

DEVELOPMENT OF THE COMPONENTS OF THE JHP 1-GEV PROTON LINAC

Fujio NAITO, Shozo ANAMI, Shigeki FUKUDA, Hirofumi HANAKI, Zenei IGARASHI, Tatsuya KAGEYAMA, Takao KATO, Masato KAWAMURA, Motohiro KIHARA, Tadashi KUBO, Chikashi KUBOTA, Kikuo KUDO, Yoshiharu MORI, Yuuichi MOROZUMI, Masaaki ONO, Akira TAKAGI, Eiichi TAKASAKI, Yasunao TAKEUTI, Akira UENO, Kazuo YOSHINO, Hiromi HISAMATSU and Yoshishige YAMAZAKI

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

JHP 1GeV 陽子リニアックの構成要素の開発

ABSTRACT

Various accelerator components have been developed and studied for the 1-GeV proton linac of the Japanese Hadron Project (JHP). The linac is composed of a volume-production type H<sup>+</sup> ion source, a long four-vane type RFQ with a  $\pi$ -mode stabilization loop (PISL), a drift tube linac (DTL) with permanent quadrupole magnets and axially symmetric annular-coupled structure (ACS) linacs connected with multi-cavity bridge couplers. The linac requires high-power L-band and UHF sources with 600  $\mu$  sec pulse duration and 50 Hz repetition rate. The present status of these developments are described.

1. 序 [1,2,3]

大型ハドロン計画用の入射器としての1 GeV大強度陽子リニアックの構成要素の開発が進んでいる。基本的な仕様はH<sup>+</sup>イオンを1 GeVまで加速、ビームの繰り返しは50 Hz、平均電流は200  $\mu$  Aである。そして全長を500 m以内に作る。これに基づいて決定された各構成要素のパラメーターを表1に示す。このリニアックを実現するために次の4種の構成要素の研究開発が進んでいる；(1) 高周波源（LバンドとUHFのパルス電源及びLバンドクライストロン）、(2) イオン源、(3) 低エネルギー部加速管（RFQとDTL入射部）、(4) 高エネルギー部加速管（ACS入射部と中間部）

高エネルギーかつ大強度の陽子リニアックでは、主に高周波源の故障とビーム損失による加速器の放射化が運転時間やビーム強度を制限すると考えられている。そのため、まず信頼性の高い高周波源としてクライストロンを使用することに決定し、それに伴いRFQとDTLの周波数は432MHzと現在実用機として稼働しているものの約2倍の周波数が選ばれた。ACSはその3倍の1296 MHzである。ビーム損失対策としては、まずビームエミッタンスを小さくしアクセプタンスを大きくするようにした。またビーム損失が主にパルスの過度的な時点で起こりやすいことから、長パルス化し低い繰り返しで運転を行なう。以上の要請からまず大電力高周波源に対する仕様が決まった。即ち出力数MW、パルス長600  $\mu$  secそして繰り返し50Hzである。他の加速器要素の

表1. 1 GeV 陽子リニアック構成要素のパラメーター

<u>リニアック全体</u>	
全長	500 m
ビームパルス幅	400 $\mu$ sec
高周波パルス幅	600 $\mu$ sec
ビーム繰り返し	50 Hz
<u>H-イオン源</u>	
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 $\pi$ mm mrad
<u>RFQ</u>	
型	4 ヴェイン型
入射エネルギー	50 KeV
出射エネルギー	3 MeV
周波数	432 MHz
ヴェイン長	2.7 m
高周波入力	1 MW
規格化エミッタンス(90%)	1.1 $\pi$ mm mrad
<u>DTL</u>	
型	アルバレ型
入射エネルギー	3 MeV
出射エネルギー	148 MeV
周波数	432 MHz
全長	83 m
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 $\pi$ mm mrad
<u>高<math>\beta</math>リニアック</u>	
型	環状結合型(ACS)
入射エネルギー	148 MeV
出射エネルギー	1010 MeV
周波数	1296 MHz
全長	411 m
タンク数	152
高周波入力	99 MW
規格化アクセプタンス(90%)	29 $\pi$ mm mrad

