

放射線医学総合研究所



801998013

NIRS-M-121
HIMAC-015

平成8年度
粒子線がん治療加速器に関する
共同研究報告書

1997年6月

編集

野田耕司、山田聰



放射線医学総合研究所
〒263 千葉市稲毛区穴川4-9-1

ISBN 4-938987-01-5

まえがき

HIMAC は、”対がん十ヶ年総合戦略”の重点計画として 1984 年から十年の歳月をかけ建設された世界初の重粒子線がん治療施設である。臨床試行研究が開始されて既に 2 年半が経過したが、この間 200 名近くのがん患者に対して治療照射が順調に終了している。一方、粒子線がん治療を支える基礎科学データを得るための共同利用研究も行われている。これは、生物及び物理・工学に関して所内外の研究者に開放されており、治療照射終了後の夜間や週末には行われている。このように HIMAC は極めて順調に稼働している。

このような臨床試行研究や共同利用研究を支えるべく、HIMAC 加速器の開発・研究も続けられ、呼吸同期照射や 3 次元照射のための RF-KO ビーム取り出し法の開発、ポジトロン放出核種による診断・治療のためのビームコースの建設、2 台のシンクロトロンを有効に活かすための入射器系の時分割加速等の研究・開発を行っている。さらに、宇宙生物医学研究に欠かす事のできない鉄イオンを十分な強度で加速するためのイオン源や小型蓄積リングに関する研究、放射光による高精度 CT による診断や環状動脈診断のための病院設置型の小型電子蓄積リングの研究を開始した。

このように、粒子線がん治療をさらに高精度、高効率にするために、HIMAC 加速器をさらに発展させる事が必要不可欠である。一方、粒子線がん治療は国内外でも注目を集め、新たな計画が提案され、その幾つかは建設が開始されている。このような状況で、粒子線がん治療のための加速器に関する開発・研究は、放医研に留まらず全国で進めて行くべき課題の一つであろう。このような観点に立ち、1996 年度より、放医研と所外の大学や研究所との”粒子線がん治療加速器”に関する共同研究を開始した。

本報告書は、今年度の共同研究の進捗状況と来年度の研究計画について発表戴いたものをまとめたものである。今後もこの共同研究を継続し、この分野を発展させるために、本報告書が少しでも寄与できれば幸いである。

平成 8 年 11 月 15 日

研究会幹事
野田耕司
山田 聰

目次

多重極電磁石による照射野拡大法の研究及び イオンビームモニターの開発	1
野田章、井上信、岩下芳久、浦壁恵理子、白井敏之、 藤田雄三、金澤光隆、取越正己、野田耕司、山田 聰、 西政嗣、平本和夫、田所昌宏	
高周波四極電場を用いた高速チューン制御の研究及び DC・SQUID を用いた微弱強度ビームモニターの開発	4
佐藤健次	
がん治療用入射重イオン線形加速器の研究	6
服部俊幸	
がん治療加速器の総合的研究	8
山田聰、熊田雅之、高田栄一、金澤光隆、取越正己、 野田耕司、北川敦志、佐藤真二、小川博嗣、荒木夏治、 板野明史、河野俊之、野村俊文、平本和夫、田所昌宏	
付録：成果発表トランスペアレンシー集	
多重極電磁石による照射野拡大法の研究及び イオンビームモニターの開発	11
野田章	
高周波四極電場を用いた高速チューン制御の研究及び DC・SQUID を用いた微弱強度ビームモニターの開発	31
佐藤健次	
がん治療用入射重イオン線形加速器の研究	52
服部俊幸、五十川克士、H. Schubert、笹公和、 伊藤崇、林崎規託、吉田拓司、馬島哲、山木晋一	

多重極電磁石による照射野拡大法の研究及びイオンビームモニターの開発

京都大学化学研究所 野田章、井上 信、岩下 芳久、浦壁恵理子、白井敏之
放射線医学総合研究所 金沢 光隆、取越 正巳*、野田耕司、山田 聡 (* 所内対応者)
東京大学原子核研究所 藤田雄三
日立製作所 日立研究所 西 政嗣、平本 和夫、日立工場 田所 昌宏

I. 平成8年度の成果

平成8年度の共同研究はガントリー小型化に向けての基礎開発及びイオンビームモニターの開発を中心に共同研究を進めてきた。このうち前者は照射系の長さ、特に患者直前の直線部分の長さを短縮し、ガントリーの小型化を図る目的から散乱体を用いない照射野拡大方法の開発を進めてきた。この方法は、散乱体によるビーム損失が避けられるため、ビームの利用効率が高いというメリットも有している。その一つの方法として図1に示したような多極磁場を用いたビーム強度分布整形法を用いる回転ガントリーを想定し、入射ビームをガウス分布に従うと仮定した場合、偏向面内でのビーム強度分布を多極磁場（8極磁場及び12極磁場）を用いることにより、2.5%以下のdeviationに抑えられるとの検討結果[1]を受けて、その実験的検証を進めることを追求してきた。具体的には先ず放医研の物理汎用実験室の直線コース上に8極電磁石を設置し、照射ビーム強度の平坦化を実験的に検証するべく準備を進めてきた。図2(a)に示したように、 $\beta_x = 30\text{m}$ 、 $\alpha_x = 0$ の地点の下流3mに 12000T/m^3 の8極電磁石を設置するとエミッタンス $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のビームはQDの下流7.0mの地点で、図2(b)のように $\pm 12\text{cm}$ の範囲内で2%の平坦度を持つように拡大できると予想される。勿論現実のビームは必ずしもガウス分布をしているとはいえないが、我々はその妥当性も含めて実験的に検証することを目指しており、ビーム分布をガウス分布に近づけるため、ビーム利用効率を落とさない程度の薄い散乱体を挿入することも検討している。本年度はこの8極電磁石の設計を完了し次年度にビームテストを遂行する予定である。

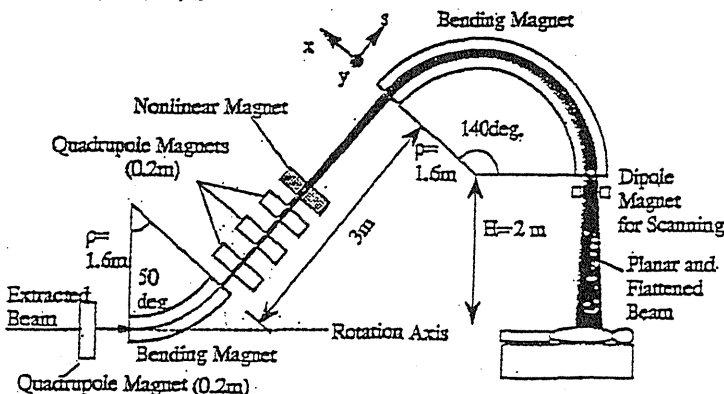


図1. 多極磁場（8、12極）を用いた小型回転ガントリーの案

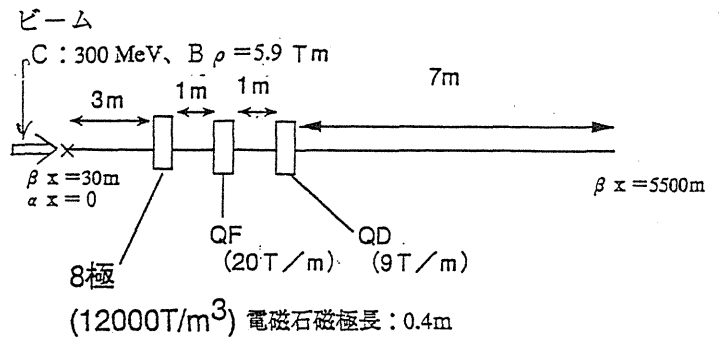


図2 (a) 放医研でテストしたい8極による照射野拡大法

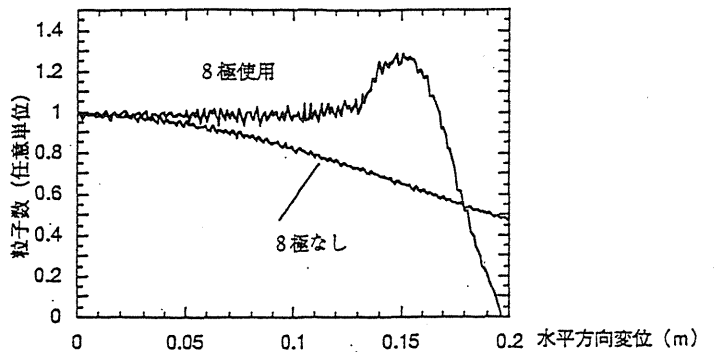


図2 (b) 期待される水平方向のビーム分布

イオンビームモニターについては、プロトタイプを製作し試験を行っている。目的は、スポットスキニング（ビームを細く絞ったものをスキニングする方式）において、'患者に照射する'ビームの強度の時間構造を知ることである。

検出器の種類としては平行平板型電離箱（PPI C）を選び、以下の要請を満たせるように試作した。

- (1) 絶対線量測定を高精度（数%以下）に行える
- (2) 線量の時間による変動（数kHz迄）をみる事が可能
- (3) 測定は患者の上流で行うので、ビームの吸収、散乱を抑えるため、少ない物質で構成が可能
- (4) 実際のビームコース上に占める長さも短い
- (5) 照射時間短縮のため、高強度ビーム（ $\sim 10^9$ ）に対しても測定が可能

この測定器の外観図を図3に示す。(3)(4)の実現のため、アルミニウムの外枠に窓を作り、電極も $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のアルミニウムを $3\mu\text{m}$ のポリプロピレンに蒸着したものをを用いた。

検出原理は、通過ビームによる検出器中のガスのイオン化により生成した電子を電場をかけて電極にあつめて電気信号として読み出すことであるが、(5)を実現するために増幅率を変えられるアンプと、カウンターガスの圧力・流量制御系も開発した。

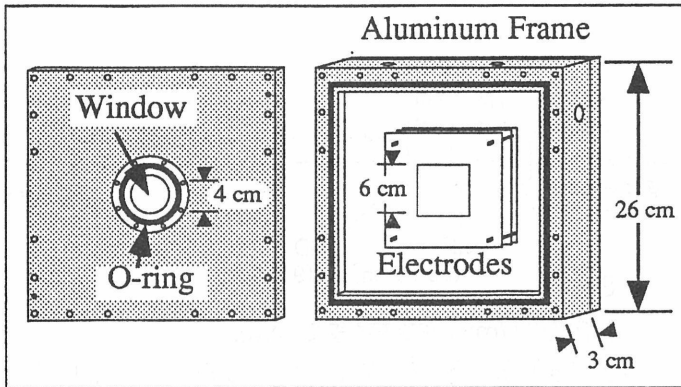


図3 イオンビームモニター・プロトタイプ

実験は、物理汎用照射室のPH1ラインにおいて、放医研からリップルモニターからの信号とイオンチェンバー等を(1)(2)を検討するためにお借りする形で行った。図4にRF-KO周波数200Hz、 3.8×10^8 ppsビームの時間構造をイオンビームモニターとリップルモニターで測定したものを示したが、時間応答は問題が無いように見える。回路系の問題もあるが、実際のフィードバックに必要なmsecオーダーの早い応答についても、現在検討中である。

I I. 平成9年度研究計画

研究計画の概要

イオンビーム治療の特徴を最大限に活かし、かつ治療における医師、医療技術者の負担を軽減し、治療効率を高める目的から、三次元高精度ビーム照射の要素開発を中心に据える。併せて、放医研で検討が開始されている医用放射光施設計画に必要な実験的研究を、京都大学化学研究所で平成9年度からのビーム周回が予定されているKSRを活用して行う。

(a) ビーム強度分布整形技術

平成8年度的设计に基づき8極電磁石を製作し、放医研の炭素ビームを用いて、ビームの空間分布をガウス分布から矩形分布に整形する可能性について、実験的に検証する。これはスポットスキャン等の能動的ビーム走査時に照射線量分布の平坦化を図る狙いも持っている。

(b) 能動的ビーム走査技術

能動的ビーム走査は患部形状に適合した高精度照射を可能とし、かつ現在の治療照射に用いられているボラス等の照射野形成用の受動的機器の準備を不要と

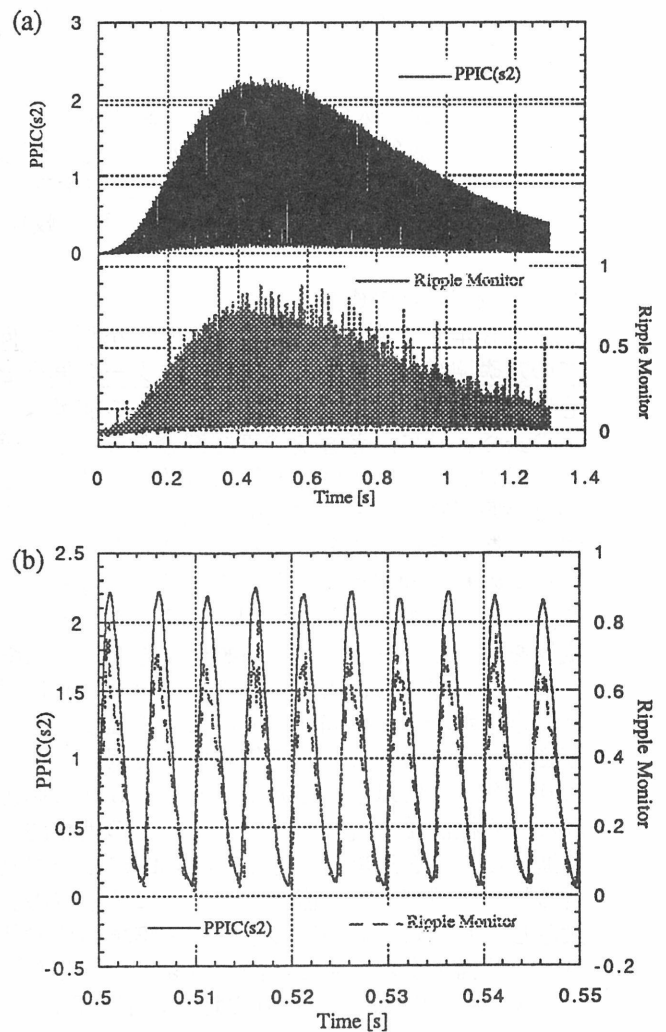


図4 試作測定器とリップルモニターによる遅い取り出しビームの時間構造

し、医師や医療技術者の負担を著しく軽減できる。この能動的ビーム走査方式は現在試験研究の段階にあり、臨床応用に供するには慎重な調査と開発を必要とする。本研究では放医研の研究を補完する形でスポットスキャン方式を重点的に取り上げたい。具体的には走査用電磁石及びその電源と電源制御装置を整備し、放医研の物理汎用実験室のビームラインに設置して開発を進める。平成9年度は機器の設計、製作にあて、平成10年度にビームを用いたテストに進む予定である。

(c) 2次元ビーム強度分布モニター

能動的ビーム走査のため、ビーム照射領域内での照射線量分布を実時間でモニターし、必要に応じて照射制御系にフィードバックをかけることが出来るとともに、異常の際にはインターロック信号も出せるビームモニターが不可欠である。本研究ではそのための非破壊型ビームモニターとその実時間信号処理技術を開発する。能動的ビーム走査では、 $200 \sim 300$ mm角の領域の走査を考慮しており、モニターの測定領域はこれをカバーしている必要がある。また空間分解能はビ

ーム径と同程度ないしそれ以下の必要があり、モニターには1次元方向に60チャンネル程度の分割が必要である。我々は上述のように平成8年度に既に60mm角のビームモニターを開発し、実時間のフィードバック用信号処理技術も開発してきた。平成9年度はこれを大口径、多チャンネルのモニターに発展させることに挑戦したい。但し、実際の開発時には必要な予算も勘案して、チャンネル数は20チャンネル程度に抑える予定である。開発したモニターを(b)の走査用電磁石電源制御装置にフィードバックし、ビーム強度の時間変動の平坦化にもチャレンジするつもりであるが、これは平成10年度以降になると考えられる。

参考文献

- [1] K. Hiramoto et al., Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., Vol. 73, No. 1 (1995) pp11-18.

(d) 強磁場挿入光源の電子ビームのビームダイナミックスに与える影響の研究

放医研ではアンジオグラフィー用の放射光源を医療専用として出来る限り小型のリングで実現することを検討しており、超伝導のウイグラーの使用が当然考慮されるが、その際挿入光源の存在がビームに及ぼす影響により、リングの周回ビームが不安定になる恐れがある。この点をKSRの300MeVの電子ビームを用いたスケーリングにより、実験的に調べたい。具体的には挿入光源の強さを変化させ、ビームが不安定になる閾値を測定する。

高周波四極電場を用いた高速チューン制御の研究及び DC・SQUID を用いた微弱強度ビームモニターの開発

平成8年(1996年)11月13日

大阪大学核物理研究センター

佐藤 健次

①高周波四極電場によるベータトロン振動数の制御の研究(平成9年度継続希望)

シンクロトロンに高周波四極電場を組込んで励振すると、周回する荷電粒子が従う運動方程式はマシュー方程式となる。このマシュー方程式に対して特定のパラメーターの範囲に対して近似的な解析解を求めることに成功し、その解は参考書においてグラフで表された解とほぼ一致することを確認した。しかし、シンクロトロンでの運動に適用するに際して当初(昨年共同研究課題提案時)一部の係数を誤り、その修正を行った結果当初よりもベータトロン振動数の制御能力が低下することが判明した。

一方、この修正に基いた解析解の妥当性をチェックするために、HIMACシンクロトロンに高周波四極電場を組込んだときの運動のシミュレーションとして、周回毎に四極電場によるキックの大きさが変化してゆく行列の積を求める計算を開始した。現時点では最終的な結論には至っていないが、ベータトロン振動数は振動する変化を示すがその平均値は元の値からずれていて、チューンのシフトとスプレッドとが重なった運動と理解できるようである。

従って、このようなチューンの振舞いを利用して粒子の運動を制御するときの対象としては、空間電荷効果によるチューンシフトの回復に適用する場合と、遅いビーム取出しにおいてチューンシフトとスプレッドを付与して呼吸同期取出しを行ったり取出しビーム強度のリップルの低減に適用する場合とが想定できる。前者においてはHIMACでのビーム入射の運転経験より垂直方向のベータトロン振動でのチューンシフトの回復が望まれており、後者においては水平方向のベータトロン振動の制御に適用することが必要である。

さて、本共同研究で製作する高周波四極電場装置ではチューンシフトとスプレッドの観測に重点をおくものとし、周回ビームの断面寸法が小さく、従って、装置の寸法等が小さくてよい垂直方向のチューンを制御することを研究対象とする選択を行った。即ち、本装置のHIMACシンクロトロンでの設置場所は発散四極電磁石の下流とし、そこでのベータ関数や分散関数の大きさを考慮して、四極電極の断面形状や寸法及び長さを決めた。

現在以上の方針と併せて設置場所や周辺機器との取合い等の現地HIMACでの確認に基いて高周波四極電場装置の設計を進めており、装置本体についてはRCNPに平成8年度内に納入すべく諸作業に取り組んでいる。

②DC・SQUIDを用いた微弱強度ビームモニターの研究（平成9年度継続希望）

極めて微弱な強度のビームの強度を非破壊型のモニターで検出する方式として、ビーム電流トランスフォーマーからの信号をDC・SQUID（直流超伝導量子干渉計）で高感度検出する方式の研究に取り組んでいる。

高感度のためにはトランスフォーマーやDC・SQUIDの環境を低雑音にすることが必要とされ、特に外来雑音を遮蔽する設計が本質的である。トランスフォーマーで検出するのはビーム電流による磁場であることからして、外来磁場を遮蔽することが必要であり、そのために、磁場の遮蔽性能の高い超伝導シールドを採用する方針とした。従って、超伝導シールドの遮蔽能力を評価しそれに基づいて設計製作を進めることが必要であり、その計算とテストに対する取り組みを行っている。

超伝導シールドには鉛を用いるのが最適であると考え、形状をリングキャビティ型として、その遮蔽性能をPOISSONにより計算している。

また、実際に鉛シールドキャビティを製作し6ターンの検出コイルをDC・SQUIDに接続してヘリウムデュアーに入れてのテストも行った。この測定は600nAの電流に対して行い、その結果、遮蔽性能は計算通り1/1000の効果であることが確認されたが、SQUIDの出力に現れる雑音に関してはさらなる低減作業により信号対雑音比を改善する必要のあることが知られた。

また、クライオスタットに関してはSUSとFRPとの比較検討を進めてきたが、シールド、真空、分解・組立時の操作性、等々から、金属製が好ましいと考え、最終形状を設計中である。

以上の設計方針とテストに基づいて設計製作を進めており、平成8年度内には装置の一部がRCNPに納入される。

ガン治療用入射重イオン線形加速器の研究

東京工業大学・原子炉工学研究所

服部俊幸

1. はじめに

世界をリードして放医研の重イオン癌治療加速器が駆動し始めた。その入射線形加速器システムは研究用としては適当だが実用型の専用機としては大きすぎる。

1980～90年代に進歩し実用化されてきたIH型加速構造は、アルバレー型やRFQ型に比較して、5～10倍の電力効率を持つことが実証されてきた。そこで、低中エネルギー領域で、高電力効率を持つIH型加速構造を利用して、現在より数倍高加速率の線形加速器が可能である。医療用としては安定性を重視した小型、省電力のIH型線形加速器一台による入射システムの検討を行った。粒子の軌道計算の後、真鍮製の1/2スケールモデルを設計、製作し、実機の高周波共振特性を計測している。さらに来年は安定性、高電圧、試験用のIH型テスト加速空洞を製作して、安定性の試験を行ないたい。

2. 入射線形加速器の概念設計

小型ECRイオン源で生成された C^{4+} イオン($q/A=1/3$)を核子当たり70keVで入射し、3MeVで出射する長さ約3mの非常に小型のIH型線形加速器の設計を行った。

入射加速ターミナルとしては安定に駆動している200kV 中エネルギーイオン注入装置を使用すると仮定して、イオン源としては小型多価発生用ECRイオン源を採用する。その結果核子当たり70keVとなり小型の加速空

洞径の発振周波数でも十分セル長が長くなるので、ドリフトチューブ型加速器構造のIH構造で加速が可能となる。

線形加速器の入射点から数十cmのところに数kVのバンチャーをセットすることで 30° 以内に50～66%のビームをバンチすることが出来て、Alternative Phase Focus (APF)収束が可能となる。

実効加速率を安全性を重視して3MV/mとして長さを3mとしたが、5m、6mにすれば出射エネルギーはそれぞれ5MeV/u、6MeV/uとなる。

小型、省電力型IH線形入射器の設計パラメータを表-1に示す。

Table - 1 Parameters of Injector IH Linac

Acceleration Particle (q/A)	$p, He, C^{4+} \geq 1/3$
Input Energy	70keV/amu
Output Energy	3MeV/amu
Operation Frequency	95MHz
Synchronous Phase	$-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$
Number of Cell	34
Cavity Length	288 cm
Average Cavity Diameter	80 cm
Focusing Sequence (APF)	$-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$
Transverse Acceptance	55π mm · mrad
Longitudinal Acceptance	30°
Transmission	66(50) % by Buncher
Acceleration Voltage	335 kV/Gap
Acceleration Rate	3 MV/m
Effective Shunt Impedance	350 M Ω /m
RF Power	120 kW

3 .APF収束粒子の軌道計算

加速ギャップ間電圧を安定性を重視して Kilpatrick限界の1倍程度として粒子の軌道計算を始めた。APF収束を採用したことからドリフトチューブの構造が自由に設計でき、加速電力効率の向上や、ギャップ間の放電を押さえることが可能である。

APF収束シーケンスは各種の組み合わせが有るため計算のサーチは未完成であるが、かなり満足できる位相運動の結果を図-1に示す。位相シーケンスは表-1に示す様な $-45^{\circ}, 0^{\circ}, 45^{\circ}$ である。図-1の安定な位相振動の中で $-55^{\circ} \sim -25^{\circ}$ の約 30° がエネルギー1%以内に入っている。

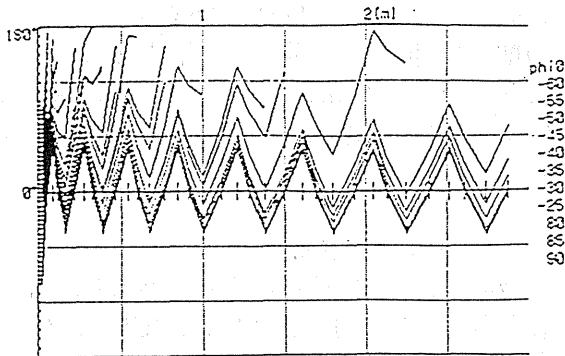


図-1 粒子の位相振動

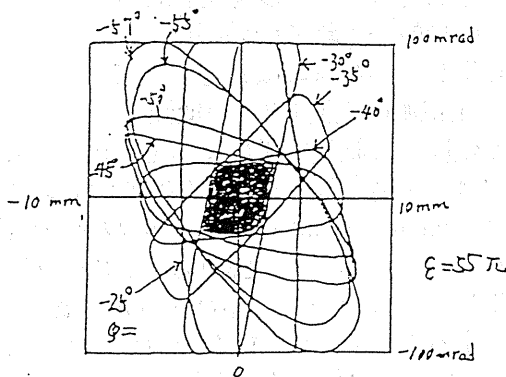


図-2 $-45^{\circ}, 0^{\circ}, 45^{\circ}$ 位シーケンスでの Transverse Acceptance

$-45^{\circ}, 0^{\circ}, 45^{\circ}$ 位相シーケンスの場合のトランスバース方向のアクセプタンスの結果を図-2に示す。 $-55^{\circ} \sim -25^{\circ}$ の共通アクセプタ

ンスは 55π mm \cdot mradであった。この値はイオン源からの規格化エミッタンスが $0.5 \sim 0.6 \pi$ mm \cdot mradであれば70 keV/uでは $40 \sim 48 \pi$ となり十分アクセプトが可能である。

4. 1/2スケールモデル空洞

軌道計算に元ずき1/2スケールモデル空洞を設計真鍮で製作した。現在組み立て中で、修了後高周波共振特性を測定する。

5. まとめ

C^{4+} イオン($q/A=1/3$)を核子当たり70keVで入射し、3MeVで出射する長さ約3mの非常に小型(直径80cm)で省電力(120kW)のIH型線形加速器一台による医療用入射器を設計した。APF収束とバンチャーにより十分ビームを加速出来ることが粒子の計算機シミュレーションより分かった。

また放電限界や空洞の安定度を試験するためのテスト加速空洞を別に設計、製作することを平成9年度に計画している。

6. 研究成果

- 1) Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy: Proc. 21th Linear Accele.Meeting, 21(1996)278-280; T. Hattori, K.Isokawa, S.Yamada, et al.
- 2) Study of IH Linac for High-Gradient Acceleration: ibid., 21(1996)281-283; K.Isokawa, T.Hattori, S.Yamada, et al.
- 3) ガン治療用入射重イオン線形加速器の研究 : 1996年秋日本物理学会講演概要集 p157; 服部、五十川、山田その他.
- 4) 高加速率IH型線形加速器に関する研究 : 1996年秋日本物理学会講演概要集, p156; 五十川、服部、山田その他.

がん治療用加速器の総合的研究

山田聰^a, 熊田雅之^a, 高田栄一^a, 金沢光隆^a, 取越正己^a, 野田耕司^a, 北川敦志^a, 佐藤眞二^a,
小川博嗣^a, 荒木夏治^b, 板野明史^c, 河野俊之^d, 野村俊文^d, 平本和夫^e, 田所昌宏^e
a:放医研重粒子, b:日立造船(株), c:兵庫県庁, d:東工大総理工, e:(株)日立製作所(株)

1. 研究の目的と年次計画

本研究は、粒子線がん治療をより高精度、高効率にするため、また粒子線治療の基礎である生物・物理実験の幅を広げるために、HIMAC 加速器の高度化を図ることを目的としている。同時に粒子線がん治療専用加速器全般の要素技術に関する開発研究を行なう。

本研究では、(a)治療照射の高精度化のための呼吸同期照射、ビームスプレの改善、2次ビーム利用、(b)治療照射の効率化のための入射器系のタイムシェアリング加速、シンクロトロンのパターン変更の高速化、HEBT系のビーム軸出しの自動化、(c)生物・物理実験の幅を広げるためのFeを中心としたArより重いイオンの加速、スプレッシャーリングやビーム冷却技術を用いたビーム性能の改善、(d)将来のがん治療専用加速器の開発のためのシンクロトロンパルス毎の可変エネルギー化、シンクロトロン小型化のための無同調RF空洞の開発等を中心に研究を進めている。

2. 今年度の研究経過及び成果

2-1 呼吸同期照射のためのビーム制御システム[1]

肺がんや肝臓がんの治療照射法に不可欠な呼吸同期照射を実現するために、加速器のビーム制御システムを開発した。本システムは、主として、(a)不規則な呼吸に従うトリガー信号に対する速い応答を持つビーム取り出し法：応答速度1ms以下のRF-KO取り出し法[2]、(b)照射線量率を最大とする運転パターン：3.3s周期、ビーム取り出しデューティ55%、(c)不要な放射化を避けるためのビーム減速によるビームポアリティシステム[3]から構成されている。基礎試験の後、'97年6月から治療照射に用いられている。

2-2 シンクロトロンでの入射特性[4]

ビームの大強度化によって、治療照射期間にビームを直流化する事が可能となり呼吸同期照射の効率化を図ることができる。また2次ビーム利用実験や材料照射実験においても非常に有益である。しかしシンクロトロンでは、 He^{2+} で 10^{11} ppsを越えると加速開始までの数10msの間でのビーム損失が大きくなる。この原因の一つは空間電荷効果によるベータトロンの振動のチューンの移動と広がりと考えられる。そこで設定動作点と蓄積粒子数

及びその時間変化との関係を測定する事でチューンの動きを推定した。現在データ解析中であるが、共鳴線を横切る前後でのビーム強度の変化から、コスティング・ビームでのビーム損失は次のような過程で生じる事が判った。(1)動作点は、多重周回入射時(約200 μ s)に空間電荷効果によって設定動作点から共鳴線を横切りながら移動するが短時間のためにビーム損失は少ない。(2)その後、徐々に強度が低下するに従い、動作点は設定値に向かって移動しはじめ、数100ms後、再び共鳴線を通る際にビーム損失が生じる。更にRFの印加によってバッチが形成されると、電荷密度の増大に伴うチューン移動量の増大及びバッチ形状に従った電荷分布によるチューンの広がりが増大によってビーム損失は急激に大きくなると考えられる。

2-3 ビームスプレの改善

治療照射ではグラブ電磁石と散乱体を用いて最大径22cmの均一照射野を得ているが、取り出しビーム強度の時間構造(スプレ・リップル)が大きいと照射野の均一度を劣化させる。またスプレリップルはカウンター実験での効率低下を招く。そこで取り出しビームスプレの改善を行っている。

(1) 主電源の電流リップルの低減

昨年度での試験結果に基づき、BM電源にアクティブフィルタ(AF)を設置し、QF電源のAFの入力部に100,300,600,1200Hzのバンドパスフィルタを設け、これらのノイズ成分を反転し入力するシステムを実用化した。またビームスプレ情報をQF電源にフィードバックすることで、スプレ構造を矩形にすると同時にリップルを低減する試験を行っている[5]。

カウンター実験ではビーム強度を 10^5 pps程度に下げするためにフィードバックによるスプレリップル低減は困難となる。このような場合でもリップルを低減できるように、スプレ情報を繰り返し制御によって補正4極電磁石にフィードバックするスプレ制御システムを開発を行っている[6]。

(2) RF-KO法によるリップル低減

現在のRF-KO法ではFMを施すことでRF周波数に帯域を持たせているために、FMの繰り返し周波数に起因したスプレリップルが生じる。これを低減するために、180度位相の異なるFM

信号を合算する方法とカートリッジによって周波数帯域を持たせる方法を試験している。両方法ともにリップルを大幅に改善できる事が確認された。さらにスペル信号をフィードバックする事でスペルの全体構造をほぼ矩形する事ができた。

2-4 COD 補正[7]

水平(12台)及び垂直(11台)の静電型位置モニターと同数の補正用ステアリング電磁石を用いて、フラットベース直流運転でのCOD補正試験を行った。本試験では、各ステアリング電磁石の励磁量と各位置モニターでのCODの変化量との関係からステアリングの補正量を決めた。この補正を数回繰り返す事で、水平及び垂直方向のCODを、それぞれ最大10mm程度から±2mm及び±1mmまで抑える事ができ、またビーム強度を最大20%程度増強できる事が判った。

2-5 2次ビームコースの建設[8]

治療照射においてイオンの停止位置を正確に把握するために、 ^{11}C 等のポジトロンミッターによる診断・治療技術開発のための2次ビームコースの建設を行っている。本コースは、角度及び運動量アクセプタンスが各々±13mrad及び±2.5%を得るように設計されている。現在、シンガ電磁石を含めた第一焦点面までの機器がアライメントされた。

2-6 入射器のタイムシェアリング加速[9]

上下リング及び中エネルギー実験室の各々に異なるイオンを供給するために、入射器のタイムシェアリング加速の開発を行なっている。本開発では主として、Fe等のより重いイオン生成用の18GHz ECRイオン源の開発[10]及び上下リングビーム振り分け部までの電磁石のパルス化とその制御系の改造からなる。現在、 Ar^{8+} で1mAを目標に18GHz ECRの基礎試験が進められている。またパルス電磁石への置き換えは今年度終了し、制御系の改造後、来年度末にはタイムシェアリング加速が実用化される予定である。

2-7 ビーム輸送系自動ビーム調整システムの開発[11]

エネルギー変更時間を短縮し治療照射の効率化を図るために、ビーム輸送系のビーム調整時間の短縮を行っている。高エネルギービーム輸送系でのビーム調整時間は、磁場測定及びビーム光学計算に基づく偏向及び4極電磁石の励磁電流の設定(運転ファイルのロード)とステアリングとプロファイルモニターによるビーム軸出しの時間によって決まっている。そこでビーム軸出しの自動化を行った。本システムでは、予

めステアリングの励磁量とプロファイルモニターでのビーム中心位置の変化量の関係を求めている。これを用いてビーム中心がプロファイルモニターの中心に一致するようにステアリングの励磁磁場を決めている。基礎試験に基づき、リングからのビーム出射系での軸出しの自動化を含めた最終的な設計を行っている。

2-8 ビームモニターの開発研究

(1) 準非破壊型リップルモニター

現在、リップルモニターとして0.2mm厚さプラスチックフィルムを用いているが、100MeV/n以下のビームでは多重散乱によるエミッション増大が無視できない。そこでセプトロンを用いたリップルモニターを開発している。本モニターは、ビームがアライ箱(数 μm)を通過する際に生成される2次電子を捕集しセプトロンで信号増幅するものである。これまでの試験の結果、プラスチックと同程度のビーム時間構造を観測することができた。また通過粒子数の約4%の2次電子を捕集できている事が判った。2次電子捕集電極の改造により捕集効率を向上させた後、ビーム輸送系に組み込み実用化すると同時にセプトロンの寿命を測定する予定である。

(2) チューンモニター

シンクロトロン運転パターン全領域のチューンを測定するためのチューンモニターを開発している。本モニターではFFTによってベータトロン振動のサイドバンド周波数からチューンを求める方式を採用している。

本研究を遂行するにあたり加速器エンジニアリング(株)の方々には加速器運転だけではなく実験での御協力をお願い致しました。改めて感謝致します。

参考文献

- [1] K. Noda et al., Proc. 5th EPAC, Barcelona, June 10-14, 1996, p.2656-2658.
- [2] K. Noda et al., Nucl. Instrum. and Meth. A374(1996)269-277.
- [3] M. Kanazawa et al., Proc. 5th EPAC, Barcelona, June 10-14, 1996, p.2653-2655.
- [4] 野村俊文, 修士論文, 東工大, 1997年.
- [5] M. Kumada et al., Proc. 5th EPAC, Barcelona, June 10-14, 1996, p.2352-2354.
- [6] M. Kumada et al., Proc. 5th EPAC, Barcelona, June 10-14, 1996, p.2358-2360.
- [7] N. Araki et al., Int. Workshop on Control System for Small- and Medium-Scale Accelerators., 1996.11, Tukuba.

- [7] M. Kanazawa et al., Proc. 5th EPAC, Barcelona, June 10-14, 1996, p.1710-1712.
- [8] M. Torikoshi et al., Int. Workshop on Non-Nucleonic Degree of Freedom Detected in Nucleus. Sep. 2-5, '96, Osaka, Japan.
- [9] T. Murakami et al., XV III Int. Linac Conf., Geneva, Switzerland. Aug. 26-30, '96.
- [10] T. Okada et al., Proc. 7th Symp. on Beam Engineering of Advanced Material Syntheses. Tokyo, 1996.11, p.135-138.
- [11] M. Torikoshi et al, Proc. 5th EPAC. Barcelona, June 10-14, 1996, p.2462-2464.

I. 平成8年度の進捗状況

(1) ガントリーの小型化に向けての基礎開発

(a) 散乱体を用いない照射野拡大法の開発——多極磁場の組み合わせ
(ガウス分布を仮定)

(b) ペンシルビームのスキヤニング 時間的変動の無いビーム
困難?

