

KAON ARENA

大型ハドロン計画 陽子リニアック

ワーキング・グループ報告 I

大型ハドロン計画推進作業部会

東京大学原子核研究所

1988年9月



大型ハドロン計画 陽子リニアック

ワーキング・グループ報告 I

大型ハドロン計画推進作業部会

JHP-10
KEK Internal 88-8
Sept. 1988

Report of the design study on the proton linac of the
Japanese Hadron Project

[I]

Abstract

The design study on the proton linac of the Japanese Hadron Project began in May 1987, in the collaboration of Institute for Nuclear Study, University of Tokyo and National Laboratory for High Energy Physics. This is the first report of the design study on the 1-GeV proton linac, which include the overall criteria, beam dynamics, the ion source, the rf-driven accelerating structures and the rf power source.

ワーキング・グループ・メンバー

穴見昌三	(高エネルギー物理学研究所)
阿部重昭	(")
新井重前	(東京大学原子核研究所)
五十嵐前衛	(高エネルギー物理学研究所)
池上清彰	(")
上野正明	(")
小野正達	(")
影山隆夫	(")
加藤元央	(")
木工藤喜久雄	(")
久保保志	(")
久保田親	(")
斎藤芳男	(")
高木昭一	(")
高崎栄一	(")
高嶋武雄	(")
竹中たてる	(")
徳田登	(東京大学原子核研究所)
内藤富士雄	(高エネルギー物理学研究所)
南藤今朝雄	(")
花木博文	(")
馬場文斉	(")
福田茂樹	(")
福本貞義	(")
福森義治	(")
両角祐一	(")
山崎良一	(")
吉野一	(")

目 次

第 1 章	序	1
第 2 章	全体設計	3
1.	必要性能と設計の基本的な考え方	3
2.	加速周波数	6
3.	加速方式と遷移エネルギー	8
4.	ビーム・ダイナミクス	11
5.	高周波電力	15
第 3 章	負水素イオン源及び前段加速部	17
1.	はじめに	17
2.	可能な負水素イオン源の種類	18
3.	ビームエネルギーとビーム輸送系について	34
第 4 章	RFQ リニアック	39
1.	概要	39
2.	RFQ リニアックの設計	42
3.	開発方針	49
第 5 章	ドリフトチューブリニアックの設計	53
1.	一般論	54
2.	設計	60
3.	開発の現況	86
第 6 章	高 β 加速空洞	95
1.	序	95
2.	高 β 加速空洞の基本構造	95
3.	シャント・インピーダンスについて	100
4.	COUPLED-CELL LINAC (CCL) の諸性質のまとめ	107
5.	空洞の許容寸法(周波数)誤差について	111
6.	SCS の製作法と同調法	116
7.	SCS の冷却法	124
8.	APS について(SCS との比較)	127
9.	APS の製作法と同調法	131
10.	APS の冷却法	134

11.	周波数の許容値の再検討について	135
12.	結論	136
第 7 章	高 β 加速洞のビームダイナミックス	137
1.	$\pi/2$ モード加速管の為の計算コード	137
2.	定速度型加速管と可変速度型加速管の比較	138
3.	加速電場	140
4.	収束系	140
5.	入射部分の問題	143
6.	高周波発散力	145
7.	ビームシミュレーション	148
8.	まとめ	154
第 8 章	高周波源	157
1.	RF 源の主要諸元	158
2.	クライストロン	159
3.	パルス変調器	167
4.	モジュレーションアノード型クライストロン電源	173
5.	低電力分配系	177
第 9 章	L バンド大電力増幅器の開発	181
1.	パルス変調器	181
2.	パルストランス	211
3.	クライストロン及び立体回路	227
第 10 章	高周波源の制御	235
1.	低電力 RF ユニット	235
2.	制御ユニット	241

第 2 章 全体設計

第2章 全体設計

1. 必要性能と設計の基本的な考え方

大型ハドロン計画における種々の円形加速器では、各実験に最適な時間構造（ビーム・パルス幅，繰り返し）および空間構造（ビーム・エミッタンス）をもったビームという条件下で、可能な限り大きなビーム電流を蓄積又は加速するのが望ましいことはいうまでもない。その目的のための入射器としては、入射効率を向上させるために

1) H⁻ビームを加速すること。

が要請され、又、ビーム・エミッタンスを改善するため、および円形加速器の設計を容易にするために

2) 可能な限り高エネルギーであること。

が望ましく、その上で

3) 可能な限り大電流であること。

が望まれる。しかも、以上の要請を満たしながら、

4) 故障率が低く、安定にビームを供給すること。

が必要とされる。加速器の性能を論ずるとき、特に、この最後の4)が見落とされがちであるが、実際の実験の成果は、ビームが安定に供給されることに大きく依存していることは強調されねばならない。

