



KEK Report 94-7
December 1994
A

The Kicker Magnet System for TRISTAN Accumulation Ring Injection

Y. SAKAMOTO, K. SATOH and H. NAKAYAMA

VOL 26 No 23

**NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS**

© National Laboratory for High Energy Physics, 1994

KEK Reports are available from:

Technical Information & Library
National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305
JAPAN

Phone: 0298-64-1171
Telex: 3652-534 (Domestic)
(0)3652-534 (International)
Fax: 0298-64-4604
Cable: KEK OHO
E-mail: LIBRARY@JPNKEKVX (Bitnet Address)
library@kekvax.kek.jp (Internet Address)

The Kicker Magnet System for TRISTAN Accumulation Ring Injection
(in Japanese)

Y.Sakamoto, K.Satoh and H.Nakayama

KEK,National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1,Tsukuba-shi,Ibaraki-ken,305,Japan

Abstract

The injection of electron beams to TRISTAN Accumulation Ring (AR) was started in November 1983 and the positron injection started in November 1985.

For the injection of electron and positron beams to AR,the unique kicker system was developed. In the kicker power supply the charging to the main capacitor was done with the resonant charge system together with the auxiliary charging unit. The impedance matching circuit was added to the kicker magnet for getting the required current form with least reflecting oscillation.

In this paper we report the performance of this kicker system.

1 はじめに

トリスタン蓄積リング（以降 AR と記する。）への電子入射は1983年11月に、陽電子入射は1985年11月に行われ、以後現在まで、順調に電子、陽電子のAR入射が行われている。我々はこの電子、陽電子のAR入射に使われるキッカー電磁石と電源（電子用4組、陽電子用4組。）を開発、製作したのでその結果を報告する。

AR入射用キッカー電磁石の磁場は、周回ビームが入射点を通りすぎた直後に立ち上がり始め、同ビームが一周してきた時（約 $1.26\mu\text{sec}$ 後）にはピーク値（750Gauss。3Gevのビームを約1.85mrad蹴れるだけの値。）に達しており、さらに一周してきた時には立ち下がっていなければならない。又キッカー電源は、放射線対策及び保守の点から、キッカー電磁石からかなり離れた場所（ケーブルの長さにして約20メートル。）に設置される。こういう場合のキッカー電磁石としてはトランスミッション型が適している。しかし、ARではビームによってフェライト等に誘起される高周波損失が大きい為キッカー電磁石を真空中に入れる事が出来ない。そこでトランスミッション型キッカー電磁石を空气中に設置する事になるが、その場合、要求される磁場ピーク値を達成する為のキッカー電源電圧が製作上非常に困難な値となる⁽²⁾。（たとえば、特性インピーダンスを 12.5Ω とした場合、キッカー電源の電圧は約100kVなる。）そこで、AR入射は長さが数nsecのビームのシングルバンチ入射である事も考慮に入れて、キッカー電磁石としてウインドフレーム型（インダクタンス型）を採用した。

又キッカー電磁石とキッカー電源は、ARへの入射効率を上げる為に、50Hz運転が可能でなければならない。

2 電磁石

上記理由により、キッカー電磁石は図1に示す様なウインドフレーム型とした。又、コアは磁場の立ち上がりが速いのでフェライト（PE12C、TDK製）を使用し、コイルは無酸素銅をエポキシ樹脂で固めて作った。

キッカー電磁石の各パラメータを表1に示す。

3 電源⁽¹⁾

3.1 基本回路

基本回路を図2に示す。

（以下の議論において、添え字の大きい記号は物そのものを、添え字の小さい記号はその物の値を表す事とする。例えば、C1は共振充電用コンデンサーその物を、 C_1 は共振充電用コンデンサーの容量を表している。）

まず充電系であるが、「50Hz運転で且つ、最初から定格出力を出す。」と言う要求を満足する為に、低電圧大容量の主充電用電源E0mの他に高電圧小容量の補助充電用電源E0aを合わせ持つ共振充電方式を採用する。又、放電用スイッチS2としては「スイッチ部にかかる電圧が高い。（キッカー電源とキッカー電磁石を繋ぐケーブルが4本並列の場合で約21kV。）」、「スイッチ部での電流増加率が大きい。（約 $2700\text{A}/\mu\text{sec}$ ）」等の理由でサイラトロン（E.E.V.製CX1174）を使用する。次にキッカー電磁

石での電流波形であるが、「キッカー電磁石はウインドフレーム型であり、かつキッカー電源との間のケーブルが約20メートルと長い。」為に、キッカー電磁石での反射が有り、前に述べた様な電流波形を実現する事は不可能である。そこでキッカー電磁石 (Lk, Rk) と並列に整合用インピーダンス (Cm, Rm) を入れて、図3の様なキッカー電磁石での電流波形を作り出し、AR入射を行う事とした。すなわち、周回ビームが入射点を通りすぎた直後に電流は立ち上がり始め、同ビームがARを一周してきた時には電流はピーク値に達しており、この時AR入射を行う。そして入射されたビームと周回ビームが、ARを1周をして来た時には電流はゼロクロスしており、さらに次の1周をして来た時には電流は減衰しているのである。

以下に本回路の主要部分について述べる。

3.1.1 共振充電

基本回路における共振充電部と放電部を書き直すと図4の様になる。以下で、この回路での共振充電の過程について考える。

今

$$T_0 \gg R_0 C_1$$

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (\text{共振充電回路の周期})$$

$$\text{ここで } \omega_{1(0)} = \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}, \alpha_1 = \frac{R_1}{2L_1}, \omega_1 = \sqrt{\omega_{1(0)}^2 - \alpha_1^2}$$

$$T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \quad (\text{放電回路の周期})$$

$$\text{ここで } \omega_{2(0)} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}, \alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2}, \omega_2 = \sqrt{\omega_{2(0)}^2 - \alpha_2^2}$$

$$T_{\text{cycle}} = T_0 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2}$$

