

PLA-95-7

95/6/19

1 GeV リニアック検討資料
1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) UHF・RF 源のテスト結果 (921211～930428)

著者(AUTHOR) 川村真人

概要(ABSTRACT)

92年12月11日から93年4月28日までに行った、UHF クライストンの大電力試験、RF増幅試験等について報告する。

- ・ 無負荷時のパルス動作試験 (921211)
- ・ 負荷短絡試験 (クローバ 動作確認) (921215)
- ・ クライストンの大電力試験 (930308～930428)
 - クライストン低圧電源の設定
 - クライストン電源及びクライストンの大電力試験
 - クライストンの温度特性
 - RF 特性

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

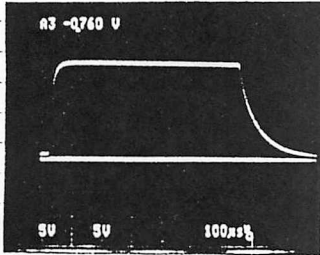
高エネルギー物理学研究所 KEK

◎UHF・RF源のテスト結果(92.12.11.~93.04.28.)

(文責・川村)

○無負荷時のパルス動作試験(92/2/1)

※2のヒビ分圧抵抗(カソード側)を100kΩ
 設定値...カソード電圧(制御盤メータの読み):100[kV], グリッド電圧:11[kV],
 <リ>返し:20pps



上: M31ド電圧 [25kV/div.]
 下: カソード電圧 [25kV/div.]
 100μs/div.

左図)

・カソード電圧: 101kV
 ・M31ド電圧 (peak-bottom): 77kV

図1

○負荷短絡試験(70-Vパルス確認)(92.12.15)

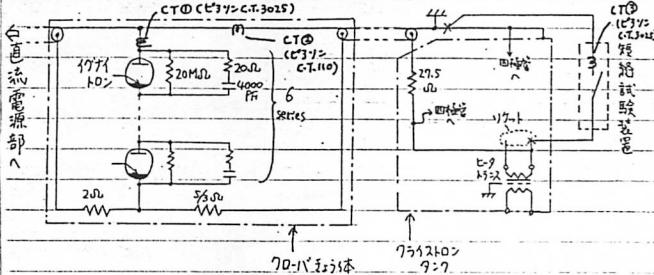
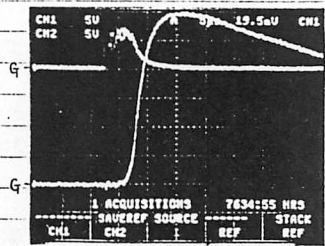


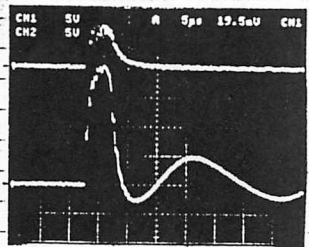
図2 負荷短絡試験回路図

○カソード電圧: 20kV, <リ>返し: 20pps (グリッド電源...使用せず)



上: CT③出力(短絡装置電流) [400A/div.]
 下: CT④出力(70-V電流) [400A/div.]
 5μs/div.
 ...短絡後約3.8μsで70-Vパルス動作。
 ...短絡装置に流入する電流(ピーク値): ピーク約680A
 ...70-V電流: ピーク約2400A

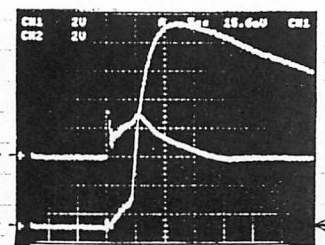
図3



上: CT③出力(短絡装置電流) [400A/div.]
 下: CT④出力 [100A/div.]
 5μs/div.
 ...CT③出力のピーク値: 約400A
 ※上流のCT③のピーク値の方がCT④のピーク値も低い
 ↳70-Vパルス発生時のグリッド電圧の脈絡パルスが70-V分布容量のインダクタンスが放出されるためか?

図4

○カソード電圧: 9[kV], <リ>返し: 20pps (グリッド電源...使用せず)

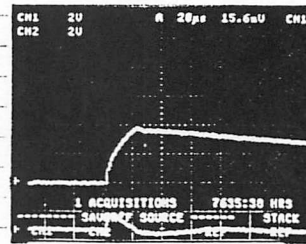


上: CT③出力(短絡装置電流) [800A/div.]
 下: CT④出力(70-V電流) [1.6kA/div.]
 5μs/div.
 ...70-V電流のピーク値: 約1400A
 ...短絡装置電流: 約1200A

図5

○70-Vパルス発生時のパルス電圧(70-Vパルス確認)短絡装置に銅線を介して短絡試験を行う。

設定値...カソード電圧: 60kV, <リ>返し: 20pps (グリッド電源...使用せず)
 ↳ (結果) 銅線切れた。



上: CT③出力(短絡装置電流) [400A/div.]
 下: CT④出力 [400A/div.]

