

PN 9410 92-050

分置

# 深海潜水調査船用高速炉システムの概念検討

1 9 9 2 年 2 月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 深海潜水調査船用高速炉システムの概念検討

大坪 章\*、羽賀 一男\*

## 要 旨

## 目的

最大潜水深度10,924m及び8,000mの潜水調査船高速炉システムの概念確立を目的として検討作業を行った。

## 方法

本システムの高速炉としては、宇宙開発用小型液体金属冷却炉の概念を用いた。一次系冷却材はNaKで、原子炉容器出口温度は680℃と550℃の2ケースとした。動力変換系である二次系にはHe(60)-Xe(40)ガスを作動流体とした密閉ブレイトンサイクルを用いた。電気出力は20kWeである。

一次系冷却材NaKの各原子炉容器出口温度に対して、密閉ブレイトンサイクルの解析計算を行い、熱効率・交換熱量・ガス及びNaKの流量・温度を求めた。

## 結果

上記計算結果に基づき、それぞれの機器の概略寸法を設定し、本システムの概念図を作成した。内径2.3mの球状部分と内径1.1mの円筒状部分からなる耐圧殻中に、本システムを格納することが出来た。

更に、本システムを搭載した潜水調査船について検討を行い、そのイメージ図を作成した。本潜水調査船の全長は約14mとなった。また、空中重量は、最大潜水深度10,924m及び8,000mの場合に対して各々約100トン及び約70トンとなったが、この程度の重量であれば母船方式が可能である。

## 結論

本潜水調査船は高速炉を動力源として用いているので、現状の蓄電池を用いている潜水調査船に比較し、電力に余裕が有るため次の特徴を有することが出来る。

・深海底に1週間連続で滞在出来るとともに、高速での移動が可能である。

・海底調査時の照明範囲が広く、広い範囲の目視観測が可能である。

従って本潜水調査船は、日本海溝の海底の地割れの詳細観測等に使用出来ると考えられる。

# Conceptual Design Study of Fast Reactor System for Deep Sea Research Submersible

Akira Otsubo<sup>\*</sup> . Kazuo Haga<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

### Objective

A conceptual design of a fast reactor system was studied for deep sea research submersibles diving to the maximum depths of 10,924m and 8,000m.

### Method

A space reactor concept was used for the system. Primary coolant of the system was NaK, whose temperatures was set as 680 and 550 °C at the exit of a reactor vessel. Secondary system was a closed Brayton cycle using He(60)-Xe(40) gas as working fluid. Electric power output was 20kWe.

Thermal efficiency, transported thermal energy, and flow rates and temperatures of the gas and NaK were calculated at closed Brayton cycle analyses.

### Result

The conceptual design was drawn, based on the size of an each component fixed with the calculated results of these values. The system could be set in a pressure hull comprising of a 2.3m<sup>1D</sup> sphere and a 1.1m<sup>1D</sup> pipe. A simple figure was drawn of the research submersible loading the system. The whole length of the submersible was about 14m. Its weights were about 100ton and 70ton for the maximum depths of 10,924m and 8,000m respectively. It could be carried by a mother ship.

### Conclusion

The submersible had the following features compared with the one loading electric cells on account of affluent electric power generation by the fast reactor system.

A continuous stay longer than a week and movement at a high speed were made possible over a deep sea bottom.

An illuminated region was very wide during sea bottom survey. Observation by watching was possible over a wide region.

Therefore the submersible could be considered to be used for detail observation

over cracks in the Japan trench and etc.

---

\* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,  
O-arai Engineering Center



12. 現状高速炉技術レベルでの目標設計

12. 1 熱効率のパラメータ解析

12. 2 ラジエータ熱交換性能

13. まとめ

付録-1 ガス-NaK熱交換器 (NaK: 680℃)

付録-2 ラジエータの熱交換性能計算 (NaK: 680℃)

付録-3 船内遮蔽線量について

付録-4 ガンマ線遮蔽厚さの検討

付録-5 ラジエータの熱交換性能計算 (NaK: 550℃)

## 図リスト

- 図 2. 1 SP-100 設計例
- 図 2. 2 原子炉廻り構造設計
- 図 3. 1 全システム系統
- 図 4. 1 密閉ブレイトンサイクル i-s 線図
- 図 4. 2 温度プロファイル
- 図 6. 1 レキュバレータ形状
- 図 6. 2 ラジエータ冷却ガス流路概念
- 図 7. 1 耐圧殻概略図
- 図 8. 1 耐圧殻内機器配置
- 図 9. 1 居住区耐圧殻
- 図 9. 2 潜水調査船行動パターンと消費電力
- 図 9. 3 潜水調査船の高速炉と蓄電池の運用
- 図 9. 4 潜水調査船概念図
- 図 11. 1 電源システム概念及び制御シーケンス
- 図 11. 2 電源系統
- 図 11. 3 電池容量と放熱量の推移
- 図 11. 4 放熱器

## 表リスト

- 表 4. 1 先行設計システムの仕様
- 表 8. 1 原子炉及び発電系（耐圧殻を含む）の概略重量
- 表 9. 1 潜水調査船主要構成機器
- 表 9. 2 潜水調査船標準作業パターン
- 表 9. 3 潜水調査船空中重量試算
- 表 11. 1 電池主要目
- 表 12. 1 解析ケース一覧
- 表 12. 2 解析結果
- 表 12. 3 既設計例比較

## 1. ま え が き

1977年米国潜水調査船「ALVIN」により、ガラパゴス海嶺で熱水噴出孔及び熱水性生物群集が発見され、プレートテクトロニクス理論の検証がなされた。これを契機に潜水調査船搭乗者による目視調査の重要性が認識され始めた。また、熱水噴出孔等の発見は地球物理、化学、地質、生物、微生物、鉱物等の多分野の学者が共同して総合的に海洋調査することの重要性を強く認識させることとなった。

我が国でも海洋科学技術センターが、潜水調査船「しんかい2000」「しんかい6500」を運用し大きな成果を挙げると共に、今後の新たな発見の期待が更に大きくなっている。

しかし、現状の潜水調査船では

- ①最大潜航深度が6,500mであること。
- ②1潜航の調査時間が3時間と短いこと。
- ③1潜航の調査範囲が狭いこと。
- ④乗員は3名で、うち研究者は1名と少ないこと。

等から調査の成果としては水深6,500m以浅での発見或いは短時間の状況確認に限定される。

一方、海洋は6,500mを越える深海は現状では未知のまま放置されることになる。例えば日本海溝の海底の割れ目等の調査では、発見や短時間の調査の他、長期的且つ連続的な調査及び専門分野の異なる学者による総合的な調査が必要となりつつある。

これらを行えるものとして、ここでは動力源として20kWeの高速炉を使用した次のような特徴を有する潜水調査船の構造概念の検討を行なった。

- ①最大潜航深度： 10,924m及び8,000m
- ②1潜航時間： 100時間
- ③乗員： 4名（うち、研究者2名）

## 2. 概念検討概要

動力を得る熱サイクルとして、ここではNaK冷却炉密閉ブレイトンサイクルシステムを採用し、その概念検討を行ったが、検討にあたっては原子炉系、発電系及び耐圧殻につき次のような条件を設定した。

- (1) 潜水調査船の潜水深度は水深10,924mおよび8,000mとする。前者は世界最深地点の深度であり、後者は日本海溝の深度である。
- (2) 所要電気出力は20kWeとする。
- (3) 原子炉系は米国GE社の下記文献の設計を参考にする。  
Scalability of Space Reactor Systems in the 10 to 100 kW Range<sup>(1)(2)</sup>  
この文献を参考にした理由は、この設計による原子炉を図2.1及び図2.2に示すように、現在までに公表されているもののうち最も寸法が小さいためである。
- (4) 原子炉炉心出口温度は680℃および550℃とする。
- (5) ブレイトンサイクルシステムはERATOプログラムの発電系<sup>(3)</sup>を参考にして、そのサイジングを概略決定する。
- (6) 発電系の各機器については、Garrett社のタービン設計例<sup>(4)</sup>を参考にして、そのサイジングを決定する。
- (7) 耐圧殻の設計は、運輸省の潜水船特殊基準<sup>(5)</sup>によるものとする。680℃設計では10%Ni鋼を使用材料とし、550℃設計では10%Ni鋼およびTi合金を使用する。
- (8) 潜水調査船については、イメージ図の作成を行う。

### 3. 全システム系統

次の考えに従って、全システム系統を作成することとした。

- (1) 本システムは耐圧殻内に設置するので、全体をコンパクトにする。
- (2) 一次系は、米国で研究されているSP-100用の原子炉の設計モデルを流用する。
- (3) 二次系の密閉ブレイトンサイクルシステムは二系統とする。

全システム系統図を図3.1とする。二次系の冷却器であるラジエータは、従来の設計通り本設計でも耐圧殻内面に設けている。

尚、本報での検討対象は前報告書<sup>10)</sup>のような無人基地用のシステムでなく潜水調査船用なので、乗組員用の放射線遮蔽が必要となり、このためγ線遮蔽体を設ける。

#### 4. 密閉ブレイトンサイクルの解析

出力を求めるためには密閉ブレイトンサイクルの作動流体であるHe(60) - Xe(40)ガスの温度・圧力・流量、ターボ機械の膨張比、圧縮比、断熱効率、熱交換器の温度効率、圧力損失等をパラメータとする、密閉ブレイトンサイクルの特性評価を行う必要がある。この評価により、図4.1に示す*i-s*線図のポイント1-6のHe(60) - Xe(40)ガスの状態量が決まる。

図4.1の評価を行う静特性モデルについては既に報告したので<sup>17)</sup>、ここでは省略する。主な解析条件は次の通りである。

- (1) 炉容器出口NaK温度は680℃とする。他のパラメータについては表4.1を参考にする。
- (2) コンプレッサ入口ガス温度については、耐圧殻外側の海水温度を5℃として、83℃と設定する。
- (3) コンプレッサ圧縮比( $\pi$ )については、前報と同じ2.06とする。タービン膨張比を決める上で必要なブレイトンサイクル構成機器の圧力損失割合は、熱効率の良いERATOの設計例を参考にし、5.7%とする。
- (4) 各種効率についても、Garrett社のカタログ値を用いる。
- (5) 混合ガスの物性値(173℃)については、次の値を用いる。

$$\begin{aligned} \gamma &= 7.4562 \text{ kg/m}^3 \\ \eta &= 3.7522 \times 10^{-6} \text{ kg s/m}^2 \\ \lambda &= 1.595 \times 10^{-5} \text{ kcal/m s } ^\circ\text{C} \\ C_p &= 0.0907 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \\ a &= 2.359 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \nu &= 4.931 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ P &= 0.2090 \end{aligned}$$

以上の条件を用いて、二次系のHe(60) - Xe(40)ガスの温度プロファイルを求める計算を行う。

タービンの膨張比は

$$\pi_T = \pi_c / (1 + \Sigma \delta) = 2.06 / 1.057 = 1.95$$

入口温度は

$$T_1 = 665 + 273 = 938 \text{ K}$$

タービン断熱効率は $\eta_T = 0.886$ (ERATO設計例)であるので、タービン出口温度は

$$T_2 = T_1 \{ 1 - \eta_T (1 - \pi_T^{(1-\gamma)/(1-\gamma)}) \} = 471 \text{ } ^\circ\text{C}$$

タービン膨張仕事量は

$$L_T = C_p (T_1 - T_2) = 17.60 \text{ kcal/kg}$$

コンプレッサは、圧縮比 $\pi_c = 2.06$ である。入口ガス温度は

$$T_3 = 83 + 273 = 356 \text{ K}$$

コンプレッサの断熱効率は  $\eta_c = 0.838$  (ERATO設計例) であるので、

$$T_0 = T_1 \left\{ 1 + \left( \pi_c^{11.66-1} / 1.66 - 1 \right) / \eta_c \right\} = 224^\circ\text{C}$$

$$L_c = C_p (T_0 - T_1) = 12.79 \text{ kcal/kg}$$

タービン出口とコンプレッサ出口の温度が判明したので、レキュパレータの温度効率  $\eta_{rx} = 0.842$  よりラジエータ入口温度と NaK-He・Xe 熱交換器入口温度を求める。

$$\begin{aligned} \eta_{rx} &= (471 - \text{ラジエータ入口温度}) / (471 - 224) = 0.842 \\ &= (\text{NaK} \cdot \text{ガス熱交換器入口温度} - 224) / (471 - 224) \end{aligned}$$

$$\text{ラジエータ入口温度} = 263^\circ\text{C}$$

$$\text{NaK} \cdot \text{ガス熱交換器入口温度} = 432^\circ\text{C}$$

図4. 2に求まった温度プロファイルを示す。

以上で単位重量当たりのサイクル計算が終わったので、次に系内を循環する流量を計算する。発電端出力で  $20 \text{ kW e}$  であるため、タービン出力より圧縮機用負荷と発電に要する損失を考慮して計算する。循環するガス流量は次のようになる。

$$20 \times 860 / \{ (17.60 - 12.79) \times 0.89 \} = 4020 \text{ kg/h}$$

熱効率は、本サイクル計算によると

$$20 \times 860 / \{ 4020 \times 0.0907 \times (665 - 432) \} = 0.202$$

となる。

ラジエータにおける放熱量は

$$4020 \times 0.0907 \times (263 - 83) / 860 = 76.3 \text{ kW t}$$

レキュパレータにおける放熱量は

$$4020 \times 0.0907 \times (471 - 263) / 860 = 88.2 \text{ kW t}$$

NaK・ガス熱交換器の交換熱量は

$$4020 \times 0.0907 \times (665 - 432) / 860 = 98.8 \text{ kW t}$$

となる。

## 5. 原子炉構造

原子炉については、米國で研究されている中核炉のF-100の一種の炉心設計を採用したが、この炉の概念図を図2.1及び図2.2に示す。この炉は、熱管式炉を用いた場合の熱出力が10kWeであるが、蒸気ブレイクンサイクルを用いると熱出力が向上し30-40kWeの発電が可能となる。

炉心は中核容器の中に収められているが、蒸気発生回路ドラム方式で炉容器周囲に配置されている。蒸気回路ドラムは吸収材B、Cと反射材Beから構成されており、この回路ドラムの回転角度で炉容器から外部へ漏洩する中核子量をコントロールして、炉出力を制御する。安全棒も同様に炉容器周囲に配置されている。

炉心は蒸気発生回路で構成されているが、炉心構成については詳しい説明を省略する。

## 6. 1 NaK-ガス熱交換器

球形の耐圧殻内に設置するという点を考慮して、全体をコンパクトにするように熱交換器はドーナツ型にする。伝熱面にはワイヤーを巻くことにより伝熱促進を図るようとする。

NaK-ガス熱交換器の形状は、交換熱量98.8kW用の熱交換器として伝熱計算をして、 $\phi 0.20\text{m} \times L 1.85\text{m}$ のドーナツ構造（ドーナツ部径1.10m）とした。熱交換器の詳細については付録1を参照のこと。

## 6. 2 レキュパレータ

レキュパレータとしては小型で熱交換性能の優れたプレートフィン型ガス-ガス熱交換器を用いる。図6.1に形状を示す。

プレートフィン型ガス-ガス熱交換器の場合、フィン形状が三角のものと矩形のものとの詳細寸法は異なるが、1cm当たり5-8フィンが採用されるのが一般的である。フィンの高さにも異なるが、 $1\text{m}^3$ 当たり伝熱面積として約 $1,300\text{m}^2/\text{m}^3$ であり、通常のシェルアンドチューブ型の熱交換器に比較して、熱通過率は約10倍（約 $1,500\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ）である。

$$\text{交換熱量: } Q = G \cdot C_p \cdot \Delta T = 4.020 \times 0.0907 \times (471 - 263) = 75.850 \text{ kcal/h} = 88.2 \text{ kW} \quad (\Delta T: \text{ガス温度上昇})$$

$$\text{熱通過率: } K = 1500 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C} \quad (\text{余裕をみた控え目の値である})$$

$$S = Q / (\Delta T_m \cdot K) = 75.850 / (39 \times 1.500) = 1.3 \text{ m}^2/2 \text{ ループ}$$

余裕をみて、 $1.3 \text{ m}^2/$ ループ程度の伝熱面積を有するように設定する。

レキュパレータの伝熱面積 $2.6 \text{ m}^2$ を有するのに必要な伝熱部容積は $2.6 / 1,300 \text{ m}^3$ である。

## 6. 3 ラジエータ

ラジエータは、ガスより耐圧殻内面にガスの強制対流で熱伝達した後、耐圧殻中を熱伝導で伝熱し、耐圧殻外面より海水中へ海水の強制対流で放熱する。

ラジエータの入口/出口温度は、 $263^\circ\text{C} / 83^\circ\text{C}$ とし、海水側は $5^\circ\text{C}$ として、耐圧殻伝熱面積が $76.3 \text{ kWt}$ の放熱面として成立の可能性があることを確認するものとする。検討が安全サイドになるように、球殻を平板として必要伝熱面積を求めるものとする。

検討の結果、下記のような構造対応を採用することで、除熱は可能と考えられる。

- ・耐圧殻の内側に間隔30mmでアニュラスを形成する。
- ・アニュラスを流れるガスの流速を $20\text{m}/\text{s}$ 程度とするように流路を確保する。
- ・熱通過率を高めるために、耐圧殻側にフィンを設置する。

尚、耐圧殻は球状のものと円筒状のものからなっているが、放熱は球殻の一部から行うことにした。ハッチがあること及び円筒殻との接続があることから、球殻内面の流路構成を3次的に詳細に決める必要があるが、本年の検討結果としてラジエータ流路構成の構造を図6.2に示す。又、除熱性能に対する検討の結果を、付録2に示す。計算結果によれば、耐圧殻外面の海水は流速1m/sの強制対流でも、或いは自然循環でも放熱が可能である。

#### 6.4 配管

原子炉冷却材のNaK配管は総て溶接によって接続する。NaK流速は2-3m/s程度として配管口径を設定する。ガス系統に関する組み立て時の機器と配管の接続は、ノズルと配管をスウェジロック等を行うことを原則とする。口径の大きい配管は溶接にて接続するものとする。即ち、出来るだけ機器と一体構造で耐圧殻内に搬入し、配管の小口径への分岐部でスウェジロック等で接続するものとする。以下に配管口径を示す。