とした時の各時間の記号を以下の様に定義し、その時間において各スイッチの開閉状態が「状態1」から「状態2」に移るものとする。

時間	記号	状態1	→	状態2
$t = 0$		S0=S1=S2=off	→	S0=on, S1=S2=off
n=1 (m=1~3)				
$t = T_0$	$t_{n=1, m=1}$	S0=on, S1=S2=off	→	S1=on, S0=S2=off

$$\begin{array}{lll}
t = T_0 + \frac{T_1}{2} & t_{n=1,m=2} & S1=on, S0=S2=off \rightarrow S2=on, S0=S1=off \\
t = T_0 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} & t_{n=1,m=3} & S2=on, S0=S1=off \rightarrow S0=on, S1=S2=off
\end{array}$$

n=N

(m=1~3)

$$\begin{array}{lll}
t = (N-1)T_{cycle} + T_0 & t_{n=N,m=1} & S0=on, S1=S2=off \rightarrow S1=on, S0=S2=off \\
t = (N-1)T_{cycle} + T_0 + \frac{T_1}{2} & t_{n=N,m=2} & S1=on, S0=S2=off \rightarrow S2=on, S0=S1=off \\
t = (N-1)T_{cycle} + T_0 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} & t_{n=N,m=3} & S2=on, S0=S1=off \rightarrow S0=on, S1=S2=off
\end{array}$$

即ち、まず「t=0」から「t=t_{n=1,m=1}」までスイッチ状態を「充電用スイッチS0=on、共振充電用スイッチS1=放電用スイッチS2=off」にする事により、共振充電用コンデンサーC1を充電用電源電圧E₀まで充電する。次に「t=t_{n=1,m=1}」で、スイッチ状態を「S1=on、S0=S2=off」にすると、C1と主コンデンサーC2間に共振が起きるが、共振充電用ダイオードD1がある為にこの振動は続かず、「t=t_{n=1,m=2}」でC1の電圧V₁が最小、C2の電圧V₂が最大になった時点で止まる。そして「t=t_{n=1,m=2}」で、今度はスイッチ状態を「S2=on、S0=S1=off」にすると、負荷(Lz、Rz)に放電を開始するが、この振動も放電用ダイオードD2がある為にやはり続かず、「t=t_{n=1,m=3}」でV₂が最小になった時点で止まる。そして「t=t_{n=1,m=3}」で、再びスイッチ状態を「S0=on、S1=S2=off」にして、C1を再度E₀まで充電し、以降同じ過程を繰り返していく事になる。そうすると共振充電後のV₁及びV₂はある値に収束していくので、その最終的なV₂の値が必要電圧になる様に各パラメーターを選べばよい。

以上の事を時間を追って式で表すと、以下の様になる。

今

$$\eta_1 = e^{-\frac{\alpha_1}{\omega_1} \pi}, \theta_1 = \arctan \frac{\alpha_1}{\omega_1}$$

$$\eta_2 = e^{-\frac{\alpha_2}{\omega_2} \pi}$$

とすると

$$V_1[t=0]=0$$

$$V_2[t=0]=0$$

n=1

(m=1~3)

$$V_1[t=t_{n=1,m=1}] = E_0$$

$$V_2[t=t_{n=1,m=1}] = 0$$

$$V_1[t=t_{n=1,m=2}] = \frac{C_1 E_0}{C_1 + C_2} \left(1 - \frac{C_2}{C_1} \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right)$$

$$V_2[t=t_{n=1,m=2}] = \frac{C_1 E_0}{C_1 + C_2} \left(1 + \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right)$$

$$V_1[t=t_{n=1,m=3}] = V_1[t=t_{n=1,m=2}]$$

$$V_2[t=t_{n=1,m=3}] = -\eta_2 V_2[t=t_{n=1,m=2}]$$

n=N

(m=1~3)

$$V_1[t=t_{n=N,m=1}] = E_0$$

$$V_2[t=t_{n=N,m=1}] = V_2[t=t_{n=N-1,m=3}]$$

$$V_1[t=t_{n=N,m=2}] = \frac{C_1 E_0}{C_1 + C_2} \left(\left(1 - \frac{C_2}{C_1} \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right) + \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right) \frac{V_2[t=t_{n=N-1,m=3}]}{E_0} \right)$$

----- (1)

$$V_2[t=t_{n=N,m=2}] = \frac{C_1 E_0}{C_1 + C_2} \left(\left(1 + \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right) + \frac{C_2}{C_1} \left(1 - \frac{C_1}{C_2} \eta_1 \frac{\omega_{1(0)}}{\omega_1} \cos \theta_1 \right) \frac{V_2[t=t_{n=N-1,m=3}]}{E_0} \right)$$

----- (2)

$$V_1[t=t_{n=N,m=3}] = V_1[t=t_{n=N,m=2}]$$

$$V_2[t=t_{n=N,m=3}] = -\eta_2 V_2[t=t_{n=N,m=2}]$$

となる。

そして、 V_1 と V_2 が平衡状態になったとすると

$$V_1[t = t_{n=N-1, m=2}]_{N=eq.} = V_1[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.}$$

$$V_2[t = t_{n=N-1, m=2}]_{N=eq.} = V_2[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.}$$

とおけるから、平衡状態での各段階の V_1 及び V_2 は次の様になる。

$$V_1[t = t_{n=N, m=1}]_{N=eq.} = E_0$$

$$V_2[t = t_{n=N, m=1}]_{N=eq.} = V_2[t = t_{n=N-1, m=3}]_{N=eq.}$$

$$V_1[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.} = E_0 \frac{1 - \eta_1 \eta_2 - \eta_1(1 + \eta_2) \frac{C_2}{C_1}}{1 - \eta_1 \eta_2 + (1 + \eta_2) \frac{C_2}{C_1}} \quad \text{----- (3)}$$

$$V_2[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.} = E_0 \frac{1 + \eta_1}{1 - \eta_1 \eta_2 + (1 + \eta_2) \frac{C_2}{C_1}} \quad \text{----- (4)}$$

$$V_1[t = t_{n=N, m=3}]_{N=eq.} = V_1[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.}$$

$$V_2[t = t_{n=N, m=3}]_{N=eq.} = -\eta_2 V_2[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq.}$$