大型ハドロン計画における入射器として、どのようなビーム・エネルギー、電流を選ぶのが最もコスト効率が高いのかという問題は、多くの質の異なる要素を比較せねばならず、数量的に最適化するの是非常に難しい。しかも、将来のハドロン加速器を使った科学研究への発展性、将来に結がる加速器技術の向上等を考慮することも、このような大きな計画においては重要なことである。

以上のような観点から、図1に示す敷地内にコスト面、技術上可能な限り高いエネルギーということで、1 GeV 陽子リニアックを建設することが計画された。加速管本体の長さは約 500m である。本リニアックの基本的なパラメータを表1に、基本スキームを図2に示す。

ここでまず、繰り返し 50Hz というのは、中性子実験から要請されるパラメータである。この条件下で平均ビーム電流 200 μ A 以上というのが、本リニアックのビーム強度に対する要請である。一方、H⁻イオン源からのピーク・ビーム電流は、前段加速方式、その周波数等に依存し、かつ今後の開発結果によって変化してくるであろうが、おそらく第3章で詳述する如く 20mA というのが妥当な値であろう。すると必然的にビーム・パルス幅 200 μ s という値がでてくる。し

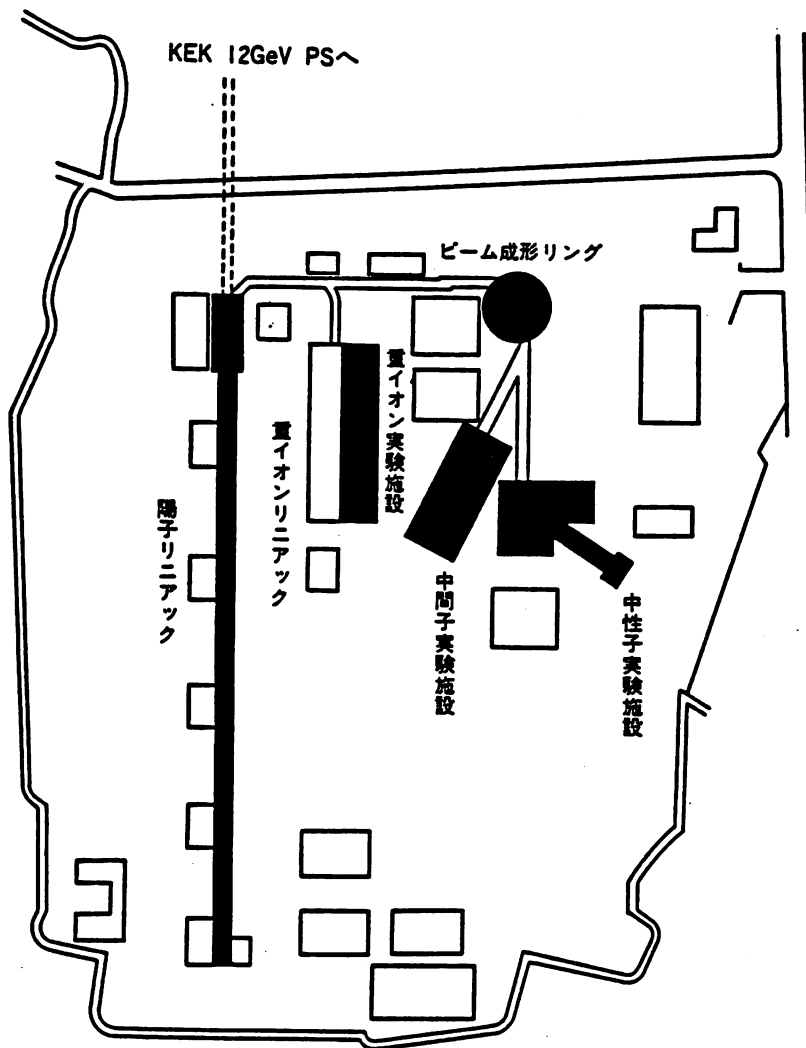


図1 大型ハドロン計画の加速器レイアウト

表1. 陽子リニアックの基本パラメーター

ビーム・エネルギー	1 GeV
平均ビーム電流	200 μ A以上
繰り返し	50 Hz
リニアック全長	約500 m
ピーク・ビーム電流	20 mA
ビーム・パルス幅	400 μ S
高周波パルス幅	600 μ S

