

大強度 C W 加速器研究会  
報告書 (1)

1992年3月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 「大強度CW加速器研究会」報告書

研究会事務局\*

## 要 旨

核変換技術に必要とされる大強度CW電子線形加速器の要素開発を効率的に進めるために、平成3年1月から活動を開始した「大強度CW加速器研究会」における、種々の報告と議論等の概要を取りまとめたものである。

事業団において開発中の大強度CW電子線形加速器に関する技術は、種々の加速器を利用した核変換技術に共通の基盤となるものであり、加速器の大強度化に向けたひとつのマイルストーンとして、着実に進める必要のあることが確認された。

また、開発すべき加速管の形式としては、進行波還流型を選定することが望ましいとされた。

---

\* 研究会事務局：動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室  
姫野 嘉昭， 遠山 伸一  
本社 核燃料サイクル技術開発部 フロンティア研究推進室  
佐久間 実

## 〔大強度CW加速器研究会〕委員構成

主査	平尾 泰男	放射線医学総合研究所 医用重粒子研究部長
委員	今西 信嗣	京都大学 工学部 原子核工学科教授
”	小山田正幸	東北大学 理学部 原子核理学研究施設助教授
”	小林 仁	高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設助教授
”	佐藤 勇	高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設研究主幹
”	富增多喜夫	(株)自由電子レーザー研究所長
”	鳥塚 賀治	日本大学 原子力研究所教授
”	水本 元治	日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部 加速器工学研究室長
”	吉田 勝英	東京大学 原子核研究所 高エネルギー物理研究部助教授

## 〔招聘専門家〕

岡田 漱平	日本原子力研究所 高崎研究所 副主任研究員
Joe McKeown	カナダ A E C L Accelerators 科学技術部長
高橋 博	米国ブルックヘブン国立研究所 Tenure Physicist

(主査を除き五十音順)

## 目 次

はじめに .....	1
1. 研究会の目的 .....	2
2. 研究会の活動経過 .....	2
2. 1 核変換の研究とその現状 .....	2
2. 2 最近のリニアックの進捗と開発課題 .....	4
2. 3 動燃加速器の開発状況 .....	6
2. 3. 1 加速管開発 .....	6
(1) 進行波還流型加速管 .....	6
(2) 定在波型加速管 .....	7
2. 3. 2 クライストロン .....	8
2. 4 加速管に関する議論 .....	9
まとめ .....	12
付録-1 研究会開催経過 .....	付-1
付録-2 大強度CW加速器研究会議題及び資料 .....	付-2

## はじめに

高レベル廃棄物には長半減期核種である核分裂生成物（F P）及び超ウラン元素（T R U）等の種々の核種が含まれる。前者のF Pは、T R Uに比較して約60倍も量が多く、特にセシウム（C s）、ストロンチウム（S r）は、比較的短期間のうちに核内のエネルギーが放出されるために、ガラス固化体中の大きな発熱源となる等、高レベル廃棄物の処理・処分技術上の注目核種となっている。一方、T R Uは、量的には少ないものの、その半減期が非常に長く、ネプツニウムのように数百万年にも及ぶものがあることから、処分技術の不確実性を指摘する理由になったりする。そこで、より効率的な処理・処分方法の可能性を探るために、これらのF PやT R Uを分離し、有効利用する技術についての研究とともに、長半減期のF PやT R Uを短半減期核種か安定核種に核変換する技術の研究が各国で進められている。

事業団では、これらの研究を創造的・革新的研究の一環として進めており、特に加速器による核変換技術については、原子力分野のみならず他分野における技術への波及効果も大きいことから、重要な取組み課題のひとつと位置付けている。このため、理論解析による核変換システムの概念検討を行うとともに、その有力な手段となる大強度C W電子線形加速器の要素開発を平行して進めているところである。しかしながら加速器の開発に当たっては、事業団内部に人的・物的研究資源が少ないことから、国内外の研究機関の協力を得ながら開発を進めることとした。また、幅広く専門家から、示唆や評価を受けながら効率的に要素開発を進めるために、「大強度C W加速器研究会」を発足させた。本研究会は、平成3年1月から活動を開始し、種々の報告と議論を行った。

本報は、研究会の平成4年3月までの活動内容及び経過を纏めたものである。

## 1. 研究会の目的

大強度CW電子線形加速器の要素開発における成果は、放射性廃棄物の核変換の研究のみならず、原子力における新技術分野の開拓にも利用できるとともに、広く非原子力分野の技術に対する波及効果も期待される。そこで、要素開発の円滑な推進を図るため、広い視野からの検討を目的に研究会を設置した。

## 2. 研究会の活動経過

本研究会では、適宜、事業団における開発の進捗状況を報告し、種々の議論を行って来た。以下に、この報告と議論の概要を述べる。また、研究会の活動経過を付録1に示すとともに、発表された技術資料を付録2に示す。

### 2. 1 核変換の研究とその現状

核変換の方法には、光核反応及び中性子反応を利用する種々の概念が考えられる。一般的に、後者の中性子核反応を利用する方法は、高速炉の高速中性子や大強度の加速器によるスポレーション中性子を用いる方法等が考えられる。TRUのように中性子反応断面積の大きい核種に適している。しかし、Cs, Sr, のような中性子反応断面積の小さいFP核種に対しては、前者の光核反応等を利用した核変換システムの概念を考える必要がある。いずれにしても、これらの核変換システムの概念におけるエネルギーバランスの問題や、工学的な成立性の問題等、現状では、その解決すべき課題は多い。

以下に、これまでの研究会で報告された核変換システムの概念及びその研究の現状に関する概要を述べる。

動燃からは、光核反応及び中性子核反応を利用してFPを核変換する概念についての解析結果を報告した。光核反応では、電子の制動放射によって得られる $\gamma$ 線を用いると、1原子のFP核種を核変換するために、その核種が発生する際に得られるウランの核分裂エネルギー(200MeV)以上が必要となり、エネルギーバランスの点で

大きな課題を有している。中性子との核反応を利用したF P核変換については、高速炉の炉心中央部にF PのCsをCsODの形で装荷し、このCsODで周囲から流入する高速中性子を熱化させてCsに照射し、Csを核変換させる炉の概念とCsの核変換速度の計算例を報告した。CsODを利用するのは、核反応断面積 $\sigma$ が1/eV則に支配されるため、この $\sigma$ が大きくなる低エネルギー側の中性子を利用するためである。結果では、現在の代表的な原子炉の中性子束 $10^{15}$ ヶ/cm<sup>2</sup>・secでは、大型の高速増殖炉相当の炉で年間220kgのCsの核変換が可能であるが、より大量の核変換量が望まれた。また、ミュー触媒核融合( $\mu$ CF)を利用した概念と計算例について報告した。そこでは発生する14MeVの中性子をF Pに照射するが、 $\mu$ CFを起こすための加速器技術のブレークスルーと $\mu$ CFの物理現象自体の研究の進展が望まれた。さらに、ムービングターゲット法と呼ばれるF Pを含む超微粒子を加速器で加速し、これに原子炉で発生させた熱中性子を照射する概念とその計算結果を報告した。これは、加速によってF Pに衝突する中性子エネルギーをF Pの共鳴吸収断面積付近に制御するところに特徴があり、その加速技術の実現方法が議論された。

水本委員からは、TRU専焼炉の概念と大強度陽子加速器を用いたTRUの核破砕に関する研究及びそのための陽子加速器開発及びターゲットの概念設計例が報告された。TRU専焼炉は、硬い中性子で炉内の燃料中に装荷したTRUを燃焼させる概念である。陽子加速器については、最初に加速エネルギー10MeVの実験用加速器を平成7年頃までに開発し、その後、核破砕に必要な数GeV規模の大型加速器が開発される予定である。ターゲットの概念設計では、入射する陽子ビームによって局所的な高熱が発生することから、その冷却能力向上に力点が置かれていた。

このような研究の報告からは、F P及びTRUの核変換に関する研究は開始されたばかりであり、それぞれ一長一短が有るとともに多くの未検討事項もあり、切り札となる方法は見いだされていない。このため、今後の研究成果に期待するところが大きい。これらの研究の共通基盤技術のひとつである大強度加速器の要素開発は着実に進めることが望まれた。

この他に、ゲストスピーカーとして、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)高橋氏からTRUの核変換について、加速器-高速炉を組み合わせたハイブリッド炉の



概念研究に関する報告があった。原研岡田氏からは計画中のポジトロンファクトリーの概要がその陽電子発生量と輸送に関する計算結果とともに報告された。計画では、Sバンドで100 MeVの加速器が使用される。また、今西委員からは、高速微粒子（マクロン）ビームの加速と、マクロンの効率的な加速を実現するための電極構造や粒径に関する実験、マクロンを用いたクレーター生成による相転移の物質研究などが報告された。これは、イオン加速や核変換のターゲット形状にも示唆を与えるものである。

## 2. 2 最近のリニアックの進捗と開発課題

ここでは文献及び委員の研究を基にしたリニアックの進捗と開発課題が報告され討議された。

リニアックは、近年、自由電子レーザからのニーズによって著しい進展が見られつつあるが、その中の重要なトピックスは高エネルギー化と大電流化である。

高エネルギー化については、そのための加速方法は基本的には(DC加速)→(バンチ)→(RF)であるが、SLAC Liner ColliderとMainzのマイクロトロンのようにエネルギーを上げてバンチしている例、Stanford Superconducting FEL Linacのように(electron gun)→(harmonic buncher)→(magnetic buncher)が採用されている例など種々の新しい試みがなされており、効率的な加速のために第3高調波を利用している例もある。さらに今後は、ビームの3次元での集束、高入射部の高圧化などの加速技術の発展が不可欠であることが強調された。

大電流化に関しては、近年あらゆる加速器でビームの不安定性が問題となっている。その主な原因は、空間荷電効果(電子自身に起因する)、静的外力との共鳴(ベータトロン振動、integral resonance、シンクロトロン振動)、空間電荷と加速構造との相互作用、連続波によるものなどである。BBU(Beam Break-up:ビームの発散)のしきい値に関する計算例として、佐藤委員から要素開発中の動燃のリニアックを対象とした解析の結果とその解析手法が報告された。そこでは、BBUの予測計算は相当正確にできるが、ビームが中心軸からずれると、BBUが起こり易くなること、また、

そのような例として、SLACのリニアコライダでは、1981年から精密なビーム輸送を考慮した改造を始めていることに注意が喚起された。参考までに内外の大電流化の例が紹介され、スタンフォード大学では定インピーダンス型で1.2 GeV - 30 mAがSLACでは定電界型で20 GeV - 80 mAが、フランスオルセー原子核研究所では準定電界型で2.1 GeV - 100 mAが、KEKでは定電界型で2.5 GeV - 400 mAがそれぞれ達成されている。

ビーム計測手法の確率も重要な課題であるが、これについては経験及び文献に基づいた考察結果が吉田委員から報告され、議論が行われた。従来の手法がパルス型加速器用に開発されたものであるため、連続波(CW)型加速器用としてcoherent bunch monitorの必要性が指摘された。この方法では、これまでより6桁高い輝度を期待できることが報告された。この他、ビーム計測に関してもビーム光学が重要な役割を果たすことが指摘され、今後の進展が期待された。

大強度(大電流)CW電子加速器では大電流のビームに伴う加速管の発熱量があり、またビームダンプでも多量の発熱が生じることから、これらに対応する冷却能力の向上が要求される。これについては、動燃の要素開発結果に基づいた設計例と小山田委員からチョークリバー等の設計例をもとにした報告が行われ議論された。パルス運転のSLACでは、すでに2倍の2.2 MWのビームダンプが設計されおり、動燃のCW用としては、少なくとも2倍の400 kW程度の耐ビーム電力性を目指す必要がある。加速管については、ディスクの冷却が問題となるため、ディスクに複数のV字型の冷却水路を設けた試設計例が報告され、その熱応力解析からは冷却能力確保の見通しが得られている。

これらのリニアックの現状から、動燃の開発する大強度CW電子加速器の意義等について議論が行われた。一義的には、この開発によって、大強度電子ビームの加速・制御技術の蓄積が図れることである。また、核変換の概念を構築するために、現時点において不足しているターゲット系の除熱や $(\gamma, n)$ 、 $(n, \gamma)$ 反応断面積等に関するデータの取得が行えるとともに、エネルギーバランスを向上させるためのエネルギー回収技術に関するデータの取得も行えるものと考えられる。

さらに、同様な大電流化を追求している原研の大強度陽子線形加速器や他のイオン

加速器との関連においては、陽子加速器では、ビーム発生については電子とは異なる独自の機構の開発が必要となるが、高 $\beta$ 領域の加速に使用される結合空洞等に関する課題の多くは、この大強度CW電子線形加速器の開発成果によって解決できるものと考えられる。この他にも、自由電子レーザー技術への波及等数多くの核変換技術以外への波及効果も期待されるものであり、将来の種々の加速器技術に対するポテンシャル向上に資するものとの議論がなされた。

## 2. 3 動燃加速器の開発状況

以下に述べる進捗状況のように進められている。

### 2. 3. 1 加速管開発

#### (1) 進行波還流型加速管

平成元年度から高エネルギー物理学研究所との共同研究で要素開発が進められて、平成7年頃までには10MeV-100mAの施設が大洗工学センターに完成する予定である。その加速管の基本仕様は以下に示す通りである。

加速モード	$2\pi/3$
加速電界	準定電界型
ディスクアリス径	56mm $\phi$
有効シャント抵抗	35M $\Omega$ /m
Q値	1900
電界減衰率	0.0457 nep./m
位相速度	1.0
群速度	0.015
結合定数	0.6396
電力増幅率	約3

これまでの開発の経緯は次のようになっている。

平成元年度 加速空洞の設計。バンチャーの一部試作。高真空導波管試作

平成2年度 進行波型加速管試作

平成3年度 大電力進行波還流型システム試作・低電力試験

これからの課題としては次のようなものがある。

電力増幅率の最適化

ビームローディング試験

## (2) 定在波型加速管

カナダ A E C L は 1970 年代に大強度陽子加速器を開発し、80 年代には 200  $\mu$ s パルスの 10 MeV 電子線形加速器の開発を行うなど、この型式の加速管に関する長年の実績を有している。そこで、加速管形式の選択技のひとつとして A E C L へ委託し、設計研究が進められた。この時の A E C L の基本方針は、新規研究は行なわず、過去に蓄積された成果の範囲内で動燃に対する報告を作成し提出することにあつた。

設計研究に用いられた加速管の基本仕様を以下に示す。

加速モード	$\pi / 2$
加速電界	準インピーダンス型
ディスクアリス径	20 mm $\phi$
有効シャント抵抗	50 M $\Omega$ / m
Q 値	20000
電界減衰率	0.0072 nep. / m
位相速度	1.0
群速度	0.009
結合定数	0.2
電力増幅率	約 2

これまでの公開論文を基にした設計検討書が作成され、その報告の一部が研究会で発表された。その際、A E C L は、定在波型単独ではなく、進行波還流型との比較検討が出来るように、動燃が両タイプ加速管を開発又は購入し、これらをシリーズに連結して試験する事を提案した。提案を検討した結果、型式の異なる加速管相互のマッチングの問題、異なる温度係数を持った加速管を使用することによる冷却系の追加などの問題が提起された。

## 2. 3. 2 クライストロン

本加速器用に開発されている大電力CWクライストロンの基本仕様は次のようになっている。なおこのクライストロンは連続出力のCW、高出力のパルスの2つの運転モードを持っている。

	CWモード	パルスモード
ヒータ加熱電力	約 250 W	約 250 W
ビーム電圧	最大 90 kV	最大 147 kV
ビーム電流	最大 25 A	最大 56.5 A
励振電力	12 W	12 W
目標飽和出力	1.2 MW	4.1 MW
目標効率	65%	(50%)
利得	50 dB	53 dB
パルス幅	CW	0.8 ms
繰り返し	—	最大 250
デューティ	—	最大 20

これまでの開発の経緯は次のようになっている。

平成元年度 クライストロンの設計。高周波部試験（ショートパルスクライストロン試作）

平成2年度 CWクライストロン試作及び試作機の特性試験

平成3年度 同上試作機の特性試験継続

平成元年度のショートパルスクライストロン試作機による高周波相互作用部の性能試験では、 $15\ \mu\text{s}$  ショートパルスで効率63%、出力1200 kWが達成されている。平成2年度のCWクライストロン試作機では、CWモードで設計目標1.2 MWに対して最高出力330 kW、50 msのパルスモードでは効率46%、最高出力780 kWであった。これは、CWモードではRF窓であるセラミックス製窓の設計値を越えた発熱のために出力上昇を断念したことと、パルスモードでは製作工場の電源の能力不足が原因であった。そこで、平成3年度から平成4年度までより設備の整った高エネルギー物理研究所で特性試験を開始しており、平成4年度まで継続される予定である。

今後の課題は次のようなものがある。

- ・設計電圧での試験
- ・RF窓の再検討及び冷却

## 2. 4 加速管に関する議論

ここで議論の対象となったのは、進行波還流型と定在波型の比較である。

まず、RFを注入する際の加速管の応答については、進行波還流型では注入時に発生する反射波の大部分はダミロードで吸収される。定在波型ではこれがクライストロンまで反射によって直接戻される。そこで、この反射波によるクライストロンの破損回避のためのサーキュレータの設置が提案された。

ビームエネルギー効率については、ビーム電流80 mAを境に、それ以上では進行波還流型が、それ以下では定在波型が有利との計算例が報告された。

次に、100 mAまでBBUの無い事が実証済みとされているカナダAEC Lの定在波型にツイテ直接報告してもらい議論した。この型式では、上述のRFのクライストロンへの反射が避けられないために、ビームシャットダウン後1~2  $\mu$ 秒以内にマイクロ波出力を切らないとクライストロン損傷の恐れがある。その回避に、上述のサーキュレータの追加設置が可能か否かAEC Lに打診したところ、過去の実績からその必要性の無いこと、また設計を行うとしたら新たな研究開発が必要であることが表明された。

続いて、動燃の要素開発での加速管の型式について議論された。以下に本題の2型式の加速管の特徴を比較して示す。

	進行波還流型	定在波型
構造	単純	複雑
製作精度	得易い	得難い
エネルギー分散	小	大
ショットインベ-ダンス	低	高
アパーチャ	大	小
フィリングタイム	長	長
電力増幅率	3	2
電場勾配	高	高
ビーム効率	70% (*)	75% (**)

脚注 \* バンチャー及びプリバンチャーを含めた値。

\*\*  $\beta = 1$ の時の値。

すでに述べたように、加速器要素開発では、原子力利用技術分野である放射性核分裂生成物の核変換をその長期目標として設定し、そのための工学施設としての加速器とその利用による技術開発が当面の開発目標である。工学施設としての開発を狙うには、将来を見通しても経済性の観点から大きな発展性が期待できるものでなければならず、そのためには、以下の諸条件が満足されなければならない。

- ① 原理的に構造がシンプルであること。
- ② 製作に過度の困難さがないこと。
- ③ ビーム効率の高効率化の可能性のあること。
- ④ 運転保守が容易なこと。
- ⑤ 着実な技術蓄積とそれに基づく技術的飛躍の可能性が高いこと。

これらの条件に対して、上記2型式の加速管構造のうち、進行波還流型が有利である。すなわち、進行波型の加速管は、原理的に構造がシンプルで、このために製作加工の難易度が過度に高くなく、高品位のビームを得る上で不可欠となる超高精度な機械加工を相対的に容易に追求できる。また還流系によって、ビーム効率の高効率化が期待できる。構造のシンプルさは、加速管の大電流に伴って発生する新たな課題である大型除熱系のシステムの複雑化を回避でき、これによって良好な加速器の運転保守性が確保できる。この原理的な構造のシンプルさとそれに付随する利点は、工学施設としての技術開発を狙う場合の必須条件とも言える。一方、技術開発の到達度から判断すると、定在波型は過去に多くの開発事例があり、高いシャントインピーダンスやロングパルスでの大電流化など関連する基盤技術が既に整備されている。このため、その技術的な成熟度は高く、今後の飛躍的な発展に対する期待度は低い。一方の進行波型は開発事例は多くはないが、その構造と原理から、工学施設としての潜在的なポテンシャルを持っており、今後期待するところが多い。

これらの議論から、加速管については、進行波還流型を採用する事が望ましい。



## まとめ

### 【核変換研究】

核変換の方法として種々の可能性が解析的研究を基に追求されているが、現時点では切り札となる方法はなく、今後の研究成果に期待するところが大きい。中でも、TRUよりも多量のFPについては、高速炉や陽子ビームによるスポレーション、反応等での核変換が難しいことから、大強度加速器をベースとした核変換システムの構築が必須と考えられる。そのため、核変換システムの共通基盤技術である大強度CW電子加速器の要素開発は、種々の加速器の大強度化に向けたひとつのマイルストーンとして着実に進めることが望ましい。

### 【リニアック開発と課題】

最近のトピックスは高エネルギー化と大電流化である。前者については、加速技術の向上と共にビーム輸送技術の発展が不可欠である。後者については、種々の原因によるビーム不安定性に対する対策が不可欠である。BBUの電流しきい値は相当正確に理論予測できるが、ビームが中心軸からズレるとBBUが起こり易くなり、このために既存の加速器の改造が行われている例もある。大電流化の例として、内外の30 mA, 80 mA, 100 mA, 400 mAの加速器がある。ビーム計測についてもビーム光学の進展が重要で、CW加速器用として輝度がこれまでよりも数桁高くなることが期待できるcoherent bunch monitorが提案された。

### 【加速管の型式選定】

大強度電子線形加速器の長期開発目標は、核変換に向けた工学施設としての加速器の開発とそのための基礎的・基盤的技術開発である。そこで、工学施設としての必須条件である経済性と将来の発展性に対する潜在的なポテンシャルを有している進行波還流型を選定することが望ましい。

**【動燃の要素開発】**

開発に伴う新たな問題に直面しつつも、それを適時解決し、またその解決方法を模索する努力が払われており、概ね順調に開発が進展するものと判断される。

以 上

付 録

付録 - 1 研究会 開催経過

第1回 平成3年 1月25日

- 議題の確認
- 動燃及び原研における消滅処理の現状
- 動燃の大電流電子加速器開発施設の概要
- 動燃の大電流電子加速器開発の現状
- 動燃の大電流電子加速器開発の現状（進行波）

第2回 平成3年 3月 7日

- 動燃の大強度電子線形加速器開発の現状
- 原研における陽子加速器開発の現状
- 大電流電子加速器の加速方式について

第3回 平成3年 5月15日

- 最近の電子ライナックの進捗について
- 原研高崎研のポジトロンファクトリーの現状

第4回 平成3年 7月17日

- マクロンビームの加速とその周辺
- 大電流でのビーム不安定性について
- 動燃のクライストロン開発の現状
- 国際会議報告（2件）

第5回 平成3年 9月26日

- 電子加速器のビーム制御について
- 動燃のライナックの仕様について
- Comparison of standing wave and traveling wave accelerators

第6回 平成3年12月 5日

- BNLにおける消滅処理の現状について
- 定在波加速器に関する技術の現状と展望について

第7回 平成4年 3月18日

- 大強度CW電子加速器開発に係わる基本的考え方について
- 報告書の審議・まとめ

## 付録 - 2 大強度CW加速器研究会発表技術資料

	発表者	資 料 名	頁 数
第 1 回 (H3. 1. 25)	小 無	1 - 1. 消滅処理研究の現状	付 - 3
	姫 野	1 - 2. 動燃加速器開発施設の概要	付 - 20
	遠 山	1 - 3. 大電流電子加速器開発の現状	付 - 24
	佐 藤	1 - 4. TW型加速器の開発現状	付 - 27
第 2 回 (H3. 3. 7)	小山田	2 - 1. 大強度電子線形加速器開発の現状	付 - 54
	水 本	2 - 2. Development Program for High Intensity Proton Linear Accelerator	付 - 69
	遠 山	2 - 3. 大電流電子加速器の加速方式について	付 - 93
第 3 回 (H3. 5. 15)	鳥 塚	3 - 1. 最近のライナックの進歩について	付 - 102
	岡 田	3 - 2. ポジトロンファクトリー計画	付 - 104
	佐 藤	3 - 3. 大電流でのビーム不安定性について	付 - 118
第 4 回 (H3. 7. 17)	今 西	4 - 1. マクロンビームの加速とその周辺	付 - 123
	佐 藤	4 - 2. 大電流でのビーム不安定性について	付 - 139
	遠 山	4 - 3. PNCライナックの仕様検討 - クライストロン -	付 - 146
第 5 回 (H3. 9. 26)	遠 山	5 - 1. PNCライナックの仕様について	付 - 153
	王	5 - 2. Comparison of Standing Wave and Traveling Wave Accelerator and PNC Proposal	付 - 165
	吉 田	5 - 3. 電子加速器のビーム制御	付 - 169
第 6 回 (H3. 12. 5)	高 橋	6 - 1. Review of BNL and PNC Collaboration Reseach	付 - 178
	Dr. Joe McKeown	6 - 2. Prototype Hardware Supply Options	付 - 186

## 1 - 1. 消滅処理研究の現状

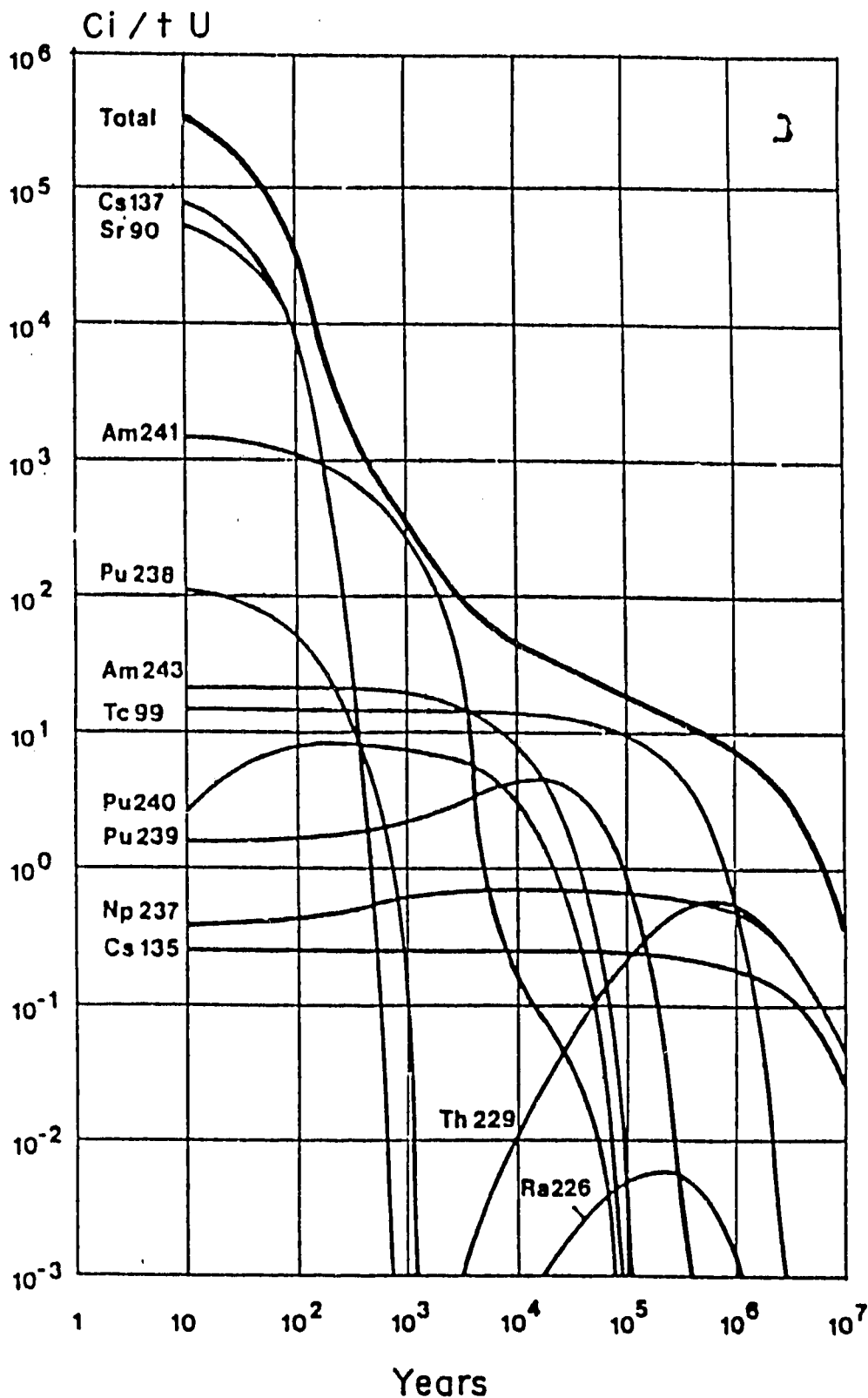


FIG. 20.23. Dominating fission products and actinides in used PWR fuel at a burn-up of 33 000 MW(th)d/t U and a power density of 34.4 MW(th)/t U; original enrichment 3.1% <sup>235</sup>U. (a) Ingestion radiotoxicity values ( $In_w$  m<sup>3</sup> water/t U) from nuclides in spent unprocessed fuel. (b) Activities left in the HAW after reprocessing 1 t spent U by which 99.9% U and 99.5% Pu are removed. (c) Ingestion radiotoxicity values for the HAW under same conditions as in (b). The time scale starts at the removal of the fuel from the reactor core. Reprocessing assumed at  $t_{cool}$  10 y.

表3-10 放射線毒性の規制値の比較

Table 3-10 Limits of radionuclides

核種	我國の値	米国の値*	Pub. 2	ALI **
<核分裂生成物>				
セレン - 79	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-5}$
ストロンチウム - 90	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-6}$
イットリウム - 90	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-5}$
ジルコニウム - 93	$8 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$
ニオブ - 93m	$4 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-1}$	$8.1 \times 10^{-1}$
テクネチウム - 99	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^{-1}$
パラジウム - 107	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-3}$
スズ - 126	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-5}$
アンチモン - 126	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-5}$
アンチモン - 126m	$3 \times 10^{-6}$		$3 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-5}$
ヨウ素 - 129	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$5.4 \times 10^{-7}$
セシウム - 135	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$8.1 \times 10^{-5}$
セシウム - 137	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$
バリウム - 137m	$3 \times 10^{-6}$		$3 \times 10^{-6}$	
セリウム - 142	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	
<アクチナイド>				
ウラン - 234	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-6}$
ウラン - 235	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-6}$
ウラン - 236	$5 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-6}$
ウラン - 238	$6 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-6}$
ネプチウム - 237	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$8.1 \times 10^{-9}$
ネプチウム - 239	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$1.6 \times 10^{-1}$
プルトニウム - 238	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$8.1 \times 10^{-7}$
プルトニウム - 239	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-7}$
プルトニウム - 240	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-7}$
プルトニウム - 241	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^{-5}$
プルトニウム - 242	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$8.1 \times 10^{-7}$
アメリカシウム - 241	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
アメリカシウム - 242	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-1}$
アメリカシウム - 242m	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
アメリカシウム - 243	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
キュリウム - 242	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-6}$
キュリウム - 243	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-7}$
キュリウム - 244	$7 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-7}$
キュリウム - 245	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
キュリウム - 246	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
キュリウム - 247	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-7}$
キュリウム - 248	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$
バークリウム - 249	$6 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-1}$	$5.4 \times 10^{-5}$
カリフォルニウム - 249	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-7}$
カリフォルニウム - 250	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-7}$
カリフォルニウム - 251	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-7}$
カリフォルニウム - 252	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-7}$

数字は水中の放射性同位元素許容濃度 ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )

\* ORIGEN-2 に付属の値によった。

\*\* (1)式の値。人間の年間に飲む水の量を仮定しているため、他の数字と値接の比較は出来ないが、オーダーの違いは分かる。



消滅処理の目的

Table 1 主な消滅処理対象核種

核種	半減期(年)	生成率(%)	(n, γ)反応 断面積*	放射線毒性 規制値**
<sup>85</sup> Kr	11	0.3	1.7b	-
<sup>90</sup> Sr	29	5.0	14mb	2.7×10 <sup>-4</sup>
<sup>90</sup> Zr	1.5×10 <sup>4</sup>	6.4	1.3-4b	1.4×10 <sup>-4</sup>
<sup>99</sup> Tc	2.1×10 <sup>4</sup>	6.1	20b	2.7×10 <sup>-4</sup>
<sup>107</sup> Pd	6.5×10 <sup>4</sup>	0.2	1.8b	2.7×10 <sup>-4</sup>
<sup>131</sup> I	1.6×10 <sup>7</sup>	0.0	27b	5.4×10 <sup>-4</sup>
<sup>137</sup> Cs	2.3×10 <sup>8</sup>	6.7	8.7b	8.1×10 <sup>-4</sup>
<sup>135</sup> Cs	30	6.2	0.25b	1.1×10 <sup>-4</sup>

\* : 熱中性子断面積

\*\* : (ALI(Ci)/1m<sup>3</sup>)×0.1水中の放射性同位元素許容濃度(μCi/cm<sup>3</sup>)

## 長寿命放射性核種に対する不安

数100年 (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr)

→ 社会学的不安定性

数10万年(<sup>237</sup>Np, 長寿命FP)

→ 地層処分の不安定性

## 処分方法の合理化

数100年 (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr)

→ 熱源の除去

消滅処理研究

総合報告

- ①原子力産業会議 (1973)
- ②BNL (1974)
- ③ORNL (1980)

目 次

1. ゼーケンダグループの目的.....Ⅱ-1

2. 消滅処理の可能性.....Ⅱ-2

2.1 放射性核種の半減期の変化.....Ⅱ-2

2.1.1 圧力の効果.....Ⅱ-2

2.1.2 化学形の効果.....Ⅱ-2

2.1.3 多価荷電体の効果.....Ⅱ-3

2.1.4 電磁場の作用.....Ⅱ-4

2.1.5 温度の効果.....Ⅱ-4

2.1.6 結 論.....Ⅱ-4

2.2 核の構造を変えることによる消滅処理.....Ⅱ-4

2.2.1 消滅の平均寿命.....Ⅱ-5

3. 対象となる核種.....Ⅱ-8

4. 米田における核燃料架(中性子燃焼法(仮称))の紹介.....Ⅱ-10

4.1 中性子源.....Ⅱ-10

4.1.1 原子炉.....Ⅱ-10

4.1.2 高エネルギー陽子加速器.....Ⅱ-11

4.1.3 核融合炉.....Ⅱ-13

4.2 照射の実験.....Ⅱ-14

4.2.1 F. P. ターゲットの形.....Ⅱ-14

4.2.2 照射方法.....Ⅱ-14

4.2.3 F. P. ターゲットの処理.....Ⅱ-14

4.2.3.1 タリプトン-85の場合.....Ⅱ-14

4.2.3.2 ストロンチウム-90の場合.....Ⅱ-17

4.2.3.3 センチウム-137の場合.....Ⅱ-18

BNL

9.111

BNWL-1900

TABLE OF CONTENTS

9.0	TRANSMUTATION PROCESSING/ELIMINATION . . . . .	9.1
9.1	TRANSMUTATION WASTE MANAGEMENT SYSTEMS . . . . .	9.1
9.1.1	Overall Criteria . . . . .	9.2
9.1.1.1	Overall Energy Balance . . . . .	9.2
9.1.1.2	Overall Waste Balance . . . . .	9.2
9.1.1.3	Specific Transmutation Rate . . . . .	9.3
9.1.1.4	Total Transmutation Rate . . . . .	9.3
9.1.2	Description of the Concept Systems . . . . .	9.3
9.1.2.1	Accelerator Devices . . . . .	9.4
9.1.2.2	Fission and Thermonuclear Explosive Devices . . . . .	9.5
9.1.2.3	Fission Reactors . . . . .	9.5
9.1.2.4	Fusion Reactors . . . . .	9.8
9.2	TECHNICAL FEASIBILITY . . . . .	9.10
9.2.1	Accelerator Devices . . . . .	9.11
9.2.1.1	Charged Particle - Nuclear Reactions . . . . .	9.11
9.2.1.2	Beta Decay Acceleration by Coulomb Excitation . . . . .	9.12
9.2.1.3	Photon Transmutation Processes . . . . .	9.12
9.2.1.4	Spallation Accelerators . . . . .	9.13
9.2.2	Fission and Thermonuclear Explosive Devices . . . . .	9.15
9.2.3	Fission Reactors . . . . .	9.16
9.2.3.1	Fission Product Transmutation . . . . .	9.16
9.2.3.2	Actinide Transmutation . . . . .	9.17
9.2.4	Fusion Reactors . . . . .	9.21
9.2.5	Candidate Transmutation Concept System . . . . .	9.23
9.2.5.1	System Description . . . . .	9.23
9.2.5.2	Requirements for the Concept System . . . . .	9.24
9.3	ESTIMATED RESEARCH AND DEVELOPMENT REQUIREMENTS . . . . .	9.25
9.3.1	Task 1 - Actinide Recycle in Fission Reactors . . . . .	9.26
9.3.1.1	Phase 1 - Evaluate Efficacy of Actinide Transmutation in Fission Reactors . . . . .	9.27
9.3.1.2	Phase 2 - Development and Demonstration of Actinide Recycle in Fission Reactors . . . . .	9.29
9.3.2	Advanced Concept Evaluations . . . . .	9.30
9.4	ESTIMATED TIME FOR REQUIREMENTS FOR OPERATION . . . . .	9.30
9.5	CAPITAL AND OPERATING COSTS . . . . .	9.31
9.5.1	System Characteristics for Cost Bases . . . . .	9.32
9.5.2	Estimated Costs . . . . .	9.33
9.5.3	Alternate Fission Schemes Which Might Reduce Cost . . . . .	9.35
9.6	PUBLIC RESPONSE . . . . .	9.36
9.7	POLICY CONSIDERATIONS . . . . .	9.36
9.8	ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS . . . . .	9.37
9.8.1	Incremental Increase in Fuel Cycle Processing . . . . .	9.37

ORNL 1981

Nongeologic Disposal of Radioactive Waste

would be an infeasible or unwarranted concept for the emplacement of radioactive wastes.

An additional part of the program is addressing the political and legal implications of an international repository beyond any nation's jurisdictional limits, and various scenarios have recently been published on the subject.

3. Disposal of Nuclear Wastes by Transmutation, J. O. Blomeke, A. G. Croff (ORNL)

One method for treating radioactive wastes to reduce their long-term radiotoxicity is to transmute the long-lived species to short-lived or stable products. A prerequisite for transmutation is that these species first be partitioned from the wastes and then recovered in a form suitable for bombardment with neutrons. Since the difficulties of effecting the necessary separations and recoveries are as great, or greater, than those associated with reprocessing the fuels to recover uranium and plutonium, any realistic evaluation of this approach must consider both partitioning and transmutation in a joint context. We recently completed a very comprehensive assessment of the transmutation option with a view to establishing its technical feasibility and to identifying any incentives that might exist for its implementation.<sup>1,2</sup>

Feasibility was assessed by formulating credible par-

tioning flowsheets based on experimental evidence, and by devising transmutation strategies that could be verified with relatively sophisticated calculations. The incentives were defined by cost-risk-benefit analysis. Only conventional chemical processes having a reasonably high assurance of success and availability were considered, and light water reactors were assumed to be the primary transmutation devices. Although the actinides were taken as the primary candidates for partitioning and transmutation (P-T), the long-lived fission products <sup>99</sup>Tc and <sup>129</sup>I were also considered.

The approach used in this assessment was to perform an incremental analysis on a reference fuel cycle and a P-T fuel cycle that were based on a self-generated plutonium recycle pressurized water reactor. They were identical except that the reference cycle provided for the recovery and recycle of only the economic values of uranium and plutonium, whereas the P-T cycle used additional partitioning processes to recover actinides from the fuel fabrication plant and fuel reprocessing plant wastes and recycle them back to the reactor.<sup>3,4</sup> Chemical flowsheets based on solvent extraction, HNO<sub>3</sub>-HF and Ce(IV)-HNO<sub>3</sub> leaching, and cation exchange chromatography were generated that have the potential to reduce unrecovered actinides in the fuel fabrication and reprocessing plant wastes to <0.25%.<sup>3,4</sup> Waste treatment facilities utilizing these flowsheets were designed conceptually, and their costs were estimated.<sup>3,4</sup> A P-T fuel shipment cask was also conceptually designed, and its cost was estimated.<sup>3,9</sup>

TABLE I  
Summary of the Costs, Risks, and Benefits of P-T per GW(e)-yr

	Reference case	P-T case	Incremental
Costs			
Fuel cycle costs, \$10 <sup>6</sup>	181.9	191.1	9.2
Short-Term Risk			
Radiological dose, man-rem	4	20	16
Total risk, <sup>a</sup> man-rem	1700	4550 <sup>a</sup>	2850
Natural background, man-rem (for comparison)	5000	5000	0
Long-Term Benefit			
Radiological dose, <sup>b</sup> man-rem	25,800	25,500	300
Natural background, <sup>b</sup> man-rem (for comparison)	33.5 x 10 <sup>6</sup>	33.5 x 10 <sup>6</sup>	0

電力価格  
5%増

0.00/%以下  
\$32,400/man-rem  
\$1,000/man-rem

<sup>a</sup> Includes nonradiological risks expressed as equivalent radiological impact using a conversion factor of 5000 man-rem/health effect.

<sup>b</sup> Expected dose integrated over 1 million yr.

## 消滅処理研究

### 消滅エネルギー

核分裂エネルギー : 200MeV  
 核分裂収率 : 6%  
 熱-電気変換効率: 33%  
 発生電力 :  $(200/0.06) \cdot 0.33 = 1100\text{MeV}$   
 10%使用可能とすると: 110MeV

### 消滅速度

装置の寿命 (約30年)、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  の寿命 (30年) を考え、有効半減期 2 年が目標とされてきた。

### 粒子線場での消滅処理速度

$$\lambda_{\text{tr}} = \int \sigma(E) \cdot \phi(E) dE,$$

ここで、

$\sigma(E)$  = 断面積

$\phi(E)$  = エネルギーEを持つ粒子のflux

### 有効半減期

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{\lambda_{\text{eff}}},$$

ここで

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{nat}} + \lambda_{\text{tr}}$$

# マクロな評価

## 消滅処理装置の規模と平衡放射能量

1 台の原子炉から発生する放射性核種を  
1 台の消滅処理装置で処理する場合

核分裂収率 $Y$ の核種の発生速度 $S(\text{sec}^{-1})$ は、

$$S = \frac{h}{\eta_R} \cdot \frac{Y \cdot E_R}{1.6019 \times 10^{-19}} \cdot \frac{1}{E_{\text{fiss}}}$$

- $E_R$  = 発電炉の出力(1GWe)
- $h$  = 稼働率(75%)
- $\eta_R$  = 熱-電気変換効率(33%)
- $E_{\text{fiss}}$  (MeV) = 核分裂エネルギー(200MeV)

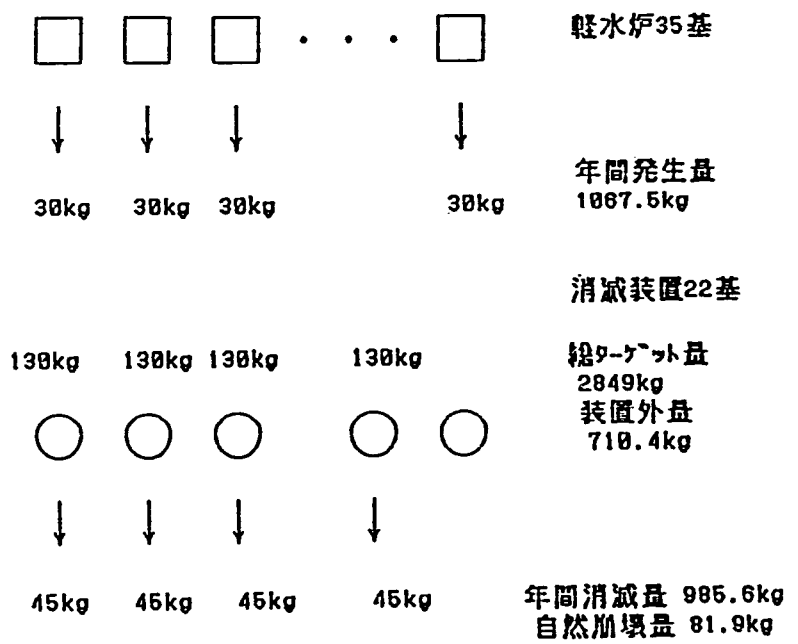
ターゲットに装荷すべき放射性核種の個数は

$$N_{\text{targ}} = \frac{S}{\lambda_{\text{eff}}} = \frac{S \cdot \tau_{\text{eff}}}{\ln 2}$$

$\tau_{\text{eff}}$ を14hrとすると  $N_{\text{targ}} = 0.5\text{mol}$   
この量は、 $^{99}\text{Tc}$ では、50gとなる。

これが、1GWeの発電炉一基と消滅処理装置  
(有効半減期14hr) 1 台のシステムに  
対応する平衡放射能量である。

ビーム出力 100 MW !



自然平衡  
46.282 kg

Fig. 1# 消滅処理システム例

Table 2 Cs-137の消滅処理の比較(2)

消滅方法	実効半減期 [y]	消滅エネルギー [MeV]	ターゲット体積 [cm <sup>3</sup> ]
電子線照射	2.00	4728	4728
逆コンプトンによる 準単色γ線照射	—	850	—
陽子線照射	2.00	789	42875
μCFによる 中性子線照射	2.00	195	43699

Table 1 Cs-137の消滅処理の比較(1)

消滅方法	加速粒子 [MeV]	エネルギー	電流値 [mA]	核反応	計算コード
電子線照射	e <sup>-</sup>	100	2000	<sup>137</sup> Cs (γ, n) <sup>136</sup> Cs → <sup>136</sup> Ba	EGS4
逆コンプトンによる 準単色γ線照射	e <sup>-</sup>	1000	—	<sup>137</sup> Cs (γ, n) <sup>136</sup> Cs → <sup>136</sup> Ba	EGS4
陽子線照射	p	1000	450	<sup>137</sup> Cs (p, xnyp)	NMTC
μCFによる 中性子線照射	d	4000	25	<sup>137</sup> Cs (n, 2n) <sup>136</sup> Cs → <sup>136</sup> Ba	MCNP

# 消滅処理研究の経緯

## これまで考えられてきた消滅処理方法

- ① 原子炉の核分裂中性子による  $(n, \gamma)$  反応を用いた消滅処理
- ② 核融合炉からの14MeV中性子による  $(n, 2n)$  反応を用いた消滅処理
- ③ 陽子加速器からの陽子による核破砕反応を用いた消滅処理
- ④ 電子加速器からの制動放射 $\gamma$ 線による  $(\gamma, n)$  反応を用いた消滅処理

問題点	原子炉	…消滅処理速度
	加速器	…消滅処理エネルギー

## 最近の研究

- ① 原子炉加速器の複合系による消滅処理
- ② 単色 $\gamma$ 線による  $(\gamma, n)$  反応を用いた消滅処理
- ③ 核融合核融合炉からの14MeV中性子による  $(n, 2n)$  反応を利用した消滅方法
- ④ 加速器からの高速中性子による  $(n, 2n)$  反応を利用した消滅方法 (free ion targetとmigma軌道の組み合わせ)

⑤ 複合核共鳴準位を利用した消滅処理

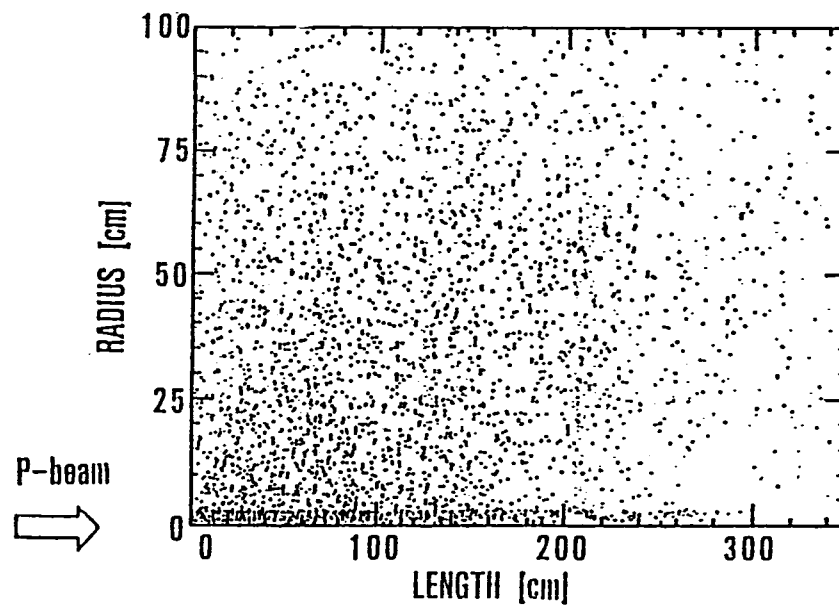
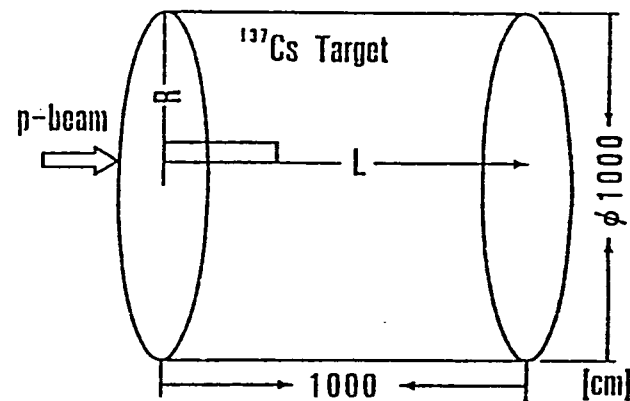


Fig. 1g proton spallation 反応分布



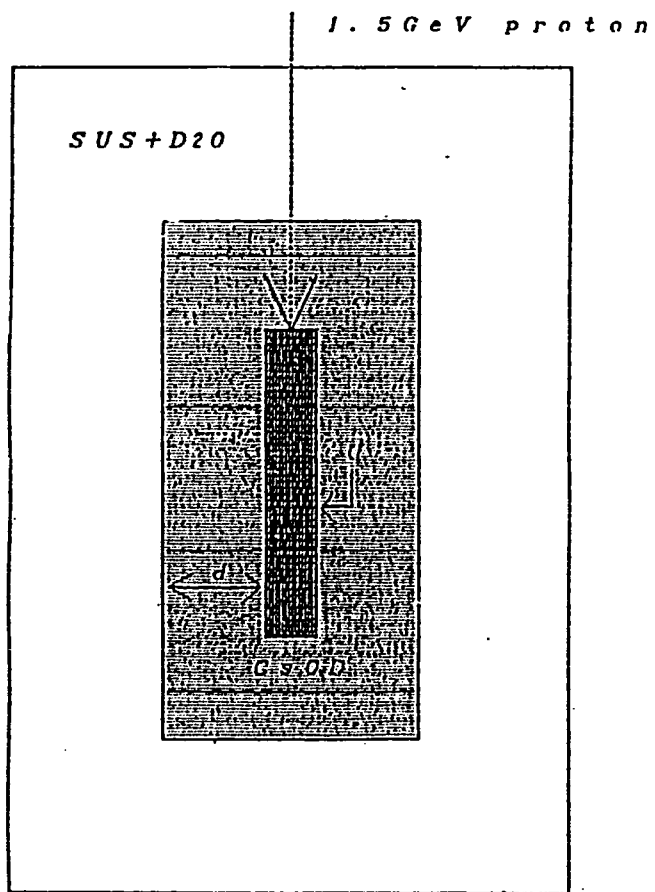


図1 陽子スプレッションターゲット配置

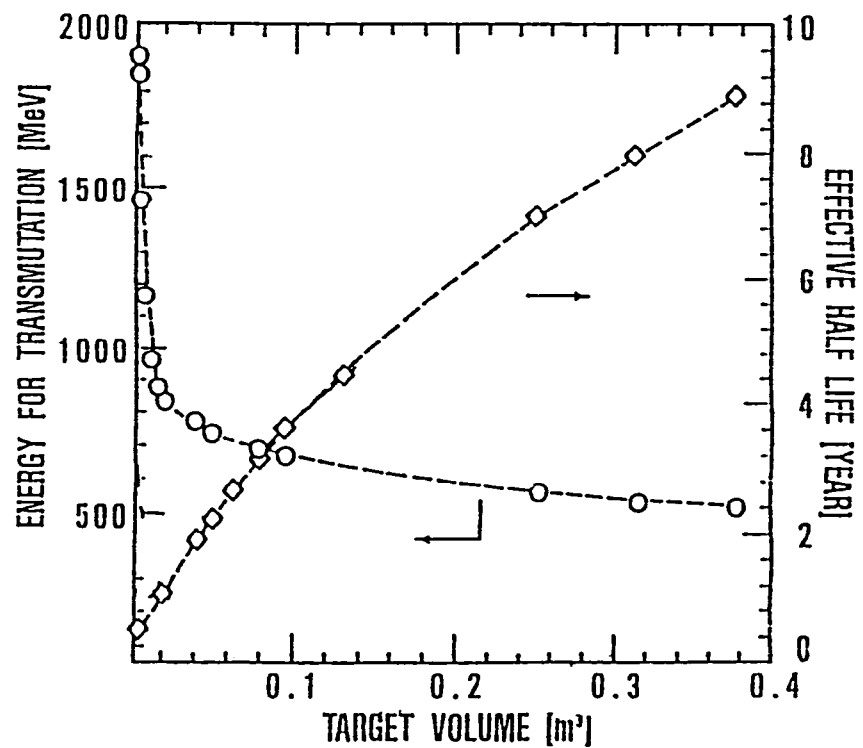


Fig. 10 消滅速度と消滅エネルギーの関係  
4 (1.5 GeV 450 mA の proton による  $^{17}\text{C}$  の消滅  
処理の場合)

表1 天然ウランターゲット中での高エネルギー陽子による  
スポレーション反応の計算 (原研)

Table H.U. Target (GeV Order) (Update)  
Targets bombarded by protons (20 batches)  
( $l = 60$  cm,  $r = 10$  cm,  $b_p = 5$  cm) (MeV)

Energy of protons	1500	2000	2500	3000
Total Heat Deposition	760.62	941.85	1131.79	1270.31
Fission*	216.09	272.52	338.82	388.85
Ioni. Loss (proton)	510.07	628.47	758.48	839.84
Escaped Energy	253.39	432.88	598.09	805.14
Energy Cut Off	49.65	65.25	79.71	101.61
Leakage (above 15 MeV)	203.74	367.61	518.38	703.53
Energy of Esc. Neutron (below 15 MeV)	225.89	298.93	349.80	409.65
Energy of Char. Partl. (below 15 MeV)	104.23	133.65	169.07	207.48
Subtotal	1344.13	1795.29	2248.75	2692.56
Total Binding Energy	284.24	346.35	440.20	530.41
Mean Excitation Energy	29.04	37.72	44.93	32.18
Total	1637.41	2179.38	2733.91	3275.13
Number of Esc. Neutron	67.89	73.75	88.57	102.77
Number of Char. Partl.	7.00	8.91	11.07	13.48
Destroyed Nuclide U235	0.000	0.054	0.058	0.046
U238	5.258	6.785	8.200	9.518

\* Fissions due to the neutrons with energies below 15 MeV are not included.

表2 陽子スポレーションからの中性子を用いた<sup>137</sup>Cs消滅処理

吸収体厚さ Cs (cm)	Cs-ターゲット量 (kg)	吸収率 (%)	Cs核変換個数 陽子一個当り	Cs消滅量 (kg)	半減期 (年)
10	274.	4.25	2.46	33.0	5.75
20	886.	10.13	5.86	78.8	7.70
30	1902.	16.59	9.60	129.1	10.54
40	3630.	22.79	13.20	177.3	14.19
50	6014.	28.38	16.43	220.8	18.88

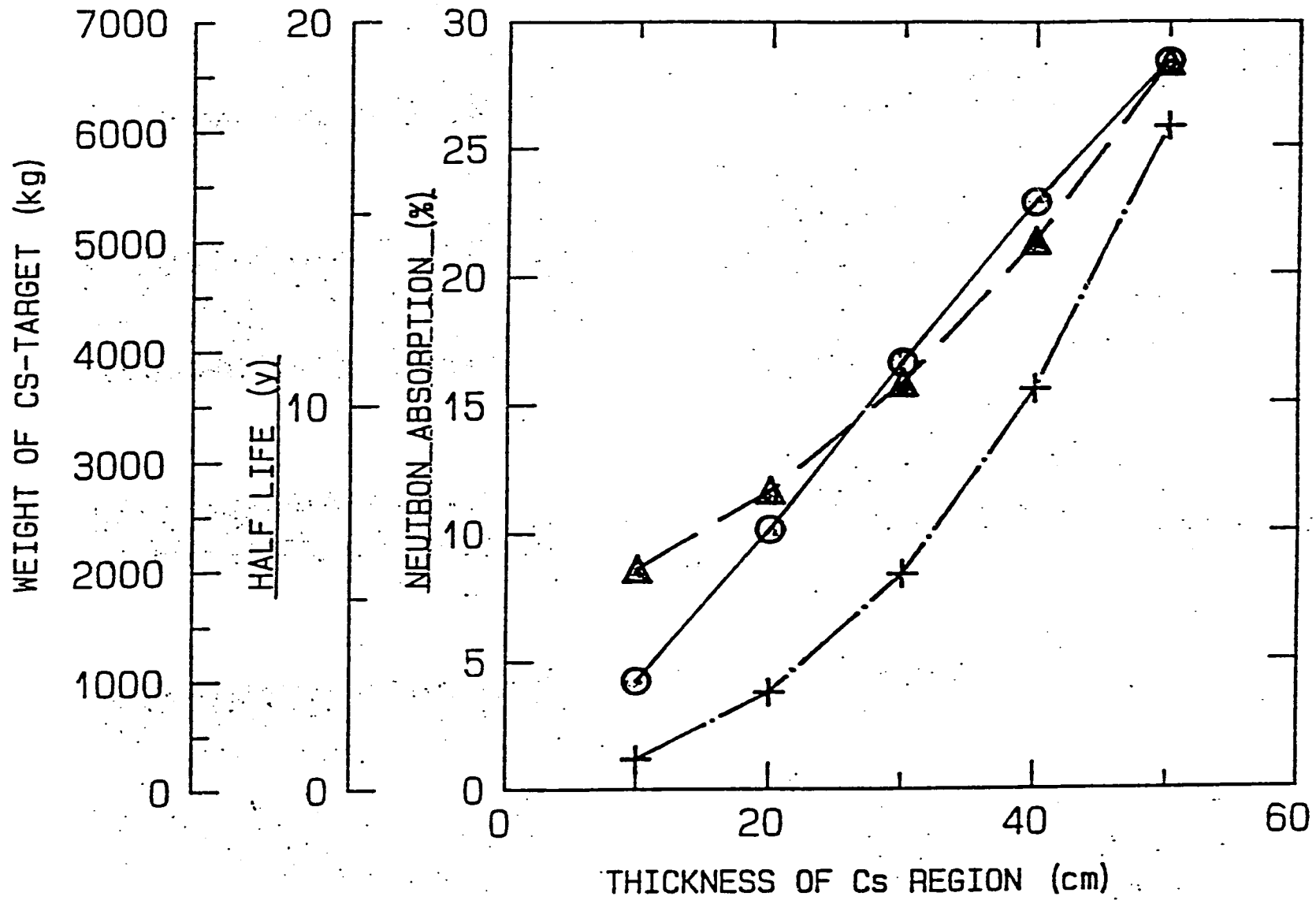


図2 1.5GeV陽子スポレーション反応からの中性子による<sup>137</sup>Csの消滅処理

- ⊙ : NEUTRON ABSORPTION
- ▲ : HALF LIFE
- +

# R&D Chart of Transmutation

## 1st Generation (current technology)

- How difficult ?
- ☞ nuclear reaction
  - ☞ charged particle
  - ☞ photon
  - ☞ neutron

## 2nd Generation (advanced technology)

- μCF
- Moving Target
- Nuclear Excitation by Laser

## 3rd Generation (new technology)

- Control of βdecay

## [ II ] 大強度加速器の必要性

1 台の原子炉から発生する放射性核種を 1 台の消滅処理装置で処理する場合、核分裂収率  $Y$  の核種の発生速度  $S(\text{sec}^{-1})$  は、

$$S = \frac{h}{\eta_n} \cdot \frac{Y \cdot E_n}{1.6019 \times 10^{-10}} \cdot \frac{1}{E_{r, \dots}} \quad (1)$$

となる。ここで、発電炉の出力、稼働率、熱-電気変換効率をそれぞれ、 $E_n(W)$ ,  $h$ ,  $\eta_n$  し、 $E_{r, \dots}(\text{MeV})$  は、一回の核分裂で放出されるエネルギーである。

これを、消滅処理エネルギー  $E_{t, r}(\text{MeV})$  で消滅する場合には、消滅処理装置のビーム出力  $D(W)$  は

$$D = 1.6019 \times 10^{-10} \cdot E_{t, r} \cdot S = \frac{h \cdot Y \cdot E_n \cdot E_{t, r}}{\eta_n \cdot E_{r, \dots}} \quad (2)$$

となる。例えば、 $h=0.75$ ,  $\eta_n=0.33$ ,  $Y=0.06$ ,  $E_n=10^6 \text{We}$ ,  $E_{t, r}=100 \text{MeV}$ ,  $E_{r, \dots}=200 \text{MeV}$  とすると、 $D = 68 \text{MW}$  となる。

即ち、消滅処理エネルギーとして、 $100 \text{MeV}$  というエネルギーコストの良い値を用いても、 $10^6 \text{We}$  として  $68 \text{MW}$  という大出力の加速器が必要である。

これは、加速粒子エネルギーとして  $100 \text{MeV}$  を選ぶと  $0.68 \text{A}$  の電流値が必要となることを意味する。この例より、加速器を消滅処理に利用しようとする場合には、 $100 \text{MW}$  ビーム出力を開発目標として設定する必要がある。

# Inertial target による消滅処理 コメント

大阪大学 レーザー核融合研究センター  
宮永 聡明、中井 貞雄

## 1. はじめに

レーザー核融合は、DT燃料を含むペレットターゲットを固体密度(0.21g/cm<sup>3</sup>)の10<sup>3</sup>倍以上に圧縮し、高温・高密度のプラズマが慣性力で保持されている間に燃焼させて、エネルギーを取り出そうとするものである。圧縮プラズマは、中心部のホットスパークと周囲の主燃料から構成される。スパークの自己点火条件は、密度・半径積  $\rho R \geq 0.3 \text{g/cm}^2$ 、イオン温度  $kT_i \geq 5 \text{keV}$  であり、 $\alpha$ 粒子加熱の伝播により主燃料の大部分を燃焼させる。レーザー核融合ターゲットを原子炉で生成した放射性廃棄物の消滅処理に利用するというアイデアは、中性子束密度が高いことと、圧縮により中性子反応の臨界が増大することに基づいている。ここでは、このような消滅処理の原理的可能性について、<sup>90</sup>Srを例にとり簡単なモデル計算により検討を加えることにする。

## 2. レーザー核融合の概念

レーザー核融合の概念を図1に示す。電気エネルギーからレーザーエネルギーへの変換効率(レーザー効率)を  $\eta_L$ 、レーザーから圧縮プラズマ(密度  $\rho_{DT}$ 、半径  $R$ )の内部エネルギーへの結合効率を  $\eta_c$  とする。イオン温度  $T_i (=T_e)$  を得るために必要なレーザーエネルギー  $E_L$  は、

$$E_L = \frac{4}{3} \pi \frac{\rho_{DT} R^3}{\eta_L} \frac{6kT_i}{m_b + m_f} = 1.1 \times 10^{10} \frac{(\rho_{DT} R)^3}{(\rho_{DT} / \rho_s)^3} \frac{T_i}{\eta_L} \quad (1)$$

である。ここで、 $\rho_s$  は固体DT密度、 $m_D$  ( $m_T$ ) はD (T)のイオン質量である。一方、熱核融合で発生するエネルギー  $E_{TN}$  は、

$$E_{TN} = \frac{4}{3} \pi \rho_{DT} R^3 \frac{f_b E_{DT}}{m_b + m_f} = 3.1 \times 10^{11} \frac{(\rho_{DT} R)^3}{(\rho_{DT} / \rho_s)^3} f_b \quad (2)$$

であり、 $E_{DT} = 17.6 \text{MeV}$ 、 $f_b$  は燃料の燃焼率である。発電効率を30%とすると、

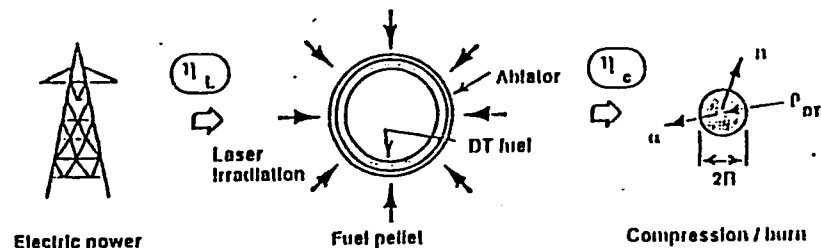


図1. レーザー核融合の概念図。

電気出力の30%を  $\eta_{LE} = 0.1$  の効率でレーザードライバーにフィードバックするには、 $E_{TN}$  と  $E_L$  の比、即ちペレット利得が、

$$Q = E_{TN} / E_L \geq 100$$

程度でなければならない。このような高利得を達成するためには、圧縮燃料に次のような条件が課せられる。 $Q \geq 100$ の条件は、(1)、(2)式より

$$\frac{29\eta_L}{kT_i} f_b \geq 1 \quad (3)$$

となる。 $\eta_c$  には上限が存在し、主燃料の  $T_i$  は圧縮時の運動エネルギーによって決定される。主燃料がピストンとなって中心部を圧縮するために、ホットスパークは高温となる。中心部で  $kT_i = 5 \text{keV}$  を得るには、圧縮速度は  $v_{imp} = 3 \times 10^7 \text{cm/sec}$  であることが必要とされており、そのとき主燃料では  $kT_i = 0.5 \sim 1 \text{keV}$  である。

また、燃料の燃焼率  $f_b$  は、燃料原子の致密度  $n_{DT}$  に関するレート方程式、

$$\frac{dn_{DT}}{dt} = -\frac{1}{2} n_{DT}^2 \langle \sigma v \rangle \quad (4)$$

より、次式のように  $\rho R$  の関数となるがよく知られている<sup>1)</sup>。

$$f_b = \frac{\langle \sigma v \rangle \rho_{DT} \tau / (m_b + m_f)}{1 + \langle \sigma v \rangle \rho_{DT} \tau / (m_b + m_f)} = \frac{(\rho_{DT} R)}{\beta + (\rho_{DT} R)} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{R}{4C_s}, \quad \beta = \frac{4(m_b + m_f)C_s}{\langle \sigma v \rangle} = 6.3 \quad (kT_i = 20 \text{keV})$$

このように、 $\rho R$  はレーザー核融合にとって重要なパラメータであり、積層閉じ込め核融合の  $n\tau$  に対応するものである。 $\langle \sigma v \rangle$  は温度  $T_i$  のマクスウェル分布で平均した反応係数であり、 $\alpha$ 粒子加熱による燃焼領域では  $kT_i = 20 \text{keV}$  と評価できる。従って、(3)式を満足するには、 $f_b \geq 0.25$  (即ち  $\rho_{DT} R \geq 2 \text{g/cm}^2$ )、 $\eta_c \geq 7\%$  が必要条件となる。尚、(1)式から明かなように、高利得(高  $\rho R$ )のためには大出力のレーザーが必要であるが、所要レーザーエネルギーは圧縮密度の増大によって大幅に緩和 ( $E_L \propto \rho_{DT}^{-2}$ ) される。

## 3. <sup>90</sup>Srを含む高利得ターゲット

通常のターゲットは固体DT燃料をCHアブレートで取り囲んだ構造をしており、CHはレーザー照射により真空中に膨張し、そのロケット作用により燃料を中心部に向けて加速・圧縮する。ロケットモデルによるとターゲット質量の約80%を噴出させたときに最大流体力学的効率を得ることができる<sup>1)</sup>。ここでは、SrをDTとCHの間に配置し、レーザーによりCHは殆どアブレートし、DTとSrが圧縮されるようにする。

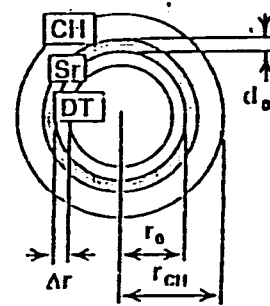


図2 Srを含むターゲット構造。

典型的なターゲットサイズとしてDT燃料半径と厚さを  $r_0$  ( $=2\text{mm}$ )および  $\Delta r$ 、Srの厚さを  $d_0$ 、全体の半径を  $r_{\text{Cl1}}$ とする。またレーザーエネルギーは10MJとする。この場合、圧縮されたDTとSrへの結合効率は $\eta_c=10\%$ 、圧縮速度  $v_{\text{imp}}=3 \times 10^7 \text{cm/sec}$ とならなければならない。十分な消滅処理が可能な圧縮プラズマを想定したときに、上記の条件が満足されるかは後ほど検討する。

4. 圧縮プラズマの状態

圧縮プラズマの構造は図3のようなものとする。高温・低密度のホットスパークの周囲を低温・高密度の主燃料が取り囲み、さらにその外側にSrがある。消滅エネルギーを評価するために以下のような仮定をする。

- 1) プラズマはフェルミ縮退に近い低エントロピーの状態で圧縮され、内部エネルギーは次式で与えられる。

$$e = \alpha \times e_F \quad (e_F: \text{Fermi energy})$$

- 2) 各層の内部では温度、密度が一定であり、互いに圧力バランスが成り立っている。

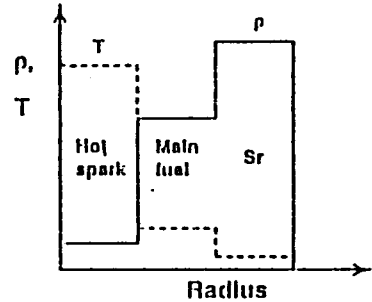
以下に典型的な初期ターゲット寸法を想定し、各層の内部エネルギーを評価する。初期条件は、 $r_0=2\text{mm}$ 、 $\Delta r=300\mu\text{m}$ 、 $\rho_{\text{DT}0}=0.213\text{g/cm}^3$ 、 $d_0=200\mu\text{m}$ 、 $\rho_{\text{Sr}0}=2.6\text{g/cm}^3$ とする。中性子発生数  $Y_N$  はレーザーエネルギーとベレット利得から求められる。燃料の総質量  $M_{\text{DT}}$  が既知のときは、次式のように中性子発生数より燃焼率  $f_0$  と  $\rho_{\text{DT}}R$  が求まり、さらに圧縮密度  $\rho_{\text{DT}}$  を評価できる。

$$f_0 = Y_N(m_n + m_p) / M_{\text{DT}} = (QE_L / E_{\text{DT}})(m_n + m_p) / M_{\text{DT}}$$

$$M_{\text{DT}} = (4/3)\pi[(\rho_{\text{DT}}R)^3 / \rho_{\text{DT}}^2]$$

いま、Srを付加したことによりベレット利得が低下し  $Q=50$  となると仮定すると、 $E_L=10\text{MJ}$  より、 $Y_N=1.77 \times 10^{20}$  である。また、 $M_{\text{DT}}=2.75\text{mg}$  であるから、燃焼率は  $f_0=0.538$  となる。この燃焼率に対応する面密度は  $\rho_{\text{DT}}R=7.33\text{g/cm}^2$  である。従って、圧縮燃料の密度と半径は、各々  $\rho_{\text{DT}}=774\text{g/cm}^3$ 、 $R=95\mu\text{m}$  となる。ちなみに、このときのターゲット半径圧縮率は  $r_0/R=21$  となり、ホットスパークについても30程度に抑えることが可能となり、レーザー-テラー不安定性を考慮しても実現可能な圧縮率である。

上記燃料密度(致密度で  $n_{\text{DT}}=1.85 \times 10^{26}$ )に相当するフェルミエネルギーは  $e_{F,\text{DT}}=1.2\text{keV}$  であり、これから圧縮プラズマ全体の内部エネルギーを評価できる。尚、ここでは、質量の軽いホットスパークがもつエネルギーを無視する。圧縮密度が最大となった時は、プラズマがほぼ静止状態であり、主燃料の圧力  $p_{\text{DT}}$  はSr領域の圧力  $p_{\text{Sr}}$  と



Hot spark for Ignition  
( $\rho R$ )<sub>hs</sub> = 0.3 g/cm<sup>2</sup>  
T<sub>1</sub> = 6 keV

図3 圧縮プラズマの構造。

バランスがとれていると考えられる。従って、

$$p_{\text{Sr}} = p_{\text{DT}} \quad \alpha_{\text{Sr}} e_{F,\text{Sr}} Z_{\text{Sr}} n_{\text{Sr}} = \alpha_{\text{DT}} e_{F,\text{DT}} n_{\text{DT}}$$

であり、計算機シミュレーションによると、 $\alpha_{\text{DT}}=5$ 、 $\alpha_{\text{Sr}}=3$  (添字  $m$  と Sr は主燃料と Sr 領域を示す) である。ここで Sr 領域のイオン化を  $Z_{\text{Sr}}$  とする。断然圧縮、フェルミ縮退ともに、圧力は電子密度 ( $n_{e,\text{DT}}=n_{\text{DT}}$ 、 $n_{e,\text{Sr}}=Z_{\text{Sr}} n_{\text{Sr}}$ ) の  $5/3$  乗に比例するので、

$$(n_{\text{DT}} / Z_{\text{Sr}} n_{\text{Sr}})^{5/3} = \alpha_{\text{Sr}} / \alpha_{\text{DT}}$$

となり、 $n_{\text{Sr}}=2.52 \times 10^{25}$  と見積られる。 $Z_{\text{Sr}}$  の評価は電子縮退を考慮した非局所熱平衡モデル等でなされねばならないが、 $v_{\text{imp}}=3 \times 10^7 \text{cm/sec}$  の運動エネルギーが熱化されたとすると、温度は数100eVとなり  $Z_{\text{Sr}}=10$  程度である。

5. <sup>90</sup>Srの消滅と圧縮におけるエネルギーバランスの妥当性

以下に、14MeV中性子による<sup>90</sup>Sr( $n,2n$ )<sup>89</sup>Sr反応を利用した消滅処理について考える。圧縮されたSrにおける( $n,2n$ )反応の確率  $P$  は、 $\sigma=1.7\text{b}$  と質量保存から求めた圧縮 Sr の厚さ  $d$  ( $=44\mu\text{m}$ ) から、

$$P = 1 - \exp(-\sigma n_{\text{Sr}} d) = 0.172 \quad (4)$$

と求められる。従って、圧縮前の値の約290倍に増大させることが可能となる。但し、実際は  $\rho_{\text{DT}}R=7.33\text{g/cm}^2$  であるから、中性子のエネルギー損失を考慮する必要がある。上記の反応確率は過大評価である。

次に、消滅エネルギーを求める。圧縮プラズマの全内部エネルギー  $U$  は、

$$U = U_{\text{DT}} + U_{\text{Sr}} = \alpha_{\text{DT}} e_{F,\text{DT}} N_{\text{DT}} + \alpha_{\text{Sr}} e_{F,\text{Sr}} Z_{\text{Sr}} N_{\text{Sr}} \quad (5)$$

である。DTとSrの原子総数  $N_{\text{DT}}=6.6 \times 10^{20}$ 、 $N_{\text{Sr}}=1.93 \times 10^{20}$  より、 $U_{\text{DT}}=0.63\text{MJ}$ 、 $U_{\text{Sr}}=1.35\text{MJ}$  であり、 $U=1.97\text{MJ}$  となる。このとき、消滅<sup>90</sup>Sr原子の総数は  $3.05 \times 10^{19}$  であり、1個の<sup>90</sup>Sr原子を消滅させるのに必要なエネルギーは、約0.4MeVである。レーザー効率、圧縮プラズマへの結合効率は各々  $\eta_L=10\%$ 、 $\eta_c=10\%$  であるから、システム全体としては<sup>90</sup>Sr原子1個の消滅当り約40MeVの電気エネルギーが必要であることになる。この値は、一般的な目標値1000MeVに比べて十分に小さい値である。

次に、上記計算の妥当性について述べる。所望圧縮速度  $v_{\text{imp}}=3 \times 10^7 \text{cm/sec}$  に対応する運動エネルギーは1.42MJであり、これは  $E_L \times \eta_c=1\text{MJ}$  とほぼ一致する。しかしながら、先に求めた内部エネルギーは約2MJであり、レーザー入力10MJでは不足していることが分かる。従って、 $E_L=20\text{MJ}$  が必要であり  $Q=25$  程度となるが、エネルギー収支のみを考えた場合は、レーザー致融合ターゲットを利用した消滅処理は採算がとれる可能性がある。ちなみに、その場合の圧縮速度は  $3.5 \times 10^7 \text{cm/sec}$  である。また、図2におけるCl1アブレータは噴出質量が初期質量の80%であるから、厚さは1.2mmである。

## 6. まとめと今後の課題

以上述べたように簡単な評価では、Srの原子1個の消滅当りに必要な電気エネルギーは致10MeVのオーダーであり、またペレット利得も $Q=25$ 程度が見込めるので、消滅処理の専焼炉としては十分に実現性があるものと考えられる。但し、この計算ではペレット利得を予め仮定したが、図2のターゲットで $Q=25$ を得るには、質量が大きいSr領域の運動エネルギーが、圧縮の最終段階で燃料の内部エネルギーに有効に変換されることが必要である。もしも、Sr領域の運動エネルギーがSr領域に残ってしまうとすれば、その分だけ所要レーザーエネルギーが大きくなることになる。エネルギーの有効な変換を妨げるのは流体力学的不安定性であり、特にDTとSrの境界面は密度ジャンプのためにターゲット圧縮の最終段階(減速相)では不安定となる。また、最適ターゲット寸法の設計等のパラメータサーベイは流体コードを用いた計算機シミュレーションが必要である。さらに、プラズマの面密度が14 MeV中性子の平均自由行程と同程度以上となるので、3次元中性子輸送の計算が必要であろう。

また、ここではエネルギー収支のみに着目したが、実際の消滅処理にあたっては、ペレットの高精度加工 (Srは加工性が悪い) やレーザー照射後の未消滅 Srの回収と分離方法などが工学的課題として残っている。

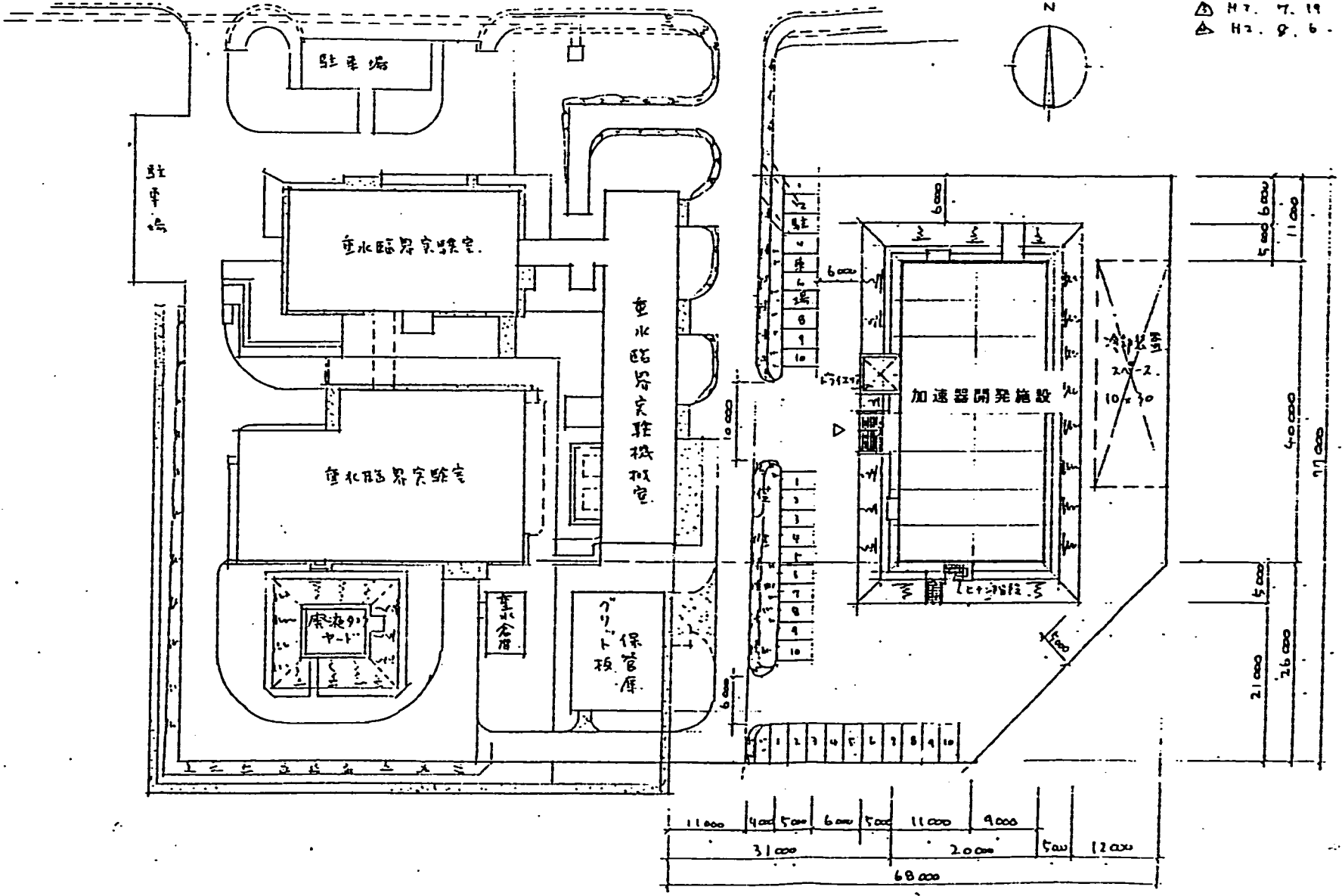
## 参考文献

- 1) 三間啓典、核融合研究、51, 400 (1984),  
西原功修、核融合研究、48, 157 (1982),  
J. J. Duderstadt and G. A. Moses, *Inertial Confinement Fusion*, Wiley-Interscience (1982). など

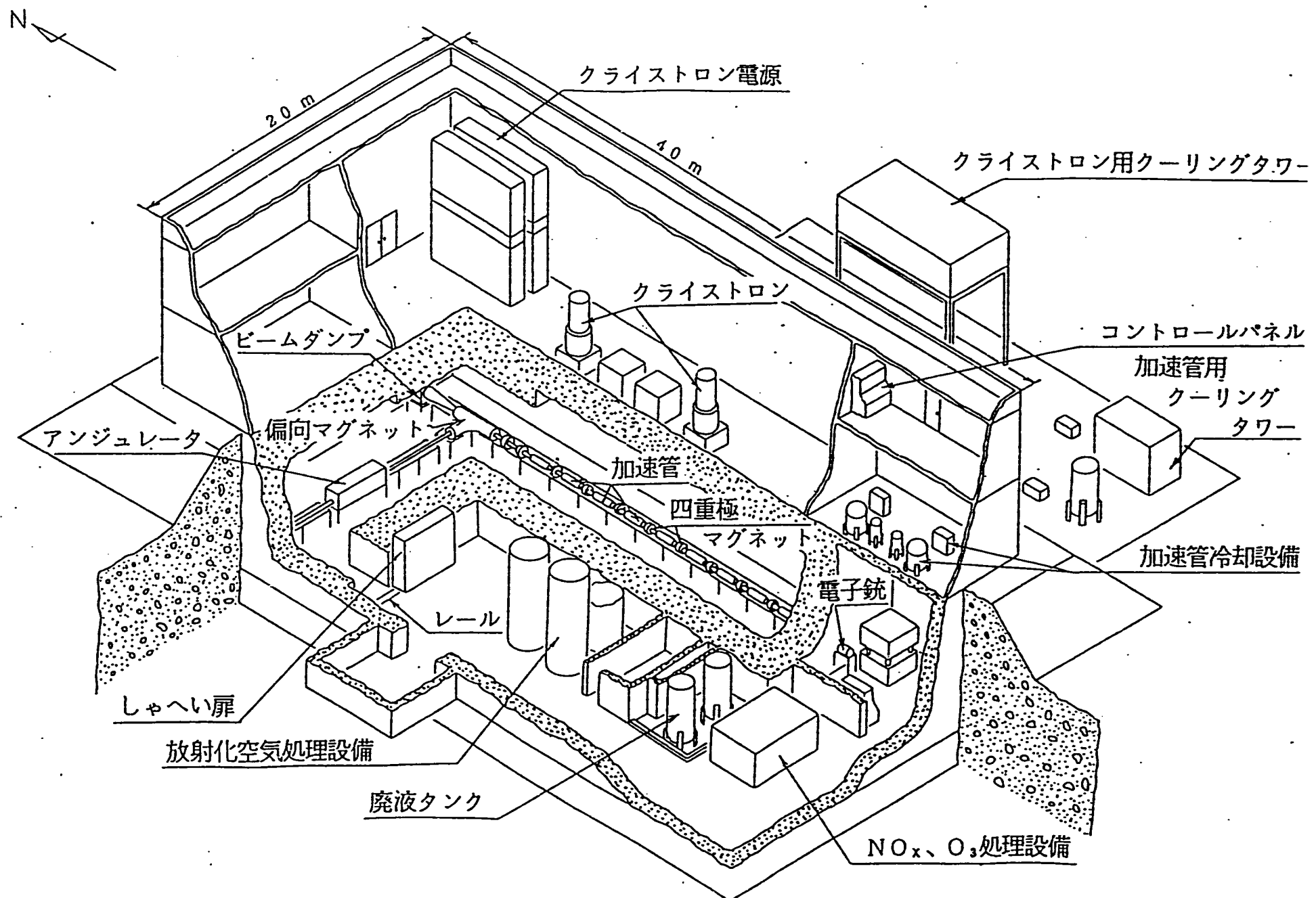
## 1 - 2. 動燃加速器開発施設の概要



- △ H2. 6. 18.
- △ H2. 6. 29
- △ H2. 7. 18.
- △ H2. 7. 19
- △ H2. 9. 6



加速器開発施設 配設計画 1/500



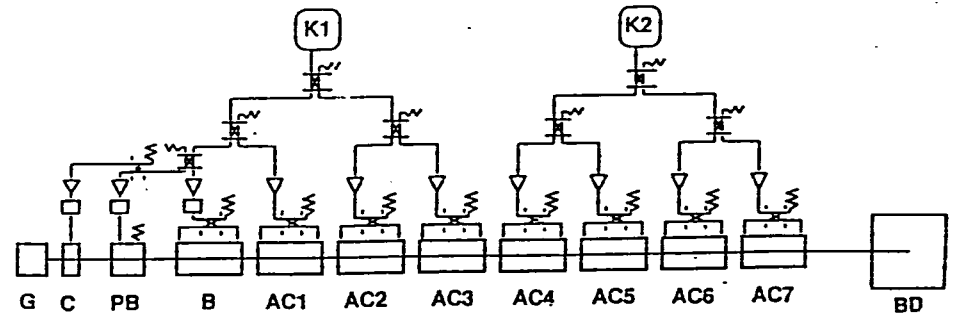
付-21

加速器技術開発施設 (鳥瞰図)

FTDS-500-00

基本性能

エネルギー (MeV)	10
エネルギー分散	$1 \times 10^{-4}$
最大ビーム電流 (mA)	100
平均ビーム電流 (mA)	20
パルス幅 (ms)	4
繰り返し数 (Hz)	50
デューティー (%)	20



- G: 電子銃
- C: チョッパー
- PB: プリバンチャー
- B: バンチャー
- K1,2: クライストロン
- AC1-7: 加速管
- BD: ビームダンプ
- ▽ 移相器
- 減衰器
- ≋ ダミーロード
- ≡ 方向性結合器

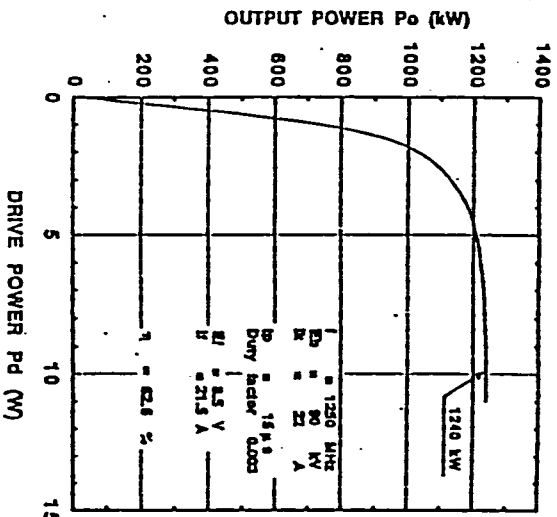
仕様

加速周波数 (MHz)	1249
マイクロ波波長 (cm)	24.0
加速管の本数	8
加速管の長さ (m)	1.2
加速器の全長 (m)	16.0
クライストロン数	2
クライストロン出力 (MW)	1.0

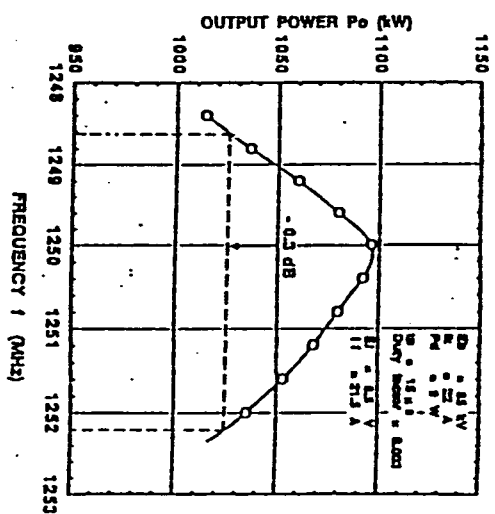
工 程 表

	年 度					
	平成2年	3年	4年	5年	6年	7年
加速器開機工程	○ ← 建築建設着手 → ○		○ → 竣工	← → 加速器 一部提供 試験	← → 加速器 全部提供 NO.0, 処理系提供	→ 加速器試験
許認可対応 (1) 科技庁	施設新設 概要説明 ●	中間報告 ●	○ ← → △ △ 使用変更 申請申請 請 可	○ ← → △ △ 申請申請 請 可 △ ← → △ ▽ 施設検査 申 検 合 請 査 格	○ ← → △ △ 申請申請 請 可 △ ← → △ ▽ 申 検 合 請 査 格	
(2) 茨城県 大洗町等	概要説明 ●	●	△ △ 第1回目 了 新增設計 解 審査届出	△ △ 第2回目 了 新增設計 解 審査届出		

