

DEVELOPMENT OF AN X-BAND KLYSTRON MODULATOR USING A PULSE-FORMING LINE AND MAGNETIC SWITCH

Mitsuo AKEMOTO and Seishi TAKEDA
 KEK, National Laboratory for High Energy Physics
 Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

A new type of klystron modulator has been developed for the Japan Linear Collider. It consists of a pulse-forming line (PFL), a pulse transformer and a magnetic switch. In order to realize a compact modulator, a triplate strip transmission line using deionized water as a dielectric was adapted for the PFL. A preliminary test has shown that an output pulse with a peak voltage of 600 kV, a pulse length (flat-top) of 420 ns and a rise time of 154 ns can be generated for a dummy load with an impedance of 450 Ω .

パルス成形線路と磁気スイッチを使用したXバンドクライストロン電源の開発

1.はじめに

JLCでは,100MW級のXバンドクライストロンをドライブするパルス変調器電源が約3600台必要である。[1]このようにクライストロンの大量化及び大出力化にともない特に,クライストロン電源の小型化,長寿命化そして高効率化が問題になる。

Xバンドクライストロンに要求されるピーク電圧は600kVと非常に高く,150ppsと比較的高繰り返しでまたRFパルス幅が400nsと狭いために高効率化をはかる上,非常に短い立ち上がり立ち下がり特性を有するパルス電源が要求される。

これまでにXバンドクライストロン用パルス電源として,従来のサイラトロンとパルス成形回路(PFN)を用いたパルス電源を開発した。[2]しかしサイラトロンについては,商業品として定格100kVのものがあるが,60kV以上でかなりのプリファイヤー及びバックファイヤーがあり実用の域にあるといいがたく,現在改良中である。またサイラトロンは大電力及び高繰り返し動作時では管内の電極の劣化,封入ガスの劣化が著しく動作寿命に限界がある。この寿命の限界は,クライストロン電源の長寿命化の妨げとなり,加速器の運転経費の増大につながる。

最近,エキシマレーザー,銅蒸気レーザー及び自由電子レーザーの高電圧パルス電源では,高繰り返し化,長寿命化及び大出力化に対処するキーテクノロジーとしてスイッチ素子の半導体化,磁気パルス圧縮法の開発等行われている。[3]サイラトロンに匹敵する通電能力を有し,寿命は格段に長い半導体デバイスも実用化されつつある。

[4]

このような状況の下でJLC用Xバンドクライストロン電源についても,スイッチング素子に半導体素子と磁気スイッチといった固体素子を使用した電源の開発を進めてきている。[5]今回,特に小型化,長寿命化及び高効率化に対する一つの解としてパルス成形線路(PFL)と磁気スイッチを使用した完全固体化クライストロン電源の開発

を行った。ここでは,この電源の放電部ユニットの設計・製造及び性能試験について報告する。

2.電源の仕様と構成

表1に今回試作したXバンドクライストロン電源の仕様を示す。電源の出力インピーダンスはクライストロンのパービアンスによる。現在開発が進められているクライストロンのインピーダンスは600~2500 Ω の範囲であるが以下のことを考慮してパルス電源の出力インピーダンスを500 Ω にした。(1)コストの低減化及び小型化の面で1台の電源から2本以上のクライストロンをドライブする可能性がある。(2)短い立ち上がりには低インピーダンスのほうが有利である。

表1
Xバンドクライストロン電源の仕様

出力電圧	600 kV
出力電流	1200 A
出力インピーダンス	500 Ω \pm 16%
パルス立上り時間(10-90%)	150 ns
パルス平坦部	400 ns
パルス平坦度	< \pm 1.0%
繰り返し	50 pps

図1にXバンドクライストロン電源全体の回路構成を示す。動作は,まずGTOを点弧し,半導体スイッチ(SCR)を使用したDC10kV高電圧電源で充電されたコンデンサC0を放電させ,コンデンサC1を充電する。磁気スイッチMS1は,コンデンサC1がピーク電圧10kVまで充電された時点で非飽和から飽和状態へ移行しパルストランスを通して8倍に昇圧されてPFLを充電し始め,同様にPFLがピーク電圧80kVに充電された時点で磁気スイッチMS2が非飽和から飽和状態へ移行することによって,パルストランスを通して15倍に昇圧された-600kV, 700nsの矩形波がクライストロンに印加される。

