

大電力パルス変圧器

High Power Pulse-Transformer

南野 幸雄* 矢浪 正夫**
 Yukio Minamino Masao Yanami
 笹倉 邦彦** 佐野 巖**
 Kunihiko Sasakura Gan Sano

内容梗概

大電力極超短波発振器において、パルス変調器と発振管のインピーダンス整合用パルス変圧器は重要な要素であるが、近時、線形加速器における電子銃電源用、あるいはクライストロン変調用パルス変圧器として、きわめて良好な波形伝送特性を有するものが要望せられるようになった。線形加速器国産化の一つのあい路であった大電力パルス変圧器の諸問題を解明し得たので、その問題点ならびに設計法、結果について述べたい。なお一般的なパルス変圧器の特性についても記述することとした。

1. 緒言

パルス変圧器に関しては、レーダー装置の研究の一部として数多くの研究がなされており、特に MITR adiation Laboratory Series-Pulse Generator にはぼう大な研究結果が報告されているし、そのほかにもいくつか発表されている。にもかかわらず、線形加速器用となると、レーダーに比して、パルス波形の立上りおよび平坦度に高度の特性が要求せられるので、決定的な文献は発表されていない。特にパルス変圧器に要求せられる鉄心の特性、選択などについての資料乏しく、国産化のめどが全々わからぬ現状であった。筆者らは外国および国産のパルス変圧器鉄心および巻線法に関し実験を行い、国産の鉄心を用い、直流バイアス法を利用することによって、立上りのきわめて良好な、サグの少ない大電力パルス変圧器の製作に成功した。この方法はもちろん小電力のものにも適用され、インピーダンス比 50Ω 対 450Ω、周波数帯域 50 c/s~12 Mc のビデオ変圧器も製作された。

大電力パルス変圧器として製作されたものの代表的な例は次のとおりである。

- (1) 出力電圧および電流： 150 kV 60 A
- (2) 変成比： 1:13
- (3) パルス幅： 4 μs, 繰返し周波数： 25 c/s
- (4) 立上り時間： 0.3 μs
- (5) 平坦度： 3%以下
- (6) バイファイラ巻線, 電流容量： 40 A

2. パルス変圧器鉄心

2.1 バイアス磁場による鉄心の特性

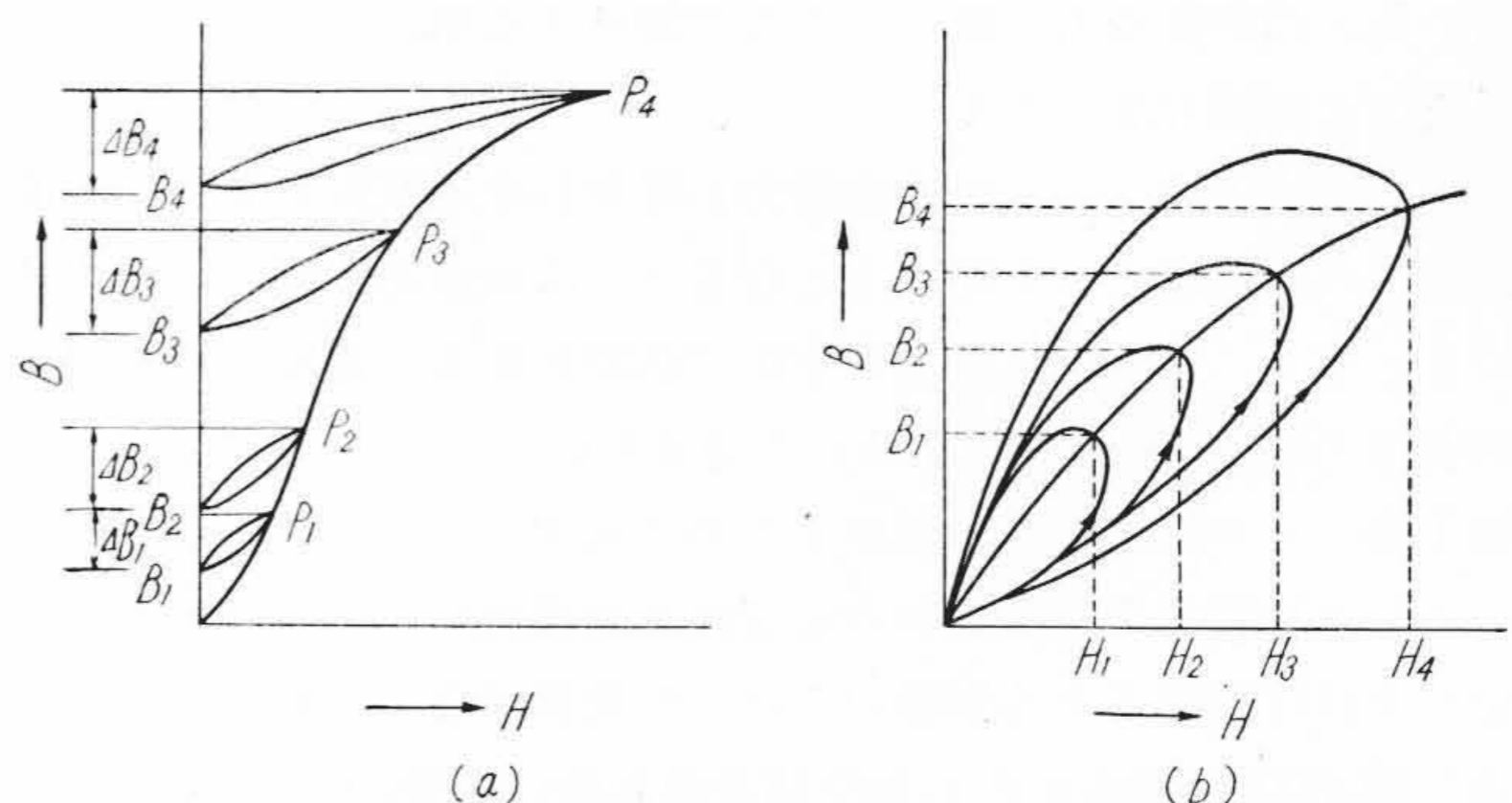
パルス変圧器に要求せられる性能は低周波特性としては一次インピーダンスが十分高く、高周波特性としては漏えいインダクタンスおよび分布容量によって形成せられる逡波回路の遮断周波特性が高いことに帰着する。

これらを満足するためにはパルスに対して利用しうる磁束密度および実効導磁率(μe)が大きいほどよい。すなわち次の二つの式が大略の見当をつける目安となる。

$$E\tau = NA_c B \cdot 10^{-8} \dots\dots\dots (1)$$

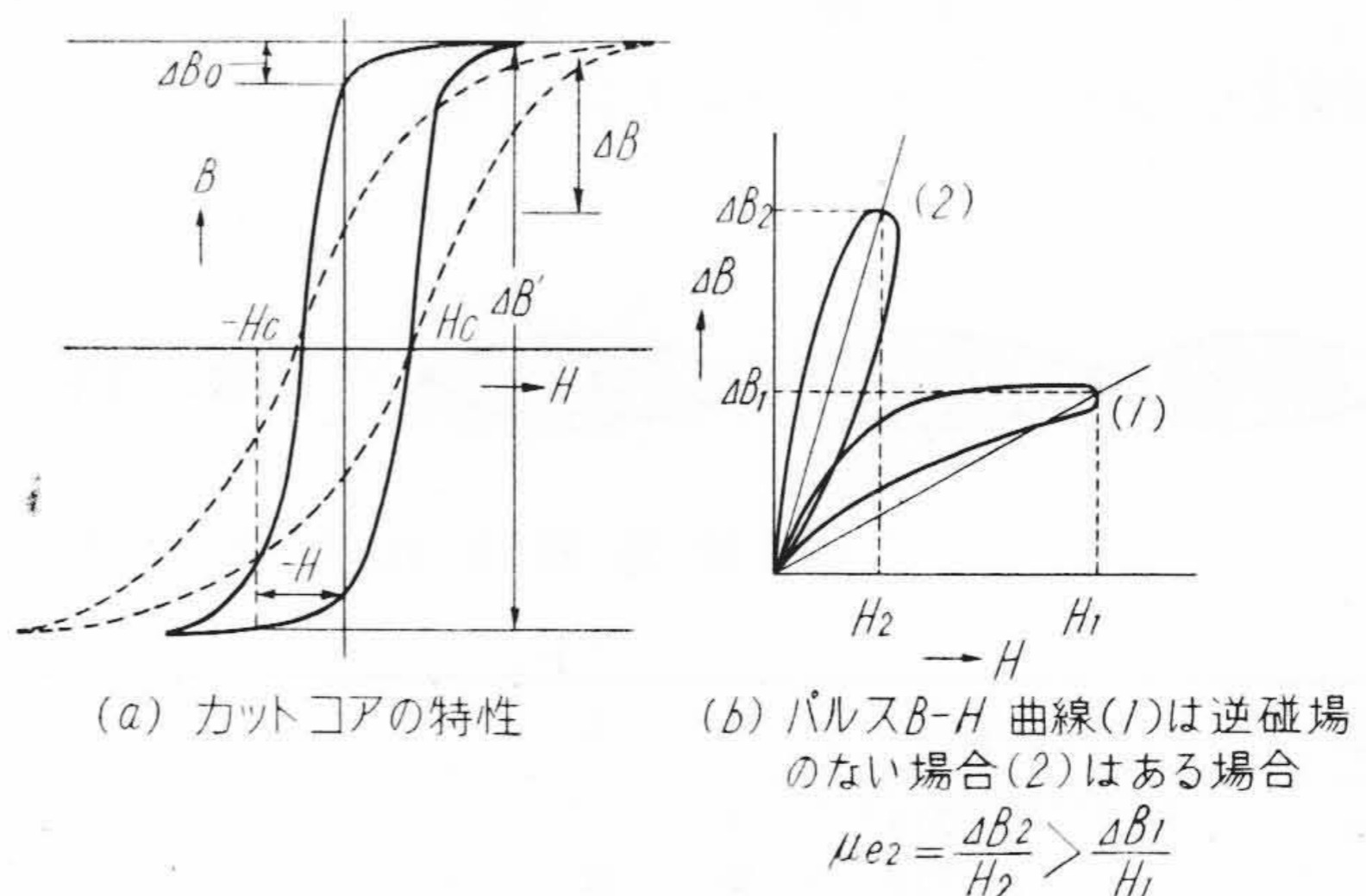
$$L_P = \frac{4\pi}{10^9} \cdot \frac{N^2 A_c \mu_e}{l} \dots\dots\dots (2)$$

