

JAERI - M  
88-057

改良船用炉の試設計の評価(8)  
— 経済性 —

1988年3月

伊藤 泰義・今村 義明・安保 則明・横村 武宣

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

改良船用炉の試設計の評価（8）

—経済性—

日本原子力研究所原子力船研究開発室

伊藤泰義・今村義明・安保則明

横村武宣

（1988年2月3日受理）

将来の実用化を目指して開発する船用炉の炉型を明らかにし、開発に必要な研究開発課題を抽出するために、半一体型、一体型および自己加圧一体型の3炉型について試設計を実施した。

本報告ではこれら3炉型について経済的面からの検討を行った。検討は、(1)炉プラントコスト (2)核燃料加工コスト (3)核燃料サイクルコスト の積算を行い、これらを用いて3炉型を想定船（タンカー、コンテナ船）に搭載した時の運送原価（RFR）を求め、RFRで経済性の検討を行っている。

その結果、経済性の面からは一体型の炉型が望ましい事が明らかになった。

Evaluation of the trial studies for a advanced marine reactor (8)

- Economics -

Yasuyoshi ITOH, Yoshiaki IMAMURA, Noriaki AMBO  
and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Toranomon, Minato-ku, Tokyo

(Received February 3, 1988)

JAERI carried out the trial design of three type reactors (semi-integrated type, integrated type, and self pressurized integrated type) in order to clarify reactor type of advanced marine reactor for the best practical use in future and to extract its research and development theme.

This report presents the comparison and estimation of these three type reactors from economical view point.

Economical comparison carried out with next items for estimating the operating cost of ships powered by these three type reactors.

(1) cost of reactor plants. (2) cost of fuel processing. (3) fuel cycle cost.

As a result, it is cleared that the operating cost is the lowest in the ship powered by the integrated type reactor.

Keywords: Marine Reactor, Economics, Cost, Semi-integrated Type, Integrated Type, Self Pressurized Integrated Type, Reactor Plants, Fuel Processing, Fuel Cycle

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 改良船用炉プラントの経済性の検討 .....	3
2.1 概 要 .....	3
2.2 コスト算出方法 .....	3
2.3 主要工程作業図 .....	3
2.4 機器・設備コストの算出 .....	4
2.5 コスト算出結果 .....	6
2.6 結果の検討 .....	6
3. 改良船用炉燃料の加工費の調査 .....	35
3.1 概 要 .....	35
3.2 燃料製造設計からの評価・検討 .....	36
3.3 加工コストの評価 .....	41
3.4 結 果 .....	46
4. 核燃料サイクルコストの試算 .....	56
4.1 計算の考え方と計算式 .....	56
4.2 まとめ .....	58
5. 経済性の検討結果 .....	61
5.1 運送原価の算出 .....	61
5.2 計算条件 .....	62
5.3 結果の比較 .....	63
6. まとめ .....	65

## Contents

1. Preface .....	1
2. Economic study of an advanced marine reactor plant .....	3
2.1 General .....	3
2.2 Calculating method of the plant cost .....	3
2.3 Main work process chart .....	3
2.4 Calculation of the equipments and facilities cost .....	4
2.5 Result of the cost calculation .....	6
2.6 Consideration of the result .....	6
3. Investigation into the processing costs of an advanced marine reactor fuel .....	35
3.1 General .....	35
3.2 Investigation and evaluation from the fuel manufacturing design point of view .....	36
3.3 Evaluation of the processing costs .....	41
3.4 Result .....	46
4. Calculation of the fuel cycle cost .....	56
4.1 Calculating method .....	56
4.2 Result .....	58
5. Result of the economic study .....	61
5.1 Calculation of the shipping charge .....	61
5.2 Condition of the calculation .....	62
5.3 Comparison of the results .....	63
6. Conclusion .....	65

## 1. はじめに

原子力船研究開発室は、昭和58年度から昭和60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。

これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性に優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様にもとづき設計研究を行い、それらの特徴、性能を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉、および自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれわが国固有の技術およびフランス、西ドイツの提携技術を基盤としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行った。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性      (I) 丸棒燃料  
                  "            (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能      (I) 遮蔽設計の妥当性  
                  "            (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を行い、用途に適合する炉型を明らかにするとともに、次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本報告書は、これら一連の設計評価研究のうち(8)の経済性の評価に関するものである。

経済性の評価の指標としては運送原価〔RFR (Required Freight Rate : 単位貨物量当りの輸送コスト)〕を用いるものとし、この算出に必要な炉プラントコスト、核燃料加工コストおよび核燃料サイクルコストの積算を行った。

炉プラントコストの積算は3炉型の機器・設備のコストを算出し、炉プラントのコスト構成を明らかにしている。

燃料加工コストについては我が国で経験のない特殊な製造法、加工工程を含む燃料も含まれていることから、成形・加工法の調査を実施し、加工コストの算出を行った。この加工費および核燃料コスト等から核燃料サイクルコストの積算を行った。

各試設計炉を搭載する想定船舶は、現在一般的に運航されている、3万馬力程度のコンテナ船

およびタンカーの2種類とし、RFRを概算した。

その結果、両船種ともに一体型炉を塔載した場合が、RFRが最も低く、経済性も良い事が明らかになった。



## 2. 改良船用炉プラントの経済性の検討

### 2.1 概 要

原子力船の実用化のためには、船用炉プラントコスト低減化が必要である。そこで現時点での船用炉プラントコストを把握し、今後開発を進めるコスト低減化の資料とするとともに、その目標値の設定に利用するため、試設計炉のコスト積算を行った。

コスト積算は、試設計結果に基づき、3炉型の機器・設備について行った。

### 2.2 コスト算出方法

コスト算出に当たっては、主要機器については機器製作の主要工程作業図を作成し、これら作業図に基づきコスト積上げによる算出を行った。また、これら機器以外の機器・設備で、コスト算出のための設計資料のあるものは、同様にコスト積上げによる算出を行った。

一方試設計結果で、コスト積上げを行うための設計資料が充分でない機器・設備については、陸上原子炉プラントより機器・設備仕様を推定して、コストの算出を行った。

### 2.3 主要工程作業図

下記の主要機器について、陸上原子炉機器の知識・経験等を基にして主要工程作業図を作成した。(図 2.1～2.9 にその例を示す。)

#### 2.3.1 主要工程作業図作成対象機器

- 1) 半 一 体 型 炉：原子炉容器，1次冷却材ポンプ，蒸気発生器，加圧器，格納容器
- 2) 一 体 型 炉：原子炉圧力容器，1次冷却水ポンプ，蒸気発生器，加圧器，格納容器
- 3) 自己加圧一体型炉：原子炉圧力容器，1次冷却水循環ポンプ，蒸気発生器，格納容器

#### 2.3.2 主要工程作業図作成条件

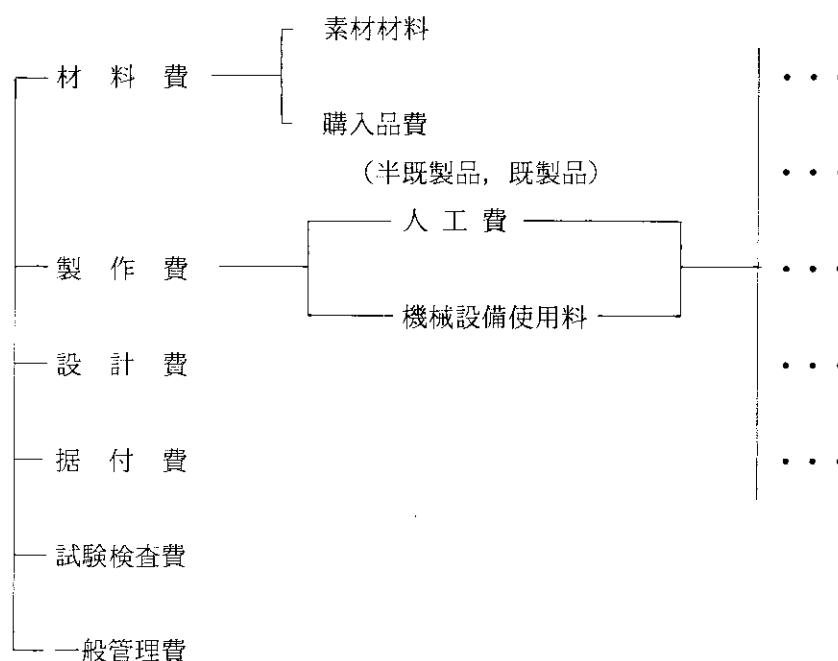
主要工程作業図の作成に当たっては、以下の条件に基づき、材料加工，製作，組み立て，検査を加味して作成した。

- 1) 各素材に関しては、半製品にて材料メーカーより納入されるものとし、素材自体の製作工程は本工程作業図に含めないものとした。(例：板材は板材加工から本工程作業図に組み込まれている。)
- 2) 試験・検査は陸上原子炉に通常適用される項目を適用させた。
- 3) 部品加工と組み立て作業は、同一工場敷地内で行われるものとし、陸上原子炉で行われる様なサイト組み立て作業(例：格納容器)は考慮しないものとした。

- 4) 工場製作能力は陸上原子炉用のものと同一とし、全て国産品を使用するものとした。
- 5) 機器製作に必要な2次的な作業工程(例:組み立てに必要な仮設設備、準備作業等)は本工程作業図に含めないものとした。

## 2.4 機器・設備コストの算出

試設計資料を基に物量を算出し、また主要工程作業図を参考にして、製作加工工数を算出し、現時点(昭和61年度)での陸上原子炉用基準コスト単価(以下基準単価という)を用いてコストの算出を行った。コストの算出にあたっては、原則として次の各コストを算出して、コスト算出総括表を作成した。



### 2.4.1 コスト構成費目算出方法

各コスト構成費目は次の方法で算出した。

- 1) 材料費: 前記物量及び試設計資料の図面から加工代, 加工減肉等を考慮して, 素材物量を計算し, 基準単価を用いて材料費を算出した。
- 2) 製作費: 主要工程作業図を参考にし, 機器加工, 溶接, 組立について陸上原子炉用機器・設備に対する知識, 経験を基にして加工工数を計算し, 基準単価を用いて製作費を算出した。
- 3) 設計費: 材料費, 製作費, 据付費, 試験検査費の合計金額を各機器・設備毎に陸上原子炉で通常用いられている比率(0.12)を乗じて設計費を算出した。
- 4) 据付費: 積み上げ方式によって算出した製品物量により, 据付工数と基準単価を用いて据付費を算出した。
- 5) 試験検査費: 主要工程作業図及び試設計資料より試験検査工数及び試験検査に必要な消耗

雑材料を計算し、基準単価を用いて試験検査費を算出した。

- 6) 一般管理費：材料費、製作費、設計費、据付費、試験検査費の合計金額に陸上原子炉の経験に基づいた比率（0.20）を乗じて算出した。

#### 2.4.2 コスト算出条件

コスト算出に当っては以下の諸条件を適用した。

- 1) 研究開発費はコストに算入しない。
- 2) 量産効果を考慮した。(生産基数 計50基 5基/年程度)
- 3) 基準単価は昭和61年度をベースとする。
- 4) 以下の機器・設備は陸上原子炉をベースとして算出した。
  - a) 主配管のコスト
  - b) 計測制御系コスト
  - c) 補助系のコスト
  - d) 廃棄物処理系のコスト
  - e) 二次浄化系のコスト
  - f) タービン、ダンプ系のコスト

#### 2.4.3 陸上原子炉をベースとした船用炉コストの算出手法

試設計結果で、コスト積上げを行うための設計資料が充分でない機器・設備に関しては、以下の手法にて陸上原子炉をベースとして算出した。

##### 1) 主配管のコスト

主配管に関しては、各炉型に対し、試設計資料の系統図を基に、主蒸気系統設備および給水設備の配管を考え、機器配置を想定してコストを算出した。

##### 2) 計測制御系のコスト

計測制御系のコストは陸上原子炉の経験および試設計資料に基づき算出した。

##### 3) 補助系のコスト

試設計資料を基に以下の系統を補助系とみなし、陸上原子炉の知識、経験に基づいてコストを算出した。

炉 型	系 統 名 称
半 一 体 型 炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工学的安全防護設備（余熱除去系を含む）</li> <li>・非常用炉心冷却設備</li> <li>・体積制御設備</li> </ul>
一 体 型 炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用炉心冷却設備</li> <li>・残留熱除去設備</li> <li>・体積制御設備</li> </ul>
自己加圧一体型炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用炉心冷却設備</li> <li>・残留熱除去設備</li> <li>・体積制御設備</li> </ul>

陸上原子炉に含まれる補助系には、上記の外に表 2.1 に示す系統・設備があるが、これら系統・設備が実際に船用炉に含まれてくるかどうかは、試設計資料では明らかでないので、ここでは補助系のコストに含めていない。しかしながら、参考資料として本報告書で算出したある補助系コストが、陸上原子炉の全補助系からみてどの位の比率になるかを表 2.1 に示した。また、表 2.1 には、補助系以外で陸上原子炉にはあるが、本コスト積算に含まれていない系統・設備名称およびそれらのコスト比率も示した。

#### 4) 廃棄物処理系コスト

本系統については、試設計結果がないので、本系統のコストは陸上原子炉のタービン蒸気流量に比例するものとして算出した。

#### 5) 二次浄化系のコスト

本系統は試設計結果がないので、陸上原子炉(PWR)におけるタービン設備と二次浄化系の比率を用いて、タービンドンプ系にその比率(0.09)を乗じてコストを算出した。ただし、陸上原子炉(PWR)においては二次浄化系は復水脱塩装置付属配管および弁が含まれているものとした。

#### 6) タービンドンプ系のコスト

試設計資料に基づき、タービン本体、タービン補機および配管を含めてコストを算出した。

## 2.5 コスト算出結果

機器・設備のコスト算出結果を図 2.10 ~ 2.16 及び表 2.2 に示す。図 2.10 は機器・設備のコスト総計を炉型別に比較したものであり、表 2.2 はその機器・設備毎の割合を示したものである。また図 2.11 ~ 2.16 は主な機器・設備のコストを炉型別に比較したものである。

なお、本報告で積算の対象とした系統設備は表 2.1 の通りであり、陸上発電炉の全コストの約 65%に相当する。

## 2.6 結果の検討

本積算結果では、半一体型炉と一体型炉がほぼ同コストで、自己加圧一体型炉がその 1.7 倍程度となった。それらの単位重量当りの相対コスト比率では(半一体型) 1.09 : (一体型) 1.0 : (自己加圧一体型) 1.24 程度であり、本積算精度からみて、それほど有意な差はみられないと考えられる。

さらに、これらの積算コストおよびコスト構成比率(表 2.1)から全プラントのコストを推定すると、半一体型炉および一体型炉が約 70 億円、自己加圧一体型炉が約 110 億円となる。これらのコストと原産の式による原子炉プラントコストの関係は図 2.17 の通りであり、自己加圧一体型がほぼ同程度で僅かに安く、半一体型および一体型はその約 60%に低下している。これらのことから

- ① 日独共同研究による 8 万馬力 EFDR (NCS -80)、造研 NSR-7 委員会の 12 万馬力一体型設計炉のコスト試算等をベースとして作成した原産の式(物価補正済)に対し、EFDR の

修正炉である自己加圧一体型炉はほぼ同額であり、本積算値はほぼ妥当な値であると判断される。

- ② 半一体型炉および一体型炉ではその改良努力により約40%のコストダウンが図られたものと考えられる。

また、表 2.1 のうち、今回の報告に含まれなかった機器・設備の部分では大幅な改良努力が期待できないことから、これらの機器・設備コストは原産式に従うものとした場合、半一体型炉および一体型炉で30%弱のコストダウンとなる。(図 2.17 ×印)

表 2.1 陸上原子炉の系統・設備のうち、本報告に含まれるものの名称およびコスト比率

No.	設 備 名 称	構成比率 (%) レベル 2	構成比率 (%) レベル 1	舶 用 炉 該 当 積 算 項 目 の 有 無
1	原子炉設備 a. 原子炉設備 b. 原子炉格納設備 c. 一次冷却設備		30.3	有
2	原子炉補助設備 a. 非常用炉心冷却設備 b. 化学体積制御設備 c. 余熱除去設備 d. 格納容器スプレイ設備 e. 原子炉補器冷却水設備 f. 原子炉補器冷却海水設備	4.58 2.10 2.06 2.49 2.03 3.19	16.45	有 有 有 無 無 無
3	燃料取扱設備		2.9	無
4	廃棄物処理設備		3.9	有
5	タービン設備 a. 蒸気タービン設備 b. 主蒸気系統設備 c. 復水設備 d. 給水設備 e. 復水器設備 f. 循環水設備 g. 復水浄化設備(二次浄化系) h. 軸受冷却水設備 i. その他設備	11.67 0.76 2.33 2.52 2.62 1.19 1.86 1.14 2.01	26.1	有 有 有 有 有 無 有 無 無
6	電気設備		11.05	無
7	換気空調設備		3.5	無
8	その他設備		5.33	無
	合 計		100.00	64.7

