

PLA - 92 - 1

92 / 4 / 6

# 1 GeV リニアック検討資料

## 1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) Development of the Proton Linac for JHP

著者 (AUTHOR) T. Kato

### 概要 (ABSTRACT)

1988年から始まった、1 GeV 陽子リニアックの開発は、若干の遅れはありながらも、順調に進んでいる。既に、大電力高周波源とイオン源は、要求仕様を満足する成果を上げている。高エネルギー加速部用として新たに開発された ACS 空洞は、優れた高周波特性が達成され、大電力高周波テストを順調に終えている。RFQ と DTL は、ビーム加速テストを目指して大電力モデル空洞を製作中である。92年から93年にかけての低エネルギー入射部ビーム加速テストに備えて、テストスタンドを建設している。開発過程では、多くの創意工夫がなされているので、それらを中心に報告する。

### KEY WORDS:

Ion source, RFQ, DTL, CCL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low level rf, High power rf, Modulator, Control, Operation, Radiation, General, Others

# DEVELOPMENT OF THE PROTON LINAC FOR JHP

T. Kato

National Laboratory for High Energy Physics  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

## まとめ

1988年から始まった、1 GeV 陽子リニアックの開発は、若干の遅れはありながらも、順調に進んでいる。既に、大電力高周波源とイオン源は、要求仕様を満足する成果を上げている。高エネルギー加速部用として新たに開発された ACS 空洞は、優れた高周波特性が達成され、大電力高周波テストを順調に終えている。RFQ と DTL は、ビーム加速テストを目指して大電力モデル空洞を製作中である。92年から93年にかけての低エネルギー入射部ビーム加速テストに備えて、テストスタンドを建設中である。開発過程では、多くの創意工夫がなされているので、それらを中心に報告する。

## 1. 序

大型ハドロン計画の入射器としての大強度 1 GeV 陽子リニアックの開発が進んでいる。その基本的な要求仕様は、エネルギーが 1 GeV、平均電流は 200  $\mu$ A 以上、全長が 500 m 以内の三点である。この実現のために、Table 1-2 と Fig. 1 に示した基本パラメーターを持つ陽子リニアックが提案された。そして、このリニアックの持つ開発課題を、

- 1) 信頼性の高い大電力高周波源、
- 2) 低エミッタンス大強度イオン源、
- 3) 低エネルギー部加速管、
- 4) 高エネルギー部加速管、

の四項目と考えると、1987年より開発研究に着手した。当初から最重要課題とされた高周波源の開発で

Table 1 1-GeV 陽子リニアックの基本パラメーター

ピーク電流	20 mA	ビームパルス幅	400 $\mu$ s
繰り返し周波数	50 Hz	高周波パルス幅	600 $\mu$ s

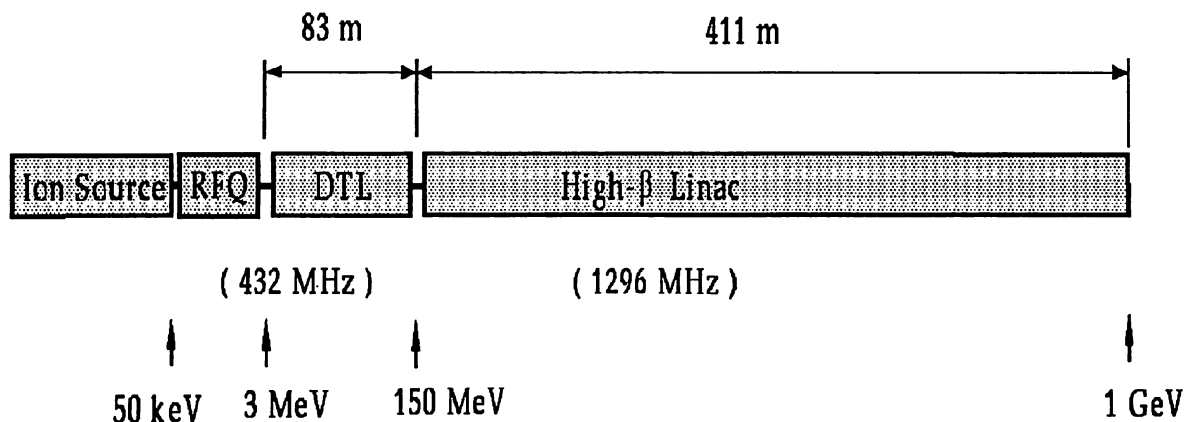


Fig. 1 1-GeV 陽子リニアックの構成。

は、89年にL-band (1296 MHz) が完成し、  
 又、UHF-band (432 MHz) は、大電力試験  
 を91年度内に行なう予定で準備している。  
 イオン源と高エネルギー部加速管 (CCL)  
 は、既に期待通りの性能を達成しており、  
 低エネルギー部加速管 (RFQとDTLの第一  
 タンク) はコールドモデルによるテストを  
 終えて、大電力モデルを製作中である。92  
 年から93年にかけて5 MeVのビーム加速テ  
 ストを控えて、最終段階に入った開発の現  
 状と予定を報告する。

Table 2 加速管の基本パラメーター

	RFQ	DTL	CCL
Win (MeV)	0.05	3	148
Wout (MeV)	3	148	1010
Frequency (MHz)	432	432	1296
Length (m)	2.7	83	411
Number of cells		342	3568
Number of tanks	1	13	152
RF power (MW)	1	12	99
Number of klystrons	1	12	38
Bore diameter (cm)		1	3
Acceptance ( $\pi$ mmmr)	1.1	8.9	29
Accelerating field (MV/m)		3	3.6 - 4.4

## 2. 1 GeV 陽子リニアックの特徴

物理実験用 (長期連続運転を行なう)  
 の大強度陽子リニアックの運転時間を制限  
 したり、加速ビーム強度を制限する要因  
 は、次の二点と考えられる。

- 1) ビームロスによるリニアックの放射化。
- 2) 加速器の故障。特に高周波源の性能。

これに対処する為に、以下の方策を採用した。

- A. transient(パルスの立ち上がり部分) と transition(加速管の構造が大きく変化する地点) によるビーム性質の劣化を最小にする為に、長パルスと低い繰り返しを採用し、beam dynamics の突然の変化が少ない設計とした。
- B. ビームエミッタンスを小さく、アクセプタンスを大きくする。特に、縦のエミッタンスに注意する。
- C. 加速電場のチューニングのパラメーター数を減らす。

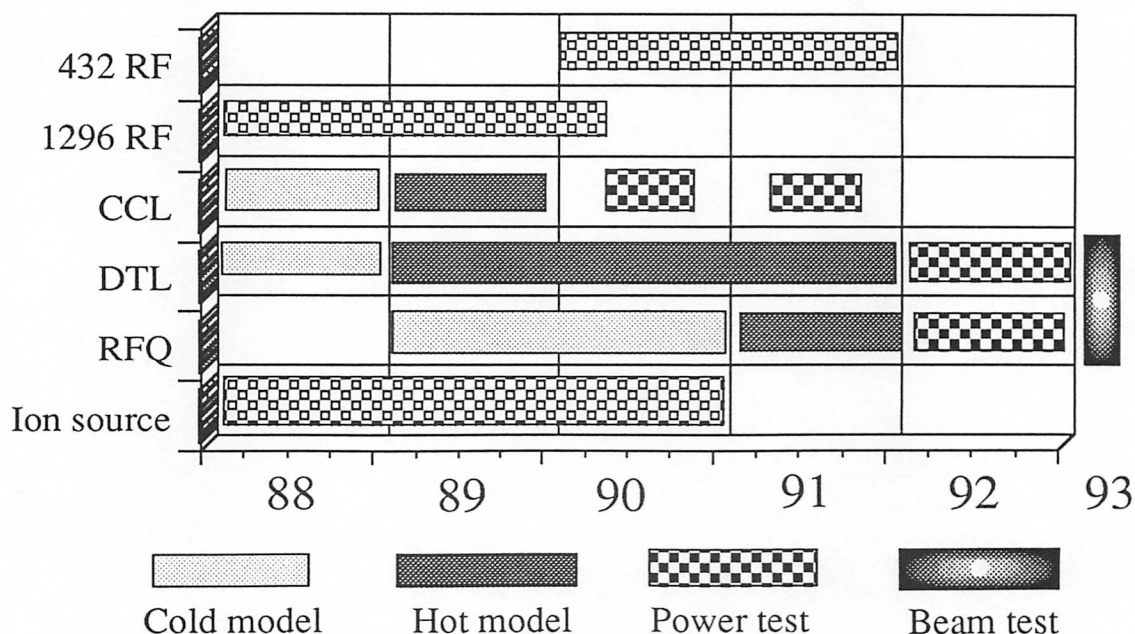


Fig.2 陽子リニアック 開発のスケジュール。

D.大出力のクライストロンを採用して、信頼性の高い高周波電源を開発する。

以上の処方箋に従いつつ、互いに反する要求の間の最適化の結果が Table 1 - 2 と Fig.1 である。特筆すべきは、全体のシャントインピーダンスを高くする為に高い周波数を選択した事、全ての加速管の電源にクライストロンが使用可能な事、予定されている敷地長さの制限と必要なビームダイナミクス計算から加速電場は決められたが、その値は、全系のコストの最適化の観点からみても合理的であり、クーリング等運転のしやすさから考えても合理的である事、等である。

