

もんじゅ 2次設計の概要

小田島嘉一郎*

1. まえがき

高速増殖原型炉を使用する発電プラント「もんじゅ」の設計は、昭和43年に始められた予備設計以来「高速原型炉1次設計」、「もんじゅ1次設計」を経て「もんじゅ2次設計」に引継が

れた。「もんじゅ2次設計」は昭和46年10月から47年3月まで住友、東芝、日立、富士、三菱の五社によって行なわれ、ひきつづき幹事会社である三菱が、この各社による設計の総合的な調整を行なった。この設計は今後「もんじゅ3次設計」、「調整設計」へと引継がれ、それと並

表1. 高速増殖原型炉「もんじゅ」の主要目

原子炉型式	ナトリウム冷却・ループ型
熱出力	714MW
電気出力	300MW
燃料	PuO_2-UO_2
炉心寸法	
等価直径	1755mm
高さ	900mm
容積	2230ℓ
プルトニウム濃縮度 (Pufiss%)	内/外炉心
初期	15.6/21.9
平衡	16.3/22.3
燃料インベントリ	
炉心 (U+Pumetal)	5.58×10^4 kg
ブランケット (Umetal)	1.67×10^4 kg
取出し燃料平均燃焼度	80,000MW D/T (目標)
燃料被覆材	SUS32
燃料被覆材外径/肉厚	6.5/0.45mm
被覆材許容最高温度	700°C
出力密度	292 KW/ℓ
ブランケット厚さ (軸/半径方向)	350 (上・下共) / 298 mm
増殖率 (初期/平衡)	1.17/1.15
原子炉出入口温度 (入口/出口)	390/540°C
2次系温度 (高温側/低温側)	515/320°C
原子炉容器寸法 (高さ/直径)	17,600/6,200 mm
ループ数	3
ポンプ位置 (1, 2次系)	コールドレグ
蒸気発生器型式	ヘリカルコイル貫流分離型
蒸気圧力 (主/再熱)	132/322 kg/cm ² g
蒸気温度 (主)	487°C
燃料交換方式	単回転プラグ固定アーム方式
燃料交換間隔	6ヶ月

* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部

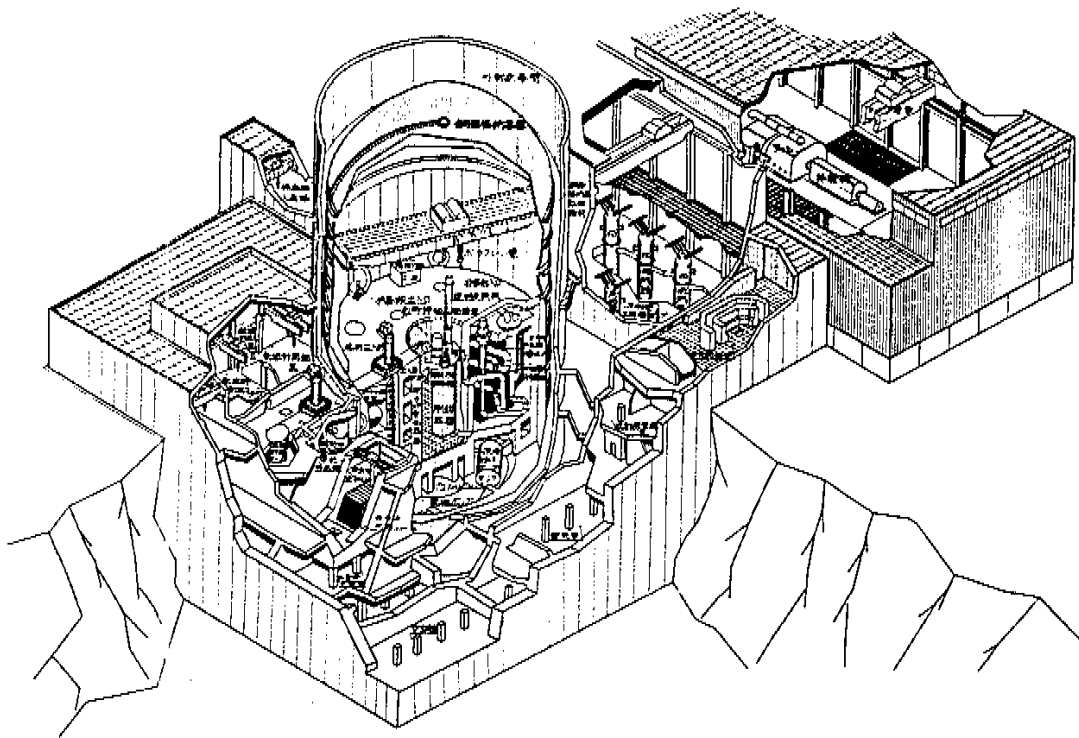


図1 もんじゅプラント鳥観図

行して行なわれるチェックアンドレビュー、安全審査などを経て49年度の建設着工に備えられる。

今回行なった「もんじゅ2次設計」では、統一のとれたプラントとしてまとまりのある設計を得ることと安全審査の予備的説明ができる設計とすることに主眼を置いた。また高速原型炉「もんじゅ」の大型高速炉発電プラントへの外挿性を検討する意味で大型高速炉プラントの概念設計を併わせて行なった。