本構成比率は軽水炉加圧水型原子力発電所のものである。

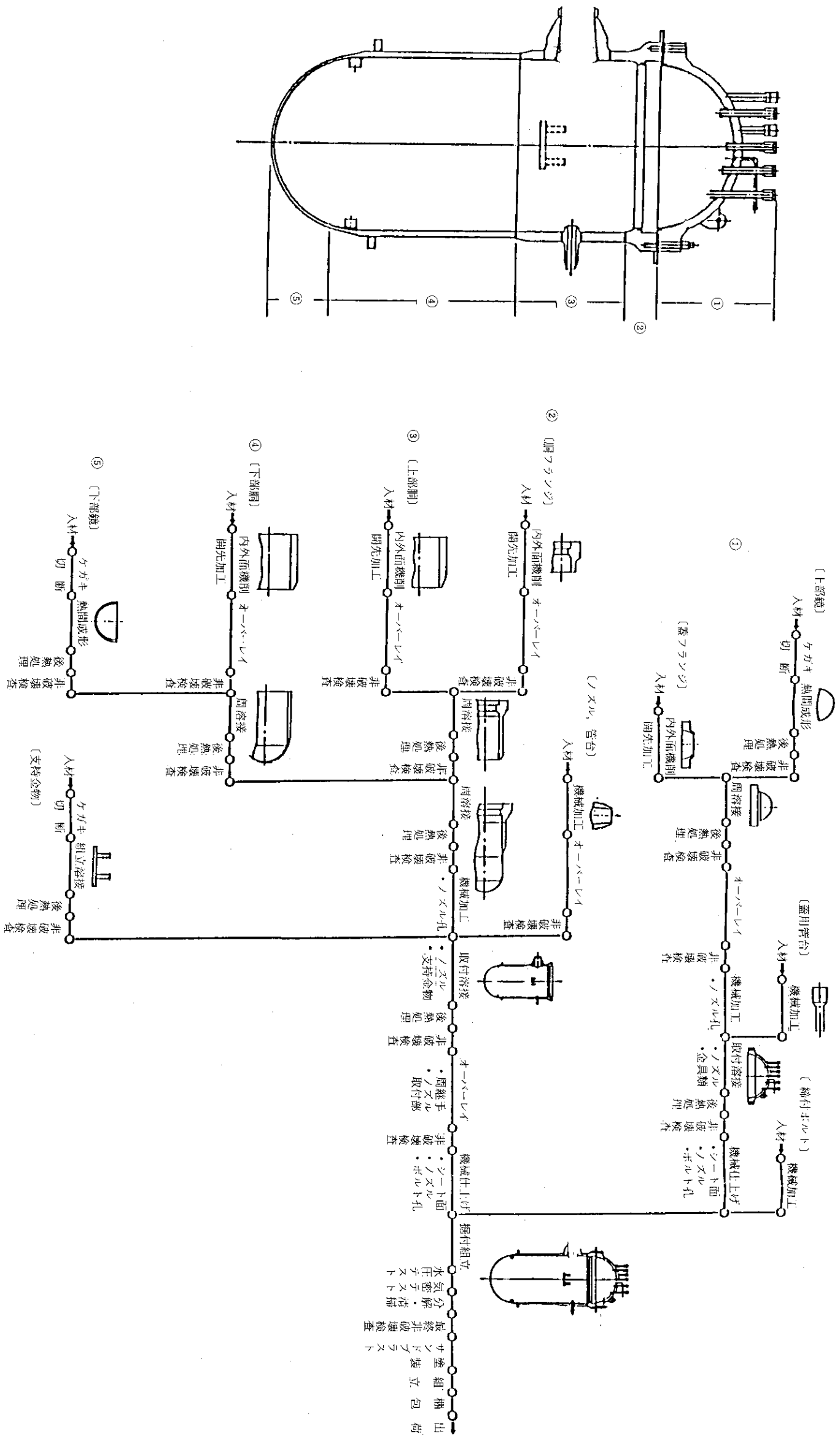


図 2.1 半一体型炉 主要作業工程図—原子炉容器

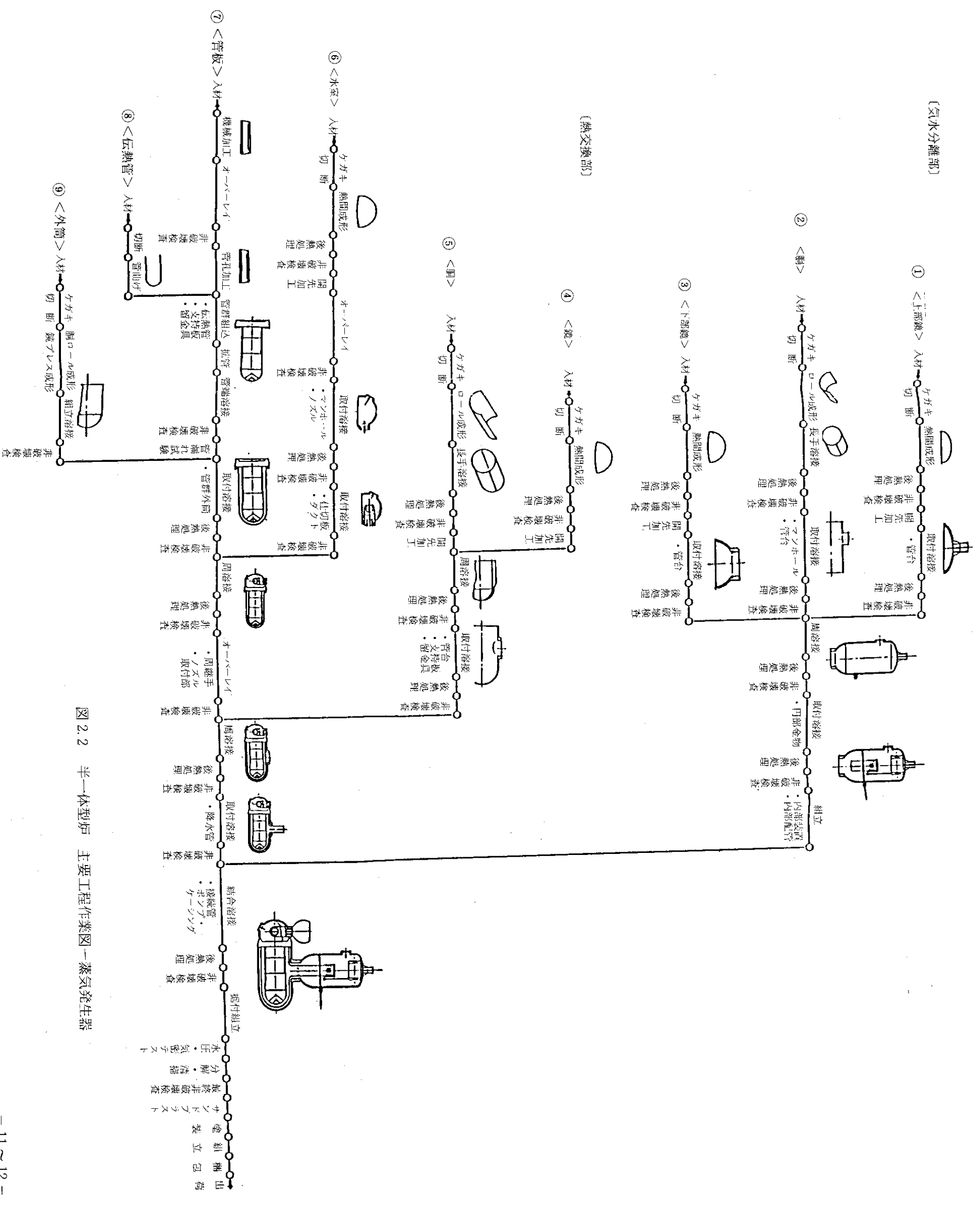
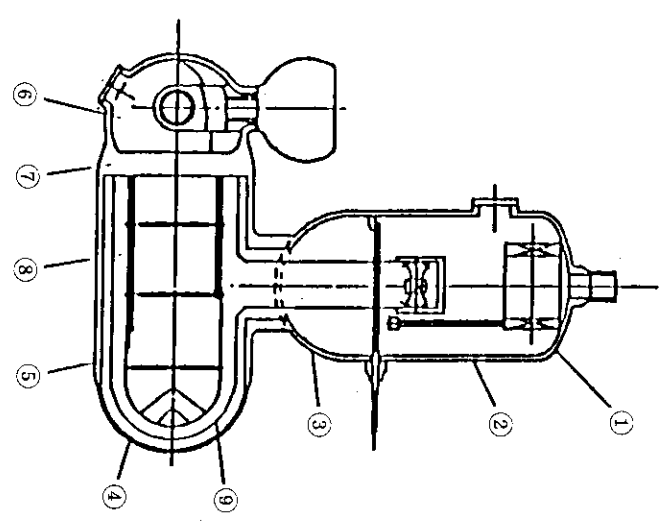


図 2.2 半一体型炉 主要工程作業図一 蒸気発生器

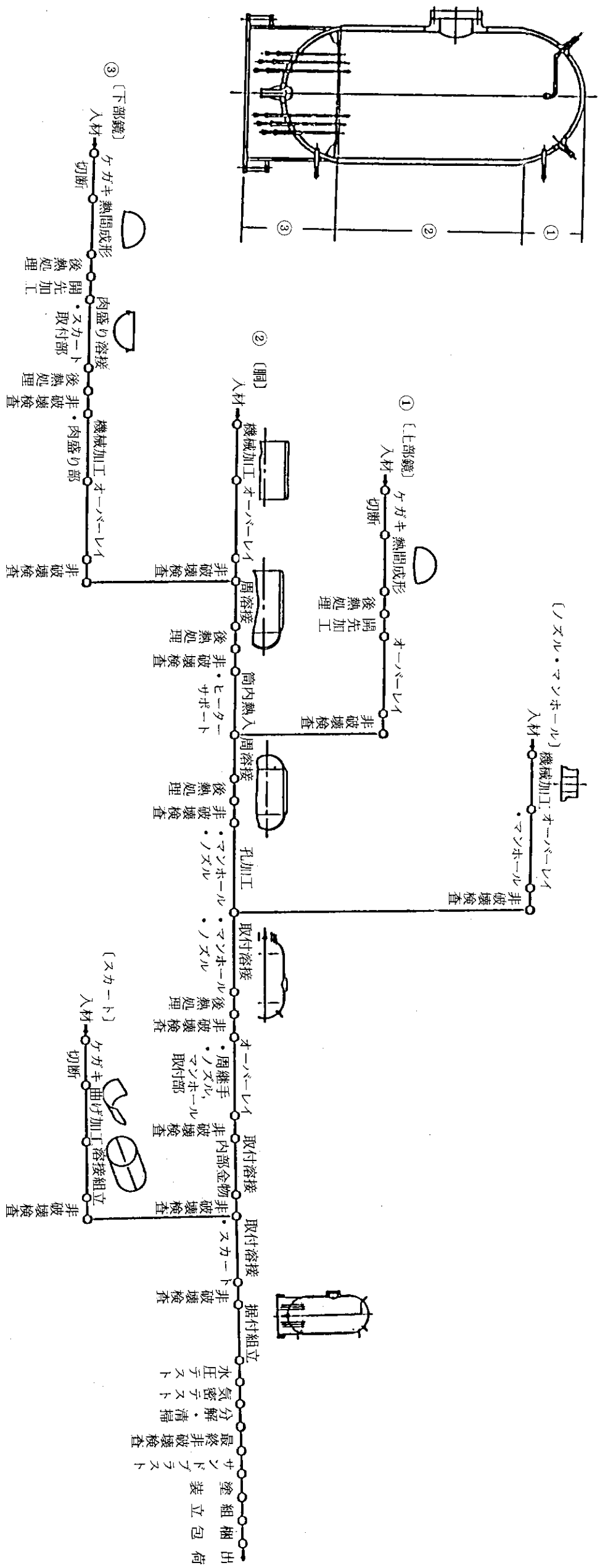


図 2.3 半一体型炉 主要工程作業図—加圧器



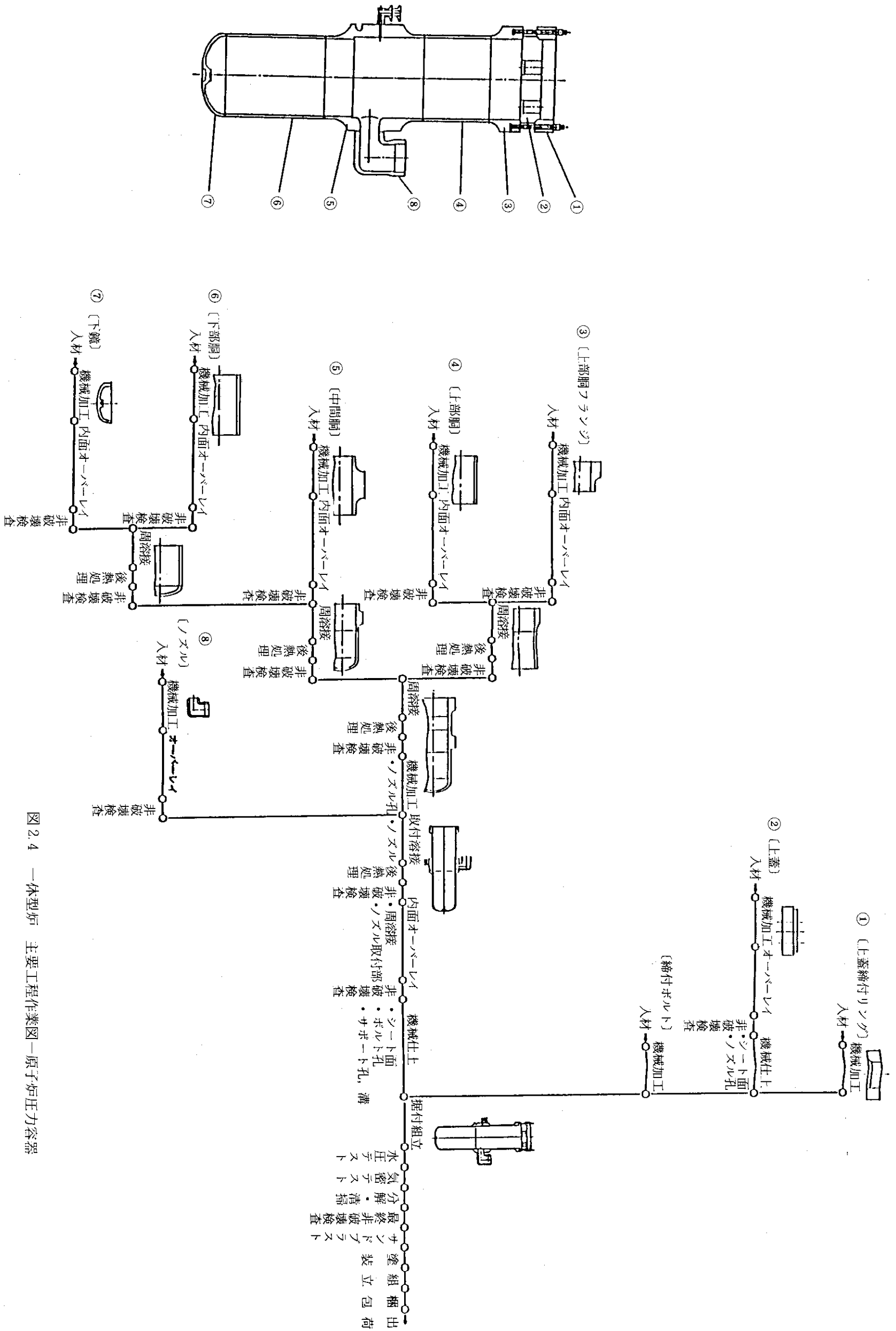


図 2.4 一体型炉 主要工程作業図—原子炉圧力容器

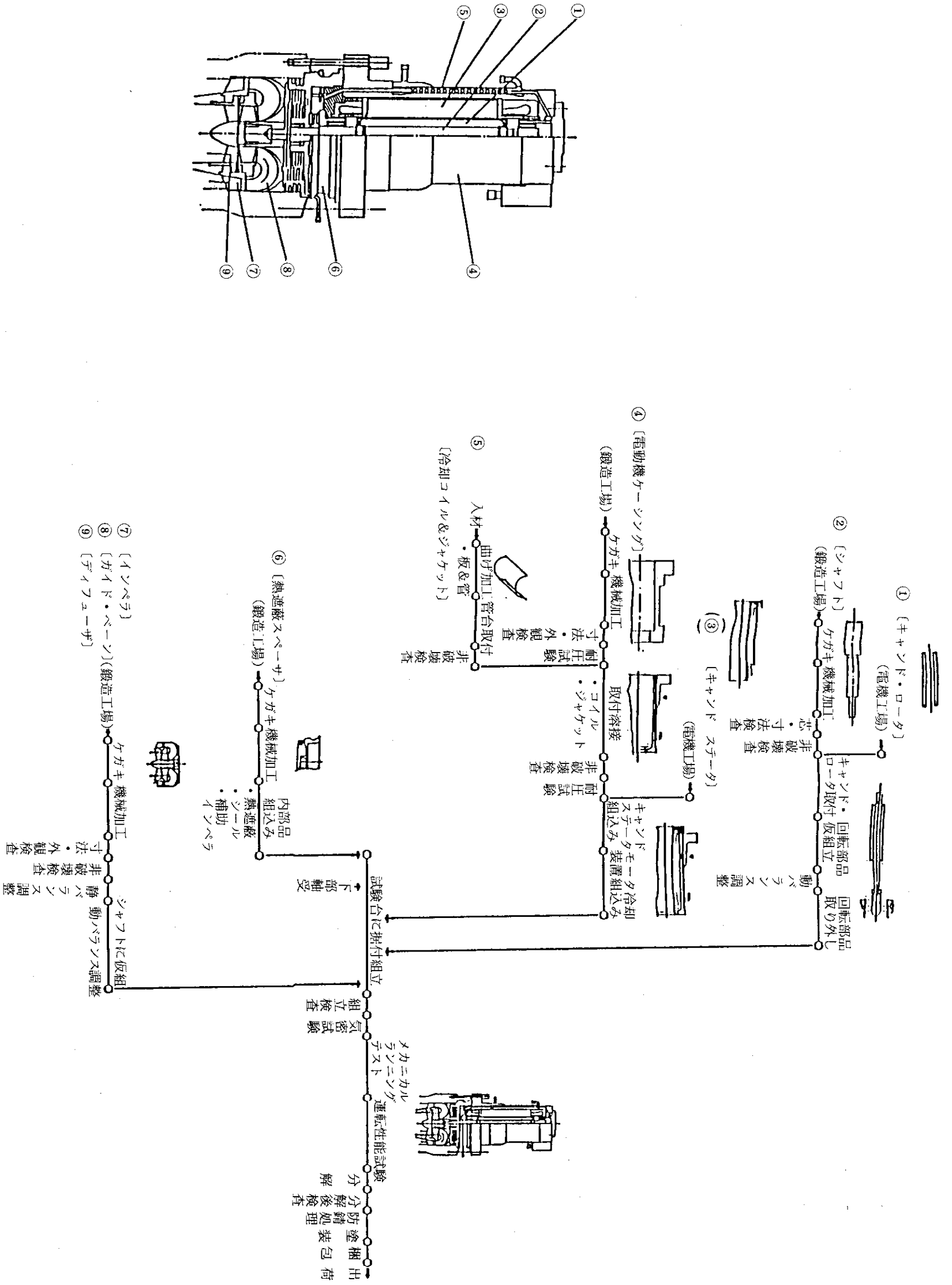


図 2.5 一体系型炉 主要工程作業図—1次冷却水ポンプ

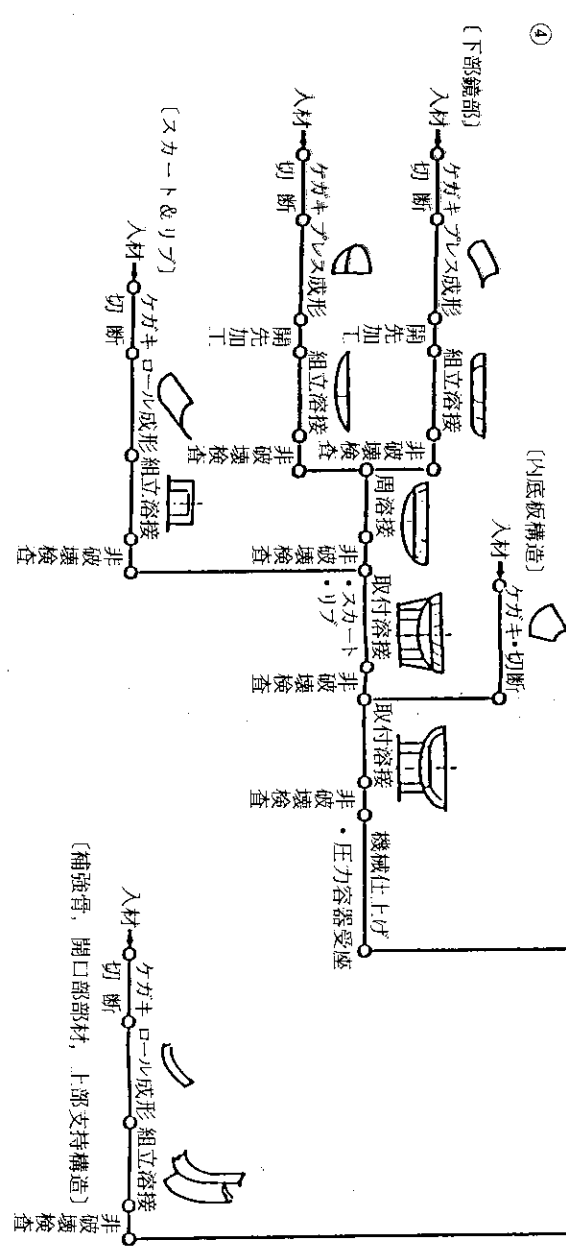
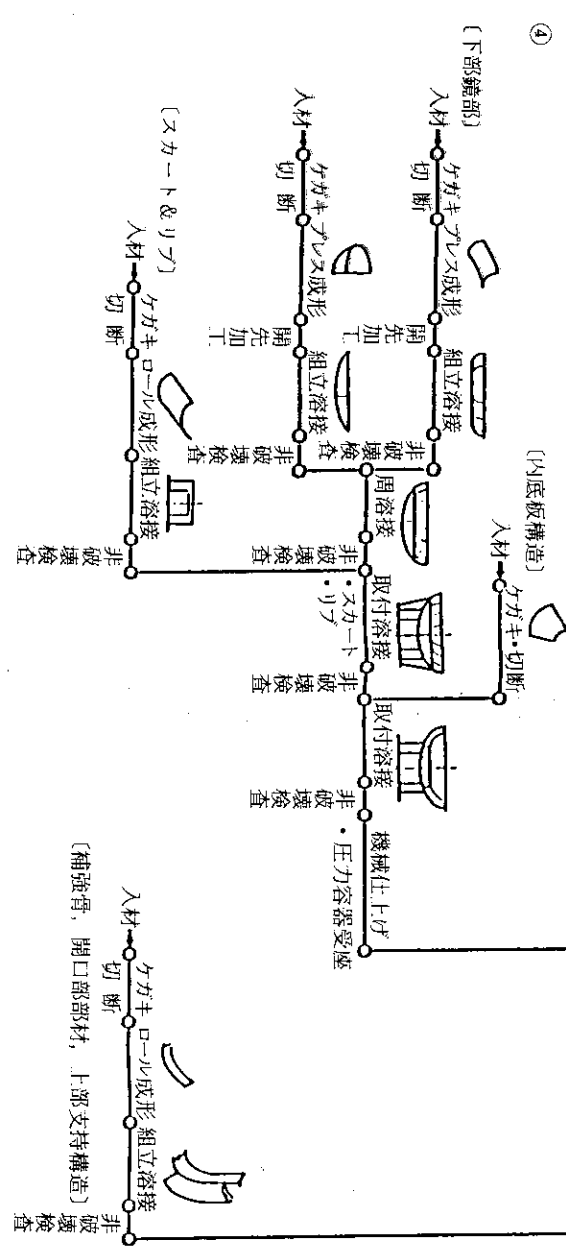
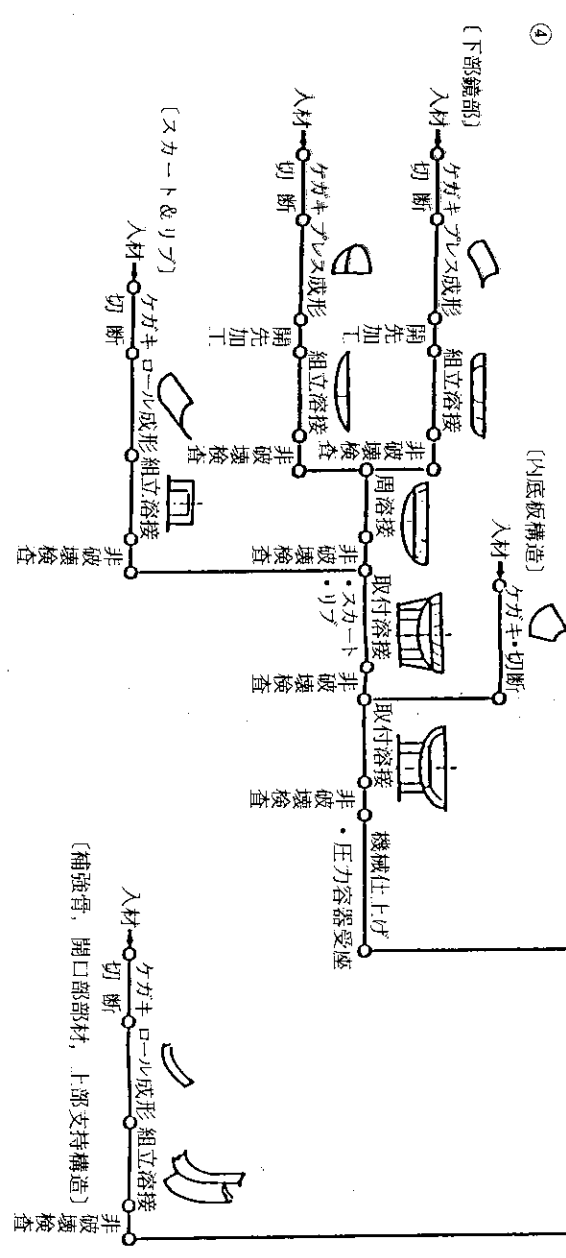
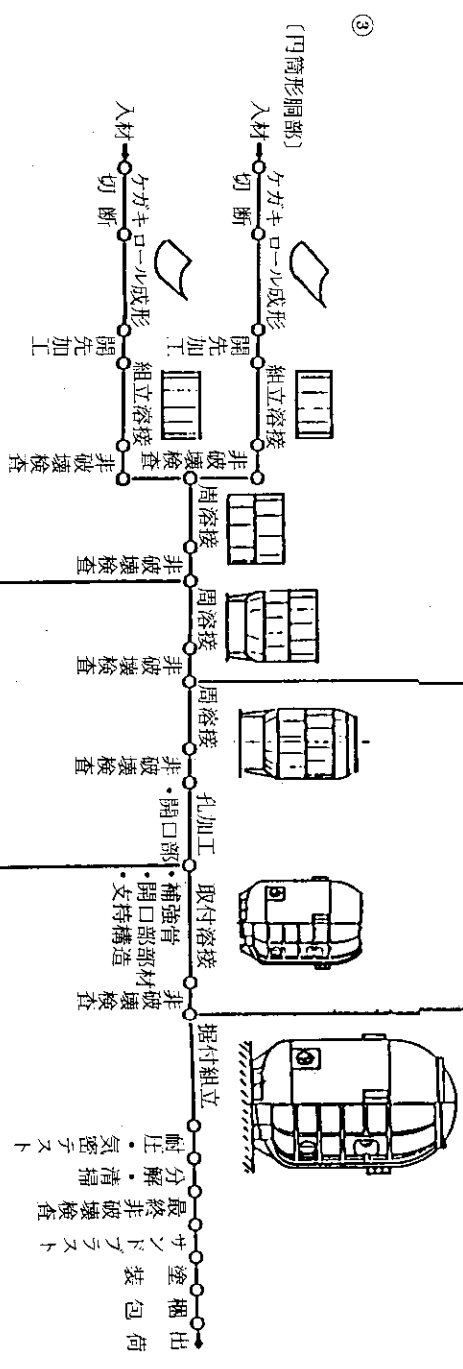
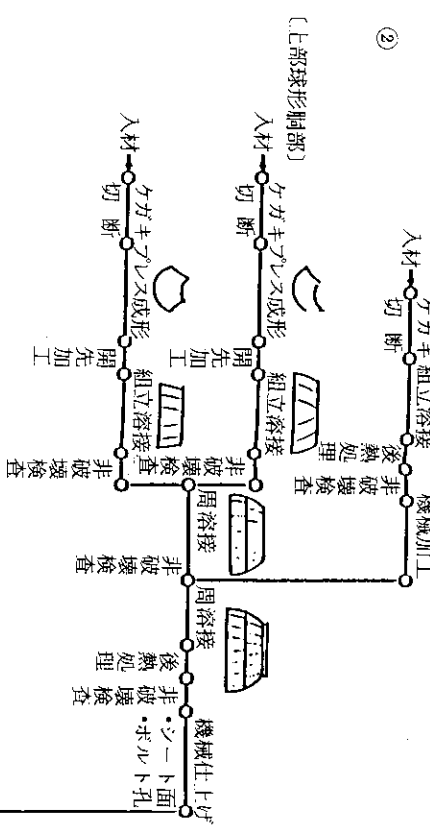
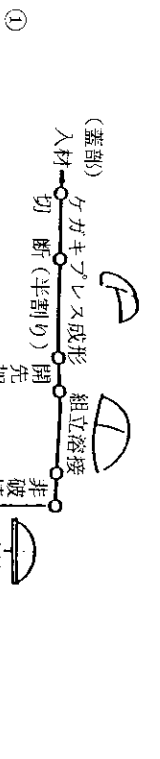
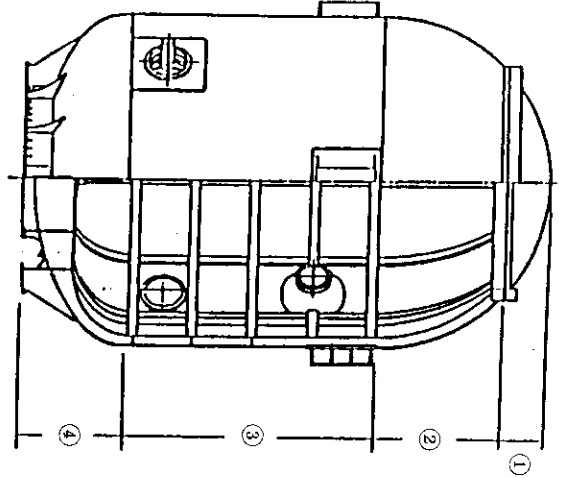