### 3. 開発の現状

#### 3.1 全体計画

1987年に大強度陽子リニアックワーキンググループが結成されて、その後1年間のデザインスタディを経てから、約5年間の予定で開発研究が行なわれており、1993年以降5~10 MeVのビーム加速テストを予定している。これまでの経過と今後の予定をFig. 2に示す。

high-dutyのリニアックの性能をサポートする高周波源の開発は、計画当初の予定通り順調に進み、1296 MHz RFでは、6 MW クライストロンと15 MW 陽極変調器により構成されるシステムが、若干の改良を残すまでに完成され、又、432 MHz RFでは、2 MW クライストロンと陽極直流電源及びアノード変調電源より構成されるシステムが製作され、1991年度に電力テストが予定されている。加速管では、high- $\beta$ 用のCCL(coupled cavity linac)として、4スロット型のACS(annular coupled structure)とマルチセル型のブリッジカップラーが開発され、既に高電力試験を順調に終えている。RFQとDTLは低電力モデル空洞によるテストを終えて、高電力モデル空洞を製作中であり、いずれも1992年度に高電力テストと、93年にかけてビーム加速テストを予定している。イオン源は、体積生成型のH<sup>-</sup>イオン源の開発により、期待された性能を、ほぼ達成している。

1993年に行なわれるビーム加速テストでは、加速ビームの性質を大きく左右する低エネルギー加速部におけるビーム qualityの検証が目的とされる。従って、そこでは正確なビーム診断の技術が必要となり、1992年度に精力的に開発される予定である。残された加速管関係の開発は、low- $\beta$ 領域のACSとhigh- $\beta$ 領域のDTLであるが、本質的な難問は無いと予測している。

各開発部門では、信頼性と性能を高める為の多くの創意工夫が為されているので、それらを中心に報告する。

#### 3.2 二つの特徴

##### 3.2.1 CAD (Computer Aided Design) の利用

開発の第一の目的は、優れたハードを作る技術を確立する事である。この数年来の開発の様子を見ると、初期段階のハードの設計開発に占めるコンピューターの利用(CAD)が顕著となっている。しかも、コンピューターの進歩と優れたソフトの進歩が相俟って、従来は諦めていた分野において(三次元計算、supercomputerの利用)、積極的に利用されている。今後もこの傾向は増大すると予測されるので、ここに特にまとめておきたい。主な題目を列挙すれば

- 1) effects of slots in ACS
- 2) PISL( $\pi$ -mode stabilization loop) in RFQ
- 3) end-part of the vane in RFQ
- 4) post-coupler analysis in DTL
- 4) rf coupler for rf structures
- 5) rf window
- 6) cooling design in rf structures
- 7) beam dynamics with space-charge effects

### 8) rf circuit simulation

以上の各項目において、CAD が非常に有効に利用されている事はまちがいない。CADの利用により、大幅な省力化と適切な設計が迅速にされていると思われる。蛇足ながら、ここでは、コンピューターは強力な開発手段となって来たと述べているだけであり、ハードの出来具合は、CAD後の問題が大きい。

### 3.2.2 熱的安定性への配慮

大きな計画であっても要求仕様が変更される事は珍しくない。問題は、殆どの場合、より難しい仕様になる事である。ハードは一度製作してしまうと、簡単には置き代わらないから、潜在的な対応能力を高めておく必要がある。逆に、こうした配慮は、仕様通りの運転法の安定性を高める結果となる。この辺の事情について一つだけ言及する。三種類の加速管(RFQ, DTL, ACS) は、上流から下流まで全て熱伝導度が優れている純銅で製作されている。即ち、duty factor の増加に対応しやすく作られている。ビームロスを考慮する時にも、duty factor が増加した時にどうなるかという視点で考えている。反面、純銅の採用によって、現時点では、いくつかの加速管製作上の困難を増加している事は否定できない。

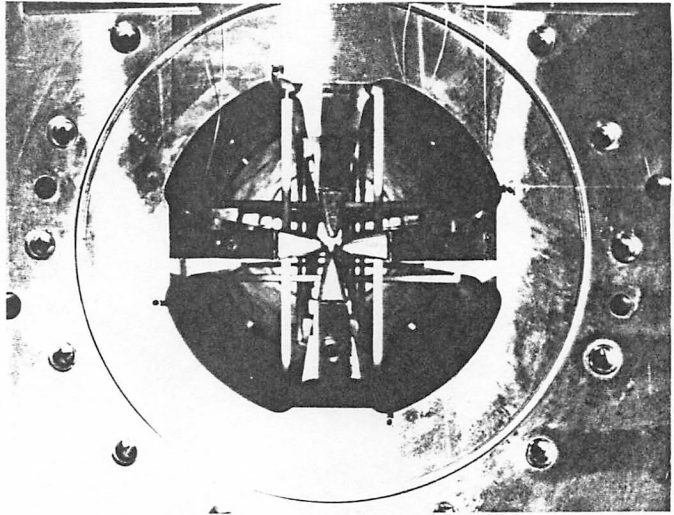


Fig. 3 PISLを装着したRFQコールドモデル空洞。

## 3.3 各部門の開発状況

### 3.3.1 イオン源

小さいエミッタンス ( $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ) で、大電流 (20 mA 以上) のH<sup>-</sup> ビームを安定に供給する為に、体積生成型のイオン源の開発に努力した結果、仕様をほぼ満足できる様になり、現在は、イオン源直後のビームラインの開発とエミッタンスの改良等の性能向上に努めている。

### 3.3.2 RFQ (Radio Frequency Quadrupole)

周波数432 MHz のRFQ は、3 MeV まで加速するので、その長さは 2.7 m と長くなり、要求される製作精度は極めて厳しくなる。コールドモデルでは、 $\pm 20\ \mu\text{m}$  の精度で製作を行ない、良好な電磁