NaK配管(1ループ) :  $\phi 31.8 \times t 1.5$  (流速2m/s程度)

ガス系配管(2ループ)

- ・タービン入口 :  $\phi 75.0 \times t 2.5$
- ・タービン出口 :  $\phi 85.0 \times t 2.5$
- ・ラジエータ入口 :  $\phi 80.0 \times t 2.5$
- ・ラジエータ出口 :  $\phi 70.0 \times t 2.0$
- ・コンプレッサ出口 :  $\phi 57.0 \times t 2.0$
- ・レキュペレータ出口 :  $\phi 70.0 \times t 2.0$

#### 6.5 熱膨張吸収ペローズ

NaK充填時の循環純化運転時の温度は200℃であるが、長期的(200日程度)な崩壊熱の減衰(定格0.5%程度)を考慮して、充填純化の完了後の冷却系統の切離し温度を70℃とし、NaKの体積膨張(70-700℃)を考慮して、その容量を設定する。

- ・NaKインベントリ RV : 約7.4ℓ, 配管 : 約5.2ℓ, IHX : 約18ℓ  
合計 約31ℓ
- ・比重量 70℃で854kg/m<sup>3</sup>, 700℃で703kg/m<sup>3</sup>
- ・体積膨張量 26.3kg/31ℓ at 70℃  
26.3kg/37.7ℓ at 700℃

NaK全体が700℃となるのでないが、熱膨張吸収ペローズの体積吸収容量に余裕をみて7ℓとする。

#### 6.6 発電機等

密閉ブレイトンサイクルのタービン・コンプレッサ・発電機については、米国Garr

e t t社のカタログより大きさを設定する。

原子炉システムは耐圧殻中に設置する。耐圧殻の大きさ（内寸法）は、原子炉システムを設置するのに必要なスペースを確保するという要求条件より決定される。

本システムの場合、機器の配置の検討をした結果、密閉ブレイトンサイクルを配置する内径2,300mmの球状の耐圧殻と、原子炉を設置する内径1,110mmの円筒状の耐圧殻と、半球状の内径1,140mmの耐圧殻を接続した形状となった。

上記のような形状の耐圧殻の圧壊強度計算を行って、耐圧殻の板厚を求めた。板厚計算方法については前報告書<sup>(1)</sup>で報告しているのので、ここでは省略する。計算結果は次の通りである。

- (1) 設計深度 10,924m 10%Ni鋼製耐圧殻
- ・球状部分 板厚 98mm (腐食代2mmを含む)
  - ・円筒状部分 板厚 91mm (腐食代2mmを含む)
  - ・半球状部分 板厚 48mm (腐食代2mmを含む)
- (2) 設計深度 8,000m 6Al-4V-Ti合金製耐圧殻 (腐食代は必要なし)
- ・球状部分 板厚 104mm
  - ・円筒状部分 板厚 98mm
  - ・半球状部分 板厚 50mm

以上の計算結果をもとに作成した耐圧殻の概略図を、図7.1とする。図7.1中には上記(1)(2)の場合の耐圧殻重量を記載している。

## 8. システム概念検討

前章で検討した結果を用いて、システムの概念設計を行う。概念設計の方針を次に述べる。

(1) 出力：20 kWe

(2) 冷却材：一次系・・・NaK、二次系・・・He60-Xe40混合ガス

(3) 原子炉：

イ. 熱出力

ロ. 炉心入口/出口NaK温度

ハ. 制御ドラム 3個(BW+B, C)

ニ. 安全棒 6本(B, C)

ホ. 一次系冷却材入口/出口 上部流入/上部流出

ヘ. 冷却材系統数 一次系・・・一系統

二次系・・・二系統(一部一系統)

(4) 原子炉設置方法

耐圧殻は上部を球殻とし、密閉ブレイトンサイクルを設置する。又、下部は円筒殻とし、原子炉をこの円筒殻に設置する。

(5) 放射線遮蔽

宇宙炉の遮蔽設計を参考に、原子炉の上部には計装関連の保護の目的で、中性子用及びガンマ線用の遮蔽材として(LiH+W+B, C)をつける。尚、遮蔽体の厚さは宇宙炉の設計例(米国GE社)<sup>(1)</sup>を参考に535mmに設定する。

一方、原子炉の横方向及び下方向には耐圧殻の高速中性子照射による材料劣化対策として、高速中性子遮蔽用に200mm程度のLiHの遮蔽体を設置するものとする。

更に横方向に関しては、原子炉及び発電系を内蔵する耐圧殻と調査船の居住部の耐圧殻間の放射線遮蔽について、次のように考える。両耐圧殻間の距離を3mとし、その間に海水を置くようにし、この海水と両耐圧殻の板厚による放射線の減衰を考慮して、居住区において0.18mrem/hとなるように原子炉容器周りの遮蔽材を設置するものとする。上記のLi, H中性子遮蔽材の他に、ガンマ線遮蔽材としてはWを用いる。遮蔽計算は付録3に示す。

(6) 発電系の系統数

電気出力は20kWeであり、10kWeのタービン2基とする。Garrett社製の10.7kWeのタービンを使用するものとする。従って、ガス系統(二次系)は2系統とする。

上記以外の熱遮蔽、NaKの充填ドレン、燃料の交換等の項目については、無人基地に関する前報告書<sup>(1)</sup>の場合と同じなのでここでは省略する。

以上の設計方針に基づいた耐圧殻内の機器配置検討結果を図8.1に示す。二次系ガスの流路を以下に示す。

NaK-ガス熱交換器 → ガスタービン → レキュパレータ → ラジエータ →  
コンプレッサ → レキュパレータ → NaK-ガス熱交換器

表8. 1に水深10,924mの場合の耐圧殻重量と、耐圧殻内の機器の重量を示す。同表のように、全重量は22トンとなった。機器の重量は米国のSNAP-DYN10k We設計の例を参考にして重量を設定した。SNAP-DYNと同じ重量と考えたのは、原子炉・熱輸送系・発電系・出力プロセス制御系及びケーブル類である。遮蔽及び除熱系は構造が異なるため構造概念図より求めた。尚、概略重量には、配管等のサポート重量は含まれていない。

## 9. 潜水調査船の構造概念の検討

### 9.1 要求条件

世界中の総ての海洋、或いは日本海洋の長期的且つ連続的な調査が行える潜水調査船建造を目標として次の要求条件を纏めた。

- |            |                                |
|------------|--------------------------------|
| (1) 最大潜航深度 | 10.924 m 及び 8.000 m            |
| (2) 型式     | 母船搭載式                          |
| (3) 乗員     | 4人(パイロット 1人、コ・パイロット 1人、研究員 2人) |
| (4) 調査期間   | 一週間位、実質100時間位                  |
| (5) 速力     | 1 kt 程度、最大3 kts (10分間)         |
| (6) 居住区耐圧殻 | 64Ti合金                         |
| (7) 動力源    | 高速炉20kWe + 蓄電池20kWe            |

### 9.2 潜水調査船の概要検討

#### (1) 主要構成装置

潜水調査船の主要構成装置を表9.1に示す。

#### (2) 居住区耐圧殻の検討

潜水調査船居住区の耐圧殻は、内径 $\phi$ 2.0mの操縦室兼観察室と、内径 $\phi$ 2.4mの居室(ベッド4台設置)の連球とする。この耐圧殻について強度計算を行った結果図9.1のような形状となった。

#### (3) 所要動力の検討

潜水調査船の所要動力を決めるために、主要構成装置の消費電力を行動パターン別に集計した。検討結果の概要を表9.1に示す。

潜水調査船の行動パターンは、①潜入・浮上、②観察移動、③重量浮量調整、④高速移動、⑤サンプリング、⑥休息、⑦夜間に大別出来る。

それぞれの用語は次のように定義した。

①潜入・浮上の潜入は潜水調査船が母船から着水後、海面から所定深度まで下降していくことであり、また浮上とは所定深度から海面まで上昇することである。

②観察移動とは、潜水調査船の観察者が所定深度の海底等をのぞき窓から観察しながら(又は、テレビカメラで撮影しながら)、潜水調査船を低速(0.5-1.5kts)で移動することである。

③重量浮量調整とは、所定深度に到達した潜水調査船の重量、浮量をつり合わせた中正浮量とするため、潜水調査船の補助タンクの海水ポンプで出し入れすることである。

④高速移動とは潜水調査船が次の観察地点へ高速(約2.5kts)で移動することである。

⑤サンプリングとは、潜水調査船を停止し、マニピュレータ、グラバ及びサンプリング

機器（採泥器、採水器、コアドリル等）を使って採泥、採水、採岩等を行うことである。

⑥休息とは潜水調査船乗員が外部観察を終え、食事、喫茶、娯楽、データ整理等を行うことである。

⑦夜間とは、潜水調査船乗員が睡眠することである。（実際には三人が就眠し、一人が見張りで見張っているものとする。）

潜水調査船の標準作業パターンを表9.2のように決める。この行動パターンの場合の消費電力は図9.2のようになる。

潜水調査船の高速炉の出力は所要電力に合わせ出力制御することも考えられるが、ここでは母船上では0 kWeとし、水中では20 kWe一定として、余剰電力は蓄電池に蓄え、不足分は蓄電池で補うこととした。潜水調査船の運航パターンから蓄電池で補うフェーズ及び補給電力の概要は次のようにした。

①高速炉出力0 kWeの着水、揚収作業； 5 kW

②潜水調査船重量調整（海水ポンプ作動）； 11 kW（照明等を減らせば4 kW）

③潜水調査船高速移動； 7 kW（特殊照明装置を消せば3 kW）

④潜水調査船サンプリング； 3 kW

高速炉の余剰電力で蓄電池に充電出来るフェーズ及び充電電力の概要は次のようになる。尚、蓄電池能力一杯に充電した後の余剰電力は、特殊ヒータで水中に放熱するものとする。

①潜入・浮上； 8 kW

②休息（夜間を含む）； 4 kW（特殊照明装置を消せば8 kW）

③調査観測； 0 kW（照明灯数を減らせばその分、充電可能）

以上を図9.3に示す。蓄電池及び特殊ヒータについては、後に説明する。

#### (4) 潜水調査船の空中重量の試算

試算の前提条件は次の通りである。

①「しんかい6500」をベースとした。

②最大潜航深度は10,924 mと8,000 mとした。海水密度は10,924 mで1.055、8,000 mで1.05、6,500 mで1.046とした。浮力材の比重は0.63（10,924 m）、0.60（8,000 m）とした。

③潜水調査船の耐圧殻は内径φ2.0 mの操縦室兼観察室と、内径φ2.4 mの居住室の連球とした。居住室にはベッド（長さ1.8 m、幅0.6 m）を4個設けるものとする。

④高速炉（出力20 kWe）の耐圧殻の材料は10Ni鋼（10,924 m、8,000 m）、6Al-4Vチタン合金（8,000 m）とし、操縦室兼観察室と居住室の耐圧殻は64Ti合金とした。

⑤蓄電池の重量は「しんかい6500」と変わらないとした。「しんかい6500」の蓄電池容量は400 AH×108 V（43.2 kWh）×2基に対し、今回は約20 kWh×2基と半分が良い。しかし、今回の蓄電池の充放電の多い使用方法を考慮し

「しんかい6500」が使用している重量の重く、主給電池でなく重量の大きい鉛電池を使用するため、重量は変わらないとした。

空中重量の試算結果を表9.3に示す。8,000mの場合約70トンとなったが、これは母船を大型にすれば潜水調査船として設計可能な重量である。

潜水調査船の概念図を図9.4に示す。高速炉の十分な発電量の余裕で、特殊照明装置を取りつけることが出来た。これにより、「しんかい6500」と比較しずっと広域且つ詳細な調査が可能となる。

# 10. 運転手順及びメンテナンス

## 10.1 運転手順

深海調査のための最初の原子炉及び発電系の運転起動と、各サイクルにおける運転手順の概要を以下に述べる。

最初の場合は次のようになる。

- ① Na K 系統の真空引き
- ② Na K の充填
- ③ Na K の純化（系統温度の昇温（200℃）、コールドトラップは別設備）
- ④ 系統の低温化（7.0℃）のための Na K の循環運転（以後継続運転）
- ⑤ 充填・純化に使用した別設備からの切離し（隔離）
- ⑥ 密閉ブレイトンサイクルの作動ガス側の真空引き
- ⑦ 作動ガスの充填
- ⑧ 耐圧殻内の真空引き
- ⑨ 不活性ガスの充填

以上で運転準備は完了する。以後、発電のための原子炉及びタービン・コンプレッサの起動を行う。

各潜水調査時において、原子炉、発電系及び耐圧殻のメンテナンスのための耐圧殻内のガス置換等がなければ、原子炉及び発電系の起動・停止が繰り返されるだけである。

## 10.2 メンテナンス

定期点検等の場合にタービン等のメンテナンスは可能であり、密閉ブレイトンサイクルの熱効率の低下を防ぐことは出来る。この場合には耐圧殻内のガスを、大気雰囲気に変換する必要がある。

この場合、耐圧殻内雰囲気を He-Xe ガスとする場合には、Xe ガスが原子炉周りで放射化する確率は低く、しかも比較的短時間で崩壊してしまうと考えられるが、安全を考慮して耐圧殻内のガスを密閉容器に入れて漏洩が無いようにすることが望ましい。

## 1 1 . 1 電 源 シ ス テ ム の 概 念

電 源 シ ス テ ム の 概 念 を 図 1 1 . 1 に 示 す 。 こ の シ ス テ ム の 特 徴 は 次 の 通 り で あ る 。

### ( 1 ) 新 動 力 源

電 力 容 量 の 大 き な 新 動 力 源 ( 高 速 炉 ) を 有 し て い る の で 、 所 要 電 力 の 大 半 は こ れ で 賄 い 、 重 負 荷 時 は 電 池 放 電 に よ り 不 足 分 の 電 力 を 補 う と と も に 、 軽 負 荷 時 は 新 動 力 源 の 余 剰 電 力 で 電 池 を 充 電 す る 。

電 池 充 電 終 了 後 の 余 剰 電 力 に 対 し て は 、 新 動 力 源 の 過 熱 防 止 並 び に 電 池 過 充 電 防 止 の た め 、 放 熱 器 を 設 け こ れ に 電 力 を 消 費 さ せ る 。

### ( 2 ) 主 蓄 電 池

主 蓄 電 池 は 重 負 荷 時 は 不 足 電 力 を 供 給 す る と と も に 、 新 動 力 源 の 停 止 時 ( 潜 航 前 後 の チェック時等) に 電 力 を 供 給 す る 。 ま た 軽 負 荷 時 は 新 動 力 源 の 余 剰 電 力 に よ っ て 充 電 す る 。

以 上 ( 1 ) ( 2 ) の 方 式 に よ り 、 新 動 力 源 に か か る 負 荷 を 安 定 化 さ せ る と と も に 、 蓄 電 池 の 所 要 容 量 を 少 な く し 、 小 型 ・ 軽 量 化 出 来 る よ う に す る 。

### ( 3 ) 予 備 電 池

新 動 力 源 と 主 蓄 電 池 に よ る 主 電 源 が 何 ら か の 理 由 に よ り 使 用 出 来 な く な っ た 場 合 に 、 主 蓄 電 池 に 代 わ っ て 重 要 負 荷 に 電 力 供 給 が 行 え る よ う に 、 予 備 電 池 を 搭 載 す る 。

### ( 4 ) 非 常 用 電 池

電 源 故 障 或 い は 二 次 電 源 故 障 時 に 、 乗 員 の 安 全 上 不 可 欠 の 最 重 要 機 器 に 低 電 圧 の 直 流 電 源 を 供 給 で き る 非 常 用 電 池 を 搭 載 す る 。

実 際 の 電 源 系 統 を 図 1 1 . 2 に 示 す 。 こ の 系 統 は 、 図 1 1 . 1 の シ ス テ ム 概 念 に 基 づ い た も の で あ る 。

## 1 1 . 2 主 蓄 電 池

### ( 1 ) 電 池 容 量 の 検 討

主 蓄 電 池 は 潜 航 中 に お い て 負 荷 変 動 に 応 じ 放 電 し た り 、 或 い は 新 動 力 源 か ら 充 電 さ れ た り す る の で 、 必 要 な 電 池 容 量 は 潜 水 調 査 船 の 所 要 電 力 と 新 動 力 源 の 出 力 電 力 と の 関 係 に よ り 、 大 き く 異 な っ て く る 。

潜 水 調 査 船 の 所 要 電 力 は 、 1 0 0 h 運 用 で ト ー タ ル 1 7 4 2 h 、 新 動 力 源 の 出 力 は 2 0 k W ( 1 9 8 0 k W h ) で あ る 。

図 1 1 . 3 は 新 動 力 源 の 発 電 電 力 と 電 池 容 量 の 関 係 を 示 し た も の で あ る 。 新 動 力

源の出力を20 kW一定としているので、新動力源の余剰電力の方が電池の充電量を上回っており、電池容量は少なくても良いが、その分の電力を放熱する必要がある。

## (2) 電池の種類と形式

電池は新動力源の発電機で直接充電出来るようにするのがシステム上望ましいので、油漬均圧型の鉛電池（又はニッケル・カドミ電池）とする。

酸化銀・亜鉛電池はエネルギー密度が高く、電池本体だけを取り上げれば鉛電池より小型軽量である（約1/2 - 1/3）が、定電流充電を要するため、専用の充電装置を発電と電池の間に設ける必要があり、トータルの重量としてはほとんど差がない。表11.1に主蓄電池の要目を示す。

### 11.3 予備電池

予備電池は日本海事規則により、潜水調査船の浮上時間に30分を加えた時間、重要負荷に電力供給を行える独立の電池とする必要がある。重要負荷とは、環境維持設備、究明設備、消防設備、水中通話装置、潜水調査船の位置検出装置、船内通信装置、船内照明装置（非常時に必要なものに限って差し支えない。）

予備電池の容量についてはこの規則だけを守れば、主蓄電池容量を上回ることは有り得ないが、本システムでは両者に互換性を持たせることによって、ミッション毎に交互使用することにより両者の劣化速度を等しくし、メンテナンス領域を共通化することの有利さを考慮し、主蓄電池と同じものとする。表11.1に要目を示す。

