

もんじゅ燃料交換機の試作開発

Development of the Fuel Handling Machine for Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"

雪 島 伊 乙 夫* 鈴 木 靖 之*
Itsuo Yukishima Yasuyuki Suzuki

I. ま え が き

動力炉・核燃料開発事業団では、高速実験炉『常陽』（熱出力5万kW）の完成に引きつづき、高速原形炉『もんじゅ』（電気出力30万kW）を昭和52年に着工すべく準備を進めている。

当社は、昭和43年に始められた高速原形炉予備設計以来この計画に参画し、特に『常陽』における製作経験をもつ燃料取扱系については、その系統計画、機器設計において主要な役割を果たしてきた。ここでは、これらの設備のうち、最も重要な燃料交換機の概要とこれまでの開発の経過を報告する。

この交換機の試作開発の成果と、動力炉・核燃料開発

事業団で現在進行中のモックアップ試験とあわせて、世界でも独特のパンタグラフ式燃料交換機の実現が可能となる見通しが得られた。

II. 燃料交換機の概要

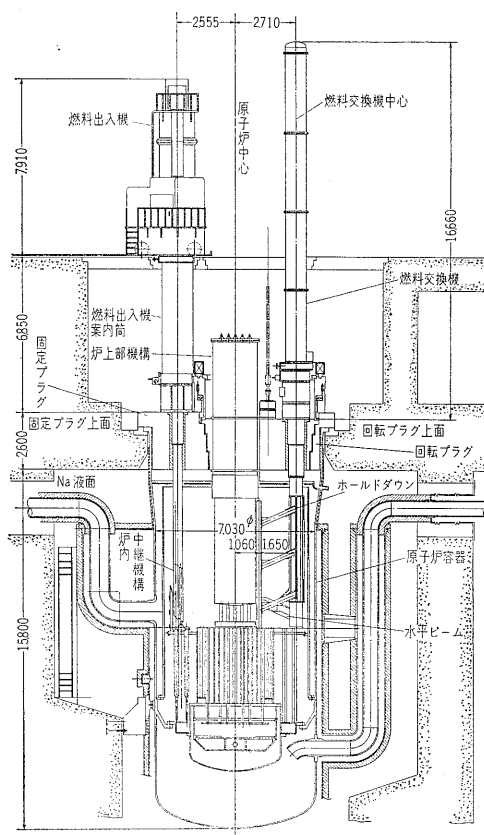
1. 燃料交換方式

燃料交換機は第1図に示すように、原子炉容器の上部に置かれ、炉心中心から偏心した位置で回転する単回転プラグ上に設置されており、その取付位置は回転プラグの回転中心から偏心している。回転プラグとこの燃料交換機の回転アームとのそれぞれの回転を組み合わせることによって、原子炉容器内の任意の燃料集合体上あるいは受渡し場所に燃料交換機グリッパを移動することができ、燃料取扱が行われる。この燃料交換方式は二重回転プラグを用いた実験炉「常陽」とは方式が異なっているが、基本的には「常陽」の経験の上にたったものであり、さらに将来の実用炉をも指向した方式として採用されたものである。二重回転プラグ方式は「常陽」をはじめすでに多くの実験炉・原形炉によって運転実績がある。しかし、1,000MWe級大形実用炉になると大回転プラグの径は、8.5m程度におよび製作上大きな問題が生じるため、「もんじゅ」では単回転プラグ固定アーム方式が採用された。さらに、この方式を用いることにより、炉容器内の交換作業と炉容器外との受渡し作業が並行して行えるようになり、燃料交換本数の多い大形炉ではプラント利用率からみても有利なものとなっている。

燃料交換は通常6か月ごとに原子炉を停止して行われる。使用済炉心燃料集合体は燃料交換機により炉心から炉内貯蔵ラックにいったん移送される。そこで次の燃料交換時まで6か月間冷却され、再び燃料交換機で炉内中継機構に移されてそこから燃料出入機により炉外に取り出される。発熱量の小さいブランケット燃料等は炉心から直接炉内中継機構に移され炉外に取り出される。新燃料等はこれと逆の手順で炉心にそう入される。

