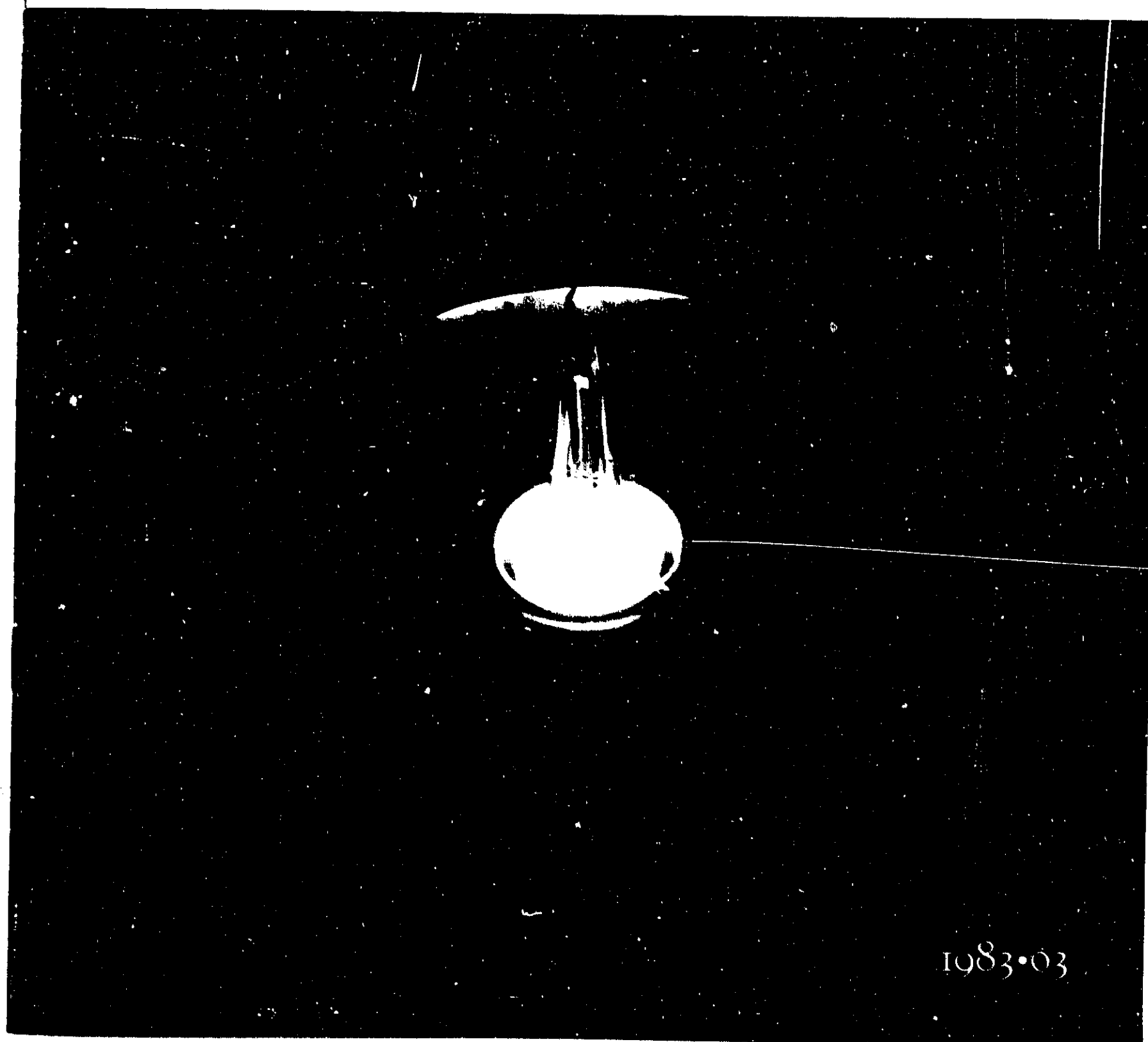


# 常陽と照射試験

JOYO MARK-IIについて



目 次

1. はじめに.....	1
2. MK-II照射試験計画の概略と意義 .....	2
3. 照射用炉心の概要.....	5
4. 炉心データ.....	12
5. 照射装置.....	13
6. 照射装置組立検査施設.....	26
7. 照射後試験施設.....	27
8. 照射業務.....	28

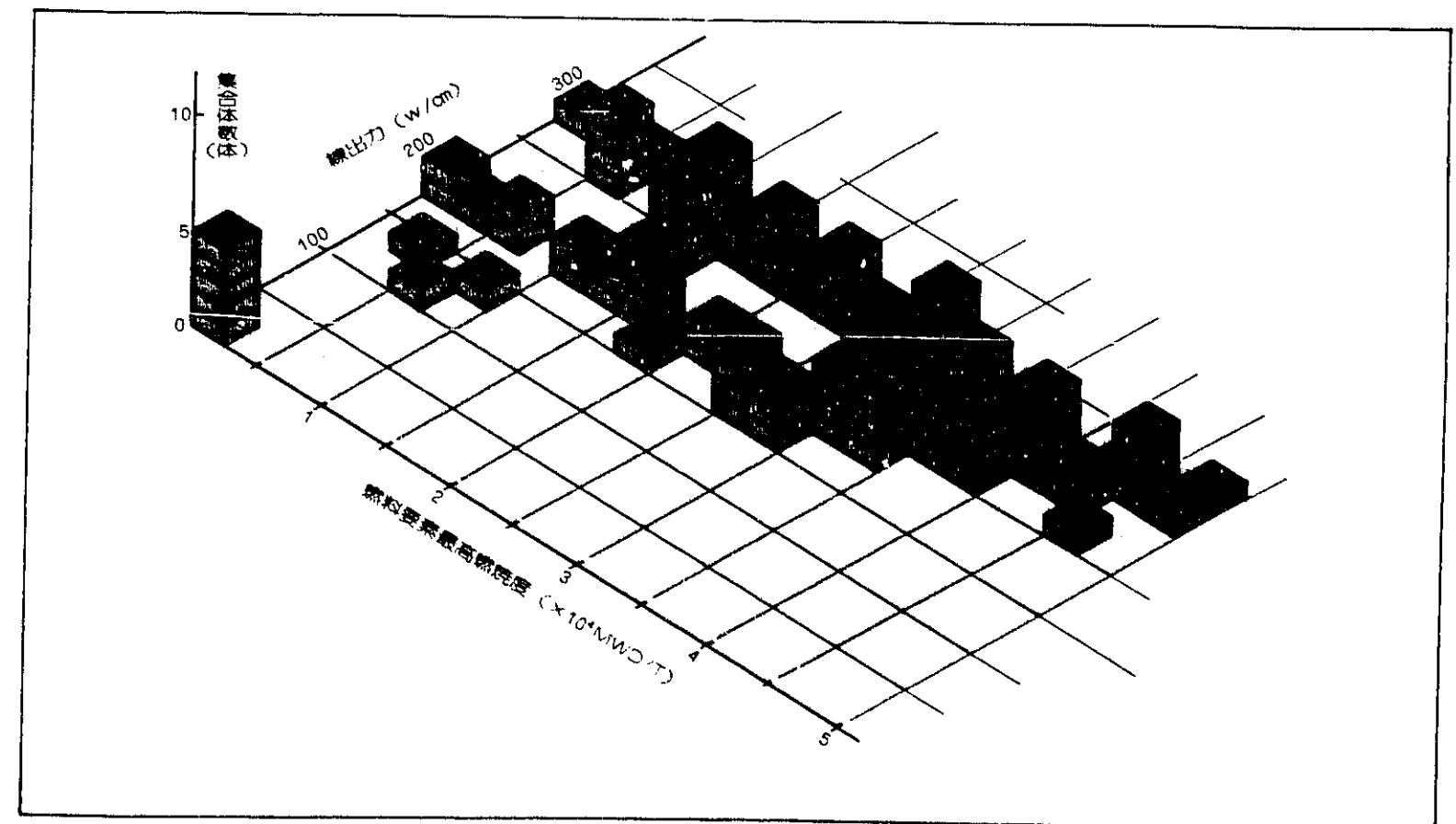
# 1 はじめに

高速実験炉「常陽」は、わが国ではじめての高速炉として昭和45年に茨城県大洗町に建設が始められ、昭和52年4月24日に初臨界に達したのち、50MW及び75MWでの運転が行われ、昭和57年1月10日に第1期炉心(MK-I)の運転を終了しました。このあと、「常陽」は炉心を改造し、昭和57年11月に第2期炉心(MK-II)での臨界を達成した後、昭和58年夏より本格的な照射試験施設として使用される予定です。

現在、世界各国においても、精力的に照射試験が展開され、しかもその試験内容は多彩で、かつ、各国で独特の特徴ある燃料材料等の照射試験や安全性試験が行われています。「常陽」でも、すでにMK-I炉心の運転用炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体などの炉心構成要素が多数取り出され、照射後試験が行われています(第1図参照)。今後さらに、燃料・材料等の原子炉内での挙動を解明し、長時間高速中性子で燃やしても安全な燃料や、多量の高速中性子にさらされても安全な構造材料の設計ができるよう「常陽」を本格的な照射施設として使用することが、わが国の高速増殖炉開発の重要な課題の1つです。

<表紙の説明>

計測線付集合体(本文P-21)の計測ケーブルが炉内ナトリウムバウンダリ(バルフヘッド)を貫通する部分の高周波加熱ニクロプレーティング施工を真空容器の窓より撮影したものである。黄色光は高周波による加熱状態(約1100℃)を示している。



第1図 「常陽」MK-I炉心で照射された炉心燃料集合体

## 2 MK-II 照射試験計画の概

「常陽」による燃料材料等の照射試験は、「常陽」がわが国唯一の高速炉であり、しかも高速増殖炉の開発にはこれらの照射中のふるまいを知ることが非常に大切であることを考えると、極めて重要であると言えます。

燃料は高温で高い高速中性子束の中におかれるとさまざまな挙動をします。すなわち、

■ スウェリング（主に中性子照射により燃料・材料が膨らむこと）

■ 熱膨張

■ 物性の変化（燃料の熱伝導度や材料の強度が変る）

■ PCCI（燃料被覆管内面が照射中に燃料により化学的に腐食されていく）

■ PCMI（燃料ペレットと被覆管が熱膨張などで機械的に干渉をおこすこと）

■ 燃料組成の変化

■ 燃料ピン内圧の変化

など、またこの他に通常の運転条件を外れた場合の挙動、すなわち、

■ 破損ピンを更に照射し続けた場合

■ 燃料冷却材流量が減少した場合

■ 高出力や高燃焼度での挙動

などです。更に、設計条件の確認として、例えば、

■ 冷却材混合効果

■ ラツバ管周辺流れ効果

■ ホットスポットファクタ

あるいは、炭化物燃料やグリッド型燃料など、いろいろの試験すべき項目があります。

そして、これらの試験のために、照射後試験施設として、照射燃料集合体試験室(FMF)、照射燃料試験室(AGF)、照射材料試験室(MMF)が建設されており、

■ 燃料ピンの外観・寸法検査

■ 燃焼度測定

■ 金相試験

■ 材料強度試験

■ 物性測定

などが実施できるようになっています。

既にMK-Iにおいても、炉心には、予め選ばれた約10体の運転用燃料が特に照射後試験を行ったデータと比較できるように、詳細な製造時検査記録をとって装荷され、燃焼が進んだ各段階で計画的に取り出され、いろいろな試験や検査が行われています。また、そのほかにも高速中性子のもとで燃料材料等がどのようにふるまうかという基礎的な問題を明らかにするため、燃料集合体をはじめとして炉心を構成している種々の集合体を取り出され、照射後試験が行われています。しかし、原型炉や実証炉の建設のためには、「常陽」の運転用燃料の照射試験だけでは不十分であり、原型炉なり実証炉なりの燃料を「常陽」で照射し、いろいろと調べる必要があります。そのため「常陽」を、MK-IIにおいて、本格的な高速中性子照射施設とするため、

1) 照射条件向上のための炉心改造

2) 照射目的に適した各種照射装置の導入

## 略と意義

3) 各種照射装置導入に伴う既設設備の改造や追加

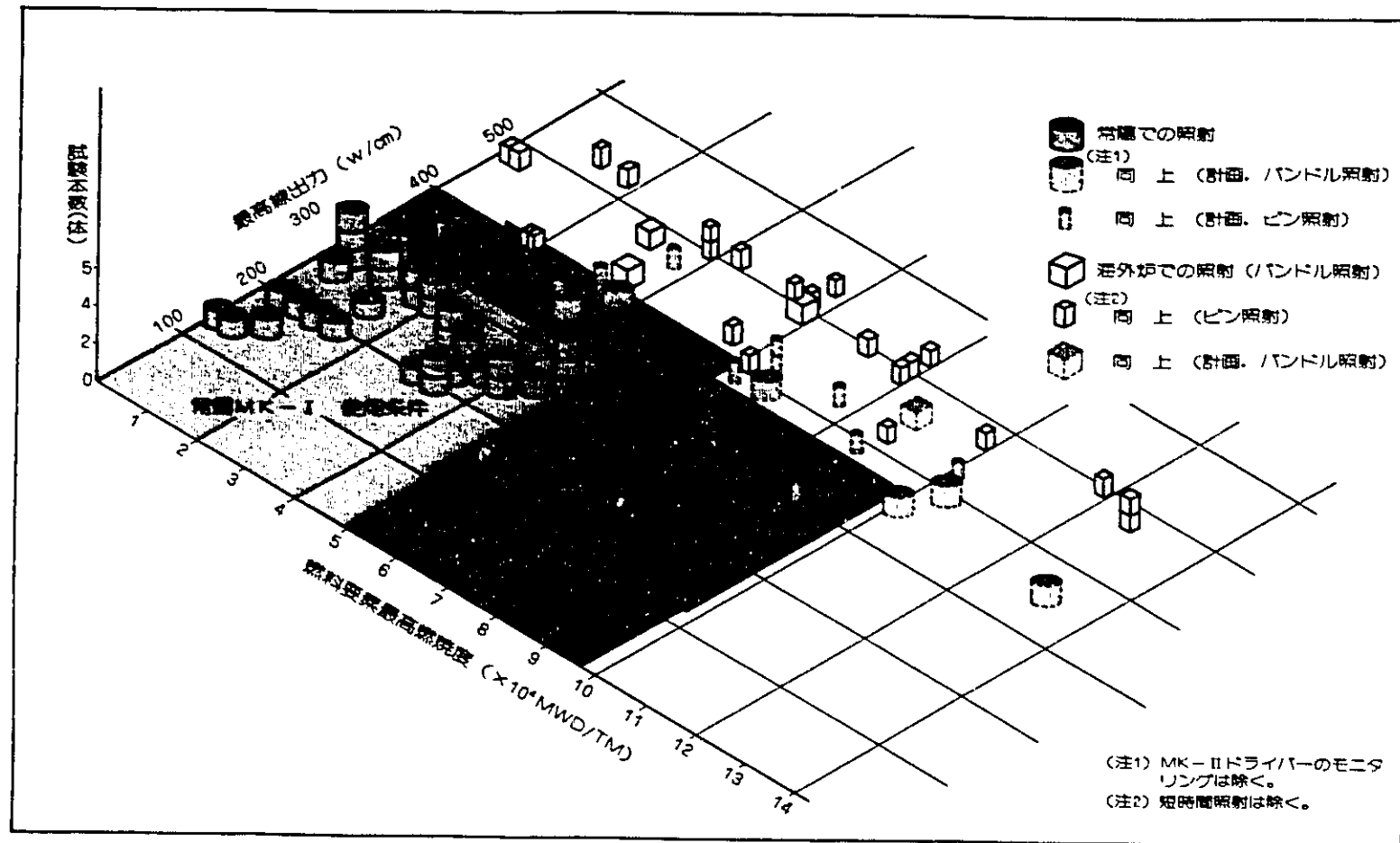
4) 各種照射装置の組立・検査施設の建設

が必要となります。また、これらの業務の遂行に加えて、照射試験データを効果的に評価・検討し、利用するため装置等の開発試験研究や照射前検査、照射後試験や原子炉照射運転データのまとめ、更には必要な許可作業の遂行等、組織体制の確立も重要な問題です。

