

UTNL-R

R 0 0 3 6

## 臨界事故検出器の特性試験研究

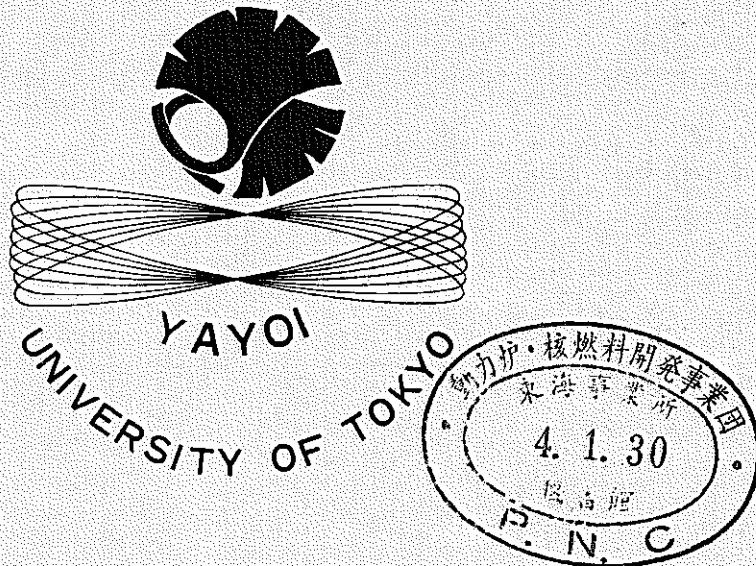
東京大学工学部  
原子力工学研究施設

安 成弘，若林宏明，吉井康司

動力炉核燃料開発事業団 村野 徹，中田 啓，牧野明寛

昭和 50 年度動力炉・核燃料開発事業団・東京大学共同研究成果

昭和 51 年 3 月 31 日



東京大学工学部附属原子力工学研究施設

Nuclear Engineering Research Laboratory  
Faculty of Engineering, University of Tokyo

## はじめに

核燃料加工や、再処理工程における臨界事故の防止は保安上重要である。したがって、臨界事故に至らしめない各種の安全装置の準備が必要である。一方、いくつかの事象の重なりで生ずる可能性のある事故を想定し、その過程を出来るだけ早期に検知して、真の臨界事故に至らしめない、あるいは万一の場合も被害を最小にすべき努力も必要である。

このような見地より、臨界事故の過程について、可能性をしらべ、考えられる種々のモードについて、臨界事故警報システムの果すべき役割を検討する。具体的には臨界警報システムの一例として、動燃再処理工場に備えられるべきものの性能を弥生炉の非定常運転及び反応度パルス運転状態においてチェックした。

# 目 次

1. 概要及び目的 .....	1
1-1 概 要 .....	1
1-2 試験の目的 .....	3
2. 弥生炉による臨界事故模擬 .....	6
2-1 概 要 .....	6
2-2 非定常運転モード .....	9
2-3 反応度パルス運転モード .....	14
3. $\gamma$ 線検出器照射試験 .....	17
3-1 $\gamma$ 線検出器 .....	17
3-2 非定常運転モード照射試験 .....	22
3-3 反応度パルス運転モード照射試験 .....	29
4. 中性子検出器照射試験 .....	48
4-1 中性子線検出器 .....	48
4-2 非定常運転モード照射試験 .....	57
5. 結 論 .....	57
6. 謝 辞 .....	68
附録 1. 臨界事故時の動特性解析モデル .....	69
附録 2. 溶液系臨界事故と臨界警報について .....	74
(参考文献) .....	76

# 1. 概要及び目的

## 1-1 概要

1. 動力炉核燃料開発事業団再処理工場の臨界警報装置設置のための検討事項としては次のような項目があると考えられる。

### (1) 臨界警報装置の必要性、設置基準

- (i) 法律的な基準
- (ii) 諸外国の基準
- (iii) 工程上の基準
- (iv) 性能上の基準

### (2) 臨界事故発生の可能性

- (i) 金属、酸化物、溶液系について
- (ii) 実際工程上での検討

### (3) 過去の事故例

- (i) 核分裂性物質、全核分裂数、被ばく線量、発生源よりの距離等
- (ii) 事故例と再処理工場で最も類似している工程

### (4) 想定臨界事故の規模の検討

- (i) 各系、工程ごとに検討する
- (ii) 全核分裂数、空間線量、施設外への関連

### (5) 臨界事故の検出

- (i) 工程との関係で配慮すべき条件は中性子か  $\gamma$  か。
- (ii) 前駆的な異常の発見

### (6) 検出装置の性能

- (i) 応答
- (ii) 感度
- (iii) 誤警報
- (iv) 警報
- (v) 保守点検

### (7) 検出系の性能と被曝線量の評価

### (8) 退避時の処置

- (i) 退避経路、および集合場所
- (ii) 退避所、および周辺の設備
- (iii) 退避所での処置

### (9) 委員会の設置

- (i) 臨界管理に関する委員会

(ii) 臨界事故に関する委員会

- 退避訓練
- 被曝評価

又、臨界警報装置の試験項目としては、

- (1) 検出範囲
  - 最小検出限界
  - 最大検出限界
- (2) エネルギー依存性
- (3) 方向依存性
- (4) 応答時間(検出系としての)
- (5) 警報設定範囲
- (6) 設置場所の線量評価

等である。ここでは、(1), (4)についての性能をしらべるため、東大工学部原子力工学研究施設「弥生」において行った実験について述べる。

## 2. 照射試験概要

Pu水溶液等で起これ得る臨界事故時の放出エネルギーの一般的パターンは図1-1に示す如きである。同時に放出される即発 $\gamma$ 線、即発中性子線もほぼ同じパターンを示すと考えられる。ここで臨界事故に特徴的なことは、ほとんどの臨界事故の場合スパイク状出力が生じることである。スパイクの持続時間巾として数10秒(即発臨界CRAC 01)から数m秒(即発臨界CRAC 08)に及ぶ値が報告されている。<sup>1)</sup>

臨界事故検出器の応答特性としては、当然これら比較的緩かな放射線場の強度変化から急激な放射線場の強度変化に至るいずれに対しても十分にその変化に追従し、しかも放射線場の強度が警報設定レベルを越えるや、警報信号を発しなくてはならない。CRAC 07, 08程度の出力変化応答特性を実験的に試験解析するには次の条件を満たす放射線場が必要である。

- (i) 放射線場の強度として臨界事故時に匹敵する強度があること。
- (ii) 放射線場の強度変化が既知であること。
- (iii)  $\gamma$ 線、中性子線のエネルギースペクトルが臨界事故時のエネルギースペクトルに近いこと。

上記の条件を満たす放射線場として、国内では東大弥生炉(非定常運転、反応度パルス運転の各モード)がある。

一方検出器の最終信号である警報出力信号は、high, lowの論理化された信号であるが、論理処理される前の(即ち閾値回路の前までの論理処理回路)信号は、 $\gamma$ 線検出器では検出器周囲の $\gamma$ 線束と共に増加するアナログ量であり、中性子線検出器では、検出器周囲の中性子束と共に増加するレートのパルス信号である。従って検出器の外部放射線場の強度変化に対する追従性を試験するには先ず論理処理される前の上記各信号を観測する必要がある。

ここで外部放射線場の変化は、原子炉の出力上昇時間（原子炉周期），及び運転モードを変える事によって実現する。

次に上記  $\gamma$  線検出器のアナログ量，中性子線検出器のパルス個数と警報出力信号との関係を解析する。

i) 原子炉による照射試験（検出器の動特性）

- ① 放射線場の強度変化が比較的緩かな場合の検出器の応答特性試験は、弥生炉を非定常運転モードで運転することによって行う。
- ② 放射線場の強度変化が急激な場合の検出器の応答特性試験は、弥生炉を反応度パルス運転モードで運転することによって行う。

なお、原子炉による照射試験に先立ち行われた以下の試験については、別途動燃レポートとして報告される。

- ii) 検出器を構成する各電子回路ユニットの特性を、電子機器を用いての試験。（検出器の電子回路特性）
- iii) 予備的試験として、線源（ $\gamma$  線源  $^{226}\text{Ra}$  50mCi，中性子線源 Am-Be 1Ci）を用いて静的（時間的変化のない）放射線場に於る照射試験。（検出器の静特性）

## 1-2 試験の目的

現在、動力炉核燃料開発事業団東海事業所再処理施設に設置されている臨界事故検出器は、 $\gamma$  線検出器と中性子線検出器の 2 種類で各々 2 系統、1 系統（各系統は 3 個の同一検出器より成る 2 out of 3 方式）取り付けられている。その系統図が図 1-2 である。

これらの検出器は仏国原子力庁（CEA）の指導の下に同国、SEIN 社が設計製作したものであり、臨界事故検出器としての性能の保証は CEA が行っている。又、これら検出器の性能は、仏国 VALDUO の CALIBAN 廉で確認試験が行われた。<sup>4)</sup> しかるに、予めの要求にもかかわらず検出器の設計、製作時の性能試験の詳細は検出器を輸入する時には付されておらず、以後も詳細な情報の提供はない。このような状況と臨界事故検出器の重要性、年 1 回の定期点検、アラーム点検の妥当性の検討、既定の配置に関する合理的な較正等を考慮すると、これらの性能を日本側でも独自に試験し、確認する必要があると考えられた。

結局検出器の最終確認項目は“臨界事故時の急激な放射線場の変化（主として放射線場の強度がバックグラウンド状態から急激に増加する状態を問題とする）に対して、検出器周囲の放射線場の強度が検出器の警報設定レベルを越えた時に、確実に警報信号を発するかどうかを種々の放射線場の変動パターンに対してその性能を確認する”ことである。

上記の放射線場の変動パターンは、検出器を炉周辺に配した状態で我国のパルス炉（東大弥生炉=東海村設置）を種々のモードで運転することによって実現することができる。

図 1-1 臨界事故の一般的パターン(出力の変化)

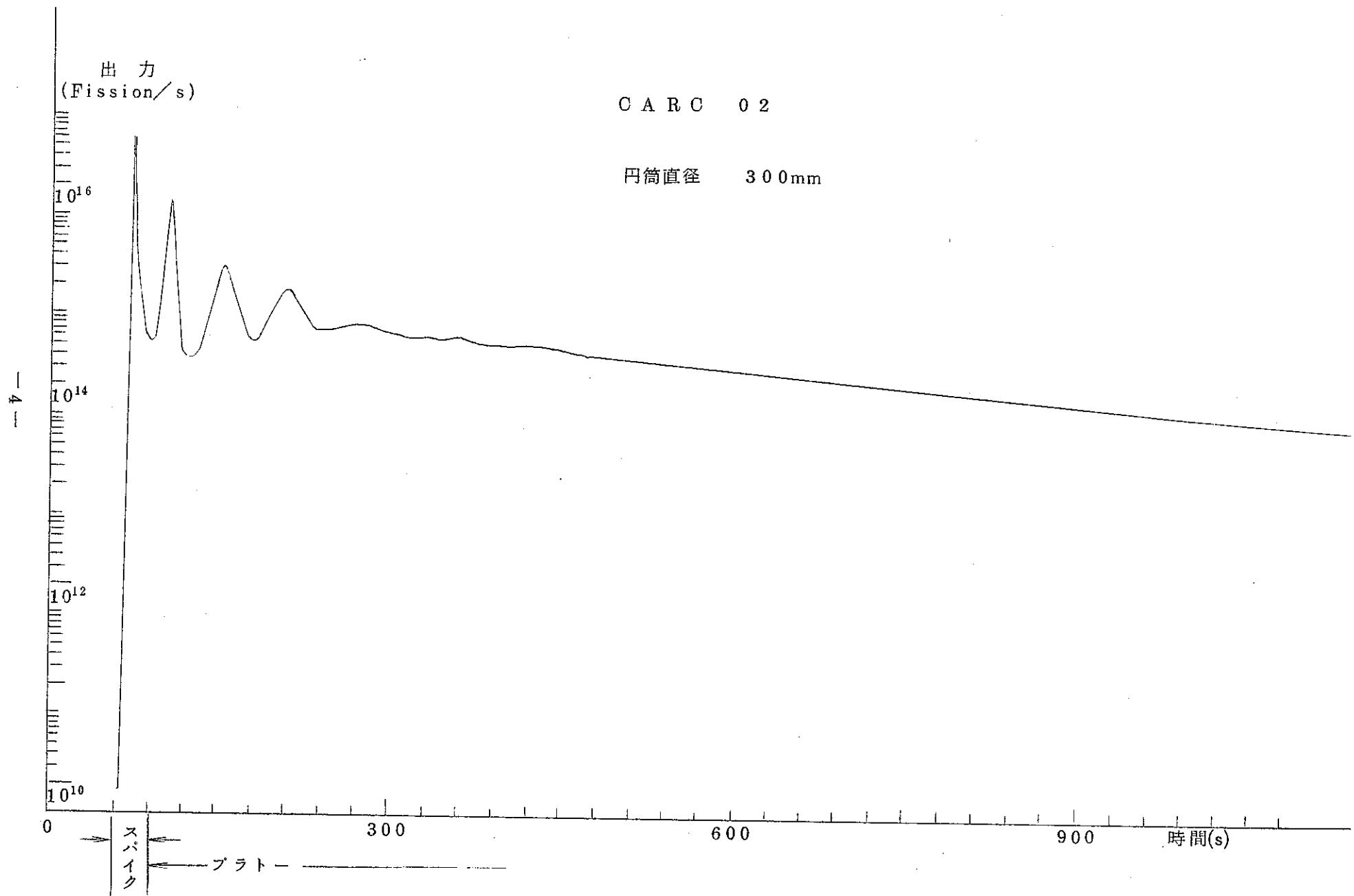
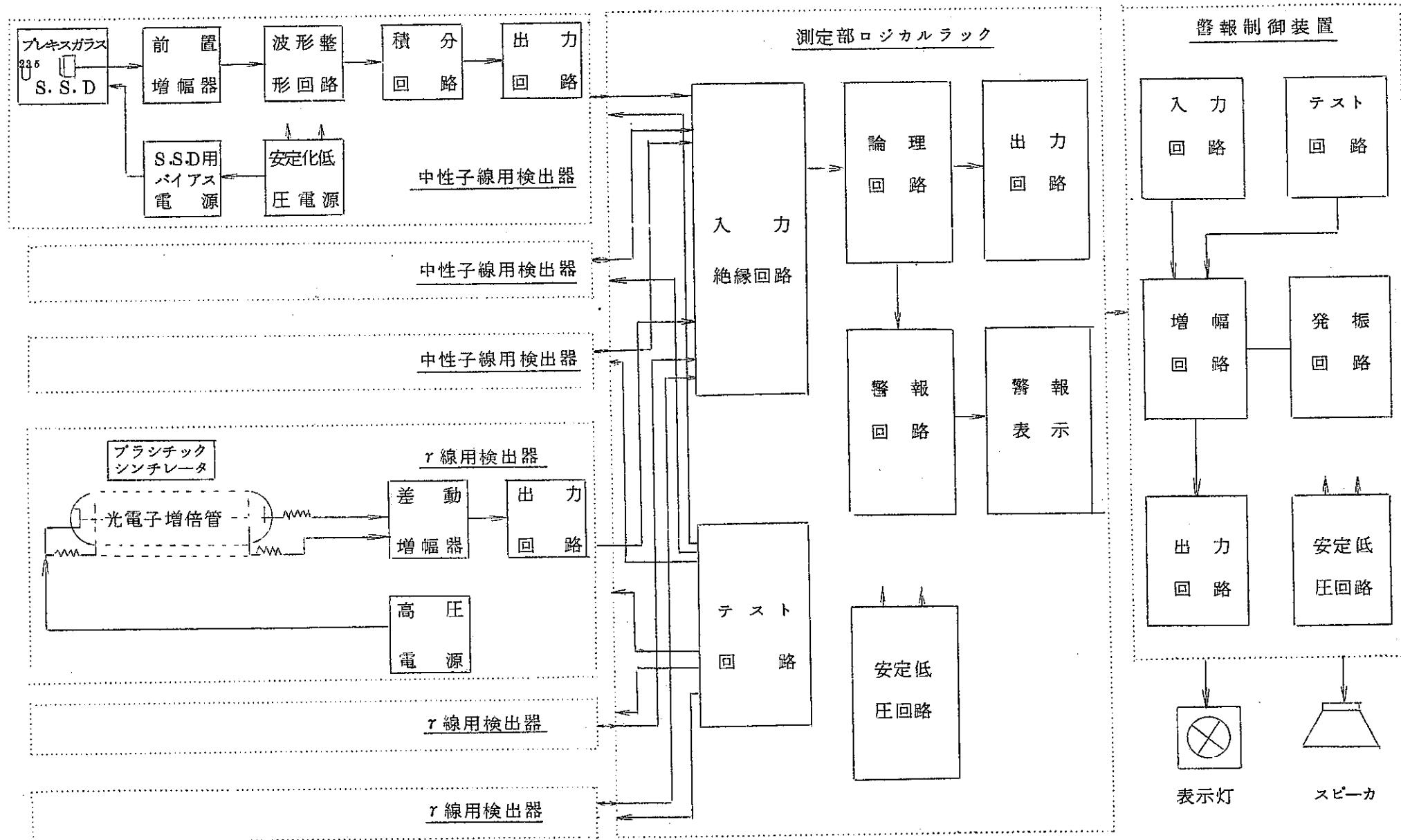


図 1-1 臨界警報装置系統図



## 2. 弥生炉による臨界事故の模擬

### 2-1 概 要

実際の放射線場に於る検出器の照射試験で臨界事故の模擬を行っている。一方、検出器の検出部分( $\gamma$ 線検出器ではプラスチックシンチレーター、中性子検出器では[(U-235 Target) + SSD]部分)を除けば他は全て電子回路によって構成されているので、電子回路的に模擬することも可能である。ところが急激に変化する実際の臨界事故時の(即発 $\gamma$ 線、散乱 $\gamma$ 線、即発中性子線、散乱中性子線、等による)放射線場の複雑さを考慮すると、単に電子回路上の模擬では不十分である。一方、現在(1976年)我国には適当な臨界事故実験施設がないが、出来るだけ実際に近い条件で臨界事故を模擬しようとすれば、茨城県東海村東京大学高連中性子源炉「弥生」をバースト運転し、放出される放射線を利用する以外にない。

弥生は9.3%EU金属燃料をベースとする小型高速炉であり、よく知られている米国GODIVA等と同様パルス運転が可能で最大1GWまでの出力が出せる。

弥生には表2-1に示す特徴をもつパイロオシレーターが付属しており、これらのモードを用いて非定常運転、反応度パルス運転が可能である。ここでGlory Hole, Grazing Holeは各々炉心の中央、隣接部を垂直に貫通する実験孔である。

なお、図2-1にパイロオシレーター装置の全体制御系図を示す。

表2-1 「弥生」バイルオシレーターシステム

運転モード	POS 装置設置			反応度素子の大きさ	反応度素子駆動方法	ストローク	駆動速度	くり返し数回転数	デルリン材に対する		その他に対する		運転制御方法	
	Gy	Gz	側部プランケット						最大設置反応度 (%ΔK/K)	最大反応度振巾 (%ΔK/K)	最大設置反応度 (%ΔK/K)	最大反応度振巾 (%ΔK/K)		
a 1Y	POS 1			17φ × 480L	油圧パルスモーターによる丸棒垂直上下運動	±190mm (炉心中心)	0.6, 1.2, 3, 6 12, 30, 80 400mm/sec	最大応答速度 0.53 Hz (ストローク最大時)	0.83	0.83	UO <sub>2</sub> (EU)	0.32   0.29	手動単動	短形, 三角形 $T_1, T_2$ (可変) 1~10 <sup>2</sup> sec
b 1G		POS 1		47φ × 480L	同上	同上	同上	同上	0.65	0.44	UO <sub>2</sub>	0.71   0.74	同上	$T_1, T_2$ 10~15 <sup>6</sup> sec
c 2		POS 2		24.25R × 360L	直流モーターによる半月棒回転運動	360°	最大 40 πrad/sec	6, 12, 30, 60, 120, 300, 600, 900 1200 rpm	0.46	0.19			手動単動	正弦波
d 3			POS 3	97φ × 100L	直流モーターの回転をクラシック軸により水平往復運動	燃料端面上 約40mm	最大 約600mm/sec	7, 9, 11, 13, 15, Hz	0.29	0.78	EU (18mm)	1.39   1.38	寸動手動	二次曲線波
e 1Y-2	POS 1	POS 2		上記の組み合せ	上記に同じ	上記に同じ	上記に同じ	上記の組み合せ	1.29	1.02	POS-1 設定同期		POS-1 設定同期	
f 1Y-3	POS 1		POS 3						1.12	1.63				
g 1Y-4	POS 1	POS 4		38φ × 90L	気送管による周期循環方式	1周 26.8m	低速6~7m/sec 高速37~42m/sec	低速 周期4.5sec 高速 周期2sec	1.17	1.10	上記の組み合せ		単独手動同期	
h 1Y-4S	POS 1	POS 4S		38φ × 90L	気送管による炉心部までの搬送及び取り出し	—	6~7m/sec	—	1.21	1.04			同上	
i 1G-R-P	R-P 1	POS 1		12.8φ × 54.6L (12.9φ × 40L)	高圧ガス圧による彫丸状物質貫通	—	約800m/sec	60, 120, 300, 600, rpm	0.90	0.69	POS-1 設定同期		POS-3 設定同期	
j 3° R-P	R-P	POS 3		上記の組み合せ	同上	同上	同上	上記の組み合せ	0.54	0.95				

POS : Pile Oscillator System

R-P : Reactivity Pulser

Gy : Glory Hole

Gg : Grazing Hole

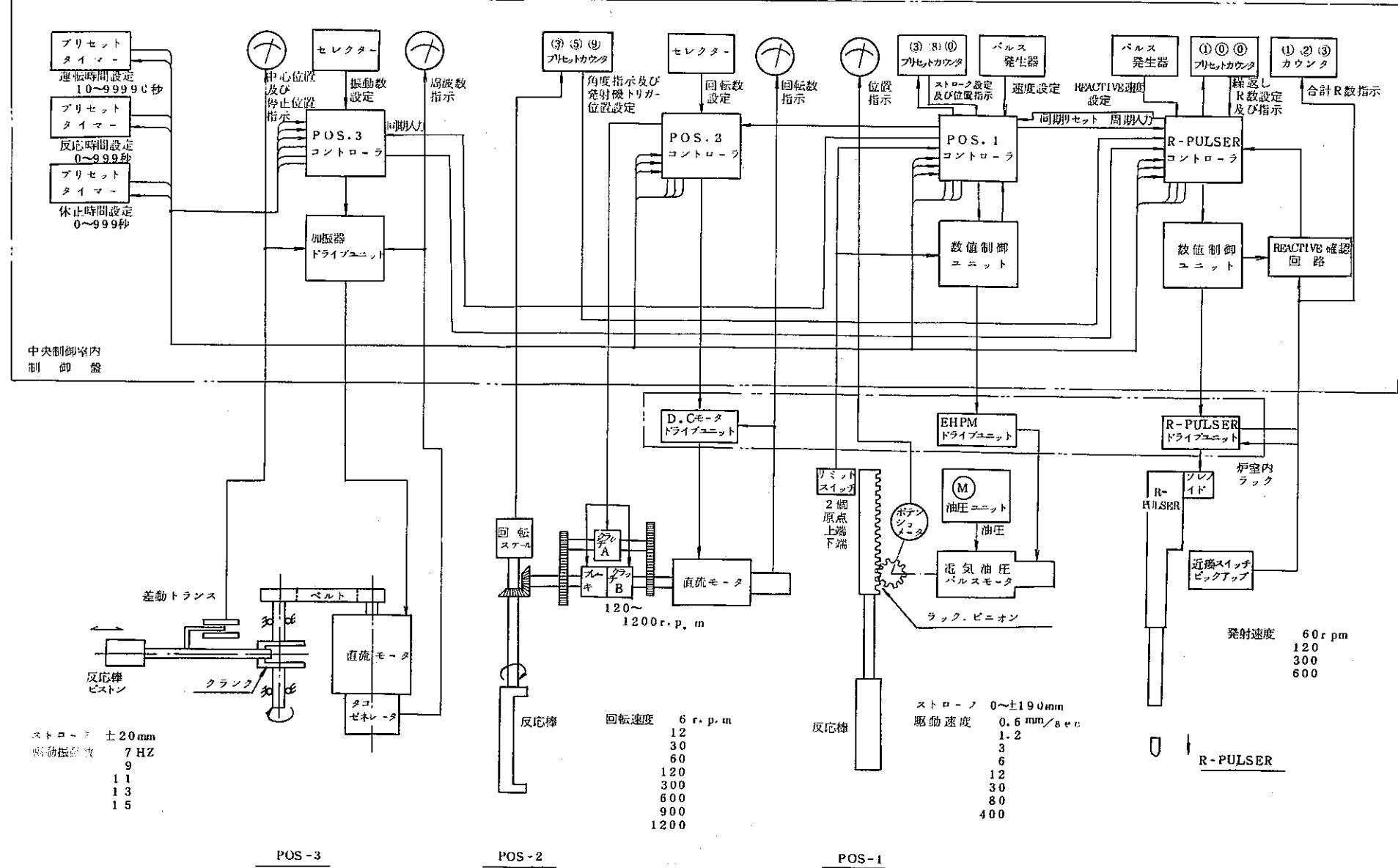


図 2-1 バイルオシレーター装置 制御系図

## 2-2 弥生非定常運転における臨界事故の模擬

この運転は即発未臨界状態で行われる。したがって、投入反応度が即発臨界以下では、投入率がゆるやかな臨界事故を模擬するに適した運転モードである。

弥生の非定常運転にはPOS 1と呼ばれるパイルオシレーターが使われる。

この運転方法は図2-2にその反応度変化を示すごとく、低出力臨界状態より規定量パイルオシレーターの引抜き（反応度は下がる）を行ない、同時に調整棒で補償反応度分を炉心へ添加して再び定常臨界（出力No）とする。この状態より高速400mm/secでPOS 1の反応度を投入するというものである。

若干の過渡状態を経て、炉出力は漸近ペリオドで上昇する。積算出力増大と共にフィードバック効果で実効的な反応度は減少して出力は頭打ちとなり、ピークを形成する。認可を受けている運転基準は最大出力200kW、積算出力0.6MW.sec/サイクル、7.2MW.sec/hour、炉心中心温度400°Cである。

