

大電力パルス発生装置

Pulse Generator

南 野 幸 雄* 土 屋 久 **
Yukio Minamino Hisaichi Tsuchiya

内 容 梗 概

ここ一、二年来にわたり製作した大電力パルス発生装置のうち、ライン型パルサに属するものについて、その設計概要と実例とを紹介した。

本文で紹介するのは、尖頭出力 300 kW, 600 kW, および 2MW のもので、このうち 2MW のものは、マグネトロン RK 5586 を内蔵し直接 RF 出力を取り出しうるようにした装置である。

1. 緒 言

マグネトロンやクライストロン製造過程の最終において行われるパルス試験には、スパイク、サグ、リップルなどのきわめて少ない良質の波形をもつパルス発生装置（以下パルサと呼ぶ）が必要である。また最近線型粒子加速器用の MW 級パルサが要求されているが、これについても上述の性能を満足にもつていなければならないことが必要である。

われわれはマグネトロン試験電源ならびに線型加速器用パルサとしてハードチューブ型、ライン型ともに種々の出力のものを製造しているが、本文では、このうちライン型に属する 300kW, 600kW, 2MW（いずれも尖頭出力）の装置を中心にして、その設計方法と、製品の性能の概要を紹介する。

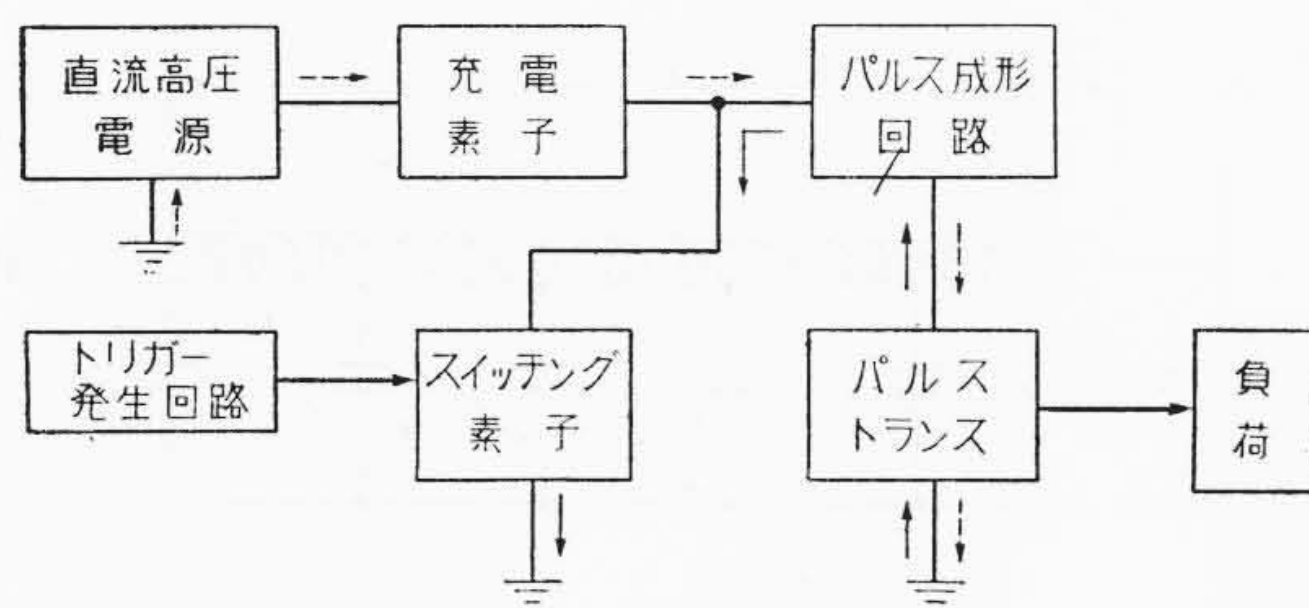
2. ライン型パルサの形式と優劣比較

第 1 図にこの型のパルサの全体の主要構成を示す。図において点線矢印は充電系路を、実線は放電系路を示すが、充電素子、スイッチング素子によつてそれぞれ特長あるパルサを形成する⁽¹⁾。

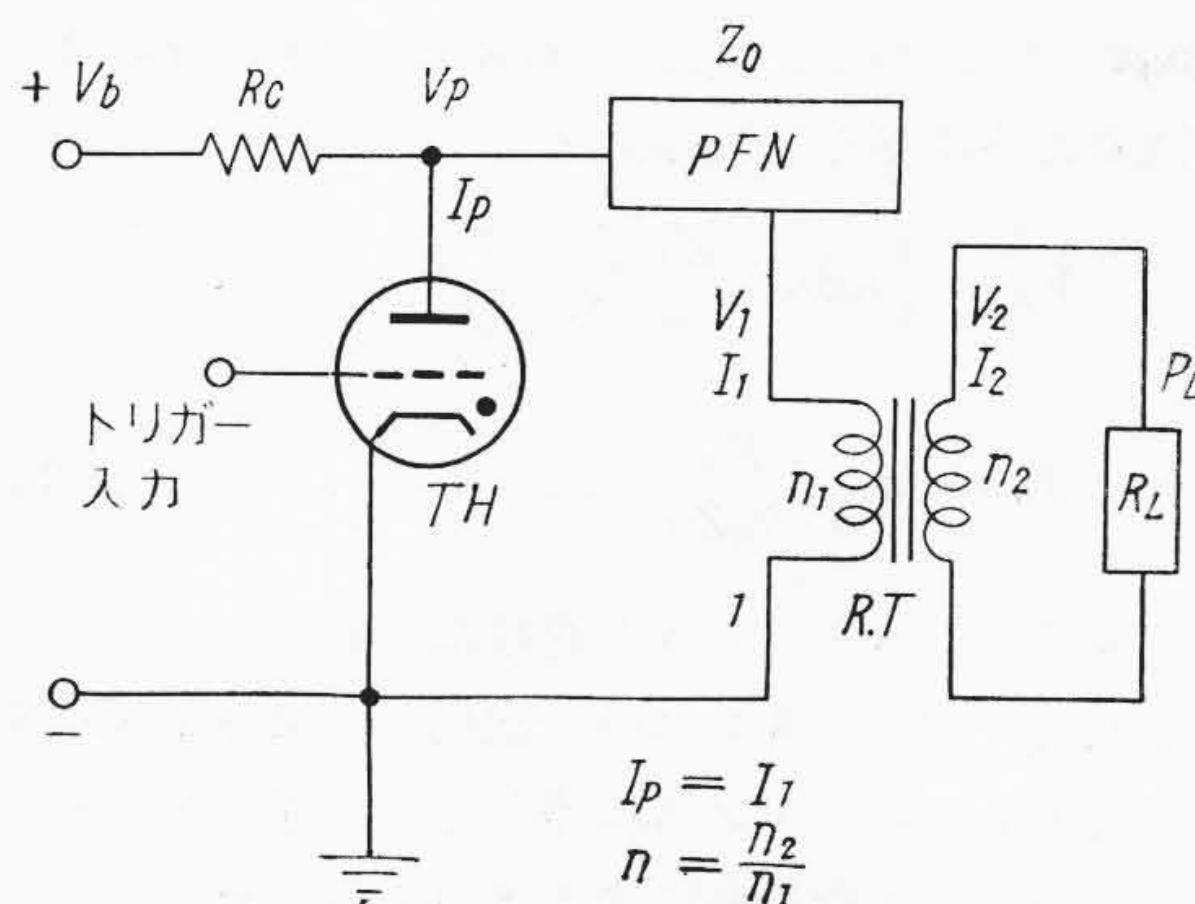
本装置では充電素子に直流共振充電方式(D.C. Resonant Charging) を、またスイッチング素子には、格子制御放電管すなわち水素入サイラトロンを採用した。充電方式にはこのほか直流非共振（抵抗）充電方式と、交

