

RF CONTROL OF ICR PROTON LINAC

Toshiyuki SHIRAI, Hideki DEWA, Hirokazu FUJITA, Masanori IKEGAMI,
Yoshihisa IWASHITA, Shigeru KAKIGI, Hiromi OKAMOTO,
Akira NODA and Makoto INOUE

Nuclear Science Research Facility, Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokanosho, Uji-city, Kyoto 611, Japan

ABSTRACT

At the ICR Kyoto University, the proton linac has been developed. The RF high power is fed into the cavity from the klystron and the RF pulse width is 65 μsec . The RF amplitude and the phase in the cavity are affected by the beam loading and the pulse shape of the klystron cathode voltage. The fast RF stabilization system are required to accelerate the high current beam stably.

The stabilization system consists of the auto level control (ALC) and the phase locked loop (PLL). The designed band width is more than 1 MHz. The main modules of the circuit are the PIN diode attenuator, the fast phase detector, the phase shifter and the wideband feedback amplifier. The variation of the RF amplitude and the RF phase are 0.5 % with ALC and 5° with PLL, respectively.

京大化研陽子線形加速器のRF制御

1. はじめに

京大化研では、7 MeV陽子線形加速器を開発しており、現在ビーム加速テストをおこなっている。この加速器は、2 MeV高周波四重極 (RFQ) 型加速管、 $\lambda/4$ 共振器型バンチャーと7 MeVアルバレ型加速管から構成されている [1]。

こうした大電流用線形加速器では、ビームを失うことなく加速し、出力ビームの質を一定に保つため

に、加速空洞内部の高周波電場が安定していることが求められる。しかし実際には、共振周波数は温度によって変化し、また、ビームローディングや、高周波電源の変動などにより、加速空洞内部の電界強度、およびその位相も変動する。従って、高周波の制御システムが必要となる。

2. 京大化研Linacの高周波系

この加速器は運転周波数として、通常の陽子線形加速器よりも2倍以上高い、433 MHzを採用している。それにより、高周波電源としてクライストロンが利用可能となり、従来に比べ、電源システム

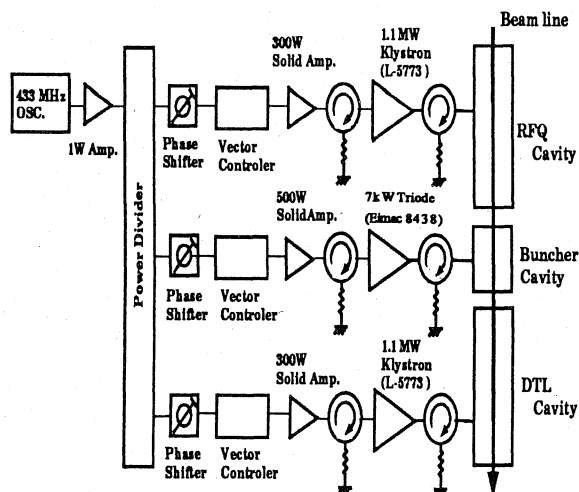


図-1 Linacの高周波系

表-1 クライストロン電源の主要パラメーター

Klystron	L-5773 (Litton)
RF frequency	433.3 \pm 1 MHz
Peak power	1.1 MW (Max.)
Pulse width	65 μSec
Duty factor	1 % (Max.)
Cathode voltage	90 kV
Gain	41 dB (typical)
Efficiency	56 % (typical)

の単純化をはかることが可能となっている。

この高周波電源系を図-1に示す。クライストロンはリットン社製L-5773であり、そのドライバーとして出力300Wの固体高周波増幅器が用いられている。クライストロンの出力は導波管(WR2100)で伝送され、導波管型のサーキュレーターを通して加速管に供給される。クライストロンの主要パラメーターを表1に示し、図-2にクライストロンの入力電力と、出力電力および増幅率の関係を示す。周波数は433.3MHzである。実際に加速空洞に必要な電力は、ビーム電流30mAの時に、RFQで600kW、アルバレで490kWであるため、十分な出力の余裕を持っている。バンチャーの高周波電源には出力500Wの固体高周波増幅器と出力7kWの三極管(Eimac 8438)を用いている[2]。

