

# 臨界警報装置の検出基準の考え方—検討資料—

Detection Criterion of Criticality detection system

1980年10月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに配布するものです。ついては供覧、複製、転載、引用等を絶対に行わないよう厳重に管理して下さい。なお、開示制限が解除になった場合は、その旨通知しますが、それ以前に関連業務が終了した場合は直ちに返却して下さい。

## 臨界警報装置の検出基準の考え方—検討資料—

## Detection Criterion of Criticality detection system

実施責任者 関 昭 雄\*

報告者 江 花 稔\*, 金 盛 正 至\*

目 的 想定臨界事故及びそれを検出するための臨界警報装置の検出基準の考え方を整理する。

要 旨 本報告は、原研へ臨界警報装置の照射実験を委託するにあたり想定される臨界事故（主に浴液状）の特徴及び臨界を検出し警報を発生する臨界警報装置に対する試験等の基準を整理する目的で実施したものである。想定する臨界事故は、1965年当時のフランスの考え方の1例を基礎にして、その後の世界各国における事故の実例及びフランスで実施された臨界事故実験（CRAC）の内容を調査し補足した。臨界警報装置の性能としては最小の臨界事故でも検出可能であり、最大の臨界事故でも故障することなく動作することが必要であるが、それは $100\ \mu\text{rad/s}$ のバースト放射線が $1\sim 3\ \text{msec}$ 継続する場合に検出し、 $2.5\times 10^4\ \text{rad}$ の放射線に曝しても正常に動作することと対応しているという結論を得た。この結論は1965年当時のフランスの考え方にそって導かれているが、臨界事故に対する新しい知見に対しても矛盾しない。しかし、この考え方は $\gamma$ 線のみを対象として導かれたものであり今後中性子線をも考慮に入れた考え方から再度整理しより充実した考え方を明確にしていきたい。

安全管理部では、臨界警報装置の照射試験を実施してきているが試験の経過も本報告内で紹介し、同時に現在までの試験によって得られた知見をも含め今後、試験を実施する場合の試験項目を考察し参考とした。

---

\* 安全管理課，放射線管理第1課

## 目 次

1. はじめに	1
2. 臨界事故の規模	2
2.1 世界各国における臨界事故	2
2.2 世界各国の臨界規模の評価	3
2.3 まとめ	4
3. 臨界警報装置に必要な性能	8
4. 現在までの試験結果	14
4.1 東大「弥生炉」における照射試験（要旨）	14
4.2 フランス「キャリバン炉」における照射試験（要旨）	15
5. 参考文献	17
別添1 フランス及びアメリカの臨界想定規模	19
別添2 東大弥生炉における臨界プローブ照射試験（概要）	23
別添3 フランスキャリバン炉における臨界プローブ照射試験（概要）	31
別添4 臨界状態の検出及び警報用 E. D. A. C. システム（翻訳）	47

## 1. はじめに

臨界事故及び事故を検知し警報を発生する臨界警報装置は、現在まで不明確な点が多く、設計上でも一定した手法がとられてきたとは言えない。しかし近年フランスで実施された「CRAC」という一連の臨界事故実験により、実体が明確に把握できるようになってきている。

そこで、原研NSRR炉における試験実施にあたり現在まで再処理工場に設置されてきたSEIN社の臨界警報装置の性能確認のために実施された試験の概要を整理するとともに、現時点で臨界警報装置を設置する場合の基準となるべきものについて考察した結果について述べる。

## 2. 臨界事故の規模

臨界事故の規模を表すパラメータとしては以下に示すようなものがある。

- ① 総核分裂数
- ② ピーク核分裂数
- ③ 最小ダブリングタイム
- ④ ペリオド
- ⑤ 付加反応度
- ⑥ ピーク時の比出力

この中で事故の規模を直接的に表すものが総核分裂数あるいはピーク核分裂数である。臨界警報装置の性能を確認する場合には対応すべき臨界事故の範囲を明確にし、その範囲内での装置の動作確認を実施する必要がある。そこで、総核分裂数とピーク核分裂数により検出すべき臨界の範囲を確認する。

### 2.1 世界各国における臨界事故

過去の臨界事故を調査すると、溶液系に限定すれば、最大は Idaho Chemical Lab の  $\sim 4 \times 10^{19}$  fissions 最小は Windscale における  $10^{15}$  fissions である。Fig 2.2 A に示すように  $10^{17}$  fissions 位の事故が最も多いが、核分裂物質 (Pu or U) の質量と明確な関係があるわけではない。事故を空気中の固体系あるいは、非均質水溶液にまで拡大すると事故の規模も  $10^{15} \sim 10^{21}$  fissions の範囲となることがわかる。Fig 2.2 A は溶液系臨界事故について横軸に核分裂性物質質量、縦軸に核分裂数をとった図である。Fig 2.2, B は、すべての種類の臨界事故について縦軸に核分裂数を取り事故の数を黒点の数で示したものである。

## 2.2 世界各国の臨界規模の評価

フランスの1965年当時の評価方法の1例として仮にS評価として紹介すると臨界事故は、最大で初期ピーク  $10^{18}$  fissions, 臨界の振動現象がある場合に全体で  $10^{19}$  fissions と評価している。 $10^{19}$  fissions は300MWSに対応しているが、作業員の被曝評価上は  $10^{18}$  fissions の初期ピーク後に退避すると考えて、最大臨界事故を  $10^{18}$  fissions と考えている。しかし臨界警報装置としては、 $10^{19}$  fissions の臨界事故にあった後にも警報を発し得る状態にならなければならないと考えられる。また最小の臨界事故の規模については、 $10^{15}$  fissions\* という値がそれに対応するものと考えられる。また、ピーク核分裂数  $10^{14}$  fiss, 総核分裂数  $10^{15}$  fiss としている例もある。\*\*このことは次章で述べるように時間軸を考慮するとある程度対応をつけることができる。

最近CEAは、溶液系臨界事故に関する調査を行うために、CRACと呼ばれる一連(60度程度)の臨界実験を行った。Fig 2.2.Cには実験の規模についてのみ、縦軸に総核分裂数を実験の結果起った総核分裂数毎に黒点を対応させと示している。これからわかるように、CRACとして実施された試験の結果発生した臨界暴走は総核分裂数で  $10^{16} \sim 10^{19}$  の範囲内にある。

アメリカは、臨界警報装置に関する国家規格を作成しているが、その中でも現在までの事故例について別添で扱っている程度で特に明確な最小臨界事故を規定していない。しかし最小臨界事故を即時検出できるように設計すべきであるとは述べている。そこで、最小の臨界事故時の線量について、反応物質から2mの地点で60秒以内に20 radの空気中の空間線量になると想定しても良いと述べている。また、最小の臨界継続時間として1 msecを与えている。また、最大の臨界については、 $2 \times 10^{19}$  fissions以上の規定をする必要はないと言っている。

日本では原子力学会の「臨界警報装置設置基準」研究専門委員会の報告(1975年)がある。この報告は文献調査によるものだが、最小臨界として  $10^{15}$ , 最大として  $10^{20}$  fissions をあげており、臨界の継続及び作業員の退避を考慮した最も起りやすい平均的事故として初期スパイクが  $4 \times 10^{16} \sim 4 \times 10^{17}$  fissions, 全体で  $2 \times 10^{18}$  fissions としている。

---

注\* § 417

\*\* Fig 2.1 想定臨界事故参照

## 2.3 ま と め

フランスの1965年当時の評価は臨界事故の範囲を文章上は総核分裂数で $10^{15} \sim 10^{19}$ としている。その後の世界的な知見を含めてもおおむねこの範囲内にある。しかし、初期ピーク核分裂数のデータについてはCRACの実験結果で $10^{14} \sim 10^{17}$  fissions ( $\phi = 300$  mmタンク、別添4を参照)という試験結果が示されており、また各施設の想定臨界事故(表2-1)を見ても、核分裂数 $10^{14}$  fissionsを採用している例も多い。さらに後述するSein社のデータ及び、Fig.2.1のS評価の凶面からみて検出すべき最小の臨界スパイクは $10^{14}$  fissions としていると考えるのが妥当であろう。また最大の臨界事故についても $\sim 10^{20}$  fissions 程度の事故は経験されている。

1965年当時のS評価の記述は $10^{15} \sim 10^{19}$  fissionsの間の臨界事故を想定するという漠然としたものであるが、採来的にはより具体的な臨界事故の想定が重要である。目的は具体的動作条件を明確にするためである。この具体的条件は1965年当時はそれ程明確にできなかったことが、現時点ではより明確に設定可能なデータが蓄積されてきて可能になってきたからこそ必要だとも言える。具体的想定事故の1例は以下のように考えられる。

### 想定臨界事故の1例

総核分裂数の範囲	$10^{15} \sim 10^{20}$ fissions
初期ピーク核分裂数	$10^{14} \sim 10^{17}$ "
初期ピークの持続時間	1 msec $\sim$ 3 msec
臨界事故の最大継続時間	20 sec



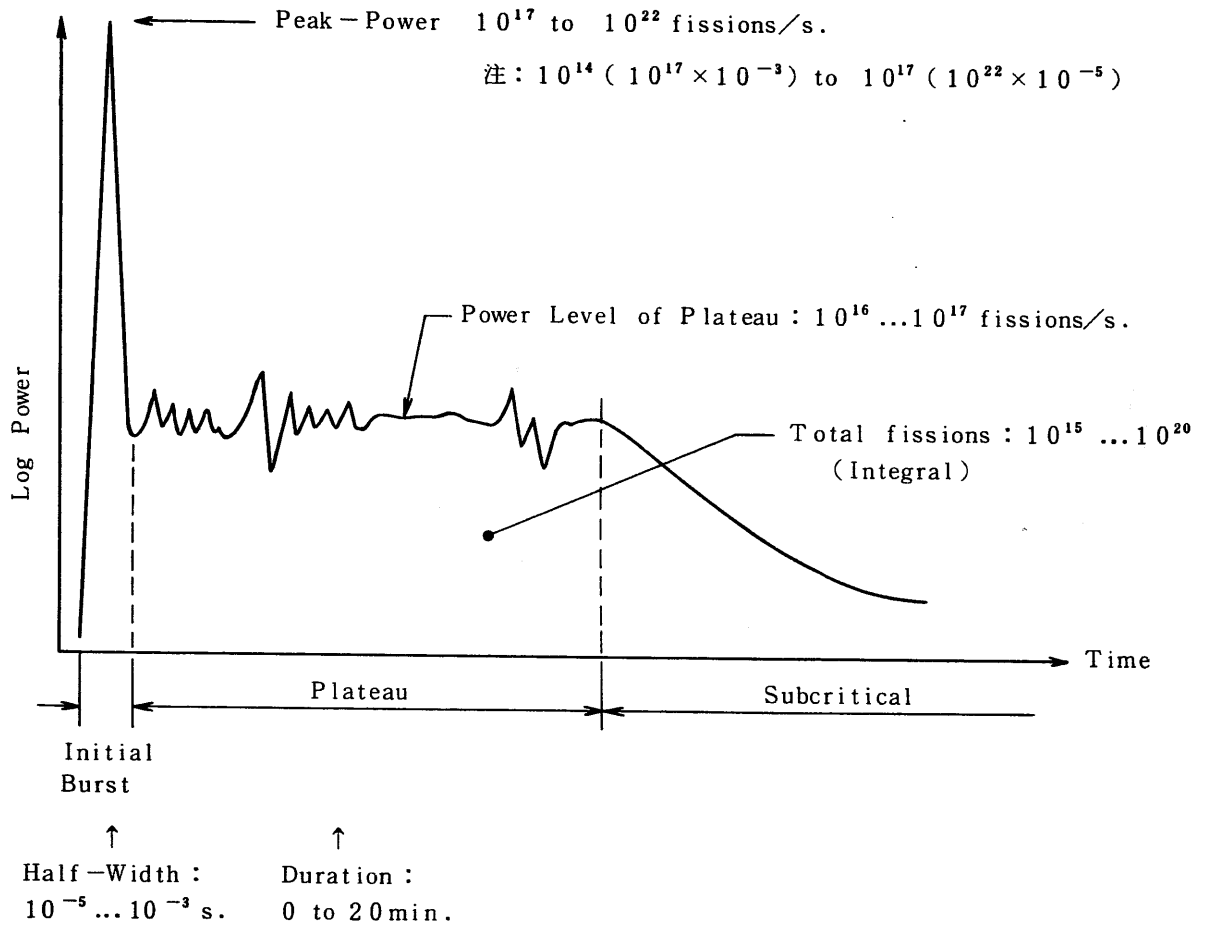


Fig. 2.1 想定臨界事故の1例

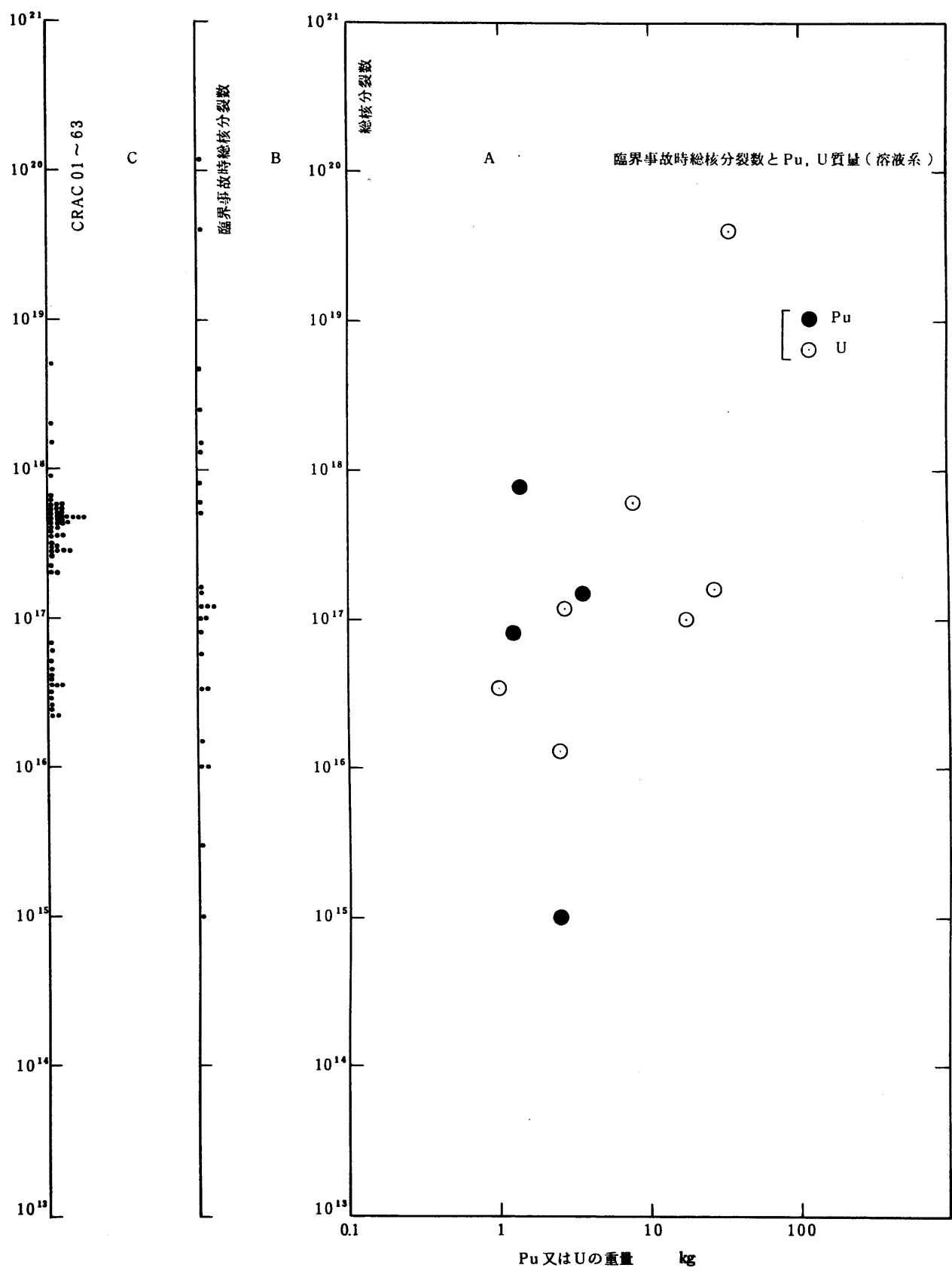


Fig. 2.2 臨界事故の規模の分布

表 2-1 臨界警報装置設計上の想定臨界事故

施設	事故の型	核分裂数	持続時間	備考
Barnwell Nuclear Fuel Plant				文献(1) t
General Electric-Wiliwington Plant	低濃縮U(<4%)の減速系	$10^{14}$	1msec	線量モニタリング計画では核分裂 $10^{18}$ および1 minを使用。
Westinghouse				文献(1) t
Rocky Flats Plant	Pu固体・減速系	$10^{14}$	$1\mu\text{sec} \sim 3\text{sec}$	文献(7)
Springfield Works	低濃縮U(<5%) 溶液・半溶液系	$10^{14}$	$1\text{msec} \sim 3\text{sec}$	$10^{15}$ 核分裂を想定し、安全係数10をとる。線量モニタリング計画では、 $10^{18}$ を使用。
Windscale Works	U固体・溶液系 (スパイク部)	$10^{15}$	$1\text{msec} \sim 3\text{sec}$	作業場の $\gamma$ 線量率が高い場合は、以下の核分裂増加率を検出限界と考える。①U系で $200\mu\text{sec} \sim 2\text{sec}$ の間は $10^{15}\text{fiss./sec}$ 、②Pu系で $200\mu\text{sec} \sim 20\text{sec}$ の間は $10^{14}\text{fiss./sec}$
Kurllsruhe Nuclear Research Center	Pu固体・溶液系 (スパイク部)	$10^{14}$	$1\text{msec} \sim 3\text{sec}$	スパイクにより、1 mの位置で、少なくとも1 Rの $\gamma$ 線が与えられる。
	固体・溶液系	$10^{14}$ (スパイク部)	$1\text{msec} \sim 3\text{sec}$	スパイクにより、1 mの位置で、少なくとも1 Rの $\gamma$ 線が与えられる。
		$200\mu\text{sec} \sim 20\text{sec}$ の間の核分裂増加率が $10^{14}\text{fiss./sec}$		1 mの位置で少なくとも1 R/secの $\gamma$ 線量率が与えられる。

6 ftの位置で、1 min以内に25 radとなるような事故を最小事故としている。持続時間は1 msec以上。  
(参考文献1より抜粋)

### 3. 臨界警報装置に必要な性能

臨界が発生した場合に臨界警報を必ず発生するためには、最小の臨界事故をも検出し、かつ最大の臨界事故でも動作することが必要になる。しかし前章の臨界事故の規模でも述べたとおり、臨界事故は総核分裂で  $10^{15}$  fissions から  $10^{20}$  fissions の範囲に分布しさらに、バーストの発生条件が大巾に異っている。また下に示すような条件が明確でないため、臨界事故の規模と警報装置の感度を直接結びつけるのは困難な点が多い。直接の関連づけを困難としている要因としては

- ① 検出すべき核分裂数の変動
- ② 核分裂あたりの中性子線、ガンマ線の放出量の変動
- ③ 遮蔽体の存在、あるいは距離の変化等による線量の変動

の3つが主なものである。臨界事故の規模についての仮定は前章で述べたので、本章ではそれに付随する項目について述べる。内容的には検出器の対応すべき条件を明確に設定するということである。

最近、フランス原子力庁（CEA）が一連のCRACの実験の結果導き出した結論で明確になっていることとして、核分裂と放射線の線量を一義的に対応させることは困難であり、かつ特徴的な最小臨界事故を決定することも困難であるという結論がある。（別添4参照）

これは、線量と実際の臨界とは全く結びつかないということであるが、実際上はおおまかに言ってどの程度の臨界と結びついているかを概念的に把握しておくことも、実際の施設への配置という観点から見て必要なこともある。いずれにしても放射線に対する感度として検出器の条件を設定すれば、臨界と結びついているいないにかかわらず検出器の配置計画等まで考えることができる。

現在用いられている臨界警報装置に対するSein社の臨界警報装置の仕様では、ある程度検出器の感度として直接に性能が示されているが、これは原子力学会等の臨界警報装置の基準に比較し線量及び時間間隔が限定されているという意味では数段すぐれた評価方法であると考えられる。現状ではこの条件を守ることが第1条件である。Sein社の臨界プローブについての技術的仕様を以下に示す。

i) ガンマプローブの臨界警報閾値

360 mR/h （動燃では200 mR/hとしている）

ii) 中性子プローブの臨界警報閾値

100  $\mu$  rad/5 sec （SSDからの出力5パルス/5 sec）

iii) 警報発生論理回路

500 msecの間における2 out of 3

この基準は、S評価に対応させて判断すれば  $10^{15}$  fissions の臨界事故を30 m離れた点で臨界

を検出できる性能に対応していると考えられるが、Sein社では別の解釈を行っていると考えられるので、上記の数値基準と臨界事故との関連をより明確に定義してみる。

そこで臨界警報装置を評価するために必要な条件について表3.1に示す。この条件の中で、現在必ずしも明確にされていない条件は、

- ① 初期スパイクの核分裂数  $F_p$  及び継続時間  $t_p$
- ② 臨界地点と検出器の距離  $S$
- ③ 核分裂あたりの放射線量率  $R_f$

である。そこで、明確にされていない部分については、世界の各施設の考え方をも参考にし、より合理的と考えられる値を仮にきめ、その値を臨界プローブ試験条件として以下に示す。(表3.1参照)

臨界プローブ試験条件

- ① 想定臨界事故 ( $F, t$ )
  - 初期 スパイクの条件  $10^{14} < F_p < 10^{18}$  fissions  
 $1 \sim 3 < t_p < 10^3$  msec
  - 臨界全体の条件  $10^{15} < F_p + F_d < 10^{19}$  fissions  
 $1 \sim 3 < t_p + t_d < 2 \times 10^4$  msec
- ② 臨界場所と臨界プローブの距離  $S$   
 $2 < S < 30$  m
- ③ 核分裂あたりの放射線量率  $R_f$   
 $R_f = 1 \times 10^{-14}$  rad/fission (1m) (表3.2を参照)
- ④ 上記①, ②, ③から導かれる臨界警報装置に対する試験条件  
(中性子線, ガンマ線とも同一とする)

(イ) 検出すべき最小臨界事故の計算

計算式

$$\begin{array}{cccc} & \text{核分裂あたりの} & & \\ & \text{放射線量 (1m)} & \text{距離} & \text{遮蔽} \\ \text{最小臨界事故} & \times 10^{-14} \text{ rad/fiss} \times & \frac{1}{30^2} \times & \frac{1}{10} \doteq 100 \mu\text{rad}(S^{-1}) \\ (3 \text{ msec}) & & & (3 \text{ msec}) \end{array}$$

以上により、 $100 \mu\text{rad}(S^{-1})$  の線量 (n線,  $\gamma$ 線とも同じ値とする) が3 msec 持続した場合に警報が発生すれば良い。(この値は、 $10^{15}$  fissions を最小臨界事故とした場合と比較すると10倍の安全側となる)

(ロ) 検出器が故障しない最大の臨界事故

$$10^{19} \text{ fissions} \times 10^{-14} \text{ rad/fiss} \times \frac{1}{2^2} \doteq 2.5 \times 10^4 \text{ rad}$$

でも故障しない。

以上の条件から臨界プローブ試験にあたっては表 3.3 に示す項目について評価し、上記(イ)、(ロ)の条件に適合していることを確認するとよい。

ここでさらにつけ加えることがある。それは、別添 4 で示されている結論である。内容の詳細については他の CRAC に関するレポート及び別添 4 を参照して頂きたいが、大きな結論として次の 2 つをあげることができる。

- ① 特徴的な最小の臨界事故を決定することはできない。
- ② 放射線量-核分裂の比を決定することはできない。

この結論は、我々が導き出した  $100 \mu\text{rad/s}$  の線量で警報を発するという考え方に対してどんな不都合があるであろうか。その内容は次の 2 つのことだと考えられる。

- i)  $100 \mu\text{rad/sec}$  という値が、常に我々が想定したところの特徴的な最小臨界事故に対応しているわけではないことを意味する。
- ii) 作業員を、常に同一基準で退避させるような警報を発することはできない。

しかし、実際には、常に一定の規模の事故の検出とか、一定の線量による退避ということも重要ではあるが、我々の臨界警報装置は新しい Intertecneque 社のプローブよりもより低い線量で警報を発するであろうと推測されるし (IN 社のプローブは  $25 \text{ rad} (1 \text{ m})$  値から導入された  $30 \text{ m}$  で、減衰なしの場合に対する値  $25 \text{ mrad}$  を用いている)、新しい観点からみても現在の検出法は十分に有効なものと言える。さらに臨界からのある距離の地点における線量の計算方法については、ANISN 等の計算コードによる評価も考えられるが、輸送方程式を解いた結果も、ポイントソースを仮定する限りは距離が  $50 \text{ m}$  位までは逆 2 乗則に従うと考えられるし、遮蔽効果も半価層から計算する方式とほぼ同様の値を示すと考えられる。そこで問題となるのは、1 核分裂当りの放射線の量であるとか、遮蔽の場合の半価層の値という、実験等により実際に確認すべき項目であり、今後計算方式をも含めてより詳細な解析が必要となろう。

表 3.1 臨界警報装置の性能評価のために必要な条件

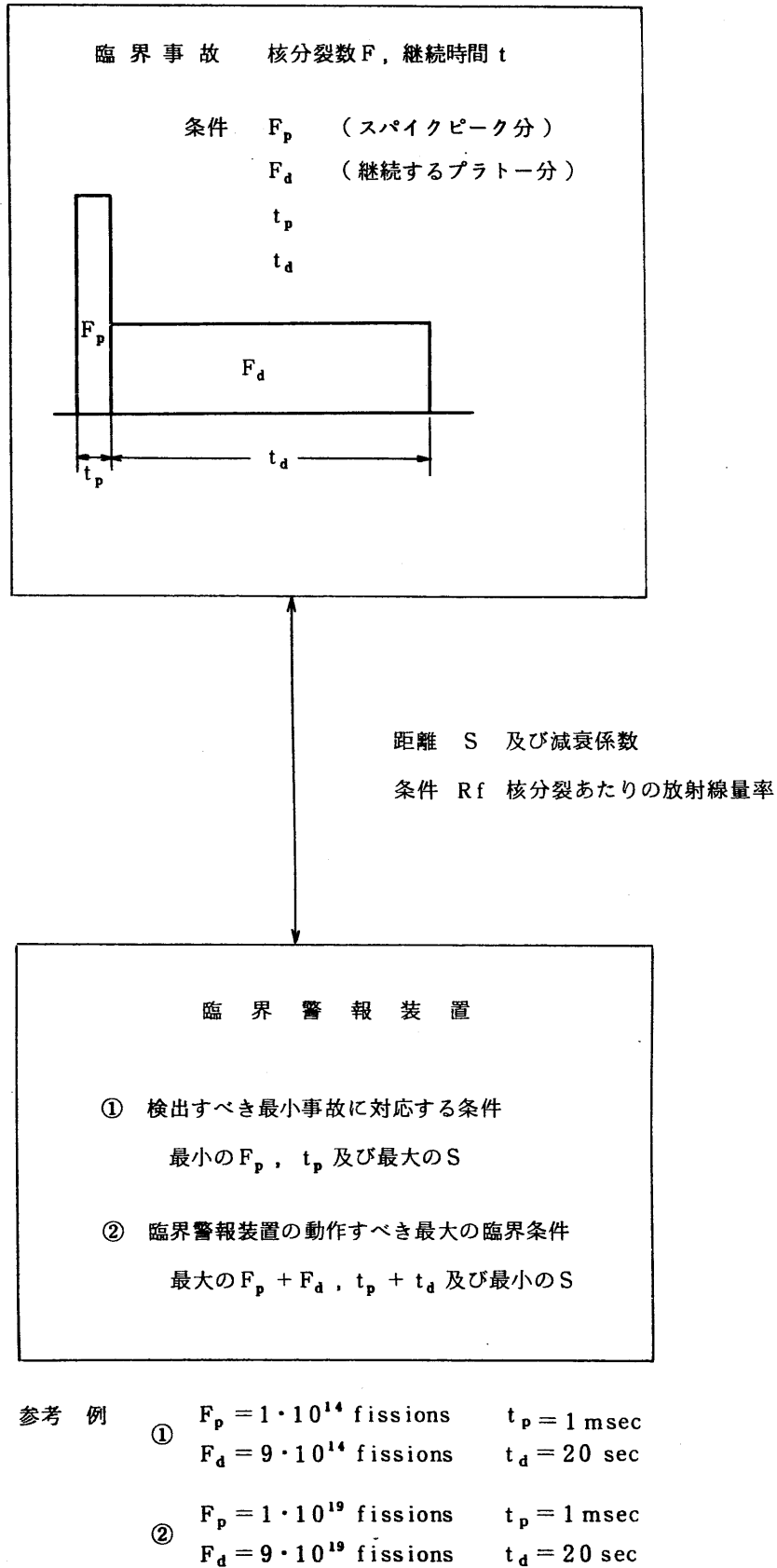


表 3.2 臨界警報装置設置基準例

項 目	設 置 基 準 概 要
1.設置の必要性を検討すべき区域	〔アメリカ〕 ①FMの存在量が <sup>235</sup> U:700g, <sup>233</sup> U:520g, Pu:450g, これらの混合物:450gをこえる場合(ただし, FMの物理的形態, 同位元素組成を考慮して超過可), ②予想最大被曝線量が25remを超える場合, 検討要。 (注) 10CFR Pt. 70, 70.24 改正案(1973)では, 上記①に加えて, <sup>235</sup> U(<4w/o):1,500g, 減速・反射材が存在する場合は, 上記FM量の1/2が追記されるとともに, ②については, 人体軟組織の吸収線量が20rad/<1min, 2m以上と改訂。
	〔イギリス〕 ①人間, 機械, 電気等による臨界管理が, すべて好ましくない状態になった場合でも臨界未滿と想定できる場合, ②予想最大規模の事故時の被曝が25rem以下の場合, 検討不要。
	〔日 本〕 FMの存在量が制限量(10CFR Pt. 70, 70.24 改正案に定める値)をこえる場合, ②人体軟組織の吸収線量が20rad/<1min, 2mをこえる場合, 検討要。
2.設置すべき装置の機能, 感度, 等	〔アメリカ〕 ①臨界検出時は必ず, 直ちに退避警報発生すること, ②25rad/<1min, 6ftの線量を与える臨界を検出すること。
	〔イギリス〕 ①臨界検出時は<0.2sec以内に退避警報発生すること, ②臨界(スパイク部)時でも正常動作すること, ③ $10^{15}$ fiss.(多量のPu存在時は $10^{14}$ fiss.)/ $10^{-3}$ ~3secを検出すること。
	〔フランス〕 ①臨界検出時は<0.5sec以内に退避警報を発生すること, ② $10^{15}$ R/ $10^{-3}$ secの $\gamma$ 線量率 $10^{20}$ fiss./1mに対応する全線量でも正常動作すること, ③ $10^{15}$ fiss.を検出すること。
	〔日 本〕 ①対象とする臨界事故時に十分応答し, 警報を発生すること, ② $10^{15}$ fiss./ $10^{-3}$ sec(固体系), $10^{14}$ fiss./1min(溶液系)に対応する $\gamma$ , 中性子線量を検出すること, ③素現象がなく, 経時変化の少ない検出器であること。
3.検出器の配置, 等	〔アメリカ〕 ①分担すべき区域のいかなる点も1組の2個の検出器からの距離は450ft以下とすること, ②遮蔽効果を考慮した配置とすること。 (注) 10CFR Pt. 70, 70.24線源, 線源-検出器間の距離を120ft以下とすべきとしている。
	〔日 本〕 ①低線量率で遮蔽物等による影響の少ない位置とすること, ②警報設定レベル, 検出器感度等を考慮して設置位置, 間隔等を決定すること。
4.誤動作, 不動作の防止	〔アメリカ〕 2個以上の検出器からの同時の応答(X out of N方式)を用いること。
	〔イギリス〕 ①X out of N方式を用いること, ②積算線量動作型を用いること。
	〔フランス〕 ①2 out of 3方式を用いること, ②積算線量動作型を用いること。
	〔日 本〕 ①2個以上の検出器からの同時応答を用いること, ②可能な限り故障検出表示系を設けること。
5.警報信号機	〔アメリカ〕 ①音調が識別し易く, 十分な音量と到達範囲を有すること, ②当該区域外からリセットしておくこと, ③その他技術上の基準は, 「即時退避信号に関するアメリカ基準」に従うこと。 (注) 「即時退避信号に関するアメリカ基準」では, 4~5Hzの複合音波, 75~130dbの音量等を定めている。
	〔イギリス〕 ①特別に定めた警報音とすること, ②施設外よりの手動リセットを可能としておくこと。
6.核分裂当りの即発 $\gamma$ 線量	〔アメリカ〕 基準としては示していないが, Y-12型事故等の場合, $1.8 \times 10^{-14}$ rad/fiss.を採用している。
	〔イギリス〕 $2 \times 10^{-14}$ rad/fiss.(溶液系), $1 \times 10^{-14}$ rad/fiss.(その他の場合)を採用している。
	〔フランス〕 $\sim 10^{-14}$ rad/fiss., 1mを採用している。