流共振充電方式とがあるが、抵抗充電方式は出力電圧の 2 倍以上の直流電圧を必要とし、電源装置が大きくなること、また交流共振充電方式は、出力電圧の約 $1/\pi$ の印加交流電圧(尖頭値)で済むが、その周波数は、くり返し周波数と等しいかもしくはその整数倍であることが必要であり、またトリガ印加の位相を、電源側の交流電圧値の零点に置くことが必要で、いずれも直流共振充電式に劣る。次にスイッチング素子であるが、大別して放電管によるものと、火花間隙によるものとがある。放電管としては放電開始時間、イオン消去時間の短いイグニトロンと水素入サイラトロン(以下単にサイラトロンと呼ぶ)が実用されているが、そのうちイグニトロンはトリガ入力電力が大きいかつ管球ごとに最適値が異なつて一般にはサイラトロンに劣る。また火花間隙にはわずかながらジッタがあることと、火花間隙全体を水素、アルゴンのようなガスを密閉した容器(ガス圧は約 1 気圧)内に収めなければならないことなど取り扱い上サイラトロンに比してやや不利である。現在数 10MW 以上の線型電子加速器用パルサにこの火花間隙スイッチが実用されている⁽²⁾が、30MW までならサイラトロンが完成されているので、この程度の出力までのパルサにはサイラトロンを使用すべきであろう。

第 2 図は直流非共振充電方式を第 3 図に直流共振充電方式を示す。第 3 図において D_c は充電二極管、 L_c は充



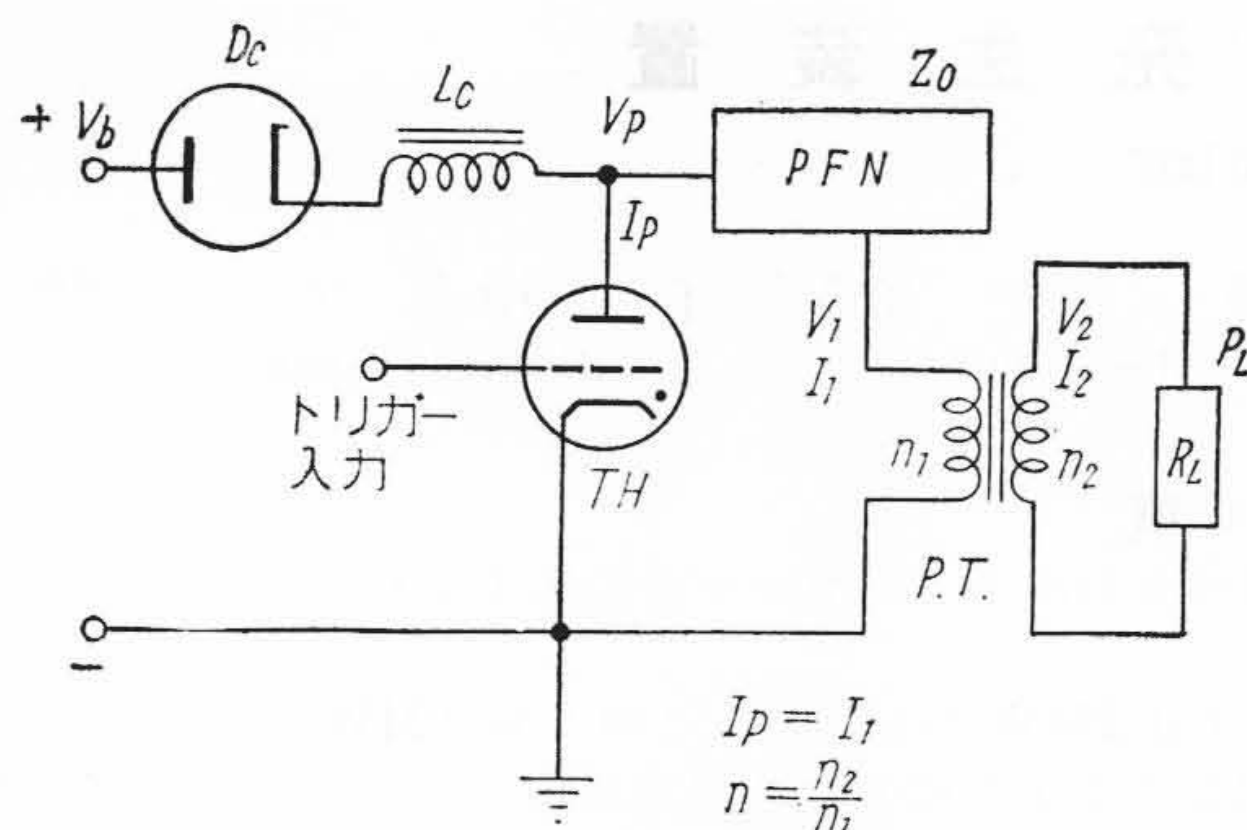
第 1 図 ライン型パルサの主要構成



第 2 図 直流非共振（抵抗）充電方式

* 日立製作所本社

** 昭和電子株式会社



第 3 図 直流共振充電方式

電リアクタ PFN はパルス成形回路兼エネルギー蓄積回路, TH はサイラトロン, P.T はパルストランスを示す。

3. 設計方法の概要

設計方針としては、パルサ自体を最高効率あるいは最大出力で動作させ負荷をこれに合せて選定できる場合と、負荷が与えられ、それにパルサを合せる場合とに大別されるが、一般には負荷すなわち使用クライストロンあるいはマグネトロンが指定される場合が多いので、ここでは後者の場合を述べることにする。

3.1 尖頭電圧、尖頭電流の決定

負荷抵抗、負荷電力すなわちパルサの出力が与えられているから必ずしも使用サイラトロンを最大の使用状態に置くとは限らない。これは現用サイラトロンの種類が少ないことによる。またパルサとしては、できるだけ広範囲の使用を目標とすべきであるが、サイラトロン, PFN の特性インピーダンス、パルストランスなどそれぞれ最適状態があるので、むやみに広い仕様を満たすことができない。結局負荷側の条件を十分満足せしめるよう設計を進めていくということになる。

第 3 図で負荷インピーダンス、出力, PFN 特性インピーダンスをそれぞれ Z_L , P_L , Z_0 , とし放電効率を η_a とせば、サイラトロンの陽極に印加すべき電圧 (Top Voltage) V_p , および電流 (Peak Current) I_p はそれぞれ次のように与えられる。

$$V_p = \left(nZ_0 + \frac{Z_L}{n} \right) \sqrt{\frac{P_L}{\eta_a Z_L}} \quad (1)$$

$$I_p = n \sqrt{\frac{P_L}{\eta_a Z_L}} \quad (2)$$

ただし n はパルストランスの巻線比である。

もし負荷インピーダンスの一次側への換算値 Z_L' を PFN の特性インピーダンスに等しくし、電力整合をとるとともに出力波形を最良にする条件をもたせると、上式はそれぞれ次のようになる。

第 1 表 水素入サイラトロンの規格 (1)

	V_p max.	I_p max.	外部インピーダンスの最適値
4C35	8 kV	90 A	90 Ω
5C22	16	325	50
5949	25	500	50