E = パルス電圧 (V)



(a) は4種のパルスによるもの、(b) はオシログラフで観測されるもの

第1図 パルス B-H 曲線の説明図



(a) カットコアの特性

(b) パルスB-H 曲線(1)は逆磁場のない場合(2)はある場合

$$\mu_{e2} = \frac{\Delta B_2}{H_2} > \frac{\Delta B_1}{H_1}$$

第2図 直流バイアス法の説明図

- τ = パルス幅 (秒)
- B ≡ ΔB = 実効磁束密度 (ガウス)
- N = 巻線数
- A_c = 鉄心断面積 (cm²)
- l = 鉄心平均磁路長 (cm)

上式で B および μe はパルス電流で鉄心を磁化した場合の値で、B ≡ ΔB は第1図 (a) における ΔB、あるいは (b) のパルス B-H 曲線の B に相当する。パルス磁化の場合は残留磁気が生ずるので、利用できる磁束密度は非常に少なくなる。

第2図の実線は uncut の場合、点線は cut の場合で、後者は Br (残留磁束密度) が下って、利用しうる ΔB は増加するし、また -H を与えて、残留磁気を取り去れば、ΔB は ΔB' となり、利用磁束密度を著しく増加できる。また一方パルス実効導磁率: μe = ΔB/H は cut の場合は、著しく低下するが、uncut で -H を加えた

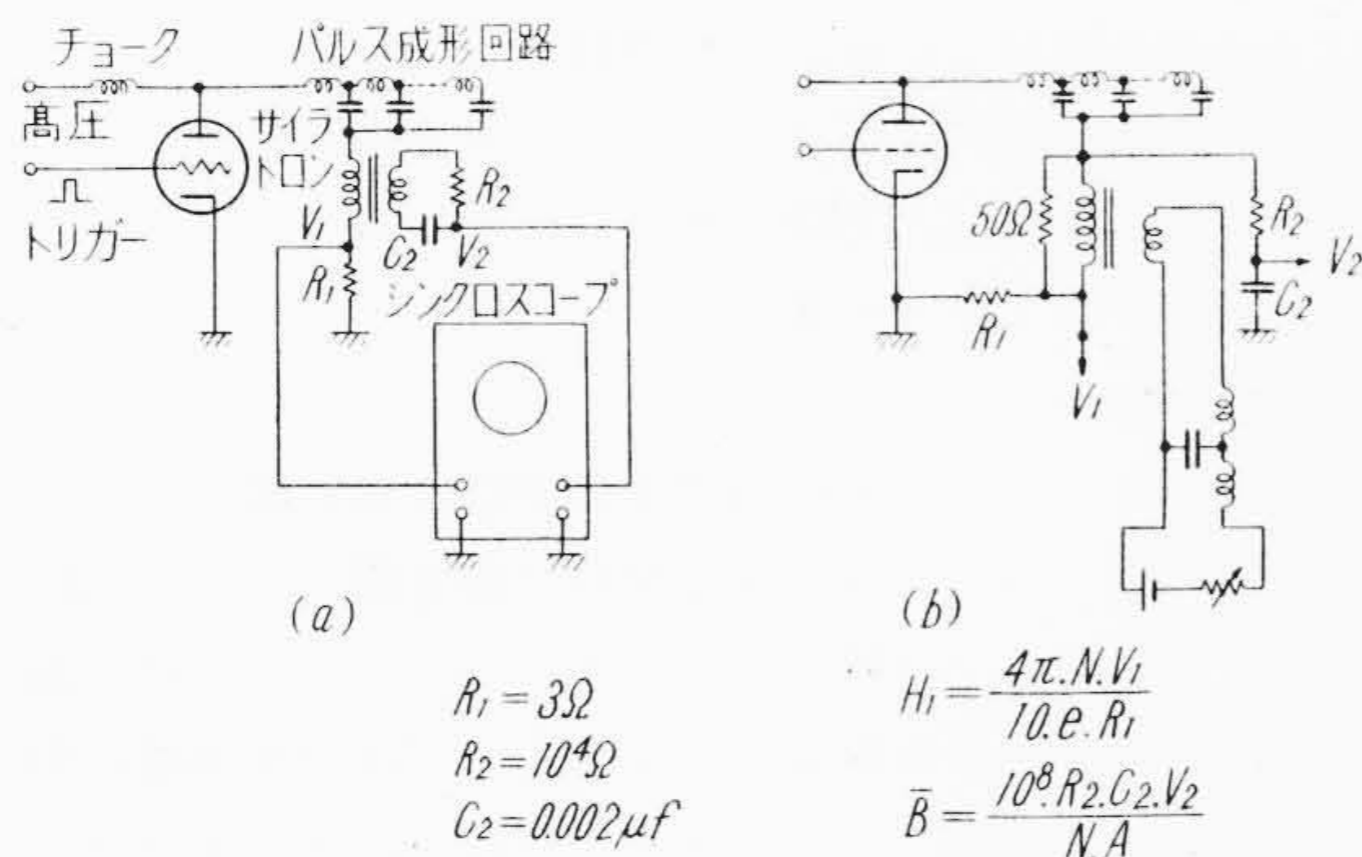
* 日立製作所本社
 ** 昭和電子株式会社

第1表 各種鉄心の測定

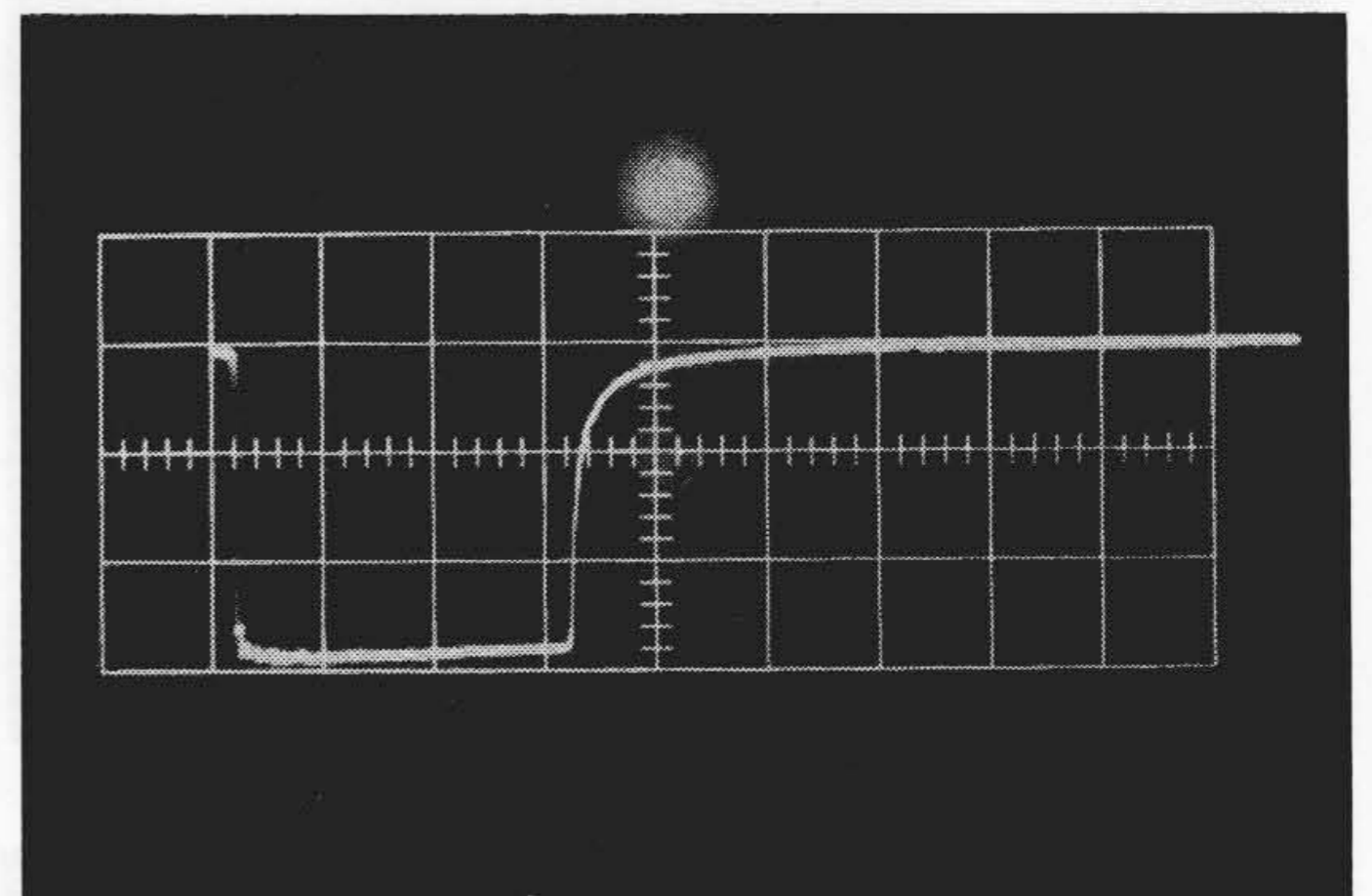
Pulse B-H Loop μe の測定

	H 1	TA 1	TB 1	TB 2	TB 3	TB 4	TB 5	U 1	Y 1	F 1	SC 1	UC 1	UL 1
Material	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	P	P	P	P	P	P
d (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1
H_c (Oe)	0.50	1.0	0.70	0.25	0.28	0.40	0.40	0.35	0.027	0.15	0.30	0.48	0.08
B_s (G)	11,500	12,350	11,700	9,950	9,800	12,000	12,300	9,860	6,320	6,000	7,500	10,400	6,900
B_r/B_s (%)	77	74	79	81	73	64	57	65	59	95	10	15	44
μ_i	440	380	330	530	730	1,200	1,300	1,450	3,700	320	1,450	1,660	3,800
μ_{max}	7,600	4,300	6,250	9,750	10,300	7,400	7,500	9,500	101,500	23,600	1,880	2,160	18,000
μ_e													
$\Delta B=2,500$	100	250	310	290	360	430	500	1,400		25			
5,000	60	150	240	200	260	340	380	900	3,400	10	400	1,150	500
7,500		100	150	120	220	300	350	140	2,700	7	250	1,000	200
10,000		60							2,000		60	750	100
15,000		40							1,500				50
$\mu_{e,d}$													
$\Delta B=2,500$	360			3,900		450				1,450			
5,000	270			3,700		400				1,300			850
7,500				3,000					50,000	1,100			600
10,000		540		2,700					40,000	900			500
15,000		400							30,000	700			400

