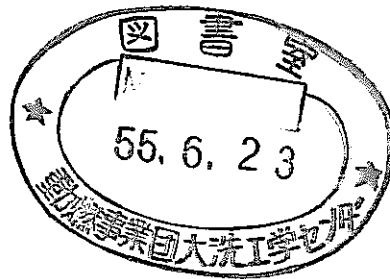


区 分 変 更	
変更後図号	<del>55.6.23</del>
決裁年月日	平成 13 年 7 月 31 日

# 「常陽」炉内中性子ドジメトリー計画書



1980年5月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



## 「常陽」炉内中性子ドジメトリー計画書

鈴木惣十 \* 佐々木 誠 \*  
宮川俊一 \* 関口善之 \*\*  
大竹俊英 \*

### 要 旨

高速実験炉「常陽」の炉内には現在材料サーベランス試験片が装荷され、一定期間照射後取出して試験が行なわれる。又燃料集合体等の炉心構成要素についても定期的に取り出して照射後試験が行なわれる。将来、照射用炉心に移行した時には、各種の燃料材料照射試験が計画されている。これらの試験の重要なパラメータの一つとして中性子照射量があり、この値を精度良く評価することが照射試験データの精度を決定する。

高速実験炉部では、照射試験結果の評価の基礎データを提供すると共に、「常陽」の炉心特性をより正確に把握するために、高温・高出力状態での炉内中性子スペクトルおよび中性子照射量を測定・解析する手段を開発するよう計画している。

この計画は、当然の事ながら、PNC内の各部門からの協力はもとより、外部諸機関との協力関係を有して進める必要がある。

本資料は、これらの開発計画の概要を述べたものである。

---

\* 高速実験炉部技術課

\*\* 日本原子力事業株式会社

## 1. 炉内中性子ドジメトリ<sup>(注)</sup>の必要性

高速実験炉「常陽」では、現在サーベランス試験片がプラント内の主要な機器を対象として装荷されており、定期的な取出し検査が、計画され実施されている。特に中性子場の中で使用される材料のサーベランスのため、炉容器内にも多数の材料試験片が装荷されている。これらの試験片は取出された後引張試験等の材料試験が行なわれ、中性子照射量やNa中での浸漬時間などとの関係で材料の性質の変化、特に劣化の割合が評価され、設計時に予測された劣化の割合と比較される。

材料の中性子照射による劣化の評価では中性子照射量がどの位の精度で予測出来るかにより、データの精度が決る。

又照射用炉心(Mk-II炉心)に移行し、燃料・材料照射試験が実施され、照射後試験データを評価する際にも、中性子照射量を十分な精度で推定することが必要である。

現在「常陽」では照射量の推定には計算に頼っているが、精度は約20%で燃料・材料照射試験データの評価を行う上で要求される精度には到っていない。又部分的に、中性子総照射量の測定が行なわれているが、中性子スペクトルを考慮した照射量の測定評価については未着手の状態である。東大の“弥生”炉ではスペクトル測定が行なわれているが高中性子束、高出力状態の高速炉炉心内のスペクトル測定は行なわれていない。米国のHEDLにおいてはEBR-IIを使ったスペクトル測定が実施されており、我国でもこの経験をと入れ、高中性子束高出力下での精度の良い中性子スペクトル測定、中性子照射量測定の技術を開発することがどうしても必要である。

本計画書の中ではドジメトリ技術を開発するために必要な試験、装置およびソフトの開発について述べる。この内容は「常陽」及EBR-IIを使うドジメータの照射計画、ドジメータのガンマ線測定装置開発、測定データからの炉内中性子スペクトルの評価手法の開発及これらの開発業務に関する日米協力を含む。

(注) ドジメトリとはアルファ線、ベータ線、ガンマ線又は中性子線などの放射線によって照射を受けた個体の総照射量を測定することで、本来は放射線係健物理の分野の被曝量評価において線量測定のことをドジメトリと呼んで来た。

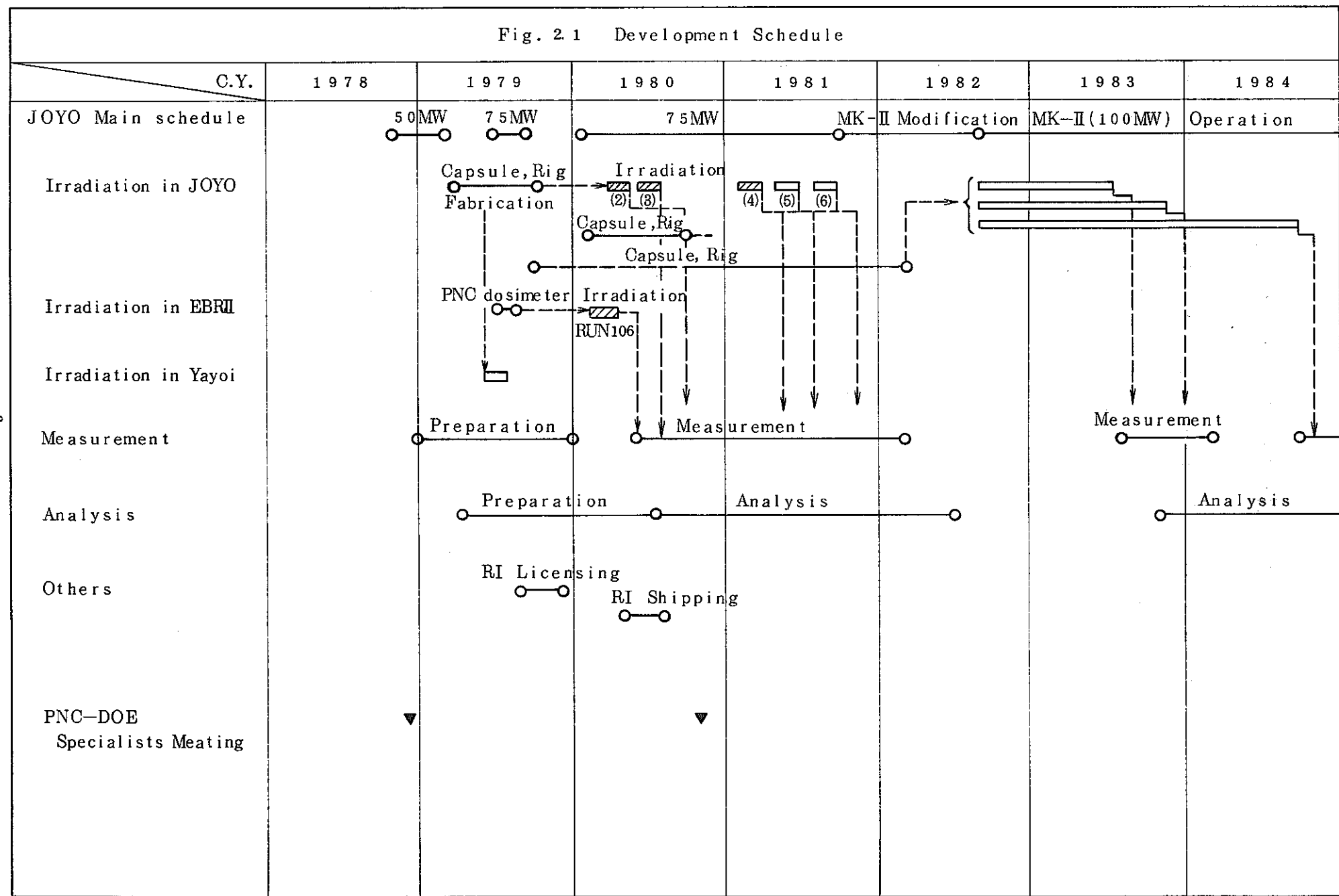
この計画書の中ではドジメトリと云う言葉を、原子炉炉心の内部及其周辺での燃料・材料に対する中性子線の総照射量の測定と云う意味に使う。

## 2. 開発試験項目及タイムスケジュール

本計画の中で実施される項目は“弥生”炉，「常陽」Mk-I炉心，米国EBR-II炉心及「常陽」Mk-II炉心を使ったドジメータの照射と，ドジメータの放射化量を測定するためのドジメトリ測定システムの開発，測定された放射化量から炉内の中性子量を計算する解析手法の開発および，これらの放射性物質を「常陽」で取扱うために必要な許認可取得業務等がある。

これらの開発タイムスケジュールを第2.1図に示す。大要としては昭和54年は諸準備，及“弥生炉”における予備実験，55年はEBR-IIとの相互照射の実施，56年は核分裂ドジメータ，SSTRの使用，そして57年にはB型特殊燃料集合体にドジメータセットを装荷照射する予定である。以下に各項目の概要を述べる。

Fig. 2.1 Development Schedule



### 3. ドジメータ照射試験概要

#### 1) “弥生”炉でのドジメトリー予備実験計画

“常陽”Mk-I炉心の材料サーベイランス位置〔9A1〕でのドジメトリーに先立ち、東京大学工学部附属施設“弥生”炉で“常陽”ドジメトリーの予備実験が計画されている。予備実験としては、“弥生”炉のPb減速体系により“常陽”炉心の〔9A1〕の中性子スペクトルを模擬し、以下の項目が予定されている。

- a) “常陽”ドジメトリーで用いられるドジメータキャプセルによる中速子束ディプレッション効果測定
- b) “常陽”ドジメトリー測定系のテストランおよび機器の較正
- c) “弥生”炉Pb体系内の測定スペクトルとANISNコードによる計算スペクトルの比較

これらのうち(c)にはJ1法中性子スペクトルアンフォールディングコードの検証が含まれる。

#### 2) Mk-I 75MWでの開発試験

前節第2.1図のタイムスケジュールに示すように、MK-I 75MW定常運転の第2～6サイクルの各照射サイクルを利用して各種ドジメータセットの照射及び測定、解析の開発試験を行う。また、このMK-Iでの試験は次の二期に分けて実施される。

##### a) 第2～4サイクル照射

昭和55年に実施される第2～4サイクル照射では、第3.1表に示す放射化ドジメータを用い、また米国DOEとの共同研究(後述)の一環としてDOE(HEDL)より供与されたスタンダードドジメータセットを「常陽」の同一照射位置に装荷する。また、第3.2表のPNCセットはDOE側に送られEBR-II炉心での相互照射に供される。

これらの照射によって放射化した各ドジメータは後述の測定系及び解析系によって放射化量の測定とスペクトル解析が行われるが、これら試験を通して、ドジメータの設計、測定方法、解析法等の検証或いは改良検討が行われる。

「常陽」での照射位置は第3.1図に示す最外周の反射体位置で、ここに装荷される反射体サーベイランスリグにドジメータキャプセルを装填する。リグとキャプセルを第3.2図及び第3.3図に示す。図に示す通り、リグには炉心位置に1箇所、炉心上部に