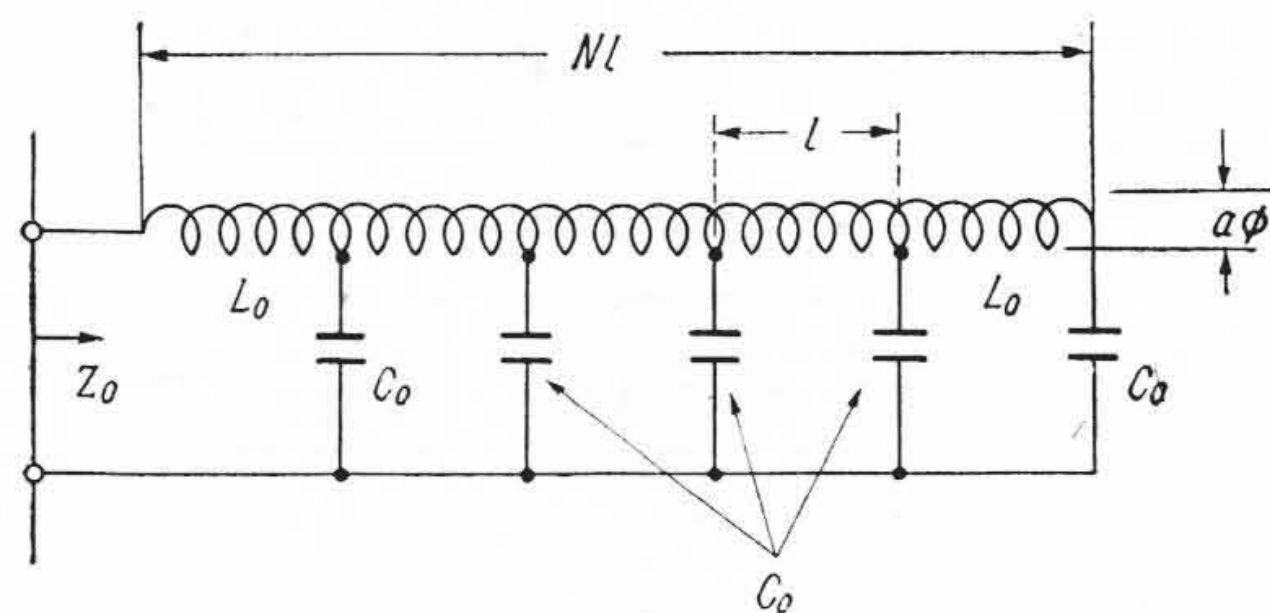
$$V_p = 2 \sqrt{\frac{Z_0 P_L}{\eta_a}} \quad (3)$$

$$I_p = \sqrt{\frac{P_L}{\eta_a Z_0}} \quad (4)$$

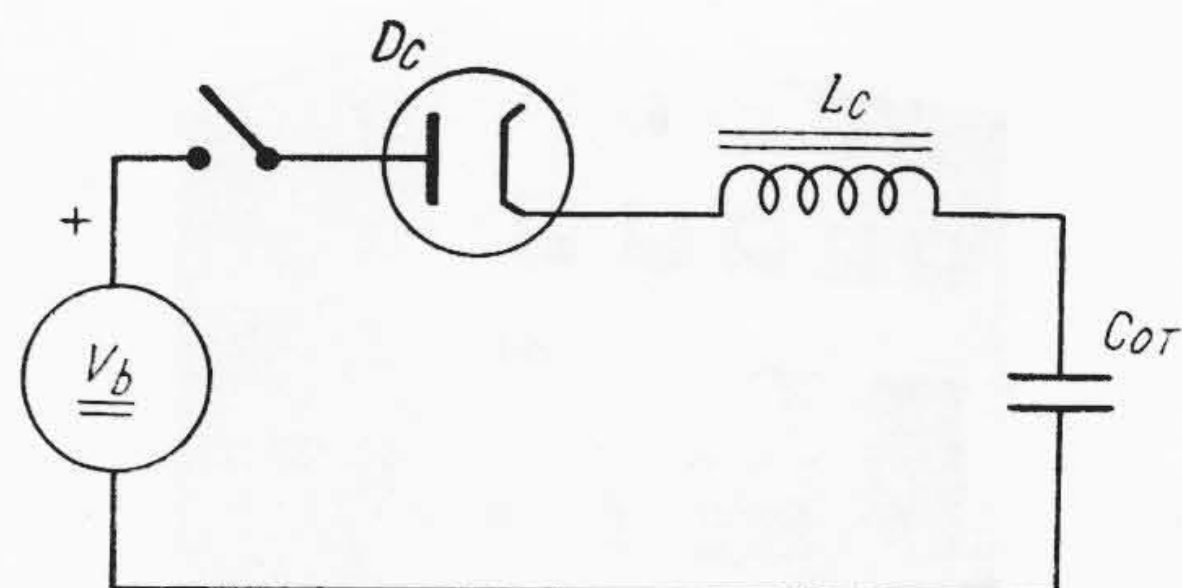
Z_0 は使用サイラトロンでそれぞれ最適値 Z_{opt} があるので、 V_p , I_p が使用限界内に入つておれば、 Z_{opt} で PFN を設計する。かくすれば最終的にパルストランスの巻線比 n が決定されることとなる。しかし Z_{opt} で、 V_p , I_p のいずれかが、選定したサイラトロンの規格値を超過してしまう場合がある。かかるときは、 Z_{opt} 以外の値で PFN を設計する必要を生ずる。一般に低インピーダンス負荷では、 V_p に制限を受けることが多いのでサイラトロンの直列接続が行われることもある。いずれにしてもパルストランスの巻線比を最終的に決める。第 1 表に中出力サイラトロンの V_p , I_p の最大規格値と、外部インピーダンスの最適値を示した。

3.2 パルス成形回路 (PFN)

ライン型パルサにおいて、その波形を決めるものは、トリガ電圧が十分であるならば、パルス成形回路である。この波形は矩形のパルスであることが必要である。そのためには、高電圧に耐え、 Z_0 が Z_L に等しい十分長い伝送線同軸型を用いればよい。しかし伝送線を用いた PFN は線間の絶縁とその長さ (たとえばパルス幅 $2 \mu s$ の PFN を作るには長さ約 300m の伝送線が必要である) に難点があつて、中出力以上のパルサでは実現することが困難である。そこで一般には第 4 図のような L , C の集中定数回路の組合せで PFN を実現する。図では N-セクションの等定数 PFN を示したものであるが、このままでは使用されず、若干の調整を行つて、波形を理想



第 4 図 パルス成形回路 (Pulse Forming Network)



第5図 直流共振充電回路

第2表 PFNのセクション数

パルス幅 τ_p	セクション数 N
0.1 μ S	1~3
0.25	2~4
0.5	3~5
1.0	4~6
2.5	5~7
5.0~10	6~12

矩形に近づける。設計としては仕様で定められたパルス幅によつて、まず全体のLCの値 L_{OT} 、 C_{OT} を求め、次いで必要なるセクション数を決めるのがよい。 L_{OT} 、 C_{OT} はパルス幅 τ_p と、 Z_0 とより次のように与えられる。

$$L_{OT} = \frac{\tau_p \cdot Z_0}{2} \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{OT} = \frac{\tau_p}{2Z_0} \dots\dots\dots (6)$$

セクション数 N は今までの実験によれば、第2表のように定めればよいことがわかつている。

等定数PFNでは各セクションの L_o 、 C_o はそれぞれ次のように与えられる。

$$L_o = \frac{L_{OT}}{N} \quad C_o = \frac{C_{OT}}{N} \dots\dots\dots (7)$$

3.3 くり返し周波数の決定

以上で V_p 、 I_p およびPFNの Z_0 が決められたが、次にくり返し周波数 f_r を決定する。 f_r は使用サイラトロンの許容損失とオペレーション係数とより制限を受ける。

サイラトロンの流れる平均電流 I_a は、

$$I_a = D \times I_p = \tau_p \cdot f_r \cdot I_p \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。ここに D はDuty比である。 I_a の許容最大値 $I_a \max$ はサイラترونによつて定まっているから最大Duty比 D_m が決められ、したがつて τ_p と f_r との組合せが決められる。ただし f_r はオペレーション係数から制限されるので結局 τ_p も制限される。オペレーション係数 F_{Op} は

$$F_{Op} = V_p \times I_p \times f_r \dots\dots\dots (9)$$

で示されるが、これもサイラترونによつてそれぞれ固

第3表 水素入サイラトロンの規格(2)