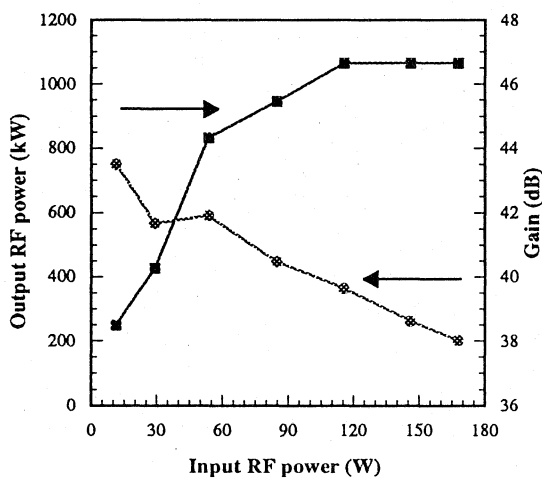


図-2 クライストロンの出力特性

共振周波数の変動は主に、室温の変動と運転のDuty Factorの変化によって引き起こされる。その変位量はRFQ、アルバレ型加速空洞で10kHz以内であり、バンチャーで80kHzである。RFQ型加速空洞の場合、その共振周波数に高周波の発振周波数を追従させて補正している。バンチャー、アルバレ型加速空洞については、チューナーを用いて共振周波数の補正が行われる。

高周波電力の強度、位相の変動原因の一つは、ビームローディングである。アルバレ型加速管の場合、空洞による高周波電力の消費が340kWであるのにたいし、ビームローディングによる電力の消費は、ビーム電流30mAのとき150kWになる。これは電界強度、位相の両方に強く影響するが、現状では入力ビーム電流が、この1/10程度と低く、影響はまだ実測されていない。

別の原因として、高周波電源の変動が挙げられる。なかでもクライストロンのカソード電源の変動が出力に強く影響する。この変動には電源周波数に起因した遅い成分と、1マクロパルス内部で変動する速い成分とがある。前者の原因はクライストロンカソード電圧のゆらぎで、電圧の変動は0.5%、それによる出力RF電力の変動は0.7%、位相変動が2°である。後者は、クライストロンのモジュレーションアノードとカソード、コレクタ間に寄生容量が存在する為、一定の時定数をもって、フローティングアノードの電位が変化するために起こる。この対策として、210pFの補償コンデンサ挿入した。この結果改善されたが、依然として、出力RF電力が1%、位相は16°も1マクロパルス内で変動している。

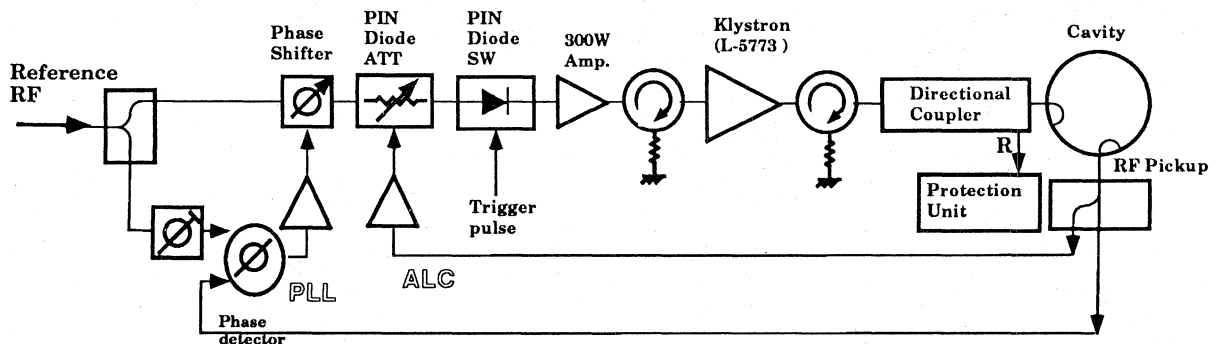


図-3 RF制御回路ブロック図

3. ALC、PLL

Auto Level Control (ALC)、Phase Locked Loop (PLL)はRF電力、位相をそれぞれ、1%、1°程度の変動に抑えることを目標としている。そのブロック図を図-3に示す[3]。この回路が3個の高周波空胴それぞれについている。この回路は低レベル高周波の段階で制御をおこなうもので、空胴のピックアップで検出した高周波信号と基準信号を比較し、その結果をフィードバックアンプを通して、高周波振幅変調器、高周波位相器にフィードバックをかけている。高周波のパルス幅が $65\mu\text{S}$ であるため、発振せずに安定したフィードバックをかけるには、ALC、PLLのループ内の各要素には、バンド幅1MHz以上の高速な応答が求められる。しかし、加速空胴は、Q値が高く、応答速度が遅いのはやむをえないため、その次に応答速度の遅い素子が、制御系全体の時定数を決めることになる。