今回の設計に参加した各社の主な設計分担では、三菱がプラント全般のまとめ、炉心設計、安全設計、建屋、格納容器、電気設備および付属設備を、東芝が原子炉本体とタービン発電機を、日立が熱輸送系を、富士が燃料取扱系と廃棄物処理系を担当した。また燃料集合体については前記五社が、制御棒駆動機構、補助制御棒および炉心拘束機構については東芝、日立、三菱が、蒸気発生器については東芝、日立、富士、三菱がそれぞれ担当した。大型炉の概念設計に

については東芝が担当した。

2. 「もんじゅ2次設計」の概要

この設計ではプラントの統一性と安全性に重点を置くという基本思想に基づいて、当事業団の「もんじゅ2次設計技術仕様書」とこれを補助する各種設計基準にしたがって作業が進められた。その結果プラントとしてかなり調和のとれた設計にまとめられている。プラントの設計主要目は表1に示すようになっている。

プラント全体の配置は図1の鳥観図に示すようになっている。原子炉と1次ナトリウム系が中央のセミダブル形の原子炉格納容器におさめられ、燃料取扱建家はその左側に、2次ナトリウム系、蒸気発生器およびタービン発電機の建家が右側に配置されている。

原子炉で発生する熱は図2に示すように、いわゆる「ループ型」で構成される1次ナトリウム系によって取り出される。冷却材は原子炉容器の下部から導入され、炉容器の上部から流出

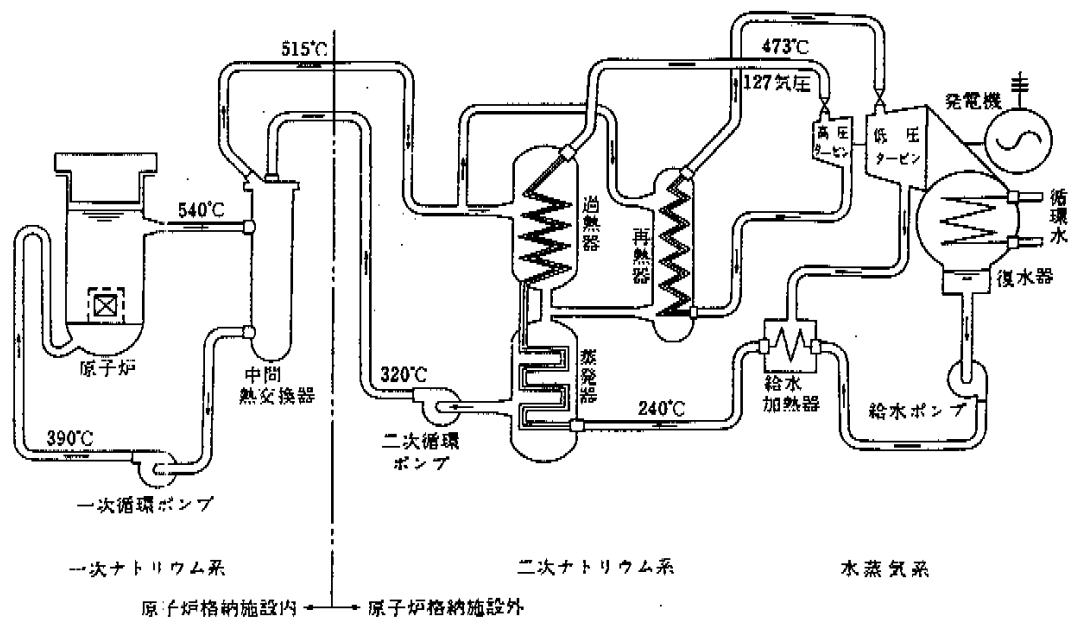


図2 高速増殖原型炉「もんじゅ」主系統概要図

するようになっている。この熱輸送系は3ループで構成されている。1次ナトリウムは390°Cで原子炉に入り、540°Cに熱せられるが、この熱は縦形平行流式の間熱交換器を介して2次系のナトリウムを320°Cから515°Cに熱し、その熱はさらに蒸気発生器により水側へ伝えられる。水は240°Cでヘリカルコイル型の伝熱管をもつ蒸気発生器に供給され、127気圧483°Cの過熱蒸気となって発電機に直結するタービンへ送られる。1次系も2次系もポンプはコールドレグに置かれている。原子炉の熱出力は714MWで、電気出力は300MWである。