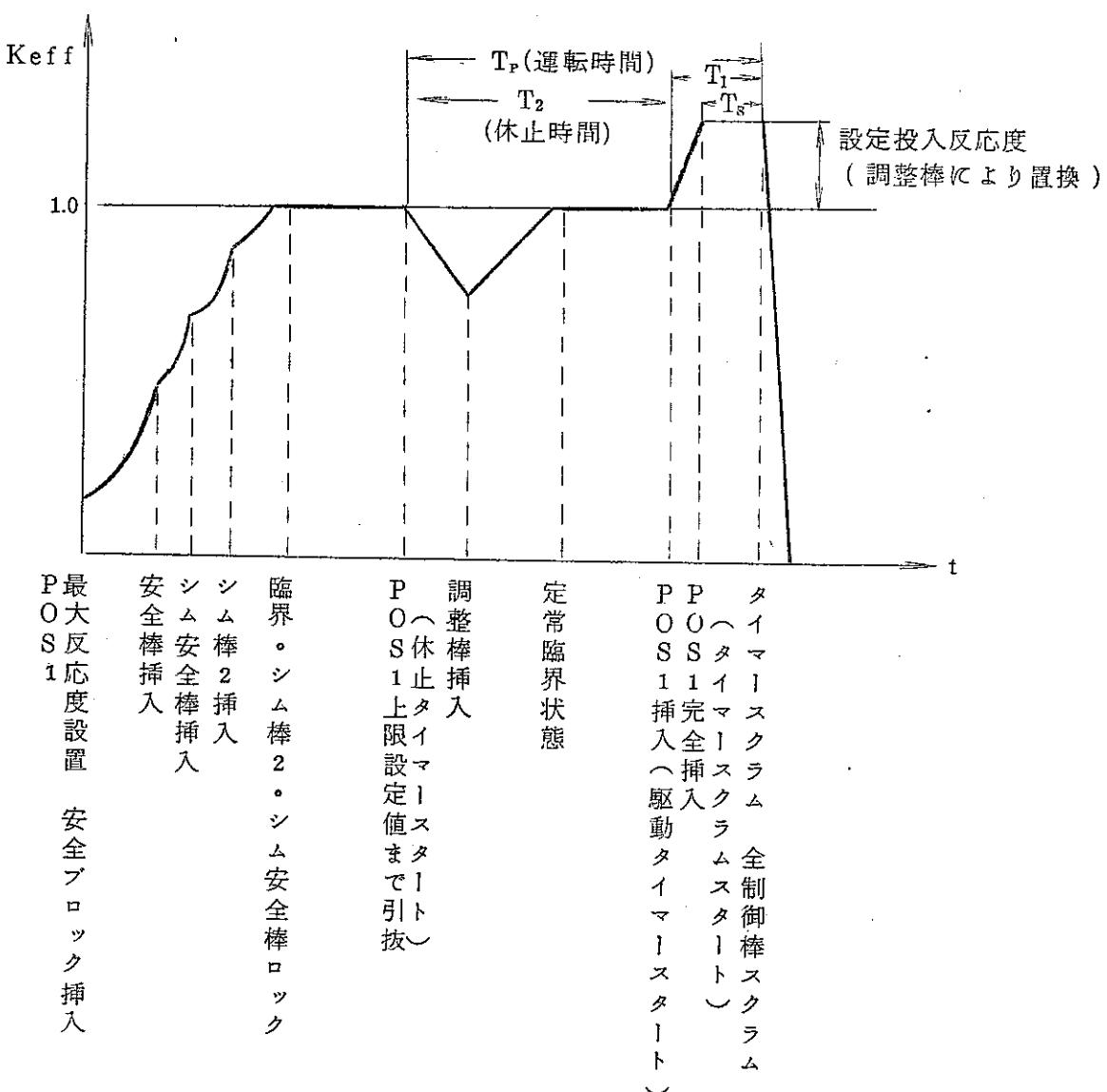


図 2-2 単発バースト運転における反応度投入方法

非定常運転の代表的な例について説明する。(図2-3, 2-4)

投入反応度  $0.57\% \Delta k/k$  を初期出力 1W および 200W の状態の炉にステップ状に投入する。系のフィードバックの様子をしらべるため冷却系の有・無の状態について測定が行われた。

グラフ中、炉心温度として、 $C_1$  (炉心中心温度)、 $C_2$  (炉心表面温度) を、バースト前の温度とバースト後の温度で示す。

このグラフより、初期出力にはよらず、冷却系有の方が冷却系無よりピーク出力が高い。出力波形としては同傾向を示す。

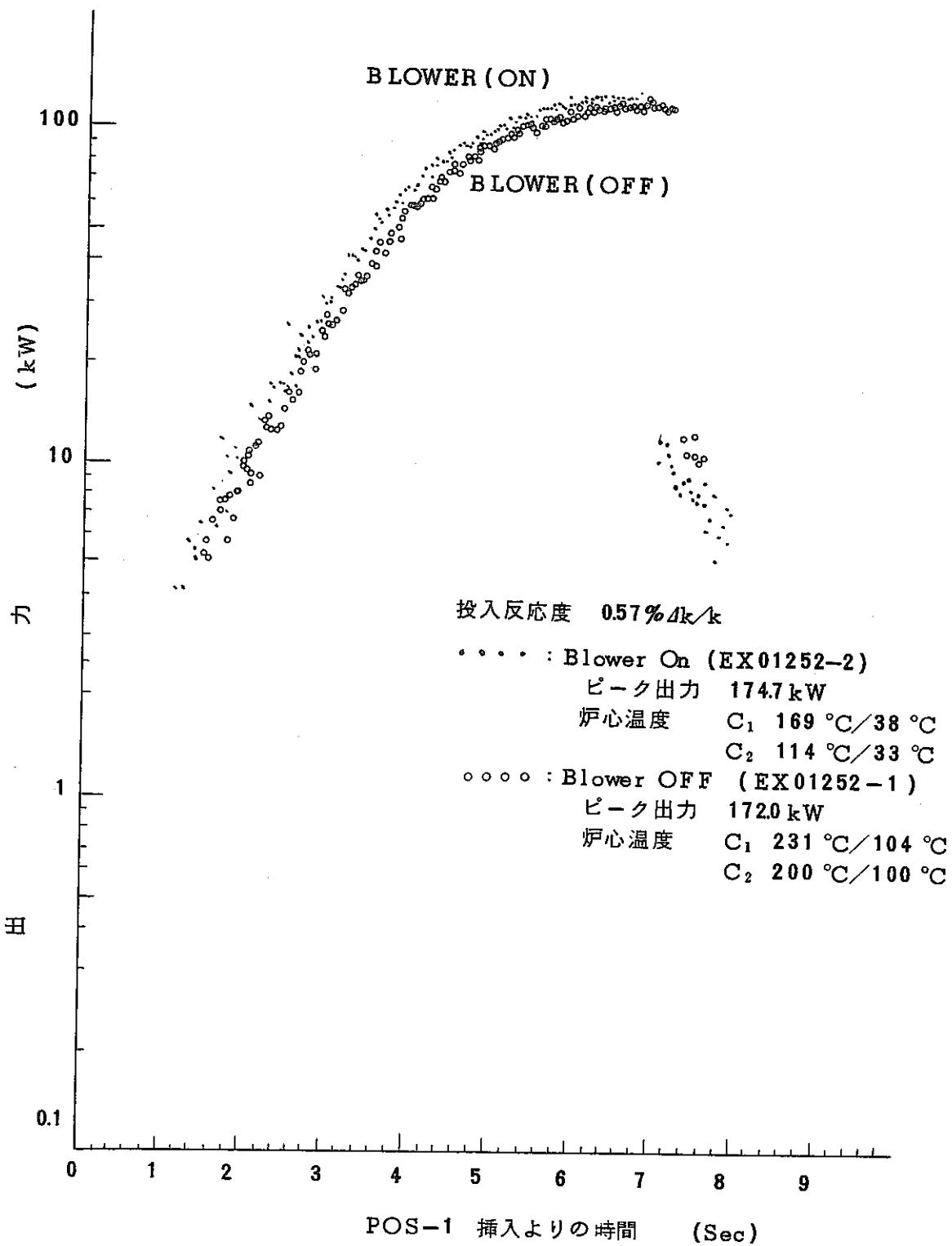


図 2-4 初期出力 200W より冷却系の有無による出力上昇出力波形の相違

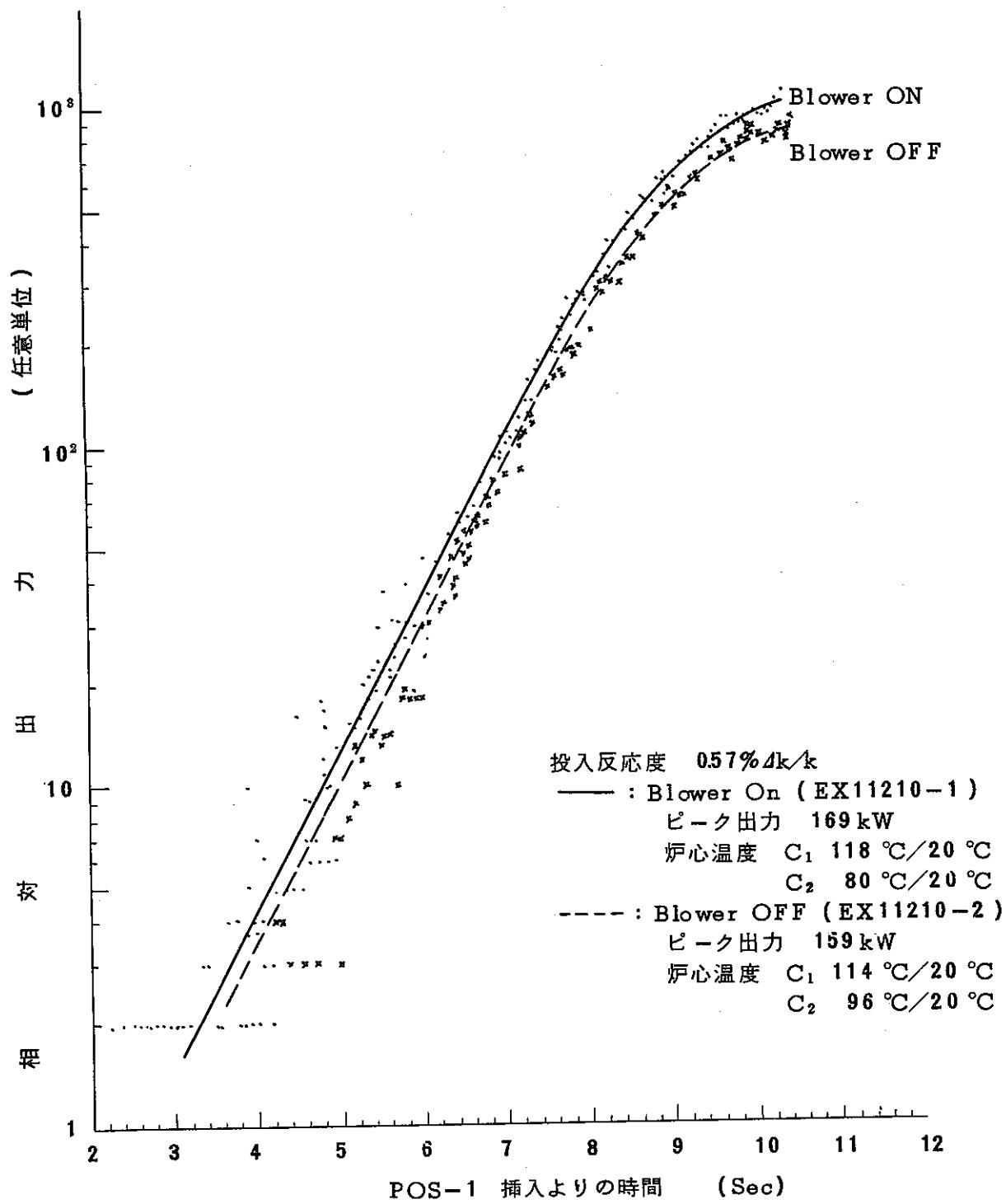


図 2-3 初期出力 1W より冷却系の有無による出力上昇出力波形の相違

### 2-3 弥生反応度パルス運転における臨界事故の模擬

この運転は、即発臨界状態で行われる。したがって、投入反応度が即発臨界以上で、投入率が急峻な臨界事故を模擬するに適した運転モードである。ここで述べる弥生の反応度パルス運転にはPOS 1+5というバイルオシレーターの組み合わせが使われる。この運転方法は図2-5にその反応度変化を示すとく、規定のPOS 1引抜き、RR挿入の状態で出力平衡状態( $n_0$ )を確認後POS 1の最大反応度位置までの挿入を行うと、RRの挿入反応度のペリオドで決まる出力上昇が開始される。出力 $L_1$ を検知してタイマーを作動し、規定の時間後所望の出力レベルでPOS 5の動作を開始させる。この時の出力変化の概要は指數関数的に変化するベース出力にパルス出力が載ったかたちとなる。

本モード(POS 1+POS 5)に対する反応度パルス運転位置及び制限出力は以下の通りである。

運転位置 B, Cにおいて 0.6 MW・sec/サイクル以下

7.2 MW・sec/h 以下

20 kWh/1日 以下

運転位置 C-, C+において 0.6 MW・sec/サイクル以下

3.6 MW・sec/h 以下

1 kWh/1日 以下

本モードにおける典型的なパルス出力例を図2-6に示す。

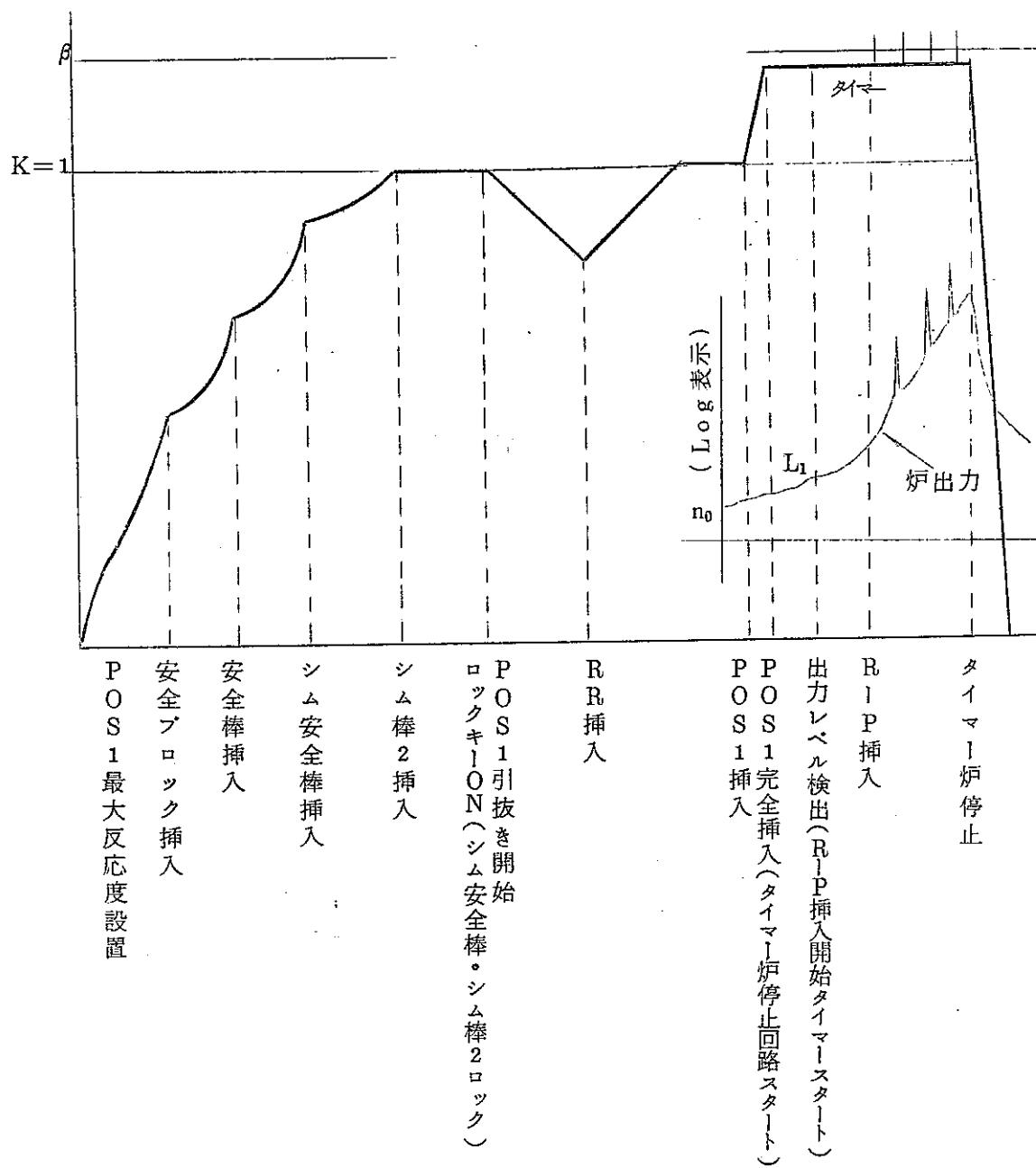


図 2-5 POS-1 × POS-5 (R-Pulser) パルス運転

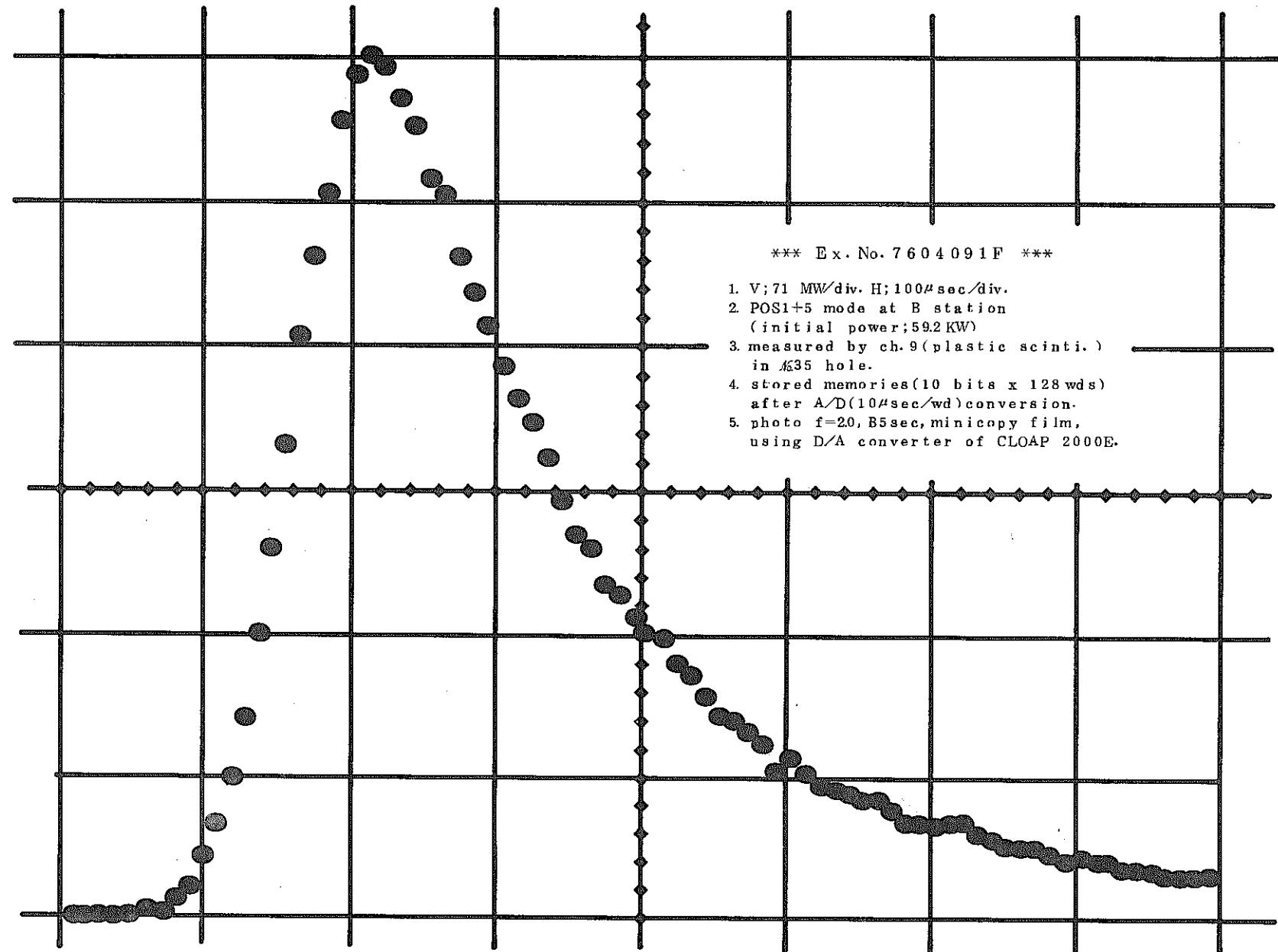


図 2-6 弥生反応度パルス出力波形

### 3. $\gamma$ 線検出器照射試験

#### 3-1 $\gamma$ 線検出器

##### 1. 検出器の動作

$\gamma$  線検出器の  $\gamma$  線検出機構は次の通りである。

$\gamma$  線検出部分は、プラスチックシンチレータと光電子増倍管より成り立っている。プラスチックシンチレータはガンマ線場に置かれるとその強度に比例した微弱な光を発する。この光子を光電子増倍管にて、電子回路を動作させるに必要な電流に増幅する。

この電流があらかじめ設定された閾値を越えると警報信号を発生する。

##### 2. 検出器の回路構成

###### (1) ブロックダイアグラム

ブロックダイアグラムを図 3-1 に示す。

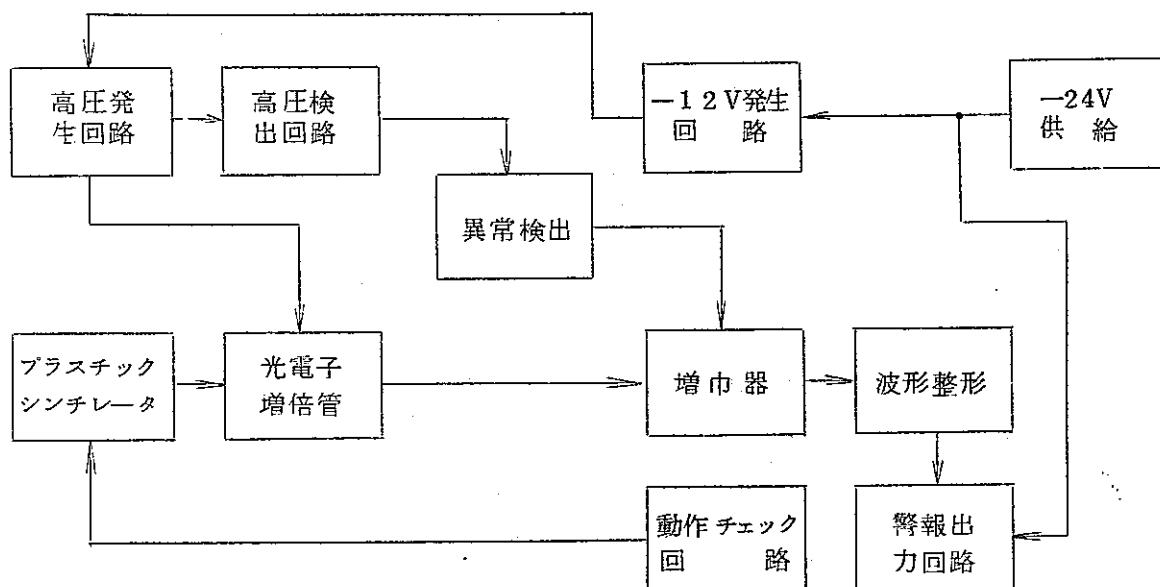


図 3-1  $\gamma$  線検出器ブロックダイアグラム

###### (2) 各ブロック動作 (詳細回路は図 3-1')

###### (i) $-12V$ 発生回路

T 14 のエミッタホロワによる簡易安定化電源です。基準電圧は Z 2, Z3 (共に 6.8 V) によって得られる電圧を P 4 ポテンショトリマーにより分割し T 14 ベースに供給される。

###### (ii) 高圧発生回路

$T_5, T_6$  より成るマルチバイブルエタ, 絶縁昇圧トランジスト TR1, 4 倍圧整流回路, L 1 の基準電圧及び  $T_2 \sim T_4$  より成る誤差増幅, 制御から構成される安定化電源である。

この安定化高圧電源は、ポテンショトリマーにより 1200V より 1800V まで出力を可変出来る。

(iii) プラスチックシンチレータ

40mm  $\phi$  × 50mm 長さのプラスチックシンチレータが用いられている。

(iv) 光電子増倍管 (PM)

150AVP (フィリップス製) が用いられている。

光電子増倍管は光子に感度を有し、その量に応じた電子増幅を行う管であり、アノード電流はその分割抵抗を流れる電流から得られる。

$\gamma$ 線がない時、即ちカソードに光子があたらない時のアノード電流は暗電流といい、このPMでは 50 nA 以下である。

また、分割抵抗を流れる電流は

$$HV / 29.25 M\Omega = I \quad \text{で表わされる。}$$

ここで HV を約 1500V とすると  $I = 50 \mu A$  である  $\gamma$  線がプローブにあたりアノード電流が流れた時、分割抵抗に流れる電流は  $I - i$  となる。

アノード電流が  $10 \mu A$  で警報が働くように (360mR/h のトリップレベルを  $10 \mu A$  としたため) した時、分割抵抗を流れる電流は  $50 - 10 = 40 \mu A$  になる。

このアノード電流  $10 \mu A$  は  $I = 50 \mu A$  の 20 % 減少に相当する。

(v) 高圧検出回路

本回路は 2 つの警報回路を有している。

1 つは、PM のアノード電流があらかじめ決められた値 ( $10 \mu A$ ) になった時、警報信号を出すもの、他の 1 つは PM の各ダイオードに接続されている分割抵抗に流れる電流があらかじめ決められた値 ( $40 \mu A$ ) 以下になつた時、警報信号を出すものである。

高圧検出回路は後者の回路で、高圧電源が異常事態で減少するか消滅した時に  $P_2$  及び  $R_{15}, R_{16}$  の電圧降下により検出する。正常な場合  $-12V$  を基準にして約  $0.05V$  である。

(vi) 異常検出

高圧異状を  $T_7$  のベースにて検出します。

即ち、電流が減少もしくは消滅した時  $T_7$  は ON し、このとき  $\gamma$  線の有無にかかわらず警報信号が出る。

(vii) 増巾器

$\gamma$  線がプローブにあたりアノード電流が流れると  $P_3$  及び  $R_{19}$  にての電圧降下が増大し  $T_8$  は OFF となる。この  $T_8$  のベースには異状検出による高圧異状をも同様に  $T_8$  OFF する様に働く。

