

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.401

第212研究部会

潜水調査船等に用いる新動力源の調査研究

成果報告書

平成5年3月

社団法人
日本造船研究協会

は し が き

本報告書は、日本船舶振興会の補助事業として、平成2年度から3ヶ年計画により、日本造船研究協会第212研究部会において実施した「潜水調査船等に用いる新動力源の調査研究」の成果をとりまとめたものである。

第212研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	伊 従 功(船舶技術研究所) (H. 2~4)	
代表幹事	三 浦 敏(三菱重工業) (H. 2~4)	
委 員	成 合 英 樹(筑波大学) (H. 2~4)	竹 内 清(船舶技術研究所) (H. 2~4)
	伊 藤 泰 義(日本原子力研究所)(H. 2)	吉 村 富 男(船舶技術研究所) (H. 4)
	(船舶技術研究所) (H. 3~4)	岩 井 芳 郎(海洋科学技術センター) (H. 2~3)
	松 田 桂 一(三菱重工業) (H. 2~4)	高 川 真 一(海洋科学技術センター) (H. 4)
	猪 野 一 郎(川崎重工業) (H. 2~4)	久 本 修 三(三井造船) (H. 2)
	須 藤 高 史(N K K) (H. 2~4)	橋 本 雅 方(三井造船) (H. 3~4)
	林 錦 吾(日立造船) (H. 2~4)	高 倉 正 秀(石川島播磨重工業)(H. 2)
		安 保 則 明(石川島播磨重工業)(H. 3~4)
オブザーバ		
	藤 田 俊 助(海上技術安全局) (H. 2)	平 田 純 一(海上技術安全局) (H. 2)
	小 崎 文 雄(海上技術安全局) (H. 3~4)	緑 川 和 徳(海上技術安全局) (H. 3~4)

幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主 査	三 浦 敏(三菱重工業) (H. 2~4)	
	久 本 修 三(三井造船) (H. 2)	高 倉 正 秀(石川島播磨重工業)(H. 2)
	橋 本 雅 方(三井造船) (H. 3~4)	安 保 則 明(石川島播磨重工業)(H. 2~4)
	徳 永 三 伍(三菱重工業) (H. 2~4)	井 上 具 大(三菱重工業) (H. 2~4)
	松 本 義 昭(三井造船) (H. 2)	宮 村 裕 明(三菱重工業) (H. 4)
	森 本 清 水(三井造船) (H. 3~4)	中 村 陽 一(川崎重工業) (H. 2~4)
	浜 巖(川崎重工業) (H. 2)	
	神 足 達 也(川崎重工業) (H. 3~4)	
オブザーバ		
	藤 田 俊 助(海上技術安全局) (H. 2)	平 田 純 一(海上技術安全局) (H. 2)
	小 崎 文 雄(海上技術安全局) (H. 3~4)	緑 川 和 徳(海上技術安全局) (H. 3~4)

目 次

まえがき	1
1. 海洋に於ける新動力源の用途調査	2
2. R I 熱源の検討	6
2.1 R I 熱源の使用実績	6
2.2 R I 核種候補	8
3. R I の使用に対する安全性確保のための検討	10
4. R I 発電システムの検討・設計	11
4.1 熱電気発電システムの概念設計	11
4.2 熱電子発電システムの概念設計	11
4.3 熱機関発電システムの概念設計	11
5. 熱電気発電システム要素試験	19
6. 熱電子発電システム要素試験	23
7. R I 発電システムを用いた潜水調査船等の概念設計	27
7.1 小型有人潜水船の概念設計	27
7.2 無索無人潜水船の概念設計	27
7.3 大型有人潜水船の概念設計	27
8. 総合評価	31
8.1 R I 熱源（核種）の評価	31
8.2 R I 発電システムの評価	32
8.2.1 熱電気発電システム	33
8.2.2 熱電子発電システム	34
8.2.3 熱機関発電システム	35
8.3 R I 発電システムを搭載した潜水調査船等の評価	35
あ と が き	38

ま え が き

近年、海底鉱物資源探査や地球環境問題にかかわる海洋調査、又地震予知のための長期連続海底観測、調査等の重要性が高まっている。

これら海洋開発用各種調査観測機器の動力源としては、洋上又は陸上からケーブルで結ばれているもの（例えば無人潜水船）は、海中行動中の制約や、気象条件に影響され、一方単独に動力源を搭載しているもの（例えば有人潜水船）は、充電や寿命等行動能力に大きな制約がある。

R I (Radio Isotope)発電システムは、基本的には長期間にわたって燃料の補給を必要としないため、これらの制約がなく、長寿命でメンテナンスフリー、低騒音等の特徴を持ち、小型有人潜水船、無人潜水船、海底観測基地等のための最も有望な動力源と考えられる。

しかしながら、R I発電システムについては、小出力のものが宇宙用電源として一部利用されているのみであり、深海への適用例はない。潜水調査船等への適用も含め、海中動力源としてさまざまな技術的検討を加える必要がある。

本調査研究は、これらを踏まえR I発電システムを小型有人潜水船等に適用するために必要な調査研究を、平成2年度から3ヶ年計画で実施したものであり、過去3ヶ年に亘る調査研究成果を取りまとめたものである。

① 海洋に於ける新動力源の用途調査

R Iを熱源とした熱電気発電システム、熱電子発電システム、熱機関発電システムについて、現状の技術開発状況を内外の文献により調査、取りまとめた。

② R I熱源の検討

R I熱源の使用実績、核種候補の抽出・比較検討、絞り込み等を行った。

③ R Iの使用に対する安全性確保のための検討

適用法規、遮蔽設計の検討等を具体的に対象（潜水調査船等）について実施すると共に、安全性の検討を行った。

④ R I発電システムの検討・設計

熱電気発電システム、熱電子発電システム、熱機関発電システムについて搭載船舶（小型有人潜水船、無索無人潜水船、大型有人潜水船）を想定して概念設計を実施した。

⑤ 要素実験

直接発電である熱電気発電システム、熱電子発電システムについては、基礎試験及び小出力（数10W）発電システムを設計・製作、性能試験等を実施した。

⑥ R I発電システムを用いた潜水調査船等の概念設計

R I発電システムを搭載することを前提として、小型有人潜水船、無索無人潜水船、大型有人潜水船の概念設計を実施した。

⑦ 総合評価

過去3ヶ年に亘り実施してきた調査、研究成果に基づき、R Iを熱源とした各発電システムの潜水調査船等への適用について総合評価を行うとともに、今後の研究開発課題についてまとめた。

1. 海洋における新動力源の用途調査

海洋における新動力源としてR I（ラジオアイソトープ）を熱源とした発電システムについての各国の開発の状況及び海洋への応用の現状、動向の調査を文献調査により行った。R I発電システムとしては、熱電気発電システム、熱電子発電システム、熱機関発電システムが考えられ、この3方式の発電システムについて実施した。

なお調査範囲として原子炉を熱源とした発電システムを含めるとともに、その用途として実績の多い宇宙炉も調査の範囲に含めた。

1) R I 発電システムの基本原理

上記に示した3方式（熱電気、熱電子、熱機関）の発電システムの基本原理と、その特徴を表1.1に示す。

2) R I 発電システムの開発事例

原子炉を熱源とした発電システムは、宇宙分野において研究されているが、R Iを熱源とした発電システムは開発段階にあるものが多く、熱電子発電システムにおいては、その実用例がない。

しかしながら、熱電気発電システム及び熱機関発電システムでは、宇宙用SNA P型の実例があるとともに、海洋用としても熱電気にSMA P-7及び旧ソ連のベータがあり、熱機関としても、60kWe～2.5kWeの実例があり、現在1～10kWeの開発を目指しているようである。

また、R I熱源に支障がなければ、数10kWe、数100kWeも可能であるとしている。R I発電システムの用途の現状を表1.2、及び表1.3に示す。

3) R I 発電システムの海洋における応用分野

R I発電システムの種類及び特徴、及び用途の現状等を総合的に考えると、応用分野は以下のように考察される。熱電気発電システム及び熱電子発電システムの特徴は、直接発電であり、駆動部がなく構造が比較的シンプルであり、長期間メンテナンスフリーが可能である点など、海洋における適用性が十分であると考えられる。特に深海における用途の可能性が大きいと考えられる。一方間接発電の熱機関発電システムは、成熟技術であり、出力範囲が広く、比較的大きな出力の用途に適するものと考えられる。

各R I発電システムの出力規模等を勘案して、R I発電システムの海洋における応用分野を表1.4に示す。

表1.1 RI発電システム基本原理

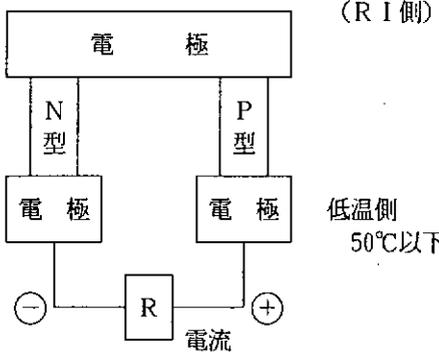
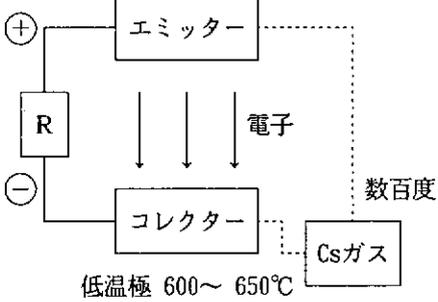
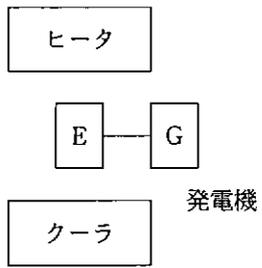
	原 理	特 徴
熱電気発電システム	<p style="text-align: center;">高温側 600℃以上 (RI側)</p>  <p style="text-align: center;">低温側 50℃以下</p> <p>2種類の半導体を接合し、温度差を与えることにより電圧が生じる効果を利用した直接発電</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○駆動部がなく信頼性大 ○低(無)騒音・無振動 ○構造簡単、小型、軽量 ○長寿命、メンテナンスフリー ○比較的低温の熱源で使用可能
熱電子発電システム	<p style="text-align: center;">高温極 (RI側) 1,300~1,500℃</p>  <p style="text-align: center;">低温極 600~650℃</p> <p>高温エミッターから放射する熱電子を低温コレクターで受取ることにより電力をとり出す直接発電</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○高温動作で変換効率や出力密度が大きい ○可動部分を持たない静止型 ○小型・軽量 ○構造簡単、保守が容易 ○耐放射線特性がすぐれ、特に原子炉に適合 ○放熱温度が高い ○熱源が多様
熱機関発電システム	<p style="text-align: center;">高温側 (RI側)</p>  <p style="text-align: center;">発電機</p> <p>高温・低温の温度差によりエンジンを駆動した発電機により電気を取り出す間接発電</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○米国においては成熟した技術 ○広範な出力範囲における適用が可能 ○効率が低い(特に大きな出力に対して) ○宇宙用として長寿命の開発例あり ○他のシステムに比べ可動部を持つ ○サイクル間の優劣: 効率の高さから順にスターリング、ブレイトン、ランキン

表 1.2 R I 発電システムの応用例、開発事例

種 類	R I 等発電システムの応用例、開発事例	
	熱 源 : R I	熱 源 : 原 子 炉
熱電気 発電	<p>以下が実用化されている</p> <ul style="list-style-type: none"> ●宇宙用電源：SNAP-3 (米) ●海洋用電源：SNAP-7A ~7E (米) 7~60We SNAP-21 (3500m用) 10~60We ベータシリーズ (ソ) 5~12We (科学技術・防衛目的の潜水装置等に 利用、詳細不明) 	<p>以下の宇宙用電源が実用化：</p> <p>直接式 ロマシュカ (ソ) (人工衛星用) 間接式 SNAP-10 (米)</p> <p>以下が開発、計画中：</p> <p>SP-100計画、MMW計画 (米) 出力数 100kw~数100MWe ソ連：数100kWe 熱発電器の構想</p>
熱電子 発電	<p>使用実績はないが、以下の設計、試作例がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●宇宙用電源： <ul style="list-style-type: none"> SNAP-13 (米) 12~ 100We Heat pipe RTIG (米) 100We 5000W System (米) 5000We Multicell Gene. (米) 200We ISOMITE (米) ~0.43We (医学・生態学用を含む) 	<p>以下が実用化：(ソ連)のみ (ソ連) 炉内型熱電子炉トパーズ トパーズ I 5~10kWe × 1000hr トパーズ II 同上 × 1500hr トパーズ III 5~7kWe × 3000hr</p> <p>一方、米国で以下が開発研究中： (米) SNAP計画及びSP-100計画の1開発 選択肢 (NaK 冷却高速炉炉内熱電子発電 システム) 出力10~ 100kWe、寿命7~ 10年。また、ヒートパイプによる炉外型 熱電子炉研究進行中、出力 400kWe、 寿命10年以上</p>
熱機関 発電	<p>使用実績はないが、以下の60We~数kWe の ものが宇宙用、深海用として研究開発中、 あるいは製品化されている。</p> <p>1) スターリングサイクル： S I P S 出力 1.1kWe 寿命10年</p> <p>2) プレイトンサイクル： B I P S 出力 1.3kWe 寿命5年 D I P S 出力 1.0~6kWe 寿命5-10年</p> <p>3) ランキンサイクル： D I P S 出力 1.3~6kWe 寿命5-10年 O R C E P S 出力 1~1.5kWe 寿命10年</p>	<p>使用実績はないが、以下が研究開発され 陸上試験を終了している。用途は全て宇宙 用である。SP-100、C S T I は開発継続中。</p> <p>1) スターリングサイクル： S P - 100 出力 100kWe 寿命10年 C S T I 出力数 100kWe 寿命10年</p> <p>2) プレイトンサイクル： 710 GAS REACTOR 出力 200kWe A M C R 出力 300kWe S P - 100 出力 100kWe 寿命10年 Advanced Hybrid Reactor 出力 5kWe</p> <p>3) ランキンサイクル： SNAP-2 出力 3kWe 寿命 2-7年 SNAP-8 出力30~60kWe 寿命 2-7年 Medium Power Reactor Exp. 140kWe SNAP-50 出力 300~1200kWe A M C R 出力 300kWe</p>

