

## ピコ秒単パルスの測定

東大・工 田畑米穂・田中治郎・田川精一・勝村庸介・上田徹・長谷川賢一

### I. ピコ秒電子単パルスの測定の重要性

放射線化学、放射線生物、放射線物理の分野では、放射線効果が直接的に測定できる手法であるパルスラツオリツス法の必要性は年々大きくなってきている。パルスラツオリツス法の時間分解能をマイクロ( $10^{-6}$ )秒からナノ( $10^{-9}$ )秒をへてピコ( $10^{-12}$ )秒の時間領域にはいつてきている。ピコ秒パルスラツオリツスの研究はトロント大学の Hunt らによってピコ秒のストロボ・スコピック法と呼ばれる巧妙な手法を用いて、ピコ秒の時間応答性を持つ測定系を用いずに始められ、アルゴンの国立研究所でピコ秒単パルスを用いたピコ秒のストロボ方式のパルスラツオリツス装置に改良されて現在も稼働している。今回我々はピコ秒単パルスとピコ秒の応答性のある測定系を組合せることによりピコ秒単パルスを用いたパルスラツオリツスの装置を建設し、ピコ秒の時間領域の放射線化学の研究を開始した。ピコ秒パルスラツオリツスの装置の建設の必須条件であるピコ秒単パルスの測定に關して以下に述べる。

### II. ピコ秒単パルスの測定系

ピコ秒単パルスを用いたパルスラツオリツスの装置の建設に必要なピコ秒単パルスの条件は次のようなものである。

- (1) 主パルスのみで副パルスを伴わない単パルスであること。副パルスが存在しても副パルスと主パルスとの比が十分に小さいこと。
- (2) パルス幅が短いこと。
- (3) 単パルスで十分に観測可能な濃度の反応中間体をつくり出せる強度があること。すなわちピコ秒単パルスに含まれるクーロン数が大きく、ビーム径は小さいこと。
- (4) ビームの安定性が良いこと。

このようなピコ秒単パルスの発生と利用を行なうためにピコ秒単パルスの測定系を製作してきたがその必要性を大別すると次のようなものである。

1. 最終的に使用するピコ秒単パルスの特性を正確に測定する。項目としては

(a) 主パルスと副パルスの比率。単パルスであることの確認

(b) パルス幅の測定

(c) 単パルスの強度。すなわち単パルス照射の線量。単パルスに含まれるクーロン数とビームスポットの面積から求められる。

(d) 単パルスの強度の安定性

2. 上記の特性を有する単パルスを発生するためにライナックを調整するのに必要な測定系。上記の単パルスの必要な特性の正確な値を測定するよりも調整結果が分かる程度の分解能でよいが調整操作と測定結果の表示とに時間的な遅れがないことが重要である。またビーム出口以外のモニターとして

使用するものは非破壊的な測定系である方がはるかに望ましい。また測定系は常時加速器に付けておけるか、すぐに取り付けれるものが望ましいので、1の測定系と比較して安価なもので放射線損傷等によって破壊しても苦にならないものが望ましい。

3. 実際にパルスラツオリンスの実験を行なっている時に試料に照射されているピコ秒単パルスをモニターできる測定系。試料に照射される直前で測定するのが望ましく、当然のことながら非破壊的な測定系である必要がある。但し試料の直前でピコ秒単パルスのすべての特性を非破壊的に測定しきれないものについては、パルスラツオリンスの実験では試料は1cm厚程度の水溶液や有機溶液であることが多いので、試料の後方で測定してもモニターとして十分役立つ場合も多い。

4. 最後にピコ秒単パルスの測定系は少しの改良でピコ秒パルスラツオリンスの測定系になる可能性のあるものがある。特に光学的な測定系は将来ピコ秒パルスラツオリンスの測定系に使用できることが装置製作の製作順位を決めるときの重要な要因となっている。

ピコ秒単パルスの測定法としては表1に示すように直接にピコ秒単パルスを測定する方法と間接的に測定する方法の二つがあり、直接的方法の方が化学者等の加速器を利用する側にはなじみやすく、間接的な方法は加速器自身を研究する者にとってなじみやすい方法である。直接測定法は大別すると単発現象を測定できるものと繰返し現象をサンプリング方式で測定するものになる。ビームの調整やモニターには単発現象を測定できるものの方が時間分解能が多少悪くともはるかに有効である。サンプリング方式は時間分解能は高いが、安定な繰返し現象しか測定できないので、ビームの調整やモニターとして使いくいげでなく、正確なパルス波形測定する方法としてもかなりめんどろな方法と言える。また測定系のヘッドとしては光学的な方法と電子的な方法とがあり、一般的に光学的な方法の方が高価であるが、光学的な測定系は多少の変更でパルスラツオリンス法の測定系になるので研究面での発展性を考えると重要である。短かいパルスの測定系としてはストリークカメラは高価であるという点を除くと、時間分解能もよく、単発現象も測定でき、モニターとしても測定結果の生データの方はテレビで濃淡として時間遅れなくみられる等要求されている条件をもっとも満たしている。しかし上述したようにピコ秒単パルスの測定の必要性はいろいろの方面から出ており、放射線損傷のことを考えるとストリークカメラのような高価なものを常時モニターとして使うことは不経済であるし、ビーム加速の途中を非破壊的に測定するような用途には向いていない。したがってビームモニターとしてはコアモニター等の非破壊的測定手段は非常に重要になってくる。

