

# 海外加速器調査報告書

—本文編—

昭和63年11月

動力炉・核燃料開発事業団

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下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

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

## 本文編 目次

	ページ
1. はじめに .....	1
2. 調査目的 .....	3
3. 我が国の放射性廃棄物政策における群分離・ 消滅処理技術研究開発の位置付けについて .....	7
4. 世界の消滅研究について .....	12
5. 電子加速器を用いた消滅処理 .....	17
6. 消滅処理用電子加速器研究の現状 .....	20
7. Chalk River 研究所における研究 .....	30
8. MITにおける研究 .....	53
9. CEBAFにおける研究 .....	74
10. '88 Liac Conferenceの紹介.....	87
11. あとがき .....	103

## 1. はじめに

放医研 平尾泰男

群分離・消滅処理技術の研究開発は、わが国の使用済核燃料の再処理・処分の基本方針にそって、その効率化、資源化、安全性について新たな可能性を追求するものである。原子力委員会は「原子力開発利用長期計画」（S. 62年6月）において、これを極めて重要な課題と位置づけ、計画的に推進すべきものとした。同委員会放射性廃棄物対策専門部会は、その線に沿って「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」（S. 63年10月）を取りまとめ、同委員会の了承するところとなった。

これより先、動燃事業団においては、問題の重要性に鑑がみ、S. 61年11月より核変換ワーキング・グループを発足させて、消滅処理法とそれに関連する加速器等について種々検討を重ねて今日に到っており、その検討結果は上記のまとめにも反映させてきた。

その検討の内容は、エネルギーバランスの観点からみた方法論の基礎的検討、必要な工学・技術の可能性検討、必要な基礎的実験データの集積、理論的計算コードの整備、物理学的新局面の模索等極めて多岐にわたっている。新たな可能性の追求には、大強度粒子線の導入は必至である。比較的現有技術の延長上にあると思われる電子加速器開発は、妥当な規模で核反応消滅の第一歩が踏み出せる点、大規模となる陽子線の加速技術のシミュレーションともなる点等を考慮すると、このような長丁場の研究開発では妥当な一里塚と思われる。勿論併せて炉・加速器複合系、新方式の開発等の可能性・妥当性を詰めなければならないと考えられる。

さて、このような観点にたって、世界の大強度電子加速器の開発の現状、将来的動向等を調査し、かつ動燃事業団で検討中の諸課題について、海外の関連研究者と討論する目的で、加、米の研究所の訪問が計画されたのは意義あることであった。

以下に、この調査結果ならびに調査に際して作成した資料等をまとめ、今後の関係者の検討に役立てたいと考え、本報告書を作成した。なお、この方面の

研究は、上にも述べたように未確定な要素が山積しているので、各項目の記述を全員の一致した見解とすることは困難であり、またそうすべき段階でもないので、各筆者に自由に記述して頂いたことを付記する。

## 2. 調査目的

動燃事業団 天野一朗

核変換ワーキング・グループ（昭和61年11月第1回開催）にて消滅処理方法及び加速器等について現在まで種々検討してきた。

( $\gamma$ , n) 反応による消滅処理を考えるとすれば、その発生装置として電子加速器があり、工学試験のためには、100MeV 100mAの加速器が必要となり、その加速器概念が研究によって明確となってきている。

さらに、62年頃よりカナダ・チョークリバー研究所よりPNCの研究及び加速器開発について興味が示されていた。

此の度、電子加速器に関する開発の現状と将来動向等について調査をし、我が国の研究開発に役立てることを目的として、昭和63年9月27日から10月9日まで下記日程表のとおり、加・米の研究所を調査した。

〔海外加速器調査日程表〕	
9月27日 (火)	東京発
9月28日 (水)	Chalk River 研究所訪問
9月29日 (木)	Chalk River 研究所訪問
	Chalk River ⇒ Ottawa ⇒ Boston
9月30日 (金)	Massachusetts Institute of Technology 訪問
10月1日 (土)	Boston ⇒ Washington D.C.
10月2日 (日)	Washington D.C. ⇒ New Port News⇒
	CEBAF technology 訪問
10月3日 (月)	} 1988 Linear Accelerator Conference 出席
10月4日 (火)	
10月6日 (木)	
10月7日 (金)	New port News ⇒ New York
10月8日 (土)	New York 発
10月9日 (日)	東京着

アメリカ・カナダに於ける加速器技術調査について

(1) 目的

核変換技術（消滅処理技術）開発の重要部分を占める高エネルギーγ線（X線）発生装置には、従来なかった大出力電子線直線加速器を必要とするが、現存する各種大形直線加速器を所有する研究所を訪問のうえ、実機の調査と関係研究者との技術的意見交換をおこなうことにより、大出力電子線直線加速器開発に資する。

(2) 調査対象

国	大学・研究所	仕 様	特 長	目 的	将来性・潜在能力	調 査 項 目	
カナダ	9月28日(水) 29日(木) チョークリバー 研究所  (オタワ)	C W ライナック			(1)重合 (2)水処理 (3)排ガス処理 (4)食品照射 (5)核増殖	中エネルギー高出力電子加速器として出力増強の可能性が最も高い。 開発方向としては、エネルギー増強電流、マイクロ波系の大電力化、高出力電流に対するビーム不安定性の改善等が必要。 〔～1MW/1台 at 30MeV〕	C W高出力ライナック (1)4MeV 20MA LINAC 詳細構成、将来計画 (2)ビーム加速実績と問題点High currentへの問題点 (3)加速管設計パラメータ計算コード調査 (4)技術Discussionへの計画の可否 High current Linac
		最高エネルギー	Beam power (エネルギー電流)	周波数			
アメリカ	9月30日(金)  マサチューセッツ 工科大学  (MIT)  (ボストン)	ハイデュティパルスライナック			(1)原子核実験 (2)二次粒子利用 ( $\pi$ , n) (3)測定精度向上	中高エネルギー大出力電子加速としては一つの方法であるがビーム効率が悪い。	ハイデュティ高エネルギーライナック (1)ハイデュティライナックの状況(構成の詳細、運転記録) (2)構成—その後の改良点 最大デュティ記録と問題点最大出力 (3)構成機器(ハイデュティ、クライストロン、パルスモジュレータ、RF伝送系、ビーム取出窓) (4)発生する問題 冷却方法、P/I処理、放射代(空気、水、金属他)、安全設備
		最高エネルギー	Beam power (エネルギー電流)	周波数			
アメリカ	10月2日(日)  シーバフ  (スーラ大学)  (ニューボートニス)	超伝導連続動作マイクロトロン			(1)原子核実験 (特に精密測定)	(1)従来超伝導リニアックの加速電流は数 $\mu$ A以下であったが、ビーム不安定現象の研究により一気に2桁の強度増加を目指す。成功すれば超伝導リニアックの可能性がたかまり、世界に後を追う計画が続出するであろう。	(1)超伝導リニアックシステムの全般 (2)ビーム不安定性制御技術 (3)我が国で実現し得るか—超伝導機器コストが米国は日本より遙かに低いのは何故か。
		最高エネルギー	Beam power (エネルギー電流)	周波数			
		エネルギー 0.5~4GeV 可変	200 $\mu$ A 連続 ビーム電力 100~800kw	1497MHz 5 kwクワイ トロン×418			

### 3. 我が国の放射性廃棄物政策における群分離・消滅処理技術研究開発の位置付けについて

科学技術庁 高橋哲夫

我が国は、使用済燃料を再処理することにより発生する高レベル放射性廃棄物は安定な形態に固化した後、30年から50年程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下数百メートルより深い地層に処分することを基本的方針としている。

群分離・消滅処理技術研究開発は、このような高レベル放射性廃棄物の処分の効率化、含まれる有用元素の資源化及び積極的な安全性の向上という新たな可能性を目指す研究開発である。

昭和62年6月に決定された原子力委員会の「原子力開発利用長期計画」において、群分離・消滅処理は、「高レベル放射性廃棄物の資源化とその処分の効率化という観点から極めて重要な課題」と位置付けられ、そのための研究開発を計画的に推進すべきものとされている。

原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会は、「原子力開発利用長期計画」に示されたこの指摘をフォローアップするものとして、本年5月から群分離・消滅処理技術の研究開発の進め方を調査審議してきたが、10月11日に開催された専門部会において「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」が取りまとめられた。その後、10月25日に原子力委員会に報告され、了承された。

科学技術庁においては、この長期計画に基づいて具体的な実施方策や関係研究機関の役割分担、国際協力のあり方等について検討を進めるため、「核種分離・消滅処理技術研究開発推進委員会」を適宜開催することとしており、10月に第1回の委員会が開催された。

今後、関係研究機関が相互に密接な連絡を取りながら本研究開発を進めていくことが期待されている。

「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」の要約は、以下の通りである。



# 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告書

## 「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」

(要約版)

昭和63年10月  
放射性廃棄物対策  
専門部会事務局

### 1. 必要性

次のような諸点に鑑み、将来の新たな可能性を目指す技術の研究開発として推進する必要がある。

- (1) 高レベル放射性廃棄物の含有物の特性に着目し、長寿命核種や白金族元素等を分離し、それぞれの特徴に応じて、処分や有効利用を行えば、高レベル放射性廃棄物の処分の効率化（最終処分の負担の軽減化）、有用元素の資源化等が図れる。
- (2) 分離した長寿命核種等については、核分裂、核破砕、光核反応等の核反応により、短半減期又は非放射性の核種に変換することにより、より一層処分の効率化等が図れる。
- (3) 群分離・消滅処理技術は、現在の再処理プロセスや高レベル放射性廃棄物の処理・貯蔵・処分システムを高度化し、積極的な安全性の向上に資する。
- (4) 群分離・消滅処理技術の研究の成果は、レーザー技術、加速器技術の向上等創造的・革新的要素を多く含んでおり、他の技術分野においても有効である（研究開発の波及効果）。

### 2. 群分離・消滅処理技術研究開発の現状

- (1) 我が国においては、日本原子力研究所及び動力炉・核燃料開発事業団において開始され、その後、電力中央研究所等においても実施されてきており、着実な研究開発の展開を示している。
- (2) 群分離技術については、高レベル放射性廃液中の元素を超ウラン元素（TRU核種）群、ストロンチウム・セシウム群、テクネチウム・白金族元素群及びその他の元素群の4群に分離する研究開発が進められている。併せて、

高レベル放射性廃液からTRU核種を乾式群分離法で分離する研究開発、再処理工程における不溶解残渣から白金族元素を回収し、その有効利用を図るための研究開発が進められている。

- (3) 消滅処理技術については、原子炉による消滅に関し、TRU核種を燃料とする専焼高速炉の研究、TRU核種混合MOX燃料を高速増殖炉(FBR)で消滅させる研究及びTRU核種・ウラン・プルトニウム混合金属燃料をFBRで消滅させる研究が進められている。また、加速器による消滅に関し、TRU核種を陽子加速器から得られる高エネルギー陽子で直接に核破碎させる反応(スポレーション反応)の研究、ストロンチウム・セシウム等の核分裂生成物やTRU核種を電子加速器から得られるガンマ線を用いた光核反応により消滅処理させる研究が進められている。

### 3. 群分離技術研究開発の長期計画

昭和75年(西暦2000年)までの研究開発を、概ね次により進める。

#### (1) 第1期

高レベル放射性廃液の群分離技術の開発、不溶解残渣からの有用金属回収技術の開発及び分離元素の有効利用技術の開発に関し、レーザー技術の活用を含めた研究開発を進める。例えば、高レベル放射性廃液の群分離技術に関しては、群分離プロセスの中心となるべき骨格を構築するために必要な基礎的総合試験研究を、高レベル模擬廃液又は高レベル実廃液を用いて実施する。

#### (2) 第2期

昭和76年以降のパイロット規模試験・実用化試験等を目指し、それぞれの研究開発を更に進展させる。例えば、高レベル放射性廃液の群分離技術に関しては、プロセスの総合工学試験を高レベル実廃液を用いて実施する。

### 4. 消滅処理技術研究開発の長期計画

昭和75年までの研究開発を、概ね次により進める。

#### 4.1 原子炉による消滅

##### (1) 第1期

炉物理・物性データの整備を行う。

FBRでの消滅については、炉心解析・最適化、サンプル照射試験等を実施する。

専焼高速炉については、炉心・プラントの設計研究、サンプル照射試験等を実施する。

##### (2) 第2期

炉物理・物性データの整備等を更に進める。

FBRでの消滅については、燃料照射試験の結果を踏まえつつ、「常陽」での装荷試験を実施する。

専焼高速炉については、技術的成立性を実証するため、燃料照射基礎実験、実証炉予備設計等を実施する。

#### 4.2 加速器による消滅

##### (1) 第1期

陽子加速器による消滅については、原理的実現性を実証するため、設計に必要なコードの開発、ターゲット系の炉物理実験及び加速器建設に必要な大電源化等の要素技術の開発を実施する。

電子加速器による消滅については、設計に必要なコードの開発、既存の加速器を用いた炉物理データ取得のための基礎試験、ビーム安定化等に関する要素技術の開発等の総合基礎試験研究を実施する。

##### (2) 第2期

陽子加速器による消滅については、消滅処理プラント概念設計、核データの収集等を進め、工学的な実現性を実証するための加速器（10mA－1.5GeV級）を建設し、工学試験を実施する。

電子加速器による消滅については、工学的な実現性を実証するための加速器（100mA－100MeV級）を建設し、工学試験を実施し、消滅処理プラントの

概念設計及び詳細設計を実施する。

なお、上記の陽子加速器又は電子加速器の建設については、第1期の終了時点で総合的なチェック・アンド・レビューを行って検討する必要がある。

## 5. 国際協力

群分離・消滅処理技術の研究開発は、原子力開発を進めている国の共通の課題であり、我が国が今後、更に積極的にこの技術の研究開発を進めるに当たっては、この技術の研究開発を進めている欧州共同体（EC）、西独、仏、米国等の諸外国と緊密な協力を進めるとともに、OECD/NEA等の国際機関とも連携を図っていくことが必要である。

## 6. 具体的な進め方

- (1) 群分離・消滅処理の実用化までには、安全性・経済性等も含めた総合的な検討が必要であり、この長期計画に基づく研究開発については、概ね3年乃至5年毎に適宜、チェック・アンド・レビューを行った上で見直していくことが適当である。
- (2) この長期計画に基づく、具体的な研究開発を推進していくためには、行政当局が関係研究開発機関と密接な連携・協力を進め、具体的な実施方策、国際協力等に関し、全体的な研究開発の総合調整を図っていくことが必要である。

## 4. 世界の消滅研究について

北海道大学 松本高明

### 4.1 はじめに

萌芽期の消滅処理研究としては、長寿命放射性廃棄物に圧力や磁場などのマクロ的な外力を加えることによって核種変換を考えた時期もあったが<sup>1</sup>、現在考えられている長寿命放射性廃棄物の消滅処理法は放射線照射による核種変換過程にもとづいている<sup>2</sup>。消滅処理には次のような放射線を利用する。

中性子線	： 中性子反応 (n, f), (n, γ) など
	原子炉 (LWR/FBR), 核融合炉, 加速器を利用
	陽子線
陽子線	： 破碎反応
	陽子加速器を利用
ガンマ線	： 光核反応 (γ, n), (γ, f) など
	電子加速器を利用

また、消滅処理の対象となる放射性核種は主に高レベル放射性廃棄物 (HLW) 中に含まれる長寿命放射性核種である。つぎのような核種が対象になっている。

超ウラン元素 (TRU)	： Np, Am, Cm, ...
	長寿命核分裂生成物 (F. P.)

簡単にいうと、消滅処理の効率は核種変換の断面積  $\sigma$  と放射線束  $\phi$  の積  $\sigma\phi$  に比例する。したがって対象核種に応じた適当な種類の放射線を選択することが肝要である。すなわち、

TRU	}	中性子線
		陽子線
		(ガンマ線)
長寿命F. P.	}	ガンマ線
		(陽子線)

また、消滅処理に利用する放射線発生装置としてはつぎのものがある。

原子炉 (FBR/LWR) :	TRUは燃料として利用出来る
陽子加速器 :	TRUの他に長寿命F. P. も消滅出来る
電子加速器 :	

#### 4.2 原子炉利用の消滅処理

1972年米国の Oak Ridge 国立研究所の Claiborneが軽水炉を用いたTRUの消滅処理を最初に提案した<sup>3</sup>。それ以来、原子炉による消滅処理に関する核計算の理論的な研究が世界各国で数多くなされ、消滅処理研究の主流であった。現在では原子炉によるTRUの消滅処理の技術的な可能性は理論的に確立している。LWRおよびFBRもともにTRUを消滅することができる。いままで世界で行なわれた原子炉利用による消滅処理研究の具体例を第4-1表に示す<sup>4</sup>。その後、核的検討だけでなく、実際に消滅処理を適用する場合について群分離技術を含めた消滅処理技術全般についてのアセスメントがIAEA<sup>5</sup>、OECD<sup>6</sup> およびORNL<sup>4</sup> において行われた。

- (1) 原子炉による消滅処理法の核的な可能性は確立されている
- (2) 群分離技術の工業的規模の実現には多くの研究開発が必要である
- (3) 消滅処理を行うことによって逆に短期的な危険性が増大する
- (4) 長期的な危険性の減少は地層処分技術の進展と競合する
- (5) 消滅処理による核燃料サイクルコストの上昇は約5%である

などのことが指摘された。

殊に、ORNLのアセスメントにおいて消滅処理技術の推進に否定的な見解が示されたために、その後、消滅処理研究は不活発になった。しかしながら、廃棄物処理の動向は処理に要する費用と環境問題の圧力とのバランスにより決定される事は他の廃棄物の場合と同様である。HLWの処分に関する環境問題の圧力が増大するのに伴って、群分離技術を含めた消滅処理技術が世界的に改めて注目されるようになった。

原子炉利用のTRUの消滅処理方法は現在では最も確実性のある方法であ

る。しかしながら、実際にTRUを用いた照射試験は西独カールスルーエ研究所においてAmについて行われた他は余り見当たらない。今後は、原子炉殊に高速炉を用いてTRUの照射試験を行い消滅処理技術の実証性を実験的に詰めてゆく段階にある。

また最近の新しいアイデアとして日本において(1)金属燃料を用いた高速炉におけるTRUの消滅処理<sup>7</sup>及び(2)TRU専焼の高速炉<sup>8</sup>が提唱されている。

前者は中性子スペクトルが従来の酸化物燃料の高速炉よりも硬くなるので、消滅処理に向いているとしている。また、後者では、高中性子束を実現するために pebble-bed 型の燃料も検討している。

#### 4.3 加速器利用の消滅処理

原子炉利用の消滅処理よりもより高効率の消滅処理を目指して加速器を利用した消滅処理法が最近研究されている。加速器を用いると、原子炉では消滅が困難な長寿命 F. P. も消滅できる可能性がある。殊に近年加速器技術の進展が目覚ましく核種変換に不可欠な大電流加速器も可能視されるようになり、この方面の研究が進んでいる<sup>2</sup>。

加速器としては陽子加速器及び電子加速器が主に研究されている。

陽子加速器は約1 GeV 程度の高エネルギーを利用する。1個の陽子で多数個の中性子を同時に発生するため、陽子による破砕反応の他に中性子反応も核種変換に有効である。高エネルギー大電流の陽子加速器の建設には多くの研究開発が必要とされている。

一方、電子加速器利用の消滅処理法が最近日本において研究されている<sup>9</sup>。電子加速器では光核反応( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, f$ )を用いる。この際、 $\gamma$ 線エネルギーは10-20 MeV である。従って、電子の加速エネルギーは100 MeV程度で充分である。また、電子加速器の場合、大電流が得やすいなど、陽子加速器に比べて、加速器開発は比較的容易と考えられる。

加速器利用による消滅処理法の場合、加速器の運転に必要な電力を何等かの方法で賄う必要がある。TRUを対象とした場合は、核分裂反応が同時に

起こるので、エネルギーを取り出すことが可能である。一方、長寿命の F. P. の場合には吸熱反応であるためのエネルギーバランスは困難である。動燃事業団ではブランケット領域を設けて、中心部で発生する中性子の増幅及びエネルギー発生を行う方法を研究している<sup>9</sup>。加速器消滅炉とも呼べるもので原子炉開発の方向としても新しいシステムである。

— 文 献 —

- (1) 日本原子力産業会議：核分裂生成物総合対策懇談会報告書（1973年）
- (2) 松本高明，植松邦彦：原子力工業，第33巻，第3号（1987年）
- (3) H. C. Claiborne：ORNL-TM-3964（1972年）
- (4) J. W. Wachter：ORNL-TM-6983（1980年）
- (5) IAEA：Tech. Rep. 214（1982年）
- (6) McKay et al.：EUR-5801（1977年）
- (7) 松村哲夫他：日本原子力学会予稿（1988年）
- (8) 向山武彦他：日本原子力学会予稿（1988年）
- (9) 笹尾信之，小無健司他：日本原子力学会予稿（1988年）



表4-1 Summary of fission and fusion reactor transmutation studies

Investigators (Organization)	Description
C. Andersson (AE ATCMENERGI Studsvik, Sweden)	Recycling of actinides containing residues of yttrium and lanthanides in thermal and fast reactors
R. L. Engel D. E. Deonigi (Battelle, Richland)	Evaluations of fusion-fission concepts
G. A. Harte R. H. Clarke (UK Central Electricity Generating Board)	Incineration of UK reactor wastes in a fast breeder reactor
J. J. Prabulos (Combustion Engineering)	Actinide recycling in a 1500-MW(e) carbide LMFBR
M. Taube (Fed Inst. for Reactor Research, Switzerland)	Transmutation of $^{90}\text{Sr}$ and $^{137}\text{Cs}$ in a fast reactor with a thermalized central region
R. Gasteiger (Karlsruhe)	Irradiation of $^{241}\text{AmO}_2$ in an aluminum matrix
T. H. Pigford J. Croi (U. of California-Berkeley)	Generic actinide transmutation study
E. Zamorani (Ispra)	Dose rates from LWR P-T fuel refabrication
T. C. Gorrell (SRL)	Survey calculations of candidate irradiation schemes for transmutation of waste actinides in thermal reactors
G. Oliva G. Palmiotti M. Salvatores L. Tondinelli (CNEN-Cassica)	Comparison of burnup in a Superphenix liquid-metal fast breeder reactor with that of a thermal reactor
G. Oliva L. Tondinelli (CNEN-Cassica)	Actinide recycling in LWRs
M. L. Williams J. W. McAdco G. F. Fianagan (ORNL)	Actinide transmutation in an LMFBR
D. H. Bernrd J. J. Drdaratndt (Exxon Res. G. Eng.; U. of Michigna)	A laser-fusion-driven actinide waste burner
D. J. Murphy W. M. Farr D. D. Ganapol (Sandia Laboratory; U. of Arisons)	Actinide transmutation in a dedicated, hard-spectrum reactor
T. A. Parish (U. of Texas)	Transmutation of fission products by fusion neutrons
A. H. Robinson (Oregon State University) G. W. Shirly (Gulf Atomic) A. W. Prichard (Oregon State University) T. J. Trapp (SRL)	Actinide transmutation in dedicated, hard-spectrum reactor
S. L. Beaman (GE)	Extensive study of actinide transmutation in LMFBRs

## 5. 電子加速器を用いた消滅処理

動燃事業団 小無健司

### 5.1 はじめに

本海外調査は、電子加速器に関するものであるが、各研究所を訪れた際に調査目的として、動燃事業団で研究開発が進められている「電子加速器を用いた消滅処理」について紹介を行った。この章ではこの紹介の内容とその際に行われた議論について記す。

### 5.2 電子加速器を用いた消滅処理方式の概要

核変換ワーキンググループでは、61年度にまず電子加速器単独による消滅処理方式の研究から始められた。62年度には、エネルギーバランスおよび多量処理の観点から、より実現性の高いシステムとして加速器－原子炉ハイブリッドシステムの研究がその主流となってきている。この間の検討については、核変換ワーキンググループ61年度報告書（PNC SN 4110 87-001）及び62年度報告書（PNC SN 4410 88-002）に述べられている。

今回の訪問先での説明では、このような現在動燃事業団で研究が進められている消滅処理方式の基礎的な考え方について説明を行った。「資料編」資料5-1に訪問先で行った説明の全内容を示す。今回の調査団の事前打ち合せにおいて、議論の中心を加速器に置くために、消滅処理に関する説明はアウトラインのみにとどめるとの了解があったので約20分程度の発表時間を想定して作成したものである。そこで内容についても論点を明確にするために、上述したハイブリッドシステムについては述べずによりベーシックな考え方として原子炉による消滅処理と加速器による消滅処理を直列に並べたものを紹介した。

「資料編」資料5-1の結論は、これまで個別に検討されてきた原子炉による消滅処理と加速器による消滅処理を組み合わせれば、より高性能な消滅処理方式が得られると言うものである。即ち、この方式によりこれまでの加速器単独による消滅処理ではクリアすることができなかったエネルギーバラ

ンスおよび多量処理に関する要求を両方とも満足することができる。

### 5.3 議 論

今回訪れた研究所の中では、MITとCEBAFでの議論は加速器に関するものがほとんどであったが、Chalk River は、自ら原子炉を4基持ち、廃棄物処理の研究も行っているので加速器に関する議論のみならず消滅処理にも興味を持っており活発な議論が行われた。そこで、ここでは Chalk River で行われた議論を主に紹介する。

Chalk River の Physics and Health Sciences Division の Senior Research Scientist である Lone 氏が代表して議論した。

Lone氏は、事前に電子加速器による消滅処理についての review を陽子加速器による消滅処理と対比して行っており、その結果を「資料編」資料7-5を基に会議の場で発表した。Lone氏の review の結論は、電子加速器による消滅処理方法は、エネルギーバランスが成り立たず有効ではないというものであり、事業団は何故これを開発しようとしているのかと質問された。

これは事前に予想したものであり上記の事業団からの説明はこれに対する答えとして行ったものである。しかし、この説明では、基礎的な考え方を定性的に述べただけであったので Lone 氏は納得せずその後2回個別に lone 氏の office で議論した。1回目の議論では大まかな数値と関連論文を教えた。Lone氏はそれを持ち帰り、次の日にそれらを検討した結果についてさらに議論を行った。その結果、事業団のアイデアの有効性について Lone 氏の理解が得られた。Lone氏との議論で残った質問は  $^{137}\text{Cs}$ だけではなく全ての RI-waste の消滅を考えた場合には、waste balance はどうなるかというものであった。これについては今後の検討課題として残した。また、Lone氏から計算結果の詳細について教えてもらいたいとの要請があった。これについては、論文に公表する予定であるのでそれを見てももらいたいと答えた。

また、何故陽子加速器ではなく電子加速器を選んだのかという質問に関しては、電子加速器が産業レベルの加速器として開発が最も進んでいる点を挙

げ、現在の技術の延長で実現性の高いシステムとするために電子加速器を選んだのであって、将来もし陽子加速器が産業レベルの加速器として利用できるようになってくれば加速器を陽子加速器に置き換えることも有り得ると答えた。

