

本資料は 91年 11月 30日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

可搬型高速炉開発計画の検討

(深海炉及び宇宙炉)

1993年10月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。
〒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
技術開発部・技術管理室

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



社 内 資 料

PNC EN9000 93-007

1993年10月

可搬型高速炉開発計画の検討

(深海炉及び宇宙炉)

大坪 章*、羽賀 一男**、片岡 一*

要旨

昭和63年7月にフロンティア新原子動力研究グループが設立されてから、FBR開発の新たな展開を求めて活動を行っている。現在までの活動結果に基づいて検討を行った結果、技術的実現性及び社会的要求から可搬型高速炉の開発が、動燃の将来計画として好ましいという結論に達した。この可搬型炉は深海及び宇宙用に用いるものである。

本報告書では、この可搬型高速炉の開発スケジュールを立てるとともに、開発項目及び内容について検討を行った。本開発スケジュールでは、現在より約15年後に10-40kWeのNaK冷却の地上試験炉を建設することを中心にしており、この試験炉はまず深海炉研究を行った後に、一部システムの改造を行い宇宙炉研究を行うためのものである。

この開発スケジュールに基づき、現時点から地上試験炉を建設して深海炉研究を終了するまでの今後約20年間の、予算及び人員計画を立てた。この間必要な予算は総額約150億円、必要な技術者は約20名ということになった。

このような可搬型高速炉の開発研究のためには、窒化物燃料、無人運転、高温材料等の技術開発を行うことになるが、これらの技術開発は動燃が行っているFBR実用化路線を大いに促進するものである。

*大洗工学センター技術開発部先進技術開発室

**大洗工学センター技術開発部



目次

	頁
1. 概要	1
2. 目的及び必要性	2
3. システム概要	4
4. スケジュール及び開発項目	16
4. 1 概念	16
4. 2 全体スケジュール及び開発項目	16
5. システム設計及びコンポーネント開発	23
5. 1 システム設計	23
5. 2 コンポーネント・計測機器開発	24
6. 予算	28
7. 人員	30
8. 事業団のプロジェクト技術への反映	33
9. おわりに	38
参考文献	39

付録

1. 海洋科学技術センター長期計画	41
2. 海底資源採鉱技術	46
3. Allied-Signal Aerospace Company よりの手紙	50
4. 原子力電池	56
5. 液体金属の種類についての考察	64

表一覧表

	頁
表 4. 1 スケジュール概念	18
表 4. 2 開発項目とスケジュール	19
表 4. 3 システム設計スケジュール	20
表 5. 1 コンポーネント・計測機器開発項目	25
表 7. 1 必要な人員（全体）	31
表 7. 2 必要な人員（システム設計）	32
付表 4. 1 原子力電池用 R I 熱源	58
付表 4. 2 米国打ち上げの原子力電池	59
付表 5. 1 液体金属の融点・沸点・比重	66
付表 5. 2 1953年米国海軍原子力推進計画	67

図一覧表

	頁
図3. 1 深海用ディーゼル発電機概念	6
図3. 2 無人基地用 10 kW _e 高速炉システム	7
図3. 3 定点観測グリッド無人基地	8
図3. 4 総合海底観測システム無人海底基地	9
図3. 5 潜水調査船用 20 kW _e 高速炉システム	10
図3. 6 潜水調査船概念	11
図3. 7 深海微生物飼育用熱源基地概念	12
図3. 8 マンガン団塊採鉱基地概念	13
図3. 9 採鉱基地用 200 kW _e 高速炉システム	14
図3. 10 ERA TO 20 kW _e 宇宙炉	15
図4. 1 冷却器試験装置	22
図8. 1 コジェネレーション型高速炉	35
図8. 2 コジェネレーション型高速炉システム系統図	36
図8. 3 可搬型炉研究と他の研究の関連	37
 付図4. 1 原子力電池原理	 60
付図4. 2 ⁹⁰ Srを用いた原子力電池	61
付図4. 3 原子力電池ユニット及び断面	62
付図4. 4 木星探査機ガリレオ用原子力電池	63
付図5. 1 原子力潜水艦 Seawolf	68

1 概要

1988年7月に結成されてからフロンティア新原子動力研究グループは、動燃内から寄せられた以下の意見を参考に活動を行ってきた。

- (1) 1兆円プロジェクトを考えること。
- (2) どんどん新しいテーマを提案すること。
- (2') 研究テーマを絞ること。
- (3) 21世紀の高速炉を提案すること。
- (4) 4-5年で一応成果を出せるようなプロジェクトの提案をすること。

より具体的には、当時動燃内で纏められた、フロンティア研究推進委員会 新分野開拓作業部会報告書 3. 未開拓利用領域分科会報告書⁽¹⁾ を参考にした。

以上の考え方従ってフロンティア新原子動力研究グループでは、宇宙炉、水素製造炉、地下立地炉、液体金属MHD発電システム炉、深海炉、コジェネレーション型高速炉について検討を行ってきた。その結果深海炉及び宇宙炉を開発目標にした可搬型高速炉の研究が、これから研究にふさわしいという考えに落ち着いた。そこで高速炉の研究開発に対して世界中で逆風の強く吹くという情勢、即ち最近の新聞報道でも伝えられるように、米国では新型炉計画がほぼ総てデスクワークの段階で終了せざるを得ないという情勢を鑑み、本計画提案では試験炉建設の実現可能性に最重点を置いた。そして可搬型炉の中でも、動燃の社会的立場を考慮し、技術的実現性の極めて高いNaK冷却地上試験炉建設を中心に、可搬型高速炉開発計画を立てた。

2 目的及び必要性

可搬型高速炉としてはまず深海炉が求められている。海洋の専門家の間では付録1に示す海洋科学技術センター長期計画⁽²⁾のように、「エネルギー源」は「基幹技術」のトップにあげられている。そして深海で他のエネルギー源に比較しづっと長期間使用可能な原子力動力源の開発が、次のような表現で求められている。

「なお、放射性物質を用いる原子炉や電池については、安全性や国の内外の情勢に鑑み、十分実用化が見通せた段階で導入を検討する必要がある。」

我が国の原子力界はこの様な原子力動力源が技術的に可能かどうか、海洋の専門家に答える義務があると考えている。その為には地上で試験炉を製作し試験を行って、パブリックアクセプタンスの得られるような、深海炉製作技術を確立する必要がある。

このような地上用試験炉としては、技術的実現性が極めて高い10-40kWeの高速炉システムが適している。本システムは、一次系はNaK冷却型高速炉であり、二次系はHe-Xe混合ガスを用いた密閉ブレイトンサイクルである⁽³⁾。

深海炉の研究は他の海洋関連の研究と同様に国際協力で行う必要があり、現在世界中より求められている日本の国際貢献に大いに寄与するものである。また観測データが地球環境問題の解決に役立ち、大きな国際貢献となり得るものと考える。

深海での原子炉の需要としては次のものが挙げられる。

- ①無人観測基地用動力源
- ②有人基地用動力源
- ③潜水調査船用動力源
- ④深海微生物飼育基地用熱源
- ⑤小規模工事用動力源

この内早期に原子力を必要とする用途としては、①の無人観測基地用動力源及び、⑤の深海底での小規模工事用動力源があげられる。①については、付録1の海洋科学技術センター長期計画⁽²⁾では、今後10年間で実用化が見込まれる大規模システムとして、「無人長期深海ステーション」というタイトルで記載されている。また⑤については、ごく最近深海にCO₂保存基地をつくるための研究を行おうという新聞報道がなされたが、深海で何らかの本格的作業を行うとなれば、このような小規模工事用動力源が必要となる。これらの用途に用いられる具体的なシステムについては次章で説明する。現在原研では軽水炉型の潜水調査船用の原子炉の設計研究を行っている。しかし海底で長時間使用する小規模工事用及び無人基地用の炉は、軽水炉型では水処理の必要があり極めて困難である。

又宇宙炉研究では、10 - 40 kW_e電力領域のNaK型宇宙炉が、フランスで初期のヨーロッパ宇宙開発計画の電力需要を満たすものとして、太陽電池等と比較しシステムの全重量が小さくなるという観点より研究されている⁽⁴⁾。上記地上用試験炉の製作経験は、このような10 - 40 kW_e電力領域のNaK型宇宙炉だけでなく、より遠い将来に予想される数百kW_eの宇宙炉製作に反映出来るものである。

3 システム概要

本高速炉システムは、現時点での技術的確立性の点から、一次系は冷却材溶融の為の予熱が不要な、炉容器出口温度550-650°CのNaK冷却炉とし、二次系は宇宙用に既に開発されているHe-Xe混合ガス密閉ブレイトンサイクルとした。全システムは、深海の高圧状態に耐えるように耐圧殻中に設置される。

本システムの発電装置としては、大型発電への外挿性のある動的な発電方式、即ち米国NASAが開発した密閉ブレイトンサイクルを予定しているが、100kWe以下では実用性があると言われている熱電発電等の静的な発電方法についても、並行して研究するものとする。深海調査は国際的なものであるので、米国DOEとの協力が望ましい。本システムは実現性の見通しのあるNaK炉を用いるものとするが、より高温で高い熱効率が期待できるリチウム炉についても、関連研究として研究を行うものとする。

参考のために、現在深海で5kWeの発電の為に利用されているディーゼルエンジン発電装置を、図3.1に示す。総発電量は60kWeHであるので、12時間しか使用できないということである。従って上記説明のような高速炉システムが開発されれば、人類の深海での活動が飛躍的に発展すると考えられる。

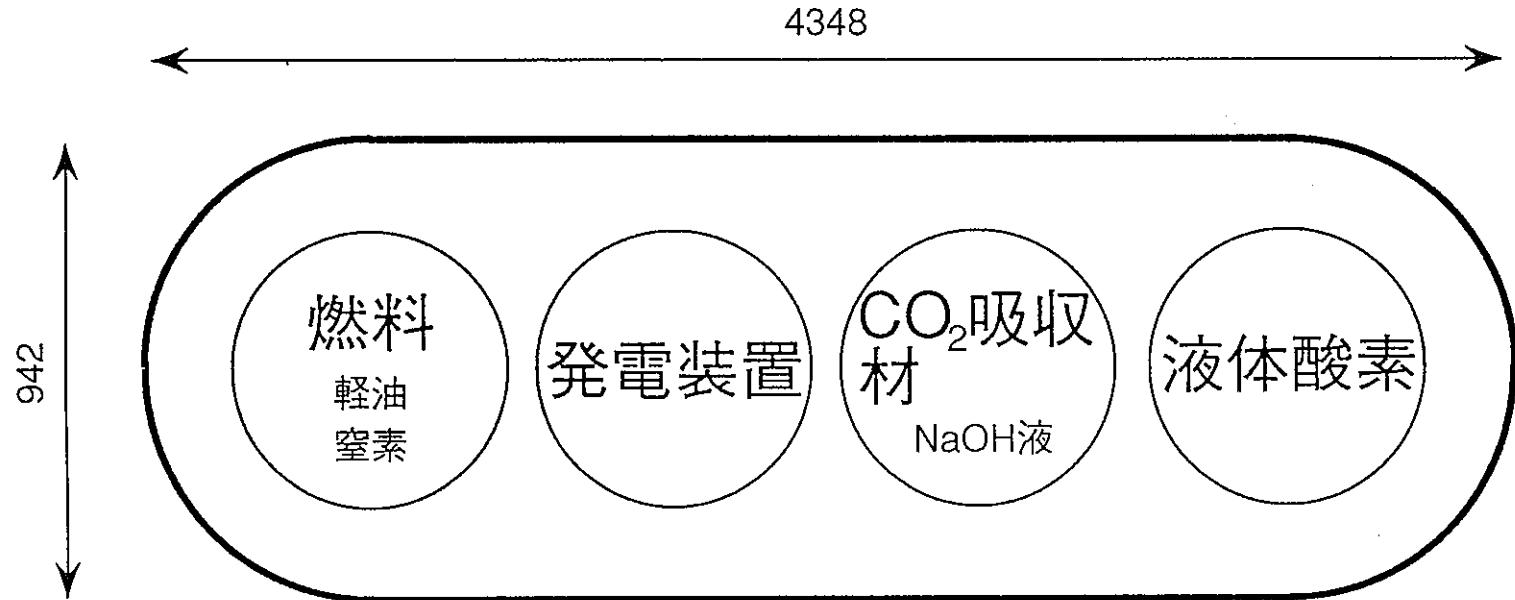
次にこのような高速炉システムの具体例について説明する。図3.2に無人観測基地用10kWeシステムを示す⁽⁵⁾。図3.3及び図3.4には無人観測基地を示す。図3.3に示すものは主に地球物理的な観測を目指したものであり、図3.4に示すものはそれに加えて深海生物調査をも目的とする。太平洋海底にこの様な基地が将来30-50ヶ所設置され、数年に亘る長期間の観測が行われることが望まれる。無人観測基地用10kWeシステムはこれらの基地の各種計測器、データレコーダ等の電源として利用される。これらの無人観測基地の高速炉システムの運転は無人運転或いは、陸上に設置されたコントロールルームまで敷設された光ファイバーケーブルを利用した運転の2通りがある。どちらの方法によるかは、その時の技術水準、観測データ取得の緊急性、予算等を考慮して決定される。

図3.5に潜水調査船用20kWeシステムを示す⁽⁶⁾。図3.6には潜水調査船全体の概念を図示する。現在の「深海6500」等の潜水調査船では深海で数時間の活動しか出来ないが、図3.6に示す潜水調査船では一週間の活動が可能である。潜水調査船用システムでは、原子炉の近傍にガンマ線遮蔽用のタンクステンが配置されているところが異なるだけで、他の点は無人観測基地用システムと同じである。

更にこのようなシステムの利用法としては、上記以外にも現在スタートしたばかりの深海微生物の研究で、将来有用な微生物が発見されたときに、深海底でこの様な微生物を大量飼育する際の熱源としての利用する方法が考えられる⁽⁷⁾。図3.7にこの様な深海微生物飼育基地を図示する。

より遠い将来には、深海海底資源採鉱のために、深海用高速炉の動力源がある海底基地を設置することも考えられる。この様な基地の概念を図3. 8に、動力源である200kWeシステムを図3. 9に示す。現在専門家の間で検討されている海底資源採鉱技術を付録2で紹介する⁽¹¹⁾。

図3. 10にフランスが21世紀始めにアリアンVロケットで打ち上げるとして設計している20kWe宇宙炉を示す。深海炉と宇宙炉を比較すると、大きく異なっているところは、前者が耐圧殻内面の冷却器より海水中に放熱するのに対して、後者はラジエータで無限宇宙空間へ放熱することのみである。



電力 5kW 発電量 60kWH 重量 3,000kg (本体1,600kg ;耐圧殻;1,400kg)