(注) FM: 核分裂性物質, 〔日本〕: 「臨界警報装置設置基準」研究専門委員会において作成した基準(案)。(参考文献1より抜粋)



表 3.3 臨界プローブ試験で確認すべき項目

試験項目	確認内容
試験炉パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○総核分裂数 ( fissions )</li> <li>○核分裂ピーク形 ( ペリオド, 半値巾 )</li> <li>○炉トリガー出力等の時間測定基準時刻</li> </ul>
照射線量データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○<math>\gamma</math>線, n線の線量時間変化</li> <li>○<math>\gamma</math>線, n線の集積線量</li> </ul>
プローブの性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>○プローブの放射線に対する反応</li> <li>警報信号発生と閾値 ( <math>100 \mu\text{rad}/\text{sec}</math> 等 ) の関係</li> <li>○プローブの動作時間</li> <li>プローブの周辺線量が警報レベルを越えてから警報発生までの時間</li> <li>○最大臨界事故でも故障しないこと</li> <li><math>2.5 \times 10^5 \text{ rad}</math> でも故障しないこと</li> </ul>

## 4. 現在までの試験結果

再処理施設に設置されている臨界警報装置は、受け入れ検査及び性能試験のために東大「弥生炉」及びフランス「キャリバン炉」において照射試験が実施されている。試験結果の抜料については、別添2及び別添3に示すが、ここにはその大要を記す。

### 4.1 東大「弥生炉」における照射試験

試験は、1)  $\gamma$ 線検出器照射試験と2)中性子検出器照射試験の2種類が実施された。弥生炉の運転モードには何種類か考えられるが、試験に際して用いた運転法は

#### ① 非定常モード運転

反応度が低く、ピークパワーまでの時間が約10秒程度であり、スクラムにより停止される運転モードである。

#### ② 反応度パルス運転

低反応度(非定常モード運転程度)を投入しておき、その反応度に加えるかたちでパルス状反応度を加えて、半値巾1 msec程度のパルス出力を得る運転モードである。

の2種類の運転モードである。以下に試験結果について記す。

#### 1) $\gamma$ 線検出器照射試験

$\gamma$ 線検出器に関しては、臨界の発散時間等の中も考慮して、非定常モード運転、反応度パルス運転の2種類の運転モードで試験を行った。

非定常モード運転による試験では、比較的ゆっくりとした放射線変動に対する特性を調べた。デジタルメモリ、シンクロスコープにより臨界 $\gamma$ プローブの動作の確認を行い警報出力が発生されていることを確認した。しかし、この場合炉出力の時間変化、放射線量変化と警報出力の対応は確認されていない。

反応度パルス運転においては、パルス巾 $\approx 1$  msec程度のパルス状のバースト放射線による臨界 $\gamma$ プローブの動作確認を行った。この場合もデジタルメモリ、シンクロスコープによる出力波形確認を行い、A点のパルスが飽和していない場合には、アラーム出力の時間遅れ(I)が、放射線量が警報閾値を超えてから、 $300\mu\text{sec} < I < 400\mu\text{sec}$ と判断され、仕様を満足していることが判明した。

#### 2) 中性子検出器照射試験

非定常モード運転により、炉出力が上昇し、放射線の方が強くなった場合の、炉出力と中性子検出器計数率の関係の確認及び核分裂片エネルギースペクトルの確認を行ったが、炉出力が低い場合にも検出器の警報が発生してしまったため、警報出力の時間関係等については

データが採取できなかった。

#### 4.2 フランスキャリバン炉における照射試験

フランスのバルダックにあるキャリバン炉は、溶液状の臨界を発生させることの可能な試験炉で、Sein社からの臨界γプローブ受け入れにあたり性能検査を行った。

照射試験は3回実施されたが、臨界発散は、半値巾  $70.5 \mu\text{s} \sim 330 \mu\text{s}$ 、ピーク出力  $1.25 \times 10^{10} \sim 1.05 \times 10^9 \text{ watts}$ 、総核分裂数  $405 \times 10^{16} \sim 1.83 \times 10^{16} \text{ fissions}$  であった。照射位置における総放射線量はTLDにより測定し、炉出力の時間変化はフォトダイオードにより測定した。臨界γプローブの動作及び炉出力と放射線量の関係は次図4.1に示すようになった。試験においては、定常レベルにおけるγプローブの動作点及び警報出力が炉トリガー出力よりも時間的に前になってしまったため正確な時間間隔の測定ができなかったため計算により推定した結果を図中に記入してある。

注. 上記4.1及び4.2は、参考文献4の要旨、及び別添3の論文の要旨を筆者がまとめたものである。

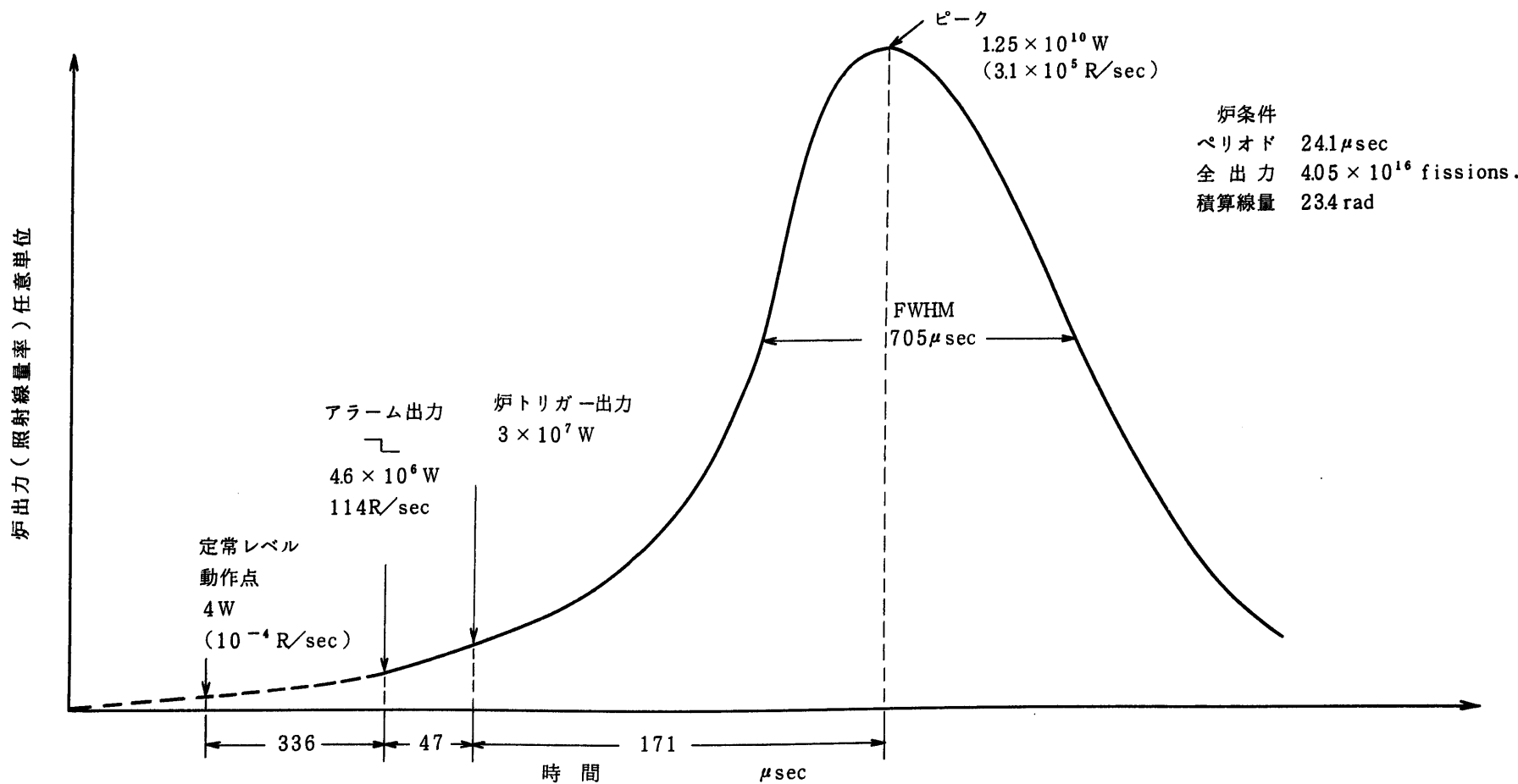


図 4.1 キャリバン炉におけるγプローブ照射試験

## 5. 参 考 文 献

1. 臨界警報装置, 「臨界警報装置設置基準」研究専門委員会, 日本原子力学会誌  
Vol 17, No.8, 404 (1975)
2. Criticality accident alarm system, American National Standard, ANSI/ANS-  
8.3-1979 Revision of N16.2-1969
3. 臨界事故検出器の時性試験研究, 安成弘, 中田啓 他, PNCT841-77-06 (1977)
4. Brief description of a criticality detection and alarm system "E.D.A.C.",  
Intertechnique, 1976
5. E.D.A.C. Ensemble de detection et d'alarme de criticite, Raymond Prigent  
et. al., CEA-R-4784 (1976)
6. Safety Evaluation Saint-Gobain Techniques Nouvelles, 1968
7. Le programme C.R.A.C. Études d'accidents de criticité en solution, Par R  
Agaisse et. al. (1972)
8. 臨界警報吹鳴時の措置検討ワーキンググループ検討結果, 市川倫夫 他, 1976
9. 核燃料の臨界安全, 原子力安全研究協会, 1969

別添1 フランス及びアメリカの臨界想定規模  
関連部分の要旨

## 1) フランスの1965年当時の考え方の1例

### 417. 臨界検出及び警報の原則 (Principles of Criticality detection and Alarm)

- 417.1
- ① いかなる臨界に対しても作業員の迅速な退避が可能なことを保証する。
  - ② プローブはそれらの管理下でない事故には不感であり、誤警報は非常に少くなければならない。
  - ③ 0.5秒以内での2 out of 3の同時計数により警報を発する。
  - ④  $10^{15}$  fissionsの線源から30mでの地点における線量がプローブに入射した場合に警報を発することとする。
  - ⑤ 臨界プローブは次の4項目に対しては能力がない。
    - 臨界事故の場所の検出
    - 臨界退避の指示
    - 全積分線量の測定
    - 事故の振幅と継続の把握
  - ⑥ Pu濃縮セルの $10^{18}$ の臨界によりMP・CRの作業員は約6remの被ばくとなる。

### 417.2 臨界検出プローブの型式と感度

- ① 濃縮ウランターゲットと接合部を臨接させた半導体検出器を“Plexiglass”9cmの中に入れてある。
- ② 検出器の感度は、 $10^{15}$  fissionsの臨界から30mの距離における線量を1/10の減衰を見込んで測定できる必要がある。
- ③ 100mrem/h以下の連続中性子線量には不感である。

## 5.1 臨界事故 (Criticality Accidents)

- 511.
- ① 実験から臨界継続時間は $10^{-4}$  sec~several secとなる。
  - ② フランスCEAは最大臨界事故を $10^{18}$  fissionの初期ピークをもち；臨界発振のある場合には全体で $10^{19}$  fissionと考えることに同意している。
  - ③  $10^{19}$  fissionは、300MWSのエネルギーに相当するものとして評価する。

### アメリカ国家規格 (ANSI /ANS 8.3-1979) 抜粋

この規格は臨界警報装置の全体に対する規格となっているが、検出基準及び感度に類する数値については以下のような記述がある。

- § 4.2.2   ◦ 最大予測吸収録量が 12 rad を超えない区域にはこの規格による臨界警報装置は要求されない。
  - この録量の評価の為には、原子炉以外の事象に対して  $2 \times 10^{19}$  fissions を超える規模のものは想定しなくてよい。
  
- § 4.5.4   ◦ 検出器は少なくとも 10 R/S の放射線場にさらされる時には必ず警報を発生するべきである。
  
- § 5.2       ◦ 臨界警報装置は、最小臨界事故を即時検出できるように設計すべきである。
  - このためには、通常 of 遮蔽厚のみを考慮して核分裂性物質を取り扱ったり、処理する区域においては、60 秒以内で、反応物質から 2 m の距離で、20 rad の空气中吸収線量と等価なエネルギーの発生を想定しても良い。
  
- § 5.3.1   ◦ 検出器の設計においては、放射線のたち上りの最小継続時間を 1 m sec と想定してよい。
  - 検出器の応答および警報作動が 1 m sec の時間推移の結果として生じるべくシステムを設計しなければならない。
  
- § 5.3.2   ◦ 線量率検出器の警報設定点は、測定点の通常又は作業時のバックグラウンドよりも 10 mR/h は上の値に設定することを推奨する。



表 1 ANS 8.3 の非公式な別添中で扱われている臨界例とその線量

分類	距離 cm	線量 rad	核物質	文献
Los Alamos (1968)	40	1.100	Pu	6
	200	56		
Los Alamos (1972)	200	1.000	<sup>235</sup> U	5
Godvia	200	750		
Parka	200	1,500		
CRAC	200	0.8		
Los Alamos (1967)	50	10 <sup>4</sup>	<sup>235</sup> U	4
	200	6.25		

以上より、この規格で使用している1分間に20 rad (2 m地点で) という値はたかだか数セントの過剰反応度による小さい臨界に対応しているとしている。

また検出器による検知範囲の計算方法として、ガンマレオメータを使用する場合の計算方法をあげている。この場合20 radの検出限界を、非減速で無反射体の金属体系の場合にn/r比を12にし、減速系の場合はn/r比を0.3として、そのr線量分に対してのみ反応するものとして計算している。検出器は1msの臨界に対するレスポンスとしてピーク線量の $\frac{1}{2500}$ に対して反応するものとしており、空気の線量伝達係数として $\frac{1}{3}$ をとって、さらに線量が逆2乗則で減衰するとして計算している。

1例として、非減速金属体系の場合に50 mR/hの閾値に対して、

$$0.050 \text{ R/h} = 1.5 \text{ rad/ms} \times 3.6 \times 10^6 \text{ ms/h} \times \left(\frac{2}{r}\right)^2 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2500}$$

検出閾値
臨界線量
時間換算
距離
空気
レスポンス

のように計算しているが、これは遮蔽等の条件を考慮できる計算方式でなく万能とは言えない。

## 別添2 東大弥生炉における臨界プローブ照射試験(概要)

(PNCT841-77-06 より抜粋した。)

### 内 容

1.  $\gamma$ 線検出器照射試験
  - 1.1 非定常モードによる照射試験
  - 1.2 反応度パルス運転による照射試験
2. 中性子検出器照射試験

## 1. $\gamma$ 線検出器照射試験

$\gamma$ 線検出器に対する照射試験は、原子炉「弥生」において

- ① 非定常モードにおける照射試験
- ② 反応度パルス運転による照射試験

の2種類の試験が実施された。

### 1.1 非定常モードによる照射試験

照射試験に利用された弥生における非定常モードは、投入反応度が $0.57\% \Delta K/K$ で出力 $\approx 170$  KW程度の運転であり、図5.3.1.に示すように反応度(PoSI)投入から約10 sec程度でピーク出力となる。炉出力はピーク出力時に手動スクラムにより停止される。

照射試験においては、図5.3.2.に示すように臨界モニタ、デジタルメモリ(DM701)及びシンクロスコープを配置した。原子炉室内に $\gamma$ 線用プローブを設置し、弥生を上述の非定常モードで運転すると、A点からの電圧として、図5.3.3.に実線で示すような変化が得られる。ここでPoSIの反応度を投入してから約4秒後に得られるA点電圧のレベル変化は警報出力によるもので、この変化により警報出力の発生時点を知ることができる。同時に点線により炉出力の炉内モニタによる測定結果を示す。但し、図中での点線と実線の時間軸は同時測定でないのでピーク位置により大体の位置を合わせたものであるから、警報の出力が炉出力のどの段階にあたり、どの程度の線量率に対応しているかという明確な情報は得られなかった。

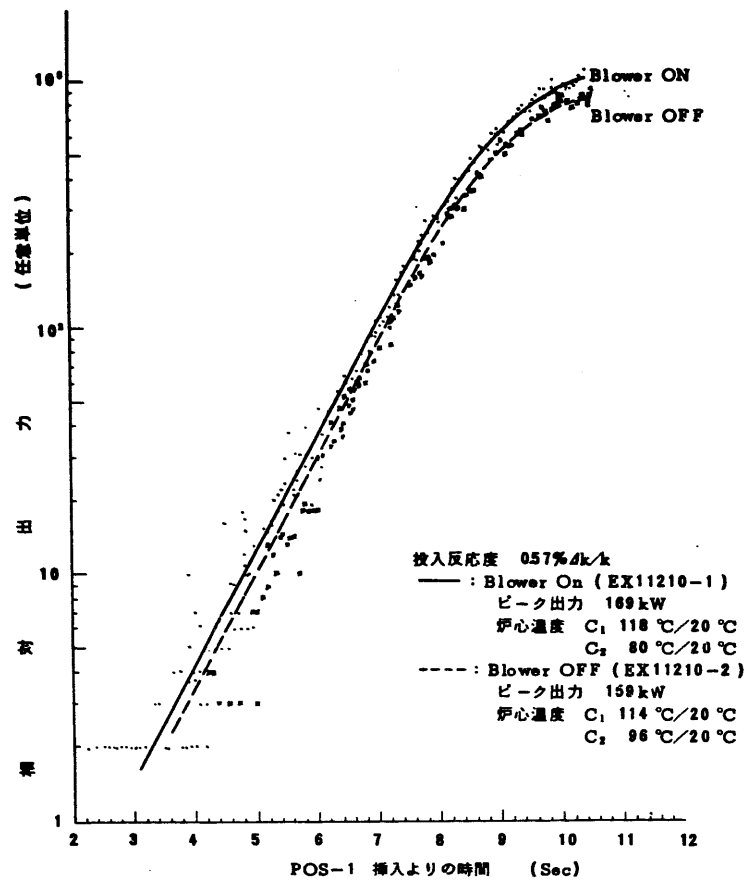


図 5. 3. 1 初期出力 1 W より冷却系の有無による出力上昇出力波形の相違

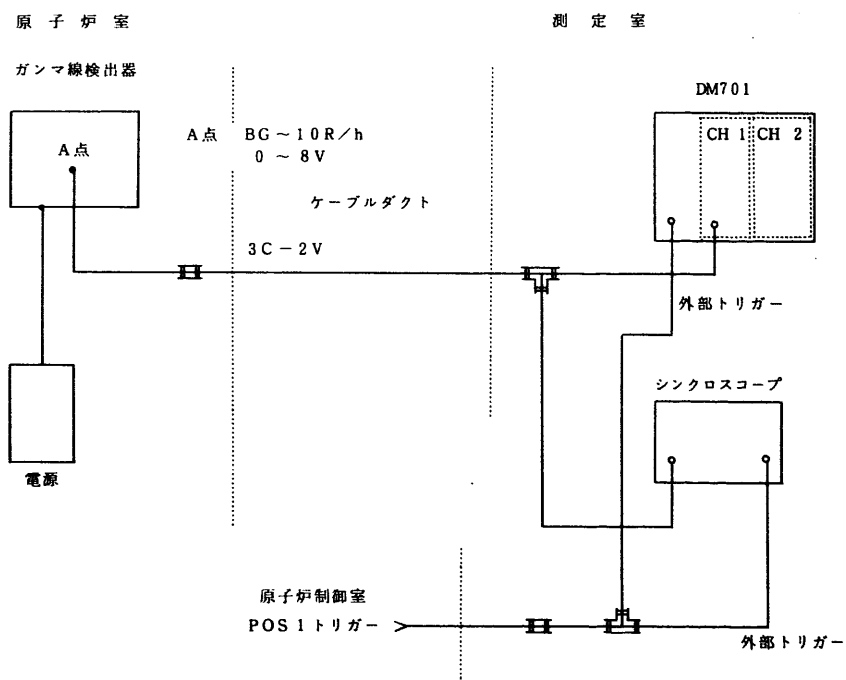


図 5. 3. 2 非正常運転時のブロックダイアグラム

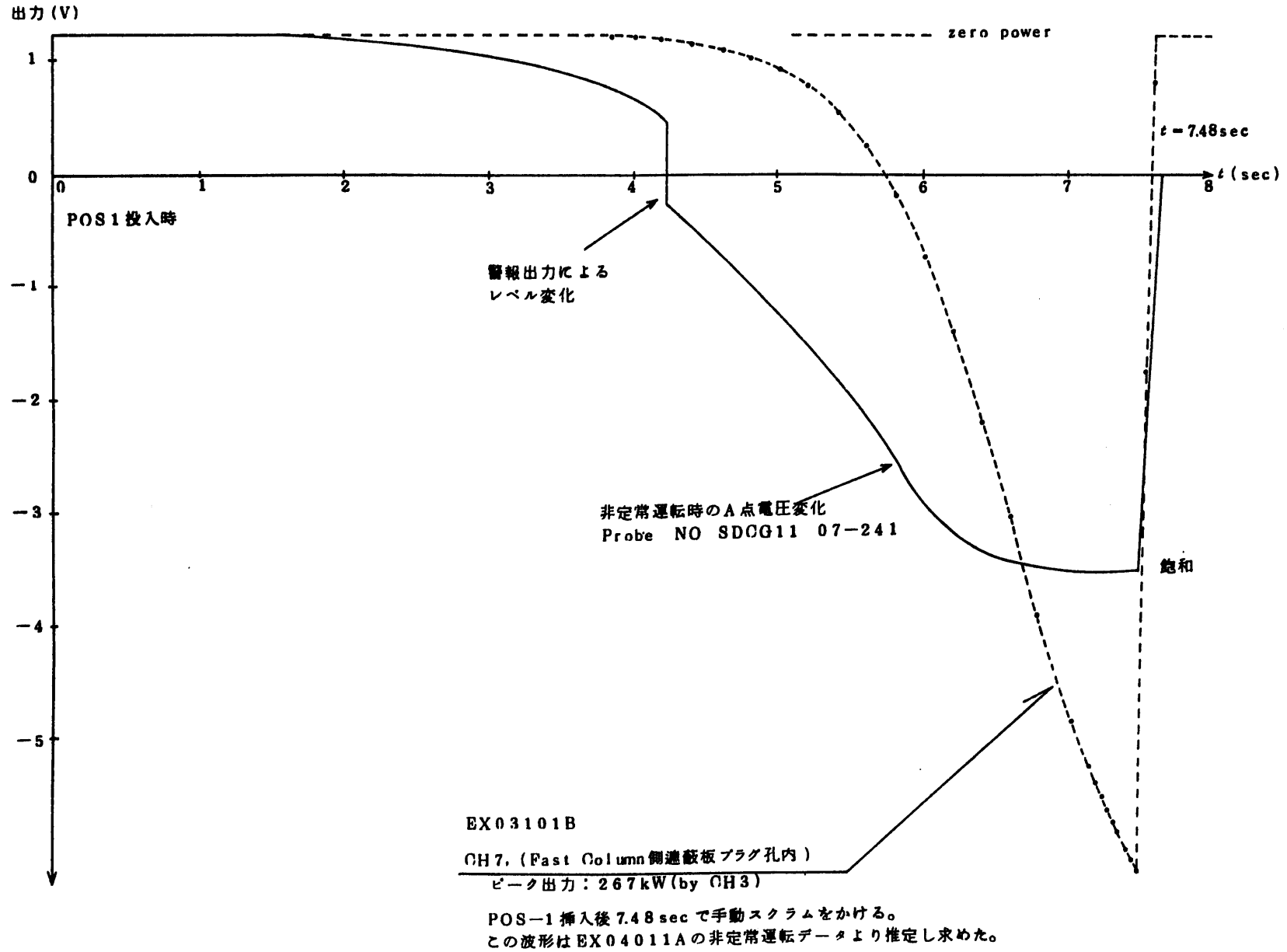


図 5.3.3 EX03101B, 弥生非常運転時臨界警報装置の応答

1.2 反応度パルス運転による照射試験

弥生の反応度パルス運転は、ベース出力として適当な反応度による遅い出力上昇のモードで運転をしている間にパルス状の反応度を投入し、半値巾  $\approx 1 \text{ msec}$  程度の高出力パルス運転をするモードである。

この試験は図 5.2.1. のブロックダイアグラムに示すように検出プローブ以外に DC プリアンプを接続して測定を実施した。試験の結果、A 点におけるパルスが飽和状態になった場合でも、ならない場合でも回路系は規定通り動作している。さらに A 点に中性子バーストパルスがあてられてからアラーム出力が出るまでの時間遅れの測定を行っているが、その結果を図 5.2.2. に示す。A 点パルスが飽和していない場合で時間遅れてが、 $300 \mu\text{sec} < \tau < 400 \mu\text{sec}$  であり、パルスが飽和している場合には  $110 \mu\text{sec} < \tau < 200 \mu\text{sec}$  の間になっていることがわかる。

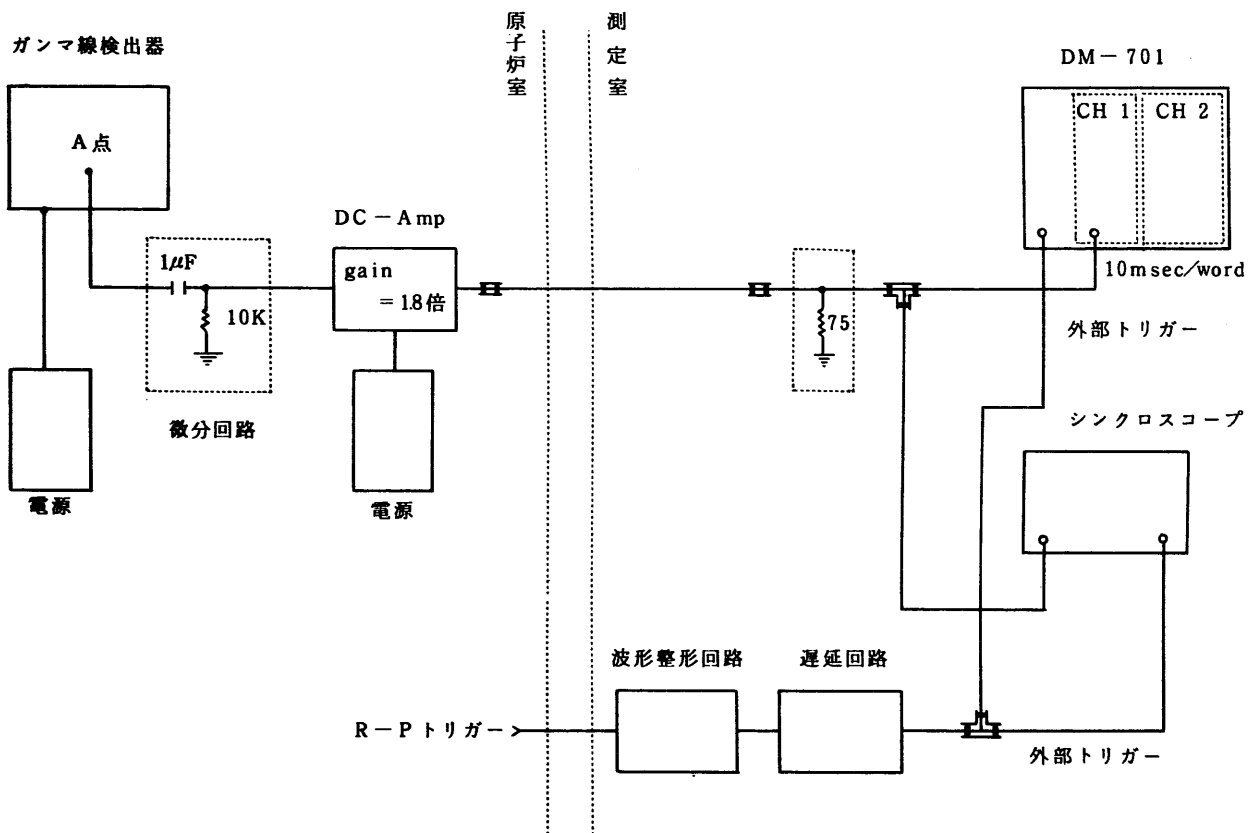
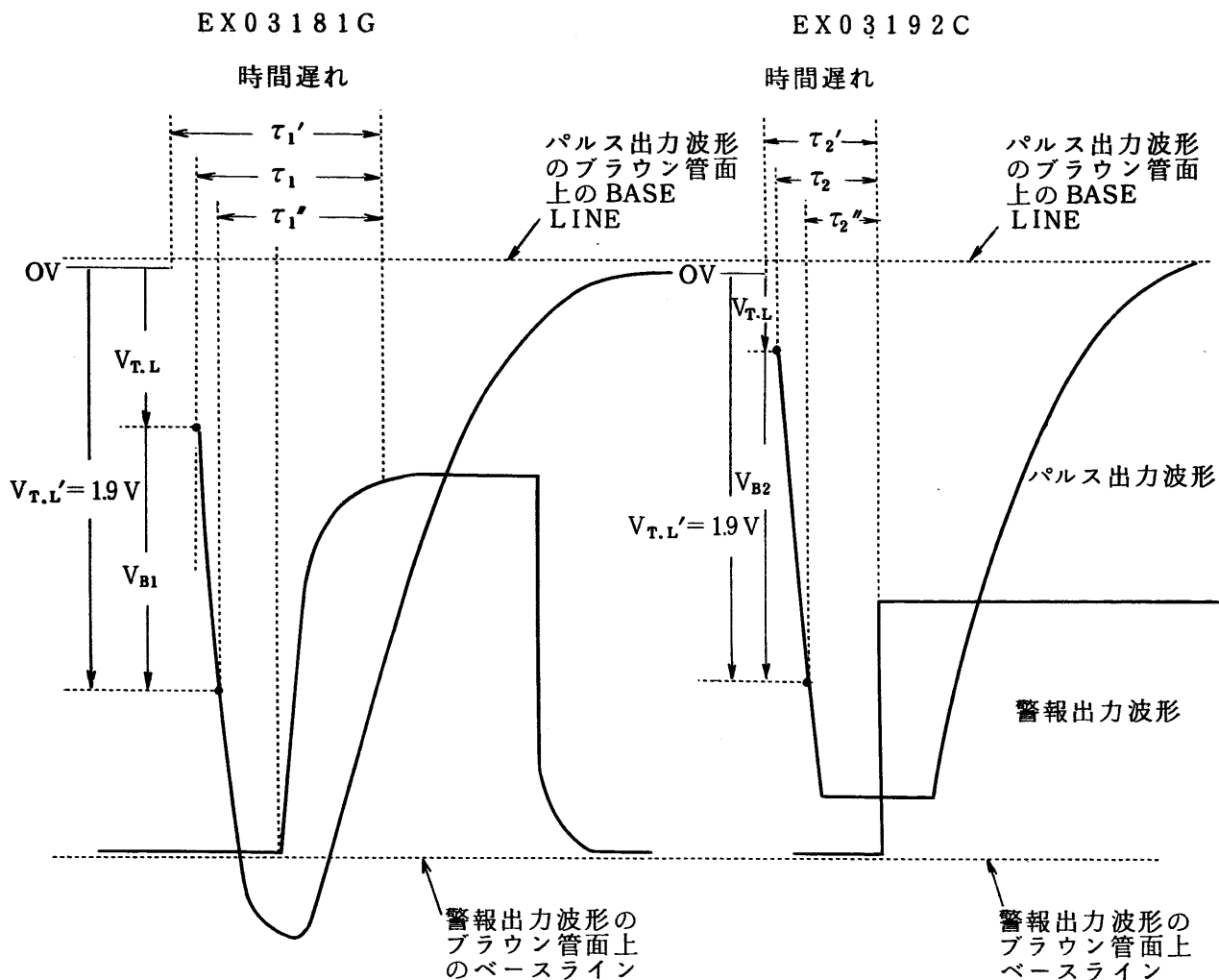