図 2.6 一体型炉 主要作業図-格納容器

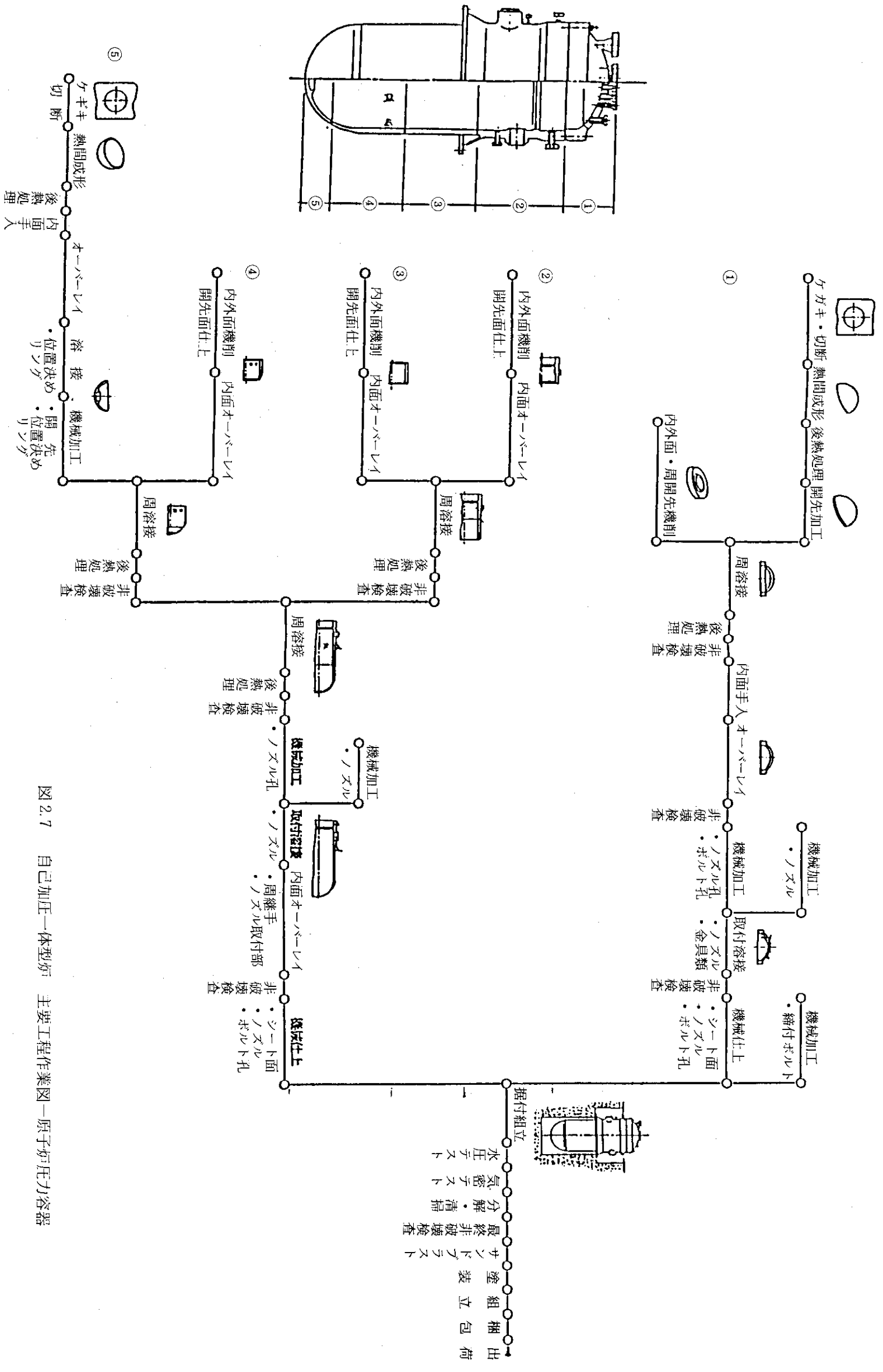


図 2.7 自己加熱一体型炉 主要工程作業図—原子炉圧力容器

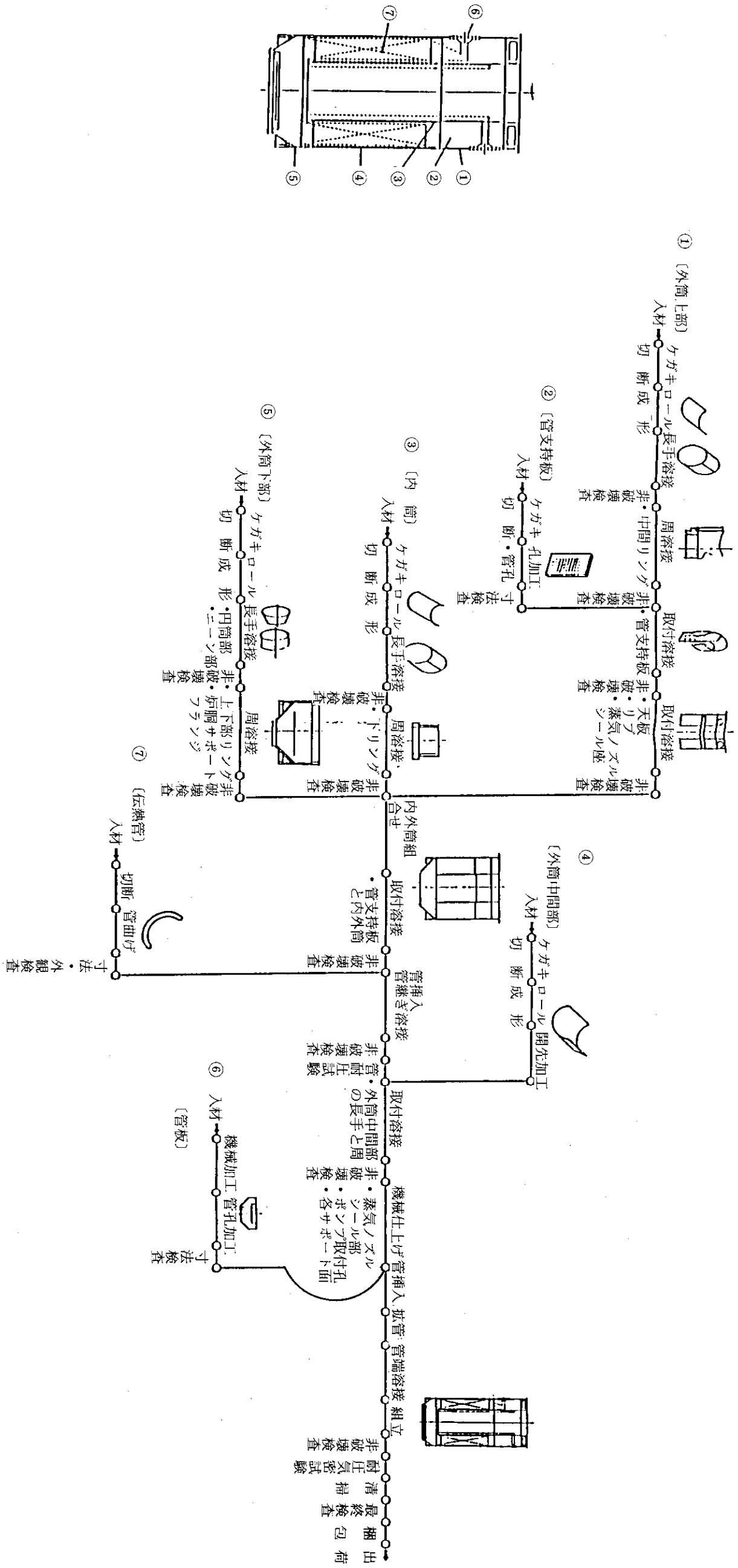


図 2.8 自己加圧一体型炉 主要工程作業図—蒸気発生器

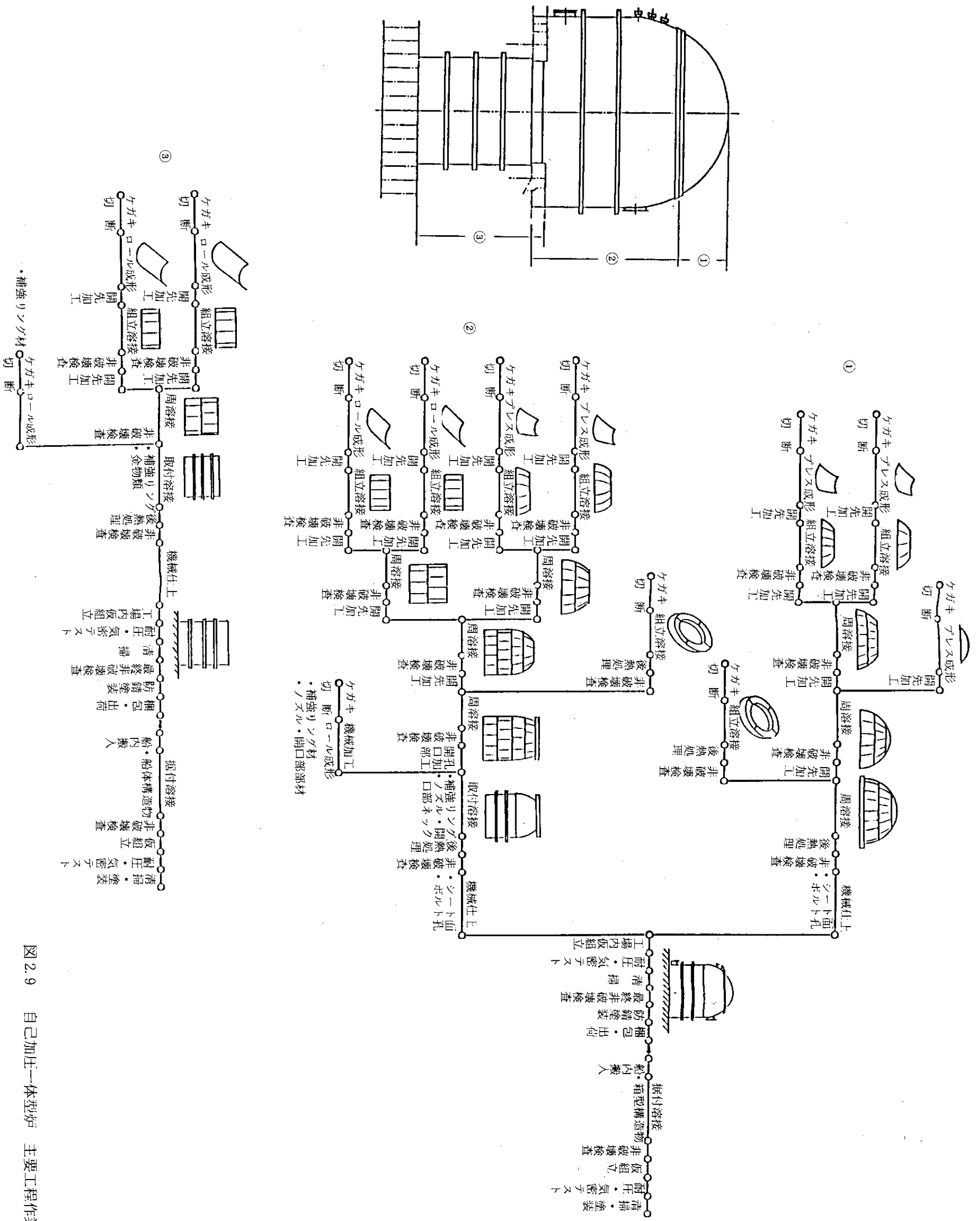


図 2.9 自己加熱一体型炉 主要工程作業図—格納容器

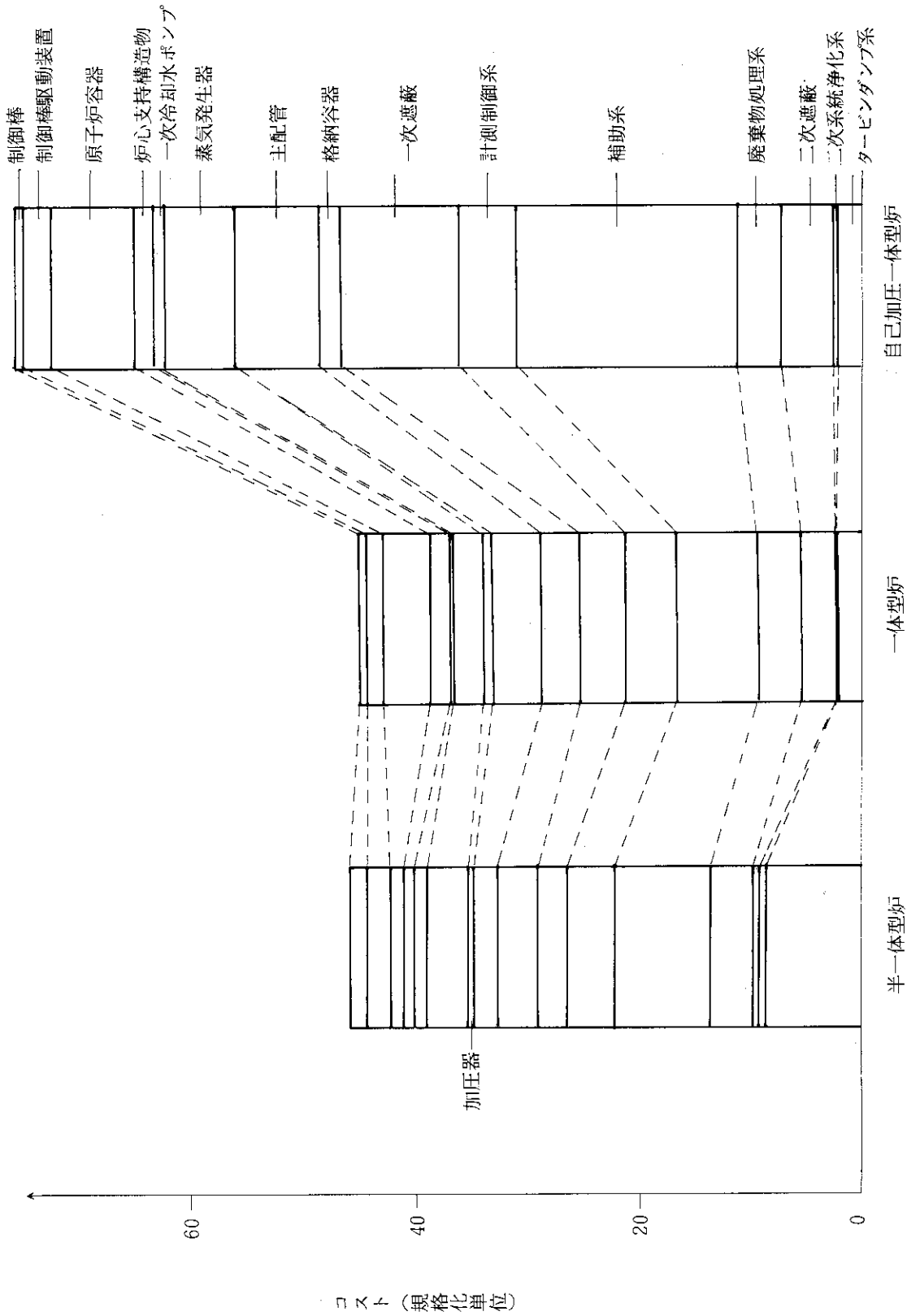


図 2.10 炉プラントコスト総計

表2.2 炉プラントコストの機器・設備毎の割合

機 器 等	半 一 体 型 炉	一 体 型 炉	自 己 加 圧 一 体 型 炉
制 御 棒 の コ ス ト	3.1	1.5	0.9
制 御 棒 駆 動 装 置 の コ ス ト	3.5	3.1	2.9
原 子 炉 容 器 の コ ス ト	3.5	9.3	10.2
炉 心 支 持 構 造 物 の コ ス ト	2.3	4.1	2.1
一 次 冷 却 水 ポ ン プ の コ ス ト	2.3	0.8	1.4
蒸 気 発 生 器 の コ ス ト	8.0	5.8	8.3
加 圧 器 の コ ス ト	1.2	1.5	—
主 配 管 の コ ス ト	4.5	9.8	9.9
格 納 容 器 の コ ス ト	7.5	7.7	2.3
一 次 遮 蔽 の コ ス ト	5.5	9.0	14.0
計 測 制 御 系 の コ ス ト	9.3	10.2	6.8
補 助 系 の コ ス ト	19.3	16.4	26.1
廃 棄 物 処 理 系 の コ ス ト	8.2	8.2	4.9
二 次 遮 蔽 の コ ス ト	1.2	6.2	6.8
二 次 系 統 純 化 系 の コ ス ト	1.7	0.5	0.3
タービン, ダンプ系のコスト	18.9	5.9	3.1
合 計	100%	100%	100%



