

KEK-PS-Booster の無同調型高周波加速装置

二宮重史^{A)}、戸田 信^{A)}、木藤清明^{B)}、東 定仁^{B)}、平島照久^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県 つくば市 大穂 1-1

^{B)} 電気興業株式会社 〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津桜台 4052-1

概要

本高周波加速装置は、同調無しで、電力効率を大きく損なうことなく、2MHz から 6MHz までの帯域を持たせたものである。広帯域の特長を活かして加速開始時には加速周波数の第 2 高調波を重畳することも考えている。

加速電場が従来のほぼ 2 倍近く高いので、加速空洞の中間に 40cm 程度の空間が出来た。ここに補正電磁石を設置することも出来る。

さらにこの加速空洞は強制空冷方式を採用しているのも大きな特徴のひとつである。

1 経過

筆者らは、卓上陽子シンクロトロンの高周波加速装置の一つの可能な形として、分布増幅器による、広帯域で、加速電場が高い無同調型高周波加速装置を提案した[1]。これには帯域外に共振性の Impedance のピークが存在していることが分かっていたので、強いビーム強度の加速器への応用は不可能であろうと考えていた。しかし、この Impedance のピークは、ある程度小さく出来ることがわかり、KEK-PS のブースター加速器への応用を提案した[2]。

その後、電力効率を上げるために、電力増幅器を Push-pull 構成に改めたので、それをここで報告する。これはもはや分布増幅器ではなく、周波数の高域は、Low-pass Filter の原理を用いて、拡張したものとなっている(原理は 1992 年に提案している[3])。しかし、分布増幅器の遅延回路も Low-pass filter と言えることから、これもそのカテゴリーに入れても良いのかもしれない。

2 無同調型高周波加速装置

2.1 加速空洞

初期の設計は、磁性体のテストピースを用いて、高周波での Impedance を見積もり、磁性体のサイズを決定した。加速ギャップまわりの等価容量は、Mapping 法を用いて計算した。空洞は 2 台使用する。その 1 台分の空洞・磁性体等の諸元は第 1 表の通りである。

表 1: 空洞・磁性体の寸法

空洞の外形	800mm(H)×800mm(W)×525mm(L)
空洞の内矩	760mm×760mm×485mm
加速管外径	165 mmφ
加速ギャップ	30mm
磁性体外形	700 mmφ(D _{out}) - 350mmφ(D _{in}) ×25mm(T/7) ×7
通風路	5mm

2 台の空洞のギャップでの Impedance の実測値を図 1 に示す。この Impedance を再現するシミュレーターの回路を次の図 2 に示す。

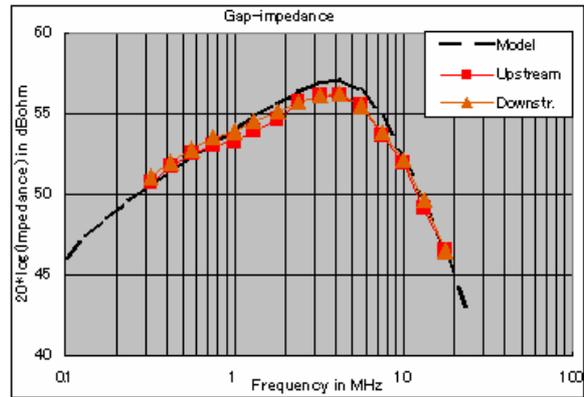


図 1: 加速ギャップでの Impedance の実測値と図-2 の回路 Model 計算の値。

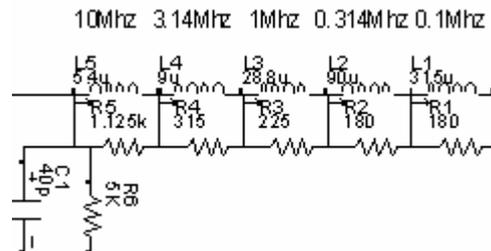


図 2: 加速ギャップでの Impedance を再現する model.