図 5.2.1 反応度パルス運転時のブロックダイアグラム



$\tau_1'$  ;  $V_{B1} \approx 0$  ,  $V_{T.L} \approx 1.9VOLT$  と評価  
 した場合の時間遅れ  
 $\tau_1' \approx 400\mu sec$

$\tau_1''$  ;  $V_{B1} \approx 1.9V$  ,  $V_{T.L} \approx 0$  と評価  
 した場合の時間遅れ  
 $\tau_1'' \approx 300\mu sec$

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

$\tau_2'$  ;  $V_{B2} \approx 0$  ,  $V_{T.L} \approx 1.9V$  と評価  
 した場合の時間遅れ  
 $\tau_2' \approx 200\mu sec$

$\tau_2''$  ;  $V_{B2} \approx 1.9V$  ,  $V_{T.L} \approx 0$  と評価  
 した場合の時間遅れ  
 $\tau_2'' \approx 110\mu sec$

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

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 5.2.2 EX03181G, 03192C の警報信号遅れの解析

1.3 中性子検出器照射試験

§ 5.1 で述べたアプローグ非定常照射試験と同じ原子炉運転モードで試験を行った。データとしては炉出力を変化した場合の検出器出力の計数率の変化と、核分裂片のエネルギースペクトルを採取した。図 5.3.1. に中性子検出器の測定に用いたブロックダイアグラムを示しさらに図 5.3.2. に検出器計数の変化, 図 5.3.3. に核分裂片エネルギースペクトルを示す。

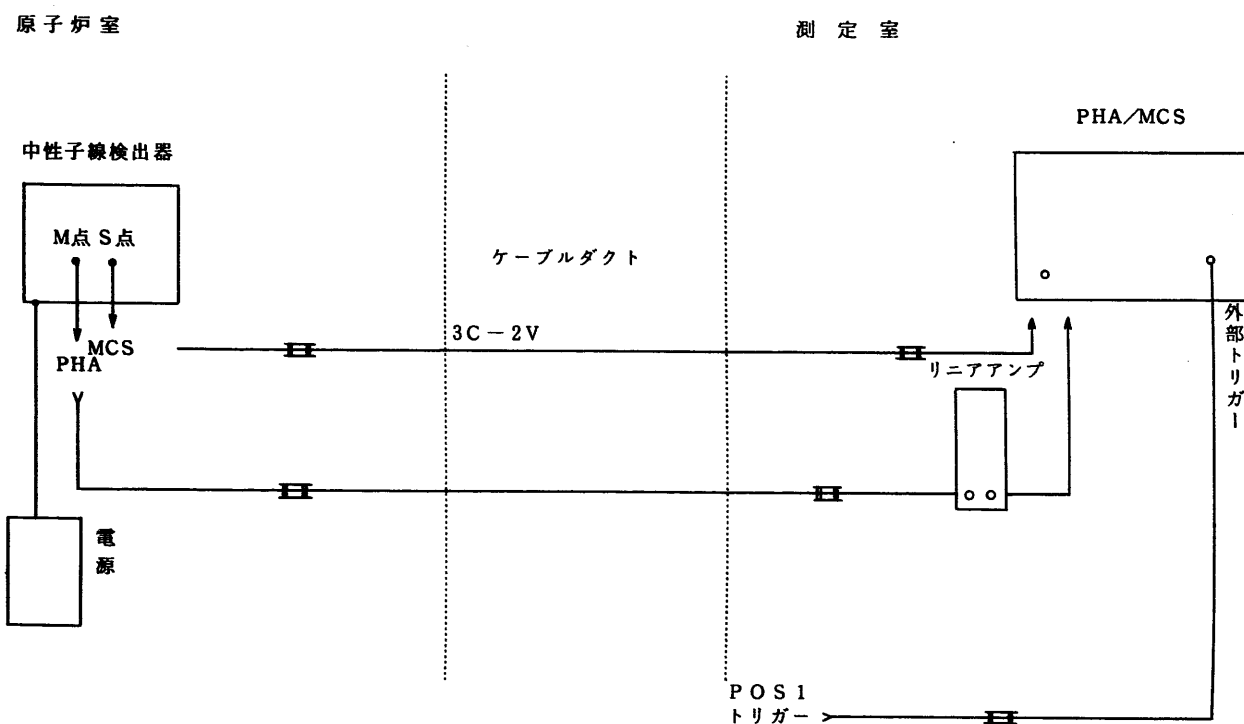


図 5.3.1 中性子線検出器照射ブロックダイアグラム



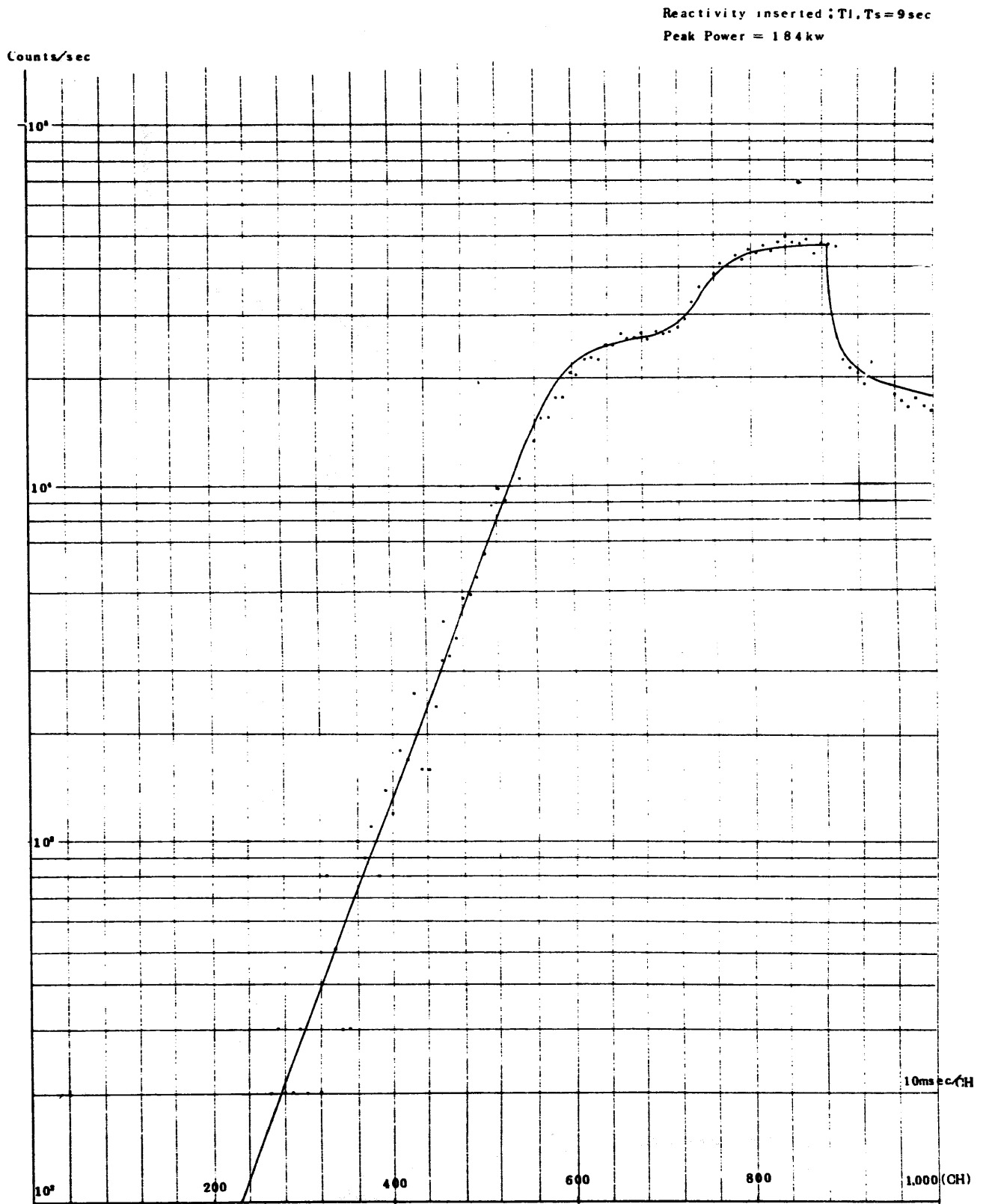
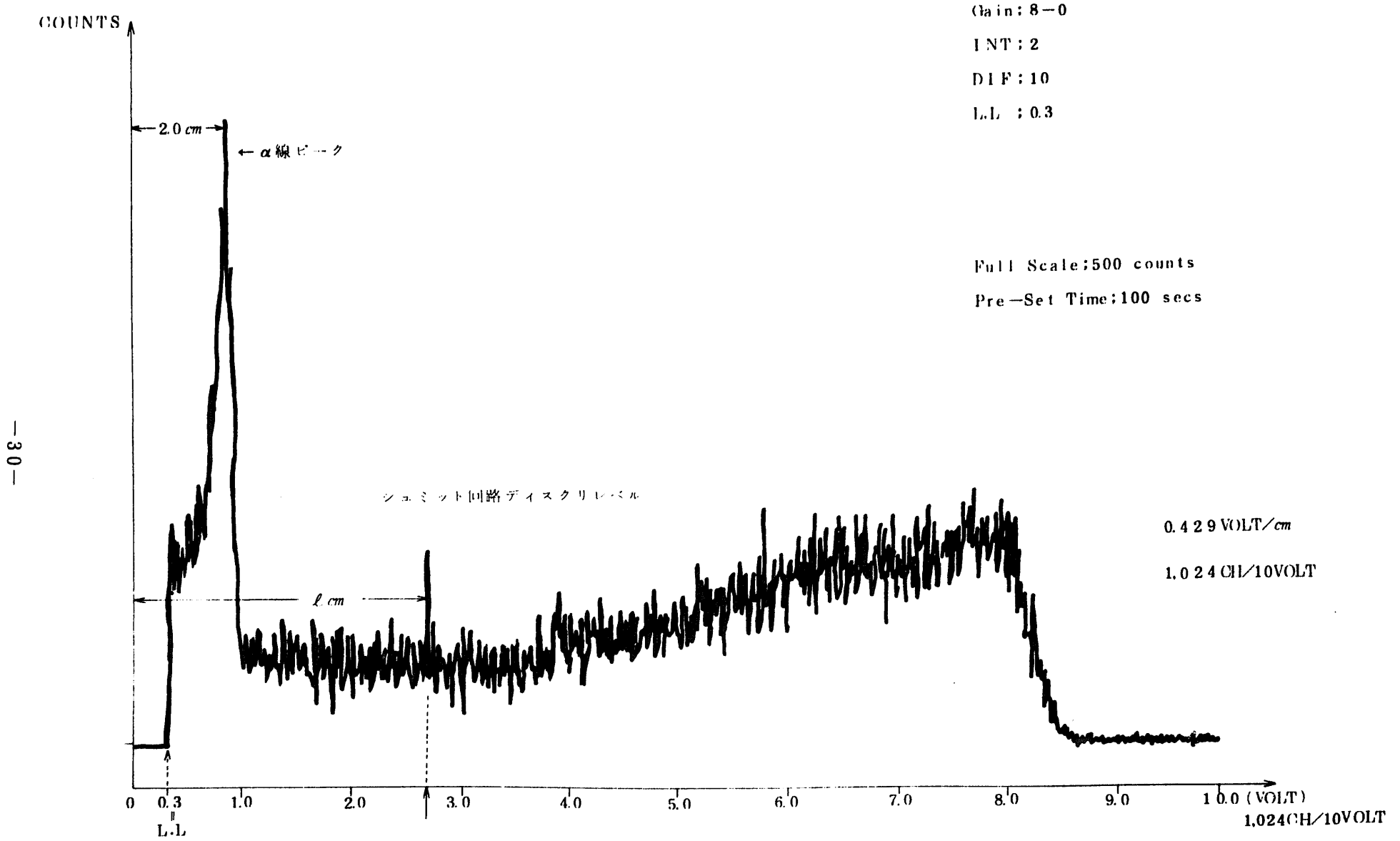


図 5. 3. 2 炉出力に対する検出器出力の時性



- 30 -

図 5.3.3 核分裂片エネルギースペクトル

## 別添3 フランスキャリバン炉における臨界プローブ照射試験(概要)

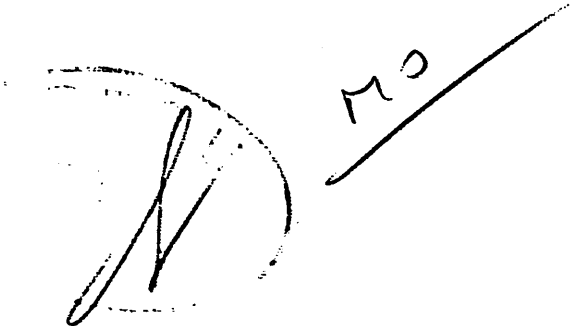
(TEST of critical accident monitor's probes  
performed with the reactor calibam by  
P. ZYROMSKI の報告概要)

### 内 容

1. 実験の原子炉条件
2. 線量測定
3.  $\gamma$ プローブの照射線量
4. 検 討



société d'électronique et d'instrumentation numérique  
SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 2 060 000 FRANCS



COPY

S. C. E. T. I.  
AKASAKA P.O. BOX 24  
TOKYO  
(Japon)

A l'attention de MM. OSHIMA  
FLESCHER

OT 45702-703-704  
n/réf. JMU/mm/77-2443  
v/réf. V/CDE 5744 du 17/5/77

Alfortville, le 28 novembre 1977

Messieurs,

Veillez trouver ci-joint en quatre exemplaires (2 en langue française, 2 en langue anglaise) le rapport officiel du C.E.A. suite aux essais sous irradiation des sondes de criticité objet de votre commande, effectués les 13-14 et 17 octobre 1977 au Centre de Valduc, avec le réacteur Caliban.

Les résultats obtenus indiquent un parfait fonctionnement du matériel testé et devraient pouvoir donner lieu à l'expédition de ce matériel au Japon.

En vous souhaitant bonne réception de ces documents, veuillez agréer, Messieurs, l'expression de nos salutations distinguées.

Jean MUNTANER,  
Ingénieur Commercial

P.J. : Rapport de test (4 ex.)

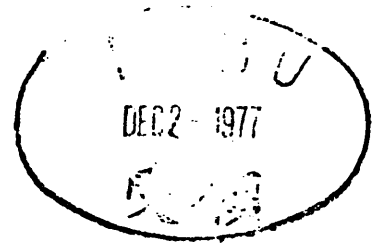
REC. 20.1977  
ソシエテ・サイエンス・エレクトロニクス  
エレクトロニクス・インストゥルメント  
国際技術株式会社  
東京都港区赤坂一丁目二番八号  
電話 357-1111

D. A. M - D. S. - D. PG

Section d'Etudes de Criticité et de Rayonnement

-----

CENTRE d'ETUDES de VALDUC



TEST OF CRITICAL ACCIDENT MONITOR'S PROBES  
PERFORMED WITH THE REACTOR CALIBAN

P. ZYROMSKI

1. 実験の原子炉条件

キャリバン炉により3回のバースト試験を実施したが、それぞれのバースト条件は半値巾、ペリオド、最高出力等異っている。各バーストのパラメータは下表の通りである。

Burst number	606	607	608
date	14/10 AM	14/10 PM	17/10 AM
period	90 $\mu$ s	40.5 $\mu$ s	24.1 $\mu$ s
half height width	330 $\mu$ s	126 $\mu$ s	70.5 $\mu$ s
peak power	$1.05 \times 10^9$ watts	$4.03 \times 10^9$ watts	$1.25 \times 10^{10}$ watts
total energy	$1.83 \times 10^{16}$ fission	$2.65 \times 10^{16}$ fission	$4.05 \times 10^{16}$ fission
peak time ※	825 $\mu$ s	303 $\mu$ s	171.3 $\mu$ s

Fig. N, V, Mにそれぞれ606, 607, 608の各バースト時の中性子バースト出力波形を対数目盛で示す。

Fig. N bis, V bis, M bis にリニアスケールで示した波形図を示す。

2. 線量測定

線量測定には2種のTLDをプローブに並設して使用した。1つは0.9mmtのアルミニウム容器に入れたAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末である。(中性子に対する感度はエネルギーを6群に分けて測定済であり、CALIBANの $\phi(E)$ が判っているので $\gamma$ 線だけによるレントゲン数が判る。)結果は両方の値がよく一致しているが測定値としては中性子束の影響の少ないAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を採用した。測定誤差としては相対誤差5%, 絶対誤差 $\pm 15\%$ である。

又、バーストの形状を知るためにフォトダイオードを試験プローブの間に設置して各バースト時のデータを記録した。例として608のバーストデータをFig. VIIに示す。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TLDの測定結果を以下に示す。(単位Rad)

Burst	Shield	Front of Shild	311	312	313	314	315	316
# 606	Polythine	25	3	3.5	3.5	3.5	4	3.5
# 607	Lead		19.5	20	18	18.5		
	No shield	19.5					27	27
# 608	Lead		20.5	22.5	23.5	24		
	No shield	30					42	36

ガンマ線に対するエネルギーレスポンスから考えるとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は低エネルギーで平坦でない欠点があるが、中性子束と混在する場所では中性子感度が低いので、今回の試験では両方の測定を行った。

以上の結果を考えて見ると鉛シールドした607と608のバーストに関しシールド前面の測定値よりも原子炉から距離的に遠い所にあるプローブ上のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TLDが高い値を示している。

これは、この線量計は photon より Electron に対して非常に高感度であるが、高エネルギーの光子が鉛から2次電子をたたき出しTLDのアルミ容器がこれを完全にはシールド出来なかったためではないかと考えられる。各バーストに対して5m地点に於る線量値を評価すると下表の如くなりよく測定値が一致している事が判る。但し606の値が高くなっているのはポリエチレンからの熱中性子の散乱と考えられる。

number of the burst	606	607	608
$\gamma$ dose at 5 meters from the core (R)	22.1	19.5	30
number of fissions (10 <sup>6</sup> )	1.83	2.65	4.05
$\gamma$ dose/fissions (10 <sup>-6</sup> )	12.6	7.36	7.40

### 3. $\gamma$ -プローブの照射線量

線量計の値は、原子炉のバースト全体の積分値を示すが同時にバースト後の tail 残留線量は無視出来ない。その比率を評価すると以下のようなになる。

$$\frac{\text{残留線量積分値}}{\text{全線量積分値}} \text{ は } \begin{cases} 48\% & (606 \text{ Burst に対して}) \\ 47\% & (607 \text{ Burst に対して}) \\ 40\% & (608 \text{ Burst に対して}) \end{cases}$$

この結果からバーストの短期間におけるプローブ位置における線量を算定すると、

$$3.5 \times (1 - 0.48) = 1.82 \text{ R} \quad 606 \text{ バーストでポリエチレンシールド裏側}$$

$$1.8 \times (1 - 0.47) = 0.954 \text{ R} \quad 607 \text{ バーストで鉛シールド裏側}$$

$$2.7 \times (1 - 0.47) = 1.431 \text{ R} \quad 607 \text{ バーストで鉛シールドなし}$$

$$2.3 \times (1 - 0.4) = 1.36 \text{ R} \quad 608 \text{ バーストで鉛シールド裏側}$$

$$2.9 \times (1 - 0.4) = 1.74 \text{ R} \quad 608 \text{ バーストで鉛シールドなし}$$

となり第4 bis, 第5 bis, 第6 bisの各図の縦軸をR/secで表現する事が出来る。各図についてパルス部分の低部の幅は半値幅の2倍と定めて面積を計算した。この結果を用いて線量のPeak値をR/secで求めた。

つまり、パルスと三角形で近似して

$$\text{高さ} \times \text{半値幅} = \text{上記で求めた線量}$$

$$(\text{R/sec}) \quad (\text{sec}) \quad (\text{R})$$

より高さ、つまり Peak 値における線量率とした。

#### 4. 検 討

原子炉からのトリガパルス以前に $\gamma$ プローブが動作するため最初2回のバースト試験では全数動作しているにもかかわらず、その動作時期を記録する事が出来なかった。

しかし、第3回目に発生したバーストに於て $\gamma$ プローブのトリガ時点とキャリバン炉からの同期信号の間の時間を測定する事が出来た。その測定値は、Fig. V1から読み取れる様に約47 $\mu$ sである。

キャリバン炉からの同期信号とバーストピーク間の時間が171.3 $\mu$ sと判っているため、シールドなしの $\gamma$ プローブ315と316のトリガ線量レベルをFig. V1より求める事が出来る。Fig. V1より、 $4.6 \times 10^6$  wattが以下の線量に対応していることがわかる。

$$4.6 \times 10^6 \times \frac{3.1 \times 10^5 \text{ R/sec}}{1.25 \times 10^{10}} = 114 \text{ R/sec}$$

定常レベルで $\gamma$ プローブは360mRad/h $\sim 10^{-4}$  R/secで動作する事を考えると原子炉のペリオドから応答時間を求める事が出来る。

今、原子炉出力Pは初期出力を $P_0$ 、ペリオドをTとして $P_0$ からの時間tで

$$P = P_0 e^{t/\tau} \quad (1)$$

で与えられるから

$$\tau = 24.1 \mu\text{s}$$

①出力 $P_1$ を時刻 $t_1$ で $\gamma$ プローブのトリガ点、つまり $4.6 \times 10^6$  watt(=)114 R/sec

②出力 $P_2$ を時刻 $t_2$ で定常レベルでのトリガ点、つまり $10^{-4}$  R/sec

に対応していると(1)式を用いて

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_0 e^{t_1/\tau}}{P_0 e^{t_2/\tau}} = e^{\frac{t_1 - t_2}{\tau}} = e^{\frac{\Delta t}{\tau}}$$

$P_1$ ,  $P_2$ ,  $\tau$ を代入して

$$\frac{114}{10^{-4}} = \exp\left(\frac{t_1 - t_2}{24.1 \mu\text{s}}\right)$$

$$t_1 - t_2 = 336 \mu\text{s}$$

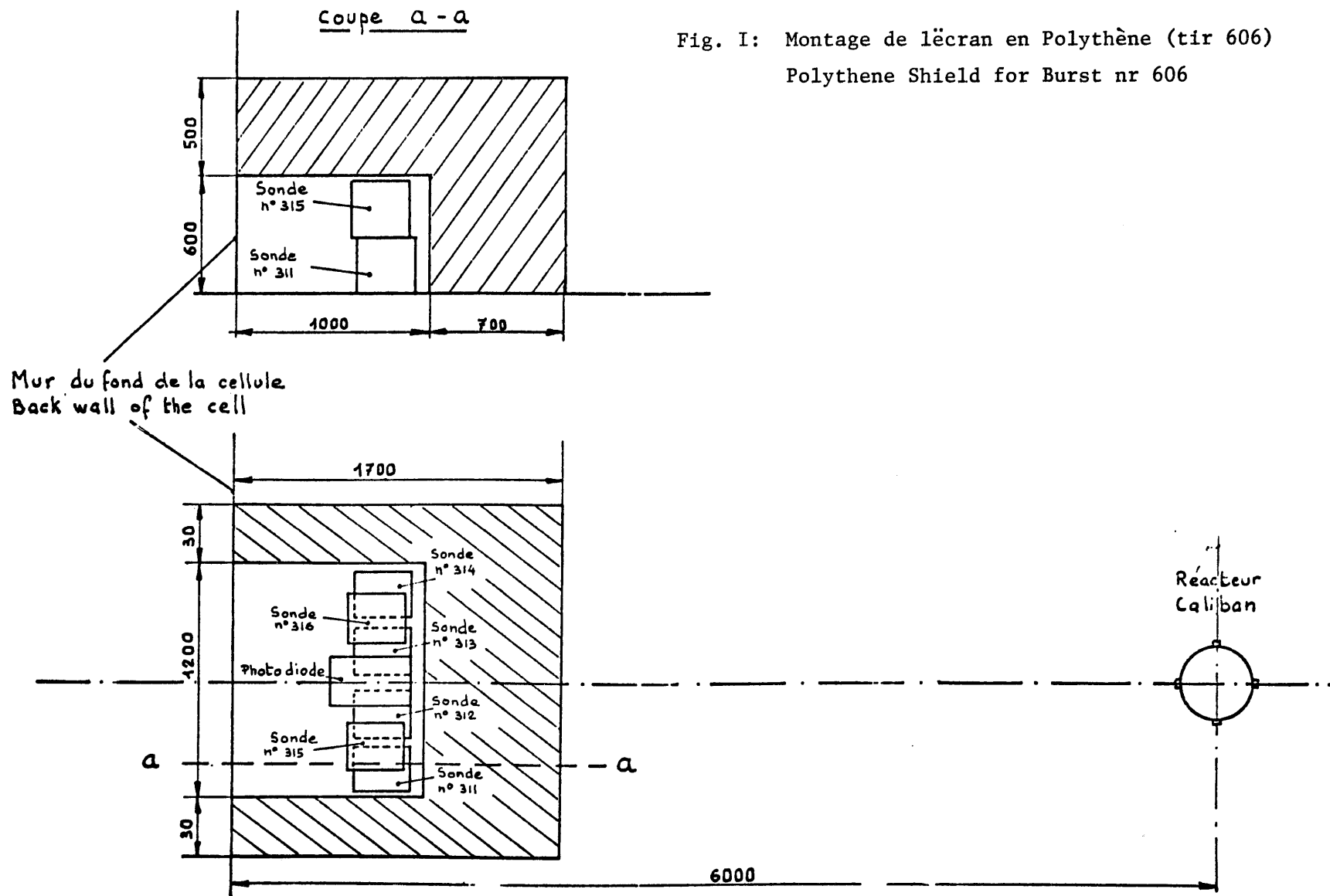
つまりCALIBAN炉の $\gamma$ 線、中性子線の混在する早いバーストに対し、315, 316プローブは定常時のトリガ設定レベル到達後、336 $\mu$ s後にトリップする事が確認出来た。



又、定常時のトリガ設定レベルに対応する時間  $t_2$  に於る原子炉出力は、

$$10^{-4} \text{ R/sec} \times \frac{1.25 \times 10^{10} \text{ watts}}{3.1 \times 10^5 \text{ R/sec}}$$