↓

ビーム強度に応じたスキャン速度の制御

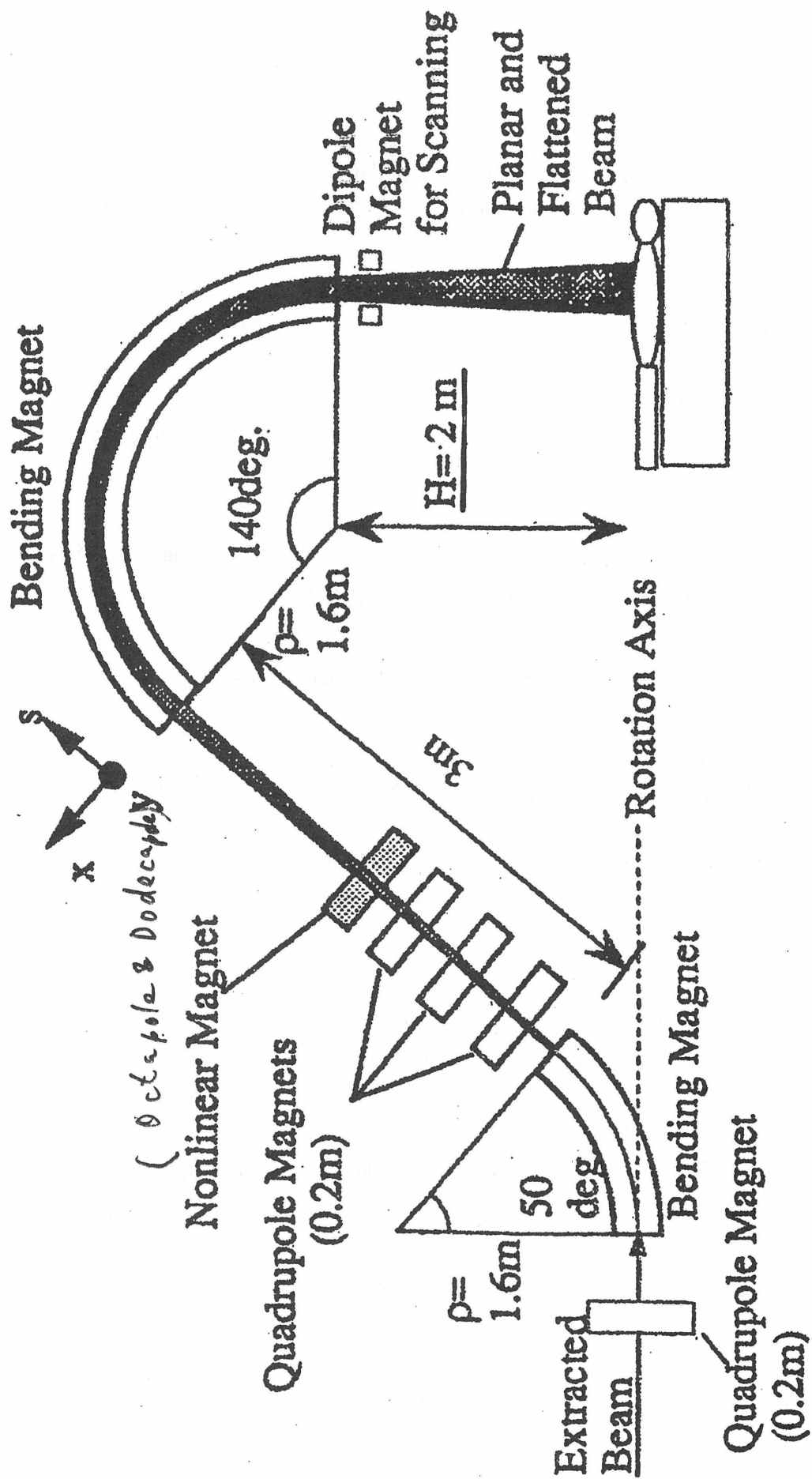
(2) 時間構造の観測可能なビームモニターの開発——浦壁が詳細報告
Parallel Plate Ionization Chamber (PPIC)の製作
電流電圧変換増幅器の製作
ガスフローコントローラ及び遠隔圧力制御系の製作

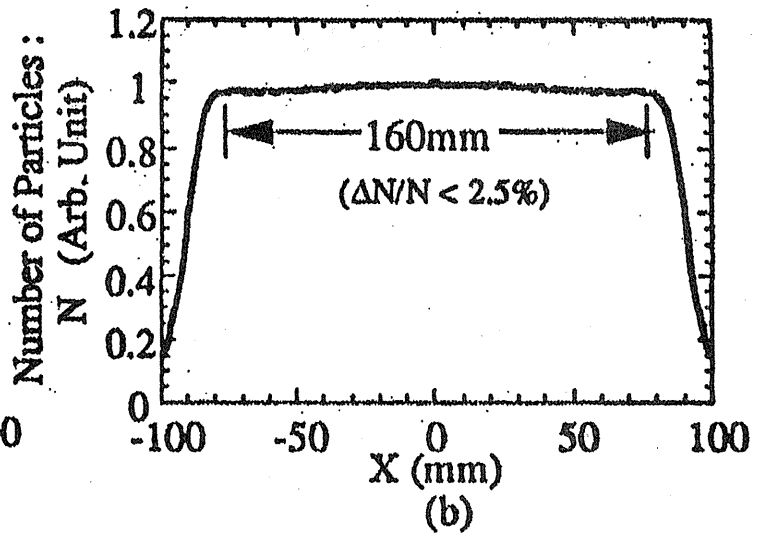
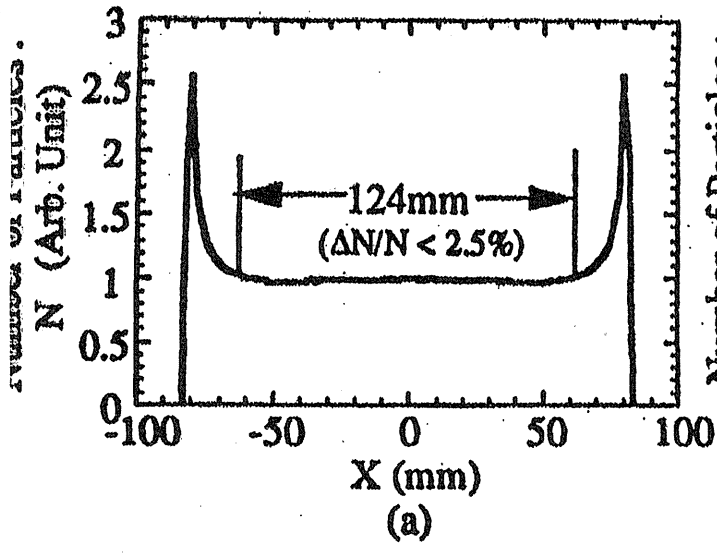
II. 平成9年度の計画

(1) ビーム強度分布整形技術	8極電磁石及びその電源	} 800万円
(2) 能動的ビーム走査技術	走査用偏向電磁石及びその電源	

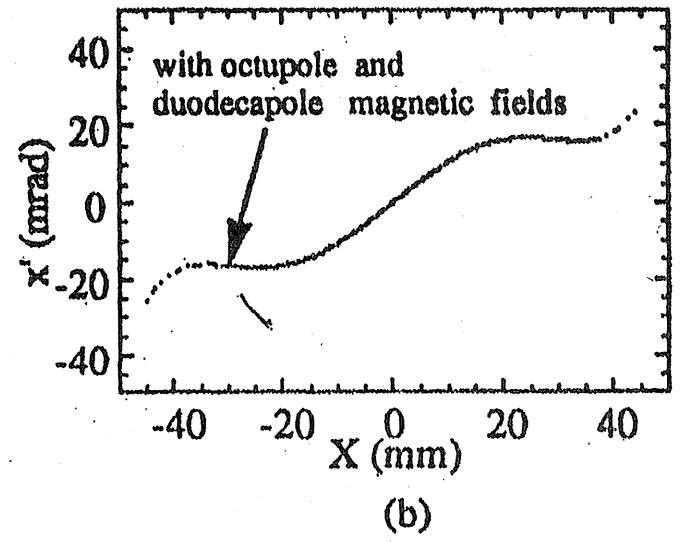
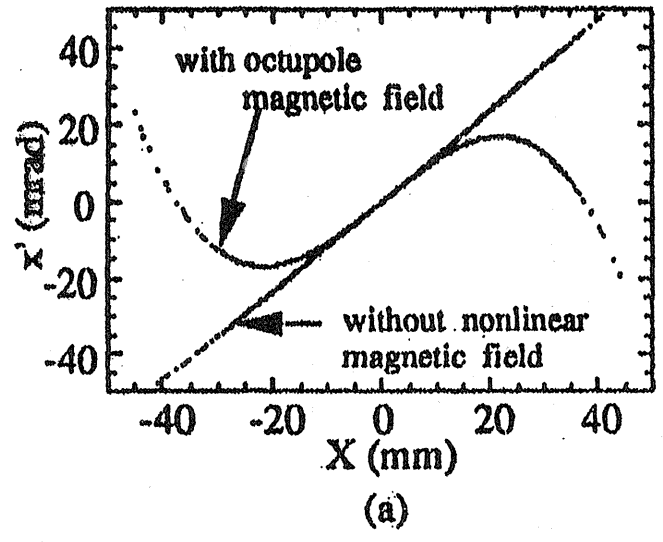
(3) 2次元ビーム強度分布モニター		
モニター本体		200万円
読み出し用増幅器及びAD変換器 (多チャンネル)		600万円

(4) 強磁場挿入光源の電子ビームのビームダイナミクスへの影響		
永久磁石による挿入光源	京都大学化学研究所手持ちの物を使用	
電子ビームモニター		200万円





Beam distribution in the deflecting plane at the position just before the patient. (a) With beam flattening by octupole magnetic field, (b) With beam flattening by octupole and duodecapole magnetic fields.

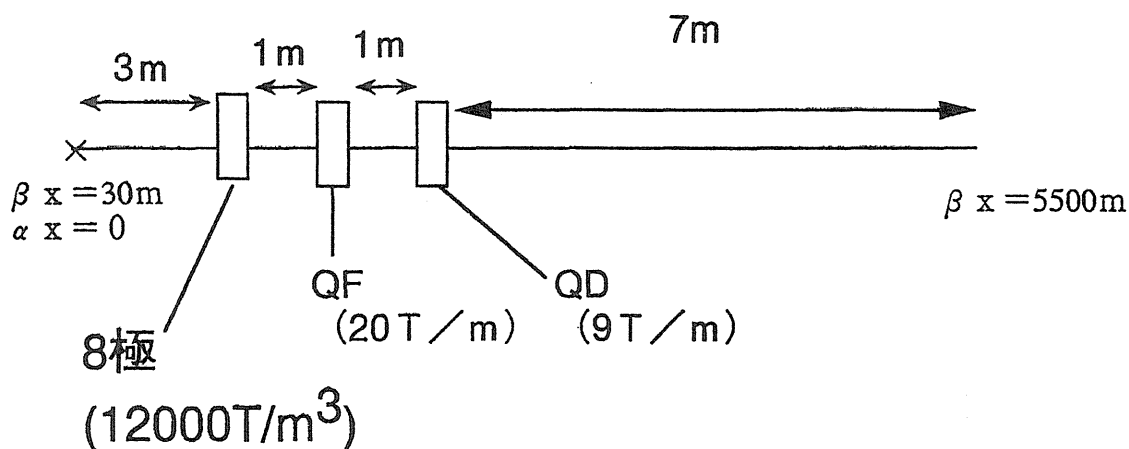


Phase spaces at the position just after the nonlinear magnet. (a) With beam flattening by octupole magnetic field and without flattening, (b) With beam flattening by octupole and duodecapole magnetic fields.

assuming Gaussian distribution of Incident beam.

8極電磁石によるビーム強度分布整形

C : 300 MeV、 $B\rho = 5.9$ 、電磁石磁極長 : 0.4m



8極磁石で、ビームサイズは、エミッタンス $10\pi\text{mmra}$ (2σ) とすると片側20mm以下であり、ダクト中心から磁極端までの距離を40mmとすると磁極端で $12000 \times (0.04)^3 = 0.8\text{T}$ となる。

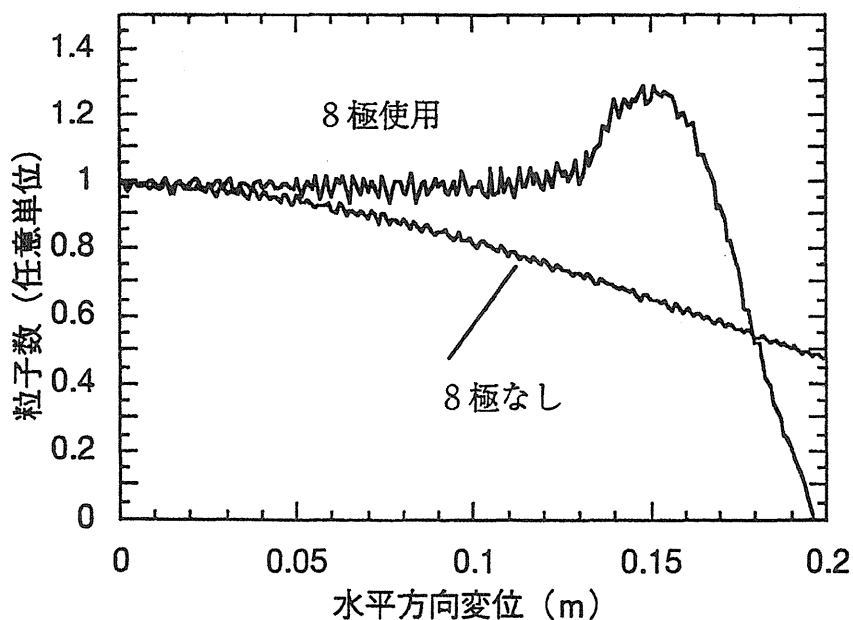
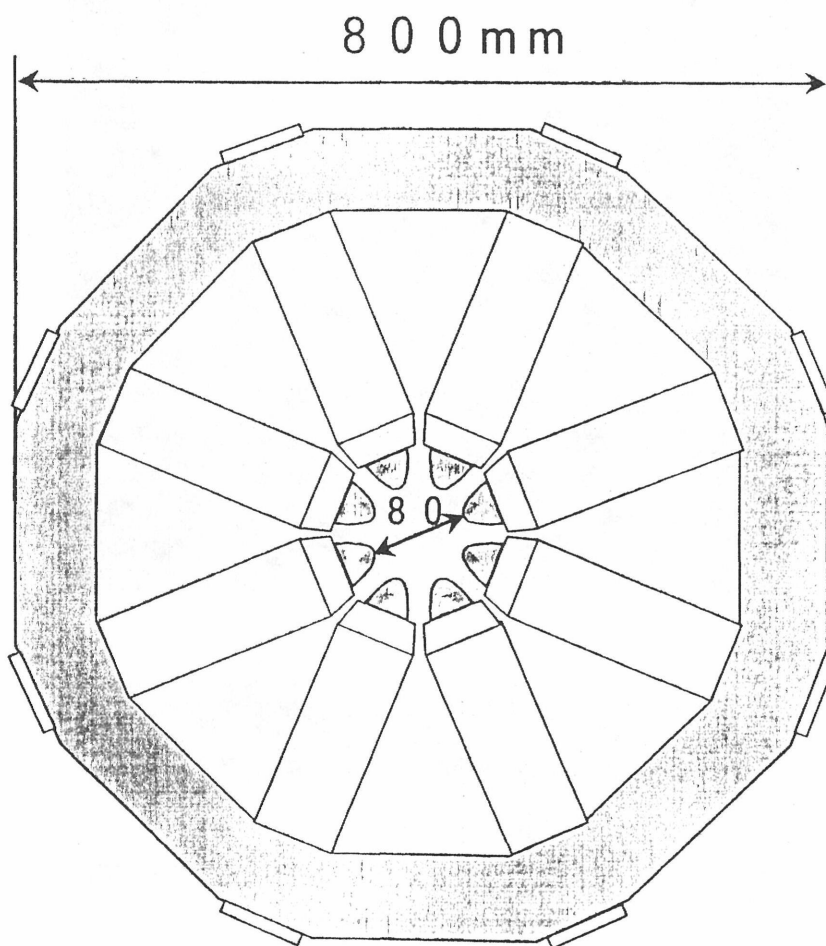


図 水平方向ビーム強度分布

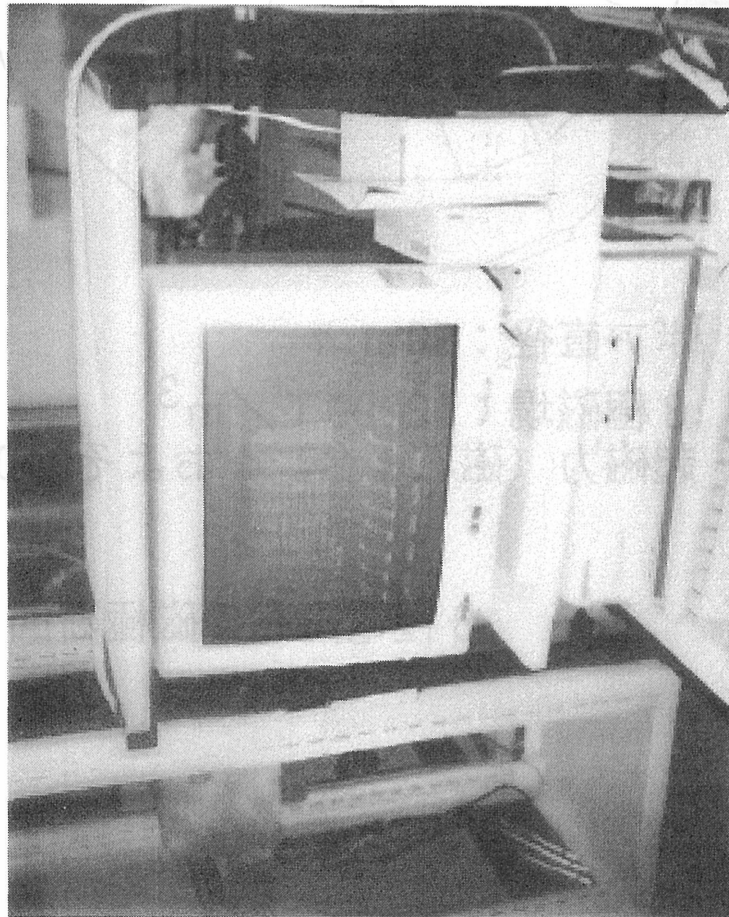
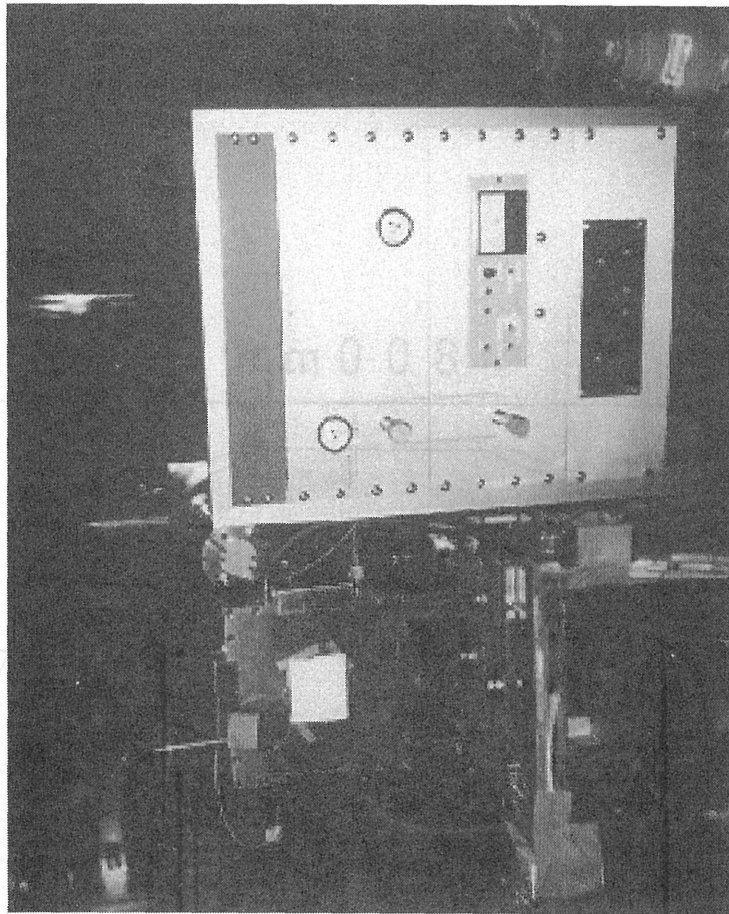


ボア直径：80mm

8極磁場：12000 T / m³

起磁力（磁石1台）：およそ25000 AT

図 8極電磁石の磁極断面

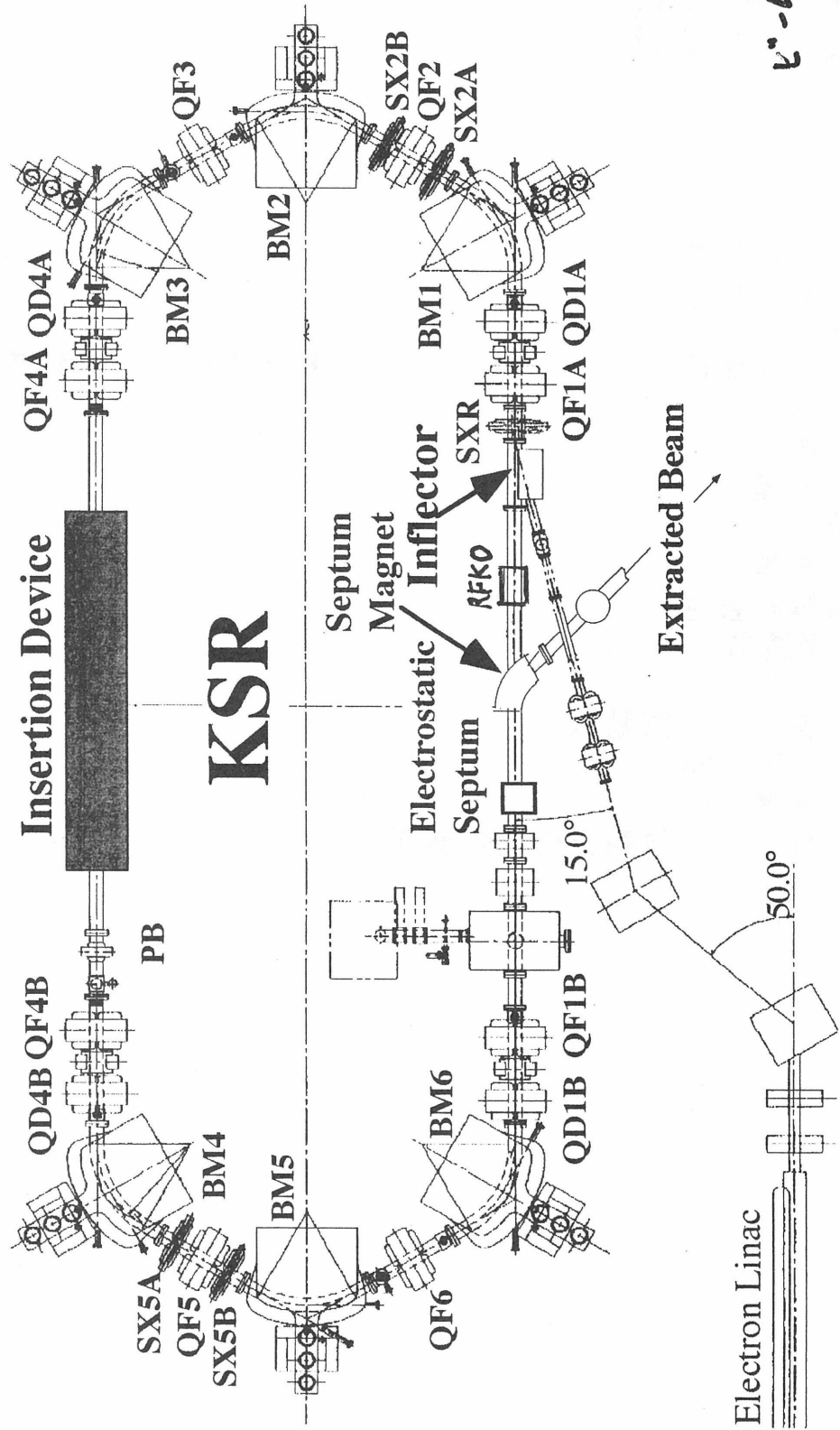




KSRの主要パラメータ

最高エネルギー	300 MeV
入射エネルギー	100 MeV
周長	25.689 m
ラティス構造	トリプルベンドダブルアクロマット
超周期	2
偏向角	60°
曲率半径	0.835 m
n-値	0
エッジ角	0°
長直線部長さ	5.619 m
RF 周波数	116.7 MHz
ハーモニック数	10
ベータトロン振動数	
水平方向	<u>2.75</u>
垂直方向	1.25
偏向部からの放射光の臨界波長	17 nm

Layout of the KSR



Ion Beam Monitor の開発と特性試験

浦壁恵理子 岩下芳久 金沢光隆^A
白井敏之 田所昌宏^B 取越正己^A
西政嗣^B 野田章 野田耕司^A 藤田雄三^C

京大化研 放医研^A 日立研^B 東大核研^C

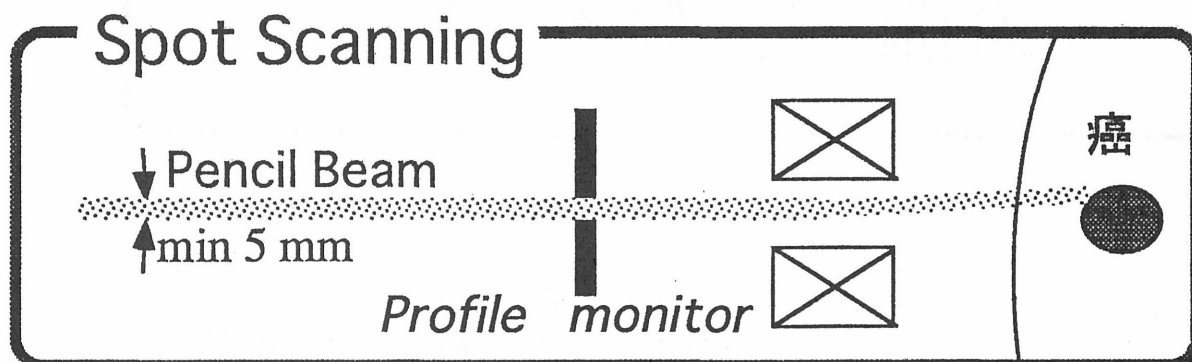
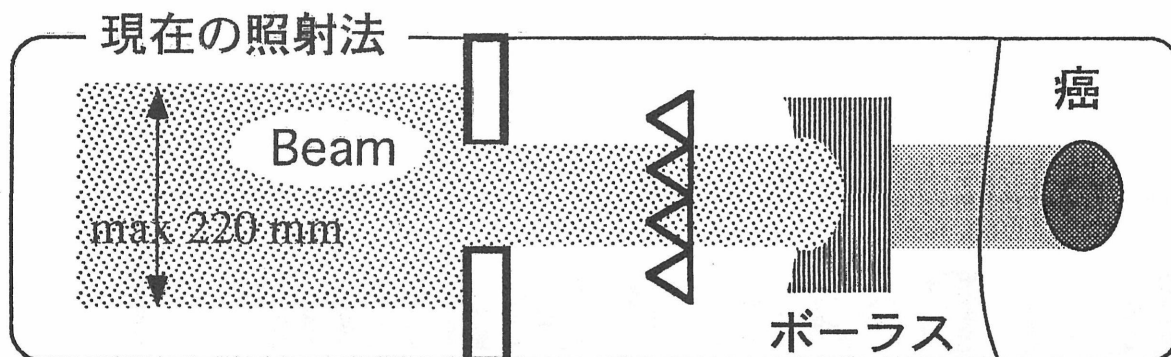
Parallel Plate Ionization Chamber (PPIC)

* 精度の良い絶対線量測定 (数%)

* msec order 時間構造の測定

- Beam の通り道の物質量が少ない
- 広い線量範囲を測定が可能 ($\sim 10^9$ pps)

重粒子の照射方法



細いペンシルビームで人体のガン細胞にスキャニングすることにより、3次元的に医療照射を行う



ビーム強度を精度良く知るために

平行平板型電離箱
(Parallel Plate Ionization Chamber)

これからは、PPIC と呼ぶ

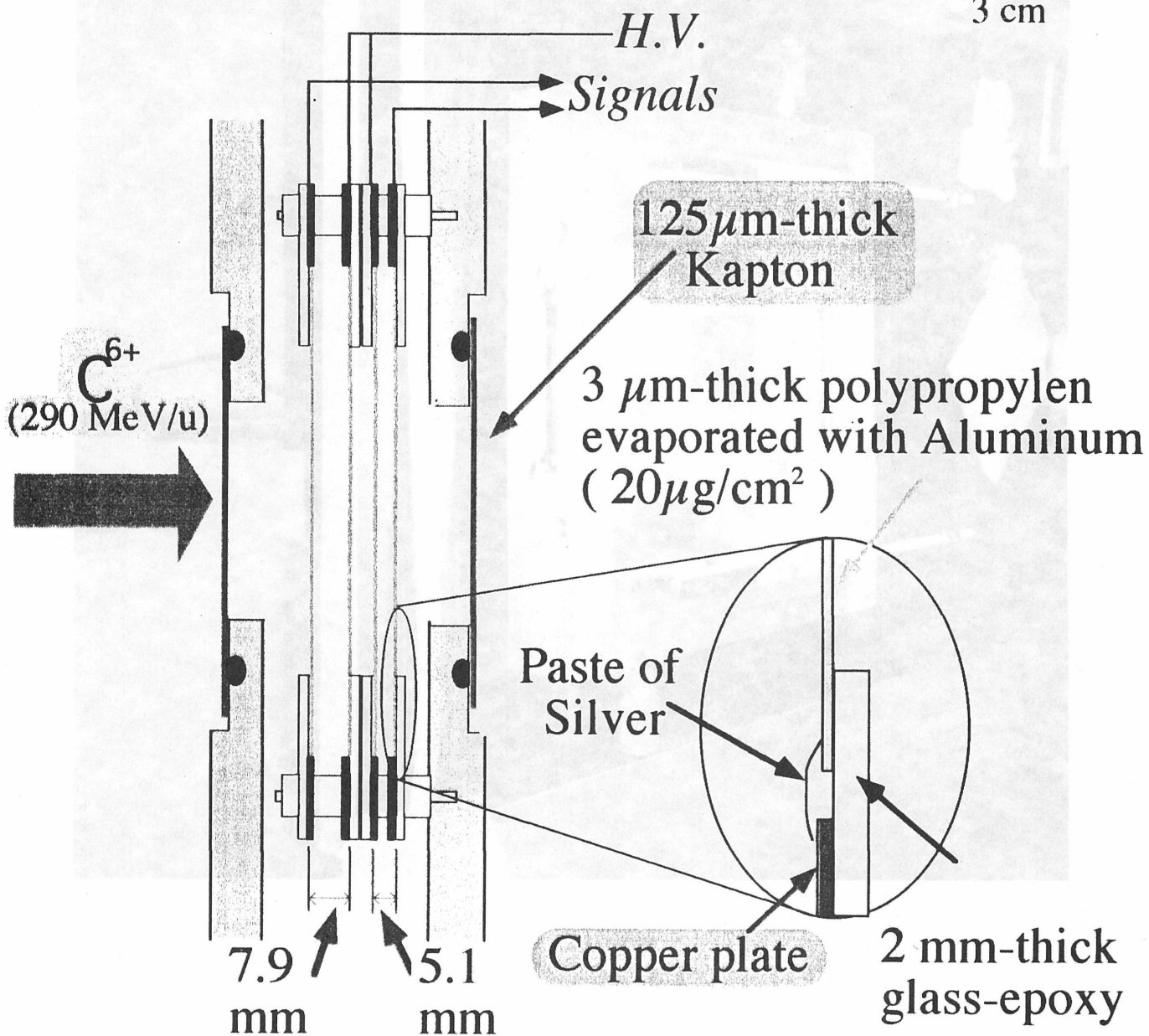
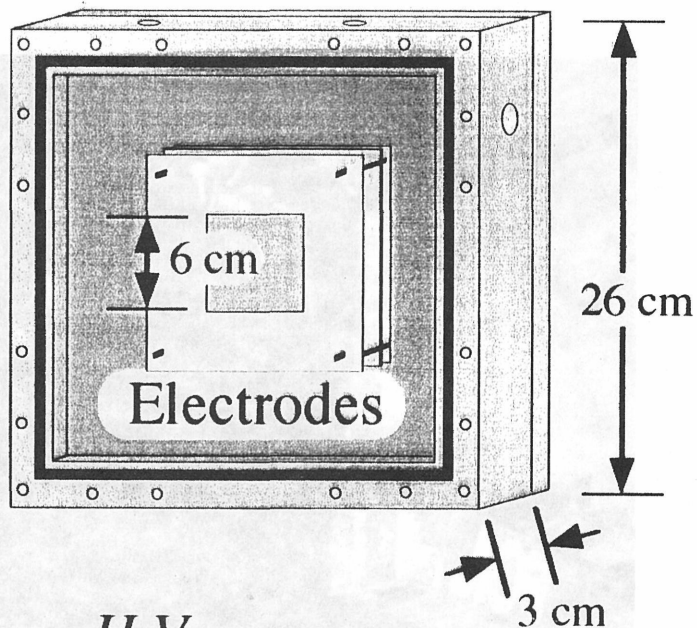
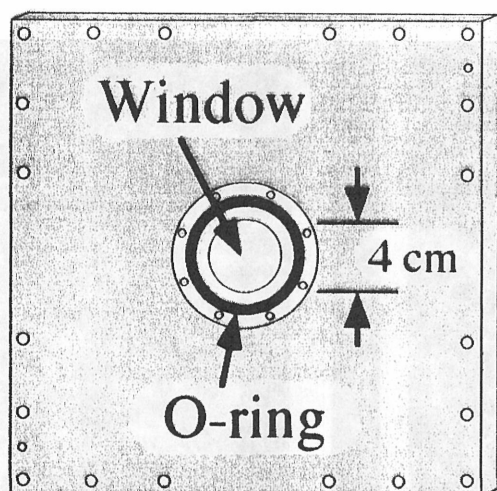
を開発する



