

日本原子力研究所 納
国産一号原子炉用燃料交換装置
 Charging and Discharging Machine for JRR-3

逸 見 文 彦* 宮 沢 浄*
 Fumihiko Itsumi Kiyoshi miyazawa
 和 世 啓 三* 萩 谷 三 由*
 Keizô Wase Miyoshi Hagiya

内 容 梗 概

すでに臨界にはいり稼働中の国産一号原子炉 (JRR-3, Japan Research Reactor No. 3) の炉頂面を走行して天然ウラン燃料棒 (長さ 5.4 m, 重さ約 100 kg) を炉心に出し入れし, 使用済燃料を新燃料と交換する燃料交換装置について述べる。使用済燃料は原子炉停止直後においては強い放射能を帯びているので, その取り扱いにはすべて遠隔操作を必要とする。このため本装置に対しては慎重な立案計画のもとに安全第一の設計がなされた。

本装置の機能中, 最も斬新な特色は 70 t に及ぶ重量物を任意の燃料装てん口に自動的に位置決めする機構である。これは位置決めヘッドにより約 30 秒で 0.5 mm 以内に位置決めを完了し, 続いて炉心との気密結合を完成し, さらに自動的にレールクランプするという画期的なものである。

1. 結 言

日本原子力研究所の国産一号原子炉⁽¹⁾は天然ウランを燃料とする重水減速, 冷却形実験炉である。燃料要素は全長約 5.4 m, 重量約 100kg に及んでいる。本原子炉においてこのような長い重量物である燃料要素の装荷, 取り出し, 運転過程における燃料の配列替えなどを安全確実にしかも容易に行なうために特に設計製作されたのが, 燃料交換装置である⁽²⁾⁽³⁾。

スイミングプール形原子炉のように比較的小規模でしかも炉心タンクの上面が開放している形の原子炉においては, 通常燃料要素も小形軽量であるのでその装荷や配列替えは簡単な手動トングで行なわれる。しかし天然ウランを燃料として用いる形の原子炉では, 燃料要素の寸法や重量は, はるかに大きくなり, これを手動トングなどで扱うことはできない。このため特別に設計された燃料交換装置が用いられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

この燃料交換装置は一般に新燃料収納管, 使用済燃料収納遮へいキャスク, 燃料棒昇降用つかみ装置および巻上装置, 走行装置などよりなり, 走行装置は電動機で駆動される。燃料交換に当たってはまず走行装置を運転してキャスクの中心を炉頂部の所定燃料要素の位置に合わせ, 燃料棒を炉内よりつかみ上げてキャスク内に収納した後, 新燃料収納管の位置決めを行ない, 新燃料をその位置に降ろす。

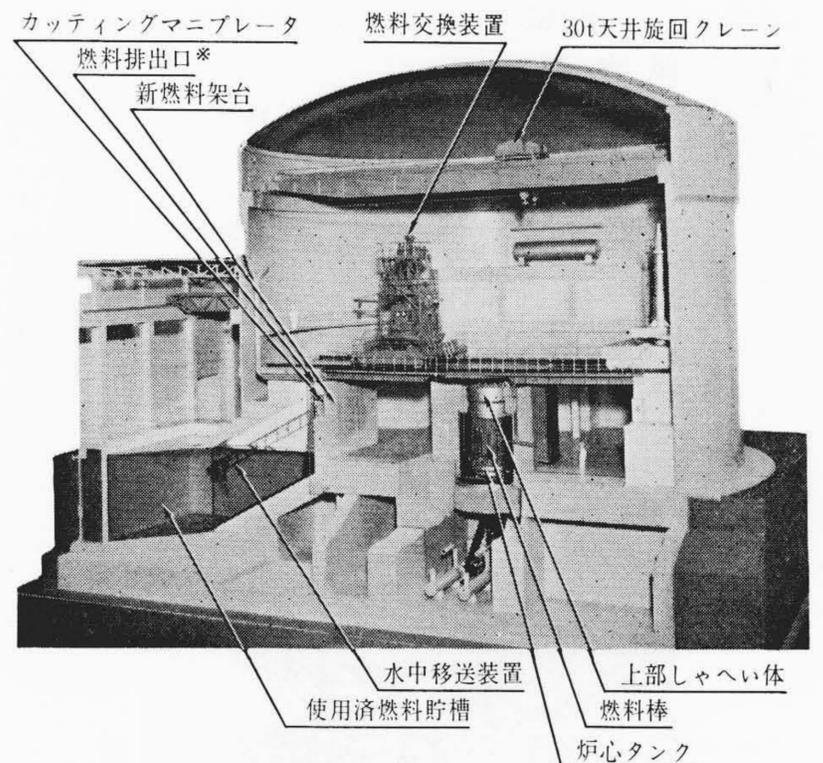
本装置にはこれらの基本的な機能のほかに, 安全操作を確保するための使用済燃料の放射能のシールド, 冷却, 自動位置決めなどの数多くの技術的に困難な問題が含まれている。

日立製作所においては, これら燃料交換装置の設計製作上の多くの難問題を, 長期間にわたる調査および試作研究により一つ一つ解決し, 本邦最初の大形燃料交換装置を完成した。本装置は目下日本原子力研究所, 東海研究所において稼働中である。