また、補足説明として小寺氏より、消滅処理用電子加速器の開発意義として「消滅処理に核反応が利用できることは専門家の間では自明のことであるが一般にはまだ馴染みがなく、放射能は一度生み出されてしまうと消すことはできないと考えられている場合が多い。従ってデモンストレーション用の装置を制作し実際に小規模の消滅処理のデモンストレーションを行う意義は大きい。この目的には、陽子加速器よりも電子加速器の方がコストが低く開発も容易である。」との説明があった。

#### 5.4 まとめ

今回訪問した研究所では、MIT、CEBAFとも基礎物理の研究が主であり消滅処理には、あまり馴染みがないようであった。これに対して Chalk River は、強い興味を示し事業団のアイデアの有効性について検討したLone氏は「事業団のアイデアは Chalk Riverが共同研究をするのに十分価値のあるものである。」と述べた。また、加速器開発についても McKeown氏は、commercialベースで協力したいとの申し入れがあった。これについて Chalk River は事業団のプロジェクトを推進する共同研究の相手であると思われるので持ち帰り検討することになった。

## 6. 消滅処理用電子加速器研究の現状

三菱電機 鈴木敏允

### 6.1 概 要

原子炉からの、高レベル放射性廃棄物処理処分技術の一つとして、 $\gamma$ 線を用いた消滅処理技術があり、この技術の中で必要とする $\gamma$ 線源は、高出力、高エネルギー・高能率が要求され、現在これらの要求をみたす可能性のある線源として、高出力、高エネルギー電子加速器がある。

62年度は、工学実証段階での要求性能を100MeV・100mAと定めて、この性能を満たす可能性のあるRFライナックに的を絞って、既存のRFライナックの性能を参考に、消滅処理用電子加速器の概念設計を行った。

RFライナックは現在最もエネルギー効率の高い電子加速器の一つと見なされており、かつ比較的容易に高エネルギーの電子線が得られるが、消滅処理用電子加速器に要求される効率に比べてかなり低い。

RFライナックの効率を左右する最も大きな要因は、電子加速器に用いられるRF源の効率と、加速電界を形成し電子を加速する加速管の効率である。

ここでは、この二つを主体に調査し、その調査に基づき消滅処理用電子加速器の検討を行い、概念設計と併せて今後の技術開発の方向づけを目的として研究を行った。

消滅処理用電子加速器として、工学実証段階で要求される諸性能（表6-1）を同時に満たす電子加速器は、現在世界に存在しない。従って、この種の電子加速器を実現させるには相当の技術開発が必要がある。特にエネルギー効率の面から加速器を構成している各構成品の効率を上げる開発も今後必要となって来る。

ここでは、要求されている諸性能のいくつかを満たす加速器システムについて、検討し概念設計を行った結果の概略をまとめて報告する。

表6-1 加速器システムに要求される性能

項目	基本性能	
電子線エネルギー	100 MeV	工学実証段階
電子線電流	100 mA	
電子線電流密度	100 mA/cm <sup>2</sup>	
効率	40 %	

## 6.2 加速器研究の現状

高レベル放射性廃棄物処理処分技術開発の一環として、高出力高エネルギー $\gamma$ 線（X線）を用いた核変換消滅処理の技術開発をとり上げた。核変換消滅処理技術開発の一つの重要な開発ポイントは、高出力、高エネルギー $\gamma$ 線（X線）の発生技術の開発である。

ここでは $\gamma$ 線（X線）の発生源を電子加速器とし、工学実証段階で要求される $\gamma$ 線（X線）源の性能を定め、電子加速器をRFライナックとし、核変換消滅処理用電子加速器に適した加速器の概念設計を行い、併せて技術的な問題点を抽出し、今後の技術の方向づけを行うことにした。

61年度の調査研究において既にRFライナックは電子加速器として最も効率がよく、かつ高出力が得られることが明らかになっており、62年度は核変換消滅処理用RFライナックの特性計算、キーコンポーネントであるRF源の調査、及び電子ビーム合成方法の検討を行い、これらの結果に基づいて、RFライナックのシステム設計を行った。

RFライナックの出力（電子ビーム電流）は、RFの周波数が数100MHz～3GHzの範囲であれば周波数の逆比に近い関係で変るがエネルギーバランスを考えると、1000MHz付近でビーム効率が若干良くなっている。

従ってRFの周波数は1000MHzとし、電流値は20mAとしてシステムを構築した。電流20mAは、ビーム不安定性の問題で、周波数1000MHzに対応して現状から類推されるビーム加速可能な電流値の1.5倍の値である。

RFライナックのビーム効率は、最大出力のとれるビーム電流値を仮定し

ても全体から見ると、21%と低くなった。これは加速管の効率を除いて、各コンポーネントの効率を現在のデータ又は実験から類推して求めたためである。

ビーム効率に寄与するものは、主に加速管の効率、RF源の効率、RF源の電源の効率であり、他のコンポーネント（冷却装置、磁石電源、真空排気装置）の寄与は高々10%程度である。

加速管の方式は、単位長さ当りの加速効率の良い定在波形加速管を用いた。

## 結論として

- (1) 核変換消滅処理用電子加速器として対応可能なものはRFライナックであり、エネルギー効率をある程度犠牲にすれば、工学実証段階に要求されるレベル（100MeV、100mA）の性能の装置の実現は可能と考える。
- (2) ビームのエネルギー効率は、加速管の効率を理論上の最大点にとっても全体から見ると20%前後であり、加速管の効率の改善はもとよりRF源の効率の改善、RF源電源の効率の改善が必要である。
- (3) 加速管の効率の改善はライナックシステムの安定性と深く関係しており単独の改善は不可能であり、理論解析と併行してテストモデルによる実験的な開発が必要である。

### 1) 電子線エネルギー

RFライナックを用いた電子加速器で加速出来る電子線エネルギーは、電子線電流（ビーム電流）が非常に少ない場合は、加速管内のシャントインピーダンス、投入されるRFパワー及び加速管の長さの積の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。加速される電子線電流値が増大すると電流増大に対し直線的に減少する。計算上は電子ビームパワーは最大値をもつ、しかし電流を多くして行くとビーム不安定性が生じ加速出来なくなる。従って通常は電子ビームパワー最大点よりも低い電流加速を行う。この様な電子線電流の少ない加速条件では、電子線エネルギーゲインはシャントインピーダンスが高い方が有利である。

RFの周波数については、加速可能な電流は周波数の逆比に近い値となり低い方が有利であるが、ビーム効率から見るとほとんど変わらず若干良い1000MHzと選んだ。加速周波数を1000MHzにとったときの加速ビームのエネルギーゲインは、図6-1の様になる。加速空洞に入れられるRFパワーは図6-2の様になり、ビーム加速電流20mAのとき、最大エネルギーゲインは、1.5MeV/mとなる。システム設計では空洞寸法の関係で加速管1本当たり4.95mとなるのでシステムで期待されるエネルギーは1.47MeV/mとなる。パルス運転の場合RF源の効率が悪いことと、電源の効率が悪くなるためCW運転とした。

エネルギーゲインを左右するRF源については、周波数350MHz, 508MHz, 2450MHz帯に出力400KW~1000KWのクライストロンがあり、RFライナックに適用可能であるが、多段に組み合わせて使用する今回の場合に周波数帯の関係でそのまま使うことはできない。効率的には周波数によってあまり大きく変わらずいづれの周波数もRFライナックに適用可能と考える。

## 2) ビーム出力 (ビーム電流)

RFライナックのビーム出力は、加速電流の増大に伴って、加速されたビームと加速空洞との相互作用によって、加速空洞内に誘起されたRFで加速ビームが発散してしまう、いわゆるB.B.Uで電流の値の上限が決まってしまう。この値は加速されたビームの性能(エネルギー、ビームの大きさ)にも左右される。定量的な解決方法は確立されていない。

各周波数に対応した加速可能な電流値は、現在の実績値から推定した結果を、図6-3に示した。

この推定値から1000MHzで加速する場合の電流値を推定値より若干多い20mAと仮定してシステムを構築した。

計算上の最大ビームパワーのとれる電流値は、65mAであり、システム設計に用いたビーム電流値20mAは、計算上の最大ビームパワーの取れる電流値に比べて30%であり、未だ改善の余地がある。



### 3) エネルギー効率

RFライナックでのエネルギー効率はシステム全体の詳細設計を行わないと出ないので、ここでは加速管内に投入されたRFパワーに対する出力ビームパワーとの比……ビーム効率とRF源の効率……RF効率との積で比較する。

加速電流に制限が無い場合のビームパワー最大になる加速条件でのエネルギー効率の計算結果を表6-2に示した。

パルスライナックの場合は理想的な条件でも、30%の効率は期待出来ない。CWライナックのエネルギー効率は各周波数に対して理想的な条件でほとんど40%強で変わらず、パルスライナックに比べてかなり良い。

従って、システム設計ではCWライナックを採用した。

システムで用いられたパラメータは表6-2の1000MHzの項でありビーム電流のみ20mAとしたものである。

このときのエネルギー効率は36%であり、理想値に比べて若干悪くなっている。

表 6 - 2 加速管特性計算結果一覧表

加速器の種類	周波数	クライストロン出力		最大入射電力 (単位空洞あたり)	加速管 の形式	単位空洞長	最小空洞長 (クライストロン 1本あたり)	シャントイン ピーダンス	1ユニットあたりの最大ビーム出力			1ユニットあたりの定在波加速管			評 価
		平均電力	尖頭電力						エネルギー 電流値	ビーム電力	加速管長	ビーム効率	RF効率	効 率	
パルスライナック	1300 MHz	300 KW	4 MW	7.8 KW 最小空洞数 39	定在波	115 mm	4.5 m	48 MΩ/m	14 MeV 14.4 mA	202 KW	4.5 m	0.673	0.43	0.289	×
					進行波	77 mm	3.0 m	36 MΩ/m	8.8 MeV 17.3 mA	152 KW	4.5 m				
		100 KW	10 MW	7.8 KW 最小空洞数 13	定在波	115 mm	1.5 m	48 MΩ/m	12.6 MeV 5.1 mA	64 KW	1.5 m	0.64	0.38	0.243	×
					進行波	77 mm	1 m	36 MΩ/m	7.9 MeV 6.3 mA	50 KW	1.5 m				
	2856 MHz	100 KW	4 MW	1.7 KW 最小空洞数 59	定在波	52.5 mm	3.3 m	70 MΩ/m	13.8 MeV 4.8 mA	66 KW	3.3 m	0.66	0.42	0.277	×
					進行波	35 mm	2.2 m	53 MΩ/m	7.3 MeV 6.9 mA	50 KW	2.2 m				
CWライナック	353 MHz	1 KW	—	100 KW 最小空洞数 10	定在波	425 mm	4.3 m	24.5 MΩ/m	4.8 MeV 138 mA	662 KW	4.3 m	0.66	0.65	0.429	○
					進行波	283 mm	2.8 m	18.5 MΩ/m	3 MeV 161 mA	483 KW	4.3 m				
	508 MHz	10 KW	—	50 KW 最小空洞数 20	定在波	295 mm	5.9 m	29 MΩ/m	6.3 MeV 108 mA	680 KW	5.9 m	0.68	0.6	0.408	○
					進行波	197 mm	3.9 m	22 MΩ/m	3.9 MeV 130 mA	507 KW	5.9 m				
	1000 MHz	400 KW	—	13 KW 最小空洞数 31	定在波	150 mm	4.7 m	42 MΩ/m	4.3 MeV 65 mA	280 KW	4.7 m	0.70	0.58	0.406	○
					進行波	100 mm	3.1 m	32 MΩ/m	2.6 MeV 75 mA	195 KW	4.7 m				
	2450 MHz	500 KW	—	2.3 KW 最小空洞数 218	定在波	61.2 mm	13.3 m	66 MΩ/m	9.9 MeV 34 mA	337 KW	13.3 m	0.674	0.52	0.35	△
					進行波	40.8 mm	8.9 m	49 MΩ/m	6.2 MeV 41 mA	254 KW	13.3 m				

図6-1 定在波加速管エネルギーゲイン (CW)

1000MHz 400KW

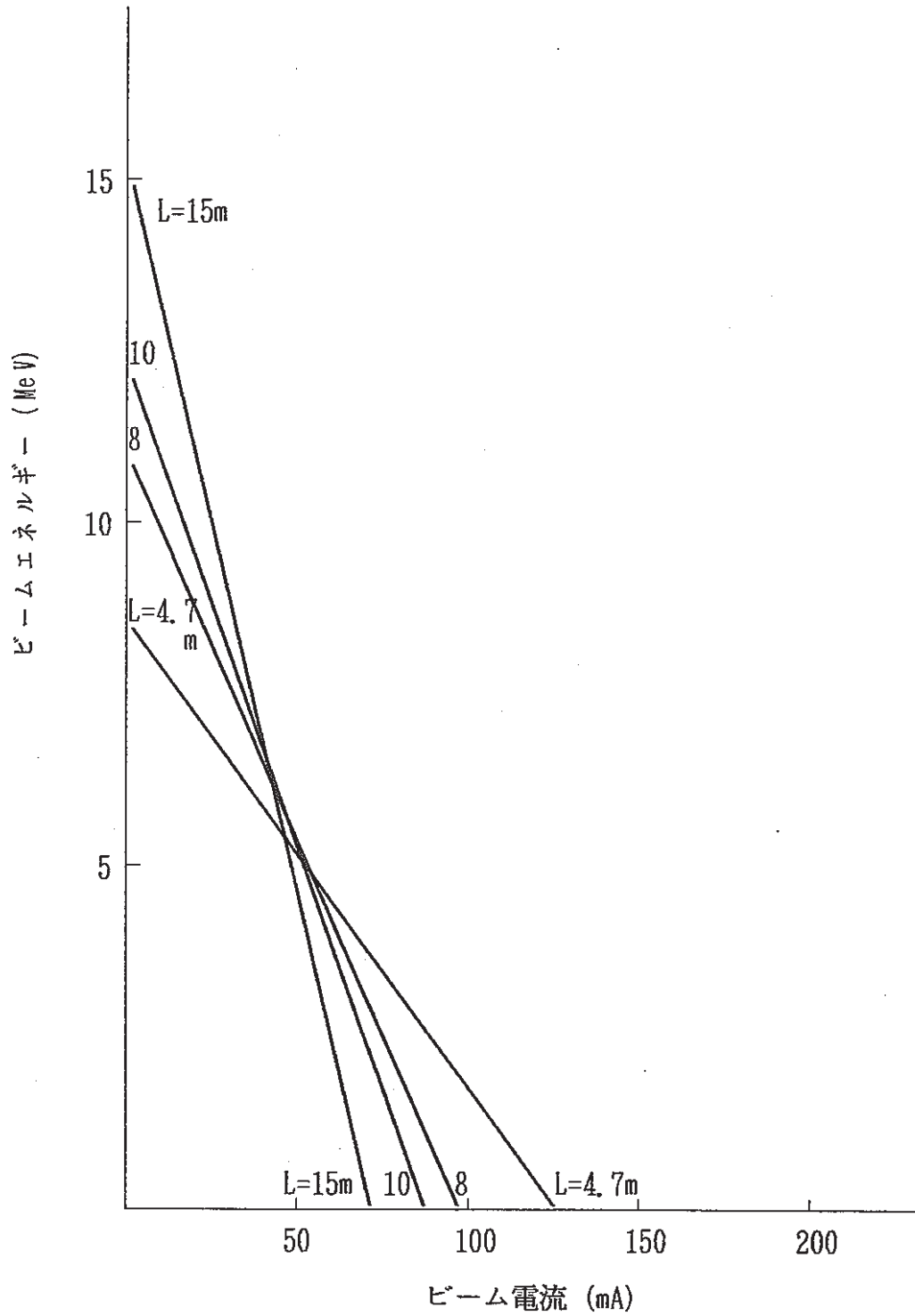


図6-2 周波数帯別入射電力許容値 (単位空洞)

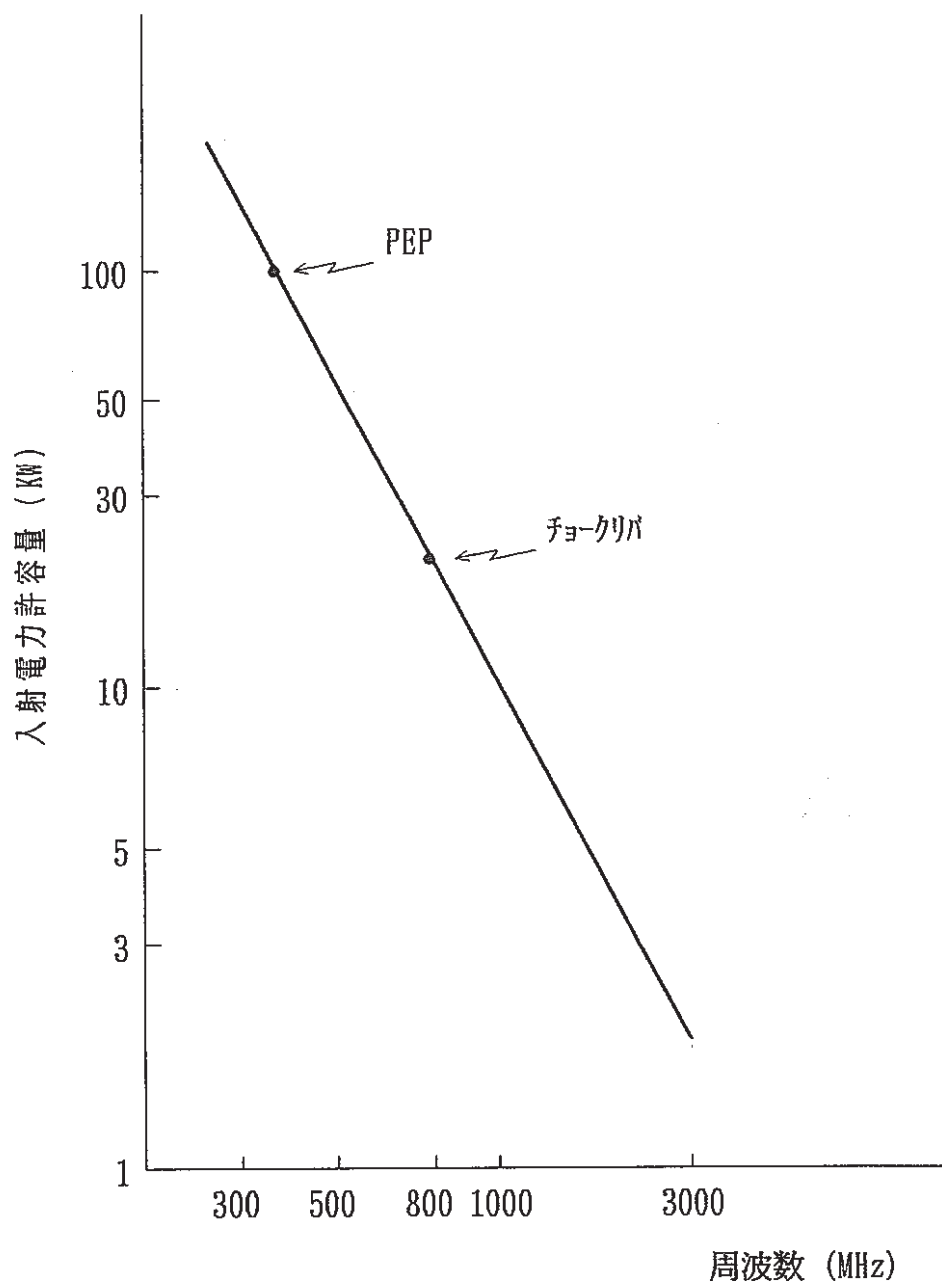
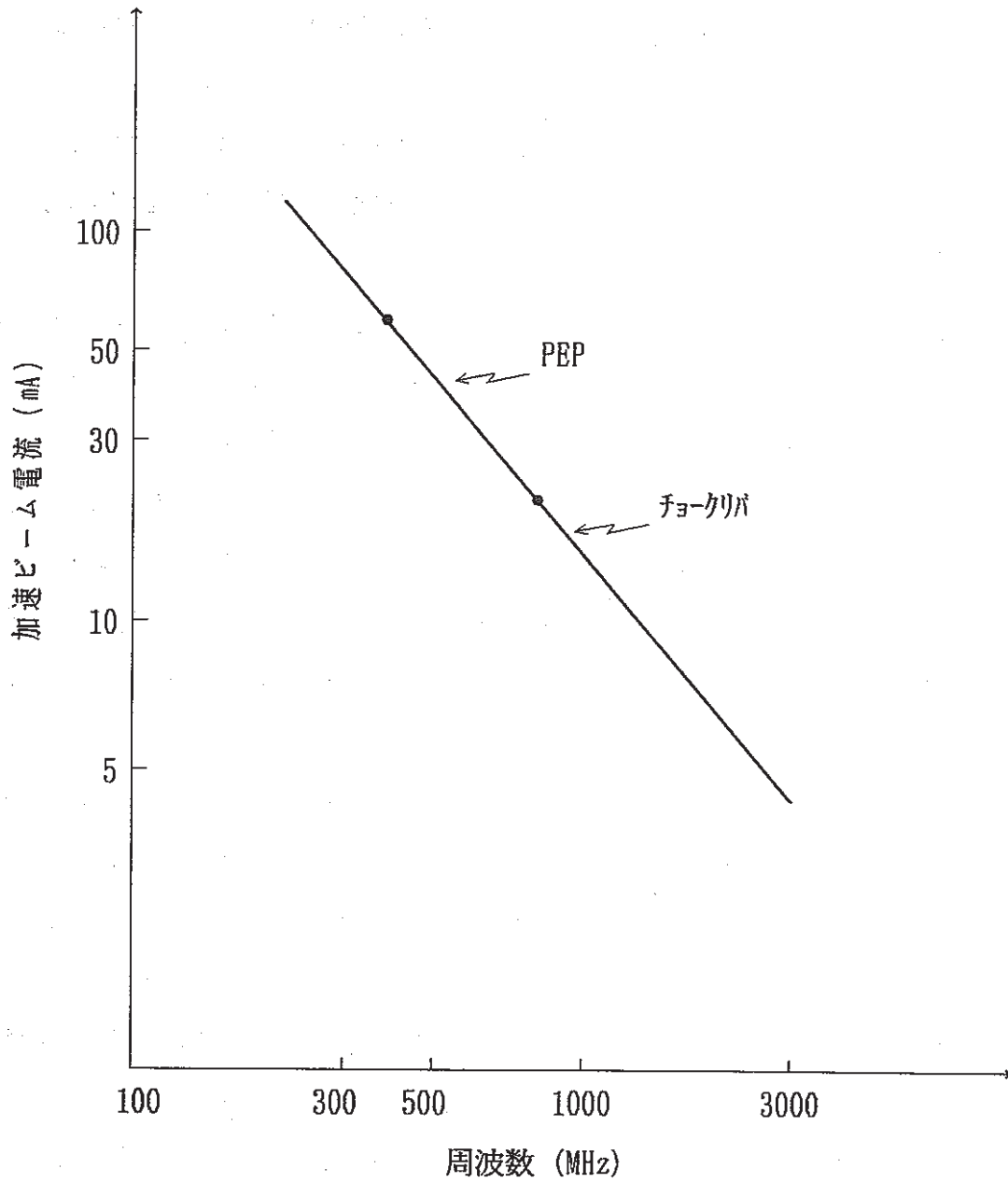


図 6 - 3 周波数帯別加速電流値



## 7. Chalk River 研究所における研究

住友重機 小寺正俊

### 7.1 はじめに

昭和63年9月27日-10月7日の北米調査に於いて9月28, 29日の両日, チョークリバー研究所 (CRNL) を訪問し, 調査の趣旨を説明するとともに同研究所の本問題に対する見解と今後の協力関係樹立の可能性をただして, 忌憚のない意見交換に努めた。

僅か一日半の訪問であったが有意義な討論を交わすことが出来たのは, チョークリバーで会合の手筈を整え, 歓迎会や研究所見学などの設定をし, 討議の舵取りもしてくれた Science & Technology Divisionのディレクターの J. McKeown氏の努力に負うところが多いが, また同研究所に数年前にその課題を放棄するまでの約30年間にわたる核変換技術開発の歴史があり, CRNL側の出席者が我々の問題を容易に理解し得た点で, その後の訪問先よりも好条件にあったこともプラスとなっている。CRNLの成果は既に多数の文献となっていることではあり, 周知のこととは思いますが, まずその概略を紹介し, 彼等の我々の説明に対する反応の理解の一助とする。そして彼等の説明と質問の分析を通じて我々の課題の再検討をし, 今後の我々の議論の出発点としたい。

28日の会合は, まず McKeown氏の歓迎の挨拶と我々の訪問に到る経緯のカナダ側参加者への説明に始まり, 調査団側から平尾 (趣旨), 天野 (動燃紹介), 小無 (動燃の電子リニアックによる核変換消滅処理方式の案), 鈴木 (100MeV, 100mA 電子リニアック概念設計案) の説明後に Physics & Health Sciences Departmentの M. A. Lone (CRNLの核変換研究紹介と動燃案に対する批判), J. H. Ormrod (CRNLの大強度イオン加速器技術), J. Ungrin (CRNLの産業用大出力電子クリアック開発状況) などの説明があり, 自由討論がその後に行なわれた。29日は, 加速器の見学後, 前日のメンバーに G. McMichael, J. Labrie, C. B. Bigham, J. Hulbert が加わり, 自由討論をつづいて行なった。(議事日程は資料7-1)

二日間の討議の主題は勿論、動燃の電子リニアックによる消滅処理シナリオとCRNLで研究されてきた陽子リニアックによるスポレーション方式の対比である。これに元来は陽子リニアックのシミュレーション用に開発された大出力電子リニアックの技術を、カナダ政府の方針変更に伴って産業用実用機の開発に振り向ける責務を負うこととなった McKeownグループの動燃電子リニアックに対する関心が活気を添えていたように思われる。

以上の主題のうち、動燃案については小無氏自身の報告があるので詳細説明は省くことにする。また、出発前に作成したCRNLの概要も討議の背景の理解に役立つと思われるので、「資料編」資料7-2として加えてある。

## 7.2 CRNLにおける大強度加速器開発研究の歴史

米国のローレンスが提案し、Livermore にそのための研究所を作って実施された加速器によるプルトニウム生産計画MTAが1954年に打ち切られた後、カナダAECLのLewis, Bartholomew 等はこの方式による核燃料の生産が世界のエネルギー問題の解決に有効と考えて、CRNLにおいて必要技術の開発を開始した。

