

高速増殖実証炉 第2巻

—プラント系統別の検討—
第2分冊 原子炉構造の検討

1985年3月

動力炉・核燃料開発事業団

実証炉設計技術検討Working Group

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

高速増殖実証炉 第2巻

プラント系統別の検討

第2分冊 原子炉構造の検討

実証炉設計技術検討Working Group

要 旨

実証炉設計技術検討ワーキンググループにおいて、世界各国の大型高速増殖炉について第1巻に引続き、プラント系統別に調査検討した。

第2巻は

第1章（第1分冊） 炉心の検討

第2章（第2分冊） 原子炉構造の検討

第3章（第3分冊） 冷却系設備の検討

第4章（第4分冊） 補助設備の検討

第5章（第5分冊） 燃料取扱設備の検討

第6章（第6分冊） 計測制御設備の検討

第7章（第7分冊） 安全設備の検討

に分類して検討を行なった。

本報告は、第2章（第2分冊）原子炉構造の検討について、まとめたものである。

目 次

まえがき	1
2.1 原子炉構造システム	5
2.1.1 炉内流動	5
2.1.2 コンパクト化及び経済性を旨とした構成についての考察	15
2.1.3 参考文献	54
2.2 制御棒駆動機構	57
2.2.1 緒 言	57
2.2.2 「もんじゅ」の制御棒駆動機構	57
2.2.3 実証炉設計研究における制御棒駆動機構の現状	60
2.2.4 海外炉の制御棒駆動機構	65
2.2.5 制御棒駆動機構のあり方	69
2.2.6 実証炉の制御棒駆動機構に必要な研究開発	72
2.2.7 結 言	72
2.2.8 参考文献	73
2.3 炉心上部機構	95
2.3.1 炉心上部機構に要求される機能	95
2.3.2 炉心上部機構の設計で考慮すべき現象	96
2.3.3 炉心上部機構の設計例	97
2.4 炉内構造物	123
2.4.1 炉内構造物に要求される機能	123
2.4.2 炉内構造物の設計で考慮すべき現象	124
2.4.3 炉内構造物の設計例	125
あとがき	152
(付) 実証炉設計技術検討ワーキンググループメンバー一覧	153

* 機器開発室 (W/G メンバー外)

ま え が き

世界の高速増殖炉の開発は、実験炉、原型炉の研究開発が進み、実証炉の研究開発の段階に進みつつある。

動燃においても、数年前から実証炉の設計研究が進められており、昭和57年9月からは、“実証炉設計技術検討ワーキンググループ”が発足し、高速増殖炉開発本部並びに大洗工学センターの関連本部（高速炉機器開発部、高速実験炉部、燃料材料試験部、高速炉安全工学部）から、各々の立場の専門家による実証炉開発のための検討が、進められることになった。

実証炉設計技術ワーキンググループ内で第1巻として世界各国の高速増殖炉の技術調査を進めることになり、以下のような項目を調査した。

- 第1章 ループ型炉の開発状況
- 第2章 タンク型炉の開発状況
- 第3章 我国の開発状況
- 第4章 炉型式の比較
- 第5章 今後の研究開発項目

第1巻に引き続き、第2巻として、プラント系統別の調査検討を以下のような項目で実施した。

- 第1章 炉心の検討
- 第2章 原子炉構造の検討
- 第3章 冷却系設備の検討
- 第4章 補助設備の検討
- 第5章 燃料取扱設備の検討
- 第6章 計測制御設備の検討
- 第7章 安全設備の検討

本報告書は、第2章 原子炉構造の検討についてまとめたものである。

報告書のまとめ方は、担当（目次の氏名）を決め、担当者が調査し、調査内容を当ワーキンググループの検討会で発表し、各分野の専門家と討論し充足してまとめられた。調査内容は、できるだけ最新の情報を入手するよう努力した。

しかし、新しい情報が入っているので、さらに追加すべきことも多いと思われるが、一応の成果と考え、報告することにした。

高速増殖炉の開発は、国際協力を必要とする時代であり、我国も各国からいろいろな形で呼びかけられつつある。また、実証炉の設計研究も経済性や安全性の観点から、タンク型炉とループ型炉の比較すべき時代に、本報告書が少しでも役に立てば幸いである。

本報告書のコメントや修正等、各方面から頂けることを期待している。

実証炉設計技術検討ワーキンググループ 事務局

2.1 原子炉構造システム

2.1.1	炉内流動	5
(1)	等温流力特性	5
(2)	熱流力特性	7
(3)	流力振動特性	12
(4)	今後の課題	15
2.1.2	コンパクト化および経済性を旨した構成についての考察	15
(1)	原子炉構造の直径を低減する手段	15
(2)	原子炉構造の高さを低減する手段	22
(3)	炉容器を薄くする手段	23
(4)	今後の課題	23
2.1.3	参考文献	54

2.1 原子炉構造システム

2.1.1 炉内流動

炉内流動に関する R & D は海外では特に 1970 年代頃に、原型炉クラスの FBR の開発段階で盛んに実施されたい。ここでは主に Phénix, PFR などの開発に伴う炉内流動の R & D について情報を示し、炉内流動に関する課題について考察する。

(1) 等温流力特性

① コールドプレナムに関する検討

(i) 検討事項

- (イ) 1 次主循環ポンプ吸込みスカート内の均一な流動
- (ロ) 構造物温度均一化のための容器下部の均一な流動

(ii) Phénix の場合の検討結果¹⁾ (図 2.1.1 参照)

Phénix の場合、1/10 スケールの模型試験により、以下の結論を得た：

- (イ) IHX 出口窓の上方 120mm のレベルに格子 (Interface grid) を設ける。これは Inter vessel の高温ナトリウム層 (560℃) を定格状態において安定化させ、コンカル・レダン (Conical Redan)、中間容器下部の円筒胴、および中間容器のハイドロリック・バッフル (Hydraulic Baffle) の熱応力を低減するためである。
- (ロ) ポンプの吸込みスカートを出来るだけ下方に延ばして、コールドプレナム内にスタグナントな領域が生ずることを防ぐ。

更に Inter vessel の 1/4 スケール水中試験装置 (SOGREAH) により、以下の結論を得た：

- (イ) ポンプ吐出管を支えるコンソール (Console) を乗せた棚の部分で流体の剥離が生じることが判明したため、そのデザインを変更した。
- (ロ) ポンプの吸込みスカート (“チューリップ”とも呼ばれる) の流動は満足できることが確認された。
- (ホ) コールドプレナムの流動は、炉心支持構造の下部にいたるまで十分に行なわれることが確認された。

② ホットプレナムおよび炉容器内自由液面に関する検討

(i) 検討事項

- (イ) 自由液面の旋回および振動が、構造物に悪影響をおよぼさないか、またガス巻込みの原因にならないか？
- (ロ) 炉心から出た冷却材の噴流 (jet) による自由液面のもり上り (hump) がガス巻込みの原因にならないか？
- (イ) ナトリウム中から液面上に突出した構造物がガス巻込みの原因とならないか？

(ii) Phénixの場合の検討結果¹⁾

(a) 炉心上の自由液面

縮尺 1/4 の水中試験体により Froude 数を合わせて試験したところ、炉心から出る冷却材による自由液面のもり上りは実機において約 40 cm の高さになると推定され、ガス巻込みの原因になることが心配された。この液面のもり上りは低い振動数 (0.1, 0.5 および 2~5 Hz) で変動することが確認された。そこでディッププレート設けることにより液面のもり上り高さを 2cm 以下におさえられることが判明した。

(b) IHX 入口窓付近

実物大 1/4 セクタモデルにより流動試験を行なった。その結果、剥離を防ぐために入口窓下縁の形状を改めた (図 2.1.2, 2.1.3)。

(iii) PFRの場合の検討結果²⁾

(a) 炉心上の自由液面

PFR の設計段階での検討によると、炉心から出る冷却材は噴流となり、その直径は約 1.2m ϕ 、中心での最大速度は約 3m/s になる。そのため炉心から約 6m 上にある自由液面は噴流の動圧とほぼ等しい高さのもり上り (ナトリウムの場合約 45cm) を生じ、ガス巻込みの原因となる。以上の現象が縮尺 1/17 および 1/5 の水中試験装置により確認された (図 2.1.4)。

上記検討の結果、液面のもり上りを抑えるためのバッファを設計することになったが、これには以下の点が考慮されている：

- (イ) このバッファには燃料出入機のパンタグラフが貫通する直径 30cm ϕ の穴が必要だが、この穴を開けたままでは通常運転中にガス巻込みの現象を免れられない。そこで Baffle plate slot plng を設け、穴を閉じられる様にした (図 2.1.5)。
- (ロ) バッファは実機の場合 4.5 ton のスラストを受ける。この力はスカートを介してしゃへいプラグが受けることになる。
- (ハ) このバッファには CRD 案内管も貫通するが、バッファの温度は定格運転中 600℃に達するため、両者が直接接触しない様にクリアランスを設ける。かつ案内管にはカラーを設けてそこからの冷却材のリークを防ぐ構造とした (図 2.1.5, 2.1.6)。
- (ニ) CRD 案内管内部にも噴流が生ずるため、案内管内にもバッファを設け、上述のメイン・バッファより上方のプール内に流れを導く様にした。(なお、この CRD 案内管は流力振動の問題にも直面した。これについては 2.1.3 項(5)で述べる。)

(b) IHX 入口窓付近の自由液面

縮尺モデルを使った水中試験により、実機において Transient gas entraining vortices が発生することが推定され、対策が検討されている。安全審査の段階でもし必要ならバッファを設けることも検討されている。

(c) 中性子しゃへい体後流の自由液面

PFR では中性子しゃへい体が自由液面上まで突出している。そのため自由液面において炉心の上方から IHX の方へ向かう流れが、この中性子しゃへい体でさえぎられることになり、中性子しゃへい体の後流では数インチ程度自由液面が低下して、ガス巻込みの原因となる(図 2.1.7)。縮尺モデルを使った水中試験により、実機条件でガス巻込みが生ずることが確認された。さらに縮尺 5/8 のモデルを使い、巻込まれた気泡が IHX 吸込窓まで達するかを調べたところ、IHX へのガス巻込みは数 ppm 以下であることが確認された。なおこの現象については安全審査の際にも再びチェックされる予定である。

(iv) Super Phenix - II の場合の検討³⁾

Novatome のシャトゥ研究所では 1/8 スケールモデルにより、ホットプレナム内の定常時および過渡時の流動試験が行なわれている。

ホットプレナム内の定常運転時のガス巻込みおよび過渡時のストラティフィケーションを防止するため、UCS に穴開き円筒を取付けることが予定され、試験されている(図 2.1.8)。

(2) 熱流力特性

① 隔壁に関する検討

(i) Phenix の場合の検討¹⁾

(a) 隔壁概念の選定⁴⁾

Phénix の段階では、隔壁構造として断熱体を用いる方式(図 2.1.9) および断熱体を用いずバッファによりスタグナント領域を設ける方式(図 2.1.10) などが検討された。

検討の結果、前者の方式では以下の点が問題となる：

- (イ) 高温ナトリウム中での断熱体の健全性
- (ロ) 2 次系トリップ時のホットショックに対するレダン (Redan：隔壁の段状部) の健全性
- (ハ) 主容器液面近傍の健全性 (主容器には低温のナトリウムおよび高温のカバーガスが接触するため。図 2.1.9 参照)

一方、後者の方式は以下の特徴を有する：

- (ニ) 垂直バッファ (B₁) , 水平バッファ (B₂) およびレダンを囲まれる環状空間は、ホットプレナムからのリークフローにより比較的高温に保たれる。(このリークフローは水平バッファの隙間からコールドプレナムに流れる。)
 - (ホ) 主容器の液面近傍は高温のナトリウムおよび高温のカバーガスが接触するため、液面近傍の健全性に関しては、前者の方式より有利 (図 2.1.10 参照)
 - (ヘ) 主容器の軸方向温度勾配は、垂直バッファの存在により緩和される。
- 以上により、Phénixには後者の方式が採用された。

(b) Phénixの隔壁構造の熱流力特性¹⁾

Phénixの隔壁構造を図 2.1.11 に示す。本構造においては、レダンの IHX 貫通部に隙間が設けられ、レダンの上面から下面へホットプレナムのナトリウムがリークする設計となっている。中間容器と主容器とで囲まれる環状空間ではストラティフィケーションが発生する可能性のあることが、設計段階で判明した：

- (イ) 上記空間の上方では、高温壁 (レダニ中間容器) , 低温壁 (ポンプ本体) および中温壁 (主容器, IHX) に沿って弱い対流が生じ、流体温度は均一となる。
- (ロ) 同空間の下方では、ポンプから IHX への流路が形成され、流体は低温に保たれる。
- (ハ) 同空間の中間部では、ストラティフィケーションにより大きな温度勾配が発生する。

実験の結果、ストラティフィケーションの発生する高さは、原子炉出力とレダニからのリーク量により変化することが判明した。

ストラティフィケーションの対策としては：

- (ニ) レダニに大きな温度勾配を与えないため、レダニからのリーク量を IHX の 4% とし、かつ Horizontal plate (図 2.1.11) を設ける。これによりストラティフィケーションの領域を Horizontal plate より下方で安定させる。
- (ホ) 上記条件におけるストラティフィケーションの温度勾配は 4°C/mm となるため、主容器保護のため Vertical Baffle (図 2.1.11) を設ける。

(ii) Super phenixの隔壁構造の変遷³⁾ (図 2.1.12)

Super Phenixの隔壁構造は、当初案はPhénixのそれに近いものであった(同図①)。しかしホットプレナムとコールドプレナムを隔てるコニカルストラクチャの熱応力評価により、この部分の熱応力が非常に厳しいことがわかり、トロイダルストラクチャを追加した(同図②)。この結果コニカルストラクチャの熱貫流率を低下させることができた。さらにこの部分の対流を抑止することを目的に、炉心部とコニカルストラクチャの間に対流防止装置 (Anti-convection device) を加えること

によりナトリウム淀み層を形成するとともに（同図③），炉壁冷却に用いた冷却材の下降流路を形成する壁を加えることになった（同図④および図 2.1.13）。

最終的な Super Phenix の隔壁構造である。

本構造においてはトロイダルストラクチャのみが IHX 出入口差圧を受ける耐圧バウンダリとなる。

(iii) EPRI の 1000 MWe タンク型炉の隔壁構造⁵⁾（図 2.1.14）

本設計では隔壁は 2 枚の水平平行平板（間隔 1.52m）およびそこに介在するナトリウム淀み層により構成される。一方，隔壁の代案として上記構造をコニカル型とした場合についても検討がなされた。

水平型隔壁およびコニカル型隔壁のナトリウム淀み層の温度分布につき，2次元解析結果を図 2.1.15 および図 2.1.16 に示す。水平型隔壁の方が断熱性能に優れ，半径方向の温度勾配がつかない点で有利なことが判明した。

両型式とも，ナトリウム淀み層には，層流の自然対流が発生するが，これは隔壁の温度分布には影響をおよぼさない。なお上記自然対流が乱流状態になると隔壁の温度分布が影響を受けることが考えられるが，想定される運転状態では乱流状態になることはないという。

(iv) CDFR の隔壁構造⁶⁾（図 2.1.17）

本設計では，上述の EPRI のタンク型炉と同様に水平型の隔壁構造が採用されている。

② 炉壁断熱方式に関する検討

(i) フランスにおける炉壁断熱方式の設計の推移^{7),8)}

(a) Phénix の設計段階においては，主容器を 500℃ 以上の設計とすることは好ましくないとの観点より，コールドプレナムからのバイパス流により主容器壁を冷却する方式（以下“炉壁冷却方式”と略す）が採用された（図 2.1.18）。

炉壁冷却方式を採用した場合の主容器および中間容器の温度分布を求める方法としては，解析は 3次元のため非常に困難で，一方，水中試験ではナトリウムと水のプラントル数が異なるため不可能である。そこで縮尺模型を用い温水または塩水の流動試験により流速分布を求めた。これに基づいて 2次元解析にて自然対流効果を考慮して実際の温度分布を求めたという。

炉壁冷却方式は，主容器をクリープ効果が顕著でない温度に保持できる点で有利だが，冷却パスの反転部レベルにおいてストラティフィケーションが発生する可能性があることが欠点である。

(b) Super Phenix にも炉壁冷却方式が採用されたが，大型化にともない，Phénix

に比べ中間容器の形状，レダンの位置および強制冷却パスの反転部形状などが変更された（図 2.1.18）。

(c) Super Phenix-II では、これまでとは異なりガスダム方式が採用される(図 2.1.19)。ガスダム方式とは主容器のホットプレナム部の内側にバリアを設け、主容器とバリアとの隙間をカバーガス雰囲気とすることにより、主容器を低温（400℃以下）に保持する方式である。

ガスダム方式が採用された理由としては：

- (イ) 物量削減の観点からは従来の炉壁冷却方式は冷却パスを形成するための円筒状のバッファが3層前後必要となり好ましくない。これに対してガスダム方式ならば、基本的には薄いガスダム壁が1層と、若干の輻射防止板があればよい。
- (ロ) 主容器の構造設計の観点からは、炉壁冷却方式では高温設計（ただしクリープ効果が顕著でない領域）となるのに対し、ガスダム方式ならば低温設計（400℃以下）が可能と期待できる。
- (ハ) 炉容器ピット室の熱負荷を小さくする観点からは、出来るだけ熱源の近くで断熱することが好ましいため。（Super Phenix の場合には炉容器ピット室のコンクリート壁に保温材を取付けていた。）

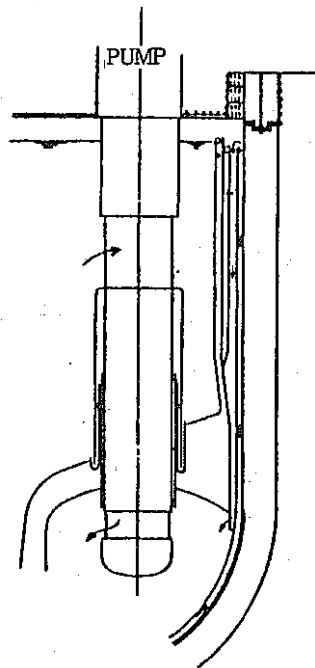


図 2.1.18 (2) Super Phenix (最終設計)

(ii) CDFR

ガスダム方式が採用され、主容器は低温設計（400℃以下）となっている（図 2.1.20）。

(iii) ループ型炉における炉壁断熱方式⁹⁾

炉壁断熱方式の設計に関しては、タンク型よりもループ型の方が設計条件（断熱性能など）および設置上の制約条件は概して厳しくなると考えられる。すなわち；

(イ) ループ型炉の方がナトリウム・インベントリが小さいため、概して熱過渡条件が厳しい。

(ロ) タンク型炉では運転温度の変化にともなって、炉内の液位が熱膨張により変化するが、ループ型炉ではオーバフロー系を有するため炉内液位が一定である。よって液面近傍の熱過渡条件は、概してループ型炉の方が厳しい。

(ハ) タンク型炉では主容器にノズルが皆無だが、ループ型炉（上部流入方式）では炉容器液面近傍に主冷却系配管のノズルが存在するため、断熱方式を設置するうえで制約が大きい。

(a) FFTFおよびCRBRP（図 2.1.21 および 22）⁹⁾ では炉壁冷却方式が採用されている。本方式では炉壁冷却用ナトリウムはノズル取付部およびバッファ上端からリークしてホットプレナムに入る。従ってこれらのリーク部分におけるストライピングが問題となる。また炉壁とバッファの熱膨張差をノズル部で逃げる工夫が必要である。

(b) 動燃実証炉第2次概念設計(I)では、正案として熱抵抗体方式が採用された（図 2.1.23）。

一方、代案として炉壁冷却方式が検討された（図 2.1.24）。

③ 炉内中性子しゃへい体の冷却方法に関する検討¹⁾

(i) Phénix の場合の検討

Phénix の炉内中性子しゃへい体（Lateral neutron shield）はアッセンブリの形状をした可動しゃへい体およびその外側の棒状の固定中性子しゃへい体より構成される。固定しゃへい体は内側からグラファイト、ステンレス鋼、 B_4C の順序で構成される（グラファイト、 B_4C はカン詰であろう）。

炉内中性子しゃへい体の γ 発熱は1MWとなり、これは炉内の自然循環のみにより冷却される方式が採用された（図 2.1.25）。この方式は、可動しゃへい体内部に冷却材を強制循環させる方式に比べて、1次冷却材流量を節約でき（とはいってもせいぜい全流量の1%程度だが）、炉心入口プレナムを簡略化できるという。

本方式については、設計段階で1/4縮尺模型による実験を行なったところ、炉心

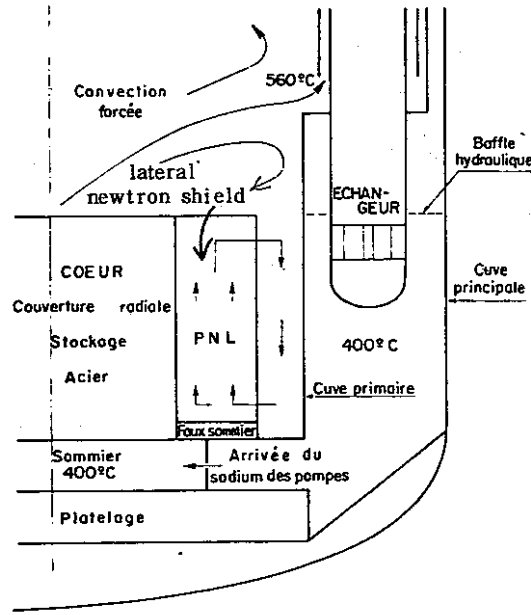


Schéma de refroidissement de la protection neutronique latérale (PNL).

図 2.1.25 Natural convection cooling of the lateral neutron shield (Phénix)

から出る冷却材が炉内中性子しゃへい体の上方で下向きの流れとなり、そのため炉内中性子しゃへい体の内部を自然循環で通過した冷却材は、上昇を妨げられ半径方向へ流れることが判明した。この様な流動状況では除熱が不十分と考えられた。

次に解析を行なったところ、しゃへい体出口温度は 600℃以下、同入口温度は 400℃以下であることが確認され、自然循環のみで除熱が可能であると判断された。

なお、Phénixにおいては炉内中性子しゃへい体の領域に使用済み燃料集合体が貯蔵されるIVST（炉内貯蔵方式）が採用されている。

また固定中性子しゃへい体は、隙間をあけて配列された棒状のしゃへい体より構成されるため、冷却材は固定中性子しゃへい体の領域を、長手方向および半径方向に流動することが可能である。

(3) 流力振動特性

① 主容器、中間容器および主容器バッファの流力振動に関する検討

(i) Phénixの場合の検討¹⁾

主容器、中間容器および主容器バッファなどの流力振動の原因としては、

- (a) ナトリウム中部材の後流（waka）に発生する渦などによる起振が容器やバッファの固有振動数の一つと一致することによる共振

- (b) 局所的流動不安定 (local instability) による起振
 - (c) 非定常流 (unstationary flow) による起振
- などが考えられる。

これらの流力振動による問題としては、疲労によりナトリウム中の溶接部にクラックが入る可能性などが考えられている。

Phénix の設計段階においては流力振動に対する検討のため、以下の試験が実施された：

- (a) 主容器バッファに関しては、流力剛性を模擬した 1/4 縮尺模型 (SOGREAH) により、振動数が直接測定された。
- (b) 主容器および中間容器に関しては、縮尺模型によりメカニカル・インピーダンスを決定する方法により、間接的に振動特性が求められた。

上記試験に基づく改良点としては、中間容器の固有振動数を上げるため、中間容器上部に“補強リング”を設けることになった。

- ② ルーフスラブからナトリウム中に吊下げられた部材の流力振動に関する検討
 - (i) Phénix の場合の検討¹⁾

燃料交換機 (FHM)、USV、液面計、中性子検出器、FFDL サンプリング管、熱電対ウェルなどナトリウム中で軸方向または軸直角方向の流れを受ける部材が検討対象となった。

これらの部材が流力振動を起こす原因としては；

- (a) 部材の後流に生ずるカルマン渦* (Karman vortex) により起振される。
 - (b) 流れ自体の非定常性により起振される。
- などが考えられる。

振動による障害としては；

- (c) 強度部材の疲労損傷
- (d) 取付け精度の低下 (FHM の位置決め精度など)
- (e) 測定精度の低下 (USV、液面計など)

などが考えられる。

FHM に関しては、流力剛性を模擬した 1/4 模型により試験が行なわれ、FHM の

*) カルマン渦：流れに垂直に置かれた円柱の後流に発生する千鳥形に配列した 2 列の渦列。渦が交互に円柱から離れる毎に円柱は流体から交互に力を受ける。風が強い時の送電線のうなりなどもカルマン渦による現象である。



アームに発生する応力と取付フランジ面におけるモーメントが計算された。また炉内におけるFHM設置位置とFHMフランジへの応力との関係がパラメータ・サーベイされた。以上によりFHMの固有振動数が共振を避ける様設定された。

(ii) PFRのCRD案内管についての検討²⁾

PFRのCRD案内管(図2.1.4)は回転プラグより吊下げられ直径約9 in, プラグ下面からの長さ約16 ftである。

縮尺模型および実寸大モックアップによる水流動試験の結果, 炉心から流出するナトリウムの流動が案内管の固有振動数5 Hzと共振し, 案内管下端における振幅は定格流量時で1 in程度となることが判明した。そこで案内管に対し, 炉心上5 ftのレベルにグリッドを設置した。案内管はグリッドに接触はしないで, 微小な隙間のあるベアリングに挿入されており, 案内管の引抜きおよび運転中の熱膨張の逃げが可能となっている。この対策により, 案内管の固有振動数は30 Hz以上となり問題のないことが確認された。なお, 安全審査の際には, 模擬燃料を装荷した炉内で実機の案内管の振動がチェックされるという。

③ タンク型炉におけるポンプ吐出配管の流力振動に関する検討¹⁾

本部材についても流力振動が心配されるため, Phénixの場合EdFの試験室で流力剛性を模擬した実寸大モデルによる試験が実施された。(本文献発表時点の1970年には試験中で結果は出ていない。)

④ IHX伝熱管の流力振動に関する検討

(i) Phénixの場合の検討¹⁾

PhénixのIHX(図2.1.2)では1次ナトリウムの流動によるカルマン渦列の振動数と伝熱管の固有振動数が一致することによる共振が問題となった。この原因は, PhénixのIHXでは1次ナトリウムが胴側を流れるため, IHXの入口部および出口部において1次ナトリウムが伝熱管の外側を直角方向に流れるためである。

実験および解析の結果, 当初4個だった伝熱管サポートを6個にすることで解決できた。

(ii) PFRの場合の検討²⁾

PFRのIHXはPhénixのそれとは異なり, 2次系ナトリウムが胴側を流れ, またクロスフロー型である(図2.1.5)。このIHXでは, 2次側ナトリウムの下降管出口部分(Tube bank, ここから2次ナトリウムが胴側に入る)における流動不安定により振動が発生した。

対策としては, 模型試験による流速分布の測定, および伝熱管のグリッドスペーシングをパラメータとした固有振動数の解析などが行なわれた。そして最終的確認

のためフルスケール・セクタモデルを用いた80℃温水試験により、流力振動がチェックされた。以上により IHX の振動は許容値以下に低減できた。

(4) 今後の課題

前述のごとく、海外ではタンク型炉の炉内流動に関しては原型炉クラスの開発段階で盛んに実施され、実証炉の開発段階ではスケールアップの効果を確認するだけで済ませている傾向が伺える。我国ではループ型炉に関してはもんじゅのスケールアップであるため特に問題はないと考えられるが、DRACS を備えた場合の炉内流動はタンク型炉のそれと類似するため、計算コードあるいはモックアップ試験などが必要と考えられる。またタンク型炉に関しては我国では原型炉クラスの経験がないため、炉内流動に関する R & D はループ型炉の場合よりも若干多くなると考えられる。またタンク型炉の炉内流動は個々の炉に固有で一段性に乏しい傾向があるため、計算コードの開発が特に望まれる。

2.1.2 コンパクト化および経済性を旨とした構成についての考察

本章では各種新概念を含め、原子炉構造のコンパクト化および経済性をいかに達成するかについての主な手段を示す。

(1) 原子炉構造の直径を低減する手段

① 炉心上部機構（UCS）の直径低減

回転プラグに取付けられる UCS は燃料交換時には回転プラグの回転とともに炉内を移動するため、UCS の回転半径は原子炉構造基本寸法を定める一因となっている。UCS の直径を低減する手段として主なものを以下に示す。

(i) ブランケット燃料集合体出口温度計装の削除

集合体出口計装は集合体個々の状態を常時監視するものであり、本案を採用するにはブランケット領域の監視を行なわなくても炉心の安全上問題のないことを確認せねばならない。

実証炉第2次概念設計(I)⁹⁾における検討では、ブランケット燃料集合体入口が閉塞（流量低下率99%）した場合、ナトリウムの沸騰は生ずるがドライアウトには至らず、事象の進展がきわめてゆるやかであり、万一異常が生じても FFD で対応可能（例えばカバーガスモニタ系ならば1ピン・スローリークの検出能力有り）との考えで出口温度計装は削除可能との見通しを得ている。

(ii) キー結合方式炉心上部機構

炉心上部機構下端と炉心支持機構上端部とをキー等で結合させる結合方式は、制御棒挿入性の確保が容易であり、本体胴部薄肉化によりその適性が低減できるなど

の特徴を持つが、この方式では回転プラグの回転に伴う炉心上部機構の最大回転半径を増大させ炉容器径を大きくすること、またキー構造の寿命期間中信頼性および構造自体の物量増加によるデメリットも大きい。一方、非結合方式においては、結合方式に比較して本体部に高剛性が要求されるが、実証炉第2次概念設計(I)における検討では耐震結果、原子炉構造の基本寸法に低触することなく、実現性のある構造で、かつ制御棒挿入性の確保が十分に行なえる見通しが得られたので、炉容器径を小さくできる非結合方式が選定された。

② 回転プラグ・燃料交換機システムの直径（大回転プラグの直径）低減手段

(i) 燃取アクセス領域の縮小

燃料取扱系は通常はすべての炉心構成要素を交換可能な設計となっているが、可動しゃへい体など交換頻度の低い炉心構成要素の取扱いを免除すれば燃取アクセス領域が縮小され、大回転プラグの直径を低減できる。この場合、通常を取扱いを除外された炉心構成要素の交換方法としては、

(a) 燃料交換機構以外の特別の交換装置による方法

(b) 燃料交換機構のグリッパに特別なアタッチメントを取付ける方法

などが考えられる。

実証炉第2次概念設計(I) (57年度)⁹⁾における検討では、可動しゃへい体3層のうち最内層以外は寿命期間中に交換不要であることが判明した。そこで引続き58年度設計では、燃取系の通常アクセス領域を可動しゃへい体最内層までとしてその設計を行ない、かつ万一の場合に残りの可動しゃへい体を交換可能な特別装置の設計を行なう予定である。

(ii) 炉心の偏心配置（大回転プラグ中心ないし炉容器中心に対して）

燃料取扱系のアクセス領域としては炉心構成要素のほか、その外側の燃料受渡しラックの位置までをカバーできねばならない。そのためアクセス領域の中心（大回転プラグ中心）は炉心の中心に対して燃料受渡しラック側に偏心していることが大回転プラグ直径を最小にする観点からは合理的である。そのためには炉心中心を大回転プラグ中心に対して偏心させればよい。ただし本案が大回転プラグの直径低減に有効か否かについては、炉心上部機構の直径および燃料受渡しラックの位置などからの制約条件がある。

実証炉設計（58年度）における検討では、炉心上部機構の直径からの制約条件により、炉心中心と大回転プラグ中心とを偏心させた場合とさせない場合とで、大回転プラグ外径が同じとなる結果が得られている。

なお炉心中心と大回転プラグ中心とを偏心させる場合においては、大回転プラグ

中心は炉容器中心と一致させ、炉容器に対して炉心が偏心する位置関係が一般的である。ただし、この様に炉心と炉容器とが偏心する位置関係においては、炉内流動の非対称を生ずる可能性があり注意を要する。

海外炉における実施例としてはSuper Phenix (図 2.1.25 参照) および BN-600 (図 2.1.27 参照) などがある。いずれも大回転プラグ中心は炉容器中心と一致し、炉心のみが炉容器に対して偏心している。Super Phenix の場合には炉心と内部容器との環状空間に偏心配置に起因する対流が生じることにより炉心支持構造がホットプレナムからのナトリウムで加熱される恐れがあるため、対流防止装置 (Anti-convection device) が設けられている¹⁰⁾ (図 2.1.26 参照)。

(iii) 非対称な炉心構成

BN-600 では炉心燃料集合体領域を燃取アクセス領域全体に対して偏心配置させている (図 2.1.27)。

(iv) “星型” UCS

Westing house 社によるアイデアで切欠き UCS の一種である (図 2.1.28 参照)。詳細は不明だが、1000 MWe クラスの FBR に本案を適用した場合、大回転プラグ直径は 19feet 6 in (約 5.95 m ϕ) となるという。

(v) FHM の格納管削除

FHM の格納管は、FHM 本体の炉内における耐震支持などの機能をもつが、FHM

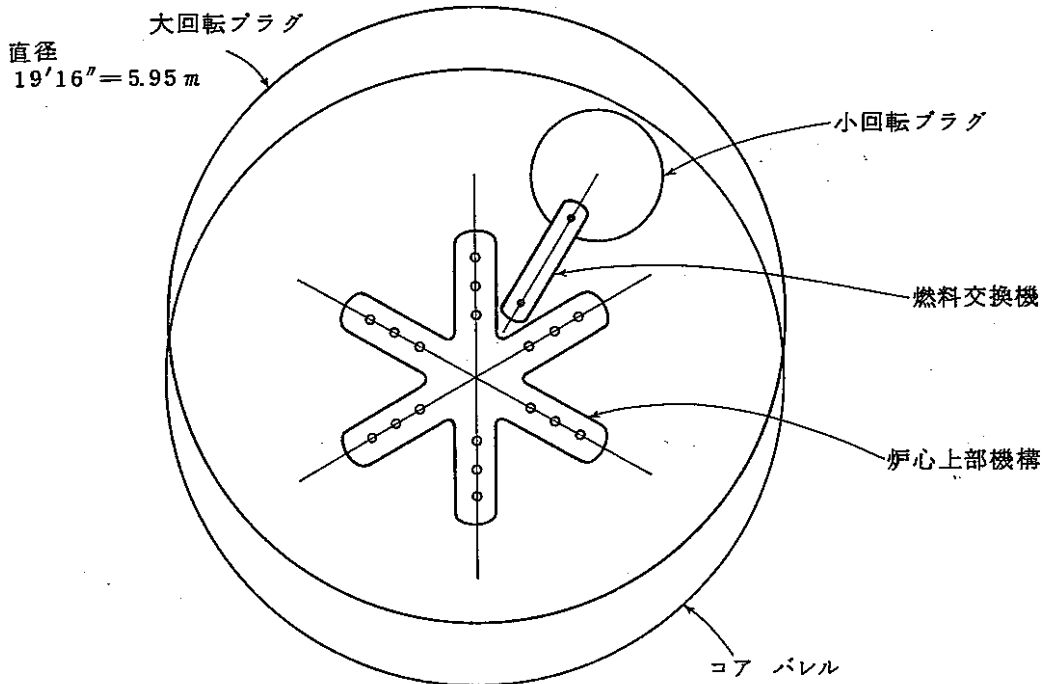


図 2.1.28 UCS

とUCSを接近させることにより大回転プラグ直径を低減させる観点より、これを削除するアイデアである。具体的には耐震支持機能などをFHM自体に持たせる方法およびUCSにもたせる方法(図2.1.29参照)などが考えられる。

③ タンク型炉における冷却系機器スペース縮小手段

タンク型炉において主容器直径を低減する手段の一つとして、1次主循環ポンプおよび中間熱交換器(IHX)の占めるスペースを低減する方法について、その主なものを以下に示す。

(i) ポンプの直径低減

タンク型炉においてポンプの占める径方向のスペースを低減するためには、インペラ直径のみならず、吸込みおよび吐出流路も含めた総合的な直径低減を達成する必要がある。

Super Phenix用のポンプ型式の選定経緯によると、単段両吸込み型および2段吸込み型は単段片吸込み型に比べインペラ自体の直径は低減するものの、吸込み流路などが複雑化し、総合的なポンプケーシングの直径は単段片吸込み型よりも大型化するため、単段片吸込み型を採用したとのことである(図2.1.30参照)¹¹⁾。

なおインデューサの採用はインペラ直径を低減するために効果的であり、単段片吸込み型ポンプを更にコンパクト化するために、その開発が期待される。

(ii) IHXの占めるスペースの低減

IHXを設置する主容器内の環状スペースを有効に利用するためにIHXを円筒状以外の形状(断面形状が扇形または四角形など)とするアイデアである。本案の採用にあたっては偏流による伝熱管の座屈などの問題がないか否かを確認する必要がある。

(iii) ポンプおよびIHXの最適基数の選定

Super Phenixの場合、主容器直径21mφ、大回転プラグ直径約12mφであり、ポンプ4基、IHX8基の構成であった。大回転プラグ直径がこの程度の大きさでは、もしIHXを4基の構成とするとIHXの胴の直径が大きくなるため主容器直径は更に大きくしなければならない。

これに対して大回転プラグ直径が9mφ程度となった場合には状況が異なることが考えられる(実証炉第2次概念設計(I)(57年度)⁹⁾の場合、大回転プラグ直径は9.15mφ)。この場合にはもはやポンプ4基およびIHX8基を設置するための円周長さが確保できなくなる可能性があり、IHXの胴直径が大きくなるのを覚悟のうえでその基数を減らす必要性も生ずることがあろう。

上述の如く、ポンプおよびIHXの最適基数については大回転プラグの直径に応じ

て論ずる必要がある。

(iv) ホットレグ・ポンプを採用したタンク型炉

ループ型炉においては1次主循環ポンプをホットレグに配置するかコールドレグに配置するかを選択が可能である。ホットレグ配置の設計は高温ナトリウム中で作動するポンプの信頼性に関する課題が残されているものの、ポンプ自体の小型化、IHXのクロスフロー型採用による小型化、1次系カバーガス圧の大幅低減などが可能となるメリットがある。しかしながら従来のタンク型炉は、その構造上1次主循環ポンプをホットレグに配置することは不可能な現状であった。

図 2.1.31 は1次主循環ポンプをホットレグに配置することを可能としたアイデアであり、従来のタンク型炉に比べ以下の特徴を有する：

- (a) ポンプの直径、軸長とも低減できる。
- (b) IHXにクロスフロー型が採用できるため IHX本体が小型化できる。またクロスフロー型の採用により IHX 1次側における偏流の恐れがなく、主容器壁を IHX 胴に接近させることが可能。
- (c) 隔壁が単純形状で小型化。
- (d) 従来のタンク型炉の様に炉心入口配管の上側に隔壁が存在することがないため、炉内配管のアクセス、メンテナンスが従来よりは若干有利。
- (e) 主容器にはコールドプレナムのナトリウムのみが接触し、炉壁断熱構造ないし炉壁冷却方式などが不用。
- (f) ポンプおよび IHX は従来のループ型炉用の型式が採用される。

本案の物量削減効果を表 2.1.1 に示す。

④ 更に合理化された原子炉構造の概念 —ドライタンク型炉—

ドライタンク型炉は従来のループ型、タンク型、ハイグリッド型とは異なり、炉容器と炉容器ガードベッセルとの隙間に1次主循環ポンプや中間熱交換器を配置することにより、ループ型炉並みの炉容器径およびタンク型炉並みの格納容器径を達成した

表 2.1.1 物量削減効果

	本 案 (推 定)	従来のタンク型炉 (Super Phenix)	従来のループ型炉 (実証炉第2次) (概念設計 (I))
主 容 器 直 径	18 mφ	21 mφ	12 mφ
1次系ナトリウム ・インベントリ	2,300 ton	3,500 ton	1,300 ton

ものである。

ドライタンク型炉の構成を図 2.1.32 (a)に示す。

原子炉容器は、しゃへいプラグで覆われ、ここから炉心上部機構などが吊下げられている。一方ガードベッセルと原子炉容器の隙間はルーフスラブで覆われ、ここから 1 次主循環ポンプおよび中間熱交換器などが吊下げられている。原子炉容器内には冷却材として液体金属が満され、その自由液面上はカバーガスで覆われている。ガードベッセルと原子炉容器の隙間には不活性ガスが封入されている。

冷却材の流れは同図中に矢印で示されている。すなわち炉心を出た冷却材はホットプレナムから出口配管を経て 1 次主循環ポンプに吸込まれる。更にクロスオーバ配管を経て中間熱交換器に入る。中間熱交換器内で 2 次系冷却材と熱交換された冷却材は、入口配管を経て原子炉容器内に入り、入口ノズルよりコールドプレナムに流入する。

出口配管および入口配管が原子炉容器を貫通する部分は各々ベローズによりシールされる。原子炉容器とガードベッセルの隙間には中子が設けられている。これは万一原子炉容器、1 次主循環ポンプおよび中間熱交換器などから冷却材が漏洩した場合に、これをガードベッセルにより保持した状態で炉心の除熱が可能な炉内液位を確保するためである。

ドライタンク型炉の特徴を以下に示す：

- (i) 原子炉容器直径がループ型炉のそれと同等にコンパクトであり、タンク型炉のそれよりも著しく小さい。また 1 次系冷却材インベントリも、ループ型炉の場合よりも更に小さい。
- (ii) ガードベッセル直径がタンク型炉のそれと同等にコンパクトで、この領域内にタンク型炉と同様に主冷却系機器が配置される。従って格納容器直径はタンク型炉の場合と同等にコンパクトである。
- (iii) タンク型炉の場合における隔壁の様な構造物が不要で、炉内構造はループ型炉の場合と同等に簡素である。
- (iv) ポンプおよび IHX などはループ型炉用とほぼ同じものが採用できる。ただしノズル位置などはドライタンクに適した構成とする。またナトリウムのドレンは上方から吸上げる方式とする。

図 2.1.32 (2)～(9)は 1 次冷却系の機器配置に関する変形例を示したものである。図中の記号は以下の通りである。

P ……… 1 次主循環ポンプ
 IHX …… 中間熱交換器
 SG ……… 蒸気発生器

なお図(2)は対比のため図(1)と同じ構成を示したものである。

図(3)は原子炉容器とガードベッセルの隙間に1次主循環ポンプと蒸気発生器を設置したもので、2次冷却系を削除した構成である。

図(4)は上記隙間に1次主循環ポンプのみ設置し、中間熱交換器は従来のループ型炉と同様に炉容器ピット室の外部に設置した構成である。

図(5)は上記隙間に1次主循環ポンプのみ設置し、2次冷却系は削除し、蒸気発生器を炉容器ピット室の外部に設置した構成である。本構成では水系を炉容器ピット室内に引廻さないため、2次冷却系を削除した構成のなかでは最も実現が容易である。

図(6)は上記隙間に中間熱交換器のみを設置し、1次主循環ポンプは炉容器ピット室の外部に設置した構成である。本構成においては稼働率向上、およびガードベッセル直径縮小の観点より、中間熱交換器は比較的小容量でケーシング直径の小さいものを各ループ毎に多数基設けることが好ましい。これにより、万一ある中間熱交換器が故障した場合には、それだけを隔離することにより、原子炉の出力を余り下げないで次の定期点検期間まで運転を続行することが可能である。

図(7)は上記隙間に蒸気発生器のみを設置し、1次主循環ポンプは炉容器ピット室の外部に設置した構成である。

図(8)は上記隙間に1次主循環ポンプと中間熱交換器の合体ユニットを設置した構成である。

図(9)は上記隙間に1次主循環ポンプと蒸気発生器の合体ユニットを設置した構成である。

表 2.1.2 にドライタンク型炉の物量削減効果を示す。

表 2.1.2 ドライタンク型炉の物量削減効果

(○:優れている)
(×:劣っている)

	ドライタンク型炉 (推定)	従来のループ型炉 (一設計例)	従来のタンク型炉 (一設計例)
原子炉容器直径	○ 約 12 mφ	○ 約 12 mφ	× 約 21 mφ
ガードベッセル 直径	○ 約 22 mφ	× 原子炉容器用:約 13 mφ その他に1次主循環ポンプ用 および中間熱交換器用が必要	○ 約 22 mφ
格納容器直径	○ 約 25 mφ	× 約 50 mφ	○ 約 25 mφ
1次系冷却材 インベントリ	○ 約 1200 ton	○ 約 1300 ton	× 約 3500 ton

(2) 原子炉構造の高さを低減する手段

① 横プレナム方式

従来炉心の下部に位置していた高圧プレナムを炉心下方の側面にトラス状に配置する方式

動燃実証炉第2次概念設計(I) (57年度)においても採用された(図2.1.33参照)。

② 燃料集合体頂部を燃交時カバーガス中に出す方式

従来燃料集合体は燃料交換時においてもハンドリングヘッドがナトリウム液面下となる設計が一般的であったが、液面上に露出することを許容すれば炉容器の軸長を低減できる可能性がある。

動燃実証炉第2次概念設計(I) (57年度)における検討では上部軸ブランケットを露出させることは許容できるとの結果を得た。しかしながら本設計においてはシステムレベルからの制約条件により本方式を採用できなかった。

③ ナトリウム吸上式FHM格納管

燃料交換時にFHM格納管内にナトリウムを吸上げることにより、燃料集合体頂部を露出させることなく炉容器軸長を低減する方式である。本方式ではハウジングのカバーガス系配管破損時の安全対策などが必要である(図2.1.34)。

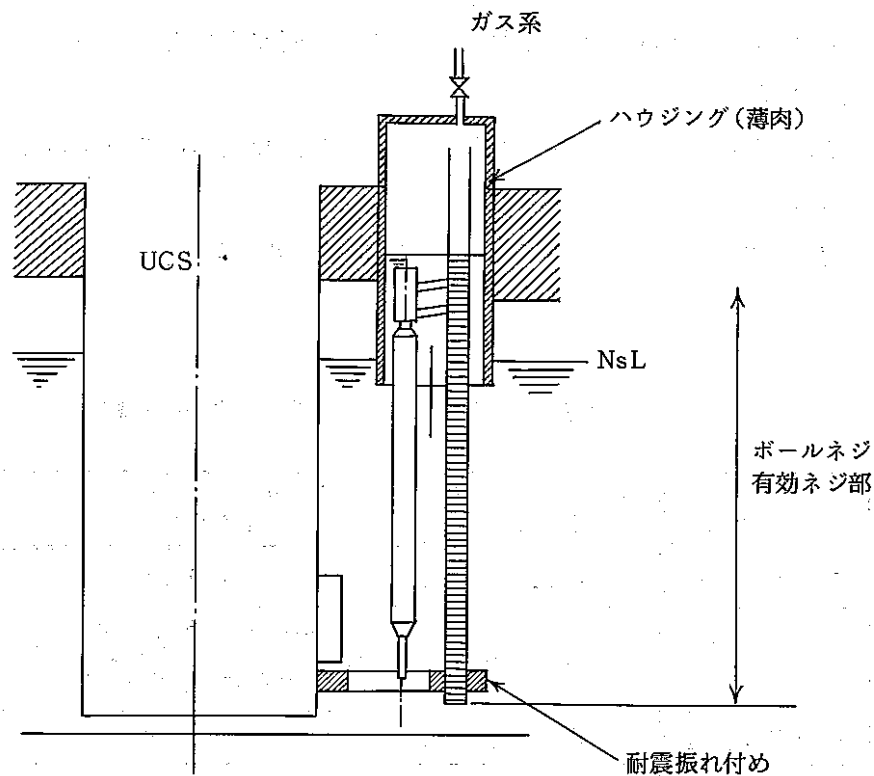


図2.1.34 ナトリウム吸上式FHM格納管

(3) 炉容器を薄くする手段

① 免震方式

原子炉構造を免震パッドにより支持する方式は耐震設計条件を緩和するうえで効果的であり、これにより炉容器を薄くできる可能性がある。

免震方式には原子炉建屋全体を免震パッドを介してベースマット上に支持する“建屋免震”と、特定の機器・構造物をその据付面に対して免震パッドを介して支持する“機器免震”とがある。建屋免震は、建物系の固有振動数を地震動の卓越振動数よりも十分低い側にずらすことにより建物の加速度応答を減らす方式である。機器免震は機器系の固有振動数を床応答スペクトルの卓越振動数よりも低い側にずらすことにより機器系の加速度応答を減らす方式である。

フランスにおいては、軽水炉プラントの建屋免震が実用化されている。また Super Phenix-II では炉容器ピット室全体を免震する方式が採用されている(図 2.1.35 参照)。なお原子炉容器が免震支持されている場合にはその固有振動数が炉内自由液面の固有振動数と接近することによるスロッシングについて注意を要する。

(4) 今後の課題

FBR の開発スケジュールが世界的にスローダウンしてきたことにも影響され、FBR の経済性向上の努力は一層活発になってきた。前述の経済性向上のための新概念はいずれも安全基準によってその採用の可否が左右されるものであり、安全基準の見直しが経済性向上にとって重要となる。

一方、これらの新概念は特許またはノウハウとして確立しておくことが、国際競争の観点より重要である。

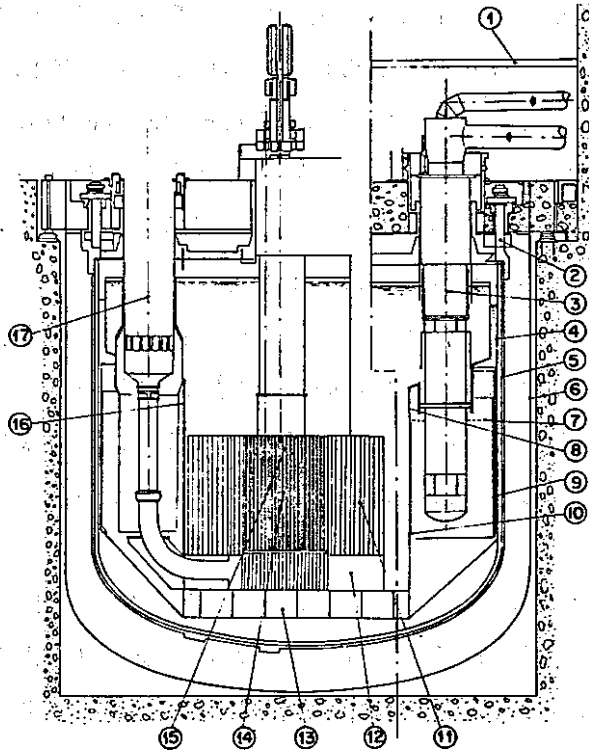
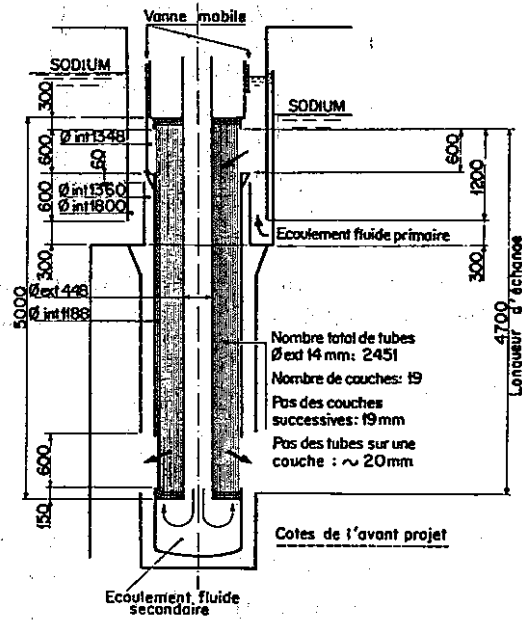


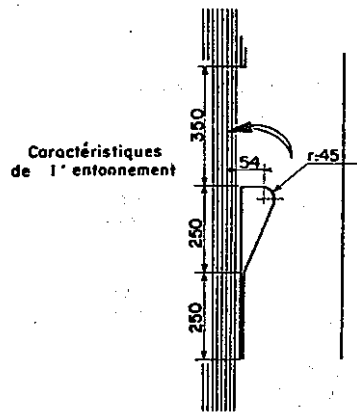
FIG. 1. Coupe schématique verticale du réacteur PHENIX.