増巾器の電源は  $Z_1, R_{28}$  にて  $5 \sim 6V$  ( $-12V$  基準にて) の安定化電源である。

又、  $P_3$  による電流は  $5 \mu A \sim 20 \mu A$  にて設定出来る。

(viii) 波形整形(シュミット)回路

$\gamma$ 線のない時は  $T_{10}$  OFF,  $T_{11}$  ON の状態になっている。

今  $\gamma$ 線があたり、即ち  $T_9$  コレクタ電圧が増加し遂には  $T_{10}$  をONにし、シュミット回路は反転する。

(ix) 韶報出力回路

シュミット回路の反転により  $T_{12}$  OFF になる。よって  $T_{13}$  OFF となる。 $T_{13}$  は -24V 電源に接続されているので出力信号は韶報時負電圧(-24V)より0になる方向に動く。

(x) 動作チェック回路

C20の電荷をリレーRS1の接点を通し、白熱灯を点灯することにより臨界事故をシュミレーションする。

$\gamma$ 線検出器の外観等を写真3-1~3に示す。

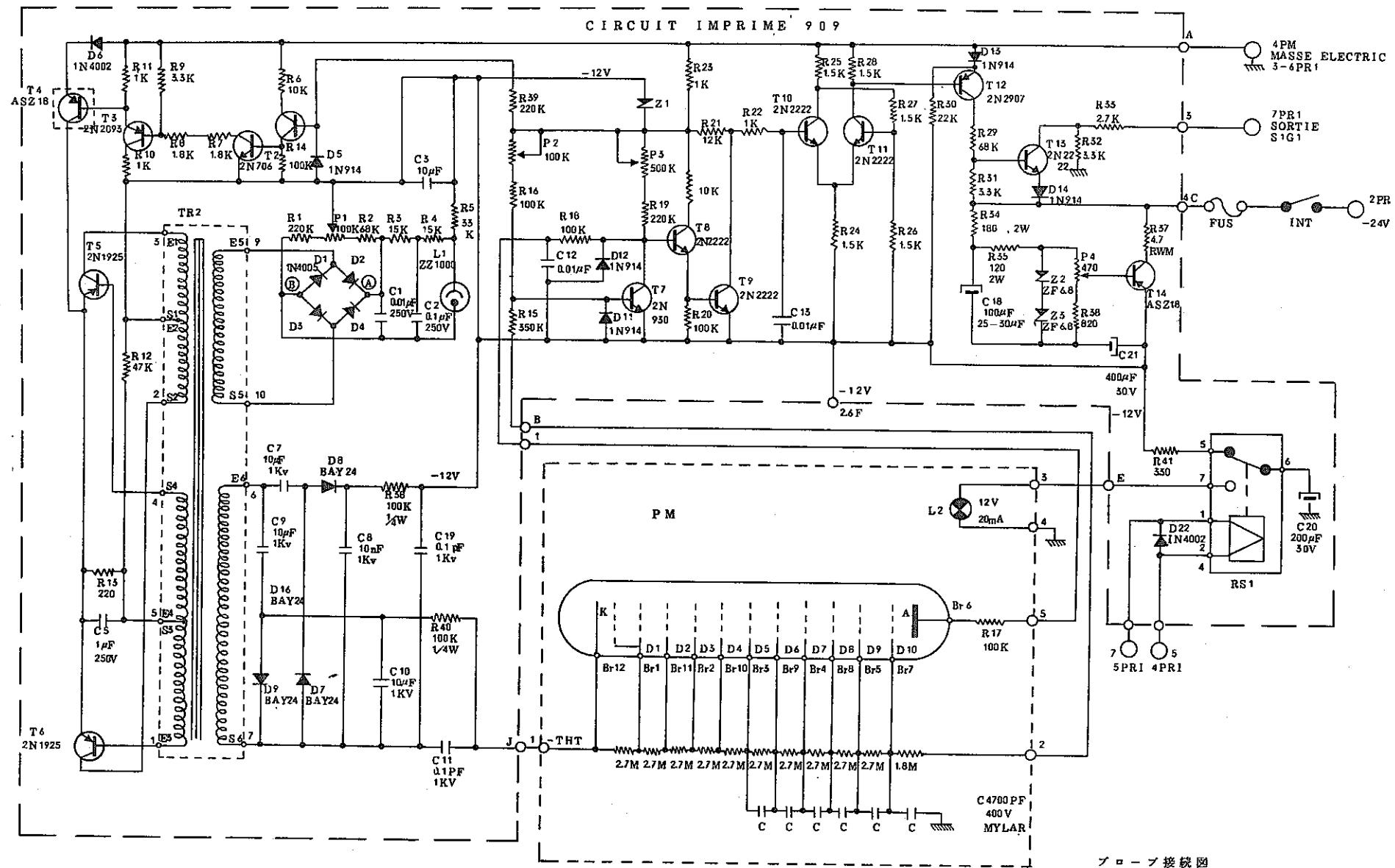


図 3-1' 詳細回路図

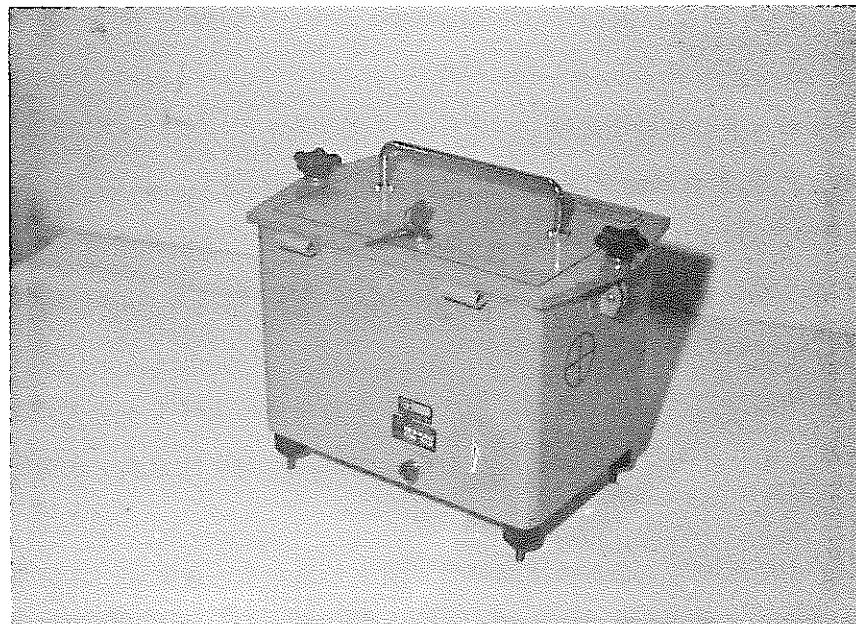


写真 3-1 ガンマ線検出器外観

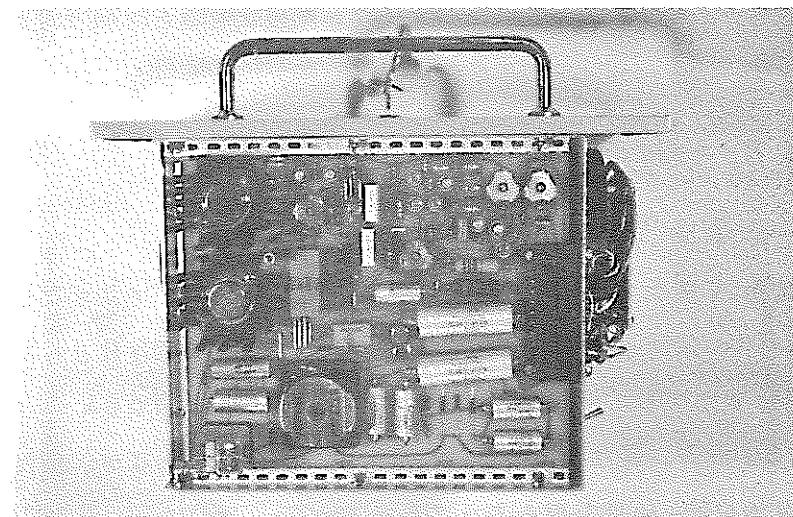


写真 3-2 ガンマ線検出器回路部分

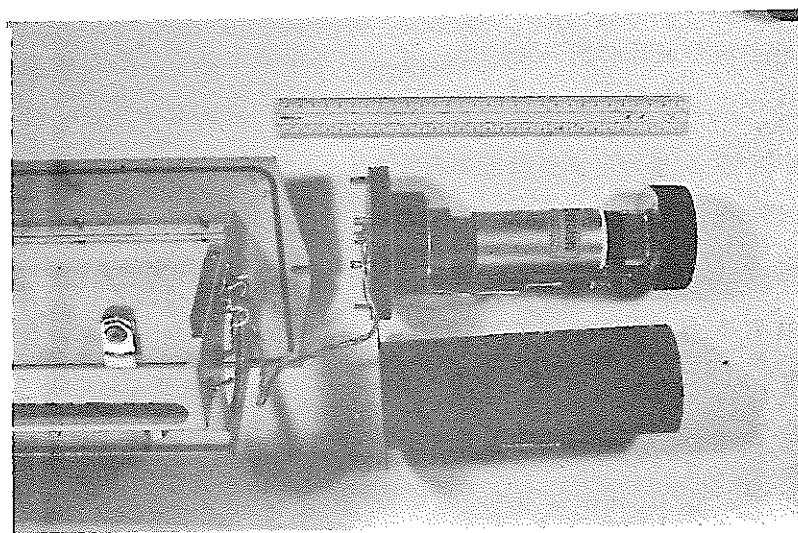


写真 3-3 ガンマ線検出器シンチレータ及びフォトマル部分

### 3-2 非定常運転モードにおける試験

Ra 線源による予備照射試験結果より検出器の dynamic range は照射線量率で ベックグラウンドレベルから  $10 \text{ R/h}$  程度であることより、弥生の非定常運転で最高出力時の照射線量率が検出器の観測点（A 点）での飽和電圧（ $\approx -8 \text{ V}$ ）にほぼ等しくなる様に原子炉室内で検出器の照射位置を決定した。

次に、検出器の照射位置は同じままで、順次最高出力を更に上げて A 点での測定をくり返した。これは比較的緩かに変化するスパイク出力に対する検出器の追従性試験（含飽和特性）のためである。

検出器照射位置での照射線量率が検出器の警報閾値を越えると後に述べる図 3-3 からも判る通り、A 点電圧にステップ状の変化が生じるので警報発生の有無はこの A 点電圧の変化で確認できる。即ち、この時点において弥生の核計装では異常な出力変化はみられないので、A 点電圧に図 3-3 の如きステップ状の変化が生じた場合には、線源照射時と同様警報出力信号が発生したと見なせる。

#### (1) A 点電圧の測定方法

- (i) ブロック図を図 3-2 に示す。
- (ii) ブロック図中の DM701 の機能

アナログ量として変化する信号を特定の設定時間巾毎にサンプリングして、これをデジタル量として記憶する装置（デジタルメモリー）である。記憶容量としては  $10 \text{ H}$  当り  $1024 \text{ WORDS}$  あり、サンプリングの時間巾は  $1 \mu \text{sec}/\text{WORD} \sim 100 \text{ msec}/\text{WORD}$  まで 6 段切り換えである。一方、最大入力は信号の全変化巾で  $5 \text{ V}$  であるが、減衰器を利用すれば  $50 \text{ V}$  までの信号変化を処理し得るようになっている。

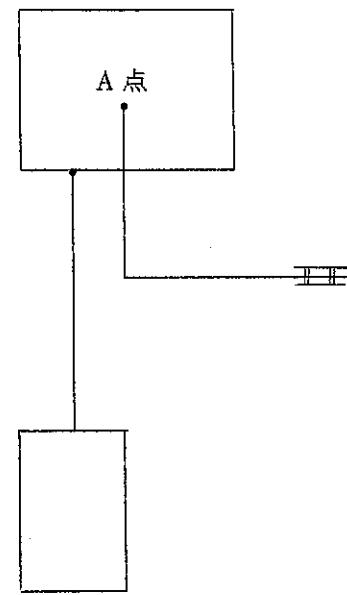
A 点電圧は検出器設置位置での照射線量率（ガンマ線束）に依存するアナログ量である。なお、今回の原子炉の非定常運転は POS 1 反応度の投入からスクラム（BASE 出力の最高値）まで 10 秒前後の運転であったので、非定常運転時（出力変動の緩かな臨界事故を模擬した場合に相当する）の検出器の外部放射線場の強度変化に対する追従性の確認を行うにあたり、DM701 のサンプリングの時間巾を  $10 \text{ msec}/\text{WORD}$  に設定すると、 $1024 \text{ WORDS} \times 10 \text{ msec}/\text{WORD} = 10.24 \text{ sec}$  になる故、POS 1 反応度投入からベースの最高出力までの原子炉のほぼ全出力変化に対する検出器の応答が確認出来た。

また DM701 の入力電圧レンジについては線源照射時の結果から A 点電圧の全変化巾は  $9 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$  ( $+1.27 \text{ V} \sim -8 \text{ V}$ ) であるがこの運転モードで検出器を炉頂 R-パンサー打込み孔真近に設置する場合には DM701 の入力レンジは  $5 \text{ V}$  フルスケールで充分であったのでそのように設定した。

原子炉室

測定室

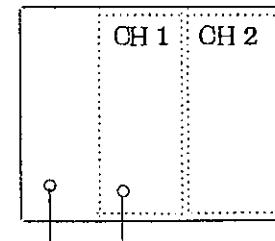
ガンマ線検出器



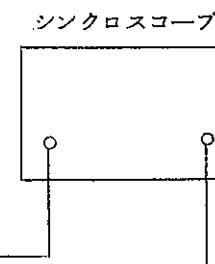
ケーブルダクト

3C-2V

DM 701



外部トリガー



原子炉制御室

POS 1 トリガー ▶

外部トリガー

図 3-2 非定常運転時のブロックダイアグラム

## (2) A点電圧の測定結果

照射試験には2個のガンマ線検出器を用い各々DM701のCH1, CH2を利用した。A点電圧変化の記憶結果はシンクロスコープに表示して、その結果を写真3-4[EX03101A], 写真3-5[EX03101B], 写真3-6[EX03101C]を示す。又、図3-3[EX03101B]について、「弥生」反応度パルス運動核計装CH8(CICO)との波形比較を示す。

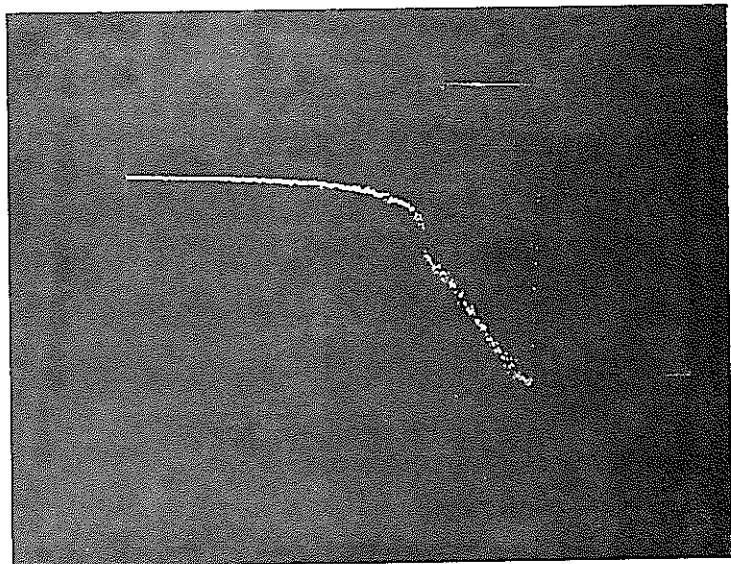
## (3) 評価

Ra線源による照射結果と比較して、 $\gamma$ 線, n線の複合放射線場に於ても放射場の強度変化が緩かな場合には、検出器は十分に原子炉の出力変化に追従し、しかも確実に警報を発する。

1) 検出器番号: S D C G 11 07-NO 241

設置場所: 炉 頂

測定機器: DM701, 100Word delay

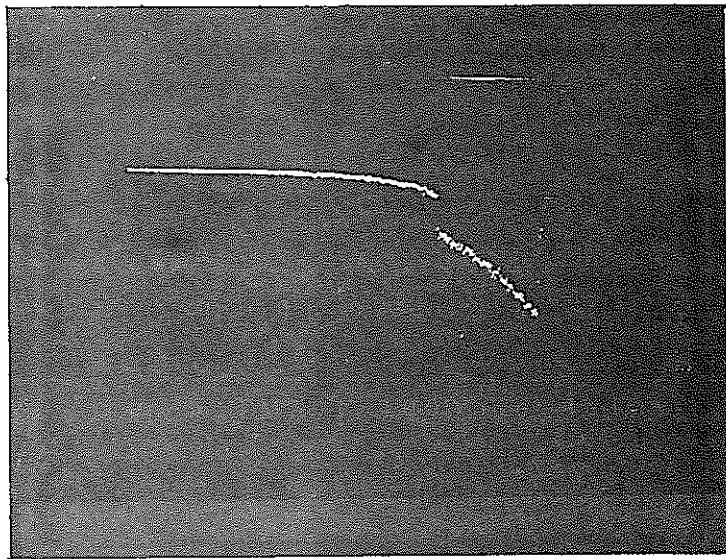


(電圧: 1V/div.  
スイープ時間: 5μs/div.)

2) 検出器番号: S D C G 11 07-NO 242

設置場所: 炉 頂

測定機器: DM701, 100Word delay



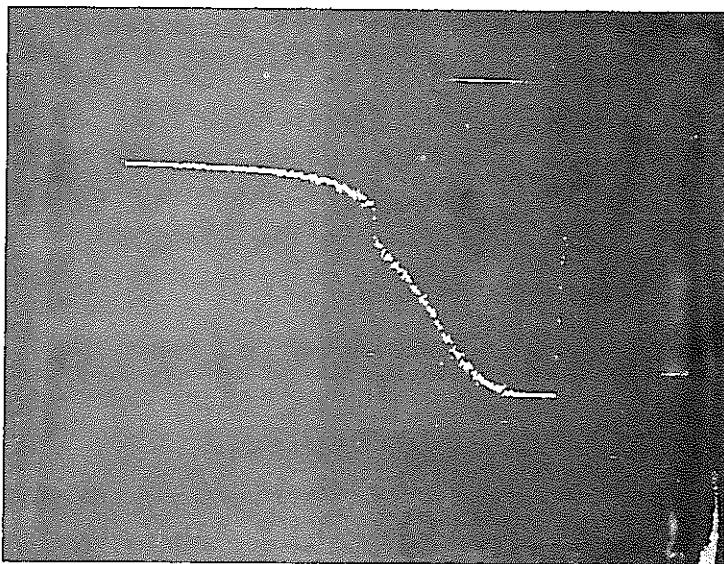
(電圧: 1V/div.  
スイープ時間: 5μs/div.)

写真 3-4 EX03101A 「弥生」非定常運転における  $\gamma$  線検出器の特性測定例  
(最高出力: 核計装 CH5にて 144 kW)

1) 検出器番号：SDCG 11 07-NO 241

設置場所：炉 頂

測定機器：DM 701

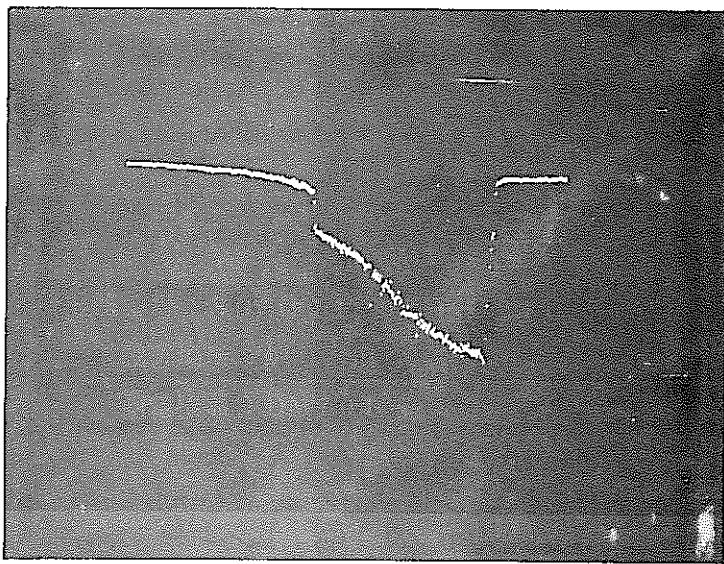


（電 壓：1V/div.  
スイープ時間：5μs/div.）

2) 検出器番号：SDCG 11 07-NO 242

設置場所：炉 頂

測定機器：DM 701



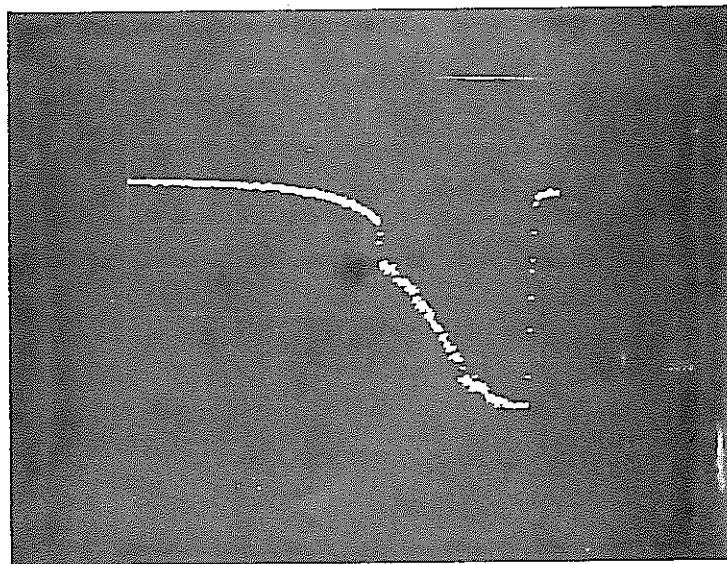
（電 壓：1V/div.  
スイープ時間：5μs/div.）

写真 3-5 EX 03101B 「弥生」非定常運転における $\gamma$ 線検出器の特性測定例  
(最高出力：核計装 OH 5にて 234 kW)

1) 検出器番号：SDCG 11 07-NO 241

設置場所：炉 頂

測定機器：DM 701

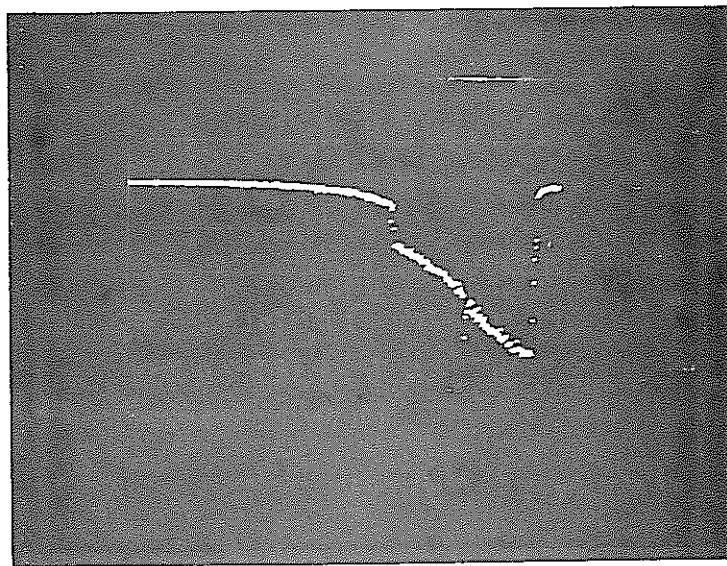


(電 壓: 1 V/div.)  
(スイープ時間: 5 μs/div.)

2) 検出器番号：SDCG 11 07-NO 242

設置場所：炉 頂

測定機器：DM 701



(電 壓: 1 V/div.)  
(スイープ時間: 5 μs/div.)

