

KEK Internal 86-13
September 1986
A

DESIGN STUDY OF A 250 MeV LINEAR ACCELERATOR

Noritaka KUMAGAI, Shinji MACHIDA and Yoshitaka KIMURA



NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS

National Laboratory for High Energy Physics, 1986

KEK Reports are available from

Technical Information Office

National Laboratory for High Energy Physics

Cho-machi, Tsukuba-gun

Ibaraki-ken, 305

JAPAN

Phone: 0298-54-1171

Telex: 3652-53 (Domestic)

(0) 3652-53 (International)

Cable: KEKOH

DESIGN STUDY OF A 250 MEV LINEAR ACCELERATOR

Noritaka KUMAGAI, Shinji MACHIDA AND Yoshitaka KIMURA

National laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, 305, Japan

Abstract

A 250 MeV linear accelerator has been designed as an injector for a new booster synchrotron, which has been proposed in an upgrade program of the KEK 12GeV proton synchrotron.

250MeV陽子線型加速器

熊谷 教孝、町田 慎二、木村 嘉孝

高エネルギー物理学研究所

この250MeV線型加速器は、KEK12GeVPSのビーム強度の増強を目指す
”new booster”計画の入射器として設計された。

250MeV陽子線型加速器

§1 はじめに

この線型加速器は、”PS New Booster (1~1.5GeV)” (文献-1) 用入射器として、そして同時に医学、物性、および材料工学等多分野に利用できる多目的加速器として設計された。この加速器に対して要求されたビーム性能を表-1に示す。この設計の一部は、すでに大ハドロン加速器計画提案書 (文献-2) の中で報告されている。

表1 線型加速器のビームパラメータ

運動エネルギー	250MeV
規格化エミッタンス	5 π mm.mrad以下
ピーク電流	25 mA
パルス幅	400 μ sec
繰り返し	100 Hz
時間平均電流	1 mA

§2 加速器構成

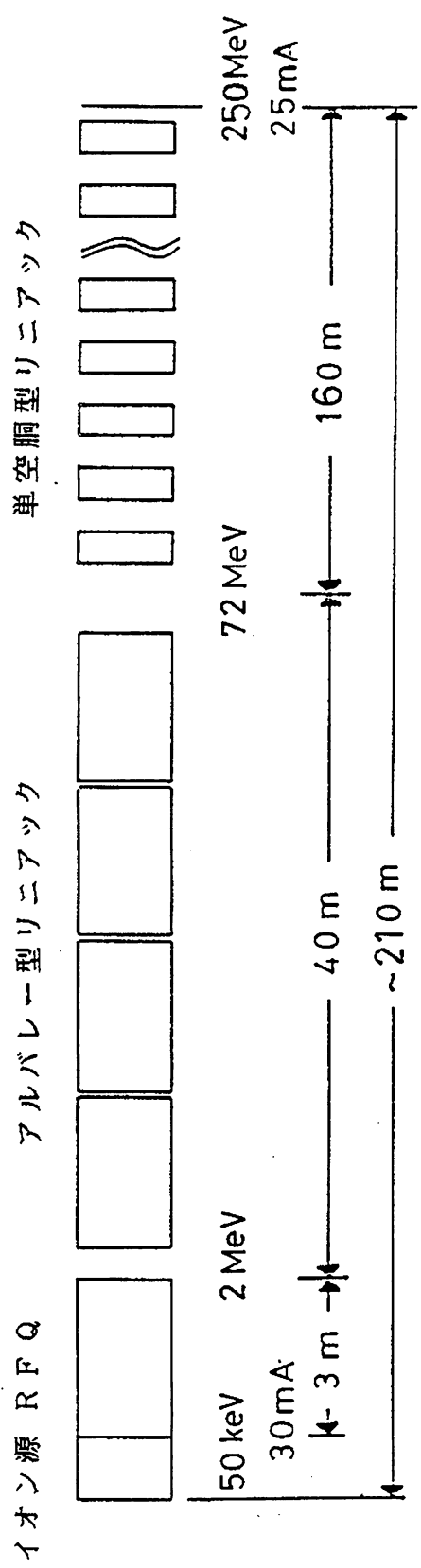
加速器構成は、次の4点を最適化して決められた。

- 1) イオン源からの連続ビームを、ビームの質と強度を落とさずに、かつ高周波的に効率よく250MeVまで加速する。
- 2) 稼働効率の向上と運転維持のしやすさ
- 3) 製作のしやすさとコストの低減
- 4) 加速エネルギーとビーム強度に対する将来の拡張性

図-1にその加速器構成を、表-2にその基本パラメータをそれぞれ示す。加速器はイオン源とRFQよりなる前段加速器と、アルバレ型(DTL)と単空洞型リニアック(SCL)からなる主線型加速器の二つで構成される。各加速器間の接続エネルギーと高周波周波数は、後で述べるビームの運動力学的要請と効率的な高周波加速および機器の作りやすさの三つの点から表-2のように決められた。

加速エネルギーは、次の理由から250MeVに設定された。

- (1) 後段シンクロトロンでの粒子数の上限値は、入射時の運動エネルギーによつて決まる空間電荷効果によつて制限される。そのため目指す”New booster”で1パルス内の粒子数として 4×10^{13} 個以上を達成するためには、入射エネルギーを250M



図一1 250 MeV 線型加速器の基本構成

e V以上にしなければならない。

(2) 医学利用、特に癌治療への利用では、治癒率の点から陽子のエネルギーを250MeV程度にする必要がある。

また、ビームの時間平均電流は、多分野の同時使用を可能にするために最大1mAとする。

表2 線形加速器の基本パラメータ

全長	~210	m
各部の長さ		
RFQ	3	m
アルバレ型リニアック	40	m
単空洞型リニアック	160	m
出力エネルギー		
イオン源	50	keV
RFQ	2	MeV
アルバレ型リニアック	72	MeV
単空洞型リニアック	250	MeV
規格化エミッタンス	5	π mmrad
ビームのパルス幅	400	μ sec
ピーク電流	25	mA
時間平均電流	1	mA
繰り返し	100	Hz
空洞の共振周波数		
RFQ	200	MHz
アルバレ型リニアック	200	MHz
単空洞型リニアック	400	MHz

§3 前段加速器

3-1 構成

前段加速器は、取り出し電圧50kVのH⁻イオン源と、加速電圧2MeVのRFQで構成される。

3-2 H⁻イオン源

イオン源は、後段シンクロトロンで大強度、低エミッタンス陽子ビームを得るためにH⁻イオン源を用いる。そのイオン源の主要パラメータを表-3に示す。

表-3 H⁻イオン源のパラメータ

イオン源の種類	カスプ磁場型H ⁻ イオン源
取り出し電圧	50 kV
取り出しピーク電流	30 mA
パルス幅	400 μ sec
規格化エミッタンス	2 π mm \cdot mrad 以下

