

# 深海調査用高速炉システムの重量検討

1991年5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)

## 深海調査用高速炉システムの重量検討

大坪 章<sup>1)</sup>，羽賀一男<sup>1)</sup>

### 要 旨

深海調査用高速炉について用途別に検討を行っている。ここではこれらの動力源のうち、近い将来に需要があると期待される無人基地用動力源（水深8020mを想定，10kWe）および1万m級潜水調査船用動力源（20kWe）について概念を構築した。出力変換方式として前者では熱電気セルおよび密閉ブレイトンサイクルを，後者では密閉ブレイトンサイクルを採用している。このような深海調査用動力源では重量が軽いほど好ましい。構築した概念に基づく計算の結果，この高速炉システム総重量は耐圧殻容器込みで，1万m潜水調査船用動力源でも10トン以下になる見通しを得た。

---

1) 大洗工学センター，技術開発部，フロンティア技術開発室

May, 1991

## Study of Weight of Fast Reactor Power System for Deep Sea Research

Akira Otsubo\*, Kazuo Haga \*

### Abstract

Fast reactor power systems for deep sea research were studied to some types of usage. Two concepts were figured out to power sources for an uninhibited base (water level 8,020m, 10kWe) and for a 10 km class research submersible (20 kWe), which are expected to be required in near future. Whereas the power conversion system of the uninhibited base adopted thermoelectric cells and a closed Brayton cycle, that of the submersible used a closed Brayton cycle. It is favorable that the power system for deep sea research is as light as possible. The calculated weight of these power sources showed that the total value including a pressure shell container will be less than an objected value of 10 tons even in the 10 km class research submersible.

---

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

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 無人基地用動力源 .....	2
2.1 基地概要 .....	2
2.2 プラント概念 .....	3
2.3 炉本体 .....	3
2.4 発電方式 .....	4
2.5 システム検討 .....	6
3. 1万m級潜水調査船用動力源 .....	9
3.1 プラント概念 .....	9
3.2 システム検討 .....	10
4. おわりに .....	13
5. 参考文献 .....	14
付録1. 最初のSP-100熱電気セルが発電 .....	36
付録2. 計算結果一覧 .....	41

## 表一覧表

表 1. 1	深海調査用原子炉の種類	15
表 2. 1	10kWe宇宙炉システム設計主要目	16
表 2. 2	無人基地用高速炉主要項目（ナトリウム炉）	17
表 2. 3	無人基地用高速炉主要項目（リチウム炉）	17

## 図一覧表

図 1. 1	しんかい6500	18
図 2. 1	北太平洋の海底地形	19
図 2. 2	総合海底観測システム無人海底基地	20
図 2. 3	中央観測ステーションを中心とした定点観測グリッド無人基地	21
図 2. 4	10~40kWe宇宙炉システム概略図(熱電気発電)	22
図 2. 5	10kWe宇宙炉システム概念図(熱電気発電)	23
図 2. 6	10kWe宇宙炉本体横縦断面図	24
図 2. 7	ブレイトンサイクル	25
図 2. 8	He-Xe密閉ブレイトンサイクル	26
図 2. 9	1.3kWe密閉ブレイトンサイクル	27
図 2. 10	熱電気変換回路	28
図 2. 11	無人基地動力源用耐圧殻(リチウム炉熱電気発電)	29
図 2. 12	10~100kWe発電領域の宇宙炉(SP-100)システム重量	30
図 2. 13	無人基地動力源用耐圧殻(リチウム炉密閉ブレイトンサイクル)	31
図 3. 1	ナックの融点	32
図 3. 2	10.7kWe密閉ブレイトンサイクル	33
図 3. 3	1万m級潜水調査船動力源用耐圧殻(垂直配置)	34
図 3. 4	1万m級潜水調査船動力源用耐圧殻(並列配置)	35

## 1. はじめに

炉容器ナトリウム出口温度が約700℃という高温高速炉を用いたシステムが深海調査船用動力源として利用可能な事を筆者らは既に報告した<sup>(1)(2)</sup>。本報告書は、この技術的可能性より一歩進んで、近い将来需要が見込めそうな深海調査用炉はどんなものか、という事を検討したものである。

表1.1に現在考えられる深海調査用原子炉の種類を示す。

将来の需要を考えると、経済性の観点からのみこれらの需要を求める事は非常に難しい。即ち、深海底のコバルトクラスト或はマンガン団塊より有用鉱物を採集するというような事は、近い将来経済ベースにのりそうにない。よって経済性に関係なく意味を持つような事をまず最初に目指す必要がある。

このような意味のある分野としては、日本の国について考えるときまず巨大地震の予知に関連するものが考えられる。又深海特有の生物からの有効な成分の抽出という事も可能性はある<sup>(3)</sup>。このような観点から、世界の海溝を調査する1万m級潜水調査船用動力源と、地球科学的観測と深海生物生態の調査を目的とした無人基地用動力源について検討する事とした。

現在の深海調査船しんかい6500は図1.1に示すように空中重量26tonと非常に軽い設計になっている。

海洋科学技術センターの専門家に以前に意見をうかがったところでは深海調査用動力源の最も重要な事は、潜水調査船全体の浮力をつけ易くする点から、重量の小さい事であるという話であった。従って本報告書では重量が10ton以下の動力源の概念構築を主目的として検討を行った。



## 2. 無人基地用動力源

### 2.1 基地概要

図2.1に北太平洋の海底地形を示す。北太平洋の海底は北西の方向に年間数cmの速度で移動し、太平洋の端にある海溝で地中にもぐり込んでいる。

海溝は約1万mの深度を有し、一番深いのはフィリピン海溝で深度は10,924mである<sup>(4)</sup>。日本海溝は最大深度は8,020mで、ここにおける海洋底もぐり込み挙動が東海大地震の発生と密接な関係にあると言われている。“日本海溝は地震の巣”という表現もされるときがあるほどである。

従って太平洋中央の海洋底の動きを観測すると共に、海溝地域における地殻のもぐり込み挙動を観測する事は、地球科学という学問的見地のみならず、地震予知という観点から将来是非必要とされるものである。

又表1.1で説明したように、深海の生物は我々地上の生物と異なり炭酸同化作用に基づいた生態系でなく、全然異った生態系であるので、これらの生物群より新しい医薬品等が将来抽出される可能性がある。従って無人基地で、これらの生物の生態を長期間観測する事も将来必要となると考えられる。

以上のような構想でまとめた無人海底基地を図2.2及び図2.3に示す。図2.2は地球科学的な観測と生物生態観測の両方を行うものである。データ収録装置よりのデータ収集にブイの使用を考えているが、この方法はブイの設置が難しいかもしれない。深海底の傍にブイ設置用のケーブルをひっぱれるような浅い場所を見つけるのは難しいように思われる。従ってデータの収集は母船が例えば週に一回無人海底基地近くに来て、一週間分のデータを収集して帰るのが実現性があると考えられる。データ収集の無線通信は海中では音響を使用し、空中では電波を使用する。本図中開孔計測群は、地熱を測定するものであり、環境計測装置群は、海水の温度、PH等を測定するものである。

図2.3は地球科学的観測に目的をしばって、多数の観測ステーションを用いて観測する基地のイメージ図である。図2.2及び図2.3共動力源は10kWeあればよいと考えられる。

## 2.2 プラント概念

無人基地用高速炉システムの概要は次のようなものである。

- (1) 無人基地の水深は8,020mとする。即ち日本海溝北端の、太平洋プレート、フィリピン海プレート及びユーラシアプレートの3プレートがぶつかる地点に無人基地を設置すると想定し、水深は日本海溝の最大深度を採用した。
- (2) 高速炉の電気出力は10kWeとする。図2.2及び図2.3の動力源は、地震計等の計測器が1台当り50~100We, ライトが1台当り500~1000We, データ収録装置が約1kWe等を考慮すると、この程度の電力量で十分である。
- (3) 高速炉は寿命10年間とし、連続運転とする。本プラントシステム及び観測装置で部分的に故障が発生した場合には、データ収集装置或は中央観測ステーションの電気信号により検出し、自動的に、故障した観測装置等を電氣的に切断する。そして、炉の電気出力をその分だけ低下させ炉の運転を続けるものとする。
- (4) 冷却材としてはナトリウムとリチウムの2通りとする。前者は現在の技術レベルで可能というものであり、後者は将来のより優れた技術の開発という位置付けである。
- (5) 冷却材の原子炉容器出口温度は、ナトリウムの場合は約720℃, リチウムの場合は950~1,150℃とする。
- (6) 発電は2次系に密閉ブレイトンサイクル或は熱電気発電装置を用いて行う。  
将来のより進んだ技術としては、スターリングエンジンの使用も考えられる。
- (7) システムの放熱は、耐圧殻中を熱伝導で海水中に放熱する。

リチウム炉では耐圧殻内側に設置した冷却器中のガス温度が、ナトリウム炉の場合よりも高温になるので、海水中への放熱に要する伝熱面積が小さくなる。従って同面積の耐圧殻で、より多量の放熱が可能となり、故により大発電量の原子炉の設置が可能となる。

## 2.3 炉本体

10kWeという極小型炉の設計を動燃はまだ実施した事は無い。ここでは海外文献を参考資料として利用する事とする。

図2.4に10~40kWe宇宙炉システム概略図を示す<sup>(5)</sup>。これは米国のSP-100プロジェ

クトのものであり、炉はリチウム冷却炉で、発電系は熱電気発電を使用している。従って発電効率は4～5%である。同じ炉心で密閉ブレイトンサイクルを用いて発電する場合には、電気出力が4倍近くになる。即ち、図2.4の10kWeの炉本体と密閉ブレイトンサイクルを使用する場合、約40kWeの発電量となる。

図2.5には10kWeのシステムの概念図、図2.6には10kWeの宇宙炉本体の横及び縦断面図を示す<sup>(6)</sup>。この炉の設計主要目を表2.1に示す。この炉は宇宙炉であるので、冷却器としてはラジエータを利用している。この炉の熱出力は253kWtである。炉容器出口冷却材温度が1400Kと高温なので、一次系の容器にはニオブ合金のPWC11を使用している。又この一次系容器は2重になっている。炉の制御は図2.6の左図で示されている。三本の円柱形状の制御ドラムで行う。安全棒は6本の細い棒で、スライド方式で挿入する。燃料ピンは同図でわかるように、ワイヤを巻かないピンを用いている。

上記の資料を参考として用いて、無人基地動力源用の炉本体の主要目を表2.2及び表2.3のように決める。表2.1で冷却材温度はナトリウムでこの程度までの温度上昇は可能であろうと考えて設定したものである。燃料はSP-100の場合は、97%濃縮のウラン窒化物燃料を使用している。炉容器の大きさは、図2.4及び図2.5より求めた値である。表2.2のリチウム炉の場合は冷却材温度を海外文献を参考にして設定した<sup>(7)</sup>。

尚97%濃縮ウランは国際協定上日本では使用し難いという意見もあるが、このため50%Pu-50%U(20%濃縮U)の燃料での炉心設計を動燃では現在計画中之である。

## 2.4 発電方式

### 2.4.1 密閉ブレイトンサイクル<sup>(8)</sup>

現在まで色々な発電方式が極小型炉用に提案され研究されて来ているが、本報告書では実現性の高い方式のみを取り上げる。

ブレイトンサイクルはガスタービンシステムである。図2.7にブレイトンサイクルを図示する。深海調査用の場合も宇宙用の場合と同様、ガスを大気開放に出来ないの密閉方式をとる。He-Xeガスを用いた密閉式ブレイトンサイクルは、非凝縮性ガスを使用するので、凝縮性の水蒸気を使用するタービンに比較し、タービン翼の損傷を低減できる点から1960年代中頃から研究されている。

タービンは作動流体のモル重量が増えると段数が減らせる。例えば、He（モル重量 = 4）10段は、Ar（モル重量 = 40）1段と等価である。He-Xe（40）は、モル重量が約40である。しかし、熱輸送特性は、モル重量が小さい（He混合割合が大きい）ほど良い。図2.8にはHe-Xe密閉ブレイトンサイクルの構造図を示す。コンプレッサー、発電機、タービンは同軸である。

図2.9には米国Allied-Signal Aerospace CompanyのMini Brayton Rotating Unit（Mini BRU）を示す。発電量は1.3kWeでNASAのプログラム用に開発したものであるが、実証試験では真空中で1,000時間以上の連続運転に成功している。

#### 2.4.2 熱電気変換

ゼーベック効果（熱電対と同じ原理）を利用する。温接点及び冷接点の2個所で接合している異種の金属の回路中には電圧が発生し、適当な電力負荷を介して結合された場合には電流が生ずる。これをゼーベック効果という。半導体の開発により、有用な電力量を生産することが可能になった。図2.10に熱電気変換回路を示す。

アメリカで使用しているTE材料の主要なものは、PbTe、TAGS（銀-アンチモン-ゲルマニウム-テルル）、SiGeである。テルル化物（telluride）は開発は長年行われているが、使用温度に限界がある（ $< 825\text{K}$ ）。

10~100kWeクラスでは、 $> 1275\text{K}$ の温度になる。SiGeは1300~1400Kに耐え得る強度あり。TE材料は、性能は熱伝導率にかかわってくる。熱伝導率は小さい程よい。この値はテルル化物、セレン化物（selenide）で $0.005\sim 0.015\text{W}/\text{K}\cdot\text{cm}$ 、SiGeで $0.04\sim 0.06\text{W}/\text{K}\cdot\text{cm}$ である。

本報告書では、熱電気発電は1300K程度の高温熱源についてでも、熱電気変換効率は4%程度と低い値であるため、発電量が10kWeと小さい無人基地動力源の場合のみ熱電気発電を検討する。

本報告書の付録“最初のSP-100熱電気セルが発電”では、最近の米国の開発状況について説明する。

## 2.5 システム検討

### 2.5.1 熱電気発電方式

図2.4の10kWeの宇宙炉システム及び図2.5の宇宙炉システムを用いて無人基地用システムを検討する。図2.5中の用語で説明すると、reactor (炉), radiation shield (放射線遮蔽, electronics用の遮蔽), drive motor (駆動機構), heat transport (熱輸送系), TEM pump (熱電磁ポンプ), thermoelectric power converter (熱電気変換器), heat exchanger (熱交換器)の部分をそのまま無人基地用動力源の耐压殻中に設置するという考えを用いる。図2.5のradiatorの部分は無人基地用動力源では、耐压殻自体が同じ熱放散という役目を受持つ事になる。

図2.11に無人基地動力源用耐压殻の内面形状を示す。この耐压殻の形状は、上記のreactorからheat exchangerまでの機器が設置され得るように設計したものである。

次にこの耐压殻の重量を計算する。参考文献(2)の作業で、10Ni-8Co鋼製の内径3mの耐压殻の場合、水深6,500mで厚さは73mmという計算結果を得ているので、この数値を用いて水深の変化については比例計算、球の内径の変化についても比例計算、円筒形の場合は球型の2倍の厚みにするという方法で耐压殻の重量を求める。図2.11の耐压殻の各部分について次のようになる。