表1.3 海中、海上用R I発電システム (SNAP等) の開発事例

※ 装 置	製造者	価 格 ド ル	出 力		寿 命 (年)	重 量 (遮蔽を含む ポンド)	用途又は状況
			W (電気)	W (熱)			
SNAP 7A and 7C	Martin	75,000	10	256	10 (同位元素) ≥ 2 (熱電素子)	~ 1,700	航海洋ブイ(7A) 及び気象測定用(7C)
LCG-25B	Martin	63,230 (5年保障)	25	600	5	3,000	現在海洋研究に使用 されている。
SNAP 7B and 7D	Martin	120,000	60	1,440	10	4,600	固定式航路灯(7B) 地上気象測定用(7D)
SNAP 7E	Martin	75-100,000	7	198	2	6,000 (加圧容器及び 遮蔽を含む)	中部大西洋の水深 1,500ftのところで 運転中。
SNAP 21	Minn. Mining		10-60	~280-1,600	5-10	515-10W(e)	1964年に計画された。

※各装置はエネルギー源としてSr⁹⁰を使用した。

(海洋工学ハンドブック)

Martin Marietta CorpのMartin Company Divから与えられた。

表1.4 R I発電システムの海洋における応用分野

種 類	海 洋 に お け る 応 用 分 野
R I熱電気発電システム	数kWe 以下の小出力、長寿命動力源： 小型有人/無人潜水船用動力源 深海における観測機器用電源
R I熱電子発電システム	数kWe 以下の小出力、長寿命動力源： 小型有人/無人潜水船用動力源 深海における観測機器用電源
R I熱機関発電システム	比較的大きな出力数 10kWe以上の長寿命動力源： 中小型潜水船 (潜水作業船等) 用動力源 海中動力ステーション用電源

2 R I 熱源の検討

2.1 R I 熱源の使用実績

R I 熱源として最も利用されている核種は、Pu-238、その次にSr-90があげられる。これらの核種が熱源として利用される理由は以下による。

- ① 核分裂性でないこと
- ② ガンマ線レベルが低いこと
- ③ 半減期が長いこと
- ④ 出力密度が高いこと
- ⑤ 化学的に安定なこと
- ⑥ 入手が容易なこと

1) Pu-238

Pu-238 は宇宙船用放射性同位体熱電気発電 (RTG) の熱源として利用されている。開発の初期はPu金属あるいはPCM (Pulutonia Molybdenum Cermet)の形態で、1975年以降はPuO₂ペレットの形態で用いられている。

以下に1980年～1983年にかけて製作された汎用熱源 (GPHS) 及び1978年から開発が始まった軽量型放射性同位体熱源ユニット (LWRHU) について紹介する。

a. GPHS

本熱源は、Los Alamos Scientific Laboratoryで開発された。

GPHSは4つのカプセルに入ったPu-238ペレットにより構成される。カプセルに入ったPu-238ペレットは2つつつ対となり、シリンダ状のFineweave-Pierced Fabric (FWPF) グラファイト衝突殻に収納され、そのまわりをCarbon-bonded carbon-fiber (CBCF) 絶縁物で覆われている。2つのFWPF衝突殻は直方体のFWPFグラファイト大気突入殻中に収納されている。

それぞれの寸法等を以下に示す。

(a) Pu-238 ペレット

材質 : PuO₂
高さ : 27.7mm、直径 : 27.7mmφ
重量 : 150g
熱出力 : 62.5W (t)

(b) ペレットカプセル

材質 : DOP-26イリジウム合金
高さ : 29.4mm、直径 : 29mmφ、厚さ : 0.64mm

なお、カプセルの一端に焼結イリジウム粉のベントを設け、崩壊による生成Heを逃がす。

(c) FWPFグラファイト衝突殻

材質 : FWPFグラファイト
長さ : 78.7mm、直径 : 39.4mmφ

(d) FWP F グラファイト大気突入殻

材 質 : FWP F グラファイト

寸 法 : 98mm×94mm×54mm

b. LWRHU

本熱源は、Los Alamos Scientific Laboratoryで開発された。

それぞれの寸法等を以下に示す。

(a) Pu-238 ペレット

材 質 : PuO₂

高 さ : 9.35mm、直 径 : 6.25mmφ

熱出力 : 1Wth

(b) ペレット格納カプセル

材 質 : Pt-30Rh

高 さ : 12.6mm、直 径 : 8.65mmφ

なお、カプセルの下端にフリット状のベントを設け、崩壊による生成Heを逃がす。

(c) グラファイト絶縁体

ペレット格納カプセルのまわりを覆っている。

グラファイト絶縁体は3つの同心円チューブ及び端部キャップより構成される。

(d) 大気突入殻

グラファイト絶縁体のまわりを覆っている。

材 質 : FWP F (Fineweave-Pierced Fabric 3-D carbon/carbon composite)

(e) 全 体

高 さ : 32mm、直 径 : 26mmφ

重 量 : 40g

2) Sr-90

Sr-90は、高出力の熱電変換発電用熱源としての開発、あるいは寒冷遠隔基地の熱源としての検討がなされている。

a. 熱電変換発電用熱源

高出力熱電変換発電 (500We) 用熱源として、Sr-90熱源がOak Ridge National Laboratory で開発されている。寸法等は以下のとおり。

熱 出 力 : $3 \times 2500\text{Wth} = 7500\text{Wth}$ ($1.12 \times 10^6\text{Cl}$)

Sr-90の形態 : 90SrF₂ (温度 800°C、圧力 5000PSIで加圧し、ペレット状になっている。)

熱 源 寸 法 : 長さ : 21.04in、直径 : 5.910inの円柱

b. 寒冷遠隔基地用熱源

寒冷遠隔基地用熱源として、放射性同位体を用いることについて、技術的、経済的なフィジビリティスタディがなされた。その結果、熱源としてはSr-90が最も適していると結論が出されている。

3) RI熱源の海中動力源への応用

RI熱源としての核種はPu-238、Sr-90が考えられる。RI熱源の被覆としては、 $^{238}\text{PuO}_2$ 熱源に対して、DOP-26イリジウム合金あるいはPt-30Rhが使用されているが、これは宇宙船用であり、海中動力源用としての要件(ex. 耐水圧、耐海水腐食(事故時))を満足するか、検討する必要がある。また宇宙船用はRI熱源被覆のまわりを大気突入時の高温及び地面衝突に耐えるようにFWPFグラファイト殻で覆われているが、海中動力源としては不要であろう。

2.2 RI核種候補

アイソトープ候補を表2.1にまとめた。

前述の実績の理由で示される観点から、最終的には ^{90}Sr と ^{238}Pu を有望熱源として選定した。

1) ^{90}Sr

^{90}Sr は核分裂生成物の中でも最も収率の高い核種の一つであり、LWR1基当りの年間取り出し燃料を処理すると約22kg抽出できる。比較的抽出しやすく、標準的熱源アイソトープとしての使用実績も豊富である。

発熱密度は単位重量当りでは、 ^{238}Pu に劣らず高出力密度であるが、単位体積当りの出力密度は小さいので、容積的には大きくなる。崩壊は100%β崩壊であり、有害なγ線や中性子線は出さないが、原子番号の大きな物質に当たると制動放射(X線)があり、遮蔽が必要となる。

^{90}Sr の製造法としてはストロンチウム-セシウム群から次のいずれかの方法で分離される。

- (a) 溶媒抽出法
- (b) 陽イオン交換樹脂法
- (c) 無機イオン交換体法
- (d) 硫酸塩沈殿法

熱源としては SrF_2 とし、ふっ化ジルコニウムとともに加工して成型している。なお前述の遮蔽の問題もあり、本研究では制動放射を阻止する物質としてBNを選定、 SrF_2 をサブ・ミクロンオーダの微細粒子とし、窒化ボロン(BN)の中に混ぜて焼き固める考えでシステムの概念設計を実施した。

2) ^{238}Pu

^{238}Pu は半減期が長く、発熱密度が大きいなど基本的条件から考えて最も適した熱源である。諸外国での標準的熱源アイソトープとしての使用実績も多い。収率及び抽出の容易さの点では、 ^{90}Sr には劣るが、LWR1基当りの年間取り出し燃料を処理すると約8.1kg抽出できる。

しかしながら、 ^{238}Pu は核燃料物質であるので管理がきわめて厳しく、IAEAの査察対象になっている。

^{238}Pu の製造法としては、アクチノイド群に含まれる ^{237}Np を大量に分離し、それをターゲットとして ^{238}Pu を製造している。ターゲットはNpの酸化物とアルミニウム粉末混合ペレットをアルミニウムの鞘で覆ったものである。年間数kg生産している研究所がある。

表2.1 熱源用アイソトープ核種一覽表

熱源核種	半減期 (年)	崩壊エネルギー (MeV)	型式 (一例)	密度 (g/cm ³)	重量当り発熱 密度 (W/g)	体積当り発熱 密度 (W/cc)	主な生成反応	問題 点
²³⁸ Pu	86	5.5 (α)	²³⁸ PuO ₂	9.51	0.40	3.77	²³⁷ Np (n, γ) ²³⁸ Np β	●標準的熱源アイソトープ ●核燃料の一部
⁹⁰ Sr	28	1.14 (β)	⁹⁰ SrF ₂	3.05	0.54	1.66	核分裂生成物	●標準的熱源アイソトープ ●発熱量がやや少ない
⁴² Ar	33	~1 (β)	希ガス	—	—	—	⁴⁰ Ar (n, γ) ⁴¹ Ar (n, γ)	●希ガスの為、発熱密度を高くできない
⁶³ Ni	92	0.067(β) (Max)	—	—	—	—	⁶³ Ni (n, γ)	●発熱量僅少
⁸⁵ Kr	10.76	0.067(β)	希ガス	—	—	—	核分裂生成物	●希ガスの為、発熱密度を高くできない
¹⁰⁸ Ag	127	0.065(β) 1.61 (γ)	¹⁰⁸ Ag	10.50	0.025	0.26	¹⁰⁷ Ag (n, γ)	●発熱量僅少 ●γ線を放射
¹²¹ Sn	76	0.42 (β)	SnO ₂	6.95	0.078	0.54	核分裂生成物	●発熱密度が低い
¹³⁷ Cs	30.0	0.19 (β)	CsCl	3.98	0.070	0.32	核分裂生成物	●発熱量が少ない
¹⁴⁶ Pm	17.7	noβ	—	—	—	—	¹⁴⁴ Sm (n, γ) ¹⁴⁶ Sm BC	●発熱ほとんどなし
¹⁵¹ Sm	87	0.076(β)	—	—	—	—	核分裂生成物	●発熱量僅少
¹⁵³ Eu	13.3	0.23 (β)	Eu ₂ O ₃	7.42	0.21	1.56	¹⁵¹ Eu (n, γ)	●原料物質 (Eu) が稀少
¹⁵⁷ Eu	150	noβ	—	—	—	—	¹⁵⁶ Dy (n, γ) ¹⁵⁷ Dy BC	●発熱ほとんどなし
²¹⁰ Pb	22.3	0.026(β)	—	—	—	—	²²⁶ Raの多段階崩壊 (ウラン系列)	●発熱量僅少
²⁰⁷ Bi	38	noβ	—	—	—	—	Pb (d, xn) ²¹¹ At α	●発熱ほとんどなし
²⁰⁹ Po	102	4.881(α)	金属	9.32	0.49	4.53	²⁰⁹ Bi (d, 2n)	●生成反応が特殊 ●化学的に不安定
²²⁷ Ac	21.6	0.11 (β)	—	—	—	—	²²⁶ Ra (n, γ) ²²⁷ Ra β	●発熱量が少ない
²³² U	72	5.31 (α)	²³² UO ₂	10.9	0.58	6.32	²³¹ Pa (n, γ) ²³² Pa β	●使用済燃料中の収率僅か
²⁴¹ Pu	14.4	0.0201 (β)	—	—	—	—	²⁴⁰ P (n, γ)	●発熱量僅少
²⁴¹ Am	432	5.40 (α)	²⁴¹ Am ₂ O ₃	9.4	0.10	0.95	²⁴¹ Pu β	●発熱量が少ない ●γ線を放射
²⁴² Am	152	noβ	—	—	—	—	²⁴¹ Am (n, γ)	●発熱ほとんどなし
²⁴³ Cm	32	4.88 (α)	²⁴³ Cm ₂ O ₃	9.4	1.21	11.4	²⁴² Cm (n, γ)	●使用実績なし ● ²⁴⁴ Cmとの分離困難
²⁴⁴ Cm	17.6	5.80	²⁴⁴ Cm ₂ O ₃	9.4	2.61	21.5	²⁴³ Am (n, γ) ²⁴⁴ Am β	●自発核分裂により中性子発生 ●使用実績不足

3. RIの使用に対する安全性確保のための検討

本項では適用法規の調査、遮蔽設計の検討、通常時、事故時の安全性の検討等を行ったが、次章以下の概念設計に密接にかかわる遮蔽設計の検討結果についてのみ示すことにする。

1) 遮蔽設計の適用法規

遮蔽設計は、船内の居住場所の放射線線量基準を規定している唯一の国内法規である運輸省令「危険物船舶輸送及び貯蔵規則」（船舶安全法）を適用法規とする。国際的にはIMO（国際海事機構）の原子力商船安全基準（案）があるが、日本は未だ批准しておらず、対象外とした。また、米国の宇宙用RTGの設計例の「B型放射性物質輸送規則基準」を参考に示した。

(1) 「危険物船舶輸送及び貯蔵規則」の線量率基準

- ① 住居場所その他、人が通常使用する場所における最大線量率 : $1.8 \times 10^{-6} \text{Sv/hr}$

かつ、年間被曝線量が1 mSvを超えないこと。

ただし、運輸大臣が適当と認めた場合にあっては年間5 mSv

(2) B型放射性物質輸送容器の線量基準

- ① 装置表面で2 mSv/hr以下

- ② 表面から1 mの位置で $1.0 \times 10^{-2} \text{mSv/hr}$ 以下

2) 深海潜水調査船の遮蔽の考え方

住居場所における最大線量率： $1.8 \times 10^{-6} \text{Sv/hr}$ でかつ年間許容量を1 mSvとした場合でも、年間61回は潜水可能となる。又、特別許可の5 mSv（年間）とすると、年間308回、即ちほとんど毎日潜航可能となる（1潜航時間：9 hrとして）

3) 大型有人潜水船（SAGA-1ベース）の場合

2)と同様な考えで検討すると年間数回ということになり、交替要員が必要となる。しかし年間許容量を5 mSvとすると年間12回以上となり、運航に支障がないことになる。（1潜航時間：9日（216hr））

4) 無索無人潜水船の遮蔽の考え方

無人のため運転時の人に対する遮蔽は当然ながら不要であるが、前記の潜水船と同様に、海上、陸上あるいは母船における毎回の通常保守点検作業の必要性を考慮すると、通常の放射線管理の範囲内で保守点検作業を可能とするための遮蔽が必要である。