図3. 1 深海用ディーゼル発電機概念

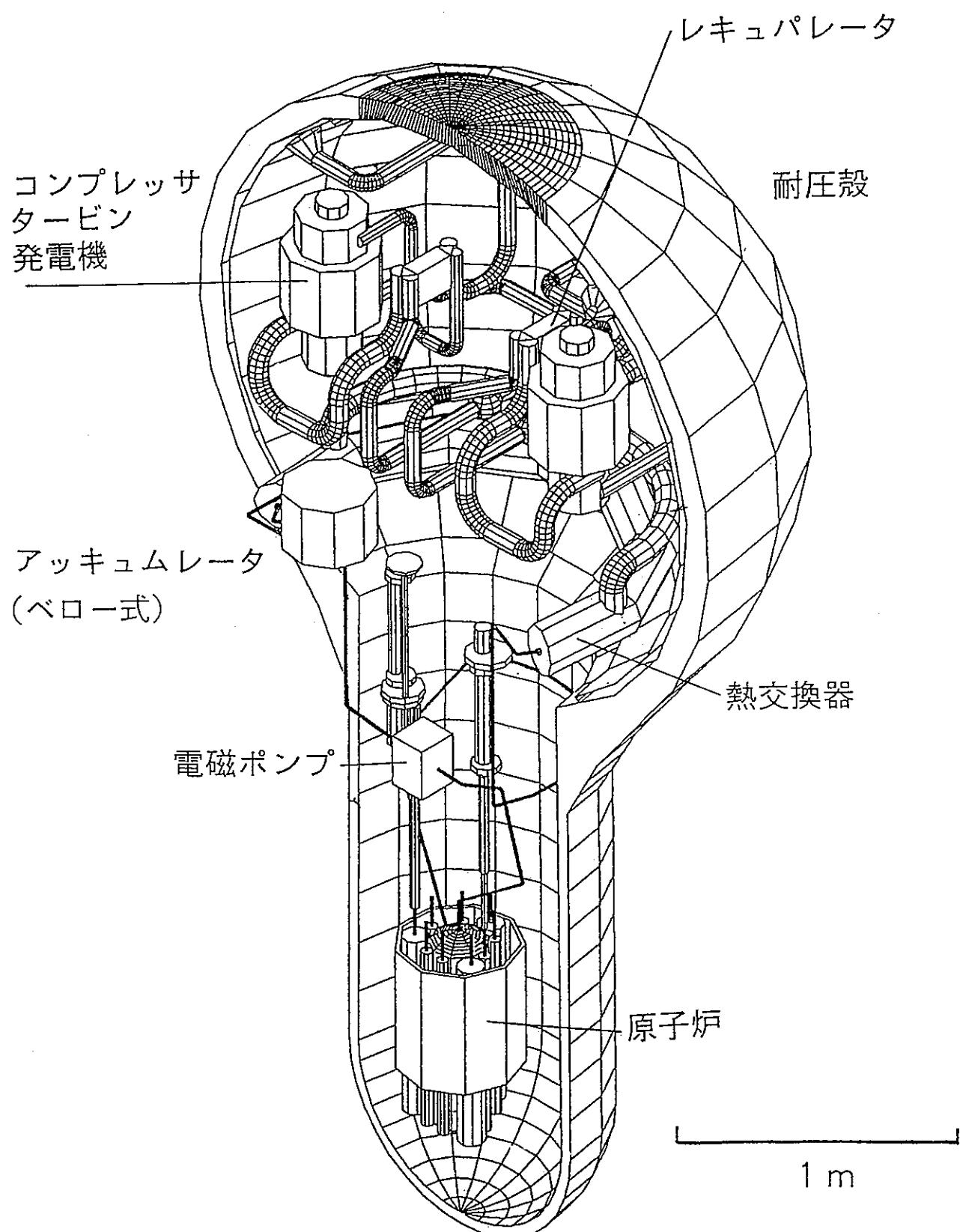


図3.2 無人基地用 10 kW e 高速炉
システム

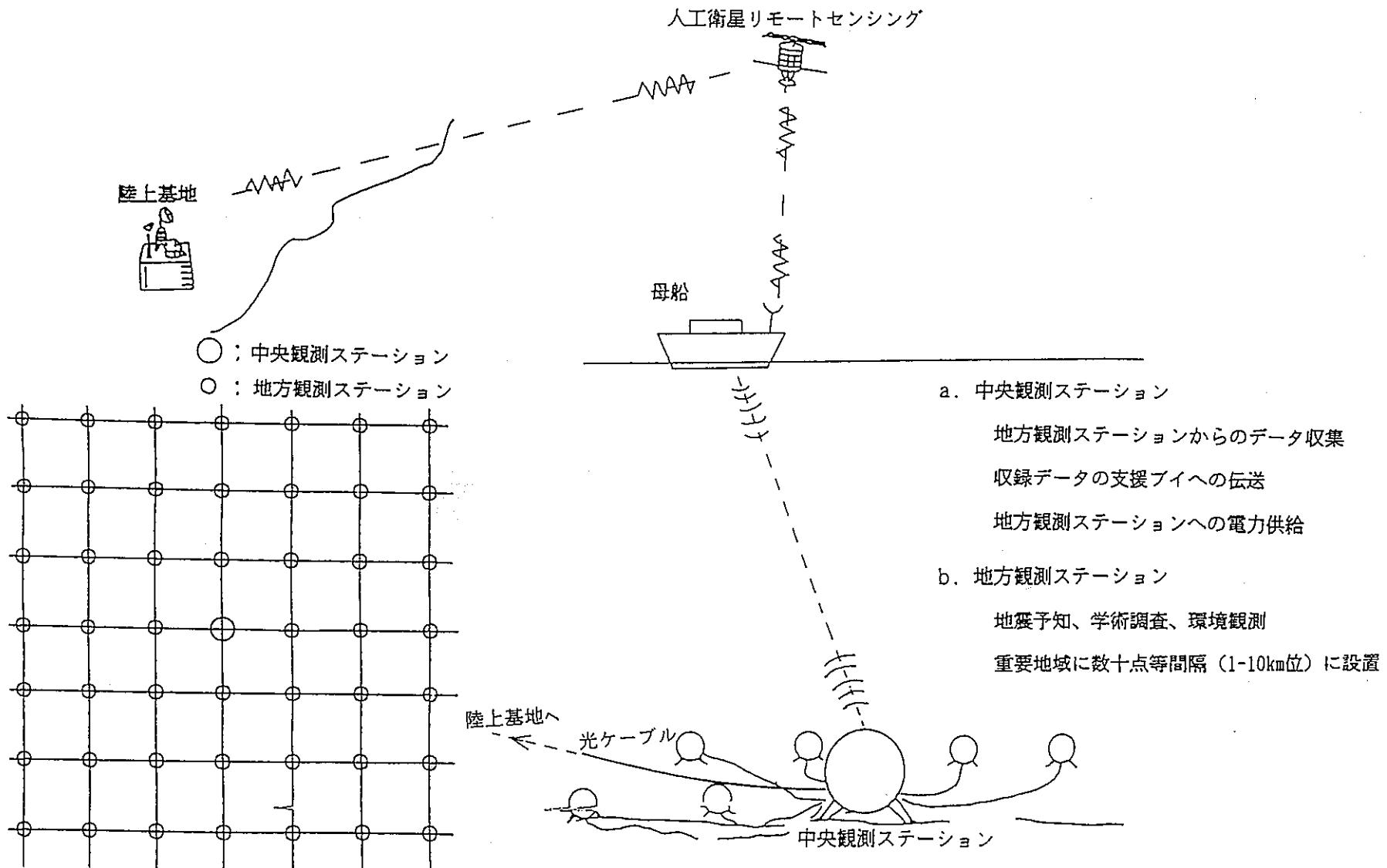


図3.3 定点観測グリッド無人基地

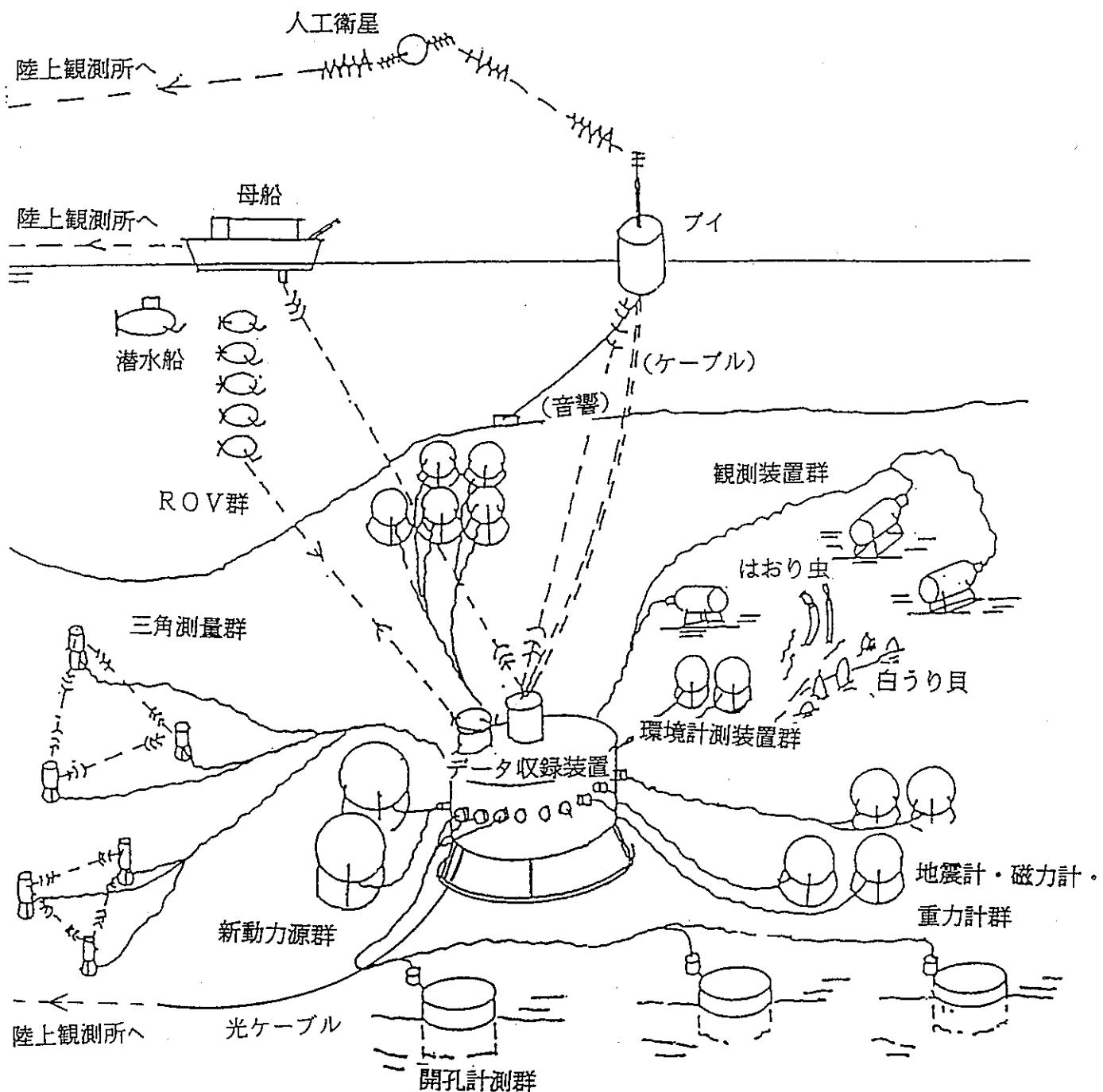


図 3. 4 総合海底観測システム無人海底
基地

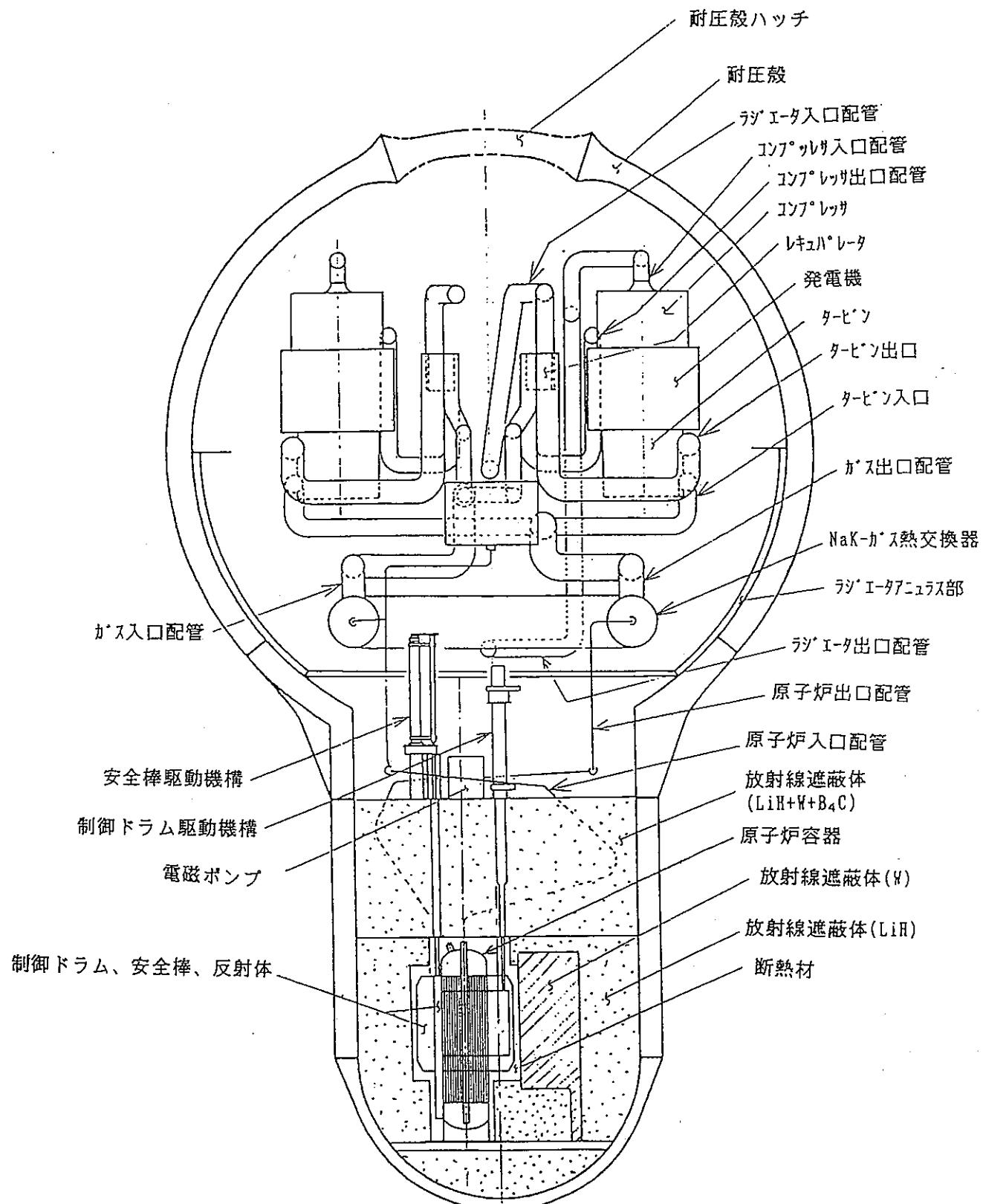


図 3. 5 潜水調査船用 20 kW e 高速炉
システム

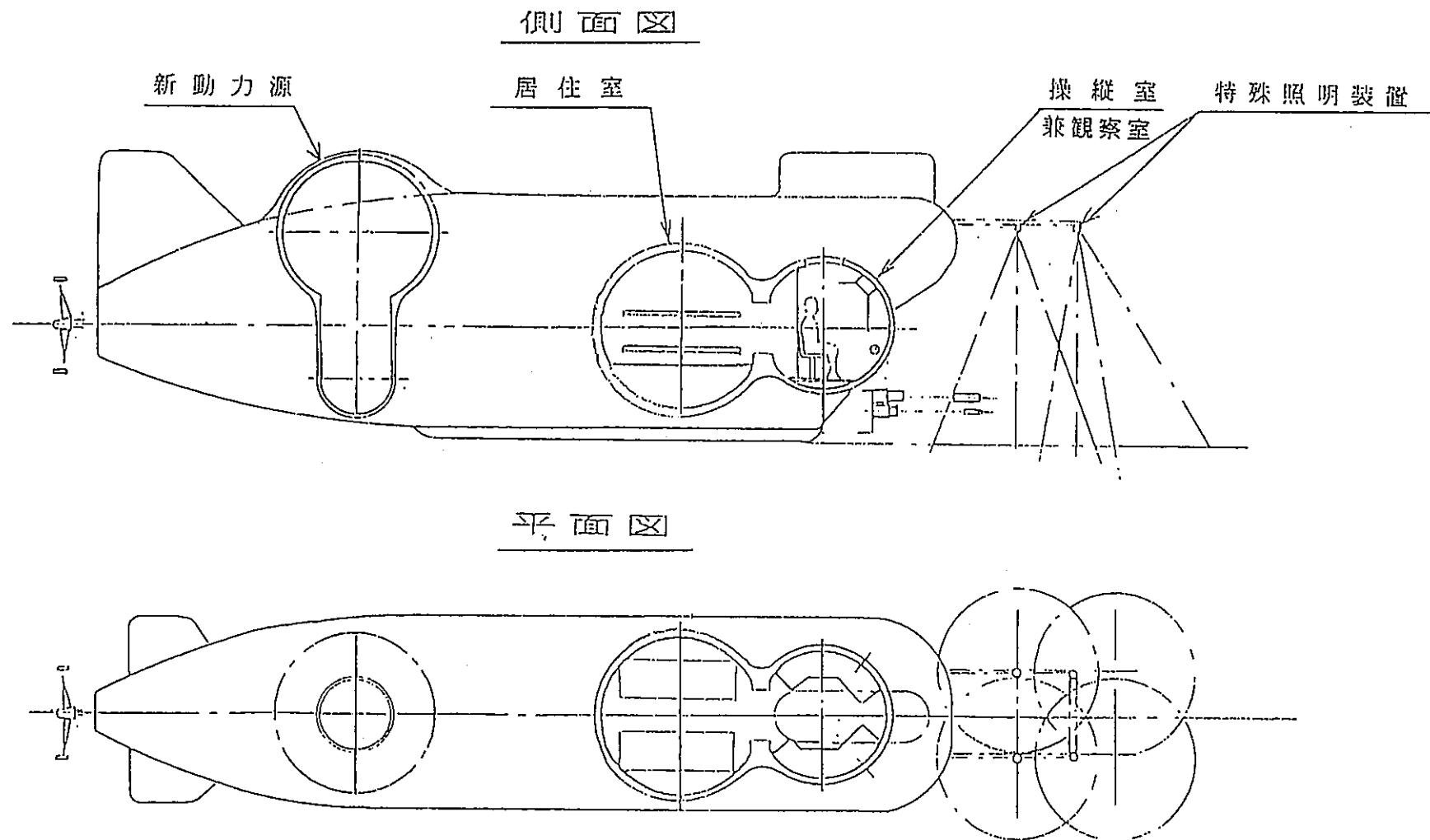


図 3. 6 潜水調査船概念 (S = 1 / 100)