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Plancher | 10 Cuve primaire |
| 2 Suspentes | 11 Protection neutronique latérale |
| 3 Echangeur intermédiaire | 12 Sommier |
| 4 Cuve principale | 13 Platelage |
| 5 Double enveloppe | 14 Cœur |
| 6 Cuve d'enceinte primaire | 15 Protection neutronique supérieure |
| 7 Grille | 16 Cuve primaire |
| 8 Baffles de cuve primaire | 17 Pompe. |
| 9 Baffles de cuve principale | |

☒ 2.1.1 Phénix reactor block

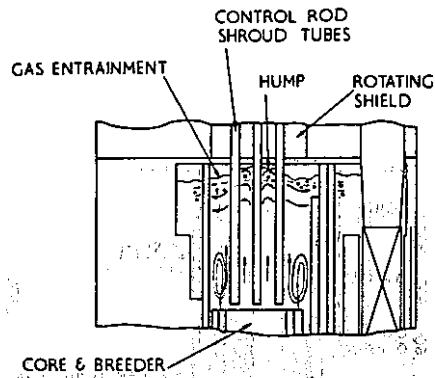


☒ 2.1.2 Phénix IHX

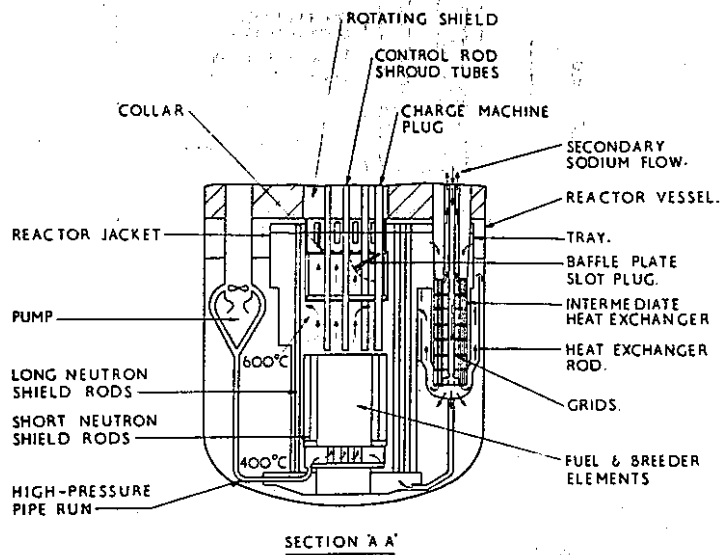


Ecoulement sur le seuil d'entrée.

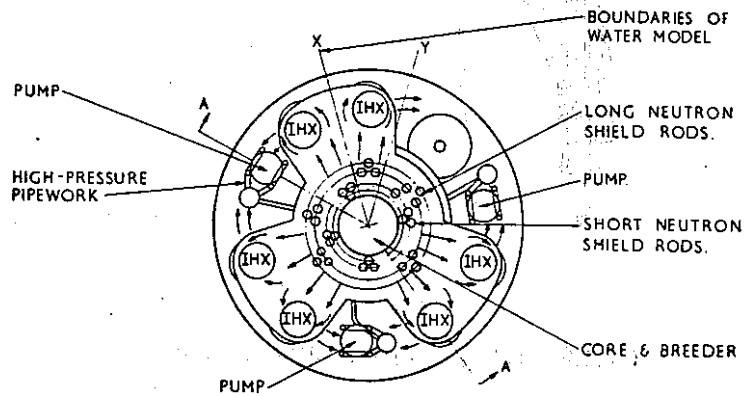
☒ 2.1.3 Intake port of Phénix IHX



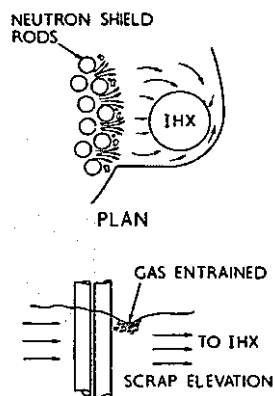
☒ 2.1.4 PFR Elow pattern and surface disturbance in the core outlet region with no baffle fitted.



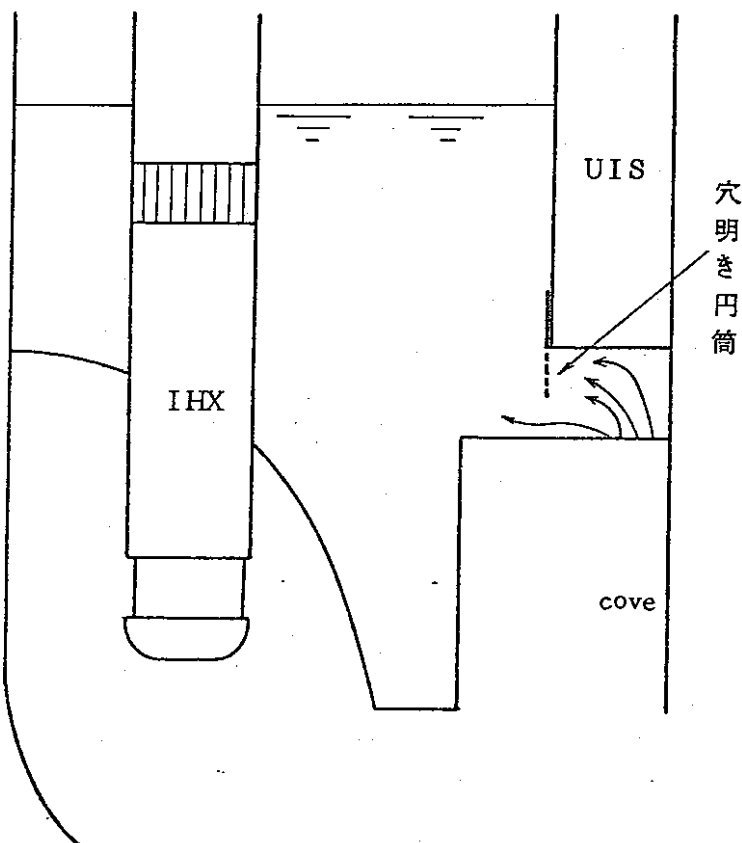
☒ 2.1.5 Elevation of PFR primary vessel.



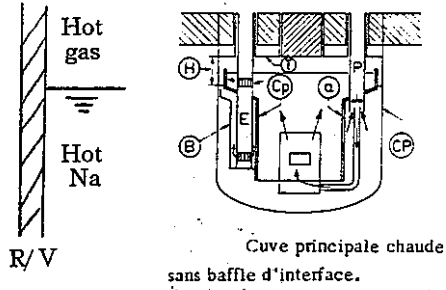
☒ 2.1.6 Plan view of PFR primary vessel.



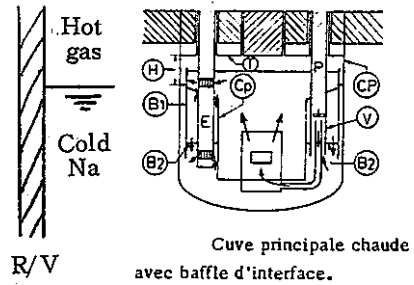
☒ 2.1.7 Gas entrainment at neutron-shield rod exits. (PFR)



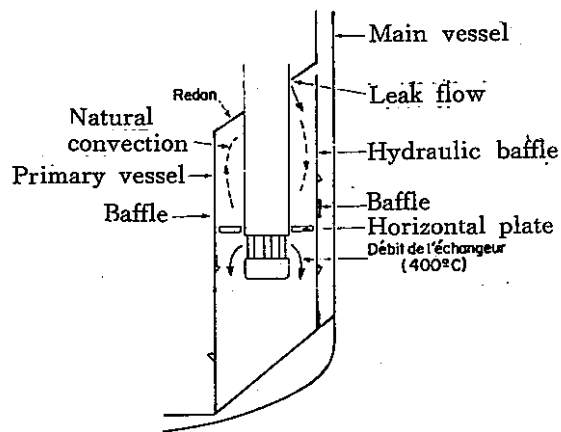
☒ 2.1.8 Novatome における Super Phenix-II の R & D



☒ 2.1.9 Inner vessel with thermal insulation



☒ 2.1.10 Inner vessel without thermal insulation



Coupe radiale dans le plan d'un échangeur.

☒ 2.1.11 Schematic of redan structure (Phénix)

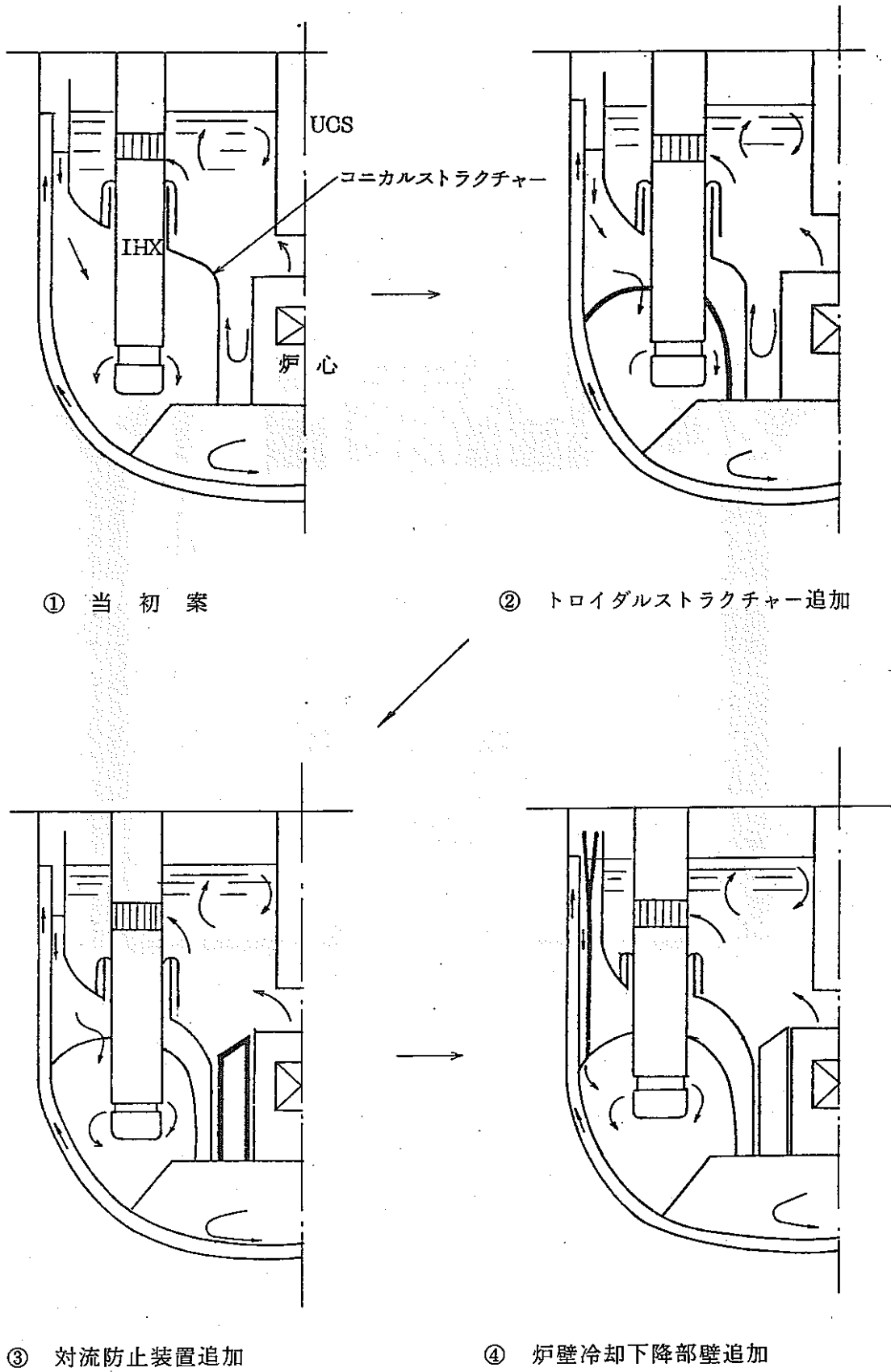
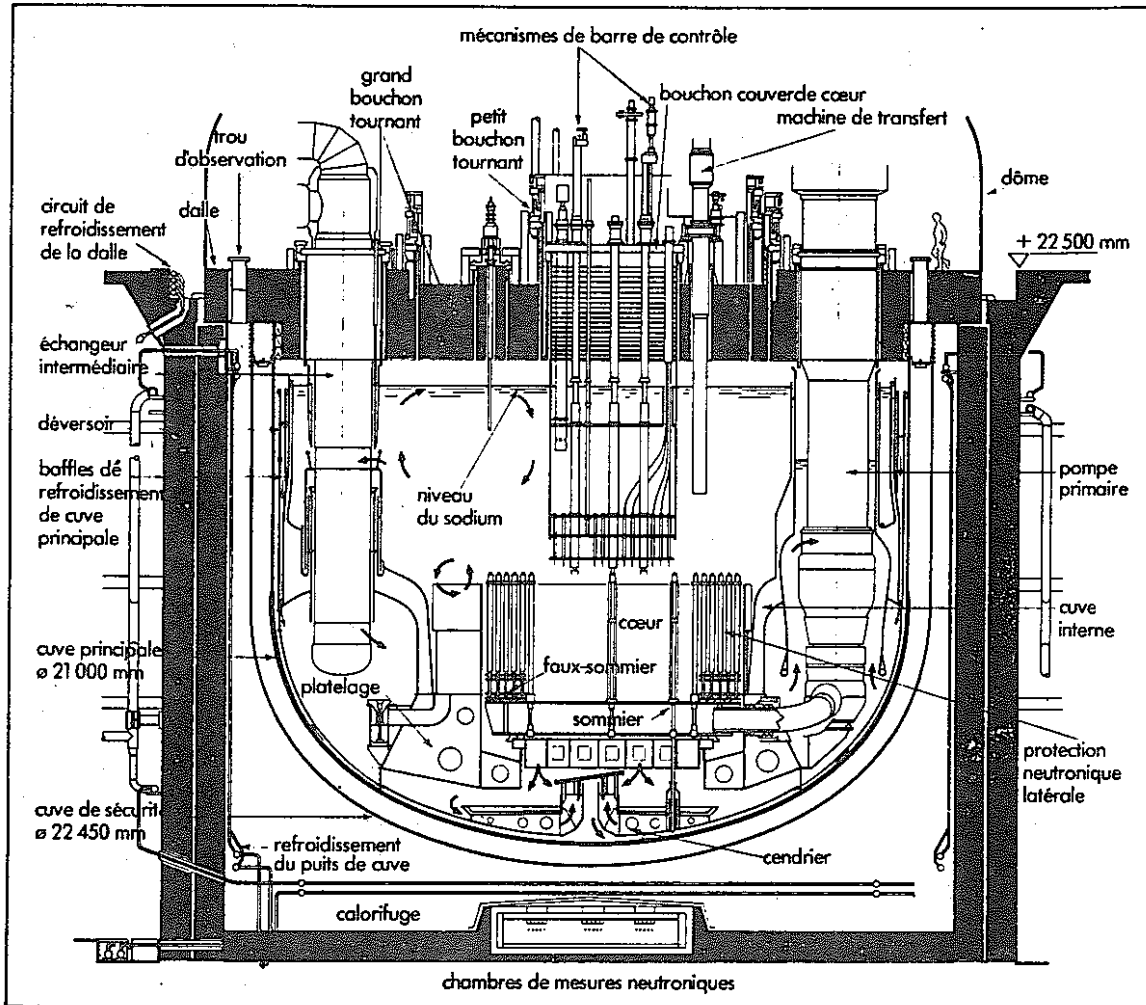


図 2.1.12 スーパーフェニックス隔壁構造の変遷



Bloc réacteur.

☒ 2.1.13 Super Phenix reactor block

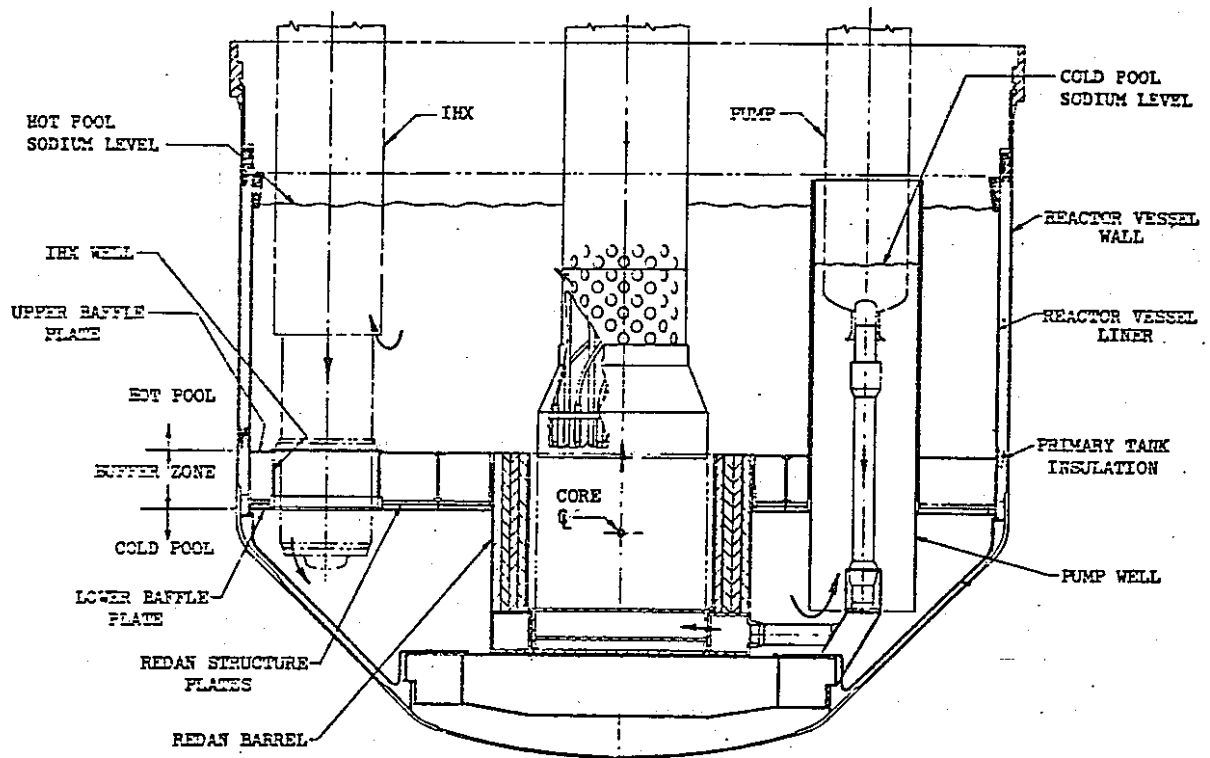
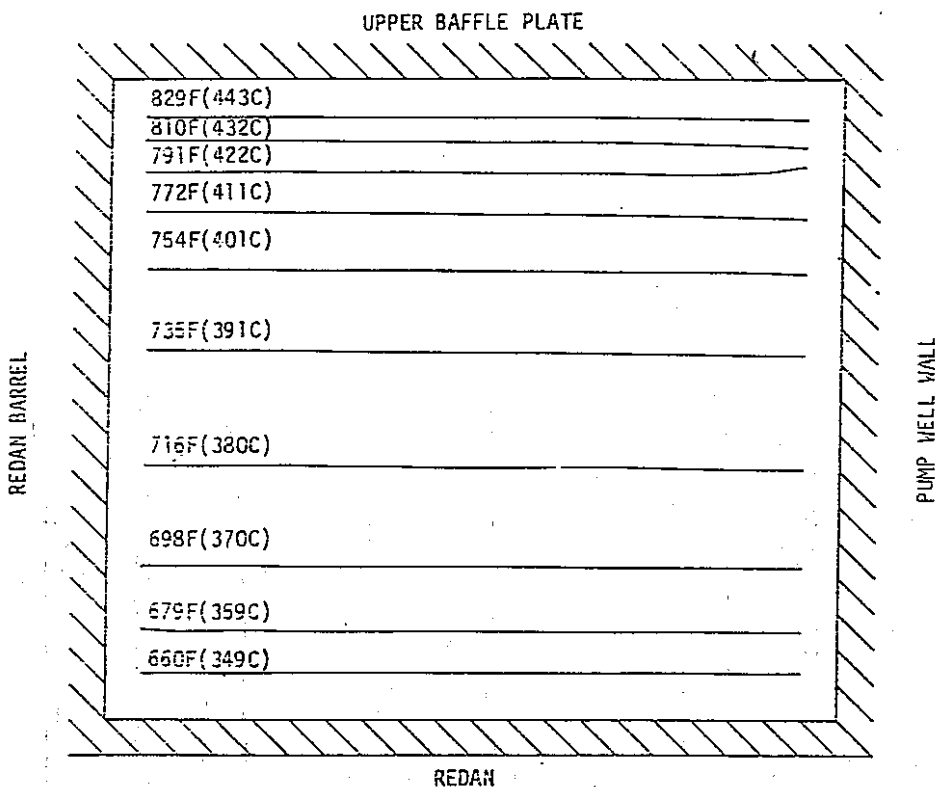
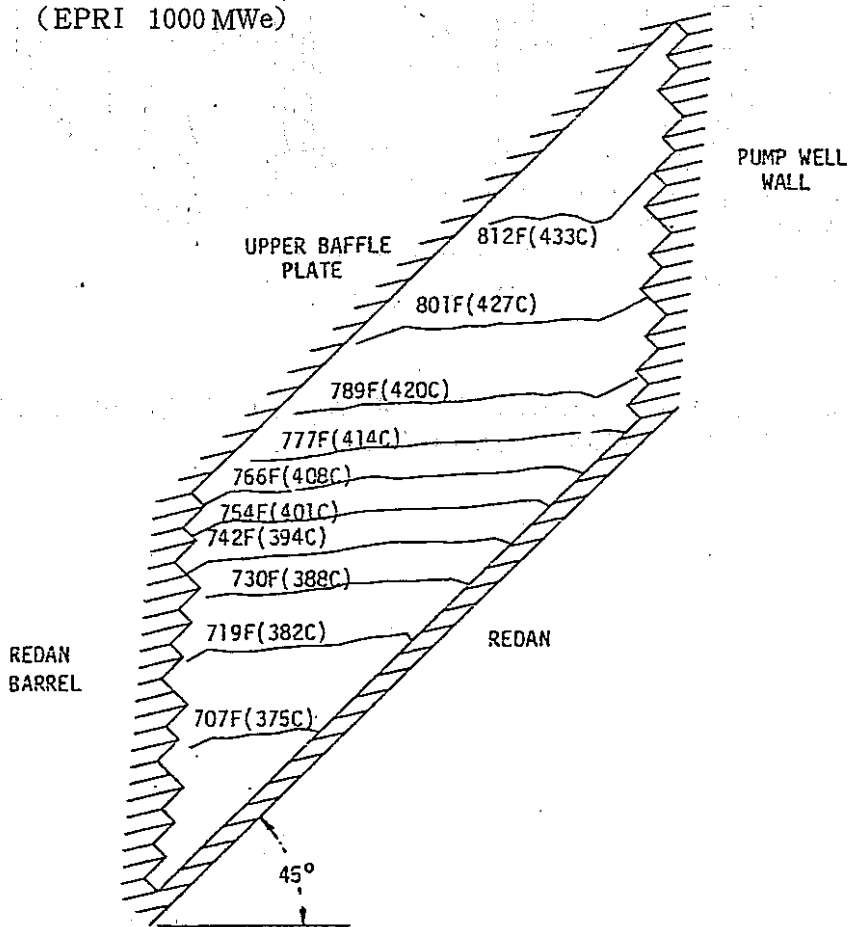


图 2.1.14 ELEVATION SCHEMATIC OF A POOL TYPE REACTOR VESSEL (EPRI 1,000 MWe)

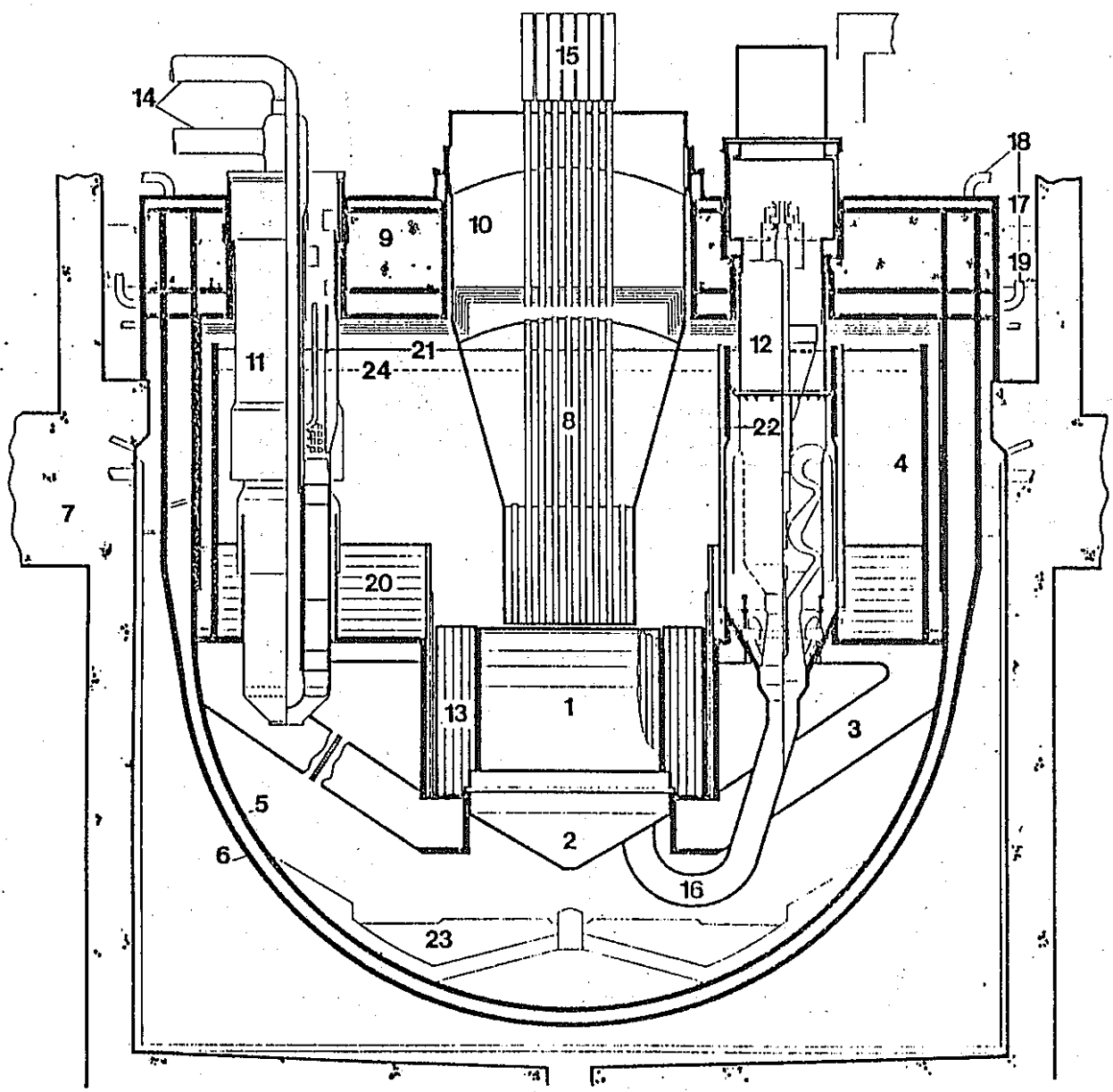


☒ 2.1.15 TEMPERATURE CONTOURS—CRITICAL CROSS SECTION (EPRI 1000 MWe)



☒ 2.1.16 TEMPERATURE CONTOURS—CONE SHAPED REDAN (EPRI 1000 MWe reference)

CDFR Reactor Arrangement



- 1 Core
- 2 Diagrid
- 3 Strongback
- 4 Inner Tank
- 5 Primary Vessel
- 6 Guard Vessel
- 7 Vault
- 8 Above Core Structure
- 9 Roof
- 10 Rotating Shield
- 11 IHX
- 12 Primary Pump
- 13 Outer Neutron Shield
- 14 Secondary Sodium Pipework
- 15 Control Rod Mechanisms
- 16 H.P. Piping
- 17 Roof Cooling
- 18 Gas Inlet
- 19 Gas Outlet
- 20 Intermediate Plenum
- 21 Dynamic Level 540°C
- 22 Dynamic Level 370°C
- 23 Debris Tray
- 24 Static Level 370°C

☒ 2.1.17 CDFR reactor arrangement

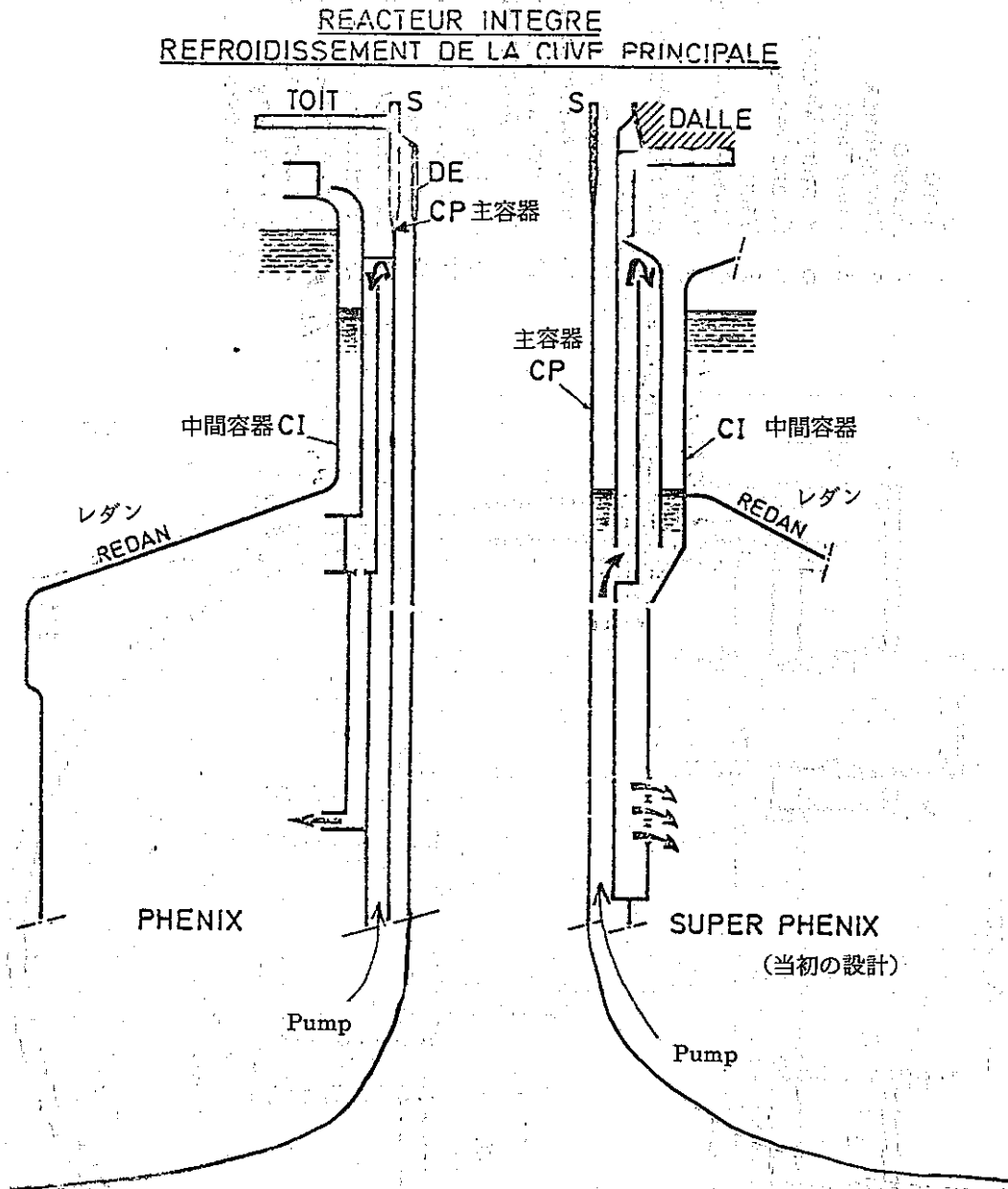


図 2.1.18 (1) Reactor vessel cooling of Phénix and Super Phenix

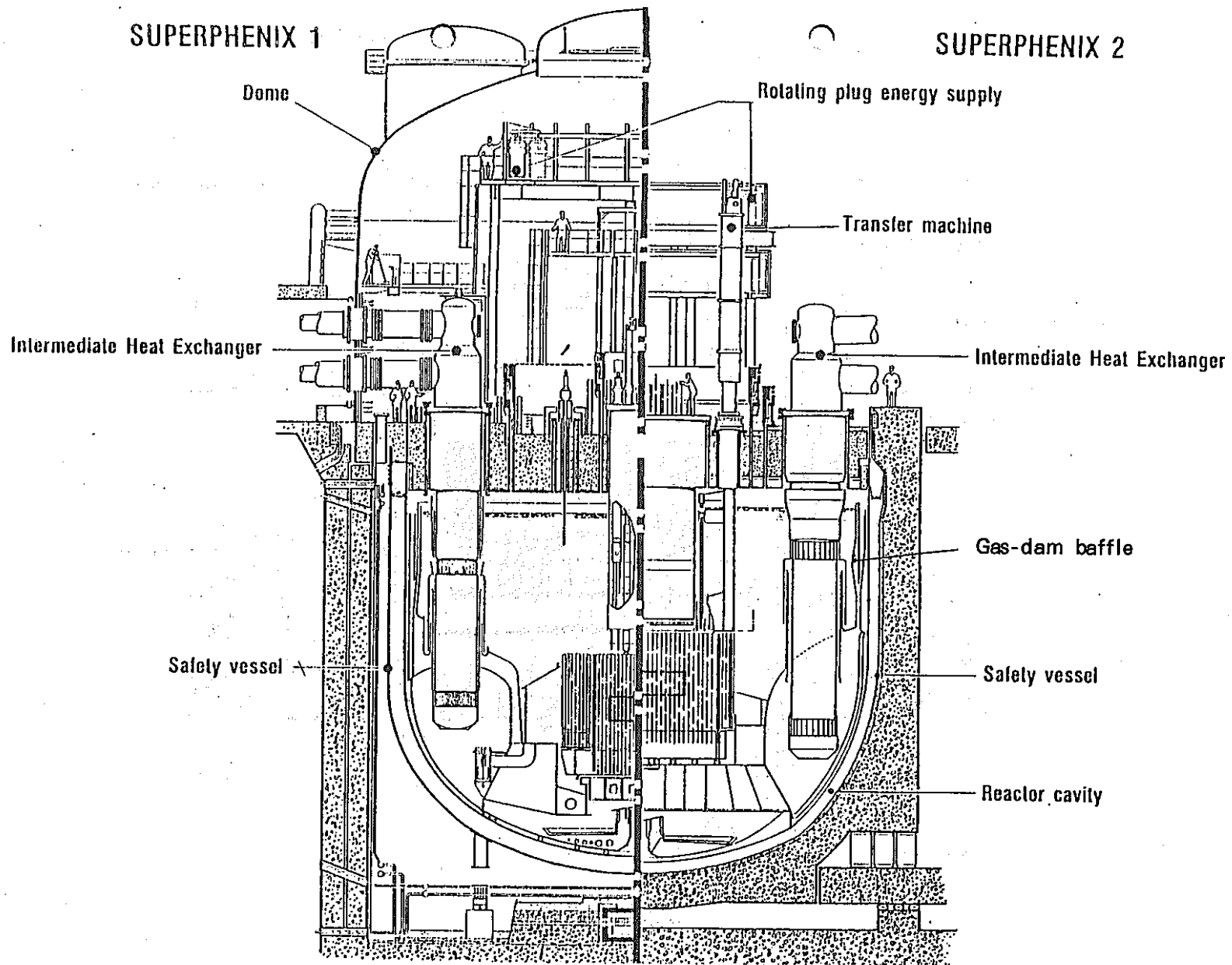
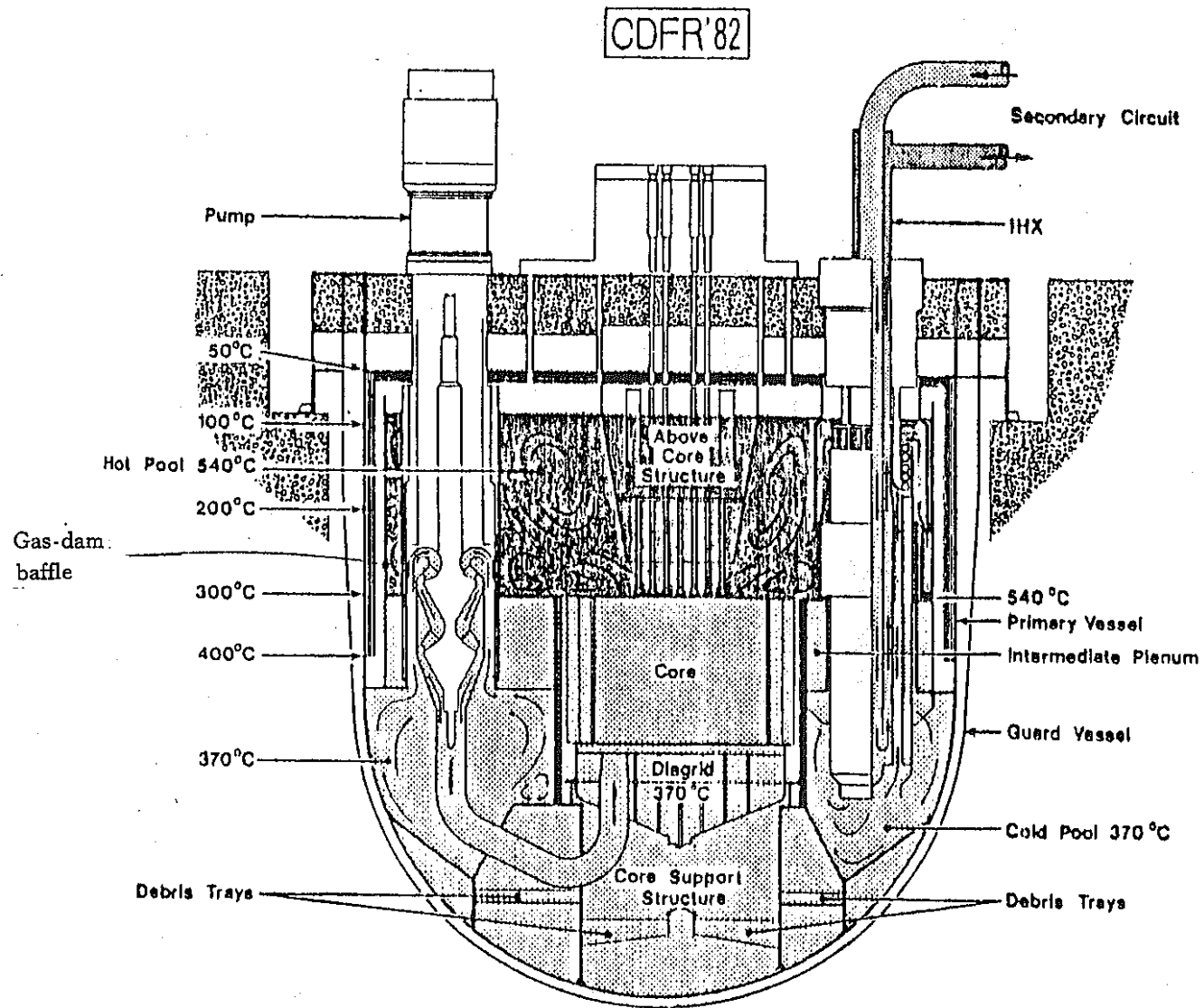


図 2.1.19 炉壁断熱方式 (ガスダム方式)



☒ 2.1.20 Temperature distribution of CDFR

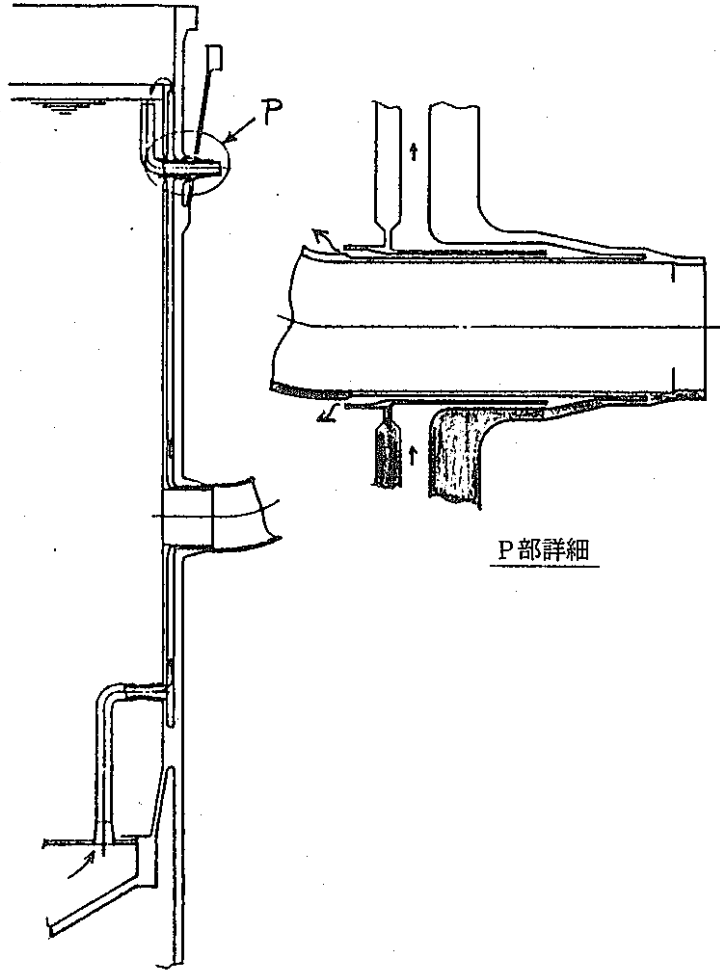


図 2.1.21 FFTF reactor vessel cooling

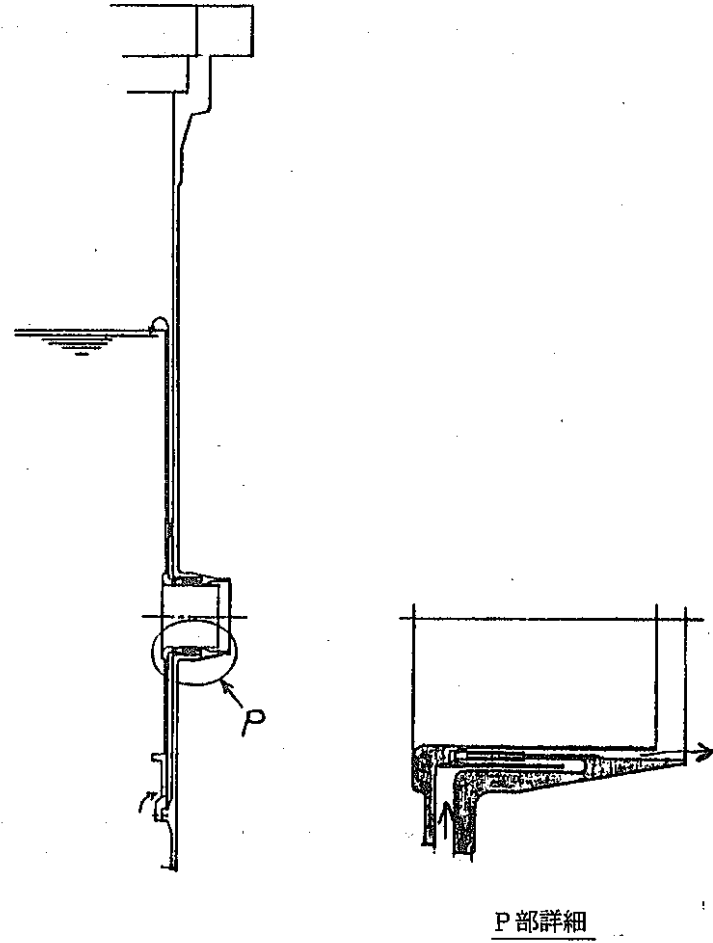


図 2.1.22 CRBRP reactor vessel cooling

8	炉内配管熱抵抗体
7	水平振れ止台
6	原子炉容器熱抵抗体
5	炉内配管
4	炉支 取付台
3	下部板
2	上部プレナム
1	上部フランジ

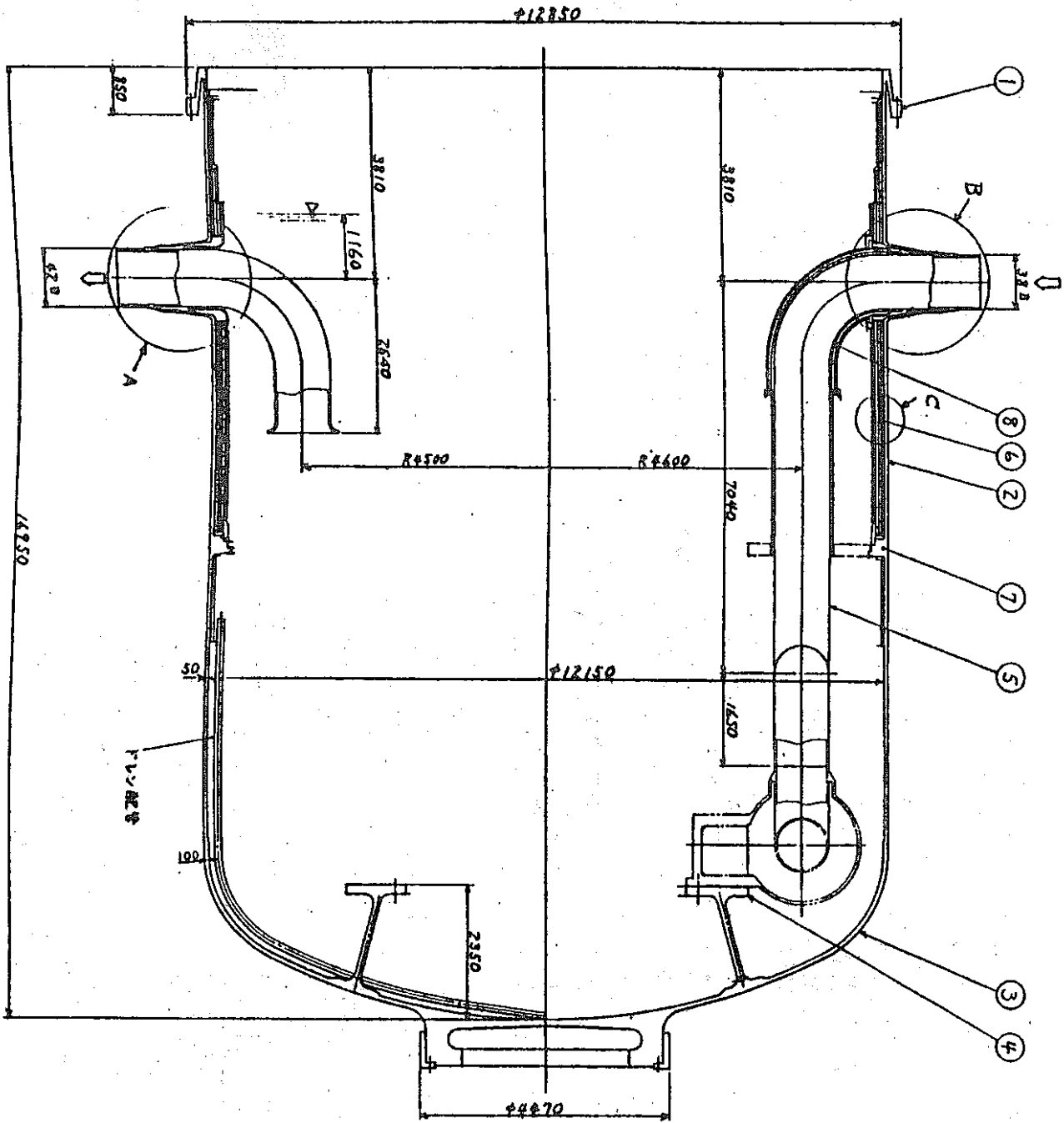
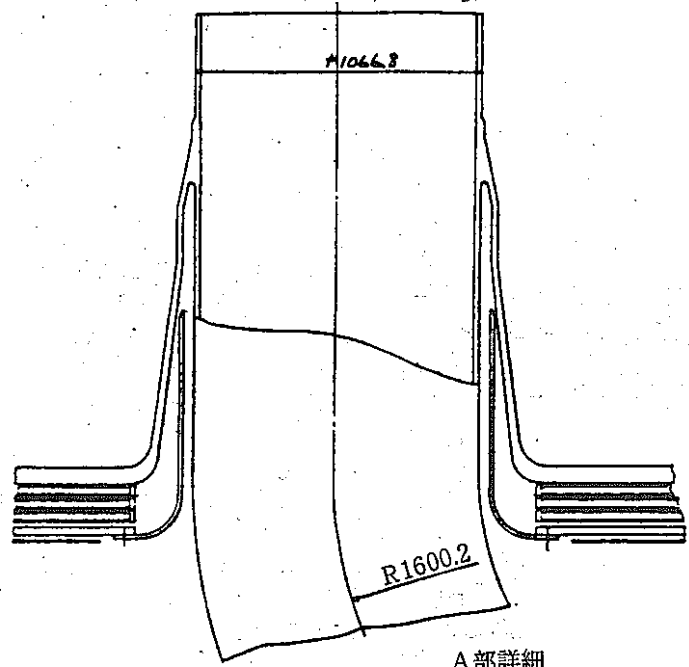
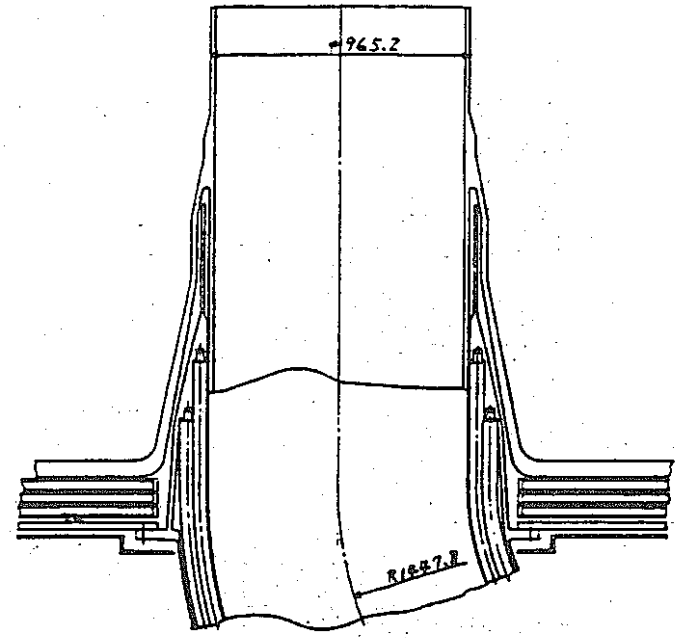


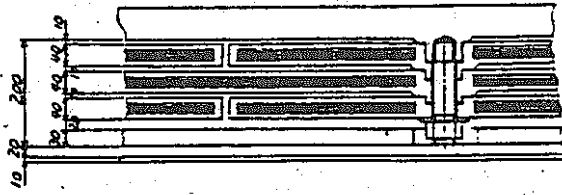
図 2.1.23 (1) 動燃実証炉第 2 次概念設計(I)
原子炉容器熱抵抗体方式 (本案)



A部詳細
(出口ノズル)



B部詳細
(入口ノズル)



C部詳細

図 2.1.23 (2)