より 4 watts となる。



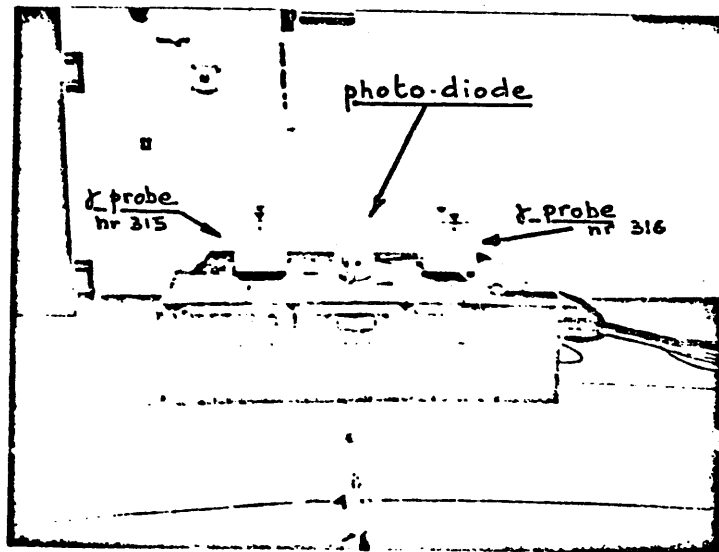


Fig: II Ecran de Plorb (tirs 607 et 608) Lead Shield  
for Bursts NR 607 and 608

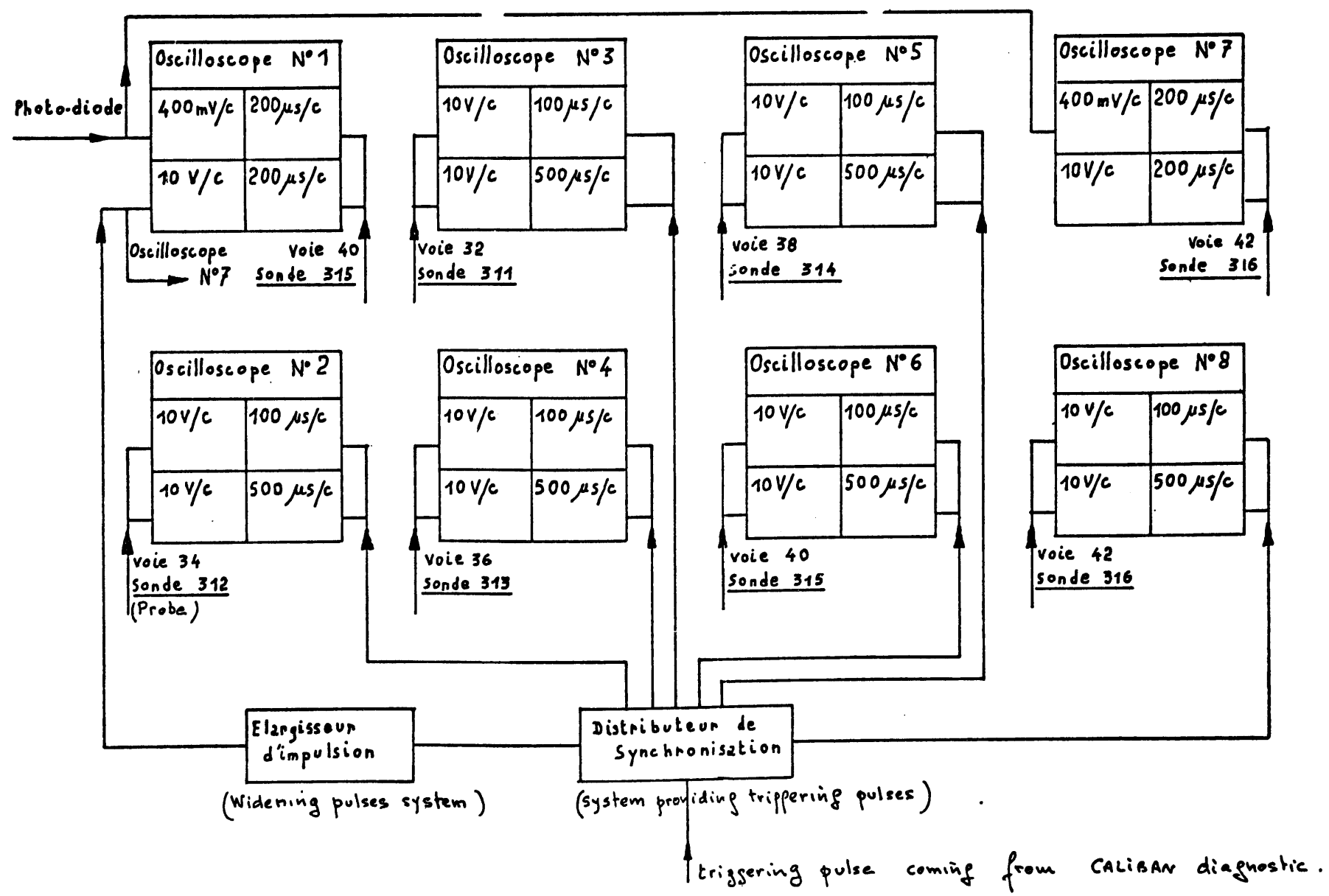


Fig: III

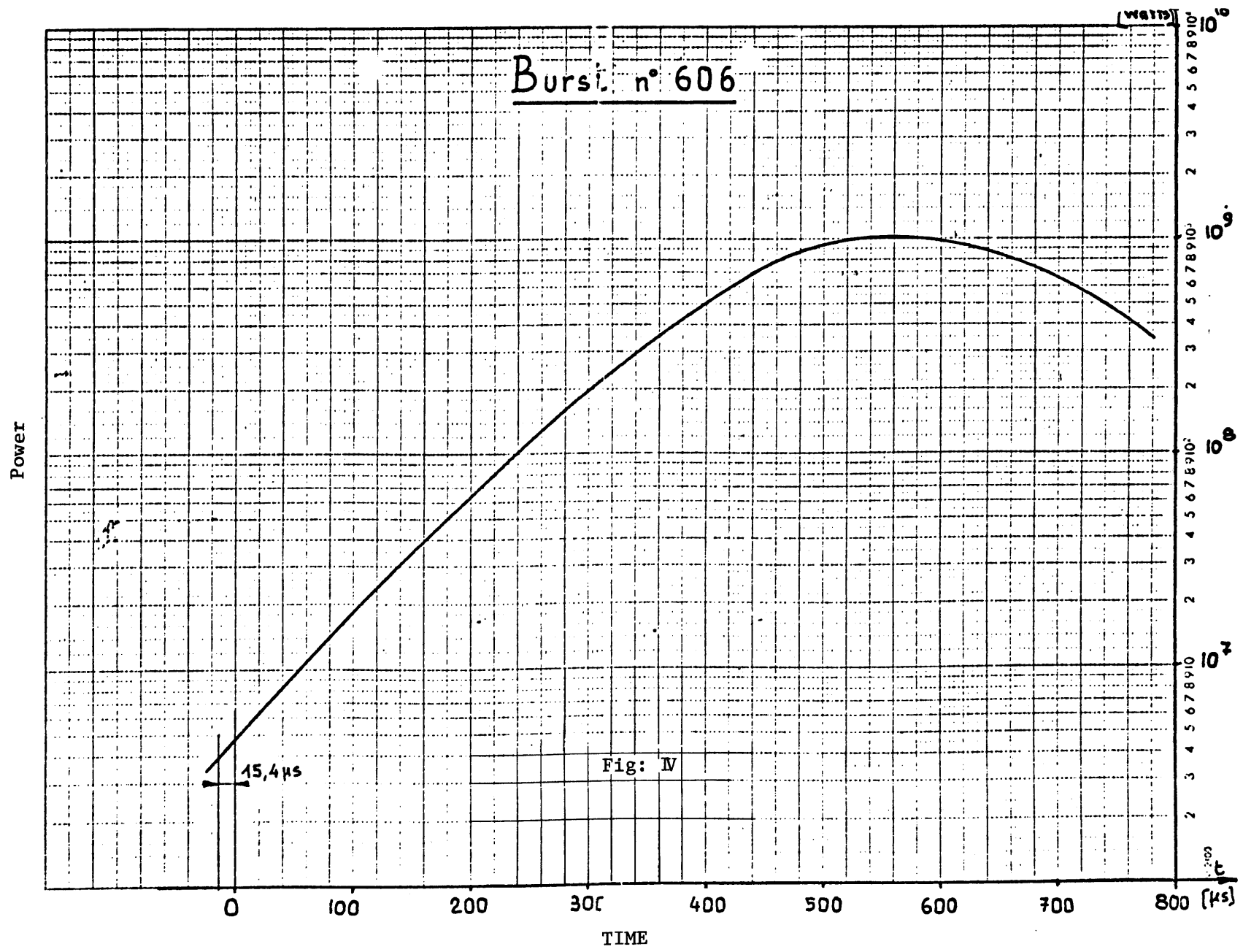


Fig: IV

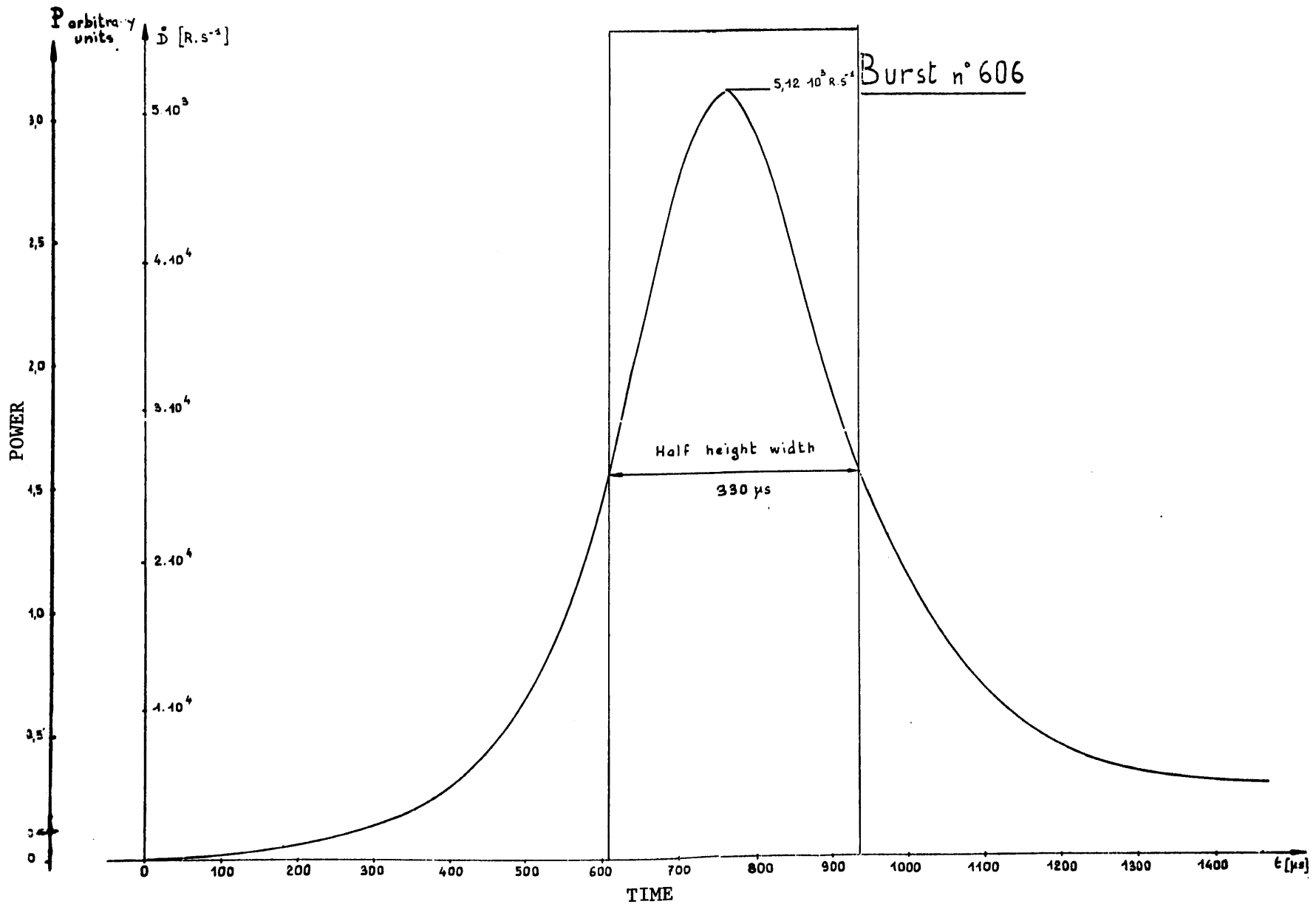


Fig: IV bis

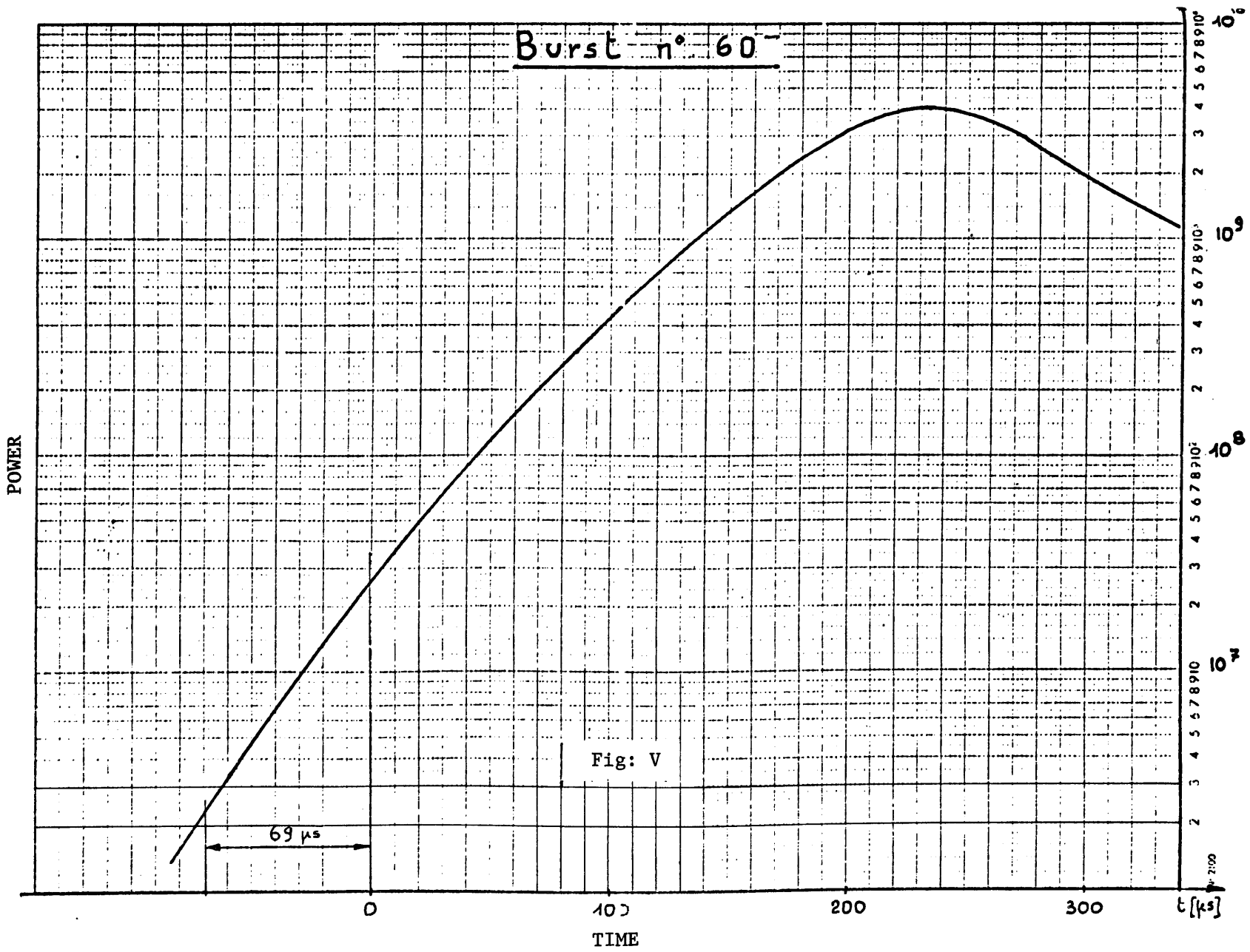


Fig: V

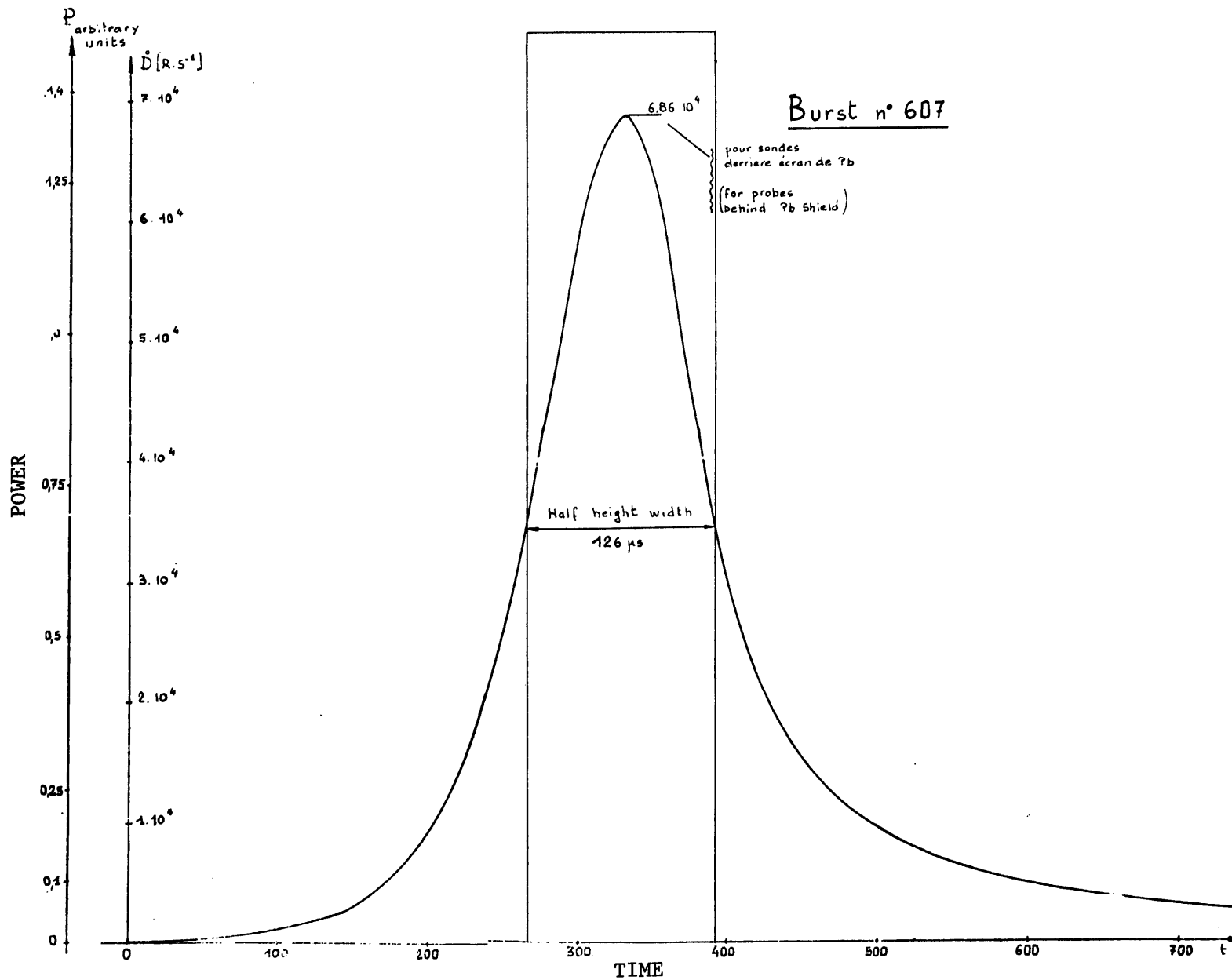


Fig: V bis



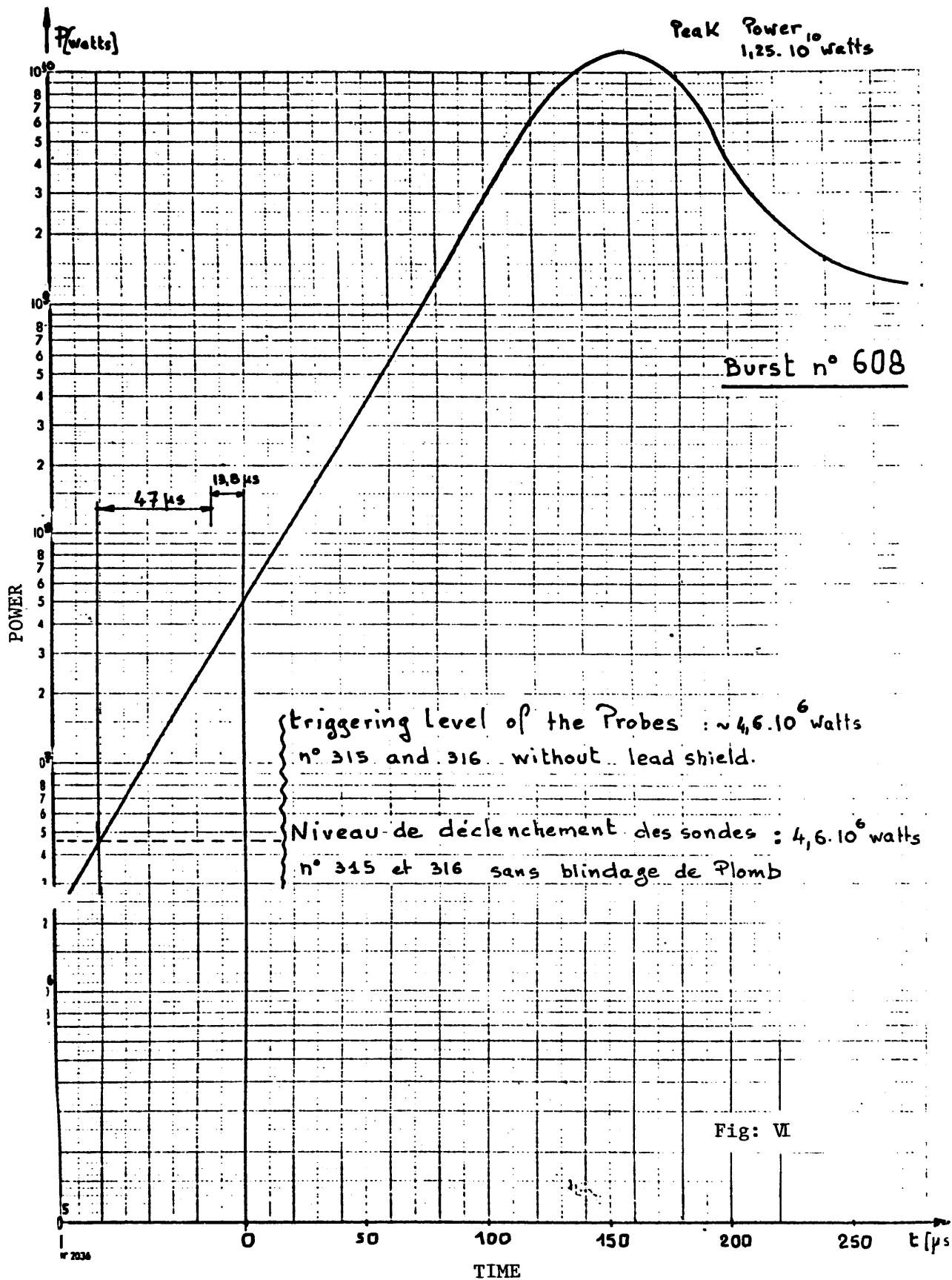


Fig: VI

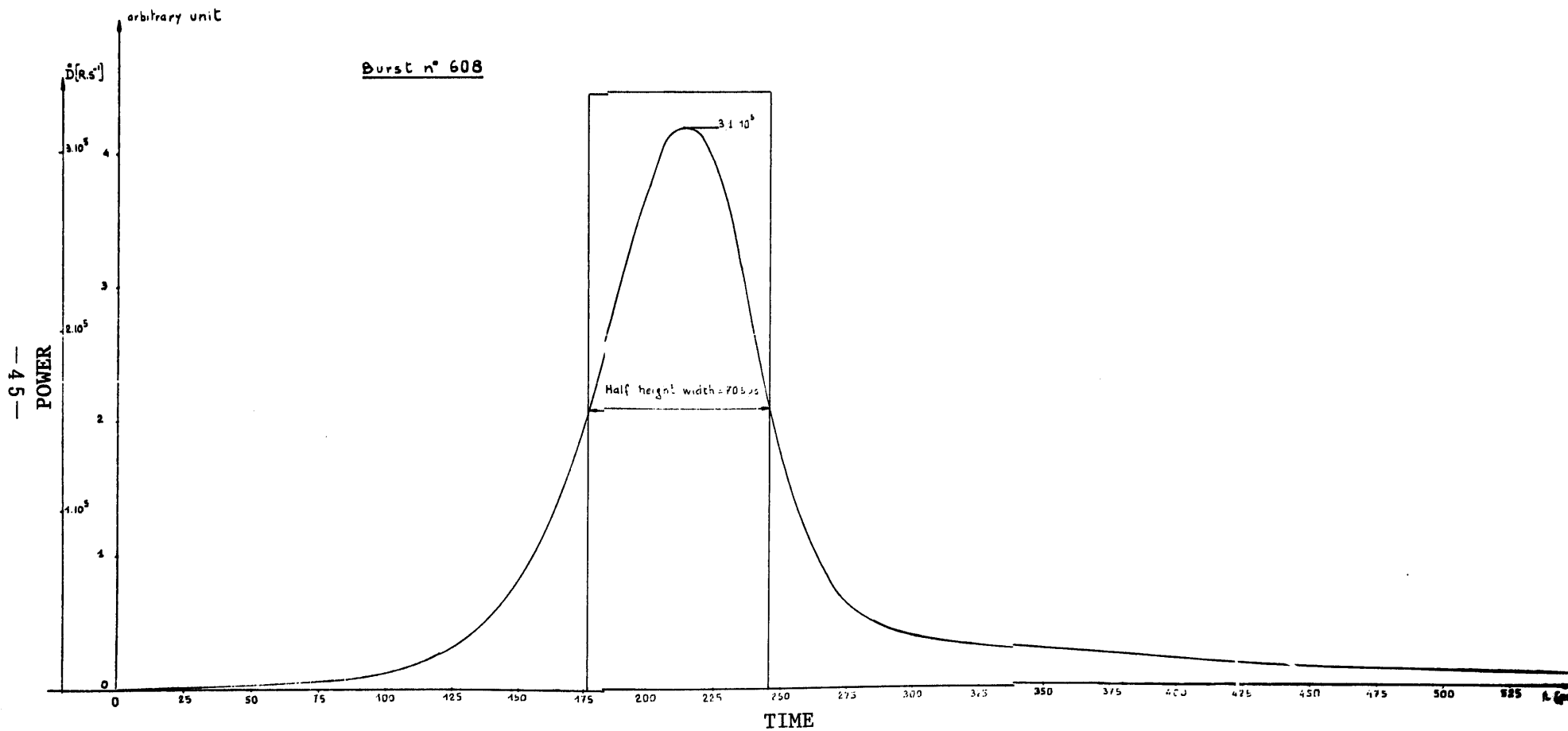


Fig: VI bis

## 別添 4 臨界状態の検出及び警報用E.D.A.C.システム(翻訳)

### 内 容

要旨 (PNC 作成)

#### 1. 緒 言

#### 2. 臨界検出の考え方の発達

2.1 旧世代の装置 - 1965年

2.2 CRAC試験で得られた新しい情報 - 1970年

2.3 新世代の検出方式 - 1975年

#### 3. 検出プローブの特性

3.1 検出装置の構成

3.2 プローブの直線性及び感度

3.3 トリップ放射線量 - 事故のダイナミクス

3.4 不感状態のないこと

3.5 エレクトロニクスの機能

#### 4. データ処理システムの特性

4.1 機 能

4.2 システムの配置

#### 5. 適用される安全基準

5.1 安全の一般的基準

5.2 検出に対する特別の安全基準

5.3 システムに対する特別の安全基準

5.4 プローブ - システム間の結合ケーブル

#### 6. 結 論

## 要 旨

### 1) CRACにより得られた溶液状臨界の概念

- 臨界は、初期ピークの後に必ず連続する継続する臨界があり、プラトー状になったり、振動したりするが、ときには初期ピークより大きな臨界となる。300 mm  $\phi$  のタンクでは初期ピークに  $10^{14} \sim 10^{14}$  fission が含まれ、800 mm  $\phi$  のタンクでは、ずっと  $10^{17}$  fissions に近い値となっている。
- 臨界の規模（核分裂数）と放出される線量との間には一切似的な比率は存在しない。これは 300 mm  $\phi$  と 800 mm  $\phi$  の中のタンクで比較してもわかるが、同一条件における測定を行っても後者が 2/1 程度の量となる。
- 初期ピークの発生する速度を考えると遅発臨界から初期ピークの頂点までの時間が 0.7 mses から 5 ses 程度である。（但し発散実験用の場合は除く）

①特徴的な最小の事故を決定することは不可能である。

②放射線量一核分裂の比を決定することは不可能である。

### 2) CEAが臨界検出器を設計するために用いた前提

①最も高い被曝をする作業員に対して 100 rad 又は 1 m 25 rad 被曝する前に防ぐことが必要である。

② 25 m rad の閾値は、衰なしでの 30 m の監視半径に対する 1 m で 25 rad という線量に対応している。

（この部分は、筆者が要約したものである）

CEA-R-4784

CEA-R-4784

**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**

---

E.40

**E.D.A.C. ENSEMBLE DE DETECTION  
ET D'ALARME DE CRITICITE  
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ELECTRONIQUES**

(Brevet n° 2 184 399 du 20 décembre 1974)

*par*

*Raymond PRIGENT, Claude RENARD*

DEPARTEMENT DE PROTECTION

( 放射線防護部 )

Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses

**Rapport CEA-R-4784**

---

**1976**

Ea

**SERVICE DE DOCUMENTATION**

---

C.E.N. - SACLAY B.P. n° 2, 91 190 - GIF-sur-YVETTE - France

## 臨界の検出及び警報用のE.D.A.C.システム

### (物理的特性及び電子的特性について)

#### 1. 緒 言

この報告の目的は、「放射線防護担当局」に対して、また臨界事故のおそれを排除し得ない施設の関係者に対して、新らしく開発された装置についてのすべての情報を伝え、その構造の理解と利用を容易にする事である。

この器材は、C. E. A. (フランス原子力庁) で考案され、且つ完成され(特許 n° 2184399, 1974年12月20日) その工業化が、INTERTECHNIQUE社に委任されたものである。この装置は監視ユニットにまとめられた複数の検出プローブ、及びプローブからやって来る情報の処理システムでできている。検出プローブは、システム全体の基本的部分である；実験室での原型に対して以前に行われたと同様にして、工業的に生産された装置に対し物理的試験が行われた。その目的は工業化の段階で、要求される特性が変更される事のなかった事を確かめるためである。

論旨を明確にするために、この報告書の中での若干のポイントは既に公刊物となっているにもかかわらず、ここでは問題を全体として取り上げている。但し、実験段階で相次いで、克服されて行った様々の問題を詳説する事は避けた；これらの内容については、既に配布されている内部の報告書類(DP<sub>r</sub>/STEPPA-73/1220, DSN/S・E・E・C-73/08, DSN/S・E・E・N・C-75/379) 及び、本報告書の付録中に与えられている。

#### 2. 一臨界検出の考え方の発達

##### 2.1 - 旧世代の装置 - 1965年

フランスでは臨界発散の事故についての最初の検出装置が1965年に使用に供せられたが、この器材がどのような基準を出発点として構想されたのかを考えて見ると興味深い。

約10年前には、検出すべき現象は殆んどわかっていなかった事を認めなければならない。つまり事故の実験的知識はほとんど存在しなかった。

自由に使える唯一の情報、アメリカで発生した事故によって与えられたものであって、これについてはW・R・STRATTONが1961年KARLSRUHEのシンポジウムの時に分析を加えたのであった。(1)

臨界安全についての専門家は、主な3つのことを確認することが出来た：即ち

a) 2つのタイプの事故を選択することが出来た。

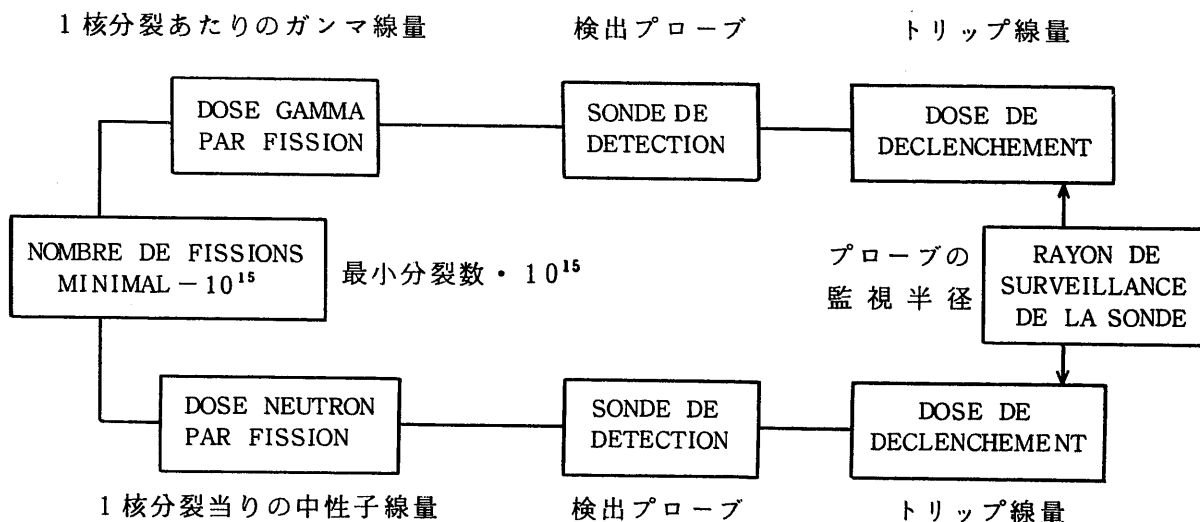
— 様々な放射線の影響を研究する目的から、特徴的な最大の事故

— 検出装置のトリップ限界を調整する目的で、特徴的な最小の事故、この事故は、最初のピーク内に  $10^{15}$  fissions に等しい分裂数発生されることに相当していた。

b) 既に発生した事故は、現象が時間的に、極度に变化し得るものである事を示したが、初期のピークはあらゆる場合に極めて短いもので、一秒の何分の一かのオーダーであると考えられた。

c) 第三番目の確認事項は、減速されたすべての溶液系での臨界に対し、1核分裂当りのガンマ線量と1核分裂当りの中性子線量の割合が確認し得るという事であった。この確認は、Oak-Ridge Y12施設で発生した事故を再現する臨界モデルを基にして、行われた研究に由来するものであった。