#### 1) 上部半球部

$$\text{厚み } 73\text{mm} \times \frac{8020\text{m}}{6500\text{m}} \times \frac{0.6\text{m}}{3\text{m}} = 18\text{mm}, \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.3^2 = 0.565\text{m}^2$$

#### 2) 上部円筒部

$$\text{厚み } 18\text{mm} \times 2 = 36\text{mm}, \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.3 \times 1.5 = 2.827\text{m}^2$$

#### 3) 下部円筒部

$$\text{厚み } 30\text{mm} \times 2 = 60\text{mm}, \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.5 \times 2.0 = 6.283\text{m}^2$$

#### 4) 下部半球部

$$\text{厚み } 73\text{mm} \times \frac{8020\text{m}}{6500\text{m}} \times \frac{1\text{m}}{3\text{m}} = 30\text{mm}, \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.5^2 = 1.571\text{m}^2$$

## 耐圧殻体積

$$0.018 \times 0.565 + 0.036 \times 2.827 + 0.060 \times 6.283 + 0.030 \times 1.571 \\ = 0.536 \text{m}^3$$

## 耐圧殻重量

$$8 \text{ ton/m}^3 \times 0.536 \text{m}^3 = 4.288 \text{ton}$$

一方炉システム本体の重量は図2.12で示されているように10kWeでは1.35tonである。この重量中にはradiatorの重量が含まれており、radiatorの重量はフランスのERATO計画関連の文献から推測すると10kWe炉の場合0.08tonぐらいにおさまりそうだが、小さな値なのでここでは保守側（重量を大きくみる側）に考えてradiatorの重量は無視して、差引かない。従って無人基地用動力源の総重量は次のようになる。

$$\text{総重量 } 4.288 \text{ton} + 1.35 \text{ton} = 5.638 \text{ton} \approx 5.64 \text{ton}$$

尚図2.11は上部円筒部に原子炉と遮蔽材を、下部円筒部に熱電気発電システムを設置するという事で設計したが、上部円筒部を下部に下部円筒部を上部にして原子炉を下方に設置する事は可能である。

## 2.5.2 密閉ブレイトンサイクル方式

図2.4及び図2.5の10kWe宇宙炉システムの炉と、発電用には密閉ブレイトンサイクルを用いるシステムとする。密閉ブレイトンサイクルとしては図2.9に示す。1.3kWeのMini BRU（米国NASA開発）を8台用いる。

密閉ブレイトンサイクルは動的機器であるので、8台とも無人基地動力源の設計寿命、例えば10年間故障せずに正常に作動するとは考えにくい。従ってあるMini BRUが故障した場合には、修理するのはまず実際的でない事を考慮すると、対策としては故障したMini BRUのみを電氣的に残りのものからはずして正常のもののみで運転を続けるのが、現在の技術水準から最も妥当な方法と考えられる。こういう点を考慮すると、無人基地動力源用の密閉ブレイトンサイクルとしては、Mini BRUのような極めて小電力量のものを数多く使用するのが好ましいという事になる。

図2.9に示されるように、Mini BRUの直径は21.3cm、長さは30.5cmである。文献(2)の検討より、レキュパレータの長さはMini BRUの全長の約0.5倍である事がわかっている。ここでは、これらの点を考慮して図2.13に示すようにMini BRUを配置する。図

2.13には耐圧殻内面形状を合せて示す。耐圧殻下部には原子炉及び遮蔽材を配置する。

次にこの耐圧殻の重量を計算する。

1) 上部半球部

$$\text{厚み} \quad 73\text{mm} \times \frac{8020\text{m}}{6500\text{m}} \times \frac{0.8\text{ m}}{3\text{ m}} = 24\text{m}$$

$$\text{面積} \quad 2\pi \times 0.4^2 = 1.0\text{m}^2$$

2) 円筒部

$$\text{厚み} \quad 24\text{mm} \times 2 = 48\text{mm}$$

$$\text{面積} \quad \pi \times 0.8 \times 4.0 = 10.1\text{m}^2$$

3) 下部半球部

$$\text{厚み} \quad 24\text{mm} \quad , \quad \text{面積} \quad 1.0\text{ m}^2$$

耐圧殻体積

$$1.0 \times 24 \times 10^{-3} + 10.1 \times 48 \times 10^{-3} + 1.0 \times 24 \times 10^{-3} = 0.533\text{m}^3$$

耐圧殻重量

$$8\text{ ton/m}^3 \times 0.533\text{m}^3 = 4.264\text{ton}$$

10kWeの炉の重量として、熱電気発電の場合の重量1.35tonを採用すると、密閉ブレイトンサイクルを用いた場合の無人基地用動力源の総重量は次のようになる。

$$\text{総重量} \quad 4.264\text{ton} + 1.35\text{ton} = 5.614\text{ton} \approx 5.61\text{ton}$$

### 3. 1万m級潜水調査船用動力源

#### 3.1 プラント概念

第2章で説明したように、日本海溝は地震の巣と表現されるほど地震国日本にとっては関心の深い地点である。第2章では、無人基地を設置して日本海溝を地球科学の研究対象として観測するという観点より、必要な動力源について検討した。

日本海溝を観測する方法としては、無人基地以外にも原子力とは関係はないが、無人観測装置を開発しようという動きもある<sup>(3)</sup>。しかし無人観測装置があれば十分というのではなく、有人の潜水調査船は無人基地や無人観測装置とは異なった特色を有するものである。

有人潜水調査船の中でも1万m級潜水調査船は、人跡未踏の世界の海溝を、乗務員が五感全部に感じたものを克明に記録しながら移動するものであり、このような調査船の建造は人類の欲望に沿ったものといえよう。

本報告書で検討する1万m級潜水調査船用高速炉システムの概要は次のようなものである。

- (1) 調査船の水深は10,924mとする。即ち、世界最深の海溝の調査が可能とする。
- (2) 高速炉の電気出力は20~40kWeとする。乗員数は3~4人で、現在のしんかい6500規模のものとする。
- (3) 原子炉システムの重量は約10トンとする。この数値は海洋科学技術センターの専門家の可能な限り軽量が望ましいという考えに基づいて設定したものである。
- (4) 冷却材としてはナトリウム（又はナック）とリチウムの2通りとする。前者は現在の技術レベルで可能というものであり、後者は将来のより優れた技術の開発という位置付けである。

ナトリウム及びリチウムは溶融するときに体積膨張がある。この値は前者で1%、後者で約20%である。従って炉停止中に冷却材温度が低下し固化した場合、炉を再起動するときは注意が必要となる。炉停止、再起動を何百回と行う潜水調査船動力源用高速炉の場合には、このための配慮が必要である。

この問題を避ける1つの方法は融点の低いナックを用いる事である。図3.1にナック



クの融点をカリウムとナトリウムの成分量のパラメータで示す。

- (5) 冷却材の原子炉容器出口温度は、ナトリウム（又はナック）の場合は約720℃或は約680℃とし、リチウムの場合は950～1,150℃とする。約680℃というのは、SUSのような現在特に材料開発を必要としない材料の使用を想定する。約720℃或は950～1,150℃という温度はニオブ合金のような特殊材料の使用を想定する。
- (6) 発電は2次系に閉ループのブレイトンサイクルを用いて行う。閉ループのブレイトンサイクルは宇宙開発用に既に開発された技術であるので、すぐにプロジェクト化するのには適している。将来のより進んだ技術としては、スターリングエンジンの使用も考える。
- (7) システムの放熱は、耐圧殻中を熱伝導で伝熱し海水中に放熱する。耐圧殻の材質としては、熱伝導率の点から高張力鋼を使用する。

### 3.2 システム検討

前節でプラント概念について検討を行った。この検討の中で現在最も重要と思われる、可能な限り軽量が好ましいという要求に基づいてシステムの検討を行う。この為発電効率が4～5%と低い熱電気発電は検討対象とせず、発電効率として約17%が期待される密閉ブレイトンサイクルを採用する。発電量としては20～40kWeが期待されているが、最小規模の20kWeについて検討する事とする。

まず原子炉としては第2章の10kWeと同じ原子炉を採用する。表2.1で明らかのように、この原子炉の熱出力は253kWtであるので、約17%の発電効率が期待される密閉ブレイトンサイクルを使用すれば20kWeの発電は、低出力運転状態で可能である。

密閉ブレイトンサイクルとしては第2章で採用したMini BRUを16台用いる方法もあるが、ここでは図3.2に示す10.7kWe密閉ブレイトンサイクルを2台用いる事とする。

図3.2では、“ものさし”が同じ写真にうつっていないので、密閉ブレイトンサイクルの寸法が正確には求められないが、隣の人のおおきさから想像して（上着の下から頭のてっぺんまでを1mとして）寸法を定める事にする。

10.7kWeの長さは、上部の垂直の配管の中央付近までとすると、1mとなり、直径はコネクション部の“でっぱり”を除くと0.62mとなる。即ち、10.7kWeの密閉ブレイト

ンサイクルはコネクション部を除いて長さ1 m、直径0.62mの円筒形内におさまる。

次に機器の配置の検討を行う。配置方法には、2台の密閉ブレイトンサイクルを直列に連結して配置する方法と、横方向に並べる方法が考えられる。

まず直列に2台連結して配置する方法を検討する。密閉ブレイトンサイクルの長さは1 mであるが、レキユパレータ及び配管配置の余裕を考慮して、密閉ブレイトンサイクル1台当り長さ2 mとする。又直径、即ち耐圧殻内径は上記のコネクションのどっぴり及び耐圧殻内面に設置される冷却器の部分等を考慮して1 mとする。このように考えると、耐圧殻内面の形状は図3.3のようになる。この耐圧殻の重量を計算する。水深は、世界最深点を考慮し11,000mとする。

1) 上部半球部

$$\text{厚み } 73\text{mm} \times \frac{11,000\text{m}}{6,500\text{m}} \times \frac{1\text{m}}{3\text{m}} = 41.2\text{mm}$$

$$\text{面積 } 2\pi \times 0.5^2 = 1.571\text{m}^2$$

2) 上部円筒部

$$\text{厚み } 41.2\text{mm} \times 2 = 82.4\text{mm} \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.5 \times 4.0 = 12.59\text{m}^2$$

3) 下部円筒部

$$\text{厚み } 24.7 \times 2 = 49.4\text{mm} \quad \text{面積 } 2\pi \times 0.3 \times 1.5 = 2.827\text{m}^2$$

4) 下部半球部

$$\text{厚み } 73\text{mm} \times \frac{11,000\text{m}}{6,500\text{m}} \times \frac{0.6\text{m}}{3\text{m}} = 24.7\text{mm}$$

$$\text{面積 } 2\pi \times 0.2^2 = 0.565\text{m}^2$$

耐圧殻体積

$$0.0412 \times 1.571 + 0.0824 \times 12.59 + 0.0494 \times 2.827 + 0.0247 \times 0.565 \\ = 1.256\text{m}^3$$

耐圧殻重量

$$8\text{ ton/m}^3 \times 1.256 = 10.05\text{ton}$$

原子炉本体の重量は無人基地の場合と同じ原子炉を使用しているのので1.35tonとする。

$$\text{総重量 } 10.05\text{ton} + 1.35\text{ton} = 11.4\text{ton}$$

次に密閉ブレイトンサイクル2台を並列配置する方法につき検討を行う。図3.4にこの場合の耐圧殻形状を示す。この場合の耐圧殻重量の検討を行う。

1) 上部球部

$$\text{厚み } 73\text{mm} \times \frac{11,000\text{m}}{6,500\text{m}} \times \frac{1.8\text{m}}{3\text{m}} = 74.1\text{mm}$$

$$\text{面積 } 4\pi \times 0.9^2 = 10.18\text{m}^2$$

2) 円筒部

$$\text{厚み } 49.4\text{mm} \quad , \quad \text{面積 } 2.827\text{m}^2$$

3) 下部半球部

$$\text{厚み } 24.7\text{mm} \quad , \quad \text{面積 } 0.565\text{m}^2$$

耐圧殻体積

$$0.0741 \times 10.18 + 0.0494 \times 2.827 + 0.0247 \times 0.565 = 0.908\text{m}^3$$

耐圧殻重量

$$8\text{ ton/m}^3 \times 0.908\text{m}^3 = 7.264\text{ton}$$

原子炉を含む総重量は次のようになる。

$$\text{総重量 } 7.264\text{ton} + 1.35\text{ton} = 8.6\text{ton}$$

並列配置の場合には直列配置の場合に比較し、約3ton軽量になる。

図3.4には上部球部の中央位置での横断面図を合せて示す。密閉ブレイトンサイクル2台とレキュバレータ2台及び冷却器の位置を示す。冷却器は耐圧殻内全体に設けられるのではなく、本設計は20kWeの極小出力炉であるので、耐圧殻の極く一部に設けられるだけである。

#### 4. お わ り に

近い将来に需要の見込まれる軽量の深海調査用液体金属冷却高速炉動力源について検討を行った。それらは無人基地用動力源（水深8020mを想定，10kWe）および1万m級潜水調査船用動力源（20kWe）である。原子炉システムとしては米国宇宙炉プロジェクトの10～40kWe用高濃縮ウラン炉心のもを想定し，出力変換方式として前者では熱電気セルを，後者では密閉ブレイトンサイクルを採用している。深海調査用動力源で重要な重量について評価したところ，耐圧殻容器重量を含め無人基地用動力源は約5.6tonで，1万m級潜水調査船用動力源は約8.6tonで設計できることが判った。

深海調査用動力源の開発は，動燃がその持てる技術的能力を十分発揮できる分野であるので，今後十分に力を注いで動燃の重要な仕事の一つとして取り組む必要があると報告者は考える。

## 5. 参 考 文 献

- (1) 動燃報告書 PNC N9410 90-167, 高温高速炉-ブレイトンサイクルシステムを使用した潜水調査船用動力源の除熱に関する伝熱解析, 大坪 章他
- (2) 動燃報告書, 6.5km級潜水調査船用動力源の概念設計, 大坪 章他
- (3) “潜水調査船の知能化”, 高川真一, 計測と制御, Vol.30, No. 1, pp.67-72
- (4) 新しい地球観, 上田誠也, 岩波新書
- (5) “Scalability of Space Reactor Power Systems in the 10 to 100 kWe Range,”  
N. P. Shepard et al.
- (6) “Design and Performance Characteristics for Low Power Space Reactor Systems,”  
N. P. Shepard et al.
- (7) “Update of the BRATO Program and Conceptual Studies on LMFBR Derivative  
Space Power System, ” F. Carre et al, Proceedings of the Seventh Symposium on  
Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, 1990年1月
- (8) SPACE NUCLEAR POWER, 1985年 J. A. Angels et al., ORBIT BOOK COMPANY, INC.
- (9) SODIUM-NAK ENGINEERING HANDBOOK, Vol.1, Foust, Gordon and Breach, Science  
Publishers, Inc.