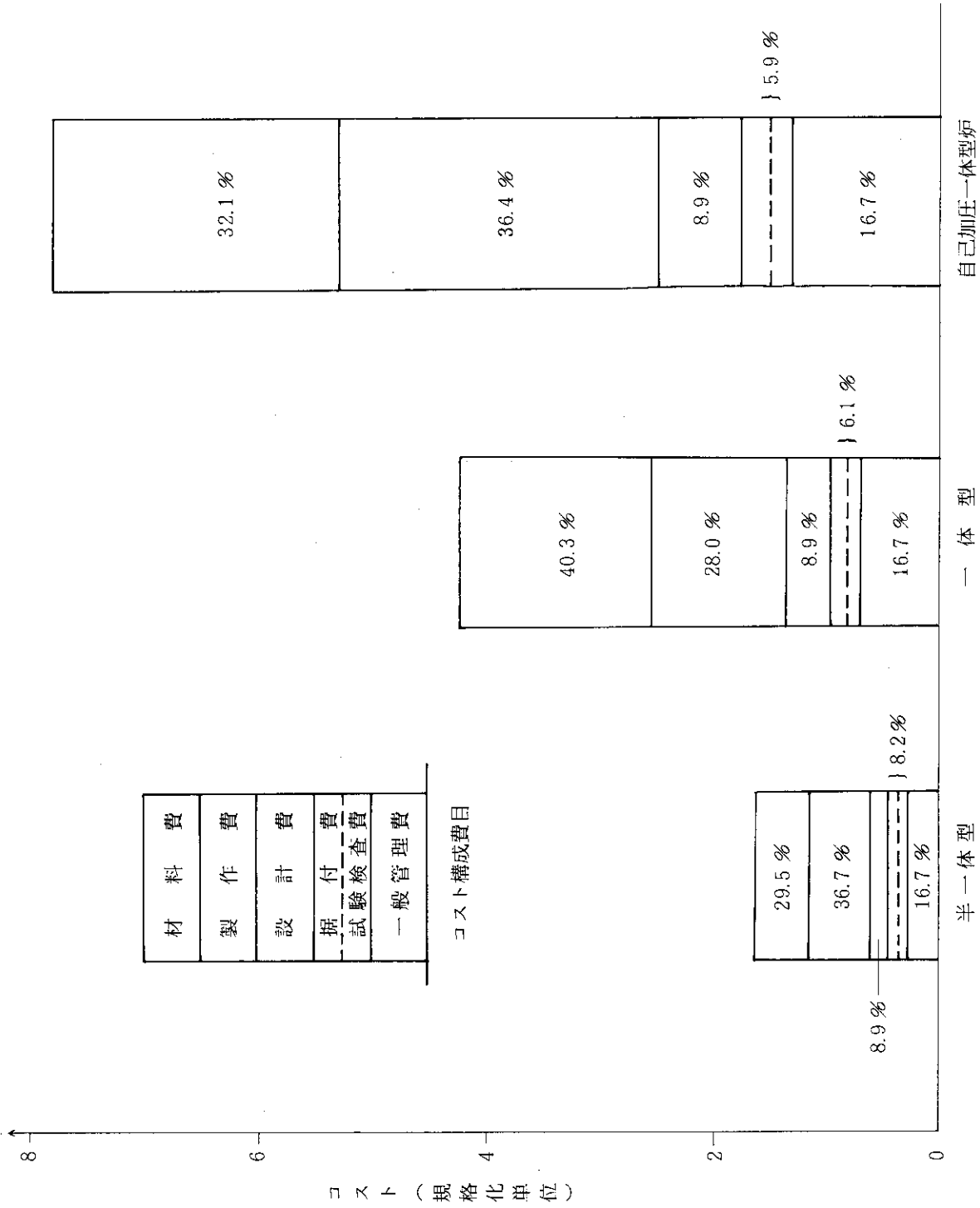


図2.11 原子炉容器

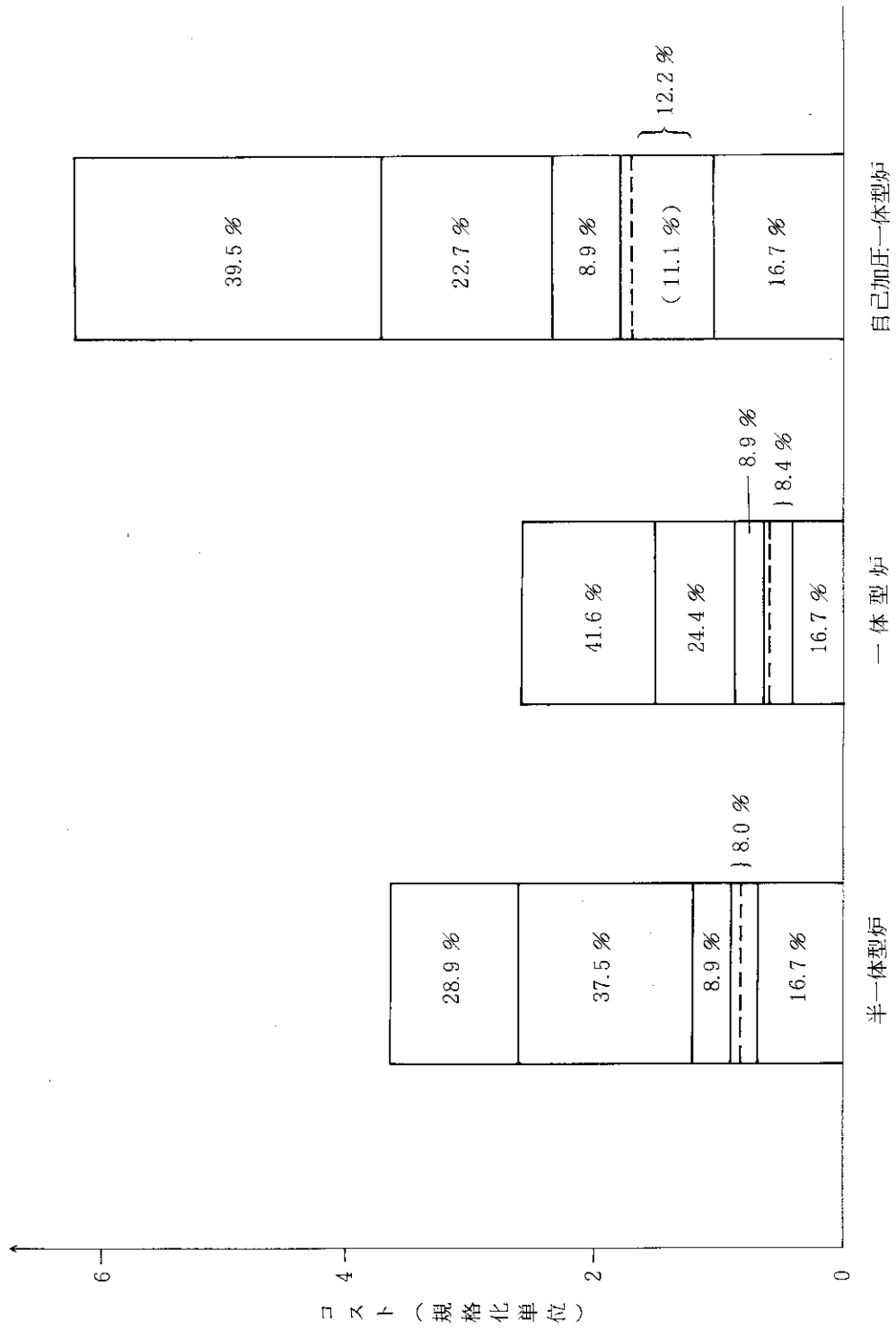


図 2.12 蒸気発生器

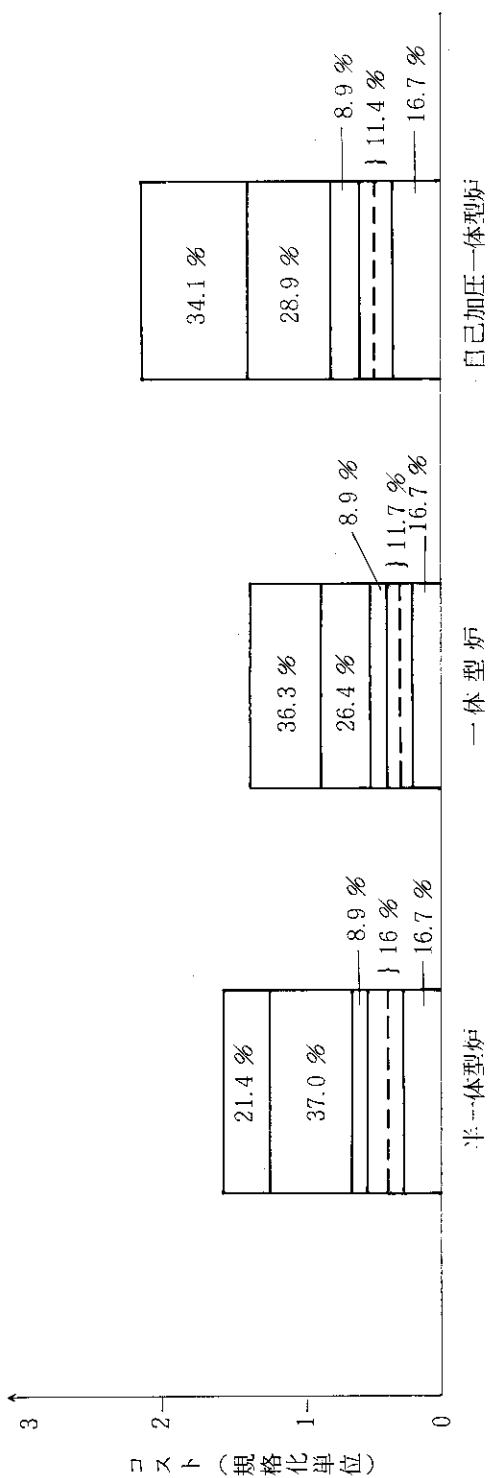


図2.13 制御棒駆動装置

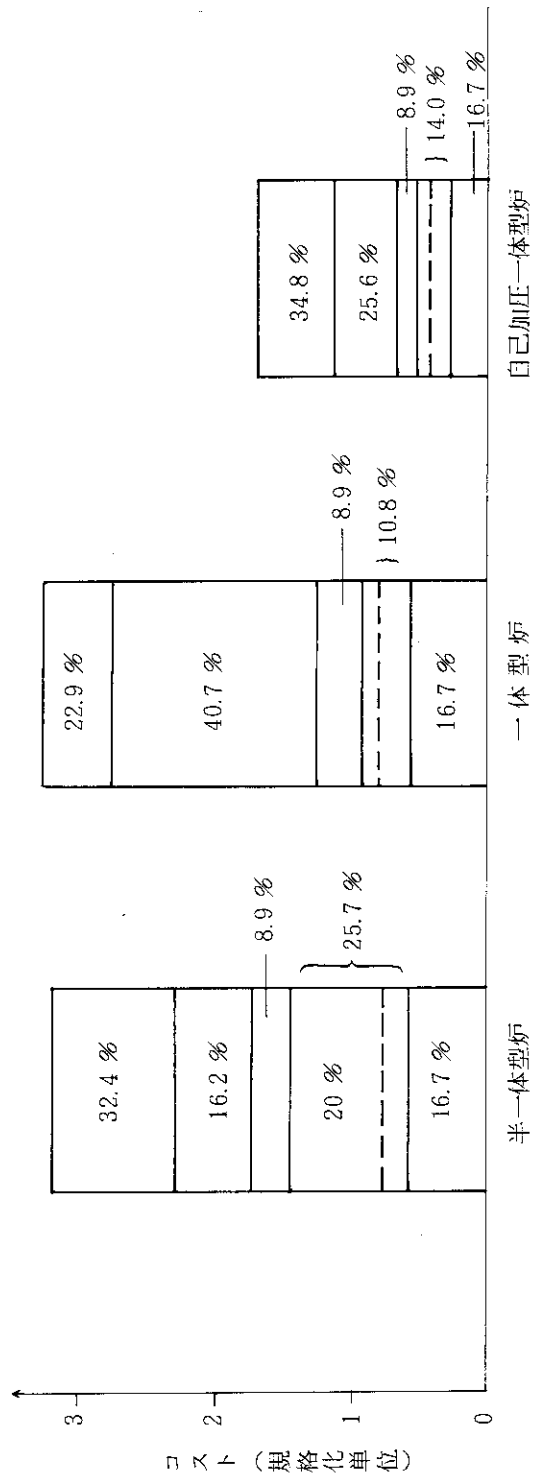


図2.14 格納容器

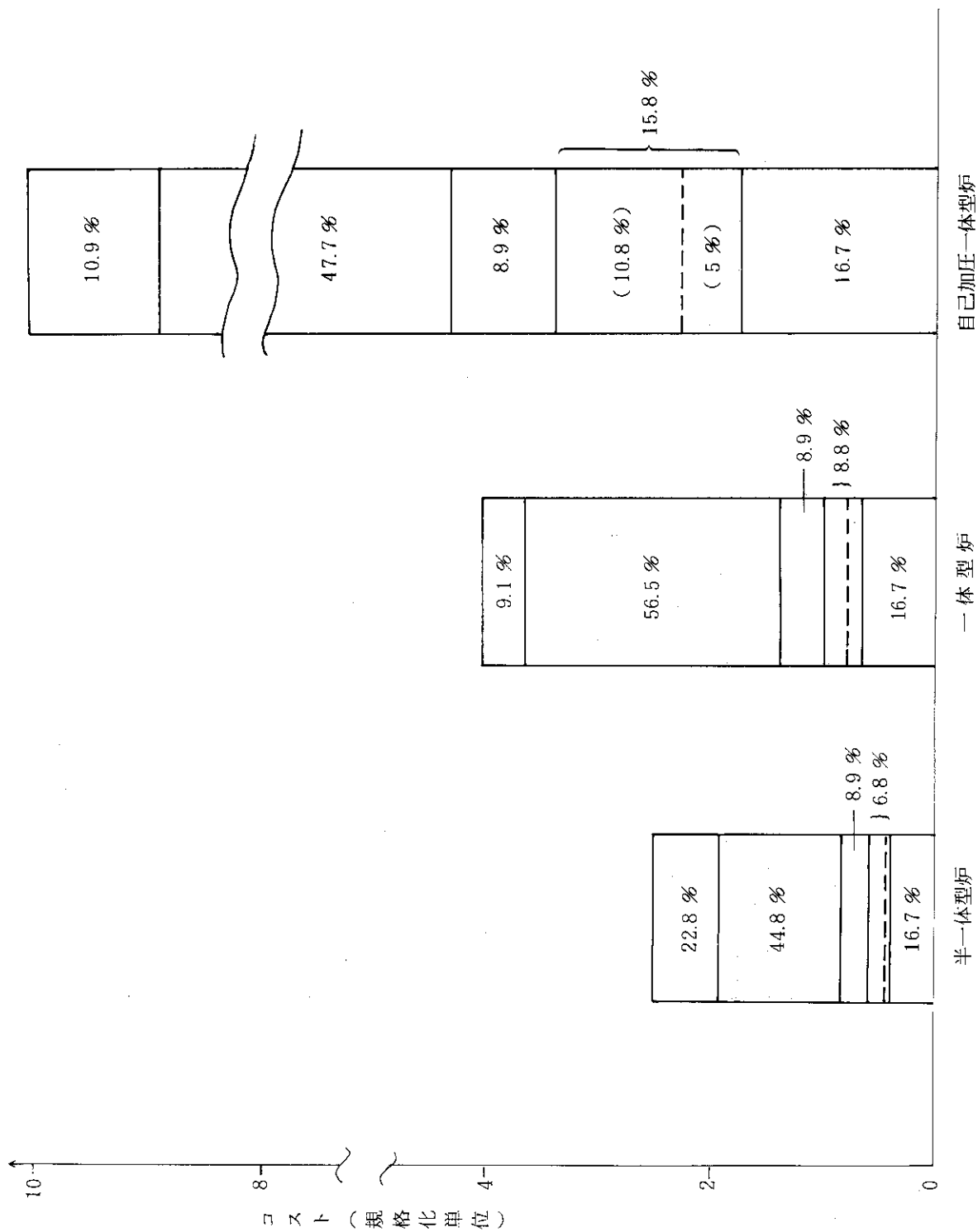


図 2.15 一次遮蔽

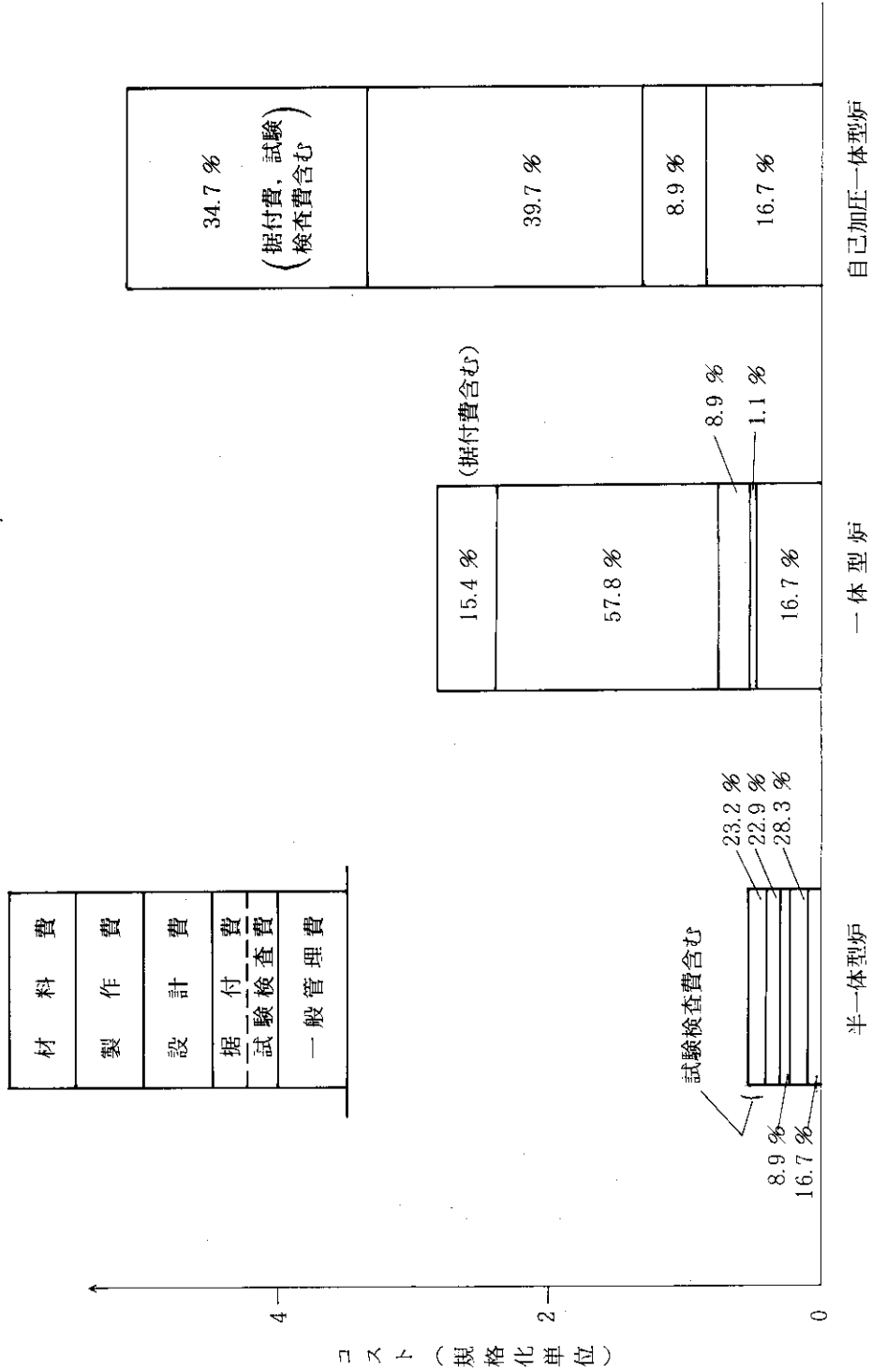


図2.16 二次遮蔽

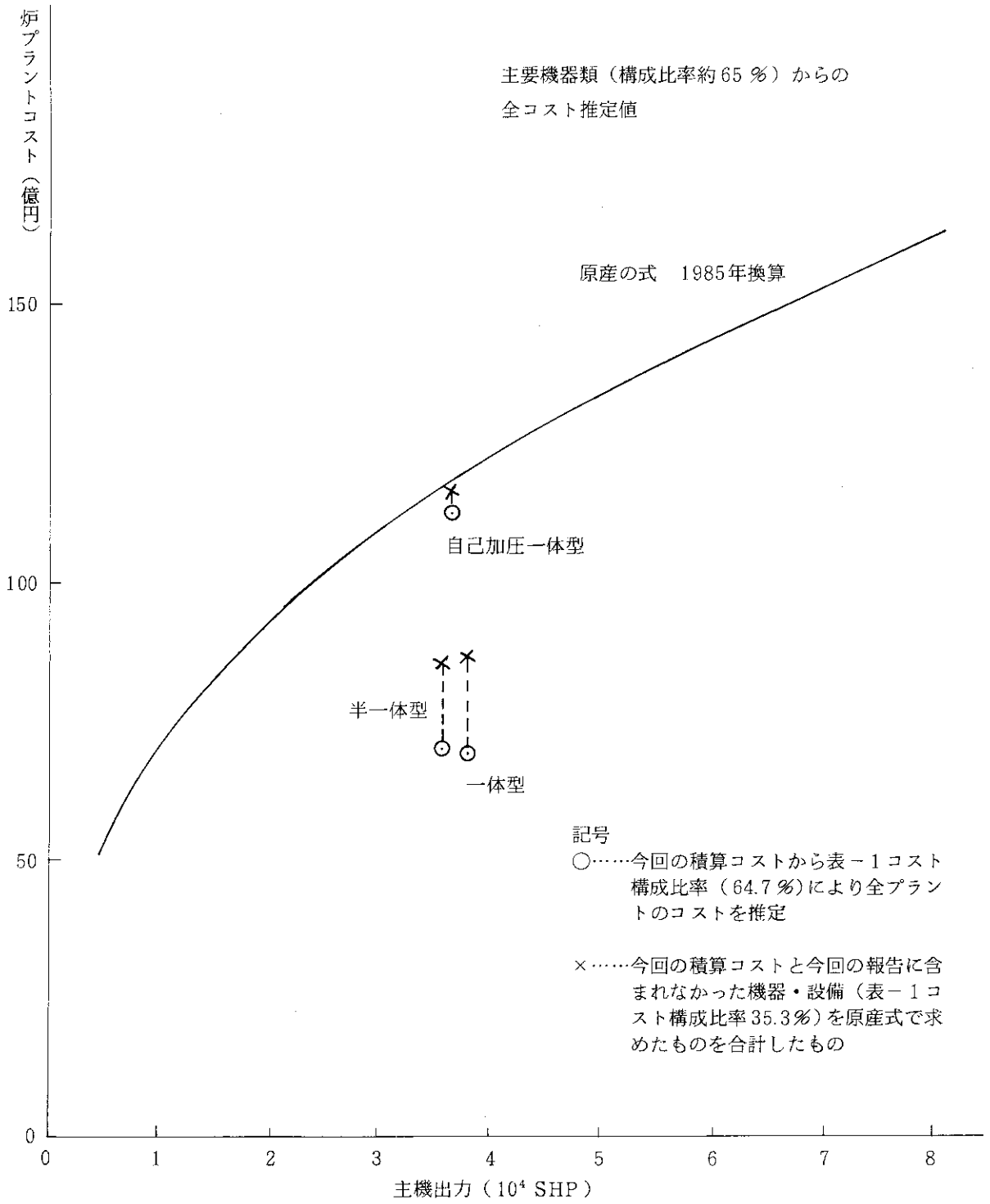


図 2.17 原子炉プラントコスト推定値

### 3. 改良船用炉燃料の加工費の調査

#### 3.1 概 要

改良船用炉の試設計で提案された燃料には従来、わが国では加工経験のないキャラメル燃料をはじめ、特殊な製造法、加工工程が含まれている。そこで燃料製作設計の観点から各燃料の成形・加工法について比較、検討を行い、加工コストの算出を行った。

##### 3.1.1 燃料の概要

検討対象とした各燃料の構成概略を以下に示し、主要仕様を表 3.1 に示す。

###### (i) 丸棒燃料-1 (半一体型炉用)

燃料棒は低濃縮二酸化ウラン焼結ペレットを、内面にジルコニウムライナ部を設けたジルカロイ-4 被覆管に挿入し、上部にステンレス鋼製コイルばねを入れて両端にジルカロイ-4 製端栓を溶接した密封構造のものである。なお、一部の燃料棒には、ガドリニア入りペレットを使用する。

燃料集合体は、正方配列を形成する燃料棒、制御棒案内シンプル、支持格子、上部ノズル及び下部ノズルより構成されている。

###### (ii) 板状燃料 (一体型炉用)

一体型炉に採用されている燃料は、直方体の  $\text{UO}_2$  焼結体 (これを「キャラメル」と呼ぶ。) をタイル状に並べ、ジルカロイで被覆した板状型燃料である。燃料板には、全てが  $\text{UO}_2$  キャラメルで構成されるもの (標準燃料板) と、一部に  $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Gd}_2\text{O}_3)$  混合焼結体を入れたもの (可燃性毒物入り燃料板) の 2 種類がある。燃料集合体は 13 枚のキャラメル燃料板の 4 周をジルカロイ側板により閉囲した燃料束の 4 体又は 3 体により構成されている。

###### (iii) 丸棒燃料-2 (自己加圧一体型炉用)

燃料棒は低濃縮二酸化ウラン焼結ペレットのスタック、スタックの両側にアルミナ断熱ペレット、上部に支持管、押さえばねをジルカロイ-4 被覆管に挿入し、両端にジルカロイ-4 端栓を溶接した密封構造である。

ポイズン棒はアルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) とガドリニア ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) の混合焼結ペレットを被覆管 (ジルカロイ-4) に挿入し、両端に端栓を溶接した密封構造のものである。

燃料集合体は、正方配列を形成する燃料棒、案内管、構造棒、スペーサ、上部タイプレートにより構成されている。

##### 3.1.2 検討の条件

燃料の成型加工性の比較・検討に当っては、下記条件で行った。

- ① 加工のための生産設備は、既に整っているものとし、新たな設備投資はしないものとする。
- ② 研究開発要素に関しては、その開発費をコストに算入しないものとする。

- ③ 検討の前提とする製作精度は軽水炉燃料加工から推定し、妥当なものとする。また、素材については、特別な要求仕様はないものとする。
- ④ 適用法規及び規則は成型加工に係るものを考慮する。
- ⑤ コスト検討条件は、現時点での技術及びコスト評価条件に基づくものとする。
- ⑥ コスト検討条件は、現時点で当社が燃料を製造すると仮定した場合の製造方法、工程に従うものとする。従って、将来実際に製造する場合には製造方法、工程で異なる点がありうるものとする。

### 3.1.3 検討の実施内容

3.1.1 で記した3種の燃料については、以下の項目の検討を行った。

- ① 燃料製造設計からの評価検討に関する内容
  - (1) 主要工程ごとの加工、製作性の難易度
  - (2) 燃料及びその他の材料の入手に関する難易度
  - (3) 燃料輸送の難易
  - (4) 公差等各燃料体製作仕様作成時の配慮事項の抽出
- ② 加工コストの評価に関する内容
  - (1) 加工工程作業  
各燃料の加工工程作業図を作成する。
  - (2) 主要工程のコスト比較  
主要工程ごとにコストの比較評価を行う。
  - (3) 総合コスト比較  
各燃料の総合コスト評価を行う。
  - (4) 量産効果の検討  
生産基数50基、5基/年までの範囲で燃料加工コストへの影響について調査する。

## 3.2 燃料製造設計からの評価・検討

### 3.2.1 加工・製作性

#### (1) ウラン濃縮度

ウラン濃縮度が高くなると、臨界安全性の観点から取扱い量を少なくする必要性が生ずる。

現在の軽水炉燃料加工施設は約4%まで扱えるよう設計しているのが標準である。今後、燃料の高濃縮度化が計画されているが、軽水炉燃料では5%以下と予想されている。従って、5%を超える燃料を扱うには、現在の施設を変更するか、新たに加工施設を建設する必要性が生ずることになる。

法規上、濃縮度に制限があるのは次のとおりである。

- ① 「原子力損害の賠償に関する法律施行令第1条」で濃縮度5%が境界となっている。
- ② 「ウラン加工施設安全審査指針について」

これらのうち、①は特に問題とならないが、②は5%を超えるウランを扱う加工施設につ



いての明確な設計指針が現時点ではないので、加工費見積について、不確定が非常に大きい。

## (2) バーナブル・ポイズン

いずれの設計もバーナブル・ポイズンとして $Gd_2O_3$ を使用している。 $Gd_2O_3$ を $UO_2$ に混ぜて使用する方法は、軽水炉、特にBWRで長い経験があるが、濃度は高々6 wt%までである。最近では高濃度の研究もされるようになったが、製造及び照射特性から考えて10~12 wt%が上限だろうといわれている。8 wt%はPWRで若干試験的に種々の炉で照射され始めているが、10 wt%の照射は、公表されている限りでは、1例（ベルギーのTihange - 1 炉）のみである。従って、丸棒燃料-1の設計の10 wt%は上限値に近いものであり、実用化には若干の年月を要する。

$Gd_2O_3$ を $Al_2O_3$ に混ぜて使用するの、最近では報告がほとんどないが、製法は粉末合金法で作ることになる。現在の軽水炉では、 $Al_2O_3$ には $Gd_2O_3$ ではなく、 $B_4C$ を混ぜたバーナブル・ポイズンが多く使用されている。

## (3) 被覆材

ジルカロイ被覆管は、軽水炉燃料用として多量に使用されており、加工については問題ない。ジルコニウムライナ付被覆管も少くともジルカロイ-2ではすでに多量に製造されており、製造上の問題はない。ただし、ライナ部分のジルコニウムの不純物濃度により値段が大幅に異なるので設計上どの程度にするか決定する必要がある。GE社のライナ用ジルコニウムの不純物濃度の実績例を参考として表3.2に示す。Crystal Barの方が純度が高いが、素材コストは数倍となる。Crystal Barとはジルコニウムスポンジを沃化・蒸着法で更に純度を高めたものをいう。ここでいうスポンジとは低い濃度の酸素を含むスポンジを選択して使用する場合をいう。

出力急昇に対する性能は、酸素濃度が低い程良好といわれている。ジルコニウムライナ付ジルカロイ-2被覆管を用いたGE社が実施した出力急昇試験結果を図3.1に示す<sup>(1)</sup>。

Crystal Barのジルコニウムを用いたライナ管の方が性能のよいことがわかる。

ジルコニウムライナ付被覆管は、GE社の特許が現在日本でも公告されており、製造に当たっては、この点の考慮も必要となる。

表 3.2 ジルコニウムの不純物

(単位：ppm)

	Crystal Bar	Sponge
Al	25	55
Cr	18	93
Fe	175	704
Ni	10	36
Si	40	40
Ti	20	25
Ta	200	200
Cb	100	100
Hf	92	57
Mg	--	30
N	9	25
O	80	850
C	40	101

## (4) 燃料棒部品（端栓、スプリング、断熱材等）

特殊な仕様のものでない限り、これらの部品の製造は問題ない。

ただし、丸棒燃料-2の下部端栓は、長い溝（スリット）があり、機械加工では溝幅が広がるため、精度のよい加工は困難である。

燃料棒に加圧が必要な設計であれば、現在の丸棒燃料-2の端栓設計は、加圧作業のしにくい形状である。

## (5) 燃料集合体部品

支持格子（スペーサ）は、材料がインコネル又はジルカロイいずれでも製造に問題ない。ただし、インコネルの場合は、溶接又はろう付で組立可能に対し、ジルカロイでは、溶接でのみ組立て可能である。かつ、溶接のふん囲気は真空又は完全な不活性ガス中とし、空気中の窒素や酸素が溶接部に吸収されないようにする必要がある。このためレーザー溶接又は、電子ビーム溶接が使用される。