又、 $R_1 = R_2 = 0$ ($\eta_1 = \eta_2 = 0$) の特別の場合は

$$V_1[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq., R_1=R_2=0} = -E_0$$

$$V_2[t = t_{n=N, m=2}]_{N=eq., R_1=R_2=0} = E_0 \frac{C_1}{C_2}$$

$$V_1[t = t_{n=N, m=3}]_{N=eq., R_1=R_2=0} = -E_0$$

$$V_2[t = t_{n=N, m=3}]_{N=eq., R_1=R_2=0} = -E_0 \frac{C_1}{C_2}$$

となる。即ち、抵抗が無い場合の V_2 の平衡値として、 E_0 の C_1/C_2 倍の電圧が得られる事が分かる。

以上の結果より、共振充電系の各パラメーターは

$$T_{cycle} = T_0 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} \leq 20msec$$

$$V_2 \left[t = t_{n=N, m=2} \right]_{N=eq.} = E_0 \frac{1 + \eta_1}{1 - \eta_1 \eta_2 + (1 + \eta_2) \frac{C_2}{C_1}} = 21kV$$

を満たす様に決めれば良い。(具体的な各パラメーターの値は後述する。)

しかし、この方式では今までの議論より明らかな様に、所定の電圧を得る為に何回か共振充電を繰り返さなければならない。そこで最初から所定の電圧を得る為に、図2に示す様な主充電用電源E0mと補助充電用電源E0aを合わせ持つ充電電源方式を採用し、最初は補助充電用電源E0aで主コンデンサーC2を所定の電圧まで充電しておき、2回目からは主充電用電源E0mを使った共振充電によってC2を所定の電圧まで充電する事とした。

3.1.2 サイラトロン⁽⁴⁾

我々は放電用スイッチとしてのサイラトロンに、重水素をセラミックケースに封入したタイプのE.E.V.製「CX1174」を使用した。「CX1174」の外観を図5に、主な仕様を表2に示す。

3.1.3 ケーブルの本数

キッカー電源は、キッカー電磁石からケーブルの長さにして約20メートル離れた所に設置される。故に、キッカー電源とキッカー電磁石を繋ぐケーブル(20D2V)の本数を1本とした場合、その持つインダクタンスは約5μHとなる。この値はキッカー電磁石本体の持つインダクタンス(約5μH)に比べて無視出来ない値であり、その分キッカー電磁石への放電に必要な電圧が上がる事になる。そこで、ケーブルの本数を増してケーブルの持つインダクタンスを減らしていく事になるが、あまり減らし過ぎると(本数を多くし過ぎると)今度はケーブルの持つキャパシタンスの影響が出て来て逆にこの必要電圧を上げる事になる。即ち、必要電圧を協力低く抑さえる為の、最適なケーブルの本数を決める必要がある。そこで図6の様なケーブルの等価回路を考え、ケーブルの本数が必要電圧にどの様な影響を与えるかを検討した。

図6の回路で、「時間t=0」の時に主コンデンサーC2が電圧E₂まで充電されていて、その直後に放電用スイッチS2をオンにして負荷L₂に放電するものとする。その時、負荷L₂に流れる電流iは以下の様になる。

$$i = i_f + i_h = I_f \sin \gamma t + I_h \sin \delta t \quad \text{----- (5)}$$

ここで

$$I_f = -\frac{4E_2}{L_c^2 C_c} \frac{\left(-\frac{L_c C_c}{2} \delta^2 + \frac{C_c}{C_2} + 1\right) \left(-\frac{L_c C_c}{2} \gamma^2 + \frac{C_c}{C_2} + 1\right)}{\gamma(\delta^2 - \gamma^2)}$$

$$I_h = -\frac{\gamma}{\delta} I_f$$

$$\gamma = \sqrt{\varepsilon - \zeta}$$

$$\delta = \sqrt{\varepsilon + \zeta}$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{L_c}{2} + \left(\frac{L_c}{2} + L_z\right) \left(\frac{C_c}{C_2} + 1\right)}{L_c C_c \left(\frac{L_c}{2} + L_z\right)}$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\frac{L_c}{2} + \left(\frac{L_c}{2} + L_z\right) \left(\frac{C_c}{C_2} + 1\right)\right)^2 - \frac{2L_c C_c}{C_2} \left(\frac{L_c}{2} + L_z\right)}}{L_c C_c \left(\frac{L_c}{2} + L_z\right)}$$

C_2 = 主コンデンサーのキャパシタンス

E_2 = 主コンデンサーの充電電圧

L_c = 長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)の全インダクタンス

C_c = 長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)の全キャパシタンス

L_z = 負荷インダクタンス

である。

式(5)での「 i_f 」は負荷 L_z に流れる電流の基本波を、「 i_h 」は高調波を表している。

式(5)において「最大電流値」、「放電周期」、「負荷インダクタンス」を既知とすると、必要電圧が求まる。最適なケーブルの本数は、この必要電圧が最低になる様に決めれば良い。計算の煩雑さを避ける為、以降は式(5)における第一項の基本波「 i_f 」のみで考える。(図8に示す様に「 $I_f \gg I_h$ 」であるからこの方法で問題は無いであろう。)