図6

※銅線が切れたのはカソード抵抗を増加(6Ω→27.5Ω)させた。20.5/3Ωの抵抗を新たに付けたためである(図2参照)。

- ・27.5Ωの抵抗...グリッドパルス短絡時、平滑コンデンサからグリッドパルス流入するエネルギーを減らすために使用。当初は70V発熱容量の問題から6Ωとしたが、以後変更(91.7)
- ・20.5/3Ω...上記の理由に加え、70-Vパルス発生時に制御盤側の信号入力の電圧変動が大きいので、これを抑えるために新設(91.7)

↳上記の変更の結果、平滑コンデンサからグリッドパルスにseriesした抵抗は

(設計当初) (現在)
 ・コンデンサの防暴用抵抗: 6Ω ⇒ 同左. 6Ω
 ・kly. カソード抵抗: 6Ω ⇒ 同左. 27.5Ω
 ・70-V抵抗: 20.5/3Ω

と約1.1倍に増加。したがって上記③の短絡試験を行う場合短絡装置に流入する電流は約1/3に、上流側は約1/9になる。

○分圧抵抗(カソード側)取り替え作業(93.2.5)

100[kΩ] (ER270AS10kΩ...10S) → 220[kΩ] (同. 22kΩ...10S)に変更
 (※東海高熱 ER270AS...)
 { 定格電力: 270[W]
 最高使用パルス電圧: 60[kV] (1x40μsec)
 許容注入エネルギー: 29850 [J]
 またカソード側は同様に7は22kΩが最大値。

設定値は以下の理由による。

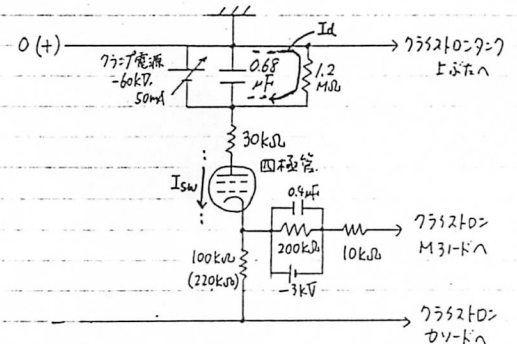


図7

上図のように、グリッド回路のターミナル抵抗に流れる電流を I_d 、四極管 (Switching tube, TH51P8) に流れる電流を I_{sw} とする。

I_{sw} の平均値を $\langle I_{sw} \rangle$ とすると

$$\langle I_{sw} \rangle = I_{sw} \times t \times f \quad (t: \text{パルス幅}, f: \text{繰返し周波数})$$

<グリッド電源によるM31ド電圧調整範囲>

・(上限)

・ $I_d \geq \langle I_{sw} \rangle$ のとき、グリッドによる調整可能、

・ $I_d < \langle I_{sw} \rangle$ のとき、調整不可能

よって $I_d = I_{sw}$ の時が上限値。(繰返し周波数により変わる)

(下限)

トランス電源の定格値 (-60kV, 50mA) によって定まる。(繰返し周波数により変わる)

① 分圧抵抗 (カソード側) が 100kΩ のとき
(仮定... $\tau = 650\mu s$)

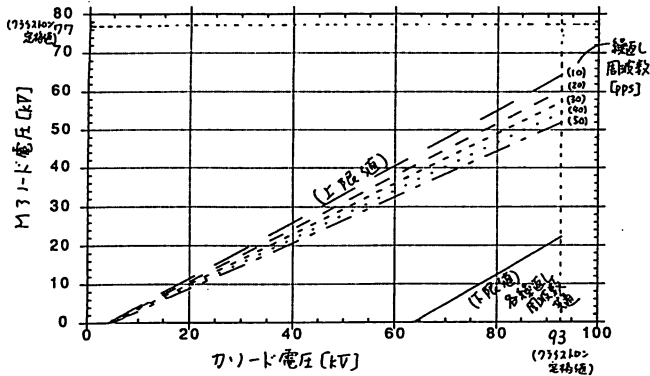


図 8.

(図 8 についで...)

トランスの定格は、カソード電圧: 93 [kV], M31-D 電圧: 77 [kV]

カソード電圧を 93 [kV] にした時、M31-D 電圧の調整範囲は、

(上限) 繰返し周波数 ... 10pps のとき 64.5 [kV], 20pps のとき 60.8 [kV]
30 " 57.5 " 40 " 54.7
50 " 52.1

(下限) 22.4 [kV]

→ カソード電圧の定格値に満たない。

② 分圧抵抗 (カソード側) が 220kΩ のとき

(※ 当初、100kΩ に使用していた抵抗は ER270AS (東海高熱) 10kΩ, 10本あり)

2本を同分圧抵抗値が最高な 6 (22kΩ) に変更

→ 同抵抗を増やすことで分圧比は変えず、M31-D 電圧は高くなる。

(仮定: $\tau = 650\mu s$)

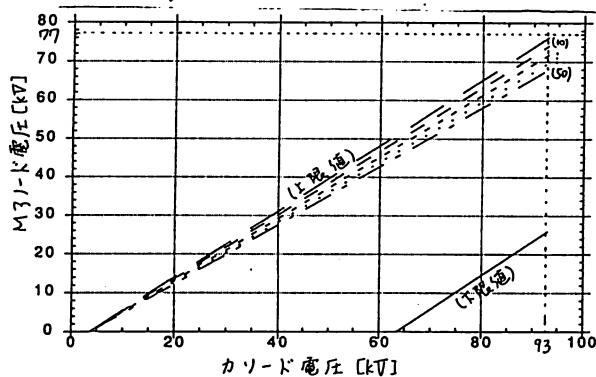


図 9.