Feedback Monitor として検討

PPIC

Aluminum Frame





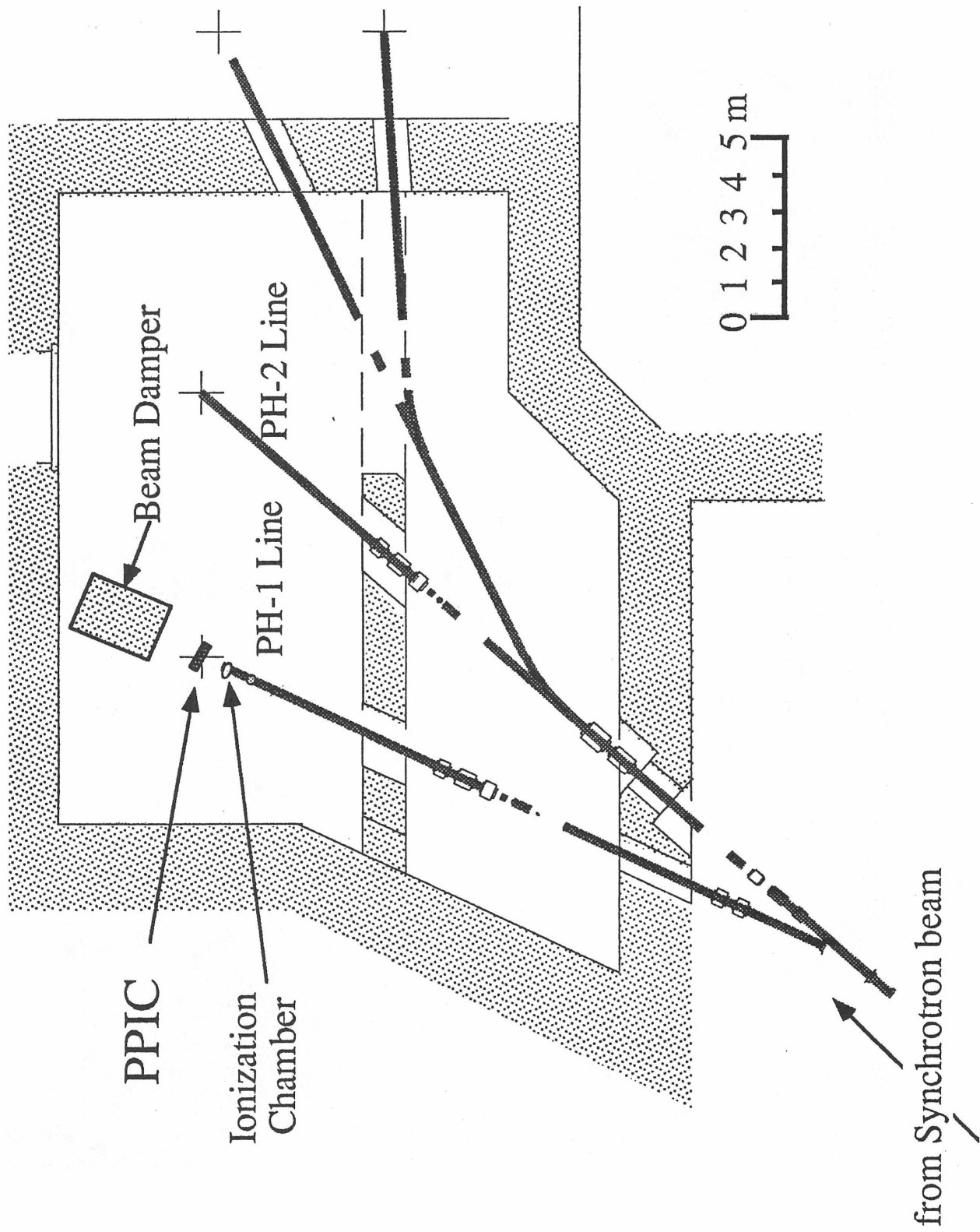
2 mm-thick
glass-epoxy

Copper plate

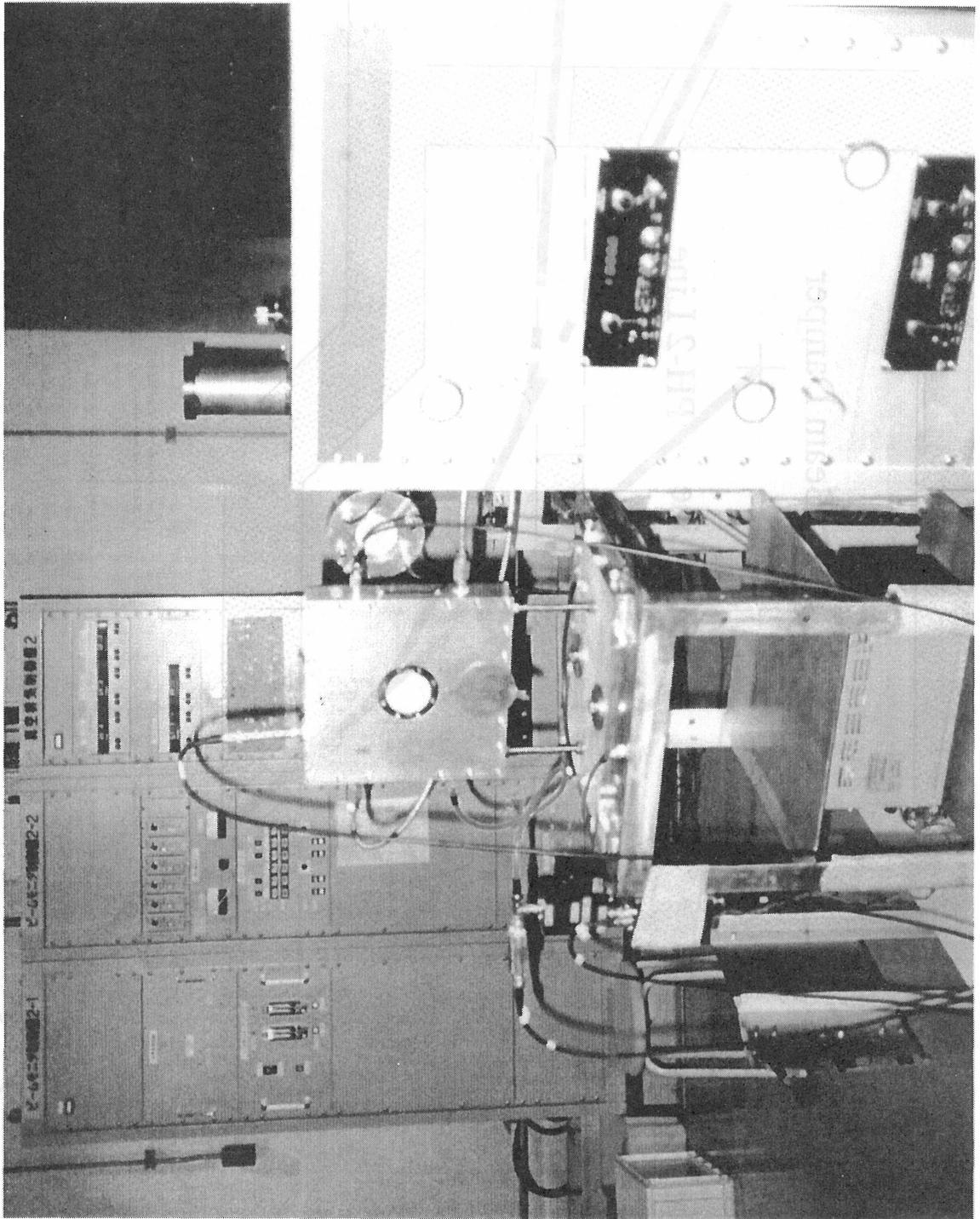
2.1
mm

7.9
mm

Counter Hall at HIMAC

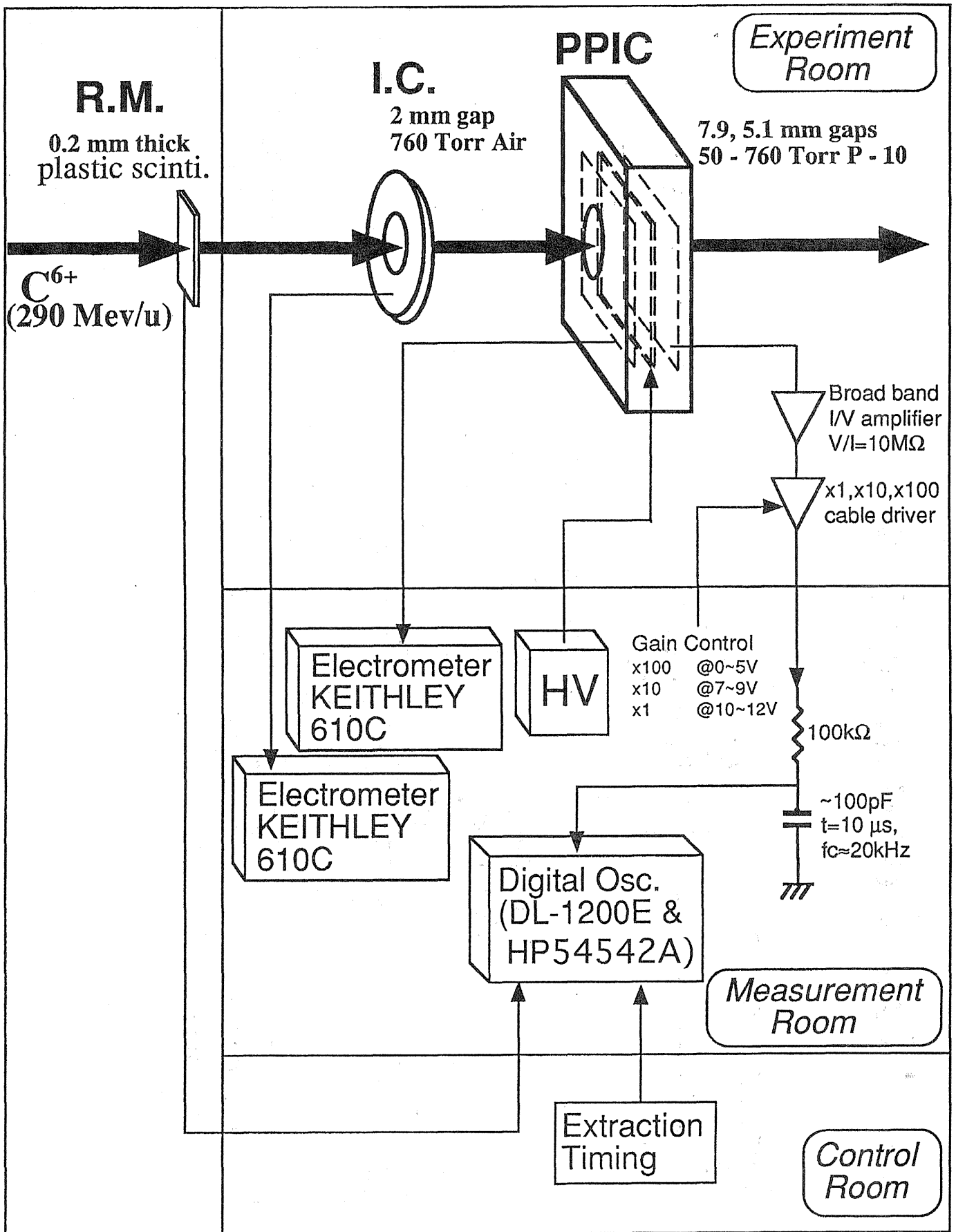


Илэрд нэртэйгээ нэрлэ

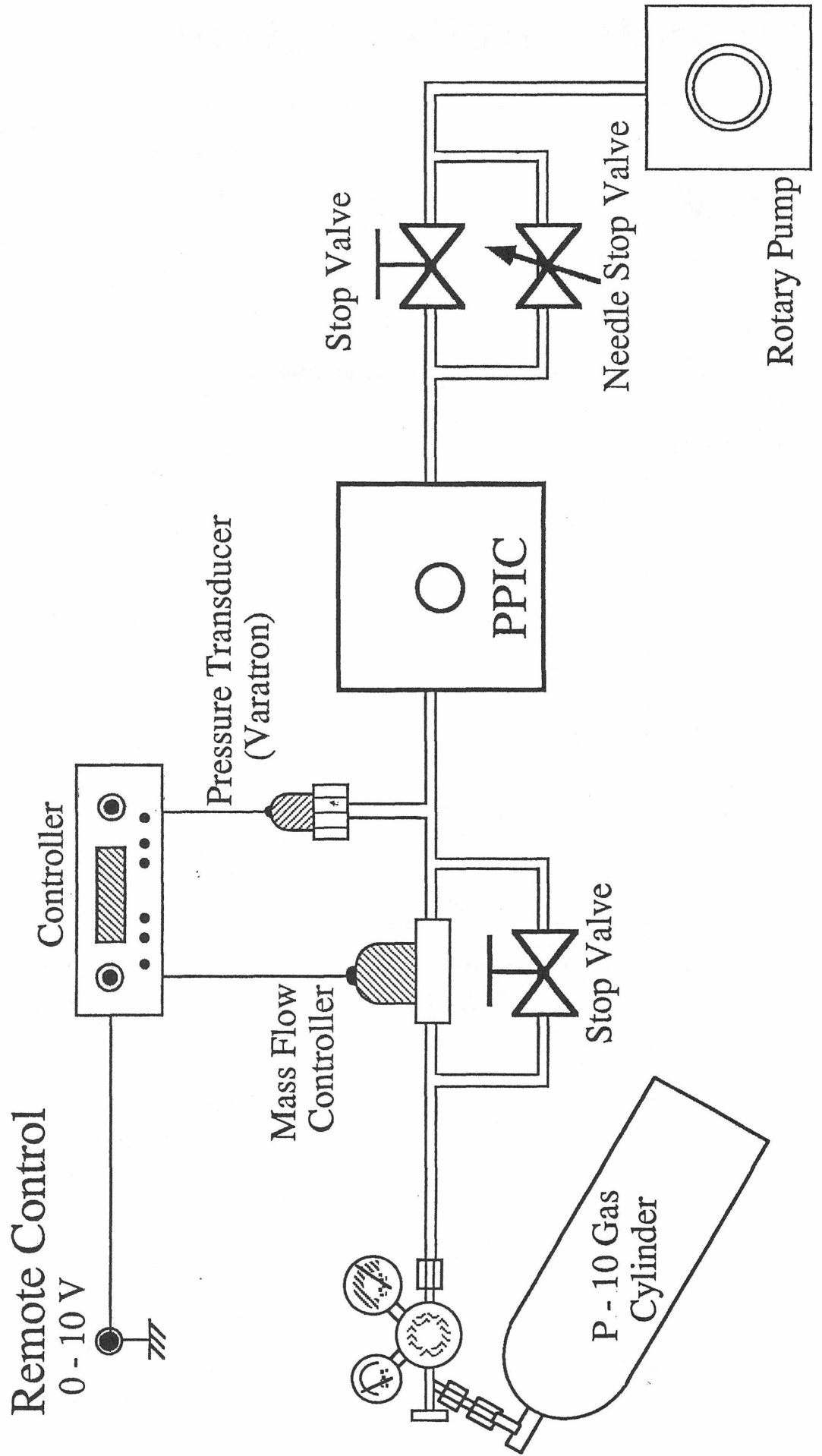


Сонгоц Илэрд нэртэйгээ нэрлэ

Measurement System

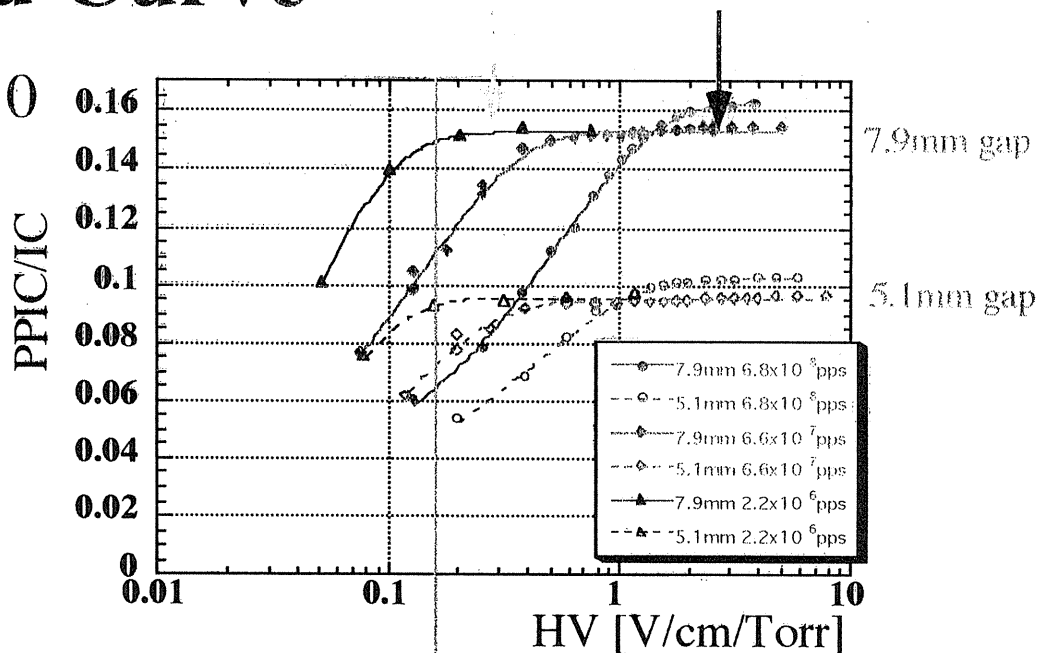


Gas-Flow Control System

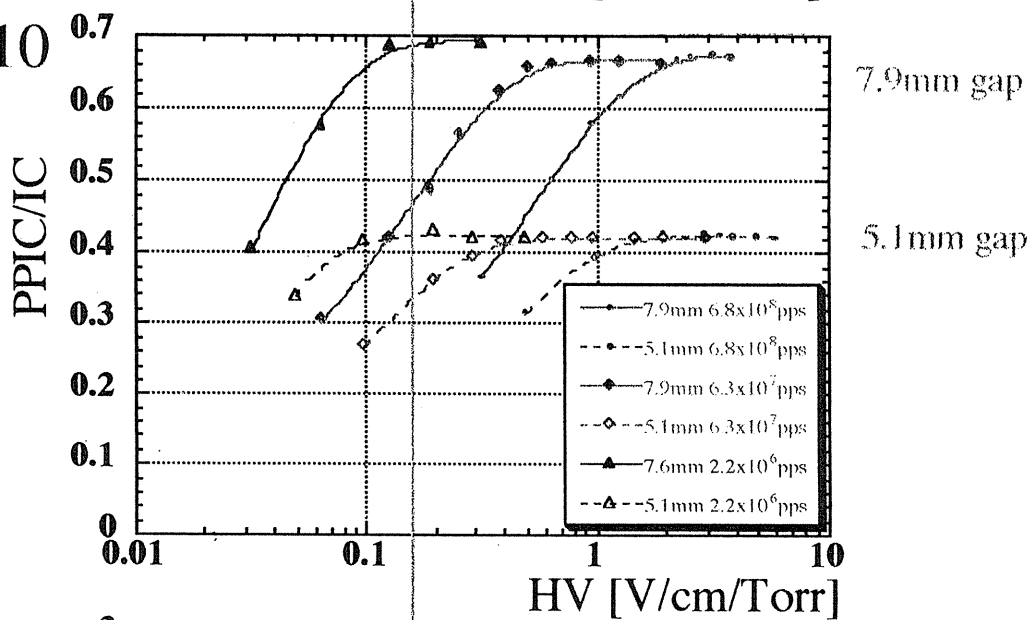


Plateau Curve

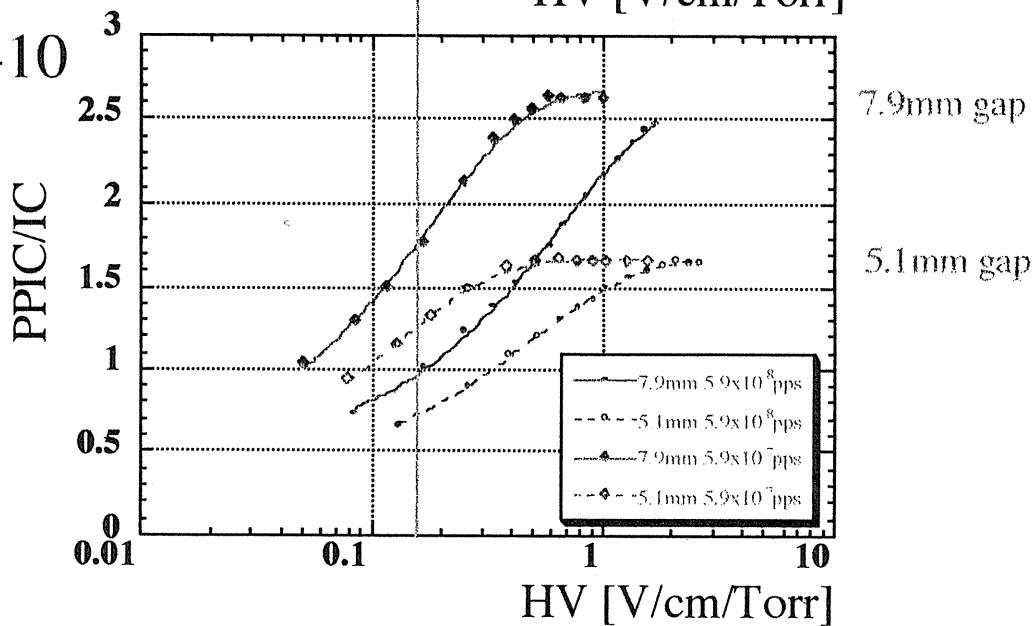
50Torr P-10



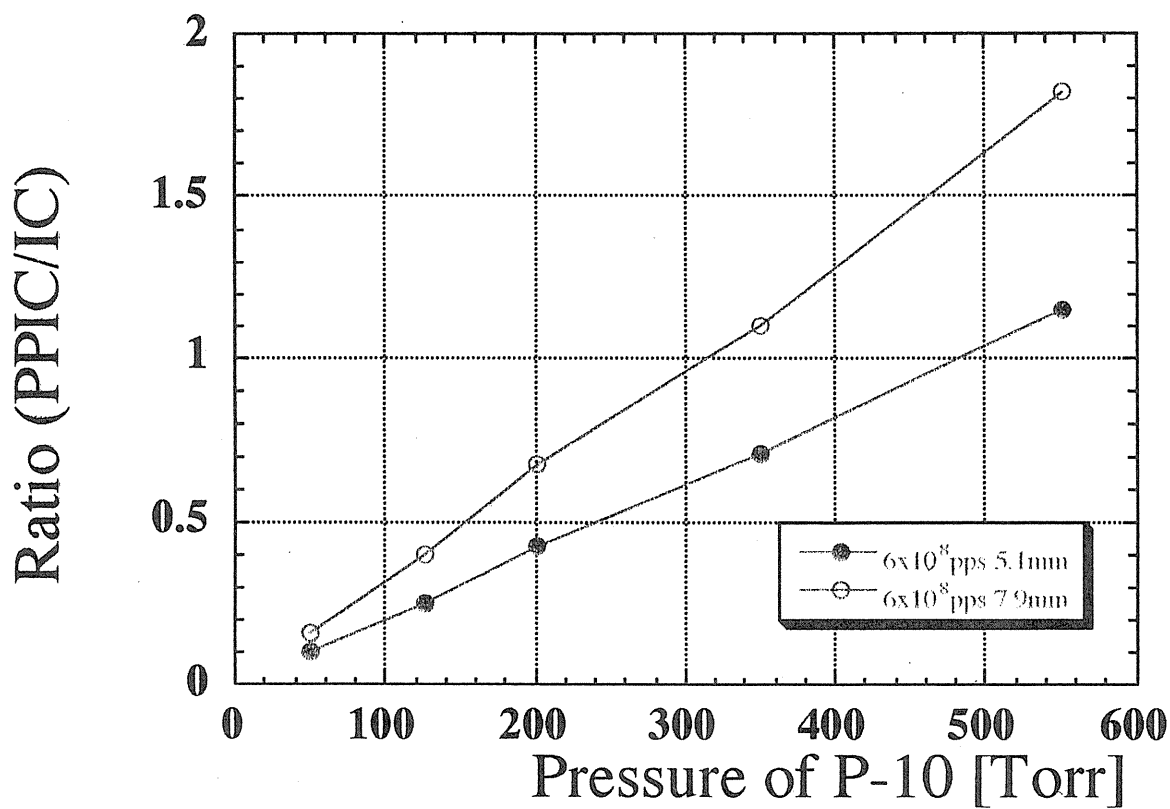
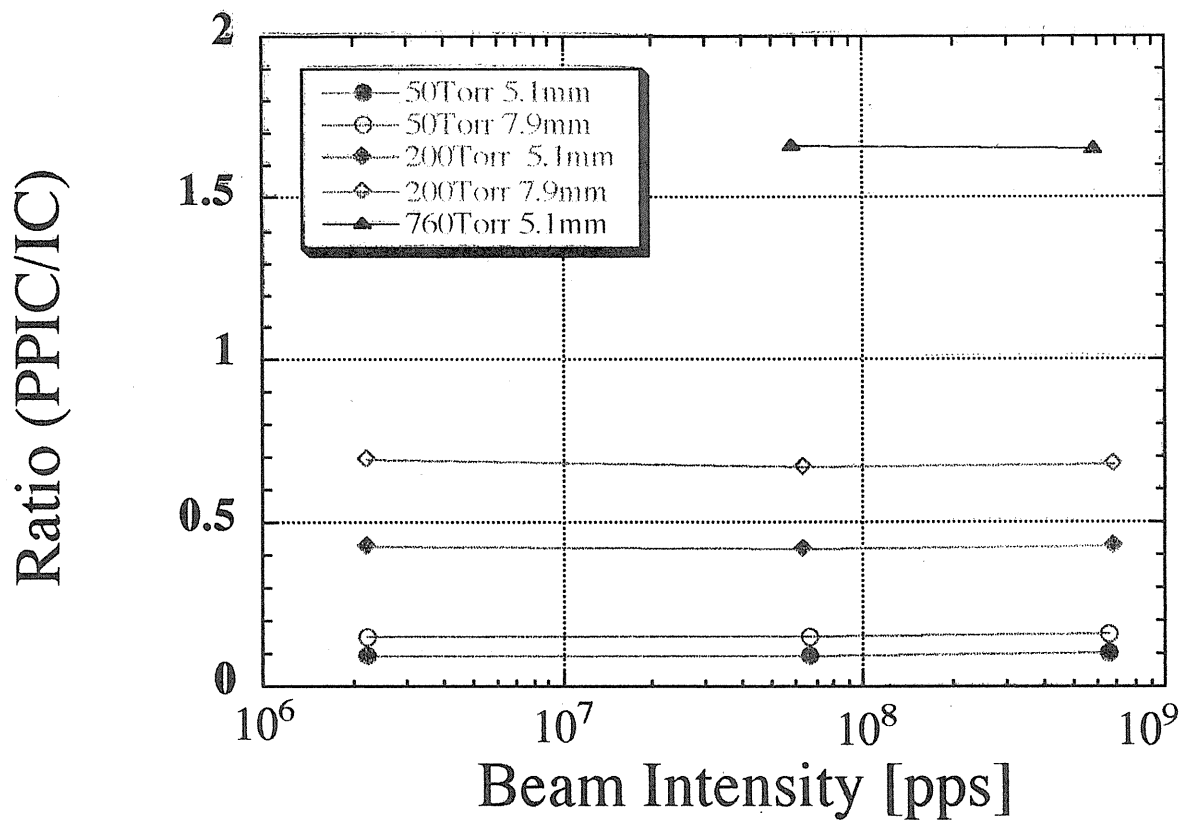
200Torr P-10



760Torr P-10

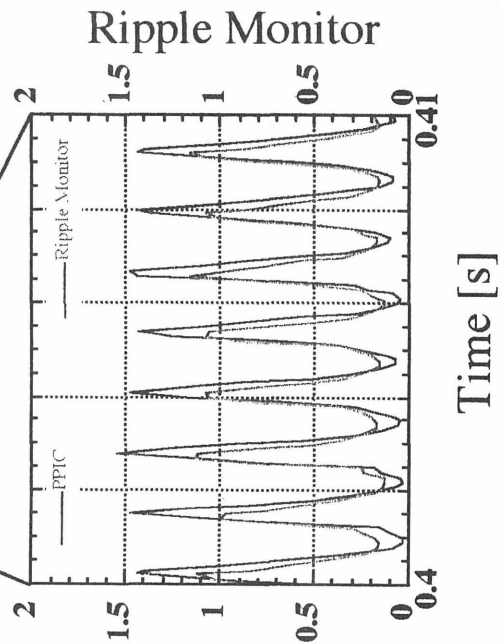
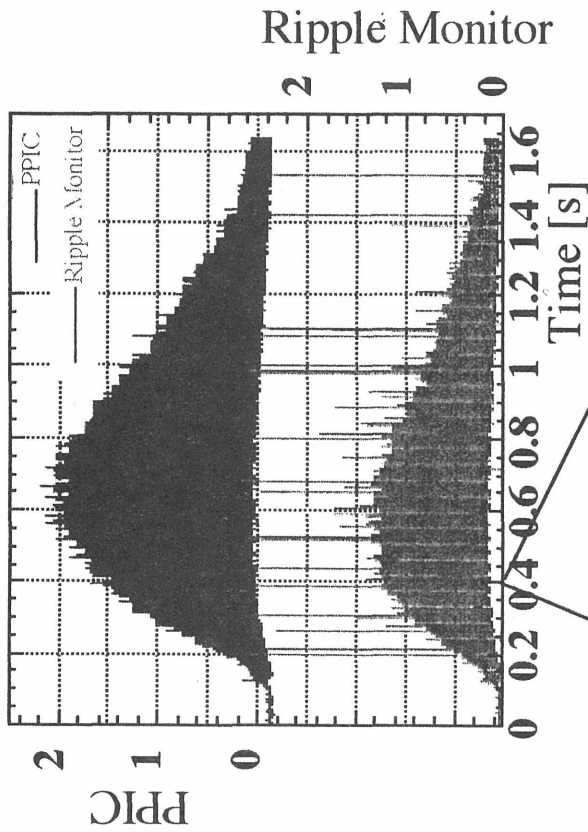


Linearity

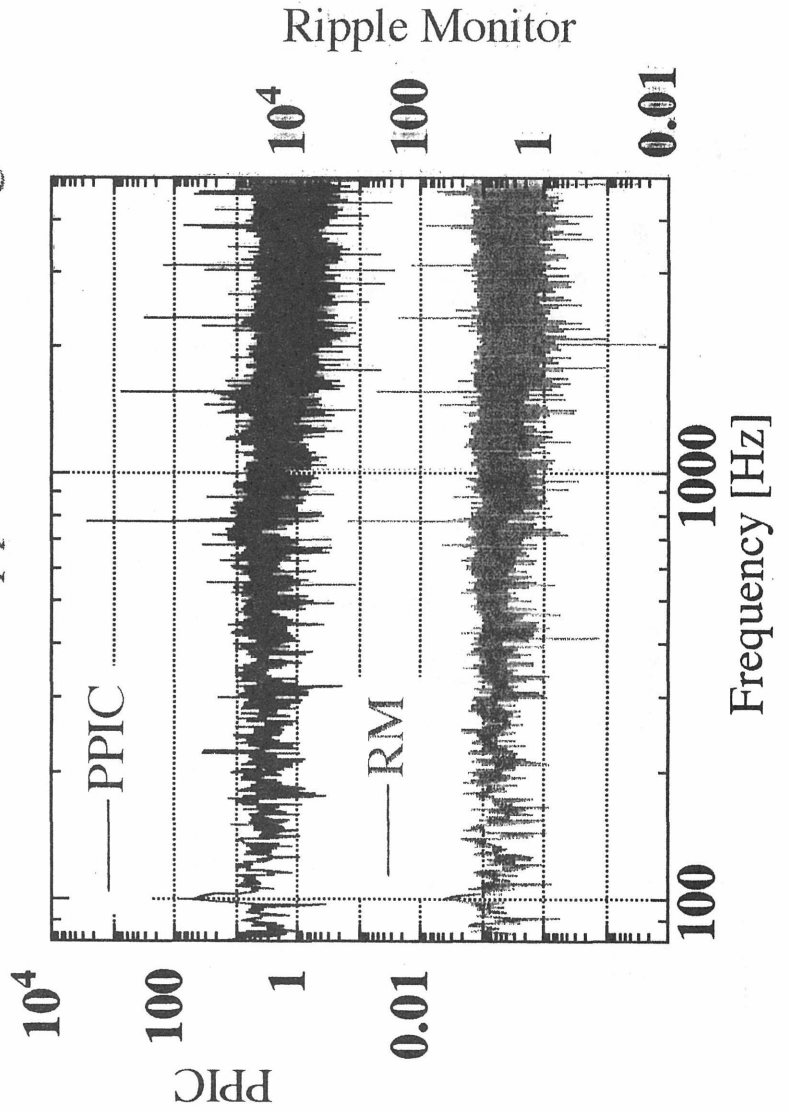


Time Structure

< Beam >
 Intensity : 1.0×10^8 pps
 FM of RF : 777 Hz
 < PPIC >
 Gap Width : 7.9 mm
 Pressure of P-10 : 50 Torr
 Applied Voltage : 100 V



Fourier-Transformed Time Structure of the PPIC & the Ripple Monitor signals



Conclusion

50 Torr P-10 Gas を用いて

ビーム強度 $10^6 \sim 10^9$ pps
に於いて安定に動作可能

Synchrotron Beam の時間構造測定
Ripple Monitor (0.2 mm thick plastic scintil.)
と比較しうる

高精度でビームの絶対線量を読み出したい
(安定性等を含めて検討)

Pencil Beam & Spot Scanning
の実用化に向けて！

Future Work :

X-Y position read out
によるより詳細な測定器とビームの研究

平成9年度NIRS-R CNP共同研究課題

平成8年11月15日

大阪大学核物理研究センター 佐藤健次

継 続 分

①高周波四極電場を用いた高速チューン制御の研究

H9年の夏までには完成予定でHIMAC に組込んで試験したい。

②DC・SQUIDを用いた微弱強度ビームモニターの開発

H9年度内に完成させ、RCNPサイクロのビーム輸送系に組込んで試験する。

新 規 分

③無同調高周波加速空洞によるビーム加速の研究

本体はRCNPで製作し現在試験中であり、HIMAC に組込んでビーム試験をさせて頂きたい。

④広帯域動作の高性能電磁石の研究

電源はRCNPで製作中で、NIRS・HIMACの磁場測定装置を用いる。まずは四極電磁石でRCNPで製作の予定。

◎マシユー方程式の近似的な解析解

シンクロトロンに高周波四極電場 (RFQ) を組み込んだ時、周回する荷電粒子がしたがう運動方程式 (進行方向の距離による)

$$\frac{d^2x}{dz^2} + K_0(z)x = \frac{q_e}{m_0 \gamma v^2} E(z, x, t)$$

ここでRFQ電場を位相で書き表わせるとして、

$$E(z, x, t) = G_0 x A \cos(K\phi + \Phi_k) \quad G_0: \text{電場勾配}$$

変数変換による運動方程式 \rightarrow マシユー方程式

$$\frac{d^2\eta}{d\phi^2} + a \left\{ 1 - \frac{2q}{a} \cos(2z) \right\} \eta = 0$$

$$\begin{cases} 2z = K\phi + \Phi_k \\ a = \frac{4}{k^2} v_0^2 \\ \frac{2q}{a} = \frac{q_e}{m_0 \gamma v^2} G_0 \beta_0^2 A \end{cases}$$

$$\begin{cases} \eta = \frac{x}{\sqrt{\beta_0}} \\ \phi = \frac{1}{v_0} \int_0^L \frac{dz}{\beta_0} \end{cases}$$

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{dz}{\beta_0} \quad (4.2 \rightarrow)$$

$$A = \frac{l}{L} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{電極の長さ} \\ \leftarrow \text{リングの周長} \end{array}$$

この式の近似的な解析解を求めるために、 η に共役な運動量を導入してさらに、 (r, θ) に変数変換

$$\begin{cases} \eta = r \cos(Qz - \theta) \\ \frac{d\eta}{d\phi} = -r \sin(Qz - \theta) \end{cases}$$

r, θ に対する連立微分方程式

$$\begin{cases} r' = -\frac{1}{4} \sqrt{a} \left(-\frac{2q}{a}\right) r \sin\{(2-2Q)z + 2\theta\} \\ \theta' = -(\sqrt{a} - Q) - \frac{1}{4} \sqrt{a} \left(-\frac{2q}{a}\right) \cos\{(2-2Q)z + 2\theta\} \end{cases}$$

このrについての微分方程式中の振動数と、式を解いて得られた解の振動数が一致すると考えることにより、安定な解の式として、

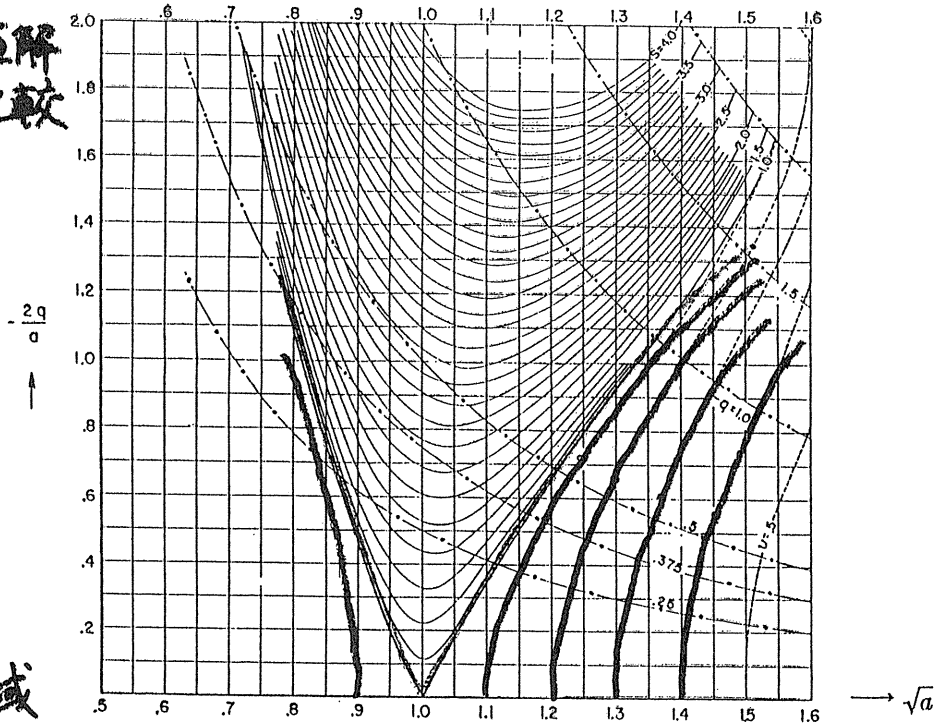
$$-\frac{2q}{a} = 4 \frac{\sqrt{(\sqrt{a}-1)^2 - (Q-1)^2}}{\sqrt{a}} \quad (\text{安定解の式})$$

($Q=1$ で、安定と不安定の境界の式)

が得られる

これは数値解を $\sqrt{a} \sim 1$ 近辺でよく再現できている

マシエー方程式の数値解と解析解の比較



Charts of the Characteristic Exponent.

(From S. J. Zarodny, An elementary review of the Mathieu-Hill equation of real variable based on numerical solutions, Ballistic Research Laboratory Memo. Rept. 878, Aberdeen Proving Ground, Md., 1955, with permission.)

— $s = e^{\nu r} = \text{constant}$; in unstable regions
 - - - $\nu = \text{constant}$; in stable regions
 - . - . Lines of constant values of $-q$.