今

L_{c1} = 長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)1本当りのインダクタンス

C_{c1} = 長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)1本当りのキャパシタンス

n = 同軸ケーブル(20D2V)の本数

$$T = \frac{2\pi}{\gamma} \text{ (電流基本波の周期)}$$

$(i_f)_{\max}$ = 負荷Lzに流れる電流基本波の最大値

とすると、式(5)より

$$E_2 = \frac{2\pi}{T} (i_f)_{\max} \sqrt{\left(\frac{L_{c1}}{2n} + \left(\frac{L_{c1}}{2n} + L_z \right) \left(\frac{nC_{c1}}{C_2} + 1 \right) \right)^2 - \frac{2L_{c1}C_{c1}}{C_2} \left(\frac{L_{c1}}{2n} + L_z \right)}$$

----- (6)

ここで

$$C_2 = \frac{2 \left(nC_{c1} \left(\frac{L_{c1}}{2n} + L_z \right) - \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \right)}{L_{c1}C_{c1} \left(\frac{L_{c1}}{2n} + L_z \right) \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 - 2 \left(\frac{L_{c1}}{n} + L_z \right)}$$

となる。

つまり、「 $(i_f)_{\max} = 2000A$ 」、「 $T = 4.96 \mu sec$ 」、「 $L_z = 5 \mu H$ 」、「 $L_{c1} = 5 \mu H$ 」、「 $C_{c1} = 2nF$ 」とした場合 E_2 は n をパラメータとして一意的に決まり図7の様になる。図7より明かな様に、必要電圧を最低にするケーブルの本数は7~8本であるが、これより本数を少なくしてもあまり必要電圧には影響しない。そこで、作業性等を考慮してケーブルの本数は4本とした。

3.1.4 整合インピーダンス

我々が採用したキッカー電磁石の構造では、キッカー電磁石とケーブルとの整合が取れていない為にキッカー電磁石の所で反射が起こり、このままではAR入射用キッカー電磁石としての用をなさない。そこで前にも述べたが、キッカー電磁石と並列に整合用インピーダンスを入れて、反射をできるだけ抑えると共に、サイラトロンが切れた後のケーブルの持っているエネルギーを出来るだけ早く減衰させて、図3の様なキッカー電磁石での電流波形を作りだす事とした。

検討には回路解析プログラム [ECAP] を用いた。(設定した回路図は図9の通り。) [ECAP] での計算によって求めた最適なキッカー電磁石での電流波形を図10に示す。この波形は要求されている条件をほぼ満足しているが、「入射されたビームがリングを2周してきた時には電流は減衰している。」という点では必ずしも完全ではない。しかし、この程度の電流ならばAR入射にほとんど影響を与えないと思われる。

3.2 実際の回路

実際の電源回路を図11に示す。

この回路と図2に示した基本回路では次の点で異なっている。

- (1) 実際の電源回路には「補助充電用スイッチS0a」、「主充電用スイッチS0m」、「共振充電用スイッチS1」が無い。
- (2) 実際の電源回路では、サイラトロンを浮かして使用するとトリガー系が複雑になるので、サイラトロンの片側を接地する方法を取った為、共振充電時の電流がキッカー電磁石にも流れる事になる。

しかし、

◎各時定数や各周期が時間的に大きく違っている。

(補助充電時定数 τ_a =約1.1sec、主充電時定数 τ_m =約2.8msec、
共振充電周期 T_1 =約30msec、放電周期 T_2 =約4.8 μ sec)

◎共振充電時の V_1 の変化は殆ど無い。(図16参照。)

◎共振充電時に流れる電流は最大値でも1A以下である。

と言う理由で、図2の回路と図11の回路は本質的には同じ物であると言える。

20Hz運転時(キッカー電磁石及び電源は50Hz運転に耐えられる様に設計されているが、実際のAR入射は入射器側の制約から、25Hz運転で行われている。)での、主充電電源E0mのみを使用した場合の主コンデンサーC2への充電波形を図12に、補助充電電源E0aをも合わせて使用した場合の主コンデンサーC2への充電波形を図13に示す。又、キッカー電磁石での電流波形(ロゴスキーコイル出力)を図14に示す。図13と図14より、「最初から定格出力を出す。」、「所定の電流波形を得る。」という目的が達成されている事が分かる。

次に、図12に示される充電波形と、式(2)から求まる主コンデンサーへの充電電圧値(計算値)との比較を行う。図12から、放電回路における主コンデンサー電圧 V_2 の反転率 η_2 は約0.52である事が分かる。これより、ケーブルや整合インピーダンス等を全て含めた等価的な抵抗(図4における R_z に当たる。)は約2.7 Ω となる。この値を使って、式(2)の V_2 を計算してみた。結果を図15に示すが、当然ながら図12と非常に良く合っている事が分かる。なお、この時の共振充電用コンデンサー電圧 V_1 (式(1)で計算する。)の値を図16に示しておく。

4. 磁場測定

キッカー電磁石の磁場測定は図17に示す様に、キッカー電磁石のギャップ内にサーチコイル(5 $^\circ$ 、10ターン)を挿入して、その出力を積分器(時定数は約0.3msec)、アンプ(SONY/TEKTRONIX,AM502)、絶縁トランスを通してパルスハイトアナライザ(CANBERRA,SERIES30)に入れて、そのチャンネル数を読む方法で行った。

磁場測定での座標系を図18に、結果を図19~図21に示す。図20からキッカー電磁石の有効長は約290mm、図21から充電電圧が最大(約21kV)の時でもフェライトは飽和していない事が分かる。

5. おわりに

本キッカー電磁石及び電源は現在まで、約11年間の長きにわたって大過なく運転が続けられており、満足のいく結果が得られている。

なお本キッカー電源の製作に当り、日本コンデンサー工業K.K.の遠山氏から適切な助言をいただいた。ここに感謝致します。

References

- (1) 坂本裕 他 : "AR入射用キッカー電源", TN-86-0008
- (2) K.Takata et al.: "FULL APERTURE KICKER MAGNETS FOR KEK PROTON SYNCHROTRON (in Japanese)", KEK-76-21
- (3) 中山久義 : "セプトム電磁石のコンダクターの渦電流損失", TN-84-018
- (4) "THYRATRON DATABOOK", English Electric Valve Company Limited