当初は理論的研究のみであったが、1960年代に入るとコスモトロン等の加速器を使用して高エネルギー陽子による Spallation 反応断面積の測定、大電流加速器の概念設計と活発な活動を開始し、1970年代には施設の具体的な設計にもとづく建設費、運転経費の試算も行ない、加速器各部のプロトタイプの製作を始めた。そして同年代末には 1GeV, 300mA陽子リニアックとCAN DU炉を組合せた体系を目標として、モントリオールに新研究所を設立し、ZEBRA, EMTF, Pilotと次々に建設してゆく計画を発表した。4MeV, 20mA, CWの電子リニアックETAはロスアラモスの中間子発生用陽子リニアックLAM PFの高エネルギー加速構造を連続運転で使用した場合の問題点を調べるために製作された装置である。その運転により得られた経験については「資料編」資料7-2の“Operational Experience----”の報告と日本語で記した要旨を参照されたい。勿論、目標は陽子の高強度加速であるので、つづい

て大強度イオン源，直流入射器，3MeV連続動作アルバレ加速器，高エネルギー加速用の新構造を製作し，1980年にRFQリニアックがLANLで開発されると，その大電流用の開発を始めるなど活発な大強度イオン加速技術の研究を行なっている。

しかし，この壮大な計画は世界的なエネルギー需給の緩和と政府支出の削減の潮流のもとに1984年には中止の運命となった。CRNLの開発した技術の民間移転が推進され，大出力加速器計画に携わってきた多くの人々が研究所を去ったが，ETAのグループは産業用プロセッシングに使用し得る大出力リニアックの開発と商業化にその技術を転用する方針をとった。ETAはこの目的で作られたものではないので，産業応用の観点から見れば，製作コスト，エネルギー効率などの点で欠点が多いことは当然であり，新しい構想のリニアックの開発が必要となった。その最初のものが「資料編」資料7-2に記したI-10/1で，パルスビームの計測技術開発を目的としたようである。更に動作率を大きくして大電流を加速しようとするれば，加速管の加熱による変形で困難の発生が予想されるから，有限要素法による多くの計算とモデル試験を行ない，連続動作も可能な冷却方式を開発した。これにより1987年9月よりIMPELA I-10/50と名づけた10MeV，50kW機の製作を開始している。熱変形の計算に関しては「資料編」資料7-3，IMPELA建設の最近の状況については「資料編」資料7-4を参照されたい。

### 7.3 CRNLの核変換による核燃料生産計画研究の概要

核燃料の生産と放射性廃棄物の消滅処理とでは対象とする核種と標的構造が異なっており，直ちに前者の結果を後者に適用することは出来ない。しかし，核反応を使用する点では共通しており，加速器，標的系，除熱工学などの技術に於いて相通ずる点も多い。今回の調査訪問に於いて突っ込んだ討議がCRNLで可能となったのは，CRNLの出席メンバー全員がこの問題について関心を持っていたためと思われる。MITではProf. Monitz，CEBAFではDr. Grunderがなぜ電子リニアックを考えるのかと疑問をCRNL



と同様に口にしたが、議論がそれ以上進まなかったのは、他の参加者に関連した知識が欠けていたためであろう。

CRNLの考えは核変換を生じさせるには中性子が最も有効であるから、中性子を出来るかぎり低いコストで作る、全過程のエネルギー収支を十分にプラスに保ち、天然ウラン資源が枯渇する状態になっても、電力コストが過大とならない価格で核燃料を供給出来る技術を開発するにあった。

そのような核変換過程として、MTA計画の初期には重陽子のストリッピング反応が考えられたが、やがて低エネルギーではエネルギーバランスが成立しないことが判り、重陽子のエネルギーを500MeVとしてストリッピングとスポレーションの両方の過程の寄与に期待することとなった。しかしその後高エネルギー加速器が素粒子研究用に作られ、スポレーション過程の実験および理論的研究が行なわれてみると、より高いエネルギーの陽子ビームを使用したほうが中性子発生量も多く、経済性にも優れているとの結論が得られるに到った。この研究にはCRNLのグループが貢献したが、米、ソ、西独、スイスでも理論的、実験的研究が行なわれてこの結論は確認されている。

図7-1はLoneが提示した陽子一個当たりの中性子発生数を陽子エネルギーを変数として表わしたグラフである。これは直径約10cm、長さ60cmの金属ウランの標的の場合であるが、体積が無限大であれば1GeVの陽子に対して約100の中性子が得られるとしている。実際は冷却や機械的支持のための機構が必要であるから、そのような理想的な標的の実現は不可能であるが、効率の高い中性子発生方法であることは確かである。図7-2は同じくCRNLの想定した加速器システム構成案、図7-3はその各部の所要エネルギー、標的系から回収可能なエネルギー、核燃料生産量である。コストは1980年の貨幣価値を考慮してもかなり甘い見積もりであるが、他はCRNLの技術開発努力の1980年における到達点とその後を目指した方向を示しており、参考にすることが出来よう。より詳細な資料としては

- 1) J. S. Fraser, C. R. Hoffmann, S. O. Schriber, P. M. Garvey and B. M. Townes ; "A Review of Prospects for an Accelerator Breeder",

AECL-7260 (1981)

他の文献も含む日本語の解説としては

2) 木村他, 「スポレーション中性子工学」原子力学会 中性子ターゲットシステム研究専門委員会編 (1984)

がある。

#### 7.4 動燃の消滅処理シナリオに対する批判と反論

上記のCRNLの開発研究の概略説明の後、消滅処理技術についての議論を進め、その検討の基準としてエネルギー収支、消すよりも多くの長寿命RIが出来てはならない、長期保存に対する毒性評価、緊急性等の幾つかの指標を挙げて、各種の手段を比較した。まず電気出力 100万kWの熱中性子炉の動作による蓄積廃棄物の量の例をあげ、その大部分がFPであり、その消滅処理を有効に行なうには化学的群分離では不足で、同位元素分離が必要なことを指摘した。更に放射性廃棄物の寿命は1000年以下の保存で消滅するものが大部分で、それらの大量の廃棄物を消滅処理するよりは1000年以上残存するものを対象としたほうが長期毒性対策として有効であり、その大部分のTRUは分離も処理も容易であると主張し、核手段に対し表7-1のような評価をした。陽子の場合にはアクチナイドを消すのであれば、300MWの加速器一台で三乃至十基のPWRで発生するTRUの処理が出来るが、FPの処理は難しいとしている。一方、電子についてはFP処理は不可能であり、アクチナイド処理も疑問としており、エネルギーバランスや処理速度も marginal と表現してはいるが、口頭では更に厳しい評価であった。巨大共鳴光核反応を起こし得るような高いエネルギーのシンクロトロン光を電子加速器で発生出来れば高い効率が期待出来ると付け加えているが、現在の技術では 10MeV を越えるエネルギーのX線を放射光として発生させることが出来ないことはLone氏も知っているはずで、電子加速器派への配慮をしたものと思われる。また、アンジュレーターを蓄積リングに組み込まなければ、放射光自体のスペクトルには低エネルギー成分が多くあり、直ちに有利と結論できるわけで

はない。

その外、標的内の熱発生密度が高いことも挙げて電子による消滅処理シナリオに疑問を呈した。司会を努めていた McKeown氏から反論を求められたのに対し、午後の討議の冒頭に小寺から“陽子と電子の優劣の比較は良く知られたところである。しかし、大電力陽子リニアックあるいはハイブリッド核融合炉は建設資金が余りに膨大で、早期の実現は到底期待出来ない。一方では長寿命放射性廃棄物の蓄積に対する不安が高まっており、核変換による寿命短縮の可能性を公衆に示すことは緊急の課題と思われる。この点で比較的小規模の資金でスタートし得る電子加速器による方式を現実的アプローチとして検討をしているのである。”との説明をした。Lone氏の明快な議論による追求に対し、調査団としての統一見解を示すべきであると考えたが、団員全員の意見をまとめる時間的余裕がなかつたので、緊急避難的に個人的意見と断って回答をしたものである。

上の発言に対し McKeown氏はその考えは了解出来るとしたうえで、午後の討議には何故か Lone氏は欠席しているので、明日、彼の居るときに再び発言してほしいと述べたので、29日にも説明をした。後に知ったことであるが、その時間には小無氏がLone氏のオフィスで電子リニアックと原子炉の組合せによる消滅処理シナリオについて、午前の説明の補足をしておられたとのことであった。Lone氏の理解が得られたとのことであるが、同じくは他のCRNLのメンバーもいる公開の場で説明をすべきであったと思われる。しかし、このような疑問を投げ掛けられるのは予期されたことで、その後の訪問先でも、これほど明確な表現ではないが、似た質問をそれぞれ呈されている。

## 7.5 その他の議事

Ormrod氏より 270MHz RFQ, 52MHz のPETRA用3/4波長共振器、プラズマ診断用イオン源等のイオン加速器関連技術の解説。

Ungrin氏からは大電力電子リニアックのCRNLでの開発経過説明がなされた。

28日午後および29日の全般的な自由討論の際に次のような意見がだされた。

- 1) 鈴木氏の説明のリニアックの電流が一台あたり20mAと言うのは保守的すぎる。
- 2) また高いエネルギー分解能を要しない用途にプリバンチャーは不要では？
- 3) IMPELAの方式なら4 MV/m, 200kW/m の熱損失に耐えられる。動燃の1 MV/mは過小では？
- 4) IMPELAの加速周波数を2.45GHzから1.35GHzに変更したのは、後者の方がクライストロンの機種が多く選択の余地が広いからである。
- 5) IMPELAのL-バンド加速管の特性の実測値は57MΩ/m, 空洞間の結合度7.5%
- 6) 動燃のリニアックのBBUしきい値は100mA以上に来ると思う。
- 7) 100MeV, 100mA のリニアックのコスト推定。高周波システムが最も高価で、5\$/W はする。動燃の場合は15MWの出力が必要だから最低75M\$を要しよう。
- 8) CW大電力運転に伴う周波数ドリフト、変動負荷とのインピーダンス整合の問題の対策の質問に対し、加速管の温度制御、ダイナミックカプラーなどETAでとられた方式とは異なる方法の提案がCRNL側からなされた。最後にCRNL側から商業ベースでの協力関係を動燃と持ちたいとの意向が表明された。

## 7.6 見 学

29日午前に以下の施設を見学し、12時にチョークリバー研究所を辞した。

TASCC……タンデムバンデグラフと超伝導サイクロトロンからなる複合加速器で、建設開始は世界でもっとも早いですが、完成まで15年を要した。提案は Bigham 氏。

RFQ-1……600keV, 75mAの目標に対し、二ヵ月間の運転により3mAが得られた段階にあり、今後数か月で目標値に達したい

と考えているとのことであった。

IMPELA…コンクリートブロックを積み上げた遮蔽室に本体はすでに設置されており、高周波源はまだ完成をみてはいないものの主要部分は製作がかなり進んだ状態にあるようである。McKeown 氏の希望する今年末の運転開始は困難にしても明年の春には試運転は可能であろう。製作が1987年9月に開始されたことを思うと、試作機としては驚くべき早さである。

## 7.7 今回の調査結果と今後検討すべき課題

チョークリバー研究所が30年の長期にわたって進めてきた核変換技術開発プログラムは1984年に打ち切られたが、その記憶が消滅する前に訪問し得たことは幸いであった。我々の今後の核変換技術検討にとって参考になる意見と資料を得ることが出来たと思われる。我々としては従来に行き掛りにとられる事無く、今回の調査で得られた情報を検討する態度が必要であろう。検討すべき課題と考えられる事項を以下に列挙しよう。

### (1) 核変換手段として何が良いか

言うまでもないが、核変換は対象とする原子核の質量あるいは原子番号の変化により生じる。そのため的手段としては多くの方法を考えることが出来る。然し、工学的レベルで使用出来るものとなると、X-線、陽子、重陽子、中性子に限られる。

これらのプロジェクティルが核変換を起こす確率は他の過程との競合で定まる。その大部分は標的元素の核外電子の励起によるエネルギー損失で、電子は標的内に原子核より遙かに多く存在し、空間内の存在確率を表わす波動関数の広がりも大きいから、電磁場を伴うプロジェクティルが核外電子と相互作用をする確率が原子核との間より大きいのは当然である。例えば、荷電粒子による核反応断面積は幅の狭い共鳴反応を除けば $10^{-27}$  から $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>程

度であるのに対し、電子励起のそれは $10^{-18}$  から $10^{-15}$  cm<sup>2</sup>もある。大きな違いである。但し、一回の電子励起によるエネルギー損失は小さいので、そのあとも核変換を起こすエネルギーを持っているから、核変換確率はこの断面積の比で与えられるほど小さいわけではない。それにしても、電磁場そのものであるX線が核外電子励起によりエネルギーを失う確率が大きく、核反応の確率が小さいのは本質的な問題で避けることは出来ない。

陽子、重陽子のような電荷を持った粒子は電磁場を伴っているが、その広がりやX線に比較すれば原子核の近傍に集中しており、標的の原子核と接触したときの核力による相互作用は電磁場より強いから、核反応の発生する確率は比較的に大きい。しかし、陽子による反応にはある程度以上のエネルギーがないと生じない場合がある。また電荷を持っているために対象とする原子核の電荷と反発し、一定以上のエネルギーを持たないと核反応を起こすのに必要な距離まで近寄れない現象がある。これらの問題は陽子のエネルギーが数 MeVと低い場合にのみ現われるので、数 10MeV以上であればそのための困難は無い。重陽子は低いエネルギーでの反応確率は陽子より高いが、加速技術的には陽子よりも問題が多く、高いエネルギーでは反応確率の優位は無くなるので、スポレーションによる中性子発生を目的とする場合は前にも述べたように採用されなくなっている。

一方、中性子は電磁場を持たず、電子の励起をしない。その13分の寿命による消滅のみが核反応との競合過程であるから、対象原子核の質量に変化の無い弾性、非弾性散乱を何回繰り返してもやがて原子核に吸収されて質量を変えるから、一旦発生した中性子が核変換を起こす確率は非常に大きい。

## (2) X線、中性子の高強度発生とエネルギースペクトル

陽子、重陽子のビームは水素、重水素をイオン化して加速することにより直ちに得られるが、X線と中性子は間接的な手段で作らなければならない。

X線は幾つかの方法で発生させられるが、大量の核変換処理に必要な高いエネルギーのX線を高強度で得るには、高エネルギーの電子を原子番号

の大きい元素で構成される標的に衝突させて急激に停止させたときに発生する阻止X線の利用が、現在のところ実用性のある唯一の方法である。電子は当然強い電磁場を伴っており、相互作用による電子励起の確率が大きい。核外電子に与えられたエネルギーの大部分は熱となる。また阻止X線には低エネルギー成分が多く、必要な高エネルギーX線分子の数は少ない。X線による核反応は殆ど吸熱的で、ほぼ10MeV以上のX線でなければ反応が生じない。光核反応の断面積はこのしきい値の上の比較的幅の狭い領域に集中しており、それより高いエネルギーのX線も核反応を殆ど起こし得ないから、コンプトン散乱、電子対創生等によりエネルギーが減少し、20-30 MeV以下となってから初めて核反応に関与することとなる。阻止X線のゼロから入射電子のエネルギーに到る幅の広いスペクトルのなかで、狭い共鳴領域以外のX線のエネルギーは熱の発生に費やされることとなるから、電子の加速エネルギーを徒に大きくしても、核変換の効率をあげることは出来ない。図7-4に示すように中性子放出反応で代表される核反応のエネルギー効率、電子については100MeV付近で一定となり、反応を一つ起こすのに平均して1000MeV以上の電子エネルギーの消費（同程度の熱発生）を要することが示されている。これは変換標的をウランとした最も効率の高い場合である。セシウムを対象とした場合は小無氏の28日の説明および原子力学会への投稿にもあるように、100MeVの電子一個当たりの核変換数は0.03であり、セシウムを一個潰すのに3300MeVの電子エネルギーを要することとなる。電子リニアックの交流から電子エネルギーへの変換効率が仮に33%と良好であったとしても、必要電力は10GeV相当となるから、エネルギー収支が成立する見込みはまず無いと思われる。

一方、中性子束の発生は、原子炉による発生がエネルギーを同時に発生しつつ行なわれるので、エネルギー収支の点だけからいえば最善である。しかし、この方式は消滅処理の対象である廃棄物を発生させる過程そのものであり、炉型、運転条件により多少の差はあっても、全廃棄物量の減少という見地からすれば矛盾の傾向がある。殊にセシウムの熱中性子捕獲断面積は小

さいから、熱中性子炉をその消滅手段として新設することは逆にセシウムを増加させる結果となることは明らかである。

加熱器と原子炉を組合せて、加速器の中性子発生量を大きくしようとする場合も、中性子のエネルギースペクトルとフラックス密度を熱中性子炉と大きく変えることが出来なければ、この矛盾はついて回ることとなる。多少の変化であれば、重水炉あるいは増殖炉によって得ることができ、消滅処理用の専焼炉も考えられている。しかし、その場合も低速中性子による核分裂の生成物とTRUは依然として発生し、中性子による消滅の最も容易なアクチナイドを増殖炉で処理する場合でも、目に見えて減少したというには100年近い時間を要するであろうとLone氏は主張している。

核分裂生成物の発生が少ないか殆どなく、高エネルギー成分が多い中性子スペクトルをもつ中性子発生源は、核融合炉と加速器である。しかし前者はまだ開発途次にあり、多くの技術課題を解くのに長期間を要するであろう。後者も有効加速電圧に関しては研究用加速器の実績があるとはいうものの、大強度ビームを安定に使用し得るためにはまだ多くの技術開発が必要であり、まして標的システムとその周辺設備の実証的開発研究は全く手が付けられていない。関係する核反応データは既に測定あるいは理論値があるので、それらを使用した多くの計算による推定がなされている段階にある。

荷電粒子による中性子発生の機構は色々あるが、中性子源として多く利用されている低エネルギーの重陽子とトリチウムの反応も、先に述べた核外電子の励起によるエネルギー損失のため、中性子一個を発生させるために消費されるエネルギーはかなり大きい。例えば600KeVの重陽子を大量のトリチウムガスのみで構成される標的に打ち込む理想的な場合でも、中性子一個の発生に7000MeVを要する。重陽子同士であれば、衝突エネルギーを1MeVとしても、この10倍の70GeVが中性子一個の発生に必要であって、中性子一個により確実に放射性核一個を消したとしても、エネルギーバランスは成立しない。

より中性子発生効率の高い反応が探された結果、現在では高エネルギー陽



子を重い元素の原子核に衝突させて生じるスポレーション反応が、中性子一個の発生に要するエネルギー消費が最も少ないとされている。図7-1に見られるように、標的が金属ウランであれば比較的小さな体積であっても、1 GeV の陽子一個に対し50の中性子発生が期待出来るから、一個あたり 20MeV のビームエネルギー消費と言うこととなる。また中性子の捕獲反応は殆どが発熱的であり、重い元素の陽子によるスポレーションもエネルギーを発生するから、それらの熱を回収して使用することも可能である。天然あるいは質量 235の成分がまだ残る減弱ウランをターゲットとすると、速中性子や陽子による核分裂も加わって、熱の発生は入射ビームエネルギーの3-4倍にもなるから、これを回収し加速器のエネルギー源とすることが出来ると考えられている。CRNLは標的そのものは鉛とし、それから距離を置いてウランあるいはトリウムブランケットでとり囲んで中性子を吸収し、核燃料に変換するとともに、熱の発生源とすることを意図した。西独のユーリッヒ原子力研究所の1.1GeV、5mAの大出力陽子リニアックSNQ計画でも、ブランケットの位置にアクチナイドを置き、消滅変換実験を行なう予定であった。このプランは認可の直前に西独の財政上の理由で実行出来なくなったが、1-1.5GeVの大電流陽子ビームのスポレーション反応で発生する中性子により長寿命アクチナイドの処理を有効に行ない得ることは、消滅処理に関心を持つ研究者にはほぼ認められている予測である。

### (3) ターゲットの除熱の問題

上に述べたように、ウランを高エネルギー陽子で直接衝撃する方式は中性子の発生数を多くし、熱発生も大きくなることはエネルギー回収の観点からは有利であるが、他面ではターゲットの除熱が難しくなる可能性を持っている。見当を付けるために粗い近似を試みると、1 GeV の陽子の水中の飛程は約 320cmで、鉛に対しては56cmであるから、原子番号が大きいことと比重が大きいことを考慮して、ウラン中の飛程を約50cmとする。ビームの直径を10cm程度に太くしたとしても、300mA のビームを打ち込むと 300MWの4倍の

1200MWの熱が直径10cm長さ50cmの円筒内に発生することとなる。このときの熱密度は300MW/lに達するから、冷却は困難である。勿論、陽子ビームは標的内で散乱されるから直径が大きくなるので、密度は飛程の末端で小さくなるようであるが、イオンビームには停止直前の単位長さ当たりの熱発生が大きくなる特性があり、散乱の効果は期待出来ない。ビーム強度を下げるか、標的を高速で移動させるか、ビームを大体積の標的上をスイープさせる等の方法で発熱密度を小さくしなければならない。そのばあい、廃棄物位置での中性子束があまりに低下したのでは寿命短縮の効果が少なくなるから、発熱密度の低下にも限度がある。図7-5に示すCRNLの案が中性子発生量がウランの1/2の鉛をビーム標的としたのはこの困難を避けるためであろう。この時の全発熱量はウラン標的の1/4の300MWで済み、熱密度は75MW/lとなる。また核変換を行なうブランケットを標的から離れたもの、中性子吸収に伴う熱発生の密度を過大にしないためであると思われる。

電子により作られるX線の核反応は吸熱的であるから、入射ビーム電力以上の発熱がターゲット内で生じることは有り得ないが、反応断面積が小さいので大電流のビームを要するためにこの問題の解決は更に困難である。100MeVの電子一個で0.03個の核変換を生じ得るとのことであるから、1GeV陽子と鉛の標的を組合せたときの発生中性子による核変換個数を陽子一個あたり20とすると、同じ数を処理するには100MeVの電子はその666倍、陽子が300mAなら200A、ビーム電力にして20GWを必要とする。そのような大電力の電子リニアックの現実性を別にしても、ターゲットの冷却が不可能であることは明らかである。100MeVの電子の水中の飛程は約40cmである。1GeVの陽子の飛程の1/8であり、タングステン、ウラン等のX線コンバーター内の飛程も同じ比率で短くなっていて、またビームの直径は同じとすると、コンバーターターゲット内の熱密度は40GW/lということとなる。電子を阻止X線に変換し、核変換を行なう方法はコンバーター内の熱密度の点でも不利である。

#### (4) 設備費

陽子ビームによる方法は1 GeV 以上の高エネルギーを要する点で大規模な施設とならざるを得ない。一方、電子リニアックのエネルギーを100MeV以上とすることは利点が無いし、エネルギーバランスが成り立たないから、実用を目指して大電流の加速を計画することも無意味である。計算上必要なX線束密度を与えるようなコンバーターも冷却が困難で実現は至難である。どうしても建設するとしても小型、小電力の施設とならざるを得ない。設備費は少なくてすむはずである。

#### 7.8 電子リニアック方式を追求する意義

前節に述べたように、電子リニアックによる消滅処理方式はエネルギーバランスの成立が困難であり、X線交換ターゲットの除熱の点からも必要な大強度のX線密度を得ることは不可能であるが、その利点は核変換による放射性同位元素の寿命短縮のデモンストレーション（核物理実験装置内では日常的に行なわれていることであるが）を比較的小規模の施設で行ない得る点にあり、それ以上ではないことは明かである。その方向をおおいに推進すべきであるが、一部は既に中村、松本委員により東北大学、北海道大学のリニアックを使用して開始されており、更に進展することが望まれる。新たに電子リニアックを建設するのであれば、それが中村氏等の業績になんらかの意義を追加し得る必要がある。

強いてこれから連続動作のリニアックを建設する理由を挙げるなら、

(i) 産業用プロセッシングあるいは滅菌用に期待されている大出力リニアックの開発援助

(ii) CRNLのETAのように、スポレーション用陽子リニアックの高エネルギー部のシミュレーション実験に使用

の二つを挙げることが出来る。(i)はCRNLのIMPELAが意図するところであり、その他にもその方向を目指すリニアックが幾つか世界で製作あるいは設計の段階にある。

(ii)について説明を加えると、加速器はどれもそうであるが、イオンのそれは特に加速の初期の部分が難しく、装置の構造も変化に富んでいて、開発のための原型の決定にも時間を要する。それに対し、速度が光速に近い高エネルギー部は同一構造の繰り返しが多く、小電流の加速ですむならば問題も少ない。しかし、大電流となるとビームが加速構造の壁に触れると破壊その他の事故を引き起こすし、事故に至らなくても加速管の放射化により保守作業が困難となるおそれがある。そのようなトラブルは、大電流がそれぞれの加速構造に特有の有害な共鳴高周波電磁場に励起してビームを正常な軌道から逸らしてしまうビーム不安定性(BBU)と呼ばれる現象によって生じることが知られている。その性質は使用しようとする加速管に同一電流値の電子ビームを打ち込んで、陽子を加速した場合のシミュレーションをすることにより調べることが出来る。電子を使用するのは陽子と違って光速にまで加速するのが容易で、小型の装置で試験が出来るからである。この目的には長大なリニアックは必要ではなく、ETAのように4 MeV程度で良いが、(i)の用途を兼ねるなら10 MeVが適当なエネルギーである。

このような点に意義をもとめるならば、(i)の場合とは違った観点から周波数の選定をしなければならないことを注意しておきたい。リニアックは一般に高い加速周波数を使用するほうが加速効率がよいとされているが、大強度の加速の場合には各種の理由で低い周波数が使用される。現在、鈴木委員が担当して進めている電子リニアックの概念設計において通常使用されている3 GHzではなくて、1 GHzと言う低い周波数を想定しているのはこのためである。イオンは電子より遙かに速度が小さく、空間電荷によるビームの発散を防止するためあって、加速初期には更に低い周波数を使用せざるをえない。速度の増加に伴って加速周波数をあげて加速効率を良好に保つ方法がとられるが、周波数の比を整数としなければビームの損失が生ずることは判りやすい道理である。この整数の値は小さいほうが望ましく4程度が限界と考えられており、CRNLのETAが805 MHzと言う電子加速器としては低い周波数を使用したのは、お手本のロスアラモスの陽子リニアックが100 MeVまで

の低速部に 201.25MHzの加速周波数を使用していたからである。新しい計画には3の比を推奨する意見もあり、また核変換用の大出力リニアックの初期加速部には更に低い周波数の方が良いとする議論もあるので、それらの動向に注意を払い、低エネルギー部担当者と協議することが望ましい。勿論、周波数の変化を多くすることにより辻褄を合わせることも出来るが、それは高周波技術を複雑にするので、なるべく避けたい方法である。

世界が今後も核エネルギーをエネルギー源として必要とするなら、放射性廃棄物の処理は避けて通ることの出来ない問題であり、特に長寿命R Iの対策に衆知を集めなければならない。これは大きな課題で、その解決には人員、資金、世論の面で国内は勿論、国外にも協力を求めることが有効と思われる。我々の電子リニアック方式の検討がその一環として有用であることを希望する。

