

[F17p11]

Study on RF Sources for the NSP LINAC at JAERI

E. Chishiro, H. Takado*, Y. Touchi**, J. Kusano and M. Mizumoto

Japan Atomic Energy Research Institute

* Mitsubishi Electric Corp., ** Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

ABSTRACT

We have performed a design study work of a proton accelerator RF source proposed for Neutron Science Project (NSP) at JAERI. The NSP accelerator will consist of RFQ, DTL and superconducting (SC) linac. It should be operated both in pulse and CW for demands in the application. The studies on the RF system of the SC linac will be presented.

原研中性子科学研究用加速器の高周波源の検討

1. はじめに

原研中性子科学研究計画 (NSP) における加速器は、RFQ、DTL、Separated-type DTL からなる常伝導部と超伝導加速器から構成される[1]。超伝導 (SC) リニアックは、5 連セルからなる 284 個の加速空洞により 100MeV ($\beta=0.43$) から 1.5GeV ($\beta=0.92$)まで、プロトンおよび負水素イオンを加速する。全空洞に亘って粒子速度が変化するため、空洞は 8 種類の異なる形状にグループ化され、エネルギーゲインも空洞毎に異なる[2]。更に NSP では、大電流パルス運転モードと低電流連続 (CW) モードが併有し、このためビームローディングや空洞 RF 特性は、各空洞毎及び運転モード毎に異なる。

本報告では、SC リニアックの RF 源について検討し、空洞 RF 励振方法やローレンツ力の影響を評価した。また、主増幅管の候補であるクライストロンや IOT システムを構築したときの検討を記述する。

2 オペレーションモード

2.1 運転モード

NSP で提示されている運転モードの仕様を表 1 に記す。現在、加速周波数を 600MHz、平均同期位相(ϕ)を-30 度として検討が進められている。第 1 期では、低電流・低デューティで運転を行ない、徐々に出力を上げ 2 期へのアップグレードにより定格 8MW の加速を行なう。

図 1 は、各運転モードに対する定常状態でのビームローディング (P_b) を示す。 P_b は SC リニアックの低エネルギー端と高エネルギー端空洞とで 6.6 倍異なり、また、同じ空洞でも 2 期パルスモードと CW モードとでは、3.4 倍異なる。超伝導空洞では、壁損失が P_b に対して極めて少ないため、RF 源の要求電力は P_b に強く依存する。従って各空洞を励振する RF システムは、SC リニアックに沿って急激に変化する要求電力に対応するために、低エネルギー空洞部と高エネルギー部では、増幅管種などの構成要素、設定値などのシステム仕様が異なる。また、同じシステムで、CW 運転時の低出力からパルス運

転時の高出力まで対応する。

ビーム定常加速時に入射及び反射 RF 電力を最小化するため、カップラーの結合度 (β_c) および空洞の共振周波数 (ω_c , f_c) は、 P_b に応じてチューニングされる。従って、 β_c と ω_c は、運転モードの切り替えごとに再チューニングされ、バンド幅やフィリングタイムなども運転モードごとに異なる。ビーム加速時の ω_c は、平均同期位相(ϕ)が -30°なので加速周波数よりも高くなり、整合結合条件下では空洞位相に換算し +30°ずれる。

2.2 空洞励振方法

空洞 RF 励振法としてパルス励振と CW 励振があり、励振方法によりローレンツ力による空洞デチューンの対応方法が異なる。過渡的なビームローディングの影響を除く、空洞励振のタイムパターンを図 2 に示す。図 2(a) は、2 期パルスモードで正負イオン同時加速モードにおけるパルス励振パターンを、(b) は、CW 励振パターンである。

パルス励振の場合、入射 RF 電力 (P_i) は、ビーム電流 (I_b) が到達する前に印加し、空洞に所定の加速電圧 (V_{acc}) を立ち上げる。立ち上がり時間 (t_r) は、空洞のフィリングタイムと位相角および入射 RF 電力 (振幅・位相) に依存する。負イオン (H^-) と正イオン (H^+) パルス間の時間 (t_o) は、位相などを調整するために必要であり、その時間は空洞のフィリングタイム程度である。この間、 V_{acc} を維持するのにビーム加速時の 1/3 倍の電力が必要である。

空洞共振周波数 (f_c) は、チューナの応答速度をパルス運転のくり返し周期に合わせられないため、変形した状態で加速周波数 (ω_{rf} , f_{rf}) にビームローディングのためのデチューン (δf_B) を加えた値 ($f_{rf} + \delta f_B$) になるよう