ターン数	2
必要電流 (A)	2000
必要磁場 (G)	740
曲げ角(mrad, 3Gev)	1.85
インダクタンス(μ H)	5.0
抵抗 (m Ω)	3.3
電磁力 (N)	37
発熱量 (W) ^a	12

表1 キッカー電磁石のパラメーター

最大瞬間順方向アノード電圧	40kV	リザーバヒータ電圧	5.0V
最大瞬間アノード電流	6kA	リザーバヒータ電流	10A
最大平均アノード電流	6.0A	最大第一グリッドプライミング電圧	150V
最大アノード電流増加率	10kA/ μ s	最大第一グリッドプライミング電流	150mA
最大アノード遅延時間	0.25 μ s	最大第二グリッドパルス電圧	2kV
最大瞬間出力	120MW	最小第二グリッドパルス時間	1.0 μ s
カソードヒータ電圧	6.3V	最小第二グリッドパルス電圧増加率	1.0kV/ μ s
カソードヒータ電流	40A		

表2 サイクロロン(CX1174)の主な仕様

図一覧

- 図1 キッカー電磁石
- 図2 基本回路
- 図3 要求されるキッカー電磁石での電流波形
- 図4 共振充電回路
- 図5 サイラトロン(CX1174)の外観
- 図6 ケーブルの等価回路
- 図7 必要電圧へのケーブル本数の影響
- 図8 基本波と高調波の波高値の違い
- 図9 「ECAP」での回路図
- 図10 キッカー電磁石での電流波形（ECAP出力）
- 図11 実際の電源回路
- 図12 主コンデンサの充電波形（補助充電電源無し）
- 図13 主コンデンサの充電波形（補助充電電源有り）
- 図14 キッカー電磁石での電流波形（ロゴスキーコイル出力）
- 図15 主コンデンサでの共振充電電圧（計算値）
- 図16 共振充電用コンデンサでの共振充電電圧（計算値）
- 図17 磁場測定の方法
- 図18 磁場測定での座標系
- 図19 磁場のX方向分布
- 図20 磁場のZ方向分布
- 図21 磁場の励磁曲線

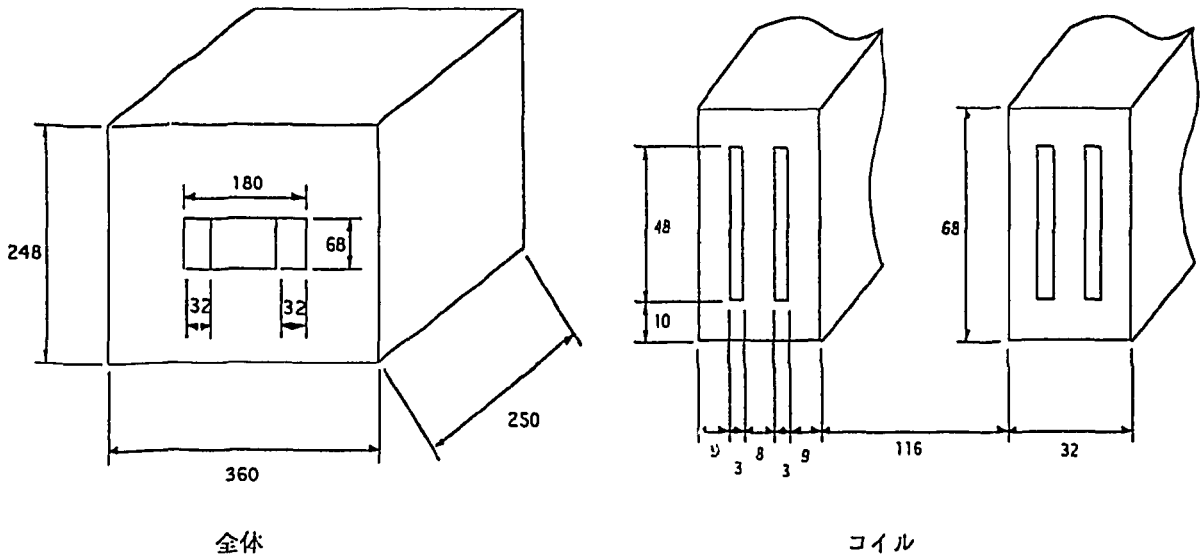
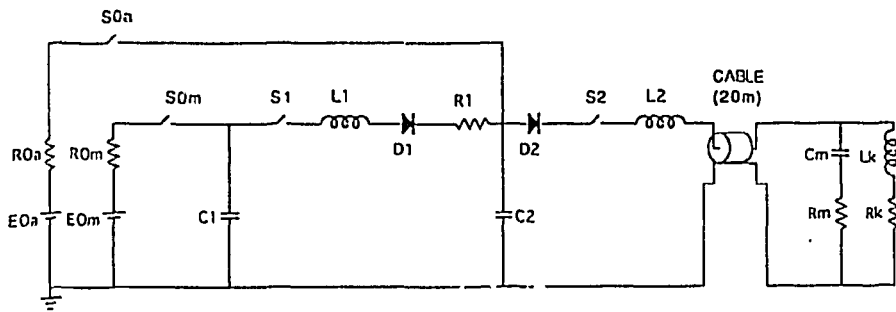