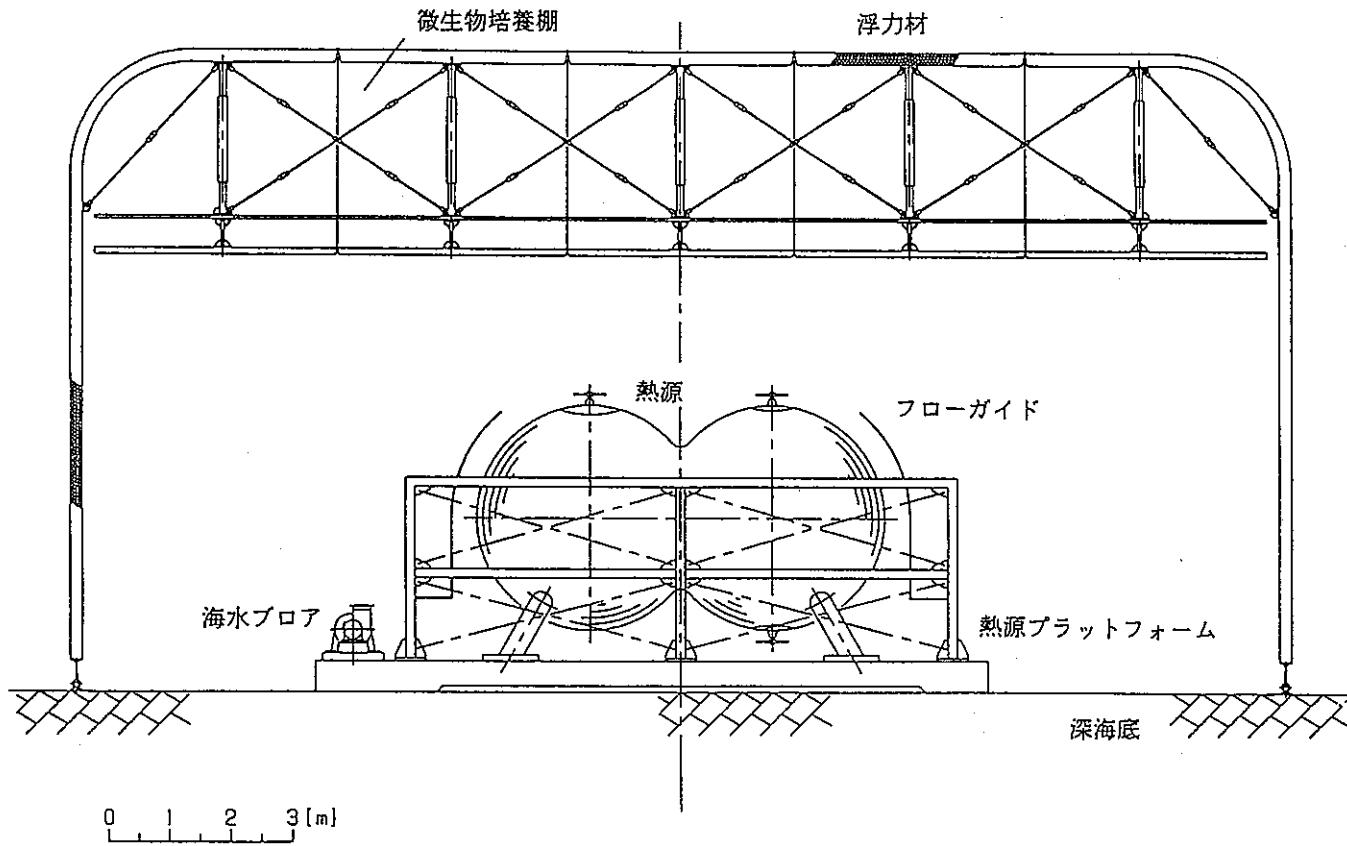


図3.7 深海微生物飼育用熱源基地概念

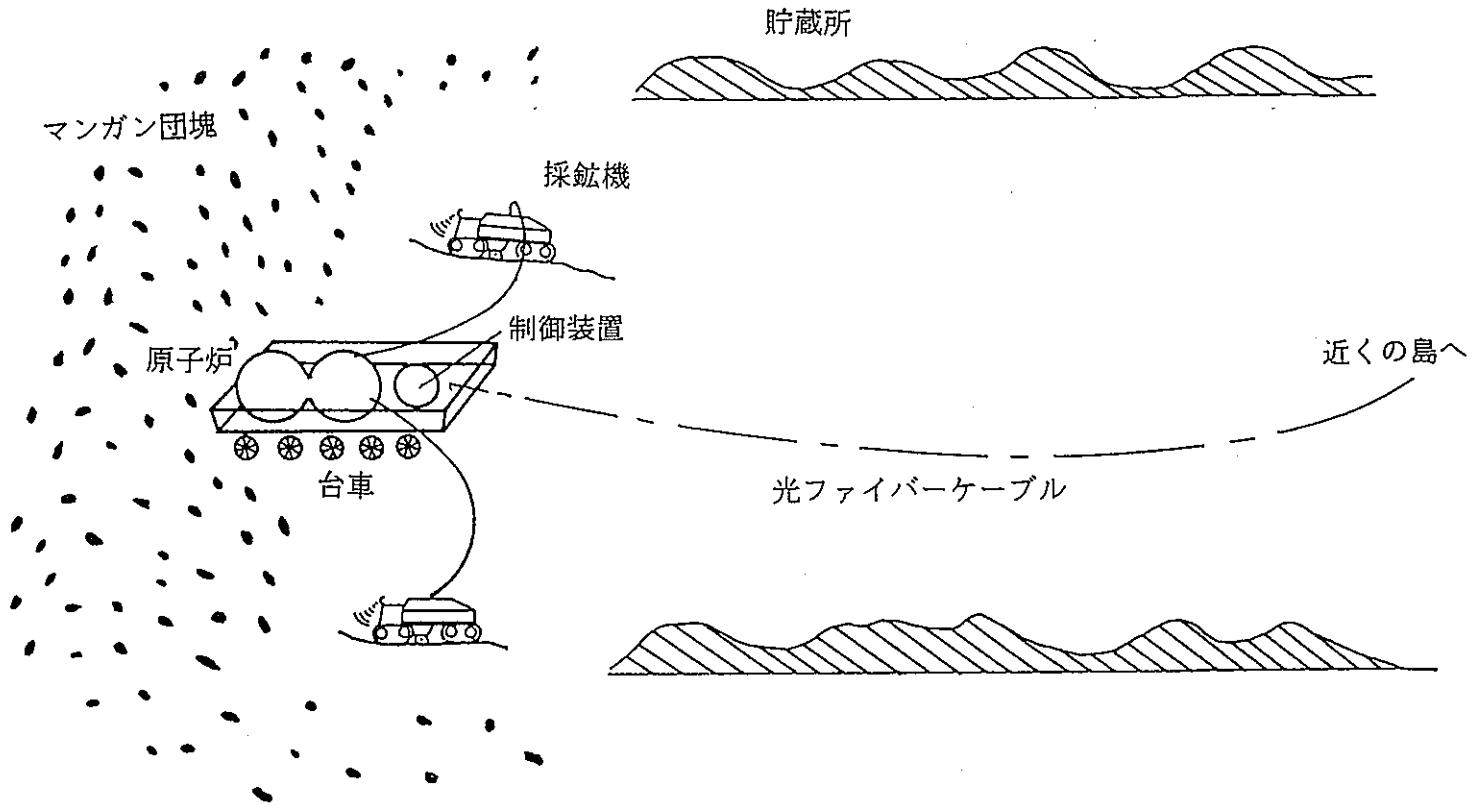


図3.8 マンガン団塊採鉱基地概念

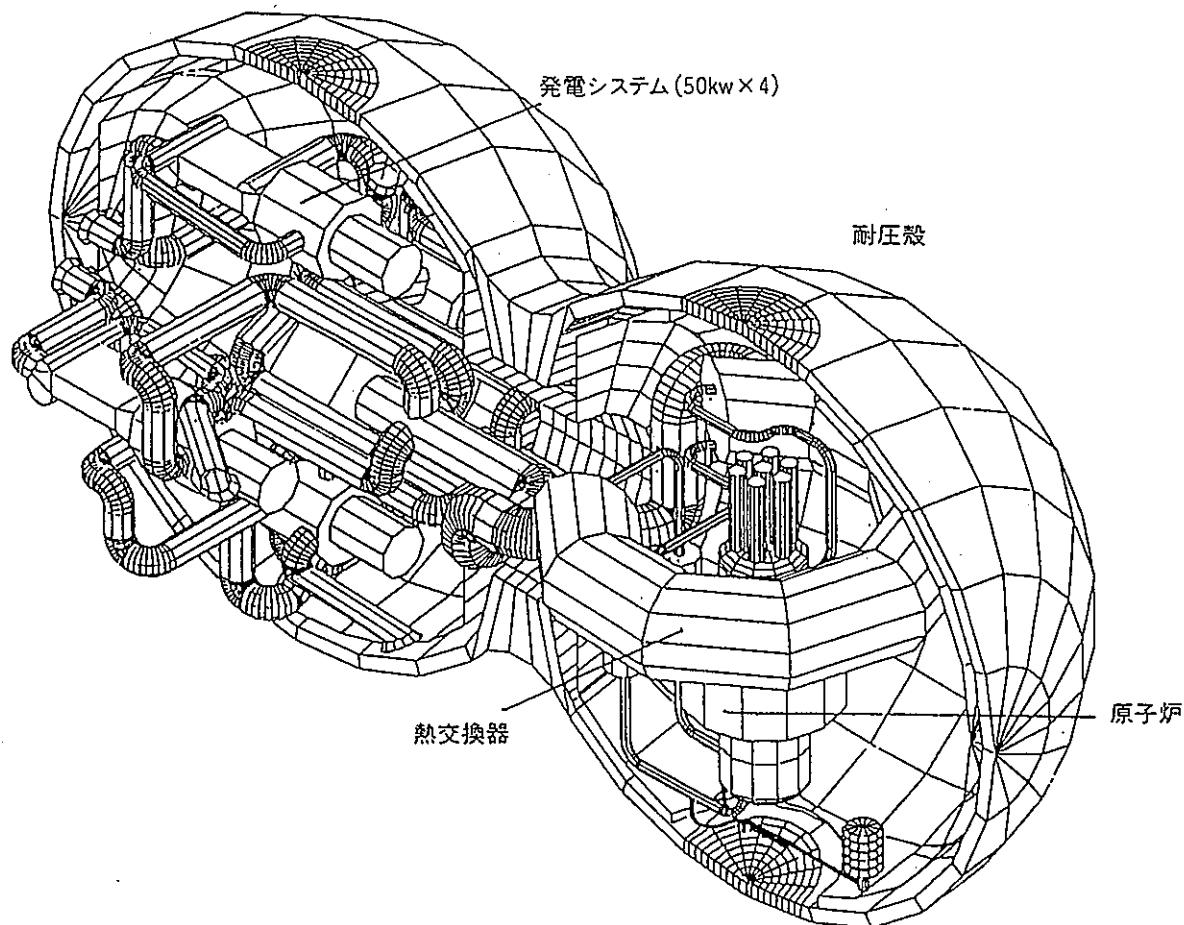
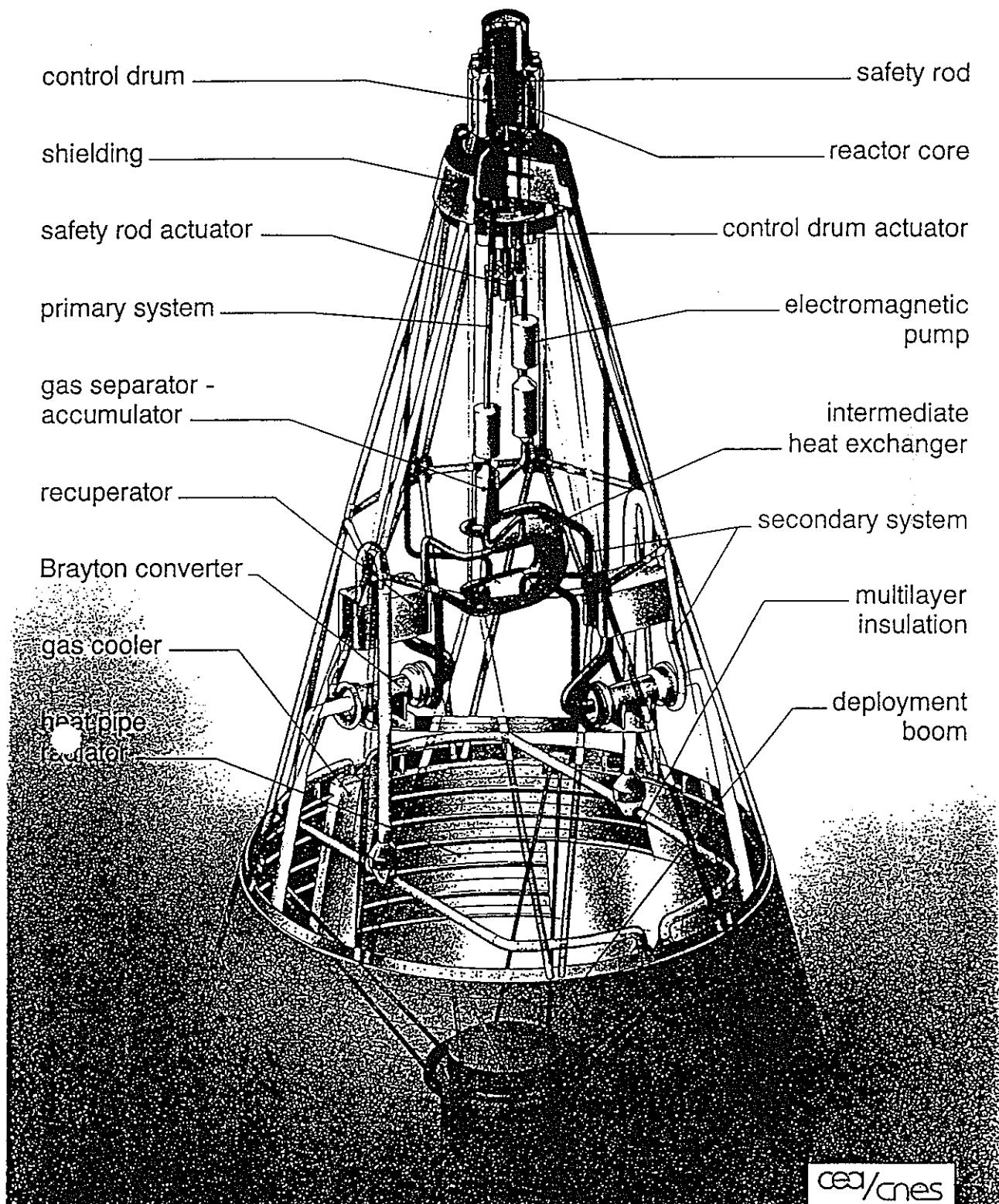


図3.9 採鉱基地用 200kWe システム

ERATO 20 kWe

Nuclear Brayton space power system



cea/cnes

図 3. 10 ERATO 20 kWe 宇宙炉

4 スケジュール及び開発項目

4. 1 概念

本開発計画の概念をスケジュールの形で表4. 1に示す。このスケジュール概念は、1997年頃に予定される次期原子力長期計画で、地上試験炉の製作が認められるという想定のもとに、作成したものである。スケジュールのメインの部分は、太線で表した地上試験炉の部分である。地上試験炉はまず最初の20年間は深海炉を研究目標にし、その後の10年間は宇宙炉を研究目標にする。

深海炉計画について言えば、地上試験炉による試験終了後ある程度の準備期間を経た後、諸条件が満たされ可能となれば第一号深海炉の製作を行う。この準備期間中に原子力界以外の人々との色々な調整が行われることになる。第一号深海炉の製作及び続いて行う海中試験については関係機関と十分な打合せが必要であるが、原子力のパブリックアクセプタンス上、海洋関係機関の協力を得て動燃が実施主体となって実施することもあり得る。宇宙炉についてもほぼ同様な展開を考えている。

4. 2 全体スケジュール及び開発項目

表4. 2に開発項目とそのスケジュールを示す。開発項目としては、地上試験炉、システム設計、コンポーネント開発、モデルテスト、関連技術がある。

地上試験炉は本可搬型高速炉開発計画の中心になるものであるが、まず深海炉開発を最初の目的として試験計画を立てる。地上試験炉の製作は2007年頃としている。この試験炉では過渡試験と連続運転試験が行われる。これらの試験では、動燃敷地内に図3. 3或いは図3. 4のような模擬無人基地を設置し、実験を行う。これらの試験の後には、この炉は宇宙炉の試験に利用される。

システム設計のスケジュールを表4. 3に示す。システム設計は、詳細設計が地上試験炉の製作開始前に終わるようにスケジュールを組んでいる。熱流動解析、構造解析、安全解析、炉心解析、信頼性について検討する。これらの内容については、更に次章で説明する。

コンポーネント開発は1995-2005年に行われることになる。コンポーネント開発の内、密閉ブレイトンサイクル(Closed Brayton Cycle; CBC)に関するものは、米国NASA用のものを開発した会社に委託するのが良いと考えられる。この他のコンポーネント開発については、設計研究からのフィードバックが出来てからスタートし、地上試験炉製作前に完了する。コンポーネント開発の具体的な内容については次章で説明する。

モデルテストは、冷却器試験とモックアップ試験を行う。前者は本システムの最も特徴的な部分である、耐圧殻を通しての海水中への放熱について、図4. 1に示す試験装置で水を用いて試験するものであり、全体スケジュールの前半に計画している。後者は図3. 2或いは図3. 5の高速炉システムを、実際の炉心燃料の代わりに電気ヒータピンを用いで模擬した試験装置を使用して、試験するものである。この場合密閉ブレイトンサイクルは、コンポーネント開発で開発した実機のものを使用する。モックアップ試験も地上試験炉製作前に終了するよう計画している。

関連技術としては、宇宙炉、コジェネレーション型高速炉、原子力電池のシステム設計を行うとともに、各炉の基本技術の研究を行う。宇宙炉の基本技術としては、1000°C以上の冷却材温度をねらうLi技術、宇宙空間への放射放熱を可能にするラジエータ技術がある。これらは、全体スケジュールの当初より深海炉開発と平行して行うものとする。

原子力電池については、付録4で技術的説明をした。原子力電池は深海炉と共に技術に基づくものというよりは、小規模発電という同じ目的を有するものという位置づけである。原子力電池は常に発熱しているラジオアイソトープを用いるため、その冷却が大変で数kWeという規模の発電は技術的に非常に難しい。米国の現在の最大発電量は、約25.0Weである。よって、動燃が将来計画を立案するとき、原子力電池をその中心にすることは、規模が小さくて無理である。原子力電池の研究開発は表4. 2で示したように、可搬型炉の研究開発に並行して関連技術として行うのが好ましい。

また、付録5では種々の液体金属の特性を比較検討して、深海炉への適用性について考察する。

表 4. 1 スケジュール概念

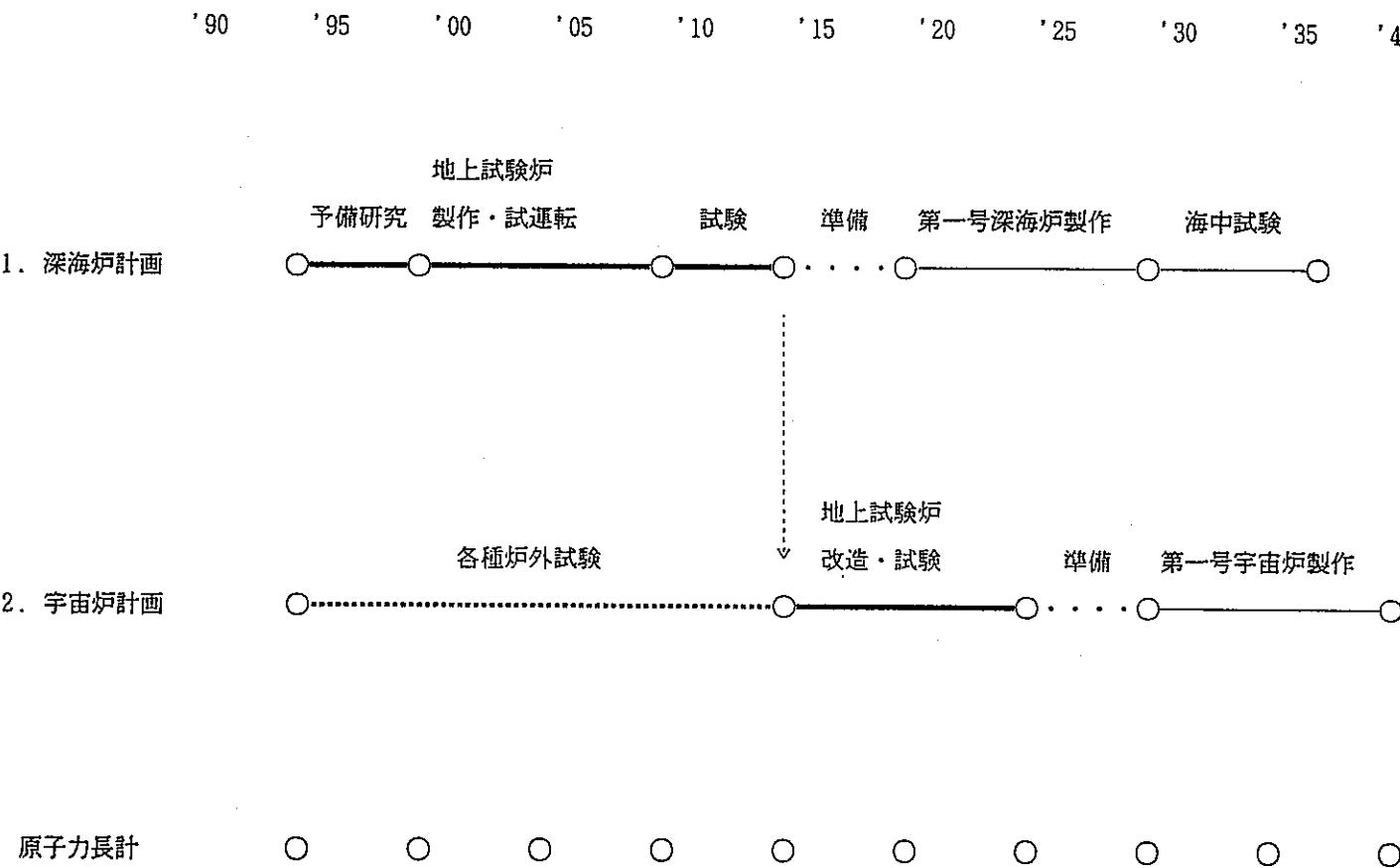


表 4. 2 開発項目とスケジュール

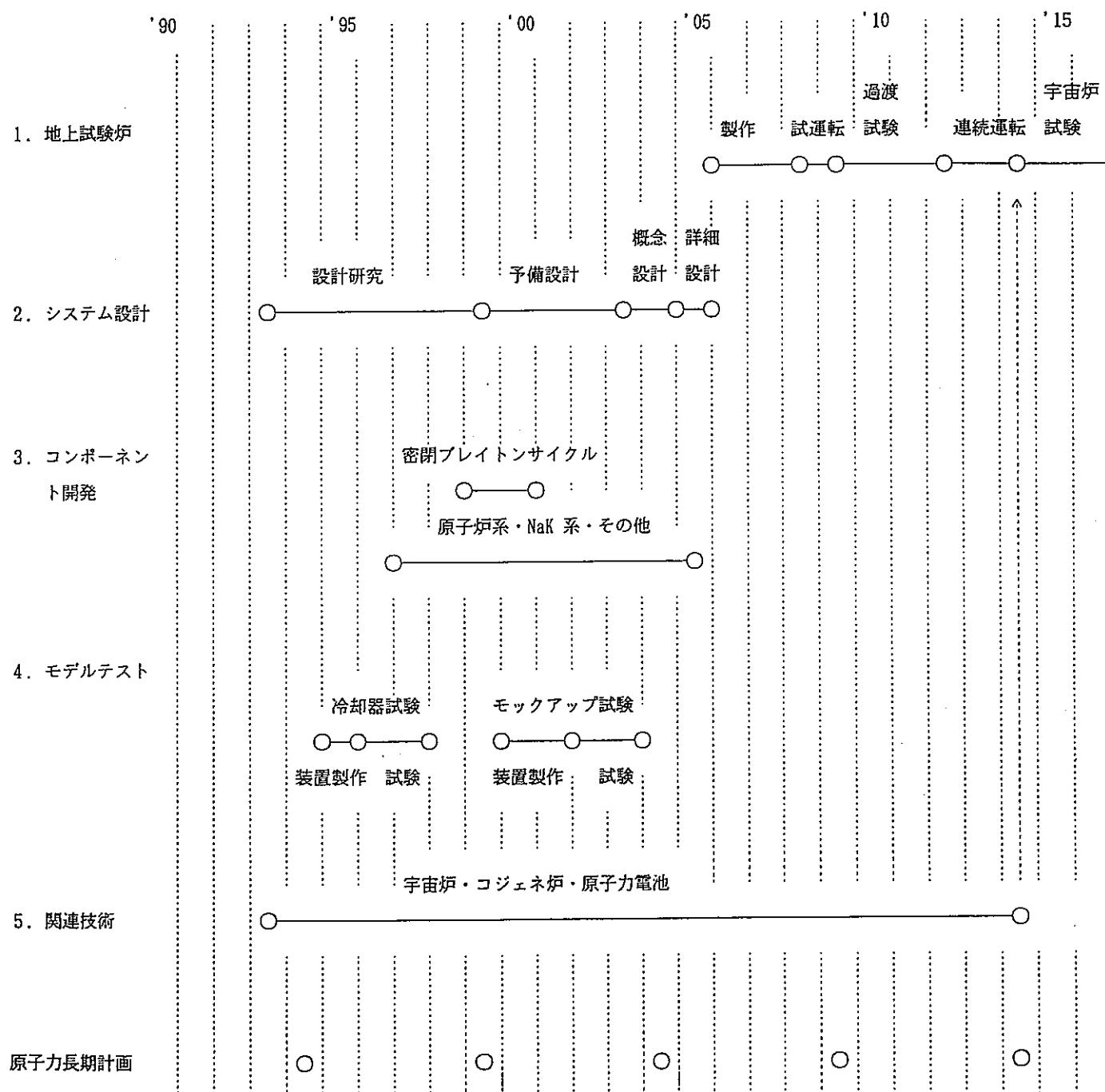
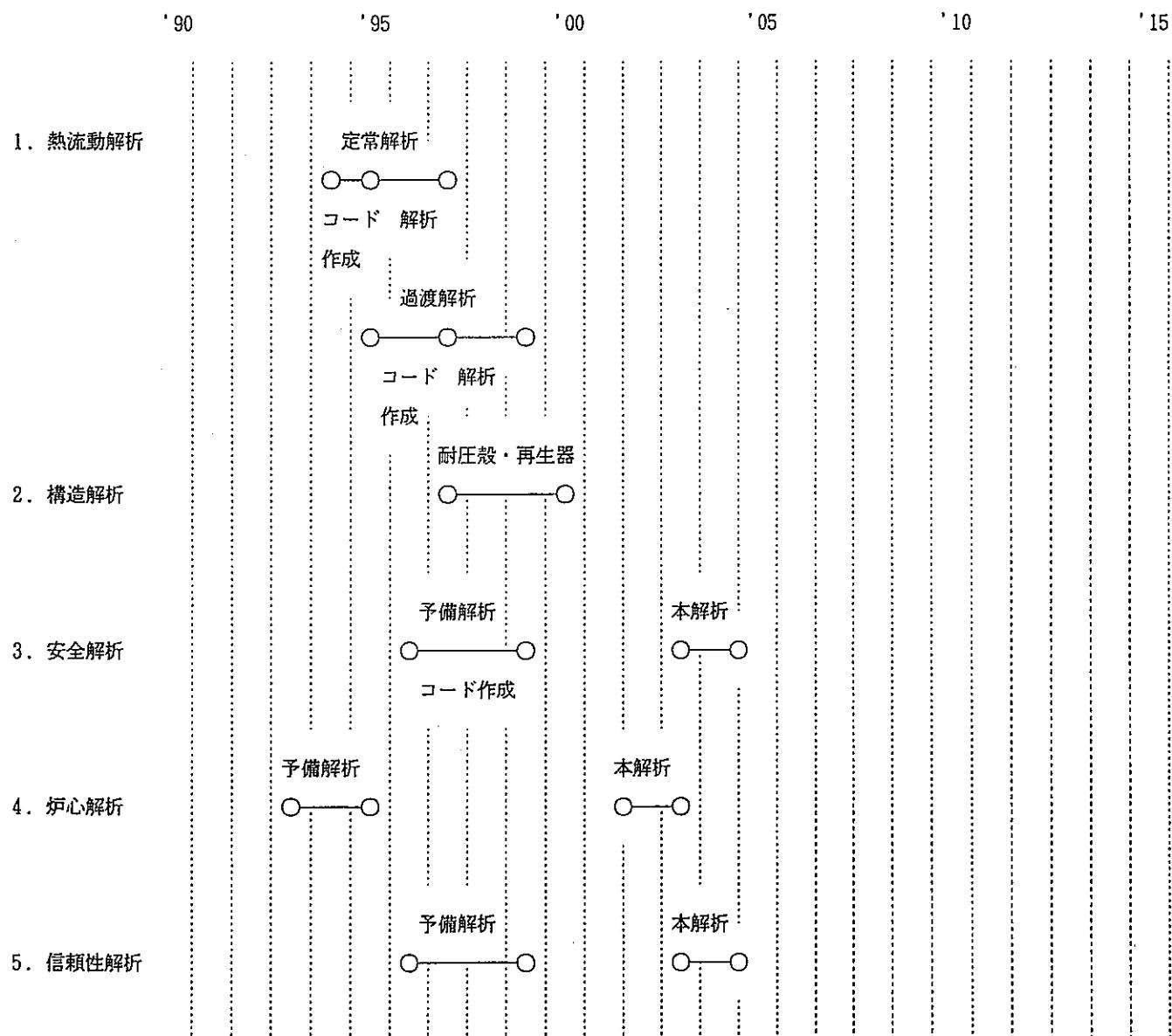


