

JAERI-M
5 5 2 3

JAERI 2MV VdGにおけるパルス中性子
(パルス巾 $0.5\mu\text{sec}$ 以上)の発生

1974年1月

月橋芳広, 竹腰英子

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JAERI 2MV VdG におけるパルス中性子 (パルス巾 0.5 μ sec 以上) の発生

日本原子力研究所東海研究所物理部

月橋芳広・竹腰英子

(1973年12月25日受理)

JAERI 2MV VdG に用いられた パルス中性子発生 (パルス巾: 0.5 μ sec 以上) に関する実験装置が記述されている。パルス中性子はパルス陽子あるいは、パルス重陽子ビームにより発生された。"パースト内の主パルスビーム強度"に対する"パースト間の残留ビーム強度"の比は 5×10^{-8} 以下と得られた。詳細な技術的説明と結果が各項目に興えられている。さらに 14.8 MeV パルス中性子による核分裂アイソマ探索が簡単にのべられている。

JAERI-M 5523

Pulse Neutron Generation (Pulse Width over 0.5 μ sec) with
JAERI 2 MV V.d.G.

Yoshihiro TSUKIHASHI and Eiko TAKEKOSHI

Division of Physics, Tokai, JAERI

(Received December 25 1973)

Experimental apparatus for the pulse neutron generation (pulse width over 0.5 μ sec), which has been used with JAERI 2 MV V.d.G., are described. Pulse neutrons were generated from pulse proton or deuteron beams, in which the ratio of any residual beam intensity between bursts to the main beam intensity within a burst was obtained to be below 5×10^{-8} . Detail technical representation and the results are given in each item. In addition, searches for fissioning isomer, with 14.8 MeV pulse neutrons, are briefly mentioned.

目 次

1. まえがき	1
2. パルスビーム発生装置 (パルス巾 $\mu\text{sec} \sim \text{min}$)	1
2.1 JAERI 2MV-VdG のビームパルス化の方法	1
2.2 デフレクタによるビームパルス化	1
2.2.1 イオンビームの静電偏向	1
2.2.2 デフレクターの設置場所	2
2.2.3 デフレクターのパルス印加電圧	3
2.3 高電圧パルスアンプ	3
3. パルスビームと測定系の同期	5
4. パルスビームの性質	6
5. 1.4 MeV パルス中性子の測定	8
5.1 1.4 MeVパルス中性子発生	8
5.2 1.4 MeVパルス中性子の測定系	8
6. 1.4 MeVパルス中性子による核分裂アイソマの探索	10
References	12

1. ま え が き

JAERI 2MV・VdG では、従来主としてDGビームによる実験がなされていたが時間変化に伴う現象に対してはビームパルス化が必要である。この報告ではあまり短時間でないパルス巾、すなわち、パルス巾0.5 μ sec 以上のビームパルス化についてのパルスビーム発生装置の製作、発生パルスビームと測定系の同期、発生パルスビームの性質、パルスビームによる1.4 MeVパルス中性子の測定に関する技術的説明と結果がまとめられている。さらに1.4 MeVパルス中性子を用いた実験の1つとして核分裂アイソマの探索が簡単にのべられている。上記パルスビームはJAERI 2MV・VdGにおいて種々の実験に役立つことが期待される。

2. パルスビーム発生装置 (パルス巾 μ sec ~ min)

2.1 JAERI 2MV・VdG のビームパルス化の方法

一般にDCイオンビームをパルス化するには、あまり短いパルス巾でない限り電場、磁場による偏向、あるいは機械的に遮断板を開閉する方法などが考えられる。これらのうち広い範囲にわたるパルス巾やデューティサイクル、およびパルスの立上り時間などを考慮すると、平行電極板にパルス状の電圧を印加し電界の力によってイオンビームを偏向させる方法が最も適している。必要とするパルスビーム波形の条件をパルス巾 μ sec ~ min の間で可変、デューティサイクルを1/10程度に設定した。

JAERI 2MV・VdG で生成されるイオンビームをパルス化するには、VdGの高圧ターミナル部でイオンソースからイオンをパルス状に引き出しこれに同期させた偏向電極板(デフレクタ)でパルスビームを得る方法(ビーム加速前の方法)、あるいは、加速した後でダクトの途中で偏向する方法が考えられた。検討の結果、高圧ターミナル部でのパルス化の方法は、パルス化回路のスペースの限定や可変操作に対するリモートコントロールの制限などパルス制御に対して不利であり所望するパルスを得るのは困難である。又、回路に故障が生ずるとタンクの開閉など厄介であり、この方法は不適當とされた。そこでビーム加速後に偏向することでパルス化の計画が進められた。

2.2 デフレクタによるビームパルス化

2.2.1 イオンビームの静電偏向

加速された荷電粒子がデフレクタ電極板間を通過中に電界によって受ける力について検討する。Fig.1 に示したように粒子は速さ v [m/s]をもってデフレクタP, Qの間にこれに平行に入ってきたものとする。デフレクタの間隔を d [m]とし、この間に電位差 V [V]を与え

1. ま え が き

JAERI 2MV・VdG では、従来主としてDGビームによる実験がなされていたが時間変化に伴う現象に対してはビームパルス化が必要である。この報告ではあまり短時間でないパルス巾、すなわち、パルス巾0.5 μsec 以上のビームパルス化についてのパルスビーム発生装置の製作、発生パルスビームと測定系の同期、発生パルスビームの性質、パルスビームによる1.4 MeVパルス中性子の測定に関する技術的説明と結果がまとめられている。さらに1.4 MeVパルス中性子を用いた実験の1つとして核分裂アイソマの探索が簡単にのべられている。上記パルスビームはJAERI 2MV・VdGにおいて種々の実験に役立つことが期待される。

2. パルスビーム発生装置 (パルス巾 $\mu\text{sec} \sim \text{min}$)

2.1 JAERI 2MV・VdG のビームパルス化の方法

一般にDCイオンビームをパルス化するには、あまり短いパルス巾でない限り電場、磁場による偏向、あるいは機械的に遮断板を開閉する方法などが考えられる。これらのうち広い範囲にわたるパルス巾やデューティサイクル、およびパルスの立上り時間などを考慮すると、平行電極板にパルス状の電圧を印加し電界の力によってイオンビームを偏向させる方法が最も適している。必要とするパルスビーム波形の条件をパルス巾 $\mu\text{sec} \sim \text{min}$ の間で可変、デューティサイクルを1/10程度に設定した。

JAERI 2MV・VdGで生成されるイオンビームをパルス化するには、VdGの高圧ターミナル部でイオンソースからイオンをパルス状に引き出しこれに同期させた偏向電極板(デフレクタ)でパルスビームを得る方法(ビーム加速前の方法)、あるいは、加速した後でダクトの途中で偏向する方法が考えられた。検討の結果、高圧ターミナル部でのパルス化の方法は、パルス化回路のスペースの限定や可変操作に対するリモートコントロールの制限などパルス制御に対して不利であり所望するパルスを得るのは困難である。又、回路に故障が生ずるとタンクの開閉など厄介であり、この方法は不適當とされた。そこでビーム加速後に偏向することでパルス化の計画が進められた。

2.2 デフレクタによるビームパルス化

2.2.1 イオンビームの静電偏向

加速された荷電粒子がデフレクタ電極板間を通過中に電界によって受ける力について検討する。Fig.1に示したように粒子は速さ v [m/s]をもってデフレクタP, Qの間にこれに平行に入ってきたものとする。デフレクタの間隔を d [m]とし、この間に電位差 V [V]を与え

たとすれば、PQ間は V/d [V/m]の強さの電界になっている。そこで粒子の質量 m [kg]、電荷を e [C]とすると、粒子はPQ間で $e(V/d)$ [N]の力を受け、 $(e/m)(V/d)$ [m/s^2]の加速度をもって放射線を描く。粒子がデフレクタを通過するのに要する時間 t は b/v [s]で、デフレクタの出口におけるずれを p [m]とすれば、 p は(1)式で与えられる。

$$p = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \cdot \left(\frac{b}{v}\right)^2 \quad (1)$$

x方向の速度成分 u [m/s]は(2)式で与えられる。

$$u = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \cdot \frac{b}{v} \quad (2)$$

また、デフレクタの中央からスリット s までの距離を ℓ [m]とすると、粒子がデフレクタを出てからスリットに達するまでの時間は $(\ell - b/2)/v$ [s]であるから、スリット上でのビームのずれ x [m]は(3)式で示される。

$$x = p + u \frac{\ell - \frac{b}{2}}{v} \quad (3)$$

(1)、(2)式を(3)式に代入して(4)が得られる。

$$x = \frac{e}{m} \cdot \frac{1}{v^2} \cdot \frac{V b \ell}{d} \quad (4)$$

例えば、1MVで陽子、重陽子を加速した場合、デフレクタの長さ $b=40$ [cm]、デフレクタの極板間隔 $d=2.2$ [cm]、デフレクタ出口からスリットまでの距離 30 [cm]、印加電圧 2 [KV]とした場合、 $x=8.9$ [mm]となる。ただし、デフレクタの周辺部に生ずる電場のフリッジングの影響、および加速粒子の運動時における質量の変化は無視している。

2.2.2 デフレクタの設置場所

Fig.2にJAERI 2MV-VdGにおけるビームトランスポートの概略を示す。加速されたイオンビームは、 Q_1 レンズ、アナライザマグネット、5方向マグネット、 Q_2 レンズなどを通してターゲットに達している。また、この間には数箇所水平、垂直方向および円形のスリットを挿入して収束性を良くしている。5方向マグネットでは、垂直方向のチャンネルを選びビームのパルス化に対して安定性と損失の軽減をはかっている。