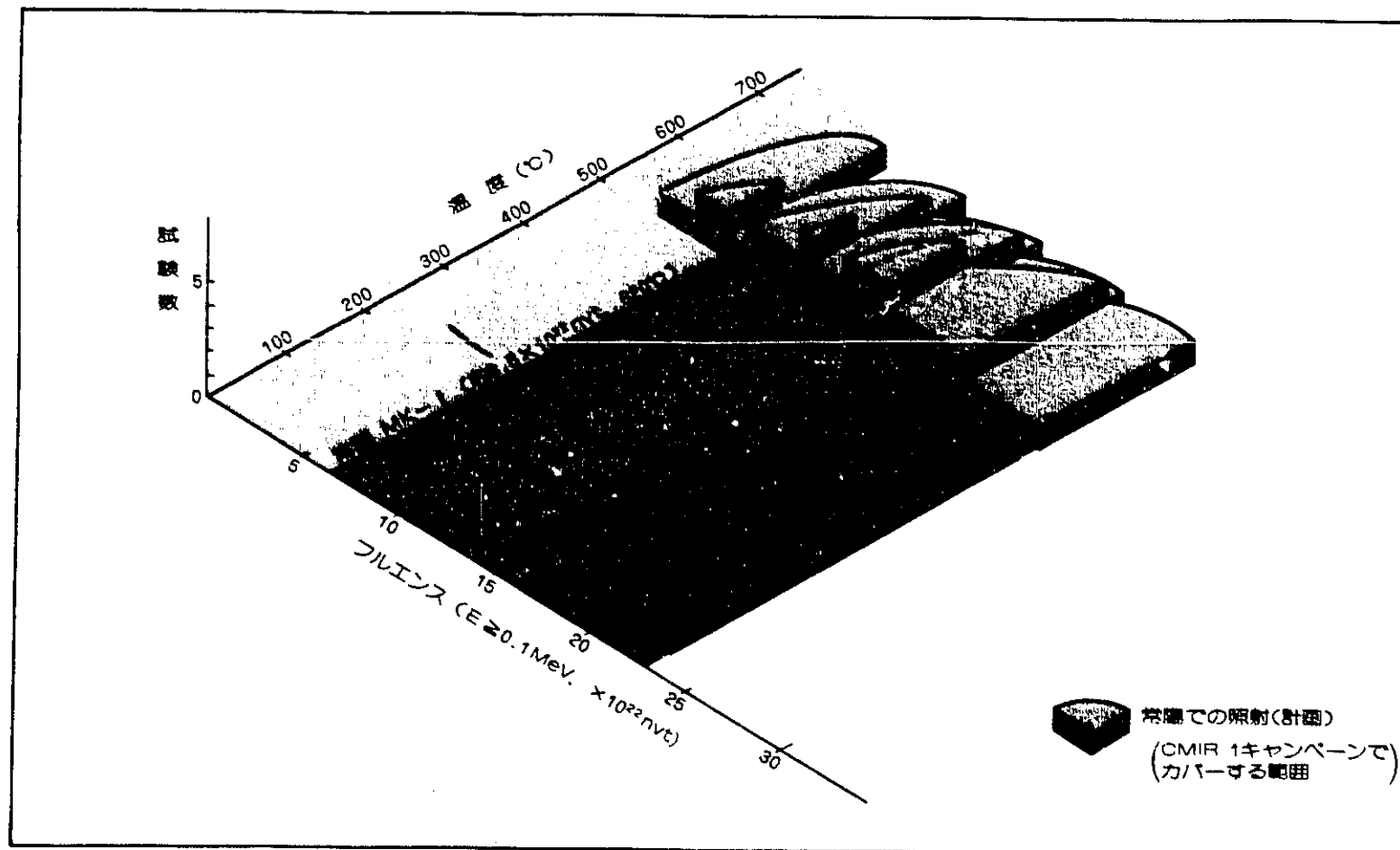
これら「JOYO MARK-II」計画は、小型の実験炉としての特性を活かして、照射試験目的に合わせた照射条件の設定や特殊な照射実験を行うことが望まれています。

すなわち「もんじゅ」の運転に先立っては、「もんじゅ」用初期炉心燃料の性能を確認する先行照射試験が行われ、すぐ引き続いて「もんじゅ」取り替え炉心の燃料材

料の照射試験がはじまることとなります(第2図、第3図参照)。つぎに、「もんじゅ」の運転開始の頃には、これらに加えてさらに実証炉用の燃料材料などの照射が計画されています。これらの試験はいずれもその試験目的に合わせて、特別の試験装置「特殊燃料集合体」によって行われます。そして運転中に燃焼している燃料の状態を時々刻々、連続的にデータを得ることのできる「計測線付集合体」や、安全性試験や特殊な条件下にある燃料のふるまいに関する試験が行える「インバイルループ」等の試験の可能性についても検討されています。



第2図 燃料照射試験実績及び計画



第3図 炉心材料照射試験実績及び計画

### 3 照射用炉心の概要

「常態」の照射用炉心は、燃料材料等の照射試験を効果的に実施できるように運転用燃料等の構造組成、更には炉心構成を改造します。そのおもな点をあげると、

- ①高速中性子束密度の増加
- ②炉心出力密度の増大
- ③中性子束の平坦化

です。そして、それぞれの炉心構成要素は、炉心燃料集合体については、

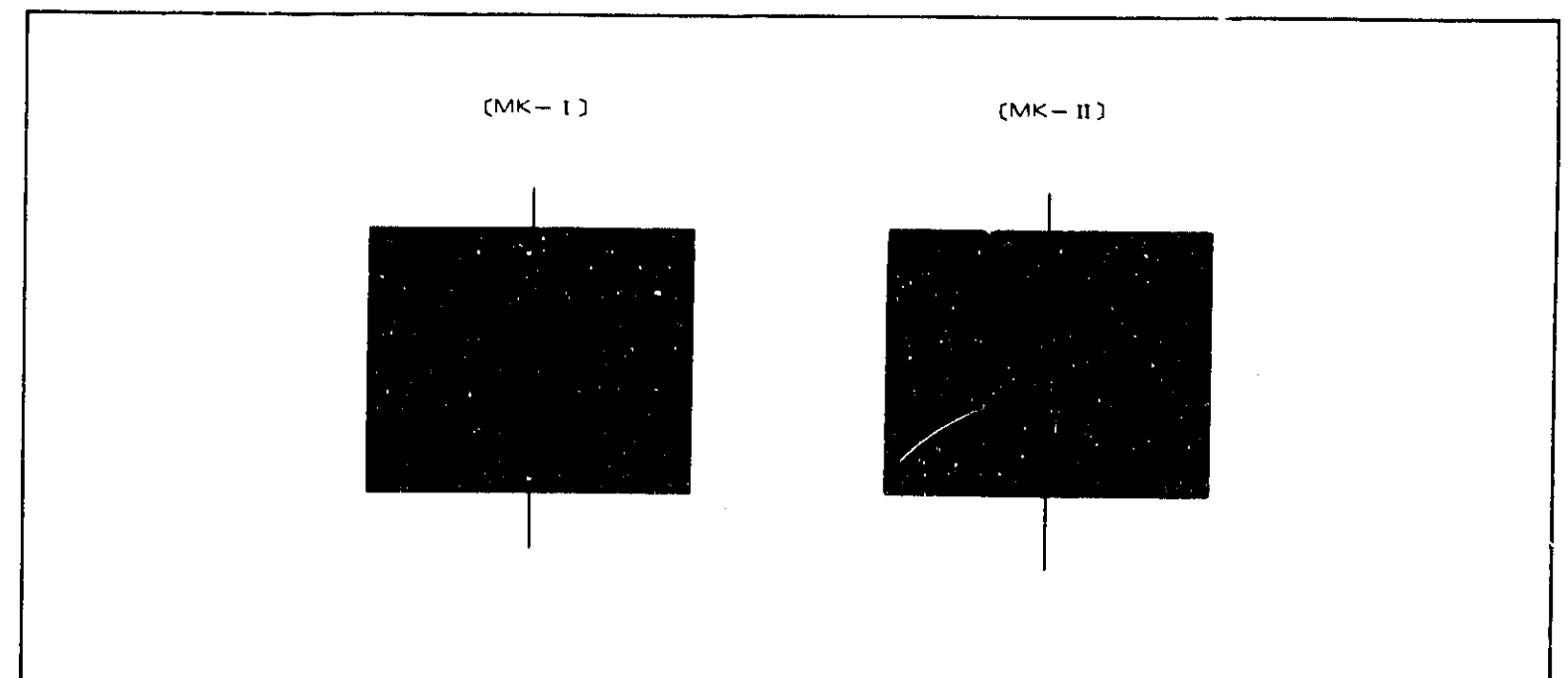
- ①プルトニウム富化度を上げる。
- ②燃料ピン直径を小さくし、ピン本数をふやす。

③炉心部高さを小さくする。

④上・下部の軸方向ブランケットをステンレスの反射体に変える。

また、ブランケット燃料集合体を取り出し、2種類の反射体に変え、合計3種類の反射体が装着されます。制御棒は調整棒と安全棒の区分を止め、6体とも同一機能（出力調整と安全停止の両機能を合わせ持つ）を有するものに変更され、寿命延長のためにベント型が採用されます。

以上の炉心改造の結果を第1期炉心と比較したのが第4図～第8図および第1表です。また、諸外国の照射用炉心性能と比較したのが第2表です。



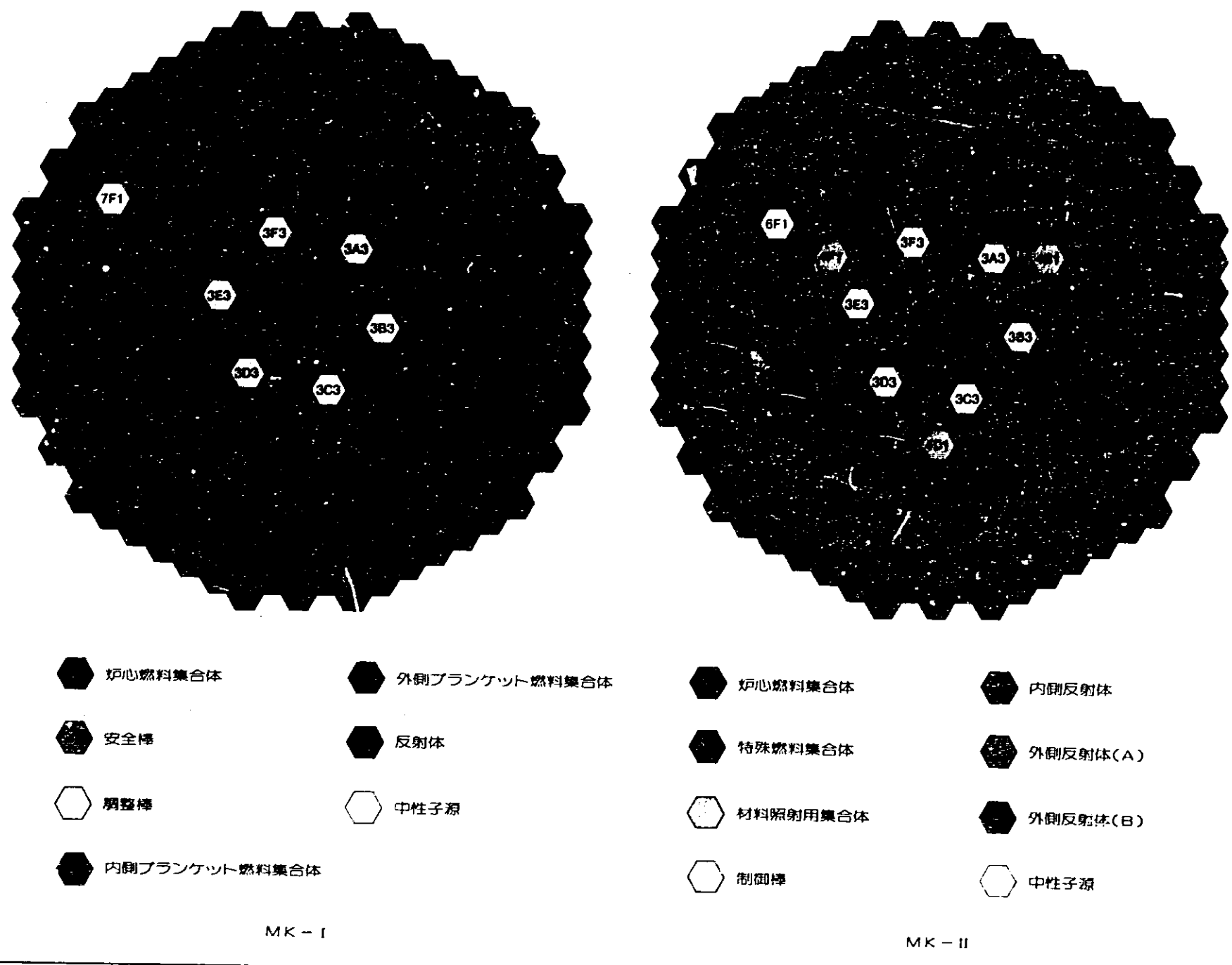
第4図 炉心比較図 (単位 mm)