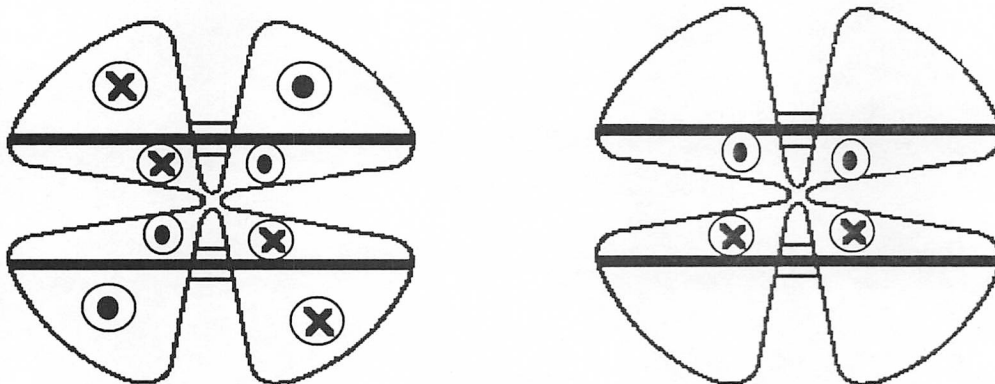


Fig.4 PISL が存在する時の四極モード(左図) と二極モード(右図) の磁場分布。

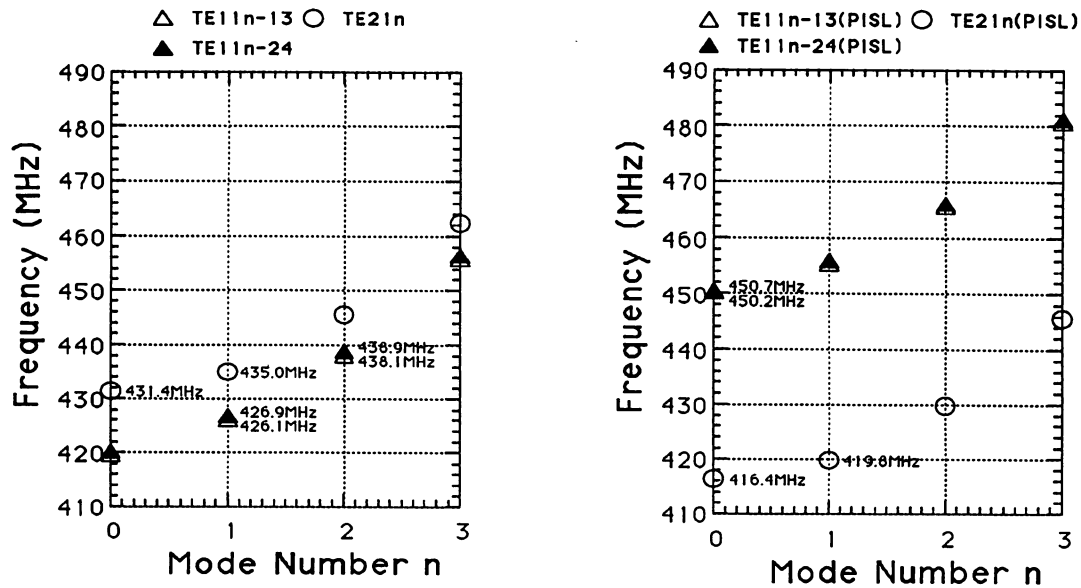


Fig. 5 RFQ コールドモデル空洞の電磁場モード。左図はPISLを装着しない時、右図はPISL装着後。

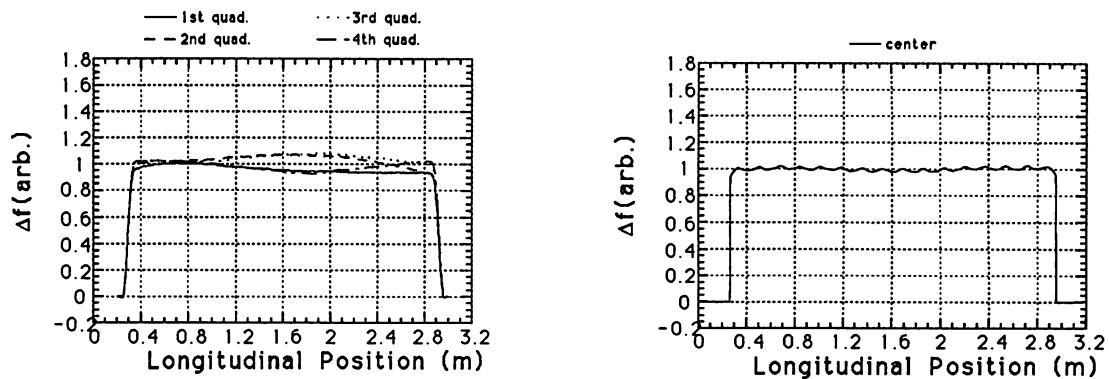


Fig. 6 RFQ コールドモデル空洞の軸方向電場分布。左図はPISLを装着しない時、右図はPISL装着後。

場分布を達成できたが、二極モードが混ざる事による不安定性を改良する為に、従来広く使用されていた VCR (vane coupling ring) に替わって、新しい安定化法 PISL ( $\pi$ モード安定化ループ) を工夫した。Fig. 3 に PISL を含む RFQ のコールドモデルを示す。PISL は、二極モードと四極モードの電磁場分布の違いを巧妙に利用して (Fig. 4)、二極モードの共振周波数を選択的に高く追いやり、基本モード (TE210) の安定性を高める効果を持つ。この方法は冷却を含む製法において優れている上に、高周波特性も極めて良好である事が実証された。Fig. 5 には、PISL 設置前後のモード分布を示してある。左図に示すように、本 RFQ の場合には、PISL が無くても、TE210 モード (四極モード) の近辺には他のモードは無いが、PISL により、全ての TE11 モード (二極モード) は大きく周波数が上昇している事がわかる (右図)。両者の基本モードの電場分布を Fig. 6 に示した (周波数変化で表示している)。空間電荷効果を一層適切に考慮して、新たに開発した設計コード (KEKRFQ) により設計した大電力モデルを製作中である。ここでは、二次元熱解析の詳細な計算結果を踏まえて、冷却構造を決めている。

92 年から 93 年にかけて、空洞の大電力テストとビーム加速テストを予定している。

### 3.3.3 DTL (Drift Tube Linac)

開発の最初の2年間で、第一にドリフトチューブの製作法の開発を行なった。その結果、二種類の製作法(銅電鍍法と電子ビーム熔接法)を確立した。その後、コールドモデルによる電場の安定化テスト等を終えて、第1タンクの前半部分(3 MeV - 5.4 MeV)の大電力モデルを製作している(Fig. 7)。そこでは、より優れた性能と安定性を求めて、新しい要素技術の開発を行なっている。それらを列挙すれば

- 1) 永久磁石片の製作法、
- 2) 永久四極磁石の組立法、
- 3) ドリフトチューブの製作法、
- 4) ステムの据付法、
- 5) ユニットタンクの連結法、

である。これらの開発要素の内容は非常に意欲的なものなので、反面、多くの技術的な問題を抱えていたが、今や、開発の最終段階に到達したと言えよう。Nd-Fe-B系磁石で作る永久四極磁石は、磁氣的にも機械的にも特性の良く揃った16片の磁石片を円周方向から寄せ集めて、組み立てる方式である(Fig. 8)。ドリフトチューブの真空シール法としては、焼きばめ法が用いられる予定であり(Fig. 9)、ステムのタンク内壁への固定法としては、テーパー詰め合いが使用される。タンク本体は長さ60 cm程度のユ

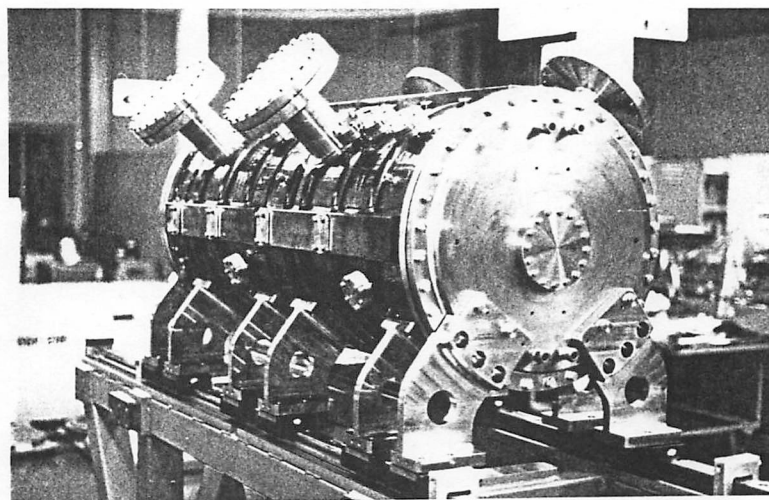


Fig. 7 製作されている DTL の大電力モデル空洞。

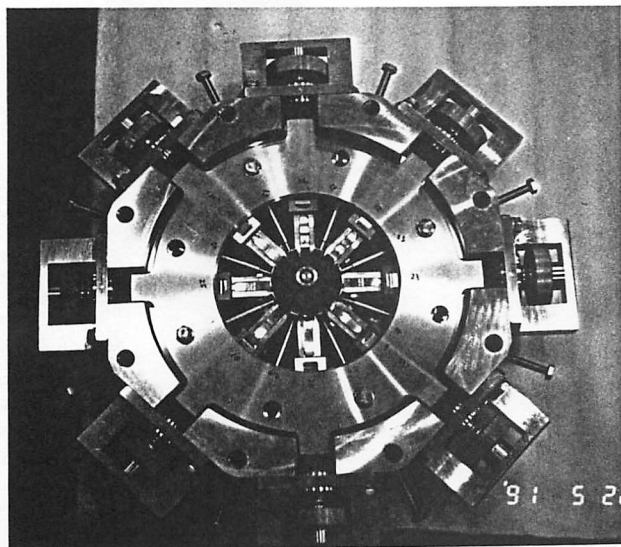


Fig. 8 治具により組立てられる永久四極磁石。

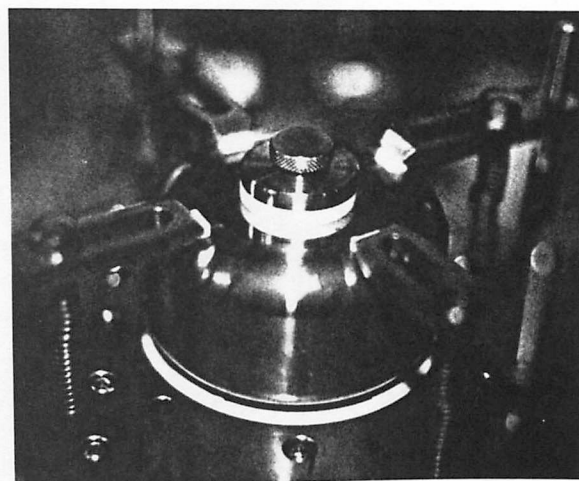


Fig. 9 焼きばめ法によるドリフトチューブ。

ニットタンクをスタックして製作する。92年から93年にかけて、空洞の大電力テストとビーム加速テストを予定している。

### 3.3.4 CCL (Coupled Cavity Linac)

CCLの構成図を Fig. 10 に示す。ひとつのタンク内のユニットセルの寸法は全て同一であるが、タンク毎にユニットセルの寸法が変化する。従って、開発要素は、

- 1) ユニットセルの構造
- 2) タンクの製法 (high- $\beta$  用とlow- $\beta$  用)
- 3) タンクとタンクをつなぐブリッジカップラー