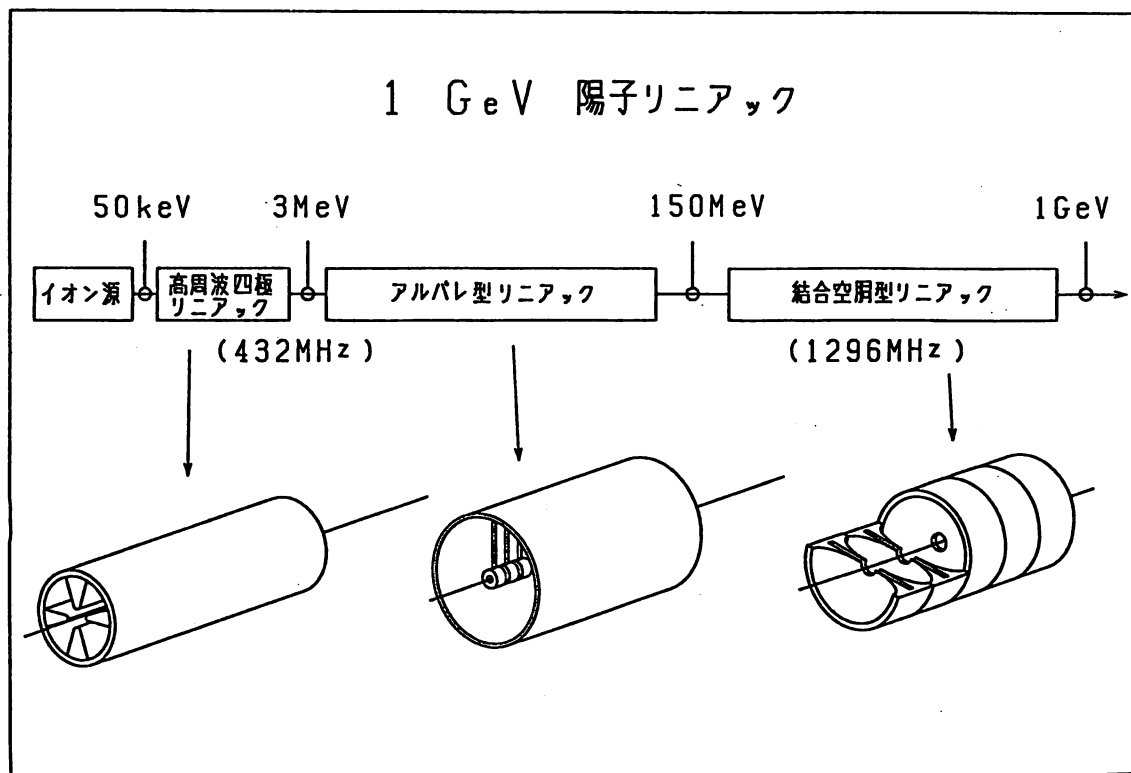


図2 陽子リニアックの基本スキーム

かし、ビーム・チョッピングによるビーム損失，その他の余裕度を考えて，ビーム・パルス幅 $400\mu\text{s}$ ，高周波パルス幅 $600\mu\text{s}$ として設計を行ってみることとした。

本計画の特色を示すために，図3に於て現存する代表的な陽子リニアックと本リニアックを比較してある。本計画が陽子リニアックとして世界最高エネルギーを狙うものであると共に，本計画に匹敵する LAMPF が 800m で 800MeV のエネルギーであることと比較すると，単位長さあたりの加速電圧が約2倍になっていることに注意したい。その結果，同じシャント・インピーダンスの加速管を採用するならば，ビーム負荷を別として同じエネルギーを得るのに約2倍の高周波電力が必要となる。

このような大電力高周波を，長パルス幅，高デューティで，安定かつ低故障率で，しかも低コストで供給できるシステムを構築せねばならないことが，本リニアックの設計，建設にとって最も留意せねばならぬことの一つである。本報告書で後に詳述される如く，技術開発の多くの部分が，この点に関連していることに注意されたい。

2. 加速周波数

前節で，同じシャント・インピーダンスの加速管を用いるならば，加速電場に比例して，高周波電力が上っていくことを指摘した。加速電場を上げると，実際にはそれ以上に高周波電力を必要とする。それは，加速管のノーズ・コーンが鋭角的である程シャント・インピーダンスを大きくできる一方，最大表面電場が上がってしまうということに起因する。即ち，放電に対する安定性，エージングの容易さ等を考慮すると，とりうる最大表面電場には適当な値があるから，加速電場を大きくしようとするれば，ノーズ・コーンの角度を鋭くすることができず，その結果シャント・インピーダンスを犠牲にせざるを得なくなるからである。

ところで，放電限界およびシャント・インピーダンスは，加速周波数の平方根に比例して高くなっていく。従って，放電限界の向上および高周波電力の軽減（即ち，シャント・インピーダンスの向上）のためには，できるだけ高い加速周波数を選ぶことが望ましい。しかるに，大電流のH⁻ビームを加速するという本計画のもう一つの特色が，以下に述べる理由によって加速周波数の上限を決めてしまう。言いかえると，大電流H⁻ビームを加速せねばならないがために，さらに高周波電力が必要となる訳である。