Si: 珪素鋼板
 P: パーマロイ
 SU1, UC1: カットコア
 H1: 日立金属製
 TA1, TB1, TB2, TB3, TB4, TB5: 東北金属製
 U1, SC1, UC1: 東芝製
 F1: 富士電機製
 UL1: アメリカ製
 Y1: 真空熔解製



第3図 パルス B-H 曲線測定回路



第4図 PFNとしてケーブルを用いたパルス発生器出力波形
 $2.0 \mu s, 8 kV$

場合は改善せられる。上述の直流的な議論は一見異様に思えるかも知れないが、実験の結果は後述のように、定性的にはきわめて正しく適用できる。

高導磁率材料の一般的な性質として、磁性材質が改善されるに従って矩形ヒステリシス特性を示し、 μ は増大するが、飽和磁束密度は減少し、特にパルスに対する利用磁束密度は著しく減少する。このために鉄心を cut して利用磁束密度を増加する方法が考え出された訳であるが、前述のように μ_e が減少するので、一次インダクタンスを大きくするためには巻線数が大となり立上り特性を悪くする。すなわち磁束密度を大きくすることと、 μ_e を大きくすることは互に相反する方向を有するので、この事実をなんとかして同じ方向に進めなければすぐれた特性は得られない。そしてその方法が第2図で説明したパルス間の残留磁気を直流バイアスによって除く方法である。

第1表は東京大学原子核研究所高エネルギー研究室と協同で各種のパルス変圧器用鉄心の特性を測定したものであって、この表から鉄心の種々の特性が一目にして知ることができる。すなわち

- (1) 直流の μ_i の大きなものは、パルス導磁率 μ_e も大きい。(ただし積層厚さは一定)

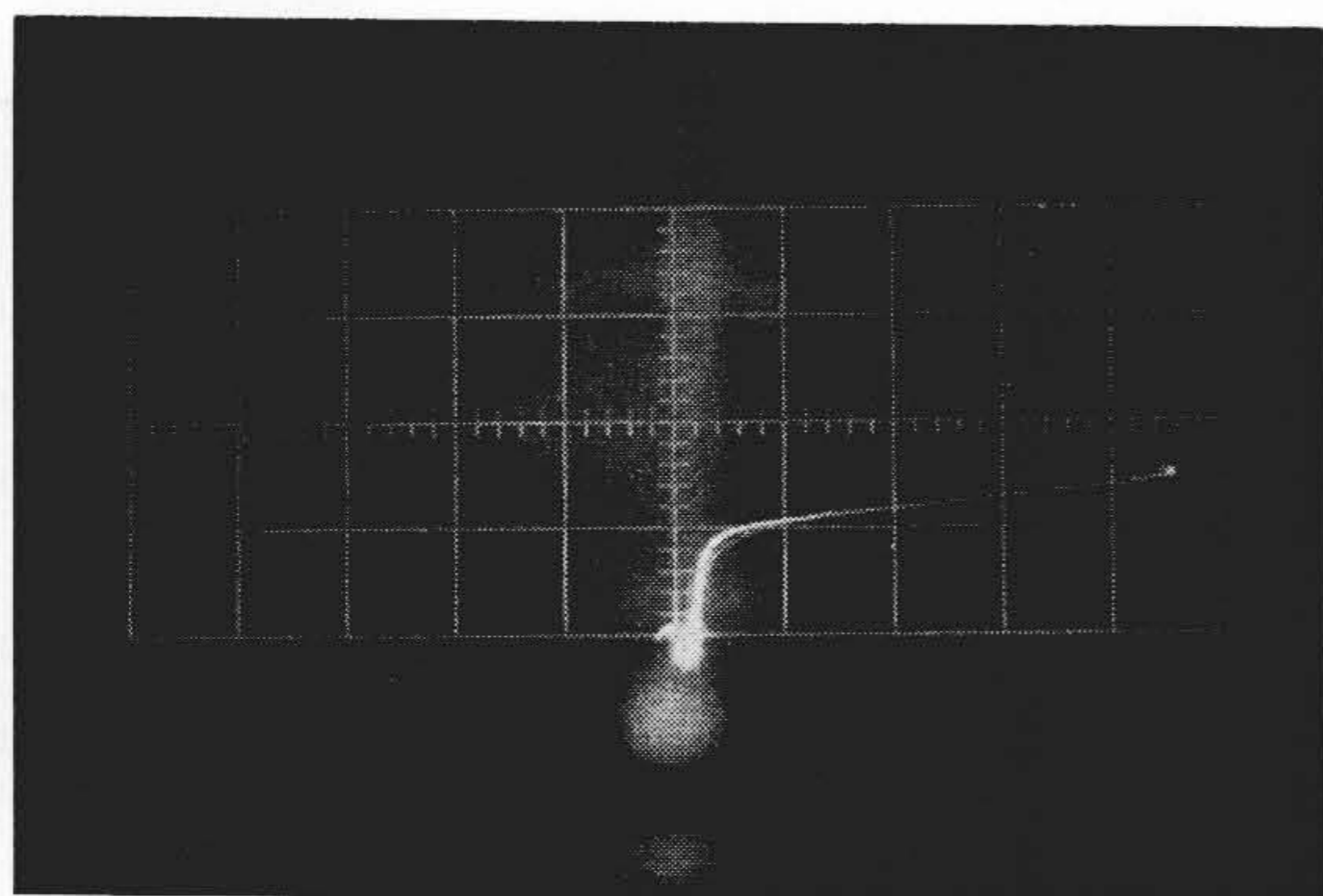
- (2) ΔB を大きく取るに従い μ_e は減少する。
- (3) 直流バイアスを加えた場合の μ_e 、(表中の $\mu_{e,d}$) は非常に大きな値を示す。
- (4) カットコアの場合直流バイアスの効果は顕著に現われない。

この表の中で目立って優秀な特性を示しているものは、Y₁ コアであって、直流バイアスを加えた場合非常にすぐれた特性を示す(スーパーパーマロイのリング状鉄心)。われわれはこの実験結果から、従来パルス変圧器鉄心への要求として B_r/B_s をできるだけ小さくしようという方針を捨てて、矩形に近く μ_i の大なるものにバイアス磁場を加えるのが最も有効な手段であることを確認した。