の三点となる。

ユニットセルとして、3次元電磁場計算とモデル空洞による実験及び熱構造解析に基づいて、ACS 空洞 (Annular-coupled structure) を初めて実用化する目処をつけた。2スロット型のACS は、スロットのあけ方が互い違いの場合には、カップリングセルに四極モードが励起されて、全体のQ値の劣化を招き、スロットのあけ方を同方向とすれば、TM110 モードが加速モードに混ざり込む事が指摘されていた(Fig. 11 左)。しかし、スロット数を4に選び、適切な設計を行えば、TM110 モードを上を追いやり(Fig. 11 右)、Q値の劣化も少なくする事が出来る事が見いだされた。 $\beta$  ( $v/c$ ) = 0.78 に対応する空洞では、シャントインピーダンス 42 M $\Omega$ /m が得られた。理論値に比べて、22 % 低い値である。Fig. 12

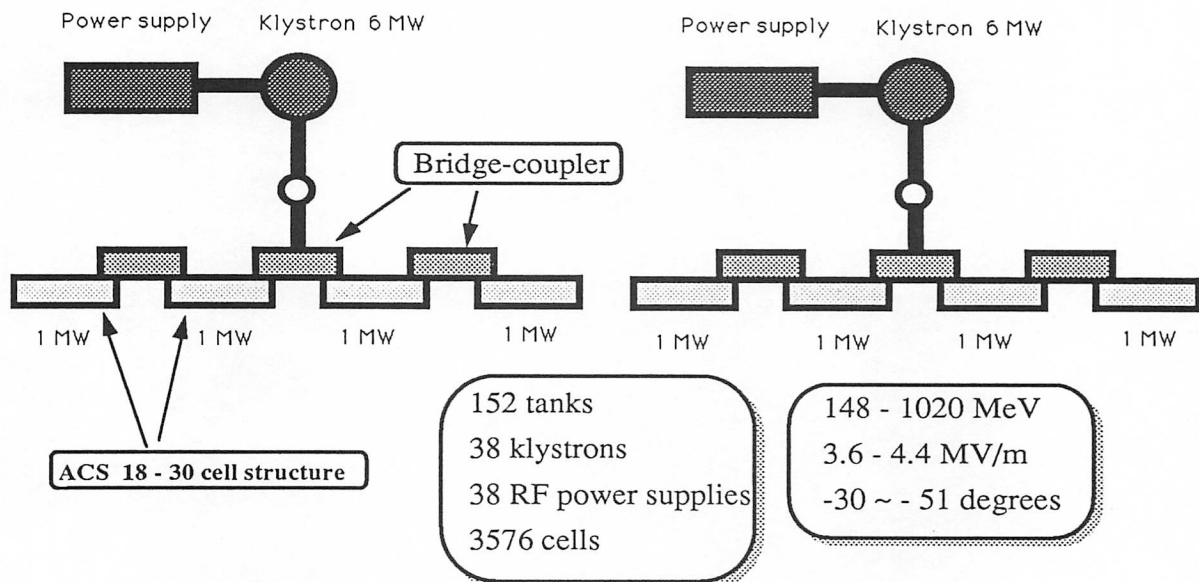


Fig. 10 CCL の構成 (高周波源、ブリッジカップラー、ACS ユニットタンク)。

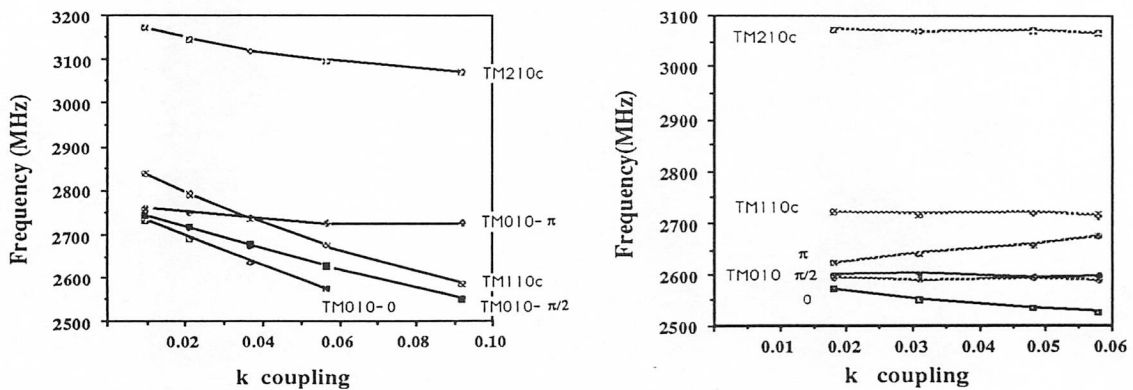


Fig. 11 2スロット ACS (左) と4スロットACS (右) の主要なモードのカップリング依存性。



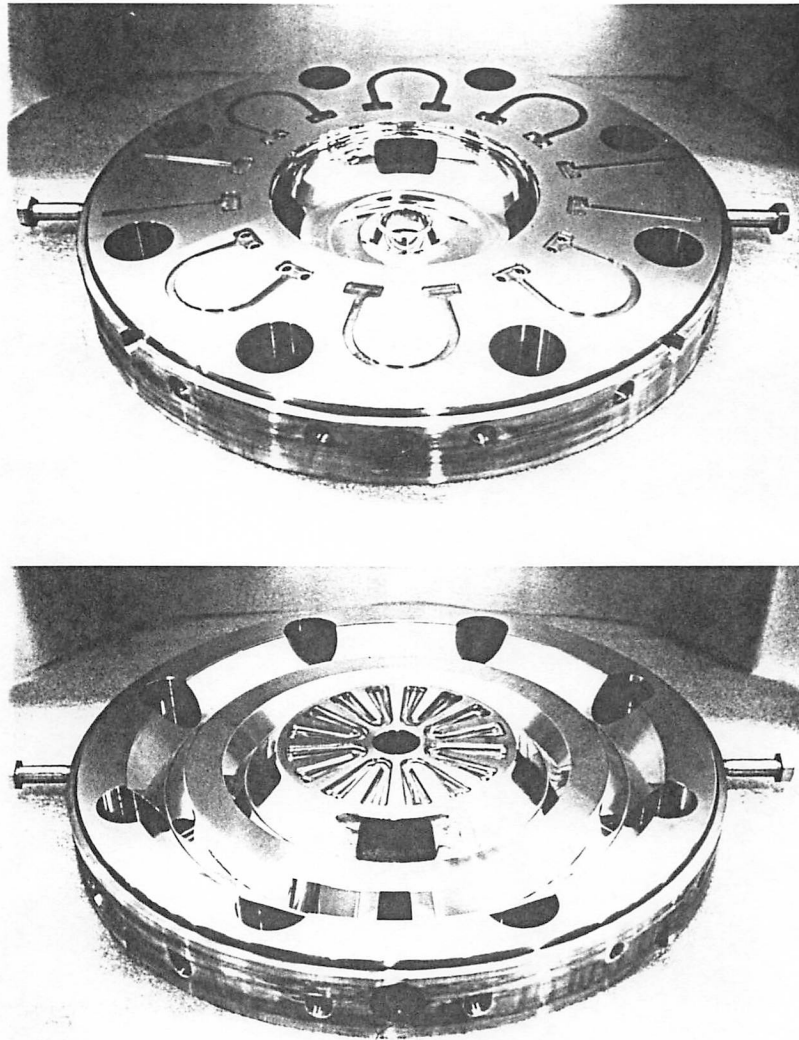


Fig. 12 4 スロットACS のユニットセル。上図はギャップ中心、下図はカップリングセルの中心位置にて、切断している。

にユニットセルを示す。図に示されている馬蹄形の溝は、詳細な三次元熱計算に基づいて決められた冷却水路である。4スロット型のACSの対称性は優れているが、スロットの数が多し、外径がやや大きくなる事、そして、ロスアラモスで使用されているSCS(side coupled structure)に比べて、Q値が5%程低い事等の欠点がある。加速管のタイプの選択にあたっては、対称性に優れている点を重視した。