その理由の第一は，一般にH⁻ビームがH⁺ビームに比べビーム電流を取りにくいということである。従って，ビーム電流を大きくするために，なるべく大きな

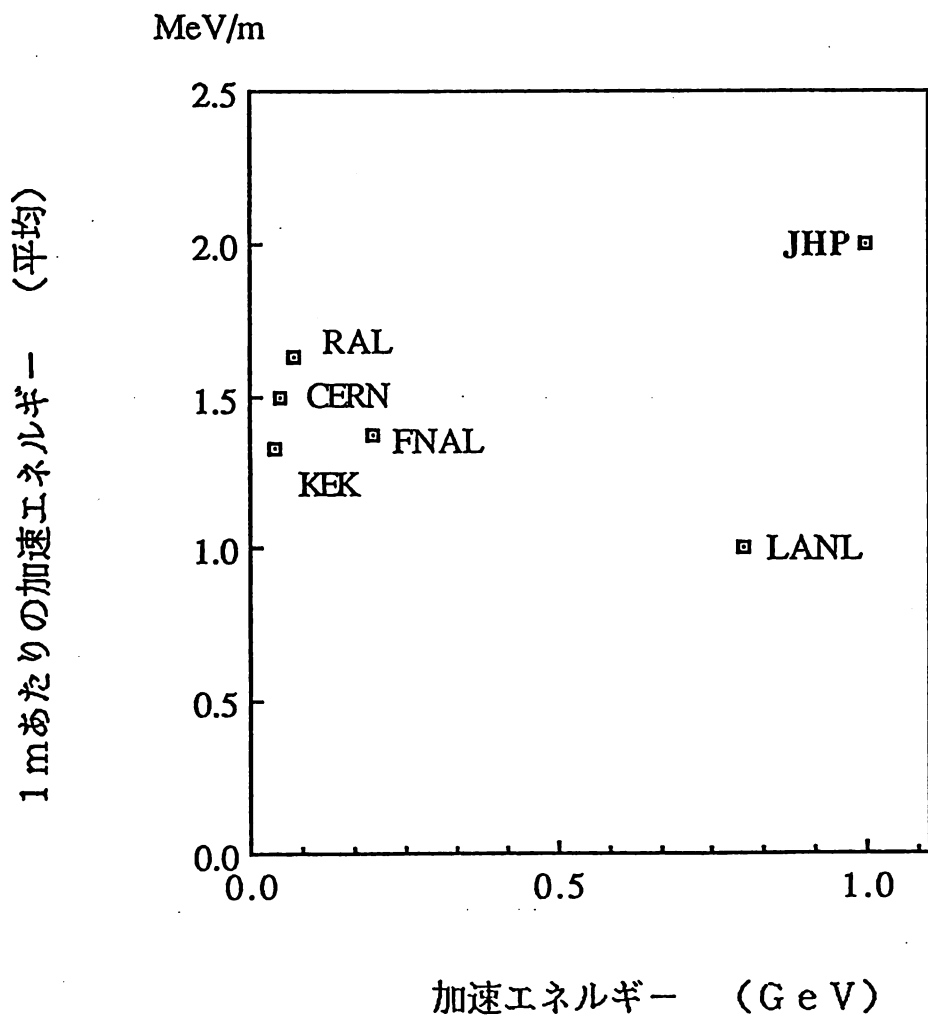


図3 代表的な陽子リニアックの比較

ボーア径およびアクセプタンスをもった加速システムを用意せねばならない。その結果、加速空洞を余り小さくできず、加速周波数を余り高くできない。このボーア径をなるべく大きく、アクセプタンスをなるべく大きくすることは、高いエネルギー領域に於ても、大きなビーム電流による放射化を防ぐという観点から、重要なことである。

第二に、このようにして得られるH⁻イオン源からのピーク電流にも限りがあるから、平均ビーム電流を上げるためには、デューティを高くする必要がある。高い加速電場で、高いデューティで使用される加速管は、平均熱損失が大きくなり、加速管の冷却が問題となってくる。加速周波数を余り高くして、その結果加速空洞が余り小さくなると、この冷却が非常に困難になってくる。このことは、高周波源（クライストロン）の冷却についてもいえることである。

こうしてみると、高エネルギーであることと大電流のH⁻ビームであることが互いに相反する要請であることが分る。高エネルギー即ち高い加速電場の方に力点が置かれるならば、加速周波数が高く選ばれる傾向があり、平均ビーム電流の方に力点が置かれるならば、周波数は低く選ばれる傾向にある。

加速周波数の選定にあたっては、以上の点に加え、前節4)の故障率が低く、安定にビームを供給するという点を特に考慮する必要がある。そのためには、高エネルギー側だけでなく、低エネルギー側についても、高周波源としてクライストロンを採用することが望ましいというのが我々の考えであり、無理なくクライストロンを使用することのできる加速周波数を選択することとした。

こうして決定されたのが低エネルギー側で432MHz、高エネルギー側で1296MHzである。LAMPFがそれぞれ200MHz、800MHzであることと比較すると、本計画が高い加速電場（図3）に力点が置かれ、周波数が高目に設定されていることに注意されたい。