表4.3 システム設計スケジュール



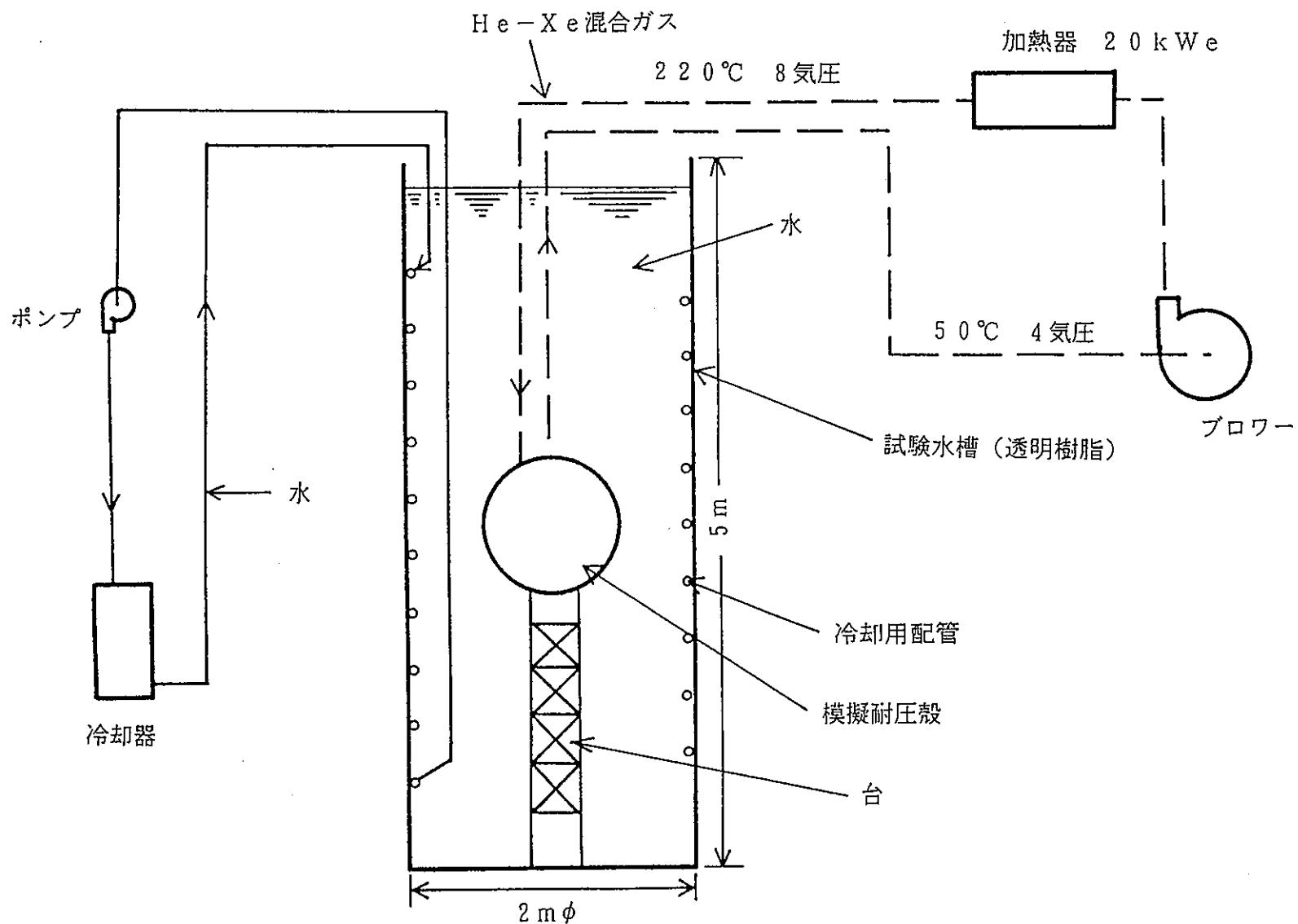


図 4. 1 冷却器試験装置

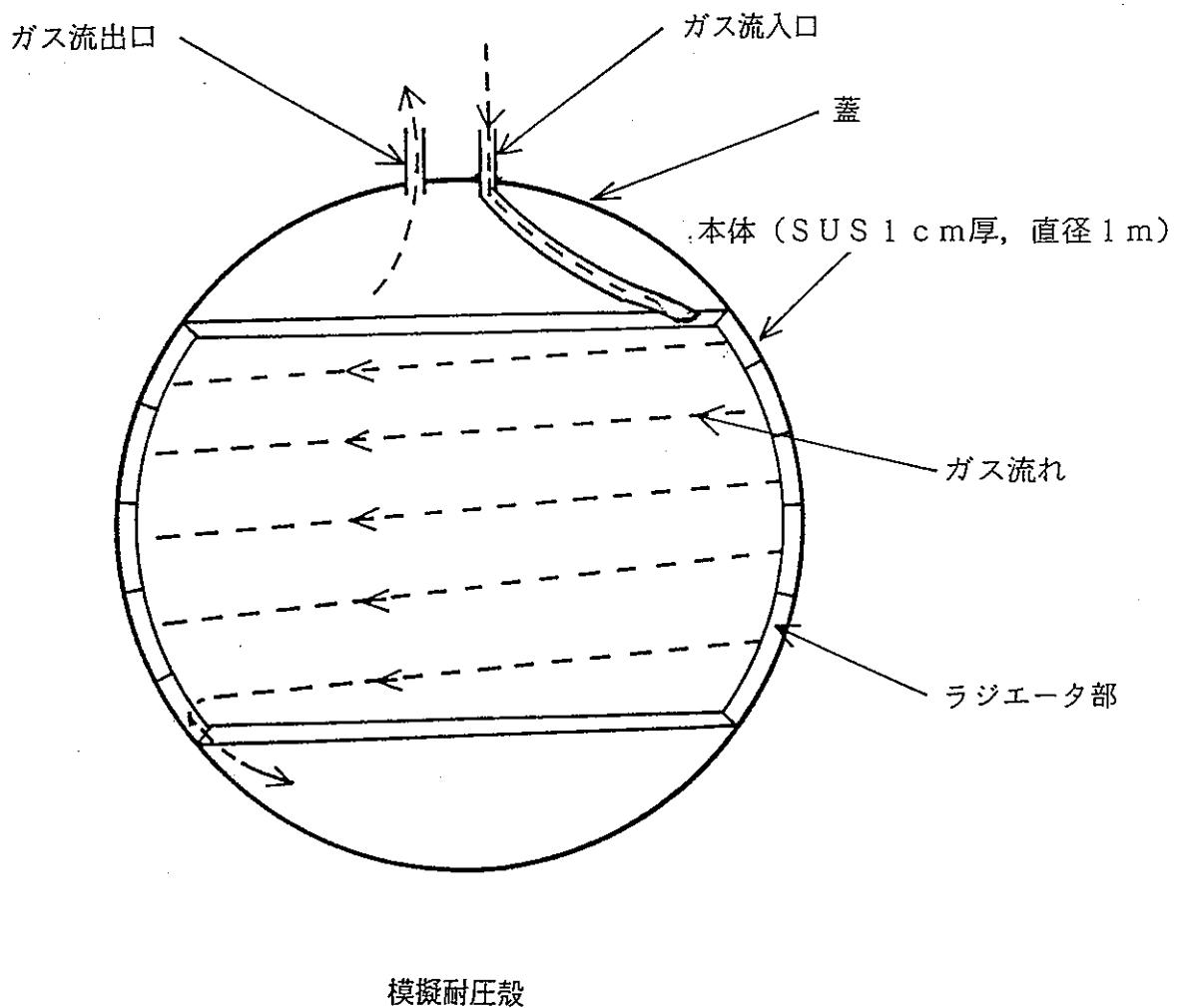


図 4. 1 冷却器試験装置（続き）

5 システム設計及びコンポーネント開発

5. 1 システム設計

深海炉開発においては、開発対象は原子炉を含む一次系と、二次系の耐圧殻内面に設置する冷却器が主で、二次系に組み込む密閉ブレイトンサイクルは米国メーカより購入するものとする。ここでは先ずシステム設計の各開発項目について説明する。

(1) システム設計

システム全体の熱効率向上、重量の軽減、メンテナンス容易性等を目指して、各コンポーネントとシステム設計パラメータを決定するような計算プログラムを開発する。開発された計算プログラムを用いて、全体の設計の取りまとめを行う。

(2) 熱流動解析

炉容器出口冷却材温度 550 - 650 °C の高速炉の、定常運転時及び過渡状態時の熱流動解析を行う。このため、定常及び過渡解析コードを作成し解析する。これらのコードの解析結果を、モデルテストと地上試験炉による試験のデータと比較検討する。

(3) 構造解析

炉容器、炉内構造物、配管等の構造設計解析を行う。これらの機器のうち、熱過渡条件の厳しい再生器（レキュバレータ）と、今までの原子炉システムでは無かったコンポーネントである耐圧殻についての検討が重要になる。

(4) 安全解析

深海炉は従来の地上炉と比較してずっと小さいものであるので、安全解析上難問があるとは予想されないが、海中で使用する或いは二次系にガス系を使用するという、従来のシステムでは無い新しい点があることに着目して行うものである。地上試験炉製作開始前に、安全審査を受けるに必要な資料を作成する。

(5) 炉心解析

炉心の核熱解析を行うとともに、遮蔽解析を行う。炉心の中性子挙動については、原研 FCA を用いて実験を行う。

(6) 信頼性解析

無人基地用高速炉システムの場合、原則として無人運転を前提としているので信頼性解析は重要である。この場合運転は、炉の起動・停止は母船より運転員が行い、定格運

転のみ無人自動運転となる。尚無人基地用高速炉システムの場合でも、必ずしも無人運転が必要という訳でなく、近くの陸地より光ケーブルを敷設し、陸上より運転することも可能である。信頼性解析は所謂フォールトツリーを使用して行う。

5. 2 コンポーネント・計測機器開発

本システムは、炉容器出口冷却材温度が550°Cと650°Cの場合について検討しているが、前者の場合は現在のFBRの温度条件であるため、本システムの研究開発に難問は見出せない。地上試験炉製作の可能性については、ほぼ間違いなく成功すると考えてよい。後者については、システム設計中の熱過渡試験及びモックアップ試験の結果、NaK冷却炉で技術的に可能かどうか明らかになる。

表5. 1にコンポーネント・計測機器開発項目を示す。以下この表に従って説明する。

(1) 原子炉関係

原子炉を耐圧殻内に設置出来るようなコンパクト構造設計を可能にするため、制御棒等の開発研究を行う。

(2) NaK(一次)系

炉容器出口冷却材温度が650°Cと高温にする場合に、熱過渡試験が特に必要になる。NaKの構造材料腐食についても試験をし、実験データをとる必要がある。

(3) 密閉ブレイトンサイクル(二次)系

ガススタービン・再生器・圧縮器・交流発電機は米国NASA用に密閉ブレイトンサイクルを開発した会社に、今回も開発を委託する。宇宙用の密閉ブレイトンサイクルとHe-Xe混合ガスの温度、圧力条件が必ずしも一致しないので、新たに設計を行う必要がある。放熱器については、図4. 3に示す試験装置を用いて、熱伝達試験を行う。

(4) 計測器

今までNaに関する実験データは多くあるが、NaKの場合については余り無いのでR&Dを行う必要がある。

研究計画全般について言えることであるが、海洋科学技術センター、資源環境技術研究所或いは大学(海洋関係)と共同研究が可能となるところがあれば、実施するのが望ましい。又、原研とも潜水調査船等、共同研究が可能なものについては共同研究を実施するのが望ましい。

表5. 1 コンポーネント・計測機器開発
項目

プラント構成主要機器	概略仕様	開発項目もしくは試験	装置(同番号は同装置)	モデルテストへの組み込み(確性試験)	備考
原子炉関係					
原子炉容器	φ182mm×700mm ⁺	・コンパクト構造設計 ・炉内流動 ・熱過渡		○	
炉停止システム (調整棒、安全棒)	制御ドラム 及び 安全棒	・コンパクト構造設計 ・耐久性 ・高温軸受け ・制御安定性(川滑作動)試験 ・スクラム試験 ・ダシノ開発	①	○	
NaK(一次)系					
電磁ポンプ(一次系)	1R, 650°C 150l/min又は75l/min が2台	・コンパクト構造設計 ・コストダウン特性 I・絶縁特性、劣化 ・キャビテーション特性 ・OH 特性 ・熱過渡特性 ・・・ 650 °Cのみ	②*	○	
熱交換器(NaK/HeXe)	NaK 630-518 °C/ HeXe 635-402°C φ0.2m×1.85m ⁺	・コンパクト構造設計 ・熱伝達特性 ・熱過渡特性	③	○	
NaK 井	1R, 300°C	・開発課題無し		○	高温部仕様の場合はR&Dが必要
(配管ベローズ)	[II]ベローズ 650°C	I・SN寿命曲線 ・・・ 650 °Cのみ			配管引き戻しが苦しいときの代案。
一次系全収納 ガードベッセル		・開発課題無し			
アッキュムレータ		・開発課題無し			NaK の体積膨張はペローズの変形で吸収

表 5. 1 コンポーネント・計測機器開発
項目（続き）

プラント構成主要機器	概略仕様	開発項目もしくは試験	装置（同番号は同装置）	モデルテストへの組み込み（確性試験）	備考
密閉ブレイトンサイクル（二次系）					
ガスター・ビン		・別途検討		○	
再生器		・別途検討		○	
圧縮器		・別途検討		○	
交流発電機		・別途検討		○	
放熱器（ラジエーター）	耐圧殻利用タイプ	・球面三次元的流路設計 ・熱伝達特性 ・熱過渡特性	③	○	
高温ガス弁		・開発課題無し		○	
計測器					
温度計	熱電対				
中性子検出系		・温度特性試験（校正法）、照射試験、応答試験、 寿命・・・650 °Cのみ			
圧力計(NaK, HeXe)		・温度特性試験（校正法）、照射試験、応答試験、 寿命	⑤	○	NaK 計器についてはR/ D データ不足
流量計(NaK, HeXe)		・温度特性試験（校正法）、MI ケーブル（コイル）、 応答試験	⑤	○	同上

表5. 1 コンポーネント・計測機器開発
項目（続き）

プラント構成主要機器	概略仕様	開発項目もしくは試験	装置（同番号は同装置）	モデルテストへの組み込み（確性試験）	備考
その他					
(崩壊熱除去系)					自然放熱による。補助冷却系は不要。
保温材	ファインフレックス等 体積断熱材	・開発課題無し		○	
抵抗式放熱器		・開発課題無し	④	○	
補助電源	蓄電池	・開発課題無し ・別途検討		○	
補機系（回転機潤滑）		・開発課題無し		○	
(燃料取扱系)					一体取り替え型とする。 。
プラント全体		・動特性試験		○	

6 予算

本章では第4章のスケジュール実施に必要な予算について検討するが、検討の範囲は現在主目的にしている地上試験炉を使用した深海炉試験までとし、その後の宇宙炉試験のための試験システム改造については、現在より20-30年後の先のことなのでここでは検討しないこととする。

可搬型高速炉開発計画に必要な予算のうち、大きな項目は密閉ブレイトンサイクルの開発費、試験炉の製作費及び試験費、関連炉外試験費及び人件費がある。但しここでは人件費については算出しない。以下に各費用について検討する。

(1) 密閉ブレイトンサイクル開発費

米国NASAから研究開発の委託を受けて、密閉ブレイトンサイクルを開発したAllied-Signal Aerospace Company よりの手紙を付録3とする。この手紙に基づいて検討する。

① 深海炉に要求される設計条件での密閉ブレイトンサイクル開発費

手紙によれば、「設計条件で費用が変わる。設計条件がほぼ決まらないと正確な費用は算出不可能である。」として、\$10M-\$50Mという概算を出している。ここでは、発電出力としては開発済のずみの10kWeのものを採用するとし、ガス温度及び圧力条件を深海炉システムに最適なものに変更するものとして、費用としては平均の\$30Mとしておく。

② 開発された密閉ブレイトンサイクル購入費

10kWe密閉ブレイトンサイクル4台で\$2M-\$8M。

ここでは上記①と②の合計で約35億円としておく。

(2) 試験炉の製作費及び試験費

① 製作費

「常陽」の建設費から次のような推定計算をし、製作費は約30億円とした。

「常陽」・・・昭和52年臨界、製作費は約500億円、熱出力は50MWt。

物価上昇・・・7倍(初任給換算)

可搬型炉・・・熱出力は200kWt(0.2MWt)、電気出力は40kWe
(0.04MWt)。

小型化係数・・・200倍

500億円×7×(0.2MWt/50MWt)×200=28=約30億円

尚小型化係数については、「もんじゅ」から「常陽」の場合には次のように約 8.2 となる。

「もんじゅ」・・・平成 6 年臨界予定、製作費は約 6,000 億円、電気出力は 280 MW e、熱効率は 40%。

$$\begin{aligned}\text{小型化係数} &= (500 \text{ 億円} \times 7 / 50) \div [6,000 \text{ 億円} / (280 / 0.4)] \\ &= 8.2\end{aligned}$$

上記のように「常陽」に対する可搬型炉の小型炉係数を 200 と非常に大きな値にしたのは、「常陽」及び可搬型炉間の設計類似性が、「もんじゅ」及び「常陽」間の設計類似性に比較して極めて少ないからである。

燃料については、10 億円とする。この費用は、「常陽」の炉心の大きさと可搬型炉の炉心の大きさを比較し、酸化物燃料が窒化物燃料にかわる費用を約 3 倍として出した値である。但し窒化物燃料の開発費は含まれない。

以上合計で 40 億円である。

②試験費

既存の建屋の改造費を 10 億円とする。この値は、大洗工学センターのナトリウム機器第一建屋（大ドブ）をイメージして計算したものである。

毎年の試験費を 2 億円とする。5 年 10 億円である。この値は、大洗工学センターの平成 5 年度の各室の予算を参考に出したものである。

①と②の合計で 60 億円である。

(3)関連炉外試験費

深海炉のモデルテスト関係の費用が約 6 億円である。現在までの経験から、深海炉のモデルはこの程度で製作が可能と判断される。

他の費用については、深海炉・宇宙炉・コジェネ炉・原子力電池の総ての約 15 年間の炉外試験費として約 49 億円を当てる。

(3)では約 55 億円となる。

以上総額は、深海炉開発計画終了時点までで、約 150 億円と予想される。

7 人員

第4章のスケジュールに従って必要な人員数を計算した。本章の検討も、地上試験炉を使用した深海炉用試験までとする。ここで検討する人数は技術者数であって、原則として管理部門は含んでいない。

表7. 1及び表7. 2に全体及びシステム設計に必要な人数をそれぞれ示す。表7. 1で、地上試験炉についてはこの人数は試験の立案及び解析を担当する技術者であって、炉の運転員はこの中に含まれていない。