デフレクタの設置場所としては、マグネット室の Q_1 レンズの後が1つの候補である。この箇所は、パルスビームによりパルス中性子発生を行ったときターゲット室における中性子、 γ 線のバックグラウンドが軽減できて都合がよい。しかし、テストの結果ここに設置した場合、ターゲット部分にイオンビームを収束させるのに著しい困難さを伴ない、さらに、パルスモード

によってはアナライザマグネットの後に設置されているVdG 高圧ターミナル部の電位を制御するコロナスタビライザの帰還回路の応答時間との関係に不都合を生じる。このため、この位置は不適当とされ他の箇所について検討された。ターゲット室にデフレクタを設置する場合には、スリットなどに附着した重水素などにより中性子や γ 線の放出が予測される。これらは、ルームバックグラウンドとして実験に悪影響をおよぼすのでデフレクタから遠ざける位置に設置する必要がある。そこで、5方向マグネットの出口附近に挿入し、スリット系の周囲は中性子や γ 線のシールドを行った。この箇所への設置により安定なパルスビームを得ることができた。

パルスビームの性能を良くするために、この位置に近接した場所に更に1台同様の構造をしたデフレクタをQ₂ レンズの後に設置し2連デフレクタとした。前段のデフレクタでイオンビームは偏向されパルス化される。しかし、デフレクタの電極板に平行でないイオンビームがあれば、それらの中のいくらかはスリットから洩れてダクト内を進む可能性がある。後段のデフレクタは、これらを再び偏向し平行でないビームを除去することが出来る。このようにして得られたパルスビームの特性は後で述べる。

2.2.3 デフレクタのパルス印加電圧

Fig.2 で示されたビームトランスポートの概略において、5方向マグネットの後ではビームの大きさが約5 mm ϕ である。2.2.1における計算例では、既存のデフレクタを使用したのものでそのデメンジョンにもとずき陽子、重陽子の加速エネルギー1 MV、偏向電圧2 KVと仮定すると、ビームに直角方向の偏向距離 x はスリット上で8.9 mm となった。スリットの間隔は、デフレクタに偏向電圧が無い時に直線イオンビームのロスを見捨てる程に少なくするために5 mm 以上が望ましく、一方、広くすると偏向距離 x とビームの大きさの関係において偏向時に洩れビームの生じない様にならない。これらを考慮すると、スリット間隔は5 mm に設定するのが最適であり、イオンビームは効率よく偏向され、また直進する。しかし、イオンビームは、主ビームを中心にその周囲に空間的に拡がりをもっているものと推定されるので偏向電圧(2 KV)は高く見積った方が安全である。しかし、必要以上の電圧を印加すると偏向過度を生じてイオンビームがデフレクタ電極板に当り反射することも推察される。デフレクタの電極板間隔を大きくすれば散乱は防げるが、印加電圧を高くする必要が生ずる。偏向用高電圧パルスを作る回路特性、耐電圧、取扱い易さなどを考慮すると、電圧の最大値は5 KV位が適当である。

2.3 高電圧パルスアンプ

デフレクタに印加されるパルス状の高電圧は、高電圧パルスアンプによって作られる。これを駆動するシグナルは第3章で述べられるパルスプログラム回路によって作られるので、ここでは駆動入力(入力パルス巾0.5 μ sec 以上の矩形波、デューティサイクルは約10%)の増幅について説明する。入力パルスを忠実に増幅させ得る高電圧パルスアンプは、パルス巾可変に対して広範囲なこと、デューティサイクルが比較的大きいこと、それにパルス波形のひずみ等に留意しなければならない。印加する電圧の値は、2.2.3で述べられた様に2~5 KVが適当である。

デフレクタのような電圧だけ必要で電力の大きさを必要としない場合のパルス増幅には、ハ

ードチューブをグリッドでパルス巾の制御をし得るようなスイッチ管として用いればよい。出力はアノードから直列式で取れば、グリッド入力の無い時にはアノードに印加する電圧がそのまま出力電圧となる。グリッドに入力がありスイッチがONの時には、出力をゼロVにする必要があるが、簡単な方法として真空管の内部抵抗によって生ずる電圧と等しいDC電圧をデフレクタの高電圧側でない電極に印加して補正すればよい。

以上を設計の基準として製作した高電圧パルスアンプの回路図をFig.3に示す。駆動パルス入力は、スイッチングトランジスタで初段増幅されグリッドの制御を行っている。真空管は、スイッチ用空冷管3F60P（または、4PR60B）を用い、規格よりはるかに小さい電力で使用するのでデューティサイクル10%以上も可能であった。高電圧部は、一次側スイッチおよび出力電圧コントロールを遠隔操作し、アノード電圧は高抵抗を介した電流計をモニターして設定する。アノード抵抗値は、パルス巾の長い場合に対して真空管や高電圧トランスの容量の安全をみて50K Ω としているので、パルス波形の立上り時間はデフレクタと真空管出力電極の静電容量の和が約50PFであるので概算で $2.2RC \sim 5 \mu\text{sec}$ となる。したがって、この回路の使用パルス巾領域としては10 μsec 以上である。

Fig.4は、パルス巾10 μsec にセットした場合の高電圧パルスアンプの入出力波形をオシロスコープ撮影したものであり、出力パルス波形の5 μsec の立上りが観測される。

上記回路においては、パルス波形の立上り時間はアノード負荷抵抗値や初段増幅トランジスタの特性によって決められる。より速い立上りを得るためには、初段増幅部に真空管を用いて初段および高電圧増幅部を並列キーピングによって補償し、更にアノード抵抗値を小さくする。

この方法によって製作された回路で波形の立上り時間は0.2 μsec と得られた。しかし、交流接続回路であるため使用パルス巾領域0.5 $\mu\text{sec} \sim 100 \mu\text{sec}$ 、デューティサイクル約5%と限定される。

3. パルスビームと測定系の同期

2.1で述べたようにデフレクタをターゲット室に設けたため、遠隔操作が容易になり高電圧パルスアンプ特性の許す範囲で所望するパルスビームを作ることができ、しかも、高電圧パルスアンプを駆動するパルスは測定系との同期を容易にした。駆動パルスは、パルスビーム発生や測定系に対して重要でありパルス巾0.5 μsec 以上、繰返しはパルス巾の約10倍で連続して供給する必要がある。

駆動パルスを作る操作の原理を Fig.5 に示す。図中Aはパルスジェネレータからのトリガ入力でこれにナンバ付けを行っている。Bは、駆動パルスの起動信号としてAのナンバ付けられたトリガから1つを抜き出しており、Cも同様にして駆動パルスの停止信号としている。Dが駆動パルスで、BからCの間に短形波パルスを作っている。これで1つの駆動パルスが得られたので、EのトリガパルスでAのナンバをリセットし最初の状態にすると繰り返して駆動パルスが得られる。したがって、Aにおけるトリガ入力の周期が駆動パルス巾となり、駆動パルスの繰返しはBやCのトリガパルスと同様な方法で得るEの周期で与えられる。

Fig.6 に駆動パルスおよび測定系を同期させるトリガパルスを作るパルスプログラム回路のブロックダイアグラムを示す。回路構成と動作の概要について説明すると、回路の配置は右側が駆動パルスおよび測定系同期パルスの発生部、左側はその制御部となっている。左上の INPUT A端子には、パルスジェネレータからの一定周期の基準となるトリガ信号を入力し、スイッチ S_1 によりゲート G_1 を通って10進回路に行く。10進回路は、ICを2個用いたBCD (Binary Coded Decimal) (Ref.1) と10進デコーダを1組としたものを2桁有し、入力信号について0~99のナンバ付けを行っている。ナンバ付けられた信号は、インバータを通しゲート G_2 、 G_3 から次段のフリップフロップに入力することによって設定された G_2 から G_3 のナンバの間に短形波パルスが得られ、電圧クランプ、エミッタホロウ回路を経てDRIVE OUTPUT 端子から駆動パルスとして出力される。 G_4 は、所望の周期に従いナンバ順位を設定し、このナンバの終了後10進回路をリセットすることによって周期的に動作が繰り返されるように働く。また、 G_4 の出力は、繰返し数の計数のためのプレセットスケーラに計数されるよう CYCLE OUTPUT 端子に接続されている。パルスビーム照射実験におけるタイムスペクトルの測定開始は、この駆動パルスのスタートと同期させて照射と同時に測定が始まるようなトリガパルスによって動作される。このトリガパルスは、測定レンジの異なる2台のマルチスケーラモードをもつPHAの条件に合わせて2種類のパルス (RCL START OUTPUT, TMC START OUTPUT) として取り出されている。

制御系は、主にフリップフロップとゲートから構成されている。左上のスタートボタンは、FF1 (フリップフロップ) の出力をOFF、FF2をONし G_5 を通って G_1 をON状態にさせる働きをする。これでINPUT Aにおけるパルスジェネレータからのパルスは、 G_1 を通って10進回路を動作させる。ストップボタンを押すとFF1をONにし G_6 に進み、 G_4 からの1サイクル終了を知らせるリセットパルスと合わせてFF2をOFFし、 G_6 を通って G_1 をOFF

にすることによってストップボタンを任意に押しても1サイクルは完全に遂行される。所望のサイクル数に対しては、例えばモジュールタイプのプレセットスケーラのINPUTにCYCLE OUTPUT, GATE OUTPUTからINPUT Bに接続しプレセット数をセットしておくこと、設定値が完了した時に Q_0 はOFFとなり Q_1 もOFFとする。ただし、この状態はプレセットスケーラからの停止信号であり、クリアボタンを押しFF2をOFFすることによって制御系機能の停止が行われる。 Q_1 の作動状態は、それを制御する Q_0 の出力をインデケータによってランプ標示することにより監視することができる。この回路は、以上の動作を行っており、実際の使用にあたってはパルスジェネレータとプレセットスケーラを合わせて構成される。