表 7 - 1 核変換手段の比較

FAST BREEDER

- FISSION PRODUCTS - MAYBE
- ACTINIDES FEASIBLE
- ACTINIDE INVENTORY BUILD UP IN REACTOR
- REAL GAIN AFTER 100 YEARS RECYCLE

SPALLATION

- FISSION PRODUCTS - TOO MANY
- ACTINIDES - FEASIBLE
- ONE ACCELERATOR - 3 TO 10 PWR  
(300 MW) (10-30% ENERGY)

ELECTRON

- FISSION PRODUCTS - NO
- ACTINIDES - ?
- BREMSSTRAHLUNG SOURCE ENERGY BALANCE AND REACTION  
RATES MARGINAL
- SYNCHROTRON SOURCE - HARDER SPECTRUM GIVES HIGH  
EFFICIENCY DUE TO GDR

図7-1 スポレーション反応による入射陽子一個当たりの中性発生数のエネルギー

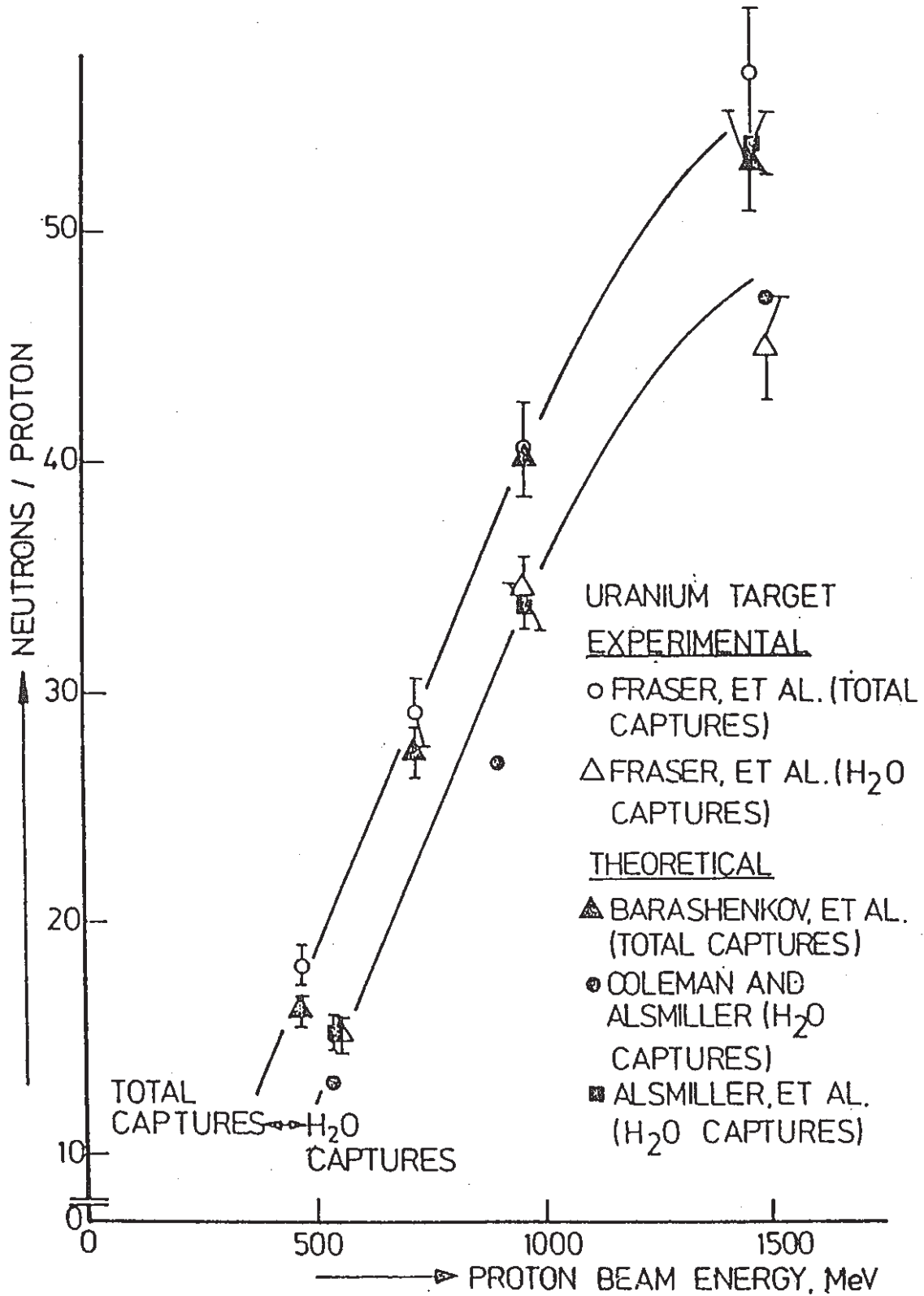
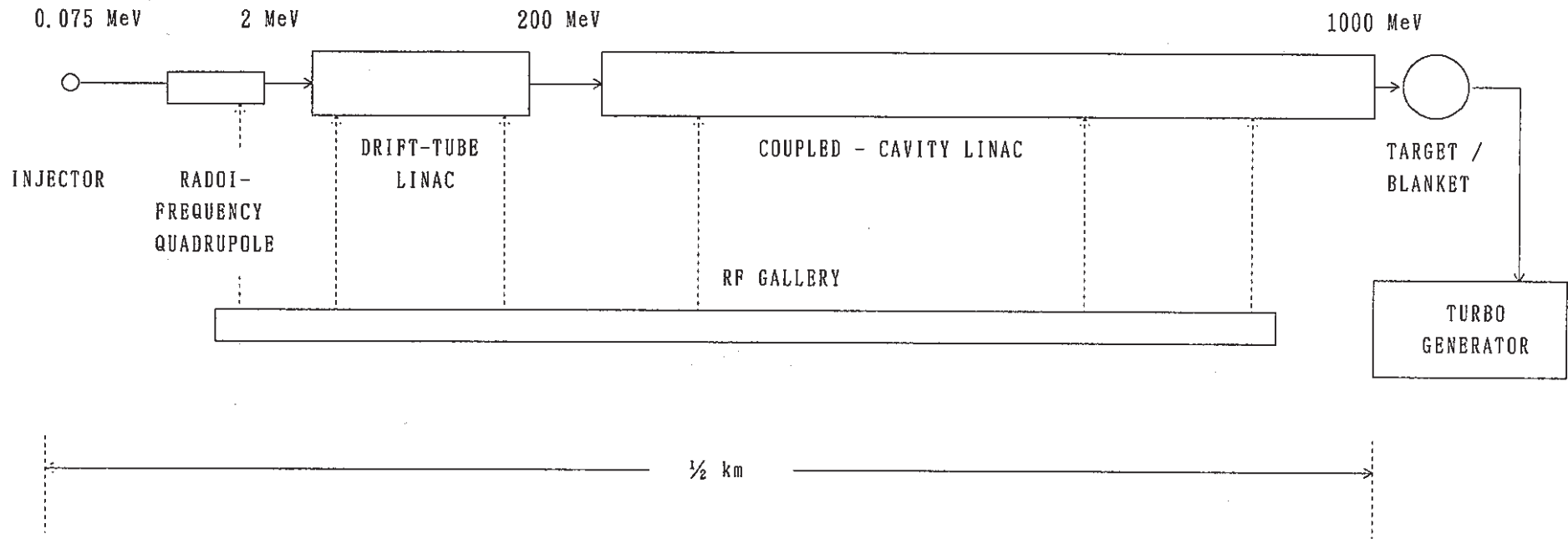


図7-2 CRNLの核変換用大出力陽子リニアック概念図





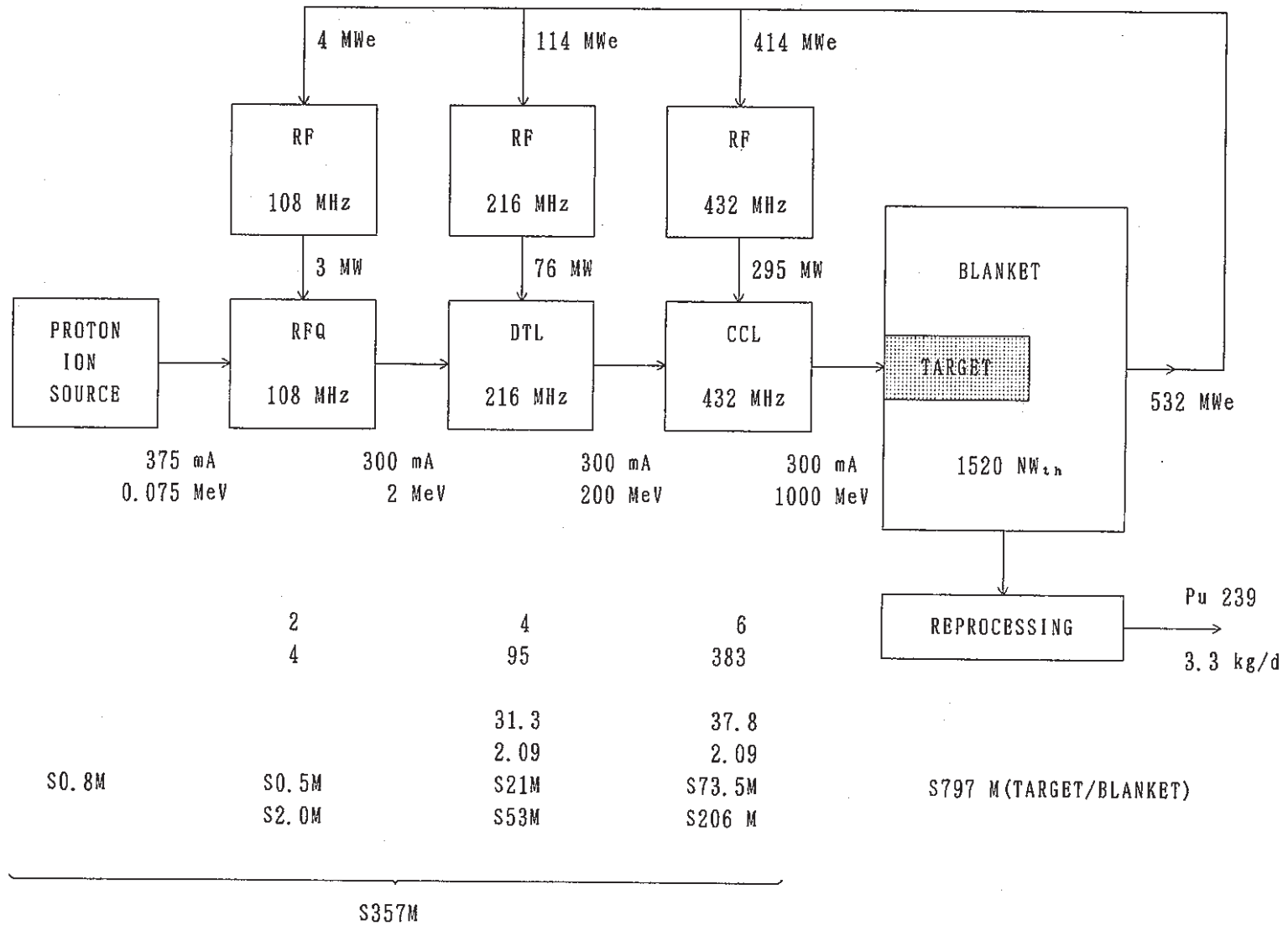
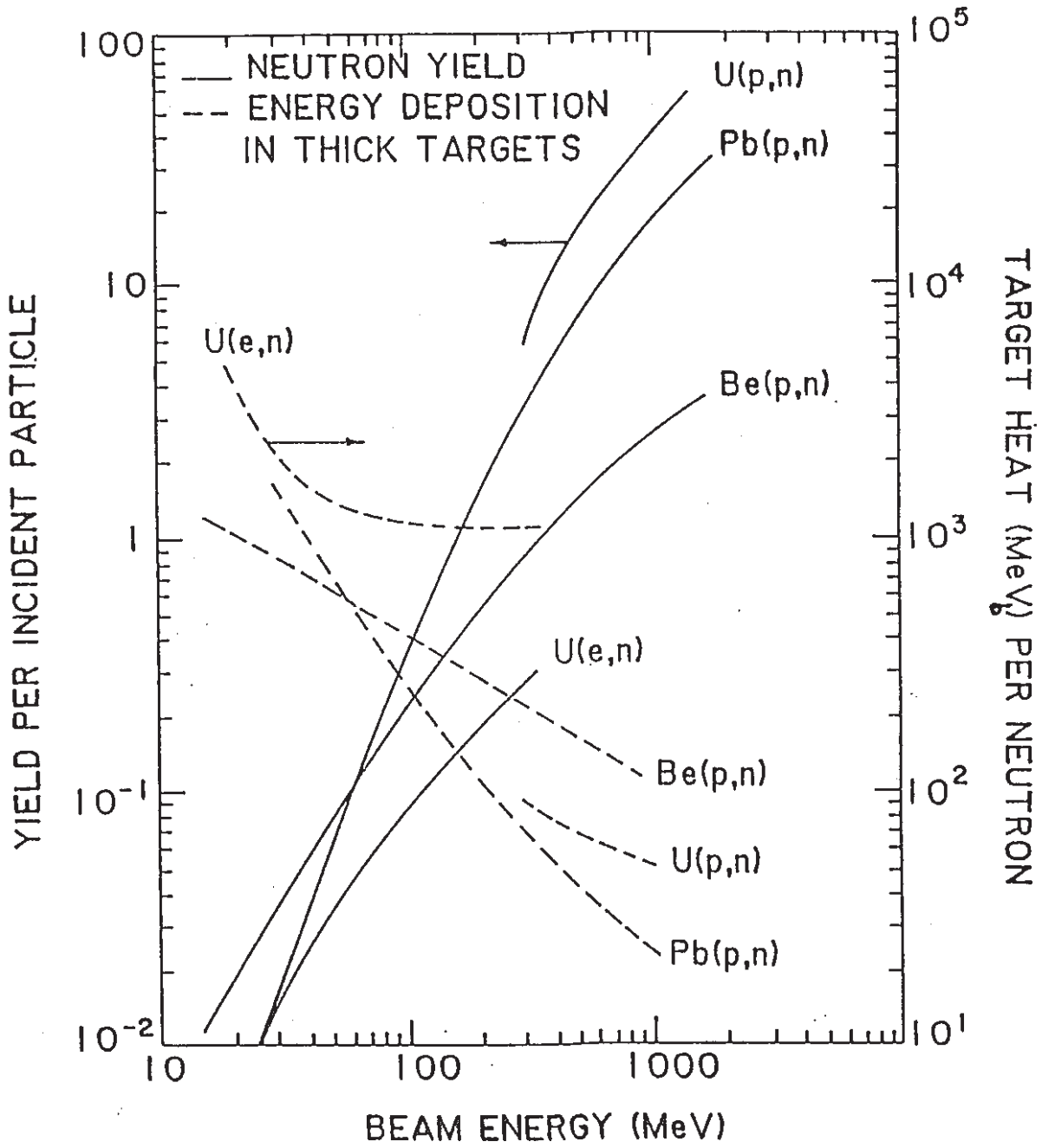


図7-3 大出力陽子リニアックの必要電力, 発生エネルギー, 建設コスト

図7-4 陽子と電子の中性子発生数とターゲットに生ずる熱量の比較



RADIAL  
DISTANCE  
CM

210

180

100

2

0

REFLECTOR

BLANKET

CAVITY

PROTON BEAM

Pb

CYLINDRICAL  
SYMMETRY  
AXIS

0

30

60

110

160

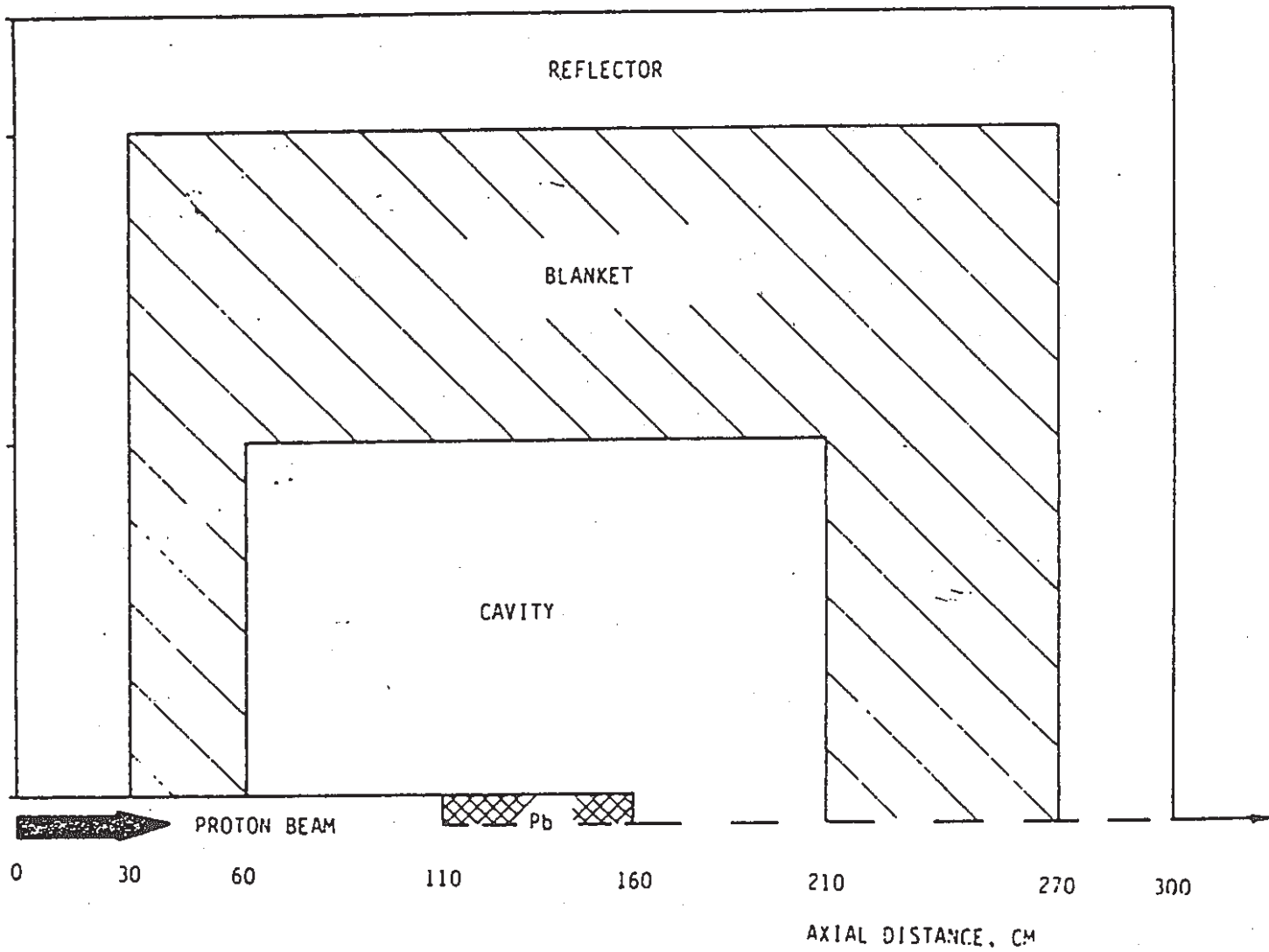
210

270

300

AXIAL DISTANCE, CM

図7-5 CRNLの標的概念図



資料7-1 1988年9月28~29日チョークリバー研究所での議事日程  
 (日程表にある発言者の他, Vice-PresidentのDr. H. K. Rae  
 とDr. J. C. D. Milton が第1日の午前に出席した)

VISIT OF THE  
 WASTE MANAGEMENT DELEGATION VISIT TO CRNL

Wednesday, 28th September

8:00 a.m.	Depart Riverview Inn	11 passenger van*
8:15 a.m.	Arrival and registration at CRNL	gatehouse/PIC
8:30 a.m.	Welcome and introductions, building 400 Conference Room	J. McKeown
8:40 a.m.	The Japanese nuclear incineration study	speakers from PNC
10:00 a.m.	Canadian physics studies on spallation and radiation physics - past and present	A. M. Lone
10:30 a.m.	Coffee	
10:45 a.m.	Introduction to Accelerator Physics Branch	L. H. Ormrod
11:15	The Electron Accelerator Development Program	J. Ungrin
11:30	Visit to proton and electron accelerator development laboratories Bldg. 610	J. H. Ormrod/ J. Ungrin
12:45	Lunch, private dining room	all participants
14:00	Discussion on PNC Questionnaire building 400 Conference Room	G. E. McMichael J. H. Ormrod J. Ungrin J.-P. Labrie
15:15	Coffee	
15:30	Departure for Riverview Inn, Deep River (Leave through gatehouse monitors)	
19:00	Bus leave Riverview Inn for K/O Lodge	
19:30	Dinner at K/O Lodge	

Thursday, 29th September

8:30 a.m.	Departure for CRNL	
8:45 a.m.	arrival and registration	
9:00 a.m.	visit TASC facility	C. B. Bigham/J. Hulbert
10:15 a.m.	Coffee Bldg. 400 Conf. room	
10:30 a.m.	closing discussions/Bldg 600 conference room	J. McKeown
11:30 a.m.	Departure for Ottawa	

\* note : all reference to transportation pertains only to the Japanese delegation

## 8. MITにおける研究

東北大学原子核理学研究施設 小山田正幸

### 8.1 はじめに

MITのベイツ・リニアック・センターはボストンのダウンタウンから国道1号線を約20マイル北上し、州道62号線に乗り換えて2マイル程西に行ったところの、ミドルトンの町の氷河によって出来た堆積丘の上に建っている。敷地の広さは約100 エーカー（40万平方メートル）で、ビームラインの水準は海拔55メートルである。〔Pr84〕表8-1に住所等の詳細を示す。

我々調査団を迎えて電子リニアックの説明や議論に参加したのは表8-2のモーニッツ博士、ターチネット博士、フランツ博士とキーティング技師の4名であった。当日（1988年9月30日）は実験のため電子リニアックは運転中であったが、幸いにも丁度12時頃に実験の切れ目とかで加速器を停止することが出来たので、1時間半程加速器本体室を含めて見学することが出来た。

会議室で議論は双方の紹介から始めて、調査団側ではチョークリバーで行ったように各スピーカーがプレゼンテーションを行い、質疑応答があった。

ベイツの電子リニアックについては、日本を発つ前に予め質問事項を連絡していたことと、事前調査資料を用意していたことにより比較的短時間に理解を深めることが出来た。電子銃カソードについては実物を手に取って見る事が出来、電子銃の製作図面も入手した。ターチネットはリニアック全般について、フランツは前日測定を行ったビームプロフィールについて、キーティングは主にクライストロンやパルス変調器について説明を行った。

ここでは今回の訪問で得られたことと、事前に調査したことをまとめて述べる。

## 8.2 ベイツ・リニアックの歴史

### 8.2.1 前 史

高エネルギー電子リニアックが原子核および素粒子の研究に非常に有用

であることを実証したのはスタンフォード大学高エネルギー研究所 (HEPL) のホッフスタッター博士 (Dr. Robert Hofstadter) である。彼はその業績により1961年にノーベル物理学賞を獲得した。これに刺激されて世界各地に原子核研究用の電子リニアックがつぎつぎに建設された。西ドイツのマインツ大学 (350MeV, 1966年完成), 東北大学 (300MeV, 1967年完成) などで, 大強度ではあるがデューティー・ファクターは小さく第2世代のリニアックと呼ばれる。これらの電子リニアックはその大強度にものをいわせて原子核研究の世界の先頭に立つことが出来た。

MITは第二次世界大戦中のレーダー開発研究の中心を担ったことから, 電子リニアックもスタンフォードと違ってマグネトロンを使ったものにこだわらず, クライストロンを使う高エネルギー・電子リニアックでは遅れをとった。

### 8.2.2 新リニアックの建設

原子核の研究にはますます精度の高い測定が要求されるようになり, デューティー・ファクターの小ささが最大のボトルネックと認識されるようになった。そこでMITは後発の利を活かして, フランスのサクレ研究所やオランダのIKO (現在のNIKHEF-K) と同様にデューティー・ファクターが数%でエネルギー幅の狭いスマートな電子リニアックの建設を提案した [Be67a]

詳細設計については, バリアン社で10数年間数多くの電子リニアックの設計を手掛けてきたヘイムソンをMITに招聘し, 存分に腕をふるわせた。文献 [Ha69] にはMITの電子リニアックをサクレのと比較しながらかなり詳しく述べている。また文献 [Ha70] では建設状況をこと細かく報告している。

電子リニアックの建設は1969年から約4年かかり, 最初のビームは1973年に得られた。[Lo76] 1972年4月7日に行われた引渡し式の席上, 正式に "The William H. Bates Linear Accelerator" と命名された。[Ha73]

ちなみに William H. Bates はこのリニアックの予算支出の法案を提出した上院議員の名前で、このいきさつを記したプレートがセンターの管理棟のロビーに掲示してある。

### 8.2.3 エネルギーアップ

ベイツのリニアックはアメリカ国内の研究者のみならず全世界の核物理研究者に共同利用施設として門戸を開いた。加速器と測定器を組み合わせた総合のエネルギー分解能は世界最高の  $4 \times 10^{-5}$  で、マシンタイムの99%を原子核の研究に注ぎ込めたこととあいまって高精度のデータを矢継ぎ早に発表することが出来た。しかしながら最高エネルギー400MeVでは原子核の微細構造の研究にはまだエネルギーが足りないので、リサーキュレーション方式で2回加速することによりエネルギーを725MeVまで上げる大規模な改良が加えられた。同時にビーム・スイッチャードの南側に新しい実験室とスペクトロメータが建設された。このアップグレードは1980年から82年にかけて行われた。〔F181〕

現在の最高エネルギーはクライストロンの出力を4 MWから5 MWに上げることにより850MeVになっている。

### 8.2.4 将来計画のスタート

1979年の12月に原子核研究諮問委員会は最初の長期計画を発表した。その中で最優先で建設すべき加速器として、エネルギー2 GeV、デューティー・ファクター100%の電子加速器をとりあげた。これに呼応してアルゴンヌ国立研究所、SURA（南東部大学研究連合）、NBSおよびMITが電子加速器のデザイン競争を展開した。1982年の秋にバーネス小委員会（主査 カーネギー・メロン大学 Dr. Peter Barnes）は加速器のエネルギーの可変範囲を4 GeV に上げる勧告を出した。翌年4月に同委員会は4つの研究機関のデザインを比較検討してSURAのパルス型電子リニアックとビーム・ストレッチャー・リングの組合せの案を採択した。SURAは