2. 装置の概要

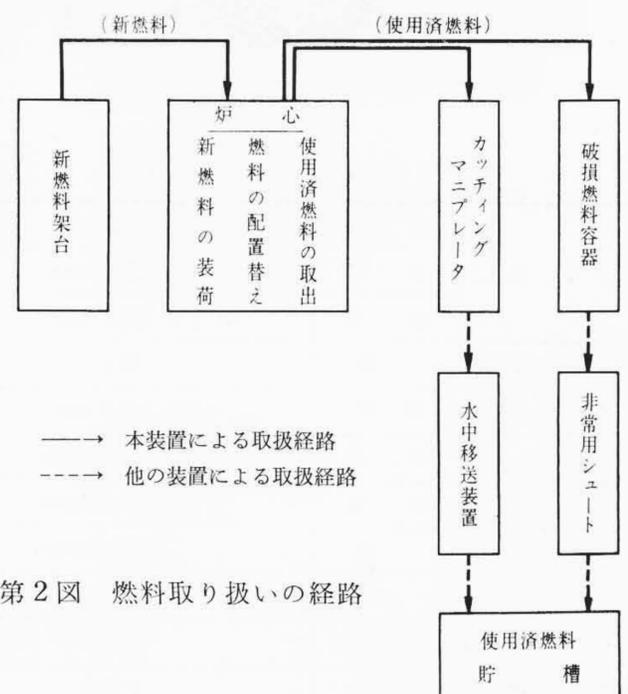
本装置は国産一号炉の炉心への新燃料の装荷, 炉心内における燃料の配置替え, 炉心より使用済燃料の取り出しを行なう自走形燃料交換装置である。原子炉まわりの各種機器の配置を第 1 図に示す。

* 日立製作所日立工場



※ この位置に使用済燃料排出口と破損燃料排出口とがある。

第 1 図 国産一号炉の機器配置 (模型)



第 2 図 燃料取り扱いの経路

燃料交換装置による燃料取扱いの経路は第2図に示すとおりである。新燃料は新燃料架台に置かれており、本装置に収容されたまま原子炉上部まで運搬され、そこで所定の炉心位置に装荷される。使用済燃料は本装置により炉心から取り出され、収容されたまま使用済燃料排出口に運ばれ、カッピングマニプレータによりプラグ部が切り離され、水中移送装置により使用済燃料貯槽に送られる。破損燃料の場合は本装置によって破損燃料排出口まで運ばれ、そこであらかじめ用意された破損燃料容器に密封された後、非常用シュートを通して使用済燃料貯槽内に落とされる。

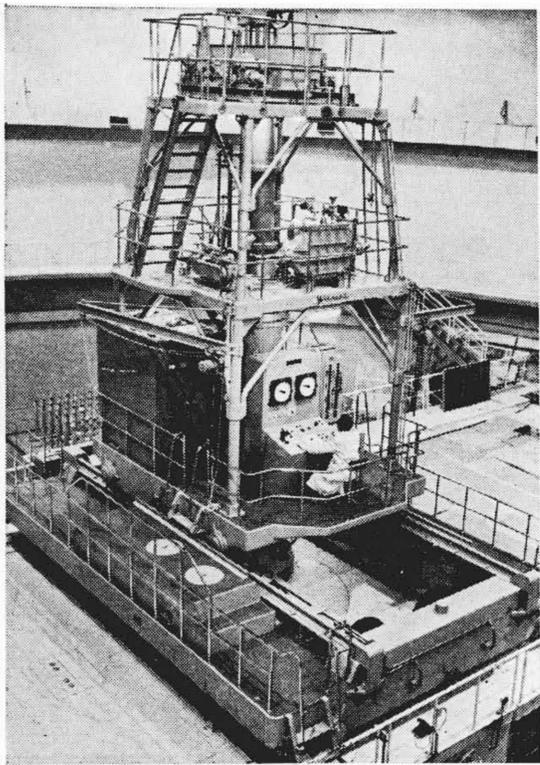
このため本装置は原子炉頂面を直交2方向に自由に自走できる自走形キャスク構造をもっている。上部台車の上にしゃへいキャスク、自動位置決め機構、巻上装置などが取り付けられている。装置の主要構成要素は下記のとおりである。

- 下部台車
- 上部台車
- しゃへいキャスク
- ボトムヘッド
- 巻上装置
- 冷却装置
- 制御装置

本装置の外観を第3図に、おもな仕様を第1表に示す。

2.1 下部台車

下部台車は装置の全重量をささえて炉頂に敷設された軌間7mの



第3図 国産一号炉用燃料交換装置

第1表 燃料交換装置の仕様

主要寸法	全長	8,050 mm
	全幅	5,660 mm
	全高	8,910 mm
総重量		70 t
自動位置決め精度		0.5 mm
上, 下台車走行速度	高速	10 m/min
	低速	0.1 m/min
巻上速度		10~2 m/min
巻上荷重		約 100 kg
しゃへい厚 (鉛相当)		270 mm
耐震度 (保証値)		0.25 g

レール上を走行する部分で、走行駆動装置、ケーブル巻取装置、ホース巻取装置、レールクランプ、走行障害物検知装置などを備えている。

走行駆動装置は高速駆動用電動機、低速駆動用電動機および差動歯車式減速装置より成り、目標位置までは高速度で近づき、その付近で低速に切り換えられて精位置決めにはいるように働く。

交換装置への電力および冷却水の供給はすべてケーブルやホースを通して行なわれ、ケーブルやホースは台車の移動につれて自動的に巻き取られる。

燃料交換作業中万一地震が起きると装置が移動して交換中の燃料棒を破損させることも考えられる。このような事故を未然に防止するために、本装置には水平震度 0.25 g の地震に耐える高性能のレールクランプを設けている。

2.2 上部台車

上部台車は下部台車上に敷設された軌間3mのレールの上を下部台車の移動方向と直交に走る台車で、下部台車と同様、高速、低速の2速度を有し、レールクランプが備えられている。