この主熱輸送系以外に、燃料交換時および緊急時に炉心の熱を除去する2系統の補助熱除去系が設けられている。

原子炉は炉心構成要素と炉内構造物を収納する原子炉容器および遮蔽プラグから構成されている。炉心は円筒形でPuの富化度の異なる2領域に分けられ、炉心燃料はPu-U混合酸化物を、ブランケット燃料と呼ばれるプルトニウム増殖用の燃料には軸方向半径方向とも減損ウラン

酸化物を用いる。炉心燃料の燃焼度は取出燃料で平均80,000MWD/Tであり、炉全体のプルトニウム増殖率は平衡炉心で1.17である。

燃料要素はガスプレナムを上部に置く密封一体型で燃料集合体中に六角形状に配置されている。燃料集合体は炉心燃料では169本(タイロッドを含む)、径方向ブランケット燃料では61本の燃料要素から成り、被覆管はすべてステンレス鋼SUS32製である。集合体は全長4200mmで遮蔽体を内蔵している。

炉心を流れるナトリウムは下から上へ流れる。炉心内流量配分は固定オリフィス方式により行なわれ、炉心入口でのナトリウム流入は横流方式である。また燃料集合体の支持はハイドロリックホールドダウンによっている。

炉心の出力制御と起動、停止は19本の制御棒で行なうが、そのうち12本は調整棒、7本は安全棒である。

炉心には集合体の熱変形およびステンレス鋼の中性子照射に起因するスエリングによる弯曲および体積膨脹あるいは地震による振動等を適

当に制限し、かつ炉停止時には確実に燃料交換ができるようにするため、炉心外部あるいは内部に、半径方向に炉心を拘束する機構が設けられている。炉内構造物は原子炉容器下部に固定する方式をとり、また炉心中心と炉容器のそれとは一致する様に設計されている。

燃料交換操作は平衡炉心においては約6ヶ月間隔で行ない、交換時には炉心燃料とブランケット燃料の1/5と、制御棒を交換する。ただし炉心燃料は炉心周囲に配置されている貯蔵ラックにおいて次の燃料交換時まで貯蔵された後、炉外に搬出される。

炉内の燃料取扱いは固定アーム、パンタグラフ方式の交換機により、燃料は炉心—貯蔵ラック—炉内中継機構の間に移送が行なわれる。

使用済燃料は、この交換機により炉内中継機構の下部に取り付けられているポットに挿入され、次いで燃料出入機案内筒を通過して炉外に取り出される。格納容器外へは炉外中継機構およびキャスクカーにより、貯蔵槽に移送され、冷却される。次にこの冷却された燃料は地下台車および回転移送機によって洗浄設備に送られ、洗浄される。洗浄された燃料は缶詰後、水プールに貯蔵される。

一方、新燃料は地下台車、キャスクカー、炉外中継機構、燃料出入機の順に使用済燃料の移送と逆の経路で炉内に挿入される。

3. 炉心

炉心部およびブランケット部は196本の炉心燃料集合体と174本のブランケット燃料集合体によって構成されており、全体として直径2387mm、高さ1600mmの円筒形に近い形をしている。炉心部は等価直径1755mm、高さ900mmの円筒形で、上下方向は炉心燃料集合体と一体になったブランケットで、また半径方向はブランケット燃料集合体で完全にかこまれている。炉心部には19本の制御棒案内管が配置されていて炉の出力制御停止のために12本の調整棒と7本の安全棒が挿入される。12本の調整棒は3本の微調整棒と9本の粗調整棒に分けられている。

これらの炉心構成要素は、原子炉容器に固定

表2 炉心構成概要

炉心構成	
炉心	
形状	円柱
高さ	900mm
等価直径	1,755mm
炉心L/D	0.57
炉心容積	2,230 l
領域数	2
ブランケット	
軸方向厚さ(上/下)	350/350mm
半径方向厚さ	306mm
炉心構成要素	
炉心領域1(6列)	108本
炉心領域2(2列)	88本
制御棒(吸収体B,C)	19本
中性子源	2本
半径方向ブランケット(3列)	174本
サーベランス集合体	8本
中性子遮蔽体(4列)	316本
全長	4,200mm
ピッチ間隔	115.6mm
炉心中心位置(炉心支持板より)	1,305mm
体積比	
炉心及軸方向ブランケット	
燃料	32.8%
冷却材	41.3
構造材	23.4
ボイド	2.5
半径方向ブランケット	
燃料	44.8%
冷却材	34.2%
構造材	19.3
ボイド	1.7

された2枚の支持板によって支持されている。配置は図3に示すようになっている。

炉心は出力を平坦化するためにPuの高化度の異なる2領域に分けられている。平衡炉心では内側の炉心領域1にはPu富化度16.3%の108本の炉心燃料集合体が、その外側には、Pu富化度22.3%の88本の炉心燃料集合体が装荷される。表2に炉心構成の概要を示す。