新しく建設する加速器施設を連続電子ビーム加速器施設 (CEBAF Continuous Electron Accelerator Facility) と名付けた。その後加速器のデザインを再検討した結果超伝導電子リニアックとリサーキュレーションの組合せによる最初から連続加速する方式に変更して現在に至っている。建設予算は1987会計年度からつき1993年に完成する予定である。

加速器デザイン競争では3番手となったMITは1984年に計画の規模を縮小しエネルギーを1 GeV としたリニアック+ビーム・ストレッチャー改造案 (予算\$30M) を提案した。[Pr84] ターチネット博士の話では半分の\$15Mに削られたが1989会計年度から建設予算がつき、それに見合った計画に練り直して10月からスタートするそうである。リングのサイズは縮小し、偏向電磁石はプリンストンのシンクロトロンのお下がりを利用する。リサーキュレーターの延長は見送ることとした。完成は1991年の予定でありエネルギーは低いですがCEBAFに先だって実験が可能になる。

### 8.3 ベイツ・リニアックの詳細

リニアックの構成と主要なパラメータを文献 [Ha69], [Lo76] から引用した図8-1, 表8-3, 表8-4に示す。加速の周波数は2856MHzでSLACのと同じである。使用しているクライストロンの本数は10本で、加速管の総延長は150mである。エネルギー・ゲインが従来のパルス電子リニアックの10MeV/m に比べて約1/4と低いのはビーム・デューティー・ファクターを大きくするためのやむを得ない譲歩である。構成図で目を引くのは最後の2本のクライストロンが例外的に4本の加速管にRFを供給していることである。将来計画のエネルギー増強に際しては、各クライストロンを6MW運転するのみならず本数を2本増設して各2本の加速管に対応させ構成の上でもスッキリしたものになる。

#### 8.3.1 入射器

電子リニアックのビームのエミッタンスはほぼ入射器によって決まる。



ヘイムソンが最も力を入れて設計したのは入射器である。文献〔H69〕からFigs. 16, 18を引用して図8-2, 図8-3に示す。電子銃の電圧を上げていくに従って、エネルギーのばらつきが大きくなり、プリバンチャーのドリフト・スペースの長さも長くなるが、エネルギーが高くなった分だけスピードのばらつきは小さくなる。ここでは350-450kVを考えている。図8-3は電子銃からバンチャーまでを示しているが、バンチ幅を小さくして余分な電子が加速管に入らないようにRFチョッパーとDCバイアス電磁石で位相角120度だけコリメータを通過させる。バンチ幅はバンチャー入口では10度で、出口では2度に圧縮される。

現在用いている電子銃のパービアンスは $10^{-9}$ で、直流高圧電源はHV社製の350kV(安定度0.1%), 20mAである。電子銃のホットデッキ上の制御は光結合器によってアイソレートされている。電流の制御は電子の流れを乱すようなグリッドは用いず、コントロールディスクを用いている。電流オフの時のバイアス電圧は-500Vで、オンの時の電圧2~5kVである。

バンチャーは $\beta < 1$ の部分と $\beta = 1$ の部分が外部の移相器を通じて直列になっており、共に定勾配型である。入射器出口でのバンチ幅(設計値2度)は測っていないがスイッチを入れれば動き、診断機能等も備えていない。現在装着しているカソードは6年前から連続して使っており、電子銃回りの真空度が良ければ寿命は非常に長い。

### 8.3.2 加速管

図8-4に加速管内の熱の発生と温度上昇の様子を示す。〔Ha69〕Fig. 11 加速管の構造は基本的にはSLACのを踏襲しているが、投入するRF電力が非常に大きいので冷却パイプの増強を行い、冷却水の流量を毎秒6.3リットルに上げた。RF的構造は全体を11段のセグメントに分け準定勾配型としている。これは発熱を均すためとBBU対策である。加速管の温度を精密に制御するため出口から30%の所に温度センサーを埋め込み供給する冷却水の温度にフィードバックしている。BBU対策のためには更にセ

グメントの構造を図8-1に示すようにA, B, C, D型と互いに違えてある。

加速管を真空に引くために各空洞に直径5mmの孔を8個ずつ開けて外側から真空ジャケットがかぶせられている。

使用加速管 長さ 3.675 m (105空洞) 集束用ソレノイド付き 4本。  
7.35 m (210空洞) ソレノイド無し 18本。

### 8.3.3 クライストロン

バリアン社のクライストロン VA938は動作電力レベルが4 MW (130kV, 91A, P=80kW, 35%) から1 MW (80kV, 44A, P=65kW, 30%) までカバーしている。ビーム集束磁場は4分割電磁コイルによる。励振用には2本の大電力クライストロンにつき1本の4 K 3 S N (1 kW) を用いている。

R F幅は40 $\mu$ 秒まで可能であるが、典型的な運転例ではカソード印加電圧の幅19 $\mu$ 秒でR F出力幅は15 $\mu$ 秒である。初めの4 $\mu$ 秒は変調器の立ち上がりで電圧が一定するまでの時間で、この間はクライストロンを励振しない。これは中途半端な電圧でR Fを出力した場合、出力R F窓でマルチパクタリングが起き破損の原因になりやすいことと、出力位相が安定しないR Fを極力加速管に入れなくて加速管の熱負荷を軽減するためである。

R Fの位相と振幅の安定度を測定した結果、非常に良好なので出力ビームの性能は普通は入射器とビーム電流の安定度によるエネルギーロスだけに依存している。

### 8.3.4 パルス変調器

クライストロンのパルス変調器は長いパルス幅のR Fの位相を安定にするためにハードチューブ方式を採用した。スイッチ・チューブはリットン社のL5097を2本並列に用いている。電流のバランスはアノードに20 $\Omega$ の抵抗を入れることで5%以内に抑えている。

クライストロンのRF出力は入力RF電力に対して飽和特性を持っているのでカソード電圧だけに依存する。RFの位相変調は±0.25度程度と非常に小さい。ハードチューブの電圧降下は小さいので電力損失は数kW程度である。

アーキングに対する保護はクライストロンのカソードにかけたパルスを積分して一定値を越えたらクローバー回路を働かせる。クローバー回路の能力は最大50ジュールまで吸収できる。クライストロンのアーキングについてはハードチューブは定電流源なので自動的に保護される。

1台の直流電源は2本のクライストロンのパルス変調器に電力を供給する(-70~-160kV)。1台のパルス変調器で2本のクライストロンをドライブすることで不都合なことは1本のクライストロンを休止するときで、その時はそのクライストロンのカソード・ヒーター電源を切っている。

クライストロンの出力のピーク電力の制限はスイッチング球の並列運転でお互いに磁氣的に結合して1本当りの電流が40アンペア以下に制限されていたため4MWであった。結合がなければ60アンペアまで上げられるので、スイッチング球の集束用永久磁石を電磁石に変更することにより制限を取り除き、クライストロン出力を5.4MWに上げる計画を進めている。将来は更に6MWに上げる予定である。

クライストロンのRF空洞は4MW出力時に最大効率になるように調整されているため将来6MW運転時に最大効率になるよう再調整する必要がある。平均RF出力はクライストロンのコレクターと窓のために100kWに制限されている。

#### 8.4 運転経験

加速器の運転は実験からの要求に対して最適なパラメータで行うことが出来る。エネルギー、ピーク電流、パルス繰り返し数、デューティー・ファクターの基本的なパラメータは異なった要求に対して広い範囲で対応することが出来る。

加速器のRF電源は繰り返し数5kHzで設計され、初期にはそれで運転された。しかしながら初期のいくつかのスイッチング球の故障が高い繰り返し数での運転時に起きた。これらの故障ではマグネトロンのような発振が起こりコレクターを破損した。シングル・アームの電子散乱や光反応では500Hz以上を要求しないので現在では750Hz以下で運転しており、例外的な同時計数実験でも1700Hzで運転している。最近はほとんど電源同期の600Hzで、ピーク電流は5mA以下で運転している。

好ましくない発振を抑制するためスイッチング球の磁気回路を改善した結果、ここ数年間そのような故障を経験していない。現在のMTBFはスイッチング球では3万7千時間以上、クライストロンについては4万時間以上である。

## 8.5 主要管球と寿命と効率

運転コストの重要な項目は各種の効率と主要なコンポーネントのコスト/寿命である。後者のカテゴリーに入るのが主要な管球すなわちスイッチング球とクライストロンである。2本1組のスイッチング球のコスト(\$5万×2)はそれらがコントロールするクライストロンのコスト(\$10万)にほぼ等しい。RFのシステム設計は運転コストを最小にしている。クライストロンとスイッチング球は直列になっていて、片方がアークした場合でもアーク電流は一次保護回路(クローバー)が働けるところまで制限されているのでお互いに保護し合うことになる。

結果は管球の寿命に対して良い記録を示している。1977年7月から1984年1月までの6年間でスイッチング球の総運転時間は64万3千時間になるが、故障は10回であった。これらの故障の内の4回は高い繰り返し数での使用に関係しており、初期の運転時に起こったものである。残りの6回はクローバー回路の故障の結果と信じられている。

同じ期間中のクライストロンの運転時間は32万9千時間であるが5本のクライストロンが故障した。全て古い球の故障で、熱歪による溶接部の金属疲

劣が原因である。これらの運転時間のかなりの割合は非常に低いデューティーでのスタンバイに使われたにしても良好な記録である。

## 8.6 リニアックのビームの性能

入射エネルギーは 20MeVで、リサーキュレートした時の最大エネルギーは現在850MeVである。ビームの集束は 40MeVまではソレノイドコイル、以降は5組の四極ダブレットを用いている。

ビーム・プロファイル・モニターは10 $\mu$ mのタングステン・ワイヤーを十字に張ったフレームをコンピュータ制御のステップ・モーターで動かし二次電子を検出することにより行う。データはコンピュータにより処理され表示される。所要時間は1ヶ所当り10秒である。[Ja88] , [Ja88a]

我々の訪問前日に測定した結果、850MeV, 6mA, デューティー・ファクター1%, リサーキュレーション加速の場合1回目のビームと2回目のビームは水平方向にはずれないが、垂直方向に少しずれていた。エネルギー幅は0.3%でエミッタンスは0.02mm $\cdot$ mrad (250MeV地点で) である。

電流-エネルギー特性は

$$\text{ヘッド-テイル加速: } (500 - 2.3 i \text{ (mA)}) \times 2 \quad \text{MeV}$$

$$\text{長パルスビーム加速: } (500 - 2.3 i \text{ (mA)}) \times 2 \quad \text{MeV}$$

将来計画では1GeV, 50 $\mu$ A, 50kW のビーム加速を行う。

## 8.7 ベイツ・リニアックの見学

見学はターチネット博士が案内してくれた。チョークリバーを見た後なのでいかにも手作り風なものが多く、大学の研究所の典型を見た思いである。

### 8.7.1 電子リニアック本体室 (リサーキュレーターを含む)

ヘイムソン電子銃が目を引く。高圧電源 (クライストロン・ギャラリーにある) からの高圧ケーブルは平滑用コンデンサーを兼ねているので長いまま天井に留めてある。入射ラインには天井の孔を通して偏極電子の入射

ダクトがつながれている。偏極電子発生用のレーザーのガイドが部屋を引き回され偏極電子光カソードを真下から照射している。

リサーキュレーターの180度電磁石はモーターによりリモートで移動出来て再入射のバンチをRFの位相と合わせることが出来る。入射部シケーン(20MeVと520MeVのビームを合流させる)はかなり小型の電磁石で構成されている。

トロイド電流モニター, パノフスキー型ビーム・ロス・モニター等が目につく。

### 8.7.2 クライストロン・ギャラリー

(電子銃高圧発生装置, 入射器制御室を含む)

キーティング氏がクライストロン, パルス変調器, クロウバー装置, ハードチューブ等を説明した。クロウバー回路を実際動作させてみせてくれた。かなり大きな放電音である。

### 8.7.3 偏極電子発生装置室

大電力レーザー発生装置, 偏極電子発生等があり, 大学院生が整備作業の手を休めて説明してくれた。半導体光電カソードは20時間毎に活性化する必要がある。電子のエミッションには付近の真空度が効く。実際に使う場所と活性化するチェンバーを仕切るゲート弁にリークがあり真空度が上がらない。弁を替えればエミッションが増えると予想している。

### 8.7.4 制御室

7年前の様子はほとんど変わっていない。制御方式は大部分がハードワイヤーを使った比較的古いものである。ストレッチャー・リングを建設すれば新しい方式に更新されるだろう。右側にはイオンポンプの電源が多数はめ込まれている。

リニアックの制御室の左隣がエネルギーロス・スペクトロメータの制御室になっている。

### 8.7.5 エネルギーロス・スペクトロメータ室

このスペクトロメータはリニアックのエネルギー幅0.3%のビームを全て使って、 $4 \times 10^{-5}$ の精度で実験できる巧妙なものである。電子のエネルギーの違いに従ってターゲットの違う場所に入射し、標的核でのエネルギーロスが同じ散乱電子を焦点面の同じ場所に収束させる。検出器はドリフト・チェンバーで焦点面の場所と入射角からオンライン・コンピュータでレイ・トレースを行いターゲット上の位置を出し、補正計算でエネルギーロスを正確に求める。

当日散乱槽の回りではセットアップの変更の作業が続けられていた。散乱槽はフランジによる直結型が据え付けてあり、任意の角度に設定できるスライディング・シール型は外してあった。

## 8.8 まとめ

ペイツはリニアックをステップ・バイ・ステップで改善していくのだと、かつてターチネット博士が筆者に語ったことがある。華やかなスポット・ライトを浴びているCEBAFをよそに、したたかにリニアックの改良を進めている姿に感銘をおぼえた。

4 GeV のCEBAFと、1 GeV のペイツはエネルギー的に棲み分けの道を選んだ。図8-5、図8-6に1984年の要求の縮小案と、半額に減額された後の現実案をしめす。ストレッチャー・リングの周長が短くなったのでリニアックのビーム幅もそれにしたがって短くなり、ビーム・パワーとしては現在より増えるわけではない。

予定ではCEBAFより2年以上前に完成することと、これまで培ってきたユーザー層の厚みを活かして核物理の研究に新風を吹き込むことが期待される。

表8-1

名 称 : Bates Linear Accelerator Center

住 所 : Manning Road, Middleton, Massachusetts

郵 便 : P. O. Box 846, Middleton, Massachusetts 01949-2846

電 話 : (617) 245-6600

FAX : (617) 245-0901

CNA : bitnet @MITBATES

表8-2

Bates 側出席者 :

Dr. Ernest J. Moniz (Director)

Dr. William E. Turchinetz (Associate Director, Operations)

Dr. Jacob B. Flanz (Head of Accelerator Physics)

Mr. Keating (Engineer)



[Ha69] J. H. Haimson: "High Duty Factor Electron Linear Accelerators"  
 in "Linear Accelerators", p. 415, edit. Lapostolle and Septier,  
 North-Holland Publ. Co. Amsterdam (1969).

8-1

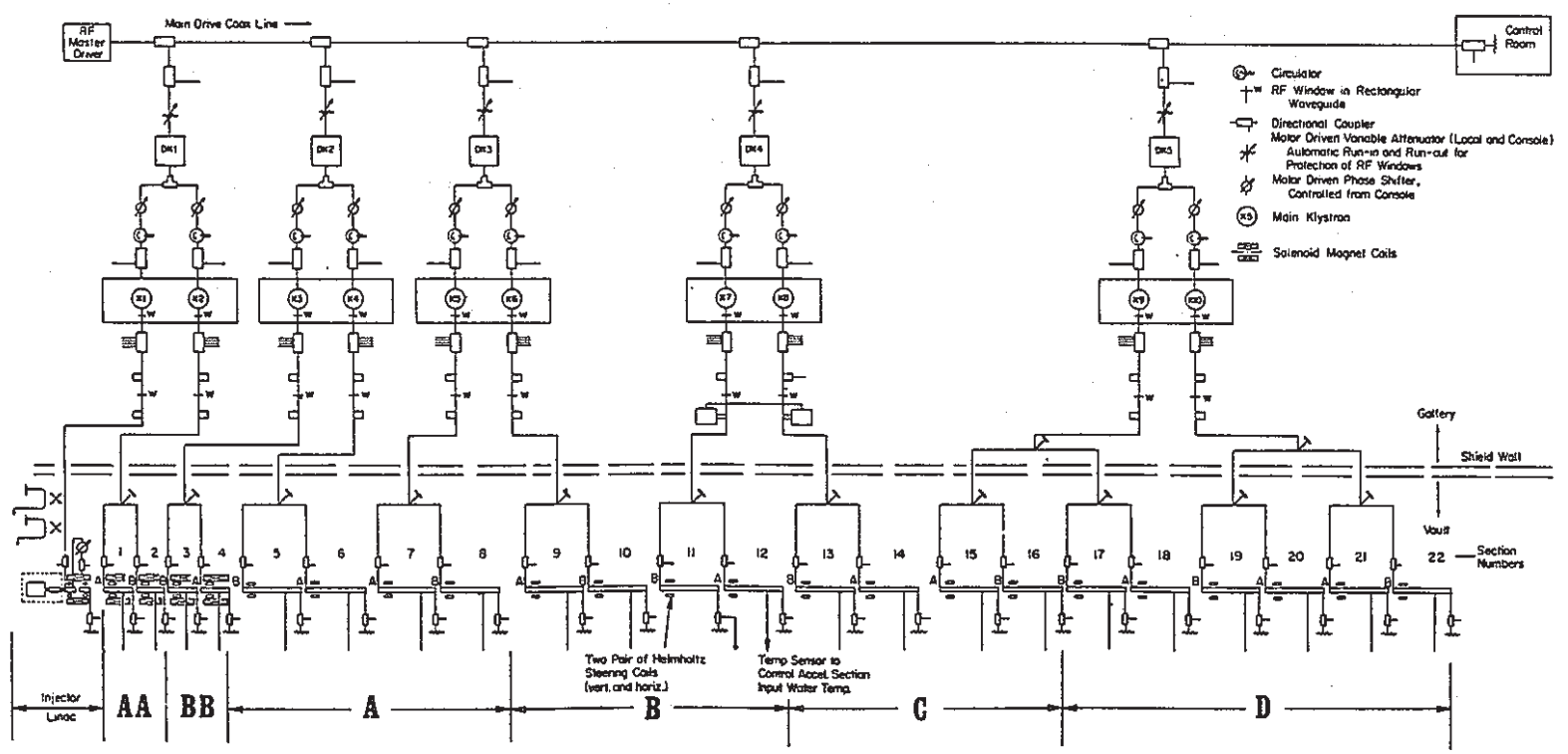


Fig. 10. Schematic layout of the microwave system and beam centerline for the MIT 400 MeV linear accelerator.

TABLE 5  
 Principal design parameters of the MIT accelerator

Number of klystrons	10 (type VA 938)	<u>Main Waveguide Sections</u> (4 short and 18 long) $2\pi/3$ mode, approx. constant gradient	
Number of modulators	5 each driving two klystrons	Length	3.675 and 7.35 meter
Number of waveguide sections	24	Number of cavities	105 and 210
Overall electrical length	150 meter	Disc thickness	5.84 and 5.84 mm
<u>Klystrons</u>		Number of uniform segments per section	11 and 11
Operating frequency	2856 MHz	Range of shunt impedance	53.8 - 57.7 and 48.0 - 56.5 M $\Omega$ /m
Microperveance	2.0 $\pm$ 0.1	Range of group velocity ( $v_g/c$ )	0.0156 - 0.007 and 0.0389 - 0.0093
Peak RF power (nominal)	4 MW to 1 MW	Average attenuation parameter	0.75 and 0.825 neper
Average RF power	80 kW to 65 kW	Average Q	13400 and 13750
Beam voltage	130 kV to 80 kV	Filling time	1.12 and 1.27 $\mu$ sec
Minimum efficiency	35% to 30%	Zero current energy gain at $P_0 = 1.8$ MW	16.6 MeV and 23.2 MeV
Minimum gain for saturation	41 db	Zero current energy gain at $P_0 = 0.8$ MW	15.5 MeV
Single RF output through ceramic window into pressurized waveguide		Beam pulse length	Variable up to 14 $\mu$ sec in accordance with duty factor and peak RF power.
<u>Modulators (Hard Tube)</u>		Beam duty factor	1.8% at $P_0 = 4$ MW and 5.8% at $P_0 = 1$ MW
Peak power	23 MW at 1.25 kHz, 7 MW at 4 kHz	Cooling	12 $\times$ 11 mm I. D. and 8 $\times$ 16 mm I. D. tubes
Average power	520 kW	Water flow per section	6.3 and 6.3 litre per sec.
Peak voltage	140 kV	Construction	Hydrogen braze (copper-silver eutectic) and vacuum jacket
Peak current	200 A	Steering coils at each input coupler, no solenoids for long sections.	
Load dynamic impedance	1400 to 1700 ohm	<u>Injector Design</u>	
Switch tubes	Four Litton - L5097 rated 180 kV	Biased chopper - prebuncher and high gradient buncher in series - connection with a 3.7 meter section	
Capacitance bank	1.8 $\mu$ F	Electron gun microperveance	10 <sup>-3</sup>
Crowbar protection	Maximum energy release < 50 joule	Electron gun voltage	300 - 400 kV
Pulse duration (99% flat-top)	Continuously variable up to 15 $\mu$ sec in accordance with duty factor and peak power (see Fig. 9)	Injected bunch width	< 10 degrees
Voltage pulse flat-top specification	$\pm$ 0.15%	Buncher length	1.2 meter
Pulse repetition rate	Continuously variable up to 5 kHz in accordance with duty factor and peak power (see Fig. 9)	Buncher zero current energy gain	6.9 MeV at $P_0 = 2.5$ MW
RF duty factor	2% to 6.5%	Beam emittance design specification at 6 MeV	10 <sup>-3</sup> $\pi$ m <sup>2</sup> c X cm
<u>Drive System</u>		<u>Overall Performance Specification</u>	
Master driver consisting of a crystal controlled solid state oscillator and a 1 kW CW klystron with optional pin-diode modulation for pulsed output. Main coaxial drive line serves five 1 kW klystrons (using regulated dc power supplies), each of which drives two main klystrons.		Zero current total beam energy	430 MeV at 1.8% duty
		Beam energy at 10 mA	400 MeV at 1.8% duty
		Energy spread	50% current in $\pm$ 0.2%

表 8 - 4

AECL-5615 ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED

COMPENDIUM OF LINEAR ACCELERATORS - 1976

Compiled by J. S. FRASER and S. O. SCHRIBER

Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, September 1976

ENTRY NO. 36

NAME OF MACHINE	<u>William H. Bates Linear Accelerator</u>		
INSTITUTION	<u>Massachusetts Institute of Technology</u>		
Location	<u>Middleton, Massachusetts</u>	DATE	<u>August 16, 1976</u>
IN CHARGE	<u>Dr. Peter Demos</u>	REPORTED BY	<u>W. Lober</u>
	<u>(Dr. Ernest J. Moniz)</u>		

HISTORY AND STATUS

DESGN, date 1964  
 ENG. DESIGN, date 1966-69  
 CONSTRUCTION, date 1972 Completed  
 FIRST BEAM, date 1973  
 COST, ACCELERATOR ~\$5 Million  
 COST, FACILITY, total ~\$13 Million  
 FUNDED BY ERDA  
 ACCELERATOR STAFF, OPERATION AND DEVELOPMENT  
 SCIENTISTS 15 ENGINEERS 17  
 TECHNICIANS 26 CRAFTS 5  
 ADMIN & CLER 4 TOTAL 67  
 GRAD. STUDENTS involved during year 9  
 OPERATED BY Sp op.  
 BUDGET, op & dev \$3M FY/76  
 FUNDED BY ERDA  
 FACILITIES FOR RESEACH  
 PHYSICAL DIMENSIONS  
 TUNNEL, length 200 m, X-sec 3 mH x 3 mW  
 ACCELERATOR, length 150 m, dia. ~15cm O.D.  
 BEAM, DIA. <1.2 cm; ENERGY GAIN 2.67 MeV/m  
 SOME TYPICAL PRIMARY EXTERNAL AND  
 SECONDARY BEAMS

PARTICLE	FLUX	ENERGY	$\Delta E/E$
	(part./sec)	(GeV)	(%)
<u>e<sup>-</sup></u>	<u><math>6 \times 10^{14}</math></u>	<u>0.4</u>	<u>~0.3</u>

OPERATING PROGRAM, time dist.  
 Basic Nuclear Physics 100 %  
 SELECTED REFERENCES DESCRIBING MACHINE  
Medium Energy Nuclear Physics With  
Electron Linear Accelerators  
MIT 1967 Summer Study  
 Edited By: W. Bertozzi, S. Kowalski  
Laboratory For Nuclear Science,  
Cambridge, Mass.

INJECTOR SYSTEM

TYPE OF SOURCE High Voltage Eng. Corp.  
-Insulated Core Transf.  
 OUTPUT, max ~20 mA, at 400 keV  
at ~10 $\pi$  mm-mrad  
 INJECTION PERIOD 15  $\mu$ s, at 5000 Hz Max.  
 Pre-Buncher Power 5 kW Peak  
 Drift Length 1.2 m  
 Buncher Power 3 MW Peak

ACCELERATION SYSTEM

TYPE Disc-Loaded  
 BEAM EN. (IN-OUT) 6-400 MeV  
 TOTAL LENGTH 150 m  
 RADIO FREQUENCY 2856 MHz  
 FIELD MODE TM 010  
 Q 13.4 - 13.75  $\times 10^3$   
 FILLING TIME 1.12 - 1.27  $\mu$ s  
 NO. OF TANKS 23  
 IRIS APERTURE 1.9 - 3.7 cm  
 THICKNESS 0.594 cm  
 SPACING 3.5 cm  
 GROUP VELOCITY 0.0389 - 0.007 c  
 WAVE TYPE T.W.  
 SHUNT IMPEDANCE 48 - 57.7  $\Omega$ /m  
 ATTENUATION 0.75 - 0.825 Np/TANK  
 RF POWER UNIT, type VA938 Klystron  
 number 10  
 RF POWER DEMAND, peak 4 MW/Klystron  
 mean 75 kW/Klystron  
 RF POWER RATING 4 MW/Klystron  
 RF POWER FEED SPACING 3.7 - 7.35 m  
 QUADRUPOLES, number 5 Doublets  
 GRADIENT 40 kG/m  
 SPACING 30 m Average  
 SOLENOIDS 1 kG for 50 ft

[Ha69] J. H. Haimson: "High Duty Factor Electron Linear Accelerators"  
 in "Linear Accelerators", p. 415, edit. Lapostolle and Septier,  
 North-Holland Publ. Co. Amsterdam (1969).