図1 キッカー電磁石



EOa=補助充電用電源、ROa=補助充電用抵抗、SOa=補助充電用スイッチ、E0m=主充電用電源、R0m=主充電用抵抗
 SOm=主充電用スイッチ、C1=共振充電用コンデンサー、S1=共振充電用スイッチ、L1=共振充電用インダクタンス
 D1=共振充電用ダイオード、R1=共振充電用抵抗、C2=主コンデンサー、D2=放電用ダイオード
 S2=放電用スイッチ、L2=放電用スイッチ部インダクタンス、Cm=整合用コンデンサー、Rm=整合用抵抗
 Lk=キッカー電磁石インダクタンス、Rk=キッカー電磁石抵抗

図2 基本回路

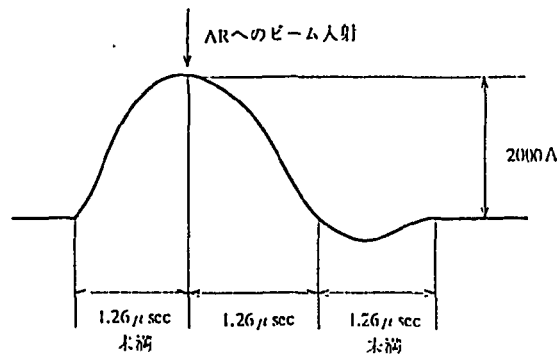
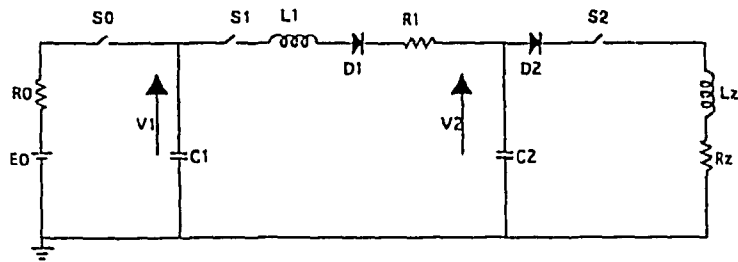


図3 要求されるキッカー電磁石での電流波形



E0=充電用電源, R0=充電用抵抗, S0=充電用スイッチ, C1=共振充電用コンデンサー, S1=共振充電用スイッチ
 L1=共振充電用インダクタンス, D1=共振充電用ダイオード, R1=共振充電用抵抗, C2=主コンデンサー
 D2=放電用ダイオード, S2=放電用スイッチ, Lz=負荷インダクタンス, Rz=負荷抵抗

図4 共振充電回路

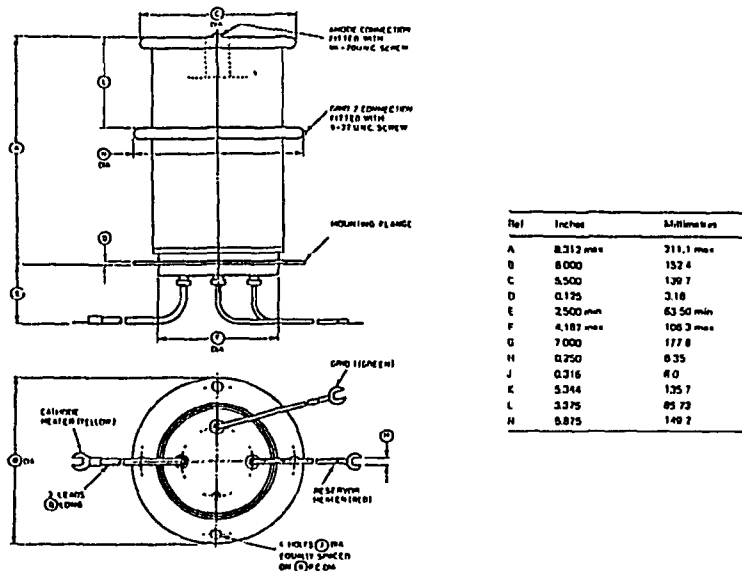
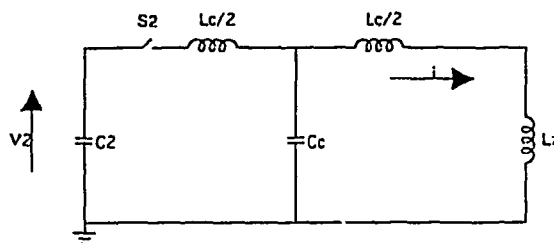


図5 サイクロトロン(CX1174)の外観



C2=主コンデンサー, S2=放電用スイッチ, Lc=長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)の全インダクタンス
 Cc=長さ20mの同軸ケーブル(20D2V)の全キャパシタンス, Lz=負荷インダクタンス