表 1.1 深海調査用原子炉の種類

## 1. 潜水調査船用

- 1) 1千m用(200kWe以上) …………… 大陸棚用, 石油資源
- 2) 3千m用(200kWe以上) …………… 熱水鉱床, コバルトクラスト
- 3) 6千m用(200kWe以上) …………… マンガン団塊
- 4) 1万m用(20kWe以上) …………… 海溝調査

## 2. 無人或いは有人海底基地用(10~300kWe以上)

水深2500~6500m/位, 広域調査(地震予知, 鉱物資源, 生物生態観測及び生物飼育\*, 地球物理及び地球化学の分野の学術調査)

※深海の生物群より新しい医薬品などの化学物質が抽出された場合

表 2.1 10kWe宇宙炉システム設計主要目

Table 1. Design Characteristics for the 10kWe Point Design

PARAMETER	VALUE
DELIVERED POWER (kWe)	10.0
THERMOPILE POWER OUTPUT (kWe)	11.0
THERMAL POWER (kWe)	
THERMOPILE INPUT	227
TEM PUMP INPUT	6
LOSSES	20
REQUIRED FROM REACTOR	253
HEAT REJECTED	222
TEMPERATURES (K)	
REACTOR OUTLET (EOM)	1400
AVERAGE RADIATOR (EOM)	855
CORE $\Delta T$	70
SIZING PARAMETERS	
TELEG LENGTH (cm)	0.66
THERMOPILE AREA (m <sup>2</sup> )	0.88
TEM PUMP TE AREA (m <sup>2</sup> )	0.025
MAIN RADIATOR	
BLACKBODY AREA (m <sup>2</sup> )	7.1
VIEW FACTOR	1.1
EMISSIVITY	0.85
DAMAGE FACTOR	0.9
*1-SIDE PHYSICAL AREA (m <sup>2</sup> )	8.4
PUMP RADIATER	
BLACKBODY AREA (m <sup>2</sup> )	0.2
1-SIDE PHYSICAL AREA (m <sup>2</sup> )	0.25
TOTAL 1-SIDE RADIATOR AREA (m <sup>2</sup> )	8.7

$$*1\text{-SIDE PHYSICAL AREA} = \frac{\text{BLACKBODY AREA}}{\text{VIEW FACTOR} \times \text{"EMISSIVITY"} \times \text{DAMAGE FACTOR}}$$

表 2.2 無人基地用高速炉主要項目（ナトリウム炉）

冷却材温度	炉容器入力／出口……………約615／720℃
電気出力	40kWe以下（密閉ブレイトンサイクル）
燃料	高濃縮窒化物燃料又は酸化物燃料
被覆管	Nb合金
構造材	Nb合金又は鉄・ニッケル基合金
炉容器	直径／高さ……………0.30／1.0m

（含制御棒）

表 2.3 無人基地用高速炉主要項目（リチウム炉）

冷却材温度	炉容器入力／出口……………約979／1,114℃
電気出力	10kWe（熱電気発電），40kWe以下（密閉ブレイトンサイクル）
燃料	高濃縮窒化物燃料
被覆管	Nb合金
構造材	Nb合金又はMo-Re合金
炉容器	直径／高さ……………0.30／1.0m

（含制御棒）



深海域有人探査システムの研究開発

# 資源の宝庫深海域—未知の世界

## 深海域潜水調査船の開発利用

深海域は、マンガン団塊などの鉱物資源やソコグラなどの生物資源が豊かに包蔵されています。そして最近では深海微生物も注目されてきました。また、深海域における海底の地殻変動の状況に的確にとらえ、そのメカニズムが解明できれば、地震や津波の発生予知に大いに役立ちます。

このように、有用な価値をもつ深海域を探索するためには、どうしても潜水調査船の開発が必要で

す。そこで、センターでは、深海域を人間の目で直接観察し、資料、データの収集や、測定器の海底設置および回収が可能な潜水調査船システムの開発を推進しています。

### 潜水調査船「しんかい6500」

「しんかい6500」は、水深6500mまで潜航して深海底を調査できる有人潜水調査船で、平成元年11月に完成しました。この潜水調査船によりわが国経済水域の約96%が調査可能となります。

この潜水調査船の主な調査目的として、深海底に賦存するマンガン団塊や熱水鉱床等、あるいは深海生物や深海微生物といった未利用深海生物資源の調査、また、地震、津波の予知のための調査研究等があります。

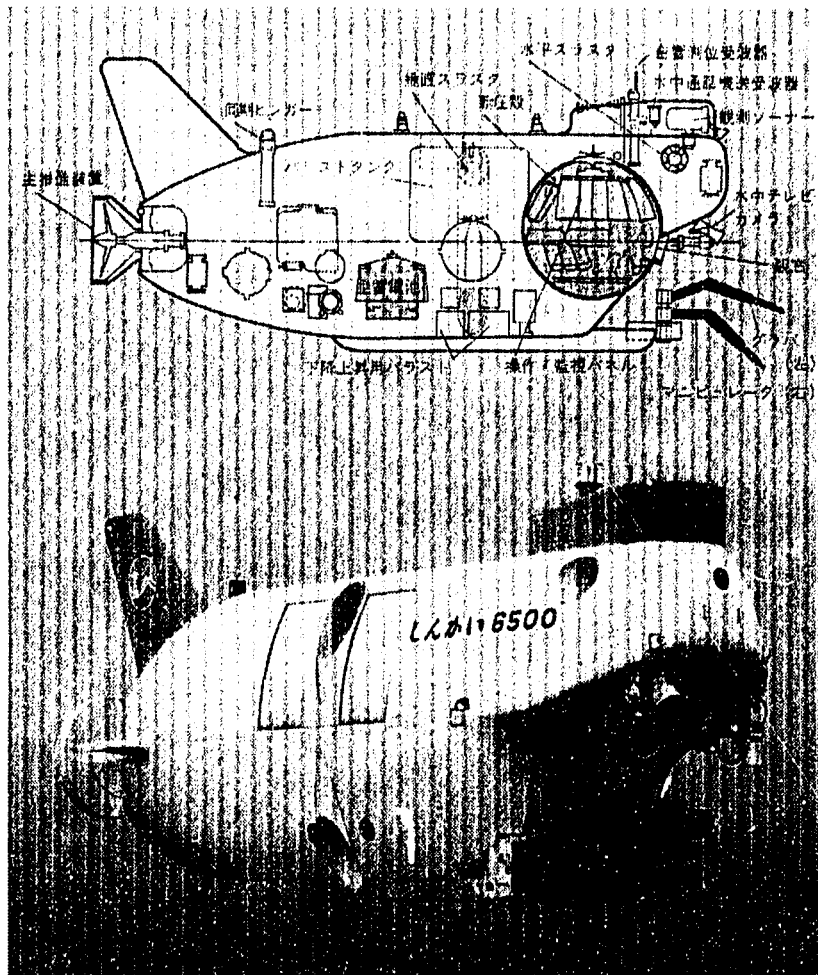
#### ●しんかい6500主要目

- 主要寸法
  - 全長 9.5m
  - 幅 2.7m
  - 高さ 3.2m
  - 質量(空中) 26.0トン
- 最大潜航深度 6,500m
- 乗員数 3名
- 水中速力(巡航) 1ノット
- (最大) 2.5ノット

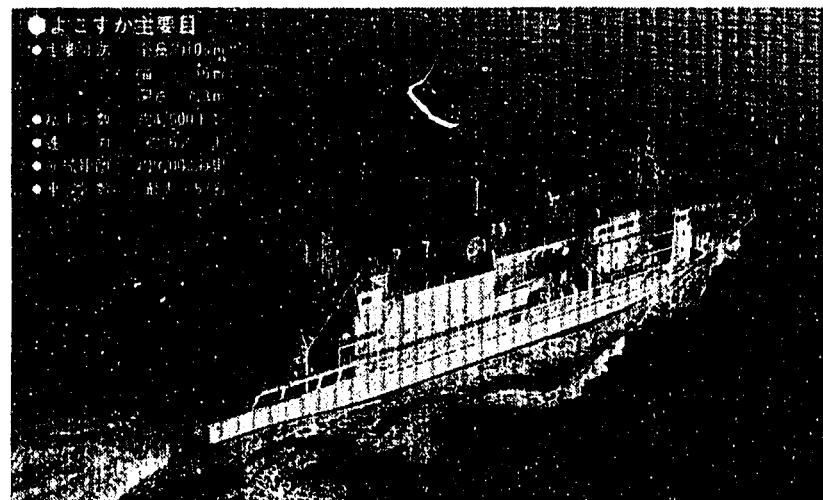
### 支援母船「よこすか」

「よこすか」は「しんかい6500」の支援母船として、その潜航を支援するためのほか、海洋調査観測船としての機器も装備され、各種計測コンテナ等の搭載も可能としています。

航続距離は9000海里の能力を有し、世界のどこの海域にも調査に行くことができます。



●6500m潜水調査船「しんかい6500」



- よこすか主要目
  - 主要寸法
    - 全長 110m
    - 幅 20m
    - 高さ 13m
  - トン数 約4,000ト
  - 速力 約15ノット
  - 航続距離 20,000海里
  - 乗員数 約100名