試験にも必要となるため、大電力電源は開発の初期段階での最重点項目であった。

加速管の加工、配列の精度不足や構造上の問題がビーム軸近傍に於て加速電場の傾きや横方向電場の混入を引き起こすとビームの偏向やエミッタンスの増大が生じ、結果としてビーム損失が増加する場合がある。従って加速管は基本特性（Q値やシャントインピーダンス等）を維持できる範囲内に於て、製作や運転時に起こると予想される各種摂動に対しても加速電場の一様性を保つ様な構造をできる限り採用するようにした。

開発に於て我々が考慮した点に、より大強度への拡張性がある。この場合、特に高冷却性を得る事が重要となるので、機能材であるが熱伝導性の良い銅を構造材料にも積極的に使用している。特にDTLに関しては従来のように鉄に銅鍍金で本体を作るのではなく、全て無酸素銅で製作している。

以下、先に述べた4種の構成要素の概要と開発状況を述べる。

## 2. 加速器構成要素の開発

### 2.1 イオン源 [4,5]

従来の表面生成型のH-イオン源は大量のセシウムを必要とするが、このセシウムが加速電場の大きいRFQに入った場合、放電限界が低下してしまう。故にセシウム不要の体積生成型イオン源を開発してき

た。最近この体積生成型イオン源にRFQの放電限界低下の問題にはならない程度の微量セシウムを使用すると、全くセシウム無しの場合に比べてH-イオンビームの電流が4倍以上に増加する事が確認された。使用したセシウム導入可能な体積生成型イオン源の断面を図1に示す。引き出されたイオンビームの電流の最大値は20mAである。測定結果はビーム強度12mAの時、90%規格化エミッタンスで約 $1\pi\text{ mm mrad}$ であった。20mAの場合でもエミッタンスはほぼ同程度であった。

### 2.2 RFQ [6,7]

RFQは全長2.7mでH-を50 KeVから3 MeVまで加速する。構造は4ヴェイン型である。構造の決定理由は主に冷却の容易さと2.7mの構造物を高精度で加工、組立が可能なる点にある。ヴェイン材料は硬度を向上させるため銀入り無酸素銅（銀0.2%）を使用した。

4ヴェイン型RFQの最大の問題点は、ビーム偏向を引き起こす双極モードが加速モードの近傍にあることである。従ってヴェインの加工精度が不十分な場合や、運転時に熱的な変形が生じると加速モードに双極モードが混入する。全長が長くなるほど双極

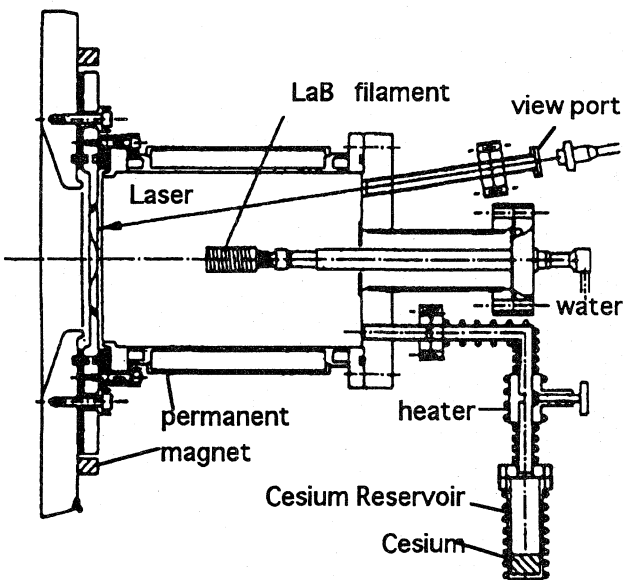


図1. 体積生成型H-イオン源

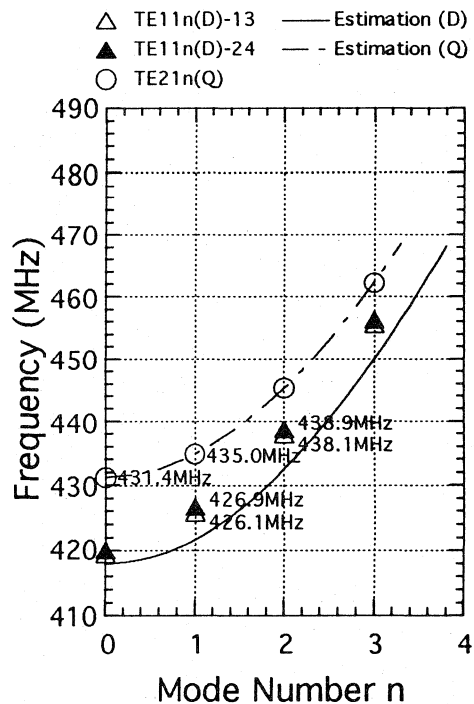


図2. RFQ低電力モデルの分散曲線 (PISLは装着されていない)