	$I_a \max$	F_{Op}
4C~35	0.1 A	2×10^9
5C~22	0.2	4.5×10^9
5949	0.5	6.2×10^9

有な許容値がある。第3表に4C-35、5C-22、5949の $I_a \max$ と F_{Op} をかかげておいた。

F_{Op} による f_r の制限はパルス幅が狭くなると、電流の立上りはそれほど狭くならずに残るので、管球の許容損失が増加するためであろうと考えられる。

3.4 直流電源と充電素子の決定

直流共振充電方式は電源が小型にできるが、充電素子には設計上留意すべき点が多い。

直流電源から供給される平均電流 I_b は、

$$I_b = V_p \cdot C_{OT} \cdot f_r \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。また直流電圧 V_b は充電能率を η_c とせば

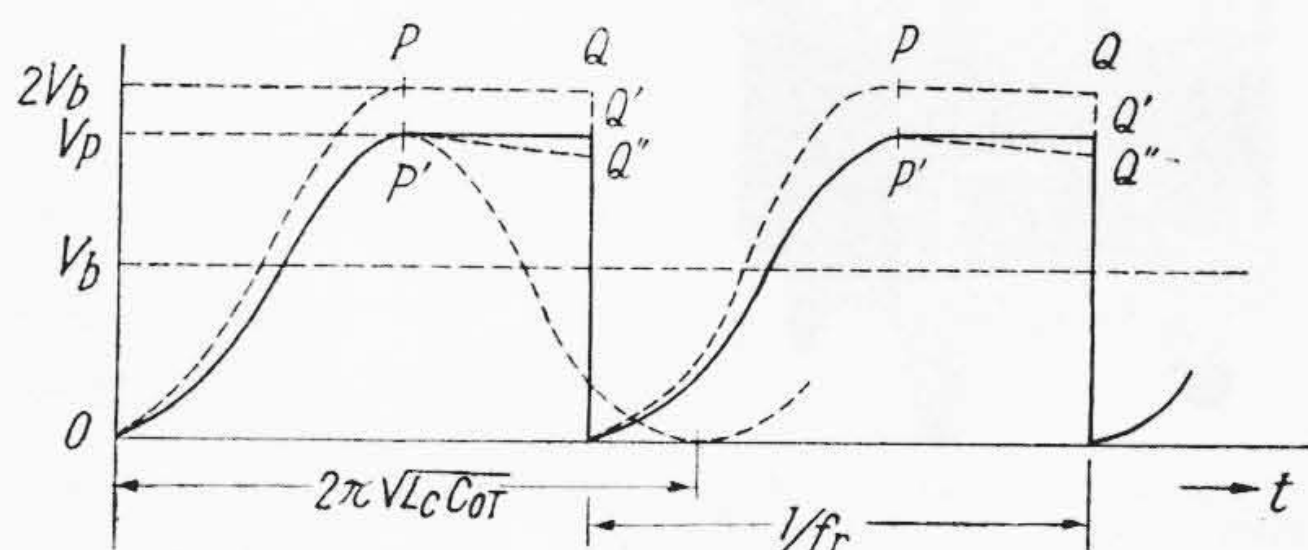
$$V_b = \frac{V_p}{1 + \eta_c} \dots\dots\dots (11)$$

で表わされるから、直流電源装置の容量が決定できる。ただ充電電流の尖頭値 I_{bm} は、 C_{OT} と L_c が共振しているので近似的に

$$I_{bm} = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{L_c}{C_{OT}}}} \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。したがつて電源としてはこれだけの電流を周期的に流せる容量のものを設計する必要がある。また出力電圧のリップル、電圧変動率なども必要に応じて十分留意して設計を行う。

次に充電リアクタ L_c は V_b の約2倍の電圧を C_{OT} に充電させる役割を演ずるので、当然その抵抗分の少ないすなわち Q の高いものが要求される。またくり返し周波数の最大値 f_{rm} で正しいインダクタンス値を持つていることが必要であるから、その鉄心にはパーマロイあるいは異方性珪素薄鋼板などを用いることも必要となる。



第6図 サイラترون陽極電圧波形

第 6 図は C_{OT} の両端での充放電電圧を示したものである。この図から L_C の最適値は P 点で放電を行うように選べばよいから次のように求められる。

$$L_C = \frac{1}{\pi^2 f_{rm}^2 C_{OT}} \dots \dots \dots (13)$$

以上でパルサにおける主要部分の設計方法を述べたが、このほかトリガ部、特に出力電圧の立ち上がり時間やインピーダンスの決定、放電時におけるサイラトロンの格子に生ずる異常電圧、デスパイク回路、クリッパ回路などの問題を十分留意した設計が必要である。

4. 設 計 例

4.1 300 kW 装置 (その 1)

この装置はマグネトロン 725 A 級のパルスエージング電源として設計されたもので、主なる仕様は次のとおりである。

型 式	V002 型
出力電圧	16kV
出力電流	20 A
出力電力	320kW
パルス幅	0.2 μ s, 1.0 μ s (2 レンジ切換)
くり返し周波数	200pps, 1,000pps (2 レンジ切換)
Duty 比	最大 1×10^{-3}
電 源	200V 50/60c/s 1 ϕ
入 力	約 700W

第 7 図はこの装置の外観写真であるが、その主要構成部分は次のとおりである。

トリガ発生部

水素入サイラトロン 4C-35

パルス成形回路, デスパイク回路, クリッパ回路, パルストランス, マグネトロンせん条加熱部
電源電圧計, 負荷平均電流計
出力パルス尖頭電圧計
動作時間計

またこの装置によつて得られた出力電圧波形は,

立ち上がり時間 0.04 μ s

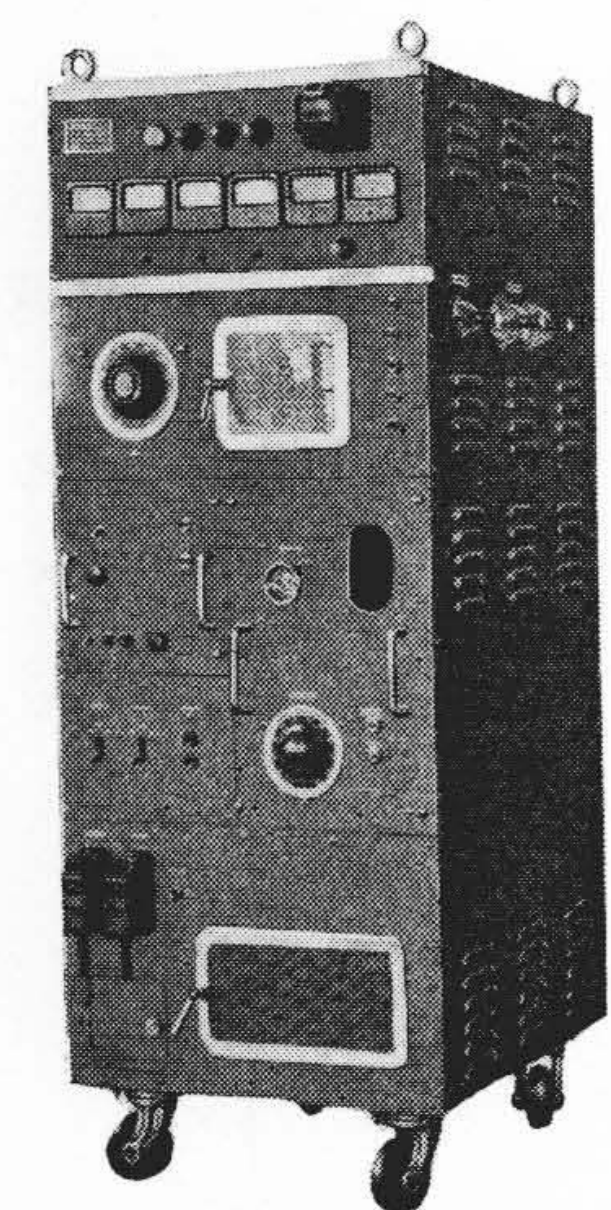
($\tau_p = 0.2\mu$ s のとき)

立ち上がり時間 0.22 μ s

($\tau_p = 1.0\mu$ s のとき)