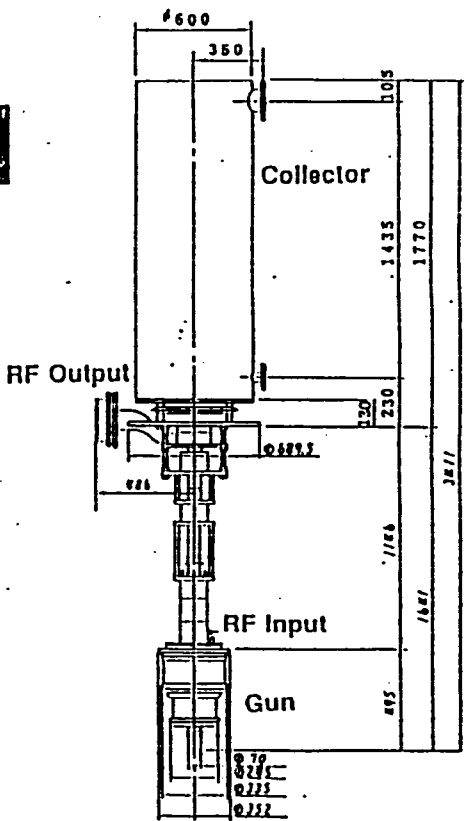
## 1 - 3. 大電流電子加速器開発の現状



TRANSFER CHARACTERISTICS



INSTANTANEOUS BANDWIDTH



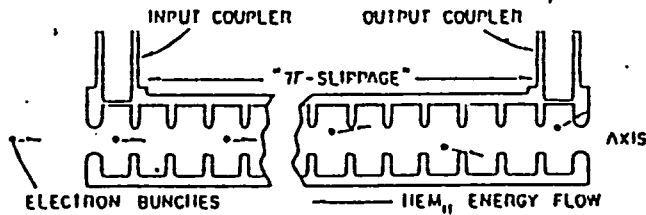
Model Test 2 ( 1989 ~ )

- Selection of Material for Heavy Duty
- Cooling Test of Collector
- CW Klystron (1.2 MW, 1.249 GHz, >65%)



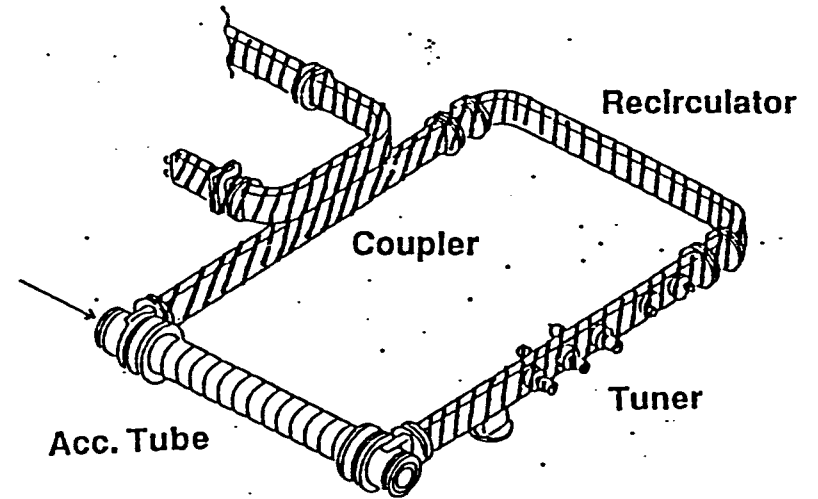
# Beam Dynamics

## Beam Instability on High Current

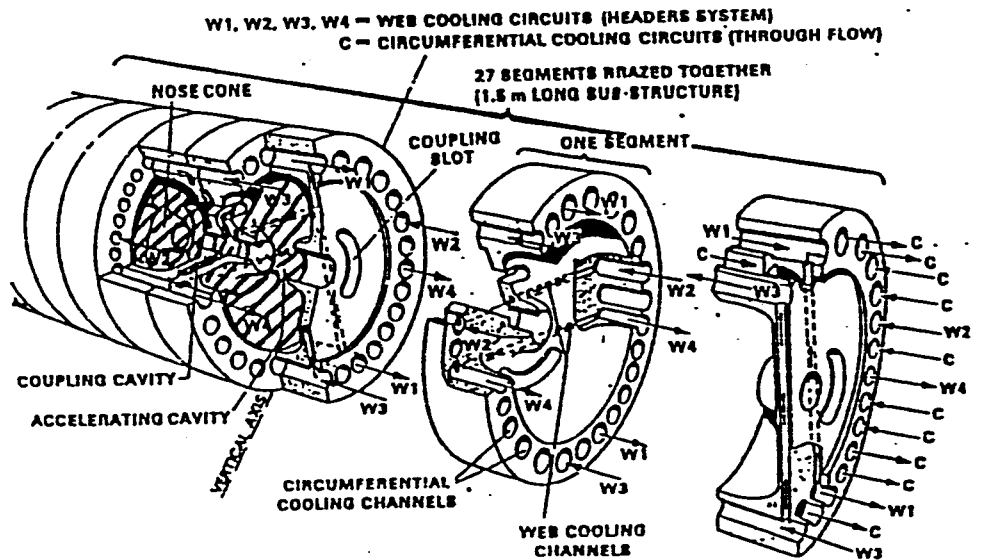


# Examples

## Travelling Wave

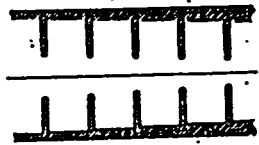


## Standing Wave

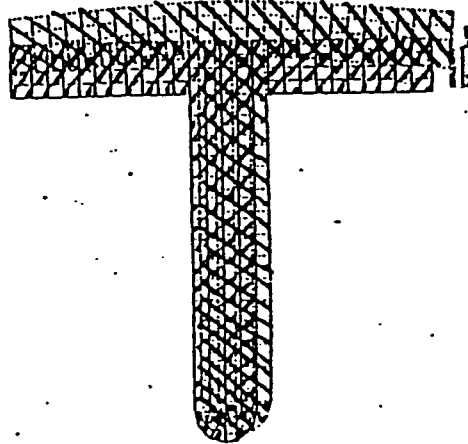


# Cooling and Thermal Stress

## Analysis

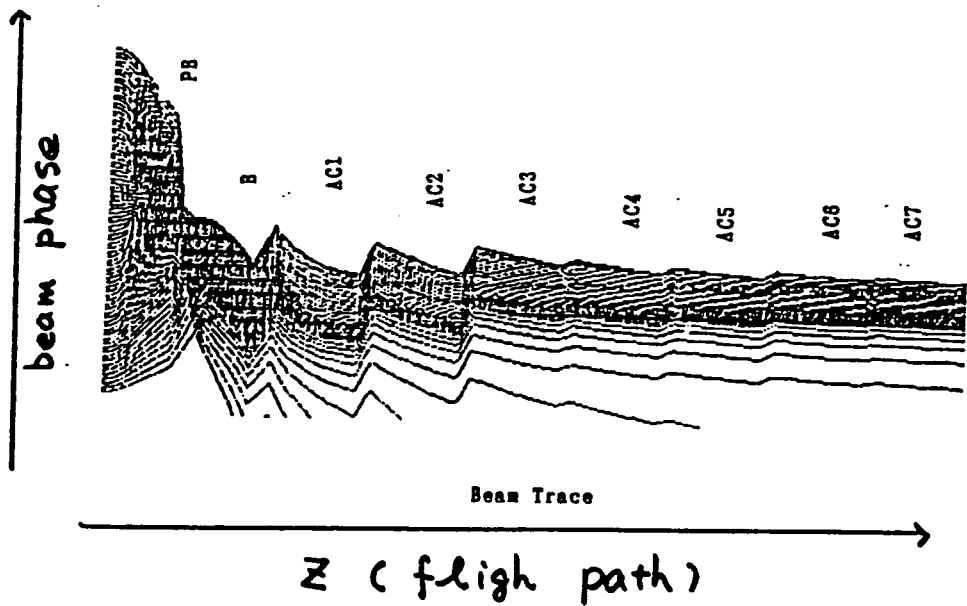


Acc. Tube





# Beam Dynamics Code Analysis



Example of Results



## 1 - 4. TW型加速器の開発現状

大電流電子線形加速器開発研究報告書  
(TW型加速器の開発現状)

KEK 佐藤 勇

§1 はじめに

原子炉又は発電用原子炉を長期間稼働すると、原子核分裂した核燃料は熱エネルギーを発生して、放射性同位元素に変換される。それらの原子炉から取り出された燃料棒は再処理され核燃料と放射性同位元素に分離される。これらの放射性同位元素のうち、寿命の半減期が数十年を越えるものは、その取扱に苦慮する。大部分の放射性同位元素はガラス固化され貯蔵される。しかし、貯蔵施設にも空間的な限界があり、放射性同位元素の短寿命化が試みられている。その1つの方法として、強力なγ線照射による核変換が指摘された。γ線照射による核変換は理論的には可能であり、その寿命を短縮する事が出来る。しかし、この方法では(γ, n)反応は断面積が小さいので、そのエネルギーバランス(核分裂による発生エネルギーに対する放射性同位元素を核変換するための消費エネルギーの比率)が問題となる。そこで、この方法ではγ線に対する反応確率の大きい原子核の共鳴現象を利用する事がより効果的となる。γ線の利用効率を高めるためには、共鳴現象が起こるエネルギーのγ線のみを発生させる事がより重要な課題となる。一方、γ線を発生させるためには、高エネルギーの電子ビームが必要であり、そのためにはエネルギー効率の良い電子加速器が必要となる。以上の理由から、省エネルギー型の大強度電子線形加速器の要素開発研究が進められた。

その第1段階として、100mAのビーム電流を10MeVのエネルギーに加速する高効率の電子線形加速器の開発研究がスタートした。その開発の主体は大電流ビームを連続に加速するための加速方式の開発と、この加速機構に供給する大電力高周波源の開発である。具体的には、次の3項目を目的としている。

- 1) 大電流ビームを安定に且つ能率よく加速するCW加速管の開発
- 2) 高効率大電力CWクライストロン管で、且つ広範囲のビーム加速テストが可能なクライストロン管の開発
- 3) 少ない消費電力で高安定度が得られる大電力クライストロン電源で、且つ広範囲のビーム加速テストが可能なクライストロン管を作動させる電源開発

ここでは、第1項目を検討しその開発の現状を報告する。

§2 大強度電子線形加速器の設計条件

通常の電子線形加速器では、加速管にパルスの大電力高周波を供給し、高い加速電界を発生させてエネルギー利得を大きくし、且つ、尖頭電流の大きい電子ビームを加速する事によって、高周波電力から電子ビームへのエネルギー変換効率を高めている。しかし、加速管の高周波電力損失による熱変形からパルスの幅並びに繰り返し数が制限されその電力負荷率は小さい。従って、その平均ビーム

- クライストロンヒーター電源
- アノード電源
- 集束電磁石電源
- 電子ビームのコレクター損失

3) 立体回路の電力損失

- 導波管
- 電力分配器
- 減衰器

4) 加速管の電力損失

5) ビーム電力

6) 温度制御損失

- 冷凍器
- 冷却水ポンプ
- 空調器

この様に線形加速器は多くの装置で構成され、電力消費の形態も種々雑多である。何れこれらの装置は徹底した省エネルギー化が進められるだろう。ここでは、電子ビーム加速に直接関係ある加速管の電力損失、並びに加速管から電子ビームへの電力変換効率を検討対象とする。

§4 大強度電子線形加速器の設計

4-1 高周波電力から電子ビームへの電力エネルギー変換効率

高周波源から加速管に供給された高周波電力は加速管に高周波電界を励起する。加速管を通過する電子ビームは高周波電界で加速される。加速管に供給された高周波電力 $P_s$ は電子ビームに移動しビーム電力 $P_b$ は増加する。この変換効率 $\eta$ は次の様に定義される。エネルギー保存則から加速管の供給電力 $P_s$ はビームの利得電力 $P_b$ と加速管の消費電力 $P_c$ の和である。従って、電力エネルギー変換効率 $\eta$ は

$$\eta = \frac{P_b}{P_s} = \frac{P_b}{P_b + P_c} = \frac{1}{1 + (P_c/P_b)} \quad (1)$$

で与えられる。電力エネルギー変換効率を増加させるためには(加速管の消費電力 $P_c/P_b$ 、ビーム電力)の値を如何に小さくするかである。即ち、加速管の消費電力 $P_c$ を少なくする事である。加速管の消費電力は加速方式や加速空洞構造に依存する。

4-2 加速方式

電子線形加速器の加速方式は加速管、単空洞、電磁誘導に大別される。

単空洞や電磁誘導の方式は大電流ビーム加速に適しているが、多数の加速装置を並べて繰り返し加速を行う場合、電子ビームと加速電界との同調が複雑であ

を使って計算し、SUPER・FISHコードを使ってチェックした。

定在波ノーズコン型加速管のパラメータはAECLが提出した100MeV、100mA電子線形加速器の加速空洞の設計データを使用した。この加速空洞の設計データはAECLでSUPER・FISHコードを使って計算したものである。定在波加速管の結合度 $\beta$ はビーム負荷がない時、定在波比(VSWR)から推定した。

表5 加速管のパラメータ

	進行波逐流型加速管	ノーズコン型加速管
共振型式	進行波循環型	定在波型
モード	$2\pi/3$	$\pi/2$
結合方式	軸上	軸外
加速管構造	周期構造	準周期構造
加速電界型式	準定電界型	準インピーダンス型
中心孔径	2 a (mm $\phi$ )	53.7
円筒部外周径	2 b (mm $\phi$ )	188.853
円板の厚さ	t (mm)	12.0
加速管の長さ	L (m)	1.2
周波数	f (MHz)	1248.135
有効シャント抵抗	r (M $\Omega$ /m)	35
利益係数	Q <sub>0</sub>	18073
トランジット・タイム	t	1.0
位相速度	V <sub>p</sub> (1/c)	1.0
群速度	V <sub>g</sub> (1/c)	0.015
電界減衰率	$\alpha$ (nep./m)	0.0457
電界減衰量	$\tau = \alpha L$	0.05484
結合係数	c	0.6398
電界増幅度	M	1.5639
加速ビーム電流	i (mA)	100.0
供給電力	P <sub>s</sub> (MW)	0.22
振動電力	P <sub>c</sub> (MW)	0.5
加速電界	E (MV/m)	1.17
加速利得	V (MeV)	1.404
エネルギー変換効率	IV/P <sub>s</sub>	0.638

4-8 ビーム発散特性

大電流線形加速器では加速空洞の高次モード(TM<sub>111</sub>, HEM<sub>111</sub>, etc)と電子ビームの相互作用によるビーム自身の不安定が問題となる。このモードとビームとの相互作用の強さは、電子ビーム電流の強さ、高次モードのシャント抵抗r<sub>s</sub>の大きさ、相互作用の長さL<sub>i</sub>、ビームの通過する場所等に関係し、発散現象が発生開始するビーム電流をi<sub>0</sub>とすると

$$i_0 = C (\lambda_{111} / L_i^2) (1 / r_s) \beta \gamma \quad (33)$$

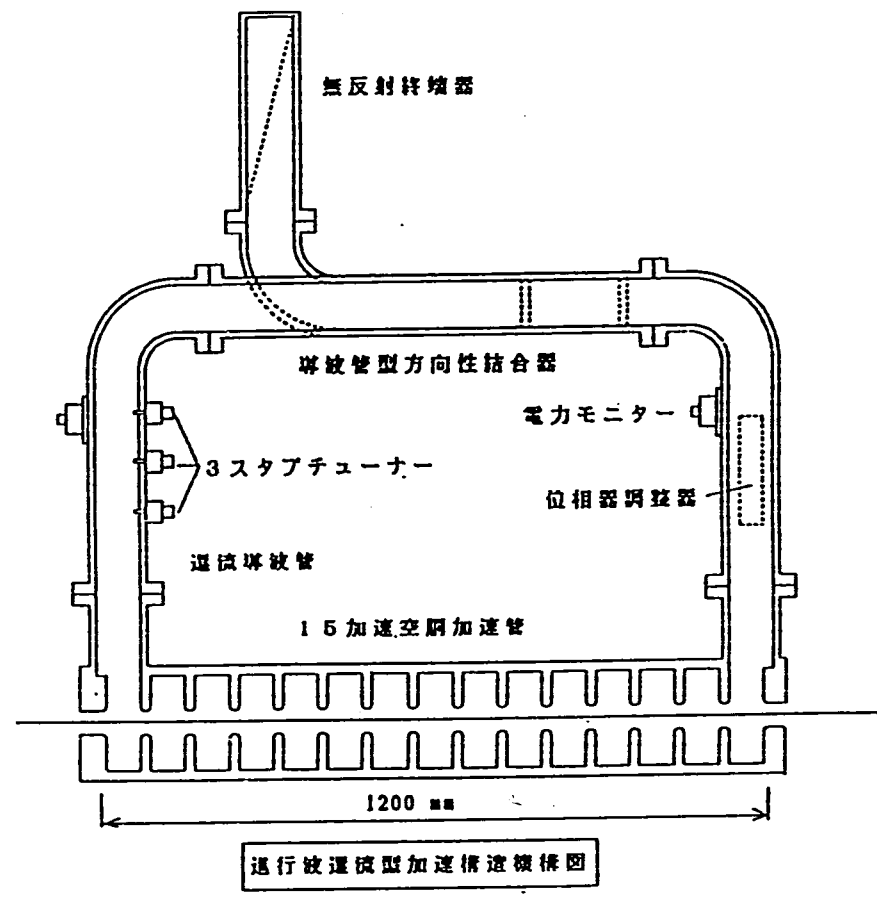
で与えられる。ここで、 $\beta$ はv<sub>e</sub>/c、 $\gamma$ はローレンツ因子である。進行波逐流型加速管とノーズコン型加速管の高次モードの周波数f<sub>i</sub>とシャント抵抗r<sub>s</sub>を表6に示す。進行波逐流型加速空洞発散モードはマフィア・コードを使って計算した。

表6 加速管のビーム発散特性

	進行波逐流型加速管	ノーズコン型加速管
発散周波数	f <sub>i</sub> (MHz)	1884.126
変態(モード)		TM <sub>111</sub>
加速モード		$\pi$
シャント抵抗	r <sub>s</sub> (M $\Omega$ /m)	32.14

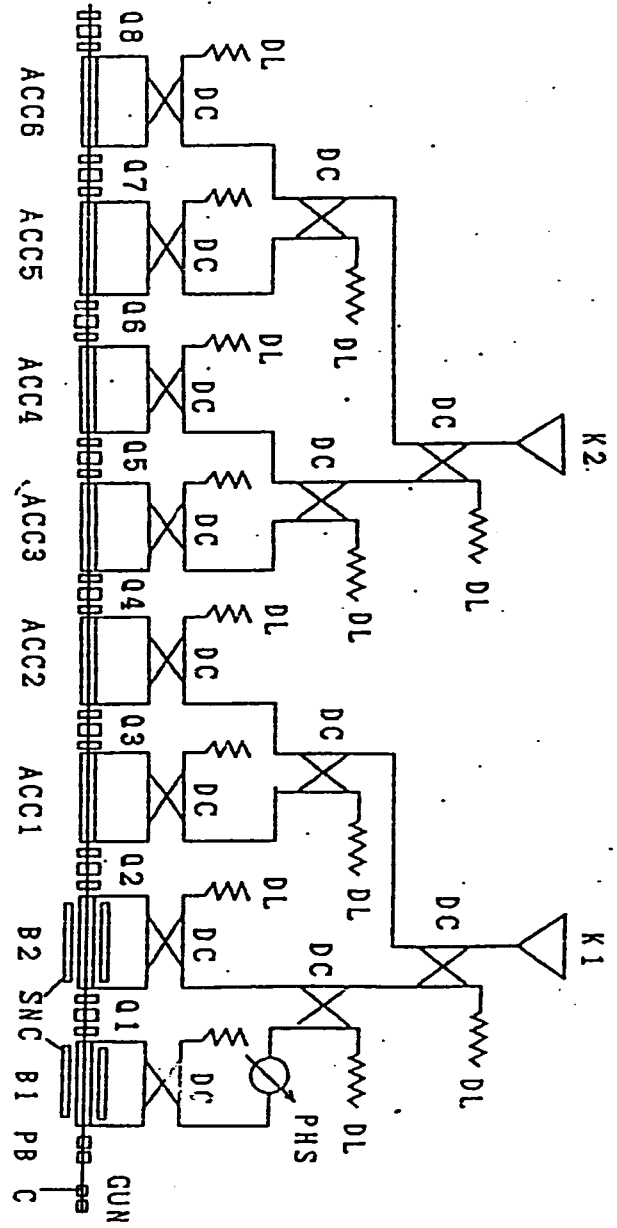
表 8 進行波速流型加速器と加速ビーム電流特性

ビーム電流 加速管の番号	10(mA)		100(mA)		200(mA)		300(mA)	
	E(MeV)	$\eta$ (%)	E(MeV)	$\eta$ (%)	E(MeV)	$\eta$ (%)	E(MeV)	$\eta$ (%)
1	1.69	4.46	1.60	40.4	1.38	60.2	1.17	62.5
2	4.16	11.2	3.10	68.1	2.27	81.3	1.75	79.5
3	6.76	11.8	4.60	68.1	3.21	85.4	2.39	86.3
4	9.49	12.4	6.15	70.7	4.17	87.2	2.99	81.5
5	12.24	12.5	7.71	70.8	5.12	86.7	3.66	91.9
6	15.00	12.6	9.27	70.8	6.08	86.8	4.33	91.7
7	17.78	12.6	10.82	70.7	7.04	87.4	5.00	92.1
8	20.55	12.6	12.37	70.5	8.00	87.4	5.67	92.7

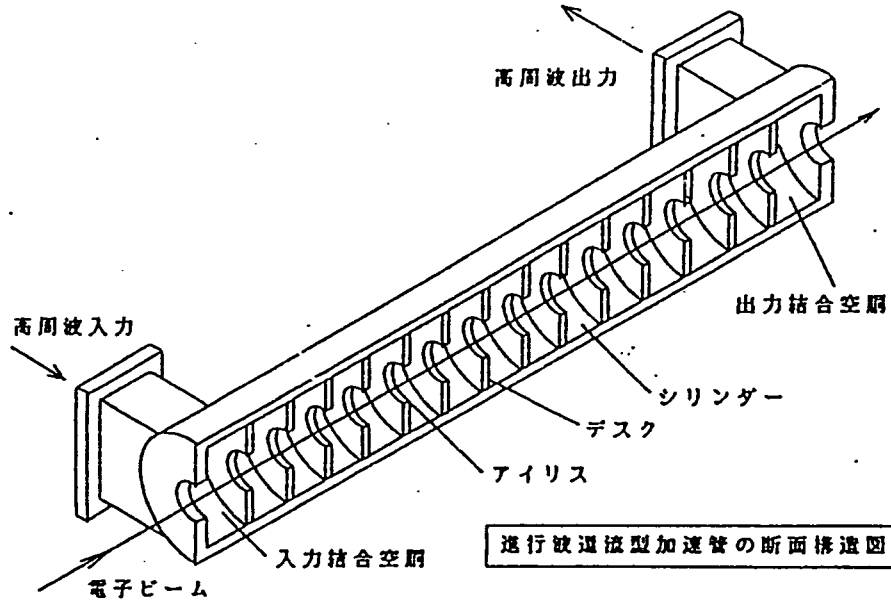


進行波速流型加速器構造概略図

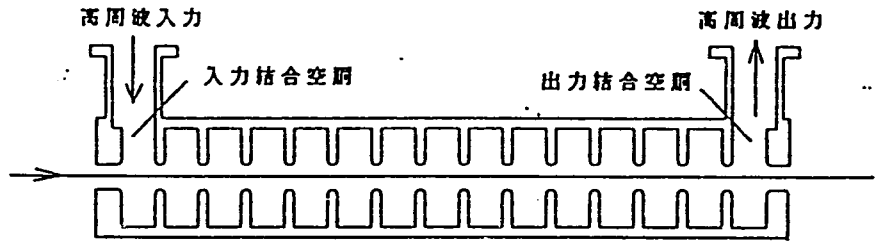
図 5-5-1 100 mA 加速のバンチャー部 1 のビームトレース



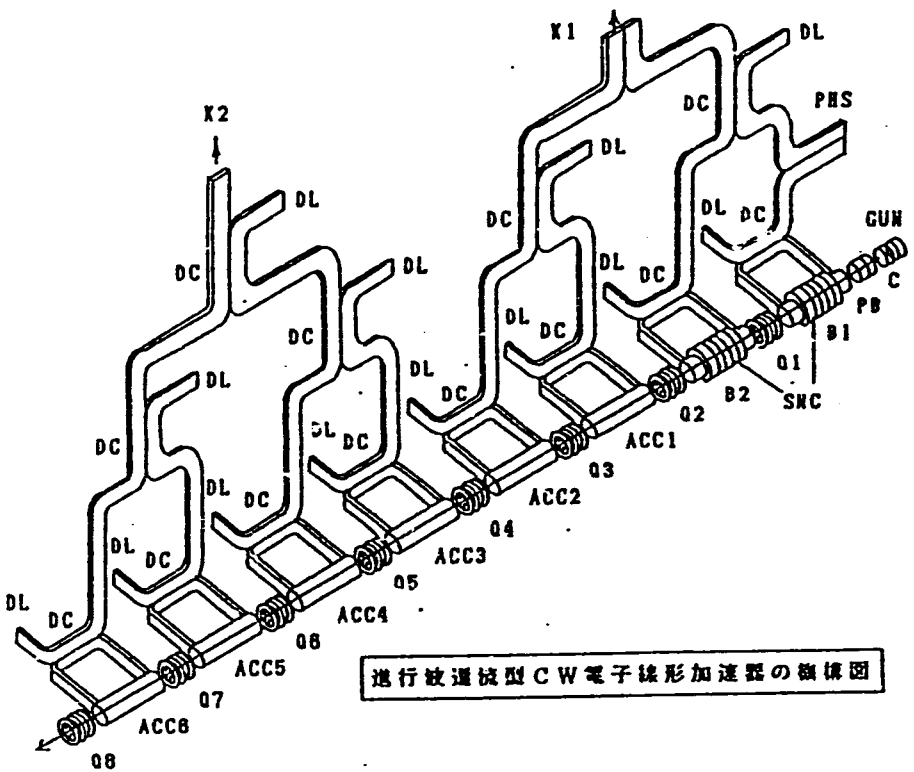
進行波逕流型CW電子線形加速器の全体図



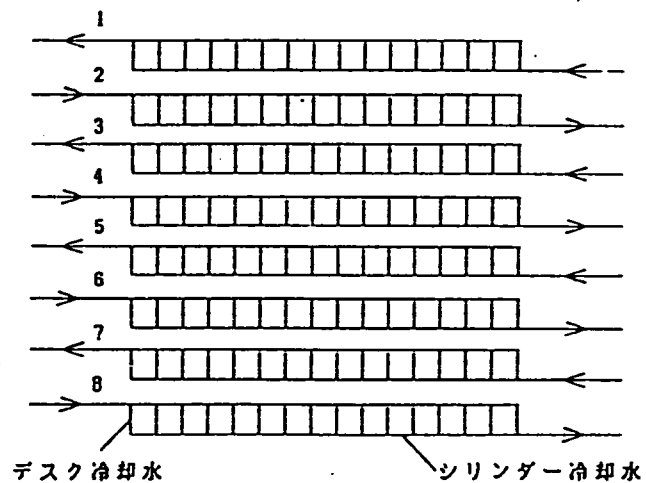
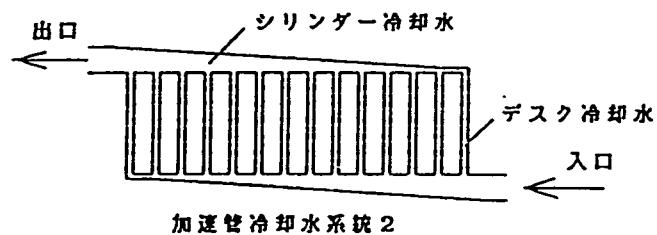
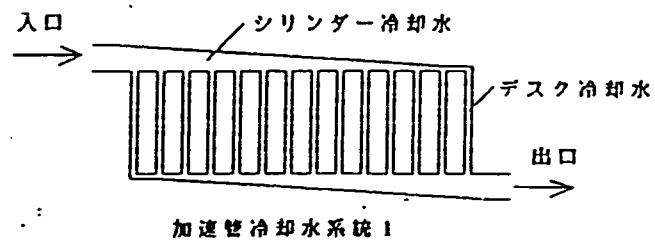
進行波逕流型加速器の断面構造図



進行波逕流型加速器の構造図

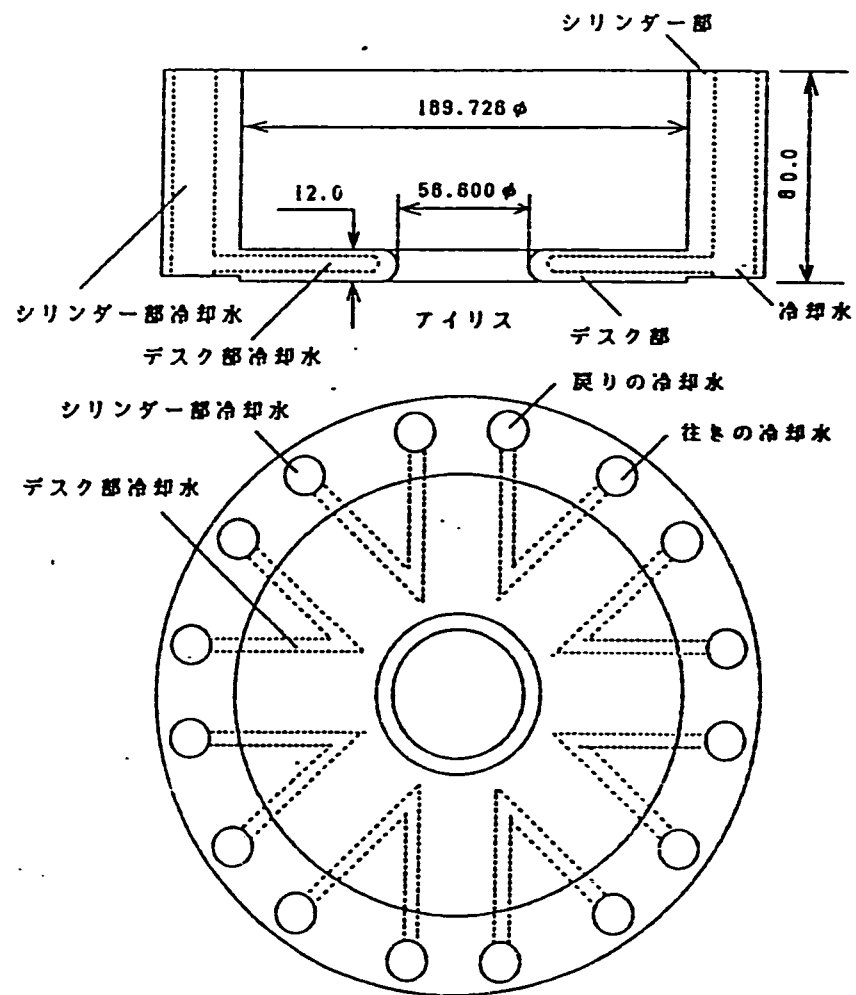


BUNCHER PARAMETER	
FREQUENCY (MHz)	1249.1
GUN VOLT (KV)	200.0
BEAM CURRENT (A)	0.10
PREBUNCHER 1 VOLT (KV)	30.0
DRIFT SPACE 1 (m)	0.5
PREBUNCHER 2 VOLT (KV)	75.0
DRIFT SPACE 2 (m)	0.2
INPUT POWER (KW)	220.0
PHASE SHIFT (DEG)	0.0
BUNCHER CAVITIES NUM.	17



加速管冷却水系統図

材質：無酸素鋼



加速空間部品の詳細図

2.3.5 結果の評価

2.3.5.1  $\partial f / \partial (2b)$ の評価と $2a-2b$ 曲線

得られた結果からわかるように、各 $\beta$ でディスクを固定し $2b$ 寸法を修正拡大したときのブリルアン曲線は $2b$ を拡大するにしたがって下方に平行移動していきます。この $2b$ 拡大にともなうブリルアン曲線の動き、また $2b$ 寸法と本加速器の加速モードである $2/3\pi$ モードでの周波数との関係を示すグラフを図2.3.80~2.3.119に示します。

これらより加速空洞の寸法の最適化のために必要な周波数に対する $2b$ 寸法の動き： $\partial f / \partial (2b)$ を求めると表2.3.12のようになり、ほぼどの $\beta$ 、ディスクにおいても $-7.0\text{MHz}/\mu\text{m}$ となっています。

この値を2.1でコンピュータシミュレーションをおこない得られた値と比較してみると、コンピュータの結果は $\beta=1.0$ のレギュラセクションで $\partial f / \partial (2b)$ が $-6.75 \sim -6.94\text{MHz}/\mu\text{m}$ でありましたので、コンピュータの方が若干小さくはありますが、実験値とよく一致しています。

表2.3.12 周波数に対する $2b$ 寸法の動き (単位  $\text{MHz}/\mu\text{m}$ )

	$2a=50.0$	$2a=54.0$	$2a=58.0$	$2a=62.0$	$2a=66.0$
$\beta=1.0$	-6.94	-6.98	-6.99	-6.96	-7.02
$\beta=0.9$	-6.98	-6.99	-6.99	-6.99	-7.04
$\beta=0.8$	-7.01	-6.97	-7.03	-7.00	-7.01
$\beta=0.7$	-6.99	-7.00	-7.02	-7.05	-7.04

またこれらのデータより、最適化の目標とする周波数 $1249.135\text{MHz}$ に対する最適 $2b$ 寸法を求め、各ディスクについて $\beta-2b$ 曲線をプロットしたものを図2.3.120~2.3.129に示します。

2.3.5.3 Q値

今回の測定では、テスト空洞法で3ディスク法の時のQ値： $Q_3$ 、6ディスク法の時のQ値： $Q_6$ を測定しています。これら $Q_3$ 、 $Q_6$ の値には測定空洞両端にあるシート板の影響が含まれており、これを除くためには

$$Q_0 = \frac{Q_3 - Q_6}{2Q_3 - Q_6} \quad \dots\dots 2.3.5)$$

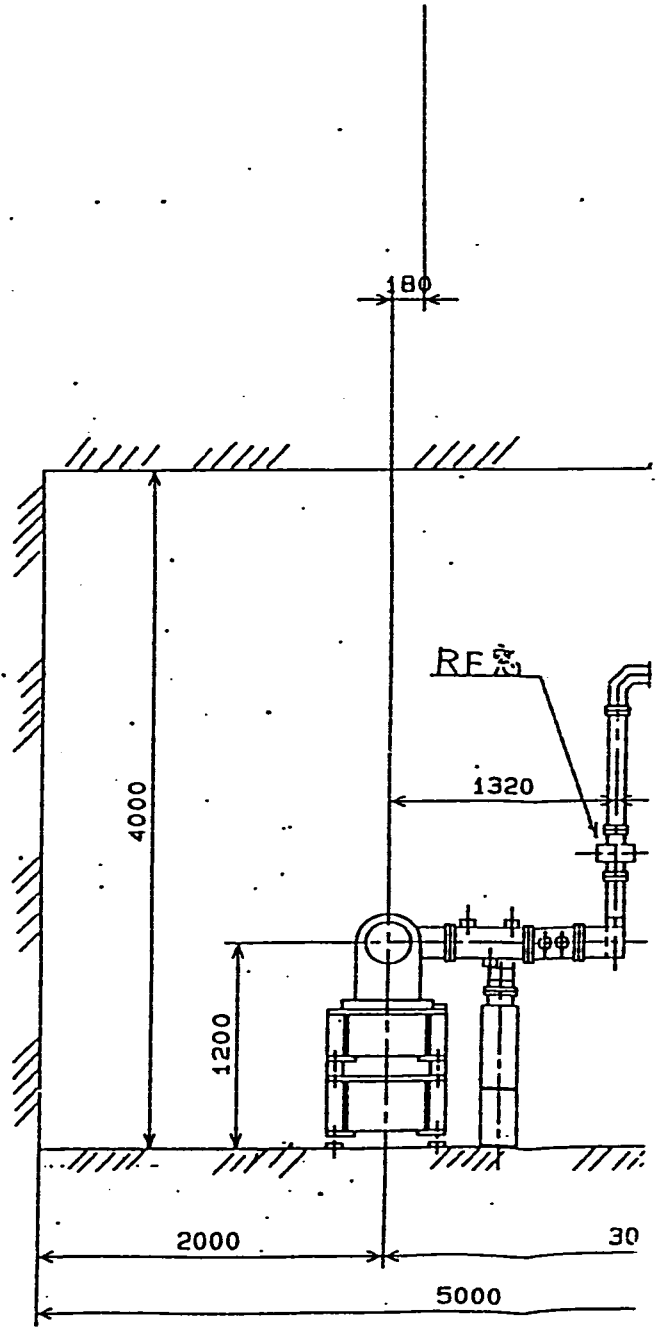
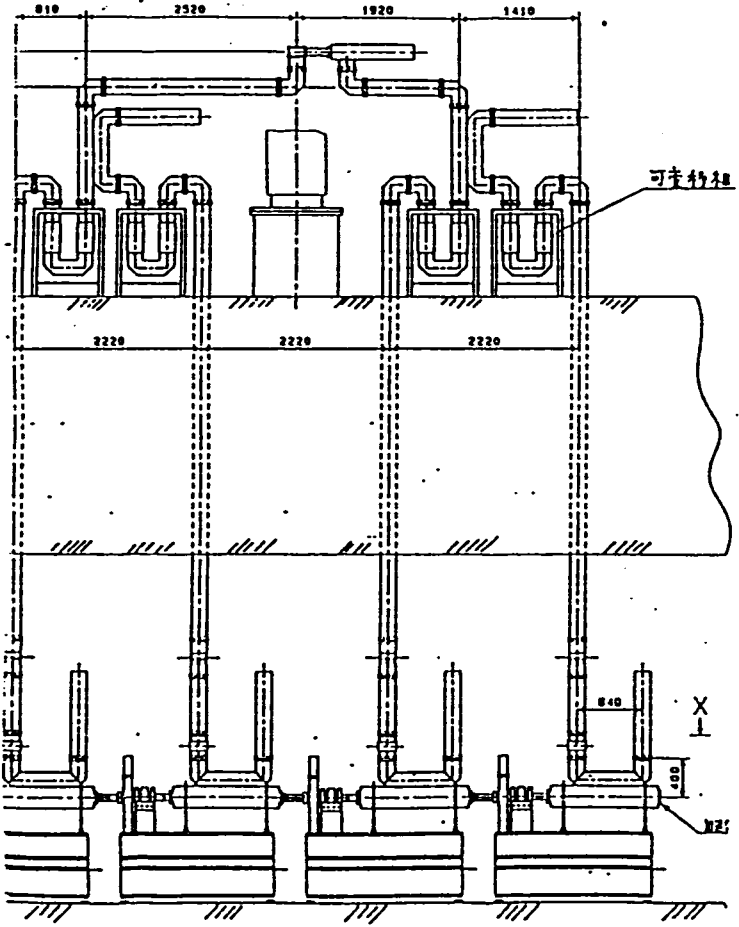
を計算する必要があります。また本測定に用いた空洞はアルミ製であるので、実際使用される銅の値("Superflash"の結果も銅製の空洞の値)に修正しなければなりません。

$\beta=1.0$ の場合の各ディスクについてのQ値のデータをまとめたものを表2.3.15に示します。2.1のシミュレーションの結果では、 $2a=51.6 \sim 58.6\mu\text{m}$ でQ値は約21200であったので、今回の測定では計算値の約80%が実現されていることとなります。

表2.3.15  $\beta=1.0$ でのQ0値

$\beta=1.0$	$Q_3$	$Q_6$	$Q_0(Al)$	$Q_0(Cu)$
$2a=50.0$	8976	10988	14156	17840
$2a=54.0$	8839	10839	14009	17655
$2a=58.0$	8722	10157	13036	16421
$2a=62.0$	8458	10332	13278	16733
$2a=66.0$	8340	9790	11850	14934





12

NEW ACCELERATOR STRUCTURE

I.Sato and Y.L.Wang

A new type of traveling wave linear accelerator structure is being developed. This structure is like disk and washer structure, but it is simpler than that one. There are no protrusions in the inner surface of the cylinder. The washers without noses are like disks. Between the disks and cavity wall there are coupling slots. In other words, we cut the round coupling slits on the disks in the disk-loaded structure.

This structure has high shunt impedance, high group velocity, high Q value and low attenuation. Therefore, this structure with traveling wave resonant ring has high efficiency. Especially, for large beam current and CW linac its efficiency can be reached as high as 90%. So we call it HELAS (High Efficiency Linear Accelerator Structure).

In addition, it has a important characteristic. Its TM<sub>11</sub>-like mode is not a backward wave, but a forward wave. Its Brillouin diagram is shown in Fig.1. So it has high threshold current of BBU.

The theoretical study has been performed using computer codes of SUPERFISH and MAPIA. Some experiments have been done. The results of calculation agree with results of experiments.

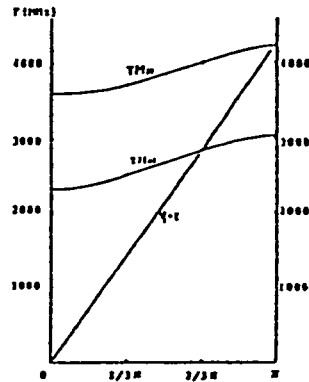
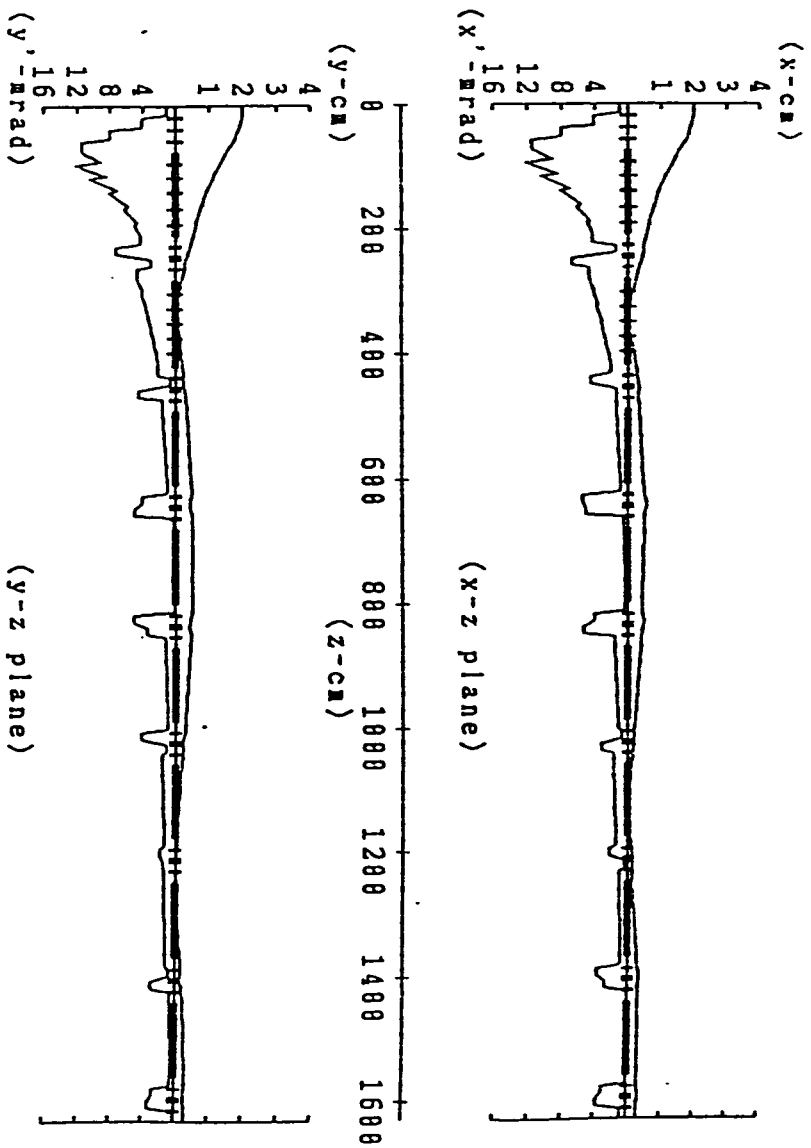


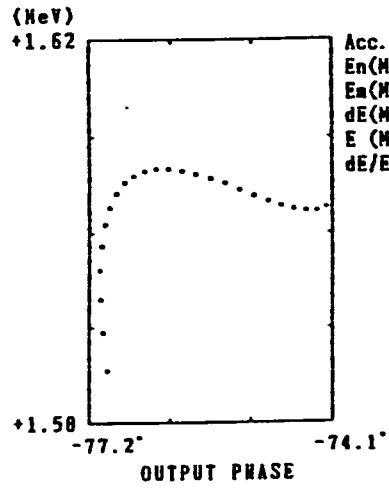
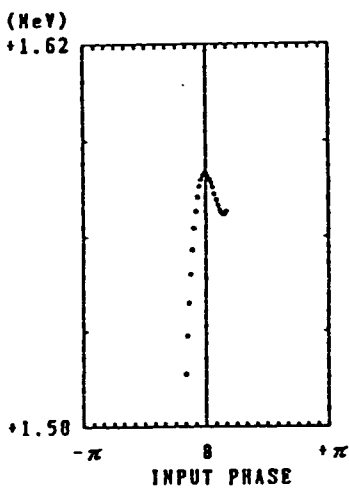
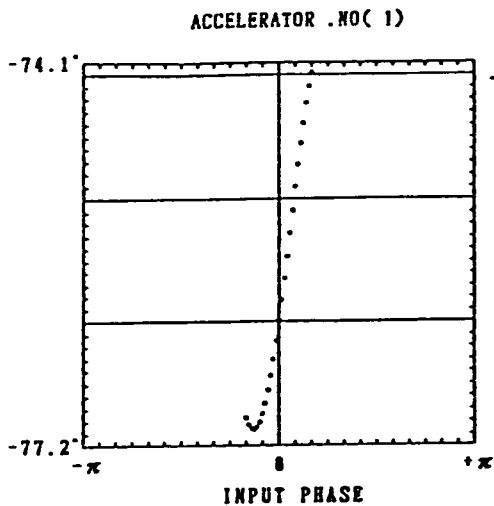
Fig.1 Brillouin diagram of HELAS

1	0	2.000	1.000	2.000	1.000	0.200	1.000	0.20
2	1	2.000	1.000	2.000	1.000	0.200	1.000	0.20
3	6	1.992	4.153	1.992	4.153	0.200	1.000	0.20
4	1	1.932	4.153	1.932	4.153	0.200	1.000	0.20
5	6	1.908	7.973	1.908	7.973	0.200	1.000	0.20
6	1	1.789	7.973	1.789	7.973	0.200	1.000	0.20
7	6	1.751	11.530	1.751	11.530	0.200	1.000	0.20
8	1	1.578	11.530	1.578	11.530	0.200	1.000	0.20
9	5	1.403	9.088	1.403	9.088	0.200	4.212	0.25
10	6	1.361	12.159	1.361	12.159	0.200	4.212	0.25
11	5	1.173	8.431	1.173	8.431	0.200	5.676	0.37
12	6	1.136	10.360	1.136	10.360	0.200	5.676	0.37
13	5	0.965	7.055	0.965	7.055	0.200	5.530	0.54
14	6	0.935	8.115	0.935	8.115	0.200	5.530	0.54
15	5	0.789	5.724	0.789	5.724	0.200	4.790	0.76
16	6	0.766	6.310	0.766	6.310	0.200	4.790	0.76
17	5	0.643	4.728	0.643	4.728	0.200	4.066	1.02
18	6	0.624	5.078	0.624	5.078	0.200	4.066	1.02
19	5	0.552	4.311	0.552	4.311	0.200	3.664	1.20
20	1	0.488	4.311	0.488	4.311	0.200	3.664	1.20
21	-3	0.474	1.436	0.459	7.258	0.200	3.664	1.20
22	1	0.462	1.435	0.387	7.258	0.200	3.664	1.20
23	3	0.421	6.854	0.338	2.870	0.200	3.664	1.20
24	1	0.353	6.854	0.311	2.870	0.200	3.664	1.20
25	-3	0.324	4.772	0.293	4.677	0.200	3.664	1.20
26	1	0.255	4.772	0.226	4.677	0.200	3.664	1.20
27	5	0.173	4.100	0.147	4.019	0.200	3.573	1.39
28	6	0.158	4.169	0.133	4.075	0.200	3.573	1.39
29	5	0.095	3.655	0.080	3.572	0.200	3.505	1.59
30	6	0.085	3.689	0.074	3.591	0.200	3.505	1.59
31	5	0.070	3.243	0.082	3.157	0.200	3.251	1.81
32	6	0.075	3.227	0.088	3.129	0.200	3.251	1.81
33	5	0.113	2.879	0.132	2.791	0.200	3.051	2.03
34	6	0.122	2.810	0.141	2.711	0.200	3.051	2.03
35	5	0.168	2.532	0.186	2.442	0.200	2.840	2.25
36	6	0.177	2.418	0.194	2.321	0.200	2.840	2.25
37	5	0.219	2.198	0.235	2.109	0.200	2.623	2.48
38	1	0.251	2.198	0.265	2.109	0.200	2.623	2.48
39	-3	0.267	4.491	0.269	0.728	0.200	2.623	2.48
40	1	0.312	4.491	0.265	0.728	0.200	2.623	2.48
41	3	0.327	1.504	0.285	4.578	0.200	2.623	2.48
42	1	0.313	1.504	0.331	4.578	0.200	2.623	2.48
43	-3	0.313	1.515	0.346	1.543	0.200	2.623	2.48
44	1	0.334	1.515	0.368	1.543	0.200	2.623	2.48
45	5	0.471	0.946	0.509	0.963	0.200	1.985	3.97
46	1	0.485	0.946	0.523	0.963	0.200	1.985	3.97
47	-3	0.501	5.570	0.515	3.986	0.200	1.985	3.97
48	1	0.557	5.570	0.475	3.986	0.200	1.985	3.97
49	3	0.559	5.153	0.480	4.916	0.200	1.985	3.97
50	1	0.508	5.153	0.529	4.916	0.200	1.985	3.97
51	-3	0.494	0.482	0.541	0.249	0.200	1.985	3.97
52	1	0.487	0.482	0.539	0.249	0.200	1.985	3.97
53	5	0.443	0.351	0.522	0.182	0.200	1.696	5.44
54	1	0.439	0.351	0.521	0.182	0.200	1.696	5.44
55	-3	0.448	3.952	0.508	5.091	0.200	1.696	5.44
56	1	0.487	3.952	0.457	5.091	0.200	1.696	5.44
57	3	0.479	5.524	0.449	3.507	0.200	1.696	5.44
58	1	0.424	5.524	0.484	3.507	0.200	1.696	5.44
59	-3	0.407	1.543	0.490	1.216	0.200	1.696	5.44

N	NN	X (cm)	X' (mr)	Y (cm)	Y' (mr)	BZ (cm)	dP/P (%)	E0 (MeV)
60	1	0.384	1.543	0.472	1.216	0.200	1.696	5.44
61	5	0.223	1.206	0.344	0.950	0.200	1.527	6.97
62	1	0.205	1.206	0.330	0.950	0.200	1.527	6.97
63	-3	0.204	0.850	0.318	4.087	0.200	1.527	6.97
64	1	0.212	0.850	0.277	4.087	0.200	1.527	6.97
65	3	0.200	3.256	0.262	1.077	0.200	1.527	6.97
66	1	0.167	3.256	0.273	1.077	0.200	1.527	6.97
67	-3	0.155	1.720	0.271	1.600	0.209	1.527	6.97
68	1	0.130	1.720	0.247	1.600	0.200	1.527	6.97
69	5	0.070	1.411	0.080	1.313	0.200	1.419	8.49
70	1	0.089	1.411	0.063	1.313	0.209	1.419	8.49
71	-3	0.098	2.275	0.056	1.810	0.200	1.419	8.49
72	1	0.120	2.275	0.041	1.810	0.200	1.419	8.49
73	3	0.130	0.424	0.033	1.454	0.200	1.419	8.49
74	1	0.128	0.424	0.034	1.454	0.200	1.419	8.49
75	-3	0.130	1.108	0.036	1.359	0.200	1.419	8.49
76	1	0.146	1.108	0.046	1.359	0.200	1.419	8.49
77	5	0.265	0.936	0.183	1.148	0.200	1.199	10.05
78	1	0.279	0.936	0.200	1.148	0.200	1.199	10.05
79	-3	0.291	3.678	0.200	0.839	0.200	1.199	10.05
80	1	0.327	3.678	0.192	0.839	0.200	1.199	10.05
81	3	0.332	2.819	0.203	2.965	0.200	1.199	10.05
82	1	0.303	2.819	0.232	2.965	0.200	1.199	10.05
83	-3	0.297	0.157	0.241	0.675	0.200	1.199	10.05
84	1	0.298	0.157	0.251	0.675	0.200	1.199	10.05
85	5	0.307	0.136	0.325	0.584	0.200	1.038	11.61
86	1	0.309	0.136	0.334	0.584	0.200	1.038	11.61
87	-3	0.316	3.094	0.328	2.645	0.200	1.038	11.61
88	1	0.347	3.094	0.302	2.645	0.200	1.038	11.61
89	3	0.344	3.716	0.304	3.139	0.200	1.038	11.61
90	1	0.307	3.716	0.336	3.139	0.200	1.038	11.61
91	-3	0.296	0.815	0.343	0.192	0.200	1.038	11.61
92	1	0.284	0.815	0.341	-0.192	0.200	1.038	11.61

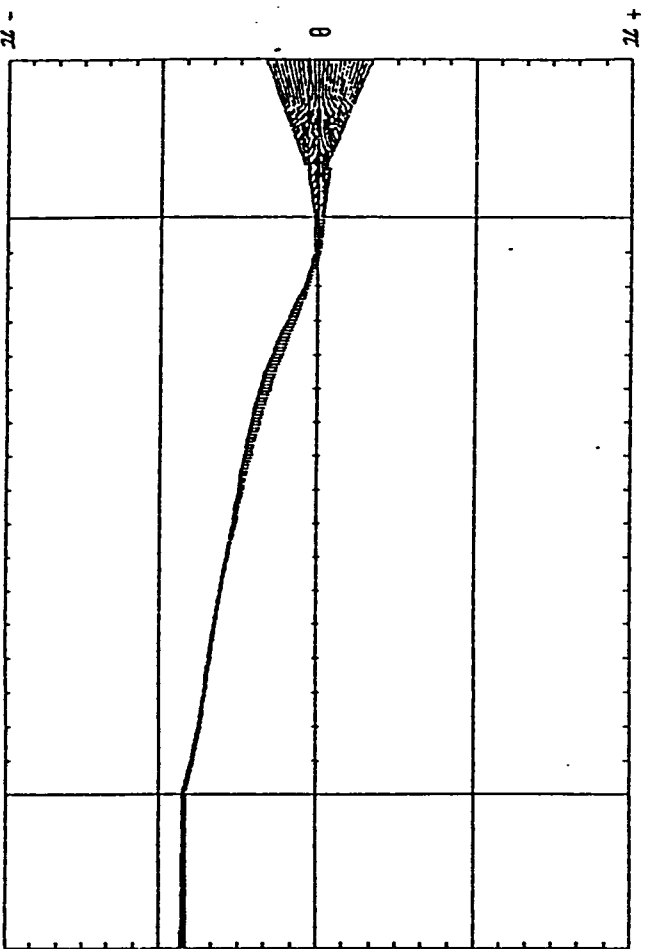


(deg)  
 Pmin= -77.86  
 Pmax= -74.18  
 Pdif= 2.89  
 P.ave= -75.96



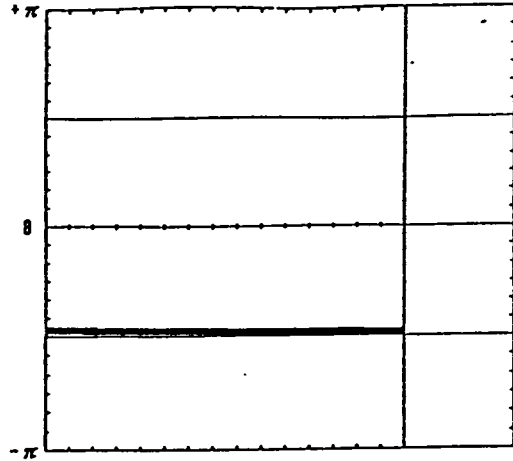
Acc. No. = 1  
 En(MeV) = 1.566  
 Em(MeV) = 1.687  
 dE(MeV) = 0.021  
 E (MeV) = 1.682  
 dE/E(X) = 1.32

ACCELERATOR NO( 1)



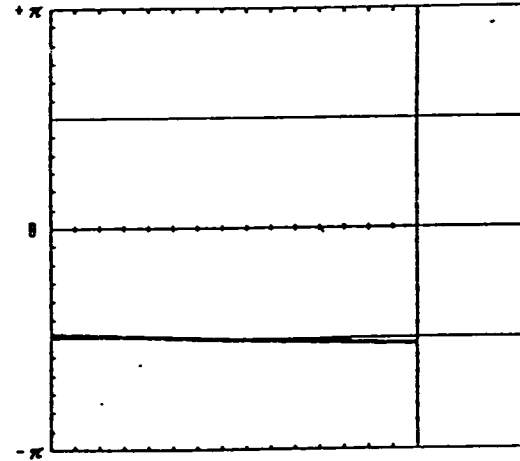
Acc. NO = 1  
 Cav. NO = 17  
 Acc. L(m)=1.162  
 Couple =0.416  
 Multi = 5.77  
 P(KW) = 228.0  
 E(MeV) = 1.682  
 I(A) = 0.108  
 dE/E(X) = 1.32  
 Eff(X) = 48.41  
 Ve/C = 0.9478  
 P (deg) = -75.96  
 dP(deg) = 2.89  
 Ps(deg)=0.0

ACCELERATOR NO( 8)  
PHASE SHIFT OF INPUT POWER 18.888



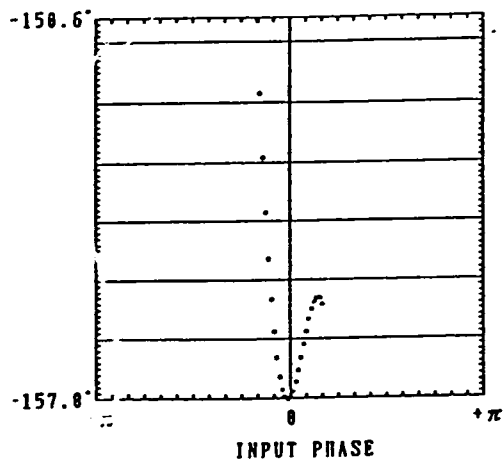
Acc. NO = 8  
Cav. NO = 15  
Acc. L(m)=1.288  
Couple =0.578  
Mult1 = 3.88  
P(KV) = 228.8  
E(MeV) = 12.372  
I(A) =0.188  
dE/E(X) = 0.19  
Eff(X) = 78.53  
Ve/C = 0.9991  
P (deg)= -85.88  
dP(deg)= 5.23  
Ps(deg)=0.8

ACCELERATOR NO( 8)  
PHASE SHIFT OF INPUT POWER 8.888

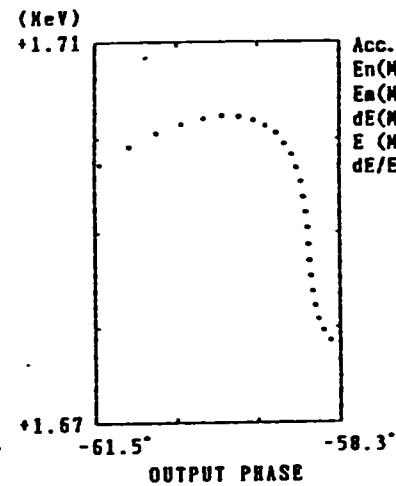
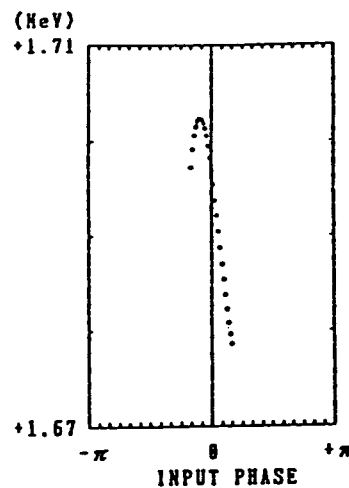


Acc. NO = 8  
Cav. NO = 15  
Acc. L(m)=1.288  
Couple =0.954  
Mult1 = 1.18  
P(KV) = 228.8  
E(MeV) = 5.686  
I(A) =0.388  
dE/E(X) = 0.52  
Eff(X) = 92.78  
Ve/C = 0.9968  
P (deg)= -94.23  
dP(deg)= 2.79  
Ps(deg)=0.8

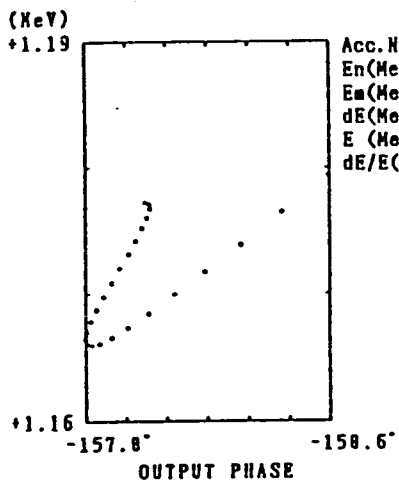
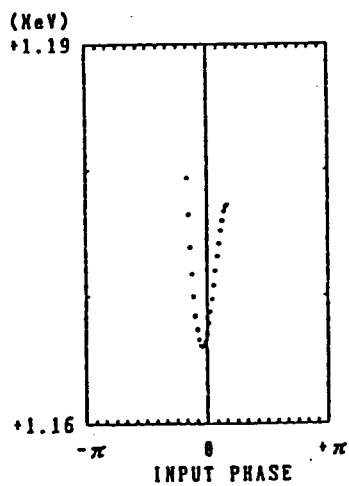
ACCELERATOR .NO( 1)



(deg)  
 Pmin=-157.81  
 Pmax=-158.65  
 Pdif= 6.36  
 P.ave=-155.48

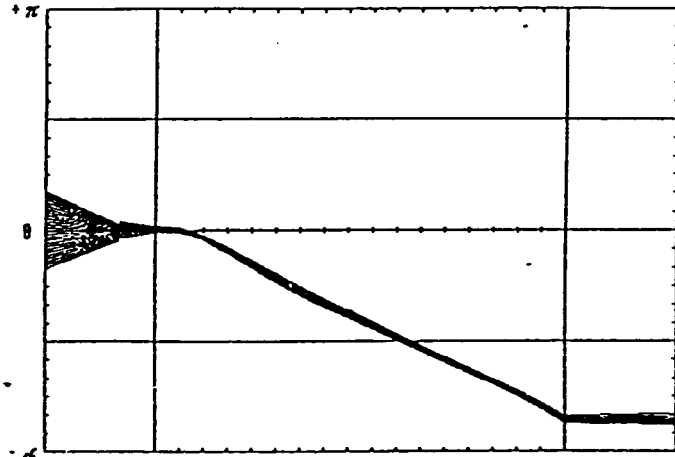


Acc.No. = 1  
 En(MeV)= 1.679  
 Em(MeV)= 1.782  
 dE(MeV)= 0.824  
 E (MeV)= 1.694  
 dE/E(X)= 1.48



Acc.No. = 1  
 En(MeV)= 1.166  
 Em(MeV)= 1.179  
 dE(MeV)= 0.813  
 E (MeV)= 1.171  
 dE/E(X)= 1.15

ACCELERATOR NO( 1)



Acc.NO = 1  
 Cav.NO = 17  
 Acc.L(m)=1.162  
 Couple =0.768  
 Mult1 = 1.78  
 P(KW) = 228.8  
 E(MeV) = 1.171  
 I(A) =0.388  
 dE/E(X)= 1.15  
 Eff(X) = 62.52  
 Ve/C = 0.8998  
 P (deg)=-155.48  
 dP(deg)= 6.36  
 Ps(deg)=158.8

$\beta=0.8, 2a=50.0, 2b=189.995$

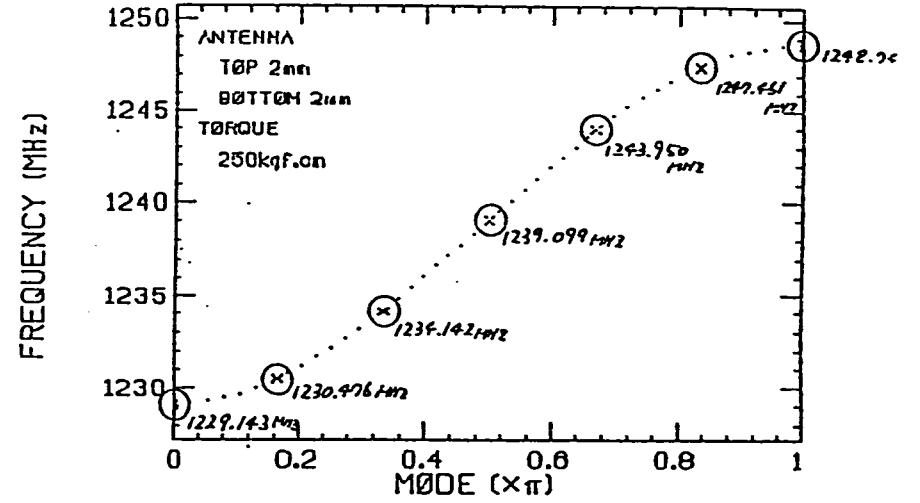


図2.3.18 ブリルアン曲線 (step 1-4,  $\beta=0.8$ )

$\beta=0.7, 2a=50.0, 2b=191.005$

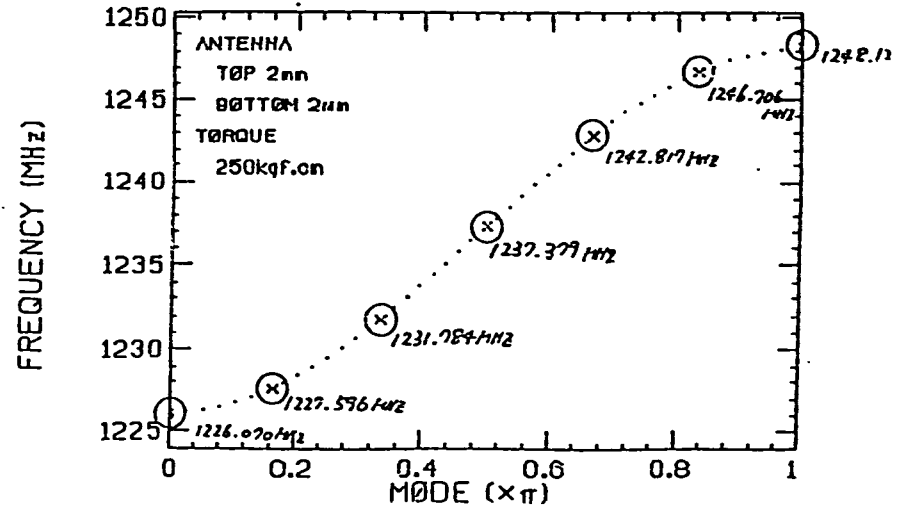


図2.3.19 ブリルアン曲線 (step 1-4,  $\beta=0.7$ )

$\beta=1.0, 2a=50.0$

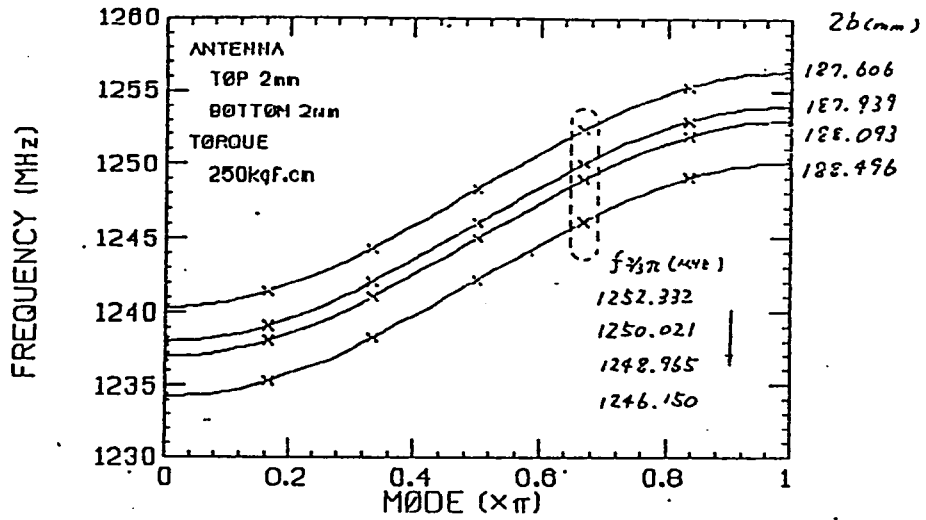


図2.3.80 プリルアン曲線の変化 (step 1,  $\beta=1.0$ )

ACCELERATOR GUIDE NUMBER 7					R0 (J)	Q0 (J)	GV (J)
J	AD (J)	BD (J)	DD (J)	BW (J)	(Mohm/m)		(1/c)
1	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
2	28.1500	94.8237	80.0000	1.00000	34.3121	19090.9	0.01791
3	28.0000	94.7839	80.0000	1.00000	34.4244	19088.9	0.01760
4	27.8500	94.7443	80.8000	1.00000	34.5377	19087.0	0.01730
5	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
6	27.5500	94.6663	80.0000	1.00000	34.7534	19082.9	0.01667
7	27.4000	94.6277	80.0000	1.00000	34.8627	19080.9	0.01636
8	27.2000	94.5767	80.0000	1.00000	35.0124	19078.4	0.01597
9	27.0000	94.5263	80.0000	1.00000	35.1640	19076.0	0.01559
10	26.8000	94.4765	80.0000	1.00000	35.3067	19073.4	0.01518
11	26.6000	94.4271	80.0000	1.00000	35.4563	19071.0	0.01481
12	26.4000	94.3784	80.0000	1.00000	35.6335	19069.3	0.01452
13	26.2000	94.3301	80.0000	1.00000	35.6367	19063.3	0.01372
14	26.0000	94.2825	80.0000	1.00000	35.5984	19063.8	0.01369
15	25.8000	94.2353	80.0000	1.00000	36.0482	19061.5	0.01334

ACCELERATOR GUIDE NUMBER 8					R0 (J)	Q0 (J)	GV (J)
J	AD (J)	BD (J)	DD (J)	BW (J)	(Mohm/m)		(1/c)
1	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
2	28.1500	94.8237	80.0000	1.00000	34.3121	19090.9	0.01791
3	28.0000	94.7839	80.0000	1.00000	34.4244	19088.9	0.01760
4	27.8500	94.7443	80.8000	1.00000	34.5377	19087.0	0.01730
5	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
6	27.5500	94.6663	80.0000	1.00000	34.7534	19082.9	0.01667
7	27.4000	94.6277	80.0000	1.00000	34.8627	19080.9	0.01636
8	27.2000	94.5767	80.0000	1.00000	35.0124	19078.4	0.01597
9	27.0000	94.5263	80.0000	1.00000	35.1640	19076.0	0.01559
10	26.8000	94.4765	80.0000	1.00000	35.3067	19073.4	0.01518
11	26.6000	94.4271	80.0000	1.00000	35.4563	19071.0	0.01481
12	26.4000	94.3784	80.0000	1.00000	35.6335	19069.3	0.01452
13	26.2000	94.3301	80.0000	1.00000	35.6367	19063.3	0.01372
14	26.0000	94.2825	80.0000	1.00000	35.5984	19063.8	0.01369
15	25.8000	94.2353	80.0000	1.00000	36.0482	19061.5	0.01334

DATE-91/01/20 TIME-23:02:45

$\beta=1.0, 2a=50.0$

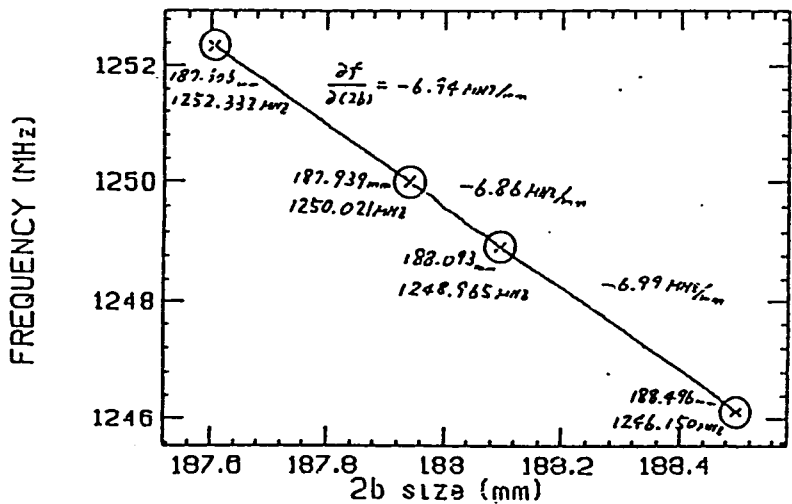


図2.3.81 2b寸法と共振周波数(2/3 $\pi$ )との関係 (step 1,  $\beta=1.0$ )



PARAMETERS OF L-BAND ACCELERATOR GUIDE CAVITIES

ACCELERATOR GUIDE NUMBER 1							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	32.4000	97.8251	56.3279	0.70410	15.2256	14527.8	0.02513
2	32.6000	97.7665	57.8030	0.72254	16.0987	14860.6	0.02692
3	32.8000	97.7074	59.3166	0.74146	16.9999	15195.6	0.02671
4	32.9500	97.6270	60.8698	0.76087	17.9645	15532.4	0.02740
5	33.1000	97.5469	62.4637	0.78080	18.9561	15871.2	0.02809
6	33.2500	97.4670	64.0994	0.80124	19.9750	16211.9	0.02876
7	33.4000	97.3875	65.7778	0.82222	21.0209	16554.4	0.02944
8	33.5500	97.3084	67.5003	0.84376	22.0965	16898.6	0.03014
9	33.7000	97.2297	69.2678	0.86585	23.1907	17244.4	0.03077
10	33.8500	97.1514	71.0816	0.88852	24.3152	17591.8	0.03145
11	33.9000	97.0693	72.4773	0.90597	25.2195	17853.1	0.03176
12	33.9000	97.0016	73.4381	0.91798	25.8663	18030.1	0.03190
13	33.8500	96.9163	74.4117	0.93015	26.5516	18206.5	0.03186
14	33.8500	96.8502	75.3982	0.94248	27.2077	18383.9	0.03197
15	33.8500	96.7849	76.3977	0.95497	27.8690	18561.4	0.03207
16	33.8500	96.7203	77.4106	0.96763	28.5358	18739.2	0.03216
17	33.8000	96.6389	78.4368	0.98046	29.2430	18916.3	0.03211

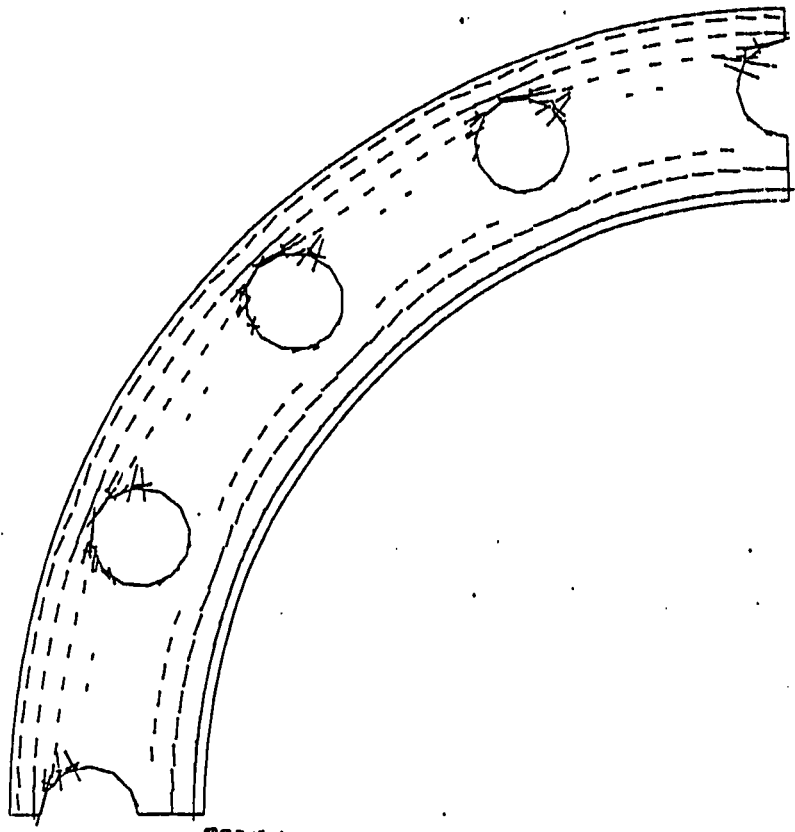
ACCELERATOR GUIDE NUMBER 4							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
2	28.1500	94.8237	80.0000	1.00000	34.3121	19090.9	0.01791
3	28.0000	94.7839	80.0000	1.00000	34.4244	19088.9	0.01760
4	27.8500	94.7443	80.8000	1.00000	34.5377	19087.0	0.01730
5	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
6	27.5500	94.6663	80.0000	1.00000	34.7534	19082.9	0.01667
7	27.4000	94.6277	80.0000	1.00000	34.8627	19080.9	0.01636
8	27.2000	94.5767	80.0000	1.00000	35.0124	19078.4	0.01597
9	27.0000	94.5263	80.0000	1.00000	35.1640	19076.0	0.01559
10	26.8000	94.4765	80.0000	1.00000	35.3067	19073.4	0.01518
11	26.6000	94.4271	80.0000	1.00000	35.4563	19071.0	0.01481
12	26.4000	94.3784	80.0000	1.00000	35.6335	19069.3	0.01452
13	26.2000	94.3301	80.0000	1.00000	35.6367	19063.3	0.01372
14	26.0000	94.2825	80.0000	1.00000	35.8984	19063.8	0.01369
15	25.8000	94.2353	80.0000	1.00000	36.0482	19061.5	0.01334

ACCELERATOR GUIDE NUMBER 2							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	31.0000	95.6973	78.8000	0.98500	31.4689	18931.1	0.02449
2	30.8500	95.6510	78.8000	0.98500	31.5785	18928.8	0.02412
3	30.7000	95.6051	78.8000	0.98500	31.6862	18926.5	0.02374
4	30.5500	95.5594	78.8000	0.98500	31.7940	18924.1	0.02336
5	30.4000	95.5141	78.8000	0.98500	31.9048	18921.9	0.02300
6	30.2500	95.4691	78.8000	0.98500	32.0134	18919.6	0.02263
7	30.1000	95.4243	78.8000	0.98500	32.1231	18917.4	0.02228
8	29.9000	95.3652	78.8000	0.98500	32.2692	18914.5	0.02180
9	29.7000	95.3066	78.8000	0.98500	32.4161	18911.6	0.02133
10	29.5000	95.2485	78.8000	0.98500	32.5615	18908.7	0.02086
11	29.3000	95.1910	78.8000	0.98500	32.7079	18905.9	0.02040
12	29.1000	95.1340	78.8000	0.98500	32.8576	18903.2	0.01996
13	28.9000	95.0776	78.8000	0.98500	33.0031	18900.4	0.01951
14	28.7000	95.0217	78.8000	0.98500	33.1524	18897.7	0.01907
15	28.5000	94.9664	78.8000	0.98500	33.2978	18895.0	0.01863

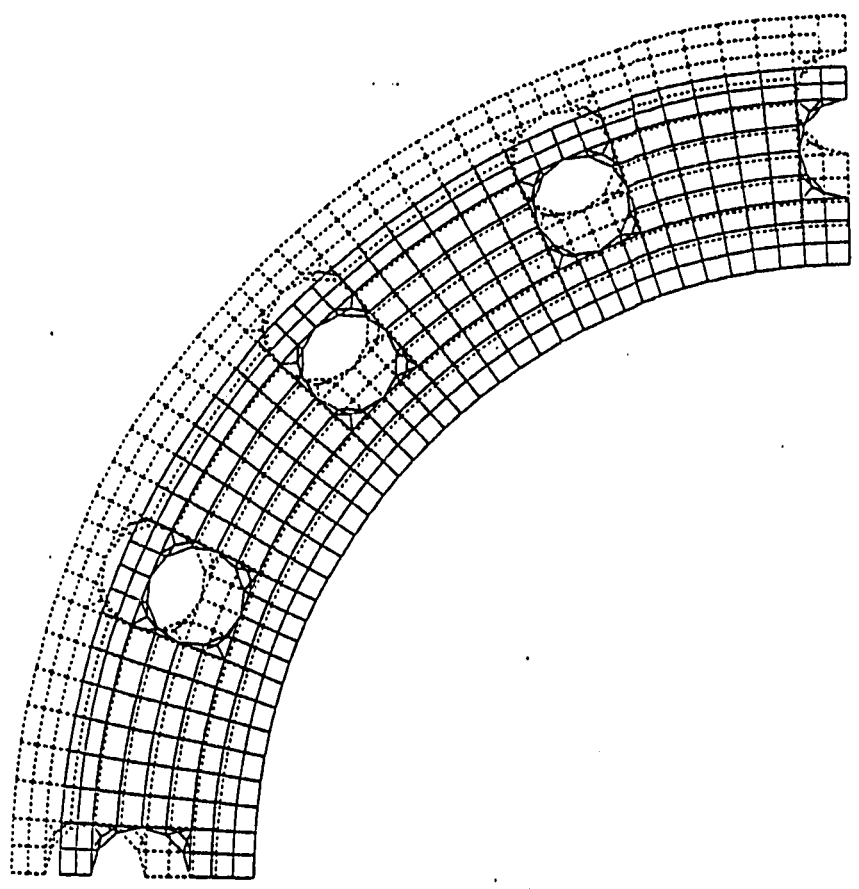
ACCELERATOR GUIDE NUMBER 5							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
2	28.1500	94.8237	80.0000	1.00000	34.3121	19090.9	0.01791
3	28.0000	94.7839	80.0000	1.00000	34.4244	19088.9	0.01760
4	27.8500	94.7443	80.8000	1.00000	34.5377	19087.0	0.01730
5	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
6	27.5500	94.6663	80.0000	1.00000	34.7534	19082.9	0.01667
7	27.4000	94.6277	80.0000	1.00000	34.8627	19080.9	0.01636
8	27.2000	94.5767	80.0000	1.00000	35.0124	19078.4	0.01597
9	27.0000	94.5263	80.0000	1.00000	35.1640	19076.0	0.01559
10	26.8000	94.4765	80.0000	1.00000	35.3067	19073.4	0.01518
11	26.6000	94.4271	80.0000	1.00000	35.4563	19071.0	0.01481
12	26.4000	94.3784	80.0000	1.00000	35.6335	19069.3	0.01452
13	26.2000	94.3301	80.0000	1.00000	35.6367	19063.3	0.01372
14	26.0000	94.2825	80.0000	1.00000	35.8984	19063.8	0.01369
15	25.8000	94.2353	80.0000	1.00000	36.0482	19061.5	0.01334

ACCELERATOR GUIDE NUMBER 3							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	30.0000	95.3398	80.0000	1.00000	32.9605	19117.6	0.02208
2	29.8500	95.2962	80.0000	1.00000	33.0683	19115.3	0.02172
3	29.7000	95.2530	80.0000	1.00000	33.1768	19113.0	0.02137
4	29.5500	95.2100	80.8000	1.00000	33.2861	19110.8	0.02102
5	29.4000	95.1673	80.0000	1.00000	33.3954	19108.5	0.02067
6	29.2500	95.1250	80.0000	1.00000	33.5044	19106.3	0.02032
7	29.1000	95.0829	80.0000	1.00000	33.6146	19104.2	0.01999
8	28.9000	95.0273	80.0000	1.00000	33.7618	19101.3	0.01954
9	28.7000	94.9722	80.0000	1.00000	33.9076	19098.5	0.01910
10	28.5000	94.9177	80.0000	1.00000	34.0546	19095.7	0.01866
11	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
12	28.1000	94.8104	80.0000	1.00000	34.3499	19090.2	0.01781
13	27.9000	94.7575	80.0000	1.00000	34.4946	19087.5	0.01738
14	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
15	27.5000	94.6534	80.0000	1.00000	34.7939	19082.3	0.01658

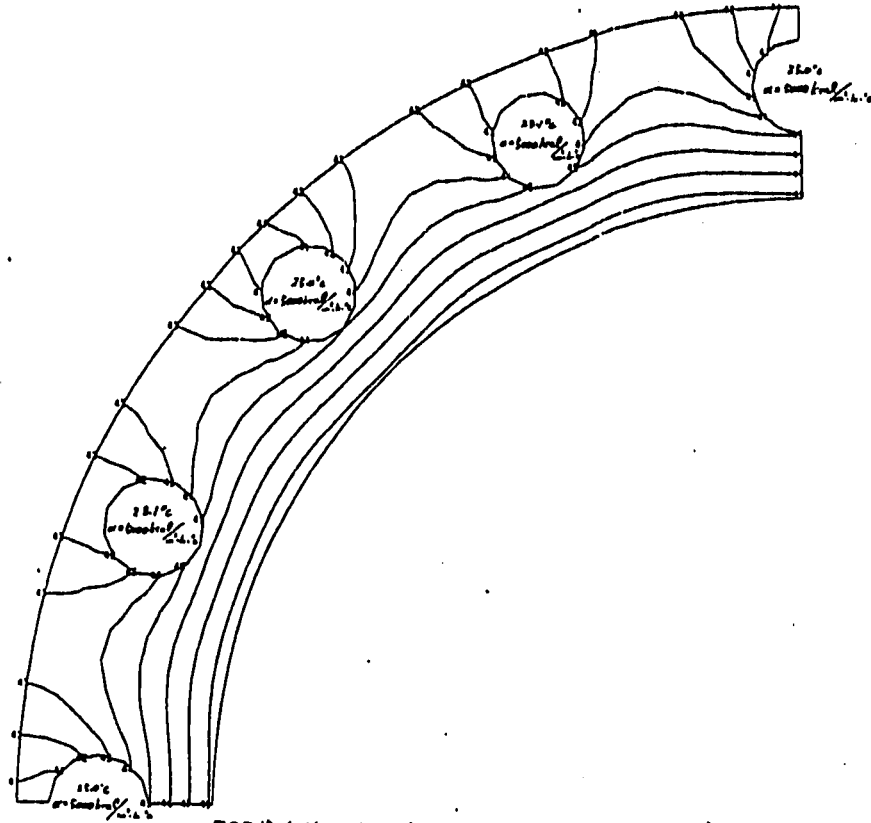
ACCELERATOR GUIDE NUMBER 6							
J	AD (J) (mm)	BD (J) (mm)	DD (J) (mm)	BW (J) (1/c)	RO (J) (Mohm/m)	QO (J)	GV (J) (1/c)
1	28.3000	94.8638	80.0000	1.00000	34.2025	19092.9	0.01823
2	28.1500	94.8237	80.0000	1.00000	34.3121	19090.9	0.01791
3	28.0000	94.7839	80.0000	1.00000	34.4244	19088.9	0.01760
4	27.8500	94.7443	80.8000	1.00000	34.5377	19087.0	0.01730
5	27.7000	94.7052	80.0000	1.00000	34.6430	19084.9	0.01697
6	27.5500	94.6663	80.0000	1.00000	34.7534	19082.9	0.01667
7	27.4000	94.6277	80.0000	1.00000	34.8627	19080.9	0.01636
8	27.2000	94.5767	80.0000	1.00000	35.0124	19078.4	0.01597
9	27.0000	94.5263	80.0000	1.00000	35.1640	19076.0	0.01559
10	26.8000	94.4765	80.0000	1.00000	35.3067	19073.4	0.01518
11	26.6000	94.4271	80.0000	1.00000	35.4563	19071.0	0.01481
12	26.4000	94.3784	80.0000	1.00000	35.6335	19069.3	0.01452
13	26.2000	94.3301	80.0000	1.00000	35.6367	19063.3	0.01372
14	26.0000	94.2825	80.0000	1.00000	35.8984	19063.8	0.01369
15	25.8000	94.2353	80.0000	1.00000	36.0482	19061.5	0.01334



2.2.15-6 应力分布图 (Spacer, CASE A)  
PRINCIPAL STRESS  
CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS  
\*\*\* INPUT POWER 11KV/CELL = 25 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*



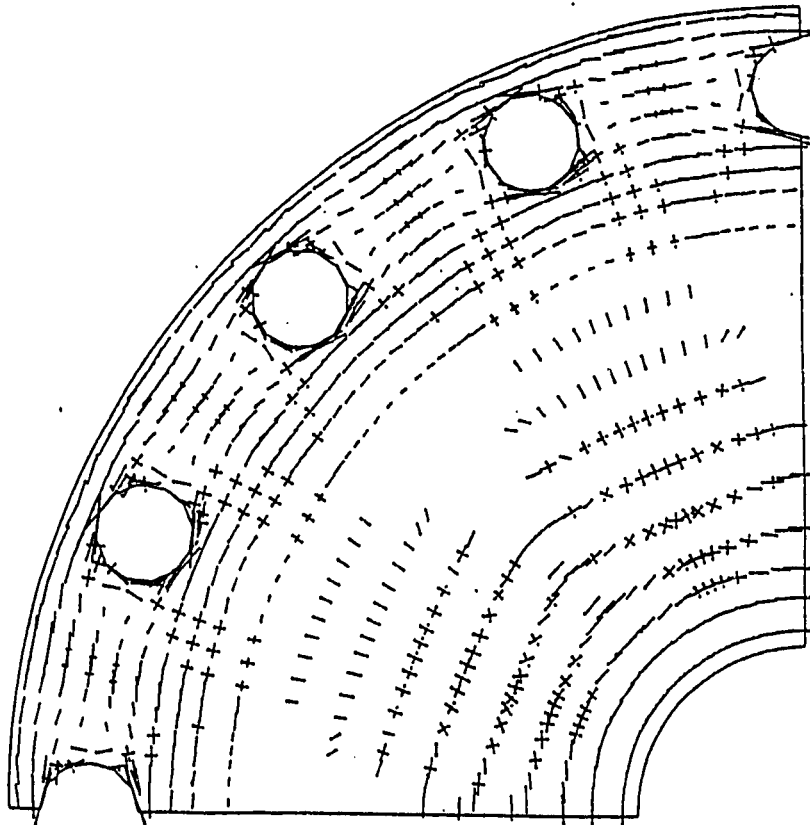
2.2.15-5 变形图 (Spacer, CASE A) SCALE(mm)  
DEFLECTION 0.0 0.0531  
CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS  
\*\*\* INPUT POWER 11KV/CELL = 25 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*



