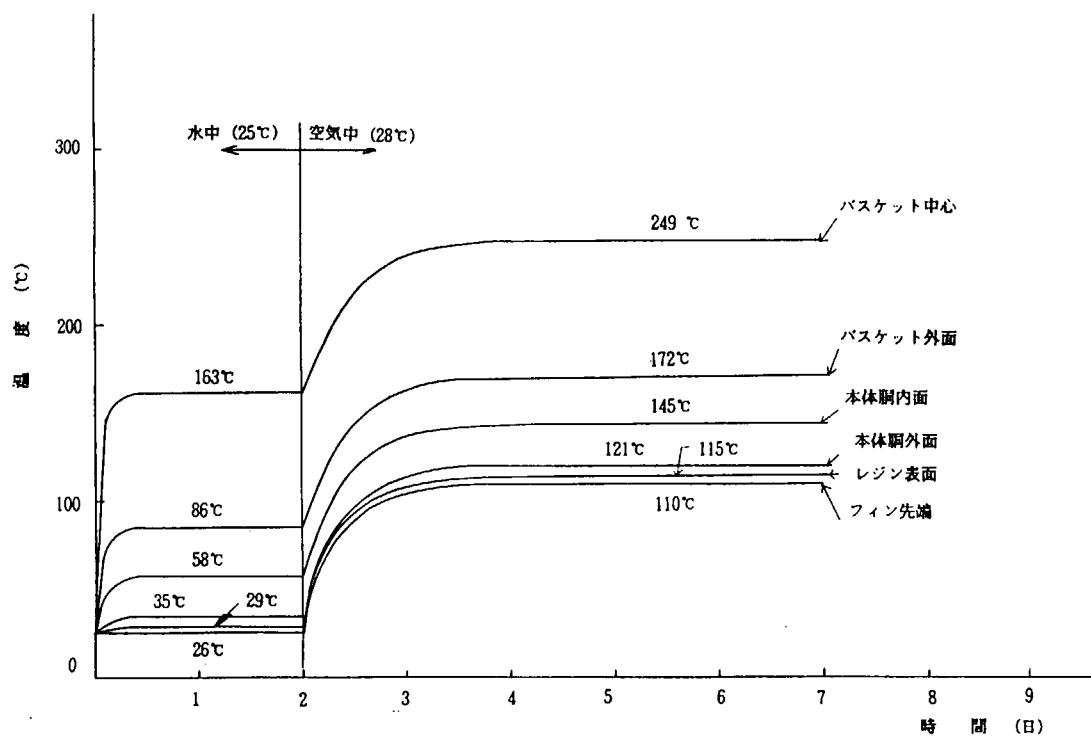


図 3.2.2-8 溫度計算結果(ケース1)

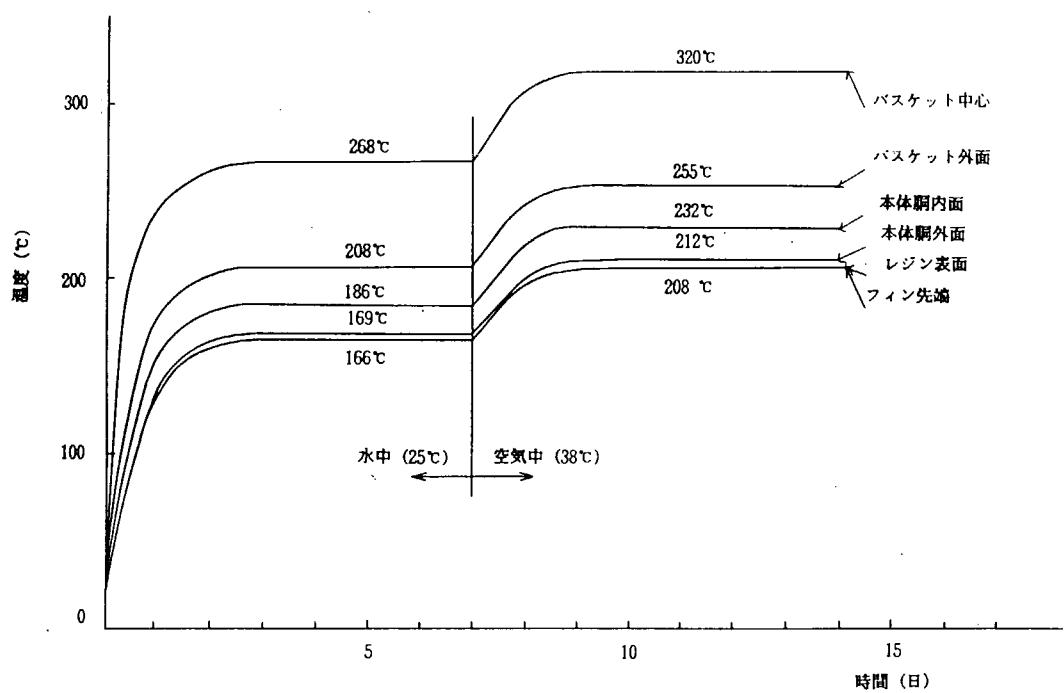


図 3.2.2-9 溫度計算結果(ケース2)

## 4. 結 言

本年度で2年計画の本調査研究部会は終了し、事故処理技術のうち水深2000mまでの沈船引き揚げ技術、冷却水漏洩時の放射線量率、伝熱計算による収納された使用済燃料の熱的健全性に関する検討を行い、緊急時の対応の指針を示した。

また、各検討項目については、一定条件のもとに審議検討を進めた結果、以下のとおりの結論を得た。

### (1) 水深500m以下からの引き揚げ方法の検討

欧米の海洋石油開発現場で使用されているADS(Armoured Diving Suit: 大気圧潜水服)を使用すれば、キャスクのみの回収が可能である。ただし、ADSでは行動が制限されるので、船艤内のキャスクの積載状況により、例えば移動空間が狭い場合、あるいは2段積みの下段のキャスクの場合、回収困難な場合がある。

### (2) 水深500m以上2000m以下の引き揚げ方法の検討

水深500m以上では、キャスクのみを回収するという作業は現在の技術では困難であり、沈船全体を引き揚げる必要がある。引き揚げは、沈船に作業バージを取り付け、作業母船により引き揚げる。

### (3) 引き揚げに必要な機器の概念設計

引き揚げに必要な機器の概念設計として、作業バージ、作業母船及び沈船引き揚げ時の船体強度を検討した。

作業母船については現在の技術で建造可能であるが、作業バージについては現在の技術では必ずしも建造可能とは言えず、今後の技術開発を必要とする。

### (4) 冷却水漏洩キャスクの放射線量率計算

冷却水の漏洩により放射線量率が上昇しても、放射線作業による被曝線量は許容値(5レム/年)を超えることはない。

### (5) 乾式及び湿式キャスクの伝熱計算

乾式及び湿式キャスクについて、事故時を想定しキャスク内各部の温度上昇を計算した結果、遮蔽材の鉛が溶けたり、燃料棒が破損したりする程の温度上昇は起こらないことを確認した。

以上の結論から、キャスクの損傷により放射線量率及び温度が上昇した状態での回収作業は、陸上の原子力発電所等における放射線作業に較べ困難なものではなく、また、サルベージについては各条件さえ整えば水深2000mからの引き揚げも不可能ではないと考えられる。

従って、今後ADSの作業性の向上、ADSの作業を考慮した船艤の構造、作業バージ等に関する技術開発を進めることにより、より実現性のあるものとなる。