図 1.1 しんかい6500

世界の海底地形

# 北太平洋の海底地形

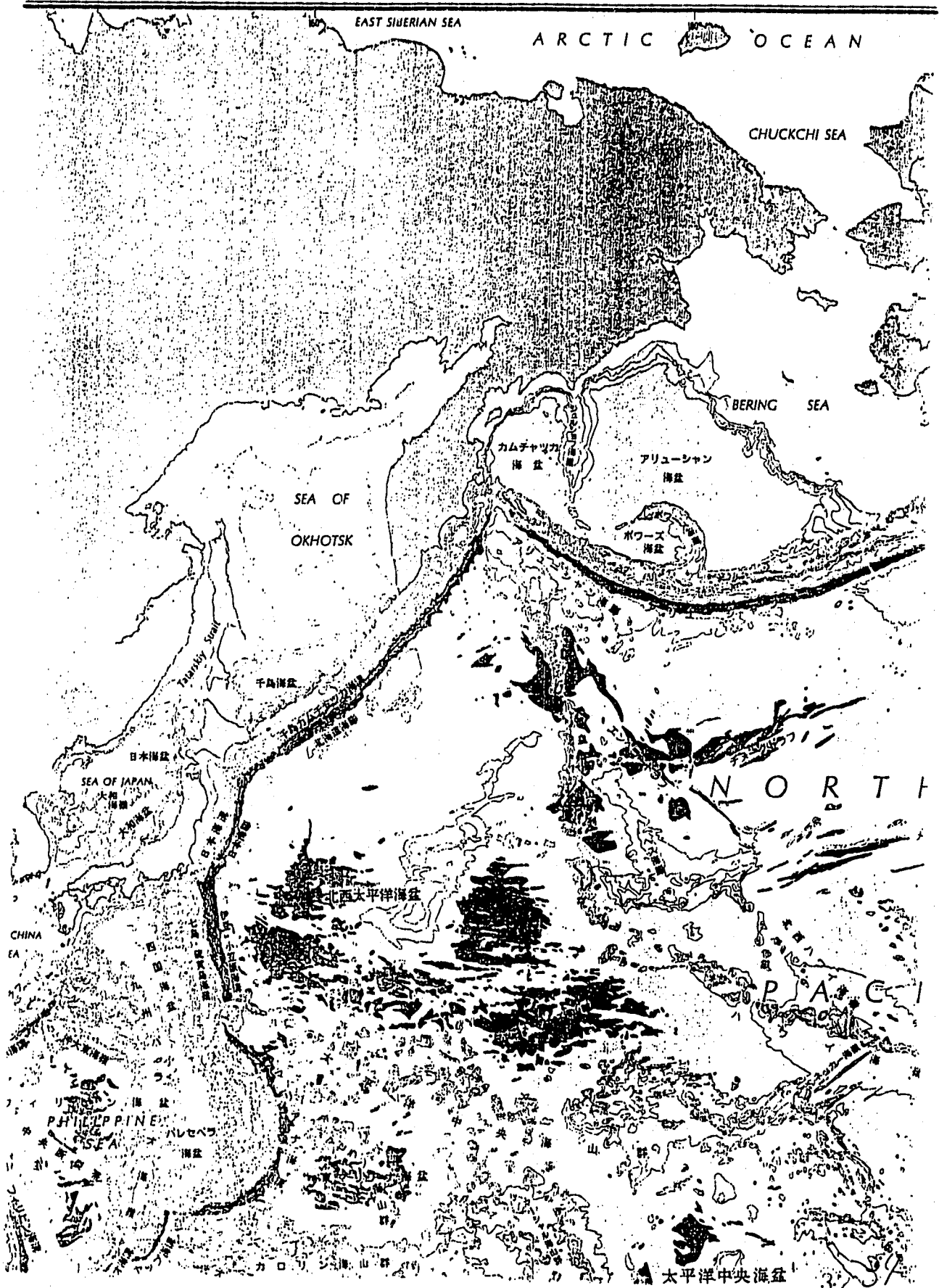


図 2.1 北太平洋の海底地形

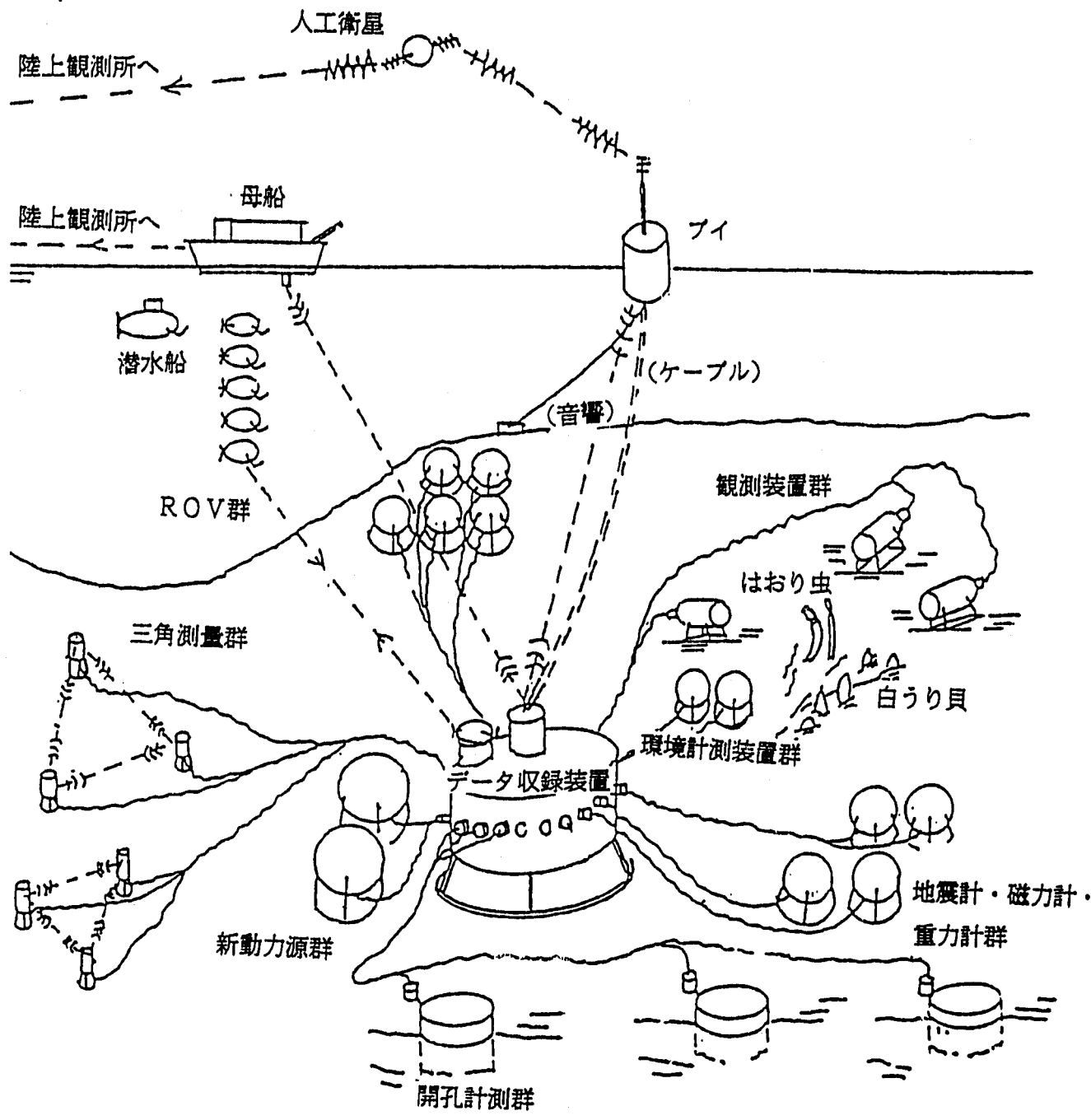


図 2.2 総合海底観測システム無人海底基地

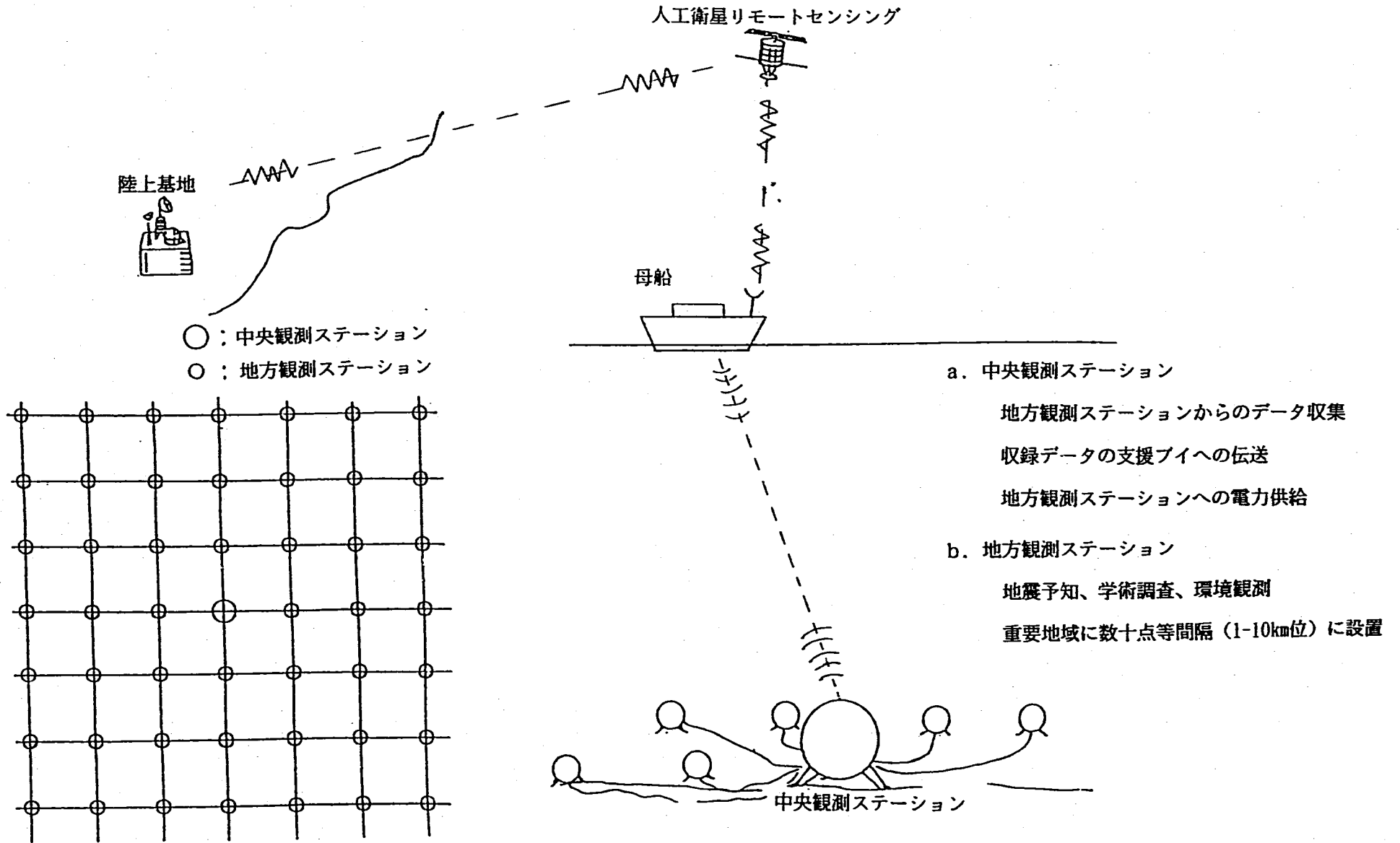


図 2.3 中央観測ステーションを中心とした定点観測グリッド無人基地

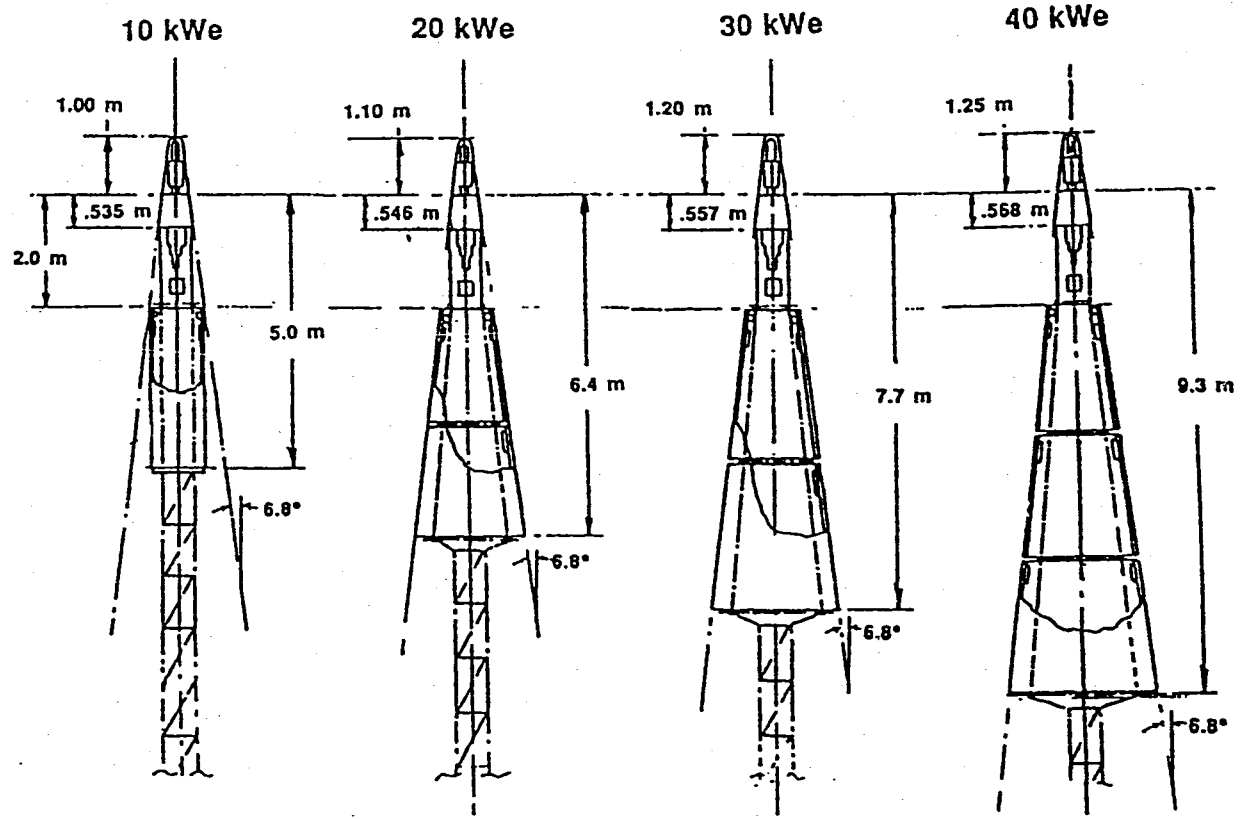


FIGURE 3. Physical Characteristics of Scaled-up Direct-coupled Systems With Fixed Radiator Panels.

図 2.4 10~40kWe宇宙炉システム概略図 (熱電気発電)

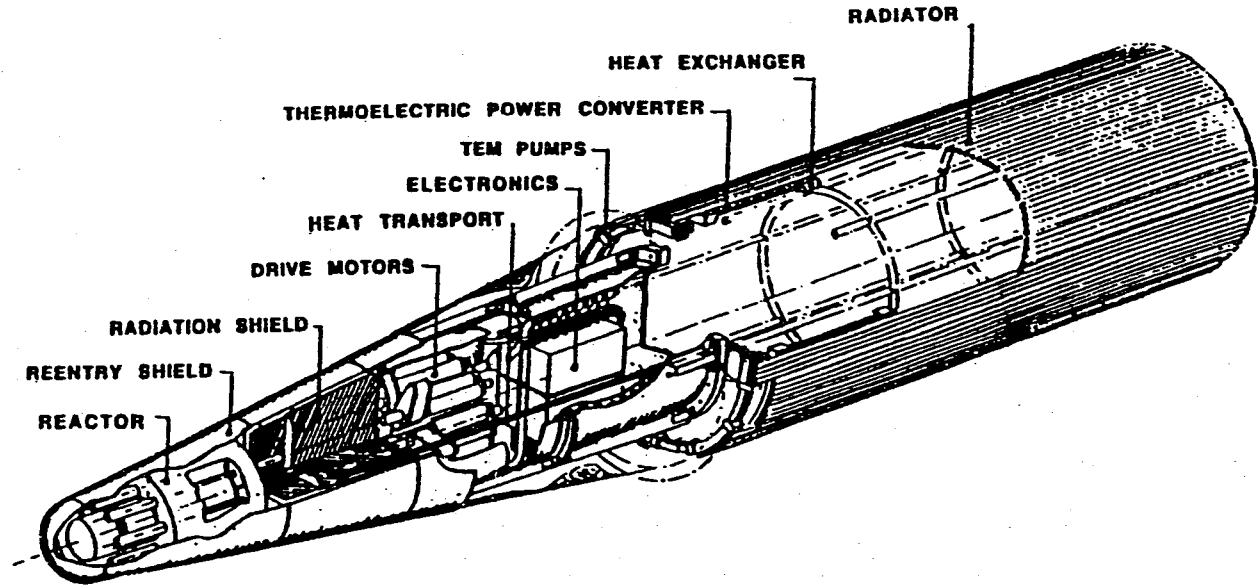


Figure 1. 10 kW<sub>e</sub> Point Design Concept

図 2. 5 10kW<sub>e</sub>宇宙炉システム概念図 (熱電気発電)

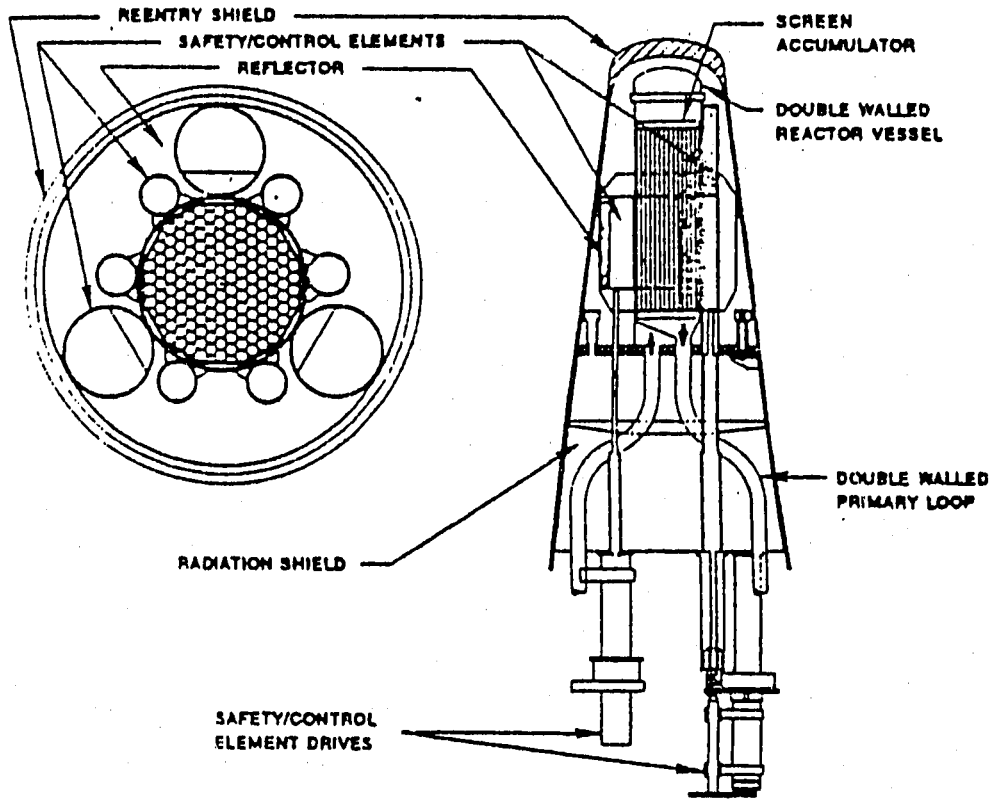


Figure 2. Reactor Power Assembly

图 2. 6 10kWe宇宙炉本体横纵断面图

CLOSED BRAYTON CYCLE (IDEAL)

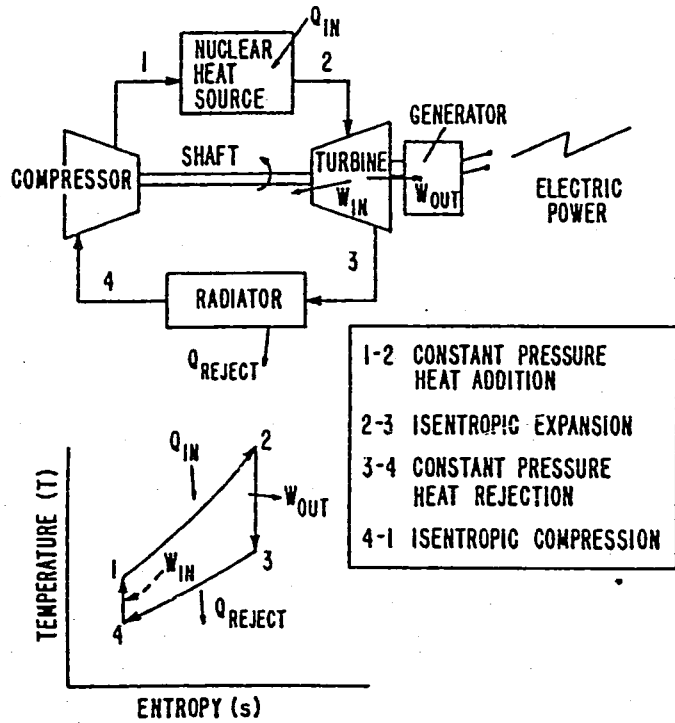


Fig. 5.14 Closed Brayton cycle (ideal).