図 2 で、C1 は構造から来る容量で、この 70% は磁性体部の同軸構造からの寄与である。他の R, L は磁性体の Impedance を再現している。磁性体の材質(Hitachi metal:FT3M)さえ同じなら、形状因子、 $F=T \cdot \ln(D_{out}/D_{in})$ をスケール・ファクターとして、他の形状でもこの Model を適用できる。我々の場合、表 1 から、 $T=0.175m$, $D_{out}/D_{in}=2$ である。

2.2 電力増幅器

電力増幅器の構成は、最初は分布増幅器[1, 2]としていたが、電力効率が極端に小さいことから、パラレル・プッシュ・プル回路に変更した(図 3)。それでも電力効率は大きくはなく、30% 台である(表 2)。出力トランスのコアには、PS 主リング加速空洞に使っている Ferrite を 6 枚使用している(後述)。巻き数は、4 ターンである。なおシミュレーションは、図 3 とは違った回路である。トランスがこの回路図のままだと正常な動作をしないので、それをプライマリ

リーケージ Inductance と理想トランスの組み合わせ回路で構成した。コイルの並列容量の影響で、4MHz 以上の周波数では、性能が悪くなり波形歪を生じるが、実用上問題ないと考えている。

グリッド回路には、All-pass Filter が使っている。真空管の様な容量性入力の場合、この回路は不可欠といつてよい。反射を効果的に低減してくれる。

表 2：16kV 加速電圧時の電力増幅器の諸元

アノード電圧	11kV
アノード入力電力	150kW
出力電力	55kW
アノード電源平均電流	11A
第 2 グリッド電圧	800V
真空管	TH571B × 4
駆動電力	1kW

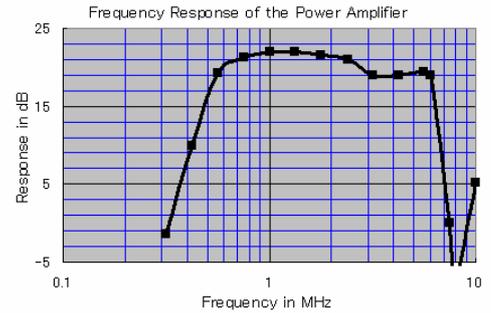
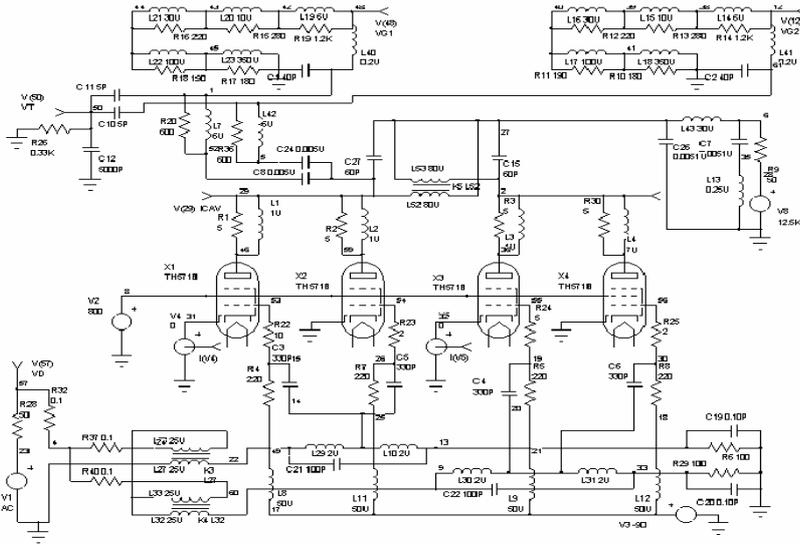