Table 3.1 Dosimeters for the 2nd Cycle Operation

	Material	Weight	Form	Activity*	Remarks
DOE  SET	Sc	2.0mg	1.27mmD 3.1mmL	4.0E-3Ci	V Capsule
	Co - V (1%)	2.6mg	0.38mmD 3.2mmL	4.2E-5Ci	
	Fe	4.6mg	0.5 mmD 3.2mmL	2.3E-5Ci	
	Ni	3.9mg	0.5 mmD 3.2mmL	3.1E-5Ci	
	Cu	5.2mg	0.5 mmD 3.2mmL	5.0E-9Ci	V Capsule
	Ti	2.7mg	0.5 mmD 3.2mmL	1.9E-7Ci	
	Np <sup>237</sup> (NpO <sub>2</sub> )	7.0mg (5 μCi)	0.9 mmD 8.7mmL	4.6E-3Ci	
	Ta - V (0.1%)	1.2mg	0.5 mmD 1.0mmL	5.9E-4Ci	
Nb	8.3mg	(1.3 mmD 0.7mmL) (0.5 mmD 4.9mmL)	5.0E-5Ci	Measure and cut at PNC	
PNC  SET	Sc	1.0mg	1.4 mmD 8 mmL (1.0 mmD 0.42mmL)	2.0E-3Ci	Cu Capsule
	Co - Al (0.6%)	16.7mg	1.0 mmD 7.9mmL	1.6E-4Ci	
	Fe	10 mg	0.76mmD 2.8mmL	5.0E-5Ci	
	Ni	10 mg	0.76mmD 2.5mmL	8.0E-5Ci	
	Cu	33mg×3	0.76mmD 8.0mmL	1.0E-7Ci	
	Ti	20 mg	1.3 mmD 3.3mmL	1.4E-6Ci	
	Rh	17mg×3	0.5 mmD 7.0mmL	8.0E-8Ci	
	Nb	10 mg	1.0 mmD 1.5mmL	6.0E-5Ci	
Ta - V	(1.2mg)	(0.5 mmD 1.0mmL)	(5.9E-4Ci)		

\* The calculation was made with the following condition:

Reactor power ; 75MW

Position ; Reflector zone

Irradiation ; 45 days

Cooling time ; 15 days



Table 3.2 PNC Dosimeter Sets of EBR-II Irradiation Test

Nuclide	#1 SET weight (mg)	#2 SET weight (mg)	Description
Co-Al	1 2 7 0	1 2 9 4	Co: 0.61 w/o
Fe	3 6 3	5 6 4	
Ni	3 2 3	3 2 1	
Cu	2 1 5 2	2 2 1 5	
Ti	1 7 7 0	1 7 6 6	
Rh	3 6 7	3 3 7	
Nb	2 0 9	1 6 9	
Ta-V	2 2 7	2 6 1	Ta: 0.1 w/o

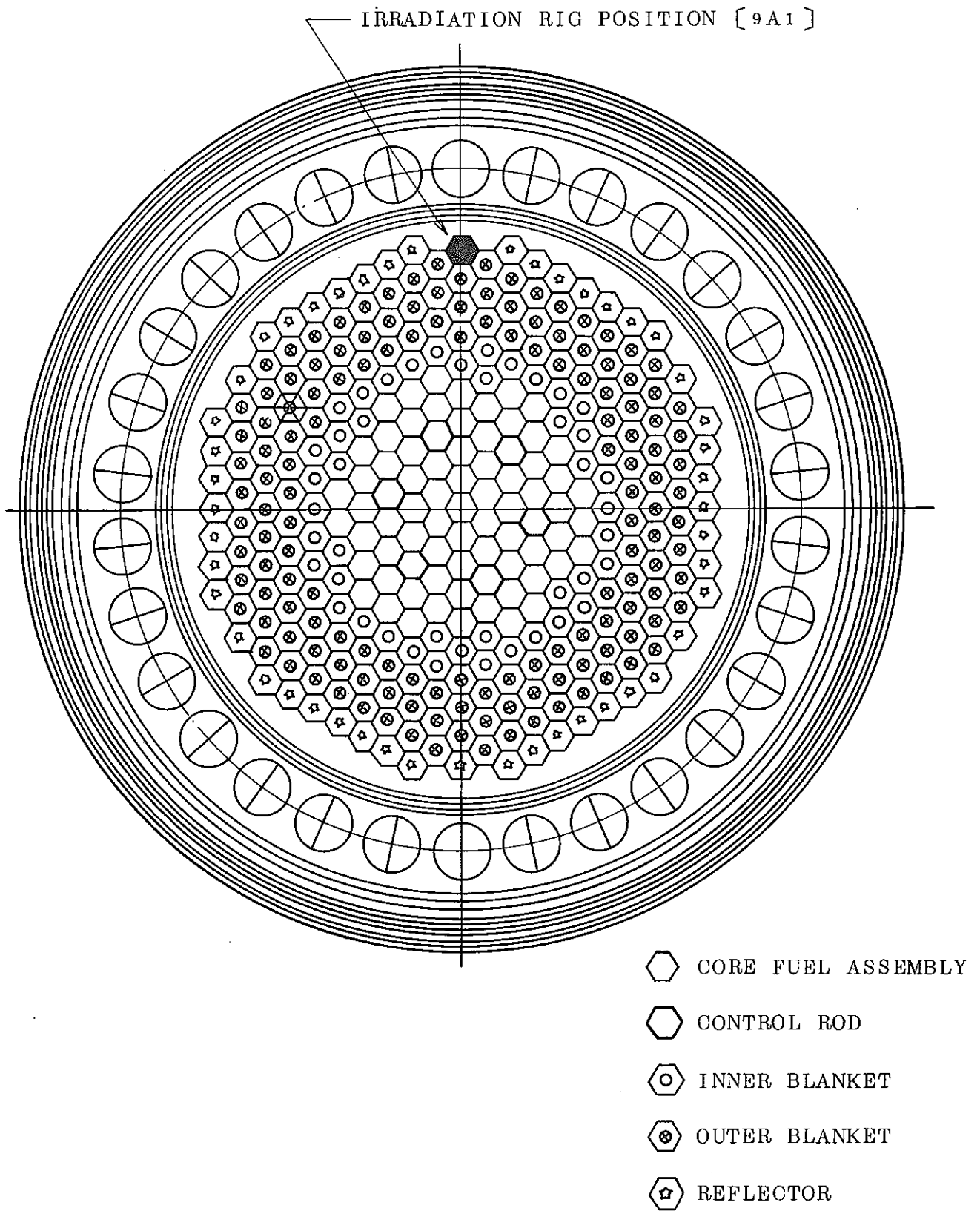


FIG. 3.1 CORE MATRIX

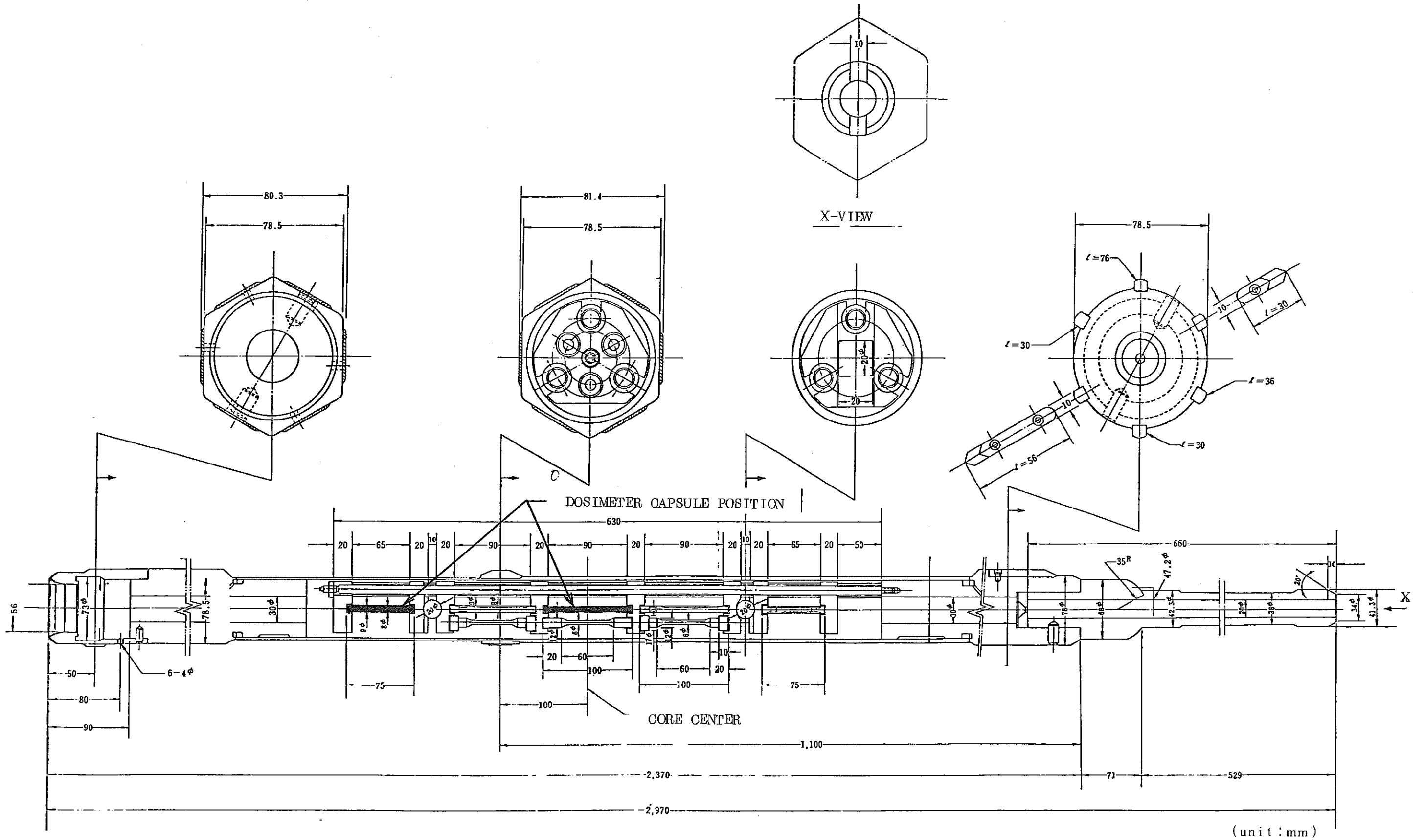
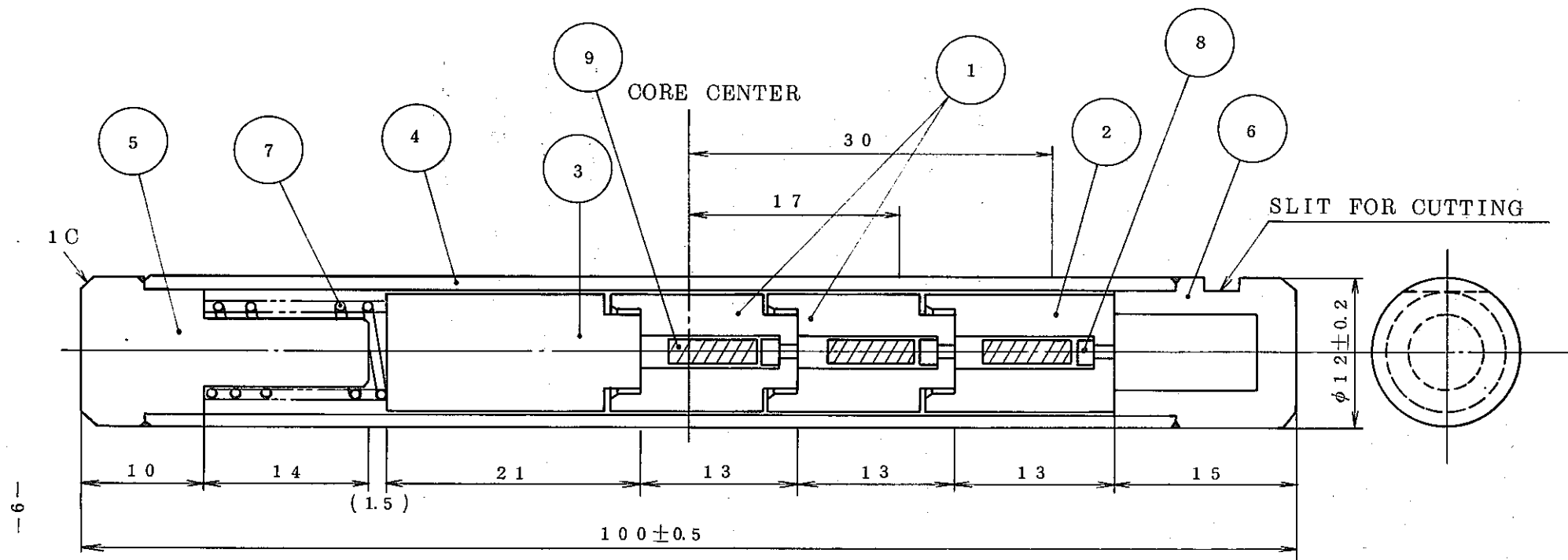