写真 3-6 EX 03101G 「弥生」非定常運転における  $\gamma$  線検出器の特性測定例  
(最高出力：核計装 OH 5 にて 205 kW)

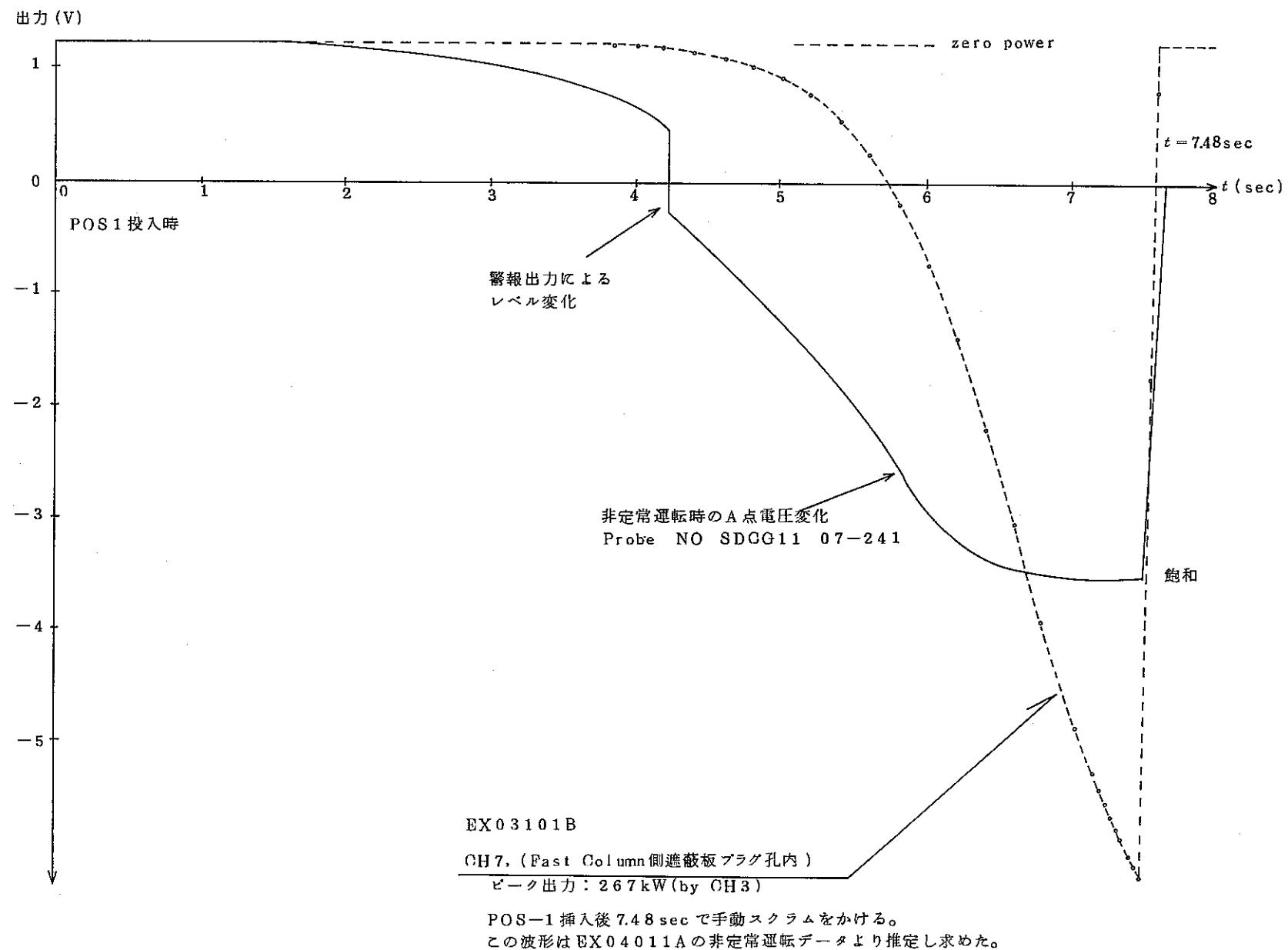


図 3-3 EX 03101B, 弥生非定常運転時臨界警報装置の応答

### 3-3 反応度パルス運転時の照射試験

#### (1) 概 要

急激な変化に対する検出器の応答試験は、ベース出力の上に打込まれる反応度パルス出力に対する追従性試験によって行う。更にパルス状に変化する放射線場に於ても警報出力を確実に発するか否かを確認する。

なお、この場合反応度パルスの打込み時のベース出力レベルは、検出器照射位置での照射線量率が  $200 \text{ mR/h}$  以下となるレベルでなくては、ベース出力の変化によって警報が出たのか、反応度パルス出力によって警報が出たのかは明らかでない。

#### (2) パルス波形の観測

- (i) 原子炉のベース出力変化に対する A 点電圧の追従性の確認後パルス出力変化に対する追従性を A 点電圧で観測した。原子炉のパルス出力変化に対する A 点電圧の応答特性に着目し、原子炉のパルス出力に相似のパルス波形を観測出来、臨界事故時のスパイクに対しても、スパイクの半値巾が原子炉の反応度パルス出力の半値巾程度以上であれば、検出器は十分に追従し得ることがわかつた。
- (ii) ここで EX 03101A 等のベース出力変化に対する観測結果(例 EX 03101A)より、ベース出力の上に打込まれた反応度パルス出力でたまたま DM-701 のサンプリング時にパルス出力が残っている場合にのみ R-バルサーの打込まれた時間( $t_i$ )及びレベルがわかる。(図 3-4)

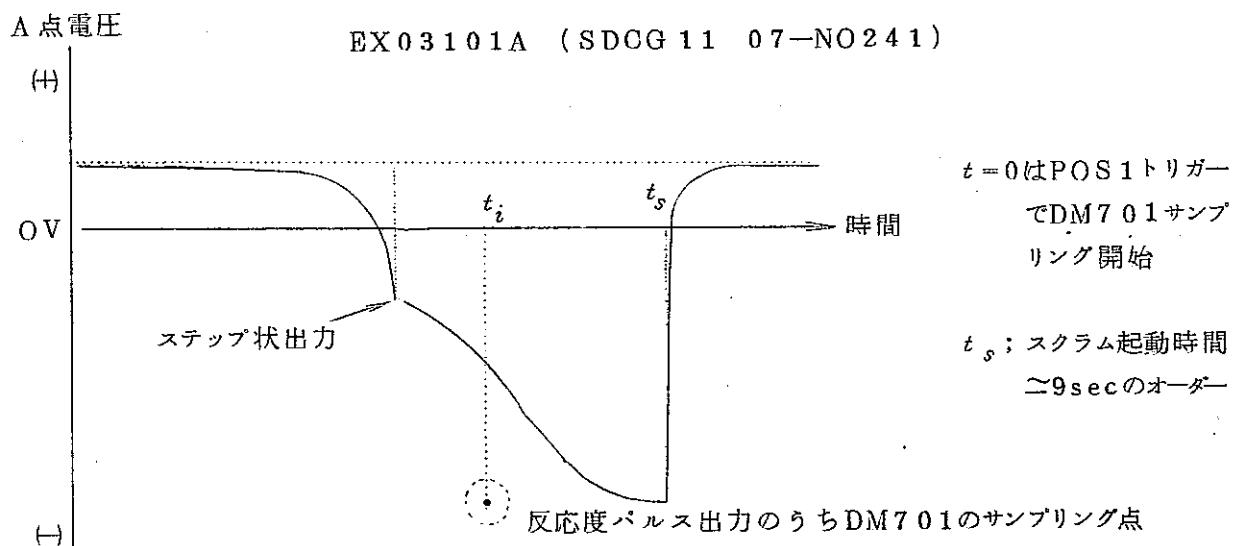


図 3-4 反応度パルス運転時出力波形

ベース出力変化を観測する場合 DM-701 は  $10 \text{ msec/word}$  で A 点電圧をサンプリングしている。一方反応度パルス出力波形はパルスの立ち上がりからパルスの消滅まで(パルスの幅の時間巾で)数  $\text{m sec}$  しかない。従って反応度パルス出力波形の DM-701 によるサンプリ

ング個数は1個となる。そのサンプリング値がEX03101A～C等の測定で記録された。

また、ベース出力と反応度パルス出力の時間領域の違いから上記反応度パルス出力をサンプリングしている点をR-ペルサーの打込み時間、及び打込みレベルと解釈しても原子炉運転の傾向を知る上では誤差は生じない。以上の状況から反応度パルス出力のサンプリング値は必ずしも反応度パルス出力の最高値には対応せず、そのサンプリング時間内の積算値である。

(iii) 反応度パルス出力波形の観測は図3-5のブロックダイアグラムで行う。A点(100kΩの抵抗の両端；ガンマ線検出器の回路図参照)での観測波形(測定電圧)を原子炉室から測定室に伝送する場合“原子炉室一測定室”間の距離が100m程度あり、伝送途中での波形の歪み、減衰等があるので炉室にDC-Ampを設置して観測波形を直流増幅して測定室に伝送する必要があった。この場合A点両端の抵抗が100kΩである事を考慮すると、入力インピーダンスが75Ω程度の普通のモジュールタイプのDC-Ampは利用出来ない。従って、別途入力インピーダンスの高いDC-Ampを設計、製作し利用した。(回路図、図3-6を参照)ここでDM-701の入力はフルスケール5Vで使用するので、このDC-Ampのdynamic rangeも5V程度に設計した。

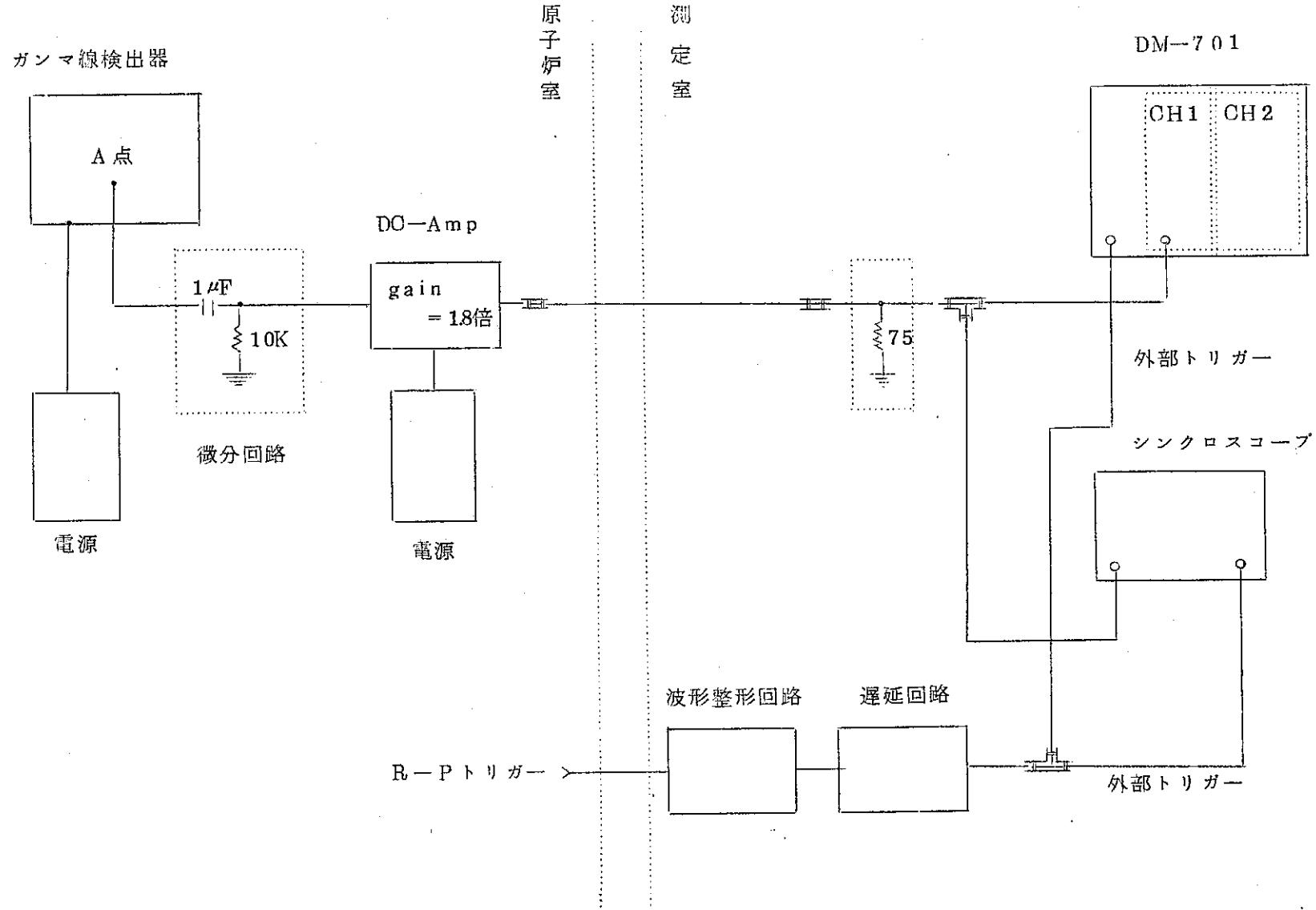


図 3-5 反応度パルス運転時のブロックダイアグラム

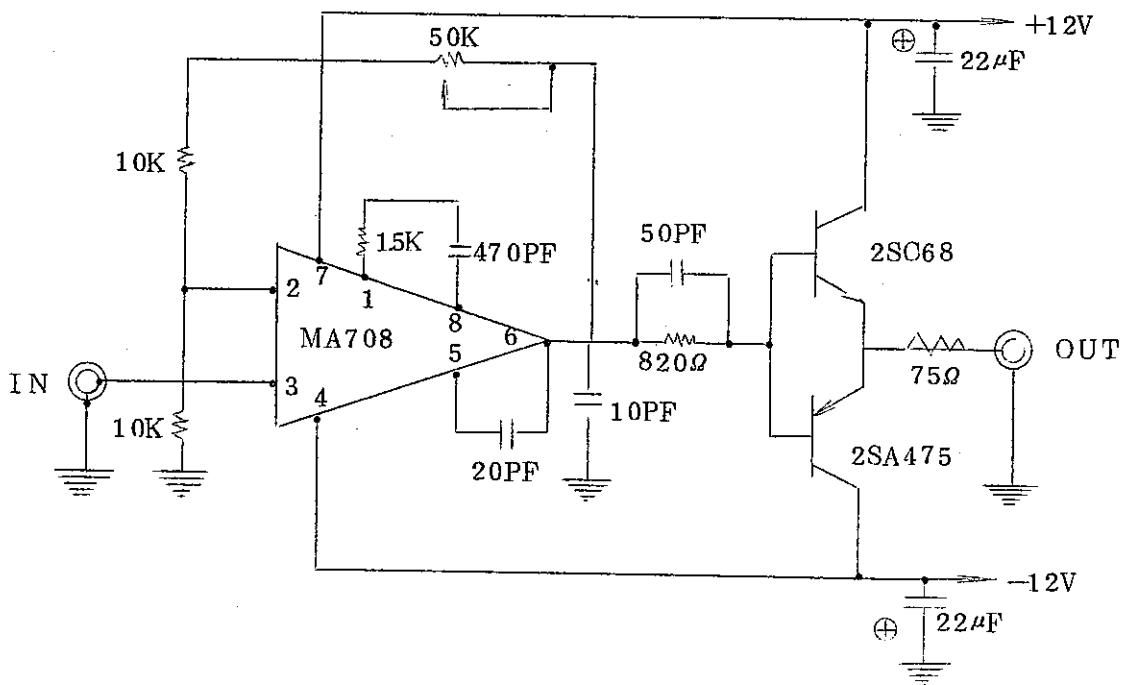


図 3-6 高入力インピーダンス DC アンプ

一方反応度パルスは、ベース出力の上に発生しているが、ベース出力の時間変化が“秒オーダー”（実際 EX03101A 等で 7~8 秒）であるのに対し反応度パルス出力変化は、“数 100 μ秒オーダー”であることから、ベース出力変化をキャンセルする様に、A 点出力電圧を微分にて取り出すと、DC-Amp の dynamic range が見かけ上広がることになる。即ち、

$$V_A(t) \text{ (A点電圧の時間変化)} = V_B(t) \text{ (ベース出力に対する時間変化)}$$

$$+V_P(t) \text{ (反応度パルス出力に対する時間変化)}$$

上式の両辺を微分（ハイパスフィルター）すると

$$\frac{dV_A(t)}{dt} = \frac{dV_B(t)}{dt} + \frac{dV_P(t)}{dt} \approx \frac{dV_P(t)}{dt} \quad (\because \frac{dV_B(t)}{dt} \approx 0)$$

従って反応度出力パルスに対する A 点電圧の変化分のみを直流増幅すればよい。

但し、ここで微分回路の時定数をあまり小さくすると  $V(t)$  が実際に微分された波形となるので注意を要する。

#### (iv) 出力波形観測

図 3-7 に output 波形の説明を行なう。

検出器の dynamic range は、線源照射結果から  $\approx 9V$  ( $+1.27V \sim -8V$ ) 程度であるから観測されたパルス出力波形に生じる飽和現象を解析する場合 DC-Amp (5V) 及び検出器の dynamic range に關し注意すべきである。

但し、ここで観測波形に飽和が生じるのは次の(i), (ii)の場合である。

- (イ)  $N_0$  が A 点電圧で  $+1.27V \sim -3V$  ( $-8V + 5V = -3V$ ) にあり、しかも “反応度パルス出力の最大値に対する A 点電圧 ( $V_{p2}$ ) が検出器の飽和電圧以下 ( $\leq V_s \approx -8V$ ) の場合、観測パルス波形に生じる飽和は DC-Amp の dynamic range による制限である。
- (ロ)  $N_0$  が A 点電圧で  $-3V$  以下 ( $\leq -3V$ ),  $-8V$  以上 ( $\geq -8V$ ) (検出器の飽和電圧 =  $V_s \approx -8V$ ) であり “反応度パルス出力の最大値” に対する A 点電圧 ( $V_{p2}$ ) が  $-8V$  検出器の飽和電圧以下の場合、観測パルス波形に生じる飽和は検出器の飽和特性による制限である。

R-パルサーの打込みレベルが図 3-6 の  $N_0$  程度である限り、反応度パルス出力波形に對応する A 点電圧の変化巾としては ( $V_s - V_0$ ) である。

ここで反応度パルス出力波形の全体を捕えようとするとき、実効的に  $V_b \approx 0$  とすれば、検出器の dynamic range の全てを反応度パルス出力波形の観測のために利用出来る。 $V_b \approx 0$  とするには次の 2 つの方法が考えられる。

- ① 検出器の照射位置を変えて、炉心から遠ざける。
  - ② R-パルサーの打込みレベル  $N_0$  を下げる。
- ②の原子炉側の運転条件を変えるのは容易ではないので、實際は①の方法で試行錯誤的に原子炉室内で適当な場所を見い出して測定を行った。

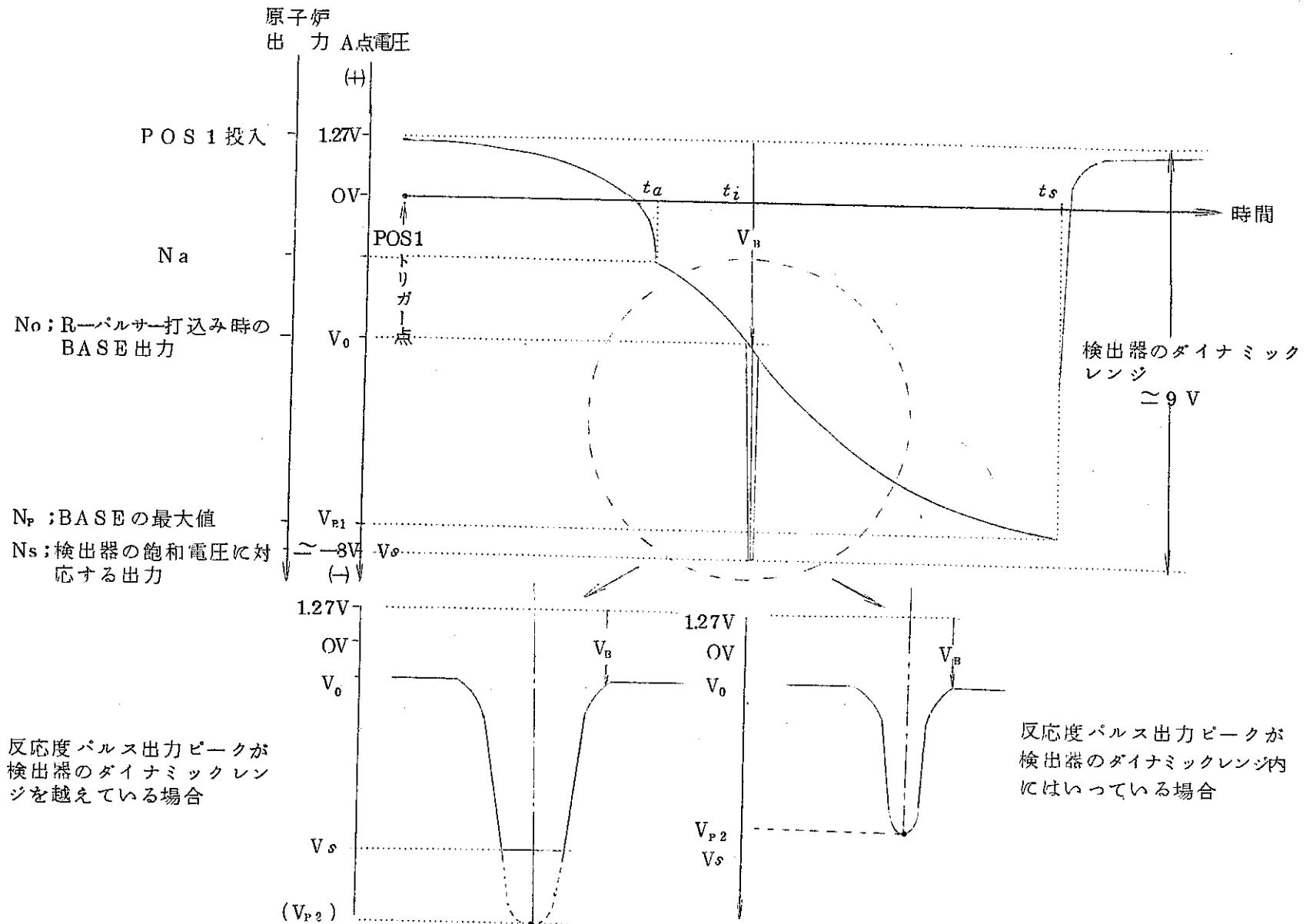


図 3-7 反応度パルス運転時出力波形

(V) 以上の方で観測された、反応度パルス出力に対するA点電圧の変化を写真3-7～  
EX03111A、写真3-8～EX03112C、写真3-9～EX03181G、写真3-10  
～EX03192C、写真3-11～EX03191A、写真3-12～EX03191Eの観測結果を示す。

又、図3-8～EX03111B、図3-9～EX03181Gの測定結果を「弥生」反応度パルス運転核計装CH8(CIC)及びCH9(プラスチックシンチレータ)の出力波形と共に示す。

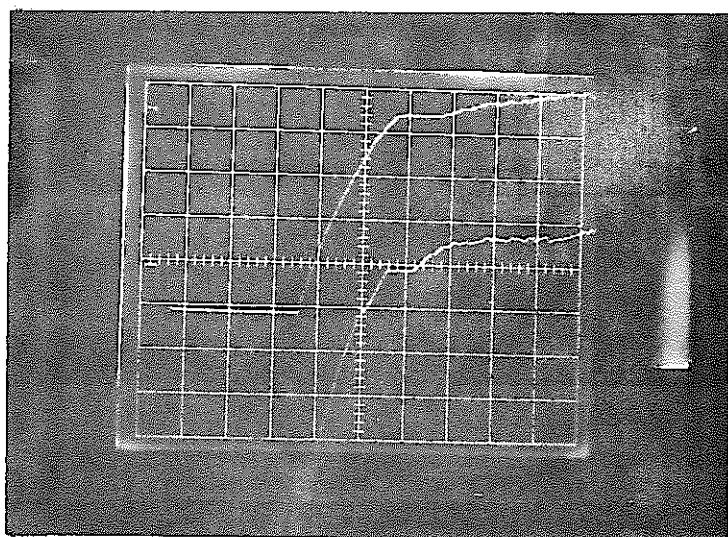
検出器番号：1) SDCG11 07-NO241 (上の波形)

2) SDCG11 07-NO242 (下の波形)

設置場所：炉 頂

測定機器：シンクロ

DCAmp Gain : 1.0 倍



両波形共

(電 壓 : 1V/div.)

(スイープ 時 間 : 200μs/div.)

注) 波形の飽和は、DCAmpによる飽和である。パルスピークは不明。

写真3-7 EX03111A 「弥生」反応度バルス運転における $\gamma$ 線検出器の特性測定例  
(最高出力：核計装OH8にて，25.5MW)

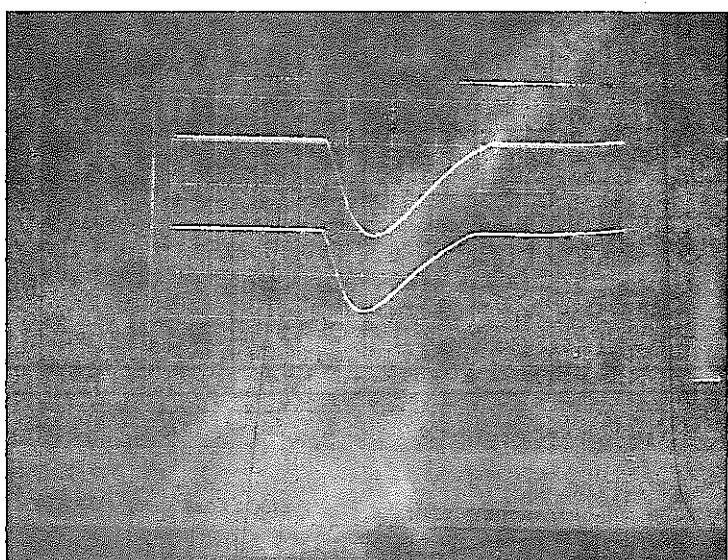
検出器番号：1) SDCG11 07-NO241 (上の波形)

2) SDCG11 07-NO242 (下の波形)

設置場所：炉室床面の炉壁ぎわ

測定機器：シンクロ

DCAmp Gain : 1.8 倍



両波形共

(電 壓 : 2V/div.)

(スイープ 時 間 : 200μs/div.)

