

## DEVELOPMENT OF THE NEW RF CONTROL SYSTEM (AGC&APC) FOR HIMAC INJECTOR LINAC

Takeshi Takeuchi<sup>1,A)</sup>, Mitsugu Yamamoto<sup>A)</sup>, Toshinobu Sasano<sup>A)</sup>, Yutaka Ohta<sup>B)</sup>, Toshiyuki Sato<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Engineering Corporation

3-8-5 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

<sup>B)</sup> THAMWAY CO., LTD.

3-9-2 Imaizumi, Fuji city, Shizuoka, 417-0001

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

### Abstract

We have developed a new RF auto gain and phase control system (AGC&APC) for HIMAC injector LINAC. The new AGC&APC supports the better workability for the research and the maintenance than the conventional AGC&APC for HIMAC injector LINAC. The test operation in the new AGC&APC showed the stable control for RF phase and magnitude. Also, we found a problem in existing APC circuit and made an additional circuit module preventing APC circuit problem.

## HIMAC入射器ライナックにおける新型AGC&APC制御装置の開発

### 1. 経緯

07～08年度HIMAC入射器において長時間にわたるビーム供給停止および運転供給が制限的となった不具合は、HIMAC入射器ライナックのAuto Gain Control & Auto Phase Control Unit (AGC&APC制御装置)を起因とするものであった。AGC&APC制御装置は、ライナックへの投入RFの強度・位相を安定に出力するようフィードバック制御する装置で、大電力アンプ前段の低レベル部に設置されている。AGC&APC制御装置の不具合によりRFレベル・位相の制御が不能となり、安定したビーム供給が困難となった主な原因は、装置内部基板およびモジュール間ケーブルコネクタや受動・能動回路素子の破損である。HIMACで使用するAGC&APC制御装置は製造より10年以上が経過し老朽化が進んでおり、内部部品も製造中止品が多数存在している。このような状況においてHIMACでは、10年以上に渡る運用経験を含めた設計の見直し、不具合時の回路調整作業時間の短縮を目的とした原因箇所を容易に特定できるように内部構成を改良した新型AGC&APC制御装置の開発が進められた。

本論文では、始めにAGC&APC制御装置の動作について説明する。次に新型AGC&APC制御装置において主に不具合復旧時間短縮とメンテナンス性向上に対して改良された点を紹介し、実機動作テスト結果を報告する。最後に、開発設計中に発見されたAGC&APC制御装置での問題点 (APC OK時の位相値相違問題) の分析と対策のための追加モジュールとその効果について報告する。

### 2. AGC&APC制御装置

ここではHIMACのAGC&APC制御装置について説明する。図1に装置の回路動作簡略図を示す。HIMAC DTLライナックの各タンクには5 kWトランジスタアンプ (TRA: Transistor Amplifier)、70 kW真空管アンプ (IPA: Intermediate Power Amplifier)、1.4 MW真空管アンプ (HPA: High Power Amplifier)の3段から構成された100 MHz高周波多段増幅器システムが設置されている[1]。DTLは通常1.2 msec幅 (RF ON/OFF区間)のパルス動作 (最大繰り返し周期: 0.413 sec)で運転される。100 MHz高周波多段増幅器システムの前段にはAGC&APC制御装置が設置されており、各タンクキャピティでのRF強度・位相をコントロールする。基本的にAGC&APC制御装置の入力は、100 MHzシンセサイザーから分配器を通ったRF IN (0 dBm)とタンクキャピティからのPickupの2つで、出力はTRAへのRF OUT (MAX: +5 dBm)の1つを持つ。RF INは、まずAGC&APC制御装置に入り分配器によりとに分けられる。は-20 dBでモニターとして使用される (後述)。RF OUTへ向かうは、上位の制御計算機からの位相設定値で動作する移相器により位相変化を受け、その後また分配器に入る。分配器では、信号が-20 dBで取り出される。はPickupと比較され、求められた位相差 (位相制御電圧)を移相器 (APC移相器)へDC出力する。このDC出力される位相制御電圧信号はAPC移相器へ入力され、分配器からの100 MHz RF信号に対して位相差分の位相変化を与える。位相制御信号はDC 0～10 Vで、位相変化量 : 0～400度に相当する。APC移相器で

<sup>1</sup> E-mail: aec2g@nirs.go.jp



### 3. 新型AGC&APC制御装置での改良点

#### 3.1 新型AGC&APC制御装置内部モジュール

新旧のAGC&APC制御装置内部の様子を図2に示す。従来型では、DBMなどが含まれるアルミフレームのRFモジュールは縦積み配置されている。これは不具合復旧・調査時の作業効率が悪いので新型ではモジュールを横に並べる配置とした。さらにAGCおよびAPC基板はケーシングされたユニットで容易に交換可能であり、天井部にボリューム抵抗調整機能を配し調整作業の効率化を図っている。またケーシングし接続コネクタをナイロンコネクタから同軸コネクタに変更（後部に設置）することで外乱ノイズからの防護とGND強化を行っている。モジュール間ケーブルも含め同軸コネクタはSMAタイプとUMタイプを使用した。