3. 加速方式と遷移エネルギー

H⁻ビームを1 GeVまで加速しようとするとき、各エネルギー領域即ち各速度領域に応じて、最適な加速方式をとるべきである。

まずイオン源は体積生成型イオン源を想定して開発研究を行うこととした。この型のイオン源を選ぶ理由は次章で詳述するが、セシウム蒸気を使用しないですむというのがその至たる理由の一つである。セシウム蒸気があるとイオン源に続くRFQ型リニアックの耐圧を劣化させるおそれがあるからである。

イオン源から出てきたH⁻ビームはコッククロフト・ワルトン型静電加速器か又はRFQ型リニアックで加速するのが一般的である。RFQ型リニアックが小型

である上にバンチャーをそれ自身の中に含み、かつビームの捕獲率が100%に近いこと、又、それと関係して縦方向のビーム電流分布の形がすぐれていること、更にはコック・クロフト型が700~800keV程度の加速であることに比べ、RFQ型が2~3MeVまで加速できること、以上の理由によってRFQ型リニアックを想定して開発を行うこととした。次章以下で詳述するように、RFQ型リニアックの入射エネルギーは50~100keV、出射エネルギーは2~3MeVの範囲で選ばれるのであろうが、まずそれぞれ50keV、3MeVとして設計研究をすることとし、その結果を見て、最終的な決定を行う予定である。加速周波数については、高周波源にドリフト・チューブ型リニアック(DTL、アルバレ型)と同じクライストロンを使用した方が試験、運転、維持の上で格段に有利なので、開発過程で余程の問題が出ない限り、432MHzを採用する予定である。

3MeVまでRFQ型リニアックで加速されたH⁻ビームはドリフト・チューブ型リニアックで100~150MeVまで加速される。このDTLでは加速周波数を432MHzに選んだことによりKEKやLAMPFの200MHzのDTLと比べ小型、軽量になると同時に高周波源としてクライストロンを使用することができる。又、電磁石のかわりに永久磁石を収束用四極磁石として使うことにより、運転、維持を容易にし、かつ故障率が低くなることが期待される。DTLの入射エネルギーは、低くなるに従って、ドリフト・チューブが小さくなり、永久四極磁石の収束力が小さくなるので、DTLにとってはなるべく高い入射エネルギーを選ぶ方が有利である。一方、RFQ型リニアックにとっては、その出射エネルギーが高くなるに従って、その長さが長くなり、チューニング等が困難となってくる。RFQからDTLの遷移エネルギーを2~3MeVのどこに選ぶかは、実際に試験機を製作し、テストを行った結果を見てから判断せざるを得ない問題である。

100~150MeVまでDTLで加速された後、高 β 加速空洞で1GeVまで加速されることになる。図4に、現在想定されているDTLと高 β 加速空洞の典型としてのSCS(Side Coupled Structure)のシャント・インピーダンスの計算値を示してある。DTLとSCSのシャント・インピーダンスが交わるのはほぼ130MeV($\beta \approx 0.48$)である。DTLから高 β 加速空洞への遷移エネルギーは、加速効率(シャント・インピーダンス)を別にすれば、150MeV程度まで高くしてもDTLにとっては技術的な問題はない。一方、高 β 加速空洞にとっては、低くするのは、セル長が短くなり、構造上、製作上やや問題がある。従って、現段階では150MeVとして設計を進めることとした。将来、開発が進んだ段階で、シャント・インピーダンス、製作コスト、技術上の問題等を総合的に勘案して最終決定されることとなる。