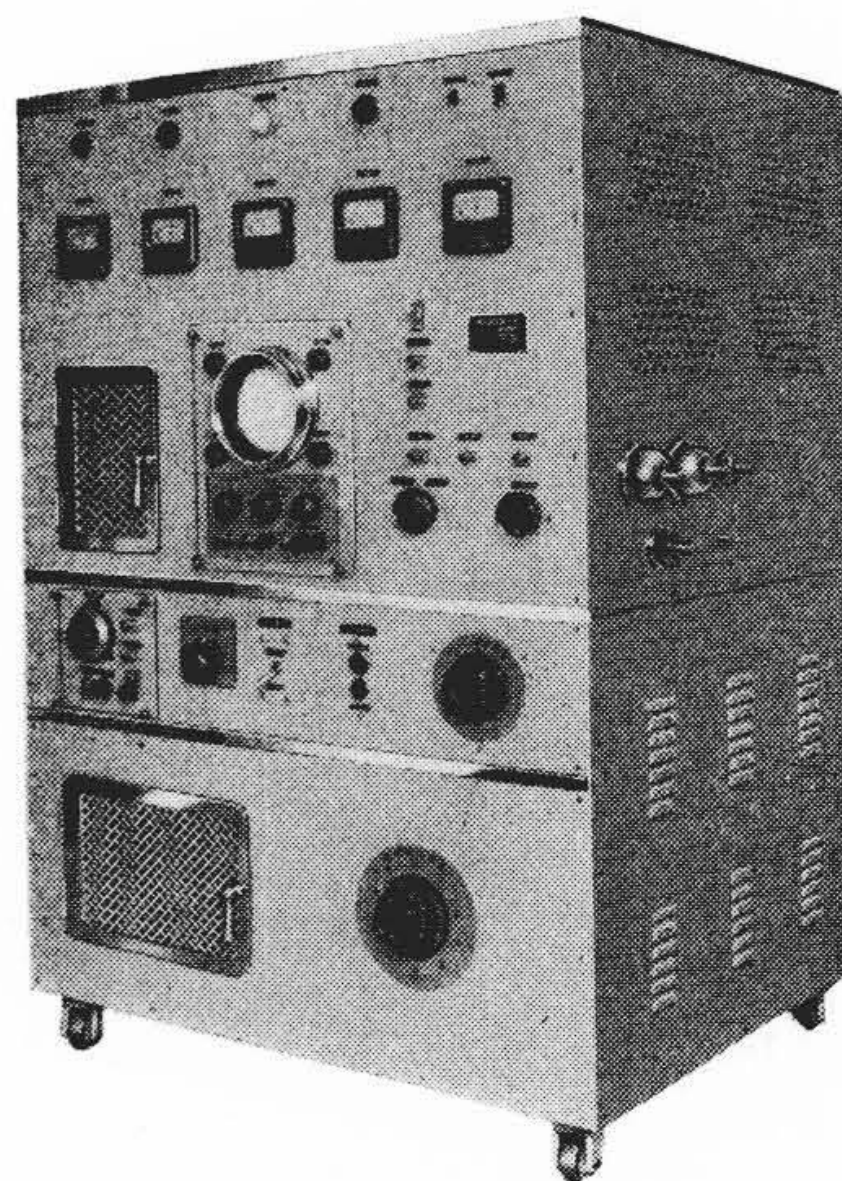
立ち下り時間 0.15 μ s

($\tau_p = 0.2\mu$ s のとき)



(大きさ 680W×1,550H×705D)
(200V, 50c/s 1 ϕ 800VA)

第 7 図 V002 型
300kW パルサ外観



(大きさ 855W×1,290H×707D)
(200V 50c/s 1 ϕ 1.2kVA)

第 8 図 B402 型 300 kW パルサ外観

立ち下り時間 0.41 μ s ($\tau_p = 1.0\mu$ s のとき)

であつて、スパイクおよびサグはほとんどなく、リップルは電圧波形で数パーセント程度である。

4.2 300 kW 装置 (その 2)

この装置は前項と同様 725 A 級マグネトロンのパルス発振試験装置として特にパルス幅を次の 5 レンジに、またくり返しを 3,000pps まで上げたもので、主なる仕様は次のとおりである。

型 式	B402 型
出力電圧	16kV
出力電流	20 A
出力電力	320kW
パルス幅	0.25, 0.5, 1.0, 2.0 および 5.0 μ s (5 レンジ切換)
くり返し周波数	200~3,000pps (連続可変)
Duty 比	1.5×10^{-3} (最大)
電 源	200V, 50/60 c/s 1 ϕ
入 力	約 1kW