モードの周波数は低下し加速モードとの周波数差が減少するため、混入は起こりやすくなる。図2に低電力モデルで測定した分散曲線を示す。双極モードが加速モードの近傍にある事が分かる。双極モード抑制方法としてはヴェイン結合環 (VCR) がある。しかし冷却及び固定は難しく、さらに長いヴェインの場合中央部に設置するのが特に難しい事から、JHPのRFQには不向きである。そこで $\pi$ モード安定化ループ (PISL) を考案し、実用化した。PISLはVCRに比較し製作と冷却は容易である。そして性能面ではVCRと大差ない。PISLにより双極モードの周波数が加速モードより著しく高くできる事は、図3に示すPISL使用の大電力モデルの分散曲線から分かる。結局、加速モードへの双極モードの混入を0.5%以下にできた。現在大電力モデルの製作、低電力試験は終了している。電源系の整備の後、早い時期に大電力試験を開始する予定である。

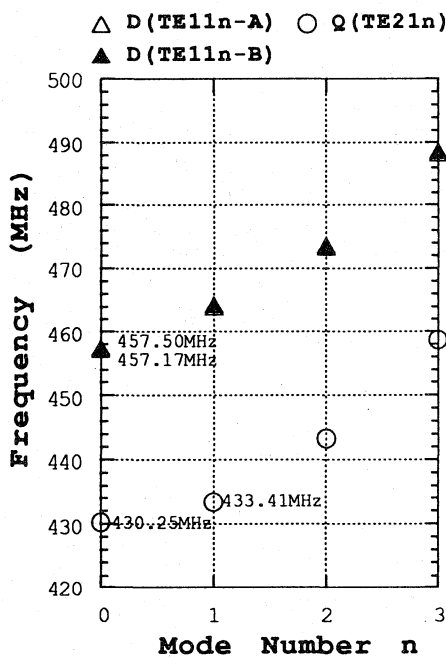


図3. RFQ大電力モデルの分散曲線  
(PISL装着後、チューナーは未調整)

### 2.3 DTL [8,9]

DTLの周波数は従来の主流の200MHzに比べて432MHzと2倍以上なので、ほぼ直径で1/2に小型化され高精度加工機器の使用が可能になった。それに伴いドリフトチューブの組立や据付方法とタンクの結合法等、製作の基本となる技術を殆ど見直し、

新規に開発を行なった。さらに4極磁石を永久磁石で製作するため、永久磁石の製法や4極磁石の組み込み法の開発も行なった。現在、要素技術開発はほぼ終了し、大電力モデルの製作もドリフトチューブ据付の段階になっている。

大電力モデルはHを3MeVから5.4MeVまで加速する。全長1.2mで約0.6m長のユニットタンク2台で構成される。加速モード ( $TM_{010}$ ) に群速度を持たせるため、2セルに1本、左右交互にポストカップラーが装着される。図4にモデルの断面図を示す。現時点では後述するように使用できるクライストロンが1本なので、DTLの高電力試験はRFQの試験が終了後、立体回路を組み替えて行なう予定である。

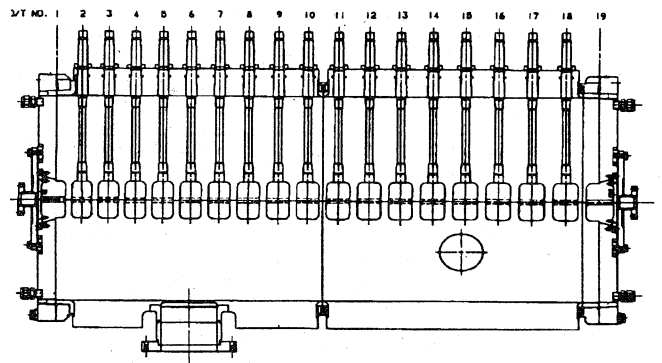


図4. DTL大電力モデル断面図  
(チューブ内の磁石は省いてある)

