JAERI-Tech
96-046

微小領域線量分布測定装置

1996年11月

田口光正・南波秀樹・青木　康・渡辺立子・松本裕一・渡辺　宏

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　日立高速印刷株式会社

JAERI-Tech 96-046

微小領域線量分布測定装置

日本原子力研究所高崎研究所環境・資源利用研究部
田口　光正・南波　秀樹・青木　　康
渡辺　立子・松本　裕一・渡辺　　宏

（1996年10月4日受理）

重イオン照射により固体及び液体中に付与される高密度なエネルギー付与によって誘起される現象を理解するために，TIARA（Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application）施設内のAVFサイクロトロンの垂直ビームポートに，重イオンによるエネルギー付与の空間分布測定及び高速時間分解吸収・発光測定の可能な微小領域線量分布測定装置を設置した。

本報告書は，装置の仕様，性能，運転方法の説明及び基本データをまとめたものである。

高崎研究所：〒370－12　群馬県高崎市綿貫町1233

JAERI-Tech 96-046

Specifications of EA-BRACHI

Mitsumasa TAGUCHI, Hideki NAMBA, Yasushi AOKI,
Ritsuko WATANABE, Yuuichi MATSUMOTO and Hiroshi WATANABE

Department of Radiation Research for Environment and Resources,
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Wtanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received October 4, 1996)

EA-BRACHI (Experimental Apparatus for Basic study of Radiation Chemistry with Heavy Ions) has been constructed at a vertical port of AVF cyclotron in TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) facility. This apparatus is used for measurement of the spatial distribution of energy deposited arround the ion's path, and the reaction of radicals and other intermediates produced by heavy ion irradiation in solid and liquid samples.
This report detailed specifications and perfomance of this apparatus, including operational procedures and some basic data.

Keywerds: EA-BRACHI, Heavy Ion, AVF Cyclotron, TIARA, Microdosimetry, Pulse Radiolysis, Emission Spectrum, Adsorption Spectrum

目　　次

1. はじめに …… 1
2. 装置の概要 …… 3
3. 各機器の特性 …… 5
3.1 全体の構成 …… 5
3.2 排気系 …… 10
3.3 ビームモニター …… 12
3.4 ビームピックアップ …… 13
3.5 照射チェンバー …… 17
3.6 光学測定系 …… 17
3.7 差動排気系 …… 21
3.8 気相のマイクロドジメトリーのためのイオン化チェンバー …… 22
4. 運転方法 …… 25
4.1 装置の立ち上げ …… 25
4.2 通常の運転方法 …… 26
4.2.1 実験準備 …… 26
4.2.2 照射及び測定 …… 31
4.2.3 終了操作 …… 35
4.3 装置の停止 …… 38
5. 安全対策 …… 39
5.1 放射線被曝に対するインターロック …… 39
5.2 漏電防止のために …… 39
5.3 非常時の真空悪化に備えて …… 39
6. 基本データ …… 40
6.1 ビーム輸送 …… 40
6.2 第1チェンバー　ビームピックアップ …… 40
6.3 第2チェンバー　発光スペルトル …… 48
6.4 第2チェンバー　吸収スペクトル …… 52
6.5 第3チェンバー　マイクロドジメトリー …… 53
7. プログラム …… 55
7.1 オシロスコープのデータ取り込みプログラム …… 55
謝　辞 …… 64
参考文献 …… 65

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Outline of the Apparatus ····· 3
3. Specifications fo Components ····· 5
3.1 Components of the system ····· 5
3.2 Pumping system ····· 10
3.3 Beam monitor ····· 12
3.4 Beam pick up ····· 13
3.5 Irradiation chamber ····· 17
3.6 Optical measurement system ····· 17
3.7 Differential pumping system ····· 21
3.8 Small ionization chamber for microdosimetry in gas-phase ····· 22
4. Operation ····· 25
4.1 Getting strated ····· 25
4.2 Usual operation ····· 26
4.2.1 Preparation for experiment ····· 26
4.2.2 Irradiation and measurement ····· 31
4.2.3 Procedure after-experiment ····· 35
4.3 Shutting down ····· 38
5. Safeguard ····· 39
5.1 Interlock against exposure to radiation ····· 39
5.2 For escaping from leakage of electricity ····· 39
5.3 Valve-shutting of vacuum trouble ····· 39
6. Basic data ····· 40
6.1 Beam transport ····· 40
6.2 No.1 chamber Beam pick up ····· 40
6.3 No.2 chamber Emission spectrae ····· 48
6.4 No.2 chamber Absorption spectra ····· 52
6.5 No.3 chamber Microdosimetry ····· 53
7. Program ····· 55
7.1 Data input program of oscilloscope ····· 55
Acknowledgement ····· 64
References ····· 65

1. はじめに

高エネルギーの重イオンを水溶液や有機化合物あるいは生物に照射した場合、電子線やγ線を照射した場合とは生成物の収率（Ｇ値）や生物に対する効果比（ＲＢＥ）が異なる事が知られている。このことはエネルギー付与の空間的分布の違いに依ると考えられている。電子線やγ線照射は物質中に比較的均一にエネルギーを付与する。一方、重イオンではその原子核が大きいゆえに①高密度なエネルギー付与、②トラックと呼ばれる空間的に不均一なエネルギー付与をする。①に関しては、数ＭｅＶの電子線照射の場合、ＬＥＴ（線エネルギー付与）が０．１ｅＶ／ｎｍ程度であるのに対し、数１００ＭｅＶの重イオンでは数１００ｅＶ／ｎｍにもなる。さらに、②で示したように、エネルギー付与は空間的に不均一に起こり、イオンの飛跡方向及び飛跡に対する径方向に特徴的な分布を持つ。一般に、物質中を直進する重イオンの飛跡方向のエネルギー付与はBethe式によって求められ、重イオンの止まる直前に最も大きなエネルギーを付与する。また、飛跡に対する径方向の分布はKatz式で近似され、イオンの飛跡からの距離の－２乗でエネルギー付与量が減少すると考えられている。イオンの飛跡に沿って大量のエネルギーが付与されるため高密度に活性種が生成し、それらは系内で相互作用を起こし特殊な照射効果を引き起こすと考えられている。

エネルギー付与の空間分布を理解するために、理論的な解析手段としてメタンガスに電子やＣイオンを打ち込んだ時の、イオン化の分布やその拡散はモンテカルロ計算によって求められている[1]。さらに、水蒸気にイオンを打ち込んだ時の、イオン化の分布が理論計算によって統計的に解析されている[2]。一方、気体Ａｒ中に２００ＭｅＶのＮｉ$^{12+}$イオンを照射し、径方向のエネルギー付与量を実験的に求めたところ、Katz式で表される距離の－２乗よりも大きな距離依存性を示す事が分かった[3]。また、窒素ガスに１０ＭｅＶ程度のプロトンを打ち込み、イオンによって励起されるエネルギーの異なる発光の強度の距離依存性を相対的に求めたところ、観測するエネルギーの違いによりその距離依存性も異なってくる事が報告されている[4]。しかしながら重イオン照射によるエネルギー付与の空間分布は、依然理論計算が主で実験的にはほとんど明らかにされていない。

水あるいは水溶液にイオン照射した場合、付与されたエネルギーが引き起こす初期の反応としてＯＨ、HO_2、H_2O_2などの活性種が生成する。これら活性種の生成収率はＬＥＴを変えた時に変化することを示すデータが報告されている[5-8]。最も生体に影響を及ぼすと考えられているＯＨラジカルの収率はＬＥＴの増加に伴い減少する。ところが生物学的な効果比は約１００ｅＶ／ｎｍまで増加し、それ以上のＬＥＴ値では逆に減少する事から、イオン照射によって生成する細胞内の傷の原因が単純にＯＨラジカルに由来するものでない事が分かる。さらにイオン照射によって励起された有機分子の発光寿命を測定した結果、その発光寿命が短くなっている事から、トラック内に高密度に生成した励起種同士の相互作用が起こっている事が考えられている[9-11]。

固体状のアミノ酸や蛋白、ＤＮＡ塩基などにイオン照射した結果生じる準安定状態のラジカルのＥＳＲ測定を行なったところ、ラジカル収率はイオン照射ではＸ線照射と比べ１桁以上小さく、その

スペクトルの解析から、イオン照射ではラジカル密度やラジカル崩壊反応が異なる事が報告されている[12]。また、有機化合物にイオン照射した時の、安定生成物の収率の比較から、アセトンにＬＥＴの異なるイオンを照射した場合、生成物の収率にＬＥＴ依存性があることが観測されている[13]。さらに、ヨウ素を含むシクロヘプタンにγ線及びα粒子を照射し生成物の比較を行なったところ、シクロヘプタン２量体生成のＧ値は両者とも０．２～０．３であったにもかかわらず、ヨウ化シクロヘプタンの生成量はα粒子照射ではγ線照射の場合の１／３程度であることが知られている[14]。

重イオン照射後の生物への効果をγ線や電子線照射と比較したところ、ＬＥＴの増加に伴いその効果も増加するが、約１００ｅＶ／ｎｍ以上のＬＥＴ値では逆に減少する事が報告されている[15-18]。生物の死や突然変異は主にＤＮＡのダメージにより、生物学的な効果とＤＮＡダメージのＬＥＴ依存性は比較的よく似ている。しかし、ＤＮＡのダメージは１本鎖切断と２本鎖切断とがあり、それらの比は重イオンの原子核の大きさによっても変わってくる。重イオン照射によるＤＮＡダメージの初期収率やその質など依然として不明であるが、細胞中のＤＮＡに引き起こされるダメージは、低ＬＥＴの放射線照射と比べ複雑で修復されにくいと考えられている。

このようにエネルギー付与やそれによって引き起こされる化学反応、さらには生物への影響などに重イオンに特徴的な効果の現れることが分かった。そこで我々は重イオンの特徴的なエネルギー付与によって引き起こされる生体関連物質の反応過程を解析するために、４つのチェンバーからなる装置をＴＩＡＲＡ施設に設置した[19,20]。まず、エネルギー付与の空間的な分布を実験的に明らかにするために、重イオンのセミマイクロビームを照射できる構造のチェンバーを設け、気体Ａｒ中のイオン化の分布を実験的に求め、理論値と計算値の違いについて明らかにした[21]。また、ＯＨ、HO_2などの活性種によって引き起こされるイオン照射によって特異的な化学反応を理解するために、高速な時間分解吸収・発光スペクトル測定の可能な装置を設置した。これにより重イオン照射によって誘起される励起状態の挙動や生成するラジカル種の測定を可能とした[22-23]。さらに、回転式の試料照射台を設け、ＤＮＡや蛋白質、アミノ酸などの生物試料への照射を可能とした。照射後、試料はＧＣ－ＭＳやＨＰＬＣ、ＥＳＲなどの手段によって測定、解析され重イオン照射に特有な化学変化について調べられる。

2．装置の概要

本装置は、重イオン照射によって引き起こされる特徴的な現象を観測及び解析するために、TIARA(Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Applicationの略)施設内のＡＶＦサイクロトロンの垂直ビームライン（ＨＸポート）に設置したものであり、EA-BRACHI(Experimental Apparatus for Basic study on Radiation Chemistry with Heavy Ionsの略)の愛称で呼ばれている[19]。本装置はイオン照射によるエネルギー付与や活性種の振る舞い、さらには生成物の収率というイオン照射によって誘起されるさまざまな現象を観測するために、いくつか特徴のある排気系、照射系及び測定系を持つ。空間的なエネルギー付与の分布を観測するために、可動式の３段のコリメータを用い装置全体で差動排気系を構築し、大気圧での気体試料に５０μｍφ程度の細いイオンビームを照射しイオンビームに対して径方向のエネルギー付与の絶対値測定を可能とした。また、イオン照射直後に引き起こされる物理化学過程の現象を観測するためにナノ秒程度の時間分解能を持つ吸収・発光測定システムが設置され、イオン照射によって誘起された励起状態の分子の振る舞いやラジカル種の反応を追跡できる。さらにそれらの反応の結果生じる生成物の収率を測定するために、固体、液体及び気体試料へ室温あるいは試料温度を変化させた状態での照射を可能とした。

このような多種類の実験を行なうために、本装置はゲートバルブによって仕切られたそれぞれ異なる役割を持つ４つのチェンバーより成り立っている。各チェンバーはイオンビーム上流から第０、第１、第２、第３チェンバーと呼ばれている。第０チェンバーにはビームビューワーが設置され、サイクロトロンから送られてくるイオンビームの形状や強度分布等をモニターすることができ、ビーム調整に使用される。第１チェンバーには、イオン照射直後のラジカル種などの反応を観測することを目的とした高速の時間分解測定を行なうための、イオンの入射タイミング信号を得るためのビームピックアップが設けられている。また、実験中のトラブルによる急激な真空度悪化からサイクロトロン及びビームラインを守るためのファーストアクティングバルブが設置されている。第２チェンバーには有機物質や生体関連物質を照射するための回転式試料照射台が設けてあり、付属のアルミナ蛍光板によってビーム形状やビームの強度分布の観測が行なわれ、ファラデーカップで電流値を測定した後、固体試料への照射が行なわれる。また、専用の照射セルを用いる事により、固体試料と同様に液体や気体試料への照射を可能とした。紫外部から近赤外領域までの光学測定を行なうために合成石英ガラスを窓材とし、高速な測定を行なうために検出器としてストリークカメラやホトマル、あるいは光源としてＸｅランプ等を設置し重イオン照射によって誘起される励起状態やラジカル種などの反応の追跡を可能とした。第３チェンバーには銅製のブロックが設置され、液体窒素温度程度の低温から１００℃までの範囲で試料温度を変化させながらの照射を可能とした。また、第１、第２、第３チェンバーのそれぞれに設けたＸＹステージ上にセットされたコリメータを用い、装置全体としてセミマイクロビームを形成し、３段の差動排気系により第３チェンバーを大気圧程度の圧力の気体試料で満たした状態での重イオン照射を可能とした。２台の気体透過型のイオン化チェンバーによって重イオ

ン照射によって生成する微小な電荷を測定し、イオンビームに対して径方向のエネルギー付与量の絶対値測定を可能とした。

3．各機器の特性

3.1　全体の構成

微小領域線量分布測定装置の概略図をＦｉｇ．３－１に示す。ゲートバルブによって仕切られた４つのチェンバーより成り立っており、イオンビーム上流側から第０、第１、第２、第３チェンバーと呼ばれている。第１、第２、第３チェンバーは、それぞれ独立した排気系を有し、さらに、水平方向に可動なＸＹステージ上に乗ったタンタル製のコリメータが設けられ、全コリメータを用いる事により全体として直径５０μｍ程度の細いイオンビームを形成する。また、専用のチェンバーを用いることにより固体のみならず、液体、気体試料への照射を可能とした。

（１）　第０チェンバー

微小領域線量分布測定装置のイオンビーム最上流部に位置し、施設側最終段のゲートバルブと接続されている。また、イオンビームの位置や形状をモニターするための、同心円状に罫書きをされたＭｇＯビームビューワーが設けられ、ＣＣＤカメラによってビーム形状及び強度分布をモニターしながらイオンビームの調整を行なうことができる。また、このビームビューワーは、イオンビーム照射実験のためにイオンビームが全く当たらない位置まで圧縮空気により遠隔操作で移動が可能である。

（２）　第１チェンバー

Ｆｉｇ．３－２に第１チェンバーの概略図を示す。チェンバー本体はＳＵＳ製円筒形の構造となっており、イオンビームは筒の上部より入射する。本チェンバーとビームライン本体ならびに第２チェンバーとは、絶縁リングにより電気的に絶縁されている。また、時間分解測定を行なうために、カーボンフォイル及びＭＣＰ（マイクロチャンネルプレート）からなるビームピックアップが設けられ、イオンの入射タイミングをパルス信号で取りだす事ができる。

真空度悪化の緊急時にはチェンバーに設置されたプレシャーセンサーからの信号を受け、ただちにサイクロトロンからのビームラインと第１チェンバーより下流の装置との間を高速緊急遮断するファーストアクティングバルブを設けた。

ファーストアクティングバルブ(NATIONAL ELECTROSTATICS CORPORATION VS2F)

遮断時間：３５ｍｓ以下

制御設定圧力：10^{-3}～10^{-8}Ｔｏｒｒ

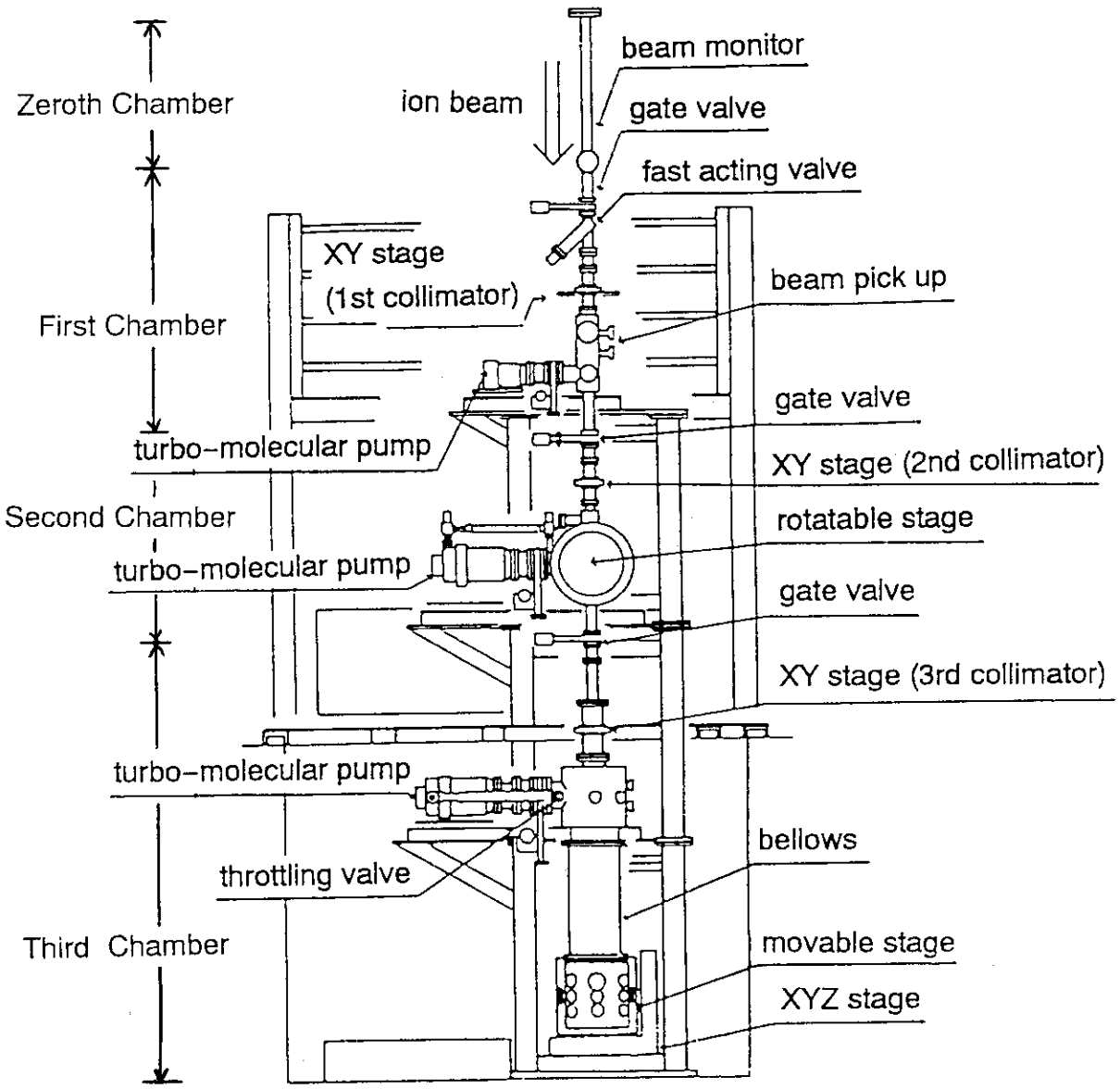

Fig. 3-1 Schematic diagram of apparatus.

（３）　第２チェンバー

第２チェンバー本体はＳＵＳ製円筒形の構造となっており、イオンビームは横向きにした筒の側面より入射する（Ｆｉｇ．３－３）。筒の片面はＯリングシールの扉とし、光学系の調整や試料の取り付けなどを行なうために、開閉できる構造となっている。本チェンバーと第１ならびに第３チェンバーとは絶縁リングにより電気的に絶縁されている。チェンバー内には回転式の照射台が設置され、生体関連試料や高分子試料はこの照射台上にセットされる。また、照射台には、イオンビームのプロファイルをモニターするための合成石英ガラスやアルミナ蛍光板(DESMARQUEST AF995R)、さらに試料に照射される電流をモニターするためのファラデーカップを設置した。

第２チェンバー内の残留ガスやイオン照射によって発生するガスの種類や濃度をモニターできるＱマスを用いた測定器が設置されている。この指示値は第２重イオン室ならびに重イオン準備室で常時モニターできる。

Ｑマス(ANELVA QIG-066)

質量数範囲：１～６６ａｍｕ

動作圧力：２ｘ１０$^{-4}$Ｔｏｒｒ以下

最小検知圧力：５ｘ１０$^{-11}$Ｔｏｒｒ

さらにイオン照射によって誘起される高速現象を観測するために、１０ｐｓ以内の時間分解能を持つ検出器としてストリークカメラや光電子増倍管、光源としてＸｅランプなどを設置した。

（４）　第３チェンバー

チェンバー本体はＳＵＳ製直方体の構造となっており、イオンビームは上面より入射する（Ｆｉｇ．３－４）。チェンバー前面には、Ｏリングによりシールする構造の扉を設けている。ビーム軸調整のために、第２チェンバーとの間はベローズによって接続され、第３チェンバー自身を可動式ステージ上に乗せＸＹＺ方向に可動とした。この駆動は第２重イオン室ならびに重イオン準備室から遠隔操作できる。

３軸ゴニオメータ　マイクロメータ遠隔駆動

可動範囲	Ｘ方向	２００ｍｍ	精度：５μｍ
	Ｙ方向	２００ｍｍ	精度：５μｍ
	Ｚ方向	８００ｍｍ	精度：１００μｍ

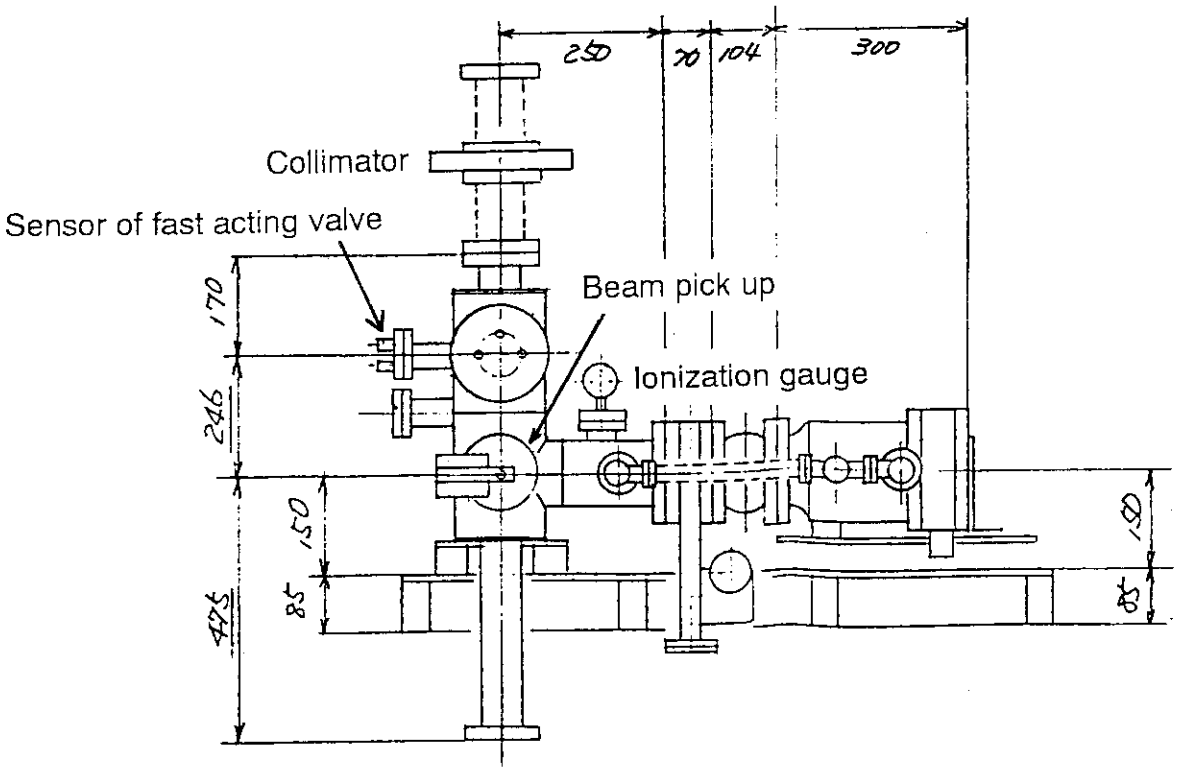

Fig. 3-2 Schematic illustration of first chamber.