高 β 加速空洞は、本リニアックの殆どの部分を占めることを考えると、本計画

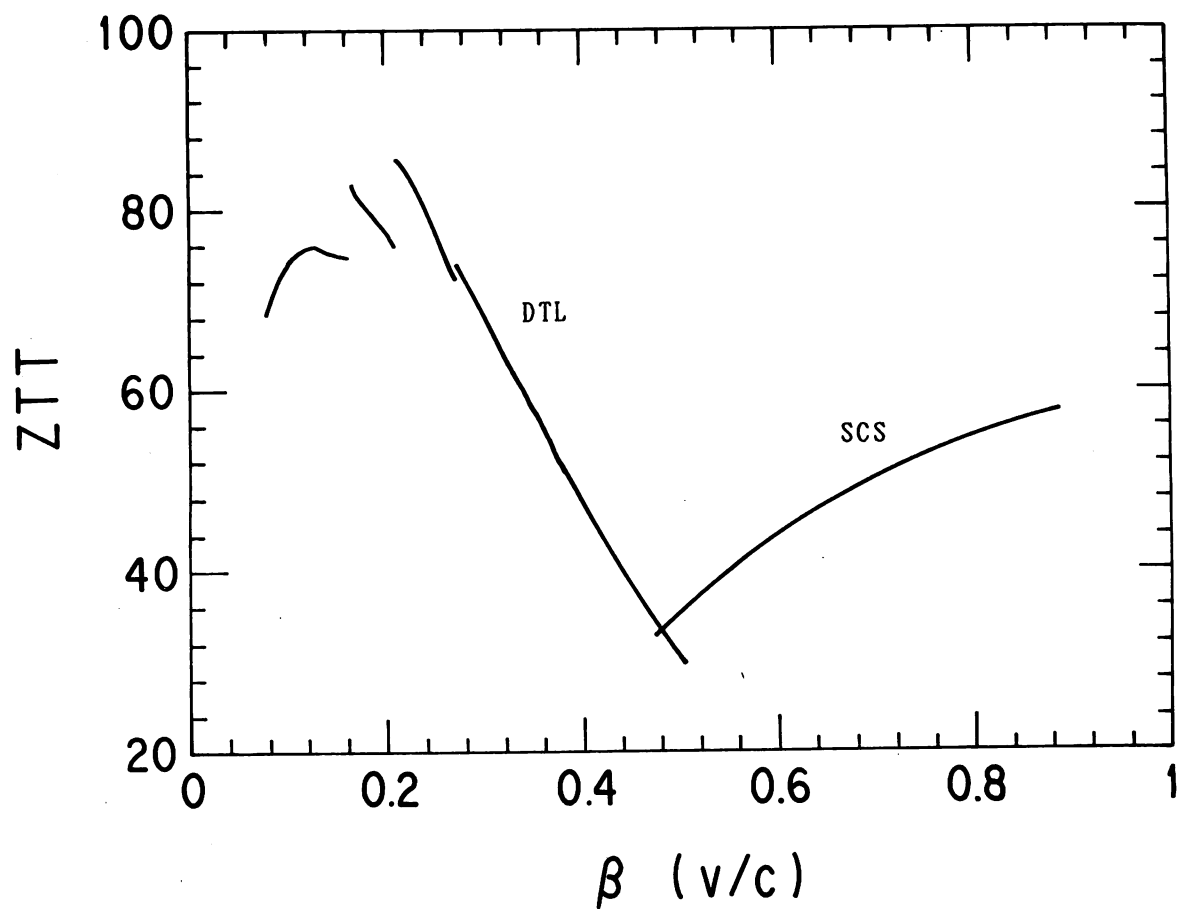


図4 DTLとSCSのシャント・インピーダンス (計算値)

のコスト、性能に大きな影響を与える構成要素である。従って、どのような型の加速空洞を選択し、どのような製法を採用するかは、詳細な技術的検討を要する重要課題の一つであり、この報告書のかなりの部分を占めると同時に、重要な開発項目の一つである。

4. ビーム・ダイナミクス

本リニアックで供給できるビーム電流の最大値は、主に二つの要因で決定される。一つは、当然のことながら、RFQ 型リニアックのアクセプタンスより小さいエミッタンスのビームが、どれだけイオン源からとり出せるかということである。もう一つは、RFQ 型リニアックから出射されたビームが、1 GeV にまで加速される間、ビーム損失をどこまでおさえられるかという問題である。後者については、ピーク電流が 20mA であるということを考えると、ビーム不安定性の問題よりも、ビームの tail 等のわずかのビーム損失のために、加速管が放射化される方がより深刻な問題であろう。即ち、物理的には大電流を加速できたとしても、加速管途中でのわずかなビーム損失による放射化の問題のために、電流を絞らざるをえないという事態が起こりうるのである。従って、大電流のハドロン加速器の設計においては、この点に特に留意する必要がある。

本リニアックの収束系は、まず RFQ 型リニアックはそれ自身加速と同時に収束の役目をこなっており、DTL は各ドリフト・チューブ内に四極磁石を内蔵している。高 β リニアックではいくつかのセルを含むタンク内には四極磁石を備えることができないので、図 5 に示すように、タンクとタンクの間には四極磁石を設置しなければならない。ビーム・ダイナミクスの詳細な数式による議論は次章以下に譲るが、一般論としては次のことがいえる。今 500m で 1 GeV の加速ということが与えられると、加速電場がほぼ決まり、さらに縦方向に必要なアクセプタンスからシンクロナス位相がほぼ 30° 程度とすると、加速電場による発散力 (RF defocusing force) が決まってしまう。この発散力は加速電場に比例する一方、エネルギーが高くなるに従って小さくなっていく。第 2 節で述べたように、LAMPF と比べ高い加速電場を選んでいるため、より大きな収束力が必要となる。一方、エネルギーが高くなるに従い、発散力が小さくなると同時に、断熱減衰によってビーム・エミッタンスは小さくなるから、収束は楽になっていく。従って、高い加速電場のため発散力が大きいリニアックでは、DTL より収束力の弱い高 β リニアックは高いエネルギーから使わざるをえなくなる。それが、前節で述べたように加速効率を犠牲にしても、やや高目の 150MeV から高 β リニアックで加速する一つの理由である。(LAMPF は 100MeV である。) しかも、図 5 に示した四