この様にして、臨界の検出プローブの構想を決定するための道筋が描かれた。次の図式は提出された問題及びそれが解決された仕方を詳しく表わしている。



検出の考え方の発達がどの様であったかをより良く理解するために、後に選択を条件づけたところの基本的仮定をここで強調する事は無益ではない。それはトリップの最小閾値に対応する基準となる最小臨界事故があるという事である。

これらの判断を基にして開発されたプローブは、ガンマ線なり、中性子線なりに感ずるプローブであったが、そのトリップ閾値は必要な監視半径において、特徴的な最小事故を検出する様に調整されたのであった。

他方、初期暴走中の分裂は、瞬間的に発生されるはずであったから、暴走の検出においても、アラーム信号の伝達においても、出来る限り迅速に应答する様にあらゆる方法を使用する必要があった。暴走の開始とアラーム信号の聴取との間の最大許容時間は、1秒と

見積られるのでこの値を基礎にし、プローブから来る信号のコインシデンスの時間（臨界質量について小委員会で報告された安全基準<sup>2)</sup>）であり、少なくとも3つの信号の一致いわゆる 2 out of 3) が、プローブの応答時間の差を考慮し、且つ、確実な装置の作動を可能ならしめるため500msに定められた。

外国特に、イギリス及びアメリカでは、装置の設計は同一の基準から導かれている(3)。即ち、英国では検出閾値はウラニウムに対して $10^{15}$  fissionsとする様になっており、またプルトニウムに対しては $10^{14}$  fissionsであった。米国での検出閾値は常に $10^{16}$  fissionsの臨界バーストが検出される様にされていた。これらの国においては核分裂に対する線量の割合は、ガンマン線がほぼ $10^{-14}$  rad/fission に等しいものと確定されていた；これらの国では事実、中性子に感ずるプローブによる検出は考慮されていなかったのである。

## 2.2 CRAC試験で得られた新しい情報-1970年

新しい条件は、CRACプログラムの実験中の1970年頃にわかった。CRACとは次の言葉の略号である 臨界事故の放射線学的結果 (Consequences Radislogiques des Accidents de Criticite)

CRACの結果は既に多数の報告または刊行物の中で報告されているが(4)(5)、その目的及び方法を思い出すのは有益である。このプログラムの目的は原子核に関連する設備の安全性に関する政策を完成させるため現実的な情報を入手する目的で、故意に臨界を発生し事故の体系的な実験的研究を行う事であった。この時迄の政策は事故の結果の理論的な評価に基づいていたのである。作成された実験装置は3つの主要部分を有していた；各種の試験調査用に、直径300mm及び800mmのタンクを備えた、中央臨界容器（事故の中核部）、核分裂性溶液の調整と除染溶液の調整を行う部分、更に遠隔操作とデータ処理を行うための装置である。

CRACプログラムが実施されていた年数の間に、約60回の実験が行われた。

我々の関心のある領域、即ち事故の特徴とそれらの結果の中で最も重要な結論は以下の様である：

- ① すべての臨界発散に対して、初期ピークの後に連鎖反応の自己継続があり、この自己継続反応は振巾が変化（この振巾は初期ピークの振巾より大であり得る）する一連の系列反応によって特性づけられる。また過渡現象の後（または過渡期間なしで）は緩慢な出力レベルの減衰によって表わされる。

従って、基本的にはこの時迄に観測されたモデルとの間に大きな差はない。これに反し、初期ピーク内に含まれる核分裂は極度に变化し得る； $\phi=300$ mmのタンクでは $10^{14}$  fissionと $10^{17}$  fissionsの間にある； $\phi=800$ mmのタンクでは $10^{17}$  にずっと近い。この様に数値広い範囲となる事をはっきりさせる事は、我々にとって極めて大切である。



何故なら、事故の検出を最も効果的にするためには初期ピークの瞬間に検出が行われなければならないからである。

- ⑧ 第二の結論は、臨界発散の位置付近で行われた放射線量測定の結果に関連がある。如何なる遮蔽もない場合には、核分裂数と空气中に吸収される放射線量の間近似的な一定の割合は存在しない事が確かめられる。これは $\phi=300\text{mm}$ 及び $\phi=800\text{mm}$ のタンクで行われた測定の間で、特に著しい；同一の点における1核分裂当りの線量は、直径の大きいタンクでは2倍も小さい。これは、いづれにしても、予想し得る事であったが、放射線源の形状、及び溶液の体積、発散の位置、特に漏れ中性子のスペクトルの変化により、極度にマチマチな線量に到達する。更に放射線分解及び沸騰の現象によってもたらされる、過渡的な変化をつけ加えなければならない。
- ⑨ 極めて重要な第三の結論は、初期の臨界暴走の変動に関してである。この暴走は、今迄考えられていた様に「瞬間的」なものではなく、ある時間内で、多少共迅速に展開されて行くものである。

この変動は時刻0の瞬間、つまり遅発臨界高さ通過の瞬間から最初のピークの頂上に至る迄の出力の増倍(T2)時間の測定によって、十分に明確にされた。記録された最も小さな値は0.7msであり、最大値は5秒であった；いくつかの例の場合、10秒と20秒の間に在る増倍時間が観測されているが、それは臨界事故と比較する事が難かしい、発散の実験に属するものである。

CRAC計画の中で実施されたすべての試験の主要な特性、及び特に最初の出力ピークで達せられた最大出力(P)及び最小倍加時間(T2)が、内部レポートDSN/SEESNC n°116から抜粋された1から4迄の表に与えられている。事故に対しては、同じ図表上に増倍時間の関数として出力が記入されている；得られた曲線は、倍加時間が短い程、最大出力が高い事を確証している様に思われる。(Fig. 1)

最初の2つの結論は、これら2つだけで事故の検出器材の構想を限定している。そして、これらをより実際的な形で次の様に要約する事が出来る；

**第一の結論：特徴的な最小の事故を決定する事は不可能である。**

**第二の結論：放射線量-核分裂の比を決定する事は不可能である。**

### 2.3 - 新世代の検出方式 - 1975年

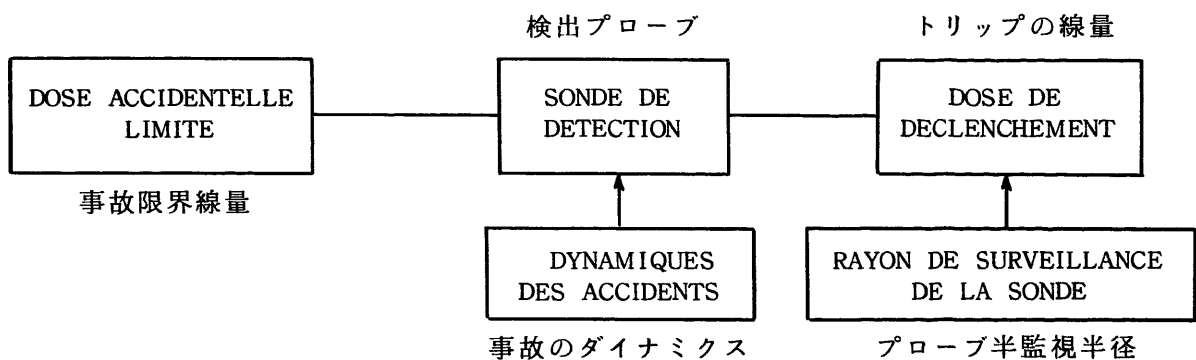
前記の2つの結論は、核分裂の数は人員が被る危険を表わすものではなく、またそれは事故検出に対して基礎的な基準として役立つ事柄を極めてはっきりと意味している。出発点の基礎として、事故の本来の特性(出力エネルギー)ではなくて、それとは逆にそれらの結果、即ち曝露される人員が受け得る-勿論それはガンマ線及び中性子線に基づくもので

あるという事は、充分わきまえた上の放射線量をとる事が不可決であるという事である。

この事は、放射線安全について責任ある人々に常に問題となる1つの配慮、即ち、人員が被曝することを出来るだけうまく防ぐため、危険を正しく評価するという配慮につながるものである。元々は、そういう考え方ではなかったという考え方は、我々からは程遠いものである。それどころか、10年前には自由にし得る情報では、臨界安全性の専門家は選択した方法以外の別の方法を進める事は、出来なかったと我々は考えているのである。

事故の過渡現象に関する、CRACのプログラムの実験結果に第三の結論の重要性については、まだ述べていなかった。その重要性は、検出装置の新世代の構想に対する基礎的基準のレベルに在るのではなく、後に述べる通り装置を作動させるレベルに在るのである。それにより、以下の様な検出の一般的考え方に対して、全面的に価値を与える事が出来る、即ち「検出プローブは、放射線量に対して応答しなければならない」という事である。事実、事故の初期ピークがほとんど瞬間的であるとした仮定においては、プローブのトリップ線量の値は特徴的な最小事故を考慮した、監視半径の選定に対してだけしか意義を有していなかった。何故なら、いづれにしても被ばくする人員は初期ピークに基づく照射をまぬがれる事は出来なかったからである。現在の仮定によればそして（特に我々の意見では発生の確率が最も大きい）緩慢な出力上昇の事故の検出に対しては、トリップの線量が一方では良く知られた値で、かつ、被曝し得る真の線量を表わしている事が大切である。

それ故、臨界の検出の新らしい世代の検出系構成は、次の極めて簡単な図式に基づいている：



それ故にこの図式は、想定される事故の振巾及びその放射線の場の特徴を示している。

「臨界出力変動」というパラメーターのみにより、プローブの設計の際に予想される出力の過渡上昇のすべてに対して応答する様にされるべきである。

事故時の限界放射線量を決定するために、我々は、「誰に警報を発すべきか？」という問を自らに発して見る。勿論、放射線源に最も近い操作員に真先に行くべきである。最も近い人は、もし彼が、例えばグローブボックスで操作しているならば、臨界以上となった設備から約50cmの所にいることもある。中性子及びガンマ線によって照射された者の50%に対する致死

線線量400 rad を出発点として、また0.5S と見積られる人間の反射時間を考慮し(これはCRACで行われた暴走の増倍時間の平均値に等しい)、我々は曝露される度合の最も大きい潜在的被曝者を遅くも、100 radsの線量、または、1メートルで25 rads被曝する前に防がなければならないと見積った。

## 記 号

$U_t - U_s$	$U_{total}$ 及び核分裂性溶液の濃度 $^{235}\text{U}$ ( $\text{g}/\ell$ )
$H_c$	臨界高さ (cm)
$V_c$	臨界体積 ( $\ell$ )
$M_{cut} - M_{cut5}$	臨界質量 $U_t$ 及び $^{235}\text{U}$ (kg)
$H_d$	導入開始時における, 核分裂性溶液の高さ (cm)
流 量	核分裂性溶液の導入流量 ( $\ell/h$ )
$H_f$	致達した最終高さ (cm)
$V_f$	核分裂性溶液の最終体積 ( $\ell$ )
$M_{fvf} - M_{fv5}$	最終質量 $U_t$ 及び $^{235}\text{U}$ (kg)
$\Delta H$	$H_c$ をこえて, 導入された核分裂性溶液の高さ ( $=H_f - H_c$ ). (cm)
$\Delta t$	$H_c$ を通過後の溶液の導入速度 (S), 持続時間, 実験の持続時間 (分)
$E_o$	振動列の終りにおける核分裂数
$N_f$	核分裂の総数
$V_p$	最初の出力ピークの瞬間における, 核分裂性溶液の体積 ( $\ell$ )
$T_2$	最初の出力ピークに至る, 最小増倍時間 (S)
$W$	周期の逆数 ( $S^{-1}$ )
$P$	最初の出力ピークにおける, 最大出力 (分裂数/秒)
$EP_1$	最初のピークのベースに至る迄に含まれる核分裂数 (核分裂で)
$EP_2$	最初の出力ピークからこのピークに続く谷に至る迄に含まれる核分裂数
$\frac{P}{V_p}$	最初のピーク時の最大比出力 (= 単位体積に還元された出力) (核分裂 $\times$ $\text{cm}^{-3} \times S^{-1}$ )
$keff_1$	出力の最初のピーク時に測定された, 実験的潜在反応度 (dollar で)



C R A C Ø 300 mm

Tableau : 2

Numero d'experience	- CARACTERISTIQUES DU PREMIER PIC - (第1ピークの特徴)									Sensitivite experimental A Kert; %
	Vp 1	T 2 s	ω rad/s	P Pissions/s	Sp1 Pissions	Sp2 Pissions	$\frac{P}{Vp}$ Pissions/cm <sup>3</sup> /s	$\frac{Sp1}{Vp}$ Pissions/cm <sup>3</sup>	$\frac{Sp2}{Vp}$ Pissions/cm <sup>3</sup>	
CRAC 01	226	2,9	0,24	1,1.10 <sup>16</sup>		2,7.10 <sup>17</sup>	4,7.10 <sup>10</sup>		1,2.10 <sup>12</sup>	0,57
CRAC 02	173	0,18	3,9	6,6.10 <sup>16</sup>		1,8.10 <sup>17</sup>	3,8.10 <sup>11</sup>		1,0.10 <sup>12</sup>	
CRAC 03	186	5,0	0,138	4,7.10 <sup>15</sup>		1,7.10 <sup>17</sup>	2,5.10 <sup>10</sup>		5,3.10 <sup>11</sup>	
CRAC 04	225	3,2	0,216	8,7.10 <sup>15</sup>		2,2.10 <sup>17</sup>	3,9.10 <sup>10</sup>		1,0.10 <sup>12</sup>	
CRAC 05	56,0	0,060	11,6	6,3.10 <sup>16</sup>	5,5.10 <sup>16</sup>	6,3.10 <sup>16</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	9,8.10 <sup>11</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC 06	56,2	0,058	13,9	6,6.10 <sup>16</sup>	5,6.10 <sup>16</sup>	6,7.10 <sup>16</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	
CRAC 07	20,5	0,00157	442	5,0.10 <sup>18</sup>		4,0.10 <sup>16</sup>	2,4.10 <sup>14</sup>		2,0.10 <sup>12</sup>	1,46
CRAC 08	20,3	0,00069	1004	3,0.10 <sup>19</sup>	8,0.10 <sup>16</sup>	8,0.10 <sup>16</sup>	1,5.10 <sup>15</sup>	4,0.10 <sup>12</sup>	4,0.10 <sup>12</sup>	1,99
CRAC 09	32,3	0,015	46	2,9.10 <sup>17</sup>	4,0.10 <sup>16</sup>	4,4.10 <sup>16</sup>	9,0.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,4.10 <sup>12</sup>	1,17
CRAC 10	30,2	0,0176	39,4	2,0.10 <sup>17</sup>	3,3.10 <sup>16</sup>	4,3.10 <sup>16</sup>	6,6.10 <sup>12</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,4.10 <sup>12</sup>	
CRAC 12	31,8	0,275	2,52	1,0.10 <sup>16</sup>	3,0.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	3,2.10 <sup>11</sup>	9,4.10 <sup>11</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	0,89
CRAC 13	36,5	0,012	57,7	5,3.10 <sup>17</sup>	4,9.10 <sup>16</sup>	5,2.10 <sup>16</sup>	1,5.10 <sup>13</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,4.10 <sup>12</sup>	
CRAC 14	31,1	0,049	14,1	4,5.10 <sup>16</sup>	3,4.10 <sup>16</sup>	4,0.10 <sup>16</sup>	1,5.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,03
CRAC 15	29,9	0,033	20,8	1,1.10 <sup>17</sup>	3,2.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,07
CRAC 16	30,3	0,242	2,86	1,6.10 <sup>16</sup>	2,9.10 <sup>16</sup>	3,6.10 <sup>16</sup>	5,3.10 <sup>11</sup>	9,6.10 <sup>11</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	0,93
CRAC 17	30,4	0,177	3,92	2,0.10 <sup>16</sup>	3,1.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	6,5.10 <sup>11</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	0,95
CRAC 18	30,1	0,52	1,33	7,7.10 <sup>15</sup>	2,8.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>11</sup>	9,3.10 <sup>11</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	0,84
CRAC 19	30,8	0,036	19,2	6,7.10 <sup>16</sup>	3,1.10 <sup>16</sup>	3,5.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>12</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,06
CRAC 20/1	19,7	0,0061	114	5,3.10 <sup>17</sup>	1,9.10 <sup>16</sup>	2,0.10 <sup>16</sup>	2,7.10 <sup>13</sup>	9,6.10 <sup>11</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	1,18
CRAC 20/2	19,7	0,0063	110	5,2.10 <sup>17</sup>	1,9.10 <sup>16</sup>	2,1.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>13</sup>	9,6.10 <sup>11</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC 20/3	19,8	0,0066	105	4,5.10 <sup>17</sup>	1,8.10 <sup>16</sup>	2,0.10 <sup>16</sup>	2,3.10 <sup>13</sup>	9,1.10 <sup>11</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	
CRAC 20/4	20,2	0,00118	587	1,3.10 <sup>19</sup>	5,9.10 <sup>16</sup>	6,1.10 <sup>16</sup>	5,0.10 <sup>14</sup>	2,9.10 <sup>12</sup>	3,0.10 <sup>12</sup>	1,70
CRAC 20/5	19,7	0,0028	120	5,8.10 <sup>17</sup>	2,1.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>16</sup>	2,9.10 <sup>13</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC 21	31,1	0,032	21,6	7,6.10 <sup>16</sup>	2,7.10 <sup>16</sup>	3,1.10 <sup>16</sup>	2,5.10 <sup>12</sup>	6,7.10 <sup>11</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	
CRAC 22	20,0	0,00147	471	5,4.10 <sup>18</sup>	4,0.10 <sup>16</sup>	4,2.10 <sup>16</sup>	2,7.10 <sup>14</sup>	2,0.10 <sup>12</sup>	2,1.10 <sup>12</sup>	1,56
CRAC 23	27,2	0,0028	120	1,2.10 <sup>18</sup>	4,1.10 <sup>16</sup>	4,2.10 <sup>16</sup>	4,3.10 <sup>13</sup>	1,5.10 <sup>12</sup>	1,6.10 <sup>12</sup>	1,30
CRAC 25	22,2	0,00153	453	4,9.10 <sup>18</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	3,9.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>14</sup>	1,7.10 <sup>12</sup>	1,8.10 <sup>12</sup>	1,45
CRAC 26	27,1	0,0027	252	2,6.10 <sup>18</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	3,9.10 <sup>16</sup>	1,1.10 <sup>14</sup>	1,6.10 <sup>12</sup>	1,7.10 <sup>12</sup>	1,43
CRAC 27	26,4	0,012	58	3,8.10 <sup>17</sup>	3,2.10 <sup>16</sup>	3,5.10 <sup>16</sup>	1,3.10 <sup>13</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	
CRAC 28	29,1	0,011	63	4,1.10 <sup>17</sup>	3,4.10 <sup>16</sup>	3,7.10 <sup>16</sup>	1,4.10 <sup>13</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,16
CRAC 29	30,8	0,032	21,7	7,3.10 <sup>16</sup>	2,8.10 <sup>16</sup>	3,3.10 <sup>16</sup>	2,4.10 <sup>12</sup>	9,1.10 <sup>11</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC 48	31,2	0,0088	79	7,9.10 <sup>17</sup>	4,6.10 <sup>16</sup>	4,8.10 <sup>16</sup>	2,5.10 <sup>13</sup>	1,5.10 <sup>12</sup>	1,5.10 <sup>12</sup>	1,28
CRAC 50	30,0	0,025	27,7	1,0.10 <sup>17</sup>	3,0.10 <sup>16</sup>	3,2.10 <sup>16</sup>	3,3.10 <sup>12</sup>	1,0.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC 52	29,0	0,0105	66	4,2.10 <sup>17</sup>	2,8.10 <sup>16</sup>	3,5.10 <sup>16</sup>	1,4.10 <sup>13</sup>	9,7.10 <sup>11</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	
CRAC 53	19,6	0,0017	406	4,4.10 <sup>16</sup>	3,6.10 <sup>16</sup>	4,0.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>14</sup>	1,9.10 <sup>12</sup>	2,0.10 <sup>12</sup>	1,53
CRAC 54	27,8	0,032	21,7	7,2.10 <sup>16</sup>	2,3.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>12</sup>	8,3.10 <sup>11</sup>	9,4.10 <sup>11</sup>	
CRAC 55	27,9	0,015	46,2	2,5.10 <sup>17</sup>	3,0.10 <sup>16</sup>	3,3.10 <sup>16</sup>	9,0.10 <sup>12</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	
CRAC 56	27,6	0,031	22,4	7,4.10 <sup>16</sup>	2,4.10 <sup>16</sup>	2,7.10 <sup>16</sup>	2,7.10 <sup>12</sup>	8,7.10 <sup>11</sup>	9,8.10 <sup>11</sup>	
CRAC 57	30,6	0,27	2,57	9,5.10 <sup>15</sup>	2,0.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>16</sup>	3,1.10 <sup>11</sup>	6,5.10 <sup>11</sup>	8,5.10 <sup>11</sup>	0,90
CRAC 59	18,4	0,0022	315	2,8.10 <sup>18</sup>	3,3.10 <sup>16</sup>	3,4.10 <sup>16</sup>	1,5.10 <sup>14</sup>	1,8.10 <sup>12</sup>	1,8.10 <sup>12</sup>	1,43
CRAC 59 bis	18,0	0,0022	315	2,9.10 <sup>18</sup>	3,3.10 <sup>16</sup>	3,4.10 <sup>16</sup>	1,6.10 <sup>14</sup>	1,8.10 <sup>12</sup>	1,9.10 <sup>12</sup>	1,43
CRAC 60	44,6	0,0259	118	2,5.10 <sup>16</sup>	7,6.10 <sup>16</sup>	8,1.10 <sup>16</sup>	5,6.10 <sup>13</sup>	1,7.10 <sup>12</sup>	1,8.10 <sup>12</sup>	
CRAC 61	19,7	0,0019	365	4,8.10 <sup>18</sup>	4,3.10 <sup>16</sup>	4,5.10 <sup>16</sup>	2,4.10 <sup>14</sup>	2,2.10 <sup>12</sup>	2,3.10 <sup>12</sup>	1,50
CRAC 62/1	23,9	0,0026	287	2,0.10 <sup>18</sup>	3,0.10 <sup>16</sup>	3,2.10 <sup>16</sup>	8,4.10 <sup>13</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,3.10 <sup>12</sup>	1,39
CRAC 62/2	23,4	0,0034	204	1,3.10 <sup>18</sup>	2,7.10 <sup>16</sup>	2,8.10 <sup>16</sup>	5,6.10 <sup>13</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,2.10 <sup>12</sup>	1,31
CRAC 62/3	25,2	0,0013	333	7,6.10 <sup>18</sup>	4,8.10 <sup>16</sup>	5,1.10 <sup>16</sup>	3,0.10 <sup>14</sup>	1,9.10 <sup>12</sup>	2,0.10 <sup>12</sup>	1,67
CRAC 63	26,7	0,028	24,8	8,8.10 <sup>16</sup>	2,6.10 <sup>16</sup>	2,9.10 <sup>16</sup>	3,3.10 <sup>12</sup>	9,7.10 <sup>11</sup>	1,1.10 <sup>12</sup>	
CRAC D 01-02	179	10,4	0,067	1,6.10 <sup>15</sup>		2,0.10 <sup>17</sup>	8,9.10 <sup>9</sup>		1,1.10 <sup>12</sup>	0,33
CRAC D 05-02	49	5,2	0,13	1,1.10 <sup>15</sup>		6,8.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>10</sup>		1,4.10 <sup>12</sup>	0,45
CRAC D 08-03	19,4	3,8	0,18	7,8.10 <sup>14</sup>		3,5.10 <sup>16</sup>	4,0.10 <sup>10</sup>		1,8.10 <sup>12</sup>	0,51
CRAC D 11-03	18,5	3,1	0,22	9,8.10 <sup>14</sup>		4,1.10 <sup>16</sup>	5,3.10 <sup>10</sup>		2,2.10 <sup>12</sup>	0,35
CRAC D 51-11	27,6	7,9	0,088	3,4.10 <sup>14</sup>		3,3.10 <sup>16</sup>	1,2.10 <sup>10</sup>		1,3.10 <sup>12</sup>	0,38
CRAC D 53-01	19,3	3,8	0,12	4,3.10 <sup>14</sup>		2,6.10 <sup>16</sup>	2,2.10 <sup>10</sup>		1,3.10 <sup>12</sup>	0,43
CRAC D 56-02	26,6	18,3	0,038	1,1.10 <sup>14</sup>		2,3.10 <sup>16</sup>	4,1.10 <sup>9</sup>		8,6.10 <sup>11</sup>	0,25
CRAC D 56-03	24,6	15,0	0,046	1,4.10 <sup>14</sup>		2,5.10 <sup>16</sup>	5,3.10 <sup>9</sup>		9,4.10 <sup>11</sup>	0,27



CARACTERISTIQUES DU PREMIER PIC (第1ピークの特徴)								
Numero d'expérience	$V_p$ 1	$\frac{1}{s}$ 2	$\omega_s - 1$	$P$ fissions/s	$E_{p2}$ fissions	$\frac{P}{V_p}$ fissions/cm <sup>3</sup> /s	$\frac{E_{p2}}{V_p}$ fissions/cm <sup>3</sup>	Activité expérimentale au 1er pic $\Delta$ Keff, %
CRAC 37	230,8	0,345	2,01	$8,6 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	0,89
CRAC 38	241,7	0,102	6,80	$2,8 \cdot 10^{17}$	$2,8 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	1,05
CRAC 39	138,7	0,031	22,4	$8,8 \cdot 10^{17}$	$1,8 \cdot 10^{17}$	$6,3 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	1,20
CRAC 40	92,9	0,018	38,5	$1,2 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$1,7 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	1,21
CRAC 41	92,8	0,183	3,79	$5,8 \cdot 10^{16}$	$8,0 \cdot 10^{16}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	$8,6 \cdot 10^{11}$	0,94
CRAC 42	72,5	0,0031	224	$1,5 \cdot 10^{19}$	$1,7 \cdot 10^{17}$	$2,1 \cdot 10^{14}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	1,30
CRAC 43	72,2	0,0050	139	$5,6 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$7,8 \cdot 10^{13}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	1,18
CRAC 44	246,1	0,0014	495	$3,1 \cdot 10^{19}$	$1,9 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	$7,7 \cdot 10^{11}$	--
CRAC 45	144,8	0,0056	124	$1,6 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	--
CRAC 46	141,2	0,061	11,4	$2,6 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{17}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$9,9 \cdot 10^{11}$	--
CRAC 47	241,5	0,055	12,6	$3,5 \cdot 10^{17}$	$1,7 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{11}$	--
CRAC D 37.02	234,5	6,76	0,103	$5,0 \cdot 10^{15}$	$3,9 \cdot 10^{17}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	0,41
CRAC D 39.02	135,8	3,24	0,214	$6,2 \cdot 10^{15}$	$3,0 \cdot 10^{17}$	$4,0 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	0,54
CRAC D 40.02	92,6	2,48	0,279	$7,4 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^{17}$	$8,0 \cdot 10^{10}$	$2,9 \cdot 10^{12}$	0,59
CRAC D 45.02	70,8	3,95	0,175	$5,4 \cdot 10^{15}$	$2,4 \cdot 10^{17}$	$7,6 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^{12}$	0,50
CRAC D 47.02	77,1	3,75	0,185	$6,0 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{17}$	$7,8 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	0,51



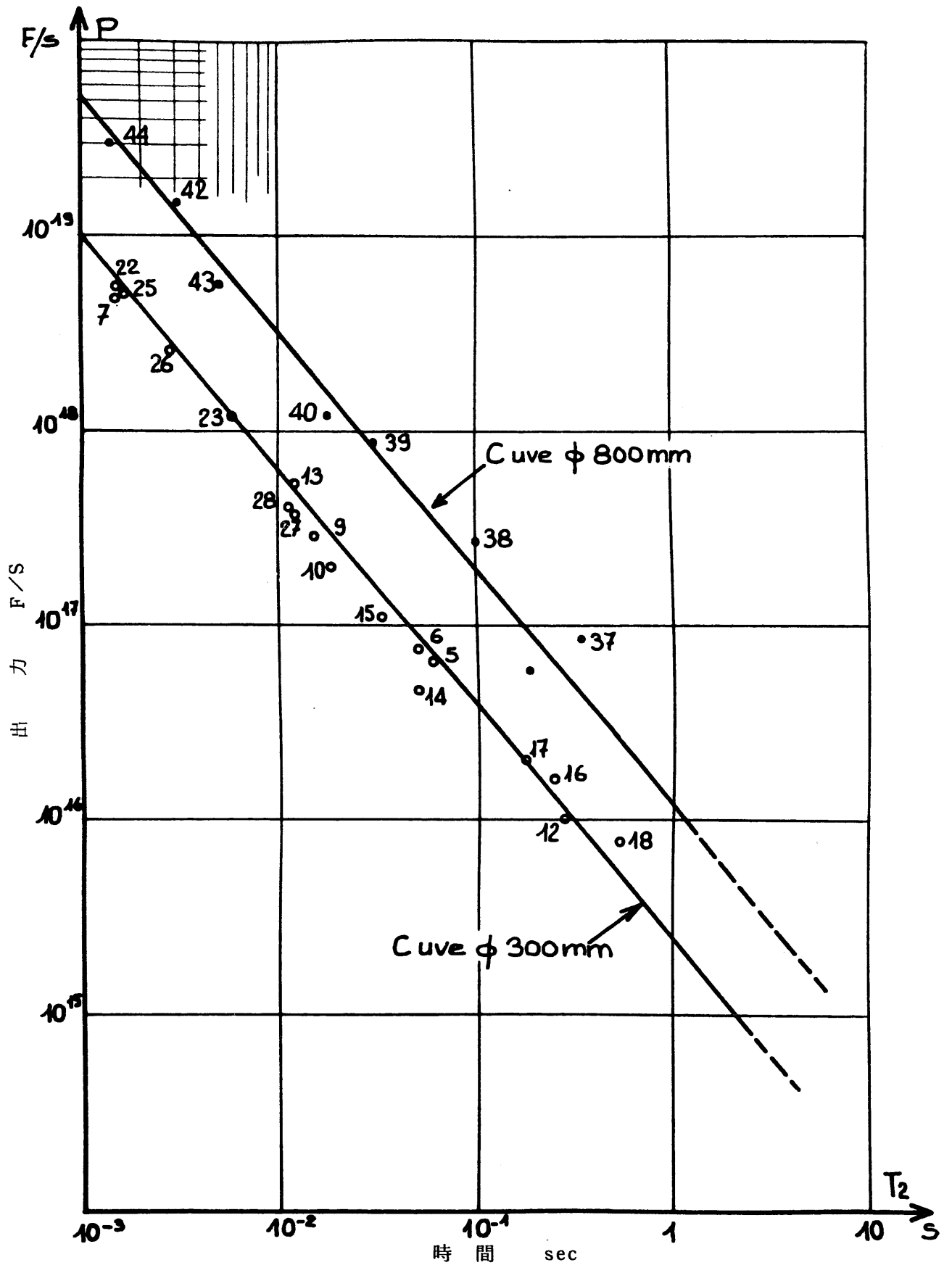


Fig. 1 増倍時間の関数としての最初のピーク時の最大出力 (実験 CRAC)

### 3. 検出プローブの特性

#### 3.1 検出装置の構成

偶発的事故での検出限界線量は、中性子、 $\gamma$ 線の混合放射線量であるから、検出プローブは発散時に生ずる中性子とガンマ線との混合放射に応答しなければならない。更にプローブは、「バランスした応答」を有し、即ちそのトリップは常に同一の一定線量に対して行われ、それがガンマ線だけを受けるか、中性子-ガンマ線の混成したものを受けるかにかかわりない様でなければならない。