上部台車上にはしゃへいキャスク、ボトムヘッド、巻装置、冷却装置、制御装置など本装置の主要部分に取り付けられている。

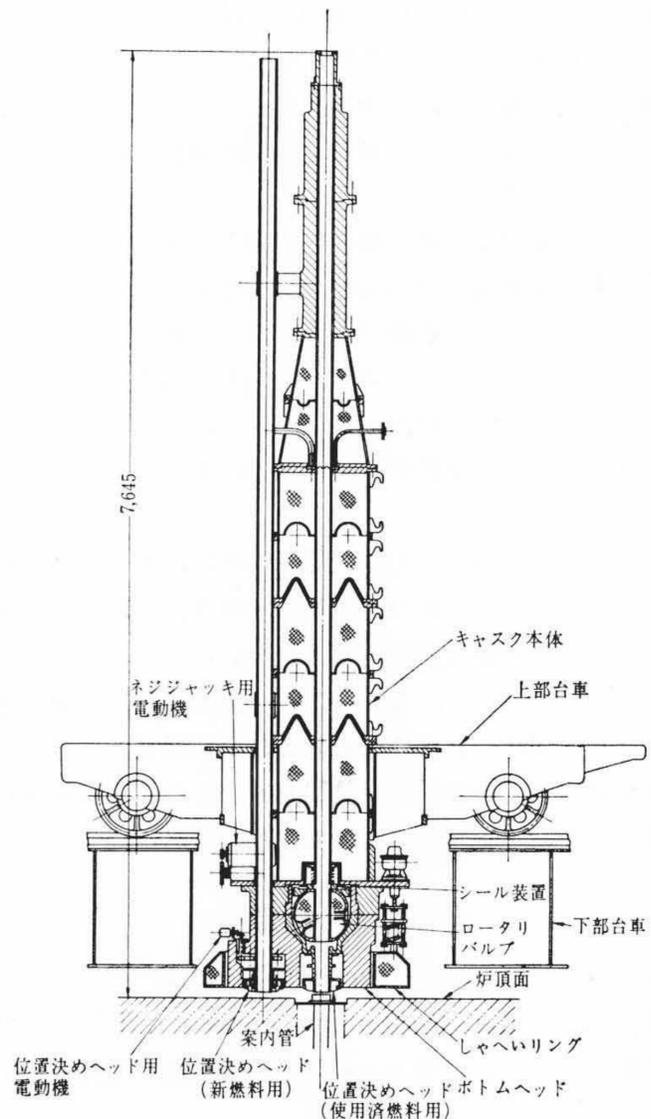
2.3 しゃへいキャスク

これは使用済燃料を収納するキャスクである。その構造を第4図に示す。キャスク内面はステンレス鋼管で、その周囲を鉛のしゃへい体で囲み、外面での放射線量が許容値(3 mrem/h)以下になるように設計されている。

なお新燃料要素収納管はステンレス鋼管製でキャスクのすぐ隣りに取り付けられる。

2.4 ボトムヘッド

ボトムヘッドはキャスクの下部に位置し、燃料交換の際炉上面の燃料装てん口に向かい合う部分で、ロータリバルブ、シール装置、



第4図 しゃへい用キャスクの構造

しゃへいリング，使用済燃料用位置決めヘッド，新燃料用位置決めヘッドなどからなっている。(第4図参照)

ロータリバルブはしゃへいキャスク下端の開口部の開閉を担当する部分で，使用済燃料通過，冷却材通過，排水通過の三つの状態を選択する構造で，特殊な三方口球形バルブである。その操作は操作盤より行なわれる。「冷却材通過」は，キャスク内に収納された使用済燃料を冷却するための冷却用気体を送入する際に使用し，「排水」はキャスク内部の除染に使った水を排出する際に使用される。

シール装置はロータリバルブの水密および気密シールを行なう装置である。バルブが上述の3位置にあるときにシールリングが球状バルブプラグの表面にバネにより鉛直上方より押しつけられシールがなされる。バルブの切換動作中はシールリングを上方にやや移動して球状体表面との間にギャップを持たせ，その回転を容易にするよう考慮されている。

しゃへいリングは使用済燃料が炉から取り出される時キャスク下面と炉上面との間げきから放射線が漏れるのを防ぐために，燃料取替作業中炉上面に密着するように置かれる環状のしゃへい体で，鋼板製容器に鉛を鋳込んだものである。その上下駆動は電動式ネジジャッキ装置によって行なわれ，バネを介して常に一定の押付力が与えられるようになっている。

使用済燃料用位置決めヘッドは，使用済燃料取り出しの際しゃへいキャスクを原子炉上の所定の位置に自動位置決めするためのものである。ヘッドは直交した2方向に相対して設けられた4本のフィーラよりなり，しゃへいリングの内側に取り付けられている。原子炉上面の所定の位置にあらかじめ案内管を取り付けておき，交換装置をリミットスイッチによりヘッドの動作範囲内にまず粗位置決めし，その後ヘッドをしゃへいリングとともに案内管上端に降下せしめれば，4本のフィーラのうちのあるものは案内管上端により突き上げられ，上部台車および下部台車の微速駆動電動機に微動の信号を与える。4本のフィーラのすべてが平等に管の上端に接するようになれば位置決めは終了したことになり，しゃへいリングは下降し炉頂面に密着して停止する。