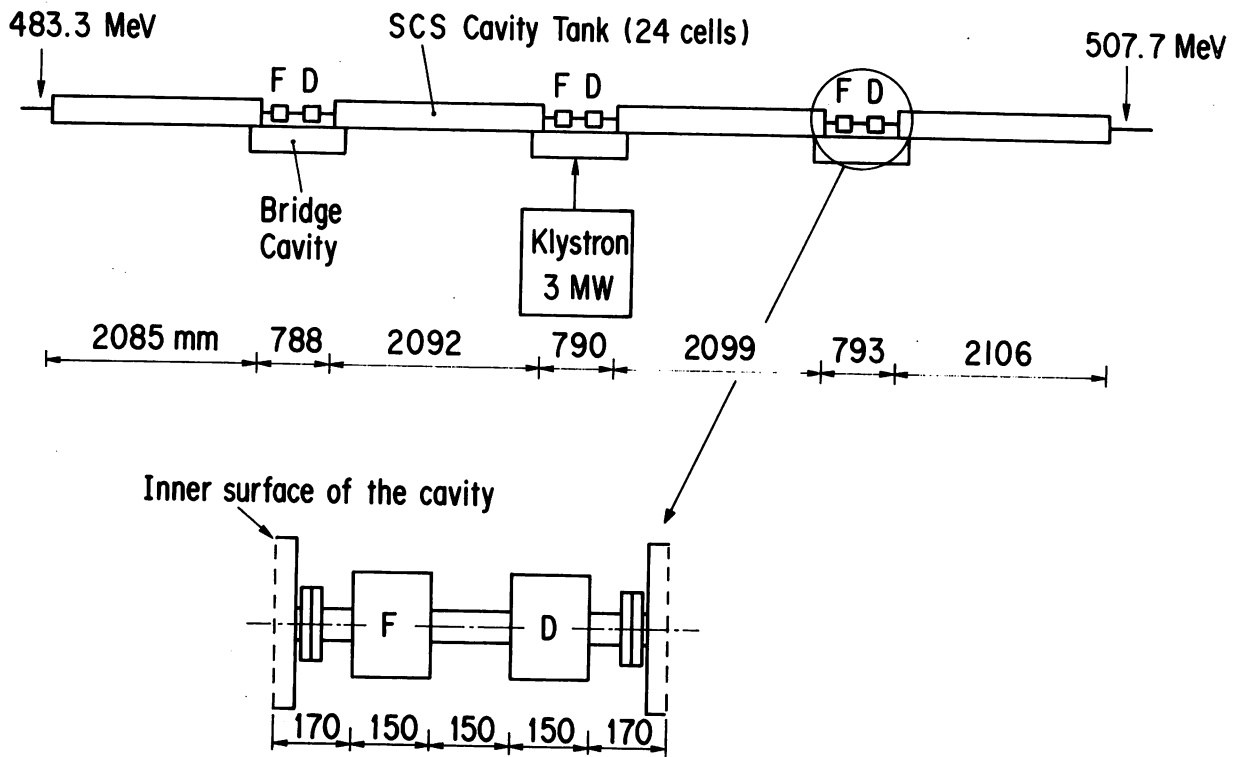


図5 高 β 加速空洞のレイアウトと収束系

極磁石の配置が可能なのは、約190MeV以上であり、150MeVから190MeVの間は、タンクをさらに分割して、2倍の四極磁石を設置するようにしてある。

また、DTLの周波数を高 β リニアックの1/4や1/5でなく(LAMPFは1/4)、1/3に選んだのは縦方向のアクセプタンスを十分にとるためであるが、高 β リニアックへの入射エネルギーを高くしたことも、縦方向のビームの性質の改善に寄付するはずである。

RFQ型リニアックの出射エネルギー即ちDTLの入射エネルギーも、ビーム・ダイナミクスの観点からは、可能な限り高いことが望ましい。それは上述したごとくエネルギーが低くなるに従って加速電場による発散力が大きくなり、それを相殺するためにより大きな収束力を必要とするにもかかわらず、432MHzのような高い周波数でエネルギーが低くなってくるとドリフト・チューブが短くなってきて、大きな収束力をもった四極磁石を内蔵できなくなるからである。さらに、RFQ型リニアックで加速されてきたビームは、縦方向及び横方向ともに非常によい性質のビームであることが期待される。いいかえると、RFQ型リニアックは非常によいフィルターであるということが出来る。従って、RFQ型リニアックから出てきたビームを、ある程度高いエネルギーの所でDTLに入射して、DTL側では十分な余裕をもってビーム・トランスポートしていく方が、高エネルギー側でわずかなビーム損失をもなくす上で効果的だと思われる。それが、比較的高目の3MeVというRFQ型リニアックを選んだ理由である。