4. パルスビームの性質

この章では、ビーム光学的観点からイオンビームの進路について検討を行っている。ビームフォーカス系では、2.2.2のFig.2のように2箇所のQレンズ(Q_1, Q_2)によって収束が行われる。 Q_1 レンズでは加速されたイオンビームを 90° マグネットの出口附近に焦点を合わせるような条件を作っており、 Q_2 レンズではそれまでに広がったビームをターゲット部に収束するよう進路の補正が成される。ダクト内に挿入された数箇所のスリットは、個有の間隙を持っているのでイオンビームはそれに応じた広がりによって限定され収束性のよくない成分は取り除かれる。ターゲット部でのビーム電流は、図中シャッター部のそれに対しておよそ9割が得られている。

このようなビームに対してパルス化が成された。パルスビームを作るためのデフレクタは、図中のAの位置に設置された。デフレクタの電極の1つにはパルス電圧4KV、高電圧側でない電極には高電圧パルスアンプの特性補正のためのDC電圧 $\sim 100V$ を印加した。そこで、ターゲット部に達するパルスビームは印加したパルス電圧の波形通りに動作しているかどうか、あるいは偏向時にビームの洩れが生じていないかについて測定を行った。パルスビームの測定においては、オペレーショナルアンプ(K-302)*1)によって微小電流の測定を行う方法を用いた。このアンプは、対数素子を外付することにより測定レンジの切換え無しで広範囲の電流測定が可能である。しかし、直流増幅用であるため速いパルス電流に対して動作しなくなるのでフィードバックによってパルス波形の改善を計っている。出力は、負極性の電圧出力でパルス巾は3msec以上のものがオシロスコープによって観測された。Fig.7は、パルス巾3msecについてオシロスコープ撮影したものであり、上のベースラインは $10^{-12}A$ でパルス時には $5 \times 10^{-6}A$ を示している。波形の立上りのなまりは、オペレーショナルアンプの動作特性からくるものである。また、対数素子特性の直線性が良くないため縦軸は等間隔になっておらず、ベースライン付近では特に著しくオフセット(ここでは 1×10^{-12} に設定)附近の電流

*1) KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. エレクトロメータ オペレーショナルアンプ
カタログ特性: 入力抵抗 $10^{12}\Omega$, オフセット電流 $10^{-14}A$, 開放利得 12,000

にすることによってストップボタンを任意に押しても1サイクルは完全に遂行される。所望のサイクル数に対しては、例えばモジュールタイプのプレセットスケーラのINPUTにCYCLE OUTPUT, GATE OUTPUTからINPUT Bに接続しプレセット数をセットしておくこと、設定値が完了した時に Q_6 はOFFとなり Q_7 もOFFとする。ただし、この状態はプレセットスケーラからの停止信号であり、クリアーボタンを押しFF2をOFFすることによって制御系機能の停止が行われる。 Q_7 の作動状態は、それを制御する Q_6 の出力をインデケータによってランプ標示することにより監視することができる。この回路は、以上の動作を行っており、実際の使用にあたってはパルスジェネレータとプレセットスケーラを合わせて構成される。

4. パルスビームの性質

この章では、ビーム光学的観点からイオンビームの進路について検討を行っている。ビームフォーカス系では、2.2.2のFig.2のように2箇所のQレンズ(Q_1, Q_2)によって収束が行われる。 Q_1 レンズでは加速されたイオンビームを 90° マグネットの出口附近に焦点を合わせるような条件を作っており、 Q_2 レンズではそれまでに広がったビームをターゲット部に収束するよう進路の補正が成される。ダクト内に挿入された数箇所のスリットは、個有的間隙を持っているのでイオンビームはそれに応じた広がりによって限定され収束性のよくない成分は取り除かれる。ターゲット部でのビーム電流は、図中シャッター部のそれに対しておよそ9割が得られている。

このようなビームに対してパルス化が成された。パルスビームを作るためのデフレクタは、図中のAの位置に設置された。デフレクタの電極の1つにはパルス電圧4KV、高電圧側でない電極には高電圧パルスアンプの特性補正のためのDC電圧 $\sim 100V$ を印加した。そこで、ターゲット部に達するパルスビームは印加したパルス電圧の波形通りに動作しているかどうか、あるいは偏向時にビームの洩れが生じていないかについて測定を行った。パルスビームの測定においては、オペレーショナルアンプ(K-302)*1)によって微小電流の測定を行う方法を用いた。このアンプは、対数素子を外付することにより測定レンジの切換え無しで広範囲の電流測定が可能である。しかし、直流増幅用であるため速いパルス電流に対して動作しなくなるのでフィードバックによってパルス波形の改善を計っている。出力は、負極性の電圧出力でパルス巾は3msec以上のものがオシロスコープによって観測された。Fig.7は、パルス巾3msecについてオシロスコープ撮影したものであり、上のベースラインは $10^{-12}A$ でパルス時には $5 \times 10^{-6}A$ を示している。波形の立上りのなまりは、オペレーショナルアンプの動作特性からくるものである。また、対数素子特性の直線性が良くないため縦軸は等間隔になっておらず、ベースライン附近では特に著しくオフセット(ここでは 1×10^{-12} に設定)附近の電流

*1) KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. エレクトロメータ オペレーショナルアンプ
カタログ特性: 入力抵抗 $10^{12}\Omega$, オフセット電流 $10^{-14}A$, 開放利得 12,000

測定は困難である。

その後、洩れビームに対する性能向上のための同様の形状のデフレクタを Fig. 2 B の位置に追加し、2重偏向を行った。そこで特に洩れビームに着目し、2連のデフレクタに同電圧を印加してターゲット部のビーム電流の測定を行った。測定には、原研型モジュール $162 \mu\text{A}$ メータ (Ref. 2) を使用し、ターゲット部の浮遊容量の除去と絶縁に注意がはらわれ測定限度を $1 \times 10^{-18} \text{A}$ とした。Fig. 8 は、デフレクタの印加電圧に対するターゲット部のビーム電流値の測定結果をグラフに示している。この時の VdG 運転条件は、重陽子を 1.1MV で加速し、ビーム電流はターゲット部で $10 \mu\text{A}$ に設定して行っている。図は、デフレクタの印加電圧 2.2KV を境界に急変し、それ以上の偏向電圧の必要を示しており、更に電圧上昇すると飽和の徴候がみられる。印加電圧 4KV において $5 \times 10^{-18} \text{A}$ であるので、印加電圧 0V のストレートビーム (10^{-5}A) に対するビーム電流比は 5×10^{-8} と得られる。2連のデフレクタで偏向してもターゲット部で電流が観測されるのは、スリットの尖耐やダクトで散乱し進路変化の生じたビーム等のうちの一部にスリットで除去しきれないものがあると推定される。

5. 14 MeVパルス中性子の測定

5.1 パルス中性子発生

14 MeVパルス中性子発生のためには2, 3章までに述べたパルスビーム発生装置とD-T中性子発生用ターゲットが必要である。 ^3T ターゲットとしては、大電流に強いメタルターゲットが用いられた。300 KeV以上の入射エネルギーをもつ重水素ビームに対してはIAEA製アルミニウム・コーティングの保護膜付のものが照射中のトリチウムの飛散やスパッタリングのチタニウム層の破損を防ぐ上で好ましい。IAEA製品ナンバとしては、トリチウム吸着量のもっとも多い20TB*2)が用いられた。トリチウムターゲットのバックキングの電気銅台板(厚さ0.3 mm)は、ターゲット支持部により熱伝導状態を保つように取付けられ、ターゲットの外部は強制空冷法で冷却された。

パルスビームの動作状態は4章で述べたが、一連のデフレクタ装着の場合は「ビームバースト」に対する「バースト間の洩れビーム」の比は 2×10^{-7} であり、2連のデフレクタ装着の場合にはこの比が 5×10^{-8} となった。このようなパルスビームを用いて14 MeVパルス中性子を発生させ、中性子検出器としては低速中性子に対して感度の非常に低いフィッションチェンバが用いられ、パルス中性子の動作状態が検討された。これらの測定は6章で述べる「核分裂アイソマ探索の研究」の一連の仕事と関連して行われた。

5.2 14 MeVパルス中性子の測定系

Fig.9 にパルス中性子測定回路系のブロックダイアグラムを示す。上半分には測定系、下半分にはビームパルス化回路およびターゲットでのビーム電流測定系がまとめて示されている。

中性子検出器としては、高速中性子に対して核分裂のしきい値をもつフィッションチェンバ(例えば ^{235}U フィッションチェンバ)が用いられている。測定系ではフィッションチェンバの中性子照射により生成されたフィッションパルスがブリアンプ、リニャアンプにより増幅された後、波形弁別系に導かれている。波形弁別系ではフィッションパルスを α 粒子、 α 粒子のパルスから弁別しうるライズタイムハイト変換回路が主回路であり、一方 α 粒子パルス、低ノイズパルスを除去するためにシングルチャネルアナライザが補助回路として用いられている。2回路に分けられたパルスは相互の時間合せをタイミングシングルチャネルアナライザで行った後、スローコインシデンス回路に導かれている。この同時計数出力はタイムスペクトル測定用シグナルとしてパルスハイトアナライザのマルチスケラモードに入力されている。