2. 燃料交換機の構造

燃料交換機は燃料をつかむグリッパ、水平・斜ビー



第1図 もんじゅ原子炉断面図

Fig.1. Section of reactor and fuel handling machines

* 川崎工場原動機部

ム、本体ケーシングからなるパンタグラフ機構、その開閉および昇降駆動装置、およびこれらをガイド支持するホールドダウンアーム等から構成される。ホールドダウンアームは原子炉運転中、炉内のナトリウム中に置かれるためこの部分は運動部がほとんどない単純な構造としている。パンタグラフ機構は外径約 350mm の本体ケーシング下部にリンク機構を応用した水平・斜ビームをもっており、その先端には燃料集合体をつかむグリッパ、同爪開閉装置およびグリッパが燃料集合体頂部に到着したかどうかを検知するセンシング機構を取り付けた構造となっている。このパンタグラフ機構は高温ナトリウム中でのしゅう動部をピンジョイントあるいは上下運動だけからなる簡単な構造にしており、可変アーム方式に比べより単純な機構となっている。さらにこれらの部分にはいずれも適当なクリアランスと表面処理が施され、原子炉運転中はパンタグラフ機構を折りたたんで、炉外に取り出すことができる保守性の良い構造としている。

このパンタグラフの折りたたみは、駆動リンクに接続された操作軸のリードスクリューによって回転を直線運動に変えて行われる。

この操作はいずれも回転プラグ上部で行われるため故障に際しても手動で操作が可能である。しかし万一のことを考えて回転プラグに影響を与えないでホールドダウン機構と共に、引き上げられるよう考慮されている。パンタグラフ機構の炉心上への位置決めはホールドダウン機構でガイド支持されて行われ、グリッパを±2mmの精度で位置決めすることができる。

一方パンタグラフ機構自体は炉心の変形を考慮して±20mmの偏心があっても燃料集合体のそう入、引抜きが円滑に行えるようになっている。すなわち、グリッパは水平ビーム先端部のピン結合部で回転を許容し、その直角方向はパンタグラフ機構自体の剛性を適当に選ぶことにより、グリッパ下端での相手側位置への追従を可能にする構造である。

III. 開発試験

1. パンタグラフ機構試作試験

1) 試験の目的

パンタグラフ式燃料交換機の採用は、わが国初めての試みである。このため、従来の燃料交換機的设计製作の経験との違いを確認し、実用化を図る第1段階として、燃料交換機の中で最も技術的に困難と思われるパンタグラフ機構の開閉メカニズムおよび燃料集合体取扱用のグリッパを試作することにより、基本構造を固め、さらにこの試作機を使って大気中、高温 Ar ガス中、Na 中のふい気で燃料集合体を取り扱った場合の各メカニズムの動作を試験し、パンタグラフ式燃料交換機的设计に折

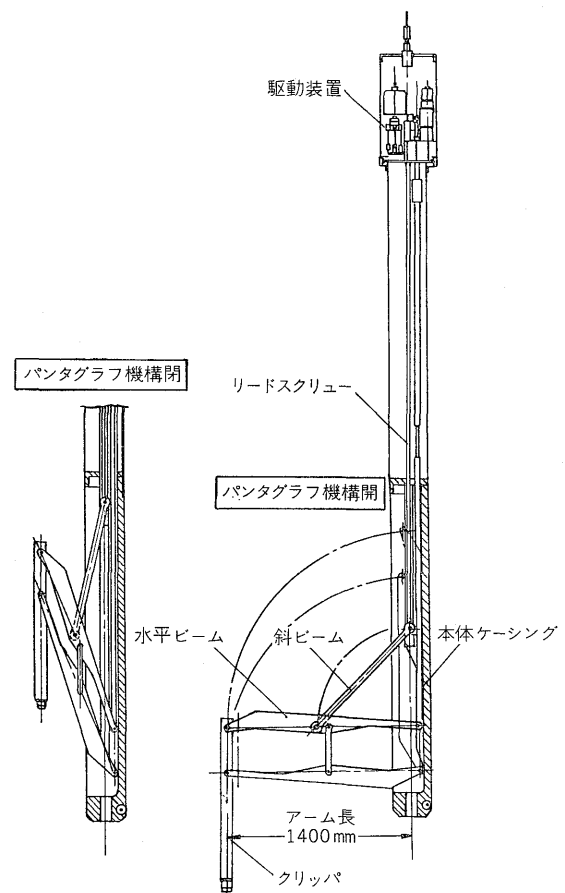
り込むべき条件を把握することにした。

2) 試験体の概要および試験装置

試験体は、グリッパ、パンタグラフ機構およびそれらの駆動装置、ホールドダウンアームに相当する案内管、パンタグラフ機構の巻上駆動装置などで構成されている。第1表に実機〔調整設計(I)〕との概略の比較を示したがパンタグラフ機構以外は簡略化した試験体である。