このようにして選んだパラメーターで計算された各構成要素の主要なパラメーターの値を表2に示す。縦方向、横方向ともに、RFQ型リニアックで加速されてきたビームのエミッタンスに対し、十分余裕をもったアクセプタンスとなっており、高エネルギーでのビーム損失を極力避けるという設計になっている。それは、一方ではイオン源、RFQ型リニアックに対し、以下で述べるように厳しい要請を課す設計となっていることは否めない。

それはまず、RFQ型リニアックの製作およびチューニングは、その長さが波長に比べ長くなければなる程困難になってくることが上げられる。表2に示した2.7mというのは、432MHzに対しては可能な最大の長さと考えられている。RFQ型リニアックの出射エネルギーが高いにもかかわらず、リニアックの長さがおさえられると、加速電場が上がり、その発散力が大きくなって、アクセプタンスがおさえられるということになる。その結果、小さなエミッタンスの大電流イオン源が必要になる訳である。このような要請をみたすためには、空間電荷効果を考慮するとRFQ型リニアックの入射エネルギーをなるべく高くしたくなる。これは一見、RFQの長さを短くするように見えるが、以下の理由によって実際はRFQの長さを長くしてしまう。即ち、RFQの長さの殆どの部分は、加速よりもむ

表 2. 各構成要素のパラメーター

負イオン源	
型	体積生成型
ピーク・ビーム電流	20 mA
規格化エミッタンス (90%)	1 π mm \cdot mrad
RFQ	
入射エネルギー	50 keV
出射エネルギー	3 MeV
周波数	432 MHz
全長	2.7 m
高周波入力	1 MW
規格化エミッタンス (100%)	2.6 π mm \cdot mrad
DTL	
出射エネルギー	148 MeV
周波数	432 MHz
全長	83 m
セル数	342
タンク数	13
高周波入力	12 MW
規格化アクセプタンス (90%)	8.9 π mm \cdot mrad
高 β リニアック	
出射エネルギー	1010 MeV
周波数	1296 MHz
全長	411 m
セル数	3568
タンク数	152
高周波入力	99 MW
クライストロン出力	3 MW
クライストロン数	36 本
規格化アクセプタンス (90%)	29 π mm \cdot mrad

しる入射エネルギーのビームを断熱的に整形していくのに使われる。入射エネルギーを高くして、ビームの速度が速くなると、その断熱性を保持するためには、RFQ を長くせざるをえなくなる訳である。

このような困難が予想されるにもかかわらず、表 2 に示した性能をみたすイオン源、RFQ を開発する目標をかかげたのは、そうすることによって、高エネルギーでのビーム損失が非常に小さくなり、その結果、実際には大電流のビームを容易に加速できると期待されるからである。勿論、開発の過程において困難さを適切に評価し、全体設計のパラメーターを見直す用意が常に必要であることはいうまでもない。

5. 高周波電力

必要な高周波電力は表 2 に示すように、432MHz が 13MW、1296MHz が 99MW であり、この膨大な高周波電力をパルス幅 $600\mu\text{s}$ 、くり返し 50Hz (デューティ 3%) で供給しなければならない。そのためには、なるべく大きな電力の高周波源 (クライストロン) を使用するのが、コスト的にも、メンテナンス、運転、コントロールの上からも有利であるが、一方 1 台のクライストロンの供給できる最大電力にも限りがある。第 8 章で議論するように、周波数 1296MHz のクライストロンが、パルス幅 $600\mu\text{s}$ で供給できる最大電力は 5~6 MW であり、かつ安定に供給できる電力は 3 MW 程度であろうと想定される。そこで、表 2 に於ては、3 MW の電力を供給するクライストロンを使用するとした場合 36 本必要であるとした。ここで注意せねばならないのは、ここで示した 3 MW は、加速空洞の入力として、3 MW 必要であるということである。導波管、サーキュレーター等での損失、電力の制御等の観点から飽和電力で使用できないこと、その他必要な余裕度を考慮すると、出力電力 4.5MW の仕様のクライストロンが必要であろう。これを十分な技術的余裕を持って安定供給できるためには、最大電力 6 MW 程度の設計のクライストロンを製造し、試験を繰り返して、その結果をもとに 4.5MW に最適化したクライストロンの設計を行うべきであると考えている。そのためには、6 MW のクライストロンに対応するパルス変調器を開発せねばならない。これは又、4.5MW で安定に動作するパルス変調器を開発するために必要なことである。

第 1 節 4) で強調した安定にビームを供給できるリニアックという要請をみたす上で、すぐれた高周波源のシステムを用意することが、最も重要なことであり、我々の開発プログラムの最重点項目となっている。