解析解は安定領域での $\nu = \text{const.}$ の線や境界の線とよく一致する
 (ここで $Q = 2 - \nu$)

元の変数 x は、

$$x = C_0 \sqrt{\beta_0} \eta = C_0 \sqrt{\beta_0} r \cos \left(Q \frac{2\gamma_0}{\sqrt{a}} \phi - \theta + \frac{\phi_k}{2} \right)$$

変数変換の定義より $2q/a$ はRFQの電場勾配で決まるパラメーター
 またRFQの周波数と回転の周波数との関係は

$$f_{RFQ} = f_{rot} \left(\frac{2\gamma_0}{\sqrt{a}} - m \right) \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

よってRFQの電場勾配や周波数の制御でチューンシフトが可能

◎シミュレーション計算

●計算方法

1) 軌道計算用ソフトMADにHIMACのラティスをいれ、RFQ設置予定場所の中心のTwissParameterを計算させ、それらを用いて一周分のマトリックス M_0 を求める

2) RFQの効果を表わすマトリックス M_{rfq}

$$M_{rfq} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix}$$

但し $k = k_0 \cos(2\pi f_k t + \phi)$

ここで k_0 はリングの四極電磁石の集束力に比べて十分小さく、RFQの位置での β 関数はターン数によらず一定

3) Nターン後の粒子の運動の様子

$$\begin{pmatrix} x_N \\ x'_N \end{pmatrix} = \prod_{n=1}^N \left\{ M_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k_0 \cos\left[2\pi \left(\frac{f_k}{f_{rev}}\right)n + \phi\right] & 1 \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}$$

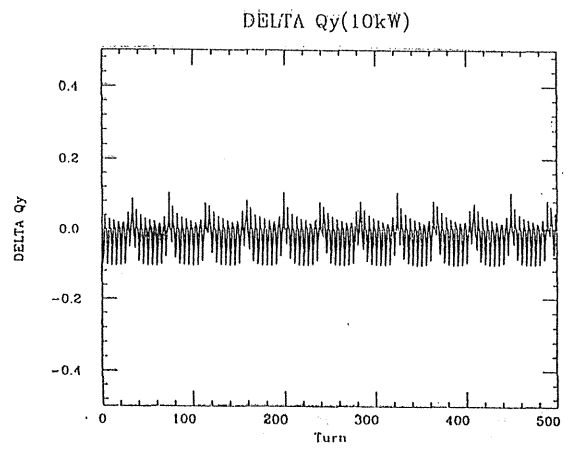
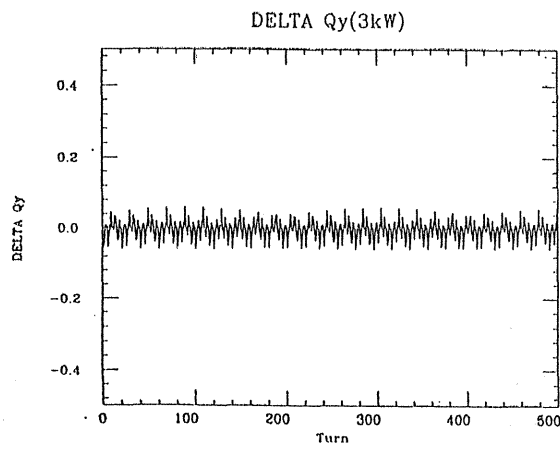
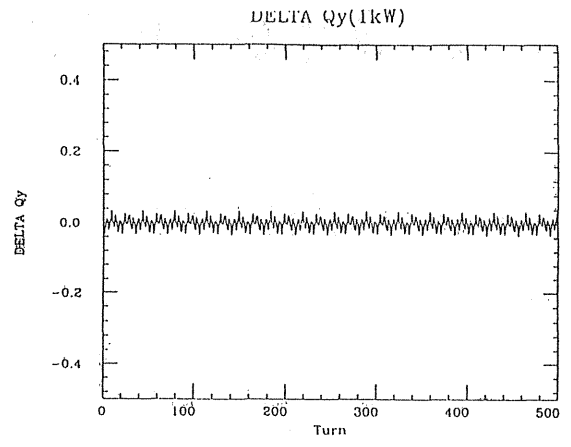
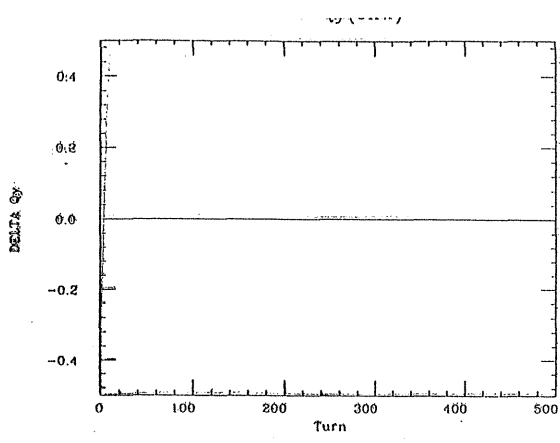
ここで n 回転分の時間 $t_n = \frac{n}{f_{rev}}$ ← 回転の周波数

4) k_0 、 f_k/f_{rev} 、 ϕ などのパラメーターを指定して、N回転後の粒子の運動の様子を調べる。

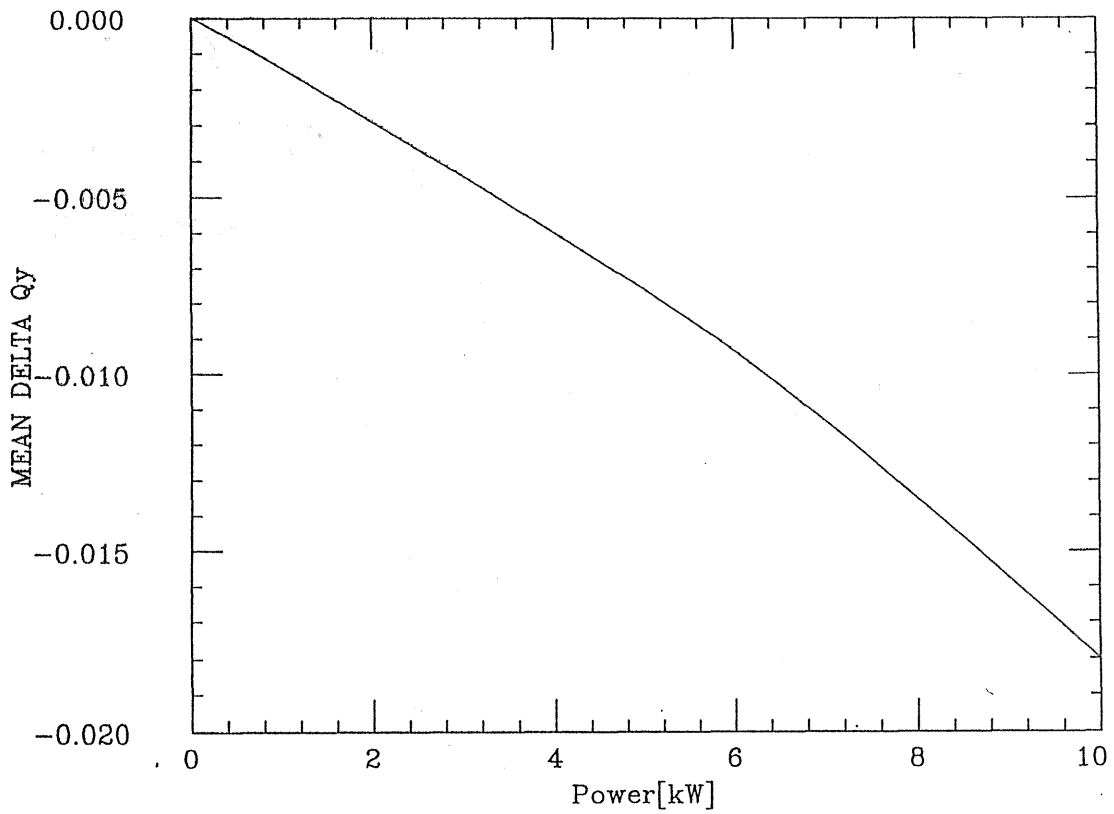
●現在までの結果

1) 各ターンでのy方向チューンはスプレッドしており、多数回のターンでチューンの平均をとると、その値はもとのチューンからシフトしている

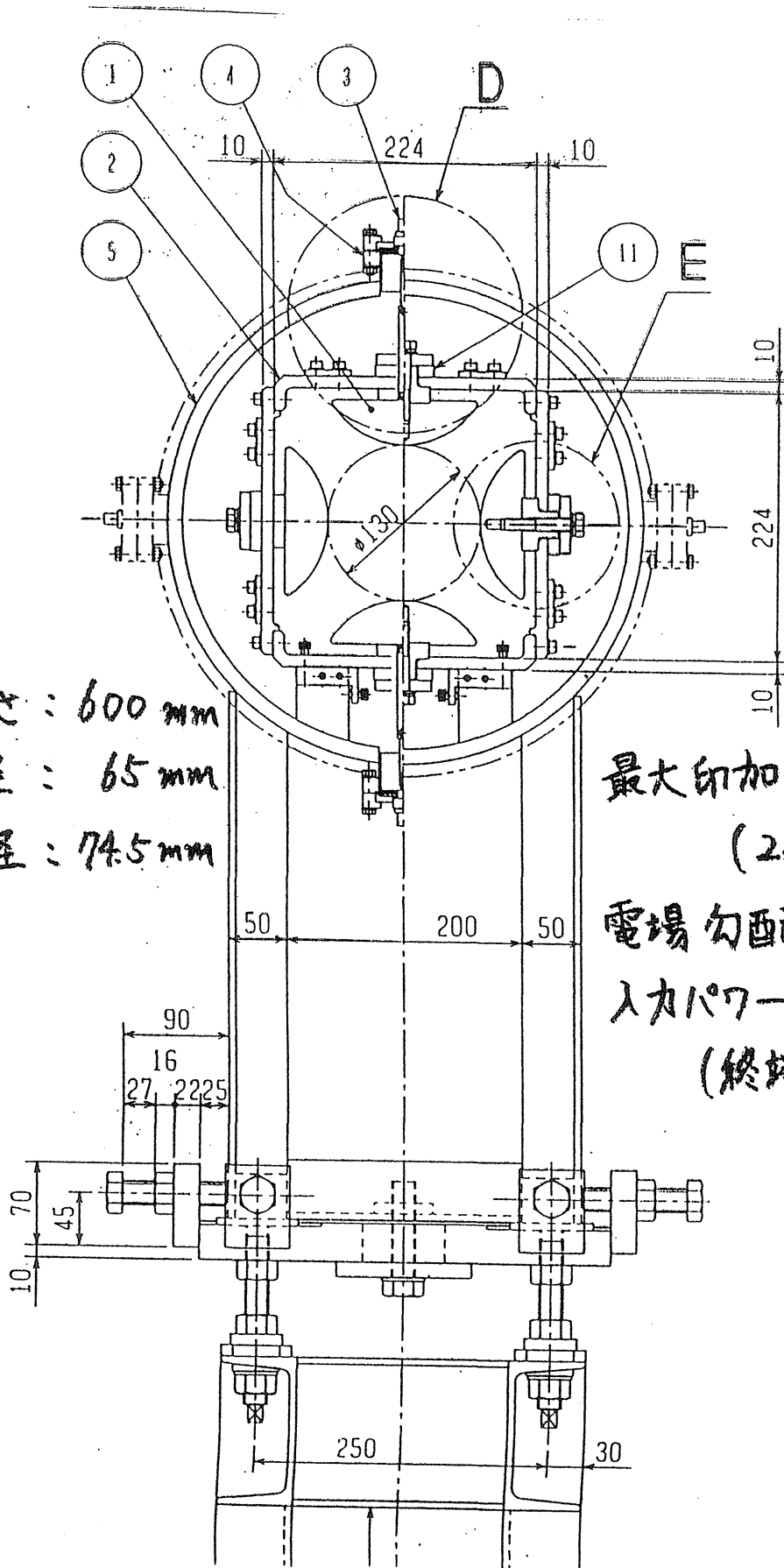
2) チューンシフト量の平均は初期条件として与えた位置(y_0, y_0')や、初期位相 ϕ には無関係で、RFQの電場勾配と周波数のみに依存する



MEAN DELTA Qy



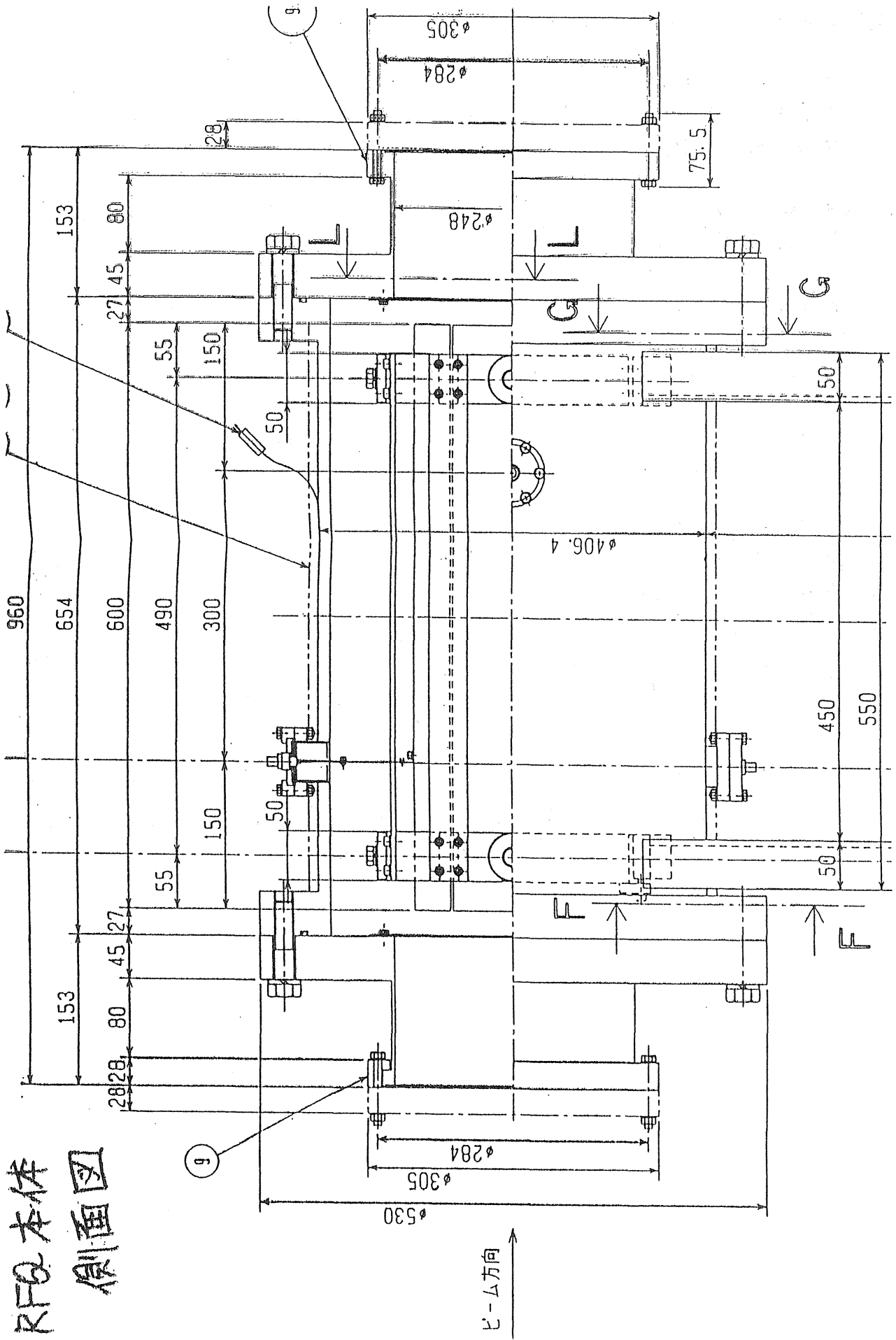
RFQ本体断面図



電極の長さ : 600 mm
 ボア半径 : 65 mm
 電極半径 : 74.5 mm

最大印加電圧 : 1250 V
 (2500 V_{pp})
 電場勾配 : 591.7 kV/m
 入力パワー : 1 kW
 (終端抵抗 800 Ω)

RFQ 本体
側面図



SQUIDを用いた微小電流測定装置開発状況

1. 超伝導シールドの計算

同軸キャビティー型、リングキャビティー型の鉛を用いた超伝導シールドの計算を” POISSON” を用いて進めている。

2. 超伝導シールドのテスト

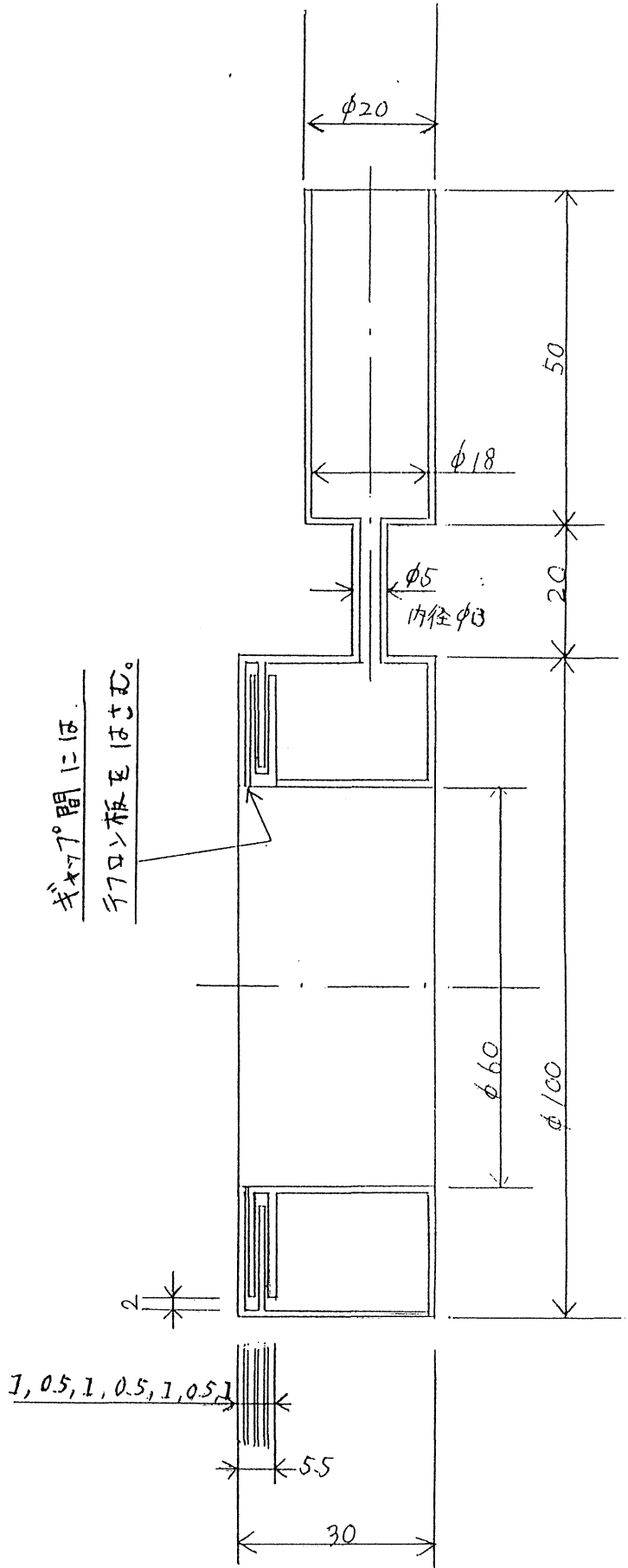
東大原子核研究所の田辺さんのグループと、島津製作所けいはんな研究所においてテストを行なった。

トロイダルコア無しで、6ターンの検出コイルをSQUIDに接続し、Heデュアーに入れて測定を行なった。

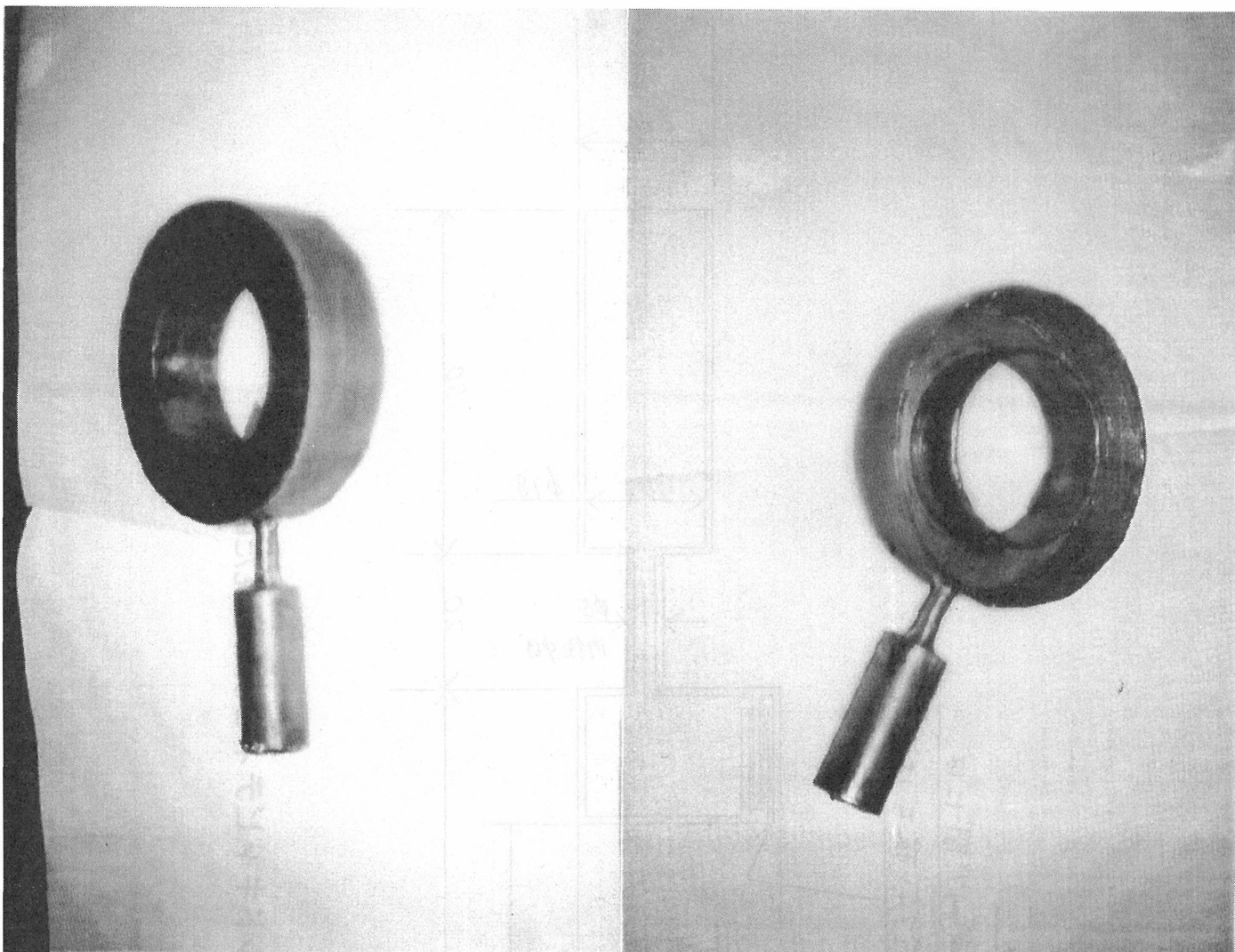
- a. 600nAの電流に対し、最大150mVの出力が得られた。このとき、雑音レベルは±100mVであった。
- b. 雑音レベルを下げるよう作業を行なった結果、雑音は±1~2mVまで下がったが、信号も5~6mV/600nAと減衰した。この現象は未解決である。
- c. 今回テストした超伝導シールドは、3段のリングキャビティー型であり約1/1000の磁気シールド効果が確認された。これは、小野新平氏の計算結果と符合している。
- d. 雑音スペクトルの解析から、低周波の機械的振動が強く観測されている。十分な除振が必要である。
- e. 電磁雑音は、予想通り60Hzが主である。

3. クライオスタットの設計

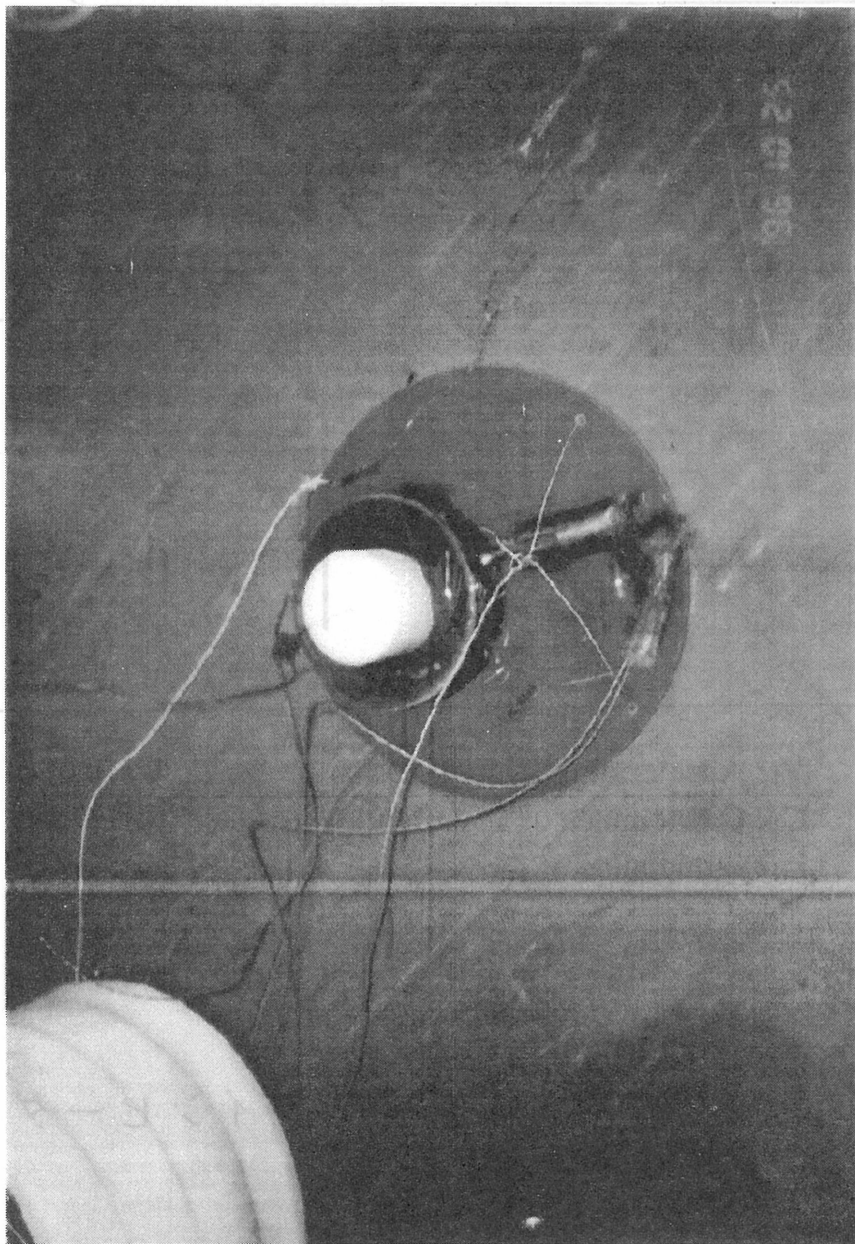
材質として、金属 (SUS)とFRPを検討してきたが、電磁シールドの必要性、真空の問題、分解可能な構造としたい、等の理由で金属製が好ましいと考える。現在、最終形状を設計中である。



鉛シールドキャビティを横から見た断面



LC並列共振回路への応用の
 共振回路の全周波数特性



● 全周波数特性

$$\frac{V}{I} = R \cos \theta$$

● L, C を決めれば

全周波数特性の条件は

$$C = \frac{\Delta L}{R}, L = \frac{C R}{\Delta}$$

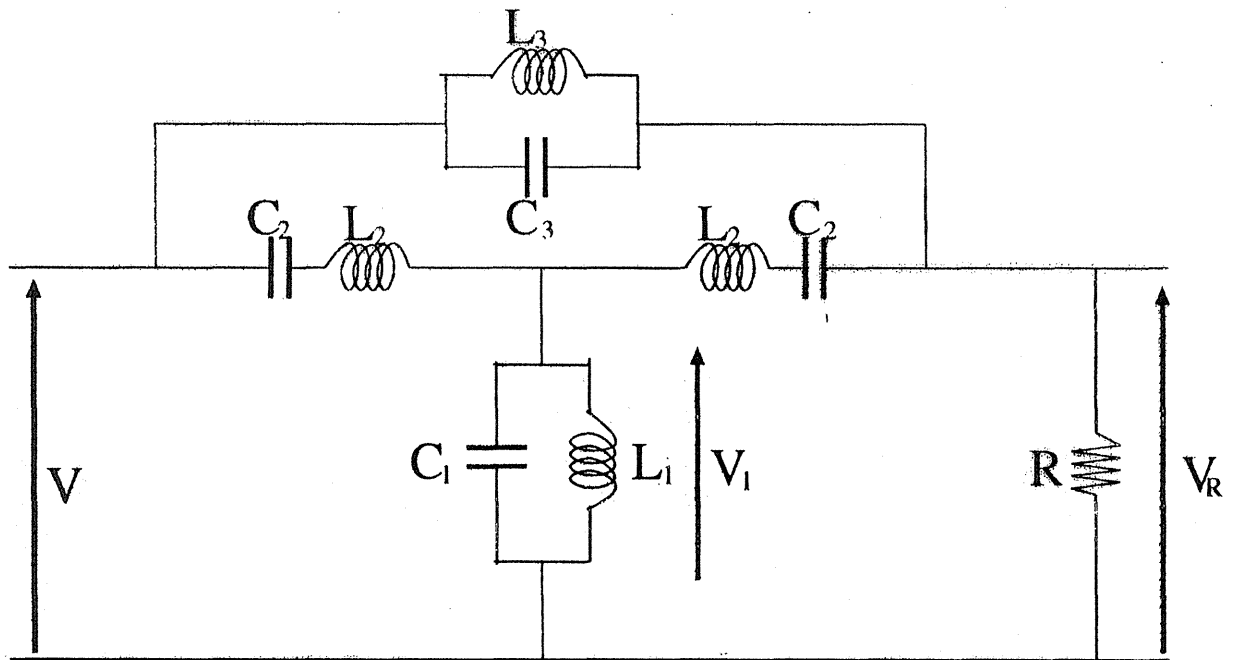
$$C = \frac{C}{4}, L = 4R$$



L, C の共振周波数

$\left\{ \begin{matrix} L_1, C_1 \\ L_2, C_2 \end{matrix} \right\}$ の共振周波数

橋絡T型全域通過網の
LC並列共振回路への適用



V_1 : Accelerating Voltage
 C_1 : Capacitance of accelerating gap
 L_1 : Inductance of ferrite

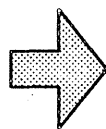
● 全域通過の条件

$$\frac{V}{I} = R(\text{const.}) \quad \text{周波数によらず入力インピーダンスが一定}$$

● L_1, C_1 を決めれば
 全域通過の条件より

$$C_2 = \frac{2L_1}{R^2}, \quad L_2 = \frac{C_1 R^2}{2}$$

$$C_3 = \frac{C_1}{4}, \quad L_3 = 4L_1$$

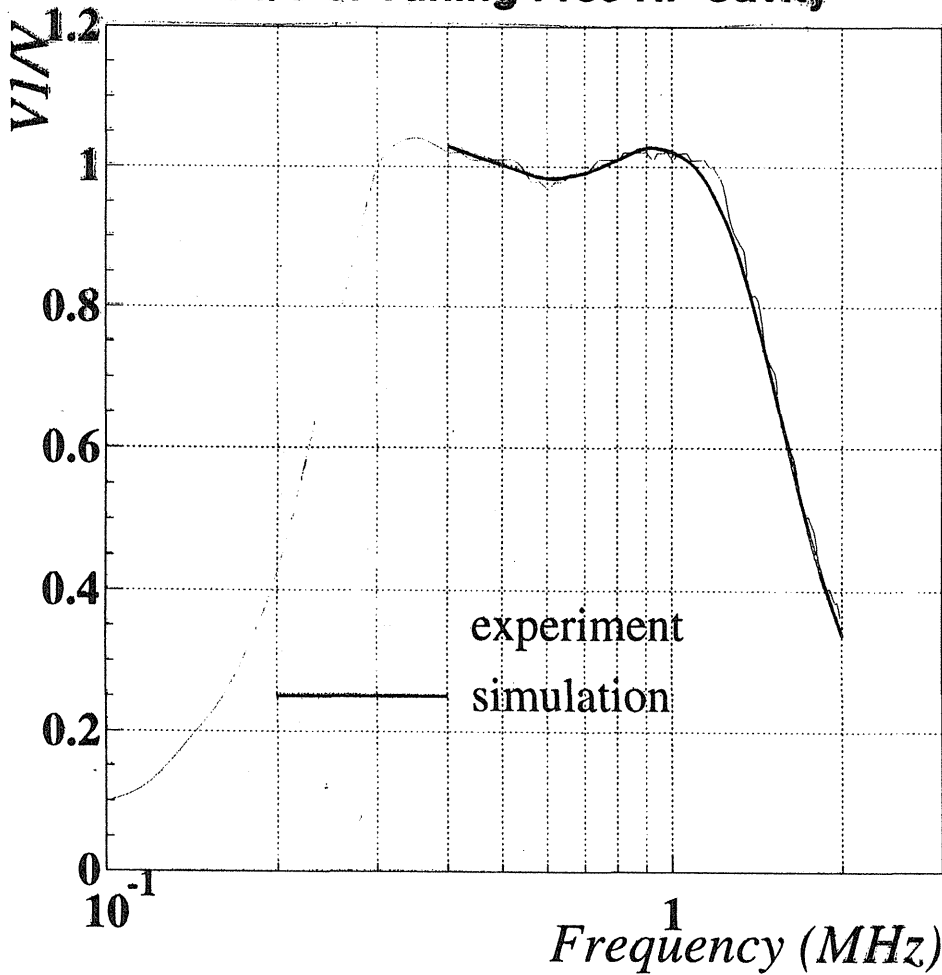


L_1, C_1 の共振周波数
 ||
 $\begin{cases} L_2, C_2 \\ L_3, C_3 \end{cases}$ の共振周波数

帯域通過特性

96/03/09 02.00

V1/V of Tuning-Free RF Cavity



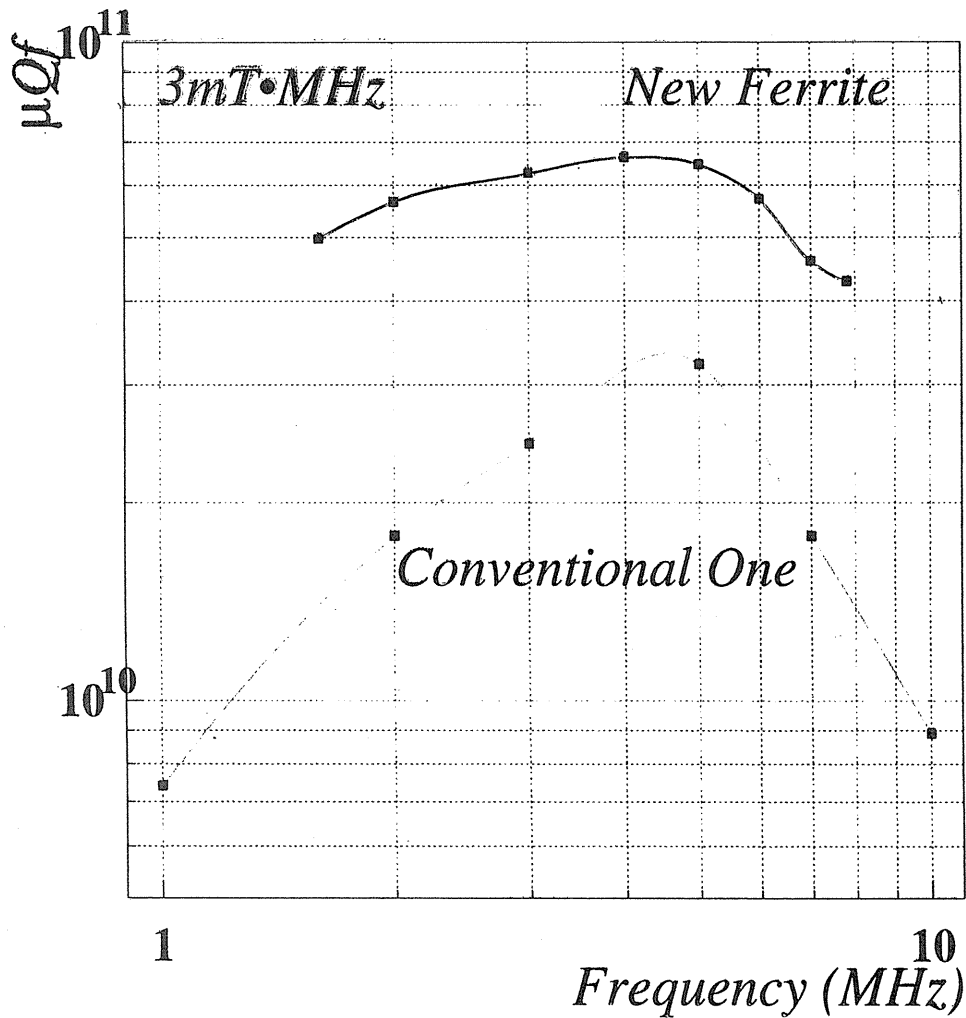
放医研から
お借りした
SY-6を使
用した簡易
モデルによ
る実験結果

● $N = \frac{\omega_u}{\omega_l}$ とすると

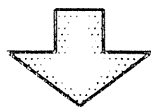
$$N = \frac{\omega_u}{\omega_l} = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{R^2} \frac{L_1}{C_1}} + \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \right)^2$$

- $C_1 \rightarrow$ 小 \rightarrow 使用周波数帯域 \rightarrow 広がる
- $L_1 \rightarrow$ 大 \rightarrow 加速電圧 \rightarrow 変化なし
- $R \rightarrow$ 小 \rightarrow 使用周波数帯域 \rightarrow 広がる
- $R \rightarrow$ 小 \rightarrow 加速電圧 \rightarrow 低くなる

