

放射線の空間分布測定手法に 関する研究(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究成果報告書)

平成6年3月

東京大学 工学部

中澤 正治

要 旨

大強度加速器放射線場におけるドシメトリーで重要となる広域かつ狭あい・複雑空間における線量率分布測定に対して、プラスチックシンチレーションファイバーを用いた新しい放射線空間分布センシング手法の開発と適用性を評価した。特に、中性子空間線量率分布の測定性能とノーマルファイバーを接続した長距離測定仕様における位置検出特性について実験的評価を行い、基本的な技術の確立と性能確認を行うとともに、従来の中性子やガンマ線サーベイメータで空間線量率マッピングを行うこととほとんど遜色のない結果が、極めて効率的に得られることを実証した。

また、本手法を加速器ビーム損失モニターとしても活かすために、対になって測定されるべき加速器ビーム特性のモニター法についても検討を加えた。特に、我々のグループが開発している電子線形加速器用のビームモニタリング手法の中で、非破壊型かつ簡便であるという観点から、空气中または真空中で使用する多線式ビームプロファイルモニター及び同軸ケーブル用コネクタを用いたビームバンチ・ポジションモニターの有用性を示した。

Abstract

A new distributed radiation sensing system using plastic scintillating fibers(PSF) has been developed for wide area dose mapping in narrow and complicated spaces around intense accelerator radiation field. In particular, the dose responses of PSF to fission neutrons are measured, which depend on the position of incident neutrons, and also the spatial resolution was checked when elongating the measurable length by combining the normal optical fiber with the PSF. The results demonstrate that this system is useful enough to substitute the ordinary dose mapping method using radiation survey meters.

In addition, nondestructive and simple beam diagnostics for an electron linear accelerator (LINAC) have been investigated, which will be suitable to make good use of the PSF as a beam loss monitor. The usefulness is shown for the multiwire beam profile monitors placed in the air or vacuum and the beam bunch/position monitor made of coaxial cable connectors.

放射線の空間分布計測手法に関する研究 (II)

目次

第1章 緒言	---	1
参考文献	---	2
第2章 プラスチックシンチレーションファイバーを用いた 放射線空間分布計測技術の開発	---	3
2.1 分布型放射線検出システム	---	3
2.2 PSFを用いた放射線分布センサー	---	5
2.3 PSF/ノーマルファイバーの併用による長距離測定のパフォーマンス評価	---	5
2.4 中性子に対する応答特性の評価	---	16
2.5 中性子線量率分布測定の実証試験	---	25
2.6 まとめと今後の課題	---	32
参考文献	---	33
第3章 電子線形加速器用ビーム計測技術の開発	---	35
3.1 空気中設置多線式ビームプロファイルモニター	---	36
3.2 パルス電子線バンチ・ポジションモニター	---	39
3.3 真空容器内多線式ビームプロファイルモニター	---	42
参考文献	---	46
第4章 結言	---	60
謝辞		

第1章 緒言

近年の原子力工学の発展の中で、「量子工学」と呼ばれる総合的学問分野が生れている。この「量子工学」を構築する大きな技術の柱には、量子物性自体の工学応用と並んで、従来の放射線に、レーザー、軌道放射光、イオンビーム、ポジトロンなどを加えた広義の量子ビームを工学的に利用するための技術体系があり、量子ビーム固有の特性とその電磁量子効果を巧みに用いた新技術の開発研究が精力的に進められている。中でも、量子ビーム発生源となる種々の加速器に関して、線源強度やエネルギー領域の飛躍的な拡大、また発生する量子ビームの高度な制御による平行性、微細性、偏光性、多様性などの大幅な性能向上が見込まれており、今後、原子力工学分野における加速器の用途は、ますます増加していくものと予想される。現在、動力炉・核燃料開発事業団で進められている大強度電子線形加速器を用いた核分裂生成物の消滅処理研究などは、そのよい例の1つと言える。

しかしながら、このような加速器利用には、必ず副次的な放射線・放射能の発生を伴い、これを完全に管理することなしに利用の実を挙げることは困難である。従って、加速器周辺に形成される放射線場のドシメトリー手法の確立が必要不可欠となるが、この放射線発生源には、ビーム損失等によって二次粒子の発生する可能性のある場所すべて、例えば、加速器本体、ビームチャンネル、その構造体、ターゲット、ビームダンプ等が該当し、極めて広範囲かつ狭あい・複雑な空間の線量率監視を余儀なくされる。

本研究は、この問題に対する有力な解決策として、プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)を用いた放射線空間分布センシング手法の開発を目的とするものである。昨年度は、PSFの発光・伝播特性及び位置検出特性、特に位置分解能の向上策と測定距離の延長の可能性について、実験的に検討した結果を取りまとめた[1-1]。これらの成果の一部は、既に動燃グループによって、 γ 線空間線量率分布の測定に活かされ、上首尾の結果が得られている[1-2]。

そこで、今年度は、残されている主な検討課題として、PSFによる中性子空間線量率分布の測定性能とPSFにノーマルファイバーを接続した長距離測定仕様における位置検出特性について実験的評価を行った。

一方、加速器放射線場におけるドシメトリーでは、遮蔽体から漏洩してくる透過力の大きい中性子や光子に対する空間線量率の他に、加速器構造体の放射化や照射損傷劣化を誘導するビーム損失も重要な測定対象となる。PSFは、ビームダクトの周辺に張り巡らすことにより、ビーム損失のハロー形状などをリアルタイムに観測するのに適した検出器と考えられるが、このビーム損失の情報は、加速器またはビームチャンネルの各種パラメータと明確に関係付けられ、運転スキーム等に有効にフィードバックされねばならない。即ち、ビーム損失に係わる加速器ドシメトリーには、ビーム損失自体の計測と同時に、その時の加速器ビーム特性の計測情報も併せて必要とされる。そこで、今年度における本研究のもう1つの課題として、非破壊型の加速器ビーム計測技術を採り上げ、特に、我々のグループが開発している電子線形加速器用の簡便なビームモニタリング手法を中心に、その適用性を調査検討

した結果について報告する。

参考文献

- [1-1] 中沢正治 他：「放射線の空間分布測定手法に関する研究」平成4年度
動力炉・核燃料開発事業団受託研究報告書 PNC PJ1602 93-005 (1993).
- [1-2] 江本武彦 他：「放射線検出器とその応用」研究会要旨論文集
UTNL-R 0304 (1994) pp.42-45.

第2章 プラスチックシンチレーションファイバーを用いた 放射線空間分布計測技術の開発

2.1 分布型放射線検出システム

従来、分布型の放射線検出システムとしては、各測定点にそれぞれ検出器を設置し、検出された信号をケーブルを用いて集めるような構成が主に用いられてきた。これに対して最近温度や圧力測定などに用いられ始めてきている、光ファイバーを使用した分布型センサーにおいては、光ファイバーケーブルそれ自体がセンサーとなるので、測定システム、特にセンサー部が極めてシンプルになるという利点がある。ここでは、まず光ファイバーセンサーについて概観し、分布型放射線検出システムとしての特徴について整理することとしたい。

2.1.1 光ファイバーセンサー

光ファイバーセンサーはシステムの構成面からみて大きく次の3つに分類できる。

- 1) 光ファイバー伝送路型センサー
- 2) 光ファイバープローブ型センサー
- 3) 光ファイバー機能型センサー

このうち、1)については、光ファイバーは単に伝送路としてのみ用いられるものであり、センサー部分と組み合わせることにより、光による伝送の特徴を活かすべく設計されるものである。また、2)については、測定対象からの放射や、プローブ光に対する測定対象からの反射などの形で得られる光情報を、光ファイバーで集光し、受光器に伝送するものである。光ファイバー伝送路型センサーとは異なり、光ファイバープローブ型センサーでは光ファイバーの全長に渡ってセンサー部が分布することになる。3)の光ファイバー機能型センサーは、光ファイバー自体がセンサーを兼ねており、光ファイバーが測定対象から物理的又は化学的に受ける変化により引き起こされる伝播光の特性変化を利用するものである。したがって、センサー部分の構成がシンプルとなり、光ファイバーの長尺性をより活かされるものと考えられる。

2.1.2 分布型光センサーの現状及び分布センサーの応用例

(温度センサー)

光ファイバーを用いた温度センサーは光ファイバーセンサーの中でも特に多種多様の試みのなされている分野である。光ファイバーを用いた温度センサーは他の手段を用いた温度センサーと比較した時超高温の測定が可能であるかこと、平均量と

分布量の双方が測定可能できることなどの利点を持っている。

- ・ 光ファイバーラマン温度センサー[2-1]

ラマン散乱により、入射光と光ファイバーとの間で振動数 ν_0 の入射光に対して光ファイバーに固有の振動数 i だけ振動数 (ν_i) の変化した、振動数 $(\nu_0 - \nu_i)$ のストークス光及び振動数 $(\nu_0 + \nu_i)$ の反ストークス光が観察される。これらの2種の散乱光の比を用いることによって温度が求められる。位置分布の測定は、パルス光を入射させ、その後の散乱光の時間変化を測定することにより [OTDR法]、各位置における温度が測定できる。

- ・ Nd^{3+} ドープ光ファイバーによる温度測定

光ファイバーのコア部に Nd^{3+} をドープした Nd^{3+} ドープ光ファイバーを用いた温度測定が、 $1.06 \mu\text{m}$ 帯の吸収を測定することにより可能である[2-2]。この場合に付いてもパルス光によりOTDR法を用いることにより、分布センシングが可能である。

- ・ コヒーレント光による温度センサー

光ファイバーは温度によりファイバー長及び屈折率が変わるので、これによる位相変化を利用し、参照光を用いたホモダイン検波により測定を行うことが可能である[2-3]。

- ・ その他の光ファイバーを用いた温度センサー

液体コア光ファイバーの後方散乱光の変化を用いることや[2-4]、プラスチッククラッド石英コア光ファイバーの低温での透過率低下を利用した低温探知[2-5]などが、温度センサーとして提案されている。

(放射線センサ)

- ・ 細長いシンチレータと光ファイバー波長シフトを用いたシンチレータの長尺化

数m以上の長いシンチレータを得ることは容易ではないが、高エネルギー荷電粒子を完全に停止させるのに必要なシンチレータを開発するために、シンチレータをブロック化し、各ブロックにおいて発生した光を光ファイバーにより集める方式について研究が行われている[2-6]。また、この方式は、分布センサーとしての応用以外にも、光ファイバーを長距離のライトガイドとして使用することにより、光電子

増倍管とシンチレータ間の結合を柔軟に選択できる利点がある[2-7]。

・ カラーセンターの生成を用いたマルチモード光ファイバー放射線検出器

宇宙船用の放射線検出器として、 $10\text{ rad} \sim 100\text{ krad}$ 程度までの放射線照射下における光ファイバーのカラーセンターの増加による吸光を調べる方式が検討されている[2-8]。燐光成分を含めたメカニズムの解明がなされれば、吸光スペクトルや、その時間変化などの種々の情報を使用した放射線検出器が実現される可能性がある。

2.2 PSFを用いた放射線分布センサー

PSFに放射線が入射すると入射部においてシンチレーション発光が生じ、PSFの両方向にシンチレーション光子が放出される。放出された光子がそれぞれPSFの端に達する時間はその発生位置によって異なるため、両端への到達時間差を測定することにより、シンチレーション光子の発生位置の特定が可能となる。このような到達時間差を利用する放射線入射位置の測定は、高速性が必要とされることから、短い減衰時定数、優れた高速性という長所を有すPSFを最も有効に活用できる測定方法であるといえることができる。

また、PSFは通常の放射線検出器に比べて形状が長尺型であることから、広いエリアにPSFを配置することにより、当該エリアの線量率分布の測定の容易化が期待できる。

PSFを使用した放射線位置検出に関する研究は、

- ・ PSF発光特性評価
- ・ 放射線位置検出、及び分布センシング回路の検討
- ・ 中性子を対象とする長距離測定の可能性検討

等が実施されてきており、PSF、及びそれを用いる計測系が、放射線位置検出を行うために必要な基本的性能を有していることが示されている。[2-9~2-11、2-13~2-16]

本研究においては、これら既往の研究成果を踏まえ、

- ・ 高速中性子、 γ 線に対する長距離測定の性能評価
- ・ 中性子に対する応答特性の評価
- ・ 中性子線量率分布測定の可能性に関する検討

を行った。

2.3 PSF/ノーマルファイバーの併用による長距離測定の性能評価

本研究では、東京大学弥生炉のファーストカラム(FC)を使用し、高速中性子に対する長距離測定の性能評価を行った。PSFとしては2.5m長のものを使用し、その両端にそれぞれ10m、15mのノーマルファイバーを接続して測定を行った。実験体系を

図2-1に示す。

ノーマルファイバーにより伝送される信号は、光電子増倍管(PMT:Photo Multiplier)、プリアンプ(FPA:Fast Pre.Amp.)を経て、CFD(Constant Fraction Discriminator)によりタイミング信号に変換される。さらにCFDからの2信号の時間差は、時間波高変換器(TAC:Time-to-Amplitude Converter)によりパルス波高値に変換され、PHA(Pulse Height Analyser)に蓄積される。本研究で使用した装置は次に示すようなものである。

- ・ PSF : Bicron Corporation BCF-20
- ・ PMT : 浜松ホトニクス R1635-02
- ・ FPA : ORTEC VT120
- ・ プリアンプ : ORTEC VT120

PSF、PMT、及びプリアンプの特性データを表2-1、表2-2、及び表2-3に示す。

(1)実験内容

エリアモニターの必要性能としては、何らかの線源の位置、及び強度の特定が可能であることがあげられる。そこで、PSFを弥生炉FCの前面に配置し、PSFの位置、及び弥生炉出力を変化させることによって、

- a)放射線入射位置とピークチャンネル
- b)弥生炉出力とピーク面積

という2つの線形性(リニアリティ)について検証した。

測定に当たっての各測定装置の設定は次の通りである。

- ・ CFD start:1.0V、stop:1.0V
- ・ PMT HV -1,240V
- ・ Delay 0 μ sec (start側、stop側のノーマルファイバー長が異なるため、特にdelayは使用しなかった)
- ・ TAC range 100nsec

(2)実験結果

a)入射位置とピークチャンネルの線形性

PSFを弥生炉FCに密着させ、炉出力を500Wに保った状態でFCからの中性子をPSFに垂直入射させた。測定開始時にPSF中央に中性子が入射するようにセットし、その後5cm間隔で平行移動させながらTACからの出力をPHAで測定した。中央、及び中央から20cmの位置に入射している際の、PHA出力を図2-2、図2-3に示す。それぞれ612ch、635ch付近にピークが明瞭に現れていることがわかる。

次に、中心から20cmの位置までPSFを移動させた場合の、移動距離とピーク位置(チャンネル)の関係を図2-4に示す。これをみると、入射位置とピークチャンネルの間に良好な線形性が認められる。この結果より、PSFとノーマルファイバーを併用しても、位置検出器として十分な性能を持つことが示さ

れた。

また、出力波高分布と図2-4をもとに計算すると、ピークのFWHMとして約75～85cm程度の値が得られた。表2-1に示すように、弥生炉FCからの高速中性子、及び γ 線を2.5mのPSFで測定した結果、FWHMとして23cmという値が得られている既往研究例 ([2-9]) もあることから、今回の測定体系は必ずしも空間分解能に優れているとはいえない。この要因としては、ノーマルファイバーによる長距離伝送に起因する、信号への悪影響が考えられる。

今後は、20cm以上移動させた場合の入射位置－ピーク位置線形性の確認、測定系パラメータの最適化による分解能向上等に取り組んでいくことが求められる。

(2) 弥生炉出力とピーク面積の関係

PSFの中央に中性子が入射するように配置し、炉出力を100Wから500Wまで変化させた場合の、弥生炉出力とピーク面積の関係を図2-3～2-5に示す。出力変化によるFWHMの変化が小さかったことから、ここではピーク値の前後それぞれ140chの計数値を合計し、ピーク面積とした。この出力範囲では、出力とピーク面積に良好な線形性があることがわかる。この結果により、PSFとノーマルファイバーによる検出系は、放射線源強度分布の測定装置として十分な可能性があることが示された。

今後は、低線量率の場合の強度－ピーク面積の線形性について検証し、弱い線源が分布している領域での、エリアモニターとしての可能性を評価することが求められる。

(3) さらなる長距離化の可能性検討

今回は、PSF：2.5m、ノーマルファイバー：10mあるいは15mという体系で実験を行い、この程度の距離ならば十分に適用可能であることが示された。しかしながら、実際にはさらに長距離伝送が求められる場面も多々存在するものと考えられるので、ここではノーマルファイバーをさらに長くした場合の、測定効率への影響について概算を行った。

まず、今回用いた体系において、PSFの中央で発生したシンチレーション光が、ノーマルファイバー長の長いstop側のPMTに到達するまでの損失には、次のようなものがある。 ([2.11])

a) PSF(2.5m/2=1.25m)中での損失

今回使用したBCF-20の減衰長(1/e)が3.5mであることから、発生点からxの距離での光強度は次のように表される。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{x}{3.5}\right)$$

従って、 $x=1.25\text{m}$ においては、

$$-10\log \frac{I}{I_0} = 1.55 \text{ [dB]}$$

となる。

b) 接続損失

・ 反射損失

PSF→空気という境界での反射による損失は、PSFコアの屈折率： $n_1=1.6$ 、
空気の屈折率： $n_2=1.0$ とおくことにより、

$$L_1 = -10\log \left\{ 1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right\} = 0.238 \text{ [dB]}$$

という値が得られる。

また、空気→ノーマルファイバーの境界での反射による損失は、ノーマルファイバーのコアの屈折率： $n_3=1.49$ とおき、

$$L_2 = -10\log \left\{ 1 - \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2 \right\} = 0.497 \text{ [dB]}$$

となる。従って、反射による損失は、合計で0.735[dB]である。

・ 間隙による損失

間隙の存在に起因する損失は、次のような式で表される。

$$L_4 = -10\log \left(1 - \frac{S \times NA}{2R} \right)$$

ここで、S:間隙、NA:開口数、R:コア径をそれぞれ表しており、 $S=0.5\text{mm}$ 、 $NA=0.58$ 、 $R=1.0\text{mm}$ を代入することにより、 $L_4=0.680\text{[dB]}$ となる。

・ 軸ずれによる損失

軸ずれによる損失は次のように表される。

$$L_5 = -10\log \left[\frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \frac{x}{R} - \frac{x}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2} \right\} \right]$$

従って、仮にコア径の1%に相当する軸ずれがあるとすると、 $x=0.01\text{mm}$ 、 $R=1.0\text{mm}$ を代入することにより、 $L_5=0.056\text{[dB]}$ となる。

・ 開口数の違いによる損失

PSFの開口数(NA_T)とノーマルファイバーの開口数(NA_R)が異なることによる損失は、 $NA_T=0.58$ 、 $NA_R=0.48$ であることから、次のように求められる。

$$L_6 = -10\log \left(\frac{NA_R}{NA_T} \right)^2 = 1.644 \text{ [dB]}$$

以上より、PSFとノーマルファイバーの接続損失の合計は、3.115[dB]となる。

c) ノーマルファイバー中での伝送損失

今回使用したプラスチック光ファイバー（旭化成 TC-1,000）の導光特性は、図2-6に示すようなものである。従って、PSF(BCF-20)のピーク発光長:492nmでの損失が85[dB/km]程度なので、15mの伝送中の損失は

$$85 \times 15 / 1,000 = 1.275 [\text{dB}]$$

となる。

以上の結果より、PSFの中央で発生したシンチレーション光がstop側PMTに到達するまでの損失は、合計5.94[dB]と評価できる。

ここで、仮に今回使用したノーマルファイバーを100mとして光伝送を行う場合には、c)のノーマルファイバー中での損失が $85 \times 100 / 1,000 = 8.5 [\text{dB}]$ となるため、全体では13.2[dB]の損失が発生することが予想される。そのため、

$$\frac{10^{-\frac{13.2}{10}}}{10^{-\frac{5.94}{10}}} = \frac{0.048}{0.26} = 0.192$$

より、単光子計数に対しては、今回の実験に比べ1/5以下の測定効率となり、エリアモニターとしての適用可能性が低くなるものと考えられる。

しかし、ノーマルファイバーには、ハードクラッド石英光ファイバーのように非常に伝送損失の小さいものもあり、そのようなファイバーを使用すれば長距離伝送は十分に可能となると考えられる。例えば、図2-7に示す伝送特性を持つハードクラッド石英光ファイバー（東レ HCシリーズ）の場合には、500nm近辺では損失が約20dB/kmであり、100m中の損失を2dBに抑えることが可能である。

（[2-12]）その際、全体の損失は6.7dBとなり、今回の実験と比較しても、それほど遜色のない測定効率を確保できる。このように、最適なノーマルファイバーを選択することによって、PSF+ノーマルファイバーの接続による長距離伝送は、十分に可能性を有すということが出来る。

