

[F17p06]

## RF control in the RNB Linac

Y. Takeda, S. Arai, Y. Arakaki, A. Imanishi, K. Niki, M. Okada,  
E. Tojyo, and M. Tomizawa

High Energy Accelerator Research Organization, Tanashi Branch  
Midori-cho 3-2-1, Tanashi-shi, Tokyo, 188-8501, Japan

### ABSTRACT

A linac for radioactive nuclear beam is working at KEK-Tanashi. We developed a piston-tuner control system and an rf phase control system to constantly keep the resonant frequencies of the cavities and the phase differences between the cavities. The piston tuners are controlled by a computer so as to maximize the voltages in the cavities. The phase differences are controlled with an accuracy better than  $\pm 0.5$  degree, and the full energy width of the beam is within  $\pm 3\%$ .

### 短寿命核用ライナックにおける高周波制御

はじめに

高エネルギー加速器研究機構田無分室では、大型ハドロン計画Eアレーナの原型器として開発したRNB (Radioactive Nuclear Beam) ライナックを運転している。このライナックは、不安定核ビーム (荷電対質量数比  $1/30$  以上) を核子あたり  $2\text{ keV}$  から  $170\text{ keV}$  まで加速する SCRFQ (Split Coaxial RFQ) ライナックと荷電対質量数比  $1/10$  以上のビームを核子あたり最高  $1053\text{ keV}$  まで加速する4台のIH (Interdigital H) ライナック、そして、荷電変換器でのエネルギーロスを補うと同時に、ビームの軸方向のエミッタンスのマッチングをとるためのリバンチャー空洞から構成されている。ビームを失うことなく、出力ビームを安定に加速するためには、加速空洞内部の高周波電場の強さとその位相が一定となることが望まれる。従って、空洞の共振周波数と各空洞間の位相の安定性が重要な問題となる。我々は、これらを安定にするために共振周波数と位相を制御する制御系を開発し、安定度の測定を行ったので報告する。位相安定度の目標は  $\pm 0.2^\circ$  以内である。

高周波系

各空洞にはそれぞれの高周波電源により電力が供給される。SG (Signal Generator) より、出力される  $25.5\text{ MHz}$  の高周波を SCRFQ、リバンチャー空洞

の高周波電源に、周波数ダブラーにより周波数を2倍の  $51\text{ MHz}$  にした高周波を各IH空洞の高周波電源にそれぞれ入力している。電源の仕様は表1に示されている。

位相、共振周波数の変動

高周波電場を用いる我々の加速器においては、高周波のどの位相にビームを乗せるかによりエネルギーが変わる。我々は6台の高周波空洞を使用しているため、次段の空洞の安定位相に粒子を乗せる必要がある。このため、各空洞間の位相の安定性が重要となる。位相変動は次の要因で発生する。1) SGからの各高周波電源に入力するケーブルの温度変化。これにより、位相長  $\theta = \omega L/c$  の変動が起こる。2) 高周波電源に供給する一次電圧の変動により、高周波電源の増幅部の変動が起こる。3) 冷却水温度の変化により空洞の寸法が変化する。さらに、空洞容積の変化により共振周波数の変化が起こる。位相の変化量が大きくなる程、加速エネルギーも大きく変動する。このため、位相の変化をなるべく小さくしたほうが、加速エネルギーは安定である。我々は、今までの測定から、空洞の温度変化が位相変化を起こす一番の要因と考え、これに対応する補正システムを製作することにした。

我々の空洞の位相と共振周波数の変化量を表2に示す。

## RF制御システム

空胴には共振周波数の変化を補正するために、SCRFQ空胴に8台、リバンチャー、IH空胴には各1台ずつ可動型Lチューナーが取り付けられている。このチューナーを動作させることにより、空胴の共振点を定め、共振周波数の変化を抑えることを試みた。制御法として、我々は二種類の制御法を検討した。1) 高周波電源から空胴へ出力している高周波の反射波を方向性結合器により読み出し、常に反射波を最小にすることで空胴への電力ロスが少なくなるように可動型Lチューナーを制御する方法。2) 空胴からの透過波をピックアップモニターにより読み取り、常に透過波が最大となるように可動型Lチューナーを制御する方法。この二種類の方法を実験により比較してみたところ、まず、1)の方法では高周波電源等のノイズがかなり反射波に影響し、反射電圧の安定度が悪かった。安定にするためローパスフィルターを入れる等、色々試みてみたが、満足できる安定した制御ができなかった。2)の方法では、比較的安定した読み込みが得られ、しかも、電源による個性(空胴と電源のマッチング)を無視することができたので制御も行いやすかった。このような