(図 9 についで...) カソード電圧が 93kV のとき

(上限) 繰返し周波数 ... 10pps のとき 76.3 [kV], 30pps のとき 71.8 [kV]
50pps " 68.0 [kV]

(下限) 26.0 [kV]

→ 10pps の時は定格値に満たない。

※ その他、分圧抵抗 (図 7 の 1.2MΩ) を減らすと I_d が増加し、上限値が更に増える事が期待される (例: 400kΩ に各繰返し周波数で定格値をほぼ満足する) が、現在、対応変更していない。

・トランスの大電力試験 (93.03.08 ~ 93.04.28)

トランスの大電力試験は以下の日程で行われた。

・93.03.08 ~ 93.03.09

トランスを含む以下の試験が行われた。

① トランス試験 (RF power 無し) (93.03.08)

② RF 試験 (" 無し) (93.03.09)

① のトランス試験では、トランス電源の AVR の上限が低く抑えられており、カソード電圧は次の条件下で以下の値に抑えられた。

(レピート幅: 400μs, 繰返し: 10pps) 89kV

(" : 600μs, " : 10pps) 88kV

(" : 600μs, " : 50pps) 86kV

→ 93.03.16、日誌が所、AVR 盤内の電圧設定用のレピート幅に 300μs を 700μs に変更した。

② の RF 試験では、カソード電圧: 88kV, レピート幅: 600μs, 繰返し: 20pps

で、RF 電力 $P_{RF} = 1.58MW$ の時に D-ドームから煙が出た。D-ドームは

以後、D-ドームは日本高周波の引取り修理 (抵抗の一部が焦げた) とのこと。以降の試験では RF 負荷として D-ドームを 2 本 parallel にして使用、また D-ドーム内部に SF6 を充てた。

・93.04.15 ~ 93.04.28

RF 試験を行った。(小野: 五十嵐: 川村)

これらの試験結果について以下の順序で報告する。

- ① トランスの低圧電源の設定
- ② トランスの電源及びトランスの大電力特性
- ③ トランスの温度特性
- ④ RF 特性

① トランスの低圧電源の設定

・集束管の電源

トランスの "Quality Conformance Inspection" の "Tube Performance" は従来の集束管電流電圧特性の 20% の読み上げを行い、値を合わせ (一実験の結果 250mA, 100V のカソード側) FOC1: 7.5A (電流値は若干異なる可能性がある)

↑ FOC2: 2.0A

(20V 側) FOC3: 10.0A

・加熱電源

2台とも 5kV に設定。(電流値は② トランスの電源及びトランスの大電力特性に記す)

・ヒータ電源

事前にヒータの校正は行った (図 10 参照)

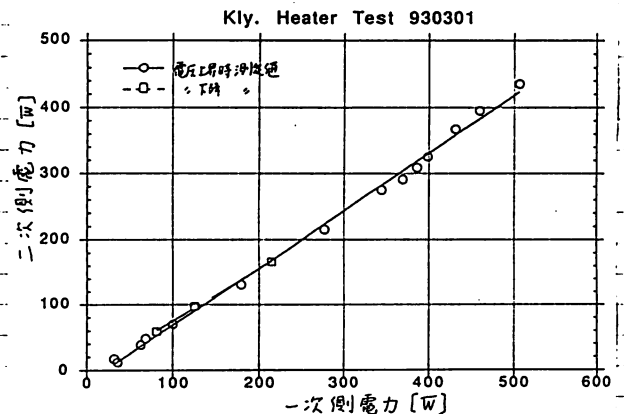


図 10.

図 10 より、電圧上昇時測定値、下降時測定値共に同様の直線性を示している。

上昇時測定値の近似式は、二次側電力を W_2 とすれば、 W_2 とすると、

$$W_2 = -18.7 + 0.874 W_1 \quad \dots (1)$$

となる。

トランス社の "Tube Performance" に引。

ヒータ電圧: 20[V], ヒータ電流: 23.9[A]

ヒータから二次側の電圧, $W_2 = 478[W]$

よって二次側の電圧, (1)式より, $W_1 = 568[W]$

(実際の1次側の設定値は 117V, 4.8A (561.6W) としている)

② クライストン電源及びクライストンの大電流特性

・V-I特性及びヒータ電圧

クライストンのV-I特性のうち、4%に取得したデータを図11に示す。テスターオシロスコープの波形から、パルス平担部とパルス立ち上がり前の値との差から求めている。図11では横軸としてM31-D電圧から31-D電圧(3kV)を引いた値を用いている。

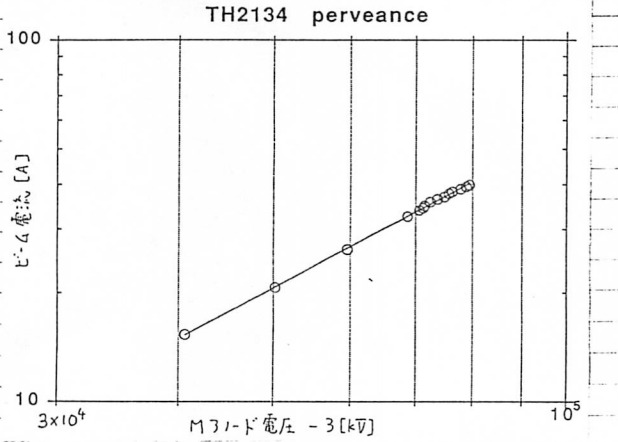


図11.

また、パルス電圧の値に依りては、クライストンのV-I特性のテスター取得したものと合計5日間、約60個あり、テスター取得に用いたオシロスコープの種類や測定定数(パルス)の値が異なるが、約 1.8×10^{-6} 程度と見られる。

・各部波形写真

(1) カソード電圧: 93kV (クライストンの最大定格), スリット: 10pps, 1V/div 中幅 (クライストン電源...使用せず) : 600 [ms]

における各部の波形写真 (4%撮影)

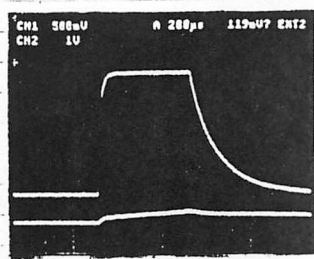
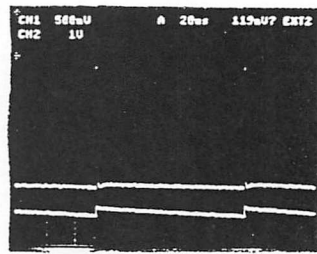


図12.