新燃料用位置決めヘッドの構造および動作は，しゃへいリングの下降動作を伴わない点を除いて，使用済燃料の場合と同様である。

2.5 巻装置

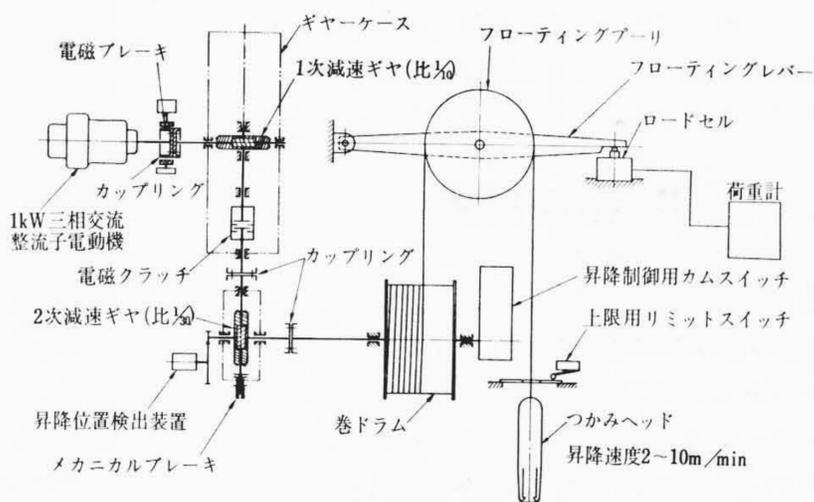
巻装置は使用済燃料または新燃料をつかんでしゃへいキャスクまたは収納管の内部に引き上げ，あるいは原子炉内その他につり降ろすための装置で，燃料交換装置の主要部分である。本装置はつかみヘッド，つり下げ兼電力供給用ケーブル，巻ドラム，荷重計，駆動電動機，減速機などより成る。第5図に巻装置の構成を示す。

つかみヘッドは燃料棒を直接つかむ装置で，巻装置中最も重要な部分に相当する。その外観を第6図に示す。誤操作その他によるつり落し事故のないよう，設計，製作には細心の注意が払われた。つかみ解放は燃料棒が完全に巻き降ろされた位置でのみ行ない得るようになっている。

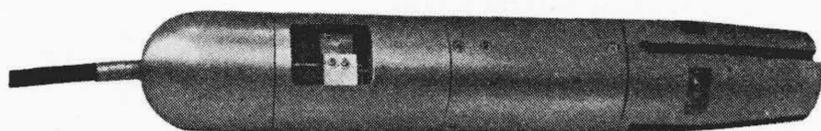
つかみヘッドのつかみ解放電磁石およびリミットスイッチなどの接続電線は多心ケーブルにまとめられており，このケーブルはまたつかみヘッドつり下げ用ロープにも兼用されている。ケーブルは電動機駆動の巻ドラムに巻きとられる。ケーブルに加わる張力はフローティングプーリおよびフローティングレバーを介してロードセルにより測定されており，万一それが異常に増加すれば荷重計より信号を出し，巻ドラム駆動機を直ちに停止する。

駆動電動機には1kW三相交流整流子電動機が使われる。

この電動機は，燃料の巻上巻下げ時にケーブルに加わる張力変化をできるだけ少なくするために，上下両端では低速運転を行ない，



第5図 巻装置の構成



第6図 つかみヘッド

巻上中の途中においてのみ高速運転を行なうようプログラム制御される。この上下両端での電動機の増速または減速の制御には巻ドラムに直結したカムスイッチを使用している。

2.6 冷却装置

この装置はしゃへいキャスクに収納された使用済燃料の崩壊熱を除去するためのもので，原子炉から取り出されるいかなる状態の燃料も安全にかつ確実に冷却を行なうため，空気冷却，不活性ガス冷却，重水冷却などを行ない得るよう設計された。

空気および不活性ガスの冷却系統は両者に共用のブロウ，熱交換器などからなっており，いずれの冷却もバルブによる回路の切換えによって開回路および閉回路による強制冷却が可能となっている。不活性ガスとしてはCO₂ガスが使用され，これはボンベより供給される。開回路空気冷却は正常な使用済燃料の冷却に使用されその排気は炉室換気ダクトに導かれる。また閉回路空気冷却は被覆の破損した放射能汚染の著しい燃料の冷却に使用される。この場合冷却用空気はキャスクより燃料を排出したのち換気ダクトに排気される。

重水冷却は使用済燃料の原子炉からの取出し時における非常用冷却やキャスク内での燃料の緊急冷却などに使用するためのもので，キャスク上部に設けられた重水タンクに貯えられた重水をキャスク内部にフラッシュさせて冷却を行なうものである。長時間の冷却が要求される場合には炉上面に設けられている緊急用重水栓からの重水の供給も可能である。これら非常用冷却に重水が用いられるのはこの原子炉が重水炉であるからである。

さらにこれら冷却のほかこの装置にはキャスク内面の汚染を洗浄するための軽水洗浄やキャスク内面の乾燥なども行なえるようになっている。

2.7 制御装置

本燃料交換装置の制御内容は次の3項目に大別される。

- (i) 台車の駆動および自動位置決め制御
- (ii) つかみヘッドの昇降および燃料棒着脱制御
- (iii) 水，ガス系統制御

これらの制御操作は上部台車に取り付けられた制御卓より一括して行なうことができる。この制御卓には上述の運転制御に必要なすべてのスイッチ類，表示灯類，指示計器類が取り付けられ，さらにグラフィックパネルが備えられていて交換中の新旧燃料の位置や状況が一目でわかるようになっているので，運転者はそれを監視しな