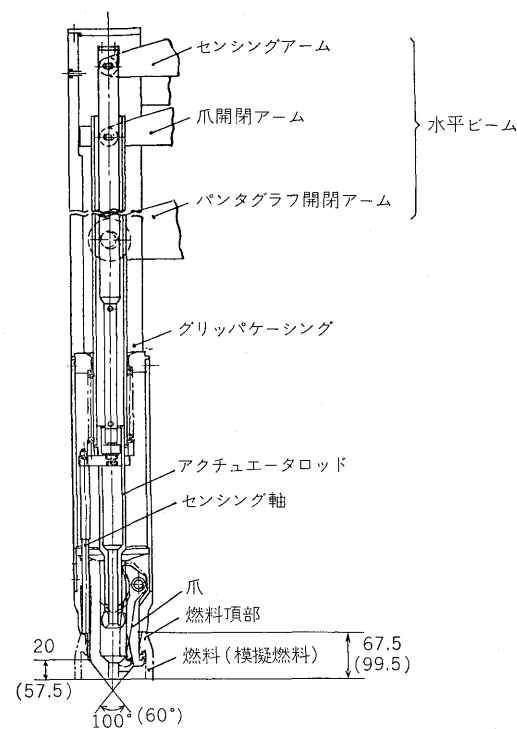
パンタグラフ機構の構造の原理は、第2図に示したように本体ケーシング、水平ビーム斜ビームなどのリンク機構、グリッパ、駆動装置などで構成されており、Na 中浸漬される部品の材料はSU S304 を使用している。パンタグラフの開閉は、第2図に示すように駆動装置に連結したリードスクリューの送りで斜ビームを動かしてアームを開閉させる方式で、駆動装置、リードスクリューなどの駆動部は、Na 液中ではベローズ、ガバースと大気との境界はパッキンを使用したシール構造である。

第2図には、パンタグラフ機構の折りたたみ途中の状態も示しているが、各ビームの節合点は、すべてかじり防止のためのハードフェーシング処理をした無潤滑のピンジョイントである。パンタグラフの完全折りたたみ状態では、グリッパを外径320mmの本体ケーシング内に



第2図 燃料交換機パンタグラフ機構断面図

Fig. 2. Section of pantograph mechanism for refueling machine

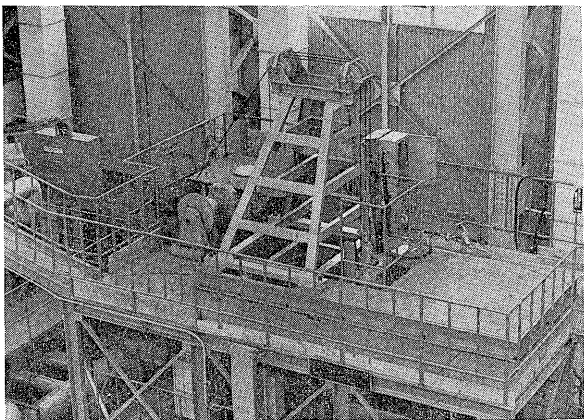


第 3 図 グリッパ構造図
Fig. 3. Fuel gripper

引込むため、水平ビームの形状は、干渉を避け得るよう
に異形になっている。

アーム先端部に取り付けたグリッパは、燃料集合体の
つかみ装置であり、第 3 図に示したように上側のビーム
で荷重を支え、下側のビームで方向性を保っている。

燃料集合体のつかみ動作は、グリッパ下端のセンシ
ング軸と爪の動きで行われる。すなわちグリッパが燃料頂
部に到達するとセンシング軸の変位は、センシングア
ームを介して駆動装置に伝えられ、駆動装置からは、爪開
閉アーム、アクチュエータロッドを介して爪が動かされ