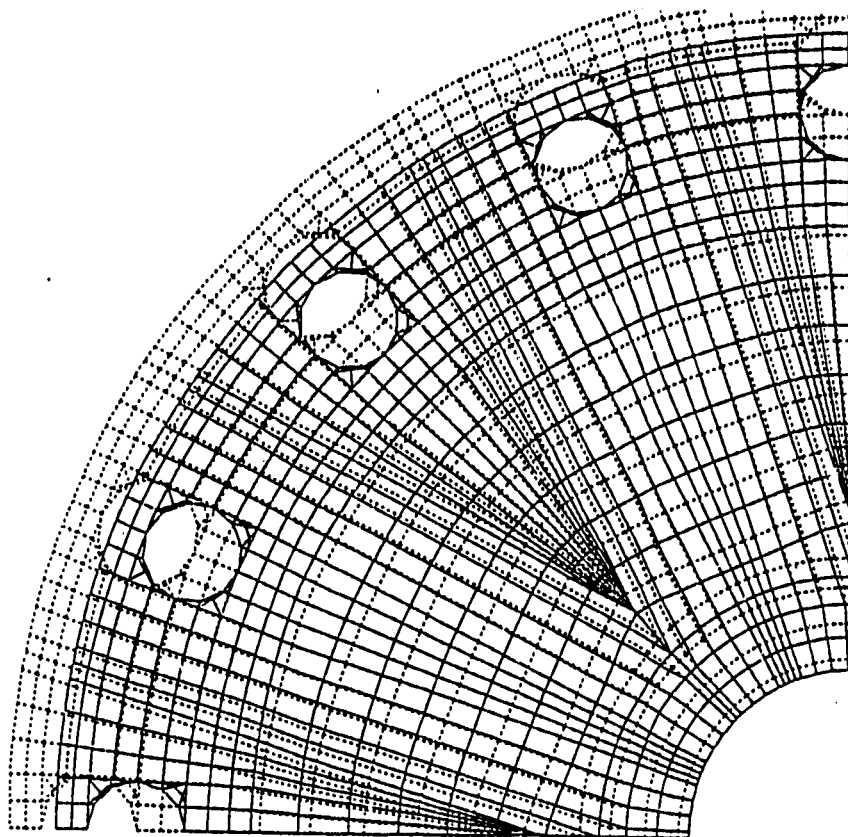
ISOTHERMAL LINE 図2.2.15-4 等温線図 (Spacer, CASE A)

CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS  
 \*\*\* INPUT POWER 11KV/CELL = 25 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*

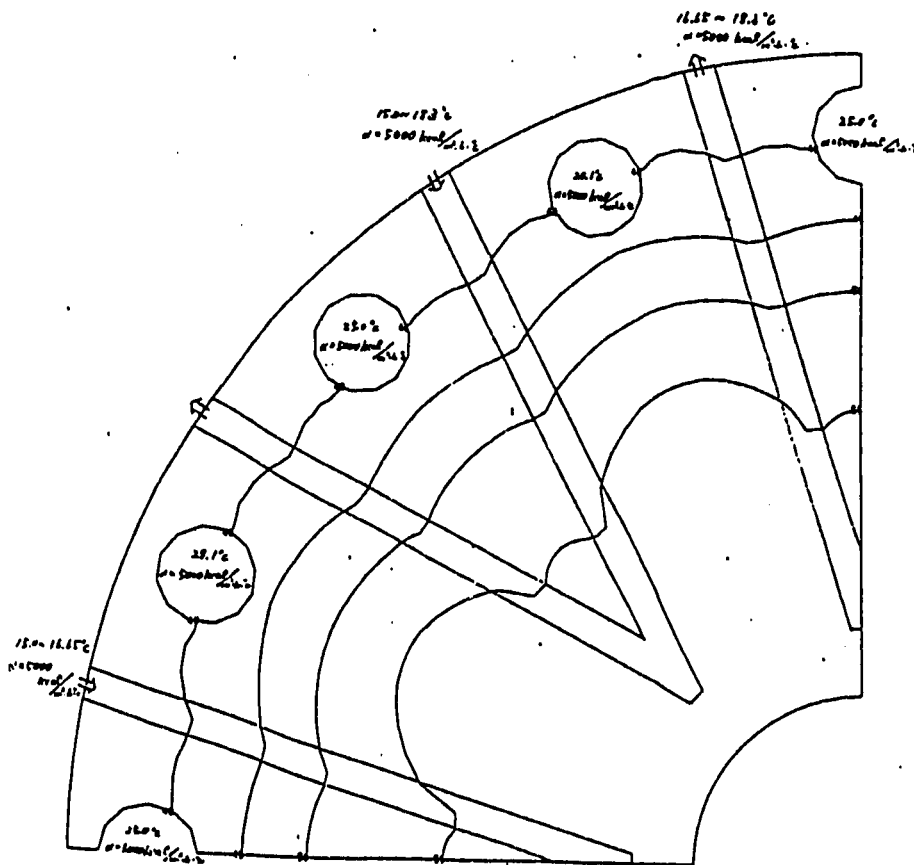
	IS-PLANE	ISOTHERMAL	SCALE (C/S/INCH)
TRANSITION	—	○	0.8
COMPRESSION	—	○	0.22





PRINCIPAL STRESS 図2.2.15-3 応力分布図 (Spacer, CASE A)



DEFLECTION 2.2.15-2 变形图 (Disk, CASE A) SCALE (mm)  
 1/5 0.0024  
 TEMPERATURE ANALYSIS OF CV-LINAC  
 \*\*\* INPUT POWER 11KV/CELL (TRANS PLANE IS DEG.C) \*\*\*



ISOTHERMAL LINE 2.2.15-1 等温线图 (Disk, CASE A)  
 TEMPERATURE ANALYSIS OF CV-LINAC  
 \*\*\* INPUT POWER 11KV/CELL (TRANS PLANE IS DEG.C) \*\*\*

90-PLANE    TANGENTIAL    SCALE (KG/CM<sup>2</sup>)  
 TENSION        0    0.1    0.2  
 COMPRESSION     0

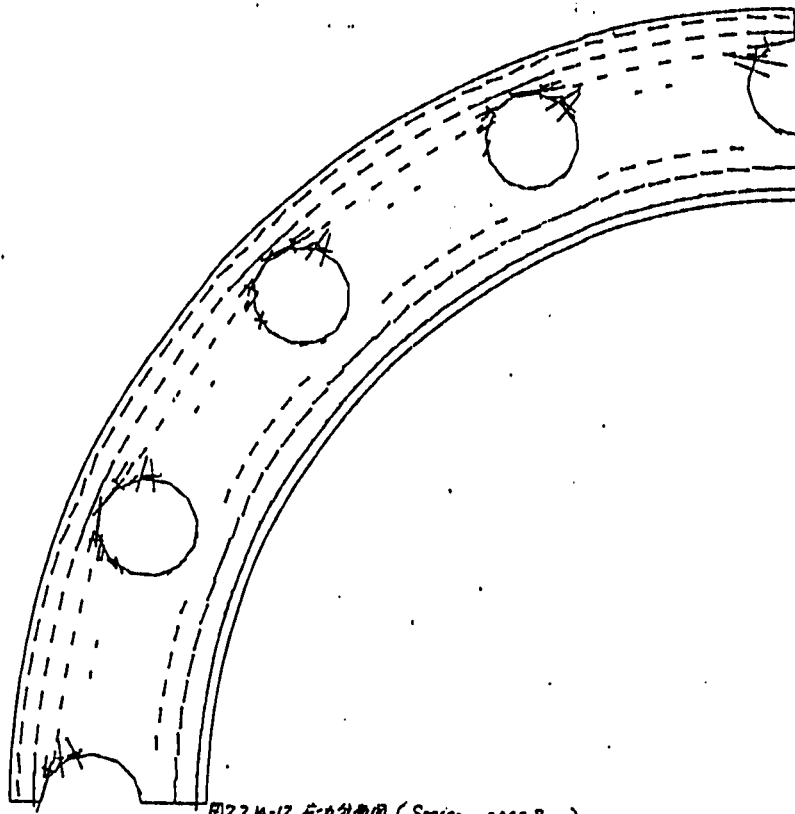


図2.2.14-12 応力分布図 (Spacer, CASE B)

PRINCIPAL STRESS  
 CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS  
 \*\*\* WALL LOSS 6.2KV/CELL = 20 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*

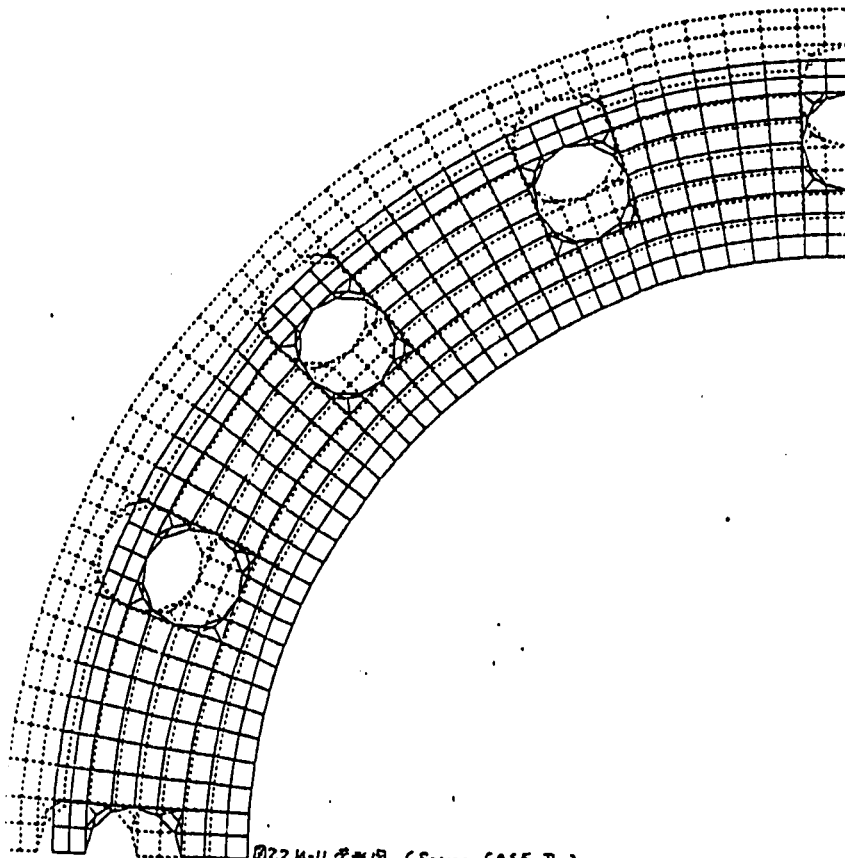


図2.2.14-11 変形図 (Spacer, CASE B)

DEFLECTION    SCALE (MM)  
 CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS    0    0.010  
 \*\*\* WALL LOSS 6.2KV/CELL = 20 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*

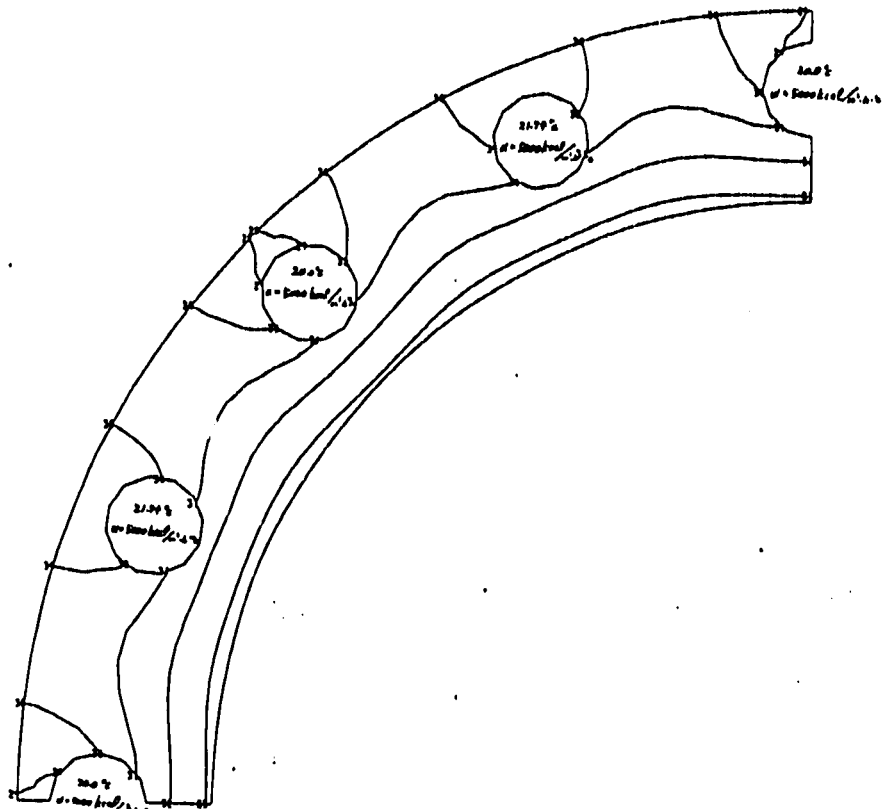


図2.2.14-10 等温線図 (Spacer, CASE B)  
 ISOTHERMAL LINE  
 CV LINAC SPACER TEMP. ANALYSIS  
 \*\*\* WALL LOSS 6.2KV/CELL = 20 DEG WATER COUNTERFLOW \*\*\*

ST-PLANE ISOMETRIC SCALE (mm) = 1:1  
 TENSION : — ○ 0.5 1.02  
 COMPRESSION : — ○

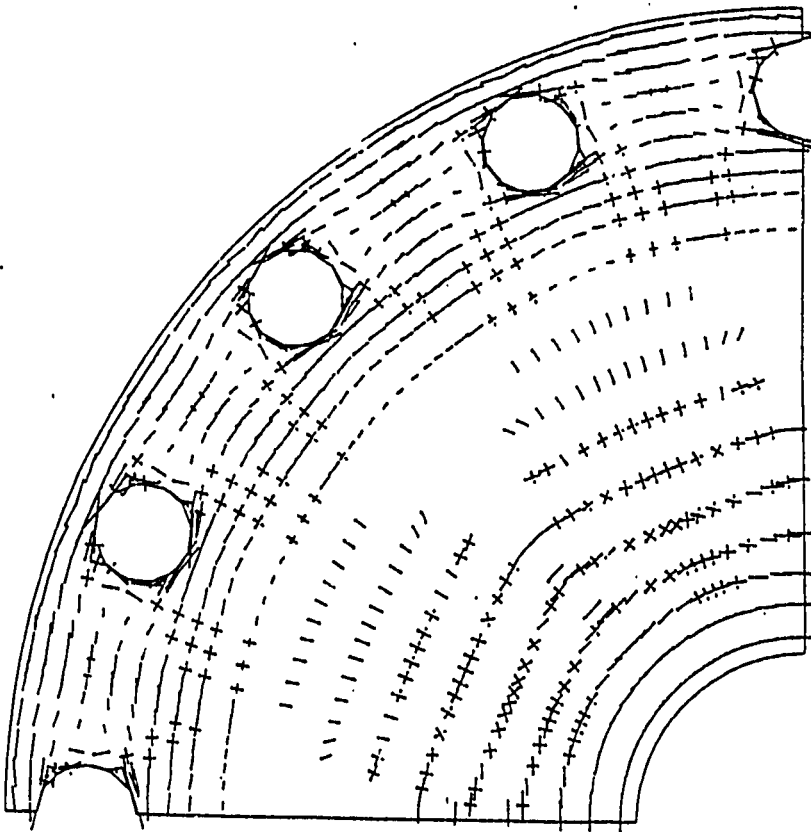


図2.2.14-9 応力分布図 (Disk, CASE B)  
 PRINCIPAL STRESS  
 TEMPERATURE ANALYSIS OF CV-LINAC

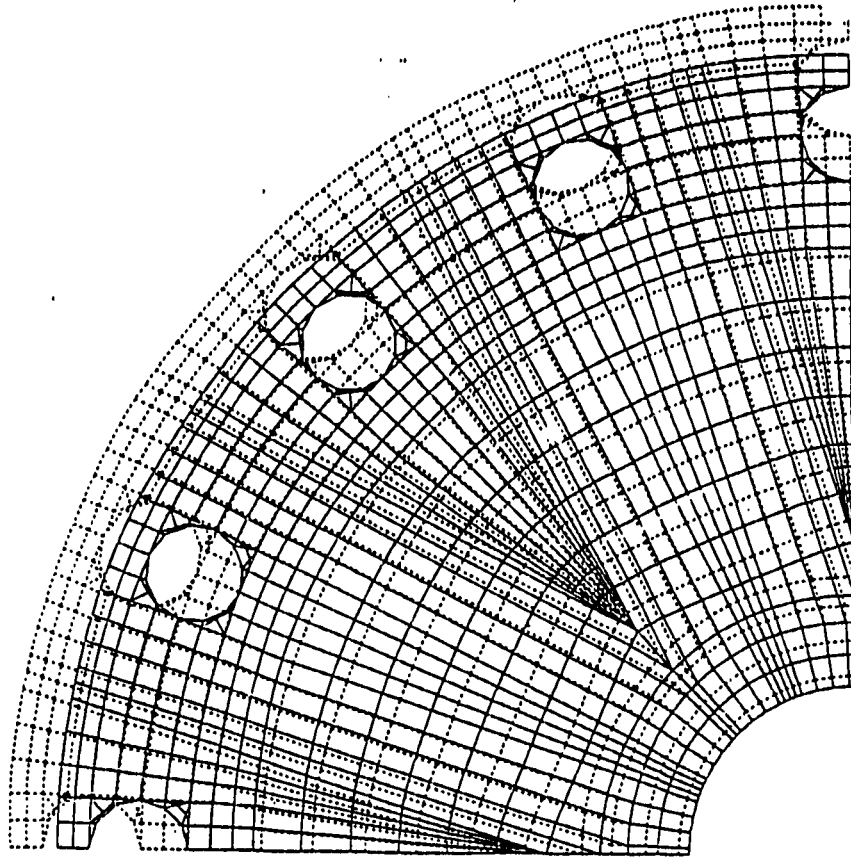
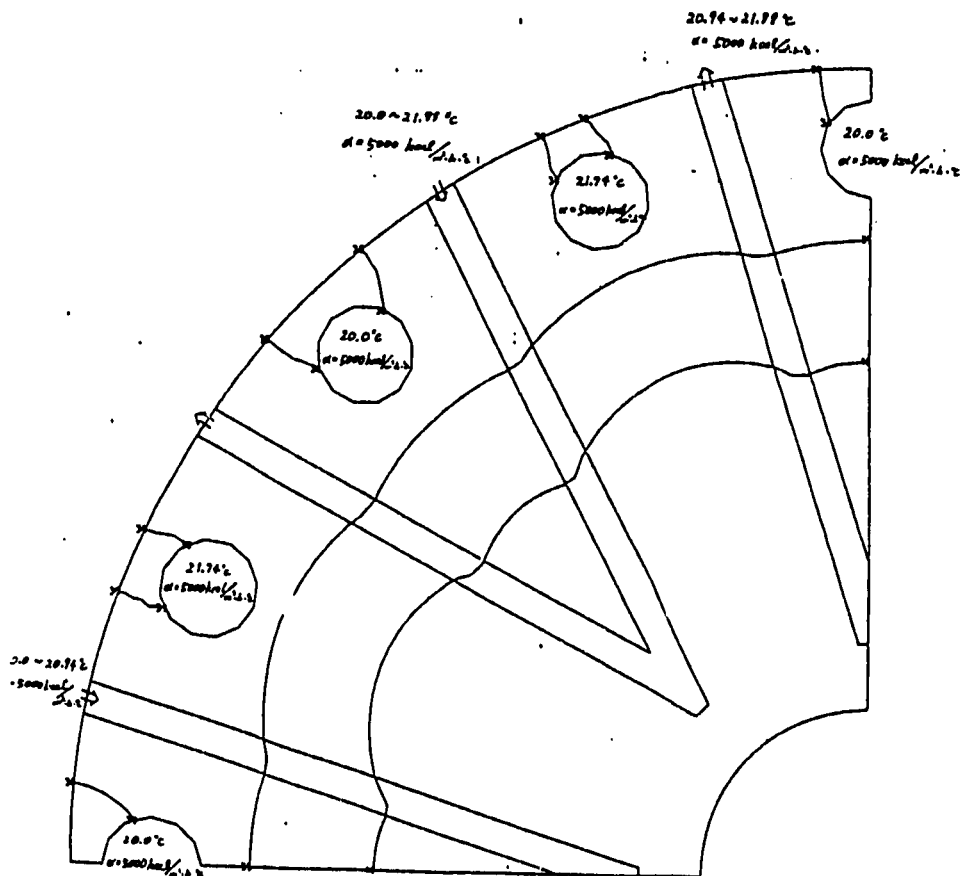


図2.2.14-8 変形図 (Disk, CASE B) SCALE 1/100  
 DEFLECTION TEMPERATURE ANALYSIS OF CV-LINAC  
 ... UNIT: 1 MPa, 4.746 MV/2.11 m, 30 DEG WATER COUNTERFLOW ...



15°-11° RHAL LINE 図2.2.14-7 等温線図 (Disk, CASE B)

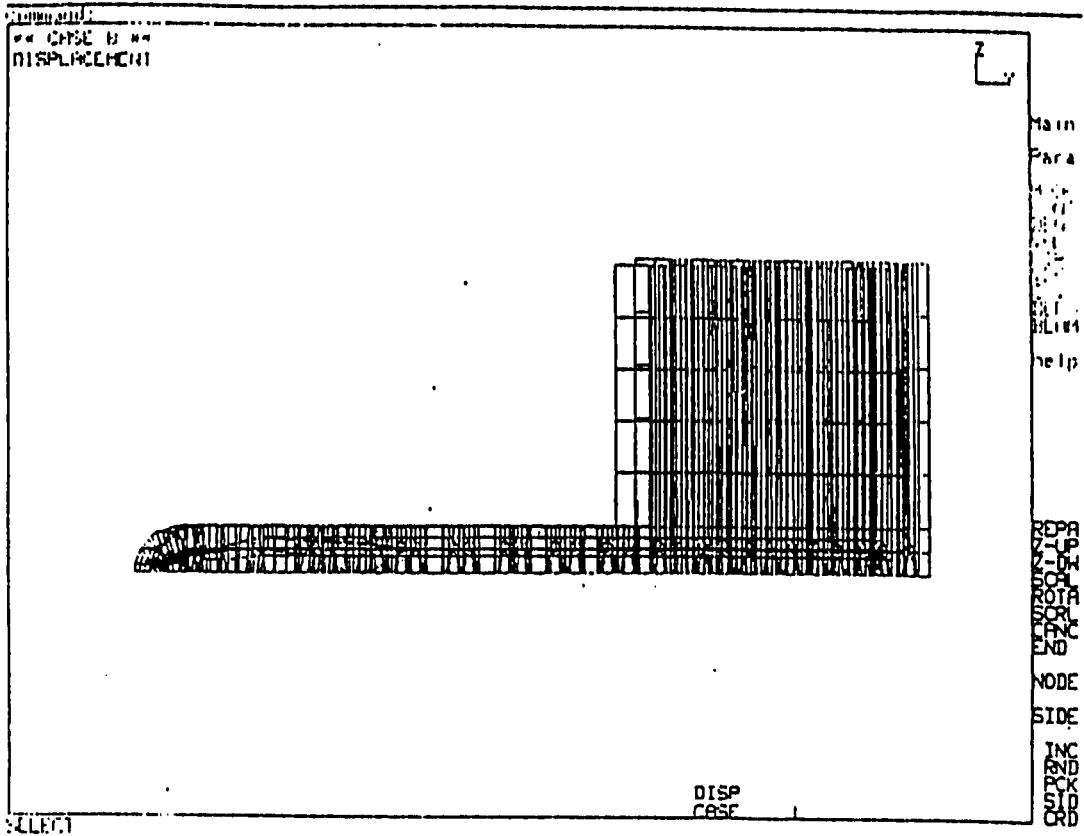


图. 2.2.44 CASE B 突形状膜图

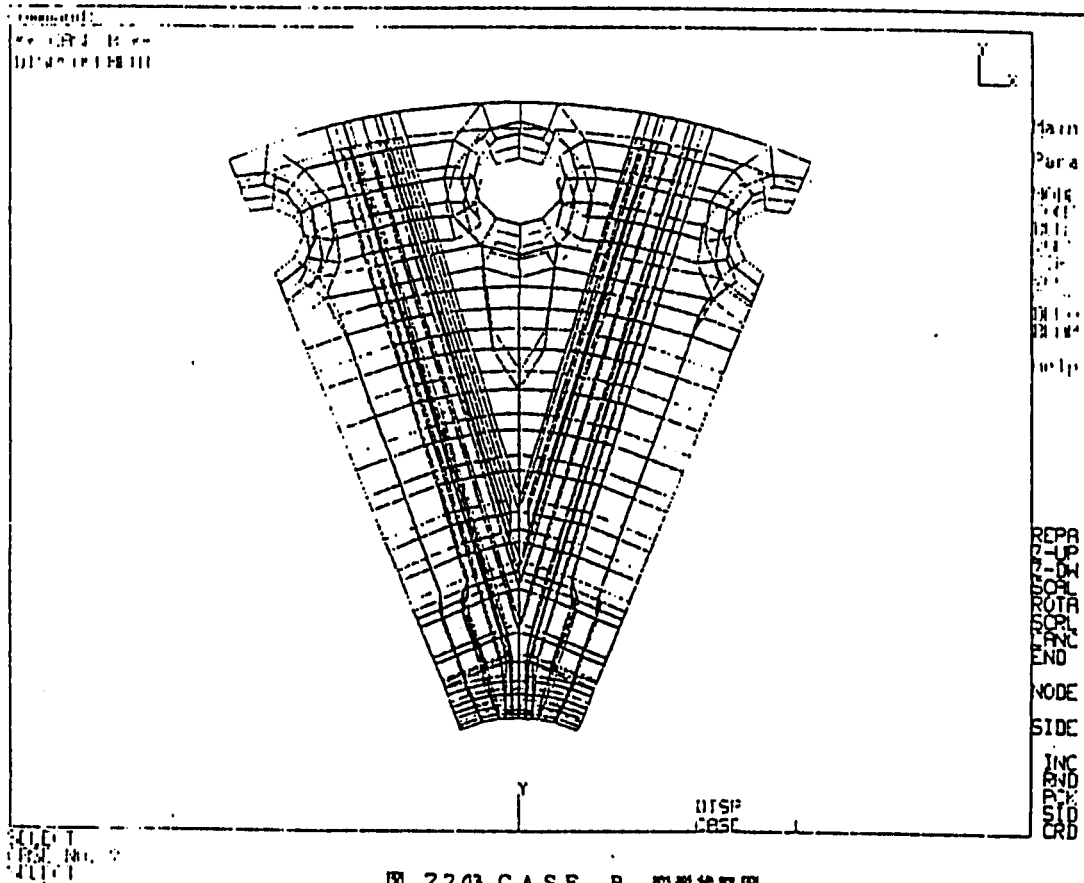


图. 2.2.43 CASE B 突形状膜图



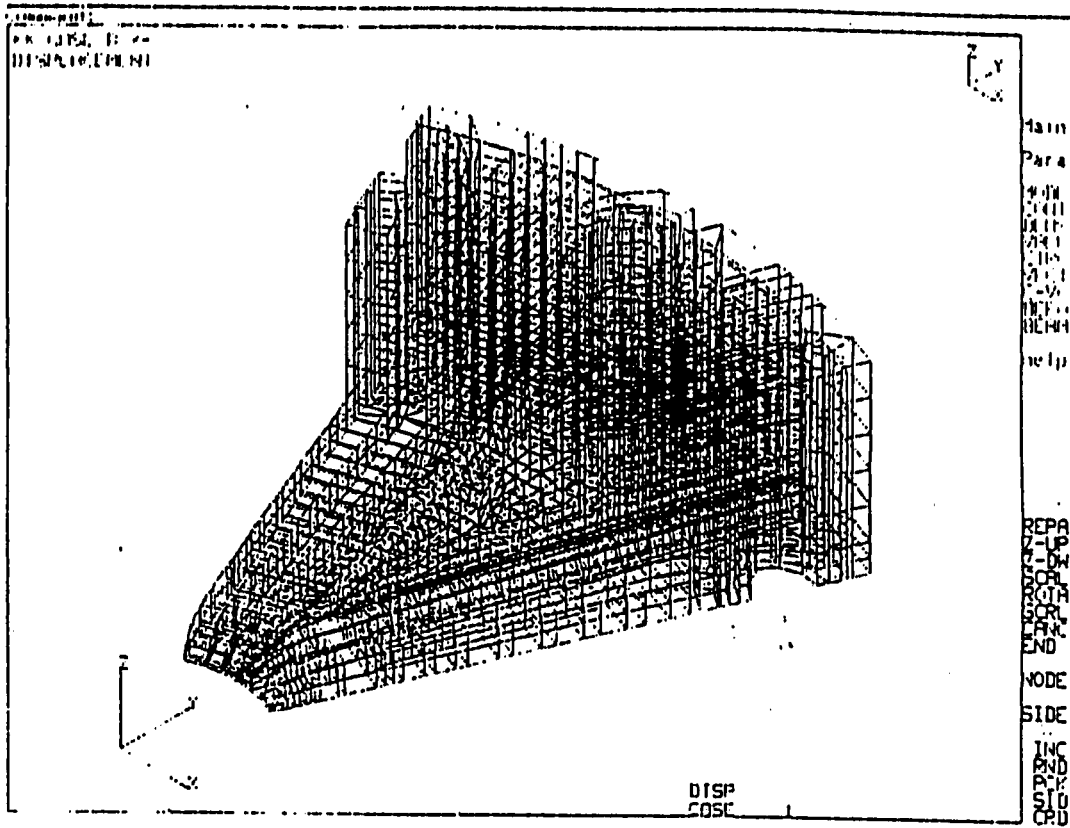


図. 2.2.42 CASE B 変形状態図

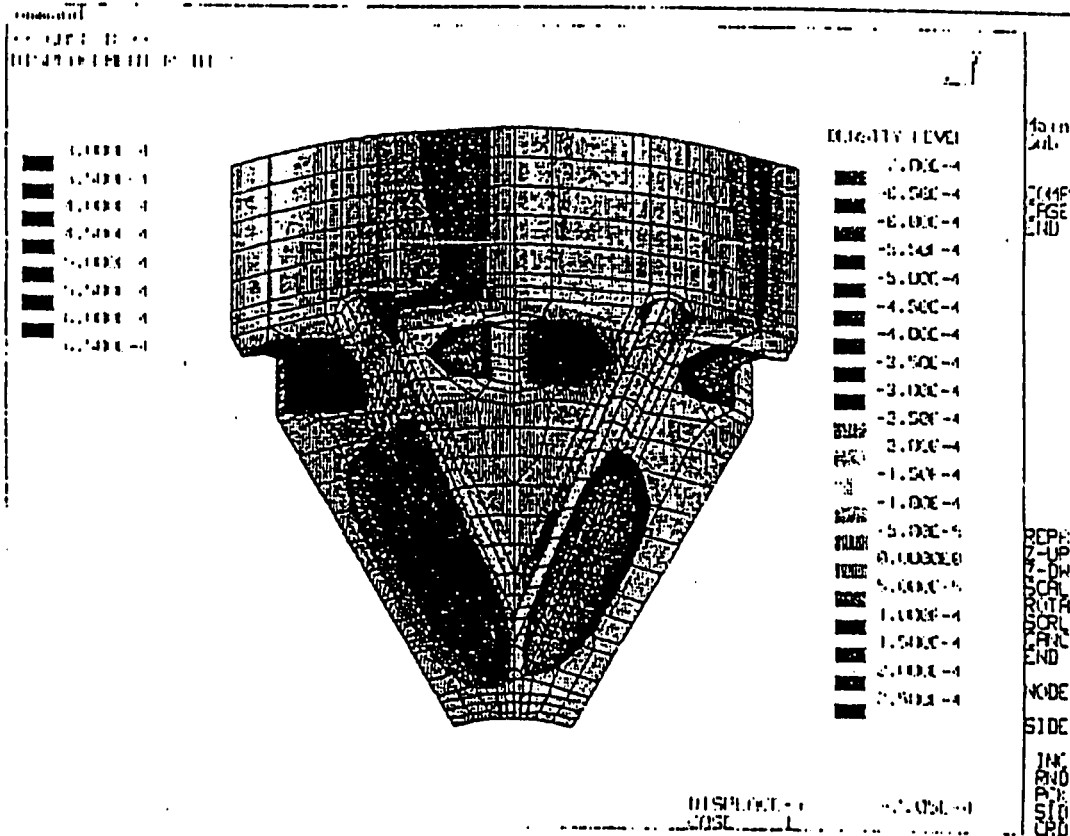
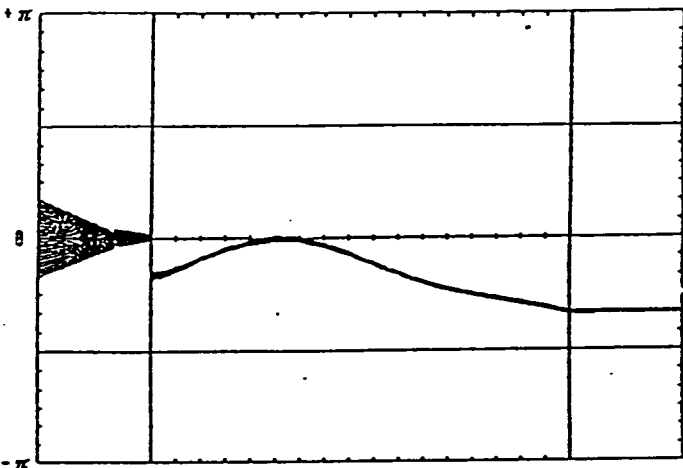


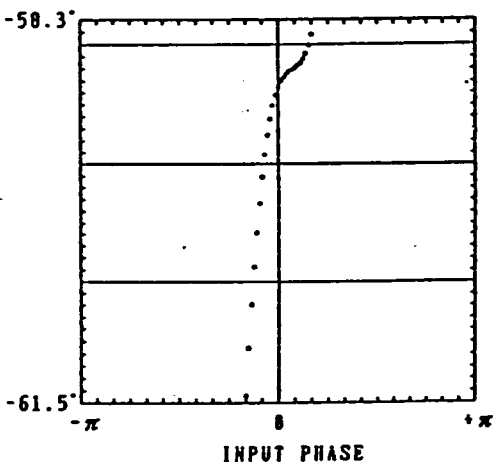
図. 2.2.46 CASE B 円周方向変位コンタ図

Acc.NO = 1  
 Cav.NO = 17  
 Acc.L(m)=1.162  
 Couple = 8.263  
 Multi = 14.43  
 P(KW) = 228.8  
 E(MeV) = 1.694  
 I(A) = 8.818  
 dE/E(X) = 1.48  
 Eff(X) = 4.46  
 Ve/C = 8.9534  
 P(deg) = -59.26  
 ΔP(deg) = 3.82  
 Pa(deg) = 8.8

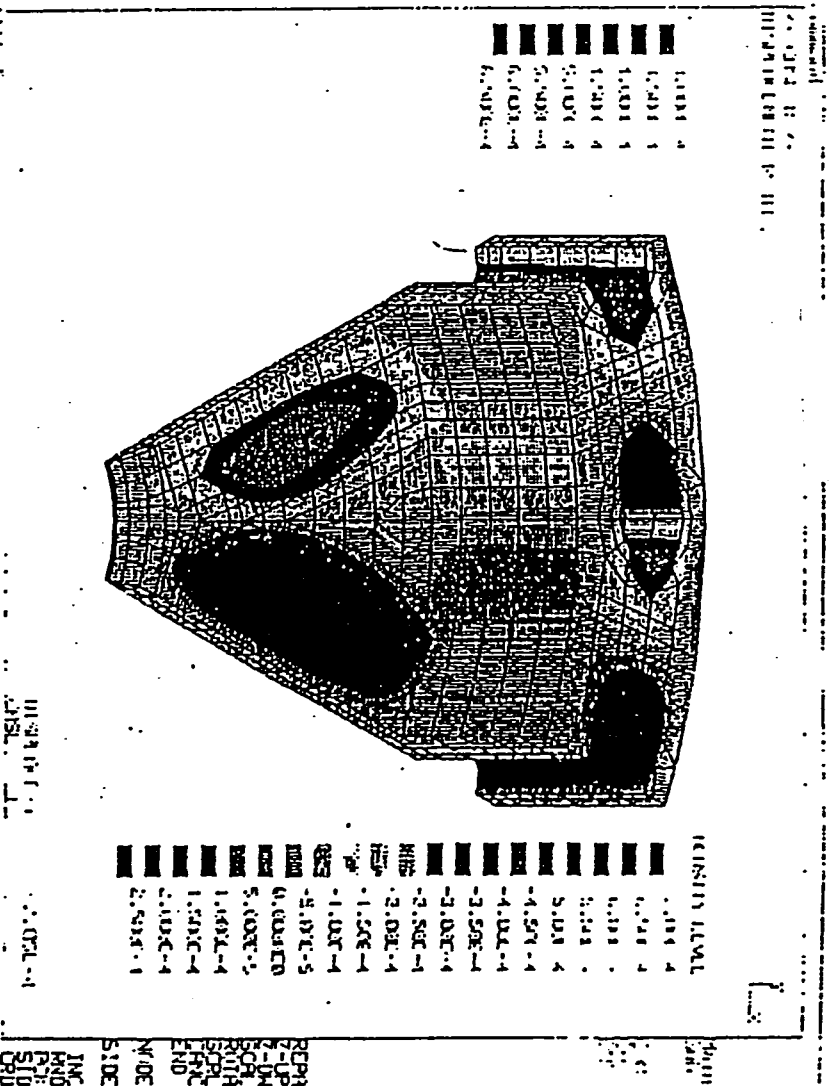
ACCELERATOR NO( 1)



ACCELERATOR .NO( 1)



(deg)  
 Pmin = -61.44  
 Pmax = -58.42  
 Pdif = 3.82  
 P.ave = -59.26



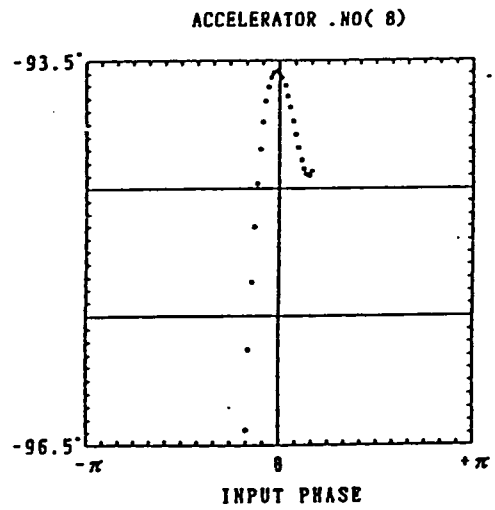
1.00E+4  
 1.50E+4  
 2.00E+4  
 2.50E+4  
 3.00E+4  
 3.50E+4  
 4.00E+4  
 4.50E+4  
 5.00E+4

1.00E+4  
 1.50E+4  
 2.00E+4  
 2.50E+4  
 3.00E+4  
 3.50E+4  
 4.00E+4  
 4.50E+4  
 5.00E+4  
 5.50E+4  
 6.00E+4  
 6.50E+4  
 7.00E+4  
 7.50E+4  
 8.00E+4  
 8.50E+4  
 9.00E+4  
 9.50E+4  
 1.00E+5

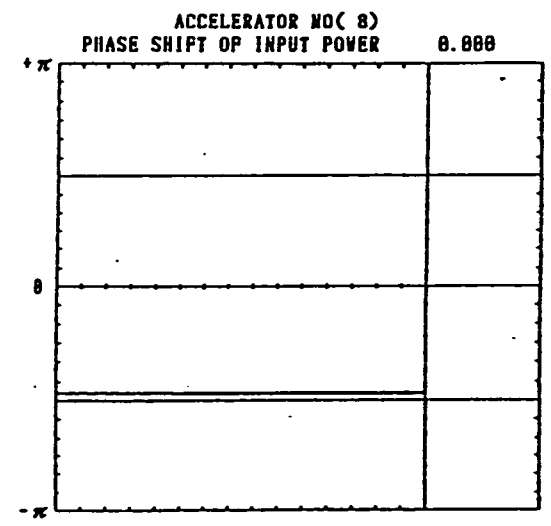
REP1  
 7-UP  
 7-DN  
 8-UP  
 8-DN  
 9-UP  
 9-DN  
 10-UP  
 10-DN  
 11-UP  
 11-DN  
 12-UP  
 12-DN  
 13-UP  
 13-DN  
 14-UP  
 14-DN  
 15-UP  
 15-DN  
 16-UP  
 16-DN  
 17-UP  
 17-DN  
 18-UP  
 18-DN  
 19-UP  
 19-DN  
 20-UP  
 20-DN  
 21-UP  
 21-DN  
 22-UP  
 22-DN  
 23-UP  
 23-DN  
 24-UP  
 24-DN  
 25-UP  
 25-DN  
 26-UP  
 26-DN  
 27-UP  
 27-DN  
 28-UP  
 28-DN  
 29-UP  
 29-DN  
 30-UP  
 30-DN  
 31-UP  
 31-DN  
 32-UP  
 32-DN  
 33-UP  
 33-DN  
 34-UP  
 34-DN  
 35-UP  
 35-DN  
 36-UP  
 36-DN  
 37-UP  
 37-DN  
 38-UP  
 38-DN  
 39-UP  
 39-DN  
 40-UP  
 40-DN  
 41-UP  
 41-DN  
 42-UP  
 42-DN  
 43-UP  
 43-DN  
 44-UP  
 44-DN  
 45-UP  
 45-DN  
 46-UP  
 46-DN  
 47-UP  
 47-DN  
 48-UP  
 48-DN  
 49-UP  
 49-DN  
 50-UP  
 50-DN  
 51-UP  
 51-DN  
 52-UP  
 52-DN  
 53-UP  
 53-DN  
 54-UP  
 54-DN  
 55-UP  
 55-DN  
 56-UP  
 56-DN  
 57-UP  
 57-DN  
 58-UP  
 58-DN  
 59-UP  
 59-DN  
 60-UP  
 60-DN  
 61-UP  
 61-DN  
 62-UP  
 62-DN  
 63-UP  
 63-DN  
 64-UP  
 64-DN  
 65-UP  
 65-DN  
 66-UP  
 66-DN  
 67-UP  
 67-DN  
 68-UP  
 68-DN  
 69-UP  
 69-DN  
 70-UP  
 70-DN  
 71-UP  
 71-DN  
 72-UP  
 72-DN  
 73-UP  
 73-DN  
 74-UP  
 74-DN  
 75-UP  
 75-DN  
 76-UP  
 76-DN  
 77-UP  
 77-DN  
 78-UP  
 78-DN  
 79-UP  
 79-DN  
 80-UP  
 80-DN  
 81-UP  
 81-DN  
 82-UP  
 82-DN  
 83-UP  
 83-DN  
 84-UP  
 84-DN  
 85-UP  
 85-DN  
 86-UP  
 86-DN  
 87-UP  
 87-DN  
 88-UP  
 88-DN  
 89-UP  
 89-DN  
 90-UP  
 90-DN  
 91-UP  
 91-DN  
 92-UP  
 92-DN  
 93-UP  
 93-DN  
 94-UP  
 94-DN  
 95-UP  
 95-DN  
 96-UP  
 96-DN  
 97-UP  
 97-DN  
 98-UP  
 98-DN  
 99-UP  
 99-DN  
 100-UP  
 100-DN

図. 2.2.45 CASE B 円周方向変位コンソング

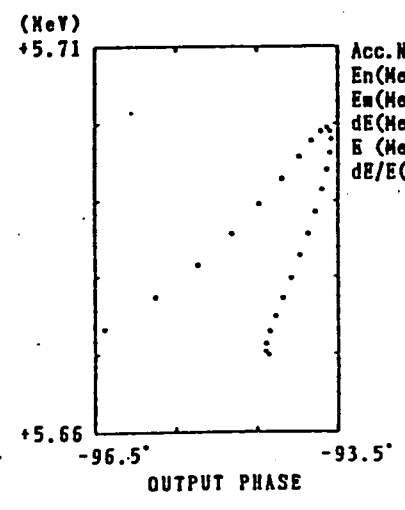
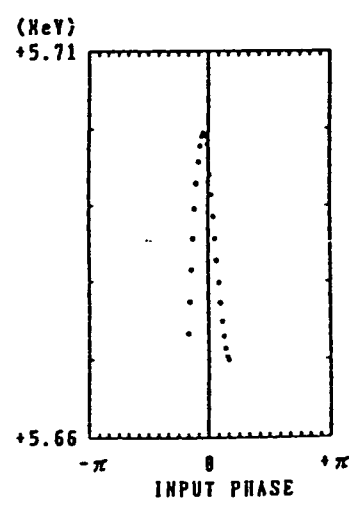
4111



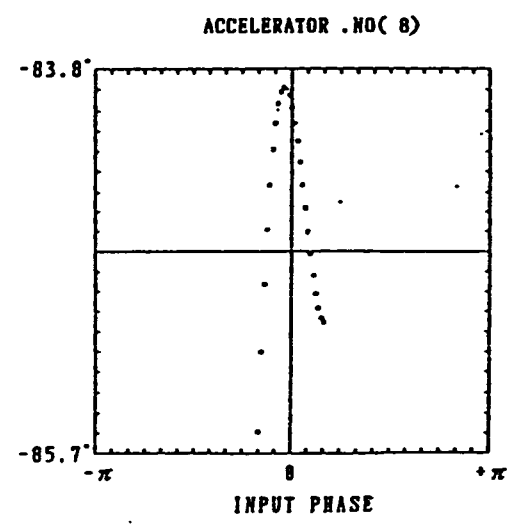
(deg)  
 Pmin= -96.38  
 Pmax= -93.58  
 Pdif= 2.79  
 P.ave= -94.23



Acc. NO = 8  
 Cav. NO = 15  
 Acc. L(m)=1.288  
 Couple =0.343  
 Multi = 8.49  
 P(KV) = 228.8  
 E(MeV) = 28.552  
 I(A) =0.818  
 dE/E(X)= 8.61  
 Eff(X) = 12.61  
 Va/C = 8.9997  
 P (deg)= -84.48  
 dP(deg)= 1.71  
 Ps(deg)=8.8



Acc. No. = 8  
 En(MeV)= 5.678  
 Em(MeV)= 5.699  
 dE(MeV)= 0.838  
 E (MeV)= 5.686  
 dE/E(X)= 8.52



(deg)  
 Pmin= -85.59  
 Pmax= -83.89  
 Pdif= 1.71  
 P.ave= -84.48

E-511/20  
TIME-22:54:19

START .....					
N	NN	NC	L (cm)		
2	1	0	15.0		
3	6	0	4.0	0.030	
4	1	0	15.0		
5	6	0	4.0	0.030	
6	1	0	15.0		
7	6	0	4.0	0.030	
8	1	0	15.0		
9	5	0	17.3	75.000	1.200
10	6	0	4.0	0.040	
11	5	0	18.7	60.000	1.200
12	6	0	4.0	0.050	
13	5	0	20.2	45.000	1.200
14	6	0	4.0	0.060	
15	5	0	21.6	30.000	1.200
16	6	0	4.0	0.070	
17	5	0	22.6	20.000	1.200
18	6	0	4.0	0.080	
19	5	0	15.6	15.000	1.200
20	1	0	15.0		
21	-3	0	5.0	0.005	
22	1	0	10.0		
23	3	0	10.0	0.005	
24	1	0	10.0		
25	-3	0	5.0	0.005	
26	1	0	15.0		
27	5	0	19.7	30.000	1.150
28	6	0	4.0	0.100	
29	5	0	19.7	30.000	1.150
30	6	0	4.0	0.130	
31	5	0	19.7	15.000	1.150
32	6	0	4.0	0.150	
33	5	0	19.7	15.000	1.150
34	6	0	4.0	0.180	
35	5	0	19.7	10.000	1.150
36	6	0	4.0	0.200	
37	5	0	19.7	5.000	1.150
38	1	0	15.0		
39	-3	0	5.0	0.015	
40	1	0	10.0		
41	3	0	10.0	0.015	
42	1	0	10.0		
43	-3	0	5.0	0.015	
44	1	0	15.0		
45	5	0	120.0	10.000	1.260
46	1	0	15.0		
47	-3	0	5.0	0.025	
48	1	0	10.0		
49	3	0	10.0	0.025	
50	1	0	10.0		
51	-3	0	5.0	0.025	
52	1	0	15.0		
53	5	0	120.0	10.000	1.250
54	1	0	15.0		
55	-3	0	5.0	0.035	
56	1	0	10.0		
57	3	0	10.0	0.035	
58	1	0	10.0		
59	-3	0	5.0	0.035	

N	NN	NC	L (cm)		
60	1	0	15.0		
61	5	0	120.0	10.000	1.290
62	1	0	15.0		
63	-3	0	5.0	0.045	
64	1	0	10.0		
65	3	0	10.0	0.045	
66	1	0	10.0		
67	-3	0	5.0	0.045	
68	1	0	15.0		
69	5	0	120.0	10.000	1.290
70	1	0	15.0		
71	-3	0	5.0	0.055	
72	1	0	10.0		
73	3	0	10.0	0.055	
74	1	0	10.0		
75	-3	0	5.0	0.055	
76	1	0	15.0		
77	5	0	120.0	0.000	1.300
78	1	0	15.0		
79	-3	0	5.0	0.065	
80	1	0	10.0		
81	3	0	10.0	0.065	
82	1	0	10.0		
83	-3	0	5.0	0.065	
84	1	0	15.0		
85	5	0	120.0	0.000	1.300
86	1	0	15.0		
87	-3	0	5.0	0.075	
88	1	0	10.0		
89	3	0	10.0	0.075	
90	1	0	10.0		
91	-3	0	5.0	0.075	
92	1	1	15.0		

## 2 - 1. 大強度電子線形加速器開発の現状

## 大強度電子線形加速器開発の現状

東北大学原子核理学研究施設

小山田 正幸

1991年3月7日

L.M.Young and J.M.Potter ;  
CW SIDE-COUPLED LINAC FOR THE LOS ALAMOS/NBS RACETRACK  
MICROTRON IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-30 (1983) 3508

disk-and-washer (DAW)  
annular-ring coupled structure (ACS)  
on-axis coupled structure (OCS)  
side-coupled structure (SCS)

- (1) high efficiency  $ZT^2 > 80 \text{ M}\Omega/\text{m}$
- (2) high accelerating field  $> 1.5 \text{ MeV/m}$
- (3) water cooling to permit 100 % duty factor operation
- (4) freedom from interfering modes that could cause BBU
- (5) enough coupling ( $>10 \%$ ) to ensure good stability

ADVANCED SIDE-COUPLED STRUCTURE  
2380 MHz CONTINUOUS WAVE (CW)  
POWER LEVEL 82 kW/2.7 m  
ACCELERATING GRADIENT 1.58 MeV/m  
at 70% of DESIGN WATER FLOW

G.E.McMICHAEL (AECL)  
 CW LINEAR ACCELERATOR DEVELOPMENT AT CRNL - STATUS AND FUTURE  
 Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B10/11 (1985) 825  
 ETA 1970s - 1982  
 1.9 MeV/m 20 mA (35 kW/m)

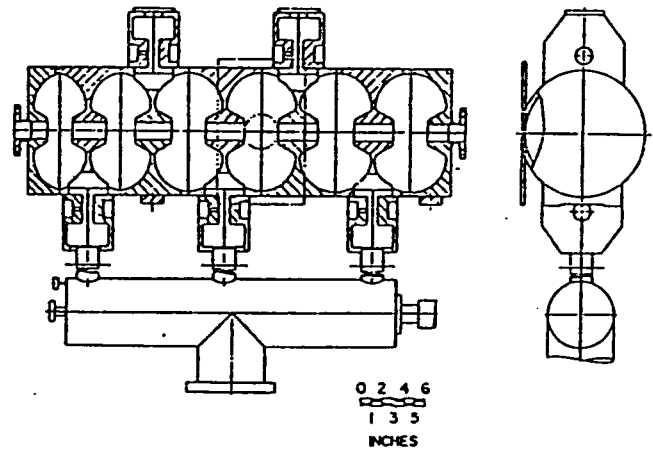


Fig. 10. A cross sectional view of model M, including vacuum manifold and integral iris-vacuum window.

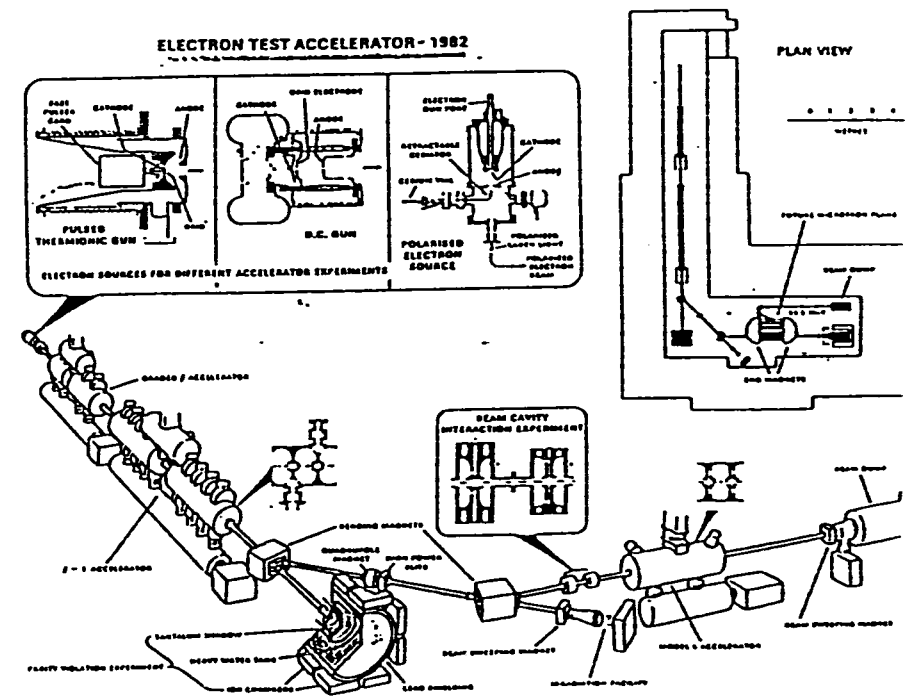


Fig. 1. Schematic of the Electron Test Accelerator

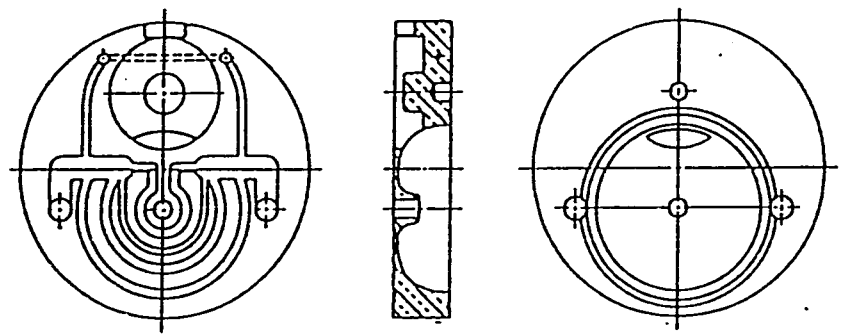


Fig. 1. Three view of the advanced SCS half-cell.

HIGH POWER ON-AXIS STRUCTURE  
 2450 MHz CONTINUOUS WAVE (CW)  
 63% BEAM LOADING  
 POWER LEVEL 200 kW/m  
 AVERAGE GRADIENT 3.5 MeV/m

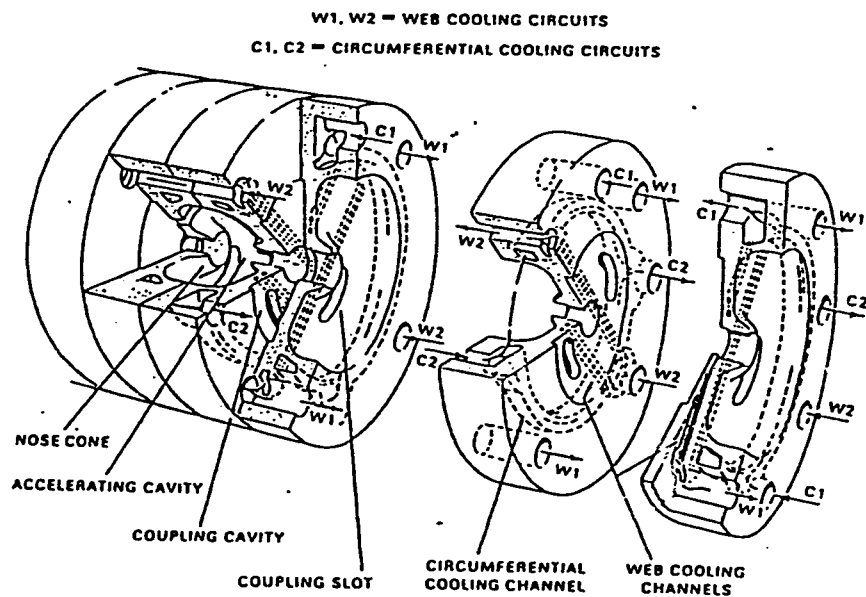


Fig. 2 Cooling channels for the on-axis coupled cavities.

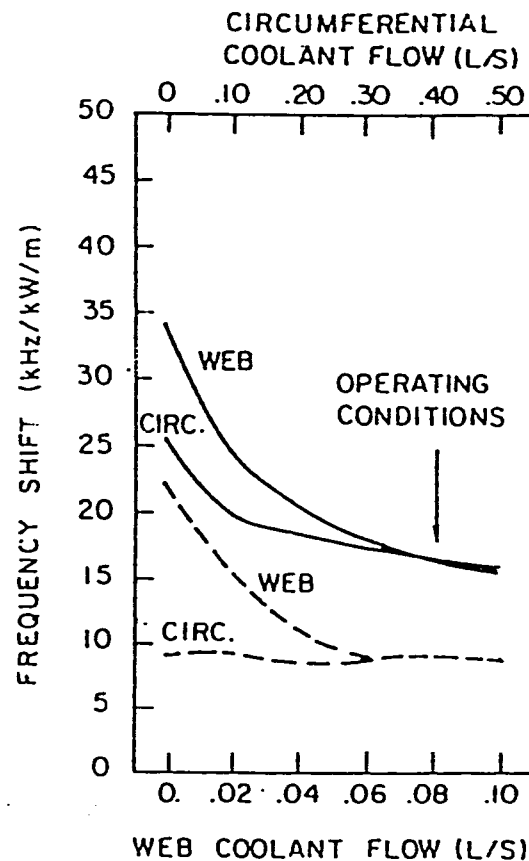


Fig. 3 Calculated frequency shift (continuous curves) and change in stopband frequency gap (dashed curves) as function of circumferential and web coolant flow rates. Results are shown for fixed web coolant flow of 0.08 L/s (identified by CIRC.) and for fixed circumferential flow rate of 0.43 L/s (identified by WEB).



Table 1

Results from Thermal Stress Analysis

Circumferential Coolant Flow :	0.43 L/s per circuit
Web Coolant Flow :	0.24 L/s per circuit
<u>Temperature Increments</u>	
Circumferential Cooling Water :	0.031 °C/kW/m per circuit
Web Cooling Water :	0.037 °C/kW/m per circuit
Average Cavity Surface :	0.38 °C/kW/m
Nose Cone Surface :	0.53 °C/kW/m
<u>Frequency Shift :</u>	16.25 kHz/kW/m
<u>Change in Stopband Frequency Gap :</u>	8.88 kHz/kW/m

J.M.Watson (LANL)  
 THE LOS ALAMOS FREE-ELECTRON LASER  
 IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-32 (1985) 3363

TABLE III IMPROVED OPERATING PARAMETERS IN ERX

	Oscillator <u>Experiment</u>	<u>ERX</u> <i>Energy Recovery</i>
Macropulse Duration ( $\mu$ s)	100	100
Micropulse Repetition Rate (MHz)	21.7	108.3
Peak Current (A)	50	100
Average Current (A)	0.05	0.030
Accelerator Efficiency	0.36	0.74
Deceleration (MeV)	0	18
Copper Losses (MW)	2.7	4.5
Beam Power (MW)	1.0	6.0
Recovered Power (MW)	0	4.6
Efficiency Improvement	1	1.5
Optical Power (kW)	6	>50

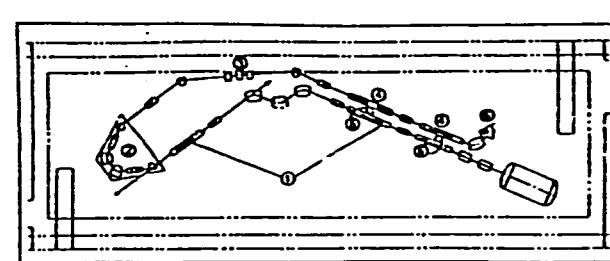


Fig. 7. Los Alamos rf-linac-driven FEL energy-recovery experiment layout: (1) accelerator and FEL operating at two-fold increase in peak current; (2) isochronous 180° bend on translation table; (3) isochronous 60° bend; (4) two 1.8-m decelerator (energy-recovery) sections; (5) two variable rf bridge couplers; (6) beam dump for 2- to 3-MeV beam; (7) 20-MeV diagnostics.

Layout of FEL oscillator with energy recovery.

J.L.Adamski et al. (Boeing)  
 IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-32 (1985) 3397

<u>LINAC</u>	<u>KLYSTRON</u>
1300 MHz $3\pi/4$	Thomson CSF
E = 120 MeV	Peak Power 12 MW
$I_{peak}$ = 100 A	Average Power 100 kW
Pulse Length = 200 $\mu$ s	Pulse Width 200 $\mu$ s

CEBAF (1987-1994)  
 Superconducting 1500 MHz (CW) 5 MeV/m *-7.5 MeV*  
 4 GeV 200  $\mu$ A (Beam Power 800 kW)

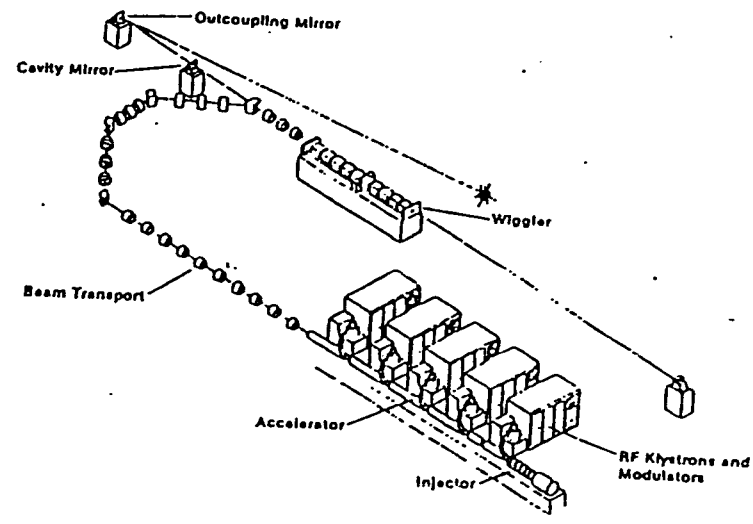
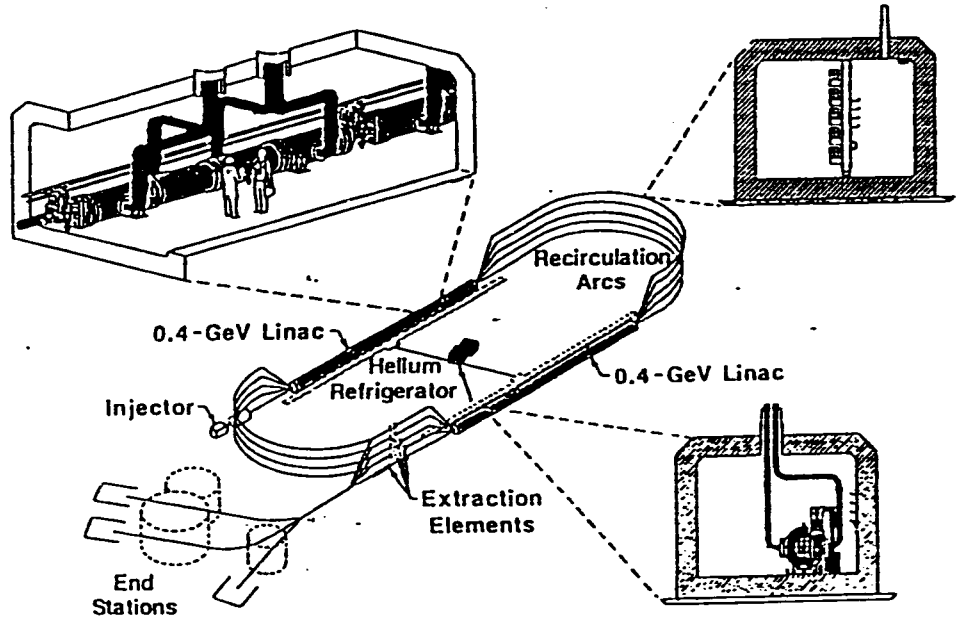


Figure 2 Visible FEL Experiment



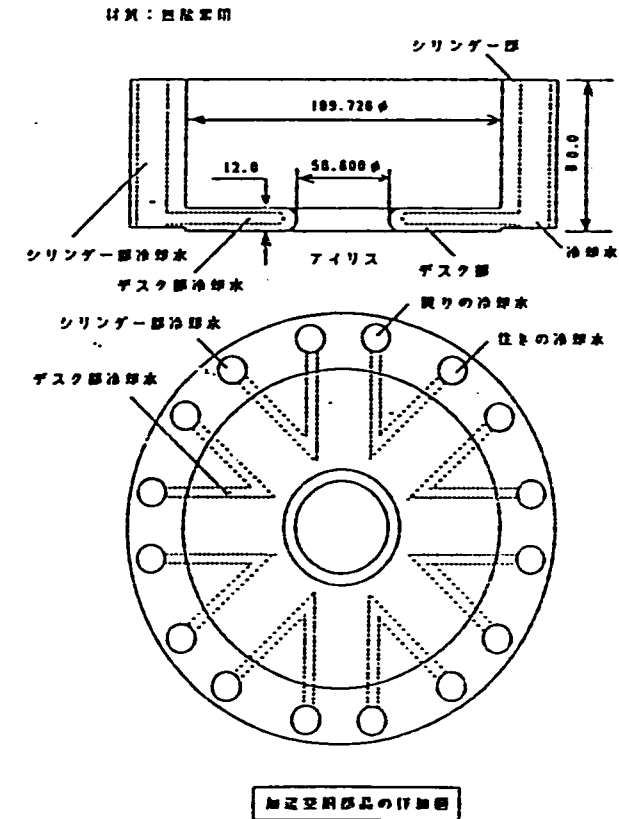
17-58

PNC/MELCO (1987,1988)  
 SCS(SW) 999.3 MHz (CW)  
 100 MeV 20 mA × 5 120 m

PNC/AECL (1990)  
 OAC(SW) 1249 MHz (CW)  
 5 m × 15 32 kW/m  
 100 MeV 100 mA (Beam Power 10MW)  
 ac to beam conversion efficiency 30 %  
 limited by (klystron 60 % beam loading 85%)

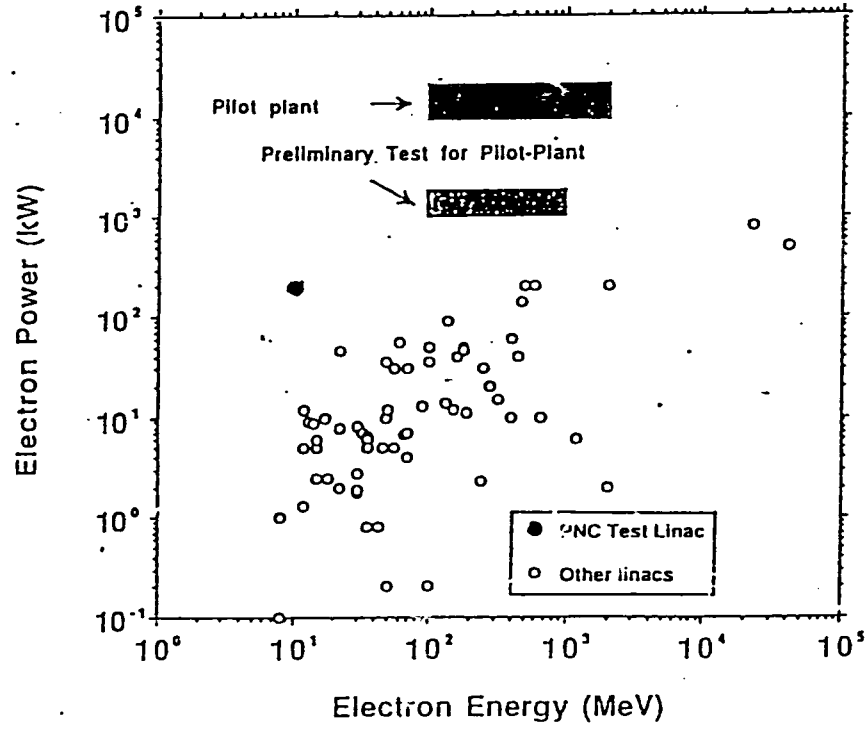
PNC/KEK (1991)  
 Test Linear Accelerator for R&D  
 ADVANCED SLAC(TW) 1249.1 MHz (CW)  
 10 MeV 20 mA (100 mA × 20 %)

PNC/KEK (1991)  
 Test Linear Accelerator for R&D  
 ADVANCED SLAC(TW) 1249.1 MHz (CW)  
 10 MeV 20 mA (100 mA × 20 %)



I. Sato (KEK)

### Map of Electron Linacs



S. Toyama (PNC)

## 大強度電子線形加速器開発の現状

東北大学原子核理学研究施設

小山田 正幸

1991年3月7日

$$P_{rf} = \frac{DE^2}{ZL} + P_b$$

wall loss

$P_{rf}$  : total rf power

$D$  : duty factor

$E$  : accelerator energy gain

$Z$  : shunt impedance per unit length

$P_b = EI_{ave}$  : beam power

$$\frac{DE^2}{ZL} \text{ (wall loss) を小さく.}$$

1.  $D \rightarrow \text{小}$

パルス型ライナック  $D = 0.1\%$

2.  $L \rightarrow \text{大}$

パルス型ライナック ( $D = 0.1\%$ ) 2"  
 $\sim 10 \text{ MeV/m}$  SLAC, TOHOKU, PF...

3.  $Z \rightarrow \text{大}$

超電導ライナック  
 HEP, TRISTAN, CERN...  
 ( $D = 100\%$ )

4.  $E \rightarrow \frac{E}{n}$

マイクロトン, リサイクルトン, ...

L.M. Young and J.M. Potter; (LANL)

CW SIDE-COUPLED LINAC FOR THE LOS ALAMOS/NBS RACETRACK  
 MICROTRON IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-30 (1983) 3508

(disk-and-washer (DAW)

annular-ring coupled structure (ACS)

on-axis coupled structure (OCS)

side-coupled structure (SCS)

(1) high efficiency  $ZT^2 > 80 \text{ M}\Omega/\text{m}$

(2) high accelerating field  $> 1.5 \text{ MeV/m}$

(3) water cooling to permit 100 % duty factor operation

(4) freedom from interfering modes that could cause BBU

(5) enough coupling (>10 %) to ensure good stability 5%

ADVANCED SIDE-COUPLED STRUCTURE

2380 MHz CONTINUOUS WAVE (CW)

POWER LEVEL 82 kW/2.7 m

ACCELERATING GRADIENT 1.58 MeV/m

at 70% of DESIGN WATER FLOW

8 m  $\rightarrow$  4 m x 2

G.E. McMICHAEL (AECL) *Review*  
 CW LINEAR ACCELERATOR DEVELOPMENT AT CRNL - STATUS AND FUTURE  
 Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B10/11 (1985) 825  
ETA 1970s - 1982  
1.9 MeV/m 20 mA (35 kW/m)

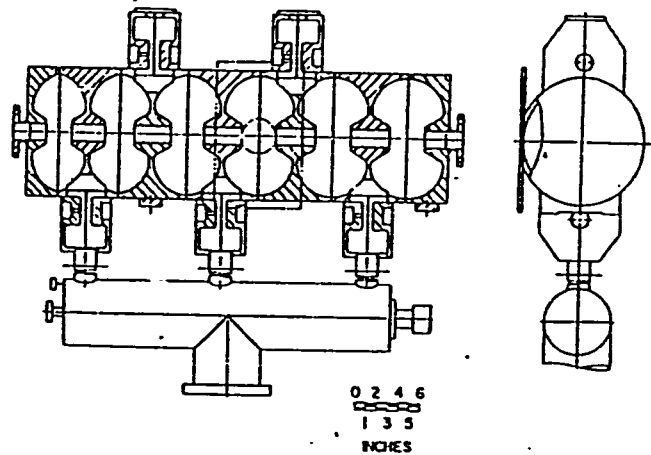


Fig. 10. A cross sectional view of model M, including vacuum manifold and integral iris-vacuum window.

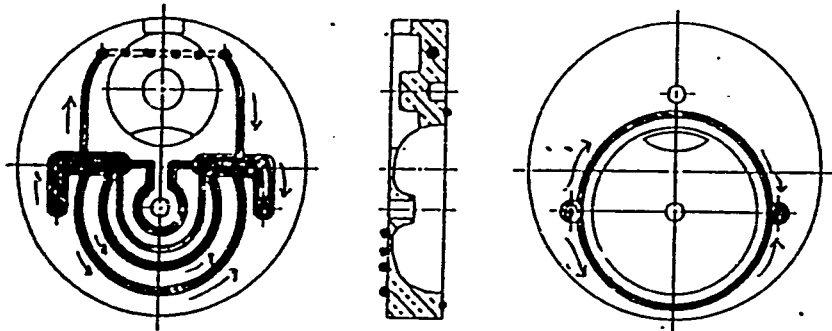


Fig. 1. Three view of the advanced SCS half-cell.

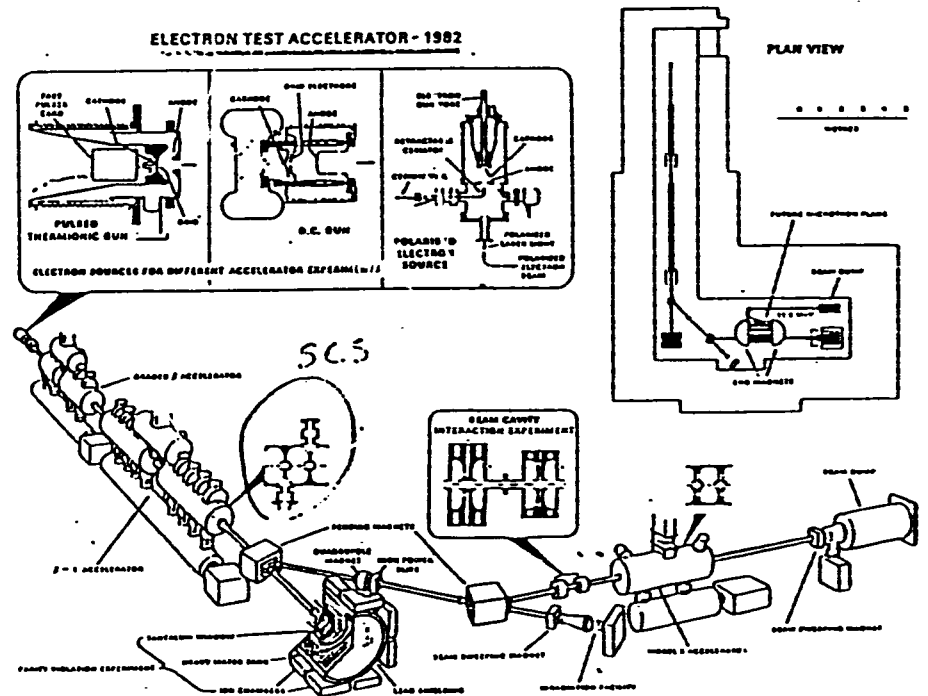
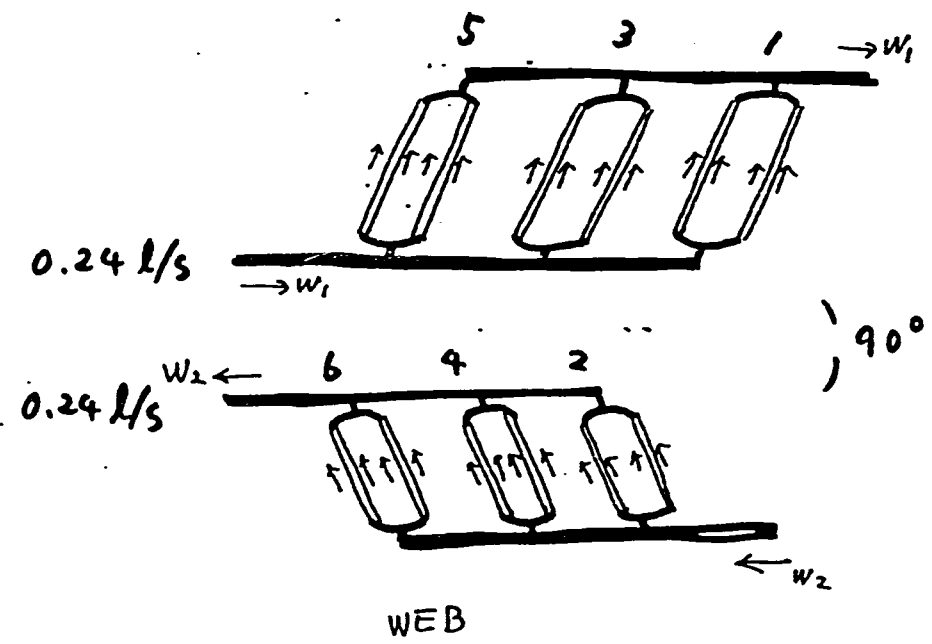
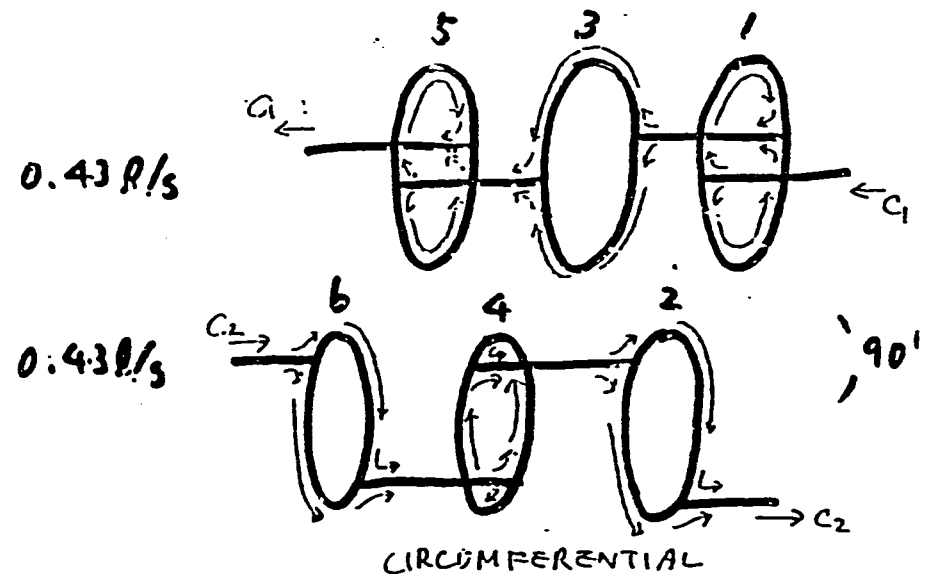


Fig. 1. Schematic of the Electron Test Accelerator

J.-P. Labrie HIGH POWER ELECTRON LINAC STRUCTURE  
 IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-32 (1985) 2775

HIGH POWER ON-AXIS STRUCTURE  
 2450 MHz CONTINUOUS WAVE (CW)  
 63% BEAM LOADING  
 POWER LEVEL 200 kW/m  
 AVERAGE GRADIENT 3.5 MeV/m



W1, W2 = WEB COOLING CIRCUITS  
 C1, C2 = CIRCUMFERENTIAL COOLING CIRCUITS

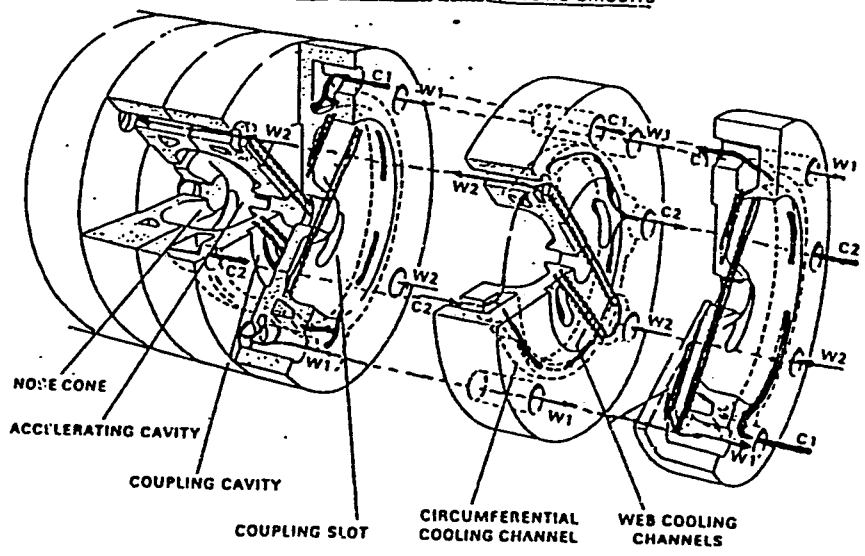


Fig. 2 Cooling channels for the on-axis coupled cavities.

44-64



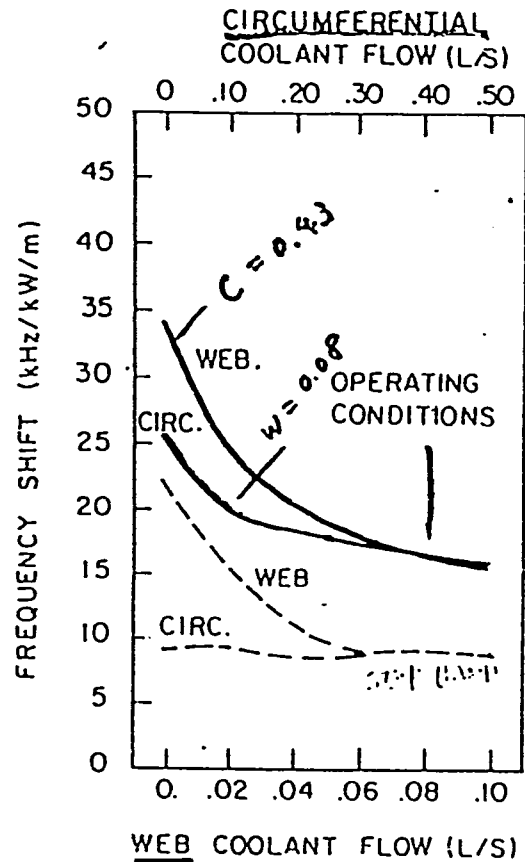


Fig. 3 Calculated frequency shift (continuous curves) and change in stopband frequency gap (dashed curves) as function of circumferential and web coolant flow rates. Results are shown for fixed web coolant flow of 0.08 L/s (identified by CIRC.) and for fixed circumferential flow rate of 0.43 L/s (identified by WEB).

Table 1

200 kW/m

Results from Thermal Stress Analysis

Circumferential Coolant Flow : 0.43 L/s per circuit  $C_1, C_2$   
 ) 13.4 L/s  
 Web Coolant Flow : 0.24 L/s per circuit  $W_1, W_2$

Temperature Increments

Circumferential Cooling Water : 0.031 °C/kW/m per circuit  
 Web Cooling Water : 0.037 °C/kW/m per circuit  
Average Cavity Surface : 76°C 0.38 °C/kW/m  
Nose Cone Surface : 106°C 0.53 °C/kW/m

Frequency Shift : 3.25 MHz 16.25 kHz/kW/m

Change in Stopband Frequency Gap : 8.88 kHz/kW/m  
 1.78 MHz

J.M.Watson (LANL)

THE LOS ALAMOS FREE-ELECTRON LASER

IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-32 (1985) 3363

TABLE III IMPROVED OPERATING PARAMETERS IN ERX

	Oscillator	
	Experiment	ERX
Macropulse Duration ( $\mu$ s)	100	100
Micropulse Repetition Rate (MHz)	21.7	108.3
Peak Current (A)	50	100
Average Current (A)	0.05 <i>50 mA</i>	0.030 <i>30 mA</i>
Accelerator Efficiency	0.36	0.74
Deceleration (MeV)	0	18
Copper Losses (MW)	2.7	4.5
Beam Power (MW)	1.0	<u>6.0</u>
Recovered Power (MW)	0	<u>4.6</u>
Efficiency Improvement	1	1.5
Optical Power (kW)	6	>50

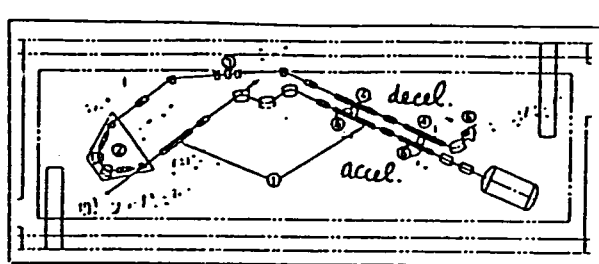


Fig. 7. Los Alamos rf-linac-driven FEL energy-recovery experiment layout: (1) accelerator and FEL operating at two-fold increase in peak current; (2) isochronous 180° bend on translation table; (3) isochronous 60° bend; (4) two 1.8-m decelerator (energy-recovery) sections; (5) two variable rf bridge couplers; (6) beam dump for 2- to 3-MeV beam; (7) 20-MeV diagnostics.

Layout of FEL oscillator with energy recovery.

J.L.Adamski et al. (Boeing)

IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-32 (1985) 3397

**FEL**

LINAC

1300 MHz  $3\pi/4$

E = 120 MeV

I<sub>peak</sub> = 100 A

Pulse Length = 200  $\mu$ s

KLYSTRON

Thomson CSF

Peak Power 12 MW

Average Power 100 kW

Pulse Width 200  $\mu$ s

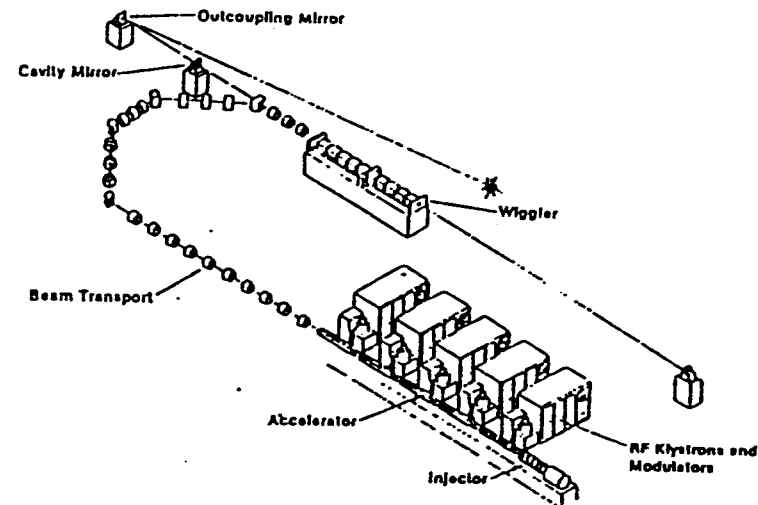


Figure 2 Visible FEL Experiment

(SDI?)