上、下部ノズル（タイププレート）は形状が複雑なプレート板を持つ。このプレート板の加工方法としては鋳物で概略の形状を作り、機械加工で仕上げる方法（現在のBWR燃料用タイププレートの作り方）又は機械加工のみ（ワイヤーカット等）で仕上げる方法が考えられる。どちらがコストの点で有利かは、製作する数量に依存する。つまり鋳物は、鋳型を作る必要があり、初期投資は多いが、加工費は安くなる。

## (6) 燃料集合体組立

いずれのタイプも組立については問題ない。丸棒燃料-2の方が燃料棒下部をすべて固定しており、かつ燃料棒本数が多いので、丸棒燃料-1より組立のための加工時間は要する。

## (7) 板状燃料

現在研究炉で使用している板状燃料はアルミ（又はアルミ合金）を被覆材としたものであり、ジルカロイを被覆材とした場合の経験はない。現在の技術から考えて、次の点はアルミ被覆の燃料板より困難と考えられる。

① 材料のジルカロイは、アルミより強度が高く、また、異方性が大きい。更に高温では空気中の酸素と反応したり、窒素を吸収し易い材料であり、これらを吸収すると、耐食性が劣化する。

②  $\text{UO}_2$  又は、 $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  の焼結体をジルカロイで被覆する必要があるが、単に組み合わせただけのみでは、ジルカロイと密着させることが困難である。圧延を実施すれば密着度が高まると考えられるが、これらの焼結体は延性に欠ける。

燃料板をスペーサにとめる方法としては、研究炉用燃料では、ロールスエージ法が採用されている。また、ピンでとめる方法も採用されたことがある。この2法はいずれも実績があり問題ない。

燃料束を燃料集合体に組み上げるには、材料がジルカロイであるため、電子ビーム又はレーザー溶接等で完全に雰囲気制御する必要がある。

以上の技術的問題点があり、技術開発の程度により不良率が変わる。これが燃料のコストに影響を与える可能性がある。

### 3.2.2 燃料及びその他の材料の入手に関する難易度

燃料・材料として入手が困難なものはないが、次のものは、若干注意すべき点がある。

#### (1) ジルコニウムライナ付ジルカロイ-4被覆管

被覆管の材料となる素管は技術的には国産化も可能である。ただし、現時点ではジルコニウムライナ付被覆管の発電炉での本格的な使用はBWRのみであり、BWRではジルカロイ-2が使用されている。PWRでの使用は、試験的なもののみである。従って、ライナ付ジルカロイ-4の素管の需要は他にないため、特注の形になり、納期、コストの点で不利となる。

### 3.2.3 燃料輸送

技術的には、現在の発電炉用燃料の輸送容器の変更で可能と考える。しかし、輸送容器に何体収納可能かは、集合体の増倍率に依存する。濃縮度が高いことから増倍率が大きく、事故時を想定すると一体でも中性子吸収材が必要となる可能性がある。

丸燃料棒-2では、中性子吸収材(BP)が別の部品(燃料集合体と組み合わせる形)となっているので、事故時でもBPの吸収効果が期待できるような工夫が必要となる。つまり、事故時でも両者が分離しない構造で輸送しないと、事故時にはBPの吸収効果を入れた解析ができなくなり、臨界解析が厳しいものとなる。

輸送容器は、その他次の解析を実施する必要がある。

#### ① 構造解析

上述した臨界解析を満足すれば、大きな問題はない。集合体1体当りの重量は、発電炉用燃料輸送容器より小さいものとなろう。

#### ② 熱解析

新燃料は発熱しなく、かつ、燃料に使用されている材料はいずれも高温で比較的安定なため熱解析は容易である。

#### ③ シャヘイ解析

新燃料は放射能強度が低く、特にシャヘイは必要としない。

#### ④ 密封解析

密封境界が被覆管又は被覆材となるので、問題とはならない。

従って、輸送容器の点では、臨界解析が最も問題となり、これにより輸送容器の製作費も変化する。しかし、1個当りの輸送容器製作費を、丸棒燃料は現在の軽水炉燃料用輸送容器から、板状燃料は研究炉用輸送容器から推定すると、次の順序となる。

板状燃料 < 丸棒燃料-1 < 丸棒燃料-2  
コスト 小 大

以上は、現行法規上での検討である。IAEA輸送規則1985年版<sup>(2)</sup>によれば、輸送物の放射能限度の基礎となる $A_1$ 、 $A_2$ 値(IAEA輸送規則第1表)が従来20%濃縮度を境としていたのが、5%濃縮度となった。このため、現行法規上は、A型輸送容器で輸送可能であった丸棒燃料-2、板状燃料は、特別型又は、B型とする必要がある。B型燃料の経験は少ないので、製作費の見積りは困難であるが、次のような順序となろう。

丸棒燃料-1 < 板状燃料 < 丸棒燃料-2  
 コスト 小 大

次に、輸送費は、一つの輸送容器に何体装荷でき、何回の輸送回数となるかに依存する。輸送容器に収納できる燃料集合体数は、臨界解析に依存する。

これは、一回の輸送で使用できるトラック数が限定されているが、輸送費はPP (physical protection, 防護) 対策等の間接費的な割合が大きく、トラックの数にはほとんど依存せず、輸送回数でコストが決定される。

### 3.2.4 燃料体製作仕様作成時の配慮事項

燃料体製作仕様作成時に配慮すべき事項としては次のような点がある。

#### ① 材料の仕様

一般の材料規格（日本では JIS）どおりであれば入手も容易で、コストも問題ないが、純物量を厳しくする等追加の規格を設けると、溶解から特別に実施する必要が生ずる。従って、コストも高いものとなる。材料の規格はなるべく一般の規格に近づけるべきである。

#### ② 部品の寸法

部品の寸法規格も問題ない部分については、JIS の公差に準拠すべきである。機械加工の場合、通常は中級程度の公差の指定で十分であり、この程度であれば、コストへの影響は小さい。ただし、燃料は設計上高い精度を要する部分も多い。例えば、燃料被覆管は、高精度が要求されるが、これは軽水炉用燃料で実績がある。

この他の部品で高精度が要求されるのは、部品どおしが嵌合される部分である。例えば、原子炉と嵌合することになる下部ノズル部分は、高精度が必要となる。

いずれにせよ、公差はできる限り JIS に準拠し、設計上必要な部分のみ、精級の厳しい公差とすべきである。

#### ③ 検査に関する仕様

原子力関係の部品は、高品質が要求されるため、製造コストの中で占める検査、品質管理に要するコストの割合は高い。従って、特に次の点を考慮して、検査に関する仕様を定めるべきである。

- 製造工程、製造実績をもとに抜取検査等の合理化を企る。
- 新しい進んだ検査方法を積極的に取り入れること。
- 発注者の立会検査も合理的なものとする。
- 実際の燃料の製造時の外観検査は主観で判定しがちになるため主観的にならないよう、できる限り仕様は定量化する。
- その他 He リーク試験や表面汚染などの仕様は発電炉用燃料のための省令<sup>(3)</sup>が参考となる。また、燃料に関連するものとしては、電気技術協会が定めた指針<sup>(4),(5)</sup>にも準拠すべきである。

#### ④ 板状燃料の仕様

板状燃料では次の2点の仕様が製造の難易に関係すると考えられる。

- キャラメルと被覆管の密着度

セラミックである $UO_2$ 焼結体と金属であるジルカロイ被覆板の密着は完全には出来ないの  
で、定量化を心がける。

- 燃料板間のギャップ寸法

ギャップ寸法は、冷却性能の点で重要である。しかし、平らな燃料板のギャップを全面で  
高精度で保つことは困難である。従って、設計上許容できる範囲で公差を考慮すべきであ  
る。

### 3.3 加工コストの評価

#### 3.3.1 加工工程

燃料の加工とは、通常濃縮ウランを $UF_6$ の形で濃縮工場から引取り、燃料集合体の形にして、指定場  
所で引渡すまでをいう。以下各燃料タイプ毎に加工工程を説明する。

##### (1) 丸棒燃料-1

加工工程は図 3.2 に示すとおりであり、現在の軽水炉燃料加工技術の範囲内で、大部分加  
工可能と考えられる。

以下では、加工工程毎に説明を加える。

##### ① $UF_6$ - $UO_2$ 転換加工

濃縮工場から送られてくる濃縮 $UF_6$ から $UO_2$ 粉末への転換加工に工業規模で用いられて  
いるプロセスは、湿式法と乾式法の二つに大別される。湿式法にはADU法(Ammonium  
Diuranate, 重ウラン酸アンモニウム)とAUC法(Ammonium Uranyl Carbonate, 炭  
酸ウラニルアンモニウム)とがあり、さらにADU法には、溶媒抽出を組合せた溶媒抽出-  
ADU法とも呼ぶべきものもある。また、乾式法には、IDR法(Integrated Dry Route)  
その他がある。ADU法は、最も歴史が古く実績があり広く用いられている方法であるが、  
最近、乾式法が廃液生成量が少なく環境管理上有利で、かつ設備もコンパクトで経済的  
であるとの理由で大いに注目されてきている。 $UO_2$ 粉末が後工程のペレット製造に適してい  
るための要件は、粉末の流動性・成形性及び活性度が適正であることであるが、以上に述  
べた各種の方法で製造された $UO_2$ 粉末は、それぞれの化学反応条件下での粒子の生成及び  
成長過程が異なるので、おのおの、その方法に特有の粉末特性を有しており、その特性に  
合せた成形工程の設計が必要となる。ADU法によって得られる $UO_2$ 粉末の物性は安定し  
ていて、ペレットの製造が容易である。乾式法で得られる粉末は一般に活性度が高いため、  
ペレットの成形前に、焼結時に分解揮散してしまう物質を添加し、焼結体中に閉気孔を分  
散生成させて、密度調整することも行われている。