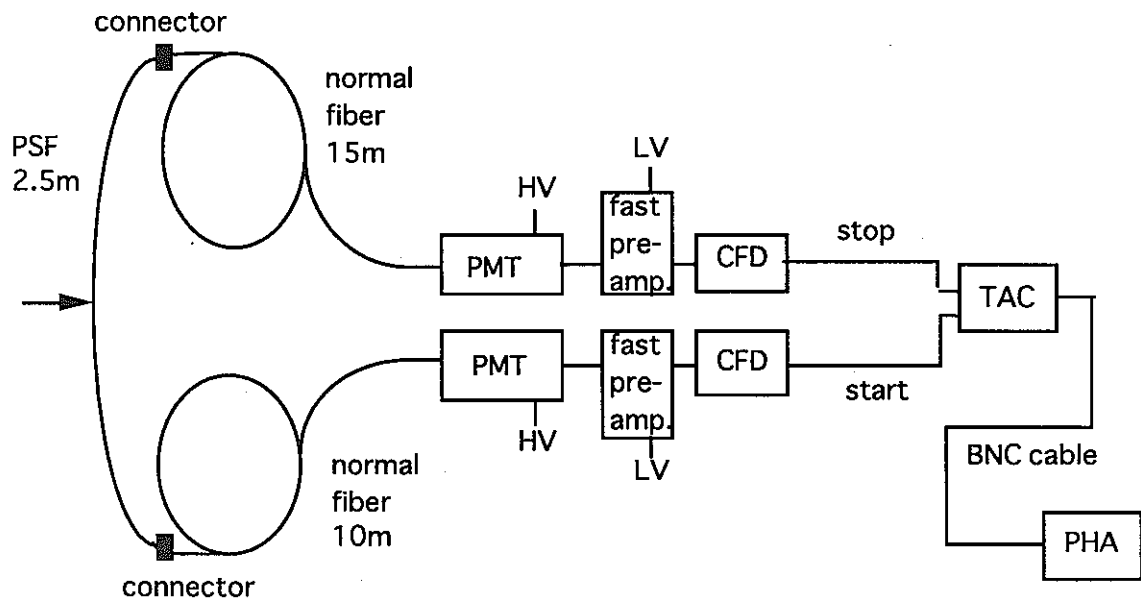


図2-1 弥生炉FC(Fast Column)における実験体系

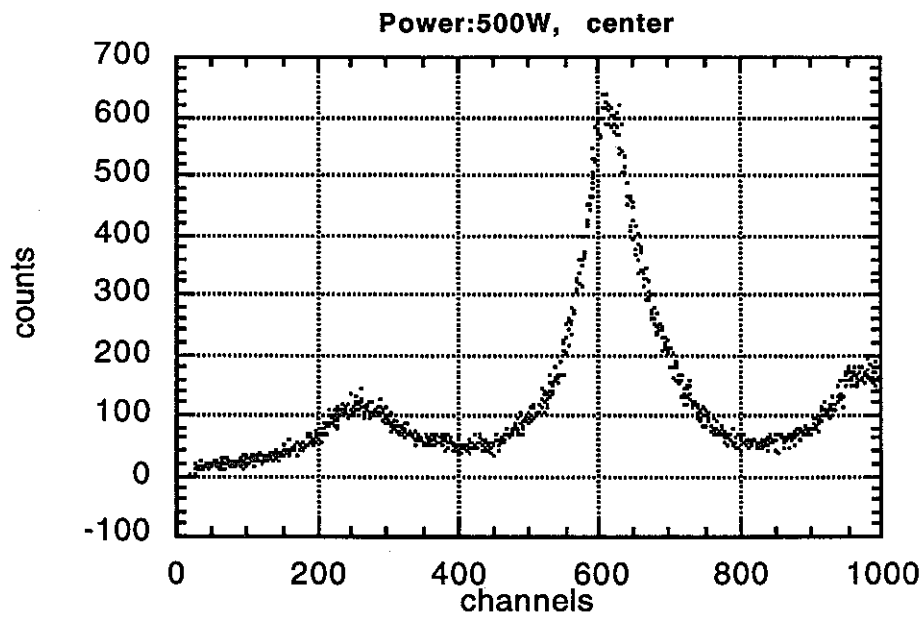


図2-2 PSF(2.5m)の中央にFCからの中性子を入射させた場合のTAC出力波高分布

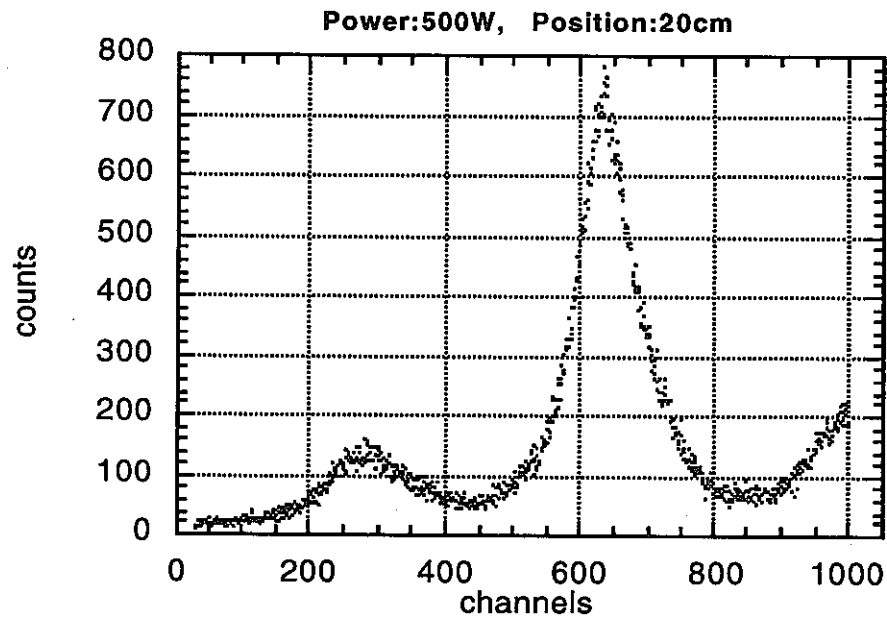


図2-3 PSF(2.5m)の中央から20cmの点にFCからの中性子を入射させた場合のTAC出力波高分布

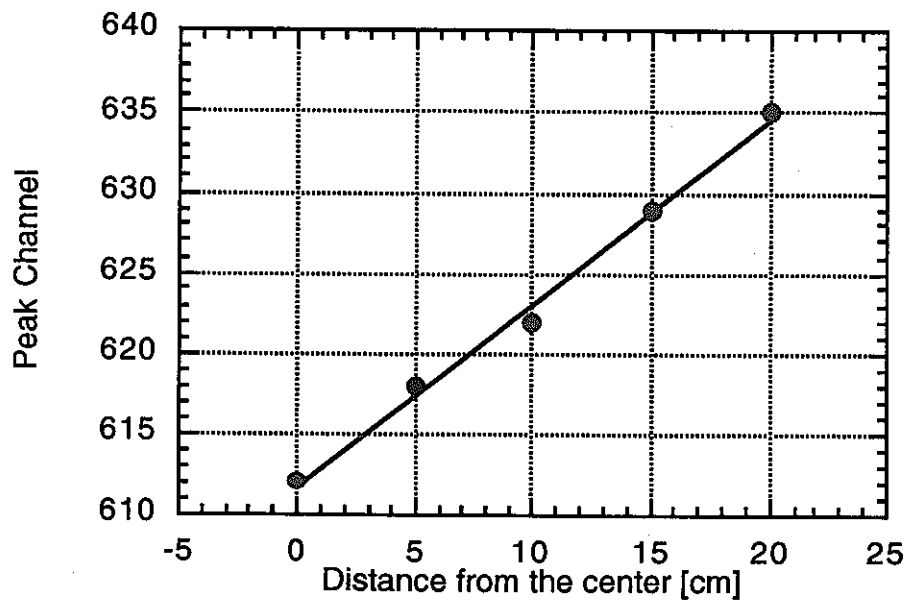


図2-4 FCからの中性子の入射位置とピーク位置の関係

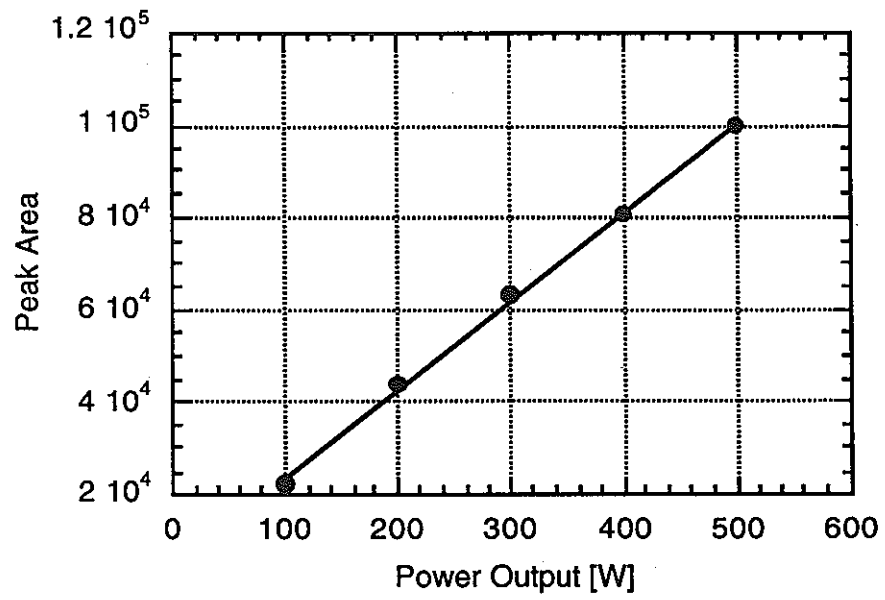


図2-5 弥生炉出力とTAC出力波高分布におけるピーク面積の関係

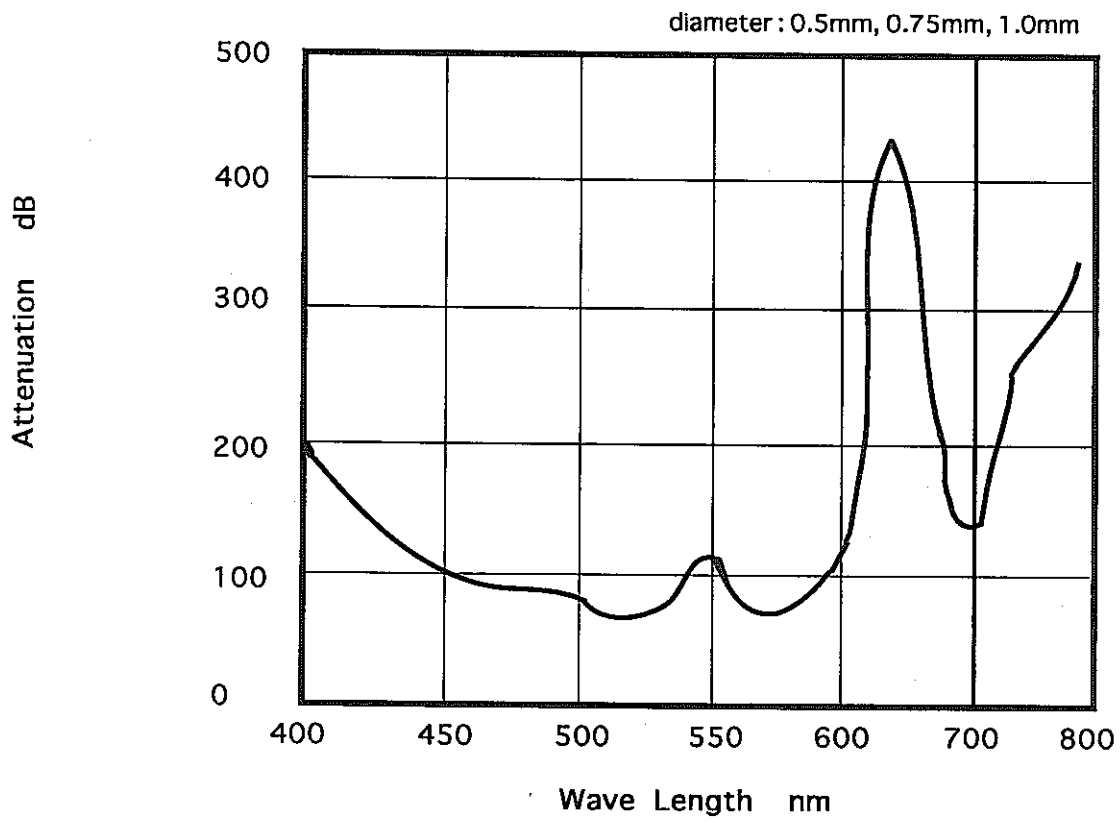


図2-6 今回使用したノーマルファイバー(旭化成TC-1000)の導光特性 ([2-12])

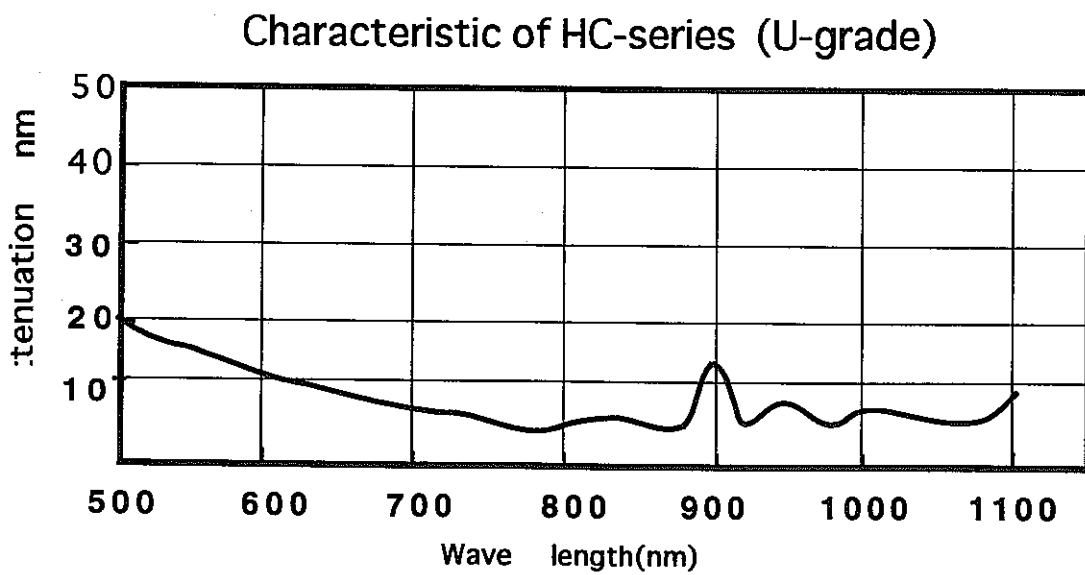


図2-7 ハードクラッド石英光ファイバーの伝送特性の例 (東レHCシリーズ) [2-12]

表2-1 使用したPSF(BCF-20)の特性データ ([2-19])

項目	BCF-20の特性値
コア部材質(scintillating Core) コア屈折率 コア径	Polystyrene with 1 % butyl-PBD 1.60 1mm
クラッド部材質(cladding) クラッド部屈折率 クラッド部径	PMMA 1.490.03mm
開口数(Numerical Aperture)	0.58
光出力(Light Output)	52% anthracene
捕獲効率(Trapping Efficiency)	3.44%(min.)
減衰長(Attenuation Length:1/e)	> 3.5 m
シンチレーション光の特性 ピーク波長(Peak Wave Length) 減衰時間(Decay Time)	492nm 2.7nsec
MeV当たりの発生光子数 (No. of photons per MeV)	~8,000

表2-2 使用したPMT (浜松ホトニクスR1635-02)の特性データ ([2-18])

項目	特性値
入射窓径	$\phi 11 \pm 0.5$
ダイノード段数	8段
光電面	MA (マルチアルカリ)
分光波長範囲	300~650nm
最高感度波長	420nm
分光感度(420nm)	82mA/W
量子効率(420nm)	25%
最大定格電圧	-1,250V
電流増倍率(-1,250V)	2.2×10^5
応答立上がり時間	0.8nsec
応答走行時間	7.8nsec

表2-3 Fast Timing Pre-amplifier (ORTEC VT120)の特性データ

項目	特性値
Gain	200, noninverting
Reise Time	<1nsec
Noise	<20 μ V rms equivalent input noise
Band Width	10 to 350 MHz
Output Range	0.5 to -5V with 50- Ω load

表2-4 PSFによる弥生炉FC前面での位置分解能測定例 ([2-9])

ファイバー長		2.5m	5.0m	10.0m
位置分解能 (FWHM)	中性子のみ	9cm	13cm	25cm
	中性子+ γ 線	23cm	26cm	47cm

2.4 中性子に対する応答特性の評価

ここでは、2.5m長のPSFに、弥生炉FC、及び²⁵²Cfからの中性子を入射させた場合の応答特性について、主に空間分解能の観点から検討する。

(1) 弥生炉FCからの中性子に対する応答

FCからの中性子を入射させ、start側：10m、stop側：15mのノーマルファイバーを介して光伝送を行った場合の、TAC出力波高分布は前出の図2-2に示したようなものである。(炉出力500W)

これを見ると、610ch付近に大きなピークがあり、これがFC中性子の入射位置を表している。その際の空間分解能は、FWHMにして86cm程度という値が得られた。また、出力、及び入射位置を、それぞれ100W～500W、0cm～20cm(中心から)の範囲で変化させたが、この程度の変動では空間分解能に大きな影響は見られなかった。

(2) ²⁵²Cf中性子に対する応答

²⁵²Cf中性子源を2.5m長のPSFに密着させ、(1)と同様の測定系を使用して測定を行った。ただし、ここでは図2-8に示すようにPSFを直接PMTに接続しており、1)のようにノーマルファイバーによる光伝送部は含まれていない。測定に当たった設定パラメータは次に示す通りである。

- ・CFD(ORTEC 584) start:2.0V、stop:2.0V
- ・PMT HV -1,240V
- ・Delay 16 μ sec
- ・TAC range 50 μ sec

中央、及びstart側、stop側90cmに入射させた場合の出力波高分布を図2-9に示す。これを見ると、空間分解能(FWHM)は28cm程度であることがわかる。これは表2-4に示したFC中性子+ γ 線に対する空間分解能(23cm)よりも劣っているが、その原因としては、

- ・²⁵²Cfが等方線源であること
- ・今回の実験体系では中性子、 γ 線を十分にコリメートしていないこと

等が考えられる。

次に、5m長のPSFを4重に束ねることによって半径16cm程度の円形に配置し、PSFの中央、start側1.2m、stop側1.2mの5点に同時に中性子を入射させた場合の、TAC出力波高分布を図2-10に示す。この結果より、5mのPSFを使用した場合のFWHMとして、23cm～29cm程度が得られた。これは2.5mのPSFを使用した場合と同程度か、あるいは小さい値となっている。今後は、さらに長いPSFを使用した場合の空間分解能について検討することが必要である。

(3)空間分解能向上のためのパラメータ最適化

既往の研究では、中性子照射時にPMTのHVを下げることにより、空間分解能が大幅に改善されることが報告されている[2-9]。そこで、ここではCFDレベル、及びPMTにおけるHVレベルを変化させた場合の空間分解能を測定し、それらの適切なレベルを把握することを試みた結果を示す。実験は東大原施核融合量子工学実験室において、 ^{252}Cf 中性子源を使用して行った。測定系は(2)において示したものと同様であり、 ^{252}Cf を2.5mのPSF(BCF-20)の中央に密着させ、CFDのディスクリレベル、PMTのHVレベルを変化させて測定を行った。

まず、HVを-1,240Vに固定した上でCFDを変化させた場合の、FWHMの変化の様子を図2-12に示す。ディスクリレベルが3V程度までは、FWHMは28~30cm程度で大きな変動はないが、5V、10VまでレベルをあげるとFWHMが小さくなり、10Vの場合には約21cmまで小さくなっていることが分かる。そこで、ここではディスクリレベルとして10Vを使用し、PMTのHVを小さくすることによって、さらに空間分解能を向上させることを試みた。

HVを-1,040Vから-1,240Vの間で変化させた場合のFWHMの変化の様子を、図2-13に示す。これを見ると、HVを小さくすることにより空間分解能は向上し、-1,040Vにおいては12cm程度の値が得られていることが分かる。従って、空間分解能だけの向上を図りたい場合にはこの程度までHVを低くして測定を行うことが有効であろう。