第 8 図はこの装置の外観写真を示す。写真でわかるようにこの装置には特にパルス波形観測用のシンクロスコープを自蔵している。主なる構成部分は次のとおりである。

トリガ発生部, シンクロスコープ

サイラトロン 5C-22,

パルス成形回路, デスパイク回路, クリッパ回路,

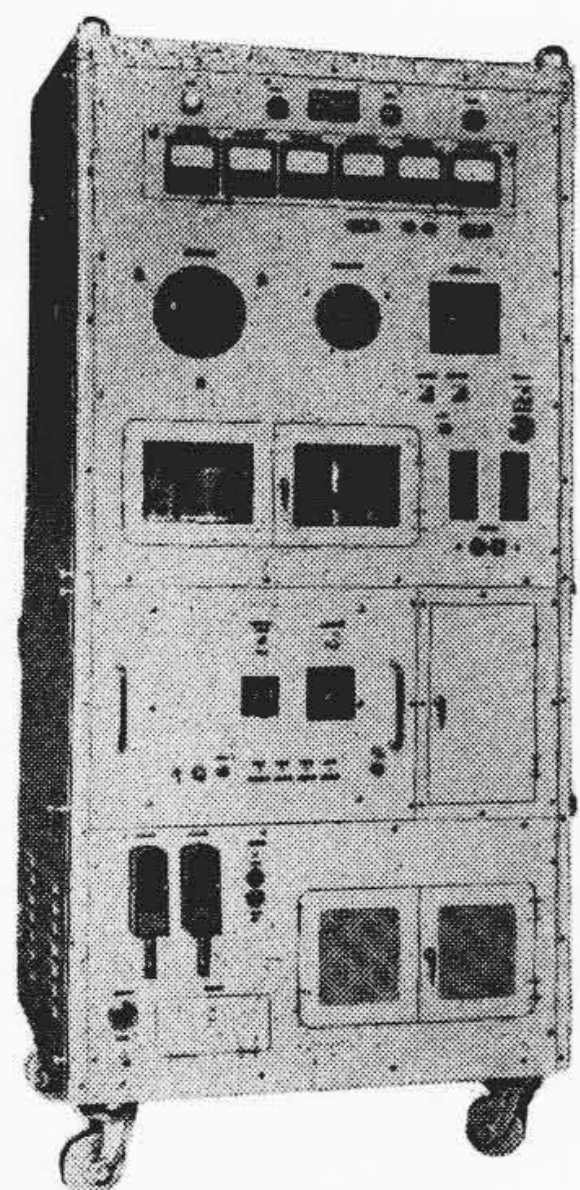
パルストランス, マグネトロンせん条加熱部

電源電圧計, 直流平均入力電流計

マグネトロンせん条電圧計および電流計

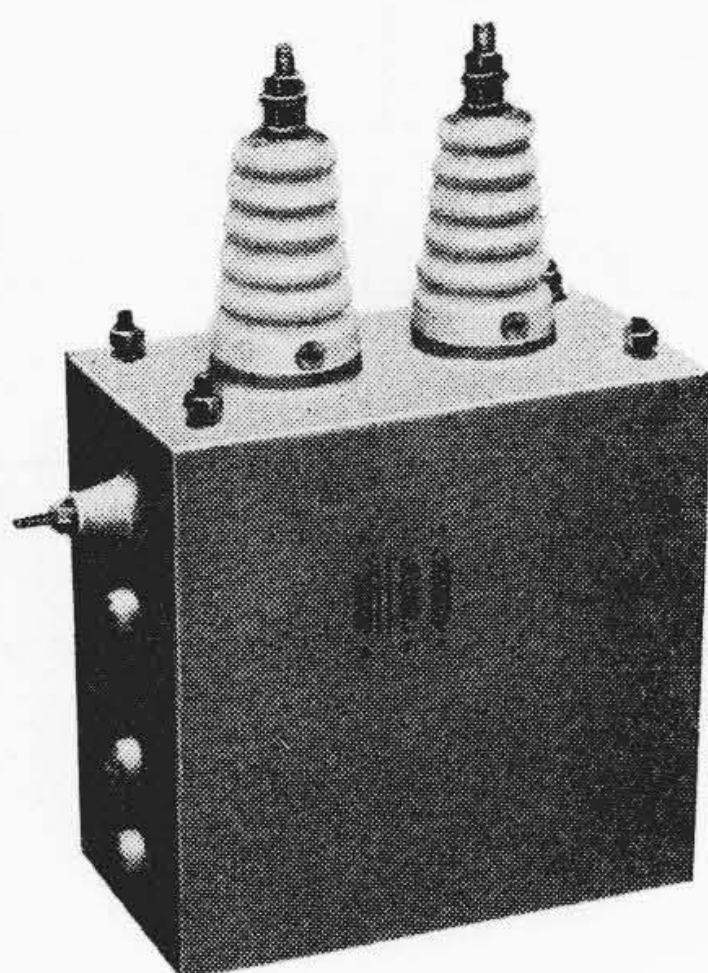
パルス出力尖頭電圧計

この装置は負荷電流の尖頭値は前項の装置と同様であ



(大きさ, 750W×1,650H×600D)
(220V, 50c/s, 1φ, 1.5kVA)

第9図 V033型 600kW
パルサ外観



第10図 600kW用パルス
ランス外観

るが、くり返し周波数の増加に伴い、平均電流が増加するので5C-22を使用してある。また出力の電圧および電流の波形は各レンジとも前項のエージング電源と同程度の満足すべきものである。

4.3 600 kW 装置

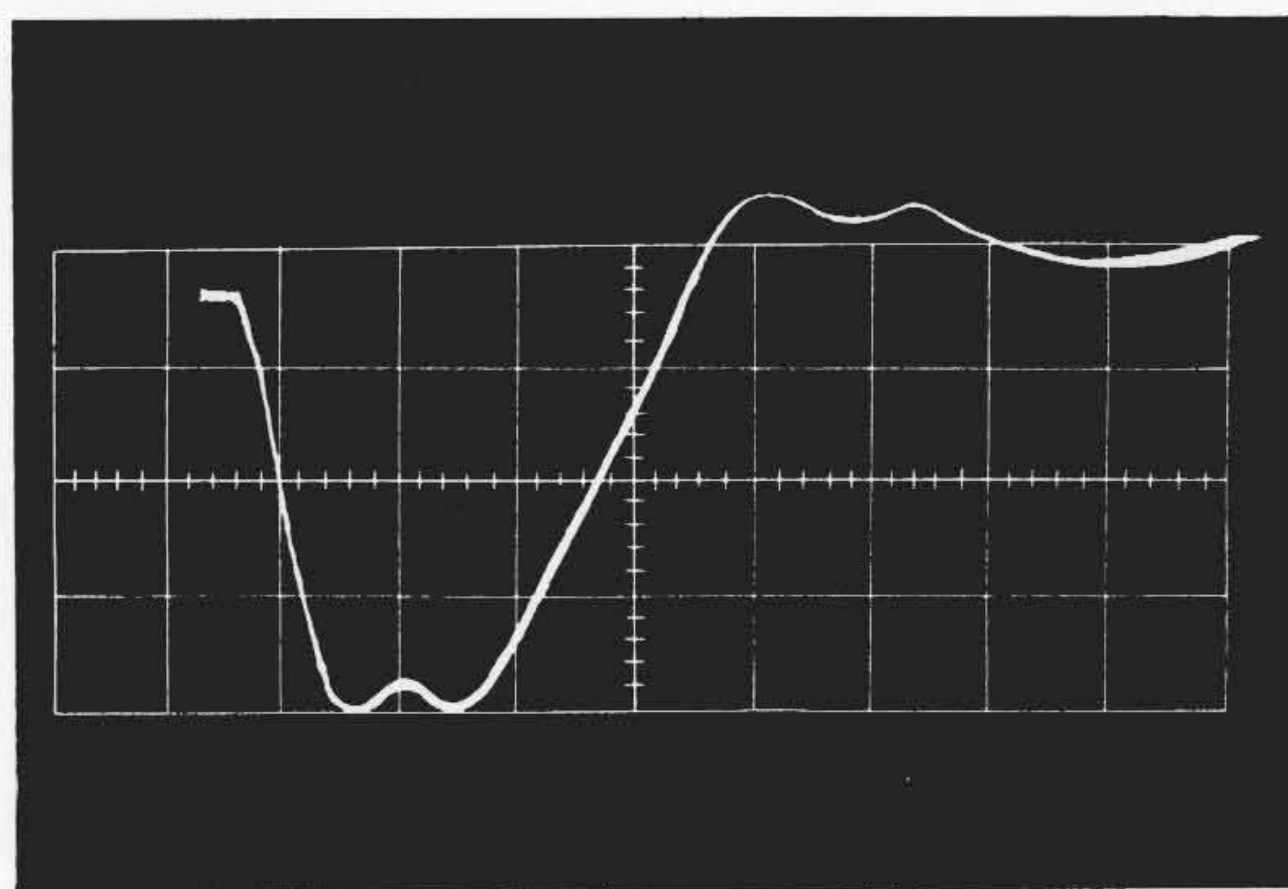
この装置は、マグネトロンに限らずクライストロン、そのほかパルス電圧を必要とする種々の用途に向くように設計されたもので、負荷の種類はある程度変えても使用しうるものである。主なる仕様を示すと次のとおりである。

型 式	V033型
出力電圧	20kV (最大)
出力電流	20~30 A
負荷インピーダンス	670~1,000Ω
パルス幅	0.25, 0.5, 1.0, 2.0, および 5.0μs (5レンジ切換)
くり返し周波数	200~2,000pps (連続可変)
Duty 比	1.5×10^{-3} (最大)