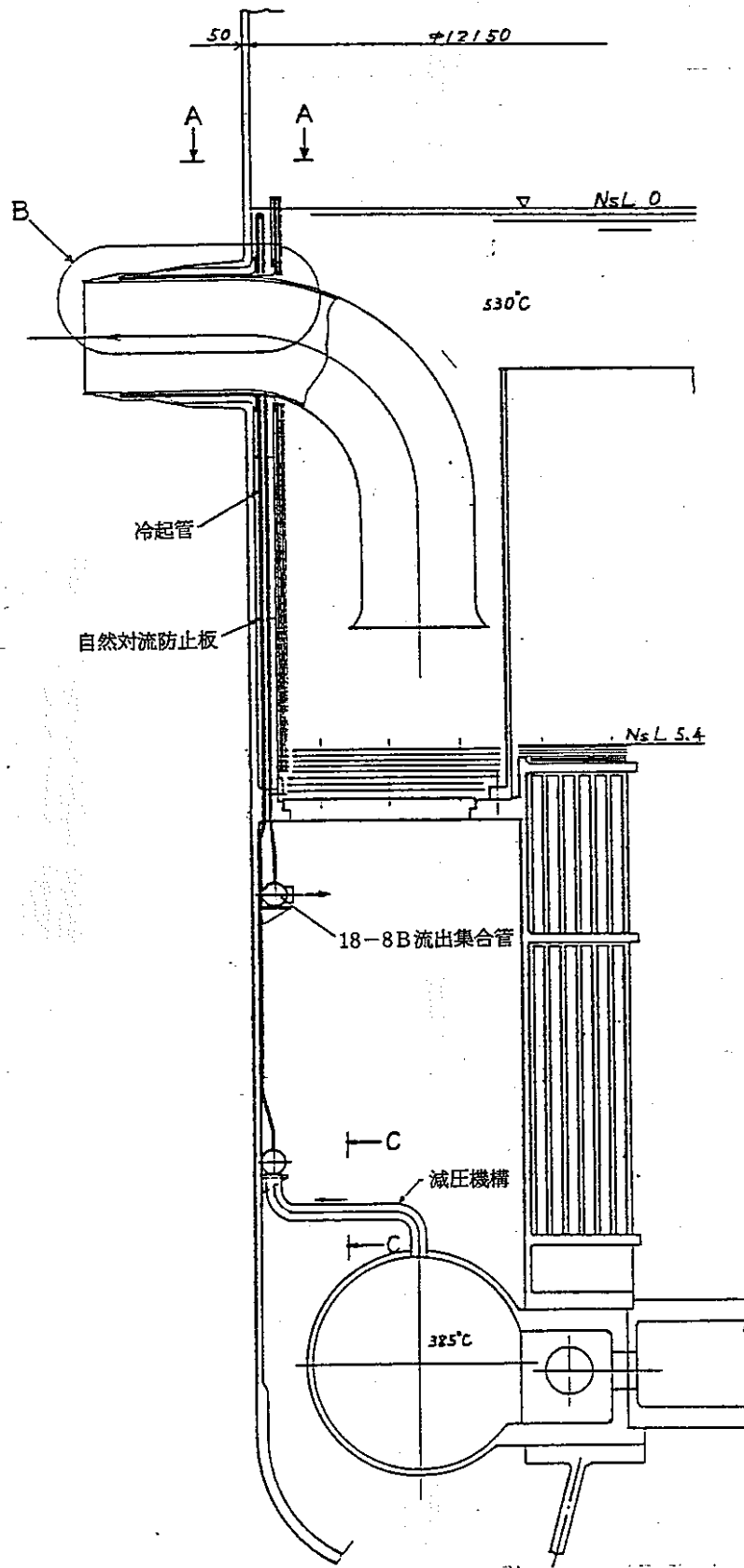
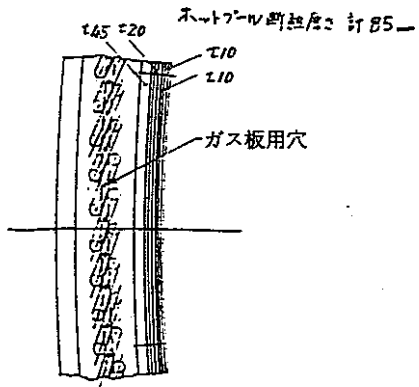
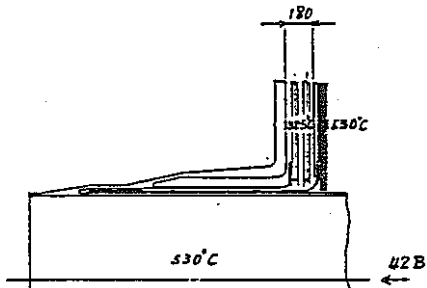


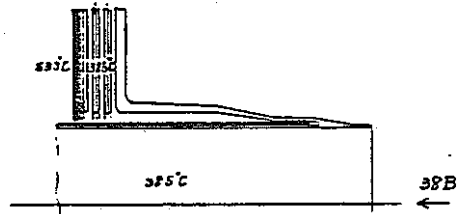
図 2.1.24 (1) 動燃実証炉第 2 次概念設計(I)
炉壁冷却方式 (代案)



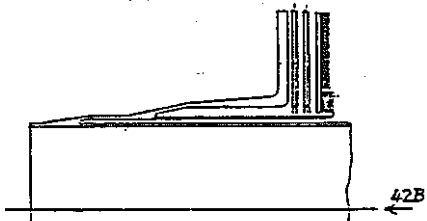
断面AA
(1/10 SCALE)



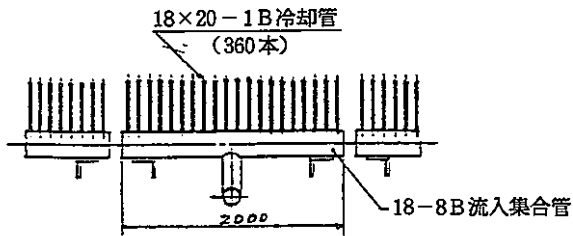
B部詳細(1)案
出口ノズル部
(1/20 SCALE)



入口ノズル部詳細
(1/20 SCALE)

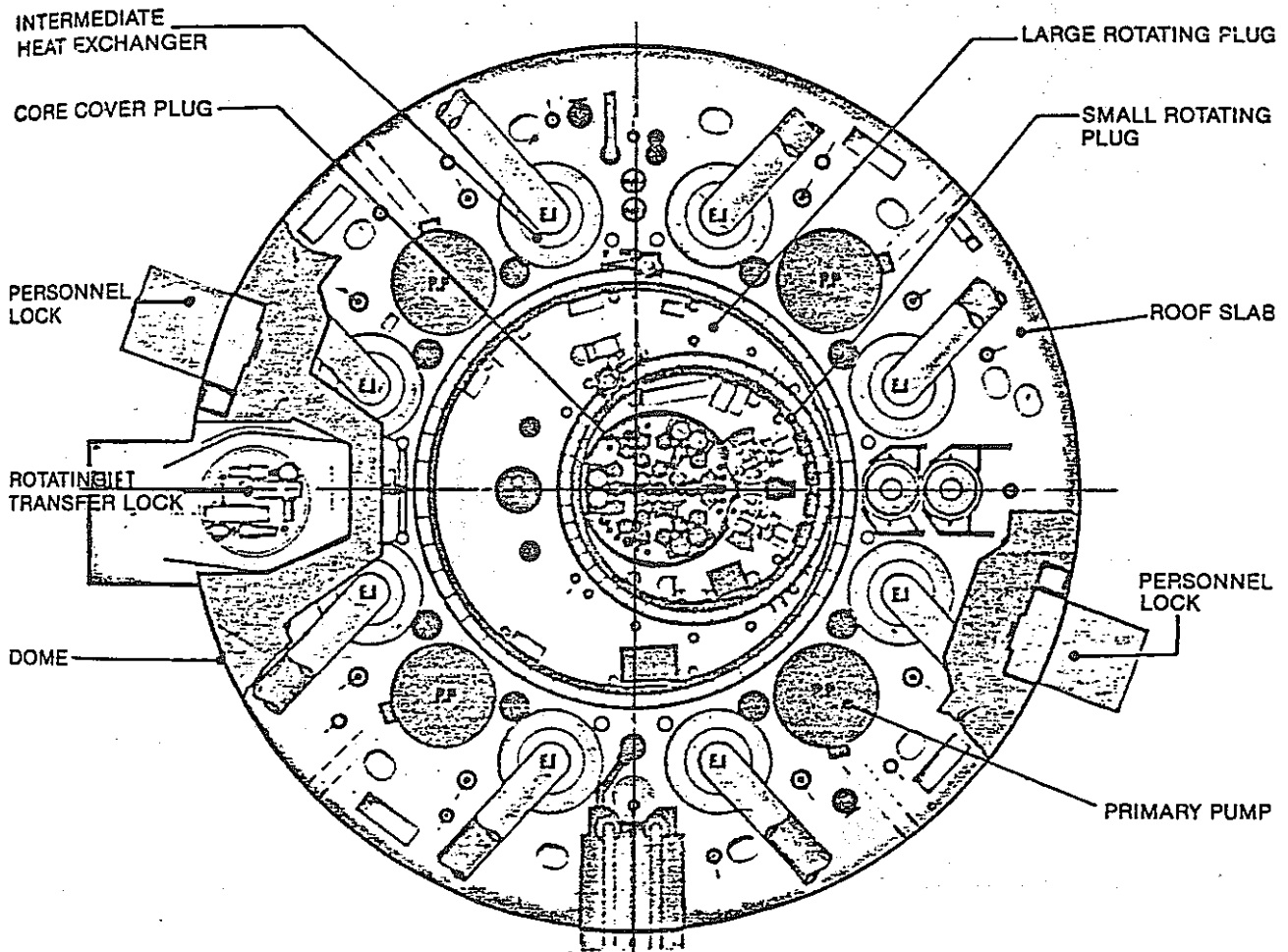


B部詳細(2)案
出口ノズル部
(1/20 SCALE)



断面CC
(1/20 SCALE)

図 2.1.24 (2)



☒ 2.1.25 Reactor block from above the roof slab.

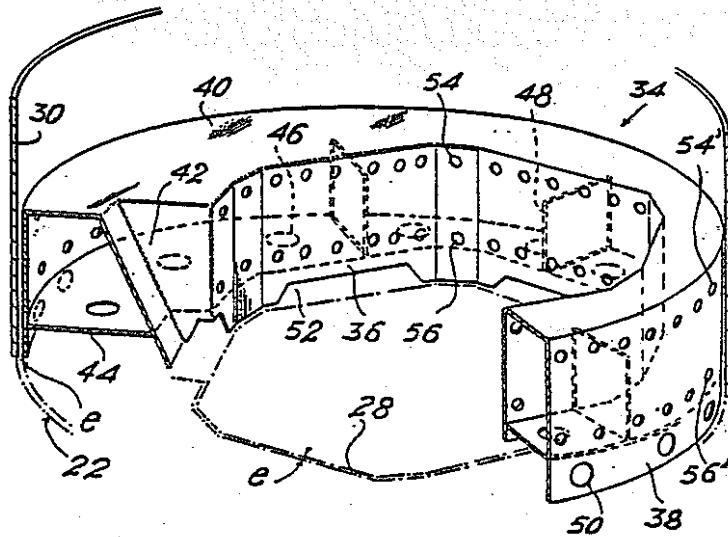
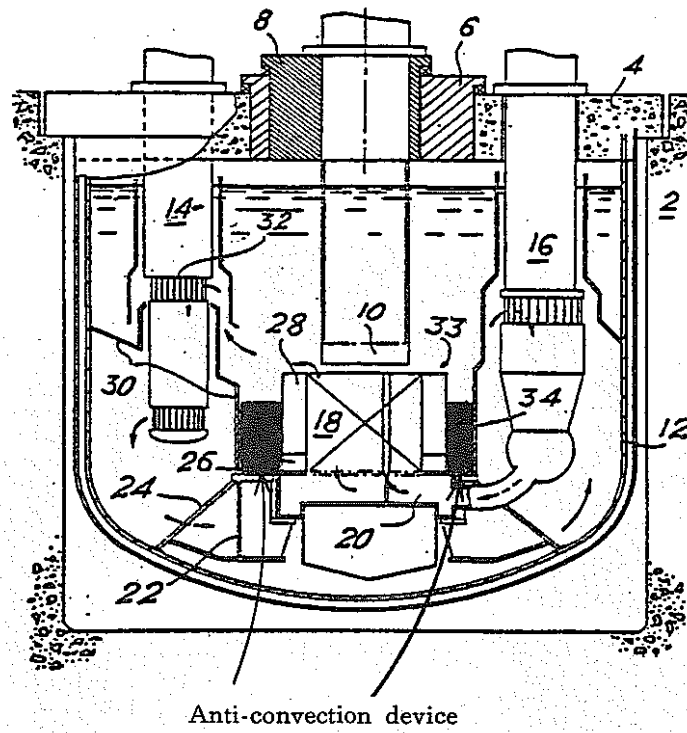


图 2.1.26 对流防止装置 (Super Phenix)

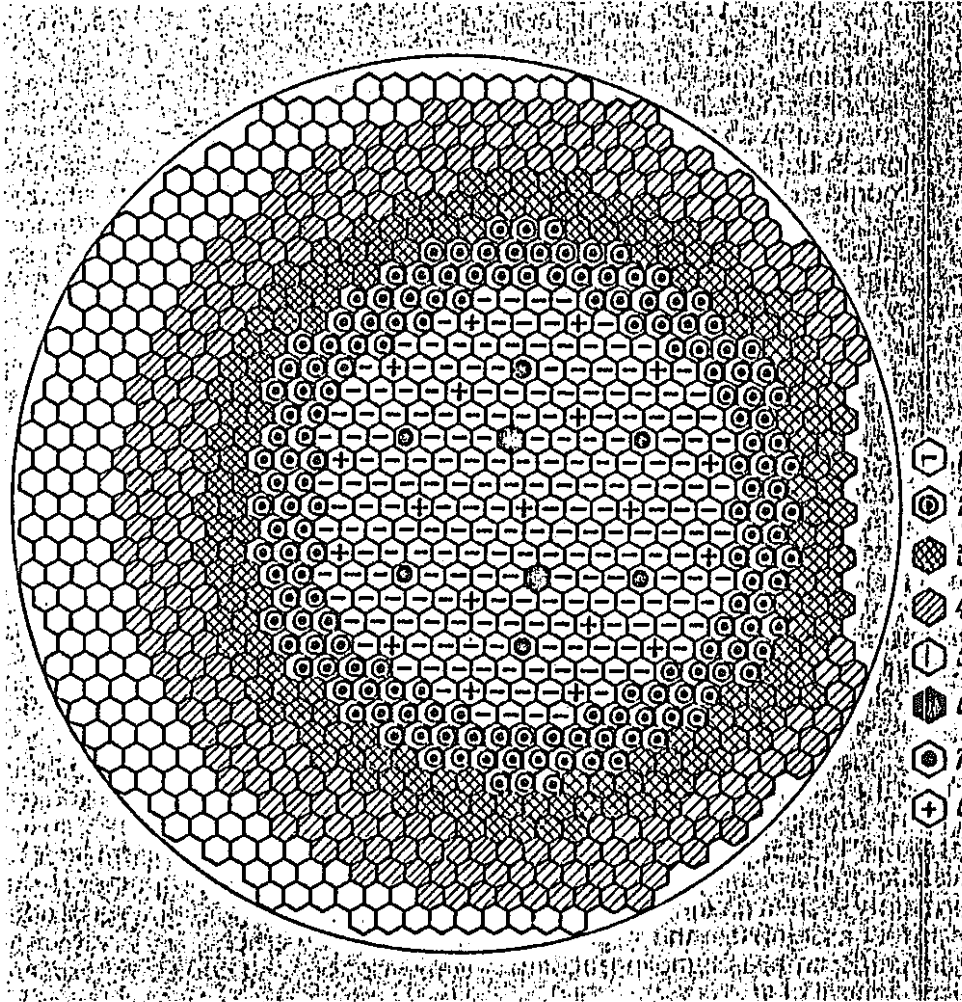


图 2.1.27 BN-600 Reactor Charging Cartogram

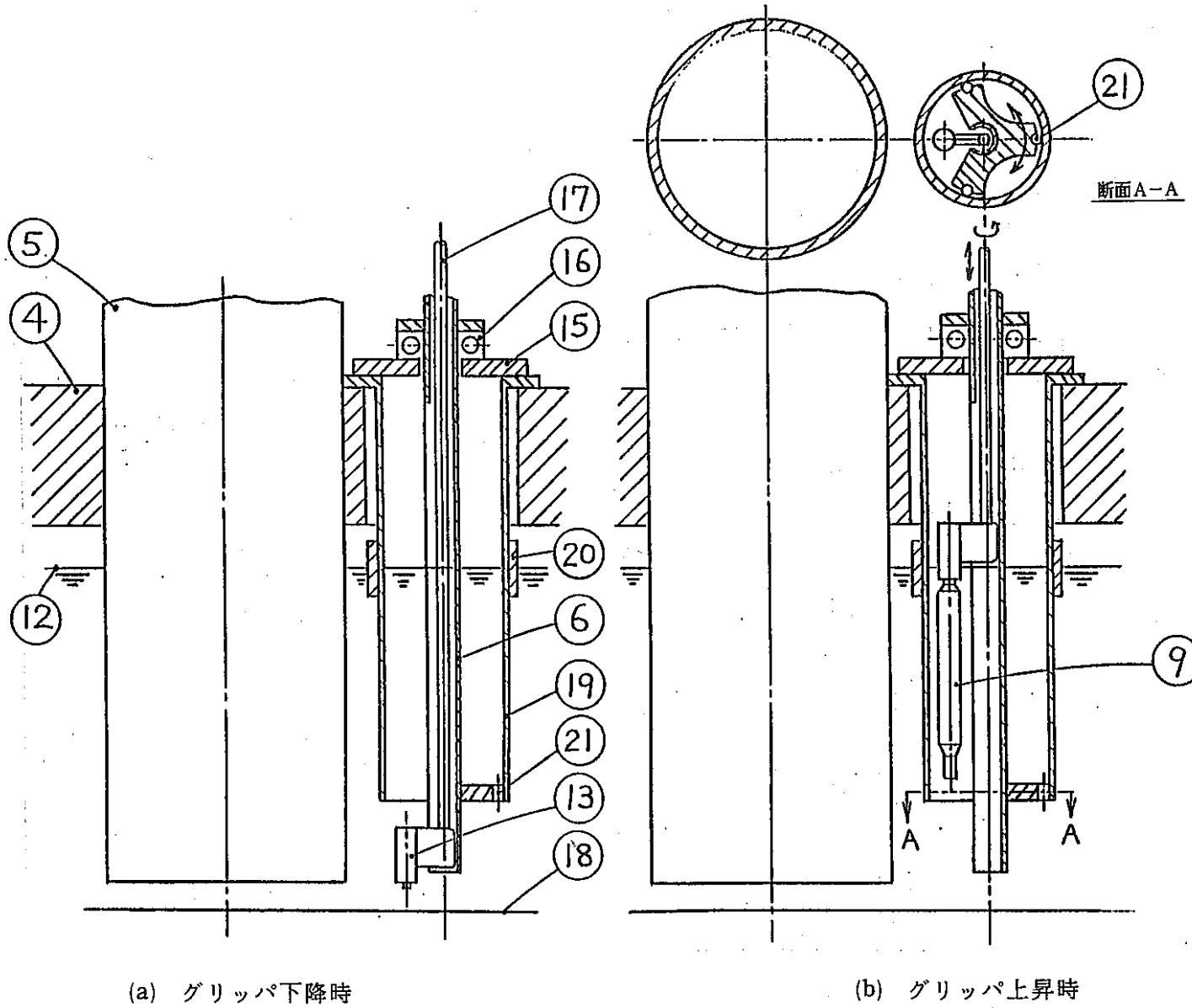
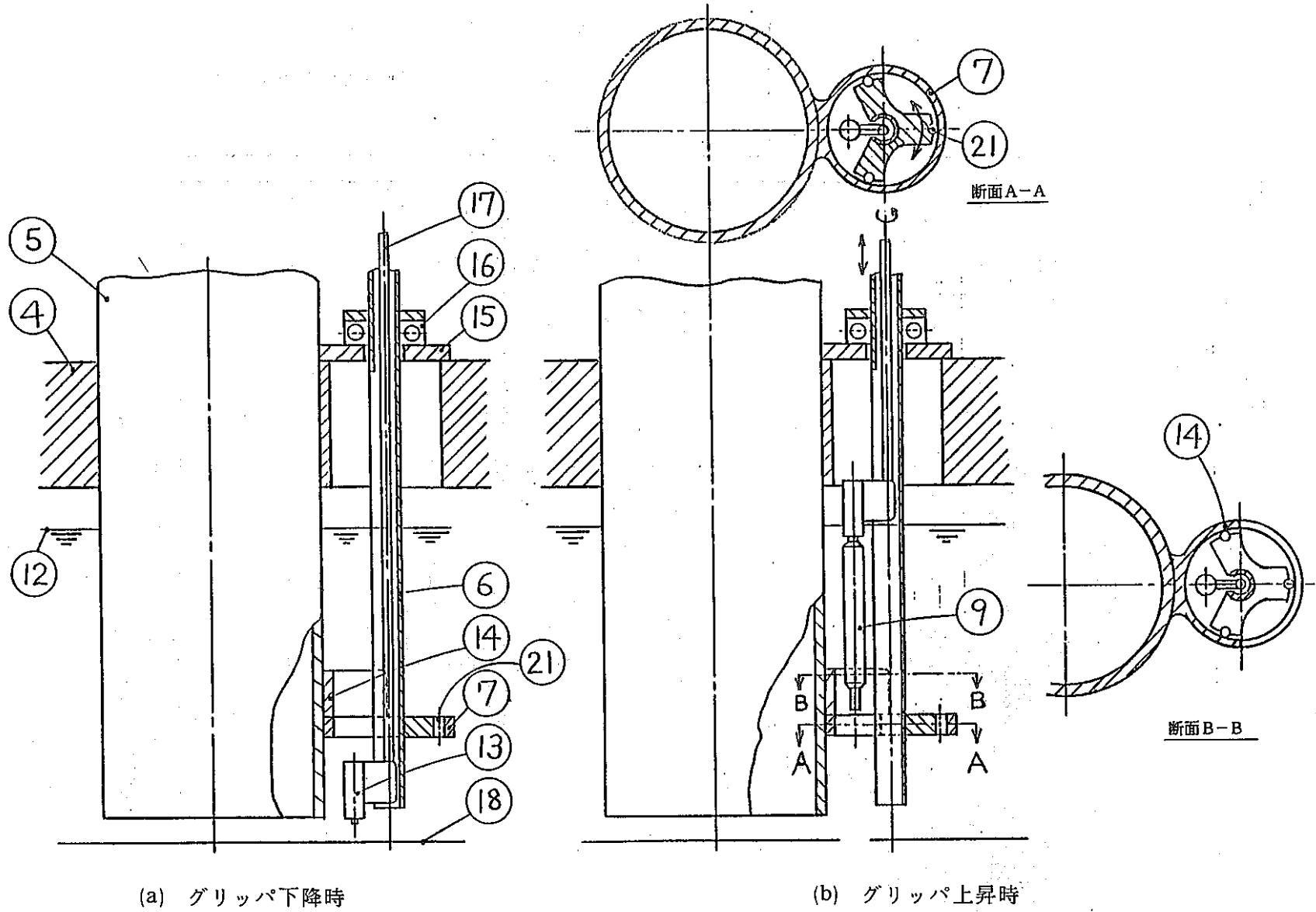


図 2.1.29 従来の燃料交換機構



(a) グリッパ下降時

(b) グリッパ上昇時

図 2.1.29 本発明 FHMの格納管削除の一例

図(1), (2)とも 1200 MWe 4 ループタンク型用の設計を示す。

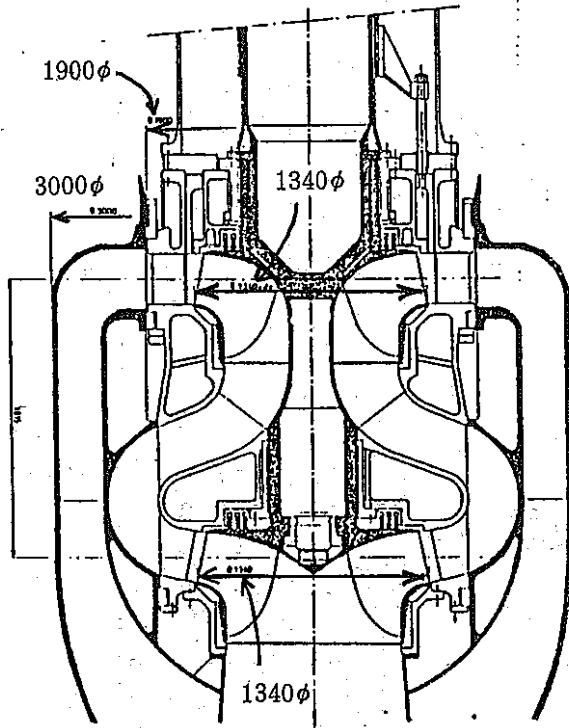


Figure 5 - Pompes double étage aspiration basse collecteur fixe

- (1) Two-stage, bottom intake, non-removable manifold
(2段吸込み型)

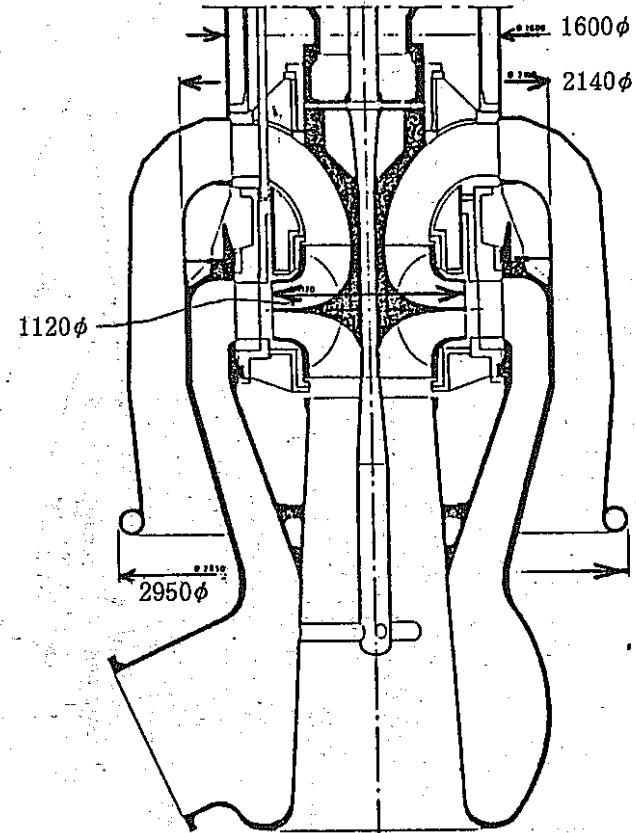


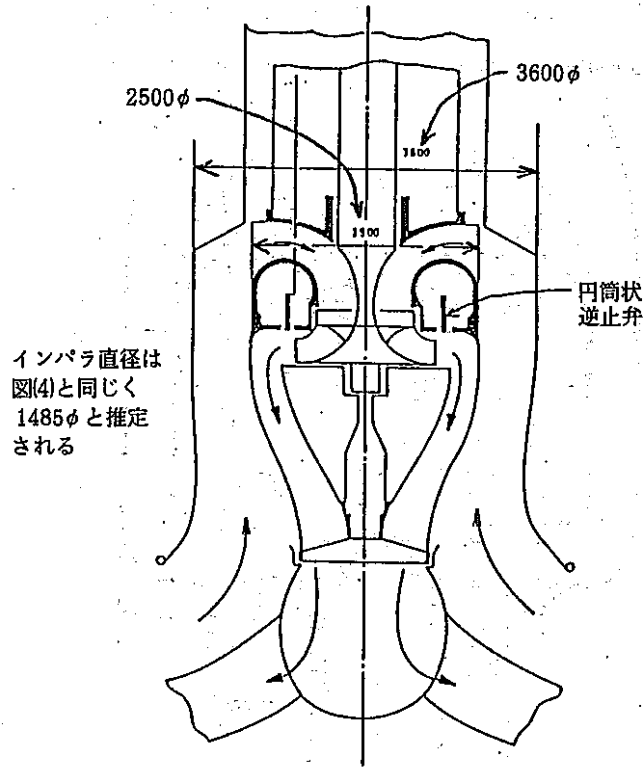
Figure 6 - Pompes roue double aspiration basse collecteur fixe

- (2) Twin rotor pump with non-removable manifold.
(両吸込み型)

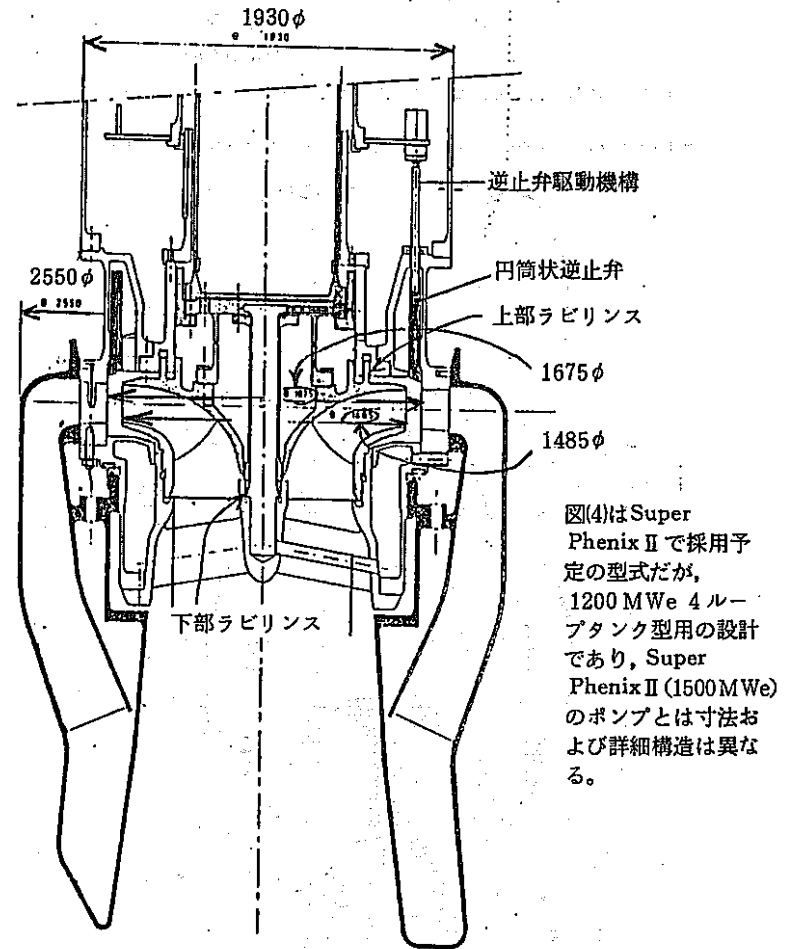
図 2.1.30 Conceptual study of primary pump for large LMFBRs

(大型FBR用1次主循環ポンプの概念設計…各図のスケールは異なる)

図(3)は Super Phenix に採用された型式で、寸法も Super Phenix のものが示されている。



(3) Single stage, top intake
(単段インペラ, 上吸込み型)



(4) Single stage, bottom intake
(単段インペラ, 下吸込み型)

図 2.1.30 Conceptual study of primary pump for large LMFBRs
(大型FBR用1次主循環ポンプの概念設計…各図のスケールは異なる)

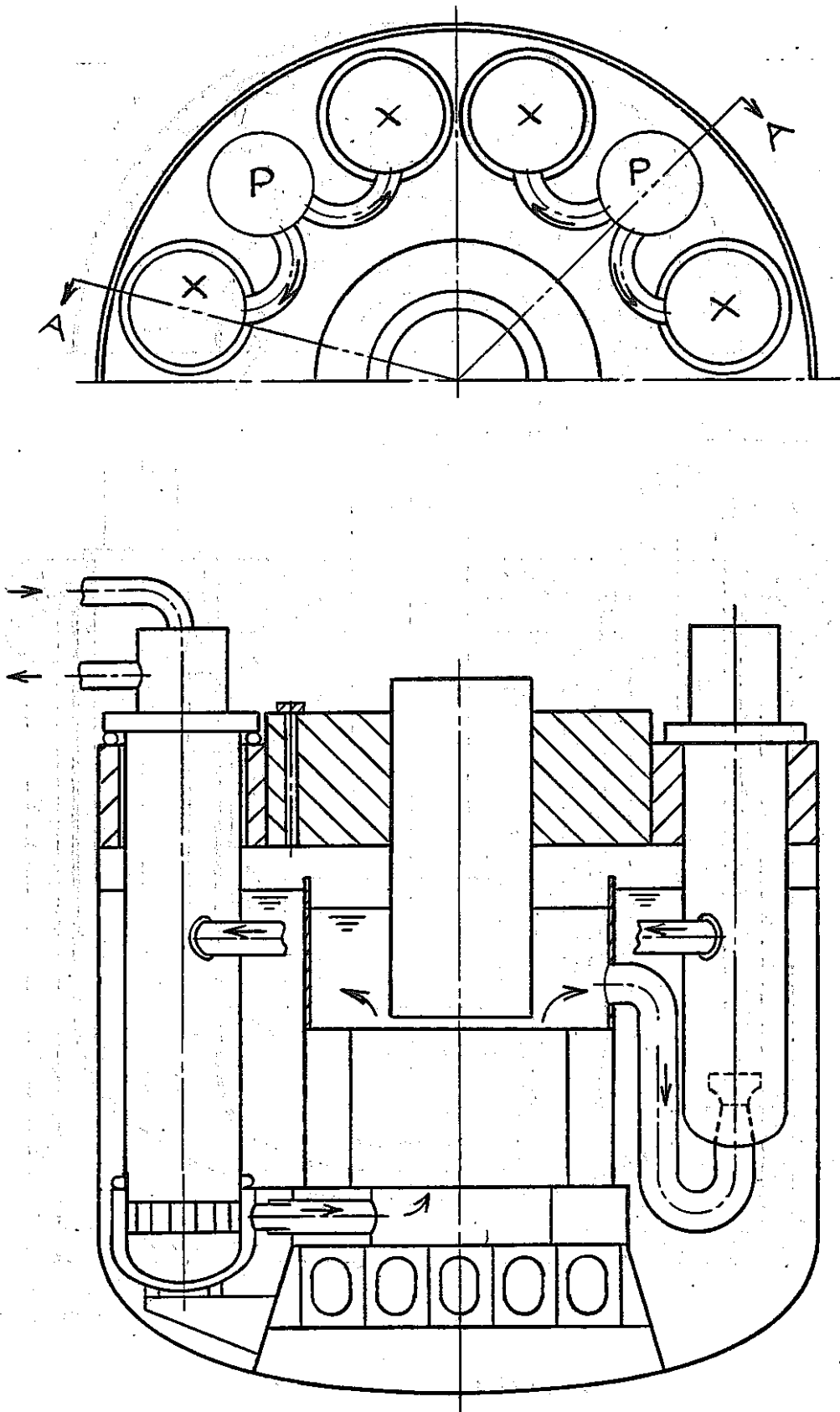


図 2.1.31 ホットレグポンプ採用のタンク型炉

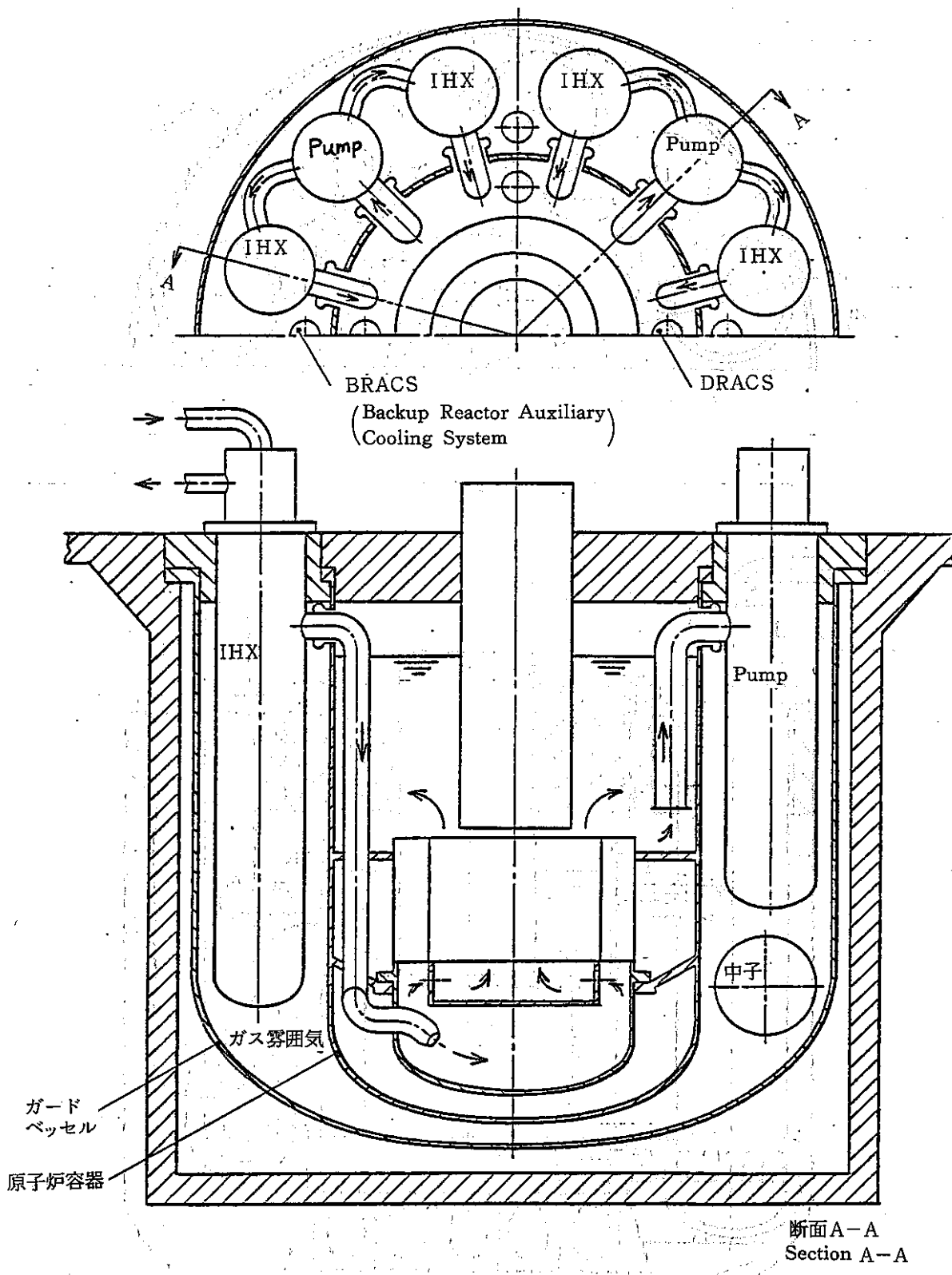


図 2.1.32 (1) ドライタンク型炉

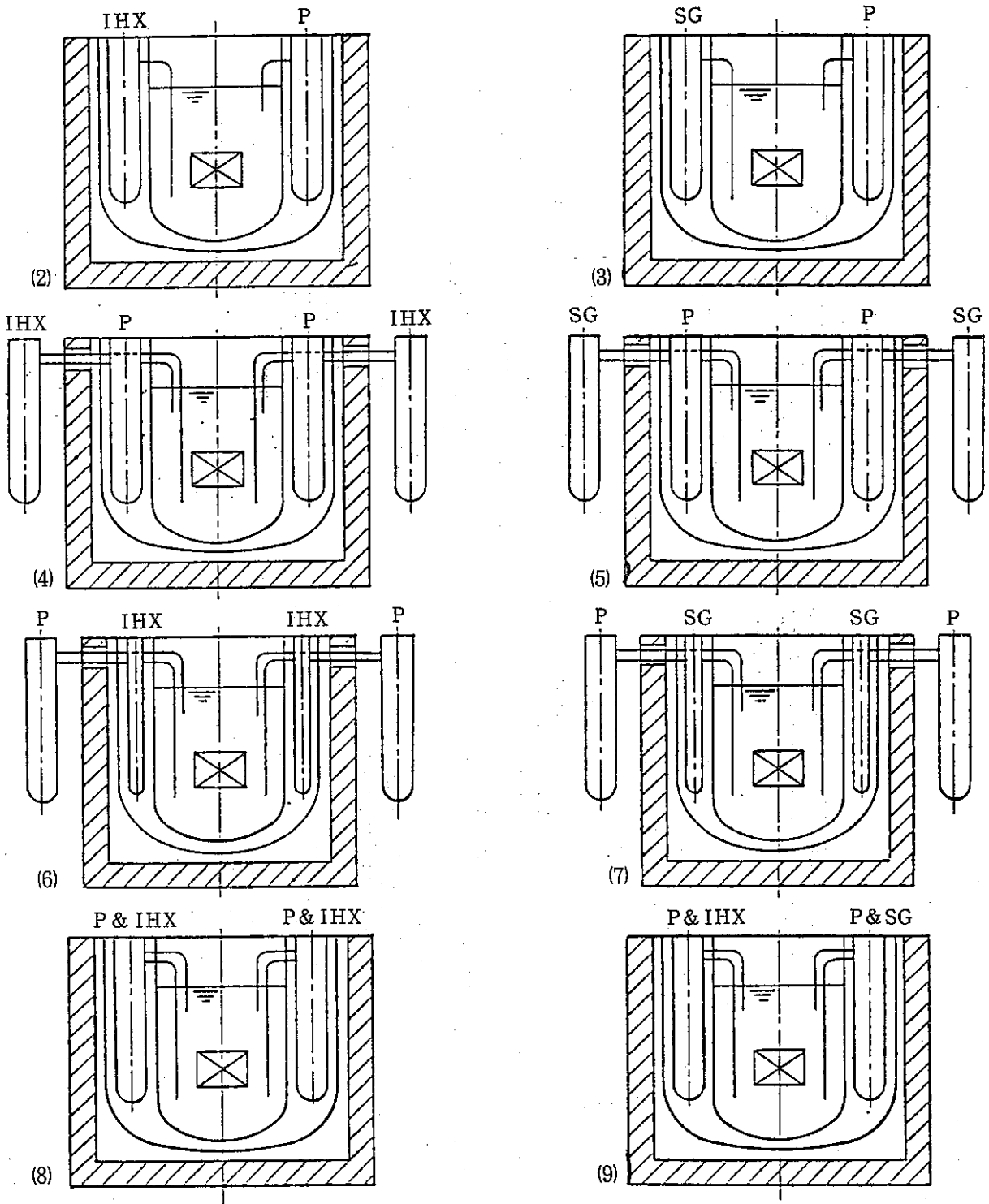


図 2.1.32 (2)~(9) ドライタンク型炉の変形例

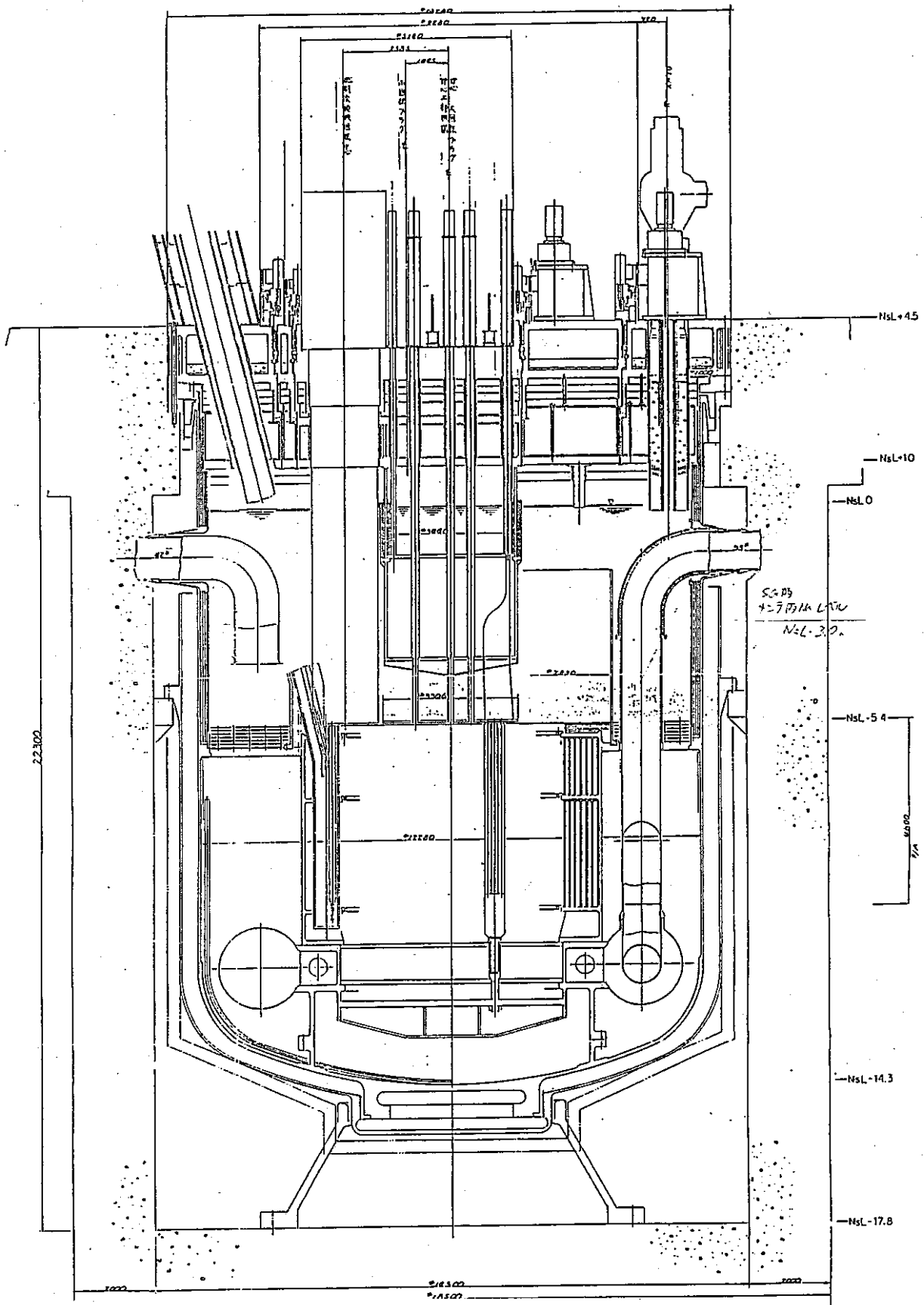


図 2.1.33 横プレナム方式

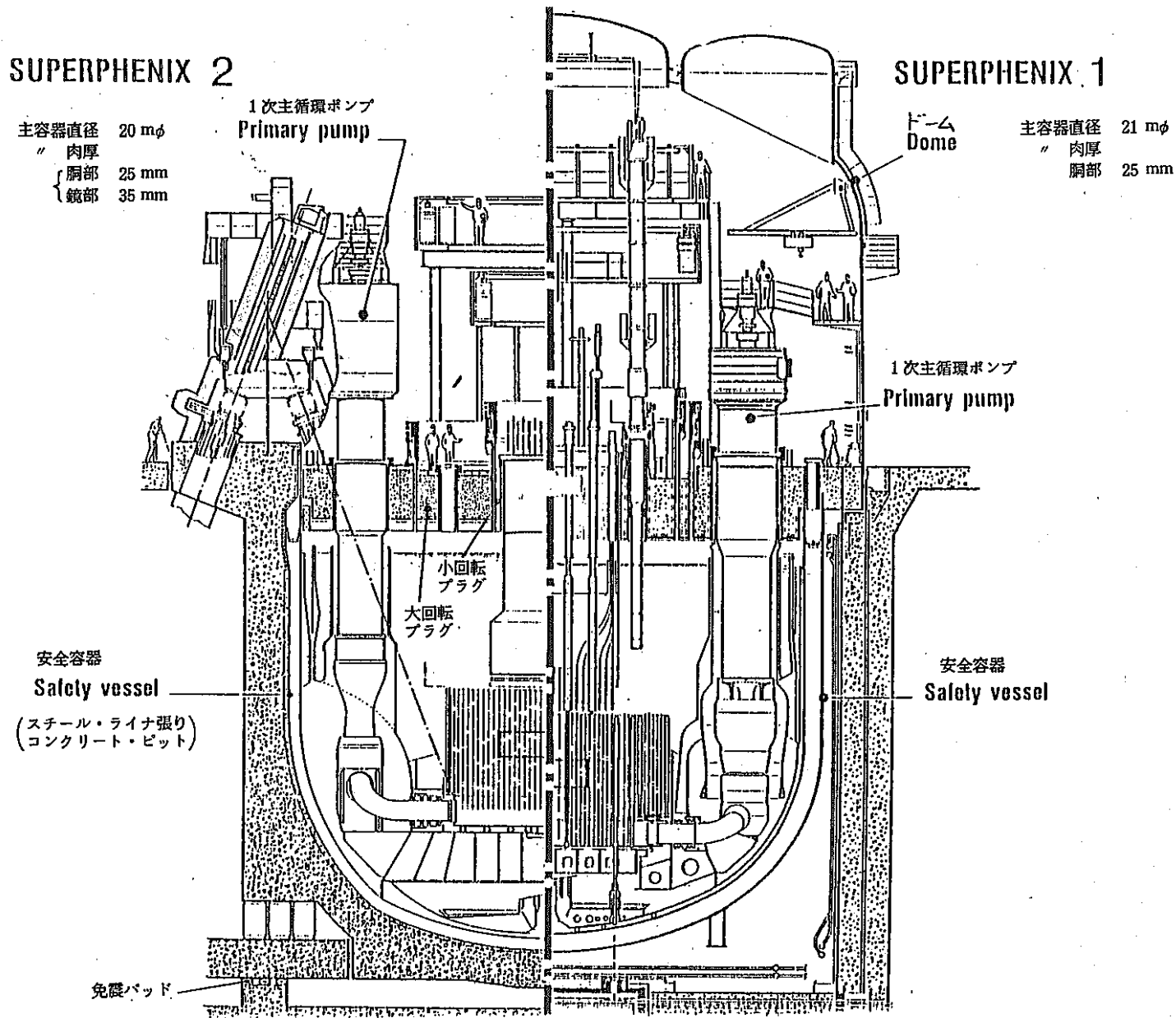


図 2.1.35 炉容器ピット室免震方式 (Super-Phenix I & II)

2.1.3 参考文献

- 1) J. P. DUPORT et al., "Incidence des problèmes hydrauliques sur la conception des reacteurs rapides au sodium". IAEA-SM-130/32, 1970.
- 2) J. M. LAITHWAITE et al., "Hydraulic problems in the PFR coolant". circuit. IAEA-SM- 130/11, 1970.
- 3) Novatome の技術者より聴取したメモ (未公開). 1982.
- 4) G. PAYAN et al., "Les cuves du reacteur Phénix et des reacteurs de puissance á circuits intégrés". IAEA-SM-130/33, 1970.
- 5) C. B. MARTIN, "Stratification of entrapped sodium as insulation in an LMFBR pool-type reactor vessel".
- 6) 日英会議配布資料, 1982.
- 7) A. DAUBERT et al., "Etudes de thermohydraulique appliquée aux reacteurs rapides refroidis par sodium". Eur. Nucl. Conf. (GBR) {9} 444-452, 1976.
- 8) パリ会議配布資料, 1983.
- 9) PNC ZJ 278 83-02, "高速実証炉・第2次概念設計(I)" 1983.
- 10) 特許公報 昭 59-795 (発明者:ジャン・ピエール・バンク, 出願人:CEA)
- 11) J. GULDEZ et al., "Pompes primaires sodium a grandes dimensions. La houille blanche /No 7/8- 1977.