FIG. 3.2 SURVEILLANCE TEST RIG



-6-

No	DESCRIPTION	MATERIAL
1	UPPER DOSIMETER HOLDER	316 SS
2	LOWER DOSIMETER HOLDER	316 SS
3	SPACER	316 SS
4	CLAD	316 SS
5	UPPER END PLUG	316 SS
6	LOWER END PLUG	316 SS
7	SPRING	316 SS
8	WASHER	316 SS
9	DOSIMETER	316 SS

FIG. 3.3 DOSIMETER CAPSULE

1 箇の合計 2 箇のドジメータカプセルが組込まれる。また、照射は 1 リグ当り 1 サイクル ( 4 5 日 ) で、最初の第 2 サイクルでの照射用リグに前述の D O E ドジメータ 1 セットと P N C ドジメータ 2 セットが装填される。なお、E B R - II での P N C セットの照射は R U N - 1 0 6 の炉心第 2 列に装荷される予定となっている。

b) 第 5 ~ 6 サイクル照射

昭和 5 6 年に実施される第 5 , 6 サイクル照射では、前節第 2 ~ 4 サイクル照射での放射化ドジメータに加えて第 3. 3 表に示すように核分裂ドジメータを含め、さらに S S T R ( Solid State Track Recorder ) をも使用する計画である。

照射位置とリグは第 2 ~ 4 サイクル照射と同様であるがドジメータカプセルは第 3. 4 図に示すように取扱い上の便を考慮して二重のカプセルとする。

3) M K - II での開発試験

M K - II 炉心の定常運転は昭和 5 8 年中ばから開始される。M K - II 炉心では種々の燃料・材料照射用リグが装荷され、それらの照射条件を知ることは重要な問題である。

M K - II 炉心でのドジメトリ-試験で採用されるドジメータ及評価方法は、M K - I での成果を受けて計画設計された仕様、方法となるものと予想されるが、現在では M K - I 第 5 , 6 サイクルで使用するドジメータセットと同一の仕様のもを、第 3. 5 図に示す二重カプセルに装填し、B 型特殊燃料集合体の中心タイロッドに装荷する予定である。B 型特殊燃料集合体を第 3. 6 図に示す。このリグは 3 体が M K - II 当初より装荷され、その炉心位置は第 1 列又は第 2 列の予定である。

M K - II 炉心での照射においてはドジメトリ-の開発試験としてはもとより、燃料・材料照射のための照射条件を明確にする上でも照射リグ装荷位置のフルエンス、スペクトルデータ採取に対してより一層の期待がもたれている。またこの照射リグ下端のエントランスノズル端栓には第 3. 7 図に示すように、ドジメータカプセルを装着し、炉心支持板下の測定を行う予定である。

Table 3.3 Dosimeter Set for No. 5 and No. 6 Cycle

Material	Weight	Form	Remarks
Natural U	10 mg	V-Capsule 1.5 mmD 8 mmL	Enclosed in V-Capsule
U-238	10	"	"
Th-232	10	"	"
Np-237	10	"	"
Sc	1.5	"	"
Fe	10	0.76mmD 2.8mmL	
Ni	10	0.76mmD 2.5mmL	
Cu	33×3	0.76mmD 8.0mmL	
Ti	20	1.3 mmD 3.3mmL	
Rh	17×3	0.5 mmD 7.0mmL	
Nb	10	1.0 mmD 1.5mmL	
Ta-V	1.2	0.5 mmD 1.0mmL	
Co-Al	17	1.0 mmD 7.9mmL	

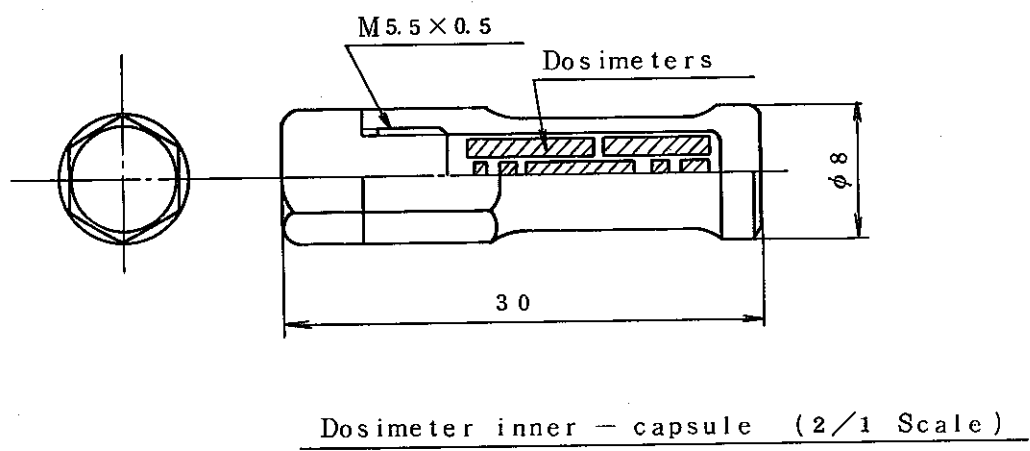
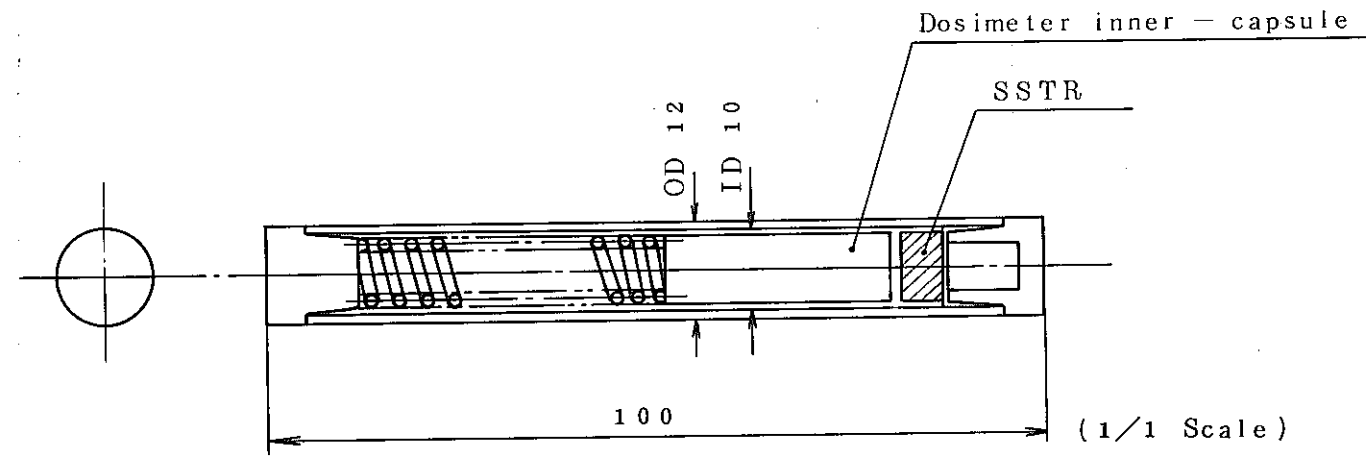


Fig. 3.4 Dosimeter capsule  
(Cycle № 5 and № 6 of MK-I Operation)