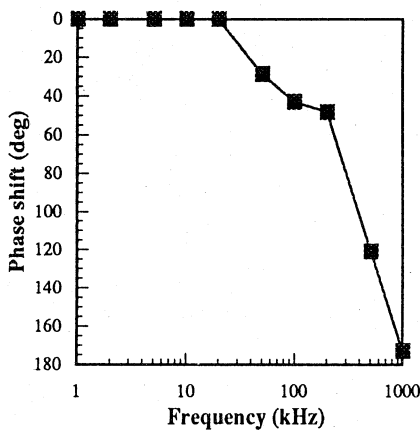


図-4 振幅変調器の周波数特性

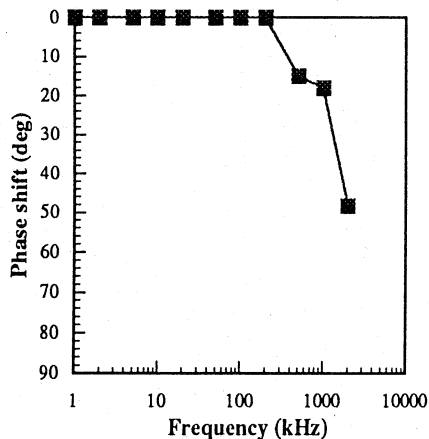


図-5 位相器の周波数特性

フィードバックアンプには高速OPアンプを使用しており、その応答速度は2MHz以上、増幅度は20dB以上にとってある。位相検出器には、ECL-Dフリップフロップを用いており、5MHzで動作している。

ALC回路において、最も時定数が問題になるのは、振幅変調器である。これにはPin Diode Mixerを用いている。図-4はコントロール信号の周波数を変化させたときの、通過高周波の位相変化を示したものである。これから、200kHz程度で、位相が回転していることが分かる。これは主に、このPINダイオードの特性によるものである。

PLL回路では、高周波位相器が時定数を決めている。これは、90°ハイブリッドとダイオードで構成された受動素子であるが、内部にコンデンサーを持つため応答速度に限りがある。この応答速度が、図-5に示してあるもので、ポールが2MHz程度に存在している。

実際にALC、PLLを動作させたときと、させないときの、RFQ加速空胴に取り付けられたピックアップモニターの出力を示したのが、図-6(a)、(b)である。図-6(a)は、高周波出力を検波して、パルスのフラットトップを拡大して、オシロスコープで測定している。図の上部分にあるTTLパルスは、ALCが動作しているタイミングを示している。ALC-OFFの時に、1.5%であったパルスの傾きが0.5%程度まで小さくなっていることがわかる。

図-6(b)はピックアップ出力を基準RFと共に、位相検出器を通し、位相出力をモニターしている。図の上部分にあるTTLパルスは、PLLの動作タイミングを示している。パルス内の位相の傾きは、PLL-OFFで16°であったものが、PLL-ONで、5°程度になった。この値は、実際の運転上は許容範囲内であるが、1°という目標には、到達していない。

4. RFブースト

アルバレ加速管は、Q値が4万と高いため、パルスの立上りに $25\mu\text{S}$ 程度を要し、ビーム加速に用いることの出来るパルス幅は、残り $40\mu\text{S}$ 程度となる。Duty factorを増やす点からは、少しでもこの幅が長いほうがよい。ALCをパルスの立上り部分でも動作させて、立上りを早めることは、可能で

はあるが、発振しやすく不安定である。そこで、ビームローディング補償等に用いられる、パルス的一部分の高周波レベルをひきあげるRFブーストの手法を、パルスの立上りに適用することにした。

図-7が、その結果を示している。図-7(a)、(b)ともに、上側が入力高周波電力、下が加速空洞内部の高周波レベルである。この結果から、ビーム加速に利用できるフラットトップのパルス幅が、 $10\mu\text{S}$ 増加して、 $50\mu\text{S}$ になっていることがわかる。

5. 結論と今後の課題

ALC、PLLによって加速管内の高周波電力の変動は 0.5% 以内となり、位相変動も 5° 以内におさまるようになった。これは、通常の運転には十分な値である。パルスのフラットトップに関しては、パルスの立上り時点で働くRFブースト回路により、 $50\mu\text{S}$ が得られるようになった。

今後の課題としては、さらに位相変動などを抑制するために、各要素の高速化をはかる必要がある。特に、PIN diode attenuator、Phase shifterの高速化が必要である。また、現状では、加速器の入射ビーム電流が小さいため、ビームローディングの存在しない状況でのテストしか行っていない。その影響が顕著になった段階で、再度調整が必要になると思われる。