第 4 図 パンタグラフ機構ナトリウム試験外観
Fig. 4. Exterior view of sodium test equipment for
pantograph mechanism

燃料集合体のつかみ動作が行われる。このアームは、前
述のパンタグラフアームの内側に配置されており、水平
ビームの中間を支点として揺動し、両端を駆動装置側の
操作軸とグリッパ側の操作軸にピンで取り付けられてい
る。

グリッパが燃料集合体をつかんだ状態での吊上げは、
第 2 図に示すように駆動装置上部をワイヤロープで吊り
電動巻上げする方式で、吊上げ荷重は、燃料集合体のそ
う入・引抜力に合わせてカウンタウェイトで釣合いをと
っている。

試験設備は、大気中試験では、床面上に据え付けた模
擬燃料体を取り扱えるように架台を組み上げ、架台上に
設置した巻上装置から試験体を吊り上げて行った。

Na 中試験では、実機の燃料交換温度、圧力、Na 純
度を模擬できるよう Na 容器と Na 循環回路を組み合わ
せた試験装置を使用した。パンタグラフ機構は、第 4 図

第 1 表 パンタグラフ機構の概略仕様
Table 1. Main parameters of pantograph mechanism

区 分		パンタグラフ機構試験	パンタグラフ機構限界 性能試験	実機燃料交換機 〔調整設計(I)〕
主 要 目	パンタグラフ機構 アーム長 (mm)	1,400	1,600	1,650
	本体全長 (mm)	5,087.5	10,219.5	13,459.5
	本体自重 (kg)	1,540	1,800	8,725
グ リ ッ パ	吊 上 力 (kg)	300~500	1,000~1,500	1,000
	全長/外径 (mm)	1,507/116	1,337/116	1,449.5/116
	許容偏心量 (mm)	10	20	20
駆 動 装 置	駆 動 方 式	スクリュー・ナット	ボールスクリュー・ナット	
	駆 動 操 作	パンタグラフ開閉, 爪開閉,	燃料頂部到達検知等	
	上下ストローク (mm)	500 (3m/min)	4,300 (高速 3m/min, 低速 0.3m/min)	
	巻 上 荷 重 (mm)	500	1,500	1,000
取 扱 対 象	形 状	円柱状	六角形ラッパチューブ	炉心要素
		本数 1	模擬燃料体 8 本	—
	全 長 (mm)	1,150	4,200	4,200
	重 量 (kg)	250	169	約150

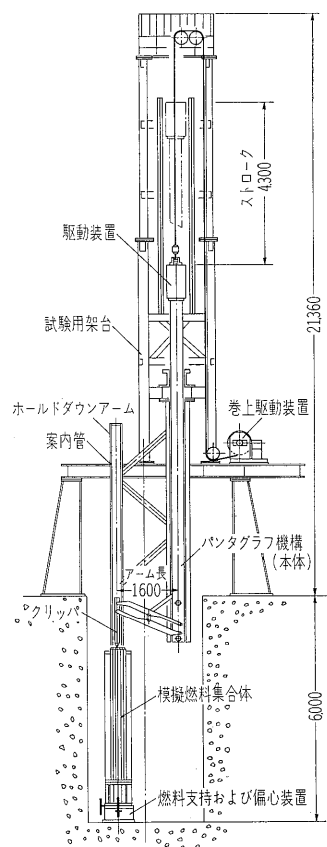
に示すように試験容器上に据え付け、容器内に設置した模擬燃料体を取り扱えるようにした。

3) 試験の経過および成果の概要

(1) 動作試験

グリップの燃料つかみ、パンタグラフの開閉、燃料到達検知などの各機構部分がスムーズに動くかどうかを試験した。試験は、パンタグラフ開閉トルク、駆動電動機の電圧電流値の変化、パンタグラフ機構の巻上荷重、各動作の所要時間などの測定および各機構部材の変形の有無を観察した。常温大気中試験では、各動作がスムーズに行われることを確認したが、高温 Ar ガス中試験では、パンタグラフ開閉用のすべり軸受のかじりによるパンタグラフ開閉不能が発生した。

この部分は、サーフェロイ No.5 処理の軸受を同じ表面硬化処理のレール上をしょう動させる構造であったが、表面硬化処理部の硬度上昇およびころがり軸受の採用により解決された。