写真3-8 EX03112C 「弥生」反応度バルス運転における $\gamma$ 線検出器の特性測定例

(最高出力：核計装OH8にて，18.9MW)

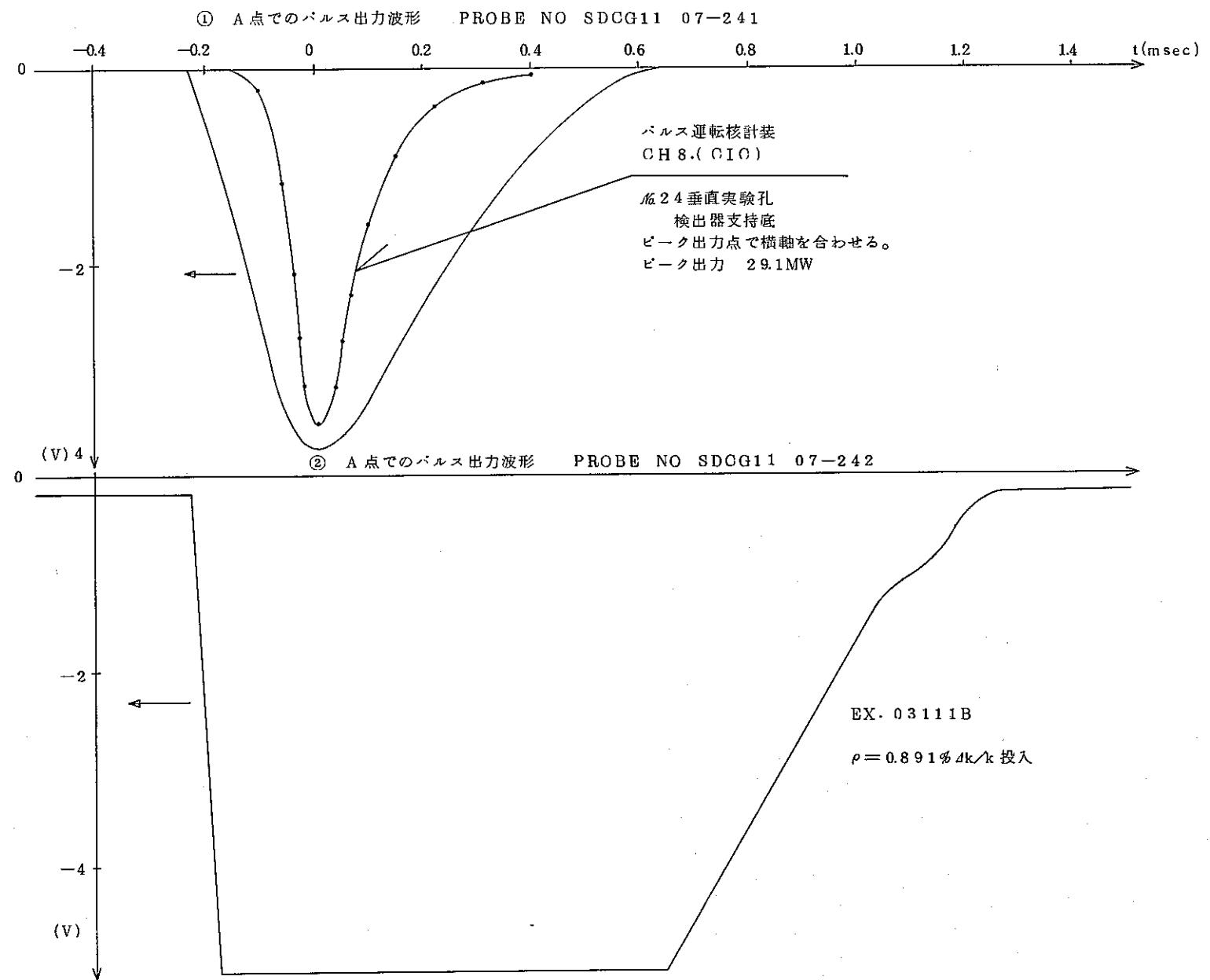
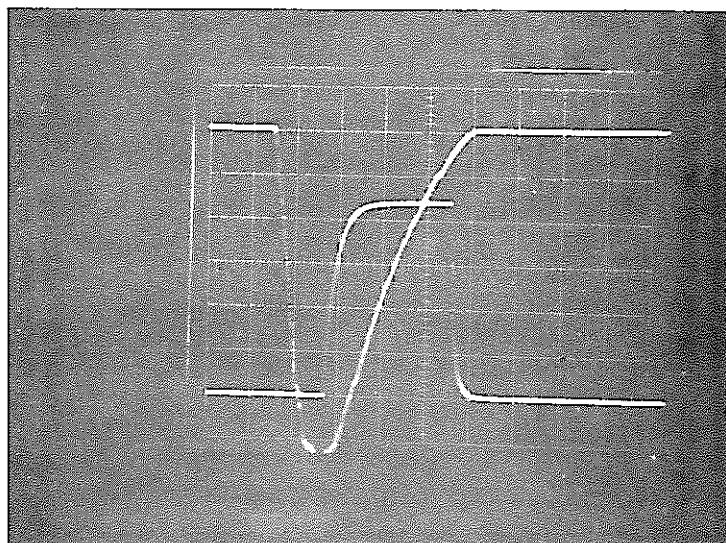


図 3-8 EX03111B 弥生反応度 パルス運転時の臨界警報装置の応答(1)

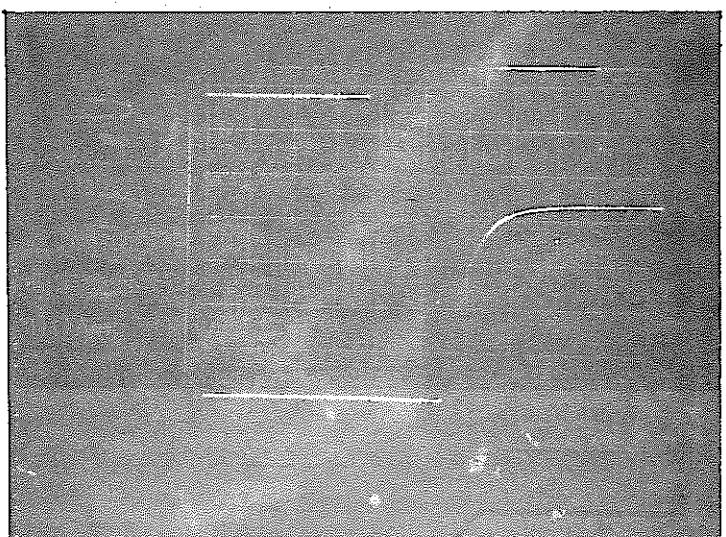
検出器番号：1) SDCG11 07-NO241 (上の立下り波形)  
 2) アラーム (下の立上り波形)  
 設置場所：炉 頂  
 測定機器：シンクロ  
 DCamp Gain : 1.8 倍



電 圧  
 1) 0.5V/div.  
 2) 5V/div.  
 スイープ 時間 200μs/div.

注) パルス電圧 700mV (360mR/hrに対応) にてアラーム出力有り、遅延時間は約200μsである。アラーム立下りが約200mVであるのは、シェミットのヒステיסである。  
**写真3-9 EX03181G 「弥生」反応度パルス運転におけるγ線検出器の特性測定例**  
 (最高出力：核計装CH8にて，1.62MW)

検出器番号：1) SDCG11 07-NO241 (上の立下り波形)  
 2) アラーム (下の立上り波形)  
 設置場所：炉 頂  
 測定機器：シンクロ  
 DCamp Gain : 1.8 倍



電 圧  
 1) 0.1V/div.  
 2) 5V/div.  
 スイープ 時間 100μs/div.

**写真3-10 EX03191A 「弥生」反応度パルス運転におけるγ線検出器の特性測定例**  
 (最高出力：核計装CH8にて，7.6MW)

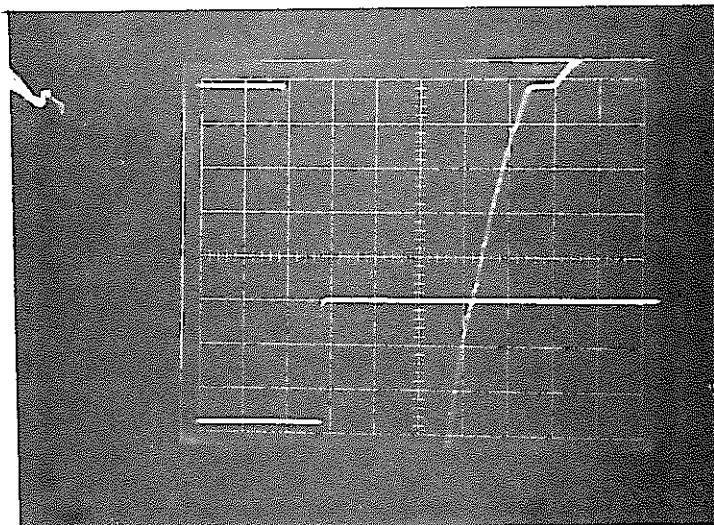
検出器番号：1) SDCG11 07-NO242 (上の立下り波形)

2) アラーム (下の立上り波形)

設置場所：炉 頂

測定機器：シンクロ

DCAmp Gain : 1.8倍



電圧

1) 1v/div.

2) 1v/div.

スイープ 時間 200μs/div.

注) アラーム出力は1/10にアッテネイト  
パルス消滅の後、アラームの出力は非定常にて線量率が200mR/hr以上と思われる。

写真3-11 EX03191E 「弥生」反応度パルス運転における $\gamma$ 線検出器の特性測定例  
(最高出力：核計装OH8にて，8.65MW)

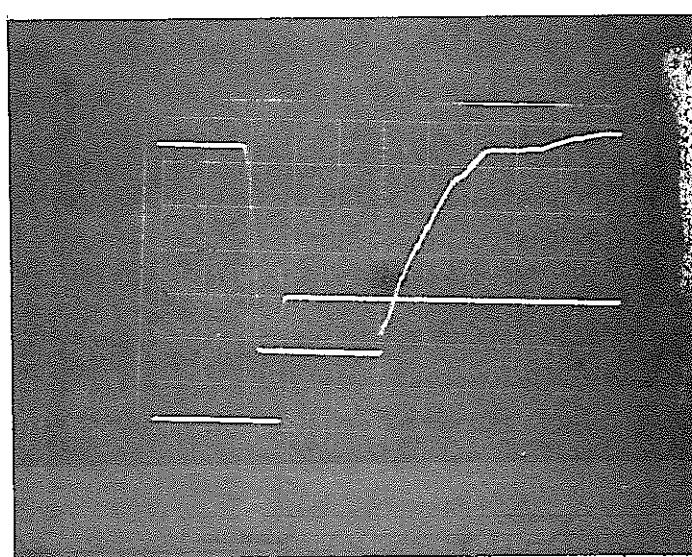
検出器番号：1) SDCG11 07-NO242 (上の立下り波形)

2) アラーム (下の立上り波形)

設置場所：炉 頂

測定機器：シンクロ

DCAmp Gain : 1.8倍



電圧

1) 2v/div.

2) 1v/div.

スイープ 時間 200μs/div.

注) アラームは1/10にアッテネイト  
パルス波形の飽和はDCAmpによる。

写真3-12 EX03192C 「弥生」反応度パルス運転における $\gamma$ 線検出器の特性測定例  
(最高出力：核計装OH8にて，3.93MW)

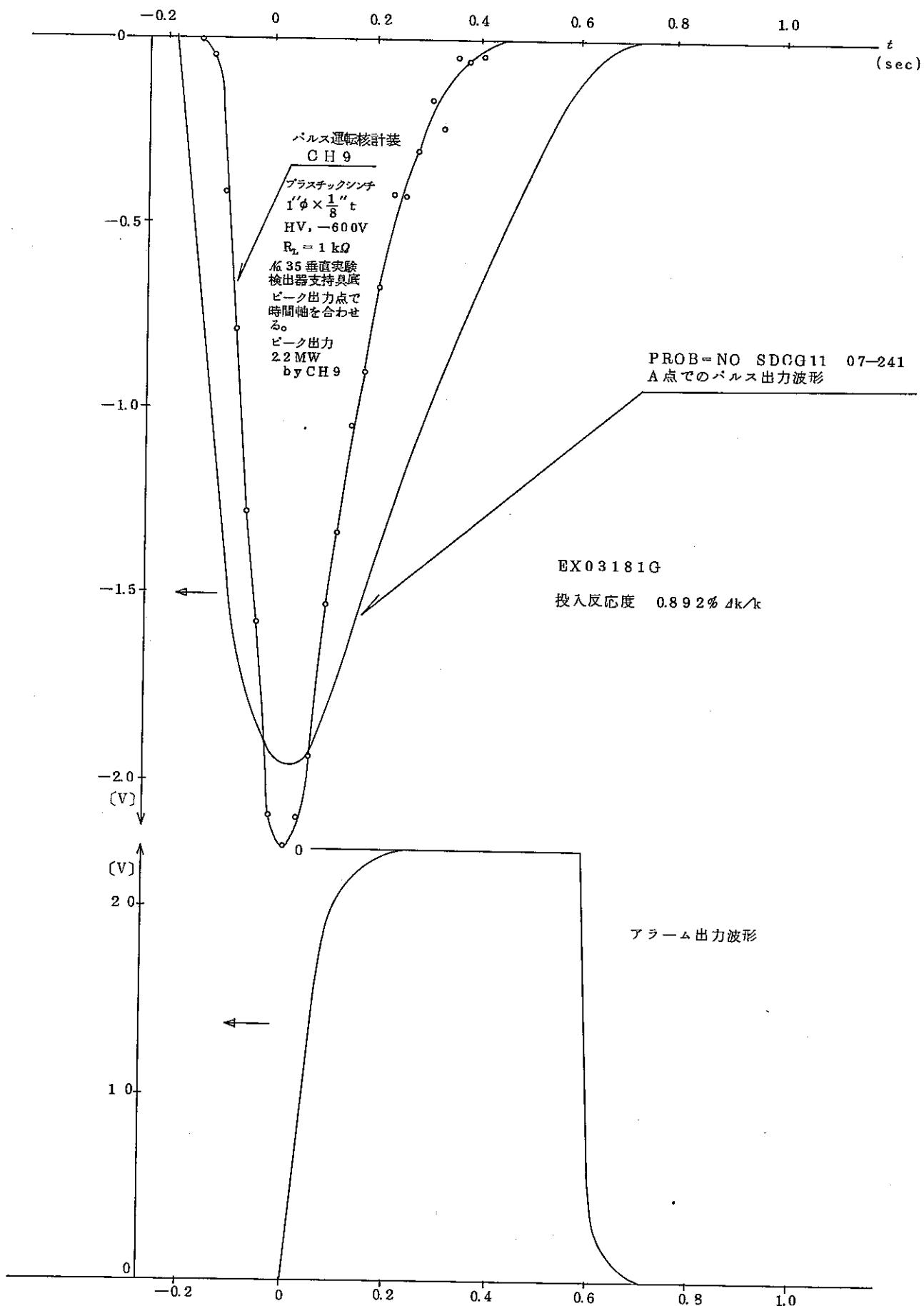


図 3-9 EX 03181G 弥生反応度パルス運転時臨界警報装置の応答(2)

#### (vi) A点でのパルス出力波形と警報出力信号の同時観測

以上で  $1 \text{ msec}$  前後でパルス状に変化する放射線場に対しても検出器は A 点電圧に関する限りは充分に追従し得る事が判った。

次に問題となるのは、警報出力信号との関係である。即ちパルス状に変化する放射線場に対しても、検出器設置位置での照射線量率が線源照射試験で確かめた値 ( $200 \text{ mR/hr}$ ) を越えたら確実に警報出力信号を発する事を以下の手順で観測する。

① EX03101A 等との関連性を求めるため、検出器の照射位置は (v) ① 等で行った照射位置から再び、炉頂の同じ場所に設置する。

② 先づ R-パルサー打込み以前に、BASE 出力によって警報出力信号が発生してはならないので、少なくとも図 3-7 で  $0 < V_B \leq 1.27 \text{ V}$  でなくてはならない。

即ち R-パルサーの打込み時のベース出力レベル ( $N_o$ ) は、 $t=t_a$  時のベース出力 ( $N_a$ ) 以下でなくてはならない。

(iv) ① とは異なり、今度は  $V_B \approx 0$  の効果を生むには R-パルサーの打込みレベル ( $N_o$ ) を下げる事が必須となる。

③ 対象とする反応度パルス出力の規模としては次の 2 つを考える。

ⓐ ; A 点での観測パルス波形に飽和が生じていない（出力規模の小さい）場合のパルス波形—警報出力波形

ⓑ ; A 点での観測パルス波形に飽和が生じている（出力規模の大きい）場合のパルス波形—警報出力波形

但し、ここで A 点での観測パルス波形に生じる飽和は、R-パルサーの打込みレベルが低くなければならぬから、全て DO-Amp による飽和である。即ち  $-3 \text{ V} \leq V_o \leq 1.27 \text{ V}$  である。

④ 更に上記 Ⓛ の観測結果から警報出力信号発生までの時間遅れを解析する場合に次の点に注意する必要がある。

ⓐ ; Ⓛ の A 点での観測パルス波形は、微分して、ベース出力に対する寄与を キャンセルして、反応度パルス出力波形のみが記録されているので A 点電圧が警報閾値に達するのは、（即ち検出器設置位置での照射線量率が  $200 \text{ mR/hr}$  に達するのは）ベース出力（による寄与）及び反応度パルス出力両方による照射線量率寄与によるので、ⓐ のパルス波形から直接警報閾値を読み取る事は出来ず、先ず R-パルサー打込み時のベース出力レベルを求め、次にその出力レベルでの線量率の寄与分（即ち A 点電圧の  $+1.27 \text{ V}$  からの降下分 =  $V_B$ ）を補正する必要がある。

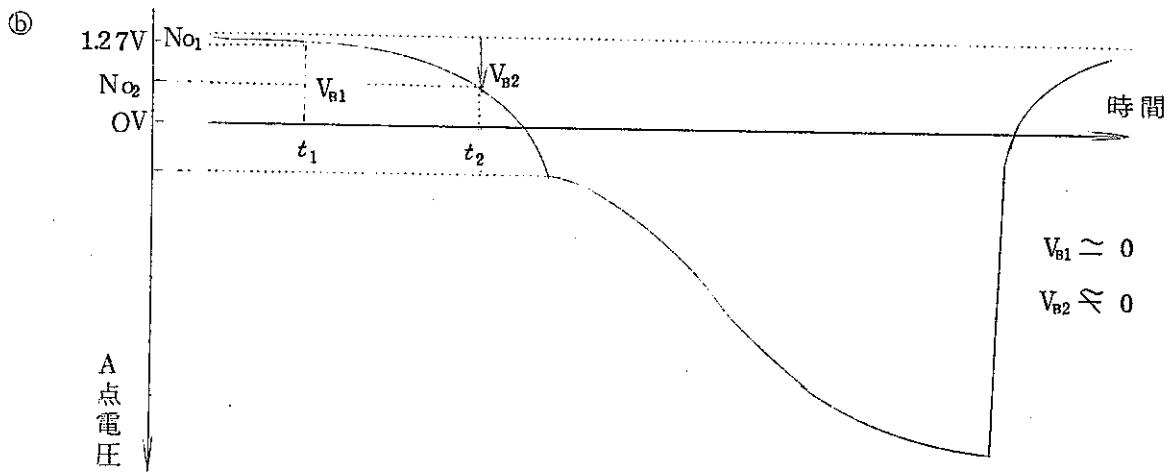


図 3-10

更に  $V_B$  の補正を行う場合、図 3-10 の如く R-パルサーの打込まれる時間 ;  $t_1$ ,  $t_2$  (POS1 投入時を  $t = 0$  とする) 即ち R-パルサー打込み時のベース出力レベル  $V_B$  を 0 と近似できるか否かにより異なる。

\* 1 ;  $V_{B1} \approx 0$  の場合は、⑤で観測したパルス出力波形の BASE-LINE から  $1.27 \text{ Volt} + 0.650 \text{ Volt} = 1.9 \text{ Volt}$  の点が警報出力の閾値 ( $V_T$ ,  $L_1$ ) である。

\* 2 ;  $V_{B2} \approx 0$  の場合は、⑤のパルス出力波形の BASE-LINE から  $1.27 \text{ Volt} + 0.650 \text{ Volt} - V_{B2} = 1.9 \text{ Volt} - V_{B2}$  の点が警報出力の閾値 ( $V_T$ ,  $L_2$ ) である。

### ⑥ 警報出力信号の遅れの解析

図 3-11, 12 に示す。又、図 3-13 にパルス出力波形と警報出力信号同時観測プロックダイアグラムを示す。

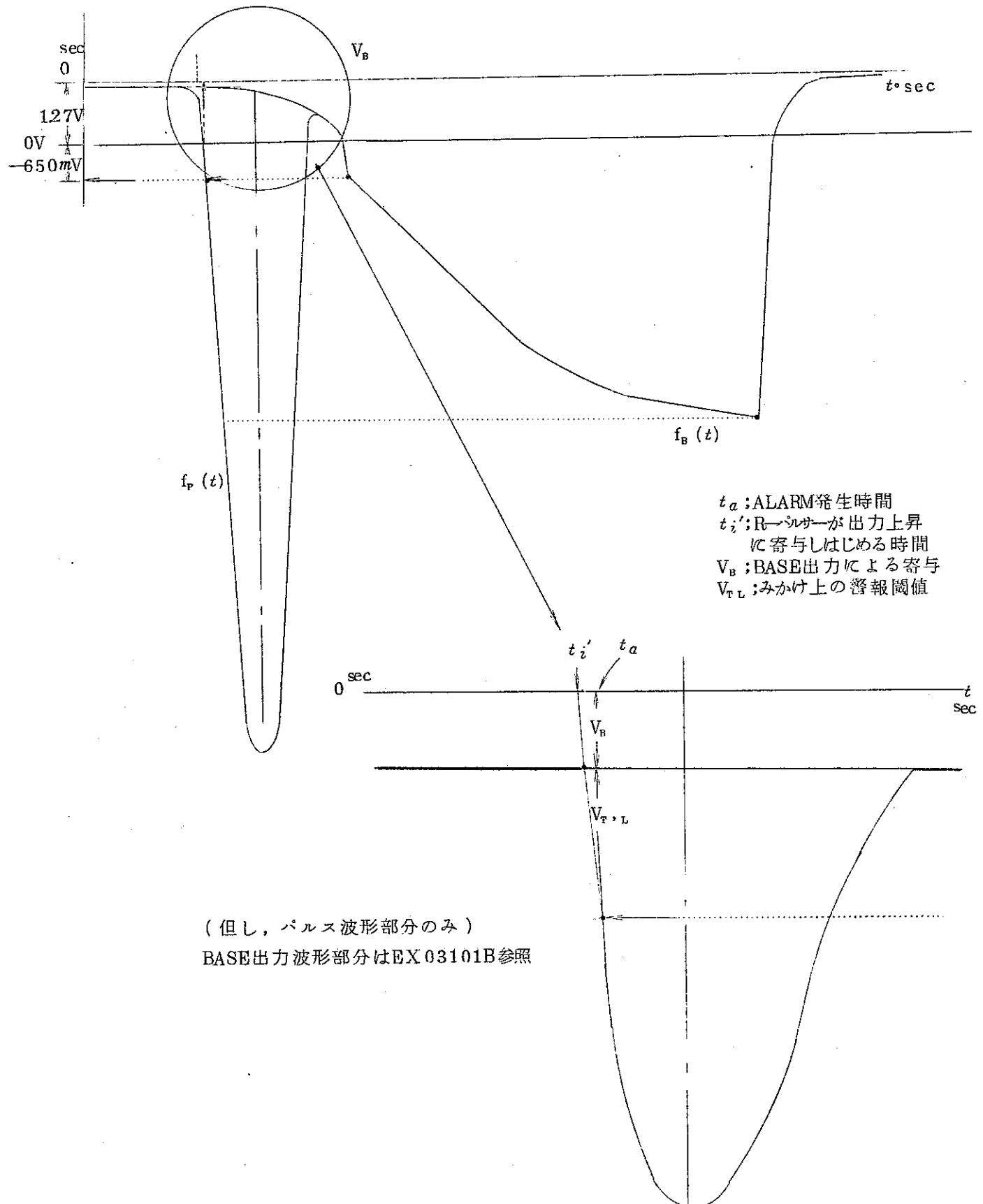
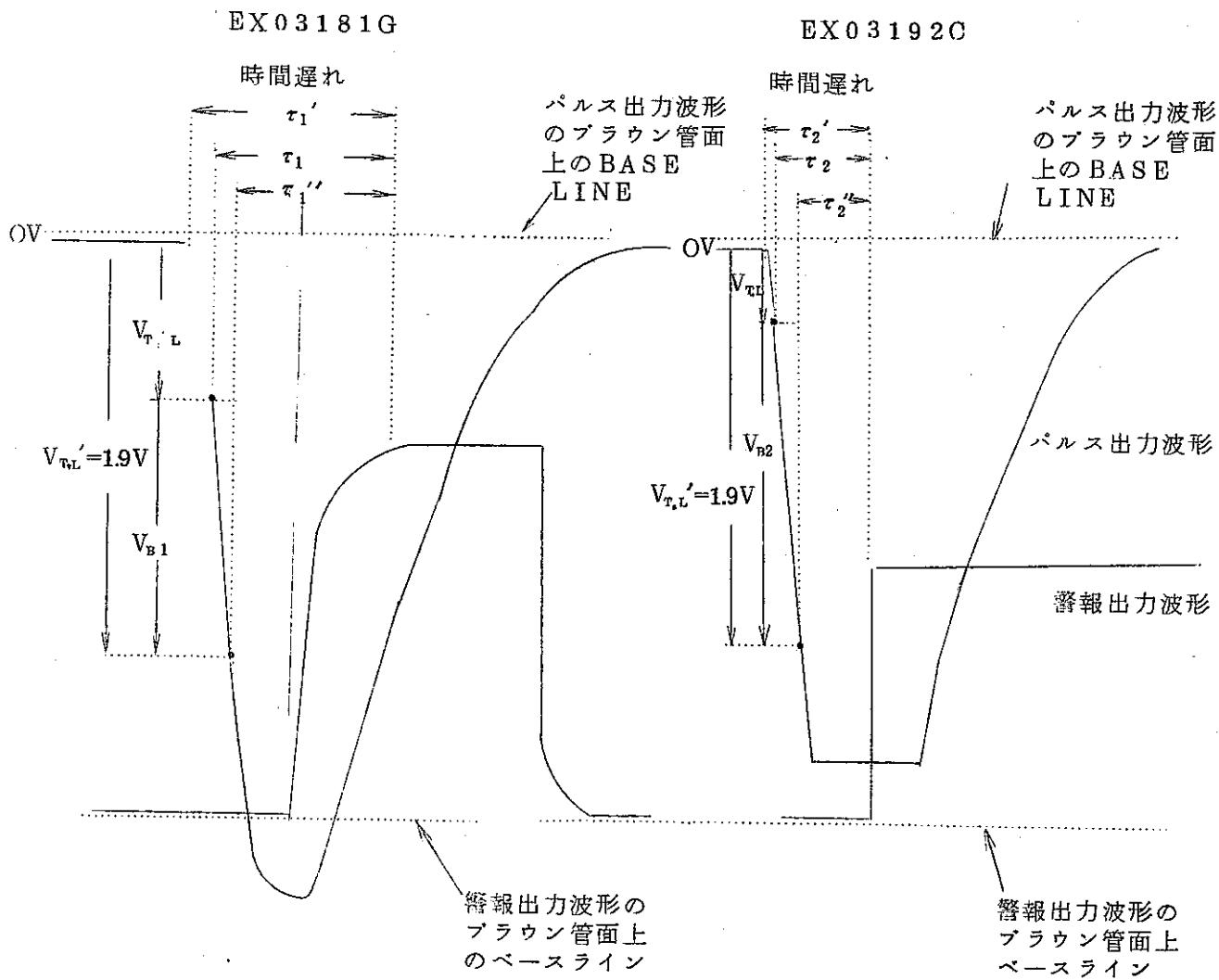


図 3-11 EX 03181Gによる警報出力信号の遅れ解析



$\tau_1'$  ;  $V_B \approx 0$ ,  $V_{T,L} \approx 1.9$  VOLT と評価  
した場合の時間遅れ  
 $\tau_1' \approx 300 \mu\text{sec}$

$\tau_2'$  ;  $V_B \approx 0$ ,  $V_{T,L} \approx 1.9$  V と評価  
した場合の時間遅れ  
 $\tau_2' \approx 110 \mu\text{sec}$

$\tau_1''$  ;  $V_B \approx 1.9$  V,  $V_{T,L} \approx 0$  と評価  
した場合の時間遅れ  
 $\tau_1'' \approx 400 \mu\text{sec}$

$\tau_2''$  ;  $V_B \approx 1.9$  V,  $V_{T,L} \approx 0$  と評価  
した場合の時間遅れ  
 $\tau_2'' \approx 200 \mu\text{sec}$