### 11.4 非常用電池及び放熱器

非常用電池は最重要負荷に低電圧直流電源を供給するため、耐圧殻内に装備する。このため、スペース節約と発生ガス対策が重要となるので、本システムでは高エネルギー密度の密閉型酸化銀・亜鉛電池とする。

放熱器は、前出のとおり、新動力源の出力を20 kWとしたとき、潜入・浮上時8 kWの放熱容量を必要とすることになる。

図11.4に放熱器の構造のイメージを示す。放熱する抵抗体としては固体抵抗と水抵抗の両方が考えられるが、水抵抗の場合は海水中では抵抗値の安定化が難しいことから、固体抵抗を油漬化し海水で冷却する方法を検討した。

また放熱器の代わりに、水中照明灯を使用する方法もある。その場合は例えば、1 kWの水中照明灯であれば、これを8個装備すれば8 kWの放熱が可能である。

### 11.5 その他の主要電源装置

#### (1) 二次電源装置

- |             |           |     |         |     |
|-------------|-----------|-----|---------|-----|
| ①推進用インバータ装置 | 主スラスト用    | 1台、 | 水平スラスト用 | 1台、 |
|             | 垂直スラスト用   | 2台  |         |     |
| ②補機用インバータ装置 | 海水ポンプ用    | 1台、 | 油圧ポンプ用  | 1台、 |
|             | 空気清浄ファン等用 | 1台  |         |     |

各インバータ装置は、主回路部を油漬均圧型とし、制御回路は耐圧容器に収納することにより、小型・軽量化を計るものとする。

(2) 配電装置

- ①主配電盤 1面、 ②船内配電盤 1面

主配電盤は油漬均圧型とすることにより、小型・軽量化を計るものとし、耐圧殻内から遠隔操作する。

船内配電盤は、耐圧殻内に装備し、操縦者が直接操作を行えるものとする。

## 1.2. 現状高速炉技術レベルでの目標設計

### 1.2.1 熱効率のパラメータ解析

20kWe出力の潜水調査船用高速炉の一次系冷却材温度条件を、圧容器出口で550℃として、熱効率のパラメータ解析を行った。

この解析をするにあたって、各種機器の効率の再検討を行った。その結果ターボ機械の効率にかかわるものは実績が優先するため、文献<sup>(1)</sup>記載の実績数値とした。一方タービン入口ガス温度は、一次系冷却材圧容器出口温度550℃より10℃低い540℃とした。表1.2.1にこれらの固定条件とした数値を示す。

この解析でパラメータ化したものは、機器容量（コストに影響する）と熱効率のトレードオフ的作業が必要となるもので、レキュペレータ温度効率、ラジエータ出口ガス温度、システム圧損失率である。

解析結果を表1.2.2に示す。最善のケースでも18.7%である。尚、今まで参考にしたフランスERATO解析や、現在までに動燃で実施した既存設計例を一括取りまとめて表1.2.3に示す。

表1.2.2の解析結果で、網掛け部分は熱効率14%以下の部分である。この表では、基本的に現時点で取れて高熱効率を目指したパラメータ値の設定はせず、余り技術的な努力をせずに達成可能な範囲内で、検討を行った。熱効率の改善は、これらパラメータ項目に関する今後の設計進捗状況によるものとなる。

本解析をもとに現時点で最も好ましいと考えられる目標設計を選ぶ。目標設計のパラメータ値設定理由等を以下に記す。

①潜水調査船の最終放熱機器となるラジエータの寸法を決定するラジエータ出口温度（この温度はコンプレッサの入口温度となり熱効率に直接影響を及ぼす）を保守的に設定しておくことを優先し、55℃とする。

②レキュペレータの温度効率は、良くすると熱効率は上昇する反面、レキュペレータの機器寸法は対数的に大きくなり、圧力損失も増加する。詳細機器設計を実施していない現状では、熱伝導の良い10%Ni鋼製耐圧殻の場合には保守的に80%程度とする。但し熱伝導の悪いTi合金製耐圧殻の場合は85%とする。

尚、第6章のレキュペレータ設計値（外形寸法が0.09m×0.12m×0.16m）との大きさの比較を、相対寸法比の形で表1.2.2に示す。

③システム内圧力損失率は出来るだけ大きい方がシステムをコンパクトに出来る可能性を有するが、熱効率との絡みもあり、ERATO設計例の7.5%程度とする。

上記①②を合わせて考慮すると、現時点での目標設計の熱効率は10%Ni鋼製耐圧殻の場合は13.6%、Ti合金製耐圧殻の場合は15.1%となる。

### 1.2.2 ラジエータの熱交換性能

N<sub>2</sub>K温度を680℃より550℃に変化させたときに、各種機器のうち寸法変更が特に生じるのは、レキュペレータとラジエータである。レキュペレータについては前節の表で述べた。ここではラジエータについて検討する。

計算機シミュレーションの出力結果を示す。この計算結果によれば、前田殿に10%  
の工費と高水機等設備の組み合わせを使用すれば、システムの冷却は十分に可能である。  
冷却が不十分なケースでも、特殊照明装置の台数を少し減らせば、対応は可能である。

### 1 3 . ま と め

潜水深度10,924m及び8,000mの潜水調査船用動力源として、高速圧・密閉ブレイトンスイクルシステムを検討すると併に、潜水調査船のイメージ図を作成しその重量、運転手順等について検討を行った。

この検討結果によれば、潜水深度10,924mと8,000mの潜水調査船の重量はそれぞれ約100トン及び約70トンとなり、母船方式が採用可能である。従って日本海溝の海底の地割れの観測等に使用出来ると考える。

関口信忠氏には、色々コメントをいただいたので、ここで謝意を表します。

川崎重工（株）の方々には、設計計算及び製図を行って頂いたので、ここで感謝致します

。

- (1) "Scalability of Space Reactor Power Systems in the 10 to 100 kW Range." N. F. Shepard et al., CONF-910116, 1991, America Institute of Physics
- (2) "Design and Performance Characteristics for Low Power Space Reactor Systems." N. F. Shepard et al., IECEC-90 Paper No. 900145, 1990
- (3) "Space Nuclear Power Studies in France." E. Proust et al., 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, July 31-Aug. 5, 1988, Denver (Colorado)
- (4) 米国Garrett社パンフレット
- (5) 潜水艇特殊基準、昭和53年2月、運輸省船舶局
- (6) 動燃報告書 PNC ZN 「海底無人基地用高速炉システムの概念検討」、大坪章 他、1991年11月
- (7) 動燃報告書 PNC ZN9410 91-185 「6.500m級潜水調査船動力源の概念設計」、大坪章 他、1991年5月

表 4 . 1 先行設計システムの仕様

Specifics of Preceding Design Examples

a. 20kWeの例(1)

b. 20kWeの例(2)

原子炉	ヒート	700℃	原子炉	熱出力	110kWt
	炉心出口	682℃		ウラン	70kg
	熱出力	110kWt		燃料	UO <sub>2</sub>
IHX	ピンチポイント	10℃		構造材	ステンレス鋼
	冷却材ΔT	102℃		1次冷却材	Na 250kPa
	交換熱量	102kWt		炉心入口/出口	577℃/682℃
タービン	入口	670℃		制御ドラム	12個(Be+B <sub>4</sub> C)
	効率	0.886	遮蔽	B <sub>4</sub> C+L <sub>1</sub> H	7本(B <sub>4</sub> C)
コンプレッサ	入口圧力	0.45MPa	IHX	ガス入口/出口	430℃/670℃
	入口温度	59℃		ブレイク・ターボ・エレクトリック・コンバータ	
	圧縮比	2.06		タービン入口	670℃
	効率	0.838		タービン入口圧力	900kPa
発電機	回転数	35000		コンプレッサ入口	59℃
	効率	0.890		コンプレッサ圧縮比	2.06
レキュレータ	交換熱量	101kWt	ラジエータ	出力	80kWt
	熱効率	0.842		入口/出口	236/53℃
				伝面	86m <sup>2</sup>
ラジエータ	交換熱量	79kWt	クーリングシステム効率		0.18
	入口/出口	236/53℃			
	伝面	86m <sup>2</sup>	重量	原子炉	375kg
熱流サイクル	圧損	5.7%		遮蔽	240kg
	ガス流量	0.833kg/s		1次系	90kg
	効率	0.218		発電系	186kg
システム	サイクル出力	27kWe		ラジエータ	430kg
	効率	0.182		機器・構造材	876kg
			全システム重量		2197kg
			発電比重量		110kg/kWe

## 原子炉及び発電系（耐圧殻を含む）の概略重量

## Approximate Weight of Reactor and Power Generation System

	SNAP-DYN 設計例	NaK冷却アレトタイプ (無人基地用)	調査船
原子炉重量	215 kg	215 kg	215 kg
放射線遮蔽	136 kg	305 kg	約2800 kg
熱輸送系	65 kg	65 kg	65 kg
発電系	316 kg	316 kg	632 kg
放熱系	567 kg	542 kg	542 kg
出力プロセス制御系	204 kg	204 kg	204 kg
ケーブル類	20 kg	20 kg	20 kg
耐圧殻	—	6150 kg*	16900 kg**
保温材	—	170 kg	170 kg
支持構造物	—	120 kg	320 kg
合計	1523 kg	8107 kg	21868 kg

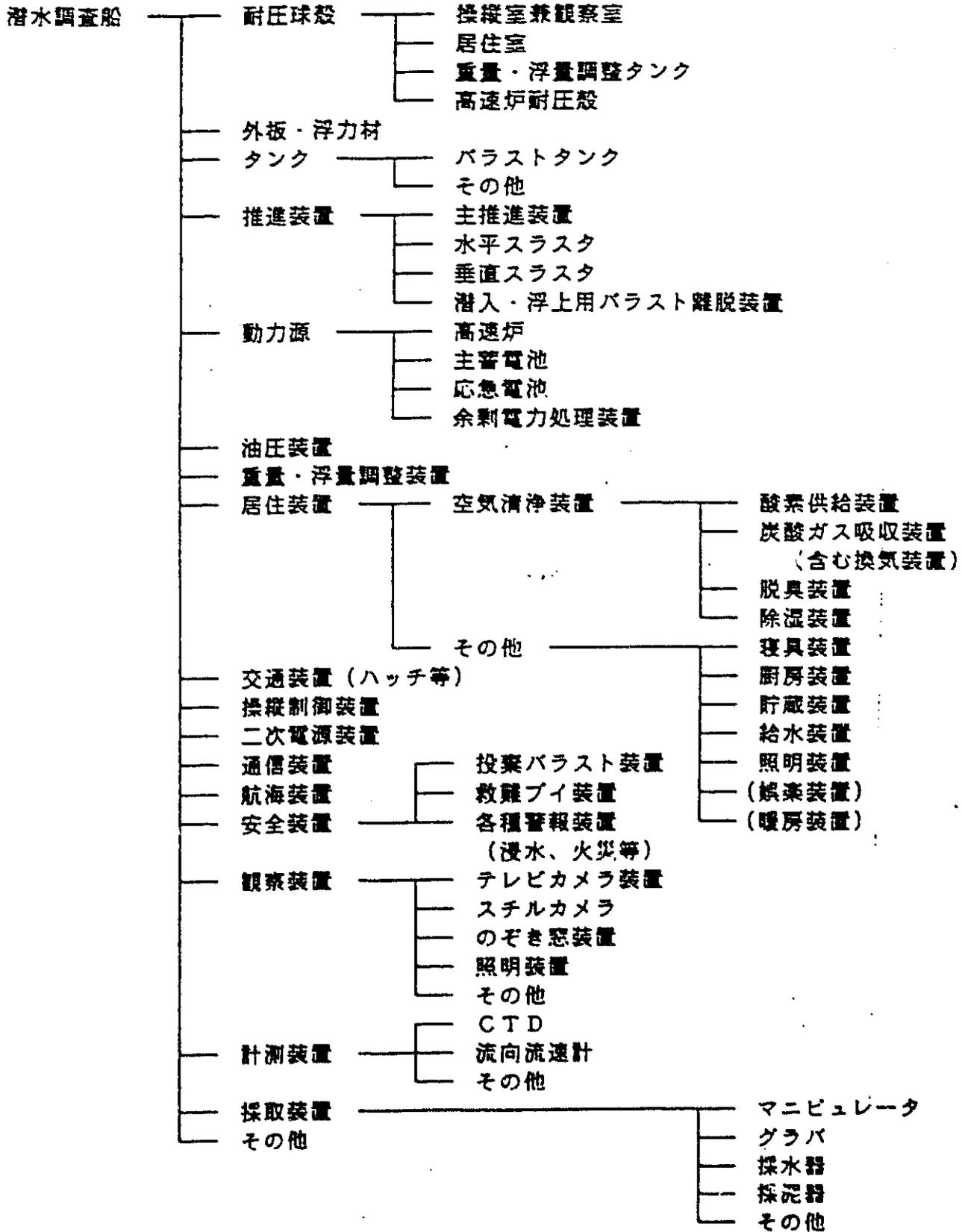
注) \* : Ti合金 水深 8.020 m (10kWe)

\*\* : 10Ni鋼 水深 10.924 m (20kWe)

表 9 . 1

潜水調査船主要構成機器

Main Components of Research Submersible



## Standard Work Pattern of Research

## Submersible

時 間		作 業 内 容
1 日 目 (月曜日)	8:00 ~ 8:30	着水
	8:30 ~ 13:30	潜入
	13:30 ~ 14:00	重量浮量調整
	14:00 ~ 15:00	高速移動
	15:00 ~ 16:00	観察移動
	16:00 ~ 17:00	サンプリング
	17:00 ~ 24:00	休息・夜間
2 日 目 ~ 4 日 目	0:00 ~ 8:00	休息・夜間
	8:00 ~ 9:00	高速移動
	9:00 ~ 9:30	重量浮量調整
	9:30 ~ 10:30	観察移動
	10:30 ~ 11:30	サンプリング
	11:30 ~ 16:00	観察移動
	16:00 ~ 17:00	サンプリング
5 日 目 (金曜日)	17:00 ~ 24:00	休息・夜間
	0:00 ~ 6:30	休息・夜間
	6:30 ~ 11:30	浮上
	11:30 ~ 12:00	揚収

表 9 . 3

## 潜水調査船空中重量試算

## Research Submersible Weight in the Air

(単位: t)

高 速 炉 出 力		20 kWe				記 事
最大潜航深度		10,924m		8,000m		
耐圧殻材料		高速炉 10Ni 鋼 居住室 64Ti 合金		64Ti 合金		
項 目		重 量	浮 量	重 量	浮 量	
「しんかい6500」 (推定)	空中重量(約合) 浮力材(推定)	同 右		25.8 6.8	25.8 15.7	{ 浮力材を約 15m <sup>3</sup> 比重0.54, 海水密度1.046 と推定した。
	浮力材を除く重量			19.0	10.1	
	今回 (6.5K推定)	21.7 (-4.4)	17.4 (-5.4)	14.9 (-4.4)	15.7 (-5.4)	
の重量増加	今回の重量増加	17.3	12.0	10.5	10.3	
高速炉新設	耐 圧 殻	16.9	10.9	11.4	11.0	
	高 速 炉	4.9	—	4.9	—	
その他		3.1	1.0	3.1	1.0	乗員増(1人)、食料、飲料水、 寝台、便器、O <sub>2</sub> ポンペ、CO <sub>2</sub> 吸収剤、 外殻構造等
小 計		61.2	34.0	48.9	32.4	
浮力材		40.3	67.5	22.0	38.5	{ 比重0.63, 海水密度1.055(10.924m) 及び 1.05(8,000m) とした。 ただし、8,000mの浮力材の比重は、 0.6 とする。
合 計		101.5		70.9		

表 1 1 . 1 電池主要目

Specifics of Storage Battery

項 目	単 位	主 蓄 電 池	予 備 電 池	非 常 用 電 池
種 類	—	鉛 電 池	鉛 電 池	酸化銀・亜鉛電池
構造・形式	—	油 漬 均 圧 型 (耐圧殻外装備)	油 漬 均 圧 型 (耐圧殻外装備)	密 閉 型 (耐圧殻内装備)
容 量	kWh	1 9 以上	1 9 以上	1
電 圧	V	2 5 0 以下	2 5 0 以下	2 4 程度
備 考		1. 主蓄電池と予備電池は互換性を有するものとする。 2. 電圧はNK規則を踏まえ250V以下とする。		

表 1 1 . 2 解析ケース一覧

Analysed Cases

項目	単位	数値	備考
原子炉出口温度	℃	550	Garrett 社カタログによる。
原子炉入口温度	℃	395	
電気出力	kWe	20	
タービン入口温度	℃	540	
タービン断熱効率	%	0.894	
タービン断熱効率	%	0.894	
コンプレッサ入口温度	℃	$P_1$	Garrett 社カタログによる。
コンプレッサ断熱効率	%	0.811	
コンプレッサ圧縮比	—	2.06	$P_2 = 5, 7.5, 10$
システム圧損率	%	$P_2$	
レキュバレータ 温度効率	%	$P_3$	$P_3 = 80, 85, 90$
発電機効率	%	89	Garrett 社カタログによる。

下表では以下の単位と記号を使用した。

変数記号 (単位)	T : 温度 (°C)	$\eta$ : 効率 (%)	$\delta$ : システム圧損率 (%)	$\theta$ : レキュバータ 相対寸法比 (—)
--------------	----------------	--------------------	---------------------------	--------------------------------

上付き添字	tur: タービン	com: コンプレッサ		
下付き添字	RAD: ラジエータ	RHX: レキュバータ	IHX: Na-ガス熱交換器	net: 熱効率
	0: 出口	I: 入口		

T <sub>o,RAD</sub> : 45								
$\delta$	$\eta_{RHX}$	T <sub>i,tur</sub>	T <sub>o,tur</sub>	T <sub>i,RAD</sub>	T <sub>o,com</sub>	T <sub>i,IHX</sub>	$\eta_{net}$	$\theta$
5	80	540	369	215	176	330	17.0	0.98
5	85	540	369	205	176	340	17.8	1.40
5	90	540	369	195	176	350	18.7	2.28
7.5	80	540	374	216	176	334	15.1	1.12
7.5	85	540	374	206	176	344	15.9	1.59
7.5	90	540	374	196	176	354	16.7	2.53
10	80	540	380	217	176	339	12.8	1.36
10	85	540	380	207	176	349	13.5	1.91
10	90	540	380	196	176	360	14.3	3.15