図7. 1では合計は最も多い年で22名となった。但しこの人員計画は、大部分の仕事を動燃内で行うとして計算したものである。

表 7. 1 必要な人員（全体）

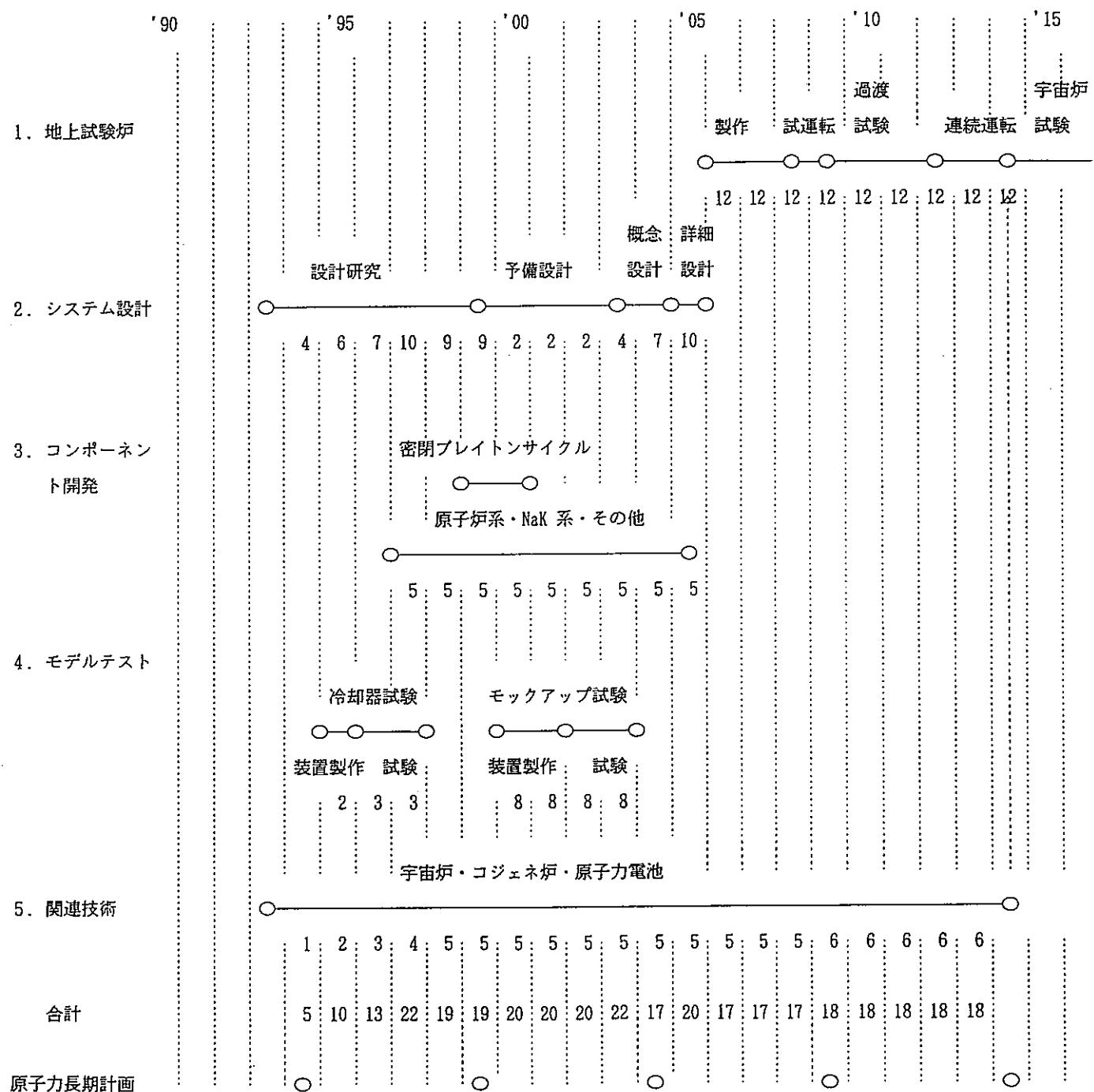


表7. 2 必要な人員（システム設計）

	'90	'95	'00	'05	'10	'15
1. 热流動解析						
定常解析						
過渡解析						
2. 構造解析						
3. 安全解析						
4. 炉心解析						
5. 信頼性解析						
合計	4	6	7	10	9	9
				2	2	4
					2	7

8 事業団のプロジェクト技術への反映

筆者等は可搬型炉以外にフロンティア研究の一つとして、Na冷却炉・He-Xe混合ガス密閉ブレイトンサイクルシステムを用いたコジェネレーション型高速炉システムの概念検討を行った⁽⁸⁾。コジェネレーション型高速炉を図8.1に示す。このコジェネレーション型高速炉の炉容器出口冷却材温度は650-700°Cを想定している。炉容器の周囲にはRVACS(Reactor Vessel Air Cooling System)を設けるとともに、全炉心ボイド反応度を負として、安全性の向上をはかっている。コジェネレーション型高速炉システム系統図を図8.2に示す。このコジェネレーション型高速炉は、寒冷な地方の、大都会より遠隔地にある小都市近郊に設置されることを想定しているが、密閉ブレイトンサイクルによる発電以外に、プレクーラからの排熱を利用した地域暖房を考えている。深海炉とコジェネレーション型高速炉はシステムが同じであるので、深海炉のR&Dの成果は、コジェネレーション型高速炉開発に役立つ。

コジェネレーション型高速炉は熱出力規模としては熱出力で300-400MWtを想定している。電気出力は50-100MWeである。熱効率は20-25%であるが、コジェネレーション用に熱を利用しているので、熱利用率は約85%である。

最近軽水炉の燃料再処理に関連してTRU燃焼が話題になっているが、我が国の軽水炉から出てくるTRUはせいぜい年間約0.5トンである。従ってこの規模のコジェネレーション型高速炉が北海道等寒冷地に約6-7基建設されれば、我が国の軽水炉で発生するTRUを燃焼することは可能である。いわゆる電力会社の所有する発電用の大型炉でTRU燃焼を行う際の技術的及び社会的問題点を考慮すると、このような小型炉でのTRU燃焼が将来採用される可能性が考えられる。

上記のようなコジェネレーション型高速炉だけでなく、本可搬型炉研究の成果は従来動燃で行われている大型FBR開発に次のような点で寄与できる。

① 窒化物燃料

- i) 窒化物燃料は、酸化物燃料よりもFPガス放出率が小さいので、ガスプレナムの長さを短くできる。
- ii) 窒化物燃料は窒素とウランの結合力が、酸素とウランの結合力より小さいために高温で窒素が解離しやすいと言われている。可搬型炉は燃料線出力が一般のFBRと比較し約1/5と小さいために燃料温度が低い。従って窒化物燃料の利用に適した条件である。

② 無人運転

- 無人基地用高速炉システムは、無人運転を一応原則としているが、この無人運転の経験は自律型炉の研究開発に役立つ。

③ 高温材料

炉容器出口冷却材温度が 550°C 以上の高温のケース用の材料開発は、大型 FBR 開発にも役立つものである。

深海炉及び宇宙炉について研究する可搬型炉研究と、コジェネレーション型炉及び事業団プロジェクトとの関係を、まとめて図 8. 3 に示す。

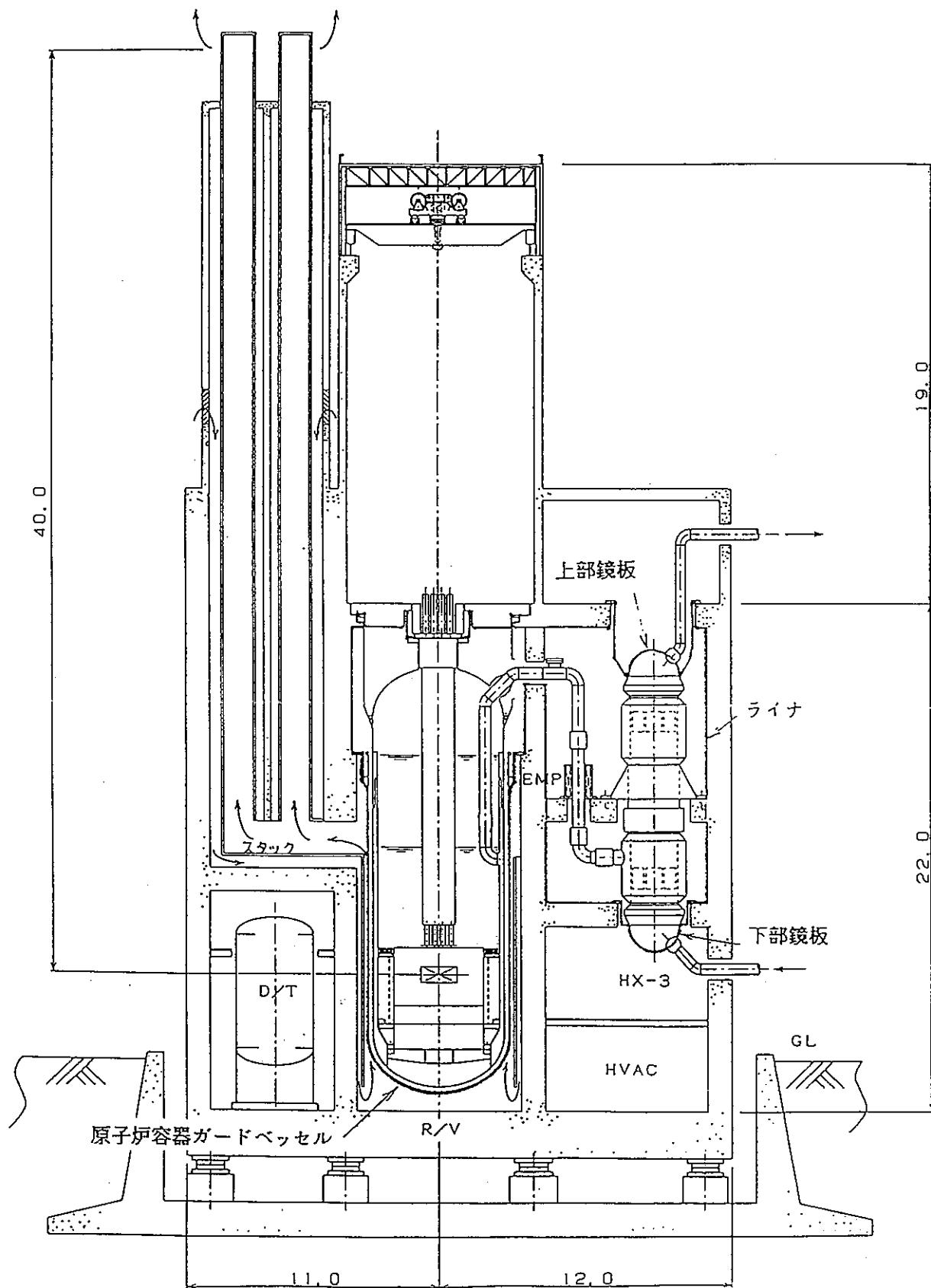


図 8. 1 コジェネレーション型高速炉

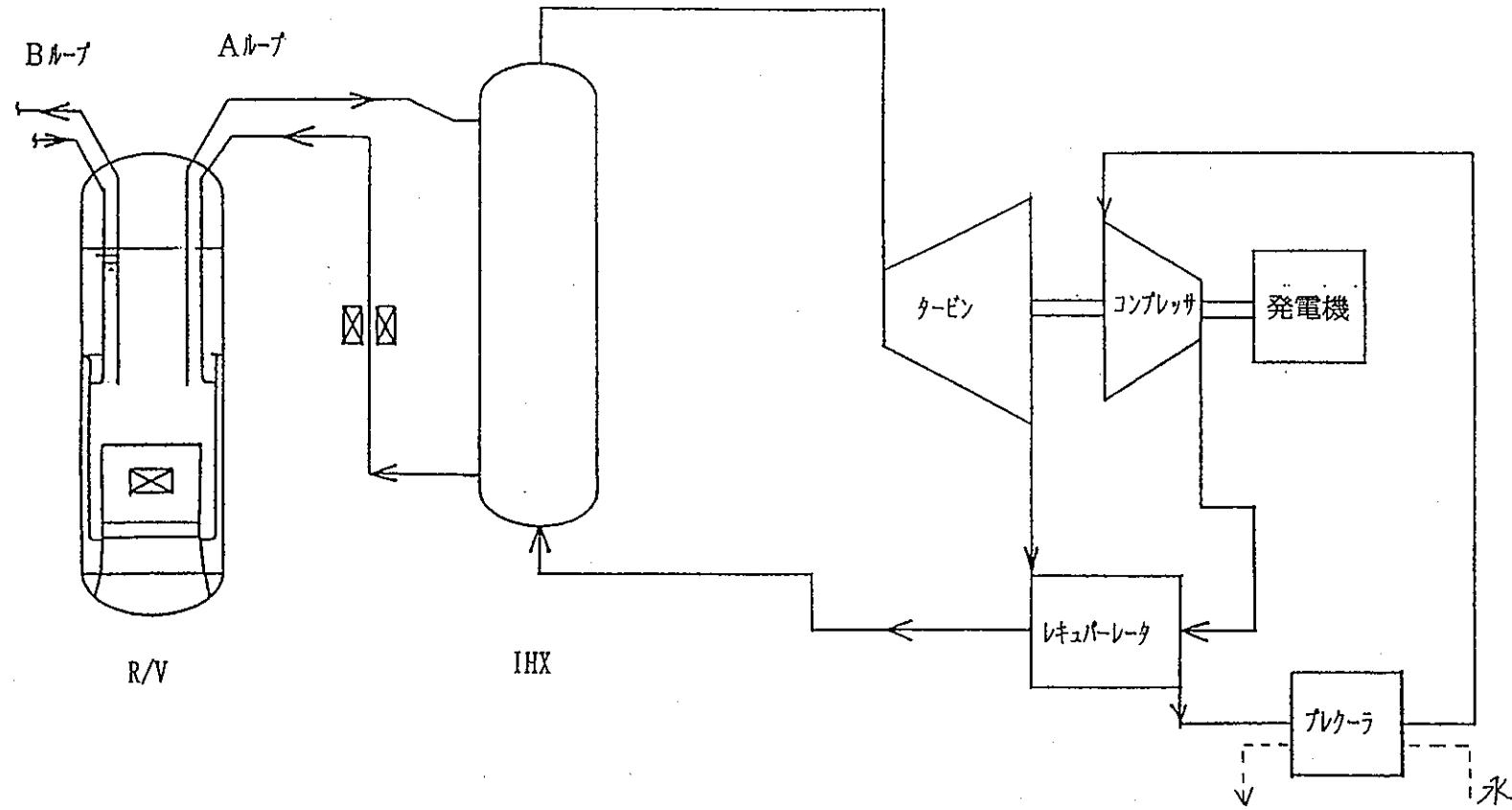
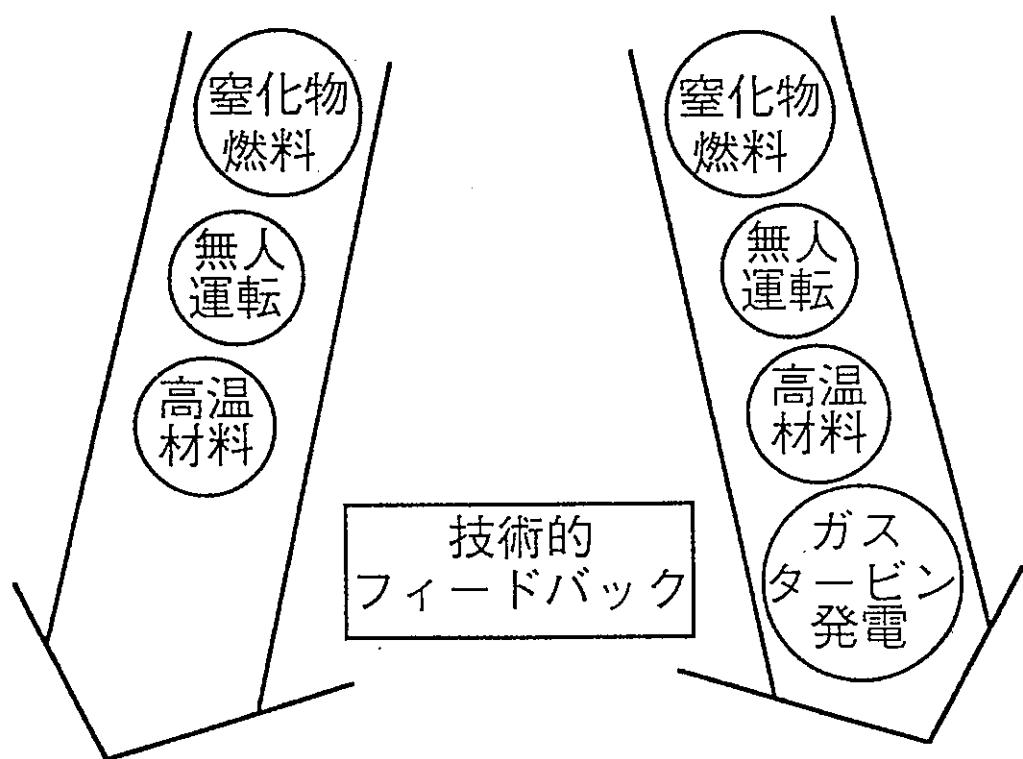
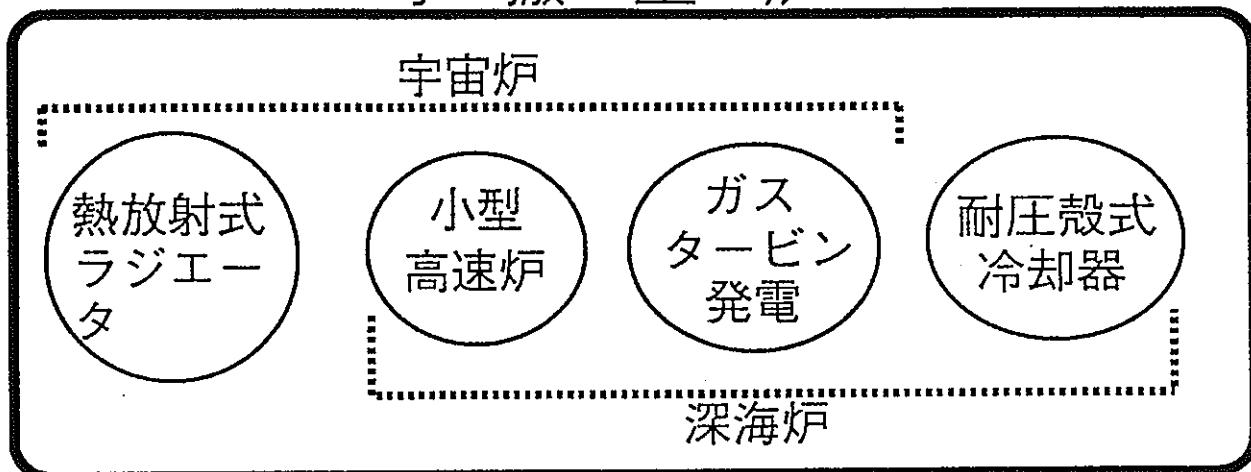


図 8. 2 コジェネレーション型高速炉システム系統図
(5万kWe : 2ループ)

可搬型炉



従来の
動燃プロジェクト

コジェネ型
高速炉

図 8. 3 可搬型炉研究と他の研究の関連

9 おわりに

第1章で記した動燃内の意見を参考に、深海炉を中心とした可搬型炉開発計画を立てた。予算は約150億円、人員は22名と適切な規模の計画案が出来上がった。この規模はかつての大洗工学センターに於ける新型転換炉の研究開発の規模と同程度である。

この可搬型炉開発計画の立案に当たっては、本文中でも述べたように、試験炉製作の実現性を最優先課題としたが、動燃内の協力が得られればその可能性は極めて高いと考える。

可搬型炉の開発は最終的に原子力以外の分野の専門家に参加して貰う必要があり、この場合パブリックアクセプタンスが問題となる。この点について筆者は海洋の専門家は第2章で説明したように、原子力に対して前向きの姿勢を取っていると考えている。現実に海洋の専門家は、原子力潜水艦が数多く運行しているのを身近に感じており、原子力エネルギーのエネルギー源としての優秀性を良く認識している。

したがって、原子力関係者は本報告書に述べたような研究開発を行って、技術的問題を総て明らかにし、可搬型炉のパブリックアクセプタンスの議論が起こる時点までもついく義務があると筆者は考える。

また核不拡散の点からも、深海炉についてはその設置範囲が限定されていること並びに、数千mの深海からPu及びU燃料を奪取するというようなことは、優れた深海技術を有する国に限定されることから、懸念される核不拡散上の問題点は無いものと考えられる。

参考文献

- (1) 動燃報告書 PNC I2420 88-001 (3)、
フロンティア研究推進委員会 新分野開拓作業部会報告書 3. 未開拓利用領域分科
会報告書、柴 公倫他
- (2) 海洋科学技術センター長期計画、平成4年1月、海洋科学技術センター
- (3) 高速炉を用いた深海用動力源の成立性、平成4年10月、日本原子力学会誌、
大坪 章、羽賀 一男
- (4) "Update of the ERATO Program and Conceptual Studies on LMFBR Derivative
Space Power Systems," F. Carre et al., 第7回宇宙原子動力システムに関するシン
ポジウム, 1990, Albuquerque, U. S. A.
- (5) 動燃報告書 PNC ZN9410 92-019、無人基地用高速炉システムの概念設計、大坪 章、
羽賀 一男
- (6) 動燃報告書 PNC TN9410 92-050、潜水調査船用高速炉システムの概念設計、
大坪 章、羽賀 一男
- (7) 動燃報告書 PNC TN9410 92-095、深海有人基地用高速炉システムの概念設計、
大坪 章、羽賀 一男
- (8) 動燃報告書 PNC ZN9410 92-252、高速炉ガスタービン発電システム
大坪 章、羽賀 一男、関口 信忠
- (9) 熱電半導体とその応用、上村 欣一 西田 勲夫、日刊工業新聞社、1988年。
- (10) 液体金属中における金属材料の腐食挙動、鈴木 正、鉄と鋼、1975年、第11号
- (11) シンポジウム「深海ステーション」(第2回)講演要旨集、東京大学海洋研究所深海
底エンジニアリング研究会、平成3年10月
- (12) "Use of a Sodium-Sulphur Battery System in an AUV Test Bed Vehicle,"
J. Cockburn, Marconi Underwater Systems Limited, England.
- (13) "High Energy Battery and Drive Systems for Electric Vehicles," C. H. Dustmann
and N. D. Anderson, Autotech 91 Conference, Birmingham England, 1991.
- (14) Nuclear Navy 1946-1962, R. G. Hewlett and F. Duncan, The University of Chicago
Press, Chicago and London.
- (15) LIQUID-METALS HANDBOOK SODIUM-NaK SUPPLEMENT, US AEC and DEPARTMENT OF THE
NAVY, Washington, D. C., 1955.