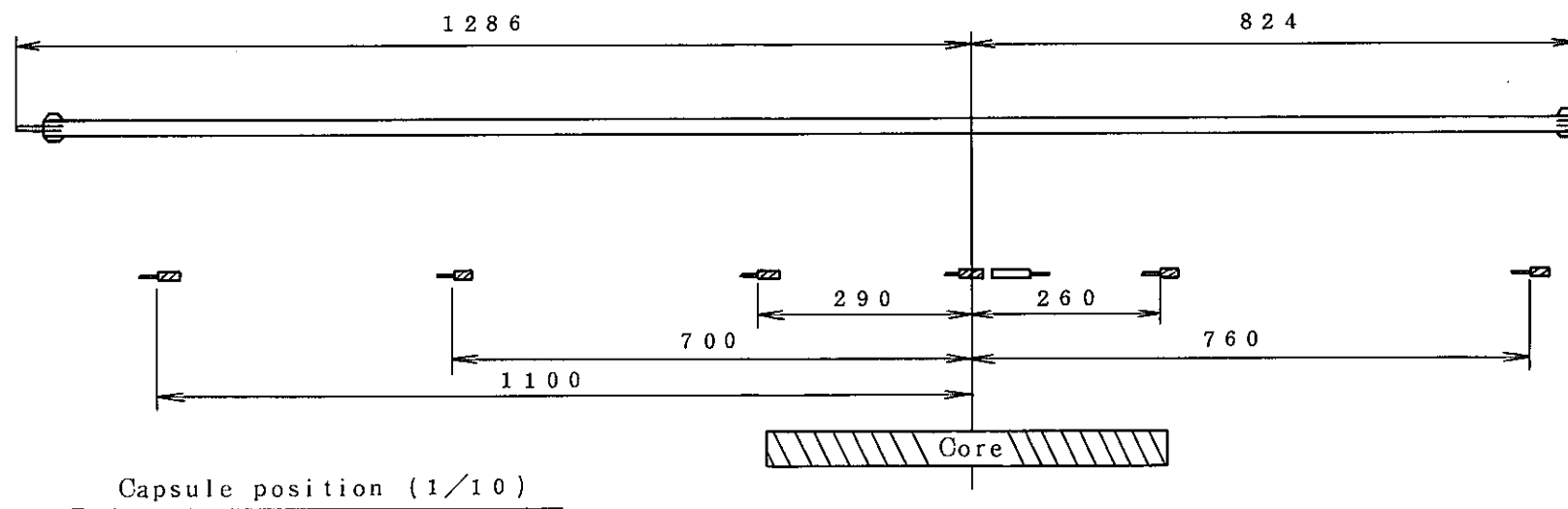
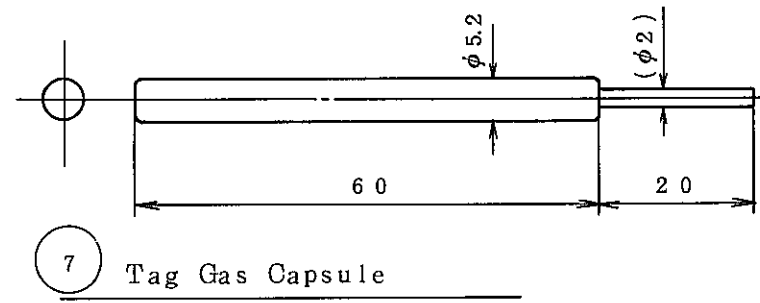
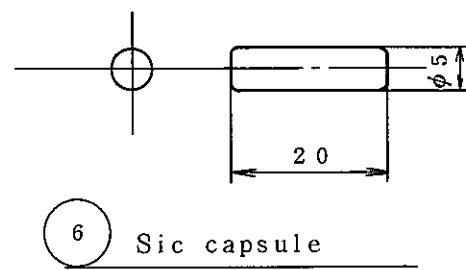
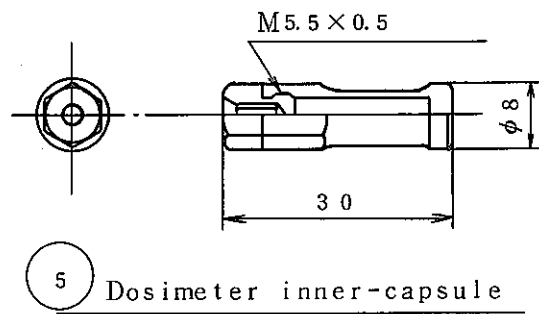
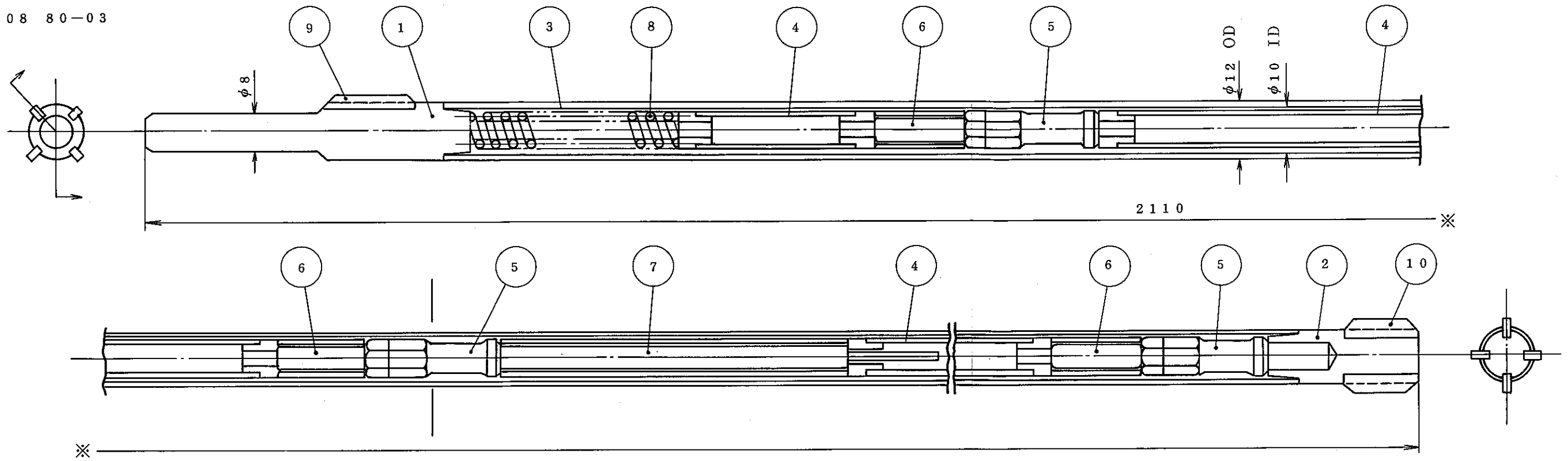
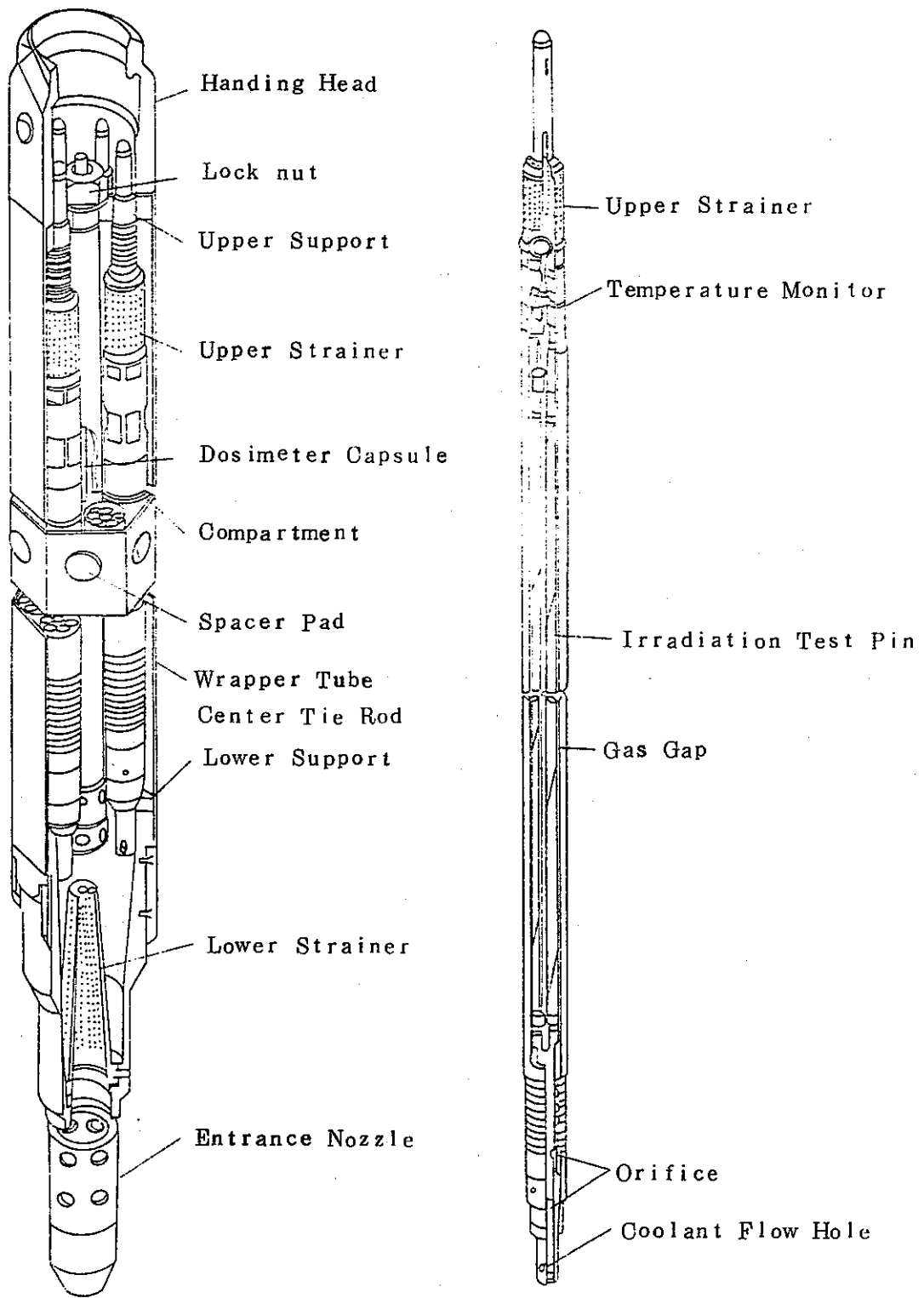


Fig. 3.5 Dosimeter capsule for MK-II core





Fuel Compartment

Fig.3.6 Uninstrumented Irradiation Subassembly B-Type  
(UNIS-B)

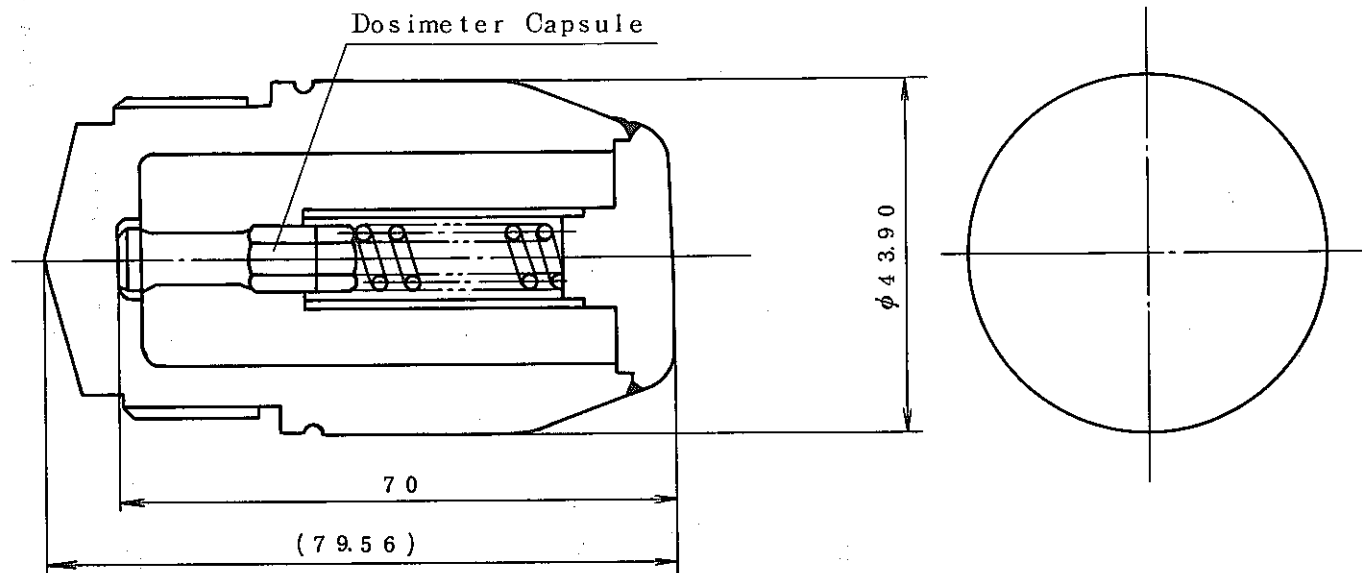


Fig. 3.7 Entrance Nozzle Plug

#### 4. ドジメトリー測定システムの開発

ドジメトリーにおいて直接測定できるのは、各ドジメータ物質の原子炉内における中性子反応率である。高速実験「常陽」におけるドジメトリーでは、中性子反応率を測定するセンサーとして次の3つのものを計画又は検討している。