#### Ⅱ. ストリークカメラを用いた測定系

ピコ秒単パルスの測定法は上述のように多様であり、現在東大ライナックで行われている方法を非常に多様である。ここでは主としてストリークカメラを用いてピコ秒単パルスを測定した結果を示す。図1にピコ秒単パルスの測定系の簡単なブロック・ダイヤグラムを示してある。この測定系で単パルス<sup>を</sup>測定する場合にはあまり問題にならないが、100回程度の積算を行なってS/N比をあげようとする次のようなことが問題になってくる。

- (1) 加速器自体の不安定性やジッターによるゆらぎ
- (2) 測定系自身のジッター
- (3) 電子線ビームと測定系の同期ジッター

図2に東大ライナック(S-バンド)から出てくる10nsecパルスの中の350psおきに出てくる約10ps幅の微細構造パルスによって生じるチェレンコフ光をストリークカメラを用いて測定した結果を示す。パルス幅は実測で18psであり、この測定系の時間分解能が18ps以内であることが分かる。

#### Ⅳ. ピコ秒単パルスの測定結果

表2に過渡モードの仕様値と実測値を示す。いずれも仕様値よりも測定値の方がかなり良い値を示している。特にピコ秒単パルスについてみると電荷量が1nCと仕様値の300pCの3倍以上出ており当初の努力目標値と一致した。この値は瞬時<sup>置</sup>であり、経時変化(無理をしている素子の劣化による。)でじんじん悪くなると思われるので、現状維持に努力することと電子銃等の改良を行なってゆく必要がある。

図3に半値中1.3nsecのパルスをリアルタイムシンクロスコープを用いて測定した結果を示す。リアルタイムシンクロスコープ(400MHz)で測定しているため、バンチ中20ps以下、パルス間隔350psの微細構造パルス列の包絡線としてしかみられぬ。電子銃から出てくるエミッションパルスはたぶんこのような形状のパルスであり、このパルスを直接加速管に入れて加速すると図4に示すように350ps間隔の微細構造パルス列となる。同一の条件で、電子銃と加速管の間でサブハーモニックバンチャーを用いて、1.3nsec中のパルスを一度バンチしてから加速管(実際にはアレバンチャー部が加速管の前にある。)に入れてやると図5のようなツングパルスになる。図7にきれいな単パルスの波形を示す。図6ではサテライトがほとんど見られず、非常にきれいな単一パルスであることがわかる。

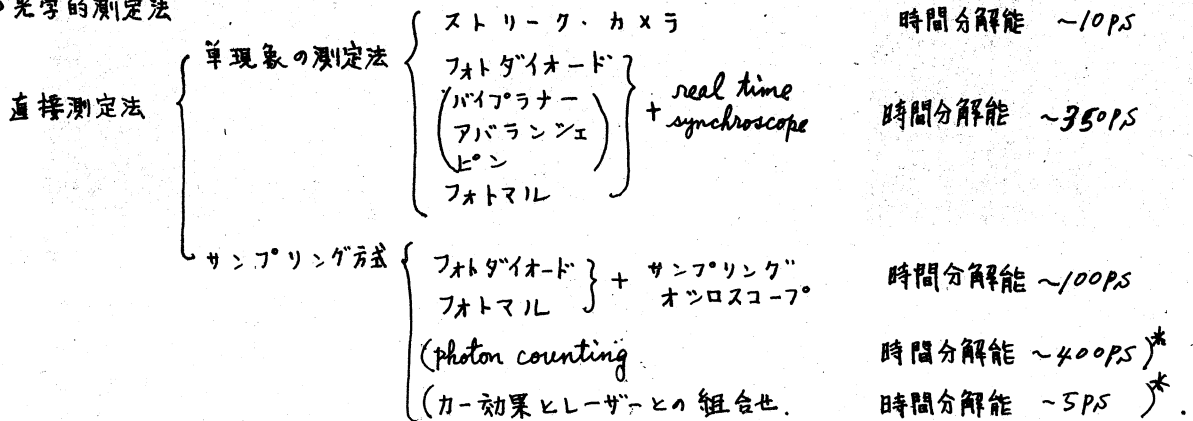
なお参考までにピコ秒の単パルスを100発打ち込んで測定したパルス波形を図7に示す。このパルス波形は手動で単発パルスを100回打ったものであるから、加速器のジッターと測定系のジッターと加速管と測定系との同期ジッターを念入りに合わせており70psのパルス幅であった。したがって個々のジッターはかなり小さいものと考えられる。