無同調型用新フェライト材

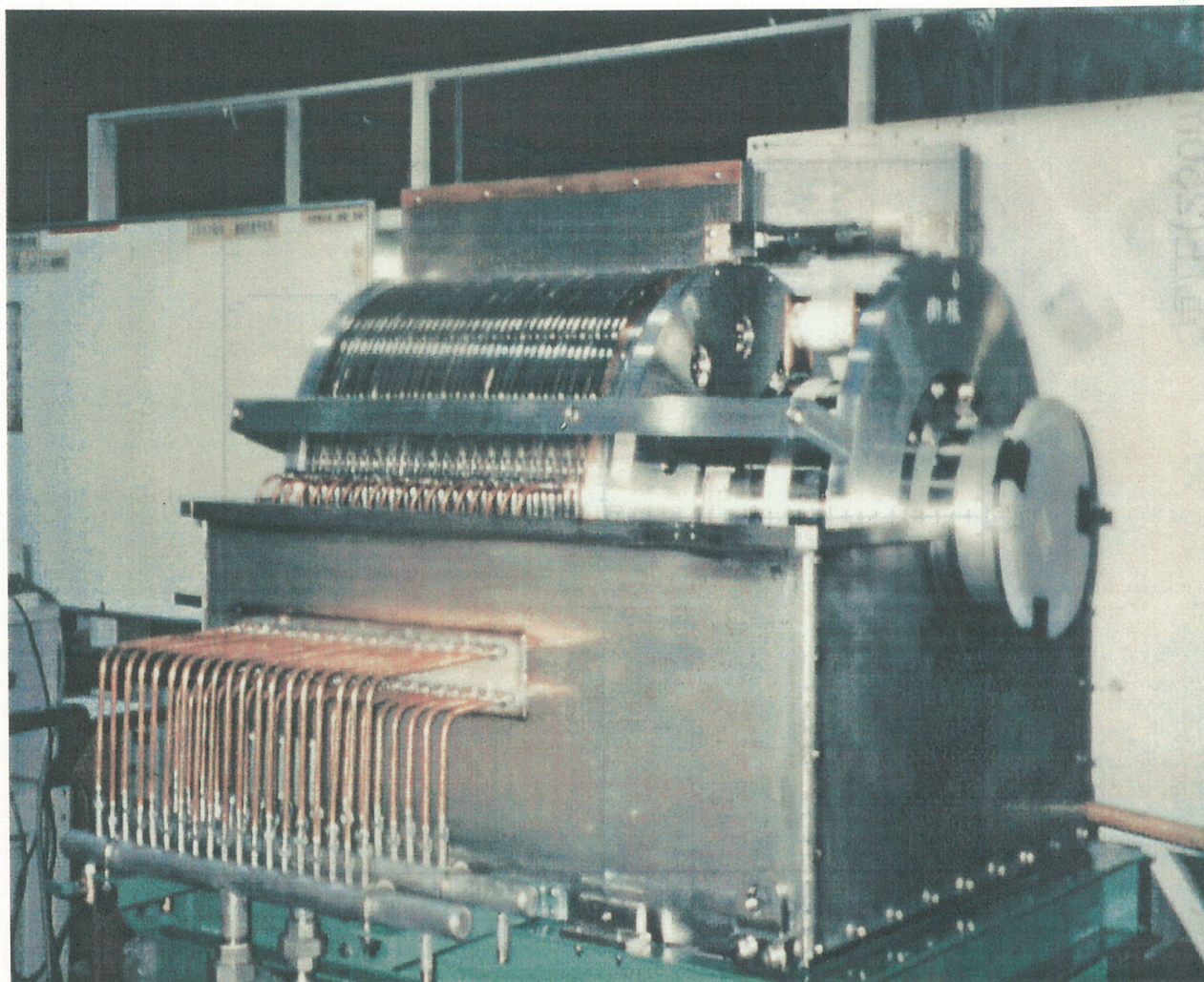


バイアス磁場をかけないため
 無同調型用のフェライトは従来のものに比べて
 μQf 積が数倍大きなものが見える



高周波損失の大幅な減少

現在試験中の無同調型RFキャビティ



(vib/amā)間執

代入W↑

マートスタ(5H 0S)em02アまstIM8~5HM1

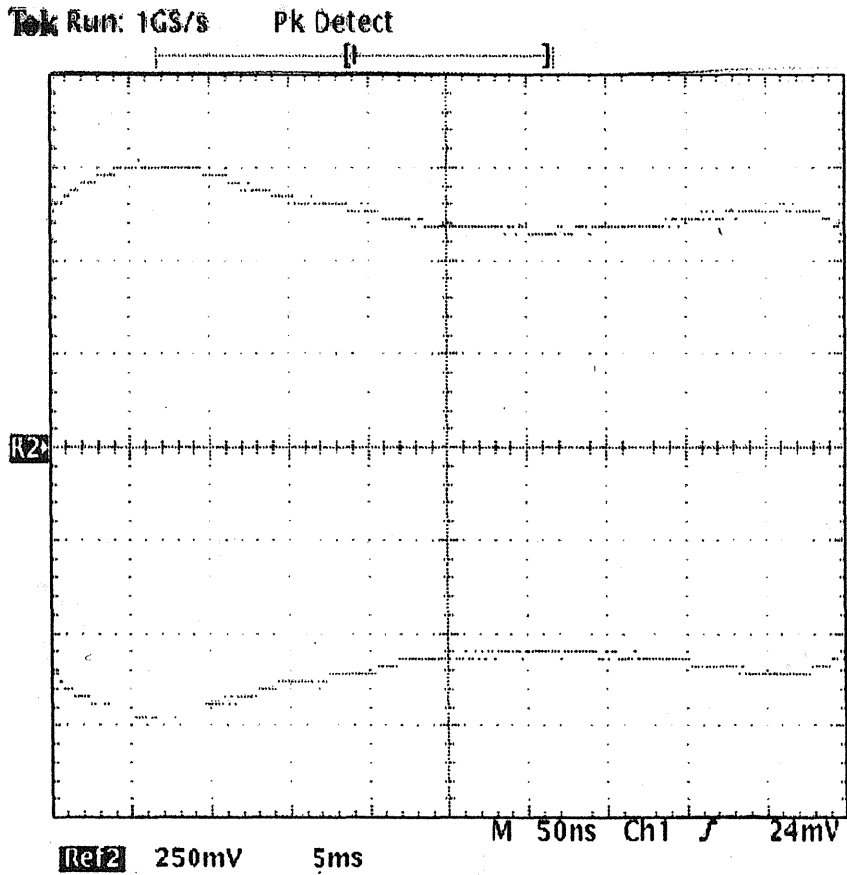
使用周波数帯域 **1MHz - 8MHz**

加速電圧 **600V - 700V**

1 kW RFアンプで励振

Low Power試験(preliminary)

電圧(250mV/div)

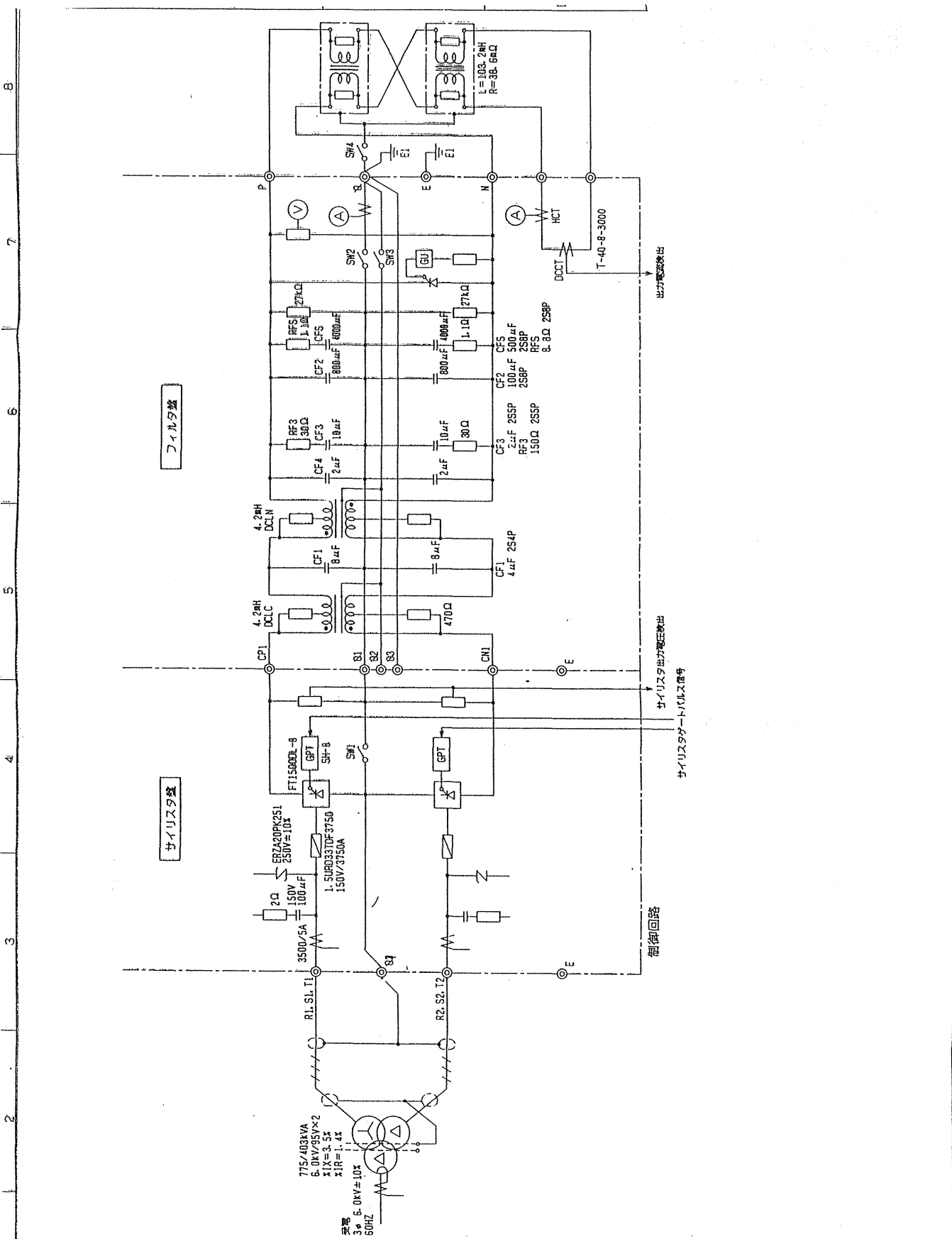


8 Nov 1996
15:01:39

時間(5ms/div)

1 W入力

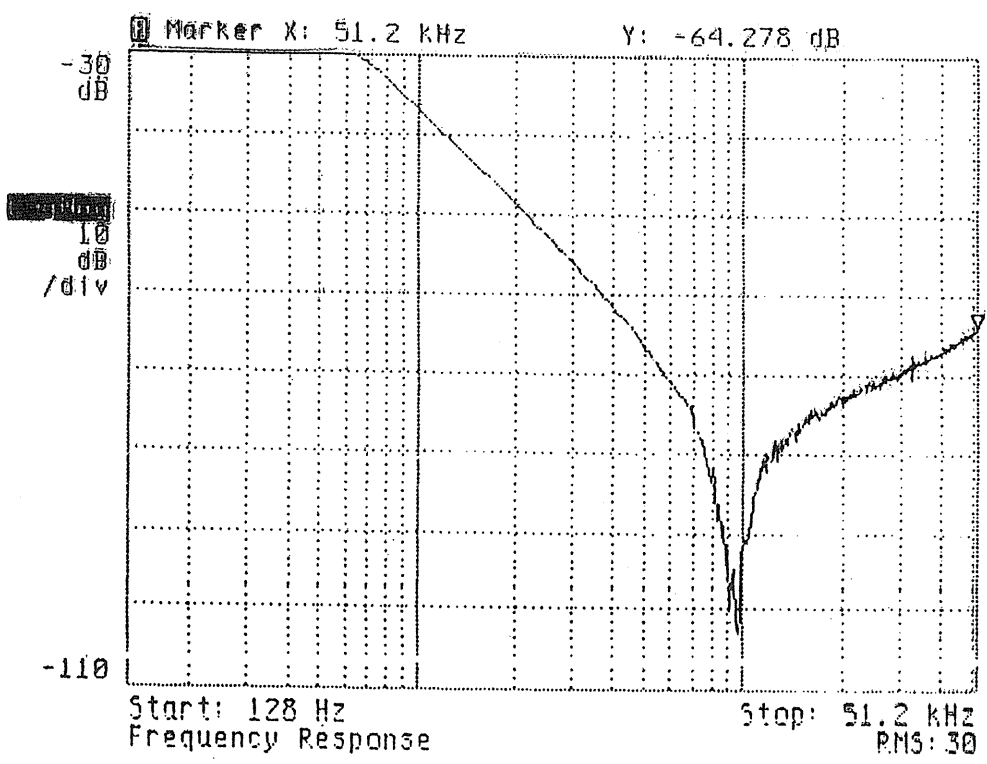
1MHz~8MHzまで50ms(20 Hz)でスイープ



記 録
 B-C88-01
 95-12-11
 打合せ用図
 アーク検知装置
 アーク検知装置
 高周波用
 コンデンサ増設
 内容が公開 [A]
 B-C88-01
 95-2-28
 打合せ用図

出 図 者	
控 製	
工 務 技 師	1
検 査 員	1
初 級 電 験 士	1

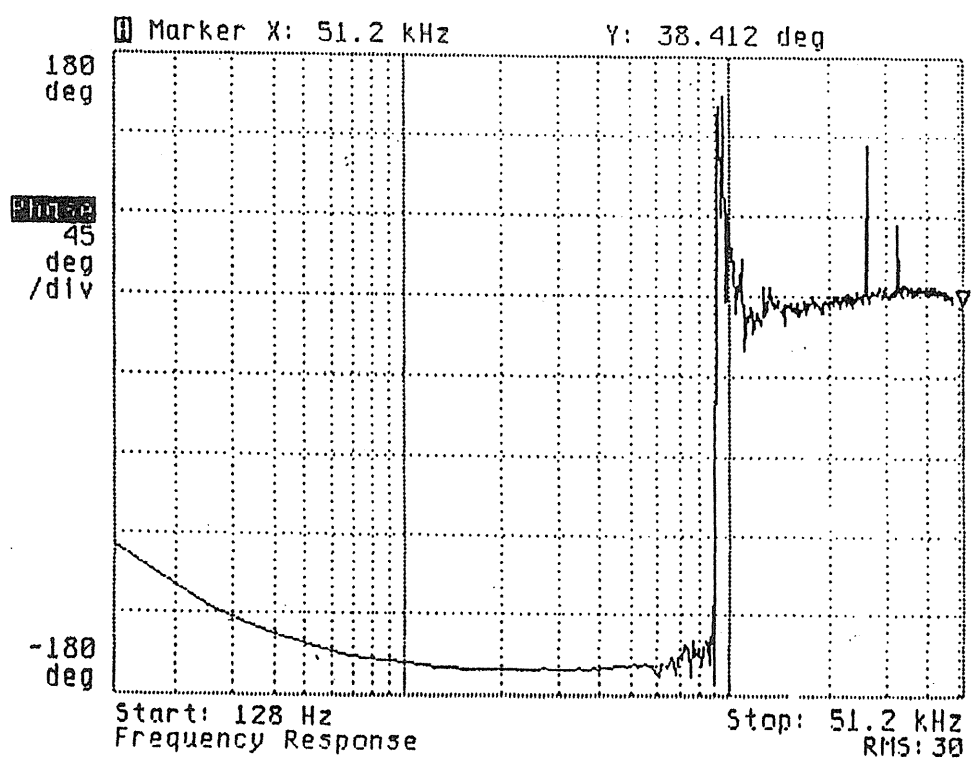
HptAddr: 11 PlotAddr: 5 PrntAddr: 1
 DiscAddr: 0 DiscUnit: 0 DiscVol: 0
 Src



17.30
 Filter 1/2
 4/2

AVERAGE COMPLETE

Src



各相

Field Measurement and End Shim Control of the HIMAC Quadrupole Magnet

Akifumi ITANO, Masayuki KUMADA, Kenji SATO, Kouji NODA,
Eiichi TAKADA, Mitsutaka KANAZAWA and Michio SUDOU
NIRS, National Institute of Radiological Sciences
9-1, Anagawa, 4-Chome, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba-ken 263, JAPAN

Kuninori ENDO
KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, JAPAN

Hiroaki SAKURABATA and Tsuneyuki TONOOKA
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.
1-1, Saiwai-cho 3-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken 317, JAPAN

Abstract

The main quadrupole magnets of the HIMAC synchrotron ring have demountable pole end pieces made of glued stack of lamination silicon steel. Step-wise end cut was applied to the pole end pieces.

We measured the integrated field gradient distribution $\text{dBly}(x)/\text{dx}$ by long twin search coil system. We analyzed how the output voltage from the twin coil changed with an addition or an omission of lamination sheets at different step positions. We could finally adjust the integrated field gradient distribution $\text{dBly}(x)/\text{dx}$ to have a wide horizontal aperture $x = \pm 122$ mm.

± 2.28 A/m. Magnetic induction field B_{50} at 5000A/m of magnetic field strength is 1.680 ± 0.003 T.

The pole shape was determined by a computer code TRIM. It is of hyperbolic shape with a tangential extension at both sides to have a wide flat region of field gradient distribution. Width of the yoke is set to be less than the height to make a space for a beam extraction line. Table 1 summarizes the specifications of the quadrupole magnet.

The magnets have demountable pole end pieces made of glued stack of lamination silicon steel that are fixed to the magnet yoke by screw bolts. This enabled an experimental determination of the end shim to control the integrated field gradient distribution. Step-wise end cut is applied to the pole end pieces. Outer parts of 30 mm length at both ends of the magnet yoke are also glued to have a solid plane to attach the pole end pieces.

I. INTRODUCTION

The HIMAC is a Heavy Ion Medical Accelerator for cancer therapy in Chiba at NIRS. The HIMAC synchrotron accelerates ion beams from He to Si(Ar) with charge to mass ratio $q/A=0.5$ up to 800 MeV/u corresponding to a magnetic rigidity $B\rho=9.75$ T·m. The synchrotron ring is a separated function type with a strong FODO focusing structure and with a six-fold symmetry. Further details of the HIMAC synchrotron are described elsewhere [1], [2].

In the present paper, the main quadrupole magnets of HIMAC synchrotron and their field measurement are described. The method and results of the shim control of the integrated gradient field distribution are presented.

II. QUADRUPOLE MAGNET

The main quadrupole magnet system of the synchrotron ring is composed of 12 focusing magnets and 12 defocusing magnets.

The maximum integrated field gradient dBly/dx is 3 T. As the ring is designed to accelerate ion beams at a rate of $\text{dB}/\text{dt}=2$ T/sec for the main dipole magnets [3], the magnet yokes are fabricated from stamped silicon steel lamination sheets of 0.5 mm thickness to reduce eddy current effects. The steel used is 50A600 of Nippon steel corporation. Coercitivity H_c is 65.30

III. FIELD MEASUREMENT AND END SHIM CONTROL

We measured the integrated field gradient distribution $\text{dBly}(x)/\text{dx}$ by long twin search coil system. Turn number of each coil is 1152. Each coil of the twin search coil system was calibrated in a uniform region of the HIMAC dipole magnet that was calibrated by NMR system. The effective area of the coils was thus obtained. The length of each coil was 1002.5 mm. Widths of left and right coils of the twin coil were then deduced to be 7.04 mm and 7.09 mm, respectively. Distance between two coils was obtained by a field measurement in the quadrupole magnet. Absolute field distribution $\text{Bly}(x)$ in quadrupole magnet was measured using one coil of the twin coil. The result was compared with a field gradient output of the twin coil. The distance was 11.38 mm.

Output signal from the twin coil was integrated by a temperature controlled integrator with a time constant $RC=0.33$ sec. Integrator outputs and magnet currents were measured before and after magnet excitation. Initialization of the hysteresis loop of the magnet was performed before measurement.

We fabricated pole end pieces whose end cut steps approximated a line with tangent 1.4 with respect to the beam axis[4]. Table II gives width W and height H of each step of the initial end shim. Step #a indicates a side that is attached to the magnet yoke. Width of each step is 4 mm. Fig. 2 shows the integrated field gradient distribution for the initial end shim at excitation currents 400A and 1350A. These currents correspond to the acceleration energy range 100 - 800 MeV/u where beams are extracted. The results show that the distribution has a deviation larger than 1×10^{-2} . This gives a large octupole component in the magnetic field. The result is that an outgoing trajectory of the phase space separatrix in slow extraction process is distorted and that a beam will not be extracted.

As measurements with different tangent values did not give a required aperture, we measured systematically how the output voltage distribution from the twin coil changed when we added or omitted lamination sheets at different steps of the end shim. The output voltage change had different x -distribution with different step position of the added or omitted lamination sheet. It seems that hyperbolic magnetic flux lines passing around the cross point between an end cut line and a hyperbolic pole face are affected most when we changed its step width. Back-side steps (side #a) give a larger change at

central part of the distribution. Front-side steps (side #f) give a larger change at outer part of the distribution. As examples, Fig. 2 - 3 shows the changes of output voltage distribution when we changed the widths of step #c and #f by -1 mm and

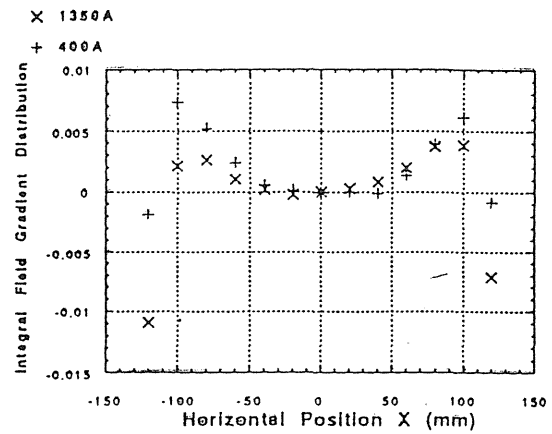


Fig. 1. Normalized integrated field gradient distribution for initial end shim at excitation current 1350A and 400A. The distribution is not satisfactory.

TABLE I
Specifications of the HIMAC Quadrupole Magnet

Number / ring	12 Focusing
	12 Defocusing
Maximum field gradient	7 T / m
Maximum integrated gradient	3 T
Aperture diameter	192 mm
Magnet length	400 mm
Good field region Hor / Ver	244 mm / 56 mm
Magnet yoke size	900 ^w x 980 ^h x 400 ^l mm
Number of coil turns / pole	18
Maximum current	1360 A
Coil resistance	9.7 mΩ
Coil inductance	9.2 mH
Magnet weight	3.2 ton
Cooling water flow	18 l / min.
Magnet yoke material	laminated silicon steel Nippon steel corporation 50A600
Lamination thickness	0.5 mm

TABLE II
Width and Height of each step of the end pole piece in mm.

Step No.	#a	#b	#c	#d	#e	#f
Initial W	4	4	4	4	4	
H	0	7	12.5	18	23.5	
Final W	4	4	1	3	5	4
H	0	7	12.5	18	23.5	30

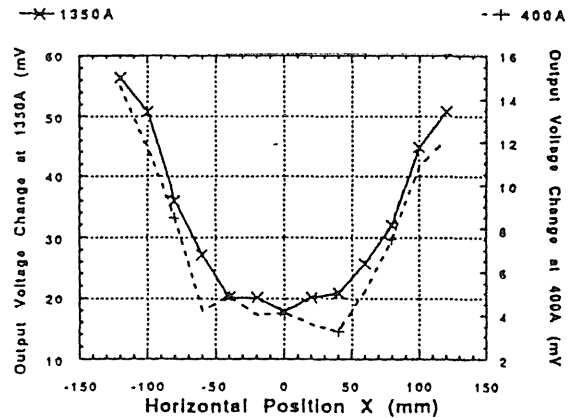


Fig. 2. Change of output voltage for 1 mm width change of step #c.

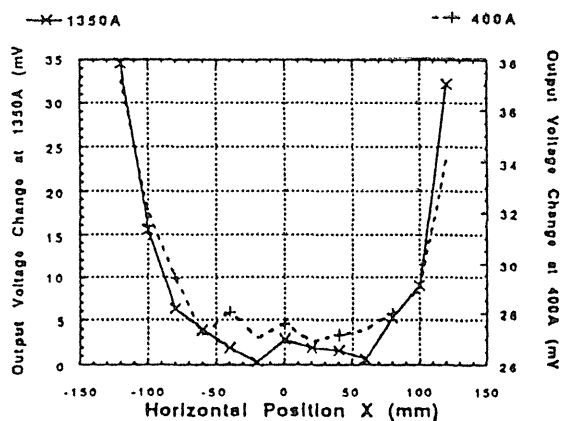


Fig. 3. Change of output voltage for 1 mm width change of step #f.

+1 mm respectively at excitation current 400A and 1350A. Having known the voltage changes for unit change of width for each step, we could calculate a voltage distribution for a new pattern of end shim. So we could determine a new form of the end cut for a desired gradient distribution. However, as the end pieces have a saturation at edge and the field has a component perpendicular to the lamination sheet, the procedure was not so straight forward when we changed widths of several steps at a same time. We needed some iterations to obtain the result. Fig. 4 compares observed output voltage distributions (in mV) for initial end shim, one of intermediate end shims and final end shim at 1350 A. Fig. 4 also shows a prediction for final end shim. Although there was a slight discrepancy between prediction and observation, we could finally adjust the integrated field gradient distribution $\text{dBly}(x)/dx$ to have a required horizontal aperture $x = \pm 122$ mm.

Fig. 5 shows a pattern of the final end shim. Table II summarizes width and height of each step. Fig. 6 shows the resultant integrated field gradient distribution. Deviations are less than 8×10^{-3} and 3×10^{-3} at 400A and 1350A, respectively.

Fig. 7 shows an excitation of the integrated field gradient $G_{lo} = \text{dBly}(x=0)/dx$ in Tesla. The relative deviation of the magnet strength among the whole magnets at full excitation current 1350A is ± 0.3 %.

IV. References

- [1] Y.Hirao et al., "Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba - A Design Summary and Update - ", NIRS-M-89 and HIMAC-001, December 1992 and references therein.
- [2] K.Sato et al., "Present status of NIRS medical accelerator - HIMAC." in these proceedings.
- [3] A.Itano et al., Proc. 8th Sym. Accel. Sci. Tech., RIKEN, Saitama, Japan (1991) 202.
- [4] M.Kumada et al., Nucl. Instr. and Methods, 211(1983)283.

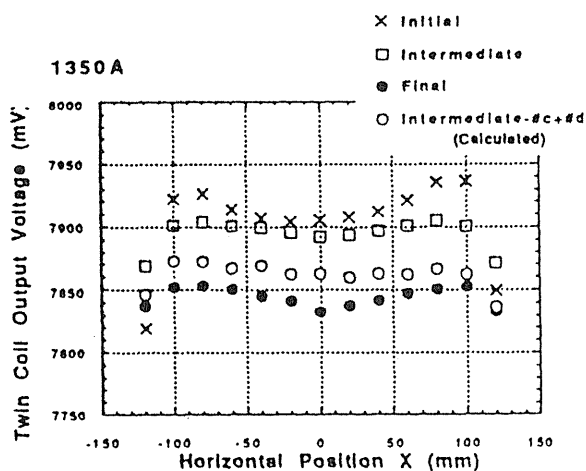


Fig. 4. Twin coil output voltages for different end shims. Calculated distribution is a prediction for the final end shim and is compared with observed final distribution.

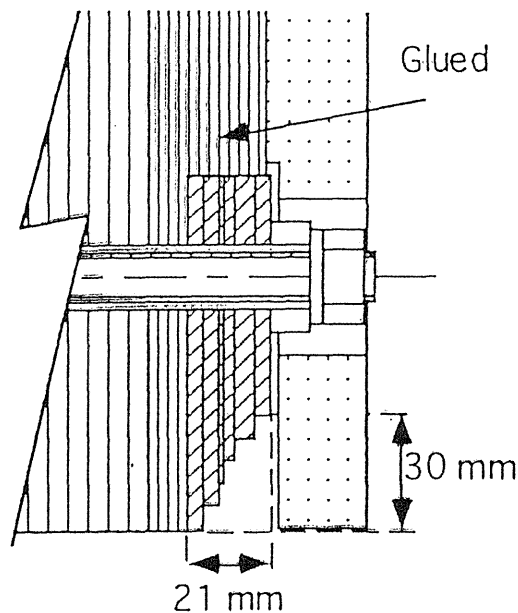


Fig. 5. Final end shim. This end shim gave a satisfactory result.

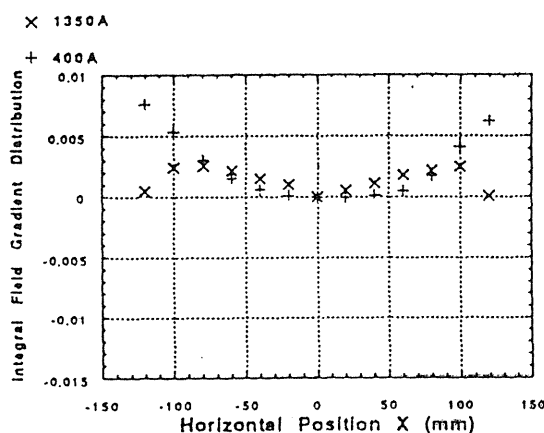


Fig. 6. Normalized integrated field gradient distribution for a final end shim at excitation current 1350A and 400A.

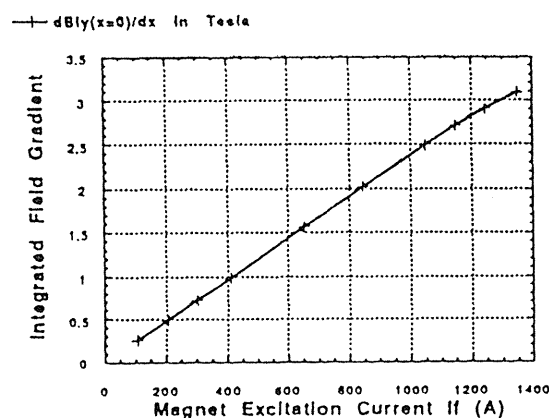


Fig. 7. Excitation of the integrated field gradient in Tesla.

ガン治療用入射重イオン線形加速器の研究

東工大原子炉研、ミュンヘン工科大^{A)}、放医研^{B)}、日本製鋼所^{C)}

服部俊幸、五十川克士、H.Schubert^{A)}、笹公和、伊藤崇、

林崎規託、吉田拓司、馬島哲、山田聡^{B)}、山木晋一^{C)}

発表内容

1. 研究目的と研究計画
2. APF収束による粒子軌道の計算機シミュレーション
3. 小型安定IH型線形加速器の設計パラメータ
4. 1/2スケールモデル加速空洞の設計、製作
5. まとめ

研究目的

IH型線形加速器の高電力効率を積極的に利用した高加速率、小型安定型線形加速器（ガン治療重イオン入射線形加速器）の研究

研究計画

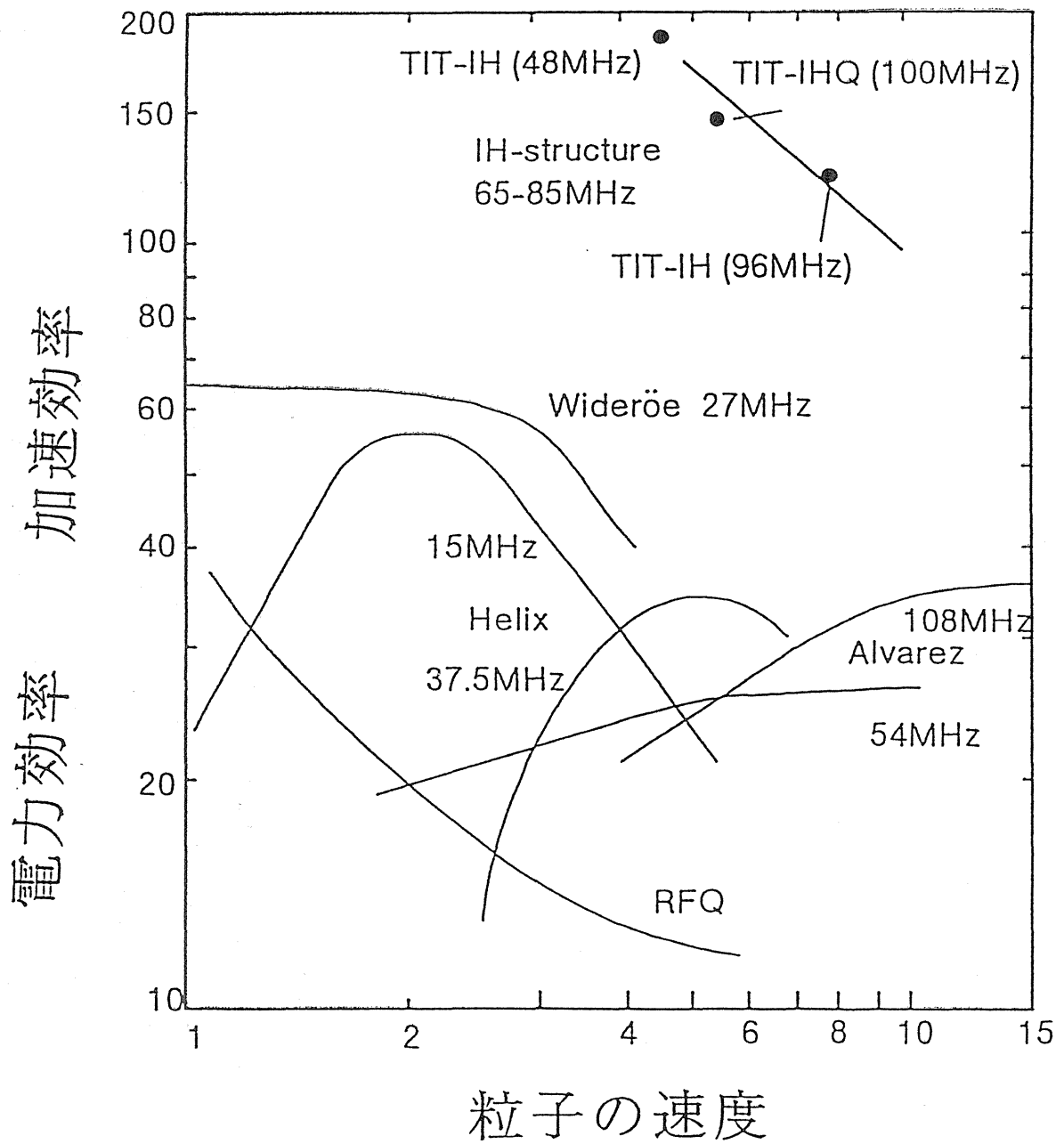
設計条件

- a) 安定性を考慮して 3MV/m （加速電界はキルパットリク限界程度）
- b) $p \sim C^{4+}$ を 3MeV/u （ $\sim 6\text{MeV}$ ）まで 3m （ $\sim 6\text{m}$ ）で加速する。
- c) 複数の加速器でなく一台の入射器システム（バンチャアを含む）とする。

研究計画

- 1) APF収束による粒子軌道の計算機シミュレーション
- 2) 1/2スケール加速空洞の設計、製作
- 3) モデル空洞による電磁場、電力効率、安定度の測定
- 4) 放電、安定度計測専用空洞による測定
- 5) 実際の重イオン入射線形加速器の設計、製作、加速試験

TIT&TUM (103MHz)