2.2 制御棒駆動機構

2.2.1	緒言	57
2.2.2	「もんじゅ」の制御棒駆動機構	57
(1)	はじめに	57
(2)	研究開発	58
(3)	現状の設計	60
2.2.3	実証炉設計研究における制御棒駆動機構の現状	60
(1)	はじめに	60
(2)	主炉停止装置	61
(3)	後備炉停止装置	62
(4)	落下方式と加速方式	63
(5)	新型炉停止装置（SASS）	63
2.2.4	海外炉の制御棒駆動機構	65
(1)	はじめに	65
(2)	仏国	65
(3)	英国	66
(4)	米国	67
(5)	西独	67
(6)	ソ連	68
2.2.5	制御棒駆動機構のあり方	69
(1)	はじめに	69
(2)	制御棒駆動機構のあり方	69
2.2.6	実証炉の制御棒駆動機構に必要な研究開発	72
2.2.7	結言	72
2.2.8	参考文献	73

2.2 制御棒駆動機構

2.2.1 緒言

制御棒駆動機構は炉心の中でおこる核分裂連鎖反応（ひいては炉心熱出力）を制御する機能を有する制御棒を駆動するための機械であり，原子炉を構成する多くの機器類の中でも，最重要機器の一つに挙げられている。制御棒駆動機構は一般に次の部分から構成される。

- 駆動装置
- 上下駆動機構
- 加速機構
- 緩衝機構
- スクラム機構
- 制御棒着脱機構
- カバーガス密封構造
- 位置検出装置
- 案内管およびハウジング
- 制御盤
- （制御棒）

原子炉に於ては制御棒は一般に主炉停止棒と後備炉停止棒の両方が設けられている。前者は出力調整機能も合わせて有しており，微調整棒および粗調整棒に分類される。各々の制御棒駆動機構はその役割の相異から，また「炉停止の信頼性を高めるため，炉停止機構は独立2系統を設け，かつそれらが出来れば作動原理が異なっていることが望ましい」という安全思想から，それぞれ異なった構造が採用されている。それに実証炉の最近の傾向は，従来の炉停止装置に加えて，新型炉停止装置 SASS (Self Actuated Shutdown System) なる新概念を採用するに至ってきている。これには各種の方法があるが，いずれにしても新概念を採用して，大型炉の核的停止の多様性を確保しようとの考えに基づくものである。

以下に原型炉「もんじゅ」，それに海外炉のそれぞれの SASS をも含めた制御棒駆動機構，R & D 等について紹介する。

2.2.2 「もんじゅ」の制御棒駆動機構

(1) はじめに

原子炉「もんじゅ」の制御棒の設計は，調整設計(Ⅲ)の時点までは主炉停止系は微調整棒（3体），粗調整棒（9体），安全棒（4体），後備炉停止系は後備炉停止棒（3体）

の合計2系統、4種、19体より構成されていた。しかしながら調整設計(M)で制御棒の種類と本数の見直しが行なわれ、この結果主炉停止系は微調整棒(3体)、粗調整棒(10体)、後備炉停止系は後備炉停止棒(6体)の合計2系統、3種、19体に変更になり、そのまま現在に至っている。「もんじゅ」の制御棒駆動機構は、構造の詳細に至っては当然ながら、長年のR&D成果が取り込まれているが、基本的には初期の頃の設計と、現在のものとの間にさほどの差はない。

以下に「もんじゅ」の制御棒駆動機構の研究開発と現状の設計について述べる。

(2) 研究開発

「もんじゅ」制御棒駆動機構の試作試験は「常陽」の経験を生かしながら昭和46年度から開始され、現在に至っている。その内容はフルモックアップ試験と部分的開発試験に大別される。前者は第1次、第2次、第3次試作機(主に第2次試作機の改造)に分けることができる。それぞれの水中試験は試作メーカーで、ナトリウム中試験は動燃・大洗工学センターで、それぞれ行なわれてきた。

① 第1次試作機

第1次試作機は3つの試験体(1)、(2)及び(3)から成り、それぞれ水中試験、ナトリウム中試験に供された。

これら3試験体は1体の中に調整棒の機能と安全棒の機能を兼ね備えたものであるが、その構造概略図を図2.2.1に示す。試験工程は図2.2.2に示すとおりである。3試験体ともに水中、ナトリウム中で常駆動、燃交時駆動、ファイン駆動、スクラム等の各種試験が行なわれ、それぞれの機能が確認された。

試験体(1)はその後、続いて水中振動試験が行なわれ、地震時を想定した特性が把握された。試験体(2)については、2度目のナトリウム中試験(耐久試験)が行なわれ、スクラム1,400回、ファイン駆動120,000回等、寿命30年間の想定使用回数の約3倍にあたる試験が行なわれ、耐久性が確認された。このようにして実施された第1次試作3試験体の試験結果は第2次試作機の設計・製作に反映されている。

② 第2次試作機

昭和49年度から第2次試作機の段階に入り、後備炉停止棒駆動機構、安全棒駆動機構、微調整棒駆動機構、粗調整棒駆動機構の4体が試作された。

これら4体の第2次試作機に対して水中、ナトリウム中でスクラム、常駆動、燃交時駆動等の各種試験が実施され、それぞれの機能の確認、問題点の摘出が行なわれた。なお各試験体ともに、ナトリウム中試験の後に水中振動試験が実施され、場合によってはさらにその後、ホールド試験または耐久試験を主体としたナトリウム中試験が行なわれている。第2次試作機全体の試験工程を図2.2.3に示す。またナトリウム中試験

の代表例として、後備炉停止棒駆動機構試作機のスクラム落下曲線（加速ガス圧の影響）を図 2.2.4 に、微調整棒駆動機構試作機のスクラム落下曲線（途中位置からの落下）を図 2.2.5 にそれぞれ示す。

③ 第 3 次試作機

昭和56年度から第 3 次試作機の段階に入り、現在に至っている。この時点では、先に述べたように安全棒は削除され、「もんじゅ」の制御棒は 3 種類になっている。

第 3 次試作機の試験工程を図 2.2.6 に示す。なお第 3 次試作機の各種試験は「もんじゅ」制御棒駆動機構実機の最終機能確認の性格を有するものであり、当然ながら第 1 次および第 2 次試作機、それに部分試験の研究開発の成果が生かされたものである。

④ 水中振動試験

ナトリウム中試験が終り、試験後の分解検査が終了した後、再組立された試作体は次の段階として水中振動試験が行なわれた。水中振動試験は主として下記の項目について実施された。

(i) 振動特性試験

本試験では、

- 模擬炉心上部機構振動特性試験
- 19本組炉心構成要素振動特性試験
- 下部案内管単体振動特性試験

などが行なわれた。

(ii) 地震波加振による応答試験

エルセントロ波、ゴールドンゲート波および人工地震波の入力を得て、その応答を得る。

第 1 次～第 3 次試作体について上記のような水中振動試験が行なわれ、それぞれの振動特性が確認され、結果は次のステップの設計に反映された。

⑤ 部分的開発試験

制御棒駆動機構の研究開発はフルサイズ試作体による水中およびナトリウム中試験が中心となって行なわれてきた。しかしながらこれらの試験の結果、ある部分に着目してさらに詳細な情報を得る必要が生じた場合、フルモックアップを用いるよりも計装設備、工程、費用等の理由から部分的モデルを作って試験する方が有効なので「もんじゅ」の場合には次のような部分的開発試験が行なわれた。

(i) メカニカルシールの開発

(ii) ベローズの開発（ストロークベローズ、ラッチベローズ）

(iii) ガスブローダウン法の開発

(IV) スプリングケーブルの開発

これらの結果が次のステップの試作体に反映されている。

(3) 現状の設計

「もんじゅ」はすでに安全審査も終了し、その制御棒駆動機構の設計に関しても、ほぼ固まってきている。現状の制御棒駆動機構の主要目を表 2.2.1 に、3種類の制御棒駆動機構の構造図を図 2.2.7～図 2.2.9 にそれぞれ示す。

2.2.3 実証炉設計研究における制御棒駆動機構の現状

(1) はじめに

動燃による高速増殖実証炉の設計研究は昭和50年度から開始され、予備設計研究（50～53年度）、第1次概念設計研究（54～56年度）を経て、現在第2次概念設計研究（57～59年度予定）に入っている。制御棒駆動機構の設計条件および構造に関する限り、これら各設計研究段階において特に大きな差異はなく、基本的には「もんじゅ」の制御棒駆動機構の経験をベースに検討されている。57年度の第2次概念設計研究では、建設費低減方策追求の一環として制御棒本数の削減が行なわれた。また55年度の第1次概念設計研究(II)からは新型炉停止装置（SASS）の検討が始められた。

以下に一つの例として、57年度の第2次概念設計研究(I)における制御棒駆動機構について紹介する。なお制御棒駆動機構の機能条件および設計条件は次のとおりである。

<機能条件>

- i) 制御棒駆動機構は、独立の2系統の炉停止系から構成すること。
- ii) 主炉停止棒駆動機構は、スクラム機能を有し、地震時にも速やかにかつ確実にスクラムできること。
- iii) 後備炉停止棒駆動機構は、主炉停止棒駆動機構とはできるだけ作動原理が異なりかつ地震時にも確実にスクラムできること。
- iv) 制御棒駆動機構は、運転中の各種要因による上下案内管の相対変位に対しても十分な許容偏心量をもちスクラム時の制御棒の挿入性が損なわれにくいこと。
- v) 機構内をできるだけ単純化し、メンテナンス性を向上させると共に故障が少なく信頼性の高い部品を採用すること。
- vi) 動作がフェイルセーフとなること。
- vii) 制御棒の位置確認ならびにスクラム動作位置確認ができること。位置検出系は、主・従2系統の検出系とすること。
- viii) 燃料交換時には、駆動機構の下端部は炉心上部機構内に納まる構造とし、回転ブラグの回転の障害とならない構造とすること。

<設計条件>

i) 計画基数	主炉停止棒駆動機構	19基
	後備炉停止棒駆動機構	6基
ii) 基本機能	主炉停修棒駆動機構	シムおよびスクラム動作
	後備炉停止棒駆動機構	スクラム動作
iii) 設計温度	しゃへいプラグ下面位置以下	550℃
iv) 原子炉出口 / 入口冷却材温度		530/385℃
v) 耐震設計	スクラム機能に関する部分	原子炉As相当
vi) 設計寿命	30年	ただし上部案内管, 延長管Oリングおよび電装品は除く。
vii) ストローク	主炉停止棒駆動機構	1000 mm
	後備炉停止棒駆動機構	1100 mm
viii) 駆動速度	主炉停止棒駆動機構	0~300 mm/min (暫定値) (可変)
	後備炉停止棒駆動機構	180 mm/min (暫定値) (定速)
ix) スクラム時間	スクラム遮断器開後85%挿入まで	1.2 秒以内 (暫定値)
x) 炉心構成要素配列ピッチ		144.4 mm
xi) 制御棒最小中心間距離		382.1 mm

(2) 主炉停止装置

主炉停止装置は通常、微調整棒と粗調整棒より構成されるが、本設計においてはまだ両者の区別に至るまで細分化されてはおらず、主炉停止装置として一括して設計研究されている。その機能および構造について以下に述べる。なお主要目は表2.2.2に示すとおりである。

① 機能

燃焼補償, 出力温度補償, 出力調整, 負荷追従などの機能を有し, スクラム動作機能をも備える。

② 構造

主炉停止棒駆動機構の構成は, 駆動部, 上部案内管, 延長管とからなる。

駆動部による制御棒の駆動は, 駆動電動機の回転力を減速機, トルクリミッタを介して, ボールネジに伝達し, ボールネジとナットの間で回転運動を直線運動に変換して上昇, 下降を行う。

駆動電動機は, 可変速度モータを基本とするが, 制御方法により有段速度可変の極数変換モータにも交換できる構造とする。

案内管部は, 上部案内管, ストロークベローズ, 流体緩衝器, 生体しゃへい体から構成し, 延長管部は, 内側延長管, ラッチベローズ, 外側延長管, 制御棒ラッチ機構

から構成する。放射性カバーガスの漏洩を防ぐために設けられたベローズには、上部案内管と外側延長管の間に設けられたストローク用のものと、制御棒着脱時に内側延長管と外側延長管が相対運動するために設けられたラッチ用の２種類があり、いずれも通常液面より上の中温ガス中としている。

このほか、プラント運転中の異常監視としては、荷重検出（ロードセル）、漏洩検出（流量計：制御盤側設置）を基本とした連続監視計を設けている。

次に主炉停止棒駆動機構のスクラム動作について説明する。スクラム信号により電磁石が消磁されると、延長管部は駆動部内スプリング加速機構のスプリング力によって加速され、制御棒を強制挿入する。スクラム落下時の延長管部の加速力の緩衝は、上下案内管部の流体緩衝器と駆動部の油圧緩衝器とで吸収する。その他の動作として、燃料交換およびメンテナンスのための制御棒と延長管部との着脱は、制御棒ストロークの下端位置で制御棒ラッチ機構をラッチモータにより開閉することにより行い、電磁石の消磁による延長管部の誤落下防止にはマグネットアーマチュアの間ロック機構を設ける。なお駆動部と延長管部との着脱もラッチモータにより延長管ラッチ機構部を開閉することにより行なう。

(3) 後備炉停止装置

後備炉停止装置は特に分類はなく、１種類のみであるが後に述べるように新型炉停止装置が本装置に組み込まれている。後備炉停止装置の機能および構造について以下に述べる。なお主要目は表 2.2.2 に示すとおりである。

① 機能

スクラム機能を有する。

② 構造

後備炉停止棒駆動機構の構成は、主炉停止棒駆動機構と同様に駆動部・上部案内管・延長管からなる。駆動部による制御棒の駆動は、電動機の回転力を減速機、トルクリミッターを介してボールネジに伝達し、ボールネジ、ナットの間で回転運動を直線運動に変換して、上昇下降を行う。後備炉停止棒駆動機構は、反応度制御機能を有さないため、定速度の三相誘導モーターを用いる。

案内管延長管部のうち、案内管部は、上部案内管生体しゃへい体、ストロークベローズ、流体緩衝器から構成され、延長管部は、内側延長管、外側延長管、ラッチベローズ、加速管、加速スプリングおよび制御棒ラッチ機構から構成する。ベローズは、主炉停止棒駆動機構と同様にストローク用、ラッチ用の２種類から成り、いずれも通常液面より上の中温ガス中としている。

このほか、プラント運転中の異常監視としては、荷重検出（ロードセル）、漏洩検

出（流量計，制御盤側設置）を基本とした連続監視系を設けている。

次に，後備炉停止棒駆動機構の主要動作であるスクラム動作について説明する。

スクラム信号により，電磁石が消磁されると，内側延長管が，内側延長管ラッチ機構から切離され延長管部下端制御棒の爪を閉じ，制御棒ハンドリングヘッドとの結合を解除する。この時，上部案内管内で保持されていた加速管も同時に切離されて加速管自重と上部に設けている加速スプリング力により機械的に制御棒を上方より強制挿入する。スクラム時の衝撃力の緩衝は，加速管の約85%ストローク位置にある上部案内管内に設けた液体緩衝器を用い，制御棒は制御棒案内管下端のダッシュポットにより別々に緩衝する。

(4) 落下方式と加速方式

制御棒駆動機構の設計研究に際しては，いろいろな構造が考えられるが重要な選択となるところは落下方式と加速方式である。

前者については，制御棒と加速軸とが連結されたまま一体となって落下する方式と，分離した状態で落下する方式とがあり，それぞれ一長一短ある。両方式の特徴を表 2.2.3 にまとめる。後者についてはガス加速方式とバネ（ナトリウム中設置又はガス中設置）加速方式および流体加速方式の 3 方式がある。これらの各特徴を表 2.2.4 に示す。

原子炉の安全思想の一つとして「炉停止の信頼性を高めるため，炉停止機構は独立 2 系統を設け，かつそれらができれば作動原理が異なっていることが望ましい」といわれているため落下方式，加速方式は一基の原子炉において制御棒の種類により，それぞれ異なった方式が採用される場合が多い。

(5) 新型炉停止装置（SASS）

炉停止装置の多様化のために従来の主炉停止系，後備炉停止系の他に新型炉停止装置

表 2.2.3 一体落下型と分離落下型の比較

	特 徴	メ リ ッ ト	デメリット	付 随 事 象
一体落下型	落下体が長い (制御棒と連なっている) 落下体が重い	下部案内管側の変形，抵抗に対し，余裕が多い。(上部案内管，駆動部側から加速するため)	駆動部または上部案内管側でスティックすると制御棒が入らなくなる。摺動抵抗が大きい。	ストロークベローズが高速伸長する。マグネットが大きくなる。(吊下重量大) 炉心支持板側への衝撃エネルギーが大きい。制御棒位置検出が容易
分離落下型	落下体が短い (制御棒単体) 落下体が軽い	上部案内管側のスティックには左右されない。摺動抵抗が少ない。	下部案内管側の変形抵抗に対し，余裕が少ない。(単体で軽い)	ストロークベローズの低速伸長 マグネットは小容量 (吊下重量小) 炉心支持板側への衝撃エネルギーは小さい。制御棒位置検出は加速管で検出となる。

表 2.2.4 制御棒駆動機構に用いる代表的加速方式の比較

	メリット	デメリット	付随事象
ガス圧加速	比較的小さいスペースで大きい加速力が得られる。 ストローク中の加速力変化が比較的少ない。	構成部品が多くなる。 シリンダ部の変形に対し弱い。 内圧0の時には挿入抵抗となる。(ガス系配管破断等) 摺動パッキン・シール類の交換頻度が高い。	気密性バウンダリが必要
スプリング加速	構成部品が少ない。 構造物としては半永久的。 スティックしても落下体の妨げとなりにくい。	ガス圧加速に比べ、単体では大きいスペースが必要。(駆動部に組込んだ場合は軸長短縮になる) 高温、高応力で圧縮したままにするとリラクゼーションの発生もあり得る。	蛇行防止のリング等が必要。 スプリング1本の長さは製作上の制限がある。
流体加速	炉内圧力が利用できる。 加速力の変化が比較的少ない。	ラビリンス等の構造が複雑となる。 微小ギャップが必要なため地震や変形に弱い。 ギャップの経年変化により性能が変化する。	

を設置することが検討されている。新型炉停止装置は冷却材喪失あるいは異常な反応度挿入のような事象に対して直接的、自動的に応答して炉を停止する装置である。しかしながら、炉停止系の信頼性向上とは言っても、そのために制御棒の本数をふやすことは得策ではない。そこで新型炉停止装置は既存の後備炉停止系に組み込む方法がとられている。

① 機能

新型炉停止装置として要求される機能は次のとおりである。

- (i) 定格出力運転中、過渡事象を自動的に検知し、自己作動により炉心内に制御棒を挿入すること。
- (ii) この機能はプラント安全保護系をできるだけ介さずに遂行されること。

② 方法

新型炉停止装置としていくつかの方式が比較された結果、下記の2方式が検討された。

- キュリー点電磁石方式
- 電磁石・温度スイッチ方式

上記2方式の原理は次のとおりである。

(i) キュリー点電磁石方式

本方式はナトリウム中に電磁石を設け、制御棒を直接保持するか、またはラッチ機構で保持し、炉心の流量急減、出力異常による冷却材の温度上昇により、電磁石の鉄心の一部に組み込んだ磁性材料がそのキュリー点に達すると電磁石の保持力が減少し、制御棒が自動的に落下する原理によっている。原理図を図 2.2.10 に示す。

(ii) 電磁石・温度スイッチ方式

本方式は電磁石コイル電流を炉心燃料集合体冷却材出口上部の炉心上部機構整流装置部内に設けた温度スイッチで遮断し、炉心出口冷却材温度上昇時に自動的に制御棒を炉心に落下させるものである。原理図を図 2.2.11 に示す。

以上の2方式を含め SASS はわが国ではまだ机上の検討段階を出ておらず、使用実績に乏しい。したがって今後は設計研究と実証試験の両面からつめていく必要があるが、炉停止装置としての性能ばかりでなく、メンテナンスの方法等についての考慮も重要である。

2.2.4 海外炉の制御棒駆動機構

(1) はじめに

高速増殖炉を開発中の国家は仏、英、西独、ソ連、米、そして日本などである。周知のとおり高速増殖炉にはループ型とタンク型の2種類があり、各国ともそれぞれ独自の炉型を開発している。しかしながら制御棒および制御棒駆動機構に関しては、この炉型に左右されることはない。すなわち原子炉の出力、炉心構成によって、調整棒や炉停止棒等の各本数や寸法等が変化することはあっても構造的には特に変更の必要はない。その基本的構造についても、電磁石による吸着・重力落下（加速装置のあるものもある）、ボールネジ・ナットによる駆動、上下案内管の存在等、各国ともに共通である。

以下に各国の代表的高速増殖炉の炉停止装置について述べる。

(2) 仏 国

仏は現在高速増殖炉の開発において、世界の最先端に位置している。実験炉ラブソディおよび原型炉フェニックスをいち早く建設して、運転経験を積み、現在は実証炉スーパーフェニックスを建設中である。

本文では実験炉を除外し、発電炉であるフェニックスの炉停止装置について述べることにする。なお両原子炉は共にタンク型である。両原子炉の制御棒本数は次表に示すとおりである。

各国の高速増殖炉の制御棒本数は後述するが、それらと比較してフェニックスの本数の少ないことは特筆に値する。6本の制御棒は次の2系統に共有されている。一つは

	主炉停止系	後備炉停止系	備 考
フェニックス	6	0	
スーパーフェニックス	21	3*	* SASSと兼用

Fast Shut-down System (FSS) で、これは Shut-down の信号が入力されても、6本の制御棒は全て210秒以内に挿入が完了すればよいとされている。これは主に2次冷却系および3次冷却系（水系）を保護するものである。もう一つは Emergency Shut-down System (ESS) で、これは6本の制御棒は全て0.数秒以内で挿入されなければならない。本システムは炉心および1次冷却系を保護する機能を持っている。

スーパーフェニックスの制御棒本数および種類は動燃の設計研究におけるそれとほぼ同じである。すなわち全本数は24本であり、主炉停止系（21本）と後備炉停止系（3本）で構成されている。主炉停止系はさらに第1系統（11本）と第2系統（10本）に区別され、1本の制御棒は31本のピンより成っている。吸収体には B_4C (^{10}B 90%濃縮) が使用されている。後備炉停止系には SASS 機能が装備されており、何かの原因でナトリウム温度が一定値以上に上昇した場合に、ナトリウム中に設置された電磁石の保持力が減少し、制御棒が落下するようになっている。

なお制御棒にはベント型が使用されているが、これはラプソディ、フェニックスで豊富な使用実績を有している。

スーパーフェニックスの主炉停止棒および後備炉停止棒の構造図を図 2.2.12, 図 2.2.13 にそれぞれ示す。

なお日本、英国などもそうであるが仏においても、制御棒駆動機構の重要性に鑑み、Common-mode Failure を避けるため、制御棒駆動機構は複数社のメーカーが製作している。

(3) 英 国

英国は高速増殖炉としては、すでに運転されている実験炉（DFR）と原型炉（PFR）を有し、現在は実証炉（CDFR）を設計研究中である。ここではDFRを割愛してPFRとCDFRについて述べることにする。両炉の制御棒本数は次表に示すとおりである。

	Control Rod	Primary Shut-off Rod	Alternative Shut-off Rod	備 考
PFR	5	5	1	
CDFR	18	5*	6**	* 6本の説もある ** 流体式 SASS

英国の制御棒は表のとおり3種に分類されている。Control Rodは調整棒のことであるが日本の原型炉、実証炉と同様スクラム機能を有している。ただし重力落下となっているので加速装置はないものと思われる。Primary Shut-off RodとAlternative Shut-off Rodは共に炉停止機能のみで、後者は後備炉停止棒に相当すると考えてよからう。CDFRのこの6本は電磁ポンプによる流体圧を利用して保持する方式であり、Control Rod, Primary Shut-off Rodは通常の電磁石方式である。

CDFRの制御棒および制御棒駆動機構の構造図を図2.2.14に示す。

(4) 米 国

米国は世界で最も早く高速増殖炉の開発に着手したが、原型炉以降の計画は少々遅れている。原型炉(CRBRP)の建設計画は中断され、実証炉は設計研究の段階である。ここではCRBRPと実証炉の設計研究の一つであるCDS(Conceptual Design Study)の制御棒について述べることにする。なお両炉は共にループ型である。

CRBRPとCDSの制御棒本数は次表に示すとおりである。

	主炉停止系	後備炉停止系	備 考
CRBRP	9	6*	* 流体式
CDS	21	9*	* SASS機能あり

両炉ともに主炉停止系(Primary Control Rod)と後備炉停止系(Secondary Control Rod)の2種類から構成されている。主炉停止系は微調整棒および粗調整棒で構成され、かつスクラム機能を有していると想像される。後備炉停止棒はスクラム機能のみを有し、SASSが装備されている。なおCRBRPの主炉停止系の吸収体には92%濃縮の¹⁰Bが使用され、1体の制御棒は37本のピンから構成されている。また後備炉停止系の吸収体は¹⁰Bを4.7kg含むB₄Cが使用され、31本のピンで構成されている。

(5) 西 独

西独の高速増殖炉の開発は実験炉KNK-IIに始まり、現在は原型炉SNR-300を建設中、および実証炉SNR-2を設計研究中である。ここでSNR-300とSNR-2の制御棒および同駆動機構について示すことにする。なお両炉は共にループ型である。両炉の制御棒本数を次表に示す。

SNR-300の1次炉停止系の9本は調整棒であり、このうち8本は粗調整用、1本が微調整用である。1体の制御棒は19本のB₄Cピンで構成され、制御棒は炉心頂部から反応域へ、すなわち上から下に挿入される。一方、2次炉停止系は炉停止機能のみを有し、

	1次炉停止系	2次炉停止系	備 考
SNR-300	9	3	
SNR-2	未 定	未 定	

3本で構成されている。吸収体の B_4C は3領域に分けられ、それぞれがフレキシブルジョイントにより連結されている。なお制御棒の駆動方式は高速増殖炉には珍しく、通常は炉心の下に位置し、炉停止時には上へ引き上げる設計になっている。制御棒および同駆動機構の諸元を表 2.2.5 に、構造を図 2.2.15 に示す。

SNR-2の炉停止機構についてはまだ設計が明確になっていない部分が多い。なお制御棒の内面腐食が問題になるようなら、被覆管内面にニオブ(Nb)のコーティングを施したwetピンを考えているようである。

表 2.2.5 SNR-300 炉停止系の諸元

	1st Shutdown System	2nd shutdown System
Number of Units	9	3
Stroke	830 mm	1050 mm
Scram Time (Full Stroke)	700 ms	700 ms
Max. Scram Velocity	1800 mm/s	2100 mm/s
Control Velocity	0.7/1,53mm/s	-
Reactivity	23.9 \$	10.5 \$
Absorber Material	B_4C	

(6) ソ 連

ソ連は高速増殖炉の開発に相当の力を注いでおり、その成果は仏と共に世界のトップレベルにある。実験炉はもとより、すでに原型炉クラスのBN-350, BN-600を運転中であり、実証炉クラスのBN-800, BN-1600の設計研究を行なっている。しかしながら制御棒駆動機構に関する情報は、制御棒に関するものが極くわずかで、駆動機構は皆無であった。不十分ではあるが得られた情報の範囲で記すことにする。次表はBN-350とBN-600の制御棒の数を示している。

	微調整棒	粗補償棒	安全棒	備考
BN-350	2	6	4	
BN-600	2	19	6	

吸収材の多くは共に80%濃縮の ^{10}B を含んだ B_4C が使用されているが、ソ連は別に「トラップ付制御棒」を有望とみて開発を進めており、BN-350の一部にはすでに使用されている。これは一般に高速中性子よりも低速中性子の方が吸収断面積が大きくなることを利用したもので、吸収材と減速材を組合わせて制御棒を構成するものである。吸収材には酸化ユウロピウムが、減速材には水素化ジルコニウムが使用される。研究開発によってこのトラップ付制御棒の方が通常のものよりも3～5倍効率がよいという結果を得ている。トラップ付制御棒の断面図を図 2.2.16 に示す。

2.2.5 制御棒駆動機構のあり方

(1) はじめに

前にも述べたように制御棒駆動機構の基本的な構造は各国ともにはほぼ同じである。細部に至っては異なる点もあると思われるが、細部に関する情報が少なく十分な検討ができない。したがって「制御棒駆動機構のあり方」を述べるに際しては、「常陽」、「もんじゅ」の研究開発の経験に基づいてわが国のそれを想定することにする。

(2) 制御棒駆動機構のあり方

① スクラム方法

ほとんどの制御棒はその延長軸を電磁石で吸着し、スクラムに際しては電磁石の励磁電源を切ることにより、重力落下または重力と加速力による落下で、制御棒を炉心に挿入する。例外的に西独のSNR-300のSecondary Shut-down systemのみが下から上に引張る方式をとっている。上から下に落す方が自然の法則にかなってはいるが、下から上への方式も軽水炉では使用されており、また「炉停止機構は独立2系統を設け、かつそれらができれば作動原理が異なっていることが望ましい」という安全思想にも合致している。本件に関してはどちらでも可と思われる。

② 機能・構造の簡素化

制御棒駆動機構は極めて高い信頼性が要求される機器である。一般に高い信頼性を得るためには、その機能・構造を可能な限り簡素化することが望ましい。しかしながら現状の炉停止装置は、いろいろな名前があるが、実質的には微調整棒、粗調整棒、後備炉停止棒（SASS兼備が多い）より構成されており、その全ての制御棒にスクラ

ム機構を持たせている。しかし機能・構造を簡素化する意味から、せめて微調整棒からはスクラム機能を除外し、微調整用としてのみ使用できるような安全の考え方を検討してみる必要がある。

③ 制御棒及び駆動機構本数の最適化

制御棒は出力制御，炉停止に対して一定の余裕を加えて設計されている。一般に制御棒及び駆動機構本数は炉心や炉心上部機構の径方向寸法に大きな影響を与える。建設コストの低減のためには，これらの本数が少ないことが望ましいが，中性子吸収材（B-10）の最適濃度も含めて本数の最適化を検討する必要がある。

④ 制御棒の長寿命化

原子炉は一般に研究開発が進み，運転経験が豊富になると設備の利用率を向上させるため次第に長時間運転をめざすようになってくる。これに対処するために，また制御棒の交換作業を減らす意味からも，制御棒の長寿命化が必要である。長寿命化にはいくつかのアプローチがあるが「常陽」MK-IIで使用されているベント型が最も一般的である。長寿命化のためには内圧要因を除くこと，スエリングによる機械力要因を減らすことなどが検討されている。

⑤ 構造上の改良点

(i) シールベローズの位置

制御棒駆動機構では1次冷却系雰囲気と格納容器内雰囲気とを分離する1次シールとしてシールが必要な場所が2カ所あり，ベローズが使用される場合が多い。すなわちラッチベローズとストロークベローズである。ベローズの設置場所はナトリウム中とアルゴンガス中の2方法がある。“もんじゅ”制御棒駆動機構試作機では，この両方式が何体かずつ試作され，試験に供されたが，耐久性ではガス中設置ベローズが優っていた。ガス中設置ベローズではナトリウムペーパーの付着による影響に対して広範な検討が行なわれ，試作機ではその中の一つとしてアルゴンガスをブローダウンする方法が採用された。ナトリウム中試験においてはこのブローダウンが良好に行なわれ，ベローズ関係の不具合は全然生じなかった。

以上の観点からアルゴンガス中にベローズを設置する方式を推奨する。なおアルゴンガス中に設置する場合も，ナトリウム液面に近い所（高温ガス中）及び遠い所（低温ガス中）の2方法がある。試作機では両方法が試験されたが，いずれも良好な結果が得られた。

(ii) 加速装置

スクラム時間が加速力に大きく依存することは試作機の試験結果で明らかにされている。加速装置としては一般にガス圧方式とバネ方式とがある。両方式が試験さ

れ、特に不具合は生じなかったが、ガス圧方式を採用した場合は全運転期間中全ての制御棒駆動機構のガスシステムを正常に保持する心要があり、これは相当困難なことが予想される。またこの方式は経済性及びスペース確保の面からも、必ずしも満足されるわけではない。一方バネ方式は経済性及び設計の簡素化の点からは申し分なく、本方式を推奨する。なお加速バネの設置場所としてはナトリウム中、カバーガス中、2次シール後方の3方法があるが耐久性・補修性の点から2次シールの後方に設置する方式が最も有利であると考えられる。

(iii) スプリング

各制御棒駆動機構共に、いくつかのスプリングが使用されているが、それらの中にはナトリウム中に設置される方式のものも含まれている。例えば微調整棒駆動機構に於ては、ナトリウム中設置スプリングの「へたり」に起因する不具合が2回発生し、駆動に支障を来たしている。液中スプリングは、約530℃のナトリウム中に長時間侵蝕されたまま激しい動きを要求されるものであり、「へたり」に至るのも早いと考えられる。一方、実機に於ては液中スプリングの交換は、不可能ではないにしても相当な困難が予想される。したがって設計段階に於て、液中スプリングの使用を極力減らし、気中側に設置するよう工夫すべきである。

(iv) スプリングケーブル

スプリングケーブル（カールコード）とは制御棒の各種駆動を指令したり、検出信号を引き出すための電線の束である。これらのケーブルは束ねれば直径約20mm程になり、通常螺旋状に成形加工され、駆動延長軸の外側に取り付けられ、制御棒駆動機構の各種駆動に追従して伸縮できるように設計されている。実機に於ては多数回の上下駆動およびスクラム駆動に対して、「へたり」や「すり切れ」が生じてはならない。しかもこの部分の雰囲気温度は約80℃と予想されている。このような可酷な使用に耐えるために、スプリングケーブルには次のような工夫を施すことが望ましい。

- (イ) ケーブルを束ねて、その上から樹脂を塗布する。
- (ロ) ケーブルにそって金属性のバネをそわせて補強する。

試作機の試験に於ては、補強用バネを施していなかったスプリングケーブル（例：微調整棒駆動機構）は試験途中で「へたり」が生じ、補強用バネを施したものと交換して以後の試験を実施した。またスプリングケーブルに関してはいくつかを試作し、部分的R & Dが行なわれたが、この結果からも補強用バネを施したものがより耐久性を有することが実証されている。

2.2.6 実証炉の制御棒駆動機構に必要な研究開発

制御棒駆動機構はループ型とタンク型の炉型式にはほとんど依存せず、実験炉、原型炉、実証炉等の炉の規模にも依存性が低いことから、SASSを除けば原型炉までの研究開発でほぼ完成されていると考えてよからう。しかしながら制御棒駆動機構の重要性に鑑み、許認可の審議等に於ては、制御棒及び制御棒駆動機構の挙動データの提出が要求されることが予想される。したがって実証炉の各種制御棒駆動機構の実寸大モデルを1体ずつ試作し、水中試験、ナトリウム中試験、水中振動試験等の各種試験を行なって性能を確証すると共に各々のデータを得ておく必要がある。

SASSに関しても基本的には問題はないと思われるが、使用経験に乏しいので今後は部分的な実験装置及び実寸大モデルでその性能、信頼性を実証しておくことが必要である。

以上のことと並行して、制御棒駆動機構に対する要求機能の簡素化、構造の簡素化の可能性を設計研究でつめていくことも必要である。

2.2.7 結 言

わが国及び諸外国の原型炉、実証炉クラスの制御棒駆動機構について、その構造、研究開発状況等をレビューしてきた。制御棒駆動機構は炉型式、原子炉規模に対する依存性が低いことから、今後改良の余地はあるものの、基本的には完成された機器と考えられる。「もんじゅ」の制御棒駆動機構に対する研究開発は、その質・量ともにほぼ完全に近い程実施されており、報告書も多く出されているので、本文に示したよりもさらに詳しい情報が必要な場合は、それらの報告書を参照されたい。

一方諸外国の制御棒駆動機構に関する情報は他の分野のそれらよりも、少ないようである。特に構造の詳細に至っては一層乏しい感があり、本文に於ても十分な記述ができなかったが基本的にはわが国の制御棒駆動機構と大きな相違はないものと考えられる。

2.2.8 参考文献

- (1) 軍司, 他「“もんじゅ”制御棒駆動機構ナトリウム中試験(M)」PNC SN941 79-126 (1979年8月)
- (2) 松本, 他「“もんじゅ”制御棒駆動機構第2次試作3試験体比較」PNC SN941 82-104 (1982年4月)
- (3) 実証炉設計技術検討W/G編「高速増殖実証炉第1巻」—世界各国の技術調査, 第2分冊タンク型炉— PNC SN241 83-08(2) (1983年4月)
- (4) OECD-NEA編「Status of LMFBR Safety Technology」CSNI Report No.69 (1983年6月)
- (5) 小山, 他編「各国の高速炉制御棒開発の現状」PNC N951 83-01 (1983年8月)

表 2.2.1 「もんじゅ」の制御棒駆動機構

項目	主 炉 停 止 装 置		後 備 炉 停 止 装 置
	微調整棒駆動機構	粗調整棒駆動機構	
全 長 (mm)	約 14,990	約 14,780	約 14,530
スクラム方式	マグネット消磁, ガス圧加速 吸収体と延長軸の一体落下	同 左	マグネット消磁, スプリング加速 吸収体の単体落下型
ストローク (mm)	1000	同 左	1100
加速方式 (kg/cm ²)	ガ ス (7*)	ガ ス (7)	スプリング力 約 80 kg
駆 動 モ ー タ	ステップモータ	極数変換誘導モータ	三相誘導モータ
駆 動 伝 達 機 構	2 軸ボールスクリュー	同 左	1 軸ボールスクリュー
駆動延長軸保持機構	ラッチリンクを介してのマグネットによる保持	同 左	同 左
1 次 シ ー ル 機 構	ラッチベローズ (低温ガス中) ストロークベローズ(")	ラッチベローズ (高温Na中) ストロークベローズ(")	ラッチベローズ (カバーガス中) ストロークベローズ(")
2 次 シ ー ル 機 構**	バネ内蔵Uパッキン	オイルシール	Vパッキン
本 数	3	10	6
備 考	* FCRの加速ガス圧は暫定値 ** 2次シールの構造については 変更の可能性あり		

表 2.2.2 実証炉の制御棒駆動機構

項目	主 炉 停 止 装 置		後 備 炉 停 止 装 置
	微調整棒駆動機構	粗調整棒駆動機構	
全 長 (mm)	(約) 12800		同 左
スクラム方式	マグネット消磁 吸収体と延長軸の一体落下	同 左	マグネット消磁 吸収体と延長軸の分離落下
ストローク (mm)	1000	同 左	1100
加速方式 (kg)	スプリング加速	同 左	スプリング加速+加速管
駆 動 モ ー タ	可変速電動機	同 左	三相誘導電動機
駆 動 伝 達 機 構	2軸ボールナットスクリュウー	同 左	2軸ボールナットスクリュウー
駆動延長軸保持機構	ラッチリンクを介してのマグネットによる保持	同 左	同 左
1次シール機構	ストロークベローズ (中温ガス中) ラッチベローズ (")	同 左	ストロークベローズ (中温ガス中) ラッチベローズ (")
2次シール機構	未 定	未 定	未 定
本 数	(合 計 で 19)		6
備 考	◦有段速度可変の極数変換モータ と交換可能		

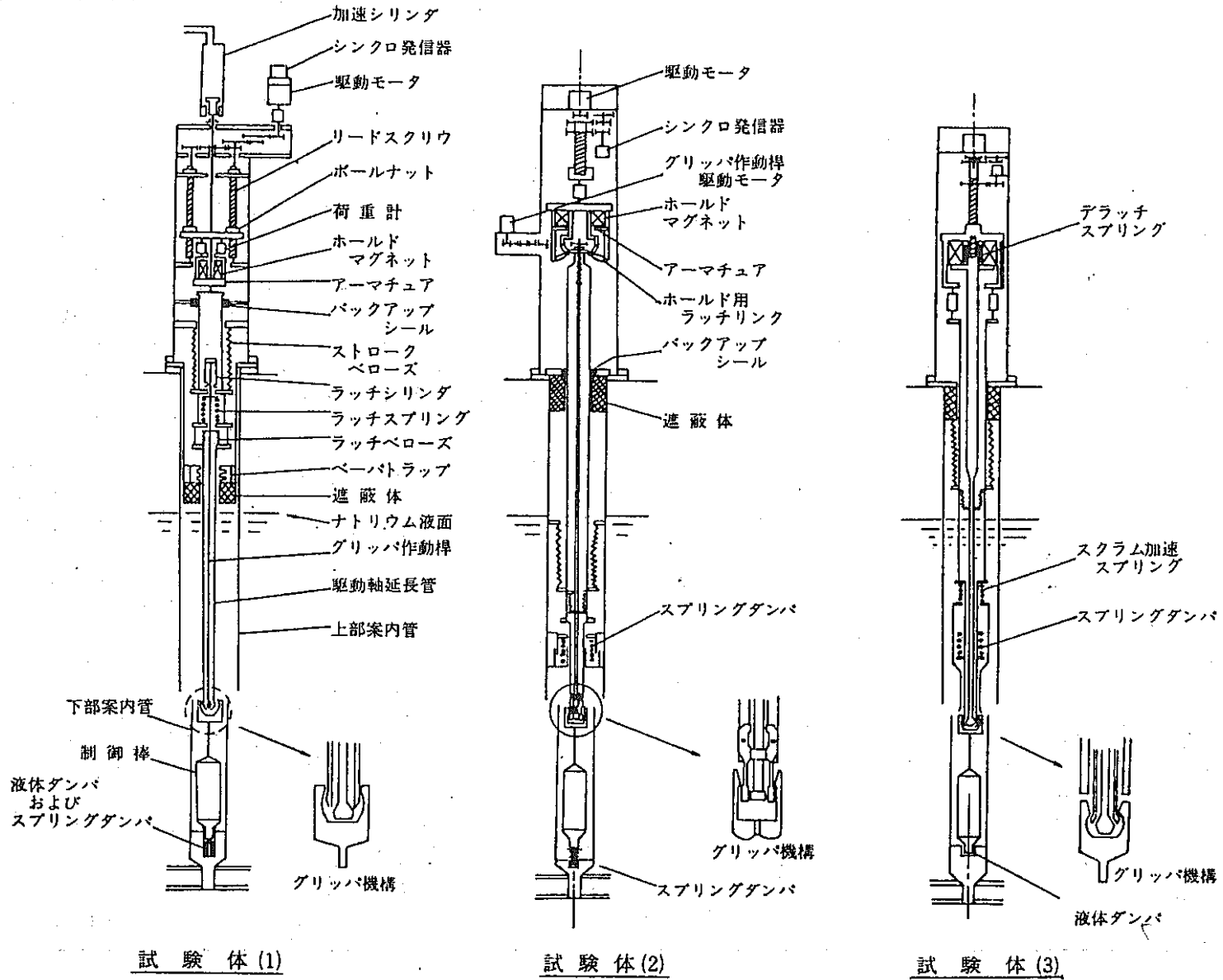


図 2.2.1 1次試作3試験体の構造, 機構

試験体	年 度	47 年 度	48 年 度	49 年 度	50 年 度
		6/E 9/E 12/E	6/E 9/E 12/E	6/E 9/E 12/E	6/E 9/E 12/E
試験体 (1)			水 中 Na中		水中振動
試験体 (2)			水 中 Na中	Na 中	
試験体 (3)			水 中 Na中		
備 考	1) 棒グラフはトラブルによる一時停止を含む 2) 試験場所 : 水中および水中振動試験 (於各メーカー) ナトリウム中試験 (於動燃・大洗センター)				

図 2.2.2 1次試作機の試験工程

試作機	50 年 度			51 年 度			52 年 度			53 年 度			54 年 度			55 年 度			56 年 度					
	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E			
後 備 炉 停 止 装 置 Back up Control Rod (B C R)	水中			Na 中			水中 振動			Na 中			中 (ホールド試験)											
安 全 棒 駆 動 機 構 Safety Control Rod (S C R)				水中			Na 中			水中 振動														
微 調 整 棒 駆 動 機 構 Fine Control Rod (F C R)													水中			Na 中			水中振動					
粗 調 整 棒 駆 動 機 構 Course Control Rod (C C R)																			水中			Na 中		
備 考	<p>1) 棒グラフは試験体の据付、撤去、トラブルによる一時停止等を含む</p> <p>2) 試験場所：水中試験（於各メーカー）、ナトリウム中試験（於当室）、水中振動試験（於三菱・高砂）</p>																							

図 2.2.3 2 次試作機の試験工程

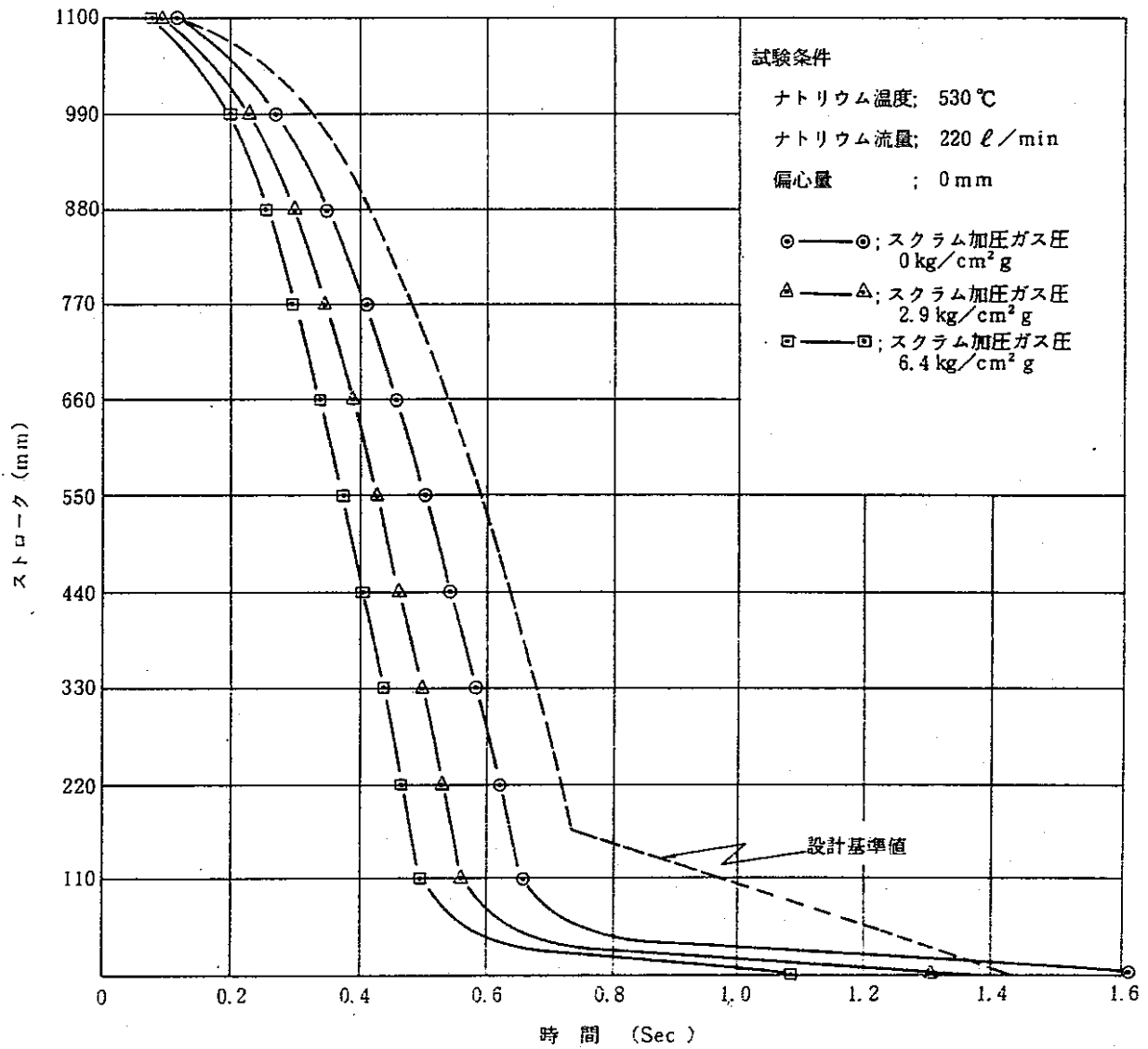


図 2.2.4 スクラム落下曲線 (加速ガス圧の影響 - 後備炉停止棒駆動機構試作機)

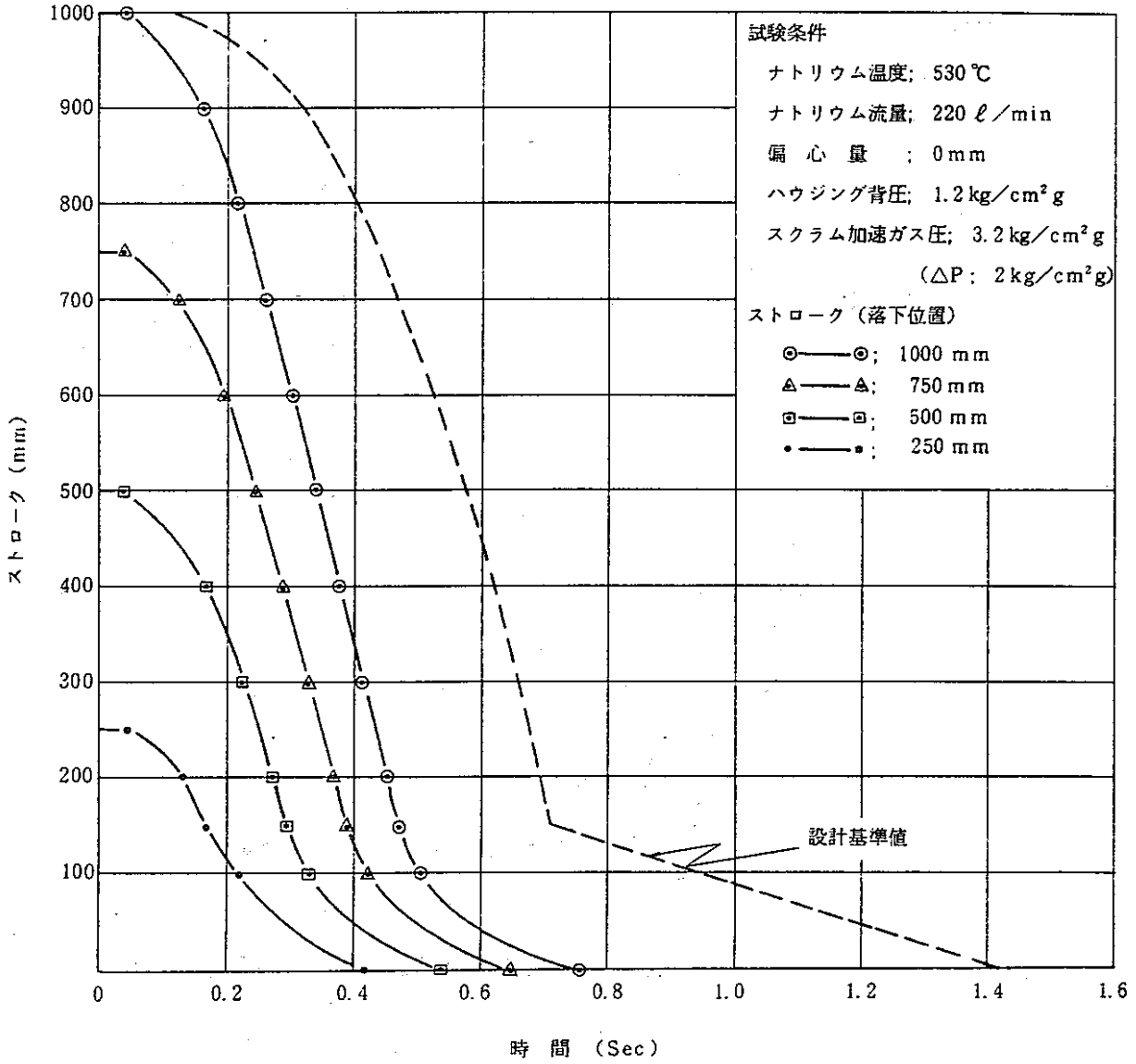


図 2.2.5 スクラム落下曲線 (途中位置からの落下-微調整棒駆動機構試作機)

年度 試作機	57年度			58年度			59年度			60年度			61年度		
	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E	6/E	9/E	12/E
微調整棒駆動機構									Na中			水中振動			
粗調整棒駆動機構									水中・水中振動			Na中			
後備炉停止棒 駆動機構		水中			Na中				水中振動						
備考															