イオン源でのビーム電流とエミッタンスの算出にあたっては、RFQ、DTL、SCL全体のビーム透過係数とエミッタンス増大効果を、それぞれ0.8、2.5と仮定した。これらパラメータの妥当な値については、今後KEK40MeVアルバレー型リニアックでの実測値と計算機プログラムを用いたシミュレーション結果との比較によつて、詳細に検討が行われるであろう。現在、表-3に示すようなビーム性能は、KEKおよびLAMPFで開発が進められているカスプ磁場型H⁻イオン源でほぼ達成されている。参考のため、このイオン源で得られているビーム性能をつぎに示す。

- 1) ピーク電流が20mA、規格化エミッタンスが2 π mm \cdot mrad (90%) 以下のH⁻ビームが得られる。
- 2) 10%程度の"high duty"な運転に対して、カスプ磁場内でのプラズマの安定性から、出力電流の変動の小さなビームが取り出されている。
- 3) KEKでのフィラメントの改良(LaB6の使用)によつて、デューティ0.5%で2000時間以上の連続運転を達成している。

しかし、さらに大電流、長寿命かつ低エミッタンスを実現するイオン源とし"volume production"タイプのマルチカスプ型イオン源の開発がKEKで現在進められている。

3-3 RFQ

RFQは、空洞内に置いた4つの電極(一般にこれをバーンと呼ぶ)の先端形状を図-2に示す様にビームの進行方向に沿って変化させ、対向するバーンは同相で、隣り合うバーンは逆相になるように、高周波で励振することによつて、次の3つの効果を同一の空洞内で実現する。

- 1) イオン源からの低エネルギー粒子(数10keV)を、高周波四極電場を用いた強い収束力によつて横方向(進行方向に直角な方向)の位相空間内に効率よく捕獲する。
- 2) 捕獲した粒子を、その高周波電場の軸方向成分を用いて、縦方向(進行方向)の位相空間内に効率良く集群させる。
- 3) 集群させた粒子を2~3MeVのエネルギーまで収束を行いつつ加速する。

このように従来の低エネルギービーム輸送系、プリバンチャー、そしてコッククロフトの三つの性能を兼ね備えたRFQを前段加速器として用いる。

空洞の共振周波数はベーン形状の作りやすさと、ビーム電流の上限値（100mA）と横方向のアクセプタンスを十分大きく取るために200MHzとした。

また、加速エネルギーは、次段のアルバレ型リニアックの入射端側での空間電荷効果と高周波による非線形力、およびドリフトチューブに組み込む四極磁石の磁場の非線形成分（エネルギーを上げる事によつてユニットセルの長さが延び、そのためボア径と磁石長の比が改善される）によつて生じるエミッタンス増大効果をできる限り小さくするために2MeVとした。

このRFQの基本パラメータを計算機コード”PARMTEQ”を用いて設計した。その結果を表-4に示す。また、図-3には、空洞内のビームの進行方向に沿った運動エネルギー（T）、収束パラメータ（B）、加速位相（ ϕ_s ）、モジュレーション係数（m）、最小半径（a）の変化の様子を示す。

表-4 RFQの基本パラメータ

入力エネルギー	keV	50
出力エネルギー	keV	2000
空洞共振周波数	MHz	200
ベーン長	m	2.78
空洞内径	cm	31
セル数		181
ベーン間電圧	kV	133
最大電場	MV/m	22
最小半径（a）	cm	0.497
平均半径	cm	0.761
B（収束パラメータ）		5.5
アクセプタンス	$\pi \text{ mm} \cdot \text{ mrad}$	5
縦方向の捕獲効率（電流0Aの時）%		97