パルスハイトアナライザのマルチスケラモードにおけるタイムスペクトル測定開始は、パルスイオンビームによって生ずるパルス中性子発生と同期する必要がある。このためにはFig.9

*2) Isotope loading

Tritium concentration : 200/in³, Titanium layer thickness: 24mg/in²

下部に示されているパルスオペレーションモードからのシグナルは高電圧パルスアンプへ、また、パルスオペレーションモードと同期しているカウンティングタイムセッティングモードからのパルスはパルスハイトアナライザのマルチスケラへのゲートとして用いられ、検出器からの入力はこのゲートパルスによってパルス中性子の発生と同期するようになっている。パルスハイトアナライザのマルチスケラにおける測定時間は、パルスビーム周期よりも短いこと、すなわち、パルスビーム周期を T 、パルスハイトアナライザマルチスケラのチャンネル当りの時間を t 、マルチスケラの全チャンネル数を N とすると $T > t \cdot N$ の条件が必要となる。 t のレンジセットが或程度限定されているので、 T をパルスプログラム回路で調整して条件に合わせる必要がある。例えば、ビームバーストの長さ $60 \mu\text{sec}$ で照射する場合には $t = 2 \mu\text{sec}/\text{channel}$ のレンジセットを使用すると $N = 256$ に対しては、測定時間は $2 \mu\text{sec}/\text{channel} \times 256 = 512 \mu\text{sec}$ となる (マルチスケラのモードによっては t に対してメモリやチャンネル移動に必要な時間を附加することが必要な場合もある)。パルスオペレーションモードにおける駆動パルス巾を $60 \mu\text{sec}$ とすると $T > t \cdot N (= 512 \mu\text{sec})$ の条件を充すためにはプログラム回路のデューティサイクル n を 9 以上にとればよい。Fig. 10 には駆動パルス、デフレクタ電圧、ビーム電流、フィッシュンシグナル、パルスハイトアナライザマルチスケラのスタートパルスおよびゲートパルスの同期関係が示されている。Table 1 には、ビームバースト巾が $60 \mu\text{sec} \sim 10 \text{sec}$ で可変しうるようにパルスハイトアナライザマルチスケラモード 3 種類を使用した場合の各パルスオペレーションモードが例として示されている。

6. 14 MeVパルス中性子による核分裂アイソマの探索

核分裂アイソマは現在ウラニウム (原子番号92) からバークレニウム (原子番号97) までの核種で中性子数が146~148に近い領域にかたまつて発見されている。これらの核分裂アイソマは原子核の変形パラメータの関数としてのポテンシャルエネルギーカーブの第2の極小値における状態として説明された (Ref. 3)。このポテンシャルカーブはダブルハンブパリアと呼ばれ Fig. 11 に示されるように2つの極小値と第1パリア, 第2パリアから構成され, 第1の極小値は基底状態に対し第1, 第2パリアの中間に存在する第2極小値に特徴付けられる状態は核分裂アイソマ (又はシェイプ・アイソマ) である。

核分裂アイソマに関する1971年現在までのレビューは Ref. 4 にまとめられている。その後の実験データも附加して現在までに核分裂アイソマが同定されている核種は Table 2 に示されている。Table 2 において, 質量数が奇数のウラニウム核種および最近観測が成功した²³⁷Np (Ref. 9)を除くネプチニウムに対する核分裂アイソマの探索は種々の荷電粒子による原子核反応を用いて試みられたが, それぞれの実験の場合の測定精度内では観測出来なかった。5章までに述べた14 MeVパルス中性子, パースト巾60 μsec ~ 10 sec, デウティサイクル約10%を用いて²³⁸U, ²³⁷Np に対する (n, 2n) 核反応で生成されるであろう²³⁷U, ²³⁶Np についての核分裂アイソマ探索がなされた (Ref. 5, 6)。測定サンプルおよび検出器としては, ²³⁸U, ²³⁷Np のフィッシュンチェンバが用いられた。サンプルの厚さおよび面積は, ²³⁸U (²³⁵Uに対して0.044%に劣化されたもの) に対しては1mg·cm⁻² 144 cm², ²³⁷Np に対しては300 μg·cm⁻² 165 cm² である。5章の Table 1 に示されるようなパルスオペレーションモードを用いて即発核分裂数に対する遅発核分裂数がタイムスペクトル測定から得られ, ビームパーストの時間に等しい半減期をもつ核分裂アイソマが存在すると仮定してR = (遅発核分裂断面積/即発核分裂断面積) の比が求められた。各パルスオペレーションモードに対するRは, パルスオペレーションモードの時間の関数として Fig. 12 に示されている。Fig. 12 において, もしどれかのパルスオペレーションモードのパースト巾に対応する又は近い半減期をもつ核分裂アイソマが明らかに存在するということを言うためには, このモードを中心としてその前後のモードのRが形成するバンプが明らかに観測されなければならない。しかし, 各パルスオペレーションモードに対応するRの値は60 μsec ~ 10 secのパースト巾の中で統計誤差内で一定である。また, 各パルスオペレーションモード内で遅発核分裂に対するタイムスペクトル観測でも明らかな崩壊カーブを見出すことが出来なかった。この2つのことを合わせて考慮すると, もし研究された時間内に半減期をもつ核分裂アイソマが存在すると仮定すると²³⁷Uおよび²³⁶Npに対するRの値は, 各パルスオペレーションモードのRの統計誤差内であると言えよう。即ち2種の核分裂アイソマに対するRの上限値は約1×10⁻⁶であろう。

荷電粒子による核反応を用いた測定では, ²³⁷U核分裂アイソマ探索が (d, p) 反応を用いて試みられ核分裂アイソマの半減期が10 nsec ~ 2 μsec と仮定するとRの値は4×10⁻⁷

以下であり (Ref.7) , また, ^{236}Np 核分裂アイソマ探索が (d, xn) 反応を用いて試みられ核分裂アイソマの半減期が $1\text{ m}\cdot\text{sec}$ 以下と仮定すると R の値は 10^{-8} 以下 (Ref.8) と報じられている。 14 MeV 中性子による我々の R の値をこれらの場合の R の値と比較すると 1 オーダもしくは 2 オーダ大きい。我々の実験においては, 4 章に述べたようにパルスビームに於ける (バースト内のビーム強度) に対する (バースト間の残留ビームの強度) の比は, 2 連のデフレクタ使用の場合には 5×10^{-8} であった。この値から算定される R の値は約 5×10^{-7} であり, パルス中性子発生によってこの R の値が約 4 倍大きくになっている。DCビームによる 1 hr 照射に対する R の値は ^{237}U に対しては 4×10^{-7} , ^{236}Np に対しては 2×10^{-8} であった。これらのことからパルス中性子発生時には, ビームダクトに吸着された重水素やトリチウムなどがストレイビームに照射されて或レベルの中性子バックグラウンドを発生し測定精度を約 4 倍悪くしていると考えられる。それ故バックグラウンドを考慮すると真の R の上限値は 10^{-7} のオーダーになるものと推定される。

荷電粒子核反応による短半減期領域, $(n, 2n)$ 核反応による比較的長半減期領域における核分裂アイソマに対する R の値の上限値を総合すると ^{237}U , ^{236}Np などにおける核分裂アイソマ状態は, その大部分の崩壊モードが第 1 バリヤを浸透し, 基底状態の第 1 極小値領域における状態に移り, その後第 1 極小値領域内で γ 崩壊をして基底状態に落付くものと考えられ, 第 2 バリヤを浸透して遅延核分裂で崩壊する確率は γ 崩壊のそれに比べかなり小さいものと推測される。最近発見された ^{237}Np 核分裂アイソマ (半減期 $40 \pm 12\text{ ns}$) に対しては R の値は $10^{-9} \sim 10^{-8}$ が得られ (Ref.9), この R の値は既知の核分裂アイソマに対する R 値, すなわち約 1×10^{-6} 以上に比較すると非常に小さい。このことは, ^{237}Np 核分裂アイソマからの崩壊のうち γ 崩壊が遅延核分裂に強く競争していることを意味するのであろう。これらの γ 崩壊測定は, 即発核分裂による生成核からの遅延 γ 線との区別など測定上非常に困難を伴うが, 今後これらの γ 崩壊を測定可能にするよう計画を進めるべきであらう。

偶々核の核分裂アイソマ ^{238}U から第 1 極小値の基底状態回転バンドメンバの 2^+ (45 KeV) へ, また, オクタポールの最底の状態の $\bar{1}$ に行くと同定されるのであろう γ 線の測定が成功し (Ref. 10), この結果は IAEA 第 3 回核分裂に関する物理と化学の国際会議で報告されたことを追加しておく。

References

1. 金原節朗：JAERI-memo 2756, ICに関する実験報告3 (1967)
2. 土屋俊男：JAERI-memo 4281, 原研型モジュールシステム6 (1971)
3. V.M.Strutinsky : Nucl.Phys.A 95 420 (1967), Nucl.phys.A 122-1 (1968)
4. 竹腰英子：JAERI-Report 1221 (1972) 71
5. E.Takekoshi : J.Phys.Soc.JAPAN 30 (1971) 284
6. E.Takekoshi and Y.Tsukihashi : J.Phys.Soc.JAPAN 35 (1973) 936
7. N.L.Lark et al : Nucl.Phys.A 139 (1960) 481
8. S.M. Polikanov and G.Sletten : Nucl.Phys.A 151 (1970) 656
9. K.L. Wolf and J.P. Unik : Phys.Lett. 43 B (1973) 25
10. P.A. Russo et al : IAEA-SM-174/96 (1973)