CLOSED BRAYTON CYCLE WITH REGENERATION (IDEAL)

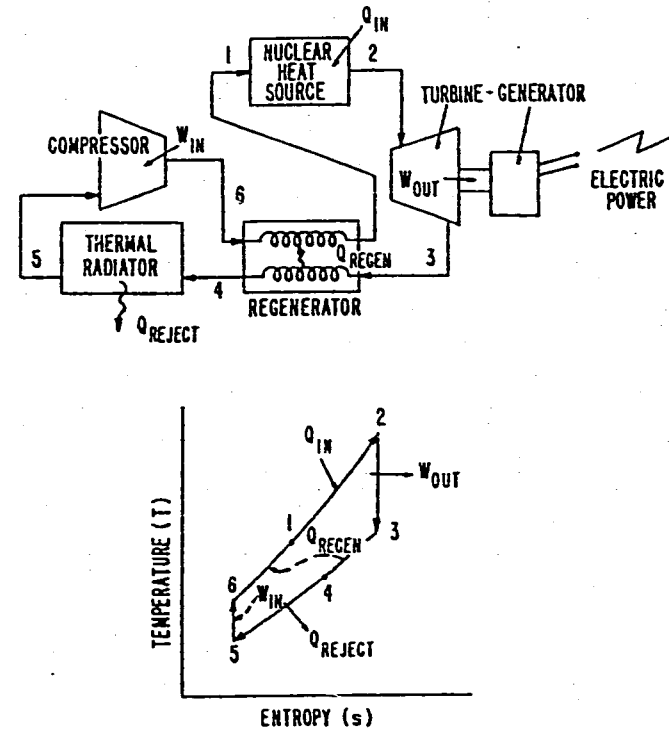
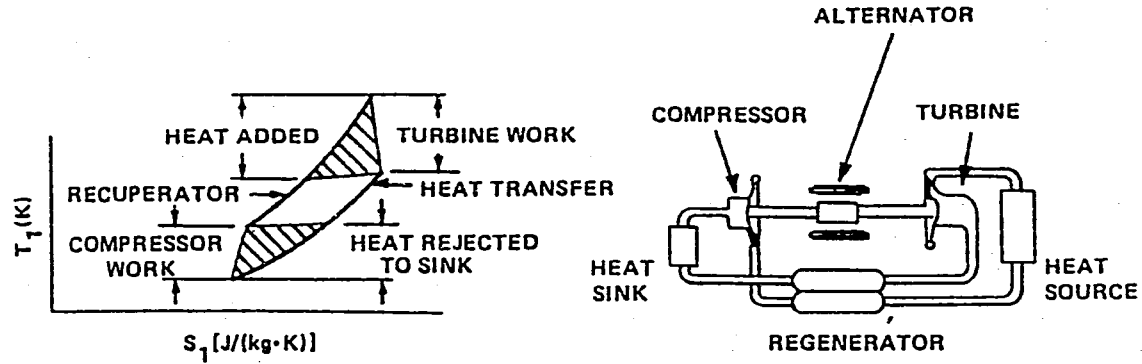


Fig. 5.15 Closed Brayton cycle with regeneration (ideal).

2.7 ブレイトンサイクル



### HIGH TEMPERATURE BRAYTON CYCLE



CYCLE  $\eta = 0.25$

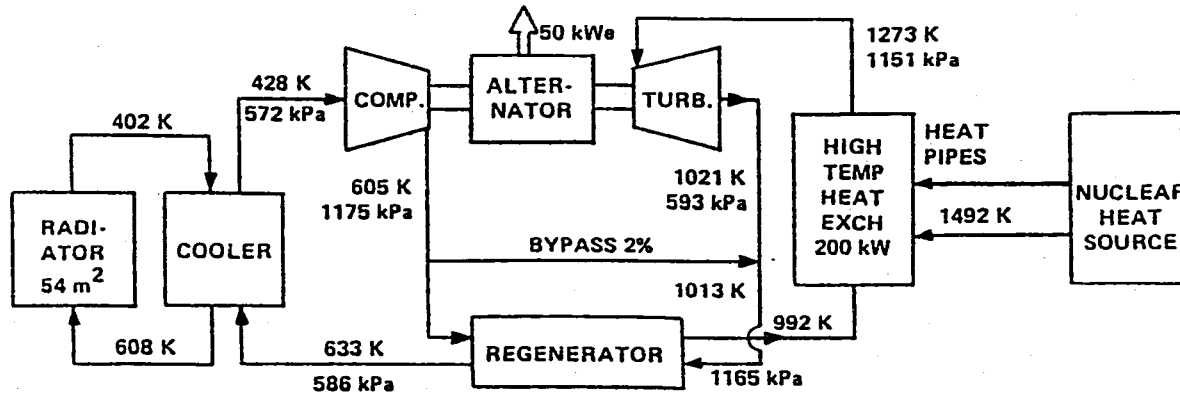
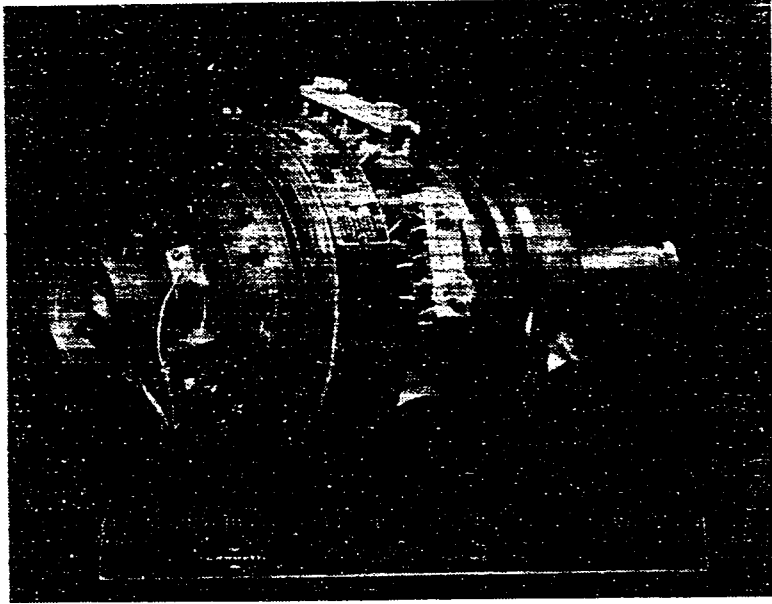


Fig. 5.18 Helium-xenon closed Brayton cycle configuration [1].

図 2.8 He-Xe 密閉ブレイトンサイクル



*The Mini-BRU, built in 1972 for NASA, is still in existence and able to be used to support NASA space programs.*

図 2.9 1.3kWe密閉ブレイトンサイクル

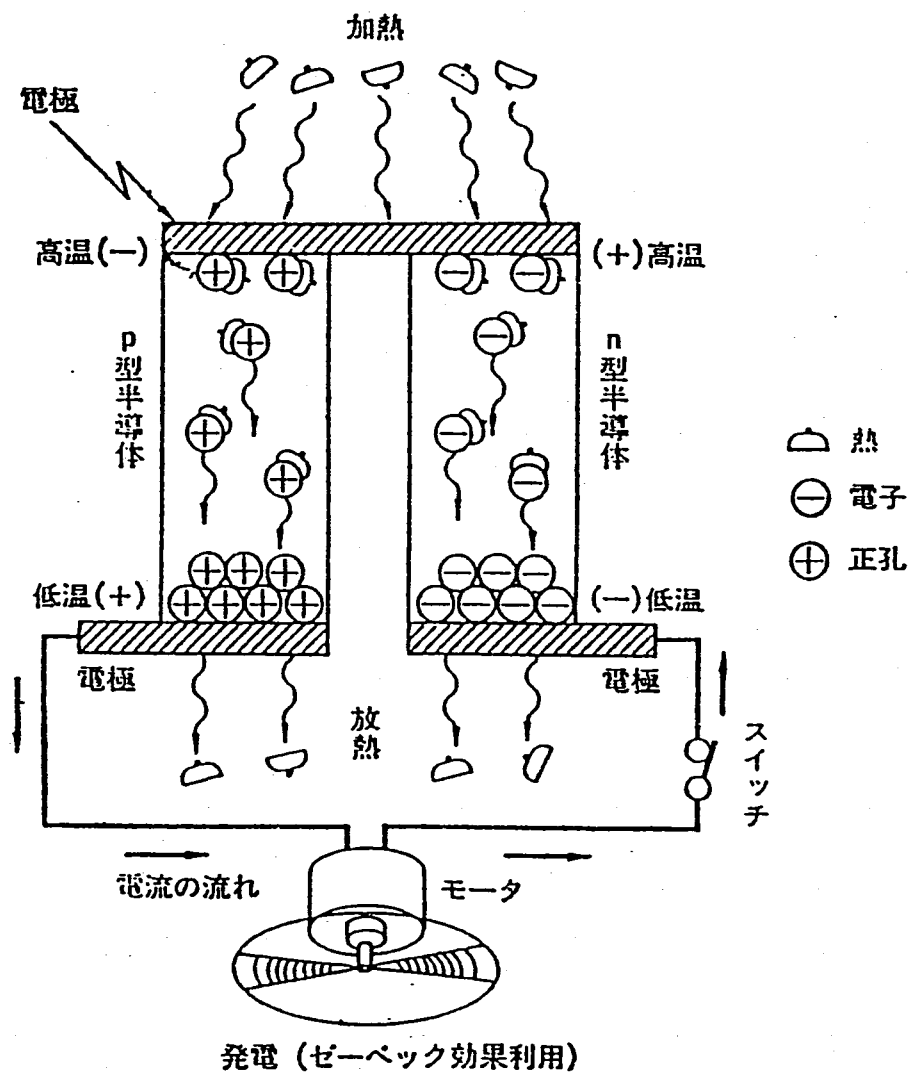


図 2.10 熱電気変換回路

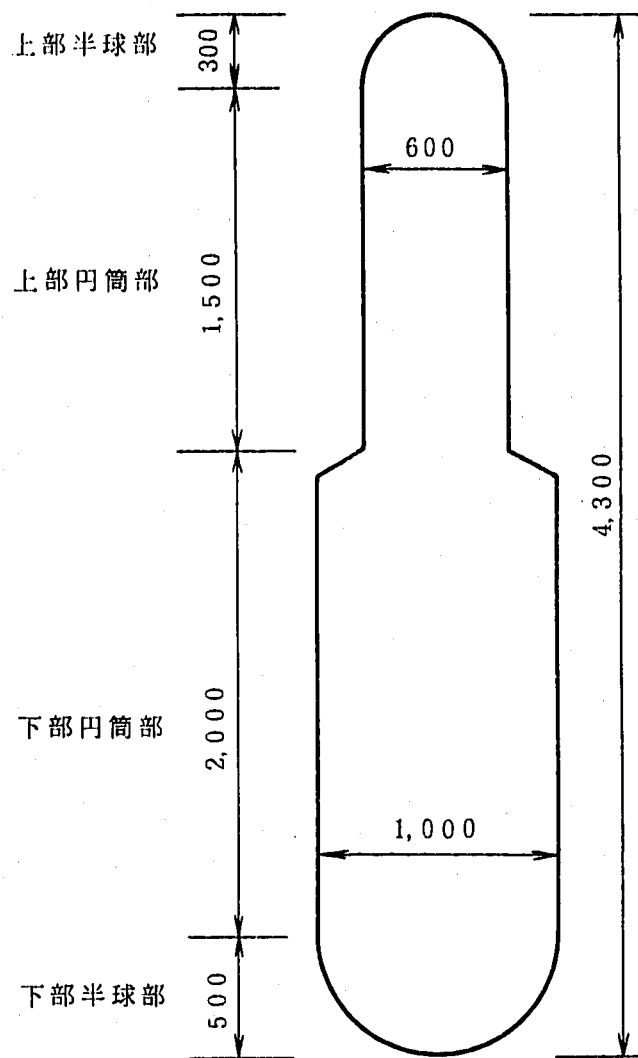


図 2.11 無人基地動力源用耐圧殻（リチウム炉熱電気発電）

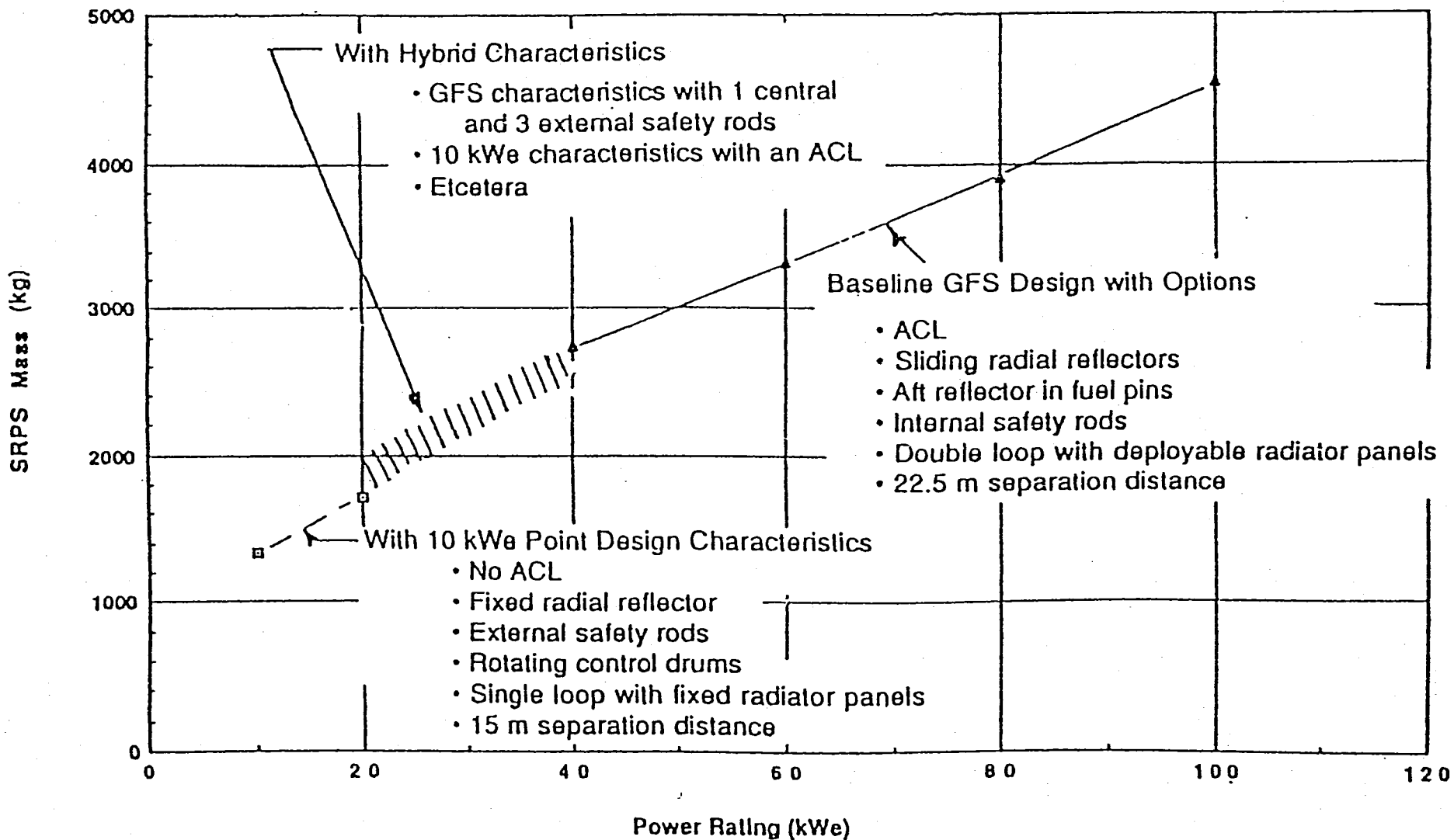


FIGURE 4. SP-100 SRPS Mass Sensitivity Over the 10 to 100 kW<sub>e</sub> Power Range.