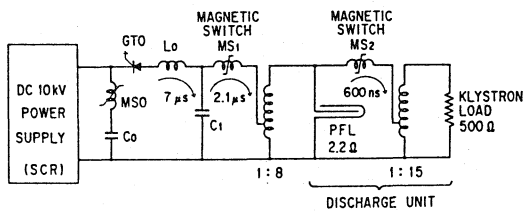


図1. 完全固体化Xバンドクライストロン電源回路構成

3. 放電部ユニット

放電部ユニットの外観を図2に示す。放電部ユニットは、水パルス成形線路(PFL), 磁気スイッチ, パルストランス及び水模擬負荷から構成される。詳細は以下に述べる。

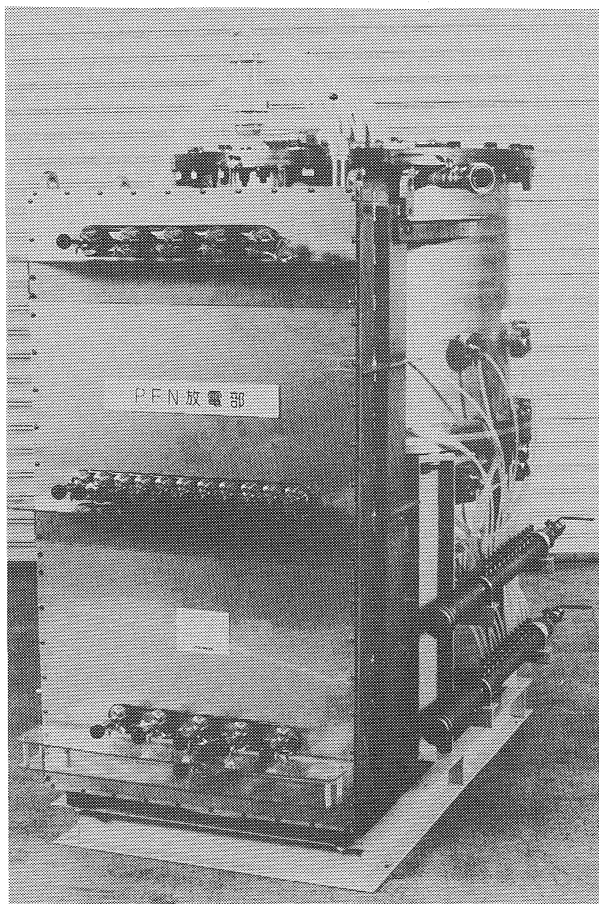


図2. 放電部ユニットの外観

3-1. パルス成形線路(PFL)

構造が単純で製作が容易な図3(a)に示されるような3枚の平行平板を用いたストリップ線路方式を適用した。真ん中に高電圧側導体板で両端にアース側導体板を配置した構造になっている。PFLの特性インピーダンス及び波形の調整ができるように高電圧側導体板とアース側導体板との間にアクリル板が挿入できるようになっている。

フリッジ効果が小さい場合, この方式のPFLの特性インピーダンス Z は次式のように求められる。

$$Z = \frac{377 d}{2\sqrt{\epsilon_r} w}$$

ここで ϵ_r 比誘電率, d は導体板間の距離そして w は高電圧側導体板の幅である。距離 d は水の絶縁耐力12kV/mmとして12mmとした。またこの式から, 幅 w は $\epsilon_r=76.8$ (水温30℃)そして最小特性インピーダンス $Z=1.848\Omega$ として140mmに決定した。PFLの長さは次式で求められる。

$$L = \frac{\tau \cdot c}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

ここで τ はPFLのパルス幅そして c は真空での光の速度(3.0×10^8 m/s)である。この式から, 要求されるパルス幅は700nsであるから, 線路の長さ L は12m必要である。PFLの仕様を表2にまとめた。