この様な混合応答を実現するため、我々は主としてガンマ線に感ずるプラスチックのシンチレーターと、熱中性子に感ずる $^{10}\text{B}$ の濃縮された硼素のシンチレーターとを組み合わせた。これら2つのシンチレーターは光電子増倍管に、光学的及び機械的に連結された、一体のシステムとして、ポリエチレンのスリーブの中に入れ密着されている。その目的は熱中性子を阻止し高速中性子を減速して硼素シンチレーターを、我々が「中性子線量」と呼んでいるものに感ずる様にする事であった。

プローブが、「バランスした応答」を有する様にするため、様々な放射線源に対して中性子及び/または、ガンマ線の測定を行い、プラスチックシンチレーター及びモデレーターの最適厚みを決定した。硼素シンチレーターは製作時に最適厚みを定めた。またバランスした応答をCRACまたは、SILENEの核分裂スペクトルに対して求めた。

この様にして決定された検出装置の構成は、以下の様である：

プラスチックシンチレーター-TPB厚さ10mm 硼素シンチレーター-SB20 光電子増倍管150AVS ポリエチレンスリーブ厚さ30mm
-------------------------------------------------------------------------------

光電子増倍管は、数ボルトの電圧で給電された。

このシステムの略図を、このテキストの終りに与えた。

この結果に至るまでに到達し得た主要段階を注目してみるのは興味深い：

1°- 3つのシンチレーターの較正；校正された様々なガンマ線源により実施。Emmerieh-Hornyack及びSPF（シンチレーター）-Centred'Etudes de Bruyères le châtel, (Bruyères le châtel 研究センター), Laboratoire central des Industries Electriques, (電気工業中央研究所), Centre d'Etudes Nucleaires de Caaar ache (Cadarache 原子核研究センター), Centre d'Etudes Nucleaires de Fontenay-aux-Roses (Lontanay-aux-Roses 原子核研センター)

2°- 14MeV, 3MeV, の中性子源及び、分裂中性子源（14MeV の中性子によるコンバ

ーター内での、天然ウラニウムの急速分裂)の許での、上記の3つのシンチレーターの校正-STIRCA du CEN-Cadaracheの照射ステーション。

これら2つの校正の結果、極めて良好なプローブの応答の直線性及び、特にSPFに対し $10^5 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$ 迄の放射線量率の如何に関せず、ほぼ一定のガンマ線感度を示していることがわかった。

3°/—中性子—ガンマ線の混合した場の中でのシンチレーターの応答研究バリウムコンクリート遮蔽の後、及び遮蔽なしでのCRAC設備における試験。Centre d'Etudes de Valduc。

**結論：**プラスチックシンチレーターを備えたプローブは、感度が最も良く臨界への追従性が良かった；他の2つのシンチレーター、即ちEmmeich及びHornyackを備えたプローブによって供給される電流は著しく変動した。特に発散の初めに甚だしかった。その結果、プラスチックシンチレーターを備えた原型だけを残した。

4°/—プラスチックシンチレータに対する、硼素SB35のシンチレーターの付加、及びガンマ線だけの存在において、硼素シンチレーターの応答研究。Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses。(Fontenay-aux-Roses原子核研究センター)。

5°/—プラスチックシンチレーター及び硼素シンチレーターとポリエチレンのスリーブ

**結論：**硼素含有シンチレータのガンマ線に対する感度は無視できる。

システムを、CEN-CadaracheのSTIRCAステーションによって得られる中性子、(14 MeV, 3 MeVの中性子)で試験し、さらに分裂中性子のフラックス内での試験—中性子に対するプラスチックシンチレーターの感度測定を行った。

試験はプラスチックシンチレーター及びポリエチレンスリーブの様々な厚みを用いて行われた。

**結論：**厚さ6 mmのプラスチックのシンチレーター、硼素SB35のシンチレーター及び厚み30 mmのポリエチレンのスリーブを用いた場合プローブの応答はバランスしている。

6°/—CRAC設備の許で4つの臨界発散における先に定められたシステムの試験。

**結論：**全体としてすぐれた機能。但し、中性子及びガンマ線に対する応答において、僅かなアンバランス。

これら5つの段階の実験結果は、内部レポート DPr/73-1220及びDSN/SEEC/73-08に詳述されている。

7°/—当初に使用されていたXA1000をタイプ150AVのものと取替えなければならなかった。この交換を利用して、SB35の代りにSB20タイプの硼素シンチレーター及び同じ直径、即ち20 mmのプラスチックシンチレーターを調整して取付ける様にした。試験は、Centre d'Etudes de VALDUCのSILENEステーションで行われた。

**結論：**実施された様々な試験は、一方では中性子及びガンマ線に対して、最も良くバランス

した応答を得る事が出来るプラスチックシンチレーターの厚みを決定する事が出来、他方では、INTERTECHNIQUE社によって作られた工業的な原型サンプルのテストを行う事が出来た。

実験結果はレポートDSN/SEESNC/75-379及び添付の付録に詳述されている。

### 3.2 プローブの直線性及び感度

#### 3.2.1 直線性

プローブの直線性は、臨界発散中の中性子及びガンマ線の線量に対する光電子増倍管の電流の比例性を表わす。

後に出て来る、2から5図迄はプローブの直線性がすぐれている事を示すに充分である；2図はSILENE D3-23の実験の時に行われた記録を示しており、これは出力上昇の増倍時間が6.7Sである緩やかな発散である；これらの記録は特に、興味深い。というのは、それらはセルだけ、即ちシンチレーターなしで、SB20の硼素シンチレーターを備えたセル、及び硼素シンチレーターとプラスチックシンチレーターとを備えたセルを同時に用いて行われたからである；3つの場合に、シンチレーターを備えたセル及び備えていないセルは、厚さ3cmのポリエチレンのスリーブで被覆されていた。3.4及び5図は発散

SILENE D1-30及びS2-30の際に行われた記録を与えており、その出力上昇の倍化時間は、それぞれ6.3S及び2.7mSである；これらの記録は2つの工業的原型

(INTERTECHNIQUE製)を用いて行われたものであるが、それらは実際には、量産に入る前のプローブである。それらはまた、図表のスケールにおいて、2つのプローブの応答の良好な一致を示していることが興味深い；しかもこの事は、「商業」的な光電子増倍管及びシンチレーターに対してである。即ち、特性のバラツキを出来る限り低下させるための工程にかかっていない、部品に対してである。

#### 3.2.2 感度

選定された、検出装置全体(プラスチックシンチレーター $\phi 200$ mm,  $t = 10$ mm, 硼素SB20シンチレーター, 150AVS, ポリエチレンのスリーブ $t = 30$ mm)の感度も何種類かの測定を行った。

最後の実験SILENE P3-33の時に得られた値は、プローブの感度として次の値を与えた：

$$k (\text{アンペア} / \text{rad} \cdot \text{h}^{-1}) = 0.51 \cdot 10^{-11}$$

但しこれは、1.159 radsに等しいガンマ線量、1.064 radsに等しい中性子の線量及びセルによって供給される $4.93 \cdot 10^{-5}$  C6に等しい電荷に基づくものである。この値は、プローブによって検出される放射線量の最小値を定める( $Z_{\min} = I_{\min} / K$ )；電流

$I_{\min}$ は、 $10^{-11}$ Aに等しい何如なら $I_{\min}=V/R$ で、 $V$ を、トリップ電圧1ボルトに固定し、固定抵抗 $R$ を、 $10^{11}$ オームに(3.3節参照)従って、

$$Z_{\min} = \frac{10^{-11}}{0.61 \cdot 10^{-11}} = 1.64 \text{ rad/h.}$$

同じ構成部品を用い、但し、実験室における原型を用いた臨界発散D3-23及びD4-23の結果、我々は、ガンマ線 $0.70 \cdot 10^{-11}$ 及び中性子 $0.67 \cdot 10^{-11}$ A/rad $\cdot$ h $^{-1}$ (付録1参照)の感度を得た。これらの条件においては、1Vのトリップ閾値は1.46 rad/hの線量率に相当していた。

これら2つの測定結果は、量産プローブ及び実験室原型プローブを用いて、得られた値が似通ったものである事を示している。

工業的なプローブの開発に対しては、次の値を採用する事が適切である：

感度 $K = 0.6 \cdot 10^{-11}$ アンペア / rad $\cdot$ h $^{-1}$ $1.6 \text{ rad/h}^{-1}$ の線量率に対して不感なこと
----------------------------------------------------------------------------------------------------

### 3.3 トリップの閾放射線量

トリップ線量閾値として次の3種類が考えられる：

25 mrad

2.5 mrad

0.25 mrad

25 mradの閾値により、1mで25 radに固定された、「線量限度」を減衰なしで30mの監視半径において検出が可能である。(臨界安全性委員会の勧告。ノートCSCn°75/144, 1975年10月16日参照)。

2節で述べた通り、プローブの機能に対して、1つの重要なパラメーターを考慮しなければならない：即ち、事故時の動特性である。この動特性は増倍時間 $T_2$ 即ち、初期ピークにおける出力の変化により放射線量が倍加する時間によって特徴づけられる事を想起しよう；この時間は、ピークの付近で明白に一定である(約5~6デカード(目盛))。

予備研究において、我々は倍加時間が0.2mSと200Sの間に含まれ得るものと予想した。これは $10^6$ のダイナミックレンジに相当する。CRACの実験の決定的な結果は、最も迅速な事故に対し、0.7mSに等しい倍加時間 $T_2$ を与えており、この時最初のピークの頂上で到達される最高出力は、 $3 \cdot 10^{19}$  f/S (CRAC08)に等しい。最も緩慢な事故に対しては、 $T_2 = 5$ S, 最高出力 =  $4, 7 \cdot 10^{15}$  f/Sである (CRAC03)。実際上は「制御された事故」である臨界発散の実験を考慮すれば、もっと大きな時間を得る事が出来、発散D56-03

の時、 $T_2 = 18\text{S}$ で到達された最高出力 =  $1.1 \cdot 10^{14}\text{ f/S}$ である。

これら2つの倍加時間、 $0.7\text{mS}$ 及び $18\text{S}$ は $2 \cdot 10^4$ のダイナミックレンジを与える。

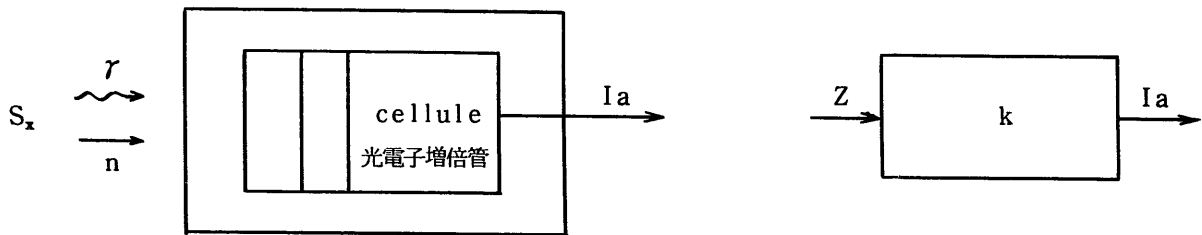
プローブの機能及び可能性を充分理解するために、次の2つの質問に答えるのが適切である：

—事故時の放射線の変動の如何に関せず、トリップの真の線量は一定の値となり得るであろうか？

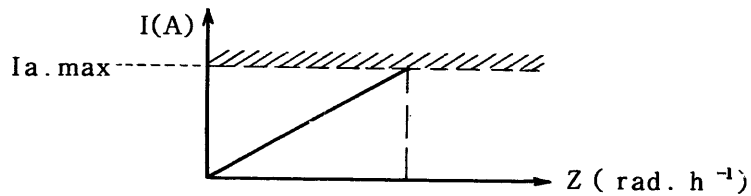
—プローブは、予想し得るすべてのタイプの事故を検出し得るか？

我々は、これら2つの質問に対する答が、実験的に定められる様々な物理的パラメーターと同様、構成部品のエレクトロニクス的特性に依存する事を知っている。更にプローブの機能の原理を手短かに思い出すのが、適切である。

a / —取付け位置における、線量の関数である電流  $I_a$  を送り出す検出装置を有している。



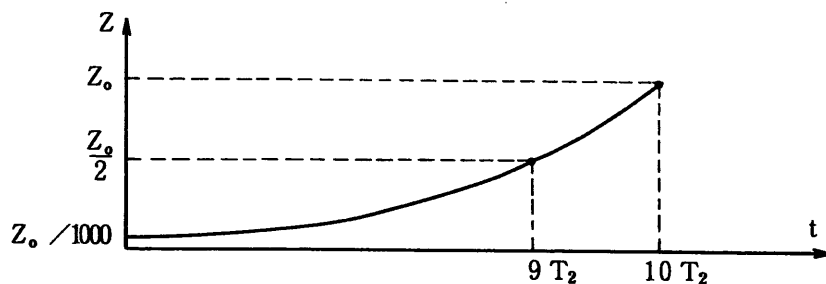
電流  $I_a$  は次図の様な特性を有すると仮定する。



セルが与え得る限界電流をこえない限り比例性は守られているとする。次式が得られる。

$$I_a = K \cdot Z, \text{ 但し } I_a < I_{a \text{ max}}$$

b / —臨界の事故は次の曲線によって正しく表わす事が出来る。



この時、数学的表現は、次の様に書かれる：

$$Z(t) = \frac{Z_0}{1,000} e^{-\frac{+0.7 t}{T_2}}$$

放射線が、非直線性の限界電流以下である場合には、出力端において、次の様に書き表わされる同一の法則に従う電流が見出される：

$$I(t) = \frac{I_0}{1,000} e^{-\frac{+0.7 t}{T_2}}$$

c / -放射線量は、線量の変化に対して与えられる時間間隔上での積分によって表わされ、次の様に書かれる。

$$D_0 = \int_0^{10T_2} Z(t) dt = Z_0 \frac{T_2}{0.7}$$

d / -電流  $I_0$  は、2つの限界を有している：

-上限は、直線性の範囲内に完全にあつて、セルが与え得る最大の電流により与えられ、例えば、

$$I_0 = 10^{-5} \text{ アンペア}$$

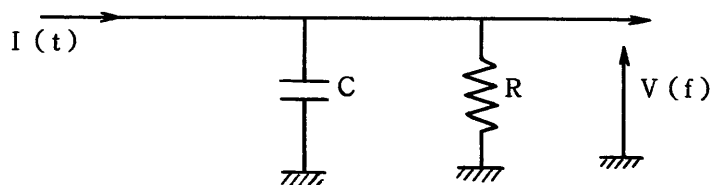
-下限は、セルの暗電流に対する割合によって定められ、例えば、 $I_{0 \text{ min}} = 100 I$  (暗電流)、これから

$$I_{0 \text{ min}} = 10^{-11} \text{ アンペア}$$

従つて、ダイナミックレンジは  $10^6$  である。

e / -電流  $I(t)$  の積分

積分回路の役目を果たす次の略図に従う RC 回路に対して  $I(t)$  が加えられる：



$$I(t) = \frac{I_0}{1,000} e^{-\frac{0.7 t}{T_2}}$$

すべての計算が、実施されると次式が得られる：

$$V(t) = \frac{I_0}{1,000} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{T_2 RC}{0.7 RC + T_2} \left[ e^{-\frac{+0.7 t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{RC}} \right]$$

$T_2 \ll RC$  ならば、

$$V(10T_2) = \frac{I_0 \cdot T_2}{0.7C} = \frac{KZ_0 \cdot T_2}{0.7C} = K \frac{D_0}{C}$$

それ故、出力側における電圧V(t)の測定値は、放射線量を充分に表わしている。

実際上の理由から、電圧V(10T<sub>2</sub>)は1ボルトに固定されている。電流I<sub>0 min</sub>は10<sup>-11</sup>アンペアに等しいから、妨害電圧である電圧R・I。(暗電流)が、トリップに必要な電圧(1ボルト)に比較して無視し得るためには、抵抗Rは、最大10<sup>11</sup>オームに等しくなければならない。

パラメーター：

V, トリップ電圧 (V(=10T<sub>2</sub>) = 1ボルト)

D<sub>0</sub>, トリップの放射線量 (25mrad, 2.5mrad 及び 0.25mrad)

R, 負荷の限界抵抗

I, 10<sup>-11</sup>と10<sup>-5</sup>Aの間でセルにより供給される電流。

これらが定まると、次の様な他のパラメーターを決定するのが適切である：

K, セルの電流と放射線量の比例常数

$$C, \text{積分容量の値, } K = \frac{I_0}{Z_0} \left( \frac{\text{アンペア}}{\text{rad} \cdot \text{S}} \right)$$

これは次の形に書く事が出来る。

$$K = \frac{Q}{D} \left( \frac{\text{クーロン}}{\text{rad}} \right) \text{ 又は } \left( \frac{\text{アンペア}}{\text{rad} \cdot \text{S}} \right)$$

実験的に (3-2-1節参照)は

$$D = D_y + D_n = 1,159 + 1,064 = 2,223 \text{ rads}$$

及び Q = 4,93 × 10<sup>-5</sup> クーロン, これから,

$$K = 2,22 \times 10^{-8} \text{ アンペア / rad S}^{-1}, \text{ または,}$$

$$K = 0.6 \times 10^{-11} \text{ アンペア / rad h}^{-1},$$

容量Cの値は次式によって定められる：

$$C = \frac{K \cdot D_0}{V(10T_2)} = K \cdot \frac{D_0}{1}$$

以上から選定された異なるトリップ放射線量に対してのCを次の表に与える：

∴ D <sub>0</sub> (mrad)	∴ 25	∴ 2,5	∴ 0,25	∴
∴ C (pF)	∴ 555	∴ 55,5	∴ 5,55	∴
∴ θ = RC (en s)	∴ 55,5	∴ 5,55	∴ 0,5	∴



これらの要素を考慮すれば、倍加時間  $T_2$  の値の関数として、トリップの実際の放射線量を計算する事が出来る。

用いられる公式は以下の様である。

$$V(t) = \frac{I_0}{1,000} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{T_2 \cdot RC}{0.7RC + T_2} \left[ e^{\frac{+0.7t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{RC}} \right]$$

$$D(t) = \int_0^t Z(t) dt = \int_0^t \frac{Z_0}{1,000} e^{\frac{+0.7t}{T_2}} dt$$

$$D(t) = \frac{Z_0}{1,000} \cdot \frac{T_2}{0.7} e^{\frac{+0.7t}{T_2}} = \frac{I_0}{K} \cdot \frac{T_2}{1,000} \cdot \frac{1}{0.7} e^{\frac{+0.7t}{T_2}}$$

予想される事故の動特性では、 $e^{-\frac{t}{RC}}$  の頂は  $e^{\frac{+0.7t}{T_2}}$  に比較して無視し得る。この場合には、 $V(t)$  は次の様に書く事が出来る：

$$V(t) = \frac{I_0}{1,000} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{T_2 \cdot RC}{0.7RC + T_2} e^{\frac{+0.7t}{T_2}}$$

比  $\frac{D(t)}{V(t)}$  を作れば、次式が得られる：

$$\frac{D(t)}{V(t)} = \frac{1}{K} \left( C + \frac{T_2}{0.7R} \right)$$

これは次の様にかかれる：

$V(t) = 1$  ボルトに対し、

$$D_0 = \frac{1}{K} \left( C + \frac{T_2}{0.7R} \right) \cdot 1$$

$\frac{T_2}{0.7R}$  が、容量  $C$  の値に比較して、無視し得ない時には、トリップの放射線量は一定ではなく、 $T_2$  の関数として変化する。

6 図は、増倍時間の関数としてトリップの実際の放射線量を与えている。

次の質問：即ち、プローブは予想し得るすべてのタイプの事故を検出する事が出来るか？  
これに答えるためには、検出の限界値を思い出せば充分である。

我々は 3.2.2 で、プローブは  $1.6 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$  の永続的な放射線量には不感である事を見た。  
はっきりいえば、これは、次の様な事を意味している。

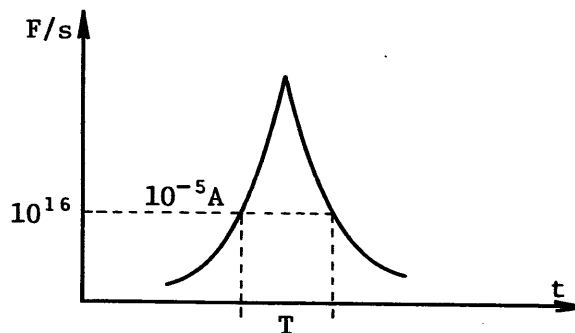
即ち、臨界の事故中にプローブのレベルにおける放射線量は、必ず  $1.6 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$  に達しなければならない。さもなければ、トリップは決して生じないという事である。考え方をまとめるため、CRAC 実験から見て、 $10^{13}$  分裂/秒 はほぼ放射源から 30メートルで  $2 \text{ rad/h}^{-1}$  に相当するものとする事が出来る。予想される限界事故は、次の様に表わされる：

Référence	T <sub>2</sub>	ピーク時核分裂数 Fissions/s au pic	1mの点での線量 Débit de dose à 1m(rad.h <sup>-1</sup> )	30mの点での線量 Débit de dose à 30m(rad.h <sup>-1</sup> )
CRAC 08	0,7 ms	3.10 <sup>19</sup>	6.10 <sup>9</sup>	6.10 <sup>6</sup>
CRAC 03	5 s	4,7.10 <sup>15</sup>	9,4.10 <sup>5</sup>	9,4.10 <sup>2</sup>
D 56-03	18 s	1,1.10 <sup>14</sup>	2,2.10 <sup>4</sup>	2,2.10 <sup>1</sup>

これら3つの場合には検出器は作動することがわかる。実際のトリップ線量は出力の増倍時間と閾値のみに関係する。線量は6図の曲線から求められる。また次表にまとめて示す。

増倍時間 TEMPS DE DOUBLEMENT T <sub>2</sub>	固定閾値 SEUIL FIXE (mrad)		
	25	2,5	0,25
実際のトリップ線量 DOSE REELLE DE BECLENCHEMENT			
0,7 ms	25	2,5	0,25
5 s	30	6	3,2
18 s	37	14	12

注意：次の様な質問を自ら考えて見たらどうであろうか。今25 m rad に調整されたプローブが、40 μs以下の増倍時間を有する暴走を受けた場合を考えて見ると、どの様になるであろうか？（6図参照）。プローブはトリップするかどうか？



事故は極めて迅速であるので、ピークで到達される出力は高いものになる。 $10^{-5}$ A に対して、フォトマルが飽和され、トリップに十分な放射線量が積分されるのに、この飽和が持続すべき時間を計算する事が出来る。

$10^{-5}$ A 迄に積分される線量を見れば、次式が得られる：

$$\frac{I_0 T}{C} = 1 \text{ ボルト}$$

$$T = \frac{1 \times 555 \cdot 10^{-12}}{10^{-5}} = 55 \mu\text{S}, \text{ これは極めて短い。}$$

倍加時間が  $5 \mu\text{S}$  に等しいとし、(CRACO18 は  $T_2 = 700 \mu\text{S}$  を与えた), 下降も同じ様に迅速である (最も不利な場合) と仮定すれば、事故は  $10 T_2$  持続しなければならない。即ち出力は  $5 T_2$  の間上昇し、例えば出力は 30 倍される事になる。 $10^{-5}$ A は  $10^{16}$  f/s に相当する事を思い出そう；従って、ピークでの出力は、最小  $3 \cdot 10^{17}$  f/s に達しなければならない。従って、トリップは生ずる事になるが、トリップの実際の線量は、固定閾値に等しくはならない。何故なら光電増倍管は、もはや直線動作範囲にはならないからである。事実、これらの  $T_2$  の値に対しては、人間の反射時間が、事故の持続時間よりも遥かに大きいので、トリップ閾値はほとんど重要性はない。

### 3.4 不感状態のないこと

様々なシンチレーター、既ちタイプ XA 1,000 の最初の光電増倍管または最終的に選定されたタイプ 150 AVS の光電増倍管のいずれにせよ、これらを用いて行われたすべての調整試験中プローブの不感現象は観察されなかった。この特性を説明するために、実験 SILENE S4-23 中に行われた記録を参照する事が出来る：出力の暴走の倍加時間は  $2.9 \text{ mS}$ 、到達された最大出力は  $8.7 \cdot 10^{18}$  f/S、ピークにおける総合エネルギーは  $1.09 \cdot 10^{17}$  fissions であった。最初出力ピークの後、放射の「バースト」後のプローブの挙動を見るため臨界発散を自由に継続させた。これは 7 図に示されている。最初のピーク後の発散全体に沿って、どの瞬間にも発せられた信号の消滅または擾乱はなく、出力の忠実な追従がある事が確かめられる。最初のピークの上昇時に、プローブがどのように作用するかを見るために、8 図にずっと拡大した目盛りを用いて、記録が描かれた。全く正常な現象である、セルの  $10^{-5}$ A における飽和が確かめられる。この飽和は、変化し得るものである：即ち、それは、光電陰極と 1.5 ボルトの供給電圧との間に  $100 \text{ K}\Omega$  の抵抗を、直列に置く事によって得られる。(自己分極の技法)。事実、技術的には、この光電増倍管は数  $10^{-5}$  アンペアをこえない、プレート電流を供給するために作られたものである。

$10^{-5}$  アンペアの値は、 $1,7 \cdot 10^6 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$  付近の中性子線及びガンマ線の放射線量に相

当する（測定は、放射源から1 mで実施）。

### 3.5 - エレクトロニクスの機能

エレクトロニクスの面においては、主要な3つのシステムから成る。

- 検出ヘッド
- 前置増幅器
- 論理回路

#### 3.5.1 - 検出ヘッド

検出ヘッドは無線技術社のタイプ150 AVSの光電子増倍管を備えている。このヘッドは厚さ10mm直径20mmのSPFタイプのプラスチックシンチレータ及び石英とシリカのSB20タイプの密封ケースに入った濃縮硼素の「熱中性子」シンチレータに光学的に結合されている。

全体は密封管内に入れられそのまわりには厚さ3cmのポリエチレンのスリーブが取付けられている。

#### 3.5.2 - 前置増幅器

使用される前置増幅器は“Analog Devices”社の311Kタイプ、または、“BURR-BROWN”社の3431Kタイプのバラクター演算増幅器である。それは100%フィードバックを行って取付けられている。「Victoreen」または「Welmegox」タイプの $10^{11}$  ( $10^{12}$ ?)  $\pm 1\%$ の抵抗がアースと、前置増幅器の、「非反転」入力の間に入れられ、更に積分容量Cも置かれている。前置増幅器は極めて入念にケーブル布設を行い、その電流が、 $5 \cdot 10^{-15}$ アンペア以下である様にしなければならない（原型を参照）。検出ヘッドの出力側は、増幅器の入力部に最も近くに位置させる。

増幅器の入力に対して必要な入力切りかえは、「SEEM」タイプの高絶縁リレーを用いて行われる。（ガラスのアンプル内の接点を有するリレー）

#### 前置増幅器全体の機能の研究（9図）

$10^{11}\Omega$ の抵抗及び容量Cが積分回路を構成する。検出セルから発せられる電流は、積分回路を充電する様になる。積分されたこの電圧は、抵抗で前置増幅器の出力側に伝えられ「LM311」回路によって構成される2つのコンパレータ回路を制御する様になる。

停止状態では、ヘッドは検出システムの前（シンチレータと光電気セルのシステム）に位置された制御放射源により与えられる放射線量に比例する電流を供給する。この電流は、RC回路の端子に0.15ボルトの電圧を発生させる。この電圧は前置増幅器によって、2つのコンパレータの段に伝えられる。「良好機能のコンパレータ」と呼ばれる、コンパレータ段は、その出力端で、正の電圧を与え（その限界は0.1ボルトに調整されてい

る。)この電圧は、「良好機能」の標示灯をドライブするトランジスタ 2N1613を制御する。；「警報コンパレータ」段は 1.15 ボルトに限界が調整されているが、この時には、励起されない。後者のコンパレータが励起されるのは、コンパレータの入力側に加えられる電圧が、1.15 ボルト以上である場合だけであって、その場合の信号は、「情報処理の論理基板」の論理回路によって処理される。

10<sup>9</sup>オーム抵抗の作動は「中間リレー」を介して、外側から制御される。この抵抗は感度を 100 倍変化し、「アウトプット制御」の前置増幅器の出力電圧の値によって、事故の状態に遠隔から追従し得る様にする。この装置によって事故の個所に割り込むことができる。

「テスト抵抗」の作動は「テストリレー」によって制御され、前置増幅器の入力に電流を注入する事ができ、増幅器は、積分器回路に充電する様になる。 $\Delta V$  は、1 ボルトである。この 1 ボルトの電圧は、時間 T の終りに達せられる。選定された時間は、10 秒に等しい。即ち操作員が「テスト抵抗」を働かせると前置増幅器の出力電圧が上昇し、「処理システム」上に在る検査電流計上で確認する事ができる。 $\Delta V$  が 1 ボルトに達し操作員が「テストボタン」を維持すると、プローブは事故の放射線量及び放射線量の線量のシュミレーションを実施している事になり、「警戒」標示灯が点灯し、また、検査電流計の針が急激に上昇するはずである。何故ならプローブの「論理基板」を介して積分容量が切られるからである。従って、このシステムを用い検出プローブの限界値と、その論理回路の良好な機能とが確かめられる。

### 3.5.3 検出プローブの論理回路

論理回路は、10 図で示されている。時間の線図は 11 図に示されている。

全体の機能原理は以下の通りである。警報は、放射線量に閾値の超過があり、且つ放射線の線量率が閾値以上である時に限って伝えられる。これら 2 つの条件を結び付けるために、次の様な方法が採られた。正常な運転状態では、前置増幅器の RC 回路は前置増幅器の入力に接続されている。事故が生ずると、RC 回路は充電され所与の瞬間に、積分された電圧は、「警報のコンパレータの限界より大きくなる。コンパレータはバランスが崩れ、情報処理の論理回路に情報を送る。リレー 1 はくっつき、且つ自励し、積分容量は、切られ短絡される。この時、前置増幅器の出力電圧は、放射線線量率に比例している。この電圧が、「警報のコンパレータ」の限界より大であると、コンパレータは必ず起動され、遅延された線量の情報が到着する瞬間に、2 つの情報がコインシデンスし、警報信号は「処理システム」に伝えられる。放射線の線量が、「警報のコンパレータ」の限界より低くなると、警報の信号は消失し、プローブはリレー 2 を介して、初めの状態に復帰する。

### 時間線図の説明

a) それぞれの閾値よりも大きな放射線量及び放射線量率を与える様な事故の場合を採り上げてみよう。コンパレータの信号は、(a)においてシュミレートする。メモリ(1)が起動される。「mono 1」は時間 $\tau_1$ のパルスを与え、これは、一方ではリレー1を制御し、このリレーは、自励され、積分容量を切り、他方では「mono 2」は、パルス幅 $\tau_1'$ のパルスを与える。時間 $\tau_1$ の終りにメモリ(2)が操作される。この時、回路ET(1)はその入力2.1に2つの情報“1”を受け；1.3は+5Vにあるので、この回路の出力信号は、“1”となり、警報信号となる。この警報信号は、放射線の線量が「警報のコンパレータ」の限界よりも大である限り維持される。放射線の線量がこの限界以下になると、回路ET(1)の出力は0に下り、回路ET(3)はすべての入力が“1”になる。リレー2は、時間 $\tau_3$ の間、励起され、リレー1の励起を解除し、リレー1は積分容量を再び接続する。プローブは初めの状態に戻される(R. E. I)

事故が持続時間 $\tau_2 + \tau_2' > \tau > \tau_2$ を有する場合に対しては、機能は、明白に同じである。R. E. I を起動するのは常にET(3)回路である。