(1) ガンマ線スペクトロスコピーによる放射化検出器の

放射化量測定 (R・M)

(2) Helium Accumulation Fluence Monitor (HAFM)

(3) Solid State Track Recorder (SSTR)

R・M (Radiometric) 法では、共鳴放射化箔 ( $\text{Co}^{59}$ ,  $\text{Sc}^{45}$ ,  $\text{Ta}^{181}$  etc) 閾放射化箔 ( $\text{Fe}^{54}$ ,  $\text{Ni}^{58}$ ,  $\text{Cu}^{63}$  etc) および核分裂放射化箔 ( $\text{U}-235$ ,  $\text{U}-238$ ,  $\text{Np}-237$ ,  $\text{Th}-232$  etc) をドジメータとして用いる。

これらのドジメータセットを原子炉内の中性子スペクトル測定位置で照射し各ドジメータの放射化量を測定する。放射化量の測定は、各ドジメータの反応生成物が放出する固有ガンマ線をゲルマニウム半導体検出器でスペクトロスコピーを行うことより行なう。これにより得られる放射化量から各ドジメータ物質の単位出力、単位時間、単位重量あたりの絶対反応率を求め SAND-II, J-1 型アンフォールディングコード等の中性子スペクトル解析コードの入力データを得る。本ドジメトリー計画で用いる放射化ドジメータを第 4.1 表に示した。

本ドジメトリー計画において RM 法で使用するゲルマニウム半導体検出器は数 KeV の低エネルギー X 線から数 MeV の  $\gamma$  線まで測定可能な  $\gamma$ -X High-Purity Ge Coaxial Detector System ( $\gamma$ -X Ge SSD System) と低エネルギー X 線のみ測定可能な Hyper pure Ge Low Energy Photon Spectrometer (LEPS System) の 2 系統である。これらの測定系で多重波高分析器に取り込まれたガンマ線スペクトルは卓上型電子計算機により前処理がなされ、大型計算機用磁気テープ (9トラック 1600BPI) に保存される。これらのデータは、簡単なプログラムにより卓上型電子計算機でオンライン処理され光電ピーク探索、エネルギー較正等がなされる。さらに詳細な計算はオフラインで大型計算機によりなされ、ガンマ放出率が求められる。LEPS System のブロックダイアグラムを第 4.3 図に、 $\gamma$ -X Ge SSD System のブロックダイアグラムを第 4.4 図に示した。

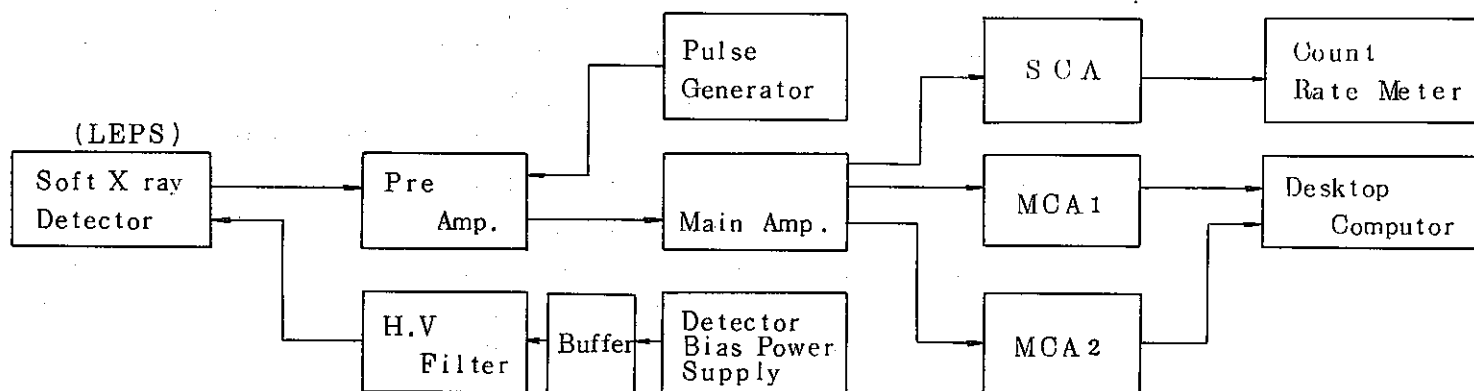
Table 4.1 JOYO Dosimeter Set and Major Reaction

(1) Nonfissile Dosimeter

Material	Major Reaction	Half Life of Products	Estimated Value irradiation for 45day at [9A1] and 15day cooling
Sc	$Sc^{45}(n, \gamma) Sc^{46}$	83.8 d	2.07 Ci/g
Co-A1 (Co 0.6%)	$Co^{59}(n, \gamma) Co^{60}$	5.272 y	9.12 mCi/g
Fe	$Fe^{58}(n, \gamma) Fe^{59}$	44.56 d	4.97 mCi/g
	$Fe^{54}(n, p) Mn^{54}$	312.2 d	0.162 mCi/g
Ni	$Ni^{58}(n, p) Co^{58}$	70.79 d	8.76 mCi/g
Cu	$Cu^{63}(n, \alpha) Co^{60}$	5.272 y	0.789 $\mu$ Ci/g
Ti	$Ti^{46}(n, p) Sc^{46}$	83.8 d	62.8 $\mu$ Ci/g
Rh	$Rh^{103}(n, p) Ru^{103}$	393.6 d	—
Nb	$Nb^{93}(n, n') Nb^{93m}$	13.6 y	45.6 $\mu$ Ci/g
Ta-V (Ta 0.1%)	$Ta^{181}(n, \gamma) Ta^{182}$	115.0 d	0.428 Ci/g

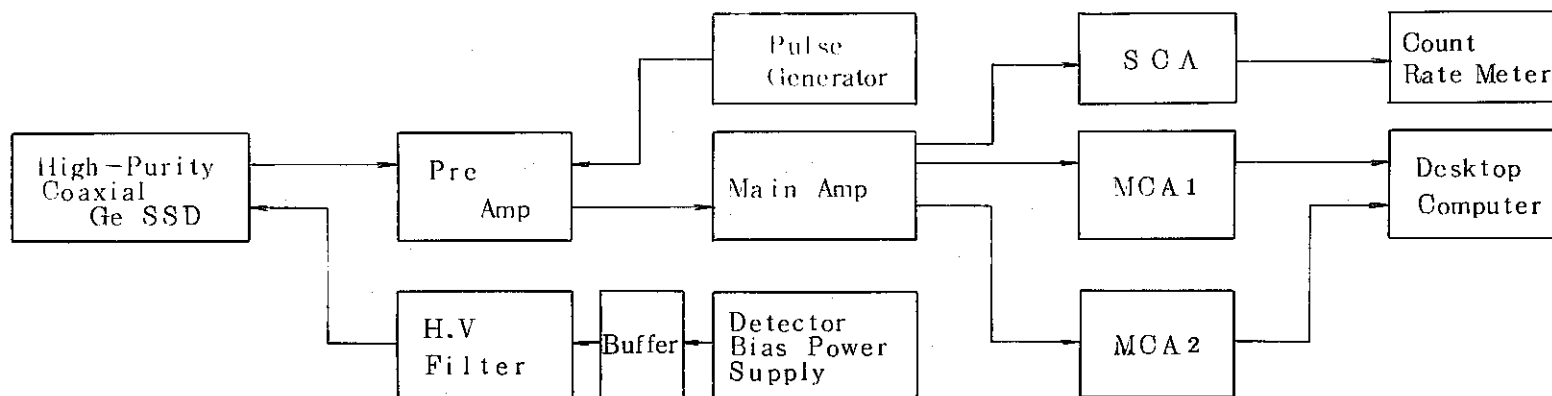
(2) Fissile Dosimeter

Material	Mk-1 75MW [9A1] の Reaction Rate	Index F.P [9A1, 75MW 45d irradiation, 15d cooling]			
		Zr-95	Cs-137	Ba-140 (La-140)	Ce-144
Th-232	$3.74 \times 10^5$ fission/sec/mg	49.3 mCi/g	0.61 mCi/g	116 mCi/g	27.9 mCi/g
Np-237	$3.36 \times 10^7$ fission/sec/mg	2.11 Ci/g	19.5 mCi/g	2.56 Ci/g	0.488 Ci/g
U-235	$3.12 \times 10^9$ fission/sec/mg	7.54 Ci/g	63.9 mCi/g	8.90 Ci/g	1.94 Ci/g
U-238	$1.77 \times 10^6$ fission/sec/mg	0.265 Ci/g	2.70 mCi/g	0.384 Ci/g	85.5 mCi/g



Soft X ray Detector	: ORTEC Hyperpure Germanium Low Energy Photon Spectrometer Active diameter 10mm Active depth 7mm beryllium window 0.127mm
Pre Amp	: ORTEC Model 120-4 Preamplifier
H.V Filter	: ORTEC Model 119 High Voltage Filter
Buffer	: NAIG High Voltage Buffer D-133S
Pulse Generator	: CANBERRA Model 807 Pulser
Main Amp	: ORTEC Model 572 Spectroscopy Amplifier
Detector Bias Power Supply	: ORTEC Model 459 5kV Detector Bias Supply
MCA 1	: CANBERRA Model 8100 Multichannel Analyzer
MCA 2	: NAIG E Series Multichannel Analyzer
Desktop Computer	: YHP 9845B
SCA	: ORTEC Timing SCA Model 455
Count Rate Meter	: ORTE Ratemeter 441

Fig.4.1 Block Diagram of Low Energy Photon Spectrometer Electronic System



High-Purity Coaxial Ge SSD	: ORTEC High-Purity Germanium (HPGe) Coaxial Solid State Detector Detector Size 45φ×40L Total Active Volume 63cm <sup>3</sup> Absorbing Layers Al 0.5mm Window to Detector Distance ~5mm
Pre Amp	: ORTEC Model 120-4 Preamplifier
H.V Filter	: ORTEC Model 119 High Voltage Filter
Buffer	: NAIG High Voltage Buffer D-133S
Pulse Generator	: CANBERRA Model 807 Pulser
Main Amp	: ORTEC Model 572 Spectroscopy Amplifier
Detector Bias Power Supply	: ORTEC Model 459 5kV Detector Bias Supply
MCA1	: CANBERRA Model 8100 Multichannel Analyzer
MCA2	: NAIG E series Multichannel Analyzer
Desktop Computer	: YHP 9845B
SCA	: ORTEC Timing SCA Model 455
Count Rate Meter	: ORTEC Ratemeter 441