図 2.2.6 3次試作機の試験工程

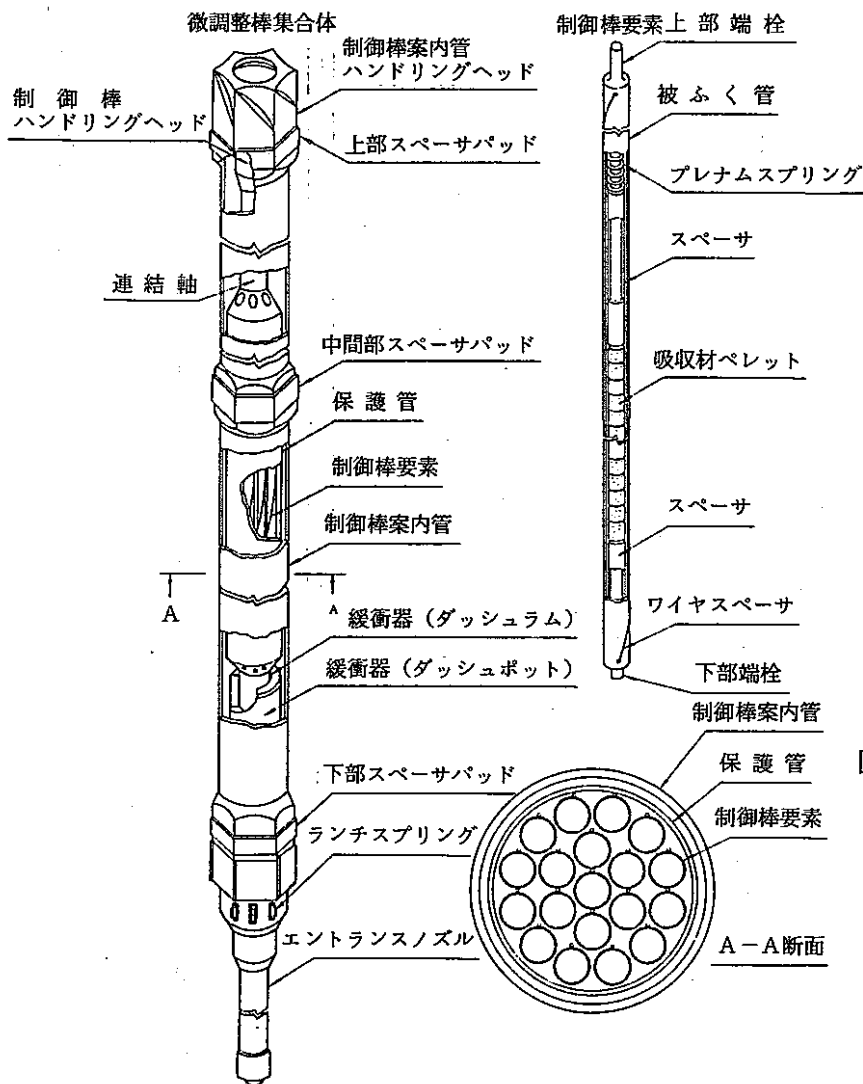
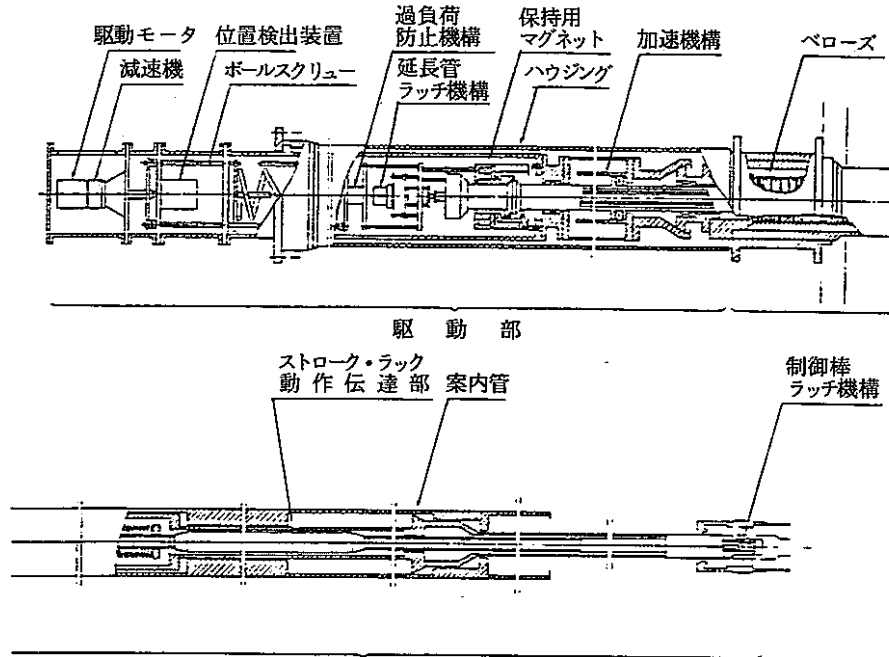


図 2.2.7
微調整棒および同駆動機構
（「もんじゅ」）

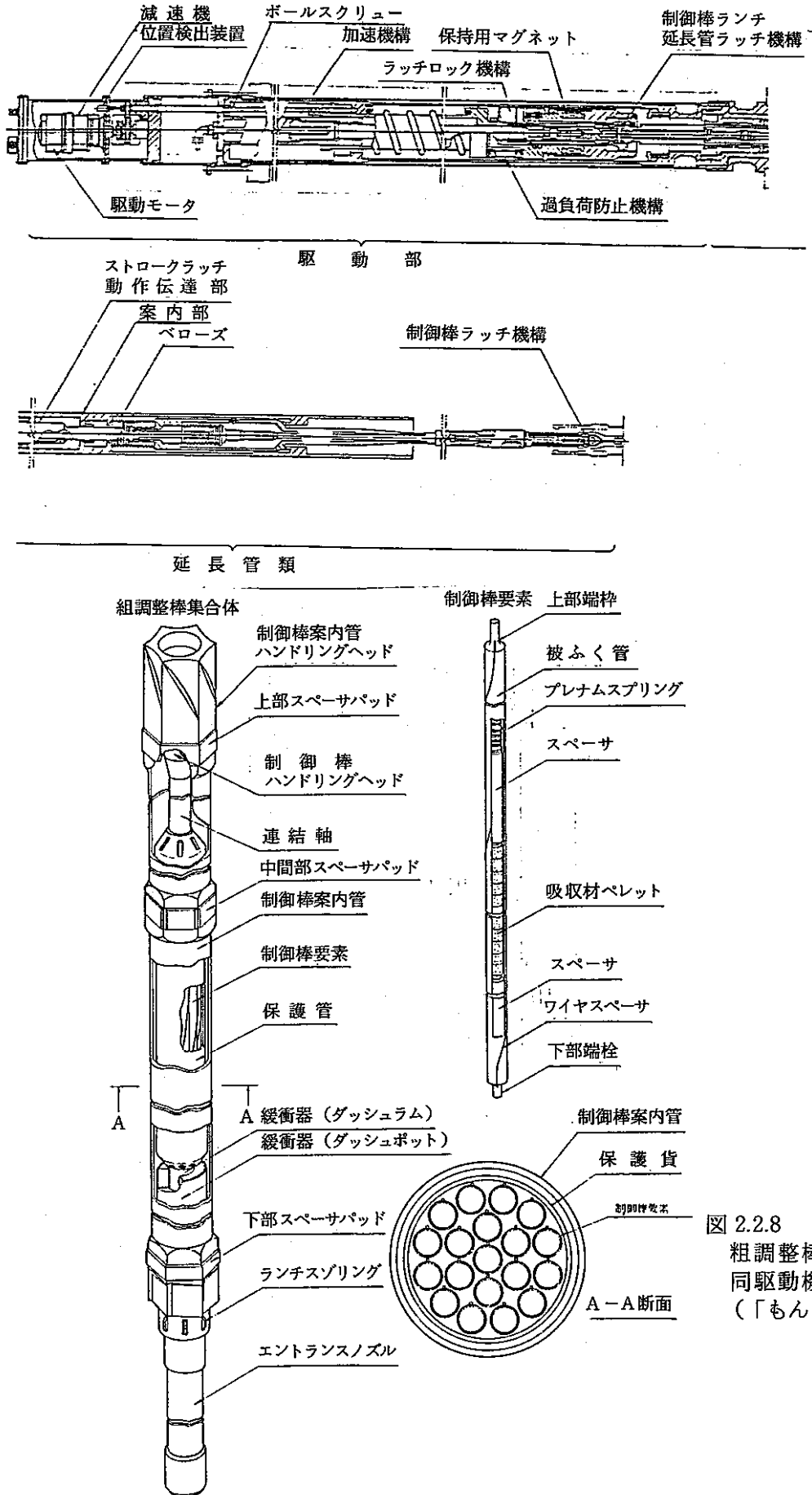
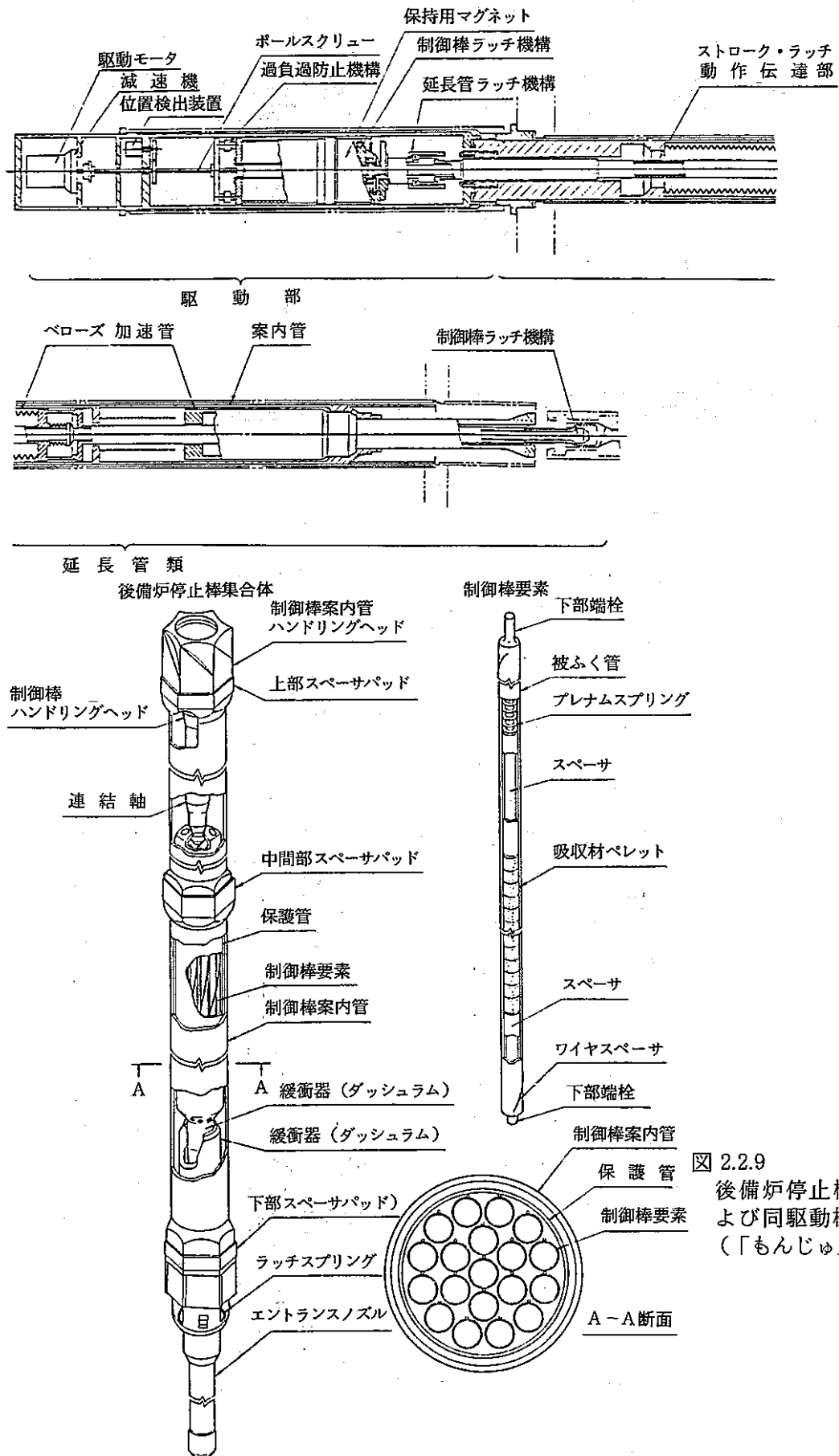


図 2.2.8
粗調整棒および同駆動機構
（「もんじゅ」）



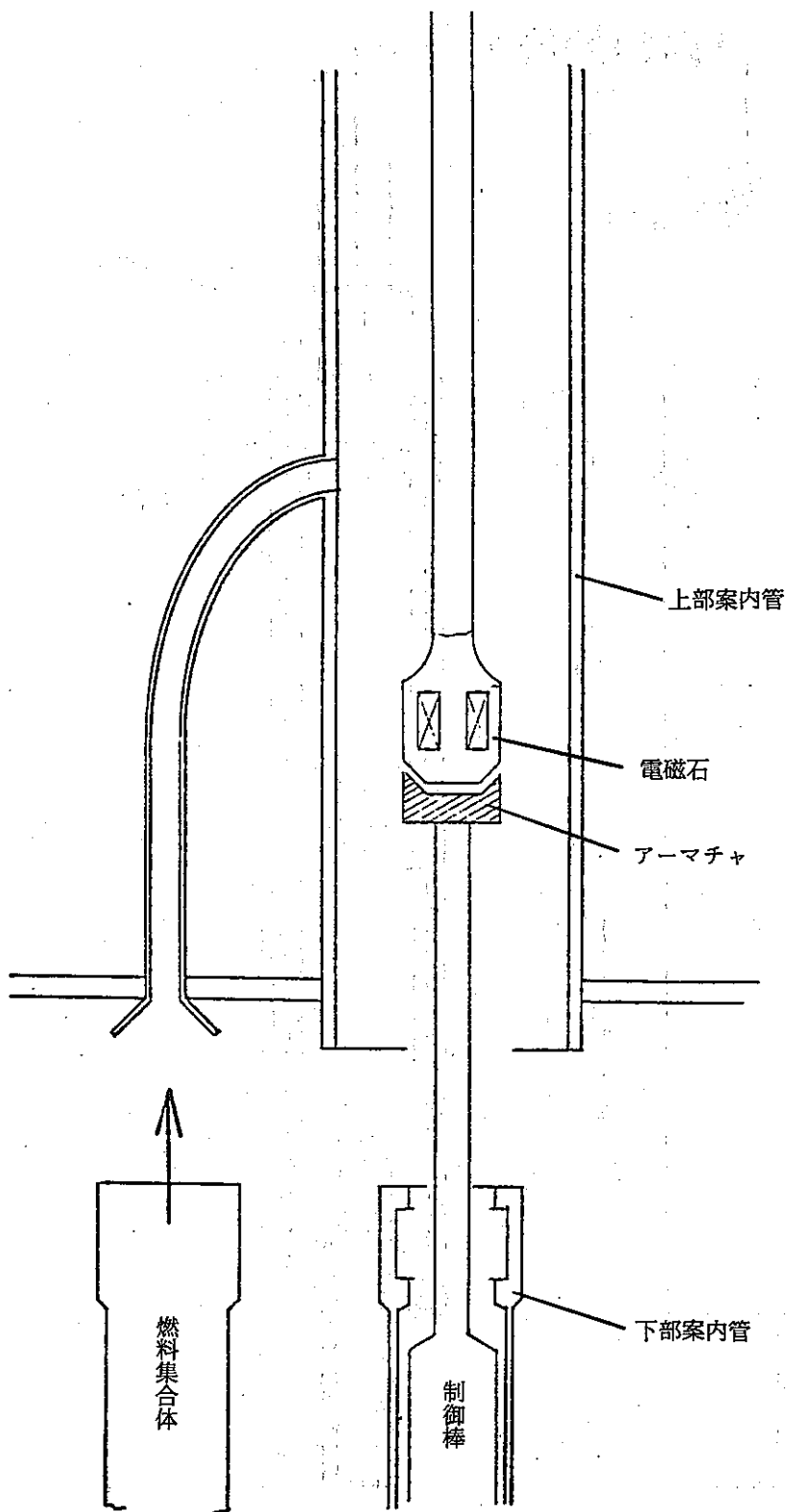


図 2.2.10 キュリー点電磁石方式

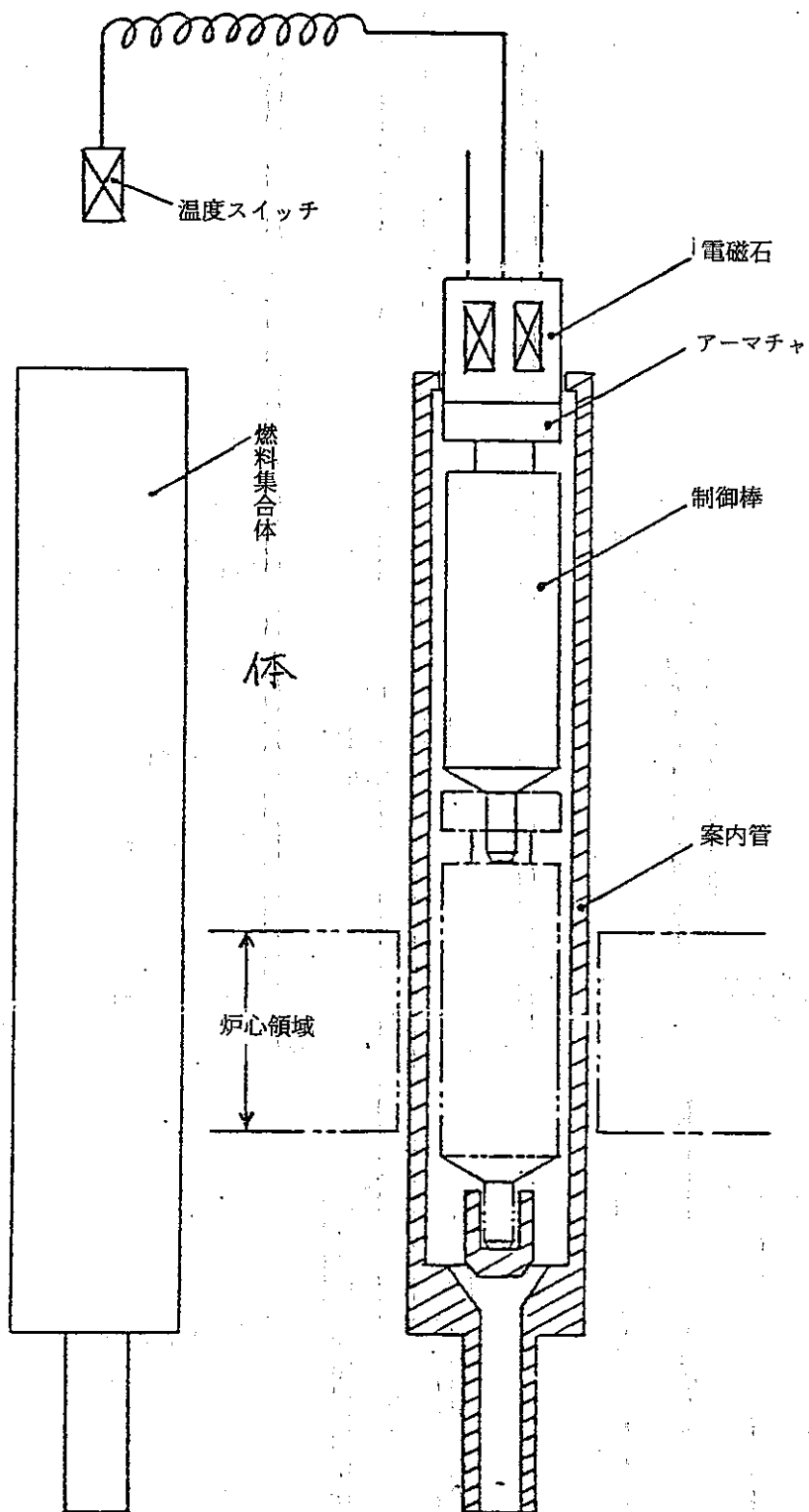


図 2.2.11 電磁石・温度スイッチ方式

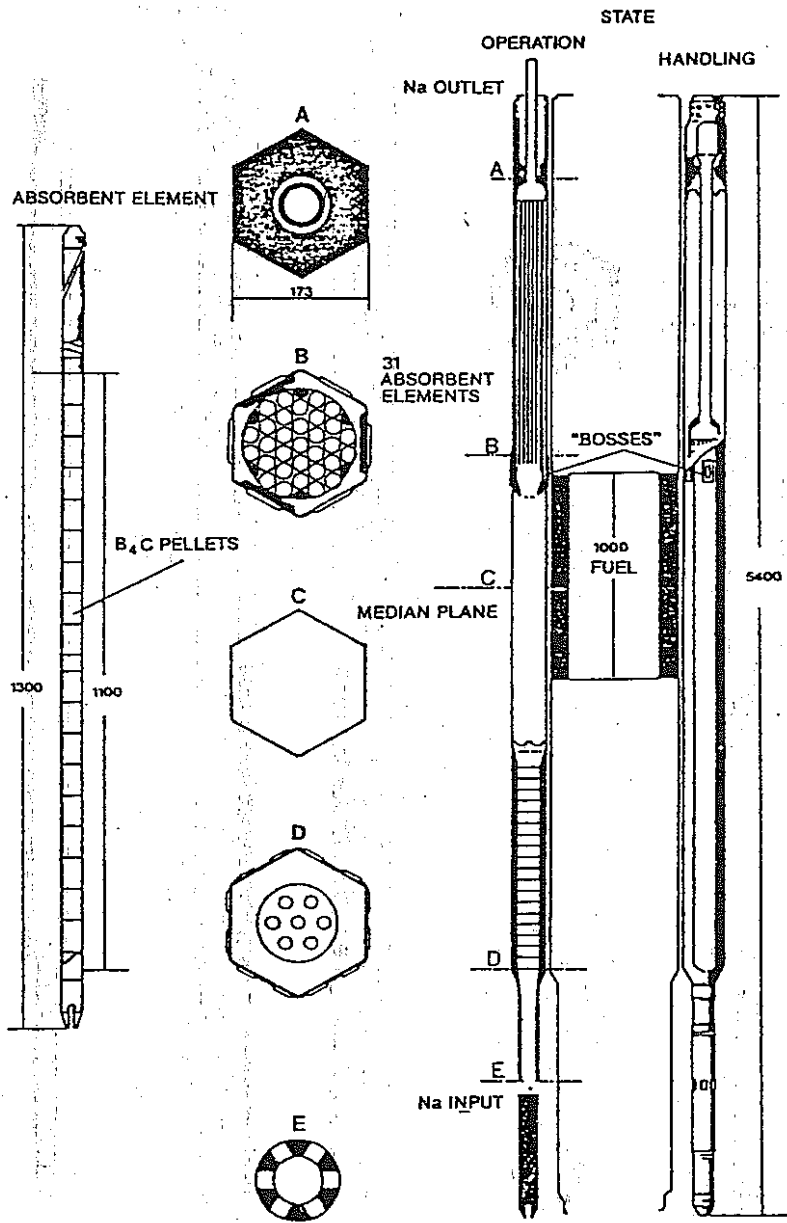


図 2.2.12 スーパーフェニックスの主炉停止棒

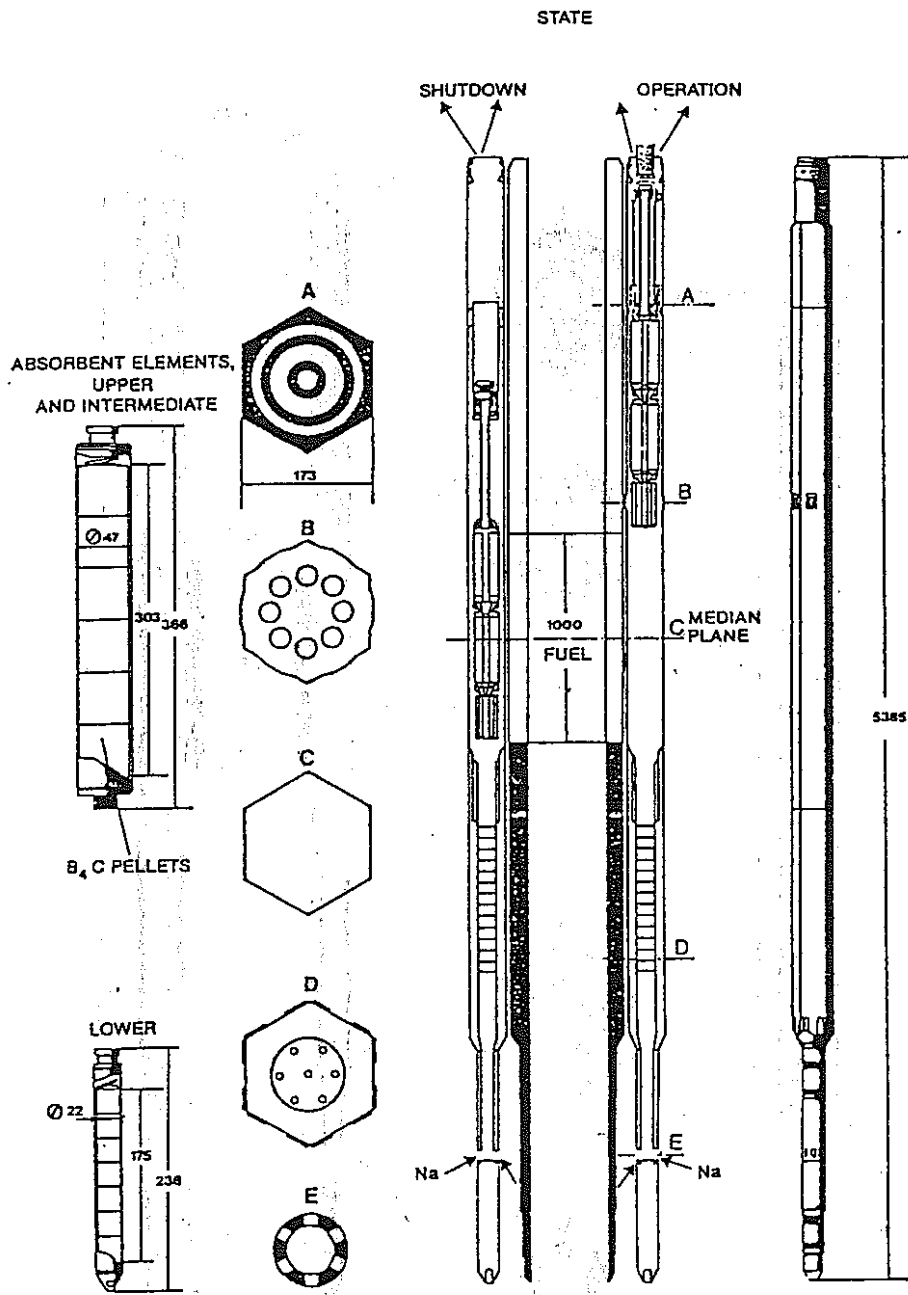


図 2.2.13 スーパーフェニックスの補助炉停止棒

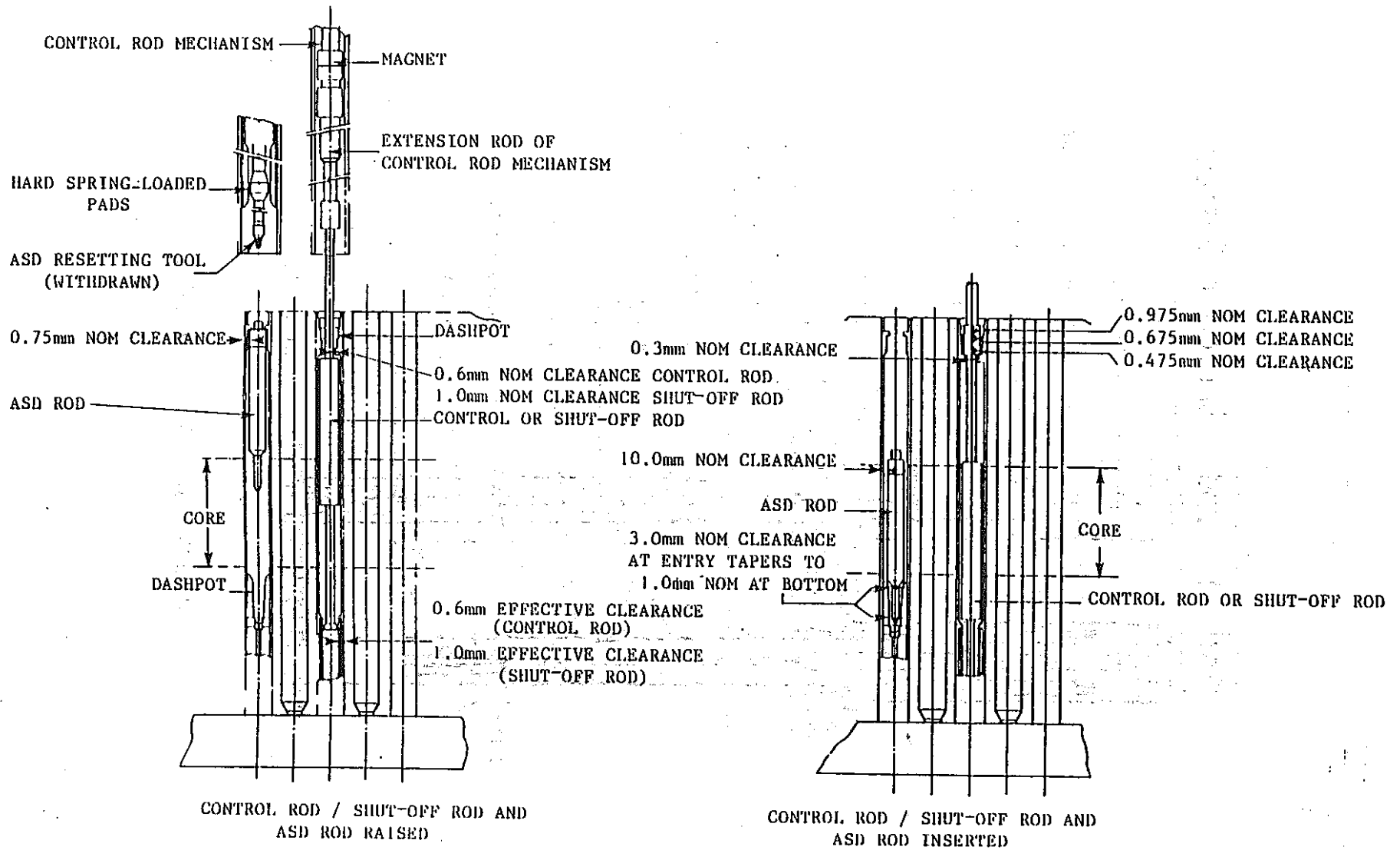


図 2.2.14 CDFR の炉停止系

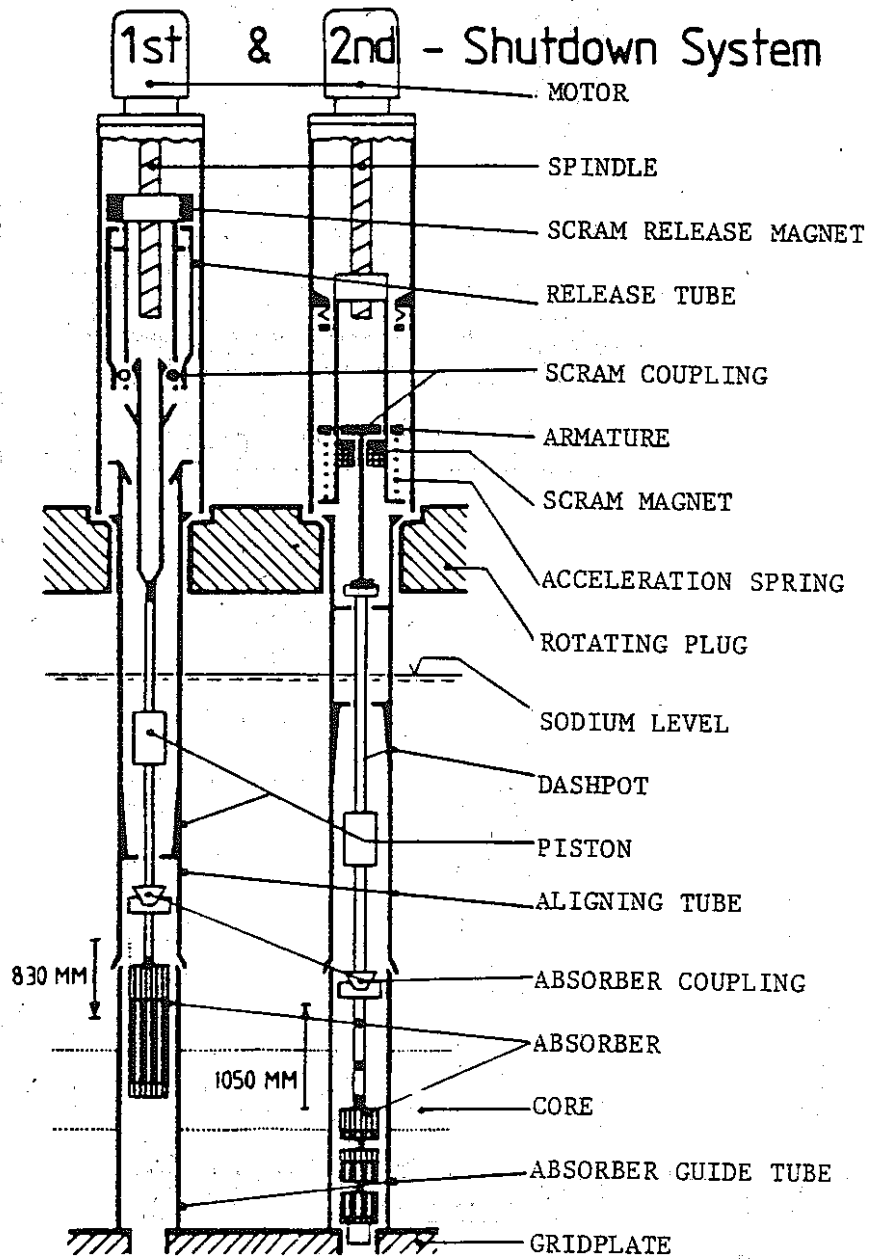


図 2.2.15 SNR-300 の炉停止系

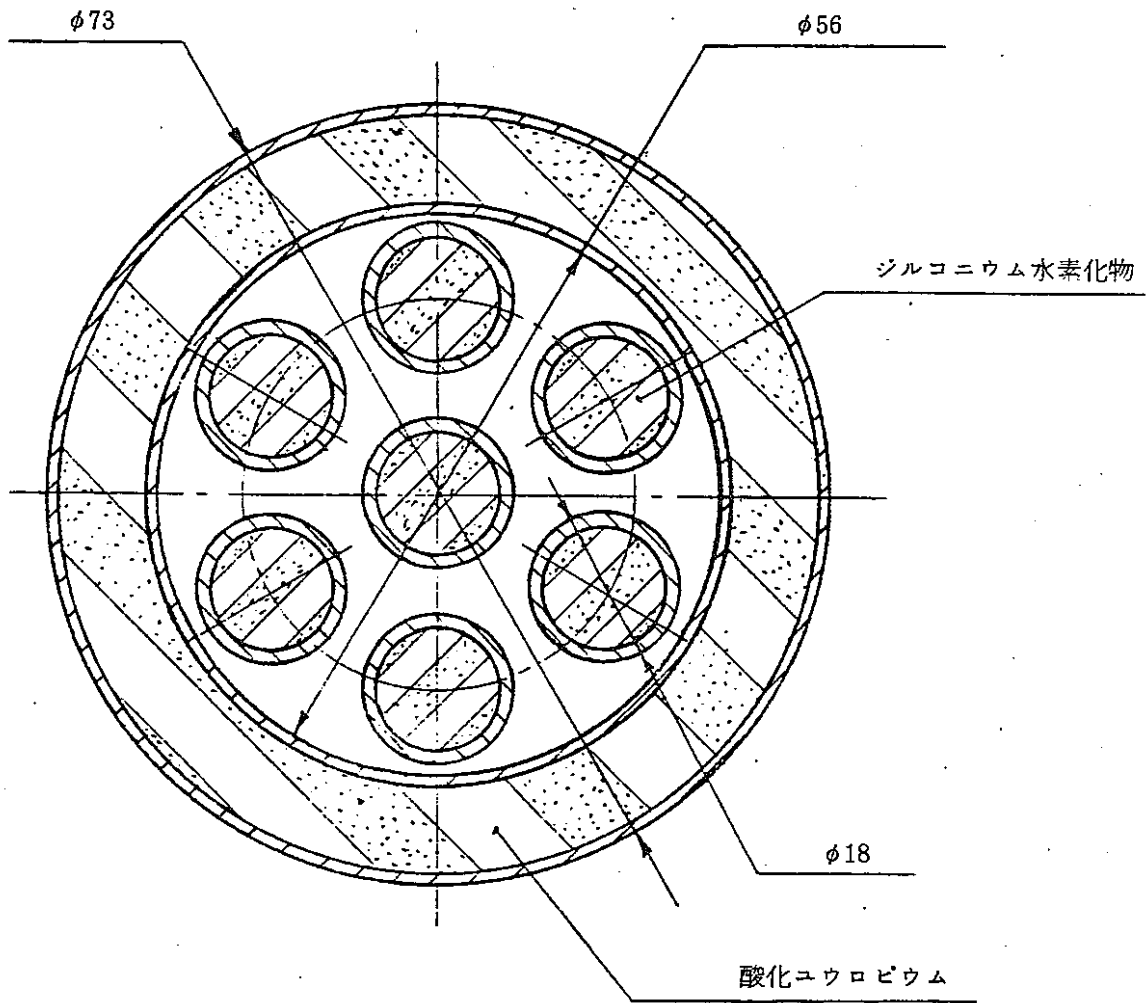


図 2.2.16 環状吸収体を有する「トラップ」付き制御棒の断面（BN-350 の例）

2.3 炉心上部機構

2.3 1	炉心上部機構に要求される機能	95
2.3 2	炉心上部機構の設計で考慮すべき現象	96
2.3 3	炉心上部機構の設計例	97

2.3 炉心上部機構

炉心上部機構は回転プラグからつり下げられ、炉心の上部に位置し、主として制御棒の案内管、炉心上部計装を内包している。炉心の直上に位置するため原子炉構造の中で最も高温でかつ厳しい熱過渡条件にさらされる構造物である。ループ型やタンク型といった炉型式によりその構造が変わることはあまりない。

2.3.1 炉心上部機構に要求される機能

炉心上部機構は主として次の機能を有している。

(1) 制御棒上部案内管支持

制御棒駆動機構により制御棒を炉心に挿入したり、引き上げる場合の案内管を垂直に保持し、下部案内管と同心にするための支持の役割をになっている。この機能が地震や熱による案内管の変形により損なわれると、制御棒が炉心に挿入されないか、あるいはされても時間的に遅くなり、炉心の制御ができなくなり、暴走を起しかねないので重要な機能である。

(2) 炉心上部計装の支持

各燃料集合体から流出する冷却材の温度や流量を監視し、異常を検出した場合には炉を停止する信号を出す、炉心上部計装のセンサーを各燃料集合体の直上に保持する機能を有している。運転中に燃料集合体との相対位置がずれると、見掛け上の温度や流量が変化するため異常と診断されるのでこの支持機能は重要である。

(3) 整流装置の支持

炉心上部計装へ正確に冷却材が送られることを確保するため、一般には燃料集合体直上には整流装置が設置される。この装置を常に正確な位置に保持する機能を有している。

(4) 燃料集合体の浮上防止

一般には炉心側で燃料集合体のホールドダウン機能を有しているが、何らかの原因により浮上した場合には、炉心上部機構の下部に燃料集合体の頂部が当ることによりそれ以上の浮上を防止するよう設計されている例が多い。

(5) 冷却材のミキシング促進

燃料集合体や制御棒下部案内管から流出する冷却材の温度が種々異なっていることから、ミキシングを促進し上部プレナムの温度を均一にする機能を有する。炉によっては積極的にこの効果をねらった設計を行っているものがある。ミキシングさせる位置を工夫することにより炉心上部機構まわりのサーマルストライビングを押えることができる。

2.3.2 炉心上部機構の設計で考慮すべき現象

炉心上部機構の機能を阻害したり、破損をひき起さぬ様設計時に考慮すべき現象を以下に述べる。

(1) 液面近傍温度分布（軸方向勾配による熱応力）

炉心上部機構の接液部は、原子炉容器と同様に定常的軸方向温度勾配による熱応力が発生し、クリープ損傷を受け易い。また過渡時にはさらに厳しい熱応力が繰返し作用するのでクリープ疲労損傷を受ける。これはアルゴンガスとナトリウムの熱伝達率の違いから生ずるものである。特に地震時の制御棒挿入性を確保しなければならないため、剛性を増す目的で形状を円筒形にしたり、板厚を厚くする必要性があるため、熱応力対策を設計に取り入れることがある。

(2) 熱衝撃

炉心上部機構は一般に円筒構造であり、剛性の確保や健全性維持のため、胴部の穴を極力さけるため、冷却材の内部への流入が少ない。従ってスクラム等の熱過渡時には、胴内部の冷却材温度は外部プレナムの温度に追従できず、板厚方向に温度分布が生じ、熱応力を発生し易い。

(3) サーマル ストラティフィケーション

スクラム等の熱過渡時には、炉心から上部プレナムに流入する低温のナトリウムと、既にあった高温ナトリウムとの密度差に起因するサーマル ストラティフィケーションが発生し、軸方向に厳しい温度勾配が生じる。それに接する構造材には熱応力が発生する。ストラティフィケーションの界面は、時間とともにわずかずつ上昇することから、熱応力の発生する部位が上方に移動することになる。したがってこの現象を考慮した設計が必要となる。

(4) サーマル ストライピング

ドライバー燃料集合体と制御棒下部案内管、ドライバー燃料集合体とブランケット燃料集合体間の冷却材の温度の違いから炉心出口部では、それらのミキシング時に温度ゆらぎが発生し、それに接する構造材に高サイクル熱疲労を起し易い。従って炉心設計においては冷却材温度差を極力おさえるとともに、炉心上部機構の設計ではサーマル ストライピングが生じにくい設計とすることが必要である。高サイクル疲労が問題となる部位では高温疲労強度の高い材料を使用する必要がある。

(5) 地震

炉心上部構造は一般に径に比して長さが長いため、地震時に座屈を生じ易い。また座屈を生じない場合でも変形が生じ、制御棒の上部と下部の案内管の相対的ずれにより、制御棒の挿入が不可能となるか、あるいは挿入速度が設計値を満足できなくなることが考

えられる。耐震の観点からは板厚を厚くすれば良いが、熱応力的には不利となる。したがってこれらの合理的な妥協点から板厚を決定する必要がある。地震時の変形を防止する目的で、炉心上部機構と炉心を結合する等の案が検討されている。

(6) 偏 流

炉心上部機構廻りに偏流が生じると周方向に温度差が生じ、変形の原因となる。このような場合も制御棒の挿入性が確保できなくなる。

(7) 冷却材のミキシング

各燃料集合体や制御棒下部案内管から流出するナトリウム温度は各々異なることから上部プレナムで十分なミキシングが行なわれない場合には、通常運転時にもストラティフィケーションが発生したり、過渡時に発生するストラティフィケーションの温度勾配が大きく、かつ解消まで長時間を必要とする。従って冷却材のミキシングを考慮した設計を行わねばならない。

2.3.3 炉心上部機構の設計例

(1) 日本の設計例

① 「もんじゅ」

「もんじゅ」の炉心上部機構の構造を図 2.3.1 に示す。炉心上部機構は回転プラグに据付けられ、円筒構造である。その内部に制御棒上部案内管、炉心上部計装のためのウェルを内包している。下部には整流装置が取り付けられている。整流装置は各燃料集合体から流出するナトリウムを炉心上部計装の計装フィンガ（内部には温度と流量のセンサを内蔵している）に導くための整流筒と、それを支持する支持板とにより構成されており、支持板は制御棒上部案内管も支持している。炉心上部機構の円筒部はプレナム液面上で遮へい胴と継胴に上下に 2 分割され、組立時の計装ケーブルの取扱いが容易にできるよう配慮されている。円筒内部には変形防止のための補強円板が取り付けられている。燃料集合体からのナトリウム整流筒を通り、上昇するが、一部は整流装置支持板にあけられたフローホールを通り、円錐状の下部熱しゃへい板に当り向きを変える。制御棒下部案内管から流出するナトリウムは、ほとんどが上部案内管内に流れ込む。

液面に接する継胴部はバケット構造を有しており軸方向温度勾配による熱応力の低減がはかられている。円筒胴部には強度部材の外側に一枚の熱しゃへい板がとりつけられており、熱過渡時の熱応力の軽減がはかられている。炉心上部機構の材料は SUS 304 であるが、燃料集合体と制御棒下部案内管からの冷却材の温度差によるサーマルストライピングに対しては、高温疲労強度の高いインコネル 718 を構造材表面に貼り

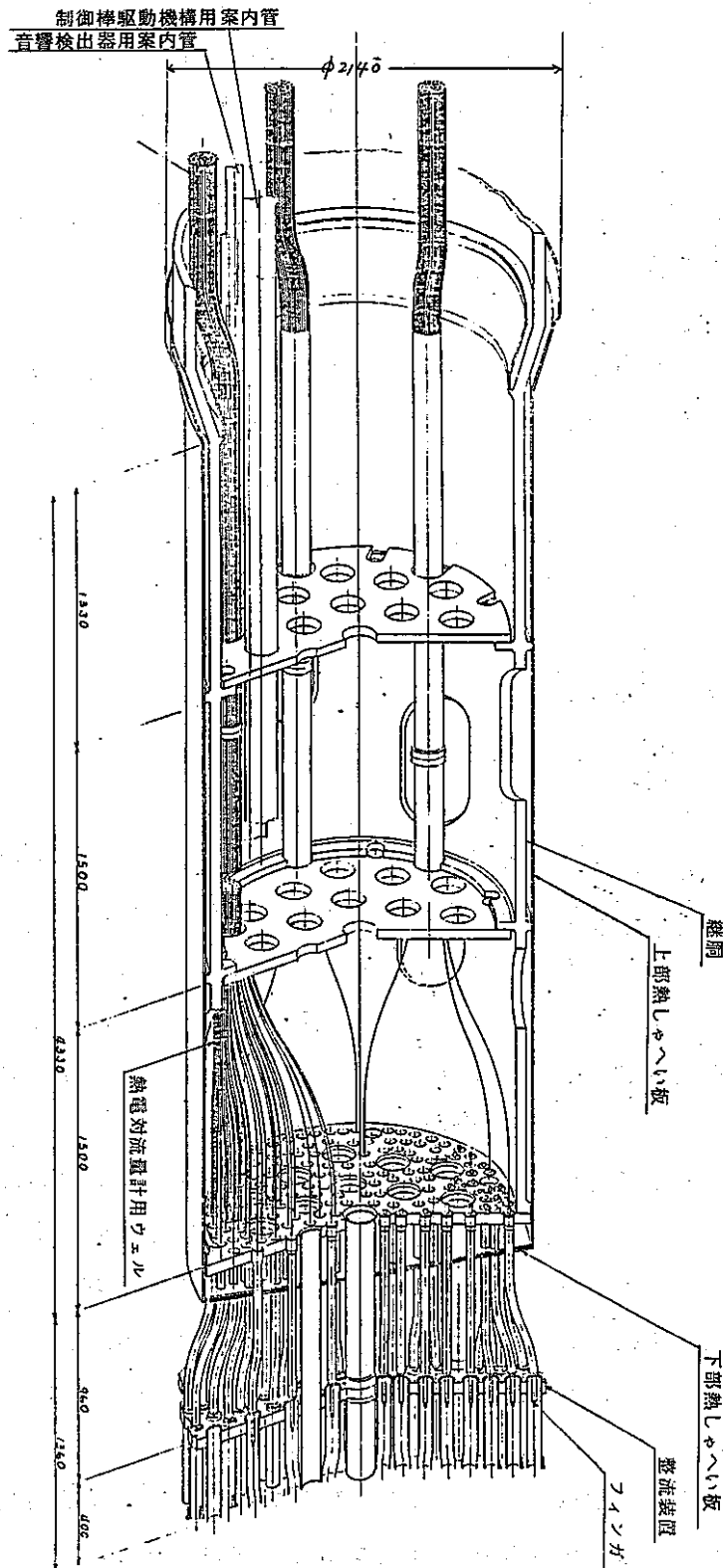
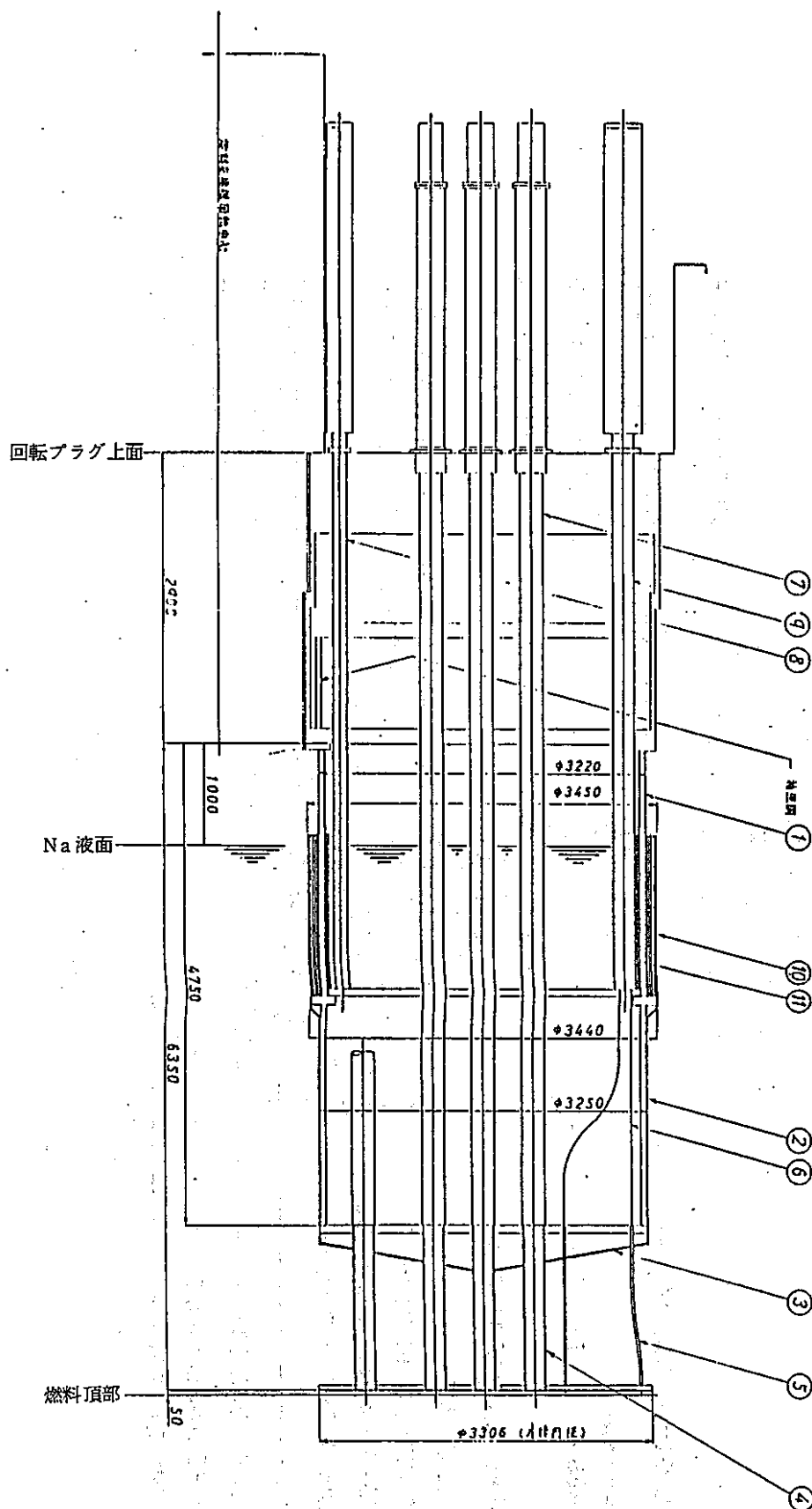


図 2.3.1 「もんじゅ」炉心上部機構



11	内筒用耐熱鋼管	SUS304	1
10	内筒用耐熱鋼管		1
9	燃料出口用耐熱鋼管		25
8	燃料出口用耐熱鋼管 (A)		4
7	燃料出口用耐熱鋼管 (B)		4
6	燃料出口用耐熱鋼管	SUS304	336
5	リング	A22447701	336
4	燃料出口用耐熱鋼管	A22447701	1
3	下筒用耐熱鋼管	SUS304	2
2	上筒用耐熱鋼管	SUS304	1
1	内筒	SUS304	1
Pnc 部品名 数量			