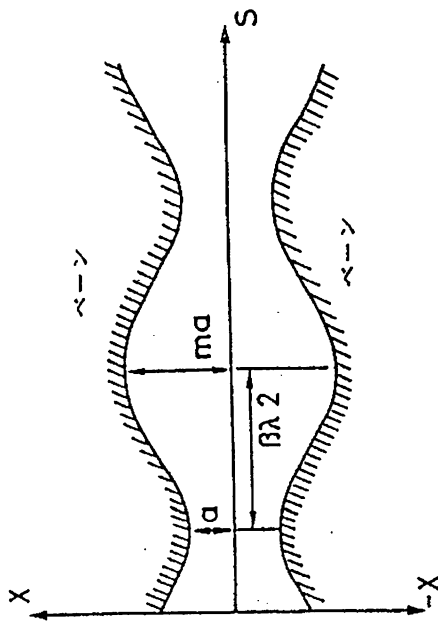


図-2 R F Q のベーン形状

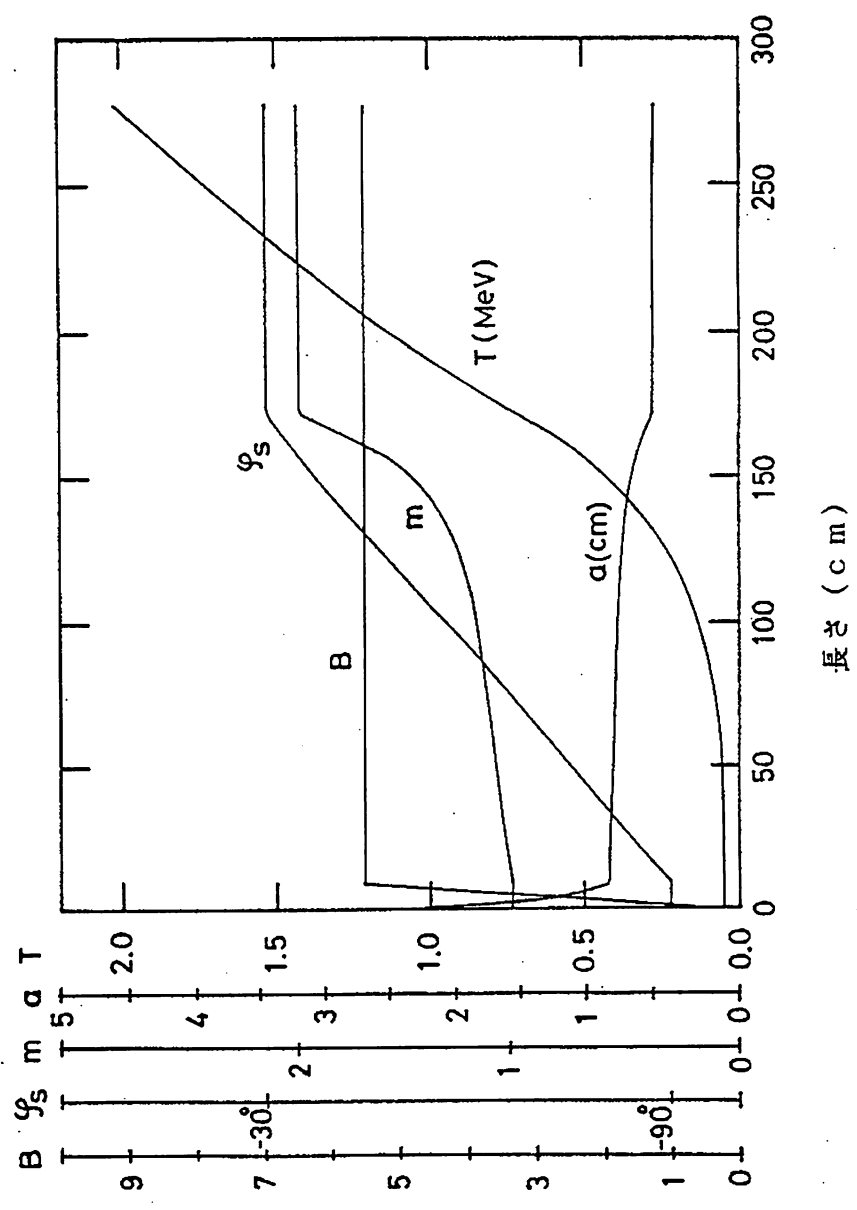


図-3 200MHz R F Q のパラメータの設計

§ 4 主線型加速器

4-1 構成

主線型加速器は、RFQからの2MeVのH⁻ビームを加速効率の目安となる空洞の実効シャント抵抗の値の大きさから低エネルギー側（2～72MeV）でアルバレ型（DTL）を高エネルギー側（72～250MeV）で単空洞型リニアック（SCL）を用いて、250MeVまで加速する。

この主線型加速器の高周波源として、稼働効率の向上と運転維持作業のしやすさを計るために大電力型クライストロンが用いられる。このクライストロンは、半導体増幅器からの数10～数100W程度の入力を数MWに増幅して取り出すことができ、また寿命も5000～10000時間と非常に長い。そのため、従来の三極管および四極管を用いた電力増幅器システムに比べて、システムが非常に簡潔になりその信頼性の向上が期待される。

4-2 アルバレ型リニアック

このアルバレ型リニアックの主要パラメータを表一5に示す。

共振周波数

共振周波数は、次の理由から200MHzとする。

- (1) 200MHzにすることで、空洞の内径が約90cm程度になり、ドリフトチューブを含めた空洞の製作が容易になる。
- (2) ドリフトチューブ内に組み込む四極磁石の強さによつて制限される入射エネルギーを2MeV程度に下げられる。そのため、RFQの長さが波長の2倍程度に収まるため、ベーンの製作および空洞への取り付け上特に問題が無いと考えられる。
- (3) 入射エネルギーが2MeVの場合、ドリフトチューブに組み込む四極磁石の長さが6cm程になる。そのため、ボア径と磁石長の比が改善でき、この磁石内での非線形磁場によるエミッタンス増大効果を小さく抑える事ができる。
- (4) 200MHzのRFQからのビームを、400MHzのアルバレ型リニアックの縦方向のアクセプタンス内に損失なく転送するためには、RFQの出力エネルギーを6MeV程度にしなければならない。これは10メートル近いベーンの加工を必要とする事からRFQの製作を非常に難しいものにする。
- (5) 最近開発された、200MHz帯の大電力クライストロンが利用できる。

空洞形状の最適化

このDTLの空洞およびドリフトチューブの形状を、計算機コード”SUPERFISH”を用いて、実効シャント抵抗と表面最大電界強度の二つを、2MeV（入射エネルギー）と40MeVの二箇所最適化して決めた。図一4と5に、これら二つの点での空洞内径（D）と間隙長（G）、そして間隙長と実効的シャント抵抗（ ZT^2 ）および表面最大電界強度（ E_s/E_0 ）の計算結果をそれぞれ示す。これらの計算結果から、空洞の内径を2か

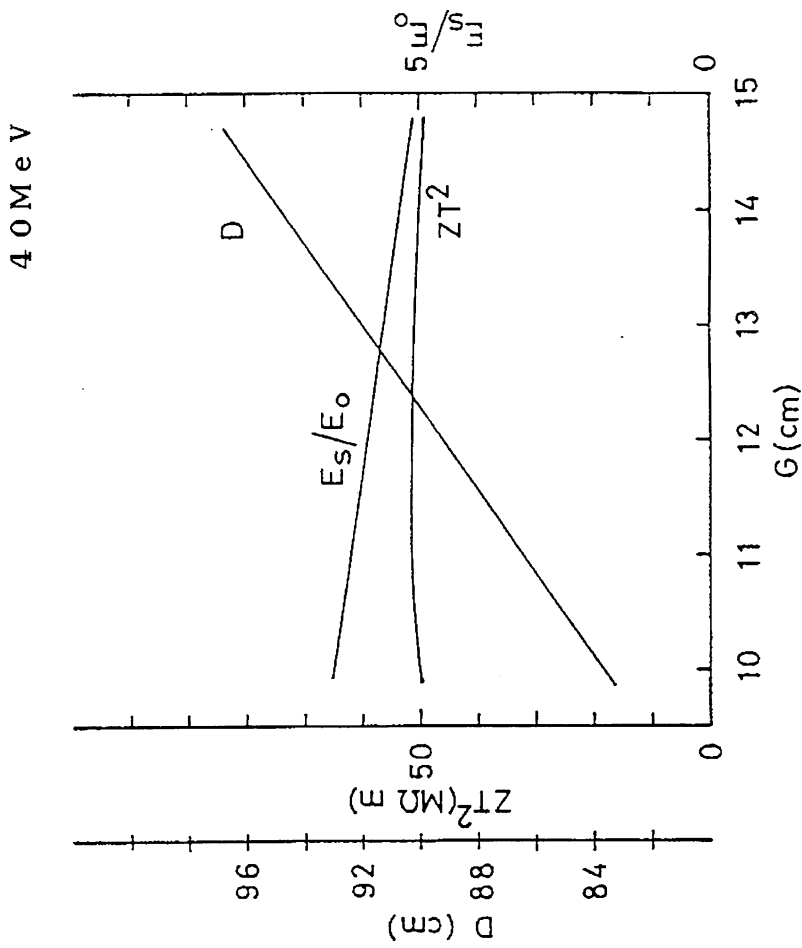
ら40MeVでは94cm、40から72MeVでは86cmとした。ドリフトチューブの外径は、大きなシャント抵抗値とその内部に四極磁石を組み込む十分な空間を得るために全て14cmとした。また、40MeV以上ではシャント抵抗を上げるために図-6に示すようにドリフトチューブに20度の"face angle"をつけた。これらの形状をもとに計算した ZT^2 の、粒子の運動エネルギーに対する依存性を図-7に示す。実効シャント抵抗は、10MeV付近にピークを持ち、それより低いエネルギーではエネルギーの減少と共に急激に低くなる。また、それより高いエネルギーではエネルギーの増加と共に単調かつ緩やかに減少する。加速電界強度は、ドリフトチューブ間での放電等の問題を避けるために、空洞内での表面最大電界強度がキルパトリック値の1.5倍以内になるように3MV/mとした。タンク長は、計算機コード"PARMILA"を用いて、高周波のピーク電力が各タンク当たり2MW以下になるように決めた。その結果、この72MeVアルバレー型リニアックは、入射端側で約9.5m、出力端側で約7.5mのタンク4台で構成される。