図6 ケーブルの等価回路

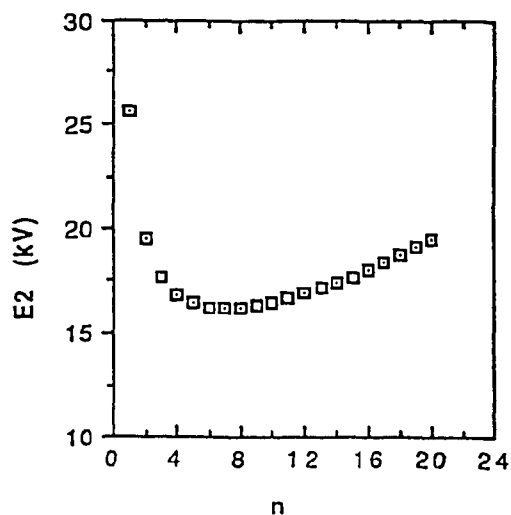


図7 必要電圧へのケーブル本数の影響

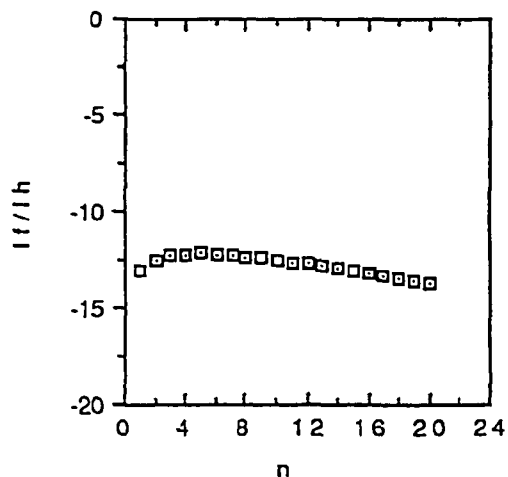
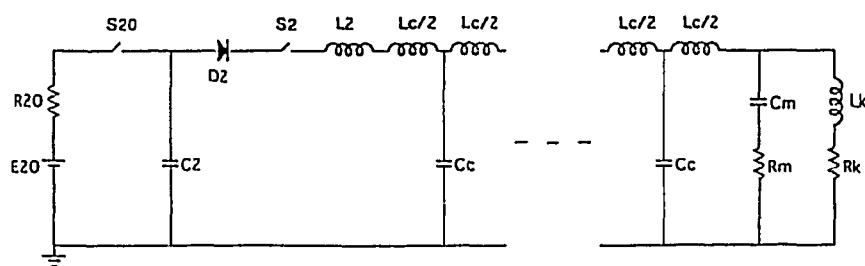
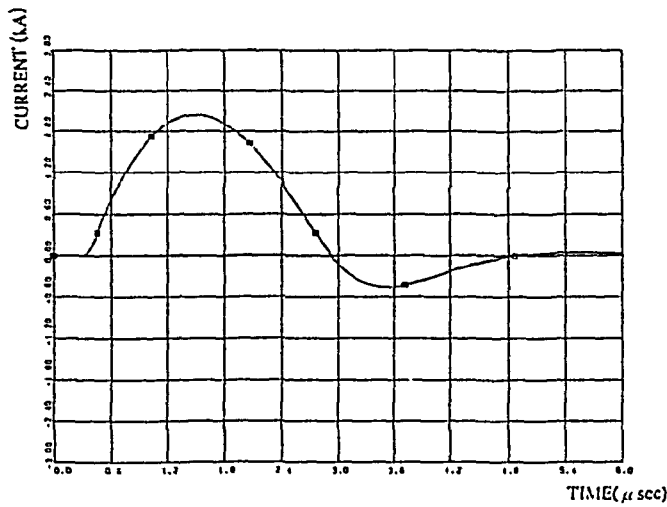


図8 基本波と高調波 成高値の違い



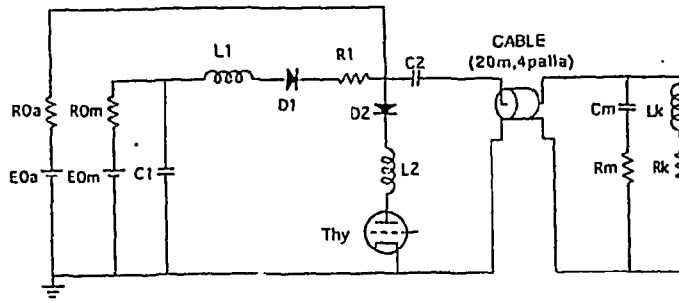
E_{20} =充電用電源、 R_{20} =充電用抵抗、 S_{20} =充電用スイッチ、 C_2 =主コンデンサー、 D_2 =放電用ダイオード
 S_2 =放電用スイッチ、 L_2 =放電用スイッチ部インダクタンス
 L_c =長さ1mの50Ω同軸ケーブルを4本並列にした時のインダクタンス
 C_c =長さ1mの50Ω同軸ケーブルを4本並列にした時のキャパシタンス
 C_m =整合用コンデンサー、 R_m =整合用抵抗、 L_k =キッカー電磁石インダクタンス、 R_k =キッカー電磁石抵抗

図9 「ECAP」での回路図



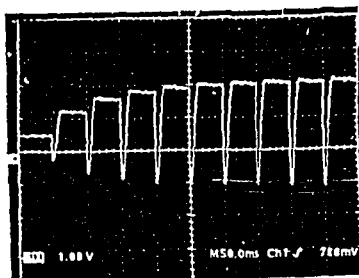
$E_{20}=21\text{kV}$, $R_{20}=0.1\ \Omega$, $C_1=84\text{nF}$, $L_1=1\ \mu\text{H}$, $L_c=62.5\text{nH}$
 $C_c=0.4\text{nF}$, $C_m=56\text{nF}$, $R_m=12.5\ \Omega$, $L_k=5\ \mu\text{H}$, $R_k=3.3\text{m}\Omega$

図10 キッカー電磁石での電流波形 (ECAP出力)



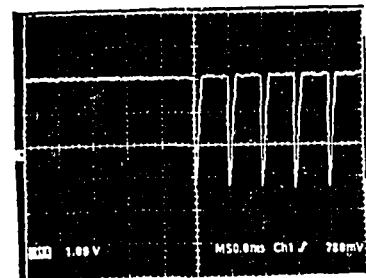
$E0a$ =補助充電用電源(30kV,3mA), $R0a$ =補助充電用抵抗(10M Ω), $E0m$ =主充電用電源(5kV,300mA)
 $R0m$ =主充電用抵抗(100 Ω), $C1$ =共振充電用コンデンサー(28 μ F), $L1$ =共振充電用インダクタンス(210H)
 $D1$ =共振充電用ダイオード, $R1$ =共振充電用抵抗(2.25 Ω), $C2$ =主コンデンサー(0.112 μ F), $D2$ =放電用ダイオード
 $L2$ =サイラトロン部インダクタンス, Thy =サイラトロン(CX1174), Cm =整合用コンデンサー(56nF)
 Rm =整合用抵抗(12.5 Ω), Lk =キッカー電磁石インダクタンス(5 μ H), Rk =キッカー電磁石抵抗(3.3m Ω)