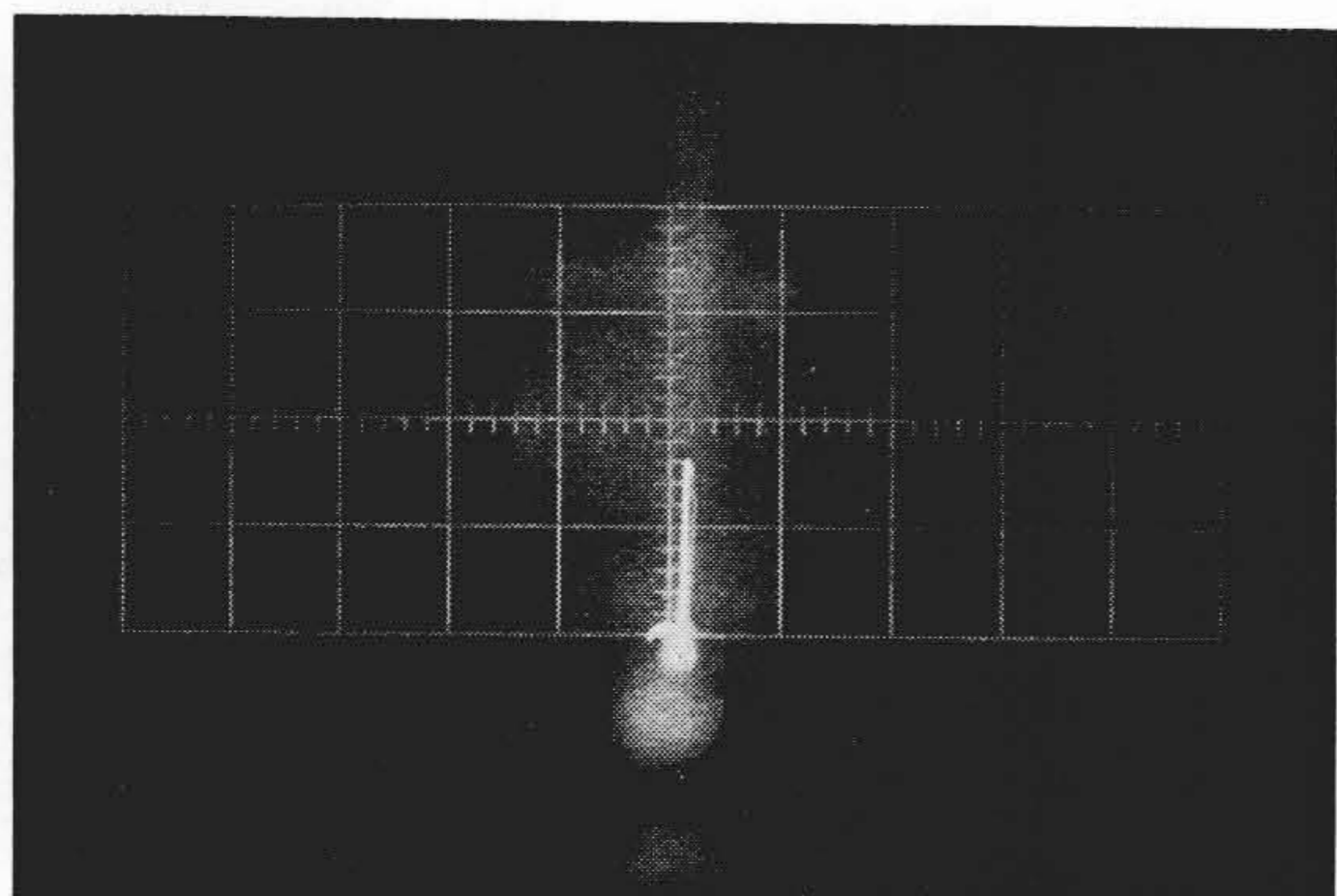
2.2 $\mu_e, \mu_{e,d}$ の測定と結果

パルス B-H 曲線の測定は、第3図(a)の回路で測定できる。ただし注意を要することは次の諸点である。

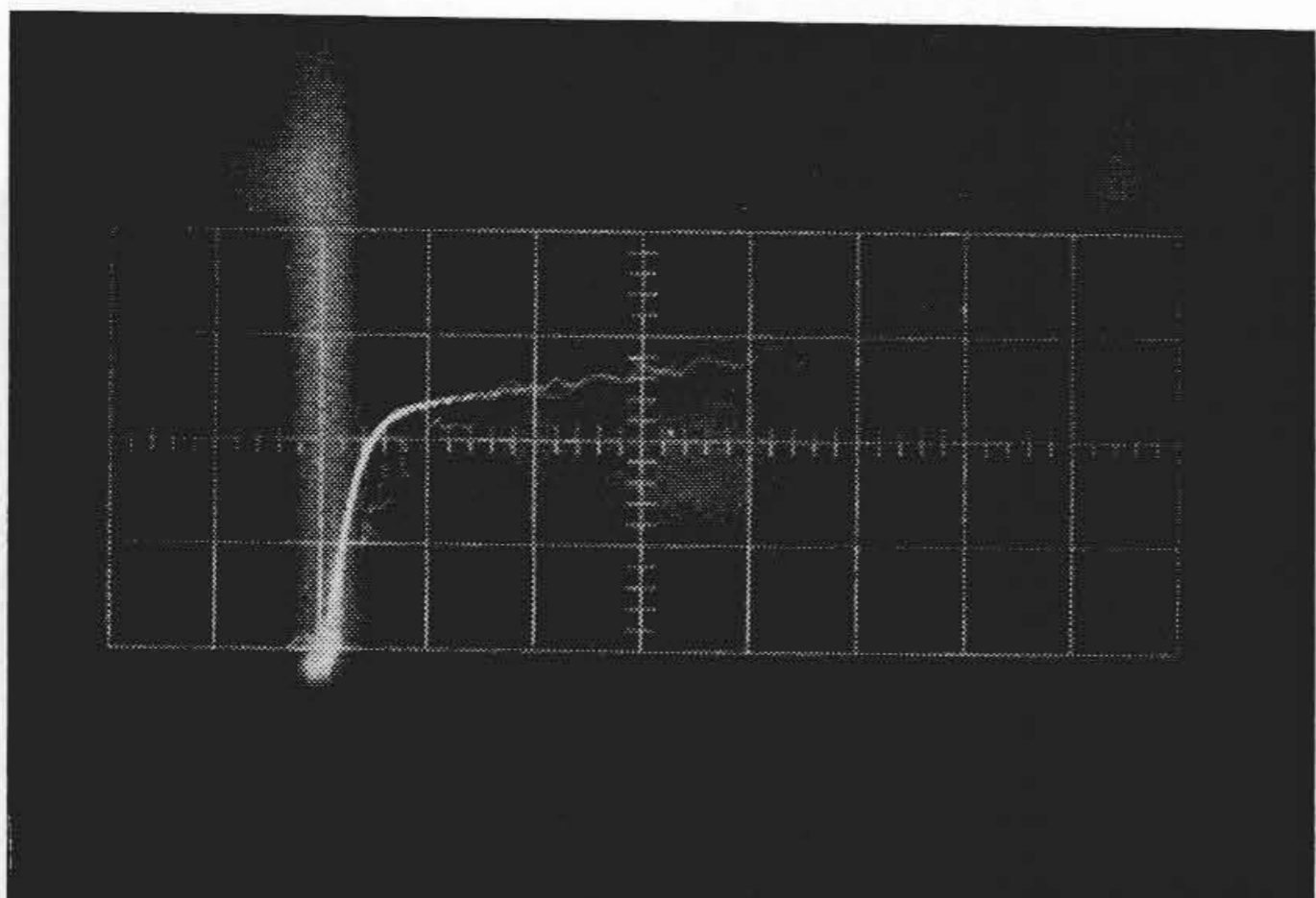
- (1) 入力電流波形は正確に矩形でなければならない。電圧波形も同様。つまりパルスの含有周波数を包含していなければならない。



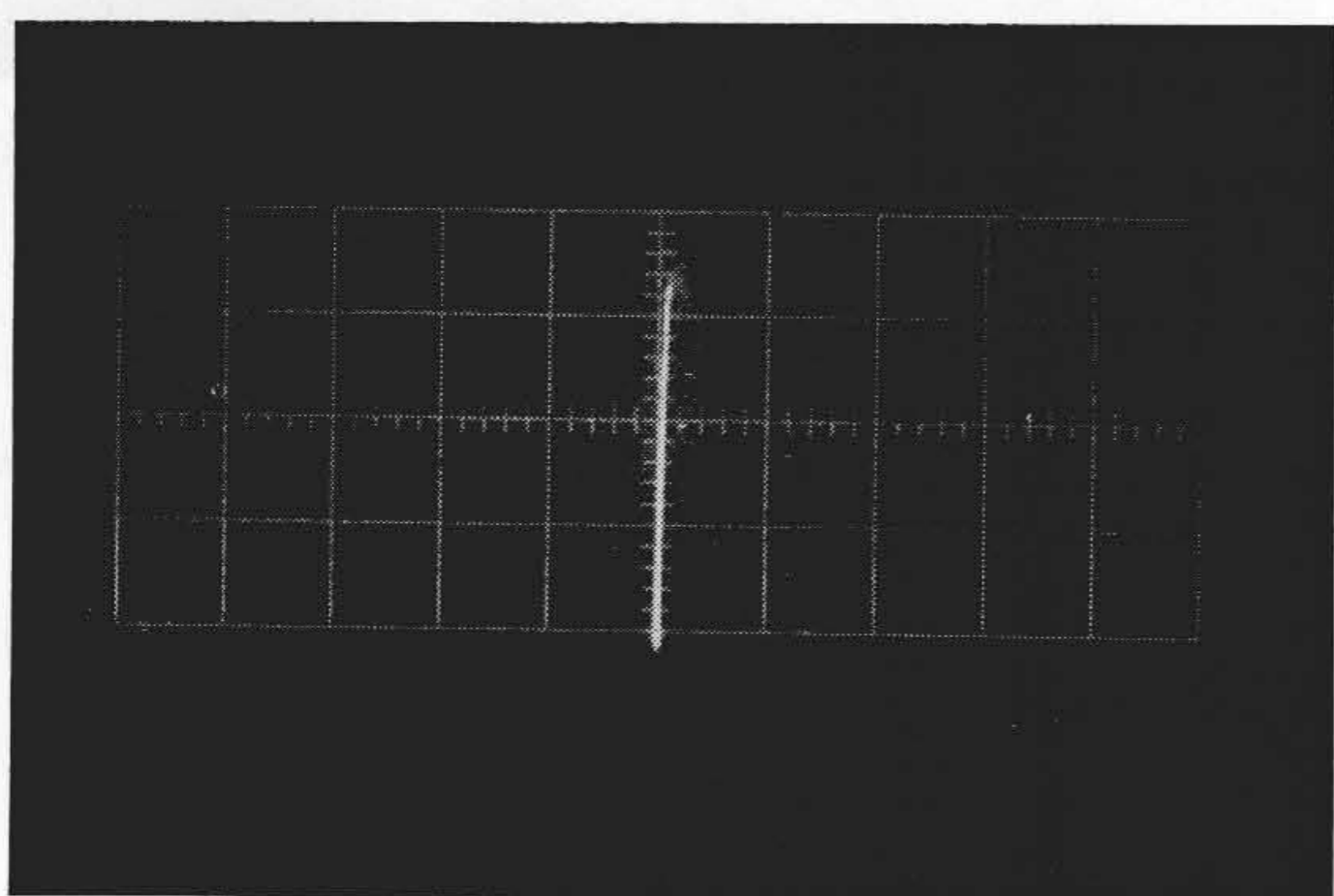
(1)



(2)



(3)



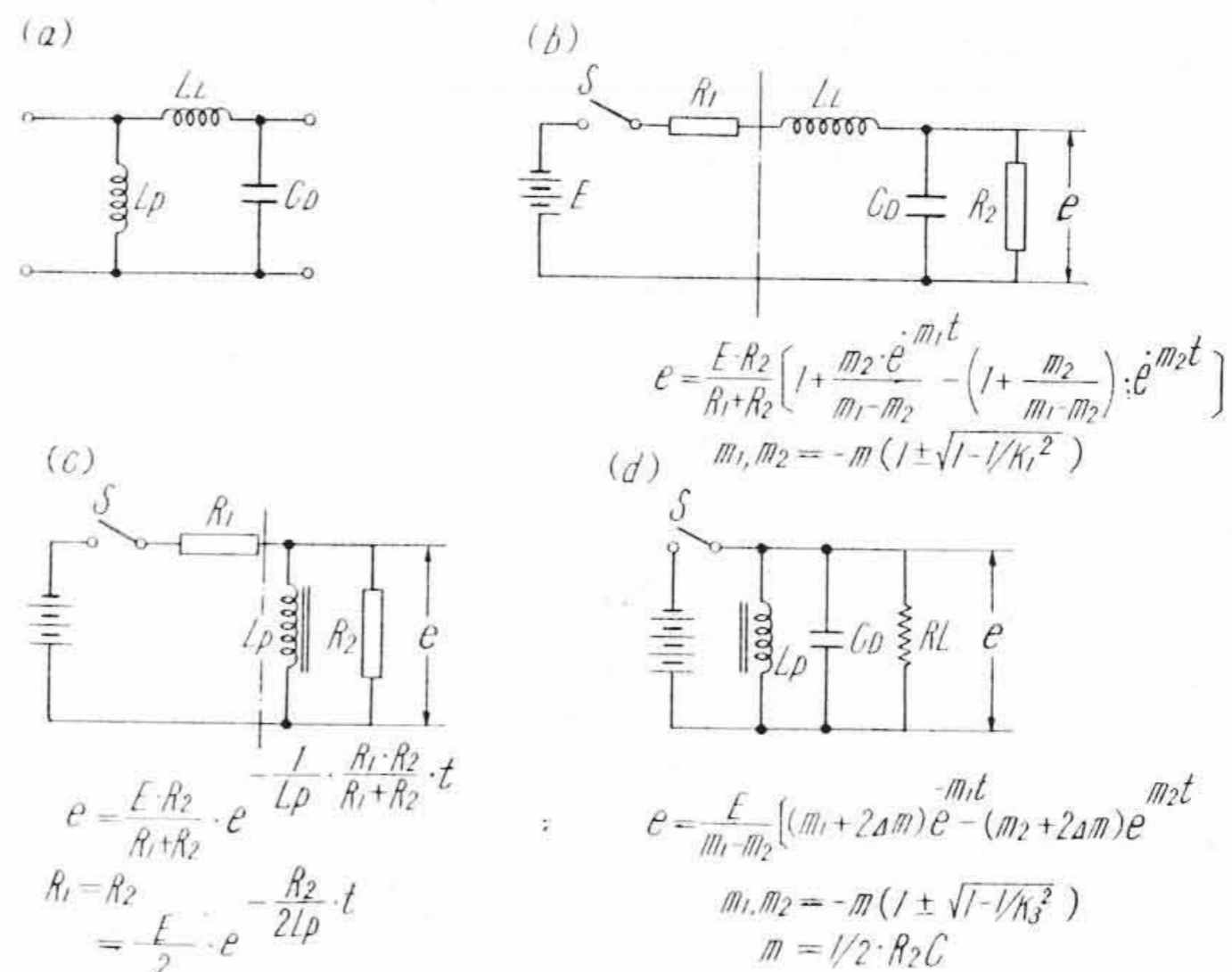
(4)