第1表 「常備」炉心比較表 (照射用炉心改造前後)

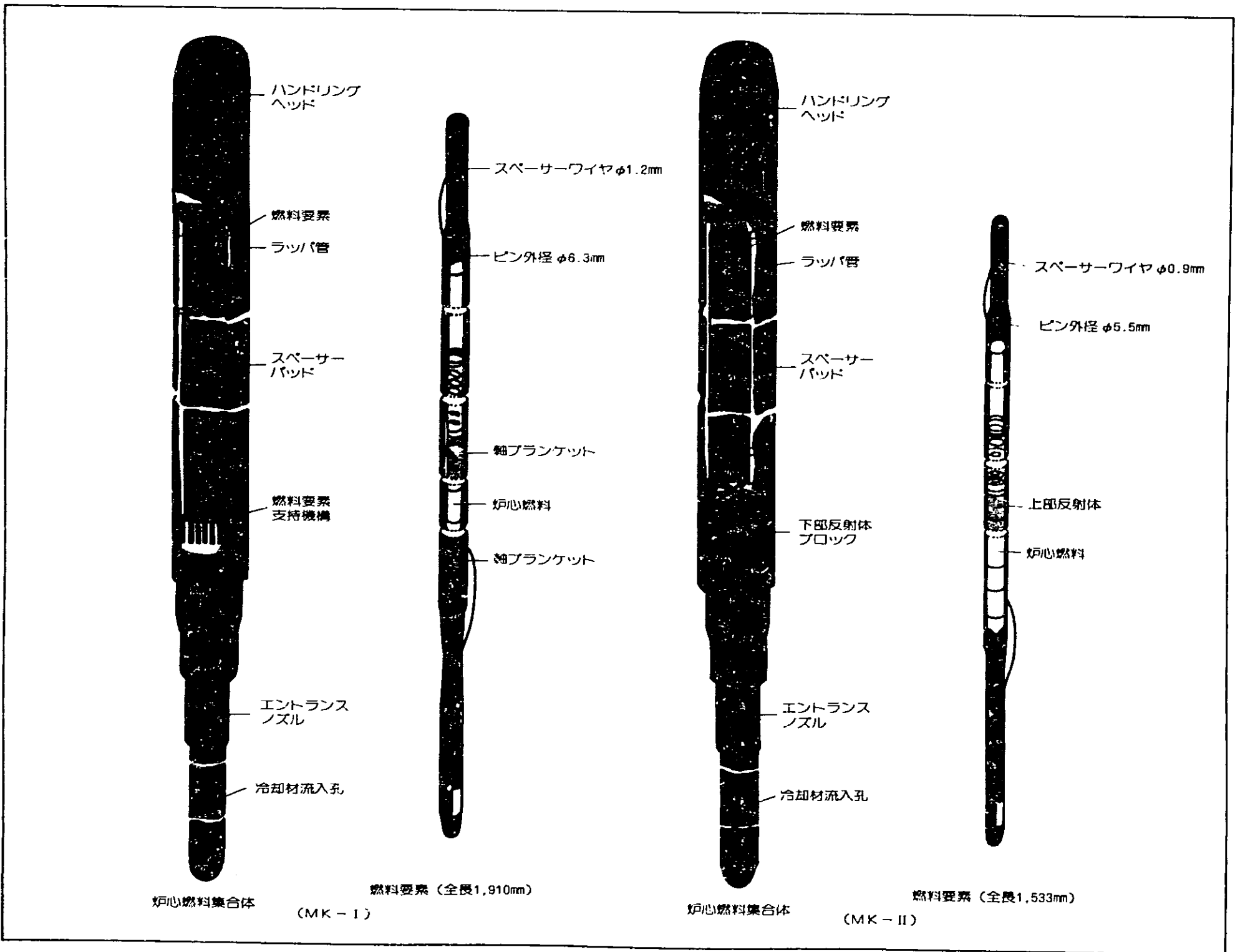
		MK-II
50	75	100
約2,200	約2,200	約2,200
370	370	370
約435	約470	約500
60	60	55
約294	約304	約250
約210	約320	約400
6.3	6.3	5.5
91	91	127
上部 40 下部 40	上部 40 下部 40	-
-	-	30
約18	約18	約30
約23	約23	約12
5~9列目	5~9列目	-
10列目	10列目	内側 5~6列目 外側(A)7~9列目 外側(B) 10列目
$2.1 \times 10^{15}$	$3.2 \times 10^{15}$	$5.1 \times 10^{15}$
$1.4 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$	$3.7 \times 10^{15}$
4.5以下(100°C)	4.5以下(100°C)	5.5以下
安全棒 4 調整棒 2	安全棒 4 調整棒 2	制御棒 6
密封型	密封型	ベント型
安全棒 5.6以上 (4本) 調整棒 2.5以上 (2本)	安全棒 5.6以上 (4本) 調整棒 2.8以上 (2本)	9.0以上 (6本)
約25,000	約42,000	約50,000
45日運転 15日停止	45日運転 15日停止	45日運転 15日停止(予定)

第2表 各国照射用炉心性能一覧

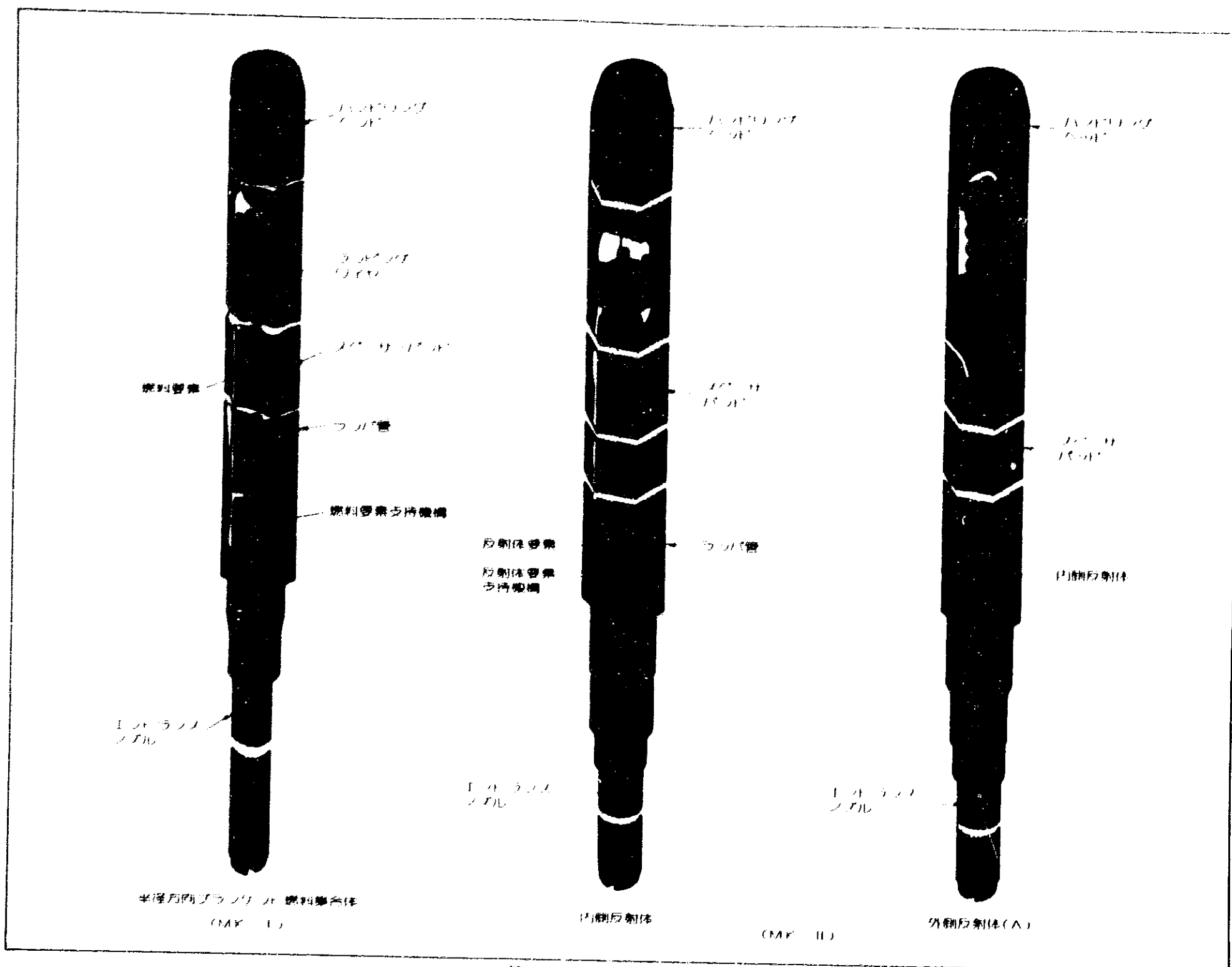
炉心名	出力 (MW)	常備		照射用炉心容量 (MW)	照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)		照射用炉心容量 (MW)	
		MK-I 80 MW	MK-I 75 MW		MK-II 100 MW	EBR-II	FFTF	EBR-II	FFTF	EBR-II	FFTF	EBR-II	FFTF	EBR-II	FFTF	EBR-II	FFTF	EBR-II
出力	50	75	100	60	400	62.5	400	60	1,034	47	75	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (Total)	$2.1 \times 10^{15}$	$3.2 \times 10^{15}$	$5.1 \times 10^{15}$	$5.7 \times 10^{15}$	$7 \times 10^{15}$	$5.7 \times 10^{15}$	$7 \times 10^{15}$	$5.7 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{15}$
照射用炉心容量 (Fast 20.1MeV)	$1.4 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$	$3.7 \times 10^{15}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
照射用炉心容量 (6)	241	252	210	60	1,034	60	1,034	60	1,034	47	75	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	70	73	67	47	75	47	75	47	75	47	75	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (外側)	5.4	5.4	4.6	-	5.84	-	5.84	-	5.84	-	5.84	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (内側)	600	600	550	361	915	361	915	361	915	361	915	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	91	91	127	7	217	7	217	7	217	7	217	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	18	18	30	-	22/26	-	22/26	-	22/26	-	22/26	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	23	23	12	49	nat.	49	nat.	49	nat.	49	nat.	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	370	370	370	371	~330 (初期)	371	~330 (初期)	371	~330 (初期)	371	~330 (初期)	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	435	470	500	473	~482 (初期)	473	~482 (初期)	473	~482 (初期)	473	~482 (初期)	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	2,570	2,570	2,570	2,000	7,400	2,000	7,400	2,000	7,400	2,000	7,400	49	nat.	405	380	371	410	376
照射用炉心容量 (30)	210	320	400	376	410	376	410	376	410	376	410	49	nat.	405	380	371	410	376