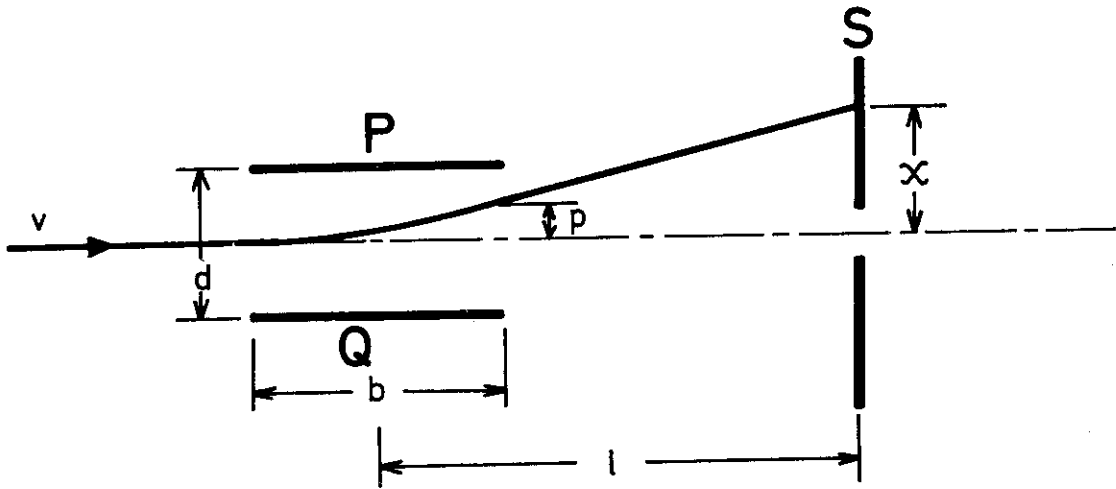


Fig. 1 イオンビームの静電偏向

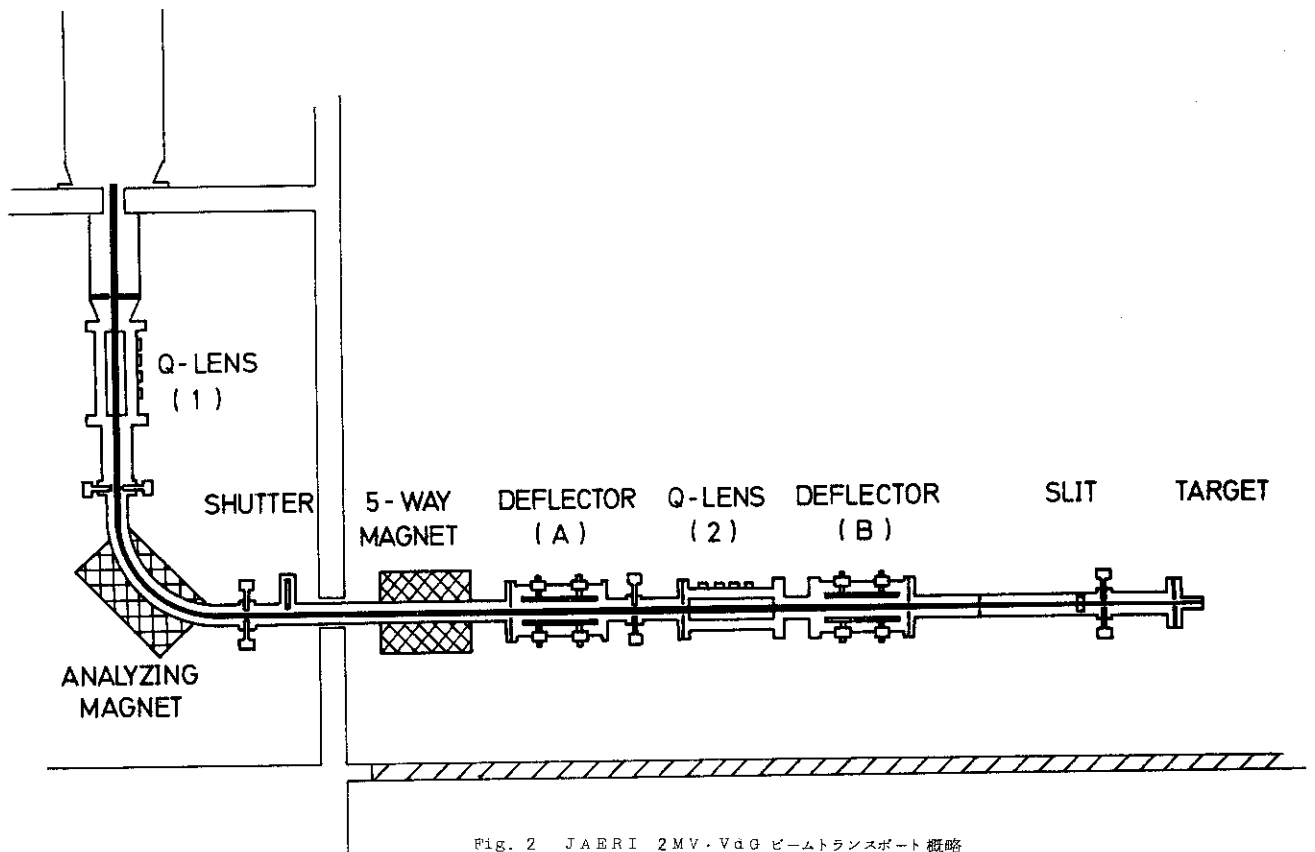


Fig. 2 JAERI 2MV-VdG ビームトランスポート 概略

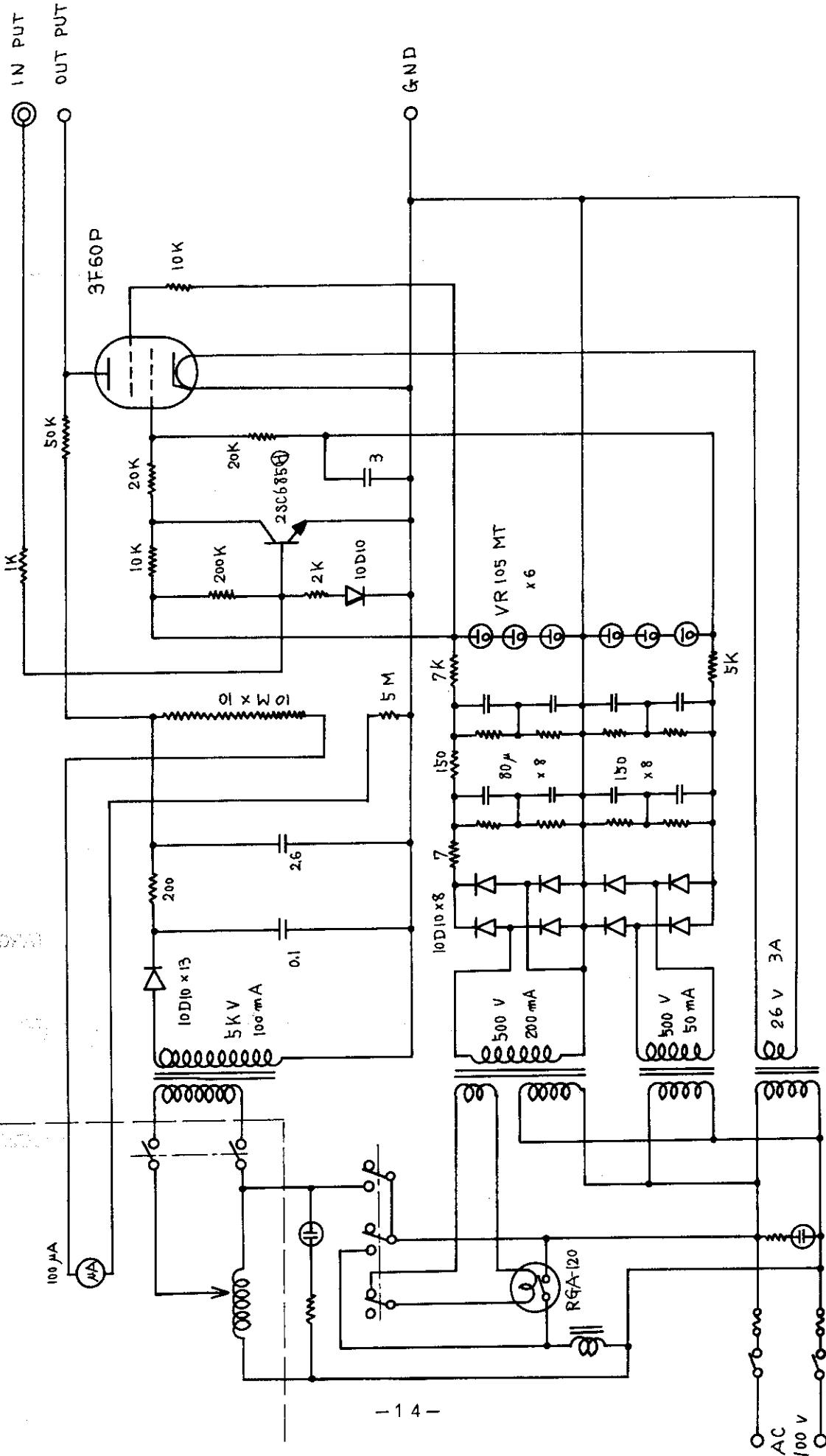


Fig. 3 高電圧パルスアンプ回路図

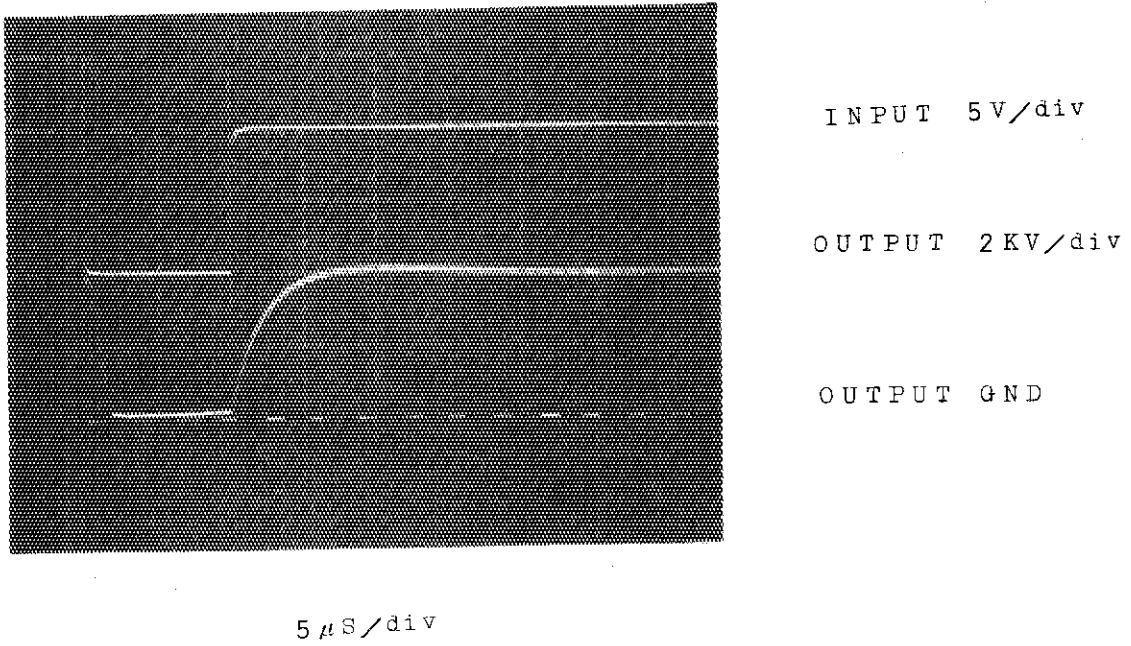