T <sub>o,RAD</sub> : 50								
$\delta$	$\eta_{RHX}$	T <sub>i,tur</sub>	T <sub>o,tur</sub>	T <sub>i,RAD</sub>	T <sub>o,com</sub>	T <sub>i,IHX</sub>	$\eta_{net}$	$\theta$
5	80	540	369	220	183	332	16.3	1.05
5	85	540	369	211	183	341	17.0	1.48
5	90	540	369	202	183	350	17.8	2.30
7.5	80	540	374	221	183	336	14.4	1.21
7.5	85	540	374	212	183	345	15.1	1.68
7.5	90	540	374	202	183	355	15.9	2.73
10	80	540	380	222	183	341	12.1	1.49
10	85	540	380	213	183	350	12.6	2.05
10	90	540	380	203	183	360	13.2	3.26

T <sub>o,RAD</sub> : 55								
$\delta$	$\eta_{RHX}$	T <sub>i,tur</sub>	T <sub>o,tur</sub>	T <sub>i,RAD</sub>	T <sub>o,com</sub>	T <sub>i,IHX</sub>	$\eta_{net}$	$\theta$
5	80	540	369	226	190	333	15.5	1.10
5	85	540	369	217	190	342	16.2	1.55
5	90	540	369	208	190	351	17.0	2.47
7.5	80	540	374	227	190	337	13.6	1.27
7.5	85	540	374	218	190	346	14.2	1.79
7.5	90	540	374	208	190	356	15.0	2.96
10	80	540	380	228	190	342	11.2	1.59
10	85	540	380	219	190	352	11.3	2.29
10	90	540	380	209	190	361	11.8	3.58

# Comparison among Preceding Designs

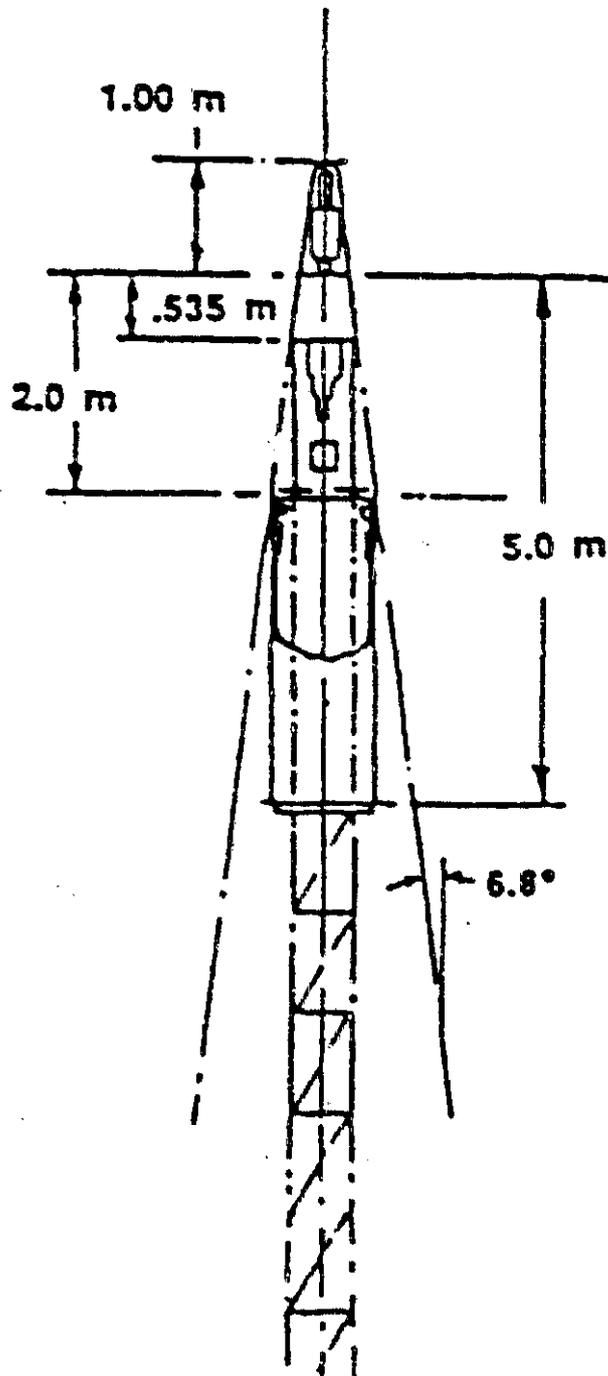
項目	単位	平成2年度 潜水調査船	平成3年度 無人基地	ERATO 設計例	ERATO 設計例
原子炉出口温度	℃	720	720	682	650
原子炉出力	kWt	1070	78.7	110	110
タービン入口温度	℃	705	705	670	639
タービン断熱効率	%	0.886	0.884*	0.886	0.888
コンプレッサ入口温度	℃	83	83	59	51
コンプレッサ断熱効率	%	0.838	0.800*	0.838	0.850
コンプレッサ圧縮比	-	2.06	2.06	2.06	2.06
システム圧損率	%	10**	10**	5.7	7.5
レキュバーク温度効率	%	0.842	0.842	0.842	0.842
発電機効率***	%	89	89	89	89
熱効率	%	18.7	16.2	21.8	20.1

(注\*) GARRETT 社の BRU実験時の予測値である。実測結果はタービン入口温度  
~~タービン断熱効率は0.894と0.831である。~~

(注\*\*) ERATO の予測値に余裕をとった。

(注\*\*\*) 軸の摩擦損失等含む。

10 kWe



2. 1

SP-100 設計例

Example of SP-100 Designs

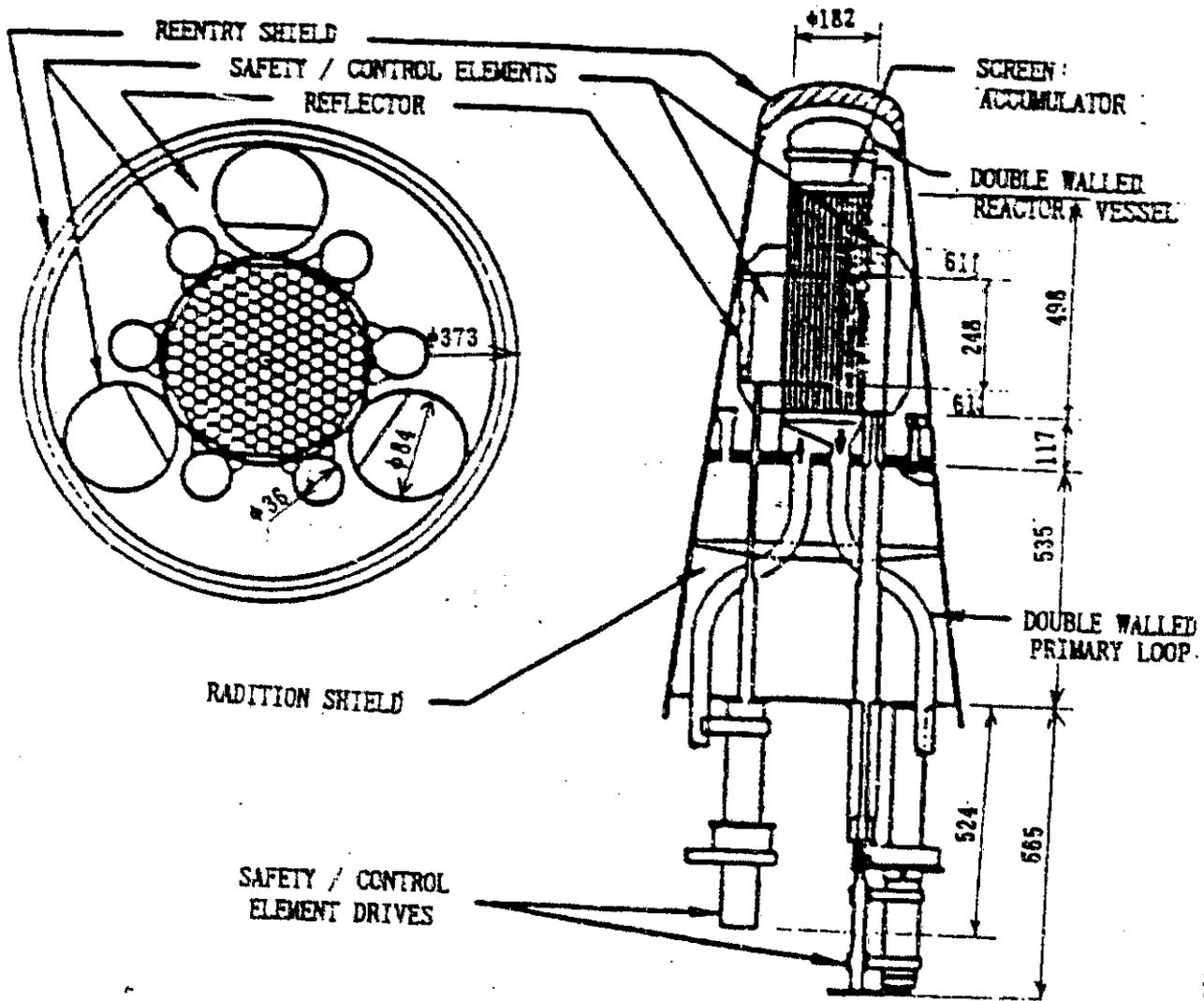
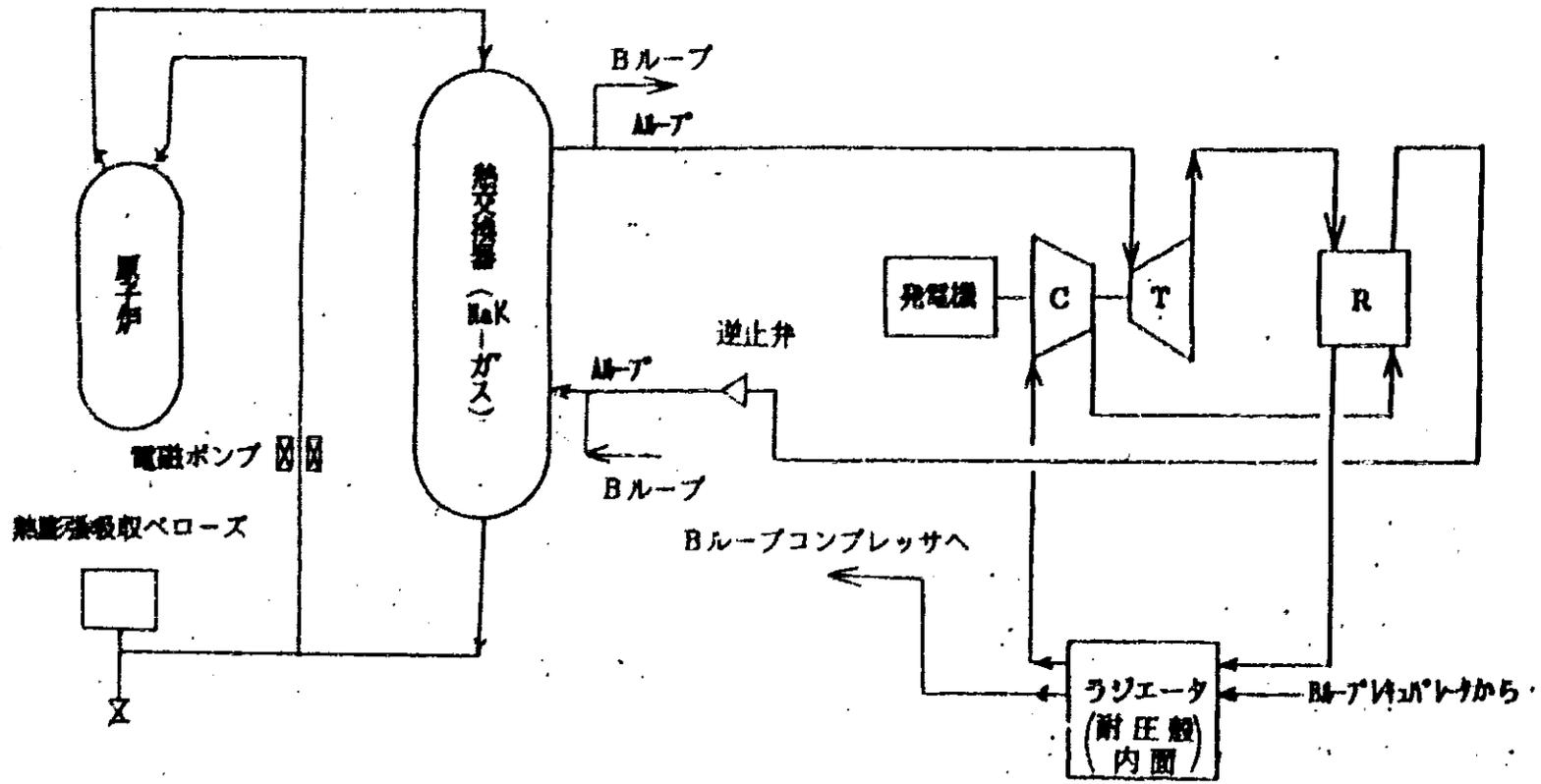


図 2 . 2 原子炉廻り構造設計

Structural Design around Reactor

記号 C:コイル  
 T:タービン  
 R:レゾナンス (熱交換器)



1次系: NaK (1b-7°)

2次系: Be-Te混合ガス (2b-7°)

図 3 . 1 全システム系統

Whole System Diagram

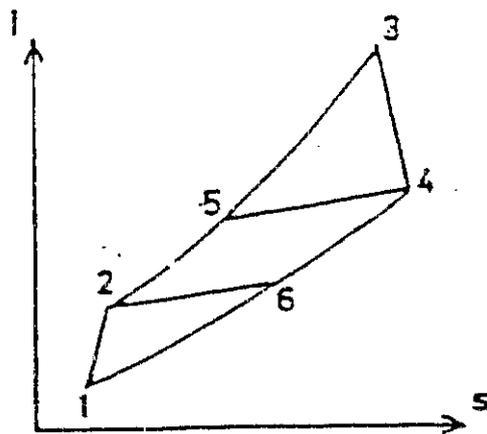
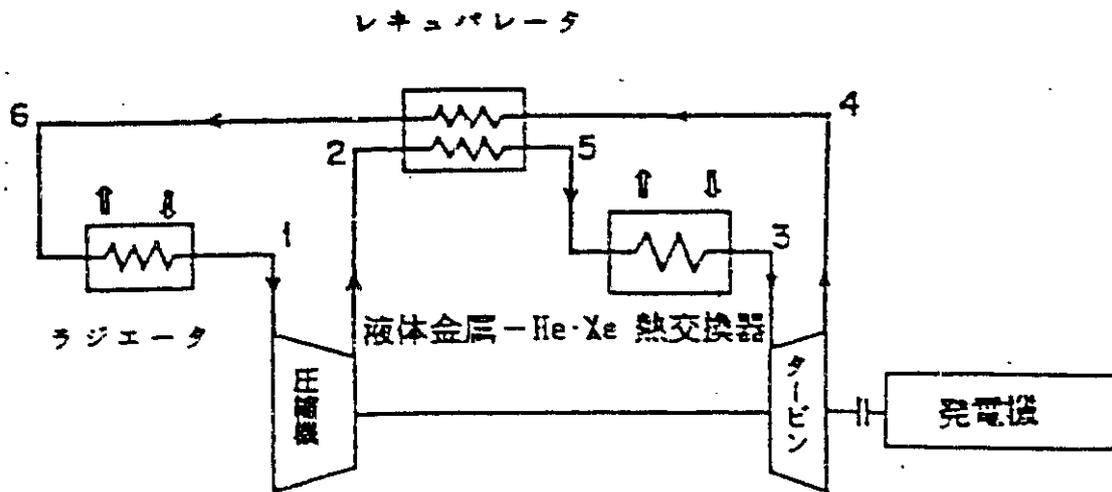


図 4 . 1 閉閉ブレイトンサイクル  $i-s$  線図

$i-s$  Diagram of Closed Brayton Cycle

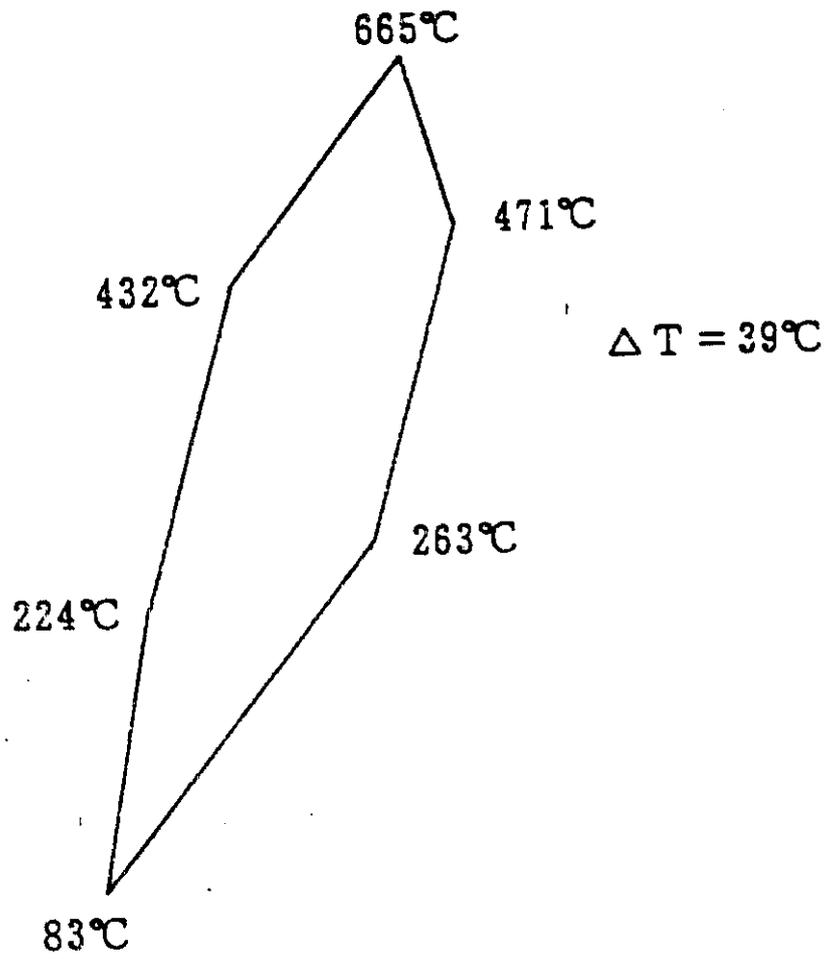


図 4 . 2 温度プロファイル

Temperature Profile

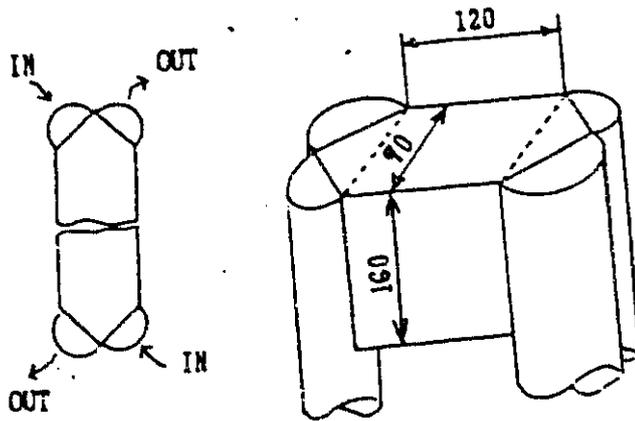
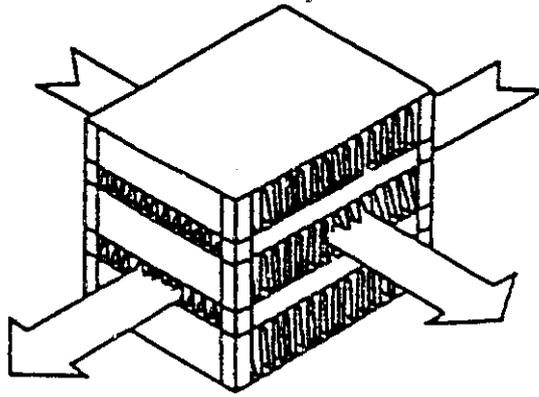