$\tau_1$  ; 実際の時間遅れ  
 $300 \mu\text{sec} \leq \tau_1 \leq 400 \mu\text{sec}$

$\tau_2$  ; 実際の時間遅れ  
 $110 \mu\text{sec} \leq \tau_2 \leq 200 \mu\text{sec}$

但し、上図  $V_{T,L}$  ;  $V_B$  の効果をも考慮した実際の閾値電圧

$V_{T,L}'$  ;  $V_B$  の効果を考慮しない、見かけ上の閾値電圧

図 3-12 EX03181G, 03192C の警報信号遅れの解析

DM 701

—45—

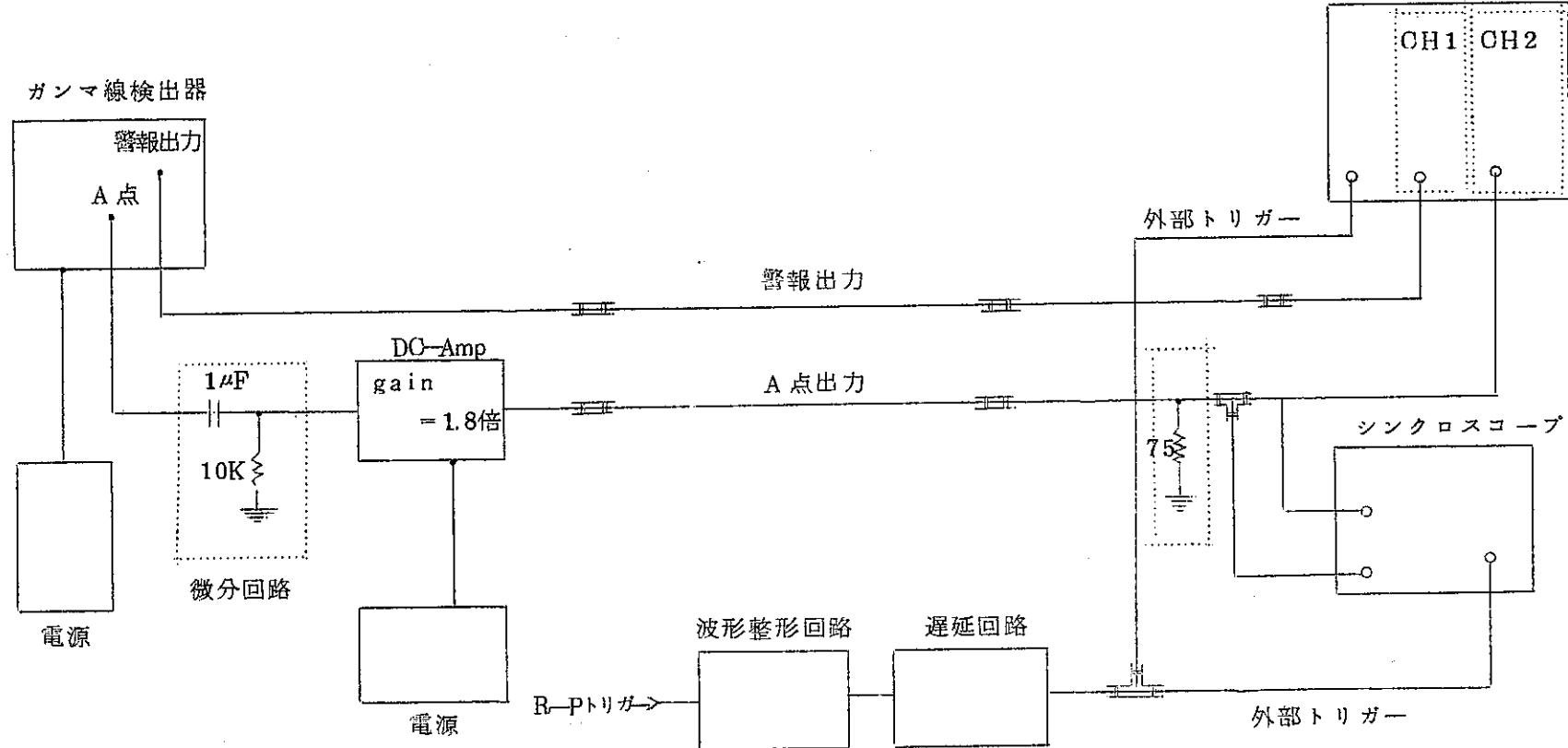


図 3-13 パルス出力波形と警報出力信号同時観測ブロックダイアグラム

④ 図3-12において、警報信号の遅れ時間を求める。

① EX03181Gにおいて、パルス打込みレベル ( $N_o=1.8 \text{ kW}$ , POS-1挿入後約 5.3 sec) に対応するA点降下電圧 ( $V_{B1}$ ) を求める。

第1反応度量は、EX03181Gは0.6%4k/k, EX03101Bは0.62%4k/kであり、ベース出力波形には若干の違いがあるが、γ線プローブ(SDCG11-07 NO. 241)により、第1反応度量0.62%に対応する波形を観測していないため、EX03101Bより推定した。

その結果、パルス打込みレベルに対応する  $V_{B1}$  は約 660 mV である。

$$\therefore V_{T,L} (\text{警報信号しきい値レベル}) = 1.9 - 0.66 \\ = 1.24 (\text{Volt})$$

従って  $\tau_1 \approx 340 \mu\text{sec}$  である。

② EX03192Cにおいて、パルス打込みレベル ( $N_o=1.53 \text{ kW}$ , POS-1挿入後約 4.1 sec) に対応するA点降下電圧 ( $V_{B2}$ ) を求める。

EX03192Cに対応するベース出力波形の観測データーとして、EX03101Cによるγ線プローブ(SDCG11-07-NO. 242)の出力波形より求める。

その結果、 $V_{B2}$  は 100 mV である。

$$\therefore V_{T,L} = 1.9 - 0.1 \\ = 1.8 (\text{Volt})$$

従って  $\tau_2 \approx 120 \mu\text{sec}$  である。

以上より、 $\tau_1$ ,  $\tau_2$  に関する結果を得る。

$$\tau_1 \approx 340 \mu\text{sec} \quad (\text{但し}, 300 \mu\text{sec} < \tau_1 < 400 \mu\text{sec})$$

$$\tau_2 \approx 120 \mu\text{sec} \quad (\text{但し}, 110 \mu\text{sec} < \tau_2 < 200 \mu\text{sec})$$

#### (viii) 解析結果

EX03181G, EX03191A, EX03191E, EX03192C 等の遅れ時間と同様の方法で解析すると、ほぼ次の結論が得られる。

先ず、各実験毎に下記の各パラメーターが異なる、即ち反応度パルス出力規模が異なる。

R-パルサーの打込み時のベース出力レベル ( $N_o$ )

R-パルサーの材質

R-パルサーの速度

また、検出器 SDCG11-07-241, SDCG11-07-242 とでは回路素子等が完全に同一であるとは限らないので、2個の検出器ではある程度特性に差があることも考えられる。(例えば EX03181G と EX03192C の警報出力信号を比較すると、検出器 SDCG11-07-241 の方が SDCG11-07-242 よりも時定数が大きい。)

このようなわけで解析結果にある程度の巾を持たざるを得ないが一応次の結論を得た。

パルス状に急激に変動する放射線場に対しても、その立上りから、消滅（減衰）までの裾の持続時間巾が  $1 \text{ msec}$  以上あり、しかも、その強度が警報閾値を越えていれば、たとえ検出器を完全に飽和させる様な強大なスパイクに対しても警報閾値を越えてからほぼ  $400 \mu\text{sec}$  以内に警報出力信号を発する。ここで  $400 \mu\text{sec}$  という時間遅れは、幾分安全側の値であるが、検出器の応答としては充分である。この理由は以下のように考えられる。

一般に臨界警報システムは、誤警報を回避するために、 $N$  out of  $M$  ( $M$  個の設置検出器のうち  $N$  個から警報信号が“ほぼ同時”に送られて来た場合に臨界事故であると判断する) の論理処理をした後、臨界事故と判断された場合にのみはじめて退避警報を発する。

この場合の“ほぼ同時”的判定は動燃東海再処理工場に設置してある論理処理モジュールの場合  $2$  out of  $3$  のシステムで、検出器から送られて来る最初の警報信号と次の警報信号の許容遅延時間は約  $500 \text{ msec}$  以内である。従って検出器ベースでの  $400 \mu\text{sec}$  の時間遅れは論理処理モジュールで同時性の判定に影響を及ぼすには至らない。又、退避警報は通常退避警報音と退避灯より構成される。

これらを起動させるためには強大な電力が要求され論理処理モジュールから、臨界警報信号を受けて瞬時に起動させる事は難しく、不可避的に  $30 \text{ msec}$  程度の時間の遅れを余儀なきされる。従って、ここでも  $30 \text{ msec}$  と  $400 \mu\text{sec}$  という時間差から  $400 \mu\text{sec}$  という時間遅れは、問題とはならない。

## 4. 中性子検出器照射試験

### 4-1 中性子線検出器

#### 1. 検出器の動作

中性子線検出器の中性子線検出機構は次の通りである。

中性子の検出部分は濃縮ウランターゲット (U-235 93%濃縮) に、接合型ダイオードを結合し、これをアルミニウムで包みプレキシグラス(減速材)のほぼ中央に挿入したものである。

中性子が検出器に飛来すると、まづ、プレキシグラスで減速され、熱中性子となる。この熱化された中性子が濃縮ウランターゲット内でU-235の核分裂を引き起こす。この時生ずる核分裂片が逆バイアスをかけられた接合ダイオードの空乏層に飛び込むと核分裂片の運動エネルギーに比例するパルスを生じる。核分裂片によって、SSDの空乏層内に発生したパルスは(M点出力)，次段のアンプで増幅される。このアンプ出力は閾値回路である波高選別回路の入力になるがここで、アンプ出力の波高が1.1V(閾値)以下のパルスに対しては波高選別回路は動作しない。1.1V以上のパルスに対しては波高選別回路は波高パルス巾のほぼ一定な出力を(S点出力)生む。これらのパルスは積分回路で積分され、積分値があらかじめ設定された値(警報設定値片5パルス/5秒)に達すると警報信号を発する。

尚、アンプのゲインを変えることによって、ウランターゲットから放出されている $\alpha$ 線をも計数する様になる。

この機能は検出部分の動作チェックのために使用され、通常は使用されない。

#### 2. 検出器の回路構成

##### (1) ブロックダイアグラム

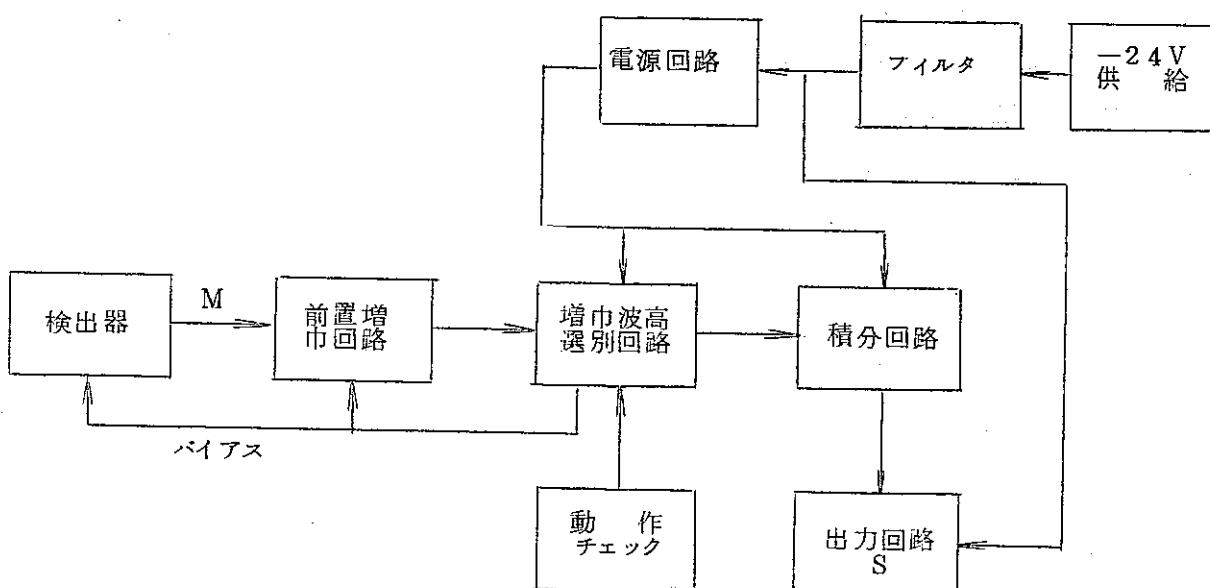


図4-1 中性子検出器ブロックダイアグラム

## (2) 各ブロック

図 4-2 に中性子検出器用回路図及び表 4-1 に部品リストを示す。

### (i) 検出器

LA RADIOTECHNIQUE 製のジャンクションダイオードを使用し、濃縮ウランターゲットのうしろにセットされ、アルミの円筒内に納められている。(写真 4-1)

また、検出器は 9 cm 立方のプレキシガラス製減速材の中央にセットされている。(写真 4-2)

### (ii) 前置増巾回路

入力部を  $T_1$ ,  $C_2$  から成るチャージセンシティブ非反転増巾器である。検出器と増巾器間の雑音障害を  $C_4$ ,  $C_7$ ,  $C_9$ ,  $C_{12}$  にて極力取りのぞいてある。

### (iii) 増巾波高選別回路

#### (a) 増巾器

$T_1$ ,  $T_2$  により検出器からのパルスを非反転増巾する回路です。又、この回路は 2 種のゲインが用意されており、 $R_{14}$  ( $47 \text{ k}\Omega$ ) を外部よりリレー USD T 24 形により短絡することにより変えられる。即ち、検出器のウランターゲットより放出する  $\alpha$  線のパルスが波高選別回路に十分かかるに足るように変えられる。尚、通常使用状態にて利得は約 25 dB である。

#### (b) 波高選別回路

トリガーレベルを  $D_1$ ,  $D_2$  により 1.1 V に設定されたシュミットトリガ回路である。

出力電圧は 9 V 一定で、 $T_6$  によるエミッタホロワにて出力インピダンスは  $50\Omega$  である。ただし、パルス巾はアンプゲインと入力パルス巾に依存するが、 $\alpha$  線の場合は約  $2.0 \mu\text{s}$  です。

### (iv) 積分回路

この回路は、波高選別回路よりの出力を積分します。 $T_2$ ,  $T_3$  より成る单安定マルチバイブレータで入力パルスは  $C_2$ ,  $R_{10}$  により微分され、その値が入力パルス巾に関係なく一定となる。出力即ち警報信号は約 2.0 ms 巾のロジック信号となり、5 秒以内に 5 パルスが積分され出力を出す。

### (v) 出力回路

この回路は積分回路からの信号をインピダンス変換するものである。長いケーブルを接続したあとでもモジュールのロジック回路が十分働く。

### (vi) 電源回路

この回路は 623 BJ モジュールより -24 V を受けて -12 V を作り検出器の各回路へ供給する。

回路はツェナダイオード  $D_1$  による基準電圧と  $P_2$  による出力設定電圧を差動誤差増巾器  $T_2$ ,  $T_3$  に入力し、この差を  $T_1$  に送り込む直列制御安定化電源である。

出力精度は  $12 \text{ V} \pm 5\%$

$D_2$ ,  $D_3$  は温度補償用である。

### (vii) H F フィルタ回路

-24 V ラインの高周波雑音障害を吸収するために用いられる。

全体概観及び内部の様子を写真 4-3, 4-4 に示す。

表 4-1 中性子検出器用回路の部品リスト

## (a) 前置回路接続図

Symbol	Indicate	Number	Observations
R 1	Resistance 4.7 M-OHM 1/2W	1	
R 2	" 5.6 M-OHM "	1	
R 3	" 82 OHM 1/4W	1	
R4-R8-R9	" 3.9 K-OHM 1/2W	3	
R 5	" 22 K-OHM "	1	
R 6	" 27 K-OHM "	1	
R 7	" 3.3 K-OHM "	1	
R10	" 5.6 K-OHM "	1	
R11	" 100 OHM 1/4W	1	
R12	" 100 OHM 1/2W	1	
R13	" 820 OHM "	1	
R14	" 2.2 K-OHM "	1	
R15	" 220 OHM "	1	
C1-C11	Condenser 0.47 $\mu$ F 160V	2	Mylar
C6-C7	" 0.47 $\mu$ F "	2	"
C 2	" 0.01 $\mu$ F "	1	"
C3-C9	" 47 KpF	2	Earthenware
C4-C10	" 0.047 $\mu$ F 160V	2	Mylar
C 5	" 22 $\mu$ F 16V	1	Tantalum
C 8	" 22 pF	1	Earthenware
C12-C13	" 22 $\mu$ F 35V	2	Tantalum
D 1	Detector	1	
D 2	Diode 1NG14	1	
L 1	Ferric 4B Trans	1	
T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	2N.3269	3	

## (b) 増巾回路, 波高選別回路図

Symbol	Indicate			Number	Observations
R 1	Resistance	18	K-OHM 1/2 W	1	
R 2	"	150	OHM 1/4 W	1	
R 3	"	6.8	K-OHM 1/2 W	1	
R 4 <sup>x</sup>	"	2.2	K-OHM 1/2 W	1	Resistance adjuster
R 5 <sup>x</sup>	"	68	K-OHM 1/2 W	1	Resistance adjuster
R6-R7	"	1.2	K-OHM 1/2 W	2	
R8-R16	"	1	K-OHM 1/2 W	2	
R 9	"	3.3	K-OHM 1/2 W	1	
R10	"	2.4	K-OHM 1/2 W	1	
R11	"	130	OHM 1/2 W	1	
R12-R21	"	100	OHM 1/4 W	2	
R13	"	3.9	K-OHM 1/4 W	1	
R14-R24	"	47	K-OHM 1/2 W	2	
R15 <sup>x</sup>	"	150	OHM 1/2 W	1	Resistance adjuster
R17	"	2.2	K-OHM 1/2 W	1	
R18 <sup>x</sup>	"	1500	OHM	1	Resistance adjuster
R20	"	47	K-OHM 1/2 W	1	
R22	"	270	OHM	1	
R23	"	100	OHM 1/2 W	1	
C1-C2-C3	Condenser	0.047	$\mu$ F 160 V	3	Mylar
C 4	"	22	pF	1	Earthenware
C 5	"	3.3	pF	1	Earthenware
C 6	"	3.3	$\mu$ F 16 V	1	Tantalum
C 8	"	4.7	kPF	1	Earthenware
C 9	"	22	F 35 V	1	Tantalum
C10-C15	"	4.7	kPF 160 V	1	Mylar
C11-C12	"	0.1	F 160 V	2	Mylar
C13	"	22	F 16 V	1	Tantalum
C14	"	0.47	F 160 V	1	Mylar
D1-D2	19 P 2			2	
L 1	1mH CLO			1	
L 2	Ferric 4B Trans			2	
T1-T2-T3	2N 2369			3	
T4-T5-T6	2N 708			3	

## (c) 積分回路接続図

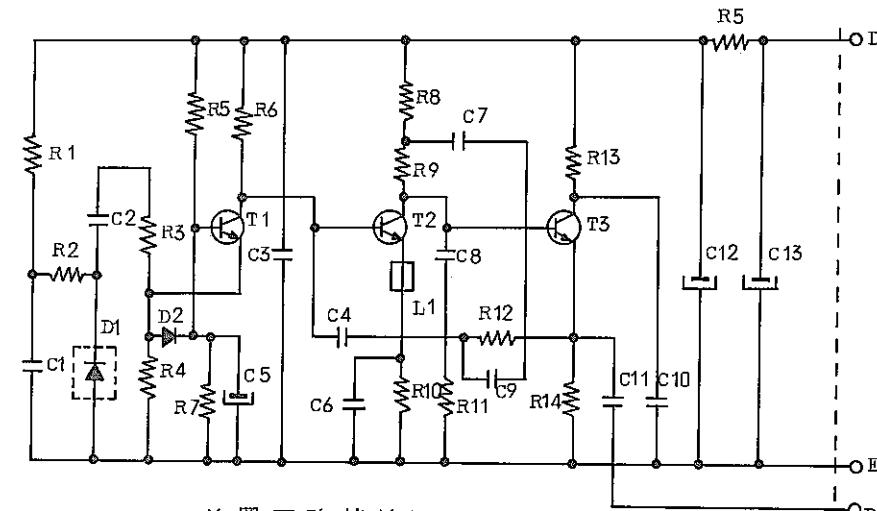
Symbol	Indicate	Number	Observations
R 1	Resistance 620 OHM SCD9S 5%	1	
R2.R10.R12 .R15	" 4.7 K-OHM " "	4	
R 3	" 1.2 K-OHM " "	1	ajuster aux essais raglage CR charge
R 4	" 33 OHM " "	1	
R5 . R6	" 30 M-OHM RMS 1%	1	
R 7	" 1.8 K-OHM SCD9S 5%	1	
R 8	" 6.8 K-OHM " "	1	
R 9	" 22 K-OHM " "	1	
R11 . R14	" 10 K-OHM " "	1	
R13	" 100 OHM " "	1	
P 1	Potentiometre 500 OHM Dralo wid	1	raglage seuld brater
T2 . T3	Diode F.D 300	2	Jiveco
C 1	Self 1mH	1	CLO 965
C 2	Transistoer 2N2218	1	Young electronic
C 3	" 2N 708	1	Cosem
C 4	Condenser 947 pF 250 V FMS	1	FFCO
C 5	" 10 nF 400 V	1	"
	" 0.22 $\mu$ F 160 V	1	"
	" 4.7 $\mu$ F 16 V	1	Pfecis CTS 13
	" 22 $\mu$ F 16 V	1	"
	Circuit imprint No. 502040 A Ribets sertir	1	Comatal BFM 13.16
	Support transistors grand modek	1	
	Support transistoer perit modek	2	

(d) 出力回路接続図

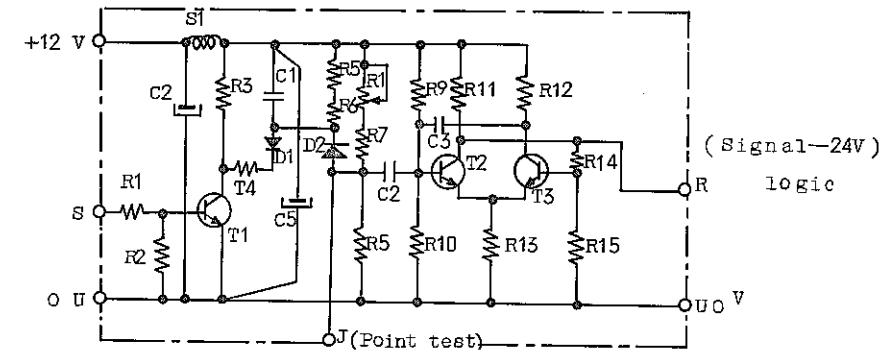
Symbol	Indicate		Number	Observations
	Resistance	1/2 W		16010001
R 1	27 K-OHM	1/2 W	1	16010001
R 2 . R 6	47 K-OHM	1/2 W	5	16010001
R 7	220 OHM		1	
	Trasistor			
T 1	2N1711		1	
T 2 . T 3	2N2905		2	
	Diode			
D 1	1N914A		1	18305034
C 1	502203		1	

(e) 安定化電源回路接続図

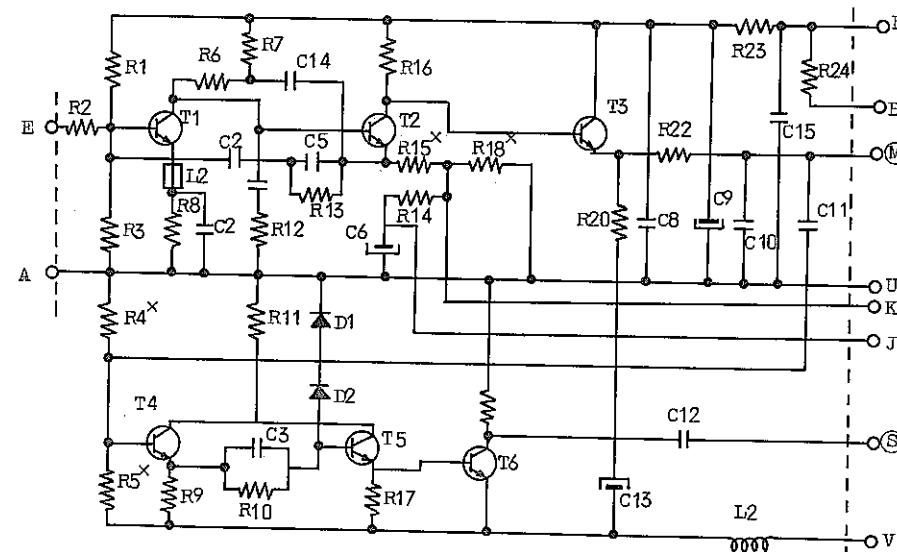
Symbol	Indicate		Number	Observations
T 1	Transistor	2N2196	1	Sesco
T 2 . T 3	"	2N1711	2	
D 1	Diode	1324	1	
D 2 . D 3	"	1N941A	2	
D 4	"	SFR 151	1	
R 1	Resistance	47 OHM 1 W	1	
R 2	"	470 OHM 1 W	1	
R 3	"	3.3 K-OHM 1/2 W	2	
R 4	"	2 K-OHM 1/2 W	1	
R 5	"	750 OHM 1/2 W	1	
R 6	"	2 K-OHM 1/2 W	1	
R 7	"	150 OHM 1 W	1	
C 1	Condenser	10 nF 400 V	1	EFCO
C 2	"	100 F 25/40 V	1	SAF Polarise Minisic
C 3 . C 4	"	50 F 40/75 V	2	"
P 1	Potentiometer	500 OHM	1	Dralowid
C 1	No.	502165	1	