Fig. 4 高電圧パルスアンプの入出力波形

(INPUTはパルスプログラム出力)

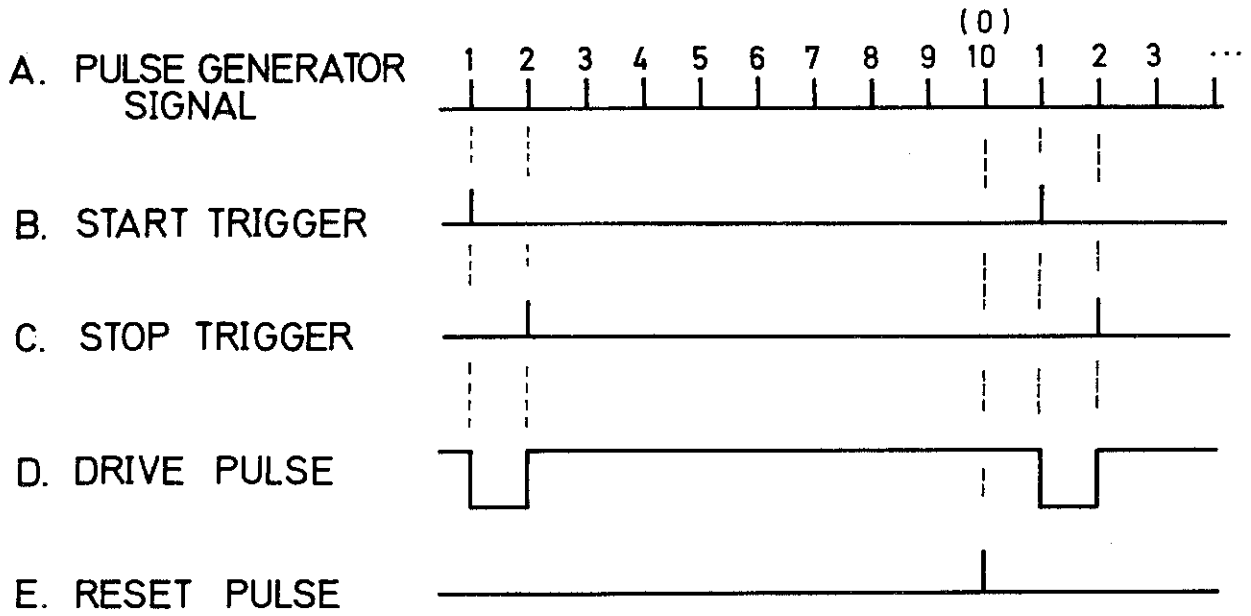


Fig. 5 駆動パルスの原理

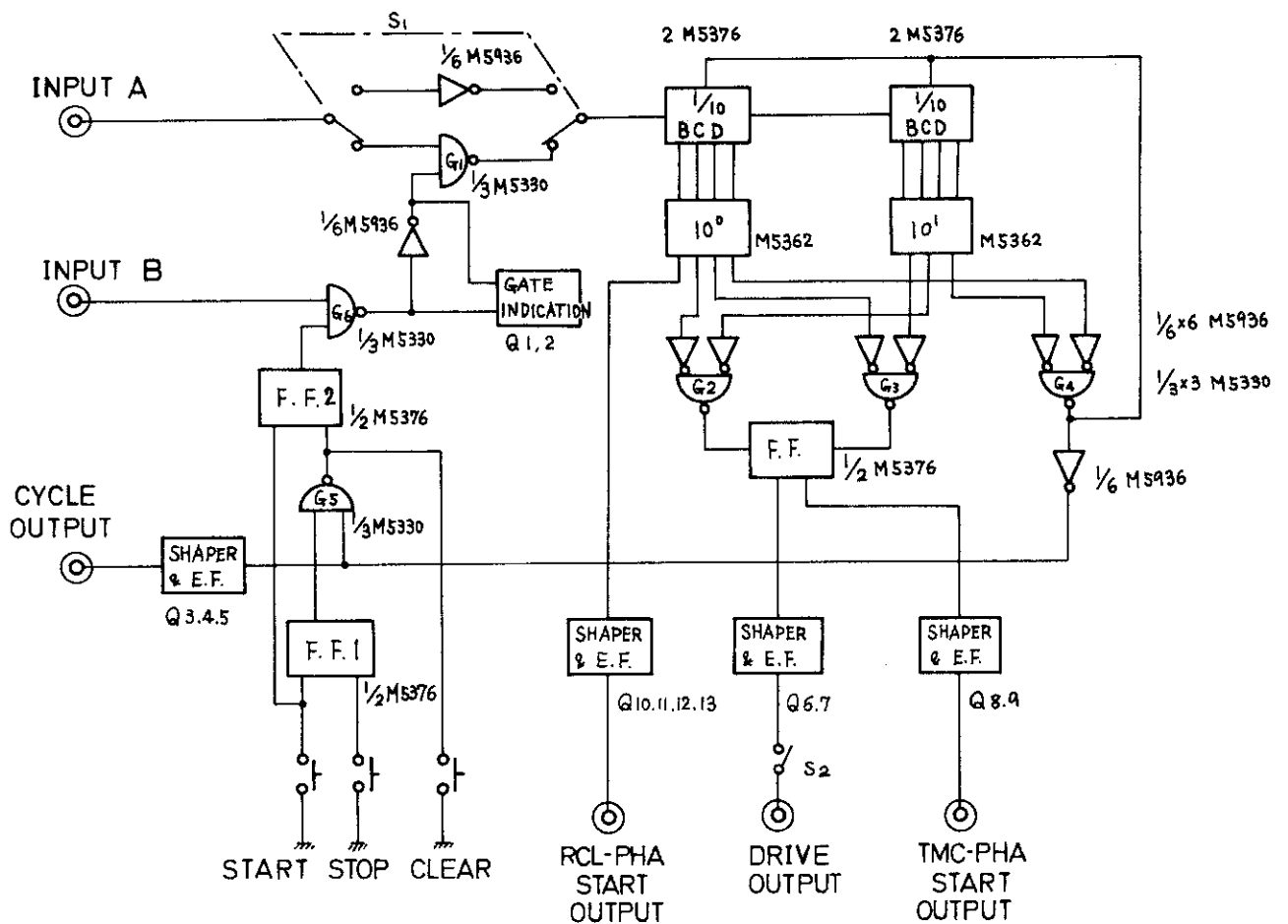


Fig. 6 パルスプログラム回路のブロックダイアグラム

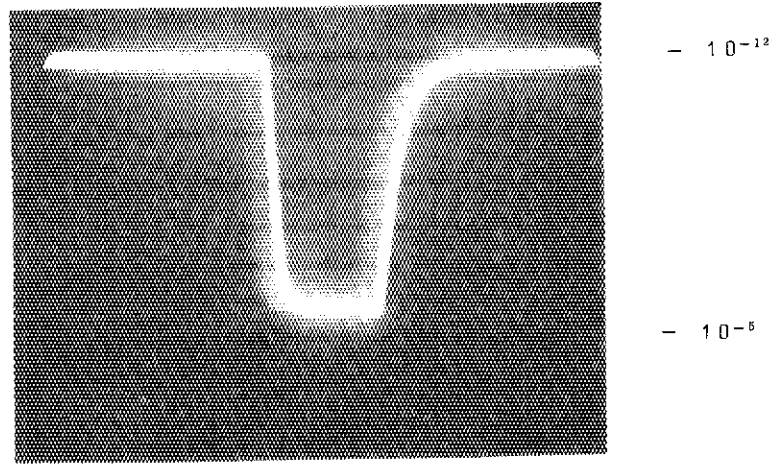


Fig. 7 パルスイオンビーム電流のオシロスコープ観測 (パルス巾 3ms)