付録 1

海洋科学技術センター 長 期 計 画

平 成 4 年 1 月

海洋科学技術センター

(2) 基幹技術等の研究開発・整備方策

(a) 基幹技術

種々の深海調査研究を効果的に実施するうえで不可欠となる以下の基幹技術について研究開発を実施する。

①エネルギー源

現在は電池が主流であるが、今後はより高出力、超寿命、軽量、小型で保守整備が容易なエネルギー源の開発が必要である。その候補として化学電池、静電式電池、燃料電池、スターリングエンジン、閉回路ディーゼルエンジンが挙げられる。

なお、放射性物質を用いる原子炉や電池については安全性や国の内外の情勢に鑑み、十分実用化が見通せる段階で導入を検討する必要がある。

②耐圧材料・構造

従来は鉄やアルミニウム、チタン等の金属が主流であったが、今後は繊維強化プラスチック（FRP）、エンジニアリングセラミックス、コンクリート等の非金属材料、複合材料についても研究開発を進める。特にセラミックスは最近では精密な仕上げ加工が可能となってきているので、耐圧殻や耐圧容器に有望である。

③軽比重浮力材

セラミックス製の大きな耐圧球を従来の深海用浮力材に埋め込む方法が考えられるが、大型成形品での信頼性を確保するための開発が必要となる。

④情報伝達手法

従来の音響のほかに、海中レーザー等を用いた新しい手法や人工知能を搭載した中継用浮遊式ロボット等を用いた高速でエラーがなく、また省電力の伝送方式を確立する必要がある。

⑤高精度音響信号解析手法

海水の音響的特性分布の連続的計測が可能で、音線の曲がりを常に修正できるようなシステムの開発、音源出力増大や背景雑音の抑圧、あるいはS/Nが負値（雑音の中に信号が埋もれている状態）であっても信号を抜き出せるような信号形態の開発等を通して、高精度でエラーがなく、高速信号処理できる手法を開発する必要がある。また、機器の小型化や長期設置のために小電力で作動する高能率で信頼性の高い音響素子を開発することが必要である。

⑥高精度測距手法

地殻の移動による海底の微小変位を検出するには、長距離を精度良く測量する必要があ

る。現在最も遠達性があるのは水中音響であるが、現状の水中音響方式では誤差が大き過ぎる。そこで海中での遠達性のある波長のレーザーとその中継器を利用する方法等、精度を十分保ちつつ長距離が測量できる手法を開発する必要がある。

⑦海底面及び海底下の調査手法

エアガンやパラメトリック方式の高分解能を有するサブボトムプロファイラ（音響地層探査装置）等により地層探査の音響浸透距離をできるだけ深くまで延伸するようにするとともに、掘削により深部の地層試料を採取して直接詳細な分析ができるような効率的な手法を開発する必要がある。

⑧低雑音化

雑音発生源そのものの雑音の低減化には今後も引き続き努力する一方、高水圧下で十分な機能を發揮する良好な防音材、遮音材、振動抑圧材の開発が必要である。

⑨自律機能

今後ROV等の海中移動機器の活躍の場がますます広がっていくものと考えられる。この場合、ROVには、人間の介在がより少なく環境に順応する高度な自律性が要求される。このため、深海用ROVの自動運転、マニピュレーション、無素無人潜水艇の自律航行のための自律機能の研究開発が必要である。

(b) 調査に必要な機器類

①高圧下微生物操作用マイクロマニピュレータ

海水圧駆動方式等を用いたmm単位の微妙な操作のできるマイクロマニピュレータの開発が必要である。

②高圧下顕微鏡

接写して観察可能な高圧下顕微鏡が必要であり、油漬均圧式レンズ系と耐圧容器入りTVカメラの組み合わせが考えられるが、環境汚染防止に配慮しつつ、マイクロマニピュレータとの組み合わせを考慮して開発する必要がある。

③海底境界層流速計測装置

カメラを2台設置しストロボを短い時間間隔で2回発光させることにより水中の浮遊粒子の三次元的な位置の移動量を計測して流速を測定する装置を開発する。

④深海音響ビーコン

安価・簡便・確実で、しかも回収を必要としないトランスポンダーを開発する。

(c) 基幹技術を用いた大規模システム

大規模システムの構築は、莫大な資金が必要となるとともに、開発期間も長期間になる

ので、以下では一応10年で開発が見込まれるシステムと10年以上の開発期間が必要なシステムに分けて述べることとする。

① 10年で実用化が見込まれる大規模システム

i) 深海ステーション観測ネットワーク・システム

深海は光・電磁波による遠距離の見通しが効かない上に、深海における地殻運動や物質循環については広域・同時的な観測を必要とすることから、海底に数箇所、観測拠点となる無人長期ステーションを設置し、これらをネットワークとして有機的に結びつけることが重要である。ネットワークは、日本近海から始め、太平洋・インド洋へと拡大する。

ii) 無人長期深海ステーション

このネットワークを構成する長期ステーションは調査内容に応じたTVカメラ、物理・化学センサ、海底地殻傾斜測定装置、地震測定装置、送受波器等を搭載した無人ステーションであり、このステーションにはその時々の最先端の自律機能の導入を図るとともに、上記の基幹技術を積極的に導入していくことが必要である。

iii) ROV

自律機能を搭載した完全な自律型潜水船として多数のROVを海中・海底に展開するとともに、これを潜水船からケーブルや光ファイバー、音響等により遠隔操作することも必要である。また、深海微生物の現場実験等のためには顕微鏡機能を有する目と、mm単位あるいはμ単位の動きのできるマニピュレータを搭載したロボットとしてのROVも必要である。

iv) 深海掘削船

地球の内部構造を探るために掘削研究は重要な課題であり、現在国際深海掘削計画が進行中であるが、そのために使用している掘削船は1978年に建造されたものであり、老朽化が進んでいることと掘削深度が1,700m未満で浅いことなどから、より深く効率的に掘削可能な深海掘削船が必要である。このため当面、泥水循環掘削で海底下3,500mの掘削が可能な深海掘削船を開発する。

② 10年以上の期間が必要な大規模システム

将来必要になる可能性のある以下のシステムについては、研究開発に長期を要するので早急に必要性を見極めるとともに、必要性の高いものについては、所要の研究を行い、最も効果的な技術体系を検討する。

i) 固定式有人長期ステーション

無人の長期ステーションとは別に、たとえば深海大型生物・微生物の研究のために4~

5名程度の研究者が1～2週間程度滞在して深海の現場で観測・実験のできる有人ステーション。

ii) 長期航走母船式潜水艇

固定式有人長期ステーションとそれに配備された潜水船やROVではカバーできない領域の調査を行う巡航式の長期航走型母船式潜水艇とそこから発着する潜水船・ROV。この母船式潜水艇は固定式長期ステーションへのエネルギー補給や人員交代・物資補給等にも用いられ、場合によっては自らも当分の間固定式長期ステーションとして機能できるもの。

iii) シャトル

固定式長期ステーションや長期航走母船式潜水艇への人員交代・物資供給・エネルギー供給のために水上の支援船や他の母船式潜水艇から発進して任務を達成後元に戻るシャトル潜水艇。

iv) 10,000m 級有人潜水調査艇

世界最深部まで潜航可能で、シャトルとしても機能する有人の潜水調査艇。

v) 海中航行観測船

従来の海洋観測船では調査困難である高緯度・荒天海域での海底地形、重力、地磁気等の観測を可能とするため海面の影響を受けずに安定した姿勢で水深数十mから1000mの海中を航走できる観測船。

3. 海洋観測・研究

3.1 研究開発目標

地球環境の変動を予測するためには、海洋全体の状態・特性の把握のみならず変動のプロセスやメカニズムを解明することが不可欠であり、そのための効果的かつ総合的な海洋観測が必須である。

海洋物理学的観点から必要とされるものは、大気・海洋間の相互作用を含めた全地球的な熱の南北輸送における海洋の役割と機構を解明し、海洋変動に関するモデリングを進めるための観測である。また、地球全体の気候変動への北極及び南極の影響は認識されながらも解明されておらず、全球モデルと組み合わせた海水モデルの確立をも含め、極域の観測体制を整えることが必要である。一方、生物・化学観測では、観測項目が多岐にわたるが、物質フラックスの時空間変化の把握等を中心に物理現象と結合した総合的な海洋観測が必要である。

付録 2 海底資源採鉱技術⁽¹⁾

海洋鉱物資源と深海ステーション

資源環境技術総合研究所

地殻工学部海底工学研究室 鶴崎克也

1. はじめに

海洋開発の掛声が聞かれてから久しいが、その間、日本においては、水産増・養殖技術などの水産工学あるいは海底トンネル・本四架橋等の海洋土木工学の分野での技術開発には目ざましいものがあった。しかし、いずれも比較的浅い海域を対象としたもので、深海を対象とした海洋開発は未着手のままである。もちろん、深海を知るための潜水艇の開発や各種調査技術の発達には目ざましいものがあるが、深海を積極的に利用するという点では、まだまだある。仮りに、海洋開発を探検の時代、科学の時代、工学の時代に分けられるとするならば、深海については、さしづめ探検の時代から科学の時代へ一步足を踏み入れた瞬間かもしれない。

海洋鉱物資源の開発についても同様で、わが国の砂鉄や海底砂・砂利、東南アジアの砂錫、南アフリカのダイアモンドの採掘など商業的に実施されているものもあるが、いずれも浅海域を対象とし、技術的にもこれまでの延長が主である。

深海底の鉱物資源の開発はまさに深海を工学の対象として考えるもので、探検の時代から科学の時代へ入ったばかりの深海にとって、次の世代の夢というべきであろう。したがって、ここで多くを述べることは大変難しいことであるが、あえて海洋鉱物資源の分野から期待する深海ステーションの活用を語ってみたい。

2. 深海底鉱物資源の概要

大洋の広大な深海底平原に砂利を敷きつめたように分布するマンガン団塊、海底山脈の裂け目に沿って煙突が林立するように黒い熱水、白い熱水を吐き出しながら成長している海底熱水性鉱床、ハワイ諸島や赤道付近の島々の海底斜面や海山の頂上、斜面を舗装したように分布するコバルト・リッチ・クラスト鉱床、これらはいずれも21世紀の資源である。

表1 深海底鉱物資源の賦存特性と金属含有率⁽¹⁾

	マンガン団塊	海底熱水性鉱床	C R C 鉱床
水深	4,000 ~ 6,000m	1,200 ~ 3,500m	800 ~ 2,400m
地形	比較的平坦	面積系、背弧海盆など	島嶼の斜面 海山の頂部、斜面
基盤	遠洋性粘土	玄武岩 変成岩	玄武岩 石灰岩 ハイアロクラストイト
賦存形態	海底表面に半埋没団塊状	海底から突出 チムニー、マウンド状	被覆型(クラスト状) 巨礫状、団塊状
鉱床特性	被覆率: < 75% 賦存量: < 40 kg/m ²	最大数 100 m 規模で点在(?)	被覆率: < 100% 賦存量: 200 kg/m ² 層厚: < 15 cm
品位	Co: < 0.5% Mn: < 35% Fe: < 25% Ni: < 2% Cu: < 2%	Fe: < 40% Cu: < 15% Pb: < 25% Zn: < 50% Au: < 15 ppm Ag: < 1%	Co: < 2% Mn: < 35% Fe: < 25% Ni: < 1% Cu: < 0.5% Pt: < 2 ppm

これらの鉱床には、表1に示したように、銅、鉛、亜鉛などのベースメタルから、マンガン、コバルト、ニッケルなどのレアメタル、金、銀、白金などの貴金属まで、さまざまな重要な金属が含まれている。

マンガン団塊は、マンガンや鉄の酸化物を主成分とした小石大の黒褐色の塊で、銅、ニッケル、コバルトの3金属あるいはマンガンを加えた4金属の回収が目標とされる。銅、ニッケルの含有率の和が2%以上で、分布率が10 kgf/m²以上のものが経済性を有しており、ハワイ南東からメ

キシコ沖に至る水深4,000m～6,000mの海域が最も有望といわれている。

海底热水性鉱床は、海底拡大軸等の海底下に浸透した海水が高温高圧の熱水となり、近傍の金属分を溶かして海底面へ循環し、低温の底層水に触れ、金属分を硫化物として沈殿したものと考えられている。研究が進むにつれて、背弧海盆等にも熱水現象があることがわかつてきた。1988年には、「しんかい2000」により沖縄北西の水深1,400mの伊是名海穴において熱水噴出の観察及びサンプルの採取が行われた。この鉱床は、高品位の金、銀を含んでいる。

コバルト・リッチ・クラスト鉱床はマンガン団塊と同じようにマンガンや鉄の酸化物を主成分とするが、マンガン団塊とは異なって、海山を形成している玄武岩やハイアロクラストタイト、石灰岩などの岩盤を基盤岩として、その表面を数cmの厚さでクラスト（皮殻）状に被覆している。成長速度はマンガン団塊の数分の1と言われており、水深800～2,400mに分布するものは0.5～2%のコバルトを含み、有望な資源と考えられている。その他にもニッケルや白金が含まれている。

3. 深海底鉱物資源を掘る

深海底鉱物資源の採掘技術については、これまでマングン団塊に関してのみ、技術開発が実施されてきている。他の鉱物資源については、探査が進められている段階で、開発技術については基本構想が練られ、それに必要な基礎的な研究が端緒に付いたところである。これらの深海底鉱物資源開発の共通的な特徴をあげるとするならば、非常に広い面積を開発の対象としなければならないことである。

例えば、热水性鉱床については、一箇所の鉱体はそれほど大きくはないが、数100m～数km程度の距離で点在する可能性がある。そこで、深海底鉱物資源開発協会では、将来の採鉱システムの概念設計として、図1に示したような、走行機能を有する複数の採掘機が同時に操業し、中央に鉱石の集積場があり、揚鉱システムはその位置に半固定的に設置される分離型の採鉱システムを提案している。一方、マングン団塊の商業的開発段階の試算によると、その採掘機は一日当たりおよそ200haの面積をカバーしなければならない。このような広い範囲を対象とするとき、これまで採鉱実験システムとして技術開発が進められてきた採鉱船・揚鉱パイプ・採掘機が一体型であり、全システムが並行して移動する曳航式の採鉱システムはロスが大きいものと考えられる。

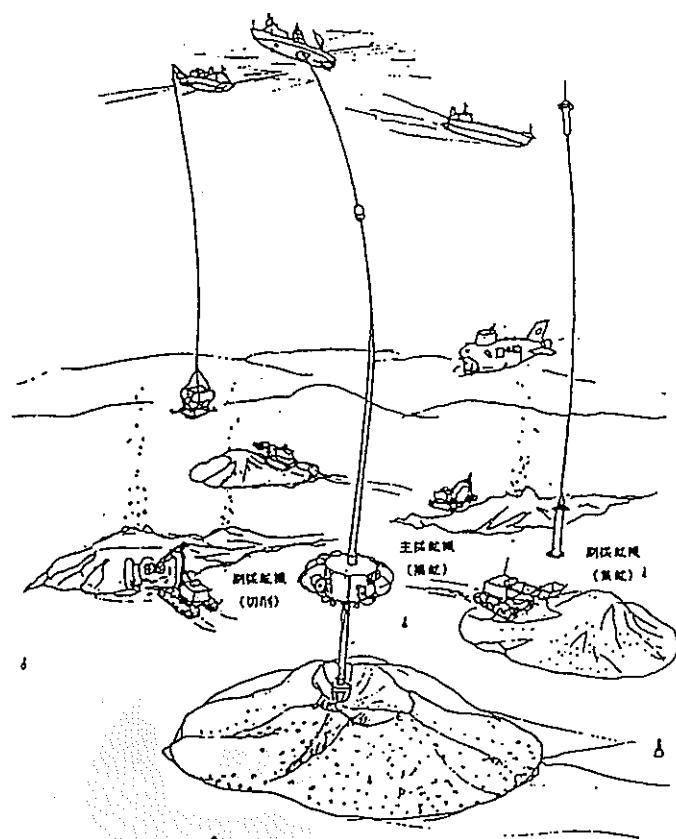


図1 分離型採鉱システム概念図²⁾

また、コバルト・リッチ・クラスト鉱床については、鉱石の価値が高いこと、分布密度が高いこと（推測）から一日にカバーしなければならない面積はマンガン団塊の数分の1になるかも知れないが、それでも数10haになる。また、海底地形はより複雑である。

このようなことから考えると、どの鉱床にとっても、採鉱システムの将来像は図1のようなものになるであろう。その場合、採鉱システム全体の効率的な運用を行うために、揚鉱システムを中心とするメインの海底操業地点に有人の深海ステーションを設置することは非常に大きな力となる。深海ステーションから、潜水艇で各採掘機が稼働しているサブステーションを巡回したり、揚鉱システムの直接的な監視など全体的な工程を管理することができる。また、個々の採掘機の動力源がバッテリーなどであればその充電やその他の定期的なメンテナンスを、その都度、海面へ回収することなく、深海底で済ませることができれば、採鉱システム全体の効率の向上は大きいものと思われる。

4. 深海底鉱物資源を精製する

深海底鉱物資源のもう一つの特徴は、高価なレアメタルや貴金属を含有していることである。このことは有用成分の含有率が非常に低いことを意味している。

表2に第一世代として開発されると予想されている各鉱床の平均品位を示したが、有用金属分の含有率は非常に低い。例えばマンガン団塊は銅、ニッケル、コバルトの含有率が3%弱で商業開発の対象と考えられたり、コバルト・リッチ・クラスト鉱床はコバルトの含有率が1%程度で採掘の対象と考えられている。このように、含有率が数%に満たない鉱石から有用金属を回収するためには、各種の問題が生じる。

図2にコバルト・リッチ・クラスト鉱床の開発における初期投資段階及び操業段階の探査、採掘、揚鉱、運搬、製錬等に要する費用の比率を示した。この図から明らかなように、初期投資額の70%が揚鉱設備で、操業費の80%が揚鉱作業及び運搬作業で占められている。開発効率全体を向上させるためには、この揚鉱費用及び運搬費用を減少させなければならない。これまでのように採掘した鉱石をそのまま数1,000m上方の海面まで揚鉱し、数1,000km離れた陸地の製錬所へ運搬するのではなく、海底において、鉱石を完全な製錬とまではいかないまでも、ある段階まで精製し、揚鉱及び運搬しなければならない鉱石量を減少させる手法が開発されれば、全体的な経済性は非常に

表2 第1世代鉱床の平均品位³⁾

Deposit Type	Metal	Grade
Nodules	Copper	1.25%
	Nickel	1.40%
	Cobalt	0.25%
	Manganese	25.00%
Crusts	Copper	0.07%
	Nickel	0.70%
	Cobalt	0.95%
	Platinum	0.50 g/t
	Manganese	25.00%
Sulfides	Zinc	12.00%
	Lead	6.00%
	Silver	400.00 g/t
	Gold	6.00 g/t