表 1 NSP リニアックの運転モード仕様

| 運転モード | 加速粒子 | ビーム電流 (中間デューティ 0.6) | デューティ (50Hz) | ビーム出力 |
|--------|-------------------|---------------------|--------------|----------|
| 1 期パルス | H ⁺ | 16 (mA) | 0.1 | 1.5 (MW) |
| 2 期パルス | H ⁺ | 30 | 0.185 | 5 |
| | H ⁺ +p | 30+30 | 0.295 | 8 |
| 2 期 CW | p | 5.33 | CW | 8 |

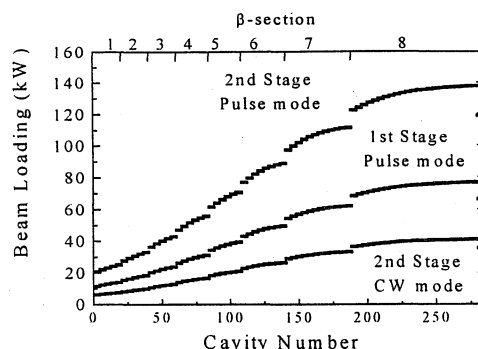


図 1 各運転モードにおけるビームローディング

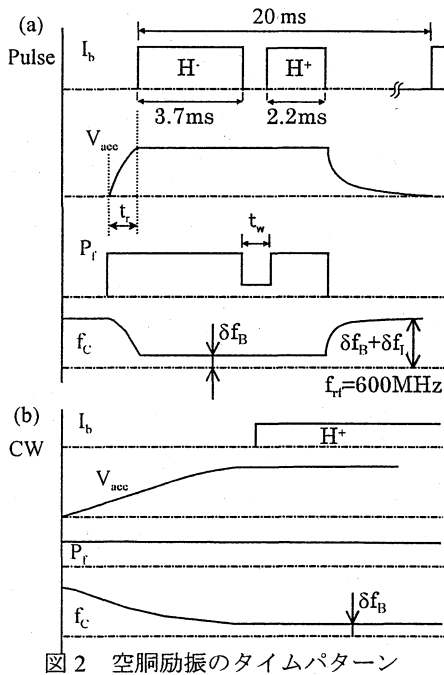


図2 空洞励振のタイムパターン

フセットが掛けられる。ローレンツ力によるデチューン (δf_L) は、共振周波数が減少する方向で発生するので、電場が立ち上がる前の f_c は $f_r + \delta f_B + \delta f_L$ となる。

空洞を CW 励振する場合、電圧を緩やかに立ち上げた後、ローレンツ力による空洞の変形をチューナーにより復元する。このチューニングにより、 f_c は $f_r + \delta f_B$ としビームを入射する。パルスビームを加速する場合は、ビームがオフのとき P_r を 1/3 に低減し V_{acc} が一定となるようにする。従って、 V_{acc} は常に一定であり、ビーム加速時のローレンツ力による空洞変動がない。

P_b の低い CW 運転モードでは、空洞を CW 励振するが、 P_b の大きいパルス運転モードでは、RF 源の電力効率、機器の熱的問題、空洞 2K 冷却系の効率等を考慮するとパルス励振が望ましい。しかしながら、後節で記述する負荷 Q 値 (Q_L) の高い空洞ではローレンツ力やマイクロフォニックの影響により、空洞が振動しにくい CW 励振を適用する可能性がある。

3 ローレンツ力とマイクロフォニックの影響

チューニングされた空洞位相角にチューニングエラーが生じると加速電圧 (V_{acc}) を励振するのに必要な RF 入射電力は増加する。定常状態における V_{acc} と P_r の関係は、

$$P_r = \frac{(1 + \beta_c)^2 V_{acc}^2}{4\beta_c R_{th}} \times \left\{ (1 - \tan \psi_b / \tan \phi)^2 + (\tan \psi_c - \tan \psi_b)^2 \right\}, \quad (1)$$

で表わされる[3]。ここで、 R_{th} はシャントインピーダンスである。また、 ψ_c は空洞位相角、 ψ_b は P_b に対するデチューン角を表わし、それぞれ、

$$\tan \psi_b = \frac{R_{th} I_b}{(1 + \beta_c) V_{acc}} \sin \phi, \quad (2)$$

$$\tan \psi_c = \frac{\omega_c - \omega_{rf}}{\omega_c} \frac{2Q_0}{1 + \beta_c}, \quad (3)$$