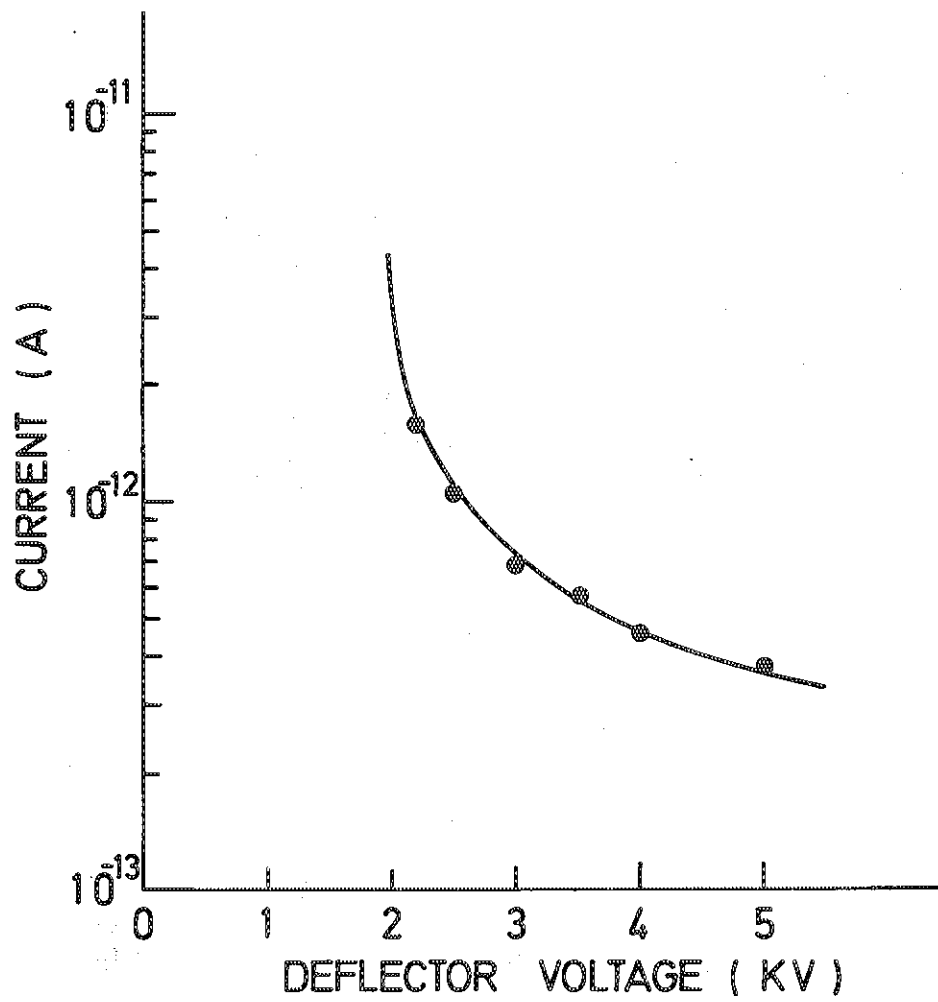


Fig. 8 2連デフレクタ-におけるターゲット部での洩れビーム電流 (デフレクタ電圧ゼロVの時 1.0×10^{-5} A)

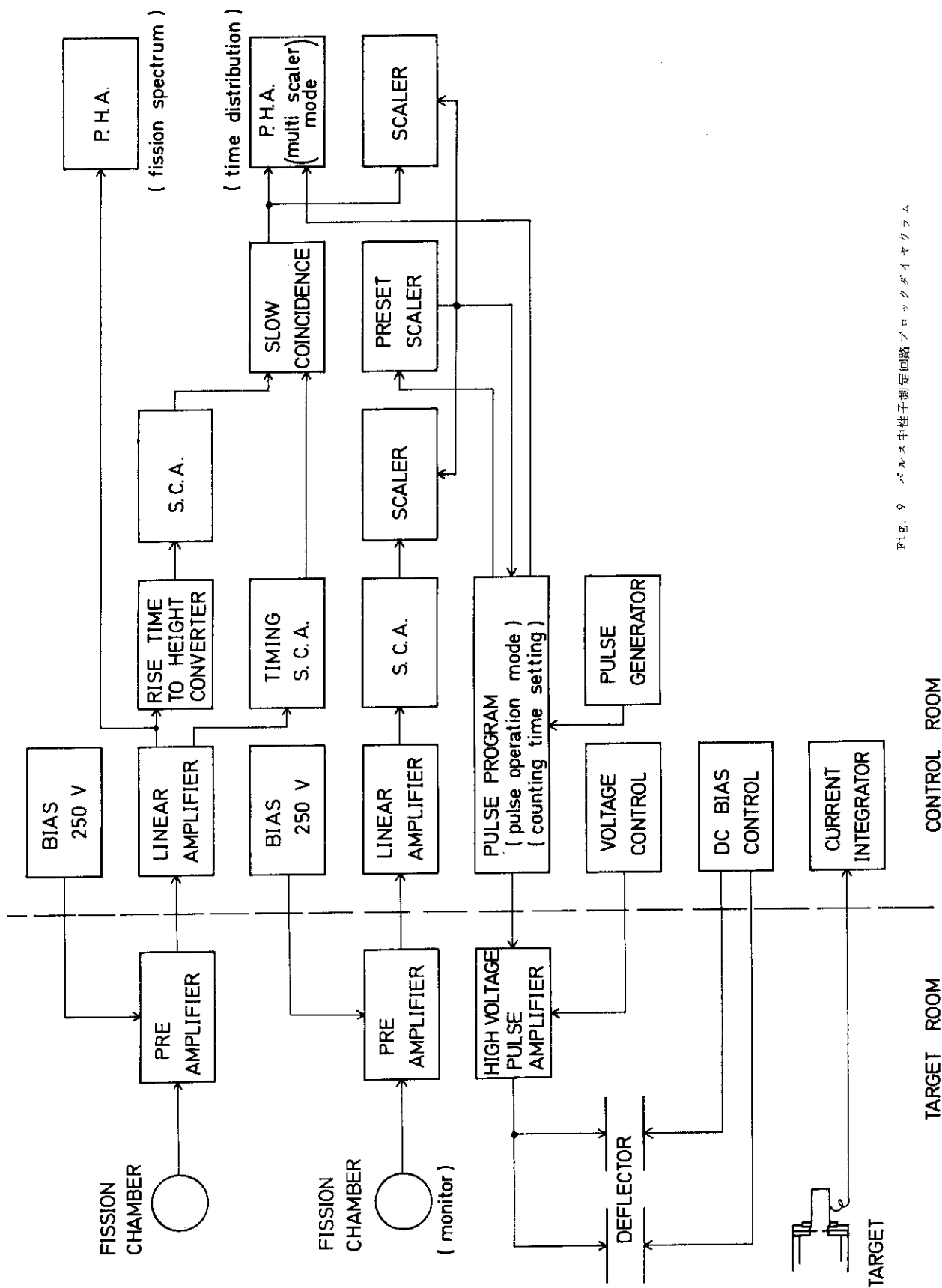


Fig. 9 パルス中性子測定回路ブロックダイヤグラム

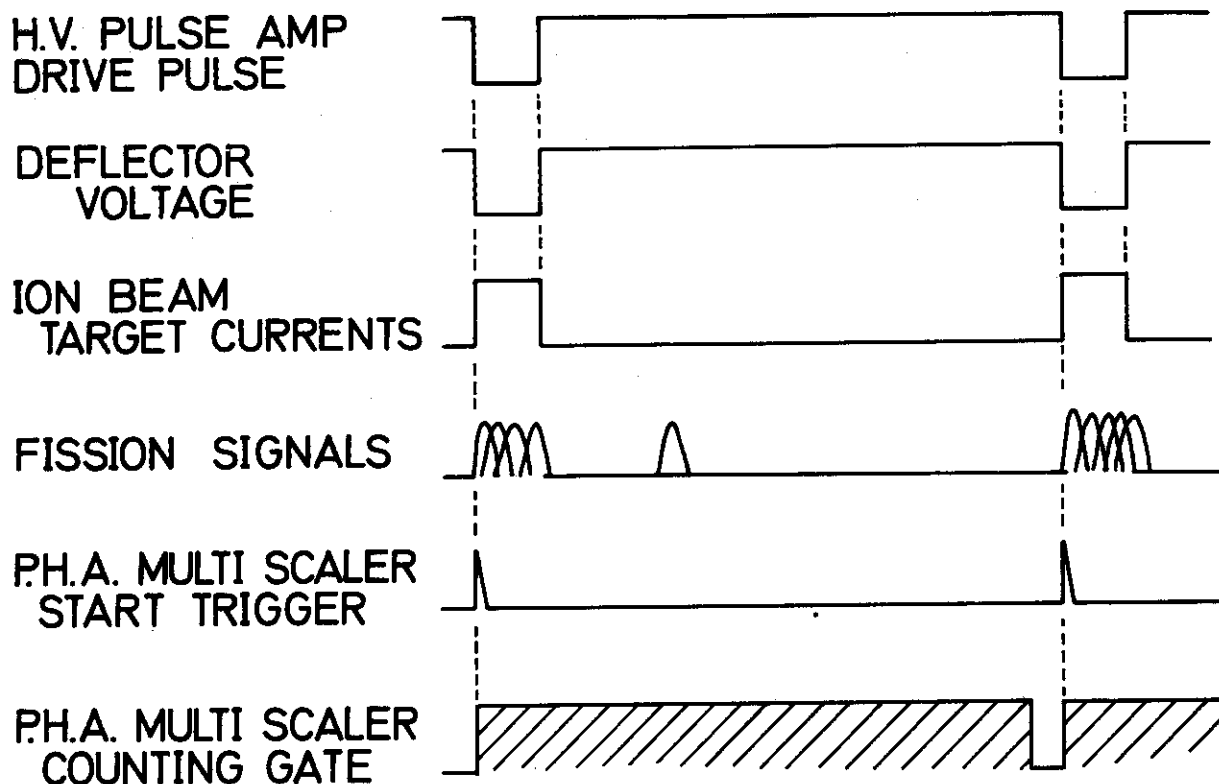


Fig. 10 パルスビームと測定系の同期

Pulse operation mode		
T prompt *	T delayed **	Pulse duty
60 us	440 us	1 / 9
300 us	3.07 ms	1 / 14
3 ms	19.8 ms	1 / 8
20 ms	164 ms	1 / 9
120 ms	542 ms	1 / 6
1 s	6.30 s	1 / 10
10 s	63.0 s	1 / 10