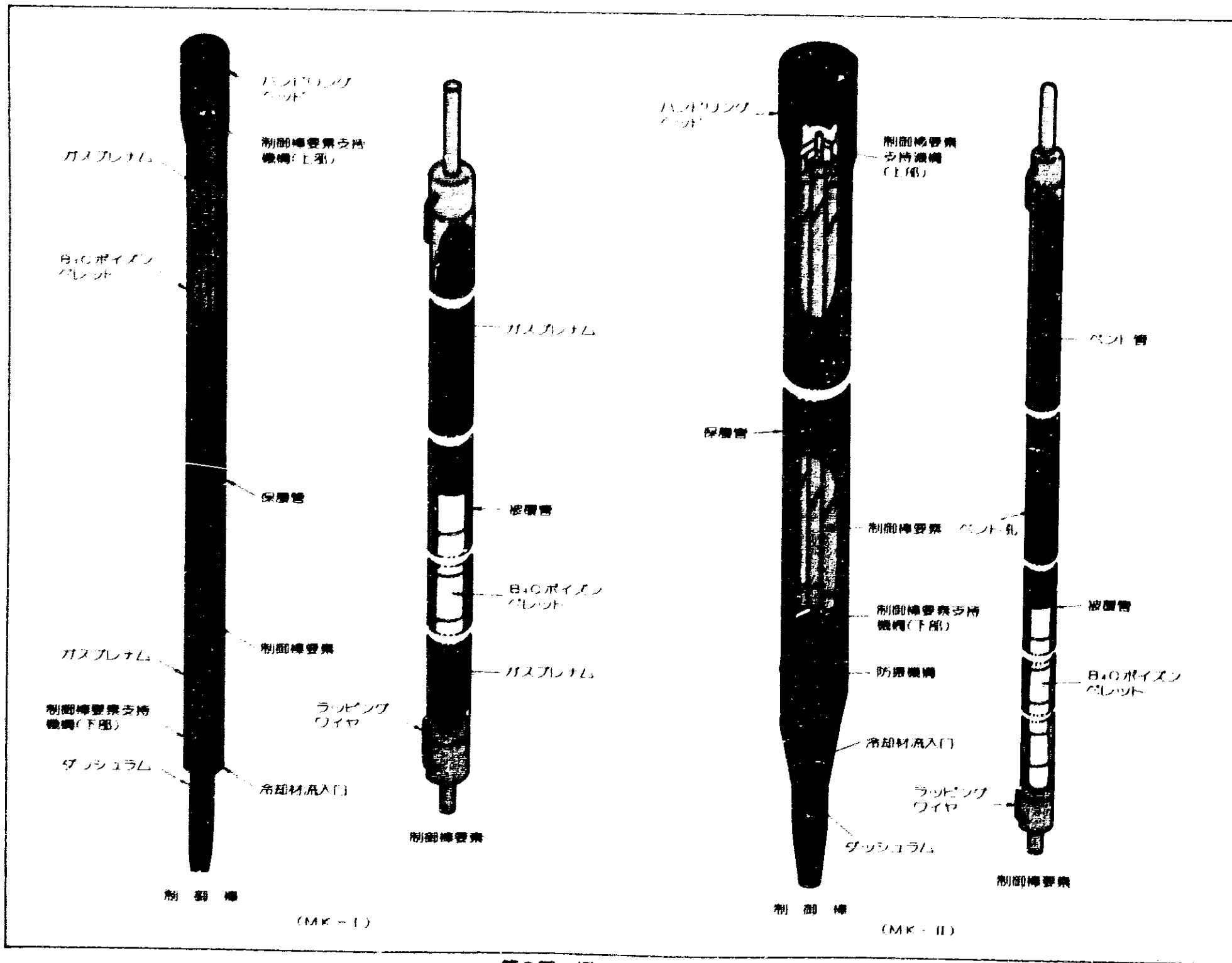
第5図 炉心比較図



第6図 炉心燃料比較図



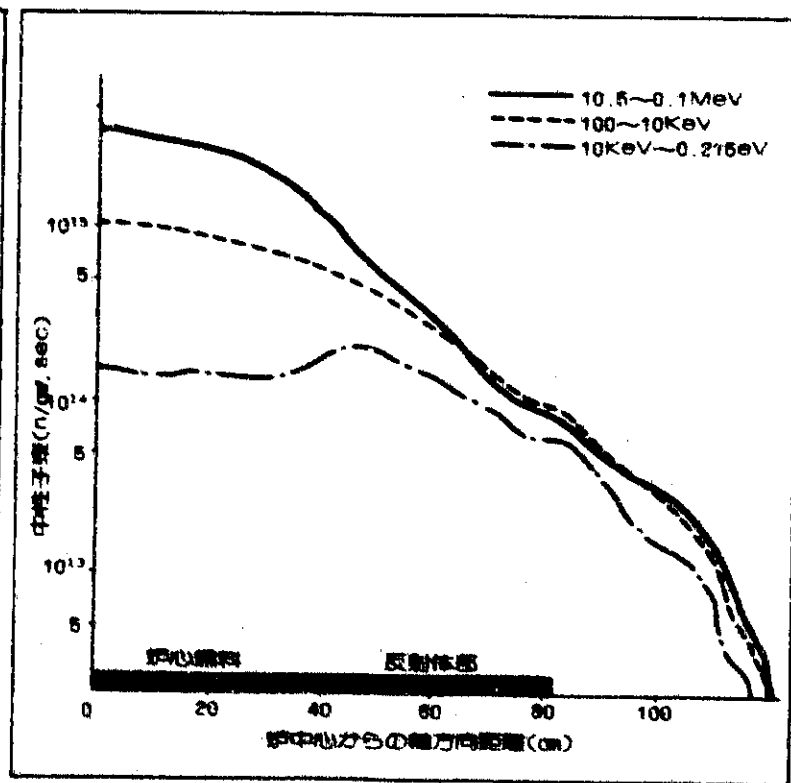
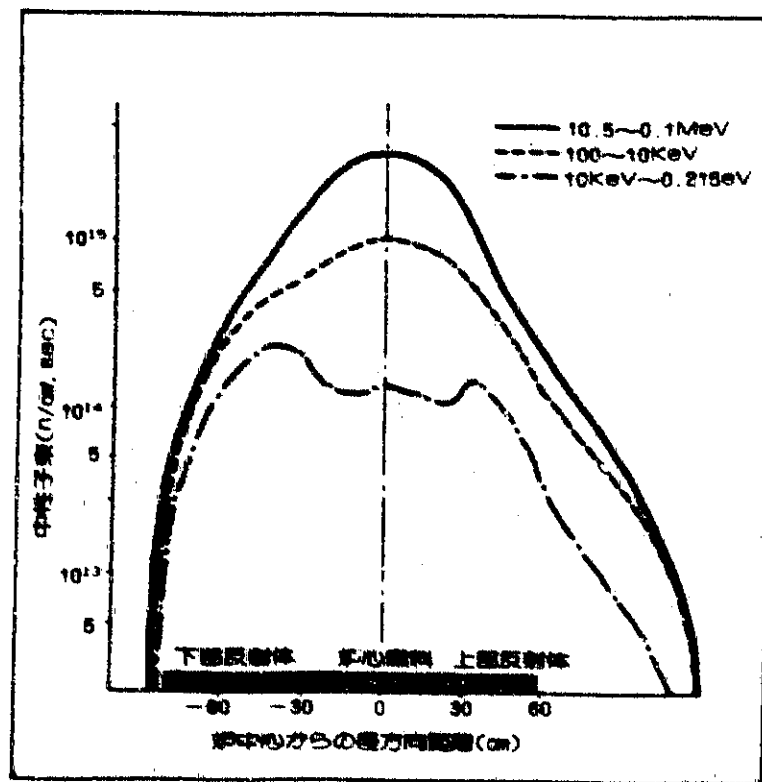
第7図 炉心構成要素比較図



第8図 炉心構成要素比較図

# 4 炉心データ

「常陽」は、熱出力100MWで45日間連続運転、15日間停止を1サイクルとする運転が計画されています。この運転サイクルの中で燃料材料の照射試験を目的に応じて効果的に行うためには、試料を照射用炉心のどの位置に配置すればよいかを、あらかじめ知っておく必要があります。そこで、照射用炉心における中性子束 (Neutron Flux)、反応率 (Reaction rate) および中性子・ $\gamma$ 線による発熱のそれぞれ軸方向及び径方向についての分布を求めます。以下に、代表的な中性子束分布(軸方向・径方向とも炉中心を含む断面)を示します。



第9図 MK-II平衡炉心軸方向中性子束分布(炉中心) 第10図 MK-II平衡炉心径方向中性子束分布(炉中心)

# 5 照射装置

照射試験を効率よく行うためには、個々の照射目的に沿った照射装置が必要となります。そのため、「常陽」では次のような照射装置を使用することになっています。すなわち、

- ①特殊燃料集合体
- ②材料照射用反射体
- ③計測線付集合体
- ④炉上部照射プラグリア
- ⑤その他の照射装置(現在検討中)
  - ・Naインパイルループ
  - ・二重カプセル
  - ・インパイルフリープ試験装置

などです。第3表は、①~④の照射装置と現在計画のNaインパイルループの特徴をまとめたものです。

## 特殊燃料集合体・材料照射用反射体

これらの照射試験は、外形形状が炉心燃料集合体と同一で、炉心への装荷や取り出しは通常の燃料交換経路で行われます。従って運転用の燃料などと交換して任意の炉心内位置で照射することができます。照射中の試験体の様子は、さまざまな計測器を内蔵させておいて後で解体して取り出し、検査して知ることができるようになっております。

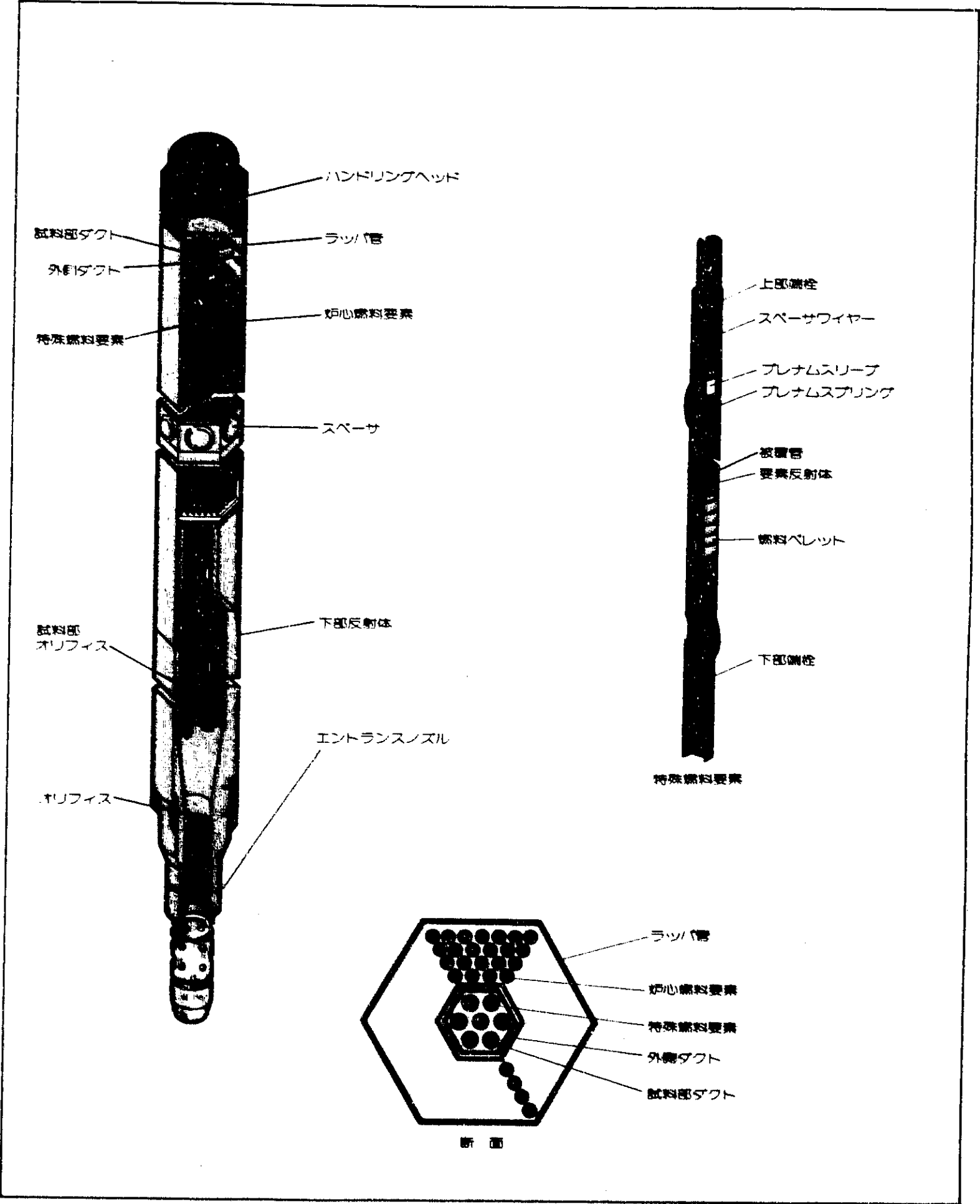
現在、特殊燃料集合体(Uninstrumented Irradiation Subassembly)には、A型、B型、C型があり、それぞれ、第3表に示すような構造及び特徴をもっており、照射目的により使い分けられます。

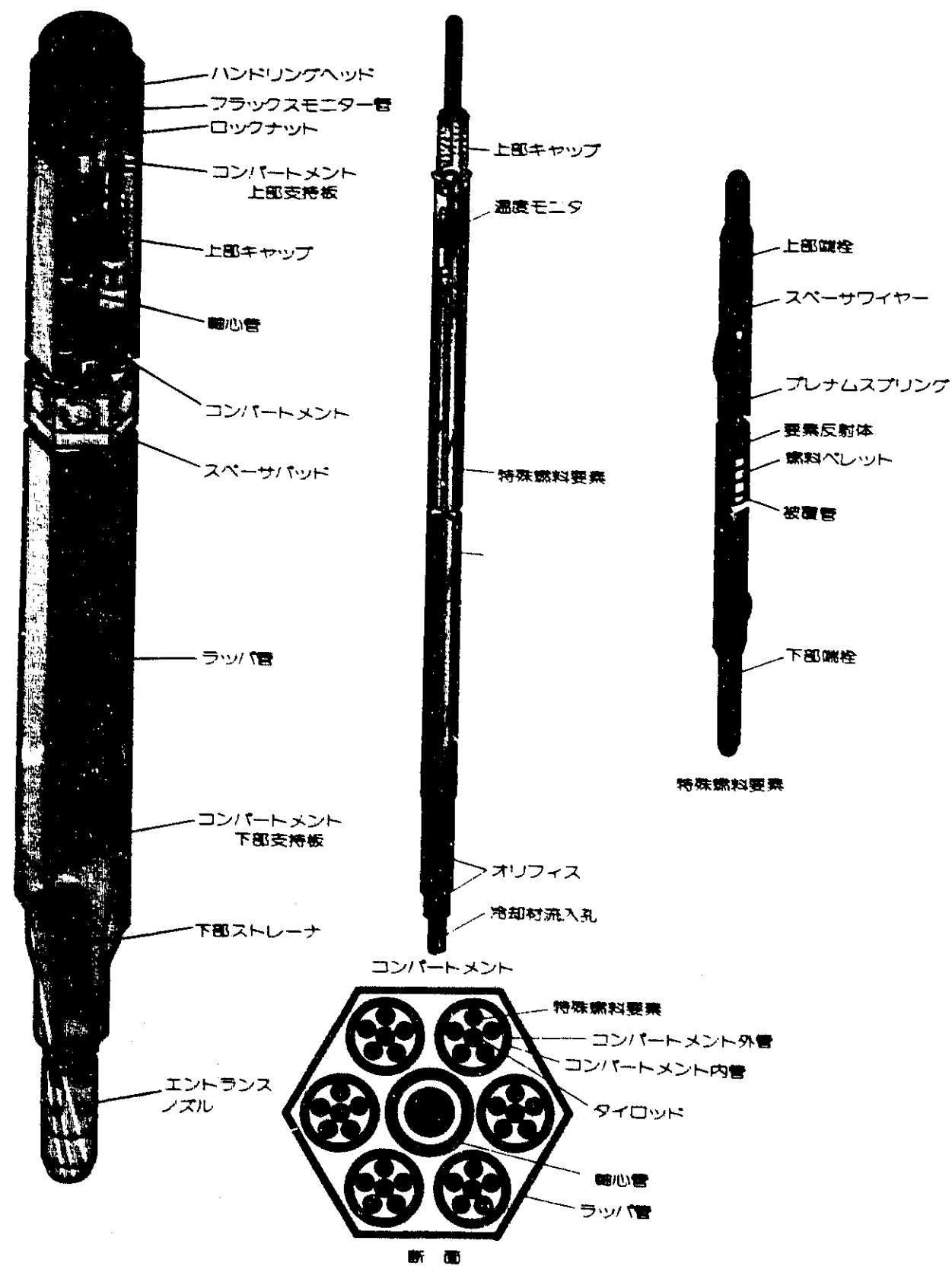
また、材料照射用反射体には、炉心材料の試験用(Core Materials Irradiation Rig)、制御棒材料の試験用(Absorber Materials Irradiation Rig)及び構造材料の試験用(Structure Materials Irradiation Rig)の3種類があります。