高周波電力システム

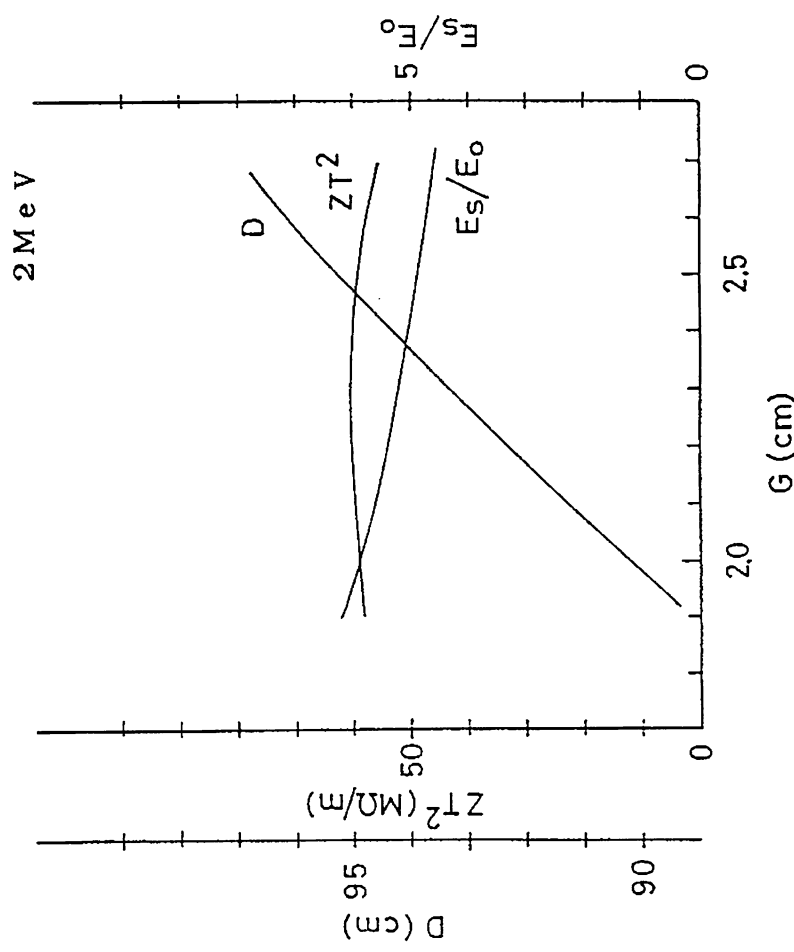
このDTLの高周波電力システムの概略構成を図-8に示す。高周波源は、電力増幅率40~50dB、ピーク出力2MW、"duty factor" 10%程度のクライストロン4本で構成され、空洞の最大励振電力は、高周波のパルス幅を700 μ sec(加速に必要な電圧を作るのに要する時間+ビームのパルス幅)、繰り返しを100Hz、ビーム電流を30mAで運転したとき約7.2MWとなる。高周波電力の輸送は、同軸管(又は導波管)を用いて行い、空洞の2ヶ所(空洞長の1/4と3/4の位置)に取り付けた高周波結合器から空洞に電力を供給する。

収束用四極磁石

ドリフトチューブ内に組み込む収束用四極磁石は、保守の容易な永久磁石を用いる。この四極磁石に必要な四極磁場の強さは、DTLの入射端側で最も強くなる。DTLの共振周波数と入射エネルギーをそれぞれを200MHz、2MeVとすると、単一セル内でのベータatron振動の位相の進み角を90度とすると、必要な四極磁場の強さは60T/m程度になる。この値は、磁極部での最大磁束密度に換算すると約1テスラとなるが、B-H積の大きな磁性帯(たとえばNe-Fe-B, Sm-Co系)を用いれば特に問題なく達成することができる。