しかしながら、PSFを線量率分布測定に適用しようとする場合には、測定時間があまりに長すぎるとは実用的とはいえない。そこで、ここでは各HVにおけるピーク面積（ピーク前後のそれぞれ100chのカウント数の総和）を図2-14として示す。これを見ると、HV=-1,240Vの場合にピーク面積が最も大きく、HV=-1,040Vの場合の約10倍となっていることが分かる。すなわち、空間分解能だけを見るならばHVが低い方が望ましいが、測定時間についても考慮が必要な場合には、図2-13、図2-14のような関係をもとに、それぞれの必要レベルに対応したHVを使用することが求められる。

(4)入射位置変化の影響に関する検討

本研究で実施した測定において、PSFへの中性子入射位置を変化させるとピーク形状が変化し、特に端への入射時に左右の対称性が失われる現象が見られた。その一例として、(2)の測定系においてHV=-1,240V、CFD=2Vと設定し、PSFの中央、start側90cm、及びstop側90cmに入射させた場合のピーク付近を拡大して、図2-15、図2-16、図2-17に示す。また、入射位置とピーク左右の半値幅を図2-18に示す。これを見ると、中央に入射させた場合のピークは左右対称に近いが、start側、stop側に90cmずれた点に入射させた場合には、対称性が悪くなっていることが分かる。このような非対称性の原因としては、モード分散による到達時間のゆらぎ、信号の減衰によるばらつき増加等が考えられる。今後はファイ

バー内での信号の劣化についての検討を通じ、入射位置によるFWHMの変化やピーク形状の非対称性の要因について明らかにすることが求められる。

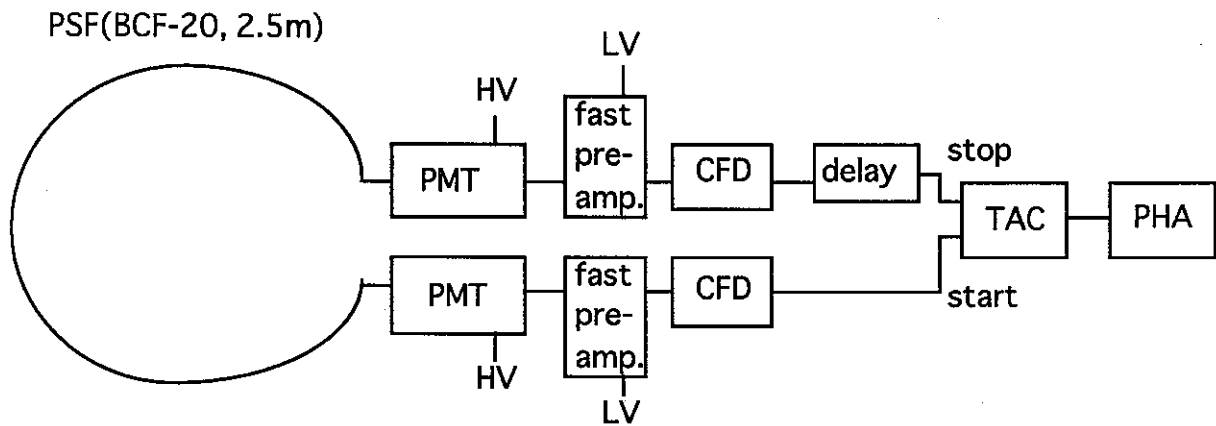


図2-8 ^{252}Cf 中性子に対する応答測定の際の測定系

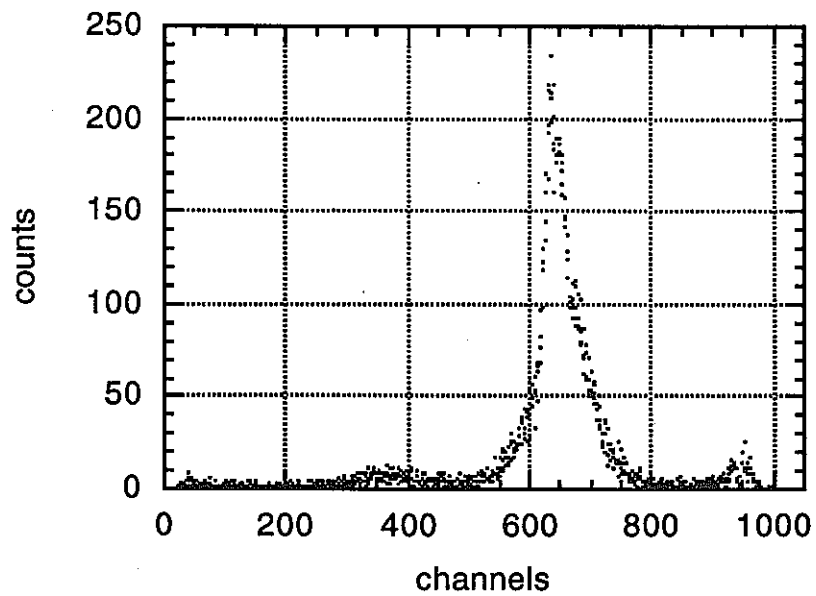


図2-9-1 ^{252}Cf 中性子源をPSF中央からstart側に90cmの点に置いた場合のTAC出力波高分布

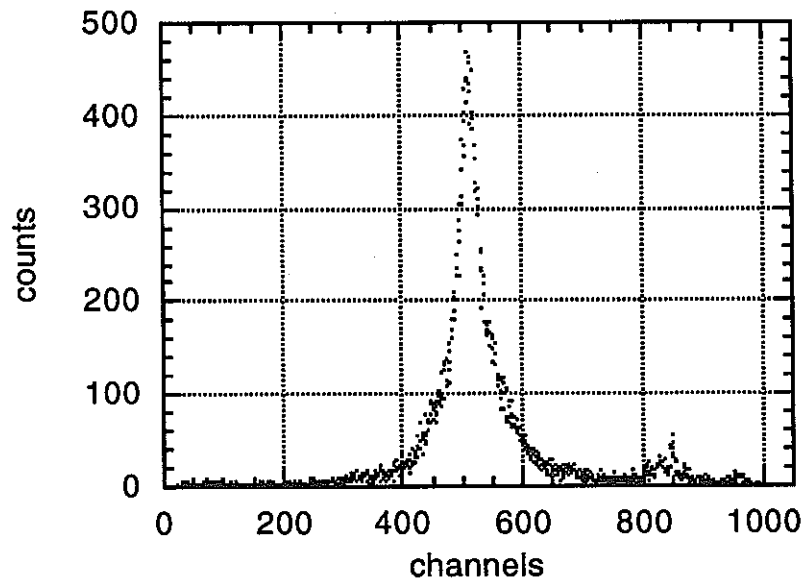


図2-9-2 ^{252}Cf 中性子源をPSF中央に置いた場合の
TAC出力波高分布

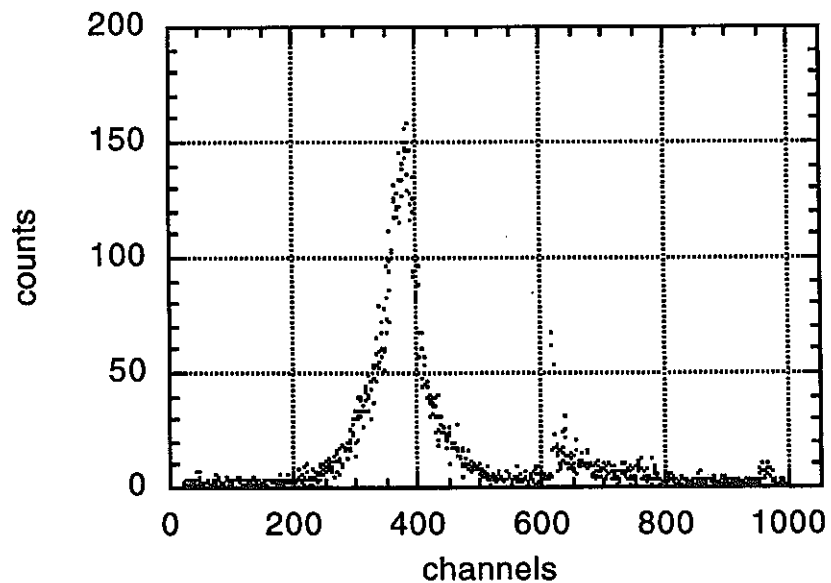


図2-9-3 ^{252}Cf 中性子源をPSF中央からstop側に90cmの点に置いた場合の
TAC出力波高分布

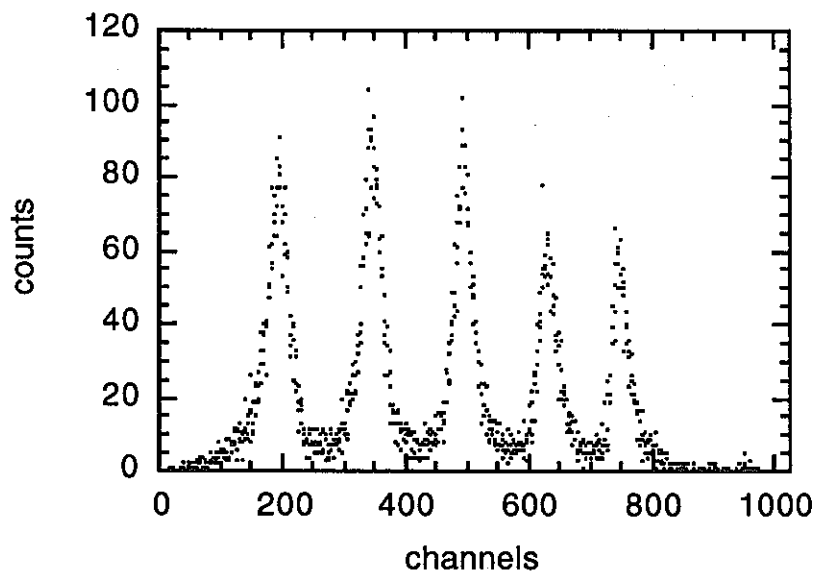


図2-10 5mのPSF上の5点に入射させた場合のTAC出力波高分布

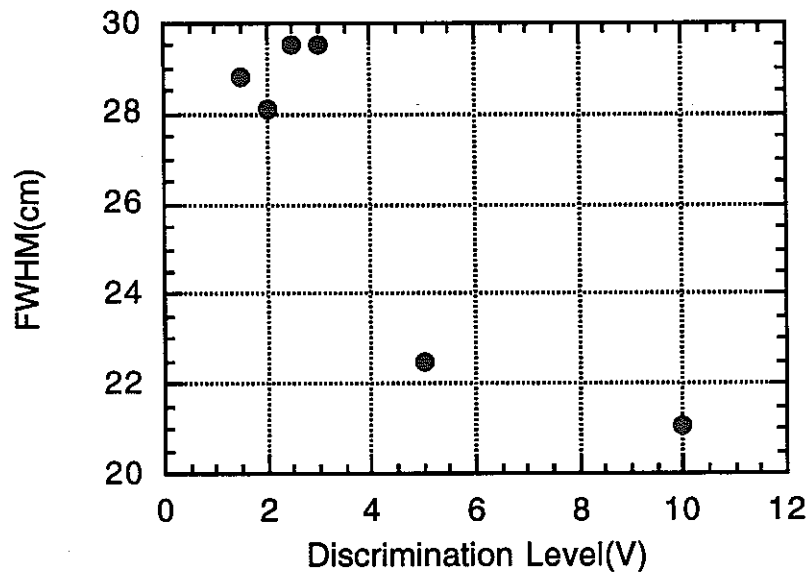


図2-11 CFDとFWHMの関係

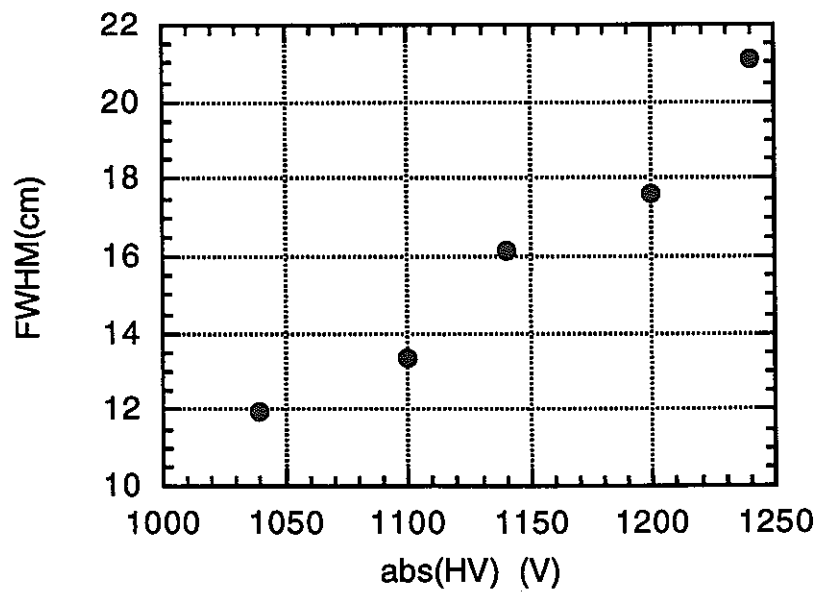


図2-12 HVとFWHMの関係

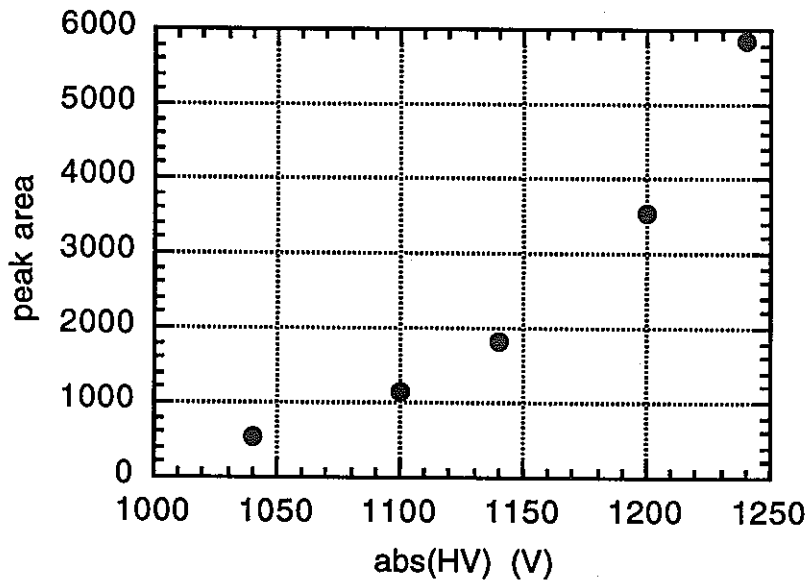


図2-13 HVとピーク面積の関係

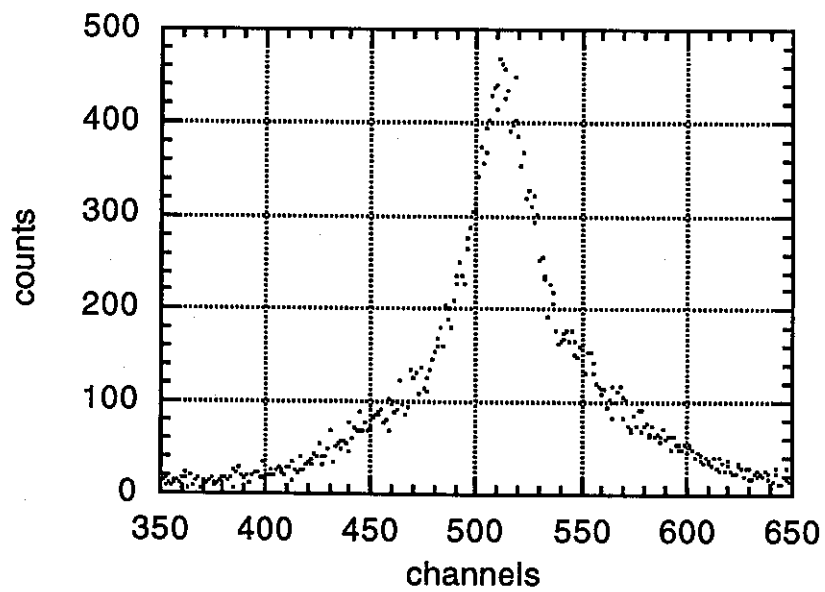


図2-14 PSFの中央に入射させた場合のTAC出力波高分布 (ピーク付近拡大図)
(HV=-1,240V、CFD=2V)

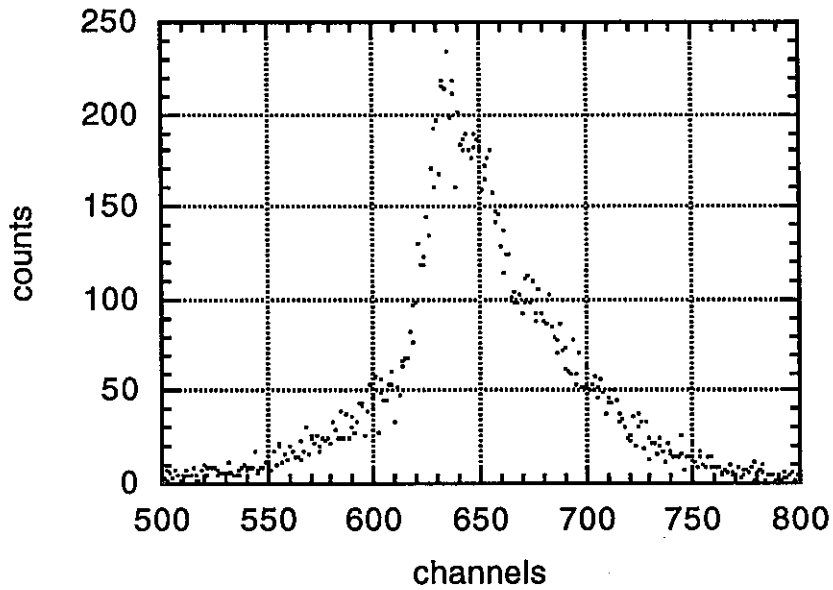


図2-15 PSFのstart側90cmの点に入射させた場合のTAC出力波高分布
(ピーク付近拡大図：HV=-1,240V、CFD=2V)

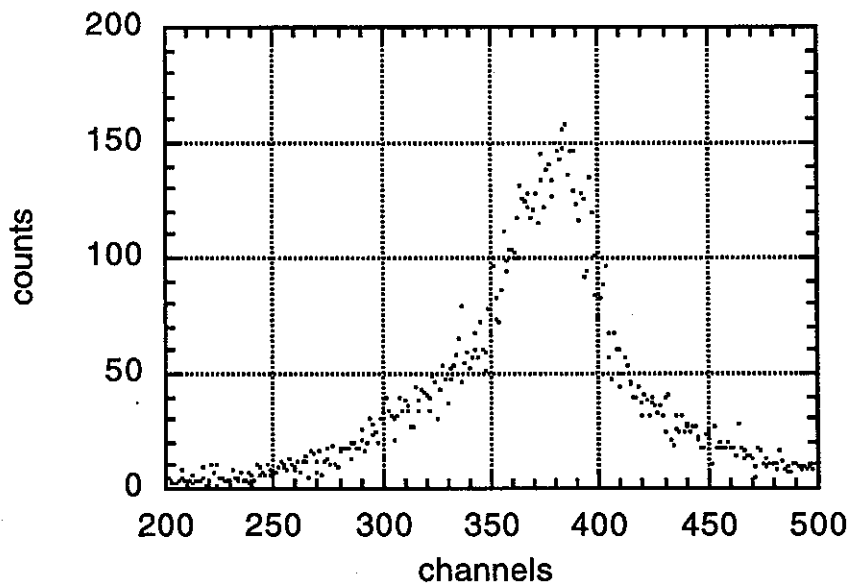


図2-16 PSFのstop側90cmの点に入射させた場合のTAC出力波高分布
(ピーク付近拡大図：HV=-1,240V、CFD=2V)

2.5 中性子線量率分布測定の実証試験

PSFを用いた線量率分布測定実験としては¹³⁷Csを使用した例 ([2-10]) があるが、本研究では²⁵²Cfを用いて実験を行い、PSFの線源分布モニターとしての適用性について評価した。測定系は図2-8で示したものと同様である。評価結果について、以下に示す。

(1) 実験方法

実験に当たっては、²⁵²Cf中性子源、及びポリエチレンブロック (5×20×10cm) を配置することによってPSF上に線量率分布を作り出した。本測定におけるパラメータ設定は次の通りである。

- ・CFD:ORTEC 583 Upper Level:5.0V, Lower Level:1.7V
- ・Delay:ORTEC 425A 60nsec
- ・TAC:ORTEC 567 Range:100 μ sec, Multiplication:1

また、PSFによる測定に加え、neutron rem counter (Fuji Electric NSN10001) による測定も実施し、両者の比較検討を通じてPSFによる線量率分布測定の可能性を検討した。