図 2.3.2 動燃実証炉炉心上部機構

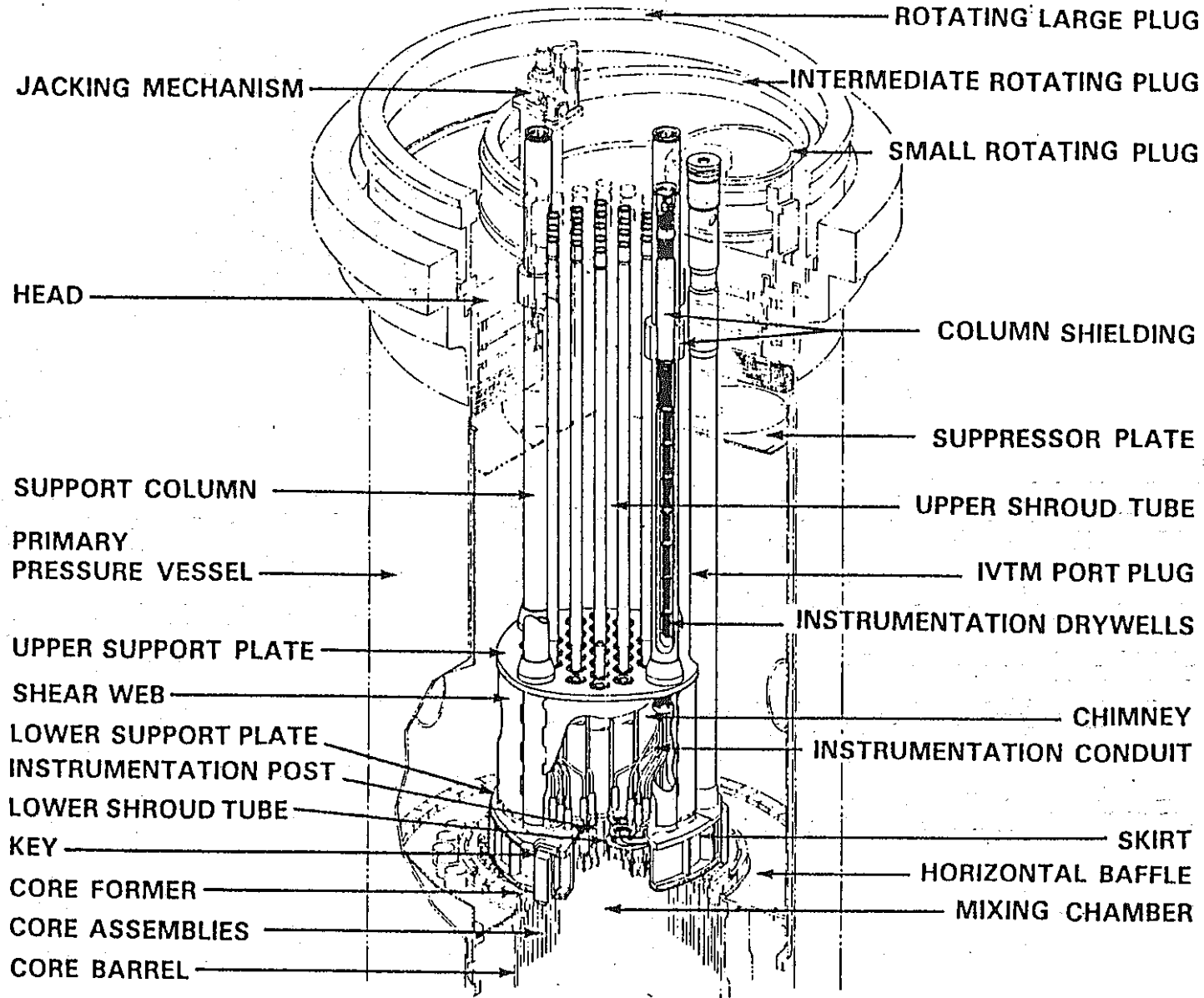


図 2.3.3 CRBRP の炉心上部機構

付けることにより対処している。これらの取付けはこの材料の溶接性を考慮して、溶接なしの固定方法をとっている。整流筒とフローホールからの冷却材が当たる下部熱しゃへい板は垂直面に対して80度の傾きをもたせ、プレナム内の冷却材の混合を促進させている。制御棒の上部案内管の内、粗調整棒の支持板より下方部分は切り取られている。これは管板構造である支持板の制御棒案内管と整流筒間の温度差が定常的に大きくなるのを防止するため支持板下部でのミキシングを良くすることを目的としたものである。

各整流筒下部にはL字形の浮上り防止用のツメが付けられており、万一燃料集合体が浮上したとしてもこれに接触し、それ以上の浮上を防止している。

炉心上部機構の研究開発はサーマルストライピングを中心に行なわれてきた。全体の温度ゆらぎ特性は上部プレナムを模擬した1/3セクタの水流動試験⁽¹⁾⁽²⁾で得られており、又局所的な構造の決定のためには実寸大の13体の燃料集合体の上部とそれに対応する炉心上部機構を模擬した試験体による試験⁽³⁾を実施した。水とナトリウムの関係や温度ゆらぎ下での熱伝達率を求めるため7本集合体による試験を実施しており、「もんじゅ」でのサーマルストライピング現象の解明がなされている。

② 動燃実証炉ループ型

動燃実証炉についての炉心上部機構に関しては文献(4)に述べられている。その後実施された第2次概念設計(II)の概要について述べる。その構造を図2.3.2に示す。

概略形状は「もんじゅ」と同様に円筒胴形であり、これにより剛性を保っている。円筒胴下部も円錐形である。炉心とは非結合であるが、地震時の変位も許容値を下まわり、制御棒挿入性を確保できる。液面上近傍熱応力対策は円筒胴保護装置(断熱構造体)を取り付けることにより行っている。小回転プラグへの取付けは下面へ溶接している。燃料浮上り防止は格子状平板方式である。下部構造は「もんじゅ」と異なり、整流筒を設けず、格子状の浮上り防止板を設置した。炉心出口計装用ウェル下端およびフィンガが下端を挿入し、支持する両端支持方式構造を採用している。この構造により下部構造の重量が大巾に軽減された。また計装用フィンガの直径が約50mmから30mm程度に縮小された。

主要材質はSUS304であるがサーマルストライピングを受ける部分にはインコネル718の熱しゃへい板を取り付けている。

③ 電力実証炉ループ型

電力実証炉の構造は「もんじゅ」とほぼ同一である。すなわち円筒形の継胴内部に制御棒上部案内管、炉心出口計装用ウェルを内蔵し、座屈防止あるいは変形防止のために振れ止め板を内部に止り付けている。継胴下部は冷却材のプレナム内ミキシング

を良くするため円錐形としている。最下部には整流装置があり、整流筒とその支持板で構成されている。整流筒内部には炉心出口計装のフィンが入っている。支持板にはフローホールがあり、整流筒を通らないナトリウムが上昇するようになっている。サーマルストライピングが厳しい部位にはインコネル718の熱しゃへい板がとりつけられている。

「もんじゅ」と異なる点は以下の通りである。熱電対用ウェル検出器案内管を大口径のものとした左右に振り分けている。そのため上部ハウジング部は断面が円形でなく長円形をしている。液面近傍熱応力対策として金属積層断熱構造体が採用され、その内部には伝熱伝導率物質としてハステロイBが選定されている。

評価項目として次のものが検討された。

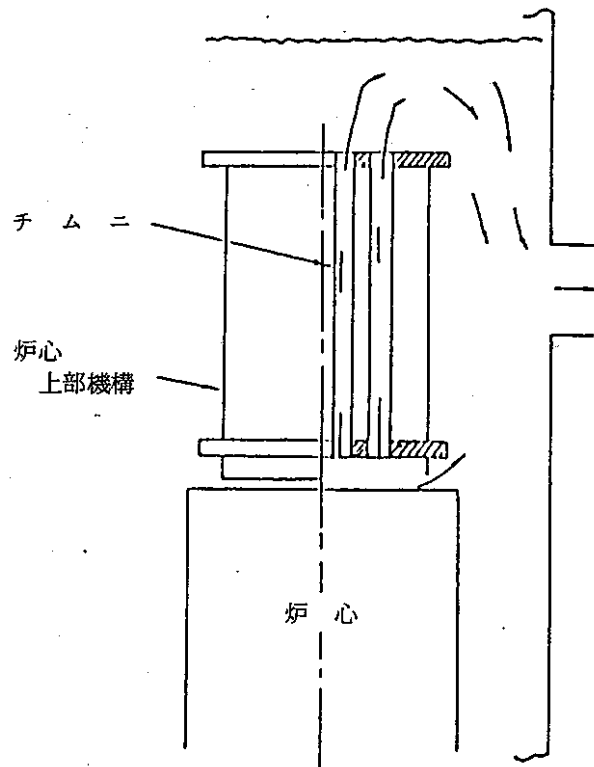
- a) 液面近傍応力緩和構造の検討
- b) 上部ハウジングの剛性評価
- c) 回転プラグの冷却構造の検討
- d) 炉心上部機構下端－燃料頂部の間隙評価
- e) 地震時炉心上部機構先端変位の検討
- f) 回転プラグへの取付部構造の検討
- g) 放射線遮へい構造の評価
- h) 整流装置管板のライナ厚さの検討

(2) 外国の設計例

① 米国CRBRP

CRBRPの炉心上部機構はチムニー型であり、その構造を図2.3.3に、冷却材の流れを図2.3.4に示す。炉心上部機構は4本のサポートプラグで支持されており、制御棒上部案内管は上下の支持板で支持される。下部はシェアーウェブとスカートでおおわれている。スカート内部はミキシングチェンバーとなっており、ミキシングをここに限定している。シェアーウェブには大口径のフローホールがあげられている。炉心とは3つのキーにより結合される。炉心側の受け構造を図2.3.5に示す。燃料交換のため小回転プラグを回転する場合にはサポートプラグ上のジャッキ機構で炉心上部機構全体がもち上げられ、炉心との結合が解除される。サポートコラムは中空であり、その内部には計装ウェルが納められ、プラグ上方にとり出されている。ミキシングチェンバー内には計装ポストがとりつけられており、各燃料集合体からの冷却材の温度を計測する。その形状を図2.3.6に示す。センサ取付位置は6ヶ所につき出たブランチの先である。

使用材料はSUS316であるが、サーマルストライピングを受ける部位についてはイ



b) CRBRタイプ
PLBRタイプ (GE社, WH社)

図 2.3.4 CRBRPの炉心上部機構まわりの冷却材の流れ

ンコネル718をはりつけている。炉心上部機構には IVTM がとりつけられている。仕様を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 CRBRPの炉心上部機構の仕様

• CONSTRUCTOR	COMBUSTION ENGINEERING
• HEIGHT, IN	427
• DIAMETER, IN	136
• WEIGHT, LBS	87,000
• QUANTITY	ONE (1)
• DESIGN TEMP, °F	
- IN MIXING CHAMBER	1220
- AT PRESSURE BOUNDARY	230
- AT IVTM PORT PLUG COVER	180
• MATERIAL	
- STAINLESS STEEL	316
- INCONEL	718

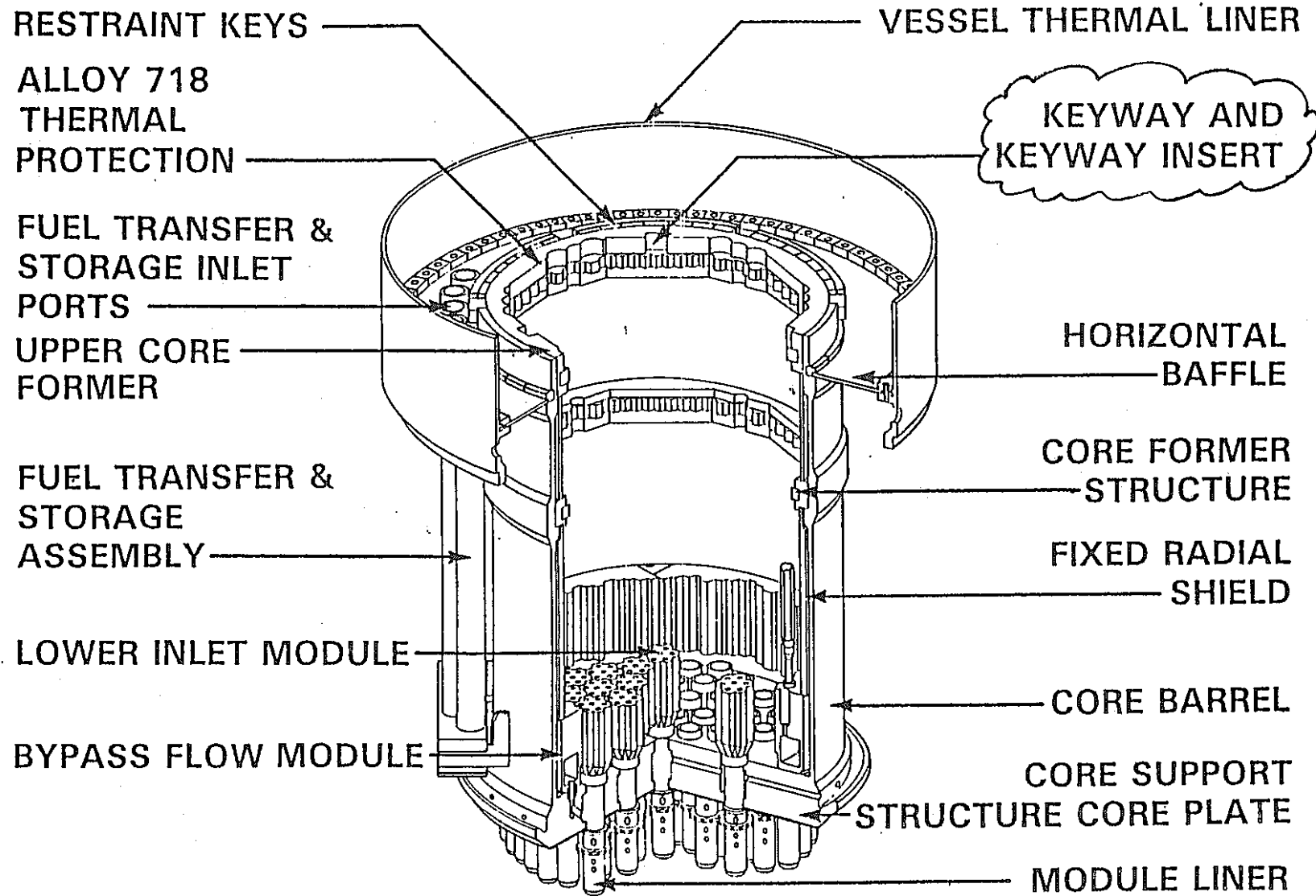


図 2.3.5 炉心上部機構のキー結合の炉心側受け構造

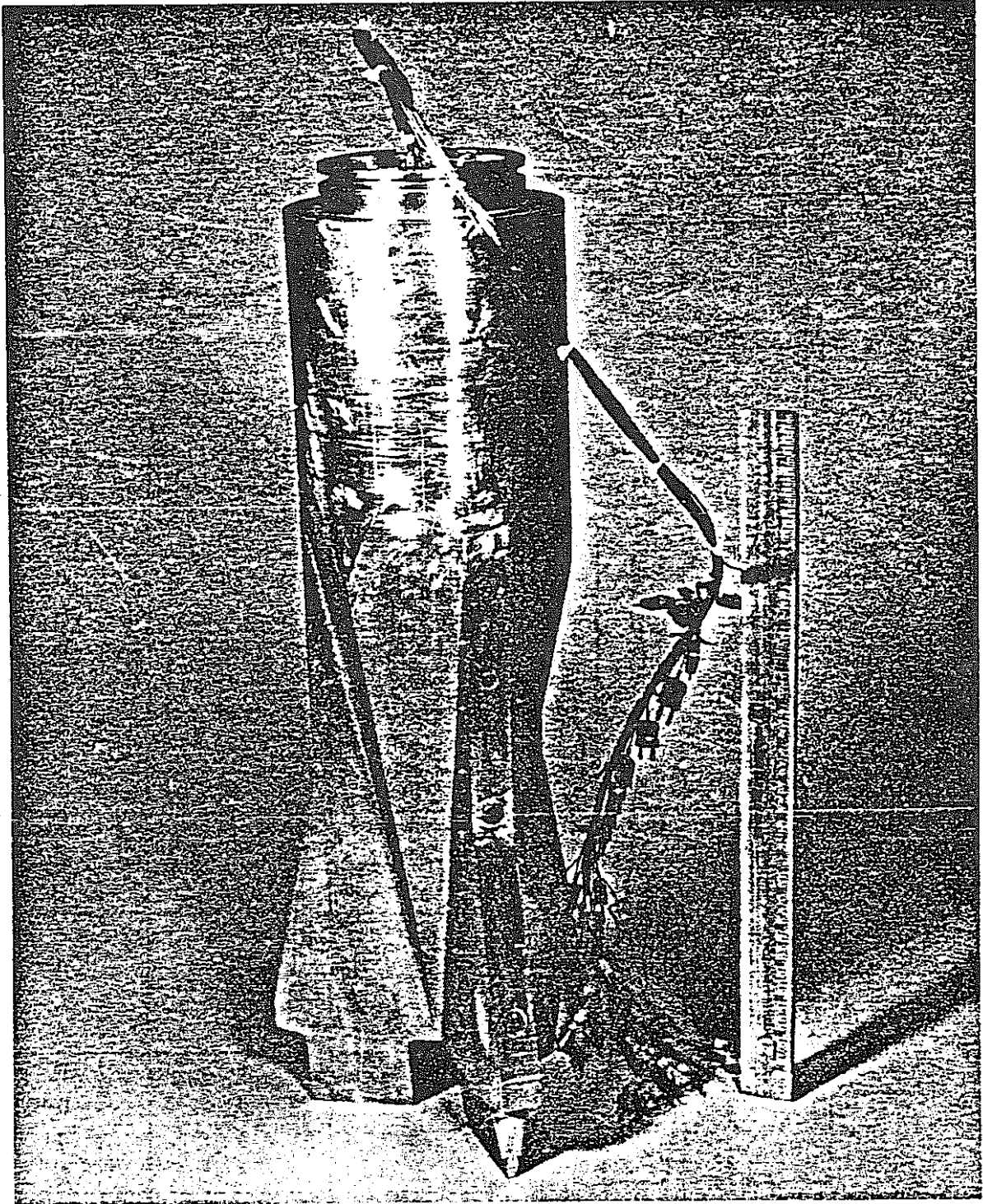
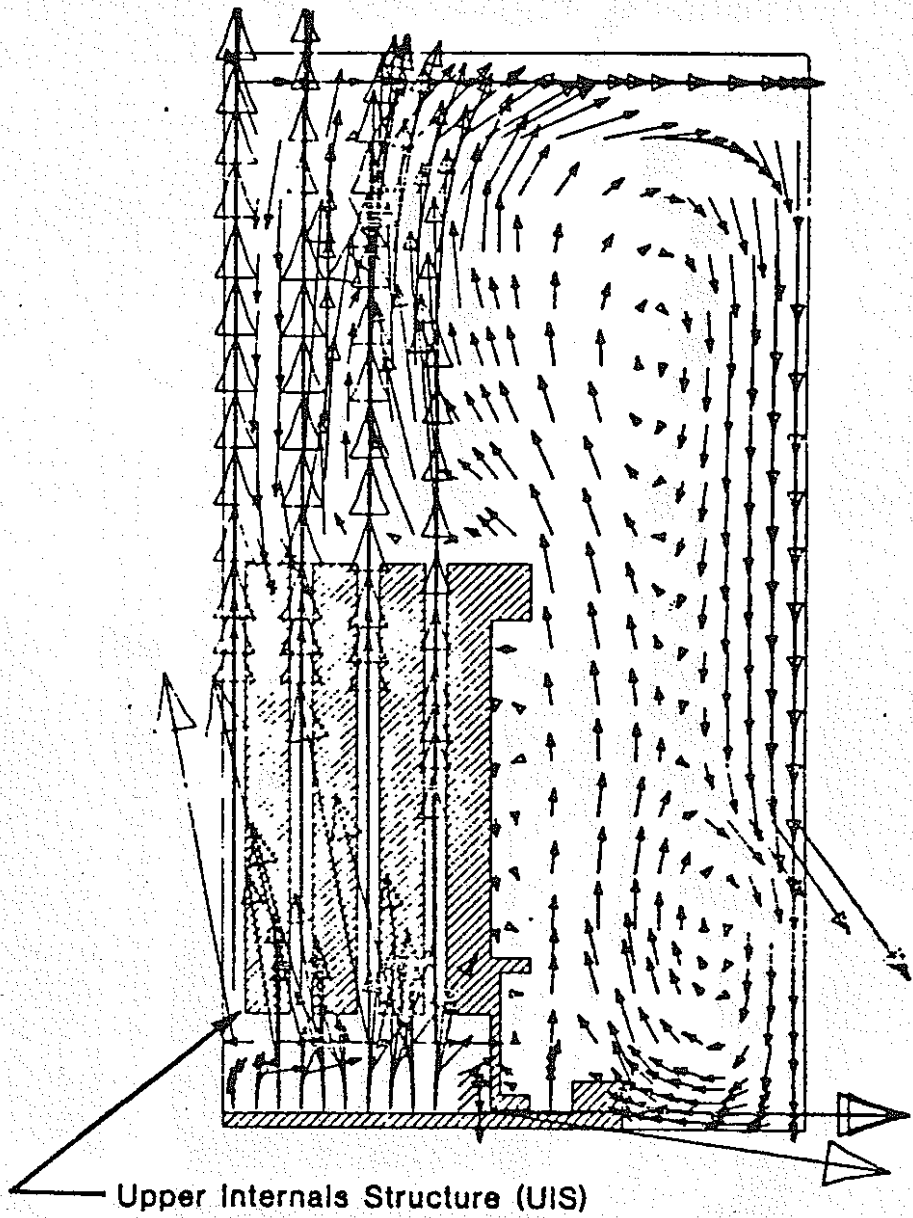


図 2.3.6 計 装 ポ ス ト

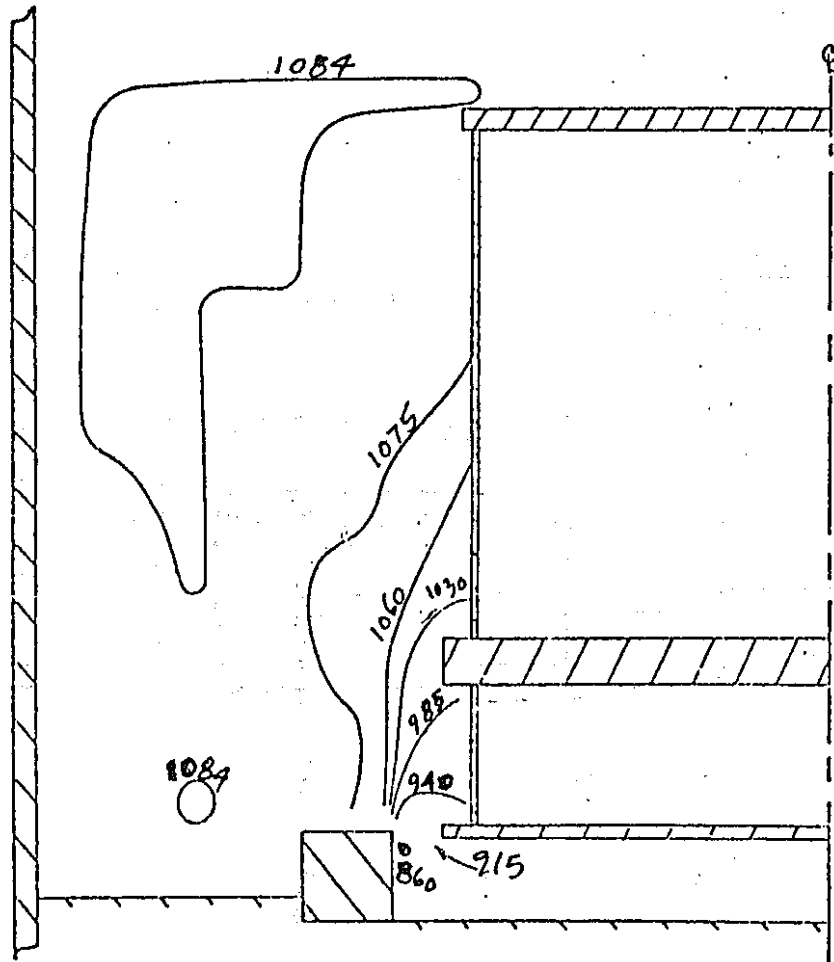


4422-17

(a) フローパターン

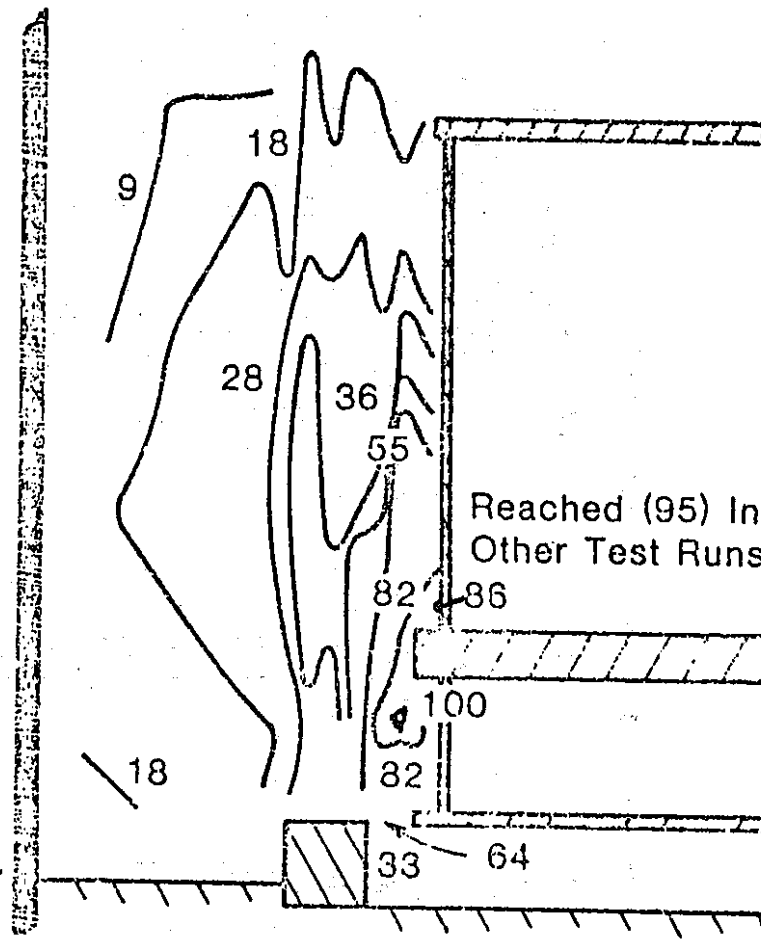
図 2. 3. 7(a) CRBRP の炉心上部機構まわりの流況と温度分布

ISOTHERMS (°F)



(b) 平均温度分布

STRIPING CONTOURS (°F)



(c) 温度ゆらぎ分布

図 2. 3. 7(b) CRBRP の炉心上部機構まわりの流況と温度分布 (UCS/CORE ギャップ 0.5 インチ)

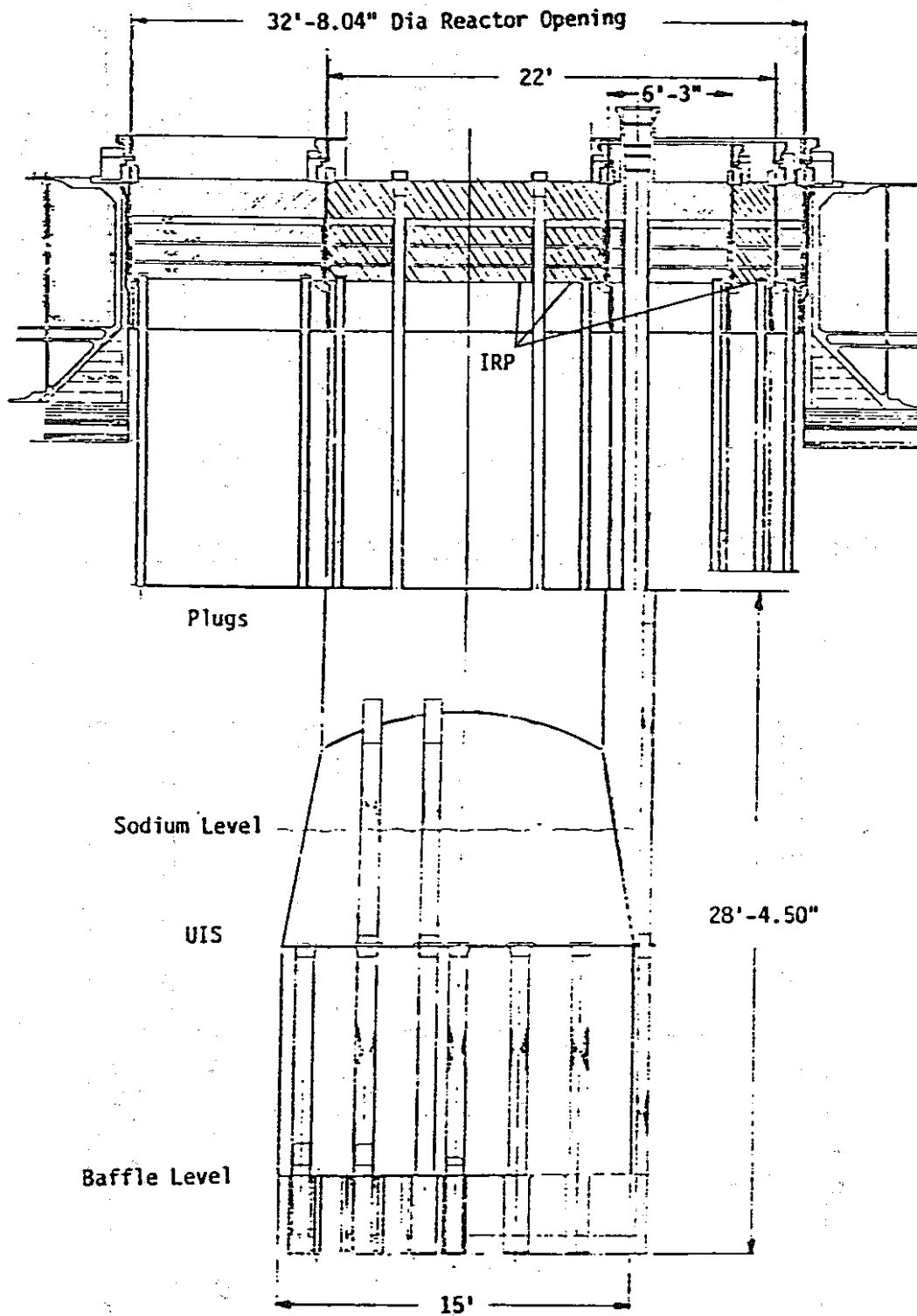


図 2. 3. 8 G E の設計した炉心上部機構

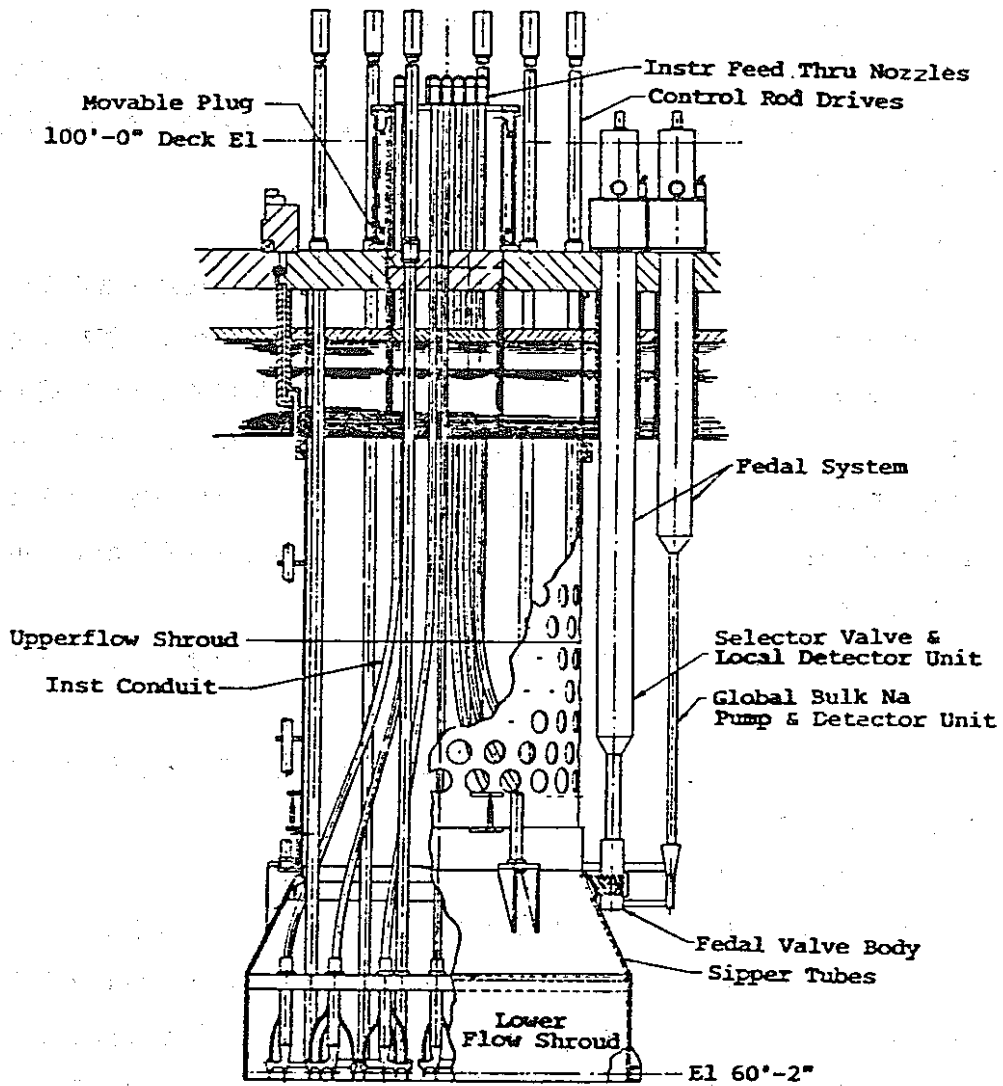


図 2.3.9 AI の設計した炉心上部機構

上部プレナムのフローパターンの解析例と炉心上部機構まわりの平均温度分布と温度ゆらぎの例を図 2.3.7 に示す。

R & D はサーマルストライピング挙動が主体であり、水流動試験がかなり行なわれている。また、ナトリウムを用いた高サイクル熱疲労試験が SUS316 とインコネル 718 について多く行なわれており、温度ゆらぎ場での非定常熱伝達率を求める試みもなされている。

② 米国 PLBR タンク型

米国で 1977 年 6 月より 1980 年まで EPRI のスポンサーで行なわれた 1000Mwe PLBR (Prototype Large Breeder Reactor) のタンク型設計研究について述べる。これは同一の設計ガイドラインについて AI, GE, WH が各々チーム編成を行い、独自の設計を競ったものである。

GE の設計⁽⁵⁾

GE は炉心上部機構について特定のリファレンスとなる設計を選んでいない。

詳細な設計概念を作り上げる前にドライバ燃料とブランケット燃料集合体出口での炉心上部機構の材料への影響とアルゴン/ナトリウム境界での垂直円筒での過大な応力について調査している。各燃料集合体での流量は集合体から出てくるナトリウムの温度差を最小にすべき調節方法が調査された。炉心上部機構の設計は選ばれた方法によって影響を受ける。サーマルストライピングの影響を受ける領域で使用される材料はたぶんインコネル 718 であろう。

炉心上部機構の計装ドライウェルと中間回転プラグを分離する方法は明確になっていない。

GE は低バックルと高バックルの概念について調査している。低バックルの設計を図 2.3.8 に示す。

AI の設計 (図 2.3.9 参照)⁽⁵⁾

炉心上部機構支持胴は移動可能な下部領域、下部フローシュラウドを有している。これは燃料交換の間 14 インチ上昇する。中間回転プラグの中の可動プラグも燃交時上昇する。これは 37 本の計装用熱電対導管と 6 本の CRD 導管を支持している。可動プラグは 3 つの昇降シリンダを有し、一方シュラウドは 4 つのシリンダーを有している。それらの作動は同一であるので、計装ツリー導管と CRD 導管の滑りシールは必要ない。

各燃料集合体は 3 本の熱電対と FEDAL ナトリウム SHIPPING 管とで監視されている。熱電対は 37 本の導管へ集められ可動計装プラグへ入る。668 本のシッピング管は下部フローシュラウドにしっかり固定された 4 つのロータリーバルブボディにつながっている。FEDAL の内部弁機構、ポンプ、管はメンテナンスのためにとり出せる。CRD

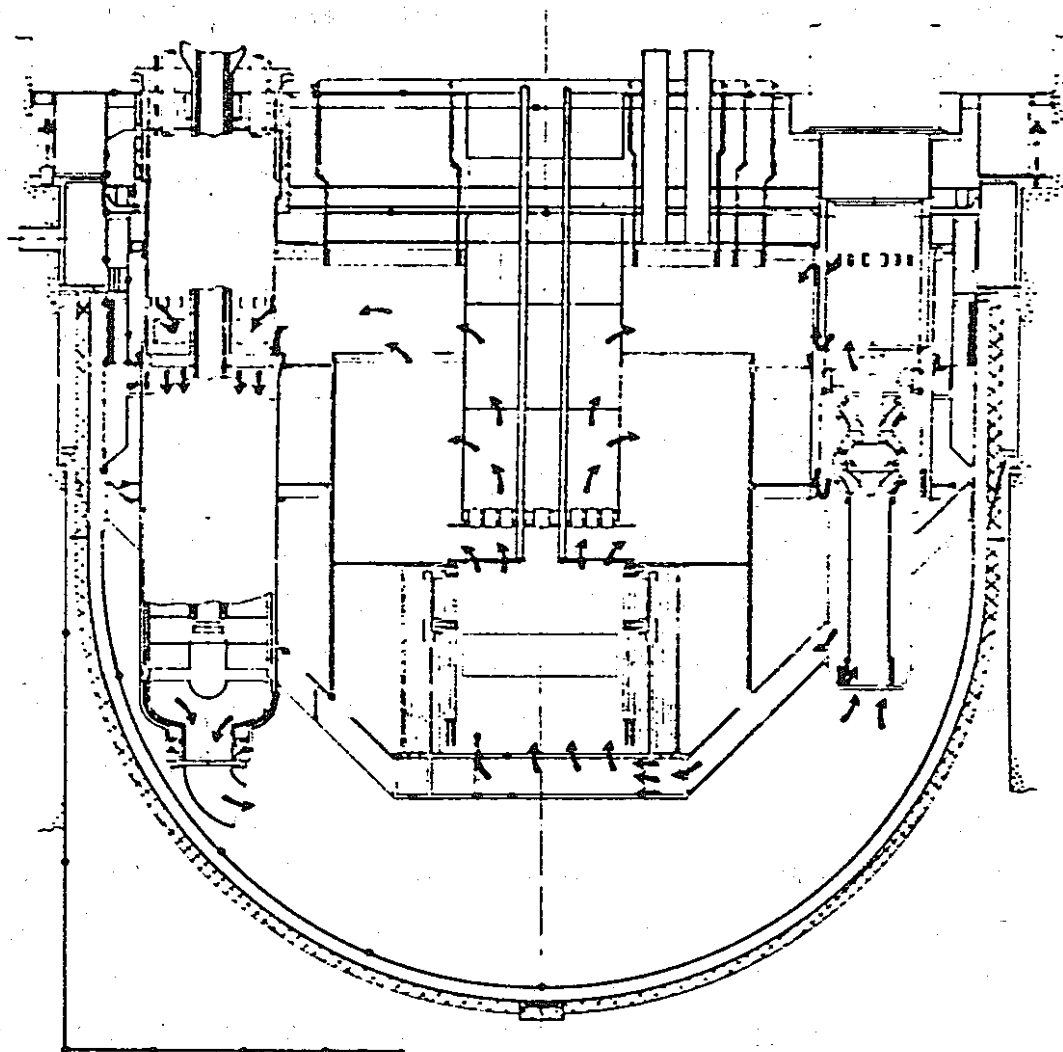


図 2.3.10 WH設計の原子炉容器

も交換可能で、熱電対もドライウェルのため取り換え可能である。

WHの設計⁽⁵⁾⁽⁶⁾

原子炉容器における炉心上部機構の位置を図 2.3.10に、全体の構造を図 2.3.11に示す。中間回転プラグの下面にボルト付けされ、炉心要素の上部の約 2 インチまでのびている。通常運転時は平均 350°F のナトリウムにほとんどの部分が接している。使用材料はステンレス鋼とそれに機械的にはりつけたインコネル 718 である。ステンレス鋼はサポートバレルと支持グリッドの主要部材の材料であり、インコネル 718 は大きな温度ゆらぎを受ける部材に使用される。炉心とは結合されていない。

支持胴は 1 インチの板厚で渦抑制板、支持グリッドと溶接されている。炉心からの冷却材が支持胴からプレナムに流出できるフローホールがあげられている。この胴は地震時に耐えうるよう剛性を炉心上部機構に与えられている。固有振動数は 9 ~ 11.9 Hz である。この胴の直径は図 2.3.12 に示す制御棒の配置から決められた。この径は中間回転プラグについてはデッキの径に影響するのでできるだけ小さくするのが望ましい。

支持グリッドは制御棒の横方向の位置決めのためのもので、6 本の I ビームで構成されている(図 2.3.12)。このビームには 24 本の垂直のパイプが貫通しているか溶接されている。これは制御棒案内管の支持として使用される。又支持グリッドは 69 本の熱電対の案内コラムの位置決めと支持にも用いられ、支持胴に溶接されている。

制御棒案内管は安定板の上下で 2 つの部分に分けられ、熱膨張をのがすため、すべり結合されている。下の部分はインコネル 18 で、約 400°F の最大温度ゆらぎ巾にも耐え得る。支持グリッドとは機械的結合であり、取り換えが可能である。ホールド板との間は結合されていない。上の部分は中間回転プラグで支持されている。

ホールドダウン板は炉心上部機構の最下端にあり、ハイドロリックホールドダウンの機能がそう失した時に燃料の浮き上りを防止する。この板には各燃料要素に対応して穴があげられ、冷却材が流れる。支持グリッドからのサポートコラムにより位置決めされている。その詳細を図 2.3.13 に示す。この板はインコネ 718 製でサーマルストライピングに耐えうる。板の大きさの制限から図 2.3.14 に示す大きさもものをつないで作られている。SUS 製の支持グリッドとインコネル 718 製のホールドダウン板の熱膨張差による変形はサポートコラムの曲げ変形で吸収される。