結果から、我々は、2)の方式で制御を行うことにした。このシステムではまず、空胴電圧を高周波電源のヘリポットを使って手で合わせておく。そして、空胴のピックアップモニターから得られた透過電圧をコンピューターで読み込み、最大透過電圧になるようにチューナーを動作させる。チューナーが移動する際の透過電圧の振らつきは、チューナーの移動量を透過電圧の差が判別できる最低の移動量とすることで、全く気にならない程度まで抑えられた。(図1)しかし、この方法だけでは、高周波電源の長時間の位相のドリフトにより、位相の安定性は得られないので、さらに、図2のようなシステムを製作し、位相を安定に制御することを試みた。各空胴からの透過波を位相比較器に取り込み、隣り合う空胴間の位相を比較する。この位相差をコンピューターに読み込み、空胴間の位相が常に一定になるように高周波電源にフィードバックをかけ、位相を安定にするものである。このようなシステムでは、安定した基準を設けなければならないが、このシステムでは最も位相変化の少ない、リバンチャー空胴の位相を基準としている。各空胴間の位相は加速粒子の種類などの変化を受けず一定であり、加速テスト

表1 高周波電源装置の仕様、規格 (V=電圧、Vm=最高電圧)

	SCRFQ	リバンチャー	IH-1	IH-2	IH-3	IH-4
周波数 (MHz)	25.5±1	25.5±0.2	51±1	51±1	51±1	51±1
出力レベル (kW)	350 (pulse)	1.8 (CW)	12 (CW, pulse)	22 (CW, pulse)	30 (CW, pulse)	50 (CW, pulse)
出力安定度 (%)	2 (V<15kW) 2 (V>=5kW)	±1	3 (V<5/100Vm) 5 (V>= 5/100Vm)	3 (V<5/100Vm) 5 (V>= 5/100Vm)	3 (V<5/100Vm) 5 (V>= 5/100Vm)	3 (V<5/100Vm) 5 (V>= 5/100Vm)
位相設定範囲 (°)	±180	±180	±180	±180	±180	±180
位相安定度 (°)	±1	±1	±1	±1	±1	±1

表2 位相と共振周波数の変化量

	SCRFQ	リバンチャー	IH-1	IH-2	IH-3	IH-4
共振周波数の変化量に対する位相の変化量 (degree/kHz)	12.8	13.4	11.8	16.8	17.7	19.9
冷却水温の変化量に対する共振周波数の変化量 (kHz/°C)	1.00	--	-1.78	-1.65	-1.43	-1.35
チューナーの移動量に対する共振周波数の変化量 (kHz/mm)	0.02	0.69	0.05	0.15	0.25	0.41