(2) 実験結果

2.5mのPSFを2重に巻くことによって半径約15cmの円形とし、その中央に²⁵²CfをおいてPSFの感度測定を行った。TACの出力波高分布を、図2-17に示す。stop側 (高ch側) の方が感度が高くなっていることが分かる。これは、今回使用した2本のPMTのうち、start側信号用のものの方がstop側信号用よりもゲインが高いためではないかと考えられる。

次に、PSFとポリエチレンブロックの配置図を、図2-18、図2-19、図2-20に示す。今回対象としたのは、次の3つのケースである。

- ・ケース1：²⁵²CfをPSFの中央から2～3cm程度の位置に置いた場合
- ・ケース2：同様に中央から15cm程度の点に置いた場合
- ・ケース3：PSF上の3点で線量率がピークとなるように²⁵²Cfを置いた場合

各ケースにおけるTAC出力波高分布を図2-21、図2-22、及び図2-23にそれぞれ示す。

これらの出力波高分布に対し感度分布に基づく補正を加えた結果、及びrem counterによる測定値を比較したものを、図2-24～図2-26に示す。ここでの測定系パラメータ (CFD=1.7V, HV=-1,240V) では空間分解能が28cm程度であったため、半径が10cm程度のrem counterに比較すると、ピークの広がりが大きく、空間分解能に劣る結果となっていることが分かる。しかしながら、どのケースでも、PSFはrem counterの測定結果を十分に再現する結果が得られており、ここで検討したケースについては、PSFによるモニタリングが可能であるということが

できる。今後は、PSFをさらに長くした場合の線量率分布モニタリング性能について、実証を行うことが必要である。また、さらに優れた空間分解能が要求される場面も予想されることから、2.4で実施したような設定パラメータの最適化を、状況に合わせて行うことが求められる。

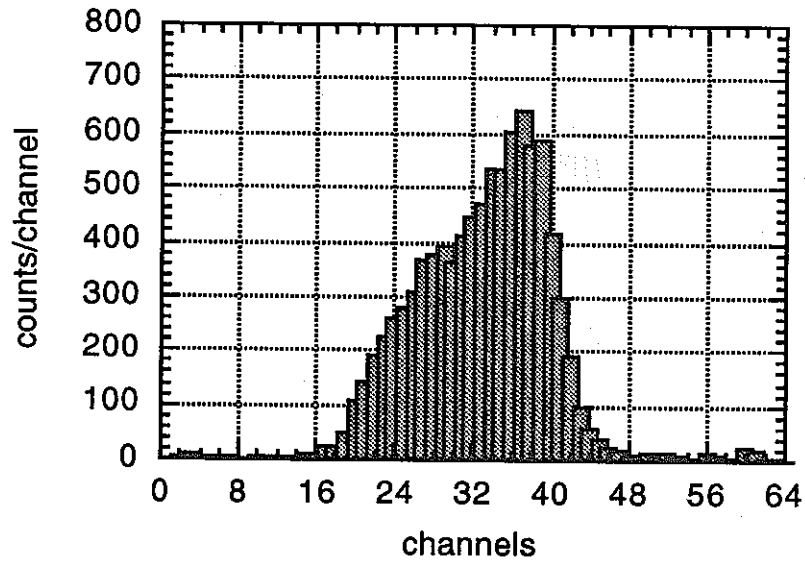


図2-17 2.5mPSFにおける感度分布

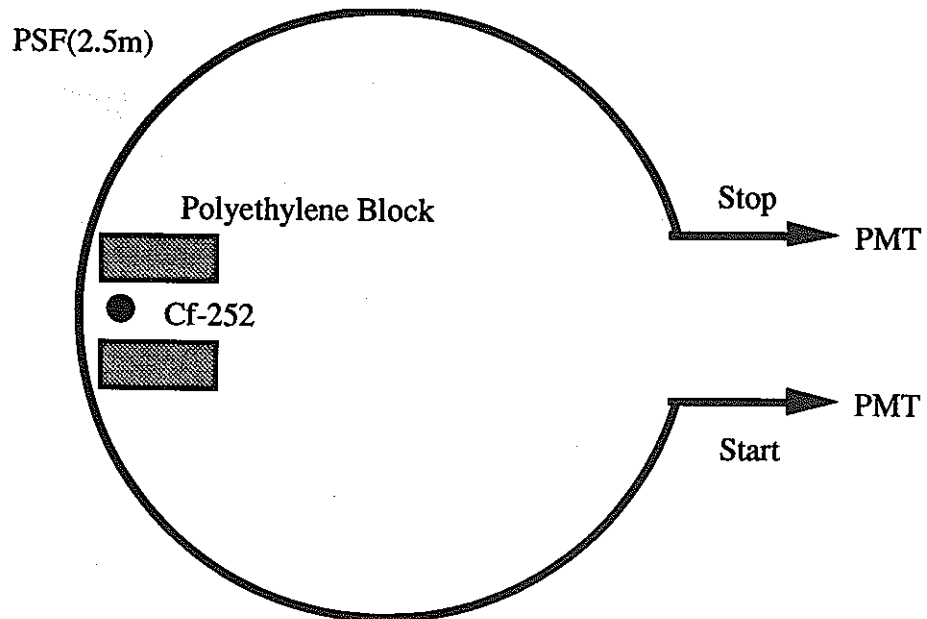


図2-18 ケース1 (PSF中央から2~3cm離して線源を置いた場合) の PSFとポリエチレンの配置図

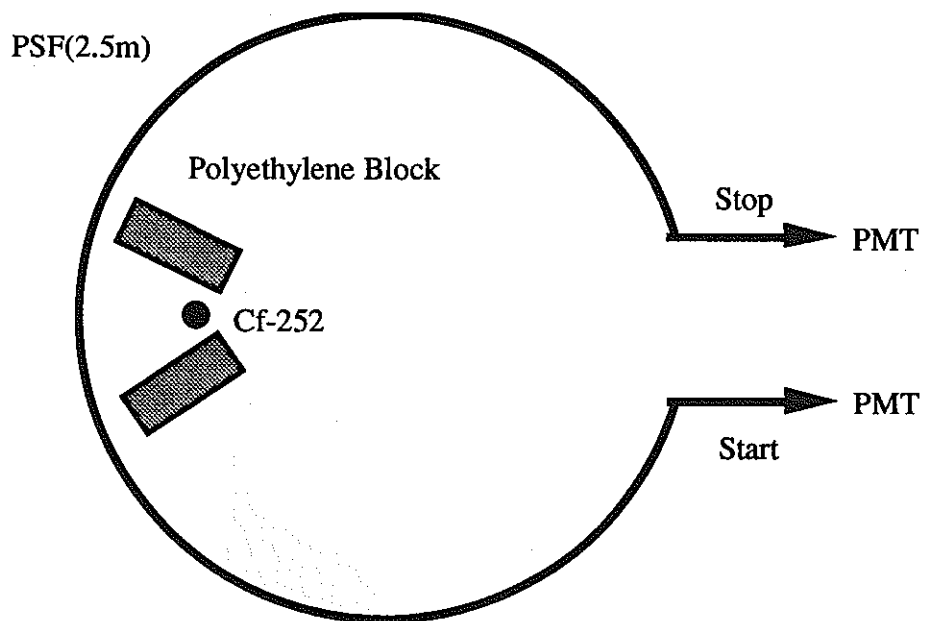


図2-19 ケース2 (PSF中央から約15cm離して線源を置いた場合) の PSFとポリエチレンの配置図

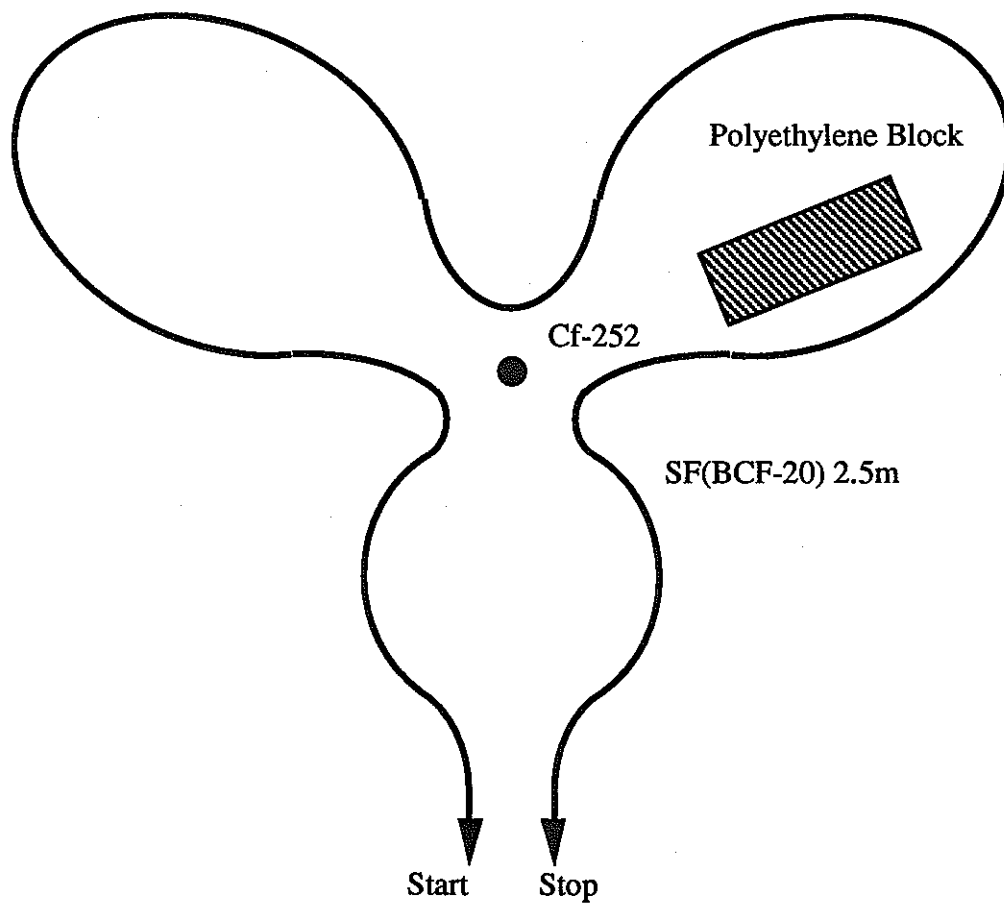


図2-20 ケース3 (PSF上の線量率分布に3つのピークを作った場合) の PSFとポリエチレンの配置図

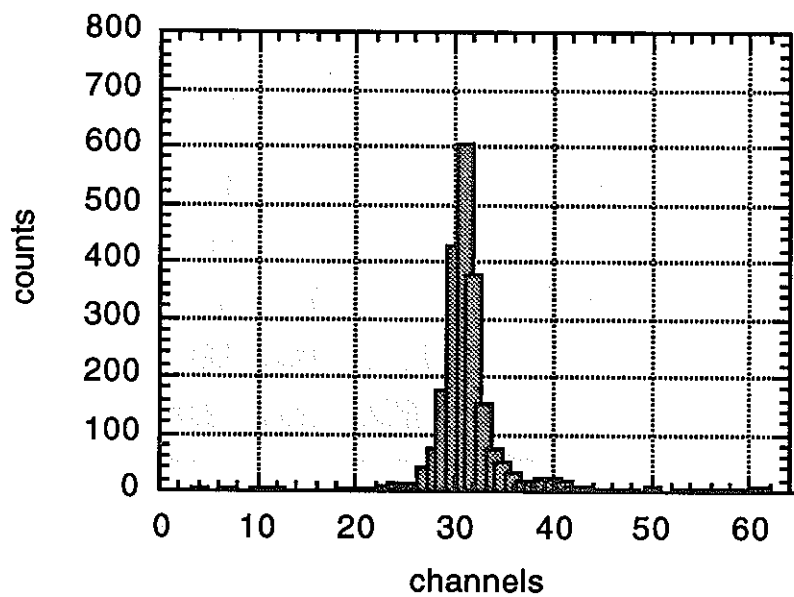


図2-21 ケース1におけるTAC出力波高分布

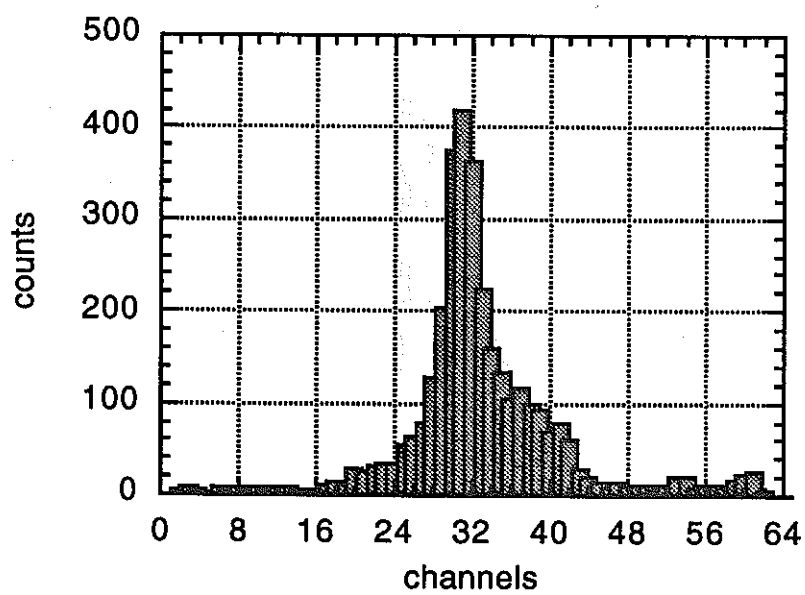


図2-22 ケース2におけるTAC出力波高分布

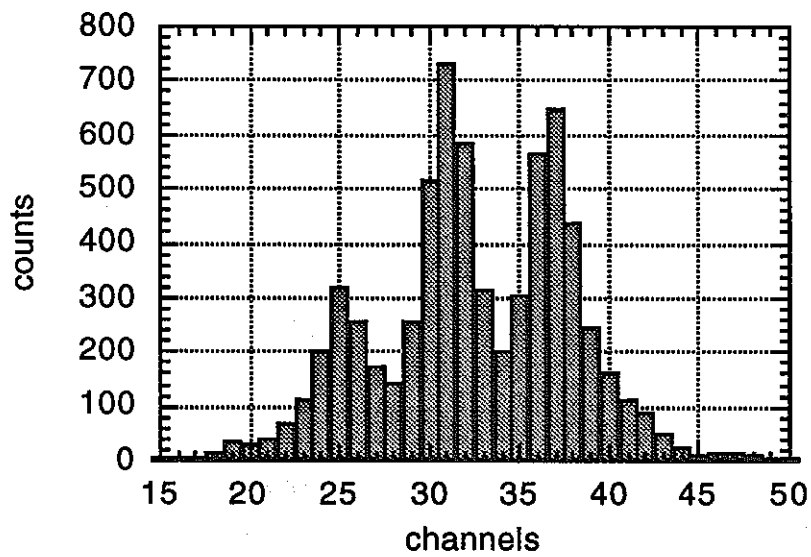


図2-23 ケース3におけるTAC出力波高分布

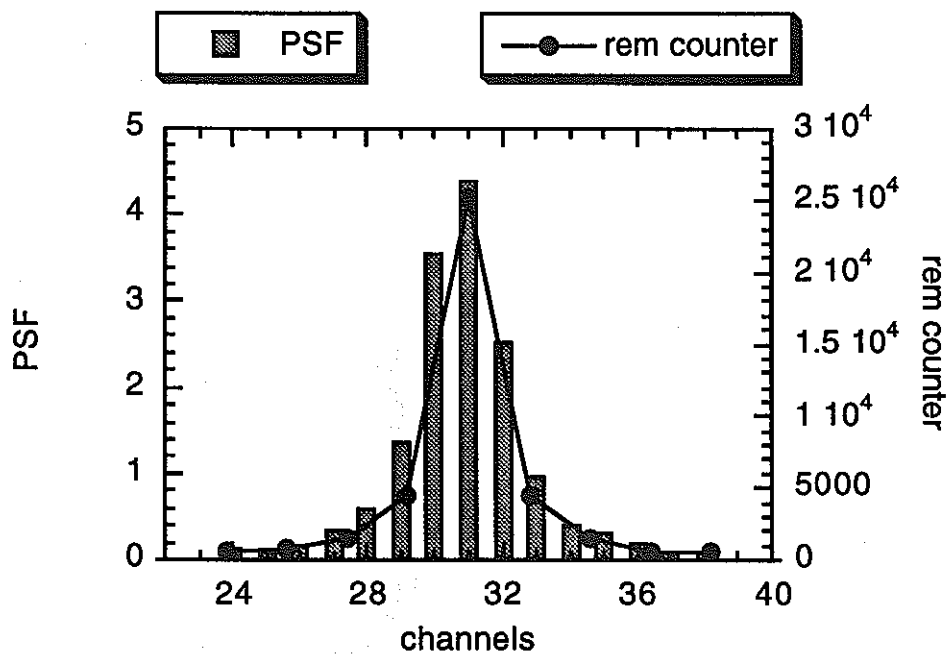


図2-24 感度補正後のTAC出力とrem counterによる測定結果の比較 (ケース1)

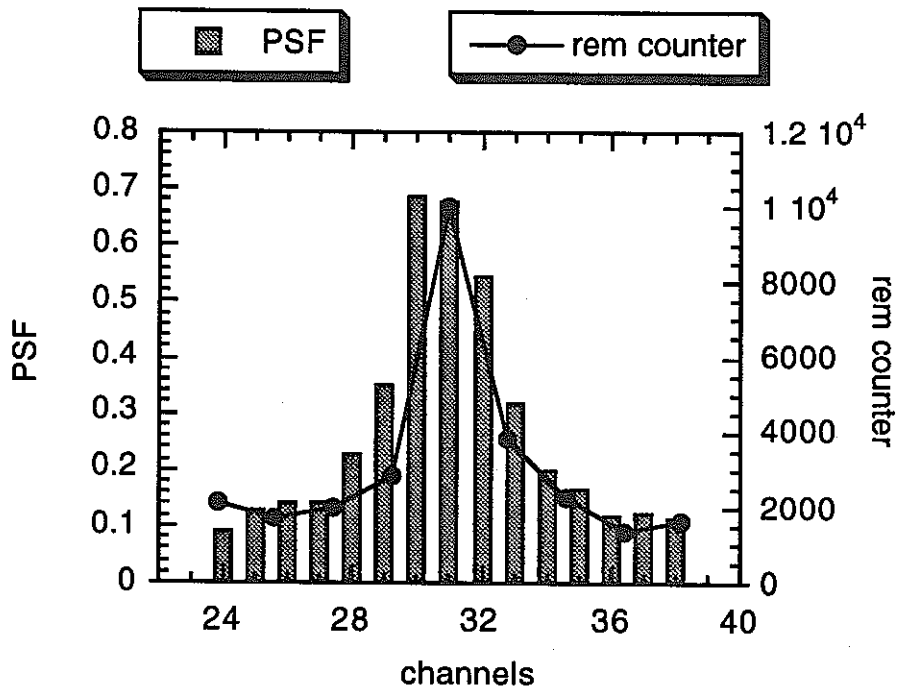


図2-25 感度補正後のTAC出力とrem counterによる測定結果の比較 (ケース2)

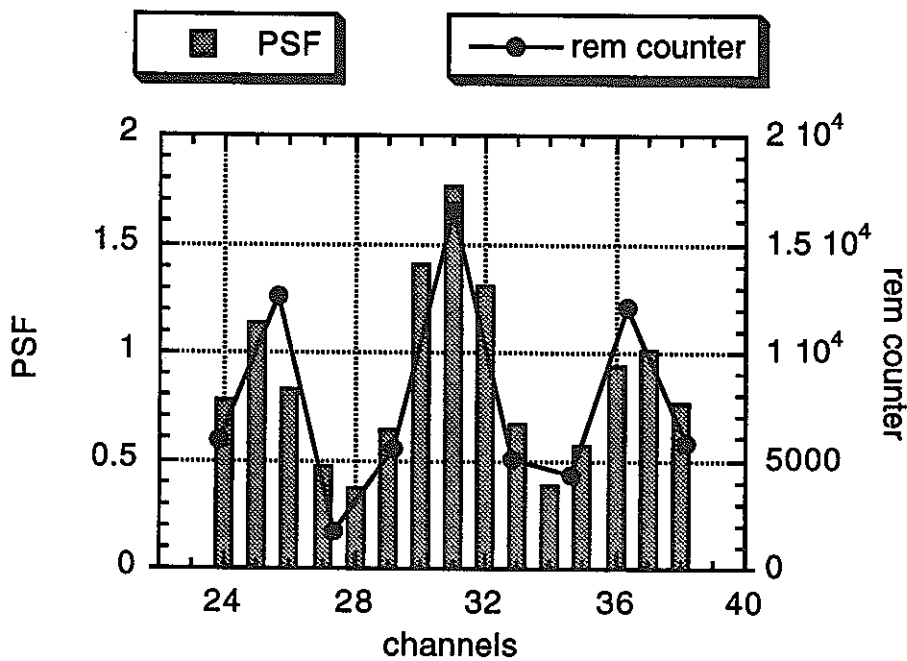


図2-26 感度補正後のTAC出力とrem counterによる測定結果の比較 (ケース3)