ブリッジカップラーは、加速空洞の一部を構成する空洞として、加速管の安定な動作に重要な働きをしている。これを単一空洞で作ると、周波数の割には、長さが長いので、モードミキシングの問題が起こり、厄介

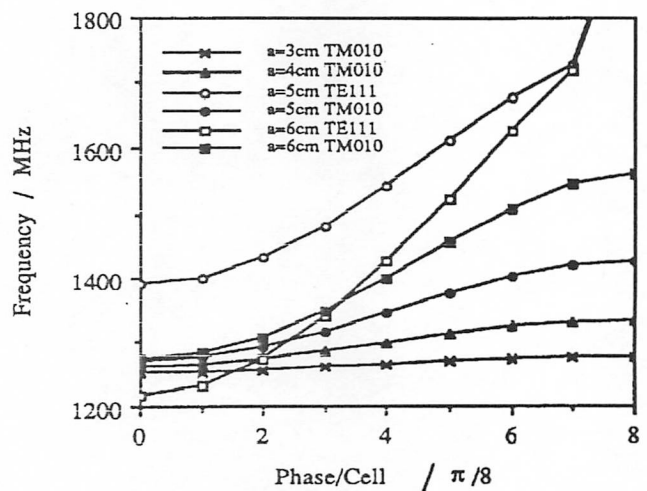


Fig. 13 9セルブリッジカップラーのモード分布(計算)。横軸は隣合うセルの間の位相変化。a = disc radius.

である。そこで、新たに disk-loaded 型マルチセルから成るブリッジ空洞を開発し (Fig. 13)、期待通りの性能を達成する事ができた。

ACS コールドモデル空洞による試験の後、加速セル 5 セルと 5 セルをブリッジカップラーにより結合した高電力モデル空洞を製作した (Fig. 14)。本空洞は期待通りの高周波特性を持ち、高電力試験においても、ピーク値で定格の 2 倍までなら問題の無い優れた性能を示した。初めての高電力エージングの記録を Fig. 15 に示す。

引き続き、結合スロットの効果を更に詳細に検討する為のモデルや、low- $\beta$  用モデルを開発している。

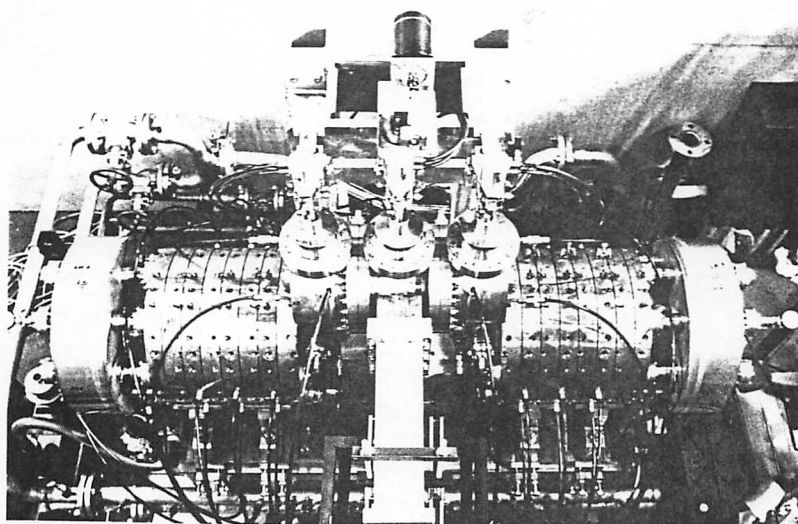


Fig. 14 10 セル大電力 ACS モデル空洞。

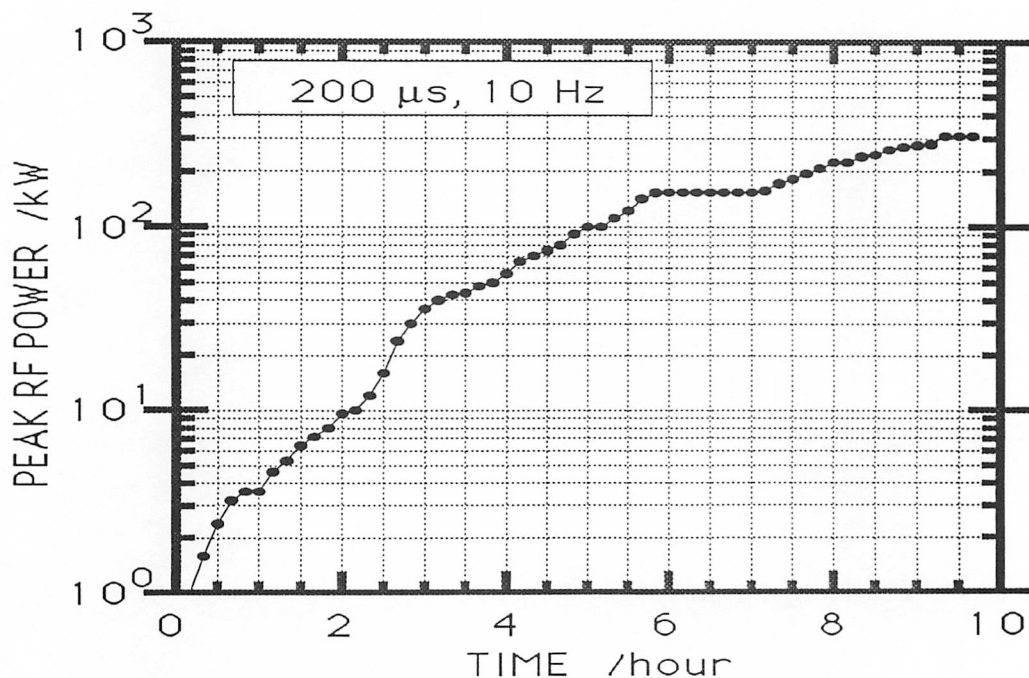


Fig. 15 ACS 大電力モデル空洞の初めてのエージングの記録。設計ピーク値は 300 kW。(300  $\mu$ s, 50 Hz, 450 kW)と(100  $\mu$ s, 10 Hz, 600 kW)を容易に達成できた。

### 3.3.5 大電力高周波源

当初から、最重要課題として認識されていた高電力高周波源の開発は、計画の初期段階から精力的に行なわれた。Table 3-5 にその仕様をまとめた。最大電力15 MW の陽極変調器とクライストロン(トムソンTH2104A)により構成されるL-band 高周波電源 (Fig. 16-17) は、既に、89年に完成されて以来、順調に稼働しており、CCLの大電力テスト、高周波窓のテスト等に使用されている。そして、パルス幅を長くする改造(200 → 600 μs)と、長パルスで高デューティ電源用のスイッチング素子として優れているサイリスタを使用する事等の改良を試みている。又、カソード直流電源と modulation anode パルス電源が完成したUHF 電源 (Fig. 18) は、91年度内に、トムソンTH2134 を使って 高周波電力テストを行なう予定である。

Table 3 クライストロンの基本パラメーター

	TH2104A	TH2134
Frequency (MHz)	1296	432
Cathode voltage (kV)	140	110
Beam current (A)	105	45
Peak rf power(MW)	6	2
Efficiency (%)	40	40
Rf pulse length (μs)	600	600
Repetition rate	50	50

Table 4 L-band 電源のパラメーター

Peak power (MW)	15
Repetition	50
Ave. power (MW)	0.45
PFN cell number	50
Impedance (Ω)	26.7
Charging voltage (kV)	40
Inductance (μH)	160
Capacitance (μF)	0.22

Table 5 UHF - band 電源のパラメーター

Peak power (MW)	5.5
Max. DC voltage (kV)	110
Peak current (A)	46
Ave. current (A)	1.5
Modulation anode voltage (kV)	40
Peak current (A)	1
Pulse length (μs)	650