参考文献

- [1] M.Inoue et al., "Status of the Kyoto University Proton Linac and Development of the 4-Rod RFQ Ion Implanter", these proceedings.
- [2] H.Dewa et al., "Study of Double Gapped Buncher for the Proton Linac", these proceedings.
- [3] Y.Iwashita et al., "7 MeV Proton Linac", Proc. of '90 Linear Accelerator Conf., Albuquerque, 746 (1990)

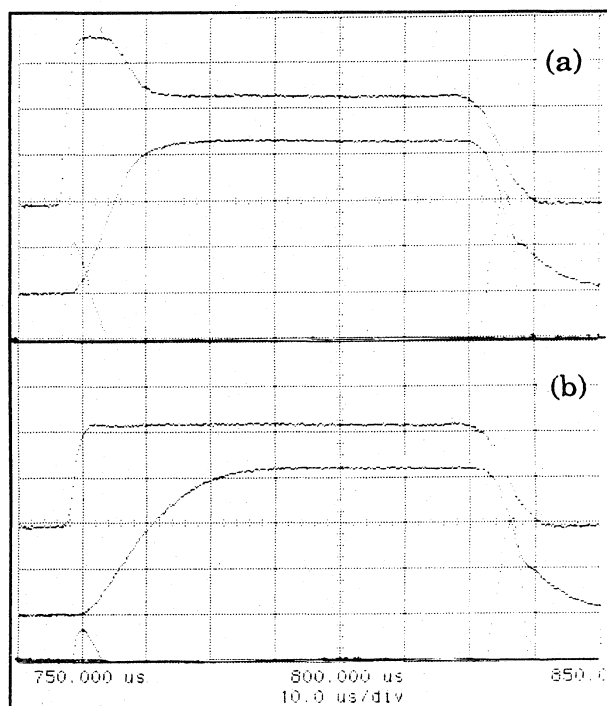


図-7 RF Boost Circuit
(a) Boost ON; (b) Boost OFF

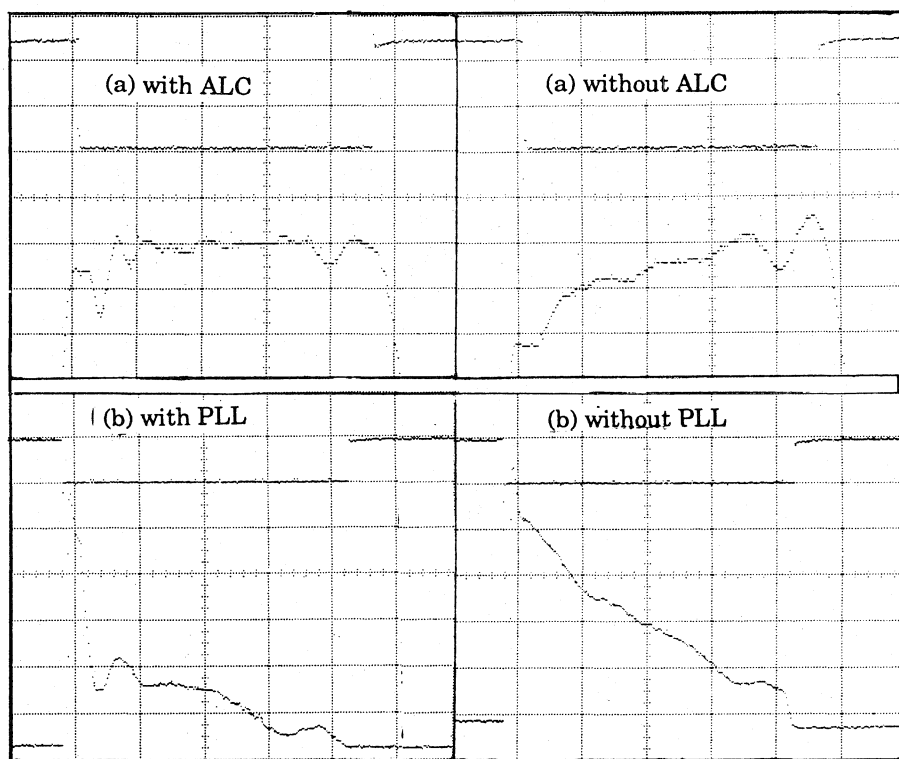


図-6 ALC、PLLの動作 (10μsec/div, 4°/div)
(a) RF Amplitude with ALC and without ALC.
(b) RF phase with PLL and without PLL.