2.6 まとめと今後の課題

本研究においては、2.5m長のPSFと、10m、及び15mのノーマルプラスチックファイバーを使用して弥生炉FCからの高速中性子測定を行った。その結果、弥生炉出力：100～500W、入射位置：中央から0～20cmという範囲では、出力ーピーク面積、入射位置ーピーク位置の2つの線形性が確認できた。

弥生炉FCからの中性子を測定した際のFWHMは86cmであり、ノーマルファイバーを使用せずに測定した際に得られている23cmという値[2-9]よりも、空間分解能が劣るといえる結果が得られた。これは、10m、及び15mのノーマルファイバー中の伝送において、信号の減衰、及び劣化が生じるためと考えられる。また、 ^{252}Cf からの中性子を2.5m長のPSFのみを用いて測定したところ、28cm程度のFWHMが得られた。前出の弥生炉FCに対する測定例(23cm)よりも空間分解能が劣る結果となったのは、 ^{252}Cf が等方線源であるためと考えられる。

しかし、測定において使用するCFD、及びHVのパラメータを最適化することにより、FWHMは12cm程度まで小さくすることが可能であり、実際の使用に当たっては必要とされる計数率との兼ね合いで、これらのパラメータ値を選定することが求められる。

また、PSF、 ^{252}Cf を用いて中性子線量率分布測定実験を行い、neutron rem counterの測定結果との比較を行った。PSFによる測定では、rem counterよりも空間分解能は悪いものの、十分に線量率分布を再現することが可能であることが示された。

以上のように、PSFは線量率分布モニターとして十分な可能性を有することが示されたが、今後はさらに次のような点について、検討を行うことが必要であろう。

- ・入射位置変化をさらに大きくした場合の、入射位置ーピーク位置の線形性評価
今回の実験では弥生炉FCからの入射位置を中央から20cmの範囲で変化させたが、実際の線量率分布モニターとして使用する場合には、より大きな変化に対する位置特定性能の実証が必要である。

- ・線量率がさらに小さい場合のピーク面積線形性評価

弥生炉出力で100W～500Wの範囲で測定を行ったが、実際の場面ではより小さい線量率分布の測定が求められる。

- ・最適なノーマルファイバーの選択による、さらに長距離の光伝送実験の実施と、その適用性の実証

今回使用したノーマルファイバーでは、十分な位置、線量率特定性能が示されたが、今後はより長距離の光伝送の可能性評価が必要である。その際には、伝送損失の小さい光ファイバーを選択することにより、系全体としての最適化を図ることが必要である。

- ・今回測定対象としなかった各種の放射線源に対する応答の測定

今回は弥生炉FC、 ^{252}Cf を用いて実験を行ったが、実際に線量率分布モニターとして使用するためには、より広いエネルギー範囲の中性子に対する応答を求めておく必要がある。

- ・入射位置による応答特性変化の精密測定に基づく、線量率分布の再構築
PSFとrem counterの測定結果を比較すると、PSFの方が空間分解能が劣っており、線量率ピークが広がって観測される傾向にある。従って、今後は各種の条件のもとで、入射位置と応答との間の関係を精密に測定し、その結果をもとに実際の線量率分布を再構築する手法の検討が求められる。
- ・ファイバー中での減衰による影響評価
本研究で実施した測定では、PSFへの中性子入射位置によって空間分解能やピーク形状が影響を受ける場合があった。この原因の一つとして、ファイバー中の伝送において光信号の劣化が生じていることも考えられる。従って、今後は、超短光パルスが伝送中に受ける影響を観測するなどの方法により、伝送中の信号劣化について評価することが求められる。

参考文献

- [2-1] J.P.Dakin et al., Electron. Lett. 21, 569 (1985).
- [2-2] M.C.Farries et al., Electron. Lett. 22, 418 (1986).
- [2-3] J.P.dakin, J.of Optical Sensors 1,101 (1986).
- [2-4] A.H.Hartog, IEEE J.Lightwave Technol. LT-1,498 (1983).
- [2-5] M.Gottlieb and G.B.Brandt, Appl. Optics 20, 3867(1981).
- [2-6] R.Wojcik et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-40, 470(1993).
- [2-7] A.Weisenberger et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-40, 455 (1993).
- [2-8] J.J.Suter et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-40, 466 (1993).
- [2.9] 中澤正治、放射線の空間分布測定手法に関する研究、
PNC PJ1602 093-005(1993).
- [2.10] 江本武彦他、放射線位置検出器の調査と特性試験。
- [2.11] 宮地杭一、プラスチック光ファイバの応用技術（電気書院、1988）。
- [2.12] 光製品総合カタログ1992-1993、（株）オプトエレクトロニクス社。
- [2.13] 深野義隆、光ファイバーによる放射線分布センシングの研究。
（東京大学工学部原子力工学科 卒業論文、1993）。
- [2.14] 今井俊一、光ファイバーを用いた時間分析型放射線分布センシングの
基礎研究（東京大学工学部原子力工学科 修士論文、1992）。
- [2.15] 今井俊一、シンチレーション光ファイバを用いた放射線検出器の開発
（東京大学工学部原子力工学科 卒業論文、1990）。
- [2.16] Seki Soramoto, A Study on Radiation Detection Methods Using Optical Techniques
（東京大学工学部原子力工学科 博士論文、1991）。
- [2.17] G.F.Knoll、放射線計測ハンドブック（日刊工業新聞社、1991）。
- [2.18] 光電子増倍管と関連部品（浜松ホトニクス株式会社、1989）。

[2.19] Scintillating Optical Fibers (製品カタログ) (日本バイクロン株式会社) .

第3章 電子線形加速器用ビーム計測技術の開発

電子線形加速器（以下、ライナックと略）に用いられるモニターは、パルス電子線を加速するために必要なカレントモニター、ポジションモニター、プロフィールモニター、エミッタンスモニター等がある[3-1]。

一般に、カレントモニターとしては、マルチバンチ用モニターとして空洞共振型モニターやコアモニター、壁電流モニターがあり、現状では建設される加速器には全てといってよい程コアモニターが設置されている。また、最近では、ナノ秒パルス電子線用モニター用としてアモルファスコアモニターも用いられるようになってきた。

ポジションモニターとしては、ボタン型やキャビティタイプ、ストリップライン型、伝送線路型モニター等、多くの方式が開発されてきた。各々モニターは、固有の特徴を有し、加速器ビームの状況に合わせて使用されている。

プロフィールモニターとしては、非接触型モニターの提案もなされているが、実用上は、必要ときにビームライン上にコルツを設置できるようにしておき、ビーム照射による発光をカメラで観測する方法や大気中でも使用可能なデマルケストを用いる方法がよく使われている。一方、このようなプロフィールを発光で観測する方法に対し、東大核研や分子研では、マルチワイヤー型プロフィールモニターの開発も行われている。この方法は、ワイヤーをパルス電子線が通過した時に、ワイヤーからたたき出される二次電子の量を求め、それからビームプロフィールを求めるもので、発光をみる方法に比べて、定量的に測定し易い特徴を有する。この他、真空中でワイヤーを回転させたり、一本のワイヤーを移動させたりする方式もあるが、これらは、バンデグラフ加速器等の直流ビーム加速器に用いられるケースが多く見受けられる。

一方、最近のビーム短パルス化の技術が進むに従って、ビームバンチ状態のモニタリングの必要性が高まっているが、これまでのモニター方式では、必ずしも十分な性能が得られていない。現在、時間分解能の最も良い測定器として、300フェムト秒の応答性をもつストリークカメラがあるが、これを用いて発光を観測する方法では、ビーム通過時に発生するチェレンコフ光を測定するため、真空中での使用ができないことや高価であるといった問題点がある。そこで、筆者らは、簡便かつ加速器ビームのバンチの状態も観測可能なポジションモニターの開発を精力的に行ってきた。この方法は、従来のボタン型モニターを発展させたもので、真空用SMAコネクタやBNCコネクタおよびNタイプコネクタをそのまま用いた簡単な構造をしている。これまで、阪大産研と東大ライナックの実験を通じて、報告のあるモニターの中で最も高い時間分解能を有し、シングルバンチビームのバンチの状態を観測できることやポジションモニターとして使用できることが確認されている。

ここでは、以上のように筆者らがこれまでに開発してきた空気中で使用可能なパルス電子線用多線式プロフィールモニターやバンチ（ポジション）モニターの経験を中心に、非破壊型の電子線形加速器用ビームモニターとしての適用性について調査・検討した結果を述べる[3-2,3,4,5,6]。

3.1 空气中設置多線式ビームプロファイルモニター

ライナックを用いた実験は、物理・化学・生物をはじめとする広範囲な研究分野で行われている。実験の多くは、空气中で行われることから、実験精度向上のためには、その場所におけるビームプロファイル、ビーム位置を知っておく必要がある。またこのことは、加速器ビームを調整する上でも欠かせないことである。

この目的のためには、ビームを照射した検出体の化学的変化（ラドカラー等）によって求めるものや、箔にZnSを塗っておき、ビーム照射による発光現象によって求める方法などが用いられている。

しかし、これらの方法は、リアルタイムで測定できなかつたり、定量的測定精度が不十分であったりする欠点をもっている。これに対しリアルタイムかつ定量的測定方法として多線式比例計数管を用いる方法がある[3-7]。

この方法は、計数管ガス増幅率を調節することができ、計数管内に生成する一次電子数が少ない場合に有効な手段として使用されてきた。生成した一次電子数が多くなると必ずしも高いガス増幅率を必要としないため、空気電離箱を用いても十分に測定が可能となることから、芯線2本を組（一方をアノード、他方をカソード）にしたパルス電子線位置モニター等が報告されてきた[3-8,9]。

筆者らは、位置分解能1mmの多線式空気電離箱プロファイルモニターを開発し報告してきたが[3-10,11]、本研究では、さらに位置分解能を向上させたプロファイルモニター（位置分解能 0.375 ± 0.02 ）を設計試作したので、その特性と実験結果について示す。

(1) 測定原理と試作モニター

試作したビームプロファイルモニター（以下BPMと略）の概要を図3-1-1に示す。アノード、カソードとも0.07mmのCu-Be線（Be数%含有）を用い、 0.375 ± 0.02 mmの等間隔に24本張ってある。アノードは、両端の4本がダミー線として設置しており、残り16本の芯線には、 $0.01 \mu\text{F}$ （誤差5%）のコンデンサーが並列に入っている。従って、ビームライン上から見た有効検出部は、約6mm×6mmの正方形となっている。

ワイヤーを支えるフレームは、市販されているガラスエポキシ基板を用いており、アノード・カソード間（約7.5mm）にバイアス電圧が加えられるようになっている。

アノード・カソード間をとともにワイヤーとした理由は、ビームライン上にBPMを設置しやすくするため、芯線の間隔を δ としアノード・カソード間を L とすると、 $L \geq 4\delta$ を満たすようにした時、アノードに対するカソードは、線ではなく面と扱うことができる。その時の電場分布は、平行平板を用いたときと等価と考えることができる[3-12]。

今、パルス電子線がBPMを通過したとすると、空气中の窒素や酸素およびアルゴンと反応し、電離現象を引き起こす。生成されたマイナス電荷は、バイアス電圧によってアノードに集められコンデンサーに蓄積される。蓄積された電荷は、コンデンサーで電圧信号となり、読みだし回路によって順次オシロスコープ上に読みださ

れる。この電圧波高値の分布によって、BPMを通過したビームのプロファイルが求められることになる。

一般に、エネルギーEの電子が物質を通過したときに失うエネルギーは、

$$(-dE/dX)_t = (-dE/dX)_C + (-dE/dX)_r$$

で与えられる[3-13]。

ただし、 $(-dE/dX)_t$ は全エネルギー損失、 $(-dE/dX)_C$ は衝突によるエネルギー損失、 $(-dE/dX)_r$ は輻射によるエネルギー損失を示す。物質密度を ρ とすると、加速された一個の電子は単位cm当り

$$N = (\rho/w) (-dE/dX)_C$$

のイオン対を生成することになる。ここにwは、一イオン対を作るのに要するエネルギー量を示す。

したがって、試作したBPM内をQクーロンの電荷を持つパルス電子線が通過すると、アノード・カソード間の距離を $(d/2)$ とすれば、

$$QN d / 1.6 \times 10^{-19}$$

個のイオン対を生成することになる。

これらを全てアノードで集めたとすれば、コンデンサー(Cファッド)に蓄積される全電荷量Qdは、

$$Qd = C (V_1 + V_2 \cdots + V_{16}) = (Q \rho d \eta / w) (-dE/dX)_C$$

と表すことができる。ここに $(V_1 + V_2 \cdots + V_{16})$ は、各コンデンサーの両端の電圧値、 η はBPM内に生じた電荷の収集効率(以下、効率と略)を示す。

図3-1-2 にBPMの読みだし回路を示す。同回路は、加速器からのビーム打ち込みトリガー信号によって作動を始め、マイナス電荷の移動時間を考慮し、ビーム通過後約 $300\mu s$ 経て読みだしを開始するようになっている。読み出された電圧信号はオシロスコープ上に表示され、全ての読みだしが終了すると、コンデンサーに蓄積された電荷は同じ順序で放電されるようになっている。したがって、オシロスコープ上には、一発のパルス電子線にたいして一回のスweepが行われることになる。実験では、読みだしのクロック周波数として50kHzを用いた。

同回路の特徴は、読みだし回路にマルチプレクサーを用いることによって、回路の簡素化を図ったことと、信号増幅は行わない単純な構成になっている点にある。

(2) 実験方法および結果

実験は、35 MeV パルス電子線ビーム（パルス幅=20 p s、電荷量=0.3 n q）を用いて、ライナックビーム出口窓近傍（チタン窓=30 μ m）から約4cmのビームライン上にBPMを設置し行った。この時ビーム出口窓の後には、3mm φのスリット（厚さ10mmのステンレス製）を設置して行った。

バイアス電圧を変化させたときのBPM特性を図3-1-3に示し、図3-1-4にバイアス電圧-2kV時における測定結果を示す。同図上部波形はビーム縦方向を示し、下部は横方向のプロファイルを示している。

プロファイルの各点は、アノードのコンデンサーの蓄積電荷量を示しており、バイアス-0.5kV以上では、半値幅（FWHM）はほぼ一定であった。

図3-1-4に示した測定結果は、プロファイルが有効領域以上になっているが、これはビームエミッタンス、チタン窓による散乱およびスリットによる散乱等の影響により、ビームが広がっているためと考えられる。

BPMの効率 η （-2KVのバイアス時）を求めると、(3)式より

$$\begin{aligned}\eta &= C \cdot (V_1 + V_2 \cdots + V_{16}) / (Q d \rho / w) \cdot (-dE / dx) \\ &\doteq (4.5 \times 10^{-9}) / (3.70 \times 10^{-9}) \\ &\doteq 0.12\end{aligned}$$

となる、ここに $Q \doteq 0.3 \text{ nC}$ 、 $d = 1.5 \text{ cm}$ 、 $\rho \doteq 1.22 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $w = 34 \text{ eV}$ 、

$(-dE / dx) = 2.225 \times 10^6 \text{ eV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ （文献[3-13]、p.225）より）とした。

$\eta = 0.12$ という値はコンデンサーの誤差、測定上の誤差等を考えると、10~20%の誤差をもつものと思われる。

この効率 η は電子線によって生じたマイナス電荷の収集効率であるが、比較のためパルスX線が本BPM内に入射したと仮定しその効率を求めてみる。

一般に平行平板型電離箱のパルスX線に対するイオン収集効率は、Boagの式[3-14]によって近似的に、

$$f = (1/u) \cdot \ln(u+1), \quad u = \alpha \gamma d^2 / (k_1 + k_2) eV$$

で表される。ここに α は再結合係数、 γ はパルス当たりの発生電荷密度、 d は電極間距離、 $(k_1 + k_2)$ は正負イオンの移動度、 e は素電荷、 V はバイアス電圧を示す。 α の値は $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 程度であるため、計算では両方について求めてみた。その結果、 $\alpha = 10^{-6}$ としたとき $f \doteq 0.122$ 、 2×10^{-6} とすると

$f \doteq 0.07$ という値になり、先に求めた $\eta = 0.12$ に近い値となった。

なお、本研究の目的はプロファイルモニターの試作であるため、収集効率の詳細な検討は行っていない。

パルス電子線がBPMを通過するとき、アノード・カソードワイヤー自体からも

2次電子を放出する。その電荷量は、2次放出率がいわゆる大線量率効果の現象[3-15]により、異常に2次電子放出率が変化したと仮定しても、空気中で生成される電荷量に比して1%以下と推定され無視できる。また、35MeVパルス電子線はBPMを通過後ビームキャッチャー（カーボン）に当り吸収されるように配置されている。ビーム出口窓からキャッチャーに吸収される過程で前方方向にある分布をもって γ 線が発生する。この影響を調べるため、ビームライン上からBPMを離しキャッチャー近傍の γ 線の影響を測定した。その結果、チタン窓、スリット、空気より発生する γ 線およびキャッチャーからの後方散乱（ γ 線）の影響は測定不可能な程度で無視できるものとわかった。

(3) まとめ

空気電離箱方式によるパルス電子線用多線式ビームプロファイルモニターを開発し、ライナックビームのプロファイル測定を行った。その結果、35MeVパルス電子線では、ビーム径数mm、電荷量 0.1 nc/pulse 以上、パルス幅20psに対し有効なモニターであることが明らかになった。本方式の特徴をまとめると、

- 1) 比例計数管でなく電離箱を用いるため、ワイヤー間隔を小さくでき、分解能の向上を計ることが容易である。
- 2) 定量的かつリアルタイムで測定できる。
- 3) 35MeVの電子線エネルギーでは、電子線ビームに与える影響は小さいと見積もられ、実質的に非破壊モニターであるといえる。
- 4) 検出部および読みだし回路は、単純な構成となっているため製作が簡単である。
- 5) 電荷量の大きいマイクロ秒パルス、数GeVの高エネルギーパルス電子線および他の荷電粒子線のプロファイル測定にも応用できる。

などが挙げられる。今後の課題としては、測定精度やBPMの工作精度の向上および表示方法の改善が考えられる。

3.2 パルス電子線バンチ・ポジションモニター

阪大産研や東大原子力工学研究施設に設置されている35MeVライナックでは、ピコ秒パルス電子線 (FWHM=30ps) を加速することが可能で、これまでパルスラジオリスや高速の物理現象の解析をはじめとする多くの研究分野で利用されてきた。

このような超高速パルス電子線による実験では、加速ビームのサテライトやジッターの発生、ビーム強度、安定性等の情報を観測しつつ行うことが求められる。

一般に、ピコ秒領域のパルス電子線の有効な測定手段としてストリークカメラ(時間分解能=300fs)が知られている。しかし、その方法は、ビーム照射により発生するチェレンコフ光を用いるので、真空中での測定が不可能であることや実験との同時観測が困難であること及びセットアップに時間を要する等の問題があった。そのため、真空中でもモニターできる簡単な非接触型ピコ秒パルス電子線モニターの開

発が求められてきた。

筆者らは、それらの要求に応えるため、SMA、BNC、Nコネクタを利用した極めて簡単なピコ秒パルス電子線モニターを開発し、ピコ秒パルス電子線のバンチモニターとしての有効性と位置検出器とした時の実用性について、検討と実験を重ねてきた[3-16,17,18]。ここでは、これまで得た知見についてまとめる。

なお、最近では、テーパをつけた円筒内に針状電極を設置する方法も試みられている[3-19]。

(1) 測定原理と試作モニター

試作したモニターの概要を図3-2-1に示す。モニターは、内部の直径が5 cmのアルミニウムパイプに、市販されているコネクタを取り付けたものである(同図は、SMAコネクタ使用時のもの)。

パルス電子線がパイプ中を通過すると、ビームによる電場変化が生じ、電極に信号が誘起される。ビームのつくる電場Eは、ピーク電流値I、ビームからの距離をr、誘電率を ϵ 、光速をCとすると、 $E = (I / 2 \pi r) (1 / \epsilon C)$ で表され、ビーム強度分布(バンチの状態)に比例した円盤状の分布となる。