4. RI 発電システムの検討・設計

本項では、熱電気、熱電子、熱機関発電システムについて各々概念設計を実施した。

具体的なシステム規模、容量を検討するためには、これら発電システムを搭載する潜水船等を想定する必要がある。

ここでは熱電気発電システムについては“しんかい6500”を想定し、定格出力を8kWe程度とし、熱電子発電システムについては無索無人機でフランスのEPAULARDをベースとして7kWe程度とし、又熱機関発電システムについては、大型有人潜水船としてダイバー支援有人潜水作業船SAGA-1をベースとして約60kWeと設定して概念設計を行った。

各発電システム共、主要諸元と概念設計図を示すこととする。

4.1 熱電気発電システムの概念設計

アイソトープを熱源とし、熱電半導体で熱を直接電気に変換して海中での動力源として使用する「熱電気発電システム」の概念設計を実施した。

検討対象として、燃料体、熱電変換部、容器等の構造物、遮蔽構造物、発電性能、保管方法等について実施した。

表4.1-1に主要目を、図4.1-1、図4.1-2に概念図を示す。

4.2 熱電子発電システムの概念設計

放射性同位元素の放射性崩壊熱を熱源とし、高温側のエミッタ電極から放出される熱電子を低温側のコレクタ電極で受け取るにより、外部負荷に直接電気出力を取り出すことができる「熱電子発電システム」の概念設計を実施した。同軸円筒型熱電子素子で構成するIn Core Type及びHeat Pipe Typeの2型式についての検討・設計を行った。RI熱源機種はPu-238 (PuO₂)及びSr-90 (SrTiO₃)である。細部検討対象として、RI熱源部、熱電子変換部、発電性能、コレクタの冷却、排熱法等について実施した。

表4.2-1に主要諸元を、図4.2-1に概念設計図(Heat Pipe Type PuO₂)を示す。

4.3 熱機関発電システムの概念設計

間接発電である熱機関発電システムについては、スターリングサイクル、ブレイトンサイクル、ランキンサイクルの3つの方式が考えられるが、各々モデル機を比較して重量面、効率面等からスターリングサイクルを選定し、概念設計を実施した。

検討対象として、RI熱源部の構造設計、ヒータ・再生器・クーラー、高温側及び低温側ヒートパイプ、耐圧容器と冷却シリンダー及び非常用ヒートパイプ熱交換器等について実施した。

表4.3-1に主要設計諸元を、図4.3-1に全体概念図を示した。

表4.1-1 RTGの主要目

項 目		仕 様
設計寿命	発電性能 構造強度	10年 30年
構 成	群 数 基 数	1群 1基(4ユニット)
燃 料 部	材 料 溶融温度 形 状 発 熱 量 重 量	(燃料) $^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$ 1190°C サブミクロン微粒子のホットプレス焼結体 116kWt 約 784kg
熱源容器	材 質 個 数 形 状 (1個当り) 設計圧力 設計温度 重 量	耐熱・耐食性合金(圧縮タングステン) 4個/システム 非耐圧型中空矩形容器 寸 法 … 400×400×600 ^h ×30 t ブラダ … 山径90mmのベローズ 断熱材 … 多孔質アルミナ ±20kg/cm ² 1000°C 約2600kg
熱電変換部	材 質 形 状 最大電気出力 最大変換効率 重 量	PbTe(高温用)/BiTe(低温用) 2段積層タイプ(カスケードタイプ) 10kWe(初期)、8kWe(10年後) 約8% 約200kg
RTG容器	材 質 形 状 設計温度 重 量	耐食性合金 非耐圧型多孔容器 寸 法 … 1250×1250×950 ^h ×4 t 100°C以下 約395kg
電気系統	重 量	5kg以下(詳細未定)
総重量 単位重量当りの性能		約3984kg 約2.5We/kg

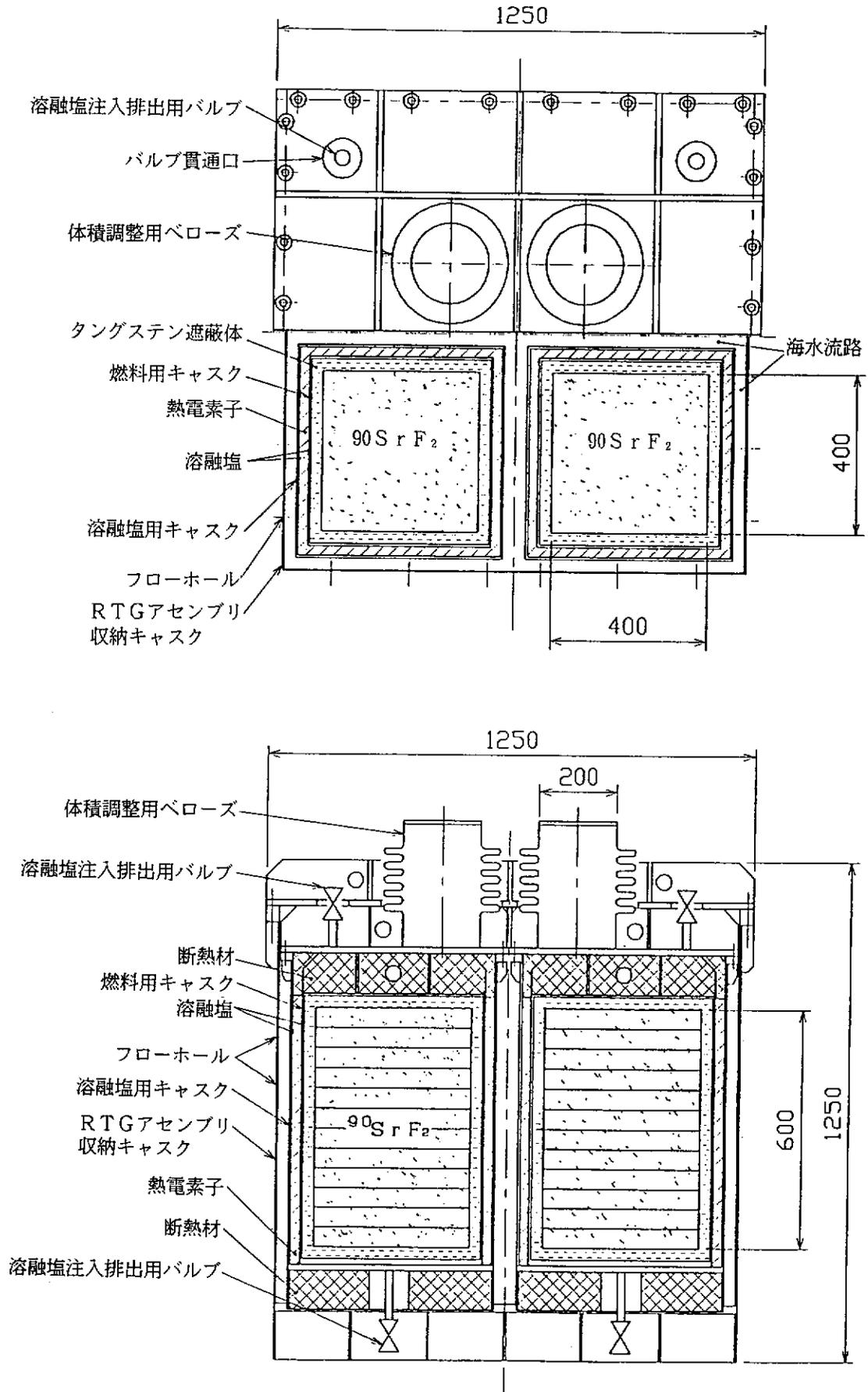


図4.1-1 海中用アイソトープ電池の概念図

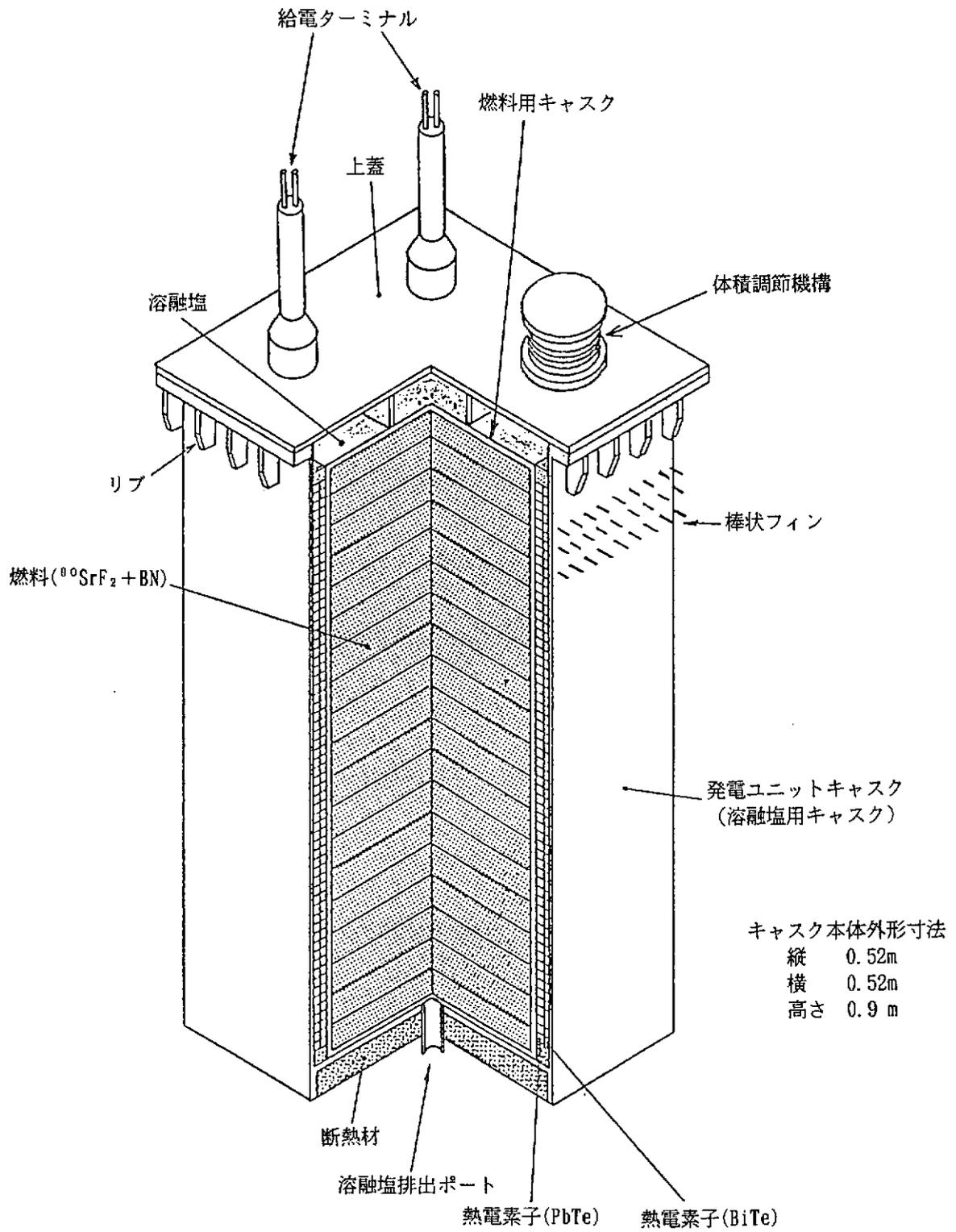


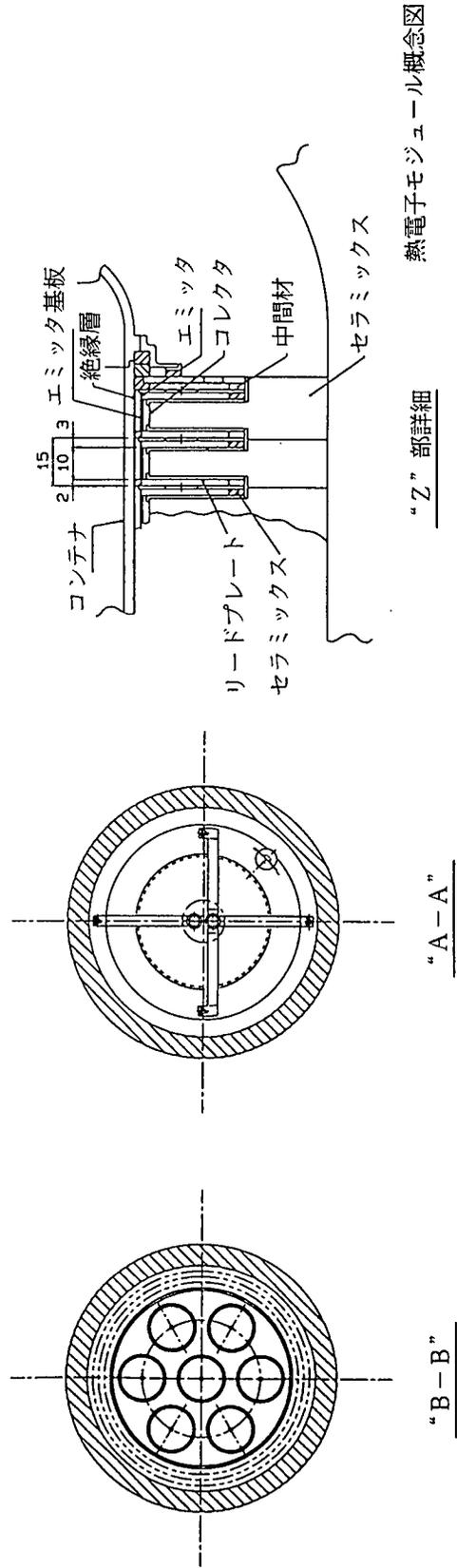
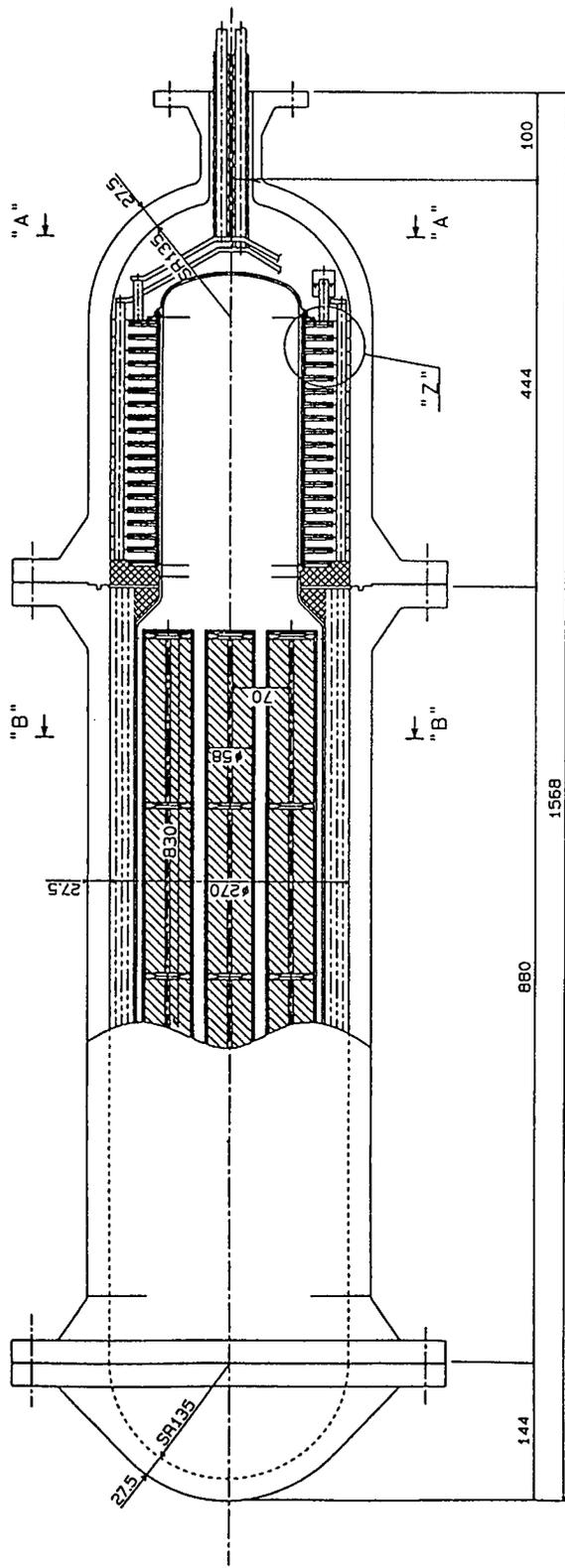
図4.1-2 発電ユニット概念図