$UO_2$ 粉末の性質は、比表面積や平均粒径などの物性値を指標として管理される。また、  
この段階で濃縮度・不純物などをチェックすることも、工程管理として行われる。現在国  
内では、ADU法による転換が大部分であり、これに適したペレット工程が確立している。  
将来は、上述の利点を考慮し、乾式法も導入されると考えられる。

##### ② ペレット製造工程

$UO_2$ 粉末は、物理的・化学的性質が同じでも焼結性が同じとは限らないので、原料粉末

のロットごとに、焼結性試験を行って、加工条件を確認する。製造では、必要に応じて、粉碎・予備圧縮・造粒等の前処理を行ったのち、多孔金型付プレスやロータリプレス等で加圧成形して、所定の寸法・密度範囲にある成形体（グリーンペレットとも言う。）とする。このとき、必要な場合は濃縮度マークが刻印される。成形体を耐熱性金属ボードに搭載し、還元雰囲気中1,700°C以上に加熱して焼結させる。次に焼結ペレットを、セントレスグラインダへ連続的に供給し、外周面を研削して、所定の直径及び表面粗さを持つものに仕上げられる。ペレットは、燃料棒に装填される以前に、厳重な検査・乾燥が行われる。ガドリニア（ $Gd_2O_3$ ）入り $UO_2$ ペレットの場合、ガドリニアは中性子吸収断面積が大きい物質であるため、 $UO_2$ 区域とは分離した別室で粉末混合から開始し、 $UO_2$ ペレットと同様な工程で製造する。ただし、ガドリニア入りペレットの製造では、ガドリニア粉末と $UO_2$ 粉末を均一に混合することに注意を要する。 $UO_2$ 粉末・ペレット等は、濃縮度ごと、ロットごと（ガドリニア入り $UO_2$ ペレットでは、さらにガドリニア濃度ごと）に、厳重な品質管理と数量管理が行われる。製造工程や、その管理方法などの詳細は、それぞれの経験や実績によって異なっている点がある。

#### ③ ジルカロイ被覆管及び棒・板材の製造工程

軽水炉燃料は、高温高压の炉水中で数年間、破損することなく、その性能を発揮し続けなければならない。ジルカロイ合金は、このような要求に応えるためアメリカで開発された材料で、中性子吸収が少なく優れた耐食性と機械的性質を有する。現在、PWR燃料にはジルカロイ-4が燃料棒被覆管として使用されている。ジルカロイ合金の製法は、図3.3に示すようにまず、原料のジルコンサンドをクロール法や蒸留抽出法により、中性子吸収能の高いハフニウムを除去して、純ジルコニウムとする。これに、耐食性と機械的強度を与えるため、少量の鉄・クロム・スズを添加し、合金としたものがジルカロイ-4である。ジルカロイ-4では、PWR冷却材中に含まれる水素の吸収を減少するため、成分としてニッケルが除かれている。

これらの合金を、被覆管・板材や棒材に加工する工程は、図3.3のとおりである。ジルカロイ合金は六方稠密構造の結晶系であるため、異方性があり、種々独特の加工技術を駆使する必要がある。合金の中でも極めて加工が困難な材料であるが、国産被覆管の品質は既に世界の最高水準にある。ただし、被覆管の素管は国内で生産する技術は確立しているが、現在は輸入されることが多い。これは、少量の素管の生産は経済的に引き合わないためである。しかし、被覆管の重要な性質（機械的性質、耐食性等）は、素管以後の工程で大部分が決定される。

ジルコニウムライナ付被覆管は、素管製造段階で通常の素管の内側に純ジルコニウムの円筒をはめ合せ、両端の重ね合った部分を真空中で溶接する工程が追加されるのみで、他に差はない。ただし、ジルコニウムライナ層の肉厚を確認するための検査工程は追加される。

#### ④ 燃料棒製造工程

被覆管を所定の長さに切断し仕上げ、内面洗浄してから、検査に合格し乾燥したペレットを所定の長さ分挿入する。次にコイルばねでペレットを押さえ、上部端栓を圧入し、上

部及び下部の端栓をそれぞれ溶接チャンパ内でTIG溶接したのち、上部端栓を貫通する小孔からヘリウムガスを燃料棒内に必要により充填し、さらに小孔をTIG溶接で密封する。現在、日本では密封溶接にTIGが使用されているが、外国では抵抗溶接の例もある。また、加圧孔の封詰には、レーザ溶接を使用するメーカーもある。

完成した燃料棒は、端栓溶接部の外観・寸法、X線透過検査のほか、ペレット間の隙間、プレナム長さ、全長、 $UO_2$ ペレットの濃縮度、ヘリウム漏れ、曲り、外観などの項目について、全数検査される。BWRでは、燃料棒表面をオートクレーブ処理した後使用するのに対して、PWR燃料では、燃料棒表面にはオートクレーブなどの処理を施さず、洗浄し、被覆管研磨表面のまま使用することが多い。

#### ⑤ 燃料集合体

インコネル製支持格子の場合は、スケルトン組立治具に支持格子を固定し、これに、ろう付で固着してあるスリーブに制御棒案内シンブルを通し、内部より拡管することにより支持格子と制御棒案内シンブルを固定し、スケルトン集合体を組立てる。ジルカロイ製支持格子の場合は、制御棒案内シンブルと直接に溶接で固定する。

スケルトン集合体を燃料集合体組立用治具に固定し、支持格子の各格子部分に燃料棒を挿入する。最後に、下部ノズルを下部支持格子とともに制御棒案内シンブルにねじ止めし、上部ノズルをスリーブと溶接し、このスリーブと制御棒案内シンブルは、拡管して固着することで、燃料集合体が出来上がる。

完成した燃料集合体は、燃料棒間隔・曲り・直角度・外観等の検査を受け、洗浄ののち、垂直状態で貯蔵する。

#### (2) 丸燃料棒－2

基本的には丸棒燃料－1と同じく現在の軽水炉燃料加工技術が使用できる。しかし、丸棒燃料－1型より構造が複雑であり、各部品の結合方法によっては組立順序を詳細に検討する必要がある。

工程概要を図3.4に示す。

以下、各工程毎に説明を加える。

##### ① $UF_6$ － $UO_2$ 転換加工

丸棒燃料－1の工程と同じである。

##### ② ペレット製造工程

丸棒燃料－1の工程と同じである。

##### ③ ジルカロイ被覆管及び棒材の製造工程

ジルカロイ被覆管及び端栓用棒材の製造工程は丸棒燃料－1と同じである。構造棒もジルカロイ－4製であり、基本的に棒材の作り方と同じである。しかし、照射中の曲りや伸びの差が生じないように工程に注意する必要がある。照射成長やクリープは、材料の加工度や熱処理温度等加工パラメータに依存するからである。

##### ④ 丸棒燃料－1とほぼ同じ製造工程である。しかし、燃料棒内に挿入する備品の種類が多いので、挿入誤りのないことを確認するため全長X線透過試験等の追加検査の必要性がある。

## ⑤ 燃料集合体

スケルトン組立治具に支持格子を固定し、これに構造棒を挿入し、両者を結合する。次に燃料棒を支持格子に挿入し、燃料棒下部で下部タイプレートを結合する。次に案内管を支持格子に挿入し、これと下部タイプレート及び上部タイプレートと結合して集合体とする。この後、燃料棒間隔、曲り、直角度、外観等の検査を実施し、洗浄後、垂直状態で貯蔵する。

## (3) 板燃料棒

考えられる製造工程は図3.5に示すものとなろう。基本的には、 $UO_2$ を直方体の焼結体にしてキャラメルを製造し、これをジルカロイの板材（被覆材、縁材、端材）に配列してはさみ込み、はめ合せ部を溶接して密封し、燃料板を作る。この燃料板13枚をスペーサにはさみ込んで、燃料板どおしの距離を保たせて、燃料束を製造する。燃料束3又は4個で燃料集合体を作る。

この工程での注意点は次のとおり。

- ① このキャラメルとジルカロイ板と密着させるため、軽い圧延が必要となろう。圧延はジルカロイの酸化及び空気の吸収を防ぐため、低温で実施するか、高温の場合は真空中で実施する必要がある。また、材料の異方性、加工硬化も考慮して条件を定める必要がある。
- ② 燃料要素として板状燃料を側板に組立てるのに、ロールスエージ法も考えられる。この時、現在の形状では、この工程は非常に困難なため、1/4づつをまず製作し、燃料束とし、次にこれを4つを集めて一つの要素とする方法が良いと考えられる。

ロールスエージ法とは、燃料板をスペーサ（側板）の溝にはめ込み、溝を押しつぶしてかみしめにより燃料板を固定する方法である。この方法は、研究炉用板状燃料で使用された実績が豊富にある。

- ③ 燃料集合体で燃料板間距離を精度よく保つ必要があるので、スペーサの溝の精度とともに、燃料板の平面度に十分注意する必要がある。

なお、この製造方法は本板状燃料の仕様をもとに日本の燃料メーカーが製造するとした場合の一例であり、実際の製造方法とは異なる場合もある。

## 3.3.2 主要工程のコスト比較

以下に主要工程毎に燃料タイプのコスト比較を実施する。

## (1) ペレット及びキャラメル

燃料集合体1体当りに必要なペレット又はキャラメルに要するコストを比較すると次のようになる。

$$\text{丸棒燃料-2} < \text{丸棒燃料-1} < \text{板状燃料}$$

丸棒燃料-1にはガドリニア入りペレットがあること及びペレット径が小さいため製造個数が多くなるためである。ただし丸棒燃料-2のウラン濃縮度は、5 wt%を超えており、このため製造設備が受ける許認可上の制限によっては、コストが逆転する可能性もある。キャラメルは薄い正方形の $UO_2$ 焼結体であるが、この形の焼結体の製造実績はある。しかし、製造の困難さが考えられるので、上記順序と考えられる。



## (2) 被覆管

被覆管1体当りのコストを比較すると次のようになる。

$$\text{丸棒燃料-1} > \text{丸棒燃料-2}$$

丸棒燃料-1の被覆管は、ジルコニウムライナ付のためである。ジルコニウムライナ付被覆管のコストは素管のコストに依存する。素管のコストは現時点では、需要量によって素管メーカーが政策的に決定しており、需要量によって大きく変化するので正確なコスト評価は不可能である。素管以後の工程は、検査工程でライナ厚さの検査が追加される程度で、大きなコストの追加となるものはない。

## (3) 燃料棒及び燃料板組立

燃料棒又は、燃料板1体(個)当りに要するコストを比較すると次のようになる。

$$\text{丸棒燃料-1} \sim \text{丸棒燃料-2} < \text{板状燃料}$$

丸棒燃料-1は、(2)のコスト上昇要因はあるが、燃料棒部品の数、種類及び形状(スプリング、断熱ペレット、端栓)を考慮すると差はほとんどなくなる。

燃料板は1枚当り248個と多くの $\text{UO}_2$ 焼結体又は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$ 焼結体を使用するので、不良となる可能性の高いこと及び被覆材の精度が必要なこと等でコストの点では不利となる。

## (4) 集合体部品

燃料集合体1体当りに要する集合体部品に要するコストを比較すると次のようになる。

$$\text{板状燃料} < \text{丸棒燃料-1} < \text{丸棒燃料-2}$$

部品の数、形状の複雑さのため、上記の順序となる。

## (5) 集合体組立

燃料集合体1体を組立てるに要するコストを比較すると次のようになる。

$$\text{板状燃料} < \text{丸棒燃料-1} < \text{丸棒燃料-2}$$

丸棒燃料-2と丸棒燃料-1の差は部品の数量が多いこと(丸棒燃料-2は $21 \times 21$ 型)及び部品の結合方法の複雑さによる。板状燃料は、燃料板が完成し、研究炉用の組立法で良ければ、組立は比較的容易である。

## 3.3.3 コストの総合評価

現在の技術で評価すると、燃料集合体当りの加工コストは次の順序になると推定される。ここで、加工コストは、UF<sub>6</sub>の形でウランを濃縮工場を受取り、燃料集合体に加工し、発注者の指定場所(国内)で、引渡すまでの費用をいう。従って、ウランの費用は含んでいない。またバーナブルポイズンは含むが、制御棒の費用は含まない。

$$\begin{array}{ccc} \text{丸棒燃料-1} < \text{丸棒燃料-2} < \text{板状燃料} \\ \text{(低)} & & \text{(高)} \end{array}$$

これは、丸棒燃料-1が最も現在の発電炉燃料の技術に近いからである。一炉心を形成するために必要な燃料集合体の数量は、燃料タイプ毎に異なる。この数量差を考慮すると、一炉心分の燃料加工のコストとしては、次の順序となる。ここにはおよその加工コストの比率を丸棒燃料-2を基準として示している。

丸棒燃料-2 < 丸棒燃料-1 < 板状燃料  
 1 1.3 2.0 (コスト比率)

また、各燃料タイプ毎の加工コストの内訳けを図3.6のケース1に示す。ただし、ここでは一般管理費を一率に15%と仮定している。一般管理費には、本社費用、営業費、利益などを含む。

上記の見積りには、工場建設費の原価償却費は含まれていない。5%以上のウランを扱える工場の建設費、維持費及び許認可で制限される工場能力によっては、次の順序となる可能性が高い。これは、丸棒燃料-1の濃縮度は5%以下であり、許認可を考慮しても施設及び維持費の見積りが可能であること及び工場を軽水炉燃料製造設備と共用させうる可能性もあるからである。

丸棒燃料-1 < 丸棒燃料-2 < 板状燃料  
 (低) (高)

### 3.3.4 量産効果

検討の前提条件で記したように、製造の技術開発がなされていると仮定すると、量産効果は次の点のみである。

- (1) 生産設備治具の原価償却費分が少なくなる。これは、生産量に反比例する。
- (2) 生産技術が向上し、生産工程での不良率を低下させることができる。
- (3) 特殊な材料については、1ロットの大きさを大きくできる。従って、材料費の中の間接費が減少する。ただし、この効果は50基/年程度では、工業的には材料ロットとしては“多量”に入らず、大きな低減効果には結びつかない。

以上をまとめれば、(1)の効果が最も大きくなる。特に丸棒燃料-1を除いては、ウラン濃縮度を考えると発電炉用燃料とは別の生産施設を作る必要があると考えられるので、生産施設の原価償却の仕方によっては大きな効果を持つ。また、丸棒燃料-1でも少くとも治具や鋳物金型は特別な設備として新たに作る必要がある。上記3つの中では最も効果が大きい。この量産効果は、原価償却が生産量に反比例するので、図3.7(1)に示す形となる。

しかし、原価償却を20年程度の長期と考えると、加工費の中で占める原価償却費の割合は2~3%と小さく、量産効果は、絶対値としては、小さなものとなる。従って、3.3.3では、原価償却費は考慮していないが、これを考慮しても量産効果は、図3.7(2)に示すようにほとんど加工コストに対しては変化を与えない。ただし、原価償却の期間によっては、加工コストに占める割合は増加する。

## 3.4 結 果

各燃料タイプ毎の加工コスト比較検討を実施した。加工コストとは、UF<sub>6</sub>から燃料集合体に成型加工し、指定場所で引渡すまでに必要な費用を称し、ウランを購入する費用は含んでいない。この結果、一炉心分の燃料加工コストの順序は、3.3.3で記したように次のような順序となった。

丸棒燃料-1 < 丸棒燃料-2 < 板状燃料  
 (コスト) 低 高

しかし、加工コストは次のようなファクターで大きく変動するものであり、詳細かつ正確なコ

スト評価には、詳細な仕様の検討、試作による技術開発の可能性の検討等が必要となる。

(1) 特殊な仕様があるか？（材料の特殊仕様，板状燃料の仕様），(2) 技術開発の程度（不良率の低下，工程能率向上）

その他施設建設費及び施設維持費にも，ウラン濃縮度が高いため不明確な点がある。

以上のような不明確の点は多いが，3.3.3で述べた結論の大きな変化はないと考えられる。

#### 参 考 資 料

- (1) GEAP - 25163 - 9  
" Demonstration of Fuel Resistant to Pellet-Cladding Interaction  
Phase 2 Ninth Progress Report, January-December 1983 "
- (2) 「放射性物質安全輸送規則 1985年版解説」  
IAEA安全シリーズNo.6 情報センター出版会
- (3) 「発電用核燃料物質に関する技術基準を定める省令」  
(昭和40年6月15日，昭和60年8月3日改正 省令 第63号)
- (4) 「原子力発電所の品質保証指針」 JEAG 4101-1981
- (5) 「発電用核燃料体検査指針」 JEAG 4204-1970

表3.1 調査対象燃料等の主要仕様

項目	原子炉方式	半一体型炉	一体型炉	一体型炉	自己加圧式一体型炉
燃料形式		丸棒燃料-1	板状燃料	丸棒燃料-2	
燃料形状		棒状	板状	棒状	
燃料材質		UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	
燃料濃縮度		第1領域 3.7% 13集合体数 第2領域 4.7% 24集合体数	第1領域 5.81% 16燃料束数 第2領域 6.91% 56燃料束数 第3領域 6.91% 48燃料束数	第1領域 3.8% 4燃料要素数 第2領域 5.4% 12燃料要素数	
燃料棒被覆管外径/ 又はペレット外径	mm	8.6 / 7.2	—	10.8 / 8.9	
燃料板厚さ/ キャラム厚さ	mm	—	3.3 / 2.5	—	
燃料被覆材質		Zry-4	Zry	Zry-4	
燃料集合体数	体	37	32	16	
燃料集合体寸法 (配列)	mm	230 × 230	214 × 214	301 × 301	
燃料配列		19 × 19 本	(13燃料板/燃料束) × 4燃料束	21 × 21 本	
数	本	21	24	16	
型式		クラスタ型	十字型	クラスタ型	
材質		B <sub>4</sub> C	Hf	B <sub>4</sub> C	
バーナブルポイズン		Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + UO <sub>2</sub> 混合焼結体 (10wt%濃度)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混合焼結体	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混合焼結体	