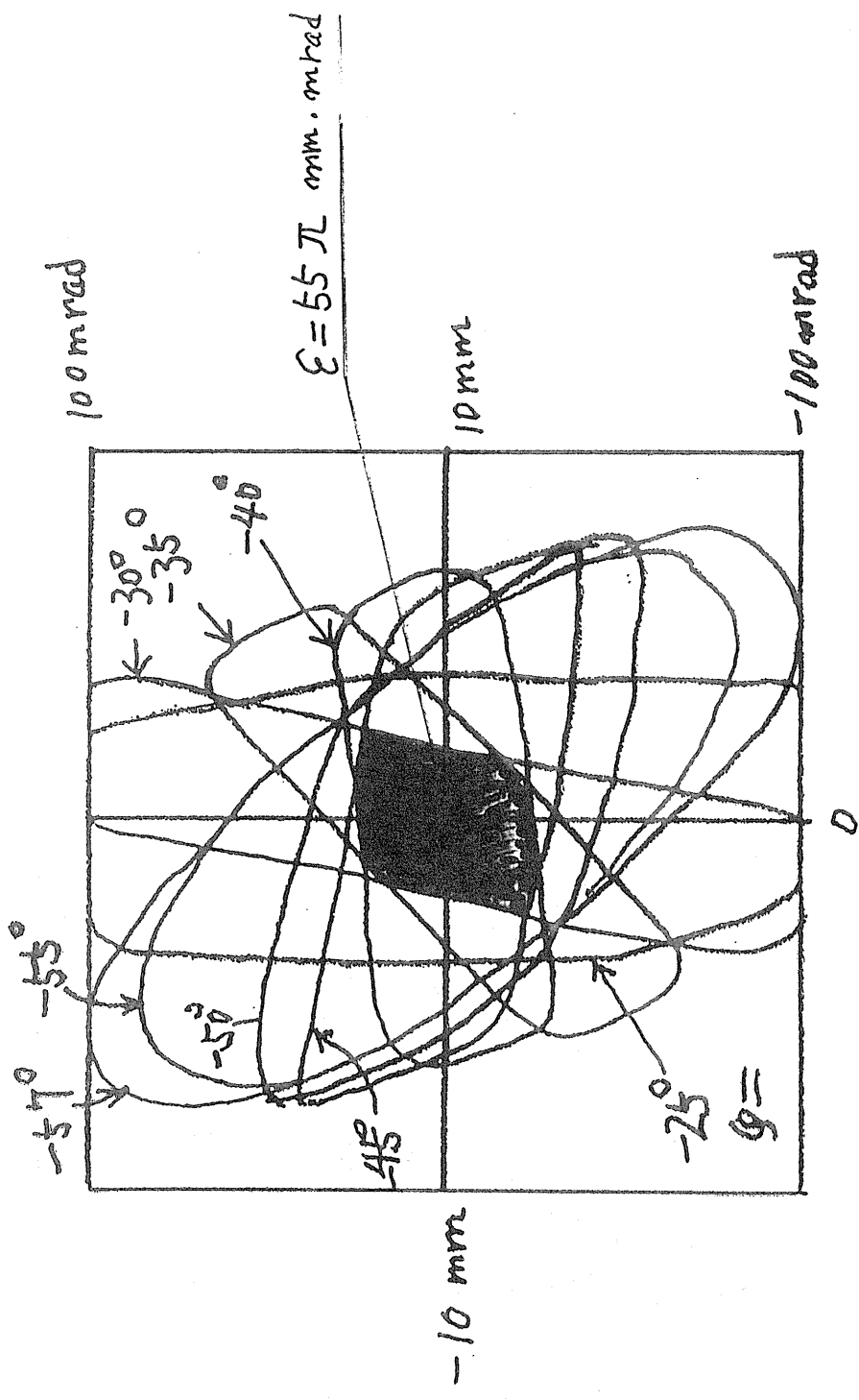


図 -45°, 0°, 45°位相シークェンスでのTransverse Acceptance

*** PHAPF0 ***** 96/06/05 12:53:42 ***** drift tube table DTNIRAS5.dat
 phi = -100 to 100 step 5[°]

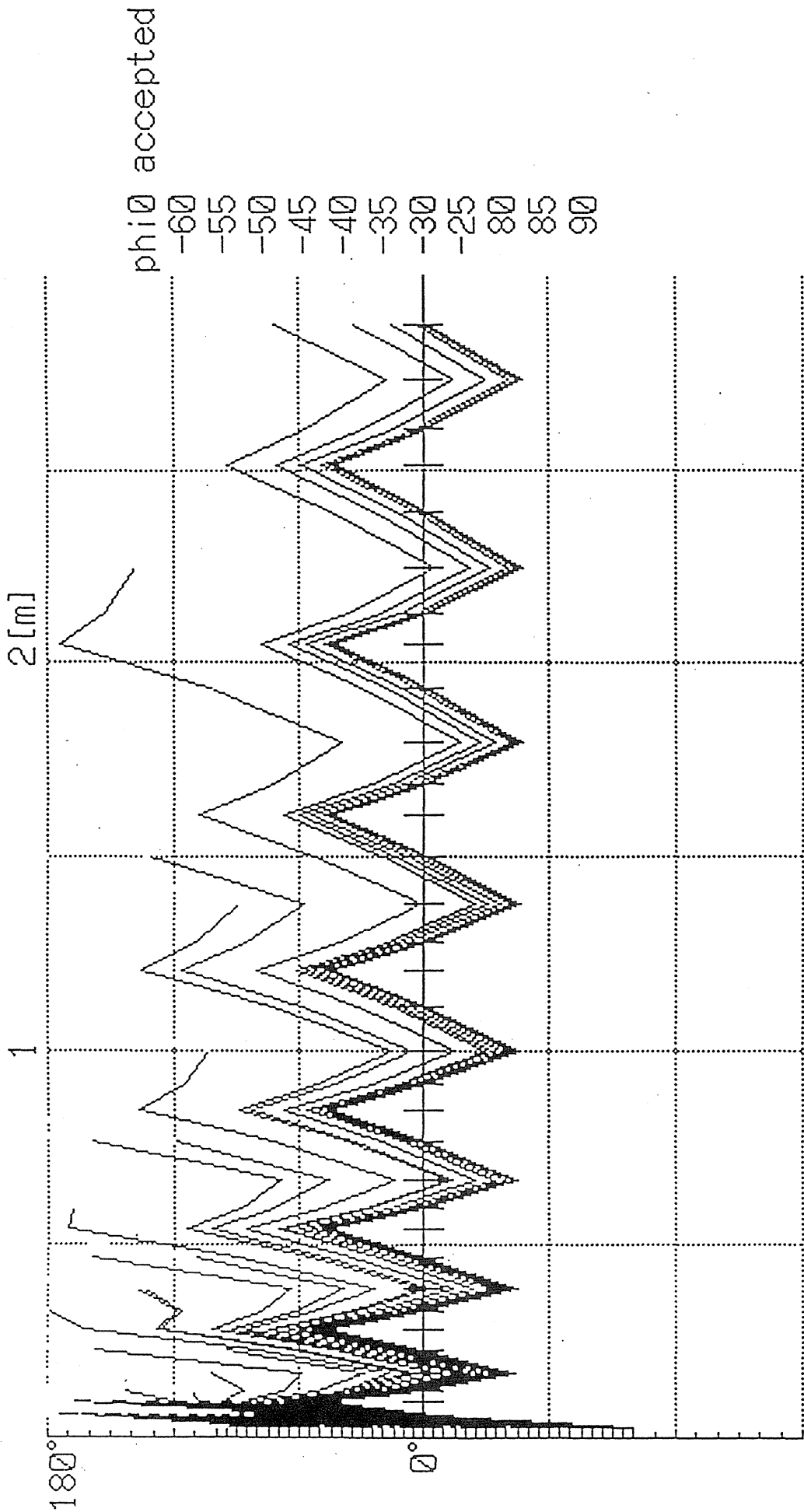
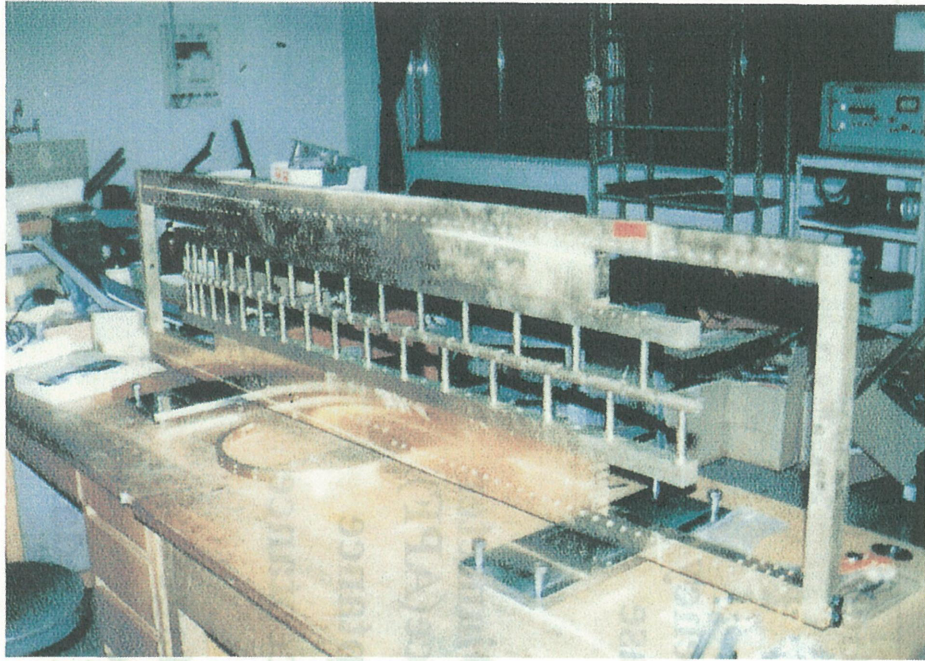
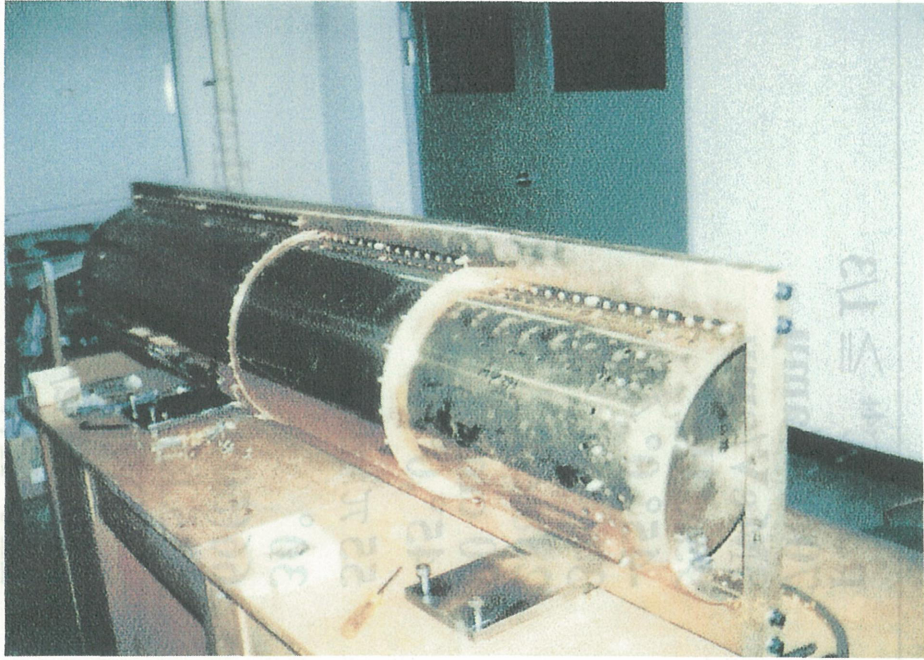


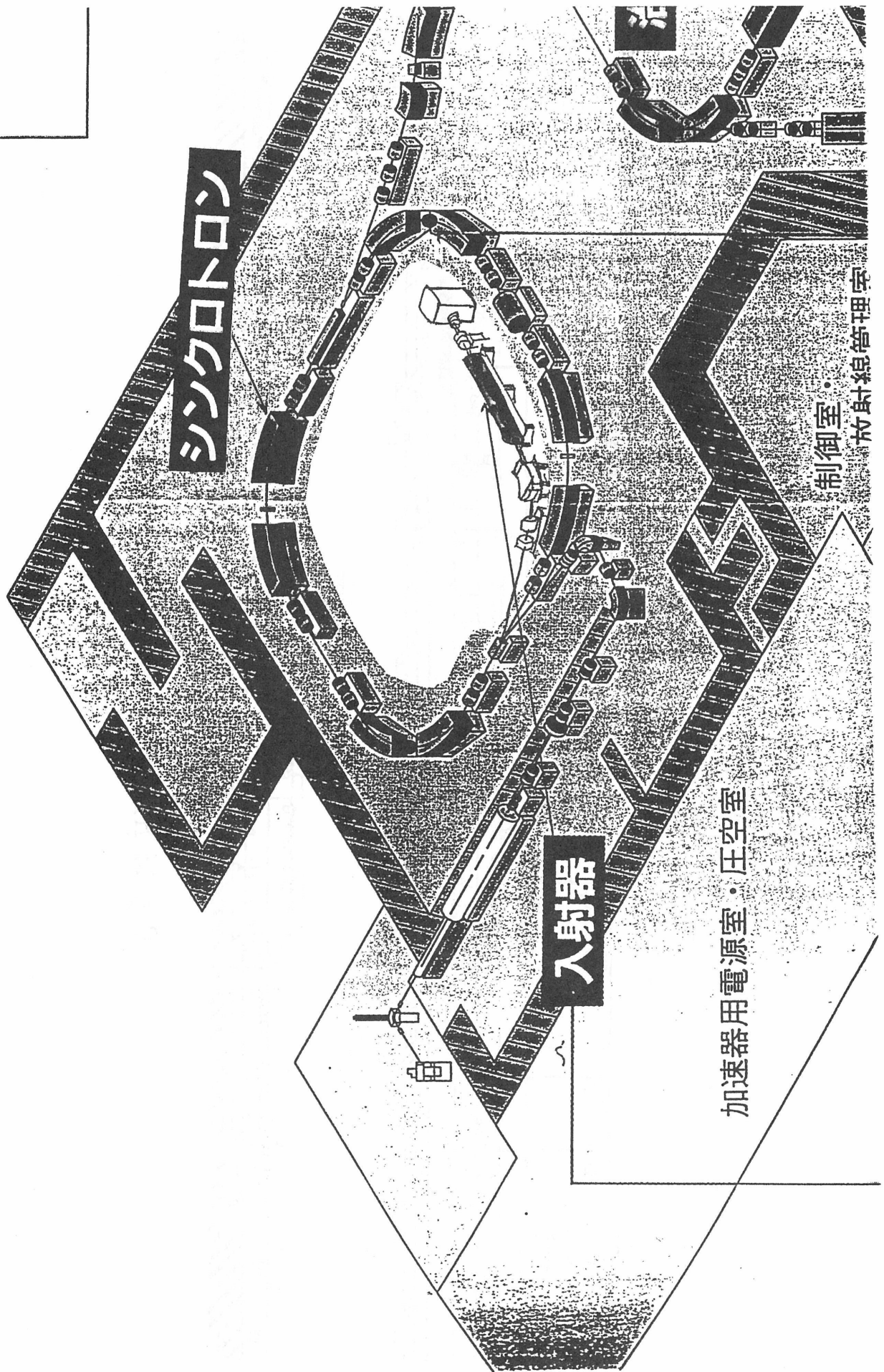
図 -45°, 0°, 45°位相シークェンスでの粒子の位相振動

Table - 1 Parameters of Injector IH Linac

Acceleration Particle (q/A)	p, He, C ⁴⁺ \cong 1/3
Input Energy	70keV/amu
Output Energy	3MeV/amu
Operation Frequency	95MHz
Synchronous Phase	-45°, 0°, 45°
Number of Cell	34
Cavity Length	288 cm
Average Cavity Diameter	80 cm
Focusing Sequence(APF)	-45°, 0°, 45°
Transverse Acceptance	55 π mm · mrad
Longitudinal Acceptance	30°
Transmission	66(50) % by Buncher
Acceleration Voltage	335 kV/Gap
Acceleration Rate	3 MV/m
Effective Shunt Impedance	350 M Ω /m
RF Power	120 kW



組立中の1/2スケールモデル



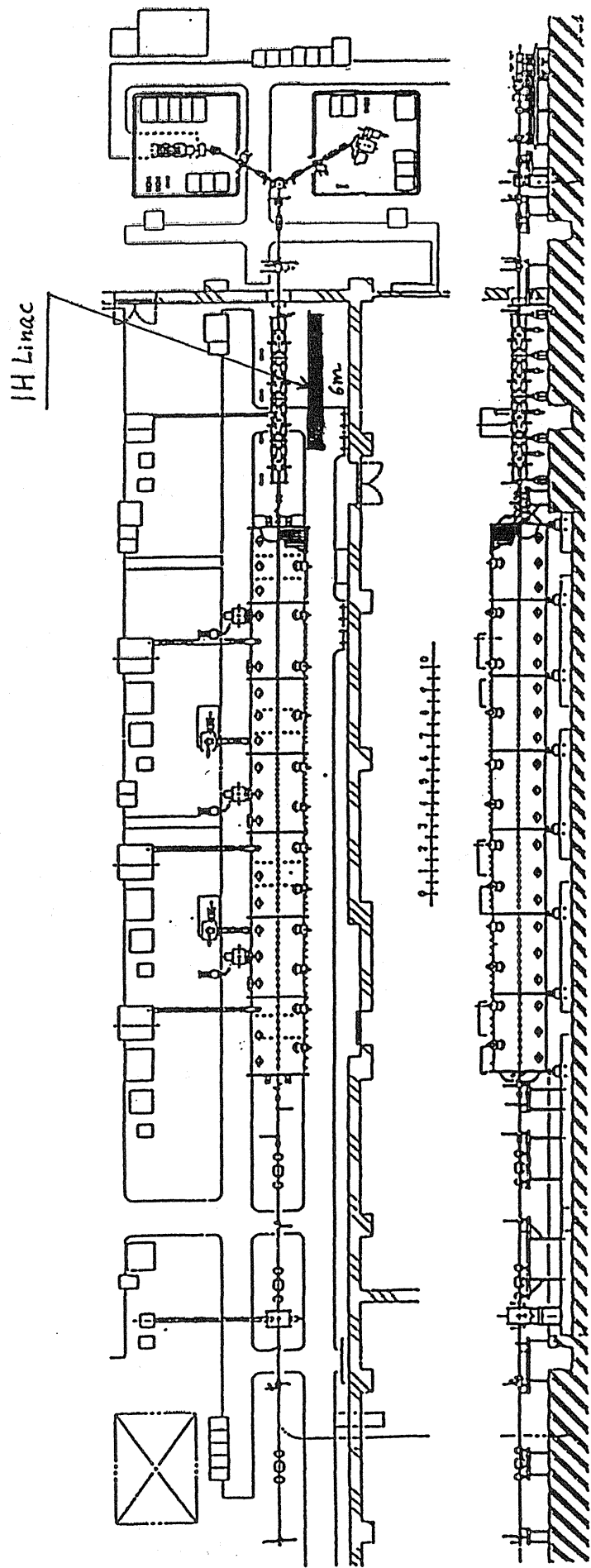
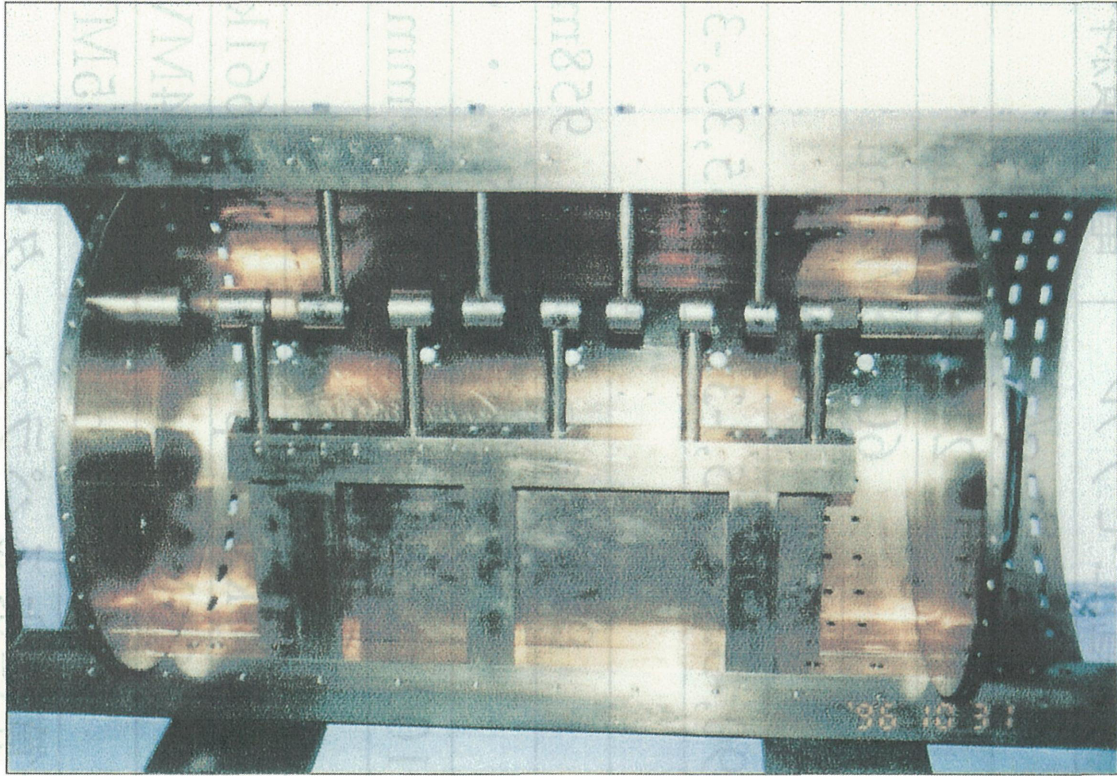


Fig. 2: HIMAC 入射器系全体配置図



放電・安定度測定用テスト空洞基本モデル
(等電界型)

	等電圧モデル	電圧傾斜モデル
Charge to Mass Ratio	q/A	$\geq 1/16$
Input Energy	219keV/amu	
Output Energy	600keV/amu	
Operation Frequency	81MHz	
Synchronous Phase	-90, -35, 35, 35, -35, -35, 35, 35, -35, . . .	
Number of Cell	18	
Cavity Length	973mm	958mm
Focusing Sequence(APF)	-35, 35, 35, -35, -35, . . .	
Transverse Acceptance	109 π mm \cdot mrad	110 π mm \cdot mrad
Longitudinal Acceptance		50°
Acceleration Voltage	518kV/Gap	420~661kV/Gap
Acceleration Rate	6.3MV/m	6.4MV/m
Electric Field	21.6MV/m	17.5MV/m

表 1 軌道計算によるパラメーター

まとめ

- * C^{4+} イオン($q/A=1/3$)を核子当たり70keVで入射し、3MeVで出射する長さ約3mの非常に小型(直径80cm)で省電力(120kW)のIH型線形加速器一台による医療用入射器を設計した。APF収束とバンチャーにより十分ビームを加速出来ることが粒子の計算機シミュレーションより分かった。
- * 同じ様な設計概念で、長さ3mの入射エネルギー100keVで出射4MeVの陽子加速IH型入射線形加速器を設計することが出来た。
また同様に長さ3mの入射核子当たり50keVで2MeV出射の重陽子加速IH線形加速器を設計することができた。
- * 粒子軌道シミュレーション結果により1/2スケール加速空洞の設計、製作を行った。
- * 放電限界や空洞の安定度を試験するためのテスト加速空洞を別に設計、製作することを計画している。

医療器具滅菌用新型電子加速器の研究 (逆転レーストラクマイクロトン)

東京工業大学・原子炉工学研究所

服部 俊幸

研究目的

- 1) 医療器具滅菌用の10MeV25kW級の電子加速器
- 1) 医療器具滅菌用の小型、省電力型の電子発生
の新型加速器を開発する。
- 2) 高パワーを必要とする電子線形加速器以外の
加速方法を開発する。

研究方法

- 1) リッジ付空洞による省電力加速電極採用
- 2) 逆転レーストラク型マイクロトン採用
- 3) 1MeV以下の実験機を製作する
- 4) 加速器学的にいろいろ面白い

[2 a - 8]

DEVELOPMENT OF 10 MeV 25KW CLASS STERILIZATION LINAC SYSTEM

Y. Kamino, N. Hisanaga, Y. Itaya

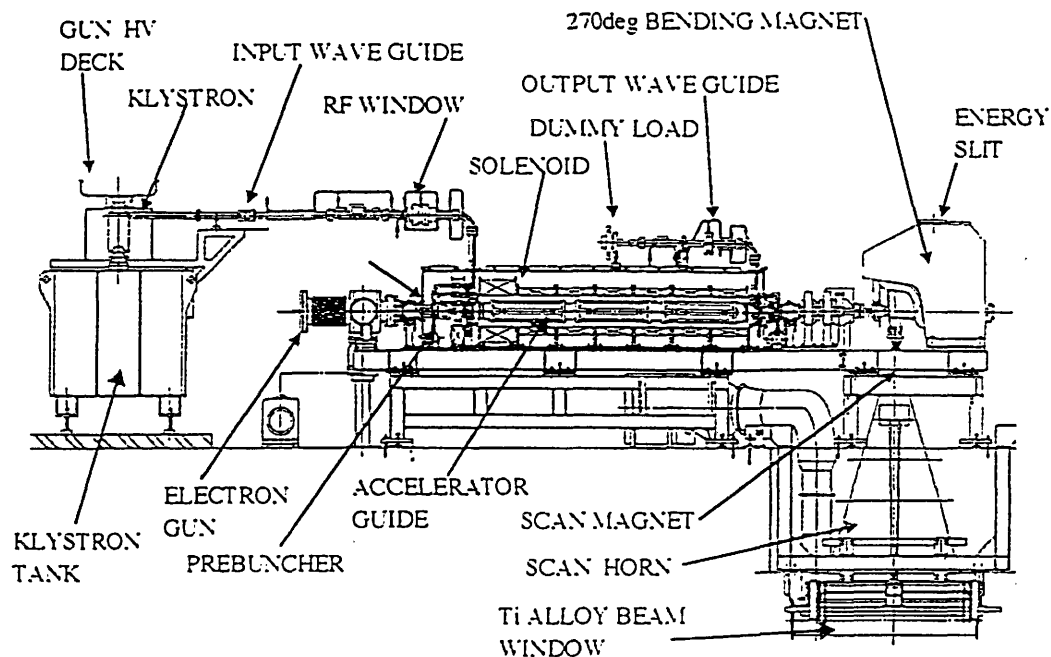
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagoya Aerospace Systems
10 Oye-Cho Minato-ku Nagoya, 455 Japan

ABSTRACT

A 10MeV 25KW class electron LINAC was developed for sterilization of medical devices. The LINAC composed of a standing wave type single cavity prebuncher and a 2m electro-plated traveling wave guide uses a 5MW 2856MHz pulse klystron as an RF source and provides 25KW beam power at the Ti alloy beam window stably after the energy analyzing magnet with plus-minus 1 MeV energy window. The practical maximum beam power reached 29KW. The control of the LINAC is fully automated and realized the "One-Button Operation" which is valuable for easy operations as a plant system. 2 systems have been delivered and are being operated stably.

10MeV 25KW級電子滅菌用リニアックシステムの開発

図-1 リニアックシステムの概略構成図

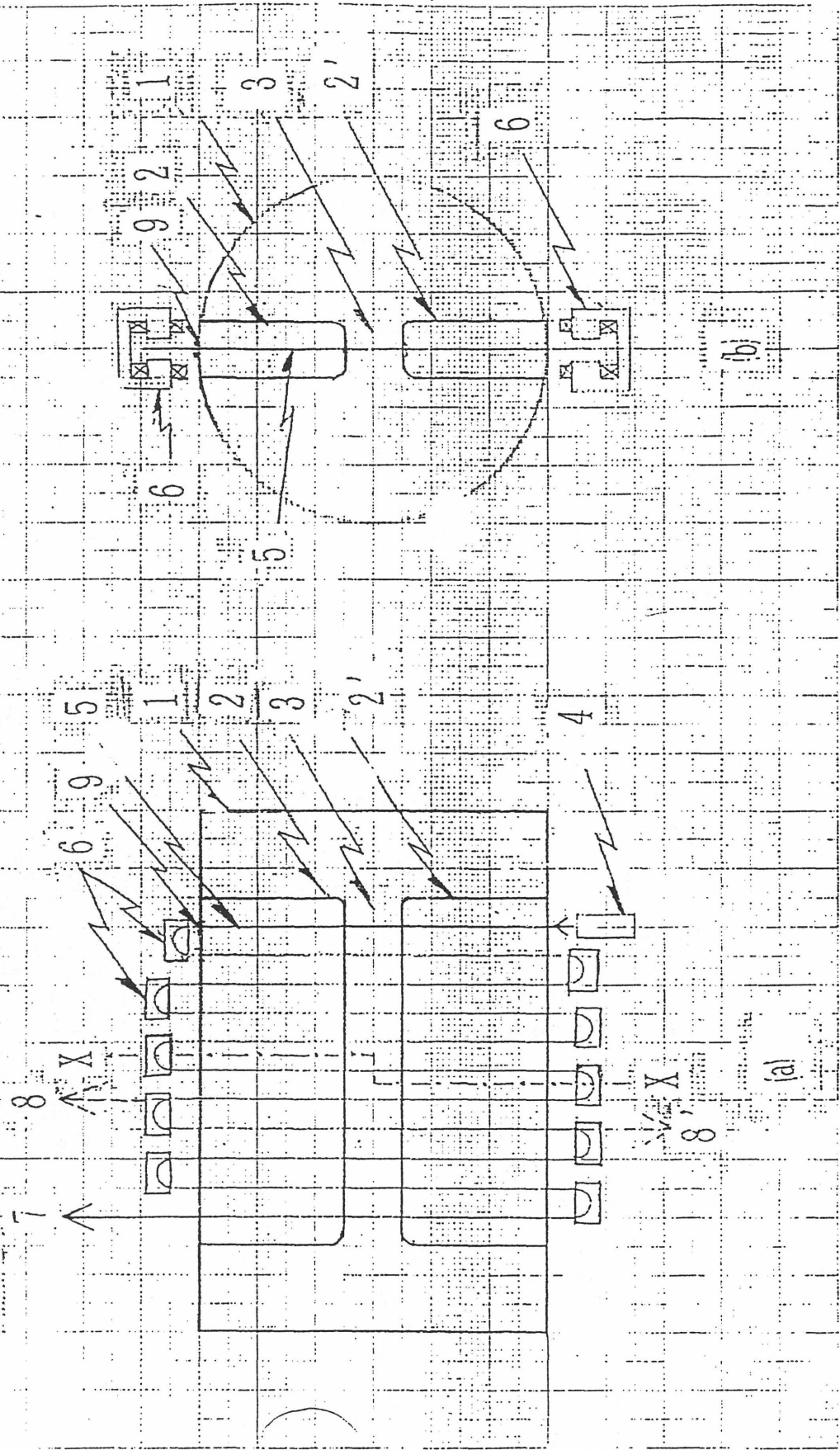


Beam Energy	: 10.0 MeV
	variable from 9 to 11 MeV
Energy Spread	: 1 MeV (90% beam current)
Beam Power at	: 25 KW (guaranty) PPS=550 Hz
beam window	: 29 KW (actual) PPS=630 Hz
PPS	: 700 Hz (Max)
Beam pulse width	: 13.5 micro sec
Beam current	: 340 mA peak
Frequency	: 2856 MHz
Klystron power	: 5 MW peak
Irradiation Surface	: 60 cm from the beam window
Beam spot size	: 16 cm diameter
	on the irradiation surface
Beam Scan Width	: 30 cm to 80 cm variable
Scan Frequency	: 5.1 Hz (Typical)
Scan Uniformity	: plus minus 2%

医療器具滅菌用新型電子加速器

(逆転レーストラックマイクロトロン)

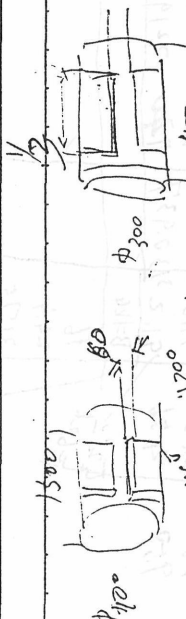
[図1]



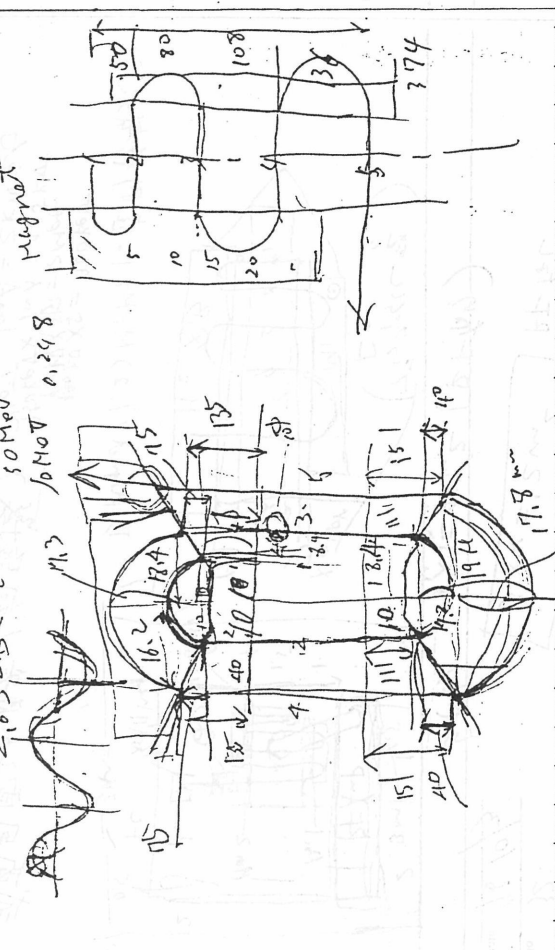
P 9938 M07
1.5.4 Tm
09.09.28 Tm

$$BP = \frac{1}{300} (T + 273.15) \frac{1}{A}$$

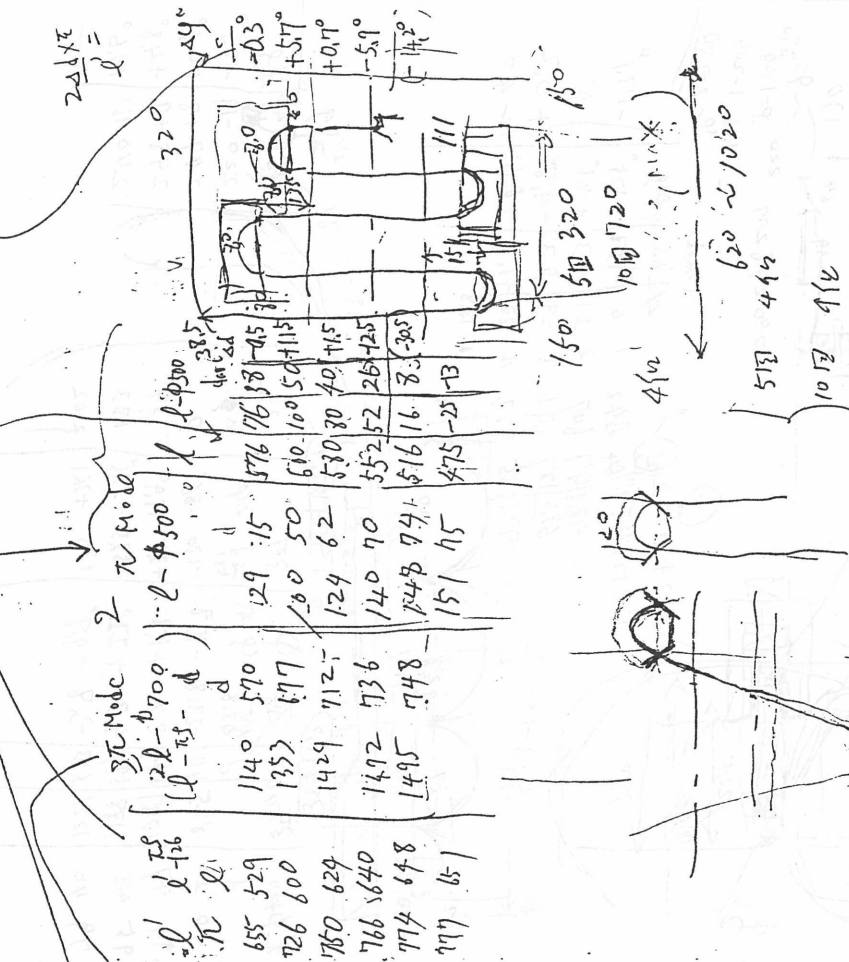
$$t = \frac{1}{2.3} \ln \frac{1835.6}{A}$$



400K	5.0 B/W	400K	β	β	β	β	β
2251	402	25	0.83	1916	1940	25	0.83
5.94	1200	40	0.92	2779	2052	40	0.92
6.33	1600	54	0.95	2250	2124	54	0.95
8.195	2000	68	0.97	2298	2172	68	0.97
9.55	2400	82	0.98	2321	2145	82	0.98
		96	0.984			96	0.984



在相控阵中0.50K
φ 8.2 ~ 9.7



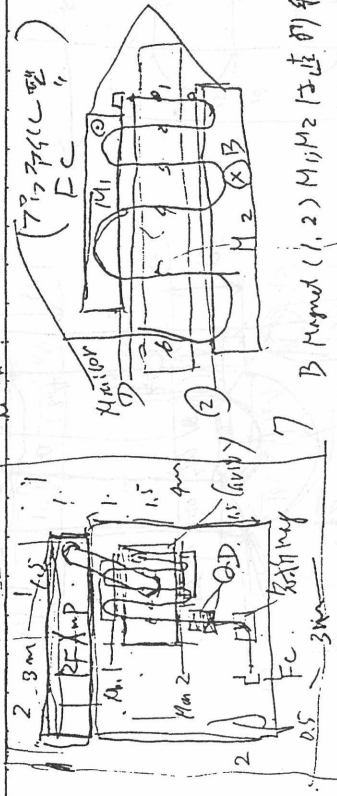
- β-型阵列
1. -0.1 ~ 5.0° 的相位 2.2912 ~ 1.12 = 0.5C 5.7LPL
 2. Varco 阵列 LIT 安装在 12 号 < 3. 相位 0.9901 到 0.9999
 3. RT Amp 3 号 2.3 号 2.7 号 3.1 号 3.5 号 4.1 号 4.5 号
 4. 精密的 频率 5.8
 - 5.