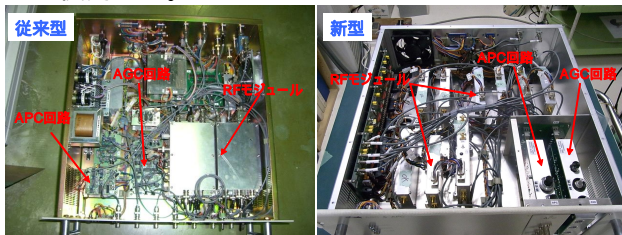


図2. 新旧AGC&APC制御装置の内部比較

#### 3.2 信号の外部出力モニター化

不具合発生時の経験からモニター確認する頻度の高い位相制御電圧、レベル制御電圧および比較演算直前の設定値（レベル、位相、ATT値）についてはバッファアンプを介してBNC端子により外部出力するように改良した。またRF信号経路上のモジュール前後（APC、AGC、ATTの前後）には方向性結合器を配置し信号出力を前面パネルから参照可能とした。従来型AGC&APC制御装置での不具合時における調査では、内部基板素子の端子等にプローブを当てて測定していた。この場合、スペース確保のため基板およびモジュールの配置変更などに多くの時間を要するので新型では大幅な時間短縮が期待できる。

#### 3.3 生産中止品への対応

ATTに使用しているPINダイオード（1SV34）が生産中止品のためリニア可変ゲインアンプ（LMH6503：ナショナルセミコンダクター）を使用する。これに対応するよう設定ATT値変換処理回路を変更した。同様にRF ON/OFFコントロールに使用していたダイオードRFスイッチ（1SS97）をRFスイッチ（SW239：M/A-COM）とスイッチドライバ（SWD119：M/A-COM）のICに変更。

#### 3.4 Pickup検波

AGC&APC制御装置に入力されるPickupのレベルを検波するOPアンプ調整ボリュームを前面パネルからアクセスできるように改造した。検波調整はタンク内

電力を指標するものであるからAGC&APC制御装置の交換時には必ず調整が行われる。従来型AGC&APC制御装置ではAGC基板上に配置されているボリューム抵抗へアクセスする必要があったので、この改良も調整時間短縮に効果がある。

#### 3.5 位相調整ボリュームの追加

回路内に2つの位相調整ボリュームを追加した。図1の経路中に設置されたPRESET PHASE ADJUSTは0～90度の位相変化が可能でAPCループの微調整に使用される。なお発振を避けるためのAPCループ調整粗調については、ケーブルを延長・短縮することで対応している。もう1つは経路中に設置されたACTUAL PHASE ADJUSTで0～90度の位相変化量を持ち、RF位相をモニターするアクチュアル値表示（PH act）の微調を行うことができる。

### 4. 新型AGC&APC制御装置の動作テスト

製作された新型AGC&APC制御装置をHIMAC入射器リニアックに装着し調整後の動作運転テストを行った。図3はDTLでの運転テストによる各種波形を示す。Ch.4（緑）はRF ON/OFF区間を示し、ビーム加速区間に相当する後半部において位相・振幅誤差が共にフラット部を形成しAGC&APC動作が正常に制御されていることがわかる。

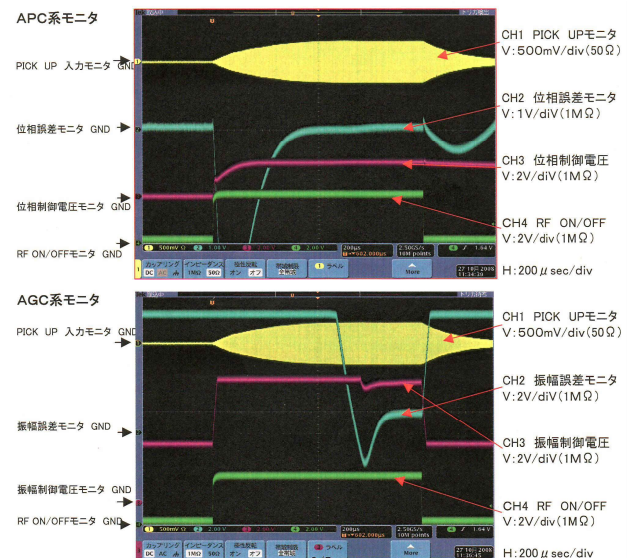


図3. DTLにおける新型AGC&APC制御装置の運転テスト結果

### 5. APC OK時の位相値相違問題への対策

AGC&APC制御回路がAPC OKとなりAPCループがロックされている時に、RF OUT側のケーブルや高周波アンプ、高周波タンクが何らかの原因でRF位相に影響を与えた際、APCフィードバック制御は位相制御電圧を変化させ影響されて位相に対して補正する動作を行う。しかし位相制御電圧が変化して移相器（APC移相器）が働くことで状態が変化すると、DBM