図 6 . 1

レキユパレータ形状

Recuperator Geometry

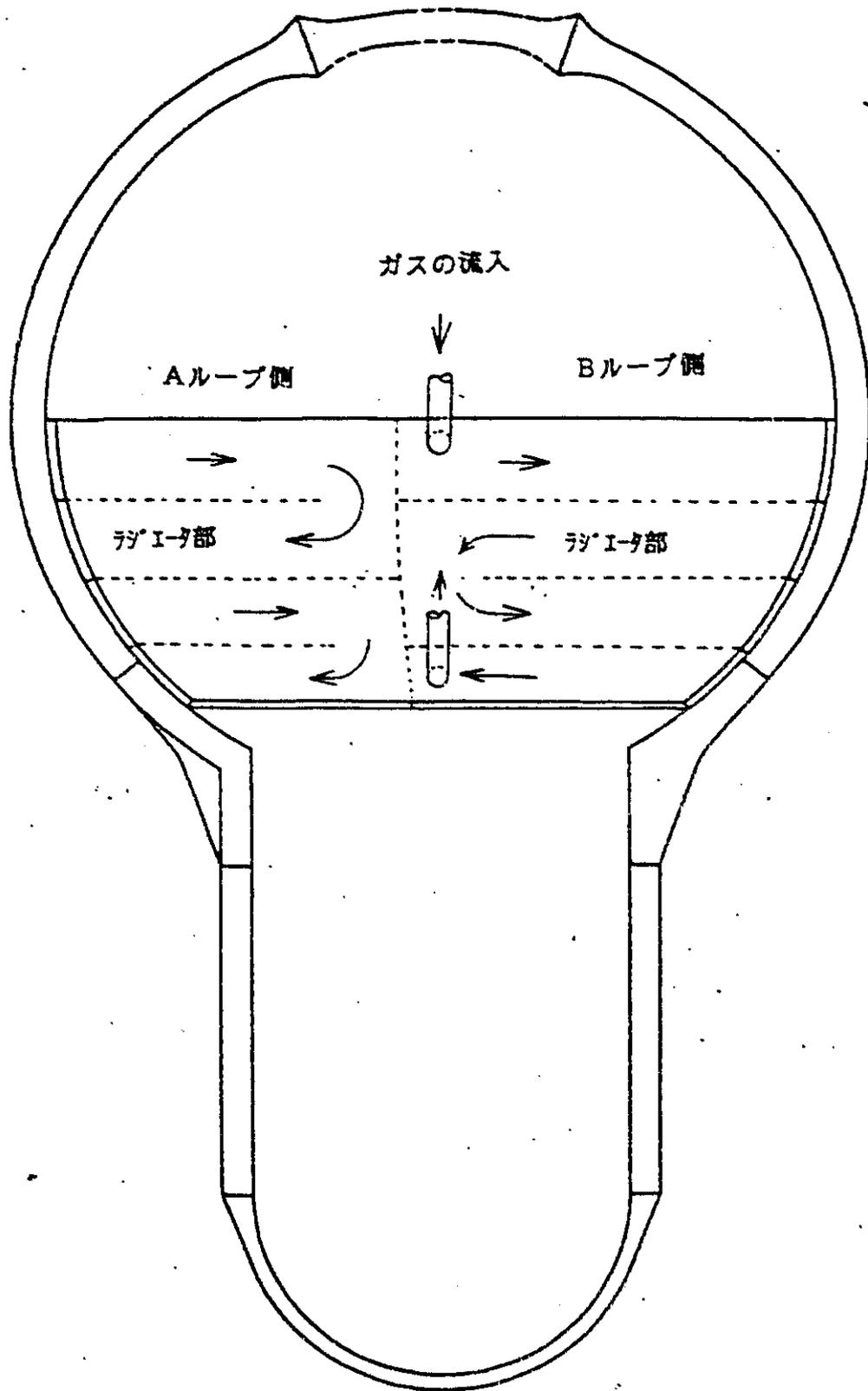
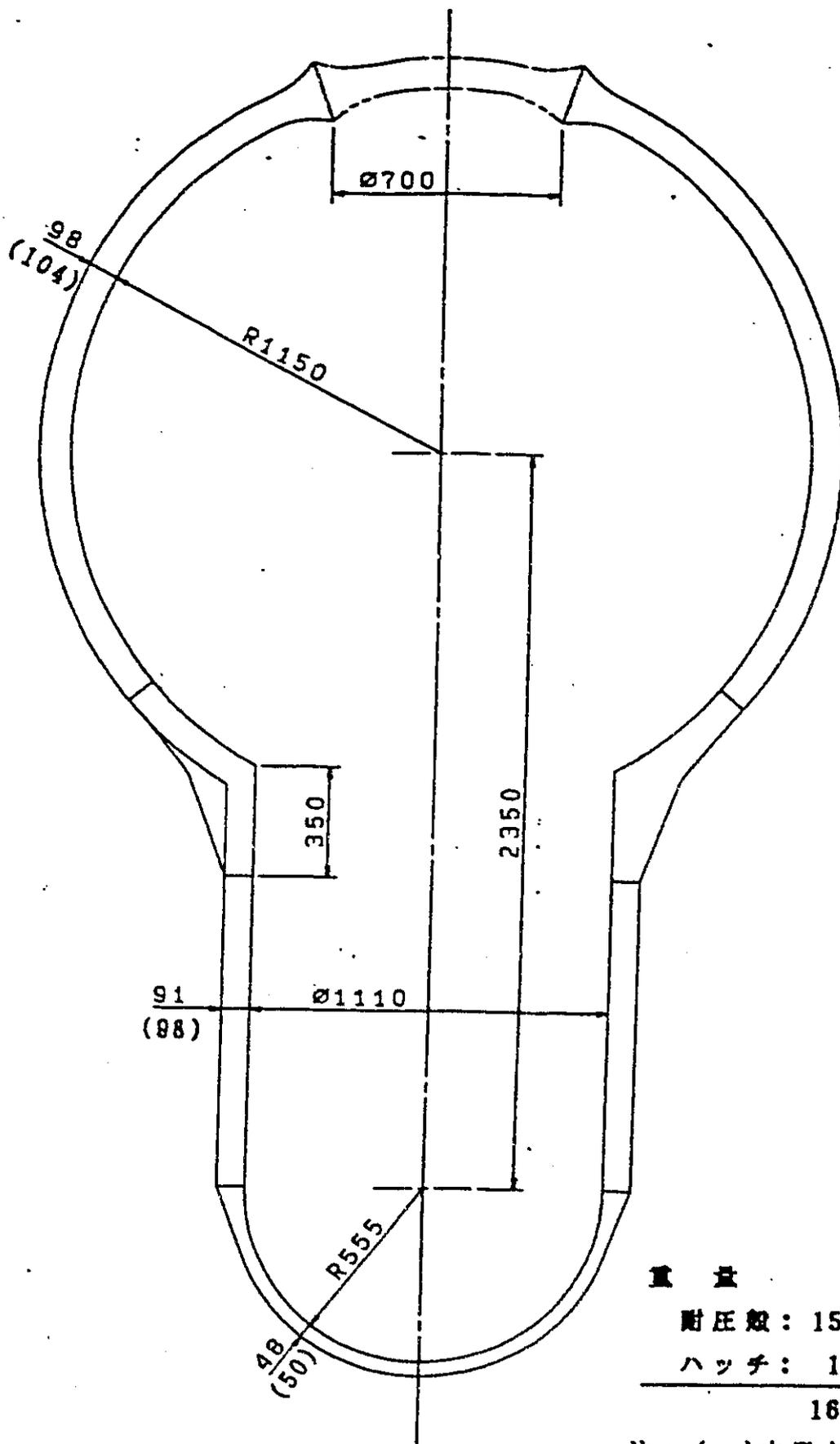


図 6 . 2 ラジエータ冷却ガス流路概念

Concept of Coolant Gas Flowing Path in Radiator



重量

耐圧殻： 15'400 (10'500)

ハッチ： 1'500 (0'850)

16'800 (11'350)

注： ( )内数値は設計深度8000m  
材質64Tiの場合を示す。

図 7 . 1 耐圧殻概略図

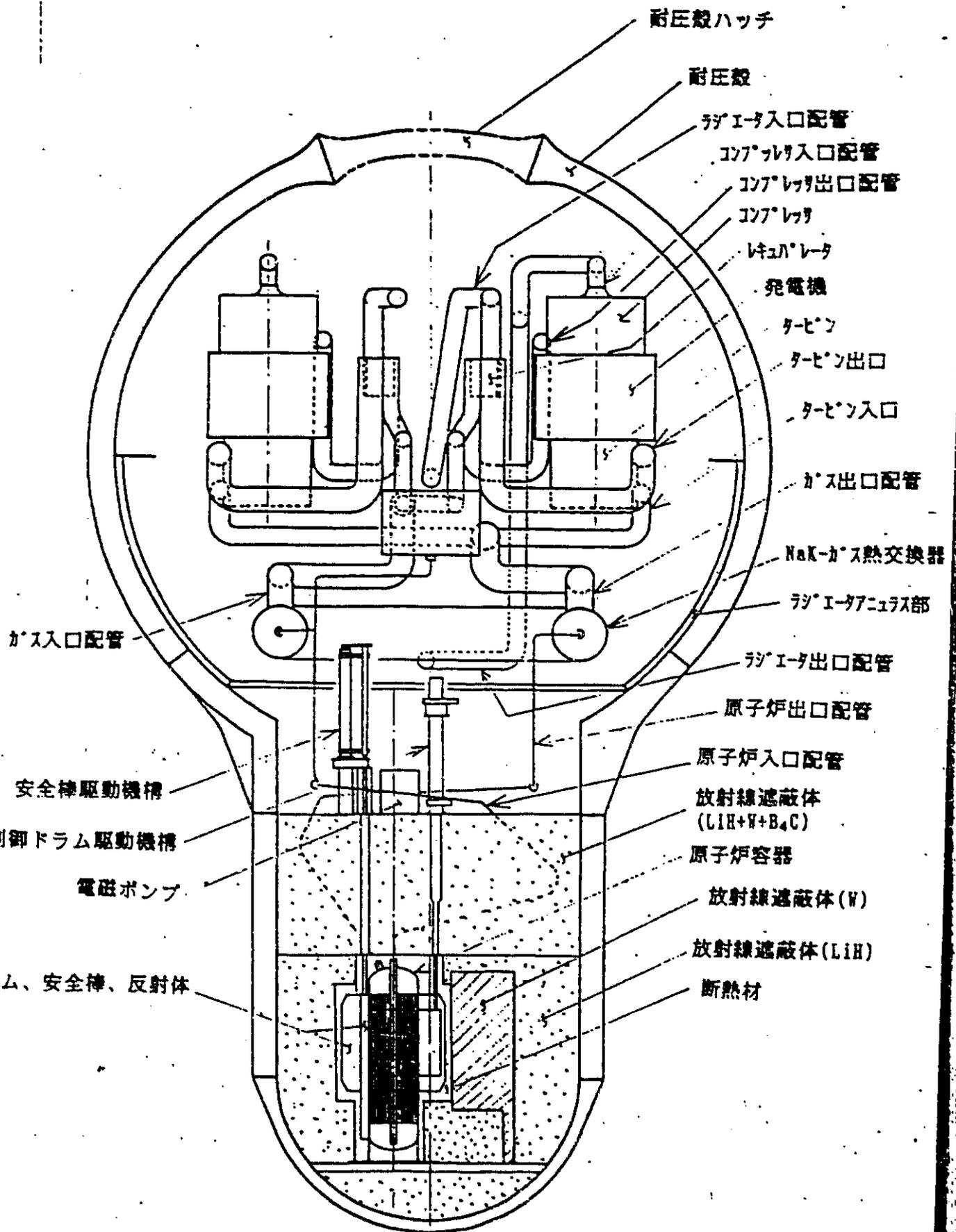
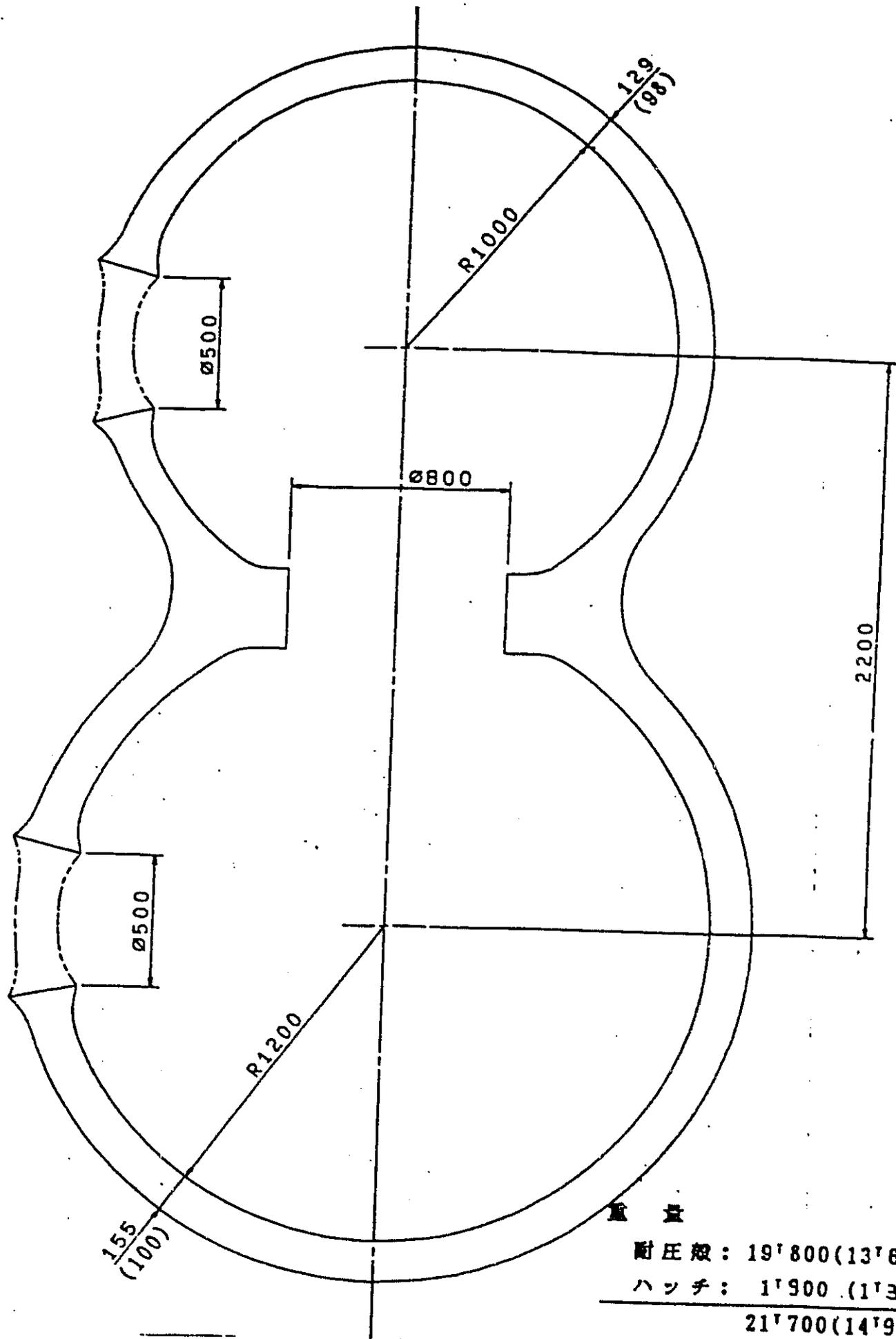


図 8 . 1 耐圧殻内機器配置

Components Arrangement in Pressure Hull



重量

耐圧殻： 19'800 (13'600)

ハッチ： 1'900 (1'300)

---

21'700 (14'900)