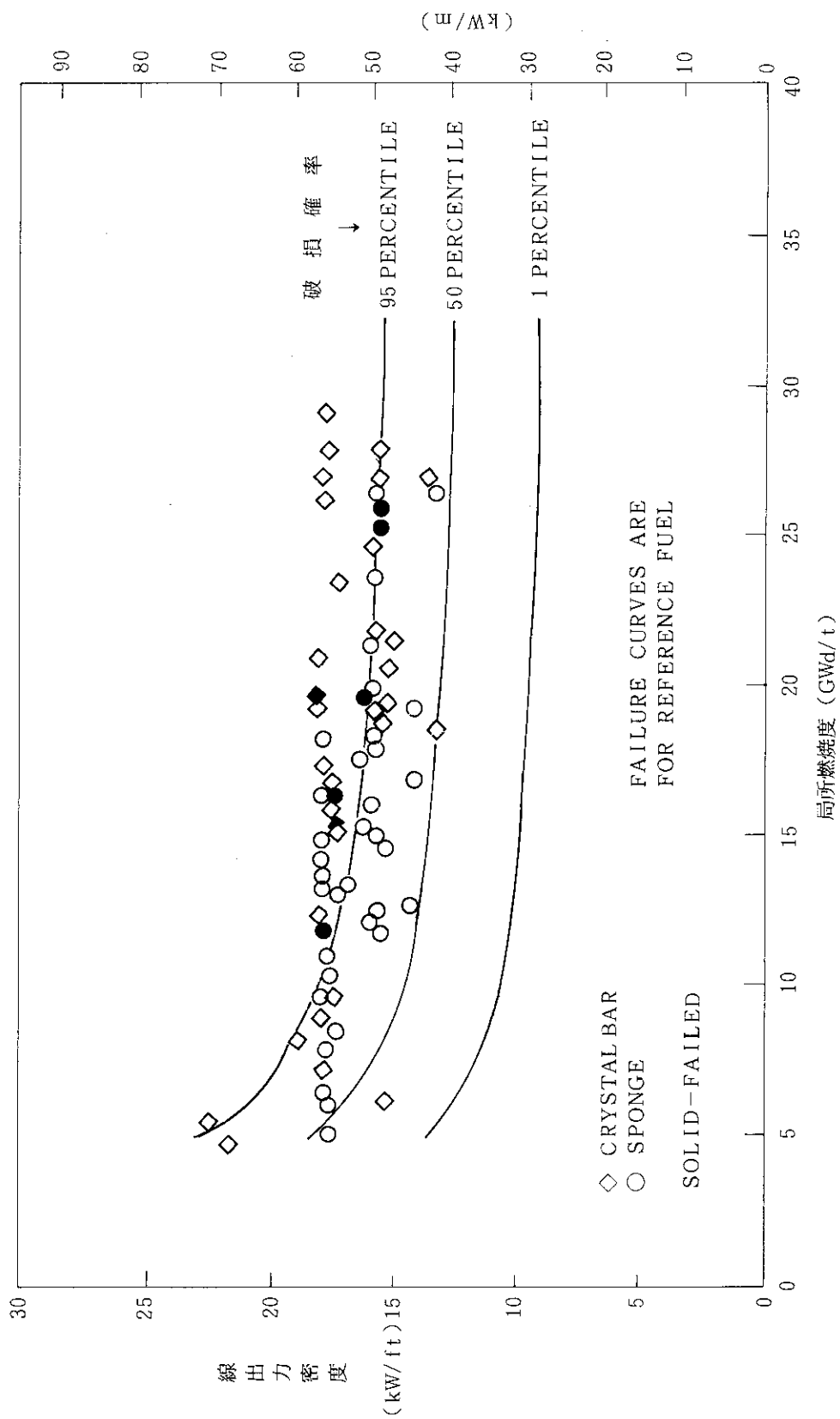


図 3.1 ジルコニウムライナ被覆管を用いた燃料棒の出力急昇試験

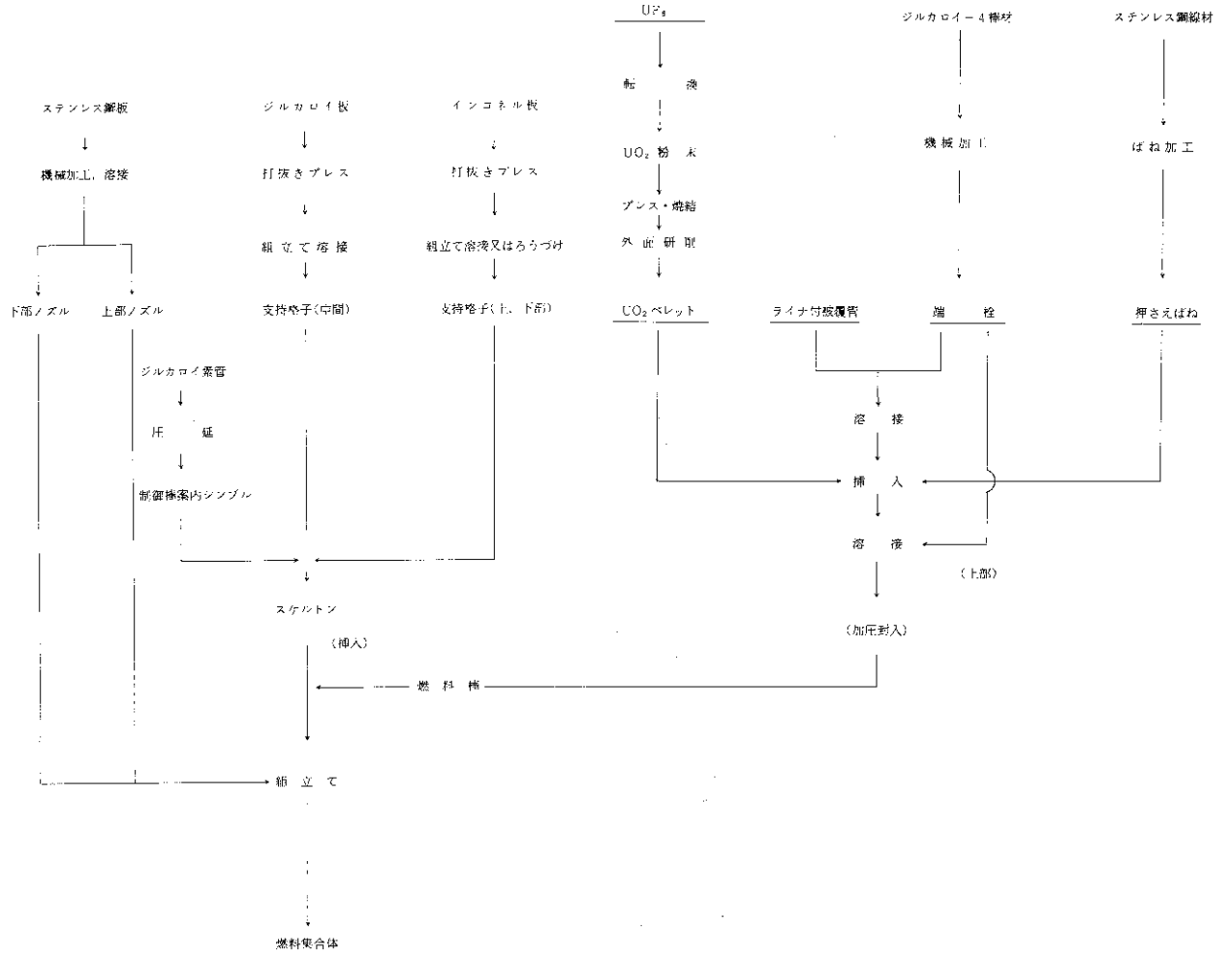


図 3.2 燃料棒加工工程図 (丸棒燃料-1)

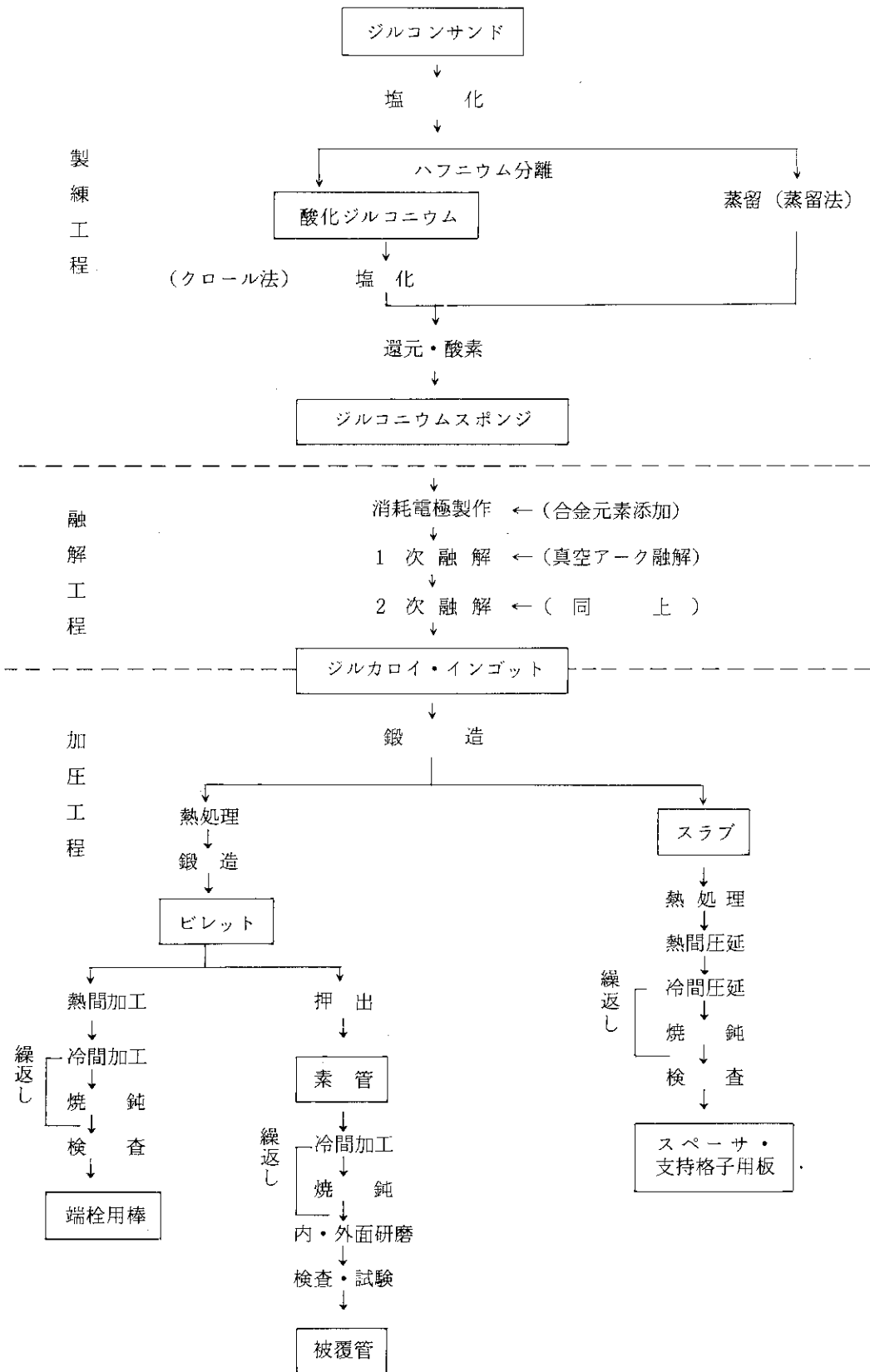


図 3.3 ジルカロイ部材の主要加工工程

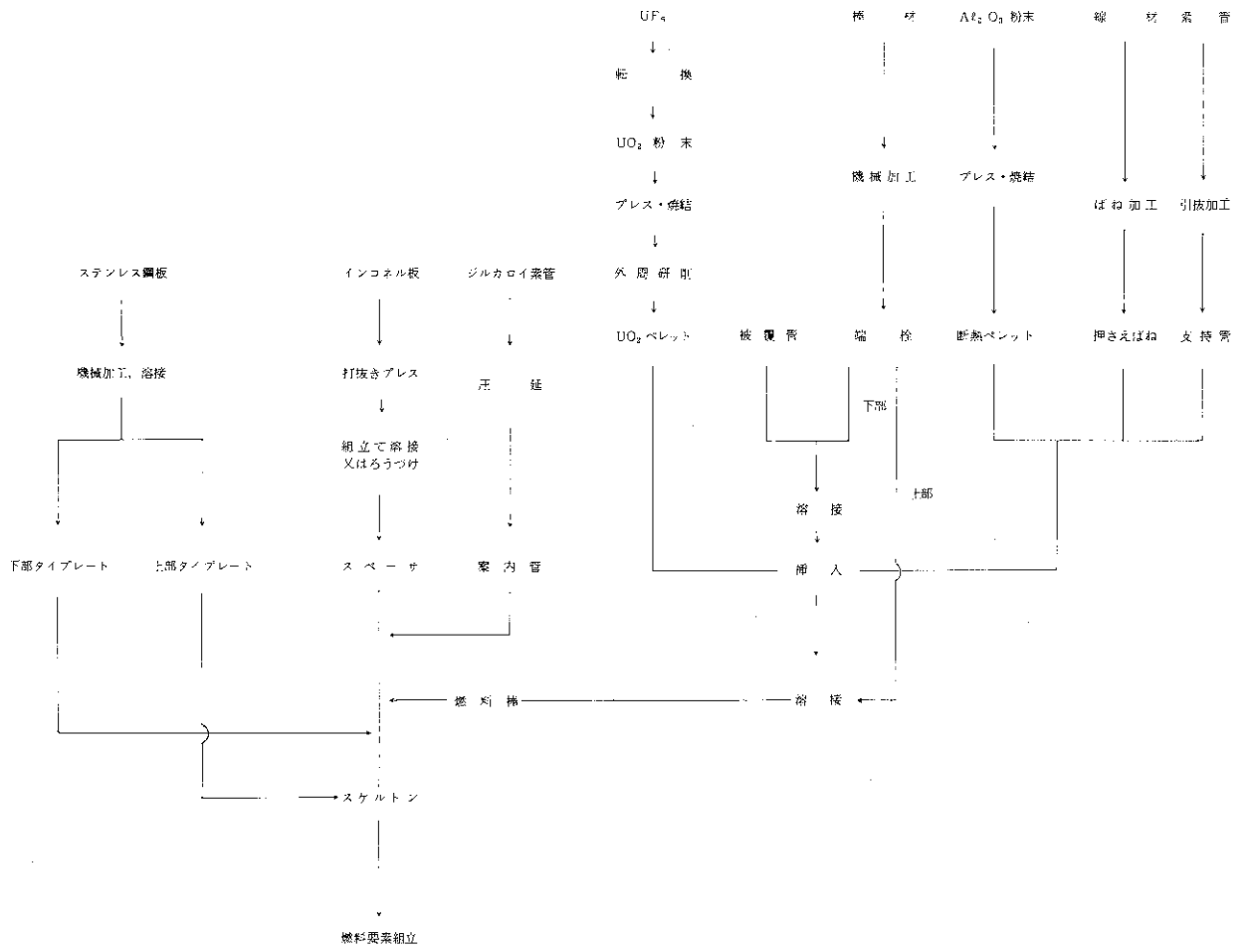


図 3.4 燃料棒加工工程図 (丸棒燃料-2)



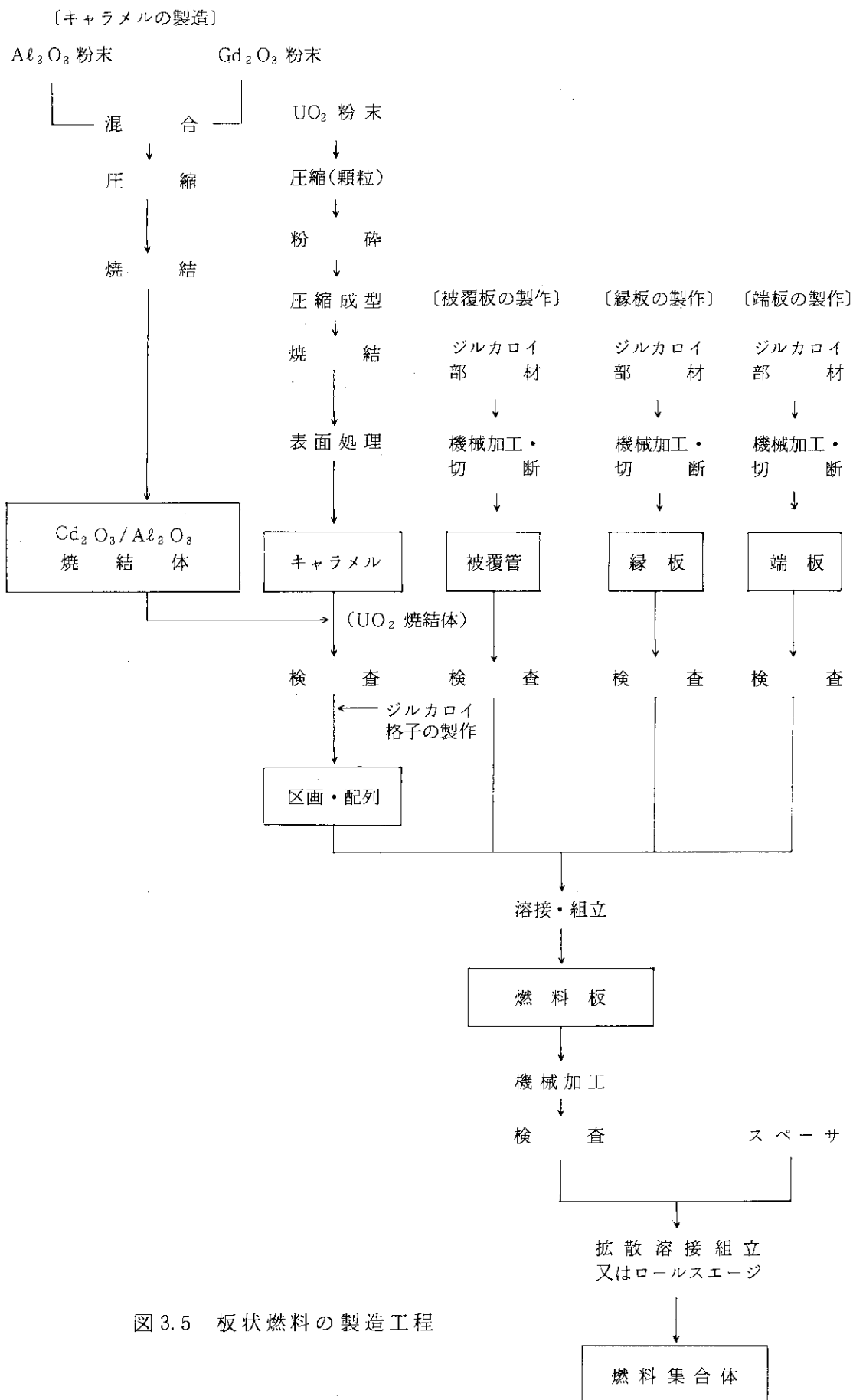


図 3.5 板状燃料の製造工程

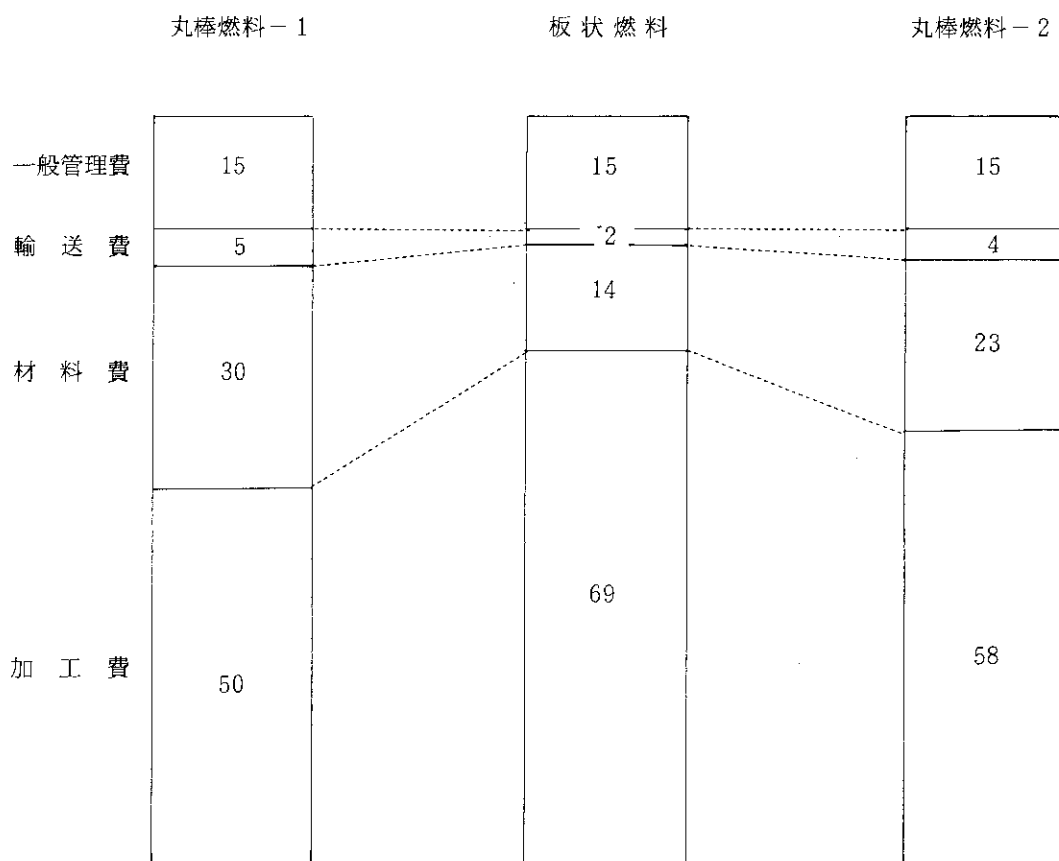
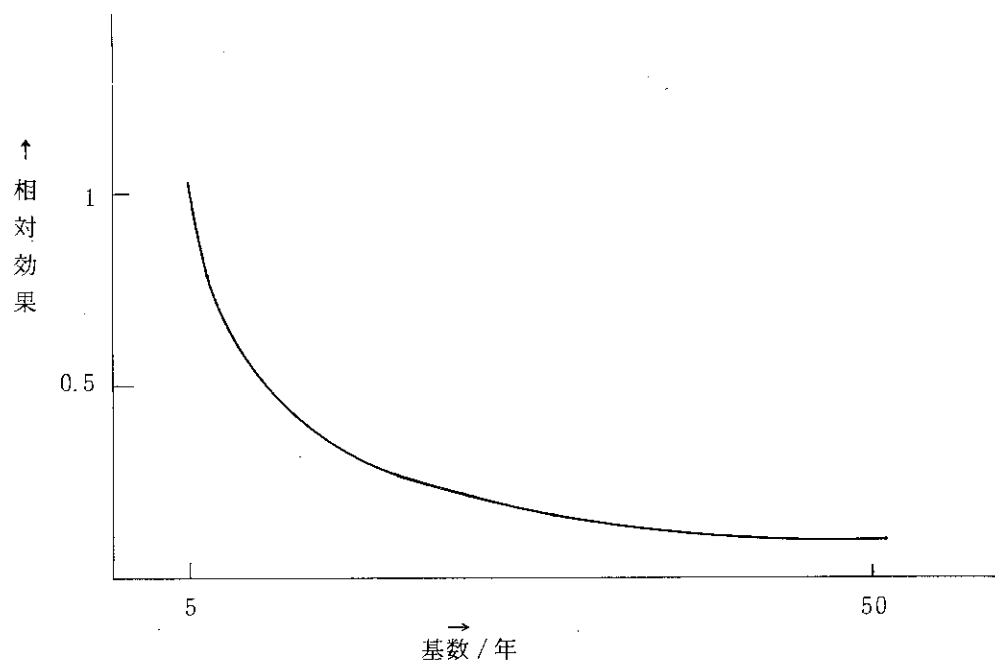
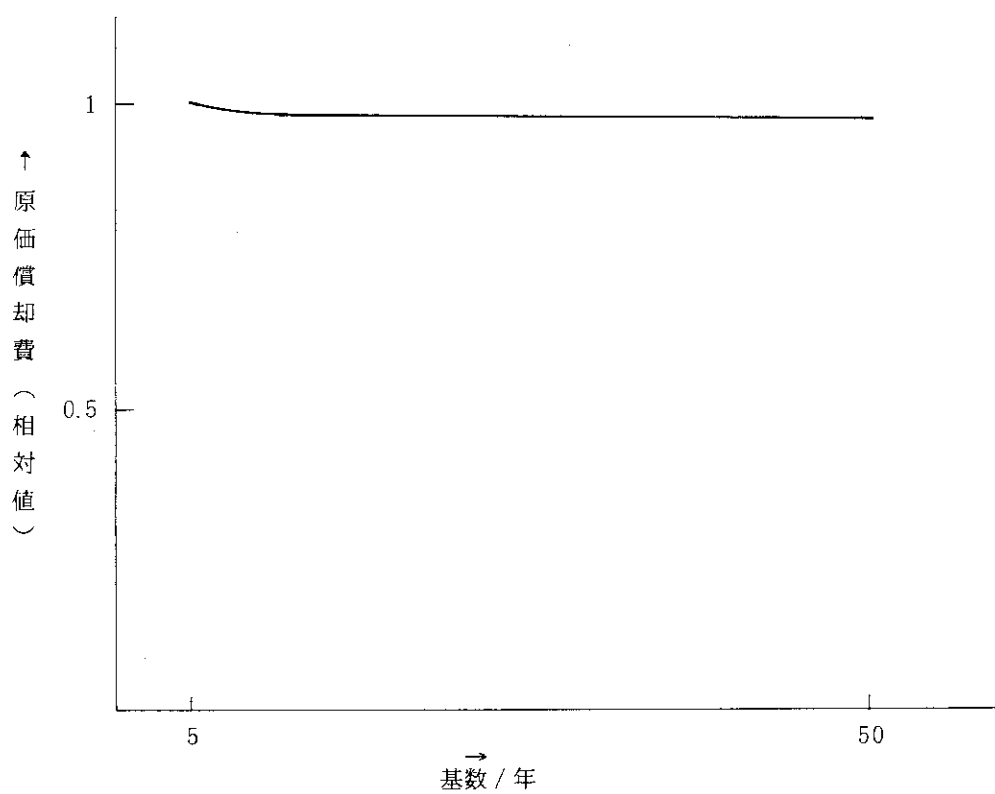


