

Rf Source for the 1 GeV Proton Linac

S. Anami, I. Abe, F. Hanaki, Z. Igarashi, T. Kubo, K. Kudo, M. Ono,
E. Takasaki, T. Takashima, T. Takenaka, H. Baba and M. Kihara
National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

An rf source of the 1-GeV proton linac for Japanese Hadron Facility is composed of 14 UHF klystron amplifiers for a RFQ and 13 DTL's, and 36 L-band klystron amplifiers for 36 CCL's. The UHF amplifier generates an output power of 1.5 MW, and uses a modulation anode type klystron capable of producing an output power of 2 MW. Power capability of L-band klystrons is desired to be 5.5 MW or more, depending on acceleration cavity structures. We also decided to fabricate a line-type modulator as a prototype for test of developed klystrons. Its peak output power is 15 MW at a 0.03 duty cycle.

1 GeV陽子リニアックのRF源

1. はじめに

大型ハドロン計画に基づく1 GeV陽子リニアックの本格的なデザイン・スタディは昭和62年度より始まった。そのRF源においては、運転周波数や単管当りの出力電力、また電源形式等の検討を行い、更に、具体的な物造りとして、最も主要なところとなる High- β 部分（周波数1296MHz）の大電力増幅器を手掛けることになった。現在、15 MWピーク出力のパルス変調器の製作を終え、クライストロン本体並びにその周辺機器の準備を行っているところであり、昭和63年度末迄にはLバンド増幅器全体について一通りの評価試験を終える予定となっている。

2. RF源の主要諸元

1 GeV陽子リニアック（1GeV, 20mA, 400 μ A, 50pps）の加速空洞はRFQ (Radio Frequency Quadrupole)-DTL (Drift-Tube Linac)-CCL (Coupled-Cell Linac)の3タイプで構成される（図1）。

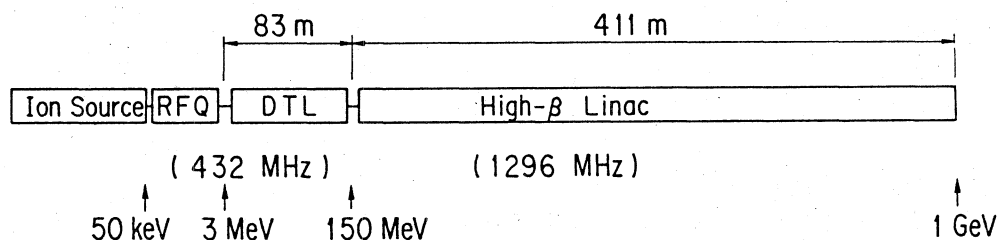


図1 1 GeV陽子リニアックの全体構成図

これらの空胴各々について
 ビーム負荷時の必要電力を表
 1に示す。DTL及びCCL
 のタンク当りの必要電力はそ
 れぞれが均等でなく、表中に
 はその中で最も大きな値とな
 るものを示している。CCL
 の空胴構造は未確定であるが
 、ここでは検討が最も進んで
 いるSide-Coupled Structure

表1 加速空胴で必要とするRF電力

	RFQ	DTL	CCL
加速周波数 (MHz)	432	432	1296
加速エネルギー (MeV)	0.05-3	3-150	150-1000
加速タンク数	1	13	36
全必要電力 (MW)	1.1	11.9	99.1
平均電力/タンク (MW)	1.1	0.92	2.75
最大電力/タンク (MW)	1.1	1.0	3.0

を対象として考え、以下の検討もこの構造によって決まる値で統一している。

表1で示される電力は空胴内での値であるため、RF源としては立体回路系の損失(10%)、加速ビーム増加の可能性(20mAから30mAの時、10%up)および空胴を含む全体としての余裕と安全係数(10%)などを十分に見込まなければならない。また、空胴内の加速電場を安定化するためのRFフィードバックを可能とするためには、クライストロンを入力RFによって出力RFが可変となる不飽和領域で使用しなければならない。このため利用できるRF電力は実際の動作点となる飽和点出力よりも低下する(10%)。これらの値を全て算入すると、RF源出力電力は空胴要求値のほぼ1.5倍となる。即ち、432MHzのDTL系が1.5MW、1296MHzのCCL系が4.5MWとなる(RFQは1.65MWとなるが、クライストロンや立体回路機器の選択で1割増を期待出来る)。

上記事柄はタンク当りの必要電力であり、特にDTLについては増幅ユニットの出力を上記の値の2倍にすれば、その分必要台数を減らすことが出来る。しかし、加速電場のビーム有、無負荷時での安定化、クライストロン入手の容易性等を考慮し、今のところそれぞれ個別に増幅ユニットを設けることにしている。