であるAPC移相器の入力インピーダンスが変化し、VSWRが変化してしまう。その結果、反射の影響が変化して上流に位置している方向性結合器からの信号（APC REF）の位相が変化する。そしてPickupのReferenceとして利用するAPC REFが変化するためにAPCは変化したAPC REF値に追従してフィードバック制御を行ってしまう。この問題による影響は各RF装置のAGC&APC制御装置により異なるが、位相制御電圧変化前後でのAPC OK時の位相値（PH act値）が最大で7度の相違があることを確認した。図4(a)に位相制御電圧変化前後でのAPC OK時の位相値変化の測定系を示す。APC移相器への位相制御信号を0~10Vまで変化させてネットワークアナライザS21の位相変化を測定する。表2に0V時をオフセットとした測定結果を示す。

以上のAPC OK時の位相値相違問題に対し図4(b)で示されるバッファアンプと方向性結合器から成るモジュールを追加した。モジュール追加による測定結果を表2に示す。位相値変化量は±0.1度程度に収まり、バッファモジュールによるアイソレーション効果によりAPC移相器からの反射の影響が軽減されていることがわかる。

09年4月よりDTLタンク2の従来型AGC&APC制御装置へこのモジュールを追加して運用を行っている。以前データでは約2度の位相値相違が発生していたが、現在まで~0.2度程度で推移しており付随する不具合は発生していない。

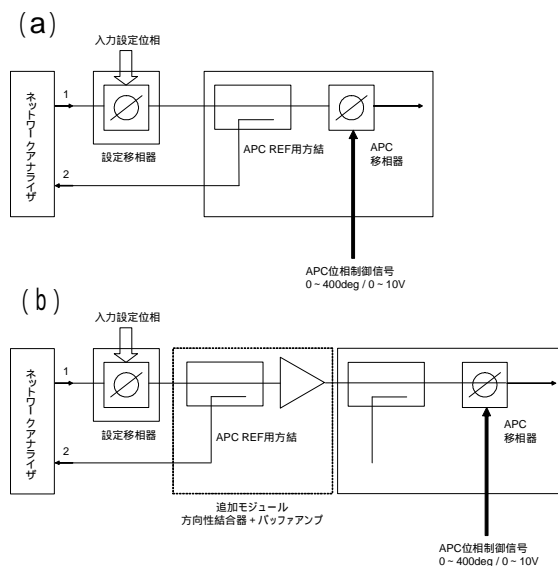


図4.(a) APC移相器変化によるAPC REFへの影響の測定系  
(b) 追加モジュールを入れた場合のAPC移相器変化によるAPC REFへの影響の測定系

## 6. まとめと今後の予定

新型AGC&APC制御装置を設計開発し正常動作を確認した。新型AGC&APC制御装置の導入により得られた利点を以下にまとめる。

- AGCおよびAPC基板をケーシングとGND強化した効果かどうか不明であるが、従来型よりもRF波形にスパイク等のノイズが少ない（特にRF運転監視に利用しているHPAのスクリーングリッド電源電流波形）。
- 不具合調査を容易に行うことを目的として回路の各箇所に新設したモニターや調整機構および配置レイアウト変更により、他RF装置（RFQ、DTL、DBC）へ導入し正常動作を確認するまでの作業時間を従来型に比べ約半分に短縮することができた。
- 不具合時対応として予備のAGC&APC制御装置と交換する際に、アナログ回路の個体差と各RF装置の高周波増幅器システムの個性のために、従来型では交換前状態（キャビティでのRF位相・レベル）を再現するのに上位制御計算機からの運転入力パラメータを変更する必要があった。新型は関連する回路の微調が可能のため上記個体差、個性を吸収することができ運転入力パラメータ変更なしで再現できる（このことは運転監視オペレータにとって大きい利点である）。

APC OK時の位相値相違問題については従来型、新型を問わない回路設計上の不具合である。新型に今後導入し運用する予定である。09年9月から運用を開始し、安定したビーム供給を得ることができれば新型AGC&APC制御装置の他RF装置への量産化を考えている。

表2 . APC OK時の位相値相違問題に対する調査結果。APC移相器への位相制御信号を0~10Vまで変化させて図4(a),(b)でのAPC REF位相変動測定結果

APC 位相制御信号 [V]	図4(a)での測定結果 [度]	図4(b)での測定結果 [度]
0	0.0	0.0
1	-2.4	-0.1
2	2.7	+0.1
3	4.0	+0.1
4	1.4	-0.1
5	2.0	0.0
6	6.4	+0.1
7	7.6	0.0
8	4.6	+0.1
9	0.6	0.0
10	-1.4	+0.1

## 参考文献

- [1] T.Takeuchi, et al., "TROUBLE RECOVERY AND MAINTENANCE OF AMPLIFIER POWER SUPPLY FOR HIMAC INJECTOR LINAC", Workshop on Accelerator Operation (WAO2007), Trieste, Italy, Sep. 23-28, 2007