ごとに位相差を調整するなどの手間は無い。また、最終空胴の位相を変化させることにより、出力エネルギーを変えて運転することも可能である。

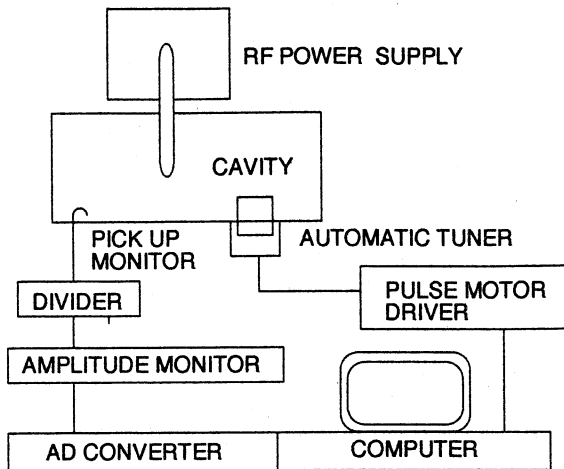


図1 チューナー・コントロール システム概略図

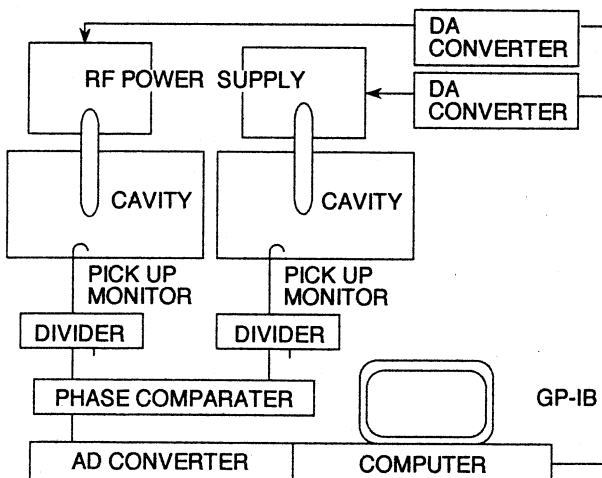


図2 フェイズ・コントロール システム概略図

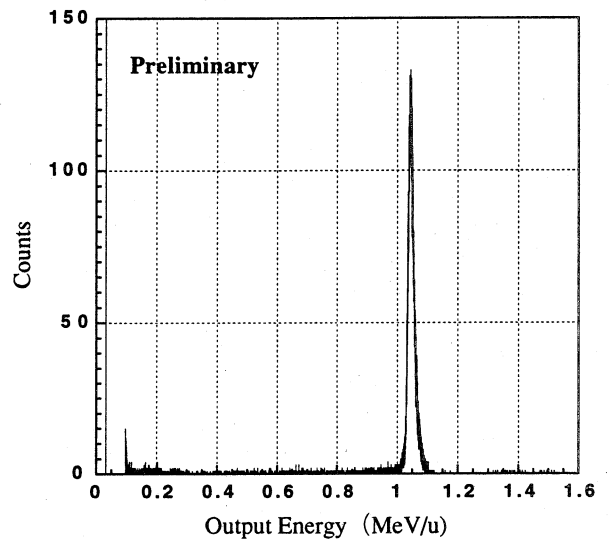
#### 安定度の測定

空胴のピックアップモニターで得た透過波を位相比較器で読み、空胴間の位相を比較することで位相の安定度を測定した。SCRFQとSGの間での位相差の測定では、位相変化量が $\pm 0.2^\circ$  (peak to peak)と安定した結果が得られた。しかし、全ての空胴を立ち上げ、測定を行って見たところ $\pm 0.3^\circ \sim \pm 0.5^\circ$  (peak to peak)という結果となり、位相を制御しない場合とほぼ同じ結果となってしまった。原因は、高周波電源のノイズが測定の信号に入り込んで読み込みが不安定となったことが考えられる。しかし、長期間で見た場合、位相は安定しており、手動で位相を頻繁に合わせ直していたものが改善されている。

さらに、SSDでビームのエネルギースペクトラムを測定することにより、位相の変化がエネルギーに

与える影響を調べた。測定の結果、位相制御時のエネルギーの幅は約 $\pm 3\%$ であった。また、位相を故意にずらすことにより、位相の変化に対してのエネルギー幅の変化を測定した。その結果、エネルギー幅は、SCRFQとリバンチャー間の位相を $\pm 2^\circ$ ずらした場合、 $\pm 4.4\%$ 、IHとリバンチャー間の位相を $\pm 2^\circ$ ずらした場合、 $\pm 4.4\%$ であった。これよりSCRFQとリバンチャー間の位相を $1^\circ$ ずらした場合、 $16.7 \text{ keV/u}$ 、リバンチャーとIH間の位相を $1^\circ$ ずらした場合、 $11.7 \text{ keV/u}$ 変化することがわかった。

図3 エネルギー分布



#### まとめ

位相コントロールシステムは、約1秒に1回という遅い制御であるため、位相変動が $\pm 0.5^\circ$ という結果を得た。また、エネルギー幅は約 $3\%$ であった。今後、これ以上の安定性を得るためには、透過電圧のコンピューターによる読み込み電圧の安定性と、高周波電源の速い位相変化にシステムを追従させる制御の高速化が望まれる。さらに、現在、位相制御システムはリバンチャーを基準としているが、リバンチャーにも長い時間を見た場合、位相変動があるため、更に安定な基準源を必要としている。我々はSGとリバンチャーの位相制御を行うことを考えている。

#### 参考文献

S.ARAI et al, "Performance of the RNB Linac at KEK-TANASHI", KEKPreprint 98-89 July 1998

M.TOMIZAWA et al, "Linac Complex of the Radioactive Beam Facility at KEK-Tanashi", KEK Preprint 98-55 June 1998

"高エネルギー加速器入門", OHO '84, OHO '90