モニターの電極部(コネクタの芯線部分)は、SMAコネクタの場合は約1.1mmとなっていることから、ビームが電極を光速で通過する時間は4 ps以下となる。パルス電子線の幅(FWHM)をPw、光のスピードで考えた電極通過時間をTとすると、 $Pw > T$ の条件下において電極に誘起される信号波形は、微分波形となる。

その信号は、16 mのセミリジッドケーブル($f_c = 34 \text{ GHz}$)やコネクタ($f_c = 18 \text{ GHz}$)およびサンプリングオシロスコープ($f_c = 14 \text{ GHz}$ 、立ち上がり時間は2.5 ps)の測定系で不完全積分され、それが観測されることになる。したがって、時間分解能は、サンプリングオシロスコープの応答性で決まるといえる。なお、ビームライン上から見た電極の特性インピーダンスは50 Ω となっている。

今、パルス電子線が正規分布に近い波形であったと仮定すると、それを微分すると上下比が1となり、それに不完全積分がかかった波形が予想される。また、立ち上がり時間が速く立ち下がり時間が遅いときは、下部が大きく上部が小さい波形となり、その反対は、下部が小さく上部が大きくなる波形が想定される。

(2) 実験方法及び結果

本モニターの応答特性を知るために、ストリークカメラ(時間分解能は500fs)との相対測定を行った結果を図3-2-2に示す(極性が逆となっている)。同図は東大35 MeVライナックを用いて行ったもので、加速電流が約0.2nC/pulse、パルス幅約30 psのシングルバンチビームを用いて行った。実験は、内径5 cmのアルミパイプにSMAコネクタを取り付けたモニターで行った。ストリーク像でギザギザと成っているのは、デマルケストに照射し、その発光をストリーク管に導くための光学系レンズの調整具合で生じたものである。

同図のストリーク像からも分かるように、シングルバンチビームは、立ち上がり

が速くなだらかなピーク部分を持ち、立ち上がりに比べて立ち下がり部分が遅い形のパルスといえる。

図3-2-3 にパルス電子線が通過した時の測定波形を示す(アッテネータ=10dB使用)。ストリーク波形を微分し、測定系で不完全積分がかかったとすると、測定結果はストリーク波形と合致しているといえる。なお、この時の測定系の応答性は、 $f_c=14$ GHzであった。(ケーブルは10m長を使用。)

上記と同様なモニターを用いて、ピーク電流233A(電荷量7nC/pulse)のシングルバンチビームを測定した結果を図3-2-4に示す(アッテネータ=40dB使用)。同測定より、加速されたビームは、立ち上がり時間が速く立ち下がり時間が遅いパルス波形であるとともに、ピークが2つある可能性を示唆するものとなっている。

次に、加速器ビームを調整して最もよい状態の加速管位相角を零として左右に位相を振って、バンチの状態を変化させたときの測定結果を図3-2-5に示す。同図から明らかなように、加速管をどちらに振っても上下の相対比は1以下であった。このことは、どちらに振っても立ち上がり時間が速くなり、立ち下がり時間が遅くなる事を示している。

東大35MeVライナックを用いた同様の実験では、加速管の位相を変化させると立ち上がり時間が速くなり、それに対して立ち下がり時間が遅くなる事が確認されている。

これらのことから考えると、産研リニアックの場合は、加速ビームのエネルギーを揃える目的で、ビーム進行方向から右に90度曲げることによって、バンチの先頭が圧縮され、立ち上がり時間が速くなるものと推定される。したがって、ビーム加速に際し最も良い状態に設定したあと加速管の位相がずれたとすると、加速ビームは立ち上がり時間が速くなり、立ち下がり時間が遅くなる、といえる。

図3-2-6にコネクタの種類による出力波高値の変化を示す。同実験は、ビームのピーク電流値が233Aのシングルバンチビームを用いて行ったもので、コネクタの芯線断面積に対する出力特性をとったものである。同図からわかるように、モニターの出力波高値は、コネクタの芯線断面積に比例することがわかる。

図3-2-7にモニターを通過するパルス電子線の電荷量に対するモニター出力特性を示す。同実験は、数nC/pulseから27nC/pulseの間で行った。実験の結果、極めて良好な直線性を持っていることが確認された。この時のモニターの内径は10cmで、使用したコネクタはN型コネクタを使用した。

なお、コネクタを複数配置することにより、本モニターは、位置検出器としても利用できることも分かっている。

(3) まとめ

SMA等のコネクタを利用した非接触型ピコ秒パルス電子線モニターを試作し、その特性測定を行った。その結果、

- ①モニターの立ち上がり時間は、いずれのタイプでも約25ps(サンプリングスコープの立ち上がり時間に相当する)程度である。

- ②出力は電極を構成するコネクタの断面積に比例する。
- ③通過電荷量と出力波高値には良好な直線性がある。
- ④ポジションモニターとして使用可能である。

等がわかった。

今後の課題としては、ポジションモニター用回路の設計製作や自己相関法によるパルス幅測定の可能性検討などが挙げられる。

3.3 真空容器内多線式ビームプロファイルモニター

3.1節では、非破壊型の電子線用ビームプロファイルモニターとして、空気中で使用する多線式モニターを検討した。しかしながら、加速器を用いた自由電子レーザー実験などの高精度な実験を行う上で、加速ビームの高品質化が求められている。ビームの高品質化のためには、それを発生させる電子銃や加速管をはじめとする多くの面での高精度・高品質化が必要である。

また、加速されたビームの質を知るためには、常に位置情報、バンチ情報、ビームプロファイル、ビームエミッタンスを監視しておく必要がある。ここでは、ビームエミッタンスモニターとして用いることも可能な真空容器内多線式ビームプロファイルモニターについて述べる。

一般に、真空中におけるパルス電子線用ビームプロファイルモニターは、コルツやデマルケストをビームライン上に設置し、ビーム照射による発光から求める方法やワイヤーを置いておき、そこをビームが通過する時にワイヤーから放出される二次電子の量を求める事によって、ビームプロファイルを求める方法がある。これまで、日本のライナックにおいては両タイプが用いられてきたが、簡便で確実な方法としては、東大核研や分子研で行われた多線式ビームプロファイルモニターがある。同モニターは、 $50\mu\text{m}$ のワイヤー径を使用しており、 10MeV 以上のパルス電子線では事実上非破壊モニターとして扱えるようになっている。

同方法は、センサーワイヤーの数に比例して、各ワイヤーに対応する読みだし回路と使用するコンデンサーの精度やゲイン調整が求められるものであった。そのため筆者らは、実装上の問題が生じないようにマルチプレクサーと電荷増幅器方式を組み合わせる事によって、同回路の大幅な簡素化を行うことを試みた[3-20]。

ここでは、真空中に於てパルス電子線を用いた実験が研究施設上で不可能に近いことから、パルス電子線用ビームプロファイルモニターを展望しつつ、それに転用可能なビームプロファイルモニターの開発結果について述べる。実験は、東海村に設置されている原子力研究総合センター重照射棟(HIT)バンデグラーフ加速器を用い、ビーム電流 $0.05\text{--}4\mu\text{A}$ 、エネルギー $0.5\text{--}2\text{MeV}$ 以下で行った。なお、本モニターをパルス電子線用に転用する時は、読みだし回路の一部を変更するだけでよい。

(1) 測定原理と試作モニター

ビームプロファイルモニターの概要を図3-3-1に示す。センサーワイヤーは、 $50\mu\text{m}$ のタングステン線（表面は金メッキ）を2mm間隔に16本張ったものを縦方向と横方向に用いている。それぞれのセンサーワイヤー部分は、 $50\text{mm}\phi$ の穴を開けたアルミ板（厚さ2mm）でサンドイッチ状に挟んでいる。アルミ板とセンサー部の距離は約10mmとなっている。その概要を図3-3-2に示す。同図（a）は、試作したセンサーワイヤー部であり、（b）はアルミ板でサンドイッチ状に挟んだときのものである。（b）の状態ですべて真空中チェンバーにセットして実験を行った。

それぞれのセンサーワイヤーには、1000pFのコンデンサーが入っており、ビームがワイヤーに当たり流れる電流を一定時間蓄積するようになっている。数MeVの陽子（6 MeV以上で通過）やイオンビームは、ワイヤーで止まってしまうことになる。

したがって、加速粒子がプラス電荷とすると、ワイヤーに入射したビーム電荷とビーム入射によってワイヤーから生じる二次電子放出による電荷が加算されることになる。この二次電子を積極的に利用することで、より小さなビーム電流も計測可能となる。しかし、ワイヤーから生じた二次電子が他のワイヤーに入ることも予想され正確なプロファイルを測るためには、発生した二次電子を完全に押え込むかあるいは集めるかの選択が必要となる。そのためアルミ板には、プラスとマイナスのいずれの電圧もかけられる様になっている。

ただし、本方式をパルス電子線用プロファイルモニターに応用するときは、ビーム通過（数MeVで通過）による二次電子放出によって、プラスにチャージアップする量を測るので、プラスバイアスを印加しておき、発生した二次電子を積極的に集める方法が有効であると考えられる。電子線による二次電子放出率 α は、東大原子核研究所の実験では、 $0 < \alpha < 1$ であった[3-21]。なお、発生する二次電子は、数十eVのエネルギーが多数を占め、数KeVのエネルギーを持つ δ 線は誤差の範囲と言われている。

コンデンサーに蓄積された電荷量は、順次マルチプレクサーを介して電荷増幅器に移動し電圧信号に変換され、オシロスコープ上に読みだされる。読みだされた出力電圧分布から、ビームプロファイルが求まることになる。

電荷増幅器のフィードバックコンデンサーは、700pF（Cf）となっている。電荷を読みだした直後にその電荷を放電し、次のワイヤーのコンデンサーに蓄積された電荷を読みだすようになっている。

この時、ワイヤーを介して1000pFのコンデンサーに蓄積された電荷量をQすると、出力電圧Vは、 $V = (Q / Cf)$ で与えられる。ただし、ワイヤーを含む浮遊容量をCsとした時、 $(Cs / Cf) \ll A$ を満たす必要がある。ここにAは、オペアンプのオープンループゲインである。

今、クロック周波数をf、チャンネル数をN、蓄積時間をtとすると、

$$t = N / f$$

で与えられる。

この回路方式の最大の特徴は簡単な構成であることと、電荷移動型であるため、電荷を蓄積する1000pFのコンデンサーの誤差に依存する事なく、電荷増幅器のフィードバックコンデンサーCfによって、一意的に決定されるということである。

今、k番目のワイヤーに当たるビーム電流を I_k とすれば、k番目のワイヤーの出力電圧は、

$$V_k = (N/f) \cdot (1/Cf) \cdot (\alpha + \beta) \cdot I_k$$

で表される。ここに、 α は、一個のイオンがワイヤーに当たった時放出する二次電子数を示し、数10MeV以下の重イオンや陽子の場合は、1以上とされている。 β はビームがワイヤーに止められる割合で、 $0 \leq \beta \leq 1$ である。

(2) 実験方法および結果

実験に用いたバンデグラーフ加速器の実験施設概観を図3-3-3に示す。実験は、中性子発生用ターゲットの前方のビームライン上に、モニターを設置した真空容器内でおこなった。それよりも上流側約5mの地点に、コルツによるモニターが設置してある。実験中の真空度は、 2×10^{-7} Torrであった。

ビームエネルギー1MeV、電流 $1 \mu A$ の陽子ビーム時のプロファイル測定結果を図3-3-4に示す。同図上部は、コルツを発光させた時のもので、下部はプロファイルモニター出力である。上部波形は、細長い縦長の形状であるが、これに対応してモニター出力も縦長となっていることが確認できる。同図右側は、ビームを横に広げた時のもので、コルツとモニターの結果がよく一致している。この時、読みだしクロック周波数は500Hzであった。

図3-3-5にビーム電流の時間変動を測定した結果を示す。同図の時間軸は、0.5sec/divであり、モニターに入射するビームが微視的には交流と言っても問題ない程に変化している様子がわかる。

図3-3-6にビーム電流を変化させた時のモニター出力電流を示す。同図は、プロファイル測定結果を写真で撮影し、それから読み取った値を用いているため、ビーム変動の影響による測定誤差が、かなり含まれていると思われる。しかし、秒オーダーの積分をかければ、良好な直線性を得ることができると考えられる。

本方式の空間分解能はワイヤー間隔で決定されるため、さらに細いワイヤーを使用し、ワイヤー間隔を狭くすれば、空間分解能の向上が見込める。一方、ワイヤー間隔を狭くすればする程、バンデグラーフで加速されるエネルギーの低いビームは、止められる割合が大きくなってしまう。そのため、現在簡単に入手可能な $20 \mu m$ のワイヤーを用い、ワイヤーに止められる割合を約10%とすれば、その間隔は $200 \mu m$ 程度まですることができると言える。当然のことであるが止められる割合を無視すれば、これよりもさらに間隔を狭め空間分解能の向上を図ることは十分可能で、 $50-100 \mu m$ 程度は実現可能と思われる。

今回の実験では、 $0.05 \mu A$ のビーム電流まで測定を行った。この測定方法で検出できる最小電流を考察してみる。検出部の作り方に依存するが、読みだし回路までの全浮遊容量を C_s (ワイヤーに付いているコンデンサーも含む)、フィードバックコンデンサーを C_f とし、オペアンプのオープンループゲインを A とすると、

$$(C_s/C_f) \ll A$$

を満たさなければならない。ここでは、十分な直線性を得るために $(C_s/C_f) \leq$

100 の条件を設定したが、確実性を考えるのであれば、 $C_f > 20\text{pF}$ とすべきであろう。なお、通常 $C_s = \text{数百pF}$ 程度と考えてよい。

一方、 C_f 両端の抵抗を R_1 とすると、ディスチャージの時定数 T_1 は $T_1 = R_1 \cdot C_f$ 、検出部の等価抵抗が R_2 とすると、その時定数 T_2 は、 $T_2 = R_2 \cdot C_s$ となる。製作方法にもよるが、制御回路から真空チェンバーまでの長いリード線やコネクタ等を考慮すれば、 $T_2 < T_1$ となる。ここでは、 $R_2 = 1000\text{M}\Omega$ と仮定する。

今、読みだし周波数を f とすれば、ディスチャージする前に読み出す必要があるから、

$$(1/f) \times N \ll T_2$$

の条件を満たさなくてはならない。ここに、 N は、ワイヤーの数である。

$C_s = 200\text{pF}$ と仮定すると時定数 T_2 は $T_2 = 0.2\text{s}$ となる。 N を 16 とすれば、 $(1/f) \ll 12.5\text{ms}$ となるから、読みだし周波数は、その十倍の 0.8kHz 程度は必要となる。

読みだし周波数を 1kHz とし $C_f = 20\text{pF}$ とすると、一本のワイヤーの電荷蓄積時間は、 16ms となる。出力電圧として最低 0.1V 程度を得ようとする、 C_s に蓄積される電荷量は、 2pC となる。 $Q = i \cdot t$ より、

$$2\text{pC} = i \times 0.016$$

$$i = 125\text{pA} = 0.125\text{nA}$$

となる。この値は、加速ビーム電流の 0.5% 程度であるとすれば、ビーム電流は、 25nA まで測定可能で、 1% とすれば 12.5nA まで可能といえる。読みだし回路やセンサー部分の絶縁を工夫し、出力電圧を 0.05V でも可とするならば、 5nA 程度まで測定可能と推定される。

次に発生する二次電子について考察する。一般に、ワイヤーから生じる二次電子が他のワイヤーに入射する影響を防ぐため、バイアス電圧をかけて実験を行うのが普通である。しかし、本実験では、 100V 近くまで印加してもプロファイルに大きな影響を与えなかった。この結果から実験は、無バイアスで行った。しかし、通常ではこのようなことは考えにくい事であり、何らかの理由により、十分に電界がかからなかったことも予想されることから、今後確認実験を行う必要があると考えている。

(3) まとめ

ライナックで加速されるパルス電子線にも簡単に転用できる多線式ビームプロファイルモニター（空間分解能 2mm ）を製作し、バンデグラーフ加速器で加速される陽子やイオンビームを用いて検証実験を行った。実験は、ビームエネルギー $0.5\text{--}2\text{MeV}$ 、 $0.05\mu\text{A}$ から $4\mu\text{A}$ の間で行った。真空ダクトに設置してあるコルツの発光との相対測定の結果、ビームプロファイルを正確に測定できることが確認された。また、加速電流に対して良好な直線性を有することがわかった。

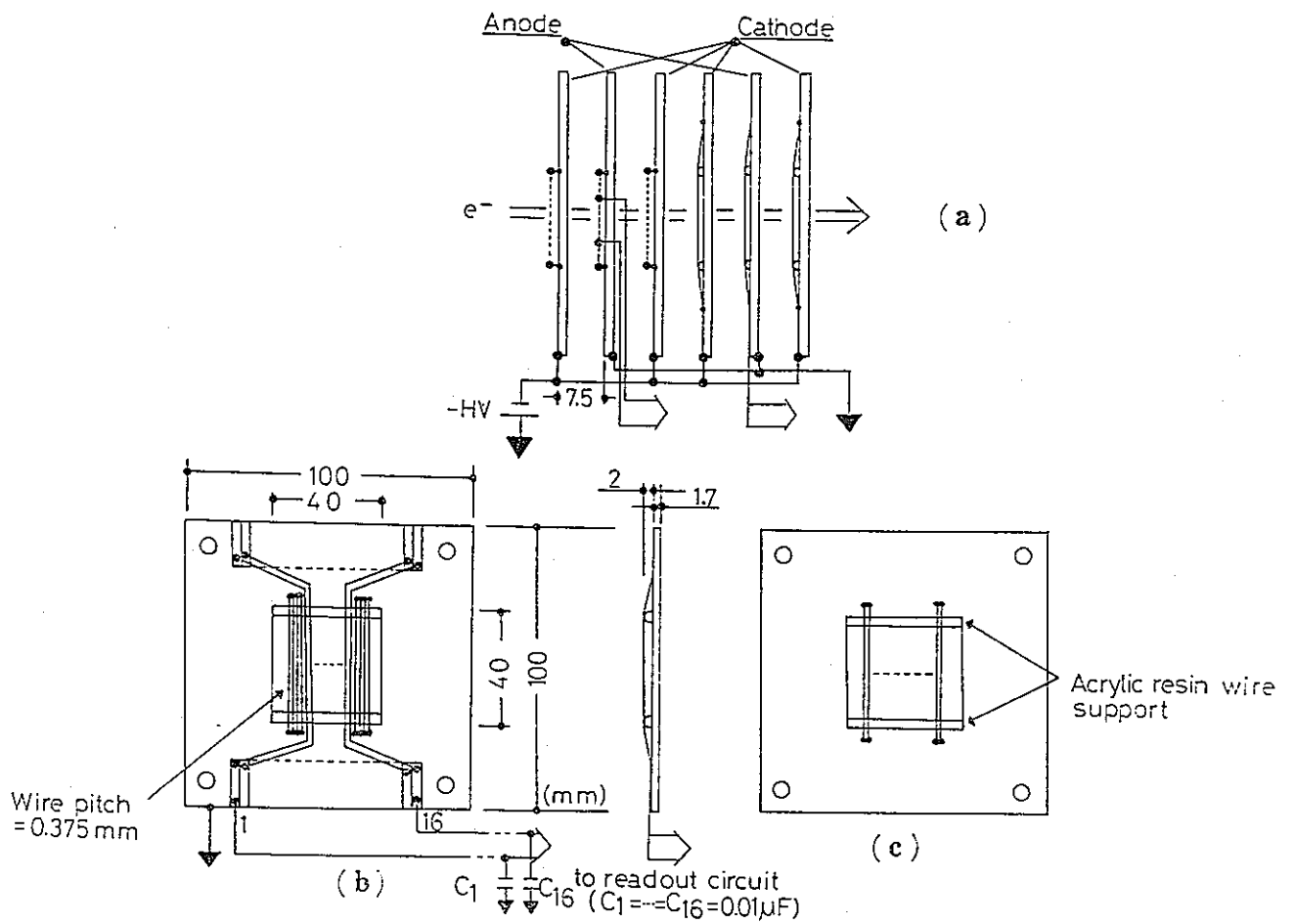
本方式は、ビームプロファイルのみでなく位置を演算無しで求めることができ、構成がきわめて簡単であるという特徴を持つとともに、もう一つのモニターを製作し一対で使用するか、ビームライン上を移動可能とするならば、エミッタンスモニターにも応用できる特徴を有する。また、本方式は、ビーム径に対して十分細いワ

ワイヤを用いれば実質的に非破壊モニターとなるものである。

今後の課題としては、ワイヤの損傷テストや測定可能な最小ビーム電流値を実験的に求めることが挙げられる。

参考文献

- [3-1] H.Koziol : "Beam Diagnostics", CERN, EUR. Organ. Nucl. Res. 89-05, (1989) pp.63-101.
- [3-2] 細野 他 : パルス電子線用多線式ビームプロファイルモニター, 応用物理 Vol.52, No.4 (1983) pp.344-347.
- [3-3] Y.HOSONO et al. : Developement of Picosecond Pulsed Electron Beam Monitor, Proceeding of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23 July 1993.
- [3-4] 細野 他 : 重イオンビーム用多線式プロファイルモニターの開発, 応用物理放射線, Vol.9, No.3 (1983) .
- [3-5] 細野 他 : ピコ秒パルス電子線モニターの開発, 1993年度大阪大学産業科学研究所共同利用報告書 (投稿中) .
- [3-6] 細野 他 : ピコ秒パルス電子線モニターの開発, 第18回ライナック研究会 (1993、筑波KEK)pp.101-103.
- [3-7] 新井重昭、五味和男、奥野英城、勝野一雄 : INS-TH-103(1975).
- [3-8] T.Fuketa et-al: Rev. Sci, Instrum, 39(1968)1573.
- [3-9] S.Fukumoto et-al: Pros. Accelerator Sci. & Technol.(OSAKA 1980) p.153.
- [3-10] 細野米市 他 : 第28回応物連合講演会予稿 (1981) p.2.
- [3-11] 細野米市 他 : 第6回日本ライナック研究会 (北海道、1981) p.176.
- [3-12] F.Sauli: Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers(CERN Press, Florida, 1977)p.51.
- [3-13] A,Brodsky: Handbook of Measurement and Protection, Section A (CRC Press Florida).
- [3-14] J.W.Boag: Radiation Dosimetry. Vol.11(Academic press, 1966)p.24.
- [3-15] 放射線による大線量率効果の現状と展望 (日本原子力学会、1980) p.45.
- [3-16] 細野 他 : 第27回応物連合講演会(1979).
- [3-17] 細野 他 : 第40回応物関係連合講演会No.1(1993)P.32.
- [3-18] 細野 他 : 第18回ライナック研究会、(1993、筑波KEK)pp.101-103.
- [3-19] 本間 他 : 阪大産研平成3年度共同利用報告書 pp.40-42.
- [3-20] K.HASEGAWA et-al: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, No.4(1981)3660.
- [3-21] 新井重昭、五味和男、奥野英城、勝野一雄 : INS-TH-103(1975).