(1), (3) NO BIAS
(2), (4) BIAS を加えた場合

第 5 図 パルス B-H 曲線

- (2) 増幅器は十分な帯域を有すること。
- (3) R_1 は一次インピーダンスに比して十分小さいこと。
- (4) R_2 は十分大きくて負荷とならぬようにすること。
- (5) $R_2 C_2$ なる積分帯数は十分大であること。

実際に使用した回路を第 3 図 (b) に示す。パルス変圧器の二次巻線を省略し、パルス発生器出力に PFN のインピーダンス 50Ω



第 6 図 パルス変圧器の等価回路

を終端して整合を取り、 L_p/τ の値を 500Ω になるように巻線を施した。パルス発生器は波形をきれいにするために PFN として、同軸ケーブルを用いた。入力波形は第 4 図に示す。第 5 図はパルス B-H 曲線のオシログラムで、直流バイアスを増加してゆく時の模様を示すされている。

3. 大電力パルス変圧器の設計

パルス変圧器に対する要求は次の項目で表わされる。

- (1) 二次出力電圧および電流 (二次尖頭電力)
- (2) インピーダンス比
- (3) パルス幅および繰返し周波数
- (4) 立上り時間およびオーバーシュート
- (5) パルスストップの下降 (サグ)
- (6) バックスイングの量
- (7) 負荷特性

周知のとおり、パルス変圧器の等価回路は第 6 図 (a) で示され、上記 (4), (5), (6) を決定する回路は第 6 図 (b) (c) (d) で表わされる。すなわち立上り時間およびオーバーシュートは、漏えいインダクタンスおよび分布容量、パルスストップはパルス幅に対する一次インダクタンスの値、バックスイングは一次インダクタンスと分布容量にそれぞれ関係している。

パルス変圧器の設計は上記仕様に対して、漏えいインダクタンス (L_L)、ストレーキャパシタイ、(C_D) を極力少なくすると同時に L_p を十分大きくして、損失 $\sqrt{2L_L/L_p}$ を最小にすることである。なお簡単な計算によって、パルス変圧器最大効率で動作するためには次のような条件が満たさねばならない。

- (1) $Z_l \equiv \sqrt{\frac{L_L}{C_D}} = R_l$ or $\frac{1}{2} L_L I_l^2 = \frac{1}{2} C_D V_l^2$
- (2) $\tau \approx 2 \sqrt{L_p C_D}$
- (3) 損失 $\approx \sqrt{2L_L/L_p} \rightarrow$ 最小