図 9 . 1 居住区耐圧殻

注： ( )内数値は設計深度  
8000m の場合を示す。

Pressure Hull for Residence

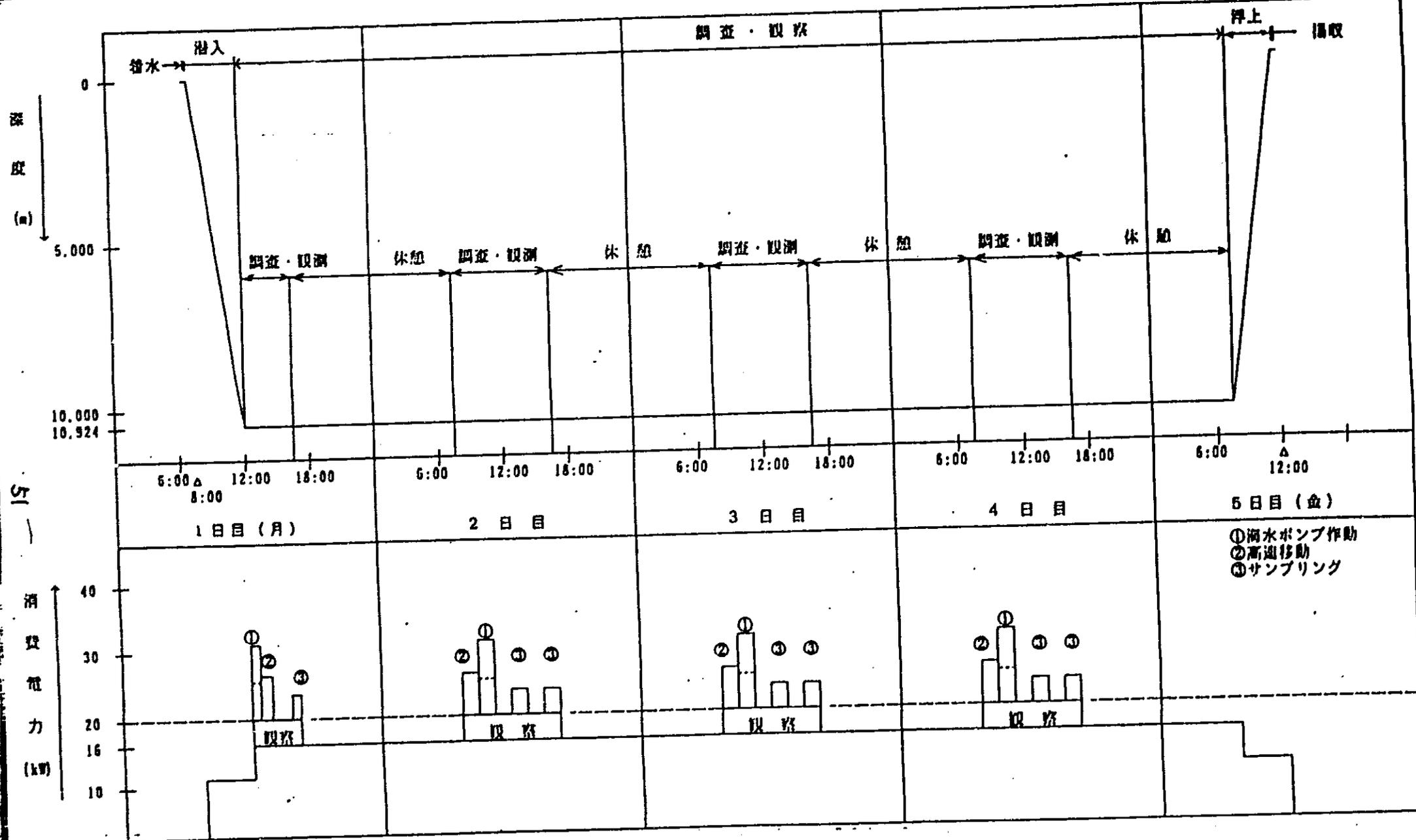


図 9 . 2 潜水調査船行動パターンと消費電力

Work Pattern and Consumed Electric Power of Research Submersible

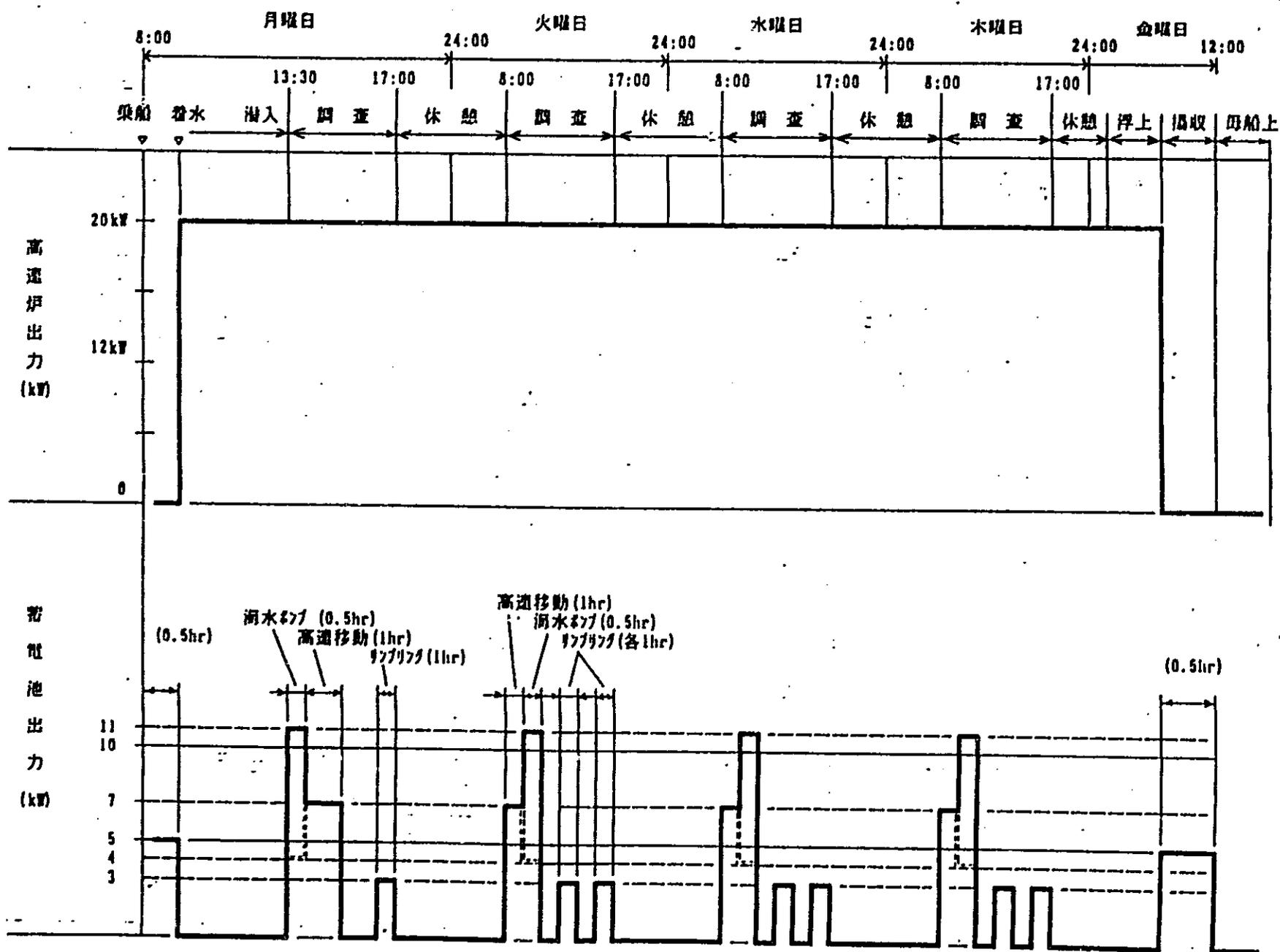


図 9 . 3 潜水調査船の高速炉と蓄電池の運用

Use of Fast Reactor and Storage Battery in Reserarch

Submersible

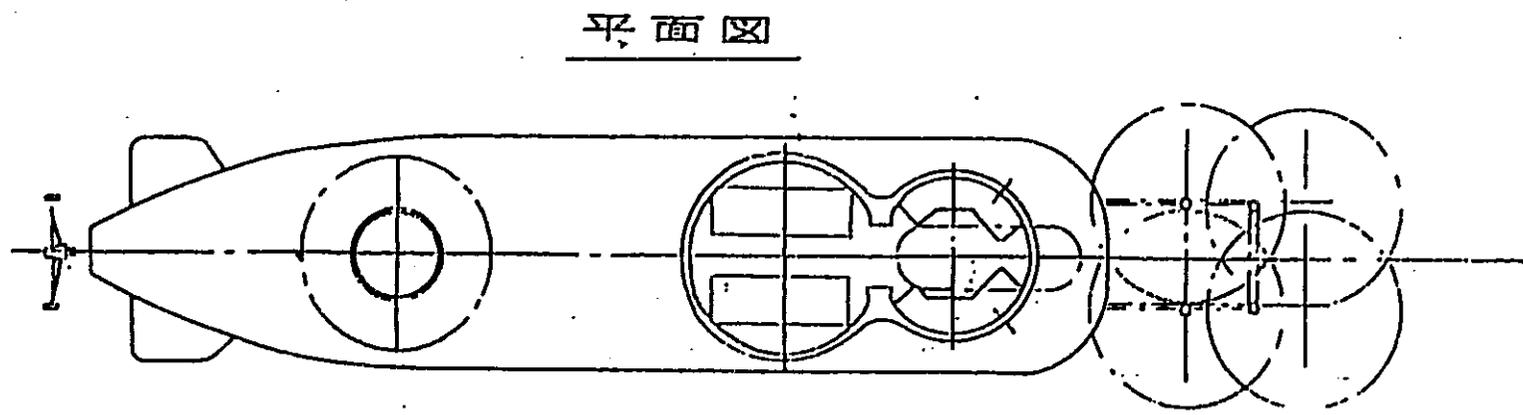
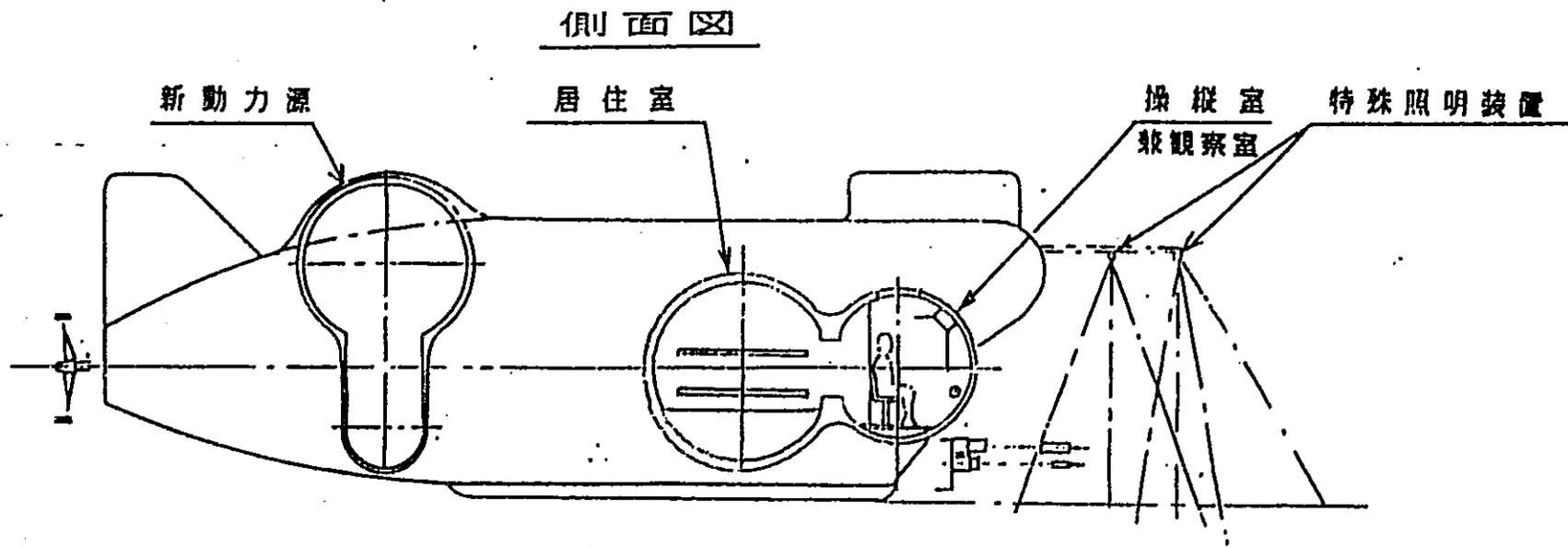
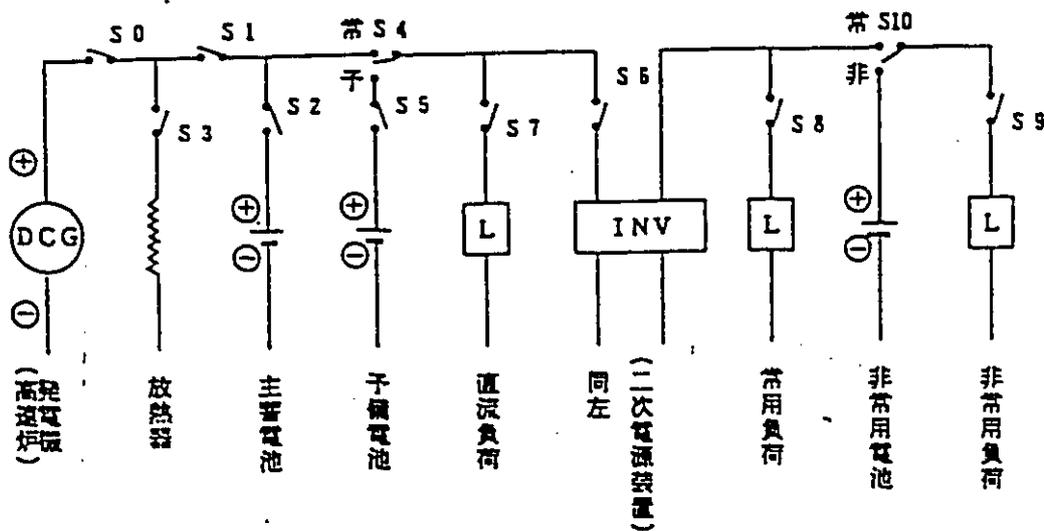


圖 9 . 4      潛水調查船概念圖

Simple Figure of Reserarch Submersible (S<sub>1</sub>/100)

53



電源制御シーケンス (一例)

潜水船運用条件		高速炉 発電機	主蓄電池	予備電池	非常用 電池	各スイッチの状態 (－は切を示す。)										
						S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	
船 上	通	休止時	停止	停止	停止	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	各機器に個別の スイッチを入切形 作する。
		潜航前後 (チェック等)	停止	放電	停止	停止	－	－	入	－	常	－	入	入	入	
		軽負荷時 (電池充電時)	運転	充電	停止	停止	入	入	入	－	常	－	入	入	入	
潜 航 中	常	同上 (放熱時)	運転	停止	停止	停止	入	入	－	入	常	－	入	入	入	負荷制御を行う ため、不要のスイ チはすべて切と る。
		重負荷時	運転	放電	停止	停止	入	入	入	－	常	－	入	入	入	
		故障時	高速炉のみ故障	(故障)	放電	停止	停止	－	－	入	入	常	－	入	入	
故 障 時	故	主蓄電池のみ故障	運転	(故障)	停止	停止	入	入	－	入	常	－	入	入	負荷制御を行う ため、不要のスイ チはすべて切と る。	
		高速炉 主蓄電池 } 共故障	(故障)	(故障)	放電	停止	－	－	－	入	予	入	入	入		
		高速炉 主蓄電池 予備電池 } 共故障	(故障)	(故障)	(故障)	放電	－	－	－	－	－	－	－	－		－

図 1. 1. 1 電源システム概念及び制御シーケンス  
Concept of Power Source and Controlling Sequence

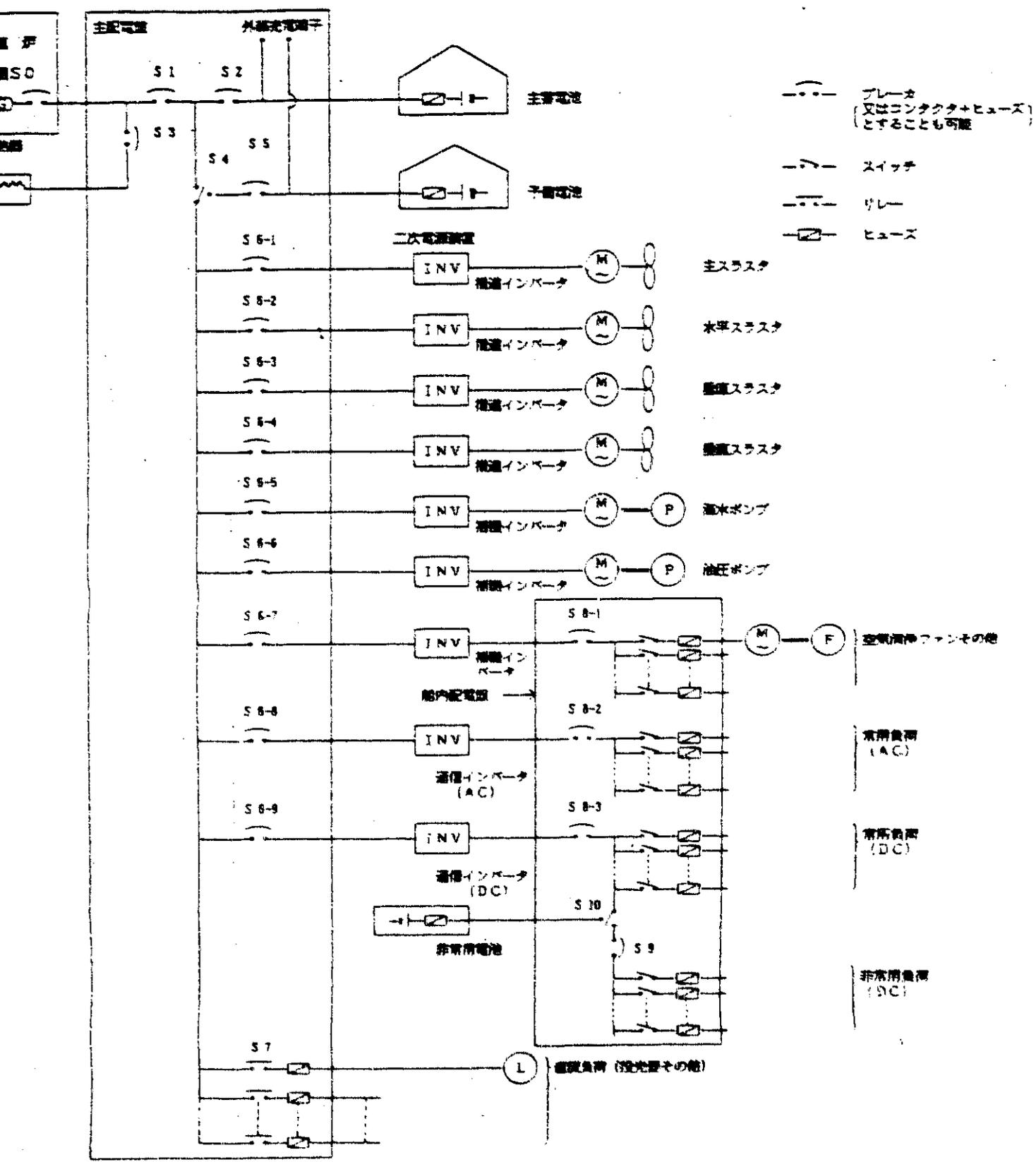


図 1.1.2 電源系統

Power Source System

潜水艇の所要電力: 1742 kWh/3ヶ月

高速炉発電容量: 20 kW

高速炉累積発電量: 20 kW × 99 h = 1980 kWh

電池所要容量: 18.5 kWh

電池累積放電量: 76 kWh

電池累積充電量: 73.5 kWh

放熱器容量: 8 kW

放熱器累積放熱量: 240.5 kWh

蓄電池容量  
(kWh)