CEBAF (1987-1994)

Superconducting 1500 MHz (CW) 5 MeV/m  
4 GeV 200  $\mu$  A (Beam Power 800 kW)

PNC/MELCO (1987,1988)

SCS(SW) 999.3 MHz (CW)

100 MeV 20 mA  $\times$  5 120 m

PNC/AECL (1990)

OAC(SW) 1249 MHz (CW)

5 m  $\times$  15 32 kW/m

100 MeV 100 mA (Beam Power 10MW)

ac to beam conversion efficiency 30 %

limited by (klystron 68 % beam loading 85%)

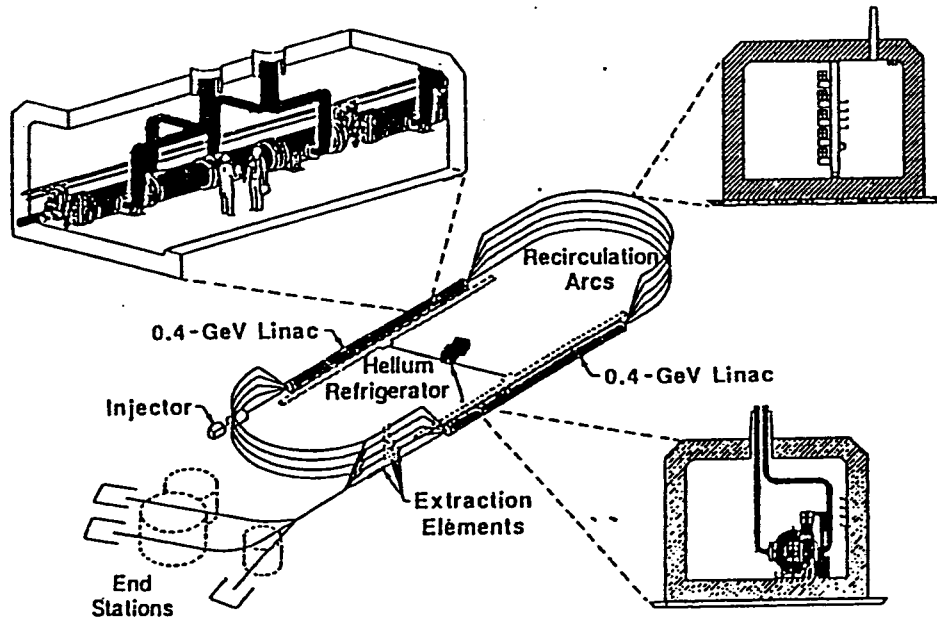
PNC/KEK (1991)

Test Linear Accelerator for R&D

ADVANCED SLAC(TW) 1249.1 MHz (CW) 20%

10 MeV 20 mA (100 mA  $\times$  20 %)

付-67



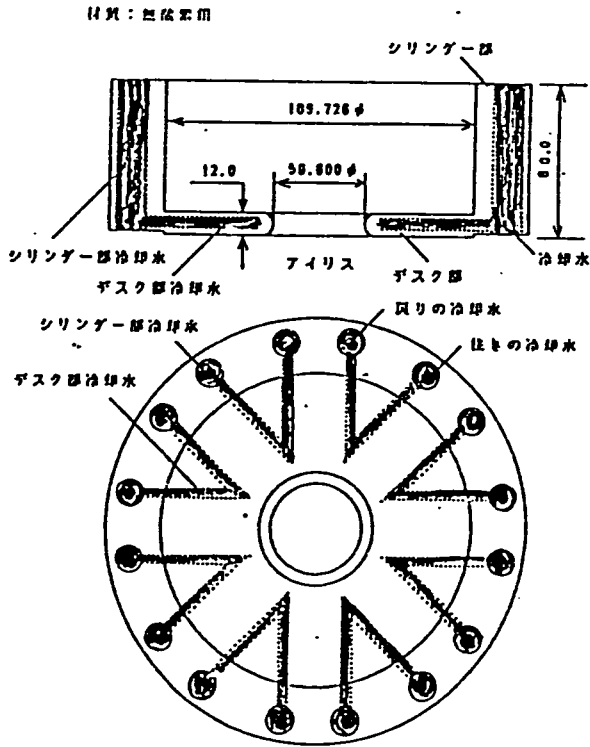
$$(0.4 + 0.4) \times 5 = 4$$

PNC/KEK (1991)

Test Linear Accelerator for R&D

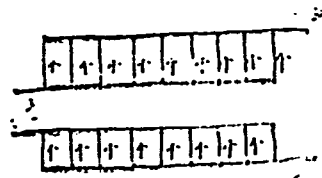
ADVANCED SLAC(TW) 1249.1 MHz (CW)

10 MeV 20 mA (100 mA × 20 %)

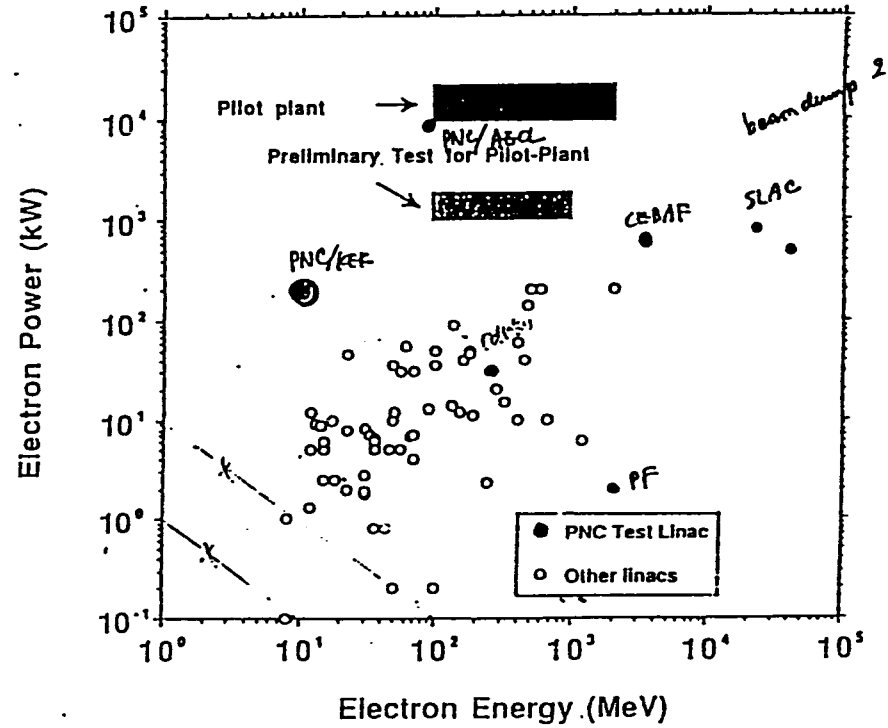


加速交換部品の詳細図

I. Sato (KEK)



Map of Electron Linacs



S. Toyama (PNC)

2 - 2.

Development Program for High Intensity  
Proton Linear Accelerator

1110 12/11 Shop  
2-4

Development program for high intensity proton linear accelerator

Motoharu Mizumoto

Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute

## Abstract

The conceptual design of the Engineering Test Accelerator (ETA) for actinide transmutation has been proposed by Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI, with a beam energy of 1.5 GeV and a current of 10 mA<sup>1-2)</sup>. This accelerator represents a large scale system when compared to the contemporary proton accelerators that are used mainly for basic nuclear physics experiments. In particular, an average proton current of 10 mA is nearly 10-50 times larger than that for existing accelerators. A beam spill should be minimized not to cause serious problems due to the high level activities induced in accelerator structures.

As a first step in the development, the low energy portion of the accelerator structure is being studied, since the beam quality is determined mainly by this low energy portion. The Basic Technology Accelerator (BTA) with a beam energy of 10 MeV and a current of 10 mA is planned to be built, which consists of ion source, radio frequency quadrupole (RFQ) and drift tube linac (DTL). The high energy portion of the accelerator (high  $\beta$  structure) will be also studied in advance of the construction of ETA.

Survey activities and preparatory design works have started in 1989. Studies for the optimization of the accelerator system and the conceptual design of accelerator structure are being carried out in 1990 which will be followed by various R&D activities in 1991. Investigation for an accelerator building and utilities has been continued simultaneously.

## 1. The present status of intense accelerator

For last two decade, various advances in accelerator technology have been made. Among them, the following four items are significant.

(1) Newly developed accelerator structure, radio frequency quadrupole (RFQ) has given great impetus to the improvements of the beam quality and beam intensity. This was first proposed by Kapchinskii and Tepiyakov<sup>3)</sup>. This structure was, then, intensively studied and put in practical use in Los Alamos<sup>4)</sup>. The RFQ has been operating successfully in various accelerator laboratories all over the world.

(2) Detailed study on beam dynamics property has been carried out and the effect to the beam characteristics now becomes well understood.

(3) Because high intensity accelerators use high power microwave RF (radio frequency) source as a power supply, developments of efficient and high power RF sources (tetrode or klystron) are extremely important. Various RF sources now become available for various accelerator frequency range between 100 MHz to several GHz.

(4) Due to the very rapid development made on electronics equipment and computer technology, elaborate control and beam diagnostics are now possible so that operation of a large and complicated accelerator system can be done reliably, safely and also economically.

In the past, several high intensity accelerators were proposed to build and partly operated. A large amount of R&D results have been accumulated. In 1950's, the deuteron accelerator was proposed and built in Livermore called MTA, Material Test Accelerator for nuclear fuel <sup>239</sup>Pu production with the goal of 500 MeV and 300 mA. The acceleration of the beam of 30 MeV and 50 mA was actually achieved. Situation on uranium fuel supply, however, was changed later on and this project was canceled. After long ceased, this accelerator breeding design study has been again continued in 1970's at BNL, ORNL and ANL, and they have accomplished to prove its technical feasibility.

In LANL, neutron distribution and spallation nucleus yield have been studied as the research activity for FERFICON (FERtile to Fissile CONversion) project in the past. Recently, they are proposing the high intensity CW proton accelerator ATW (1.6 GeV, 250 mA) for accelerator-based transmutation of nuclear waste. LANL has also proposed the FMIT project (Fusion Material Irradiation Test Facility) jointly with Hanford Laboratory. In that project, high intensity RFQ was built and successfully operated with hydrogen molecular beam of 50 mA. At the present, the study of more intensive version IFMIF (35 MeV, 1 A) is being continued.

In Chalk River, Canada, the high intensity proton accelerator project was proposed for the nuclear fuel cycle and still various R&D works are continued with the emphasis on the continuous was (CW) operation.

For pulsed neutron source for material researches, a 1.1 GeV, average 5 mA accelerator SNQ (Spallations-Neutronenquelle) was proposed in Julich, Germany. The conceptual design study and some detailed R&D works were completed.

In Table 1, the present status of the high intensity accelerator including existing and proposed accelerators is given. At present, the most high intensity accelerator is LAMPF in LANL which accelerates a 200 MeV and 1 mA proton beam. This accelerator was built in 1972 and has been stably operated for 20 years. In Europe, ISIS at the Rutherford and Appleton Laboratory, England, and SINQ at Paul Scherrer Institute, Switzerland, are routinely operated for the neutron source, and meson and muon production. The detailed references for above mentioned accelerators can be found elsewhere<sup>5)</sup>.

## 2. The time schedule of the ETA and BTA development

The research plan for developing the high intensity proton linac is proposed by JAERI with the goal of the project as shown schematically in Fig. 1.

### (1) The 1st step development. (BTA)

The basic technologies are investigated for the development of a proton accelerator within the range of 5 - 6 years. The research building will be built at the Tokai Establishment of JAERI. The feasibility study and trade-off study for the accelerator and transmutation plant are carried out in this initial period. The various activities in the accelerator research field will be organized to provide technologies and staff that are required to build such an intensive accelerator. The Basic Technology Accelerator BTA with a current of 10 mA and an energy of 10 MeV will be constructed and operated for these initial studies. The conceptual layout of BTA is shown in Fig. 2.

### (2) The 2nd step development. (ETA)

A proton accelerator ETA for the research purposes with a 10 mA current and 1.5 GeV energy will be designed and constructed. The construction is expected to start in about 1996, after several check and reviews have been completed. The various engineering tests of the incineration process, including medium and large scale integral test, mock-up test and prototype experiments, will be made using this accelerator. Some other accelerator applications such as material researches, radio-isotope production, nuclear data measurement, meson physics and radiation therapy will also be carried out. The schematic layout of ETA is given in Fig. 3.

### (3) The 3rd step development. (Commercial Plant)

A commercial incineration plant utilizing an intensive proton linac will be constructed, after all the engineering and pilot plant tests both for accelerator and target system have been completed. As an industrial plant, every accelerator parameters such as proton energy, current and operational mode as well as the target system will be fully evaluated and optimized.

## 3. Conceptual design study for high intensity accelerator

### (1) General consideration

The main characteristics of the BTA and ETA is the high beam current. In the conceptual and detailed design of the system, much attention has to be paid in order to maintain the small beam spills. The caution has to be also taken to the design of other various parts such as the radiation shielding and beam controlling on the same reason.

As the first step of the development for BTA, the accelerator structure consists of the following components: ion source, radio frequency quadrupole (RFQ) and drift tube linac (DTL). The high energy portion of the accelerator (high  $\beta$  structure) will be studied also in advance of the ETA development.

The parameters for the BTA are determined by aiming at proving the validity of the low energy part of the ETA. Various tests of the characteristics of the accelerator structures will be conducted so that the design and operational experience can be accumulated. The beam energy is chosen to be 10 MeV, below the Coulomb barrier to avoid proton induced reactions in accelerator structural materials.

The acceleration frequency of 200 MHz is chosen for our purpose both for RFQ and DTL mainly due to the availability of RF source and heat removal problem. The high frequency has a problem of the heat dissipation per unit area, therefore it is easy to occur resonance frequency drift, gas release and electric discharge.

As the first step of the accelerator operation, low duty operation is appropriate to adjust the various parameters so that the adequate parameters can be obtained before future full CW operation. Therefore, the pulse operation is prepared for the optimum development step with the necessities to provide sufficient electric power supply for CW and pulse operation.

### (2) Ion source

Duoplasmatrons and the duoPIGatron<sup>6)</sup> have been widely used in proton linacs as an intense ion source. Multi-cusp type ion source has been developed for neutral beam injectors (NBI) in fusion reactor heating devices<sup>7)</sup>. Further development of intense ion sources is necessary for high intensity and high duty operation. In the case of accelerator applications, necessary beam qualities such as emittance and beam size for acceptance into the following accelerator structures is more severe than those that contemporary sources can provide. Simultaneous acceleration of the  $H^+$  and  $H^-$  beam may be also desirable for the later basic research proposes. The injection voltage of about 100 keV is chosen at present. Table 2 shows the preliminary parameters for the BTA ion source.

### (3) RFQ

The RFQ is the only choice for an accelerator structure that can accelerate an 10 mA proton beam up to 2 MeV with good beam quality acceptable by the next structure DTL. The various evaluation and test of the RFQ are still needed with low and high power RF tests, and actual beam test during the construction of the structure. The design parameters of the RFQ is shown in Table 3.

As the test calculations for the design of the RFQ for our

purpose, the computer code PARNTEQ was used. An example of calculated result of the beam dynamic calculations is shown in Fig. 4.

#### (4) DTL

As DTL development, a high electric field and a high frequency are preferred, because of the higher effective shunt impedance and the efficient longitudinal focusing that result in a shorter total accelerator length. Our accelerator requirements, however, call for extremely small beam spill in the high energy section resulting in the 200 MHz structure with the inner diameter size of 88.63 cm and the tank length of 380 cm.

The test calculations for the design of the DTL have been made using the computer code PARNILA. The tentative parameters for the test calculation is given in Table 4 and an example of the beam dynamics calculation is shown in Fig. 5.

#### (5) RF source

As the first step of the development, the RF power source of 1 MW (peak) is necessary for 10 MeV beam energy and 10 mA beam current. While the klystron for the high frequency region above 350 MHz have become currently available for the MW class RF source, those for the low frequency region are difficult to obtain. The klystrones newly developed are only available so far with the several hundred kW output power range. The triode or tetrode tubes are, therefore, considered to be our choice used for BTA with multistage amplifier configuration. Table 5 shows the presently available 200 MHz hard tube amplifiers. If the development of the MW class klystron or Klystrode with the 200 - 350 MHz range and CW operation are available on the commercial base, these amplifiers will be useful for our purpose.

#### (6) High $\beta$ linac

The detailed development works of the high  $\beta$  linac will be started after the first step accelerator development has been completed, because their R&D for this section is still in progress. There could be several possible candidates for the structures, either single cavity or coupled cavity structures. In particular, as to the coupled cavity structures, many candidates are now being investigated in various laboratories: side coupled structure (SCS), alternating periodic structure (APS), disk and washer structure (DAW) and annular coupled structure (ACS). After 5 years development period, some new conceptual design may also come out other than those choices. We have to investigate and carry out survey work for these choices. The choice itself will depend on many aspects such as the space of the accelerator building, the capacity of power supplies and the availability of RF sources.

#### 4. The summary and works carried out in 1989 and 1990

Fig. 6 shows the time schedule for the R&D program and construction for BTA and ETA. In 1990, we are in the stage of system and conceptual study. Actual R&D works will be started in 1991 with the design and construction of various prototype accelerator structures for cold model test and hot model test. For hot model test, RF power source will be prepared and measurements of the electric magnetic characteristics of the accelerate structure will be conducted. Problems of heat dissipation and heat removal in the structure will be studied. The validity of the various computer design programs which we are now using, has to be checked by comparing the results from R&D works with the calculated results.

We are expecting to start accelerator construction of BTA in 1992 and complete the fabrication and assembly till the middle of 1994. The test operation will be started in 1994. The detailed design works for the ETA construction is planned to begin in 1996. Simultaneously, the conceptual design study and various trade-off study for the accelerator parameters of ETA is being carried out before the actual construction will start.

The major activities for the developments in 1990 are summarized as follows.

- 1) Survey activities of high intensity proton accelerators. Preparation and test run of computer programs for design calculation.
- 2) Determination of operation mode (CW, duty cycle, RF frequency, energy configuration etc.)
- 3) System studies of Basic Technology Accelerator.
- 4) Conceptual design studies of accelerator elements: Ion source, RFQ, DTL, RF power source, control system etc.
- 5) Design of cold and hot models for RFQ, DTL and RF source.
- 6) Studies of utilities such as electricity, water consumption, space and layout required for the BTA building.
- 7) Trade-off studies of the Engineering Test Accelerator.

#### 5. Acknowledgement

The author would like to thank all the collaborators of Nuclear Spallation Study Group I (Accelerator) and the members of Study Group of the BTA building for valuable discussions.

#### References

- 1) Y. Kaneko, "The Intense Proton Accelerator Program". The 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, 1990, p 25.
- 2) M. Mizumoto et al., "Development Plan of Basic Technology for A high Intensity Proton Linear Accelerator, Ibid, p 219
- 3) I.W. Kapchinskii and V.A. Teplyakov, "Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing", Prib. Tekh. Eksp. 119, No.2(1970)19
- 4) J.E. Stovall, K.R. Crandall and R.W. Hamm, "Performance



## A COMPARISON OF EXISTING AND PROPOSED HIGH INTENSITY PROTON ACCELERATORS

1990/1/20

Name	Country	Lab.	Type	Energy (MeV)	Current (mA)	Width $\mu$ s	Rep. Rate (Hz)	Power (MW)	Status
KENS	Japan	KEK	synchro	500	0.0067	10,100	20	0.003	Operating
IPNS	US	ANL	synchro	500	0.012	3,10	5	0.006	Operating
TRIUMF	Canada	TRIUMF	cyclo	450	0.100	CW		0.045	Operating
ISIS	UK	RAL	synchro	800	0.200	3,10	50	0.16	Operating
SINQ	Swiss	PSI	cyclo	600	1.	CW		0.6	Operating
LAMPF	US	LANL	linac	800	1.	500	12	0.8	Operating
JHP	Japan	KEK	linac	1000	0.200	400	50	0.20	Proposed
SHQ	FRG	XFA	linac	1100	5.	250	100	5.5	Cancelled
ASPH	US	ANL	synchro	1100	3.5	3,10	35	3.85	Proposed
EURAC	EC	Ispra	linac/cyclo	600	6.	CW		3.6	Proposed
JAERI	Japan	JAERI	linac	1500	10.	CW/pulse		15.	Proposed
DEMO	Canada	CRNL	linac	1000	300.	CW		300.	Proposed
ATP	US	LANL	linac	1600	250.	CW		400.	Proposed

Table 1 A comparison of existing and proposed high intensity proton accelerator

- Characteristics of a 425 MHz RFQ Linac". 6th Conf. on Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, Texas, IEEE NS-28 (1981) 1508
- 5) S. Clerjacks (Edit), "Neutron Sources for Basic Physics and Applications", An OECD/NEA Report, Pergamon Press, 1983
- 6) R.M. Hutcheon and G.E. McMichael, "Low Power RF Tuning of The RFQ Accelerator", the 1984 Linear Accelerator Conference, Darmstadt, FRG, 1984 and Private Communication in 1989.
- 7) Y. Okumura, "Review Of The High Current Ion Sources For Fusion From A View Point of Accelerator Applications", The 2nd Int.Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, 1990, p 441.

RFQ Parameters

High Brightness H<sup>+</sup> Ion Source

Overall	Energy	50-100 KeV	Energy (Shaper Output)	0.068 MeV
	Current	100mA(H <sup>+</sup> )	(GB Output)	0.51 MeV
	Duty Factor	CW	Vane Length RM	1.54 cm
	Emittance	0.5πmm·mrad	Shaper	56.87 cm
	Proton Yield	>90 %	GB	64.34 cm
	Impurity	<1 %	Accelerator	102.74 cm
			Total	225.49 cm
Plasma Generator	Type	Multicusp	Cavity Diameter	66 cm
	Size	20cmφ×17cm	Minimum Aperture	0.384 cm
	Plasma Production	ECR(2.45GHz)	Maximum Modulation Factor	0.24
		Arc(LaB6 Cathode)	Vane Voltage	0.128 MV (1.8Ek)
		Arc(W filament)	Synchronous Phase	-30 deg.
	Operating Pressure	0.2Pa(H <sup>+</sup> )	Wall Loss Power	221 Kw
			Beam Power	216 Kw
			Transmission	96.0 %
Extractor	Type	Two-stage Extraction (4 Grids)	Normalized Emittance	
	Insulator	Alumina Ceramic	X Input (100%)	0.049 π·cm·mrad
	Current Density	200mA/cm <sup>2</sup> (H <sup>+</sup> )	Output (100%)	0.38 π·cm·mrad
	Aperture	8mm(H <sup>+</sup> )	Output (90%)	0.095 π·cm·mrad
			Output (rms)	0.020 π·cm·mrad
			Y Input (100%)	0.046 π·cm·mrad
			Output (100%)	0.38 π·cm·mrad
			Output (90%)	0.11 π·cm·mrad
			Output (rms)	0.023 π·cm·mrad
			Z Input (100%)	2.98 π·MeV·rad
			Output (100%)	0.38 π·MeV·rad
			Output (90%)	0.015 π·MeV·rad
			Output (rms)	0.0026 π·MeV·rad

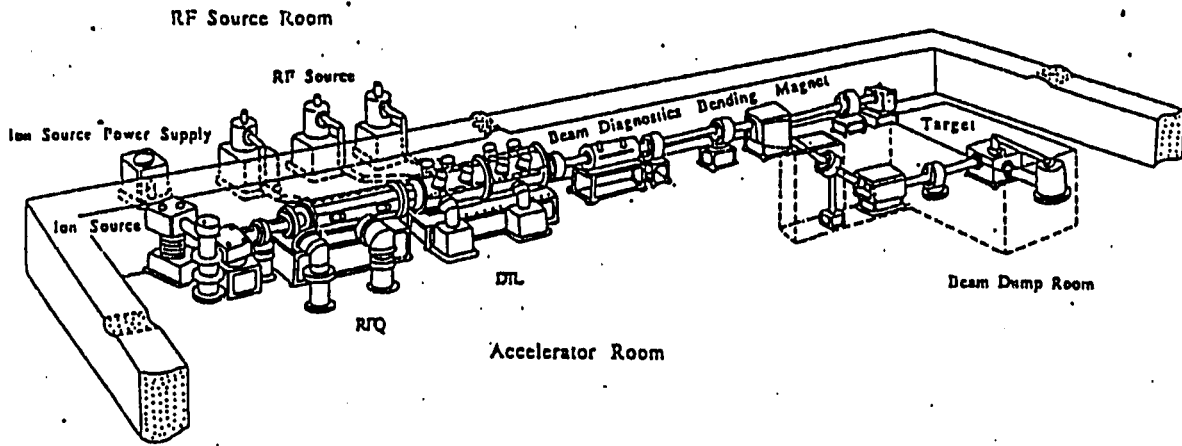
Table 2 Preliminary design parameters for ion source

DTL Parameters

Length of Tank	380.97 cm
Inner Diameter of Tank	88.63 cm
Drift Tube :	
Outer Diameter	18.00 cm
Inner Diameter	2.00 cm
Cell Length	
(at 2 MeV)	9.91 cm
(at 6 MeV)	16.85 cm
(at 10 MeV)	21.57 cm
Gap Length	
(at 2 MeV)	1.94 cm
(at 6 MeV)	3.97 cm
(at 10 MeV)	5.60 cm
Number of Cell	23
Synchronous Phase	-30 deg.
Wall Loss Power	900 Kw
Beam Power	800 Kw
Transmission	98.6 %
Normalized Emittance	
X	
Input (100%)	0.38 $\pi$ -cm-mrad
Output (100%)	1.1 $\pi$ -cm-mrad
Output (90%)	0.51 $\pi$ -cm-mrad
Output (rms)	0.097 $\pi$ -cm-mrad
Y	
Input (100%)	0.41 $\pi$ -cm-mrad
Output (100%)	1.7 $\pi$ -cm-mrad
Output (90%)	0.52 $\pi$ -cm-mrad
Output (rms)	0.077 $\pi$ -cm-mrad
Z	
Input (100%)	0.061 $\pi$ -MeV-rad
Output (100%)	0.14 $\pi$ -MeV-rad
Output (90%)	0.037 $\pi$ -MeV-rad
Output (rms)	0.0062 $\pi$ -MeV-rad

Table 5 the presently available 200 MHz hard tube amplifiers.

Manufacturer	RS2074SK	RS2042SK	8973	7835	TH526	TH116
Type	Tetrode	Tetrode	Tetrode	Triode	Tetrode	Triode
Frequency (MHz)	50-200	17-200	20-200	200-300	200-220	1-250
Output Power (HV peak)	1.6 (100MHz)	1 (150MHz)	1.6 (70MHz)	4 (250MHz)	2.5 (155MHz)	2.2 (200MHz)
	(5ms)	(4ms)	(1ms)	(2ms)	(300 $\mu$ s)	(700 $\mu$ s)
Duty Factor (%)	25	40	33	6	3	3
Anode Voltage (kV)	24	14	20	30	24	30
Efficiency (%)	65	66		60.6	64.7	48.1
Application	GSI NIRS	GSI RCNP	JT60 JET	DNL FNAL LANL		KEK CERN



Basic Technology Accelerator ( BTA )

Fig. 2 Conceptual layout of the Basic Technology Accelerator

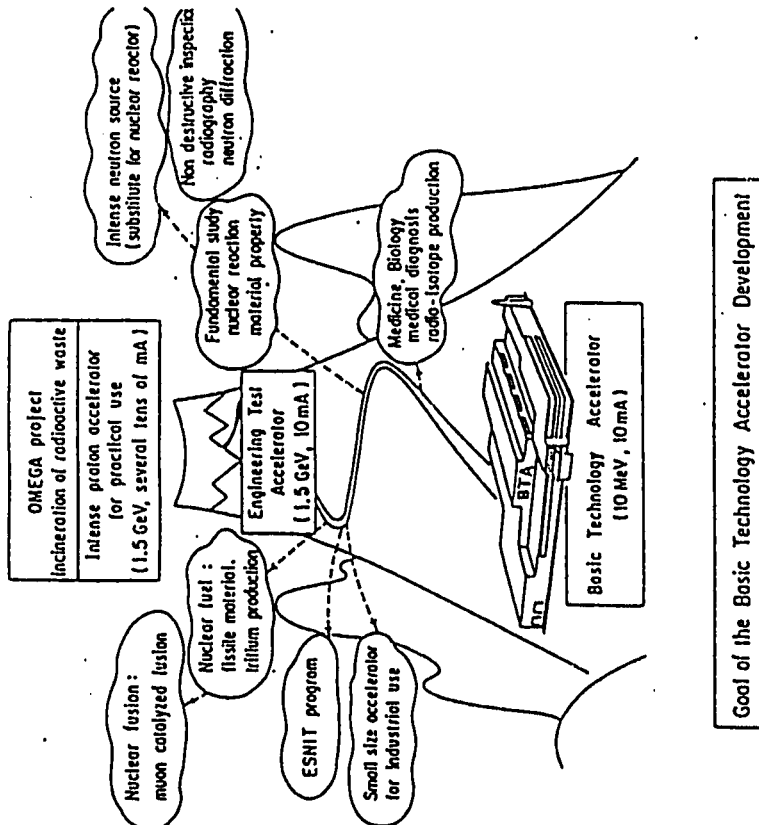
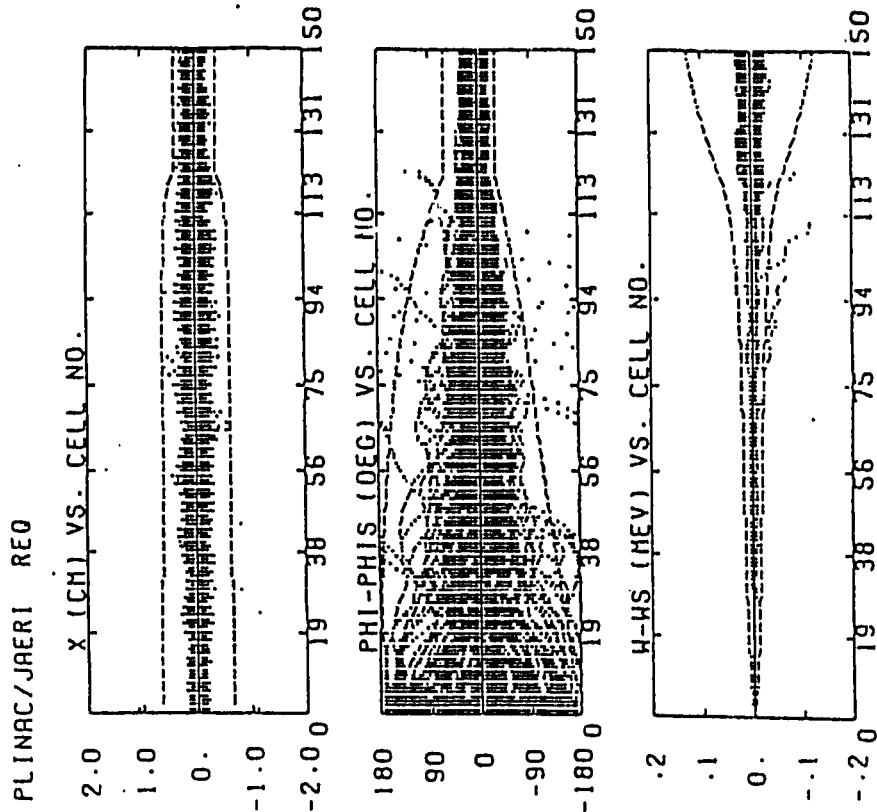


Fig. 1 Goal of the Basic Technology Accelerator



RFQ Beam Dynamics Calculation with PARNTEQ

Fig. 4 An example of the preliminary design calculation for RFQ

24-21

### Engineering Test Accelerator

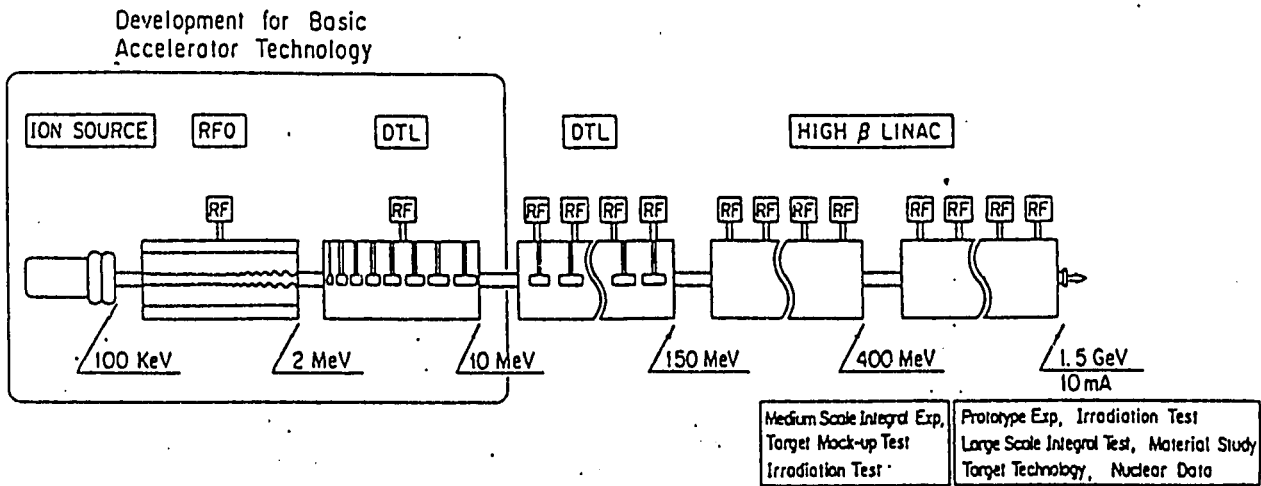


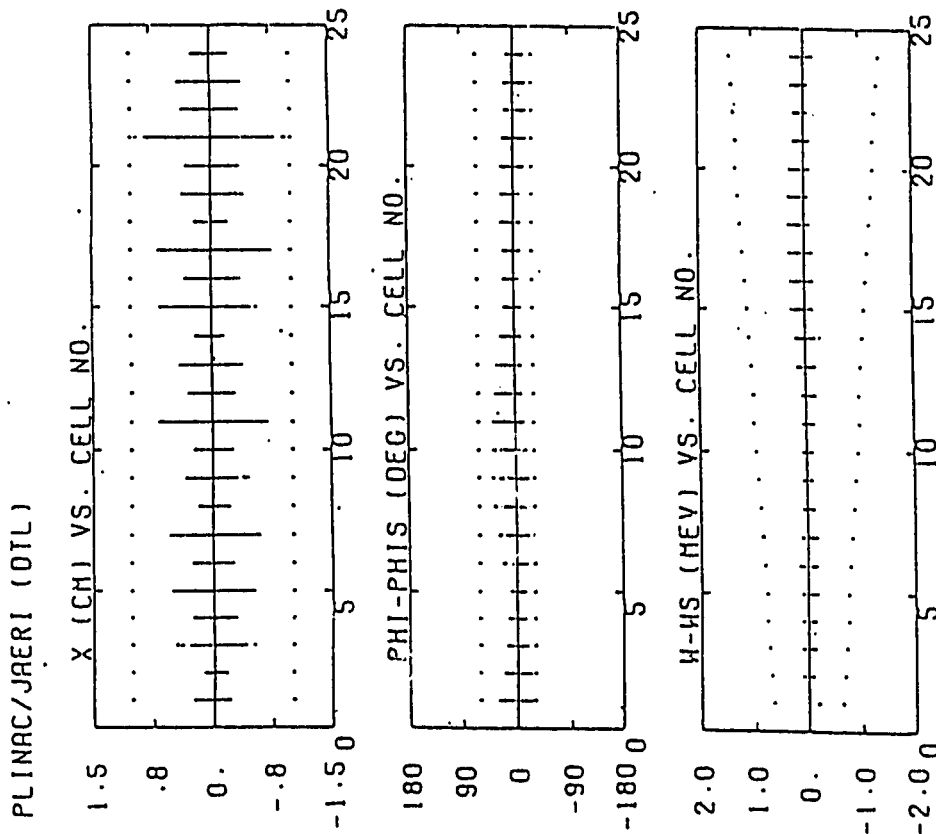
Fig. 3 Schematic layout of the Engineering Test Accelerator

Intense Proton Linear Accelerator Program

(Oct. 16, 1990)

Year		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
I s t	Develop. of Basic Accel. Technol.									
	(1) System & Concept Study	Survey, Study, Conceptual Design								
	(2) R&D for Accelerator Elements	Ion Source, RFQ, DTL, RF Source								
	(3) Building	Prelim. & Execution Design, Construction								
s t e p	Basic Technology Accelerator (10 MeV, 10 mA)									
	(1) Fabrication			Ion Source, RFQ, DTL						
	(2) Assembling				Full Assembly					
	(3) Basic Accel. Technology Test					Test, Operation				
	(4) High $\beta$ Linac				Preliminary Study					
2 n d	Engineering Test Accelerator (1.5 GeV, 10 mA)									
		Concept Study, Trade-off Study						Design, Construction		

Fig. 6 Time schedule of intense proton linear accelerator program



DTL Beam Dynamics Calculation with PARMILA

Fig. 5 An example of the preliminary design calculation for DTL

(OECD/NEA Information Exchange Meeting)  
(Proceeding Paper)

STUDY OF TRU TRANSMUTATION SYSTEM WITH A PROTON ACCELERATOR

T. Nishida, I. Kanno, H. Takada, T. Takizuka, M. Mizumoto,  
M. Akabori, Y. Nakahara, H. Yasuda and Y. Kaneko

1990. 11. 8.

Japan Atomic Energy Research Institute

(Abstract)

Researches on the TRU transmutation with a proton accelerator, which were performed at JAERI in these years, have been promoted as one of main themes in the newly started national project OMEGA, which aims to establish new safer technologies to process long-lived radio-active wastes. Conceptual design studies of the transmutation plant have been made from the nucleonics and hydraulics analysis points of view. The present transmutation system is a hybrid one of an intense proton accelerator, a tungsten target cooled with sodium and a subcritical core loaded with the TRU alloy fuel. In this system the transmutation rate of about 200 kg TRU a year (generated from about 8 units of 1 GWe PWR) are attainable and the marginal electricity more than one needed to drive the accelerator can be produced.

With the aim to make assessment of the system design and to upgrade the computer codes for simulating nuclear spallation processes in the transmutation system, the integral spallation experiment has been planned. The lead target has been set up along the 500 MeV beam line of a proton synchrotron booster at KEK. The first irradiation experiment has started Autumn in 1990.

## 1. Introduction

The management of minor actinides and fission products in the high level wastes is an important, hazardous problem due to their strong radio activities. In particular, transuranium nuclides (TRU) have a very long half lifetime of millions of years. Most of countries promoting the nuclear power generation have developed the vitrification and geological disposal techniques for managing these wastes. This subject, however, should be re-examined from the viewpoint of applying new, advanced technologies at present. By establishing new transmutation technologies the upgrade of safety assurance in the waste management will be achieved.

In Japan the OMEGA project (Option Making Extra Gains from Actinides and fission products) started to research and develop the new technologies on nuclear waste partitioning and transmutation as the long term one. As a part of the project, Japan Atomic Energy Research Institute has set up the R & D plans mainly on

- 1) advanced partitioning technology,
- 2) TRU transmutation in burner and power reactors and
- 3) TRU transmutation with proton accelerators."
- 4) basic researches for TRU technology.

The research for the item (3) at JAERI is being promoted as following items (a) ~ (d),

- a) development of the basic simulation code system,
- b) conceptual study of the TRU transmutation system,
- c) spallation integral experiment,
- d) development of an intense proton beam accelerator.

As for the item (d) the detailed description is given in another proceeding paper by Dr. Mizumoto. In the present paper brief descriptions are given for the spallation reaction & the particle transport simulation codes, some results in design studies of TRU transmutation target-core system driven by proton accelerator and spallation experiment. Tree structure illustration of R & D items for the TRU Transmutation Plant and High Intensity Proton Beam Accelerator is shown in Fig.1.

## 2. Research of transmutation system driven with proton accelerator

### 2.1 Nuclear spallation reaction occurred by high energy protons

Figure 2 shows the schematic illustration of main nuclear reactions and the particle transport process generated in the transmutation target system discussed in the present paper. Above the cutoff energy of 15 MeV the

intranuclear and internuclear cascade processes with the spallation, evaporation and high energy fission reactions occur from the proton bombardment. Through these processes many light particles such as neutron and helium are emitted. Most of evaporated neutrons transport in the target after slowing down into the energy range below 15 MeV.

The flow sheet in Fig.3 shows the mutual relation among the simulation code systems prepared at JAERI. The High Energy Nuclear Reactions and Nucleon-Meson Transport Code NMTC/JAERI<sup>TM</sup> is main code in this code system. The NMTC/JAERI-NMTA and NUCLEUS<sup>TM</sup> codes included in the right side of vertical dot-line simulate the high energy nuclear reactions above 15 MeV. MORSE-DD<sup>4)</sup> and TWOTRAN codes in the other side carry out the neutron transport calculation below 15 MeV. SPCHAIN and ORIGEN-2 calculate the time evolution process in the energy range larger and smaller than the cutoff energy respectively.

The results computed by these spallation codes presents us the important, basic data<sup>TM, 5)</sup> for researching the feasibility of TRU transmutation, as represented in the following figures. As seen in Fig. 4 the bird eye's views of yields of products are drawn in log scale for the cases of 1 GeV proton impinging on a) uranium and b) lead nuclei. The yield consists of three components of the hill of spallation product, the spire of evaporated particles and the valley of high energy fission products between them. It is apparent that the yield of SP is more by two orders than FP. Table 1 summarizes the number of produced light particles such as proton, neutron and so on. They are emitted from a uranium target nucleus bombarded by protons with the energies of 0.5 GeV to 3 GeV. The number of emitted particles has the maximum value around 2 GeV, where the neutrons more than 17 are emitted per one uranium nucleus. The results show that the incident energy has the optimum value around 2 GeV for the neutron production. Figure 5 shows the histogram of half-life distributions of products when a 2 GeV proton bombarding on <sup>237</sup>Np and <sup>241</sup>Am target nuclei. The shaded portions in the classifications of 7 and 9 represent tritons and deuterons & heliums respectively. The nuclides included in the classification 8 are a few. These nuclides are considered to be most harmful from the hazardous point of view. Most of SP in this case have the half-life shorter than one year except triton and deuteron. High energy nucleons generated in the spallation can transmute TRU nuclides through the cascade processes. Figure 6 shows the dependence of the number of spallated nuclides on the incident proton energy when the proton injects on the <sup>237</sup>Np metal target (20 cm φ x 60 cm).



The number of nuclides transmuted at 1.5 GeV is about 5 per incident proton. The rough estimation shows that it is too small to process TRU wastes in the commercial base unless the proton beam can have current higher than 300 mA. The heat generation is not sufficient to drive the intense accelerator. However it is noted that several tens neutrons with hard spectrum similar to the one in the fast reactor are emitted in the spallation process. The computer simulation result shows that the number of spallation neutrons generated in the targets of actinides such as U, Np and Am, and heavy elements such as Pb and W increases monotonously when the proton energy increases up, as shown in Fig. 7. For the case of  $^{237}\text{Np}$  target bombarded by a 1.5 GeV proton the neutron number is  $\sim 40$ . As seen in Fig. 8<sup>7)</sup> the  $(n, f)$  cross section of  $^{237}\text{Np}$  is larger by a factor of two or three than the  $(n, \gamma)$  cross section of  $^{237}\text{Np}$  in the energy range above 0.5 MeV. These facts suggest that the application of these neutrons to the TRU transmutation system is very promising.

The recent advance made in accelerator technology during the past decade has given the high possibility of providing the intense proton beam to the present transmutation system.

## 2-2. Basic design study of the TRU transmutation system

At the present stage the accelerator-driven transmutation system mainly utilizing the fission reactions induced by spallation neutrons has been studied as the type of transmutation plant because of high transmutation rate and good energy balance. We have been promoting the conceptual studies on the TRU transmutation in the target-core system driven by an accelerated proton beam.<sup>7), 8)</sup> The basic conditions settled for the system design are (1) high transmutation rate of TRU, the goal line of which is the transmutation of amount of TRU produced in about ten commercial 1 GWe PWR plants, and (2) good energy balance, in which it can generate enough electricity to operate the accelerator at least. The yields of TRU produced per year from 1 GWe PWR are summarized in Table 2. Total amount of TRU is about 26 kg/y, 56 % of which is  $^{237}\text{Np}$ .

Therefore it is considered to be advantageous to adopt high energy proton-induced spallation and the secondary neutron causing fission reactions as a means of the nuclear transmutation of TRU. Figure 9 shows the target-core of hybrid plant driven by high power proton beam with the energy of 1.5 GeV and the current of several tens of mA. The core design parameters are summarized in Table 3. The tungsten target is 60 cm long in

the direction of the incident beam, 1 m high and 10 cm wide and is installed in an TRU-fueled subcritical core ( $k_{\text{eff}}$ : 0.9 ~ 0.94). The core has dimensions of 2 ~ 2.6 m length, 1 m height and 1 m width, surrounded by the HT-9 steel container with thickness of 20 cm. A beam window is located at a depth of 0.7 m from the front face and has a rectangular cross section with dimensions of 1 m high and 0.1 m wide. The heat generated in the TRU fuel is removed by the forced circulation of liquid metal coolants Na/Pb-Bi. The heat removal performance is one of the major factors to determine the rate of TRU transmutation in the system. The core consists of metallic alloy fuel of TRU and provides considerably harder neutron spectrum than the other types of fuels. The fuel consists of two types of alloys, Np-22Pu-20Zr and AmCm-35Pu-5Y and has the sufficiently high phase stability<sup>8)</sup>. The fuel pin cell geometry is shown in Fig. 10, with a diameter of 4 mm clad with HT-9 steel. The pin pitches has been adjusted to be 8 mm and 10 mm for Na and Pb-Bi cooled cores, respectively, to keep  $k_{\text{eff}}$  around 0.86 ~ 0.95. Here Pu is added initially to the fuel in order to suppress the reactivity swing within an acceptable burnup range. With addition of 20 wt% of Zr, the melting point of Np is supposed to increase from 640 °C up to about 900 °C. The fuel assembly in the core is similar to that employed in a TRU burner reactor design.<sup>7)</sup>

For neutronics calculations the target-core system is approximated by an axially symmetric cylinder with the same volume as the original system for the efficient computation. A circular beam window located at the center line has a diameter of 0.36 m and the maximum beam diameter is 0.2 m. The nuclear spallation processes above the cutoff energy of 15 MeV were calculated by NMTC/JAERI code. For the reaction below 15 MeV the Monte Carlo transport code MORSE-DD was used with 52 neutron group constants edited from JENDL-2 and ENDF-B4, where spallation neutrons were treated as the source. The results of the neutronics calculations, for four cases of the system cooled by Na and Pb-Bi, with and without the tungsten target, are summarized in Table 4. The number of TRU nuclei disintegrated in fast fission reactions is much larger than that in the spallation reaction for each case. Profiles of the two-dimensional power distribution for these cases are shown in Fig. 11 (a) to (d), respectively. It is apparent that the power peaking which occurs just behind the beam window is lower in the system with the tungsten target than in the one without it due to the flattening effect for cases of both coolants and the flatter power distribution increases the number of transmuted nuclides. The maximum transmutation rate is 202 kg/year in the core with the

target cooled by Na (reference system).

Thermal hydraulics calculations for the system were done to obtain the maximum achievable thermal power within the maximum temperature limits of fuel and cladding. Maximum temperatures in the TRU fuel and the HT-9 cladding tube are limited to 900 °C and 650 °C, respectively, where the temperature at the inlet of coolant is set to 300 °C. The temperature distributions along the hottest fuel pins cooled by Na in the core with the tungsten target are shown in Fig. 12. The maximum thermal power is limited by the maximum allowable fuel temperature of 900 °C. The operating conditions of the target-core system are summarized in Table 5. In the case of Na cooling and the tungsten target the maximum thermal power is 691 MW with the maximum and average power densities of 889 W/cc and 307 W/cc. The thermal power is sufficiently large to supply the electric power to the accelerator while the beam current required for the power is 22.6 mA. Without tungsten target the thermal power is 405 MW with the maximum and average power densities of 776 W/cc and 159 MW/cc and its peaking factor is larger by a factor of 1.7 than the case with the tungsten target. The maximum powers of Pb-Bi cooled core with and without the target are considerably lower than those of the Na cooled one and the beam current required is less than 8 mA. This is attributed mainly to the lower thermal conductivity of the coolant and the wider fuel pin pitch than in the case of Na cooling. The variation of multiplication factor  $k_{eff}$  with burnup days was calculated as shown in Fig. 13. The increase tendency of  $k_{eff}$  at the initial stage turns the decrease around 1000 days and the subcritical operation of the system can be kept during the burning time. The changes of concentrations of some minor actinides with burn-up days in the reference system (Na cooling, with tungsten target) were also calculated, as shown in Fig. 14, using the burnup code ORIGEN2. The amounts of  $^{237}\text{Np}$  and  $^{241}\text{Am}$  at 1500 burning days become one half of their initial inventories, while  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{242}\text{Cm}$ , which are not contained in the initial loading, build up.

The hybrid transmutation system of accelerator-target-core has the additional merits:

- (1) The system can be quickly shut down only by switching off the beam current of proton accelerator.
- (2) Since the hybrid target-core is always operated in a subcritical state, it can have a simpler structure without safety and control rods than the reactor.
- (3) The higher burnup rate is expected for the TRU fuel in this system

with no constraints for the criticality. In this case the main limitation is the lifetime of fuel and structural material under the irradiation conditions.

- (4) The target-core designing is flexible because it is free from the safety requirements of non-positive Na void coefficients and the poisoning effect due to variation of isotope abundances in the fuel composition as the fuel is burning.

However there are technological items requiring further researches and developments:

- (a) an intense proton beam accelerator (1.5 GeV, ~ 10 mA),
- (b) TRU technologies,
- (c) high energy radiation shielding.

Moreover the spallation target system can be used for other applications such as the breeding of fissile nuclides and the creation of very intense neutron sources. The useful nuclides or short-life RI's used for special purposes can be produced from residual nuclides after transmutation and nuclide partitioning processes also.

### 2-3. Spallation Integral experiment

More accurate experimental data for the spallation reaction in the energy range of ~ 100 MeV to ~ 1 GeV are needed to examine the actual efficiency of TRU transmutation by spallation reaction<sup>(9,10)</sup> and to upgrade the simulation code system for the TRU transmutation processes. The research plan of spallation integral experiment by using the high energy proton beam has started. The lead cylinder system for the experiment has been set up last March near the dump of beam line connected to the proton synchrotron booster at KEK. Figure 15 shows the lead cylinder installed in a Stainless Steel container with 100 cm length and 60 cm diameter. This has several small holes parallel to the central axis, which are plugged by specimen wires such as Ni, Au, Cu and Fe. Reaction products in these specimen by irradiation of 500 MeV protons are identified from their  $\gamma$ -ray emissions measured by a Ge(Li) detector. The energy of spallation neutron can be known from the activity of specimen foils with the threshold energy of neutron emission, imbedded in the holes in the cylinder. The safety analysis for spallation experiment has been made to know whether the activity in the irradiated specimen and the dose rate are lower than the values restricted by the law when they are transported in the cask to be measured at JAERI. The switching magnet has been newly equipped on the booster beam line to

control the intensity of irradiating beam by adjusting the number of pulses in current. The irradiation experiment for the lead system has started November this year. In the next step, a tungsten or a depleted uranium target, which is inserted in the central region of the lead cylinder, will be used to simulate the TRU target spallation experiment.

### 3. Summary and Conclusion

Finally the report is summarized as follows.

The computer code system has been developed and upgraded for simulating the spallation reaction induced by high energy protons and designing the TRU transmutation system.

The conceptual design studies have been made for comparison of the accelerator-driven TRU transmutation systems with and without the tungsten target. When the Na cooled TRU metal fuelled core with tungsten target is operated at the thermal power of 691 MW and the beam current of 23 mA, this system can transmute about 200 kg TRU per year. In the case of the Pb-Bi cooled system at the thermal power of 342 MW and the beam current of 7.5 mA, it can transmute 140 kg TRU annually. Improvement and optimization of target-core design will be carried out also in more detail through the plant design studies. The performance of transmutation plant of the type of molten TRU is examined as the next step. The spallation integral experiment for lead target will start soon, using 500 MeV proton beam at the KEK booster facility.

### References

- 1) Y. Kaneko : " THE INTENSE PROTON ACCELERATOR PROGRAM," Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research - Evolution by Accelerator -, (1990)(Mito).
- 2) Y. Nakahara, T. Tsutsui: JAERI-M 82-198 (1982) (In Japanese).
- 3) T. Nishida, Y. Nakahara, T. Tsutsui : JAERI-M 86-116 (1986).
- 4) M. Nakagawa, et al., " MORSE-DD A Monte Carlo Code Using Multi-Group Double Differential Form Cross Sections," JAERI-M 84-126 (1984)
- 5) T. Nishida, Y. Nakahara : Kerntechnik, 50, 193 (1987).
- 6) T. Nishida, Y. Nakahara : Kerntechnik, 55, 147 (1990).
- 7) H. Takano, T. Mukayama : " Nuclear Characteristic Analysis of TRU Burner Reactors", JAERI-M 89-072 (1989)(In Japanese).
- 8) T. Takizuka, I. Kanno, H. Takada, T. Ogawa, T. Nishida, Y. Kaneko : " A Study on Incineration Target System," Proc. ICENES (1989)(Karlsruhe)

- 9) S.S. Clerjacks, et al.: "High Energy Particle Spectra from Spallation Target," ICANS-V, (1981)
- 10) W. Amlan, N.F. Peek, D.J. Shaddan, G. Sterzenbach : " Production Rates of Spallation and Fission Products in Depleted Uranium and Natural Lead Targets Bombarded by 600 MeV and 1100 MeV Protons", Proc. of ICANS-VII, (1983)

Table 2 TRU production per Year from 1 GWe PWR

Nuclide	Weight (kg)	Fraction (%)
<sup>237</sup> Np	14.5	56.2
<sup>241</sup> Am	6.82	26.4
<sup>243</sup> Am	3.1	12.0
<sup>243</sup> Cm	0.0078	0.03
<sup>244</sup> Cm	1.32	5.1
<sup>245</sup> Cm	0.072	0.3
Total	25.8 (kg)	100.0

Fuel - Burn Up : 33,000 MWD/T  
Cooling Time before Reprocessing : 3 years  
Cooling Time before Partitioning : 5 years  
Collection Rate of U and Pu : 100 %

Table 1 Number of particles emitted from a spallated nucleus

Emitted particle	Energy of incident proton ( MeV )			
	380	1000	2000	2900
Proton	0.994	2.924	3.697	3.276
Neutron	12.085	16.050	17.319	15.243
Deuteron	0.1249	0.7063	0.9108	0.7729
Triton	0.0576	0.2719	0.3407	0.2956
Helium 3	0.0010	0.0258	0.0411	0.0361
Alpha	0.0732	0.2777	0.3079	0.2588

Table 3 Target-core design parameters

Coolant	No/Pb - Bi	
Proton energy	1.5 GeV	
Target		
Length	200 ~ 260 cm	
Height	100	cm
Width	100	cm
Tungsten		
Length	60	cm
Height	100	cm
Width	10	cm
Reflector		
Composition	Stainless steel	
Thickness	20	cm
Fuel		
Composition	Np-15Pu-30Zr AmCm-35Pu-10Y	
Bond	No	
Clad	HT-9 steel	
Fuel slug diameter	4.00 mm	
Clad outside diameter	5.22 mm	
Clad thickness	0.3 mm	
Pin length	1000 mm	

Table 4 Target-core operating condition

Plns	Reference	Version-1		Version-2		Version-3	
		TRU+R	Pb-BI	TRU+R	TRU	TRU	Pb-BI
Proton Beam Current (mA)		22.6	7.5	18.1		5.4	
Thermal Power (MW)		691	484	405		163	
Power Density (W/cc)		max. 889	523	776		425	
		ave. 307	246	159		83	
Linear Power Rating (W/cm)		max. 695	499	713		530	
		ave. 240	235	146		103	
Coolant Temperature (°C) outlet		389	451	352		377	
Clad Temperature (°C)		max. 492	610	481		589	
Fuel Temperature (°C)		max. 900	900	900		900	
Coolant Velocity (m/s)		max. 8	2.35	8		2.35	
Pressure Drop (kPa)		78	67	62		48	

Table 5 Performance of this transmutation system

Target system	Reference	Version-1	Version-2	Version-3
Coolant	Na	Pb-Bi	Na	Pb-Bi
Effective multiplication factor	0.92	0.86	0.94	0.95
Pin pitch (mm)	9.5	10.5	10.5	12.0
Actinide loading (kg)	2866	2013	2682	1584
Beam current (mA)	22.6	7.5	18.2	5.4
Neutrons per proton	38.1	52.8	35.3	55.1
Fissions per proton (>15MeV)	0.67	0.24	0.64	0.42
( <15MeV)	150.6	171.3	108.0	147.4
Average neutron energy (keV)	739	629	774	626
Average neutron flux ( $\times 10^{13}$ n/cm <sup>2</sup> ·sec)	4.6	6.6	2.0	1.9
High energy component (>1.0 MeV)	20%	18%	20%	17%
(>0.1 MeV)	72%	78%	71%	77%
Operation time (days)	270	270	270	270
Burnup rate (%)	7.0	6.9	4.3	2.7
weight (kg)	202	139	114	42
Unit of 3000 MWt LWR	7.6	5.3	4.3	1.8
Burnup reactivity swing (% $\Delta k/k$ )	3.8	2.9	2.7	2.1

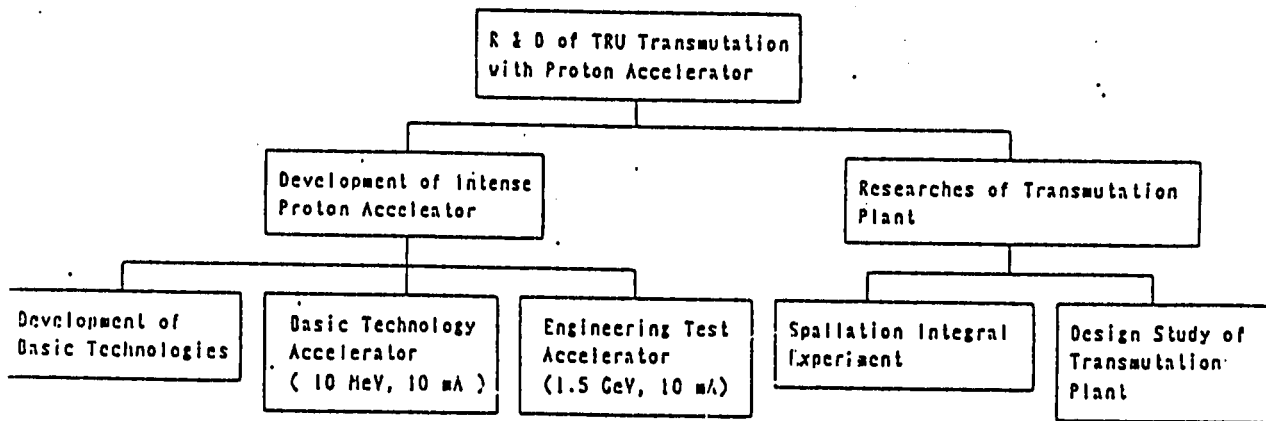


Fig. 1 Tree Structure of R & D Items for TRU Incineration Plant Driven by High Intensity Proton Accelerator

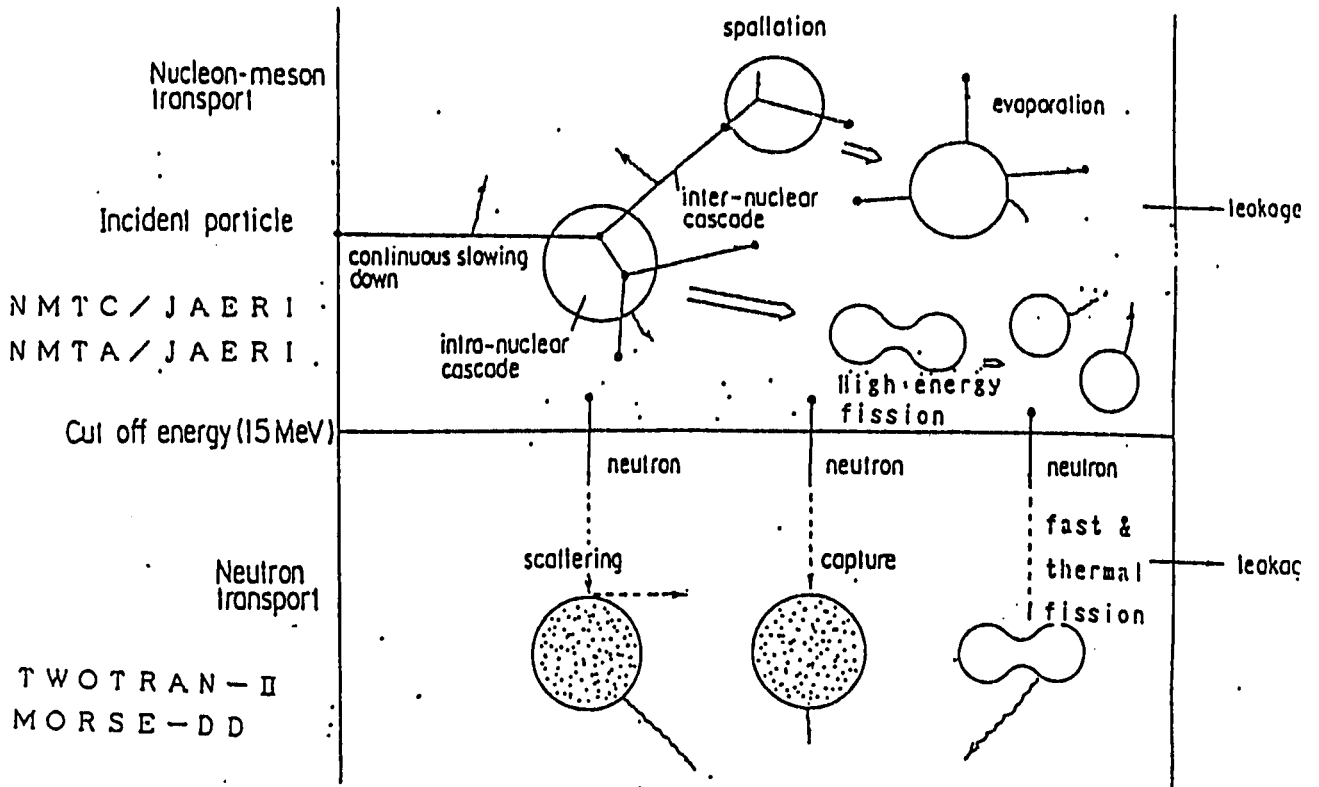


Fig. 2 Spallation process in the target injected by high energy protons

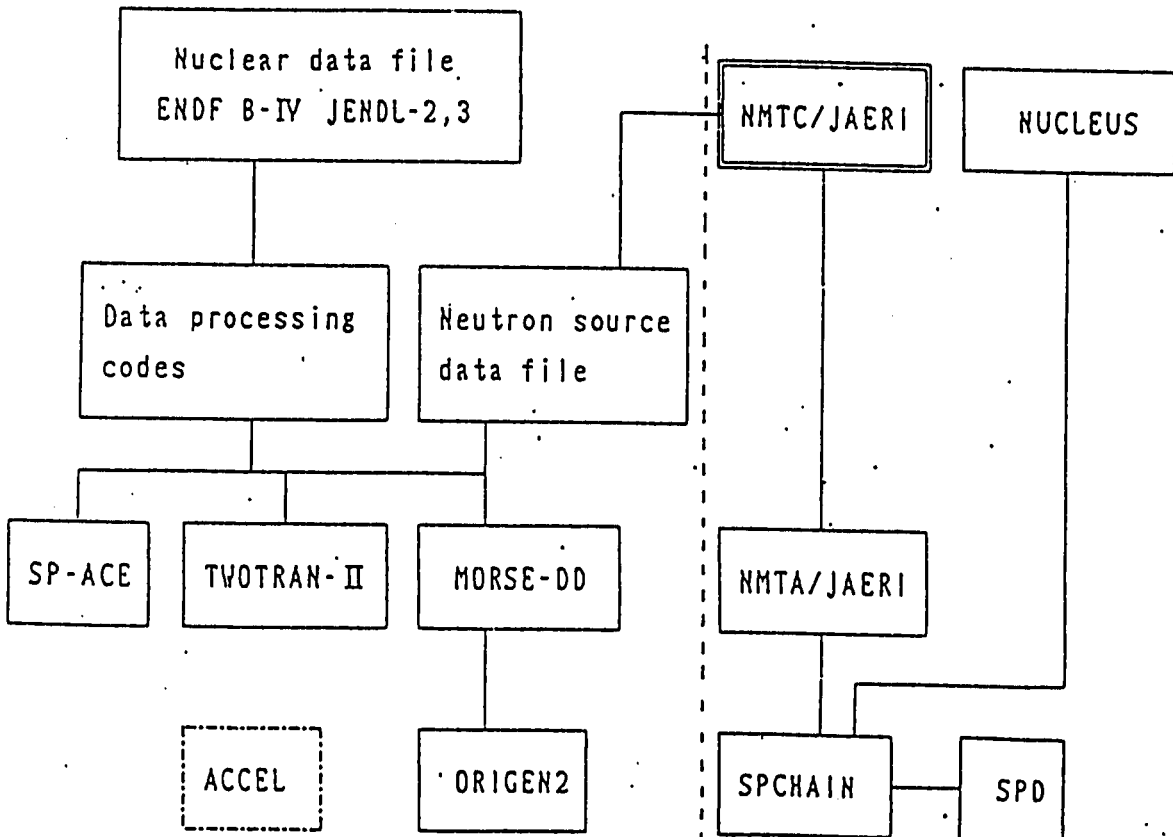


Fig. 3 Simulation code system for the accelerator transmutation system

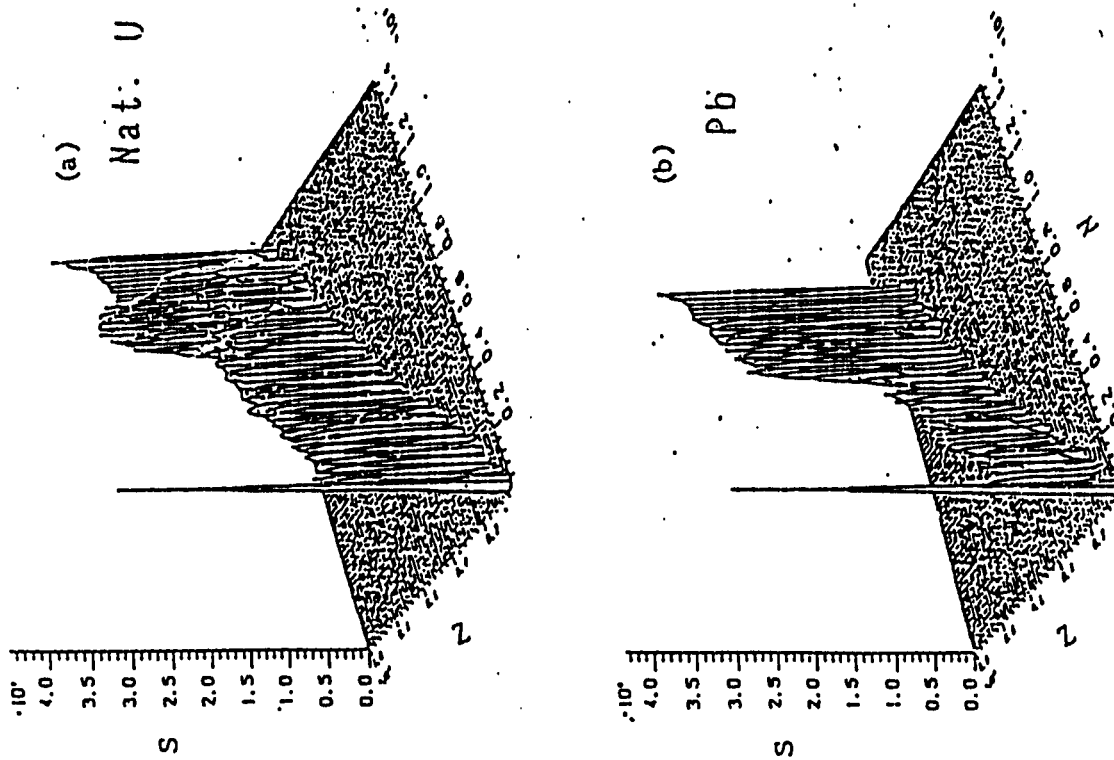
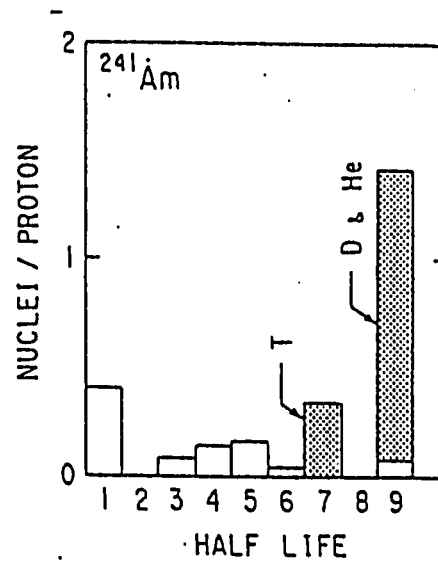
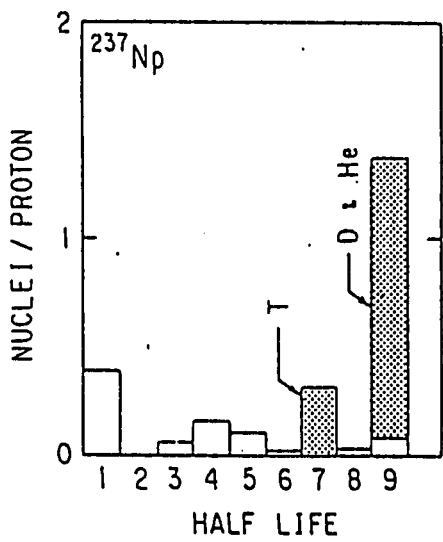


Fig. 4 Yields of reaction products from a) U and b) Pb nuclei bombarded by a 1 GeV proton



Classification by Half Life  $T_{1/2}$

1 : $0s < T_{1/2} < 10^{-3}s$	6 : $5d < T_{1/2} < 1y$
2 : $10^{-3}s < T_{1/2} < 1s$	7 : $1y < T_{1/2} < 100y$
3 : $1s < T_{1/2} < 1m$	8 : $100y < T_{1/2} < 1 \times 10^6 y$
4 : $1m < T_{1/2} < 1h$	9 : Stable Nuclides
5 : $1h < T_{1/2} < 5d$	

Fig. 5 Half-life distribution of products in the spallation reaction due to 2 GeV protons



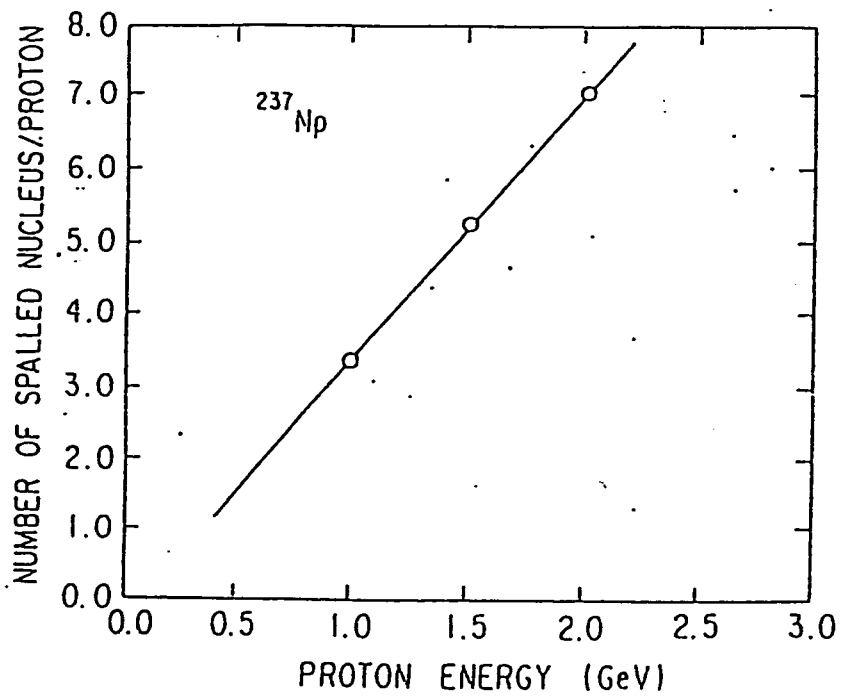


Fig. 6 Energy dependence on number of nucleus destructed due to spallation reaction

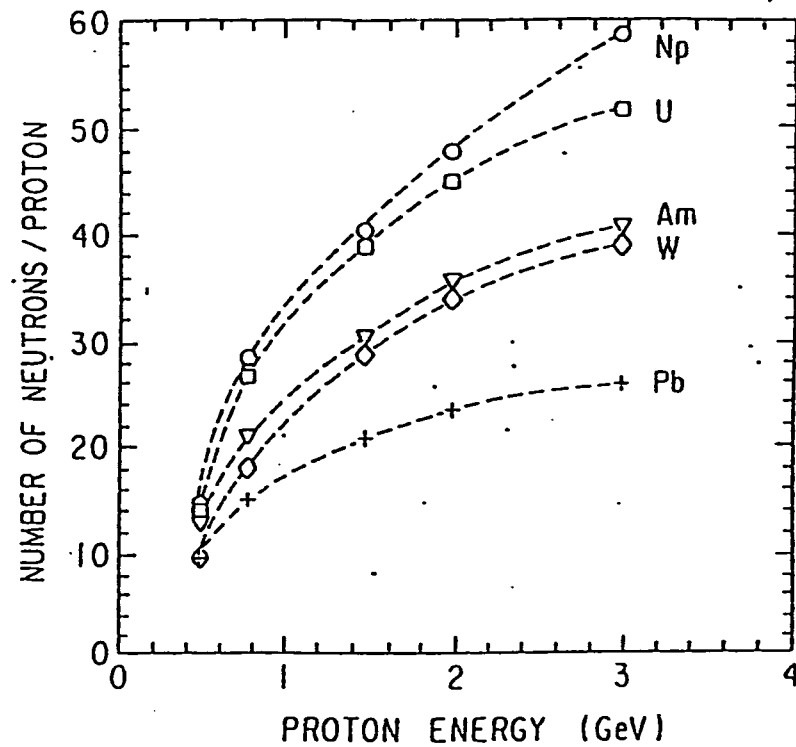


Fig. 7 Energy dependence on number of neutrons generated by spallation reaction

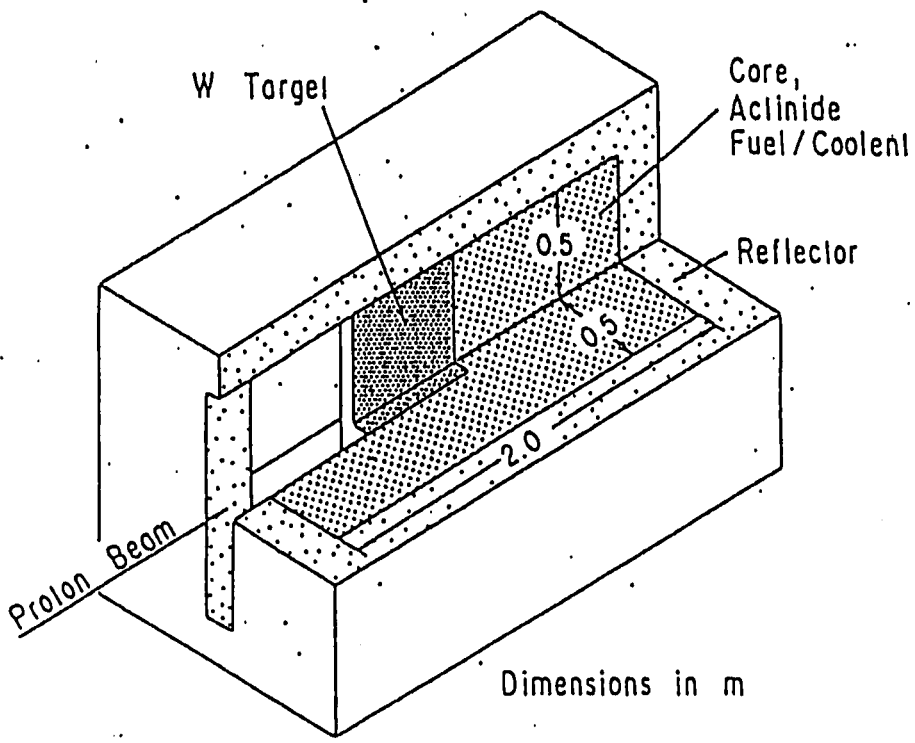


Fig. 9 Target-core configuration of hybrid plant(refernece system)

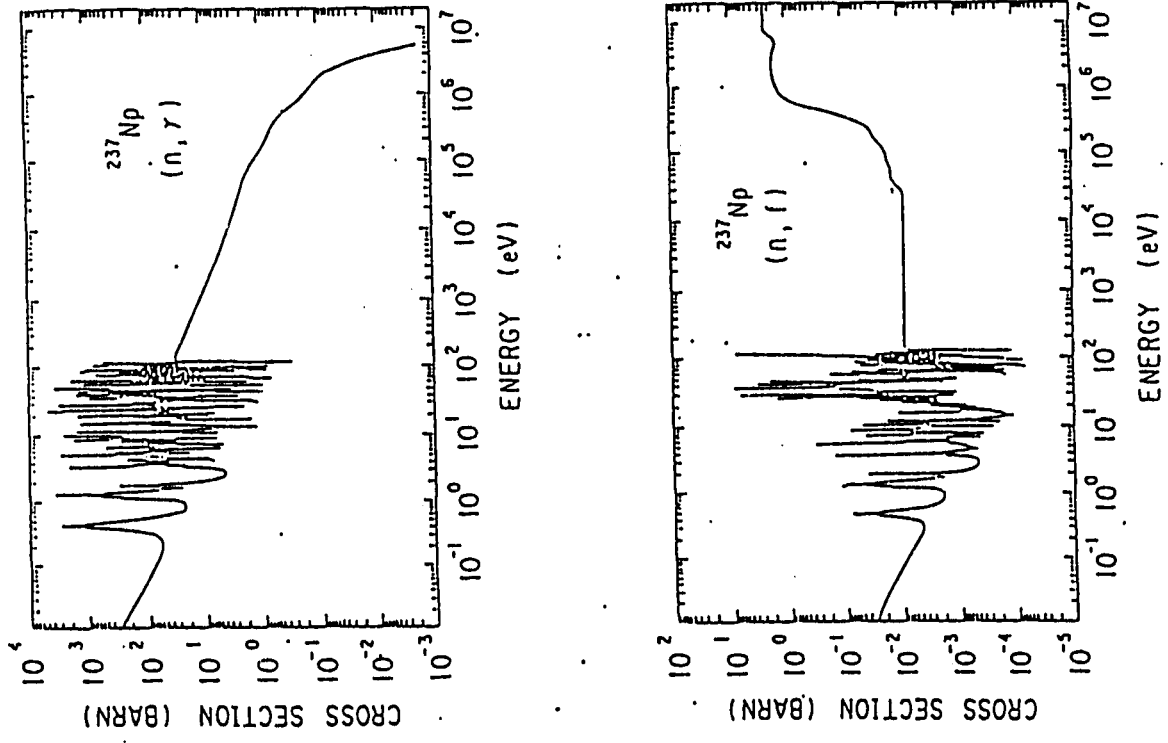


Fig. 8 Neutron cross section of  $^{237}\text{Np}$

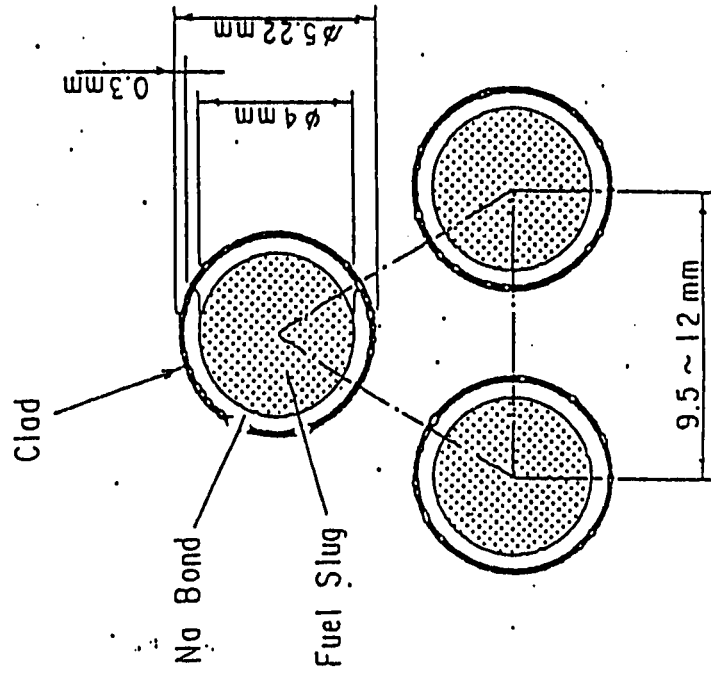
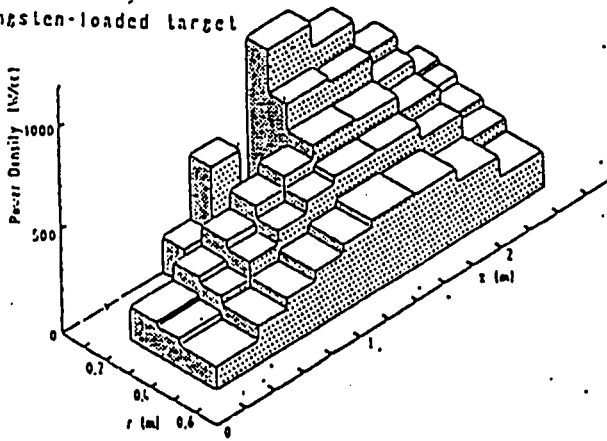
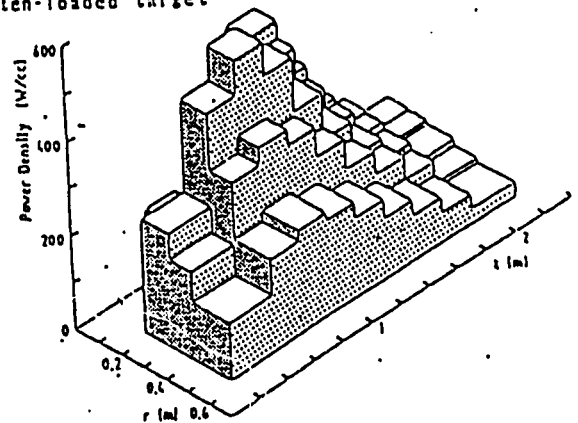


Fig. 10 TRU alloy fuel pin geometry

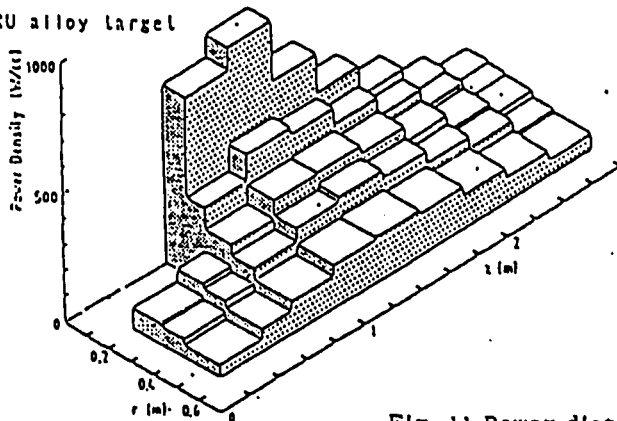
(a) Na cooled  
tungsten-loaded target



(b) Pb-Bi cooled  
tungsten-loaded target



(c) Na cooled  
TRU alloy target



(d) Pb-Bi cooled  
TRU alloy target

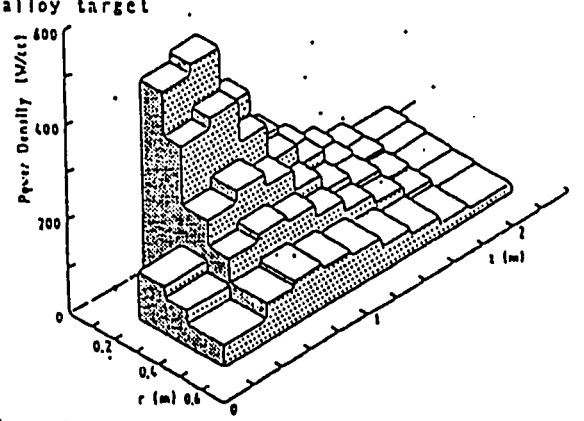


Fig. 11 Power distributions for four cases of (a) to (d)

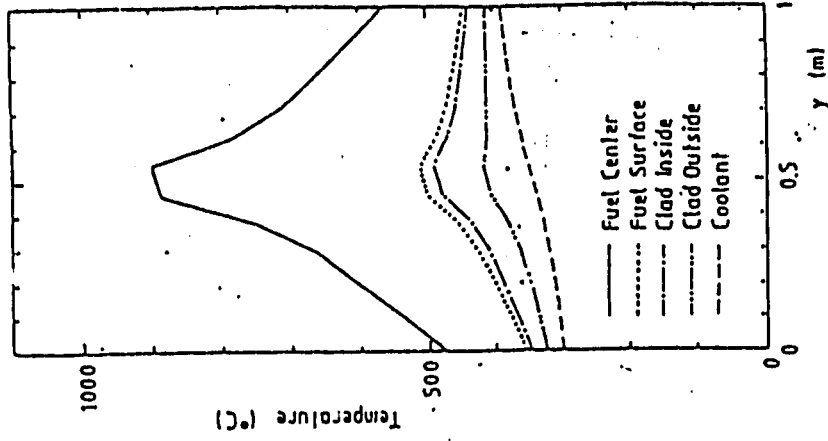
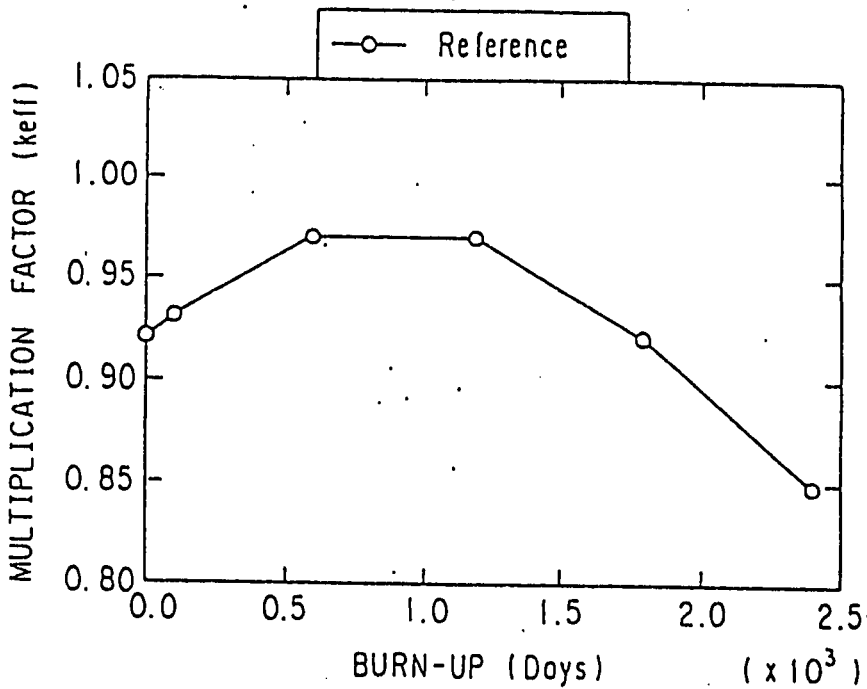


Fig. 12 Temperature distribution in the reference core



\* 1,000 burnup days correspond to  $\sim 10^5$  MWD/ton

Fig. 13 Change of  $k_{eff}$  with burn-up

Fig. 15 Lead cylinder target for the spallation experiment

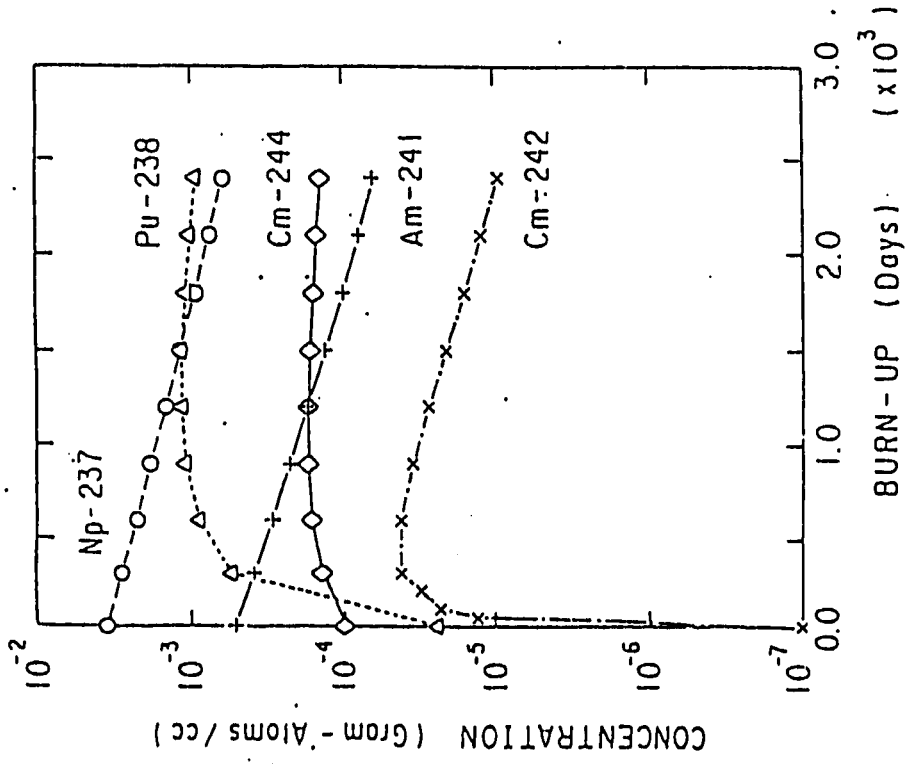
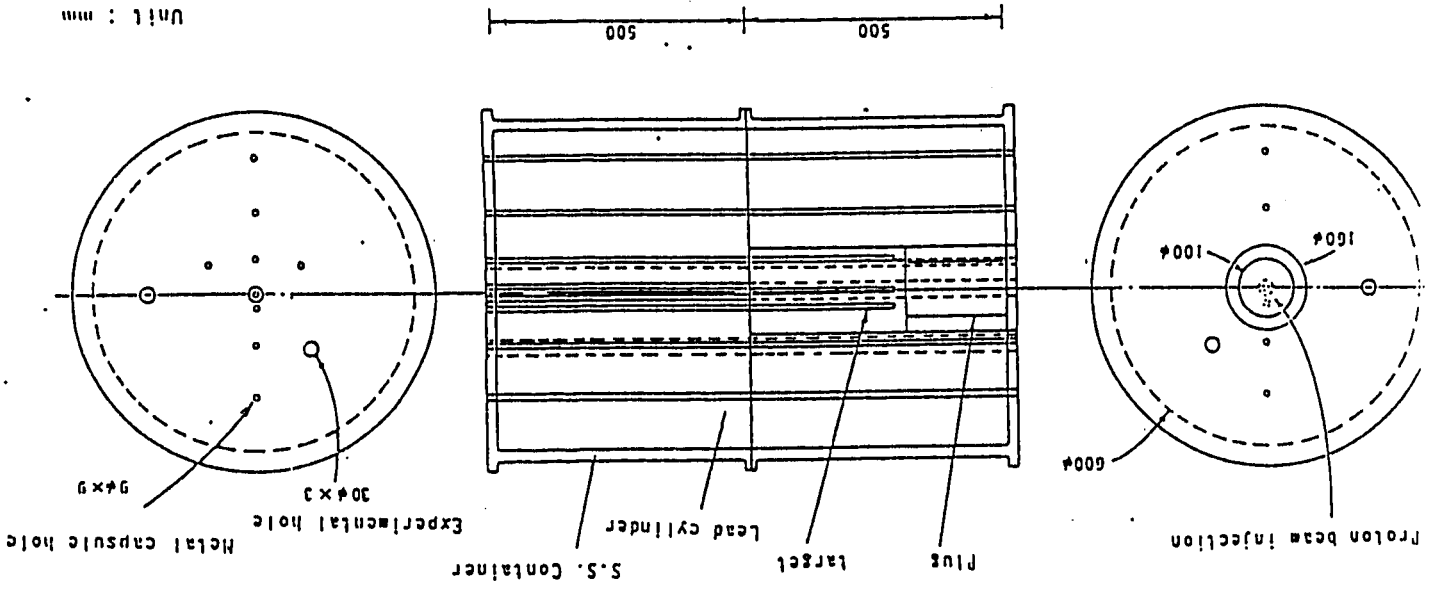