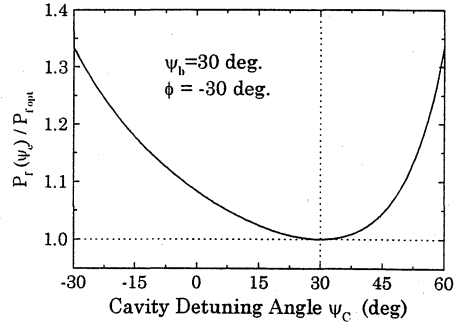


図3 空洞位相角に対する RF 電力増加量

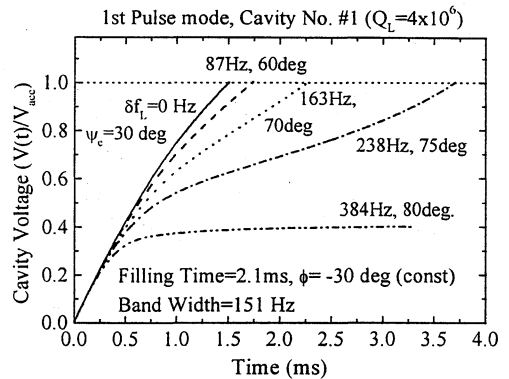


図4 空洞 #1 の電圧立ち上がり特性

で与えられる。 β_c と ω_c がそれぞれ P_b に対し最適化されていると、 $\psi_c = \psi_b = -\phi$ となり $P_{f,opt} = (\beta_c + 1)^2 V_{acc}^2 / (\beta_c R_{th})$ で入射電力が最小化される。図3は、 ψ_c に対する V_{acc} を維持するのに必要な電力増加比を示す。図より $\psi_c > \psi_b$ で急激に電力比が増加することが分かる。パルス励振の場合、ローレンツ力による変形のため空洞は $\psi_c > \psi_b$ にプリチューニングされるので、 δf_L が大きくなると反射電力が多くなり空洞に RF が入りにくくなる。 $\psi_c = 90$ 度では全反射が起り、電場が立たなくなる。

ローレンツ力の影響は、空洞形状が扁平で Q_L の高い 1 期パルスモードでの低エネルギー端空洞(#1)で著しい。図4は、空洞の機械的変形を含む状態方程式[4]より求めた空洞 #1 での ψ_c に対する電場の立ち上がり特性を示す。 ϕ を常に -30 度に保ち、RF 源から V_{acc} の 2 倍の電圧が印加されるとして計算を行なうと、 V_{acc} まで立ち上がるのに $\psi_c = 30$ 度で 1.5ms、75 度で 3.7ms となり、80 度までずれると電場が立ち上がらなくなる。この時の位相のずれを δf_L に換算すると 80 度で 384Hz であり、 δf_L がこの程度まで大き

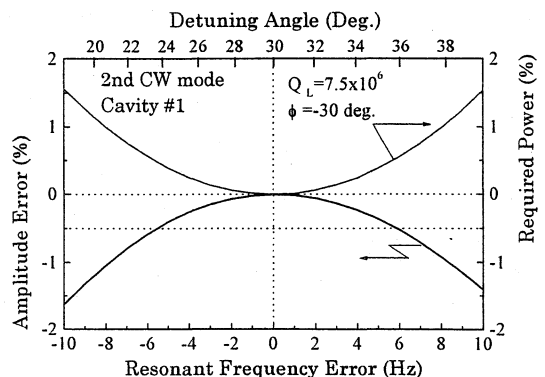


図5 空洞位相角エラーに対する振幅エラー

くなるとパルス励振できなくなる。

CW励振でも、マイクロホニックによる空洞位相角の振動は問題となる。図5は、2期CWモードでの空洞#1の ψ_c の変動に対する空洞電圧の変化及び V_{acc} を一定に保つために必要な電力増加比を示す。空洞共振周波数エラーが ± 6 Hzを超えると振幅で-0.5%以上のエラーが発生する。この振幅エラーはローレベルにより制御する必要があり、数百Hzの位相角エラーが生じることを考慮すると[5]、増幅管は定格出力よりかなり低い動作点で運転し、十分なRFマージンを見込まなければならなくなる。

4. RFシステムの検討

SCリニアックのRFシステムは、現在、クライストロンを主として検討が進められている。クライストロンは、UHF帯で高出力(1MW)、長パルス(CW)の運転実績があるため、SCリニアックのRF源として用いるのに技術的な問題がない。また、出力が大きいため多空洞にRFを分配し、RFシステムのユニット数を低減することができる。これは、建設コスト、メンテナンスを考慮すると有利である。一方、低出力運転時に動作効率が低下する問題があり、CW運転モードまたはCW励振を考慮すると運転コストの面で不利になる。一方、クライストロンに替わる有力な主増幅管の候補としてIOTがある。IOTは、グリッドにより電子ビームをコントロールするため低出力動作時での効率の低下が少なく、しかしながら、出力が低いため、IOT1台当たり1ないし2空洞しか駆動できず、従ってユニット数が多くなる。クライストロンまたはIOTでシステムを構築したときのそれぞれの問題点に付いて以下に記述する。