このうち、B型特殊燃料集合体と3種類の材料照射用反射体は、照射後に分解・再組立・再照射の行える構造となっています。

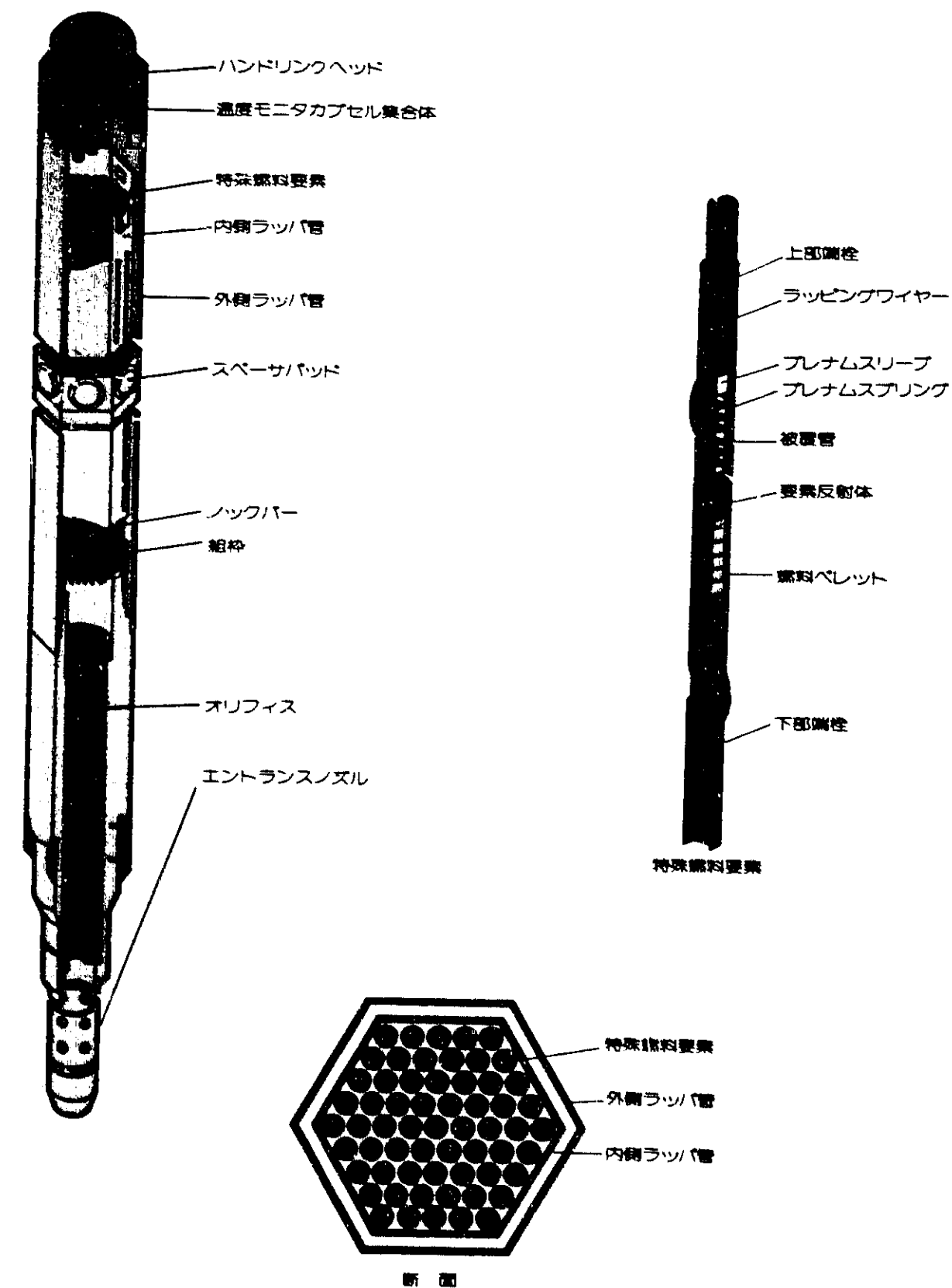


特殊燃料集合体		種類	特徴	用途	図号	
特殊燃料集合体	A型	UNIS-A	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 集合体中央部に燃料ブロック (線1または2本の内部ラツパ管で区別)を設け	• 集合体中の燃料体積密度が比較的大で燃費向上有利。 • 内部ラツパ管で流量・温度を測定できる。	• 燃費材料試験 • 燃料の燃焼出力測定	第 11 図
	B型	UNIS-B	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 軸心管(中心・本)コンパートメント(周囲6本)組立式。 • コンパートメント内に燃料試験ピン受取納。	• 燃焼後、FMEホットセル内で分解、再組立可能。「燃焼」で再現可能。 • コンパートメントにより燃焼条件(流量・温度)を設定できる。	• 「もんじゅ」燃料の燃性試験 • PCCI、PGM試験 • スペーサワイヤ等燃費測定	第 12 図
	C型	UNIS-C	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 標準燃料ラツパ管内側に別のラツパ管を設け、内部に燃料ピン受を取納。	• ピン/バンドルの燃焼挙動測定が可能。 • 多段階条件燃焼による計測的データ取得ができる。 • 異なる設計・仕様のピンの同一条件燃焼比較試験ができる。	• 「もんじゅ」燃料集合体燃性試験	第 13 図
特殊燃料集合体	燃料材料	CMIR	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 6本のコンパートメント内に燃料を取納。	• 7. 燃焼一系燃焼による燃焼試験。	• 「もんじゅ」燃焼挙動試験 • インバイルクローブ試験。	第 14 図
	燃焼材料	AMIR	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 6本のコンパートメントと1本の軸心管の中に試験入りのキャプセルを取納。	• 7. 燃焼と試験キャプセル中のキャプセルにより燃焼挙動試験。	• 「もんじゅ」燃焼材料(B、C)試験。	第 15 図
	燃焼材料	SMIR	• 外形寸法は標準燃料と同一。 • 6本のコンパートメントと1本の軸心管の中に試験入りのキャプセルを取納。	• He-Arの混合比と、燃焼によりキャプセル中に燃焼試験。	• 「もんじゅ」燃焼材料(SUS904等)試験。	第 16 図
燃焼材料	UMP	• 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼タンク、燃焼セルに収納する。 • 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。 • 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	• オンラインで燃焼試験を測定できる。 • 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	• 「もんじゅ」燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	第 19 図	
燃焼材料	JOOCL	• 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼タンク、燃焼セルに収納する。 • 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	• オンラインで燃焼試験を測定できる。 • 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	• 燃焼試験時、燃料は、燃料内蔵、燃焼セルに収納する。	第 20 図	