・写真から観測出来るM31-D電圧の値 (peak値-bottom値) ... 約82kV
 ・パルス出力中カソード電圧波形が歪んでいるのは、クライストン負荷を挿入した事 (25) 負荷及びカソード電源回路に電流が流れ、P1左に図2の275Ωの抵抗にパルス電圧が加わる事と直流電源の平滑コンデンサに充電した電圧が放電して直流電圧が低下する事による。

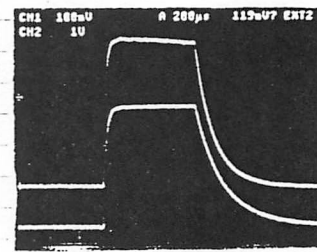
パルスとパルス間でカソード電圧が立ち上がり前の値に抵抗による電圧降下が原因で、パルス中クライストンビーム電流が減少している(図14参照)にともなうカソード電圧波形が右上部の平滑コンデンサの放電によるものと見られる。(波形より、カソード電圧の最大必要値は約5kVである)



↑ G(カソード)
 ↓ G(M31-D)
 (波形は図12と同じ)
 20ms/div.

図13.

・カソード電圧はパルスオフの間減少している。平滑コンデンサの充電がゆるい傾向にあることがわかる。2の値から繰り返して上げると充電時間が長くなるカソード電圧の絶対値がやや少なくなる可能性がある。



上: ビーム電流 [8A/div.]
 下: M31-D電圧 [20kV/div.]
 200µs/div.

図14.

・両者のパルス平担部を比べると、カソード電流の平担部の方がサグが大きくなり、二極管の式

$$I = kV^{3/2}$$

に当てはめているためである。

(以下、定量的に計算している)

2の時のビーム電流のピーク値は $\sim 40[A]$ (読み取りデータより)

写真よりパルス平担部で減少している分の値は、約1.3A (写真の12%の約85%)

二極管の式

$$I = kV^{3/2} \quad (k = 1.8 \times 10^{-6} \text{ とする})$$

から計算されるVの値は、

$$\text{① } I = 40[A] \text{ のとき、 } V = 79.04 \text{ kV}$$

$$\text{② } I = 38.7[A] \text{ , } V = 77.32 \text{ kV} \text{ (差は } 1.7 \text{ kV (写真の12%の約85%))}$$

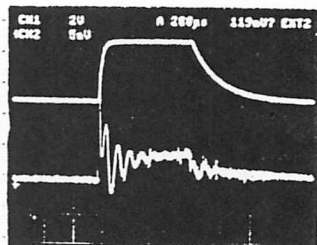
よって写真ではサグが約半分に見える。

また、31-D電圧はサグが見えなくなるが、回路C (0.68µF) - R (1.2MΩ) 並列回路に四極管電流の1V/divの間中流れている。Cに蓄えらる電荷が増加する傾向がある。

・M31-D電圧波形から計算出来る立ち上り及び下り時定数は、

$$\text{立ち上り: } \tau_r = 23 \pm 3 [\mu s]$$

$$\text{立ち下り: } \tau_f = 178 \pm 7 [\mu s]$$



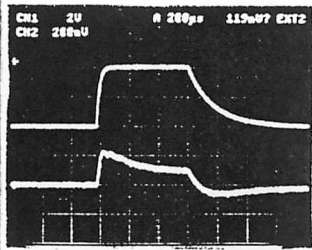
↑ G(M31-D電圧)
 ↓ G(M31-D電流)
 上: M31-D電圧 [40kV/div.]
 下: M31-D電流 [200mA/div.]
 200µs/div.

図15.

・M31-D電流の1V/divのend部分とbottom部分の差は $\sim 160mA$

M31-D電源を構成したリレー電気の仕様による31-D電流の検出器の定格は $\pm 25mA$ であり、実際には定格値の6倍以上の電流が流れている。

→ M31-D電源の0k.信号の誤動作の原因となっている。



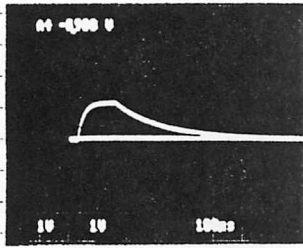
上: M31-D電圧 [40kV/div]
下: 四極管電流 [1A/div]
200μs/div

図16.

・四極管電流の値は、パルスのend部で約0.5A.

・カソード電圧、パルス幅、くり返し等を変えた時のカソード電圧、M31-D電圧の波形状(3/4)

① パルス幅: 100μs, くり返し: 10ppsでカソード電圧増加



・カソード電圧: 29kV (制御盤のメータ読み)

上: M31-D電圧 [20kV/div]
下: カソード電圧 [20kV/div]

100μs/div

(波形からの読み) <※絶対値ではない>

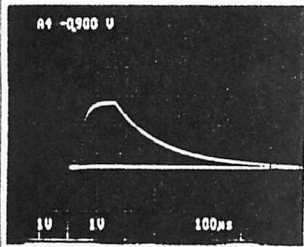
カソード電圧 (V_k): 28kV

M31-D電圧 (V_a)ピーク: 28kV

ピーク: 4kV

図17.