Z_l : 負荷インピーダンス

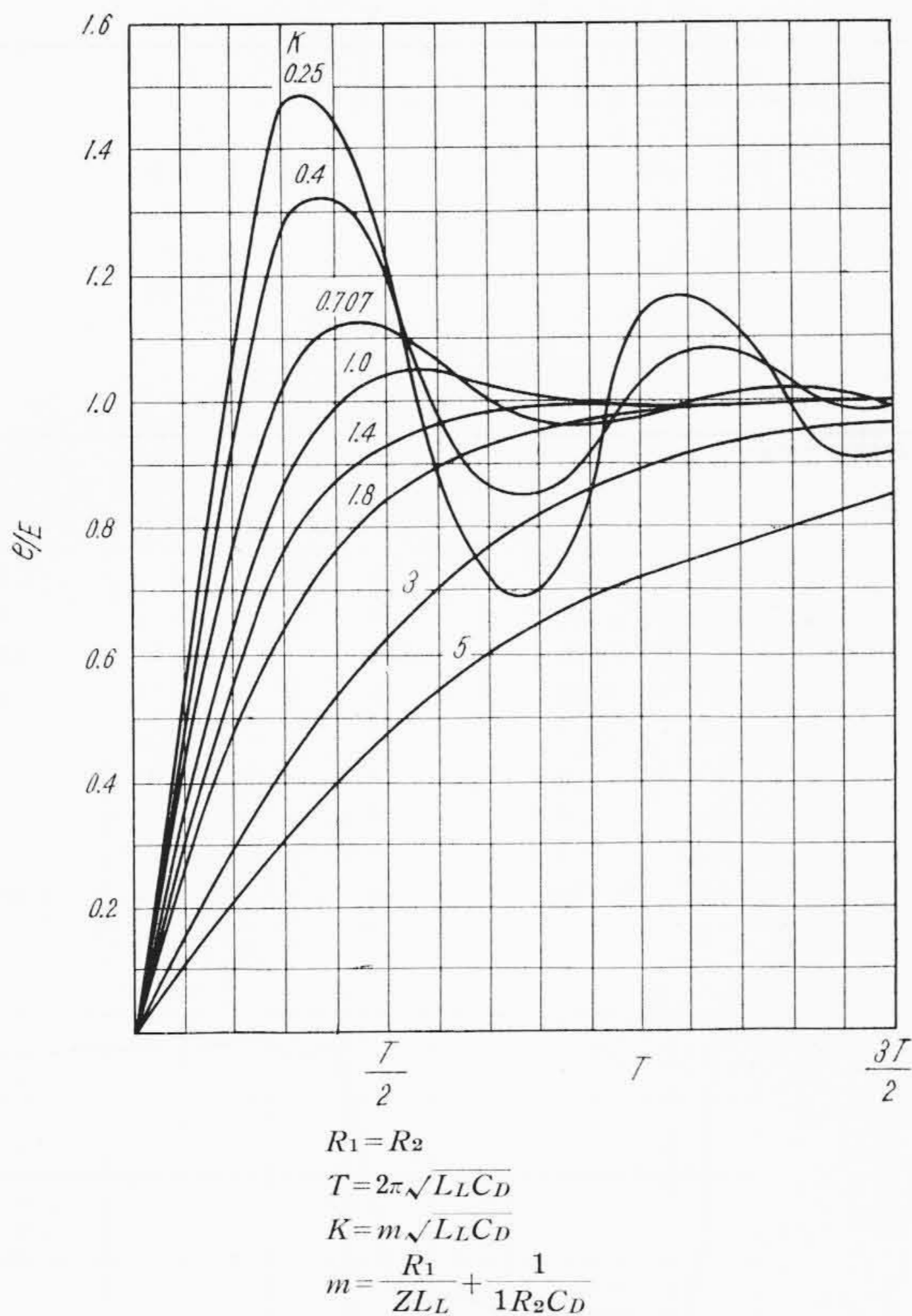
R_l : 負荷抵抗

L_p : 一次インピーダンス

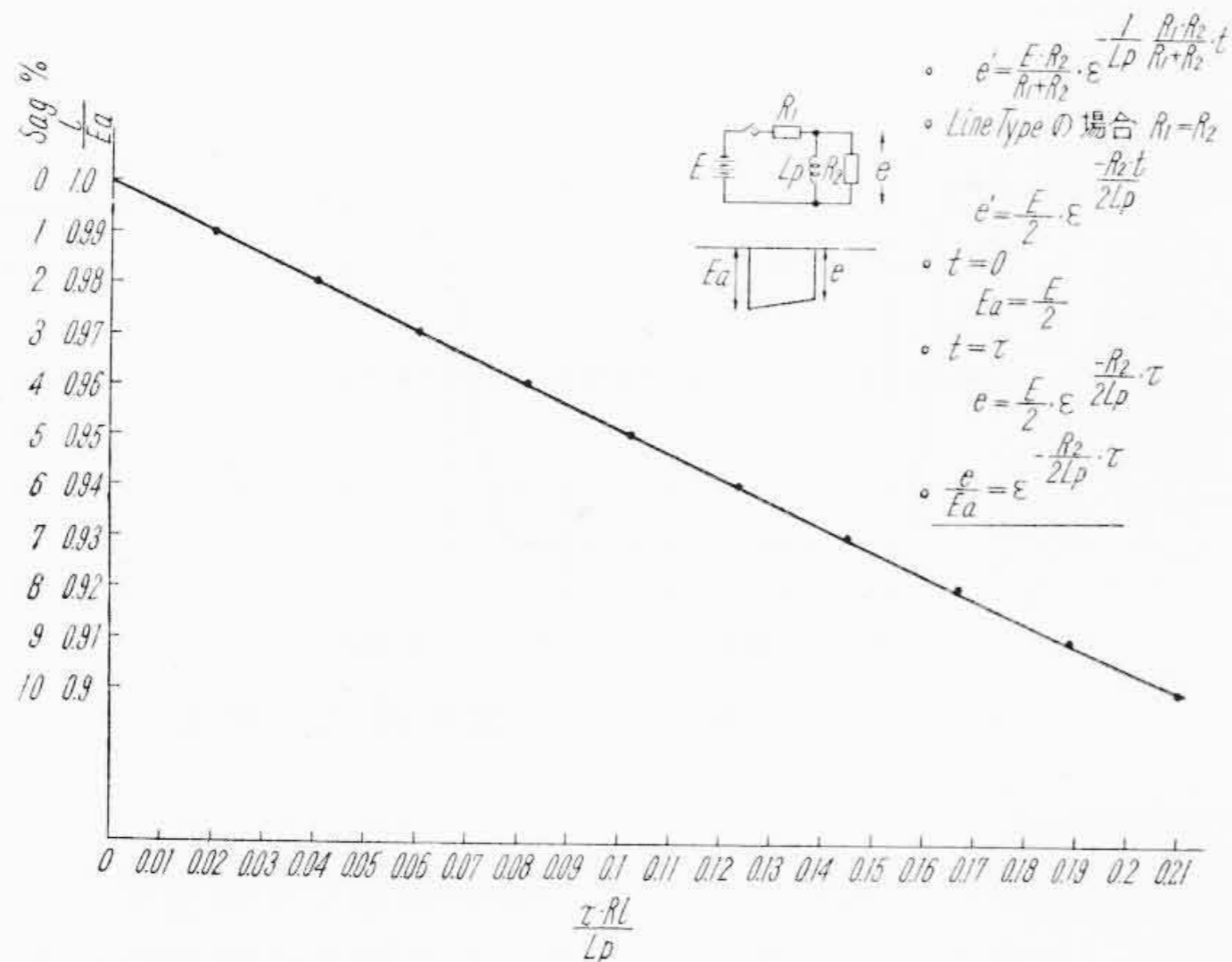
V_l, I_l : 負荷電圧および電流

τ : パルス幅

パルス変圧器の鉄心の選択については上述せるとおり、パルス B-H 曲線を取ってその性能を試験しなければならないが、Moody の与えた実験式はわれわれのところ種々検討した値とよく一致している。鉄心の導磁率は、 ρ 抵抗率、 τ パルス幅、 δ (厚さ) に関する。



第7図 パルス立上りの過渡特性



第8図 パルスストップの降下量

Moody の式は

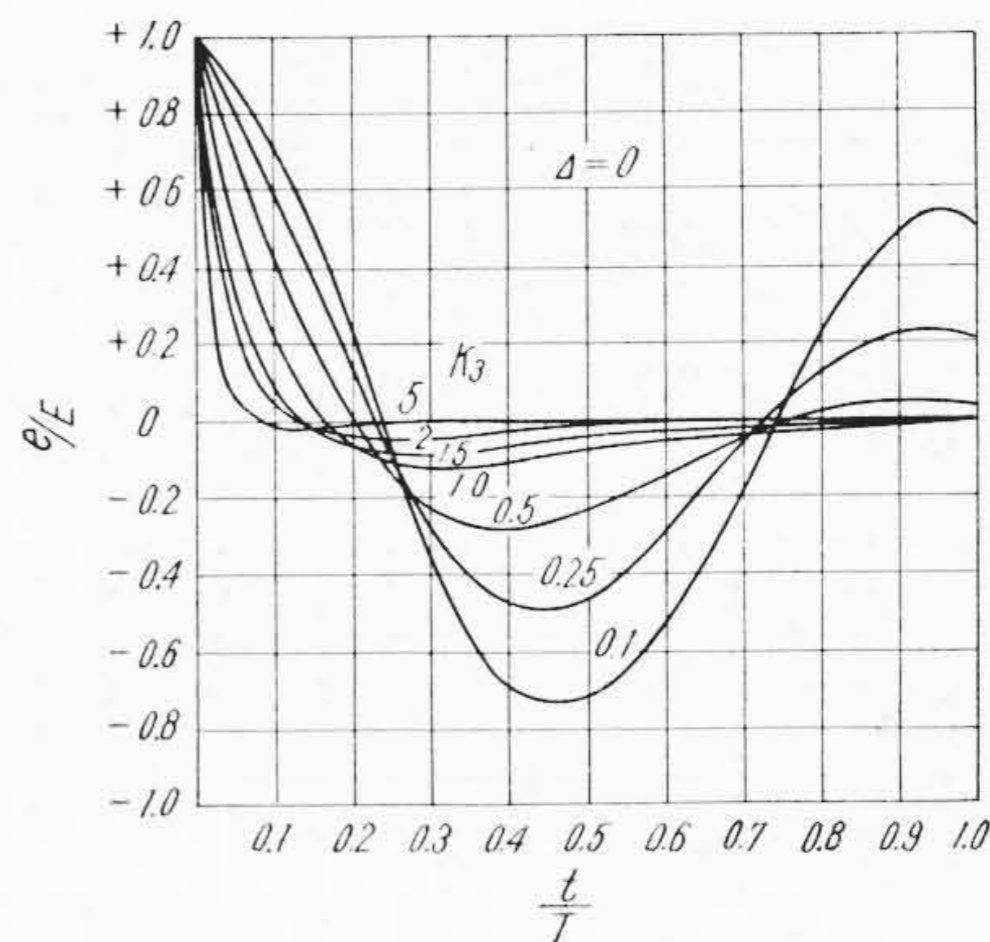
$$\mu_e = \frac{6.2 \sqrt{\rho \tau \mu_0}}{\delta} \dots \dots \dots (3)$$

- ρ : $\mu\text{V}/\text{cm}^2$
- τ : μs で表したパルス幅
- δ : mil で表した厚み
- μ_0 : 完全磁束透過の μ

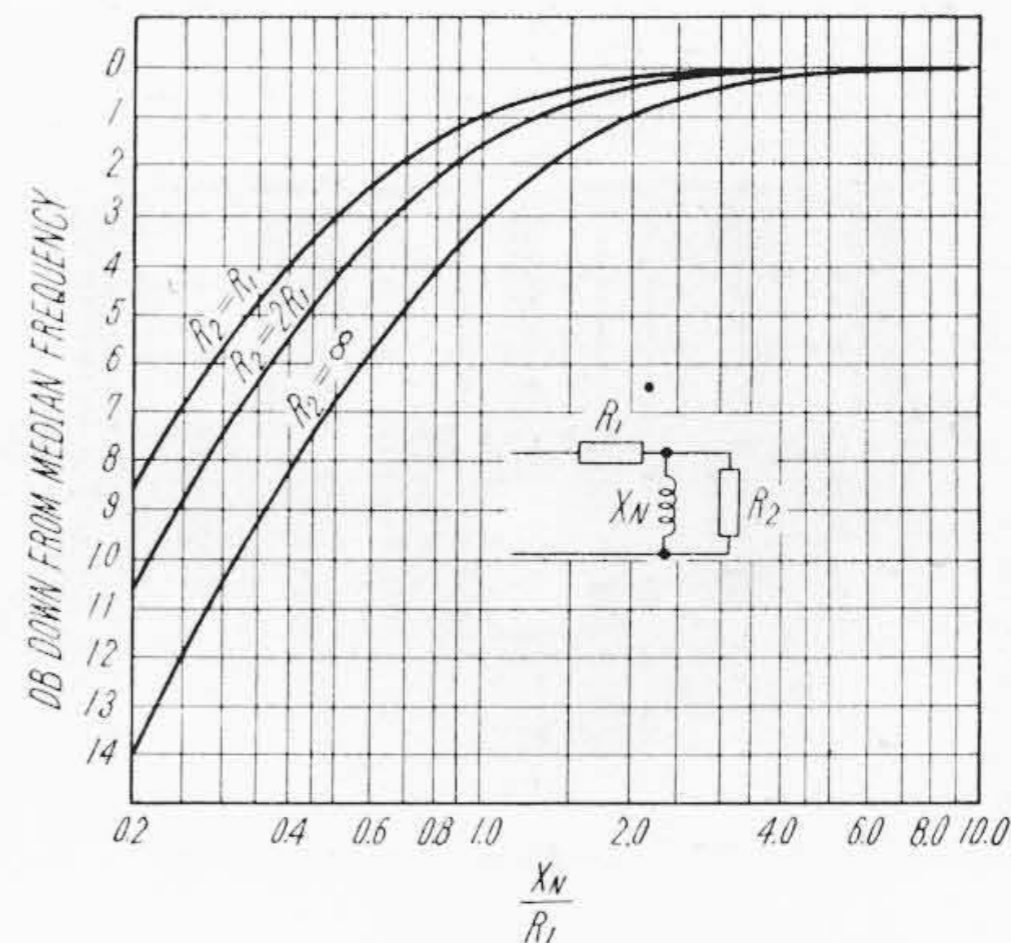
たとえば $\tau=1$, $\rho=50$, $\delta=1$ のとき $\mu_e=800$ で, $\tau=10 \mu\text{s}$ になると $\mu_e=240$ に低下する。

パルス変圧器の設計としては, 仕様を与えられると, 伝送エネルギー, μ_e , ΔB から鉄心の重量が決まり, 鉄心断面積と二次巻線数を計算し, さらに一次, 二次の巻線の線径を考慮し, また一次, 二次間の絶縁を考慮して窓の大きさを決めることができる。鉄心および線ひずみ, 巻回数が求まると, 所要の絶縁, 耐圧を考慮して巻線の方法を考える。巻線の方法が決定すると, $L_L C_D$ を計算し, 次のようにして過渡特性を計算によって求めて, 所要の特性が得られるかチェックする。

(1) 立上り時間およびオーバーシュート



第9図 バックスイングの過渡特性



第10図 パルス変圧器の低周波特性

立上り時間およびオーバーシュートは第6図(b)の回路で, スイッチSを入れた時の過渡特性と等価であって, その解は次式で表わされる。

$$e = \frac{E}{2} \left[1 + \frac{m_2 \epsilon^{m_1 t}}{m_1 - m_2} - \left(1 + \frac{m_2}{m_1 - m_2} \right) \epsilon^{m_2 t} \right]$$