この長いPFLをコンパクトに収めるために, 図3(b)のように線路を11回折まげて幅1260mm, 奥行660mm, 高さ390mmの水で満たされ箱に収納されている。線路及び箱の材質はステンレスである。

水の誘電率は著しい温度特性をもち, その温度変化率は30℃近辺では-0.5%/℃である。従って, PFLの特性インピーダンスの安定度を±0.5%におさえるためには, 水温の安定度は±1.0℃以下にしなければならない。



図3(a) PFLの断面

$$v-s = N \cdot \Delta B \cdot A$$

$$L_{sat} = \frac{\mu_{sat} \cdot N^2 \cdot h}{2\pi} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

ただし

- v-s = 磁気スイッチのボルト-秒積
- N = 巻線の巻数
- ΔB = コアの磁束密度変化量
- A = コアの断面積
- L_{sat} = 飽和後のインダクタンス
- μ_{sat} = コアの飽和後の透磁率
- h = コアの高さ
- r_o = コアの外半径
- r_i = コアの内半径

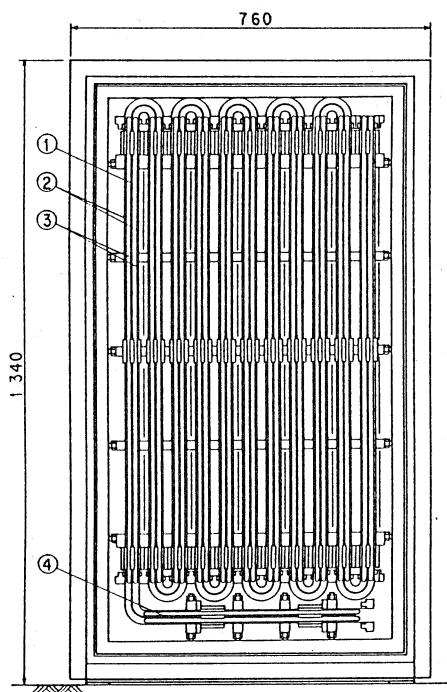


図 3(b) PFL箱の構造

(1)高電圧側導体板(2)アース側導体板(3)インピーダンス調整板(4)高電圧接続口

表 2
PFLの仕様

線路の長さ	12 m
特性インピーダンス	2.2Ω±16%
パルス幅	700 ns
高電圧側導体板の幅	140 mm
アース側導体板の幅	200 mm
高電圧側導体板の厚さ	6 mm
高電圧側導体板とアース側導体板との間の距離	12 mm

3-2.磁気スイッチ

磁気スイッチの仕様は(1)スイッチのボルト-秒積と(2)飽和後のインダクタンスの制約から決められる。PFLの充電電圧とそのピークとなる時刻で丁度飽和する条件からボルト-秒積が0.084v-sでなければならない。また150nsの立ち上がり時間を満足させるには磁気スイッチの飽和後のインダクタンスは120nH以下でなければならない。コアとしてトロイダル型を用いることから、コアのサイズは、次の式で計算される。

表 3
磁気スイッチの仕様

巻線の巻数	1
コアの外半径	230 mm
コアの内半径	130 mm
コアの高さ	384 mm
(高さ48 mmのコアを8段重ね)	

3-3.パルストランス

比較的大きな昇圧比1:15なので周波数特性が悪くならないよう設計しなければならない。コアは磁気スイッチで使用したものと同一ユニットコアを3段重ねて使用した。1次及び2次コイルの巻数はそれぞれ1と15である。立ち上がり時間を短くするためには、もれインダクタンスを小さくしなければならない。2次巻線をbifiler巻でテーパ状に巻いた。もれインダクタンス及び分布容量の計算値は高圧側換算でそれぞれ9.3μHと284pFであった。パルストランス、磁気スイッチそして水模擬負荷が収納されているオイルタンク内部の断面を図4に示す。