表4.2-1 RTIGの主要諸元

熱電子素子型式	In-Core Type	Heat Pipe Type	Heat Pipe Type
RI核種	プルトニウム	プルトニウム	ストロンチウム
燃料形態	PuO ₂	PuO ₂	SrTiO ₃
発熱体直径 mm	88	50	62
燃料体本数 本	—	7	19
発熱体熱出力 Wt	22,300 * ¹	37,200 * ¹	26,600 * ¹
発熱体中心温度 °C	2,270	1,850	1,650
発熱体表面温度 °C	1,300	1,535	1,532
エミッタ温度 °C	1,300	1,500	1,500
コレクタ温度 °C	650	600	600
素子の出力密度 We/cm ²	0.5	4.4	4.4
発電出力 We	1,340 * ²	3,500 * ²	2,300 * ²
変換効率 %	6.0	11.5	11.5
耐圧容器外径 mm	184	325 (325) * ³	708 (306) * ³
耐圧容器全長 mm	1,690	1,568	1,700
耐圧容器表面温度 °C	45	100	100
発電器重量 kg	270	450	850
遮蔽体重量 kg	—	—	1,750
搭載発電器数 本	5	2	3
総発電出力 We	6,700	7,000	7,000
総重量 kg	1,400	900	8,550

* 1、* 2 は夫々寿命末期の熱出力及び発電出力を示す。

* 3 Heat Pipe Type RTIG の耐圧容器はRI熱源部を示し、() 内寸法は発電部を示す。



熱電子モジュール概念図

“Z”部詳細

“A-A”

“B-B”

図4.2-1 Heat Pipe Type RTIGの概念設計図 (Pu-238)

表4.3-3 大型有人潜水船用スターリングサイクル発電システムの主要設計諸元

発電機	出力	P_e (kWe)	30	ヒータ	材料		Nb-1Zr-0.1C	
	温度比率	τ (-)	2.9		伝熱熱量	Q_H (kW)	2.8	
RI熱源と遮蔽体	熱効率	η_t (%)	36.2	クセラ	内径	D_{Hi} (mm)	23.0	
	高温側温度	T_{EH} (°C)	850		ガス通路寸法	- (mm)	2.5×5.5×24個	
重量	低温側温度	T_{EL} (°C)	114	冷却システム	放射側熱伝達率	α_H (W/m ² °C)	2,577	
	外径	D_E (mm)	506		ガス側温度差	ΔT_{HG} (°C)	16.8	
	高さ	H_E (mm)	1,070		壁の熱伝導率	k_{HW} (W/m°C)	41.9	
	RI燃料材料		⁹⁰ SrF ₂ +BN		壁の温度差	ΔT_{HW} (°C)	26.2	
	RI燃料径	D_R (mm)	278		ウィック熱伝導率	k_{HWi} (W/m°C)	45.0	
	RI燃料長さ	L_R (mm)	800		ウィックの温度差	ΔT_{HWi} (°C)	9.4	
	RI燃料本数	N_R (-)	7		総温度差	ΔT_H (°C)	52.4	
	熱出力	Q_R (kW)	112		非常用ヒートパイプ	材料	(-)	TB 49 Pd
	加ヒル等の材料		Nb-1Zr-0.1C			伝熱熱量	Q_c (kW)	2.05
	ウィックの種類		金網(40メッシュ)		耐圧容器	内径	D_{Ci} (mm)	33.0
熱源容器外径	D_{RC} (mm)	1,210	ガス通路寸法	- (mm)		2.5×5.5×24個		
熱源容器高さ	H_{RC} (mm)	1,010	耐圧容器	放射側熱伝達率	α_c (W/m ² °C)	2,213		
断熱材材料		Saffil		ガス側温度差	ΔT_{CG} (°C)	14.3		
断熱材厚み	t_{RA} (mm)	150	耐圧容器	壁の熱伝導率	k_{cw} (W/m°C)	16.0		
遮蔽体材料		タングステン ($\gamma=17$)		壁の温度差	ΔT_{cw} (°C)	14.4		
遮蔽体厚み	t_v/t_H (mm)	27/36	耐圧容器	ウィック熱伝導率	k_{cwi} (W/m°C)	79.5		
モジュール型ヒートパイプ熱交換器本数 (-)		40		ウィックの温度差	ΔT_{cwi} (°C)	0.6		
高温側ヒートパイプ	熱輸送量	Q_{HH} (kW)	2.8	総温度差	ΔT_c (°C)	29.3		
	ヒートパイプ型式		焼結合金・ 7-テリ-複合型 ソジウム (Na)	●高温側・低温側ヒートパイプ：機関と同一 ●熱交換器⇒長さ：200mm、隙間：1.5mm、充填材：He				
低温側ヒートパイプ	作動流体		Nb-1Zr-0.1C	耐圧容器	材料	(-)	STB 510	
	蒸気温度	T_{HV} (°C)	850~950		設計圧力	P_{cc} (MPa)	6.0	
重量	パイプ材料			耐圧容器	形状		円筒殻	
	パイプ内径	D_{HHe} (mm)	23.0		総放熱量	Q_{cc} (kW)	82	
重量	パイプ有効長さ	L_{HEF} (mm)	300	耐圧容器	内径	D_{cc} (mm)	50	
	7-テリ-の内径	D_{A1} (mm)	1.0		板厚	t_{cc} (mm)	3.4	
重量	パイプの本数	N_A (-)	2	耐圧容器	全長	L_{cc} (mm)	200	
	熱輸送量	Q_{LN} (kW)	2.05		本数	N_{cc} (-)	55	
重量	ヒートパイプ型式		円周金網複合型	耐圧容器	熱伝達率	a_{cc} (W/m ² °C)	850	
	作動流体		水		壁の熱伝導率	k_{cc} (W/m°C)	54	
重量	蒸気温度	T_{LV} (°C)	20~114	耐圧容器	外面温度	T_{cco} (°C)	82.0	
	パイプ材料		TTH 49 Pd		内面温度	T_{cci} (°C)	84.9	
重量	パイプ内径	D_{LHo} (mm)	33.0	耐圧容器	材料	(-)	超高張力鋼	
	パイプ有効長さ	L_{LEF} (mm)	550		設計圧力	P_{pv} (MPa)	6.0	
重量	ウィックの材料		銅 (C16200)	耐圧容器	耐圧容器形状		円筒殻	
	第1ウィック		金網 (30メッシュ)		外径	D_{pv} (mm)	1,800	
重量	第1ウィック		金網 (300メッシュ)	耐圧容器	板厚	t_{pv} (mm)	25	
	熱源重量	W_R (kg)	2,760		上側鏡板半径	R_{UPVi} (mm)	870	
重量	機関重量	W_E (kg)	240	耐圧容器	板厚	t_{UPV} (mm)	11	
	ヒートパイプ重量	W_H (kg)	50		下側鏡板半径	R_{LPVi} (mm)	900	
重量	遮蔽体重量	W_S (kg)	7,830	耐圧容器	板厚	t_{LPV} (mm)	11	
	耐圧容器重量	W_{PV} (kg)	3,770		全長	L_{PV} (mm)	3,300	
重量	全体重量	W (kg)	14,650					

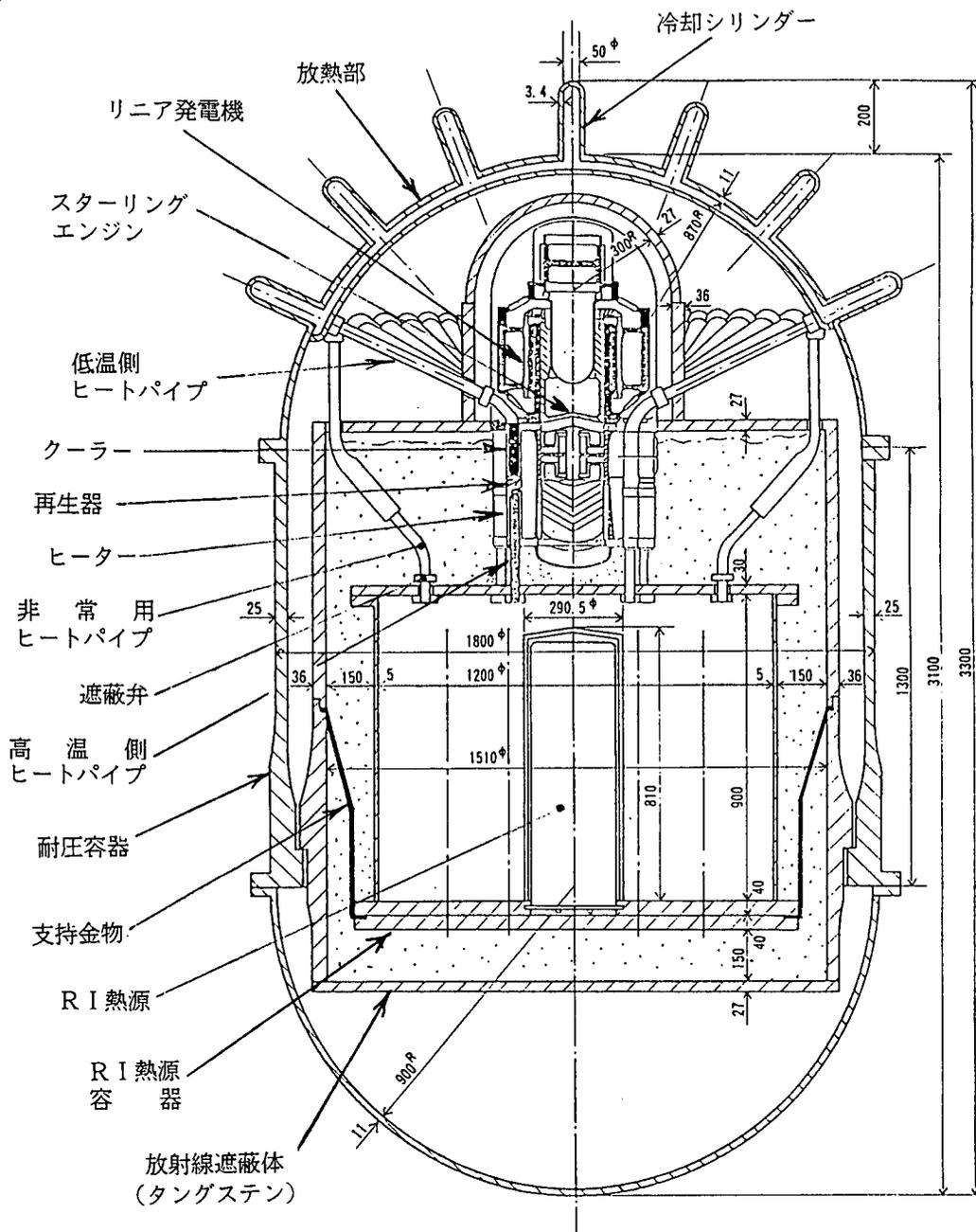


図4.3-15 大型有人潜水船用スターリングサイクル発電システムの全体概念図

5. 熱電気発電システムの要素試験

熱電気発電システムの要素試験はモジュール単体性能試験と部分ユニット性能試験について実施した。

モジュール単体は Pb-Te/Bi-Te 2 段カスケード型熱電発電モジュールであり高温側素子数 (Pb-Te)16ヶ、低温側素子数(Bi-Te)14ヶで構成され出力規模は 2 Weである。

モジュール単体については平成 2 年度に試作、平成 3 年度に性能試験（電気出力、電気抵抗、温度分布）を実施した。

部分ユニットについては平成 3 年度に試作、平成 4 年度に性能試験を実施した。

本報告では、部分ユニット試作、性能試験について示すこととなる。

1) 部分ユニット試作

試作品の基本仕様は以下のとおりである。

- 熱 源 : 電気ヒータ
- モジュール数 : 24個 (4個×6ブロック)
- 貫流熱量 : 21W/モジュール
- 冷却方式 : 冷却水循環
- 温度条件 : モジュール高温側 600℃
モジュール低温側 50℃
- 目標出力 : 45W

図 5. 1 に部分ユニット全体組立図を示す。又図 5. 2 に各ブロックの詳細組立図を示す。

本装置は、熱電発電モジュールの両端に温度差を与え、各ブロックでの発生電圧、電気抵抗及び温度を測定することが可能である。

作動テストとして昇温試験を実施し、ヒータ計画温度 (700℃) を達成することを確認すると共に、ヒータ温度分布のバラツキ (± 8℃程度の設定制度) 及び昇温による装置の健全性を確認した。

2) 部分ユニット性能試験

部分ユニットの性能評価試験の測定項目は、電気出力、電気抵抗、温度分布等であり、発電効率についても評価した。

3) 試験結果

試験は部分ユニットを組立後、冷却水を通水し加熱用ヒータに通電し昇温を行うことにより実施した。測定項目は、昇温過程において各ブロックで発生する電圧及び各ブロックでの電気抵抗及び部分ユニット内温度である。