が複雑多岐にわたる本装置の運転制御を容易に、かつ安全確実にこなうことができる。

3. 自動位置決め機構

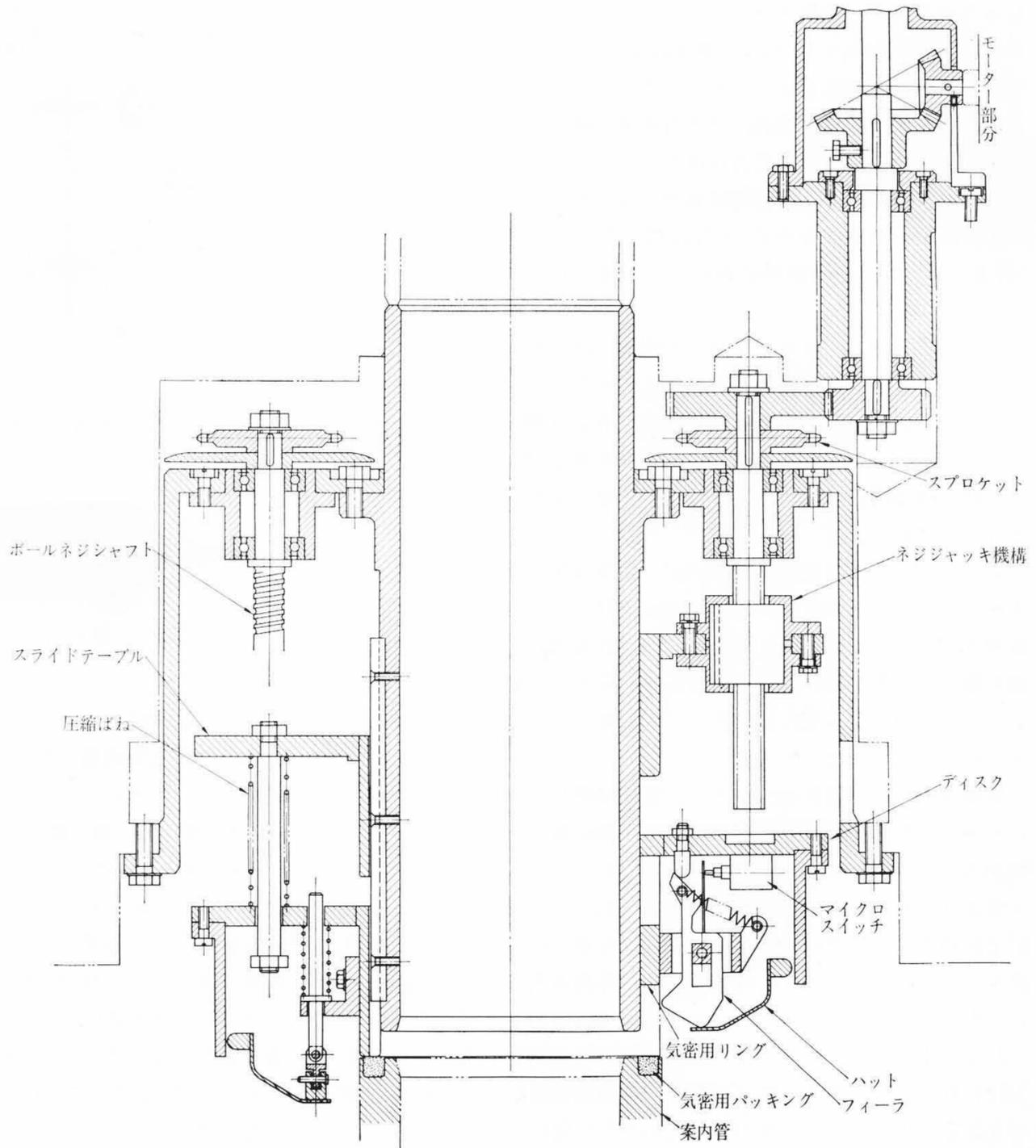
燃料交換装置の機能中、最も大きな特色は70 tに及ぶ重量物を任意の燃料装てん口に自動位置決めすることである。すなわちあらかじめ装てん口にそう入れさせた案内管に対し、その近傍30 mm程度に高速で粗位置決めを完了すれば自動的に微速に切換えられて精位置決めに移り、30秒前後で心出し精度0.5 mmに位置決めされる。続いて気密用リングおよびしゃへいリングが自動的に下降して炉頂部に密着し、炉心との気密およびしゃへい結合を確立して自動位置決め過程を終了する。

交換装置においては位置決め失敗は、燃料の破損、放射性物質の散逸などの事故に発展する可能性がある。この点を考慮し、安全性および確実性の面から各種制御方式を検討した結果、位置決めされるべき点を直接探り当てる定位置制御方式を採用することにした。すなわち所定の装てん口には目標となる案内管を取り付けておき、一方燃料交換装置には前述のように、フィーラを有する位置決めヘッドを設ける。フィーラにはマイクロスイッチが付属しており、これが案内管上端に触れるとマイクロスイッチが動作するようになっている。フィーラは同一円周上において直交二軸上に2個ずつがそれぞれ向かい合うように合計4個が取り付けられている。所定位置からの燃料交換装置のずれはすべて4個のマイクロスイッチの開閉の形で検出される。最終的に位置決めされた状態では4個のフィーラはすべて案内管に接するが、装置が所定位置からずれるとマイクロスイッチが動作してそれを修正するように位置決め用微速駆動電動機が回転する。