($R_1 = R_2$ の場合) (4)

$$m_1, m_2 = -m(1 \pm \sqrt{1 - 1/K_1^2}), \quad k = m\sqrt{L_L C_D}$$

$$m = \frac{R_2}{2L_L} + \frac{1}{2C_D R_2}$$

Kの値を計算し第7図を用いて, 過渡特性を求めることができる。

(2) パルスストップの下降量

パルスストップの過渡特性は上記と同様に第6図(c)の回路を解く。すなわち

$$\epsilon = \frac{E R_2}{R_1 + R_2} \epsilon^{-\frac{1}{L_P} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} t} \quad \text{or} \quad e = \frac{E}{2} \epsilon^{-\frac{R_2 t}{2 L_P}}$$

$\tau R_2 / L_P$ を計算し, 第8図から下降量を求める。

(3) バックスイング

バックスイングの過渡特性は, 第6図(d)の回路でスイッチSが接の状態から断になった場合に相当する。この回路で, R_L, C_D は一次側に換算した場合の値である。この場合の解は次式で表わされ, 第9図で示される。

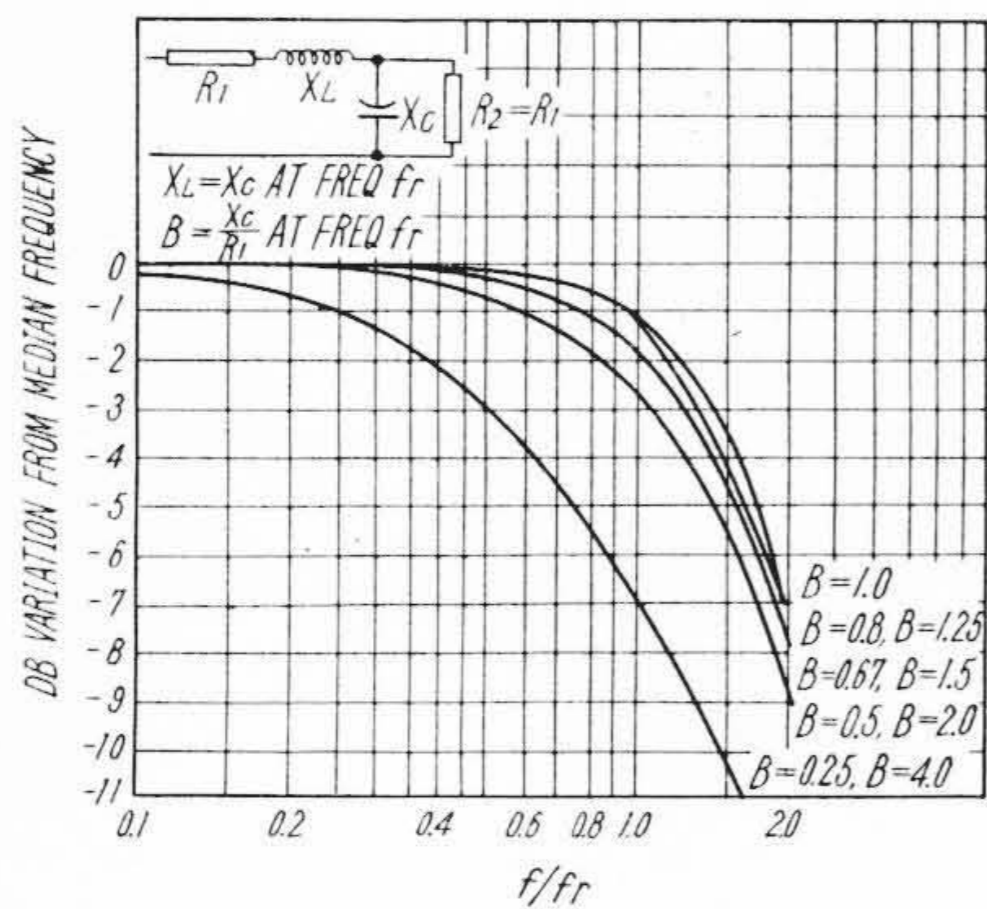
$$e = \frac{E}{m_1 - m_2} \left[(m_1 + 2\Delta m) \epsilon^{-m_1 t} - (m_2 + 2\Delta m) \epsilon^{-m_2 t} \right]$$

$$\text{ここに } m_1, m_2 = -m(1 \pm \sqrt{1 - 1/k_3^2}), \quad m = \frac{1}{2} R_2 C_D$$

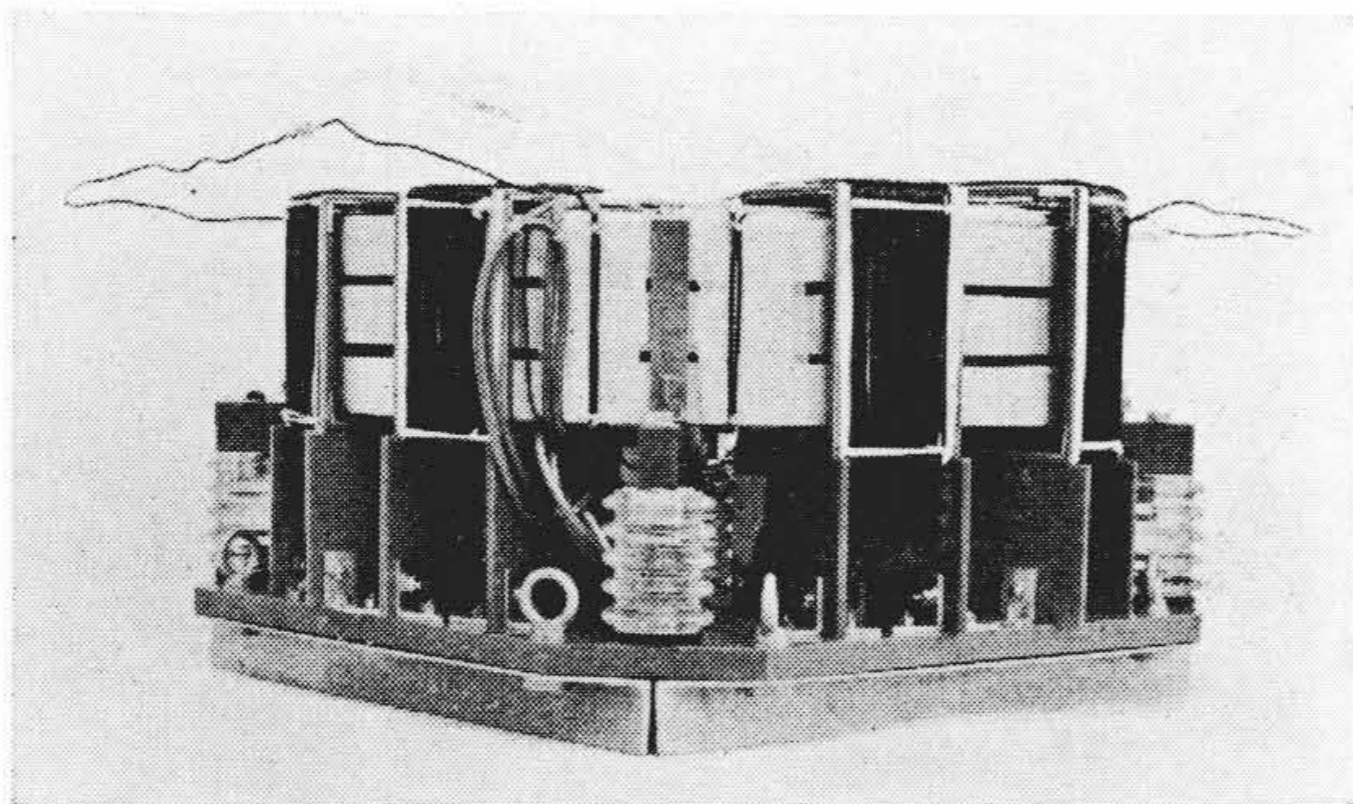
- Δ : 磁化電流/負荷電流
- k_3 : 波尾の係数

第11図は $\Delta=0$ の場合を示し, k_3 の値を計算し, この図からバックスイングの量を求めることができる。

以上で一応パルス変圧器設計の考え方を示したが, さらに正確を期するためには次に述べるとおり, 測定を行ってみるのが便利で



第 11 図 パルス変圧器の高周波特性



第 12 図 大電力パルス変圧器

ある。もっとも上記の方法によって得られた答が極端に狂っている場合には、巻線方法を変えるが、場合によっては、鉄心の大きさを考えねばならない。小さなものでは絶縁物などが問題になる。実測するものとしては最も簡単なのは漏えいインダクタンスである。分布容量は電圧分布によって変るので適当ではない。もう一つの方法は周波数特性であって、パルス波形と周波数特性の関係を調べると、次のようになる。

(1) 低周波特性

低周波特性はパルストップに関係し第 10 図の曲線から、 $R_2 = R_1$, $X_N/R_1 = 1$ では 1 dB down の周波数特性を有する。

$$\frac{X_N}{R_1} = \frac{2\pi fL}{R_1} = 1, \quad f = \frac{R_1}{2\pi L}$$

一方下降量 10% の条件は

$$\frac{\tau R_1}{L} = 0.2 \quad (\text{第 8 図})$$

ゆえに

$$f = \frac{0.2}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau} \right) = 0.0318 \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

周波数特性と下降量が対応する。

(2) 高周波特性

$$k = \frac{R_1 \sqrt{L_L C_D}}{2L_L} + \frac{\sqrt{L_L C_D}}{2R_1 C_D} \quad (R_1 = R_2)$$

$$B = \frac{\omega L_L}{R_1} = \frac{1}{\omega C R_1} = \frac{2\pi f_r L_L}{R_1} = \frac{L_L}{R_1 \sqrt{L_L C_D}}$$