熱しゃへい板はサーマルストライピング対策としての板のインコネル 718 をかさねたものでそれより上部の SUS 板を守っている。

③ 米国 LDP

米国 LDP の設計例を図 2.3.15 に示す。CRBRP と同一のチムニー型であるが、上

部には流れを反転するフローデレクター板が取り付けられている。炉心とはロッドによる結合が可能な構造となっている。

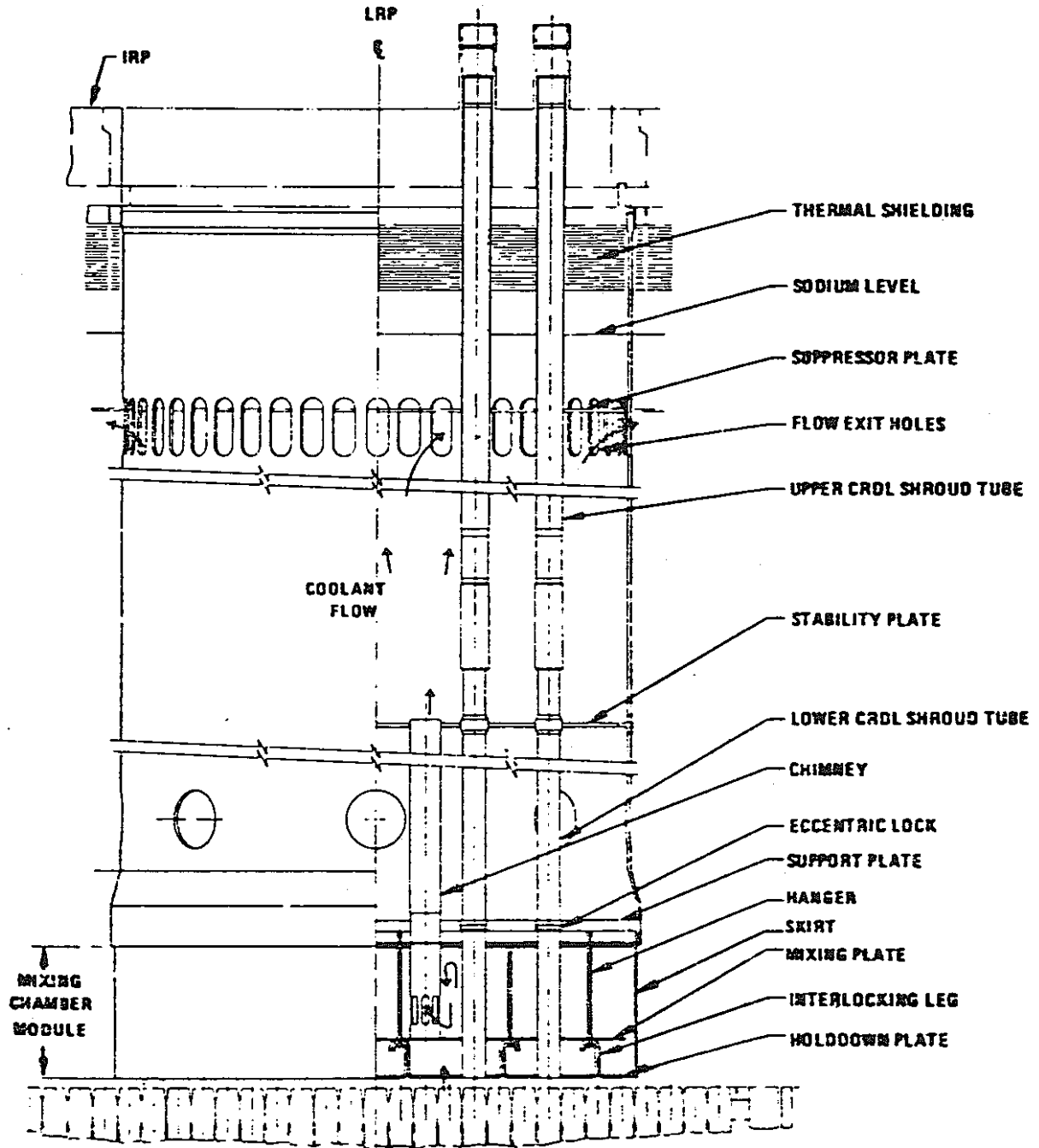


図 2. 3.11 WH の設計した炉心上部機構

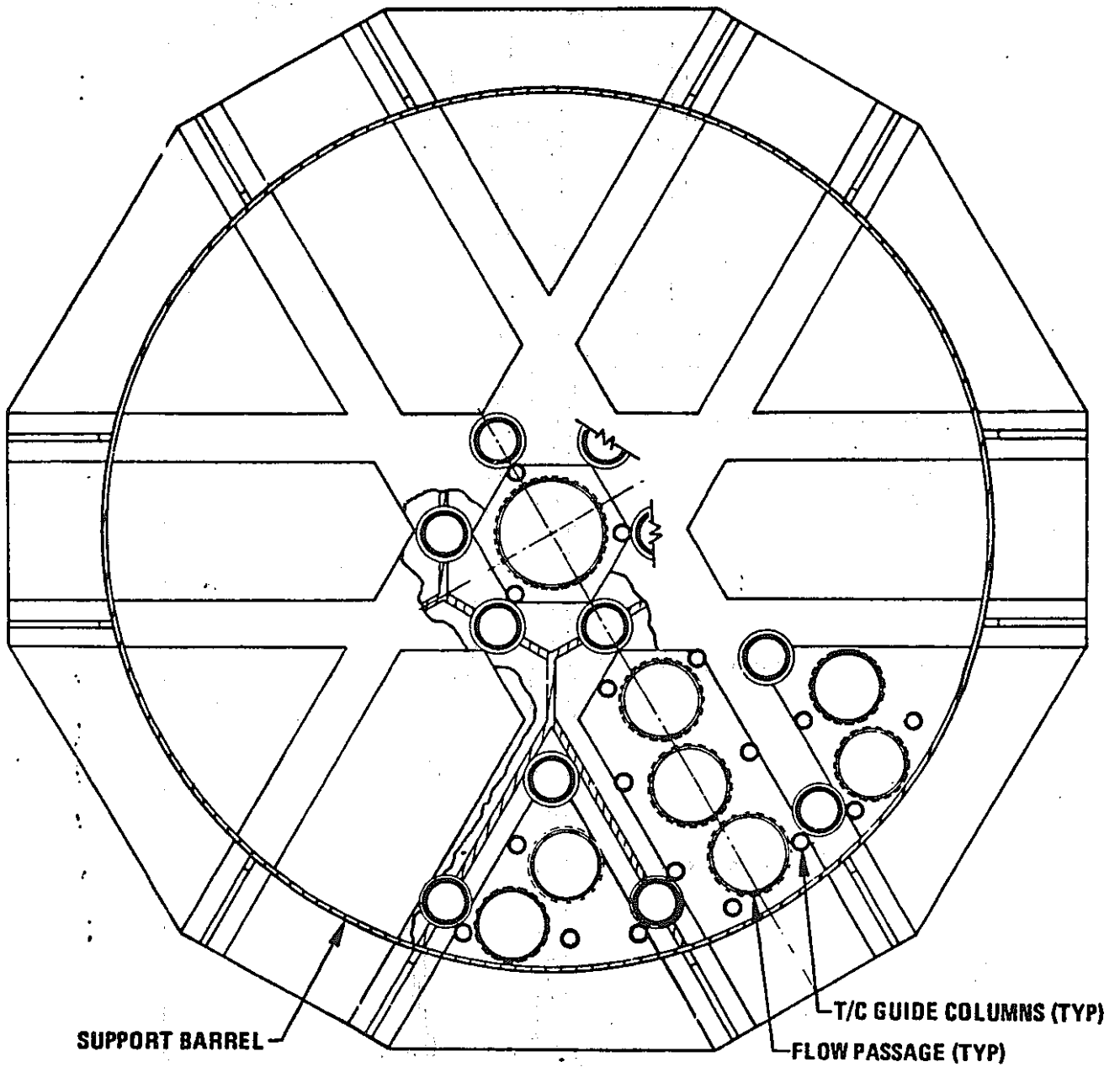


図 2. 3.12 W H炉心上部機構支持グリッド

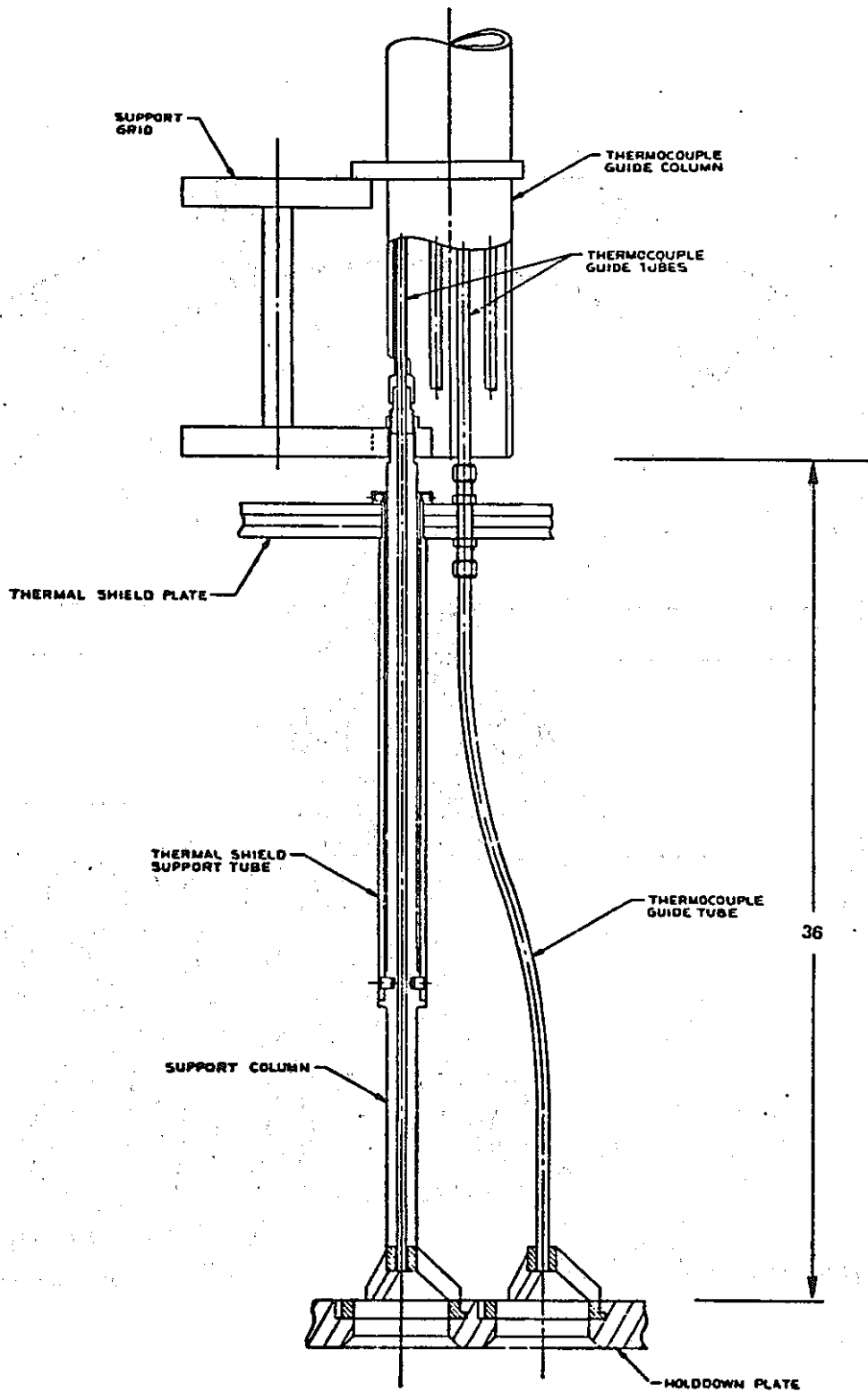


図 2. 3.13 炉心上部機構のホールドダウン板のサポート

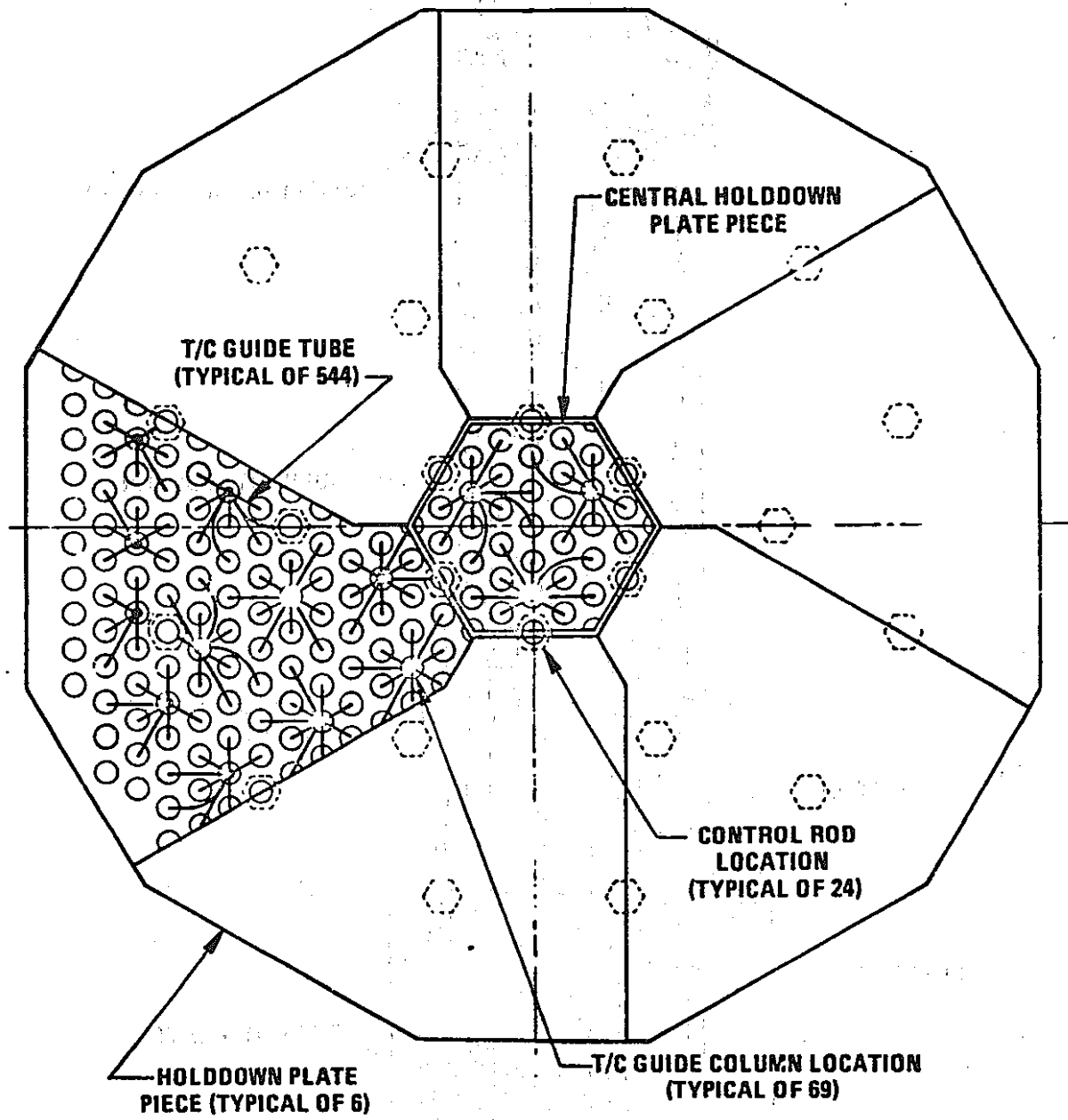


図 2. 3.14 炉心上部機構のホールドダウン板

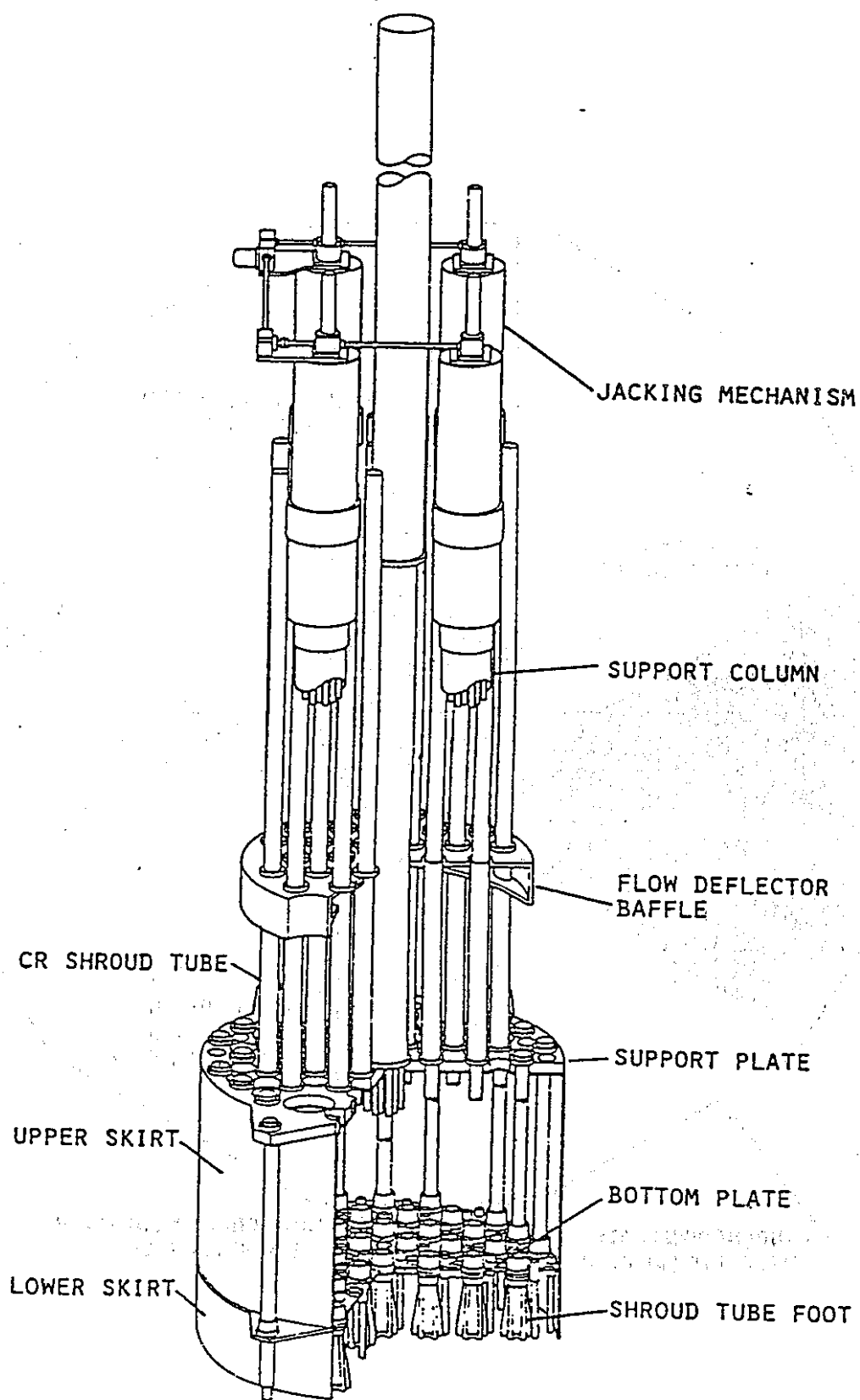


図 2.3.15 LDPの炉心上部機構

参考文献

- (1) 馬渡他, 炉心上部周辺水流動試験 PNC SJ201 80-39
- (2) " (II) SJ201 81-25
- (3) 池田他, 炉心上部機構局所モデル水流動試験 PNC SJ201 77-47
- (4) 高速増殖実証炉第1巻 PNC SN241 83-08 (1)~(4)
- (5) Assessment of Maintatinability of LMFBR Designs. NP-174 Vol. 1 EPRI
- (6) Large Pool LMFBR Design. Executive Summary. NP-1016SY EPRI

2.4	炉内構造物	123
2.4.1	炉内構造物に要求される機能	123
2.4.2	炉内構造物の設計で考慮すべき事象	124
2.4.3	炉内構造物の設計例	125
	(1) ループ型	
	(2) タンク型	
	参考文献	151

2.4 炉内構造物

炉内構造物は炉内に設置される機器設備の内、主に炉心支持に関連する構造物であり、炉心上部機構、液面近傍構造、ディッププレート、燃取関係機器、非常用直接炉心冷却器やタンク型炉の一次系ポンプ、中間熱交換器は一般に除かれる。

タンク型はポンプと中間熱交換器が炉内に設置されているのでホットプールとコールドプールを分離する機能が重要となる。したがってタンク型の炉内構造物は複雑となる。

2.4.1 炉内構造物に要求される機能

炉内構造物は主として次の機能を有している。

(1) 炉心等の支持

炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体、制御棒下部案内管、中性子しゃへい体、中性子源等の炉心構成要素や、炉内ラック、炉内中継ラックを支持しその重量を支える。支持方法は種々あり、ループとタンクによって変わってくる。炉容器から支持する場合とプラグ（タンク型の場合ルーフスラブ）から吊り下げる場合とに大別できる。

(2) 流配機能（圧力調整機能）

各炉心構成要素に送られる冷却材の流量配分を行う。これは炉内構造物のみで行うことではなく、各炉心構成要素にとりつけられたノズルのオリフィス等と組み合わせて行うことが多い。一般に炉内構造物側では大きく数種類の流量調整を行い、炉心構成要素側でさらに細かく調整する。液面近傍応力対策として炉壁冷却システムを採用した場合には下部プレナムの一部をそれに当てることもある。

(3) 炉心構成要素の浮上り防止

流体力による炉心構成要素の浮上りを防止する。この機能を果たすため流体力を利用した hidroリックホールドダウンと機能的な浮上り防止とが考えられている。

(4) 中性子遮へい

炉心からの中性子の遮へいのため炉心構成要素の一部として中性子遮へい体があるが、その他にも遮へいの目的で種々の構造が設置される。

(5) 燃料の炉内ラック及び中継

使用済燃料や新燃料を炉内に一時貯蔵したり、燃料交換器を出入器とを中継するラックを設ける。

(6) ホットプールとコールドプールの分離

炉心から出た高温ナトリウムと中間熱交換器で冷やされた低温ナトリウムとを分離することは熱効率を上げる上で重要である。ループ型では高低温ナトリウムの接触面積が小さいので比較的簡単な構造であるが、タンク型では中間熱交換器やポンプが設置され

ることから隔壁の構造は大きく複雑となる。又高低温のナトリウムで、はさまれるので熱応力や変形に対する考慮が必要である。中間熱交換器はホットプールとコールドプールにまたがっていることから、そのシール構造や、漏れ流がある場合にはサーマルストラティフィケーション対策が必要となろう。また、構造が一般的には大きくなるので耐震や流力振動に注意する必要がある。

2.4.2 炉内構造物の設計で考慮すべき事象

炉内構造物の機能を阻害したり、破損をひき起すため設計時に考慮すべき事象を以下に述べる。

(1) 地震

炉心部の重量が重いため、地震によって炉心部が振動し、制御棒の挿入性が阻害される可能性がある。これらの対策として炉容器側部から支持部を取る設計がなされている。炉心をプラグあるいはルーフスラブから取る場合には、その剛性を充分に取る必要がある。

(2) 熱衝撃

スクラム等のように炉を急激に停止した場合、炉心にはホットショックが負荷される。この場合炉心支持部に熱衝撃が加わり、変形や損傷を起すおそれが生じる。特に重量のある炉心を支える炉心支持板やダイヤグリッドは剛性を持たせるため管板構造の厚板や複雑なボックス構造となっているのでこの現象を良く考慮した設計が必要となろう。

(3) サーマルストラティフィケーション

上述のようにスクラム等ではホットショックが加わるので流れの停留部がある場合にはストラティフィケーションが生ずる可能性がある。また、流配にも影響する。

(4) 中性子脆化

炉内構造物は炉心に非常に近いため、中性子を受け易く、それによる脆化が問題となる。従って中性子束の適切な推定と、それを考慮した設計が必要である。

(5) 偏流

炉心に流入する冷却材に偏流が生じると各燃料集合体への流量が設計値からはずれ、燃料ピンの損傷をひき起す。したがって定常はもとより過渡時においても偏流を生じない構造が要求される。

(6) タンク型炉隔壁構造内対流防止

タンク型においてはホットプールとコールドプールの隔壁としてスタグナントナトリウムを封入して構造がとられることが多い。この場合には内部において対流が生ずると各々のプール間の熱交換が多くなり、熱効率の低下となるだけでなく、隔壁構造の変

形や損傷をひき起すおそれがある。

(7) 流力振動

タンク型ではホットとコールドのプールの隔壁として主容器内部に大きなタンクを設置することが多い。この場合は熱応力対策としてできるだけ板厚を薄くすることから剛性不足により流力振動を起す恐れがある。

2.4.3 炉内構造物の設計例

炉内構造物の設計例をループ型とタンク型に分けて以下に述べる。この節では多くの文章を文献(1)からそのまま引用させていただいた。

(1) ループ型

① 「もんじゅ」

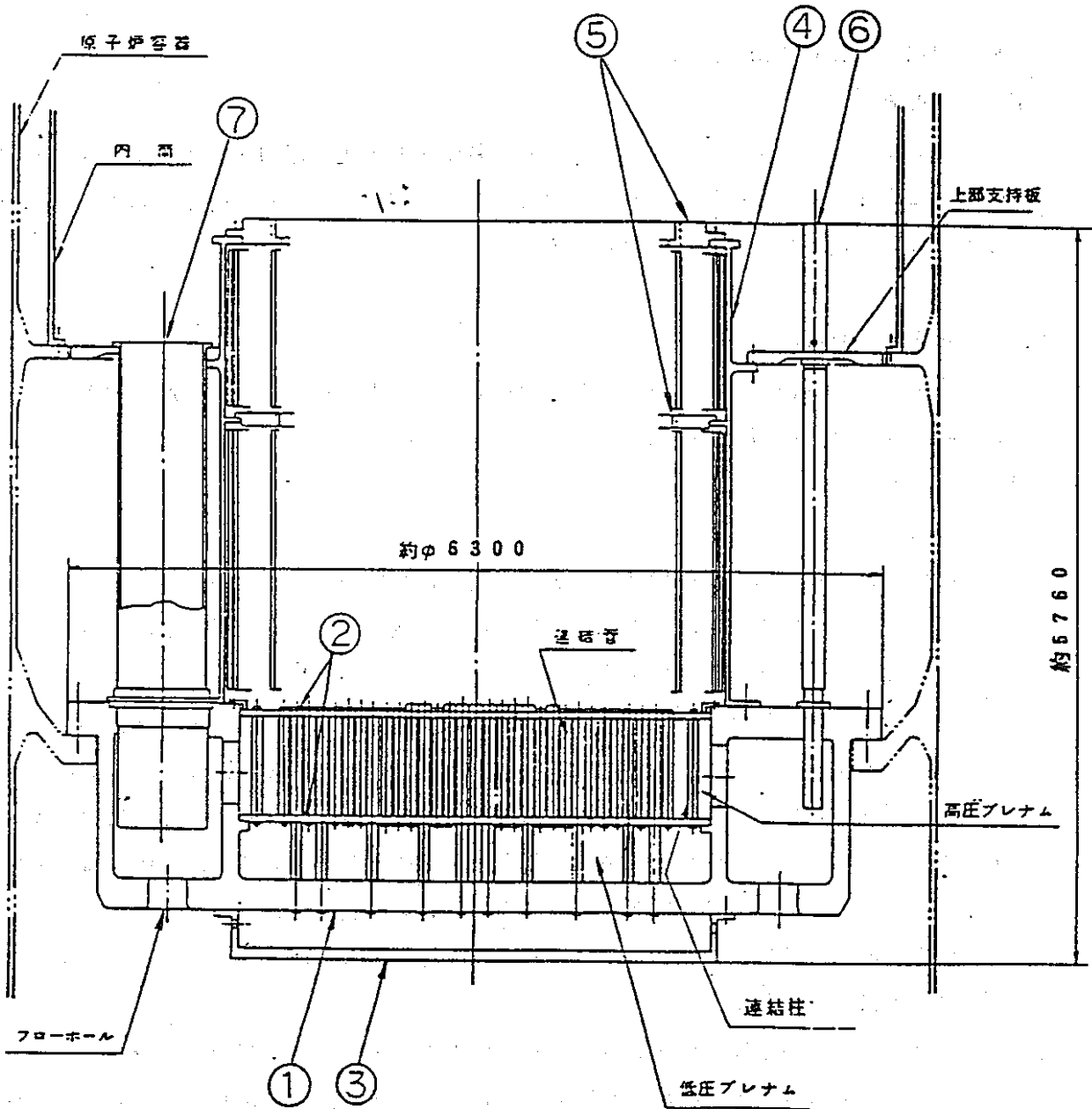
炉内構造物は炉心構造支持構造物、炉心支持板、受皿炉心槽、炉内ラック、炉内中継ラック等により構成され、炉心の保持、炉心の各構成要素への冷却材流量配分等を行う設備である。構造を図2.4.1に示す。

炉内構造支持構造物は炉心支持板上の炉心構成要素、炉心支持板、炉心槽、炉心ラック、炉内中継ラック等の炉内構造物構成機器を支持し、その重量を支え、原子炉容器に伝達する。同構造物は中空矩形断面を有する円環構造で円環上部外側に上部支持フランジが突き出て、原子炉容器側炉内構造物取付台への台座となっている。流力的には炉心支持板内の高圧プレナムに横方向から冷却材を導き、炉心燃料集合体エントランスノズルと連結管との組合せによるオリフィス形式で流量配分を行う他、ハイドロリックホールドダウンの機能もはたす。

炉心支持板は、炉心構成要素を定められた間隔と所定の位置の配列、支持し、その重量を支える。形状は上下2枚の多孔円板を連結管及び連結柱で結合したサンドイッチ構造である。

炉心槽は最外周の炉心構成要素と接触、支持できるようにした円筒構造体で、その下端部を炉心構造支持構造物にボルトで締めて固定し、地震時の炉心構成要素の変形を押える役目を果たす。円筒構造の上部および中間部には最外周炉心構成要素と接触する炉心支持棒が取り付けられている。円筒構造の内面には中性子しゃへい及び熱しゃへいのためのライナーが取り付けられている。また、炉容器との間には炉心槽の支持のための上部支持板が取り付けられている。これは炉内構造支持構造物と一緒に炉内ラック及び炉内中継ラックを垂直に支持している。上部支持板等には熱しゃへい板が取り付けられている。

炉内構造支持構造物の下面には底板付円筒胴形の受皿が取り付けられており、側面の



⑦	炉内中継ラック	1	SUS304
⑥	炉内ラック	10	+
⑤	炉心支持棒 (上部, 下部)	2	+
④	炉心槽	1	+
③	受皿	1	+
②	炉心支持板 (上部, 下部)	2	+
①	炉内構造支持構造物	1	SUS304
NO	名称	員数	備考

図 2.4.1 「もんじゃ」炉内構造物

フローホールから入った冷却材は支持柱のオリフィスから低圧プレナムに入る。このように流配機能も受けもっている。

炉内構造支持構造と上部支持板とによって支持される炉内ラックは10組みあり、炉内中継ラックは1組である。

連結管は炉心構成要素エントランスノズルとの組合せで炉心構成要素の誤装荷を防止している。

他機器と接触している設備は、相手機器が耐用期間中1回以上交換される場合、その接触部に表面硬化処理を施している。

② 動燃実証炉ループ型

予備設計において炉内構造物の支持方式として吊胴方式と炉容器下部支持方式、燃料集合体の保持方式として水学的保持と機械的保持、燃料集合体への冷却材流入方式として縦流入方式と横流入方式が比較された。また炉心構成要素の変形対策として、外部クランピング方式と内部クランピング方式の比較等も実施された。

概念設計においては、炉心設計で決定された流量配分に従って炉心支持機構内の流量配分が検討された。原子炉容器の全高を縮少することを目標として、縦流入方式の炉心燃料集合体エントランスノズルを用いること、炉心の流量配分の性能向上、原子炉容器下部プレナム高さの縮少を目標として、新概念であるモジュール方式の流量調整機構の採用が検討された。

炉心支持機構流路概念図を図 2.4.2 に、モジュール流量調整機構の概念図を図 2.4.3 に示す。

流量調節機構としてモジュール方式と連結管方式を比較検討した。モジュール方式は現状では嵌合部からの冷却材漏洩が全流量の 1.9% と比較的大きいが改造の余地がある事、更に流調機構の実現性、炉心支持板の合理化、補修性の観点から大型炉の流量調節機構として優れていると判断した。モジュール方式と連結管方式の比較を表 2.4.1 に示す。なお炉心として非均質炉心を採用するとモジュールの種類が21種類から28種類程度増加することが明らかになった。

原子炉容器内プレナム容器は、原子炉容器側壁付近に設置する横プレナム方式と炉心下部に設置する下プレナム方式が考えられる。流力特性の安定性、製作性及び原子炉容器を含めた物量比較の結果、下プレナム方式を選定した。

プレナム容器から流量調整機構への冷却材導入は「もんじゅ」と同じ横流入方式とし、プレナム内入口ノズルには「もんじゅ」程度の逆流防止抵抗を得る様にした。

炉心構成要素の保持はハイドロリック・ホールドダウン方式とし、誤装荷防止は基本的に「常陽」「もんじゅ」と同様な方式で取れる設計を行った。また径方向の指持は、

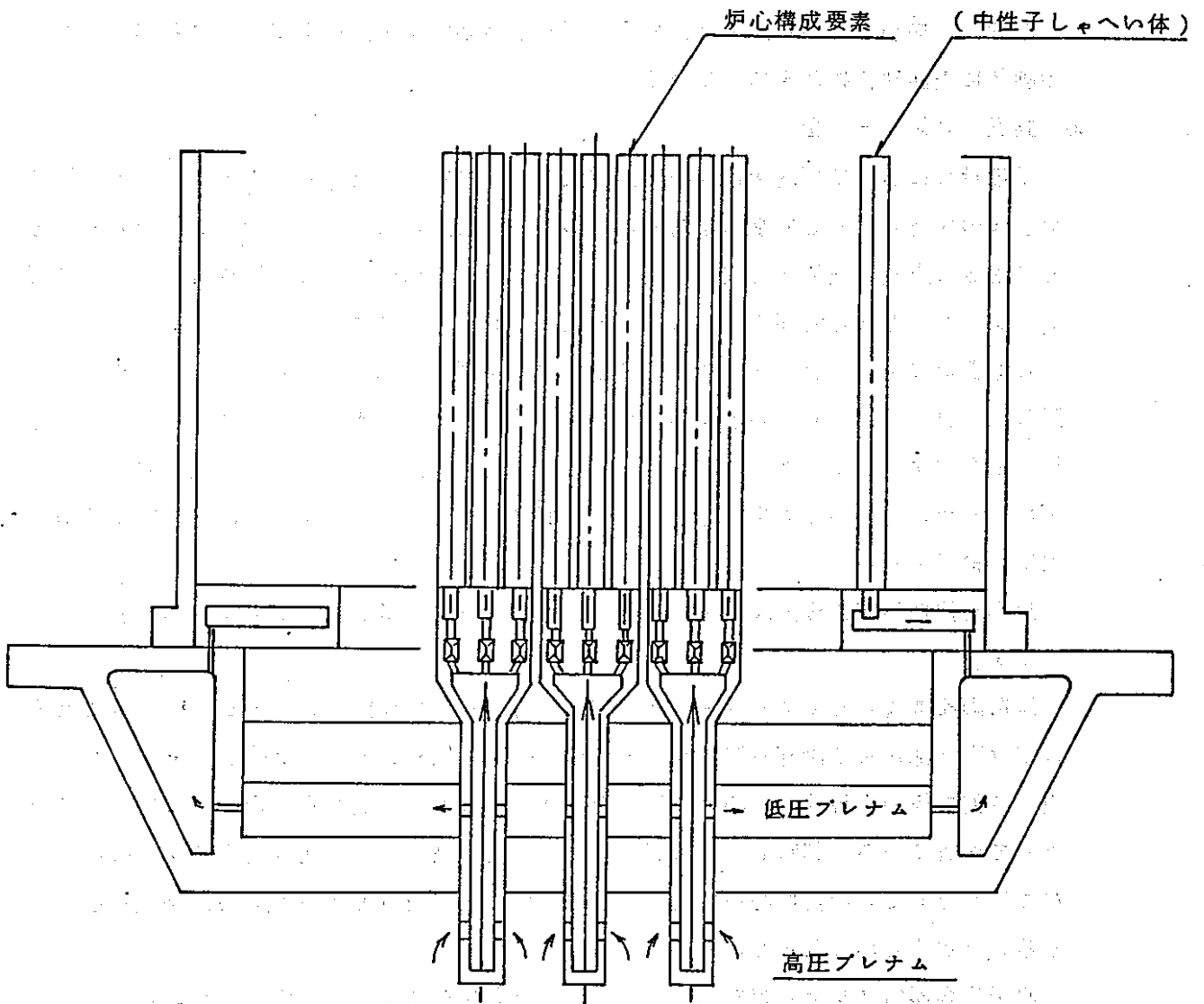


図 2.4.2 炉心支持機構部流路

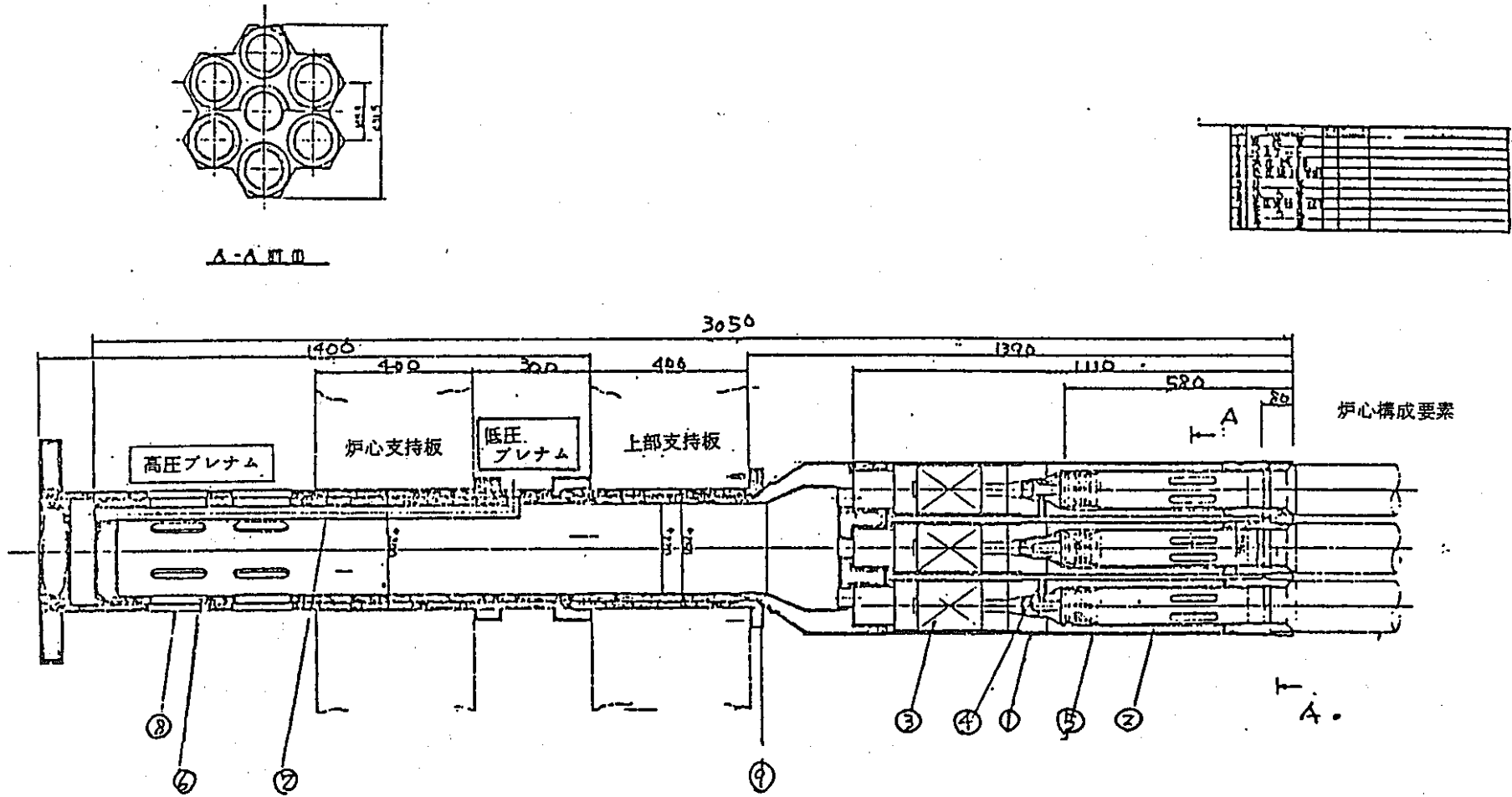









図 2.4.3 炉心構成要素支持モジュール

表 2.4.1 モジュール方式と連結管方式

	流 調 精 度			基 本 寸 法		信 頼 性	製 作 ・ 据 付 性	そ の 他
	流量調節機構の特徴	流 調 部 圧 損	合 部 漏 洩 量	炉 心 支 持 板	流 調 部			
モジュール方式	<ul style="list-style-type: none"> 高圧プレナム内管群 圧損小 (注1) 56年度設計 0.06% 炉心燃料領域流調精度 高 設計裕度大 注1) 炉心最外端流速 4 m/sec	56年度設計 0.38% 計画値 (0.35%)	56年度設計 1.9% (対全流量比)  合部漏洩 流量利用	1500×φ5600 貫通孔 169×φ270	<ul style="list-style-type: none"> モジュールエントランスノズル 1300mm 炉心構成要素寸法 (4300mm+500mm) エントランスノズル 炉心頂部より流調部 下端 約7000mm 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心支持機能流調機能の機能分離 炉心支持機能の裕度大 炉心中心から炉心支持板上面迄の距離増大 炉心支持板の中性子照射量低 炉心支持板信頼性向上 	<ul style="list-style-type: none"> 大型機器構造単純化の為製作性良 流調機構と支持機構別製作の為工期短縮化 モジュール複雑な為製作難い 据付性悪い 	<ul style="list-style-type: none"> モジュールの交換可能 (補修性よい) R&Dの実現しやすさ 実用炉への外挿しやすさ
改善策		 計画値のみなかし (圧損をふやす)	 <ul style="list-style-type: none"> 低圧プレナム設置方式 図Ⅱ-2.6-11 		 モジュールのコンパクト化			
改善策	<ul style="list-style-type: none"> 高圧プレナム高さ増加 約2300mm  モジュール方式と圧損を同一にするには			モジュール方式  貫通孔 減少	モジュール方式 	<ul style="list-style-type: none"> プレナム間圧力バランスによる流調 事故時のインパクト大 	<ul style="list-style-type: none"> 支持板構造の製作が難しい 一体据付の為据付性良 	<ul style="list-style-type: none"> 流調機構の補修は困難
連結管方式	<ul style="list-style-type: none"> 高圧プレナム内管群 圧損大 0.29% (注1) 炉心燃料領域流調精度 低 流調機構部での流れ 流量少い 注1) 炉心最外端部流速 6.4 m/sec		'もんじゅ'設計例 0.6% (対全流量比)	約600×φ5600 貫通孔 1111×φ110 <ul style="list-style-type: none"> 構造健全性の確認大変 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心構成要素寸法 (4300mm+3000mm) エントランスノズル 炉心頂部より流調部 下端 約7200mm 低圧プレナム高 300mmを考慮して 			

信頼性の高いパッキングクラピン機構とした。

③ 電力実証炉ループ型

Phase I では炉内構造物について炉壁冷却流路を含めて、高圧、中圧及び低圧プレナムの構成が設定された。

冷却材は、高流量を要する炉心燃料集合体には高圧プレナムから下部流入方式の連結管より直接流入し、低流量でよいブランケット燃料集合体、制御棒及び中性子遮へい体には低圧プレナムから横流入方式の連結管から流入する。なお、炉心燃料集合体は、ハイドロリックホールドダウンにより支持されている。

Phase II でメンテナンス方法に着目して検討を行ない、炉心支持板は修理交換が困難であることが明らかになり、モジュール流量調整方式の採用を選択した。

Phase III ではモジュール方式の炉心支持構造につき各種の流量調整を検討した。検討の結果、モジュール導入高圧プレナム内の圧力損失が少ないこと、炉心、炉心支持板の強度を損なわなかったこと、及び交換性の良いこと等を考慮し7本モジュールを採用した。

各種構造の基本寸法、流路構成、及びモジュール内圧力構成が定められた。又モジュールの交換法につき検討し、交換可能な構造とした。

本構造に適合する炉心支持構造概念を定め、プレナム容器概念、及び、炉心槽概念が明らかにされた。

Phase III の中で最新の 58 年度設計について少し詳しく以下に記述する。58 年度は各部の構造を詳細化している。

(i) モジュール流量調節機構

1つのモジュールで支持する炉心構成要素数を7本とし、炉心支持板への位置決めは、モジュールエントランスノズル下部端栓形状により行っている。炉心構成要素エントランスノズルへの冷却材導入は、炉心燃料集合体は横流入、それ以外の炉心構成要素にはたて流入とし、ハイドロリックホールドダウンを計っている。モジュールについてもハイドロリックホールドダウンを検討し、炉心燃料集合体とモジュールのハイドロリックホールドダウンを達成するため、低圧プレナム構成流路を3流路として各重性をもたせた。

(ii) 炉心支持板

剛性の検討結果から直径 60 mm、板厚 630 mm となり、炉心支持板支持構造を二重ボックス構造とした。地震時には支持板支持構造のたわみを含み 3.5 mm たわみ、応力は 2.0 kg/cm² となる。モジュール案内管貫通孔は組立性の優れたガイドキー構付きの形状とした。下部プレナム容器は強度評価及び冷却材ミキシングを検討した結果、胴部を円筒胴、続板を 1/2 半楕円とした。

(iii) 炉心槽

炉心槽は18枚リブ構造とし、上部振れ止めフランジ上下及び炉心槽胴の内外温度差に起因する熱応力低減のため、炉心槽フランツ上部に熱遮へい層領域を設けた構造とした。

その他モジュールの交換計画、製造計画、据付方法、ISIの検討、DRACS設置対応等について検討した。

④ CRBRP

CRBRPの原子炉構造を図2.4.4に示す。その炉内構造物の構造を図2.4.5に示す。炉心支持構造は「もんじゅ」と同様に原子炉容器から取られており、基本的には同様の形状となっている。「もんじゅ」と異なる点は炉心支持板が一枚の厚板で製作されていること、炉心構成要素の支持と流配をモジュール方式で行っていること、受皿の代わりにモジュールライナを用いて流配を行っていること、炉心上部機構の剛性を上げるため炉心結合方式を採用していることから炉心支持枠にキー溝を設けていること、炉内構造物の炉容器との結合方式が異なっていること、バイパスフローモジュールを有している事等である。

(2) タンク型

① 電力実証炉タンク型

主容器内構造物としては、ホットプールとコールドプールを分離し、熱しゃへいを行うための隔壁構造、IHXやポンプ等のルーフスラブ塔載機器のガイドとなる案内管および炉心支持構造等がある。

(i) 隔壁構造

隔壁構造はPhase Iの検討では、Super Phenixと同様ホットプールとコールドプールを分けるコニカル構造物と断熱構造を形成するトロイダル構造物とで構成されていた。Phase IIの耐震検討の結果、炉心支持構造が変更され、その結果、図2.4.6の③、⑦に示すプレナム仕切板構造により上下方向の熱遮へいを行う構造となった。上部のポットプール下部のコールドプールの中に中間プレナムが形成されている。半径方向の熱遮へいは、炉心槽の外側にプレナム仕切板を設け熱遮へい槽とする事によって行っている。

隔壁構造として重要な要素である熱遮へい体^{*)}に関しては、各種断熱構造の比較の結果アルゴンガスを密封した直径2B、長さ1~2m程度の円筒を6段積み上げた「ガス密封円筒積上げ方式」が採用されている。

*) スタグナントナトリウム槽、ステンレス板(厚板、積層板)、Arガス層(開放型ガス層、ガス密封パネル、ガス密封円筒積上げ構造)、その他(ハステロイ系)の熱抵抗体等

(ii) 炉内構造物支持構造

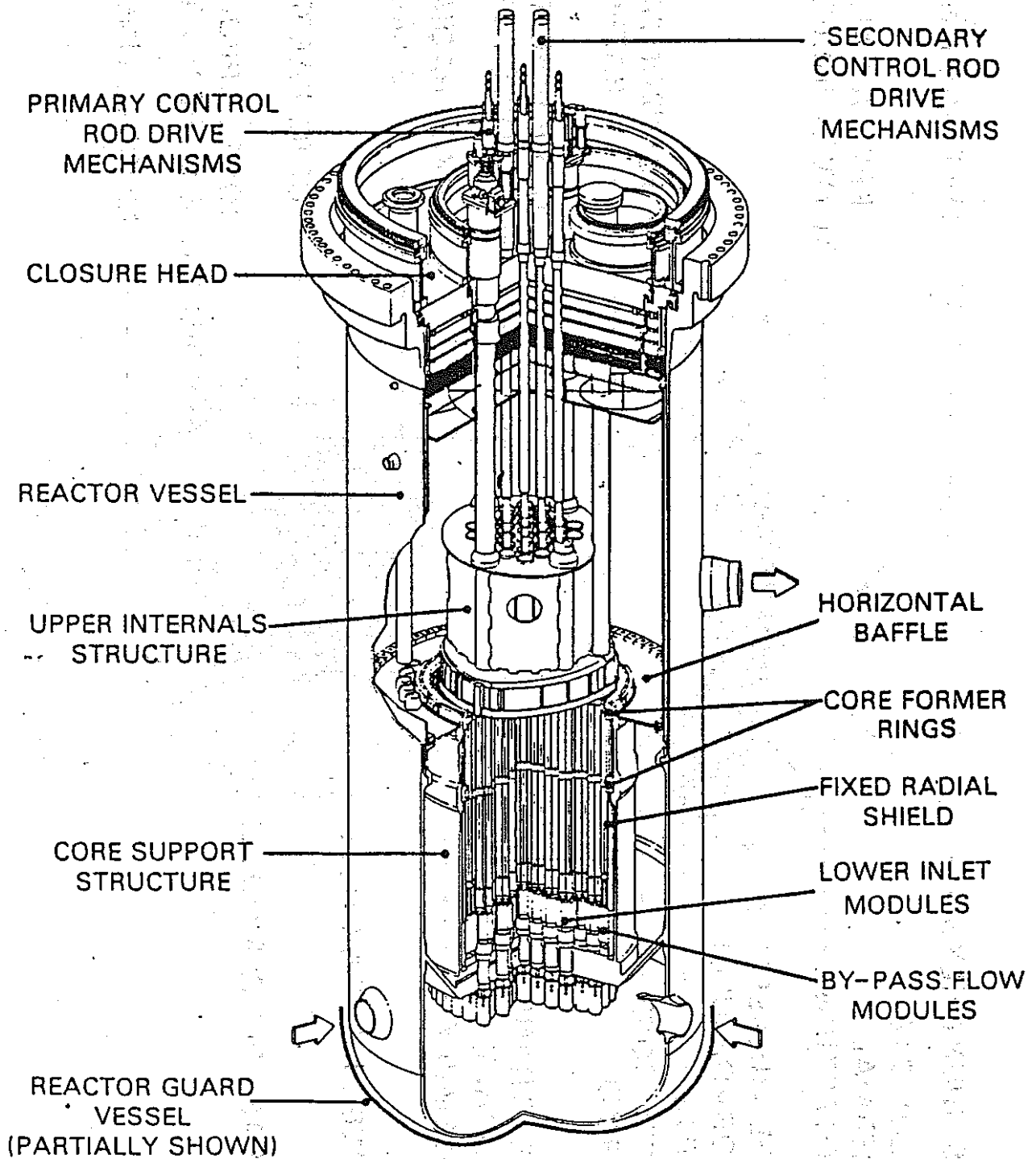


図 2.4.4 CRBRP の原子炉構造

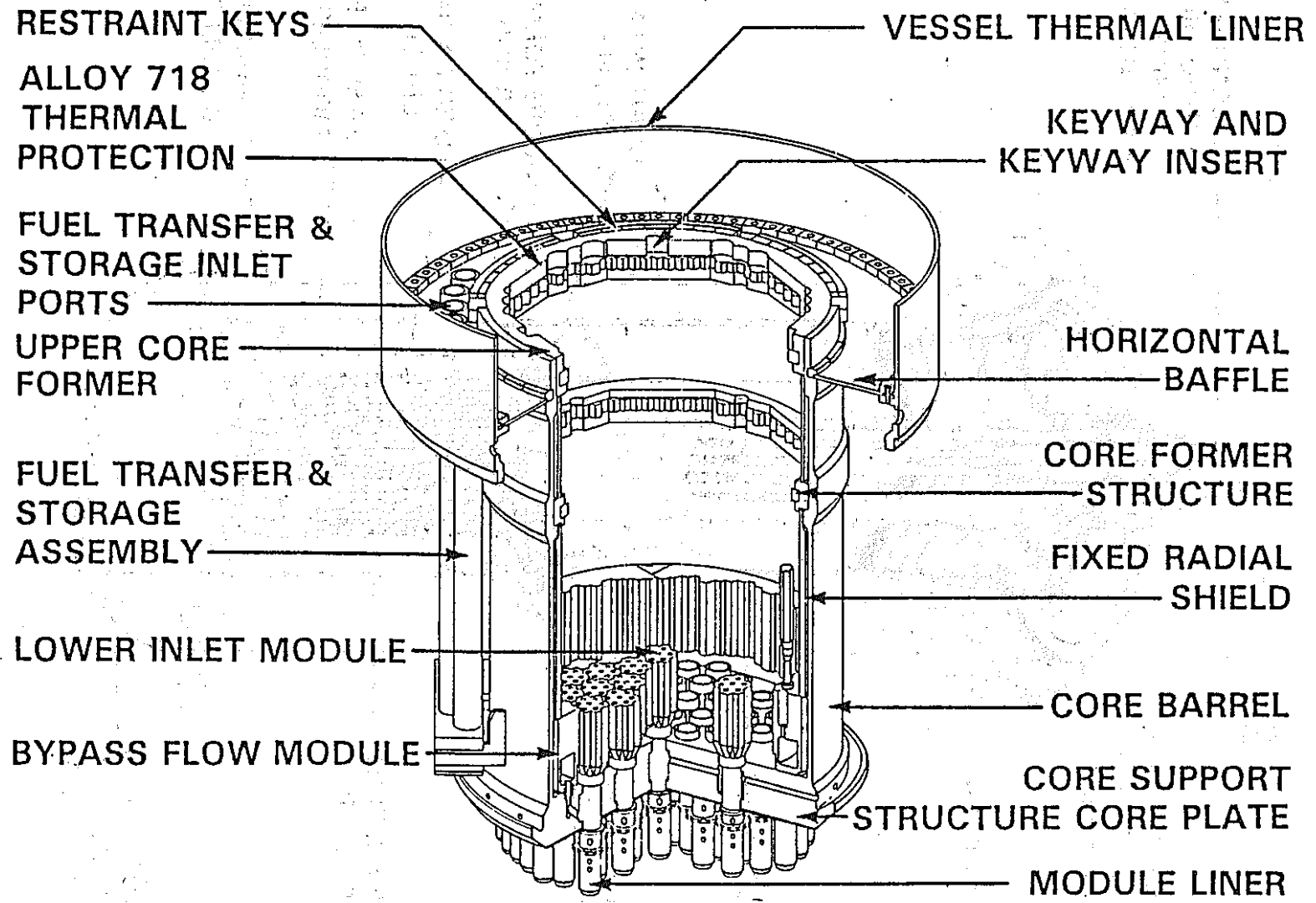
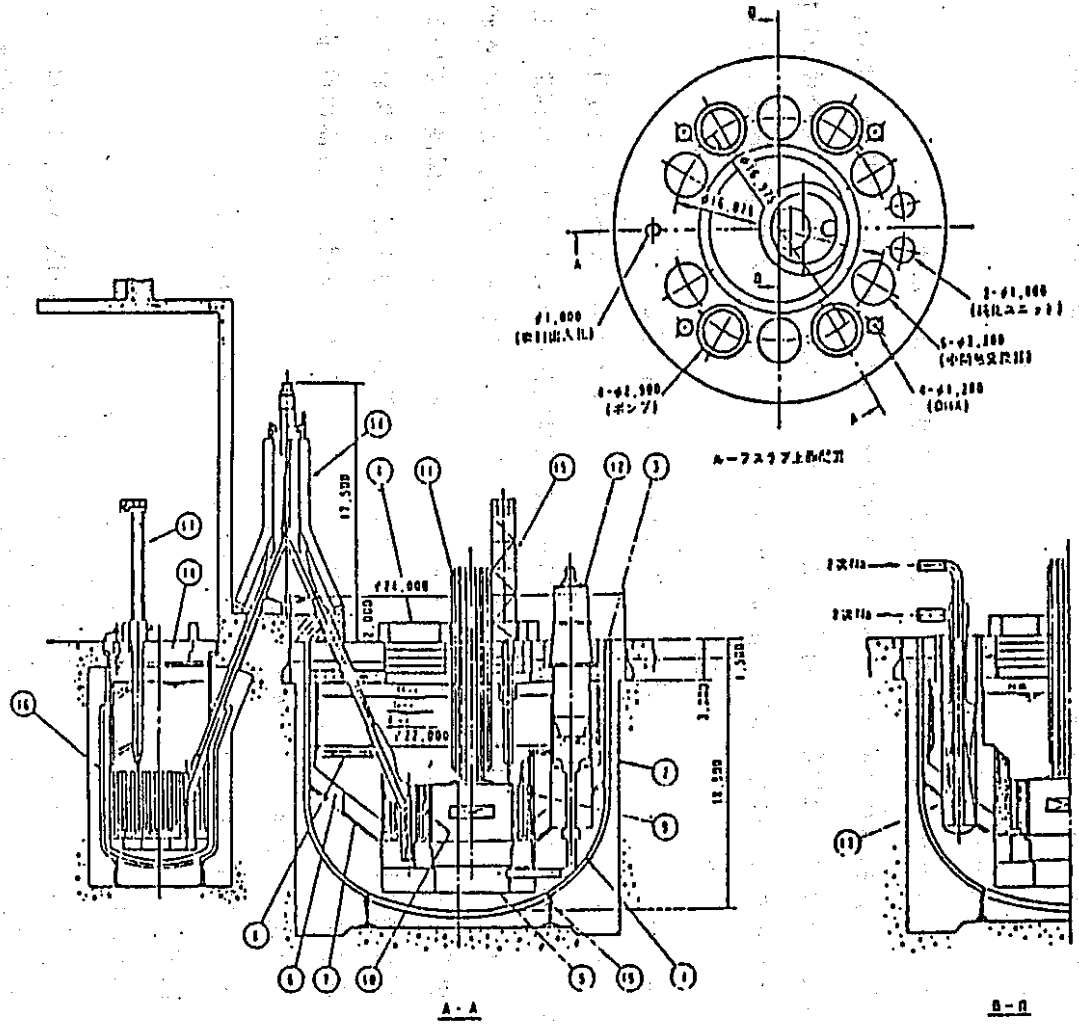


図 2.4.5 CRBRP の炉内構造物



No	名 称
1	主 要 器
2	安 全 容 器
3	ルーフスラブ
4	回 転 プ ラ グ
5	炉 心 支 持 構 造 物
6	炉 心 サ ポ ー ト
7	熱 シ ャ へ い 層 (ホ ッ ト シ ョ ッ ク 用)
8	熱 シ ャ へ い 層 (上 ・ 下 方 向)
9	熱 シ ャ へ い 層 (半 径 方 向)
10	中 性 子 シ ャ へ い 体
11	炉 心 上 部 機 構
12	1 次 主 循 環 ポ ンプ
13	中 間 熱 交 換 器
14	燃 料 出 入 機
15	燃 料 交 換 機
16	炉 外 燃 料 貯 蔵 槽
17	燃 料 移 送 機
18	回 転 プ ラ グ
19	主 容 器 支 持 構 造

原子炉構造変更・改善点

No	項 目	内 容
1	炉内構造物支持方式	スーパーフェニックス方式 → 上部水平支持方式
2	主容器耐震支持方式	下部に新設

図 2.4.6 タンク型原子炉構造

炉内構造物は Phase I の検討で Super Phenix と同様、下部鏡板内で支持されていたが、Phase II で、上部サポート方式と下部サポート方式の比較検討が行なわれた。その結果、上部サポート方式の方が、荷重の伝達経路が、上下動に弱い鏡板部を經由せずにルーフスライプ支持部へ伝わるため、有利であることが確認され、上部サポート方式に変更された。構造は 2 枚のコニカル状の支持構造物を、円周方向 24 枚の堅リブ及び円周方向リングで結合した箱型構造とし、これを主容器胴及び炉心支持構造に直付けしている。

(iii) 炉心支持構造

炉心支持構造の検討では炉心支持板、高圧プレナム構造、中性子遮へい体構造等の構造概念を明確にするとともに、強度面及び耐震面からの検討を行い、健全性が確認されている。

タンク型炉の場合、中性子遮へい体がループ型に比べて大きいため、炉内構造物が大型になっており、炉心支持構造と中性子遮へい体支持構造は分離された構造となっている。

② フェニックスの設計

フェニックスの原子炉構造を図 2.4.7 及び図 2.4.8 に示す。

炉心支持構造物は直径 3500 mm、高さ 965 mm の円板状のボックス構造であり、炉心の支持とナトリウム流量配分を行う。燃料集合体 103 本、ブランケット集合体 90 本、銅の集合体 216 本（又は 222 本）、貯蔵用集合体 41 本（又は 17 本）、制御棒 6 本である。

③ スーパーフェニックスの設計

スーパーフェニックスの原子炉構造を図 2.4.9 に示す。

フェニックスでは、ホット、コールドプレナムはコニカル構造により仕切られていたが、スーパーフェニックスでは、熱的及び機械的観点からトロイダル構造とし、ホット、コールドプレナム間の差圧に耐えられるようになっている。また、さらに外側にコニカル状構造物を配置し、トロイダル構造物をサーマルショックから保護している。

炉心構造物は、フェニックスで採用した主容器からつり下げられた環状サンドウィッチ構造を改良している。すなわちダイアグリッドサポートは、主容器の底部に溶接された環状構造の内側部分に据付けてある。