No 32

Date 96/10/3

$3 \times 4 = 12 \text{ m}^2$ PF 7.2L

$6 \times 7 = 42 \text{ m}^2$ (PF 7.0)



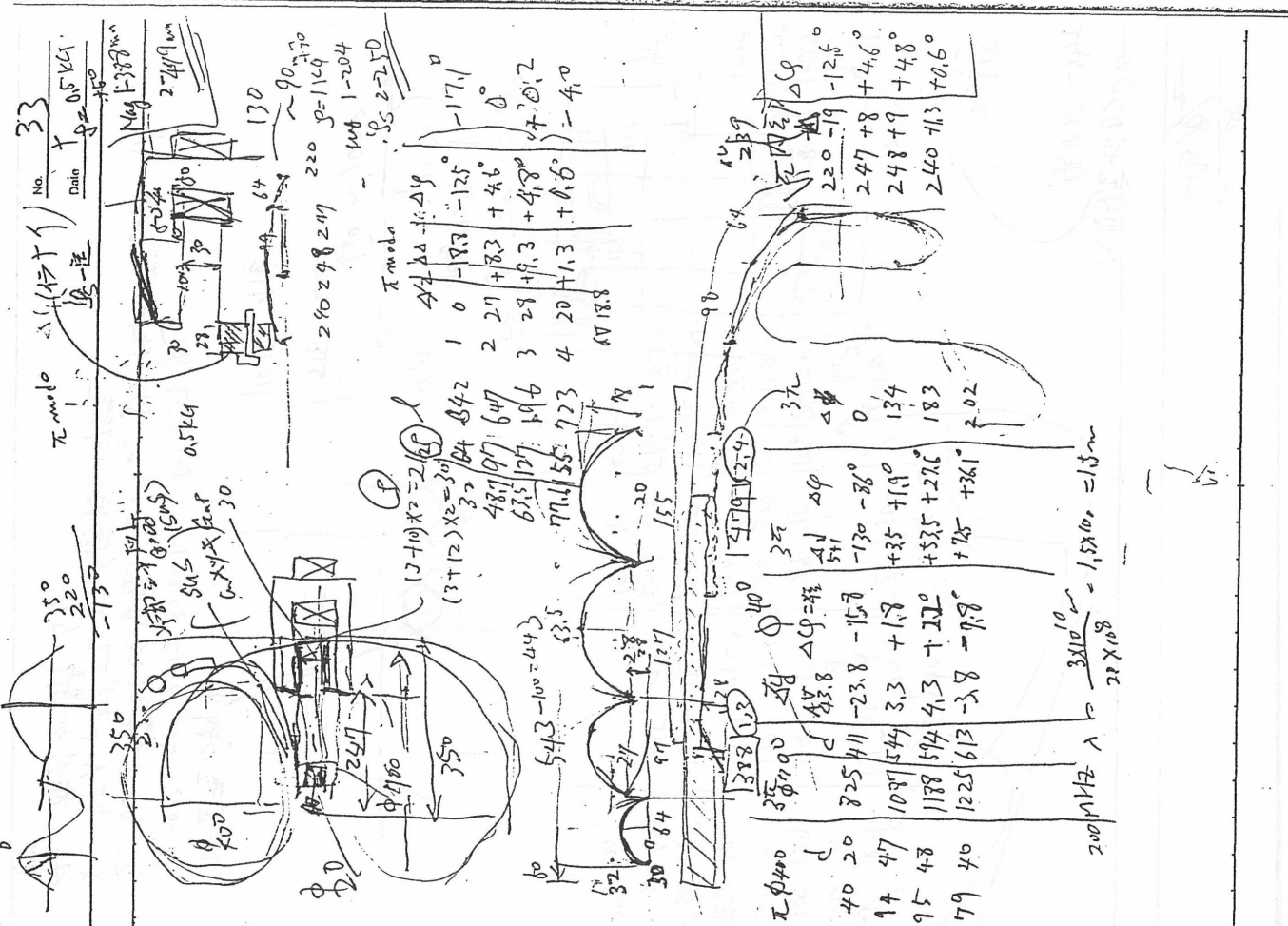
戒蓋用電子加速器 (封裝機) 逆回線型 2 个 0.1 m x 1.0 m
 10 MeV $I_{\text{an}} = 2 \text{ kV}$ 40
 $900 \text{ kV} \times 5 = 950 \text{ kV}$
 $400 \text{ kV} \times 5 = 2000 \text{ kV}$
 $950 \text{ kV} \times 1 \text{ mA} = 0.95 \text{ kW}$
 B Magna (1.2) $M_{11}M_{22}$ (正確) 輕便式
 10 MeV $S_{\text{an}} = 50 \text{ kV}$
 1 MV $X_{10} = 10 \text{ MeV}$

計算機 以 聖聖 2 XIRS (IT) (x)

$950 \text{ kV} \times 1 \text{ mA} = 0.95 \text{ kW}$
 $190 \text{ kV} \times 10 \text{ mA} = 1.9 \text{ MeV}$

Er	BS V_{an}	β	$\rho(\text{r})$ mm	ΔMod cavity $\rho_{\text{r}} - \rho_{\text{r}} \text{ p}$	ΔMod cavity $\rho_{\text{r}} - \rho_{\text{r}} \text{ p}$
190 kV	160	0.685	541	1622	3E
330 kV	243	0.719	647	1940	$\rho_{\text{r}} - \rho_{\text{r}} \text{ p}$
570	318	0.891	696	2097	
760	388	0.916	723	2169	
950	456	0.912	770	2219	
	$B=119$				
	16			4910	
	244			57140	
	3175			59659	
	388			60155	
	45.6				

ΔMod cavity $\rho_{\text{r}} - \rho_{\text{r}} \text{ p}$



小型リングによるクラスターイオンの 加速、蓄積の研究

東京工業大学・原子炉工学研究所

服部 俊幸

研究目的

- 1) クラスタ (C₆₀) 多価イオンを生成し加速し、蓄積して
クラスタバンチビームを発生させる
- 2) 非線形インパクト反応の物理現象を開拓する

研究方法

- 1) C₆₀ 多価イオン生成装置の開発
- 2) プレ加速と効率良いビーム輸送系の開発
- 3) 小型リングに入射、蓄積、加速、取り出しの研究

8aH6

クラスターイオン加速の基礎研究

東工大原子炉研

吉田拓司、服部俊幸、笹公和、伊藤崇、林崎規託、五十川克士、馬島哲

Basic Study of Clusters-ion Acceleration

Research Laboratory for Nuclear Reactors Tokyo Institute of Technology
T. Yoshida, T. Hattori, K. Sasa, T. Ito, N. Hayashizaki, K. Isokawa, S. Majima

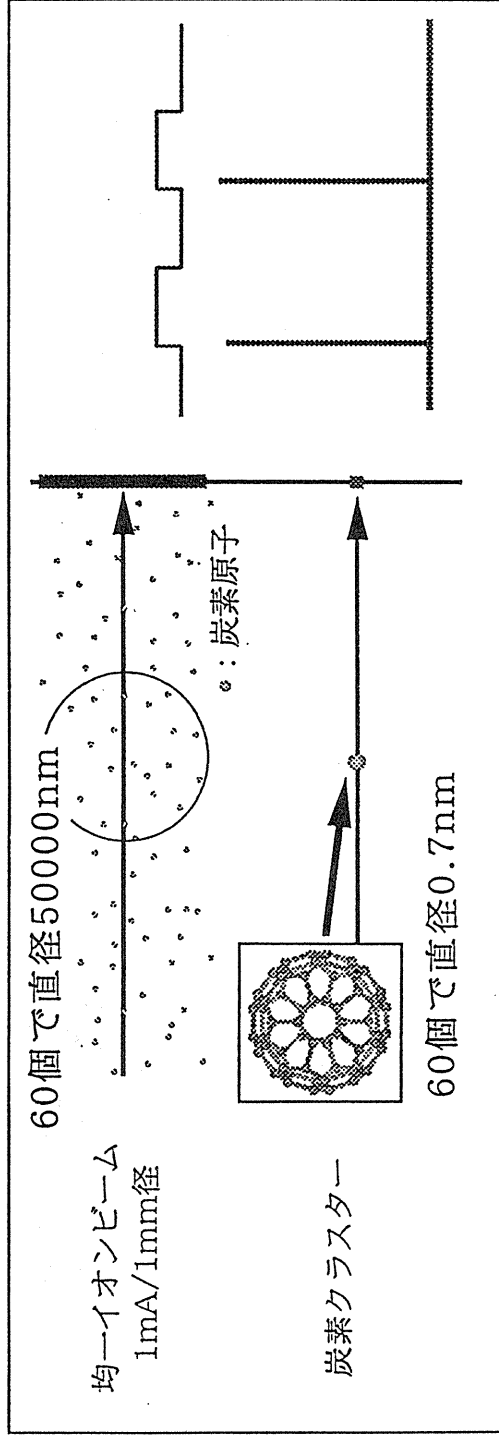
発表内容

1. 本研究の目的と研究計画
2. 実験システムの概要
3. 実験結果
4. まとめと今後の課題

1. 本研究の目的と研究計画

クラスターのパルスパワーとしての特性

- ☆微小領域に高エネルギーが集中する
- ☆非常に短い高速パルスビーム



多方面でこの非線形効果の研究が想定されている。

(慣性核融合の打ち込み、化合物クラスター等の局所的な注入による新素材の開発、他)



効率よくクラスターイオンを発生して加速する必要がある。

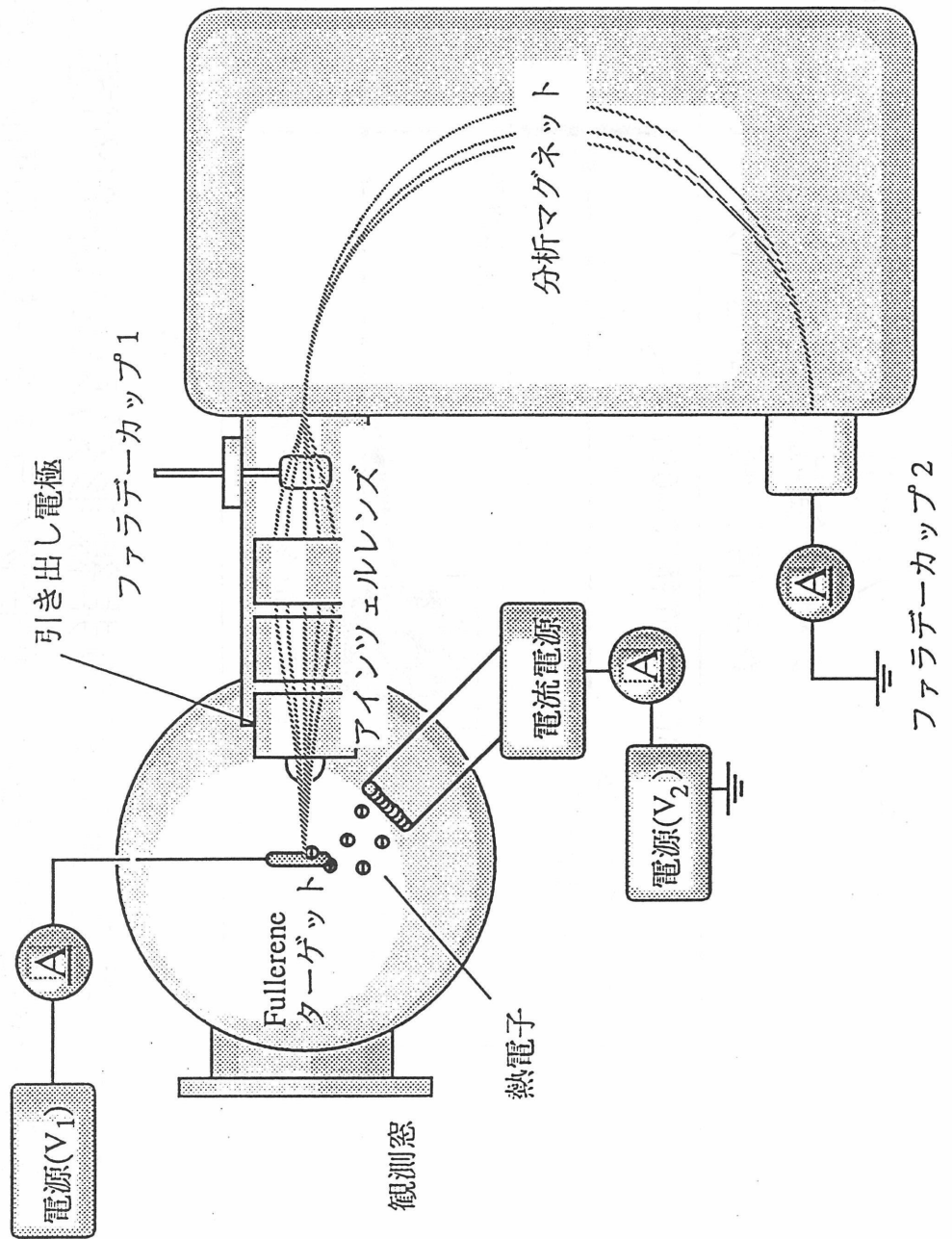


クラスターイオン発生諸条件の最適値を求め。

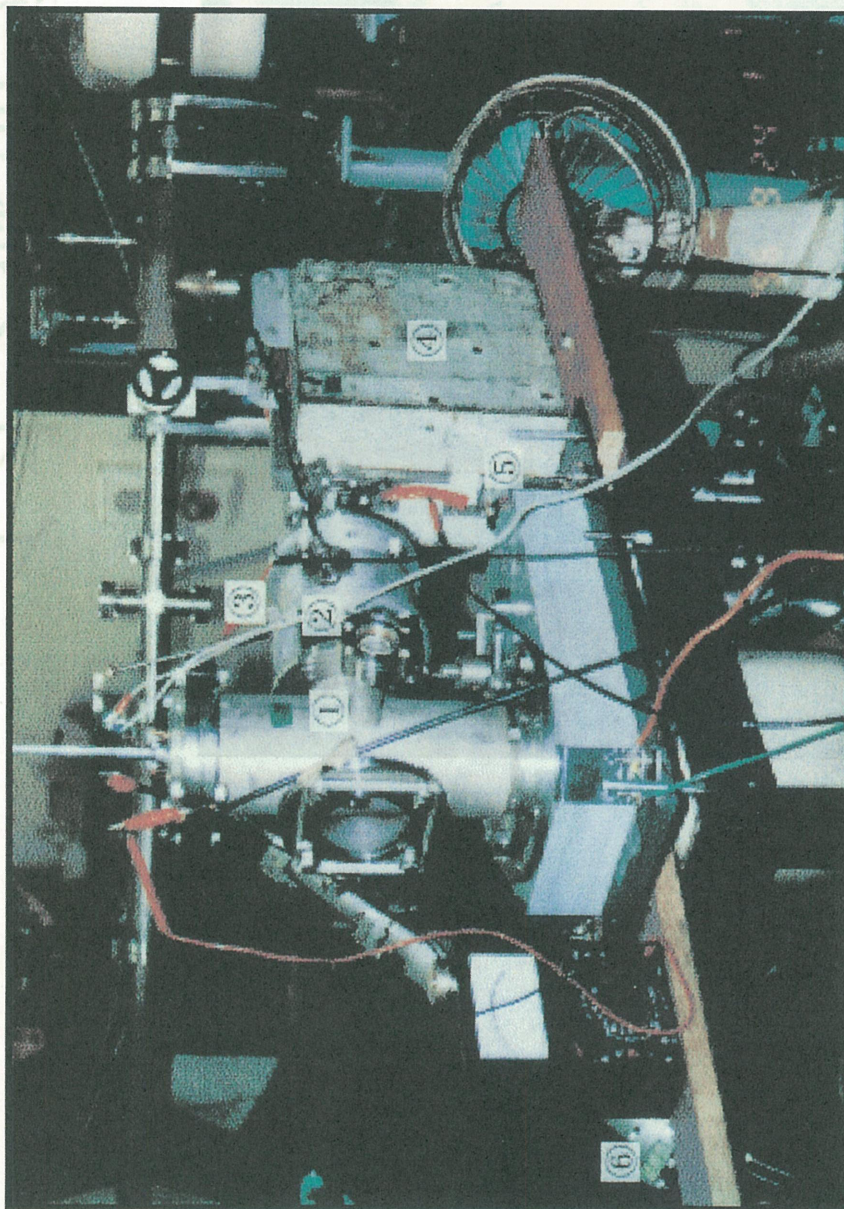
2. 実験システムの概要

★実験法

- ①ターゲットに+印加。
- ②熱電子をあてる。
- ③アース電極で引き出し。
- ④アインツェルで収束。
- ⑤磁気分析器で分析。
- ⑥F.C.で検出。

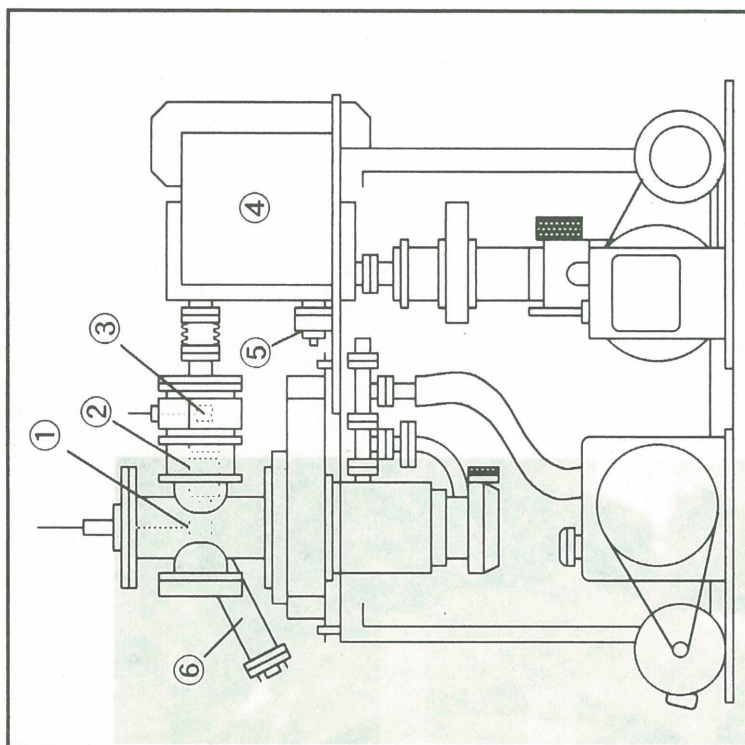


実験装置外観



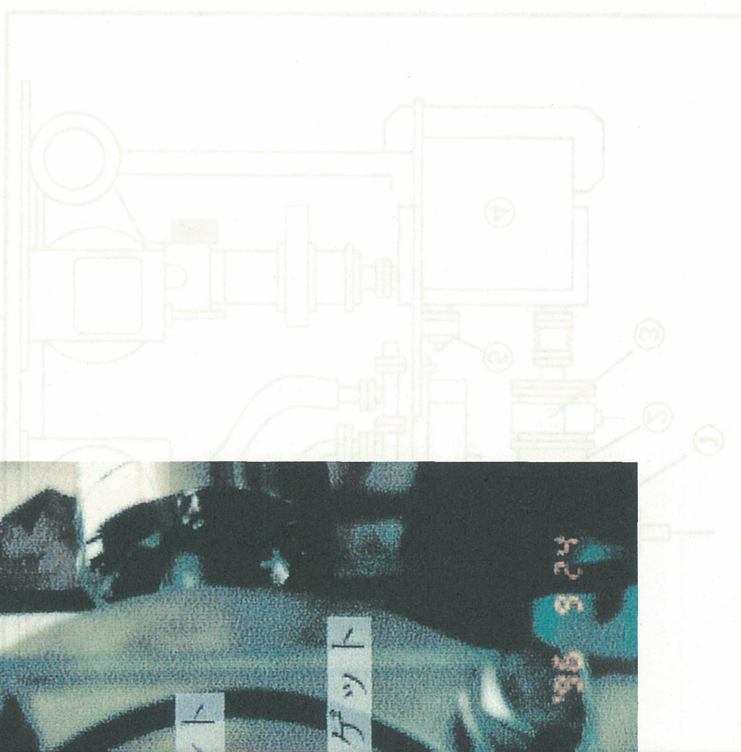
全体写真

- ①ターゲット部
- ②アインツェルレンズ
- ③F.C.1
- ④分析マグネット
- ⑤F.C.2
- ⑥四重極質量分析器



全体図

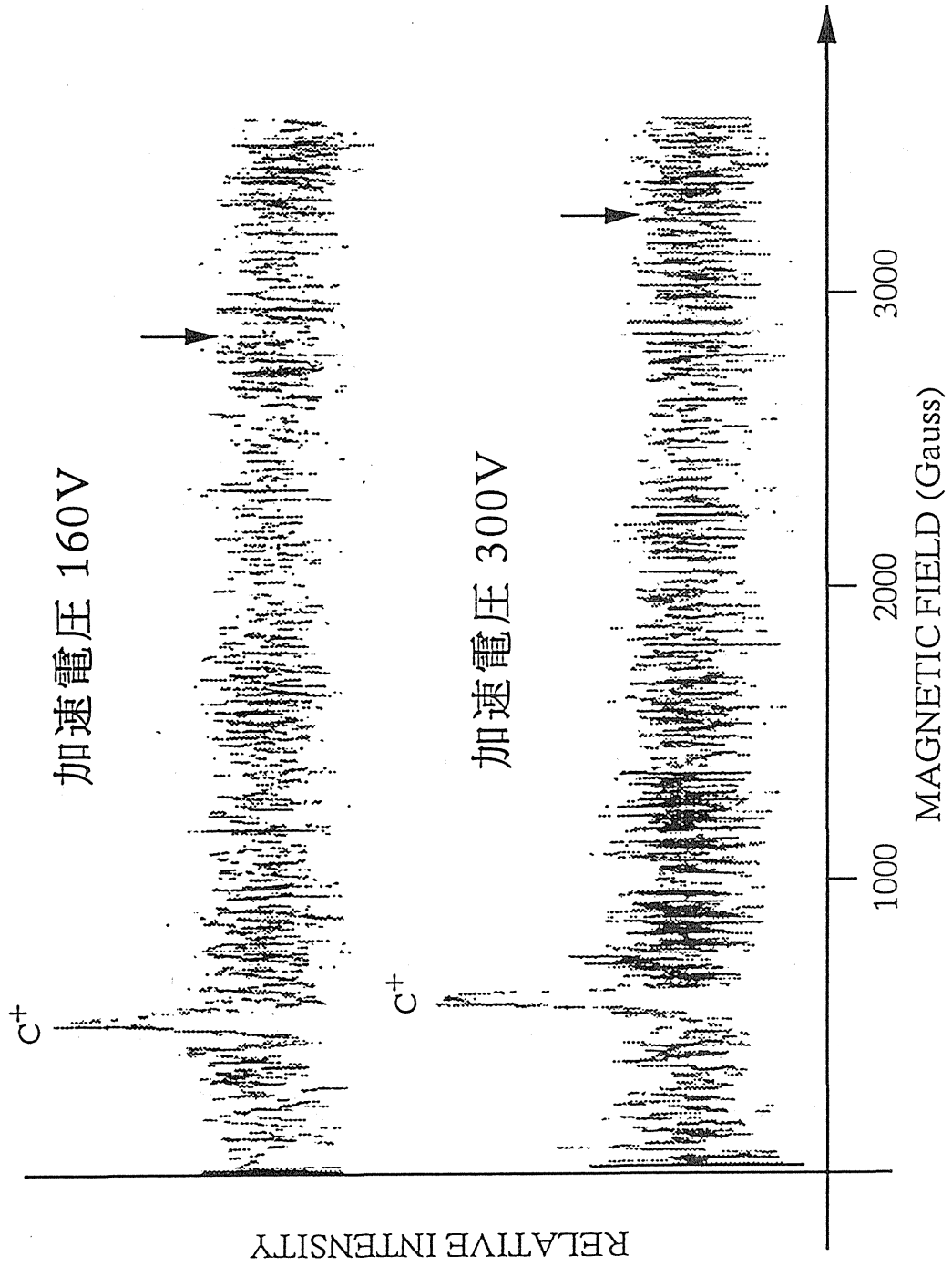
電子源部写真



図本全

- ① トックスタータ
- ② S.O.F
- ③ I.O.F
- ④ トックスタータ
- ⑤ ステムヘッド
- ⑥ 器体質量耐重四

3-3 フラールンターゲットでの測定結果 (加速電圧小)



アンジュオグラフィー用放射光リングの 準備研究

東京工業大学・原子炉工学研究所

服部 俊幸

アンジュオグラフィー用放射光(AG-SR)リングの 特徴

- 1) 数 GeV の SR リングからの放射光を 2.5 GeV の SR リングで発生させる
- 2) 8~10T の超伝導ウイグラーで X 線領域のウイグラー光を効率良く発生させる

アンジュオグラフィー用放射光(AG-SR)リングの 開発研究対象

- 1) 10T 超伝導ウイグラー(SCW)の製作技術開発
- 2) 超伝導ウイグラーの強い磁場(10T)による SR 内での粒子のパーターベーション効果の研究

研究目的

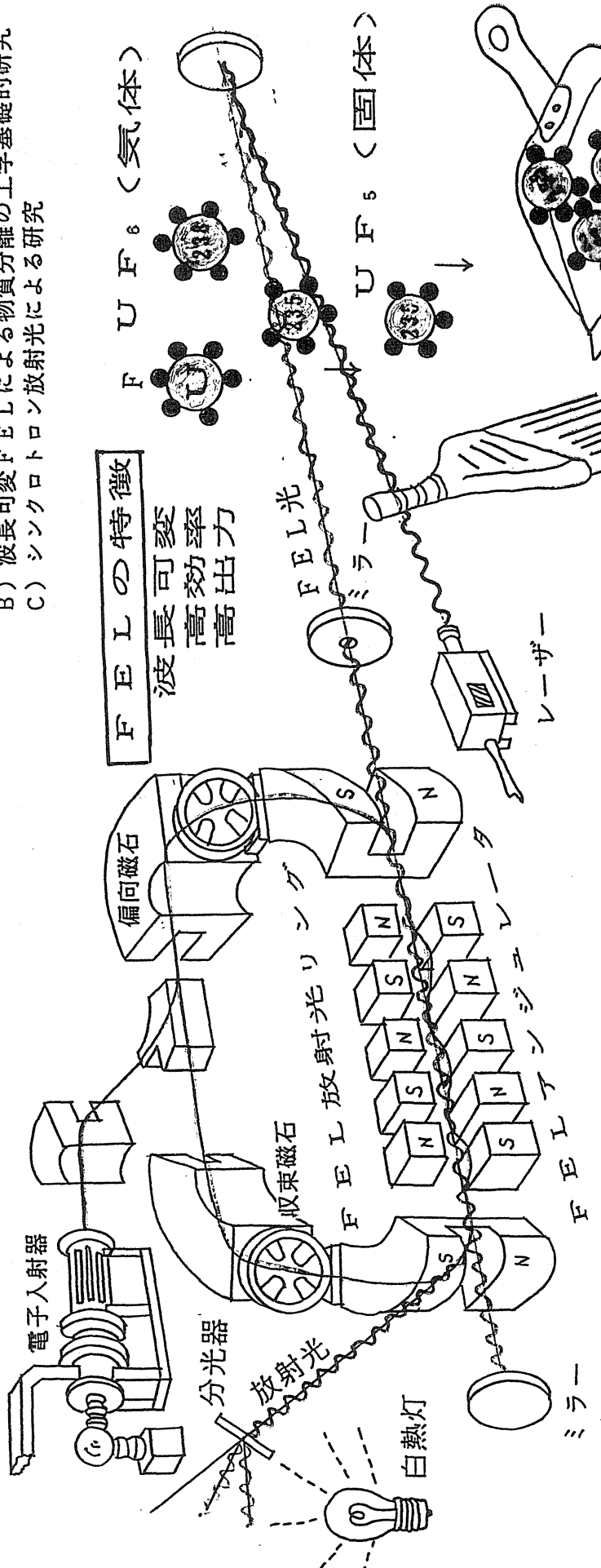
強磁場(10T) ウィグラーによる SR 内の
粒子のパーターベーション効果の研究

研究方法

- * 2.5GeVSR と 10TSCW による研究(現実に不可能)
- * 250MeV の SR と 1TSCW による研究
100MeV の SR と 4kG 常伝導ウィグラーによる研究
 $\eta = \eta' = 0$ の直線部を持つシンクロトロンが必要
- * 東工大 FEL-CAS 放射光リング(35~300MeV)
入射エネルギー 35/100MeV(e-Linac/マイクロトロン)
最大エネルギー 300 MeV
 $\eta = \eta' = 0$ の長直線部を持つレーストラック型 SR リング
自由電子レーザー(FEL)専用放射光リング
- * 東工大 FEL-CAS リングを完成させ直線部に超
又は常伝導ウィグラーを挿入して粒子のパー
ターベーション効果の研究を行なう

「光量子工学実験装置」

自由電子レーザー (FEL) 専用小型放射光リング



FELの特徴
 波長可変
 高効率
 高出力

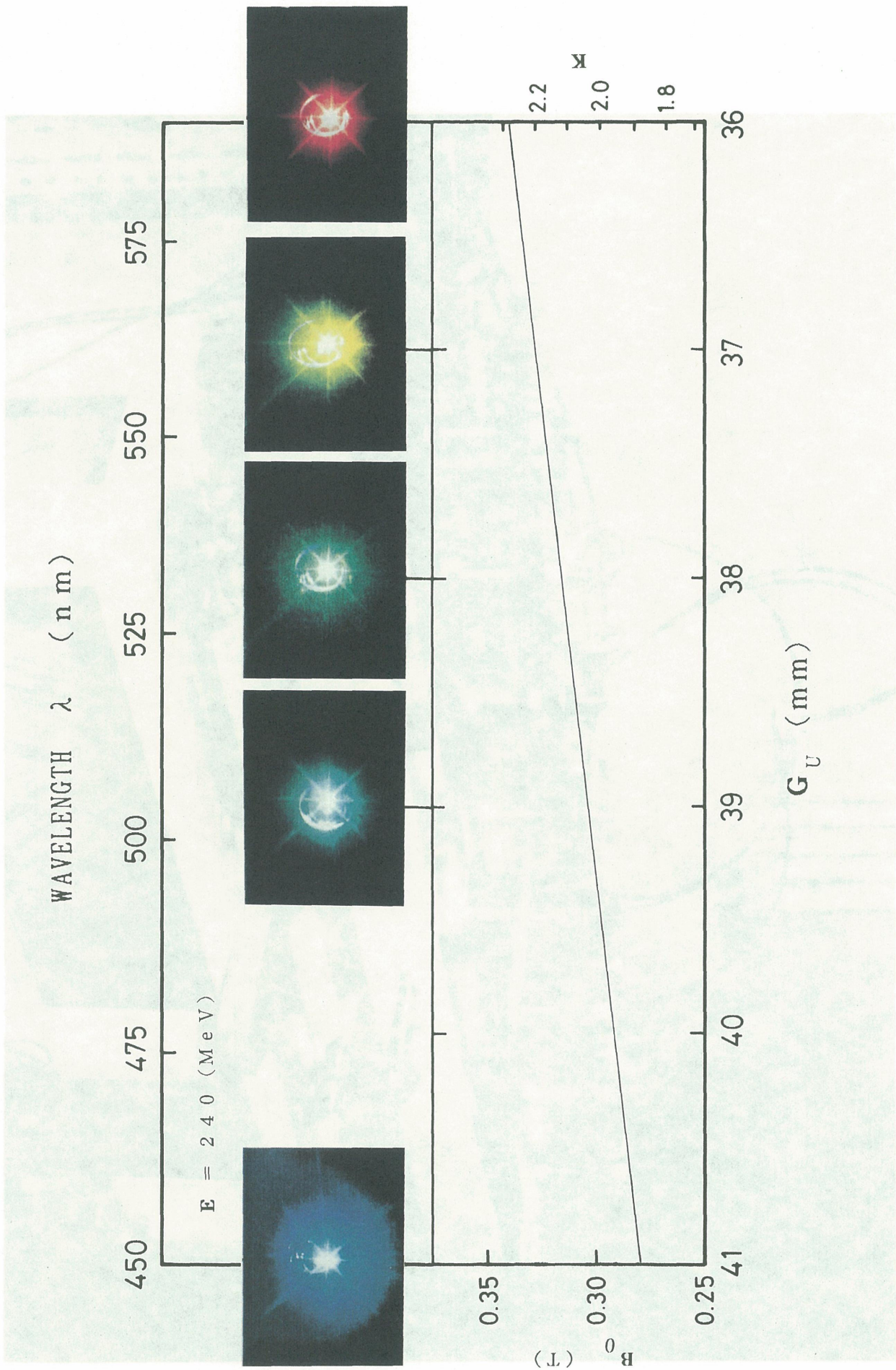
研究目的、内容

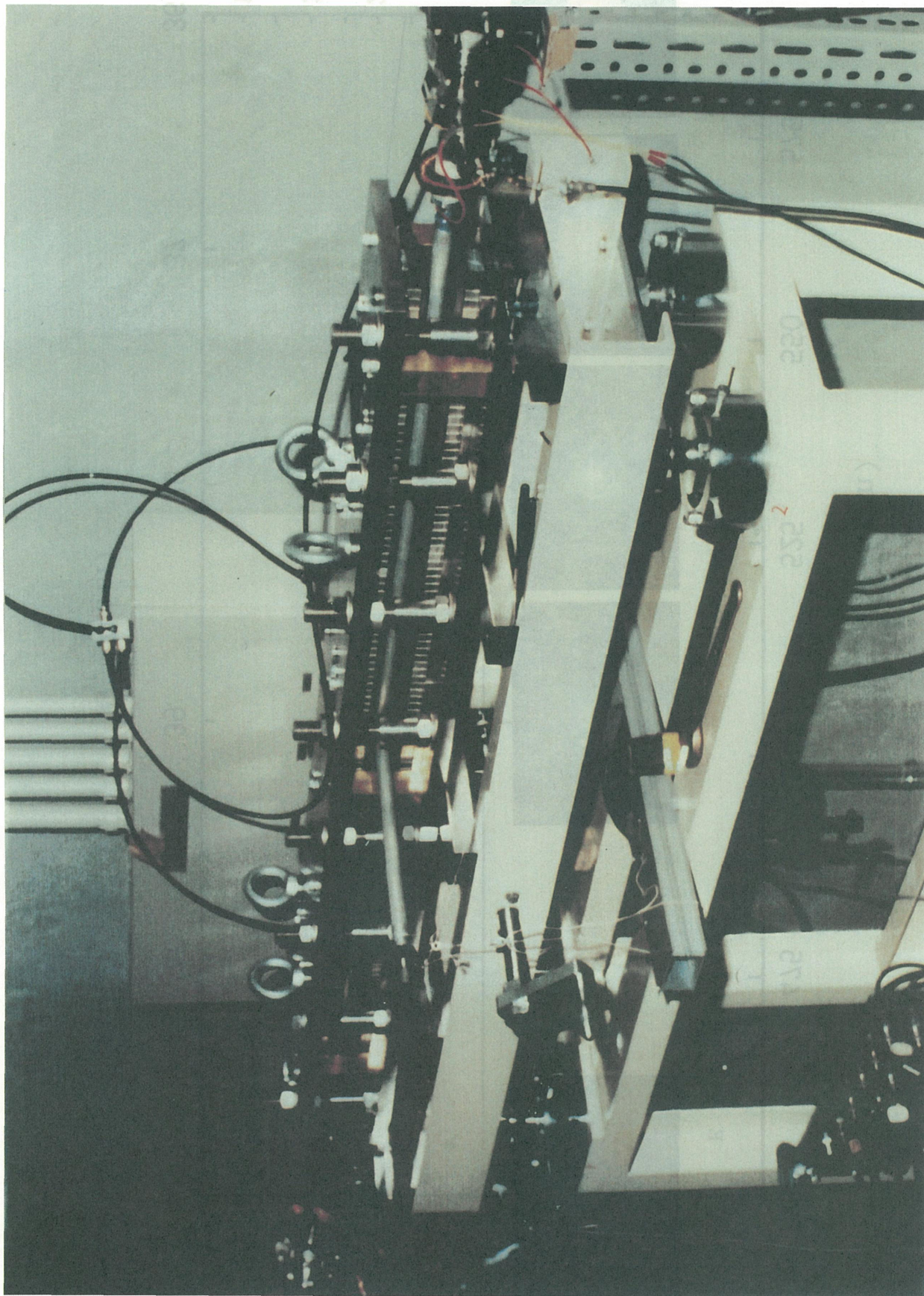
- FEL専用小型放射光リング (光子工学実験装置) 建設
- A) 小型放射光リングによるFEL研究
 - B) 波長可変FELによる物質分離の工学基礎的研究
 - C) シンクロトロン放射光による研究