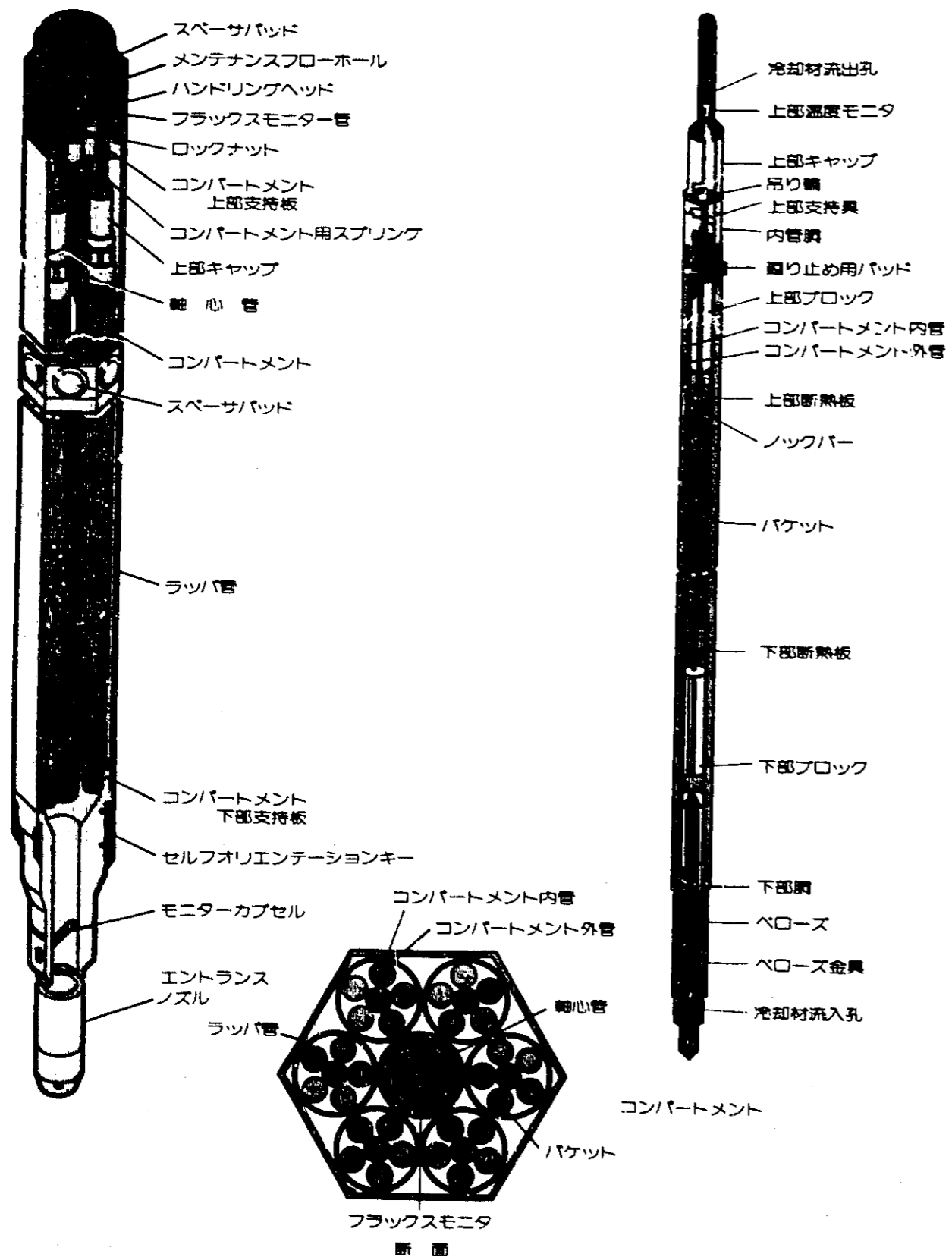




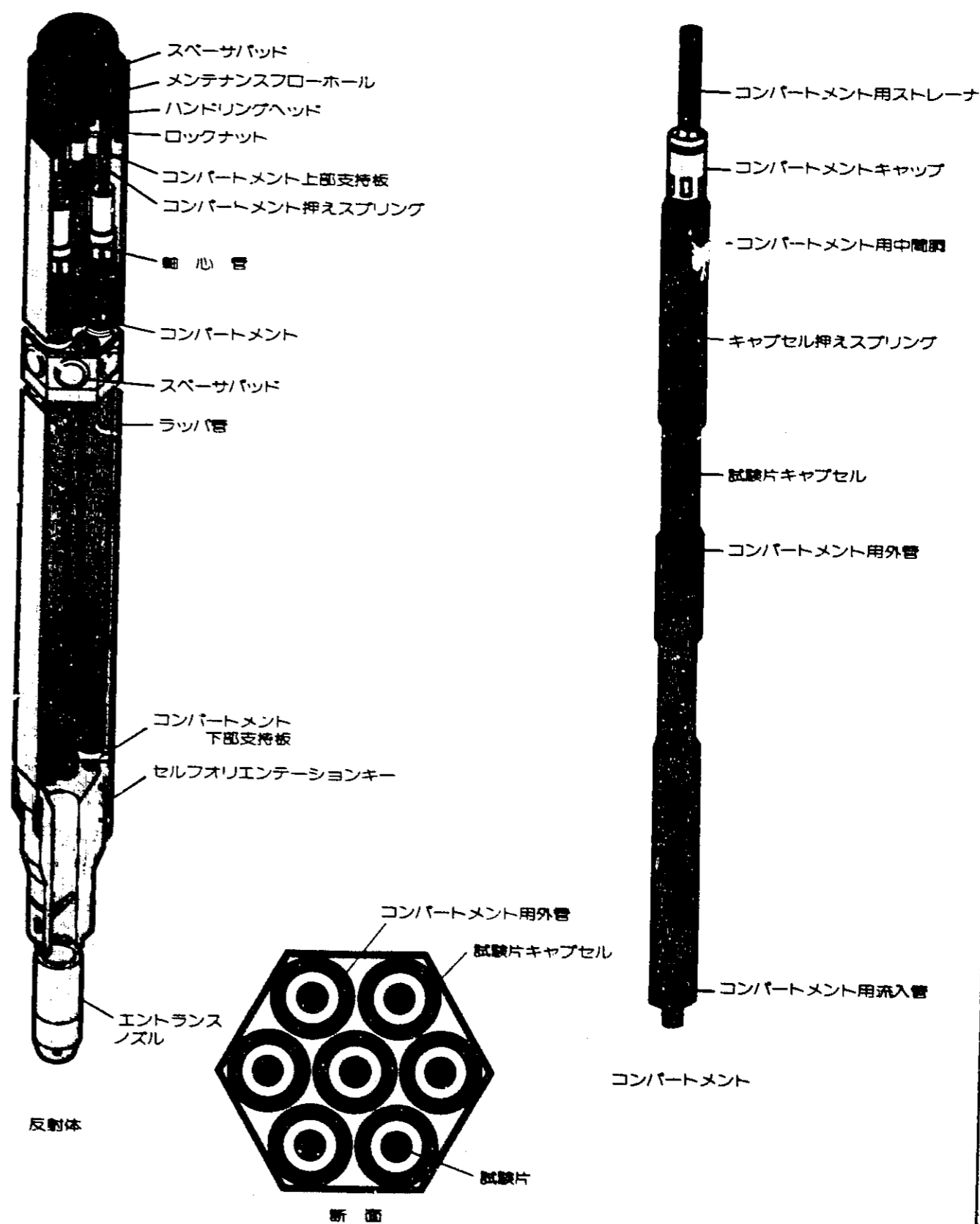
第12図 B型特殊燃料集合体



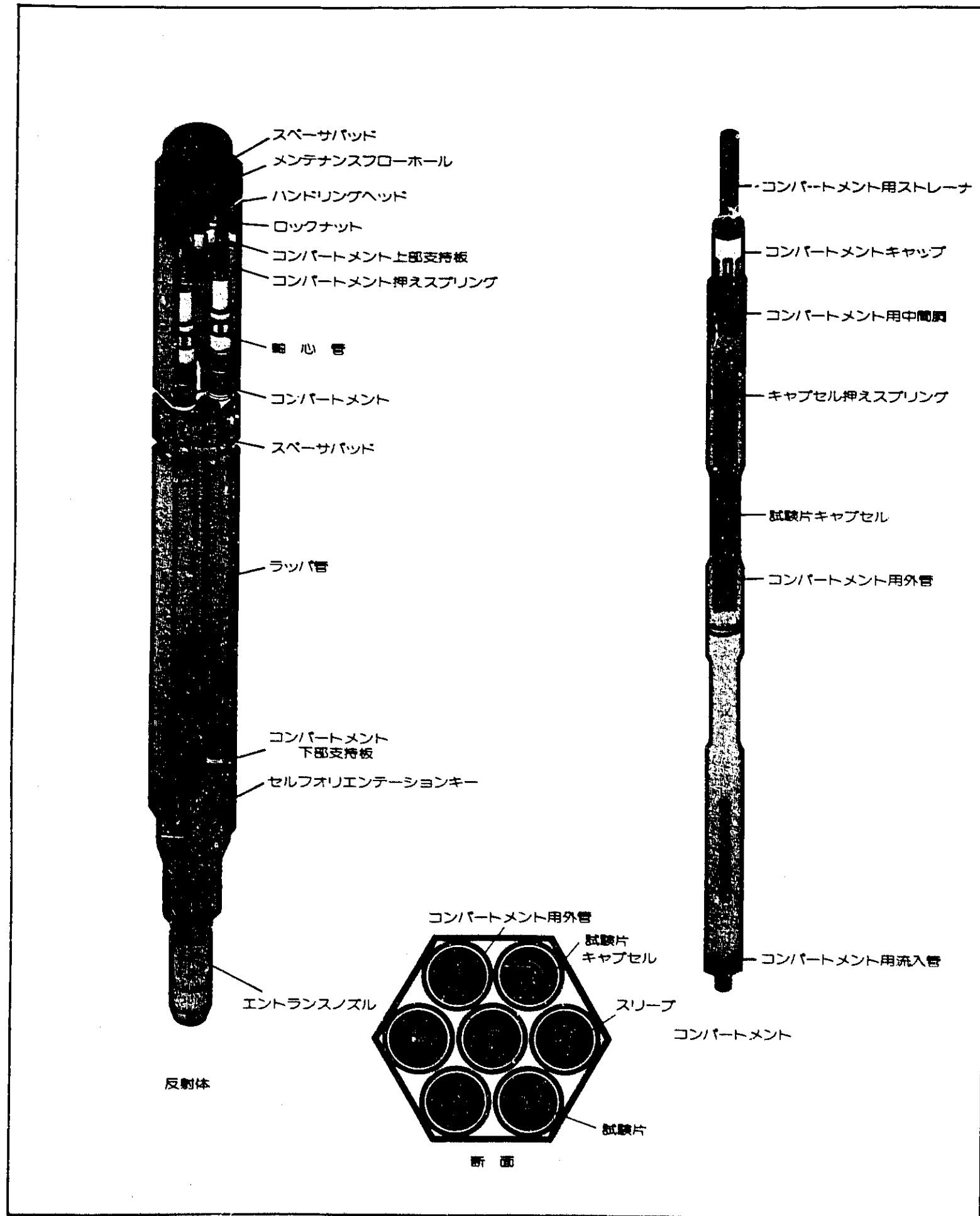
第13図 C型特殊燃料集合体



第14図 燃料材料照射用反射体 (CMIR)



第15図 制御棒材料照射用反射体 (AMIR)



第16図 構造材料照射用反射体 (SMIR)

## 計測線付集合体

計測線付集合体は、オンラインで燃料材料等の照射中の挙動を調べるためのものです。このため計測線付集合体にはいろいろな計測器が組み込まれています。これらの計測器はいずれも原子炉の炉心の中に照射試料と近接して置かれます。従って、高温で多量の高速中性子にさらされますし、しかも燃料ピンの束の中に組み込むために非常に細くする必要があります。よい照射データを得るためには、これらの計測器の開発から必要で、精力的に進められています。

計測器からの信号は、照射中、すなわち原子炉の運転中も時々刻々と記録されます。信号は原子炉の上部構造の中を原子炉外に引き出されたケーブルによって送られます。ですから、計測線付集合体は原子炉の上部から炉心まで貫通する装置となります。

一方、照射後の試料部は通常の燃料取扱経路を経て照射後試験施設に送ります。そのためには、試験終了後にケーブルを切断します。もちろん切断部分は原子炉の炉心のすぐ上ですから遠隔操作でナトリウム中の見えない部分の切断を行うこととなります。

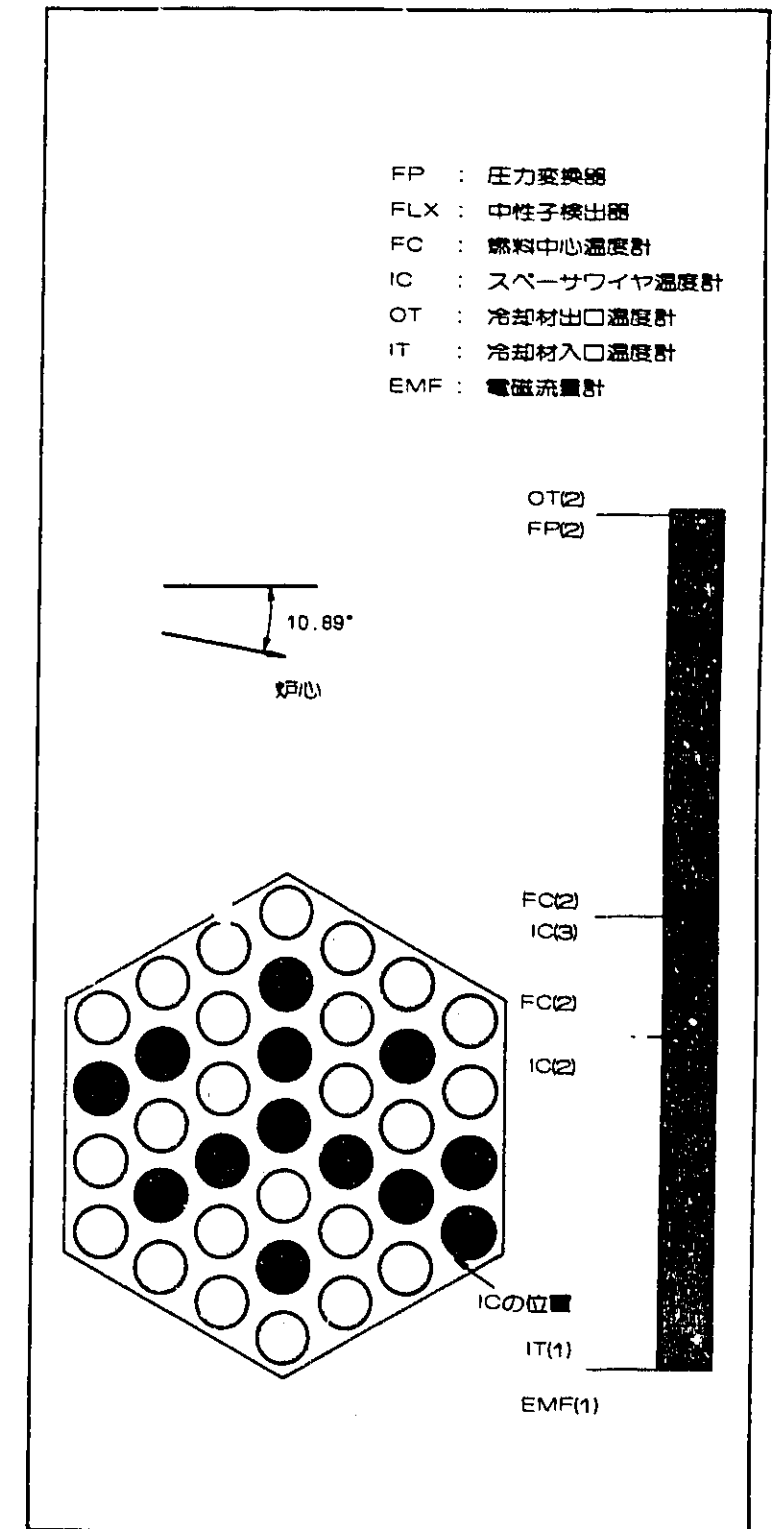
この他、原子炉の炉心燃料の交換時には、炉心から上部に引き上げてやり、燃料取扱系統設備の運転ができるようにしてやる必要があります。

## 炉上部照射プラグリグ

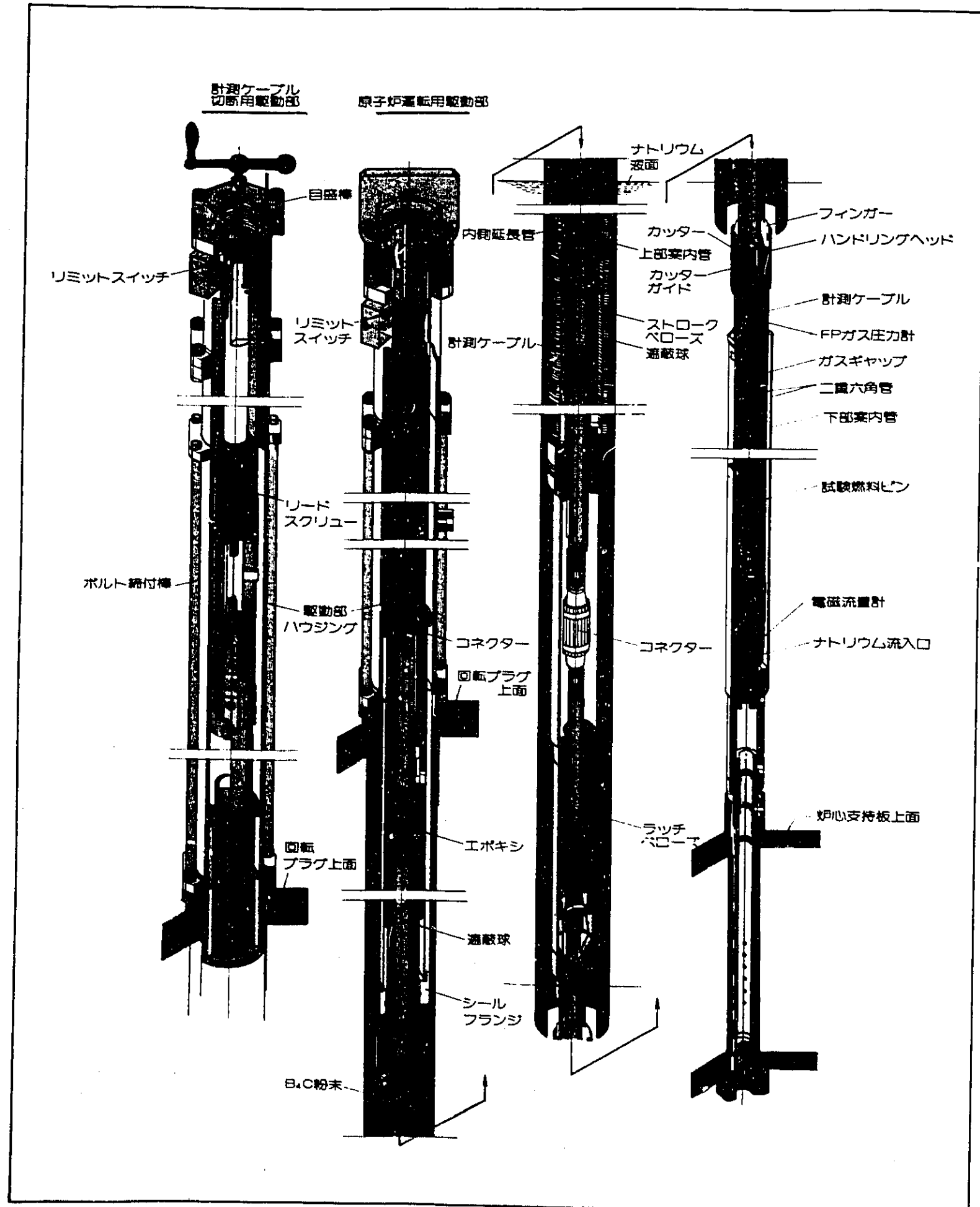
炉上部照射プラグリグは、原子炉容器等の構造材料の照射中の挙動を調べるのと同時に、流速計・温度計等のオンラインの計測器を組み込み、炉心上部の状況を調べるためのもので、「常備」の炉心上部機構に装荷されます。