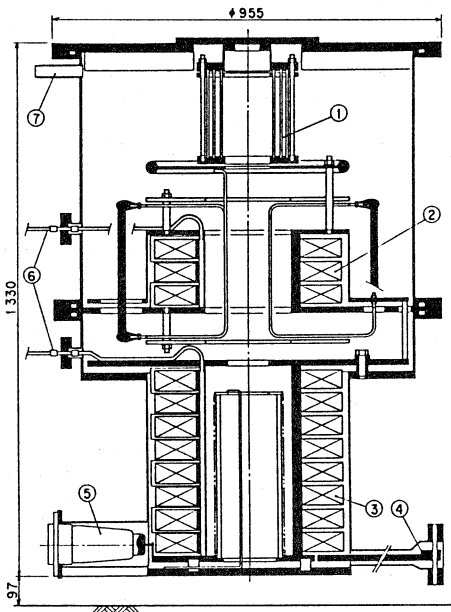


図4. オイルタンク内部の断面

(1)水模擬負荷 (2)パルストランス用コア (3)磁気スイッチ用コア (4) PFL箱との接続口 (5) 高電圧パルス入力接続口 (6)パルストランス及び磁気スイッチ冷却オイル入口 (7)冷却オイル出口

4. 性能試験

放電部ユニットの試験用回路を図5に示す。PFLのインピーダンスを安定にさせるために水の温度を30±1.0℃に維持した。

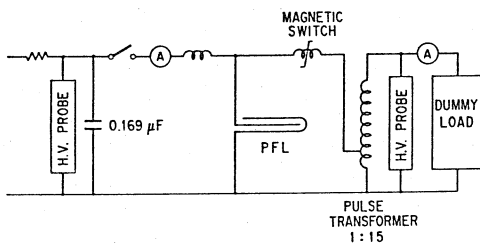


図5 試験回路

4-1. 出力電圧波形

0.169 μFのコンデンサを90kVまで充電し、ギャップスイッチで放電部ユニットのPFLに充電を行った。図6にPFL調節後の水模擬負荷(450Ω)での電圧波形を示す。出力電圧と電流は、それぞれログスキーコイル及びPearson製CTで測定した。またパルス平坦部を拡大したものを図7に示す。ピーク電圧は600kV、ピーク電流は1,330A、半値全幅は707ns、立ち上がり時間(10-90%)は154nsそしてパ

ルス平坦部は平坦度±1.7%で420nsの波形を得た。平坦度を除いては仕様を満足する波形を得ることができた。

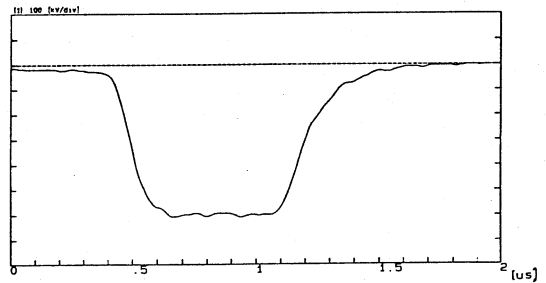


図6. ダミー負荷(450Ω)での出力電圧波形
(V: 100 kV/div, H: 100 ns/div)

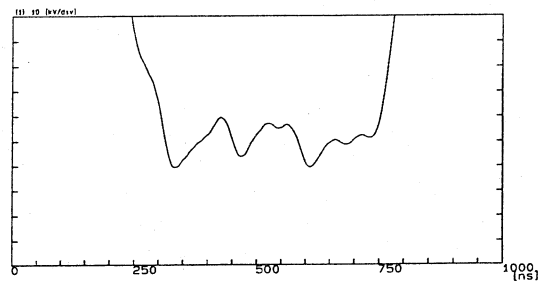


図7. 出力電圧波形パルス平坦部の拡大
ダミー負荷(450 Ω)
(V: 10 kV/div, H: 50 ns/div)