以下に試験結果を示す。

図 5. 3 は代表値として、1つのブロックにおけるブロックの熱電発電モジュール加熱側温度と冷却側温度との差であるモジュール温度差に対する Pb-Te側及び Bi-Te側の開放端電圧の関係を示す。図中の記号○及び△はそれぞれPb-Te 側での値及び Bi-Te側での値である。単体性能の場合と同様に温度差の上昇に伴い開放端電圧も上昇しており、温度差 492.2℃ (高温側温度 531.7℃、低温側39.5℃) で Pb-Te側4.99V、Bi-Te側 14.06Vが得られている。これは、モジュール1個当たりでは、それぞれ1.25V及び3.52Vとなり、単体性能試験に用いたモジュールとほぼ同等の特性を示している。

図5.4にはモジュール温度差に対する部分ユニット電気出力の関係を示す。図中の記号□及び▽はそれぞれ部分ユニット全体での出力（24モジュール）及び1つのブロックでの電気出力（図5.3と同一のブロック）を示す。なお、電気出力は開放端電圧と内部抵抗から算出しており、部分ユニット全体の電気出力に対するモジュール温度差は1ブロックでの温度差を代表値として用いている。図5.3の開放端電圧の場合と同様にモジュール温度差の上昇に伴い電気出力も上昇しており、本試作熱電気変換部部分ユニットでは温度差 492.2℃で 41.13Wが得られており、ほぼ目標値を達成した。

以上の通り、部分ユニットに用いたモジュールにおいても単体試験を基に設定した温度条件及び発電出力をほぼ達成しており、部分ユニットに於いてもモジュール性能は先に実施した単体性能試験結果と同等の性能を有していると考えられる。

なお、実際のシステム効率はヒートロス、リード線の取り出しに伴う電気抵抗の増加及び外部負荷との整合性等を検討する必要があり、これらを考慮したシステム効率の評価は今後の課題である。

本部分ユニットにおいては、各部でのヒートロスの影響によりモジュール部での貫流熱量の正確な評価は困難であるが、仮に冷却水温度差から熱量を求め、得られた電気出力との関係からユニット効率を推定すると4%程度となる。この値は単体性能による値（7.5%）に比して小さいが、この原因としては、基板間等の空隙部で生じる対流の影響、構造物を介しての熱移動等が考えられる。なお、モジュールの発電特性のみを見ると、単体性能と同等の性能が得られており、実用化には上記の熱損失の低減が必要である。

表5.1に評価項目に対する結果の一覧を示す。各ブロックにより若干のバラツキがあるが、いずれもほぼ目標値を達成している。

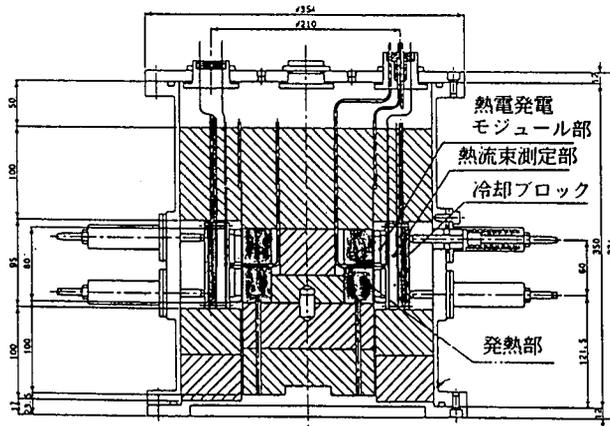
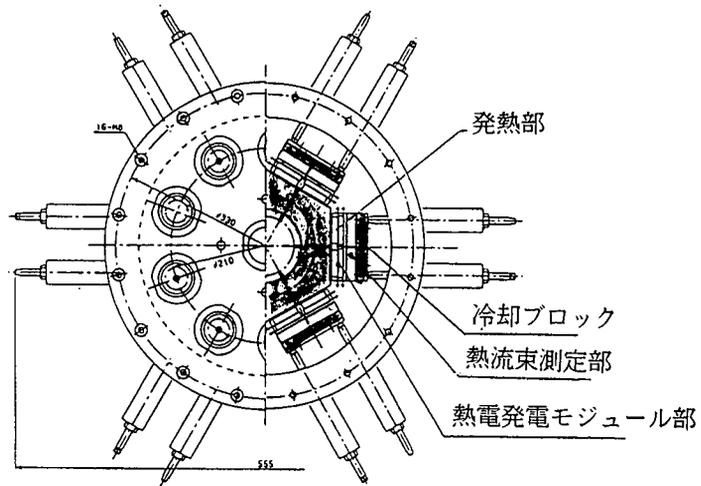


図5.1 部分ユニット全体組立図

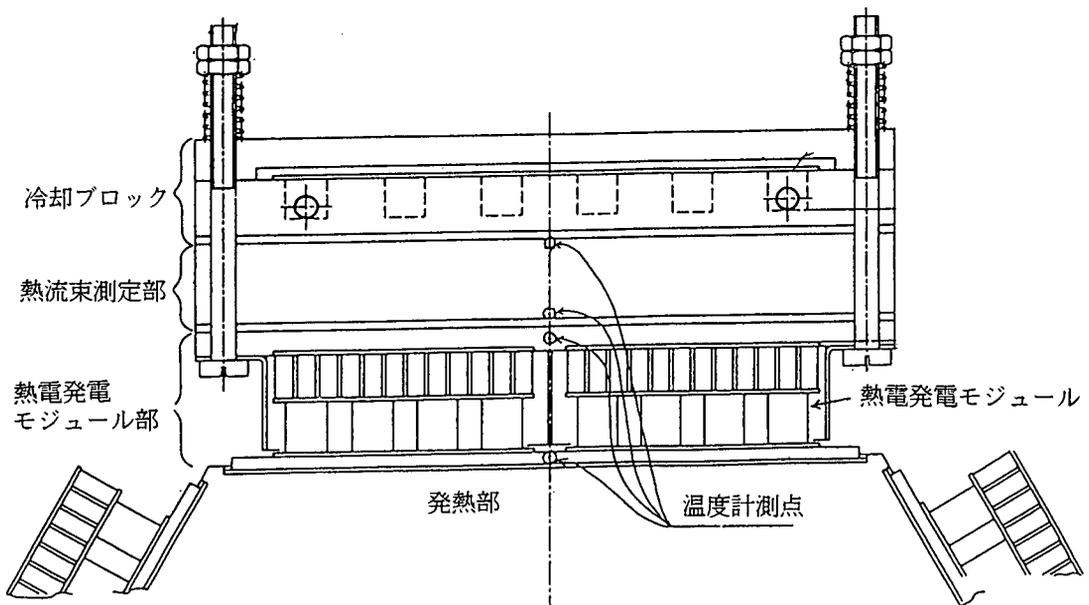


図5.2 ブロック詳細組立図

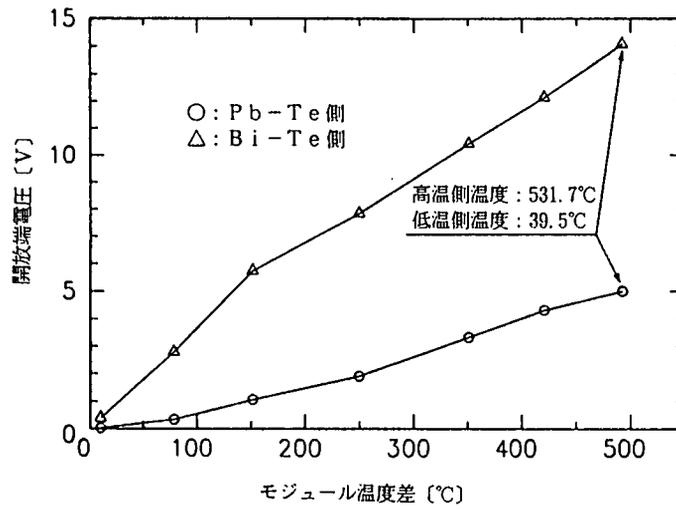


図5.3 1ブロック開放端電圧 (代表値)

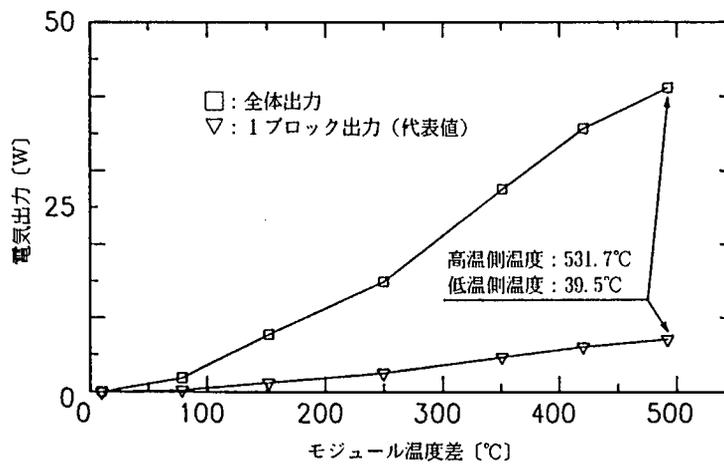


図5.4 部分ユニット電気出力

表5.1 部分ユニット性能評価試験評価結果

評価項目	試験結果						評価	
	ブロックNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5		# 6
開放端電圧 [V]	Pb-Te側	4.6	4.9	4.4	4.7	4.3	5.0	単体性能試験結果と同等、目標達成
	Bi-Te側	14.2	15.2	14.2	14.6	13.2	14.1	
電気抵抗 [Ω]	Pb-Te側	2.8	2.4	2.8	2.7	3.1	3.0	単体性能試験結果と同等、目標達成
	Bi-Te側	10.1	10.1	10.5	10.2	11.4	9.8	
温度分布 [°C]	高温側	488	518	508	496	480	532	ほぼ計画目標値を達成 #5ブロックは冷却ブロックのソリの影響あり。
	低温側	36	39	40	41	73	40	
電気出力 [W]	理論出力41.1Wを達成						ほぼ計画目標値を達成	
変換効率 [%]	冷却水温度上昇より推定。約4%						ヒートロスにより、単体性能試験結果よりも低い。モジュールでは単体性能試験と同等。	

6. 熱電子発電システムの要素試験

熱電子発電システムの要素試験は、要素部品の接合部の試作・試験と熱電子変換部性能試験について実施した。要素部品の接合部試験は、発電モジュールや熱電子素子を構成する高融点金属材料（W、Nb、Mo、etc）及び非金属材料（ Al_2O_3 ）の加工、組合せ接合試験、接合部の組織検査を行った。接合は電子ビーム溶接とロー付であり、溶接性、異種金属材料との適合性、及び接合状態を評価し、部品形状、寸法、接合条件、最適組合せ等についてデータを取得した。

熱電子変換部については、熱電子素子の設計・試作、性能試験を平成4年度に実施した。

本報告では熱電子変換部の試作、性能試験について示すこととする。

1) 熱電子素子の設計・試作

熱電子発電システムの概念設計で設定した熱電子変換部について、単体性能試験に用いる熱電子素子の設計基本仕様は以下のとおりである。

- 熱 源 : 電気式（電子衝撃加熱）
- 型 式 : 同軸円筒型熱電子素子
- エミッタ電極 : 基材Ta 電極W $T_E = 1500^\circ C$
- コレクター電極 : TZM-Mo $T_C = 650^\circ C$
- セラミックシール : Al_2O_3 KOVAR
- 絶 縁 体 : Al_2O_3 （単結晶サファイヤ）
- 電極間スペース : 0.5mm（初期設定）
- 目 標 出 力 : 60~80We（設計出力密度3~4 We/cm²）
- 冷 却 方 式 : 空冷式

図6.1に試験体の全体組立図を示す。又図6.2に性能試験を行うための性能試験装置を示す。

本装置は以下の主要構成機器から成る。

- 加 熱 装 置 …… 電子衝撃加熱方式
- 冷 却 装 置 …… 清浄乾燥空気
- 真 空 装 置 …… ロータリーポンプ、高真空用クライオポンプ $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Torr

2) 性能試験

RTIGの熱電子変換部を構成する熱電子素子を模擬した性能試験用素子を用いて性能試験を実施し、熱電子素子単体の発電性能、耐熱性能及び絶縁性能等を評価した。具体的な評価対象は以下のとおりである。

イ) 熱電子素子単体の発電出力特性

性能試験における代表的な試験結果を図6.3及び6.4に示す。○印の最大発電出力は66We（ $0.38V \times 175A$ 、 $T_E = 1430^\circ C$ 、 $T_C = 600^\circ C$ 、 $T_R = 320^\circ C$ ）と実測され、設計出力60~80We（ $T_E = 1500^\circ C$ 、 $T_C = 600^\circ C$ 、 $T_R = \text{opt.}$ ）に対して、所期の成果を収めることができた。発電出力はエミッタ温度が高くなるほど大きくなるので、試作熱電子素子は出力向上の余地を十分に残しているといえる。

ロ) 電極接合部・セラミックシール等の耐熱、絶縁、真空封着性能

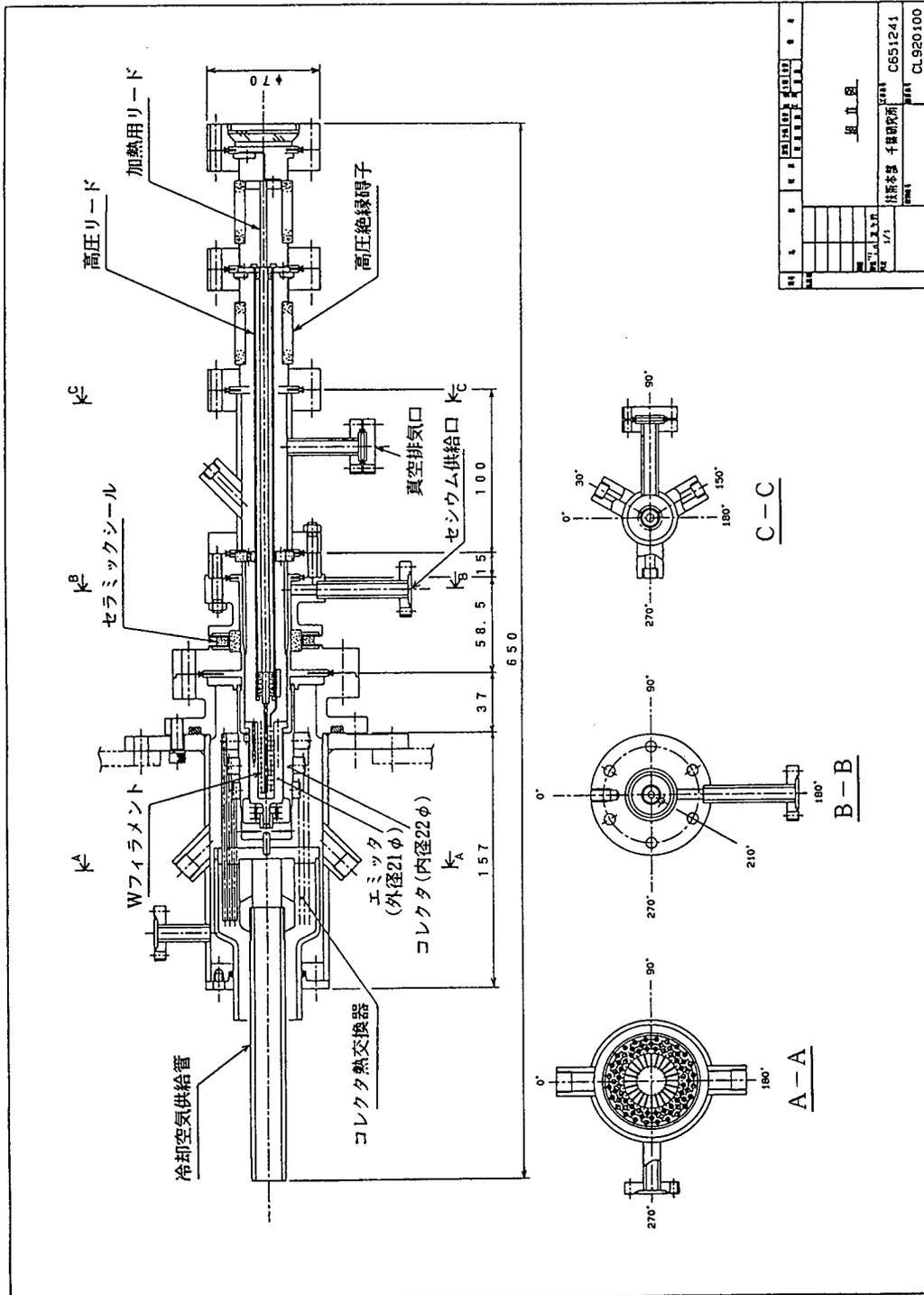
性能試験における電極接合部（エミッタブロック）の到達最高温度は1430℃であり、耐熱性能が確認された。また、セラミックシール等の最高温度 410℃における到達真空度は 6×10^{-7} Torrであり、真空封着性能も確認された。エミッタ・コレクタ間の絶縁抵抗は1 MΩ以上と実測され、十分な絶縁性能を有していることがわかった。