... パルスoff時、M31-D電圧V_aの方がカソード電圧よりやや下にある。(逆バイアス電圧がかかっている)



・カソード電圧: 50kV

(波形からの読み)

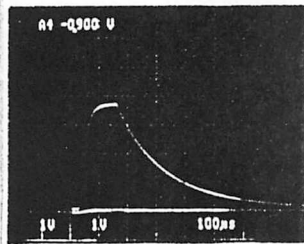
V_k: 49kV

V_aピーク: 49kV

ピーク: 4kV

... パルスoff時、V_aピークとV_kとがほぼ同じ(逆バイアス電圧がかかっている)

図18.



・カソード電圧: 80kV

(波形からの読み)

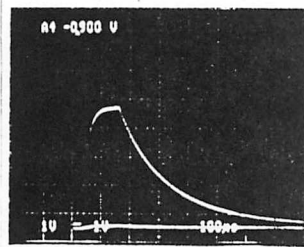
V_k: 79kV

V_aピーク: 79kV

V_aピーク: 6kV

... パルスoff時、V_kの方がV_aピークより上にある(逆バイアス電圧がかかっている)

図19.



・カソード電圧: 90kV

(波形からの読み)

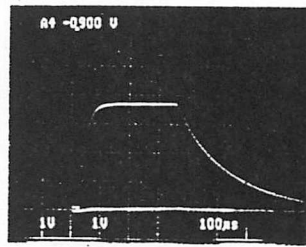
V_k: 89kV

V_aピーク: 89kV

V_aピーク: 6kV

図20.

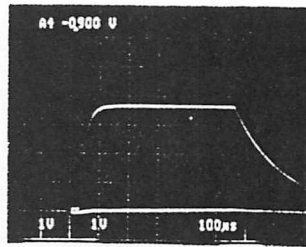
②カソード電圧: 80kV, くり返し: 10ppsでパルス幅増加



・パルス幅: 300μs

... フラットトップの幅: 約160μs

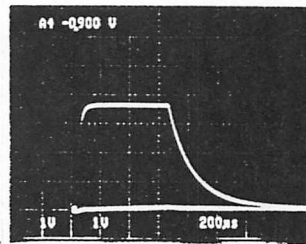
図21.



・パルス幅: 500μs

... フラットトップの幅: 約360μs

図22.



・パルス幅: 600μs

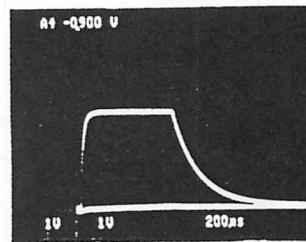
200μs/div.

... フラットトップの幅: 約460μs

V_aピーク: 7kV

図23.

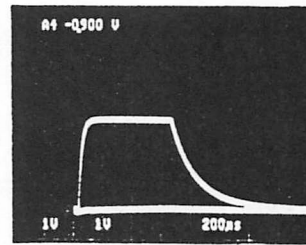
③カソード電圧: 80kV, パルス幅: 600μsでくり返し増加



・くり返し: 30pps

... V_aピーク: 12kV

図24.



・くり返し: 50pps

... V_aピーク: 16kV

図25.

・出力波形状より、立ち上がり部分は約140μsでその分フラットトップ幅が増えている。
(V_kとV_aパルス幅: 100μsでフラットトップ幅は見られない)

・図17~図20より、カソード電圧: 50kV以上で逆バイアス電圧がかかっている。リジンの電気で試験結果も同じような結果が見られるので元々この回路の特性(原因が良く判りません)

・V_aピークの絶対値がカソード電圧、パルス幅、くり返しが増えるに連れて増加する。フラットトップのC (0.68μF) と7Ω抵抗R (1.2MΩ) で作られる回路の時定数が
$$\tau = 0.68 \times 10^{-6} \times 1.2 \times 10^6 = 0.816 [s]$$

と大きく、パルスoff時でのCの放電が、Cの行われるのでカソード電圧、パルス幅、くり返しの変化に対するCの充電電圧の変動が十分に受けては行かぬ。

・図23~図25の様に繰り返しを繰り返してカード電圧波形が安定しているのを図13の様に平滑した時の電圧波形、繰り返しを繰り返して電圧波形が安定しているのを図13の様に平滑した時の電圧波形、繰り返しを繰り返して電圧波形が安定しているのを図13の様に平滑した時の電圧波形。

直流電源出力電流の特性 (3/8)

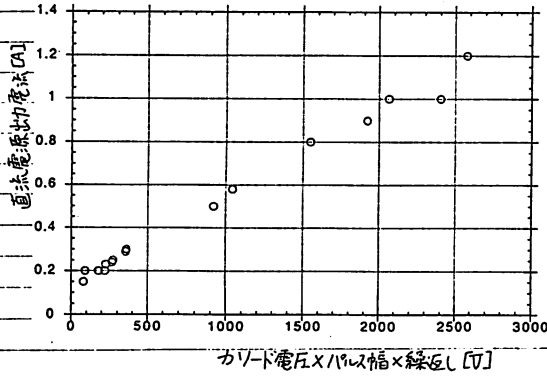


図26

直流電源出力電流はAVRの電流×7から測定した。
 カード電圧86kV, 1/10幅600ms, 繰返し50ppsでの出力電流値は1.2A。
 および出力電圧
 $86 \times 1.2 = 103.2 \text{ [kW]}$... ①
 20 V の $V_k = 3 \text{ [kV]} = 63.0 \text{ [kV]}$
 $I_k = 28.16 \text{ [A]}$
 および75%の電圧に到達する電圧
 $63 \times 28.16 \times 0.03 = 53.2 \text{ [kW]}$... ②
 ①, ②の効率 51.6% (48.4%のロスがある)

インポート電流の特性 (3/8, 3/10)

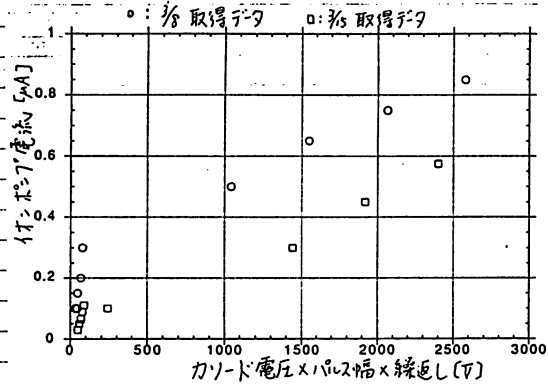


図27

インポート電流値は27あるうちの最大値の値を取っている。
 3/8のデータも3/10のデータもほぼ同じなので、同じ結果になるのか?