図 2.12 10~100kWe 発電領域の宇宙炉 (SP-100) システム重量

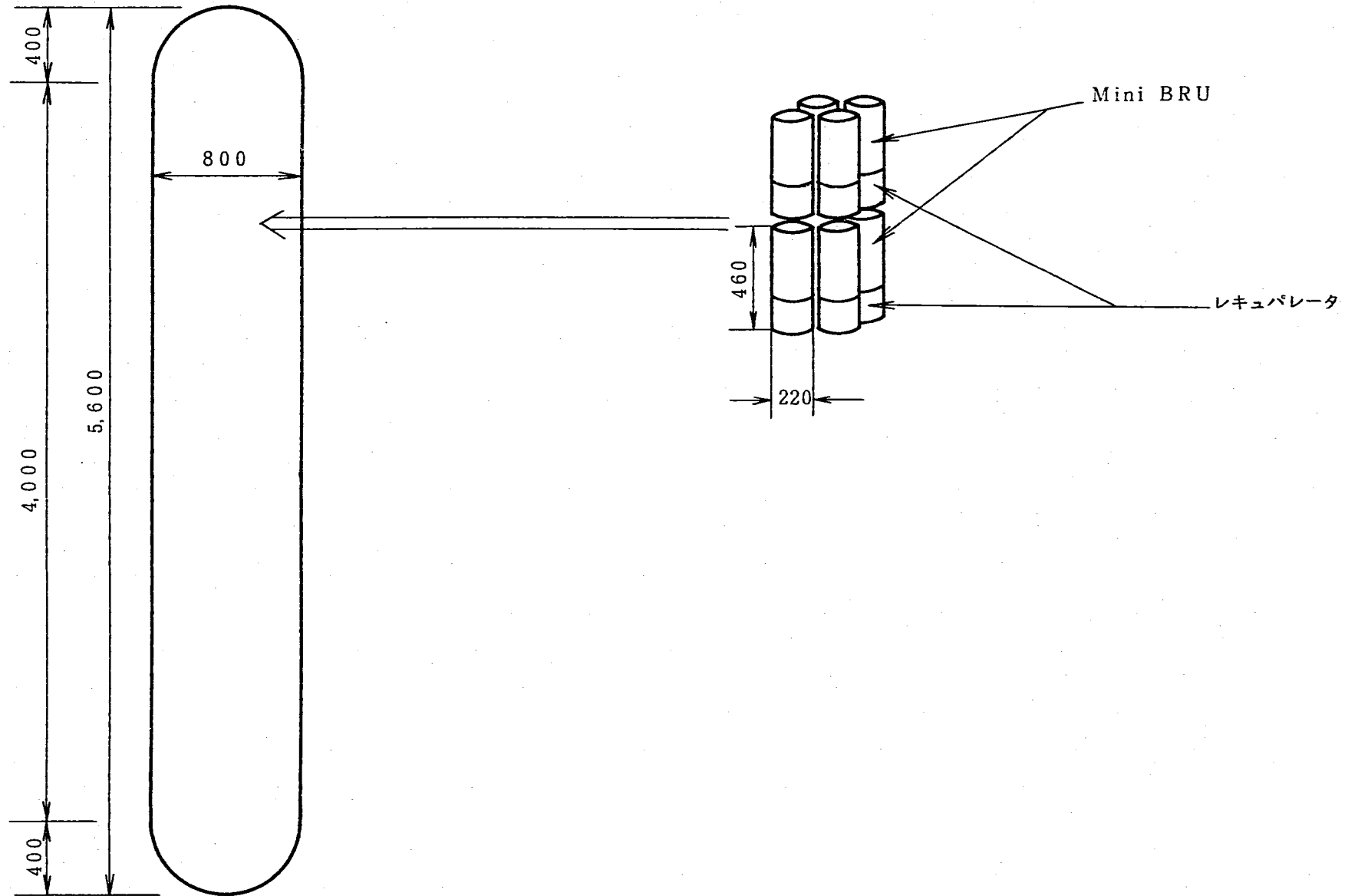


図 2.13 無人基地動力源用耐圧殻 (リチウム炉密閉ブレイトンサイクル)

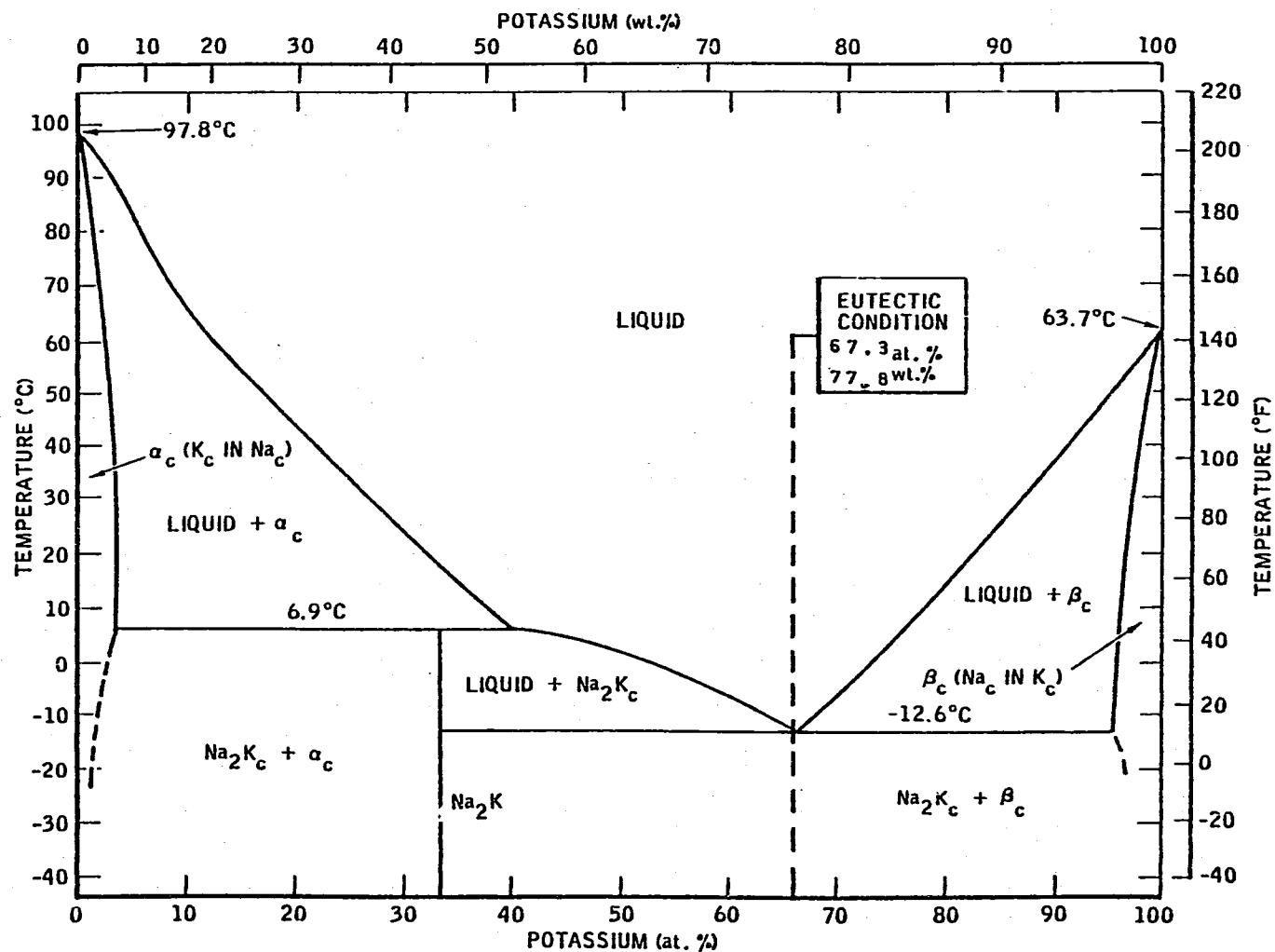
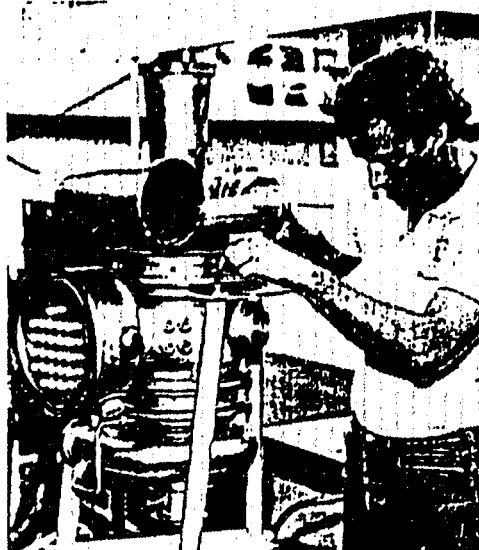


Fig. 1.5 Sodium-potassium equilibrium diagram.

図3.1 ナックの融点



*Assembling the 10.7 KW<sub>e</sub> Brayton  
Rotating Unit*

図 3. 2 10.7kWe密閉ブレイトンサイクル



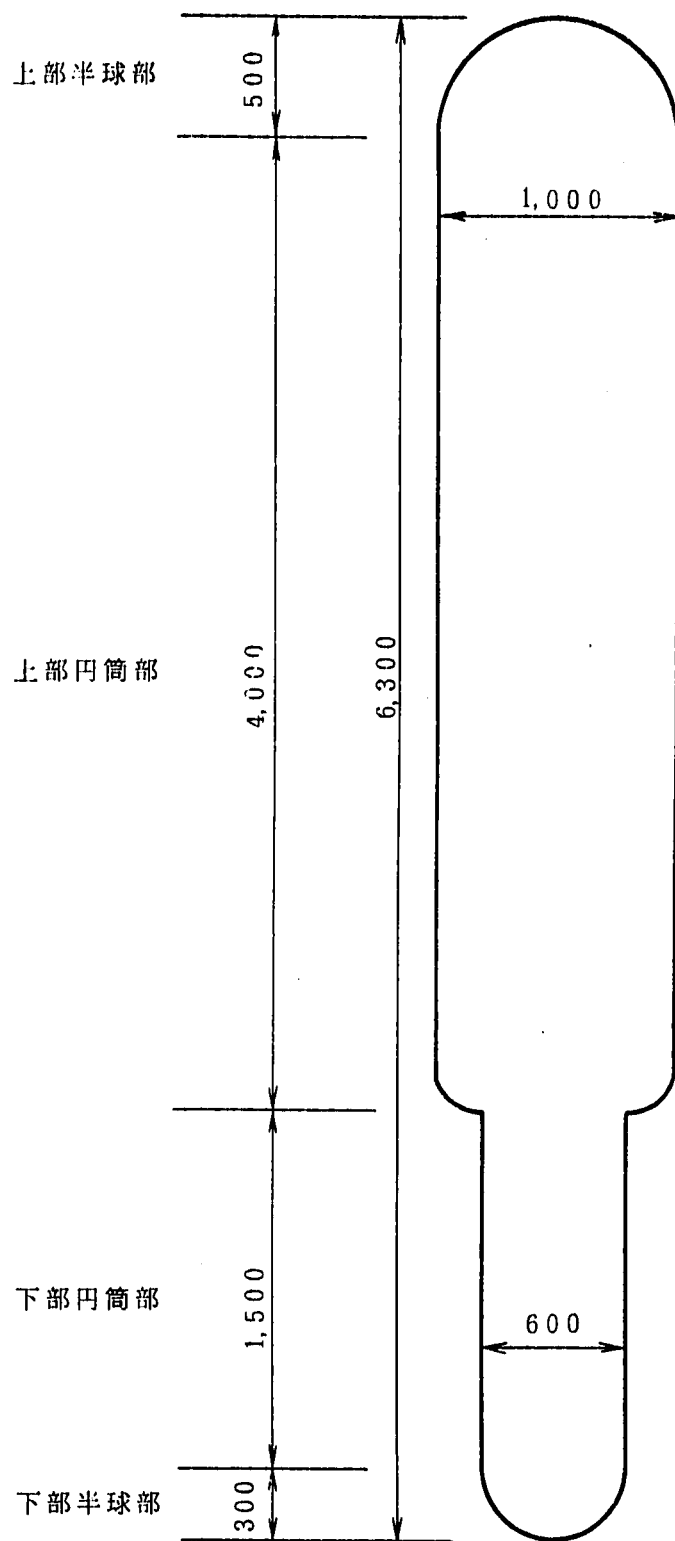


図 3.3 1 万 m 級潜水調査船動力源用耐圧殻 (垂直配置)