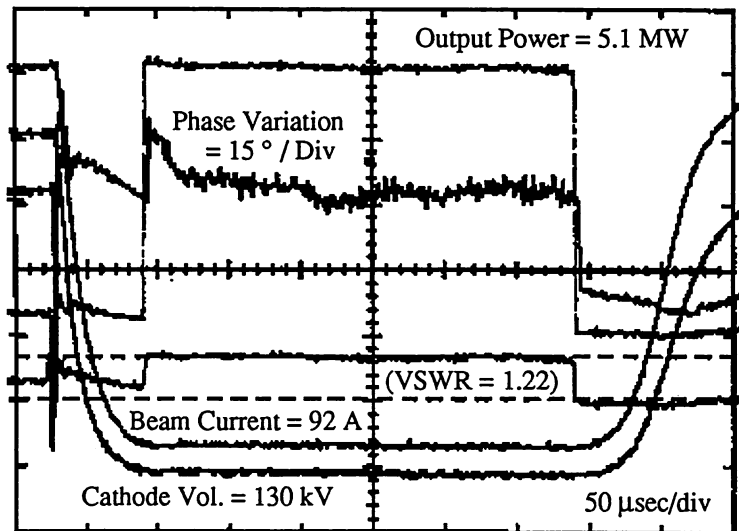


Fig. 16 L-band 電源のパルス波形 (5 MW 出力時)。

## 4. 今後の開発計画

### 4.1 入射部ビーム加速テスト

92年度から93年度にかけては、開発の集大成ともいえるべき、低エネルギー加速部のビーム加速テストを予定している。そこでは、イオン源の低エミッタンスビームは、ビームラインをへてRFQに入射され、3 MeVまで加速された後、再びビームラインを通過してDTLへ入射され、5.4 MeVまで加速される。加速ビームの基本的性質は、低エネルギー加速部で決まってしまうと言っても過言ではない。従って、ビームテストにおいては、基本的な加速管のパラメーターの確認と同時に、ビームライン

を含めて、加速ビームの性質をコントロール出来る事が重要となる。また、ビーム加速テストの成果は、ビーム診断の技術に大きく依存する。これは、92年度に精力的に開発すべき課題となる。

ビーム加速テストの予定されている KEK のアSEMBリーホールには、既に、高周波関係の設備が設置されており、92年夏から行なわれる予定の RFQ の高電力試験の準備が始められている (Fig. 19)。

#### 4.2 今後の開発課題

更に、今後の開発課題としては、以下が考えられる。

##### 1) 加速管関係

主要な部分は成果が出たとはいえ、幾つかの未着手部分の開発。

各種試験の結果から導きだされる改良。

ビーム加速テストのエネルギーの延長(10 MeV 程度)。

これは、入射部のビームテストのエネルギーを10 MeV 程度まであげる方が、ビームの性質等の物事がはっきりするからである。

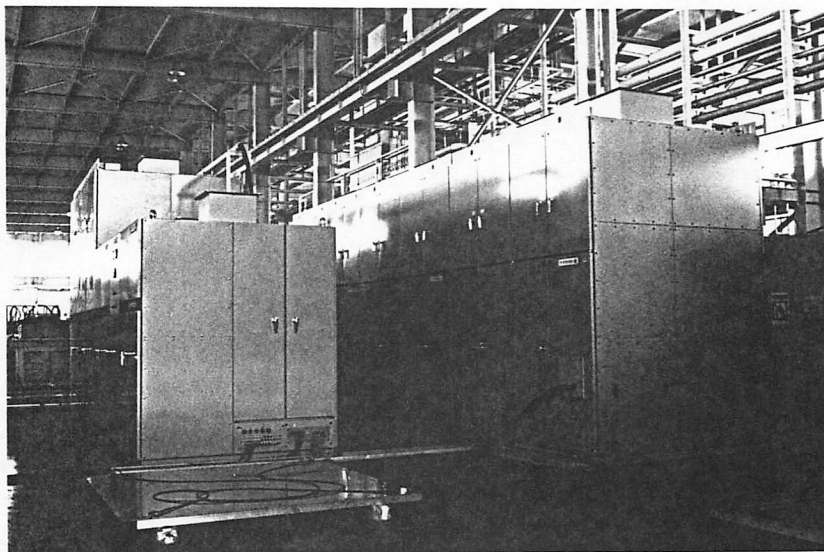


Fig. 17 L-band 高周波電源。コントロール部と高圧部 (左側)とパルスフォーミングネットワーク部 (右側)。

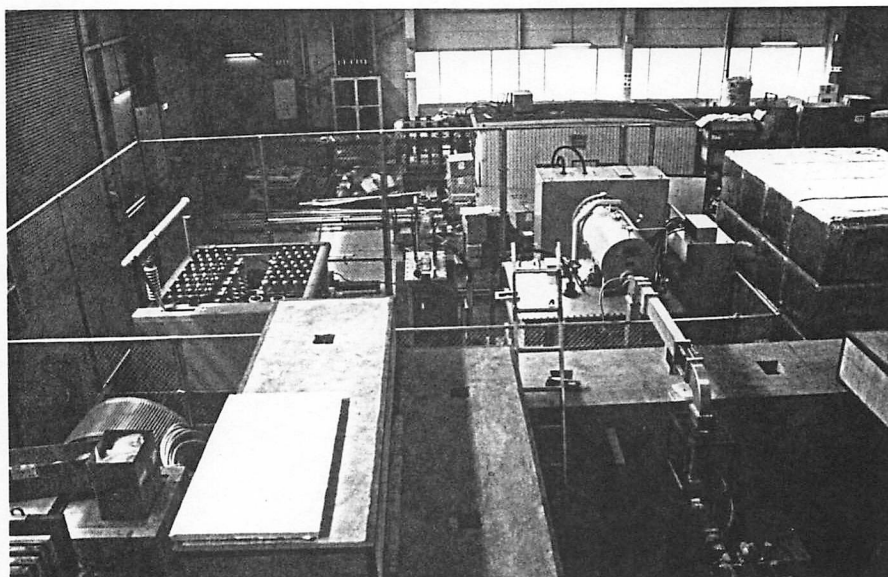


Fig. 18 UHF-band 高周波電源 (奥)。手前は ACS 大電力テストスタンド。

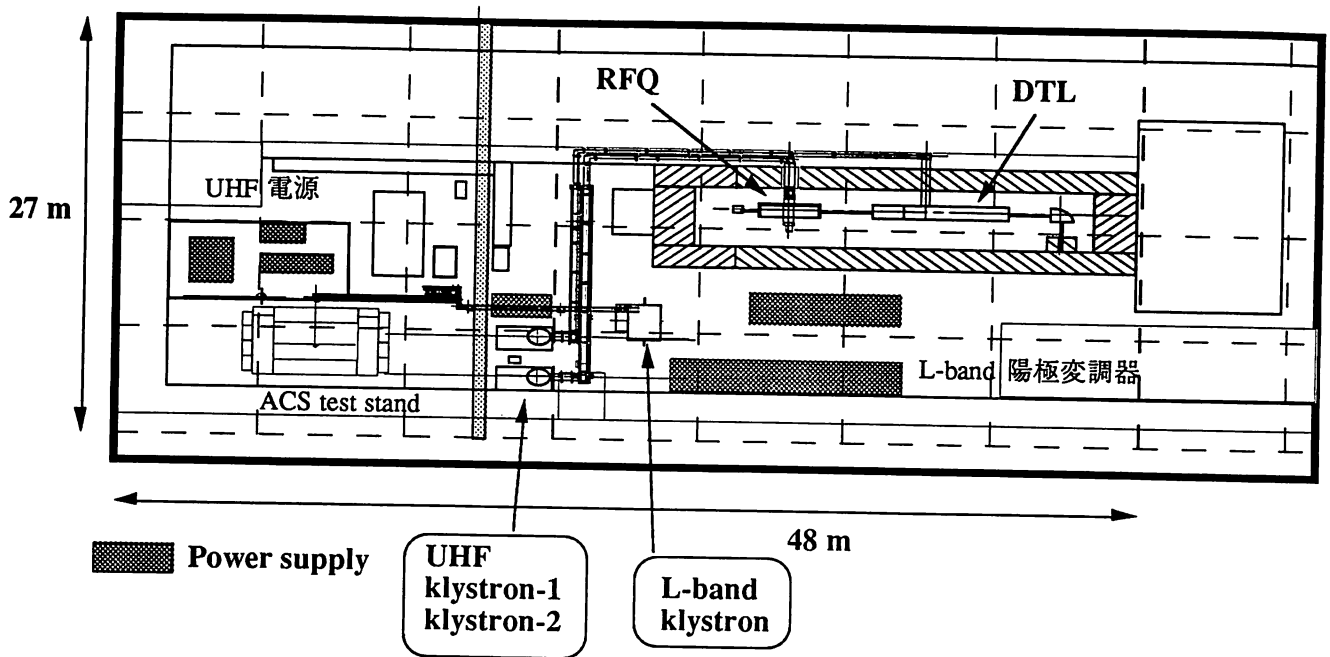


Fig. 19 アセンブリーホールに建設された高電力電源と建設中のビーム加速テストスタンド配置図。イオン源と RFQ, DTL を使って、ビームを 5-10 MeV まで加速して、リニアックの入射部の基本的性能を検証する予定である。