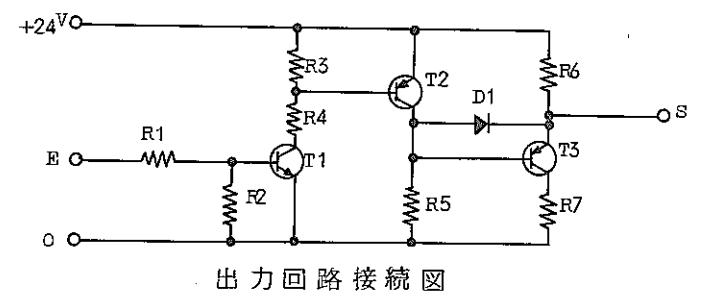
前置回路接続図



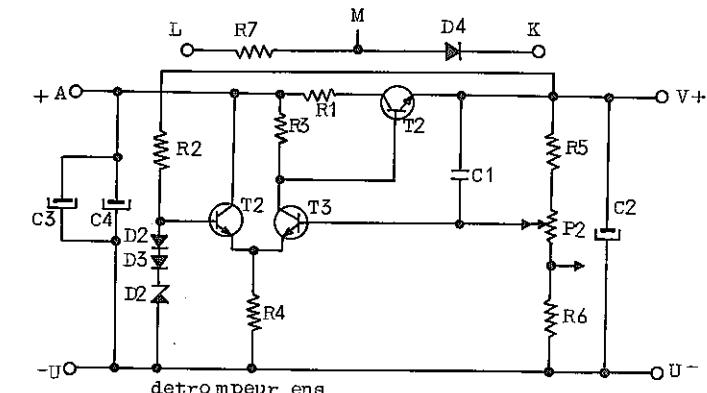
積分回路接続図



増幅回路，波高選別回路図



出力回路接続図



安定化電源回路接続図

図 4-2 中性子検出器用回路

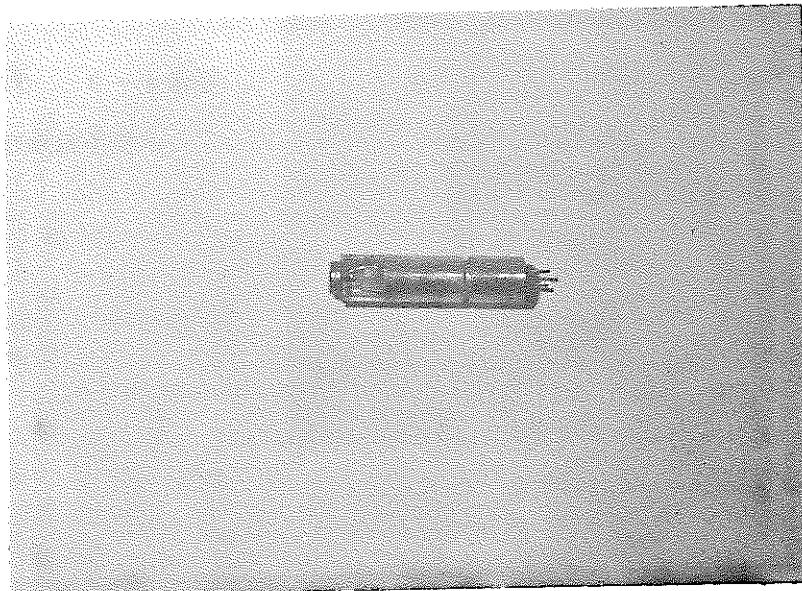
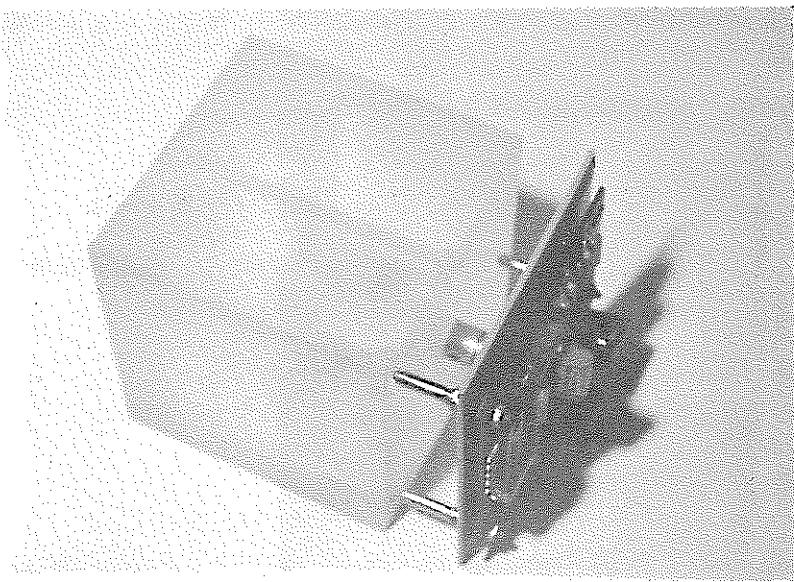


写真 4-1

検出部分

S S D+U-235 ターゲット



減速材

前置増巾器

写真 4-2

減速材

前置増巾器

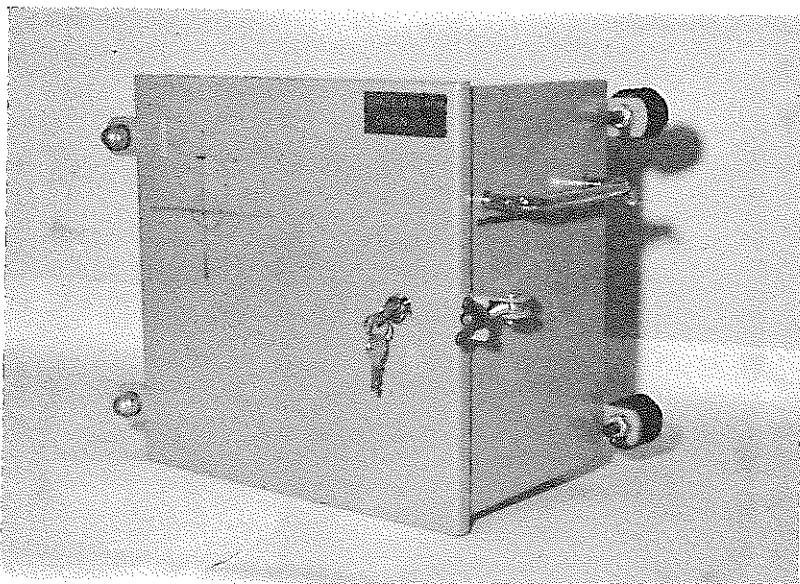


写真 4-3

中性子線検出器外観

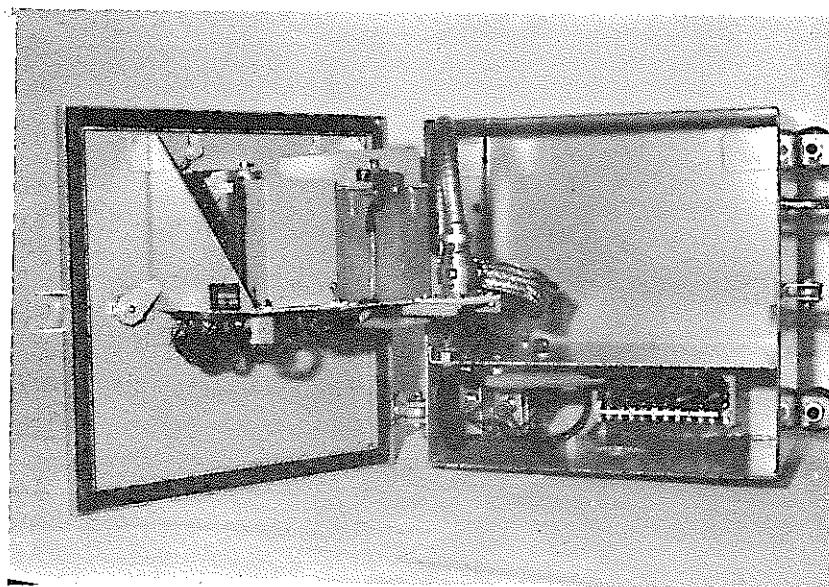


写真 4-4

中性子線検出器内部

#### 4-2 中性子検出器非定常運転モード照射試験

スパイク出力に対する検出器の追従性を確認するにはS点出力の時間分析を行うことが望まれているが以下の理由によりそのことは困難である。すなわち、反応度パルス出力の半値巾が $\approx 200 \mu\text{sec}$ 程度であるので、時間分析器のチャンネル当たりの時間巾(TIME BASE)を $100 \mu\text{sec}$ 以下にしなくては、時間的に反応度パルス出力波形をカバーすべきチャンネル数が少なくなる。一方S点出力の計数率限界が $10^4 \text{cps} = 10^2 \text{counts}/10\text{msec} = 1\text{count}/100\mu\text{sec}$ であるので、S点出力パルスの時間分析方法によって、反応度パルス出力波形を観測する事は元来困難であることがわかる。

従って、検出器の最終確認項目である、パルス状に急激に変動する中性子場に対する応答特性の確認と同時に、警報閾値を越えてから警報出力発生までの遅延時間の確認も出来ない。すなわち、即発臨界状態についてはこの検出器の応答性には注意を要する。

ここでは、非定常運転時の照射試験データ収集を主な目的とし、次の項目について測定を行った結果について述べる。

検出器の照射位置は熱中性子柱ビームホール軸上においた。

- (1) S点出力パルスの時間分析
- (2) M点出力パルス(S点入力)の波高分析

なお、測定のブロックダイアグラムを図4-3に示す。

なお、非定常運転状態で、原子炉出力と警報出力との関係を求める事も出来なかった。これは検出器を弥生熱中性子柱内に設置したため、POS1反応度を投入する直前に既に警報出力が出てしまうからである。従って、POS1反応度挿入直前の熱中性子柱ビームホール軸上の中性子束が警報閾値である。

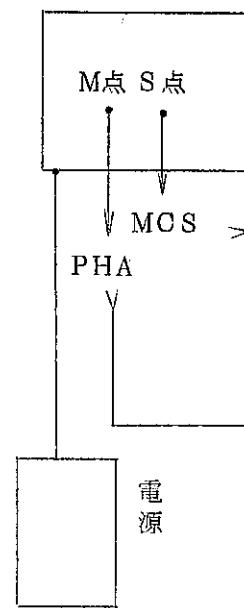
本試験については、特別な結果を述べるに至っていないのでデーターを示すにとどめる。

原子炉室

測定室

PHA/MCS

中性子線検出器

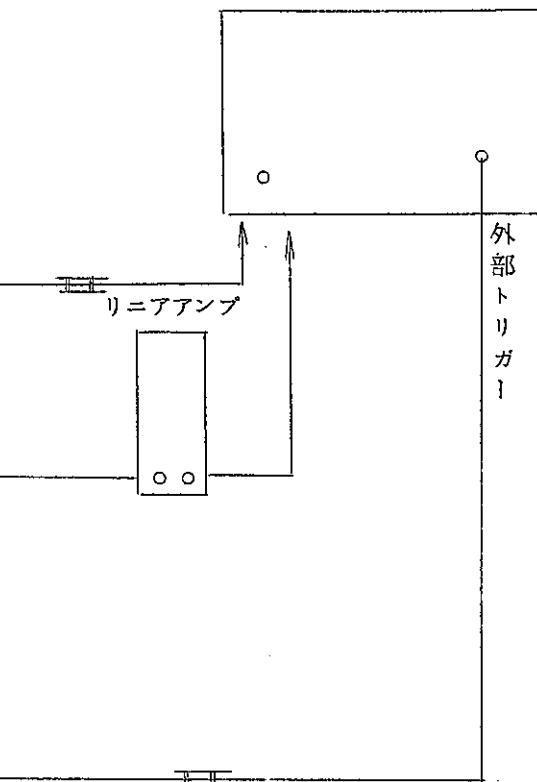


ケーブルダクト

3C-2V

POS 1  
トリガー >

測定室



外部トリガー

図 4-3 中性子線検出器照射ブロックダイアグラム

### (1) S点出力パルスの時間分析

原子炉のベース出力を  $P(t)=P_0 \cdot e^{t/T}$  で上昇させると炉心からの漏洩中性子数も同様に増加する。従って検出器の U-235 内での核分裂率も、原子炉の出力上昇につれて増加する。ここで“増巾器回路及び波高選別回路”の総合周波数特性は  $f_M = 1.1 \times 10^4 \text{ cps}$  が上限と考えられるので、次の 2 点を目的とする。

①  $f_M = 1.1 \times 10^4 \text{ cps}$  に相当する原子炉出力 ( $N_M$ ) はいくらか。

② 上記、 $N_M$  以上の原子炉出力時の S 点に於るパルス出力の時間分析結果はどの様になるか。

一方、S 点での出力パルスは約  $5 \mu\text{sec}$  の時間巾を有するので S 点での計数し得る最大計数率は、高々  $1/5 \mu\text{sec} = 2 \times 10^5 \text{ cps}$  である。

図 4-4 では  $f_M' > f_M$  であるがこれは  $f_M$  はシンクロスコープの管面波形より計算された値であり、幾分誤差を含む、従ってオーダーとして見れば  $f_M' \approx f_M$  である。

原子炉出力 S 点での計数率

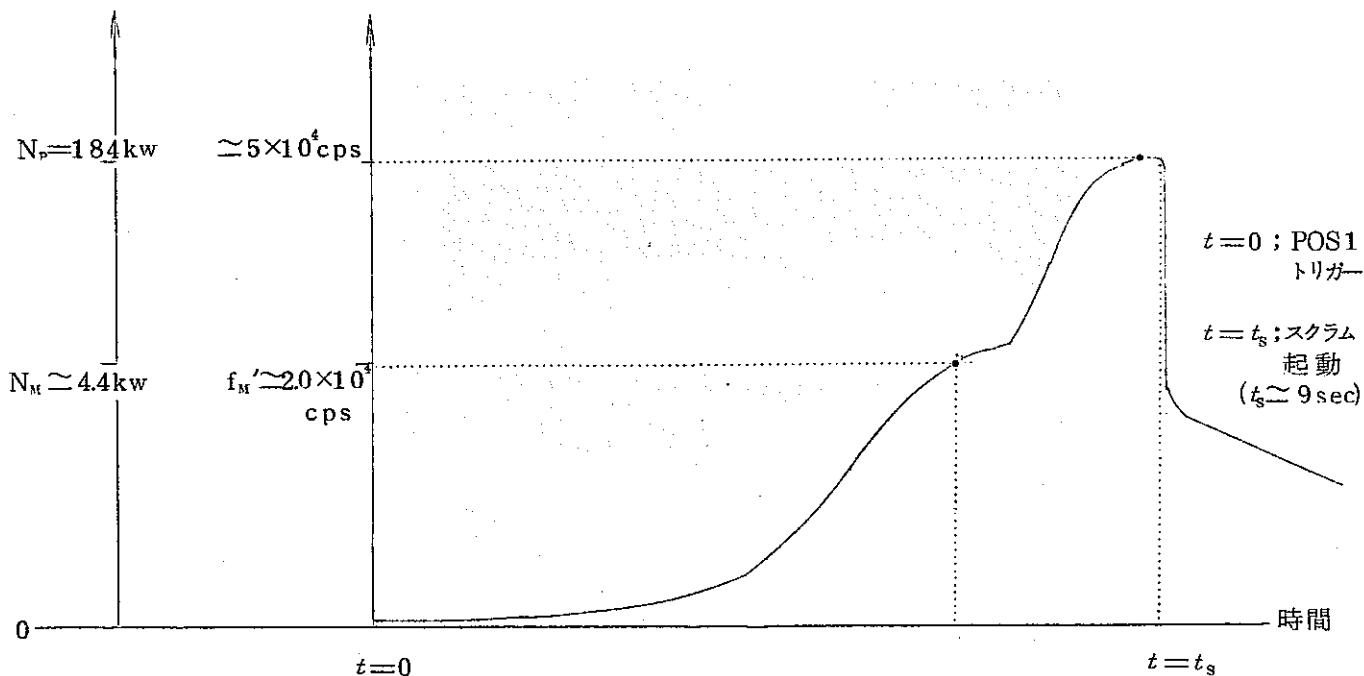
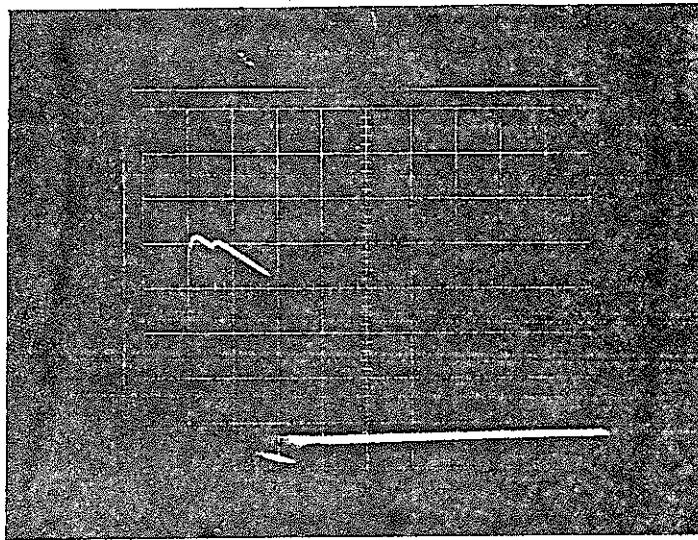


図 4-4 EX12021E の波形解析

i) S 点での出力パルス波形（低出力時，高出力時）（写真 4 - 5，6）

a) S 点での出力パルス波形（低出力時）

EX 12021E

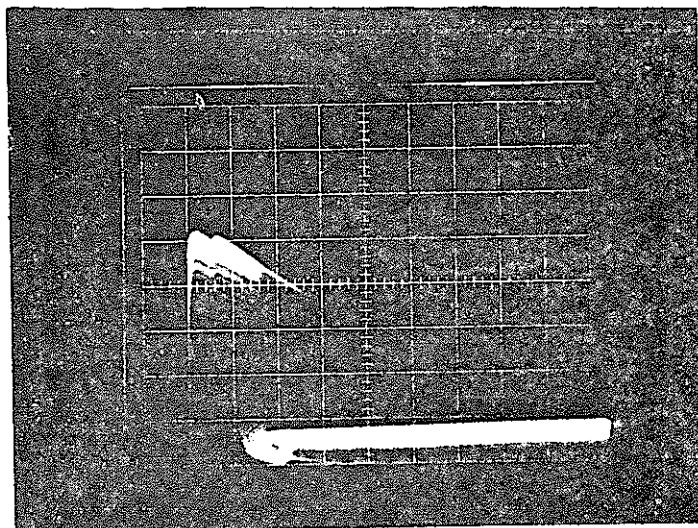


2 VOLT/cm  
2  $\mu$  sec/cm

写真 4 - 5 スクラム以後（低出力時）の S 点出力パルス波形

b) S 点での出力パルス波形（出力上昇時）

EX 12021E



2 VOLT/cm  
2  $\mu$  sec/cm

写真 4 - 6 原子炉出力上昇時の S 点パルス波形

ii) S 点パルス出力の時間分析(観測時間) ; POS 1 投入からスクラム起動までの時間)

a)  $N_p \leq N_m$  の時(写真4-7,8)但し,  $N_p$  ; BASE 出力の最大値

$N_m$  ; 検出器の  $f_m = 1.1 \times 10^4 \text{ cps}$  に相当する原子炉出力

EX 04013A

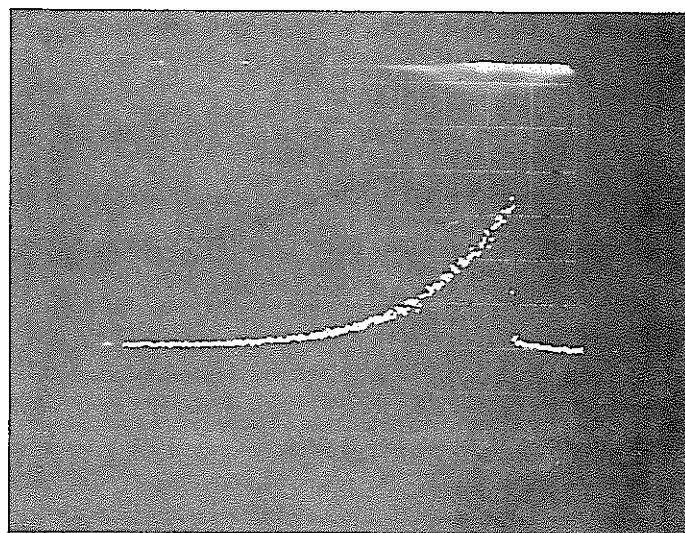


写真 4 - 7 S 点出力パルスの時間分析

日立505; MCSモード  
外部トリガー; POS-1

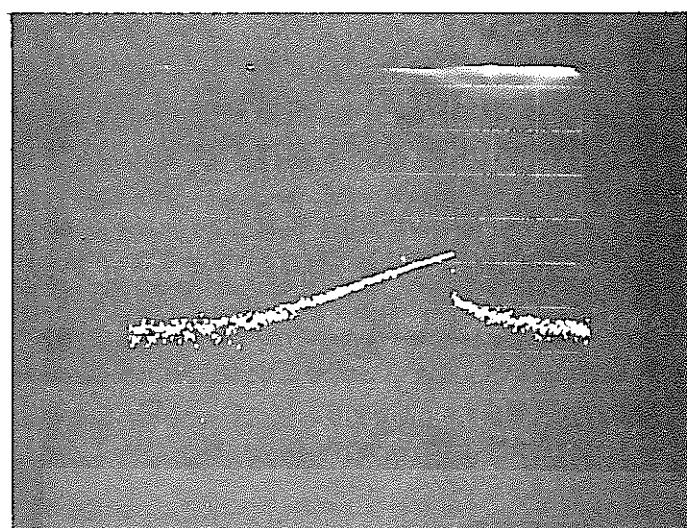
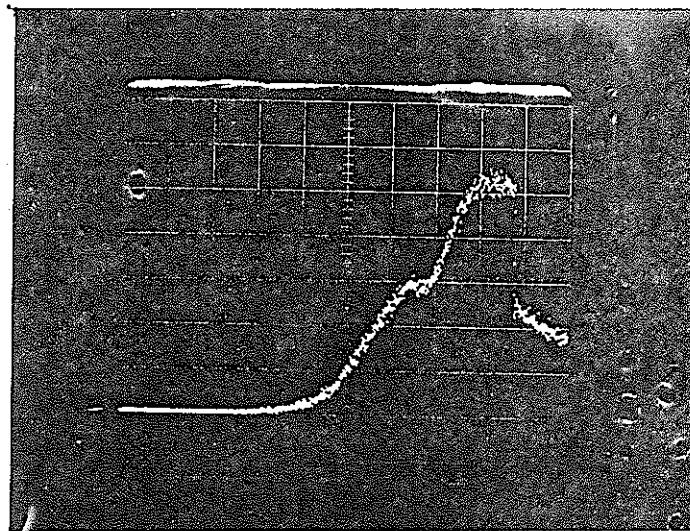


写真 4 - 8 同上の Log 表示

b)  $N_p \geq N_m$  の時 (写真 4 - 9 )

EX12021E



日立505; MOSモード  
外部トリガー; POS-1

写真 4 - 9 S 点出力パルスの時間分析

c)  $N_p \geq N_m$  時の測定データ

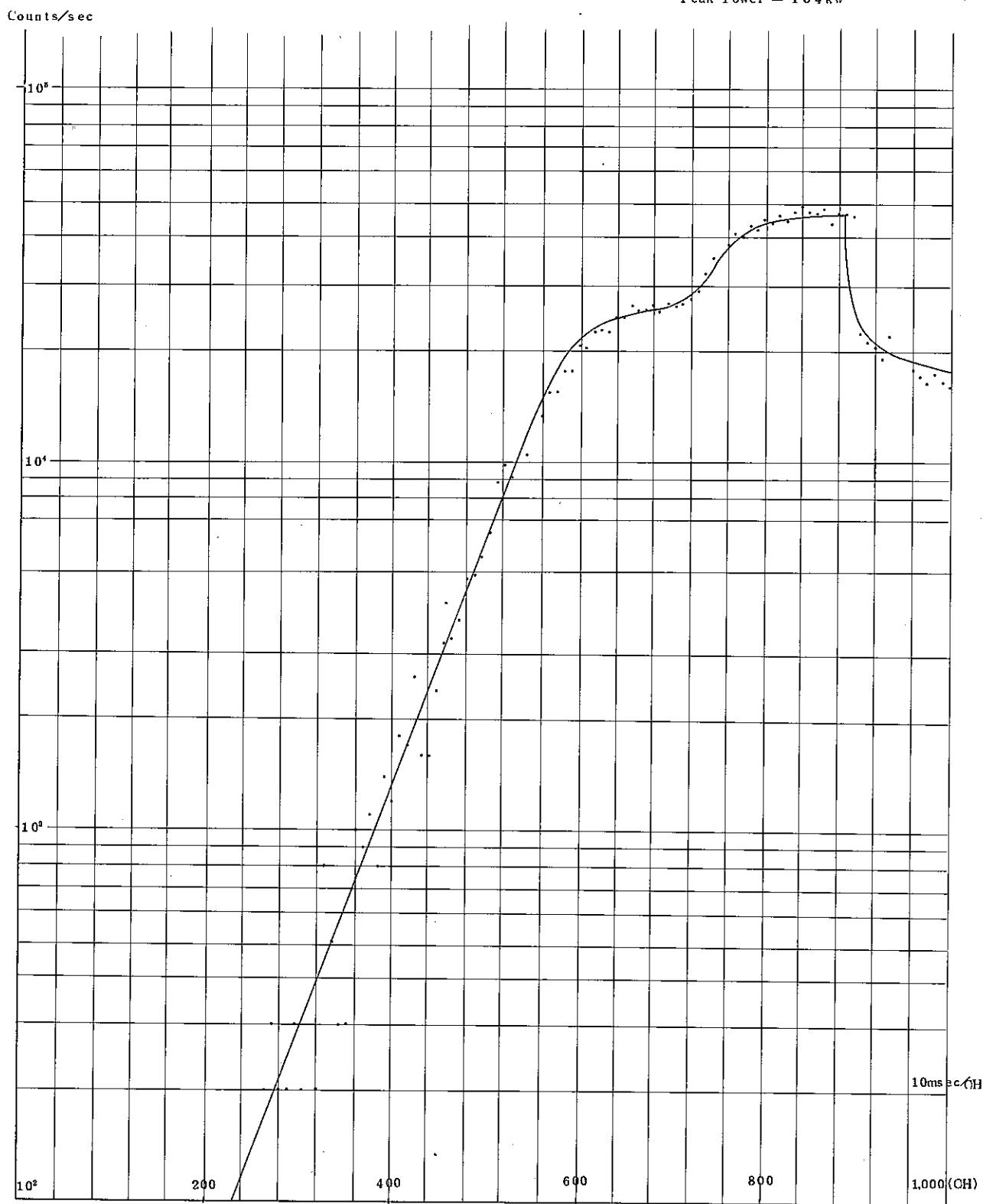
但し、縦軸は cps で、かつ Log 表示である。図 4 - 5 に示す。

実際の測定は、時間分析器 (日立505のMOSモード) のTIME-BASEを  
 $10\text{ msec}/\text{ch}$  にとってあるので

$$\text{Counts/ch} \text{ は } \frac{[\text{Counts}/\text{CH}]}{[10\text{ msec}/\text{CH}]} = \text{Counts}/10\text{ msec} = \text{C} \times 10^2 \text{ cps.}$$