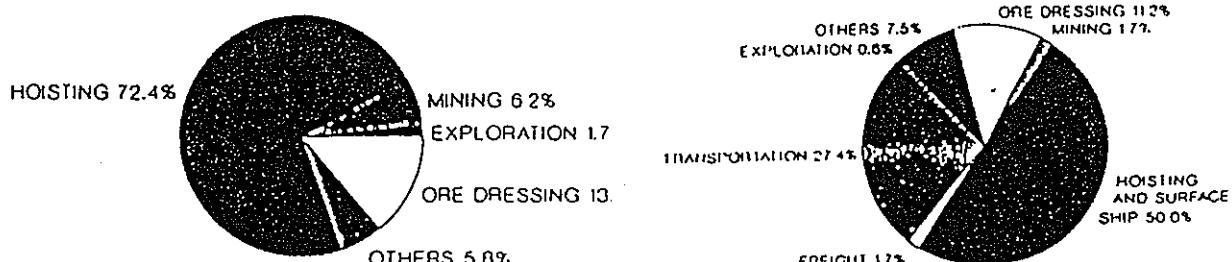


図2 クラスト鉱床開発における初期投資時(左)及び操業時(右)の費用割合⁴⁾

向上する。深海底原位置製錬である。

高水圧恒温の深海底の機能を利用した新しい製錬技術、例えば深海微生物によるバクテリアリーチングなどの研究開発が必要となってくる。もちろん、ビーカーサイズの研究段階は陸上実験室に設置する高圧容器内での実験で充分であるが、各種の深海微生物のサンプリングや海底環境条件を正確に把握するためには、研究者が繰り返し潜水艇で出かけることのできる深海ステーションの利用が必要となる。その後のプラント実証試験や現場適応試験などについては、研究者が長期間滞在できる深海ステーションが必要不可欠となる。

もちろん、深海底原位置製錬技術が開発されれば、そのエネルギー供給、工程管理の基地として深海ステーションが活用されるであろう。

この深海原位置製錬技術は、深海底鉱物資源開発の効率向上だけでなく、陸地の製錬所から出る廃滓も減量されることになり、環境保全の意味からも意義は大きい。

5. 深海底鉱物資源を育てる

前述したように、海底熱水性鉱床は底層水が海底下に浸透し、再び海底面に循環して生成したものと考えられている。同鉱床が最初に発見された東太平洋海嶺ではベースメタルが主であったが、沖縄伊是名海穴で得られたサンプルは金、銀の含有率が非常に高く、別の視点から重要な資源と考えられている。陸上において、地下に熱水や蒸気が蓄えられていらない高温の岩体に人工的に亀裂を造成して、水を循環させ、地熱エネルギーを回収する試みが行われているが、伊是名海穴のような海底でこの技術を応用すれば、熱水性鉱床を人工的に生成したり、自然の生成速度を増大させることができるかもしれない。このような実験を行う基地として深海ステーションが利用できるであろう。潜水艇によって海底の適切な地点を探し、深海ステーションから海底ボーリングの監視、人工亀裂の生成と制御、海水循環の制御などの実験を研究者及び技術者が現場の間近で行うことができる。

このような技術は海底資源を育てるだけではなく、陸上と同様に熱だけでも回収できれば深海ステーションのエネルギー源としても利用できるかもしれない。

6. あとがき

深海底資源を採掘する、精製する、育てるという海底資源開発の分野からみた深海ステーションの活用について述べた。これらは、実験、研究段階の話であったり、もっと遠い将来の夢であるかもしれない。もっと近い将来に深海ステーションが実現すれば、実は、現在、米国が主体になって実施している深海採鉱環境影響実験に活用したい。本実験は、深海底で模擬採掘機を作動させて堆積土のブリュームを発生させ、深海生態系への影響を、2年の間、いくつかの定点で観測するものであるが、同一地点での観察、サンプリングに非常に苦労している。深海ステーションがあれば、非常に精度のよい、効率的な実験ができる。このように、深海ステーションの実現は海洋資源開発の分野でも待望されている。

参考文献

- 1) 鶴崎克也：資源と素材、106巻、10号、1990
- 2) 深海底鉱物資源開発協会：海底熱水鉱床の開発に関する調査研究報告書、1991
- 3) C. Charles 他：Materials and Society, 14巻、3/4号、1990
- 4) K. Hakalehto : Materials and Society, 14巻、3/4号、1990

付録 3

Allied-Signal Aerospace Company よりの手紙

Allied-Signal Aerospace Company

Garrett Fluid Systems Division
1300 W. Warner Rd.
P.O. Box 22200
Tempe, AZ 85285-2200
(602) 893-5000
Telex: 187125 FSD TMPE
Facsimile: (602) 893-5123



May 5, 1992

Refer To:
S:DEC:0106:050592

Dr. Akira Otsubo
Frontier Technology Section
Technology Development Division
O-arai Engineering Center
Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp.
4002 Narita-cho
Oarai-machi, Higashi-Ibaraki-gun
Ibaraki-ken, Japan

Dear Dr. Otsubo:

Subject: **DEEP SEA RESEARCH FAST REACTOR PROGRAM**

We appreciate the opportunity to review your technical summary "High Temperature Fast Reactor System for Deep Sea Research" and are very pleased to respond to your request for pricing on a Closed Brayton Cycle conversion system. In our review of your technical summary we developed some detailed comments regarding thermodynamic cycle, working fluid, and the use of two conversion systems. Our comments are presented to you in the attached white paper.

We are very interested in the concept you are proposing and in the use of a Closed Brayton Cycle conversion system. Our goal is to provide the best possible design at the best price to support your concept. As you can see from the comments on the thermodynamic cycle, we want to ensure that the Closed Brayton Cycle system provides the optimum performance and we are suggesting another possible set of operating parameters for the Closed Brayton Cycle. We are interested in working further with you on the concept and would be honored to work on developing the conversion system operating parameters in support of your paper and proposal.

To address your main question on the cost of supplying a Closed Brayton Cycle gas turbine for this application, we would of course need to better understand exactly what equipment you wish us to furnish and what the applicable program requirements will be for the equipment (i.e., performance, size, weight, interfaces with other equipment,

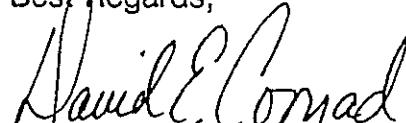
Dr. Akira Otsubo
Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp.

S:DEC:0106:050592
Page 2

environment, life, reliability, safety, etc.). Lacking these details, the cost can be addressed only in the broadest terms. We will assume for now that you wish us to supply the turboalternator, its associated speed/output control, and the recuperator; there are many other components in the system that we could supply and would be interested in discussing. Given this set of assumptions and assuming program requirements similar to ones on previous programs a development program would be estimated to be between \$10M and \$50M. This estimate is based on past program experience and a major cost driver will be the aerodynamic component design and development, particularly that of the compressor. If previously characterized components can be adapted without significant compromise, significant savings can be realized. This appears to be the case for your system, in view of our extensive prior experience on the 10 kW BRU. The price for delivery of two (2) units of hardware will be \$1M to \$2M. The pricing for the development effort and the two deliverable units is Rough Order of Magnitude in 1992 dollars.

We apologize for the wide range of pricing provided but there are a lot of variables which could affect a specific price. We do want to work with you to resolve these variables, and to provide you with a well designed, cost effective, Closed Brayton Cycle design. We trust this information will satisfy your immediate need and look forward to additional dialogue in the near future. If you have any questions or need additional information please feel free to contact either our local representative, Mr. Tom Mitchell at (03)3767-8551 or myself at (602)893-4421.

Best Regards,



David E. Conrad
Product Line Sales Manager
Missiles, Space & Undersea

/mj

cc: Tom Mitchell, ASASCO Tokyo

ATTACHMENT: Discussion of
"High Temperature Fast Reactor System for Deep Sea Research"

1. Thermodynamic Design

The following temperatures are given in the paper:

<u>Temperature</u>	<u>T, °C</u>	<u>T, °F</u>
Compressor Inlet (Cooler Outlet)	53.0	127.2
Compressor Outlet	188.5	371.3
Recuperator Hi Out (Heat Ex Inlet)	340.0	643.8
Turbine Inlet	535.0	994.8
Turbine Outlet	368.4	694.9
Recuperator Lo Out (Cooler Inlet)	217.0	422.4

Using these numbers we "back calculated" the CBC system parameters summarized in the following table:

CBC Thermodynamic Design		
<u>Temperatures, F</u>	<u>Other Parameters</u>	
*comp in	127.2	*beta, % 93.5
comp out	371.1	*recup eff, % 84.5
recup hi out	644.6	*bleed, % .01
*turb in	994.8	*comp eff, % 80
turb out	694.8	*turb eff, % 90
bleed out	371.1	*brg/sl pwr, kW 0
recup lo in	694.8	*frac abs, % 80
recup lo out	421.3	*pres ratio 2.05
		*mol wt, #/mol 55
		*output, kw 10
		comp flo, #/s 1.876
		turb flo, #/s 1.876
		heat in, kW 62.58
		cyc eff, % 15.97

* = specified inputs

As you can see, the temperature values match the ones given in the technical summary quite well, although slightly different values of the "specified inputs" would do the same. The molecular weight assumed for the gas is discussed subsequently. The low system efficiency is due primarily to the modest value of the turbine inlet temperature and the high value of the compressor inlet temperature. For the case shown, 52.58 kWt must be rejected. Using an average h of 100 Btu/hr-ft²-°F on the seawater side (Perry's handbook), an overall U of 26 Btu/hr-ft²-°F was computed (including the 7 cm wall mentioned in the paper, titanium material assumed). For the 8.7 m² (93.6 ft²) of heat exchanger area quoted in the paper, a ΔT of 73.7°F was computed which agrees well with the value listed above, since the sea water temperature at depth is around 50°F.

At this level of performance, we would be concerned that the system feasibility might be challenged. For example, a Rankine (steam) conversion system operated at this temperature

would show a significantly higher efficiency, and power systems of this type have been operated extensively.

Our understanding of liquid-metal-cooled reactors suggests that considerably higher operating temperatures are feasible ($1375^{\circ}\text{K}=2015^{\circ}\text{F}$)¹. The limiting factor is the interface heat exchanger; superalloy materials are limited to $1500\text{-}1600^{\circ}\text{F}$ for long lifetimes, this allows turbine inlet temperatures (TIT) in the range of $1400\text{-}1500^{\circ}\text{F}$. The effect on the system performance is illustrated in the table below for a conservative 1400°F TIT. Note that the recuperator effectiveness has been upgraded to a value more consistent with previously demonstrated systems. The lower heat rejection results in the lower compressor inlet temperature shown (with the U given above, the 8.7 m^2 of heat exchanger area yields a ΔT of 26°F).

CBC Thermodynamic Design		
Temperatures, F		Other Parameters
*comp in	76	*beta, % 94
comp out	298.6	*recup eff, % 94
recup hi out	960.2	*bleed, % 2
*turb in	1400	*comp eff, % 80
turb out	1013.7	*turb eff, % 90
bleed out	450.7	*brg/sl pwr, kW .25
recup lo in	1002.4	*frac abs, % 80
recup lo out	354.1	*pres ratio 2.05
		*mol wt, #/mol 40
		*output, kw 10
		comp flo, #/s .502
		turb flo, #/s .492
		heat in, kW 28.34
		cyc eff, % 35.28

* = specified inputs

We believe this cycle is fully attainable and recommend it for your consideration.

2. CBC molecular weight

The 60%He/40%Xe mentioned in the paper summary can be interpreted as follows:

$$\begin{aligned} 60/40 \text{ by weight} &\rightarrow M_{\text{ave}} = 54.9 \text{ gm/gm-mole} \\ 60/40 \text{ by volume} &\rightarrow M_{\text{ave}} = 6.5 \text{ gm/gm-mole} \end{aligned}$$

Which interpretation is correct? In the past, we have usually tried to pick (as a nominal) one of the noble gases so that initial testing could be done at lower cost. For this system, either argon (mw=40), or krypton (mw=83.8) could be considered.

3. Use of two turbomachines

If the plan is to run two 5 kW engine continuously to achieve 10 kW output, this is less reliable than use of a single engine (more critical failure modes). Also, the issue of control for equal load sharing must be dealt with. If greater reliability is needed than a single CBC can provide, two 10 kW units could be considered, either operated in parallel or with one in reserve. Failure detection and switching criteria are issues for such an approach. Note that use of a single CBC would allow significant space savings (a 3 to 4 ft dia by 8 to 10 ft length cylindrical pressure vessel could be used with substantial weight savings).

In any case, the reliability issue should be attacked at the system level. Are data available to show that the EM pump has a sufficiently high reliability that circulation of the liquid metal coolant is not an especially critical issue?

4. Is an alternate concept of any interest?

During the last few years, many power system studies have been done wherein the CBC was powered by gas-cooled nuclear reactors (GCR) employing a wide variety of fuel forms². This type of a system, where the working fluid flows through the fuel form, solves two problems: 1) the CBC compressor is the "gas circulator" for the entire loop, and 2) no heat source heat exchanger with its temperature limit and pressure drop is needed, the TIT can be essentially the same as the core operating temperature. Such systems are being designed and analyzed in France, Germany, and Great Britain as well as here in the United States.

The following table illustrates the conceptual application of the GCR to deep undersea power system. Helium is used as the working fluid because of prior indications that the higher molecular weight noble gases may have an adverse effect on the core reactivity.

CBC Thermodynamic Design		
<u>Temperatures, F</u>	<u>Other Parameters</u>	
*comp in	74	*beta, %
comp out	295.8	*recup eff, %
recup hi out	1033.4	*bleed, %
*turb in	1500	*comp eff, %
turb out	1092.9	*turb eff, %
bleed out	468.5	*brg/sl pwr, kW
recup lo in	1080.4	.25
recup lo out	357.6	*frac abs, %
		*pres ratio
		2.05
		*mol wt, #/mol
		4
		*output, kw
		10
		comp flo, #/s
		.044
		turb flo, #/s
		.043
		heat in, kW
		26.47
		cyc eff, %
		37.77

* = specified inputs

References:

1. Truscello, Vincent C. and Lyle L. Rutger, "The SP-100 Power System", Ninth Space Nuclear Power System Symposium, Albuquerque, NM, 1992, Part One, pp. 1-23.
2. McDonald, Colin F., "Closed-Cycle Gas Turbine Potential for Submarine Propulsion," ASME Paper No. 88-GT-126.

付録 4 原子力電池

原子力電池はラジオアイソトープ熱発電器、RTG(Radioisotope Fueled Thermoelectric Generator)とも呼ばれている。ここでは原子力電池という名称を用いる。付録4では、参考文献(9)を引用して、原子力電池について説明する。

原子力電池は付図4. 1に示すように、熱源としてRIを利用していている。したがって、原子力電池は、発電部分に熱電気発電のような静的な機器を用いる場合には、全く可動部分がなく、RIからの放射線が放出している間は放置したまま長い年月にわたって電力を供給し続ける。この原子力電池に利用できるRIは、半減期が1～300年程度で、単位重量当たりの熱出力が200Wt/kg以上であるとともに、これらのRIは化学的に安定した化合物を作ることが必要である。これらの条件を満足するRIを付表4. 1に示す。このRIの中で α 線のみを放射するものは飛程が非常短く、遮へいを必要としないので、軽量化ができ主に宇宙用原子力電池に使用されている。また、 β 線は制動放射によって γ 線の放射を伴うので、遮へいが必要なため重くなり、地上または海底用原子力電池に使われている。

最初の地上用原子力電池は自動気象観測所の機器に電力も供給するために作られ、この原子力電池の実験結果によって、長い動作期間（寿命）と高い信頼性が確立された。この成果によって、原子力電池は自動気象観測所の電源として極めて関心を引くようになった。付図4. 2はアメリカのSNAP(System for Nuclear Auxiliary Power;原子力補助電源)計画で開発された海底用電源の構造である。熱出力は1.44kWt、電気出力は68We、熱効率は4.7%である。

β 線を熱源とする原子力電池の利用分野は、主に科学技術、防衛目的の潜水用装置である。この分野における初期の原子力電池は、波の作用による海岸の砂監視、様々な深さの水中の流速、方向、水の層が混ざり合う条件などの研究に利用された。その後、水中原子力電池が開発され、深海音響灯台として戦艦や潜水艦の航海、あるいは海岸気象観測に利用された。このような原子力電池は、旧ソ連においても“ベータ”シリーズとして電気出力約10kWeのものが開発された。また現在、イギリスではBi₂Te₃-Sb₂Te₃系熱発電素子による8～48Weの原子力電池が生産され、経済的に見合う用途が現れている。

α 線によって容易に高熱源を得るために、初期の原子力電池はRI熱源としてPo-210が使用された。このRIは比出力が142kWt/kgと大きく、少量のRIによって高温熱源を得ることができ、高効率の原子力電池を作ることができる。しかし、Po-210の半減期は138.3日と短いために、原子力電池は宇宙用電源として役立つことを実証する実験に利用された。その後、高純度化されたPu-238が製造されるようになり、このRIは宇宙用原子力電池の熱源として利用されるようになった。最初に利用された宇宙炉原子力電池はSNAP-3型で、その熱源はPo-210またはPu-238を厚さ0.76mmの円筒状SUS-304に密封したアンプルとした。このアンプル2個は厚さ0.86mmのSUS-304に再封

入され、円筒状超耐熱合金（ヘイネル-25）中に封入して熱ブロックとした。このブロックと熱源アンプルの間には確実な熱伝達を行うため、10atmのHeガスが満たされている。熱発電素子はp形としてNaを、n形としてIを添加したPbTeで構成され、27対の熱発電素子が熱ブロックの円周に沿って配置された。S N A P - 3型の外観はほぼ球状で、この改良型（S N A P - 3B7）は1961年6月にT R A N S I T衛星に取り付けて打ち上げられた。現在までに宇宙用電源としてアメリカで利用された原子力電池を付表4. 2に示す。最近、宇宙炉原子力電池の様々な利用形態に適応する熱源が開発され、モジュールの高温接合温度はボイジャー用電源より100K高くすることができるようになった。この熱源は、イリジウムで包んだ熱出力62.5Wtのプルトニウム酸化物($^{238}\text{PuO}_2$)ペレット2個を円筒状カーボン複合材に収納したもので、多目的熱源、G P H S (General Purpose Heat Source)といわれている。

付図4. 3はG P H Sを2本モジュール化した熱源の側面にGa添加Si-Ge合金の積層モジュールを8モジュール配置した熱電変換部(a)と熱発電器ユニットの中央断面(b)である。この発電器は木星探査機ガリレオ以降の惑星探査機用に設計され、探査機に必要な電源に応じて熱発電器ユニットを何段も積み重ねて利用する多目的発電器ユニットである。たとえば、アメリカのフェアチャイルド・スペース&エレクトリック社の282We熱発電器M I T G (Modular Isotopic Thermoelectric Generator) の設計仕様によると、熱発電器ユニットを12段重ね、出力282We (28V-10.1A)の多段発電器にすることによって、総合効率9.5%，比出力10.4We/kgを得ている。また、木星探査機ガリレオの電源は、付図4. 4に示すように、G P H S熱源モジュール18個の側面にSi-Ge熱発電素子576対配置し、出力294We (4万時間後、250We)，熱効率6.7%，比出力5.3We/kgを得ている。

この他に、 $^{238}\text{PuO}_2$ を熱源とする地上用R T Gとして数We以下の小型発電器が開発されている。これらの中で、 $^{238}\text{PuO}_2$ 150～180mgの熱源とBi-Te系熱発電モジュールを用いた小型発電器（単四乾電池程度の寸法）は0.2～0.4mWeの出力が得られ、旧ソ連はもとよりアメリカやフランスでは心臓ペースメーカーの電源として、人体に埋め込まれている。この電源の寿命は10年で、1970年にフランスで初めて埋め込まれてから、1974年までに465人にも達している。

我が国では、約く20年前に電灯を灯すR Tを開発する目的をもって、日本原子力研究所大洗研究所で研究されたが、熱源 $^{90}\text{SrTiO}_3$ を開発する前段階の放射性SrTiO₃の焼結ペレットを作るトレース実験まで中断している。