③ クライストロンの温度特性

各部温度

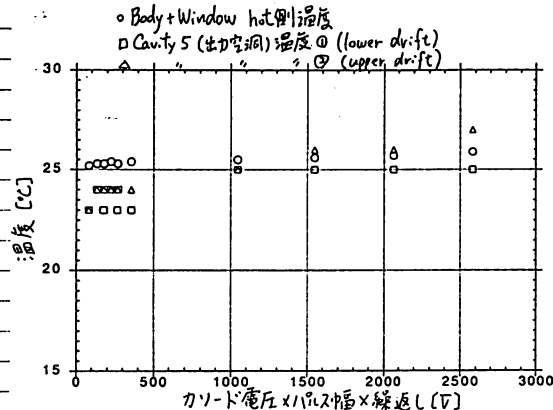


図28

・Body+Window hot側温度は最大で+0.7Cの上昇
 ・Cavity 5は2.7C...
 ・lower driftは最大で+2Cの上昇
 ・upper driftは+4C (2Cの違い)

冷却水の出入口温度差

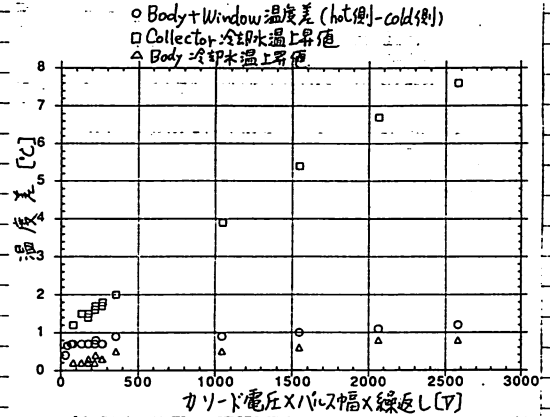


図29

・Body+Window温度差(hot側-cold側)は最大で+1.2C。
 ・冷却水の水温上昇値から発熱量を計算して2.3(カード電圧x1/10x幅x繰返し)
 $= 2.580 \text{ [F]} (86 \text{ kV}, 600 \text{ ms}, 50 \text{ pps})$ を得る。

<Collector>

冷却水温上昇値は2.6C

冷却水量は19.5%/min

$$P_s = \Delta T \cdot J \cdot \frac{4.18}{60} \quad \text{①}$$

(P_s [kW]: 平均消費電力
 ΔT [C]: 水温の上昇値
 J [kg/min]: 水の流量)

$$P_s(\text{Collector}) = 103.2 \text{ [kW]}$$

<Body>

冷却水温上昇値は0.8C

冷却水量は21%/min

①式より

$$P_s(\text{Body}) = 1.17 \text{ [kW]}$$

④ RF特性 (詳細は小沢氏のProceedingを参照して下さい)

RF特性の測定に用いた回路のA, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Zの回路図を図30, 31に示す。

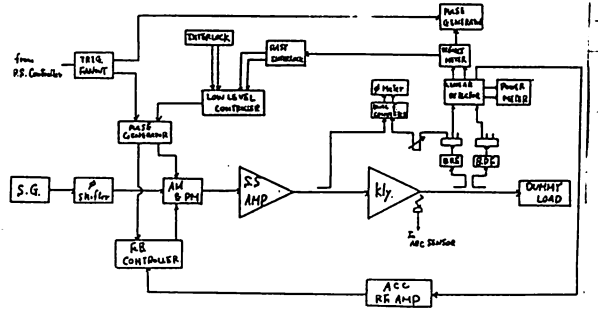


図30

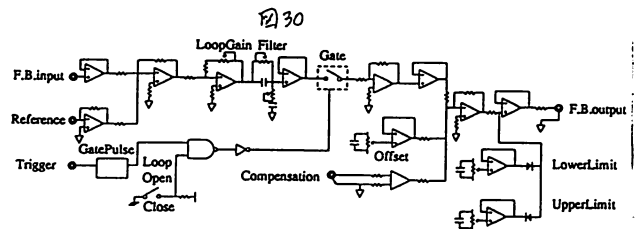
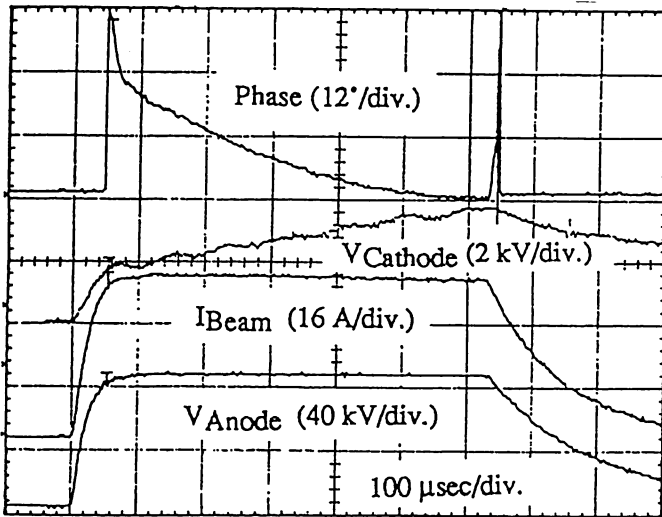


図31

各部波形



The data are taken at 600 μsec pulse-duration, 10 Hz repetition-rate and 93 kV cathode voltage.
The clamp voltage is 0 kV.