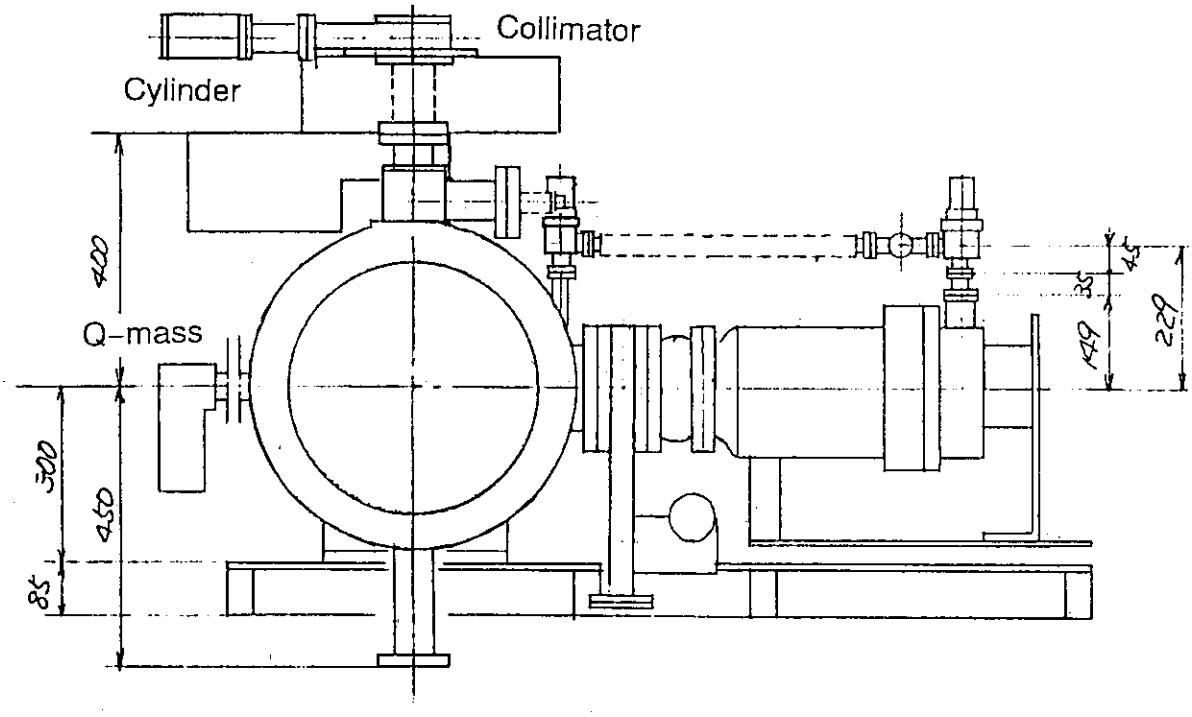

Fig. 3-3 Schematic illustration of second chamber.

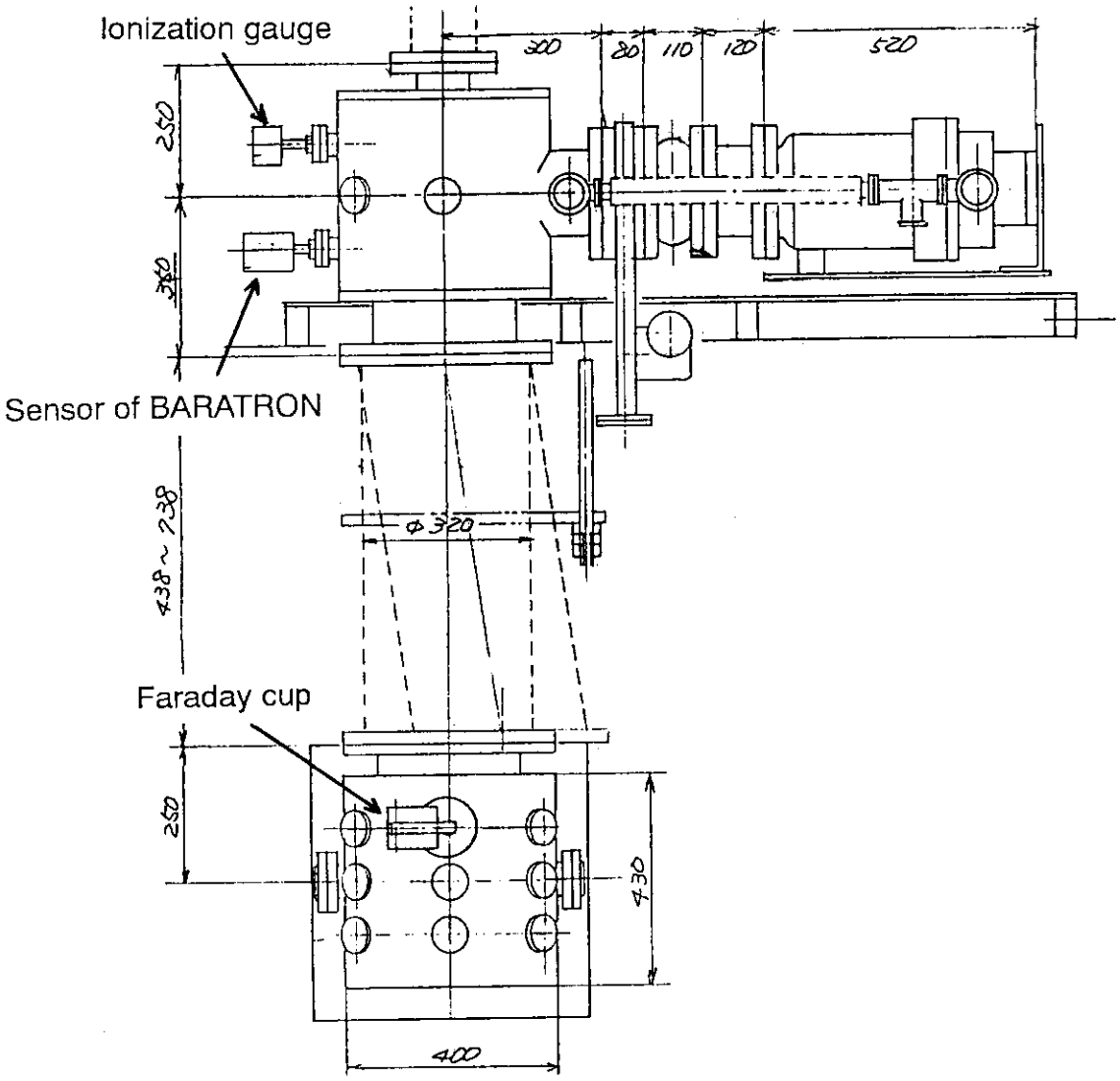

Fig. 3-4 Schematic illustration of third chamber.

3.2 排気系

第1、第2、第3チェンバーは、それぞれ独立した3台の真空排気装置を有し（Ｆｉｇ．３－１）、通常1×10^{-7}Ｔｏｒｒ以下の真空度に排気されている。それぞれの真空排気装置は、ターボ分子ポンプ及びそのコントローラーならびにロータリーポンプにより構成されている（Ｔａｂｌｅ　３－１）。装置全体でセミマイクロビームを構成するために、振動を極力さけられる磁気浮上型でダンパー付きのターボ分子ポンプが使用されている。

各チェンバーにはチェンバー内の真空度を常時モニターするために、４組のピラニゲージ及び電離真空計が設置されている（Ｔａｂｌｅ　３－２）。イオン照射直後の微弱な発光の高感度な測定を行なう場合に、電離真空計のフィラメントを消すため、第２チェンバーにはコールドカソードゲージが取り付けられている。これら真空計の指示値は、第２重イオンに設置された制御盤（Ｆｉｇ．３－５）および重イオン準備室に設置した装置コントロール用机の表示盤（Ｆｉｇ．３－６）で常時モニターできる。

Ｔａｂｌｅ　３－１　Ｃｏｍｐｏｎｅｎｔｓ　ｏｆ　Ｖａｃｕｕｍ　Ｓｙｓｔｅｍｓ．

Ｃｈａｍｂｅｒ	Ｖａｃｕｕｍ　ｓｙｓｔｅｍ
Ｆｉｒｓｔ	Turbo-molecular pump(OSAKA VACUUM TG360M)　360 l/s Rotary pump(Edwards 12 two-stage)
Ｓｅｃｏｎｄ	Turbo-molecular pump(OSAKA VACUUM TG600M)　600 l/s Rotary pump(Edwards 12 two-stage)
Ｔｈｉｒｄ	Turbo-molecular pump(OSAKA VACUUM TG1000M)　1000 l/s Rotary pump(Edwards 30 two-stage)

Ｔａｂｌｅ　３－２　Ｖａｃｕｕｍ　Ｇａｕｇｅｓ　ｏｎ　Ｅａｃｈ　Ｃｈａｍｂｅｒ．

Ｖａｃｕｕｍ　Ｇａｕｇｅ	Ｃｈａｍｂｅｒ	Range(Torr)
Ｐｉｒａｎｉ (DIAVAC LIMITED PT-120)	0th, 1st, 2nd, 3rd	10^{-3}～760
Ｉｏｎｉｚａｔｉｏｎ (DIAVAC LIMITED IT-510)	0th, 1st, 2nd, 3rd	10^{-9}～10^{-3}
Ｃｏｌｄ　Ｃａｔｈｏｄｅ (HPS Division 941 COLD CATHODE)	2nd	10^{-9}～10^{-2}

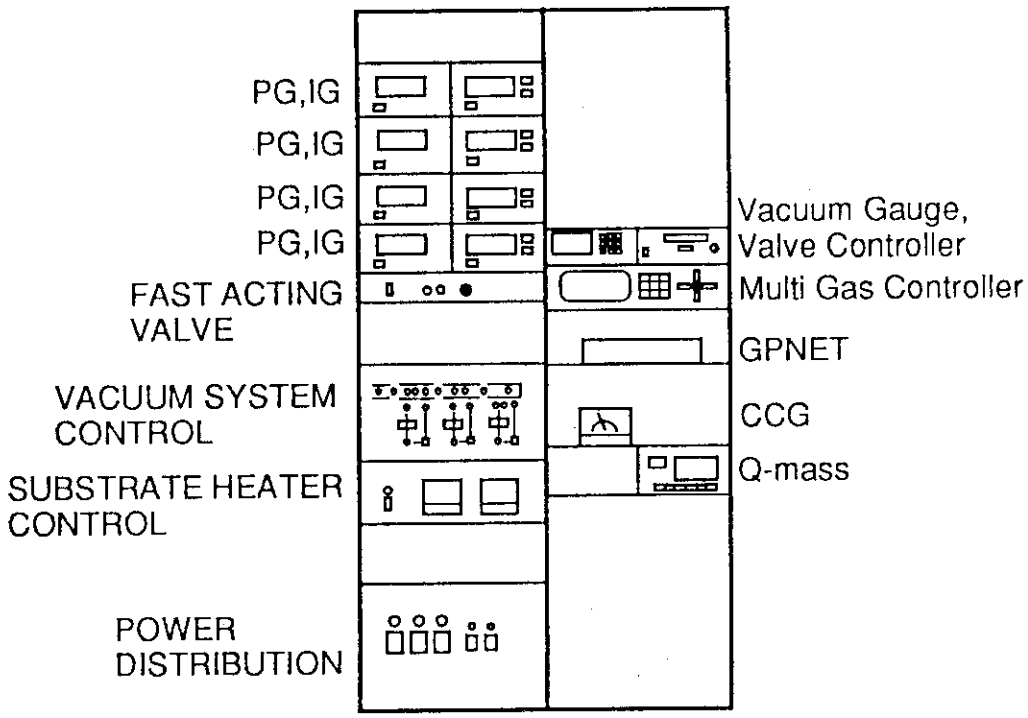

Fig. 3-5 Control panel for EA-BRACHI installed in second heavy ion irradiation room.

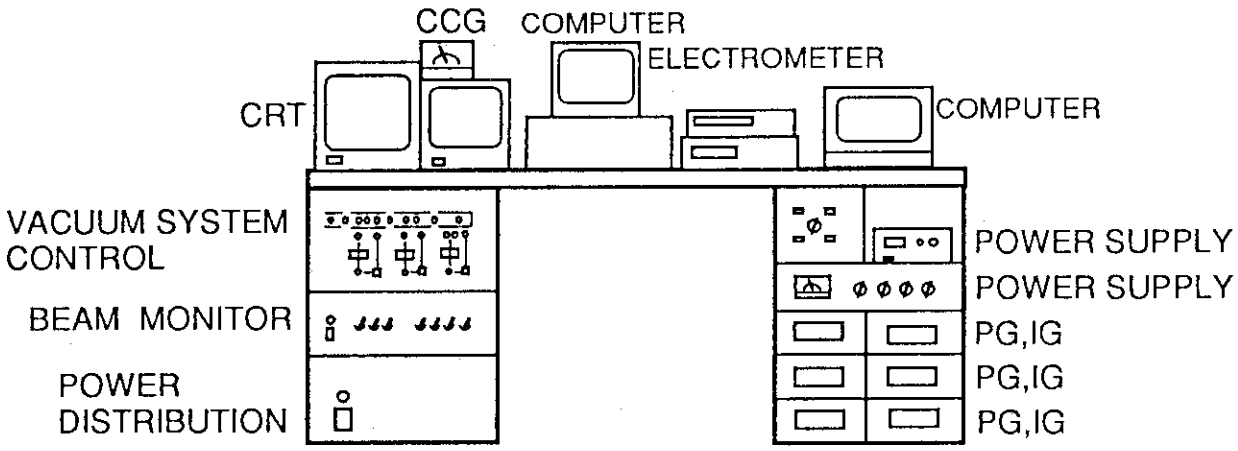

Fig. 3-6 Control panel and computers for EA-BRACHI installed in heavy ion preparation room.

3.3 ビームモニター

・ビーム形状のモニター

第０及び第２チェンバーにはそれぞれイオンビームの位置や形状、強度分布をモニターするためのビームビューワーを設けた。このビームビューワーのプロファイルは、ＣＣＤカメラにより重イオン準備室ならびにサイクロトロン制御室にて観測ができ、イオンビーム調整時に使用される。

第１重イオン室には、本微小領域線量分布測定装置を組み立てる時に疑似イオンビームとして使用したＨｅ－Ｎｅレーザーが設置されている。各チェンバーのビームビューワーやコリメータ及び検出器の位置、さらに光学系はこのレーザー光に合せて調整されている。また、イオン照射準備として２ヶ所のビームビューワーでレーザー光を観測しＣＲＴ上にマーキングを行なう事により、イオンビームの軸調整が簡便に行なえる。

第０チェンバーには同心円状に罫書きをされたＭｇＯが取り付けられている。イオンビーム照射実験の際にはイオンビームが全く当たらない位置まで圧縮空気により遠隔操作で移動が可能である。第２チェンバーには、回転式照射台の上に、中心に罫描き線のあるクウォーツガラス及びアルミナ蛍光板が取り付けられている。これらビームビューワーでイオンビームをモニターしながら適当なスポットに調整した後、照射台を回転させる事により、試料への照射が可能とした。

・ビームカレントのモニター

加速器からのイオンビーム量を正確に測定するための電流測定用ファラデーカップ（Ｆｉｇ．３－７）を第１チェンバーに１つ、第２チェンバーに２つ、第３チェンバー１つずつに設けた。ファラデーカップは電流測定用電極（内筒）、サプレッサー電極（前面筒）及びガード電極（外筒）から成り、圧縮空気により第２重イオン室、重イオン準備室の両方から出し入れ可能な構造である。

対電圧	サプレッサー電極、電流測定電極間	３ｋＶ以上
	サプレッサー電極、ガード電極間	３ｋＶ以上
暗電流変動		１ｐＡ以下

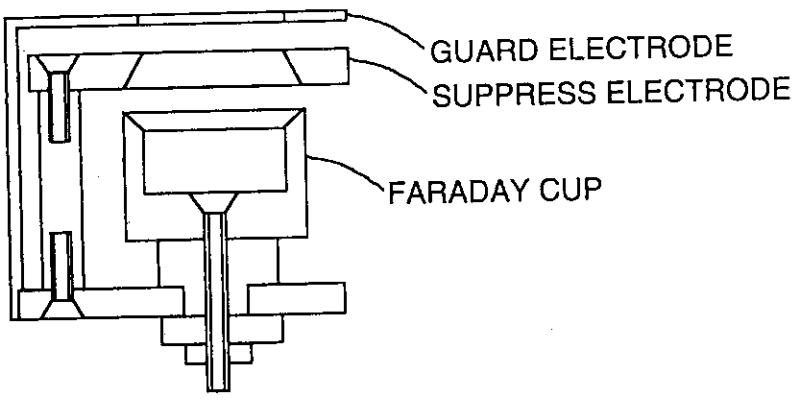

Fig. 3-7 Layout of Faraday cup.

3.4 ビームピックアップ

加速器からのパルスイオンを薄いカーボンフォイル(MONTVALE, NEW JERSEY, 10μg/cm^2)に照射し、前方方向に飛出す２次電子をＭＣＰ（マイクロチャンネルプレート）で受ける事で、イオンの入射タイミングをパルス信号で取りだす事ができる（Ｆｉｇ．３－８）。ただし、ＭＣＰからの信号は大変微弱なために出力側にプリアンプを設けた。

カーボンフォイル及びサプレッサーさらにＭＣＰに電圧を供給するための電源サプレッサー回路をＦｉｇ．３－９に示す。この回路内の抵抗Ｒを適当に変える事により、カーボンフォイルとＭＣＰの間に適当な電圧勾配をかける事が可能となり、２次電子をより高い効率でしかも立ち上がりのはやい信号として得られる。このＭＣＰからの信号はデジタルオシロスコープで観測すると共に、ＭＣＡ（マルチチャンネルアナライザー）などで解析される。

ＭＣＰ　ＨＡＭＡＭＡＴＳＵ　Ｆ４６５５　２段

ゲイン：５ｘ１０^7（２．４ｋＶ印加時）

ダークカウント：１．６８ｃｐｓ／ｃｍ^2

抵抗：７５．７ＭΩ

プリアンプ　ＨＡＭＡＭＡＴＳＵ　Ｃ５５４９－４４

ゲイン：３６ｄＢ

周波数帯域：５０ｋ～１．５ＧＨｚ

オシロスコープ　ソニーテクトロニクス　ＴＤＳ－５４０

周波数帯域：ＤＣ～５００ＭＨｚ

最高サンプルレート：１ＧＳ／ｓ

入力チャンネル：４ｃｈ（ただし４ｃｈ時は２５０ＭＳ／ｓ）

感度：１ｍＶ／ｄｉｖ

垂直分解能：８ビット

アベレージング併用１１ビット

低速短発信号１２ビット（ハイレゾモード）

最高掃印率：５００ｐｓ／ｄｉｖ

レコード長：５０ｋポイント／ｃｈ

ＭＣＡ　ラボラトリー・イクイップメント・コーポレーション　ＭＣＡ／ＰＣ９８Ｂ

ＡＤＣ変換方式：ウイルキンソン方式　５０ＭＨｚ

入力信号：０～１０Ｖ　ユニポーラシステム

ＡＤＣ変換利得：256, 512, 1024, 2048, 4096ch/8V

入力インピーダンス：１ＫΩ

カウント容量：２^{32}－１

バス規格：ＮＥＣ製　ＰＣ－９８０１シリーズ準拠

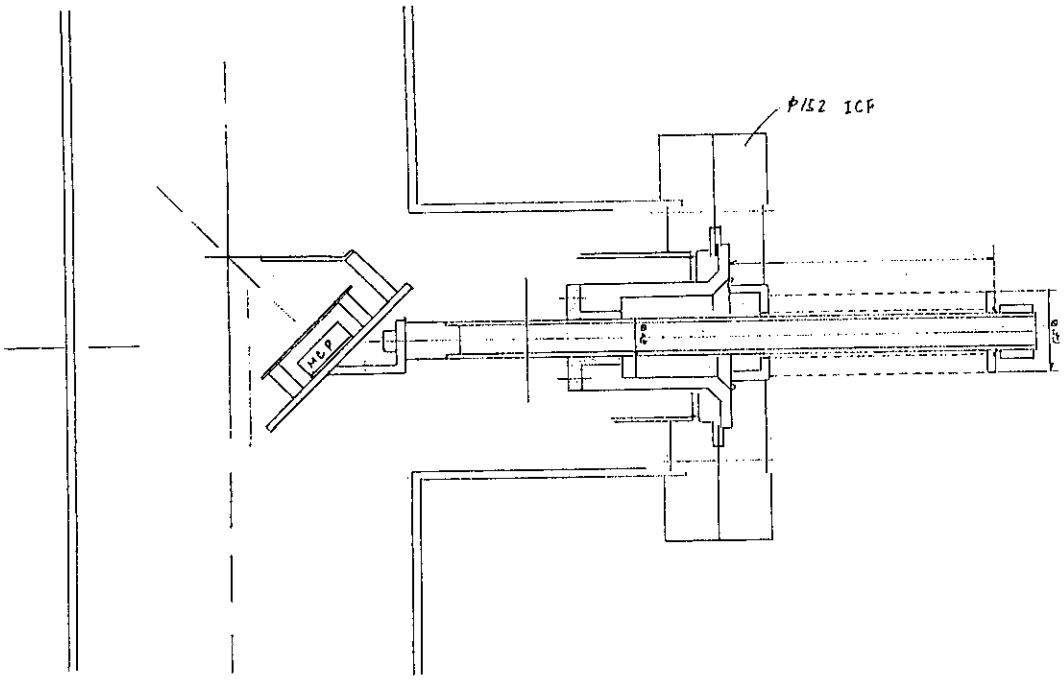

Fig. 3-8 Beam pick up.