図一5 40 MeVでの空洞内径 (D) と間隙長 (G)、
 間隙長と実効シヤント抵抗 (ZT^2) および表面
 最大電界強度 (E_s/E_o) の関係



図一4 2 MeVでの空洞内径 (D) と間隙長 (G)、
 間隙長と実効シヤント抵抗 (ZT^2) および表面
 最大電界強度 (E_s/E_o) の関係

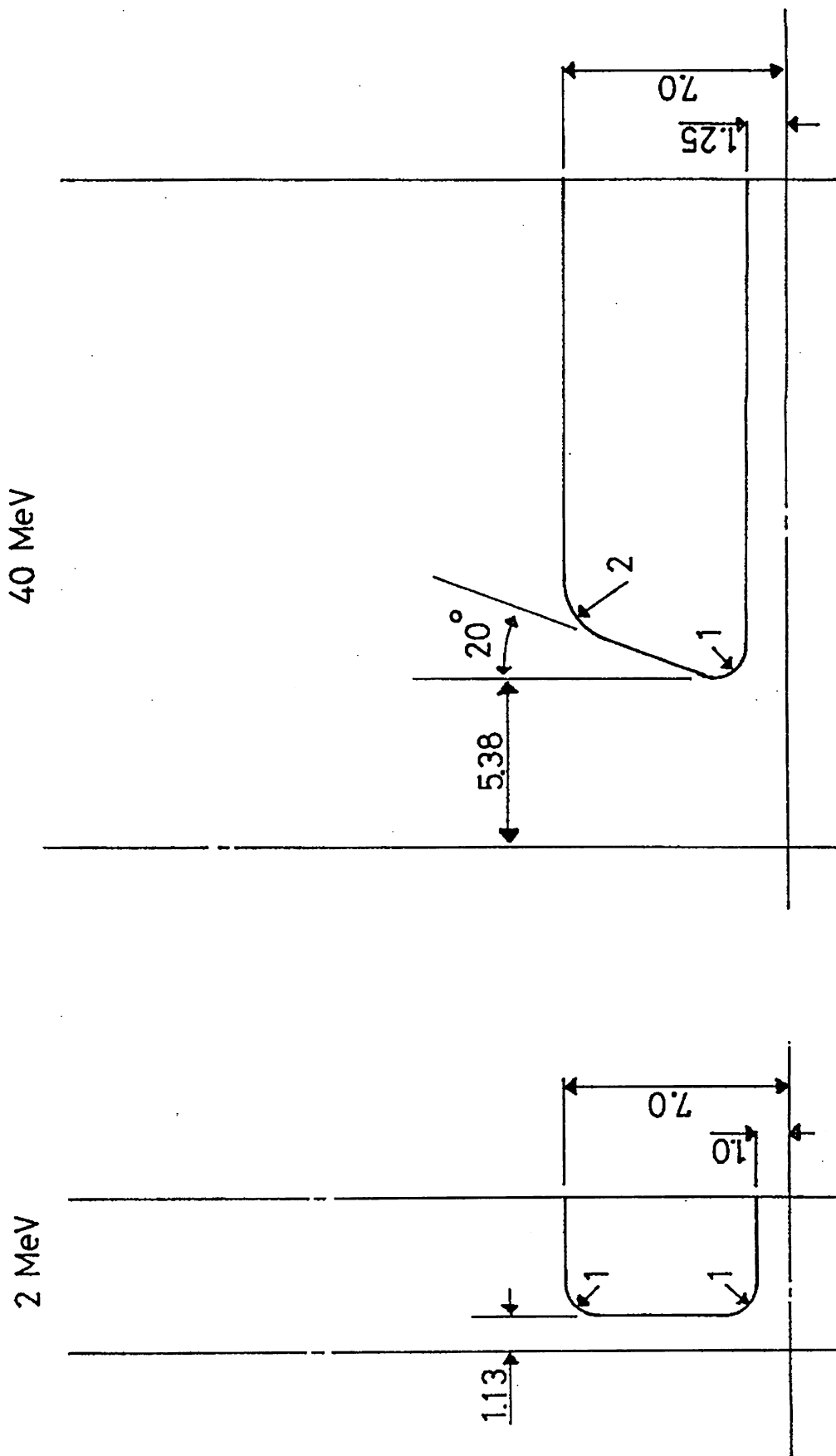
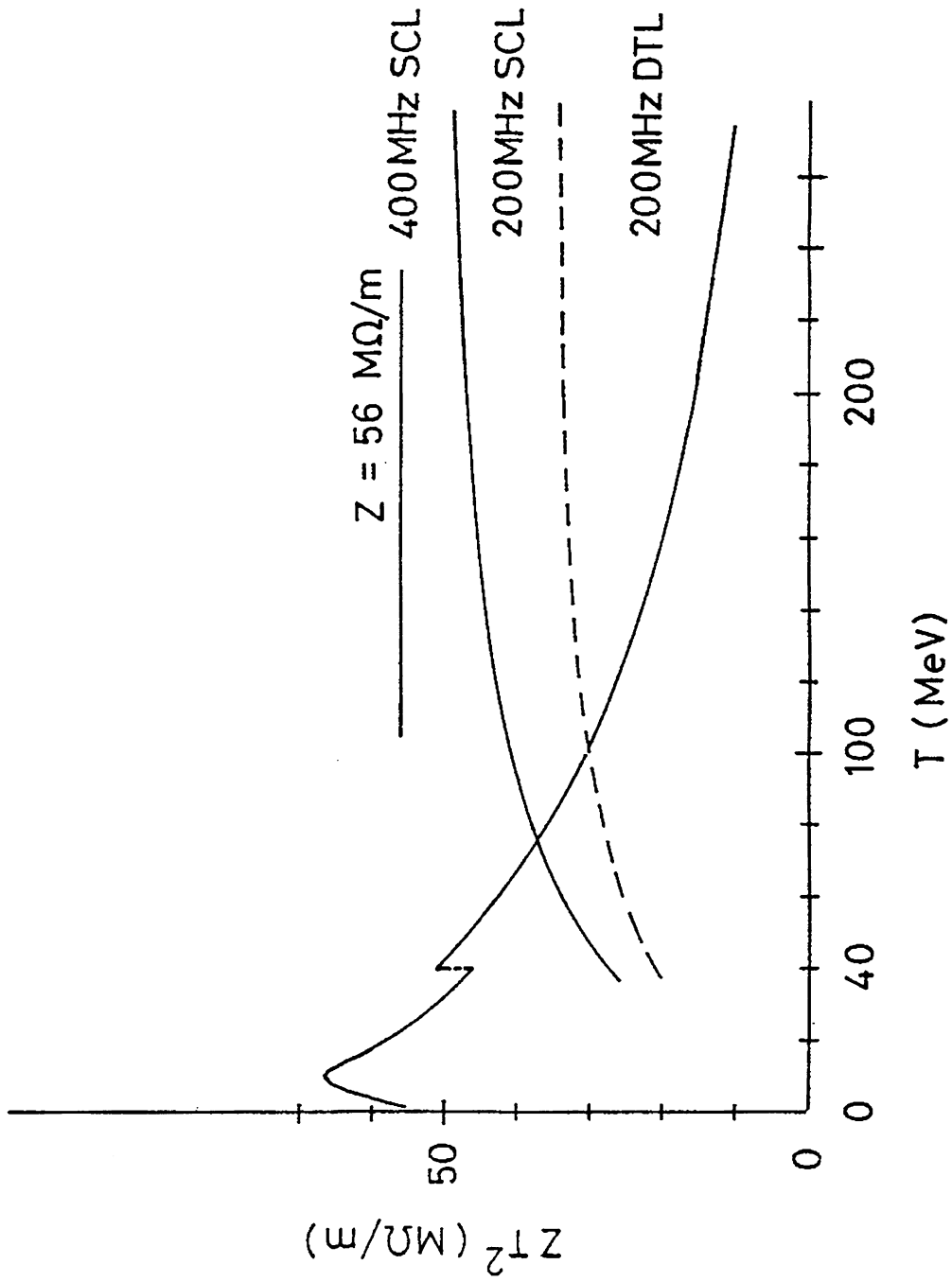
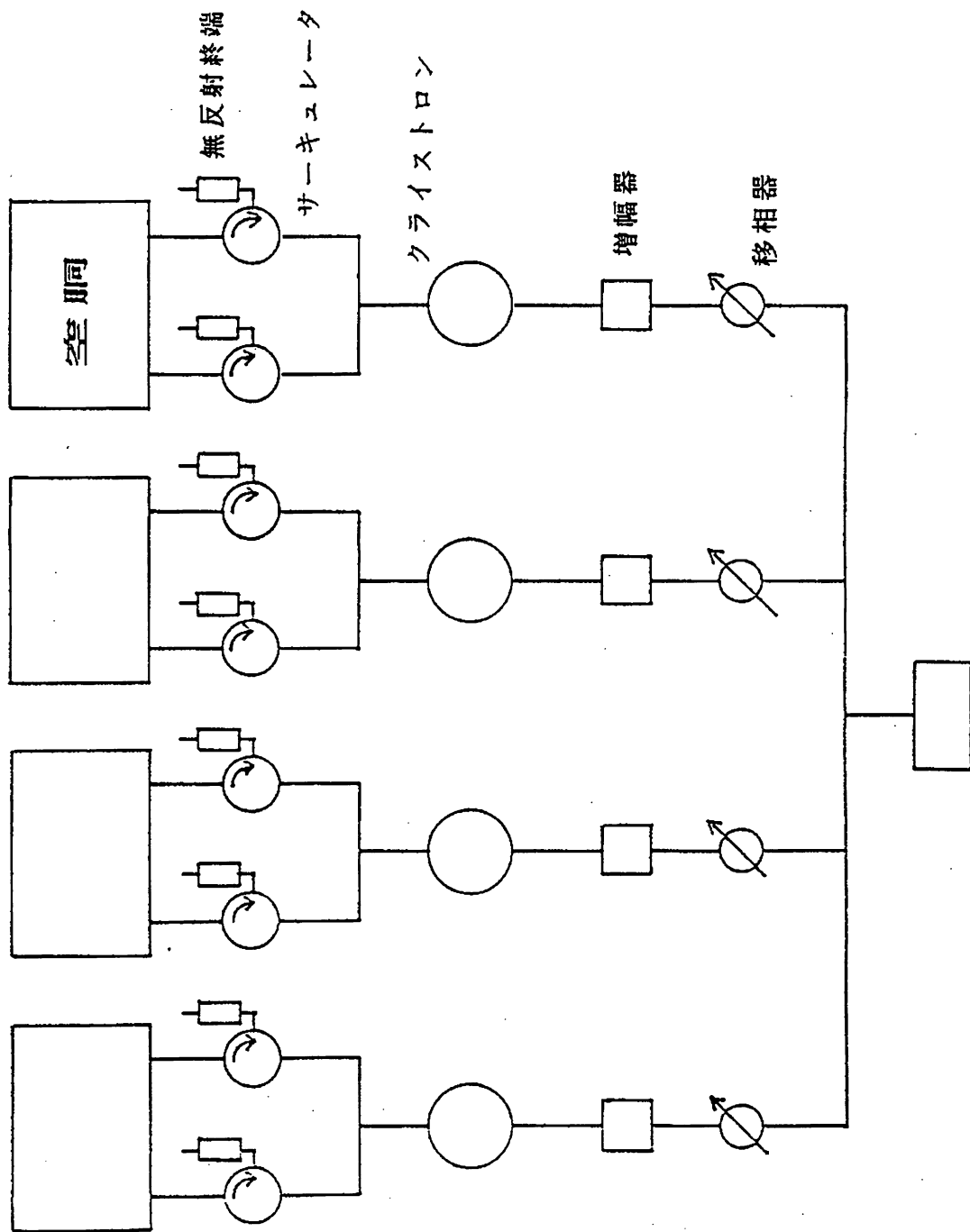