ゆえに

$$k = \frac{1}{2B} + \frac{B}{2}$$

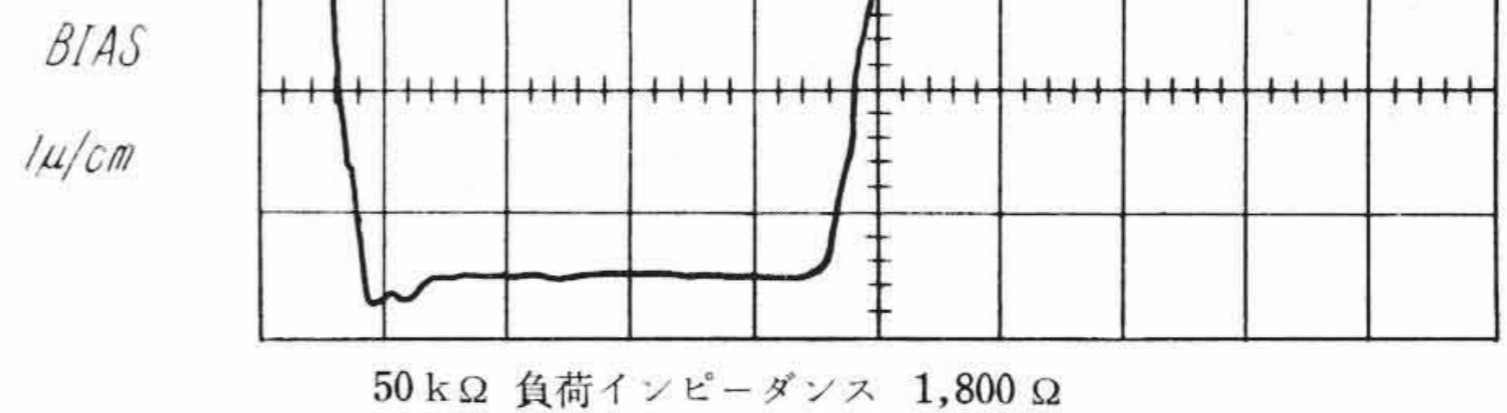
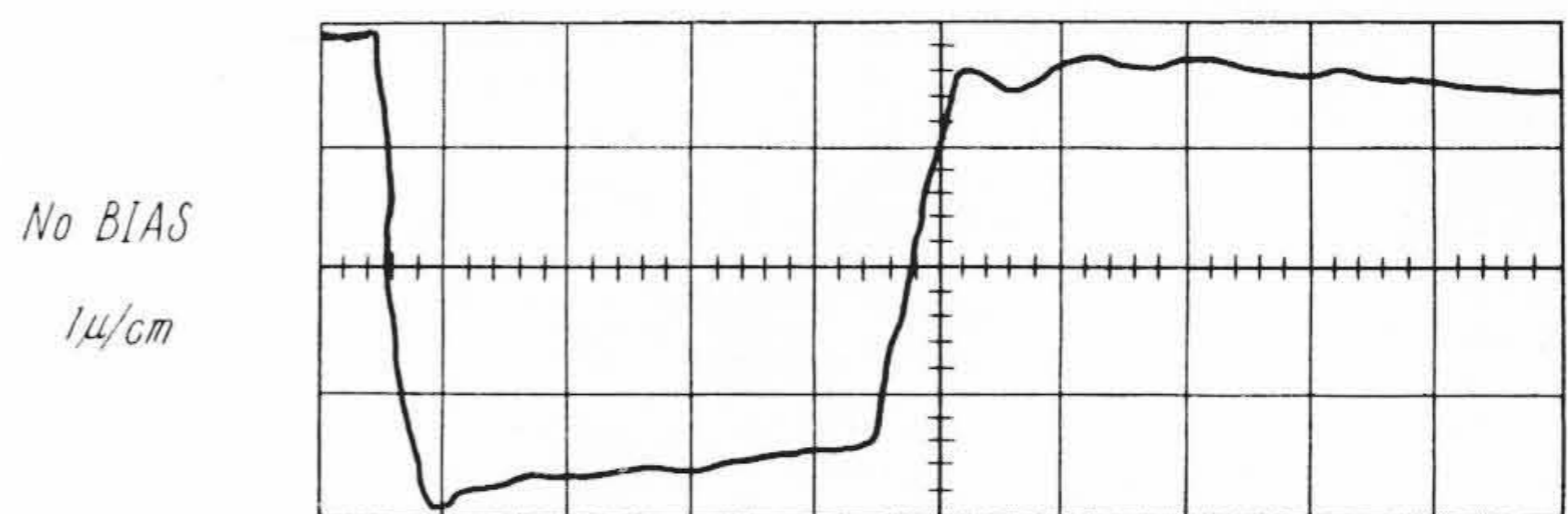
B と k とは上記の関係になり、第 7 図と第 11 図から、高周波特性と過渡特性の対応が得られる。B と k の表を第 2 表に示す。設計のチェックの意味での試験は上述のとおりであるが、最終的な試験は実負荷もしくはそれに近い状態で行わなければならない。鉄心の試験に関してもまったく同様なことがいえる。以上は大電力パルス

第 2 表 B と k の関係表

B	k
1.0	1.0
0.8, 1.25	1.025
0.67, 1.5	1.08
0.5, 2	1.25
0.25, 4	2.125

第 3 表 各種パルス変圧器仕様

種類および納入先 性能	クライストロン電 (原子核研究所)	電子銃 パルス源 (東北大学)	電子銃パルス源 (日立中研)	マグネトロン電 源 (近畿大学)
最大尖頭出力電圧 (kV)	150	50	8	13
最大出力電流 (A)	60	34	20	20
負荷抵抗 (Ω)	2,500	1,500	365	650
一次インピーダンス (Ω)	13	50	50	50
パルス幅 (μs)	4	5	2	0.25
立上り時間 (μs)	0.3	0.3	0.2~0.3	0.03
立下り時間 (μs)	0.5	0.5	0.4	0.1
平坦度 (%)	3.0	2.5	5.0	3.0
繰返し周波数 (c/s)	25~250	50	50~360	1,000



第 13 図 大電力パルス変圧器出力波形

変圧器に限らず、一般のパルス変圧器に関しても通用することがらであるが、大電力パルス変圧器の場合次の諸点に特別な注意を払わなければならない。すなわち

- (1) 誘起電圧が高く、かつ性能向上のために巻線数を極力減らす必要があるため鉄心の選択を適確にし、多少のマーヅを見込まなければならない。
- (2) 線形加速器のクライストロン用のように二次出力電圧が 150~200 kV の場合、一次電圧はサイラトロンに制限せられて、あまり高い電圧はとれなくて、せいぜい 10~15 kV である。したがって巻線比は大となるので、非常に一次巻線数が少なくなり、一回巻線あたりの電圧は 2 kV くらいになる。この電圧が鉄心の薄板を積み重ねた方向に加わり、薄板間の絶縁被膜にかかる。この値は非常に大きな値となり、このために被膜の絶縁破壊が生ずるので、この防止方法が考えられねばならない。このことがらに関して筆者らは特に鉄心の絶縁処理に注意を払うとともに、鉄心の薄板間に加わる電圧を下げる方法を採用している。
- (3) 一次、二次巻線および鉄心間相互の耐圧は特に重要な問題で、巻線方法とも関連して性能の決定に大きな役割を果たす。鉄心および巻線の相互位置、寸法が決定されれば、計算によって、大略の値は推定可能である。大電力パルス、変圧器では一次、二次巻線間の耐圧が非常に大きいので、一次、二次間の間隔が大と

なり、漏えいインダクタンスの増加を招来して立上りを悪くするので、われわれは特別な巻線方法を考案し、低圧側から高圧側に行くに従い次第に間隔を広くするような方法を採用している。そのようにして巻いた変圧器の例を第12図に示す。

(4) 高圧部のコロナリング、巻線の支持方法、鉄心の支持方法などに関しても、高電圧のために特別な注意を払わねばならない。

4. 製品とその結果

筆者らは上述の設計方針に従い、各種の大電力パルス変圧器を製作した。使用した材料も多種多様にわたるが、これらは変圧器の仕様に従って選定さるべきであるが、直流バイアス法を用いることによってほとんど決定的になった。

第3表に現在までに製作した大電力パルス変圧器の例を示す。

第13図は抵抗負荷の場合の出力波形の一例を示す。バイアスを加えた場合に立上りおよびサグが改善されている様子が明確である。出力波形に負荷抵抗の特性が良好でないと、立上りのところに高周波振動が重畳して現われる。大電力用負荷抵抗は現在完全といえるものがなく、今後の研究にまたねばらぬ状況である。

5. 結 言

以上大電力パルス変圧器の問題点と設計の概略について述べたが、現在までの結果が必ずしも線形加速器その他に用いられてまだ完全に満足なものとはいえない。しかしながら一応現在文献に散見するものより一步前進したものといえよう。線形加速器はもちろんのこと核融合反応装置としても将来さらに大電力、高性能のもの要求は深まるので、さらに研究を進める必要がある。特に層間絶縁の問題、パルス放電現象、鉄心内磁波侵入の問題など未解決の問題が多い。

擧筆に際し、この仕事を推進していただいた東京大学原子核研究所西川助教授、宮原氏、昭和電子株式会社藪田工場長、西、荷口部長ならびに土屋氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) MIT: Radiation Laboratory Series Office of Scientific Research and Development National Defense Research Committee, 1948.
- (2) Lee: Electronic Transformer and Circuit
 • New York, John Wiley and Sons; 1955
 • Reuben hee (Advisory Engineer, Westinghouse Electric)



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その2)

(第33頁より続く)

種 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
"	254711	磁気レンズ焦点距離調節装置	多賀工場	菊地嘉夫	"
"	254712	換気扇ファンの推力を利用した自動シャッタ開閉装置	多賀工場	石沢進午	"
"	254713	磁気レンズ焦点距離調節装置	多賀工場	海野義昌	"
"	254717	放射性同位元素容器	多賀工場	鷺見哲雄	"
"	254722	誘導形继电器限时特性調整装置	多賀工場	猿渡房吉	"
"	254725	気化器	多賀工場	石川重夫	"
"	254729	ガンマ線照射装置	亀戸工場	和小田正脩	"
"	254703	クロスバ式自動交換機における割込通話方式	戸塚工場	江中森五郎	"
"	254704	クロスバ式自動交換機	戸塚工場	吉江田足五郎	"
"	254705	クロスバ式自動電話交換方式	戸塚工場	江中森五郎	"
"	254706	クロスバ式自動交換方式	戸塚工場	江中森五昭	"
"	254707	通信機の常用機を予備機に切替える方式	戸塚工場	中谷信夫	"
"	254716	真空管劣化表示装置	戸塚工場	朝比奈隆夫	"
"	254721	温度继电器	中央研究所	二木久夫	"
"	254724	熱的負性抵抗体	中央研究所	二木久夫	"
特 許	254731	熱的負性抵抗体	中央研究所	二木久夫	34. 9. 16