FEL専用小型放射光リングの特徴

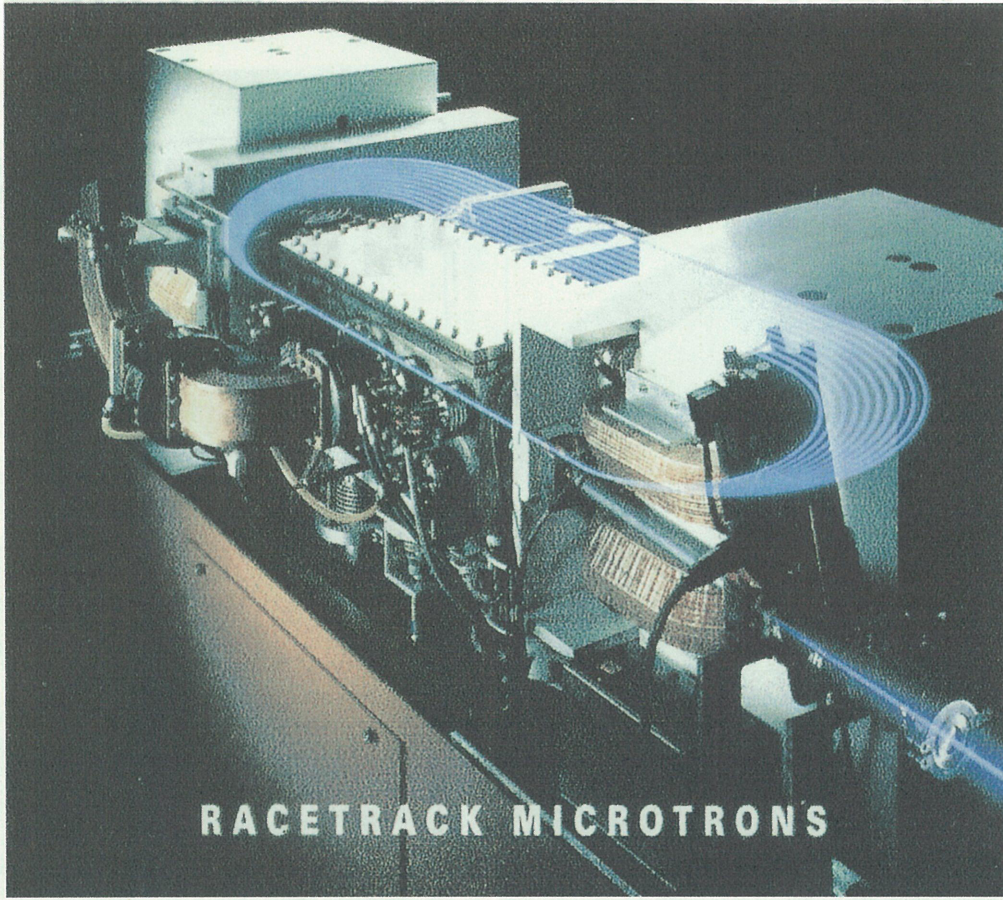
1. 電子エネルギーを変えることで高速に可変
2. FELレーザー光源の強弱、大きさを高速で可変
3. 低エネルギーの入射電子線形加速器からの電子でも放射光リングの中で高品位化、高強度化が可能

レーザーラマン同位体分離



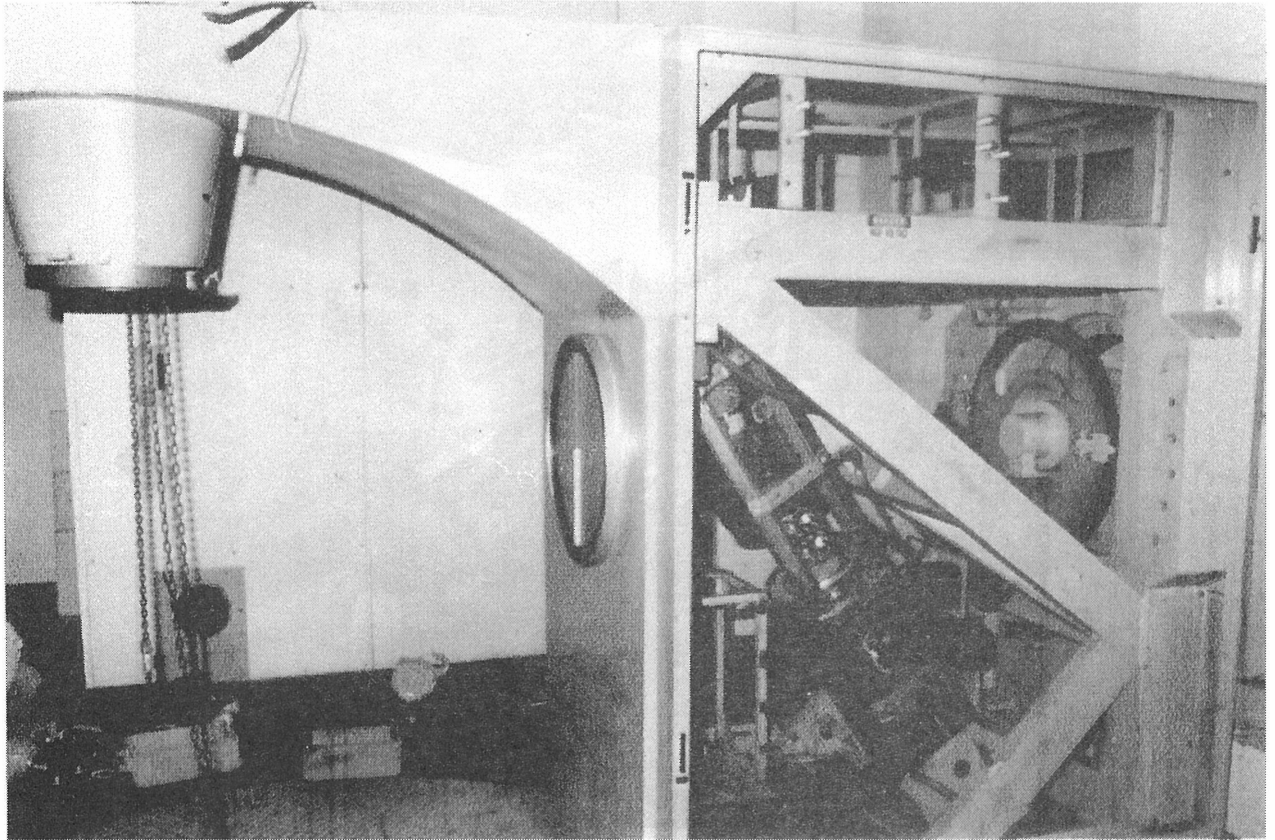


100MeV Injector Racetrack Microtron



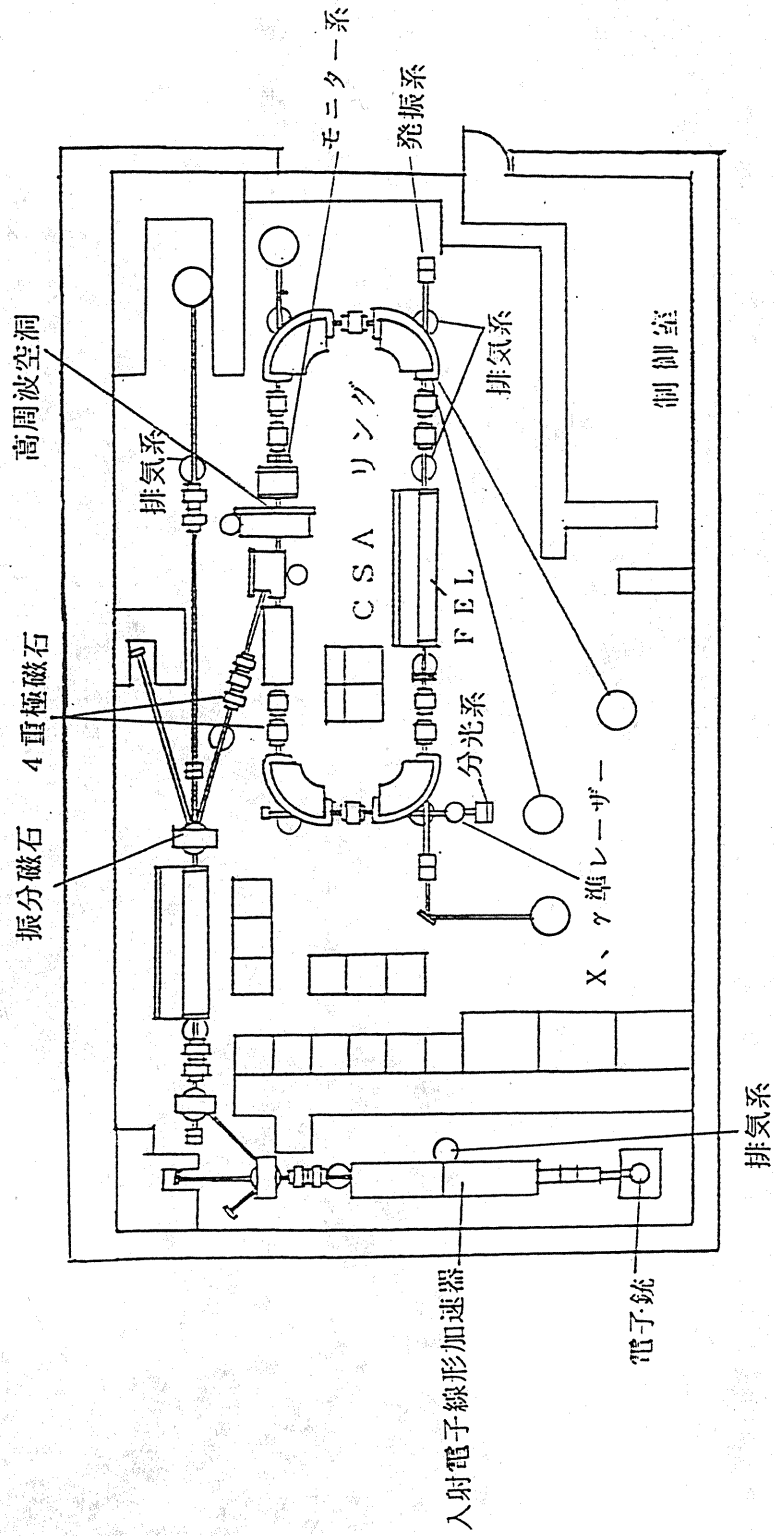
Electron energy	100 MeV
Beam current	25 mA
Emittance, vertical and horizontal	0.1π mm · mrad
Energy spread	± 0.1 %
Pulse length	0.1-5 μ s
Pulse repetition frequency	0-300 Hz

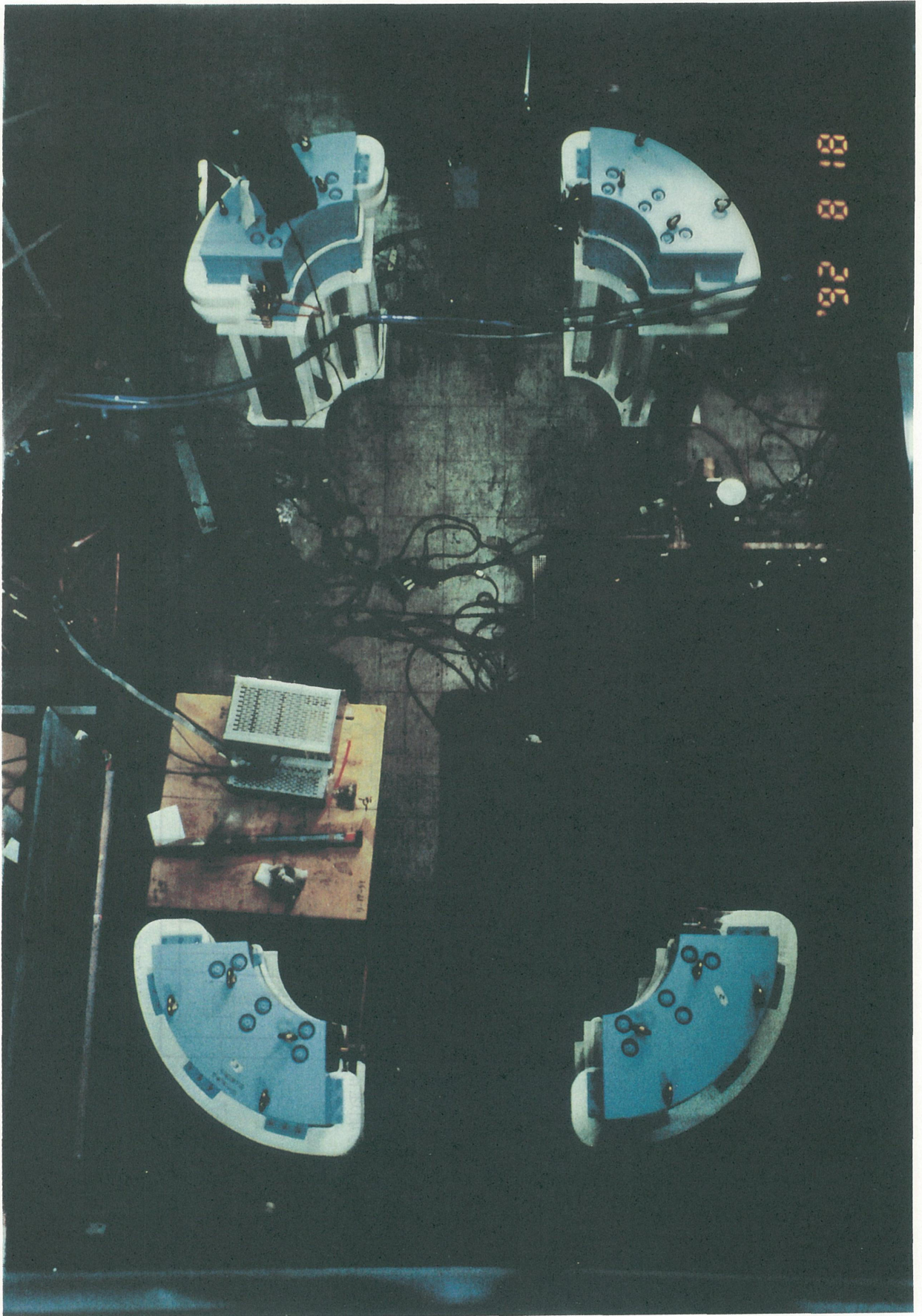
Injector Linac (NELAC-4030)

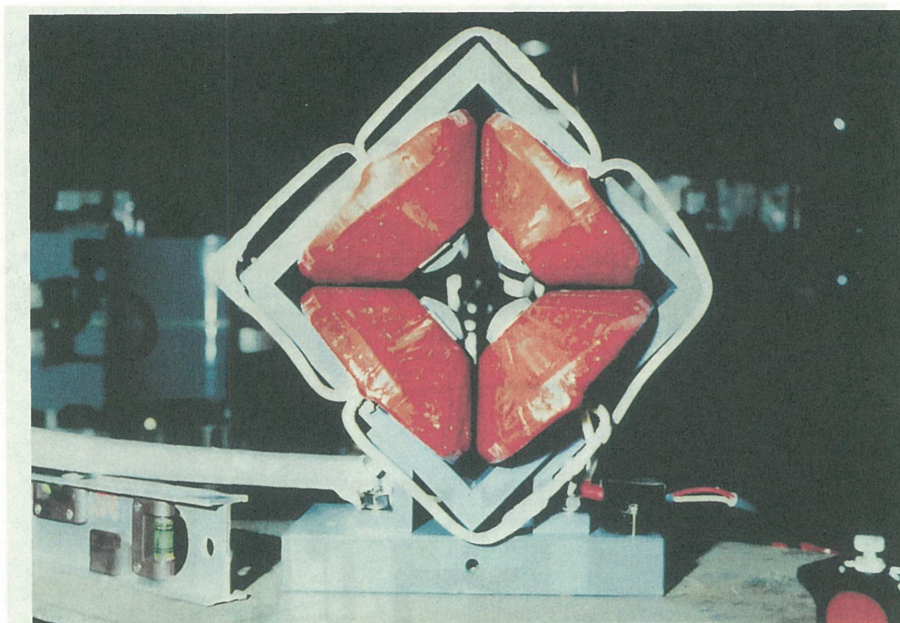


Energy	35MeV (Max. 40MeV)
Beam Current	150mA (~50mA)
Beam Width	3.3 μ S
Structure	2/3mode, Traveling Wave type
No. of Cell (Bunchet)	71(9)
Length	247cm
Operation Frequency	2856MHz
Repetition	21MW(10kW av.)

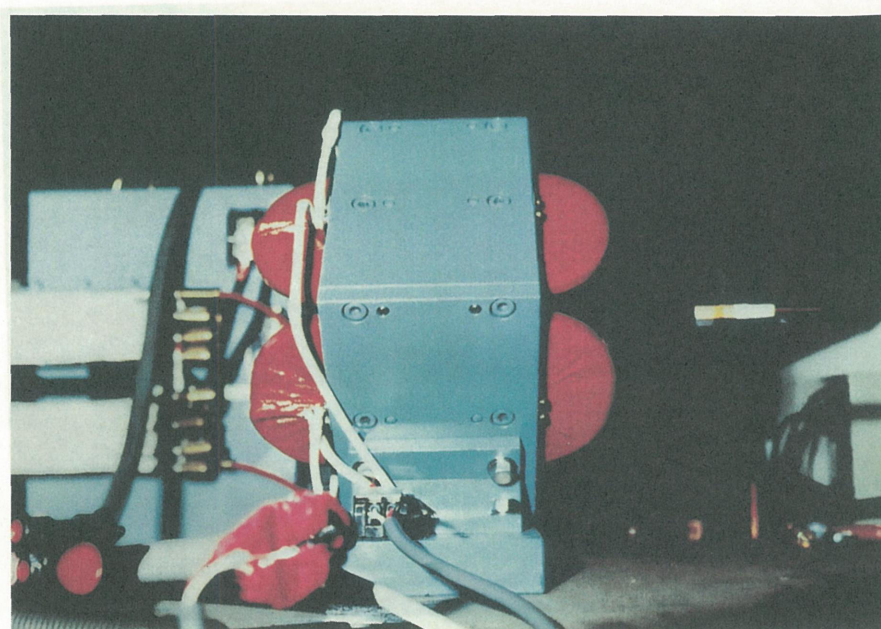
X、 γ 線準レーザー研究実装装置配置図



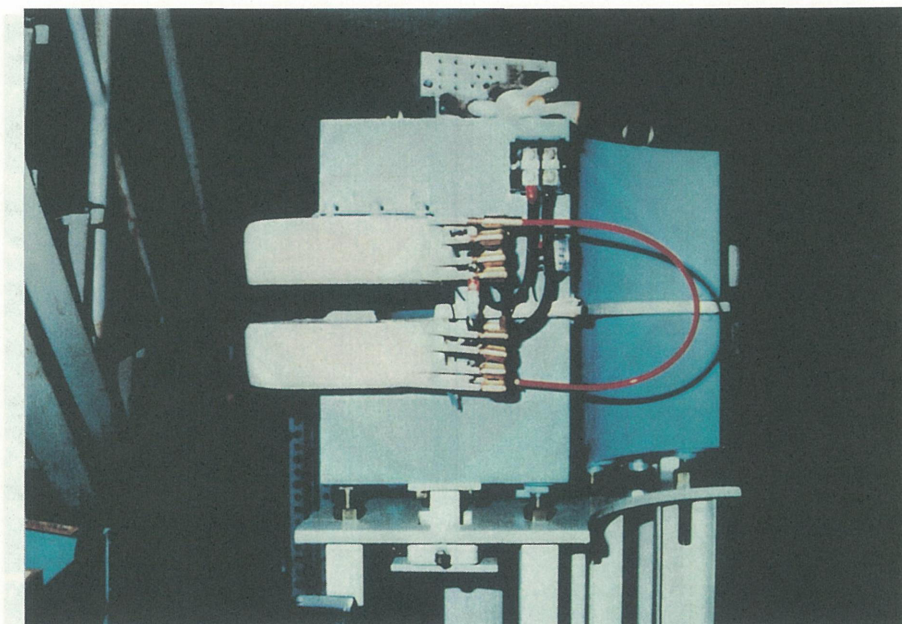




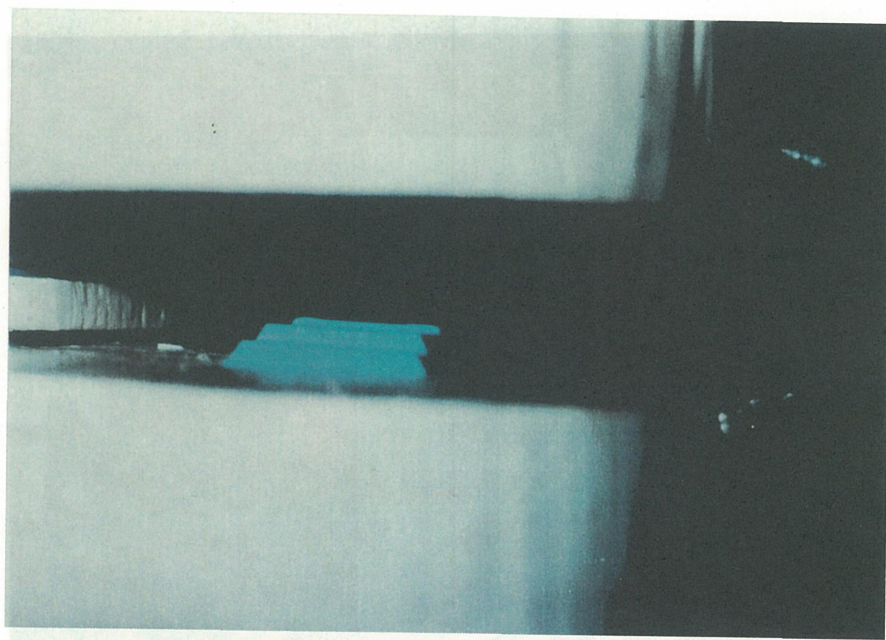
完成した四重極電磁石の正面図



四重極電磁石の側面図



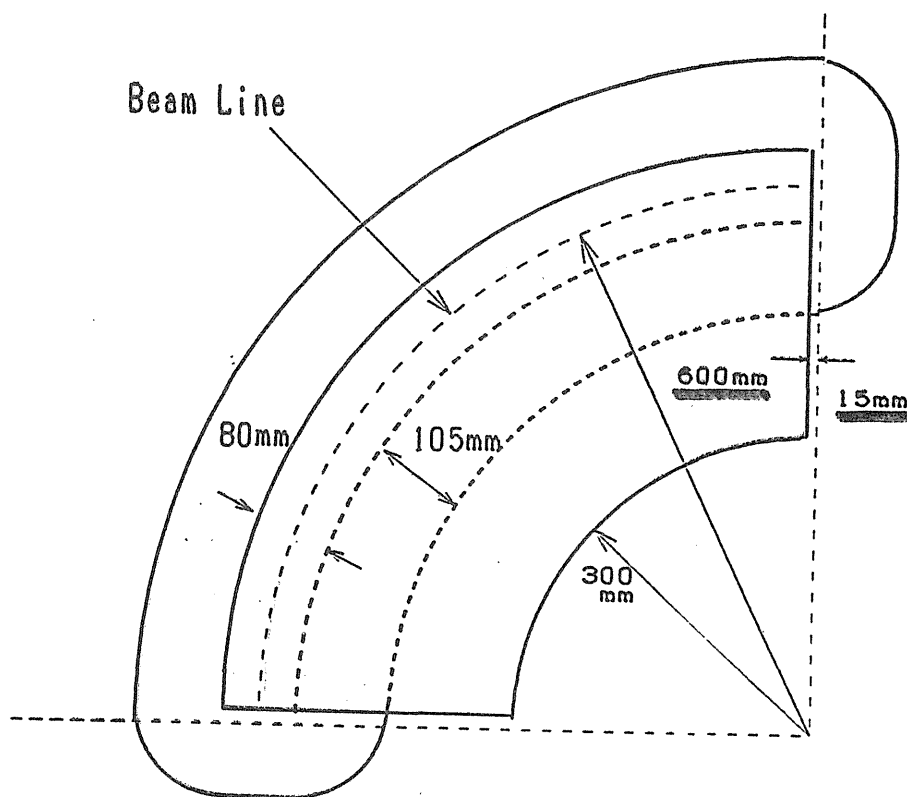
偏向電磁石の完成写真



磁極端面のロゴスキーカットの様子

電磁石数	4 個
曲率半径 (設計値)	60 cm
偏向角	90°
中心部のギャップ高	2.6 cm
n 値	0
磁極幅	8 cm
磁場強度 (計算値)	1.67 T (25000 A·T)
コイルの巻数	216回 / pole
コイルの電流	120 A
シム形状	高さ 0.4 mm 幅 12 mm

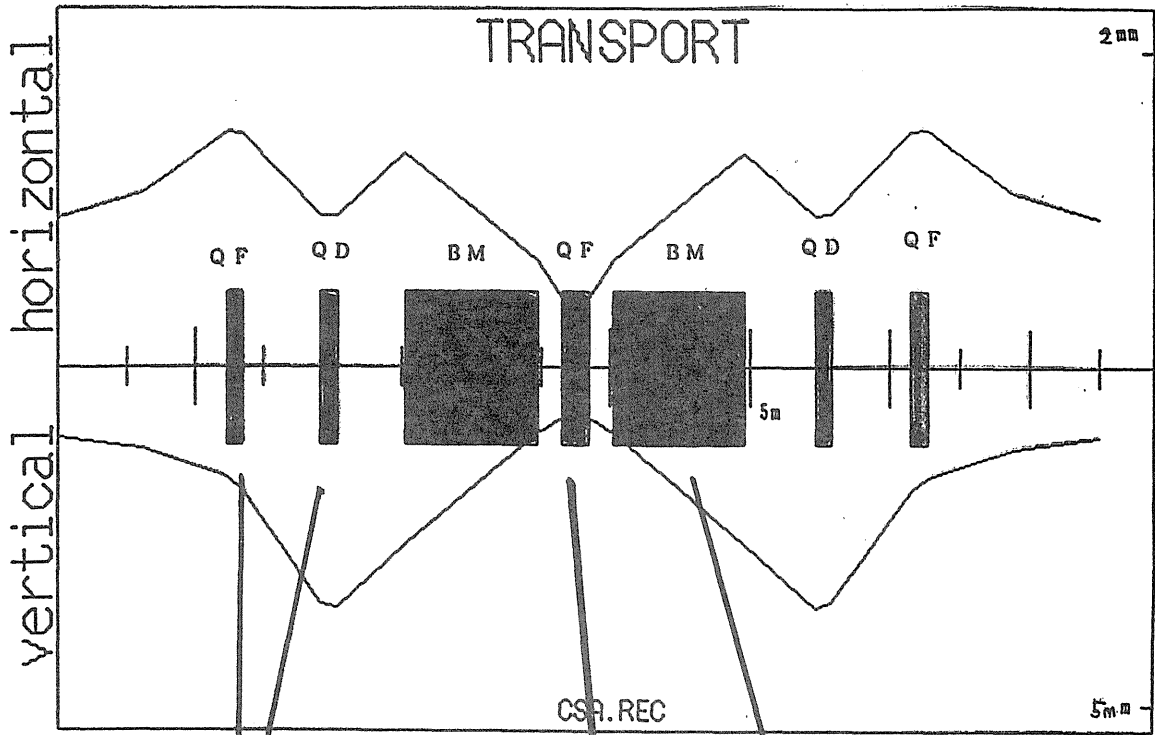
偏向電磁石の仕様



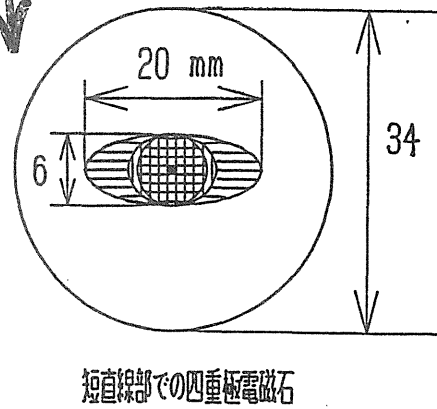
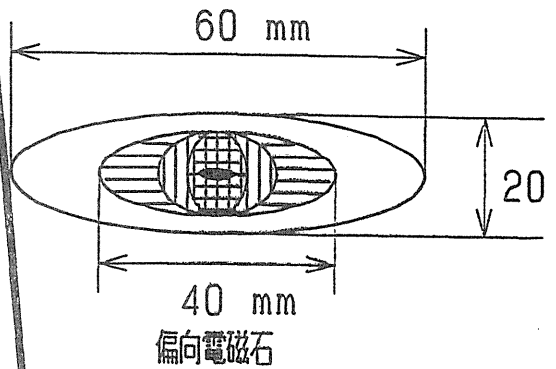
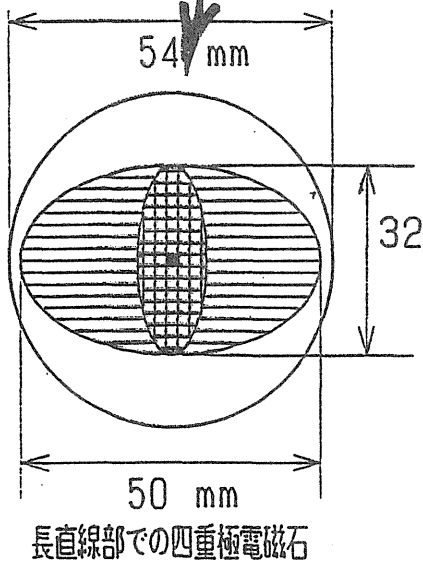
Plane view of the Bending Magnet

偏向電磁石の平面図

CSAリングのビーム径



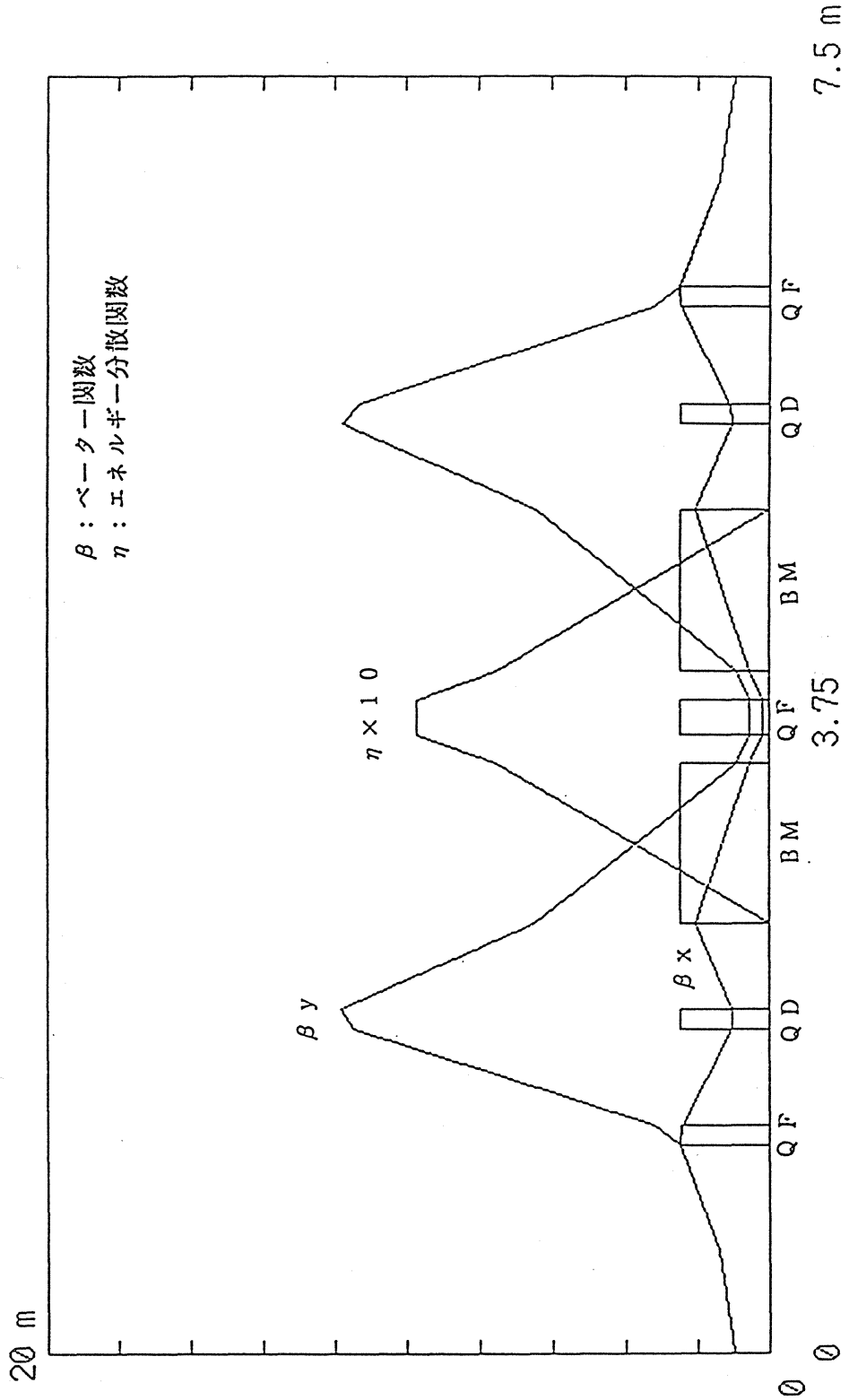
CSAリングのビームエンベロープ



- クリアランス
- 入射時のベータロン振幅
- 運動量分散による広がり
- ダンピング以前のベータロン振幅
- ダンピング後のビームスポット

必要アパーチャーの算定

分散関数とラテイスパラメータ

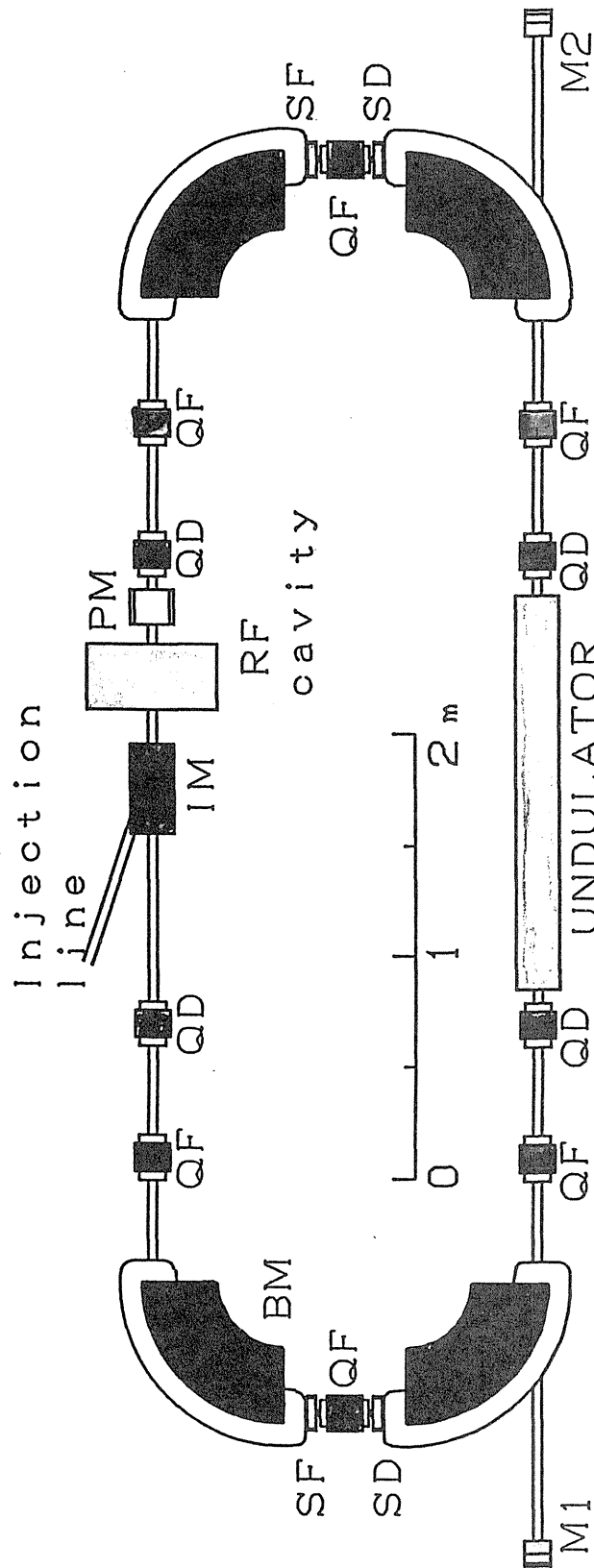


C S A リングの主要パラメータ

BEAM ENERGY (MAX ENERGY)		<u>35 (300) MeV</u>
CIRCUMFERENCE		<u>15 m</u>
AVERAGE RADIUS	R	2.39 m
BENDING MAGNET	No.	<u>4</u>
	RADIUS OF CURVATURE	<u>0.6 m</u>
	FIELD STRENGTH	<u>1.94 (16.7) kG</u>
QUADRUPOLE MAGNET	No.	<u>10</u>
	LENGTH	0.18, 0.12 m
	FIELD GRADIENT	<u>1.8 kG/cm (MAX)</u>
LONG STRAIGHT SECTION	No.	2
	LENGTH	<u>2.43 m</u>
BETATRON NUMBER	ν_x	~2.25
	ν_y	~1.25
RF FREQUENCY		<u>100 MHz</u>
RF VOLTAGE		<u>≥ 50 kV</u>
HARMONIC NUMBER		5
MOMENTUM COMPACTION FACTOR		0.0991
RADIATION LOSS		0.204 eV (at 35MeV) 1.43keV (at 300MeV)
PRESSURE		<u>1.0×10^{-9} Torr</u>
RADIATION DUMPING TIME	τ_x	24.3 s (at 35MeV)
	τ_y	15.8
	τ_E	6.73
NATURAL EMITTANCE	ϵ_x	<u>8.7×10^{-7} mrad</u>
	ϵ_y	<u>8.78×10^{-8}</u>
BEAM CURRENT		<u>≥ 200 mA</u>
BEAM LIFE TIME		<u>≥ 60 min</u>
UNDULATOR	LENGTH	1440 mm
(Proto Type)	GAP	18-50 mm
	FIELD STRENGTH	0.75-4.7 (kG)
	K VALUE	0.34-2.11
	PERIOD LENGTH	48 mm
	NUMBER OF PERIOD	30
	WAVE LENGTH	16.5-0.074 μ m

(2)

C S A リングの平面図



- BM : BENDING MAGNET
- QF : FOCUSING MAGNET
- QD : DEFOCUSING MAGNET
- M1, M2 : MIRROR
- PM : PERTURBATION MAGNET
- IM : INFLECTION MAGNET
- RF : RF CAVITY
- SF, D : SEXTUPOLE MAGNET
- MAGNET