炉心燃料集合体は図4に示すように、管外対面間距離110.6mmの六角形のラップ管と呼ばれるステンレススチール製の筒の中に169本の軸方向ブランケットと一体になった燃料ピンがおさめられたものである。この筒の上部には

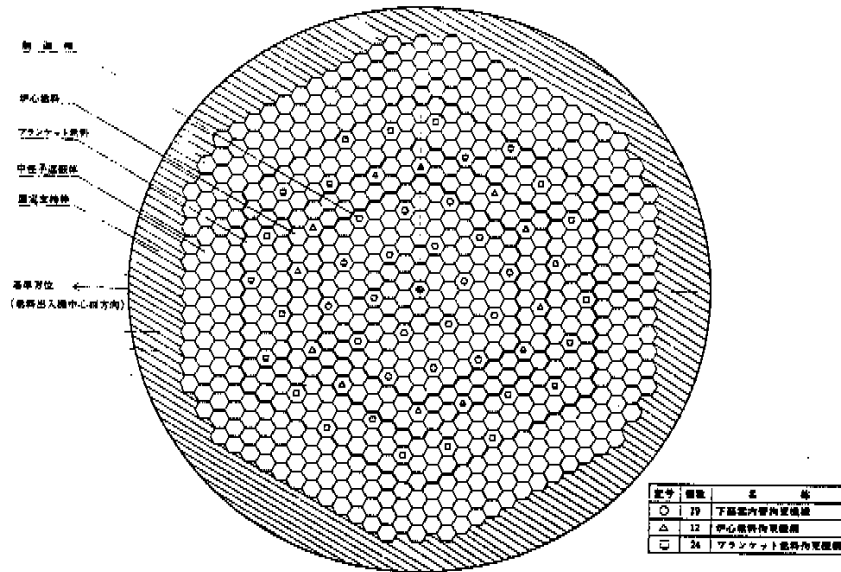


図3 もんじゅ 2 次設計炉心断面

集合体取扱い用ヘッドがついており、下部には集合体の支持と、冷却材ナトリウムの流入部を兼ねている入口ノズルがついている。炉心燃料

はPu-Uの混合酸化物で密度85%TDのペレット状のものが外径6.5mm、肉厚0.45mmのSUS32でできた被覆管の中におさまられている。こ

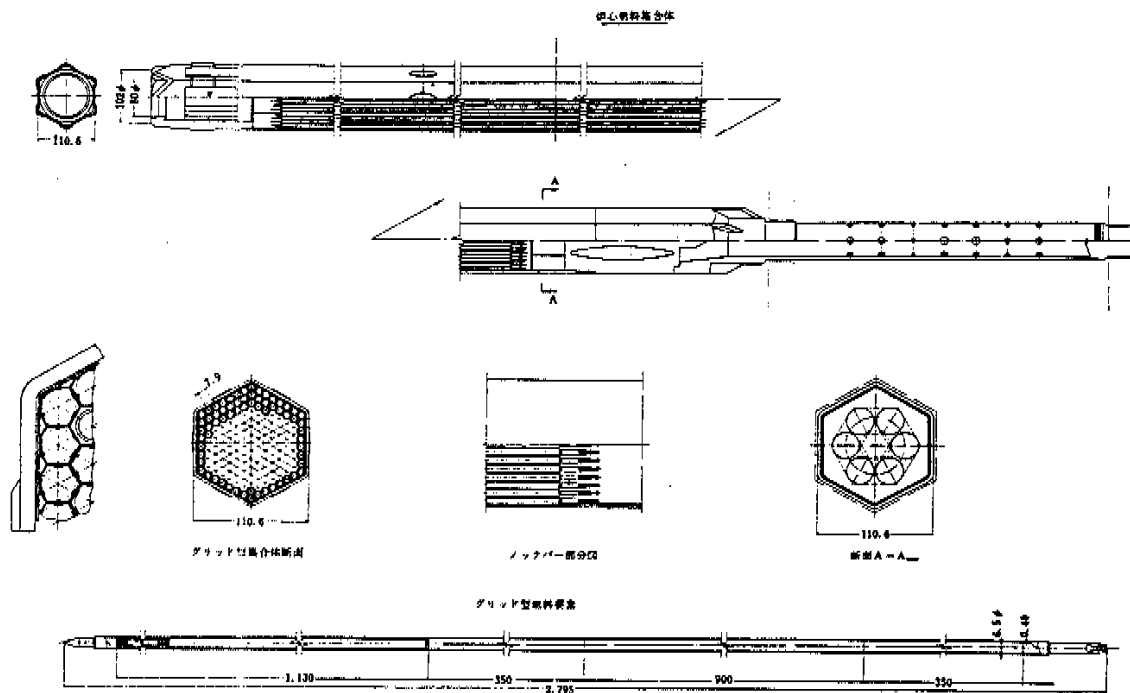


図4 もんじゅ 2 次設計炉心燃料集合体(グリッド型)