図32

*位相は1μsec以内で約36°動いている事わかる。

TEK Stopped: 5374 Acquisitions

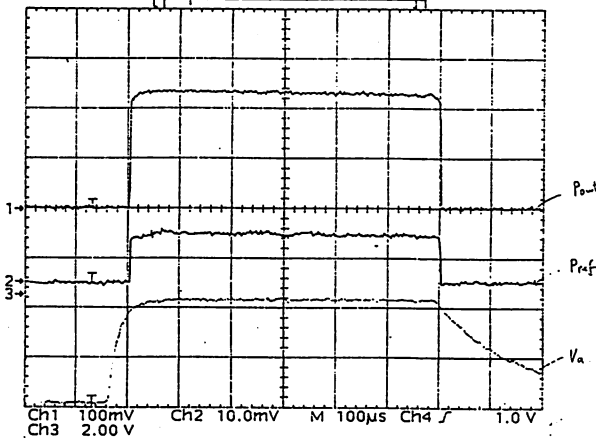


図33

(設定値: 93kV, 600μs, 10pps, Pdrive=30.2w)

* Pout = 1.9MW, Pref = 2.8kW

出力 v.s. ドライブ (図30)

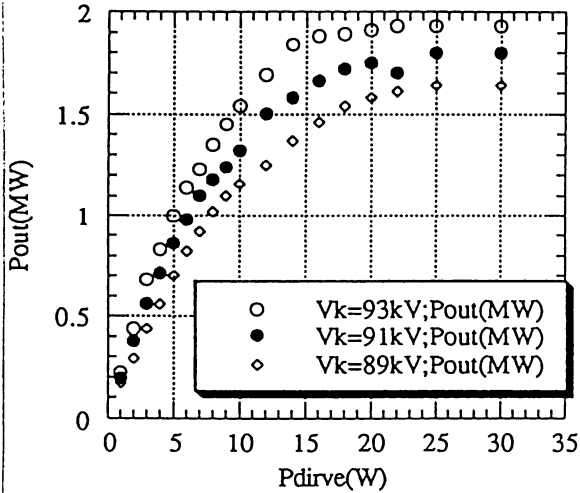


図34

カソード電圧 v.s. 効率, ビーム電流 (図25, 図30)

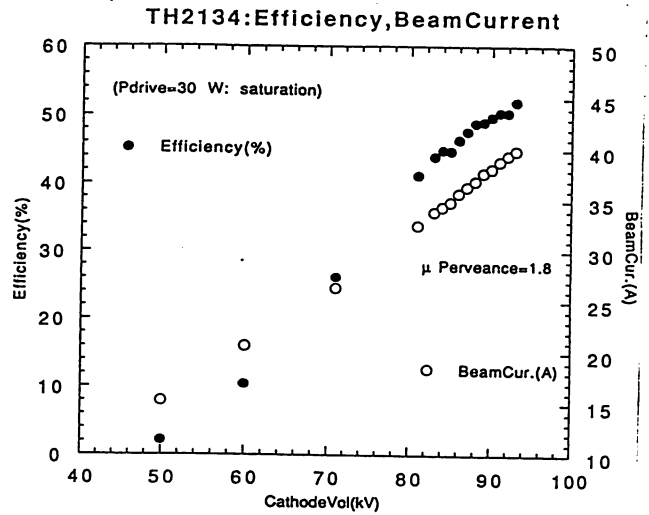


図35

TH2134: Efficiency, Beam Current

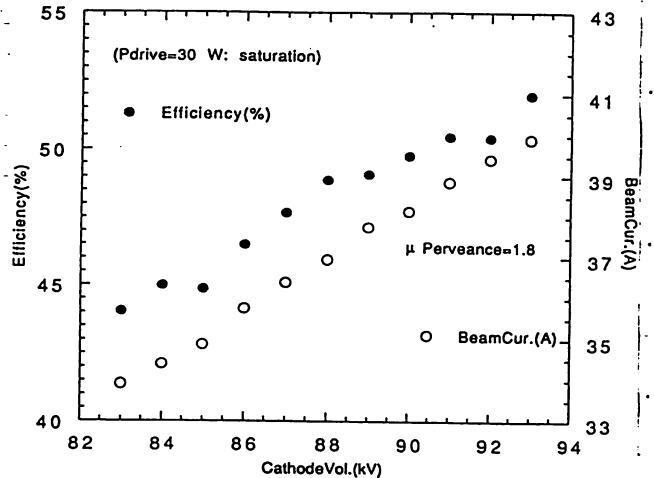


図36 (図35の一部拡大)