試作熱電子素子はこれらの試験条件においても合計50時間以上にわたり発電出力が安定に実測されており、1430℃以上の高温度場で機能できる耐熱性能を有すること、及びセラミックシール等の耐熱、絶縁、真空封着性能が実験的に確認できた。

ハ) 電極形成と電極間スペースの設定

試作熱電子素子の2層構造エミッタ電極は、タンタル基材にタングステン電極材をスパッタリング、またはろう付け接合することによって、設計仕様通りの試作結果を得ることができた。一方、RTIGの概念設計で設定したコレクタ電極は、熱膨張率・加工性及び溶接性を考慮してニオブとしたが、性能試験用の試作熱電子素子のコレクタ電極は使用実績や実験データが豊富なモリブデンとした。モリブデン及びニオブのセシウム吸着時の仕事関数は $M_o = N_b = 1.78\text{eV}$ でありほぼ等しい。

熱電子素子の電極間スペースは、従来データによれば10mils（約0.25mm）が最適値と考えられる。試作熱電子素子の電極間スペースは電極接合部の加工精度及びエミッタ・コレクタ電極の短絡防止を考慮して所期設定は0.5mmとしたが、設計目標出力を達成したことにより、実用的な電極間スペースとして実験的に確認された。



図名	組立図
図番	CL920100
製図者	1/1
検査者	千原誠哉
承認者	CS51241
発行	CL920100

図6.1 試験体の全体組立図

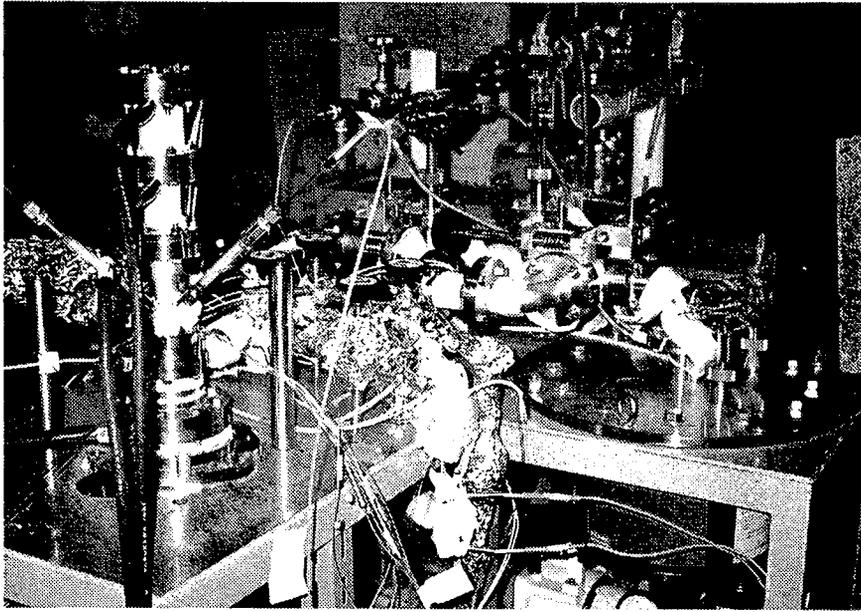


図6.2 性能試験装置

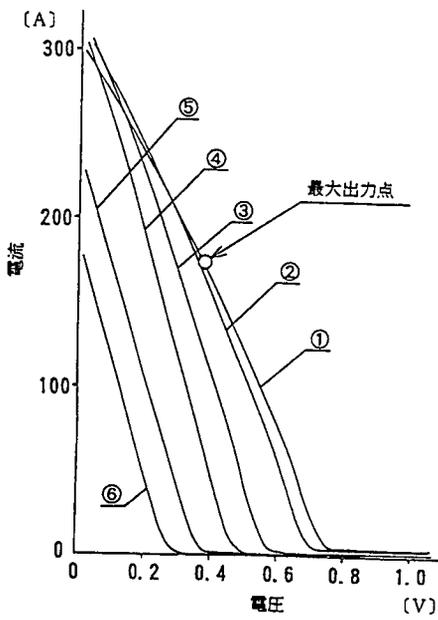


図6.3 試作熱電子素子の発電出力特性

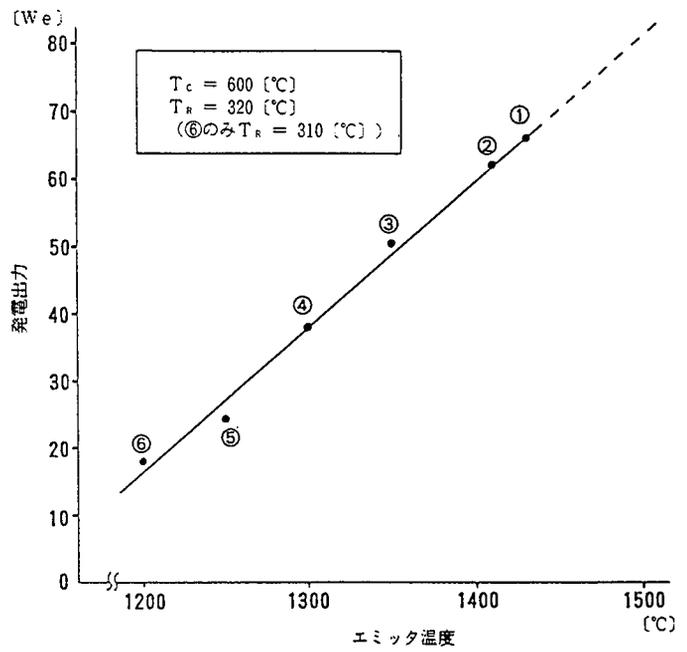


図6.4 エミッタ温度と発電出力

7. RI発電システムを用いた潜水調査船等の概念設計

7.1 小型有人潜水船の概念設計

本項では、RIを熱源とした熱電気発電システムを“しんかい6500”程度の小型有人潜水船に適用した場合の概念設計、銀亜鉛電池とRTGの比較さらにRTGのメリットが生かせる長期滞在型小型潜水船の概念設計等を実施した。

図7.1-1に長期滞在型（6人-1週間）の小型潜水船の概念図と、主要目等を示す。

7.2 無索無人潜水船の概念設計

本項では、仏の無索無人潜水船EPAULARDを原型としてRI熱源をプルトニウムとした場合とストロンチウムとした熱電子発電システムを搭載した場合のシステム規模、運用法等概念設計を実施した。

図7.2-1に核種をプルトニウムとした場合の概念図と主要目等を示す。

7.3 大型有人潜水船の概念設計

本項では、仏の水中航行作業船“SAGAI”を原型としてRI熱源をストロンチウムとしたスターリングサイクル発電システムを搭載した大型有人潜水船の概念設計を行った。

システムの運用法、動力計画等も検討した。

図7.3.1に大型有人潜水船概略配置図と主要目、設計条件等を示す。

- 主な用途 : 深海調査観測
- 主な機能 : 目視観測及び記録 (スチル及びテレビカメラ)
 サンプル採取・機器の設置回収 (マニピュレータ)
 海洋諸データ観測 (地形・地質・水温など)
- 運用要領 : 母船搭載型。目的地で母船により着水揚収。潜水浮上はスラスタ及びバラスト併用
- 性能 : 最大潜航深度 6500m
 最大乗船人員 6名
 潜水航続日数 7日
 水中航行速力 2.5ノット
 ライフサポート 7日+5日

(主要目等)

- 主要寸法 長さ 11.0×幅 3.2×高さ 3.5 (m)
 重量 48 t
- 一般配置 図7.1-8
- 推進器 主 推 進 : 油漬交流モータ 10kW×1
 垂直スラスタ : 同 上 1kW×2
 水平スラスタ : 同 上 2kW×2
- 動力源 主 電 源 : RTG定格 12kWe(108V)
 補 助 電 源 : 銀電池 50AH (108V)
- 航海通信 船 位 測 定 : 同期ピング、音響測位
 高度ソナー、上方ソナー
 通 信 装 置 : 水中通話、画像伝送、高速データ伝送
- 調査観測 観 測 装 置 : 窓、スチルカメラ、テレビカメラ
 計 測 装 置 : CTDV、流向流速、持込諸センタ
 作 業 装 置 : マニピュレータ2本、コアラ
 持込諸機器

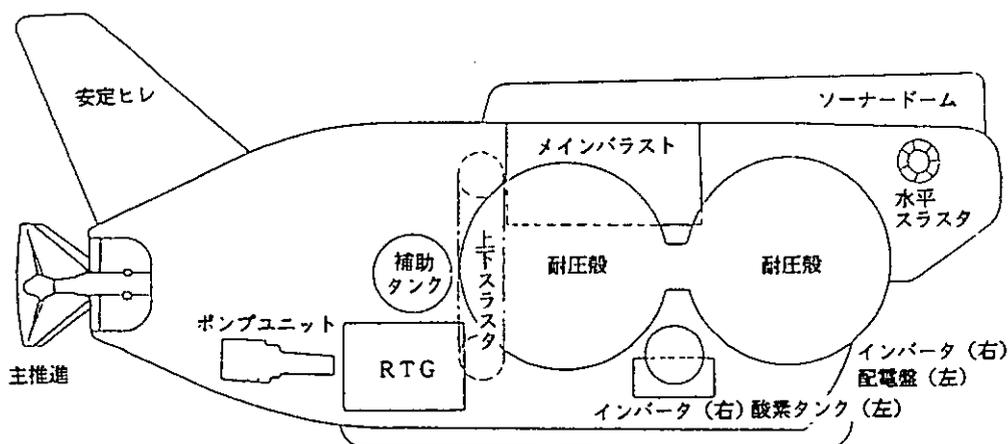


図7.1-1 RTG搭載小型有人潜水船 (6人-1週間)

RTIG搭載小型無索無人潜水船

	ストロンチウム	プルトニウム
ミッション	(a) 海域調査(*) (温度、音速、海流・潮流分布、等) (b) 海底調査(*) (Moジュール、Coラスタ、熱水鉱床、等) (c) 生物調査(*) (魚群資源管理、) (d) 海底基地の建設・保守支援 (e) 海底基地代替の長期滞在型調査 (調査科の自由選定、移動)	(*) 広範囲、短時間、高精度、垂直分布の繰り返し調査
機能	(a) 移動、位置保持→前進・後進、上昇・下降(バラスト、V-スラスタ)、トリム制御(V-スラスタ)、舵制御(ヨー) (b) 自律航法→プログラム航法、AI航法、超音波遠隔航法 (c) 情報伝達→海面からのマッド(針路、速度、カメラ撮影、バラスト投棄) (d) 測位→海底基準点&海面母船との相対位置測位(LBL/SSBL音響測位) (e) 観察・計測・記録→カメラ(海底撮影観察)各種センサー(温度、潮流、等) (f) 給電・変圧→RI発電→動力用、計測制御用 (g) 着水、揚収→フック等の吊上げ金具を装備、(h) 故障診断→故障状況発信機能	(ピッチ・ロール±30°)
仕様型式 全長×全幅×全高 空中重量 潜航深度 速度(前進最大) 稼動可能海象条件 潜航持続時間 環境条件	浮力材成形の涙滴型シェル構造 6.4m × 1.9m × 2.7m 23 ton 3.0 Kts SS3 (但し、揚収はSS4可) 連続 (設計寿命10年) 気温(甲板上) -10℃~+40℃、水温 -5℃~+30℃、湿度(甲板上) 95%(相対)	4.0m × 1.1m × 2.2m 4.5 ton 最大 6000 m 4.0 Kts
RI熱電子発電システム 搭載モジュール数 モジュール主要寸法 総重量 総発電出力(冷却)	熱源RI ⁹⁰ SrTiO ₃ 3本 φ708mm × 1700mm (含、耐圧容器) 8.55 ton (耐圧容器込) 7 Kw。(海水自然対流冷却(揚収時、散水冷却))	熱源RI ²³⁸ PuO ₂ 2本 φ325mm × 1568mm (含、耐圧容器) 900 Kg (耐圧容器込)
主要搭載機器、ほか	(a) 構造、等 浮力材 シツクゲイック・フォーム 比重≒0.6(エポキシ樹脂+ガラスマイクロバルーン) 耐圧容器 Ti合金Ti-6Al-4V (RI発電システム用、電子機器用) (b) 給電装置 インバート(油漬均圧型) DC→AC(昇圧)→DC、接続箱(油漬均圧型) (c) 推進装置 前・後進スラスタ×1、垂直スラスタ×2 (電動DCブラシ、電圧制御) 舵(電動アクチュエータ)×1、およびスラスタによる高度保持 (d) 航海装置 前方障害物探査機、高度計、フロッパー・サー、ピッチ、ジャイロ、深度計、トランスバ、受波器 (e) 調査観測装置 X-スキャンカメラ(カラー)、35mmスチルカメラ&ストロボ、ローカンプ、CTDセンサー×各1 (f) 非常用装置 ライト、フラッシュ、吊上げ金物 ×各1、バラスト	