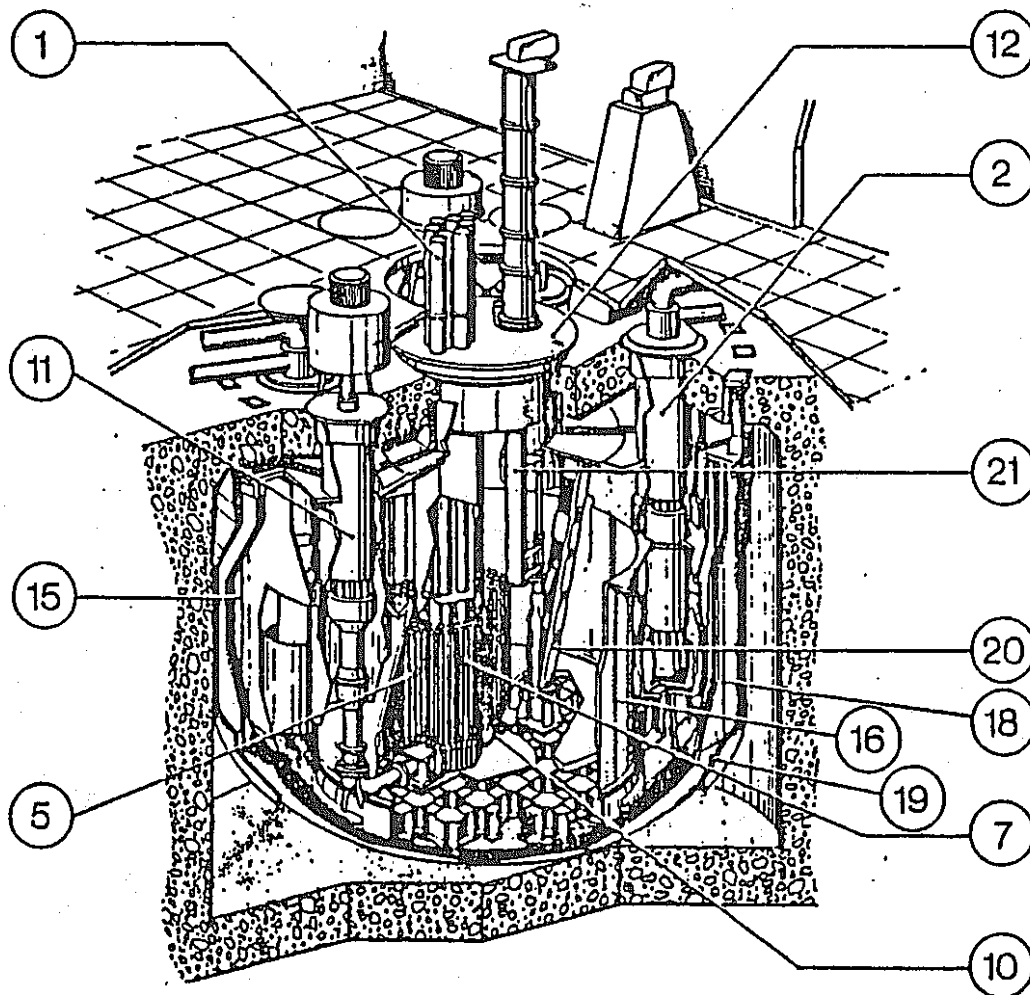
炉心支持構造の中央部には、Core Catcher が配置されている。

④ PFR

PFRの原子炉構造を図 2.4.10 に示す。

タンク内には円筒型のリアクタージャケットがあり、IHXが入る部分はポット状になっている。このリアクタージャケットは一次と二次の高温ナトリウムを隔離しており、ステンレス板とアルゴンの入った断熱構造となっている。

CUT-AWAY VIEW



REACTOR BLOCK

- 1 control rod drives
- 2 intermediate exchanger
- 3 leak detector
- 4 upper neutron shielding
- 5 lateral neutron shielding
- 6 blanket
- 7 core
- 8 lat. shielding support
- 9 conical support collar
- 10 fuel support slab
- 11 primary pump
- 12 rotating plug
- 13 slab
- 14 roof
- 15 main vessel
- 16 primary vessel
- 17 core cover
- 18 double envelope vessel
- 19 primary containment
- 20 transfer ramp
- 21 transfer arm

図 2.4.7 フェニックスの原子炉

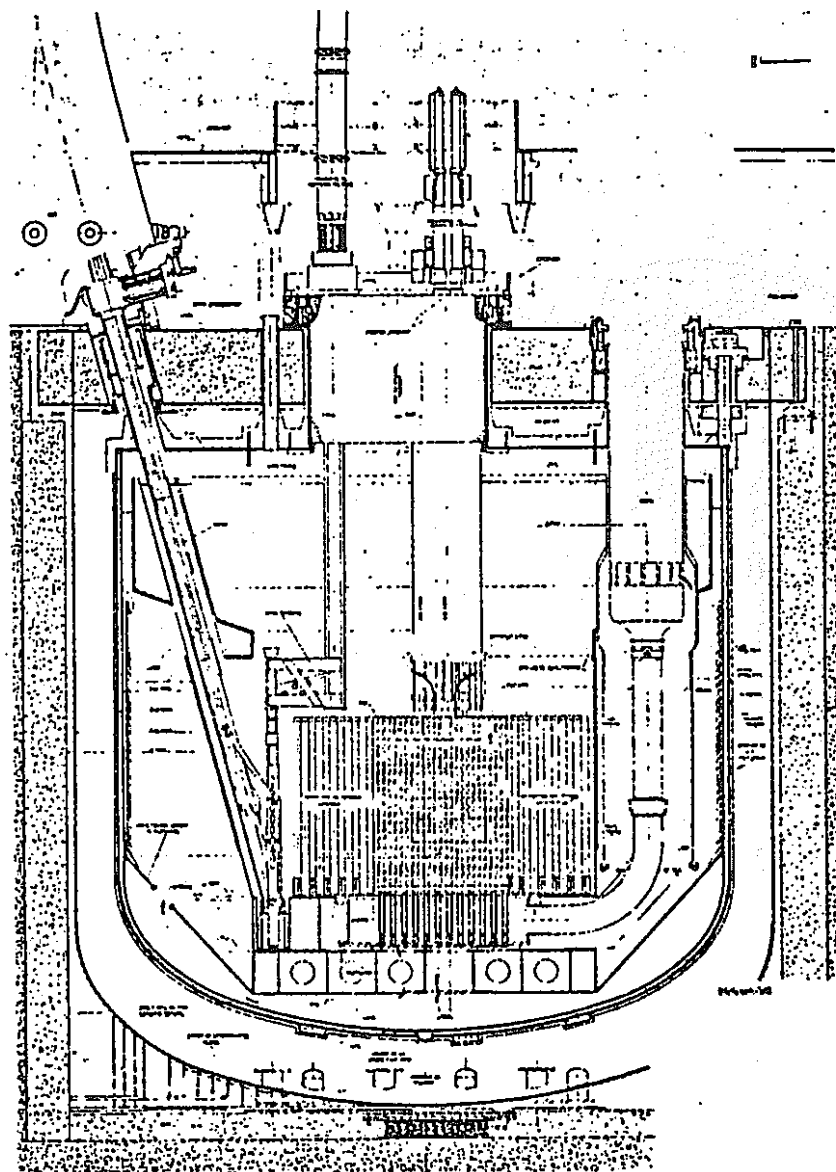
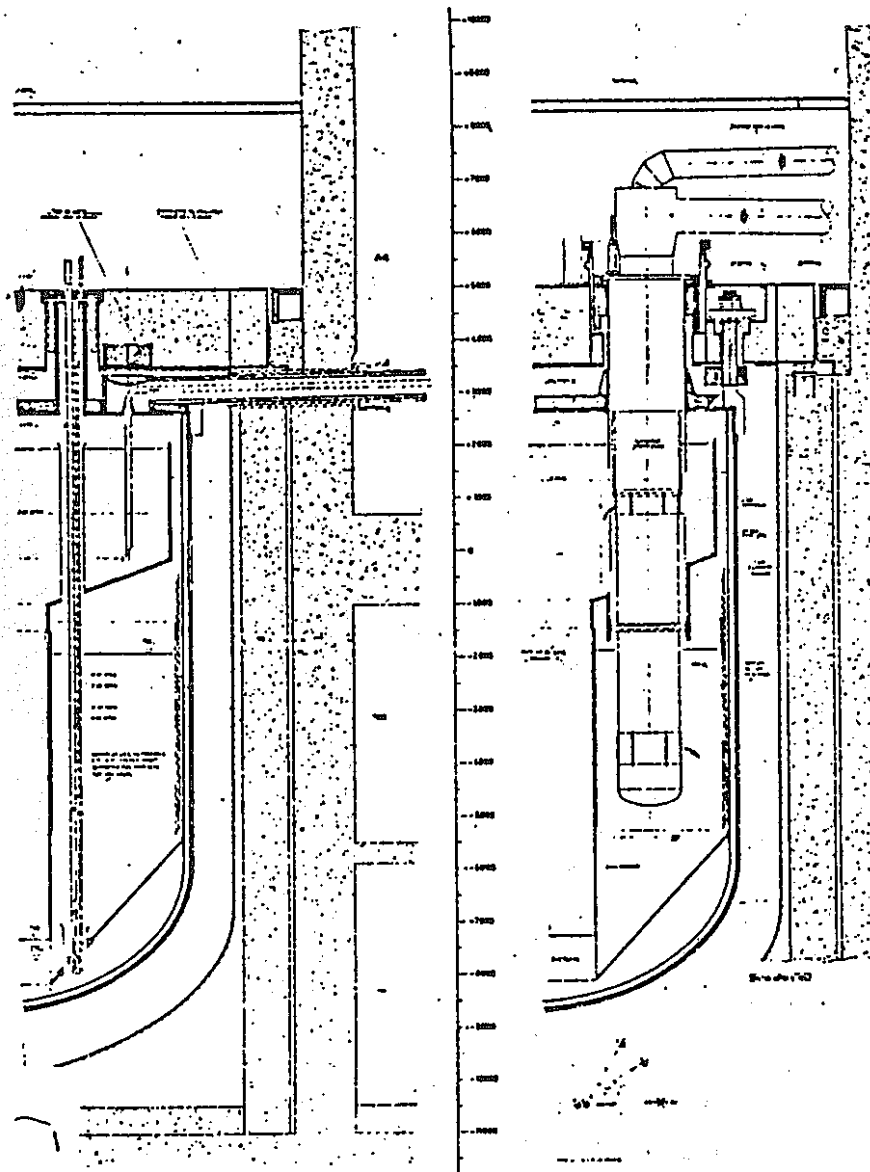


図2.4.8 フェニックス(a)原子炉N-S方向断面



(b) 炉炉容器詳細

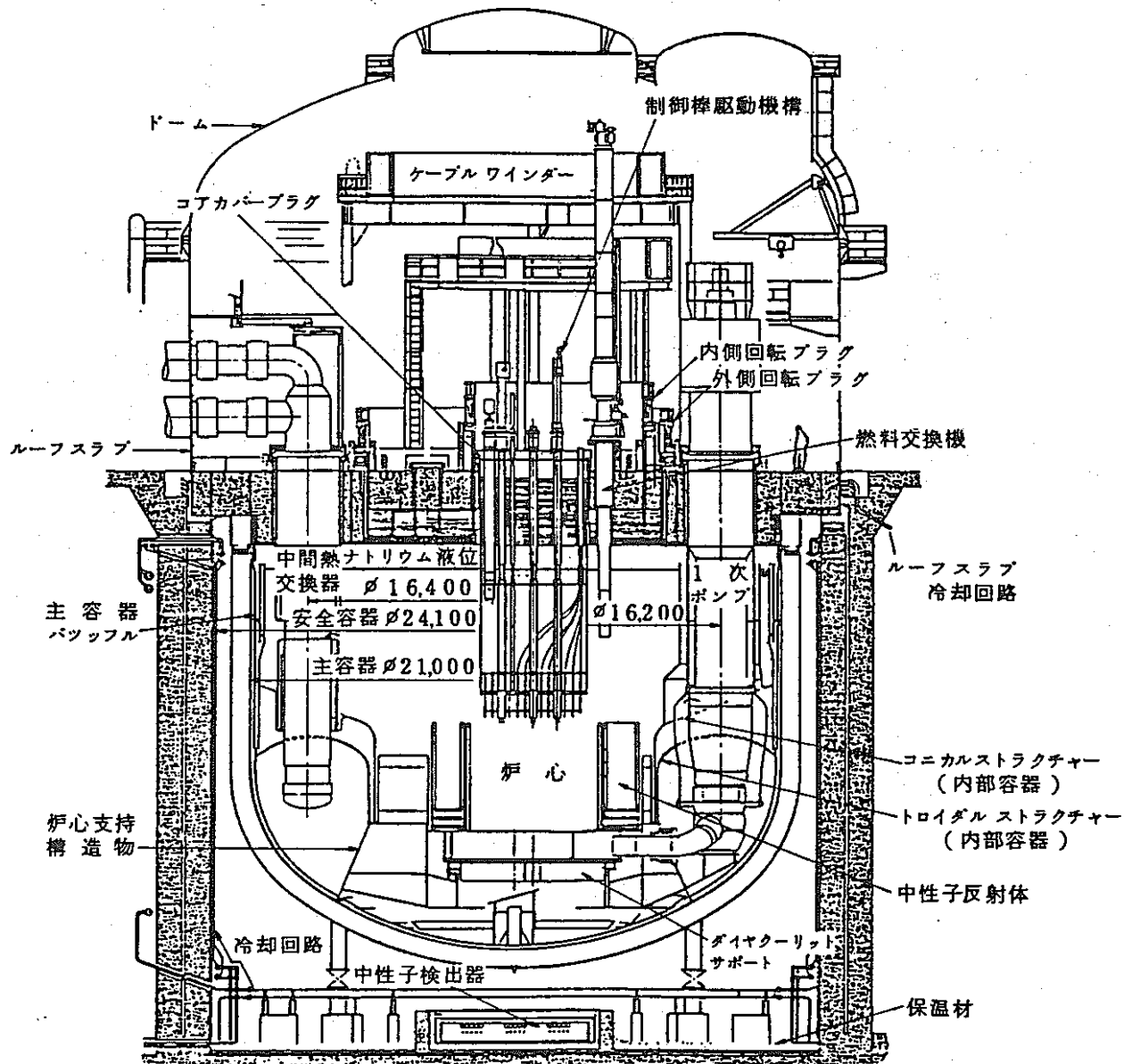


図 2.49 スーパーフェニックス原子炉構造

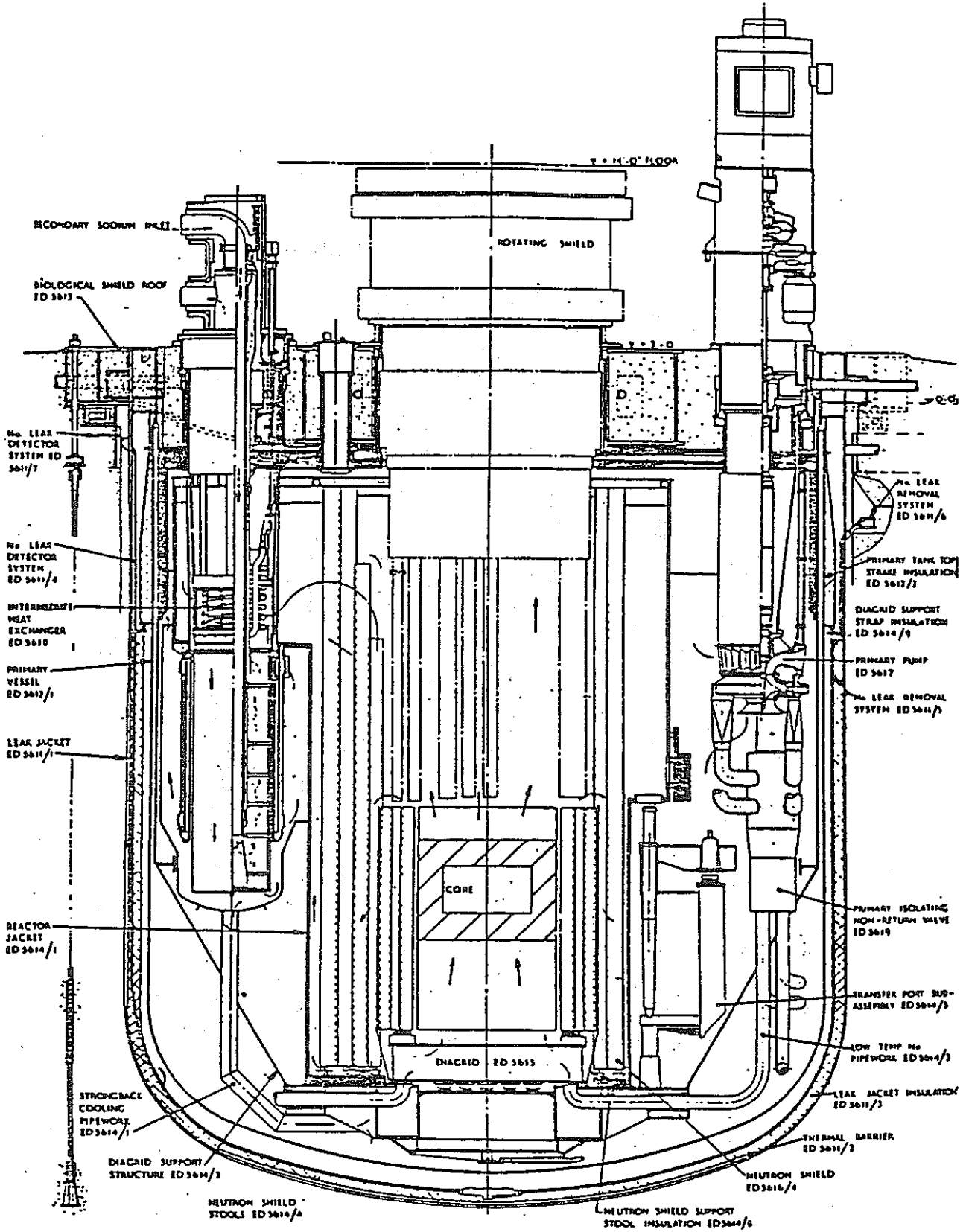


図 2.4.10 PFR の原子炉構造

炉心支持構造はダイヤグリッドと呼ばれ、その構造を図 2.4.11 に示す。直径は 3.7 m、深さ 0.9 m のステンレス鋼製で、重量 9.5 ton であり、複雑なハニカム構造物である。ダイヤグリッドは 55 のコンポーネントから成り、70 mm 厚さの板から切り出した。この構造物を作り出す上で最大の問題の 1 つは溶接時の厚板に発生する熱応力、あるいは溶接後の収縮による変形をさけることである。この変形により溶接部のまわりの金属にヘアークラックが発生する。この問題を克服するため、一連の溶接は慎重に計画され、ピーク応力を除去するため溶接後に安定化熱処理を行った。すべてのつき合せ溶接部は X 線検査を実施した。

他のすべての溶接部は超音波探傷試験を行い、完成したダイヤグリッドは特別な試験で耐荷重試験を行い、変位を計測した。ダイヤグリッドはすべてにわたって機械加工を行い、最後に p. c. d. の許容差 0.5 mm で燃料集合体のキャリア（モジュールに相当する）を入れるチューブを加工した。材料はステンレス鋼 BS 1501 TI である。

原子炉内部構造物は一次容器の底部近くに位置する直径 8 m のダイヤグリッド支持構造物で支えられている。この上にダイヤグリッドおよび炉心から出てくる高温ナトリウムと IHX からの低温ナトリウムを分離しているリアクタージャケットをのせている。

⑤ CDFR

CDFR の原子炉構造を図 2.4.12 に示す。

炉心を支持するダイヤグリッドは、燃料、ブランケット、中性子遮へい体へのナトリウム流量配分のための共通プレナムとして機能する。ダイヤグリッドはストロングバッグにより支持する。ストロングバッグは炉心荷重を一次容器に伝え、荷重はルーフに伝わる。炉心は一次ポンプ出口高圧ダクトによって支持される。

ホットプレナムとコールドプレナムの分離は水平薄板で行う。これは両プレナムのヘッド差（約 2.5 m）に耐え得る必要がある。両プレナムの間に多層の中間プレナムが設けられ、構造物における所定の温度勾配を保持する。適切な断熱法は開発中である。

⑥ 米国 PLBR

(i) AI 社

AI 社が設計した原子炉構造を図 2.4.13 に示す。

炉心支持は下部サポートで、水平構造により横方向荷重が支えられる。熱応力を軽減するため熱膨張を吸収する必要があるが、本設計では炉心部および主容器へはフレキシブルスカートを通じて接続される。

上部のホットプールと下部のコールドプールのリーク防止の為に、IHX 及び DIHX 貫通部にはラビリンスシールが検討されている。これらを図 2.4.14 に示す。

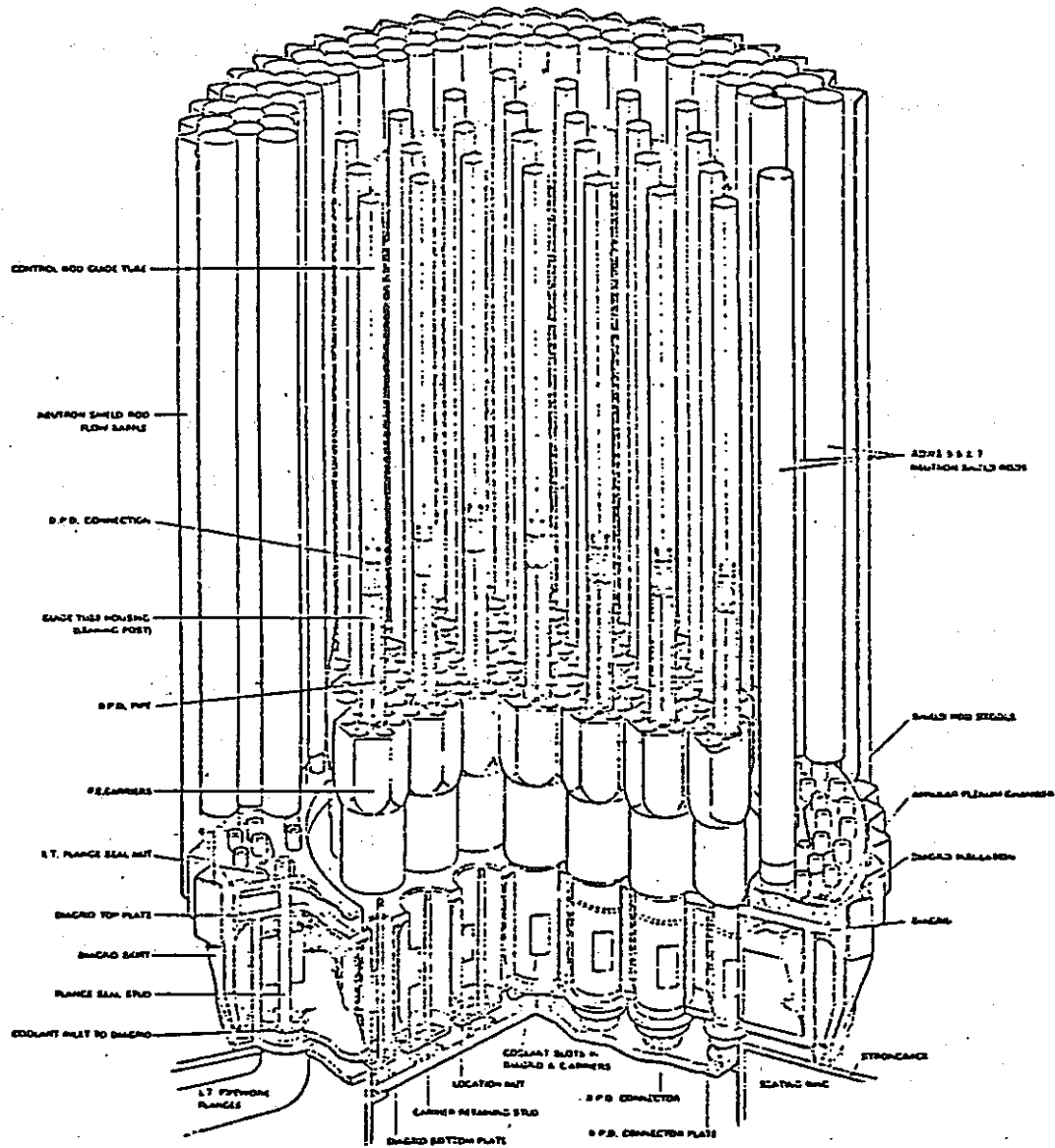
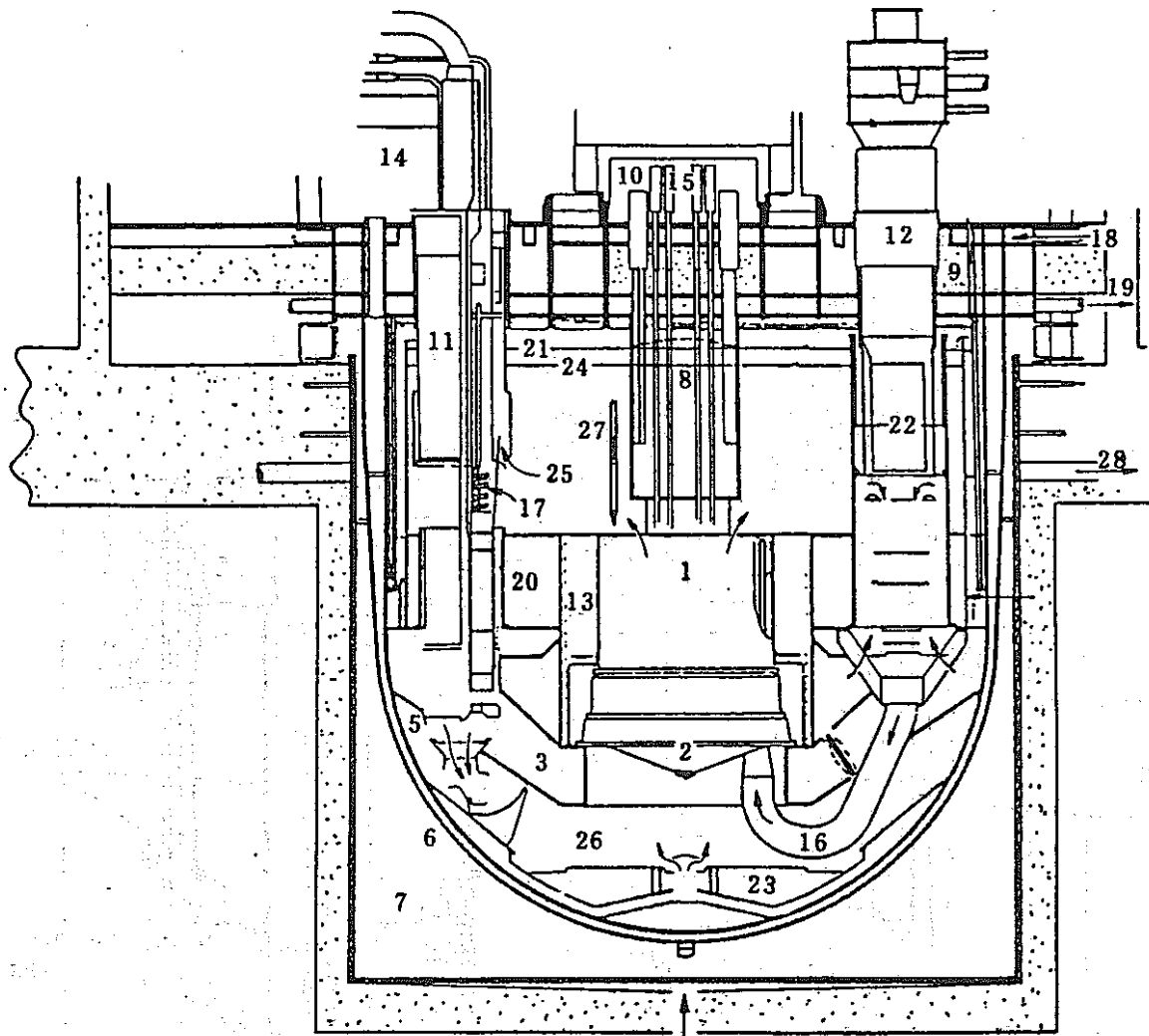


図 2. 4.11 PFR の炉心支持構造



- | | | |
|------------|-----------------|-------------------|
| 1. 炉心 | 11 中間熱交換器 | 21 ナトリウムレベル(540℃) |
| 2. ダイアグリット | 12 1次ポンプ | 22 ナトリウムレベル(370℃) |
| 3. 炉心支持構造 | 13 外部中性子遮蔽体 | 23 デブリドレイ |
| 4. 内部タンク | 14 2次系配管 | 24 ナトリウムレベル(370℃) |
| 5. 1次容器 | 15 制御棒駆動機構 | 25 ホットプール |
| 6. ガードベッセル | 16 炉内配管 | 26 コールドプール |
| 7. ビット | 17 崩壊熱除去コイル | 27 燃料集合体 |
| 8. 炉心上部機構 | 18 ルーフスラブ冷却ガス入口 | 28 ビット冷却出口 |
| 9. ルーフスラブ | 19 ルーフスラブ冷却ガス出口 | |
| 10. 回転プラグ | 20 中間プレナム | |

図 2.4.12 CDFR の原子炉構造

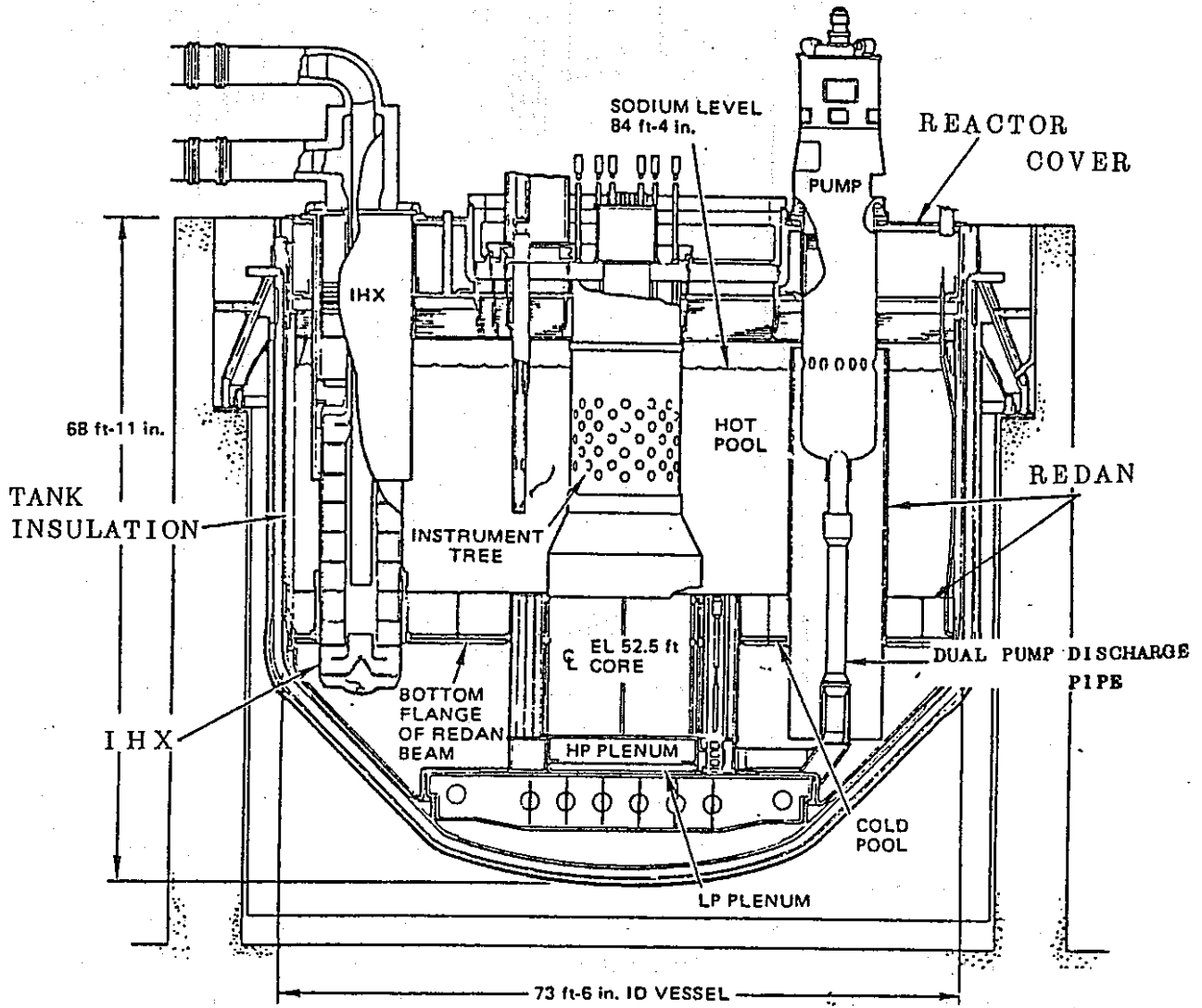


图 2.4.13 原子炉構造図 (AI 社)

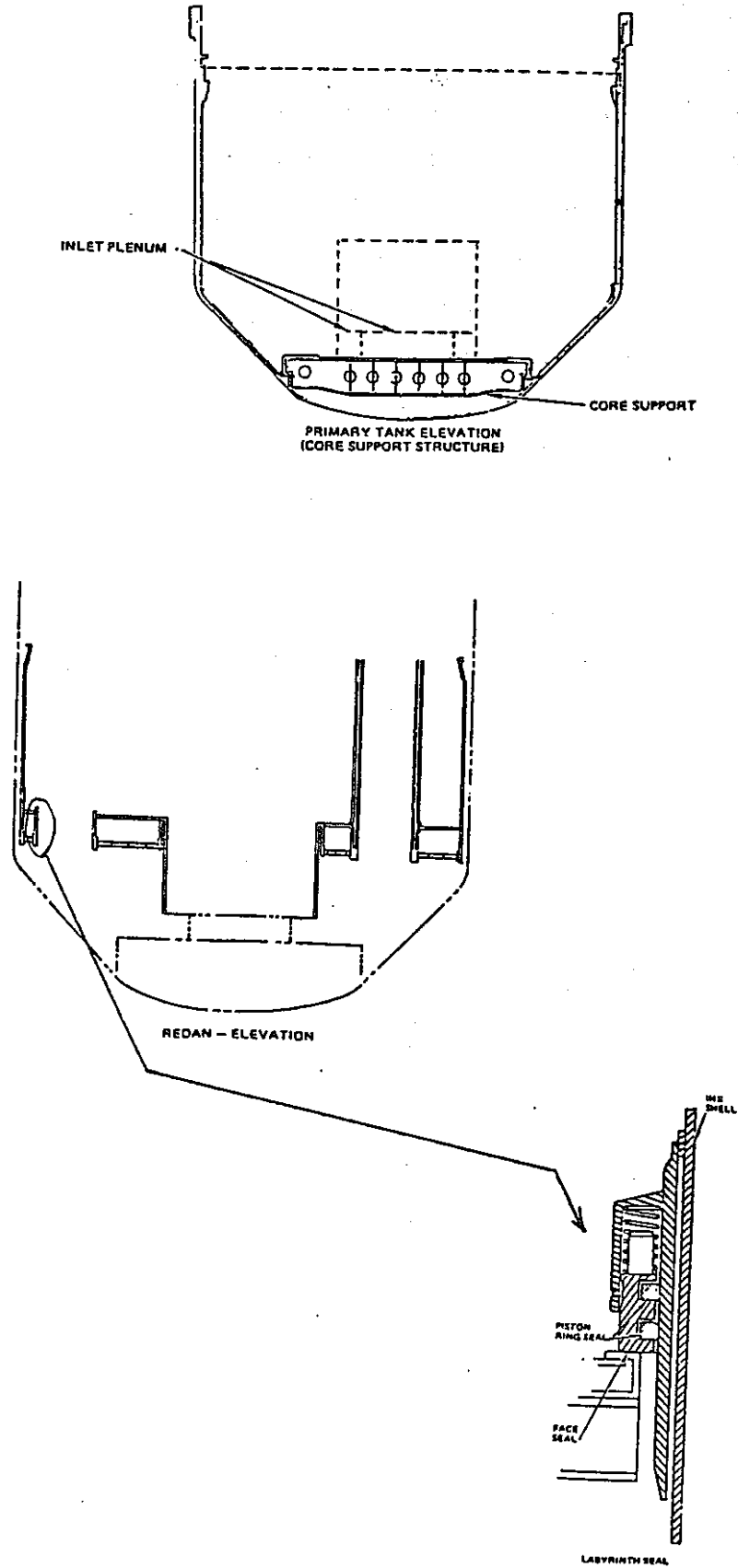


图 2.4.14 炉心支持，隔壁构造

(ii) GE 社

GE 社の設計した原子炉構造図を図 2.4.15 に示す。

炉心は上部サポート方式により支持され、ボックス構造により剛性を高くしてある。両プール間の温度差は水平構造上 30 インチに積み重ねられた 10 枚のステンレス板とボックス内のナトリウムの淀み層によって保たれる。

両プール間のリーク防止には中間熱交換器とスタンドパイプ間にベローシールが用いられている。これらを図 2.4.16 に示す。

(iii) WH 社

WH 社の設計した原子炉構造を図 2.4.17 に示す。

炉心は上部サポート方式で支持され、サポートはリブ構造で低温ナトリウム領域に設けられている。各バックル板によりナトリウムプレナムを形成し、ナトリウムの淀み層により両プールの断熱の機能を保持している。両プール間のリーク防止にはベローズシールが用いられている。これらを図 2.4.18 に示す。

以上、主容器内部構造物について述べたが、その他の詳細については表 2.4.2 に示す。

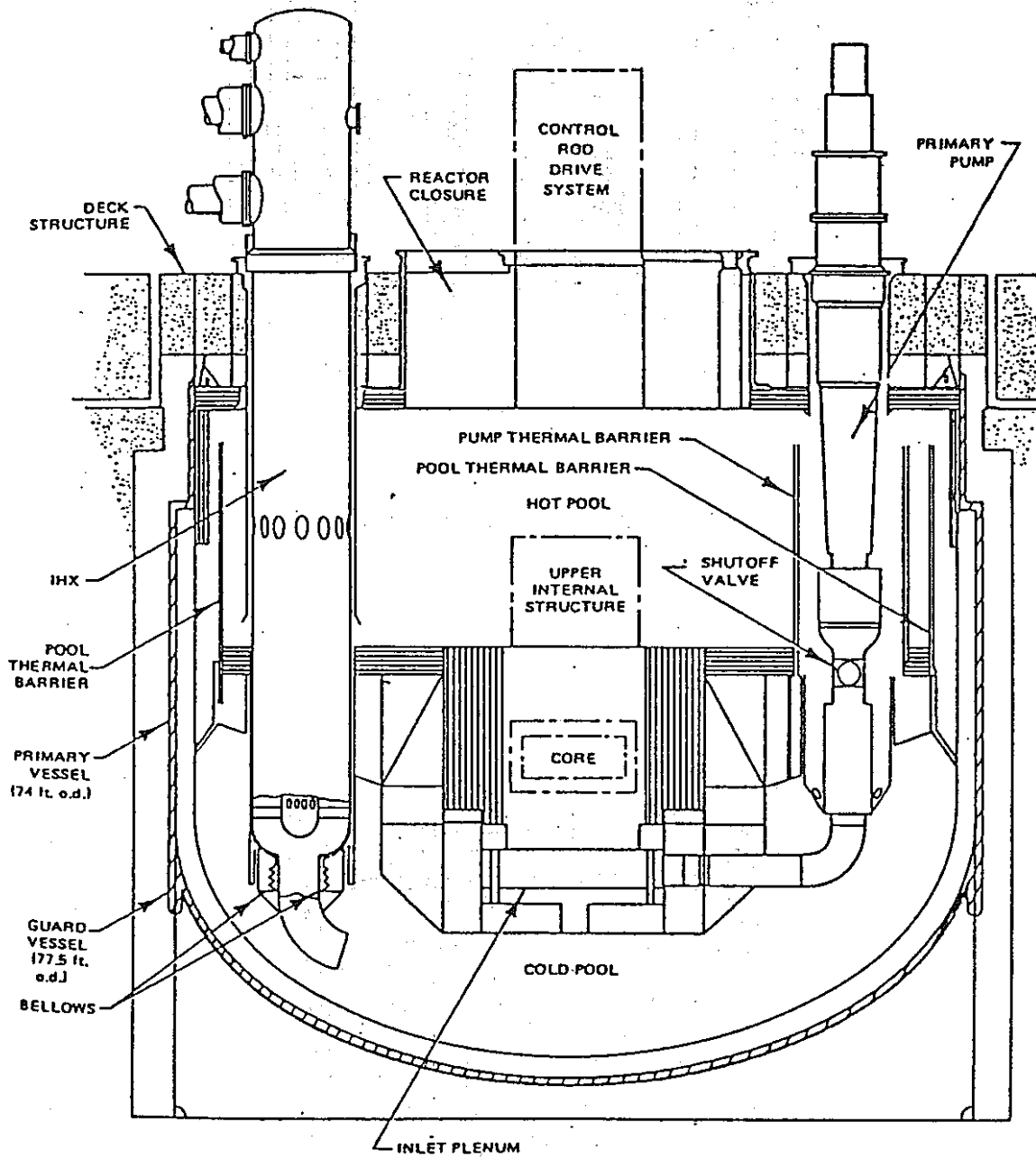


图 2.4.15 原子炉構造図 (GE 社)

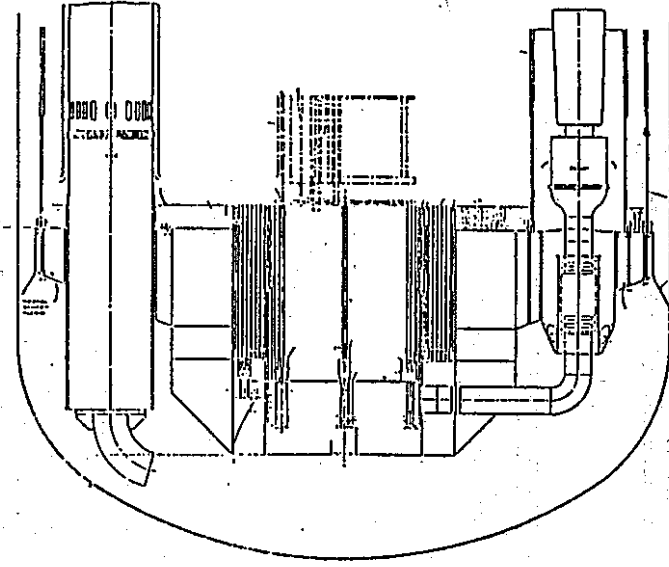


图 2.4.16 炉心支持，隔壁构造

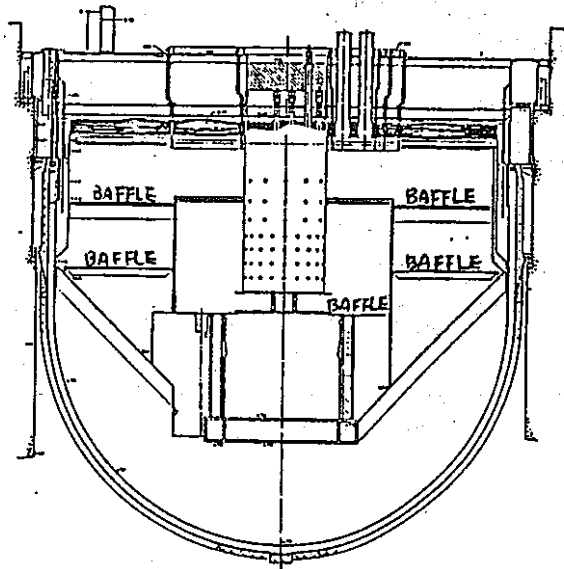


图 2.4.18 炉心支持，隔壁构造

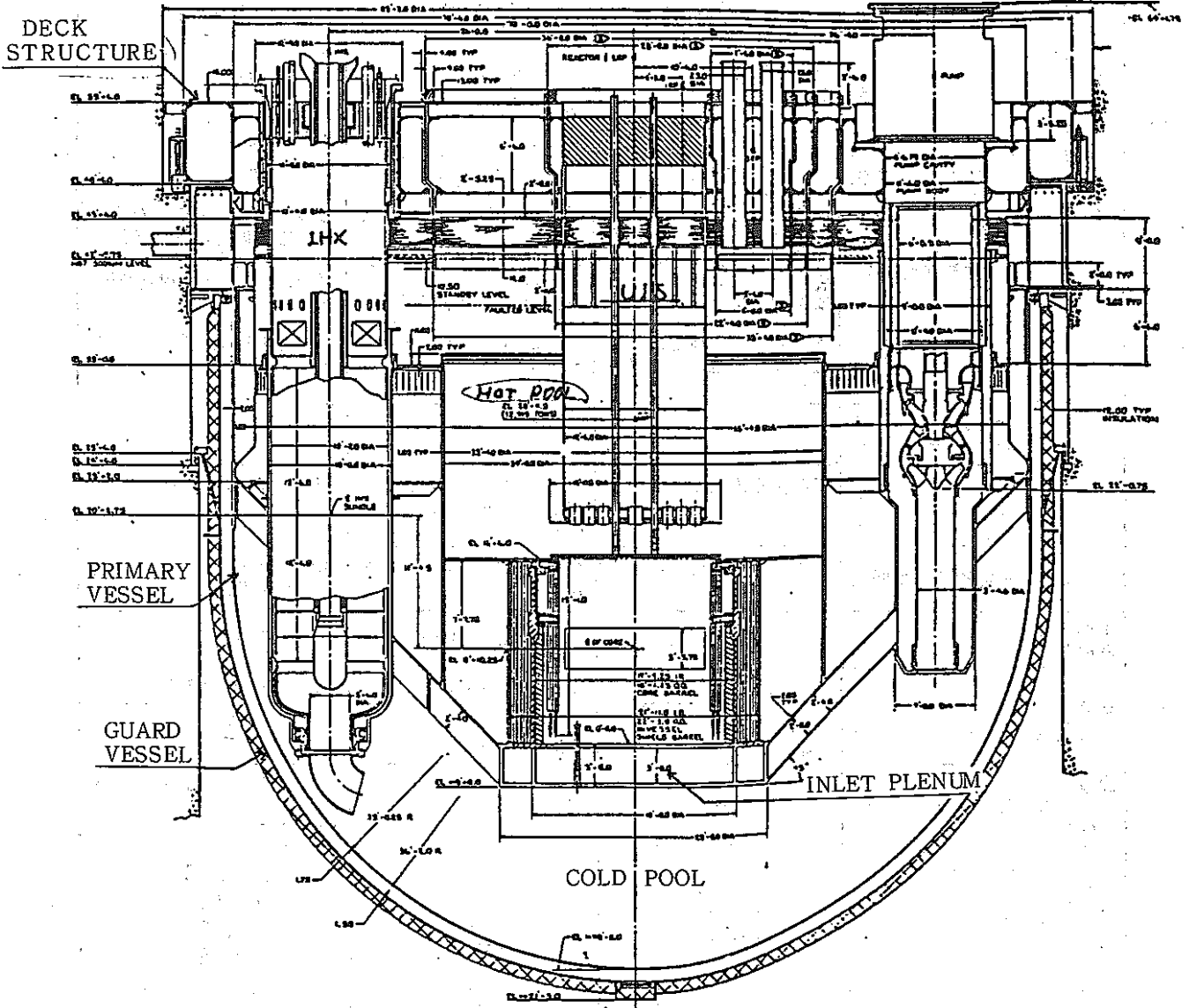
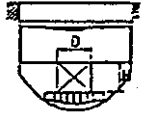
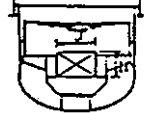
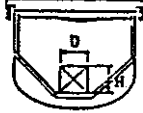

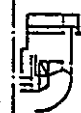
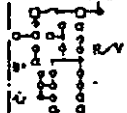


图 2.4.17 原子炉構造図 (WH社)

表 2.4.2 主容器内部構造のまとめ

		P L B R			
		A I	G E	W H	
構造	構造図				
	寸法・重量	D = 7.5 m H = 5 m We = 429 m	D = 5.5 m H = 5 m We = 429 ton	D = 5.5 m H = 5 m We = 429 ton Ws = 1371	
	炉心-U I S の関係	結合方式	結合方式	非結合方式	
	概念の選定根拠	全投 (耐熱性検討)	解析結果より、コニカル構造の炉心支持必要脚性を確認し、箱型リング構造を介し、トリコニカル構造で支持	①下部部よりの円錐支持 ②主容器側面よりの円錐支持を比較し、②を採用	Dual Conical 構造を採用し、主容器との取付方法について検討を加え、Horizontal bog 構造を改良
		炉心支持構造	トリコニカル構造から立ちあげた箱型リング構造支持	リップ構造を圧縮円錐スカートで支持	円錐箱型構造で胴部より吊下支持
		炉心支持構造の鋼性	-	-	-
		ロッキングモード防止法	下部円錐鋼板の剛性で防止	スカートのレベルと炉心重心レベルを一致させて防止	円錐支持構造の剛性で防止
		外壁構造との関係	別にレダンを設ける	熱しゃへい板を設けて兼用	温度だけでなく、圧力境界としても兼用
	条件性	材 料	SUS 304	SUS 304	SUS 304
	条件重		2.28G (2.2~3.0Hz)	2.26G (2.8Hz)	2.6G (2.5~3.2Hz)
機器減衰定数		OBE 2% SSE 3%	OBE 2% SSE 3%	OBE 2% SSE 3%	
保構造守性	製作・据付性	-	-	円錐サポートの溶接困難だが可能改良予定	
解析方法	解析モデル				
耐張特性	固有振動数 (Hz)	水平	5.4	5.8	-
		垂直	5.2	5.3	-
	U I S との相対変位 (mm)	水平	(炉心支持部変位) SSE 9.9	SSE 10.9	SSE 33.6
		垂直	SSE 27.5	-	-
	炉心への応答加速度 (G)	水平	SSE 0.8	-	-
		垂直	SSE 1.2	-	-
イ導ン入時の	日本の床応答を脱出した場合の U I S との相対変位 (mm)	水平	(炉心支持部変位) 105	(炉心頂部変位) 82	99.1
		垂直	-	-	-

参考文献

- (1) 高速増殖実証炉第1巻 PNC SN 241 83 - 08 (2)~(3)
- (2) Assessment of Maintainability of LMFBR Designs.
NP - 1714 Vol.1 EPRI
- (3) Large Pool LMEBR Design. Executive Summary NP - 1016 SY EPRI

あ と が き

昭和57年8月に実証炉設計技術検討ワーキンググループが発足し、約2カ年の間に、各メンバーは、日常業務とは別に勤務時間外等により調査したので、内容が充分でないと思われるが、少しでも早く、多くの人々の検討資料として、役に立てて頂ければと思い、報告することにした。

本報告書をまとめるまでに、高速増殖炉開発本部、開発調整室、奈良実証炉ブロックリーダー（現大洗工学センター高速炉機器開発部）や室員の多くの方々に、御指導頂いた。また、企画部、石上調査役等には数多くの資料を提出して頂いた。ここに深く感謝する次第である。

本実証炉設計技術検討ワーキンググループの発足や会議の運営にあたり、望月理事、野本副本部長、堀開発調整室長、各ブロックリーダー、大洗工学センター関連部長（厚母、井滝、松野、三本各部長）等、数多くの御協力を得ましたことを感謝します。

当ワーキンググループの発足以来、約2カ年が経過し、発足当初計画したPhase-1：「世界各国の技術調査」を一応終了し、今後はPhase-2に移行すべき段階にきている。

動燃内においては、昭和59年3月16日および4月1日に、大幅な人事異動が行われ、大洗工学センター内にFBR大型炉グループが発足し、新しい局面を展開しつつある。

今後とも、一層の御支援を期待する。

(付) 実証炉設計技術検討ワーキンググループメンバー一覧

(本 社)	佐々木 修 一	(実証炉Gr)
	大 谷 暢 夫	(炉物理Gr)
	坂 本 寛 巳	(システム設計Gr)
	服 部 直 三	(高速炉工学Gr)
	赤 対 雅 博	(現. 三菱重工)
(大 洗)主査	亀 井 満	(機器開発室)
	中 本 香一郎	(")
	林 道 寛	(")
	久保田 淳	(")
	片 岡 一	(")
	軍 司 稔	(")
	今 井 暎	(システム設計開発室)
	中 西 征 二	(構造物強度試験室)
	平 野 正 敦	(ナトリウム材料開発室)
	高 橋 克 郎	(炉心安全工学室)
	宮 口 公 秀	(プラント安全工学室)
	黒 羽 光 男	(")
	布留川 修	(高速炉工学室)
	池 上 哲 雄	(原子炉技術課)
	小 山 真 弘	(照 射 課)
	鹿 倉 栄	(現. 東海PU燃設計開発課)
	松 島 英 哉	(照射燃料集合体試験室)
	横 田 淑 生	(現. 科学技術庁)
	神 戸 満	(高速炉機器開発部)
	瀬戸口 啓 一	(原子炉第2課)
(事 務 局)	山 田 栄 吉	(高速炉機器開発部)