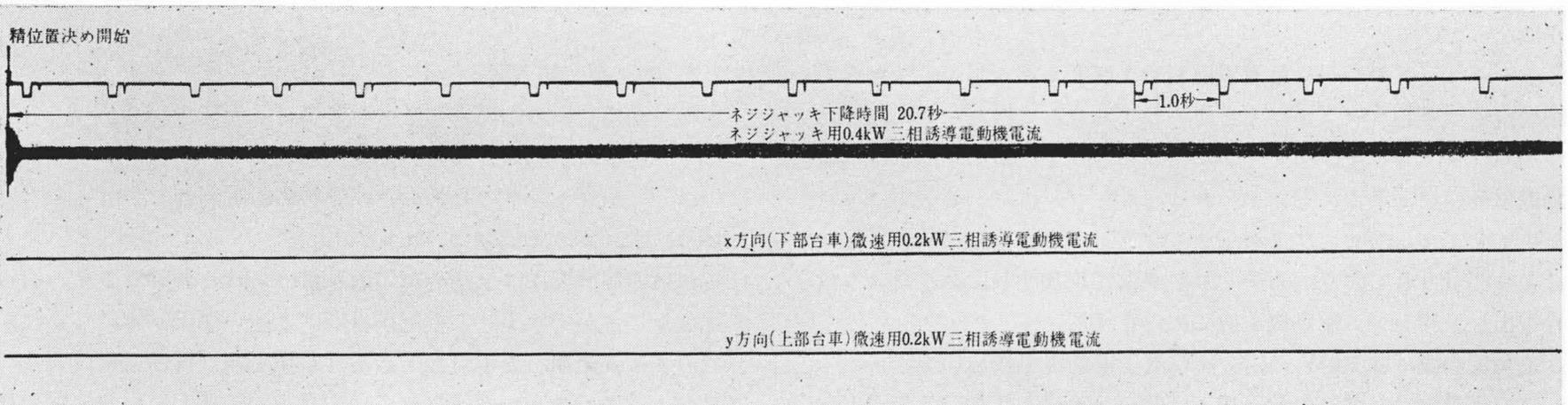
この方式は本質的にはオンオフ制御であり、計算のみでは必ずしも精度や安定性に対する見通しを得ることが困難であったので、装置と同一規模の試験用台車を作り、それに等価荷重をのせてこの二

点について徹底した試験を行ない、位置決め速度とフィーラの感度の最適値を得て、その結果を最終設計に適用した。

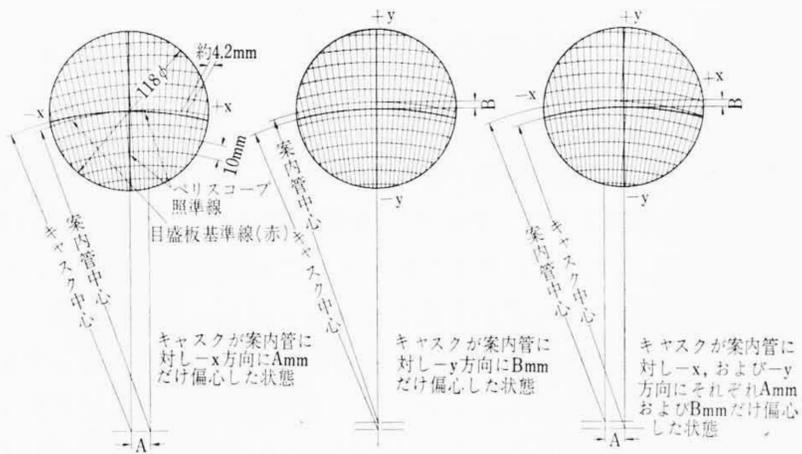
位置決めヘッドの構造概要を第7図に示す。位置決めヘッドは案内管を指触して自身の位置を自動的に修正するものである。動作部は円板状のハットと、ハット上面に接する上述の4本のフィーラから成る。その動作を具体的に説明する。しゃへいリングとともに位置決めヘッドが案内管上端に降ろされると、まず偏心している側のハットまたはフィーラが直接案内管上端に当たりその側のフィーラが突き上げられてマイクロスイッチを動作せしめる。次いで突き上げられたフィーラの方に下部あるいは上部台車が微速で進行して



第7図 位置決めヘッドの構造
(左半分はジャッキが下降した状態を示す)



第8図 精位置の運転の一例



第9図 ペリスコープによる位置決め測定

偏心を修正し、ずれがなくなるまで直交2方向に精位置決め動作が繰り返される。ずれがなくなり4本のフィーラがそれぞれ等に案内管に接すればジャッキはさらに下降して下限で止まり位置決めを完了する。続いて気密用リングが押しパネによって下方に押し出され案内管上面のパッキングを圧着し、これと気密結合し炉内からの放出ガスがキャスク外に漏れるのを防ぐ。以上の動作はすべて自動的に行なわれる。

位置決め動作中における電動機の運転状態を示すオシログラムの一例を第8図に示す。粗位置決め後、まずネジジャッキが下降してハットまたはフィーラが案内管に当たりx方向(下部台車走行方向)のずれを修正、さらにジャッキが下降しy(上部台車走行方向)およびx方向にそれぞれのずれを修正する。この場合の修正距離はx方向に約20mm、y方向に約30mmである。

ジャッキ機構は、瞬時制動電動機によってかさ歯車を介して平歯車に運動を伝達する歯車列と、一組のチェーンホイールおよびスライドテーブルをバネを介して昇降させるボールネジシャフトから成る。

キャスクが所定の位置に自動的に精位置決めされたのち、その位置決め状況を観測し完全を期するために位置指示確認の指標となる目盛板を案内管外周にあらかじめ取付けておき、キャスクの位置決め完了後ペリスコープで目盛板を観測する方式を採用した。これは第9図に示すように目盛の基準線とペリスコープの照準線とのずれからキャスクの案内管に対する偏心状態を監視しようとするものである。ペリスコープの接眼部分は操作卓上に設けてある。もし必要なら目盛板を観測しながら自動位置決め機構を使用することなく手動のみでキャスクを位置決めすることもできる。