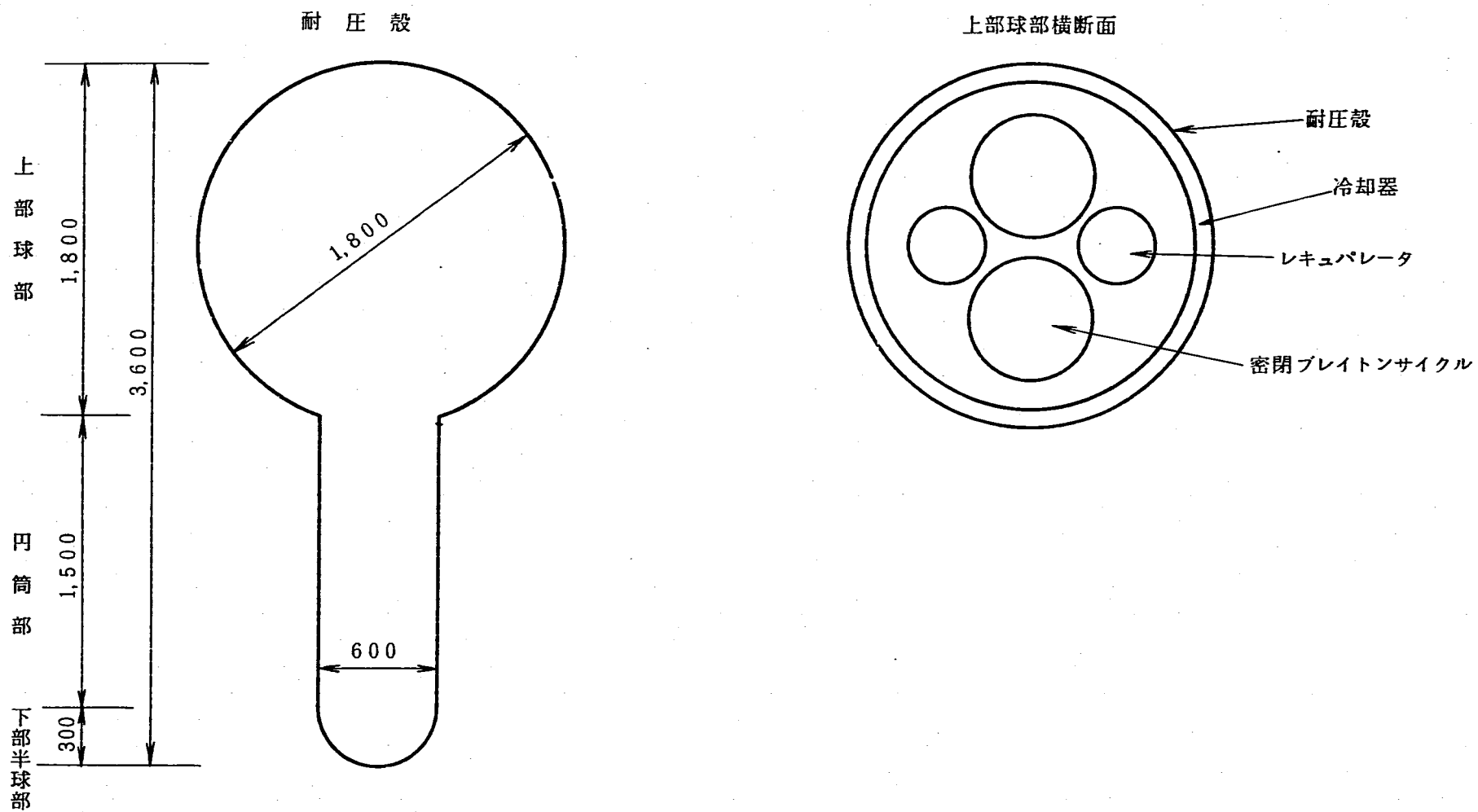


図3.4 1万m級潜水調査船動力源用耐圧殻（並列配置）

## 付録1 最初のSP-100 熱電気セルが発電（発電系）

First SP-100 Thermoelectric Cell Produces Power

出典：Space Power News, JPL D-5962 Issue 4, January 1990

SP-100プロジェクトは1989年大きなマイルストーンを達成した。それはサファイアの絶縁材とニオブの緩衝パッド (compliant pad) を持った、最初の熱伝導接合・多対 (multicouple) 熱電気セルの製造と試験に、初めて成功した事である。同様な熱電気発電はボイジャーでも用いられたが、このセルではそれと同じ体積により、6倍の電圧で、25倍の電力を得ることができる。この量的ジャンプは、90年代それ以降の宇宙機の電力に展望を開くものである。

ボイジャーでは、輻射熱で加熱された熱電気対 (uncouple) が用いられた。SP-100では、熱伝導によりセルが加熱されるため、ヒートソースとセルの間の温度低下が減る。これを実現するためには、耐高温緩衝パッドと耐高温高電圧電気絶縁材の開発が要求された。

SP-100セルでは、6対の1セットがFig. 1に示すように一つのセルを構成する。一对の発電対は一つの正孔脚 (positive doped leg) シリコンゲルマニウムSiGeと、一つの負孔脚 (negative doped leg) SiGeとからなる。高温側の電極と低温側の電極を接続することによって、電流が対から対へ流れる。熱交換器への電気絶縁は、新たに開発された絶縁材によってなされる。対の脚の間のガラス層は、熱絶縁をすると共に、モジュールを一体とする機械的接合材としての役割を果たす。作動温度では、高温と低温の熱交換器の間の熱膨張の差によるドーム状の変形を、sensitiveなセル要素に大きな応力を生じないようなものにしなければならない。これは2対の緩衝パッドによって成し遂げられる。これらのパッドのキーパラメータは、高熱伝導度、せん断と圧縮に対する受容性 (low stiffness)、織じょうの局所的な変形によるピーク引っ張り応力の制限である。これらのパッドの機械的性能は、主に織じょうの長さ、直径、材質、面積当りの密度、によって決まる。しかし、これらのパラメータと矛盾する、温度勾配を小さくしなければならないというもう一つの要求がある。

現設計では、パッドの熱交換器側にニオブのfacesheetを、モジュール側にタングステ

ンのfacesheetを用いる。これにより各面で材質の膨張計数とマッチし、セルにおける応力を最小にする。最初のセルはすべてニオブのfacesheetを用いたため、異なった熱膨張係数の材質との接合による比較的大きな応力を分散させるために高温側と低温側それぞれについて緩衝パッドと熱電気モジュールの間にグラファイトバッファを設けることが必要であった (Fig. 2 参照)。

最初の試験が真空条件で行われた。高温側温度が1106K、温度勾配が540Kのとき、0.65 voltで4 wattが得られ、これは予想値の5%以内であった。このセルは400時間何の性能劣化も示さず試験に耐えた。

### 緩衝パッド

Fig. 1 に緩衝パッドの詳細を示す。このパッドが、ヒートソースとヒートシンク間の高い熱流束と、熱膨張に起因する高い応力からセルを守る構造上のフレキシビリティを与える。表に、SP-100地上試験のためのセルのその詳細を示す。

織じょうの直径は髪の毛の1/10より細い。100kWシステムの1インチ四方のセルの織じょうをすべてつなぎ合わせると、地球を3.5周りする。

地上試験のためのセルの製作が進んでいる。ニオブのfacesheetsを持った数限りない固体織じょうパッドが作られ試験された。固体直径0.4milの織じょうを持った緩衝パッドが伝導接続概念の実証を行った。

### 高電圧絶縁材

高電圧絶縁材の見通しが充分立った。その高電圧絶縁アセンブリは、両面にニオブのフォイルを取り付けた $SxAl_2O_3$  (単結晶アルミナ) からなる。各絶縁アセンブリの内側は緩衝パッドfacesheetと、外側は、リチウムと接するNb1Zrと結合する。絶縁アセンブリに要求されるのは低電気伝導性と、高熱伝導性である。その代表的な要求は、 $7.9mA/m^2V$  ( $7.9 \times 10^{-7}ohm^{-1}cm^{-2}$ ) と $71kW/m^2K$ である。外側の絶縁材は100volt,  $320kW/m^2$ , 1362Kで7年耐えなくてはならない。解放状態では、分オーダーで200Vがかかるかも知れない。他の要求には機械的強度と環境との化学的両立性がある。試験プログラムは、リチウムなしの加速試験、絶縁材/ニオブ/リチウム両立性試験、リチウムあり加速試験、を含む。

初期の加速（スクリーニング）試験は1988年、1000時間まで、1100、1200、1300℃で行われた。この試験の目的は、

- ・長時間安定性の面から、候補材を評価する
- ・電気伝導メカニズムを解明する、特に、伝導がどの程度電子によるものかイオンによるものか
- ・熱電気変換器で用いられる金属と接触したときの絶縁材の熱化学安定性を実証する
- ・実際よりも過度な電氣的、温度条件での十分な寿命を実証する
- ・伝導モデルと絶縁低下モデルを開発する

結果は、 $SxAl_2O_3$ は優れた成績を示した。1300℃の抵抗値は $10^9$ ohm-cmであり、これは1090℃のシステム作動時の要求値である。1100℃での測定値は $10^{10}$ ohm-cmである。試験後のニオブ電極中のAlとOの解析では、電氣的、熱化学的低下は無視しうるものであった。

単結晶アルミナに対する寿命予測数学モデルが開発された。そのモデルは、全伝導性の一部を占めるイオンによる伝導性が、低下割合を決めるという考えにもとづいている。そのモデルによれば、4 kV/cmの電圧勾配に100000時間、1100℃曝されると5%低下する。1989年に始まった加速試験では、4500時間までの1100℃から1400℃までの温度での結果では、絶縁低下値は予測より小さかった。1300℃、4500時間後の絶縁抵抗は $8.1 \times 10^7$ ohm-cmで、これは要求値より180倍大きい。試験後のニオブfacesheet中のアルミナの化学分析によれば絶縁材の低下割合はモデルの予測値より非常に小さかった。

$SxAl_2O_3$ /Nb/Nb1Zr/Lithium系での両立性の試験が、現在進行中である。考えられている劣化のメカニズムは、リチウムが近くにあるために絶縁材とニオブの境界でintermetallicsが形成される事である。供試品は、リチウムを内蔵しているNb1Zr熱交換器と接した熱電子セル絶縁材アセンブリの環境を模擬して、リチウムで満たされたカプセルとそのニオブfacesheetが接合した絶縁材アセンブリである。二つの供試品が現在試験中である。600時間後、抵抗は $2.6 \times 10^7$ ohm-cmで安定しており、これらの試験は終わった。絶縁材アセンブリが、劣化の事実があるかどうか調べられた。予備的には、どちらのサンプルもリチウムの存在によりマイナスの効果はなかった。この知見は、SP-100プログラムに対するサファイア絶縁系の化学的両立性を確かめる追加の試験サンプルで、さらに証明されよう。

(訳 羽賀)