* 効率時カソード電圧: 93kV, ドライブ出力: 30w で 52%

カソード電圧 v.s. 出力, 位相 (図30)

$$y = -692.54 + 7.439x$$

$$y = -792.42 + 8.543x$$

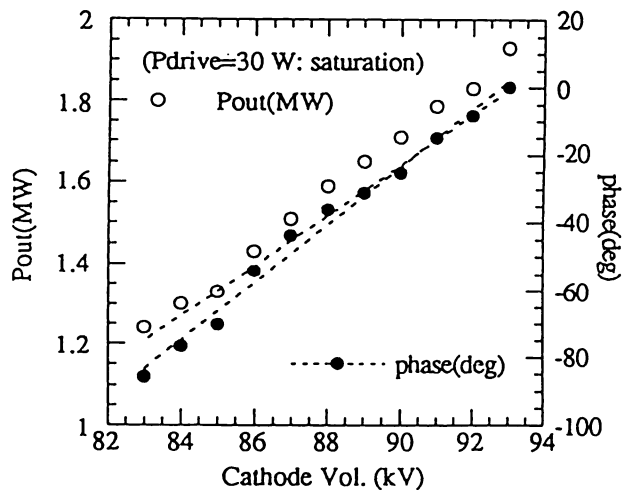
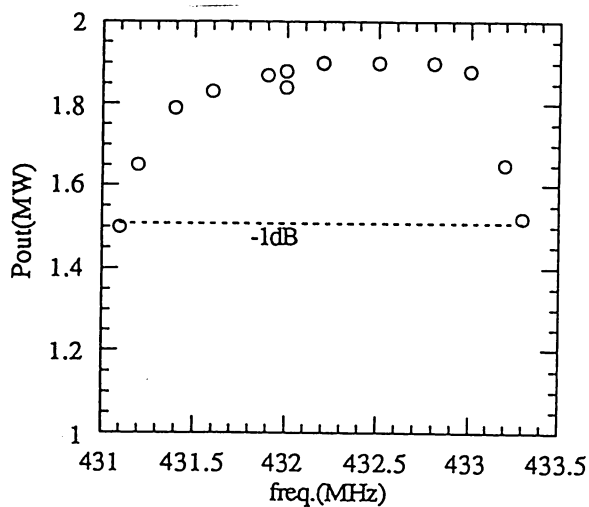


図37

* カソード: 1kV での約 8° 位相遅延。

周波数 vs. 出力 (図38)



Measured at saturation point (Drive power= 30 W).

図38

* 周波数が2MHz以上の範囲に於いても出力の減衰は-1dB.

ALC (automatic level controller) のテスト

(i) ALC-off の出力変動 (図39)

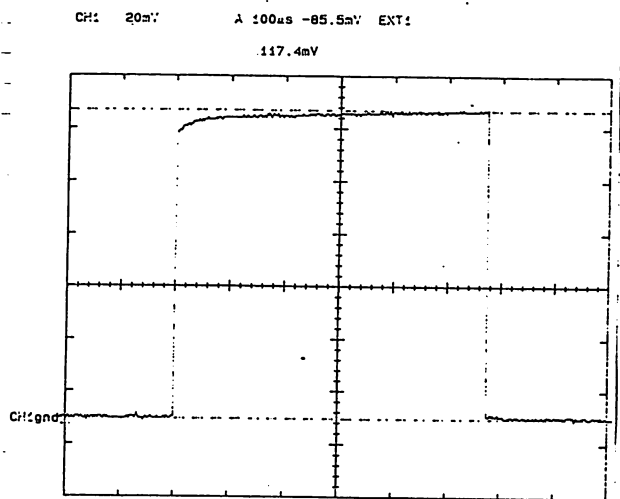


図39

(カソード電圧の値: 93kV(?), ドライブ power: 30W)

* サグの割合: 7.67%

(ii) ALC-on の波形 (図40)

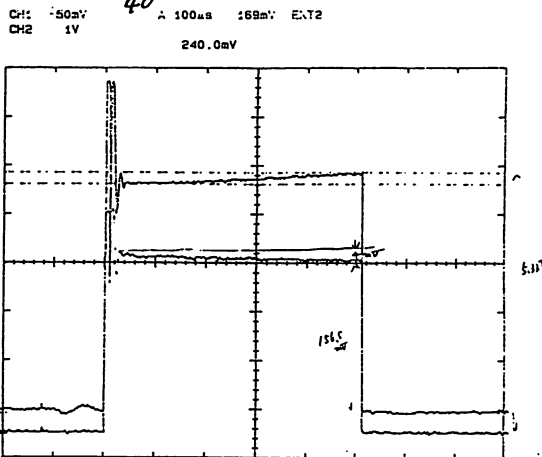


図40

(カソード電圧の値: ~90kV, ドライブ power: 5.4W)

CH1: Pout CH2: ALC出力

* Pout は ~1MW

* Pout のサグの割合: 2.56%

* 立上り部の比は出ていると3を改善する必要がある。

(iii) カソード電圧 vs. 出力 (ALC on と off の比較) (図41)

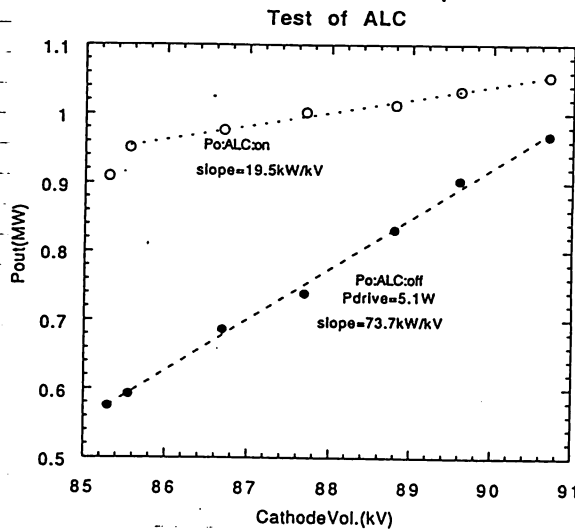


図41

* ALC on 時の方がカソード電圧の変動に対して出力が安定する