図-6 2 MeV と 40 MeV でのドリフトチューブの形状



図一七 実効シャント抵抗の陽子の運動エネルギーに対する依存性



基準周波数発生装置

図一八 アルバレ型リニアックの高周波電力系の構成

表-5 70MeV アルバレ型リニアックの主要パラメータ

空洞番号		1	2	3	4
入力エネルギー	MeV	2.0	22.22	40.30	56.78
出力エネルギー	MeV	22.22	40.30	56.78	72.28
空洞長	m	9.376	8.606	7.407	7.396
空洞内径	cm	94	94	86	86
ドリフトチューブ外径	cm	14	14	14	14
ビームホール径	cm	2.0	2.0	2.5	2.5
セル長	cm				
入射端		9.99	32.29	42.80	50.11
出力端		31.80	42.34	49.68	55.46
間隙長/セル長 (G/L)					
入射端		0.233	0.308	0.260	0.309
出力端		0.305	0.368	0.306	0.345
透過時間因子 (T)					
入射端		0.763	0.825	0.865	0.814
出力端		0.828	0.765	0.817	0.769
シャント抵抗 (Z)	MΩ/m	96-82	82-79	67-66	66-65
Q値 (平均)		96000	92000	74000	73000
平均電界強度	MV/m	3	3	3	3
最大表面電界強度	MV/m	16.3	16.0	18.9	17.8
ピーク空洞損失(1.3xPcav) MW		1.194	1.249	1.309	1.330
ビーム負荷(30mA)(Pb) MW		0.607	0.542	0.494	0.465
全ピーク損失(1.3Pcav+Pb) MW		1.801	1.791	1.803	1.795

4-3 単空洞型リニアック

単空洞型リニアック (SCL) (文献-3) は、図-11に示すように外部四極電磁石をFDFD構造のラティスに配置し、それぞれのラティス空間に単空洞4台を等間隔に据え付け、それぞれの空洞に高周波電力を独立に供給したものである。この単空洞型リニアックは、結合空洞型リニアック (例えばDTL) に比べて次のような利点を持っている。

- 1) 実効シャント抵抗 ($Z T^2$) が数10MeV以上のエネルギー領域でDTLのそれより大きくできる。しかも、その値はエネルギーが増加するにつれて透過時間因子 (T) が1に近づくために図-7に示すように漸近的に空洞のシャント抵抗に近づいていくようになる。
- 2) 単一形状の空洞を用いるためその製造コストが安い。

- 3) 空洞間の高周波位相を調整すること（たとえば導波管の長さを変える）によつて、高周波電力源を増強すれば加速エネルギーを変えることができる。
- 4) 1 空洞当たり 1 個の独立な高周波ソースによつて励振するため、結合型空洞で問題になるような近接モードを考慮する必要がない。
- 5) ビーム収束系が、DTL と異なり空洞外に置くことができるため、空洞と磁石の設計を独立にかつ最適な条件下で行うことができる。また、この特長によつて収束系の据え付け精度を上げることができる。

しかし、反面結合型リニアックに比べて高周波系に使用する機器の数の増加による信頼性の低下を如何に回避するかという問題、そしてビーム負荷に対する電圧と位相補償を含む高周波分配系の設計という、今後十分検討し解決しなければならない問題がある。