となる。

Reactivity inserted;  $T_1, T_s = 9 \text{ sec}$   
Peak Power = 184 kw



## (2) M点パルスの波高分析

シュミット回路の入力点(M点出力)に於るパルス波高の分析を行う。

これは、シュミット回路入力で閾値(1.1 VOLT)以上のパルスに対してのみシュミット回路が動作するので、シュミット回路の入力点に到達するパルスの波高分布がどの様であるか、即ち閾値以上のパルスの個数と閾値以下のパルスの個数の比がどのような分布をするかを、以下の各場合について測定する。

原子炉の出力が (a) 運転開始から P O S 1 反応度投入直前まで

(b) B A S E 出力ピークで 150 kW 前後の運転時

(a) 運転開始(P O S 1 引き抜き)から P O S 1 反応度投入直前までの低FLUX下に於る M点出力パルスの波高分布を図 4-6 に示す。

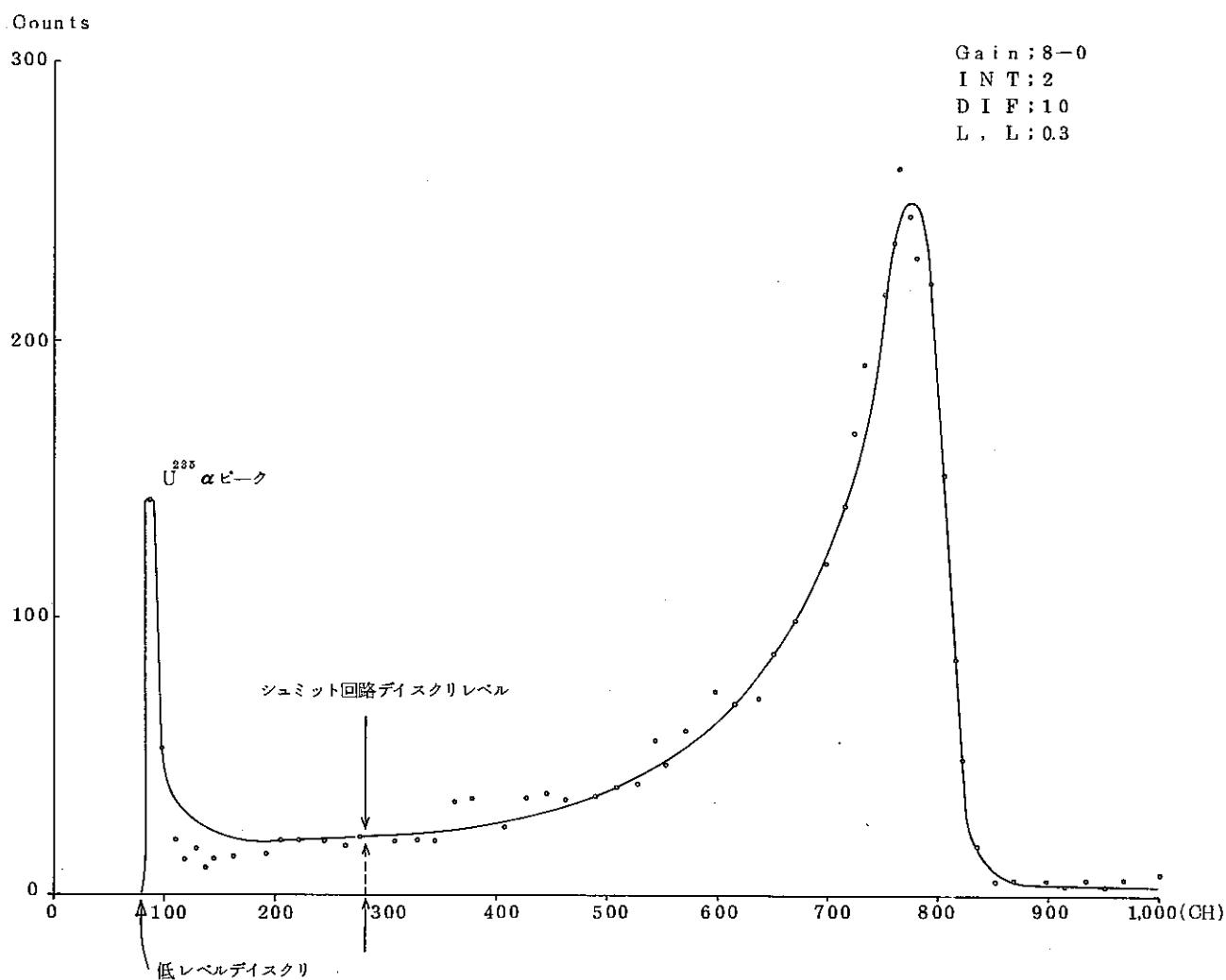


図 4-6 パルス波高分布

(b) ベース出力ピークで 150 kW 前後の運転時

M 点パルス波高分析結果を図 4-7 に示す。ここでシュミット回路のディスクリレベルは以下のようにきめられる。

但し、ここで観測結果中に記してあるシュミット回路のディスクリレベルの決定は以下の手順で行う。

たとえば、EX 04013A の場合のピークはアンプなしで 350 mV であることがわかっているので、リニアアンプの利得を G とすると以下の比例関係より

$$\frac{2.0 \text{ cm}}{350 \text{ mV} \times G} = \frac{\ell \text{ cm}}{1.1 \text{ VOLT} \times G}$$

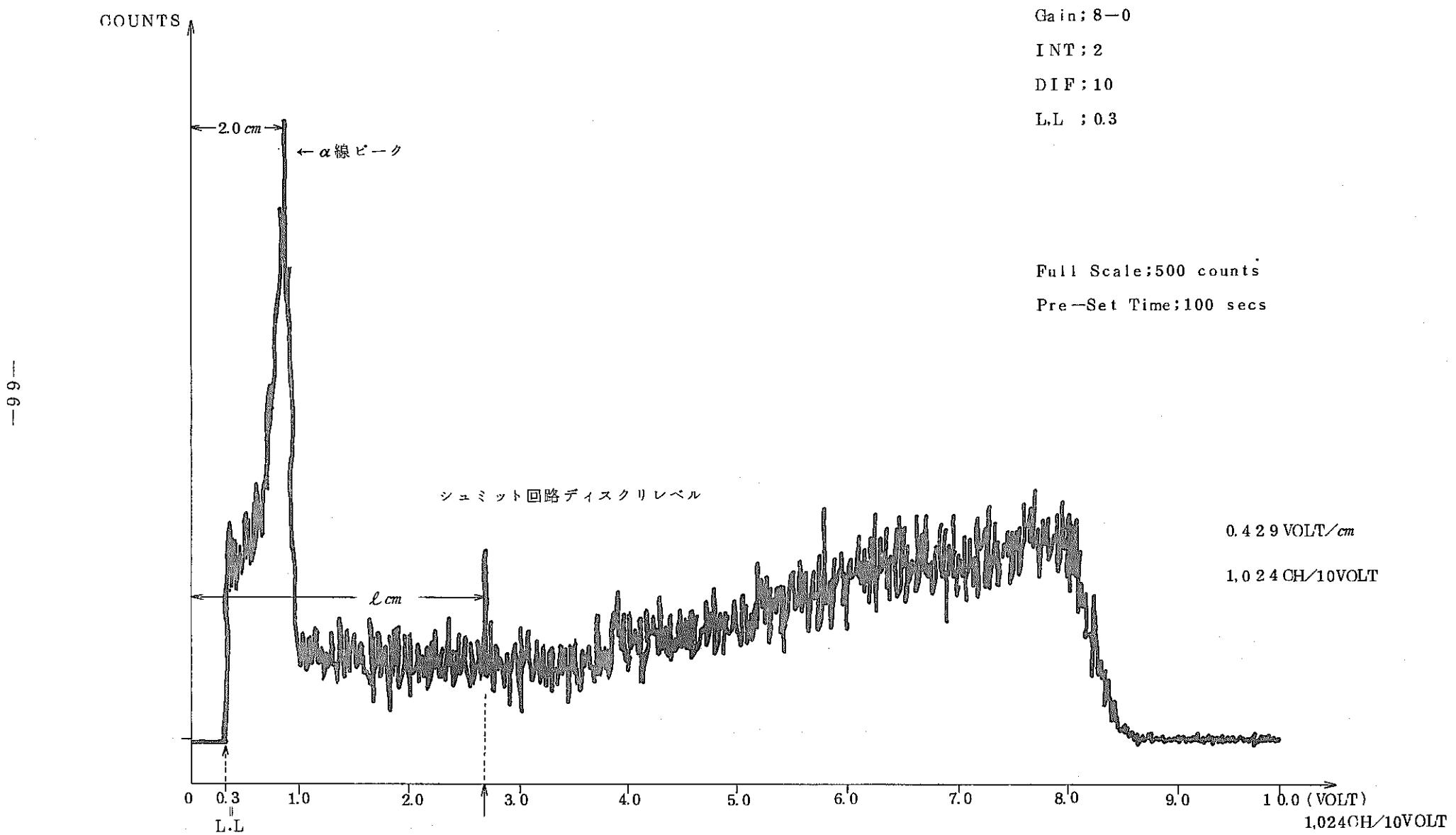
$$\ell = \frac{1.1 \text{ VOLT}}{350 \text{ mV}} \times 2.0 \text{ cm} = 6.28 \text{ cm}$$

となる。

付記 1 ; PHA の条件は Full Scale 10 Volt , 即ち 1024CH / 10 Volt である。

付記 2 ; ここで EX 04013A の運転時に、M 点出力パルスのエネルギー分析と、S 点出力パルスの時間分析を同時に行つた。

図 4-7 EX 04013A



## 5. 結 論

弥生の非定常運転、反応度パルス運転モードは、臨界事故の模擬に適しており、臨界警報装置の試験に適用できることがわかつた。まず、非定常運転モードにおける試験でプラスチックシンチレーターを主体とする $\gamma$ 線検出器は、 $\gamma$ 線、n線の複合放射線場において、検出器は十分に原子炉の出力変化に追従し、しかも確実に警報を発生する。反応度パルス運転モードにおける試験では、検出器を完全に飽和させる様な強大なスパイクに対しても警報閾値を越えてからほぼ $400 \mu\text{sec}$ 以内の時間遅れでアラームに対する発生シグナルを発生させる。この時間は後者に対する遅れ時間 $30 \text{m sec}$ に比し充分小さなものであり問題とはならない。

S S Dを主体とする中性子検出器は、計数率が高くなると数え落し現象を生じ、正確な警報閾値、遅れ時間の確認は困難であることがわかつた。したがつて照射試験は非定常運転にとどめ、出力パルスの時間分析、シュミット回路入力点におけるパルス波高分布の計測を行ない結果を得た。

## 6. 謝 辞

本試験研究を行うにあたり、動力炉核燃料開発事業団東海事業所安全管理部長岩崎皓二氏には一方ならぬ援助と激励を受けた、ここに厚く感謝する。又、データーどりにあたっては東大原子力工学研究施設職員ならびに動燃事業団、江花稔、松本盛雄、小原勝三、同嘱託二宮英行、高平理司、井口舜二、白山新平、木下純一、小長井主税の諸氏の援助並びに御検討を受けた。併せて厚く感謝申し上げる。

## 附録 1. 臨界事故時の動特性解析モデルについて

臨界事故の起こる状況により、動特性のモデルが異なることは当然であるが溶液系が臨界状態になることを想定する場合、ここに述べるランプ状反応度入力に対する Fuchs のモデルが妥当であると考えられる。

一点近似の動特性方程式は次式の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum \lambda_i C_i + q \\ \frac{dc_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 + \tau t - \alpha T \quad (2)$$

ここで  $n$  : 系の出力  $C_i$  : 遅発中性子先行核出力,  $\rho$  : 反応度 ( $= \frac{k-1}{k}$ )  
 $\beta$  : 遅発中性子割合 ( $= \sum_i \beta_i$ ),  $\ell$  : 中性子寿命  
 $\lambda_i$  : 遅発中性子先行核減衰定数  $q$  : 中性子源  
 $\tau$  : 反応度印加率,  $\alpha$  : 温度フィードバック係数,  $T$  : 温度

ところが、即発臨界を越す事故（通常はそうである）では何と云っても  $n$  の再生が著しく、(1)式はむしろ次式と考えてよい。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n \quad (1')$$

又、熱移動の速度が追いつかない場合が普通であるので次式のような断熱近似がなりたつ。

$$\frac{dT}{dt} = K n \quad (3)$$

(2), (3)式より

$$\frac{d\rho}{dt} = \tau - \alpha K n \quad (4)$$

(1)', (4)式より時間変数を消去すると

$$\frac{dn}{d\rho} = \frac{(\rho - \beta) n}{\ell(\tau - \alpha K n)} \quad (5)$$

となり、(1)', (2)の動特性方程式を  $(n, \rho)$  平面で考えてよいことを示す。

逆ペリオドを次式で定義すると

$$\omega = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = -\frac{\rho - \beta}{\ell} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

(5)式は

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{\ell\omega n}{r - \alpha K n} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

又は

$$\frac{d n}{n} - \frac{\alpha K}{\tau} d n = \frac{\ell}{\tau} \omega d \omega \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

(4)式より、 $\rho$ の極大値  $\rho_m$ 、それに対する  $\omega_m$ を与える  $n$  は

このパラメタは、最小ペリオド出力と呼ばれる。

$n_m$  を用いて(7)'式は次式となる。

$$\frac{d n}{n} - \frac{d n}{n_m} = \frac{\ell}{r} \omega d \omega \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

(6)式より、 $\omega = 0$  の時  $n$  は極大値  $\hat{n}$  又は最小値  $n_{min}$

(9)式を  $\omega = 0$ ,  $n = n_{min}$  より積分すると,

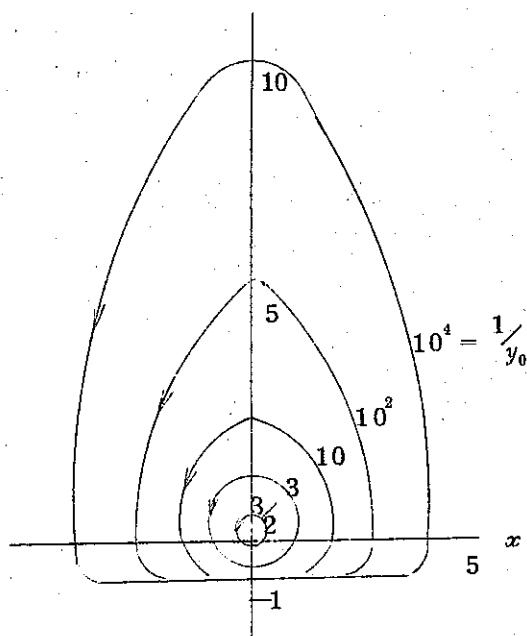
$$\ell \ln \frac{n}{n_{m.i.n}} = \frac{n - n_{m.i.n}}{n_m} = \frac{\ell}{2r} \omega^2 \dots \quad (10)$$

( $n$ ,  $\omega$ )面で考えると(10)は閉曲線を示す。実際

$$x = \left(\frac{\ell}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \omega, \quad y = \frac{n}{n_m}, \quad y_0 = \frac{n_{min}}{n_m} \dots \quad (11)$$

とすると

$\frac{1}{y_0}$  をパラメタとしてこの曲線を示すと次の図のようになっている。



(9)式を  $n = n_m$ ,  $\omega = \omega_m$  より積分すると

$$\ell n \frac{n}{n_m} - \frac{n - n_m}{n_m} = \frac{\ell}{2r} (\omega^2 - \omega_m^2) \quad \dots \dots \dots (13)$$

出力ピークでは,  $n = \hat{n}$ ,  $\omega = 0$

$$\frac{\hat{n}}{n_m} - 1 - \ell n \frac{\hat{n}}{n_m} = \frac{\ell}{2r} \omega_m^2 \quad \dots \dots \dots (14)$$

$\hat{n} \gg n_m$  の時には

$$\hat{n} \simeq \frac{\ell n_m \omega_m^2}{2r} = \frac{\ell \omega_m^2}{2\alpha K} \quad \dots \dots \dots (15)$$

(13)式で  $n = n_{min}$ ,  $\omega = 0$  とおくと,

$$\ell n \frac{n_m}{n_{min}} - 1 + \frac{n_{min}}{n_m} = \frac{\ell}{2r} \omega_m^2 \quad \dots \dots \dots (16)$$

$n_{min}/n_m$  が他の項に較べて小さい時

$$\omega_m = \pm \sqrt{\frac{2r}{\ell}} (\ell n \frac{n_m}{n_{min}} - 1) \quad \dots \dots \dots (17)$$

(17), (6)式より

$$\rho_m = \beta \pm \sqrt{[2\tau\ell(\ln \frac{n_m}{n_{min}} - 1)]} \quad (18)$$

1回あたりのバーストで  $\Delta\rho$  変化があるとすると

$$\Delta\rho = 2\sqrt{[2\tau\ell(\ln \frac{n_m}{n_{min}} - 1)]} \quad (19)$$

この間のエネルギー発生は、

$$E = 2n_m \sqrt{\frac{2\ell}{r}(\ln \frac{n_m}{n_{min}} - 1)} \quad (20)$$

$\Delta\rho$  が  $r/\text{sec}$  で補われるゆえ、同期  $\Delta T$  は、  $\Delta\rho/r$  で与えられる。

$$\Delta t = 2\sqrt{\frac{2\ell}{r}(\ln \frac{n_m}{n_{min}} - 1)} \quad (21)$$

バースト巾を  $\tau \simeq E/n$  で定義すると、

$$\tau \simeq 2\sqrt{\frac{2\ell}{r}(\ln \frac{n_m}{n_{min}} - 1)} \quad (22)$$

さて、Fuch のモデルでは、フィードバックがかからないうちに即発臨界になつていなければならぬ。これは CRAO 実験のごとき場合であつて、ゆっくり反応度が入る場合には、フィードバックが利いて、即発臨界にならぬ。

フィードバックのない動特性で  $\tau \gg \lambda \beta$  の時には、

$$n = 2n_0 \beta \left( \frac{\pi}{2\tau\ell} \right)^{1/2} \exp(\beta^2/2\tau\ell) \cdot \exp(-\frac{r}{2\ell}t^2 - \frac{\beta}{\ell}t) \quad (23)$$

$\rho = \beta$  の時の  $n^*$  を  $n_{min}$  と考えることが妥当である。

$$n^*(\rho = \beta) = n_0 \beta \sqrt{2\pi/\tau\ell} \quad (24)$$

もちろん以上の諸式が成立する条件は

$$n^* < n_m$$

この条件は次式に相当する。

$$\left( \frac{\ell}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{r^{1/2}}{\beta \alpha K n_0} > 1 \quad (25)$$

以上のモデルにもとづく、出力  $n$ 、反応度  $\rho$ 、温度  $T$  を分かり易く描くと図のようになり、まさに CRAC 実験のような様相を提することがわかる。

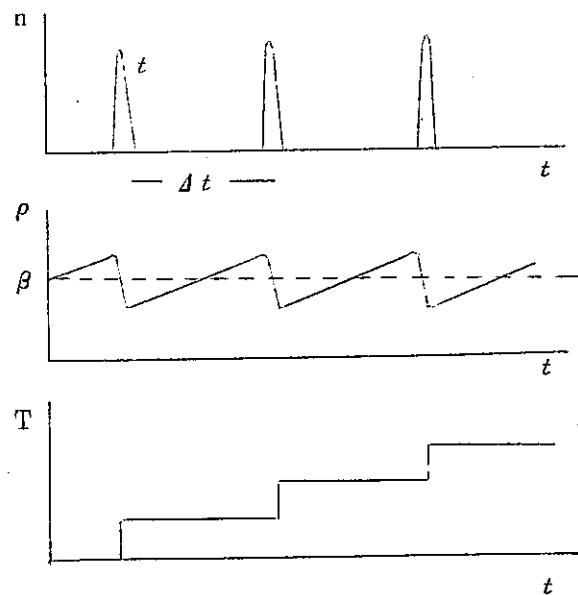


図 NF モデル動特性

このモデルのみでは臨界事故の状況すべてを説明することは出来ない。つまり、遅発中性子の効果や冷却の効果が入っていない。前者の効果はこのような連続パルスをさまたげる。又、実際には、物理的  $\rho$  が頭打ちになること、フィードバックが複雑で  $\alpha = \alpha(T)$  となることなどがあげられる。

以上

## 附録 2. 溶液系臨界事故と臨界警報について

溶液系の臨界事故が、どのような出力様相を示すかを実験的に調べるために1968年11月より、フランスValduc臨界実験所で一連の実験が行なわれた“Consequence Radiologiques d'un Accident de Criticité”(CRAC)実験<sup>1)</sup>と呼ばれるものである。CRAC 01～29は3mmφ, 300mmφの容器が用いられ、37～44では、800mmφのものが用いられた。長さは1又は2mである。これらに93%EU硝酸溶液を104ℓ/h(CRAC 12)～1864ℓ/h(CRAC 25)の一定スピードで注入する。初期条件は、未臨界のものと低出力臨界の場合がある。前者では中性子源が使われた。フィードバック機構は加熱による膨張、溶液の飛び躍ね、分解ガス生成である。詳細なデーターとその解析は、文献2)に詳しいが、類似状況での臨界事故防止対策及び臨界警報装置の設計という点からみると、その結果の結論及び評価を次のようにまとめることができる。

- 1) スパイク部分での全出力は、次式で近似出来る。

$$\frac{\text{全出力}}{\text{全体積}} \approx K \rho_{\text{total}}$$

$$1 < K < 2 \times 10^{12} \text{ fissions}/\ell \cdot \rho_{\text{cm}} \text{なる定数}$$

この式を利用するには、臨界状況での体積と、それに相当する反応度 ( $\rho_{\text{cm}} = 10^{-5} \Delta k/k$ ) を予め知る必要があることを示している。そのためにはCRAC及び類似の実験を内挿することが考えられる。

- 2) スパイク出力の後に続く出力は、反応度の小さい時には  $10^{13} \text{ fissions/sec}$ (CRAC 04) 程度であるが、十分即発臨界を越した状況では、反応度に拘わらず  $5 \times 10^{14} \text{ fissions/sec}$  である。通常臨界事故が起こる状況では、この条件になることが多いと考えられる。
- 3) 容器より4mの位置でのγ線量は、300mmφのものについて  $(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-15} \text{ R}/\text{fissions}$  であり、第1スパイクにもとづく線量は40～550Rで14倍の違いしかない。少し手の込んだ警報(積分型)にする場合には2)のプラトー出力と同様このデーターが使える。一方、800mmφの時は  $-5 \times 10^{-16} \text{ R}/\text{fissions}$  となっている。以上より、臨界警報装置の設計において、次のことが重要である。
  - a. たとえ短時間といえど、強烈なパルス状出力であるスパイクが出るので、それにより回路系が死なないようにすること。特に部品の放射線損傷に注意を払うべきである。
  - b. 装置としては、むしろ反応度印加に伴う①出力変化(ペリオド)又は、②プラトー出力を見るようになすべきであると考へられるが、パルス出力が発生するものについては、①のペリオドと同時に②のプラトー出力をとるべきである。何故なら、①では反応度が即発未臨界でかつ出力レベルが低い出力に設定する必要がある。つまりパルス部の計測では応答的に問題を

生ずると考えられるためである。結局、以上を合せた性能をもたせるためには、信頼性と安定性のある、対数アンプ、ペリオド系を備えるべきである。代表的なものとしては、日本原研一阪大の開発になるもの、東大の開発になるもの 富士電機の開発になるもの等があり、それらが一定の性能を示すことが弥生炉で確かめられている。これらを使う場合、たとえば  $10^{10}$  と  $10^{13}$  fiss/sec にディスクリを set することは容易である。

c. 較正は、定常線源で行なえると好都合であるが、一般的には、困難である。少なくとも、精度よく行なうことは出来ない。したがって、そのために別途小型 F B R (Fast Burst Reactor) を設置する必要がある。価格は、建屋を含め約 10 億円であるが、臨界事故の絶無を期し、他に応用の広いことを考えると廉価である。

d. 臨界検知と共に退避は当然であるが、 $10^{14}$  fiss/sec ( $\sim 10$  kW) オーダーの出力が出続けることに問題がある。したがって、そのような可能性のある部分については、予め重コンクリート遮蔽 (2m 厚さ) を施すことが考えられる。その場合には退避にも余裕ができる。又、電磁ドレインバルブを自動的に開にする装置も必要であると考えられる。又、そのようなプロセスの近くには、人が近づかぬインターロック管理も重要である。これらの条件が満たされるかぎりは、臨界事故といえど致命的にはなり得なくて済ませるといえる。

e. 弱い中性子源 (自発核分裂より強いもの) で、back ground 中性子源を与えるべきである。この場合の臨界事故は、第 1 スパイクが相対的に低くなり (早く中性子増倍が始まり、フィードバック効果が顕著でパルス部での投入反応度が下がる) 容器の破損が防げる。

f. スパイクの持続時間、及び全放出エネルギー、エネルギー放出パターンの詳細は、臨界事故の要因、及び関係する種々のパラメーター (反応度の添加率、初期中性子密度、体系が減速系であるか否か等) によって支配されている。これらを簡単な動特性方程式系で表現することも可能であるが付随するパラメーターを決定することが困難である。また、ある種の仮定の下に、臨界事故を方程式系で形式的に取扱うことは、臨界事故の解析が十分に行なわれていない現在、無理がある。従ってむしろ、CRAC 等、実際の臨界事故実験データを、そのまま主たる根拠として、種々の問題を考えてよい。

(参考文献)

- (1) A Review of the Experiments Performed to Determine the Radiological Consequences of a Criticality Accident, Pierre Lécorché and R.L.Seale Y-CDC-12 UC-46... Criticality Studies.
- (2) フランスにおける臨界事故実験 "CRAC" PNC 安全管理室 安全資料№9, 昭和44年10月
- (3) フランスの Valduc 臨界実験所における実験 PNC安全管理室 安全資料№10, 1969.12.1
- (4) CEA . Valduc Center における臨界警報装置  $\gamma$  プローブ, n プローブ試験の詳細 1974-3-10, 東京芝浦電気株式会社