図11 実際の電源回路



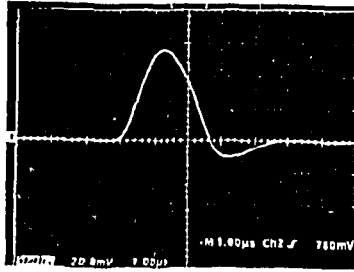
電圧モニター→10kV/V, オシロ縦軸→1V/Div
 オシロ横軸→50ms/Div, 主充電電源電圧→5.1kV

図12 主コンデンサーの充電波形(補助充電電源無し)



電圧モニター→10kV/V, オシロ縦軸→1V/Div
 オシロ横軸→50ms/Div
 主充電電源電圧→5.1kV, 補助充電電源電圧→25.2kV

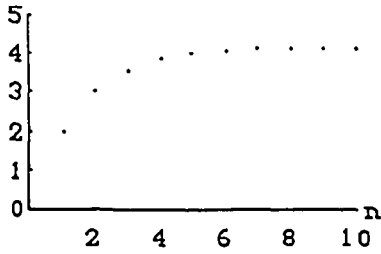
図13 主コンデンサーの充電波形(補助充電電源有り)



電流モニター→36A/mV, オシロ縦軸→20mV/Div
 オシロ横軸→1µs/Div, 主コンデンサー電圧→21kV

図14 キッカー電磁石での電流波形(ログスキーコイル出力)

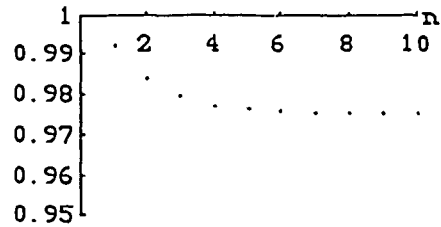
V2/E0



$C_1=28\mu\text{F}, L_1=210\text{H}, R_1=2.25\Omega$
 $C_2=0.112\mu\text{F}, L_2=5\mu\text{H}, R_2=2.7\Omega$
 n =共振充電の回数

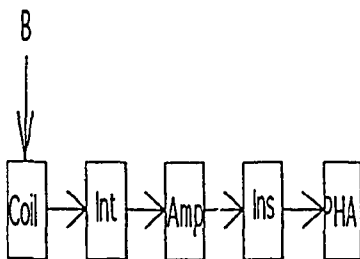
図15 主コンデンサーでの共振充電電圧
(計算値)

V1/E0



$C_1=28\mu\text{F}, L_1=210\text{H}, R_1=2.25\Omega$
 $C_2=0.112\mu\text{F}, L_2=5\mu\text{H}, R_2=2.7\Omega$
 n =共振充電の回数

図16 共振充電用コンデンサーでの共振充電電圧
(計算値)



Coil=Search Coil(5'), Int=Integrator, Amp=Amplifier
 Ins=Insulator, PHA= Pulse Height Analyzer

図17 磁場測定の方法

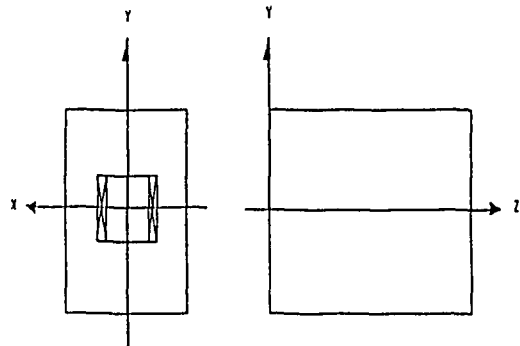


図18 磁場測定での座標系

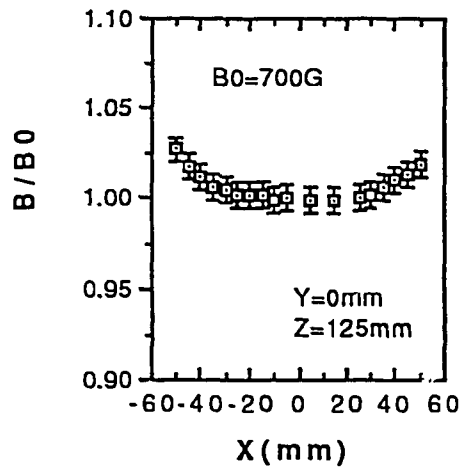


図19 磁場のX方向分布

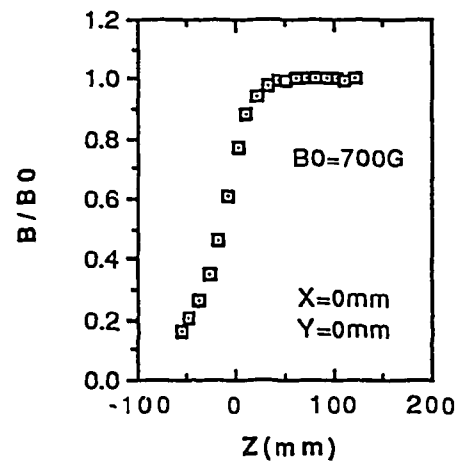


図20 磁場のZ方向分布

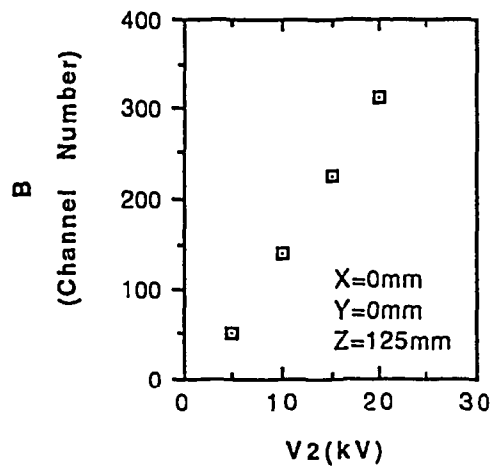


図21 磁場の励磁曲線