4. レールクランプの機構と設計

燃料交換装置が炉内の燃料棒を扱っている過程では、炉とキャスクは案内管を介して完全に外気と隔離された状態で連結されており、炉内冷却材の漏出を防いでいるが、万一この操作中に地震が起きた場合には炉とキャスクの連結部がずれ、炉内と外気との隔離状態が破れる可能性がある。さらに最悪の場合として、炉とキャスク

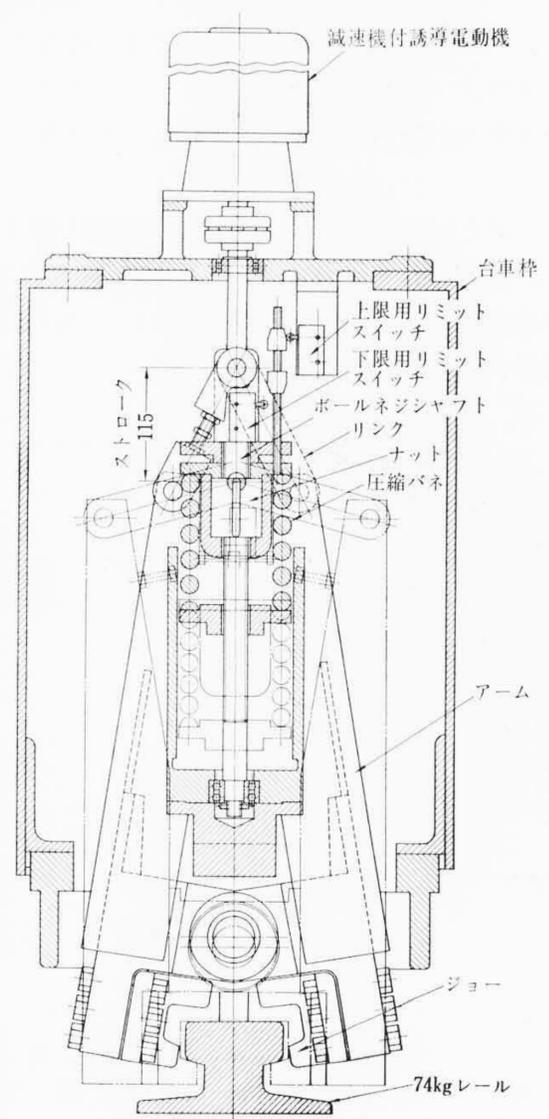
の連結部にたまたま燃料棒が位置している際に地震が起きると燃料棒が切断され、燃料棒内の核分裂性生成物が外気に放出されることになる。このため精位置決め完了後は台車をレールに固定しなければならない。本機では下部および上部台車にそれぞれ2台のレールクランプを設けた。本レールクランプは限られたスペースにはいるよう小形化され、しかも大きいクランプ力を出しうるようその機構には特別な考慮が払われている。これについて以下に述べる。

一台のレールクランプの所要水平クランプ力Pは次式で表わされる。

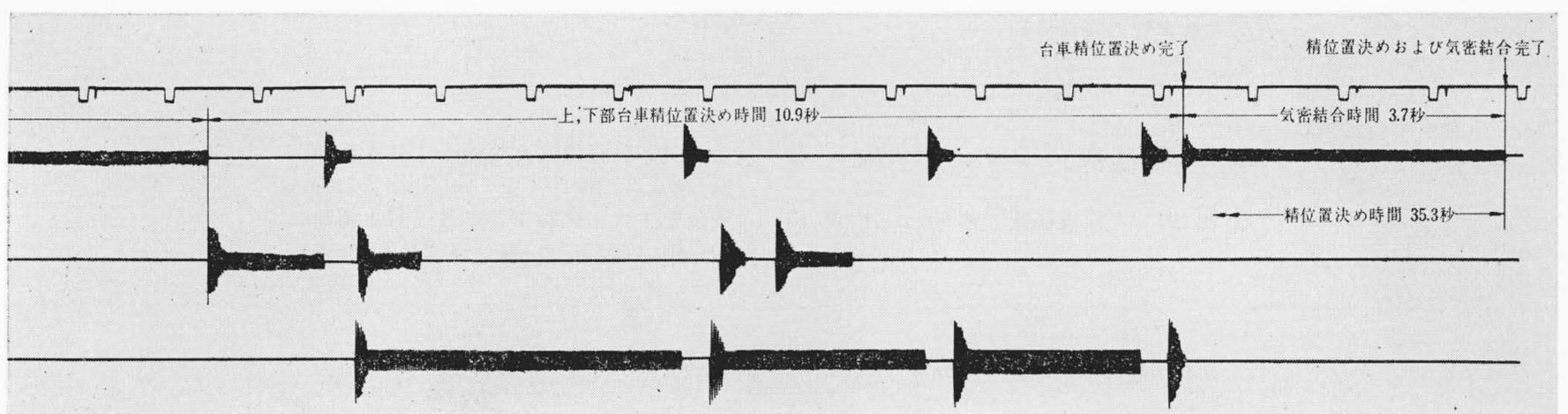
$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{g} G - \frac{W}{2} \mu \right) \quad (t) \dots \dots \dots (1)$$