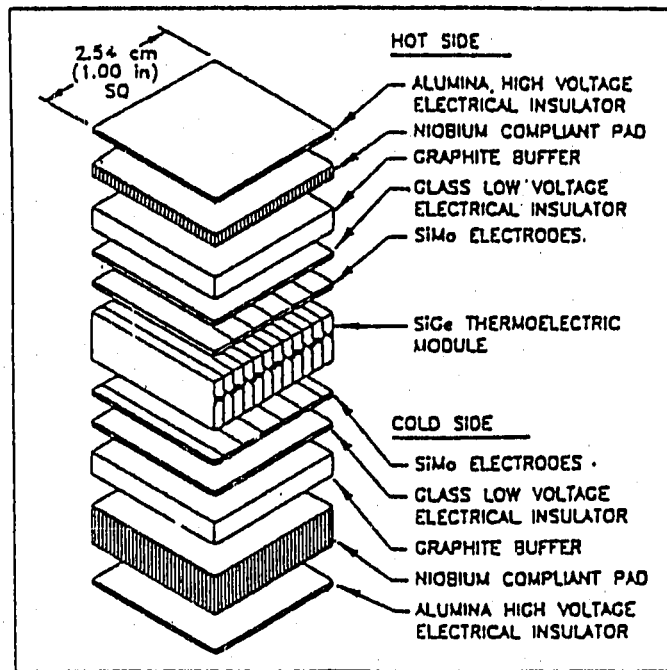


Figure 1. Thermoelectnic Cell

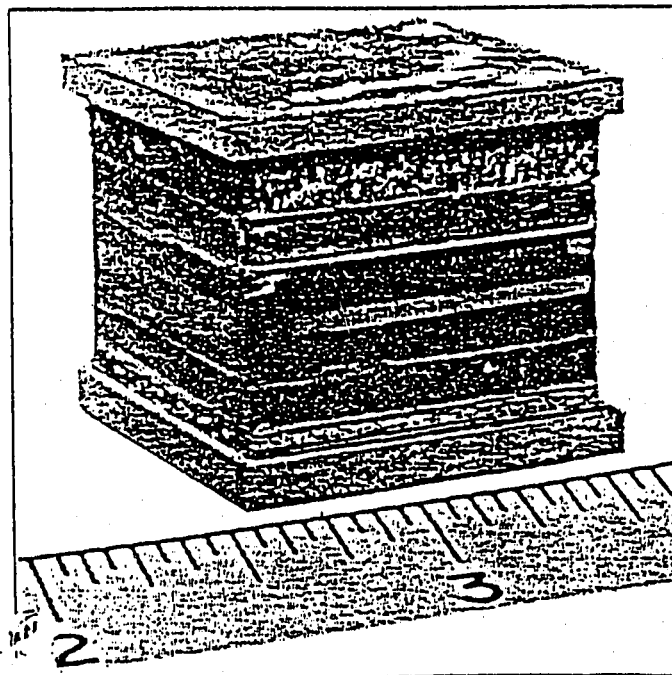


Figure 2. Photograph of Thermoelectric Cell

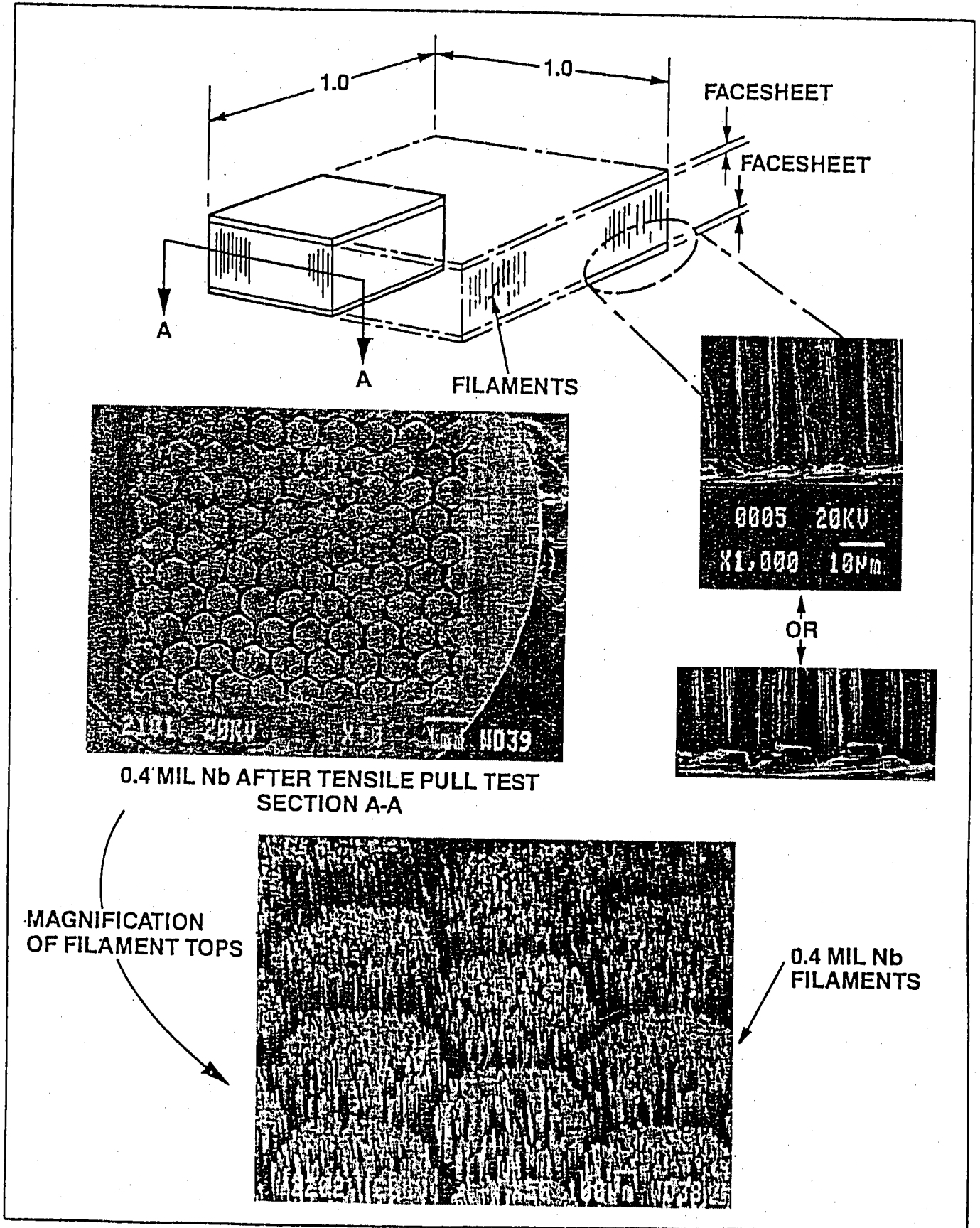


Figure 1. Details of the Compliant Pad

## 付録2 計算結果一覧

追加計算結果を含めて一覧表を作成しておく。

無人基地（水深8,020m, 10kWe）

発電方式	重量（耐圧殻+原子炉）	備考
熱電気発電	5.64 t (4.29+1.35)	付録図2.1
密閉ブレイトン	a) 5.61 t (4.26+1.35)	図2.13
	b) 4.69 t (3.39+1.35)	付録図2.2

無人基地（水深6,500m, 10kWe）

発電方式	重量（耐圧殻+原子炉）	備考
熱電気発電	4.83 t (3.488+1.35)	付録図2.1
密閉ブレイトン	a) 4.81 t (3.464+1.35)	図2.13
	b) 4.05 t (2.70+1.35)	付録図2.2

無人基地（水深4,500m, 10kWe）

発電方式	重量（耐圧殻+原子炉）	備考
熱電気発電	3.77 t (2.42+1.35)	付録図2.1
密閉ブレイトン	a) 3.75 t (2.40+1.35)	図2.13
	b) 3.23 t (1.88+1.35)	付録図2.2

1万m級潜水調査船（密閉ブレイトンサイクル, 20kWe）

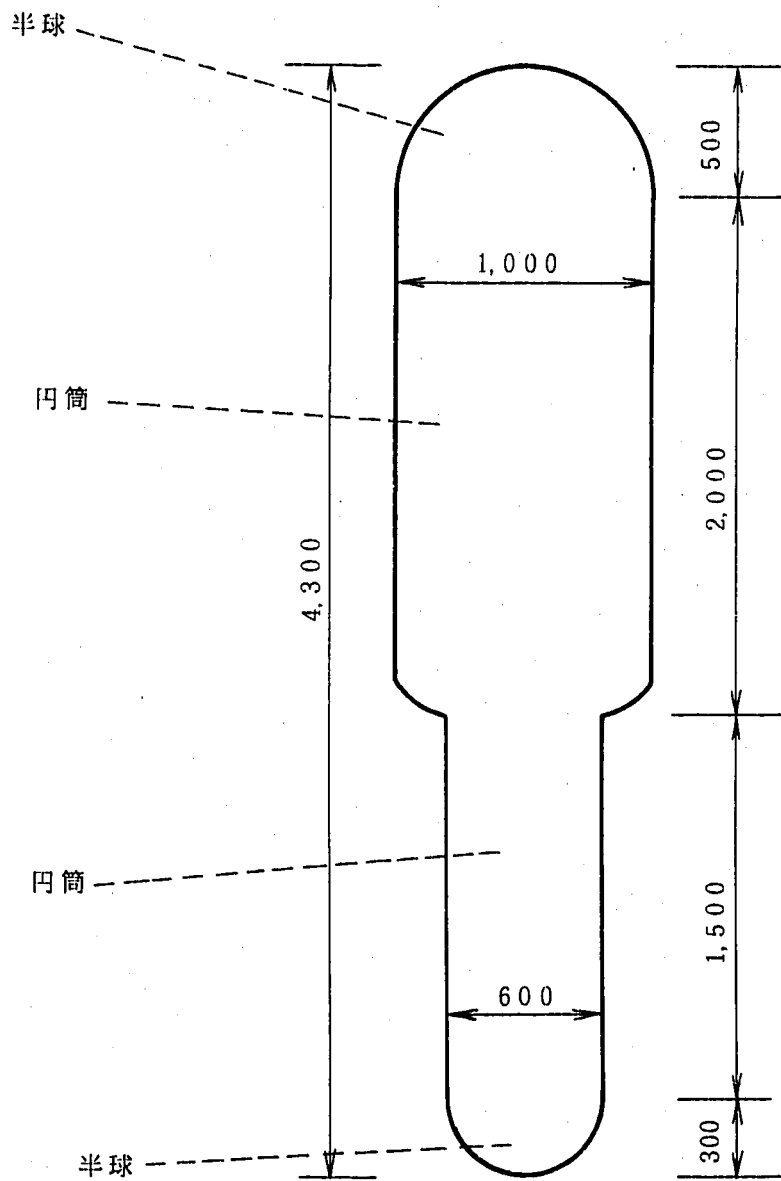
水深	重量（耐圧殻+原子炉）	備考
11,000m	11.40 t (10.05+1.35)	図3.3
11,000m	8.61 t (7.26+1.35)	付録図2.3
8,020m	8.57 t (7.22+1.35)	図3.3
8,020m	6.64 t (5.29+1.35)	付録図2.3



無人基地

10kWe 熱電気発電

水深	重量
8 km	5.6 t (4.29 + 1.35)
	耐圧殻 原子炉
6.5 km	4.8 t (3.49 + 1.35)
4.5 km	3.8 t (2.42 + 1.35)



付録図 2.1 無人基地 (熱電気発電)

無人基地

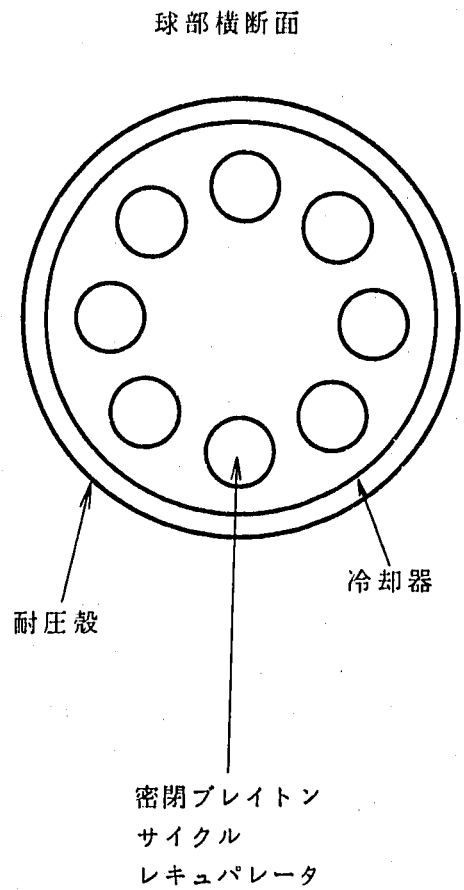
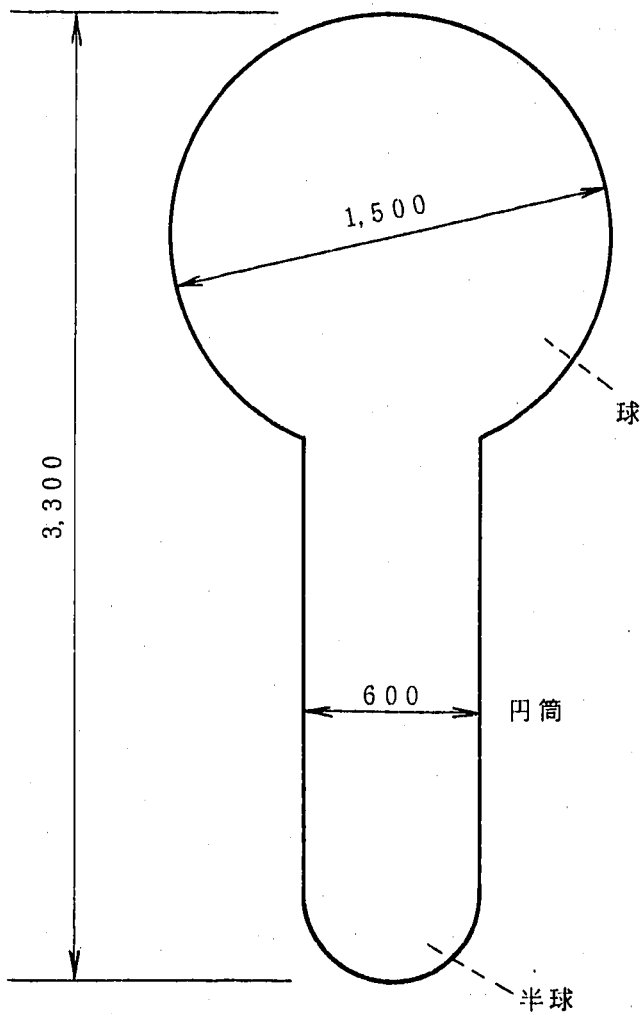
10kWe 密閉ブレイトンサイクル

水深	重量
8 km	4.7 t (3.39+1.35)

耐圧殻 原子炉

6.5km	4.1 t (2.70+1.35)
-------	-------------------

4.5km	3.2 t (1.88+1.35)
-------	-------------------



付録図 2.2 無人基地 (密閉ブレイトンサイクル b)

1万m級潜水調査船

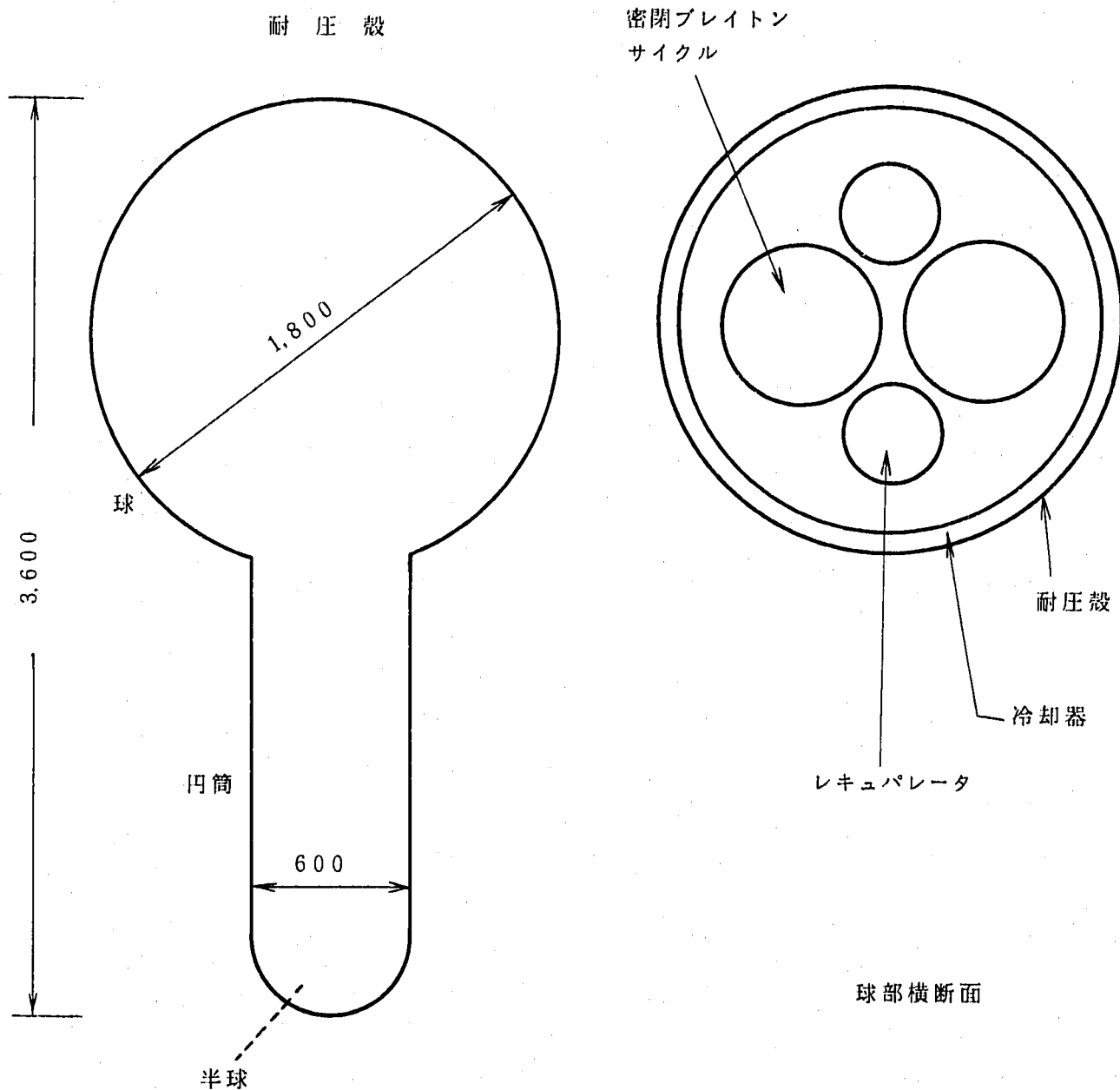
20kWe 密閉ブレイトンサイクル

水深 重量

11km 8.6 t (7.26+1.35)

耐圧殻 原子炉

8 km 6.6 t (5.29+1.35)



付録図 2.3 1万m級潜水調査船