(a) Monitor construction (b) Anode (c) Cathode

図3- 1-1 ビームプロファイルモニターの概要

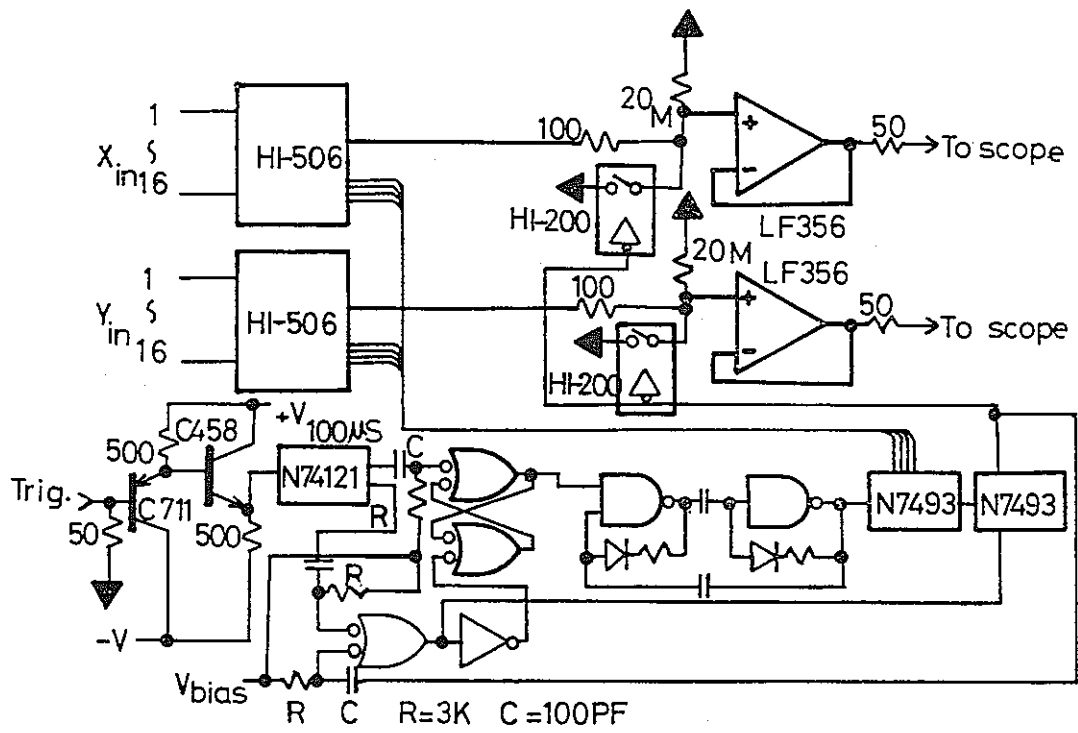


図3- 1-2 読み出し回路

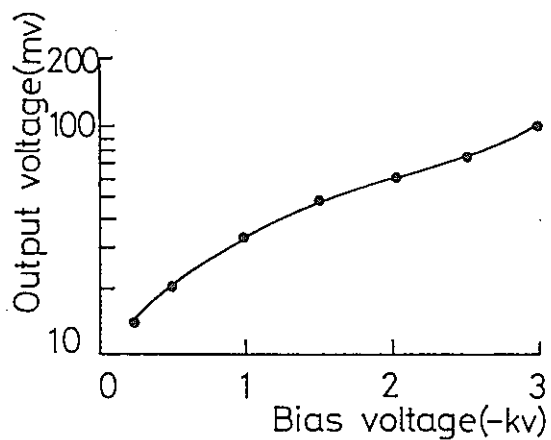
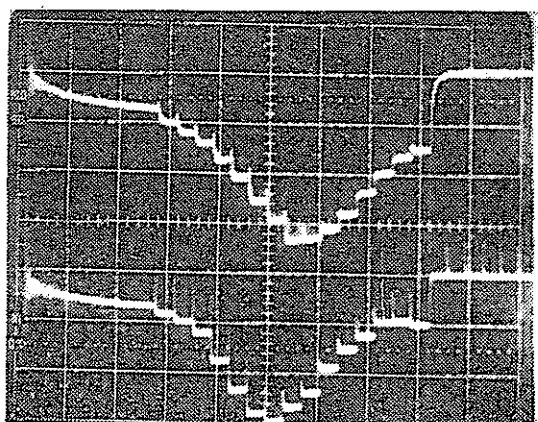


図3- 1-3 バイアス電圧特性



The upper trace shows the beam profile in the vertical axis; the lower trace shows the profile in the horizontal axis. Oscilloscope setting: $50 \mu\text{s}/\text{division}$ horizontal, $20 \text{ mV}/\text{division}$ vertical.

図3- 1-4 プロファイル測定結果

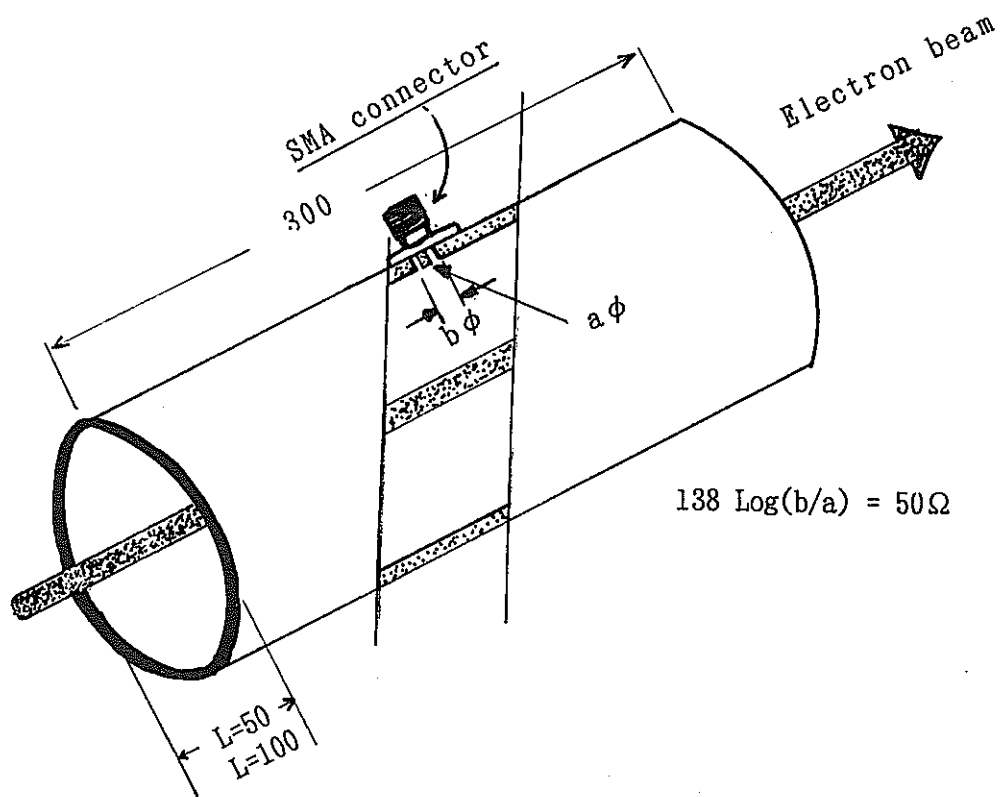


図3- 2-1 モニターの概要

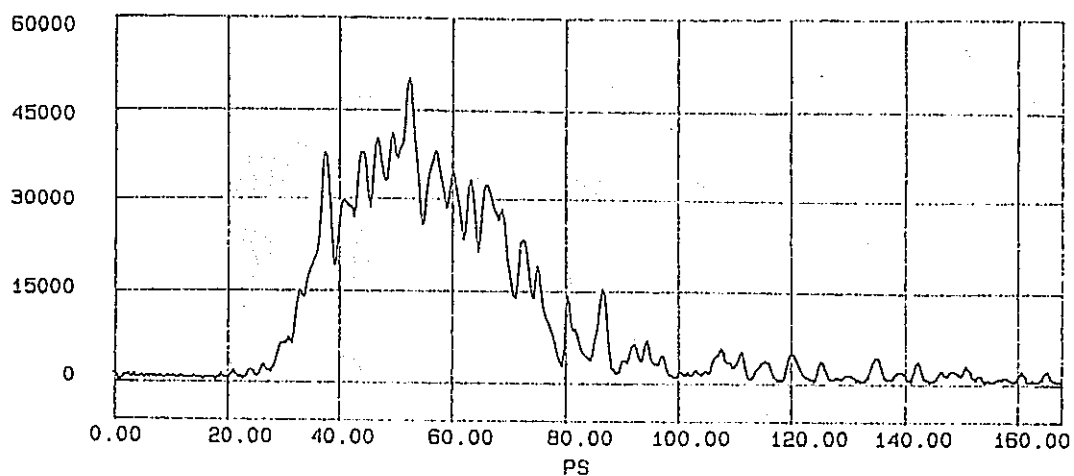


図3- 2-2 ストリークカメラによる観測波形
 加速電荷量：0.2nC/pulse
 vert.:arb.unit.,horiz.:20ps/div.

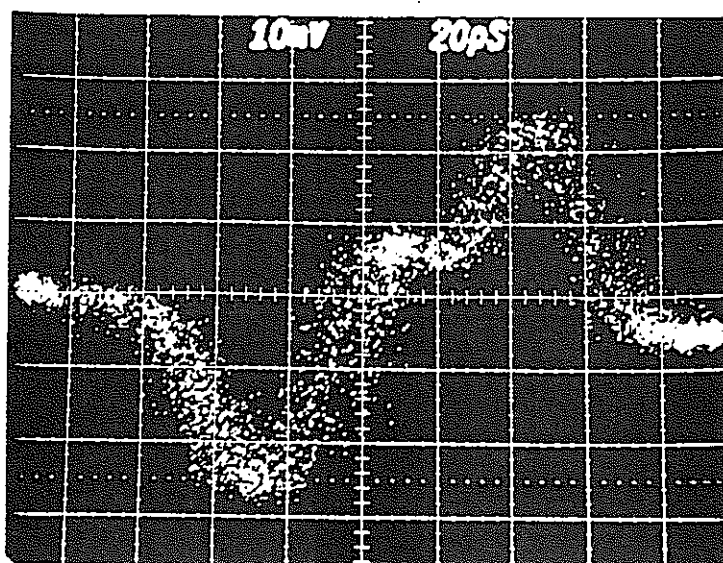


図3- 2-3 モニター出力波形
 加速電荷量：0.2nC/pulse
 vert.:10mV/div.,horiz.:20ps/div.
 (att.= 10dB)

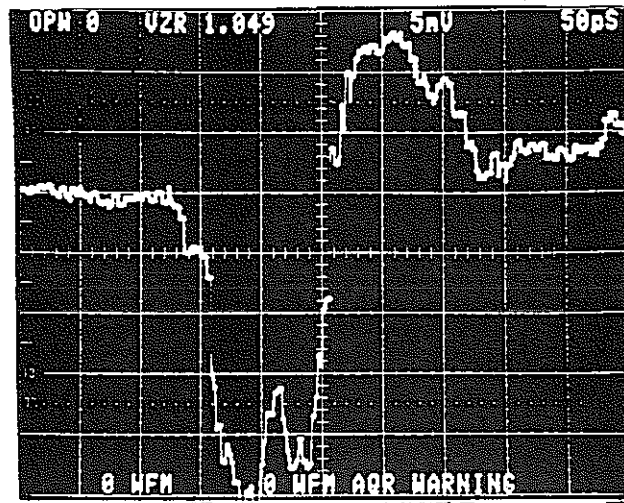


図3- 2-4 モニター出力波形

加速電荷量：7 nC/pulse

vert.:5mV/div.,horiz.:50ps/div.

(att. = 40dB)