第5図
パンタグラフ機構限界
性能試験全体組立
Fig. 5.
General arrangement
of pantograph
mechanism for the
limit performance
test

(2) 偏心試験

グリップと燃料集合体との相対的な位置ずれがある場合に、燃料集合体のつかみができるかどうかを試験したもので、試験結果は、Na 中において設計条件の10mm まで満足に行えることがわかり、実機で要求される 20 mm の偏心はグリップの形状を検討することにより可能であることを確認した。

(3) 連続作動試験

パンタグラフの開閉、グリップによる燃料集合体のつかみ、吊上げなどの繰返し運転を行い、可動部および構造部の異常の有無を試験したもので、大気中試験では偏心量 5 mm, 10mm, 15mm において燃料集合体のつかみ操作おのおの約 200 回また、Na 中試験では、偏心量 0 mm, 5 mm, 10mm で各燃料集合体操作合計 720 回（パンタ開閉回数の約 30 年間分相当）行った。その結果、高硬度ナットの摩耗によりパンタグラフ開閉トルクの幾分の増加が認められたほかは分解点検の結果でも異常は認められず、パンタグラフ機構の構造の見通しが得られた。

2. パンタグラフ機構限界性能試験

1) 試験の目的

燃料交換機で取り扱う燃料集合体は、正常な状態に配列された状態とは考えられない。特にもんじゅのような高燃焼度で大きい変形量が予想される場合は、燃料交換機の機能としてできるだけ大きな偏心（燃料集合体の位置ずれ）が許容できること、大きな偏心に対して機器損傷が生じないこと、変形した燃料集合体を取り扱えるそう入力・引抜力を持っていることなどが必要となる。

限界性能試験は、この問題を検討するために実施した。機器にとって苛酷な試験で、損傷する場合も予想されるため、すでに製作し試験を完了したパンタグラフ機構を改造して実寸大化し、燃料集合体の押込み・引抜きに対する主要部の変形と強度上の限界、パンタグラフ機構の有する可撓性と各部の変形と強度との関連で許容しうる偏心許容範囲などの確認を行った。

2) 試験体および設備の概要

試験体は、第5図に示すようにグリップ、パンタグラフ機構、ホールドダウンアーム、駆動装置、巻上装置などで構成されており第1表に示すとおりほぼ実機に近い寸法となっている。

第6図に示すパンタグラフ機構は、アーム 1,600mm で、アームを広げた状態では第5図に示すように水平に対して若干傾いた位置でアーム全開位置になっている。これは、もんじゅ調整設計(I)における合理化を取り入れて機器高さの縮小化を図った方式であり、実機的设计検討のそれに合致している。また、パンタグラフ機構（本体）のケーシング径（320mm）は、改造機なので、実機（約350mm）より小さいが回転プラグ下の高さは実機のそれに合わせてあり、ホールドダウンアームの枠組に取り付けたレール面を走行する車輪を装備している。

グリップは、許容偏心範囲をできるだけ大きくとるため先端部形状は、第3図に示すような鋭角とし、グリップとアームとの節合部の滑合ピンの隙間は広げてある。

ホールドダウンアームは、燃料集合体のホールドダウンおよび耐震性を持たせた構造体で、もんじゅ調整設計

(I)の結果を取り入れて新製したものであり、第5図に示すようにグリップ側は、剛構造の枠組の内側にグリップおよび燃料集合体のガイドとなる案内管を設けている。この案内管は、偏心時におけるパンタグラフの可撓性に追従できる可撓性を持ったものである。

グリップおよびパンタグラフ開閉の駆動装置は、燃料集合体のつかみ状態、燃料集合体頂部への到達検知、パンタグラフの開閉トルクおよびストロークなどの検出器を内蔵しており、燃料集合体のつかみおよびパンタグラフ開閉は電動である。パンタグラフ開閉の送りねじは、摩擦力の軽減、負荷容量を増加させるためボールスクリューを使用した。