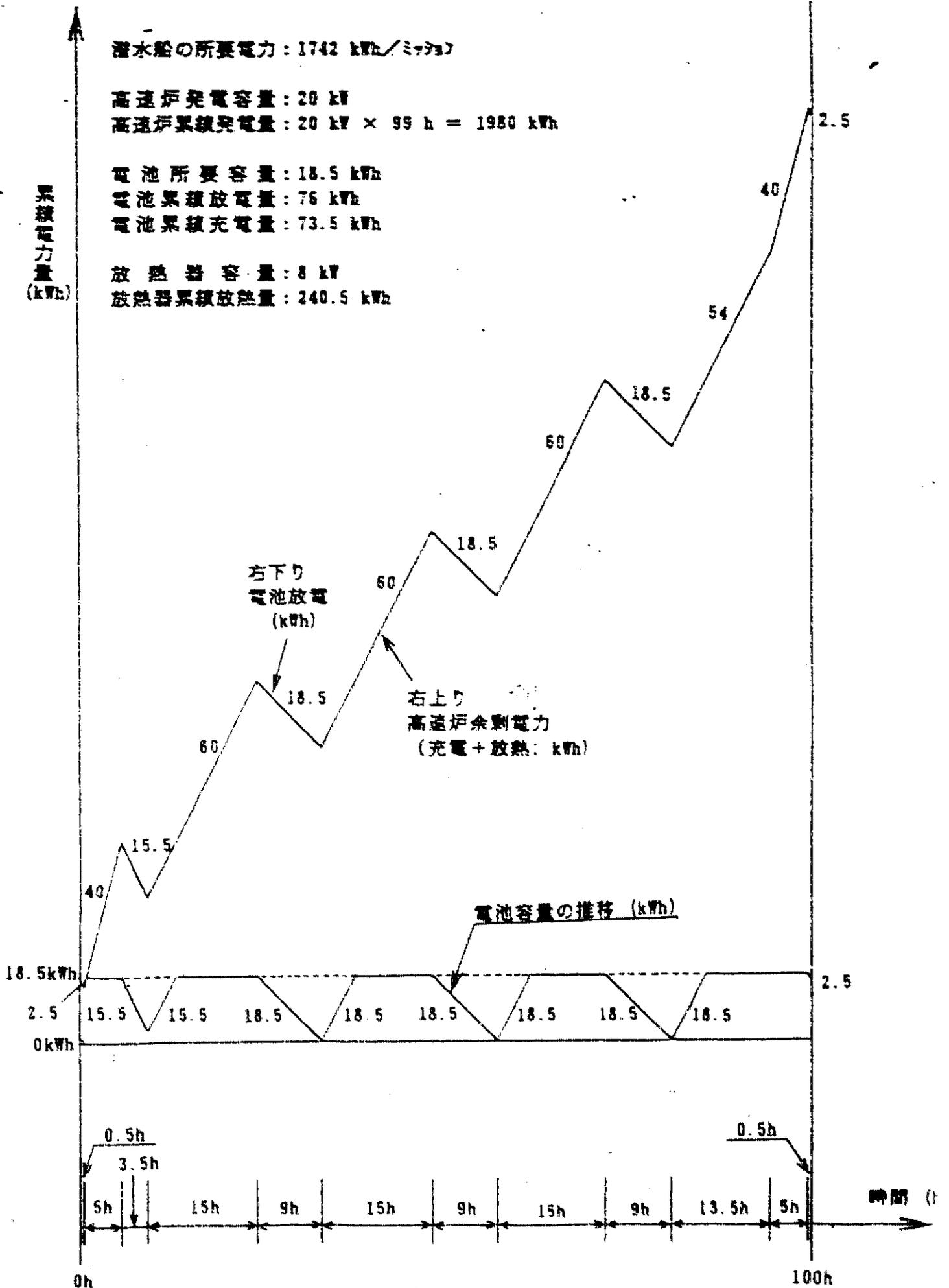
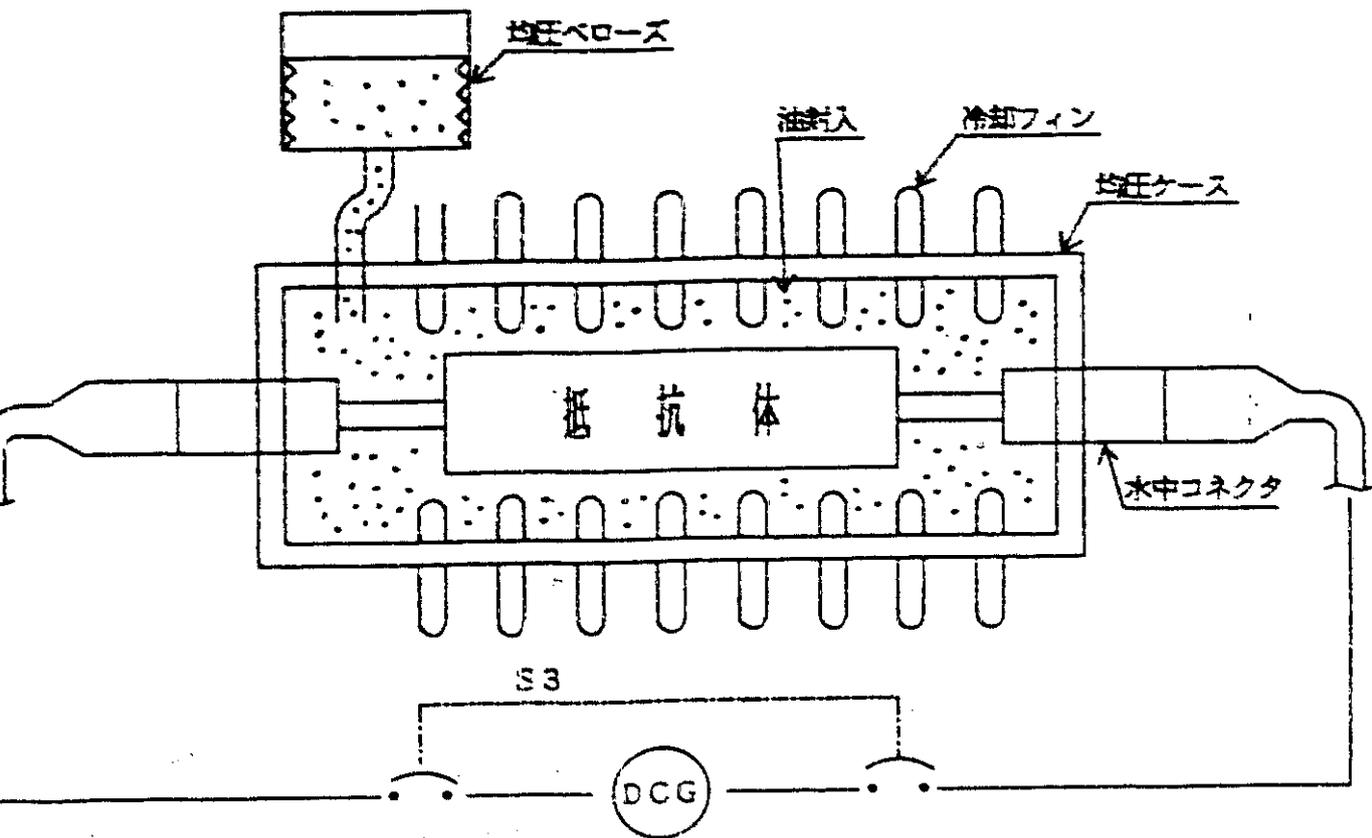


図 1 1 . 3 電池容量と放熱量の推移



抵抗値 R (Ω)  
 放熱量 P (W)  
 電圧 V (V)  
 電流 I (A)

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R}$$

P (W)	8000 の時	
V (V)	100 の時	250 の時
I (A)	80	32
R (Ω)	1.25	7.81

☒ 1 1 . 4 左文 典内 番号

Radiator

付録 - 1      ガス - NaK 熱交換器  
(NaK : 680 °C)

交換熱量      98.8 kWt

温度条件

NaK 温度 (入口/出口)      : 680/578 °C

混合ガス温度 (入口/出口)      : 432/665 °C

流量

NaK 流量      : 3971 kg/h

混合ガス流量 : 4020 kg/h

構造仕様

伝熱計算結果に基づき以下の構造を設定した。詳細は、添付図 - 1 参照。

構造型式 : シェルアンドチューブのドーナツ形状  
(1次側 : 伝熱管内、2次側 : シェル側)

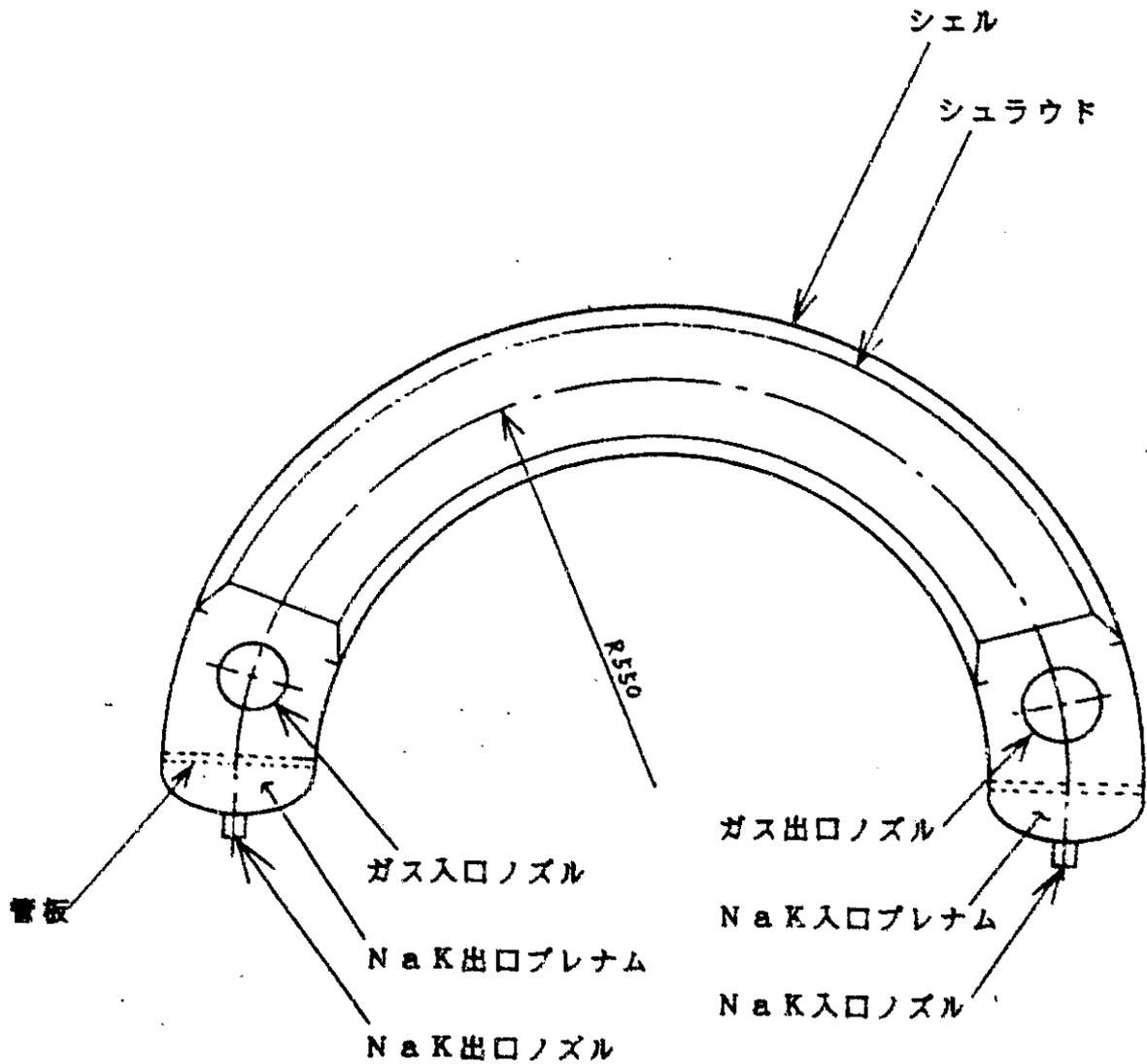
伝熱管      形状       $\phi 15.9 \times t 0.9$  (外側にワイヤーを巻く)  
                 本数      55 本  
                 有効長さ      1.25 m (有効部シュラウド内径 0.13 m)

胴              ドーナツ径 : 1.1 m (中心)  
                 胴径              : 0.2 m  
                 胴中心長さ : 1.55 m  
                 胴全長              : 1850 mm

NaK 流速 0.19 m/s  
 ガス 流速 20.7 m/s

伝熱管  $\phi 15.9 \times t 0.9 \times 55$  (本)  
 伝熱管ピッチ 管板部 21mm  
 伝熱部 18mm  
 伝熱有効長 1250 mm  
 シェラウド内径 150 mm

熱交換器 全長 1850 mm  
 胴内径 200 mm



添付図 - 1 ガス-NaK熱交換器 (NaK: 680℃)

Heat Exchanger between Gas and NaK

付録 - 2 ラジエータの熱交換性能  
(NaK : 680℃)

1. 混合ガス気体の流量

(1) 条件

・ 温度	ガス入口/出口	263℃/83℃
	海水	5℃一定
・ 気体圧力		5 kg/cm <sup>2</sup> a
・ ガス混合割合		He : Xe = 60 : 40

(2) 流量

混合ガス流量 4020 kg/h

(3) 体積流量

$$\begin{aligned} \text{体積流量} &= \text{重量流量} \div \text{比重} \\ &= 4020 \div 7.77 = 517 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 0.144 \text{ m}^3/\text{s} \\ &\quad (\text{ただし、平均温度 } 173.0^\circ\text{C} \text{ での値}) \end{aligned}$$

2. 熱伝達係数

(1) 条件

平均流速	20 m/s (目安)
流路高さ	0.03 m
流路幅	流速 20 m/s 程度となる幅
交換熱量	76.3 kW

(2) 熱伝達率

流速 = 体積流量 / 流路断面積より 流路幅 = 0.24 m

$$\text{等価直系} : d = 4 \cdot s / 1 = 4 \times 0.03 \times 0.24 / (2 \times (0.03 + 0.24)) = 0.0533$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{20 \times 0.0533}{4.931 \times 10^{-6}} = 2.162 \times 10^5$$

$$\begin{aligned} (3) \quad Nu &= 0.019 Re^{0.8} Pr^{0.5} \\ &= 0.019 \times 2.162^{0.8} \times 10^4 \times 0.457 \\ &= 161 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{161 \times 1.595 \times 10^{-5}}{0.0533} \\ &= 0.0482 \text{ kcal/m}^2\text{s}^\circ\text{C} \\ &= 173 \text{ kcal/m}^2\text{h}\cdot^\circ\text{C} \end{aligned}$$

耐圧殻からの放熱の促進のため、耐圧殻内側にはフィンを設け熱伝達 $\alpha$ の向上を1.4倍とする。

$$\alpha_1 = 173 \times 1.4 = 242 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

耐圧殻の外側の熱伝達係数 $\alpha_0 = 2460 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ である。

### 3. 必要伝熱面積の検討

#### (1) 熱質流量

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{1}{\alpha_1} + \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_0} \\ &= \frac{1}{242} + \frac{.096}{23.5} + \frac{1}{2460} \\ &= \frac{1}{116} \end{aligned}$$

$$K = 116 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

(2) 平均温度差

$$\Delta t_m = \frac{(263-5) - (83-5)}{\ln\{(263-5)/(83-5)\}} = 150.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(3) 必要伝熱面積

$$S = Q / (\Delta T_m \cdot K) = 76.3 \times 860 / (150.5 \times 116) \\ = 3.76 \text{ m}^2$$

(4) 耐圧殻外強制循環喪失時の放熱計算

強制循環喪失時による強制冷却機能が喪失した場合においても、強制循環時において確保されている流路における自然循環によって、除熱が期待できる。その除熱量は海水との温度差にもよるが、文献によると少なくとも  $100 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  期待できるといふ。この場合の必要伝熱面積は、以下のようになる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{242} + \frac{0.096}{23.5} + \frac{1}{100} = \frac{1}{54.9}$$

$$S = Q / (\Delta T_m \cdot K) = 76.3 \times 860 / (150.5 \times 54.9) = 7.9 \text{ m}^2$$

となり、除熱は可能であるといえるが、その成立性については自然対流についての詳細検討が必要である。

4. 結論

球殻部の放熱部面積を半球部分だけとしても約  $8 \text{ m}^2$  確保できそうであり、必要伝熱面積はその約半分であり、十分の除熱容量を有するように設計可能である。