付表4.1 原子力電池用R I 热源

RI	半減期 [年]	放射線	製造法	固有出力密度 [C/W] [kW/kg]	燃料形	出力密度 [MW/m ³]	遮へい
Co-60	5.3	β, γ	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	65 17.4	金属	14	重
Ac-227	21.2	α, β, γ	$^{226}\text{Ra}(n, \gamma)$	— 15.0	Ac_2O_3	104	中
Th-228	1.91	α, γ	$^{227}\text{Ac}(n, \gamma)$	24 17.0	ThO_2	1270	重
U-232	74	α, γ	$^{231}\text{Pa}(n, \gamma)$	26 4.8	UO_2	33	中
Pu-238	89	α	$^{237}\text{Np}(n, \gamma)$	30 0.56	PuO_2	5.6	軽
Cm-244	18	α, n	$^{242}\text{Pu}(n, \gamma)$	30 2.8	Cm_2O_3	26.4	中
MFP ^{a)}	meta	β, α	F. P	— —	酸化物	0.1'	一
Sr-90 ^{b)}	28	β	(5.77%)	150 0.98	$\text{SrTiO}_3, \text{SrF}_2$	1.05	重
Cs-137 ^{b)}	30	β, γ	(6.15%)	207 0.42	ガラス, CsCl	0.24	重
Pm-137 ^{b)}	2.67	β	(2.6%)	2270 0.32	Pm_2O_3	1.9	軽

a) 混合核分裂生成物 b) 核分裂生成物から分離

付表4. 2 米国打ち上げの原子力電池

打上げ順序	発電器型名	ミッション名	打上げ年月	出力[W]	経過
ラジオアイソトープ熱発電器					
1	SNAP 3	Transit4-A	6/61	2.7	軌道に乗る
2	SNAP 3	Transit4-B	11/61	2.7	"
3	SNAP 9A	Transit5-BN-1	9/63	26.8	"
4	SNAP9A	Transit5-BN-2	12/63	26.8	"
5	SNAP9A	Transit5-BN-3	4/64	26.8	打上げ失敗、焼失
6	SNAP 19	Nimbus B-1	5/68	28.1	打上げ失敗、熱源回収
7	SNAP 19	Nimbus III	4/69	28.1	軌道に乗る
8	SNAP 27	Appolo-12	11/69	73.6	月面に着陸
9	SNAP 27	Appolo-13	4/70	73.6	月面着陸失敗、熱源は南太平洋に落下
10	SNAP 27	Appolo-14	1/71	73.6	月面に着陸
11	SNAP 27	Appolo-15	7/71	73.6	"
12	SNAP 27	Appolo-16	4/72	73.6	"
13	SNAP 19	Pioneer F/10	3/72	40.7	木星を探査する
14	RTG	Transit	9/72	35.6	軌道に乗る
15	SNAP 27	Appolo-17	12/72	73.6	月面に着陸
16	SNAP 19	Pioneer-G/11	4/73	40.7	木星と土星を探査する
17	SNAP 19	Viking-1	8/75	42.7	火星に着陸
18	SNAP 19	Viking-2	9/75	42.7	"
19	MHW ^{a)}	LES8/9	3/76	158	軌道に乗る
20	MHW	Voyager I	8/77	155	木星と土星を探査する
21	MHW	Voyager II	9/77	155	木星、土星を探査し、天王星と海王星に飛行中 ^{b)}
原子炉熱発電器(1回のみ打上げ)					
22	SNAP10A	SNAPSHOT	4/3/65	500	軌道に乗る

a) 発電器名にラジオアイソトープ熱源の名称 (Multi-Hundred-Watt) の略字を使っている。

b) 現在、天王星を観測(1986年1月)し、海王星に飛行中。

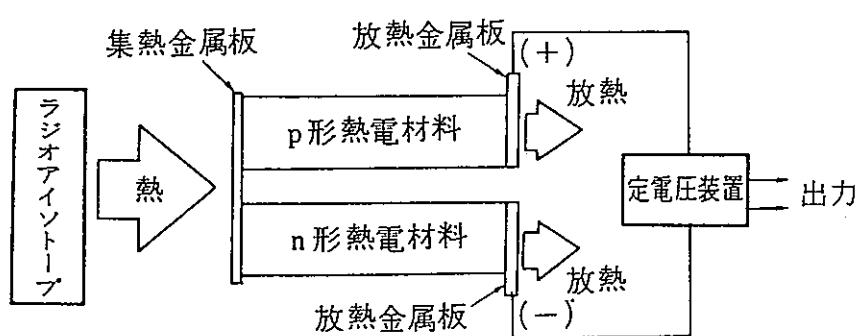
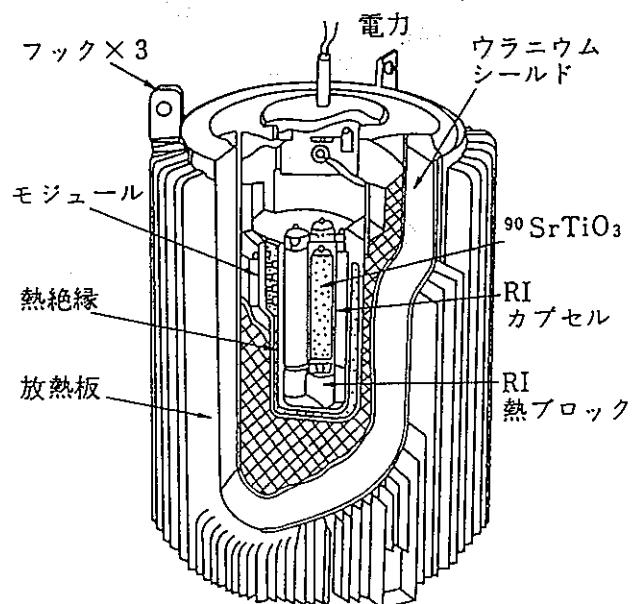


図 6.18 ラジオアイソトープによる発電原理

付図 4. 1 原子力電池原理



RI はラジオアイソトープの略
図 6.19 ストロンチウム-90($^{90}\text{SrTiO}_3$)を
熱源とする発電器 (SNAP-7B)

付図 4. 2 ^{90}Sr を用いた原子力電池

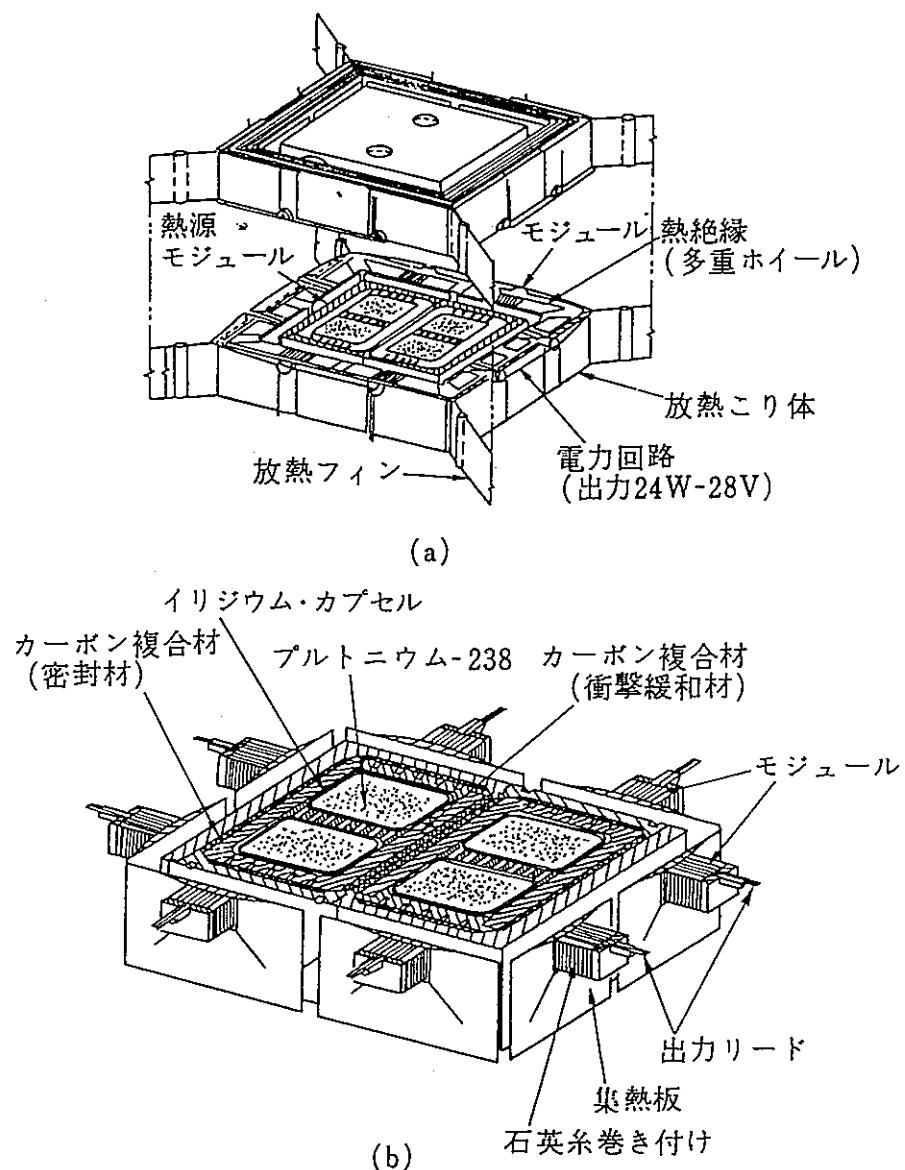


図 6.20 多目的宇宙用熱発電ユニット(a)と熱電変換部中央断面(b)

付図 4. 3 原子力電池ユニット及び断面

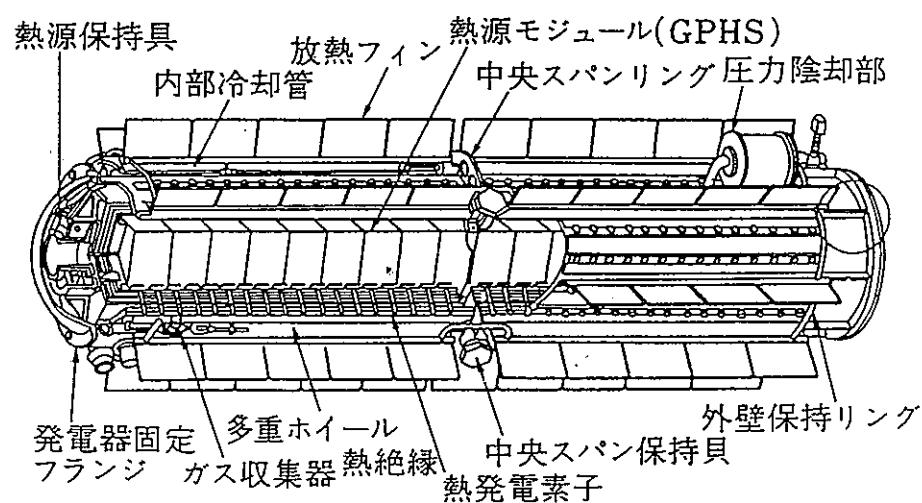


図-6.21 木星探査機ガリレオの電源に使用する 282W 热發電器

付図 4. 4 木星探査機ガリレオ用原子力電池

付録 5 液体金属の種類についての考察

可搬型炉の冷却材の候補としては、Li、Na、NaK、Pb、Hg等があげられる。ここではそれらについて比較検討を行う。

まずNaであるが、これは地上の通常の高速炉において使用されている。Naを可搬型炉の冷却材として用いる場合の問題点は、付表5. 1に示すように融点が98°Cで、室温で固体であることである。従って深海炉においても宇宙炉においても、長期間炉停止した後再起動する場合には、固体のNaを再溶融する必要がある。再溶融場合にNaが膨張し炉容器或いは配管等を破損しないようにする必要がある。そうでなければ、長期間炉停止中にNaが固化しないように別に熱源を用意する必要がある。同じことは、Li、Pb或いはPbBi合金についても言える。

Pbは旧ソ連で原子力潜水艦に使用されているものである。Pbは構造材に対して非常に腐食性が強い。このような腐食性が強い材料は、原子力潜水艦のように使用期間が比較的短いと想定される軍事目的の場合には使用できても、長期間にわたって使用する平和目的の可搬型炉に使用可能かどうかは分からぬ。Pbの腐食性対策として旧ソ連では何かを行っているらしいが、今のところ公開していない。この腐食性対策のために、何らかの作業を原子力潜水艦の乗組員が行っているとすれば、潜水調査船用にはPbを使用できるとしても、運転期間が2~4年間になる深海無人基地の場合には不可能である。旧ソ連でPbを使用したのは、戦闘を前提とした、即ち炉システムの破壊を前提とした原子力潜水艦であるが故に、NaK-水反応を避けてあえてPbを使用したと考えられる。

Hgについては融点が低く常温で液体なのは優れた特徴である。付表5. 1に示すように沸点が1気圧で375°Cと低温なのが欠点である。深海炉の場合、2次系ループの一部は開放しており、従って耐圧殻内圧力は約4気圧であるが、この場合だと沸点は400°Cを越える。原子炉出口温度を400°Cとして密閉ブレイトンサイクルの熱効率を計算したところでは、約4%という結果が得られている。NaやNaKを用いた場合の熱効率の約1/6ぐらいとなる。従ってHgを用いる場合には、結果的に発電出力を数kWeと小さくすることになる。

NaKについては、室温で液体であり、且つ沸点は785°Cと高い。従って深海炉用としては最も優れている。宇宙炉用の場合には、システムよりの排熱温度が深海炉の場合より高温にする必要があるので、Liを使用する傾向もあるが、この場合には最初に述べたようにLiの固化の問題を解決する必要がある。このために、システムの一部にNaKを使用したヒートパイプを用いる方法も提案されている。

以上のように、深海炉としてはNaKが最も優れている。宇宙炉用には現状ではNaKが、将来技術としてはLiが良い。尚、海中における原子力と関係のないNaの使用に関しては、既にNa-S電池として使用されている^{(12) (13)}。

ここでは念のため最後に有人の潜水調査船の場合にはどうしてもNaKを使いたくない

という立場に対応して、Pbを用いた場合の高速炉システムの重量増について検討してみる。

図3.5に示す20kWeシステムの場合には、冷却材NaKの体積は31ℓ⁽⁶⁾であるので、重量増は付表5.1の値を使用して次のようになる。

$$(11.3 - 0.9) \text{ } \ell/\text{kg} \times 31 \ell = 322.4 \text{ kg}$$

図3.7及び図3.9に示す2MWt、200kWeシステムの場合は、冷却材体積は0.42m³⁽⁷⁾であるので重量増は次のようになる。

$$(11.3 - 0.9) \text{ } \ell/\text{kg} \times 420 \ell = 4,368 \text{ kg}$$

従ってこのような重量増を見込んで潜水調査船を設計すれば、Pbの使用も可能である。

最後に1950年代に米国で、Beを減速材として使用したNa冷却中速中性子炉を、動力源として搭載した原子力潜水艦が建造された事があるので、ここで簡単に紹介する⁽¹⁴⁾。

原子炉はSIR Mark Aと呼ばれるもので、付表5.2に示すように原子力潜水艦Seawolfに搭載された。付図5.1には原子力潜水艦Seawolfを示す。

Seawolfは進水後低出力運転試験が行われた。しかしこの間に蒸気発生器で水の漏洩が発生し、この補修工事に長期の日数が必要となった。この当時平行して軽水炉を搭載したNautilusが開発されていたが、Nautilusの性能が非常に良かったためNa冷却炉は中止となった。以後米国では原子力潜水艦には軽水炉のみが使用されている。

尚このSeawolfの開発に当たっては、運航中に原子炉が損傷した場合、炉内の冷却材Naを海水中に噴出することも考えていたらしく、Na-水反応に対する原子力潜水艦の健全性を確認するための、Na-水反応試験が行われた⁽¹⁵⁾。

付表 5. 1 液体金属の融点・沸点・比重⁽¹⁰⁾

金属	融点°C	沸点°C	室温での比重 kg/l
L i	1 8 0	1, 3 3 6	0. 5 3 (s)
N a	9 8	8 8 3	0. 9 7 (s)
N a K	- 1 2. 6	7 8 5	0. 8 9 (l)
H g	- 3 9	3 5 7	1 3. 6 (l)
P b	3 2 7	1, 7 5 5	1 1. 3 (s)
B i	2 7 1	1, 4 2 0	9. 8 (s)

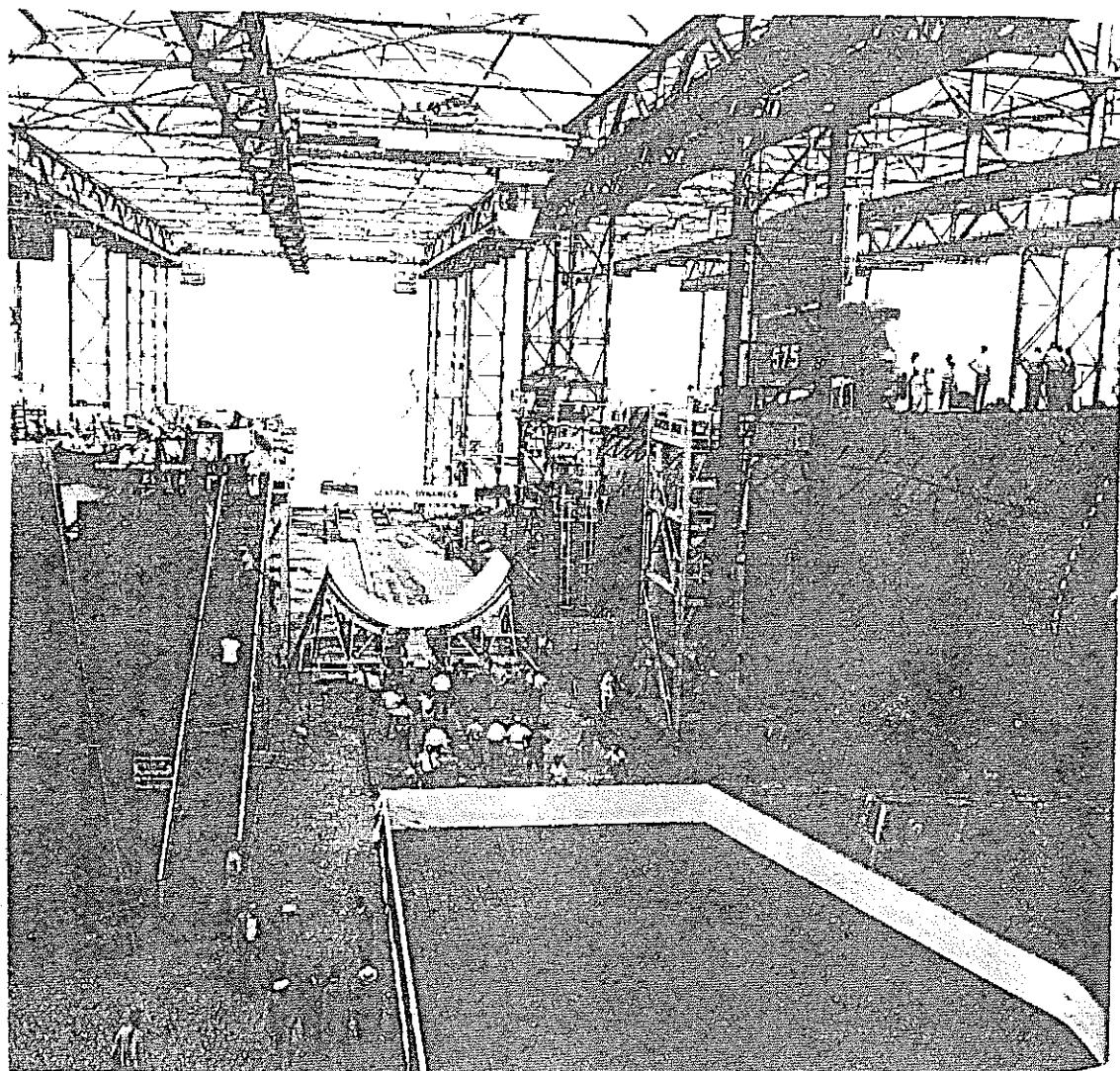
(s) : 固体 (l) : 液体

付表5。2 1953年米国海軍原子力推進計画

Table 2. Navy Nuclear Propulsion Program in 1953

	Water-Cooled Reactor	Sodium-Cooled Reactor
AEC Field Office	Pittsburgh	Schenectady
AEC Contractor	Westinghouse (Bettis Laboratory)	General Electric (Knolls Atomic Power Laboratory)
Land Prototype	Submarine Thermal Reactor (STR) Mark I, National Reactor Testing Station, Idaho	Submarine Intermediate Reactor (SIR) Mark A, West Milton, New York
Nuclear Submarine	<i>Nautilus</i> SSN 571 STR Mark II	<i>Seawolf</i> SSN 575 SIR Mark B
Shipyard	Electric Boat Division, Groton, Connecticut	Electric Boat Division, Groton, Connecticut

26. Preparations at 7:30 A.M., July 21, 1955, for a dual ceremony at Electric Boat. Keel laying of the *Skate* (SSN-578) is to take place in the building way at the center, and the *Seawolf* (SSN-575) is to be launched at the right.



26

付図 5. 1 原子力潜水艦 *Seawolf*