巻上駆動装置は、電動によるワイヤロープの巻取式で上下ストロークは、実機のそれに合わせて4,300mmとした。巻取装置によるパンタグラフ機構の上下速度は、燃料集合体そう入・引抜時の低速(0.3m/min)と燃料集合体そう入前および燃料集合体引抜後の高速(3m/min)の二速度とし、燃料集合体そう入・引抜時に衝撃力が加わらないようにした。また、燃料集合体そう入・引抜力は、カウンタウェイトによりパンタグラフの自重が1,000kg(～1,500kg可変)となるように調節し、ロードセルで荷重検出している。

試験設備は、模擬燃料集合体、燃料支持および偏心装置、試験用架台などであり、スティック急解放試験では、パンタグラフ機構に加えて荷重を急速に解放する装置を使用した。これらの試験設備の配置は、第5図に示している。

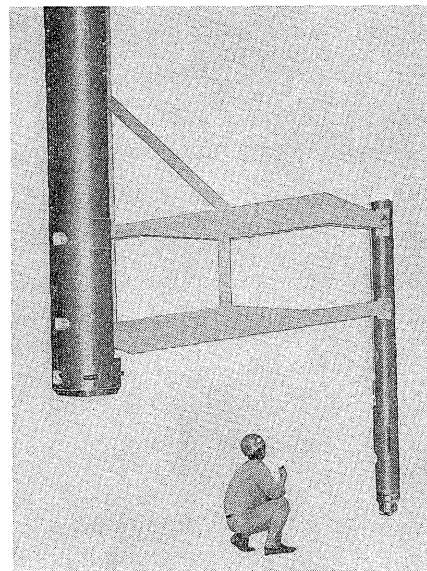
燃料支持および偏心装置は、7本の模擬燃料体を配置し偏心試験時にX-Y方向に移動させることができる。パンタグラフ機構で取り扱う燃料集合体は、7本配置の中央の1本で、その形状は、もんじゅ調整設計(I)をもとにした全長4,200mmのものであり、弯曲した燃料の装荷状態を確認するための燃料集合体(弯曲量20mm)も準備した。試験用架台は高さ約17mの鋼製枠組で装置の据付台となっている。

3) 試験の経過および成果の概要

(1) 偏心位置燃料取扱試験

取扱燃料集合体が燃料そう入位置から燃料の対辺方向および対頂角方向に偏心している場合のそう入性・引抜き性の確認試験を行った。燃料頂部不揃いの状態と組み合わせた試験を第7図に示す。

取扱燃料集合体は正常(真直)燃料集合体および20mm弯曲した燃料集合体について行い、それぞれ34mm、26mmの偏心量まで取扱が可能であることが確認できた。偏心量34mmの極端な場合はそう入・引抜き時燃料集合体どうしのこすれ合いにより、燃料集合体表面に帯状痕の発生がみられた。これは後述するセルフオリエンテーション



第6図 パンタグラフ機構

Fig. 6. Pantograph for refueling machine

ョン試験結果と合わせて燃料集合体形状の検討により改善が行えるものと思われる。

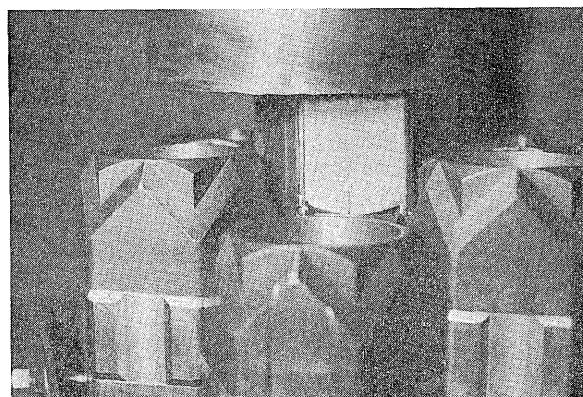
いずれの場合も許容偏心量20mmについてはそう入性および燃料集合体表面状態とも良好で十分満足する性能を確認することができた。

(2) セルフオリエンテーション試験

燃料そう入時の回転方向角がそう入穴に対してずれている場合、燃料集合体はグリップ爪部ですべり回転し、自転を行いつつそう入穴にセルフオリエンテーションされる。これは前記の偏心位置燃料取扱とともに実際の燃料取扱上非常に重要な機能である。