Fig. 14 Change of trans-uranium inventory with burn-up

## 2 - 3. 大電流電子加速器の

### 加速方式について

# 大電流電子加速器の加速方式について

動燃

遠山伸一

## 加速ダイナミクス

### - 定在波型

シャントインピーダンスが高い  
重い粒子の加速が容易

### - 進行波型 (還流型)

蓄積エネルギーが大きい  
アパーチャーが大きい  
構造が簡単

大電流加速安定性 (100mA)  
高効率

BBは計算できない

今日の進行波型加速器では  
300mAまで加速できる

# 環流器

全長	1.16	(m)
空周長	17	
ディスク厚	1.2	(mm)
2a	6.5-6.7	(mm)
シャント	15.2-29.3	(M $\Omega$ /m)
群速度	0.025-0.032	(/c)
減衰	0.036-0.021	(Nepers/m)
Q	14520-18910	

表3. バンチャーパラメータ

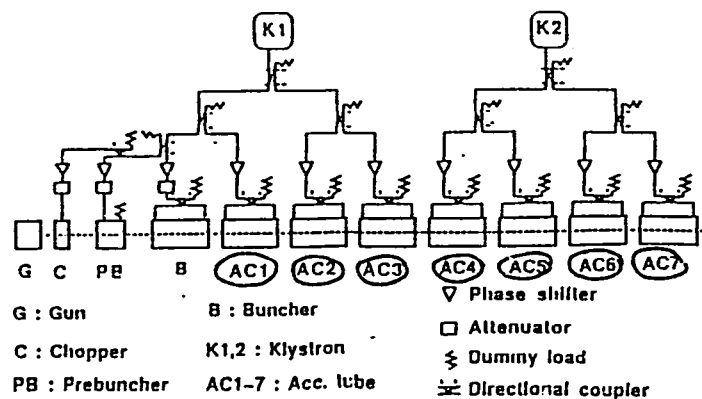


図1. 主要開発器の概念的ブロックダイヤグラム。

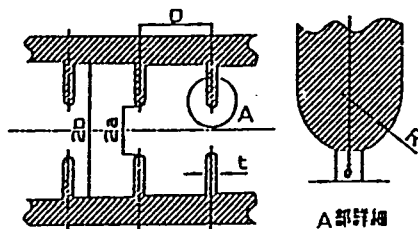


図2. バンチャー概念図。

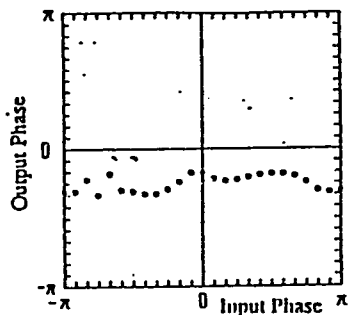
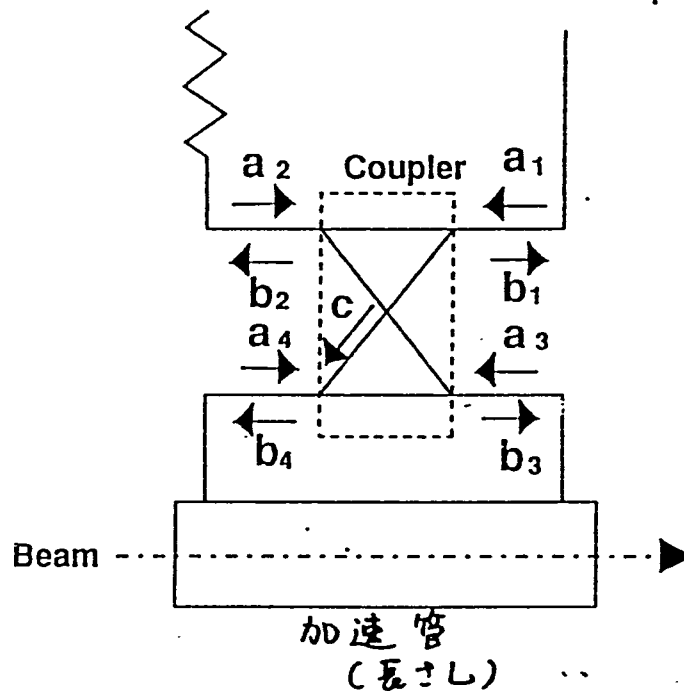


図3. 電子ビームの位相角の変化。  
振幅振幅は失々、電子銃、  
バンチャー通過後の位相角を示す。





結合部のMatrix

$$S_c = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{1-c^2} & 0 & jc \\ \sqrt{1-c^2} & 0 & jc & 0 \\ 0 & jc & 0 & \sqrt{1-c^2} \\ jc & 0 & \sqrt{1-c^2} & 0 \end{bmatrix}$$

加速管部のMatrix

$$S_a = \begin{bmatrix} \Gamma e^{-j\theta} & \sqrt{1-\Gamma^2} e^{-j\theta} \\ \sqrt{1-\Gamma^2} e^{-j\theta} & \Gamma e^{-j\theta} \end{bmatrix}$$

$\Gamma$ は加速管での反射係数。

よって電場の流れは、

$$\begin{aligned} a_3 &= \Gamma e^{-j\theta} b_4 + \sqrt{1-\Gamma^2} e^{-j\theta} b_3 \\ a_4 &= \sqrt{1-\Gamma^2} e^{-j\theta} b_4 + \Gamma e^{-j\theta} b_3 \end{aligned}$$

よって電界増巾度は

$$\frac{b_4}{a_1} = jc \frac{1 - \sqrt{1-\Gamma^2} \sqrt{1-c^2} e^{-(n+j\beta l_w + j\theta)}}{1 - 2\sqrt{1-\Gamma^2} \sqrt{1-c^2} e^{-(n+j\beta l_w + j\theta)} + (1+c^2) e^{-2(n+j\beta l_w + j\theta)}}$$

ここで、 $\phi$ は加速管での位相進み  
 $\beta$ は還流部導波管での伝搬定数  
 $\alpha$ は還流部系全体での電界の減衰定数。

理想的な場合

- (1)  $\phi + \beta l_w = 2n\pi$
- (2)  $\Gamma = 0$

$M \equiv \frac{b_4}{a_1}$ とすると

$$M = \frac{jc}{1 - e^{-\alpha} \sqrt{1-c^2}}$$

電力増巾度は

$$G \equiv |M|^2 = \frac{c^2}{(1 - e^{-\alpha} \sqrt{1-c^2})^2}$$

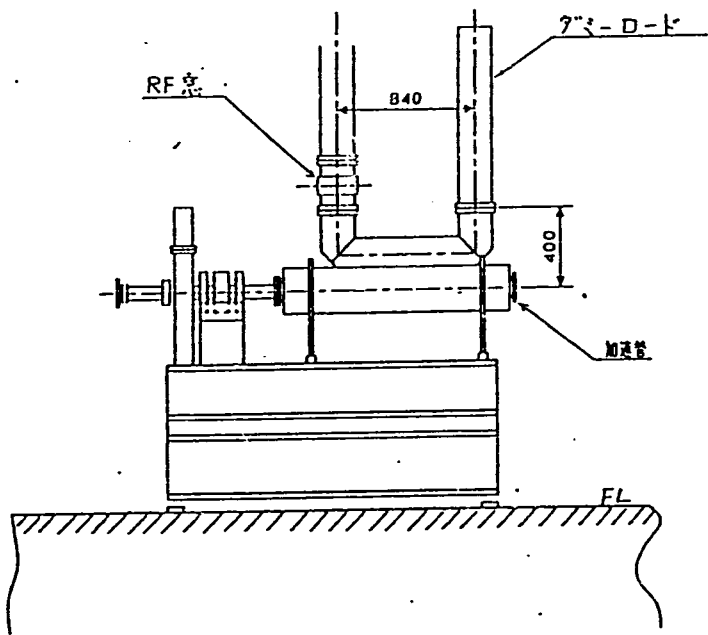
還流部系の減衰

- (1) 加速管損失
- (2) ビームローディング
- (3) 導波管損失

(1)  $e^{-\alpha}$

(2)  $\frac{E_0 - ir_0 \tau}{E_0} = \sqrt{r_0 G P_s (1 - e^{-2\alpha})} / L$

(3)  $e^{-\beta l_w}$

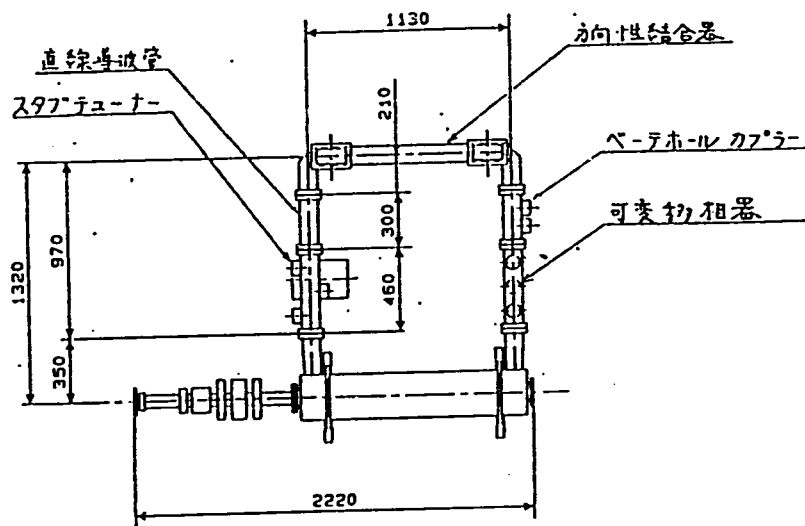


パラメータ

加速管

	種別 A	種別 B	種別 C
タイプ	2/3π 定電界型		
2a (mm)	62.0 ~ 57.0	60.0 ~ 55.0	56.6 ~ 51.6
シャインビークス (MΩ/m)	31.5 ~ 33.3	32.9 ~ 34.8	34.2 ~ 36.1
v g / c	0.025 ~ 0.018	0.022 ~ 0.016	0.018 ~ 0.013
α (Naper/m)	0.028 ~ 0.037	0.031 ~ 0.041	0.038 ~ 0.051
τ	0.0380	0.0427	0.0524

付-96



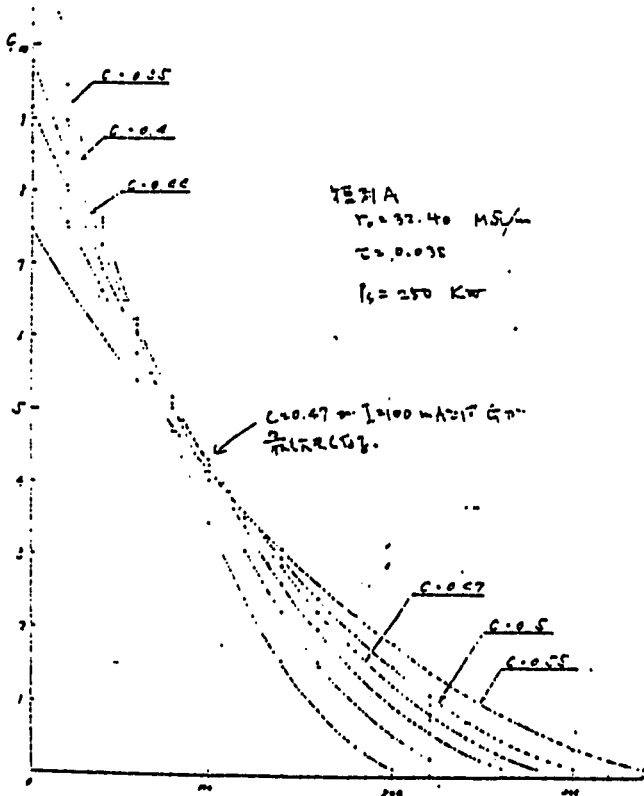
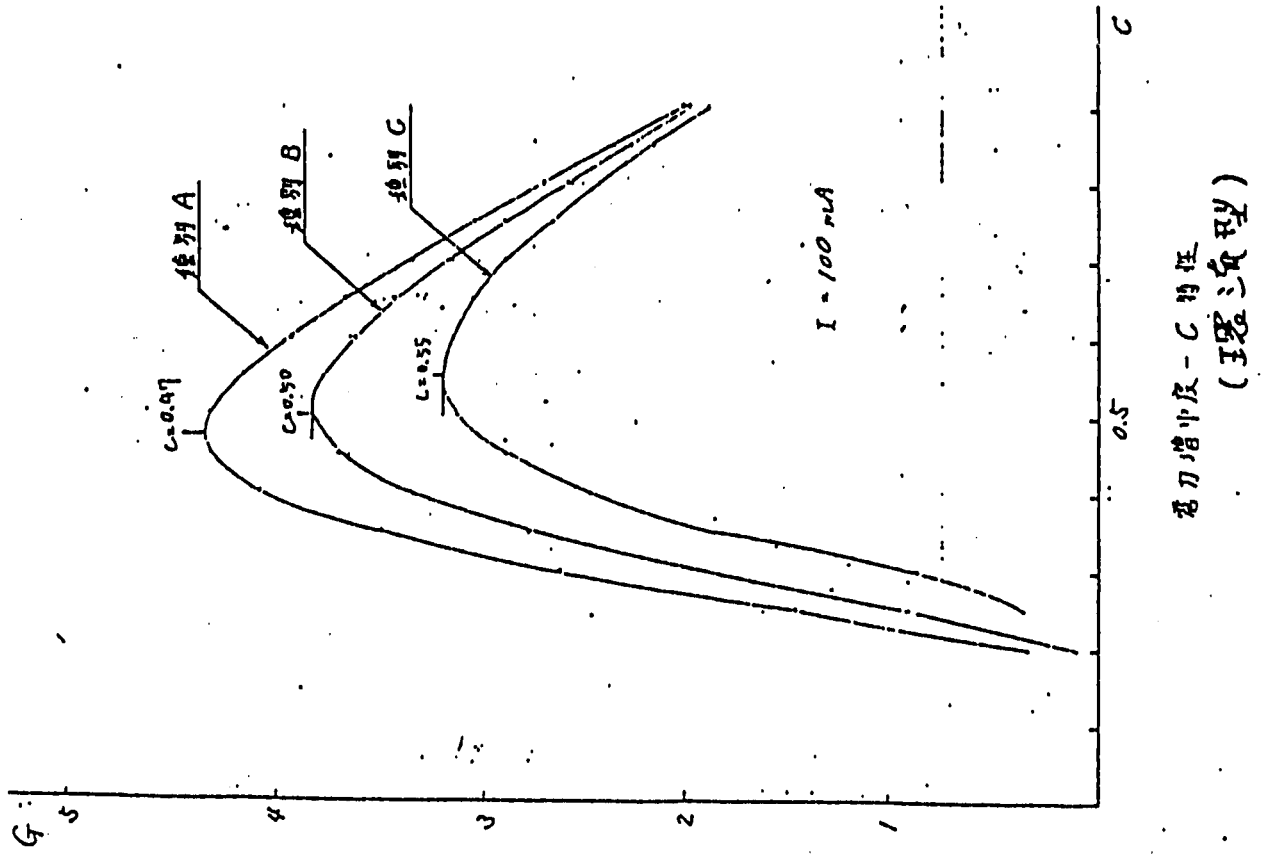
加速ユニット(環流型)

エネルギー	10 (MeV)
最大ビーム電流	100 (mA)
パルス幅	4 (ns)
繰り返し	50 (Hz)
デューティ	20 (%)

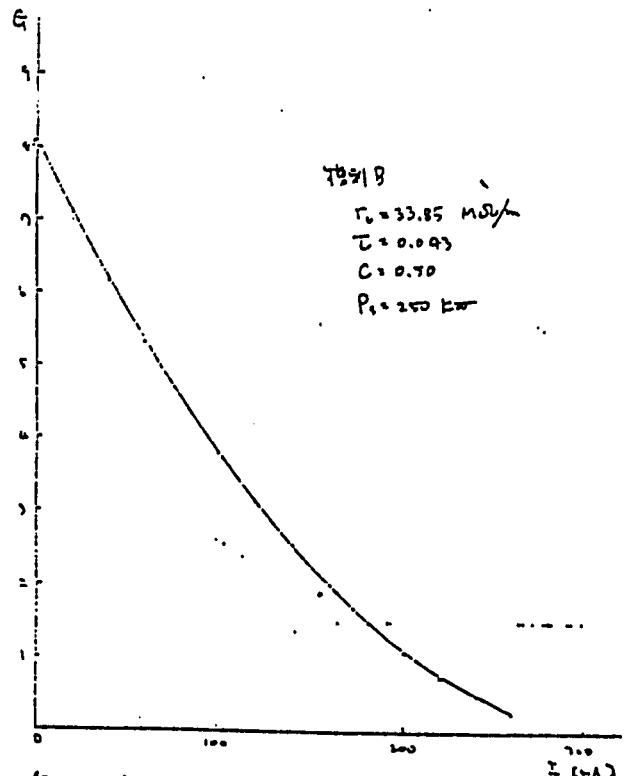
表1. 要素開発器の基本仕様

加速周波数	1249 (MHz)
マイクロ波波長	24.0 (cm)
加速モード	2π/3
加速管の長さ	1.2 (m)
加速器の全長	1.8 (m)

表2. 加速管の基本仕様



类别 A - C 特性 (环流型)



类别 B - C 特性 (环流型)

AECL

**ELECTRON TEST ACCELERATOR, 1985**

定在波  
( $\pi$  mode)

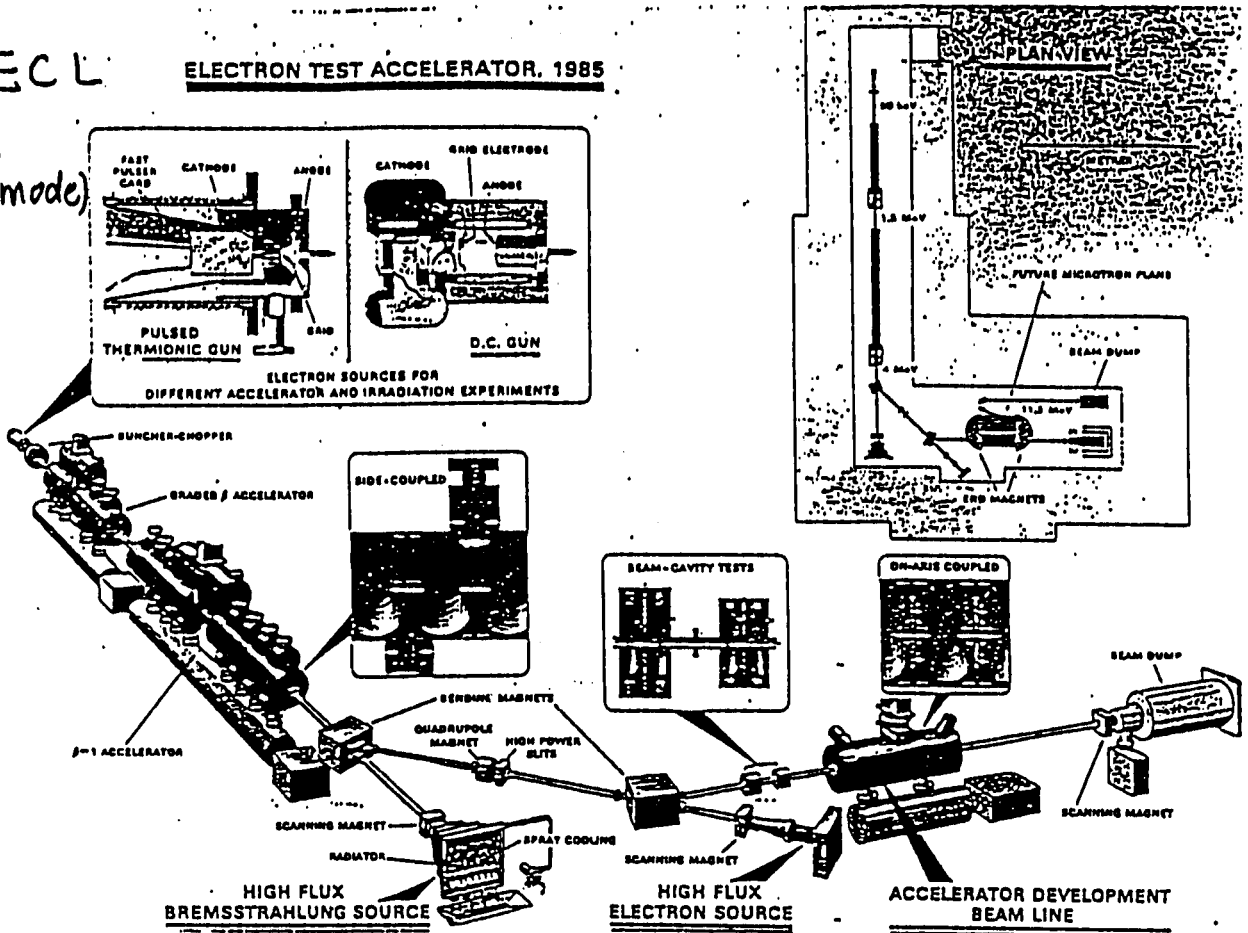


Fig. 3

**IMPELA Sample Specification  
10 MeV 50 kW Model†**

Beam power At the output window 50 kW  $\pm 5\%$

Beam energy At peak intensity 9.5 $\pm$ 0.5 MeV; 1 MeV FWHM spread

Beam dimensions at product surface 80 cm across the conveyor; 10 cm in the direction of the conveyor

Rf frequency 1300 MHz

Pulse length 200 microseconds

Pulse repetition rate 250 pulses per second

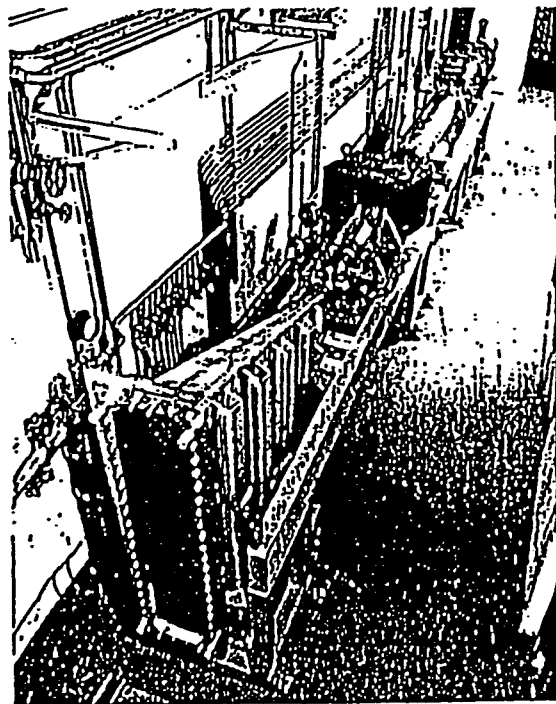
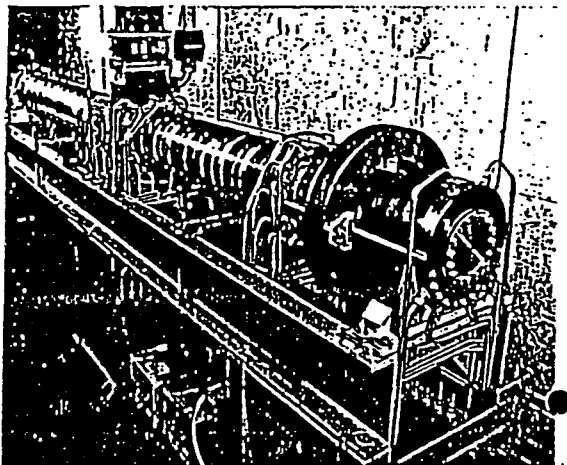
Klystron TH-2115

Electric supply power 1000 kVA; 50 or 60 Hz

Cooling water requirement 510 litres per minute at less than 21°C

† Different settings may be achieved with a given set of hardware by adjusting the machine operating point

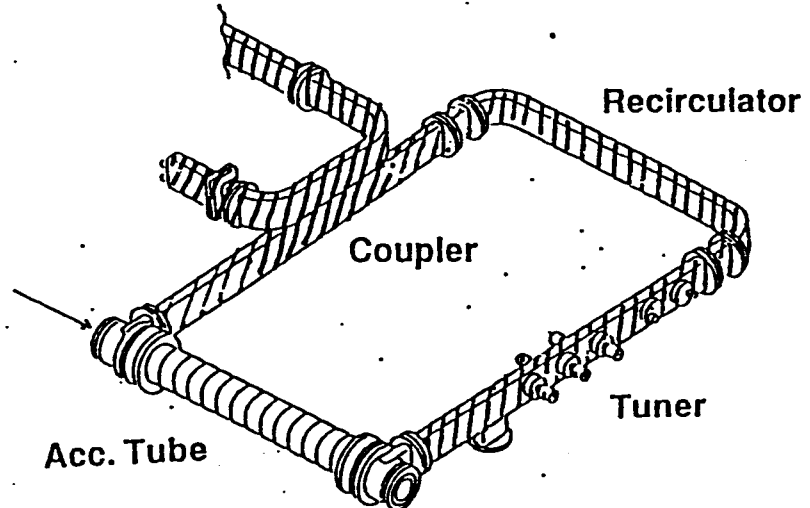
This specification was in effect at time of printing. Atomic Energy of Canada Limited has a policy of continuing development and reserves the right to discontinue models at any time or change specifications or design without notice and without incurring obligation.



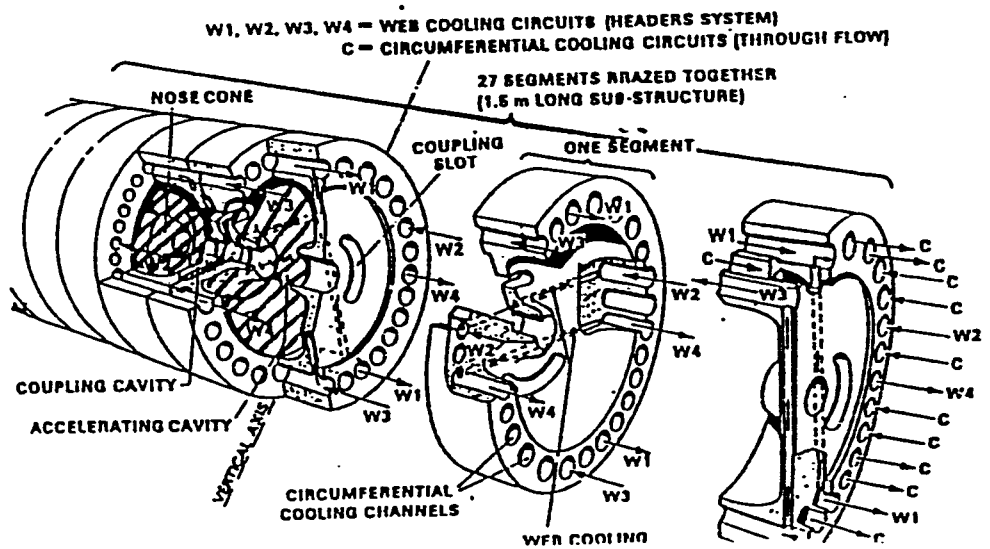
IMPELA™ 10/50 prototype.

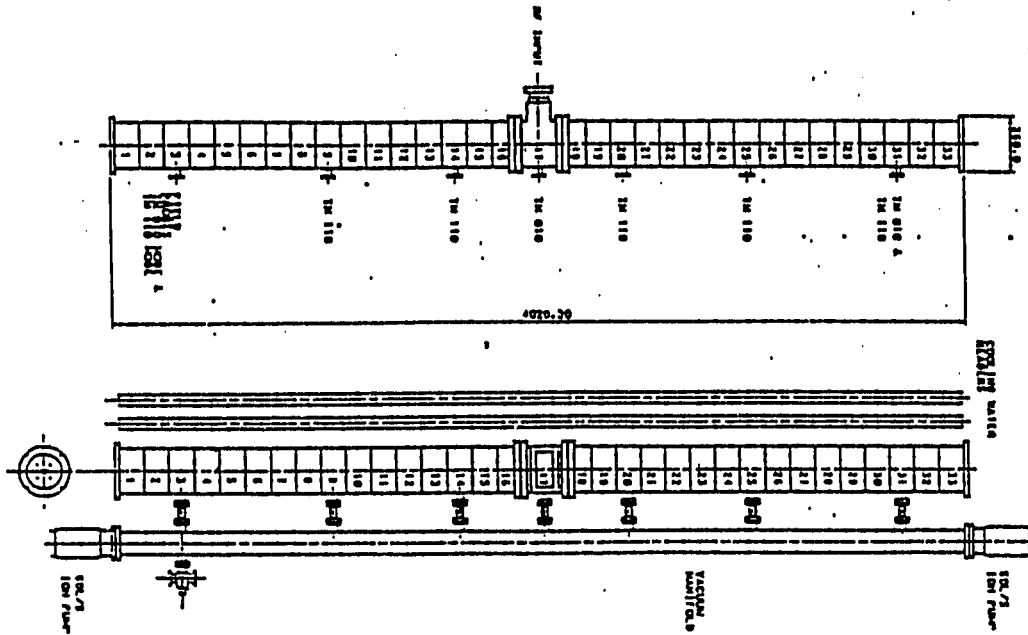
Industrial Material Processing Electron LINAC

### Exemples Travelling Wave

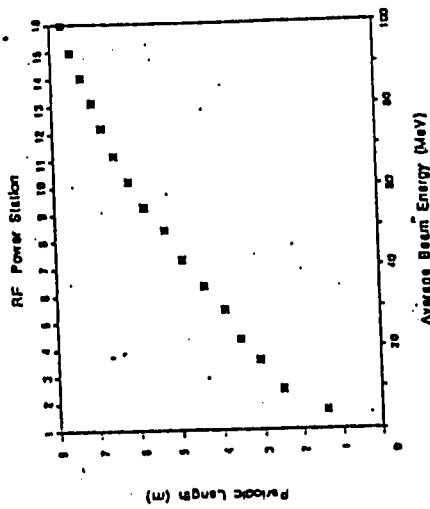


### Standing Wave

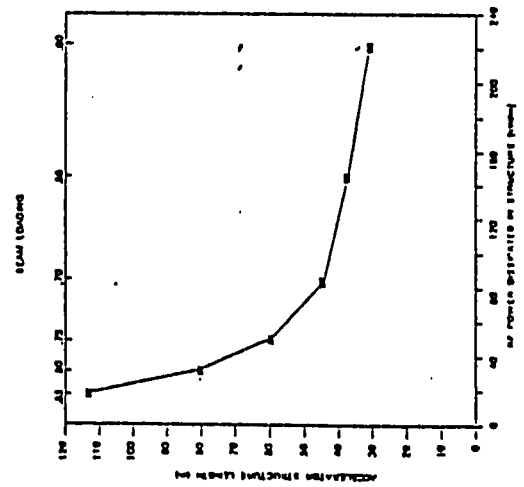
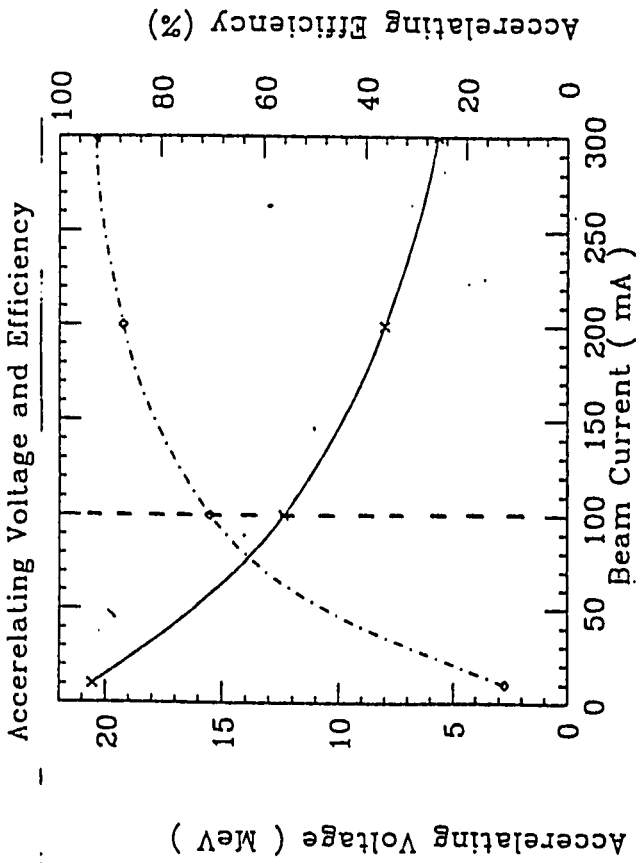




定在波 加速管



Periodic lengths of 1249 MHz standing-wave accelerator structures for a beam-breakup starting current of 100 mA.



Accelerator design parameters

### 3 - 1. 最近のライナックの進歩について

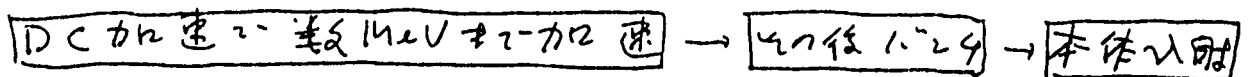


# 最近のライナックの進歩について

## 1. はじめに

最近のライナックの進歩の背後に、自由電子レーザー (FEL)、リニアコライダー、マイクロトロン等がある。これらの加速器は、電流、バンチ特性、エミッション、エネルギー幅、ビーム変換効率等について厳しい要求を課している。その結果、まず入射器に対するコメントがまとまった。また本体は加速器のアライメントも非常に重要なことが分かった。ここではまずこの研究背景について議論されることからスタートすることにする。

## 2. 佐藤 勇 氏の アイデア



この背景には、RF加速のヒート、DC加速はエミッション、エネルギー幅等をおいている。また、バンチは加速段数数MeVの速い20-50の方がよい。先述の上の方式は、陽子に対してコメントしたものが、電子において可能である。それがこれがこの話である。

## 3. SLC (Stanford Linear Collider)

SLCの特長は衝突点でビームを1mmのサイズに絞ったことである。そのために  $e^+, e^-$  を12GeVに加速した後ビーム管で冷却し、6m長のビームをバンチコックで

1 ~ 0.5 mm に圧縮する。

#### 4 エネルギー圧縮装置 (ECS) 東北大学ライオン

ライオンの出口ビーム (位相幅  $\Delta\phi = 5^\circ$ ,  $l = 5\text{mm}$ ,  $\Delta E/E \sim 2\%$ ) を偏向マグネット系で、エネルギー差による経路長差を判別用し ( $\Delta\phi = 127^\circ$ ,  $l = 33\text{mm}$ ) に絞るのほし、エネルギー整列したビームを rf で変調しバンチ長 33 mm エネルギー幅 0.2% のビームに圧縮する。

#### 5 マイック、カスケードマシンの

マシンのマシンのカスケード方式で、初段が 14 MeV 2 段目が 180 MeV、最終が 840 MeV となっている。入射部にはまず、バンチ長 33 mm で 2.1 MeV を加速し rf 加速と偏向マグネット系でバンチ長 33 mm 初段に入射する。この出力 14 MeV のビームを同様方式でバンチ長 33 mm 2 段目に入射している。180 MeV のエネルギー幅は 1% エネルギーは  $0.01\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  とし、~~整列した~~ 他が報告されている。

#### 6 Stanford 超伝導 FEL ライオン入射部

Rf 加速は harmonic 加速を行っている。fundamental と third の harmonics で  $37^\circ$  の flat-top をつくす。この場合電場の振幅のピーク  $Q_{21}$  になる。energy spread は 0.1% である。また harmonic buncher (300 keV) では bunching のピークを補正する必要がある。2.5 MeV 38 (100 ps) で magnetic bunching を行う。2.5 MeV  $18^\circ$  (5%  $10\text{A}$   $200\text{A}$ ) に変換し本体に入射する。

#### 7 Los Alamos FEL ライオン

flat-topping, Rf による momentum ramping, magnetic compress

~~をくり返し圧縮する~~

## 3 - 2. ポジトロンファクトリー計画

# 原研高崎のポジトロンファクトリー計画の現状

日本原子力研究所 高崎研究所 岡田 敬平

◇ ポジトロンファクトリー計画の概要

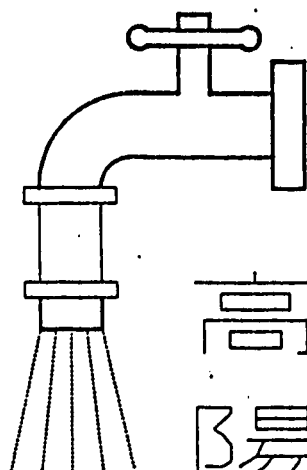
◇ Linac側への要請

◇ Linacの検討

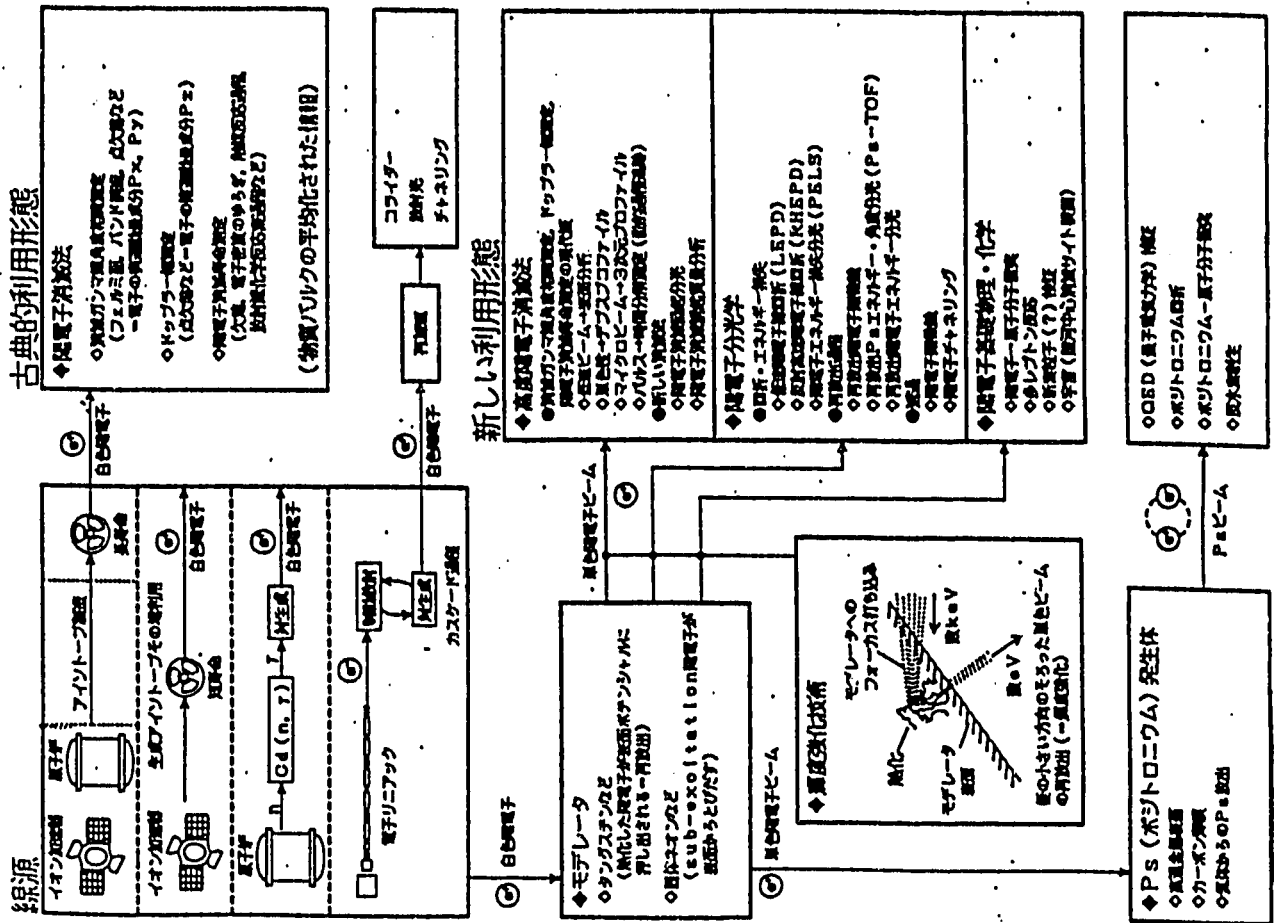
◇ ターゲット関連の課題

## ポジトロンファクトリー計画

陽電子研究・  
利用のための  
総合施設



高品質  
陽電子  
ビーム



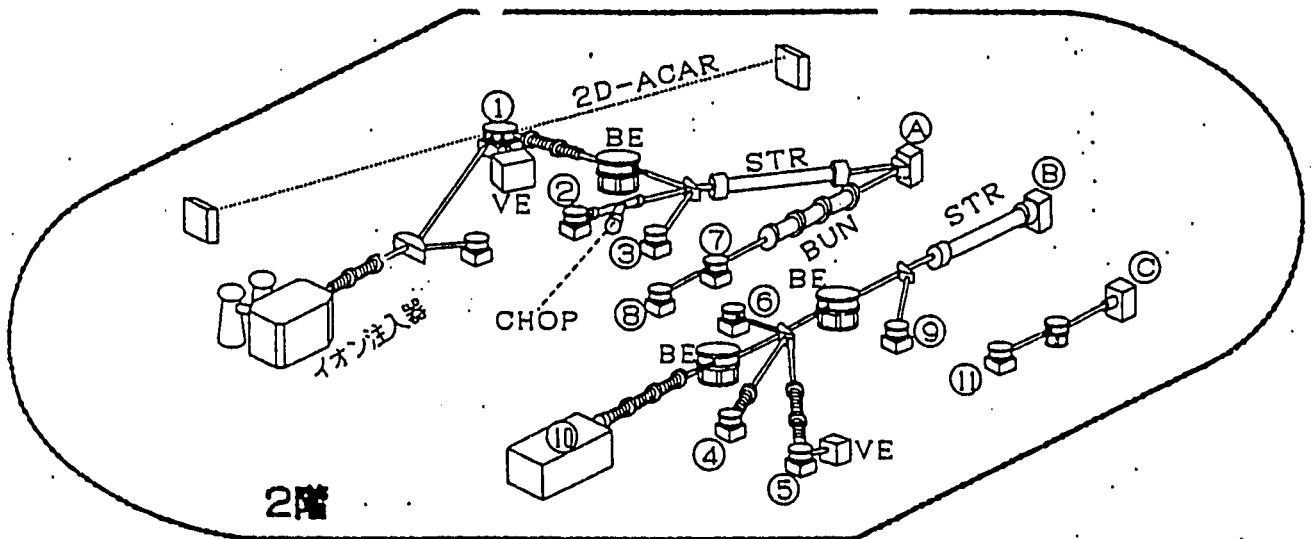
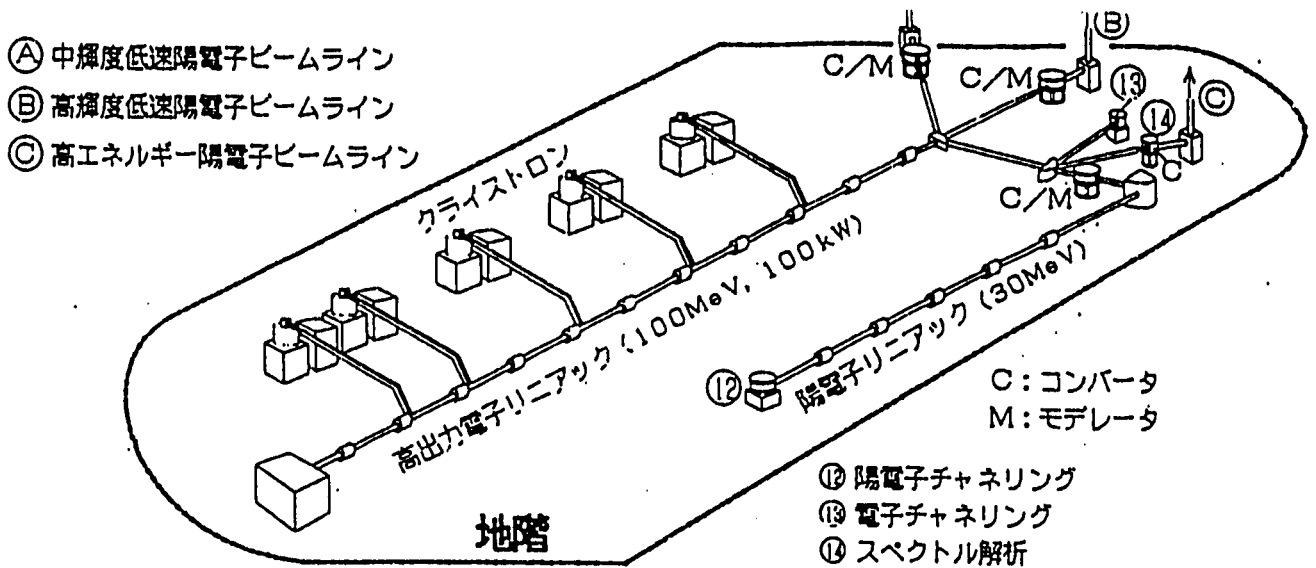
### 単色陽電子発生と利用に関する研究の国内外の現状

単色陽電子強度 (個/秒)

	55	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>
電子リニアック利用 米国ローレンスリバベロ国立研	LINAC 120MeV, 93μA 発生技術								
欧州リニアック CERN	LINAO 200MeV, 1μA 発生技術、電子電圧力学								
欧州リニアック CERN	LINAO 25MeV, 15μA 発生技術								
欧州リニアック CERN	LINAO 80MeV, 10μA 発生技術、ビーム整形技術、陽電子回折 (予定: 基礎研究)								
欧州リニアック CERN	LINAO 120MeV, 90μA 発生技術、ビーム整形技術、陽電子回折 (予定: 基礎研究)								
欧州リニアック CERN	LINAO 140MeV, 27μA ビーム輸送技術 (計画中)								
ボジトロフアクトリー計画 米国ブルックヘブン国立研	Cu <sup>2+</sup> (100Ci) [半減期13時間] 発生技術								
欧州リニアック CERN	Co <sup>60</sup> (100mCi) 各種測定技術 (基礎研究)								
欧州リニアック CERN	Na <sup>22</sup> (10mCi) [半減期2.6年] タイミング測定技術								
欧州リニアック CERN	Na <sup>22</sup> (10mCi) 陽電子線発生装置など (基礎研究)								
イオン加速器 米国ウェイン国立研	ファンダメント (1.7MeV, 40μA) 高単色線発生技術								
欧州リニアック CERN	サイクロトロン (150MeV, 30μA) 発生装置の陽電子線発生								

XXXX 実績  
XXXX 目標、推定

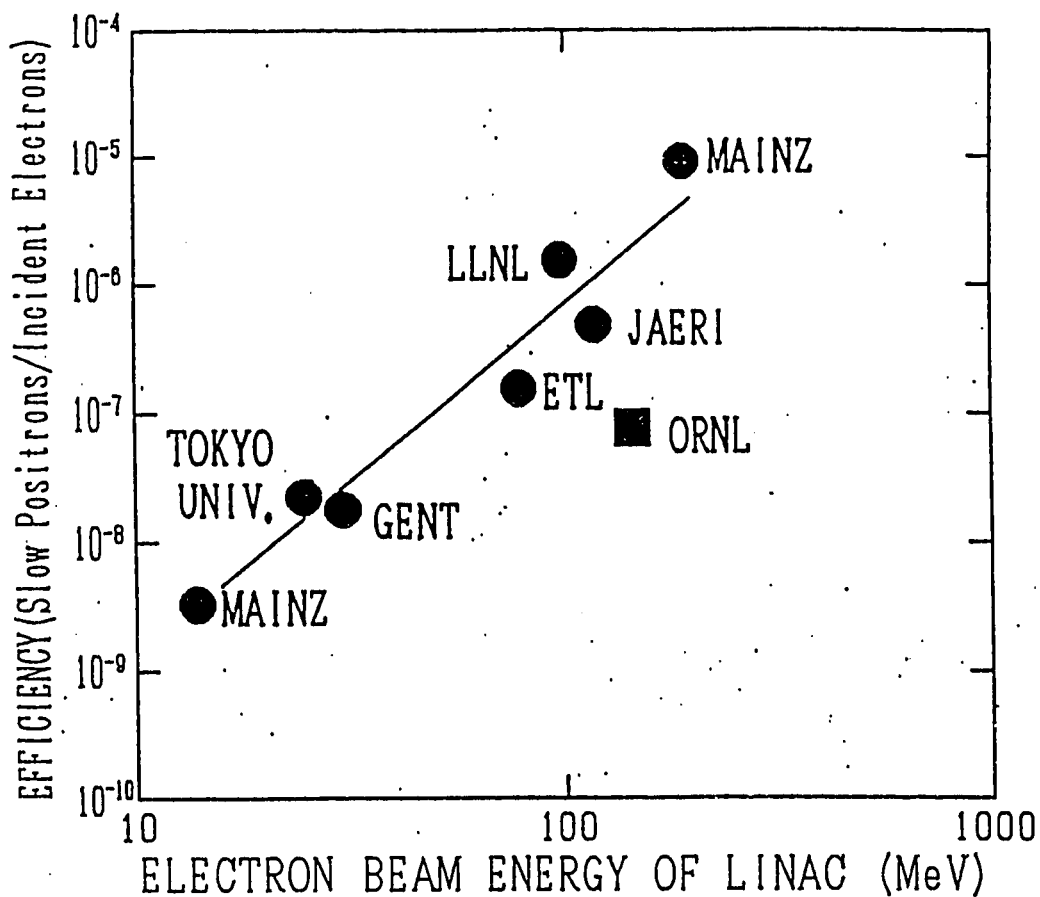
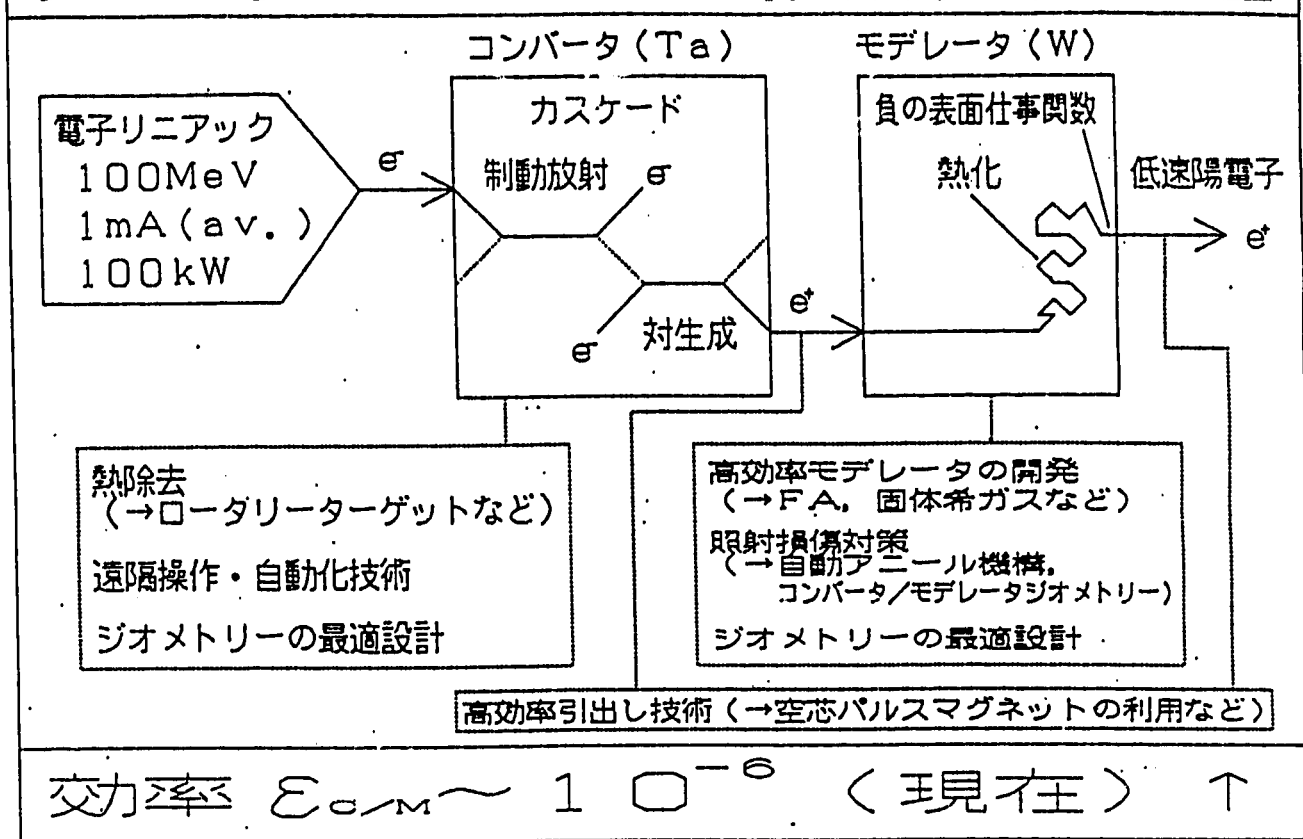
ブレークスルー



STR: DC化装置    BUN: 短パルス化装置    CHOP: ビームチョッパ    BE: 輝度強化装置    VE: 蒸着装置

- ① 電子構造プロフィール測定 (2D-ACAR)    ② パルス低速陽電子寿命測定    ③ 陽電子消滅励起分光
- ④ LEPD (LEED), PELS (EELS)    ⑤ RHEPD (RHEED)
- ⑥ 陽電子-原子・分子散乱測定    ⑦ レプトン反応系    ⑧ Ps-TOF, Ps回折    ⑨ 再放出スペクトロスコーピー
- ⑩ 陽電子顕微鏡, 陽電子マイクロアナリシス, コンパクト角相関
- ⑪ 陽電子チャネリング, 陽電子-ガンマ コインシデンス

ターゲット系の技術的白書結果是頁



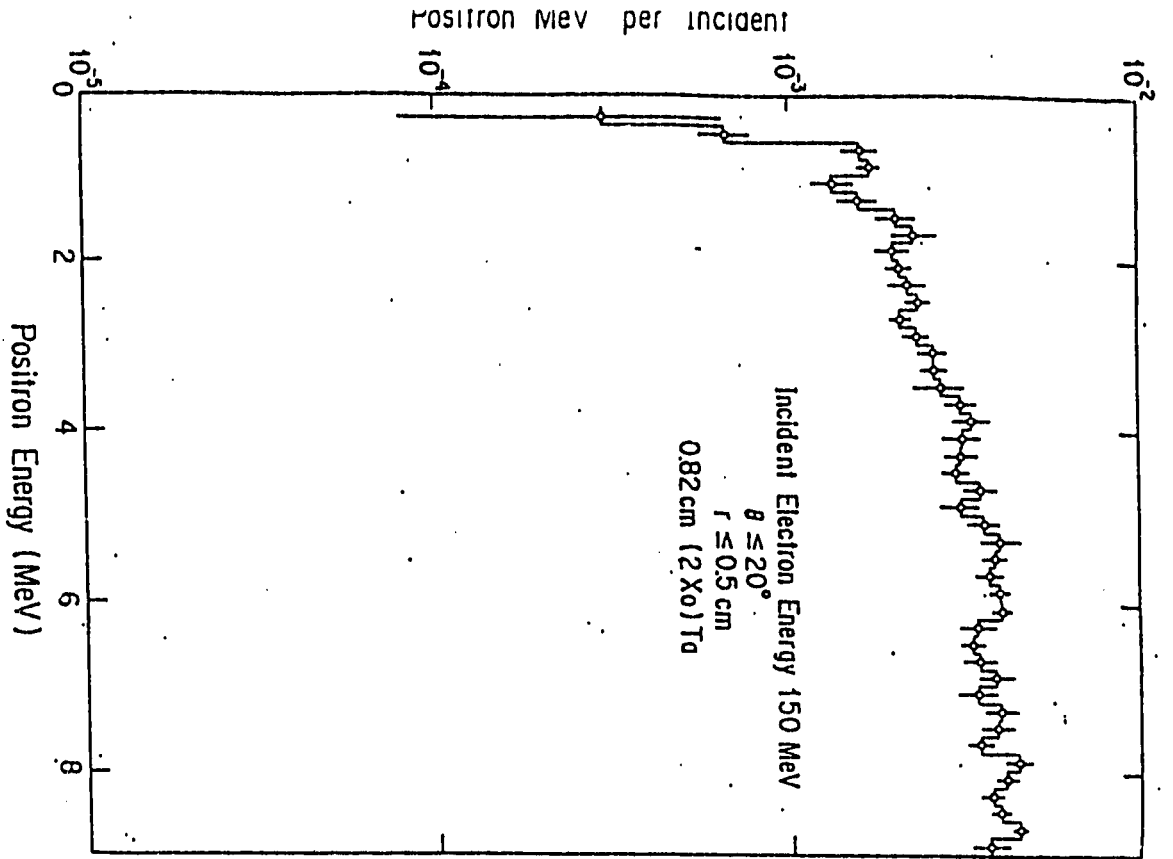
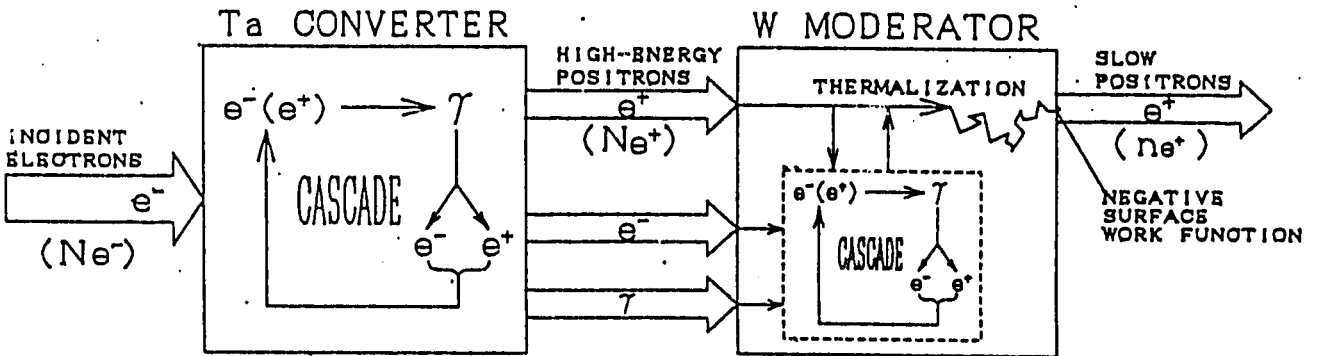


FIG. 7 Positron energy spectrum collected from 2 X<sub>o</sub> Ta target with  $\theta$  less than 20 degree by 150 KeV electron.

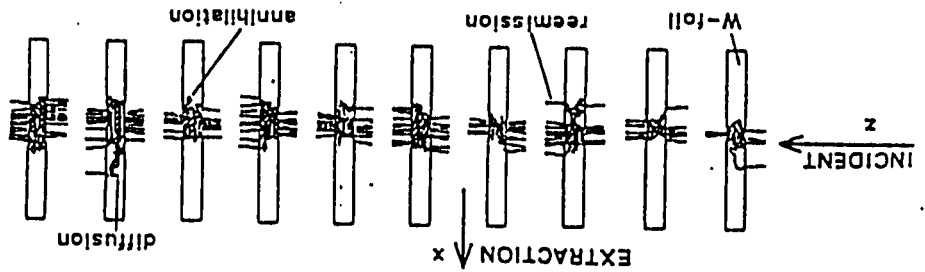
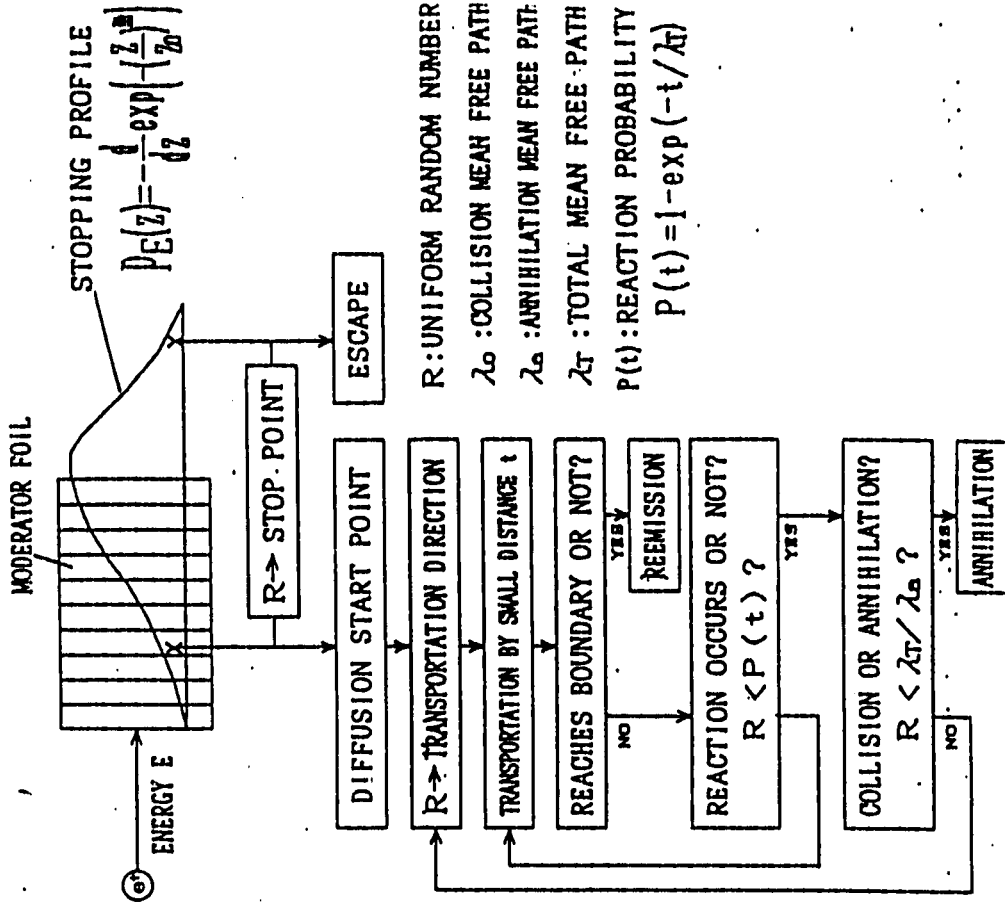
H. Hirayama, KEK

-22-

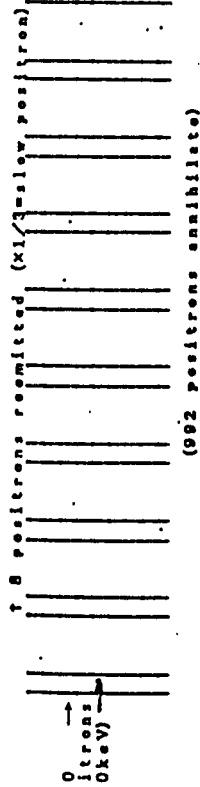




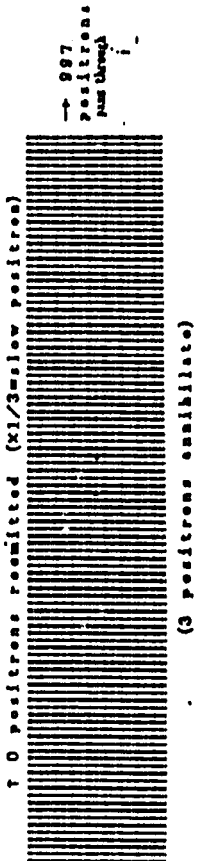
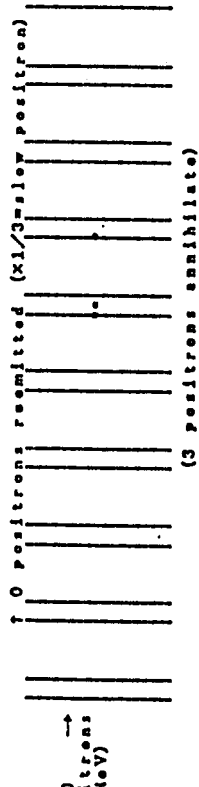
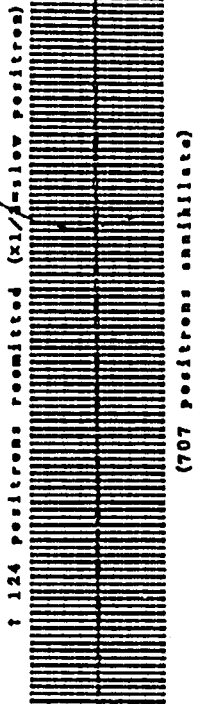
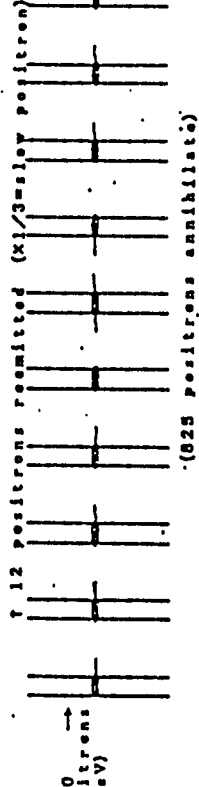
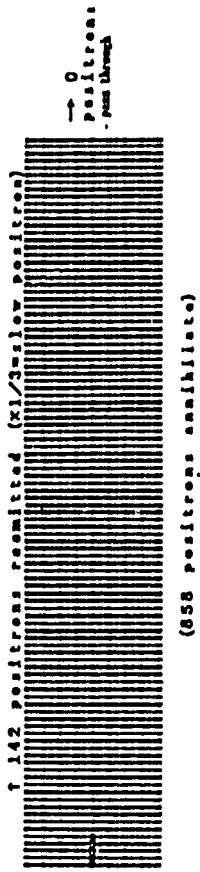
MONTE CARLO SIMULATION ON SLOW POSITRON PRODUCTION IN MODERATOR

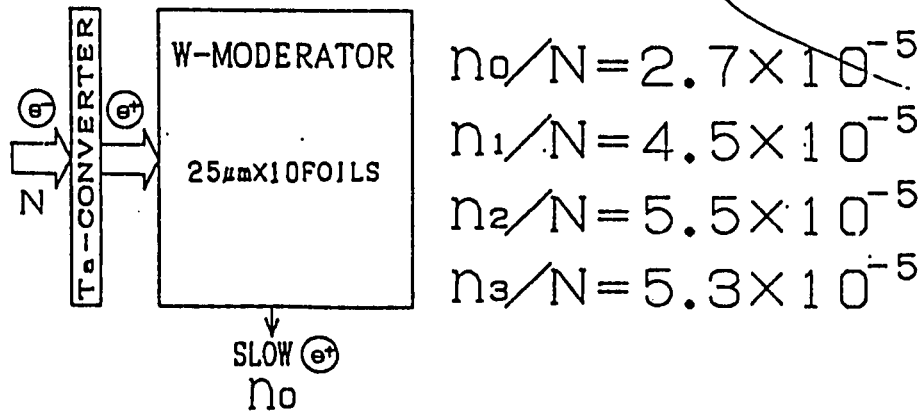
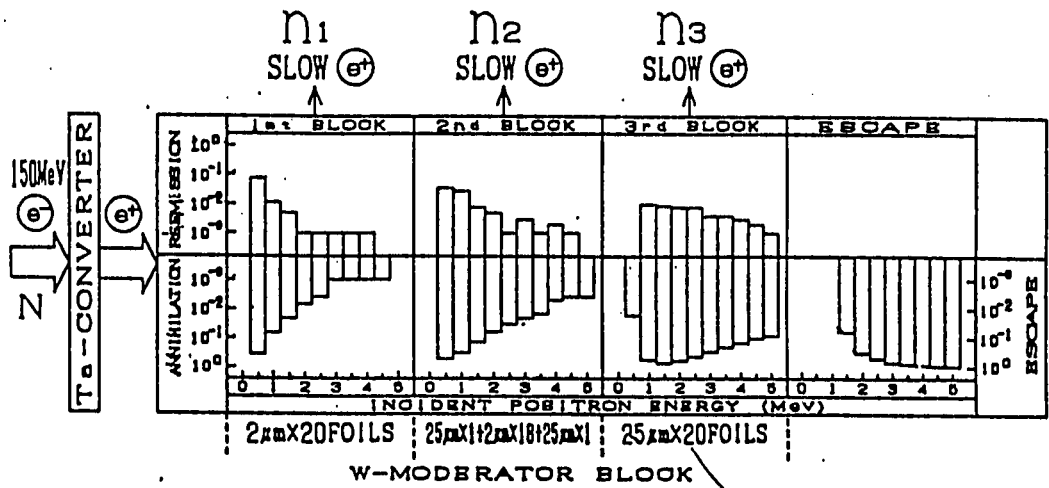
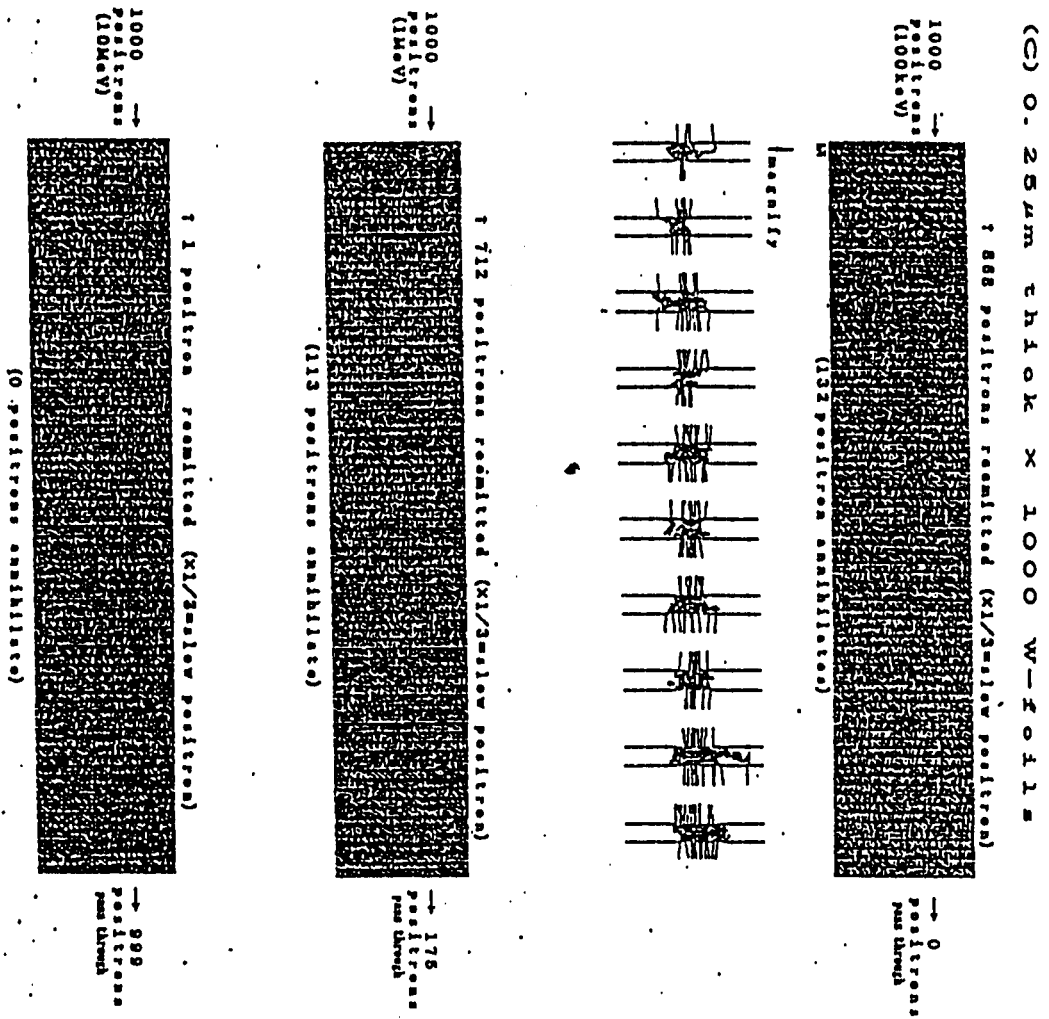


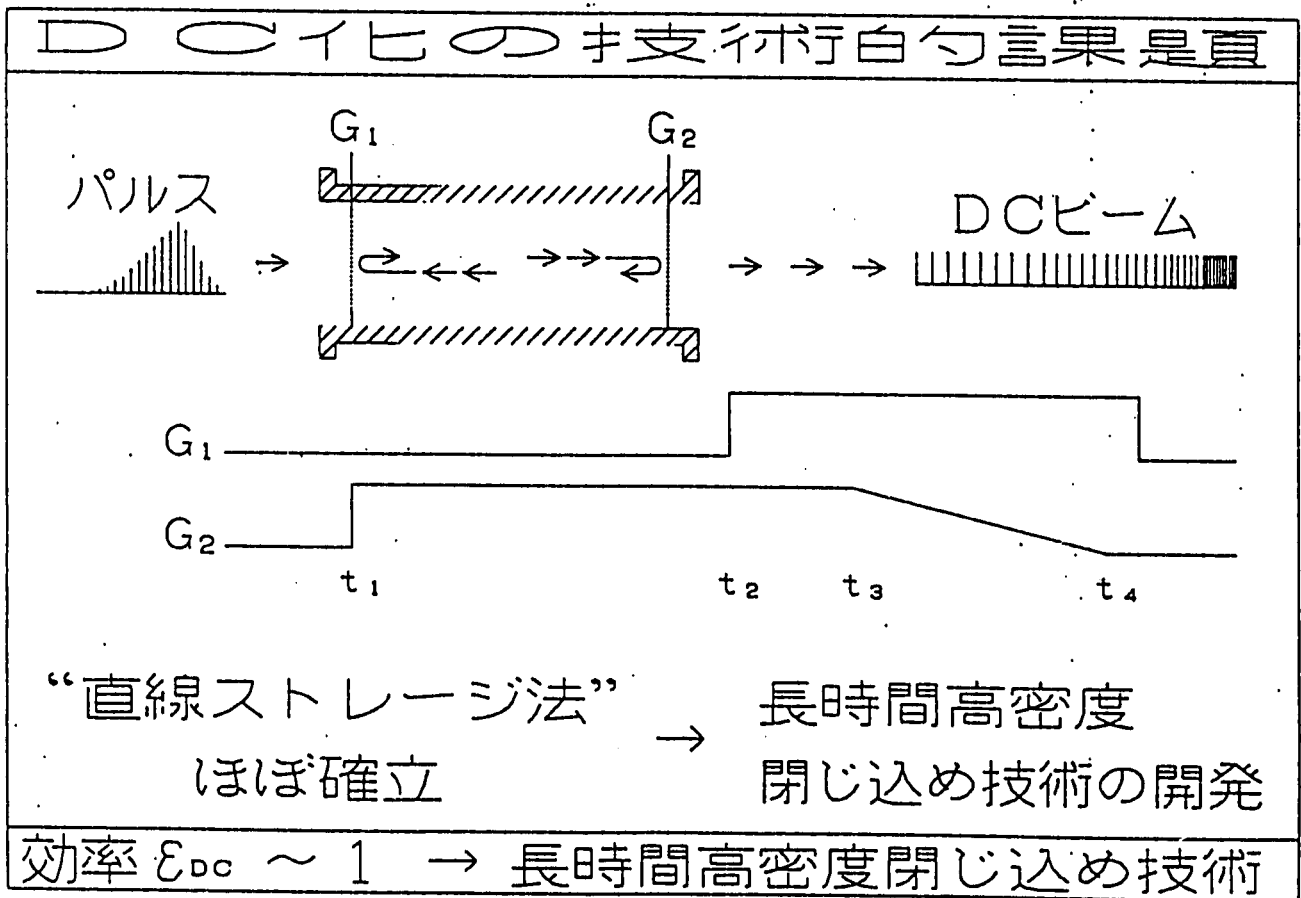
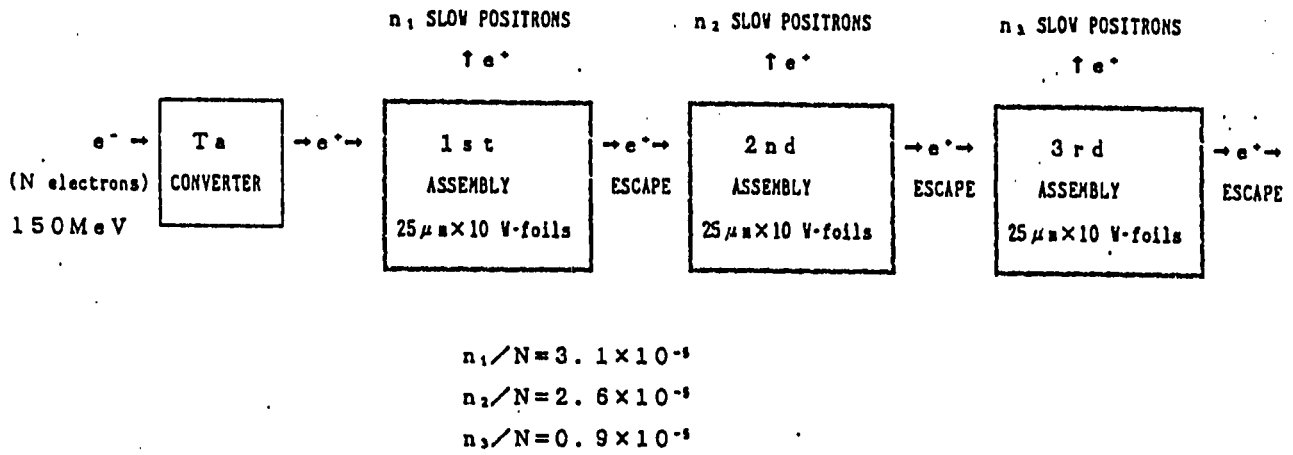
25 μm thick X 10 W-foils



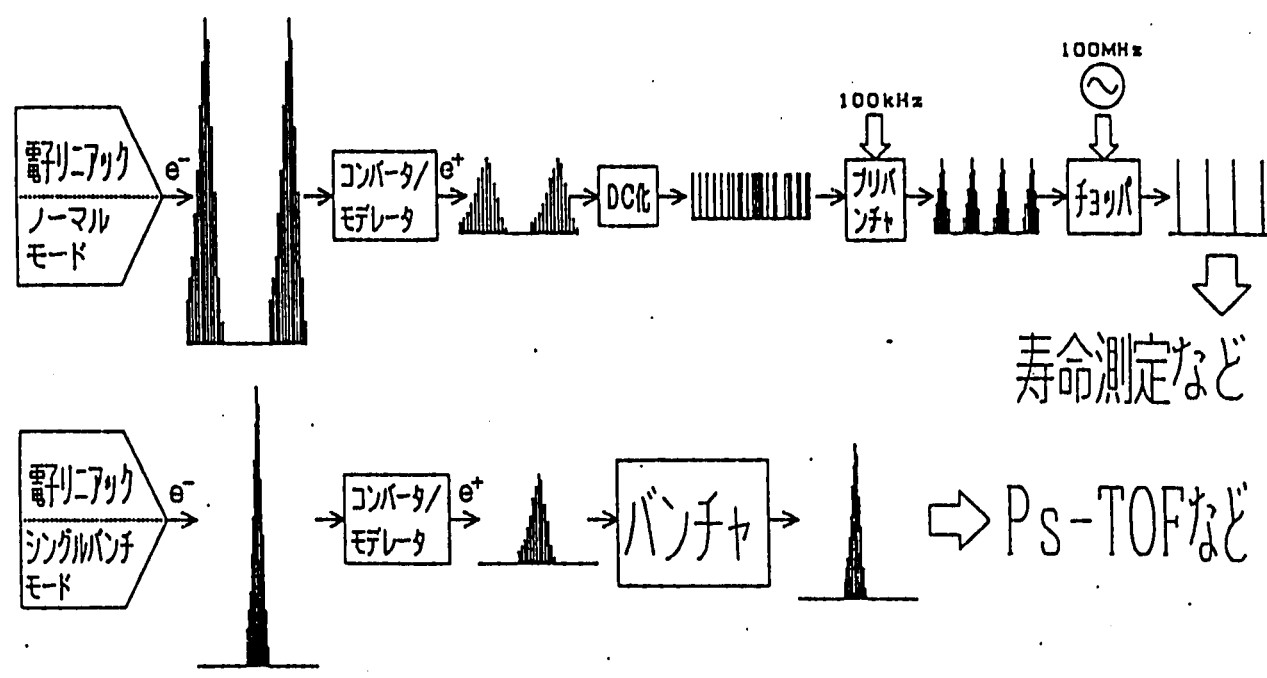
2.5 μm thick X 100 W-foils





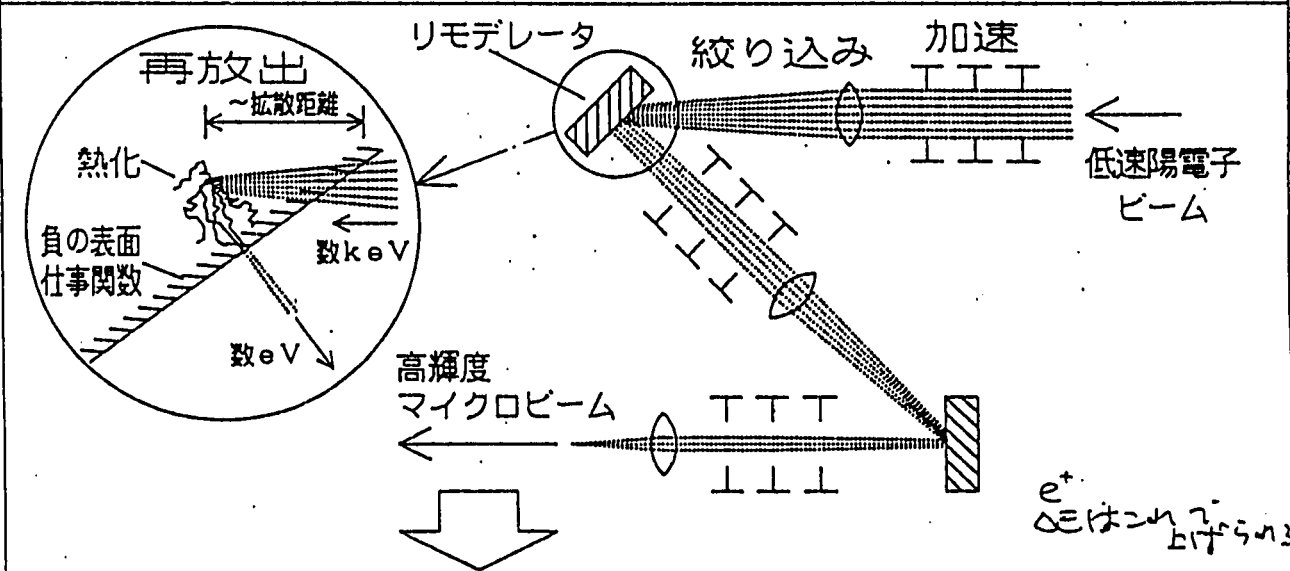



タイムバンチングの技術的白勺結果是買



最表層の解析 → 減速法の開発が必要

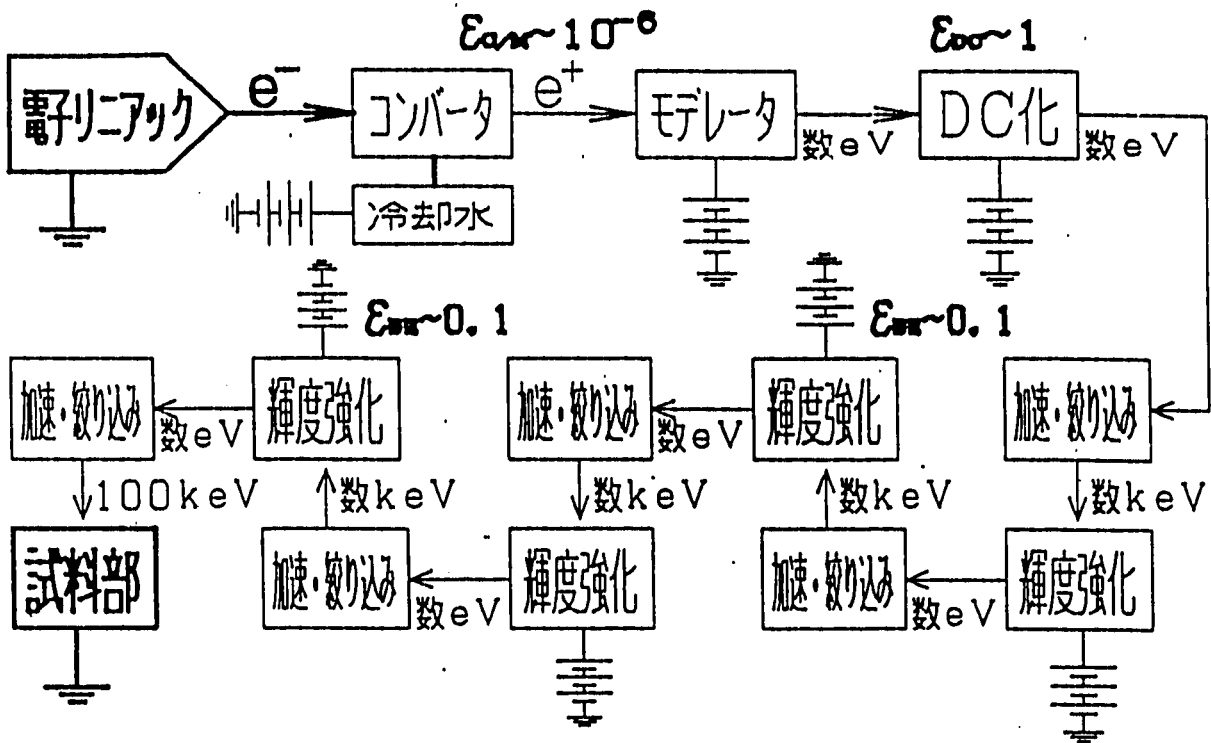
輝度強化 (BE) ・ マイクロビーム化の技術的課題



透過型リモデレータ (光学系との組み合わせが容易; ) の開発  
 ビーム輸送系の磁場や地磁気の影響を取り除く方式の検討

効率  $\epsilon_{BE} \sim 0.1$  (加速-再放出2段) ↑

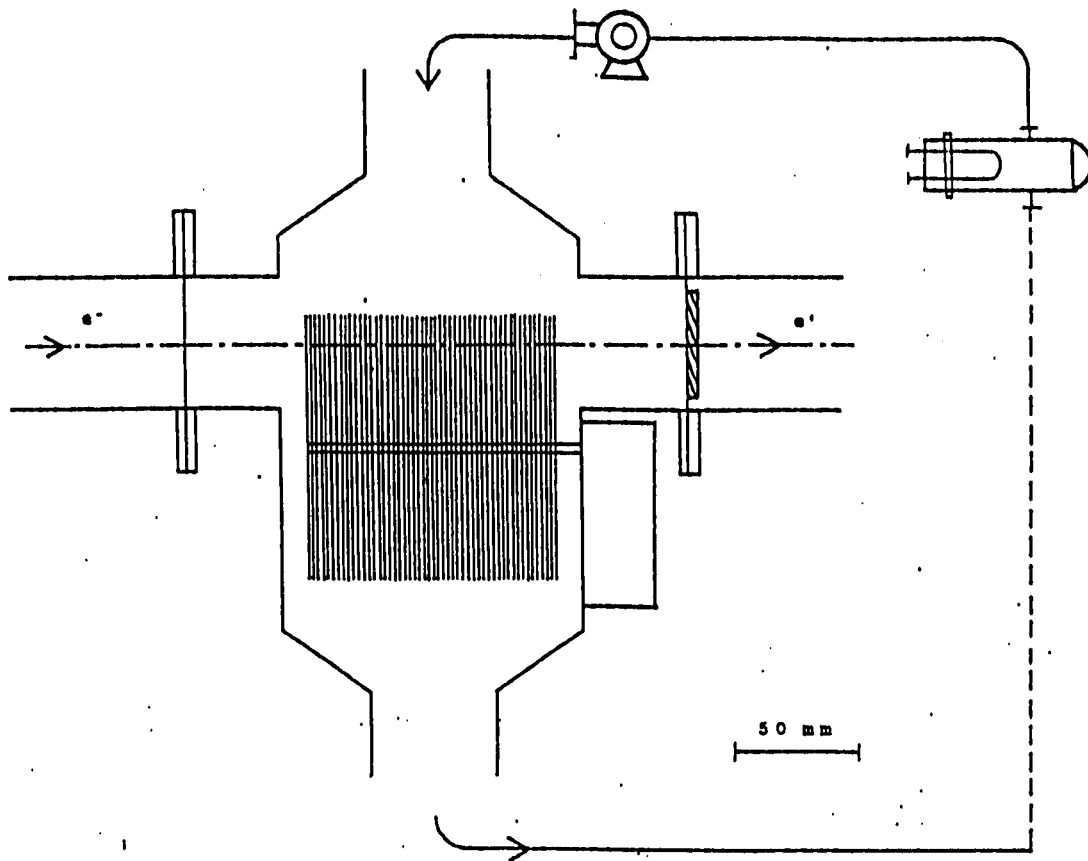
電氣的グラウンドの問題(例:陽電子頭微鏡)



最適設計 (安全性、簡便性、安定性)

PLANNED SPECIFICATION OF HIGH POWER ELECTRON LINAC  
IN POSITRON FACTORY

OPERATION MODE	NORMAL	SINGLE BUNCH
MAXIMUM AVERAGED CURRENT	1mA	0.67mA
MAXIMUM BEAM ENERGY	100MeV	150MeV
MAXIMUM BEAM POWER	100kW	
PULSE WIDTH & REPETITION	$1\mu s \times 1000\text{pps}$ $\sim 5\mu s \times 200\text{pps}$	30ps