表2 過渡モードの性能

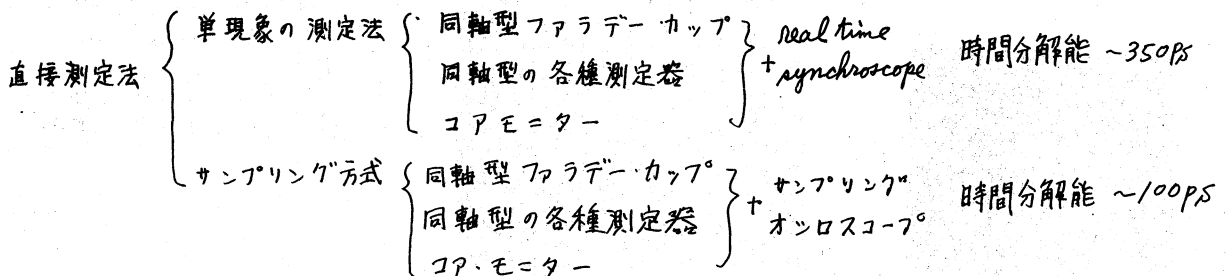
項目		規格	測定結果
10nS ビーム	電子ビーム電流	2A以上	2A
	ビームパルス幅	10nS (半値中)	11nS
	ビーム径	4mm中	4x3
	ビーム電流安定度	±3%/5min	±1.5%/5min
		±6%/30min	±3%/30min
パンチ中	20PS以下	18PS以下	
RF	電荷量	1nC	1nC
単パルス	電荷量	300 pC	1nC

表1 ピコ秒単パルスの測定法

○光学的測定法



○電氣的測定法



間接測定法 { エネルギースペクトルの中より位相中を出し、パルス中を求める。  
 ビームの持つ高周波成分を測定し、周波数解折よりパルス中を求める

\* のものを除いて既に表の程度の時間分解能が得られている。

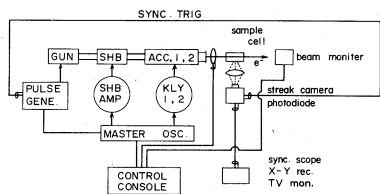
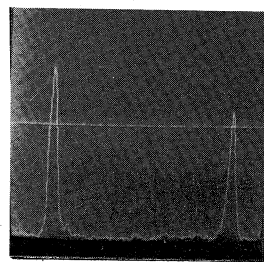


図1. ピコ秒単パルスの測定システム図



← 350 PS →

図2. 微細構造パルス (10nsビーム) ストリークカメラによるチェレンコフ光の測定

パルス中 < 18 PS

パルス間隔 350 PS

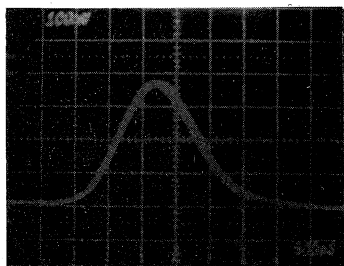


図3 半値中1.3nsの電子線パルスの出すチェレンコフ光をフォトダイオードで測定  
500 PS/div

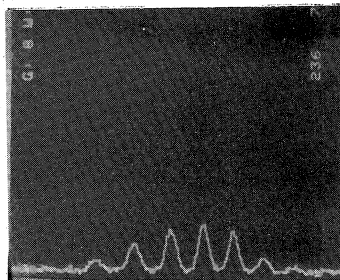


図4. 半値中1.3nsの電子線パルスの出すチェレンコフ光をフォトダイオードで測定 (サブハーモニックバンチャーの入カ)

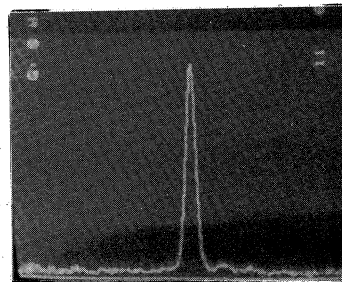


図5 図4と同一条件でサブハーモニックバンチャーにマイクロ波入力を入れたバンチングを行った後のバンチャーに入れたときの加速管出口での電子線パルス。縦軸は図4と同一であるから単パルスになると同時にピーク電流が大きくなっているのがわかる。

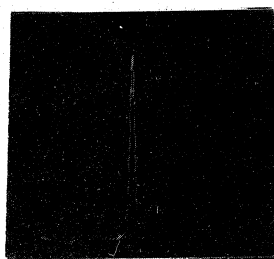


図6 ピコ秒単パルスのストリークカメラによる測定。350 PSおきに出る可能性のあるサテライトは観測されていない。

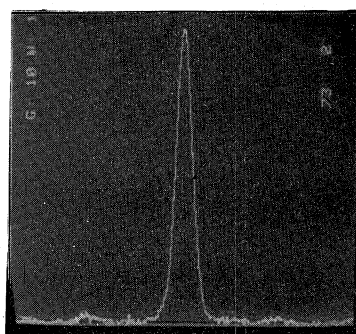


図7. ピコ秒単パルスを1発づつ100回積んでストリークカメラで測定した波形