の被覆管は全長2695mmで、その上部から順に、ガスプレナム、上部軸方向ブランケット、炉心燃料、下部軸方向ブランケットがおさめられた一体密封型管である。

ブランケット燃料には U^{235} 含有率0.2w/oの減損ウランが使用される。炉心燃料部の長さは900mmである。ラッパ管内の燃料ピンはグリッドスペーサーによりピンピッチが7.9mmとなるように配置されている。燃料ピンの最大線出力は116%の過出力時に457 w/cm、定格時の被覆管最高温度は700°C、過出力時の燃料最高温度は2700°Cを制限値としている。

今回の設計では燃料集合体ラッパ管の熱彎曲、高速中性子照射によるステンレス鋼のスエリングとかクリープなどにより出力係数や温度係数が正になるようなことを防ぐため、および集合体の残留変形のために燃料の取出しとか装荷に支障をきたすことを防止するために、いわゆる炉心拘束機構が設けられている。この拘束機構としては炉外周辺部からしめつけるものと、内部でしめつけるものと両方が考えられている。

炉心燃料装荷量はPuとU合わせて 5.58×10^3 kgである。燃料の交換は6ヵ月に1回行ない炉心は5バッチ分散方式で、ブランケットは内側1列を5バッチ分散方式、外側2列を10バッチ分散方式で交換する。負荷率80%として平均取出燃料燃焼度は80,900MWD/Tが期待されている。増殖比は平衡炉心初期で1.17、末期で1.15と計算されている。燃焼による反応度変化は初期で2.29% $\Delta k/k$ で平衡時には2.54% $\Delta k/k$ となっている。

原子炉の熱出力は平衡炉心初期には炉心で約91%、残りが半径方向および軸方向ブランケットで発生されるが、プルトニウムが蓄積してくるに従ってブランケット内の核分裂の割合は増して、平衡炉心末期でその出力比は炉心で88.9%、軸方向と半径方向ブランケットで11.1%となる。

原子炉を冷却材が通るときの平均上昇温度は150°Cに設計されている。このときの冷却材流量は 13.53×10^6 kg/hrでその流量配分率は炉心に80.5%、半径方向ブランケットに11.8%、パイパス

に7.7%となっている。各燃料集合体内での冷却材の温度上昇を同一に保つために、炉心を構成している各燃料集合体については、その冷却材入口ノズルの挿入される上下支持板の間に流量調節機構を設けて、冷却材流量を調節するようになっている。冷却材は、ノズル側面にあけられた流入孔を横に流れて入り、ノズル内を上昇する。冷却材の上昇流によって集合体が浮き上がらないように、上下支持板間の高圧プレナムの圧力と、下部支持板下の低圧プレナムの圧力差を利用した、ハイドロリックホールドダウン方式によって、集合体は押えられている。

4. 原子炉構造

原子炉構造は図5に示すようにその関連構造物も含めて次のような部分から構成されている。すなわち原子炉容器、遮蔽プラグ、炉上部構造物、炉内構造物および安全容器である。

原子炉容器はステンレス鋼SUS 27で作られており、その大きさは炉容器内径が6280mm、肉厚が35mm、炉容器全高が17,515mmである。遮蔽プラグのおさめられる炉容器上部フランジの部分は、その外径が7,550mmになっている。原子炉容器はこのフランジの部分で原子炉容器をとりかこんでいるベDESTAL部で支えられており、容器の熱膨脹は下方へ逃がすようになっている。

炉容器は、炉容器からの冷却材漏洩が仮に発生したとしても、漏洩を容易に検出することおよび冷却材の喪失を防ぐために、炉容器と一体になったリークジャケットでおおわれている。炉容器とリークジャケットの間にある空間は、炉容器の予熱ガス用空間としても利用される。一次主冷却系入口ノズルは26Bで炉容器の下部鏡板部に3方向に取付けられている。出口側ノズルは36Bで炉容器上部の円周方向の3ヵ所に取付けられている。この他に炉容器上部には、補助冷却系の入口、出口ノズルおよびオーバーフロー系の出口ノズルが取付けられている。

原子炉容器はリークジャケットを介する振れ止め機構によって地震時に横方向の振れがないように設計されている。振れ止めはテンションロッド形式で、生体遮蔽コンクリート部で支持す