図 3：電力増幅器の回路図と 1kW アンプ入力から電圧分割器出力までの周波数特性。

2.3 電圧検出器

コンデンサ型高周波電圧分割器は、簡単には広帯域に出来ない。それは、コンデンサの自己共振が観測帯域内に入ってしまう、特定周波数に伝達ゼロを作ってしまうからである。共振周波数以上では、コンデンサはコイルになってしまうので伝達特性も大きくなる。これを避ける為、510pF には 22Ω を直列にしたものを 2 組、同じく 510pF と 10Ω を直列にしたものを 7 組、並列接続している(図 4)。抵抗は 50Ω~100Ω の範囲が並列容量や直列 Inductance の影響が少ない。左端のコイル 36μH は 1MHz での特性を大きく改善している。総合的に 0.7MHz~10MHz の間は、±0.5dB 内に入っている。図 5 は電圧分割器の周波数特性とその調整・計測時の写真である。真空コンデンサを囲む円筒形ガード・リングは設置場所による影響を除くためである。その下のアルミ箱の中にコンデンサや抵抗が入っている。

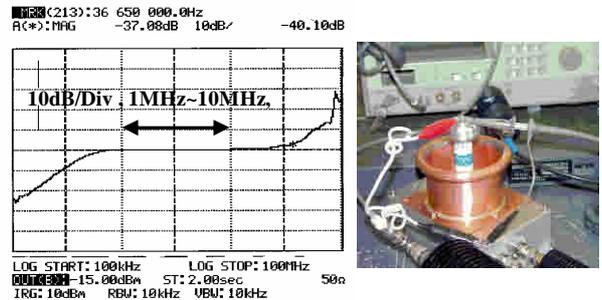


図 5：電圧分割器の周波数特性と形状。

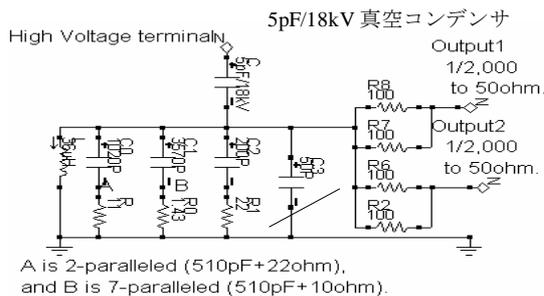


図 4：1MHz~10MHz の帯域を確保した電圧分割器。

2.4 空冷装置

基本的な設計方法は、[3]に述べているし、PS のインターナル・レポートにも述べている。二つの空洞から出る熱 70kW を空気冷媒で取り去るのである。高温になった空気は、この装置内で水冷する。

表 3：空冷器の性能

水の流量	40 liter/min. × 2
空気の体積流量	1m ³ /sec × 2
最大風速	~86 km/h
入/出端水温	20°C/30°C
入/出端空気温度	40°C/30°C
送風モーター電力	3kW
磁性体表面温度	<90°C

設置場所がないので、空冷装置は2段に設置した(図 6)。二つの空洞のおおの独立な構成で、インターロックはそれらをシリーズ接続して安全性を確保している。



図 6: 空冷装置の外観。

実験室での運転では、2台の空洞での 55kW の発熱に対して、空洞出口の空気温度、32°C、磁性体外周の表面温度は、52°C であった。

3 テスト運転

3.1 テスト結果

テスト運転は高周波実験棟で行った。グリッド・バイアスは、高周波電圧出力中のみ A 級動作となるように連続変化させている。試験の最初は、分布増幅器の回路[2]で 14kV の加速電圧を出してみた。この場合、波形歪を小さくするには、真空管電流を多く流して、電力効率を下げる必要があった。そこでかねて考えていた、図 3 で示したような Push-pull 結合に切り替えた。アノード回路の結合トランスの設計の不良で、それを 3 回も作り直した。実験は電圧制御(AVC)を働かせている。テスト運転中の記録写真を、図 7、図 8 で示す。