2) ビームライン関係

ビームラインを構成する要素については、開発が遅れている。但し、既存の技術で対応出来る部分が多いので、これまで優先されなかった。

3) 高周波関係

432 MHz RF の高周波試験。

1296 MHz RF の改良。

既に、CCL と L-band 大電力電源は、良い結果を生んでいるので、今後予定される低エネルギー入射部ビームテストにおいて、きちんと良い結果を出す事が、1 GeV リニアック全体の成功への道と考え、総力を結集したいと考えます。

最後に、これまでの研究開発が順調に行なわれたのは、各方面からの御支援の結果であり、ここに感謝致します。

参考文献

Y. Yamazaki 教授が作成された項目別文献リストを付加しました。なお、少し重複しますが、内部資料として、"1 GeV リニアック検討資料(全 101 篇)" がありますので、あわせて御利用下さい。

## GENERAL

1. M. Kihara, "Outline of the Japanese Hadron Facility," Proc. International Workshop on Hadron Facility Technology, 1987, Los Alamos, LA-11130-C p.67; KEK Preprint 86-106.
2. T. Kato, "1 GeV Proton Linac," Proc. 12th Linear Accelerator Meeting in Japan, 201 (1987).
3. M. Kihara, "Present Status of the Japanese Hadron Facility", Proc. Advanced Hadron Facility Accelerator Design Workshop, 1988, Los Alamos, LA-11432-C p.4.
4. Y. Yamazaki, S. Anami, H. Baba, S. Fukumoto, T. Kageyama, T. Kato, M. Kihara, Y. Mori, A. Takagi, E. Takasaki, A. Ueno, S. Arai and N. Tokuda, "The 1 GeV Proton Linac for the Japanese Hadron Facility," Proc. Advanced Hadron Facility Accelerator Design Workshop, 1988, Los Alamos, LA-11432-C p. 80 ; KEK Preprint 87-159.
5. Y. Yamazaki, S. Anami, S. Arai, H. Baba, S. Fukumoto, T. Kageyama, T. Kato, M. Kihara, T. Kubo, Y. Mori, Y. Morozumi, F. Naito, M. Ono, E. Takasaki, N. Tokuda and A. Ueno, "The 1 GeV Proton Linac for the Japanese Hadron Facility", Proc. 1988 Linear Accel. Conf. 79 (1988), CEBAF-Report-89-001, 79 (1988).
6. Y. Yamazaki, T. Kato and M. Kihara, "The 1 GeV Proton Linac for the Japanese Hadron Facility," Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 242 (1988).
7. "Report of the Design Study on the Proton Linac of the Japanese Hadron Project [I]," (in Japanese), JHP-10 or KEK-Internal 88-8.
8. Y. Yamazaki, S. Anami, S. Arai, H. Baba, T. Kageyama, T. Kato, M. Kihara, T. Kubo, Y. Mori, Y. Morozumi, F. Naito, M. Ono, E. Takasaki, N. Tokuda, and A. Ueno, "Development of the 1 GeV Proton Linac for the Japanese Hadron Facility," Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. 947 (1989).
9. T. Kato, Y. Yamazaki and M. Kihara, "The 1 GeV Proton Linac for the Japanese Hadron Project," Proc. 2nd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, JAERI, 177 (1990); KEK Preprint 89-187.
10. E. Takasaki, S. Anami, H. Baba, S. Fukumoto, T. Kageyama, T. Kato, M. Kihara, T. Kubo, Y. Mori, Y. Morozumi, F. Naito, M. Ono, A. Takagi, A. Ueno and Y. Yamazaki, "Developments of Accelerator Components for a 1 GeV High Intensity Proton Linac of JHP", Proc. 2nd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, JAERI, 177 (1990); KEK Preprint 90-16.
11. Y. Yamazaki, "Proton Linear Accelerator Development for the Japanese Hadron Project," Proc. 18th INS International Symposium on Physics with High-Intensity Hadron Accelerators, INS, 1990; KEK Preprint 90-15.
12. "Report of the Design Study on the Proton Linac of the Japanese Hadron Project [II]," (in Japanese), JHP-14 or KEK-Internal 90-16.
13. Y. Yamazaki and M. Kihara, "Development of the High Intensity Proton Linac for the Japanese Hadron Project," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 543 (1990); KEK Preprint 90-91.
14. Y. Yamazaki and T. Kato, "A Proposal for a High-Intensity, High-Energy, Continuous-Beam Proton Linac," Submitted to the First International Workshop on High Mean Power Particle Accelerators for Technology, Gudauri, Georgia, USSR (1991); KEK Preprint 91-11.
15. T. Kato, "Development of the JHP 1-GeV Proton Linac," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 115 (1991) (in Japanese).
16. Y. Yamazaki, "Development of New Techniques for the JHP 1-GeV Proton Linac," Proc. 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, 102 (1991).

## ION SOURCE

17. Y. Mori, T. Okuyama, A. Takagi, and D. Yuan, "Development of the KEK Volume H- Ion Source," submitted to Nucl. Instr. Meth.; KEK Preprint 90-64.
18. T. Okuyama, Y. Mori, A. Takagi, and A. Ueno, "Cesium Effect on the Volume H- Ion Source," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 196 (1990) (in Japanese).
19. Y. Mori, T. Okuyama, A. Takagi, and D. Yuan, "Cesium Effect on Volume H- Ion Source," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 680 (1990).

## RFQ

20. N. Tokuda, S. Arai and N. Ueda, "Design Study on the Proton RFQ for the Japanese Hadron Facility," Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 248 (1988).
21. A. Ueno, Y. Mori, A. Takagi and Y. Yamazaki, "Design Study of 432 MHz RFQ Linac and Construction of Cold Model" (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 90 (1989).
22. A. Ueno and Y. Yamazaki, "New Field Stabilization Method of a Four-Vane Type RFQ," Nucl. Instr. Meth. A300, 15 (1991); KEK preprint 90-38.
23. A. Ueno and Y. Yamazaki, "New Beam Dynamics Design Procedure for RFQ," 1990 Linear Acc. Conf., 329 (1990); KEK Preprint 90-105.
24. A. Ueno, T. Kato, and Y. Yamazaki, "The  $\pi$ -Mode stabilizing Loop for Four-Vane Type RFQ," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 57 (1990); KEK Preprint 90-106.
25. A. Ueno, Y. Mori, A. Takagi, C. Kubota, and Y. Yamazaki, "RF Field Measurement of an RFQ Cold Model Cavity for the JHP," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 60 (1990); KEK Preprint 90-104.
26. A. Ueno and Y. Yamazaki, "Effect of  $\pi$ -Mode Stabilizing Loops in an RFQ Model Cavity for the JHP," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 187 (1991) (in Japanese).
27. K. Yoshino, A. Ueno, and Y. Yamazaki, "Heat-Structure Analysis of a 432 MHz RFQ Linac," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 239 (1991) (in Japanese).
28. K. Yoshino, A. Ueno, and Y. Yamazaki, "Heat-Structure Analysis of a 432-MHz RFQ for the JHP," Proc. 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, 119 (1991).

## DTL

29. T. Kato, Z. Igarashi, C. Kubota, F. Naito, E. Takasaki, T. Takenaka and Y. Yamazaki, "Proton Drift Tube Linac for the Japanese Hadron Facility," (in Japanese), Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 257 (1988).
30. F. Naito, T. Kato, E. Takasaki and Y. Yamazaki, "Study of the 432 MHz DTL cold model," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 86 (1989).
31. E. Takasaki, T. Kato, F. Naito, K. Nanmo and Y. Yamazaki, "On the Permanent Quadrupole Magnets for the JHP Drift Tube Linac," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 355 (1989).
32. F. Naito, T. Kato, Y. Yamazaki and E. Takasaki, "A Tuning Method of Post Couplers for a Low  $\beta$  Drift Tube Linac", Proc. of the XIV International Conference on High Energy Accelerators, 1989, Japan; Part. Accel. 32, 27(1990); KEK Preprint 89-115.
33. F. Naito, T. Kato, E. Takasaki, and Y. Yamazaki, "Development of 432 MHz DTL," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 41 (1990) (in Japanese).
34. F. Naito, T. Kato, Y. Yamazaki and E. Takasaki, "Development of the DTL for the JHP," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 695 (1990); KEK Preprint 90-100.
35. F. Naito, T. Kato, Y. Morozumi, Y. Yamazaki and E. Takasaki, "Design Features of the Input Coupler for the DTL," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 156 (1990); KEK Preprint 90-99.
36. Y. Iino, T. Adachi, M. Ozaki, T. Kato, F. Naito, E. Takasaki, and Y. Yamazaki, "Fabrication Technique of Drift Tube with Permanent Quadrupole Magnet for the Linac of the JHP," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 123 (1990); KEK Preprint 90-109.
37. F. Naito, T. Kato, E. Takasaki, Y. Yamazaki, Y. Iino, T. Adachi, T. Kawasumi, and M. Ozaki, "Development of the High Power Model of 432 MHz DTL," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 193 (1991) (in Japanese).