☒ 8 - 2

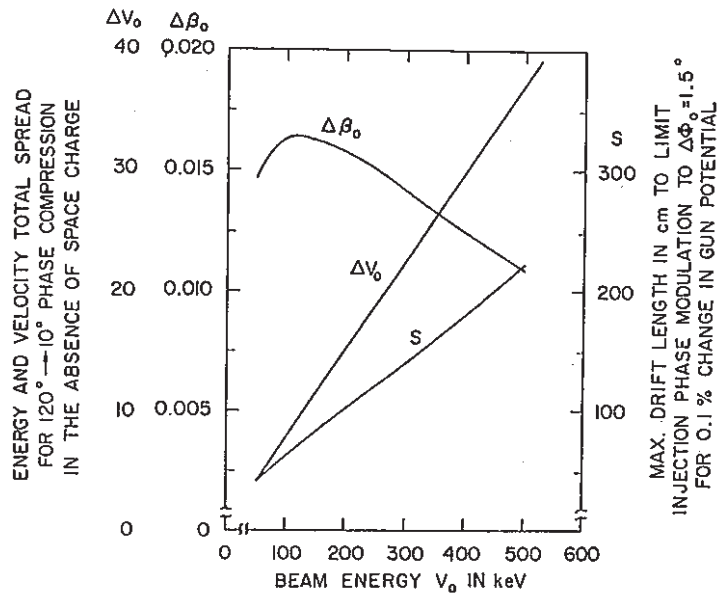


Fig. 16. Prebuncher drift space parameters for 12 to 1 bunch compression, in the absence of space charge.

☒ 8 - 3

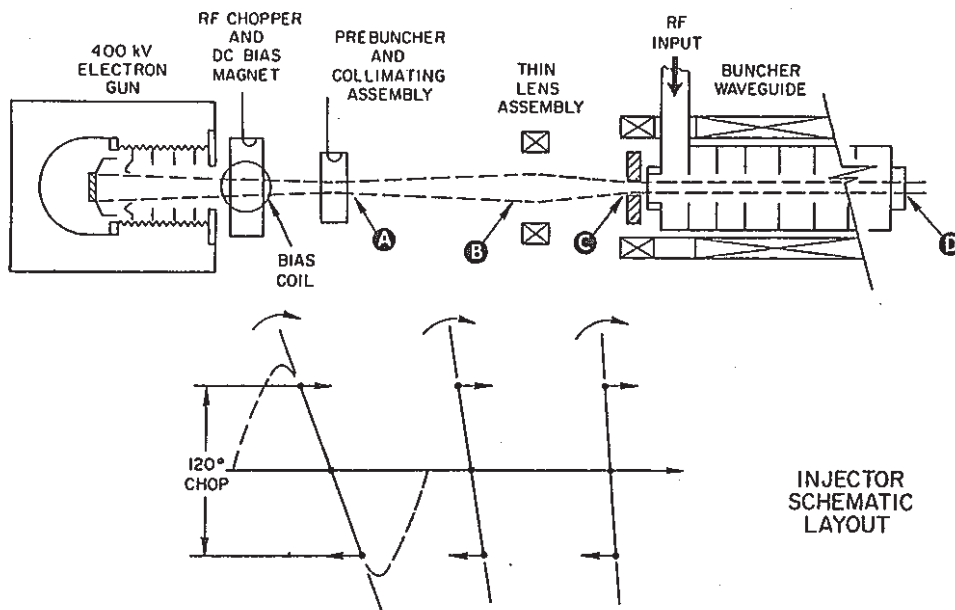


Fig. 18. Schematic layout of high beam energy, chopper-prebuncher injection system.

[Ha69] J. H. Haimson: "High Duty Factor Electron Linear Accelerators"  
in "Linear Accelerators", p. 415, edit. Lapostolle and Septier,  
North-Holland Publ. Co. Amsterdam (1969).

8 - 4

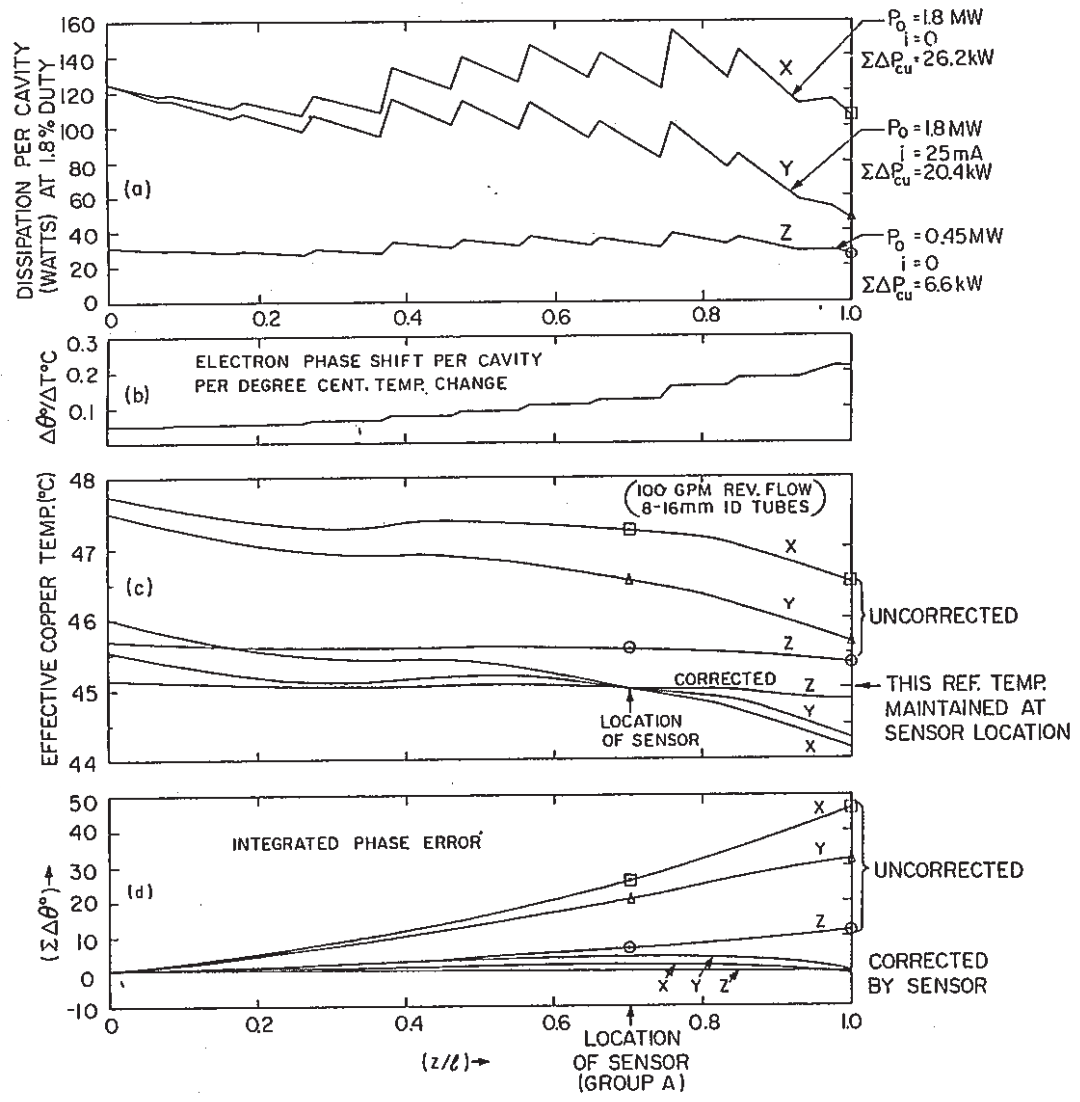
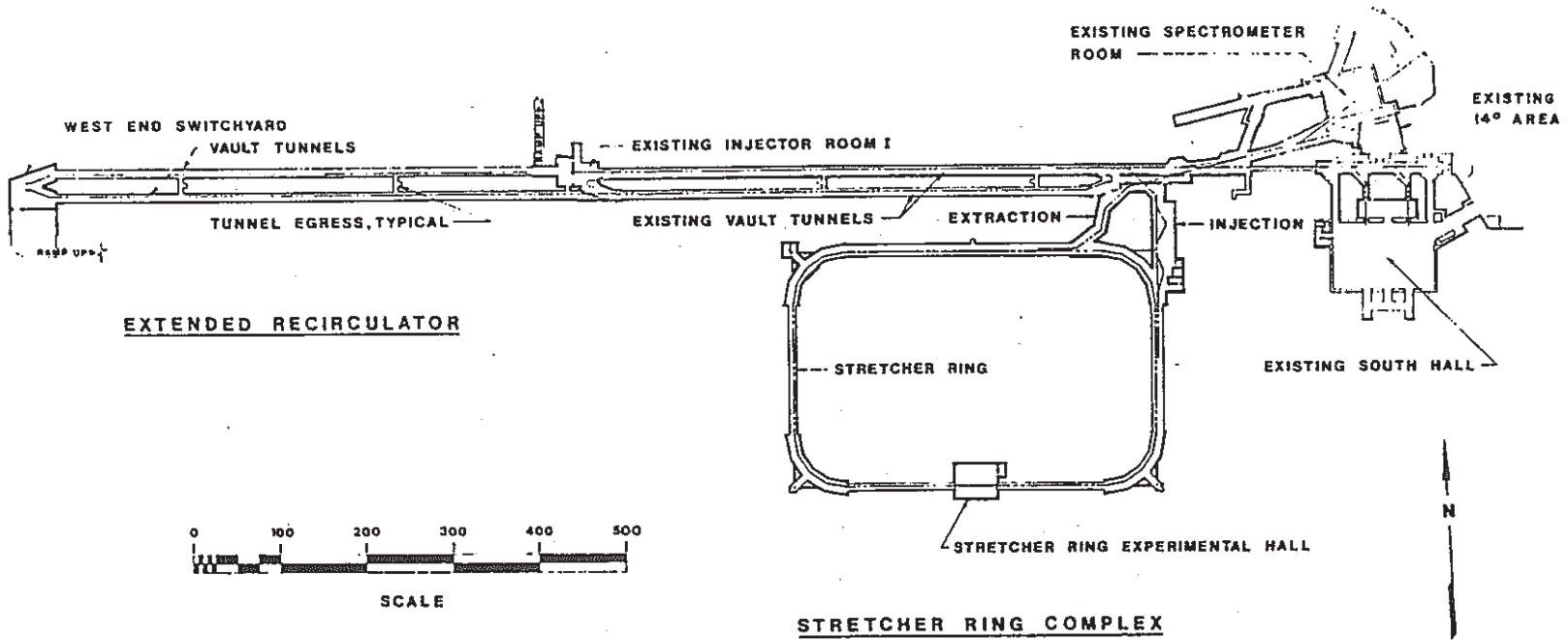


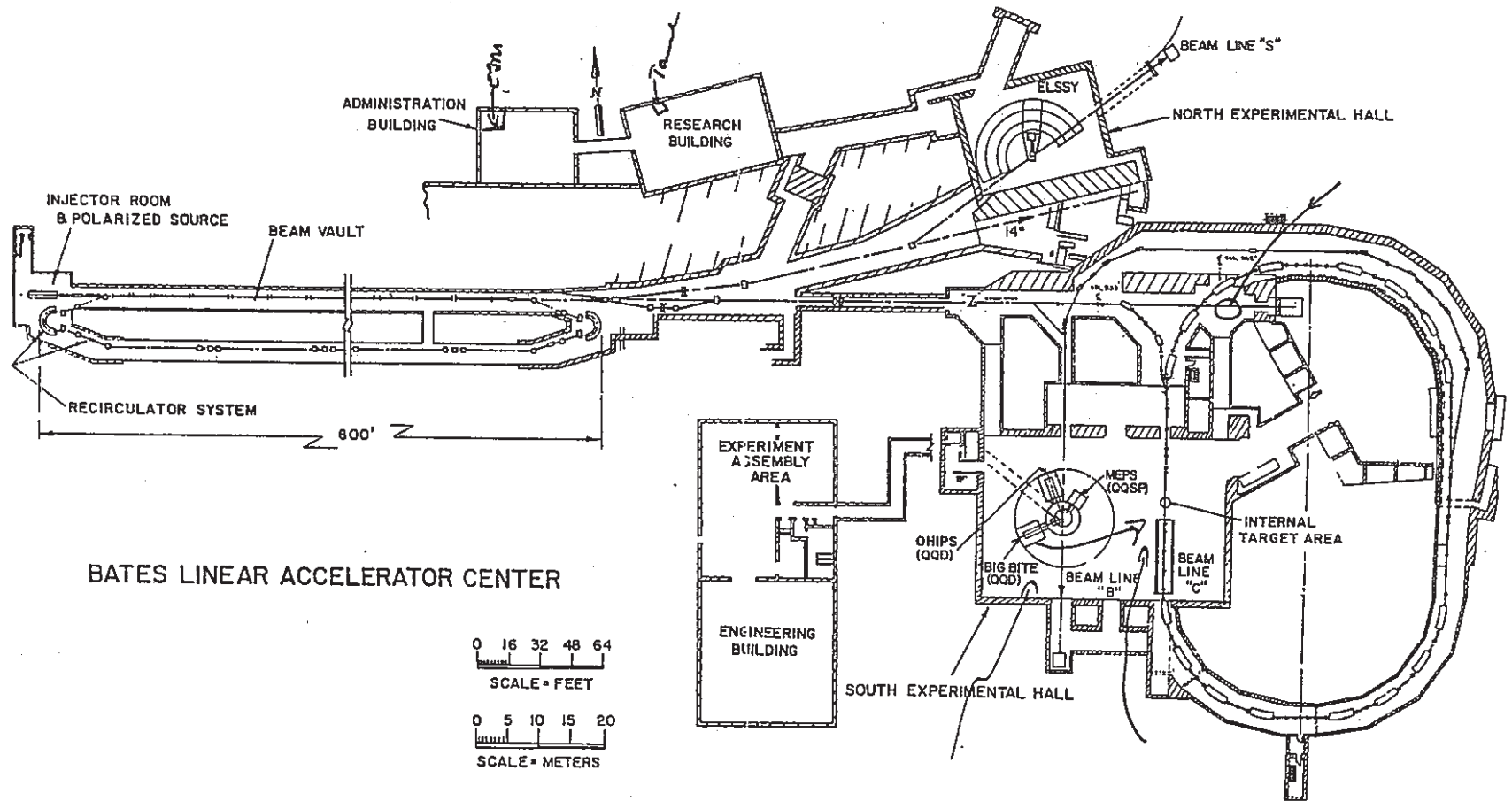
Fig. 11. Power dissipation and temperature-phase characteristics for a MIT long waveguide design. (a) Variation of the copper loss per cavity with distance along the waveguide, for three different loading conditions, (b) variation of the thermal coefficient of phase change with distance along the waveguide, (c) comparison of uncorrected and sensor corrected waveguide temperature distributions, (d) comparison of uncorrected and sensor corrected integrated phase error distributions.

[Pr84] WILLIAM H. BATES LINEAR ACCELERATOR CENTER PULSE STRETCHER RING  
Proposal for a CW Upgrade (1984) MASSACHUSETTS INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY, Laboratory For Nuclear Science.

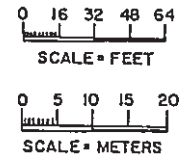
8-5



PLAN AT BEAM ELEVATION



BATES LINEAR ACCELERATOR CENTER



- 71 -

参考文献 (MIT LINAC 関係)

- ◎ [Be67] W. Bertozzi, J. Haimson, C. P. Sargent, and W. Turchinetz; "THE MIT HIGH DUTY, HIGH INTENSITY 400 MEV LINEAR ELECTRON ACCELERATOR", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-14, no. 3, 191 (1967).
- ◎ [Be67a] Medium Energy Nuclear Physics With Electron Linear Accelerators MIT 1967 Summer Study, edited by W. Bertozzi, and S. Kowalski, (1967).  
Laboratory For Nuclear Science, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- ◎ [Bi71] R. D. Biron, H. C. Fischer, and J. N. Weaver; "SOME MECHANICAL DESIGN AND CONSTRUCTION ASPECTS OF THE MIT-LNS LINAC", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-18, no. 3, 589 (1971).
- [Br ] F. P. Brooks, J. M. Davin, and B. M. Bailey; "A study of removal of RF-generated heat from rectangular waveguides in the MIT-400-MeV linac using one- and two-pass cooling arrangements", Internal Report, LNS-Mechanical Engineering,  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- ◎ [F181] J. Flanz, S. Kowalski, and C. P. Sargent; "AN ISOCRONOUS BEAM RECIRCULATION MAGNET SYSTEM", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-28, 2847 (1981).
- ◎ [F185] J. B. Flanz, and C. P. Sargent; "SIMULATION OF HALF AND THIRD INTEGER RESONANT EXTRACTION FROM A ONE-GEV PULSE STRETCHER RING", IEEE Trans. on Nuclear Science NS-32, 2444 (1985).
- ◎ [F185a] J. B. Flanz, and C. P. Sargent; "TESTS WITH AN ISOCHRONOUS RECIRCULATION SYSTEM", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-32, 3213 (1985).
- ◎ [Ha65] J. Haimson; "INJECTOR AND WAVEGUIDE DESIGN PARAMETERS FOR A HIGH ENERGY ELECTRON-POSITRON LINEAR ACCELERATOR", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-12, no. 3, 499 (1965).
- ◎ [Ha65a] J. Haimson, and L. Katz; "A COMPARISON OF THEORETICAL AND ACTUAL BEAM PERFORMANCE OF A 140 MEV ELECTRON LINEAR ACCELERATOR AT THE UNIVERSITY OF SASKATCHEWAN", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-12, no. 3, 457 (1965).
- ◎ [Ha69] J. H. Haimson, "High Duty Factor Electron Linear Accelerators" in "Linear Accelerators", p. 415, edit. Lapostolle and Septier, North-Holland Publ. Co. Amsterdam (1969).
- ◎ [Ha70] J. Haimson; "A High Duty Factor 400 MeV High Resolution Electron Linear Accelerator", Proceedings of the Seventh International Conference on High Energy Accelerators, Yerevan, USSR, 1, 244 (1970).



- ◎[Ha71] J.Haimson; "A LOW EMITTANCE HIGH DUTY FACTOR INJECTOR LINAC", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-18, no.3, 592 (1971).
- ◎[Ha71a] J.Haimson, C.P.Sargent, and J.N.Weaver; "HIGH PHASE-STABLE RF POWER CIRCUITS FOR THE MIT-LNS LINAC", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-18, no.3, 595 (1971).
- ◎[Ha73] J.Haimson; "INITIAL OPERATION OF THE MIT ELECTRON LINEAR ACCELERATOR", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-20, 914 (1973).
- ◎[Ja88] K.D.Jacobs, J.B.Flanz, and T.Russ; "EMITTANCE MEASUREMENTS AT THE BATES LINAC", 1988 Linear Accelerator Conference Proceedings, Williamsburg, Oct. 2-7, 1988.
- ◎[Ja88a] K.D.Jacobs, J.B.Flanz, R.D.Biron, E.E.Ihloff, J.E.Kelsey, Z.Radouch, T.Russ, and A.Saab; "ACCELERATOR BEAM PROFILE MEASUREMENTS AT THE BATES LINAC", 1988 Linear Accelerator Conference Proceedings, Williamsburg, Oct. 2-7, 1988.
- ◎[Lo76] J.S.Fraser and S.O.Schriber(edited); COMPENDIUM OF LINEAR ACCELERATOR - 1976 AECL-5615 ATOMIC ENERGY OF CANADA (Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, September 1976).
- ◎[Pr84] WILLIAM H. BATES LINEAR ACCELERATOR CENTER PULSE STRETCHER RING  
Proposal for a CW Upgrade (1984) MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY,  
Laboratory For Nuclear Science.
- ◎[Sa83] C.P.Sargent; "ACCELERATOR DEVELOPMENT AT BATES", IEEE Trans. on Nuclear Science NS-30, 3262 (1983).
- ◎[Sa85] C.P.Sargent, and J.B.Flanz; "RF SYSTEM FOR A 1 GEV PULSE STRETCHER RING", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-32, 2614 (1985).

◎: available    ○: not available    at LNS-TOHOKU

## 9. CEBAFにおける研究

三菱電機 鈴木敏允

調査日時 Oct. 2, 1988

面談者 H. A. Grunder, C. Rode, B. Hartline, V. Nguyen

### 9.1 概要

CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility)では、超電導加速空洞を用いたCW (Continuous Wave)形の電子ライナックが計画され、一部試作実験が始まっており、建家の建設も着手された所である。

加速エネルギーは4 GeV (40億電子ボルト) で、電流は200  $\mu$ A、ビームパワーとして800KWを設定している。

予算はDOEより出ており、総予算265百万\$で1987年度より予算化され建設にとりかかっている。1992年度に機器を完成し最終的に本プロジェクトが完了するのは1993年となっている。

人員は現在248名 (+4 Comitments)で場所は、Washington D. C.の南東約200kmのVirgineaのNewport Newsにあり、敷地は旧NASAの研究所の跡である。

既に実験用の入射器の100KVセクション、超電導加速空洞、空洞用のクライオスタット、空洞用RF電源、実験用制御装置の一部が出来上り、各ユニットの単品試験を行っている段階である。ユーティリティ関係はヘリウム貯蔵タンク、ヘリウム液化装置の一部が完成し、実験用に稼働している。

超電導加速管の開発はコーネル大学と連携し、加速管の設計試験以外にも製造方法の開発もやっている。超電導材料はNbでNb板をドイツより購入、表面処理溶接組立等の製造技術開発と加速管の特性試験をCEBAF自身でやっており、工作技術の確立をはかっている。特に表面粗さ、汚れが加速電界の限界を決める重要なfactorとなるための慎重に開発が進められている。

最終的に工作技術が確立すればメーカーに製作させる予定である。

(1) スケジュール

C E B A Fの加速器の建設の概略スケジュールは、次の様なスケジュールである。

Feb	1987	Start construction
May	1988	End station conceptual design
Aug	1988	Start tunnel construction
2QFY	1989	Place cavity contract, Experimental equipments conceptual design
3QFY	1989	Complete cryomodule R/D
3QFY	1990	Start front end test to 25MeV
1QFY	1991	Start C H L operation (Central Helium Liquefier)
3QFY	1992	Start north linac beam commissioning
4QFY	1993	Construction project complete
2QFY	1994	First beam to experiment

(2) 予算

予算の項目別、年度別の内訳は

① 項目別には

Accelerator	\$ 124 M
Research Equipment	\$ 40 M
Conventional	\$ 67 M
Contingency	\$ 34 M
Total	\$ 265 M

② 年度別には

\$M

年度	87	88	89	90	91	92	93	94
Construction	16	34	44	67	65	35	5	0
Operation	8	10	12	18	25	32	40	40
Total	24	44	56	85	90	67	45	40

## 9.2 加速器の概要

C E B A F の電子加速器は、次の様な特長をもっている。

- (1) 超電導加速空洞を用いた高エネルギーCW
- (2) リサーキュレーション5回を行いエネルギー4 GeV を得る。

いずれも技術的に非常に難しいものである。

加速器の主体である主加速部は、5セルで一つの加速空洞を形成する0.5 mの超電導の加速空洞（加速管）を総数320本用い、160本を1セグメントとして、レーストラック状の軌道の2つの直線部に1セグメントずつ配置している。

偏向部は、レーストラック状の軌道の円弧部に偏向電磁石群を垂直方向に5系統（入射器側は4系統）配置している。円弧の平均半径は80mである。

入射器はDarmstadt方式にgraded  $\beta$ セクションを加えた方式で45MeVまで加速して、主加速部に入射する。

加速は、主加速部で5回のリサーキュレーションを行い、1セグメントで0.4GeV、一周で0.8GeV加速し、5回のリサーキュレーションで最終的に4GeVのエネルギーを得る。

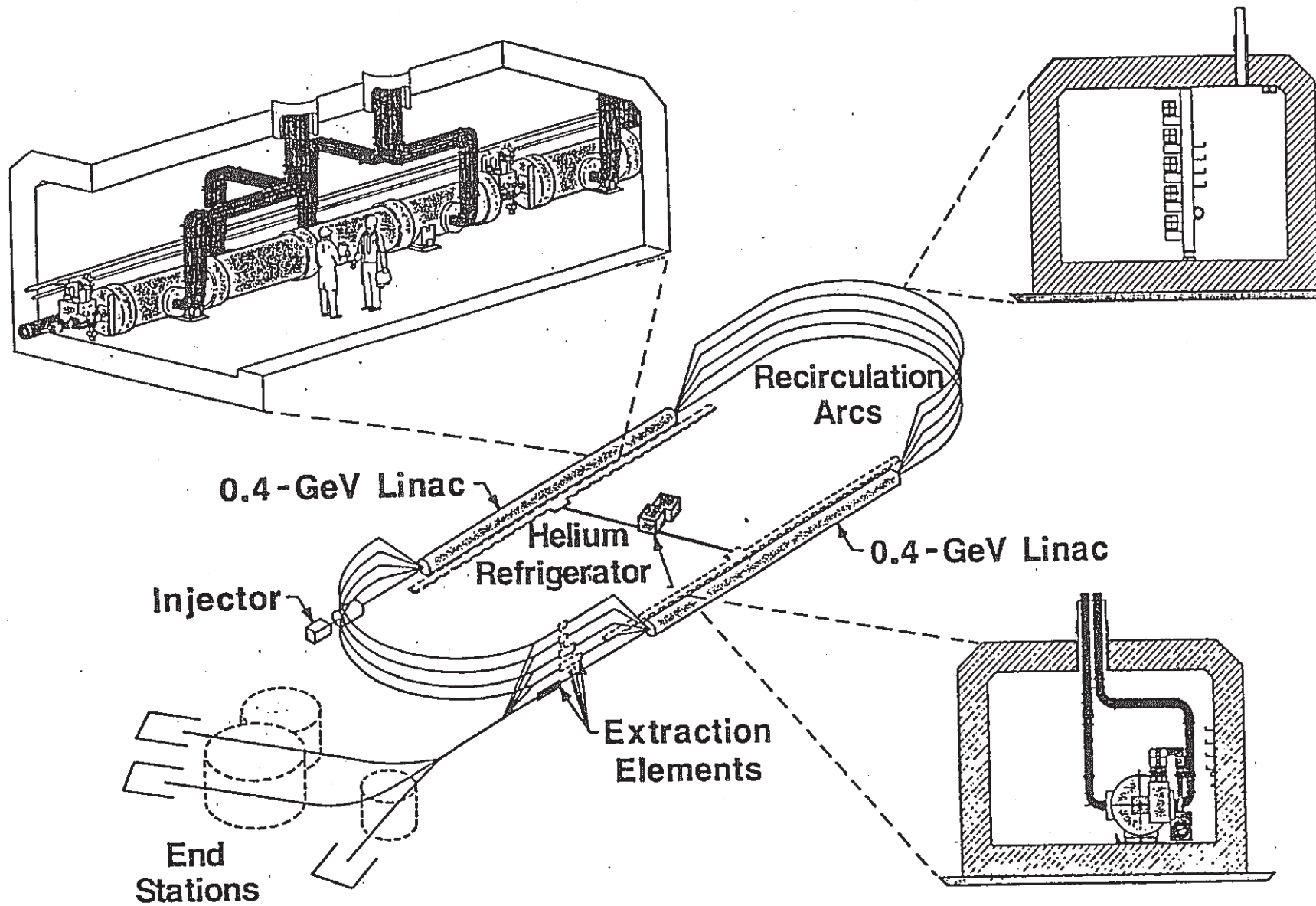
加速器全体の概略構成を図9-1に示した。又加速器の主要パラメータを表9-1に示した。