### 付録 - 3 船内遮蔽線量について

以下には今後の作業の参考用として、種々の船内基準遮蔽線量基準についてまとめた。  
現時点での日本国内法規としては「危険物船舶運送及び貯蔵規則」があるが、これが本潜水調査船に直接適用できるものか否かは今後の検討を要する項目であろう。

#### (1) 「危険物船舶運送及び貯蔵規則」関連

第91条の17：船長は、放射性物質等を運送する場合は、当該放射性物質等を積載した場所の周囲に立入制限区等設け、関係者以外の者の立入りを制限しなければならない。  
ただし、船内にある者が当該区域において、毎週30ミリレムを超える被ばくするおそれのない場合は、この限りでない。

2：船長は、前項の立入制限区域を標識によって明示しなければならない。ただし、関係者以外の者が当該区域に近づくことが困難な場合は、この限りでない。

第91条の18：船長は、船内の居住場所その他人が通常使用する場所において最大放射線量率が毎時0.18ミリレムを超えないようにしなければならない。

2：船長は船内にある者の受ける被ばく線量が年間0.5レムを超えないようにしなければならない。

#### (2) 「IMCO原子力船安全基準(案)」(出典：運輸省船舶局検査測度課) 関連

管理区域：PPC1及びの際に放射線又は汚染が発生するおそれのある区域又は場所であって、電離放射線に対する防護の目的のために特別な規則により管理することとなり、かつ、立入りが管理されるものをいう。管理区域内においては、被ばくする人の受ける線量当量は、職業上被ばくする人に対しICRPにより勧告される線量当量限度の3/10を超えるおそれがある。(PPC：Plant Process Condition)

監視区域：PPC1及び2の際に放射線又は汚染が発生する区域または場所であって、電離放射線に対し防護のため適当な監視を必要とするものをいう。監視区域においては、被ばくする人の受ける線量当量は、職業上被ばくする人に対しICRPにより勧告される線量当量限度の1/10を超える恐れがある。

非管理区域：電離放射線に対する防護のための管理区域又は監視区域以外のすべての区域をいう。非管理区域においては、PPC1、2及び3において被ばくする人の受ける線量当量は、公衆の個人に対しICRPが勧告する線量当量限度を超えるおそれがない。

居住区	：	0.015mrem/h
船橋	：	0.075mrem/h
上甲板と貨物艙	：	0.05mrem/h
喫水線上外側部	：	0.05mrem/h
底板上、そこで 水中の保守又は 検査を実施*	：	0.75mrem/h
(* 炉出力10%)		

(3) 乗組員の許容被曝線量基準 (ICRP勧告) による場合

管理区域内作業の一日 (一回) あたりの被曝線量当量限度 : 30mremあるいは  
10mrem

(4) 原子力船「むつ」における基準線量率 (出典: 「原子力船工学」竹村敦男著)

遮蔽体外面の放射線量率は、

㊸ 考えている場所がどんな区域 (管理区域、周辺監視区域、安全区域など) に属しているか

㊹ その場所に乗員が一日あたり、または一年あたり、どんな割合でいるのか。

などによって決められる。

このようにして設定した遮蔽に関する基準線量率は以下の通りである。

① 安全区域について

船内の居住区のような安全区域は、一年中そこに人がいたとしても0.5レム以上の線量を与えてはならないので、線量率は次のように求めることができる。

$$\text{線量率} = 0.5 / (24 \times 365) = 0.057 \text{ mrem/h}$$

② 周辺監視区域について

同様にこの区域での許容線量率は1.5mrem/yであるから

$$\text{線量率} = 1.5 / (24 \times 365) = 0.171 \text{ mrem/h}$$

③ 管理区域について

管理区域に常時出入でき、その場所で作業できる人は放射線業務従事者のみであり、許容線量は5rem (5000mrem) /yであるから

$$\begin{aligned} \text{線量率} &= (5 - \text{安全区域での線量}) / (9 \times 365) \\ &= (5 - ((0.5 \times 15 \times 365) / (24 \times 365))) / (9 \times 365) \\ &= 1.427 \text{ mrem/h} \end{aligned}$$

ここで、機関部の乗員は9時間の当直勤務と15時間を居住区域で過ごすものとした。  
この結果は次表に示す。

「むつ」の各区域における計画線量と立入制限

(出典：「原子力船工学」竹村数男著)

場所	区域	基準線量率 ( $\mu\text{rem/h}$ )	原子炉運転中		原子炉停止中	
			従事者 随時立入者	一般人	従事者 随時立入者	一般人
格納容器内	C、D	—*	×			
原子炉室上部	C、D	—	△			
同 下 部	C、D	—	×			
同側部空所	C	—	×			
同下部二重底	C	—	×			
原子炉補機室	C、D	1.37 以下	△			
同側部空所	C	—	×			
同下部二重底	C	—	×	×	△	×
機 関 室	C	1.37 以下	}	}	}	}
同下部二重底	C	—				
補助ボイラ室	C	1.37 以下				
管理区域送風機室	C、D	0.57 以下				
汚染検査区画	C、D	〃	△			
サンプリング室	C、D	〃	}	}	}	}
計 測 室	C、D	〃				
汚 染 物 倉 庫	C、D	〃				
保健物理室	B	0.171以下	}	}	}	}
保健物理倉庫	B	〃				
計装用電動発電機室	B	〃				
炭酸ガス瓶室	B	〃				
配電盤室	B	〃				
廃棄物処理制御室	B	〃				
電子工作室	B	〃				
第2甲板上原子炉室周辺通路	B	〃				
上甲板上原子炉室開口	B	〃				
上記以外の区域	A	0.057以下	無用の立入を制限する。			

[注] A：安全区域 B：周辺監視区域 C：管理区域 D：放射性汚染区域

×：立入禁止 △：管理された状態で立入許可

\*：格納容器などは原子炉運転中、立入禁止またはほとんど立入ることがないので特に定めない。

## 付録 - 4 ガンマ線遮蔽厚さの検討

深海調査船の重量を決定する要因として、原子炉からのガンマ線に対する遮蔽材タングステンの重量が挙げられる。中性子遮蔽に関しては低密度の遮蔽材を使用することもあり陸路にはならないものと想定される。

今回の概念図作成にあたって、宇宙用原子炉を基本とした原子炉の遮蔽設計データの無い状態で、上記タングステン厚さを超概算で見積る必要がある。

従って、今後の原子炉回りの設計進捗によっては、以下で想定した概略タングステン厚さの大幅な見直しがあることを想定しておく必要がある。

### (1) 前提条件

①原子炉からのガンマ線エネルギーレベルを3 MeVと想定した。

「原子炉理論」(ラマーシュ著)によると、 $U^{235}$ の核分裂で放出される即発ガンマ線エネルギーは7 MeVであるが、原子炉燃料構造材等で原子炉外周で上記レベルまで落ちると仮定した。

上記の値については今後炉心設計で確認が必要であり、より高いエネルギーレベルとなる場合は、遮蔽材は厚くなる方向にある。

②概略遮蔽計算で用いた質量減衰係数は $Fe$ および $H_2O$ と仮定した。

「放射線遮蔽設計計算の理論と実際」(竹内清著)付表3.1および付表3.2、付表3.5に記載の「質量減衰係数」と「点等方線源に対する照射再生係数」より、10% Ni 鋼 Ti-64 鋼、海水に近い元素もしくは化合物として、表中に記載された $Fe$ および $H_2O$ を使用。

### (2) 居住区から原子炉容器表面近傍までのガンマ線の減衰割合

③原子炉容器表面近傍から居住区までの距離による減衰

原子炉炉心中心軸からタングステン遮蔽体外表面までの距離が48 cmであり、原子炉側耐圧殻と居住区側耐圧殻間に介在する海水の距離が300cmであることから、円柱状線源と仮定してその減衰効果は

$$\frac{48}{48+300} = 0.138$$

⑥原子炉側耐圧殻および居住区側耐圧殻容器と海水による減衰

両耐圧殻容器材料の厚さの合計は  $(9.1+15.5) = 24.6$  cmである。

両耐圧殻容器間の海水の厚さは 300cmである。

付表-1の表より、エネルギーレベル3MeVの鉄と海水の $\mu/\rho$ の値を読み取り、

求まった鉄と海水の $\mu$ を夫々 $\mu_{Fe}$ 、 $\mu_{H_2O}$ とする。

$$\mu \times t = \mu_{H_2O} \times t_{H_2O} + \mu_{Fe} \times t_{Fe} = 18.83$$

18.83に対応する再生係数 $B_r$ を付表-2より内挿して 17.79

$$B_r \times e^{-\mu \times t} = 1.1814 \times 10^{-7}$$

⑦表面線量設定

上記の減衰効果を踏まえて、居住区で $Y$  mrem/hの線量率するためには原子炉容器近傍に設置した遮蔽材タングステン表面では下記の値になる。

$$\frac{Y}{0.138 \times 1.1814 \times 10^{-7}} = Z$$

⑧タングステン遮蔽厚さの検討

深海船用に直に適用できる法規制が無い現状において、居住区における線量率については多方面の角度からの検討作業の後に設定される必要がある。

参考迄に船舶用放射線線量率にかかわる規制例を添付資料に一括示した。

ここでは、本作業のために「危険物輸送船」に関わる規制値  $0.18$  mrem/hを暫定的に用いることとすると、上記Zの値は  $1.104 \times 10^7$  mrem/hとなる。

タングステン材の対ガンマ線遮蔽効果は  $4.68$  cm/1桁であるので、今回の概念図作成作業用としては設置環境等も考慮し、 $1.104 \times 10^7$  mrem/hを約6桁落とすだけのタングステン厚さとし、 $28$  cmとした。

付表 - 1 質量減衰係数  $\mu / \rho$

Mass Attenuation Coefficient

Photon Energy [MeV]	海水	鉄	備考
3.0	0.0396	0.0361	$\rho_{Fe} = 7.83 \text{ g/cm}^3$ $\rho_{H_2O} = 1.0 \text{ g/cm}^3$

付表 - 2 点等方線源に対するビルドアップ係数  $B_r$

Bildup Factor for Isotropic Point Radiation Source

材質	Photon Energy [MeV]	$\mu \times t$						
		1	2	4	7	10	15	20
海水	3.0	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1
鉄	3.0	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	17.0

(注) 出典：竹内清著「放射線遮蔽設計計算の理論と実際」(第3巻：総集編)

(NaK : 550℃)

1. 最大潜航深度 10,924m、 高速炸耐圧殻 10%Ni鋼

## 1.1 混合ガス気体の流量

## (1) 条件

- ・温度 ガス入口/出口 227℃/55℃、 海水 5℃
- ・気体圧力 5 kg/cm<sup>2</sup> a
- ・ガス混合割合 He : Xe = 60 : 40

## (2) 流量

混合ガス流量 6,877 kg/h

## (3) 体積流量

$$\begin{aligned} \text{体積流量} &= \text{質量流量} \div \text{比重} = 6,877 \div 7.46 = 922 \text{ m}^3 / \text{h} \\ &= 0.256 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

## 1.2 熱伝達係数

## (1) 条件

- 平均流速 20 m/s (目安)、 流路高さ 0.04 m、
- 流路幅 流速 20 m/s 程度となる幅、 交換熱量 124.4 kW

## (2) 熱伝達率

$$\begin{aligned} \text{流速} &= \text{体積流量} \div \text{流路断面より} \quad \text{流路幅} = 0.32 \text{ m} \\ \text{等価直径} : d &= 4 \times S \div l = 4 \times 0.04 \times 0.32 \div (2 \times (0.04 + 0.32)) = 0.0711 \\ \text{Re} &= v \cdot d \div \nu = 20 \times 0.0711 \div (4.931 \times 10^{-6}) = 2.884 \times 10^3 \\ \text{Nu} &= 0.019 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^{0.4} = 0.019 \times 2.884^{0.8} \times 10^4 \times 0.457 = 203 \\ \alpha_1 &= \text{Nu} \cdot \lambda \div d = 203 \times 1.595 \times 10^{-5} \div 0.00711 = 0.0455 \text{ kcal/m}^2 \text{ s } ^\circ\text{C} \\ &= 163 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

耐圧殻からの放熱の促進のため、耐圧殻内側にはフィンを設け熱伝達 $\alpha$ の向上を1.4倍とする。

$$\alpha_1 = 163 \times 1.4 = 229 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

耐圧殻の外側の熱伝達係数 $\alpha_0 = 2,460 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$  である。

## 1.3 伝熱面積の検討

## (1) 熱貫流量

$$\begin{aligned} 1/K &= 1/\alpha_1 + t/\lambda + 1/\alpha_0 = 1/229 + 0.098/23.5 + 1/2460 = 1/112 \\ K &= 112 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

## (2) 平均温度差

$$\Delta T_m = ((227-5)-(55-5)) \div \ln \{(227-5)/(55-5)\} = 115 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## (3) 伝熱面積

$$S = Q \div (\Delta T_m \cdot K) = 124 \times 860 / (115 \times 112) = 8.91 \text{ m}^2$$

(4) 球殻外面自然循環時の検討

$$1/K = 1/\alpha_i + t/\lambda + 1/\alpha_o = 1/229 + 0.098/23.5 + 1/100 = 1/53.9$$

$$K = 53.9 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$S = Q / (\Delta T_o \cdot K) = 124.4 \times 860 / (115.3 \times 53.9) = 17.2 \text{ m}^2$$

球殻部面積は約 15 m<sup>2</sup> なので、冷却は不可能である。自然循環による冷却を可能にするには、出力を下げる必要がある。

$$20 \text{ kWe} \times 15 \text{ m}^2 / 17.2 \text{ m}^2 = 17.4 \text{ kWe}$$

よって、17.4 kWeの発電量まで自然循環による冷却が可能である。

2. 最大潜航深度 8,000 m、 高速炉耐圧殻 Ti合金

2. 1 混合ガス気体の流量 …… 1. 1と同じ。ここでは省略する。

2. 2 熱伝達係数 …… 1. 2と同じ。ここでは省略する。

2. 3 伝熱面積の検討

(1) 熱貫流量

$$1/K = 1/\alpha_i + t/\lambda + 1/\alpha_o = 1/229 + 0.098 \times (8.000/10.924)/23.5 + 1/2460 = 1/128$$

$$K = 128 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

(2) 平均温度差

$$\Delta T_o = [(227-5)-(55-5)] + \ln [(227-5)/(55-5)] = 115^\circ\text{C}$$

(3) 伝熱面積

$$S = Q / (\Delta T_o \cdot K) = 124.4 \times 860 / (115 \times 128) = 7.24 \text{ m}^2$$

2. 4 自然循環時の伝熱面積の検討

海水が自然循環で流動する時の伝熱面積の検討を行う。自然循環時の熱伝達率を 100 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°</sup>Cとする。この場合の伝熱面積は次のようになる。

$$1/K = 1/\alpha_i + t/\lambda + 1/\alpha_o = 1/229 + 0.098 \times (8.000/10.924)/23.5 + 1/100 = 1/57.4$$

$$K = 57.4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$S = Q / (\Delta T_o \cdot K) = 124 \times 860 / (115 \times 57.4) = 16.1 \text{ m}^2$$

球殻部の放熱に使用可能な面積は約 15 m<sup>2</sup> あるので、今の場合自然循環による除熱を行うには少し出力を下げる必要がある。

$$20 \text{ kWe} \times 15 / 16.1 = 18.6 \text{ kWe}$$

例えば、図 9. 4 で特殊照明灯を 4 ケから 2 ケに減らせば自然循環による除熱が可能となる。

3. 最大潜航深度 8,000 m、 高速炉耐圧殻 Ti合金

3. 1 混合ガス気体の流量

(1) 条件

・温度 ガス入口/出口 212℃/50℃、 海水 2℃

・気体圧力  $5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$

・ガス混合割合  $\text{He : Xe} = 66 : 40$

## (2) 流量

混合ガス流量  $6442 \text{ kg/h}$

## (3) 体積流量

体積流量 = 重量流量 ÷ 比重 =  $6442 \div 7.46 = 863.5 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $= 0.240 \text{ m}^3/\text{s}$

## 3.2 熱伝達係数

### (1) 条件

平均流速  $25 \text{ m/s}$  (目安)、流路高さ  $0.04 \text{ m}$ 、

流路幅 流速  $25 \text{ m/s}$  程度となる幅、交換熱量  $110.1 \text{ kW}$

### (2) 熱伝達率

流速 = 体積流量 / 流路断面より 流路幅 =  $0.265 \text{ m}$

等価直径:  $d = 4 \times S / l = 4 \times 0.04 \times 0.265 / (2 \times (0.04 + 0.265)) = 0.0695$

$Re = v \cdot d / \nu = 25 \times 0.0695 / (4.931 \times 10^{-6}) = 3.52 \times 10^5$

$Nu = 0.019 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.019 \times 3.52^{0.8} \times 10^4 \times 0.457 = 238$

$\alpha_i = Nu \cdot \lambda / d = 238 \times 1.595 \times 10^{-5} / 0.0695 = 0.0546 \text{ kcal/m}^2\text{s} \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $= 196 \text{ kcal/m}^2\text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$

耐圧殻からの放熱の促進のため、耐圧殻内側にはフィンを設け熱伝達  $\alpha$  の向上を  
1.4倍とする。

$\alpha_i = 196 \times 1.4 = 275 \text{ kcal/m}^2\text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$

耐圧殻の外側の熱伝達係数  $\alpha_o = 2,460 \text{ kcal/m}^2\text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$  である。

## 3.3 伝熱面積の検討

### (1) 熱貫流量

$1/K = 1/\alpha_i + t/\lambda + 1/\alpha_o = 1/275 + 0.104/7.14 + 1/2460 = 1/53.7$

$K = 53.7 \text{ kcal/m}^2\text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$

### (2) 平均温度差

$\Delta T_m = \{(212-2)-(50-2)\} / \ln \{(212-2)/(50-2)\} = 108.4 \text{ } ^\circ\text{C}$

### (3) 伝熱面積

$S = Q / (\Delta T_m \cdot K) = 110.1 \times 860 / (108.4 \times 53.7) = 16.2 \text{ m}^2$

よってこの場合は電気出力を、

$20 \times 15 / 16.2 = 18.5 \text{ kWe}$

18.5 kWeまで落とせば除熱が可能である。