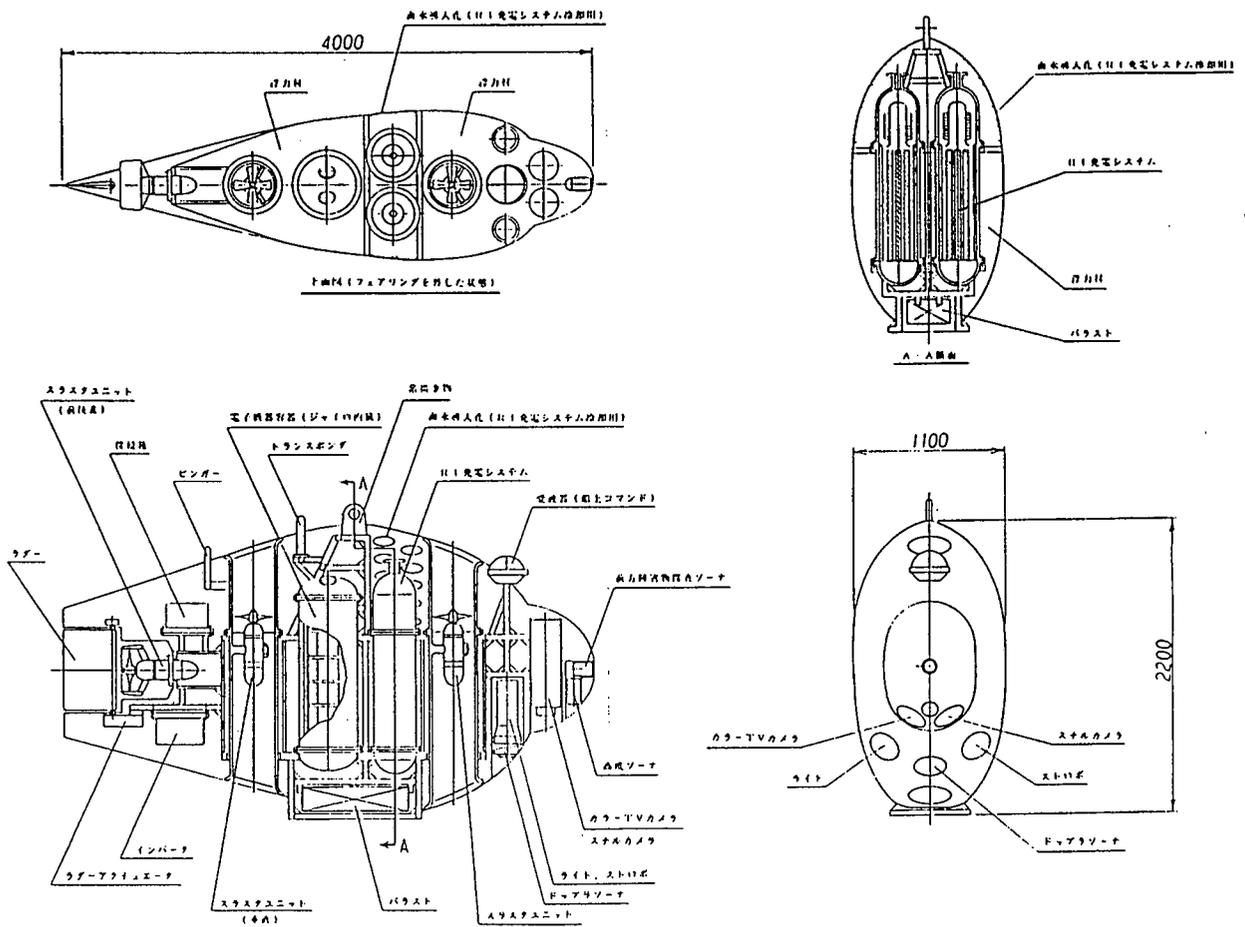
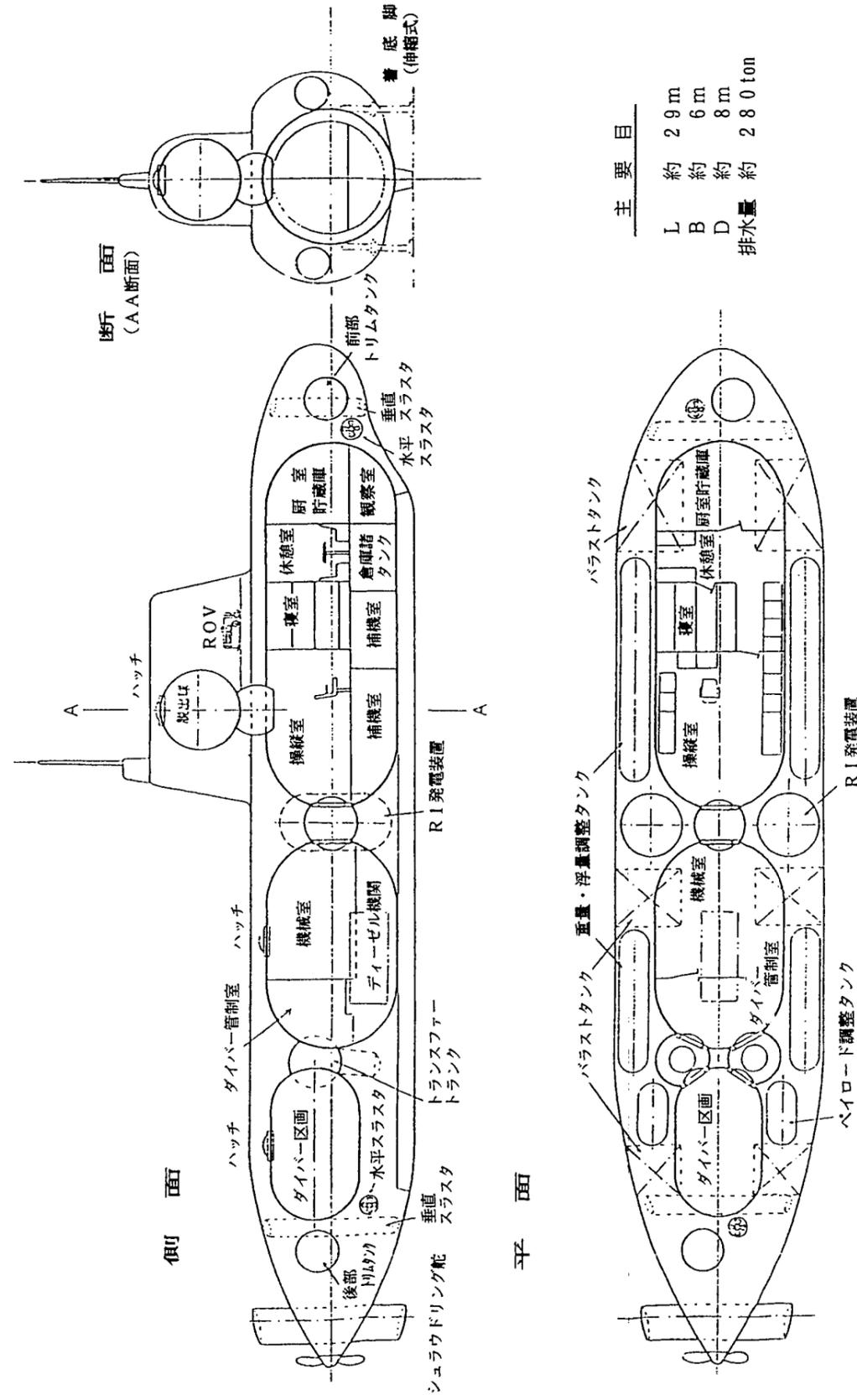


図7. 2-1 RI (ストロンチウム) 熱電子発電システム搭載小型無索無人潜水船 (全体配置図)

設計条件

項目	内容	備考
●運用形態	独立自航型	曳船、母船は必要としない
●ミッション	海洋観測 ダイバー作業支援	ダイバーロックアウト設備を有す
●速力	約4kts (水中)	緊急時のみ、水上約7kts航走
●潜航深度	潜水船 600m {ダイバーロックアウト 深度 450m}	
●行動範囲	基地より約100NM	
●潜航日数	9日 (作業7日+往復航2日)	
●ライフサポート	16日	潜航日数+7日として設定 (7日はMTSのrecommendation)
●乗員	{大気圧区画 4名* 加圧区画 4名 (ダイバー)}	内訳* : {パイロット 2名 エンジニア 1名 ダイバー支援者 1名
●動力源	RI発電システム 出力: 30kW×2基	出力の大きさは、(付録1)の仮定 で設定 緊急時にディーゼル発電機を装備



主要目

L	約 29 m
B	約 6 m
D	約 8 m
排水量	約 280 ton

図7.3-1 大型有人潜水船概略配置図

8. 総合評価

8.1 RI熱源（核種）の評価

RI発電システム用のアイソトープ候補は、19種を選び出し、半減期が長いこと（長寿命）、出力密度が高いこと、崩壊系列に γ 線や中性子線の放出核種が生じないこと等の観点から、 ^{90}Sr と ^{238}Pu を選定した。各々一長一短があるが要約すると以下のとおり。

(1) ^{90}Sr の特長

- 核分裂生成物の中でも最も収率の高い核種で比較的抽出しやすい。（軽水炉一基当たり年間取り出し可能は約22 kg）
- 標準的熱源アイソトープとしての使用実績も豊富。
- 発熱密度は単位重量当りでは ^{238}Pu に劣らず高出力密度であるが、単位体積当りの出力密度は小さいので、容積的には大きくなる。
- 崩壊は100% β 崩壊であり、有害な γ 線や中性子線は出さないが、原子番号の大きな物質に当たると制動放射（X線）があり、遮蔽が必要。

(2) ^{238}Pu の特長

- 半減期が長く、収率及び抽出の容易さの点では ^{90}Sr には劣るが軽水炉一基当たりの年間取り出し可能は約8.1 kg。
 - 発熱密度が大きく諸外国での標準的熱源アイソトープとしての使用実績が多い。
 - 崩壊は、 α 崩壊が主体である。 α 線が酸素原子に当たると、中性子を放出するため、酸化物の使用を避けるのが望ましい。
 - 核燃料物質のため管理はきわめて厳しく、IAEAの査察対象となっている。
- 又我が国の場合、P. A (PUBLIC ACCEPTANCE)という困難な問題がある。

以上のとおり ^{90}Sr 及び ^{238}Pu は各々特長があるが、 ^{238}Pu については管理の厳しさもさることながら、我が国独自のP. Aの問題もあり、将来的にはRI発電システム用熱源として、きわめて有望な核種と認識すべきであるが、当面は ^{90}Sr を第一候補として考えるのが妥当であろう。

従って以下の技術開発課題については ^{90}Sr に絞って触れることとする。

(3) RI発電システム熱源としての ^{90}Sr の技術開発課題

^{90}Sr については制動放射（X線）の問題があり、遮蔽が必要であることが明らかとなり、このための対策を種々検討してきた。この場合燃料体そのものを遮蔽構造にするとの発想でフッ化ストロンチウム（ SrF_2 ）をサブ・ミクロンオーダの微細粒子とし、窒化ボロン（BN）の中に混ぜて焼結する方式が提案され、検討が行われてきた。従ってここでは $^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$ の燃料体について実用化までに検討すべき課題、技術開発内容等を示すこととした。

イ) 実用化までの検討課題

遮蔽に関して

- SrF_2 とBNをある体積割合とした場合、 ^{90}Sr 原子核との相互作用をどの程度抑えられるか。

- BNとの相互作用で制動放射はどの程度の強度になるか。
- そのときの制動X線のエネルギースペクトルはどうか。
- その制動X線を遮蔽するのにどの程度の厚さが必要か。

又、燃料について言えば

- $^{90}\text{Sr} + \text{BN}$ 焼結体の試作
- 発熱データなどの取得等が必要であろう。

ロ) 技術開発内容

a. RI熱源実用化のための調査

将来実用化する場合の制約条件（量的供給体制、法的規制等）の明確化と解決策の具体化を調査検討する。

b. RI熱源の試作及び特性評価

熱源として有望な $^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$ 小型焼結体等の試作を行い、放射特性及び熱特性の試験、評価を行う。

なお上記技術開発課題等熱電気発電、熱機発電への応用のための ^{90}Sr を核種とした $^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$ 燃料体の場合について述べたものであるが、熱電子発電システム用としては、 $^{90}\text{SrTiO}_3$ を選定して検討した。また ^{238}Pu についても若干対象が異なるとはいえ、 ^{90}Sr と同様技術開発課題があることは言うまでもない。

8.2 RI発電システムの評価

RI発電システムについては3ヶ年に亘り熱電気発電システム、熱電子発電システム、熱機発電システムの三方式について概念設計を実施してきた。直接発電システムである熱電気発電、熱電子発電については、一部要素試験及び部分ユニットの発電試験等を実施し、可能な限り概念設計に反映した。以下に三方式の評価ならびに実用化までの検討課題について示すこととするが、概念設計のサマリーとして表8-1にその基本仕様と概略諸元等を示す。

表8-1 RI発電システムの基本仕様

熱電気発電システム (8KW) (小型有人潜水船想定)	熱電子発電システム (7KW) (小型無人潜水船想定)	熱機発電システム (60KW) (大型有人潜水船想定)
<ul style="list-style-type: none"> ○燃料は$^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$の焼結体 ○装置全体は均圧構造 ○熱電素子 <ul style="list-style-type: none"> ・高温側 PbTe (600°C) ・低温側 BiTe (50°C) ○容積 1,250立方体×4 set ○重量 1.9 t 遮蔽込 4.0 t 	<ul style="list-style-type: none"> ○燃料は^{238}Puまたは$^{90}\text{SrTiO}_3$ ○立形円筒耐圧容器に収納 ○熱電子素子 <ul style="list-style-type: none"> ・エミッターW (1,500°C) ・コレクターNb (600°C) ○容積 $\phi 325 \times 1,568 \times 2$ set ○重量 0.9 t ($^{90}\text{SrTiO}_3$の場合8.55 t) 	<ul style="list-style-type: none"> ○燃料は$^{90}\text{SrF}_2 + \text{BN}$の焼結体 ○機関はスターリングサイクルエンジン ○立形円筒耐圧容器に収納 ○ヒートパイプ <ul style="list-style-type: none"> ・高温側 850~950°C ・低温側 20~114°C ○容積 $\phi 1,800 \times 3,300 \times 2$ set ○重量 6.9 t 遮蔽込 14.7 t