第9図 はこの装置の外観写真で、主なる構成部分は

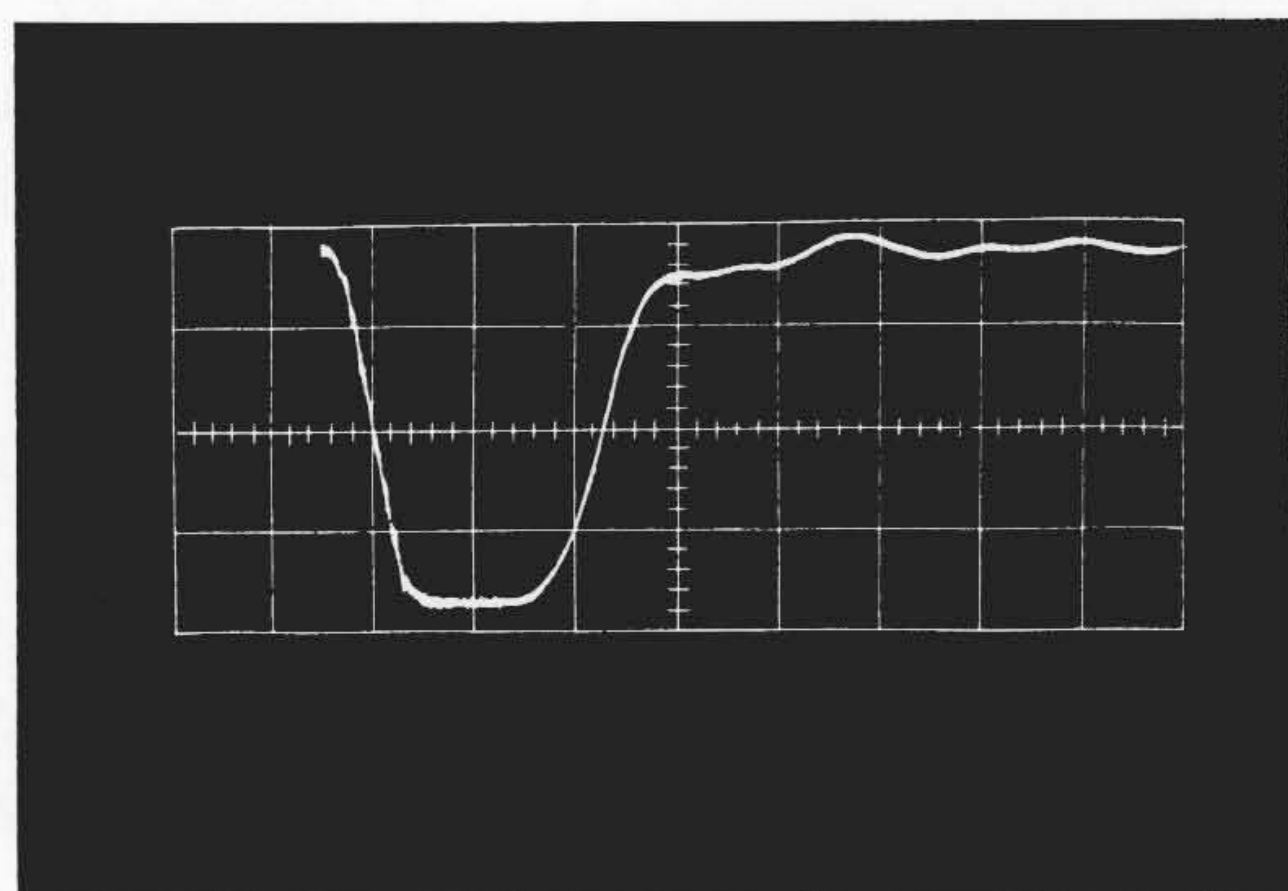
トリガ発生部
パルス成形回路
サイラトロン 5C-22
クリップ回路, デスパイク回路
パルストランス
マグネトロンせん条加熱回路
電源電圧計, 直流平均入力電流計
負荷平均電流計, 供試管せん条加熱電圧計および電流計

などである。本装置および4.2の装置はパルス幅が5レ



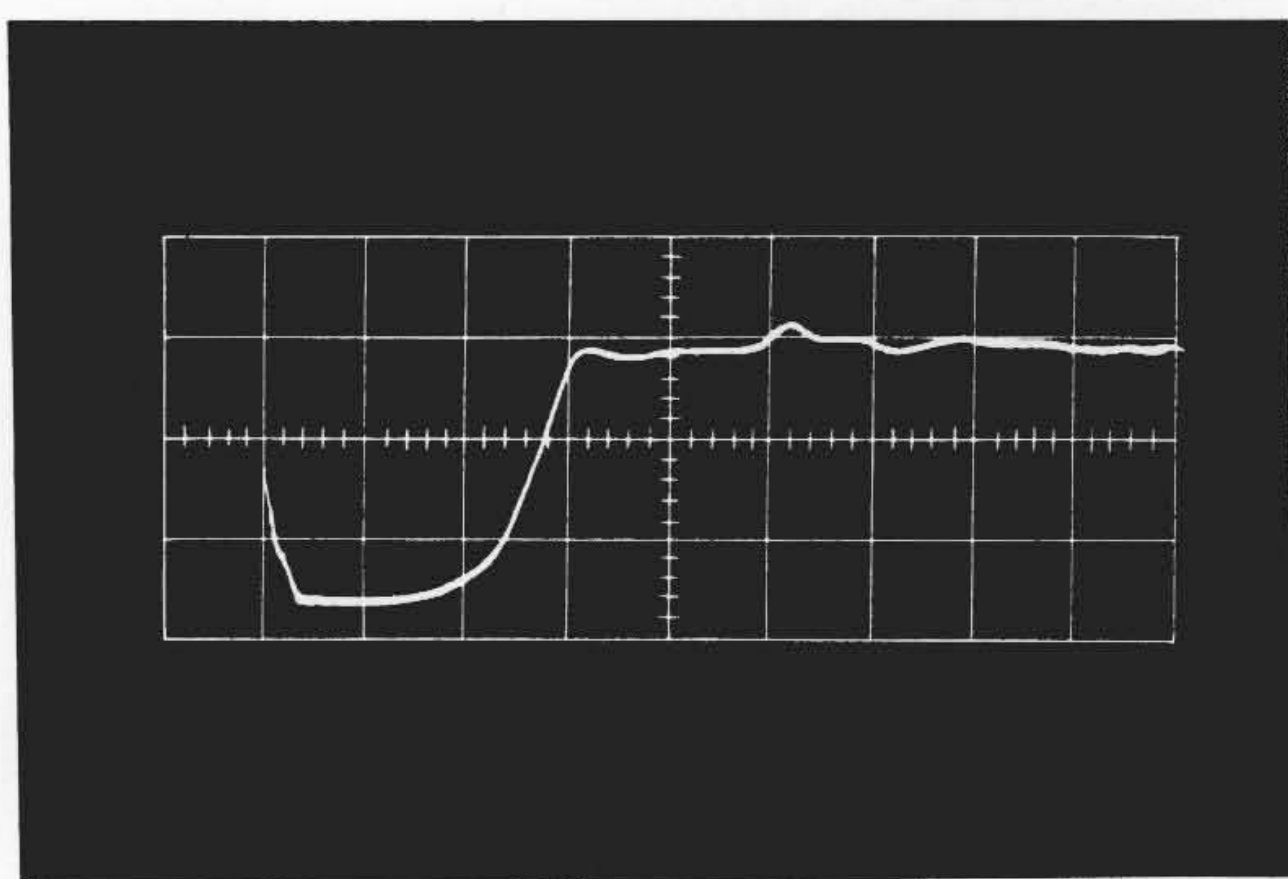
$\tau_p = 0.25\mu s$ $fr = 1,000pps$
 $V_b = 4kV$ $R_L = 765\Omega$
X軸: $0.1\mu s/cm$
Y軸: $3.5A/cm$

第11図 出力電流波形 (抵抗負荷)



$\tau_p = 1\mu s$, $fr = 320pps$
 $V_b = 5kV$, $R_L = 1k\Omega$
X軸: $0.5\mu s/cm$
Y軸: $4.6A/cm$

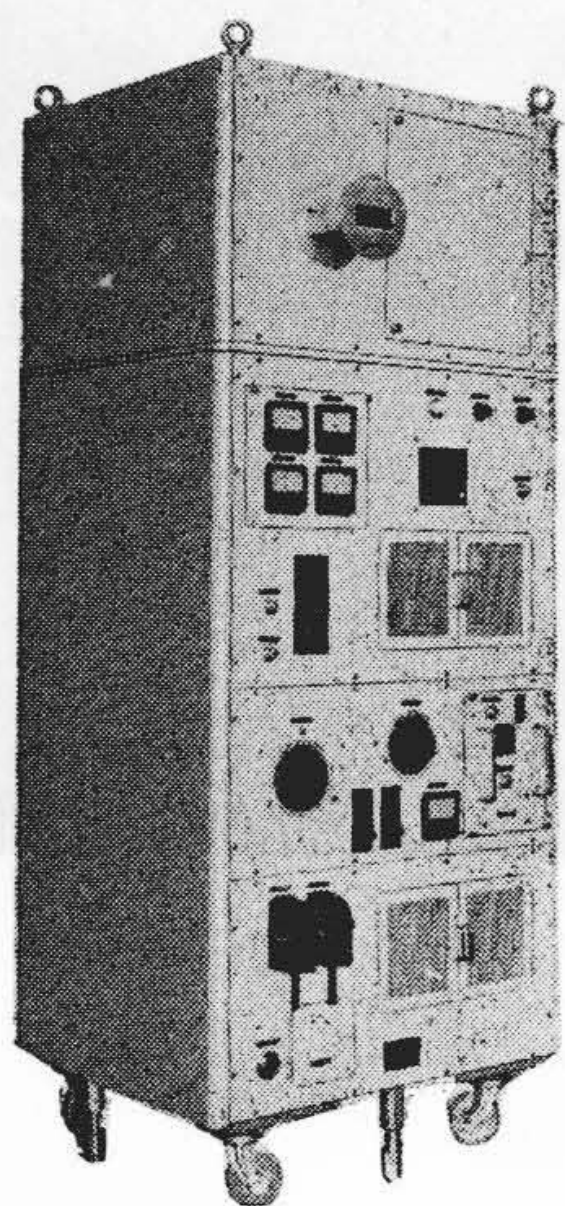
第12図 出力電流波形 (抵抗負荷)