加速エネルギーの可変範囲は0.5～4 GeV であるが、dutyを50%にすれば6 GeV の加速も出来るようにしている。

又将来 up grade する場合も考慮して、16GeV まで加速出る flexibility ももたせてある。

# MACHINE CONFIGURATION

CEBAF



9-1 MACHINE CONFIGURATION

表9-1 CEBAF加速主要パラメーター

1. ヒーム性能	
ビームエネルギー	4 GeV
ビーム電流	200 $\mu$ A
デュティファクター	100 % (CW)
エネルギーの広がり	$< 2 \times 10^{-4}$
エミッタンス	$< 1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{rad}$
2. ライナックパラメーター	
電子銃電圧	100 KV
入射エネルギー	45 MeV
キャビティ数	入射器18本, 加速部320本 計338本
クライオスタット数	入射器 9個, 加速部160個 計169個
加速電界強度	5 MV/m
3. 加速管パラメーター	
方 式	超電導CW $\pi$ モード定在波
周 波 数	1497 MHz
シャントインピーダンス ( $ZT^2/Q$ )	960 $\Omega/\text{m}$
$Q_0$	$2.4 \times 10^9$
HOM $Q_{\text{ex}}$	$10^3 \sim 10^5$
4. RF	
クライストロン数	338 本
クライストロンパワー	5 KW/1本
位相変動	$< 1^\circ$

### 9.3 主要構成と性能

#### 9.3.1 入射器

入射器は、電子銃、チョッパー、バンチャ、キャプチャーセクション、前段加速器及びインジェクター加速器から成っている。

電子ビームは、電子銃で100KeV ( $\beta=0.55$ ) に予備加速され、チョッパーで位相幅 $60^\circ$  が選択される。 $60^\circ$  の位相幅をもった電子ビームは、バンチャで位相圧縮され $10^\circ$  の位相幅になる。 $10^\circ$  の位相幅に圧縮された電子ビームはキャプチャーセクションで、さらに位相圧縮及び加速され、位相幅 $1.7^\circ$  , エネルギー 0.95MeV ( $\beta=0.94$ ) の電子ビームとなる。

この電子ビームはさらに前段加速器で位相圧縮及び加速され、位相幅 $1.2^\circ$  エネルギー5.8MeV ( $\beta=0.997$ ) の電子ビームを得る。

この電子ビームはインジェクター加速器で 45MeVまで加速され主加速部に打ち込まれる。

入射器の構成を図9-2に示した。

この様な構成にした理由は、Darmstadt の超電導ライナックが電子銃で電子ビームを100KeVに予備加速した後、すぐ $\beta=1$  の超電導のキャプチャーセクションに入れうまくいかなかったと言う経験から改良したもので、キャプチャーセクションを graded  $\beta$  のキャプチャーセクションとし改善をはかったものである。

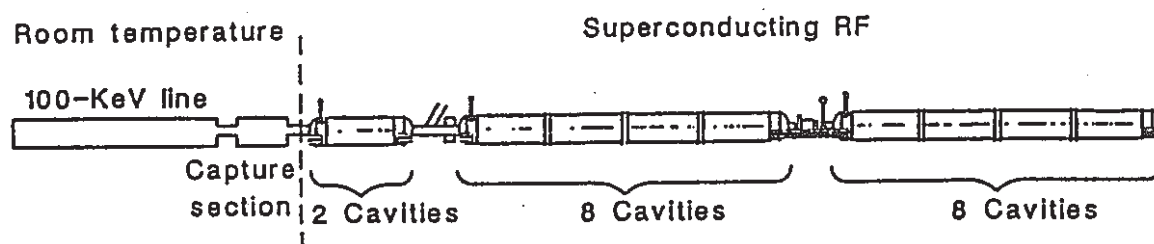


図9-2 The CEBAF injector.

電子銃はピアス形電子銃で、カソードは1 mm径のデスペンサ形で2 mAの電流がとり出せる。エミッタンスは約 $1 \text{ mm} \cdot \text{m rad}$  とかなり良い特性が得られている。電子銃の詳細を図9-3に示した。

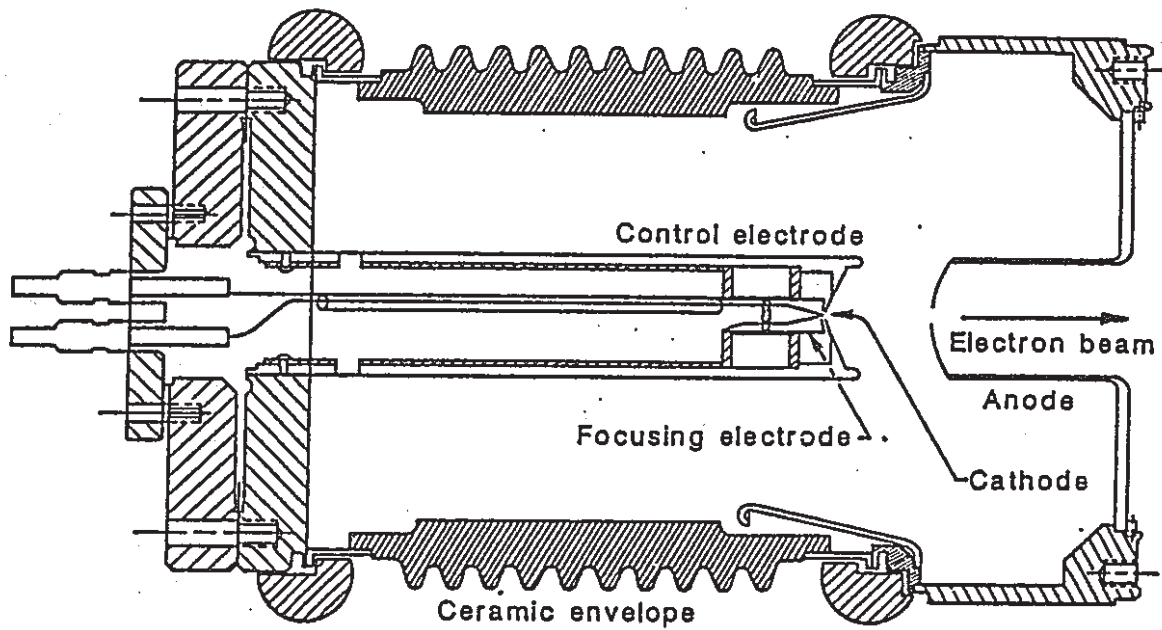


図9-3 Details of the 100-keV electron gun for the CEBAF injector.



チョッパーはRFチョッパーで、矩形の空洞で横方向から  $f_0/2$  の周波数のRF、縦方向から  $f_0/3$  の周波数のRFを加えて100KeVの電子ビームをチョップしている。チョッパーは偏向用空洞、スリット及び補償用空洞からなっている。

チョッパーの構成、構造及び動作原理を図9-4、図9-5、図9-6に示した。

バンチャは $TM_{010}$ モードを用いた Re-entrant 形の常電導バンチャであり、周波数は主加速部と同じ 1500MHzでドライブされる。

キャプチャーセクションはNBSで開発された5セル空洞で $\beta$ が変る常電導の加速空洞である。最終的に $\beta = 0.94$  (エネルギー0.95MeV)となっている。

前段加速器は、2つの5セル空洞を有するCEBAF - Cornellタイプの加速管である。

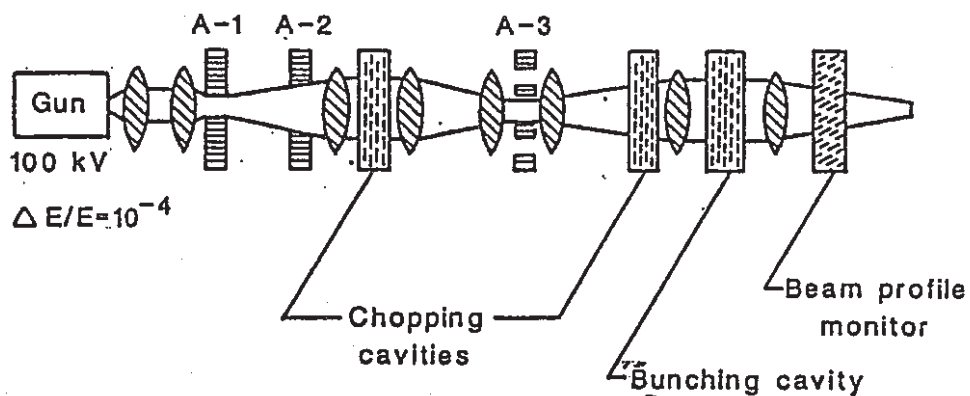


図9-4 Schematic view of the 100-keV section of the CEBAF injector. This section produces a chopped and bunched beam for further acceleration in the rest of the injector.

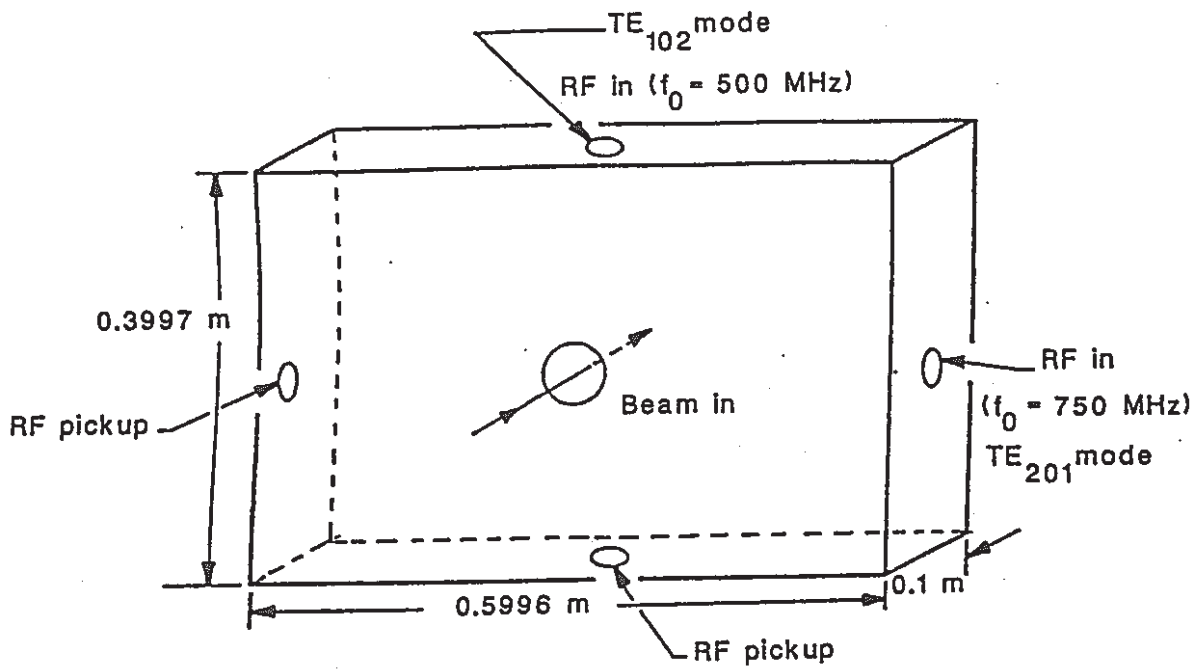


图 9-5 矩形次谐波斩波腔的细节。

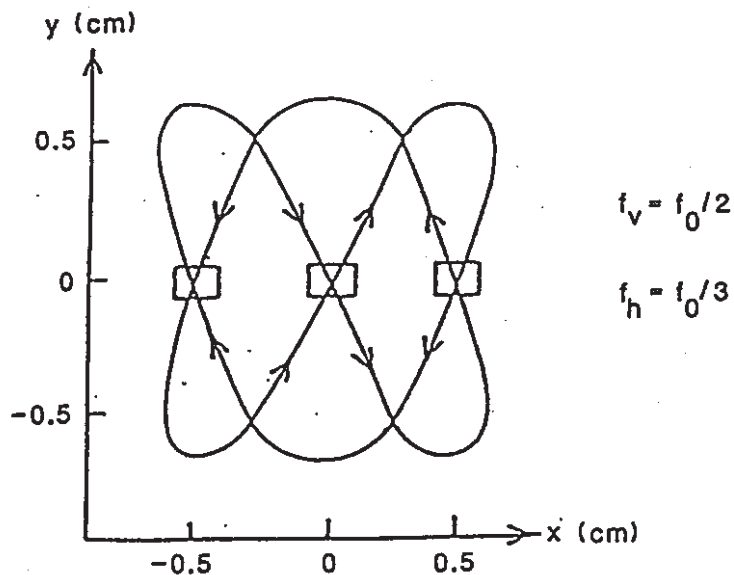


图 9-6 斩波腔在 A-3 处产生的束流图案。

### 3.2 加速部

加速部は主体が超電導の加速空洞と超電導加速空洞を冷却するためのクライオスタットから成っている。

加速空洞の基本単位は、Nbを使った5セルから成る加速空洞で空洞全体の同調を取るため空洞の両端に端板を設け、この端板間にネジ棒を通じ、ネジを調節することにより空洞寸法を変えて同調の粗調整を行っている。微調整はネジ棒と反対側に圧電素子を使った調整機構を設けて行うようにしている。この微調は500Hz程度まで行える。

5セルから成る単位加速空洞の同調機構を図9-7に示す。周波数は1500MHzを採用している。

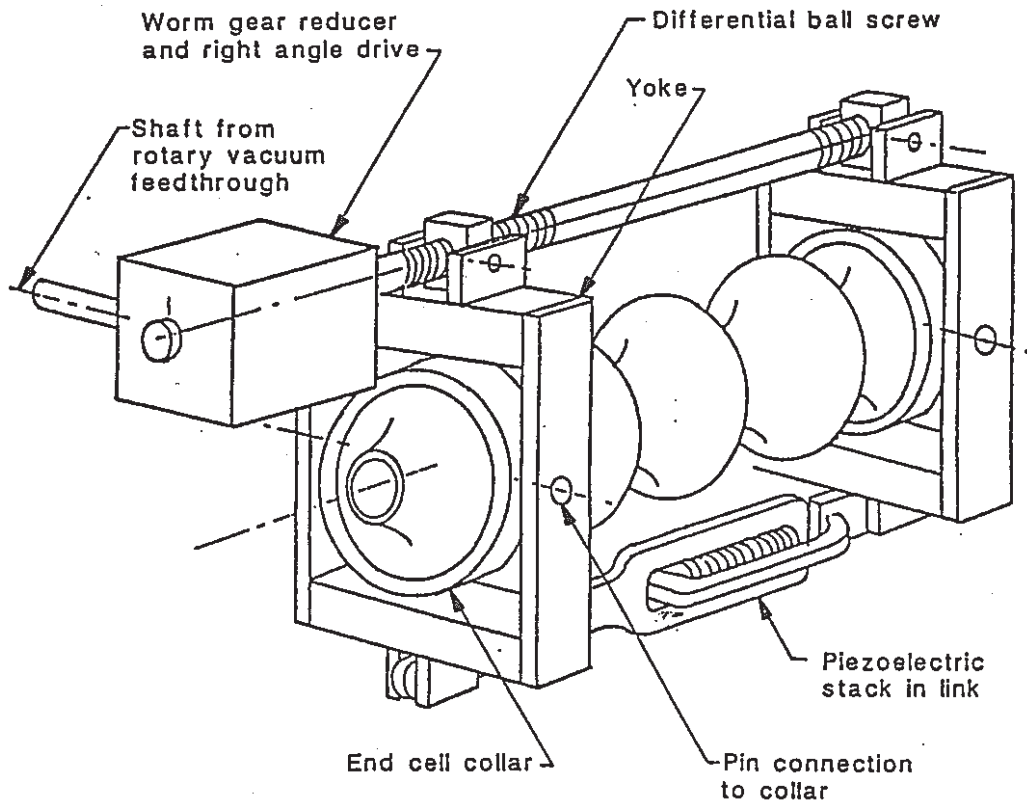
単位加速空洞には、ビームの発散を抑制するため higher order mode を抑制するためのHOM吸収体がRF入力と反対端のセルに、2個互いに直角方向にとりつけられている。

HOM吸収体の採用、入射器のビーム性能向上等によって加速系のBBUのthreshold電流を10mA以上にとれるようにしている。

単位加速空洞は2個1組となって1つのクライオスタットに入れられ、このクライオスタットを4本組合せて一つのクライオモジュールにしている。クライオスタットの詳細構造を図9-8、クライオモジュールを図9-9に示した。

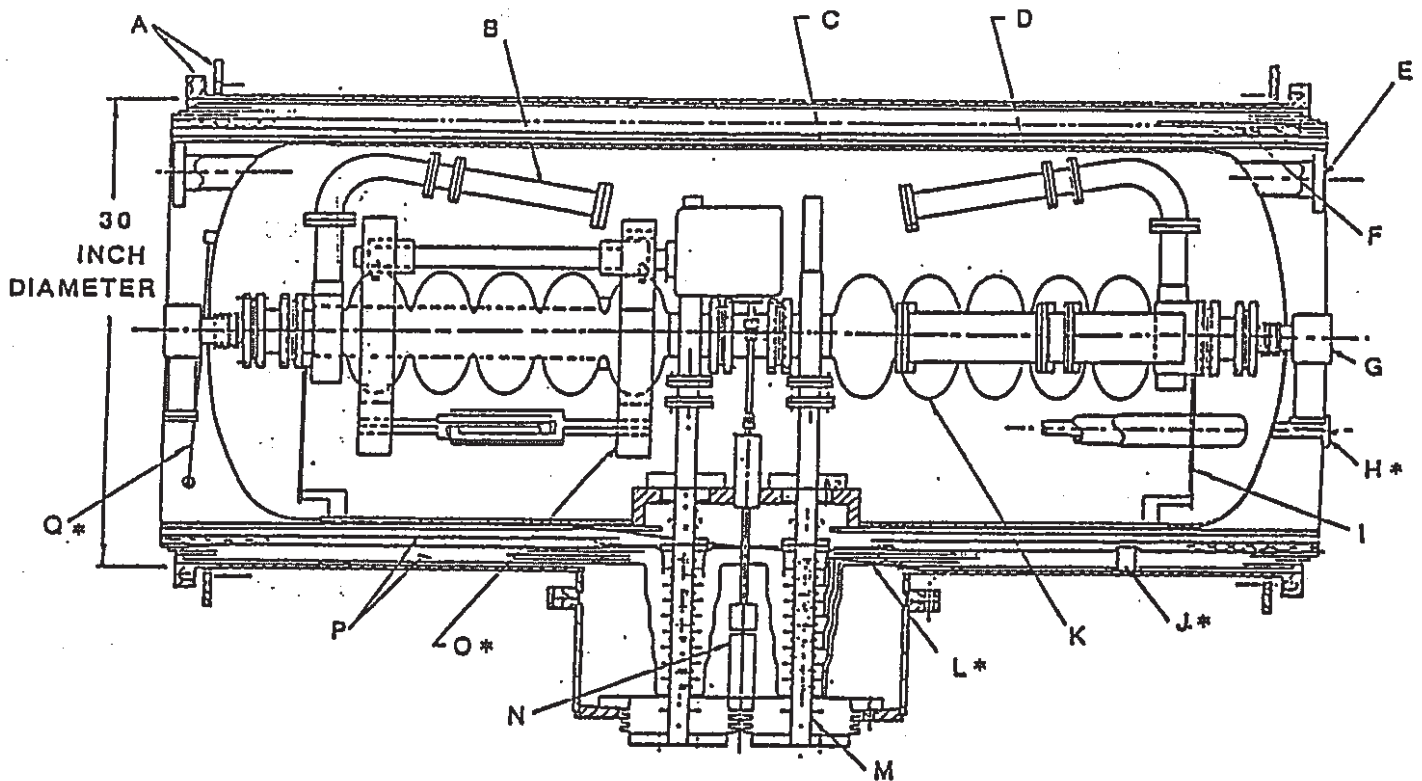
CEBAFの超電導の加速空洞と他の施設の超電導の加速空洞とを比較すると表9-2の様になりかなりよい特性をもっていることがわかる。

☒ 9-7 Frequency tuner for the CEBAF-Cornell cavity.



Note: Couplers not shown

☒ 9-8 CBBAF cryo-unit.



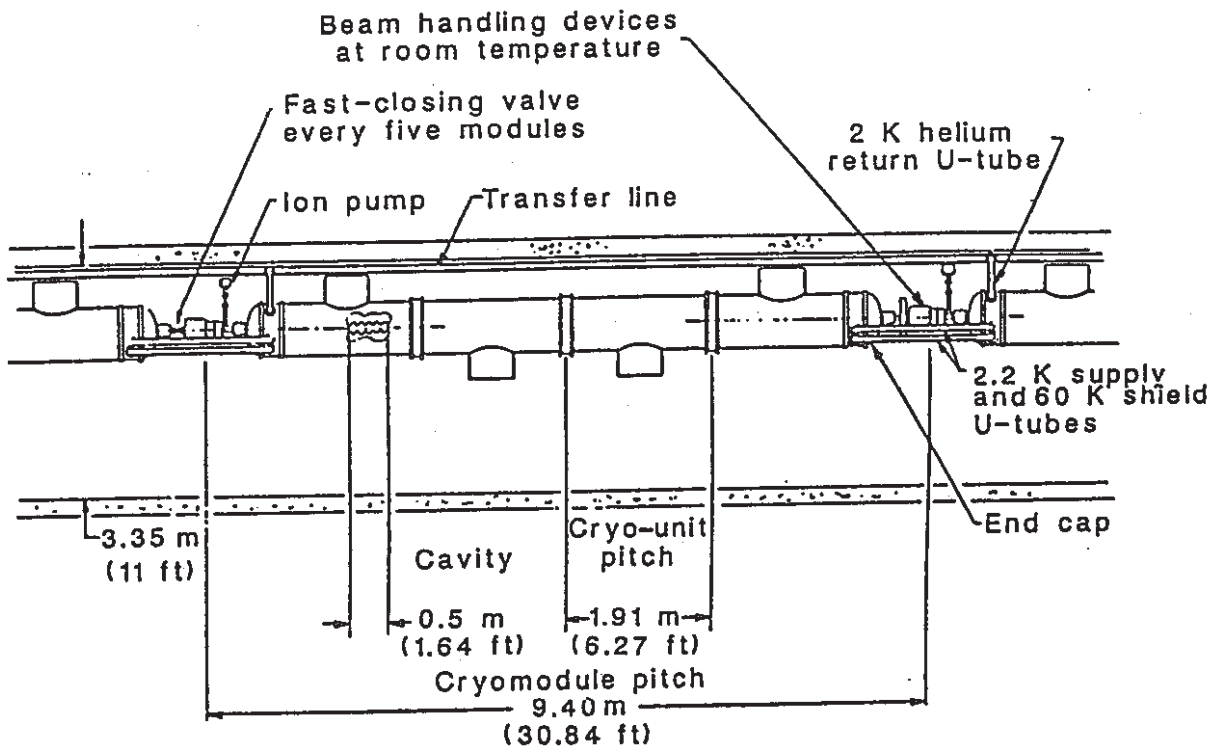


图 9-9 Schematic plan view of a cryomodule installed in the linac. (RF equipment not shown.)

表 9-2 Performance of Superconducting RF Cavities

Laboratory	CERN			KEK	DBSY	Cornell	Wuppertal-Darmstadt	
Accelerator	LBP			TRISTAN	PETRA/HERA	CBSR	130-MeV Recyclotron	
Material	Nb	Nb	Nb on Cu	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb <sub>3</sub> Sn
Frequency in MHz	350	500	500	500	1000	1500	3000	3000
Operating temperature	4.2 K	4.2 K	4.2 K	4.2 K	4.2 K	1.8 K	1.8 K	4.2 K
Single-cell cavities								
Ea (MV/m)**	10.8	13.0 *	10.8	7.6 *	5.5	22.8 *	23.1 *	7.2
QatBa1985	$1.8 \times 10^9$	$0.7 \times 10^9$	$0.4 \times 10^9$	$0.6 \times 10^9$	$5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	$1.2 \times 10^8$	$1.1 \times 10^8$
Ea (MV/m)*	4.7	7.6	—	6.5	5.5	8.5	10.0	—
QatBa1983	$5 \times 10^8$	$3.6 \times 10^8$	—	$4.1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$7 \times 10^8$	$4 \times 10^8$	—
Multicell results								
Ea (MV/m)	4 cells 7.5*	5 cells 5.0	—	3 cells 5.8	9 cells 5.5	5 cells 15.3 *	5/20 cells 12.3/7.4	5 cells 4
QatBa1985	$2.2 \times 10^9$	$0.7 \times 10^9$	—	$0.6 \times 10^9$	$0.5 \times 10^9$	$2.2 \times 10^8$	$3.5/1.2 \times 10^8$	$4.5 \times 10^8$
Ea (MV/m)*	—	2.8	—	—	2.5	5.4	3.7	—
QatBa1983	—	$1 \times 10^9$	—	—	$5 \times 10^8$	$4.5 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	—

\* Cavities fabricated from high-thermal-conductivity niobium

\*\* Under continuous wave operation

Source: H. Piel, Wuppertal.