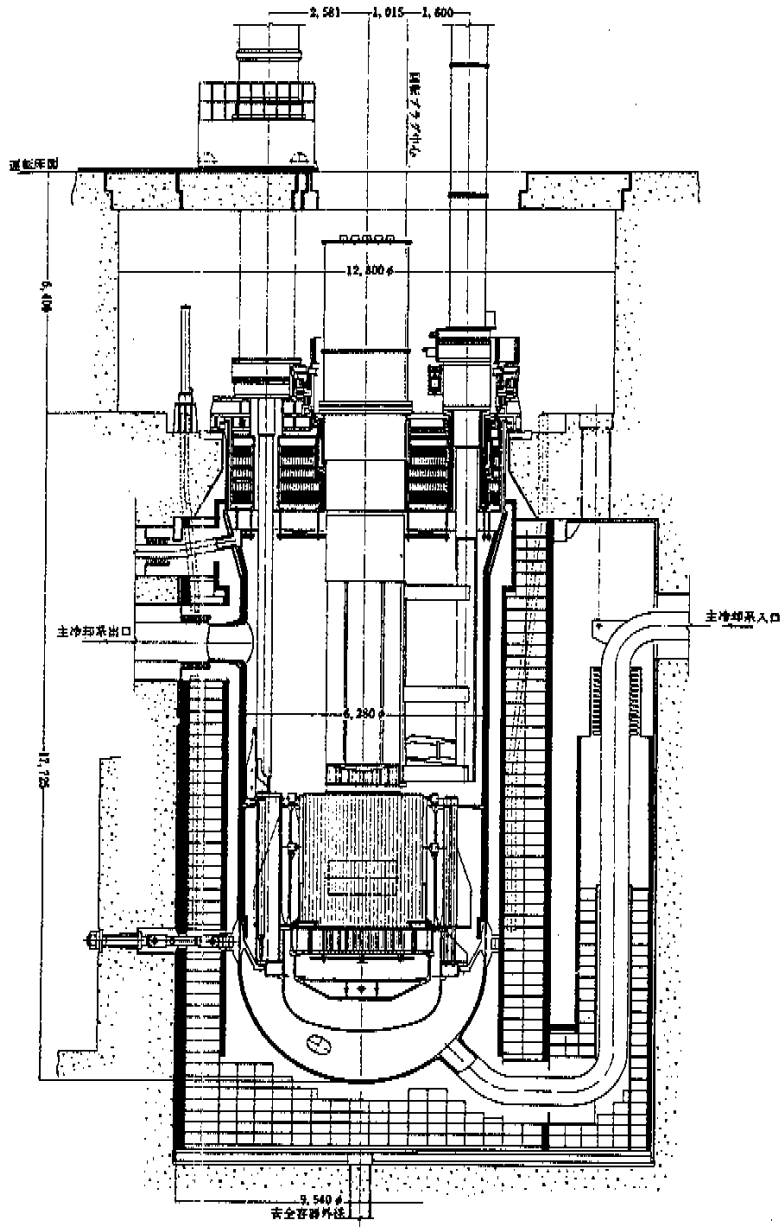


図5. もんじゅ 2次設計原子炉構造計画図

る構造となっている。

原子炉容器は図5に示すように、さらに安全容器におさめられており、原子炉容器とか一次冷却系配管類が仮にやぶれて冷却材の漏洩がおきても、原子炉容器内のナトリウムレベルの低下を制限し、炉心の冷却が十分行なえるようになっている。原子炉容器と安全容器の間の空間

には、グラファイトブロックが積み込まれ、中性子遮蔽と空間内容積の制限の機能を持たせてある。

原子炉容器の上部には厚さ2600mmの遮蔽プラグが設置されている。遮蔽プラグは固定プラグとその中心から1015mm偏心した位置に回転の中心をもつ回転プラグとから構成されている。回

表3. 炉内構造物設計条件および仕様

項	目	仕 様
設計圧力	高压ブレナムと、上部ブレナム間の圧力差 低压ブレナムと上部ブレナム間の圧力差	5.5 kg/cm ² 0.5 kg/cm ²
設計温度	高温部（燃料要素頂上部） 低温部（炉心支持台近傍）	570℃ 410℃
許容中性子照射量	炉心支持棒 炉心支持棒以外の構造物	5 × 10 ²¹ nvt以下 3 × 10 ²¹ nvt
熱衝撃条件		2.92℃/sec × 35sec
性能及び寸法	炉心支持バレル 外径×高さ×板厚 炉心支持板間隔×板厚 貯蔵ラックピッチ円径 貯蔵ラック本数 炉心～炉内中継機構回転中心	3700φ × 3410 × 50 t 700 × 50 t 4340φ, 4740φ 66本 2436
炉心拘束機構	外部拘束機構 内部拘束機構 炉心構成要素配列ピッチ	パット上、下2段、周囲12ヶ所 パット位置は上記通り 115.6

転プラグはこれに設置される燃料交換機と共に燃料取扱時に回転できるようになっている。回転プラグ上には、制御棒駆動機構その他の炉上部機構、燃料交換機、破損燃料位置検出装置が設置される。固定プラグ上には、炉内中継機構、回転プラグの駆動装置、油圧装置、マンホール、炉内検査装置用ダミープラグ、液面測定装置、アルゴンガスヘッダー、電気設備端子盤等が設置される。

炉上部構造物は円筒プラグ形で、大きさは上部フランジ外径が2,400mm、全高が14,790mmであり、下端は燃料集合体頂部の上60mmの所にくる。炉上部構造物には制御棒駆動機構と制御棒駆動軸案内管がそれぞれ19本、計装案内管が19本とそれに入れられる熱電対が392本と各燃料集合体の流量計測装置等が設置される。