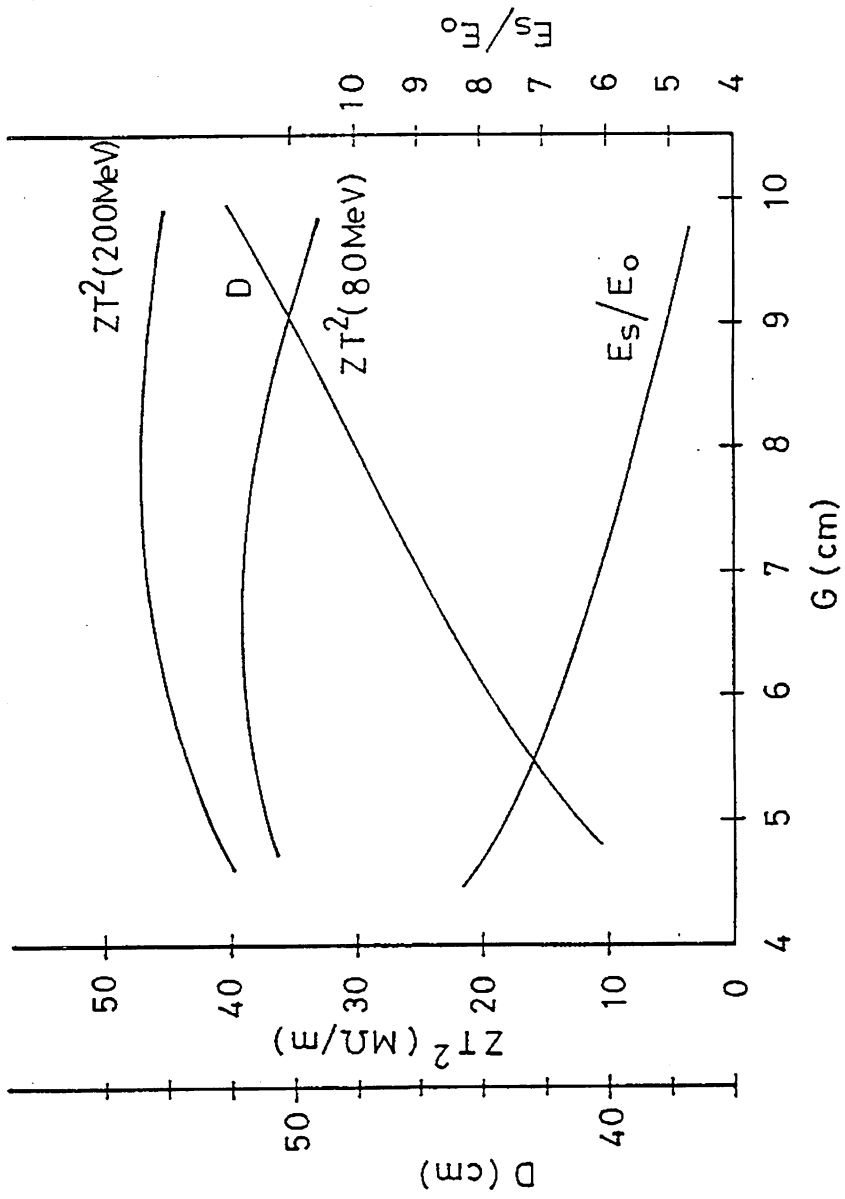
空洞の共振周波数

共振周波数は、次の理由から 400MHz とした。

- 1) 実効シャント抵抗が、後で示すように 200MHz 空洞のそれより 1.4 倍程大きい。そのため同じ高周波電力でより大きな加速電界強度を利用できる。
- 2) 放電限界が、200MHz の約 1.4 倍に上がるため、4MV/m 程度の加速電場を利用できる。
- 3) DTL の 200MHz から 400MHz に周波数を変更しても、バンチ長が 2MeV の 0.26 倍にダンピングしている事から縦方向のアクセプタンス上全く問題がない。
- 4) 給電系に取り扱いが簡単な導波管を用いる事ができる。

空洞形状の最適化

単空洞の設計は、計算機コード”SUPER FISH”を用い、DTL との接続側空洞（72MeV）で大きな実効シャント抵抗を実現するように形状の最適化をおこなった。図-9 に、周波数を 400MHz に固定したときの、間隙長（G）と空洞内径（D）との関係を、そして間隙長と実効シャント抵抗（ ZT^2 ）、および表面最大電界強度（ E_s/E_0 ）との関係をも同時に示す。この計算結果から空洞内径と間隙長を、それぞれ 47.25cm、7.5cm とした。この単空洞の形状とその寸法を図-10 に、そしてこの形状をもとに計算した ZT^2 の運動エネルギー（T）に対する依存性を図-7 に示す。図中には、参考のため 200MHz SCL の計算結果も示してある。この結果を用いて、SCL の空洞の個数が、空洞当りの加速電圧と空洞と高周波電力システムのコストの和の二つを最適化して決められた。空洞数は、加速ゲイン 180MeV の場合、おおよそ 270 個、空洞当りの加速電圧は約 0.88MV、電界強度は約 4MV/m となる。この単空洞の主要パラメータを表-6 に示す。



図一9 空洞内径 (D) と間隙長 (G)、間隙長と実効シヤント抵抗 (ZT^2) および表面最大電界強度 (E_s/E_0) の関係

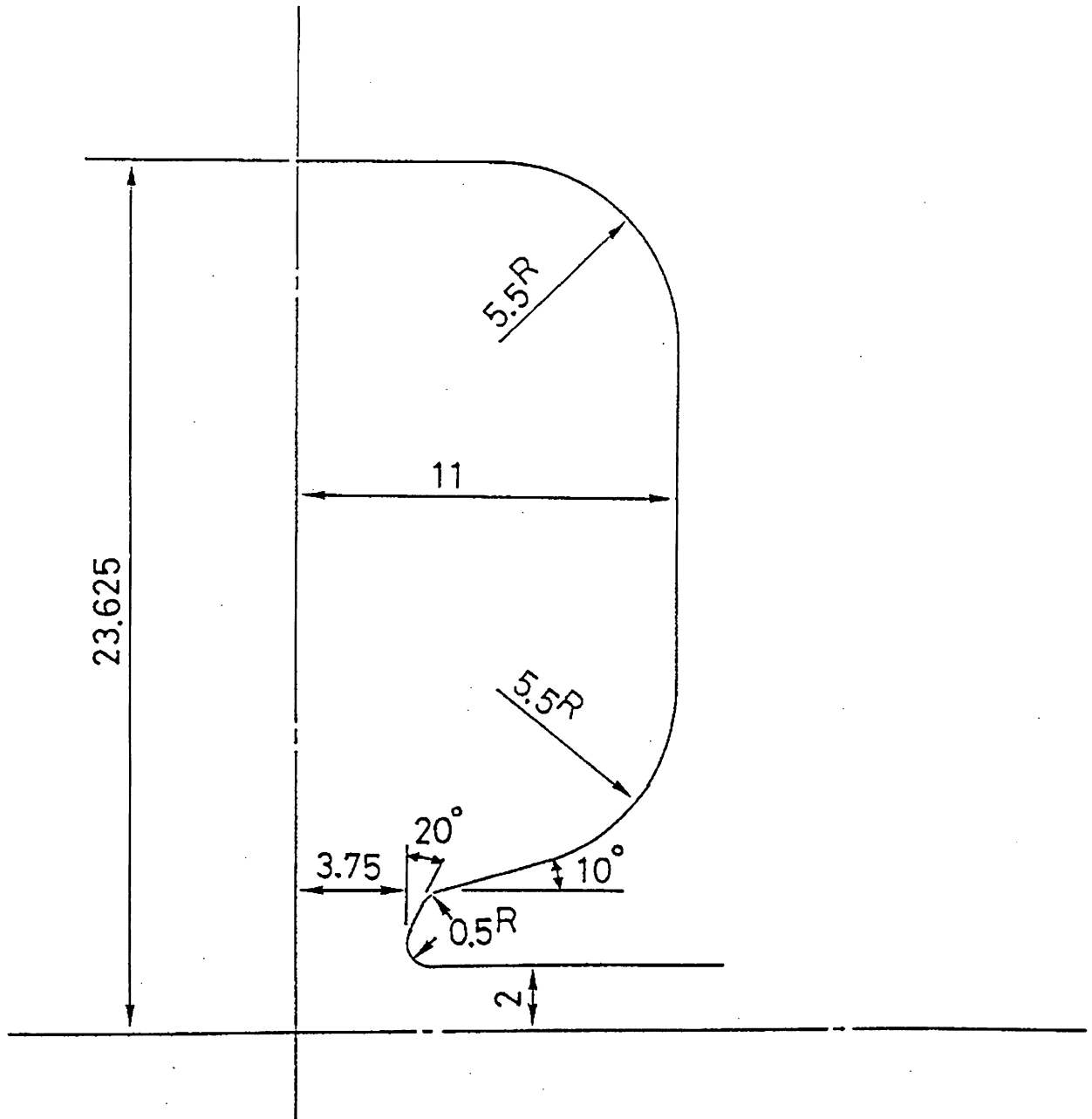


図-10 400MHz単空洞の形状

単空洞型リニアックの高周波電力システム

高周波系は、図-11に示すように8台の空洞を一単位とし、ピーク出力1MWのクライストロンとT型分配器、導波管、サーキュレータおよび無反射終端よりなる高周波輸送系で構成される。高周波電力は、この輸送系を用いてクライストロンから各空洞に独立に供給される。全空洞励振電力は、ビーム電流を25mAとすると、最大で約22MWとなる。(ただし平均損失は”duty factor”を6%とすると約1.3MW程度となる。)