事故が持続時間 $\tau_1 < \tau < \tau_2$ を有する場合には、R. E. I を操作するのは、回路ET(2)である。事実、警報信号は、時間 $\tau_2$ が経過する前に0に再び降下する。回路ET(3)は起動され得ない。何故なら、入力5では、信号は0であり、入力4では、一時的な信号が得られるが、これは、時間 $\tau_2$ の後、入力5が再び“1”に上昇する時には、消失してしまっているからである。回路ET(2)で入力1.0及び1.1は“1”になり「mono 4」によって送られる、時間 $\tau_2$ の信号が到着すると、「mono 5」は起動され、プローブは初めの状態に戻る。

b) 限界値よりも大きな放射線量を与えるが、この限界値よりも小さな線量率としかならない様な事故の場合。これは恐らく積分容量の障害電荷の場合であろう。この場合には伝えられる警報信号はない。然しプローブは初めの状態に戻されなければならない。この場合、時間 $\tau_2$ 後R. E. I.を行うのは矢張り回路ET(2)である。注意—すべての場合に、警報信号があるとすればその信号は時間 $\tau_1$ の後にしか伝達されない。この時間 $\tau_1$ は、リレー1が、くつつき自励し得る様にしなければならない。時間 $\tau_1$ は10mS以下に下げられてはならない。

原型では、時間は次の通りである。

$$\tau_1 = 20 \text{ mS}, \quad \tau_1' = 5 \text{ mS}, \quad \tau_2 = 100 \text{ mS}, \quad \tau_2' = 20 \text{ mS}, \quad \tau_3 = 10 \text{ mS},$$

擾乱パルスの場合には、プローブは、時間 $\tau_2$ の間、積分回路に到達される事はなくなり、どの場合でも、抑止されてしまう。リレー1がくつつく事ができず、従って「放射線線量率」との間のテストの役割を果し得ない時間 $\tau_3$ の間でも、 $\tau_3 > \tau_1$ であるた

め、正常な機能となる。時間  $\tau_2$  は、必要ならば、30mS 迄下げる事ができる。

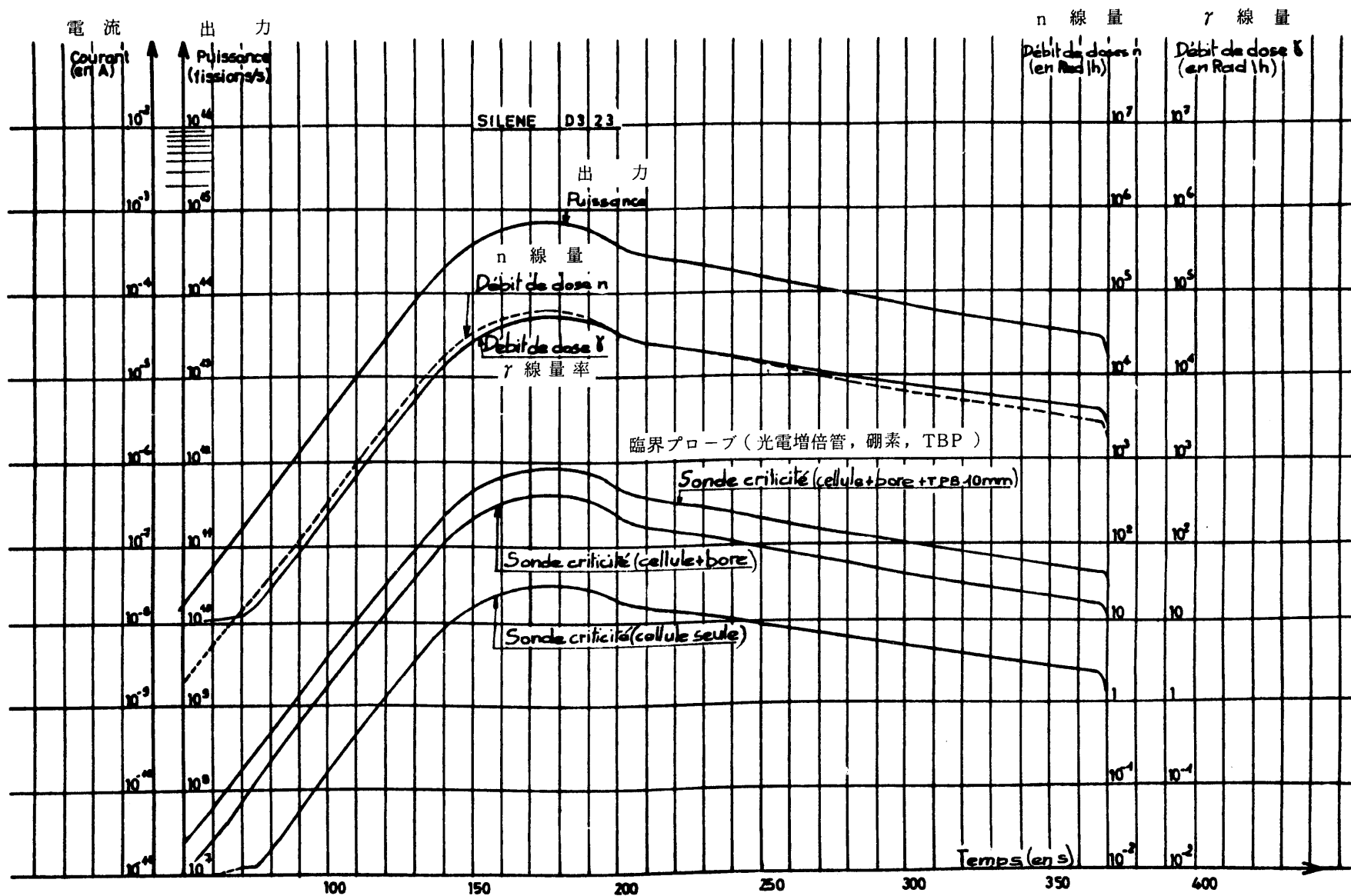


Fig. 2 SILENE : 実験D3-23の時の臨界の状態及び放射線量に対するプローブの応答



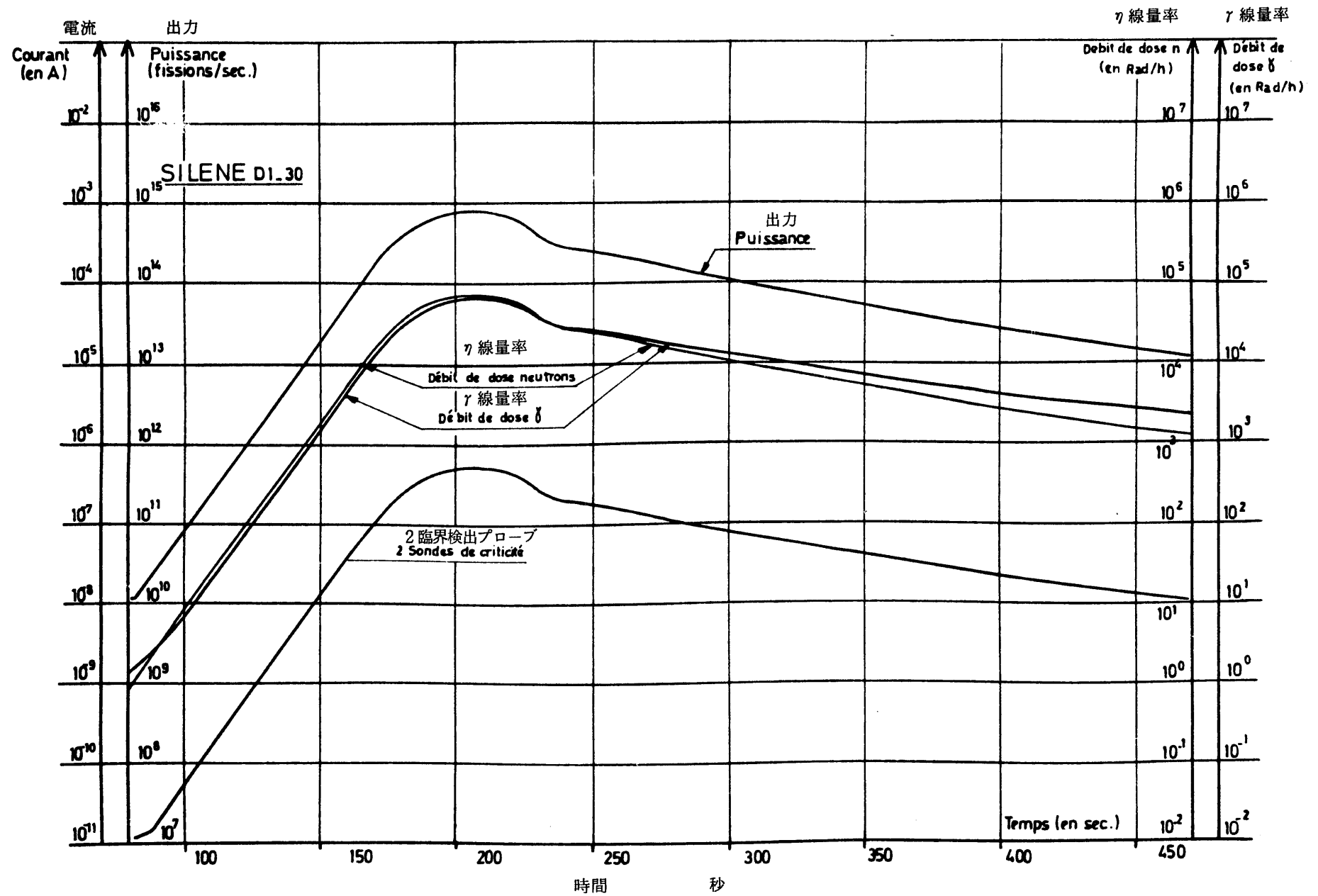
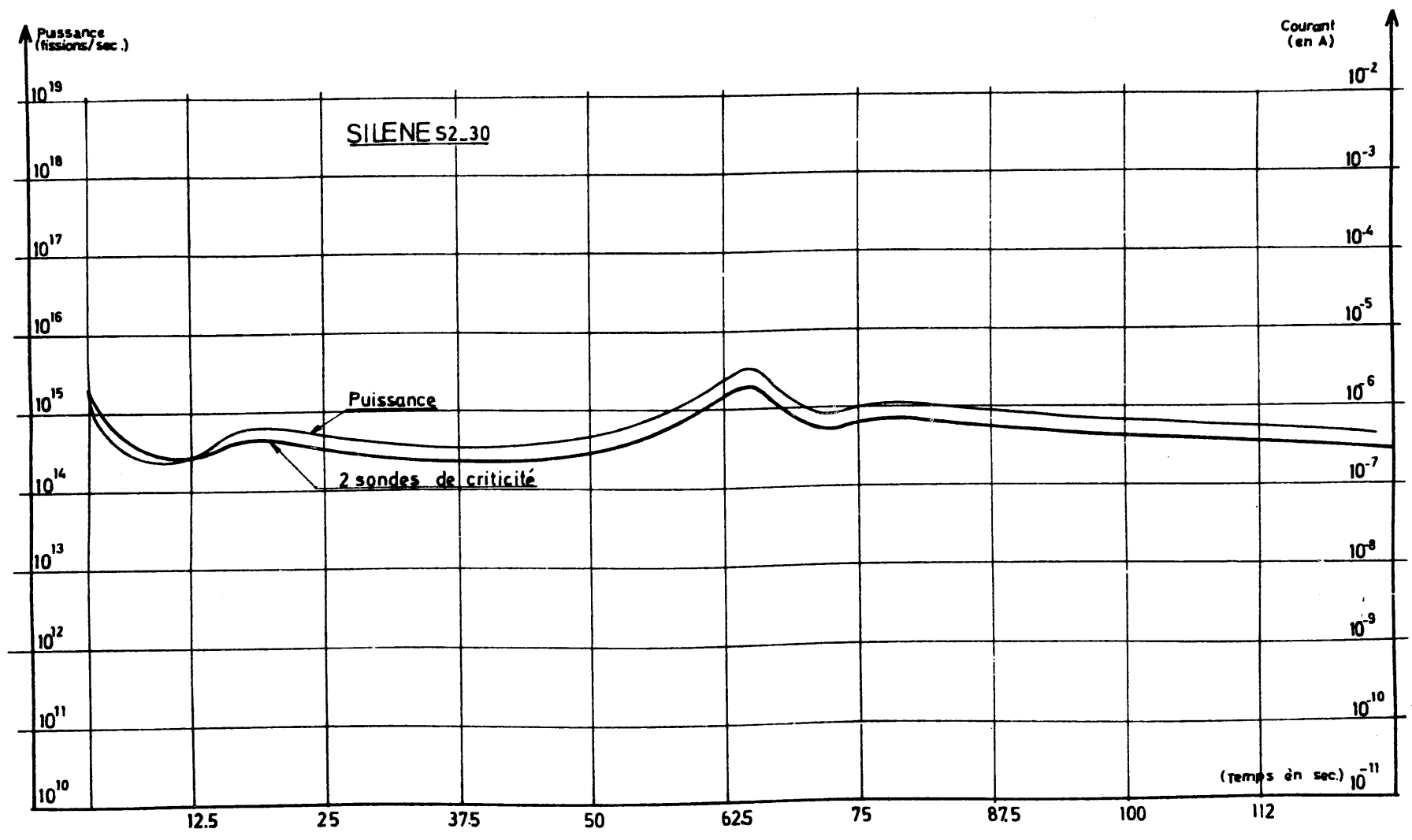