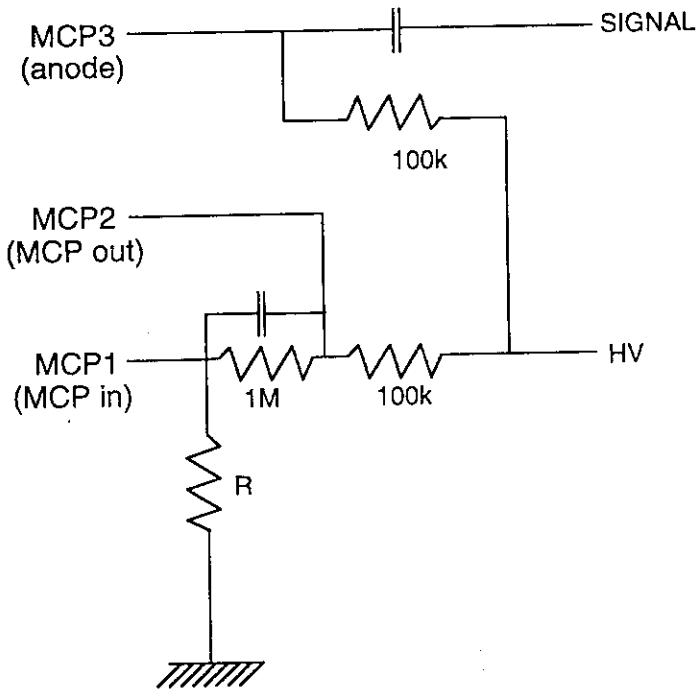

Fig. 3-9 Electric circuit of MCP power supply.

・カーボンフォイルの貼り方

第１チェンバーのビームピックアップで用いる非常に薄いカーボンファイルを２ｃｍφの穴の空いたステンレス製の支持板に貼る。

(1)コロジオン：酢酸イソアミル＝２：１０（ｃｃ）溶液をつくる。

・コロジオン

ニトロセルロースを溶媒（エーテル＋アルコール）に溶かしたものでフィルムの補強剤として用いる。

・酢酸イソアミル

徐々にニトルセルロースを乾かすための溶媒であり、エーテルを使うと早く乾きすぎてしまい失敗する

(2)スライドガラスについたままの状態でカーボンフォイルを(1)の溶液に浸ける（５～１０秒）。これによりカーボンフォイルとスライドガラスをニトロセルロースでくるむ（Ｆｉｇ．３－１０）。長時間浸けるとニトロセルロースがカーボンフォイルとスライドガラスの間に入ってしまう。

(3)スライドガラスを立てたまま乾かす（１５分）

(4)Ｆｉｇ．３－１０中の破線の様にカーボンフォイルの回りのニトロセルロースを削り、カーボンフォイルがスライドガラスから剥がれるようにする。

(5)洗面器などに水を張り、スライドガラスを水面に斜め４５°で徐々に挿入しカーボンフォイルを水面に浮かす。

(6)カーボンフォイルフォルダーにて斜め４５°で手前からカーボンフォイルをすくう。

(7)フォルダーを逆さまにして、乾燥する。

＝注意点＝

・ニトロセルロースはイオンビームによって焼けてしまうのでニトロセルロースをイオンビーム入射側に持ってくる。

・フォルダーはステンレス製とし、厚さは０．５ｍｍ程度が良い。細かい傷などない方が良い。

・カーボンフォイルを押さえるためのフォルダーの上側の押さえは要らない。

・真空引きは徐々に行なう。

・照射するイオンのエネルギーが１ＭｅＶ／ＡＭＵ以下の場合、カーボンフォイルは切れやすい。

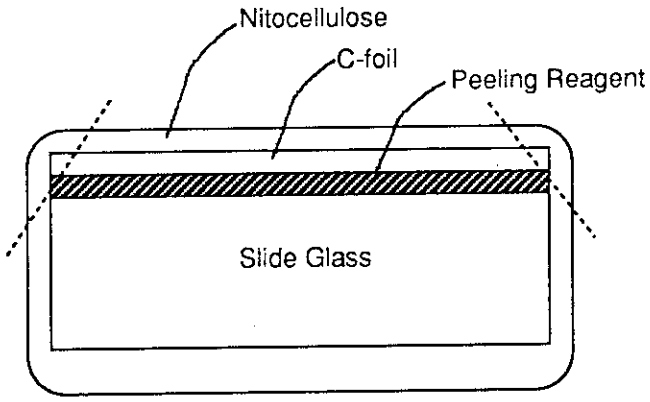

Fig. 3-10 Carbon fiol on slide glass covered with nitrocellulose.

3.5 照射チェンバー

・室温照射

第２チェンバー内に設置された回転式照射台の上にフィルム状の生体関連試料や高分子試料をのせることにより、真空中室温に於いて照射することができる。照射台は２種類あり、直径１ｃｍあるいは２ｃｍの大きさの穴が空いており、ネジ止めによって試料が取り付けられる構造となっている。照射台には、試料に照射されるイオンの形状をモニターするために２種類のビームビューワー及び、電流をモニターするためのファラデーカップが設置されている。

回転式照射台　直径３０ｃｍ

回転位置の精度：０．１ｍｍ

照射部直径：１ｃｍ　照射部：２４個

照射部直径：２ｃｍ　照射部：１０個

・低温あるいは高温での照射

第３チェンバーに取り付けた銅製のブロック内に冷却した窒素ガスを通過させる事、あるいはヒーターによる加熱によって温度制御を行ない、ブロック表面に固定したフィルム試料の温度を一定に保ちながらイオンビーム照射できる。

温度制御

制御範囲　－１９６℃～１００℃

制御精度　±１℃

・液体、気体照射チェンバー

液体や気体試料に重イオン照射を行なうために作成した専用チェンバーをＦｉｇ．３－１１に示す。本チェンバーはＳＵＳ製となっており、上面には２μｍまたは５μｍのハーバー箔が貼ってある。この箔を通過して試料への照射は行なわれる。

本チェンバーは固体試料と同様に回転式試料照射台の上部に設置され、時間分解分光測定も可能とした。

3.6 光学測定系

重イオン照射によって誘起された試料の励起状態からの発光や生成するラジカル種などの初期生成物の反応を追跡するために、高速な時間分解測定を行なう。第２チェンバーに設置された回転式試料照射台のイオンビームの軸に対して斜め４５°に傾いた専用試料ホルダーに試料を取り付ける。試料からの発光や試料の光透過率の変化を調べるために正面扉及び左右両側の、覗き窓は合成石英製とした。また、測定システムはＦｉｇ．３－１２に示した通り、検出器として光電子増倍管及び１０ｐｓ

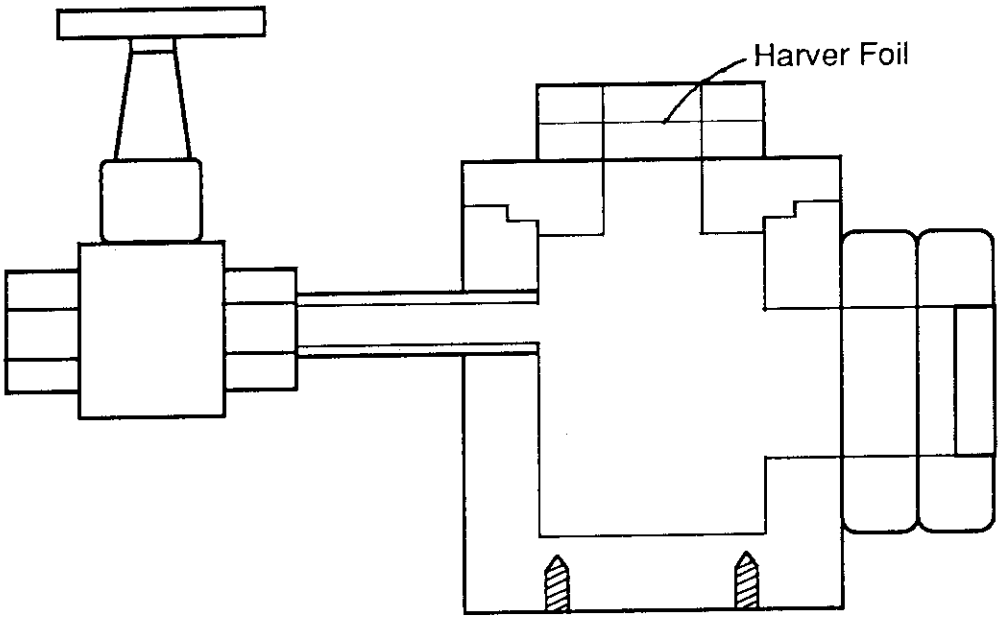

Fig. 3-11 Schematic illustration of small chamber for the irradiation of liquid and gaseous samples.

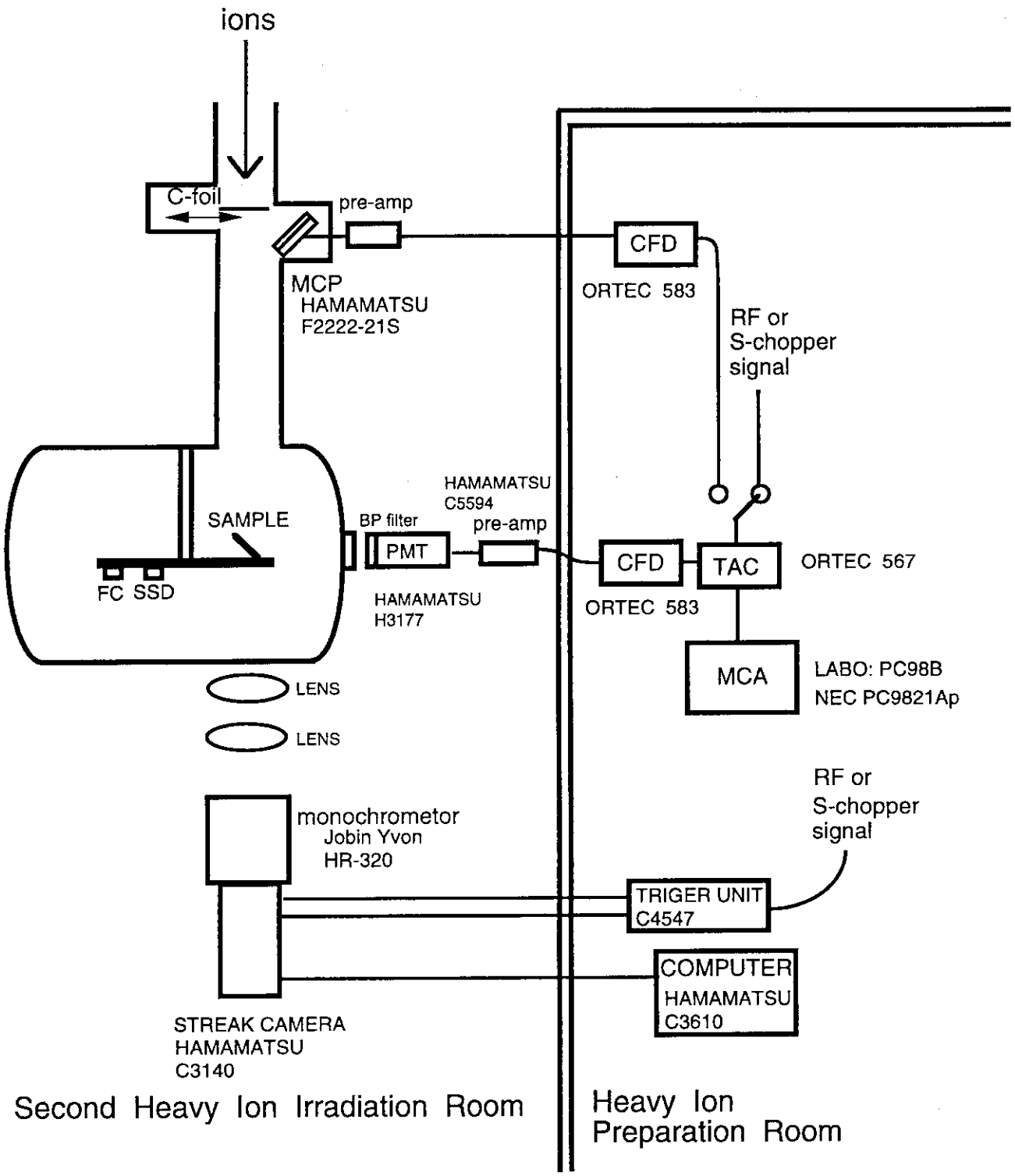

Fig. 3-12 Schematic diagram of fast time resolved optical measurement system.

以内の時間分解能を持ち、２００～８５０ｎｍまでの波長領域に分光感度を持つストリークカメラを設置した。ストリークカメラから試料を挟んだ反対側には、光源としてのＸｅランプが設置されている。

光電子増倍管(HAMAMATSU H3177)

陽極感度：２１００Ａ／ｌｍ（－２５００Ｖ印加時）

陽極暗電流：１４．００ｎＡ

ストリークカメラ(HAMAMATSU C-CCD TA C3601)

時間分解能：１０ｐｓ以内（高速ユニットＭ２５４７使用時）

１００ｐｓ以内（低速ユニットＭ２５４８使用時）

最大繰り返し周波数：１ｋＨｚ（Ｍ２５４７使用時）

１０ｋＨｚ（Ｍ２５４８使用時）

ゲート時間：最小　３００ｎｓ

最大　１００μｓ

ゲート方式：光電面ー加速電極、ＭＣＰ同時ゲート

ストリークトリガ信号入力：＋５Ｖ～＋４０V_{p-p}，５０Ω

ストリーク管（Ｎ２８０３）

光電面：マルチアルカリ（Ｓ－２０）

画板材質：ＵＶガラス

分光感度特性：２００～８５０ｎｍ

有効光電面：１．５ｍｍｘ８ｍｍ

ライトゲイン：約３ｘ１０^{3}倍

時間分解能：１０ｐｓ以下

分光器（ＪＹＯＢＩＮ　ＹＶＯＮ　ＨＲ３２０）

グレーティング：1200groove(520-25,　190-700nm)

150groove(520-32,　250-800nm)

Ｘｅランプ

Ｘｅｎｏｎ　Ｌａｍｐ　Ｐｏｗｅｒ　Ｓｕｐｐｌｙ：ＸＣ－１５０

Ｘｅｎｏｎ　ｌａｍｐｈｏｕｓｅ：ＬＨＸ－１００

3.7 差動排気系

数Ｔｏｒｒから１気圧程度の生体等価ガスや純粋なＡｒガスに重イオン照射した時のイオンビームの径方向のエネルギー付与の絶対値を測定するために、装置全体で３段のコリメータによる差動排気系を構成する。各チェンバーに５，０．５，０．１ｍｍφのコリメータを取り付け、第３チェンバーを１気圧の空気で満たした場合でも、第１チェンバーは１ｘ１０$^{-7}$Ｔｏｒｒ以下の真空度を保つ。また、第３チェンバーを超高純度窒素ガスで１気圧に保った状態でも第１チェンバーが２ｘ１０$^{-7}$Ｔｏｒｒ以下となる。

・コリメータ

３段のコリメータで加速器からのビームをセミマイクロビームとする。ビーム軸合せを行なうためにコリメータ自身はパルスモーターによる遠隔操作で移動が可能なＸＹステージ上に設置されている（Ｔａｂｌｅ　３－３）。第２チェンバーのコリメータは、イオンビームをコリメートしない実験のためにイオンビームが全くコリメータに当たらない位置まで、圧縮空気により遠隔操作で出し入れが可能である。

これらのコリメータはガスの流れに対して抵抗として働き、他のチェンバーと併せて差動排気系を構成する。コリメータ本体は穴の空いたタンタル製の円盤とし、照射中のイオンビームの変動がモニターできるように、電流測定端子が取り付けられている。

コリメータ　タンタル製　交換可能

マイクロメータ遠隔駆動

Ｔａｂｌｅ　３－３　Ｄｉａｍｅｔｅｒ　ｏｆ　Ｈｏｌｅｓ　ａｎｄ　Ｍｏｖａｂｌｅ　Ｒａｎｇｅｓ　ｏｆ　Ｃｏｌｌｉｍａｔｏｒｓ．

Chamber	Diameter of hole	Movable Range	Accuracy
First	5mm	X：　25mm	5μm
		Y：　50mm	5μm
Second	0．5mm	X：　25mm	5μm
		Y：　50mm	5μm
Third	0．1mm	X：　25mm	5μm
		Y：　50mm	5μm

・圧力制御装置

3段のコリメータを入れた状態で、第3チェンバー内の圧力を一定に保つ事を可能とするため、バラトロンセンサーでチェンバー内の圧力を測定し、ガスボンベより供給される試料ガスの流量を制御しながら、第3チェンバーのターボ分子ポンプの前に取り付けたスロットルバルブの開閉の制御を行なう（Ｆｉｇ．３－１３）。

バラトロンセンサー(MKS 122A)

マルチガスコントローラー(MKS147B)

制御圧力範囲　１０００～０．００１Ｔｏｒｒ

分解能　　フルスケールの０．０１％

3.8　気相のマイクロドジメトリーのためのイオン化チェンバー

・イオン化チェンバー

気体試料に５０μｍφ程度の細いイオンビームを照射した際に生成するイオン化電流を測定し、イオンビームの径方向のエネルギー付与の絶対値を求める。第3チェンバーに、イオン化量の空間的な分布を測定するために、ガス透過率の高いメッシュ状の球型及び筒型小型イオン化チェンバーを設けた（Ｆｉｇ．３－１４）。これら小型イオン化チェンバーは、ガード電極及び、イオン照射によって生成した電荷をすべて集めるための電圧を印加するためのサプレッサー電極、集めた電荷の量を測定するための電流測定電極からなる。電流測定電極によって集められた電荷をパソコンによって制御されているエレクトロメータによって測定し、イオンビーム照射中の電流値の変動を観測するために、第3チェンバーに取り付けられたコリメータの誘導電流もエレクトロメータにより同時に測定する。

球型小型イオン化チェンバー

ニッケル製　　直径２ｃｍ

電流測定電極、サプレッサー電極、ガード電極

耐電圧

サプレッサー電極、電流測定電極間　　３ｋＶ以上

サプレッサー電極、ガード電極間　　３ｋＶ以上

暗電流変動　　０．０１ｐＡ以下

筒型小型イオン化チェンバー

ニッケル製　　３０φｘ１５０ｍｍ

電流測定電極、サプレッサー電極、ガード電極

耐電圧

サプレッサー電極、電流測定電極間　　３ｋＶ以上

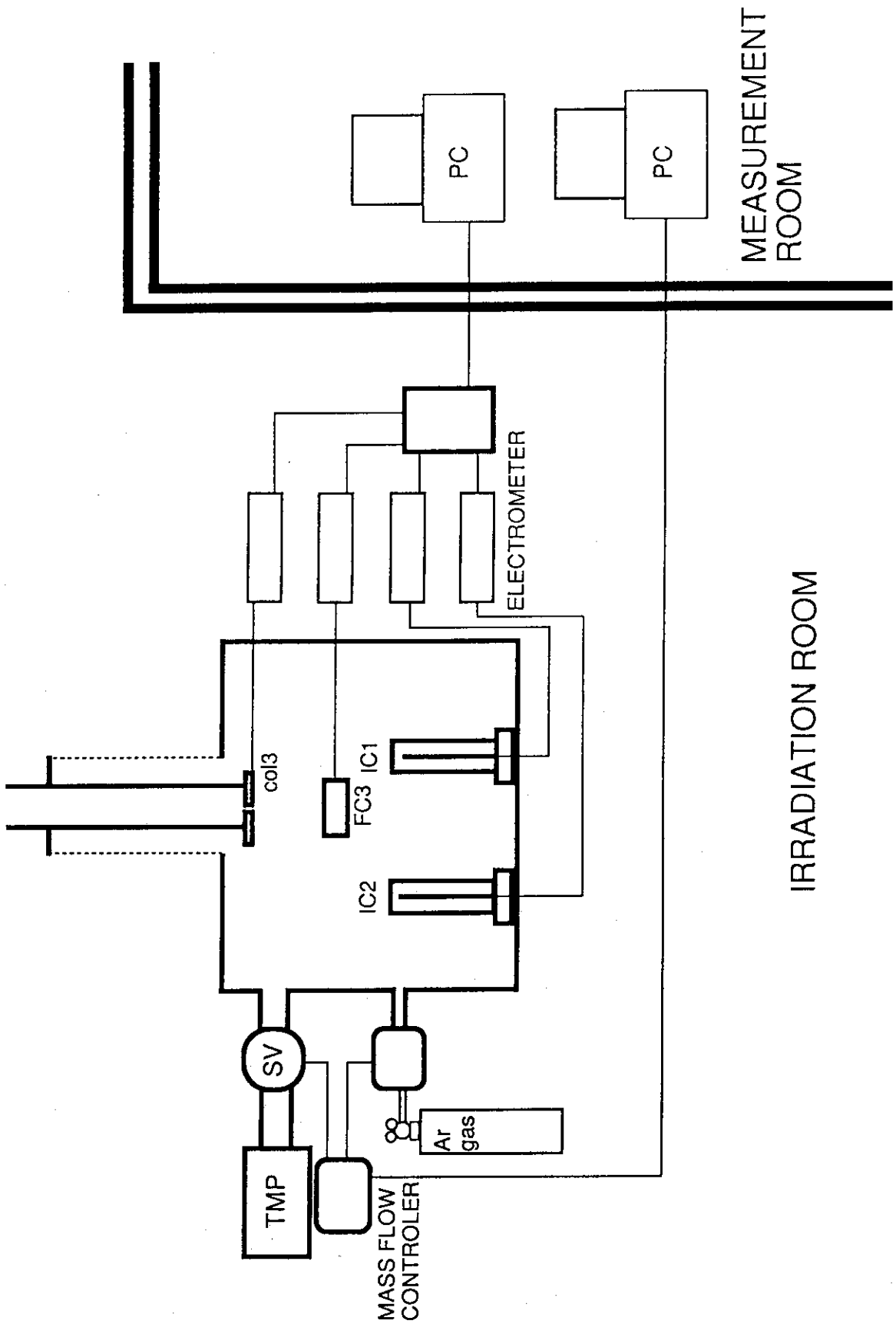

Fig. 3-13 Schematic diagram of pressure control system and current measurement system.