各空洞間隙での、ビームと高周波加速位相との整合は次の二つの方法で行う。

- (1) ビームに対する各ユニットの平均位相の調整は、クライストロンの励振源である基準周波数発生装置からの信号を電気的に移相して行う。
- (2) ユニット内でのビームと各空洞との位相調整は、導波管の長さを機械的に変えて行う。

現在、KEKでは、これと類似した高周波系がトリスタンで安定に運転されていることから、構成上特に問題になることはないと考えられる。

表-6 400MHz 単空洞のパラメータ

空洞長	cm	22	
空洞内径	cm	47.25	
ギャップ長	cm	7.5	
ビームホール径	cm	4.0	
Q値		36000	
シャント抵抗(Z)×空洞長	MΩ	12.3	
空洞当りの電圧(V)	MV	0.88	
ピーク空洞損失(P _{cav})	kW	63	
エネルギー	MeV	72	250
透過時間因子(T)		0.75	0.92
実効シャント抵抗(ZT ²)×空洞長	MΩ	6.9	10.4
VT	MV	0.66	0.81
ピークビーム損失(P _b)	kW	14	18
(I _p =25mA, cosφ _s =0.87)			
全ピーク損失(P _{cav} +P _b)	kW	76	81

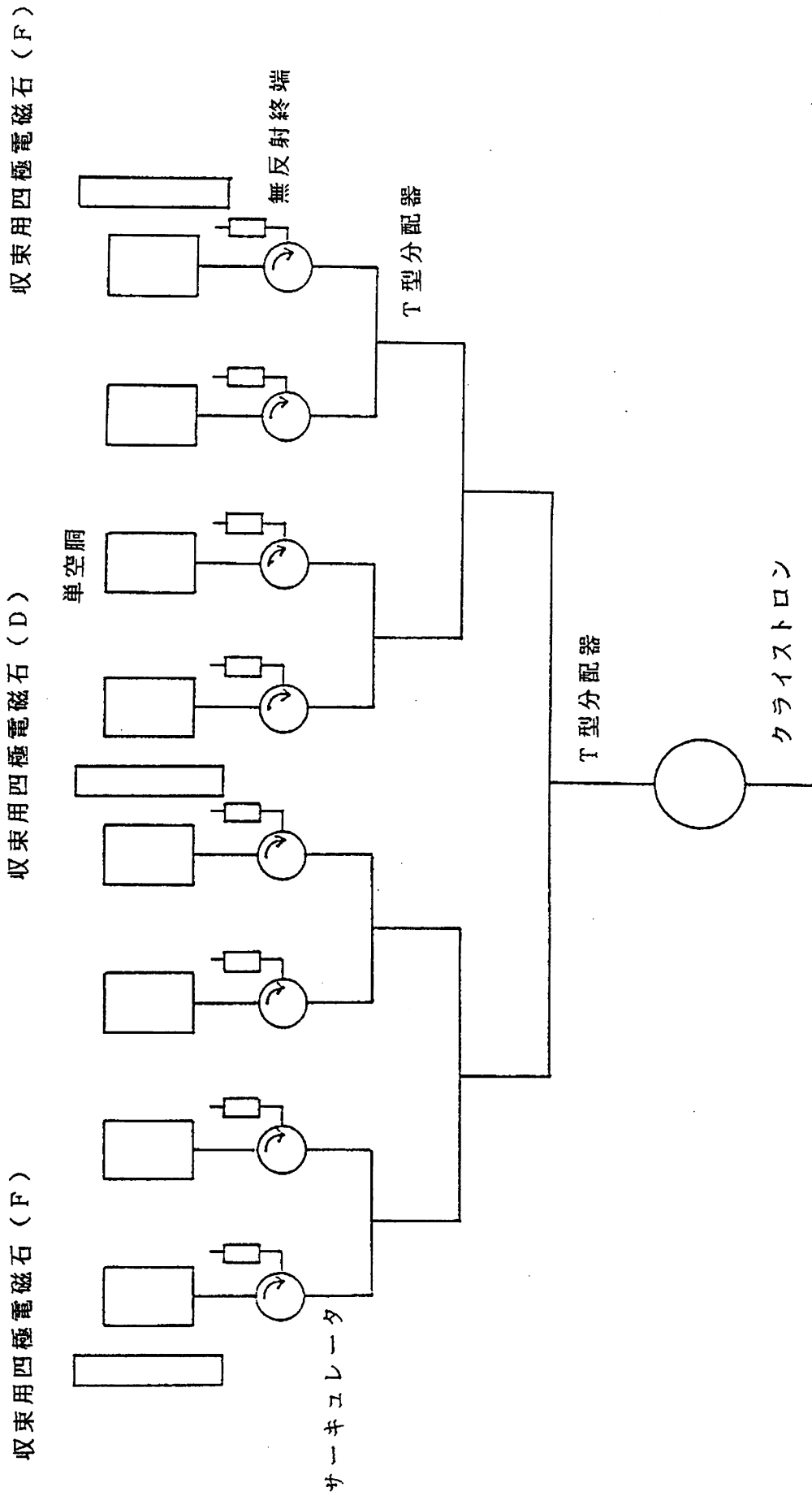


図-11 単空洞型リニアックのセル構造および高周波電力系の構成

§ 5 今後の検討課題

このレポートは、主に機器の概略設計をまとめたものである。従って、今後この線形加速器を更に現実的なものにするためには、次のような項目についてより詳細な検討を行う必要がある。

(1) ビームダイナミクスについて

- (a) 各空洞でのビームに対する高周波位相の系統的・非系統的誤差のビームへの影響
- (b) 多数の空洞および収束系の据え付け誤差のビームへの影響

(2) 単空洞型リニアックにおける高周波分配系

- (a) 1つのクライストロンから数個の単空洞にRF電力を分配する場合、ビーム負荷に対する加速電圧と位相補償の方法をどうするか、また実際それをビームダイナミクスの点からどの程度行わなければならないか？
- (b) 各空洞でのビームに対する高周波位相の制御

§ 6 謝辞

このレポートをまとめるにあたり福本、高田両教授にはいろいろと御教示頂き深く感謝いたします。

文献

- 1) T.KAWAKUBO, KEK Internal 85-14 (1986) 14
- 2) 大ハドロン加速器計画提案書 昭和61年4月
- 3) C.Zettler, Proc. of the 1984 Linear Accelerator Conference, GSI-84-11 480