Fig. 3 SILENE : D1 - 30 実験に対する臨界プローブの応答



-77-

Fig. 4 実験S2-30における臨界プローブの応答

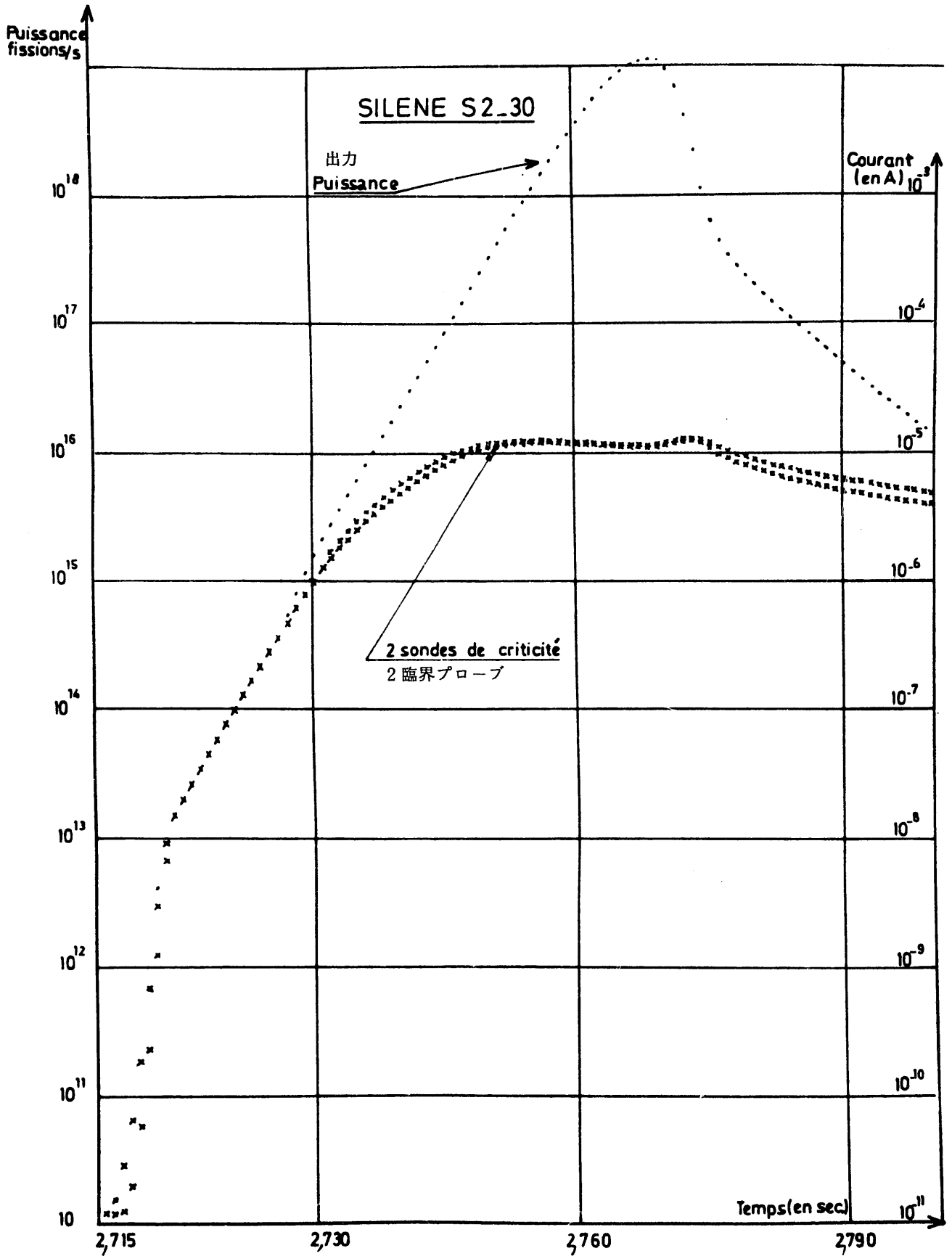


Fig. 5 SILENE: 臨界初期ピークにおけるプローブの飽和状態

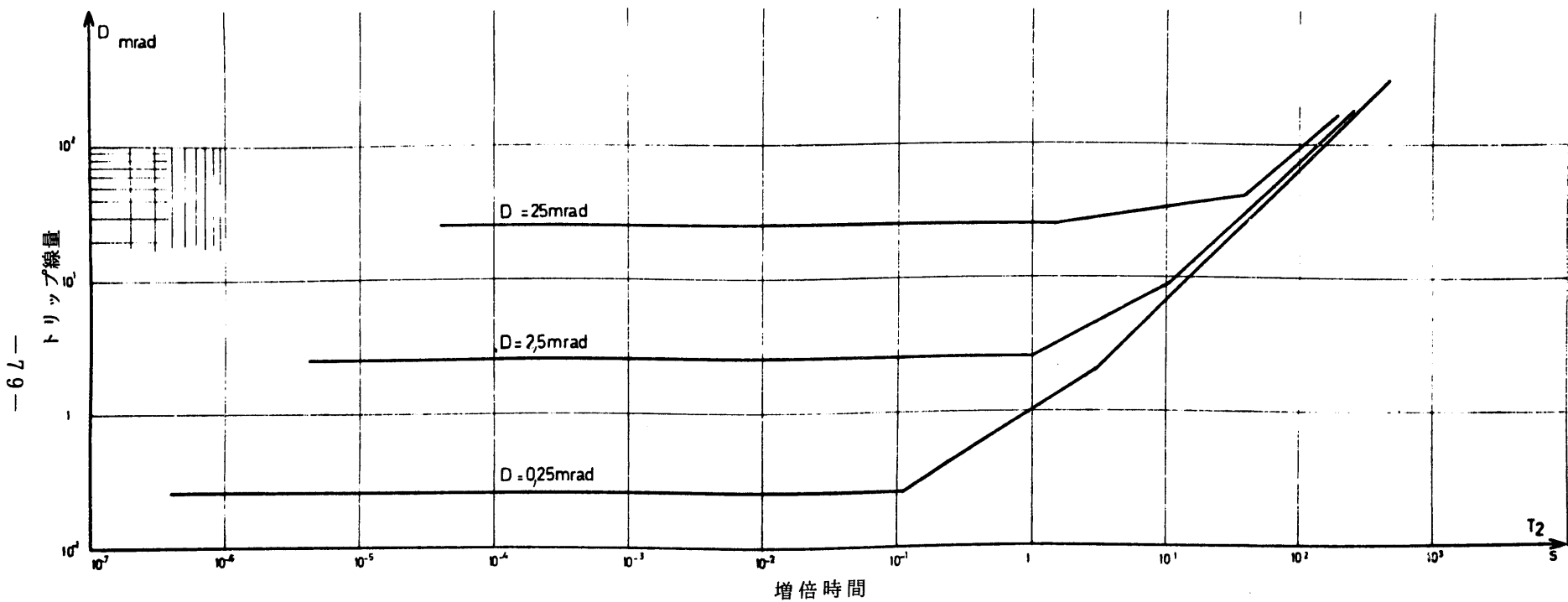


Fig. 6 増倍時間の関数としてのトリップの線量

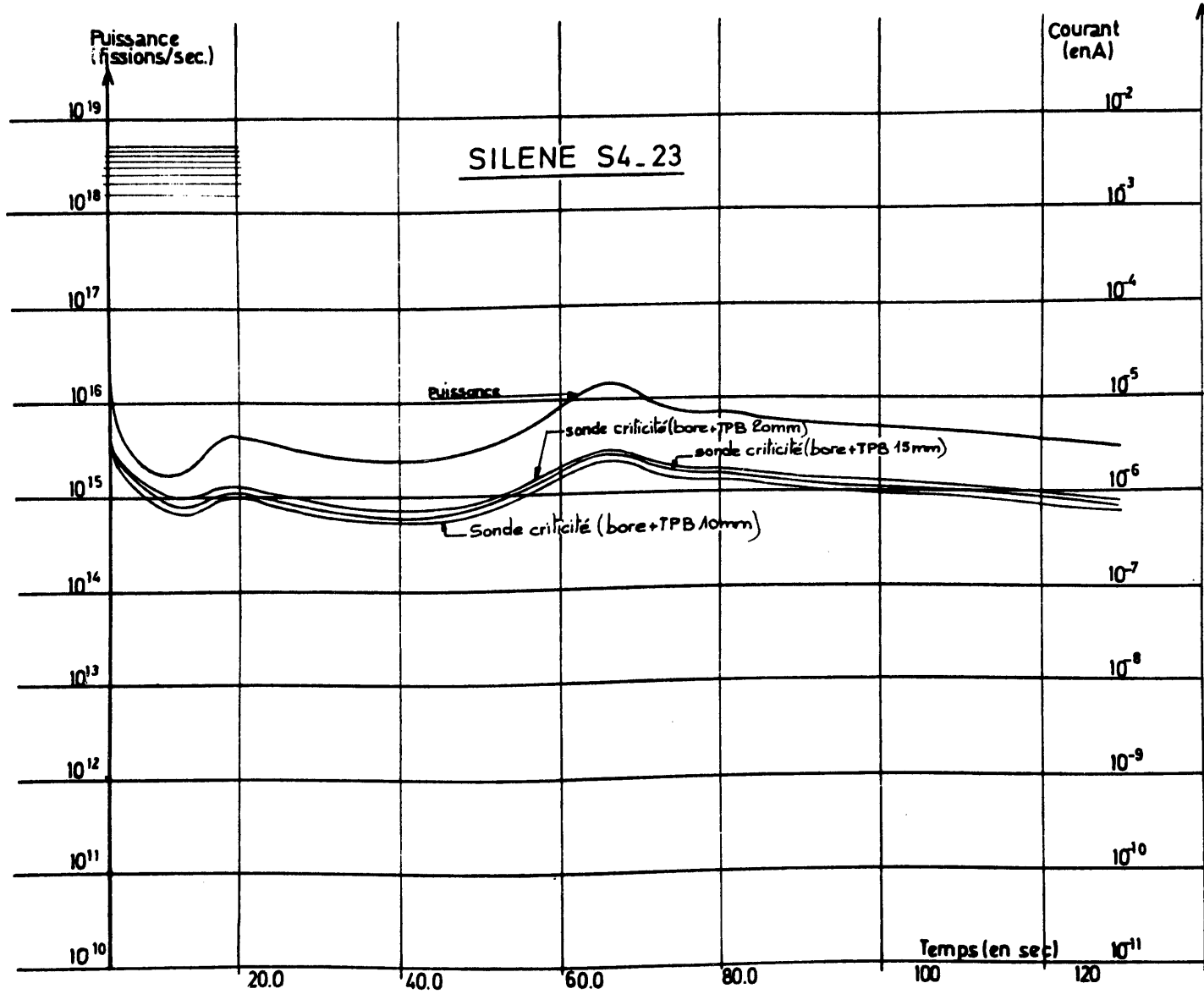


Fig. 7 S4-23 実験におけるプローブの応答

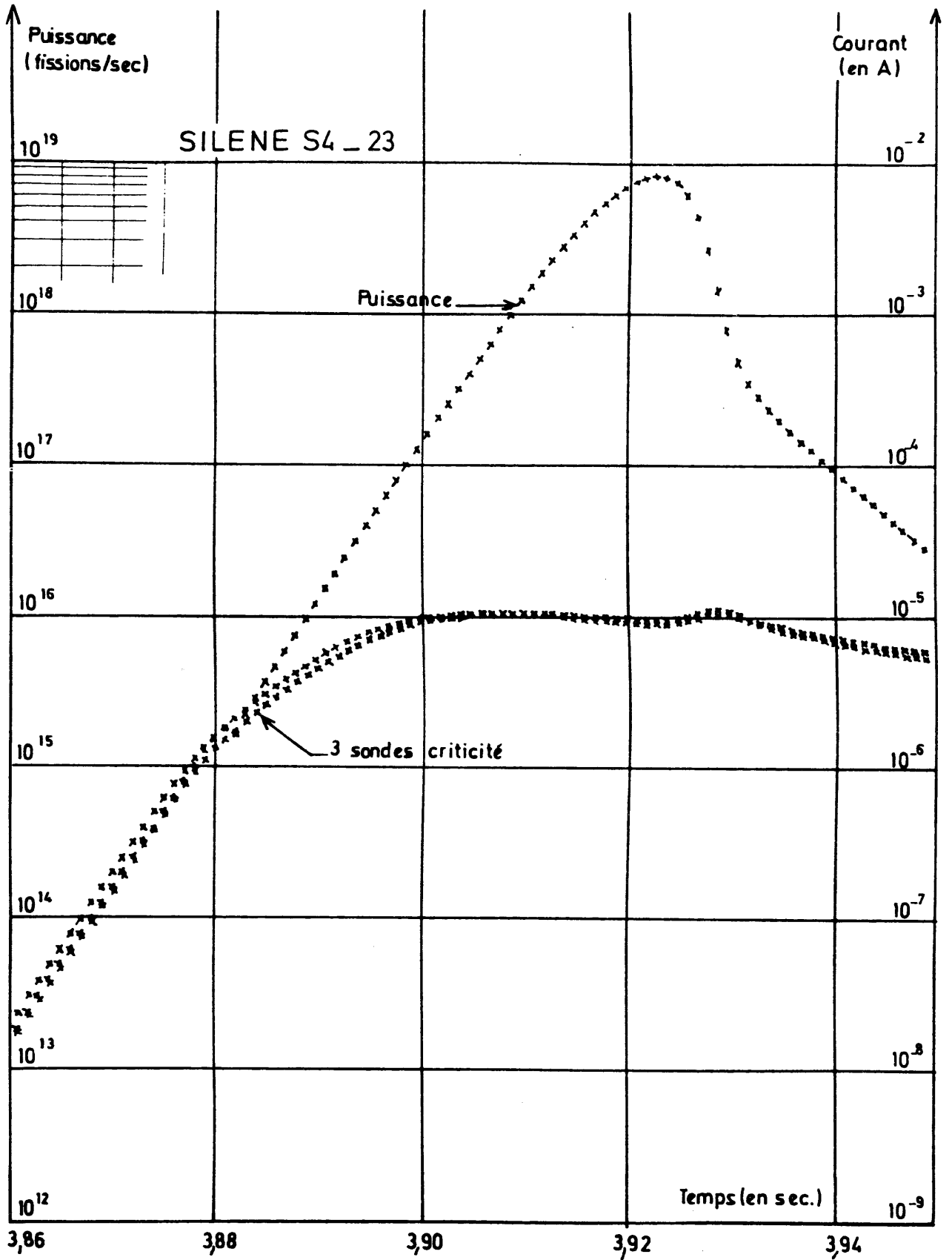


Fig. 8 初期ピークにおけるプローブの飽和状態

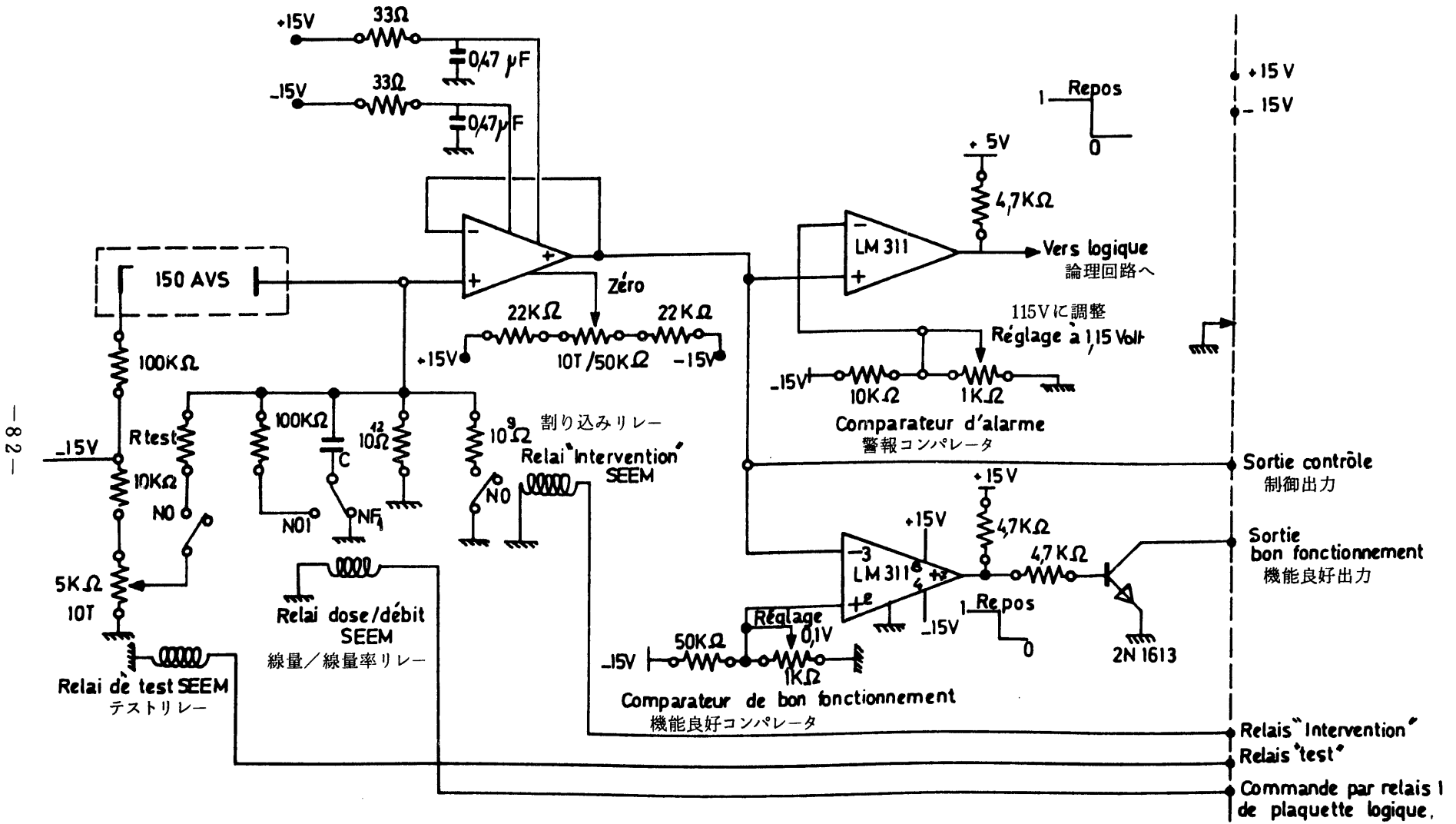


Fig. 9 臨界プローブ及び前置増巾器の回路

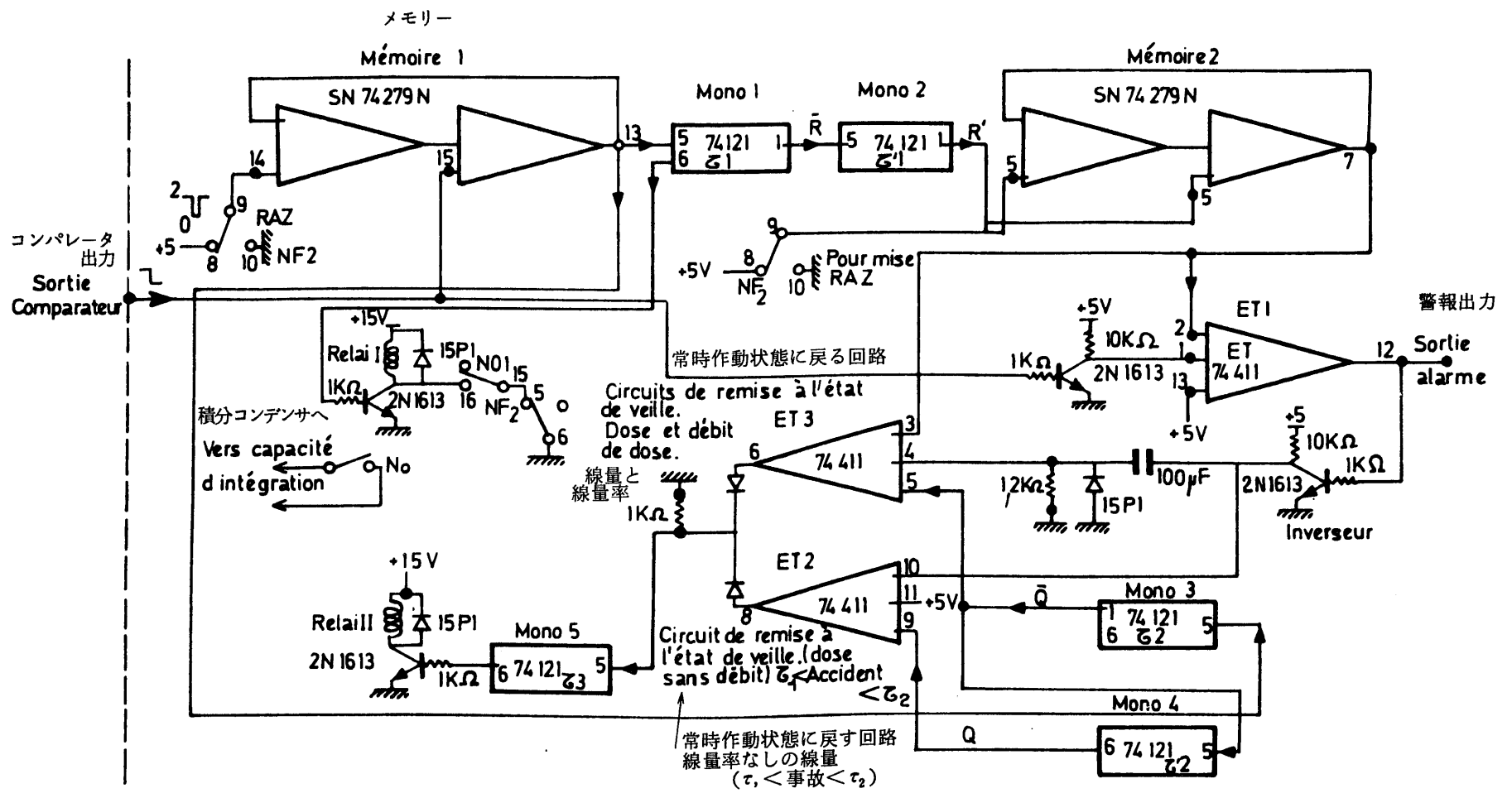


Fig. 10 臨界プローブ - 論理回路



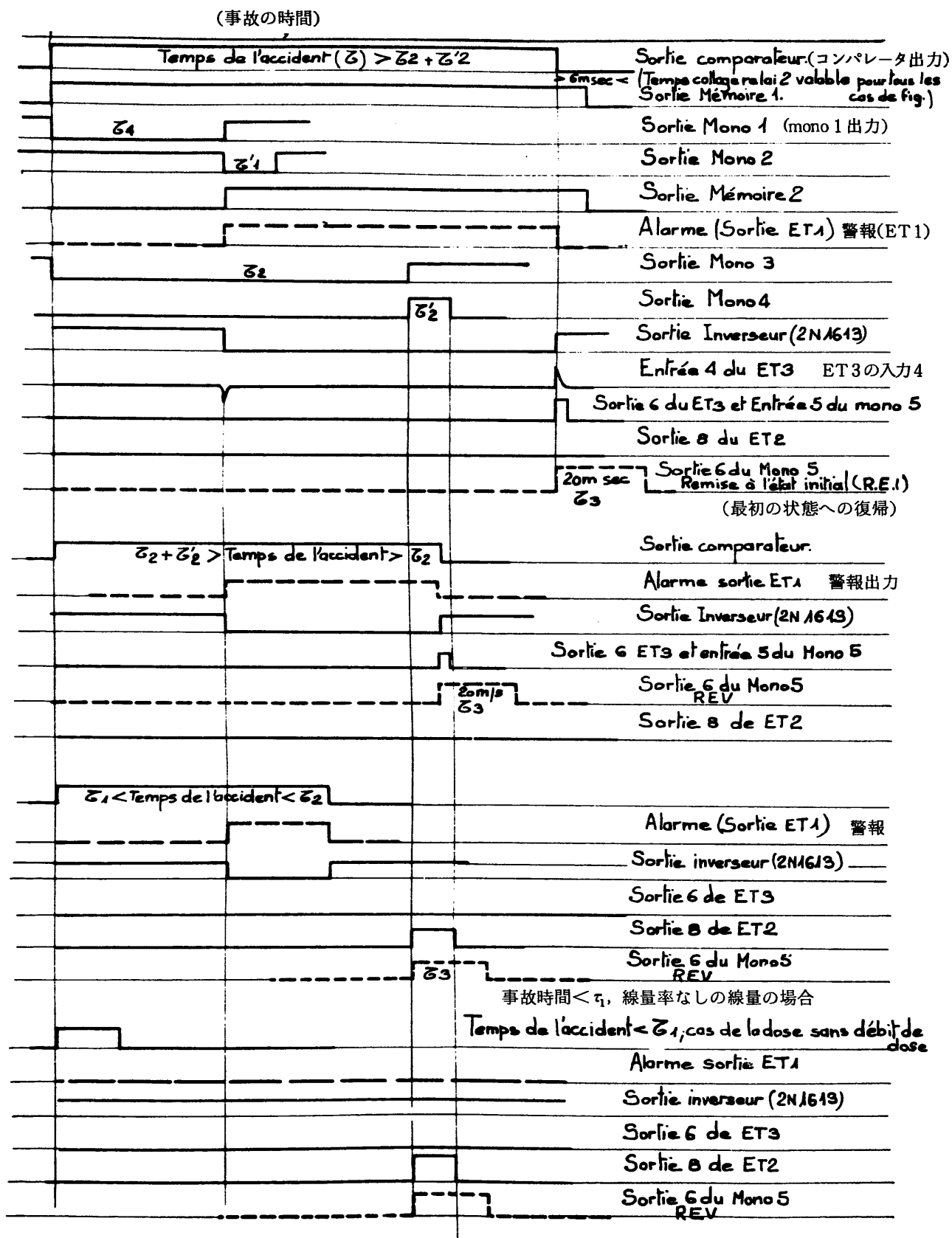


Fig. 11 臨界プローブ - タイミングチャート

#### 4. 処理システムの特徴

##### 4.1 機能

処理システムの機能は以下の通りである。

- 検出装置の給電
- 検出装置からの情報を集中する。
- 検出装置からの情報を処理する。

同じ監視ユニット内にコインシデンスがある場合に、警報をトリップする。

- EDAC装置の系統的制御を行う。

##### 4.2 システムの配列

処理システムは、6系統監視ユニットを処理する事ができる：各監視ユニットは、3または4個の検出装置を含み得る（5節-機能の安全参照）

システムの外観は、この資料の写真で見られる（プローブ+システム）

これには、以下が含まれている。

- a) 余分な監視ユニットカード（最高12）、これらは各監視ユニットの4つの検出装置からやってくる信号を処理伝達する。
- b) 監視ユニット基板からやってくる論理情報を処理する2つの一般回路基板
- c) 論理基板及び検出装置の全体に通ずる6つの給電基板。給電の具体的な相互接続により、使用者の選択に応じ、検出装置及び論理基板の給電は希望する形で可能である。

この様な巧みな方法により、使用者に対してこのEDACの「安全性」の構想を最適ならしめる可能性が与えられる。2つの給電が組み合わされる場合には、欠陥のある給電を交換する自動システムが備えられている。

- d) 2つの多重化基板により（これはオプションである）遠隔でシステム（もしくは複数のシステム）に向けて「放射線量率」の24の類似情報の状況、及び感度についての24の遠隔制御情報を転送する事ができる。

前部パネル上に、以下の各々が区別される：

監視ユニット当り

- 「機能の良好性」を示す4個の緑色の標示灯
- 「警戒」を示す4個（ダブル）の赤い標示灯
- 「警報」を示す1個（ダブル）の点滅赤色標示灯
- 監視ユニット及び検出装置の2つのスイッチによる監視
- 放射線量率の指示電流計
- 以下の各検査を可能にする「テスト」機能

－検出装置の放射線量の予め定められた閾値のテスト。

これは、一式スイッチ及び、自動戻り式キーによって行われる。

－キーを単に押す事による標示灯のテスト

－キー式スイッチ及び、自動戻り式キーによる警報回路のテスト

・「解除」機能により解除を可能にする

－欠陥、機能良好回路

－警告回路

－警報回路

・緑の「使用中」標示灯

・赤色の欠陥給電標示灯

## 5. 適用した安全基準

EDACシステムは十分な確実性をもつ放射線防護の機能を保証しながら、できる限り簡単な構造にとどまる様に設計された。購入が高価で、過度に維持に金がかかる複雑なシステムが実施される様な事のない様に、冗長度は合理的なレベルに限定した。

全体の信頼性はすぐれている。（Inter technique 社によって行われた信頼性の研究参照）特に誤警報の確率はほぼ0である。

### 5.1 安全性の一般的基準

#### 5.1.1 確実且つ迅速な検出

これは以下に基づいている：

a) 最初のピークのガンマ線及び中性子の同時且つバランスした混成検出（3.1節参照）

b) 各検出器は警戒情報信号を次の2つの時期に準備している。

第一段－予め定められた放射線量閾値の超過（0.25-2.5または25 mrad）

第二段－放射線量率閾値の超過（約  $1.6 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$  及びこの超過の持続）

検出器の警戒信号が処理システムに伝えられるためには、これら2つの段が実現される事が必ず必要である。

c) 同じ監視ユニットの少くとも2つのプローブの一致した警報による冗長系の原理の適用（2 out of 4あるいは2 out of 3）いずれかのプローブが故障または使用不能の場合には、2つが残存していれば2つの中の1つで警報がトリップされる。

d) 検出器の持続性

－警報信号を発したプローブ（もしくは複数のプローブ）は依然そのまま作動をつづける。従って警報の音を解除した後、トリップ条件が存在すれば新しい信号を与る事ができる。

—プローブは飽和され得る。しかし決して不感状態にはならない。 $10^{10} \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$ の放射線量率においても、または、 $5 \cdot 10^4 \text{ rad}$ の放射線量を積分した後（これは3mで約 $10^{19}$ に相当）でも作動状態に在る。

e) —システムの応答時間 < 1 秒

5. 1. 2 —使用は確実である：

—外部蓄電池による自動給電の原理の適用で回路との結合なしに作動する（擾乱に対する不感のため）

—試験は、警報をトリップする危険はない。

—テスト後システムは自動的に作動状態になる。

—内部装置により検出装置から警報装置に至る迄すべての系統を確かめる事ができる。

5. 2. —プローブに対する特別の安全基準

基準 n°1 —誤警報の回避

警報のトリップに結びつけられない誤った信号は警報信号と良好な機能とを分離して表示する事で処理される。

警報信号は電流の射出タイプである：即ち 0 から +10V への移行。機能良好信号は 10V から 0V への移行。

基準 n°2 —プローブの良好な機能の監視

この監視は、次の様にして行われる：

—プローブの部分の主要部分に対して自動的な検査ができる。自動的にプラスチックシンチレータの近くに置かれた、 $200 \text{ mrad} \cdot \text{h}^{-1}$ を出す放射線源が用いられる。この様にして、恒久的に以下の機能の検査を行う事ができる。

a) —物理的部分

—プラスチックシンチレータ

—光電子増倍管

—光電子増倍管電圧

b) —アナログ部分

—電荷の積分器

—低レベル電圧の弁別器

—電流の増幅装置

c) — $\pm 15 \text{ V}$  の給電

情報の処理システム上に位置された緑の標示灯は、これらのエレメントの1つが故障した場合には消滅する。

一定期的に試験手続きにより以下が検査される。

論理部分（高レベルにおけるセレクター）及びコンパレータと切換えの論理システム。光電子増倍管の出す電流をシュミレートするため、システムによって操作される、プローブの内部電流発生装置が用いられる。

この様にして以下の値が確かめられる：

- 弁別器の閾値
- コンパレータ及び切換えシステム
- 警報へのトリップ点
- 応答時間

### 5.3 - 情報処理システムに対して特別の安全基準

情報処理システムのレベルでは冗長性は以下の様にすべての回路に及んでいる：

a) - 監視ユニットの論理基板は二重になっている。

同一の監視ユニットのプローブから発せられる信号は、この同じユニットの2つの論理基板に同時に入って行く。

- 機能の良好性信号

欠陥を表示するブロックの目的は、誤った情報の収集及び記録化並びに多安定回路を介して0へ復帰した後「機能良好」の縁の標示灯を作動（消灯）する事である。一過性の欠陥は記録されるが欠陥が消滅すれば、解除し得る。

- 警戒信号

「警戒」を表示するブロックは各プローブの赤い標示灯を作動させる。発光信号は記録されない。標示灯は2つのランプを有している。

- 警報

警報の標示灯は2つのランプを有している。それらの中の各々は、監視ユニットの各論理回路の出力についている。

上に挙げられた各組のランプは2つの異なる給電源から給電される。

b) - システムの一般回路は2重である。

c) - 完全なシステム(6系統×4プローブ)に対して6つの給電源が必要な電圧を供給している。

- プローブに対し

- 論理回路に対し 電圧を供給している。

- 一般回路に対し

各電源は、プローブ、論理回路または一般回路に無差別に所属する10枚のカードに対し必要な電力を供給する。

電源の数及び機器の配置は、回路網の容量及び使用者の選択によって決まる。「誤警報」の赤い一般的の標示灯はいつれかの電源の故障を示しており、故障中の電源の識別は箱を開いて行われる。(各電源は、1つの機能良好の標示灯を持っている。)

警報のトリップリレー(一般回路カード毎に1つ)は二重である。それらの機能の確認は警報回路網の試験と同じ操作で行われる。

#### 5.4 一連絡ケーブル

一電流が切断している事の検出

一機能良好の信号の欠如(緑の標示灯消灯)

一警報テストを行うことが不可能

一導線の切断の検出

この目的に対して極めて重要な接続は以下の通りである：

一アース：これは二重になっているが、2つの接続が消失すると緑の標示灯が消える。

一機能良好の出力：切断：緑の標示灯消灯

一電源+15V：切断：緑の標示灯消灯

一電源-15V：切断：緑の標示灯消灯

一警戒出力：切断：警戒テストでわかる。

#### 6.一結論

これらの装置の最初のサンプルは1977年の内に工業的に使用される事になるが、これはフランスで設置された最初の臨界の検出及び警報の装置から10年たつての事である。

これらの新しい装置のその性能と特性は、技術進歩に負うものであり、さらに、CRACプログラム及びSILENEの結果わかった検出すべき物理的現象に関する良い情報にも負うものである。これらのプログラムは、ヨーロッパにおいてさらに世界においてすら独得のものであって装置を事故の実際の条件において調整しテストする事ができたのである。それらのプログラムは更に工業的器材をその使用に供する前、及び時によっては使用の途中においても定められた仕様に充分応じているか否かを確認する事ができるのである。

結論のレベルにおいて、はっきりさせておくのが望ましいと考えられるこの器材の元来の特性の1つは、事故を遠隔でつきとめ且つ確認する可能性並びに、万一の救助作業及び退去した個所の技術的処理または、復元を導く目的での関連設備内の周囲線量の測定の可能性である。この様な可能性は、臨界安全性委員会によって定められた、臨界回路網の検出と警報の基本的機能を何等変えるものではない。即ち、検出プローブがトリップされる時に与えられる情報だけが利用される。即ちプローブが被る、中性子及びガンマ線の周囲放射線量である。この情報

は、何等の困難なしに、遠隔から中央の安全機器に伝達され警報の場合または誤った警報の場合においてすら人員退去時に生ずるすべての問題を解決できる様にするのである。特に本当の事故の場合に、ある処置が実行し得るか否か、しかも中間設備を無用にさらす事なく行えるかどうかを予め承知の上で救助作業を試みる事ができる事になろう。

**BIBLIOGRAPHIE**

---

- (1) STRATTON W.R.  
A review of criticality incidents. In: "criticality control in chemical and metallurgical plant". Paris, European nuclear energy agency, 1961, pp 491-533
- (2) Procédure applicable au projet, à l'installation et à l'exploitation d'un réseau de criticité. Recommandations de la Commission de Sécurité-Criticité, Commissariat à l'Energie Atomique, 1968 (texte revu en 1975)
- (3) ASPINALL K.J. and DANIELS J.T  
Review of U.K.A.E.A. criticality detection and alarm systems.  
AHSB (S) R.92, 1965.
- (4) AGAISSE R., BARBRY F., BOULY J.C., LECORCHE P., MANGIN D., MAUBERT L., REVOL H.  
Le programme CRAC : études d'accidents de criticité en solution.  
Bull. Inf. Sci. Tech. (BIST) 1972, n° 172, 3-27
- (5) LECORCHE P. CRAC experimental study of criticality accidents  
19 th annual meeting of the ANS, chicago, 10-14 june 1973  
Trans. Am. Nucl. Soc., 1973, 16, 163-164

*Manuscrit reçu le 15 juillet 1976*



E. D. A. C.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ELECTRONIQUES

- ANNEXE 1 -

---

## E. D. A. C.

## 物理的特性及び電気的特性

## 一付 録

この付録は3つの実験室のプロトタイプのプロープに対して、SILENEの許で行われた試験結果を示すものである。

最初の臨界発散(D3-23)において、次の3つのプロープを試験した：

光電子増倍管 n°1 のみを有するプロープ n°1

光電子増倍管 n°2 + 硼素シンチレータを有するプロープ n°2

光電子増倍管 n°3 + 硼素シンチレータ + 厚さ 10mm のプラスチックシンチレータを有するプロープ n°3

3つのセルは光電陰極の各々の感度として、次の値を有していた：

$$S1 = 71 \mu A / L$$

$$S2 = 69 \mu A / L$$

$$S3 = 66 \mu A / L$$

第二の臨界発散(D4-23)においても、3つのプロープを試験した：

光電子増倍管 S2 + 硼素シンチレータ及び厚さ 5mm のプラスチックシンチレータ(TPB)を有する n°4 プロープ。

光電子増倍管 S1 + 硼素シンチレータ + 厚さ 15mm の TPB を有するプロープ n°5

プロープ n°3 と同一のプロープ n°6

## 1°-プロープの様々な部品の応答

様々な場合におけるガンマ線に基づく電荷  $Q_\gamma$  及び中性子に基づく電荷  $Q_n$  を、光電陰極の感度が  $7/\mu A/L$  に等しいと仮定し、且つガンマ放射線量が中性子の線量に等しいと仮定して計算して見よう。

## 1. 1. -光電子増倍管のみの照射

発散 D3-23 において記録された結果は、光電子増倍管のみに基づく電荷が総電流(光電子増倍管 + 硼素 + TPB10mm)の 4.2% をなす事を示している。

この報告により臨界発散 D4-23 の実験条件において、光電子増倍管のみが発生したはずの電荷を計算する事ができる。

$$Q_e = 5.93 \cdot 10^{-5} \times 0.042$$

$$Q_e = 2.49 \cdot 10^{-6} [C]$$

ガンマ線及び中性子の放射線源の許での実験で示された通り、この電荷はその主要部分はガンマ線だけに基づくものである。

## 1. 2. -光電子増倍管 + 硼素シンチレータ

光電子増倍管のみに対する場合と同様に発散 D3-23 の時に記録された結果により、発散 D4-24 においてガンマ線に感じない硼素シンチレータを備えた光電子増倍管が受けたはずの電荷を計算する事ができる。

$$Q_c + Q_b = \frac{3.36 \cdot 10^{-5} \times 5.93 \cdot 10^{-5}}{7.36 \cdot 10^{-5}} = 2.70 \cdot 10^{-5} [\text{C}]$$

$$Q_c = 2.49 \cdot 10^{-6} \text{C} \text{ として上式より}$$

$$2.49 \cdot 10^{-6} + Q_b = 2.70 \cdot 10^{-5} \frac{71}{69}$$

但し光電子増倍管の差を等しく考慮している。

$$\text{これから } \boxed{Q_b = 2.53 \cdot 10^{-5} [\text{C}]}$$

### 1.3 - 光電子増倍管 + 硼素シンチレータ + 10mm の TPB シンチレータ

実験 D4-23 で測定された電荷は、光電子増倍管のみに基づく電荷硼素シンチレータに基づく電荷及びプラスチックシンチレータに基づく電荷を含んでいる。

$$5.93 \cdot 10^{-5} = Q_c + Q_b + Q_{\text{SPF10}}$$

これは常に光電子増倍管の同じ感度を基準にするため、次式の様にかく事ができる。

$$5.93 \cdot 10^{-5} \frac{71}{69} = 2.49 \cdot 10^{-6} + 2.53 \cdot 10^{-5} + Q_{\text{SPF10}}$$

$$\boxed{Q_{\text{SPF10}} = 3.60 \cdot 10^{-5} [\text{C}]}$$

プラスチックシンチレータは、中性子及びガンマ線に対して同時に感ずるので、この電荷は中性子及びガンマ線の寄与分の合計である。

$$Q_{\text{SPF10}} = D_\gamma K_\gamma + D_n \cdot K_n$$

$K_\gamma$  及び  $K_n$  は、中性子及びガンマ線に対する効率である (C/rad)

プラスチックシンチレータはガンマ線に感ずるが中性子にも感じその割合は、この場合、20%となし得る事が実験的に観察された。従って  $K_n = 0.2 K_\gamma$

一般の場合に、ガンマ線と、中性子の放射線量は等しくはない。今線量の比  $D_\gamma / D_n$  を  $K$  とすれば、

$$Q_{\text{SPF10}} = D_\gamma K_\gamma + \frac{D_\gamma}{K} \cdot 0.2 K_\gamma$$

$$Q_{\text{SPF10}} = K_\gamma \cdot D_\gamma \left( 1 + \frac{0.2}{K} \right)$$

実験 D4-23 に対しては  $K$  の値は 1 に等しいとする事ができる：事実

$$D_n = 1.093 \text{ rads}, \quad D_\gamma = 1.046 \text{ rads},$$

これは、5%以下のずれであって確かに測定精度以下である。

$$Q_{\text{SPF10}} = 1.2 K_{\gamma} D_{\gamma}$$

即ち、TPBシンチレータによって記録される総電荷はガンマ線だけに基づく電荷の12倍に等しい。

$$Q_{\text{SPF10}} = 1.2 Q_{\text{SPF10}}^{\gamma}$$

$$Q_{\text{SPF10}}^{\gamma} = 3.00 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$$

これから

$$Q_{\text{SPF10}}^{\text{n}} = Q_{\text{SPF10}} - Q_{\text{SPF10}}^{\gamma}$$

$$Q_{\text{SPF10}}^{\text{n}} = 0.60 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$$

1.4 ー同じ計算を5 mm及び15 mmのTPBシンチレータを備えたプローブを用いて行う事ができる。

ー第一に実験D4-23で記録された電荷は69  $\mu\text{A/L}$ に等しい光電子増倍管の感度により、 $4.26 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$ である。

$$4.26 \cdot 10^{-5} = Q_{\text{c}} + Q_{\text{b}} + Q_{\text{SPF5}}$$

$$4.26 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{71}{69} = 2.49 \cdot 10^{-6} + 2.53 \cdot 10^{-5} + Q_{\text{SPF5}}$$

$$Q_{\text{SPF5}} = 1.60 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$$

$$Q_{\text{SPF5}}^{\gamma} = \frac{1.60 \cdot 10^{-5}}{1.2}$$

$$Q_{\text{SPF5}}^{\gamma} = 1.33 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$$

$$Q_{\text{SPF5}}^{\text{n}} = 0.27 \cdot 10^{-5} \text{ [C]}$$

ー第二に、この同じ実験で7/ $\mu\text{A/L}$ に等しい、光電子増倍管の感度を用いて、記録された電荷は、

$$6.74 \cdot 10^{-5} = Q_{\text{c}} + Q_{\text{b}} + Q_{\text{SPF15}}$$

$$6.74 \cdot 10^{-5} = 2.49 \cdot 10^{-6} + 2.53 \cdot 10^{-5} + Q_{\text{SPF15}}$$

$$Q_{\text{SPF15}} = 3.96 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

$$Q_{\text{SPF15}}^{\gamma} = 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

$$Q_{\text{SPF15}}^{\text{n}} = 0.66 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

## 2° / -プローブの選択

上記の結果を考慮すれば、電荷  $Q_\gamma$  及び  $Q_n$  を計算する事により、ガンマ線及び中性子に対する様々なプローブの応答を比較する事ができる。

$$Q_\gamma = Q_e + Q_{SPF}^\gamma$$

$$Q_n = Q_b + Q_{SPF}^n$$

n°4 プローブ (TPB 5 mm) に対して

$$\begin{aligned} Q_\gamma &= 2.49 \cdot 10^{-6} + 1.33 \cdot 10^{-5} \\ &= 1.58 \cdot 10^{-5} [C] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_n &= 2.53 \cdot 10^{-5} + 0.27 \cdot 10^{-5} \\ &= 2.80 \cdot 10^{-5} [C] \end{aligned}$$

n°5 プローブ (TPB 10 mm) に対して

$$Q_\gamma = 3.25 \cdot 10^{-5} [C]$$

$$Q_n = 3.13 \cdot 10^{-5} [C]$$

n°6 プローブ (TPB 15 mm) に対して

$$Q_\gamma = 3.55 \cdot 10^{-5} [C]$$

$$Q_n = 3.19 \cdot 10^{-5} [C]$$

従って、最もバランスしたプローブは、セル、硼素、SB20シンチレータ及び厚さ10mmのプラスチックシンチレータから成るプローブである。このバランスは極めて満足なものである。何故なら、ガンマ線量による電流及び中性子線量に対し総電流のそれぞれ51%及び49%を示しているからである。

## 3° / -プローブの感度の計算

実験D4-23の時に記録された、ガンマ線及び中性子の線量は1mでの線量である；確かめて見るとプローブの検出部分は、放射線源から92cmの処に在った。実験S4-23の時に、修正係数が測定された。(報告DSN/SEESNC, 75/379参照)

この時、プローブに対する放射線量は：

$$D_\gamma = 1.046 \times 1.23 = 1.286 \text{ rads}$$

$$D_n = 1.093 \times 1.19 = 1.301 \text{ rads}$$

この事は中性子及びガンマ線の放射線量が、これらの実験で等しかった事をなお一層確かにするものである。

感度の計算は次の様に見える：

$$K_\gamma (\text{A/rad} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{3.25 \cdot 10^{-5}}{1.286 \times 3.6 \cdot 10^3} = 0.70 \cdot 10^{-11}$$

$$K_n (\text{A/rad} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{3.13 \cdot 10^{-5}}{1.301 \times 3.6 \cdot 10^3} = 0.67 \cdot 10^{-11}$$

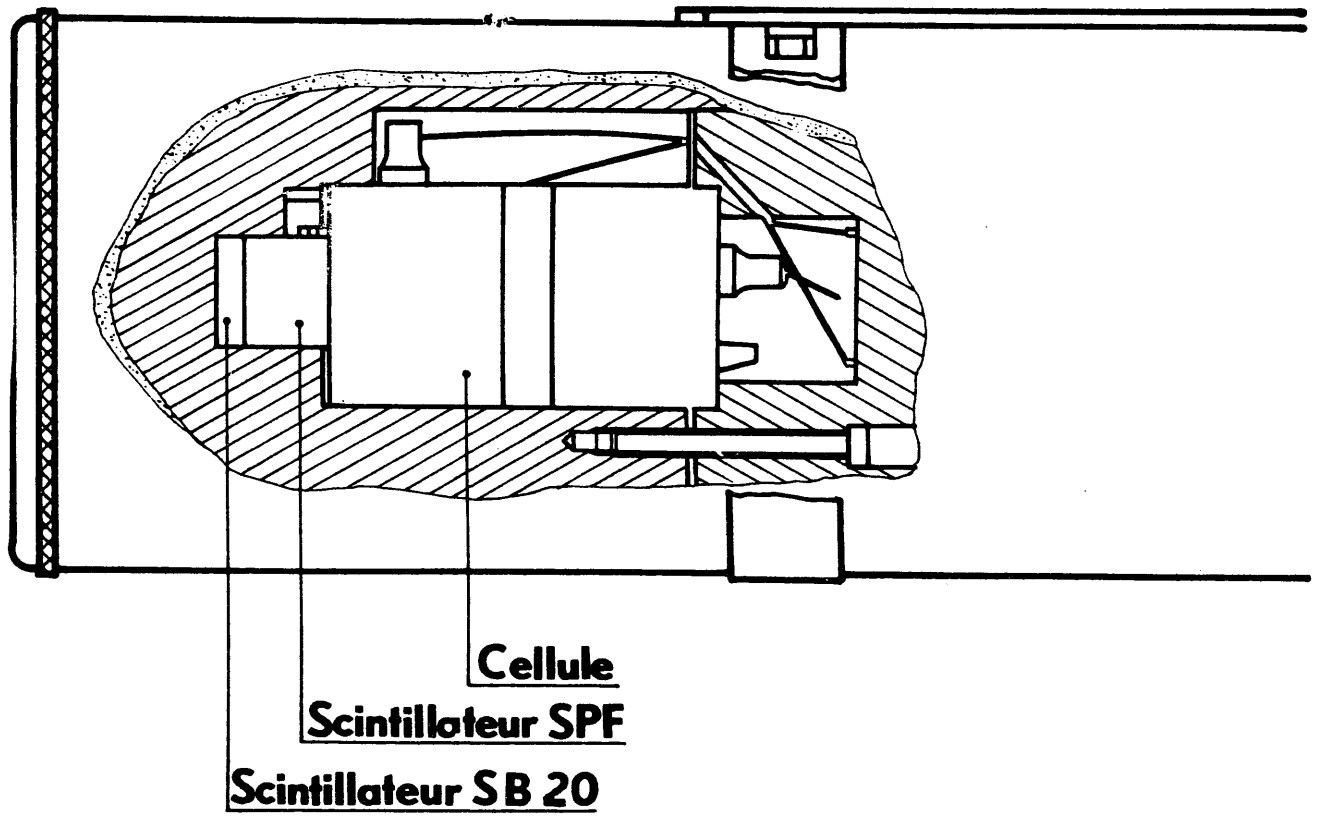


Fig. 12 臨界プローブの構成図