サプレッサー電極、ガード電極間　　３ｋＶ以上

暗電流変動　　０．０１ｐＡ以下

イオン化チェンバー用電源(HAMAMATSU C3350)

電圧範囲　０～±３ｋＶｄｃ

電圧安定度　±（０．００５％＋１０ｍＶ）

最大出力電流　１０ｍＡ

高圧出力レセプタクル　ＭＨＶ（前面），ＳＨＶ（背面）

プログラマブルエレクトロメータ(KEITHLEY 617型)

最小電流測定　０．０００１ｐＡ

精度　±（１．６％ｒｄｇ＋６６ｃｏｕｎｔｓ）

・イオン電流計測システム

４台のエレクトロメータを遠隔操作し、それぞれの電流値を取り込む。１０回測定を行ない、最大値及び最小値を除いて他の８つのデータの平均値を表示する。

ＮＥＣ　ＰＣ－９８０１ｎａ

プログラム：Ｉｏｎ．ｅｘｅ

パソコン設定条件

ボーレート：１２００

データビット長：８ビット

パリティチェック：無し

ストップビット長：２ビット

通信方式：全二重

Ｘパラメータ：無し

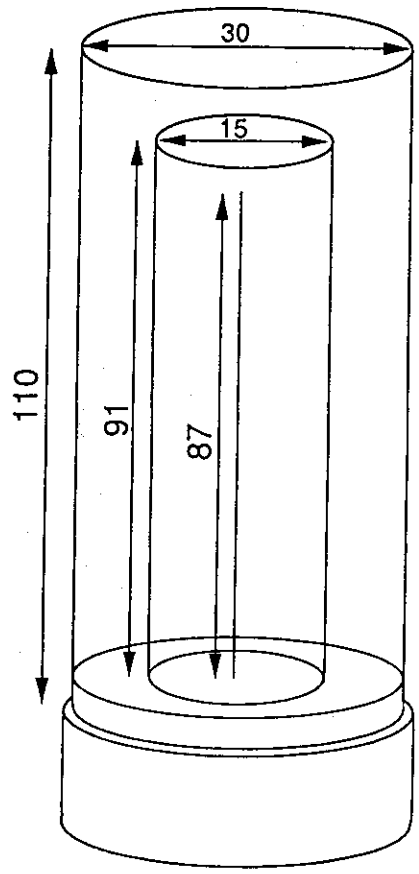

Fig. 3–14 Ionization chamber in third chamber.

4．運転方法

4.1　装置の立ち上げ

・第２重イオン室内のブレーカー（１００Ｖ，２００Ｖ）をＯＮにする。
・ＰＯＷＥＲ　ＤＩＳＴＲＩＢＵＴＩＯＮをＯＮにする。
・ＰＩＲＡＮＩ　ＧＡＵＧＥをＯＮ。各チェンバーの真空度を確認する。
・重イオン準備室内のブレーカーをＯＮとし、ＰＯＷＥＲ　ＤＩＳＴＲＩＢＵＴＩＯＮをＯＮにする。
　真空計指示器の点灯を確認する。
・第０と第１チェンバーの間のバルブを開ける。
・ＳＹＳＴＥＭ　ＭＡＩＮのキースイッチをＯＮにする。
・ＳＴ１，２，３ボタンをＯＮにする。
　これにより各チェンバーのステージに電気が供給され、ロータリーポンプが動き出す。
・第２重イオン室内の３台のロータリポンプが正常に動いている事を確認する。
・ピラニーゲージの指示値を確認し、真空度が悪い時はＲＶ１，２，３をＯＰＥＮにし、粗引きを行う。粗引き終了後、ＲＶをＣＬＯＳＥする
・ロータリーポンプとターボ分子ポンプの間のバルブを開ける。
・３台のターボ分子ポンプをＯＮにする。７分位でポンプが立ち上がる。
・ターボ分子ポンプと各チェンバーとの間のバルブを開ける。
・コールドカソードゲージの電源を入れる。
・さらに５～１０分位たったら電離真空計の電源を入れる。

4.2 通常の運転方法

通常の状態では、各チェンバーは３台の排気系によって高真空に保たれており($1x10^{-7}$Torr)、その他の制御系は電源が切られている。ここでは通常状態から立ち上げて、実験を行なう運転方法を述べる。

4.2.1 実験準備

(1)初期状態の確認

実験を開始する前に、装置の異常がないか以下の項目について確認する。

・各チェンバーの真空度が$1x10^{-7}$Torr以下になっていること。
・ターボ分子ポンプの回転数が正常であること。
・ロータリーポンプが正常に動作していること。
・ロータリーポンプのオイルが十分にあること。また、オイルが洩れていないこと。
・排気系以外の装置の電源がすべて切られていること。
・第０と第１チェンバーの間のゲートバルブが開いていること。
・第１と第２チェンバーの間のゲートバルブが閉じていること。
・第２と第３チェンバーの間のゲートバルブが閉じていること。

(2)ビームビューワーのセット（第０チェンバー）

・第０チェンバーにセットされているＣＣＤカメラの電源を入れる。
・カメラの出力は"MON1"とマークされたターミナルを通して重イオン準備室に送る。
・第２重イオン室－重イオン準備室間のターミナルと、重イオン準備室－サイクロトロン制御室間のターミナルをＢＮＣケーブルで結線し、サイクロトロン制御室にビームビューワーの映像を送る。
・重イオン準備室にあるＣＲＴに電源を入れ、ＭｇＯビームビューワーが見える事を確認する。

(3)ビームピックアップ（第１チェンバー）

・第１チェンバーにセットされているＭＣＰに電圧を掛けるための電圧ディバイダーとの間の結線を行う（Ｆｉｇ．３－９）。
・ＭＣＰの電源は重イオン準備室の電源(HAMAMATSU C3350)から"HV1"とマークしたターミナルを通し、ディバイダーの"HV"につなぐ。
・ＭＣＰからの信号はとても弱いので電圧ディバイダーのすぐ後にプリアンプ(HAMAMATSU C5594-44)を接続し、＋１５Ｖの電源を供給する。
・プリアンプの出力信号は"MCP/SIGNAL"とマークしたターミナルを通し、重イオン準備室に送る。
・徐々に電圧を上げながら、最終的にＭＣＰに＋１８００Ｖの電圧を掛ける*。

・ファーストアクティングバルブの電源を入れる。

(4)回転式照射照射台の取り外し（第２チェンバー）

・第２チェンバーの電離真空計を切る（Ｆｉｇ．３－５）。

・第２チェンバーとターボ分子ポンプの間のメインバルブを閉じる。

・第２チェンバーをリークするために３ヶ所ある正面扉の止めネジをはずす。

・ピラニー真空計の指示値を確認しながら、乾燥窒素ガスを徐々に注入し大気圧とする。

・第２重イオン室内の装置コントロール用パソコンの電源を入れ、"2)seek control point"を選択する。

・"CH6:theta"を選択し、回転式試料照射台のファラデーカップを正面扉側に移動する。

・正面扉を開け、ファラデーカップのサプレッサーケーブルと電流測定用ケーブルをはずす。

・回転式試料照射台にＳＳＤが付いている場合は、この同軸ケーブルもはずす。

・回転式試料照射台の下側の４ヶ所の止めネジをゆるめ、照射台をはずし重イオン準備室に移動する。

(5)試料の取り付け

・約１ｃｍφの大きさの照射試料を用意する。

・回転式試料照射台にネジ止めで照射試料をセットする。

・イオン照射による試料の光吸収の変化や発光を測定する時は、４５°に傾いた試料ホルダーに試料を取り付ける。

・光吸収を測定する場合、第２チェンバーの開閉扉に対して垂直方向に試料をセットする**。

・試料からの発光を測定する場合は、発光強度の波長依存スペクトルをとる場合は光吸収と同じ方向、発光強度の時間依存スペクトルをとる場合は試料面が扉に向かう方向にセットする。

・回転式試料照射台に照射する重イオンの飛程より少し厚い空乏層を持つＳＳＤ検出器を取り付ける。

---

*最低でも実験開始１時間前に電圧を掛ける。このウォーミングアップによりＭＣＰの電気ノイズが減る。

**光吸収スペクトルや発光の波長依存スペクトルをとる場合には、Ｘｅランプとディテクター(ｽﾄﾘｰｸｶﾒﾗ HAMAMATSU C-CCD TA C3601)の光軸調整を行っておく必要がある。

(6)回転式試料照射台の取り付け

・回転式試料照射台のファラデーカップが正面扉に向いた位置で、台の下側の４ヶ所の止めネジで照射台を固定する。

・ＳＳＤに専用のＢＮＣケーブルを接続する。

・ファラデーカップのサプレッサーケーブルと電流測定用ケーブルを接続する。

・第２チェンバーを真空引きするために正面扉を閉める。

・ロータリーポンプとターボ分子ポンプのバルブを閉じる。

・第２チェンバーとロータリーポンプの間のバルブを開け、ロータリーポンプによる真空引きを開始する。

・ピラニーゲージの指示値に注意しながら、真空度が$5x10^{-3}$Torrになるまで待つ。

・第２チェンバーとロータリーポンプの間のバルブを閉じる。

・ロータリーポンプとターボ分子ポンプのバルブを開ける。

・第２チェンバーとターボ分子ポンプの間のメインバルブを開け、ターボ分子ポンプによる真空引きを開始する。

・第２チェンバーと第３チェンバーの間のゲートバルブを開ける。

(7)回転式試料照射台の位置合せ及びマーキング

本装置はレーザー光を疑似イオンビームとしてアライメントされており、すべてのコリメータや測定系及び試料の照射部をレーザーの光軸に合せる事により理想的なイオンビームの軸が見つけられる。また、イオンビームの軸調整もすべてレーザービームで行なったマーキングに合せる。

・施設側ビームライン、第０、第１、第２チェンバーの真空度が良い事を確認した後、第１と第２チェンバー及び第２と第３チェンバーの間のゲートバルブを開ける。

・第１重イオンにセットしたＨｅ－Ｎｅレーザーを点灯する。

・施設側にセットされているファラデーカップやアルミナビームビューワーをイオンビームの当たらない位置に引っ込める。

・第０チェンバーにセットされているＭｇＯビームビューワーをｉｎにし、ＭｇＯの位置とＭｇＯに当たっているレーザー光の位置を重イオン準備室及びサイクロトロン制御室にあるＣＲＴにマーキングを行なう。マーキング終了後、ＭｇＯはｏｕｔにする。

・回転式試料照射台上の石英製の板をレーザー光が当たる位置に回転し、中心の罫書き線にレーザー光の中心が来るようにパソコンで微調整を行なう。この時の数値は機械的な位置であり、小数部分は切り捨て０点に照射台を戻し、プログラム上の原点を決定する。

・"2)seek control point"のプログラムを終了し、メインプログラムを起動する。

・第１重イオンにセットしたＨｅ－Ｎｅレーザーの電源をきる。

(8)ストリークカメラを用いた光吸収発光スペクトル測定

・Ｆｉｇ．３－１２に示した通りの結線を行なう。

・第２重イオン室内の、ストリークカメラのメイン電源を入れる。

・ロータリーポンプを立ち上げ、バルブを開く。

・C-CCD/ILの電源を入れ、－３０℃にセットされているクーラーの電源を入れる。

・ATAGO MIC Ⅲ、ANALOG CRT EXTENDER Ⅱ及びＣＲＴの電源を入れる。

・重イオン準備室内の、CCD-TA、ANALOG CRT EXTENDER Ⅱ、STREAK TRIGGER UNIT C4547の電源を入れる。

・パソコンの最初のメニュー画面でマウスを右クリック*。

・測定画面でマウスを左クリックする。

・測定用のメインメニューが出てくるので、測定条件を設定する。

各メニューの主な機能は以下の通りである。

ＭＥＡＳＵＲＥＭＥＮＴ	積算回数の設定
	測定のスタート
ＣＯＲＲＥＣＴＩＯＮ	ＢＧの引き算
ＵＴＩＬＩＴＹ	ＦＤのフォーマット
	光学シャッターの開閉
	測定波長の設定
	測定する時間軸の設定
	ＭＣＰの電圧の設定
ＩＭＡＧＥ	データのセーブ
	データのロード
ＳＨＵＴＤＯＷＮ	パワーオフ

(9)光電子増倍管を用いた時間分解発光測定

・Ｆｉｇ．３－１２に示した結線を行なう。

・第０チェンバーに設置された電離真空計を除く３台の電離真空計の電源を切る。

・第２重イオン室内の明りをすべて落とす。あるいは覆いをして光を漏らさない。

・測定する波長に合せたバンドパスフィルターをホトマルに取り付ける。

---

*もしどこかにエラーがあれば、この時に警告音が鳴りメッセージが出るので注意する

(10)ガス圧コントロール（第３チェンバー）

・第３チェンバーの真空度が十分に良い事を確認する。

・バラトロンパワーサプライ、マルチガスコントローラー、プレシャーコントローラ及びネットワークサプライのパワーを入れる（バラトロンは安定するまで３０分位かかる）。

・第３チェンバーの電離真空計の電源を切る。

・ガスボンベのバルブを開け、１ｋｇｆ／ｃｍ^{2}程度の圧力をかける。

・第３チェンバー裏側のガス導入用バルブを開ける（ツマミを立てる）。

・重イオン準備室の第３チェンバーの排気系がＳＴＡＮＤＢＹになっている事を確認する。

・第２重イオン室内の第３チェンバーの排気系をＬＯＣＡＬからＲＥＭＯＴＥに変える。

・重イオン準備室の第３チェンバーの排気系をＲＥＭＯＴＥにする。ターボ分子ポンプの制御が重イオン準備室に移り、メインバルブが開いた事を確認する。

・第３チェンバーの排気系をＲＥＭＯＴＥからＢＹＰＡＴＨに変える。

・マルチガスコントローラーのボタンを”ＯＮ”，”０／ＡＬＬ”，”ＯＮ”と押す。これによりフロー、インプットの表示が共にＯＮになる。

・プレッシャーコントロールのキーを回し、ＲＥＭＯＴＥにする。

・第２重イオン室と重イオン準備室のそれぞれに設置された装置制御用のパソコンの電源を入れ、"1.PRESSURE CONTROL"を立ち上げる。

・"1.POSITION SETTING"を起動する。

・装置制御用のパソコンでＧＡＳ　Ａ及びＰＲＥＳＳ．を適当な値にセットする。これにより、マルチガスコントローラーのＣＨ２が流れているガス流量を表示し、プレッシャーコントローラーがバルブの開閉を行なう。

(11)電流値測定

・第３チェンバー内の２台の筒型小型イオン化チェンバーに電圧を供給するために、２台のパワーサプライのＨＶ１とＨＶ２ケーブルを通して電圧供給用のレセプタクルに接続する。

・イオン化チェンバーからの電流を測定するために、第３チェンバーの電流測定用レセプタクルとプログラマブルエレクトロメータ(KEITHLEY 617型)とをＢＮＣケーブルで接続する。

・第３チェンバーのファラデーカップ及びコリメータの出力をプログラマブルエレクトロメータに接続する。

・４台のプログラマブルエレクトロメータとＧＰＩＢエクステンダーの間をＧＰＩＢケーブルで接続し、さらにＧＰＩＢエクステンダーにはＲＳ２３２Ｃケーブル、さらに光ファイバーを接続する。

・４台のプログラマブルエレクトロメータの電源を入れ、電流測定モードにし、ゼロチェックをはずす。

・ＧＰＩＢエクステンダーの電源を入れる。

・重イオン準備室のプログラマブルエレクトロメータ制御用のノートパソコンにＲＳ２３２Ｃケーブ

ル、さらに光ファイバーを接続し、電源を入れ"ION MEASUREMENT"というプログラムを起動する。

(12)温度制御装置

・SUBSTRATE HEATER CONTROLのメイン電源をＯＮにする。

・第３チェンバーに取り付けた銅製のブロック内に液体窒素を通過させる。

・ブロックが十分に冷却した事を確認した後、ヒーターの設定温度をセットする。

(13)重イオン準備室への制御の移動（制御パネル）

実験中は実験者が照射室にいられないため、第２重イオン室で制御していたコントロールを重イオン準備室に移す。

・重イオン準備室の装置コントロールパネル（Ｆｉｇ．３－５）のスイッチボタンを第２重イオン室のコントロールパネル（Ｆｉｇ．３－６）と同じ状態にする。

・重イオン準備室の排気系コントロールキーをすべてＳＴＡＮＤＢＹにする。

・第２重イオン室の排気系コントロールキーをすべてＲＥＭＯＴＥにする。ターボ分子ポンプが一時的にコントロール不能となり、メインバルブが閉じる。

・重イオン準備室の排気系コントロールキーを第１、第２、第３ともにＬＯＣＡＬする。ターボ分子ポンプが立ち上がり、メインバルブが開く。

・３つのコリメーターと４つのファラデーカップの電流値出力切り換えリレーの電源を入れる。

・重イオン準備室の装置制御用のパソコンのＦ１キーを押し、各ステージや回転式試料照射台のコントロールを可能にする。

4.2.2　照射及び測定

(1)回転式照射台上の試料への照射

・第２チェンバーにセットした合成石英あるいはアルミナ蛍光板にイオンを照射し、ビーム形状及び強度分布をモニターしながらビーム調整を行なう。

・希望の電流値になるようにビーム電流を調整する。回転式照射台のファラデーカップによって照射前後に必ず電流値測定を行なう。

・第０チェンバーのＭｇＯビィームビューワーの出し入れによって第２チェンバーにセットした試料への照射時間を決める。ただしＦｉｇ．４－１に示したように、イオンビームのカレントは照射時間中に多少の変動がある。また、ビームビューワーの出し入れには２秒のタイムラグがあるので、希望する照射時間よりも２秒短い時間でビームビューワーの出し入れを行なう。イオンビームの電流の安定度にもよるが、一般的には１分から５分程度の照射時間が望ましい。

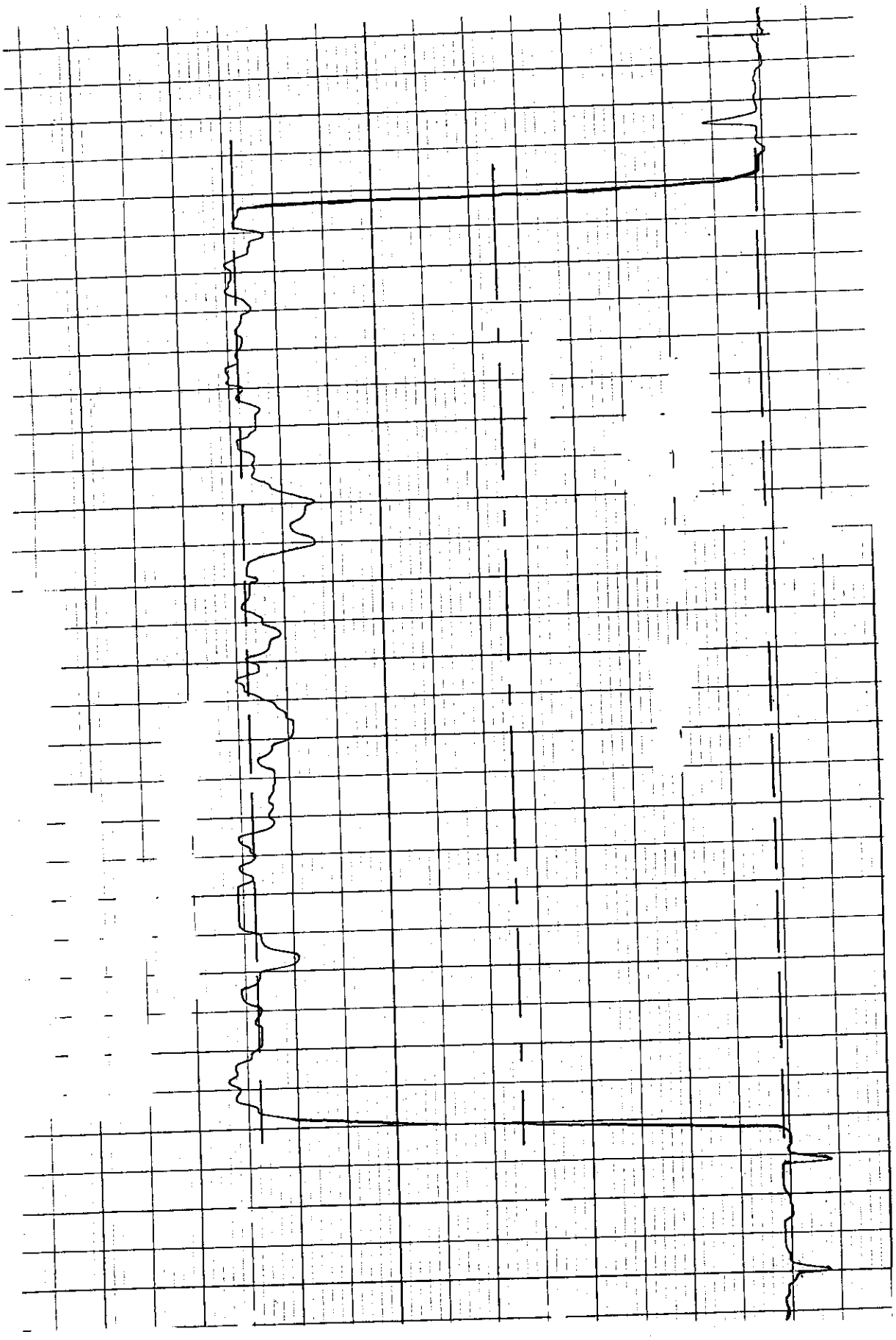

Fig. 4-1 Time profile of current intensity of ion beam during 10s controlled by MgO beam viewer.