4.1 クライストロン

図6は、クライストロン(E3732、508MHz、1MW、CW、東芝製)の飽和出力-効率特性を示す。低出力領域では、急激な効率の低下を防ぐためにパービアンスを下げて運転している(0.4 μ Per.まで)。このため、低出力時のビーム電圧・電流は定格出力時より低い。飽和出力が下がると効率が急激に低下し、250kW以下では効率が50%を下回る。これは、定格出力(1MW)時に効率が最も良くなるように設計されているためであり、低出力時ではビーム電圧に対しクライストロン出力空洞の Q_L が低過ぎるため効率が低下する。これを防ぐために Q_L を低出力動作時に上げる必要があり、出力窓近くに反射材を設置し Q_L 値を変化させ、効率低下を改善する方法が試みられている[6]。

表2は、図6の特性から求めたRFシステムの効率と電力を記す。クライストロンは、高出力管(1MW)と低出力管(400kW)を使用し、1台当たり4空洞にRFを分配す

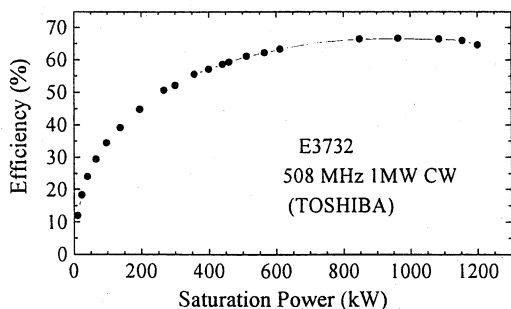


図6 クライストロンの飽和出力-効率特性

表2 SCリニアックRF源のシステム効率と電力

| 運転モード | 1期 | | | 2期 |
|----------------------------|-----|-----|--------------------|-----|
| | パルス | パルス | パルス ^(*) | CW |
| ビームパルス幅 (ms) | 2 | 3.7 | 5.9 | — |
| ピークRF電力 (MW) | 14 | | 25 | 7.5 |
| 平均クライストロン効率 (%) | 41 | | 48 | 33 |
| ピークDC電力 (MW) | 34 | | 53 | 23 |
| 平均デューティ ^(*) (%) | 18 | 23 | 38 | 100 |
| 平均DC電力 (MW) | 5.8 | 12 | 20 | 23 |

*1) 正負イオン同時加速、*2)立上がり時間等を含む

るものとした。従って、284個の空洞を駆動するのに71台(低出力管27台、高出力管44台)の管が必要となる。クライストロンの動作点は、RFマージン25%、伝送損失5%とすると飽和出力の76%となり、動作効率も飽和効率の76%となる。全体的なクライストロン効率は、CWモードで最も低く33%である。電場立ち上がり時間を含むデューティを考慮した平均DC電力は、2期正負イオン同時加速モードで20MW、CWモードで23MWであり、電力効率(ビーム電力(7.5MW)/平均DC電力)は、2期パルスで38%、CWで33%となる。また、2期パルスモードでCW励振を行なうと平均DC電力は、パルス励振の1.5~2倍と大きくなる。

4.2 IOT

IOTは、低出力動作時に効率の低下が少なく、従ってCW励振またはCWモードで高効率が見込まれる。また小型でビーム電圧も低くRFシステムを小型化できる。

しかしながら、ゲインが低く2段増幅を施さなければならず、またピーク出力が低いため1空洞当たり1台のIOTが必要となる。従って4空洞RF分配のクライストロンシステムと比較し8倍の管数が必要となる。システムのアベイラビリティ(稼働している確率)(A)を評価すると、IOTとクライストロンの平均駆動時間(寿命)を1万時間、全修理時間(休止時間)をクライストロンが500時間、IOTは小型で電圧も低いのでその1/4とすると、クライストロンのAは0.95、IOTシステムのAは0.91となり、管数が多い分IOTシステムの稼働率が低くなる。

上記でのAの見積もりは単純であり、また、IOTを加速器RF源として使用した例が少ない。今後、35kW CW出力のIOT動作試験を通じて諸特性を評価していく。

5. まとめ

効率や熱問題、稼働率を思慮に入れると、高出力管による多空洞RF分配のパルス励振が望ましく、クライストロンを用いたシステム検討で、20~23MWの電力供給が見積もられた。一方、 Q_L が高く δf_c の大きい低エネルギー空洞では、所定の位相・振幅の安定度が達成できない場合CW励振が必要となる。このとき個々の空洞の ψ_c エラーの影響が大きく、多量のRFマージンが必要であるため、1空洞駆動のIOT-RFシステムが適当である。

参考文献

- 1) M. Mizumoto et al., Proc. Int. Linac Conf., Geneva, (1996).
- 2) Y. Honda et al., Proc. 1998 APAC, Tsukuba, (1998)
- 3) 赤井和憲, "RFシステム", OHO94, p11-14.
- 4) A. Mosnier TESLA reports, DAPNIA-SEA-92-05
- 5) K. Mukugi et al., these Proceedings. (1998)
- 6) K. Hirano et al., these proceedings. (1998)