#### 9.4 まとめ

CEBAFの超電導加速空洞を使ったCW加速器は5回のリサーキュレーションを行った加速器で非常に効率の良い加速器である。RF入力電力に対し電子ビームとしてとり出されるエネルギー効率 $\eta$ は

$$\eta = \frac{200 \mu\text{A} \times 4 \text{ GeV}}{5 \text{ KW} \times 338 \text{ (本)}} = 0.473$$

47%と、従来の高エネルギー加速器に比べて非常に高い。

5 KWのクライストロンの電力効率を60%とするとクライストロンの入力電力から見た効率 $\eta_k$ は

$$\eta_k = 0.473 \times 0.6 = 0.284$$

となる。しかし全体としては、リサーキュレーション用の電磁石が相当のエネルギーを消費するので、全体の効率はかなり低下するものと推定される。

又、5回のリサーキュレーションは技術的に非常に難しくなり、安定にビームを供給する装置としては未だ未知な要素が多くあることが予測される。

## 10. '88 Linac Conference の紹介

三菱電機 鈴木敏允

10.1 場 所 931 Kingsmill Rd. Williamsburg Virginia  
The Kingsmill Resort and Conference Center

10.2 日 時 Oct. 3～7 '88

10.3 参加者 国及び人数 ( ) 登録された人数  
BRAZIL (1), CANADA (14), CHINA (23), FRANCE (33),  
GERMANY (22), HOLLAND (7), ITALY (14), JAPAN (54),  
SOVIET UNION (34), SWEDEN (3), SWITZERLAND (7),  
THE NETHERLAND (6), UNITED KINGDOM (1),  
UNITED STATE (382),  
CONFERENCEへの出席者は約 300名

### 10.4 発表要約

#### (1) 発表分野と件数

発表は, Invited talk 50件 Oral presentaion 36件 Poster Presentation 194 件 (Oral presentation 又は Invited talk と重複しているものもある。) あり正味 244件発表があった。

分野では, (1)高エネルギー加速器の状況 (現状と up grade 計画), (2)大電流加速器及びF E L用加速器, (3)超電導ライナック, (4)加速管の計算及び設計, (5)Beam Dynamics BBUの計算シミュレーション, (6)マイクロトロンおよびストレッチャー, (7)電子銃, (8)R F源 (大出力クライストロンおよびジャイロトロン), (9)インダクションライナック, (10)イオンライナック, (11) R F Q, (12)イオン源, (13)ビームトランスポート の分野が主なものであった。

これらの発表分野で発表件数の多いものはR F Qに関する発表が21件以下 F E L用大電流パルスライナック16件, 高エネルギー加速器, 超電導ライナ

ック、キャビティのシミュレーションを含めた beam dynamicsの計算などであった。

関係のある電子ライナックの動向は(1)高エネルギー化、高ルミノシティ化への研究、(2)大電流低エミッタンス化への研究に主力が注がれていた。

(1)に属するものとしてSLACの Linear Collider (SLC) のエネルギー 50GeV, ルミノシティ  $7 \times 10^{28}$ , さらに TeV級の Linear Colliderのエネルギー 0.5TeV, ルミノシティ  $1 \times 10^{33}$ , KEKでも同様 0.5TeV の Linear Collider, CERNでは1TeV の Collider の研究開発をしている。

これらの Collider 用高エネルギーライナックを実現するためには key deviceとなる high power RF源, 高電界 ( $\sim 100\text{MV/m}$ )加速の出来る加速管等の研究開発が必要であり, 上記の大形計画にリンクしてこれらの key deviceの研究開発が多くあった。関連した研究開発の主要テーマを表10-1に示した。

(2)に属するものとしては, FEL用の大電流パルスライナックがあり, 又平均電流を多くとる試みは Chalk Riverの 1300MHzのCWライナックとLLNLの高くり返しのインダクションライナック等であり, 発表件数は少なかった。

key deviceの開発を含めて関連する研究のリスト表10-1にまとめた。

## (2) 高エネルギー加速器関係

### 1) SLAC SLAC Linear Collider (SLC)

スラックでは現在 2 miles accelerator を使って電子, 陽電子衝突実験が進められている。

SLCの概要は図10-1に示した。

現在得られている電子, 陽電子の特性は,

$e^- / e^+$ エネルギー	50GeV/50GeV
電子の数 $N^-$	$>1.5 \times 10^{10}$



陽電子の数	$N^+$	$> 1.1 \times 10^{10}$
エミッタンス		$\sigma_x < 5 \mu\text{m}$
		$\sigma_y < 3 \mu\text{m}$

さらに性能upし、1989年春までには次の様なビーム性能に上げて行く予定である。

$N^-$	$>$	$3 \times 10^{10}$
$N^+$	$>$	$2.2 \times 10^{10}$
$\sigma_x$	$<$	$3 \mu\text{m}$
$\sigma_y$	$<$	$3 \mu\text{m}$
$L$	$>$	$7 \times 10^{28}$

さらにSLACではTeV級のTLCの計画が取り上げられ特別プロジェクトが組まれて研究開発が進められている。このLinacはマイクロ波周波数11~17GHz 単基出力100~500MWのクライストロンを用い、加速管の加速電界を100~200MW/mまで上げて0.5TeVの電子及び陽電子を作り衝突実験に供給しようとするものである。

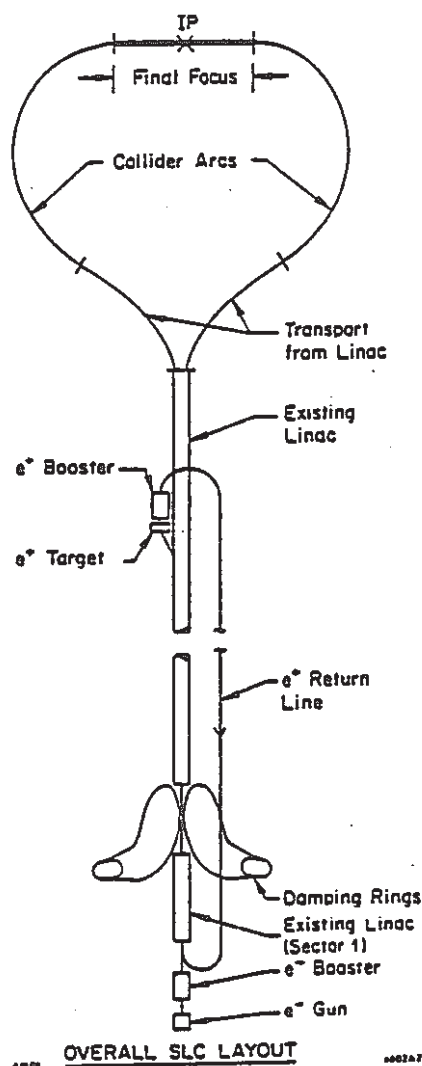


図10-1 Schematic layout of the SLC.

目標としているパラメータは

$e^- / e^+$ エネルギー	0.5 TeV / 0.5 TeV
加速電界強度	93 MV/m
マイクロ波周波数	17.1 GHz
クライストロンパワー / 1本	100MW
ルミノシティ	$1 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$
加速器長	7.7 Km

現在特別プロジェクトの中で Collider Systemのパラメータ, ダンピングリング, 主ライナック, ライナックビームダイナミックス, 最終の到達点, 電子-陽電子衝突などのテーマについて研究開発を行っている。

主ライナックを構成する key device としてXバンドのクライストロン, Xバンド加速管などの研究開発も併行して進められている。

## 2) CERN

マイクロ波周波数10~30GHz, 全マイクロ波電力2.5~5 TW, 加速電界~100MV/m で加速出来る linacで電子を1 TeV, 陽電子を1 TeV に加速し, 衝突させるリニアコライダーの計画が紹介された。

このリニアコライダーの主要な仕様は

e <sup>-</sup> / e <sup>+</sup> エネルギー	1 / 1 TeV
加 速 電 界	80 MV/m
マイクロ波周波数	29 GHz
加 速 管	進行波形
加 速 器 長 さ	25 km
ルミノシティ	$1 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sce}$
くり返し周波数	1.69 KHz

CERNでは, この計画の実現の可能性についてR/Dとして, 現在Xバンドの新型加速管, 従来のSバンド加速管による高電界およびマルチバンチングの実験を進めている。

提案されている新しい加速管は図10-2の様な構造でエミッタンスを悪化させる Higher order modeを抑制するためのスロットを各空胴に設けた進行波形加速管である。現在この形の加速管を電鑄で作ることを考えておりマンドリルを製作している所である。

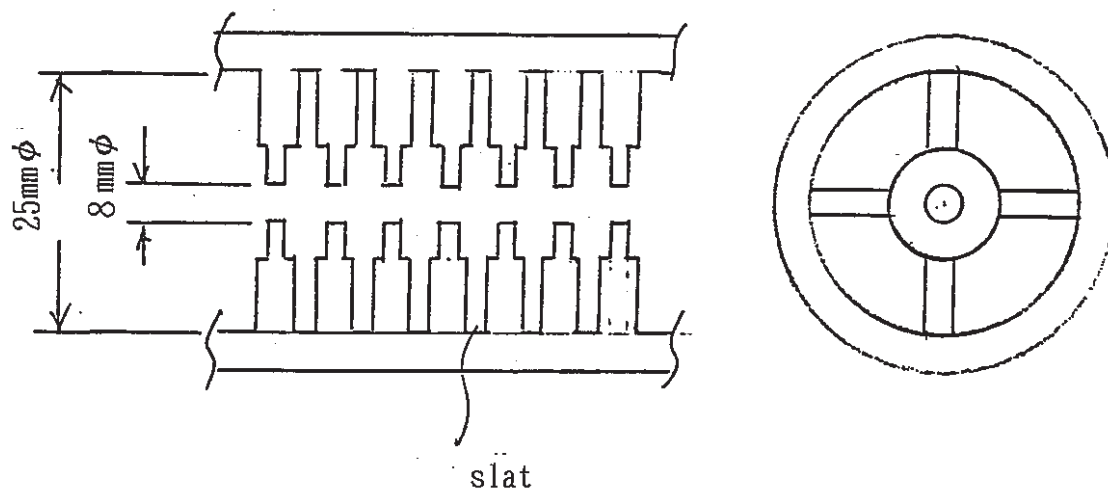


図10-2 Xバンドライナック加速管

### 3) KEK

KEKより、マイクロ波周波数11.4GHz、マイクロ波電力 100MWのクライストロンを用い、加速電界 100MV/mのライナックで電子および陽子のエネルギーと夫々0.5TeVに加速し、衝突させるリニアコライダーの計画が紹介された。

このリニアコライダーの主要な仕様は

e <sup>-</sup> / e <sup>+</sup> エネルギー	0.5 / 0.5 TeV
加速電界	100 MV/m
マイクロ波周波数	11.4 GHz
加速管	進行波形
加速器長さ	5 km / 5 km
ルミノシティ	$> 1 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$

KEKの計画は、本番の計画のR/Dとして、1.5 GeV のTEST ACCELERATOR FACILITY (TAF) を建設し、高エネルギー

ギー、高ルミノシティの実験及び high power のクライストロン、高電界形の加速管等の keydevice 研究開発をスタートさせている。

このTAFはSバンドライナック及びXバンドライナックとの組合せで、陽電子発生及び電子、陽電子の予備加速は、電流のとれるSバンドで加速し、高エネルギー加速は加速効率の良いXバンドライナックで加速する計画であり、Sバンドのマイクロ波源はSLACの高出力クライストロン5045を購入し、加速管電源の製作にとりかかっている。KEKのTAFの概略構成を図10-3に示した。

## KEK TEST ACCELERATOR FACILITY FOR LINEAR COLLIDER R & D

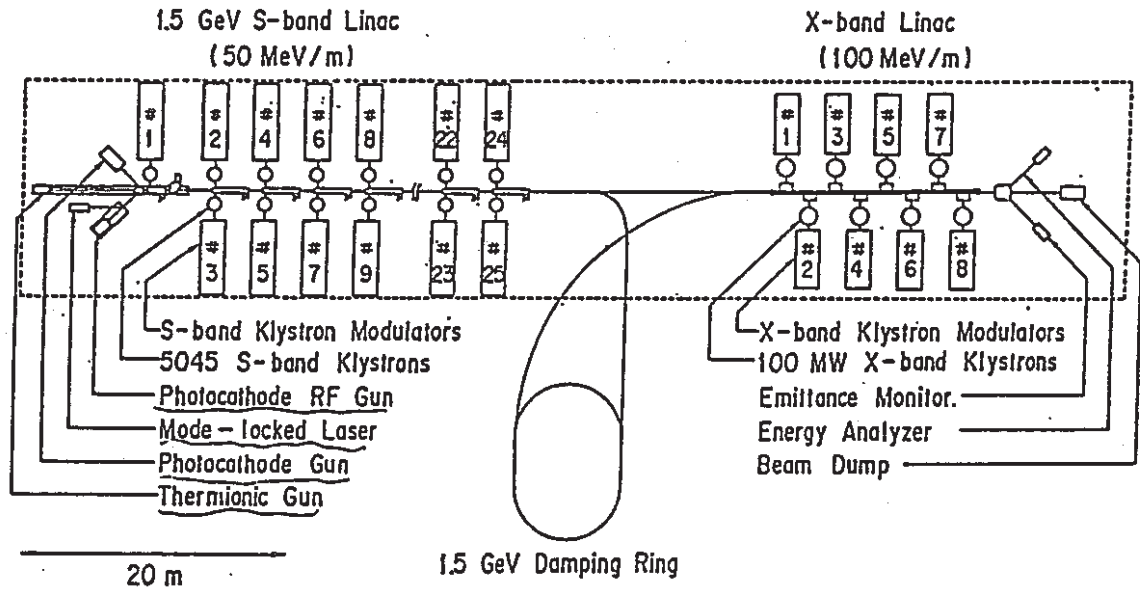


図10-3 TAF (Test Accelerator Facility) の構成図<sup>1, 3)</sup>

### (2) 大電流加速器

大電流加速器は目的がほとんど自由電子レーザー発振のための加速器で、RFパルスライナックが主体であるが、一部インダクションライナック (LLNL), CWライナック, (Chalk River) などの発表があった。代表的なライナックを紹介すると

#### 1) Boeing Aerospace

マイクロ波周波数1.3 GHz, 尖頭出力12MWのThomson CFSのクライストロンを5本と定勾配形  $3\pi/4$  モードの進行波形加速管, 5本を用い, 120MeVのエネルギーに加速し bunched beam 320Aと得て,  $0.63\mu\text{m}$ のレーザー発振の実験に供している。Wiggler は5mの variable taper のサマリウムコバルトの永久磁石とバナジウムパーマンジュラのポールピースの組合せで作られている。

電子銃はSLACタイプの電子銃で90KVで運転しており, bunched beamを増すため108MHzと433MHzの Subharmonic buncherおよびtapered  $\beta$ の加速管を入れて 15MeVまで加速してからレギュラー加速管に入射している。

現在 bunched beam 10 nsec で320Aのビーム電流が得られており, 電荷量としては 5.5nCが観測されている。

## 2) LLNA Induction LINAC ETA-II

high current, high repetition rateの Induction Linacが設計され, 運転された結果について報告された。

この Induction Linacの仕様は

	Micro pulse	Macro pulse
ビームエネルギー	7.5 MeV	7 MeV
ビーム電流	1.5 KA	2.5 KA
パルス幅	50 nsec	50 nsec
くり返し	$5 \times 10^3$	5
$I / \text{cm}^2 / (\text{rad})^2$	$2 \times 10^9$	

この Induction Linacは磁気スイッチによるパルスコンプレッションを行うパルサ, M Typeのディスペンサーカソードを用いた1.5MeVの入射器及び60個のインダクションセルから成っている。各セルでビームを100KeVに加速する。得られた結果は

	Macro	Micro
ビームエネルギー	6 MeV	5.8 MeV
ビーム電流	0.8 A	1.5 A
くり返し	1	1
ビームパルス幅	50 nsec	50 nsec
$I / \text{cm}^2 / (\text{rad})^2$	$0.6 \times 10^9$	$7 \times 10^9$

電流透過率は94%と非常によかった。

### 3) Chalk River IMPELA 10/50

L-バンド (1300MHz) でON-AXIS COUPLED 形加速管を用いた 10MeV 5mA のライナック IMPELA の研究開発を行っている。現在RF系の一部を除いて建設を終り1989年春の完成をめざして試験調整を始めた所である。

設計パラメータは次の通りである。

ビームエネルギー		10 MeV
ビームパワー		50 KW
ピーク電流		100 mA
パルスくり返し		250 pps
加速管長		3.25 m
マイクロ波周波数		1300 MHz
シャントインピーダンス		67 M $\Omega$ /m
クライストロンパワー	ピーク	2 MW
	平均	150 KW

IMPELA 10/50はプロトタイプとして5% duty で運転され、この実験機でライナックの特性を研究する予定である。

加速管は 150KW/mのRFパワーで運転できる能力をもつよう設計されビームパワーも 250KWまで出せる能力をもっている。

この加速管はRFのコールドテストの結果ではシャントインピーダンス 55M $\Omega$ /mが得られている。



表10-1 '88 LINEAR ACCELERATOR CONFERENCE 主なテーマの要約

High Energy Linac Facility		High current or FEL 用 Linac		Linac General	Accelerating Structure or Cavity
SLAC	SLC Status Report J.C. Sheppard Luminosity, Reliability改善策を検討している。	LINA	Design & Initial Operation of ETA-II Induction Linac J.C. Clark High current High duty I. L FEL 用 7.5MeV 100Hz (5KHzバースト) 70ns.	DARMSTADT The Darmstadt SC Linac H. D. Graf 他 SC injector linac 運転を始めた最初の beamが, 87とり出された。	Boeing Aero. Measurement of Field Asymmetry in accelerating cavity with WG coupler A. M. Vetter 他
CEBAF	CEBAF Status Report H. A. Grunder 超電導加速管を用いた4GeV 200μA のリサ キュレーション加速器建設スタート	LINA	Laser Guided on the Advanced Test ACC G. J. Caporaso	7つのSCのACC structureのうち4ヶが新 しい rf circuit によるtestが行われた。	DESY RF Super conductivity a status Review Dieter Proch
CERN	LBP Injector D. Warner '86 e <sup>-</sup> 500MeV加速, '87 e <sup>+</sup> 加速, '88 7月よりLEP にbeam 供給, 1/8周期まで導 いた。	LINA	Laser で生じたion をGuidにしBBU を抑制 出来ることがわかった。50MeV 10KAの加速 は出来る。emittance growth	fine tuning はpiezo electricに代わって magneto strictive translatorが用いられ た。	SCを用いた大形 linac計画あり, acc gradient 5~7 MeV/m はprovenされている loading 時のfield emission bonding sputtering techniques に開発の主体であ る。
CEBAF	S. C RF & Direct Acceleration in TeV Collider	LLNL	FEL FROM THE ADVANCED TEST ACC T. J. Orzechowski		SACLAY SUPER CONDUCTING RF ACTIVITY AT SACLAY B. Aune
KEK	SLC 程度のparameter で2TeV は可能 KEK PLANS FOR A LINEAR COLLIDER R/D, G. Horikoshi et al. TeV のLinear collider の可能性について 検討。Test Accelerator Facilityを計画 しており, 1.5GeV S-band linacと 100MV/m のX-band linacのtestを行う予定。		PALADIN は45MeV Induction Linac 10.6μ m 増幅する15m のWiggler で14KW入力で27 db, 5MWで飽和。		1500MHz SC ACC structure開発中 five cell cavity coupler なしは非常によい結 果であった。
		ORSAY	ADVANCED ACCELERATOR STUDY AT LAL- ORSAY J. Le Duff 1985末LAL/ORSAY で e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> colliderにつ いてのR/D programが発足した。 at pulse Lasertronのhigh gradient worm structure を含んだシステム。3GHzのtest high gradient施設を作り実験している。		LANL ON CAVITY WG COUPLING THROUGH LARGE APERTURE MAFIA codeによる3D計算
			Boeing RF LINAC FEL RESULTS Aerospace D. C. Sholfstall 1300MHz 120MeV Linac 0.63μのFEL の運 転を行った。Linac はConstant grad. TW, 120MW peak output power Klystron, Wiggler は5m Variable taper hybrid samarium cobalt 製		CEBAF CEBAF CAVITY FABRICATION A SUCCESSFUL TECHNOLOGY TRANSFER M. Hiller Babcock & Wilcox (B & W) Cornell U より 技術のトランスファを行った。 Nb 12 niobium spool
		NIKHEF	THE ELECTRON ACCELERATOR FOR FEL IX FELIX Free Electron Laser for Infrared experiment P. W. van Amersfoot 8 ~ 80 μm-1GHz 4MeV buncher + 15~45MeV 2本 S band linac 70A-3psec designed		

Microtron & Stretcher		Beam Dynamics Simulation BBU	KLYSTRON GYROTRON	GUN
MAINZ	Microtron Operational experience & Upgrade Progress H. Herminghaus 常電導CW3つの race track microtron 最初は14MeV 2 段は180MeV加速4 年間運転し new buildingに移している。 3 段目は855MeV加速で建設中である。	SLAC THE USE OF ELECTROMAGNETIC PARTICLE IN CELL CODE IN ACC APPLICATION Kenneth Eppley PIC コードはPLASMAのSimulationで開発されたが linacの GUN, buncher, rf source beam transport emittance growth の simulationに役立つ。	LANL HIGH POWER MICROWAVE SOURCE DEVELOPMENT AT LOS ALAMOS M.V.Fazio et al. large orbit gyrotron, virtual cathode oscillatorで~100MW ~GW 現在1M 20KA 1 μ sec 5Hzのmodulator を開発	LLNL HIGH BRIGHTNESS, HIGH CURRENT DENSITY CATHODE FOR INDUCTION LINAC FEL'S W.C. Turner Osmium coated dispenser cathode 5.10cm dia. 250KV 10Ω 35nsec Blumlein pulse line $1 \times 10^{10} \text{A/m}^2/\text{rad}^2\text{h} \rightarrow 140\text{A/cm}^2$
SASKATCHEWA	COMMISSIONING HIGHLIGHT OF THE PULSE STRETCHER RING BROS 1986. 12 STRETCHER が運転開始 1988. 6 160MeV 5μA 70% のduty factor, 次multi tern injectionを検討中	DZSY LATEST DEVELOPMENT CODE OF ELECTRO-MAGNETIC FIELD T.Weiland 最も進んだCODE MAFIA はquasi open boundary conditionの simulation にも役立つ(3D Particle in cellの計算等)	LANL AN RE-DRIVEN LASERTRON P.J.Tallerico et al. rf driveされたphotocathodeを用いて1.3 GHz 1MW のrf powerを得るための開発, 光は532nm, パルス幅10μsec electron beam は 0.5~1MeVシミュレーションは PARMELA コードとlasertron コードで行い効率60 %が得られた。	LBL CONCEPTUAL DESIGN OF A BRIGHT ELECTRON INJECTOR BASED ON LASER DRIVEN PHOTO CATHODE relativistic KLY RF photo cathode electron gun
NBS	RASE TRACK MICROTRON STATUS	LANL TRANSVERSE EFFECTS OF WG COUPLING SLOT R.K.Cooper MAFIA 3D COMPUTER CODEでCOUPLING SLOT による非対称横方向の計算を行い実測とよく一致していた。	LLNL PARTICLE SIMULATION OF RELATIVISTIC KLYSTRON R.D.Ryne et al. 50nsecのINDUCTION LINAC を用いた relativistic klystron のシミュレーションを行っている。	LLNL FORMULAS FOR RF & SPACE CHARGE INDUCED EMITTANCES IN LASER DRIVEN RF GUN laser 駆動されるRF GUNのspace chargeと時間変化するRF fieldとを考慮した検討を行いこの fomularを使うことによってGUN の最適化を行うことが出来た。
LANL	Energy 17 ~185MeV 500μA で design された injector. は 5MeV 15turnで1 turn  12MeV Linac, f は2380MHz standing wave mode linacが test された。		SLAC TRANSIENT ANALYSIS OF MULTICAVITY KLYSTRONS T.L.Lavine et al. linear collider に必要な100 ~200MV/m の加速電界は, high powerのRF source を必要とする。これは magnetic pulse compression を用いた modulatorと relativistic klystron 及び RF pulse compression の技術開発が必要。周波数11 ~17GHz 100 ~500MW のklystron開発に着手。	LANL DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE PHOTO CATHODE ELECTRON GUN high brightness photo cathode 用の1300MHz 2cell rf cavityを設計製作した, SUPER FISHにより $ZT^2=29.5$ 及び $45.8\text{M}\Omega$ が得られMax field は $32.1\text{MV/m}$ 1cellで1MV, 1A averageがとれた。
IHI	STATUS OF 150MeV INJECTOR RACE TRACK MICROTRON FOR COMPACT "SPRING"150MeV RACE TRACK MICROTRON (RTW) 建設中 650MeV SC, SPRING入射する GUN 20KeV →SINGLE GAPCAVITY 120KeV 6MeVでINJECT Reentrance cavity で加速する。	LBL SIMULATION OF EMITTANCE GROWTH IN THE ALS PRE INJECTOR Charles H. Kim 120KV 2A 125MHz buncher, 500MHz buncher, S band buncher Bw=0.75 4cavities 50MeV 3GHz linac パルスは2nsec, パンチングはbunch で10倍 SHB で10倍 エミッタンスは GUNで $6 \times 10^{-4}$ S band buncher midle 点で $6 \times 10^{-2}$ . linac end で $1 \times 10^{-8}$ . $\epsilon_n=50 \pi \text{ mm mrad}$	Univ. of Meryland, DESIGN CONSIDERATION OF HIGH PEAK POWER GYROTRONS FOR LINER COLLIDER W.Lowson 10GHz, 30MWのGyrotronの構成及び実験計画の紹介, さらに10~30GHz 100MW の Gyrtron scale upの検討をする。	BNL MECHANICAL DESIGN OF A RF e GUN M.H.Woodle 他 BNL では電子のlaser accelerationの研究用Test ACC Facility を建設中 non-linear compton scattering によるX線研究と6ps 50~100MeV electron half cell RF gun thermoinic or photo emissineを用いている。

	High current or FEL 用 Linac	測 定	
	<p>JAERI A LINAC FOR FREE ELECTRON LASER AT JA1 M. Ohkubo他 10~20<math>\mu</math>m, 25MeV, 300KV 127MHz SHB 508MHz Buncher 2つのSC Pre ACC 508MHz Main ACC GUN 12.7MHz 2nsec micro pulse Physics HIGH CURRENT RF ACC FOR FEL APPLICATION International Room temperature Company SW ACC加速勾配 20MV/m for 500MHz これは0.5~3GW のRF sourceが必要 bore apertureを大きくし低 Qeにとり micro pulseで 2KAをとれるよう にした150MeVで最良のemittance <math>\Delta r</math>, etc.</p> <p>Chalk1 BEAM DELIVERY SYSTEM FOR River INDUSTRIAL ACCELERATOR 2 HIGH POWER L-BAND KLYSTRON FOR LINEAR ACCELERATOR</p>	<p>BATES EMITTANCE MEASUREMENT AT THE BATES LINAC J. B. Flanz 25<math>\mu</math>のresolution BATES THE BEAM PROFILE MEASURING SYSTEM AT THE BATES LINAC 20<math>\mu</math> wire 13<math>\mu</math> linear location</p>	

## 11. あとがき

放医研 平尾泰男

各筆者の努力のおかげで、今後の検討に極めて有意義な資料が作成された。特に、目的は同一ではないが、かつて核燃料生産のための大強度陽子加速器を目指して、シミュレーションのための大強度電子加速器開発の実績を積み上げ、また関連する検討を深めてきたチョークリバーの研究者との討論、情報は有意義であった。また目的は異なるが、MIT, CEBAFの研究者との討論、LINAC-88における諸報告論文にも、最新の大強度粒子加速技術に関する情報が多々見出すことができた。

今後、このワーキング・グループにおける研究が、この調査から得られた様々の知見を参考に、幅広くかつ着実に積上げられてゆくことを期待したい。

今回の調査を、有意義にかつ支障なく進めることができましたのは、当事者の努力は勿論のことですが、広く関係者諸氏のご協力・ご支援の賜物であったことを感謝をこめて付記いたします。