(2)ビームピックアップを用いたビームの間引き

測定する試料の発光寿命により、寿命の３倍程度のパルス間隔になるようにパルス状のイオンビームを間引く。

・第１チェンバーにセットされているビームピックアップの結線をＦｉｇ．３－９の様に行なう。
・ビームピックアップからの信号をファストタイミングアンプを通した後、オシロスコープで観測する。この時、信号の大きさが２～３Ｖ程度になるようにアンプのゲインを調整し、アンプの出力をサイクロトロン制御室に送る。
・送られてきた信号をオシロスコープで確認した後、ＣＦＤ(Constant-Fraction Discriminator)に入力し、ＣＦＤの出力をレートメータで観測しながらスレショルドを決める。
・ＣＦＤの出力をＴＡＣ(Time to Amplitude Converter)のストップ信号とする。
・Ｓ－チョッパーを制御している高周波信号をＴＡＣのスタート信号とする。
・ＴＡＣのタイムレンジを５００ｎｓとし、出力信号をＭＣＡに入力する。
・ＭＣＡのメモリー長を１ｋｃｈとし、測定を開始する。
・ＴＡＣの測定結果を見ながら、Ｓ－チョッパーの調整を行なう。

(3)光電子増倍管を用いた時間分解発光測定

・サイクロトロン制御室からＳ－チョッパーを制御している高周波信号を重イオン準備室まで導き、ＴＡＣのストップ信号とする。
・第２チェンバーにセットされている光電子増倍管を第２チェンバーにセットしＦｉｇ．３－１２に示した結線を行なう。
・光電子増倍管からの信号をファストタイミングアンプを通した後、オシロスコープで観測する。この時、信号の大きさが２００～３００ｍＶ程度になるようにアンプのゲインを調整し、ＴＡＣのスタート側に入力する。
・ＴＡＣの出力をＭＣＡで測定する。

(4)ストリークカメラを用いた発光スペクトル測定

・Ｓ－チョッパーの信号をパルスジェネレーターに入力し、ストリークカメラのトリガー信号とする。
・カメラ本体はゲートＡモードとし、分光器のスリットを１００μｍとする。
・測定する波長範囲、時間範囲及び積算回数を設定する。ＭＣＰの電圧を６００Ｖ程度とする。
・イオンビームを第０チェンバーのビームビューワーで止めた状態でバックグラウンドの測定を行ない、メモリーの２番に保存する*。
・イオンビームを照射しながらの発光測定を行なう。このデータはメモリーの１番に保存する。

---

*バックグラウンドのデータも試料からの発光測定と全く同じ条件で測定すること。

・ダークコレクションモードでメモリー２のバックグラウンドデータを用いてメモリー１のデータの補正を行なう。

(5)ストリークカメラを用いた光吸収スペクトルの測定

発光測定とほぼ同じ手法を用いてイオン照射によって変わる試料の光透過率の測定を行なう。

・カメラ本体はフォーカスモードとし、モノクロメータのスリットを１００μｍとする。
・測定する波長範囲、時間範囲及び積算回数を設定する。ＭＣＰの電圧は３９０Ｖとする。
・イオンビームを第０チェンバーのビームビューワーで止め、さらにＸｅランプの光が入らないようにシャッターをとじたままの状態でバックグラウンドの測定を行なう。ただし、このデータはメモリーの２番に保存する*。
・イオンビームをＭｇＯビームビューワーで止めたまま、Ｘｅランプ光を測定する。このデータは一時的にメモリーの１番に保存される。その後メモリー２番のデータを使いダークコレクションが行ない、メモリーの３番にセーブする。発光測定の場合とは異なり、画面上の中心部にＸｅランプの光強度の分布が明るさの濃淡として観測される。
・７０ｃｈ程度の横方向のウィンドーを開き、光強度の分布をスペクトルとして表す。
・イオンビームを適当に照射した後、再びＸｅランプの光を測定する。測定結果はダークコレクションした後、メモリー４番に保存する。
・メモリー３番を選択した後、イメージプロセッシングモードで以下の計算を行なう。

1)Ｉ１＝Ｉ３ｘ１００

2)Ｉ３＝Ｉ１／Ｉ４

・Ｆ６キーのアナライズを選択し、バッファー１にウィンドー０を読み込んだ後、次の計算をする。

Ｂ１＝ｌｏｇ（Ｂ０／ｃｈ）ｘ１０００－２０００

ただし、ｃｈはウィンドーの縦軸のチャンネル数を表す。

(6)シェーディング補正

ストリークカメラで得られた３次元のイメージは感度ムラがある。この原因としては主に２つある。１つはＭＣＰ自身の感度ムラであり、ＭＣＰの個々のマイクロチェンネルによるものである。これはＭＣＰ電圧にも依存するので注意する必要がある。２つ目は、レンズによる歪みであり、画面上の中心部分では比較的均一になるが、端の部分では感度が低下する。

・ストリークカメラの入口に（分光器のフタを開ける）名刺などの紙を置き、白色光を入れる。
・ストリークカメラを以下の条件に設定する。ただし、測定回数はＳ／Ｎが上がるので多ければ多い方が良い。

---

*バックグラウンドのデータも試料からの発光測定と全く同じ条件で測定すること。

ストリークユニットの設定（第２重イオン室）

Ｇａｔｅ　Ａ

Ｃｏｎｔ．

ストリークの設定（重イオン準備室）

Ａｃｑｕｉｒｅ　ＭＯＤＥ：Ｃｌｅａｒ

ＡＭＰ．Ｇａｉｎ：Ｈｉｇｈ

Ｔｒｉｇ．Ｔｙｐｅ：ＥＸＴ＆ＥＶＥＮＴ

Ｃｙｃｌｅ：１００

Ｅｘｐｏｓｕｒｅ　Ｅｖｅｎｔ：１０

ＭＣＰ：３９０Ｖ

ＴＩＭＥ：１ｍｓ

ＨＰ８１１２Ａ　ＰＵＬＳＥ　ＧＥＮＥＲＡＴＯＲ

Ｐｅｒｉｏｄ：１００ｍｓ

Ｄｅｌｅｙ：１μｓ

Ｗｉｄｔｈ：２ｍｓ

ＭＯＤＥ：ＮＯＲＭ

・パルスジェネレーターのTriger OutputにGate CLSと書いてあるケーブルを接続する。この信号がPre-triger信号となる。さらにOutput にTriger INと書いてあるケーブルを接続する。この信号がTriger信号となる。パルスジェネレーターは通常、Disableボタンでオフにしておく。測定の時にのみオンにする。そうでないと常にストリークは走っている状態になってしまう。

・ストリークカメラのシャッターを閉じた状態で暗電流、つまりＤＡＲＫ測定を行う。その後シャッターを開けて、白色光の測定を行う。

＝注意点＝

・ＤＡＲＫのデータはイメージ２に保存すること。白色光のデータはイメージ１に保存し、ダークコレクションした後のシェーデングデータはイメージ３に保存する。

・Ｓｈａｄｉｎｇ補正のデータは光学系調整の後、必ず測定する必要がある。さらに正確にはＭＣＰ電圧に応じて行う必要がある。

・本装置では３０Ｃｈ以下と４５０Ｃｈ以上ではほとんど感度がない。さらにその間でも必ずしも均一の感度ではない。

4.2.3　終了操作

(1)ビームビューワー

・第０チェンバーにセットされているＣＣＤカメラの電源を切る。

・重イオン準備室及びサイクロトロン制御室にあるＣＲＴの電源を切る。
・サイクロトロン制御室に映像を送っていたケーブルをはずす。

(2)第２重イオン室への制御の移動
・重イオン準備室内の３つのコリメーターと４つのファラデーカップの電流値出力切り換えリレーの電源をきる。
・第２重イオン室の装置コントロールパネルのスイッチボタンを重イオン準備室と同じ状態にする。
・第２重イオン室の排気系コントロールキーをすべてＬＯＣＡＬにする。
・第２重イオン室のパソコンのＦ１を押し、各ステージや回転式試料照射台のコントロールを可能にする。

(3)ビームピックアップ
・プリアンプの＋１５Ｖの電圧をきる。
・第１チェンバーにセットされているＭＣＰと電圧ディバイダー、高圧ケーブル、プリアンプとの間の結線をはずす。
・ファーストアクティングバルブの電源をきる。

(4)試料の取り外し
・第２チェンバーの電離真空計の電源をきる。
・第１と第２及び第２と第３チェンバーの間のゲートバルブを閉じる。
・第２チェンバーとターボ分子ポンプの間のメインバルブを閉じる。
・第２チェンバーをリークするために正面扉の止めネジをはずす。
・ピラニー真空計の指示値を確認しながら、乾燥窒素ガスを徐々に注入し大気圧にする。
・正面扉を開け、ファラデーカップのサプレッサーケーブルと電流測定用ケーブルをはずす。
・回転式試料照射台にＳＳＤが付いている場合は、この同軸ケーブルもはずす。
・回転式試料照射台を照射室に戻し、ファラデーカップが正面扉に向くようにし、照射台の下側の４ヶ所の止めネジをゆるめ、照射台をはずし重イオン準備室に移動し、照射試料をはずす。
・回転式試料照射台の下側の４ヶ所の止めネジで照射台を第２チェンバーに固定する。
・ＳＳＤにＢＮＣケーブルを接続する。
・ファラデーカップのサプレッサーケーブルと電流測定用ケーブルを接続する。
・第２チェンバーを真空引きするために正面扉を閉める。
・ロータリーポンプとターボ分子ポンプのバルブを閉じる。
・第２チェンバーとロータリーポンプの間のバルブを開け、ロータリーポンプによる真空引きを開始する。
（ピラニーゲージの指示値に注意しながら、真空度が5×10^{-3}Torrになるまで１０分程度待つ）

・第２チェンバーとロータリーポンプの間のバルブを閉じる。
・ロータリーポンプとターボ分子ポンプのバルブを開ける。
・第２チェンバーとターボ分子ポンプの間のメインバルブを開け、ターボ分子ポンプによる真空引きを開始する。

(5)ストリークカメラ
・重イオン準備室内のコントロール用のパソコンで"SHUTDOWN"を選択し、パワーオフする。
・CCD-TA、ANALOG CRT EXTENDER Ⅱ、STREAK TRIGGER UNIT C4547の電源を切る
・第２重イオン室内のC-CCD/ILのクーラーを切る。ＣＣＤカメラが室温に戻るまで３０分程度かかる。
・C-CCD/ILの電源を切る。
・ロータリーポンプのバルブを閉じ、電源を落とす。
・ATAGO MIC Ⅲ、ANALOG CRT EXTENDER Ⅱ及びＣＲＴの電源を切る。
・メイン電源を切る。

(6)ガス圧コントロール
・第２重イオン室のプレッシャーコントロール用のパソコンでＧＡＳ　Ａ及びＰＲＥＳＳ．の値を０にセットする。
・４台のプログラマブルエレクトロメータとＧＰＩＢエクステンダーの電源を切る。
・プレッシャーコントロールのキーを回し、ＯＰＥＮにする。
・ガスボンベのバルブを閉じる。
・第３チェンバー裏側のガス導入用バルブを閉じる（ツマミをねかす）。
・マルチガスコントローラーのボタンを”ＯＦＦ””０／ＡＬＬ””ＯＦＦ”と押す。これによりフロー、インプットの表示が共にＯＦＦになる。
・バラトロンパワーサプライ、マルチガスコントローラー、プレシャーコントローラ及びネットワークサプライのパワーを切る。
・第３チェンバーのイオンゲージの電源を入れる。

(7)温度制御装置
・SUBSTRATE HEATER CONTROLのメイン電源を切り、銅製ブロックが自然に室温に戻るまで待つ。

4.3 装置の停止

・装置全体が正常に動いている事を確認する。
・各チェンバーに取り付けられている４組の電離真空計及びピラニーゲージと、コールドカソードゲージの電源を切る。
・ターボ分子ポンプと各チェンバーとの間のバルブを閉じる。
・ロータリーポンプとターボ分子ポンプの間のバルブを閉じる。
・３台のターボ分子ポンプのスイッチを切る。６分くらいでポンプは停止する。（コントローラーのＲＯＴＡＴＩＮＧパイロットランプが消えるまで待つ）

＝注意点＝

必ず完全に停止するまで待つ事、タッチダウンを起こすとターボ分子ポンプを痛める。
また、トータル５回のタッチダウンを起こした時点でポンプ自身のオーバーホールが必要となる。

・重イオン準備室内のＳＴ１，２，３ボタンをＯＦＦにする。
・ＳＹＳＴＥＭ　ＭＡＩＮのキースイッチをＯＦＦにする。
・重イオン準備室のＰＯＷＥＲ　ＤＩＳＴＲＩＢＵＴＩＯＮをＯＦＦにする。
・第２重イオン室のＰＯＷＥＲ　ＤＩＳＴＲＩＢＵＴＩＯＮをＯＦＦにする。
・ブレーカー（１００Ｖ，２００Ｖ）をＯＦＦにする。
・３台のロータリポンプをベントする。

5．安全対策

5.1　放射線被爆に対するインターロック

重イオンが装置の内壁やコリメータ、試料などに当たった時にγ線、中性子などが発生する。このため、照射実験中に照射室にいることは大変危険である。そこで、実験を開始する際には実験準備終了後、警告ブザーを鳴らし実験責任者が照射室に誰も残っていない事を確認した後、照射室の扉を閉める。また、実験中に過って照射室の扉を開けないように、照射室の鍵はＡＶＦサイクロトロン制御室に置き、照射室に入る時は実験責任者が鍵をとる。なお、照射室の扉はインターロックとなっており、扉が閉じていないとイオン照射はできない構造となっている。

5.2　漏電防止のために

第３チェンバーは地下１階よりもさらに２ｍほど低い位置にあるので、地下水のしみだしやエアコン排水の洩れなどで発生した水がここに溜まる可能性がある。そこで水漏れ検知器を第３チェンバーの周りに取り付けた。

5.3　非常時の真空悪化に備えて

実験中の装置の故障や試料からのアウトガスによる真空度の悪化からＡＶＦサイクロトロン本体及びビームラインにある高電圧部、真空排気系等の損傷を回避する為に、本装置のイオンビーム上流側の第０チェンバーに取り付けた電離真空計の指示値が一定値以上になると、サイクロトロンからのビーム輸送ライン最終段のゲートバルブが自動的に閉じる。

また、何等かの原因による急激な真空度の悪化時には、第１チェンバーに取り付けられたプレシャーセンサーからの信号を受け、このファーストアクテイングバルブによってただちに加速器からのビーム輸送ラインと第１チェンバーより下流側の装置とが切り離される。

6．基本データ

6.1　ビーム輸送

イオンビームが良い形状及び強度分布で第２チェンバーの回転式照射台まで届いた時の、ビームライン最終段のファラデーカップの電流値と本装置のファラデーカップの電流値から、イオンビームの透過率を求めた（Ｔａｂｌｅ　６－１）。

イオンビームの調整は、ビームモニターによる形状や濃度分布の観測の他に、ファラデーカップの示す電流値から求められる透過率にも注意しながら行なう。

Ｔａｂｌｅ　６－１　Ｔｒａｎｓｍｉｓｓｉｏｎ　ｏｆ　ｉｏｎ　ｂｅａｍ.

Faraday cup position	Current	Transmission
End of Beam Line	４ｎＡ	－－
First Chamber	２００ｐＡ	５％
Second Chamber	１８０ｐＡ	４．５％
Rotating Stage	１２０ｐＡ	３％

6.2　第１チェンバー　ビームピックアップ

第１チェンバーに取り付けられたビームピックアップの構造をＦｉｇ．６－１に示す。カーボンフォイルを重イオンが通過する時に前方に散乱した２次電子をＭＣＰで検出する。ただし、ＭＣＰの信号は微弱なのでプリアンプを通しオシロスコープで観測した（Ｆｉｇ．６－２）。

ＭＣＰとカーボンフォイル間の電圧の掛け方を変え、ＭＣＰへの適切な電圧の掛け方を考察した。Ｆｉｇ．６－３はＭＣＰとカーボンフォイルの間に電気的なバリアをつくり、低エネルギーの２次電子がＭＣＰに入らないようにしたもので、時間分解能の高い測定が可能になると考えた。しかし、２２０ＭｅＶのC^{5+}イオン照射した場合、バリアの電圧を０Ｖとした時でも（Ｆｉｇ．６－４）、－１０００Ｖの電気的バリアを作った時でもパルス信号の形はほとんど変化しなかった。次に、２次電子の検出効率を上げるために、飛び出したすべての２次電子を引き込むようにＦｉｇ．６－５のような電気回路を作成し、引き込み電圧を１９８Ｖかけた。その結果、２次電子の検出効率は高くなったが、Ｆｉｇ．６－６に示したように信号が尾を引くようになりトリガー信号には向かない事が分かった。

また、入射イオンに対するＭＣＰの検出信号数を調べたところ、Ｆｉｇ．６－７に示したように10^7ions/sec程度までイオンビームのフルエンスに線形的に比例する事が分かった。

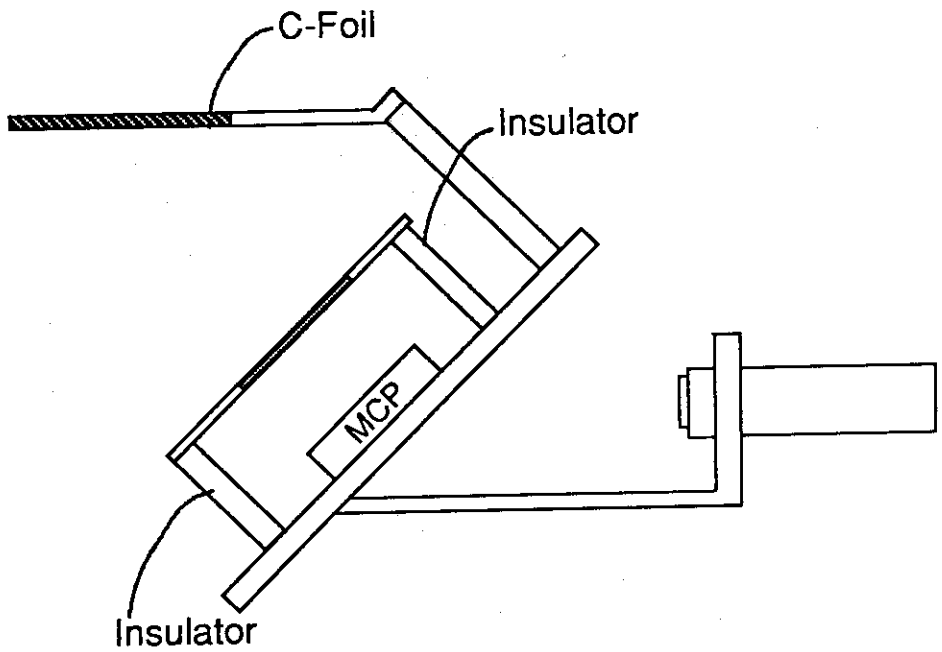

Fig. 6-1 Schematic diagram of beam pick up system.

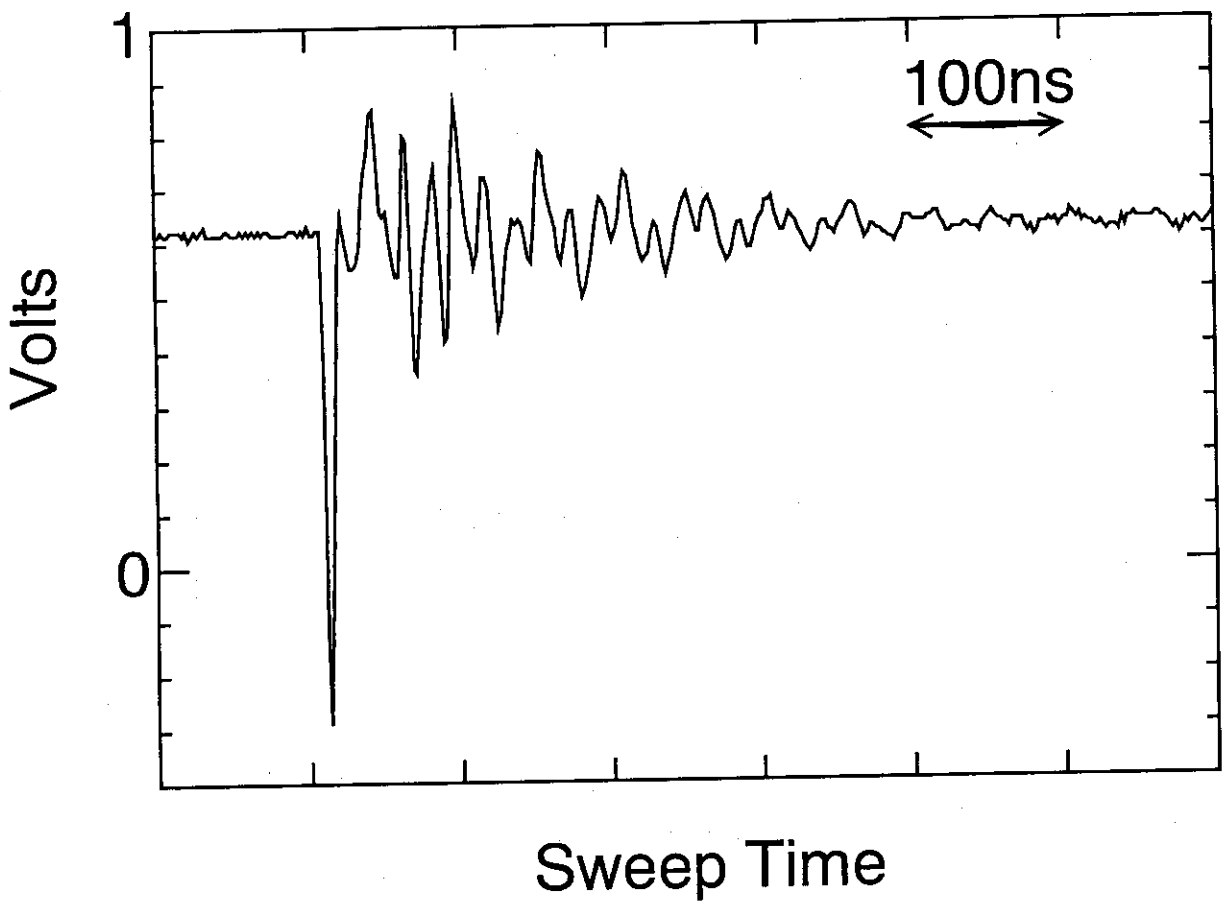

Fig. 6-2 Time dependence of MCP signal.

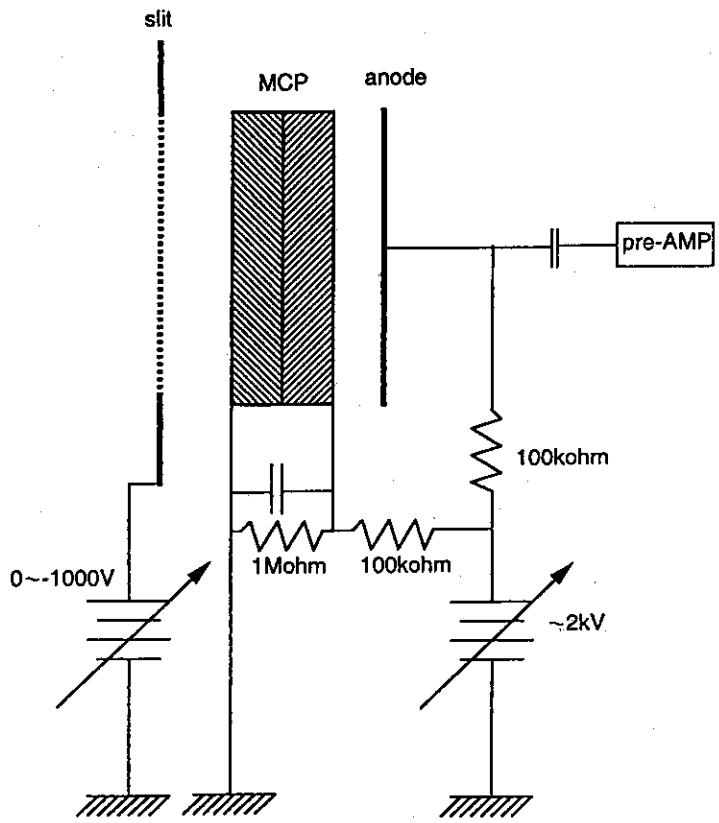

Fig. 6-3 Electric circuit of MCP and slit.

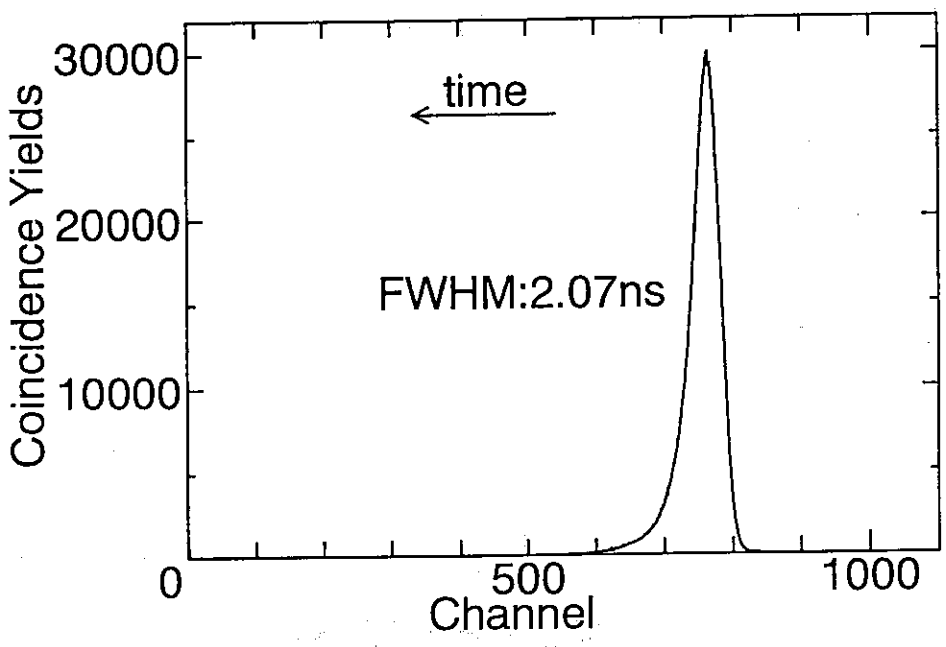

Fig. 6-4 Profile of time difference
between MCP and S-chopper signal.