加速ビームのパルス幅400 μ sに対して、RFパルス幅は、パルス変調器の立ち上がり、立ち下がり時間($\sim 80\mu$ s)、空胴内RFが十分に平坦になり、かつビーム補償パルス後にも多少の平坦部が残るための時間($\sim 80\mu$ s)等を考慮し、一応余裕のある600 μ sとしている。しかし、この値は、RFフィードバックの掛け方やその応答時間、また反射波に対する機器の耐電力性等にもよるところが大きく、今後ある程度の修正を受けるものである。

以上をもとに、関連するRF源の主要な諸元が表2にまとめられている。ここで電源出力はクライストロンの効率を40%としている。

表2 RF源の主要諸元

加速空胴	RFQ, 13-DTL	36-CCL
運転周波数 (MHz)	432	1296
増幅器ユニット数	14	36
クライストロン数	14	36
出力/ユニット (MW)	1.5	4.5
RFパルス幅 (μ s)	600	600
RF繰り返し (pps)	50	50
RFデューティ (%)	3.0	3.0
電源ピーク出力 (MW)	3.8	11.3
電源平均出力 (kW)	110	340
電源パルス幅 (μ s)	600	600

3. クライストロンの出力性能について

陽子リニアックでは、全てのクライストロン増幅器の出力値が、それぞれの空洞で要求されるある狭い範囲の許容値に保たれてなければならない。電子リニアックのように、クライストロンの出来不出来、好不調に合わせて出力レベルを変えたり、またスタンバイとして休ませたりすることは出来ず、1本でも規定許容値を外れたものがあれば、ビーム加速を行うことが出来なくなる。この為、使用されるクライストロンにはかなりの信頼性が要求され、その使用本数が多くなると、その要求度は多大となる。この様な高い信頼性を持ったクライストロンを入手することは、我々の仕様値を満たすものが既存しないだけに、非常に難しいことである。信頼性を高めるには、勿論、それなりに完成度の高いものを用いればよいが、まず一般的に言えることは、出来る限り余裕のある使い方をすることである。その余裕度は高い程良いが、余り求め過ぎて、仕様ぎりぎりで不安定なものとなったり、メーカーの歩留まりを低下させてしまったのでは、意味の無い余裕度となり、ただ高い買物をしてしまうことになりかねない。現存するクライストロンや、メーカーの開発状況報告などを参考にすると、現在の製造技術で可能な長パルスクライストロンの出力限界値は、ほぼ6 MW程度と見ることが出来る。一方、モジュレーション・アノードタイプのクライストロンが使用できるのは、ほぼ3 MW程度までと見ることが出来る。

この様な事柄から、ここで用いるUHF及びLバンドクライストロンの出力能力（仕様値）を、その余裕度が使用値の2～3割程度として、それぞれ次のように定めた。

- (1) UHFクライストロンの最大出力はモジュレーション・アノード内蔵型も使用できる、2 MW (600 μ S, 50pps) とする。
- (2) Lバンドクライストロンは、カソード供給電力15 MW (プロトタイプ定格値、140kV \times 105A) 以下で、少なくとも6 MW以上の出力が得られるものとする。

4. パルス変調器について

ピーク出力11.3 MW、パルス幅600 μ sのLバンドクライストロン用パルス変調器をラインタイプとするか、或はハードチューブタイプにするかを定めることは、RF源の検討中最も重要なことである。しかし、この事について色々深く検討したとしても、明らかに何れかの一方が有利であると言うことは難しいようである。仮に、パルス幅が200 μ s程度であれば、効率が高く、比較的簡単に高安定、高特性のパルスが得られるラインタイプの方が採用されるが、幅が1000 μ 近くにもなると、PFNが余りにも大きくなり過ぎ、ラインタイプが現実的でなくなる。この様な意味で、パルス幅600 μ sと言うのは、丁度、何方とも決め難いところにあると言える。

ハードチューブタイプで、そのハードチューブをGTOに置き換えた場合を考えると、出力パルスの質はリップルやサグで低下するが、回路的に単純になり、かなりの魅力を持つものとなる。しかし、大電力GTOの多段使用技術はそれほど進んでおらず、またターンオフ時の負荷インダクタンスからの過電圧、過電流時のターンオフ不可等これから開発されなければならない項目を多く持っている。一方、ラインタイプの場合で問題になるのは、PFNの大きさ、高デューティに起因するサイラトロンの再点弧と並列使用、不可欠なクローバ回路などがあげられる。しかし、これら問題点はそれほど決定的とは思われず、先ずは、このタイプの性質が良く解っており、しかも豊富な経験があると言うことが重要なことであり、試作第一号器はこのタイプを採用した。