4MHz でエンベロープ歪が見える。このとき波形の下端がクリップされ、それ以上の周波数では、三角波に近づいている。これは、トランスの寄生容量に高周波電流が流れて、トランスとしての機能を失うことによる。

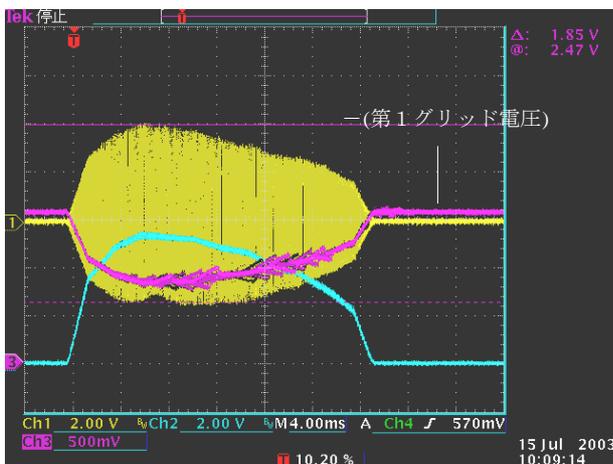


図 7: 上から、加速電圧 16kV の高周波電圧(画面表示の 18kV はカーソルの位置不良)、次が、グリッド電圧 -130V から -70V まで連続変化している。下が、高周波電圧の検波波形。電圧出力は 25ms 続いている。この間周波数は、左が 2.2MHz で 25msec 後は 6.2MHz に変化している。



図 8: 図 7 の拡大写真。左の写真は 4MHz での高周波波形、右はほぼ 4.5MHz での波形。

3.2 高周波電力トランス

巻き線の寄生容量は、概略 35pF/m である。初期のシミュレーションではこれは周波数特性に効かないことを示していた。このことから、巻き線として、同軸ケーブルをそのまま使って実験を開始して、大失敗をしたのである。これはシミュレーターの誤動作であることが分かり、新たにトランスを製作して、16kV の加速電圧を得ることが出来た。コアは Ni-Zn フェライト、450mmφ-230mmφ-25mm(t)、 $\mu_r=110$ のもの(主リングの空洞用の予備品)を実験中は 8 枚使用し、10D-2E の芯線部を使って、4 ターン×2 を交互に巻いた。コアは、冷却のため 5mm 間隔で保持している。加速器にインストールした増幅器のトランスは、コアを 6 枚に減らしている。将来、サイズを最適化したコアを試すべきであると考えている。

4 結論

報告を書いている時点で、Booster に設置後の動作テストを行っている。操作してみて、先ず感じることは、同調形空洞には不可欠の自動同調装置が無いことで、気安くパワーを入れることが出来ることである。

無同調型加速装置は増幅器内の位相遅れが大きい。このことから、空洞電圧の位相調整ループがうまく働くかどうか心配であったが、これも難なくクリアしてくれた。

総合的な電力効率は同調形加速装置より 50%程度劣るのだが、運転の簡便性はそれを十分に補うものがある。空洞の長さ(表 1 の L)はもっと小さく出来る、そうするともっと加速電場は高くなるのだが、こういう実用機では、加速電場のスペック競争は出来ない。

ともあれ筆者らの 10 数年来の夢が現実となるような装置である。後は Beam 加速テストを待つのみである。

謝辞

CERN-PS や J-PARC の RF の人々、東洋製作所の遠藤さん、その他多数の人々、多くの文献から多くを教わったのに、参考文献は自己中心的で恥ずかしい限りである。

参考文献

- [1] S. Ninomiya, *et al.*, Proceedings of EPAC2000, p1981, Vienna, 2000.
- [2] S. Ninomiya, *et al.*, Proceedings of APAC01, p535, Beijing, September. 17-21, 2001.
- [3] S. Ninomiya, KEK Report 92-2, April, 1992.