Fig.4.2 Block Diagram of Gamma-X ray Ge Solid State Detector Electronic System

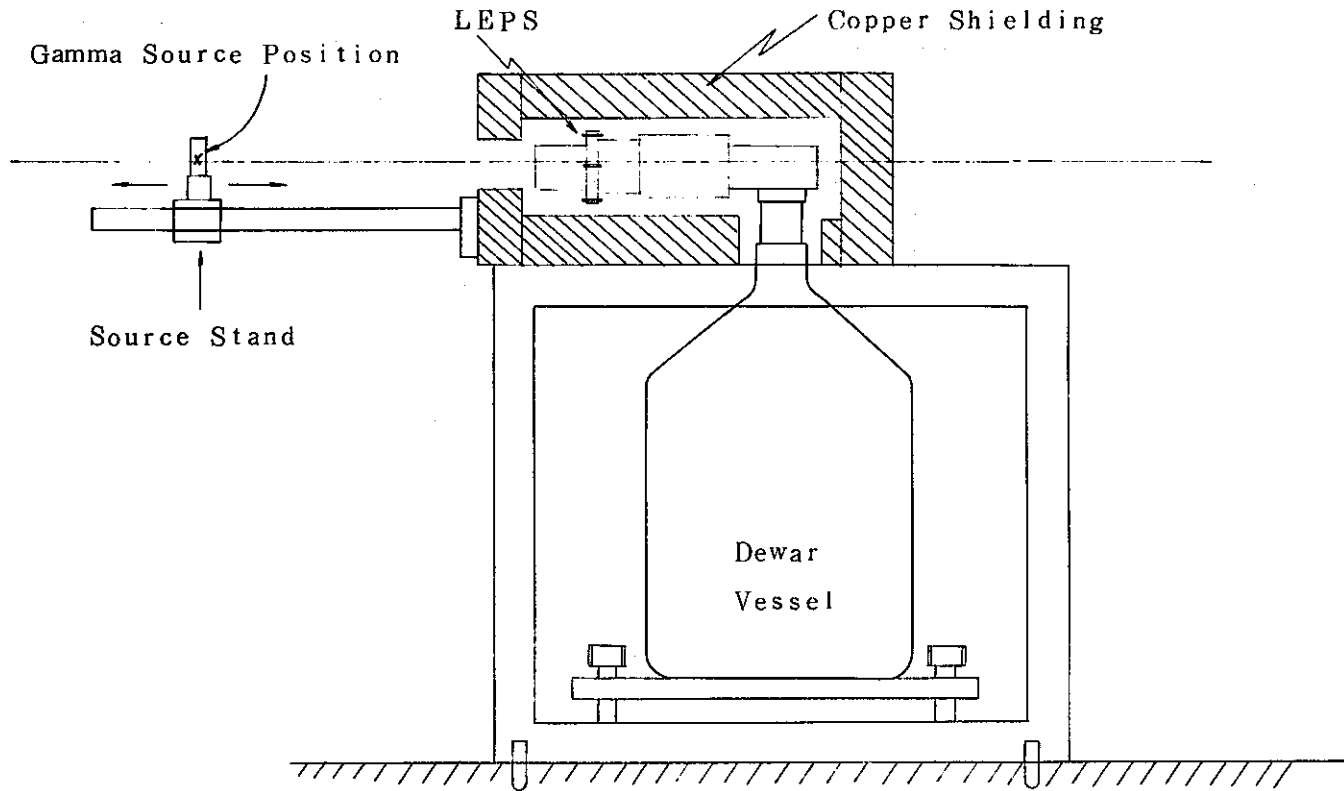


Fig 43 Figure of LEPS (Low Energy Photon Spectrometer) System

(a) Pb,Cu Shielding of Gamma-X SSD

(b) Pb Shielding of Gamma Source

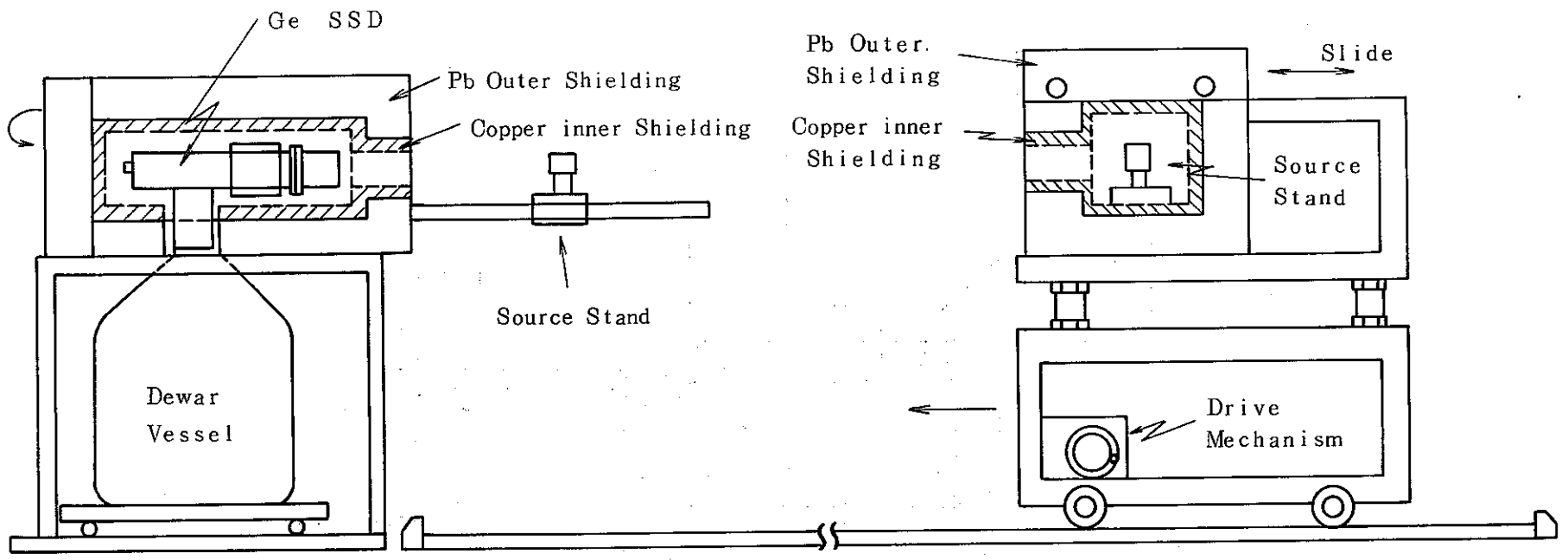


Fig.4.4 Figure of Gamma-X Ge SSD System



これらのシステムでは、バックバンドを低くおさえるために  $\gamma$ -X Ge SSD は  $\sim 10$  cm 厚の鉛遮蔽体および  $\sim 2$  cm 厚の銅遮蔽体で、また、LEPS System は  $\sim 2$  cm 厚の銅遮蔽体で遮蔽されている。

さらに  $1 \sim 10$  mCi 程度の強い線源を測定できる様に  $\sim 10$  cm 厚の遮蔽体をもつ線源部遮蔽体がある。この遮蔽体はレール上を走行することにより検出器との距離を  $\sim 20$  cm から  $600$  cm 迄変化させることができガンマ計測上最適なガンマ線強度（システム計数率  $3000$  cps 以下）が得られる様に設計されている。

これらのシステムはガンマ線エネルギーに対しては、数 KeV から数 MeV、線源強度に対しては  $0.01 \mu$  Ci から  $10$  mCi の範囲の放射化ドジメータが測定できる。

現在、これらのシステムの性能試験がおこなわれバックグラウンドは、Pb の X 線 K-40 等の天然放射線および回路系の雑音も含め、システム計数率で  $2 \sim 3$  cps 程度であることが確認されている。

HAFM 法は、 $(n, \alpha)$  反応で生成する  $^4\text{He}$  を定量することにより積分  $(n, \alpha)$  反応数を測定する方法である。ドジメータとしては、 $^6\text{Li}$  の化合物、 $^{10}\text{B}$  の化合物を用いる。 $^6\text{Li}$ 、 $^{10}\text{B}$  は数 eV から数  $10$  KeV の中速中性子エネルギー領域で  $1/v$  法則に従う断面積をもつ。この特性のためにこのエネルギー領域で有効な検出器となりうる。HAFM 法に用いられるドジメータキャプセルは、He リークがない材質、構造とする必要があり、内部充填ガスは  $^3\text{He}$  を用いる。 $^4\text{He}$  の生成量は、質量分析器を用いて測定される。

現在高速実験炉では、これらの測定技術、測定装置をもっていないので DOE よりドジメータを借り受け照射後返却して測定してもらう等の方法を検討する必要がある。本方法の採用については、将来計画として考えたい。

Solid State Track Recorders (SSTR) 法は、陽子、 $\alpha$  粒子および核分裂片などの重荷電粒子が絶縁体内に形成する放射線損傷数を計数することにより反応率を測定する方法である。通常原子炉は、高温、高放射線場であることから飛跡検出物質 (Solid State Track Detector) としてマイカを用いる。また中性子コンバーターとしては  $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、等の核分裂性物質を用い積分  $(n, f)$  反応数を測定する。本方法については、技術の導入を計画中である。

高速実験炉「常陽」のドジメトリ計画の中では DOE の SSTR を照射し RM 法による核分裂性ドジメータとの比較を行なうことを計画している。RM 法では核分裂生成物のうち、Zr-95、Cs-137、La-140、Ce-144 等の比較的収率が高く、半減期が長

くてガンマスペクトロスコピーに適したエネルギーのガンマ線を放出するものに注目して間接的に核分裂反応数を測定する。

この方法では、指標核分裂生成物の収率およびその燃焼による誤差、ガンマ計測上の誤差等の評価が問題となる。

SSTR法では、核分裂片による照射損傷数をエッチングすることにより直接核分裂数を計数するため前述の誤差をのがれることができる。またSSTRでは中性子コンバーターとして用いられる核分裂性物質が非常に微量であるため汚染、放射化等の問題がなく取扱いが容易であるといった利点がある。

以上高速実験炉「常陽」のドジメトリーにおいて現在計画もしくは、検討中の3つの測定法を述べた。「常陽」ではRM法が主であり既に検出系、データ処理系が完成している。これらのシステムの較正のためにフランスLMRIより標準 $\gamma$ -X線源を購入した。さらに「常陽」のドジメータの重量測定は、 $1\mu\text{g}$ まで測定可能な精密天秤および熱中性子による放射化分析法が用いられる予定である。