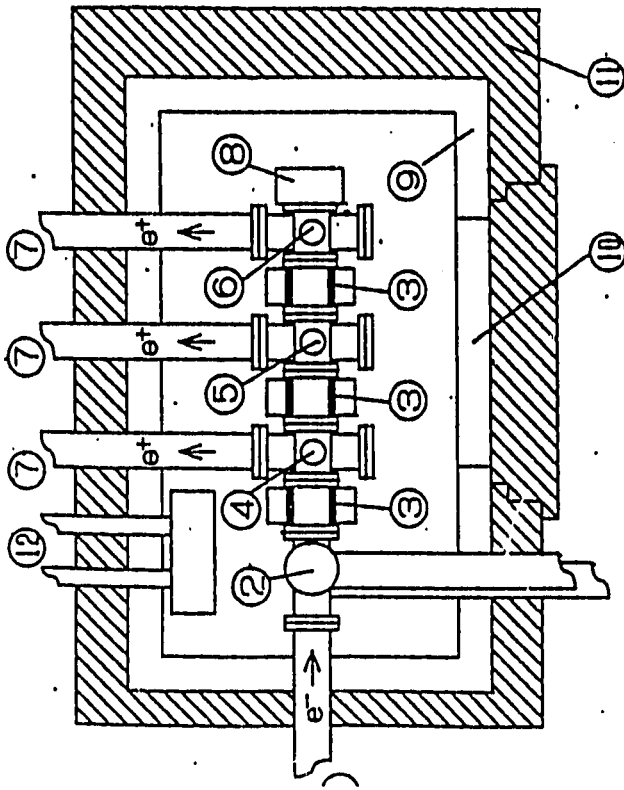


Electron energy = 100 MeV  
 Target  $2 X_0$  (0.82 cm) Ta

$E_e \leq 5$  MeV  
 $r \leq 0.5$  cm  
 $\theta \leq 20^\circ$

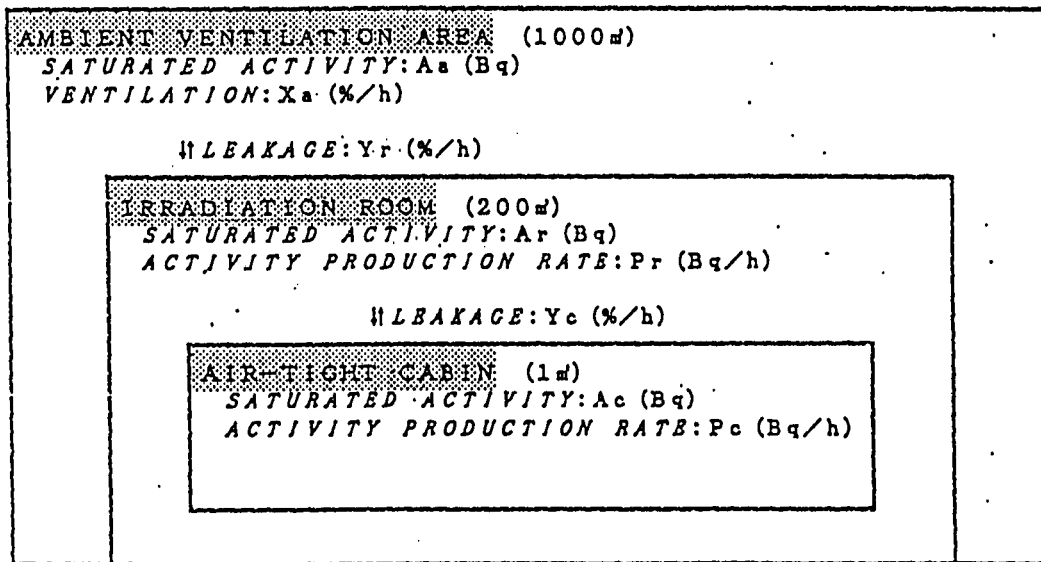
Cooling material	unit Ta	unit cooling	$e^+$ efficiency
-----	0.82 cm	0 cm	$7.6 \times 10^{-3} e^+/e^-$
He	0.02	0.1	$2.4 \times 10^{-3}$
Water	0.02	0.1	$4.0 \times 10^{-3}$
Water	0.082	0.2	$6.0 \times 10^{-3}$

H. Hirayama, KEK



- ① HIGH ENERGY ELECTRON BEAM LINE FROM A LINAC
- ② ROTARY CONVERTER
- ③ PULSE COIL MAGNET
- ④ 1st BLOCK OF MODERATOR FOILS
- ⑤ 2nd BLOCK OF MODERATOR FOILS
- ⑥ 3rd BLOCK OF MODERATOR FOILS
- ⑦ SIMULTANEOUS DELIVERY LINES OF SLOW POSITRON BEAMS
- ⑧ BEAM DUMP
- ⑨ ALUMINUM AIR-TIGHT CABIN
- ⑩ AIR-TIGHT DOOR WITH METAL SEALING
- ⑪ LEAD SHIELDING
- ⑫ FAN COIL UNIT FOR COOLING

CONFINEMENT OF ACTIVATED AIR + LOCAL SHIELDING



$P_r = P_c / 100$  (Local Shielding)  
 $X_a = 50\%/h, Y_r = 1\%/h, Y_c = 0.1\%/h$   
 10,000m<sup>3</sup>/h Fresh Air Mixing



Airborne Activity of N-13  
 in Exhaust Air  
 < 1/10 of Permitted Concentration



現状と将来計画

		----- 本計画の子びとして大蔵認可	~~~~~ 予算要求を希望	----- 完了, 進行中の関連研究	..... 関連研究将来計画		
		1989年まで	1990年	1991年	1992年	1993~'95年	1996年以降
建設・整備	検討		調査費 (I)	調査費 (II)	実施設計・詳細設計	建設・製作	利用開始
電子リニアック	検討		技術調査 (結論: 製作可能)	設計研究	^		
型 来 技 術	コンバータ	従来型の使用	新型の検討	..... R&D			
	モデレータ	従来型の使用	高効率型・VOLT-A デリバツションの提案	詳細検討	..... 実証試験		
	DC化	技術確立(*, **)					
	短パルス化		技術確立(**)				
	輝度強化		技術確立(*)				
新規利用技術			RHEPD, 陽電子消滅励起分光(*)		新規技術探査開発		
計測系開発			高効率高分解能位置敏感ガンマ線検出器開発		低速陽電子パルスラジオリシス		

\*: 原研-大学プロジェクト共同研究 (原研リニアック利用)    \*\*: 電研研リニアック利用

◆きわめて新しいチャレンジは別として, 周辺技術はほぼ確立されたと見て良い。

<参考: 世界の状況> ポジロンファクトリーと同様 (10<sup>10</sup>個低速陽電子/秒を目指す) 計画が提出

PSI (スイス): サイクロトロン → <sup>18</sup>O (p, n) <sup>18</sup>F → <sup>18</sup>F

ILL (仏独共同): 原子炉 → <sup>113</sup>Cd (n, γ) <sup>114</sup>Cd → γ → 対生成

ORNL (米国): 原子炉 → <sup>78</sup>Kr + n → <sup>79</sup>Kr

(要素技術未知数, RIの減衰, 断続的利用, 原子炉定検時シャットダウンなどの問題あり)

### 3 - 3. 大電流でのビーム不安定性について

大電流でのビーム不安定性について

KEK 佐藤 勇

§ 1 ビーム不安定性とは

電子ビームの不安定性は電子ビームと加速空洞との相互作用で発生する。この不安定性現象は図1-1に示す様に電子貯蔵リングでも観測される。この相互作用の強さは加速ビームと加速空洞との間の空間的な対称性のずれに依存する。特に、ビームの進行方向に対して直角方向（トランスバース方向）の対称性の崩れはビーム電流の不安定性に敏感である。これは図1-2に加速空洞のビーム発散モード（ $TM_{11}$ ）に関連する。これらのモードの電界は図1-3に示す様に加速空洞の中心軸に対称であり、中心軸上には電界が存在しない。従って、ビーム電流が軸上通過する場合、このモードと相互作用がない。一方、ビームの進行方向に対して平行な方向（ロングチュードナル方向）の対称性の崩れはビーム電流の不安定性に敏感である。寧ろ対称性の崩れはビームの発散を抑えるためには歓迎される場合が多い。ビームライン上に同じ形状の加速空洞が多数配置されると、ビーム電流によるビーム発散モード（ $TM_{11}$ ）の増幅作用を指数関数的に増強するためである。その増幅度は同一形状の加速空洞が連結している場合はその加速管の長さの3乗に比例する。これは短い加速管を利用する理由の1つである。しかし、各加速管の間の増幅作用の解析は非常に複雑である。増幅作用を小さくする方法の1つは、同じ形状の加速管によるビーム加速を行わない事である。

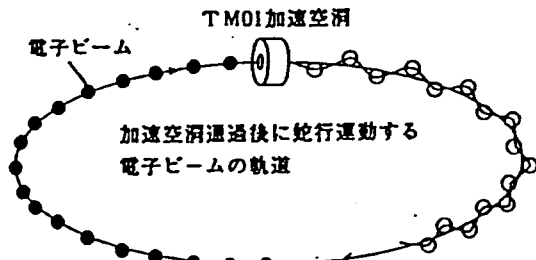


図1-1 リングのビーム不安定性

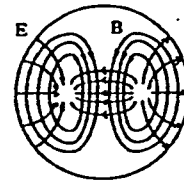


図1-2 加速空洞の $TM_{11}$ モード

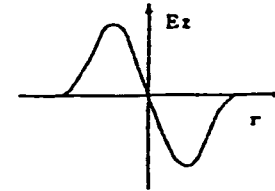


図1-3 加速空洞の $TM_{11}$ モードの $E_z$

§ 2 加速管のビーム発散特性

線形加速器に発生するビーム発散現象は、再生型と累積型に分類される。ビーム発散は再生型も累積型も同一構造の加速空洞がビームラインに配置される事に原因がある。再生型は、図2-1に示す様に、1本の加速管内で発生するビーム発散現象を言う。このビーム発散は同一加速空洞が多数連なる加速管（定インピーダンス型加速管）で顕著に発生する。累積型は、図2-2に示す様に、加速管をビームライン上に多数配置された場合に発生するビーム発散現象を言う。このビーム発散は各々の加速空洞構造が異なる小数の加速管（定電界型加速管）をビームラインに配置された場合は発生しない。しかし、多数の加速管を並べた場合に発生する。

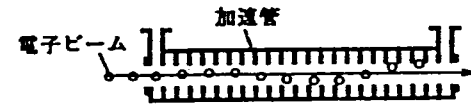


図2-1 再生型ビーム発散

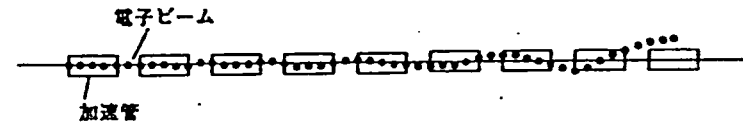


図2-2 累積型ビーム発散

ここでは、最も一般的な再生型ビーム発散について、解析して見よう。

【再生型ビーム発散 Regenerative beam blow up】

再生型ビーム発散は定インピーダンス加速管で顕著に発生する。定インピーダンス加速管のビーム発散は比較単純なので、その特性について考察して見よう。周期構造に於ける角周波数  $\omega = 2\pi$  と伝搬常数  $\beta = \pi/L$  の関係を表す分散曲線はバンドパス理論から図2-1の様になる。デスク負荷型加速管の加速モードを  $TM_{01}$ 、ビーム発散モードを  $TM_{11}$  ( $HEM_{11}$ ) とすると2つのモードは図2-3の上下の曲線に相当する。

円筒型加速空洞の  $TM_{11}$  モードの電磁界は図1-2に示すようになる。一般に  $TM_{11}$  モードでは中心軸上に  $z$  方向の電界  $E_z$  は存在しない。しかし、 $\pi/2$  だけ遅れた位相では、垂直方向の磁場  $B_\phi$  は中心軸上で最大値をしめす。

今、加速空洞を進行する電磁波の波動関数が  $e^{j(\omega t - \beta z)}$  で表されるものとする。高周波損失のないデスク型進行波加速管の  $HEM_{11}$  モードの電界  $E_z$  は Hahn 等によって<sup>1)</sup>

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \frac{J_1(k_{n,r} r)}{J_1(k_{n,a} a)} \cos \phi e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1)$$

で与えられた。ここで、 $\phi, r, z$  は円筒座標系、 $a_n$  と  $\beta_n$  は  $n$  次の空間高調波の振幅と伝搬係数、 $a$  は加速管のデスク穴径、 $k_{n,r}^2 + \beta_n^2 = k^2$ 、 $k = \omega/c$  をそれぞれ表す。加速空洞の横方向のシャント抵抗  $r_s$  は定義より

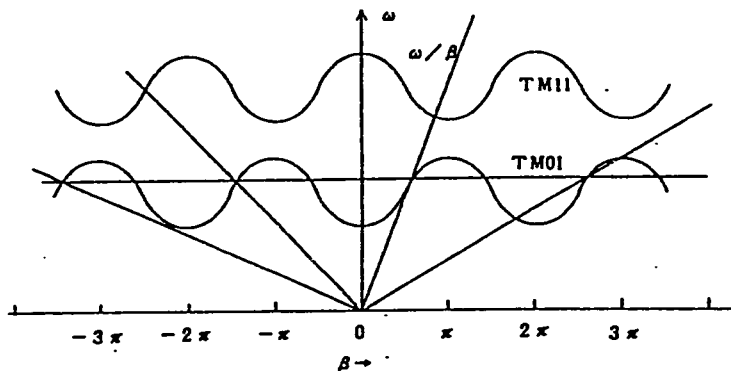


図2-3 周期構造の  $\beta-\omega$  curve

$$r_s = \frac{\left[ \frac{1}{\beta_n} \frac{\partial E_{z,n}}{\partial r} \right]_r}{\left| \frac{dP}{dz} \right|} \quad (2)$$

で表される。 $TM_{11}$  モードに近い  $HEM_{11}$  モードの電磁界は

$$E_z \propto J_1(kr) \cos \phi \quad (3)$$

$$B_\phi \propto -j \left[ \frac{J_1(kr)}{kr} \right] \sin \phi \quad (4)$$

$$B_z \propto -j J_1'(kr) \cos \phi \quad (5)$$

$$E_r = E_\theta = B_r = 0 \quad (6)$$

で近似される。ここで、 $J_1(kr)$  は1次のベッセル関数であり、 $k$  は伝搬常数で  $k = \omega/c$  を表す。円筒座標系の中心軸を原点 (水平方向を  $x$  軸、垂直方向を  $y$  軸) とする  $xy$  の座標系に展開すると、 $TM_{11}$  モードは  $r \rightarrow x$ 、 $\phi \rightarrow y$  の座標に展開できる。ここで、 $TM_{11}$  モードの電磁界が中心軸近傍で電磁界が線形に展開できると仮定する。中心軸付近に於ける  $x$  方向の  $E_z$  の変化量を  $(\partial E_z / \partial x)$  とすると、 $E_z(x)$  は  $\partial E_z / \partial x$  と中心軸からのずれ  $x$  の積で表される。又、 $B_\phi$  は  $r \rightarrow 0$  では

$$J_1'(kr) = \frac{J_1(kr)}{kr} - J_2(kr) \approx \frac{J_1(kr)}{kr} \quad (7)$$

であるから (3)、(5) より

$$E_z \approx \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) x \quad (8)$$

$$B_\phi \approx -\frac{j}{k} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (9)$$

で表される。光速に近い電子が加速管の中心軸近傍を進行すると水平方向にローレンツ力 ( $F = e [E + v \times B]$ ) を受ける。図2-3に示す様に、長さ  $L$  の加速管を通過中に受ける電子の水平方向の運動量の増加量は

$$\Delta P_x = e \int_0^L \left[ E + \left( \frac{v}{c} \right) \times B \right]_x \frac{dz}{v} \approx \frac{j e}{k c} \int_0^L \frac{\partial E_z}{\partial x} dz \quad (10)$$

である。ここで、 $v$  は電子の速度である。

一方、電子の水平方向の運動量増加は電子が加速度を受けた事を意味する。電子が加速度を受けると電磁波を放出、或いは、電磁波を吸収する。即ち、電子が加速空洞と相互作用しエネルギーを授受する事になる。そのエネルギーを  $\nabla U$  とすると、 $\nabla U$  は

$$\nabla U = -mc^2 \nabla \gamma \approx -e \int_0^L \frac{\partial E_z}{\partial x} x dz \quad (11)$$

で表される。ここで、 $v$  は電子速度であり、 $\gamma$  はローレンツ因子で  $\gamma = \{1 - (v/c)^2\}^{-1/2}$  である。斯くして、電子は加速空洞の水平成分電界で積分した横方向の運動量を受取るが、もし電子の横方向の変位が電界の符号と反対なら、

正のエネルギー増加を電界に分け与える事になる。

もう少し詳しく説明すると次の様になる。加速管に励起された電磁界は各加速空洞の中心軸上の穴を通じて結合し、ここで空洞から空洞へ適当な位相で伝搬していると仮定している。TM<sub>11</sub>モードを利用した高周波空洞は電子ビームの偏向分離装置として使用されている。

テクス負荷型加速管ではTM<sub>11</sub>モード以外にTE<sub>11</sub>モードも電子ビームを偏向する。これらのモードは縮退している場合が多い。この縮退モードをHEM<sub>11</sub>と呼ぶ。HEM<sub>11</sub>モードの電磁波は電子速度と少しずれる。このモードの位相速度をv<sub>+</sub>とするとこの電磁波はe<sup>-j(ω<sub>+</sub>t - βz)</sup>の波動関数で伝搬する。

もし加速管を通過中の電子の位相スリップが約πである場合、電子の偏向振幅は最大になる。周期構造の加速管では、一般に位相スリップが最適化された周波数があり、大多数のビームの不安定はこの周波数付近で発生する。

今、周期構造の加速管には、既に記述した電子偏向の仕組みに加えて、帰還作用の仕組みもあり、再生作用が起こり増幅作用は大きく増加する。この時、もしビーム電流がある値を越えると、このビームによって発生した高周波電力は加速空洞から流れだし、そして、初期の雑音信号は徐々に増進し再生増振が始まり、この電界はビームが加速管の壁に衝突するまで増大する。この帰還作用はHEM<sub>11</sub>モードが後進波であるか、又は、加速管の終端からの反射波によって維持される。

次に増振開始電流について考察する。

HEM<sub>11</sub>モードは図2-3に示す様にTM<sub>01</sub>加速モードの上部にある。HEM<sub>11</sub>モードは負の群速度を持つ。即ち、v<sub>g</sub> = -|v<sub>g</sub>|である。一次近似ではHEM<sub>11</sub>モードの伝搬常数をβとすると<sup>11,11,11</sup>

$$\beta \approx \beta_0 + \frac{\partial \beta}{\partial \omega} (\omega - \omega_0) = \beta_0 - \frac{\omega - \omega_0}{|v_+|} \quad (12)$$

で表される。ここで、β = ω/v<sub>+</sub>、v<sub>+</sub>は位相速度、ω<sub>0</sub>はv<sub>+</sub> = cに於ける周波数、ωはビームが増振する増振周波数を表す。

後進波増振に対する開始電流は、ビームによって励起される高周波電力が加速管を伝搬するTM<sub>11</sub>モード電力に等しい場合である。

ビーム電流をI<sub>0</sub>、ビームの電流密度をi = I<sub>0</sub>/S<sub>0</sub>とすると、単位長さ当たりのビームが励起する電力(∂P<sub>0</sub>/∂z)のrf周期の時間平均値は

$$\frac{\partial P_0}{\partial z} = -\frac{1}{2} R_0 \int [E^* \cdot i] \cdot dx dy \quad (13)$$

である。又、これを加速管の長さLに渡って積分すると、ビームが加速管に励起する高周波電力P<sub>0</sub>は

$$P_0 = -\frac{1}{2} I_0 R_0 \int_0^L \left[ \frac{\partial E_x^*}{\partial x} x \right] \cdot dz \quad (14)$$

で表される。[]はz = 0でt = τなる時刻を示し、t = τ + ∫<sub>0</sub><sup>z</sup> dz'/v(z')の時間経過で電子軌道に沿って数値を求める事を意味である。(14)のxはビーム電流の初期条件、即ち、rf電磁界で発生する偏向は(10)を積分によって

得られる。

$$x(z, t) = \frac{ja}{ck} \int_0^z \frac{dz'}{p(z')} \left[ \int_0^z \frac{\partial E_x^*}{\partial z'} \right] \dots dz' \quad (15)$$

ここで、pは電子の運動量であり、(p < p<sub>0</sub>)ではp = mc(γ<sup>2</sup> - 1)<sup>1/2</sup>で表される。E(z, τ)を非常に緩やかに変化する振幅関数であると

$$\frac{\partial E}{\partial x} = k E(z, \tau) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (16)$$

で定義される。(14)、(15)、(16)から

$$P_0 = -\frac{1}{2} k \frac{e I_0}{c} R_0 \int_0^L dz \int_0^z \frac{dz'}{p(z')} \int_0^z j \phi(E) dz' \quad (17)$$

となる。ここで、φ(E)は

$$\phi(E) = E^*(z, \tau) E(z', \tau) e^{j(\omega t - \beta z) - j(\omega t' - \beta z')}$$

で与えられ、Δ(z)、δβはそれぞれ

$$\Delta(z) = \int \delta \beta(z') \cdot dz$$

$$\delta \beta = \omega \left( \frac{1}{v_+} - \frac{1}{v} \right) = (\omega_0 - \omega) \left( \frac{1}{v_+} - \frac{1}{c} \right) - k \left( \frac{c}{v} - 1 \right) \quad (18)$$

で表される。(17)は0次近似ではp(z')とE(z, τ)は1定である。その結果、P<sub>0</sub>は

$$P_0 = 2k \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{e}{Pc} \right) I_0 |E|^2 g_1(\alpha) \quad (19)$$

で表される。ここで、αは位相スリップ変数でα = Lδβで与えられる。

g<sub>1</sub>(α)は

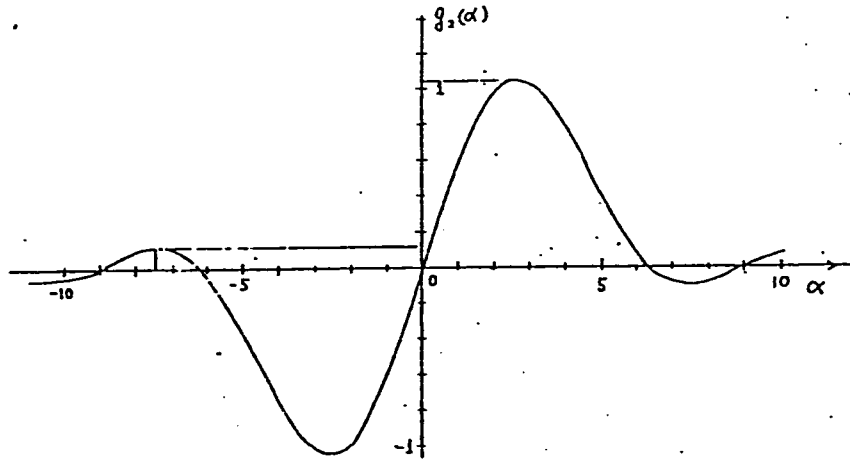
$$g_1(\alpha) = \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{1 - \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha}{\left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2} \right) \quad (20)$$

で与えられる。ビームを不安定にする高周波電力P<sub>0</sub>の最大値は位相スリップ変数がα = 2.65の場合で、このときのg<sub>1</sub>はg<sub>1</sub>(α) = 1.04である。g<sub>1</sub>(α)をグラフにすると図2-4の様になる。

加速管の電界減衰係数をc<sub>1</sub>(r.e.p.e.r/m)とすると、単位長さあたりの高周波電力損失はdP/dz = -2α<sub>1</sub>Pである。これと(4-2)に定義されたシャント抵抗と電界強度の関係を使って加速空洞を伝搬する高周波電力P<sub>1</sub>は

$$P_1 = \frac{|E|^2}{\alpha_1 r_1} = \frac{v_+ Q}{\omega r_1} |E|^2 \quad (21)$$

で表される。ここで、α<sub>1</sub> = ω/2v<sub>+</sub>Qである。



Willisonは加速空洞の構造係数 ( $r_s/Q$ ) を

$$\left(\frac{r_s}{Q}\right) \sim \left(\frac{2\eta l}{\lambda L}\right) \left(\frac{g_1}{\rho_{11} J_0(\rho_{11})}\right) \quad (22)$$

で近似した。ここで、 $\eta$ は自由空間に於けるインピーダンスで $\eta = 377 \Omega$ 、 $l$ はHEM<sub>11</sub>モードが加速空洞との有効結合長、 $\rho_{11}$ はベッセル関数 $J_1$ の最初の根の値で $\rho_{11} = 3.82$ 、 $J_0(3.82) = -0.403$ である。ここで、 $D$ を円筒空洞の長さ、 $t$ をデスクの厚さとするとき $l$ は $l \sim (D-t)$ で近似できる。又、 $g_1$ は

$$g_1 = f\left(\frac{a}{b}\right) \left[ \frac{\sin\left(\frac{\beta_p(D-t)}{2}\right)}{\frac{\beta_p(D-t)}{2}} \right] - \frac{\sin\left(\frac{\beta_p l}{2}\right)}{\left(\frac{\beta_p l}{2}\right)} \quad (23)$$

で与えられる。ここで、 $a$ は加速管のデスクの穴半径、 $b$ は加速管の円筒空洞の内半径、 $\beta_p$ は $\beta_p = 2\pi/\lambda_p$ であり、 $\lambda_p$ は管内波長を表わす。

$\beta_p = 2\pi/\lambda_p$ とすると位相スリップ変数 $\alpha$ は

$$\alpha = \beta_p L_1 - \frac{\omega L_1}{v_p} = \beta_p L_1 \left(1 - \frac{v_p}{v_0}\right) \quad (24)$$

で表される。ここで、 $v_p$ はTM<sub>11</sub>モードの位相速度である。

ビームが不安定になる電流 $i_c$ は(21)の高周波電力 $P_0$ が(18)の $P_c$ と等しくなる場合である。このときに再生型後進波共振が発生する。<sup>21)</sup>

不安定性の発生開始電流 $i_c$ は(18)と(21)より

$$i_c = \left(\frac{\pi P_0 \beta_p}{g_2(\alpha)}\right) \left(\frac{Q}{r_s \lambda_{11}}\right) \left(\frac{\lambda_{11}}{2L_1}\right)^2 \quad (25)$$

で与えられる。ここで、 $P_0$ は電子ビームの運動量、 $\beta_p$ は群速度を $v_p$ とすると $\beta_p = v_p/c$ 、 $\lambda_{11}$ はTM<sub>11</sub>モードの管内波長である。これまではビームの運動量の変化を無視したが、Willisonは加速管を通過する間のビームの運動量変化を考慮した補正を行った。その補正関数 $F_0(\zeta)$ は

$$F_0(\zeta) = \left(\frac{\zeta-1}{8\zeta}\right)^2 \left\{ \frac{(\zeta-1)^2}{2} + (-1 - \zeta \ln \zeta)^{-1} \right\} \quad (26)$$

で与えた。ここで、 $\zeta$ は加速管を通過する前の運動量を $P_0$ とし通過後の運動量を $P_1$ とすると $\zeta = P_1/P_0$ で与えられる。 $\zeta$ が大きい場合、 $F_0 \approx 0.3$ となる。

大電流線形加速器では加速空洞の高次モード(TM<sub>11</sub>, HEM<sub>11</sub>, etc)と電子ビームが相互作用し、高次モードの横方向の電磁界によってビーム自身が偏向される。このモードとビームとの相互作用の強さは、電子ビーム電流、高次モードのシャント抵抗 $r_s$ 、相互作用の長さ $L_1$ 、ビームの通過する場所の中心軸からのずれ等に関係する。

ノーズコン型加速管の場合、不安定になるビーム電流を $i_c$ とすると<sup>22)</sup>

$$i_c = \left(\frac{\lambda_{11}^2}{L_1^2}\right) \left(\frac{1}{r_s}\right) \alpha \beta \gamma \quad (27)$$

で与えられる。ここで、 $\lambda_{11}$ はTM<sub>11</sub>モードの管内波長、 $\beta$ は電子の速度を $v$ とすると $\beta = v/c$ 、 $\gamma$ はローレンツ因子である。

次に(25)、(26)、(27)を使って不安定性が発生するビーム電流値を評価してみよう。

進行波遅流型加速管とノーズコン型加速管の高次モードの周波数 $f_c$ とシャント抵抗 $r_s$ を表2に示す。進行波遅流型加速空洞共振モードはマフィア・コードを使って計算した。又、 $2\pi/3$ モードのテスト空洞を使って測定した基本波と高次モード波の周波数を表3に示す。

表2 加速管のビーム飛散特性

	進行波遅流型加速管	ノーズコン型加速管
飛散周波数 $f$ , (MHz)	1884.126	2450.0
変態 (モード)	TM <sub>110</sub>	TM <sub>110</sub>
加速空胴移相量	$\pi$	0
シャント抵抗 $r$ , (M $\Omega$ /m)	32.14	12
利益係数 $Q$		
電子エネルギー $E$ (MeV)	10.0	10.0
不安定になる電流 $I$ , (mA)		59.7

表3  $2\pi/3$ モードのモデル空洞の寸法とその特性

ディスク	2a径	mm $\phi$	51.6
シリンダー	2b径	mm $\phi$	188.6
セルの長さ	D	mm	80.0
ディスクの厚さ	t	mm	12.0
セル			
測定条件	20C° (真空換算)		

モード	周波数 (MHz)			Q値		
	TM <sub>01</sub>	TM <sub>11</sub>	TM <sub>02</sub>	TM <sub>01</sub>	TM <sub>11</sub>	TM <sub>02</sub>
位相シフト						
0	1234.97	1858.47	2836.17	19640	21190	30000
$\pi/6$	1236.19	1860.75	2841.58	18020	18540	27700
$2\pi/6$	1239.52	1868.23	2855.67	18190	18880	27000
$3\pi/6$	1243.99	1880.42	2875.48	17810	19800	27000
$4\pi/6$	1248.45	1896.34	2896.14	18120	20150	27000
$\pi/6$	1251.65	1912.12	2912.06	17420	22100	26800
$6\pi/6$	1252.82	1919.68	2917.74	19720	26560	30000

- 1) H. Mann and H. J. Halama, 1965, Rev. Sci. Instr. 36, 1788.
- 2) P. B. Wilson, 1963, HEPL-297(Rev-A), Stanford University.
- 3) H. H. G. Cheng, 1964, University California.
- 4) E. L. Chu, 1966, TN-66-7, Stanford University.

§3 ビーム飛散に対する所見

CW電子線形加速器のビームの不安定性は電子所蔵リングで観測されるビームの不安定性に類似した現象があるので、高エネルギー物理学研究所の電子リングで発生した不安定性を参考にすると次の様になる。

3-1 PFリングにおけるビーム不安定性

PFリングでは高周波加速にノーズコン型の単空洞を4個使用している。基本周波数とビーム不安定性を起こす周波数を表4に示す。

表4 ビームを不安定にするモードの周波数

加速周波数	$f_0$	(MHz)
	500	
ビームを不安定にする周波数	$f_1$	758
	$f_2$	830
	$f_3$	1070

最も数値の低いビーム電流で不安定になる高周波空洞に励起される周波数は $f_3$ であった。 $f_3$ が空洞に励起すると10mAしか加速出来なかった。加速空洞の温度を変えて $f_3$ を回避すると約100mAのビーム加速が可能となった。

更に加速空洞の温度を段階し $f_1$ を回避すると約250mAのビーム加速が可能となった。

$f_2$ を回避すると約350mAのビーム加速が可能となった。

加速空洞にモード・サプレッサーを取付けて、ビームを不安定にする高周波電力を外に取り出す試みは効果が薄いので取りやめている。この理由はダンパー取り付けると、加速ビーム電流が増加すると、カップリング・バンド幅が広がり、それまでにカップルしなかった有害モードが結合して、ビームが不安定になる現象が観測される様になったためである。現在は色々な改善策を施して500mAのビーム加速が可能となった。

3-2 ARリングに於けるビームの不安定性

ARリングでは最初、D&W型の加速空洞を使って100mAの電子ビーム加速を行った。しかし、実際のD&W型の加速空洞のシャント抵抗は設計値より約20-30%低く、且つ、TM11に似た多数モードが観測されるとの理由から、構造が簡単なASP型(閉周期構造型加速管)に切り替えた。しかし、この場合の加速電流は約40mAに低下した。MRリングも同様な理由でAPSと超伝導空洞が使用されているが、現在、加速ビームの最大値は12mAである。

## 4 - 1. マクロンビームの加速とその周辺



# 高速微粒子の特徴

(粒径  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ )

数  $\text{km/s}$  の速さの微粒子

↓ (衝突)

固体ターゲット (ターゲットを破壊しない)

↓ (瞬時的、微小領域)

衝撃波

(数十万～数百万気圧)

↓

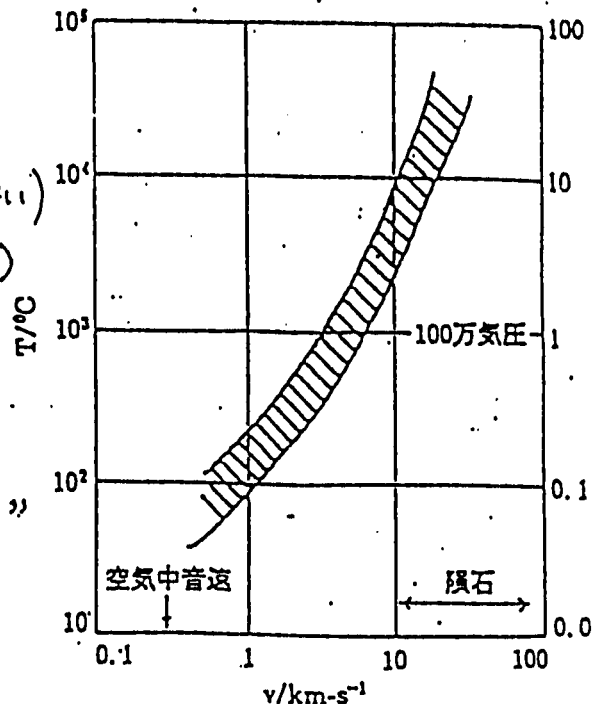
固体表面にクレーター等の”損傷”

相転移、新素材生成

表面改質の技術開発

高電荷微粒子イオンをマクロンと呼ぶことにする (Ni powder)

衝撃圧力と温度上昇



平成3年7月17日  
大強度CW加速器研究会  
電理

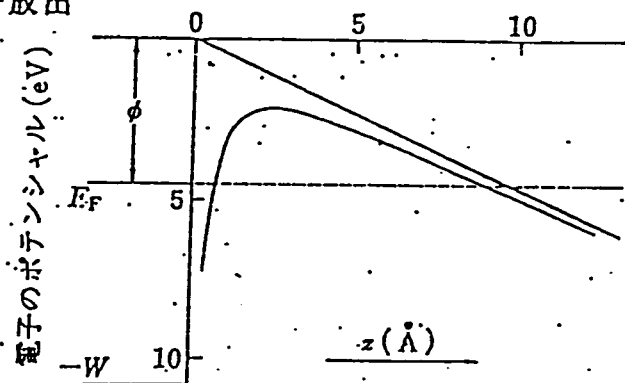
マクロンビームの加速とその周辺

京都大学工学部

今西信嗣

負イオンの放電限界

\* 電場電子放出



電流密度 J

$$J \approx \frac{1.54 \times 10^{-6} E^2}{\phi} \exp \left[ \frac{-6.83 \times 10^7 \phi^{3/2}}{E} \right] \quad (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$\phi = 4\text{eV}, E = 1, 2, 5 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$   
 $J = 7 \times 10^{-17}, 1 \times 10^{-3}, 5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$

放電限界  $E \sim 1 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$

ガウスの定理

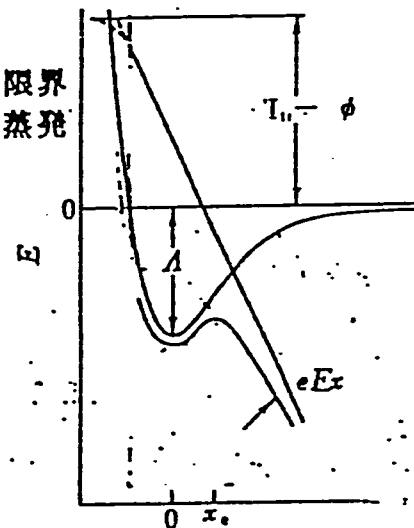
$$E = q / (4\pi r^2 \epsilon) \quad \epsilon = 8.9 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

r [μm]	q [e]	N <sub>v</sub>	N <sub>s</sub>	q/N <sub>v</sub>	q/N <sub>s</sub>
1	7(5)	4(11)	2(8)	2(-6)	3.5(-3)
0.1	7(3)	4(8)	2(6)	2(-5)	3.5(-3)
0.01	7(1)	4(5)	2(4)	2(-4)	3.5(-3)

Ni :  $\rho = 8.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}, A = 58.7, r(\text{atom}) = 0.125 \text{ nm}$

正イオンの放電限界

\* イオンの電場蒸発



活性化エネルギー Q

$$Q = \Lambda + I - \phi - e^2/4r - eEr$$

Q = 0 より

$$E = (\Lambda + I - \phi - 36r) / r$$

但し単位は eV nm

$$\approx 3 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$$

r [μm]	q [e]	N <sub>v</sub>	N <sub>s</sub>	q/N <sub>v</sub>	q/N <sub>s</sub>
1	2(7)	4(11)	2(8)	6(-5)	0.1
0.1	2(5)	4(8)	2(6)	6(-4)	0.1
0.01	2(3)	4(5)	2(4)	6(-3)	0.1

Λ : 表面原子の結合エネルギー

I : 電離エネルギー

φ : 仕事関数

r : ポテンシャル障壁までの距離  
(表面原子の半径)

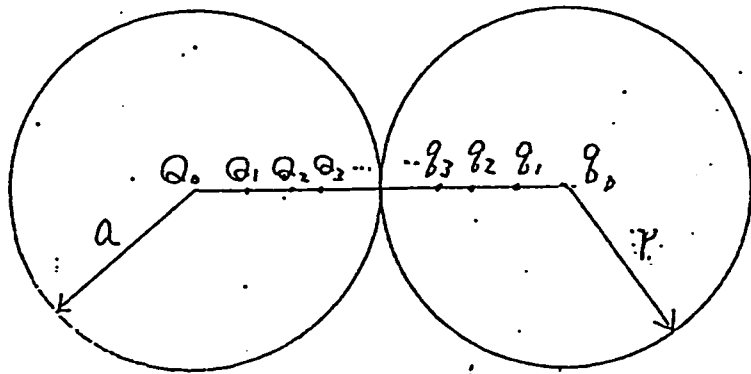
E : 電場

高電位球との接触による帯電

\* 電位  $V$  に保たれた半径  $a$  の球に、半径  $r$  の球が接触して帯電し、クーロン反発力で離れていったとする。球  $r$  の帯電量はいくらか。

表面電位を一定に保つため  
鏡像をそれぞれの相手の球内に置く。  
この鏡像に対する鏡像をさらに追加して置く。

球  $r$  の電荷はこのような鏡像をすべて加えたもの。



$$q = \sum_{i=0}^{\infty} q_i$$

接触帯電量

球-球接触

半径  $r$  の球の帯電量

$$q_0(r) = 4\pi\epsilon_0 r^2 \eta_0(r/a) E_a$$

ただし  $E_a = V_a/a$ : 球  $a$  の表面電場

$$\eta_0(r/a) = \frac{1}{(1+r/a)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k \left( k - \frac{r/a}{1+r/a} \right)}$$

$a \gg r$  ...  $\eta_0 = 1.65$  (平板の場合)  
 $a \ll r$  ...  $\eta_0 = a/r$

球-非球接触

形状因子  $G$  を用いる。  
(Niマクロンの場合  $G = 0.3$ )  
 $q(r) = G \cdot q_0(r)$

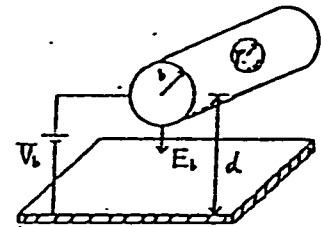
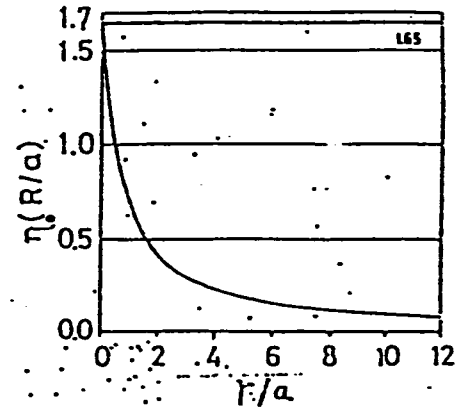
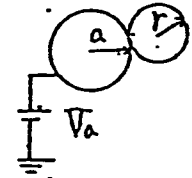
円柱-非球接触

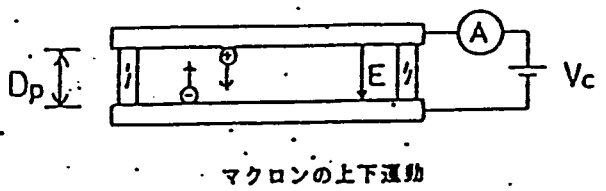
$$q_{cy}(r) = 4\pi\epsilon_0 r^2 G \eta_{cy} E_{cy}$$

$\eta_{cy}$  を正確に求めるのが難しい

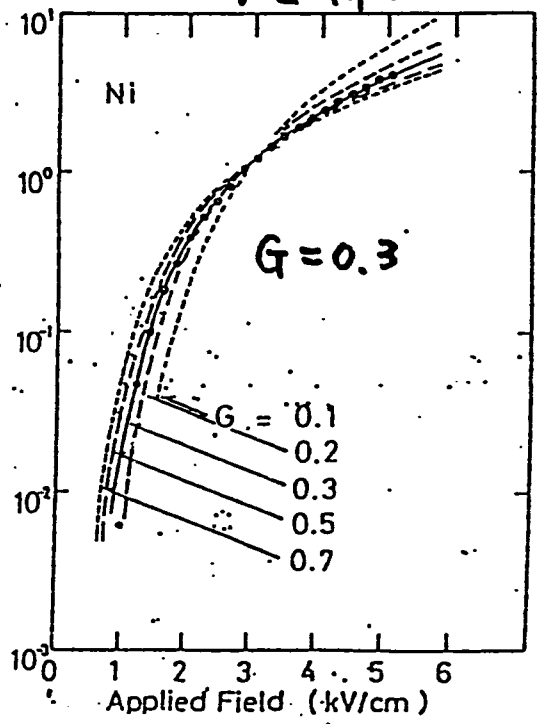
$$\eta_{cy} \approx \eta_0(r/b)$$

$$E_{cy} \approx E_b = \frac{Vb}{b \ln(2d/b)}$$





Current ( $\mu\text{A}$ ) **VI特性**



$$I(V) = N \int_0^{r_m} g \cdot \nu \cdot \phi \, dr$$

$$g = G \cdot 1.65 \cdot 4\pi \epsilon r^2$$

$$\nu = [t_{\uparrow} + t_{\downarrow}]^{-1}$$

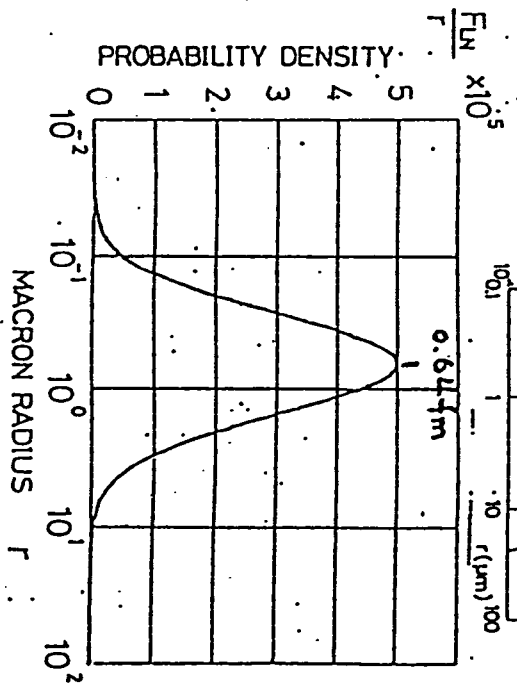
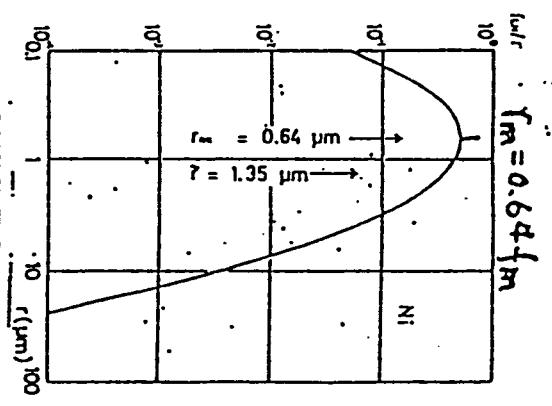
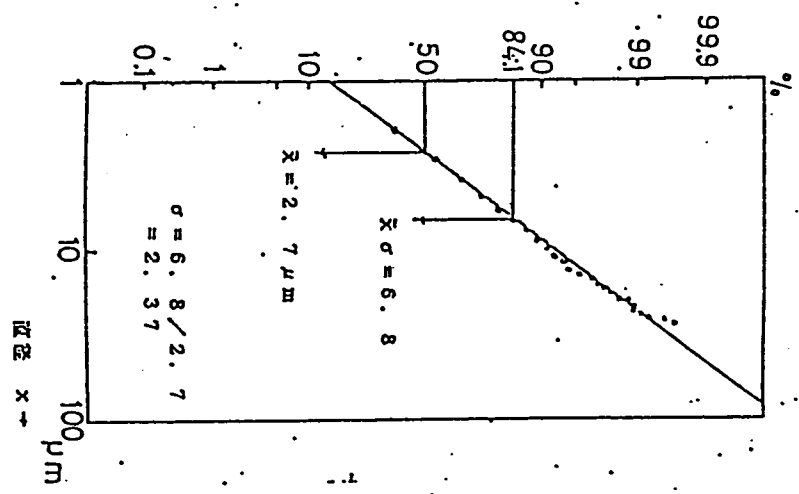
$\phi$  = 粒径分布

$r_m$ : Eで浮上する最大粒子半径

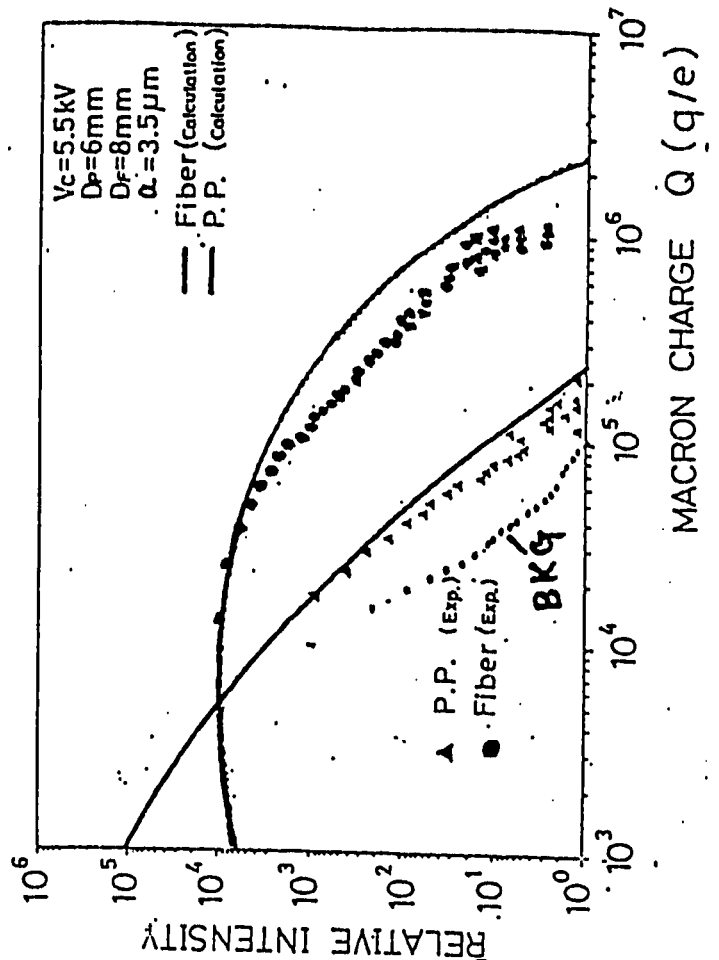
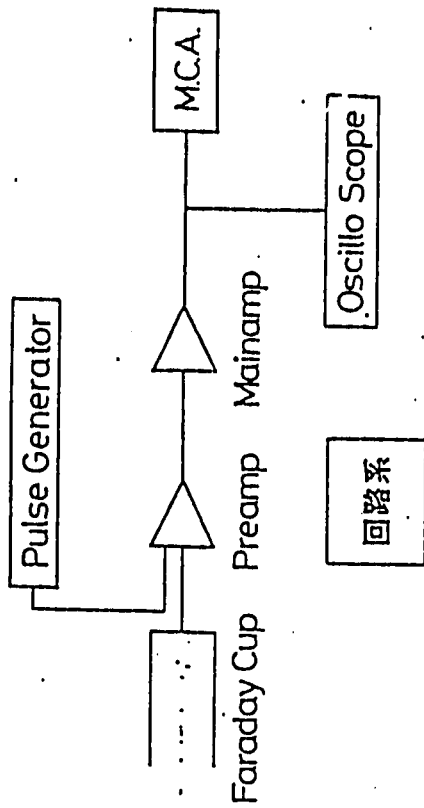
$$g \cdot E - m g = 0$$

### Ni粒子の粒径分布

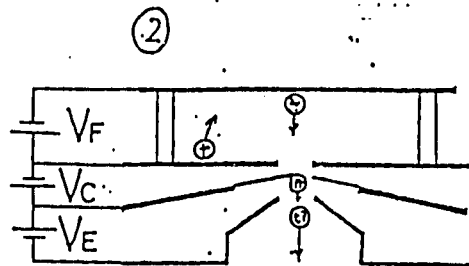
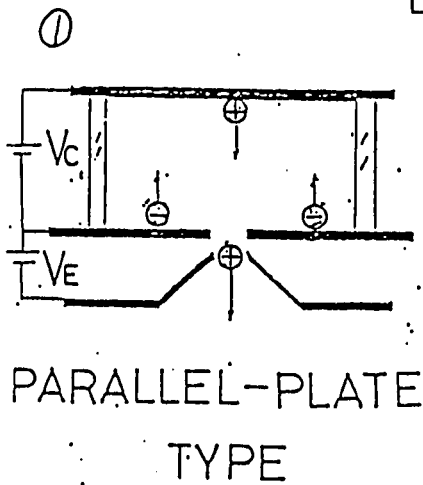
L.U.Z.E.X.5000による測定  
(対数正規分布) 20000AD



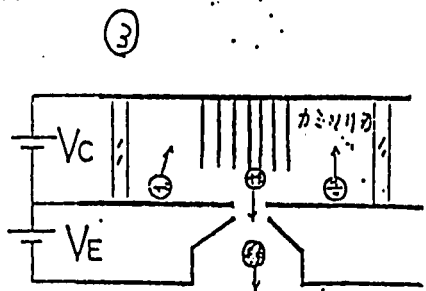
電荷分布の測定



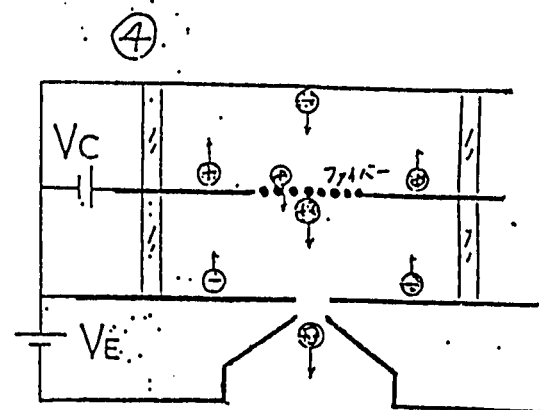
VL : 5.5kVの時電荷分布の実測値と計算値の比較



$\gamma \approx 4\mu m$   
衝突確率小



微粒子が刃間につき。

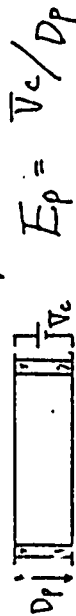


FIBER TYPE  
カーボンファイバー  
7  $\mu m \phi$

具体的な帯電量

平行平板型

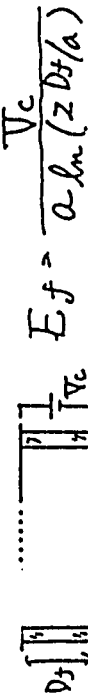
$$Q_p(r) = 5.49 \times 10^{-11} r^2 E_p$$



$$E_p = V_c / D_p$$

7711V-型

$$Q_f(r) = 3.33 \times 10^{-11} r^2 E_f \eta(r/a)$$

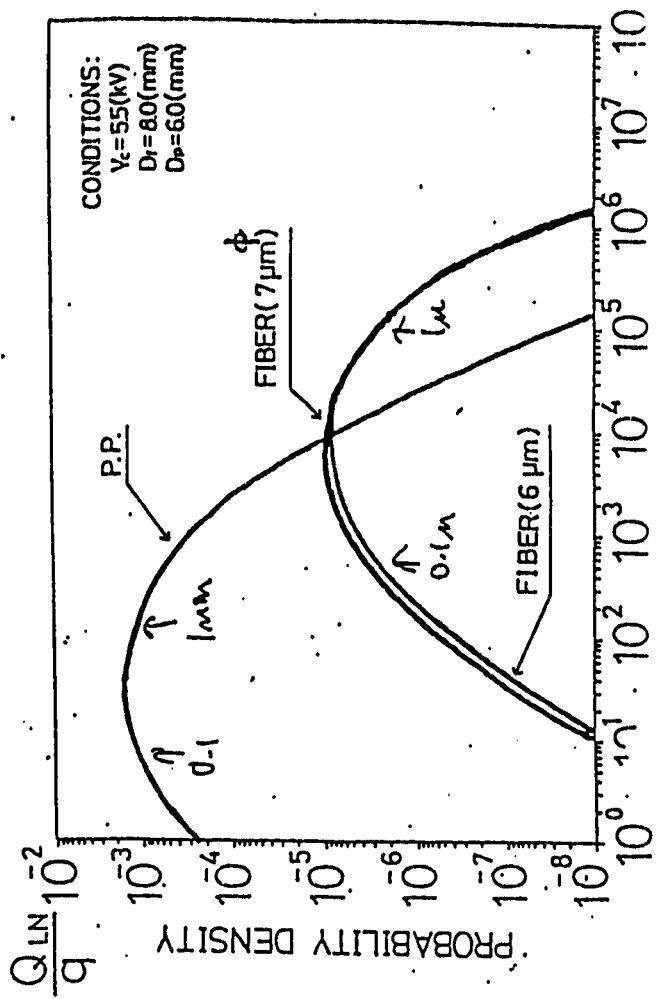
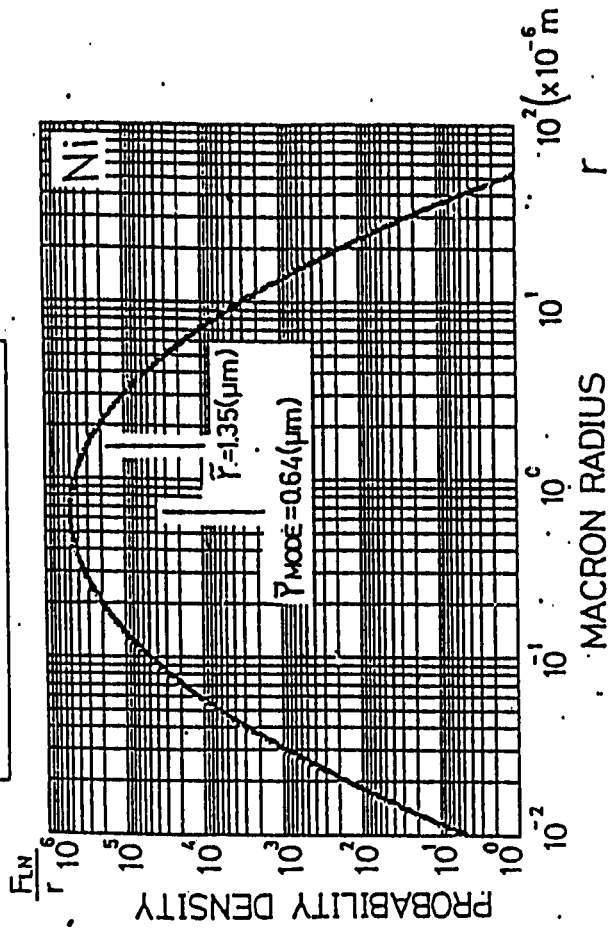


$$E_f = \frac{V_c}{a \ln(z D_f / a)}$$

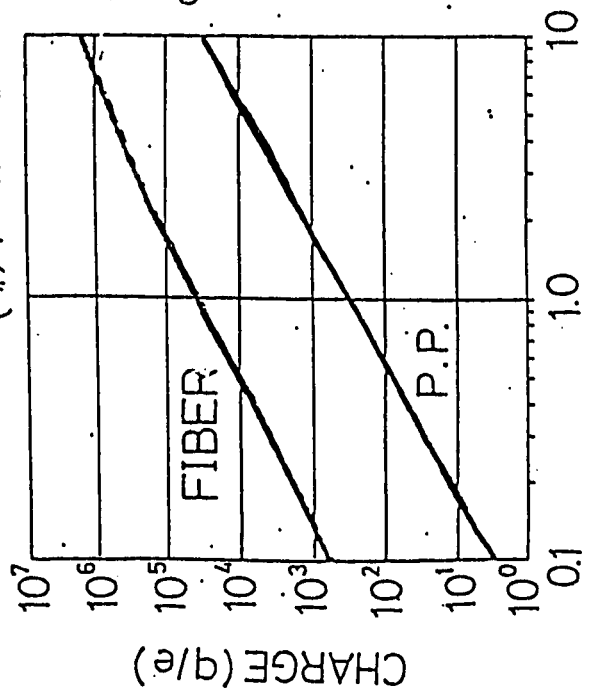
$$\eta(r/a) = \frac{1}{(1+r/a)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{r^k}{k} \ln \left( k \frac{r/a}{1+r/a} \right)$$

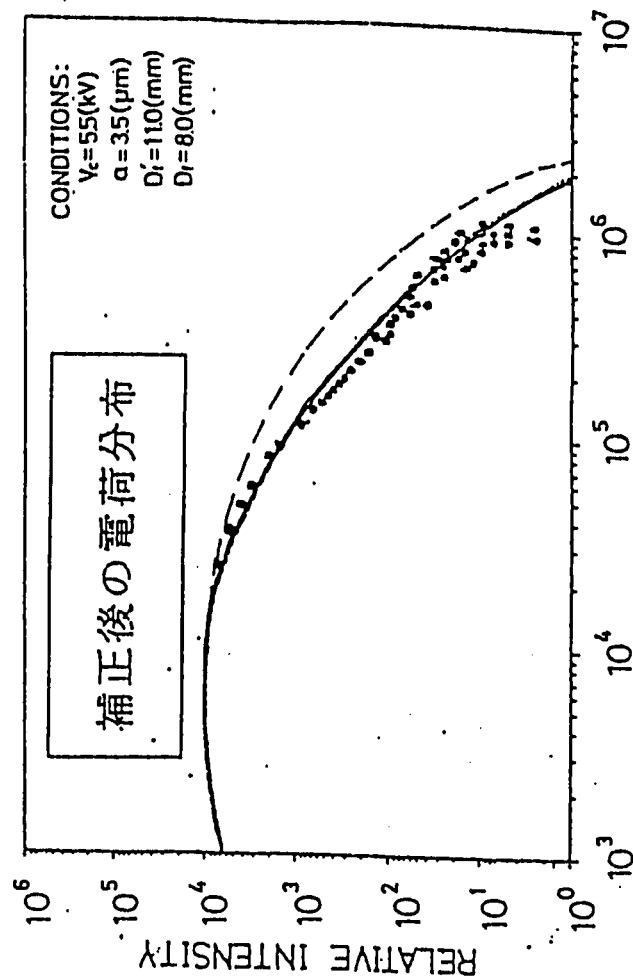
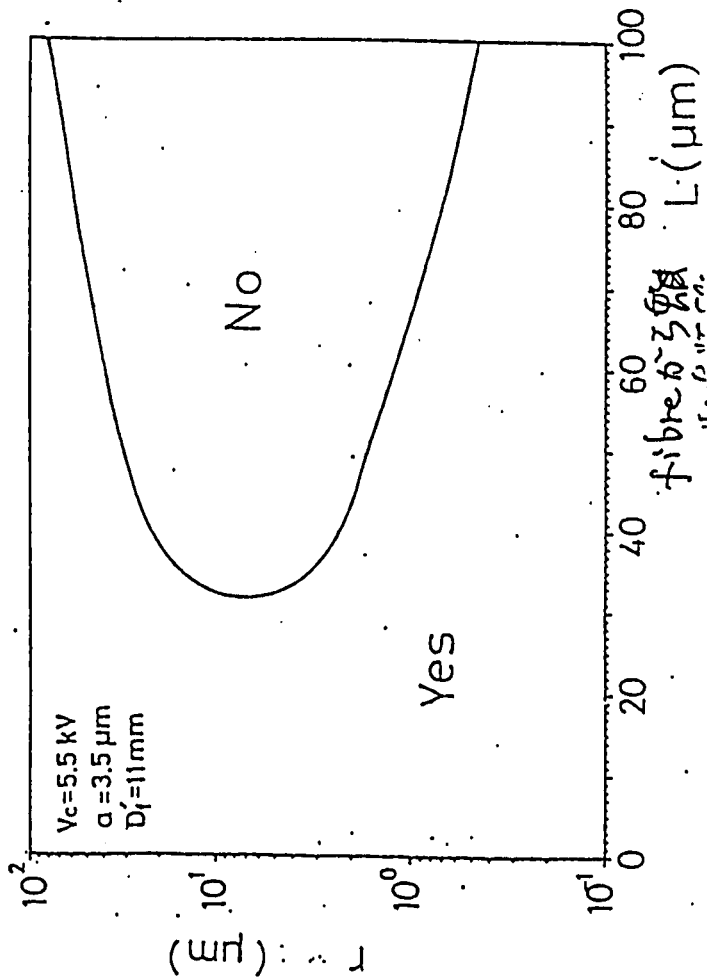
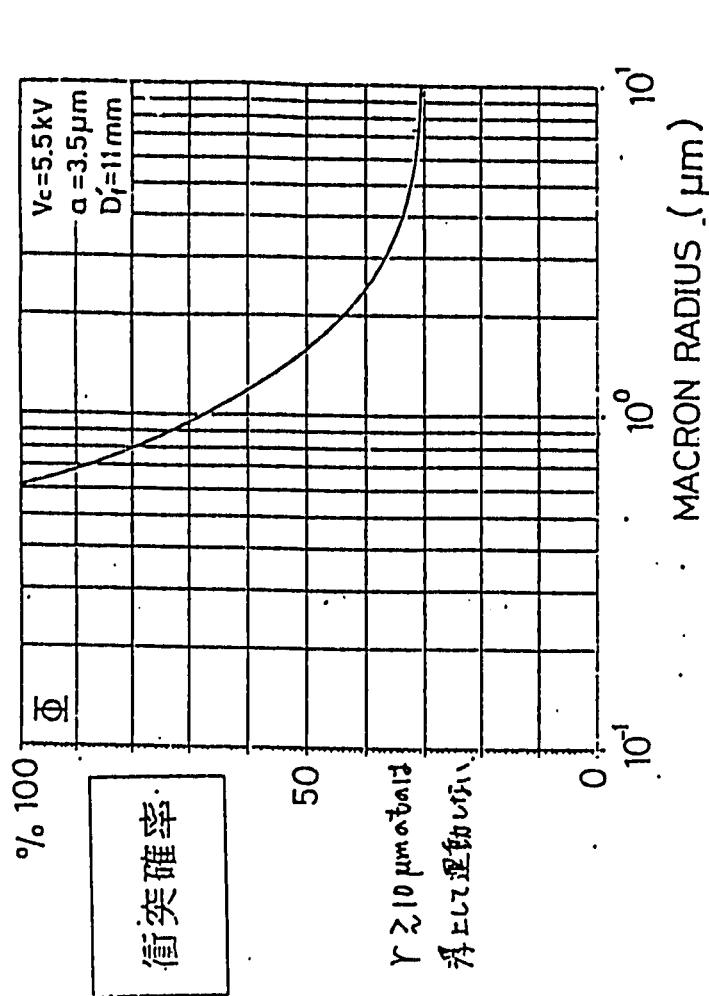
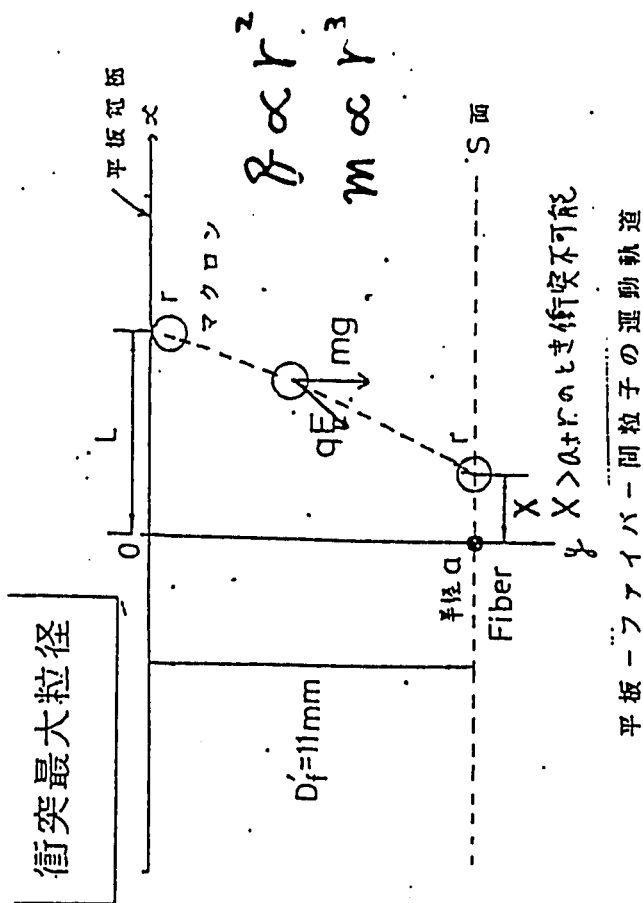
(約100倍の増加と予想)

粒径分布と電荷分布

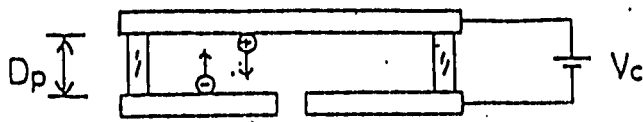


CONDITIONS:  
 $V_c = 55(\text{kV})$   
 $a = 3.5(\mu\text{m})$   
 $D_f = 80(\text{mm})$   
 $D_p = 60(\text{mm})$   
 $E_f \approx 10^2 E_p$

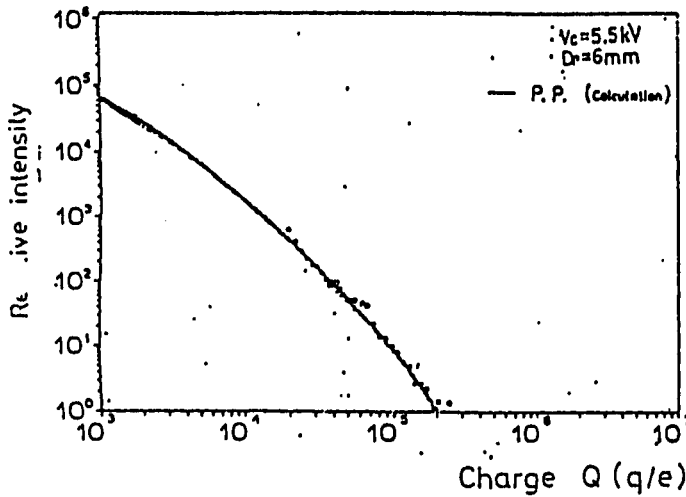




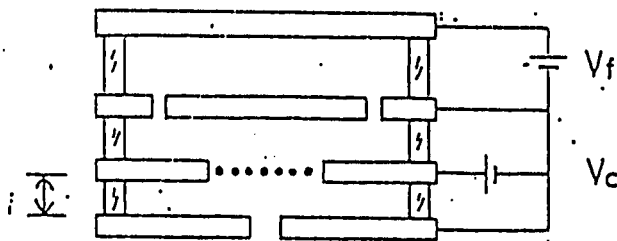
マクロン源の開発過程 1



(a) Parallel Plate type

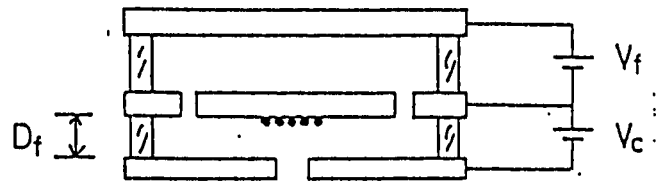


マクロン源の開発過程 2



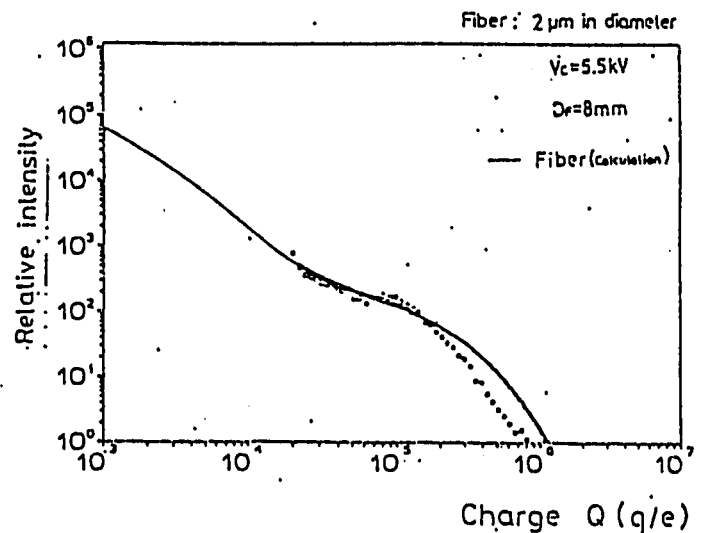
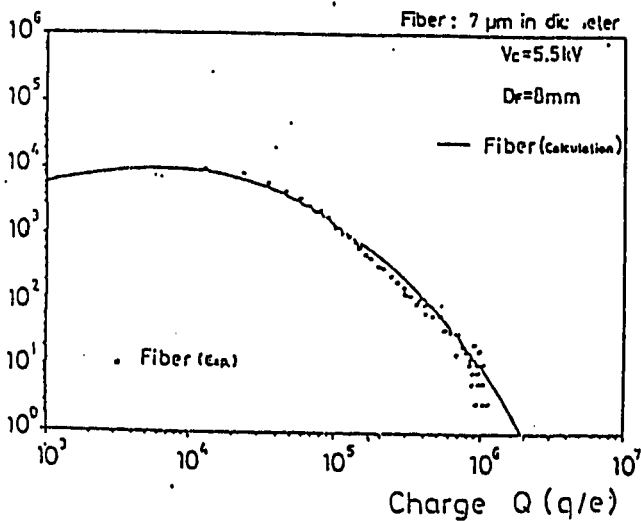
(d) Fiber type I

ファイバーが切れ3.

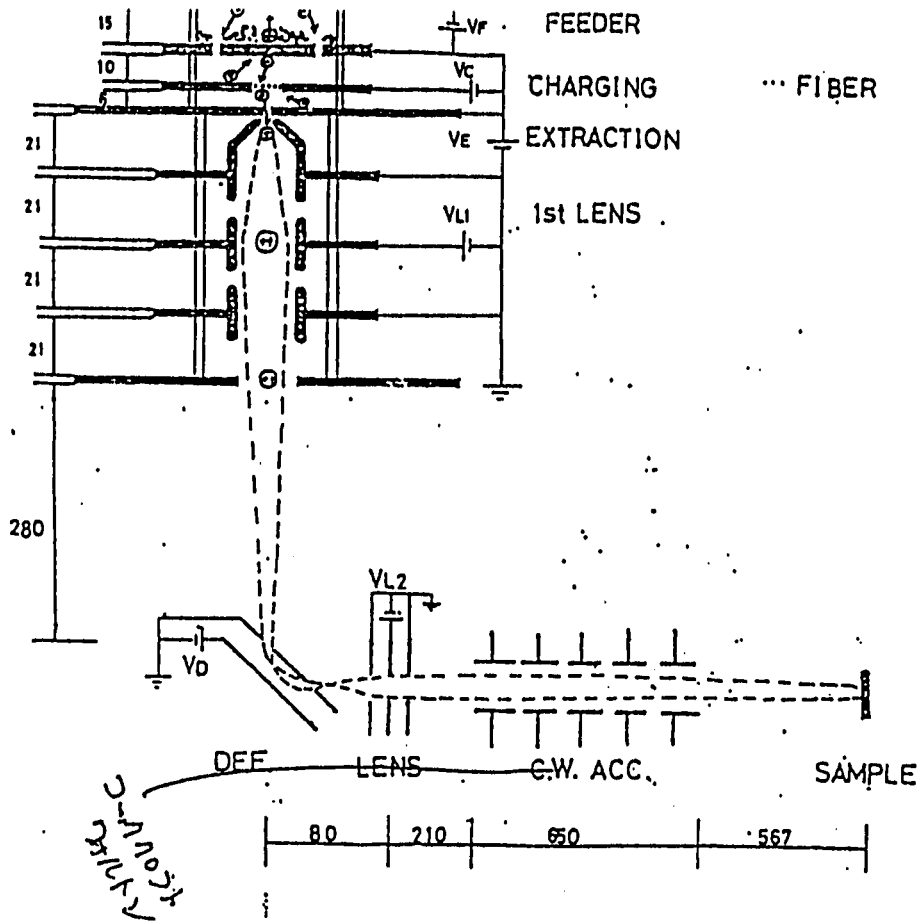


(e) Fiber type II

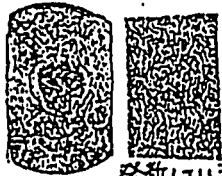
2 $\mu$ m $\phi$ (sus)でもOK!!



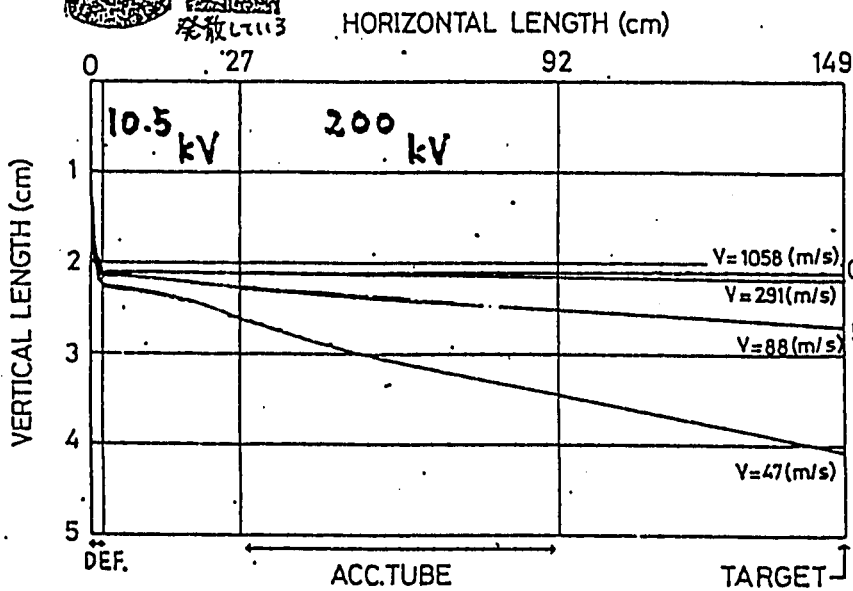




レンズ無し

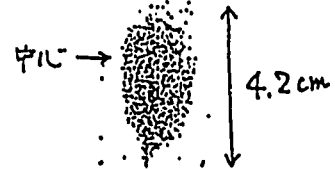
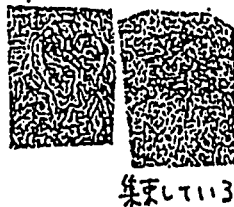


偏向器出射後の軌道



- CONDITIONS:
- $a = 3.5 (\mu m)$
  - $V_C = 5.5 (kV)$
  - $V_E = 5.0 (kV)$
  - $V_{L1} = 7.5 (kV)$
  - $V_D = 8.0 (kV)$
  - $V_{L2} = 7.5 (kV)$
  - $V_{ACC} = 200.0 (kV)$

レンズ有り



衝撃波の発生 RANKINE-HUGONIOT THEORY

\* 保存則

$$\begin{aligned} \rho_0 U_s &= \rho_1 (U_s - U_p) && \text{質量} \\ P_0 + \rho_0 U_s^2 &= P_1 + \rho_1 (U_s - U_p)^2 && \text{運動量} \\ E_1 - E_0 &= \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1) && \text{エネルギー} \end{aligned}$$

\* 保存則より

$$\begin{aligned} V_1 / V_0 &= (U_s - U_p) / U_s \\ P_1 &= \rho_0 U_s U_p + P_0 \\ U_p &= [ (P_1 - P_0) (V_0 - V_1) ]^{1/2} \end{aligned}$$

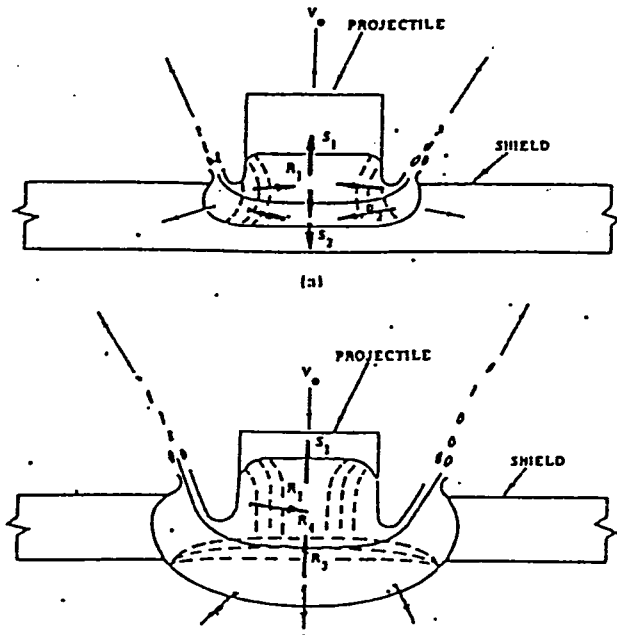
\* 測定可能な物理量

$$\begin{aligned} U_{fs} &= U_p + U_r \\ U_p &= U_{fs} / 2 \quad (U_p = U_r) \end{aligned}$$

\* 衝撃面

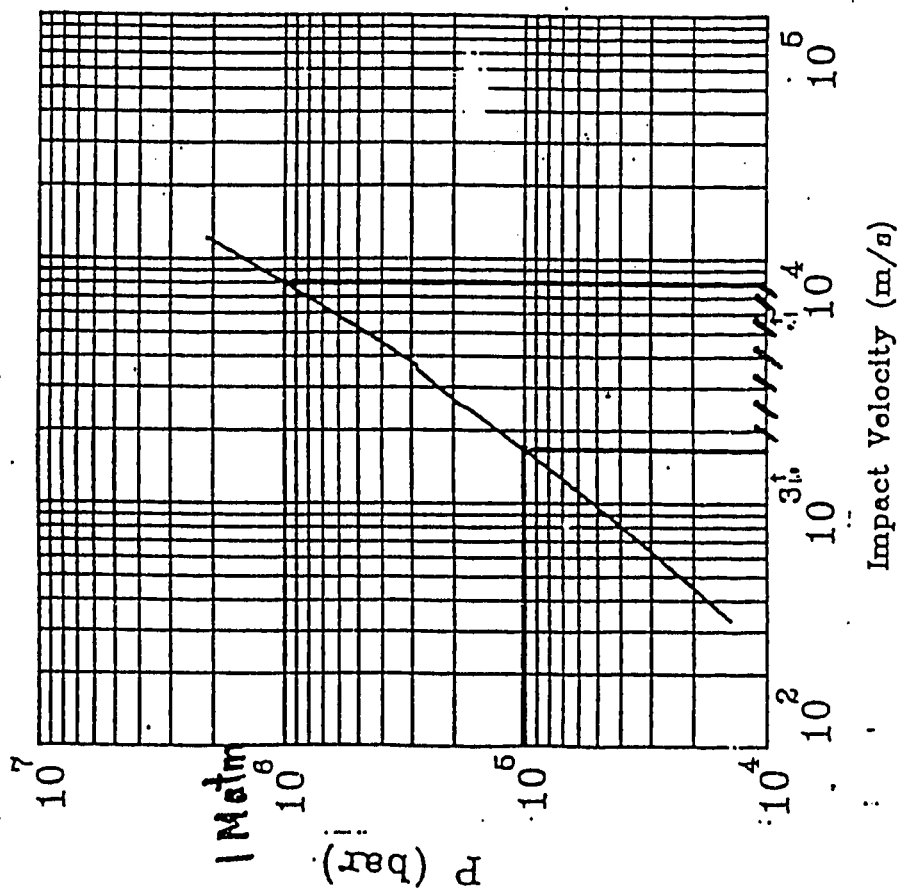
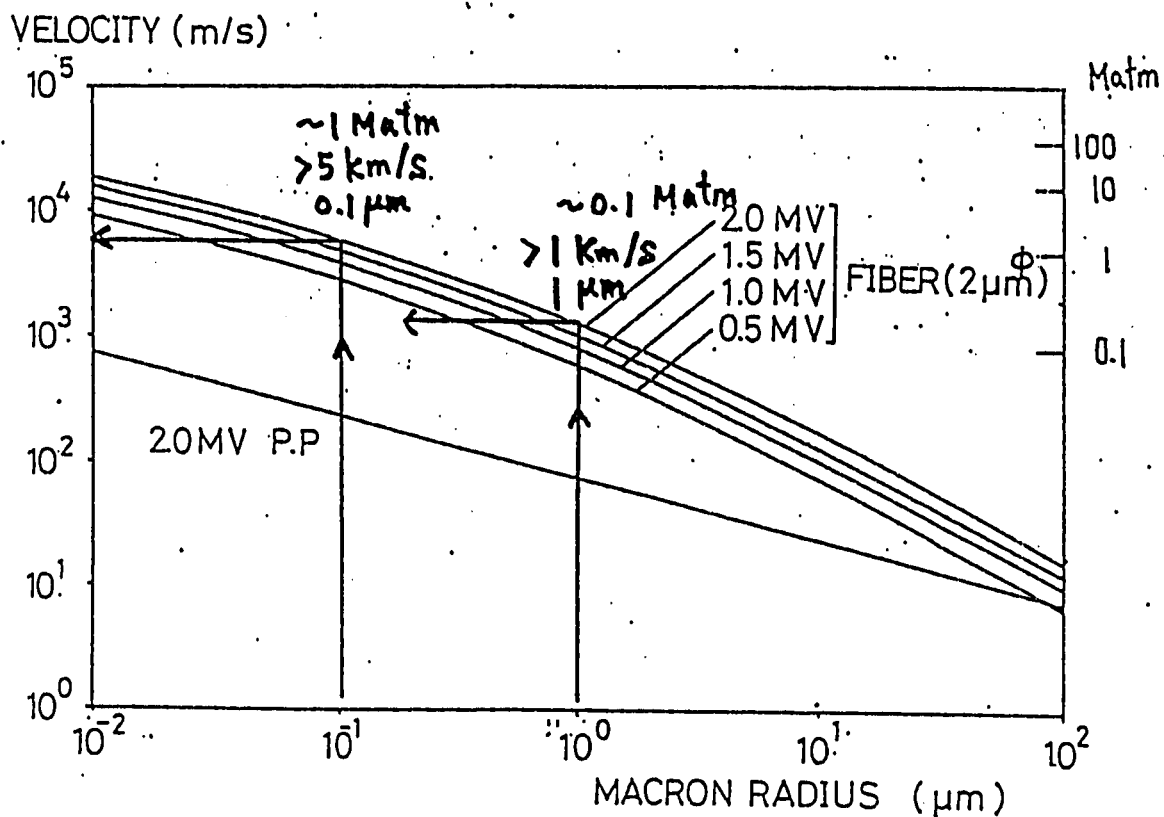
$$\begin{aligned} U_s &= A + B U_p \quad (\text{近似}) \\ P_i &= P_t \\ v - U_{p,i} &= U_{p,t} \\ P_i &= \rho_i U_{p,i} U_{s,i} \\ P_t &= \rho_t U_{p,t} U_{s,t} \\ \rightarrow v P_t \text{ 関係図} \end{aligned}$$

$\rho$ : DENSITY,  $U_s$ : SHOCK WAVE VEL.,  
 $U_p$ : SHOCK PARTICLE VEL.,  $P$ : PRESSURE,  
 $V$ : SPECIFIC VOLUME,  $E$ : SPECIFIC ENERGY  
 $U_{fs}$ : FREE SURFACE VEL.,  $U_r$ : RAREFACTION WAVE VEL.  
 0,1: BEFORE AND AFTER COLLISION  
 i,t: PROJECTILE AND TARGET  
 $v$ : PROJECTILE'S VELOCITY



薄膜での衝撃波の挙動

今回の実験でのマクロンビームの到達速度



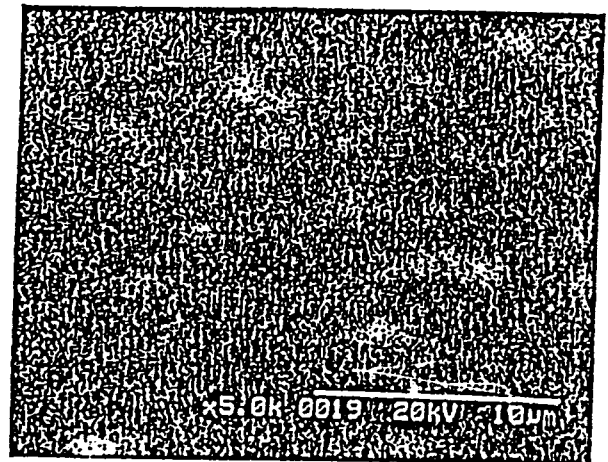
Cターゲットの場合の衝撃圧力

# ターゲット照射

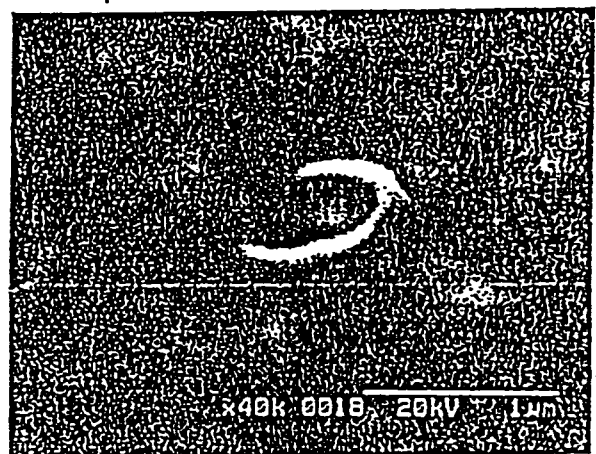
使用ターゲット：ガラス面に銀を蒸着したもの

照射時にターゲットの半分を覆う

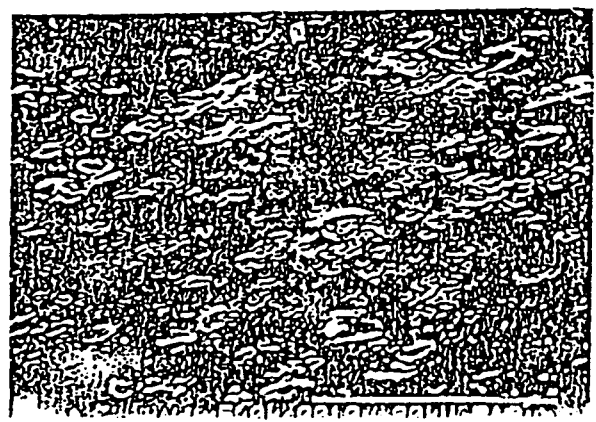
マクロン照射によるターゲット表面の変化



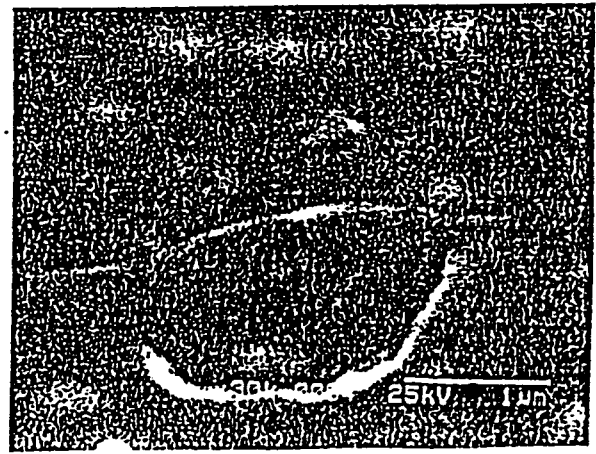
非照射部



2 M V  
銀蒸着



照射部

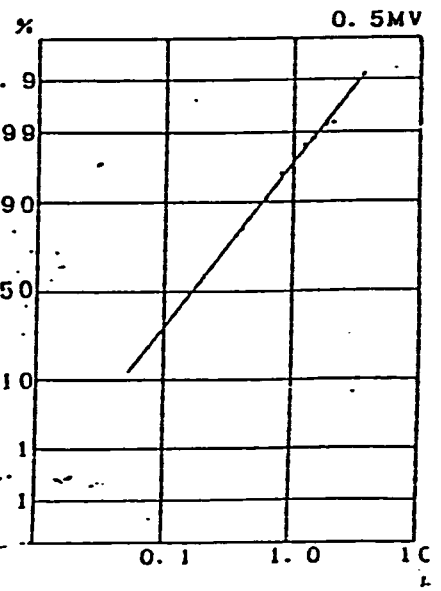
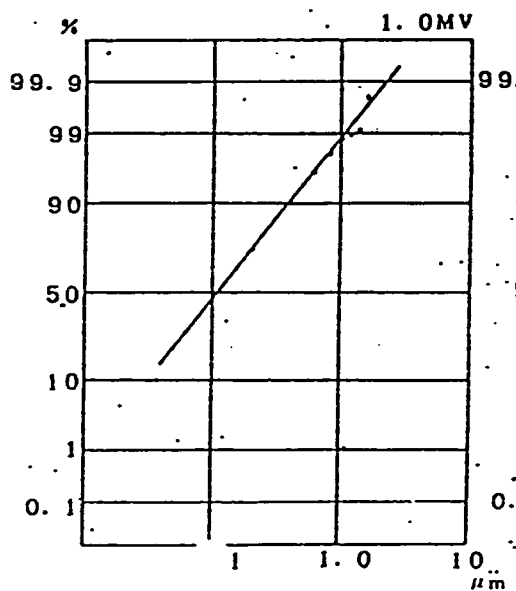
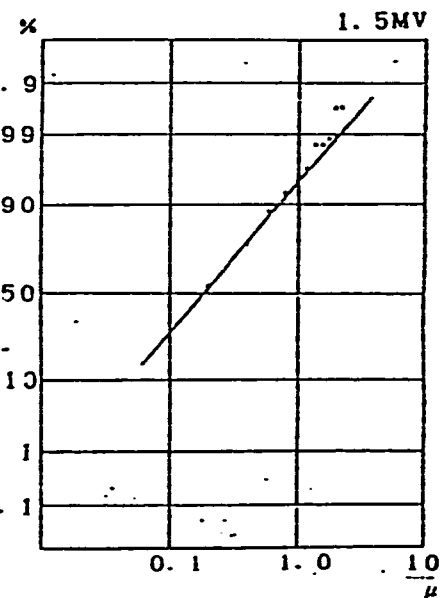
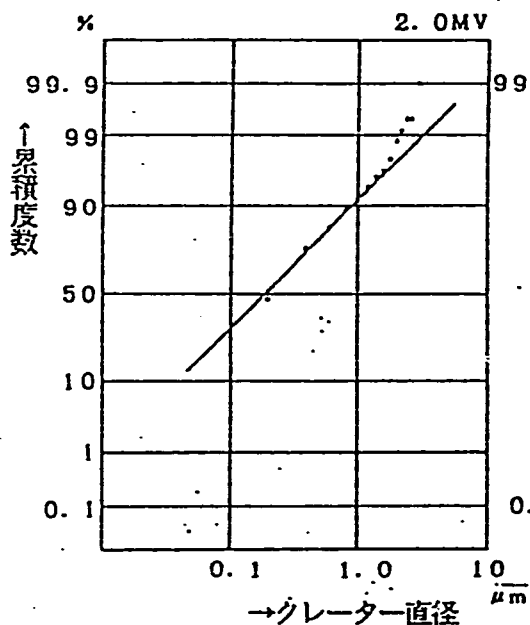
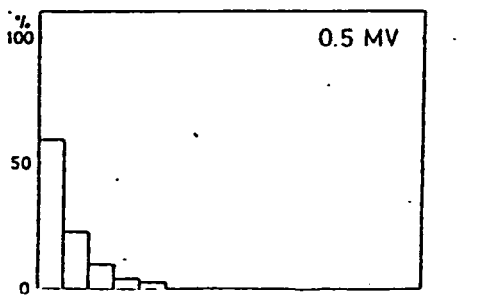
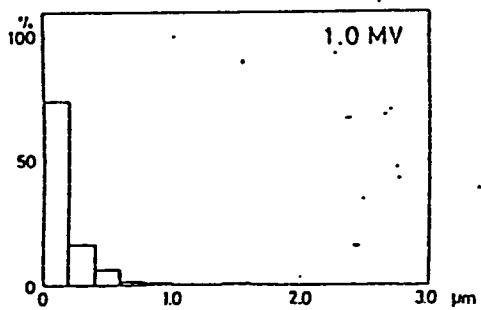
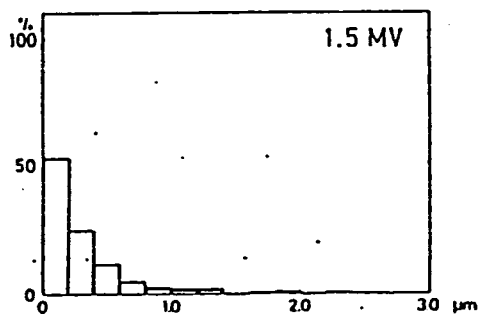
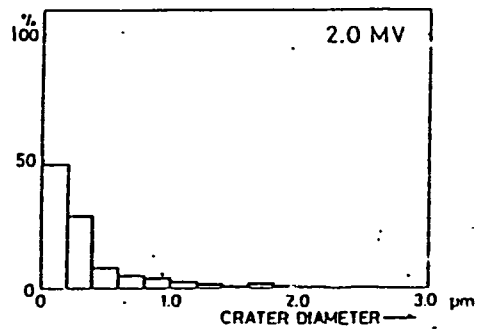