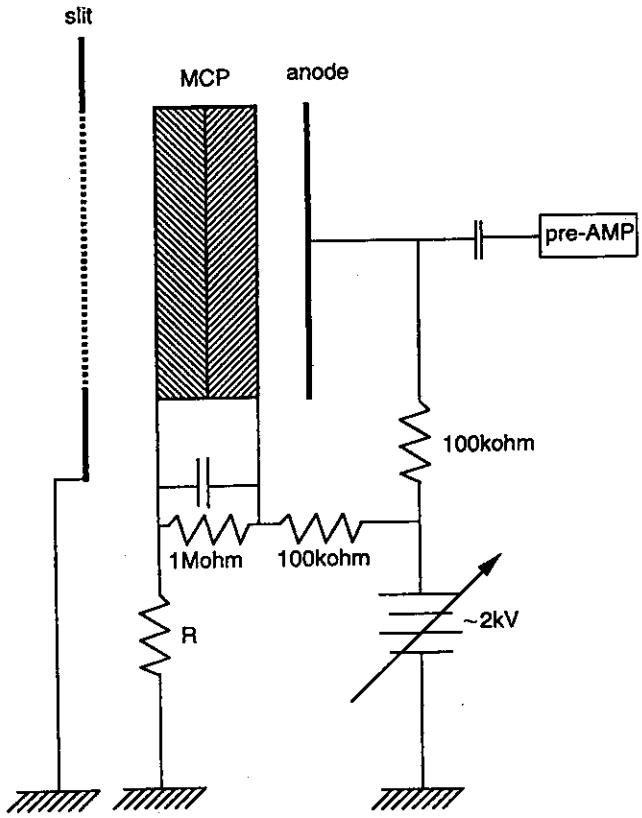

Fig. 6–5 Electric circuit of MCP and slit.

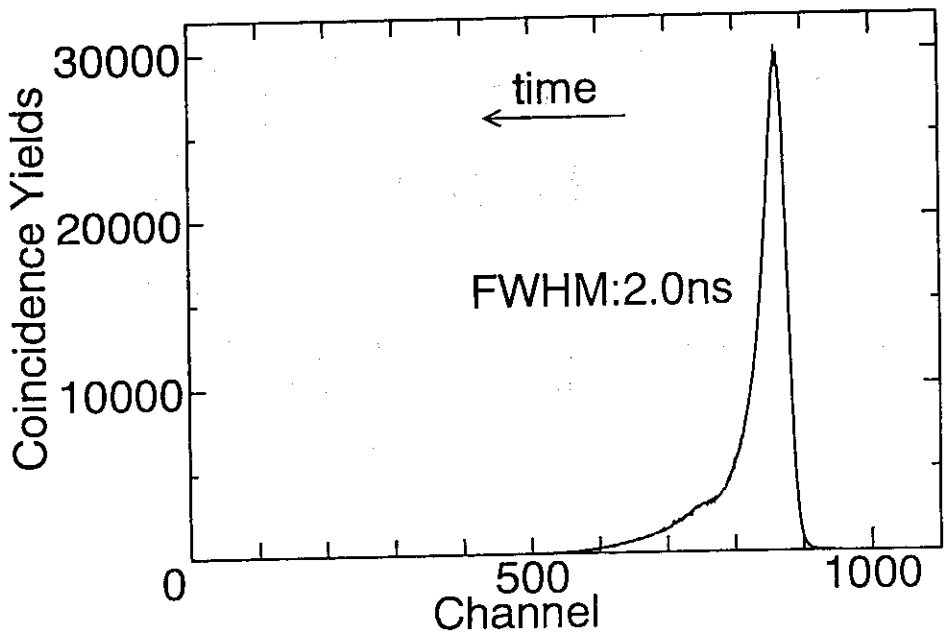

Fig. 6–6 Profile of time difference
between MCP and S–chopper signal.

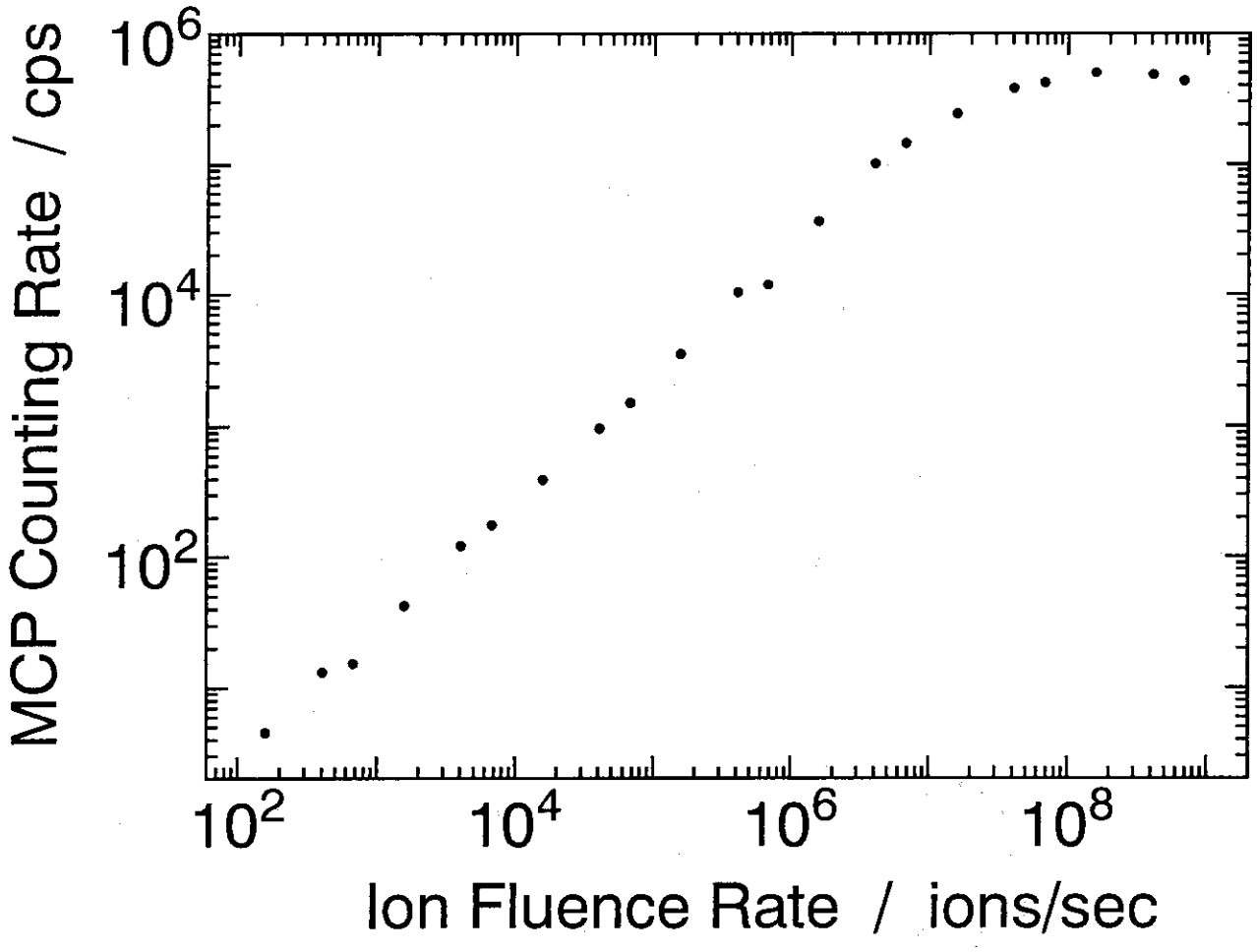

Fig. 6–7 Relationship between MCP counting rate and the current of Faraday cup 1.

Ｆｉｇ．６－８にＳ－チョッパーを制御している高周波の波形を示す。サイクロトロンで加速された重イオンをS-Chopperにより１／６程度に間引き試料に照射する。このチョッパーの繰り返しの周波数は重イオンと同期がとれている事から、チョッパーの信号をＴＡＣのスタート信号とし、ＭＣＰからの信号をストップ信号とすることでイオンビームのパルス波形をＭＣＡで観測する事ができる。Ｆｉｇ．６－９にＴＡＣレンジを５００ｎｓとした時の、３３０ＭｅＶのＡｒ$^{11+}$イオンのパルス波形を測定したものを示す。横軸は相対的な時間を示し、各ピークの高さはイオンの数を示す。Ｔａｂｌｅ　６－２に各ＴＡＣレンジにおける横軸の時間係数を示した。Ｓ－チョッパーを用いた間引き後のパルス波形をＦｉｇ．６－１０に示す。図よりピーク数が減り、１／６に間引けている事が分かる。また、Ｔａｂｌｅ　６－３にチョッパーによる間引きを行なった時と行なわない時のイオンビームの透過率を示したが、チョッパーによる透過率の変化はほとんどない事が分かった。

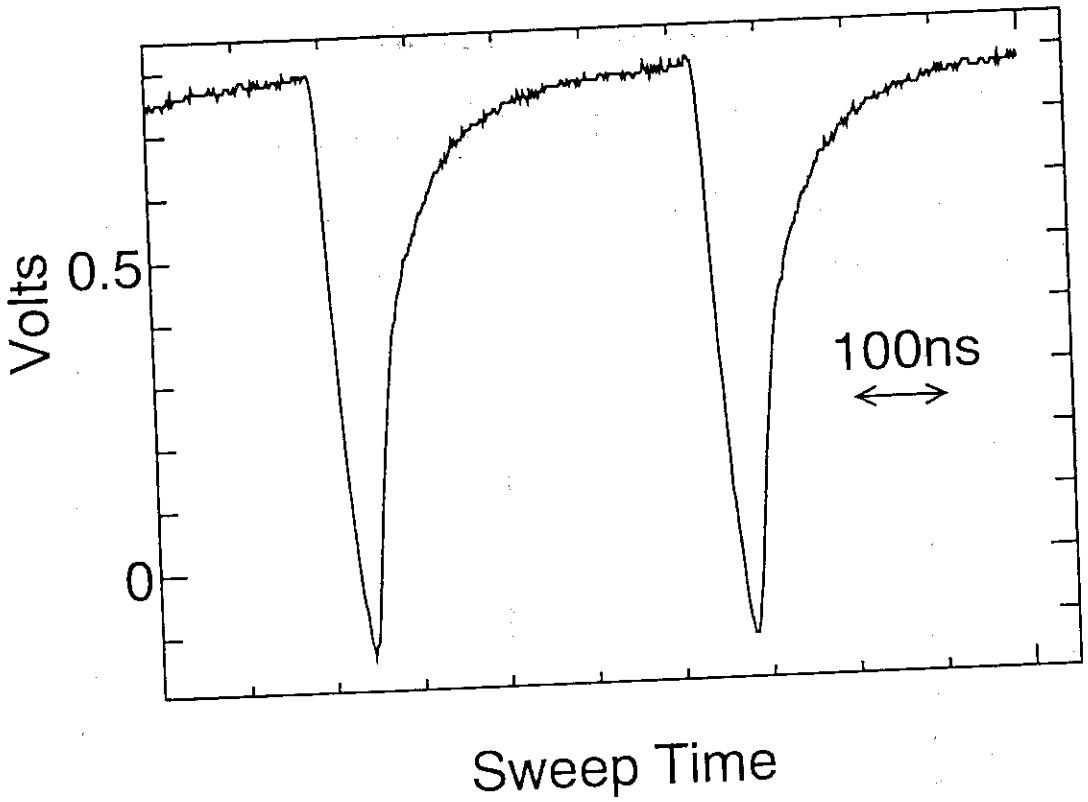

Fig. 6-8 Time dependence of S-chopper signal.

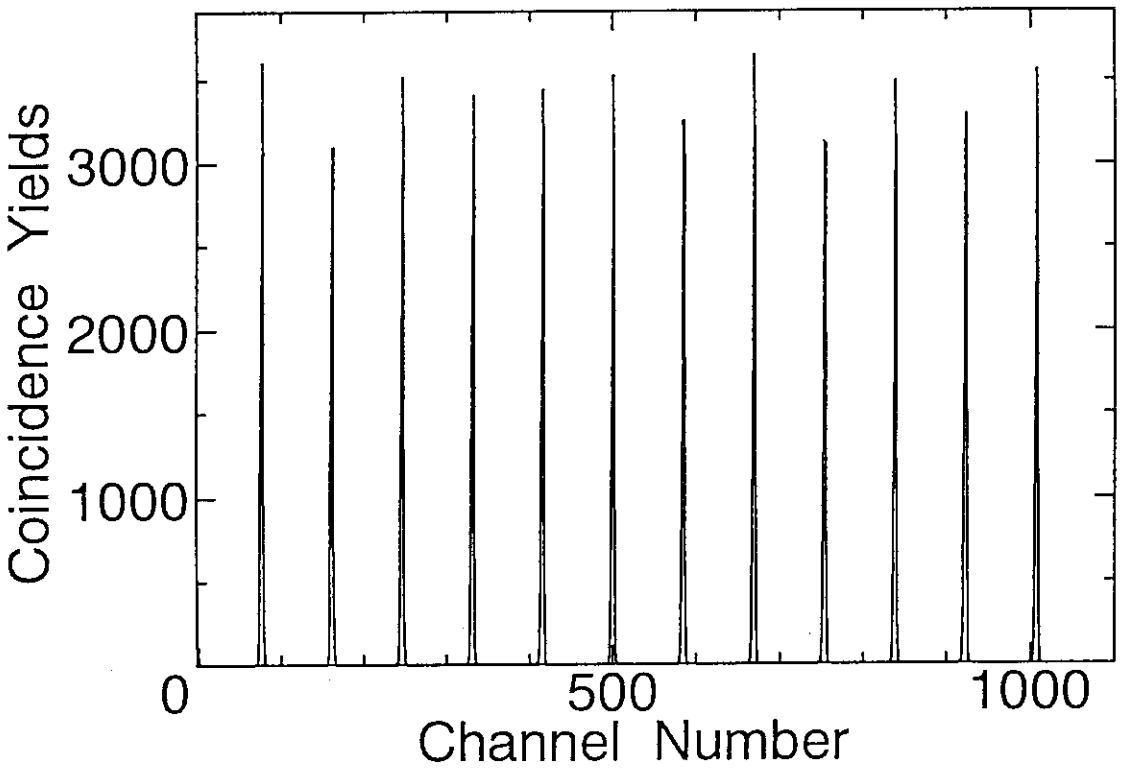

Fig. 6-9 Coincidence between MCP and S-chopper signal of original ion beam.

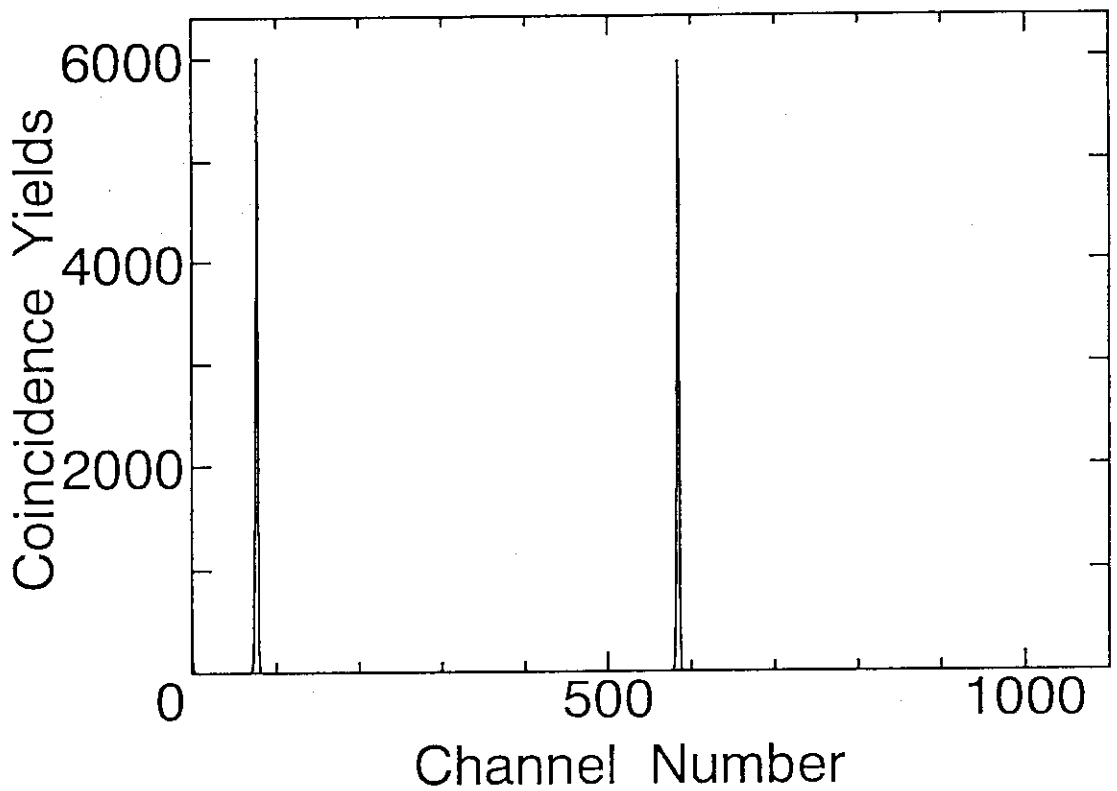

Fig. 6-10 Coincidence between MCP and S-Chopper signal of 1/6 chopped ion beam.

Table 6-2 Time calibrations of each TAC range.

TAC RANGE	MARKER PERIOD	Time Calibration of channel
50ns	10ns	4.52×10^{-2}ns/ch
100ns	10ns	9.11×10^{-2}ns/ch
200ns	20ns	1.80×10^{-1}ns/ch
500ns	80ns	4.30×10^{-1}ns/ch
1000ns	160ns	8.65×10^{-1}ns/ch
2000ns	320ns	1.73ns/ch
5000ns	640ns	4.38ns/ch

Table 6-3 Transmission of ions for on and off of S-Chopper.

	S-Chopper out		S-Chopper in	
Faraday Cup Position	Current	Transmission	Current	Transmission
End of Beam Line	3nA	--	4nA	--
First Chamber	160pA	5.3%	220pA	5.5%
Second Chamber	165pA	5.5%	200pA	5%
Rotating Stage	100pA	3.3%	120pA	3%

6.3　第２チェンバー　発光スペルトル

・波長校正

ストリークカメラの光学系調整を行った後、水銀ランプの光を減光し、ストリークカメラのフォーカスモードでモニターすることによって、波長校正を行なった。

（分光器入口横スリット：５０μｍ
ＭＣＰ電圧：３９０Ｖ

約２００ｎｍから６５０ｎｍまで波長スキャンしたしたところ、いくつか輝線が観測された（Ｆｉｇ．６－１１）。理科年表を用いて、輝線の各ピークの波長を求めた。

２５３．７ｎｍの輝線をもとにチャンネルを波長にキャリブレーションしたところ、次の式が得られた。

波長＝（中心波長－０．８）－０．３５８ｘ（チャンネル数－２５６）

ただし、０．８は２５０ｎｍ中心の時のものであるので注意する必要がある。また、後述するように波長分解能がそこまで高くないことからこの数字は無視しても良い。

・波長分解能測定

ストリークカメラの波長分解能を測定した。分光器の入口側の横方向のスリットを５００μｍ程度に開いた状態において水銀灯の光を測定した結果、４３７ｎｍ付近の輝線はＦＷＨＭで１８ｃｈだった（Ｆｉｇ．６－１２）。これは７ｎｍの分解能に相当する。次に分光器入口側横スリットを絞って１００μｍにしたところ６．７ｃｈとなり約４ｎｍの分解能になった（Ｆｉｇ．６－１３）。ただし、スリットを絞る事で波長分解能は高くなるが、逆に光量が１／３程度に落ちた。

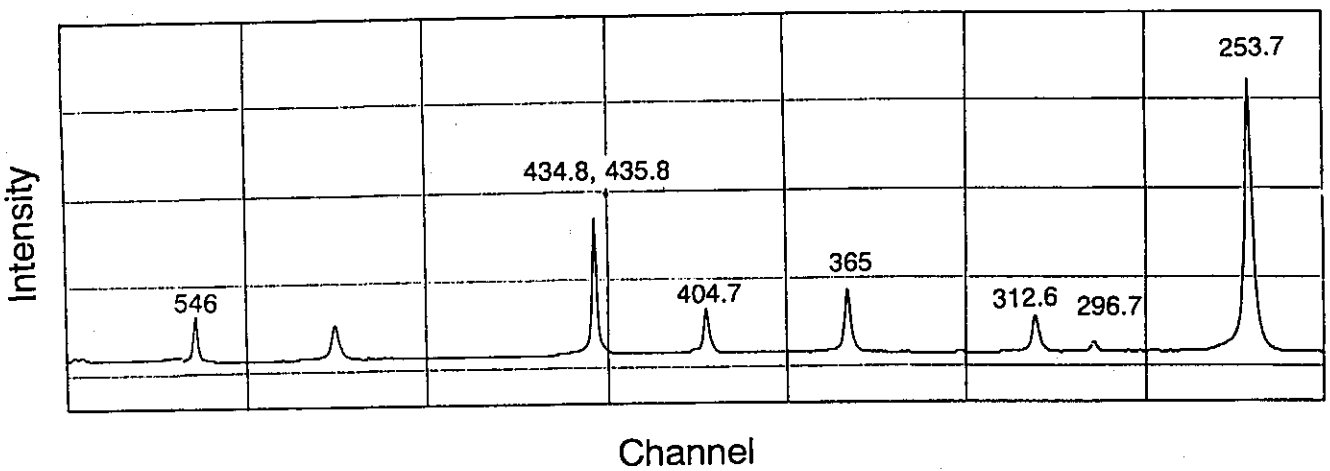

Fig. 6-11 Intensity of Xe lamp monitored by streak camera.