### 2.4 ACS [10,11]

1 GeV リニアック全長の80%を占める多連空洞型のリニアックは、軸対称性が良くシャントインピーダンスも比較的大きい事から環状結合型の加速構造 (Annular Coupled Structure: ACS) が選択された。詳細な3次元電磁場計算に基づき、空洞形状は決定され、大電力試験で特性は確認されている。最近  $\beta (=v/c) = 0.52$  の入射部近傍 (エネルギー160MeV) と  $\beta = 0.78$  (エネルギー560MeV) の部分の大電力試験が成功裏に行なわれた。表2に両ACSの特性をまとめておく。実際に大電力試験を行なう時の組立断面図を図5に示す。図の左側が  $\beta = 0.52$ 、右が  $\beta = 0.78$  のACSである。次の段階は量産化対策であり、製法と工程を簡略化し、構造を一部見直したACSを製作中である。

ACSへの大電力高周波は、図5の中央の橋絡結合

表2. low- $\beta$ とhigh- $\beta$ のACSプロトタイプ  
設計値と測定結果

frequency	1.296 GHz	
duty factor	3 %	
pulse width	600 $\mu$ s	
repetition rate	50 Hz	
	low- $\beta$ prototype	high- $\beta$ prototype
$\beta = v/c$	0.52	0.78
$E_0$	3.0 MV/m	3.5 MV/m
RF peak power	18 kW/cell	26 kW/cell
coupling constant	0.052 <i>measured</i>	0.056 <i>measured</i>
$Q$	$1.5 \times 10^4 / 1.8 \times 10^4$	$1.9 \times 10^4 / 2.4 \times 10^4$
$R(=ZT^2)$ M $\Omega$ /m	30 / 37	42 / 54
$R/Q$ $\Omega$ /cell	120 / 124	201 / 205
	<i>measured / SuperFish</i>	<i>measured / SuperFish</i>

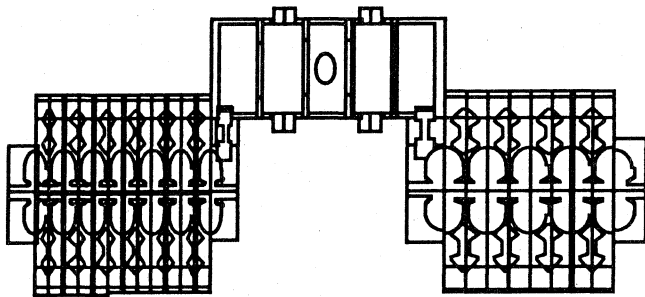


図5. ACS大電力試験の構成図  
左側の7セルが $\beta=0.52$ の空洞  
中央が橋絡結合器

器を通して給電される。橋絡結合器は単一の長円筒空洞ではなく、モードの混入を防ぐため図の様に5セルのディスクロード型空洞を $\pi/2$ モードで使用している。

## 2.5 大電力高周波源 [12,13]

JHPのリニアックはUHFで14本、Lバンドで36本、合計50本のクライストロンを必要とする。従ってリニアック全体の高稼働率を確保するためには、個々の電源の信頼性を極めて高くしなければならない。電源の安定性を確保し故障率を低下させるため、RFの出力電力の要求値は30%以上の余裕を持たせ、UHFで2MW、Lバンドでは6MWにした。そして前述したようにビーム損失による加速器の放射化を最低限に抑制するため長パルス(600 $\mu$ sec)、低い繰り返し(50Hz)の運転を行なう。

Lバンドクライストロンとしては既存で先の要求をほぼ満たすTHOMSON TH2104Aを1台使用して

いる。パルス電源はピーク電力15MW(平均電力450kW)のラインタイプ変調器(50段PFN)を持つものが製作され、既に所定の性能が確認されている。現在ACSやセラミック窓の試験に随時使用されている。

UHFクライストロンはアノード変調型のTHOMSON-CSF TH2134が2台(RFQとDTL用)用意されている。現在1台が電源に接続されシステムの試験が行なわれている。このクライストロンは飽和領域で2MWの出力であるが、実際はビーム負荷補償などを行なうため比例領域で使用される。現在