燃料を除く炉内構造物としては、燃料その他の支持構造物と冷却材・流量配分機構、66本の使用済燃料炉内貯蔵ラック、炉内中継機構、炉心の外部拘束機構、4層で316本のステンレスチール製中性子遮蔽体等から構成されている。

炉内構造物は、炉心支持構造を介して炉心の全重量を原子炉容器下部サポートでうける。炉心

支持構造の上には上、下炉心支持板、炉心支持バレルが取り付け、炉心構成要素は支持板に設けられた正三角形配列の穴にさし込まれる。炉心支持板には外部クランピング機構が取り付け、炉心構成要素を周囲から拘束する。炉心支持構造の下には低压ブレナム流量調節のための円錐状仕切板があり、さらにその周囲を囲んで整流板がある。

炉心流量は、炉心燃料集合体については、整流板を通ったナトリウムが、上下支持板の間から高压ブレナムに入って集合体入口ノズルにあけたオリフィスと連結管スリットによって各列毎に流量調節されて集合体に入るようになっている。ブランケット燃料と制御棒については、整流板を通ったナトリウムが下部の円錐状仕切板に設けたオリフィスを通して減圧され、更に低压ブレナムのオリフィスを通して減圧されて流れる。中性子遮蔽体への流量は専用の低压ブレナムを設けて高压ブレナムからオリフィスを通じて減圧される。貯蔵ラックについても専用の低压ブレナムを設け強制冷却をしている。

炉心支持バレルと炉容器の間には炉内中継機

構トランスファーラックと炉内貯蔵ラックがある。上部プレナムには炉内中継機構用ガイドがある。

通常運転時の炉容器内のナトリウム液面は燃料頂部から7,000mm（遮蔽プラグ下面から500mm）の位置にあり、炉内構造物はすべてナトリウムの中にある。ナトリウムの自由液面は圧力100mm Aqのアルゴンガスでおおわれている。

表3に炉内構造物の設計条件と仕様を示す。

5. 燃料取扱系

燃料取扱系は、炉容器内燃料交換系、燃料出入機、格納容器内外の中継を行なう炉外中継機構および燃料受入貯蔵設備系によって構成される。燃料取扱手順を図6に示す。

使用済燃料の一本当りの平均崩壊熱は炉停止10時間後でも約40KWあるので、それを直接炉外に取り出すことはむずかしい。したがって取替えるべき使用済燃料は一旦炉の外周にある炉内貯蔵ラックに貯蔵して6ヵ月の冷却期間をおいた後に炉容器外に取出される。また、炉停止後、燃料の急速取出しを行いたいときのことも考えて設計されている。この使用済燃料はパンタグラフ式の燃料交換機によって炉内中継機構に置いてあるナトリウムの入った取出用ポットに挿入され、そこから燃料出入機によって炉容器外にポットに入ったままの状態を取り出される。その後は図6に示されるような経路で炉外中継機構を通り洗浄され、缶詰めにされて使用済貯蔵プールに貯蔵された後再処理のために外部へ送