図 3.6 燃料加工コストの内訳（一炉心当り）（単位 %）



(1) 原価償却費の相対的な変化



(2) 燃料加工コストに占める原価償却費の変化

図 3.7 生産量と原価償却費の関係

## 4. 核燃料サイクルコストの試算

### 4.1 計算の考え方と計算式

燃料サイクルコストを考えるにあたり、使用済燃料は再処理を行い、再処理出来るウランとプルトニウムを回収し、再利用するものとし、この時、得られた減損ウランは同じ濃縮度をもつ新燃料のウランと同価値をもつものとする。

以上の考え方に基づき核燃料費を試算する。船に積込んだ核燃料は全部、一度に交換するものとして考えれば核燃料費は次の式<sup>1)</sup>で表わすことが出来る。

$$\begin{aligned} \text{核燃料費} &= \frac{(\text{積込時総価格} - \text{取出時総価格}) + (\text{総利息})}{\text{炉心寿命間総発生馬力}} \\ &= \frac{(U_f - U_i) L_0 + \frac{1}{2} (U_f + U_i) L_0 i \frac{b \cdot L_0}{365 \cdot P \cdot f}}{24 \cdot b \cdot \eta \cdot L_0} \times 0.7457 \dots \\ &\dots\dots\dots(\text{円} / \text{SHP} \cdot \text{hr}) \end{aligned}$$

ここで、

$U_f$  : 燃料装架時点に換算した燃料価値 (円/kgU)

$U_i$  : 使用後再処理して使えるウラン価値を燃料取出し時点へ換算した値 (円/kgU)

$L_0$  : 炉内への燃料装架量 (kgU)       $P$  : 原子炉の熱出力 (kW)

$i$  : 価値換算をする場合の年金利       $f$  : 原子炉の平均負荷率

$b$  : ウランの燃焼度 (KWD/kgU)      0.7457 : kW・馬力換算係数

$\eta$  : 機関の正味効率

#### ① $U_f$

$U_f$ は次のような項目から成り立っている。

㊸ イエローケーキ単価=(単価)(割増率)：割増率には決められた濃縮度の新燃料1kgを得るのに供給しなければならない天然ウランの量、転換中と成型加工中のロスの見込み分が見積られる。

㊹ 転換単価=(単価)(割増率)：上記㊸と同様であるが、天然ウランからUF<sub>6</sub>への転換中のロスはここでは見込まない。

㊺ 濃縮単価=(分離作業単価)(分離作業単位)(割増率)：分離作業単価は1kgウランに1分離作業単位(1SWU)の作業を行ったときの価格である。1分離作業単位とは1kgの濃縮ウランを得るのにどのくらい仕事が必要かという量である。また、割増率はUO<sub>2</sub>への転換中と成型加工中のロスを見込んだものである。

㊻ 成型加工単価=(単価)(割増率)

割増率については上記の㊺と同じである。

⑤ 輸送費=(輸送単価)

⑥ 金利

上記の②, ③, ④, ⑤に対しては, 購入してから, 転換し終わってから, 濃縮し終わってから, 成型加工が済んだ時点から, それぞれ炉内に燃料を装架するまでの期間の金利を考える。

従って $U_f$ は

$$U_f = \text{②} + \text{③} + \text{④} + \text{⑤} + \text{⑥}$$

で表わされる。

②  $U_i$

$U_i$ は次のような項目から成り立っている。

① 再処理単価=(単価)(割引率): 割引率は炉内で燃えたために減ったウラン分と再処理中にロスとなるウラン分を差引く率である。単価には $UF_6$ への再転換費も含まれるものとする。

② 輸送費

③ 再生ウラン売却益

④ プルトニウム売却益

⑤ 金利: 再処理(処理, 再転換)中の期間の再処理費用に対する金利を考える。

⑥ 貯蔵単価

従って, 実際に入手した時点での $U'_i$ は

$$U'_i = \text{③} + \text{④} - (\text{①} + \text{②} + \text{⑤} + \text{⑥})$$

で表わされる。これを燃料取出し時点の $U_i$ に換算しなければならない。 $U'_i$ は, 使用済燃料の冷却期間, 輸送期間, 再処理期間の後でなければ実際に入手できない価値であるから, この期間の利息分だけ割引される。すなわち,

$$U_i = U'_i / (1 + it_1 + it_2 + it_3)$$

ここで,  $t_1, t_2, t_3$ は冷却期間, 輸送期間, 再処理期間を年で表わした値で,  $i$ は年金利を表わす。

以上の $U_f, U_i$ に含まれている構成要素の実際の価格は, 原子炉の形式と出力によって当然変わるものである。

計算に用いる各単価は, 現時点で最も新しく, かつ信頼性の高いものを採用して行うこととし, 船用炉燃料としての補正は行わなかった。

計算に使用した単価を下表に示す。引用した文献は備考欄に示すとおりである。

構 成	単 価	備 考
イエローケーキ	3.34 ドル/ 1b U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ( 64.5 ドル/kg・U)	文 献 2 よ り
転 換	5.50 ドル/ kg・U	”
濃 縮	116.9 ドル/ kg・SWU	”
成 工	半 一 体 型 炉 一 体 炉 炉 自己加圧一体炉炉	} 国内燃料加工業者 の見積りによる
使用済燃料貯蔵	( 40+4/年)ドル/kg・HM	
” 輸 送	41,670円/ kg・HM	文 献 2 よ り
再 処 理	175,000円/ kg・HM	”
廃 棄 物 処 分	150ドル/ kg・HM	文 献 3 よ り
再生ウラン売却	同濃縮の新燃料と同じ価値	—
プルトニウム売却	15ドル/ gr・Puf	文 献 3 よ り

ここで、成型加工単価については第3章で述べたように、各炉型燃料を国内で成型加工した場合の単価とした。

なお、文献2，文献3の該当部分を表4.1と4.2に示す。

#### 4. 2 ま と め

以上、議論した計算式による燃料サイクルコスト（FCC）の計算結果を示す。

		半 一 体 型 炉	一 体 型 炉	自己加圧一体型炉
FCC 計 算 結 果	Pu, Uクレジット	1.51円/kwt・hr	1.61円/kwt・hr	1.51円/kwt・hr
	有 の 場 合	(7.5ミル/kwt・hr)	(8.0ミル/kwt・hr)	(7.5ミル/kwt・hr)
	Pu, Uクレジット	1.80円/kwt・hr	1.89円/kwt・hr	1.88円/kwt・hr
	無 の 場 合	(9.0ミル/kwt・hr)	(9.4ミル/kwt・hr)	(9.40ミル/kwt・hr)

これによると、我が国で経験のないキャラメル燃料を用いた、一体型炉が燃料の成形加工費が高いため、プルトニウムのクレジットの有・無に抱わらず、3炉型の中でFCCが最も高くなっている。また、半一体型炉と自己加圧一体型炉ではプルトニウムクレジット無の場合、自己加圧一体型炉のFCCが大きい。しかるに、プルトニウムクレジットを有とした場合、両者のFCCは同じになった。これは自己加圧一体型炉の方が濃縮度も高く、かつ3年で燃料交換を行うので、年あたりの燃焼度も高いため、プルトニウム売却費が大きくなった効果と考えられる。

表 4.1 核燃料価格サイクル

価格は全て実質価格である。

1. ウラン精鉱					
	ドル建価格 [\$/1bU <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	ドル建価格 [\$/kgU]	伸 び 率 [%/年]		
1986	34.3	64.5			
2006	41.9	78.7	1.0		
2014	55.8	105.0	3.7		
2020	69.1	130.0	3.6		
2030	100.3	192.4	4.0		
注) 1) 2014年には、ウランの累積需要量が80 \$/kgUで供給できる確認、推定追加資源量を上回るようになるので、80~130 \$/kgUの確認資源を開発する必要性が生じてくる。これより2014年の価格を105.0 \$/kgU(80~130の中間値)と規定する。					
2) 2020年には、累積需要量が130 \$/kgUの確認、指定追加資源量を越えるので2020年度価格を130.0 \$/kgUと想定する。以降については、4.0%/年で伸ばしている。					
2. UF <sub>6</sub> 転換					
	ドル建価格 [\$/kgU]	伸 び 率 [%/年]			
1986	5.50				
2030	5.50	0.0			
3. ウラン濃縮					
	D O E [\$/kgU]	EURODIF [\$/kgSWU]	投 務 割 合 [DOE/EURODIF]	ドル建価格 [\$/kgSWU]	伸 び 率 [%/年]
1985	130	100	2100/1000	120.3	
1986	125	100	↑	116.9	-2.8
1990	100	100	↑	100.0	-3.8
1993	97	97	↑	97.0	-1.0
1998	80	80	↑	80.0	-3.8
2003	65	65	↑	65.0	-4.1
2030	65	65	↑	65.0	0.0
4. 成型加工					
	円 建 価 格 [円/kgU]	伸 び 率 [%/年]			
1986	88,000				
2030	88,000	0.0			
5. 使用済燃料輸送					
	ポンド建価格 [ポンド/kgH. M]	為替レート [円/ポンド]	円 建 価 格 [円/kgH. M]	伸 び 率 [%/年]	
1986	130.0	320.5	41.670		
1990	130.0	320.5	41.670	0.0	
1991	—	—	25.000	-40.0	
2030	—	—	25.000	0.0	
注) 1991年度より国際輸送に切り替わるものと想定している。					
6. 再処理					
	フラン建価格 [フラン/kgH. M]	為替レート [円/フラン]	円 建 価 格 [円/kgH. M]	伸 び 率 [%/年]	
1986	6,740	25.96	175,000		
1995	—	—	191,390	1.0	
2030	—	—	271,130		
注) 円建価格で1.0%年の実質上昇としている。1995年に国内再処理工場が運開予定であるが、国内再処理価格についても国際価格と同一水準で推移すると想定している。					

表 4.2 軽水炉核燃料サイクルの単価

1984年1月1日現在のUSドル

構 成	BWR/PWR	PWRでの基本仮定	
		標 準 単 価	パ ラ メ ー タ
ウランの購入	75.4 - 104/kgU (29 - 40/1b U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) エスカレーション0-4%/年	83.2/kgU (32/1b U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) エスカレーション 2%/年	- - 0および4%/年
転換	3 - 8/kgU	6/kgU	-
濃縮	110 - 150/kgSWU	130/SWU	100 - 150/SWU および70/SWU
成形加工	150 - 210/kgU	190/kgU	160 - 210/kgU
中間貯蔵			
輸送	28 - 47/kgHM	40/kgHM	-
貯蔵	90 - 200/kgHM	(40+4/年)/kgHM	20+2/年-60+6/年
再処理サイクル			
再処理	} 640 - 950/kgHM	550/kgHM	} 500 - 1000/kgHM
ガラス固化		200/kgHM	
廃棄物処分		150/kgHM	
ワンス・スルー方式			
処理	} 128 - 380/kgHM	200/kgHM	} 150 - 550/kgHM
処分		150/kgHM	
Puクレジット		\$15/g プルト ニウム核物質	

## 参 考 資 料

1. 竹村数男 「原子力船工学」 成山堂書店
2. 「海洋における原子動力利用に関する調査」報告書 日本造船研究協会 昭和61年9月
3. 「OECD/NEA 原子燃料サイクルの経済性」 日本産業会議 1985年11月



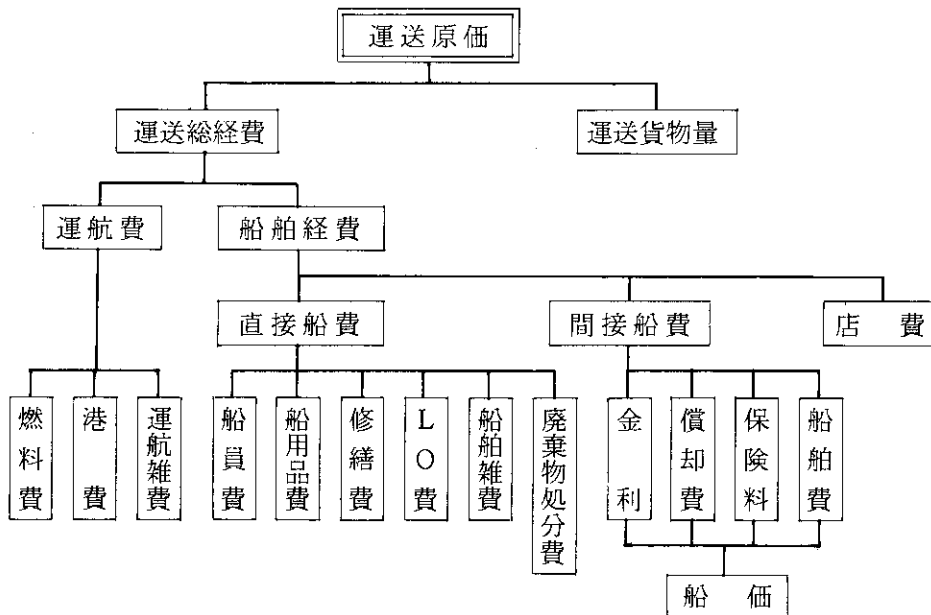
## 5. 経済性の検討結果

### 5.1 運送原価の算出

経済性評価の指標としてRFR（Required Freight Rate：単位貨物量当りの輸送コスト）を用いて行う。RFRの計算にはトータルライフタイム・ディスカウント法を採用した。この手法は船の全生涯を通じて発生する費用をある基準時点の価値に割引いて船の全生涯における総コストを計算し、これを船の全生涯における総貨物輸送量で割ってRFRを求めるものである。

$$\text{運送原価：RFR} = \frac{\text{船の全生涯で発生する総経費}}{\text{船の全生涯における総貨物輸送量}}$$

総経費は、運航費と船舶経費からなり、運航費には、燃料費、港費等が含まれる。又、船舶経費には直接経費、間接経費、および店費からなり、船員費、修繕費、保険料、償却費等が含まれる。この総経費を構成している各項目のフローダイアグラムを以下に示す。



運送原価を求めるフローダイアグラム

## 5.2 計算条件

今回、試算を行う検討対象船種として、試設計の想定船種である一船商船（タンカー、コンテナ船、専用船）のうち、タンカーとコンテナ船を選んだ。以下にその主要な入力条件について述べる。

### (1) 想定船，想定航路

タンカーの想定船は20万 DWTを選び、航路は日本，ペルシャ湾とした。

タンカー（200型）20万 DWT：日本←→ペルシャ湾

コンテナ船の想定船はコンテナ2,000個積みとし、航路は日本，米国西海岸とする。

コンテナ船 2,000 TEU：日本←→米国西海岸

これらの寸法は下記の表のようである。

		200型タンカー	2000 TEUコンテナ船
全	長	300.0 m	220.0 m
型	幅	50.0	34.0
型	深さ	28.5	22.0
喫	水	19.0	9.5
方	形係数	0.85	0.57
DWT, TEU		206,600	2,000

### (2) 船速

想定船の主要目より、次の関係式を用いて算出した。

$$\text{馬力} \propto (\text{船速} / \text{基本船速})^3$$

タンカーについては

	馬力	馬力比の $1/3$ 乗	船速
標準タンカー	30,000 PS	1.0	15.0 kn
半一体型炉	35,150	1.059	15.81
一体型炉	37,700	1.079	16.19
自己加圧一体型炉	36,400	1.067	16.00

コンテナ船については

	馬力	馬力比の $1/3$ 乗	船速
標準コンテナ船	34,500 PS	1.0	22.0 kn
半一体型炉	35,150	1.006	22.14
一体型炉	37,700	1.030	22.66
自己加圧一体型炉	36,400	1.018	22.40

(3) 船 価

船体価格および炉プラント価格の合計として船価を求めた。船体価格および炉プラント価格の表を下記に示す。

船 種	価 格		船 体 価 格	炉 価 格	船 価
	炉 型				
タン カ ー	半一体型炉	1.0	1.0	1.0	1.0
	一 体 型 炉	〃	0.9912	0.9982	
	自己加圧一体型炉	〃	1.656	1.137	
コン テ ナ 船	半一体型炉	1.0	1.0	1.0	1.0
	一 体 型 炉	〃	0.9912	0.9979	
	自己加圧一体型炉	〃	1.656	1.155	

船体価格は参考文献-1によった。炉価格は第2章で算出した値を補正して求めた。

(4) その他、船舶関係費

船員費、船用品費、修繕費、潤滑油費、保険料、廃棄物処分費等々について、上記資料を参考にして補正等を行って定めた。

(5) 核燃料サイクルコスト

核燃料サイクルコストは第4章で算出した値を用いた。以下にその値を示す。

		半一体型炉	一 体 型 炉	自己加圧一体型炉
FCC 計 算 結 果	Pu, Uクレジット	1.51円/kwt・hr	1.61円/kwt・hr	1.51円/kwt・hr
	有			
	の 場 合	(7.5ミル/kwt・hr)	(8.0ミル/kwt・hr)	(7.5ミル/kwt・hr)
	Pu, Uクレジット	1.80円/kwt・hr	1.89円/kwt・hr	1.88円/kwt・hr
無				
の 場 合	(9.0ミル/kwt・hr)	(9.4ミル/kwt・hr)	(9.40ミル/kwt・hr)	

5.3 結果の比較

以上の入力値をもとにECONOMコード<sup>2)</sup>によりRFRを計算した。結果を表5.1表に示す。これによると、経済性は、タンカー、コンテナ船ともに、Pu, Uのクレジットの有・無にかかわらず一体型炉を搭載した場合が最もよいことが明らかになった。

表 5.1 各試設計炉を搭載した想定船の RFR

	20万 DWT タンカー		2,000 TEU コンテナ船	
	Pu, Uクレジット		Pu, Uクレジット	
	有の FCC	無の FCC	有の FCC	無の FCC
	円/ton	円/ton	万円/TEU	万円/TEU
半一体型炉	4,152	4,288	25.33	26.03
一体型炉	4,119	4,247	25.25	25.92
自己加圧一体型炉	4,403	4,574	27.21	28.10

## 参 考 資 料

1. 原子力船懇談会報告書 ー原子力船の開発目標についてー 資料編  
日本原子力産業会議
2. 原子力船開発の技術予測に関する試験研究  
日本造船研究協会 原子力船委員会 第9研究部会 昭和53年10月

## 6. ま と め

今まで議論してきたように、炉プラント価格は、半一体型炉、一体型炉はほぼ同額であり、自己加圧一体型炉は、両炉の約1.6倍程度となった。また、核燃料サイクルコストについては、日本で経験のないキャラメル燃料を装荷している一体型炉が燃料の成形・加工費が他の二炉の丸棒燃料に比して高価となり、3炉型中で、Pu・Uのクレジットの有・無にかかわらず、核燃料サイクルコストが最も大きくなっている。これらの結果をもとに算出した運送原価（RFR）は、タンカー、コンテナ船の両船種ともに、一体型炉、半一体型炉、自己加圧一体型炉の順となり、経済性は一体型炉が最もよいことが明らかになった。

この理由として一体型炉の馬力が3炉型中、最も大きく、それに伴って船速が一番速くなる。又、炉プラント価格も半一体型炉と一体型炉がほぼ同額であることから、その結果として一体型炉を塔載した船種のRFRが最も安くなったものと考ええる。

さらに、塔載船のRFRを安くするには、一体型炉に核燃料サイクルコストの高いキャラメル燃料の代わりに丸棒燃料を装荷すれば、更に一層のRFRの低減化が可能となろう。今後、この検討を行う必要がある。