2 M V  
銅板

# クレーターの拡大図

# クレーター径分布の 対数正規確率紙へのプロット

クレーターの径分布

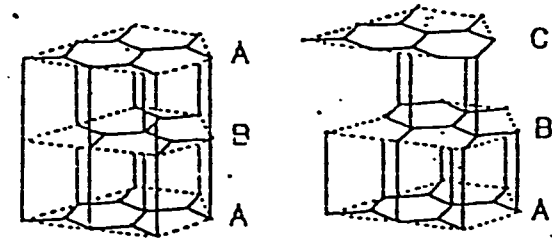


カーボンの構造

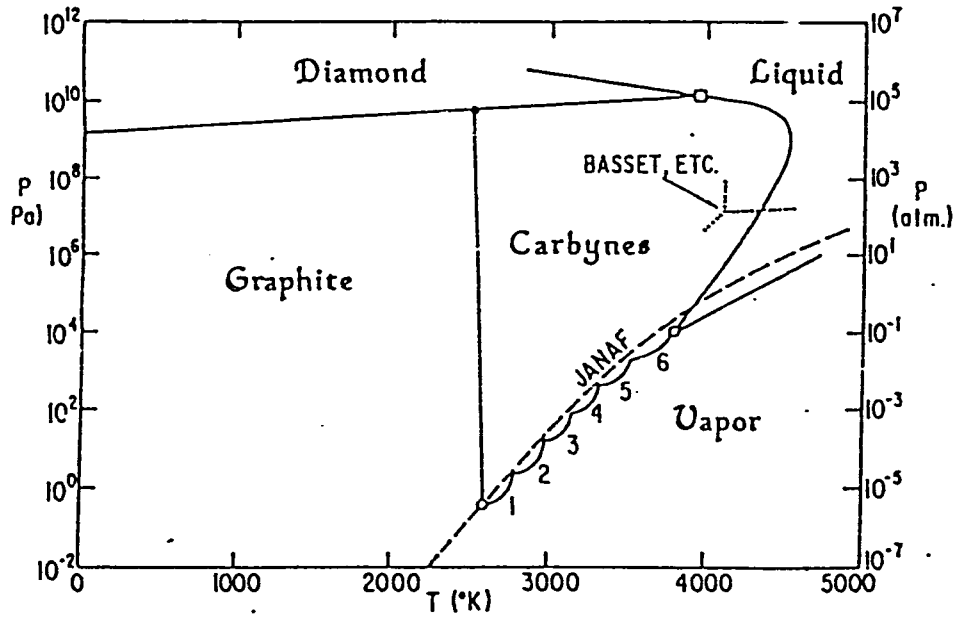
相変化

人工ダイヤモンドの製造

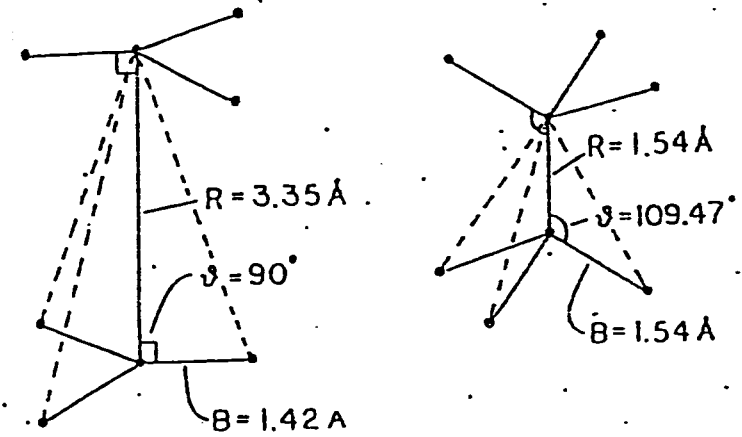
1. 溶媒法 (Fe, Co, Ni, + C)
2. 静的 高压 + 高温 > 10 GPa
3. 気相炭素化合物 + 水素の熱分解

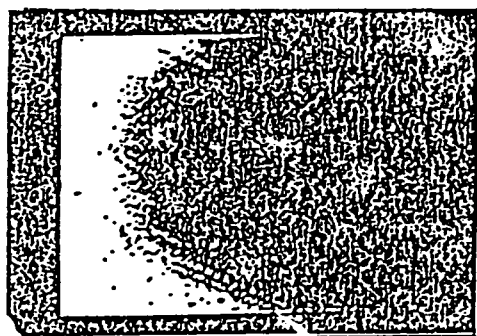


Hexagonal Rhombohedral

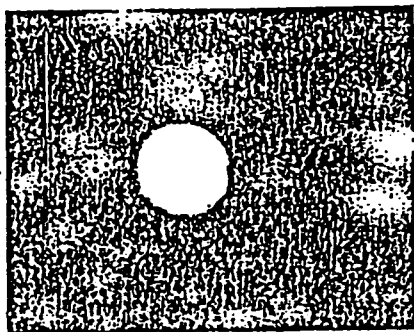


圧縮  
→





照射前のTEM像

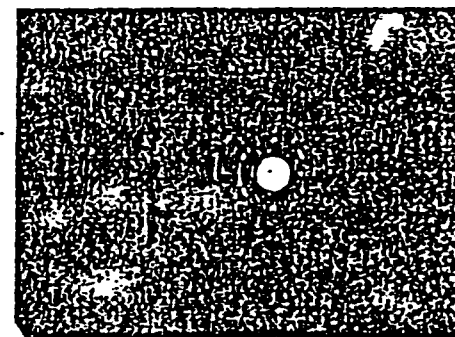


照射前の電子回折像



1 μm

照射後のTEM像2



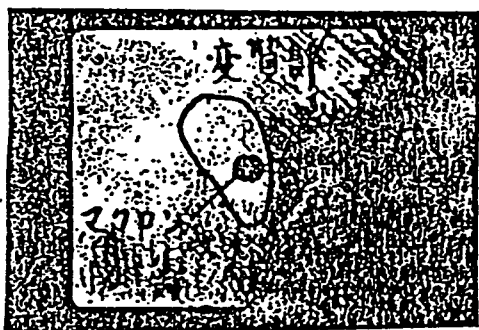
照射後の電子回折像2

変質部：中心付近一層状  
周辺一柱状

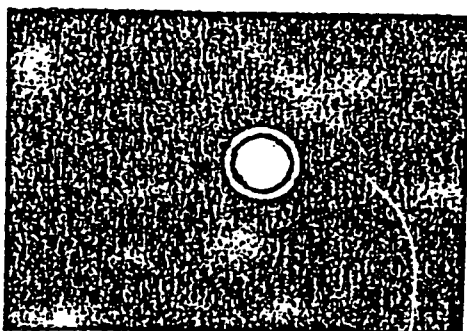
グラフマイト

(hkl)	r (nm)	d (Å) (理論)	d (Å) (測定)
002	4.2	3.37	3.41
100	6.6	2.13	2.17
004	***	1.68	****
110	11.25	1.23	1.28
200	1.31	1.07	1.10

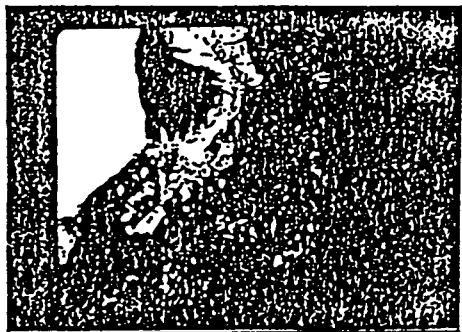
測定値と理論値の比較



照射後のTEM像1

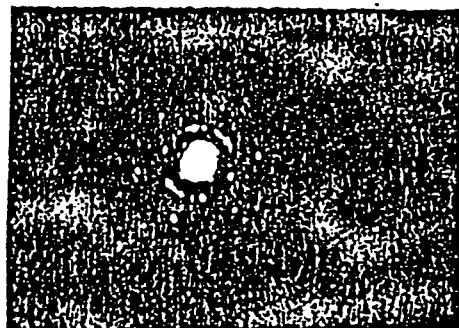


照射後の電子回折像1



1 μm

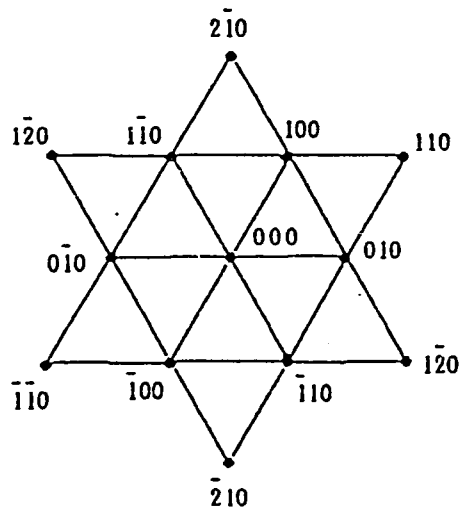
照射後のTEM像3



照射後の電子回折像3

マクロン照射直下  
：層状の変質

1  
方位の  
そった  
単結晶  
パターン



回折パターンの指数づけ

[001]入射 大才晶

(hkl)	d(Å)
002	3.37
100	2.13
004	1.68
110	1.23
200	1.07

Graphite

(hkl)	d(Å)
111	2.06
220	1.26
311	1.08
400	0.89
331	0.81

Diamond

Table 5-3 カーボンの面間距離

面間距離が近い面がいくつか存在する。

$$a = b = 2.464 \text{ \AA}$$

$$c = 6.736 \text{ \AA}$$

$$a = b = c = 3.5670 \text{ \AA}$$



## 4 - 2. 大電流でのビーム不安定性について

大電流でのビーム不安定性について  
KEK 佐藤 勇

§1 ビーム不安定性とは

電子ビームの不安定性は電子ビームが進行方向と直角な方向（トランスバース方向）の力を繰り返し受けた場合に発生する。例えば、電子ビームが加速空洞の横振動モード（ $TM_{11}$ ）と相互作用した場合や、電子ビームがベータートロン振動に同期した電磁力を繰り返し受けた場合に発生する。この不安定性現象は電子線形加速器で顕著に観測されるが、図1-1に示す様に電子貯蔵リングでも観測される。

電子線形加速器では、この相互作用の強さは加速ビームと加速空洞との間の空間的な対称性のずれに依存する。特に、ビームの進行方向に対して直角方向の対称性の崩れはビーム電流の不安定性に敏感である。これは図1-2に加速空洞のビーム発散モードに依存する。一般に、これらのモードの電界は図1-3に示す様に加速空洞の中心軸に対称であり、中心軸上には電界が存在しない。従って、ビーム電流が中心軸上通過する場合、電子ビームはこのモードと相互作用しない。一方、ビームの進行方向に対して平行な方向（ロングチュードナル方向）の対称性の崩れはビーム電流の不安定性に非常に敏感である。寧ろ対称性の崩れはビームの発散を抑えるためには歓迎される場合が多い。

ビームライン上に同じ形状の加速空洞が多数配置されると、電子ビーム電流によるビーム発散モード（ $TM_{11}$ ）の増幅作用を指数関数的に増強する。同一形状の加速空洞が連結している加速管の場合は、その増幅度は加速管の長さの3乗に比例する。これは短い加速管を利用する理由の1つである。しかし、各加速管の間の増幅作用の解析は非常に複雑である。増幅作用を小さくする方法の1つは、同じ形状の加速管によるビーム加速を行わない事である。

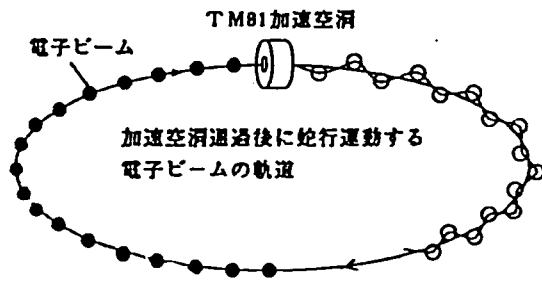


図1-1 リングのビーム不安定性

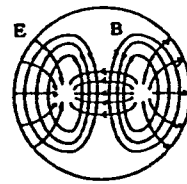


図1-2 加速空洞の $TM_{11}$ モード

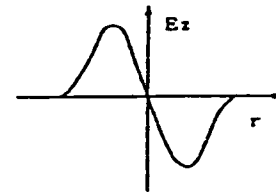


図1-3 加速空洞の $TM_{11}$ モードの $E_z$

§2 加速管のビーム発散特性

線形加速器に発生するビーム発散現象は、再生型と累積型に分類される。ビーム発散は再生型も累積型も同一構造の加速空洞がビームラインに配置される事に原因がある。再生型は、図2-1に示す様に、1本の加速管内で発生するビーム発散現象を言う。このビーム発散は同一加速空洞が多数連なる加速管（定インピーダンス型加速管）で顕著に発生する。累積型は、図2-2に示す様に、加速管をビームライン上に多数配置された場合に発生するビーム発散現象を言う。このビーム発散は各々の加速空洞構造が異なる小数の加速管（定電界型加速管）をビームラインに配置された場合は発生しない。しかし、多数の加速管を並べた場合に発生する。

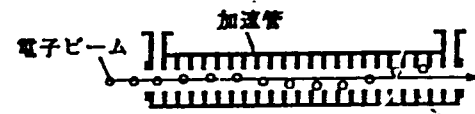


図2-1 再生型ビーム発散

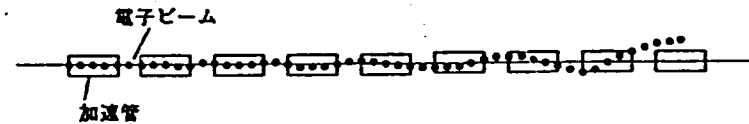


図2-2 累積型ビーム発散

ここでは、最も一般的な再生型ビーム発散について、解析して見よう。

4-139

2-1 再生型ビーム発散 [Regenerative beam blow up]

再生型ビーム発散は定インピーダンス加速管で顕著に発生する。定インピーダンス加速管のビーム発散は比較単純なので、その特性について考察して見よう。周期構造に於ける角周波数  $\omega = 2\pi$  と伝搬常数  $\beta = \pi/L$  の関係を表す分散曲線はバンドパス理論から図2-1の様になる。デスク負荷型加速管の加速モードを  $TM_{01}$ 、ビーム発散モードを  $TM_{11}$  ( $HEM_{11}$ ) とすると2つのモードは図2-3の上下の曲線に相当する。

円筒型加速空洞の  $TM_{11}$  モードの電磁界は図1-2に示すようになる。一般に  $TM_{11}$  モードでは中心軸上に  $z$  方向の電界  $E_z$  は存在しない。しかし、 $\pi/2$  だけ遅れた位相では、垂直方向の磁場  $B_\phi$  は中心軸上で最大値をしめす。

今、加速空洞を進行する電磁波の波動関数が  $e^{j(\omega t - \beta z)}$  で表されるものとする。高周波損失のないデスク型進行波加速管の  $HEM_{11}$  モードの電界  $E_z$  は  $H_{a1}$   $H_n$  等によって<sup>1)</sup>

$$E_z = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{J_1(k_{r,n} r)}{J_1(k_{r,n} a)} \cos \phi e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1)$$

で与えられた。ここで、 $\phi, r, z$  は円筒座標系、 $a_n$  と  $\beta_n$  は  $n$  次の空間高調波の振幅と伝搬係数、 $a$  は加速管のデスク穴径、 $k_{r,n}^2 + \beta_n^2 = k^2$ 、 $k = \omega/c$  をそれぞれ表す。加速空洞の横方向のシャント抵抗  $r_{11}$  は定義より

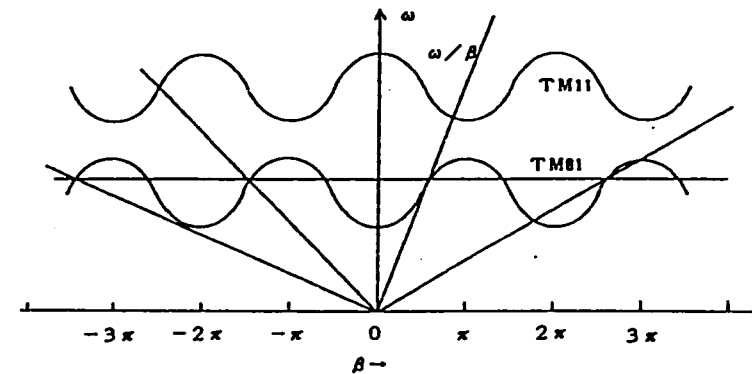


図2-3 周期構造の  $\beta-\omega$  curve

$$r_{11} = \frac{[\frac{1}{\beta_n} \frac{\partial E_{z,n}}{\partial r}]^2}{|\frac{dP}{dz}|} \quad (2)$$

で表される。 $TM_{11}$  モードに近い  $HEM_{11}$  モードの電磁界は

$$E_r \propto J_1(kr) \cos \phi \quad (3)$$

$$B_\phi \propto -j \left[ \frac{J_1(kr)}{kr} \right] \sin \phi \quad (4)$$

$$B_z \propto -j J_1'(kr) \cos \phi \quad (5)$$

$$E_z = E_\theta = B_r = 0 \quad (6)$$

で近似される。ここで、 $J_1(kr)$  は1次のベッセル関数であり、 $k$  は伝搬常数で  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  を変し、 $\lambda$  は管内波長である。円筒座標系の中心軸を原点として、その付近を  $x-y$  の座標系 (水平方向を  $x$  軸、垂直方向を  $y$  軸) で展開すると、 $TM_{11}$  モードは  $r \rightarrow x$ 、 $\phi \rightarrow y$  の座標に展開できる。ここで、 $TM_{11}$  モードの電磁界が中心軸近傍では電磁界を線形に展開できると仮定する。仮に、中心軸付近に於ける  $x$  方向の  $E_r$  の変化量を  $(\partial E_r / \partial x)$  とすると、 $E_r(x)$  は  $\partial E_r / \partial x$  と中心軸からのずれ  $x$  の積で表される。又、 $B_\phi$  は  $r \rightarrow 0$  では

$$J_1'(kr) = \frac{J_1(kr)}{kr} - J_2(kr) \approx \frac{J_1(kr)}{kr} \quad (7)$$

であるから (3)、(5) より

$$E_r \approx \left( \frac{\partial E_r}{\partial x} \right) x \quad (8)$$

$$B_\phi \approx -\frac{j}{k} \frac{\partial E_r}{\partial x} \quad (9)$$

で表される。光速に近い電子が加速管の中心軸近傍を進行すると水平方向にローレンツ力 ( $F = e[E + v \times B]$ ) を受ける。図2-3に示す様に、長さ  $L$  の加速管を通過中に受ける電子の水平方向の運動量の増加量は

$$\Delta P_x = e \int_0^L \left[ E + \left( \frac{v}{c} \right) \times B \right] \cdot \frac{dz}{v} \approx \frac{j e}{k c} \int_0^L \frac{\partial E_r}{\partial x} dz \quad (10)$$

である。ここで、 $v$  は電子の速度である。

一方、電子の水平方向の運動量増加は電子が加速度を受けた事を意味する。電子が加速度を受けると電磁波を放出、或いは、電磁波を吸収する。即ち、電子が加速空洞と相互作用しエネルギーを授受する事になる。そのエネルギーを  $\nabla U$  とすると、 $\nabla U$  は

$$\nabla U = -mc^2 \nabla \gamma = -e \int_0^L \frac{\partial E_r}{\partial x} x dz \quad (11)$$

で表される。ここで、 $v$  は電子速度であり、 $\gamma$  はローレンツ因子で  $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$  である。斯くして、電子は加速空洞の水平成分電界で積分した横方向の運動量を受取るが、もし電子の横方向の変位が電界の符号と反対なら、

正のエネルギー増加を電界に分け与える事になる。

もう少し詳しく説明すると次の様になる。加速管に励起された電磁界は各加速空洞の中心軸上の穴を通じて結合し、ここで空洞から空洞へ適当な位相で伝搬していると仮定している。TM<sub>11</sub>モードを利用した高周波空洞は電子ビームの偏向分離装置として使用されている。

デクス負荷型加速管ではTM<sub>11</sub>モード以外にTE<sub>11</sub>モードも電子ビームを偏向する。これらのモードは縮退している場合が多い。この縮退モードをHEM<sub>11</sub>と呼ぶ。HEM<sub>11</sub>モードの電磁波は電子速度と少しずれる。このモードの位相速度をv<sub>0</sub>とするとこの電磁波はe<sup>-j(ωt - βz)</sup>の波動関数で伝搬する。

もし加速管を通過中の電子の位相スリップが約πである場合、電子の偏向振幅は最大になる。周期構造の加速管では、一般に位相スリップが最適化された周波数があり、大多数のビームの不安定はこの周波数付近で発生する。

今、周期構造の加速管には、既に記述した電子偏向の仕組みに加えて、帰還作用の仕組みもあり、再生作用が起こり増幅作用は大きく増加する。この時、もしビーム電流がある値を越えると、このビームによって発生した高周波電力は加速空洞から流れだし、そして、初期の雑音信号は徐々に増進し再生発振が始まり、この電界はビームが加速管の壁に衝突するまで増大する。この帰還作用はHEM<sub>11</sub>モードが後進波であるか、又は、加速管の終端からの反射波によって維持される。

【発散開始電流】

次に発散開始電流について考察する。HEM<sub>11</sub>モードは図2-3に示す様にTM<sub>01</sub>加速モードの上部にある。HEM<sub>11</sub>モードは負の群速度を持つ。即ち、v<sub>0</sub> = -|v<sub>0</sub>|である。一次近似ではHEM<sub>11</sub>モードの伝搬常数をβとすると

$$\beta \approx \beta_0 + \frac{\partial \beta}{\partial \omega} (\omega - \omega_0) = \beta_0 - \frac{\omega - \omega_0}{|v_0|} \quad (12)$$

で表される。ここで、β = ω/v<sub>0</sub>、v<sub>0</sub>は位相速度、ω<sub>0</sub>はv<sub>0</sub> = cに於ける周波数、ωはビームが発散する共振周波数を表す。

後進波発振に対する開始電流は、ビームによって励起される高周波電力が加速管を伝搬するTM<sub>11</sub>モード電力に等しい場合である。

ビーム電流をI<sub>0</sub>、ビームの電流密度をi = I<sub>0</sub>/S<sub>0</sub>とすると、単位長さ当たりのビームが励起する電力(∂P<sub>0</sub>/∂z)のrf周期の時間平均値は

$$\frac{\partial P_0}{\partial z} = -\frac{1}{2} R_0 \int [E^* \cdot i] \cdot dx dy \quad (13)$$

である。又、これを加速管の長さLに渡って積分すると、ビームが加速管に誘起する高周波電力P<sub>0</sub>は

$$P_0 = -\frac{1}{2} I_0 R_0 \int_0^L \left[ \frac{\partial E_0}{\partial x} \cdot x \right] \cdot dz \quad (14)$$

で表される。[]はz=0でt=τなる時刻を示し、t = τ + ∫<sub>0</sub><sup>z</sup> dz'/v(z')の時間経過で電子軌道に沿って数値を求める事を意味である。(14)のxはビ-

ーム電流の初期条件、即ち、rf電磁界で発生する偏向は(10)を積分によって得られる。

$$x(z, t) = \frac{j e}{c k} \int_0^z \frac{dz'}{p(z')} \left[ \int_0^z \frac{\partial E_0}{\partial z} \right] \dots dz'' \quad (15)$$

ここで、pは電子の運動量であり、(p < p<sub>0</sub>)ではp = mc(γ<sup>2</sup> - 1)<sup>1/2</sup>で表される。E(z, τ)を非常に緩やかに変化する振幅関数であると

$$\frac{\partial E_0}{\partial x} = k E(z, \tau) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (16)$$

で定義される。(14)、(15)、(16)から

$$P_0 = -\frac{1}{2} k \frac{e I_0}{c} R_0 \int_0^L dz \int_0^z \frac{dz'}{p(z')} \int_0^z \phi(E) dz'' \quad (17)$$

となる。ここで、φ(E)は

$$\phi(E) = E^*(z, \tau) E(z'', \tau) e^{j(\beta(z) - \beta(z''))}$$

で与えられ、Δ(z)、δβはそれぞれ

$$\Delta(z) = \int \delta \beta(z') \cdot dz$$

$$\delta \beta = \omega \left( \frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right) = (\omega_0 - \omega) \left( \frac{1}{v_0} - \frac{1}{c} \right) - k \left( \frac{c}{v} - 1 \right) \quad (18)$$

で表される。(17)は0次近似ではp(z')とE(z, τ)は1定である。その結果、P<sub>0</sub>は

$$P_0 \approx 2k \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{e}{pc} \right) I_0 |E|^2 g_2(\alpha) \quad (19)$$

で表される。ここで、αは位相スリップ変数でα = Lδβで与えられる。

g<sub>2</sub>(α)は

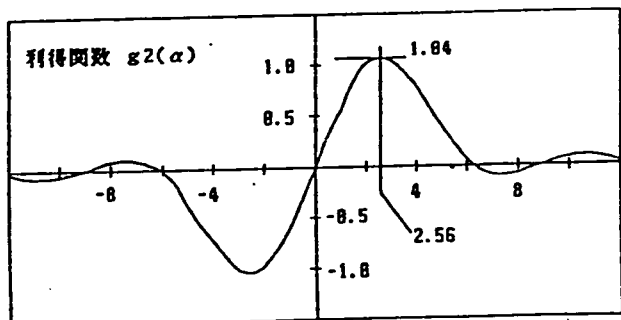
$$g_2(\alpha) = \left( \frac{1}{2} \right) \left\{ \frac{1 - \cos \alpha - \frac{1}{2} \alpha \sin \alpha}{\left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2} \right\} \quad (20)$$

で与えられる。ビームを不安定にする高周波電力P<sub>0</sub>の最大値は位相スリップ変数がα = 2.65の場合で、このときのg<sub>2</sub>はg<sub>2</sub>(α) = 1.04である。g<sub>2</sub>(α)をグラフにすると図2-4の様になる。

加速管の電界減衰係数をα<sub>0</sub> (neper/m)とすると、単位長さあたりの高周波電力損失はdP/dz = -2α<sub>0</sub>Pである。これと(4-2)に定義されたシャント抵抗と電界強度の関係を使って加速空洞を伝搬する高周波電力P<sub>0</sub>は

$$P_0 = \frac{|E|^2}{\alpha_0 r_1} = \frac{v_0 Q}{\omega r_1} |E|^2 \quad (21)$$

で表される。ここで、 $\alpha_1 = \omega / 2 v_p Q$ である。



スリップパラメーター ( $\alpha$ )

図 2-4 周期構造における  $TM_{11}$  モードの利得関数

Wilson は加速空洞の構造係数 ( $r_1/Q$ ) を

$$\left(\frac{r_1}{Q}\right) \sim \left(\frac{2\eta l}{\lambda L}\right) \left(\frac{E_1}{\rho_{11} J_0(\rho_{11})}\right) \quad (22)$$

で近似した。ここで、 $\eta$  は自由空間に於けるインピーダンスで  $\eta = 377 \Omega$ 、 $l$  は  $HEM_{11}$  モードが加速空洞との有効結合長、 $\rho_{11}$  はベッセル関数  $J_1$  の最初の根の値で  $\rho_{11} = 3.82$ 、 $J_0(3.82) = -0.403$  である。又、 $l$  は  $D$  を円筒空洞の長さ、 $t$  をデスクの厚さとする  $l \sim (D-t)$  で近似できる。 $g_1$  はトランジット時間係数で

$$g_1 = f\left(\frac{a}{b}\right) \left[ \frac{\sin\left(\frac{\beta_p(D-t)}{2}\right)}{\beta_p(D-t)} \right] \sim \frac{\sin\left(\frac{\beta_p l}{2}\right)}{\left(\frac{\beta_p l}{2}\right)} \quad (23)$$

で与えられる。ここで、 $a$  は加速管のデスクの穴半径、 $b$  は加速管の円筒空洞の内半径、 $\beta_p = \beta_p = 2\pi/\lambda_p$  であり、 $\lambda_p$  は管内波長を表わす。

$\beta_p = 2\pi/\lambda_{11}$  とすると位相スリップ変数  $\alpha$  は

$$\alpha = \beta_p L_1 - \frac{\omega L_1}{v_p} = \beta_p L_1 \left(1 - \frac{v_p}{v}\right) \quad (24)$$

で表される。ここで、 $v_p$  は  $TM_{11}$  モードの位相速度である。

ビームが不安定になる電流  $I_0$  は (21) の高周波電力  $P_1$  が (19) の  $P_0$  と等しくなる場合である。このときに再生型後述波共振が発生する。<sup>21)</sup>

不安定性の発生開始電流  $I_0$  は (18) の  $P_0$  と (21) の  $P_1$  が等しい場合に発生すると仮定すると

$$I_0 = \left(\frac{p c \pi \beta_p}{e g_2(\alpha)}\right) \left(\frac{Q}{r_1 \lambda_{11}}\right) \left(\frac{\lambda_{11}}{2 L_1}\right) \quad (25)$$

で与えられる。ここで、 $p$  は電子ビームの運動量、 $\beta_p$  は群速度を  $v_p$  とすると  $\beta_p = v_p/c$ 、 $\lambda_{11}$  は  $TM_{11}$  モードの管内波長である。これまではビームの運動量の変化を無視したが、Wilson は加速管を通過する間のビームの運動量変化を考慮した補正を行った。その補正関数  $F_1(\zeta)$  は

$$F_1(\zeta) = \left(\frac{\zeta-1}{6\zeta}\right)^2 \left(\frac{(\zeta-1)^2}{2} + \zeta - 1 - (\ln \zeta)\right)^{-1} \quad (26)$$

で与えた。ここで、 $\zeta$  は加速管を通過する前の運動量を  $P_0$  とし通過後の運動量を  $P_1$  とすると  $\zeta = P_1/P_0$  で与えられる。 $\zeta$  が大きい場合、 $F_1 \approx 0.3$  となる。

大電流線形加速器では加速空洞の高次モード ( $TM_{11}$ ,  $HEM_{11}$ , etc) と電子ビームが相互作用し、高次モードの横方向の電磁界によってビーム自身が偏向される。このモードとビームとの相互作用の強さは、電子ビーム電流、高次モードのシャント抵抗  $r_1$ 、相互作用の長さ  $L_1$ 、ビームの通過する場所の中心軸からのずれ等に関係する。

陽子線形加速器の定在波加速管に於けるビーム不安定性は Gluckstein<sup>22)</sup> が最初に解析を行った。電子線形加速器のビームが不安定になる電流値の簡単な解析は超伝導空洞について Wilson<sup>23)</sup> が行った。Wilson は (18) 式を

$$\frac{1}{K} \frac{\partial E_x}{\partial x} = E_1 e^{i(\omega t - \beta_p z)} + E_2 e^{i(\omega t + \beta_p z)} \quad (27)$$

と置き換えた。ここで、進行波の振幅  $E_1$  と後方波の振幅  $E_2$  は等しいと仮定し、 $E_1$  と  $E_2$  との間の位相は加速空洞の終端の境界条件に依存する  $\beta$  に強制されるとしている。エネルギー損失  $P_1$  は加速空洞の壁損失とし

$$P_1 = \int_0^L \frac{\omega}{Q} U dz = \int_0^L \frac{1}{r_1} \left| \frac{1}{k} \frac{\partial E_x}{\partial x} \right|^2 dz = \frac{L}{r_1} (|E_1|^2 + |E_2|^2) = \frac{2L}{r_1} |E_1|^2 \quad (28)$$

で与えられる。(28) の  $E_1$  と  $E_2$  との積は積分過程で消える。ビームで励起される電力は (27) で定義される電場と、(14) と (15) で取り扱った考え方から求められる。この場合、後方波の寄与は完全に消失していない。しかし、進行波の寄与と比べる非常に小さい。従って、もしエネルギーが一定とするなら、(21) を適用できる。即ち、

$P_1 \approx 2K (L/\pi)^2 (e/pc) I_0 |E_1|^2 g_2(\alpha)$  で与えられる。 $P_0$  と  $P_1$  が等しい場合をビームの不安定発生開始電流  $I_0$  とすると

$$i_s \approx \frac{\lambda}{2g_2} \left( \frac{\pi}{L} \right), \frac{1}{r_s} \frac{pc}{e} \quad (28)$$

となる。ノーズコン型加速管の場合、不安定になるビーム電流を  $i_s$  とすると

$$i_s \approx \left( \frac{\lambda_{110}}{L_s^2} \right) \left( \frac{1}{r_s} \right) c \beta \gamma \quad (30)$$

で与えられる。ここで、 $\lambda_{110}$  は  $TM_{110}$  モードの管内波長、 $\beta$  は電子の速度を  $v$  とすると  $\beta = v/c$ 、 $\gamma$  はローレンツ因子である。

次にモデル加速空洞を並べた定インピーダンス型加速管に発生する不安定性を (25) と (30) を使ってそのビーム電流値を評価してみよう。ここで、加速管の長さは 1.2 m とする。

進行波型加速管とノーズコン型加速管の高次モードの周波数  $f_s$  とシャント抵抗  $r_s$  を表 2 に示す。進行波加速空洞の共振モードはマフィア・コードを使って計算した。表 3 には  $2\pi/3$  モードのテスト空洞のパラメータを示す。このテスト空洞を使って測定した基本波と高次モードの周波数とその Q 値を表 4 に示す。表 4 から求めた分散曲線を図 2-5 に示す。

この  $TM_{11}$  モードの周波数  $f_s$  は利得関数  $g_2(\alpha)$  が最大利得になるスリッピング値 ( $\alpha = 2.85$ ) から予測できる。1本の加速管の空洞数を  $n = 15$  とすると、共振モードの電力を最大にする加速空洞の伝搬位相量 ( $\theta\beta_s$ ) は

$$\theta\beta_s = \frac{2.85}{nD} = \frac{0.1767}{D} = \frac{0.0582\pi}{D} \quad (31)$$

で与えられる。ここで、 $D$  は 1 個の加速空洞の長さである。即ち、この値は  $\pi$  モードから伝搬位相量のずれを表す。このずれに相当する周波数  $\delta f$  は、表 3 から実験的に求める事ができる。

$$\delta f \approx \frac{(1860.75 - 1858.47) \times 0.0582\pi}{\pi/6} = 1.44 \text{ (MHz)} \quad (32)$$

即ち、 $f_s$  は  $\pi$  モードの周波数より 1.44 MHz 高い約 1860 MHz 近辺で観測されるであろう。このモードは  $\pi$  モードに近いのでその群速度は小さい。表 3 を使って、 $5\pi/6$  モード周波数と  $\pi$  モード周波数から群速度を求めると

$$v_g = \frac{2\pi(1858.47 - 1860.75) \times 10^6}{\frac{\pi}{6} \times 0.08} = -0.0036c \quad (33)$$

となる。上記の  $v_g$  値を用いて、長さ 1.2 m の定インピーダンス型加速管 1 本で BBU が発生するビーム電流値は約 135 mA と計算された。一方、5 m の長さのノーズコン型加速管で BBU が発生するビーム電流値は (30) から約 80 mA となる。5 m のノーズコン型加速管は 1.2 m の定インピーダンス型加速管 4 本に相当する。同一加速管を 4 本並べた場合に発生する BBU の取扱いは、累積型のビーム不安定性となる。この不安定性現象による加速ビーム電流値の低下は別途議論する必要がある。

何れにしても、進行波で電子ビームを加速する場合、定電界型加速管を用いる事になる。この加速管では BBU の発生開始電流は飛躍的に改善される。

表 2 加速管のビーム発散特性

	進行波遅速型加速管	ノーズコン型加速管
電子エネルギー E (MeV)	10.0	10.0
加速管の長さ (M)	2.2 × 4	5.0
加速管構造	定インピーダンス型	軸外結合型
運転周波数 $f_s$ (MHz)	1248.123	1300.0
発散周波数 $f_s$ (MHz)	1858.24	2450.0
$\pi$ モード周波数 $f_\pi$ (MHz)	1858.47	
加速空腔 (モード)	$TM_{110}$	$TM_{110}$
加速空腔移相量	$\pi$	0
群速度	0.0036c	
スリッピング量 (rad)	0.3831	
シャント抵抗 $r_s$ (MΩ/m)	32.14	12
利得係数 Q	21180	
不安定が発生開始電流 $i_s$ (mA)	135.0 / tube 再確認 (たないまぢり)	59.7

表 3  $2\pi/3$  モードのモデル空洞の寸法とその特性

デスク	2a 径 mmφ	51.6
シリンダー	2b 径 mmφ	188.6
セルの長さ	D mm	80.0
デスクの厚さ	t mm	12.0
6セル		
測定条件	20°C (真空換算)	

表 4 モデル空洞の基本モードと高次モードの周波数とその Q 値

モード	周波数 (MHz)			Q 値		
	$TM_{01}$	$TM_{11}$	$TM_{02}$	$TM_{01}$	$TM_{11}$	$TM_{02}$
位相シフト						
0	1234.97	1919.68	2836.17	19640	26580	30000
$\pi/6$	1236.19	1912.12	2841.58	18020	22100	27700
$2\pi/6$	1239.52	1896.34	2855.67	18190	20150	27000
$3\pi/6$	1243.99	1880.42	2875.48	17810	19800	27000
$4\pi/6$	1248.45	1868.23	2896.14	18120	18880	27000
$5\pi/6$	1251.65	1860.75	2912.06	17420	18540	26800
$6\pi/6$	1252.82	1858.47	2917.74	19720	21190	30000

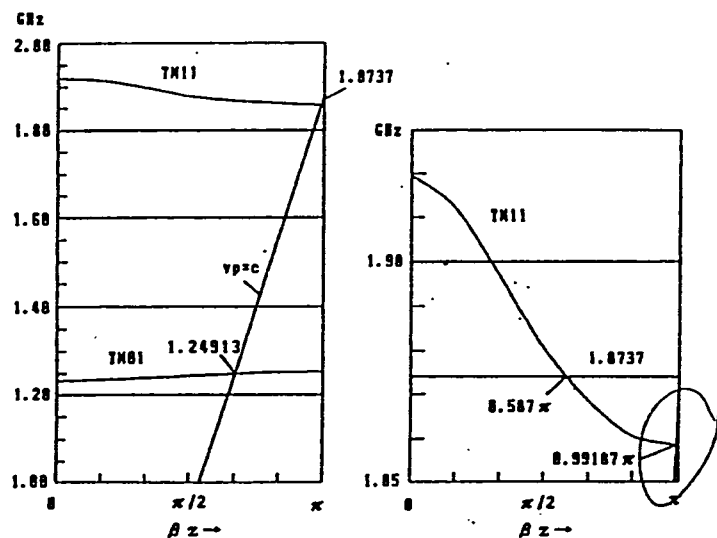


図2-5 モデル空洞の分散曲線とTM<sub>11</sub>モード分散曲線の詳細

- 1) H. Hann and H. J. Halama, 1965, Rev. Sci. Instr. 36, 1788.
- 2) P. B. Wilson, 1963, HEPL-297 (Rev-A), Stanford University.
- 3) H. H. G. Cheng, 1964, University California.
- 4) E. L. Chu, 1966, TN-66-7, Stanford University.
- 5) R. L. Gluckstern, 1964, Proceeding of the MURA Conf. on Linear Accelerator, p. 186.
- 6) P. B. Wilson, 1967, HEPL-TN-67-8, Stanford University.
- 7)

2-2 累積型ビーム発散 (cumulative beam breakup)

電氣的に完全に分離された加速管を配列した線形加速器で発生するビーム発散を考えてみる。ビーム発散モードを励起する信号は加速ビームによって分離された加速管から加速管に運ばれる。この効果は大体2つの作用に分けられる。

第1の効果は加速器の最初の数個の区分(セクション)(低エネルギーの領域)で発生し、再生過程が重要となる。この場合、ビームと加速管の相互作用は過渡理論を使って詳細に解析できる。この効果は長い同一構造の加速ユニットからなる線形加速器に表れる。例えば、Kharkovの2 GeVの線形加速器で観測されたビーム発散現象である。

第2の効果は、加速器全体で発生し、再生過程は重要でない。又、簡単なモ

デルを使って解析できる。モデルでは、加速器の区分全体の効果、或いは、数個の区分の効果が1点に加えられる衝撃と同等であると仮定している。この取扱いは特にどの加速空洞構造も異なるテーパ型加速管からなる線形加速器に適用できる。

[単加速空洞モデル]

このモデルは与えられた加速器の区分の中にある通過領域(パスバンド)の電磁場がノーマルモードに拡張できると仮定する。ノーマルモードの周波数を $\omega'$ 、各空洞の位相シフト量を $\theta_j = \beta_j' l_j'$ 、特性モードを $\chi_j'$ で特定できるものとする。j次のモードの電磁場が加速管のn番目の加速空洞に

$$A = A'(\tau) \chi_j' \phi_j(r') \quad (34)$$

で与えられるものとする。ここで、モード $\chi_j'$ はデルタ関数で

$$\sum_j \chi_j' \chi_j' = \delta_{jj} \quad (35)$$

で規格化できると仮定する。このモードの全微分方程式は

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega_j'}{Q_j} \frac{\partial}{\partial \tau} + (\omega_j')^2 \right] A'(\tau) = \gamma c^2 F' I(\tau) x(z, \tau) \quad (36)$$

で与えられる。ここでは、インパルス近似を使って、1本の加速管によるビームの偏向 $x_j(\tau)$ は非常に小さいと仮定し、平均値 $x(z, \tau)$ で置き換える。 $F'$ は区分全体の形状係数(form factor)であり

$$F' = \sum F_j \chi_j' \cos(\omega_j' t + \phi_j') \quad (37)$$

で与えられる。ここで、 $F_j$ はある加速空洞の形状係数で

$$F_j = \int_{-l_j'/2}^{l_j'/2} \phi_j^{(j)}(z') \cos(\omega_j' z' / v_{phj}') dz' \quad (38)$$

で定義される。 $\phi_j'$ は相互作用を最大にする様な任意の位相角であり、 $t_j$ は

$$t_j = \int_{-l_j'/2}^{l_j'/2} dz' / v_{phj}' \quad (39)$$

で表される。 $Q_j$ は(加速管の無負荷Q)

$$1/Q_j = \sum (\chi_j')^2 / Q_j \quad (40)$$

で単一構造では(35)より $Q_j = Q$ である。

横方向の衝撃運動量は、電子軌道に沿って $(e/c) \theta A_j / \theta x$ を積分する事に得られ、

$$\Delta p_x' = \frac{e}{c} F' A'(\tau) \quad (41)$$

で与えられる。簡単化のために、新しい変数 $V'(\tau)$ を設け

$$V'(\tau) = \frac{F'}{\omega_j'} \left( \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\omega_j'}{2Q_j} + i\omega_j' \right) A'(\tau) \quad (42)$$

で定義する。ここで、 $\omega_j'$ はリング周波数で $\omega_j' = \omega' [1 - (1/2Q_j)^2]^{1/2}$ で定義する。(36)と(41)より

$$\Delta p_x' = \frac{e}{c} \text{Im} (V'(\tau)) \quad (43)$$

そして

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\omega'}{2Q'} + i\omega_s'\right) V'(\tau) = \frac{(\omega')^2 R'}{2cQ'} I(\tau) x(z, \tau) \quad (44)$$

で表される。ここで、シャント抵抗  $R_s$  は

$$R_s' / Q' = 2\eta (c/\omega')^2 (F')^2 \quad (45)$$

と定義できる。(43)と(44)は加速器の薄い加速空洞の相互作用を記述している。一般に、 $R_s$ は単位長さ当たりのシャント抵抗の有効長  $L_{eff}$

$$R_s' = L_{eff} r_s \quad (46)$$

である。単一構造の加速管では、有効長は  $L_{eff} = (1/2) T^2$  で表される。ここで  $T$  は  $T = [\sin(\alpha/2)/(\alpha/2)]$ 、 $L$  は全長、 $\alpha$  は電子ビームの全位相スリップ量を表す。テーパー加速管の有効長は高周波測定を行って求めるか、或いは、計算器でシミュレーションかである。シミュレーションは  $HeI m^{th}$  がおこなった。

テーパー加速管のビーム発散の解析の詳細は次回に行く。

- 8) R.H.Helm, Proceeding of the 1968 Linear Accelerator Conference, LA-3609, pp254-266.

### §3 ビーム発散に対する所見

CW電子線形加速器のビームの不安定性は電子所蔵リングで観測されるビームの不安定性に類似した現象があるので、高エネルギー物理学研究所の電子リングで発生した不安定性を参考にすると次の様になる。

#### 3-1 PFRリングにおけるビーム不安定性

PFRリングでは高周波加速にノーズコン型の単空洞を4個使用している。基本周波数とビーム不安定性を起こす周波数を表4に示す。

表-4 ビームを不安定にするモードの周波数

加速周波数	$f_0$	(Mhz)	制限電流 (mA)
		500	
ビームを不安定にする周波数	$f_1$	758	100
	$f_2$	830	350
	$f_3$	1070	10

最も数値の低いビーム電流で不安定になる周波数は  $f_3$  であった。例えば、 $f_3$  が空洞に励起されるとビーム電流は 10 mA しか容積出来ない。加速空洞の温度を変えて  $f_3$  を回避すると約 100 mA のビーム加速が可能となった。

更に加速空洞の温度を数回し  $f_1$  を回避すると約 250 mA のビーム加速が可能となった。

$f_2$  を回避すると約 350 mA のビーム加速が可能となった。

加速空洞にモード・サプレッサーを取付けて、ビームを不安定にする高周波電力を外に取り出す試みは効果が薄いので取りやめている。この理由はダンパー取り付けると、加速ビーム電流が増加すると、カップリング・バンド幅が広がり、それまでにカップルしなかった有害モードが結合して、ビームが不安定になる現象が観測される様になったためである。現在は色々な改善策を施して 500 mA のビーム加速が可能となった。

#### 3-2 ARリングに於けるビームの不安定性

ARリングでは最初、D&W型の加速空洞を使って 100 mA の電子ビーム加速を行った。しかし、実際のD&W型の加速空洞のシャント抵抗は設計値より約 20-30% 低く、且つ、TM11に似た多数モードが観測されるとの理由から、構造が簡単なASP型(陪周期構造型加速管)に切り替えた。しかし、この場合の加速電流は約 40 mA に低下した。MRリングも同様な理由でAPSと超伝導空洞が使用されているが、現在、加速ビームの最大値は 12 mA である。



## 4 - 3. PNCライナックの仕様検討 ー クライストロナー

第4回大強度CW加速器研究会資料  
資料 No. 4-5

### PNCライナックの仕様検討

- クライストロン -

動力炉・核燃料開発事業団

遠山伸一

### 大強度CW電子線形加速器用クライストロン

-> CWクライストロン

\* Lバンド (1249MHz)

\* 出力1.2MW 効率65%

-> 未開発

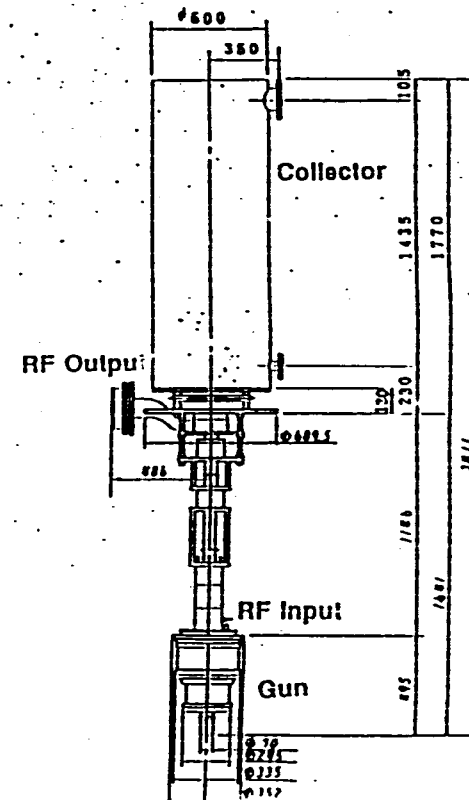
# Klystron

## Model Test 2 ( 1989 ~ )

- Selection of Material for Heavy Duty
- Cooling Test of Collector
- CW Klystron  
(1.2 MW, 1.249 GHz, >65%)

E3718基本仕様

項目	単位	動作モード	
		CWモード	パルスモード
ヒータ加熱電力	W	約250	約250
ビーム電圧	kV	最大90	最大147
ビーム電流	A	最大25	最大56.5
ビーム電力	MW	約1.86	最大8.3
動作周波数	GHz	1.25	1.25
励振電力	W	12	—
目標総出力	MW	1.2	—
目標効率	%	65	—
絶対電力利得	dB	50	—
パルス幅	ms	—	最大0.8
繰り返し	pr	—	最大250
ラューティ	%	—	最大20



**開発の現状**

\* 試作1号機 (平成元年～2年)

高周波特性の確認、  
電子銃部、コレクタ部の設計

\* 試作2号機 (平成2年～3年)

CWモード試験  
大電力化のための問題点の把握

2号機による試験は継続中

**現在までの成果**

\* 空洞特性

増幅利得、出力、効率はパルスモードで確認  
(試作1号機)

\* CWモード

現在、調整中であり、現在値で

効率 46%

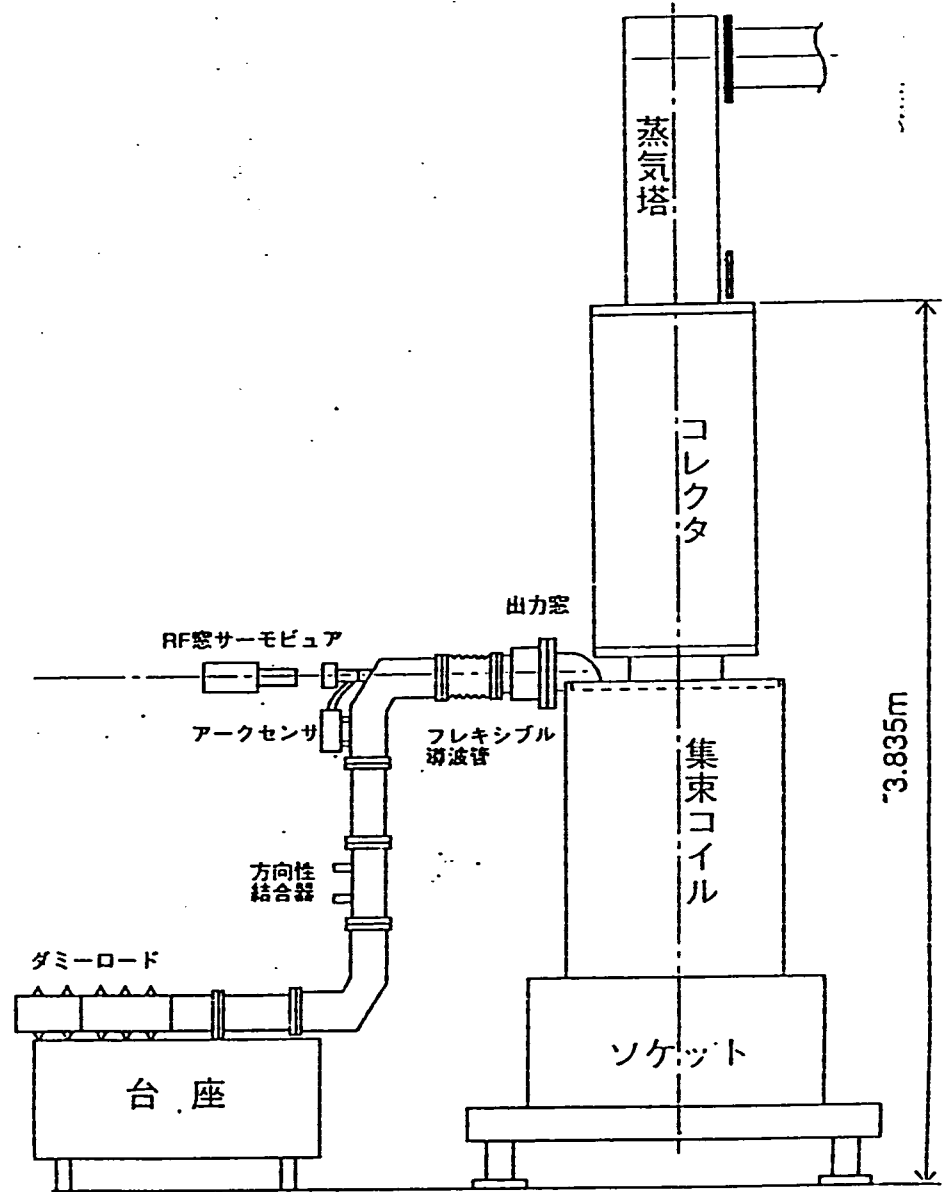
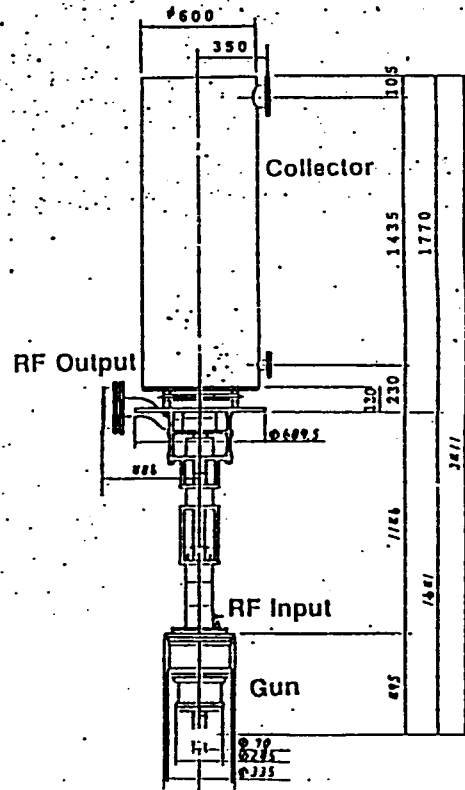
出力 780 kW

ただし、50msパルス

# Klystron

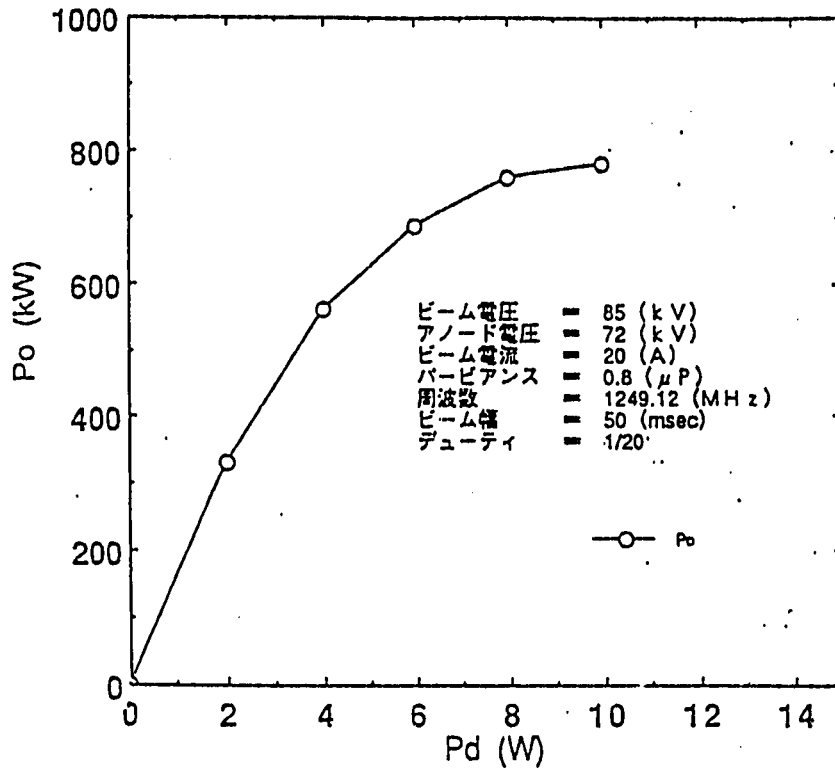
Model Test 2 ( 1989 ~ )

- Selection of Material for Heavy Duty
- Cooling Test of Collector
- CW Klystron (1.2 MW, 1.249 GHz, >65%)



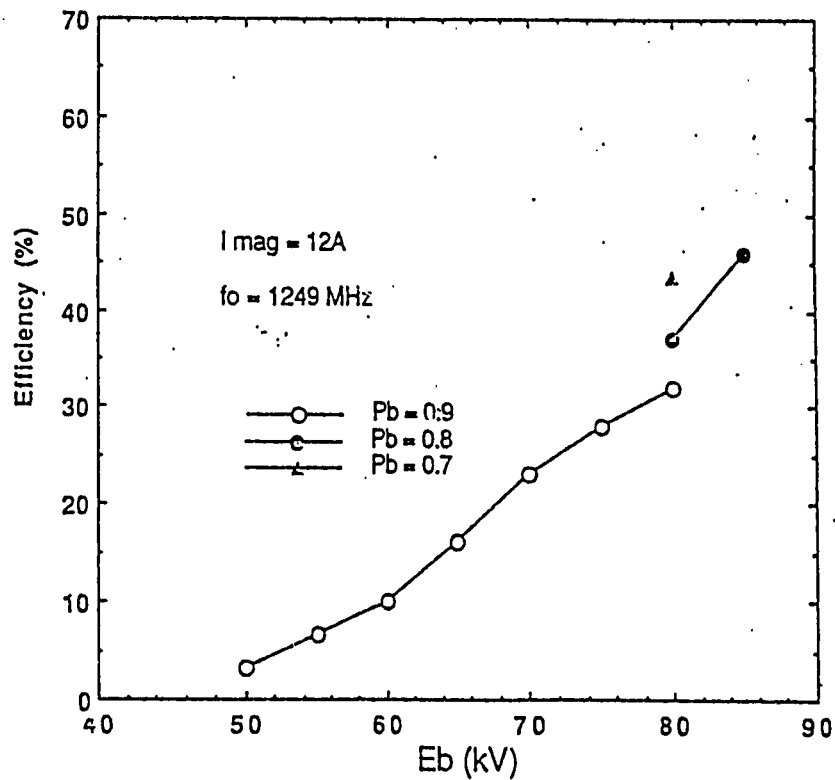
クライストロン試験セットアップ('91. 7)

### マイクロ波出力

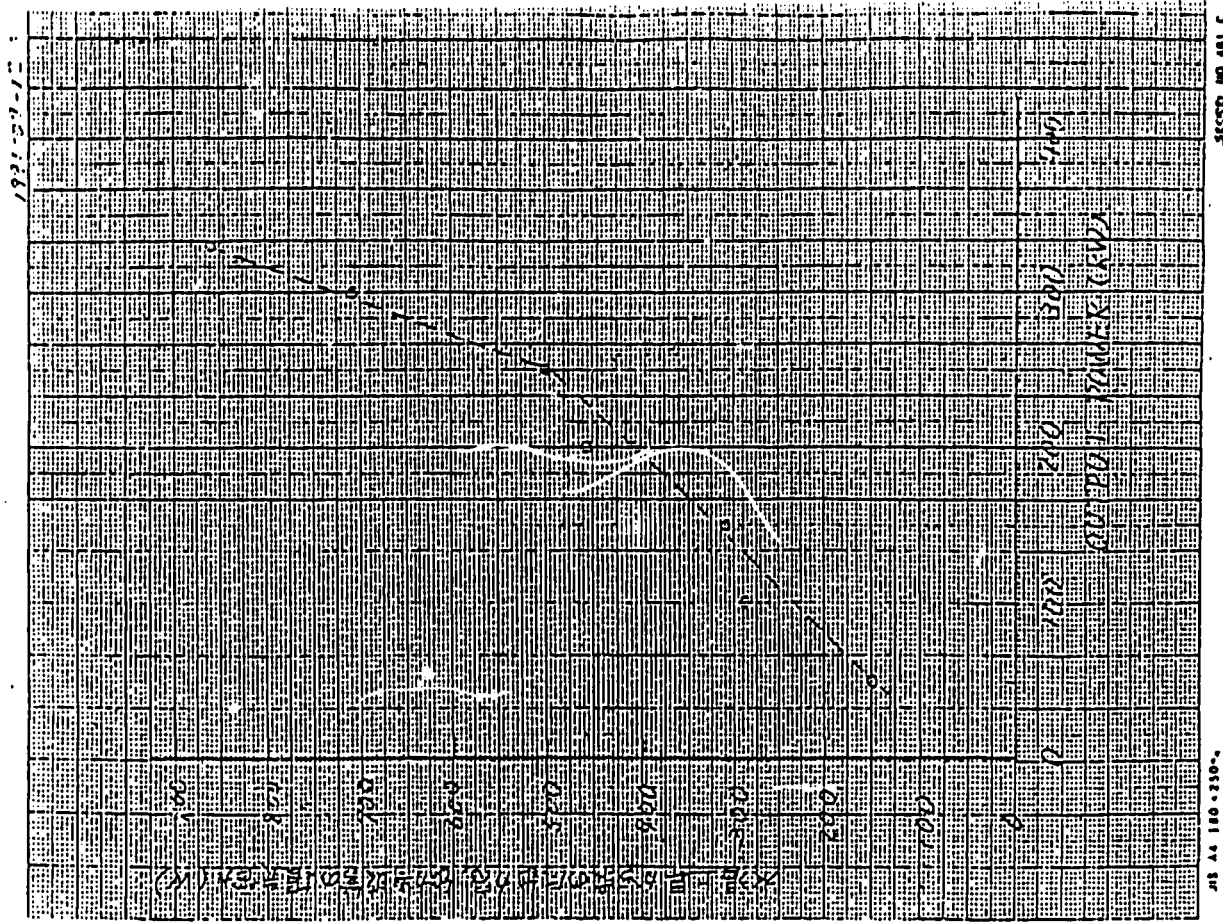


Data from "電和特性"

### ビーム電圧- 効率特性



Data from "Unkled Data #1"



今後の課題

\* 効率の挙動変化の考察

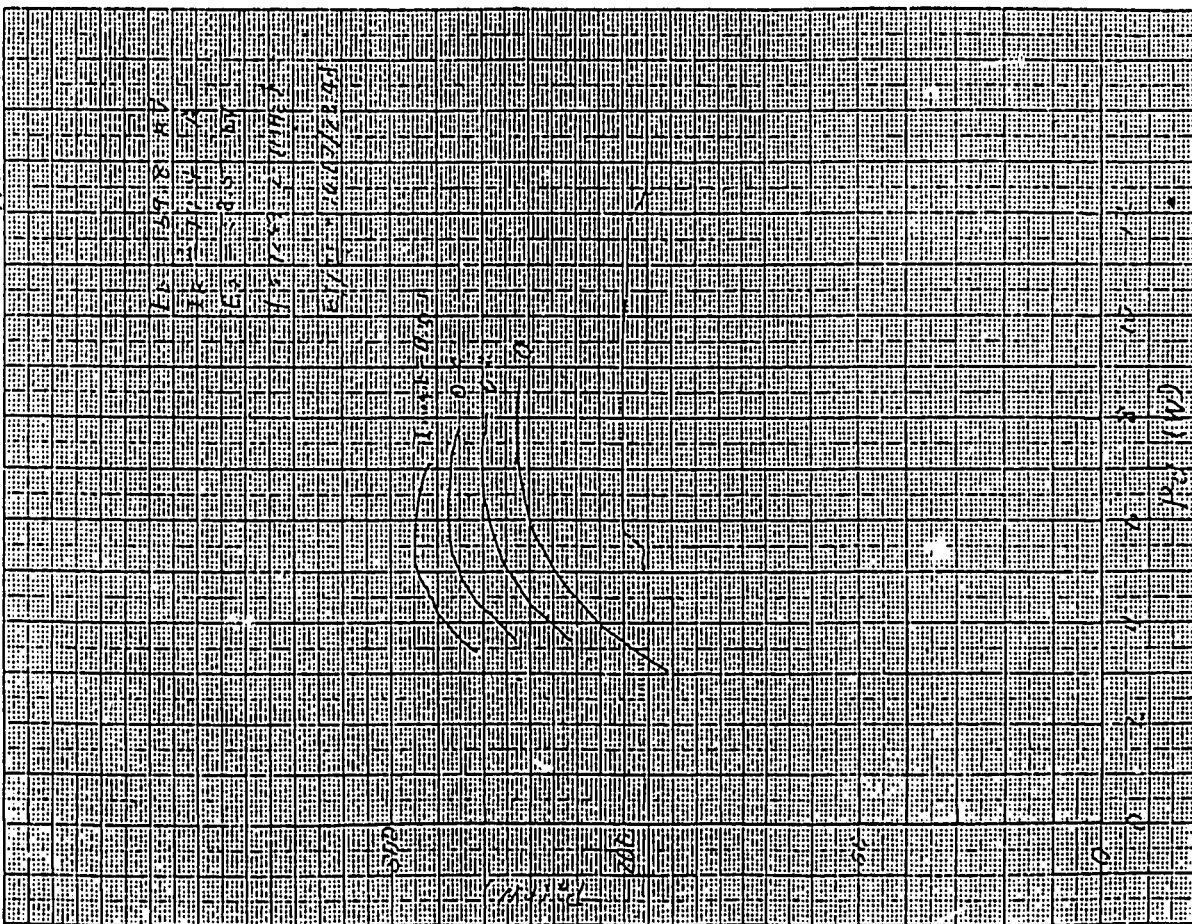
パービアンス、集束コイル、  
バックシールドコイル等

\* R F 窓の検討

温度上昇の原因  
BeOの特性？  
エージング不足  
試験セットアップ

→ 第2次試験 (平成3年度)  
平成4年度最終試作 (予定)

60-60-1831



4545208 NO. 401, C

MS A4 180-250



## 5 - 1. PNCライナックの仕様について

「第5回大強度CW加速器委員会」資料

## PNCライナックの仕様について

1. 初めに
2. 加速管
3. クライストロン
4. クライストロン電源
5. 工程

動力炉・核燃料開発事業団

遠山伸一

## 1. 概観に

エネルギー	(MeV)	1 0
最大ビーム電流	(mA)	1 0 0
平均ビーム電流	(mA)	2 0
パルス幅	(ms)	4
繰り返し数	(Hz)	5 0
デューティー	(%)	2 0
ビーム出力	(kW)	2 0 0

加速器基本性能

加速周波数	(MHz)	1 2 4 9
マイクロ波波長	(cm)	2 4 . 0
加速モード		$2\pi/3$
加速管の本数		8
加速管の長さ	(m)	1 . 2
加速器の全長	(m)	1 6 . 0
加速ユニット数		2
クライストロン数		2
クライストロン出力	(MW)	1 . 0

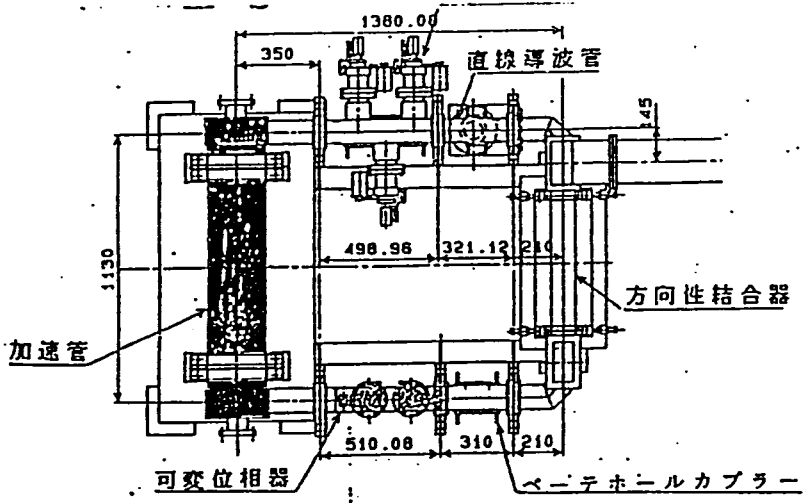
加速器仕様

制御方式		7ノード変調型
動作周波数	(MHz)	1 2 4 9 . 1 3 5
空洞数		6
パービアンス		$2 \times 10^{-6}$
ビーム電圧	(kV)	9 0
ビーム電流	(A)	2 5
最大コレクター損失	(MW)	1 . 7 2
コレクター冷却方式		蒸発冷却
コレクター供給流量	(l/m)	5 0
飽和出力	(MW)	1 . 2
目標効率	(%)	6 5
電力利得	(dB)	5 0
-----		
パルス幅	( $\mu$ S)	1 5
繰り返し周波数	(PPS)	3 6 0
デューティー	(%)	0 . 5 4
ヒーター加熱電力	(W)	2 5 0

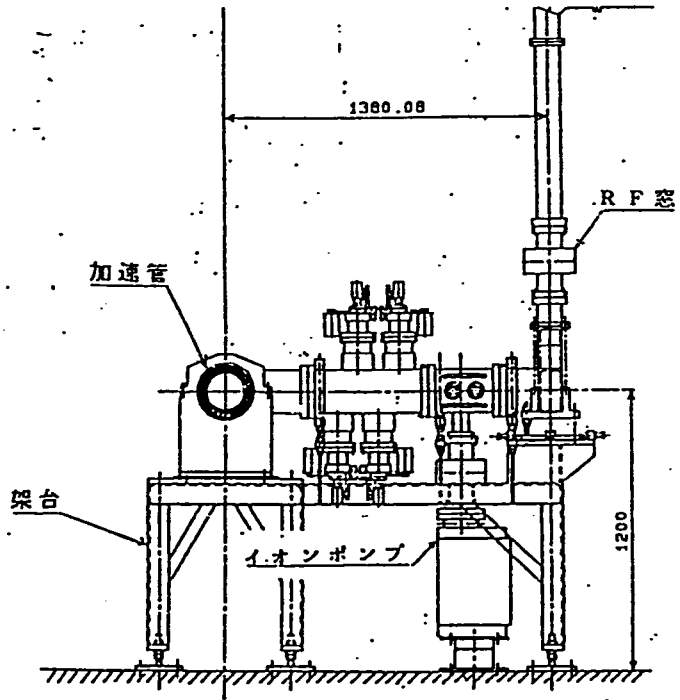
クライストロン仕様

加速方式		進行波遅流型
位相量/空洞		$2\pi/3$
空洞数/加速管		2 4
加速管の長さ	(m)	1 . 2
Q値		1 9 9 6 0
ビーム電流	(A)	0 . 1
シャント抵抗	(M $\Omega$ /m)	3 9 . 6

加速管仕様

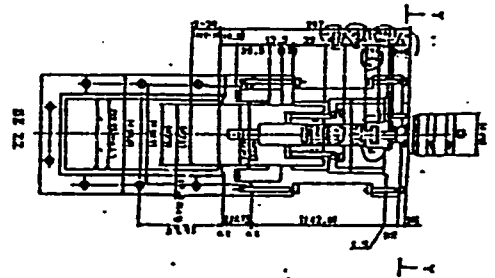
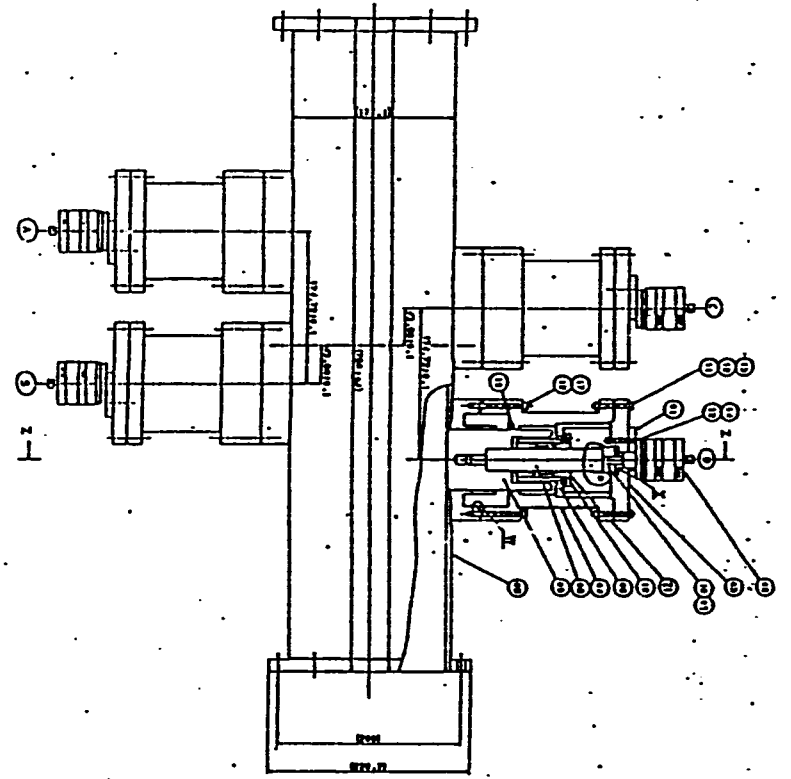


上面図



側面図

多相器





## 移相器

台数 : 1台  
 方式 : H面へのブリッジ可動方式  
 位相可変量 : 最大 $20^\circ$   
 駆動方式 : スリットモータによる各ブリッジ独立, 電気駆動

## 方向性結合器

台数 : 1台  
 方式 : H面結合方式  
 結合度 :  $5.2 \pm 0.8$  dB  
 方向性 : 25 dB以上 (目標値)  
 VSWR : 1.08以内

## スタブチューナ

台数 : 1台  
 VSWR補正量 : 1.20  
 スタブ本数 : 3本  
 スタブ間間隔 :  $\lambda_g / 6$   
 駆動方式 : スリットモータによる各スタブ独立, 電気駆動

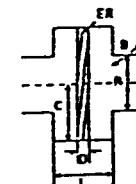
## ベータホールカブラ

台数 : 1台  
 VSWR : 1.05以内  
 モニタ数 : 2 (順方向 $\epsilon$ 、逆方向 $\epsilon$ 各1)  
 結合度 : 50 dB  
 方向性 : 27 dB以上  
 モニタ部コネクタ : N-J型

### 3. 大電力レバンドCWクライストロン

E3718基本仕様

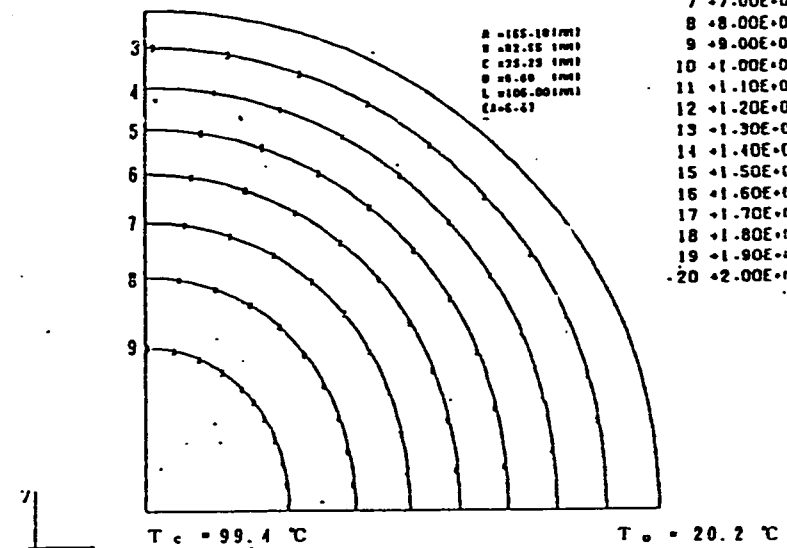
項目	単位	動作モード	
		CWモード	パルスモード
ヒータ加熱電力	W	約250	約250
ビーム電圧	kV	最大90	最大147
ビーム電流	A	最大25	最大56.5
ビーム電力	MW	約1.86	最大8.3
動作周波数	GHz	1.25	1.25
励振電力	W	12	—
目標飽和出力	MW	1.2	—
目標効率	%	65	—
飽和電力利得	dB	50	—
パルス幅	ms	—	最長0.8
繰り返し	pps	—	最大250
デューティ	%	—	最大20



A = 105.10 (mm)  
 B = 82.25 (mm)  
 C = 25.25 (mm)  
 D = 6.60 (mm)  
 L = 106.00 (mm)  
 (A-D-G)

TEMP. ( °C )  
 I.D. VALUE

1	-1.00E+0
2	+2.00E+0
3	+3.00E+0
4	+4.00E+0
5	+5.00E+0
6	+6.00E+0
7	+7.00E+0
8	+8.00E+0
9	+9.00E+0
10	+1.00E+1
11	+1.10E+1
12	+1.20E+1
13	+1.30E+1
14	+1.40E+1
15	+1.50E+1
16	+1.60E+1
17	+1.70E+1
18	+1.80E+1
19	+1.90E+1
20	+2.00E+1



HEAT GENERATION OF BERYLLIA CERAMIC (E3718)  
 SHEET 2 (REVISION 2)

セラミック内の温度上昇分布  
 (セラミックが20℃に固定)  
 セラミック厚さ D=6.6 mm . セラミック半径 C=95.25 mm

表 3. 3-1 誘電体の物理特性表

材 質 (純度)	アルミナ 99.5%	アルミナ 99%	サファイア 99.9%	ベリリア 99%	
メーカー	WESGO	京セラ	京セラ	Brush-Wellman	
品番	AL995	A-479	SA-100	Thermalox 995	
呈色	白	白	透明	白	
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	3.84	3.8	3.97	2.9	
機 械 的 特 性	硬 度 [モース]	9	9	9	9
	曲げ強度 [MPa]	310	310	700	190
	圧縮強度 [MPa]	>2070	2200	3000	1830
	ヤング率 [GPa]	385	350	480	360
熱 的 特 性	比 熱 [J/g・℃]	0.77	0.80	0.76	2.1
	熱伝導率 [W/cm・℃]	0.30	0.25	0.42	2.4(20℃) 1.8(100℃)
	線膨張係数 [×10 <sup>-6</sup> /℃]	6.9	6.8	4.5(透明) 5.3(Z-R)	4.6
	最高使用温度 [℃]	1725	1600	2000	2000
電 気 的 特 性	比誘電率	9.30(1GHz)	9.7(1MHz)	9.3(透明) 11.5(Z-R)	6.75(10GHz)
	tanδ × 10 <sup>-4</sup>	1.4(1GHz)	2(1MHz)	1.5(1GHz)	8.0(1GHz)
	絶縁耐圧 [kV/mm]	31.5	10	48	14
	体積固有抵抗 [Ω・cm]	>10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>

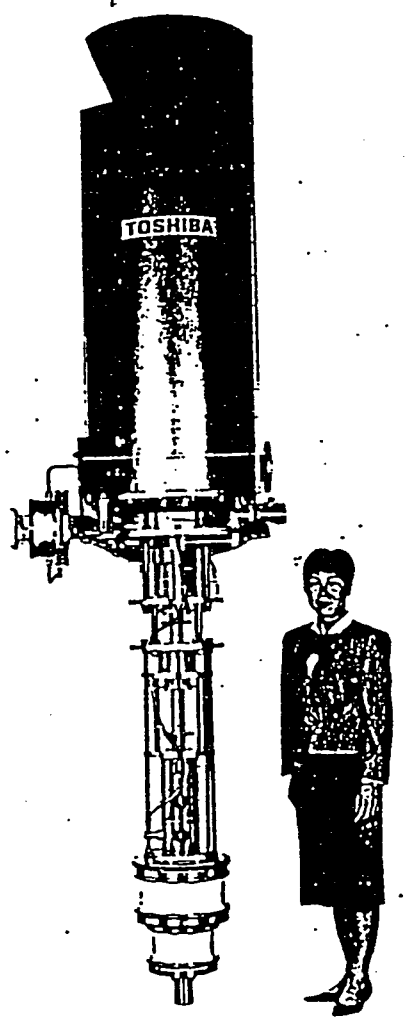
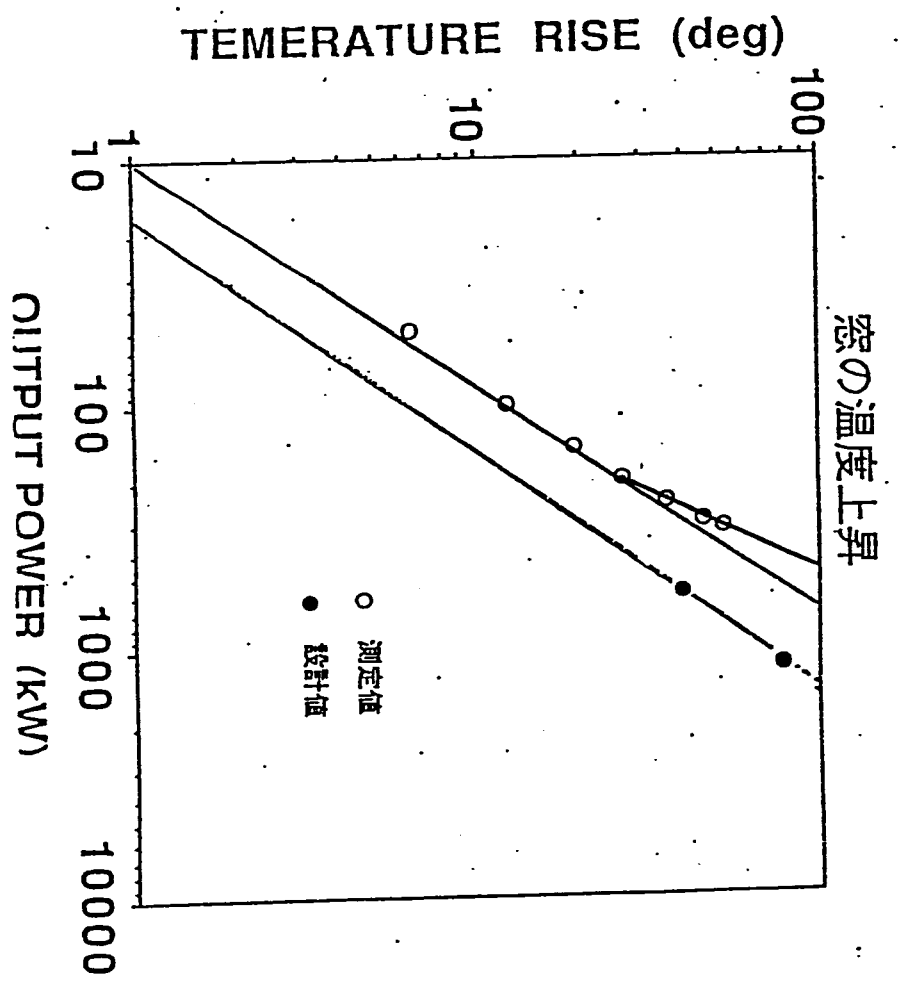
ベリリア・セラミックの物性値

特 性	物 性 値
ヤング率	350 × 10 <sup>9</sup> (Pa)
ポアソン比	0.26
線膨張係数	4.6 × 10 <sup>-6</sup> (/℃)
熱伝導率	2.5 × 10 <sup>2</sup> (W/m℃)
比 熱	2.1 × 10 <sup>3</sup> (J/kg℃)
比 重	2.9 × 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
圧縮強度	1830 × 10 <sup>6</sup> (Pa)
引張り強度	150 × 10 <sup>6</sup> (Pa)

出力窓の設計パラメータ

構造形式	ビルボックス形
誘電体材料	ベリリア (BeO)
誘電体窓外径	190.5 (mm)
誘電体窓厚さ	6.6 (mm)
ビルボックス長さ	106.0 (mm)
出力環被覆	WR650
帯域幅 (VSWR 1.1dB)	70 (MHz)
V S W R	1.005
冷 却	水冷



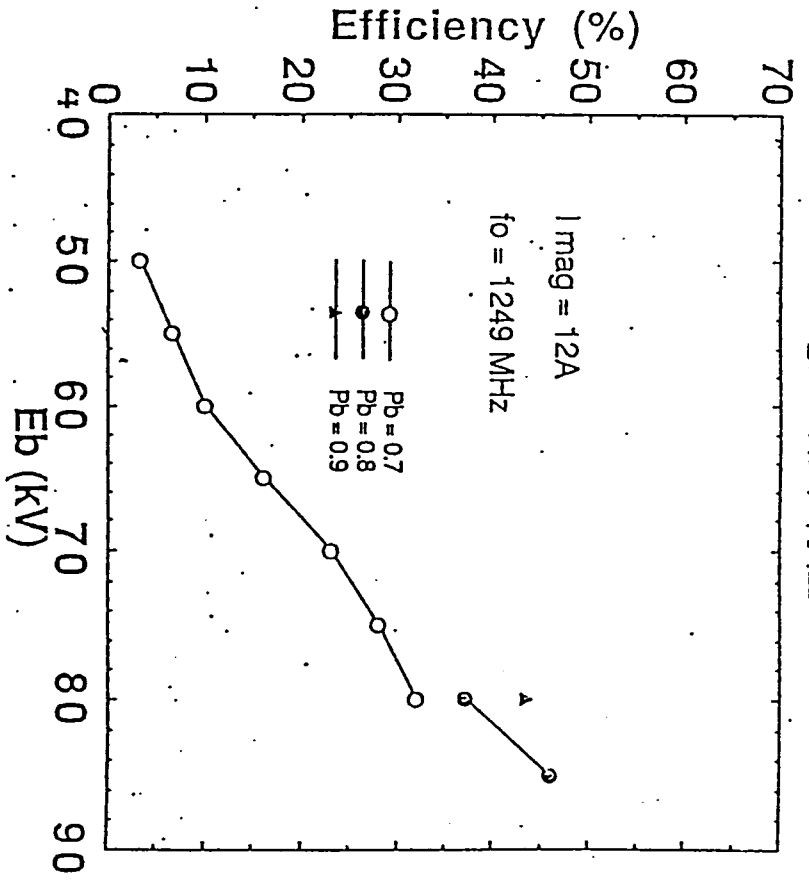


FTDS-500-1

4. クライストロン電源

クライストロン電源の入出力特性

	C W モード		パルスモード
	20%パルスモード	500kVAモード	
ピーク出力電圧	90KV	90KV	147KV
ピーク出力電流	25 <sup>A</sup> × 2	25 <sup>A</sup> × 2	56.5 <sup>A</sup> × 2
パルス幅	4msec	4msec	0.8msec
パルスくり返し	50pps	18pps	25pps
デューティ	20%	7.2%	2%
パルス出力	4.5MW	4.5MW	16.6MW
平均出力	900KW	324KW	332KW
制御系電源電力	30KW	30KW	30KW
全平均電力	930KW	354KW	362KW
電源効率	90%	90%	90%
必要電力	1033KW	393KW	403KW
力率	80%	80%	80%
必要KVA	1292KVA	492KVA	504KVA

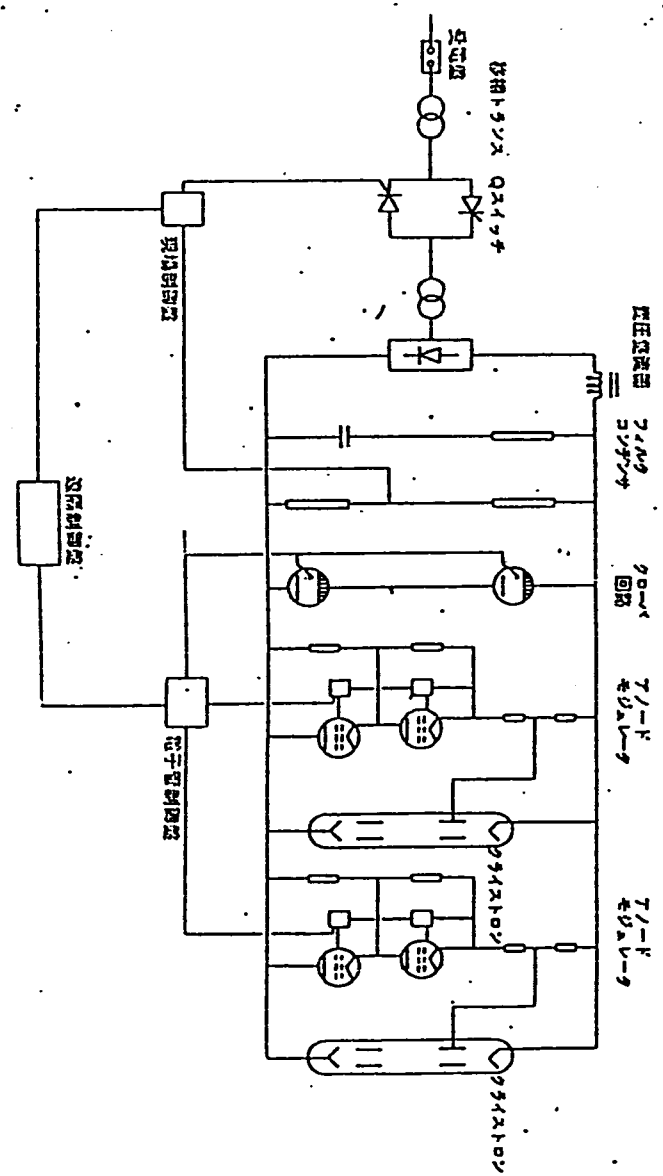


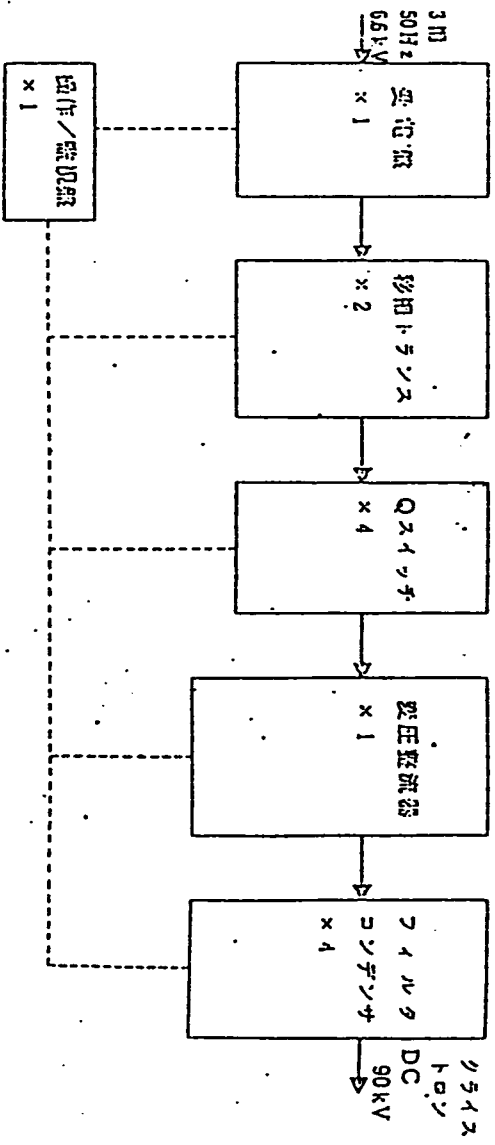
ビーム電圧-効率特性

クライストロン電源の性能の仕様

項目		モード	C W モード		パルスモード
			モード I	モード II	
			* 推定値		
負 荷 特 性	RF出力 (ピーク)		1MW × 2	5MW × 2	
	アノード電流		< 5 mA	< 5 mA	
	パルス幅		4msec	0.8msec	
	パルスくり返し		50pps	50pps	
	デューティ		20%	4%	
	平均RF出力		200KW × 2	200KW × 2	
	RF効率		96%	95%	
行状器入力電力 (平均)		667KW	784KW		
電 源 特 性	出力電圧		90KV	147KV	
	出力電流		25A × 2	56.5A × 2	
	パルス幅		4msec	0.8msec	
	パルスくり返し		50pps	50pps	
	デューティ		20%	4%	
	ピーク出力		2.25MW × 2	8.3MW × 2	
	平均出力		900KW	664KW	
電圧安定度		1%	1%		
ア ノ ド 装 置	アノード電圧		0~70KV	0~130KV	
	パルス幅		4msec	0.8msec	
	パルスくり返し		50pps	50pps	
	パルス立上り		< 400 μ sec	< 100 μ sec	

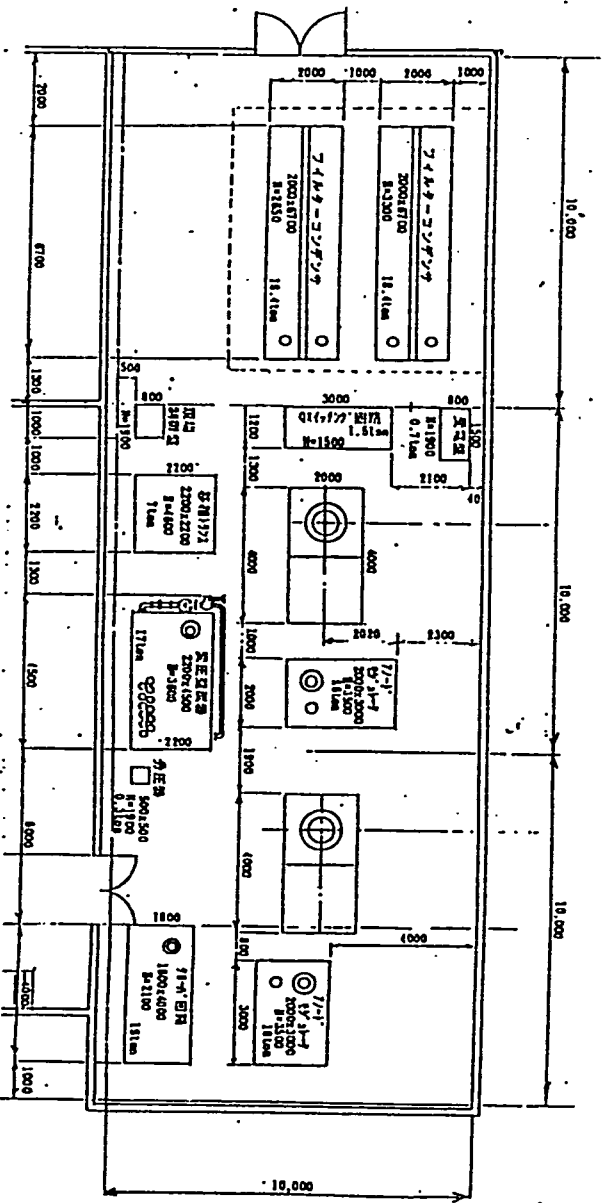
クライストロン電源システム構成図



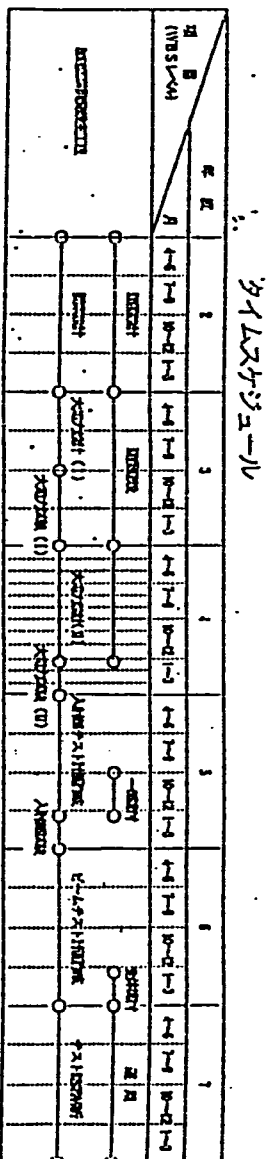


クライストロン電源接続図

UCU-003-0015



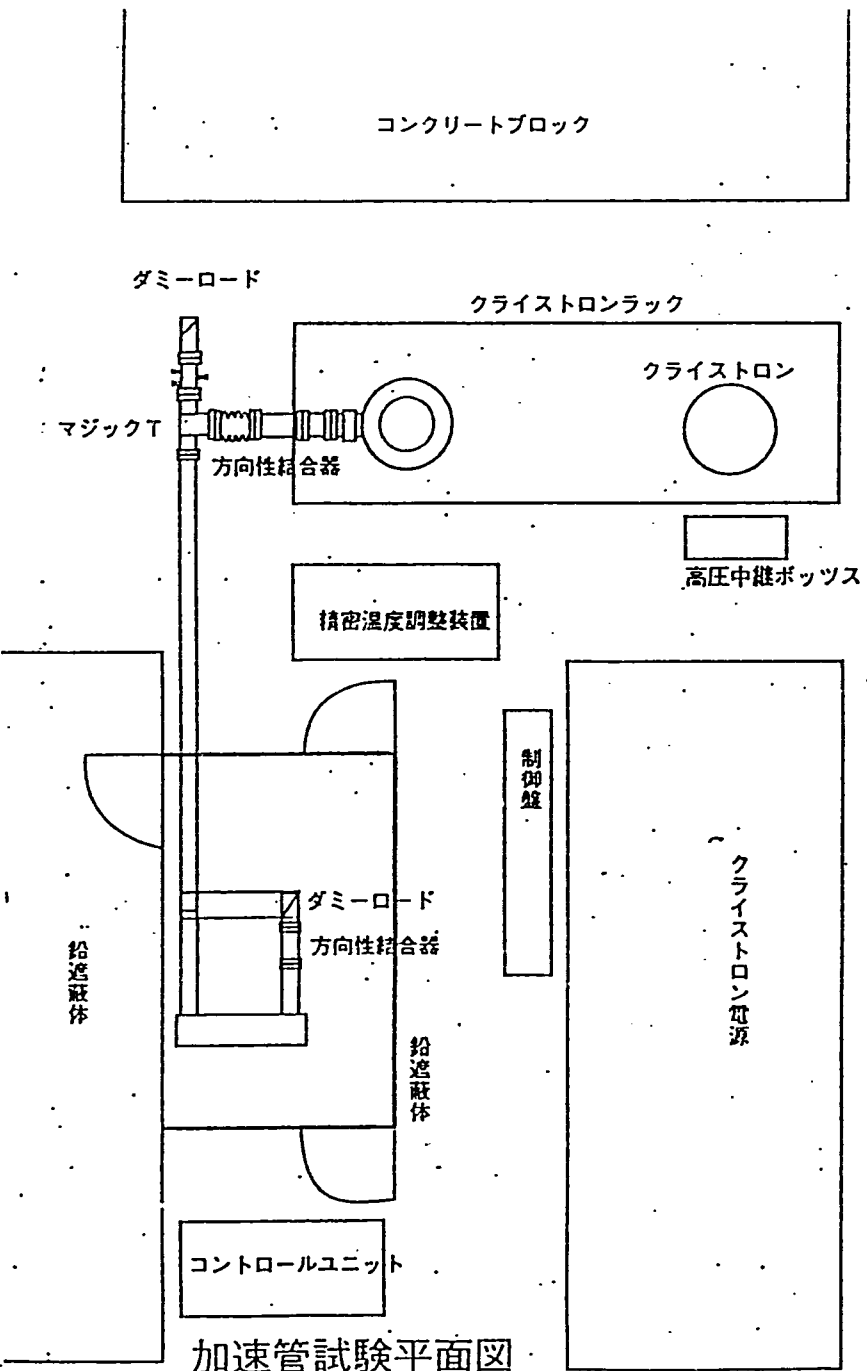
クライストロン電源配置



平成3年度 加速器開発・大電力試験工程

H3.1.1 加速器

項目	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							



5 - 2.