## 5. 解析手法の開発

原子炉内で中性子照射を受けた、ドジメータの放射化量測定結果より、中性子スペクトルを考慮した、総中性子照射量を評価する手法について述べる。

### 1) 照射データの流れ

前節で述べた測定システムにより、測定されたドジメータの放射化量データの流れを、第 5.1 図に示す。

同図の内、(a)では、データ処理系のハードウェアを、(b)では、データ処理系のソフトウェアを示している。

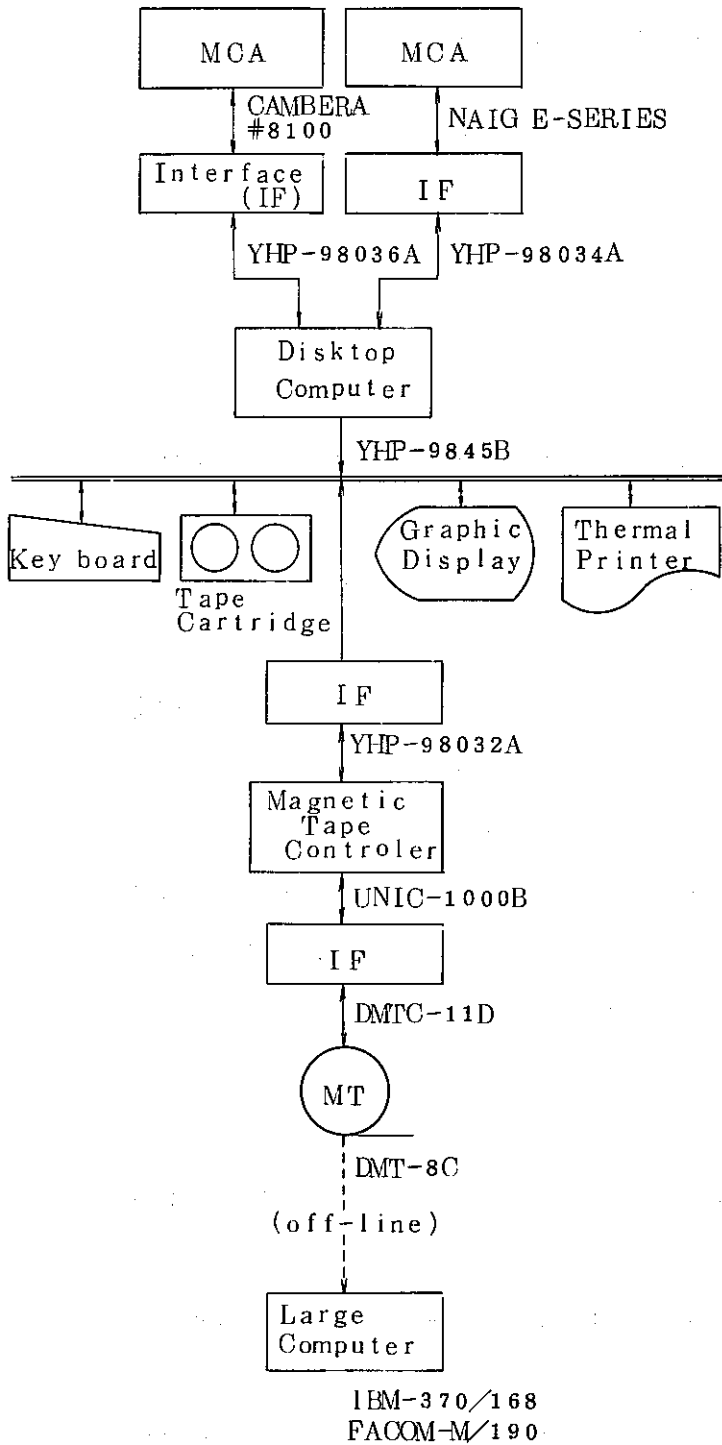
波高分析器により得られたドジメータの放射化量、既ち、 $\gamma$ 線スペクトルは、YHP社製の卓上型電子計算機（以下マイコンと略す）に取込まれる。マイコンでは、大型計算機を使用しての詳細解析の前処理として、以下の作業が行なわれる様、ソフトウェアが用意されている。

- a) 多重波高分析器の遠隔操作と、遠隔操作によるガンマ線スペクトルの自動測定と、データ処理。
- b) 詳細解析に先立つデータのチェック、データの簡易解析。
- c) 大型計算機でのガンマ線スペクトル詳細解析コードのインプット・データ自動作成。即ち、マイコンに取込まれた $\gamma$ 線スペクトルデータから、大型計算機での詳細解析用のインプットデータを自動的に作成し、データ・レコーダを通し、マグネテックテープ（MT）に書き込む。

大型計算機では、ガンマ線スペクトルの詳細解析と、中性子アンフォールディングを実施し、中性子スペクトル又は、中性子照射損傷量等を推定する。この方法は次の 2 段階より成る。

- a) ガンマ線スペクトル詳細解析コード（BOB75/SEEK）により、光電ピークのエネルギー較正、ガンマ線強度の計算。
- b) 中性子アンフォールディングコードによる中性子スペクトル又は、中性子照射損傷量の決定。この場合、J<sub>1</sub>型アンフォールディングコードと、SAND-IIコードによる比較、及び、これ等コードによる誤差評価の実施。

(a) Hardware



(Note) → means the data flow

(b) Software

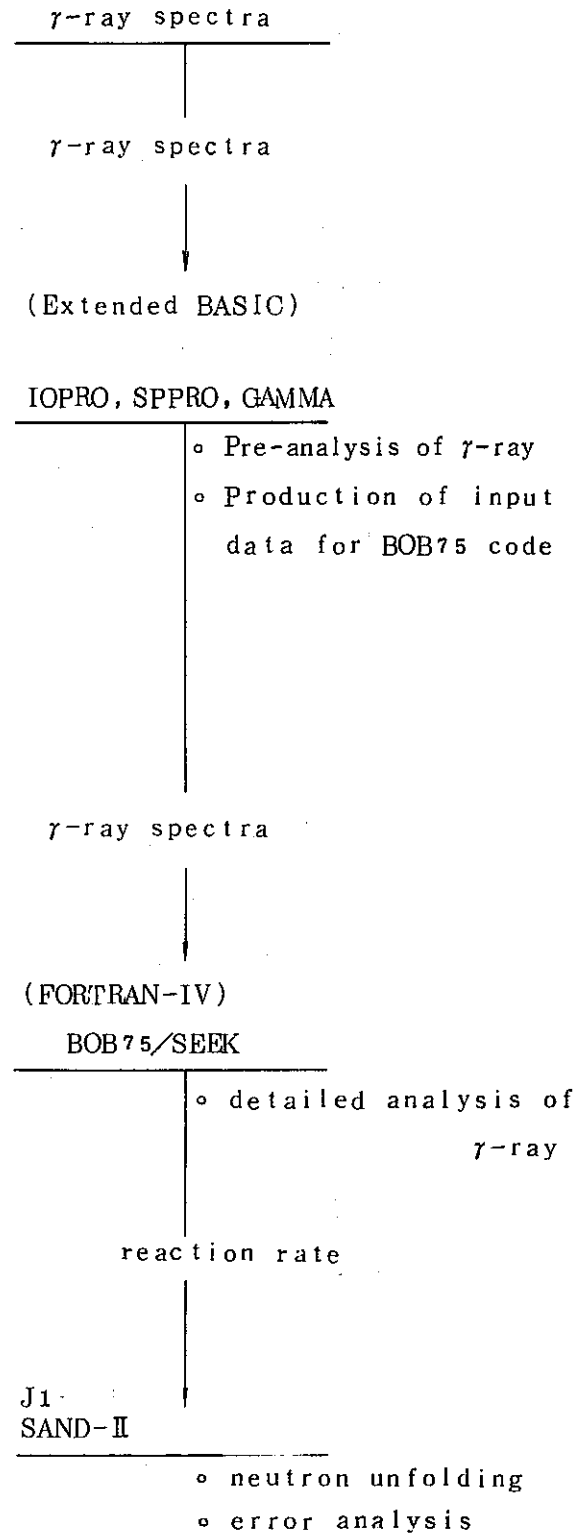


Fig.5.1 Flow of Irradiation Data

2) データ処理系のハードウェア

第 5.1(a)図に示す、データ処理系ハードウェアは、YHP社製卓上型電子計算機 (YHP9845B) と、安立電気社製、データレコーダ (DMT8C) 及び、これ等を結ぶ、インターフェース・カードより構成されている。

YHP社製、9845Bは64Kバイトメモリーを有し、拡張BASIC言語によりデータ処理を行なう。多重波高分析器のうち、キャンベラ製<sup>#</sup>8100とは、8ビット・シリアルインターフェース (YHP社製98036A) で、NAIG社製E-563とは、8ビット・パラレルインターフェース (YHP社製98034A, HB-IB用) で結ばれている。又、データレコーダとは、8ビット・パラレルインターフェース (YHP社製98032A) 及び、磁気テープコントローラ (UNIC社製UNIC-1000B) とコントローラ用インターフェース (安立電気DMTC-11D) で結ばれている。

卓上型電子計算機には、二台のテープカートリッジ (128Kバイト/巻の容量)、グラフィック・ディスプレイ装置、ハードコピー装置、及び3ヶ月無停電リアルタイム・クロック (YHP-98035A) が装備されている。

データ・レコーダは、最大2400ft/巻の電子計算機用磁気テープが装備され、9トラック、1200BPIの密度で、データを書込むことが出来る。

3) マイコンによる簡易解析コード

マイコン用のプログラムは、拡張ベーシック言語により書かれている。

マイコンには多重波高分析器を、マイコンで制御し、ガンマ線スペクトルの計測開始、終了、マイコンのデータ取込等の処理を自動化する様、ソフトウェアが用意されている。

この他、大型計算機でガンマ線のスペクトル詳細解析を実施する前段階として、データチェックの為、次の様な処理をするソフトウェアが作成されている。

- ① ガンマ線スペクトルデータ良否確認
- ② データの平滑化
- ③ 光電ピークの探索
- ④ 同 ピーク・フィッティング
- ⑤ 同 面積計算
- ⑥ 同 エネルギー較正
- ⑦ 核種同定及び定性、定量解析
- ⑧ BOB75コード、インプットデータの作成

上記①～⑦の機能は、あくまで簡易解析であり、大型計算機により詳細解析の補助手段である。又、⑧の機能は、BOB75コードのインプット・データカードをマニュアルで作成する繁雑な作業を避ける為のインプット・データ自動作成機能である。

#### 4) BOB75/SEEK コード

BOB75コードは、<sup>1)</sup>原研RI事業部の馬場氏等の開発したものであり、SEEKコードは、<sup>2)</sup>同研究管理部の海江田氏等の開発したコードである。両コード共、FORTRAN-IV言語で作成され、同一モジュール上にリンクされて使用される。

本コードの機能は以下の通りである。

- ① ガンマ線スペクトルデータの平滑化
- ② 光電ピーク探索
- ③ 崩壊に対する時間、測定の効率等の補正
- ④ 光電ピークのフィッティング
- ⑤ 同 エネルギー較正
- ⑥ 同 強度計算
- ⑦ スペクトル・データの作画
- ⑧ ガンマ線放出核種の探索、同定