オンラインの計測器からの信号は、原子炉の上部構造の中を原子炉外に引き出されたケーブルにより、原子炉の運転中も時々刻々記録されます。この他に、炉上部照射プラグリグは、試験片の照射温度や中性子照射量を測定するために、多数のオフラインモニタを配置しています。

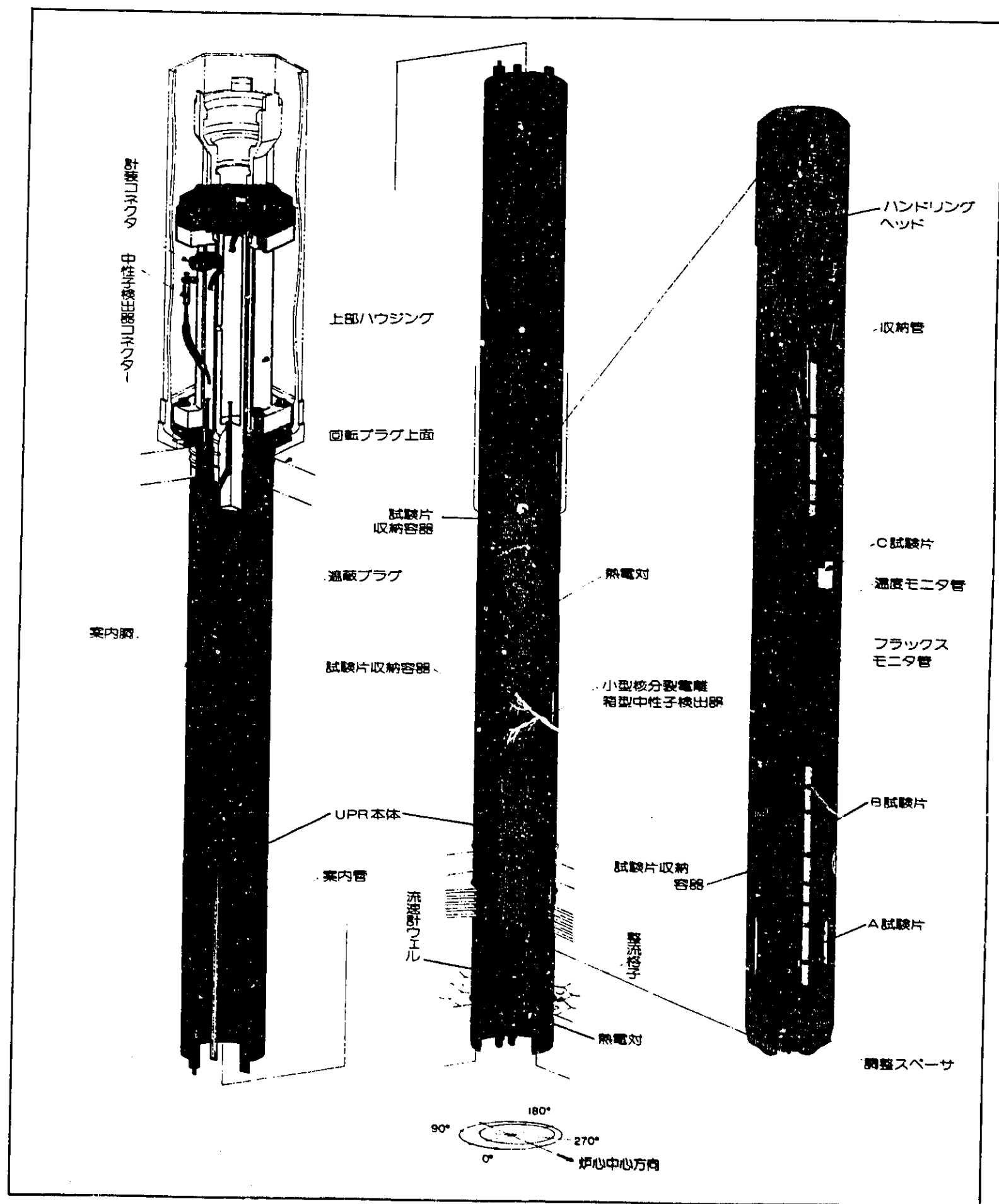
また、試験片とその収納容器は、照射目的に応じて、本体とは別個に取り出すことができ、照射後試験施設に送られます。



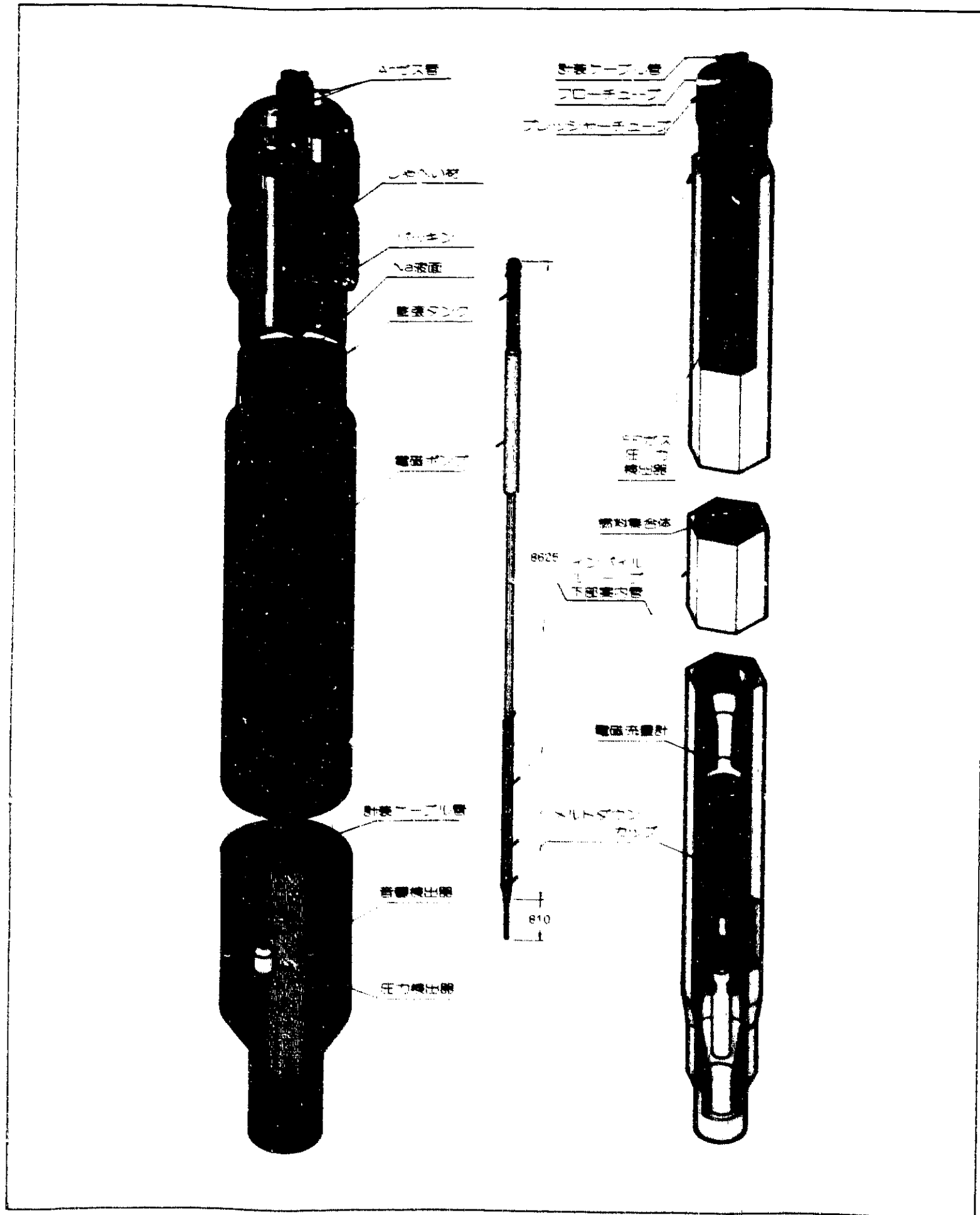
第17図 検出器の径方向及び軸方向の配置図



第18図 計測線付燃料集合体 (INTA)



第19図 「常備」炉上部照射プラグリグ (UPR)



第20図 常備インバイルループ (JOGIL)

### その他の照射装置

「常備」では、前に挙げた照射装置のほかに、照射目的に応じてどのような照射装置の設置可能性を検討しています。

すなわち、

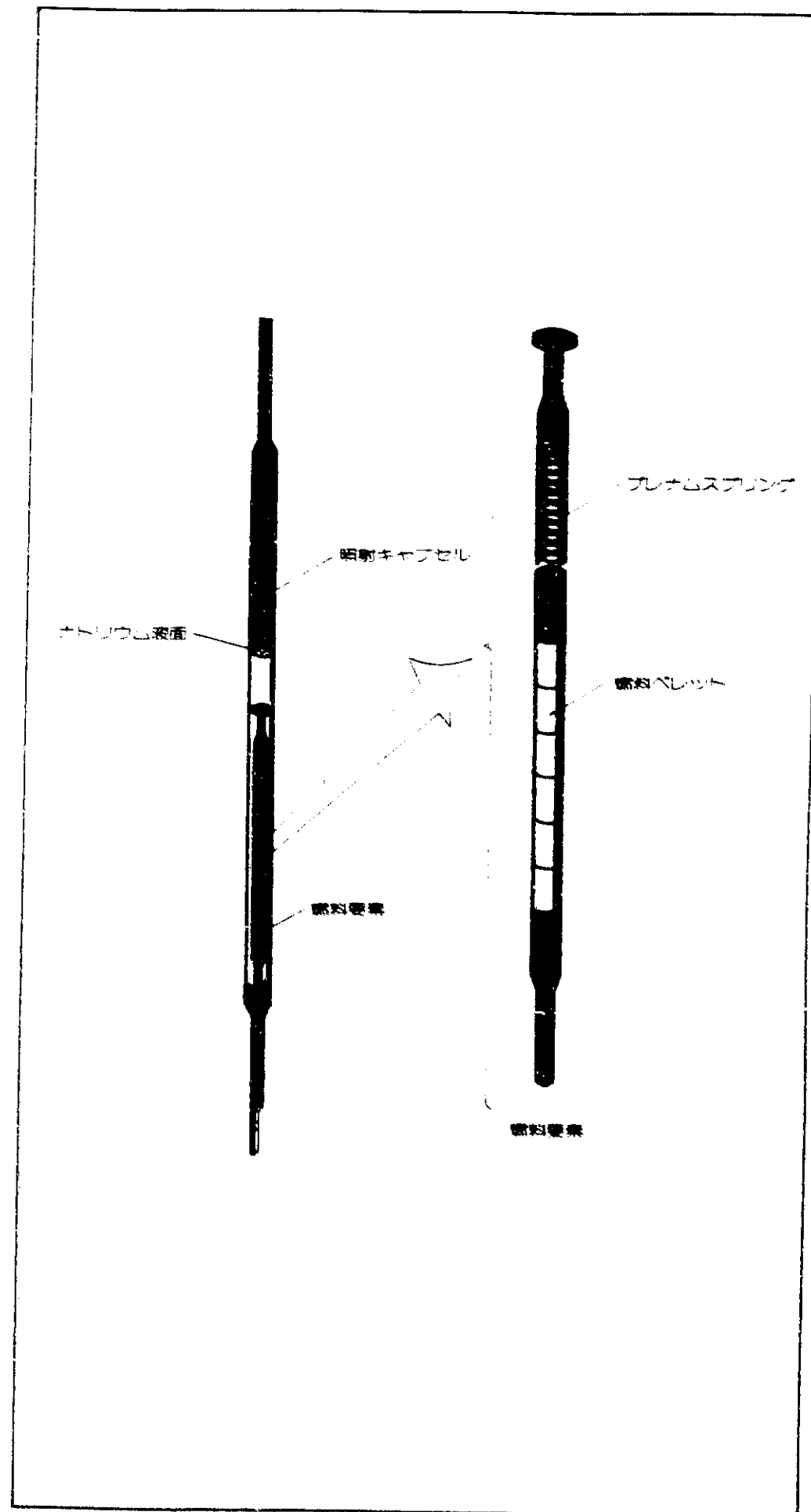
- ① Naインバイルループ：  
照射した燃料の挙動などを調査する。
- ② 二重キャプセル：  
高温下や破壊の可能性のある条件下での燃料の挙動を調査する。
- ③ インバイルフリープ試験装置：  
中性子照射とフリープの調査効果を確認する。

などです。

Naインバイルループは、「常備」の1次系と隔離された照射装置です。これも計測線付集合体と同様に、原子炉の上部から炉心まで貫通するもので、試料部の冷却系や計測ケーブルが原子炉の外部へ出てきます。第20図に概念図を示します。

二重キャプセルの概念図を第21図に示します。このキャプセルを前に上げた照射装置に組み込んで照射を行います。

インバイルフリープ試験装置は、前に上げた計測線付集合体を使い照射中の材料試験片の径、応力等を測定できる様に改造したものです。



第21図 二重キャプセル

# 6 照射装置組立検査施設

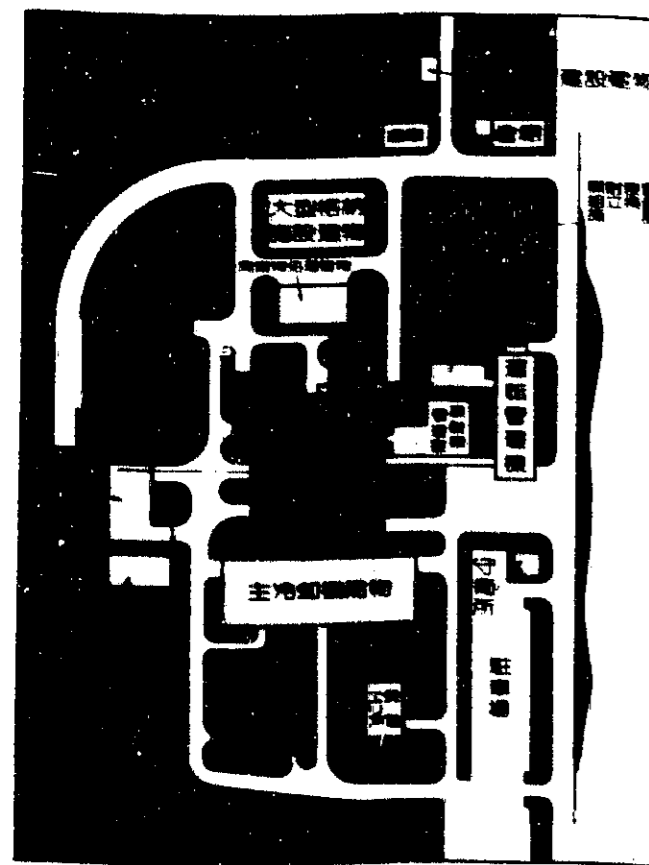
(IRAF)