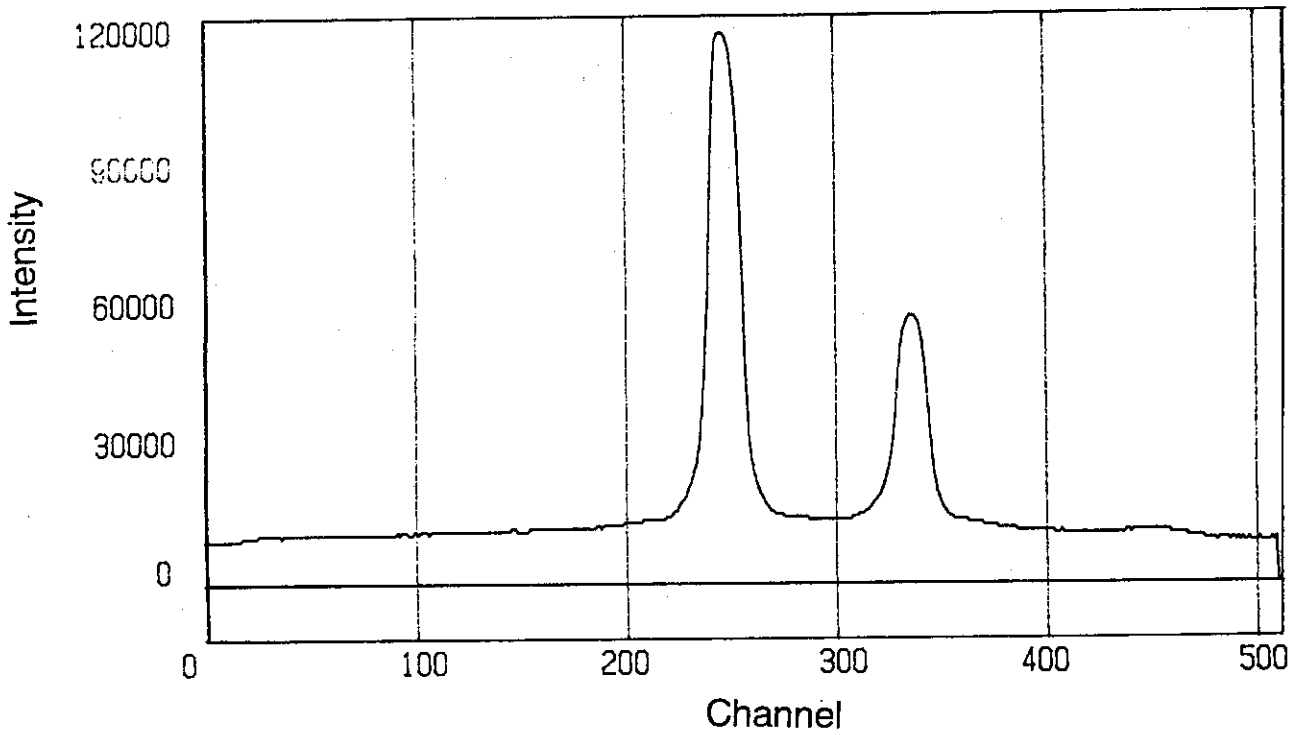

Fig. 6-12 Intensity of Xe lamp at 437nm monitored with horizontal slit for 500μm.

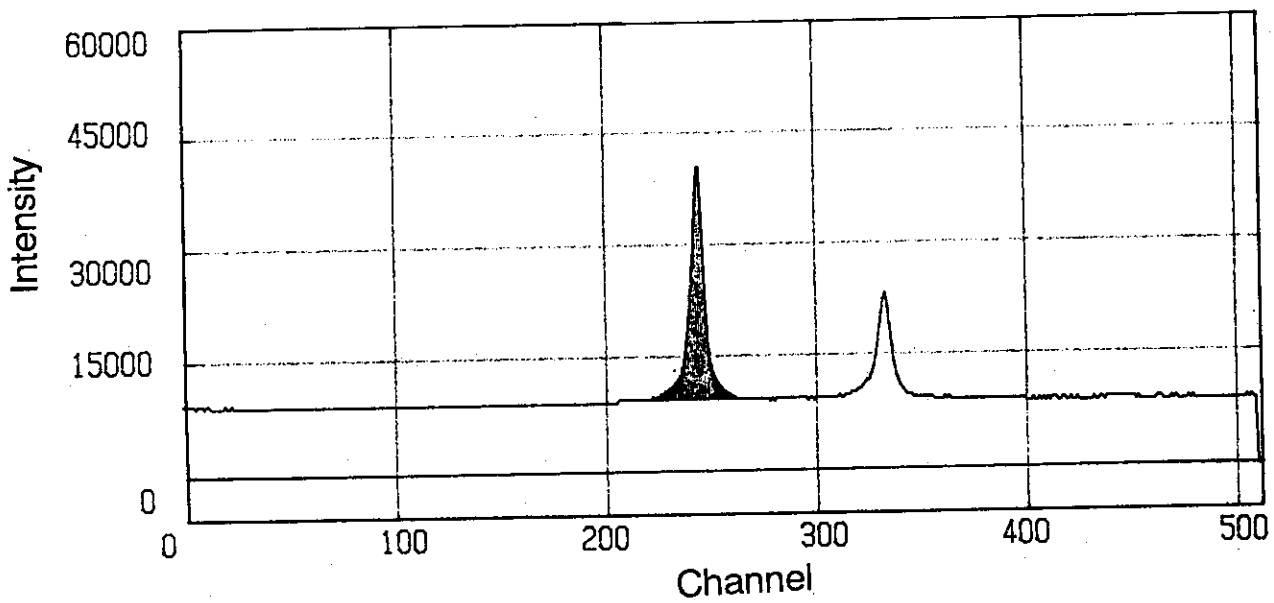

Fig. 6-13 Intensity of Xe lamp at 437nm monitored with horizontal slit for 100μm.

・時間分解測定

Ｆｉｇ．３－１２に高速の時間分解発光測定を行なうための測定系及び電気的な回路を示した。サイクロトロンで加速された重イオンはS-Chopperにより１／６程度に間引かれ試料に照射される。このチョッパーの繰り返しの周波数は重イオンと同期がとれている事から、ビームチョッパーにかける高周波の信号をトリガー信号とした。Ｆｉｇ．６－１４に１７５ＭｅＶのＡｒ$^{8+}$イオンをアルミナ蛍光体に照射した時の、３３０ｎｍ付近の発光の時間変化をストリークカメラで測定したものを示す。この発光バンドは非常に速い減衰を示す事が知られており、得られたスペクトル中の２本のピークは重イオンのパルスの形をほぼ反映していることが分かる。イオンのパルス幅は半値幅で約９ｎｓであった。

ナフタレンを含む高分子フィルムに３３０ＭｅＶのＡｒ$^{11+}$イオンを照射した時のストリークカメラで測定した発光スペクトルをＦｉｇ．６－１５に示す[23]。スペクトルの形はナフタレンをＵＶ光で励起した時のものと一致していた。このピーク波長である３３０ｎｍの発光寿命をホトマルを用いたフォトンカウンティング法で測定したところ、Ｆｉｇ．６－１６に示したようにUV光照射した場合とは異なり、単純な１次減衰ではなく重イオン照射直後の初期に於いて速い減衰が観測された。

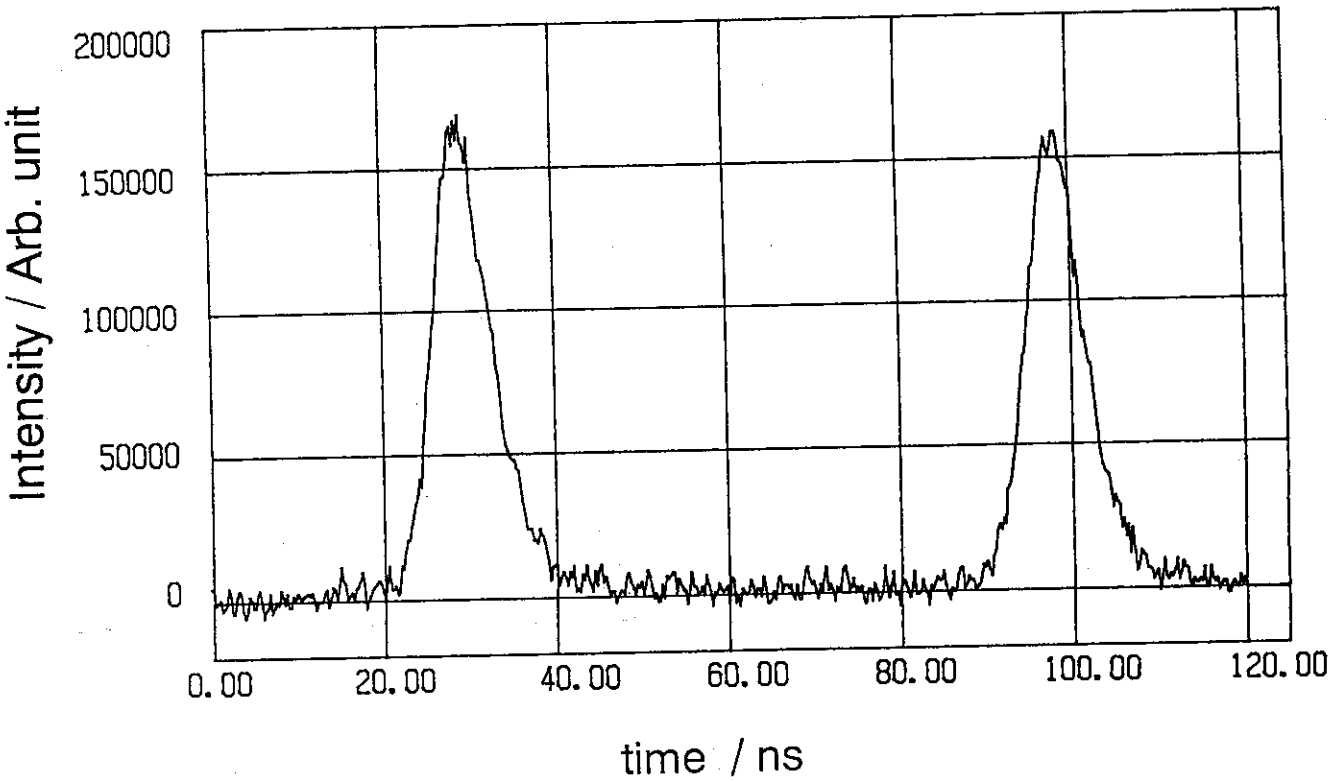

Fig. 6-14 Time dependence of luminescence at 330 nm of alumina induced by ion beam irradiation.

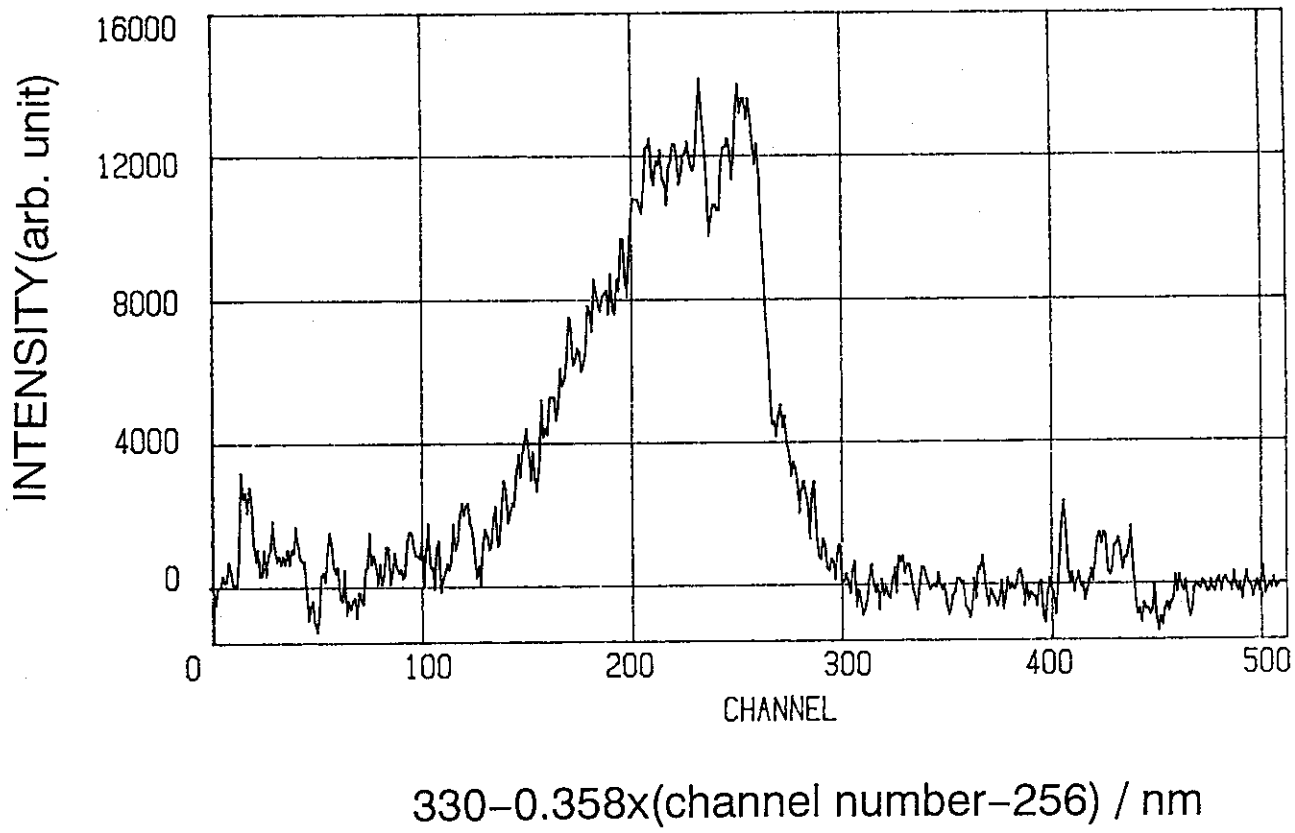

Fig. 6–15 Luminescence of naphtharene in polymer film irradiated with 330–MeV Ar^{11+} ion.[23]

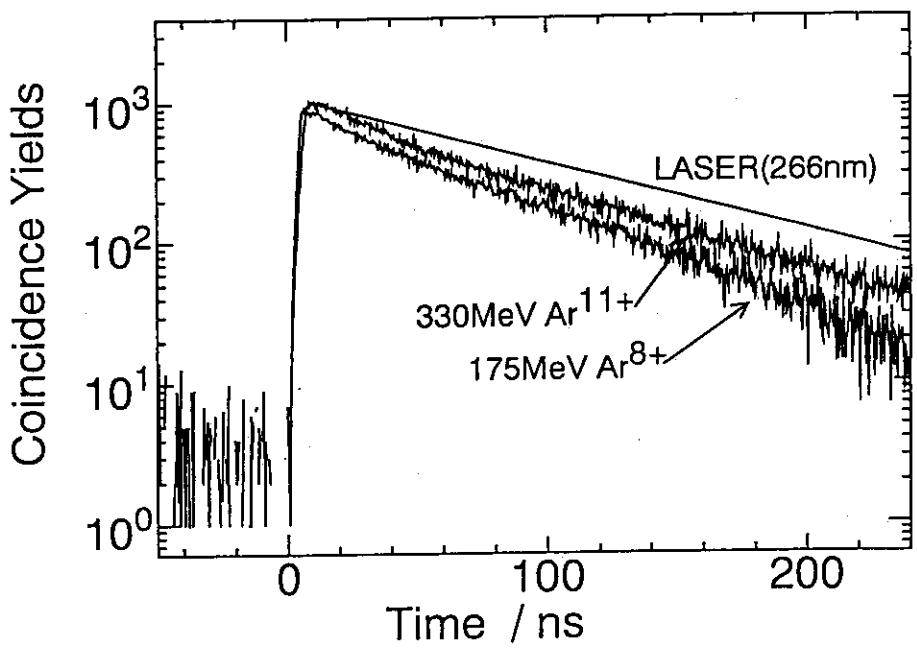

Fig. 6–16 Emission decay of naphtharene in polymer film irradiated with Ar ions and UV light.[23]

6.4 第２チェンバー　吸収スペクトル

ストリークカメラを用いて発光スペクトルと同じ測定系で、検出器の反対側にＸｅランプを設置する事で照射試料の吸収スペクトルを測定することができる。Ｆｉｇ．６－１７にテトラシアノベンゼンのイオン照射後の光吸収スペクトルを示す。２００ｃｈ付近と３５０ｃｈ付近に弱いながらピークがある事が分かる。これらのピーク位置はテトラシアノベンゼンアニオンラジカルの吸収位置と良く一致している。

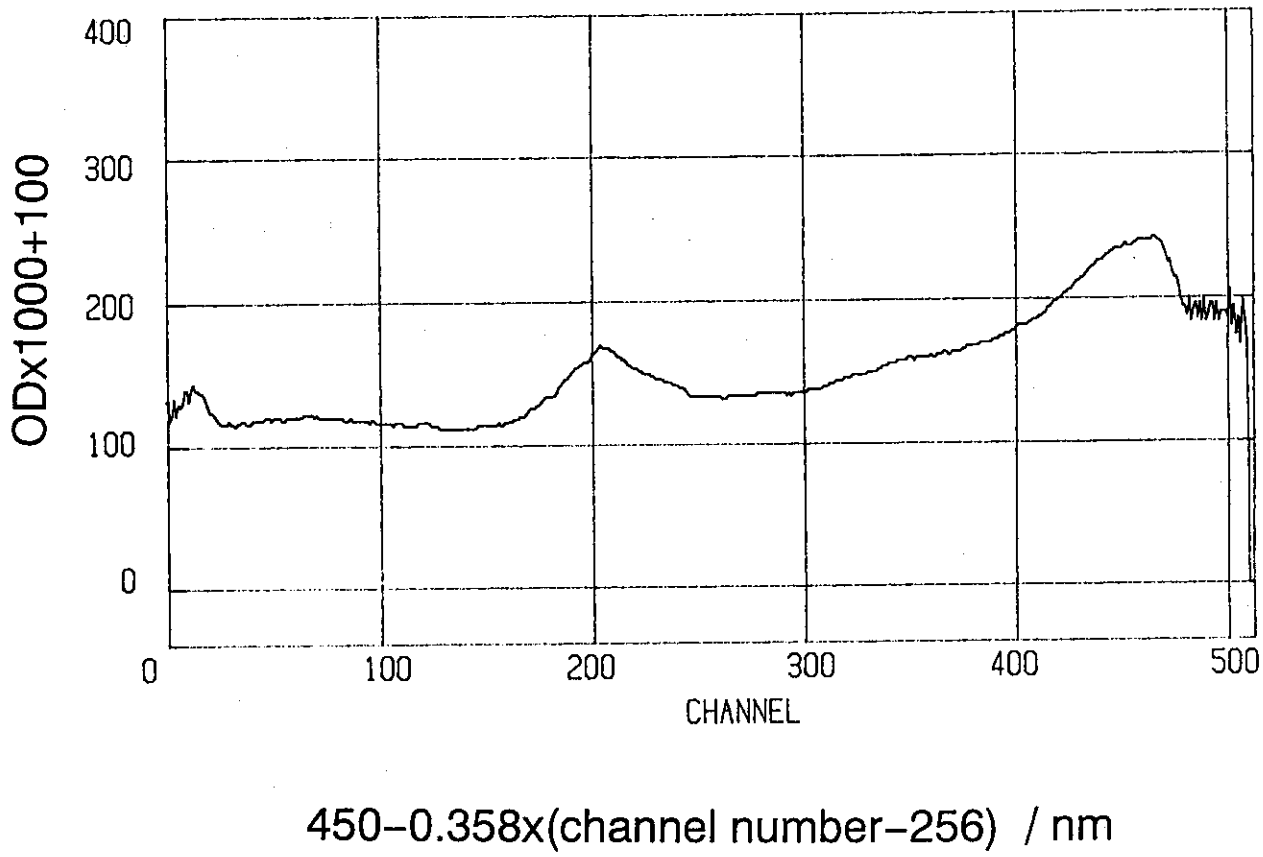

Fig. 6-17 Absorption spectrum of tetracyanobenzene in polymer film between before and after ion beam irradiation.

6.5 第3チェンバー　マイクロドジメトリー

第3チェンバーにArガスを吸入した時の各チェンバーの真空度の変化をFig. 6－18に示す。第3チェンバーの圧力を1気圧にした場合、第1チェンバーは0．5x10^{-8}Torrであった。このことは作動排気が正常に働いており、第3チェンバーの圧力を1気圧まで変化させながらの実験が可能であることを示す[19]。Fig. 6－19に約1TorrのArガスに175MeVのAr^{8+}イオンを照射した時の、小型イオン化チェンバーで測定した電流の値を示す。図から、20Vまでは比例領域に相当しイオン化チェンバーに掛ける電圧の増加によって集められる電流量が増加する事が分かる。電圧20～40Vで電流の飽和が観測された。また、それ以上の電圧領域は増幅領域に相当する。さらにイオンビームからの距離を変えたところ、距離が大きくなるにつれて、飽和領域の電流も減少した。このように飽和領域の電流値をイオンビームからの距離を変えながら測定し、距離依存性を求めることができる（Fig. 6－20）。

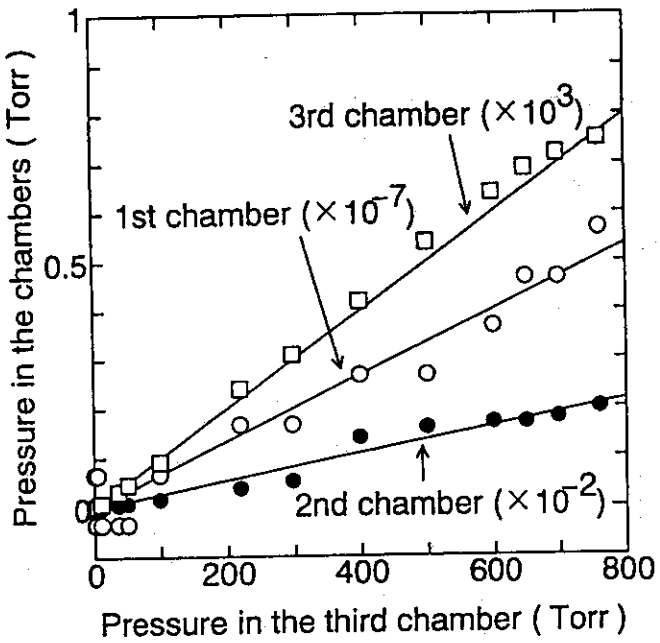

Fig. 6–18 Relationship of pressure between third chamber and other chambers.[19]

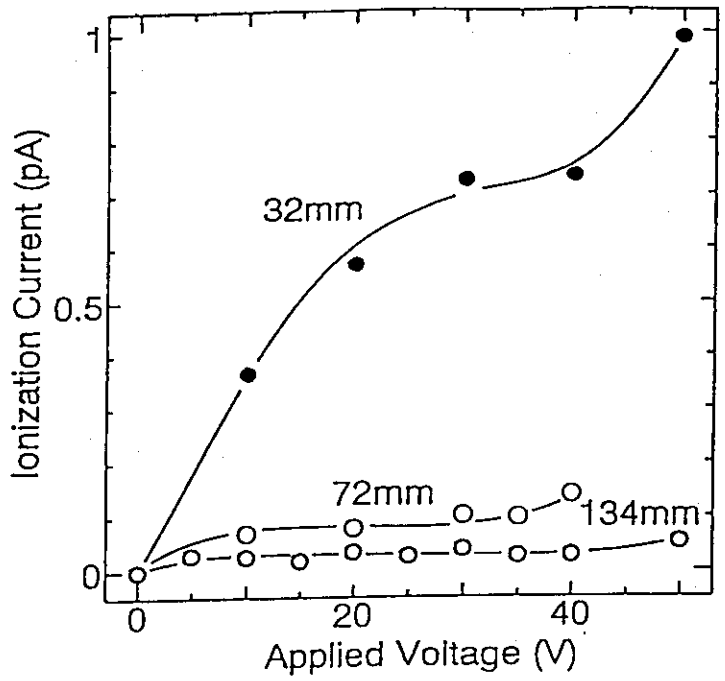

Fig. 6-19 Dependence of induced current of ionization chamber on applied voltage.[21)]