## CCL

38. Y. Yamazaki, "Stability of the Standing-Wave Accelerating Structure Studied with a Coupled Resonator Model", Proc. of the XIV International Conference on High Energy Accelerators, 1989, Japan; Part. Accel. 32, 39(1990); KEK Preprint 89-122.
39. T. Kageyama, T. Kato, Y. Morozumi, Y. Yamazaki and K. Yoshino, "Design Study of Coupled Cell Linear Accelerator Structures of the JHF 1 GeV Proton Linac," Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 254 (1988).
40. K. Yoshino, T. Kageyama, Y. Morozumi and Y. Yamazaki, "Study on Water Cooling of an Annular-Coupled Cavity for the JHP 1 GeV Proton Linac," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 79 (1989).
41. T. Kageyama, Y. Yamazaki and K. Yoshino, "Research and Development on Annular-Coupled Structure at KEK," Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 82 (1989).
42. Y. Morozumi and Y. Yamazaki, "Bridge Coupler," Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 202 (1989).
43. T. Kageyama, Y. Yamazaki and K. Yoshino, "A New Annular-Coupled Structure Suppressing Higher Order Modes' Mixing with the  $\pi/2$  Coupling Mode", Proc. of the XIV International Conference on High Energy Accelerators, 1989, Japan; Part. Accel. 32, 33(1990); KEK Preprint 89-94.
44. T. Kageyama, Y. Morozumi, Y. Yamazaki, K. Yoshino, K. Yamasu, T. Iwata, and M. Hamaoka, "Development of a High-Power Model of the Annular Coupled Structure," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 35 (1990) (in Japanese).
45. K. Yoshino, T. Kageyama, Y. Morozumi, and Y. Yamazaki, "Study on Water Cooling of an Annular-Coupled Cavity for the JHP 1 GeV Proton Linac," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 38 (1990) (in Japanese).
46. Y. Morozumi, T. Kageyama, and Y. Yamazaki, "Multi-Cavity Bridge Coupler," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 44 (1990).
47. K. Yamasu, T. Iwata, M. Hamaoka, T. Kageyama, Y. Yamazaki, Y. Morozumi, and K. Yoshino, "Fabrication Technique of ACS Cavity for the JHP," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 47 (1990).
48. T. Kageyama, Y. Yamazaki, Y. Morozumi, and K. Yoshino, "A High Power Model of the ACS Cavity," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 150 (1990); KEK Preprint 90-102.
49. K. Yamasu, T. Iwata, M. Hamaoka, T. Kageyama, Y. Yamazaki, Y. Morozumi, and K. Yoshino, "Fabrication Technique of ACS Cavity for the JHP," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 126 (1990); KEK Preprint 90-110.
50. Y. Morozumi, T. Kageyama, and Y. Yamazaki, "Multi-Cavity Bridge Coupler," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 153 (1990); KEK Preprint 90-120.
51. T. Kageyama, Y. Morozumi, Y. Yamazaki and K. Yoshino, "Development of High-Power Models of the Annular Coupled Structure," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 190 (1991) (in Japanese).
52. K. Yoshino, T. Kageyama, Y. Morozumi, and Y. Yamazaki, "Studies on Water-Cooling of an ACS High-Power Model," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 242 (1991) (in Japanese).

## RF

53. S. Anami, I. Abe, H. Hanaki, Z. Igarashi, T. Kubo, K. Kudo, M. Ono, E. Takasaki, T. Takashima, T. Takenaka, H. Baba and M. Kihara, "RF Source for the 1 GeV Proton Linac," (in Japanese), Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 260 (1988).
54. E. Takasaki, S. Anami, M. Ono, K. KUdo, T. Kubo, T. Takenaka, H. Baba, and H. Hanaki, "Modulator for the RF Source of the 1 GeV Proton Linac," (in Japanese), Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 263 (1988).
55. H. Hanaki, I. Abe, Z. Igarashi, T. Takashima and S. Anami, "Control System for an RF Amplifier of the 1 GeV Proton Linac," (in Japanese), Proc. 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, 266 (1988).
56. H. Hanaki, I. Abe, Z. Igarashi, T. Takashima and S. Anami, "Control of an RF Amplifier for Japanese Hadron Facility," Proc. 1988 Linear Accel. Conf., 571 (1988).



57. S. Anami, M. Ono, E. Takasaki, T. Takashima, H. Hanaki and Z. Igarashi, "RF Control System of the 1 GeV Proton Linac," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 240 (1989).
58. S. Anami, H. Hanaki, T. Kubo, K. Kudo, M. Ono, E. Takasaki, T. Takenaka, H. Baba and M. Kihara, "Design and Construction of a Long-Pulse Modulator," Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. 2002 (1989).
59. T. Takenaka, H. Hanaki, T. Kubo, M. Ono, E. Takasaki, S. Anami, M. Kawamura, C. Kubota, K. Kudo and M. Kihara, "Test Operation of 1 GeV Proton Linac Modulator," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 54 (1989).
60. K. Kudo, S. Anami, Z. Igarashi, M. Ono, M. Kawamura, T. Kubo, C. Kubota, E. Takasaki, T. Takenaka, H. Hanaki and M. Kihara, "L-Band Klystron High Power Test," (in Japanese), Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, 281 (1989).
61. M. Ono, S. Anami, H. Hanaki, T. Kubo, C. Kubota, K. Kudo, E. Takasaki, T. Takenaka, H. Baba and M. Kihara, "Development of L-Band High-Power RF Source for the Japanese Hadron Project Proton Linear Accelerator," Proc. of the XIV International Conference on High Energy Accelerators, 1989, Japan; Part. Accel. 32, 51(1990).
62. T. Kubo, S. Anami, M. Ono, K. Kudo, C. Kubota, E. Takasaki, T. Takenaka, H. Baba and M. Kihara, "Design and Construction of a Pulse Transformer for a Long Pulse klystron," Proc. of the XIV International Conference on High Energy Accelerators, 1989, Japan; Part. Accel. 32,45(1990).
63. S. Anami, M. Kawamura, T. Kubo, K. Kudo, M. Ono, E. Takasaki, T. Takenaka, S. Ogawa, and S. Koseki, "A Long-Pulse Thyristor-Switch Modulator for the JHP Proton Linac," Proc. 1990 Linear Accel. Conf., 174 (1990).
64. M. Kawamura, S. Anami, M. Ono, K. Kudo, T. Kubo, C. Kubota, E. Takasaki, T. Takenaka, and M. Kihara, "Design and Construction of a Prototype of Power Supplies for UHF Klystrons," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 147 (1990).
65. T. Takenaka, S. Anami, K. Nanmo, and E. Takasaki, "Test or Design of the High Voltage Pulsed Switch with GTO," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 150 (1990).
66. Z. Igarashi, S. Anami, M. Ono, K. Kudoh, T. Takashima, and H. Hanaki, "RF Control of an L-Band Klystron for the 1 GeV Proton Linac," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 242 (1990) (in Japanese).
67. S. Fukuda, Y. Takeuchi, H. Hisamatsu, R. Afdachi, S. Anami, and M. Kihara, "Manufacturing and Testing of a Test Diode for High Duty Klystron," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 306 (1990) (in Japanese).
68. S. Anami, I. Abe, F. Hanaki, Z. Igarashi, M. Kawamura, T. Kubo, C. Kubota, K. Kudo, M. Ono, E. Takasaki, T. Takashima, T. Takenaka, and M. Kihara, "RF Source for the JHP 1-GeV Proton Linac," Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, 309 (1990) (in Japanese).
69. Y. Takeuchi, S. Fukuda, H. Hisamatsu, and Y. Saito, "Development of L-Band Pillbox RF window," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 78 (1991) (in Japanese).
70. M. Kawamura, S. Anami, M. Ono, K. Kudo, C. Kubota, E. Takasaki, T. Takenaka, and M. Kihara, "A Thyristor Switch for the Long-Pulse Modulator," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 81 (1991) (in Japanese).
71. S. Fukuda, Y. Takeuchi, H. Hisamatsu, S. Anami and M. Kihara, "Manufacturing and Testing of a Test Diode for High Duty Klystron (II)," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 84 (1991) (in Japanese).

#### OTHERS

72. T. Kato, "New Design of an RF Beam Chopper," Proc. 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, 228 (1989).