* Pulse duration

** Time interval for measurement after beam pulse

Table 1 パルスオペレーションモード

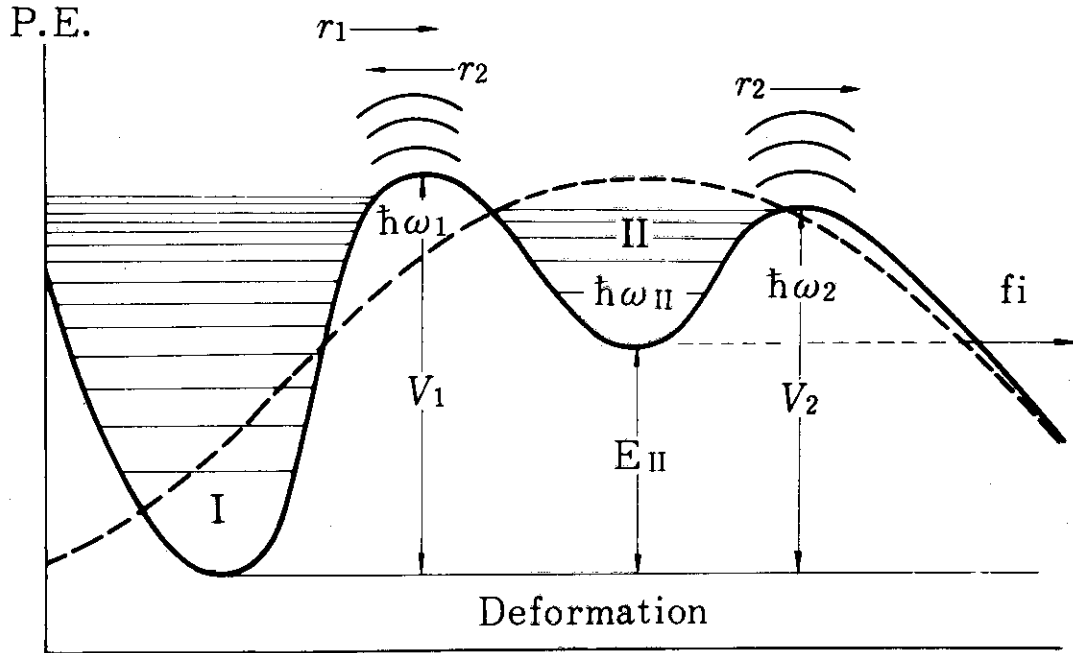


Fig. 11 2山核分裂バリヤ(実線). 横軸は原子核の変形, 縦軸は原子核ポテンシャルエネルギーを示す. I, IIは第1, 第2バリヤの高さ, $\hbar\omega_1, \hbar\omega_2$ は第1, 第2バリヤの中, E_{II} は第2極小値の励起エネルギー, $\hbar\omega_{II}$ は第2極小値のカーベチャーである. f_i は核分裂アイソマ崩壊を示す. 点線は液滴モデルによる核分裂バリヤを意味する.

Proton Number (Z)	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
92				234U ?	235U ?	236U 105ns	237U ?	238U 195ns	239U ?				
93	232Np ?	233Np ?	234Np ?	235Np ?	236Np ?	237Np 40ns	238Np ?	239Np ?					
94			235Pu 20ns	236Pu 40ps 34ns	237Pu 82ns 1.1μs	238Pu 0.5ns 5ns	239Pu 8μs	240Pu 4ns	241Pu 30ns 27μs	242Pu 3.5ns 30ns	243Pu 60ns	244Pu 400ps	245Pu ~80ns
95				237Am 5ns	238Am 66 s	239Am 120ns	240Am 0.9ms	241Am 1.5μs	242Am 14ms	243Am 6.5μs	244Am 1.1ms	245Am ~800ns	246Am ~20μs
96							241Cm 20ns	242Cm 180ns	243Cm 80ns	244Cm 500ns	245Cm 12ns		
97							242Bk ~10ns ~900ns	243Bk ?	244Bk 100ns	245Bk 2ns			

Neutron Number (N)

Table 2 既知の核分裂アインマンの半減期
 ?印のついたものは核分裂アインマンがまだ同定されていないものを示す。
 データは, Metag et al: Nucl. phys. A165, 289 (1971),
 Vanden bosh IAEA/SM-174/203 (1973), Metag et al:
 IAEA/SM-174/26 (1973) よりまとめられている。

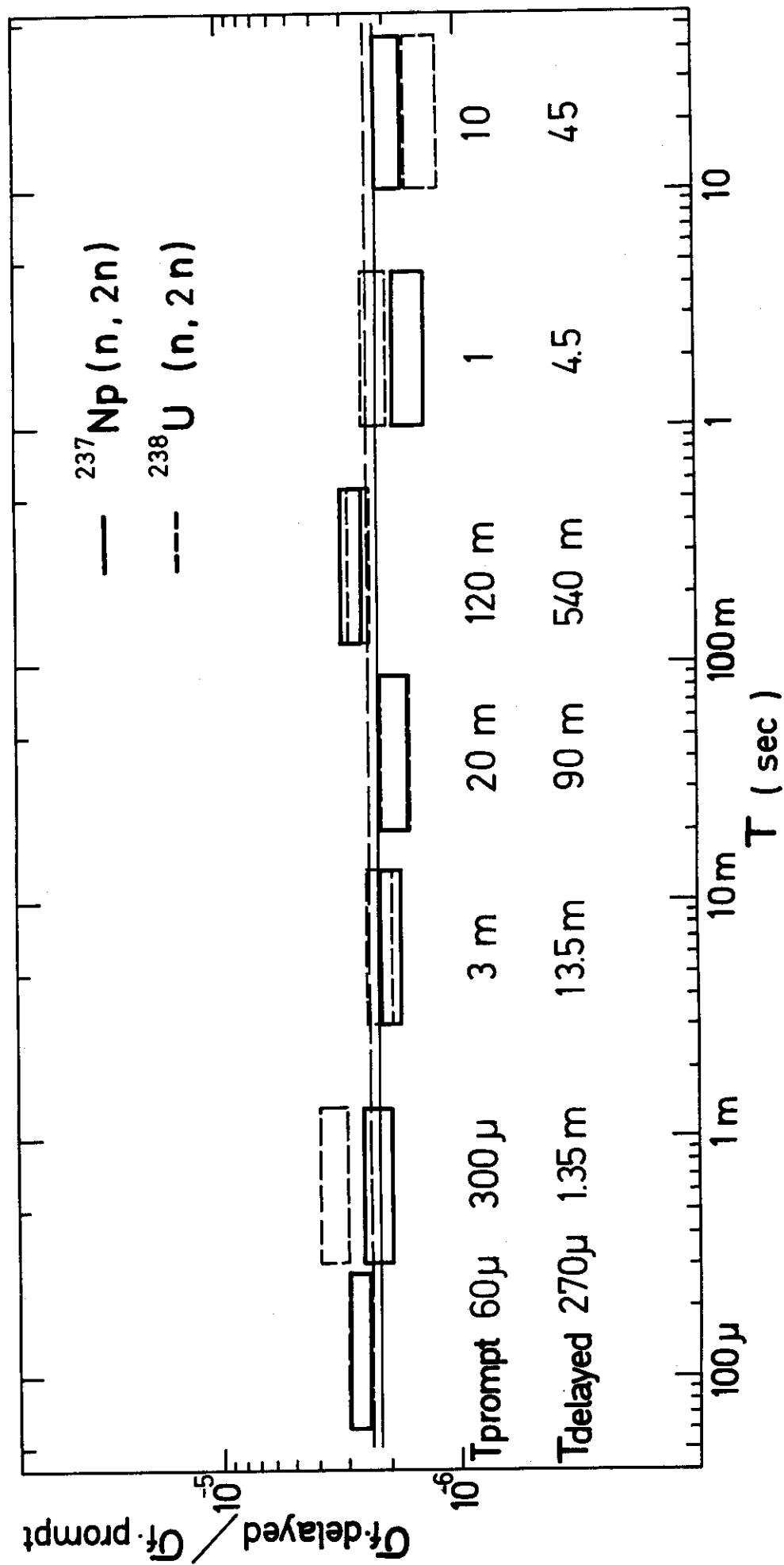


図 12 各バカスオベレーションモードで行ける σ_f 、delayed/ σ_f 、prompt