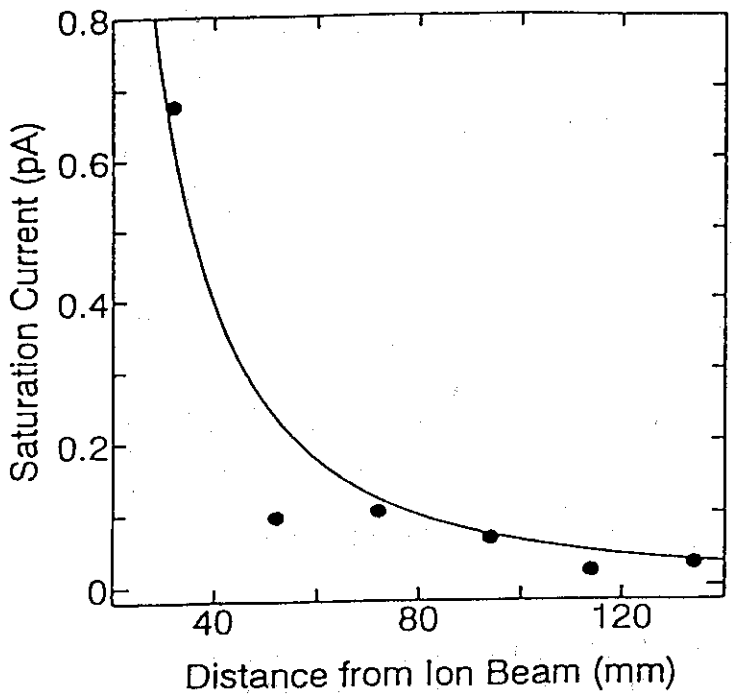

Fig. 6-20 Saturation current at different distance from the center of 175-MeV Ar^{8+} ion beam.[21)]

7. プログラム

Fig. 6－2や6－8に示したようにMCPの信号やホトマルの信号の確認、及びそれらデータの保存を行なうためにオシロスコープの波形取り込みプログラムをN88BASICを用いて作成した。

7.1 オシロスコープのデータ取り込みプログラム

```
100 '          SAVE "¥TDS-540¥DSO.BAS",A
110 '    ************************************************
120 '    * Tektronics   TDS 540                         *
130 '    *        Data Input Program                    *
140 '    *                                              *
150 '    *                  (H7.5.12  M.Taguchi)        *
160 '    ************************************************
170 '
180 ' National Instrument の n88basic 用ソフトを利用
190 '  NI-488.2
200   CLEAR   &H200          ' N88-BASIC(86)(MS-DOS ﾊﾞｰｼﾞｮﾝ) 宣言
210   IBINIT1 = 0 : IBINIT2 = IBINIT1 + 3
220   IBINIT3 = IBINIT1 + 6 : IBINIT4 = IBINIT1 + 9
230   DEF SEG = SEGPTR(2) : BLOAD "B:¥TDS-540¥bib.m"
240   POKE 12, 0             ' ｺﾝﾊﾟｲﾗ･ﾊﾞｰｼﾞｮﾝには，0 のところに 1 を置いて下さい。
250   CALL IBINIT1(IBFIND,IBTRG,IBCLR,IBPCT,IBSIC,IBLOC,IBPPC,IBBNA,IBONL,IBRSC,IBSRE,IBRS
V,IBPAD,IBSAD,IBIST,IBDMA,IBEOS,IBTMO,IBEOT,IBRDF,IBWRTF,IBTRAP,IBDEV,IBLN,IBLINES,IBCONFI
G)
260   CALL IBINIT2(IBGTS,IBCAC,IBWAIT,IBPOKE,IBWRT,IBWRTA,IBCMD,IBCMDA,IBRD,IBRDA,IBSTOP,I
BRPP,IBRSP,IBEVENT,IBDIAG,IBXTRC,IBRDI,IBWRTI,IBRDIA,IBWRTIA,IBSTA%,IBERR%,IBCNT%)
270   CALL IBINIT3(SENDCMDS,SENDSETUP,SENDDATABYTES,SEND,SENDLIST,RECEIVESETUP,RCVRESPMSG,
RECEIVE,SENDIFC,DEVCLEAR,DEVCLEARLIST,ENABLELOCAL,ENABLEREMOTE,SETRWLS,SENDLLO)
280   CALL IBINIT4(PASSCONTROL,READSTATUSBYTE,TRIGGER,TRIGGERLIST,PPOLLCONFIG,PPOLLUNCONFI
G,PPOLL,RESETSYS,FINDRQS,ALLSPOLL,FINDLSTN,TESTSYS,IBRDKEY,IBWRTKEY,WAITSRQ,TESTSRQ)
290  REM
300  REM GPIB ｺﾏﾝﾄﾞ:
310      UNL% = &H3F : UNT% = &H5F : GTL% = &H1 : SDC% = &H4 : PPC% = &H5 : GGET% = &H8 :
TCT% = &H9
```

```
320     LLO% = &H11 : DCL% = &H14 : PPU% = &H15 : SPE% = &H18 : SPD% = &H19 : PPE% = &H60
 : PPD% = &H70
330  REM
340  REM GPIB ｽﾃｰﾀｽ･ﾋﾞｯﾄ･ﾍﾞｸﾀ:
350     EERR = &H8000 : TIMO = &H4000 : EEND = &H2000 : SRQI = &H1000 : RQS = &H800 : SPO
LL = &H400 : EEVENT = &H200 : CMPL = &H100
360     LOK = &H80 : RREM = &H40 : CIC = &H20 : AATN = &H10 : TACS = &H8 : LACS = &H4 : D
TAS = &H2 : DCAS = &H1
370  REM
380  REM iberr ｸﾞﾛｰﾊﾞﾙ変数に戻って来るｴﾗｰ･ﾒｯｾｰｼﾞ:
390     EDVR = 0 : ECIC = 1 : ENOL = 2 : EADR = 3 : EARG = 4 : ESAC = 5 : EABO = 6 : ENEB
 = 7
400     EOIP = 10 : ECAP = 11 : EFSO = 12 : EBUS = 14 : ESTB = 15 : ESRQ = 16 : ETAB = 20
410  REM
420  REM EOS ﾓｰﾄﾞ･ﾋﾞｯﾄ:
430  REM
440     BIN% = &H1000 : XEOS% = &H800 : REOS% = &H400
450  REM
460  REM ﾀｲﾑ･ｱｳﾄの値と意味:
470  REM
480     TNONE% = 0 : T10US% = 1 : T30US% = 2 : T100US% = 3 : T300US% = 4 : T1MS% = 5 : T3
MS% = 6 : T10MS% = 7
490     T30MS% = 8 : T100MS% = 9 : T300MS% = 10 : T1S% = 11 : T3S% = 12 : T10S% = 13 : T3
0S% = 14 : T100S% = 15
500     T300S% = 16 : T1000S% = 17
510  REM
520  REM いろいろ:
530  REM
540     S% = &H8 : LF% = &HA
550  REM
560  REM IBLN 定数:
570  REM
580     ALL.SAD% = -1 : NO.SAD% = 0
590  REM
600  REM IBEVENT 定数:
```

```
610  REM
620      EVENTDTAS% = 1 : EVENTDCAS% = 2
630  REM
640  REM IBCONFIG関数の "OPTION" 選択ｺｰﾄﾞ:
650  REM
660      IBCPAD% = &H1 : IBCSAD% = &H2 : IBCTMO% = &H3 : IBCEOT% = &H4  : IBCPPC% = &H5 :
IBCREADDR% = &H6
670      IBCAUTOPOLL% = &H7 : IBCCICPROT% = &H8 : IBCIRQ% = &H9 : IBCSC% = &HA  : IBCSRE%
= &HB : IBCEOSRD% = &HC
680      IBCEOSWRT% = &HD : IBCEOSCMP% = &HE: IBCEOSCHAR% = &HF : IBCPP2% = &H10  : IBCTIM
ING% = &H11 : IBCDMA% = &H12
690      IBCREADADJUST% = &H13 : IBCWRITEADJUST% = &H14 : IBCEVENTQUEUE% = &H15 : IBCSPOLL
BIT% = &H16 : IBCSENDLLO% = &H17
700      IBCSPOLLTIME% = &H18 : IBCPPOLLTIME% = &H19 : IBCNOENDBITONEOS% = &H1A
710  REM
720  REM Send ｺﾏﾝﾄﾞに使えられる値:
730  REM
740      NULLEND% = &H0 : NLEND% = &H1 : DABEND% = &H2
750  REM
760  REM Receive ｺﾏﾝﾄﾞに使えられる値:
770  REM
780      STOPEND% = &H100
790  REM
800  REM IBLINES関数に使えられる値:
810  REM
820      VALIDEOI = &H80 : VALIDATN = &H40 : VALIDSRQ = &H20 : VALIDREN = &H10 : VALIDIFC
= &H8 : VALIDNRFD = &H4 : VALIDNDAC = &H2 : VALIDDAV = &H1
830      BUSEOI = &H8000 : BUSATN = &H4000 : BUSSRQ = &H2000 : BUSREN = &H1000 : BUSIFC =
&H800 : BUSNRFD = &H400 : BUSNDAC = &H200 : BUSDAV = &H100
840  REM
850  REM この値でｱﾄﾞﾚｽ･ﾘｽﾄの終わりをﾏｰｸします。 最後のｴﾝﾄﾘにｱｻｲﾝします。
860  REM
870  REM
880      NOADDR% = &HFFFF
890
```

```
900 '*********************************************************************
910  DIM Y(2000),RD2$(600),ACC.Y(2000),SUM.Y(2000)
920  SCREEN 3:CONSOLE 0,24,1,1:CLS 3
930  KEY ON
940 '
950 '**********************   INITIAL  SETTING   *************************
960 FILE.NAME$="950520.DSO"    ' ダミーのファイルネーム
970 ACC=0
980  FOR I=1 TO 1000:Y(I)=0:NEXT I
990  KEY 1,"HDCOPY":KEY 2,"    ":KEY 3,"CL SCR":KEY 4,"    ":KEY 5,"SAVE"
1000  KEY 6,"END   ":KEY 7,"      ":KEY 8,"ACC.  ":KEY 9,"AC.RES":KEY 10,"AC.STO"
1010 ON KEY GOSUB *HDCOPY,*RETU,*CLS3,*RETU,*SAV,*EXIT,*RETU,*ACC,*ACC.RESET,*ACC.STOP
1020 'ON HELP GOSUB *HHLEP
1030 '**********************  MAIN    PROGURUM    *************************
1040 PRINT "READ MEASUREMENT FROM TDS-540":PRINT
1050 BOARD$="GPIB0"
1060 CALL IBFIND (BOARD$, BRD1%) 'GPIB0のユニット記述子をBRD1に割り当てる
1070    IF BRD1% < 0 GOTO 1240  ' ERROR ROUTINE
1080 DEV$="DEVA"                        ' OPEN DSO
1090 CALL IBFIND (DEV$, DSO%)
1100   IF DSO% < 0 GOTO 1250
1110     CALL IBCLR (DSO%)
1120  COMD$ = "BELL"                    '命令コマンド
1130 CALL IBWRT(DSO%, COMD$)
1140 CLS 3
1150   GOSUB *READDATA
1160   GOTO 1150
1170   STOP
1180 '
1190 '
1200 '
1210 '
1220 '
1230 '**********************  ERROR    ROUTINE    ************************
1240  PRINT "ERROR ＧＰＩＢボード"
```

```
1250 PRINT  "ERROR ＤＳＯ                    "
1260 '
1270 *READDATA
1280 '********************  READ DATA FROM TDS 540 ********************
1290 COM1$="DATA:SOURCE CH1 "
1300  CALL IBWRT(DSO%, COM1$)
1310 COM2$="DATA:ENCDG RPBINARY "
1320  CALL IBWRT(DSO%, COM2$)
1330 COM3$="DATA:WIDTH 1 "  'SAMPLE  MODEでは１  AVERAGE  MODE  では  ２が良い
1340  CALL IBWRT(DSO%, COM3$)
1350 COM4$="DATA:START 1"
1360  CALL IBWRT(DSO%, COM4$)
1370 COM5$="DATA:STOP 500"
1380  CALL IBWRT(DSO%, COM5$)
1390 COM6$="WFMPRE:CH1? "
1400  CALL IBWRT(DSO%, COM6$)
1410 COM7$="CURVE?"
1420  CALL IBWRT(DSO%, COM7$)
1450  RD1$=SPACE$(98)              'COMMENT
1460  CALL IBRD(DSO%, RD1$)
1470 '  PRINT RD1$
1480    RD2$=SPACE$(5)                                'ＩＦ文を挿入予定
1490    CALL IBRD(DSO%, RD2$)
1500 '  PRINT RD2$
1510  A$=LEFT$(RD2$,1):'IF A$="#" THEN GOTO 1450 ELSE GOTO 1030
1520  B$=RIGHT$(LEFT$(RD2$,2),1)
1530  C$=RIGHT$(LEFT$(RD2$,5),3):DATA.NUM=VAL(C$)    'ＩＦ文を挿入予定
1540  IF DATA.NUM < 500 GOTO 1030
1550 'PRINT DATA.NUM:'PRINT RD2$
1560  FOR I=1 TO DATA.NUM
1570    RD2$=SPACE$(1)
1580    CALL IBRD(DSO%, RD2$)
1590 '       ＤＳＯから送られてくるデータは一つのデータが一つの文字で
1600 '       表された文字列のためＡＳＣコマンドで１０進数に変換する
1610 '       データは０から２５５までの整数で１２７が画面の中心になる
```

```
1620 '        ただし画面上は１００までを表示している
1630    Y(I)=ASC(RD2$)
1640    Y(I)=Y(I)-127                          'データは中心が０の整数値
1660  NEXT I
1670 '
1680 IF ACC=2 THEN GOSUB *ACC.ZERO
1690 IF ACC=1 THEN GOSUB *ACC.CAL
1700 GOSUB *CRT.PR
1710 RETURN
1720 '
1730 *EXIT
1740 LOCATE 10,22:INPUT "終了しますか (Y/N) ";EN$
1750 IF EN$="Y" OR EN$="y" THEN GOTO 1760 ELSE GOTO 1780
1760 KEY OFF
1770 SYSTEM
1780 STOP
1800 '
1810 *CRT.PR
1820 '********************  GRAPHIC MODE  ****************************
1830 CLS 2
1840 LINE (10,20)-(510,340),2,B
1850 FOR T=-3 TO 3:LINE (10,180+T*40)-(510,180+T*40),7,,&HF0F0:NEXT T
1860 FOR T=-4 TO 4:LINE (260+T*50,20)-(260+T*50,340),7,,&HF0F0:NEXT T
1870 LINE (10,180)-(510,180),2
1880 LINE (260,20)-(260,340),2
1920 FOR I=1 TO DATA.NUM-1
1930 LINE (I+9,180-Y(I)*1.6)-(I+10,180-Y(I+1)*1.6),4
1940 NEXT I
1950 '
1960 IF ACC=0 THEN GOTO 2000
1970 FOR I=1 TO DATA.NUM-1
1980 LINE (I+9,180-ACC.Y(I)*1.6)-(I+10,180-ACC.Y(I+1)*1.6),5
1990 NEXT I
2000  '          :PRINT RD1$
2010 LOCATE 66,1:PRINT DATE$
```

```
2020 LOCATE 66,2:PRINT TIME$
2030 LOCATE 64,6:CHANNEL$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,17),16):PRINT CHANNEL$:
2040 LOCATE 63,7:HORIZONTAL$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,34),16):PRINT HORIZONTAL$:
2050   HORIZONTAL.SCALE1$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,24),5):
2060   HORIZONTAL.SCALE2$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,25),1):
2070 IF HORIZONTAL.SCALE2$="m" THEN HORIZONTAL.FACTOR=4*VAL(HORIZONTAL.SCALE1$)/100/1000 E
LSE HORIZONTAL.FACTOR=4*VAL(HORIZONTAL.SCALE1$)/100
2080 LOCATE 67,8:VERTICAL$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,47),12):PRINT VERTICAL$:
2090 LOCATE 64,5:MODE$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,72),11):PRINT MODE$:
2100              TIME.FACT1$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,41),5):'PRINT TIME.FACT1$
2110              TIME.FACT2$=RIGHT$(LEFT$(RD1$,42),1):'PRINT TIME.FACT2$
2115 IF TIME.FACT2$="n" THEN TIME.FACTOR=2*VAL(TIME.FACT1$)/100/1E+09
2120 IF TIME.FACT2$="u" THEN TIME.FACTOR=2*VAL(TIME.FACT1$)/100/1E+06
2130 IF TIME.FACT2$="m" THEN TIME.FACTOR=2*VAL(TIME.FACT1$)/100/1000
2140 IF ACC=1 THEN LOCATE 66,13:PRINT "ACC.TIMES=";ACC.TIME
2150 '
2160 RETURN
2210 *RETU
2220 *CLS3
2230 CLS 3
2240 RETURN
2250 *SAV
2252 IF ACC=1 THEN LOCATE 10,20:PRINT "積算したデータをセーブします":FOR I=1 TO DATA.NUM:Y
(I)=SUM.Y(I):NEXT I ELSE GOTO 2260
2260 IF LEN(DIREC.NAME$)<>0 THEN GOTO 2280
2270 LOCATE 10,21:INPUT "INPUT DIRECTORY NAME ";DIREC.NAME$
2280 LOCATE 10,22:PRINT "INPUT FILE NAME ?"+FILE.NAME$
2290 LOCATE 10,22:INPUT "INPUT FILE NAME";FILE.NAME$
2300 ' OPEN "B:¥"+DIREC.NAME$+"¥"+FILE.NAME$+".DSO" FOR OUTPUT AS #1
2305   OPEN "B:¥"+FILE.NAME$+".DSO" FOR OUTPUT AS #1
2310    PRINT #1,MODE$,CANNEL$,HORIZONTAL$,VERTICAL$
2320    FOR I=1 TO DATA.NUM
2330    PRINT #1,I*TIME.FACTOR,Y(I)*HORIZONTAL.FACTOR
2340 '  PRINT I*VAL(TIME.FACT$),Y(I),Y(I)*HORIZONTAL.FACTOR
2350    NEXT I
```

```
2360  CLOSE
2370 CLS 3
2380 RETURN
2390 *HDCOPY
2400 LOCATE 10,22:PRINT "用紙をセットして下さい（左端）"
2410 LOCATE 10,23:PRINT "準備ができたら何かキーを押して下さい"
2420 INK$=INKEY$ :IF INK$="" GOTO 2420
2430 LOCATE 10,21:PRINT SPACE$(40)
2440 LOCATE 10,22:PRINT SPACE$(40)
2450 COPY 3
2460 RETURN
2470 *HHELP
2480 RETURN
2490 *ACC
2500 ACC=1
2510 RETURN
2520 *ACC.CAL
2530 ACC.TIME=ACC.TIME+1
2540 FOR I=1 TO DATA.NUM
2550 SUM.Y(I)=SUM.Y(I)+Y(I)
2560 NEXT I
2570 MAX.SUM.Y=ABS(SUM.Y(1))
2580 FOR I=2 TO DATA.NUM
2590   IF MAX.SUM.Y < ABS(SUM.Y(I)) THEN MAX.SUM.Y=ABS(SUM.Y(I))
2600 NEXT I
2610 FOR I=1 TO DATA.NUM: ACC.Y(I)=SUM.Y(I)/MAX.SUM.Y*90:NEXT I
2620 RETURN
2630 *ACC.RESET
2640 ACC=2
2645 ACC.TIME=0
2650 RETURN
2660 *ACC.ZERO
2670 FOR I=1 TO DATA.NUM:SUM.Y(I)=0:NEXT I
2675 ACC=1
2690 RETURN
```

```
2700 *ACC.STOP
2710 ACC=0:ACC.TIME=0
2715 FOR I=1 TO DATA.NUM:SUM.Y(I)=0:NEXT I
2718 LOCATE 66.13:PRINT SPC(20)
2720 RETURN
```

謝辞

本装置の設計ならびに研究テーマの策定にあたり貴重なご助言を頂いた「重イオン放射線化学研究グループ」の諸先生方、大阪大学産業科学研究所の田川精一氏、吉田陽一氏、関修平氏、東京大学原子力研究総合センターの柴田裕実氏、北海道大学工学研究科の吉田宏氏、小泉均氏、早稲田大学理工学部総合研究センターの浜義昌氏、群馬大学工学部の平塚浩士氏、原研高崎材料開発部の瀬口忠男氏に感謝いたします。また、本装置の製作・設置にあたり、ご協力を頂きました放射線高度利用センターの利用計画課、イオン加速器管理課及び管理部工務課の皆様に感謝いたします。

イオン照射初期過程に於ける線質効果の理論的解析を行なうにあたりご助言を頂いた東海大学開発技術研究所の大野新一氏、東海研究所燃料研究部の古川勝敏氏に感謝いたします。ビームピックアップのカーボンフォイル貼り付け作業にご指導を頂いた東海研究所原子炉工学部の金沢修平氏に感謝いたします。そして、本装置の作成にご協力いただいた群馬大学の前岡裕徳氏、富田玲氏に感謝いたします。

参考文献

1) J.E.Turner, R.N.Hamm, G.S.Hurst, H.A.Wright and M.M.Chiles, Radiat. Prot. Dosim., 13, 45-48(1985).

2) G.Leuthold and G.Burger, Radiat. Prot. Dosim., 13, 37-40(1985).

3) K.Furukawa, S.Ohno, H.Namba, M.Taguchi and R.Watanabe, The 7th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, 65(1996).

4) M.Lassmann, H.Roos and A.M.Kellerer, Radiat. Prot. Dosim., 52, 51-55(1994).

5) J.A.LaVerne, Radiat. Res., 118, 201-210(1989).

6) W.G.Burns and H.E.Sims, J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1, 77, 2803-2813(1981).

7) J.A.LaVerne and R.H.Schuler, J. Phys. Chem., 96, 7376-7378(1992).

8) A.Appleby, E.A.Christman and M.Jayko, Radiat. Res., 104, 263-271(1985).

9) H.Shibata, Y.Yoshida, S.Tagawa, Y.Aoki and H.Namba, Nucl. Instr. and Meth., A327, 53-56 (1993).

10) J.H.Miller and M.L.West, J. Chem. Phys., 74, 728-731(1981).

11) J.A.LaVerne and B.Brocklehurst, J. Phys. Chem., 100, 1682-1688(1996).

12) J.Huttermann and A.Schaefer, Appl. Radiat. Isot., 40, 915-921(1989).

13) M.Matsui and M.Imamura, Bull. Chem. Soc. Jpn., 48, 2346-2348(1974).

14) G.Foldiak, M.Roder and L.Wojnarovits, J. Radioanal. Nucl. Chem., 165, 385-394(1992).

15) E.A.Blakely, Radiat. Environ. Biophys., 31, 181-196(1992).

16) J.T.Lett, Radiat. Environ. Biophys., 31, 257-277(1992).

17) A.Chetioui, I.Despiney, L.Guiraud, L.Adoui, L.Sabatier and B.Dutrillaux, Int. J. Radiat. Boil., 65, 511-522(1994).

18) R.Roots, W.Holley, A.Chatterjee, M.Irizarry and G.Kraft, Int. J.Radiat. Boil., 58, 55-69 (1990).

19) H.Namba, Y.Aoki, M.Taguchi and K.Furukawa, JAERI TIARA Annual Report 1, 163-166(1992).

20) 南波秀樹　原子力工業　第４０巻　Ｐ５０－５２（１９９４）

21) H.Namba, M.Taguchi, K.Furukawa, S.Ohno and Y.Aoki, TIARA Annual Report 2, 69-71(1992).

22) M.Taguchi, Y.Matsumoto, H.Hiratsuka, H.Namba and Y.Aoki, TIARA Annual Report 4, 65-67 (1994).

23) M.Taguchi, Y.Aoki, H.Namba, R.Watanabe, Y.Matsumoto, H.Hiratsuka, Y.Yoshida, S.Tagawa and H.Shibata, Pro. 38th Symp. on Radiat. Chem., 133-134(1995).