- ここで W: 台車の全重量 (t)
- g: 重力の加速度 (m/s²)
- G: 地震の水平加速度 (m/s²)
- μ: 車輪とレール間の静摩擦係数

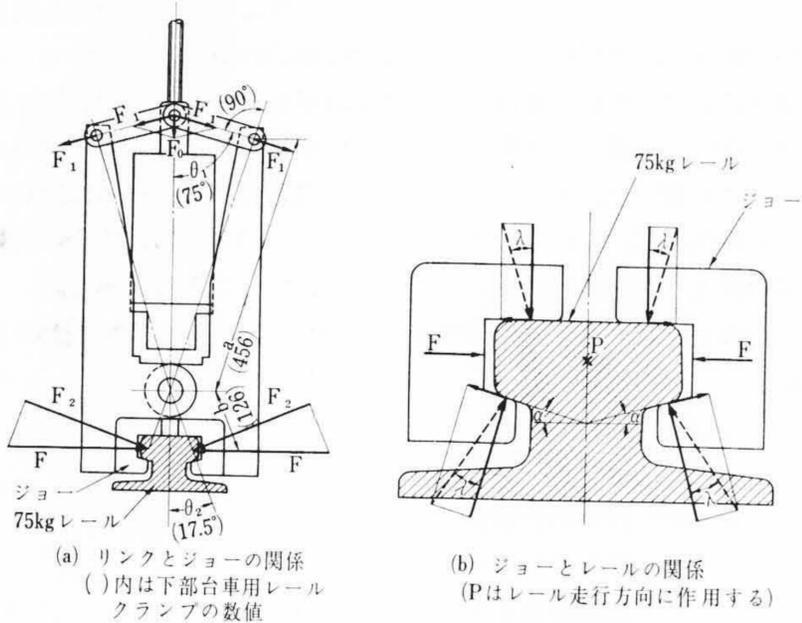
本機では設計値 G=0.4g (関東大震災では約0.2gと推定されている)、μ=0.2として下部台車(W=70t)の場合、P=10.5tとなる。



第10図 下部台車用レールクランプの構造 (二点鎖線はクランプした状態を示す)



(電動機電流のオシログラム)



第11図 レールクランプの力の関係

る。
レールクランプの機構は第10図に示すように減速機付誘導電動機でボールネジシャフトを回転し、それにはまり合うナットを昇降させることにより、リンク機構を介してレールをクランプするものである。レールをつかむジョーはくさび状としてクランプ効果を大きくしてある。

レールクランプとレールの力のつりあいの状態は第11図に示すとおりである。第11図(a)においてナットを下降させる力 F_0 とジョーに発生する水平力 (レールを水平方向に締めつける力に相当する) F との関係を表わすと次式となる。

$$F = \frac{F_0 \cdot a}{2 \cdot b \cos \theta_1 \cos \theta_2} \quad (t) \dots\dots\dots (2)$$

本機の場合クランプ状態で

$$F = 7.2 F_0 \quad (t) \dots\dots\dots (3)$$

となる。さらに第11図(b)においてジョーとレールにおける力の関係を求めると(4)式となる。

$$\frac{P}{F} = \frac{2 \{ \cos \lambda + \cos (\alpha + \lambda) \} \tan \lambda}{\sin (\alpha + \lambda) + \cos (\alpha + \lambda) \tan \lambda} \dots\dots\dots (4)$$

ここで λ は摩擦角である。

試作装置により実験の結果 $P/F=1.55$ となった。これは $\alpha=15^\circ$ で $\lambda=25.1^\circ$ (摩擦係数は 0.47) である。実験結果と(3)式より F_0 は 0.94 t を要する。ナットを押す圧縮バネにはあらかじめ約 0.6 t の内力を与えておき、ナットが下降してジョーがレールを押し付けはじめ、バネのたわみが F_0 に相当するところでリミットスイッチを動作させて電動機を止める。これにより短時間(約 10 秒)でクランプを完了することができる。さらに圧縮バネを介してクランプしているので、クランプ時に台車に衝撃を与えない。

5. 結 言

放射線のしゃへい、燃料棒の冷却、遠隔操作、耐震などの必要から、特殊な機能ならびに複雑な操作機構が要求された本装置は、設計当初において未開の分野が多く、ほとんど創意による開発を余儀なくされ、その結果幾多の新機軸が生み出された。ことに 70 t に及ぶ重量物を、簡単な構造のフィーラを使ったオンオフ制御によって任意の燃料装てん口に精度 0.5 mm で自動位置決めし、さらに自動的にレールクランプする一連の機構は、この種原子力機器に今後の指針を与えるものであると信ずる。

終わりに本装置の計画に当たり終始ご指導賜わった日本原子力研究所関係者各位、特に JRR-3 建設室八剣室長および木下係長に深じんの謝意を表するとともにご協力いただいた日立工場関係者各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 杉本：原子力工業 4, 54 (昭33-5)
- (2) 島井ほか：日立評論 40, 1273 (昭33-11)
- (3) 江頭：日立評論別冊 6 (昭37-8)
- (4) J. S. Foster ほか：Nucleonics, 18,66 (Oct. 1960)
- (5) NRU 偏：Nuclear Engineering, 3, 19 (Jan. 1958)
- (6) John Thompson Ordnance 偏：Nuclear Engineering, 5, 164 (Apr. 1960)

第26巻 日 立 第8号

目 次

- 随 筆.....野村万蔵
- 市房ダムの自動洪水調節装置
- 家庭に太陽エネルギー
——日立太陽熱温水器“アポロネット”——
- 国産最初の大型電子計算機 HITAC5020
- お宅のテレビはよくうつりますか?
——ブラウン管の寿命診断——

- 楽しく清潔な入浴は日立ホームバス
- そこにも、ここにも日立チェンの幅広い活躍
- 明日への道標：インド国鉄納 2,400 kW 交流電気機関車
- 日立ハイライト：豊かなお湯を楽しく使おう!
- 電線百話第43話 電車の大動脈—BN ケーブル—
- 新しい照明施設
- 日 立 だ よ り

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番