Comparison of Standing Wave  
and Traveling Wave Accelerator  
and PNC Proposal

COMPARISON OF STANDING WAVE AND TRAVELING WAVE ACCELERATORS  
AND PNC PROPOSAL

Y. L. Wang

1. History

The controversy over the relative advantages of the standing wave accelerator (SWA) and the traveling wave accelerators (TWA) is now in its fourth decade. So at first let us lookback the accelerator history.

The early proposal mentioned the acceleration was due to G. Ising [1] in 1924. The first successful linear accelerator was described by R. Wideroe [2] in 1928. In his accelerator system the drift tubes were connected alternately to a source of high frequency waves and to ground, the lengths of the drift tubes and the frequency were chosen so that ions could continually arrive at gaps between drift tubes when the field was in the accelerating phase. When the field was in the opposite (decelerating) direction the ions were shielded by the drift tubes. Ions could gain up to 50 kev of energy. It was the prototype of standing wave accelerator.

In 1933, J. W. Beams and L. B. Snoddy [3] reported on a traveling wavefront accelerator. In this device a 15 kv impulse was applied in sequence to 15 drift tubes. Electrons at 28 kev injected along the axis of the drift tubes were accelerated to 90 kev. The work was continued until 1935, the peak electron energy reported was 2.5 Mev.

During World War II because of radars development, high power pulse RF source such as klystron and magnetron had been developed. It was clear that linear accelerators could be designed.

After that in 1947 W. W. Hansen [4] proceeded toward construction of an electron linear accelerator and L. W. Alvarez [5] was to result in the first proton linear accelerator.

For the electron linear accelerator a simple traveling wave structure was chosen. The phase velocity in the waveguide was reduced to the velocity of light by loading periodically with iris diaphragms. Frequency was chosen to be about 3000 MHz, the length of accelerator was about 9ft long. In it electrons had been accelerated to 4.5 Mev. It was the prototype of the traveling wave accelerator.

During the period between 1949 and 1953, several electron accelerators were build, both the traveling wave [6] and standing wave [7] accelerators were investigated. After that most electron linear accelerators adopted traveling

wave disk loaded structure. Almost all standing wave accelerators were build in 0 mode or  $\pi$  mode. These modes had one very serious drawback, the group velocity is approximately zero. It means the structure is poor at delivering energy to the beam and that the field profile is very sensitive to beam current and mechanical tolerance. So the standing wave accelerator fell into disuse for electrons.

For the proton linear accelerator, because a proton is much heavier than an electron, at 1 Mev the velocity of a proton is less than 5% of that of light. It is impractical to slow down phase velocities in waveguide to so low a value, so low frequency standing wave drift tube structure was used.

In 1967 the doubly periodic structure (biperiodic structure)[8] was developed. Los Alamos moved the coupling cells off-axis and created the side-coupled structure. It is electrically a  $\pi/2$  mode, but in terms of its interaction with beams it is a  $\pi$  mode. The very serious drawback of standing wave accelerator was overcome. It had resulted in considerable improvement in stability both in waveguide and drift tube structures.

Although traveling wave structure has a lot of advantages compared with standing wave structure, it is very difficult to want to enhance the shunt impedance. When the standing wave biperiodic structure has much higher shunt impedance and can make shorter accelerators than the traveling wave structure. In the low energy, electron linear accelerator adopted SWA again, especially for radiotherapy.

In 1949 L. B. Mullett [9] proposed a method which provided for feedback of the residual RF power from the end of accelerator and combination of this power in suitable phase relationship with input power. The main incentive which led the early British workers to the use of feedback was the less restrictive frequency, temperature and dimensional tolerances resulting from the lower value of  $Q$  which is permitted when feedback is employed. Feedback found its main use in comparatively short single feed accelerators used for medical purpose.

In 1960 traveling wave resonator [10, 11] was developed.

In 1965 S. D. Winter [12] proposed a short accelerator using traveling wave resonator. But it did not attract person's attention.

In 1981 in Nanjing University Y. L. Wang [13, 14] gave detailed analysis and research about the traveling wave accelerator with traveling wave resonator (TWR), and pointed that it has high gradient accelerating field.

In 1987 in KEK Prof. I. Sato [15] first successful using a short traveling wave accelerator with TWR accelerated electrons by as high as 60 MV/m gradient accelerating field.

Now it is possible to use traveling wave accelerator with TWR to construct a electron linear accelerator.

Following, we will compare with them.

## 2. Comparison

Table 1. Comparison of Three Kinds of Accelerators

	TWA with TWR	TWA	SWA
Structure	Simple	Simple	Complex
Manufacture	Easy	Easy	Difficult
Energy Spread	Small	Small	Large
Capture	Large	Large	Small
Shunt impedance	Low	Low	High
Filling Time	Long	Short	Long
Field Multiplication Factor	M	1	2
Accelerating Field Gradient	High	Low	High

Table 2. Example for Design

Type	PNC Design	Chalk River Design
	TWA with TWR	SWA
Energy	100 Mev	100 Mev
Beam Current	100 mA	100 mA
Duty Factor	100 %	100 %
Length	1.2x15=72 m	5x16=80 m
RF Power	1.2x15=18 MW	1.2x16=19.2 MW
Energy Spread	< 1 %	< 4 %
Width of Beam Bunch	< 5'	
Capture	50 %	15 %
Energy Gain	1.43 Mev/m	1.25 Mev/m
Efficiency	55 %	52 %

Besides, 1), reflections from SWA are a serious concern because klystron can be destroyed by reflected power. Any high Q resonant cavity reflects a large fraction of the incident power during the beginning of the filling time. Furthermore, SWA can only be matched for one nominal current. So without a circulator it is very difficult to adjust.

For TWA with TWR during the beginning of filling time a large part of incident power will pass to dummy load.

2), For standing wave bi-periodic structure frequency between coupling cavities and accelerating cavities can only be matched at one temperature. If the beam loading or operating duty factor changing it will mismatch.

3), Energy gain given by:

for TWA with TWR,

$$V = Mb\sqrt{2P_e R} L \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau} - IRL \left(1 - \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau}\right) \quad (1)$$

for SWA,

$$V = \sqrt{RLP} \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} (1 - \exp(-t/tf)) - IRL \frac{1}{1+\beta} (1 - \exp(-t/tf)) \quad (2)$$

The beam loading characteristics are shown on Fig.1. We can see that the slope of SWA is steeper than TWA with TWR. So when the beam current became higher and higher, the TWA with TWR is better and better than SWA. The efficiency of TWA with TWR is higher and higher.

Prof. Sato gives the shunt impedance a new definition called normalized shunt impedance:

$$R_n = V^2 / (dP/dz)$$

where V is energy gain per meter with the beam loading, and dP/dz is all RF power loss per meter.

According to this definition the normalized shunt impedance of TWA with TWR at 100 mA beam current is higher than that of SWA.

4), About BBU problem, for SWA it is no problem for 100 mA beam current, because its accelerating cavities and coupling cavities are different.

For TWA with TWR, using low  $\tau$  value, short length sections,  $2\pi/3$  mode, constant gradient structure and progressive stop-band technique, it is no problem for 100 mA beam current.

For the future, when the beam current is 1 A, it is necessary to study BBU for both accelerators.



3. Proposals

Now there are three proposals: the first proposal is using TWA with TWR shown on Fig.2, the second one is using SWA shown on Fig.3 and the third one is mixed proposal shown on Fig.4. the test accelerator consists of two parts: the first part is TWA with TWR and the second one is SWA.

1). From technique point of view, comparison among three accelerators, TWA with TWR has both advantages of TWA and SWA, especially for high beam current, it is more suitable. Although the third mixed proposal can compare them directly, it is very difficult to adjust SWA, when we operate the pulse case during the beginning of filling time a large reflection will destroy the klystron, and during the test for the different input RF power and beam current it is much more difficult to match them.

2). From PNC developing point of view, we need develop our accelerator science and technique. TWA with TWR is a new kind of linear accelerator, especially, for CW operation and high beam power accelerator it has bright prospect. If we employ SWA, Chalk River only gives us accelerator not technique. PNC only uses it.

3). From financial and labour power point of view, if we choose the mixed proposal, we must have two groups to be responsible for two types accelerators, and must pay about two times test fee for two accelerators tests.

From all points of view we prefer to adopt the traveling wave accelerator with traveling wave resonator rather than the standing wave accelerator.

References

1. G. Ising, 1924, Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik 18, 1
2. R. Wideroe, 1928, Archiv fur Elektrotechnik 21, 387
3. J. W. Beams and L. B. Snoddy, 1933, Phys. Rev. 44, 784
4. E. L. Ginzton, V. W. Hansen and W. R. Kennedy, 1948, Rev. Sci. Instr. 19, 89
5. L. W. Alvarez, et al., 1955, Rev. Sci. Instr. 26, 111
6. J. Yastel, 1952, Ann. de Radioelectricite 8, 20
7. A. Sarazin, 1953, Ann. de Radioelectricite 8, 134 and 228
8. D. Nagle, E. A. Knapp and B. C. Knapp, Rev. Sci. Instr. 38, 1583, 1967
9. L. B. Mullett, 1949, Proc. Phys. Soc. (London) B62, 270
10. F. J. Tischer, IRE Trans. MTT-5 No. 1 1957, 51
11. S. J. Miller, The Microwave Journal, 1960, Sep., 50
12. S. D. Winter, IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-12, No. 3 1965, 494
13. Y. L. Wang, IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-28, No. 3, 3526, 1981
14. Y. L. Wang, IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-30, No. 3, 3024, 1983
15. I. Sato et al. Proc. The 6th Symp. on Accelerator Sci. and Tech. 95, 1987

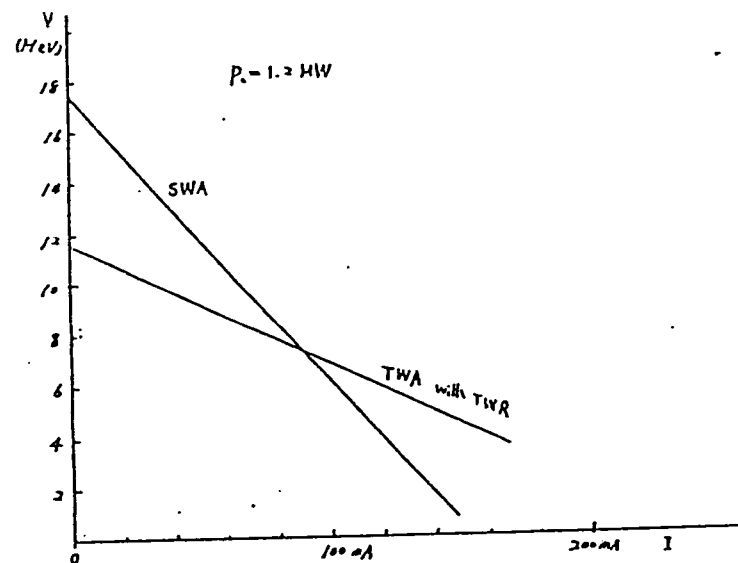
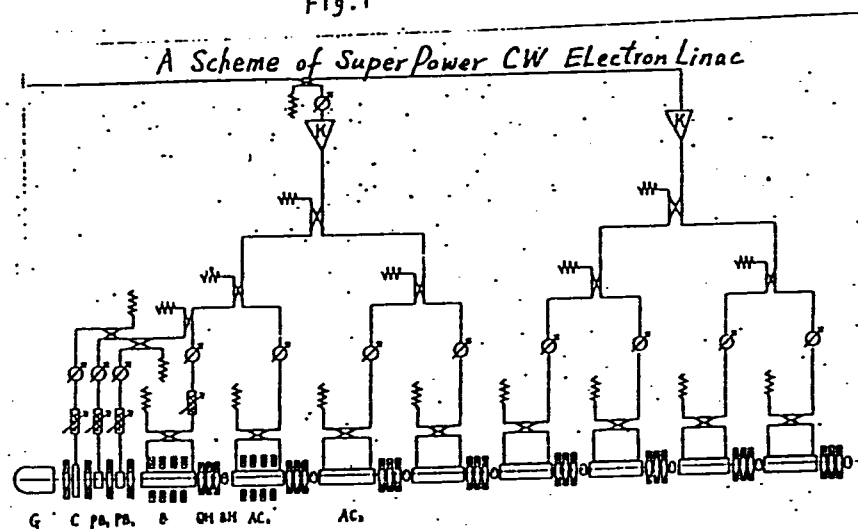


Fig. 1



G - Gun      A - Attenuator      Ø - Phase Shifter  
 C - Cropper      PB - Prebuncher      B - Buncher  
 QH - Q Magnet      BH - Beam Monitor      Ac - Accelerator

Fig. 2

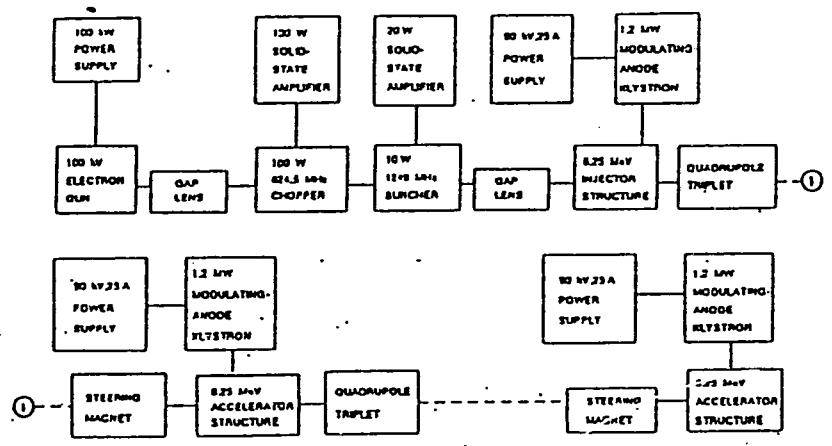


Fig. 3

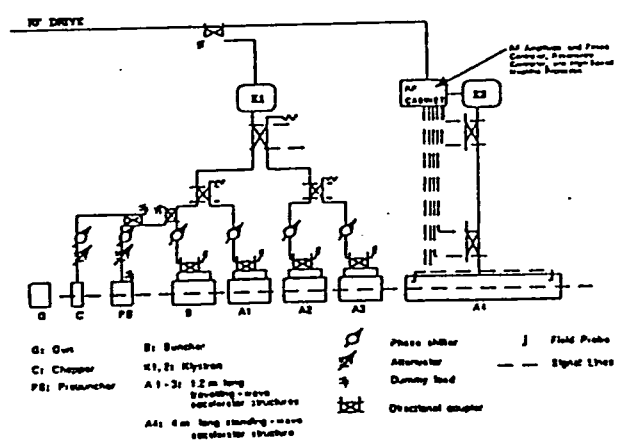


Fig. 4

## 5 - 3. 電子加速器のビーム制御

# 電子加速器のビーム制御

東大核研 吉田 勝 英

## Proceedings of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation

Volume 1 of 2

April 22-24, 1991  
KEK, Tsukuba, Japan*Editors*

A. Ogata and J. Kishiro

*Organizing Committee*

A. Ando (RCNP, Osaka Univ.)  
 A. Enomoto (KEK)  
 T. Ieiri (KEK)  
 J. Kishiro (KEK)  
 N. Kumagai (RIKEN)  
 Y. Mizumachi (KEK)...chairman  
 Y. Miyahara (JAERI)  
 T. Tomimasu (ETL)  
 T. Nakazato (Tohoku Univ.)  
 K. Nakajima (KEK)  
 A. Ogata (KEK)...secretary  
 J.-L. Pellegrin (SLAC)  
 S. Watanabe (INS)

### PNC電子線型加速器

10 MeV      100 mA Peak

4 ms Pulse, 50 Hz → 20% Duty

Cumulative  
BBUHigh  
Av. Power  
200 kW

National Laboratory for High Energy Physics

*Survey of Beam Instrumentation  
Used in SLC*

*Stanley D. Ecklund  
(SLAC)*

BEAM INTENSITY

TOROIDAL TRANSFORMER PICKUP

- \*Inner Dia. 1~4inch
- \*Ceramic Gap in Metal Pipe
- \*1% Measurement Accuracy
- \*LC Circuit with Local Preamp
- \*Sample & Hold
- \*Read Out via CAMAC
- \*For Macro Pulse

GAP PICKUP

- \*Measurement of
  - Wall Image Current
  - Oscilloscope Display
  - Charge Integrator
- \*For Long (nanosec.) Pulse
- \*Cable Connection is Critical
  - to get Clean Pulse

BEAM LOSS MONITOR

- \*Optimize Beam Transmission
- \*Give Warning to avoid
  - Melting or Cracking
  - of Machine Component

LITER-SIZED GAS ION CHAMBER

- \*Set near the Device
  - to be Protected
- \*To Turn Off the Machine or
  - Reduce the Repetition Rate
- \*Calibrate by Safe Beam Power
- \*Filled and Flushed with He
- \*Argon Gas for Final Focus
  - Quantitative measurement
  - of Loss
  - Used to Reduce Background
  - In Detector

LONG CABLE AS AN ION CHAMBER

- \*Measurement of Loss along 3km
- \*Filled with Nitrogen Gas
- \*~100V Bias Voltage to
  - Center Conductor
- \*Temporal Distribution Readout
- \*Used to Turn Off or Reduce

MONITORING THE BEAM POSITION IN THE SLC INTERACTION REGION\*

J.-C. Denard, G. B. Bowden, G. J. Osoby, J.-L. Pellegrin, M. C. Ross  
Stanford Linear Accelerator Center  
Stanford University, Stanford, California 94305

Abstract

The Stanford Linear Collider requires special Beam Position Monitors near the Interaction Point (IP) to bring the two beams ( $e^+$  and  $e^-$ ) into collision. These beams pass through two monitors on each side of the IP with a short time separation (about 20 and 50ns). The mechanics of the monitors as well as the electronics will be described. In order to bring beams of several microns diameter into collision at the IP, these monitors measure beam deflection induced by the presence of the opposite beam.

Introduction

The  $e^+$  and  $e^-$  beams of the Stanford Linear Collider (SLC) must have very small transverse dimensions, a few microns, at the Interaction Point (IP) in order to achieve high luminosity. Such a small size increases the difficulty of steering the beams into collision. A promising method<sup>1</sup> uses two Beam Position Monitors (BPM) on each side of the IP to measure the deflection of either beam induced by the opposing beam at the crossing point. First, the undeflected beam position is measured in a BPM, located after the IP, with the opposing beam turned off. Then the deflected position is measured relative to the previous one by turning on the opposing beam.

In this method, we do not need absolute measurements, accurate to a micron, but rather require a pulse to pulse resolution of the order of 20fs. Furthermore, to measure the actual deflection accurately, the cross talk from the incoming beam should not induce more than 10µm error on position measurements of the outgoing beam. Considering the short time intervals between beams (about 20 and 50ns respectively for each pair of BPMs) and the possible disparity between the two beam currents ( $5 \cdot 10^{10}$  to  $5 \cdot 10^{11}$  particles), this is a tight tolerance on the monitor directivity and the electronics performance. Our choice went to low impedance coupler-type electrodes. Opposing beams are read out from opposite

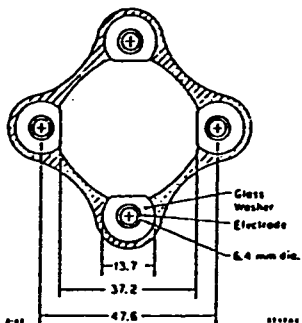


Figure 1: Transverse cross section of the monitor. The electrode diameter is calculated for a 50Ω characteristic impedance<sup>2</sup>; each cable collects 2% of the beam charge; position sensitivity is 10 µm/mm around the center.

ends of the monitor<sup>2,3</sup>. Beam signals from the downstream end of the BPM measure the relative deflection of the outgoing beam. The beam signals from the upstream end have a different purpose: they must measure the centering of the incoming beam in the quadrupoles to 100µm.

All electrodes are connected to their processing electronics with identical cable lengths (about 60m of RG214 coaxial cable), matched within 100ps. The electronic racks are always accessible for ease of maintenance.

Monitor Design

The Beam Position Monitors are designed<sup>4</sup> to mount in the boxes of the final quadrupole triplets of the SLC on either side of the Interaction Point. Figure 1 shows the transverse cross section of the monitor. The external aluminum body extrusion has four hyperbolic surfaces which match the iron pole faces of the quadrupole magnet. In this way the monitor's straightness and alignment with the magnet are insured. Mounting monitors inside the magnets saves considerable space along the beam line and avoids separate support and alignment structures.

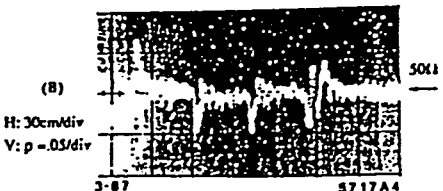
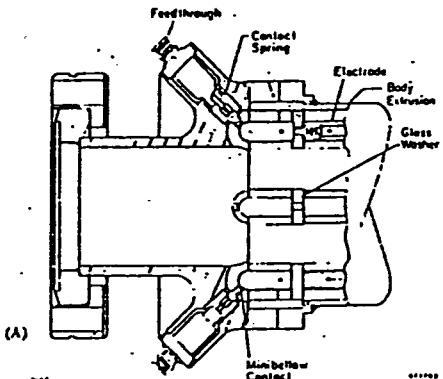


Figure 2: (A) Cross Section of the monitor end: To keep a 50Ω impedance, the electrodes have a smaller diameter inside the support washers as a compensation for the dielectric constant of glass. The coaxial feedthroughs carefully match the electrode impedance. (B) Reflectometer measurement of an electrode connected to a 50Ω reference load.

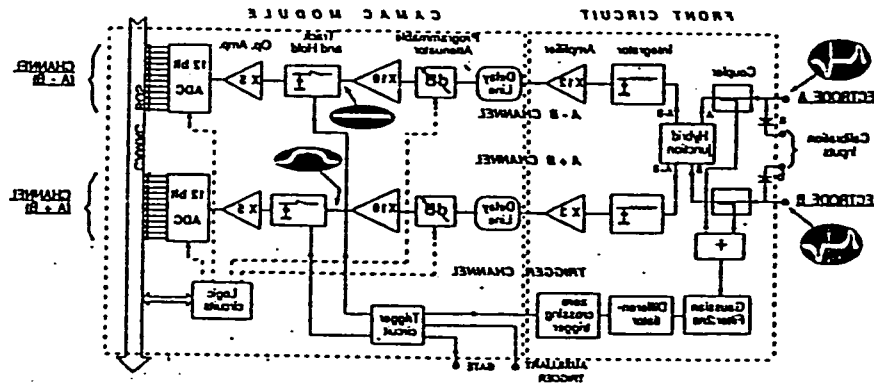


Figure 3: Block diagram of the processing electronics.

We would like to thank a few people for their interest in this project: W. Kozarzewski, J. Flory, J. Bampick, C. Fontana, M. Brown, A. Lee, R. Horvath, H. Tain, and the Final Focus Group.

References

1. R. Bampick, R. Einfeld, "Beam-Beam Deflection as an Interaction Beam Diagnostic for the SLC", SLAC-PUB-7219, May 1988.
2. J.-L. Pellegrin, "A Review of Accelerator Instrumentation", SLAC-PUB-2112, July 1980.
3. R. Linnemann, "Beam Instrumentation", SLAC Summer School 1981, p.205.
4. G. Bowden, "Beam Position Monitor for the Final Focus", unpublished.
5. J.-C. Denard, G. Osoby, J.-L. Pellegrin and E. Williams, "Mechanics of the Stanford Linear Accelerator Center", SLAC-PUB-7108, Feb 1987.
6. J.-L. Pellegrin, M. Ross, B. Scott and D. White, "Beam Position Monitors for the SLC", SLAC-PUB-7108, Feb 1987.

... and Difference signals before filtering and ...

The front end of each channel is composed of a wide bandwidth preamplifier (low  $\beta$ , 200MHz) for matching the input ...

... in the other BPM detector of SLC, over the same ...

The monitors are installed and the electronics is being ...

\* Work supported by the Department of Energy, contract DE-AC03-76SF00513.

## BEAM POSITION

- \*For Efficient Beam Transport
- \*To Avoid Beam Induced Field  
In Disk Loaded Wave Guide
  - Emittance Growth
  - Luminosity Reduction
  - Background Increase
- \*To Check Q-mag. Alignment

## STRIP LINES INSIDE BEAM PIPE

- \*4 Strips for  
Horiz. and Vert. Position  
or Only 2 Strips
- \*Vacuum Coax. SMC → 50Ω Cable
- \*Sometimes Rotated by 45°  
to Avoid Synch. Rad.
- \*Located at least Every 90° In  
Betatron Phase  
to get Adequat Trajectory
  - 270 for Linac
  - 1710 in total
- \*Readout by CAMAC
  - Subtract Signal→Amplitude
  - Sum Signal→Self Gating
- \*Multiplexing of Signals  
to Reduce Module Cost

check its response.

To preserve low cross talk levels the high frequency components of the arc BPM system have been packaged in a separate, monolithic, machined aluminum package. This device delivers a filtered, amplified, waveforms, along with a sampling trigger, to the CAMAC based 12 bit ADC. Pairs of electrodes are mounted making the BPM sensitive to either x or y. The signals are individually processed with the subtraction required for position information done in software. For calibration, a remotely controlled CAMAC pulse generator unit is used to inject pulses to the preamplifier. The pulse is evenly split and injected into two parallel amplifier chains. Their gain ratios at a given digitizer attenuator setting are measured for three signal levels and fit to a line. Variations from flatness do not exceed  $10^{-5}$  or ADC LSB.

The final focus interaction point BPM's serve as detectors of beam-beam deflection. As such they must have good resolution. In order to have good signal strength in a medium bandwidth and separate the the closely spaced (20 ns) incoming and outgoing beam pulses, the electrode set consists of four 1.3 m long and rods placed in an aluminum extrusion. Signal separation is achieved through the directionality of the electrode coupler (both ends are used) and by external gating from the timing stem. The signals are integrated and sampled using a system similar to the arc system.

Figure 1 summarizes the resolution of the two BPM electronic systems over their dynamic range.

Electronic contributions to absolute accuracy include effects from mismatched cables, electronic multiplexers, passive adders and splitters. Mechanical contributions include effects from surveying and electrode calibration, used to determine the difference between the electrical and mechanical center of the assembly. This calibration is done by simulating the beam pulse and coupling it to the electrodes by sending it down a rod in the center of the BPM. Readings are made as the BPM is rotated in fixture. Repeated measurements show the error in this procedure to be 25 μm. Cable tests are performed in a similar fashion,

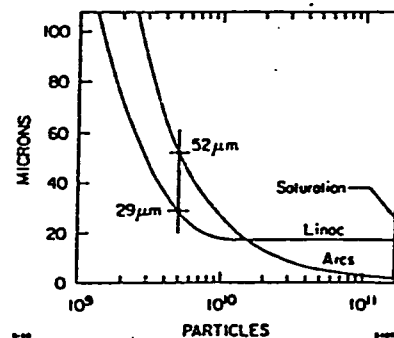


Fig. 1. Resolution for the two main BPM systems shown versus beam intensity.

Use Region

### Energy Spread Monitor

Injector	250 MeV
Injector	1.2 GeV
Linac-Arc	50 GeV

### Emittance Measurement

Damping Ring Exit	
Linac	50 GeV
Arc Rev. Bend	
Final Focus	

Since the beam shape may become very useful. A series of 8 for monitoring beam 'tail' growth of the linac. A pulsed magnet will the screens which are slightly off axis is used to compress the data by firing each horizontal line. Data from the wakefield tail growth by controlling

Video from each profile monitor is digitized. A CAMAC based partial frame flexible digitization of a portion of the number of 4 K 8 bit data points may spacing of 512/picture width by 25 the performance of these devices at the same size as the phosphor grain also arise from the camera tube and

Accurate, nondestructive, beams of this size are sometimes useful for estimate of energy spread aspect ratio is expected to be large as a full image. Two systems have been proposed. The first uses the quadrupole signals from the position monitor electronics are represented  $T, N, B, S$

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + z^2 - y^2 \propto \frac{N}{f}$$

Since the signal gives the square of the resolution expected in beam size, assuming the visible. This system has been implemented packages to add and subtract the electronics is used for digitization.

The other nonintercepting beam synchrotron light monitors. These rings and in the linac to arc transport case, a vertical three pole wiggler is X-rays through a tungsten converter screen. A set of horizontal lines the image are processed by an anal

but Not for the Linac  
 → Useful for Searching  
 Pulse-to-Pulse Beam Jitter  
 \*Accuracy : 100 μm  
 Short Term Reproducibility  
 : 25 μm  
 \*Resolution < 25 μm

AUTOMATED EMITTANCE MEASUREMENTS IN THE SLC\*

M. C. ROSS, N. PHINNEY, G. QUICKFALL,  
 H. SHOAZE, J. C. STEFFARD  
 Stanford Linear Accelerator Center  
 Stanford University, Stanford, CA 94305

Abstract

The emittance of the SLC beam is determined from measurements of the beam width on a profile monitor as a quadrupole field is varied. An automated system has been developed to allow this to be done rapidly and accurately. The image on a fluorescent screen profile monitor (resolution about 20 μm) is read out through an electronic interface and digitized by a transient recorder. A high level software package has been developed to set up the hardware for the measurements, acquire data, fit the beam width, and calculate the emittance.

Introduction

The optical matching of various SLC subsystems as well as optimizing the beam luminosity at interaction point requires accurate determination of the beam ellipsoid ( $\sigma$ -matrix) and emittance ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) at key points throughout SLC. The beam ellipsoid will be used as input to modelling programs such as COMFORT to calculate quadrupole strengths to achieve matched beam lines. Additionally, since emittance growth adversely affects the collider luminosity, an accurate estimate of its magnitude is valuable in controlling its growth and thereby improving the system performance. The phase space measurements in the vicinity of the injector also serves as a figure of merit for its operation. In view of the complexity of the measurement process and the number of locations where these measurements are required it was deemed desirable to automate the entire process as much as possible.

The basic idea behind the emittance measurements is to determine the horizontal and vertical beam size ( $\sqrt{\sigma_{11}}, \sqrt{\sigma_{22}}$ ), with a profile monitor as function of the strength(s) of an upstream quadrupole(s)<sup>†</sup> as shown in Fig. 1. Knowledge of the beam size at a particular location in the beam line for three different quadrupole strengths is sufficient to calculate the beam sigma anywhere along the beam line.

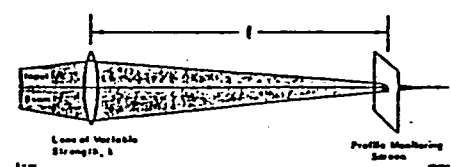


Fig. 1 Typical Emittance Measurement Profile Monitor Installation from the digitized beam profile

Theory of Measurements

Consider a quadrupole Q of strength  $k = \int \beta dL / (B_{av})$  separated from a downstream screen S by a transfer matrix S. The total transfer matrix of the measurement system is given by

$$R = SQ$$

where Q is the transfer matrix of the quadrupole

The  $\sigma$  matrix is propagated through the system by the relation<sup>††</sup>

$$\sigma^f = R\sigma^0 R^T \quad \text{where}$$

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & R_{34} \\ 0 & 0 & R_{43} & R_{44} \end{pmatrix}, \quad \sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ 0 & 0 & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{pmatrix}$$

then, for the above uncoupled system

$$\sigma_{11}^f = R_{11}^2 \sigma_{11}^0 + 2R_{11}R_{12} \sigma_{12}^0 + R_{12}^2 \sigma_{22}^0$$

$$\sigma_{22}^f = R_{21}^2 \sigma_{11}^0 + 2R_{21}R_{22} \sigma_{12}^0 + R_{22}^2 \sigma_{22}^0$$

The measured x-plane spot size at the screen is  $\sqrt{\sigma_{11}^f}$ . (y-plane may be deduced by analogy.)

THIN LENS FORMULATION

For a measurement setup where the length of the varying quadrupole is short compared to its focal length a simple relationship describes the emittance as a function of the lens strength<sup>†††</sup>. The transfer matrix for the quad in the thin lens approximation is

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

Hence the spot size as a function of the quad strength is given by

$$\sigma_{11}^f = S_{11}^2 \sigma_{11}^0 + 2S_{11}S_{12} \sigma_{12}^0 + S_{12}^2 \sigma_{22}^0$$

$$+ k(S_{11} \sigma_{11}^0 + S_{12} \sigma_{12}^0) 2S_{11}$$

$$+ k^2 \sigma_{11}^0 S_{11}^2$$

The measured  $\sigma_{11}^f$  may be fit to a parabola

$$\sigma_{11}^f = A(k - B)^2 + C$$

from which we can obtain the value of the  $\sigma$  matrix at the

\* Work supported by the Department of Energy, contract DE - AC03 - 76SF00515.

付 - 173



## BEAM PROFILE

- \*To Know the Emittance of Beam
  - Three or More Separated Screen Monitors
  - A Single Screen Monitor for Scanning Focusing Q-mag.
- \*Measurement of Energy Spread at Dispersive Location

## FLUORESCENT SCREEN AND COMMERCIAL TV CAMERA

- \*Advantage :
  - Simple
  - Digitizers are Commercially Available
  - Curve Fitting and Emittance Calculation Are Easy

- \*Disadvantage :
  - Radiation Damage of Screen, Camera, Optics
  - Disturbance of Beam
  - Wire Scan Monitor

- \*Profile Monitoring
  - at Linac End
  - Sample A Pulse Every Second

R. Fulton et al. / A high resolution wire scanner

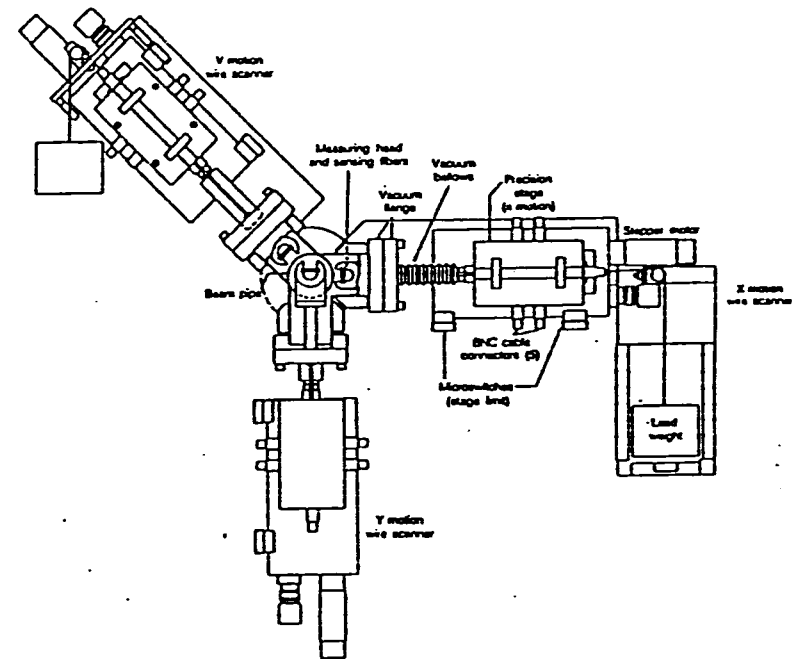


Fig. 2. Schematic of the arrangement of the three wire scanners mounted at the IP location. Some components are illustrated for the X-motion scanner.

head reaches the fully inserted position, as indicated by an electrical contact. The gear and ratchet mechanism which accomplishes this is seen in fig. 4. The calibrated wire spacing allows a direct calibration of the deflection magnet sensitivity, setting the scale for profile measurements. The wire rotation allows the beam waist measurement to be made in the directions of the X or Y axes, or any intermediate direction if X-Y correlations are present.

### 3. Electrical and electronic design

#### 3.1. Preamplifier and CAMAC module

Signals from each of the scanner wires are taken via 3 m lengths of RG223 cable (double-shielded) to a preamplifier which is completely surrounded by an electrostatic enclosure. In addition, the preamplifier is con-

tained inside a heavy lead shield which protects it from ionizing radiation. The circuit block diagram is shown in fig. 5. The input signal from the wire is buffered by charge sensitive preamplifier with provisions for placing a bias voltage on the wire and injecting a charge for the purpose of calibration. The signal from the preamplifier is amplified and shaped with a peaking time of about 1 ns. The output is sent via 125 m of shielded multiconductor twisted pair cable to a CAMAC module which serves as an interface to the rest of the digitization control modules, having connections for: calibration, wire bias, stepper motor control, encoder readout as analogue wire signal output. This signal is digitized by CAMAC analogue-to-digital converter (ADC).

#### 3.2. Signal response

Fundamental to the approach is the response of the electronics to the two types of input signal as illustrat-

by Use of Kicker Mag.

→Screen

- Camera is outside Shielding
- Use of Mirrors and Lenses
- Two Screens separated by 90° Betatron Phase

### WIRE SCAN MONITOR

\*Composed of Wires

Bellows

Linear Stage

Stepping Motor

\*Three Wires : 0°, 45°, 90°

(Hor. Vert. and Skew Project)

\*Avoid Wire Vibration

Caused by Stepping Motor

\*Accuracy : 2μm

\*Move the Beam

Rather Than the Wire

\*Detection of Interaction :

• Secondary Emission

(Strong Field of the Beam

Presents Noises)

• Scintillator + Photomul.

(or Ion Chamber)

to Detect Beam-Wire Scatt.

(Successful but

7004

Figure 2 shows the mechanical construction of the profile monitor. The screen itself, shown in the inset, has an active area of 4.2 mm vertical by 6 mm horizontal surrounded by an array of holes used for scale. The plane of the screen makes a 45 degree angle with the vertical plane so that the vertical active area is compressed to 3 mm. The screen insertion mechanism forces the holder upon a shallow tapered stop ensuring that the inserted position is reproducible. The phosphor,  $Gd_2O_3:S:Ti$ , is settled on the aluminum in a water bath and bound to it with barium silicate<sup>6</sup>. This technique is used by the CRT industry and results in a very fine grained screen.

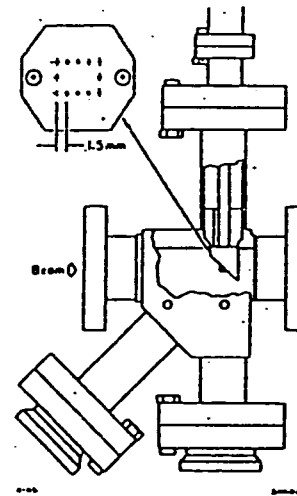


Fig. 2. Mechanical construction of the high resolution profile monitor. Illumination (for calibration purposes) enters through the port directly below the screen and the image is viewed through the lower left port.

The screens have been tested for linearity and sensitivity to radiation damage using the linac beam. No sign of radiation damage was observed after bombardment with  $1.6 \times 10^{11}$  electrons in a 0.5 mm spot. Some damage was seen at three times this intensity. Linearity tests showed no indication of saturation for beam spots of  $10^{16}$  particles in a 100 μm spot.

The screen is viewed with a diode array image tube television camera (72 diodes/mm)<sup>7</sup>. Typical camera performance contributes  $60\mu m/M$  to  $\sigma_{pp}$ , where  $M$  is the magnification of the camera optics. The .7 inch camera tube has an active area of  $8.8 \times 6.6$  mm, setting  $M = 1.5$ . The linearity of the diode array camera is very good and it exhibits none of the image burn in and saturation characteristic of amorphous photoconductor (vidicon) cameras. A 135 mm focal length telephoto<sup>8</sup> lens with remote iris control is used to focus the image and control the signal strength on the camera tube. Careful focusing and iris adjustment are required in order to keep this part of the system from contributing most of  $\sigma_{pp}$ .

The closed circuit television signal is transmitted SLC broadband communications cable to the control. There it is received by an ordinary television receiver passed to a video analyzer<sup>9</sup> which is used to select a horizontal and a vertical sampling line. The analyzer provides front panel control, both a trigger pulse which can be used to select a particular horizontal scan line and a composite signal made up by sampling each horizontal scan at a particular point along the scan. The vertical signal is accompanied with a synchronized clock. Horizontal and vertical slices of the image are digitized in two high speed tri waveform digitizers. Both are gated with the machine time trigger and record the waveform with 8 bit resolution 256 points. The data are then read out through CAM into the SLC control system into the main control computer.

Background data are taken with the beam suppressor subtracted from the beam on data. The result is scan signal and fit to a Gaussian. Spatial calibration constant (microns/mm) are either retrieved from the database or manually set using the pattern of holes on the screen. Slice emittance measurement consists of several beam size measurements made at different quadrupole settings, selected strengths are recorded as the data is taken and accepted. Time and other beam parameters are determined using an optics deck for that part of the system.

### SYSTEM PERFORMANCE

Figure 3 shows two examples of single pulse digitized from a screen at the 1.2 GeV point in the SLC injector. The online fit is shown superimposed on the data. These show the non-Gaussian nature of the beam emerging from SLC gun at currents of  $3 \times 10^{10}$ . Figure 4 shows  $\sigma^2$  vs strength of an upstream quadrupole. The error bars (typical) represent a weighted average of the errors on the fit  $\sigma$  for several (typical) measurements and represent only statistical errors.

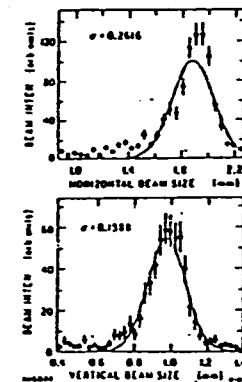


Fig. 3. Background-subtracted profile data taken 1.2 GeV point in the SLC injector. The online fit is superimposed on the data with the fit result for the  $\sigma$  shown in the corner.

Considerable Care  
Is Required)

\*Every 15 Minutes Measurement

#### SYNCHROTRON RADIATION

- \*Measurement of Beam Size  
In Damping Ring
- \*Measurement of Energy Spect.  
At the Linac End
- \*Simple Use of Video Camera
- \*Non-Destructive
  - Continuous Monitoring  
of Energy Spectrum
  - Useful Tool for  
Fine Tuning of RF Phase

#### A VARIANT OF STRIP LINE

- \*A Series of 6 Strips  
In Rectangular Chamber
- \*To Know Coarse Profile

#### BEAM-BEAM SCAN

- \*Ultimate Method to Know  
Beam Size

#### HEAD-ON COLLISION OF 47GEV $e^+e^-$

- \*Measure the Deflection of  
Beam by BPM
- \*Measure the Radiated Photon  
by Cerenkov Counter

#### LONGITUDINAL BUNCH LENGTH

- \*Typical Bunch Length :  
0.5% In Energy Spread  
1~1.5mm Length
- \*Bunch Length is Reduced at  
Transport Line  
6mm → 1mm
- \*Subharmonic Buncher  
at Injector: 600mm → Several mm

#### BEAM PICKUP RF CAVITY

- \*9GHz Resonator
- Output Signal Depends on

Freq. Component of  
Beam Pulse (Bunch Length)  
•Resonate For 5mm Bunch

STREAK CAMERA

\*Cerencov Radiation From  
Thin Quarz Plate  
\*Resolution : 2ps ?  
\*Useful at Early Commissioning

6 - 1.

Review of BNL and PNC

Collaboration Research

REVIEW OF BNL AND PNC  
COLLABORATION RESEARCH

H. TAKAHASHI

H. HARADA

PNC TOKAI LABORATORY

NOVEMBER 29, 1991

1. Feasibility study of Transmutation of Sr-90 and Cs-137 using Inertial Fusion
  - a. Transmutation in Blanket Region
  - b. Transmutation in Compressed Target
2. Transmutation of Minor Actinide and Fission Product (Tc-99) using Particle Fuel Reactor
  - a. Particle Fuel Incinerator
  - b. Radiation Damage Estimation of Liquid Lead Loaded Target Wall
3. Laser-Nuclear Interaction
  - a. Multi-photons Nuclear Excitation
  - b. Excitation of Isomer State by Laser Irradiation (Glaser)

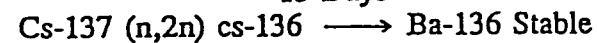
1. Feasibility Study of Transmutation of Sr-90 and Cs-137 Using Inertial Fusion

V. B. Rozanov, N. G. Basov, N. I. Belousov  
(Levedev Institute)

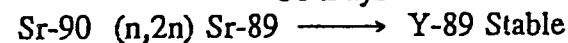
(a) Transmutation in Blanket Region

"Burn Up and Transmutation of Long Lived Fission Products and Actinides in a Laser-Driven Fusion Reactor"  
(ICENES'91)

13 Days



50 Days



Cross Section 1-2 Barns

4. Production of Coherent Tunable Gamma-Ray by Coalescing e and e+ Beams

5. Fast Reactor Assisted by Accelerator

6. Particle Fuel Thermal Transmutor and Phoenix Program

Cs-137

	Metallic Cs	Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Density	1.87 gr / cc	4.25 g / cc
Melting temp.	29°C	400°C

Sr-90

	Metallic Sr	SrO
Density	2.6 gr / cc	4.7 gr / cc
Melting temp.	769°C	2430°C

## LASER FUSION

## 1. LLNL

High gain > 100

5-10 MJ Laser Wave Length 0.25 - 0.53  $\mu\text{m}$

Present Gain 0.15% by 20 KJ (0.35  $\mu\text{m}$ )

Nd Glass Laser Efficiency 10 %

Cascade Design (Figure)

## 2. Nakai (Osaka University)

Temperature: 5 KeV

Density Ratio 500 - 1000

$\rho R > 0.3 \text{ g cm}^{-3}$

Present Data:

Osaka Univ  $10^{13}$  n 0.2 % gain.

LLNL  $2 \times 10^{13}$  n

PRODUCTION RATE OF Cs-137 OF 1 . GWth PWR:  
100 mol (14 Kg)

100 1 GWe PWR per year: 4.2 tons for Cs-137  
2.7 tons for Sr-90

Large Inventory of 4.2 Ton of Cs-137 and 2.2 Ton of Sr-90

To Reduce the Effective Half Lifetime to 3-4 Years,  
the First Wall Radius Becomes 50 cm for 1 Gwt Incinerator

High First Wall Loading 400 MW /  $\text{m}^2$  for 50 cm Radius  
12 MW /  $\text{m}^2$  for 300 cm radius  
(Cascade reactor)

Analysis Using MCNP Code

Reflector Width: 2-20 cm

Incineration Rate: 0.6 - 1.1 tons per year for Cs-137

Energy Required to 1 FP: 2.5 - 5. MeV for Reactor  
with Gain Factor of 10

Production of C-14 << Processing Rate of Cs-137

Thermal Loading in Cs-137 Target and Reflector  
Regions: 6-170 W / cc



Absorption length: 10 -20 cm (In Normal Condition)

Temperature of DT: 5-10 Kev

Temperature of FPs less than 1-10 Kev (Variable)

Many electrons in FP atom requires large compression energy

Thermal energy U in the compressed target.

$$U = U^{DT} + U^{FP} = (U_i^{DT} + U_e^{DT}) + (U_i^{FP} + u_e^{FP})$$

1. Ions are treated as classical particles

$$U_i = 3/2 N_i T$$

$N_i$  = number of ions

T = temperature

2. Electron is treated as Fermi-Dirac gas

Number of ionized electrons depend on compression factor and temperature

$$U_e = AT \int_0^{\infty} \frac{x^{3/2} dx}{e^{x-\eta} + 1} \quad T \text{ means } kT$$

$$A = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{h^2}\right)^{3/2} \quad \lambda = x$$

$$\eta = \frac{\mu}{T}$$

Density of FP is determined by  $P_{ft} = P_{dt}$

(b) Transmutation of Compressed FP with DT Target  
(H. Makowitz et al., (BNL)\* and K. Konashi et al.\*\*  
(PNC))

Makowitz H. et al.

\* "Hyperfuse: A Novel Inertial Confinement System Utilizing Hyper Velocity Projectiles for Fission Energy Production and Fission Waste Transmutation," Atom-Kernerg. Kerntech. 36,47 (1980)

\*\* K. Konashi, N. Sasao, P. Louvet, I. Sato, and Y. Hirao, "New Transmutation Method by Using Moving Target," International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, Monterey, California, June 16- 21, 1991

ADVANTAGE:

1. Low Inventory
2. If Alpha Particle is Utilized Efficiently for Heating and Compression, then it does not Require to Generate Electricity. No First Wall Problem.

RESULTS:

Energy Required to Transmute 1 FP: 5 Mev for  $T_{fp} = 1$  Kev and Compression Factor:  $10^4$

Transmutation Rate Per One Shot: 11 %

Compression of FP Requires Larger Energy than Compression of DT

Compression of FP with Low Temperature is Needed

FUTURE STUDY:

1. Thomas Fermi Model, or Analysis of High Density Plasma State
2. Alpha Heating and Compression Model
3. Heavy Ion Fusion (Rubbia, BNL-RHIC)
4. (N-gamma)-Reaction in High Temperature (Many Body Effect)

Energy required to incinerate the FP is

$$E = U / (P \cdot N_n)$$

$N_n$ : Number of Neutrons Produced in Implosion

P: (n,2n) Reaction Probability in FP

$N_n$  is Expressed By

$$N_n = \frac{N_t^{DT}}{2} \cdot F_b^{DT}$$

↑  
number of DT pair

$F_b^{DT}$  (=Burn up fraction of DT fuel) is expressed as

$$F_b^{DT} = \frac{q^{DT} r^*}{6 + q^{DT} r^*}$$

$r^*$  is the Radius After Compression

$\rho^{DT}$  is the Density of DT Target

2. Transmutation of Minor Actinide and Fission Product (Tc) using Particle Fuel reactor.

a. Particle Fuel Transmutor

High Flux Beam Reactor  
(Thermal Neutron Flux of  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>/sec)

(LANL Thermal Incinerator Requires Large Proton Current Accelerator)

Thermal Neutron Transmutor (Todosow et al., Last ICENES Conference)

Fast Neutron Transmutor (He Gas Cooled)  
(Mukaiyama)

Hard Neutron Spectrum: Short Neutron Lifetime and Small Doppler Coefficient

ACCELERATOR PARTICLE FUEL TRANSMUTOR:

Safe Operation: Subcritical  $k = 0.9-0.99$

Transmutation of Minor Actinide and FP of Tc-99, I-129

Use of Graphite Reflector: Long Neutron Lifetime

Still Hard Neutron Spectrum

Neutron Capture by Tc: 10-20 % of Total Neutrons

(Yield of Tc: 6% per Fission; about 27 Kg / 1 Gwe PWR /year)

Effective Half Lifetime 8-25 years (Depends on the Location of Tc) Fig.

b. Radiation Damage of Window and Pb Loaded Wall

Chierjacks(KFA)'s Criticism on the LANL Pb Target Design at Saltsjobaden Conference

H-Tape Code in Lahet Code System

Used the dpa Cross Section (2000 barn)

Evaluated by Yu A. Korovin et al. (Obninsk Preprint)

Takizuka (JAERI) Tungsten dpa might be Large

(a) MULTI-PHOTONS NUCLEAR EXCITATION

S-matrix

$$S_{fg}^{(1)} = -2\pi i \delta(E_f - E_g - h\omega) \langle f | V | g \rangle$$

$$S_{fg}^{(2)} = -2\pi i \delta(E_f - E_g - 2h\omega) \sum_i \frac{\langle f | V | i \rangle \langle i | V | g \rangle}{E_i - (E_g + h\omega_2) + i\epsilon}$$

Transition probability

$$W^{(1)} = \int |S^{(1)}|^2 \phi(h\omega) d(h\omega)$$

$$= (2\pi)^2 |\langle f | V | g \rangle|^2 \phi(h\omega)$$

where  $h\omega_1 = E_f - E_g$

$$W^{(2)} = (2\pi)^2 \left| \sum_i \frac{\langle f | V | i \rangle \langle i | V | g \rangle}{E_g - E_i - h\omega_2} \right|^2 \phi(h\omega_2)$$

where  $h\omega_2 = (E_f - E_g)/2$

Giant Dipole Resonance is a State of Collective Coherent (1-p 1-h state)

Cross Section to GD State is Roughly  $N^2$  (N: Number of 1-p 1-h States Participate to GD State = 10)

Consider 1f-1g-1h States for Sr-90 Proton Excitation

Wave Function is Calculated by Using the Square Well Potential with Infinite Wall

(b) EXCITATION OF ISOMER STATE BY LASER IRRADIATION (GLASER)

J. C. Solem, L. C. Biedenharn, G. A. Rinker

Transfer	I'(1 <sup>+</sup> )
Slow	Fast Lasing Transition
	0 (0 <sup>+</sup> )

Proposed Gamma-Ray Laser Level Scheme

Bormann Mode Propagation

Dual Process for Nuclear Excitation

Photo Absorption Via the Atomic Electron

1. Atomic Electron Can be Amplify the Field Produced at Nucleus
2. The Electrons can Produce Harmonics of the Driving Field
3. The Electron can Generate Electric Fields at the Nucleus of Higher Multi-Polarity than the Driving Field
4. Classical Model (Vlasov Gas)

$$\frac{W^{(2)}}{W^{(1)}} = \left| \frac{\langle f | \ddot{V} | i \rangle}{E_g - E_i + h\omega_2} \right|^2$$

$$\langle h | \overset{H'}{V} | g \rangle = -ie \frac{\sqrt{nh\omega}}{V} \langle h | \overset{\vec{x}}{V} | g \rangle$$

$$|\langle h | \overset{H'}{V} | g \rangle|^2 \approx 150 \frac{n}{V} [Me\tau]^2$$

$n$ : number of photons

$V$ : normalized volume [ $fm^3$ ]

$$E_{1f} + h\omega - E_{1g} = 0.85 MeV$$

$$F = 3.22 \times 10^{34} / cm^2 / sec$$

$$7.06 \times 10^{22} W / cm^2$$

$$\frac{n}{V} = \frac{F}{c} = 1.07 \times 10^{-15} / (fm)^3$$

$$\frac{W^{(2)}}{W^{(1)}} = \frac{150 \times 1.07 \times 10^{-15}}{(0.85)^2} = 2. \times 10^{-13}$$

Too Small Cross Section

6 - 2.

## Prototype Hardware Supply Options



# IAEA Advisory Group Meeting

Partitioning and Transmutation (P&T)

Vienna, 1991 Oct 21-26

21 delegates, 14 countries plus 7 IAEA (directorate)

## Leaders

- Japan
- France
- USSR

## Canada

- Geological disposal safe
- P&T research concept
- Participate on commercial basis



# A Perspective on Waste Transmutation

J. McKeown

AECL Accelerators

Kanata, Ontario

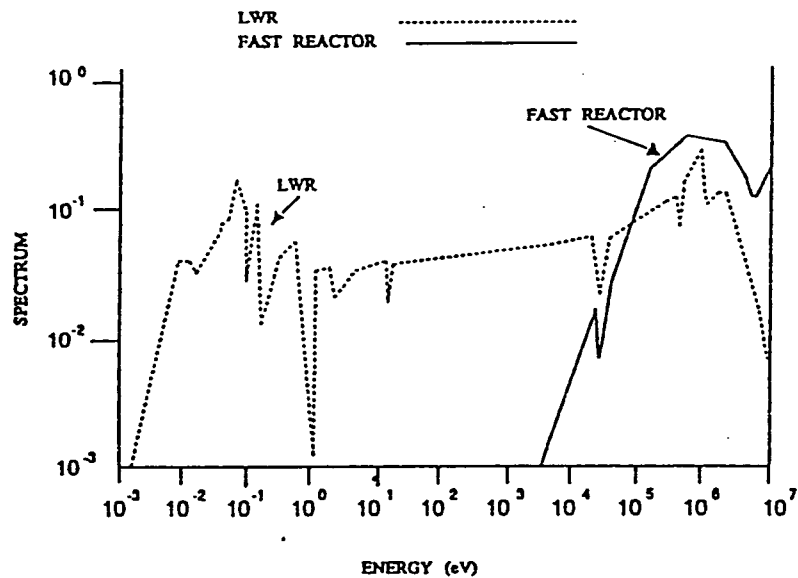
- Presentation to CNA Spring, 1991
- Presentation to PNC in support of Electron Proposal December, 1991

0. committed - PNC  
 1. built  
 2. AECL involvement.

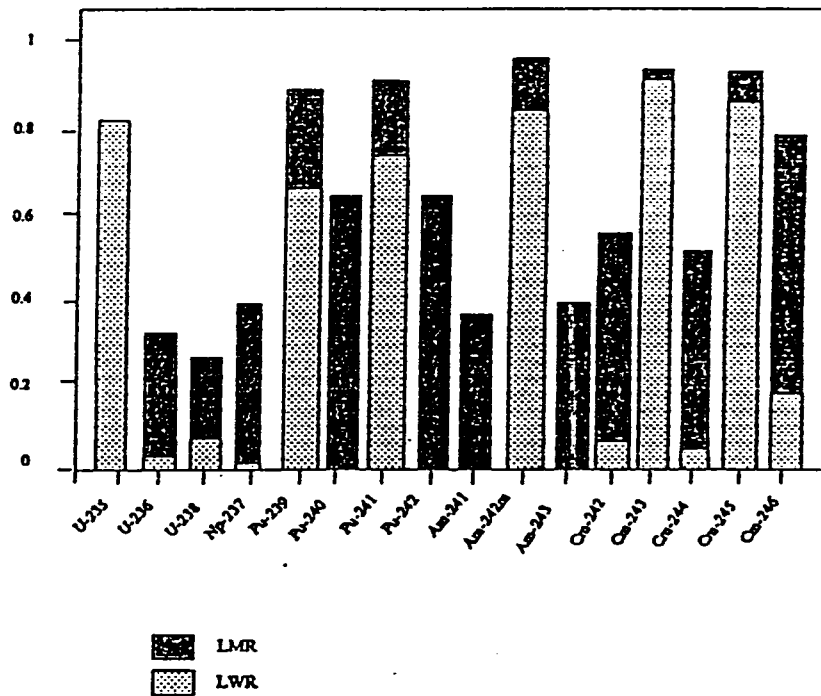
1. standing wave type  
 2. travelling wave type  
 3. induction type  
 (Livermore)  
 The amount  
 fast magnetic SW  
 efficiency of  
 conversion from  
 DC to RF

### NEUTRON SPECTRUM

T.J. DOWNAR  
ANS WASHINGTON



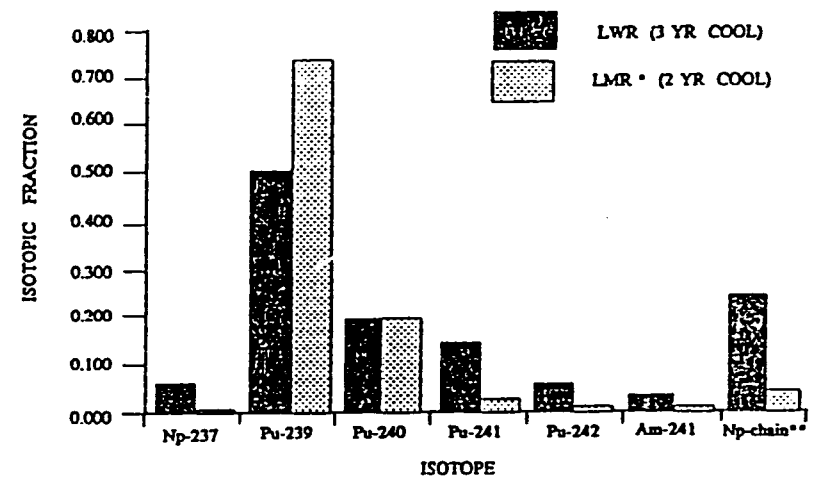
### PROBABILITY OF FISSION / NEUTRON ABSORBED





Tc - 99 and I - 129 TRANSMUTATION RATES (%/yr)

Isotope	LWR*	LMR**
TC - 99	11	5
I - 129	3	10





## Burn-up (Protons)

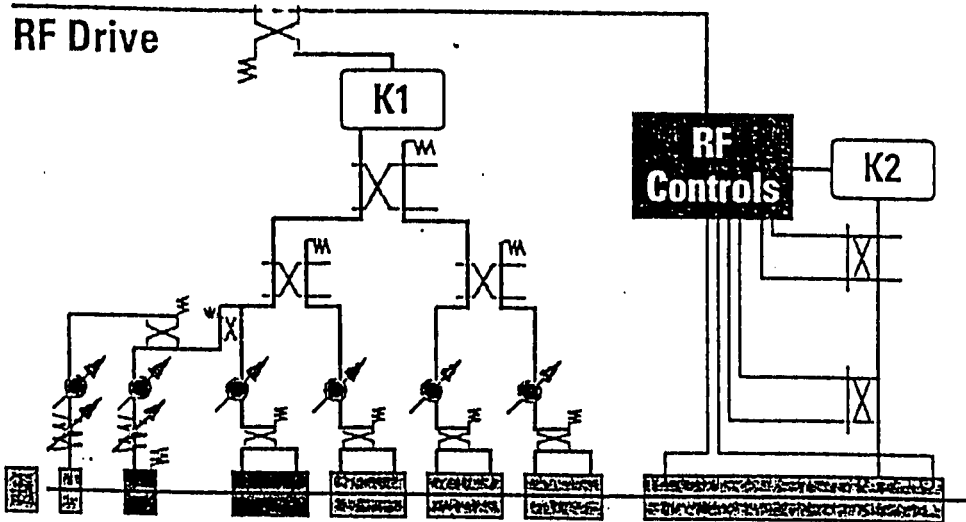
- Production**  
 1000 MWe (LWR) → 25 kg/a
- Direct Burn-up**  
 1.5 GeV proton with 300 mA  
 ↓  
 100 kg/a
- Neutrons**  
 Spallation Target → 250 kg/a

### Accelerator - Subcritical Hybrids vs. Reactors

Problem	Accelerator - Subcritical Lattice	Reactor (Fast Spectrum)
Subcriticality	Supplement Using Accelerator (Protons Induce Spallation)	Add Fissile Materials (More Actinides, More Fission Products)
Reactivity Build-Up	Reduce Current Adjust "Burnup" Rods Change Geometry	Burn-Off Fissile Loading (U or Pu) Adjust "Burnup" Rods Reduce Fuel Loading
Shut-down	Fuses in Beam and Coolant System Cut Off Beam	Scram Systems "Passive" Shutdown Systems (1)
Reactivity Accidents	Insignificant: Subcritical	Scram or "Passive" Shutdown (1)
Uncertainties in Cross Sections	Adjust Beam to Compensate	Perform Critical Experiments
Problem Fission Products from LWR Waste Stream	Transmute Using Leaked Neutrons or Additional Targets (2)	Not addressed (Need Thermal Neutrons)



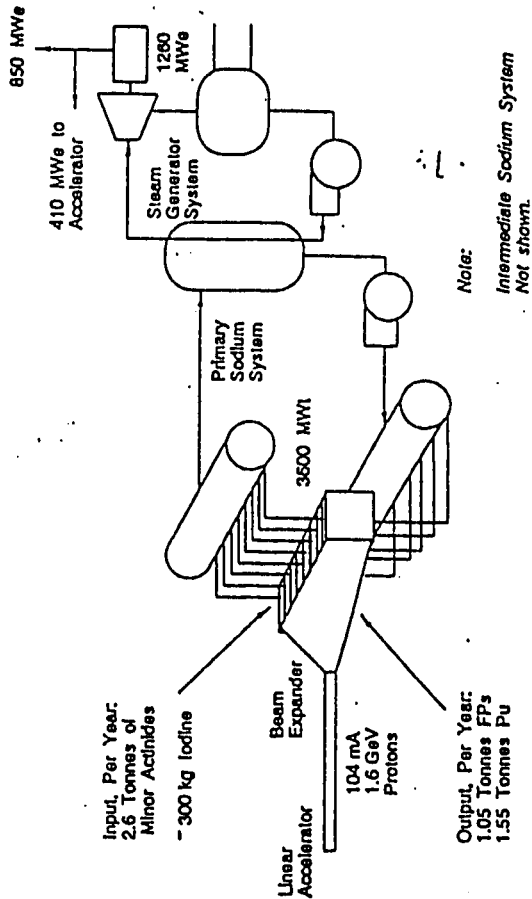
# Test Electron Accelerator



100

①, recirculator  
Est. for 1st & 2nd (McKeown)  
RF 及 特小 c  
cc 11/1/85

## THE PHOENIX CONCEPT



Input, Per Year:  
2.6 Tonnes of  
Minor Actinides

~ 300 kg Iodine

Linear  
Accelerator

Beam  
Expander

104 mA  
1.6 GeV  
Protons

3600 MWt

Primary  
Sodium  
System

1260 MWt

410 MWt to  
Accelerator

850 MWt

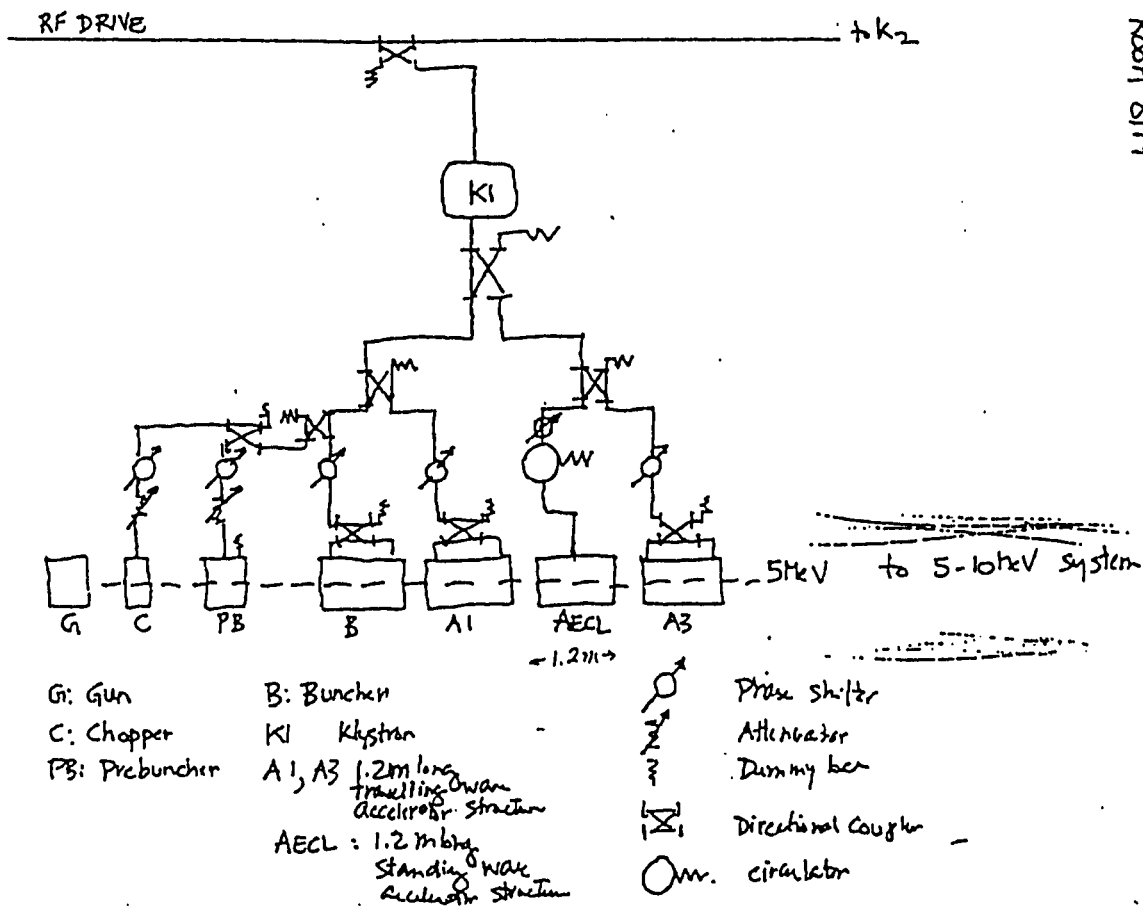
Output, Per Year:  
1.05 Tonnes FP's  
1.55 Tonnes Pu  
~ 300 kg Xenon



# History

## PNC/AECL Accelerator Association

- August 1990 Conceptual design delivered
- September 1990 Proposal for 5 to 10 MeV stage
- April 1991 Proposal for design of 5 to 10 MeV stage
- December 1991 Program review



DR. JOE MCKEOWN  
Room 8117

USEC

NS

30f3

COMPARISON OF ACTINIDE BURNING

	LMR (MAB) <sup>1</sup>	ACCELERATOR <sup>2</sup>
Power (MW th)	1157	3600
Cost <sup>3</sup>	1.0	4.7
Annual Mass Flow		
LWR Minor Acts (kg/yr)	341	2600
(Number of LWRS) <sup>4</sup>	(12)	(75)
Recycled Acts (kg/yr)	2665	-
LWR Plutonium (kg/yr)	17	-
Actinides Fissioned (kg/yr)	341	1050
Actinide Fissioned / Total Inventory	0.12	0.40
Actinide Fissioned / MWth	0.29	0.29
Actinide Fissioned / \$ (LMR)	1.0	0.67
I-129 Transmuted (kg/yr)	-	300



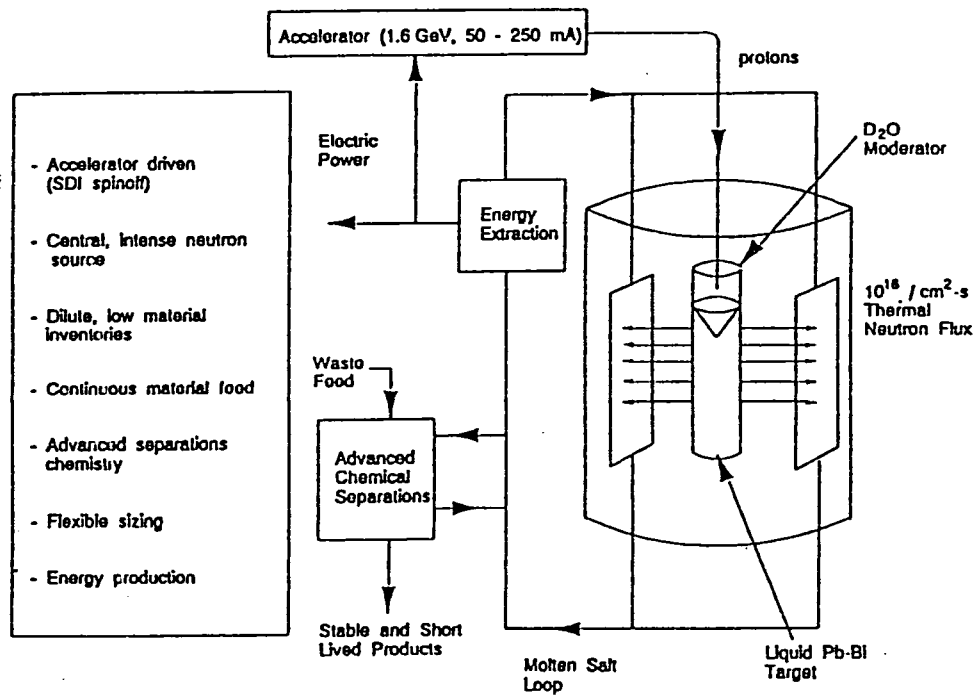
37

**A. Prototype Hardware Supply Options**

1. Entire structure and controls/electronics
2. Entire structure
3. Partial structure
  - AECL also provides commissioning support

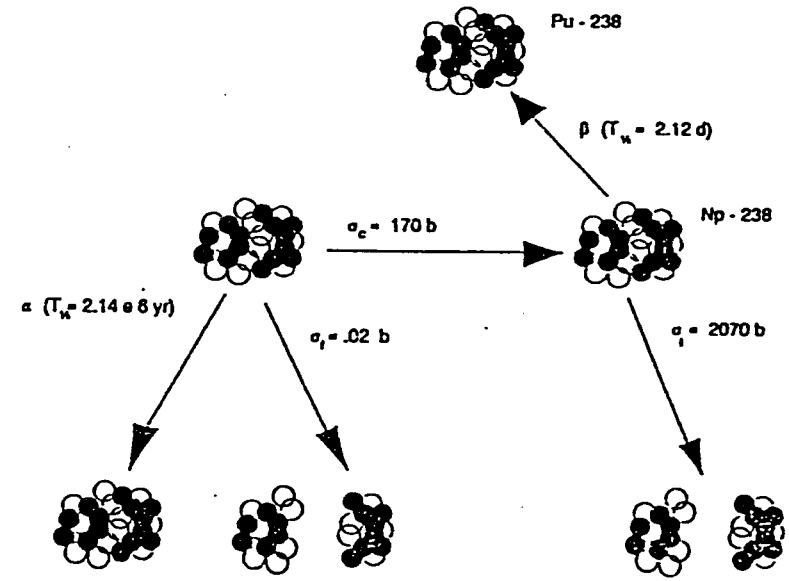
*Slides 22 - 36 Eletron Accelerator Structure design calculations  
 Task - stability at high power gradient  
 and heavy beam loading*

Los Alamos National Laboratory



- Accelerator driven (SDI spinoff)
- Central, intense neutron source
- Dilute, low material inventories
- Continuous material feed
- Advanced separations chemistry
- Flexible sizing
- Energy production

TWO-STEP THERMAL FISSION OF Np - 237



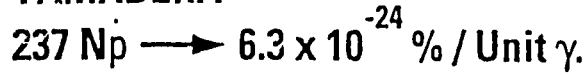
Np - 238 Fission Probability:	$\Phi$ (n/cm <sup>2</sup> -s)	$N/N_0$ (t = 2.12 d)
		10 <sup>4</sup>
	10 <sup>16</sup>	0.023



## Burn-up (Electrons)

( $\gamma, n$ ) & ( $\gamma, f$ ) TRU

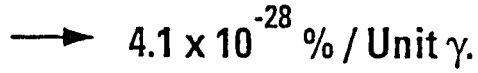
▲ YAMADERA



( $\gamma, n$ ) fission products

▲ MATSUMOTO

$^{137}\text{Cs}$



$^{90}\text{Sr}$

### ATW PERFORMANCE

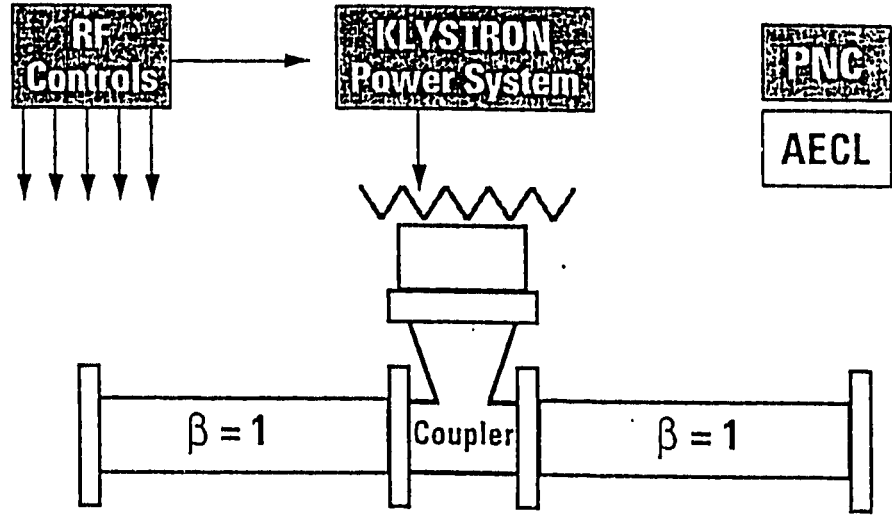
	Fission Products	Actinides
Transmutation Rate per System (Defense Waste Application)	300 - 350 kg/yr	75 - 100 kg/yr

Defense Wastes: Transmute complete inventory of HLW at sites such as Hanford in 30 years.  
 Commercial Wastes: Transmute all long-lived waste discharge from ten power reactors per year.

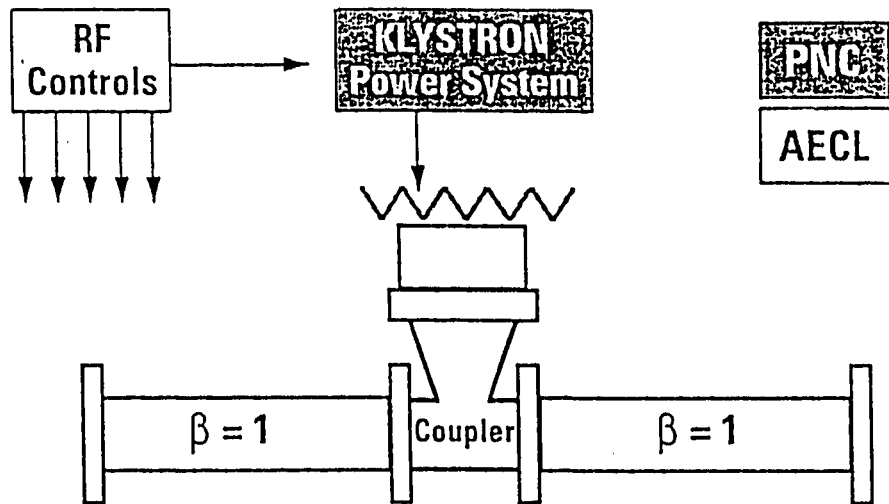
20



### Option 2



### Option 1





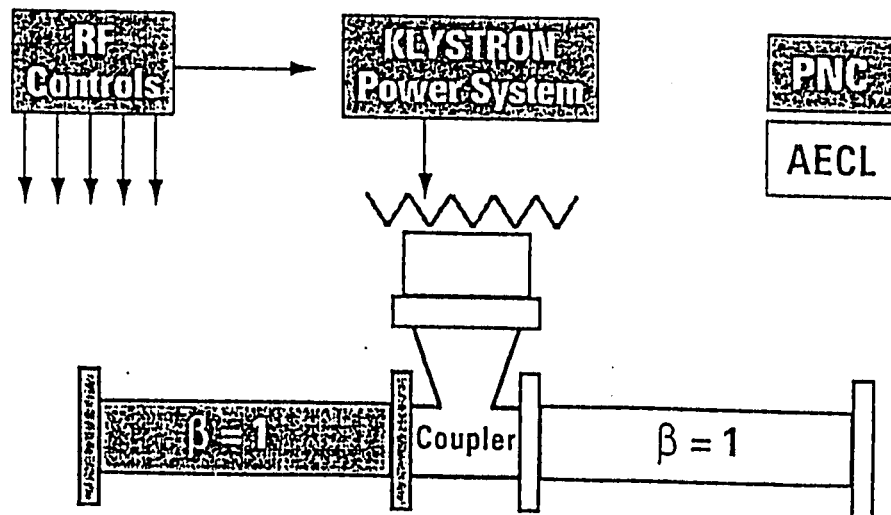


## B. Technology Ownership Options

1. AECL owns
  - Deliver
    - Results of computer simulations
    - Assembly drawings
2. PNC obtains licence from AECL for fee
  - Deliver
    - Construction drawings
    - Wiring diagrams
    - Manufacturing support



### Option 3





## **Action**

- 1. PNC selects desired options, A and B.**
- 2. PNC sends work scope to AECL.**
- 3. AECL responds with proposal.**