4-2. パルス平坦部での振動

パルス平坦部での振動の周波数主成分は波形のフーリエ解析から7.6MHzであった。この振動の発生源を調べるために(1)磁気スイッチの出力部に模擬負荷を接続してパルストランス直前の出力電圧・電流波形の測定、(2)パルストランス単独での周波数特性及びパルス応答特性を測定した。(1)からは平坦度が±1.0%以下の良好な波形を得た。(2)からは7.6MHzを中心とした共振特性及びパルス平坦部の振動と同様な振動波形が得られた。このことから、この振動はパルストランスで発生しており巻線の分布容量と分布インダクタンスの共振に起因するものと考えられる。

4-3. ダンピング抵抗付パルストランスによる平坦度の改善

パルス平坦部の平坦度を改善する1つの方法としてパルストランス内で発生した振動をパルストランスの巻線に抵抗成分をもたせて除去する直接的方法が考えられる。パルストランスの2次巻線の15巻の内13巻に5Ωの抵抗を各巻線に直列に接続し、このときの出力電圧波形を図8に

示す。またパルス平坦部を拡大したものを図9に示す。ピーク電圧は590kV,ピーク電流は1,250A,半値全幅は712ns,立ち上がり時間(10-90%)は154nsそしてパルス平坦部は平坦度±0.7%で370nsの波形が得られた。この方法は平坦度の改善には効果はあるが,このダンピング抵抗によって72J/pulseのエネルギー損失を生む。

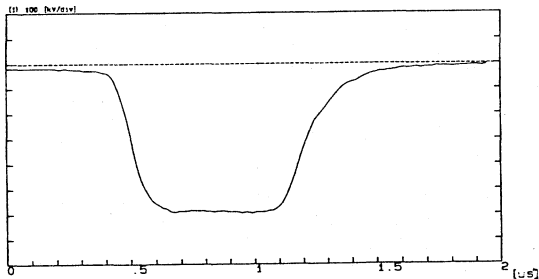


図 8. ダンピング抵抗付パルストランスでの出力電圧波形(V: 100 kV/div, H: 100 ns/div)

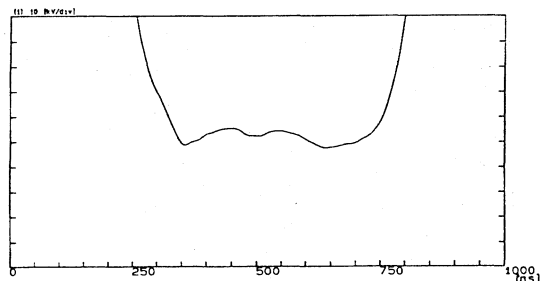


図 9. 出力電圧波形パルス平坦部の拡大
(V: 10 kV/div, H: 50 ns/div)

5.まとめ

水PFLと磁気スイッチを使用した完全固体型のコンパクトなJLC用Xバンドクライストロンパルス変調器の開発を行った。パルストランスのR&Dはまだ必要であるが,ほぼ仕様を満足した出力パルス波形を得ることができた。今後,実用化にむけ,各素子のエネルギー損失の解析,高繰り返し動作試験等を行う。

謝辞

この電源の製作にあたってはニチコン(株)草津工場特機技術課の徳地明氏,吉本宏氏及び二宮紀彦氏に大変お世話になった。ここで謝意を表したい。

参考文献

[1] JLC Group, "JLC-I" KEK Report 92-16, (1992).

- [2] M. Akemoto et al., "Development of an X-band Klystron Modulator for Japan Linear Collider," Proc. of the 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, Saitama, Japan, 144-146(1991).
- [3] T. Shimada, et al., "An all Solid-State Magnetic Switching Exciter for Pumping Excimer Lasers", Rev. Sci. Instrum., 56, 2018(1985).
徳地明, "FEL用GW級完全固体化電源", パワーエレクトロニクス研究会論文誌, Vol. 18, 15-22(1992).
- [4] F. Endo, et al., "Pulse Switching Characteristics of MAGTs for Pulsed Power Applications", Trans. IEE of Japan, Vol. 113-D, No. 4, 445(1993).
- [5] T. Shidara et al., "Performance Test of a 600 kV Blumlein Modulator for an X-Band Klystron relevant to Japan Linear Collider," Proc. of the 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, Saitama, Japan, 153-154(1991).