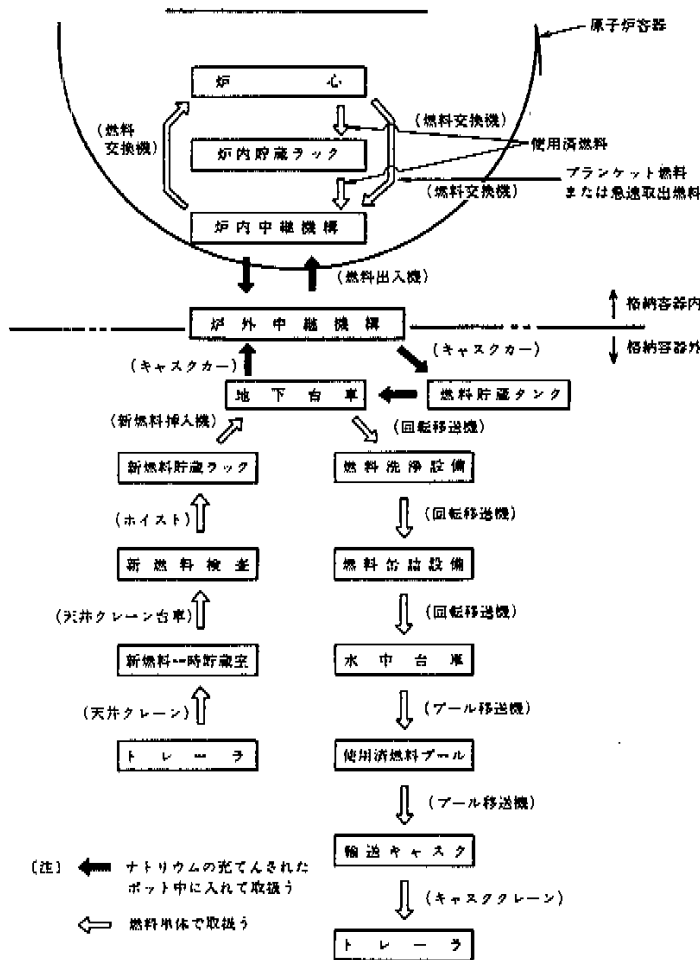


図6. 燃料取扱手順

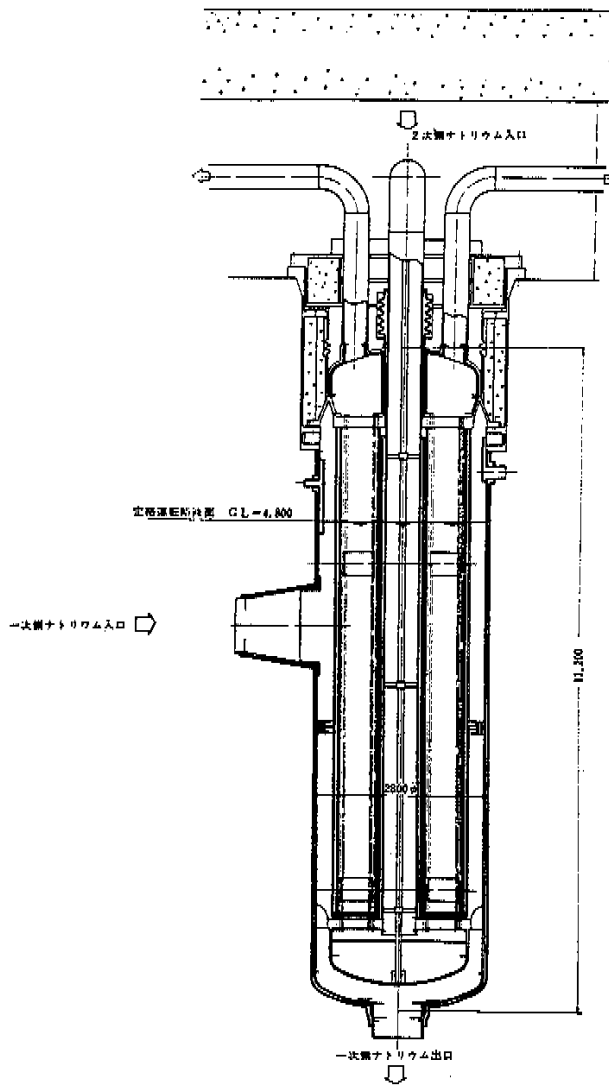


図7. もんじゅ2次設計主冷却系中間熱交換器

り出される。新燃料の受入れは使用済燃料の取り出し経路と逆の順序で行なわれる。炉内燃料取扱いのための燃料交換機つかみヘッドの位置決めは、回転プラグの位置と交換機アームの回転位置の組合わせによって行なわれる。1本あたりの燃料交換所要時間は炉内における使用済と新燃料の交換サイクルと、格納容器外のそれらのサイクルのいずれかの長い時間で支配されるが、実際にはこれらがほぼ同じであり約50~60分である。燃料交換機のパンタグラフ機構は、炉の運転中に炉容器外に取り出されて保管

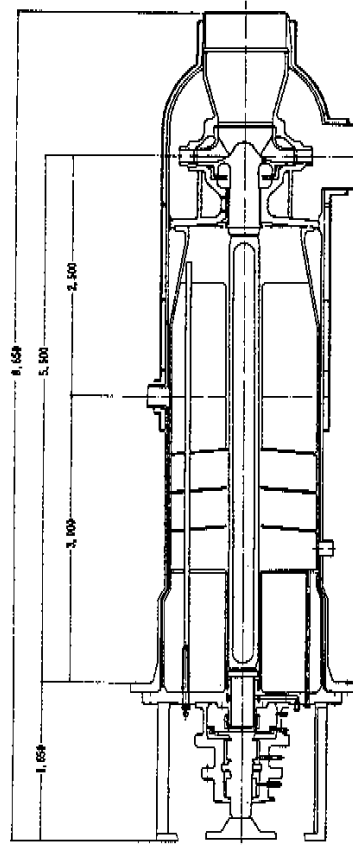


図8. もんじゅ2次設計1次系主循環ポンプ

される。

6. 熱輸送系

熱輸送系は、原子炉の熱を中間熱交換器、蒸気発生器を通じて発電系に伝える主冷却系、緊急炉停止後および燃料交換時の炉心冷却のための補助冷却系、系へのナトリウム装荷、ナトリウム液面制御、ナトリウム排出およびナトリウム浄化等を行なう補助ナトリウム系、各機器、建家等の空調、冷却、予熱、カバーガスのためのガス系から構成される。