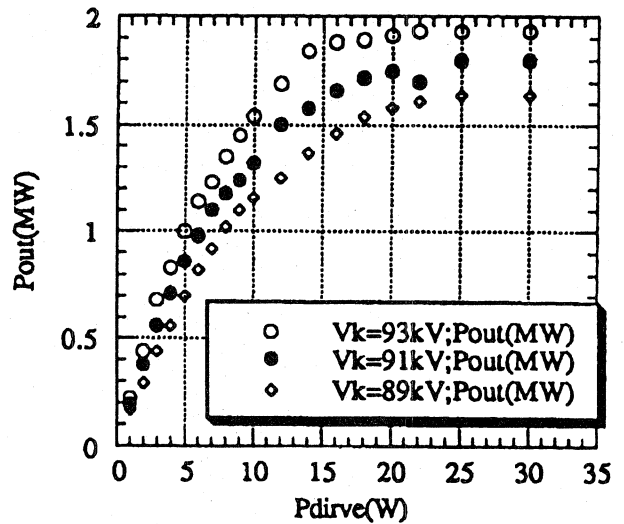


図6. UHFクライストロン  
入力と出力パワーの関係

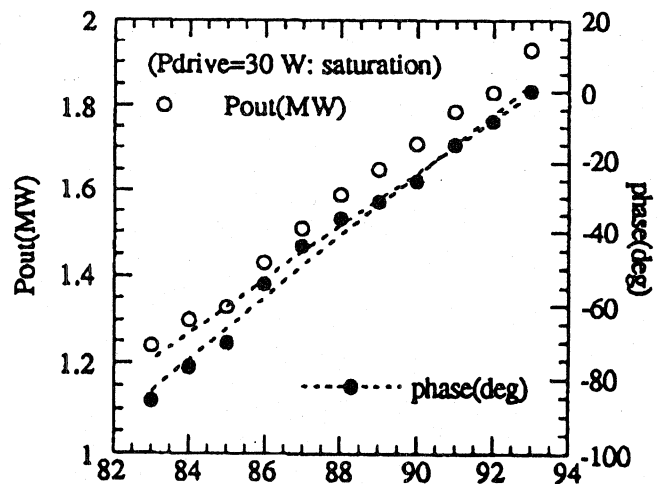


図7. UHFクライストロン  
カソード電圧に対する出力のパワーと位相の関係

周辺器材の整備と運転パラメーターの最適化を行ないながら試験を続けている。最近試験したパルス長約  $600\mu\text{sec}$ 、繰り返し  $10\text{Hz}$  での測定結果を図 6 と 7 に示す。前者は駆動電力と出力の関係を、後者はカソード電圧と出力及び出力位相の関係を示す。年度内に、もう 1 台のクライストロンも接続して、RFQ と DTL によるビーム加速ができる状態にする予定である。

#### 参考文献

- [1] E. Takasaki, et al., submitted to Proc. 9th Symp. Accel. Sci. Tech., KEK, Japan
- [2] Y. Yamazaki and M. Kihara, KEK Preprint 90-91 (1990)
- [3] T. Kato et al., Proc. 16th Linear Accel. Meeting in Japan, p115 (1991)
- [4] Y. Mori et al., Proc. 1992 Linear Accel. Conf. p639 (1992)
- [5] T. Okuyama and Y. Mori, Rev. Sci. Instru. 63, p2711 (1992)
- [6] A. Ueno and Y. Yamazaki, Proc. 1992 Linear Accel. Conf. p713 (1992)
- [7] A. Ueno and Y. Yamazaki, submitted to Proc. 9th Symp. Accel. Sci. Tech., KEK, Japan
- [8] F. Naito, et al., Proc. 1992 Linear Accel. Conf. p320 (1992)
- [9] H. Iino, et al., Proc. 1990 Linear Accel. Conf. p123 (1992)
- [10] T. Kageyama, et al., submitted to Proc. 9th Symp. Accel. Sci. Tech., KEK, Japan
- [11] Y. Morozumi, et al., Proc. 1990 Linear Accel. Conf. p153 (1990)
- [12] S. Anami, et al., Proc. 1990 Linear Accel. Conf. p174 (1990)
- [13] M. Ono, et al., submitted to Proc. 1993 Part. Accel. Conf., Washington