本試験では正常(真直)および20mm弯曲燃料集合体を用い0mm、20mm、34mmの偏心量と組み合わせてそれぞれ燃料そう入試験を行った。

セルフオリエンテーションの良好な作動は、燃料集合体に依存するので、その検討がさらに必要であることがわかったが、「常陽」燃料交換機の開発試験の経験とあ



第7図 偏心位置燃料取扱試験

Fig. 7. Limit eccentricity test of fuel handling

わせて本試験により今後の燃料集合体形状の設計に対する見通しを得ることができた。

燃料交換機自体は、セルフオリエンテーション上、十分な機能をもっていることが確認できた。

(3) 偏心位置燃料連続取扱試験

パンタグラフ機構の開閉機構の耐久性を確認するために正常燃料集合体を用い、34mm偏心量で100回の燃料取扱操作を行った。(パンタグラフ機構の30年間使用回数は60回)パンタグラフ機構には異常なく、大気中運転における耐久性を実証した。

(4) 過負荷試験

燃料交換機の強度確認のために2トンの燃料荷重(設計荷重1トン)を加えて各部材の応力および変位の測定を行った。

強度的には水平ビーム不連続部の形状検討が必要であるが他の部材は座屈強度を含めて十分安全であることが確認できた。

(5) スティック急解放試験

燃料集合体そう入・引抜き中のスティック後、急解放された場合の燃料交換機の健全性を確認するために1.5トンの荷重急解放を行い各部材の応力・変位を測定した。グリップ部の変位は燃料交換機本体の変形量約10mm/tとこれを支持するワイヤロープの伸び約35mm/tが加わった変位量であった。これらの変位量は燃料位置決め精度からみて大きな値であるためワイヤロープの使用の可否を含めて検討の余地が残されている。燃料交換機自体には荷重急解放時ぶつかり、かじり等はなく反発衝撃荷重も初期荷重の20%程度で問題とはならなかった。

IV. あ と が き

ここに報告した開発試験は、すべて動力炉・核燃料開発事業団の委託により、当社が設計製作を請負い、試験を行ったものである。その過程でいろいろご指導頂き、また、この報告の発表を許可された同事業団関係各位に厚くお礼を申し上げたい。

最近公告になった富士出願

〔特 許〕

公告番号	名 称	発 明 者	公告番号	名 称	発 明 者
特公昭50-8764	油入変圧器における油中溶解ガス分析用ガスの採集方法	山岡 道彦 小原 昭二	特公昭50-12899	制御信号受信装置	井崎 健一 松尾 治
" 50-11192	排水中のフッ素イオンの除去方法	渡辺 健三 福田 実夫 白石 秀夫	" 50-12905	電流しゃ断装置	竹谷 是幸 鎌倉 武
" 50-11527	制圧機の制御装置	小林 一夫 宗宮 誠一	" 50-13143	フリップフロップ回路	飯島 輝明
" 50-12073	優先制御回路	野々山延男	" 50-13464	制御信号受信装置	松尾 治
" 50-12897	遠隔操作用送信装置	里見 義朗 牧垣 貢 牛島 義夫	" 50-13477	開閉器の開閉機構	松本 英夫
" 50-12898	遠隔操作用受信装置	里見 義朗 牧垣 貢 牛島 義夫	" 50-13632	電子装置のモールド方法	横山 浩

〔実用新案〕

公告番号	名 称	考 案 者	公告番号	名 称	考 案 者
実公昭50-12758	ローラ形加熱装置	秋山 茂 小野寺慶一 東 泉	実公昭50-14104	油入電器の保護監視装置	黒岩 峰雄
" 50-13272	電気機用ブッシュ	大森 豊明 奥田 泰造 辻 貞夫 横山 武夫	" 50-15208	交流ファラデ形電磁ポンプ	秋山 茂 小野寺慶一 新藤 義彦 渡部 俊春
" 50-14085	小形電動機	藤島 藤治	" 50-16187	無接点スイッチ	中島 紀尊 大久保智之

〔意 匠〕

公告番号	名 称	創 作 者	公告番号	名 称	創 作 者
登録 402773	分析計用操作盤	土橋 孝昭 石渡 正敏	登録 405483	限時継電器	横田 徳恵
" 404111	表示灯	西尾 三男	" 405484	直流電源器	野地 恭弘 赤星 和明
" 404111-1	表示灯	西尾 三男	" 405485	モニタテレビ用コンバータ	小川 英爾



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。