8.2.1 熱電気発電システム

熱電気発電システムについては小型有人潜水船、具体的には“しんかい6500”を想定し、現状の2次電池を熱電気発電システムに置き換えることを前提に発電システムを検討した。3ヶ年に亘り概念設計を実施したが、この間に要素試験としてモジュール単体性能試験、部分ユニット性能試験を実施し、概念設計に反映した。

要素試験内容をごく簡単に示す。

(1) モジュール単体性能試験

単体モジュールとして高温用（600℃）Pb-Te素子16ヶ、低温用（50℃）Be-Te素子144ヶ、計160ヶを組合せたもので性能試験を実施し、電気出力、電気抵抗温度分布等を計測し、その結果を部分ユニット試作に反映した。なお熱源は模擬熱源（電気ヒータ）としている。

(2) 部分ユニット性能試験

前記モジュールを24個組合せた部分ユニットを試作し（素子数 $160 \times 24 = 3,840$ ヶ、計画出力45W）モジュール単体と同様、電気出力、電気抵抗、ユニット内部温度分布等を計測、解析した。いずれも計画どおり所期の成績を収めた。

以上のとおり熱電気発電システムについては、最小限の直接発電性能試験を実施し、所期の成果は得られたが実規模発電システム（8KW級）に比較するときわめて小規模のものである。又潜水船に搭載するという条件でみた場合、今後検討すべき事項はいろいろある。

以下に主要検討課題を簡単に示す。

イ) 素子部での伝熱機構の解明

モジュール単体性能試験においてモジュール内部の温度分布の測定や、解析プログラムによる温度分布シミュレーション計算等を実施したきたが、総合的な素子部（高温側、低温側）での伝熱機構を明らかにする必要がある。

ロ) 絶縁機構の機能確認

各モジュールについては高温側、低温側及び中間部にアルミナ絶縁基盤（32mm×32×0.64）を設けているが、寸法と絶縁効果との定量的な把握が高効率化を検討する上でも必要と考えられる。

ハ) 均圧構造の実証

潜水船搭載を考えた場合、小型軽量はきわめて重要であり、本発電システムも概念設計では全体を均圧機構とする考えに立っている。潜水船等で実用化されている二次電池は均圧機構を有しているものが多く、均圧構造の基本的な設計手法は確立されているが、高温環境で特殊材料で構成される本システムについては、体積調節機構も含め細部設計検討と場合によっては実証実験等が必要であろう。

ニ) システムのハンドリング技術

本システムは海中から引き上げ、船上又は陸上に置く場合には水冷保管しなければ温度的に問題であることが明らかにされている。従って潜水船からの撤去、搭載等、熱管理、放射管理等も含めてハンドリング技術を検討する必要がある。

ホ) 1KWe級プロトタイプシステムの試作試験

平成3年度には24個のモジュール数による部分ユニットの性能試験を実施したが出力規模は45Weであり、小型有人潜水船を想定した8KWe級に対し大きなへだたりがあり、実用化の目途をつけるためには1KWeクラスのシ

システムの試作試験が必要であろう。この場合熱電モジュール性能向上試験を実施した上で試作試験を行うのが効率的であろう。性能向上の狙いは下記の2点が考えられる。

a. 高効率化

熱電素子充填密度向上、素子周囲からの熱損失対策等により発電効率向上を図る。

b. 高信頼性

熱応力緩和、接合部の信頼性向上、性能劣化抑制等によりモジュールの高信頼化を図る。

8.2.2 熱電子発電システム

熱電子発電システムについては、6,000m級の深海底調査を目標として開発されたフランスの無索無人潜水船のEPAULARDをモデルとして本発電システムの概念設計を3ヶ年に亘り実施した。

平成3年度、4年度には、要素試験として特殊材料接合試験、単体発電性能試験を実施し、概念設計に反映した。要素試験内容をごく簡単に示す。

(1) 特殊材料接合試験

熱電子発電システムの発電モジュールや熱電子素子を構成する高融点金属材料(W、Nb、Mo、etc.)及び非金属材料(Al、O₂)の加工、組合せ接合試験、接合部の組織検査を行った。接合は電子ビーム溶接とロー付であり、溶接性、異種金属材料との適合性、及び結合状態を評価し、部品形状、寸法、接合条件、最適組合せ等について有用なデータを取得した。

(2) 単体発電性能試験

熱電子発電システムの概念設計で設定した熱電子変換部について、単体性能試験用の熱電子素子の設計、試作を行い、又性能試験装置(電気加熱装置、冷却装置、真空装置、計測制御装置等)の設計、製作を行い、単体性能試験を実施した。

性能試験としては熱電子素子の発電性能(計画出力50W)、耐熱性能及び絶縁性能等を計測、解析した。いずれも計画どおり所期の成績を収めた。

以上のとおり熱電子発電システムについては、最少限の直接発電性能試験を実施し、所期の成果は得られたが前項の熱電気発電システムと同様、今後検討すべき事項はいろいろある。以下に主要検討課題を簡単に示す。

イ) 高融点耐熱材料の信頼性評価

要素試験として特殊材料接合試験を実施し、エミッター電極としてタングステン(W)、コレクター電極としてニオブ(Nb)、中間材としてモリブデン(Mo)、絶縁体としてセラミックス(Al₂O₃)等を選定した。

しかし接合試験では外観検査、マクロ、ミクロ検査等のみでの評価であり、実用化迄には、最適組合せによる長期耐熱試験等を行い、信頼性を確認する必要がある。

ロ) 真空封着部の信頼性評価

エミッター電極から電子を放出し、コレクター電極で電子を捕捉する熱電子発電システムについては、両電極間の真空度維持は発電効率に直接影響する。単体発電性能試験結果を踏まえ、真空封着部の詳細検討を行い、信頼性確保を図る必要がある。

上記イ)、ロ)については熱電子発電システムとしての検討課題であるが、前項の熱電気発電システムで示された検討課題のうち、下記項目については、対象範囲、規模等に差異はあっても本システムでも必要な技術開発課題である。

- a. 絶縁機構の機能確認
- b. システムのハンドリング技術
- c. 両電極間伝熱機構の解明
- d. 1KWe 級プロトタイプシステムの試作試験

8.2.3 熱機関発電システム

熱機関発電システムについては大型有人潜水船であるフランスのSAGA-Iをモデルとして3ヶ年に亘り概念設計を行った。外燃機関の候補としては、スターリングサイクル、プレートンサイクル、ランキンサイクルの三つの方式について効率、重量、寸法との比較研究を行い、スターリングサイクルエンジンが最も有利であるとの結論を得た。又機関をとりまく構成要素(RI熱源構造と遮蔽体、ヒータ、クーラー、高温側、低温側ヒートパイプ、放熱システム、発電機等)の概念設計も行い、熱機関発電システムの基本仕様を設定した。

本発電システムについては、要素試験は実施していないが概念設計の過程でも示されているように今後検討すべき課題はいろいろある。以下に主要検討課題を簡単に示す。

イ) 高温側及び低温側ヒートパイプの熱輸送能力

スターリングエンジンの駆動源として、即ち熱輸送手段としてのヒートパイプシステムはきわめて重要な構成要素の一つであり、効率に直接影響する。概念設計では、かなり細部に亘り検討を加え、シミュレーション計算等実施しているが、実用化に先がけ、熱輸送能力を主体とした要素試験を実施し、実験の裏づけが必要である。

ロ) スターリングエンジン故障時対策

熱電気発電システム、熱電子発電システムとことなり、熱機関発電システムは間接発電であり、スターリングエンジンの停止という故障時を想定した対策が必要である。概念設計では、熱源で発生する熱出力を非常用ヒートパイプと熱交換器の装備による非常用熱輸送システムを検討した。しかしながらシステム構成は比較的複雑であり、又ヘリウムガス充填二重円筒型熱交換器等技術検討をさらに加えるべき事項もある。

今後詳細検討や場合によっては一部試作試験等も必要と考えられる。

前述の直接発電システム(熱電気、熱電子)と同様、下記項目については、スターリングエンジン発電システムとしても重要な技術開発課題である。

- a. システムのハンドリング技術
- b. プロトタイプシステムの試作試験

なおスターリングエンジン本体については、海中動力源としては我が国では実績がないが、海外ではすでに実用化されており技術開発課題はほとんどないと言える。むしろRI熱源を組み込んだ全体システムの信頼性評価がきわめて重要と考えられる。

8.3 RI発電システムを搭載した潜水調査船等の評価

RI発電システムを搭載することを前提とした潜水調査船等については、小型有人潜水船、大型有人潜水船、無索無人潜水船を対象に3ヶ年に亘り概念設計を実施した。概念設計のサマリーとして表8-2にその基本仕様と概略諸元等を示す。

表 8-2 潜水調査船等の基本仕様

小型有人潜水船	小型無人潜水船（無索）	大型有人潜水船
<p>○深度 6,500m</p> <p>○しんかい6500をモデル</p> <p>○搭載発電システム（8KW） 熱電気発電システム （2KW×4 set） 〔別途RTGの特長である長寿命を考慮した概念設計を実施〕</p> <p>○主寸法、重量 10.2m×2.7m×3.2m 重量 30 t 〔現船より重量4 t増 長さ0.7m増〕</p>	<p>○深度 6,000m</p> <p>○フランス EPAULARDをモデル</p> <p>○搭載発電システム（7KW） 熱電子発電システム （3.5KW×2 set） 〔熱源材料$^{90}\text{SrTiO}_3$と$^{238}\text{PuO}_2$の2ケースについて概念設計を実施〕</p> <p>○主寸法、重量 4 m×1.1m×2.2m 重量 4.5 t（$^{238}\text{PuO}_2$の場合） （$^{90}\text{SrTiO}_3$の場合は23 tオーダ）</p>	<p>○深度 600m</p> <p>○フランス SAGA-Iをモデル</p> <p>○搭載発電システム（60KW） スターリングエンジンシステム （30KW×2 set） 〔外燃機関としては他にプレイトン、ランキンサイクルエンジンについて検討〕</p> <p>○主寸法、重量 29m×6 m×8 m 重量 280 t</p>

潜水船等についての実用化までの検討課題は、種々考えられるが主としてRI発電システムがらみの問題と考えられる。

小型及び大型有人潜水船、無人潜水船そのものについては現状技術又はその延長線で対応可能と考えられる。従って共通的な問題として、以下に簡単に示すこととする。

(1) 運航パターンの検討

概念設計でも基本的検討が行われたが、母船搭載型の小型有人潜水船や無人潜水船と、自航型大型有人潜水船とでは管理の面も含め大きな違いが出てくる。又RI発電システムの最大の特長である燃料の補給を不要とする点を十分システムに折り込み運航パターンを検討していく必要がある。

(2) 遮蔽設計の詳細検討

遮蔽についてはRI発電システム側で主体的に行われることになるが、潜水船の装備状態によって設計諸元が変わってこよう。特に有人潜水船については、設計の基本計画段階からRI発電システム側との十分な整合性のある詳細検討が必要であろう。

(3) RI発電システムハンドリングの詳細検討

RI発電システムの陸上輸送、システムへの組込、潜水船等への搭載、洋上運搬、潜航揚収後の取外し保管等、一連のプロセスにおける管理方法等について詳細検討が必要であろう。特に搭載、撤去時の放射線対策、さらに船上におけるRI発電システムの冷却対策等、概念設計でも一部検討が加えられているが、実用化に当っては十分な詳細検討が必要である。

(4) システム全体の信頼性解析

潜水船等についてはF T Aを中心に検討をすすめると共に一部重要システムについてはF M E Aの検討も必要であろう。R I発電システムとしてはR Iの発熱制御は困難であり一定電力を長期に亘り発生するので、軽負荷時の余剰電力の有効活用（又は強制放熱）等給電システムを含めた細部について信頼性確保のための検討が必要である。

あ と が き

海中動力源として燃料補給を長期間に亘って必要とせず、長寿命、メンテナンスフリー、低騒音等の特徴を有する R I 発電システムについて 3 ヶ年にわたり調査研究を実施してきた。

8. 総合評価で成果の概要や今後の課題等を示しているが以下に要約を示す。

(1) R I 熱源 (核種)

核種として半減期が長いこと (長寿命)、出力密度が高いこと、崩壊系列に γ 線や、中性子線の放出核種が生じないこと等の観点から ^{90}Sr と ^{238}Pu を選定した。

^{238}Pu は諸外国での使用実績は多いが I A E A の査察対象となっており又我が国独特の P. A の問題もあり、遮蔽対策を必要とするが当面 ^{90}Sr を第 1 候補とするのが妥当である。

遮蔽効率をあげるため、 $^{90}\text{Sr} + \text{BN}$ 焼結体方式が提案されたが将来的にはこれら熱源の試作を行い、放射特性、熱特性の評価試験が必要であろう。

(2) R I 発電システム

R I 発電システムについては、3 ヶ年に亘り熱電気発電システム、熱電子発電システム、熱機関発電システムの三方式について概念設計を実施してきた。

熱電気発電システムについては、小型有人潜水船を想定して 8 KW (2 KW \times 4 set) を、熱電子発電システムについては、無索無人潜水船を想定して 7 KW (3.5 KW \times 2 set) を、又熱機関発電システムについては大型有人潜水船を想定して 60 KW (30 KW \times 2 set) を各々ベースとして、システム全体について検討してきた。

熱電気発電システム、熱電子発電システムについては出力規模は数 10 W ではあるが要素実験を行い所期の成果を収めた。

技術開発課題は各々のシステムに対し数多くあるが、熱電気発電システムについては、システム全体の均圧構造の実証が、熱電子発電システムでは高温使用に対する材料も含めた信頼性、真空封着技術が、又熱機関発電システムについては、R I 熱源を組み込んだ全体システムの信頼性が特に重要と考えられる。

(3) R I 発電システムを搭載した潜水調査船等

小型有人潜水船、無索無人潜水船、大型有人潜水船を対象に 3 ヶ年に亘り概念設計を実施し、全体システムの規模等を明らかにした。

潜水船等については、大きな技術開発課題はなく、むしろ、R I 熱源を搭載するための問題点がクローズアップした。

即ち、遮蔽に関する詳細検討、運航パターンの検討、ハンドリング (陸上輸送、搭載、揚収、保管等) の詳細検討等である。

深海への適応を考えた場合、我が国としては全く新しい技術である新動力源について 3 ヶ年に亘り調査研究を実施してきた。

今後は、具体的なニーズを掘り起こし実用化に向けての一層の技術開発を推進することが期待される。また、本調査研究では、R I 熱源についてはフィジビリティスタディのみであり、近い将来、試作、評価試験等の実施が望まれるものである。

地球規模での海洋観測、調査活動等の重要性が近年とみに指摘されていることに鑑み、この新動力源の実現は、人類に残された最後のフロンティアである海洋の調査、研究、開発の全体に対して大きなインパクトを与えるものと思考する。

終りにあたり、本研究開発に係わった委員各位に深甚なる謝意を表す次第である。