#### 5) 中性子アンフォールディングコード

中性子アンフォールディングコードは、基準計算コードとして、東大原子力工学研究施設助教授、中澤正治氏の開発したJ<sub>1</sub>型アンフォールディング・コード<sup>3)</sup>を用いる。

本コードは、現在、開発中のコードであり、FORTRAN-IV言語で書かれている。本コードは、ドジメータの反応率測定値をインプットすることにより、J<sub>1</sub>型線型汎関数

$$J_1[\phi_0] = \int_0^{\infty} [W(E) - \sum_{i=1}^N C_i \sigma_i(E)] \phi_0(E) dE + \sum_{i=1}^N C_i R_i$$

を、最尤法 (Maximum Likelihood Method) により、中性子束 ( $\phi$ ) 又は中性子損傷量  $I = \int_0^{\infty} W(E) \phi(E) dE$  及びこれ等の誤差を求めるものである。<sup>4)</sup>

J<sub>1</sub>型アンフォールディングコードは、この他、中性子断面積の最適化 (Adjustment) する機能を持ち、断面積の持つ誤差を小さくすることにより、最終評価値の誤差巾を小さくすることが可能である。

又、本コードの比較コードとして、世界的に使用されている。SAND-II アンフォールディングコード<sup>5) 6)</sup>を用いる。

SAND-II コードも  $J_1$  型アンフォールディングコードと同じく、推定中性子スペクトル  $\phi_0$  を用い最尤法により、次式から最もらしい解を探し出すものである。

$$\ln\left(\frac{\phi_g^{k+1}}{\phi_g^k}\right) = \frac{\sum_{i=1}^N W_{ig}^k \ln\left(\frac{R_i}{R_i^k}\right)}{\sum_{i=1}^N W_{ig}^k} \quad (K = 0, 1, 2, \dots)$$

$$W_{ig}^k = \sigma_{ig} \phi_g^k$$

$$R_i^k = \sum_{g=1}^G \sigma_{ig} \phi_g^k$$

但し、本コードは、 $J_1$  コードと違い反応率の誤差あるいは、反応断面積の誤差が考慮されない欠点がある。従って最終結果の誤差評価にはモンテカルロ法<sup>7)</sup>を併用する。

又、非線形問題であり、逐次近似の収束性も数学的に証明されていない等の問題もある。

## 参 考 文 献

- 1) H. Baba, T. Sekine and S. Baba et.al., JAERI-1227 "A Method of the Gamma-ray Spectrum Analysis : FORTRAN IV Programs "BOB73" for Ge(Li) Detectors and "NAISAP" for NaI(Tl) Detectors", Jul. 1973.
- 2) 高橋彰, 海江田圭右他, JAERI-memo 7667 「BOB75による $\gamma$ 線放出核種の探索」 1978年4月
- 3) 近日発行予定
- 4) M. Nakagawa and A. Sekiguchi "Several Applications of J1 Unfolding Method of Multiple Foil Data to Reactor Dosimetry", Proc. of the 3rd ASTM-Euratom Symposium on Reactor Dosimetry, Ispra, Oct. 1-5, 1979.
- 5) W. N. McElroy, S. Berg, and T. Crockett et. al., AFWL-TR-67-41, Vol I "A Computer-Automated Iterative Method for Neutron Flux Spectra Determination by Foil Activation - A Study of the Iterative Method" Sep. 1967.
- 6) S. Berg BNWL - 855  
"Modification of SAND-II", Aug. 1968.
- 7) C. A. Oster, W. N. McElroy and J. M. Marr. HEDL - TME 76-60  
"A Modified Monte Carlo Program for SAND-II with Solution Weighting and Error Analysis" Aug. 1976.



## 6. DOE-PNC 共同ドジメトリー試験計画

常陽におけるドジメトリー技術開発を進める上において、国内や国外の関係機関と連携を保ち、進めることが必要である。

本計画は海外との協力関係の一環として米国 HEDL のドジメトリー作業を担当している Irradiation Analysis Gr と共にドジメータの照射、測定、解析を行い結果を比較しようとするものである。

本計画の目標は次の通りである。

- 1) PNC と DOE のドジメトリー技術について互に知り合うこと、および、EBR-Ⅱ と JOYO から得られる燃料・材料照射試験に関する照射データを互に評価する際の助けとなるように中性子束、照射量、スペクトルなどのデータを提供すること。
- 2) 明確な照射条件下で照射されたドジメータの実験データを互に比較し、又、それらのデータを共同で評価することで互のドジメトリー技術の向上を計ること。

このために行なわれる共同試験は次の三項目である。

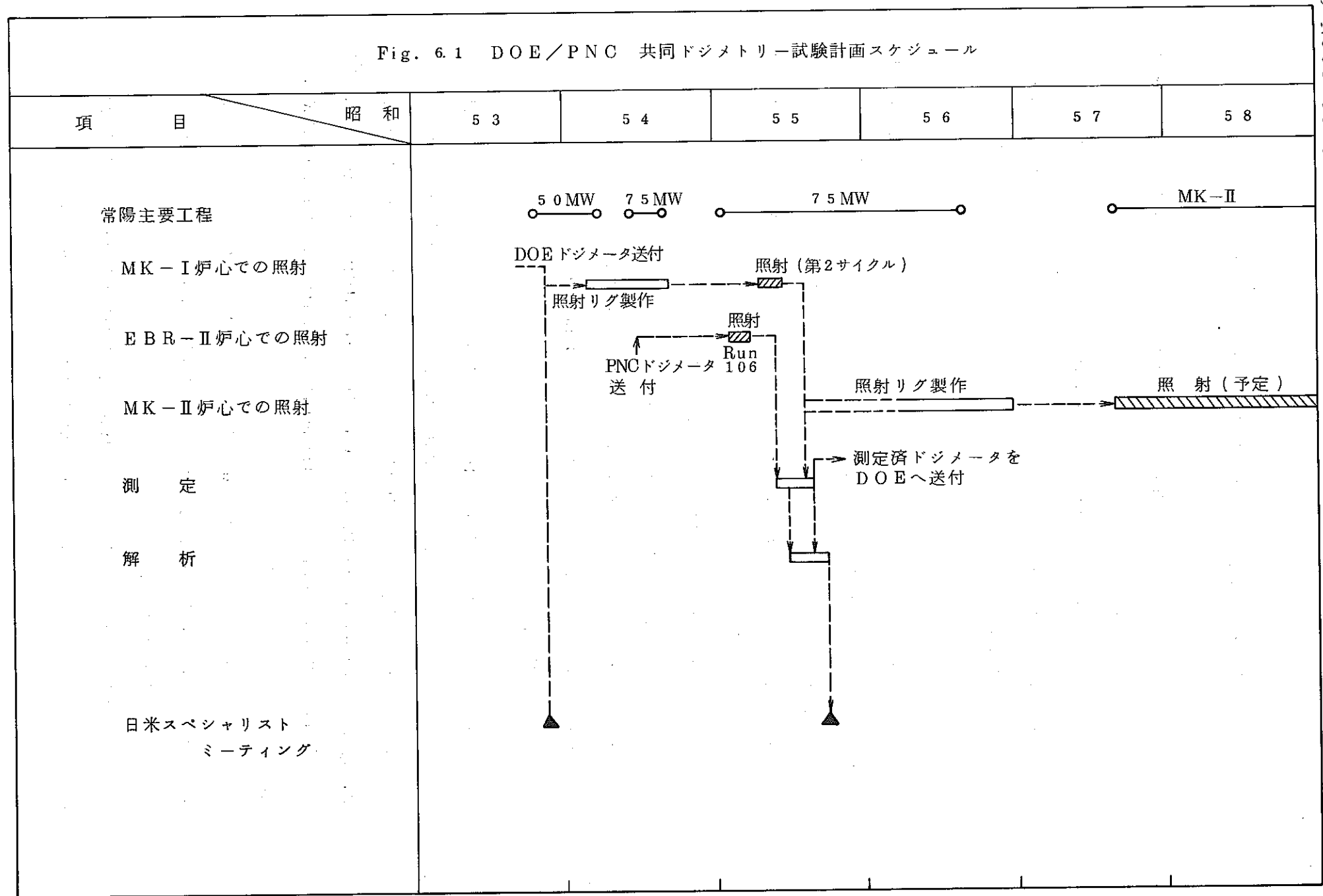
- a) 「常陽」Mk-Ⅰの反射体のサーベランス位置(9A1)において、75Mwt の第2サイクル目に互のドジメータを同じ位置に装荷し照射すること。
- b) EBR-Ⅱ炉心の第2列目で照射すること。(Run-106)
- c) 「常陽」Mk-Ⅱ炉心において照射すること。

この照射は日米高速炉協定の DOE-DNC の燃料材料ワーキンググループの活動の中に入っている。PNC 側の窓口は本社、FBR本部燃料グループ石田主研がこれに当り、実施は高速実験炉部技術課で行う。DOE 側の窓口は、J.J. Laidler (Acting Manager, International Program Coordination HEDL) がこれに当り、実施は Materirls Engineering の中の Irradiation Analysis (Manager は W.N. McElroy) が行なうことになっている。

ドジメータの照射時期については、Mk-Ⅰ炉心及び EBR-Ⅱ炉心における照射は 1980 年に行なう。Mk-Ⅱ炉心における照射は今後担当者間で打合せて決めることになっている。(Fig. 6.1)

これらの計画に伴う作業分担としては、照射を受け持つ側で照射リグの製作を行ない、両方のドジメータを一所に組込んで照射し取出したあとすぐに照射したサイトでドジメー

Fig. 6.1 DOE/PNC 共同ドジメトリ試験計画スケジュール



タの放射化量を測定し、次いで相手側から供与されたドジメータを送り返し相手側で同様に放射化量を測定する。

これらの測定データは互に交換されて、日米双方が解析を行ない、結果をつき合せて両方の測定方法の精度、解析方法の評価を行うことになっている。

現在まで、日米間の打合せは1978年12月にHEDLで持たれたスペシャリストミーティング一回のみであるが、この親委員会である燃料ワーキンググループでの情報交換及び書簡による情報交換により、情報を知らせ合っている。

今回の予定は1980年10月にMk-Iでの照射結果とEBR-IIでの照射の結果を持ち寄ってスペシャリストミーティングを持つことになっている。

本計画はMk-II炉心でB型特殊燃料集合体を使ってドジメータ照射を行うことまで含むため長期にわたる日米の協力関係が必要である。

お わ り に

高速実験炉部におけるドジメトリー技術開発計画は始まったばかりであり、これから解決せねばならない問題も多い。このため動燃内各部門ばかりでなく、中性子測定技術・経験を有している関係諸機関との協力関係を有しつつ進めて行きたい。特にJ<sub>1</sub>法アンフォールディングコード開発および測定システムの開発に関しては、東大関口教授及び中沢教授等の全面的なバックアップが得られており、ここで強く感謝の意を表したい。

本計画はMk-II炉心での試験を含んだ長期にわたる計画であり、外部との情報交換を重ね高速実験炉部におけるドジメトリー技術の向上を計りたい。