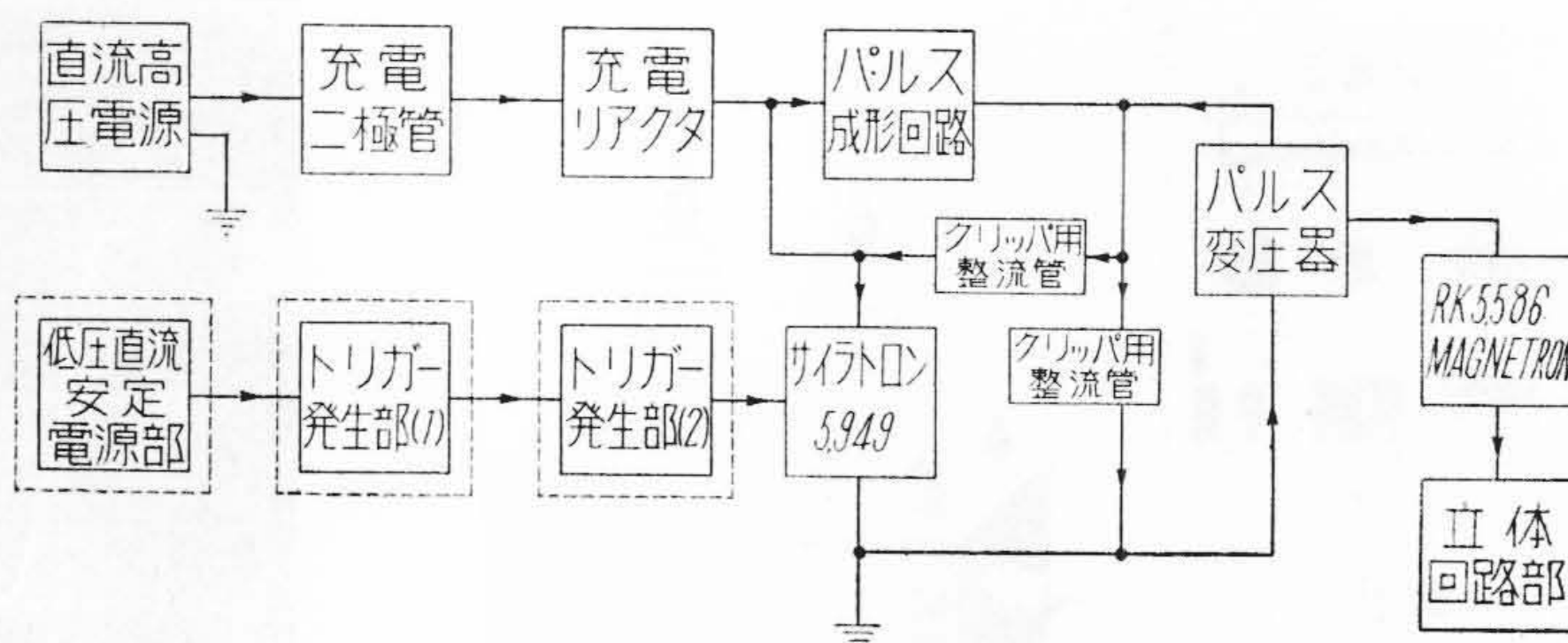
$\tau_p = 5\mu s$, $fr = 200pps$
 $V_b = 5kV$ $R_L = 1k\Omega$
X軸: $2\mu s$
Y軸: $5.8kV/cm$

第13図 出力電圧波形 (抵抗負荷)

ンジであるので、PFN はそれぞれのパルス幅のもの5組設置し、高圧切り換えスイッチによつてパルス幅の切り換えを行うようにしてある。またパルストランスはパルス幅の範囲によつて2個設置してあるが、そのうち



(大きさ, 900W×1,810H×600D
(100V/200V 50c/s, 1φ 1.3kVA)
第14図 V015型 2MW パルサ
外観



第15図 V015型 2MW パルサの構成ブロック図

0.25~0.5 μ s 用のものを第10図にかか
けておいた。またこ
の装置は負荷インピ
ーダンスの使用範囲
がやや広いので、充

電チョーク, PFN, パルストランス, クリッパ回路, デ
スパイク回路などに十分な注意を払って設計を行つてあ
る。

第11~13図はこの装置による出力波形を例示したもの
で、たとえば第11図のパルス幅 0.25 μ s レンジの出力電
流波形をみると、そのパルス幅は 50% 振幅の間で 0.27
 μ s, 立上り 0.03 μ s, 立下り 0.12 μ s でありまたリップル
約 3%, スパイク, サグほとんどなしという波形である。

第12図はパルス幅 1 μ s レンジの出力電流波形を示す
ものであるが、インピーダンス整合のよくとれたきわめ
てすぐれた波形を示している。

第13図は 5 μ s の出力電圧波形を示したものである。

4.4 2MW 装置

この装置はマグネトロン RK-5586 をパルス発振せし
め、直接高周波出力を取り出しうるように設計されたも
ので、小型の線型電子加速器用の高周波電源として好適
のものである。

主なる仕様は次のとおりである。

型 式	V015型
出力電圧	25~32kV
出力電流	55~70A
パルス幅	2 μ s
くり返し周波数	20 $\pm$ 5pps (可変)
Duty 比	5 $\times 10^{-5}$
パルスの立上り時間	0.15 μ s 以下
パルスの立下り時間	0.3 μ s 以下

第14図はこの装置の外観写真である。その主要構成
部分は、

トリガ発生部

サイラトロン 5949 マグネトロン RK-5586
パルス成形回路, デスパイク回路, クリッパ回路
パルストランス
電源電圧計, 直流入力平均電流計
平均負荷電流計
同軸導波管変換部

第15図は本装置のブロック図を示したもので、点線で
囲った部分は、それぞれ単独で出力を取り出しうること
になつており、波形の観測もできる。またパルストラン
スの二次側のパルス電圧とその波形はコンデンサ分圧器
によつて指示および観測しうるようになつている。

特にこの装置の特長は、構成部品のすべてが、十分余
裕ある設計を行つてあるので、長時間の連続運転に好適
な装置であることである。

5. 結 言

以上大電力パルス発生装置の設計方法の概要と、その
実例とを紹介したが、充電リアクタ、パルストランスな
らびに部分的な回路の説明については、ほとんど触れな
かつた。これらに関しては、別の機会に紹介したいと考
えている。

上例であげた各種のパルサはいずれも十分満足すべき
結果を得ており、現在各分野で活躍している。

終りに常々討論下されている東京大学原子核研究所西
川助教授、宮原氏、日立製作所中央研究所の沢田課長、
木村、前川両氏、ならびに昭和電子株式会社の矢浪、荷
口両氏、製作および実験上種々協力された松沢、笹倉、
西村、佐野の四氏に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz: Pulse Generator (M. I. T. Rad, Lab, series 5, 1948)
- (2) M. Chodrow and others: Stanford High-Energy Linear Electron Accelerator (Mark III) R. S. I. 26 134 (1955)