照射装置はすでに述べた様々の機能や構造をもっています。また今後も種類が増えていくことが予定されています。それらの照射装置の組立と照射前の検査は、照射試験を円滑に進めるためにも、また照射試験の結果を評価するためにも極めて重要です。しかも照射装置は多彩です。さまざまな要求に答えていくために、「常陽」のすぐ近くに照射装置組立検査施設 (IRAF; Irradiation Rig Assembling Facility) が設置されました。

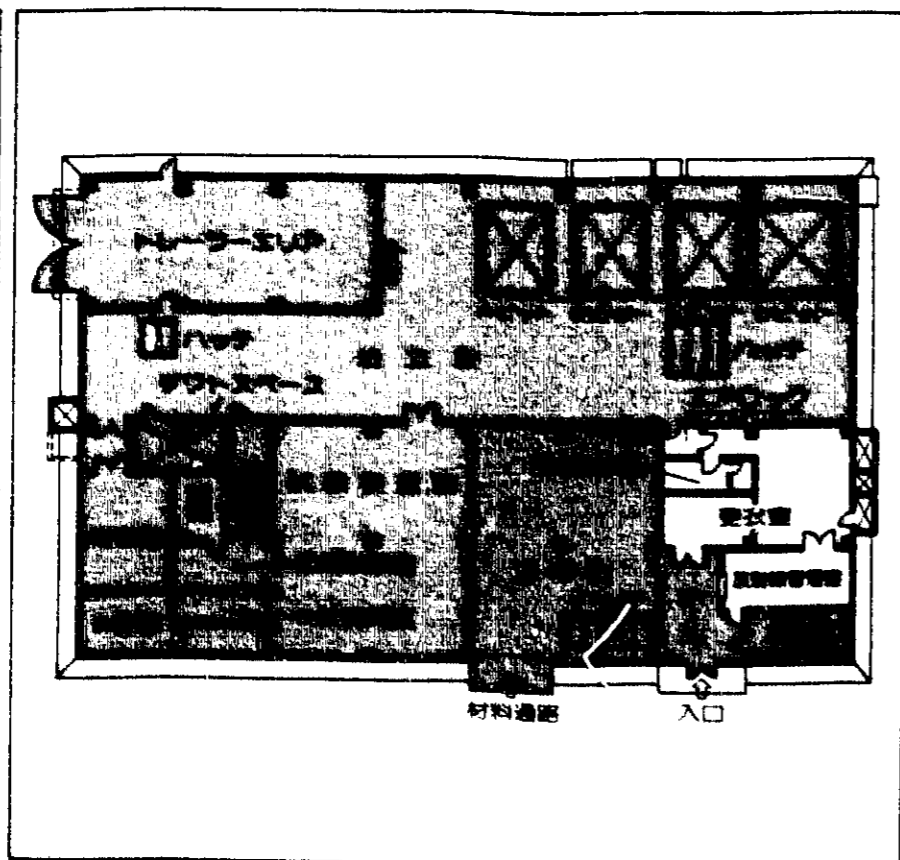
この組立検査施設では、燃料加工施設でピンにまで組立てられた照射燃料試料、材料試料、計測器や装置構造部品を最終的に組み立て、各種の試験検査を行います。また、特に計測線付集合体や現在計画中のイン

パイループでは、計測器の接続、原子炉1次パワングリ形成部の組立、ループ圧力容器部組立、長大な全体装置の組立と各種機能の確認試験などの作業が行われます。またNaインパイループではNaの充填や純化などの作業を行う予定です。最後に、これら計測線付集合体やNaインパイループはここで原子炉へ装荷するためのキャスクに入れられます。

この施設はこれらの条件を満たすため、各種部品の受入と検査、工作・組立、機械加工や溶接後の検査および後処理、全体組立と試験、Naの充填・純化などが行えるように、各種の部屋、ピットなどが用意されています。



第22図 照射装置組立検査施設設置位置説明図



第23図 照射装置組立検査施設：1階平面図

# 7 照射後試験施設

照射された試料は、照射後試験を行うために「常陽」の周囲に建設された各種の施設へ送られます。これらの各施設を次に概観してみましょう。

照射後試料施設としては、照射燃料集合体試験室 (FMF, Fuel Monitoring Facility) 照射燃料試験室 (AGF, Alpha Gamma Facility) および照射材料試験室 (MMF, Materials Monitoring Facility) の3つがあります。

FMFは、燃料集合体の非破壊試験と解体、燃料要素の非破壊試験と切断および燃料要素切断試料の金相試験などを行うとともに、AGFやMMFに送る試料の準備と調整を行うところです。このFMFは「常陽」のすぐ隣にあり、地下を通して燃料の受け渡しを「常陽」の燃料取扱系統設備とできるようになっています。

特殊燃料集合体や計測線付集合体の試料部は照射後この経路でFMFに送られます。また、B型特殊燃料集合体や材料照射用反射体はFMFで分解・検査後再組立して「常陽」の炉内に再装荷されることもあります。Naインパイループの解体もここで行えるようにする計画となっています。

AGFは、燃料要素切断試料の金相試験、燃焼度測定、放射化学分析、燃料物性測定などの破壊試験まで行われる施設です。

MMFは、燃料以外の集合体部材の金相試験、機械強度試験および燃料要素部材の機械強度試験などを行う施設です。



第24図 照射後試験施設配置図

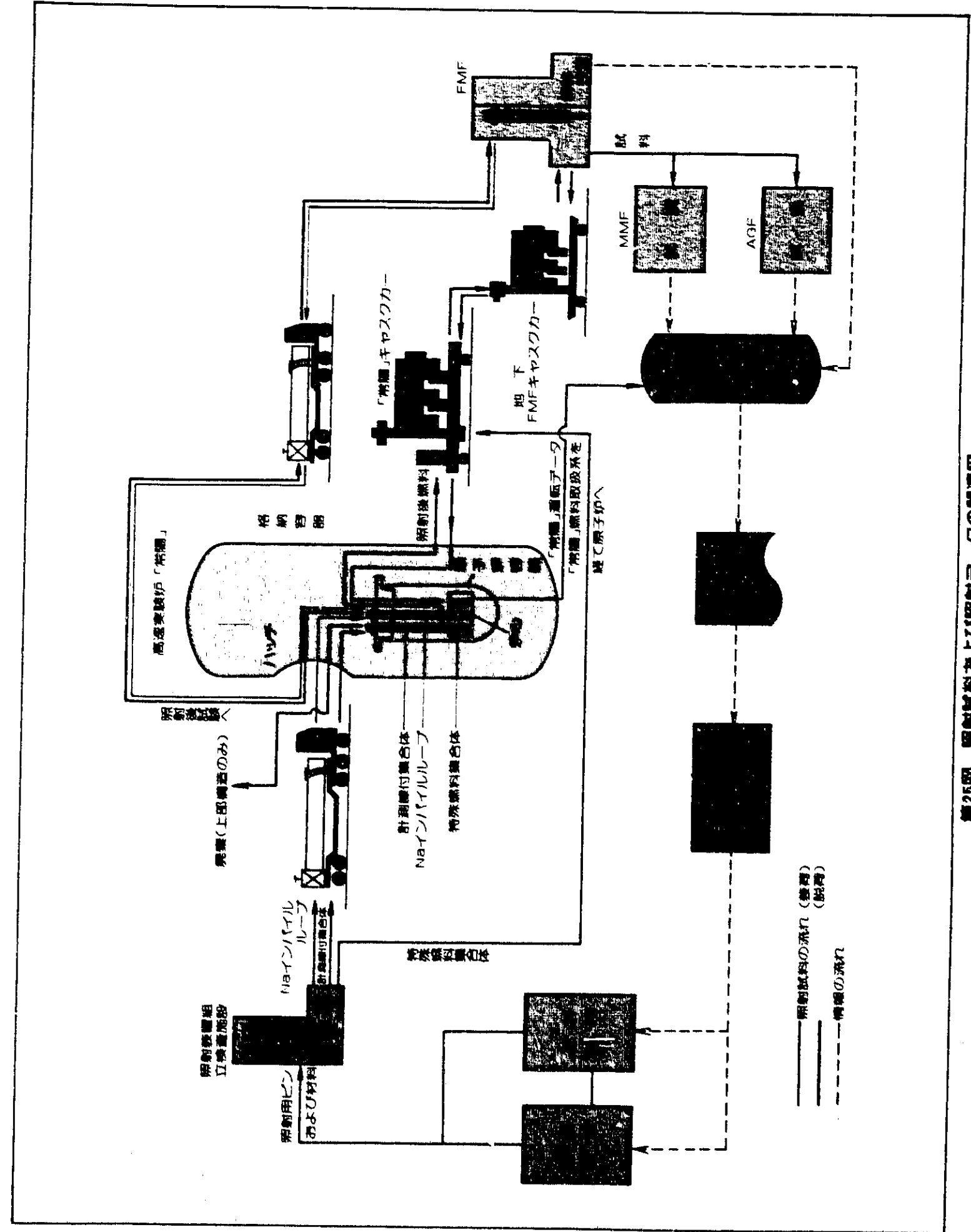
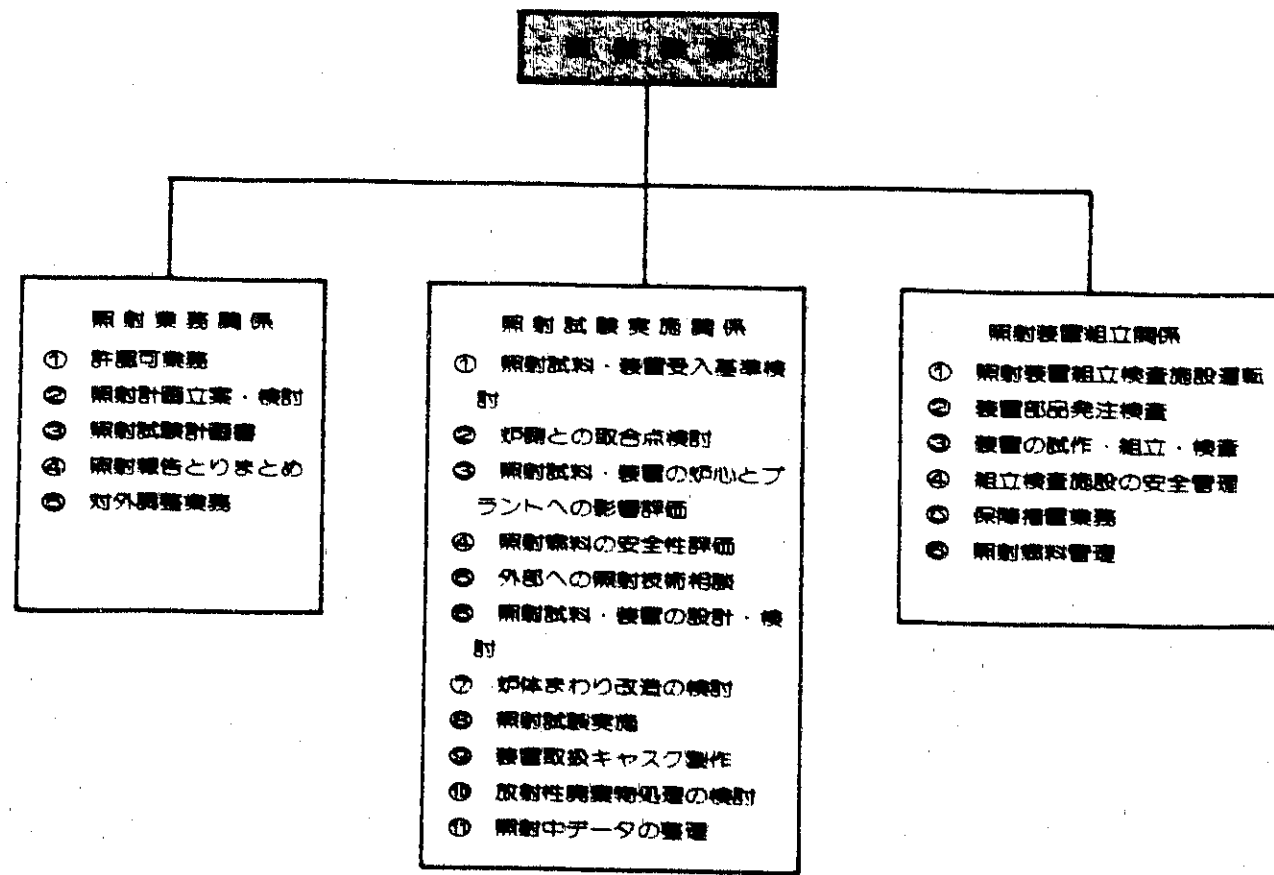
# 8 照射業務

さて、高速実験炉を照射試験に利用するための照射試験全体の関連を図示したものが第25図です。そして、高速実験炉側で行う主な仕事は、

- ・照射試験や装置について、官公庁から認可や許可を得るための仕事
- ・照射試験計画の調整と整理
- ・照射試験や装置の安全性評価の検討と受入基準などの作成
- ・照射試験や装置の組立・取扱い、照射の実施・取出し・運搬
- ・照射装置組立検査施設の運転・維持
- ・照射運転中の原子炉や照射装置のデータの整備・検討・評価

などで、この他にもまだまだ沢山の仕事が照射試験を円滑に行うためにあります。

第4表 照射業務内容



第25図 照射試験および照射原子炉との関連図