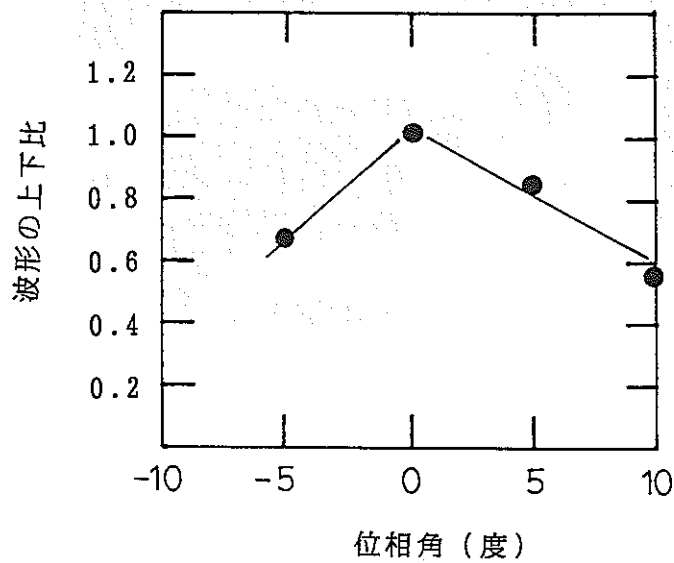


図3- 2-5 バンチの測定

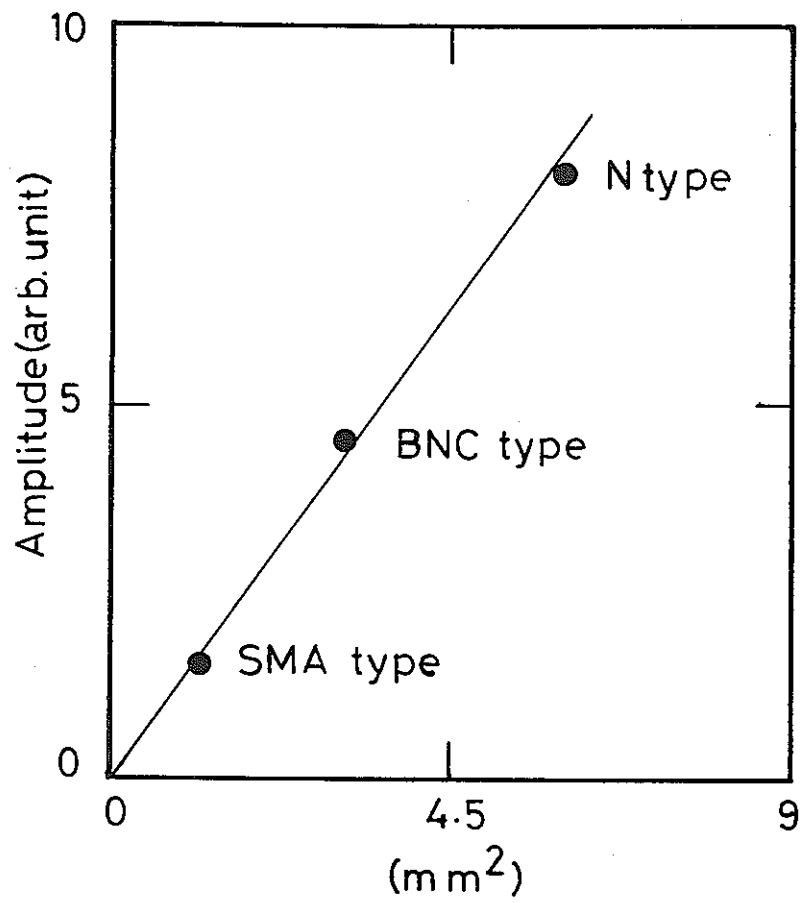


図3- 2-6 電極断面積に対するモニター出力

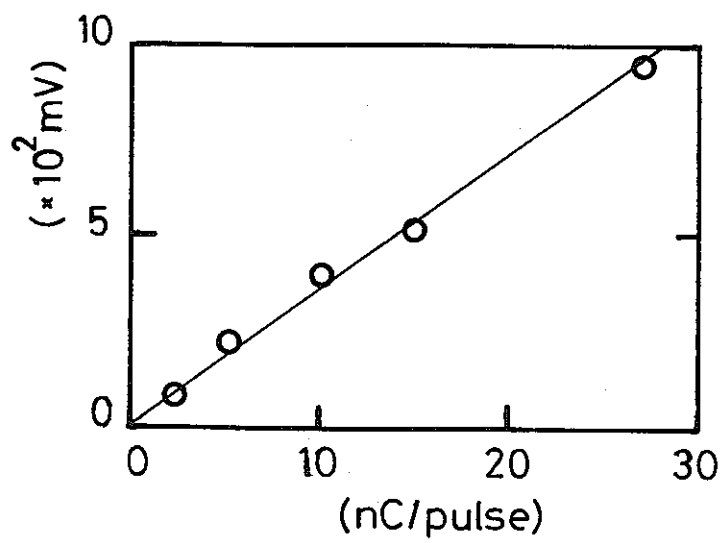


図3- 2-7 加速電荷量に対するモニター出力

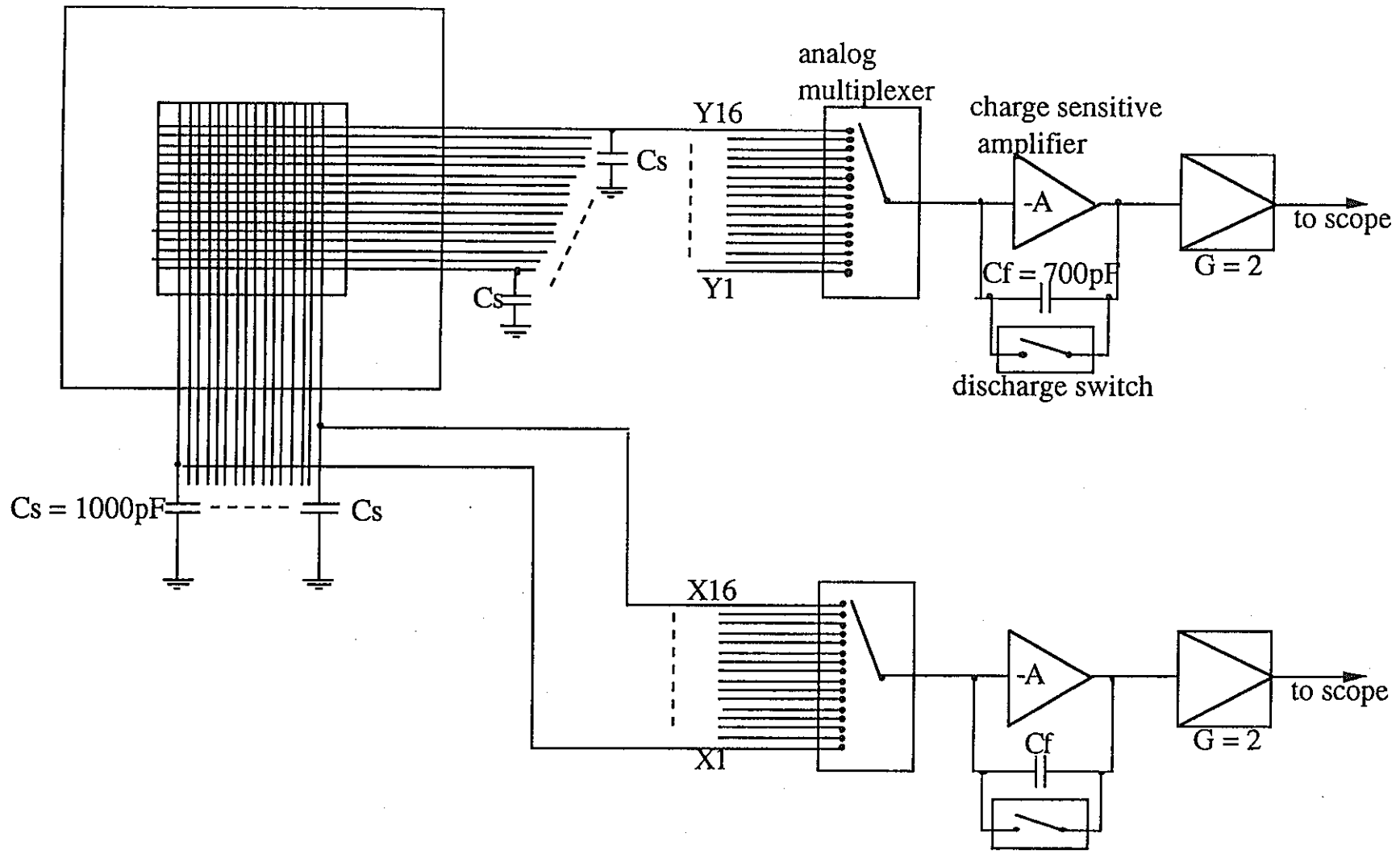


図3- 3-1. ビームプロファイ
ルモニターの概要

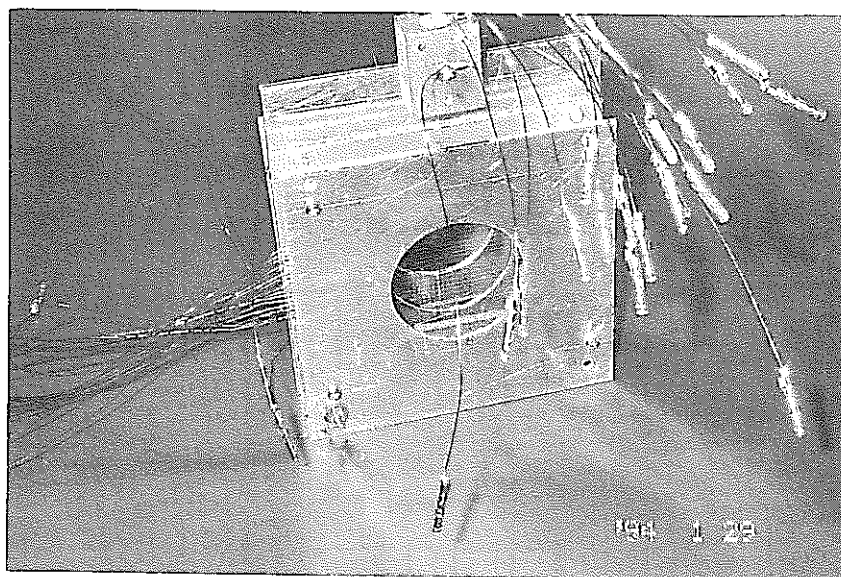
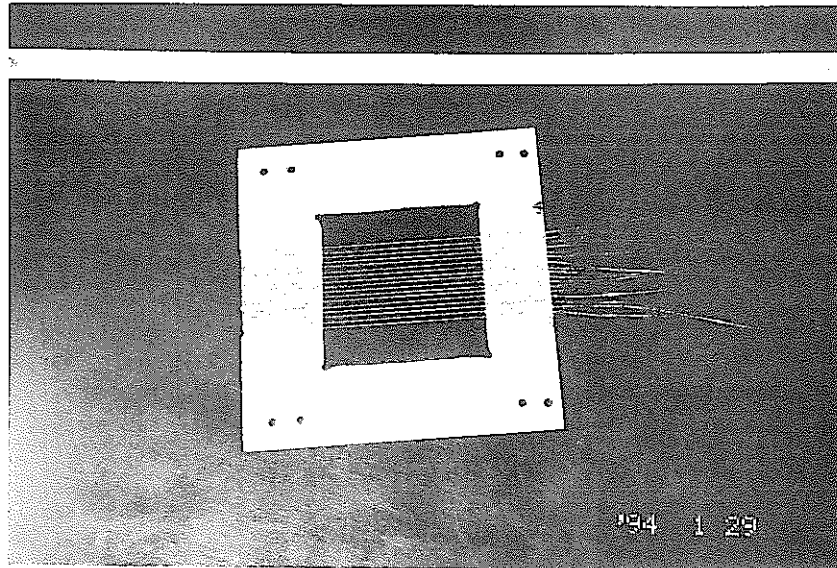


図3- 3-2. センサー部の概要

上 センサーワイヤー部

下 サプレッサーとセンサーワイヤー部

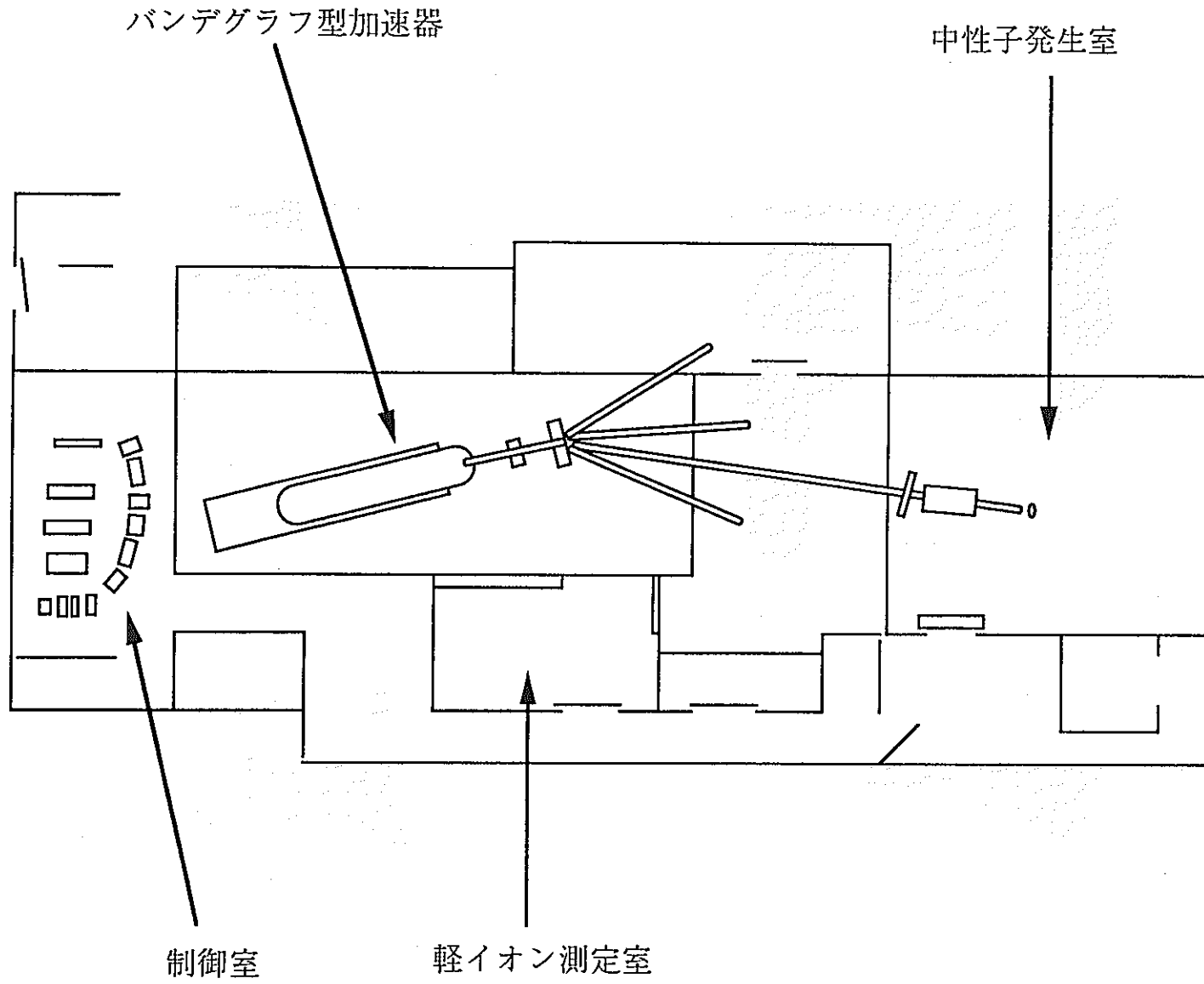
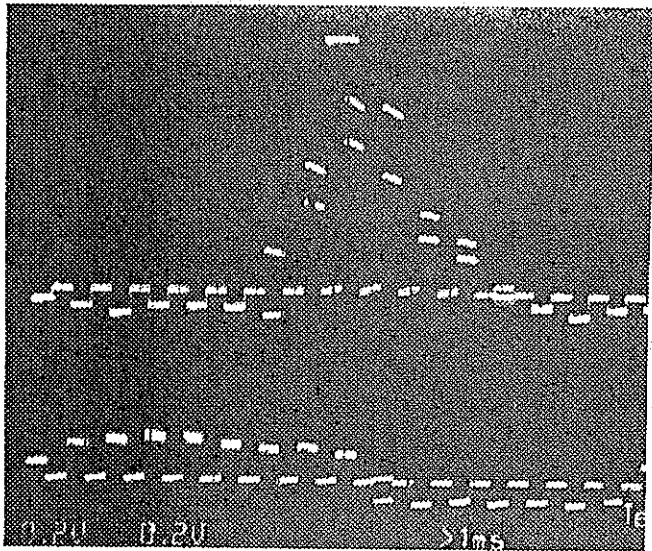
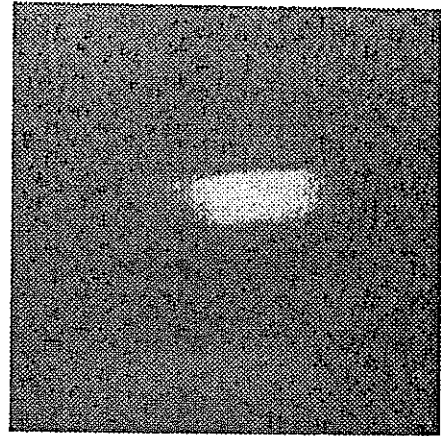
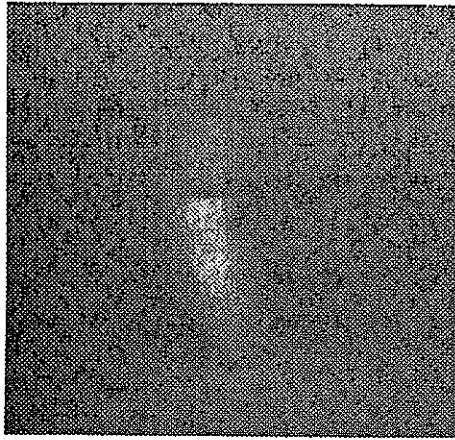
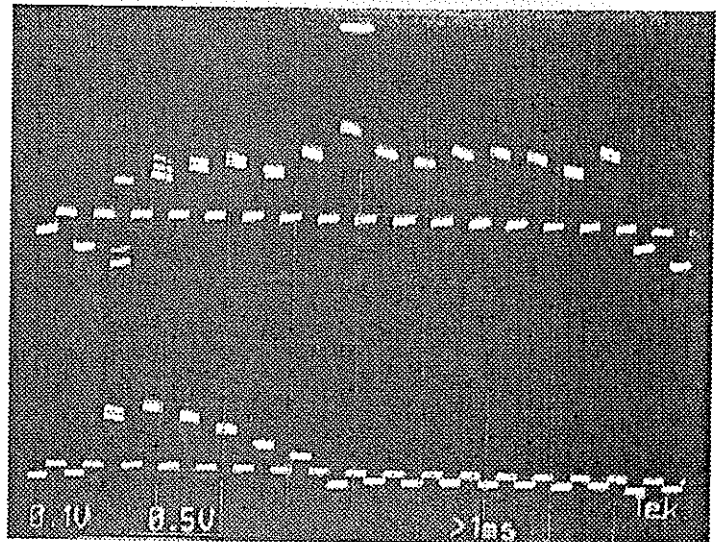


図3- 3-3. 実験施設の概要



ビームプロファイル縦長



ビームプロファイル横長

図3- 3-4. ビームプロファイル測定結果

上部波形 コルツへの照射観測

下部波形 ビームプロファイル

(上 縦方向、下 横方向)

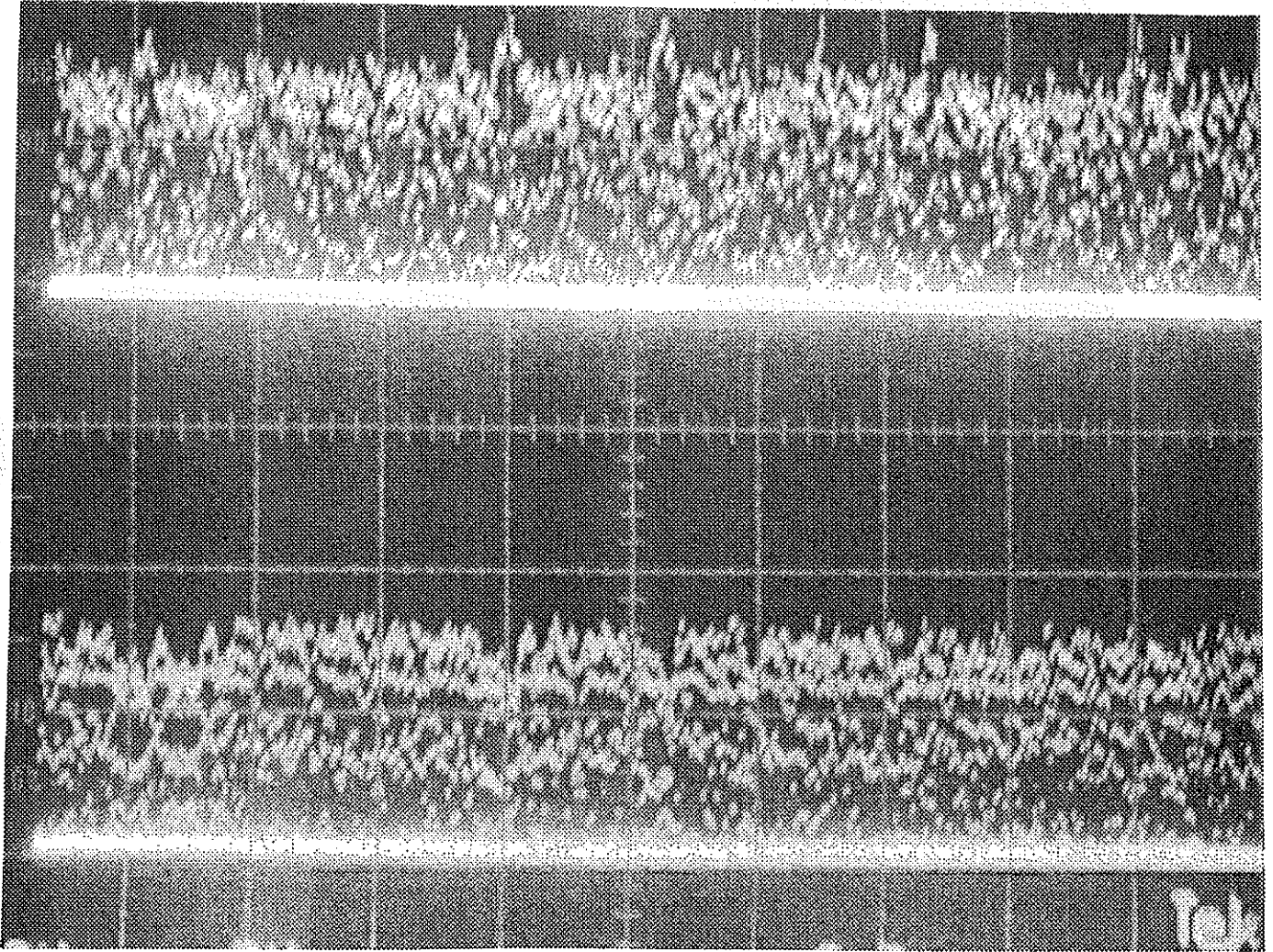


図3- 3-5. ビーム電流変動の様子

多線式ビームプロファイル
モニターのY軸の出力電圧 [V]

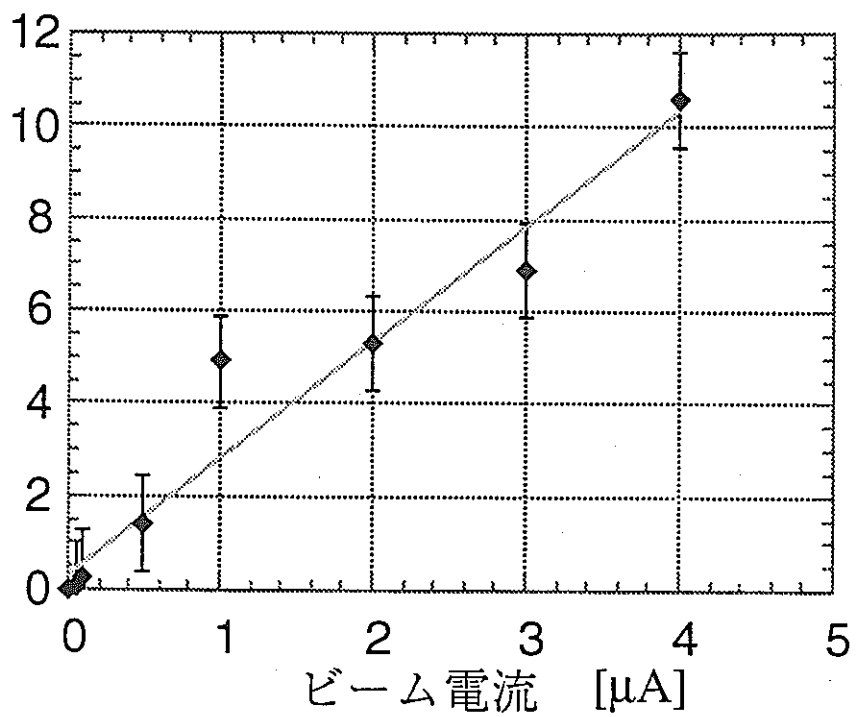


図3- 3-6. ビームプロファイル
モニターの出力特性

第4章 結 言

本研究では、大強度加速器放射線場におけるドシメトリーで重要となる広域かつ狭い・複雑空間における線量率分布測定に対して、プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)を用いた新しい放射線空間分布センシング手法の開発と適用性を評価したものである。平成4、5年に渡る2年間の研究により、本手法の基本的な技術は確立され、従来の中性子やガンマ線サーベイメータで線量率の空間マッピングを行うこととほとんど遜色のない結果が、極めて効率的に得られることを実証した。従って、現時点でも既に実用レベルに達しているとも考えられるが、検出器応答の位置依存性の補正やノーマルファイバーを接続した測定範囲の長距離化における位置分解能などに関して、より詳細な検討及び性能改善の余地が残されている。

また、本PSFセンシング手法は、これまでほとんど測定された実績のない大強度加速器におけるビーム損失モニターとしても極めて有望と考えられ、本研究では、このビーム損失情報を活かすために、対になって測定されるべき加速器ビーム特性のモニター法についても検討を加えた。特に、我々のグループが開発している電子線形加速器用の簡便なビームモニタリング手法の中で、非破壊型かつ簡便であるという観点から、空气中または真空中で使用する多線式ビームプロファイルモニター及び同軸ケーブル用コネクタを用いたビームバンチ・ポジションモニターの有用性を示した。

以上、本研究で得られた成果が、動燃事業団で進められている大強度CW電子線形加速器の開発研究やドシメトリー計画に反映されることを期待する次第である。

謝 辞

本研究の遂行にあたりまして、プラスチックシンチレーションファイバー実験では、井口哲夫氏、高橋浩之氏、高田英治氏（以上、東大工）、また、電子線形加速器用ビームモニターの試作及び性能検証実験では、細野米市氏、小林利明氏、渋谷武夫氏、大塚康介氏（以上、東大工）、本間 彰氏（北大工）の各氏に多大なご協力をいただきました。ここに配して、感謝の意を表します。