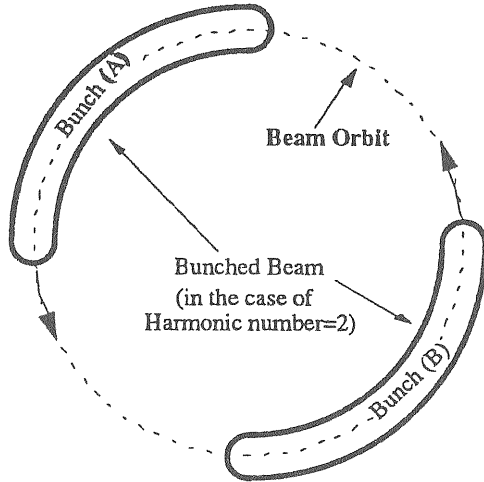


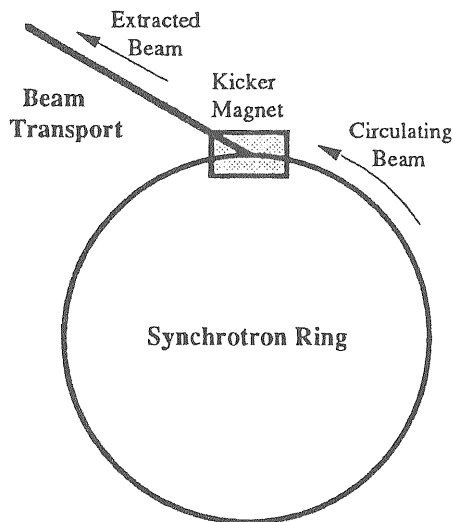
第1章 速い取り出しとは

通常シンクロトロンリング内には(図1)のように単独又は複数個のバンチしたビームが周回している。このビームが加速され取り出しエネルギーに達したら、周回ビームを損失する事なく取り出さねばならない。



(図1) リング内を周回しているバンチしたビーム (周回ビームのバンチ数(h)が2の時)

この為には(図2)のように、ビームをリングの周回軌道から取り出し軌道(通常"ビームトランスポートライン"と呼ばれる)へと切り替える役目をするマグネットシステムと、そのマグネットをタイミング良く励磁するシンクロナイゼーション回路が必要である。



(図2) 周回ビームをビームトランスポート軌道に切り替える働きをするマグネット

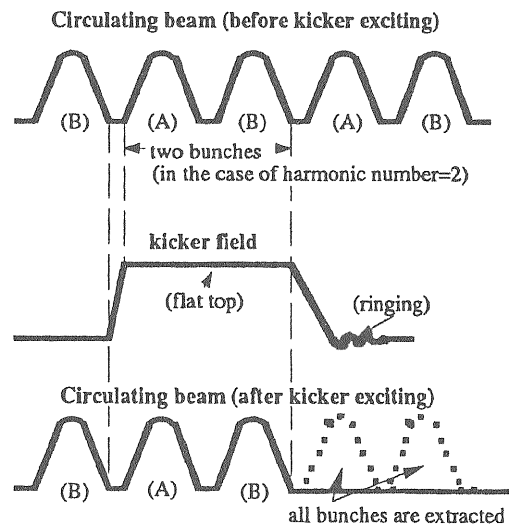
本論では後者の回路は簡単に概説するに留め、前者のシステムを構成するセプタム・バンパ・キッカー3種のマグネットを詳述し、特にこのシステムの要となるキッカーマグネットについては現在のPSで使用されている従来型と、将来主リングからのビーム引き出し用に開発中の新型について具体的に解説する。

第2章 速い取り出しに必要なマグネットシステム

§2-1 磁場波形

(図2)のような軌道切り替えに必要なマグネットに要求される磁場波形としては、

- (1) リング内を周回しているビームバンチがマグネットを通過して次のバンチが来るまでに、磁場が完全に立ち上がっている事。(速い立ち上がり磁場) ((図3)参照)

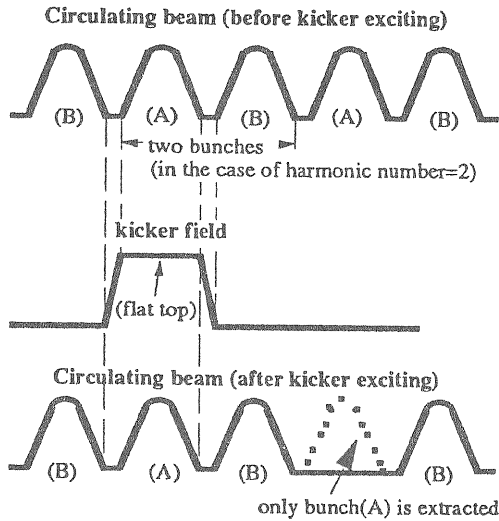


(図3) 周回ビームを全部引き出す場合のキッカーの磁場波形

- (2) 周回しているバンチ数("harmonic number"と呼ぶ)が複数個の場合、一度に全部引き出す為には、全てのバンチを引き出す時間中、ビームを引き出すに足る磁場を発生しなくてはならない(長いフラットトップと強い磁場)

((図3)参照)。但し、その後はリング中にはビームは存在しないから磁場の立ち下りは遅くても、又、リングングがあっても問題は無い((図3)参照)。

(2) 周回しているバンチ数が複数個で一度に1バンチずつしか引き出さない場合、長いフラットトップは必要としないが、今度はそのバンチが引き出された後も他のバンチは存在するのであるから、次のバンチが来るまでにマグネットの磁場は完全にゼロとなっていない。又、リングングがあってはならない (速い立ち上がり磁場) (図4参照)。

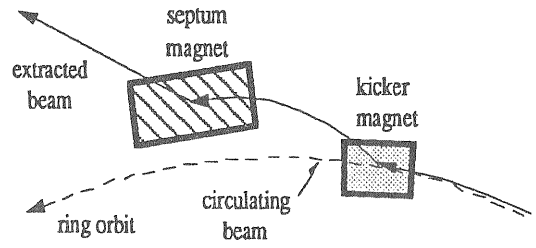


(図4) 周回ビームを単発だけ引き出す場合のキッカーの磁場波形

§ 2-2 (キッカー)+(セプタム)システム

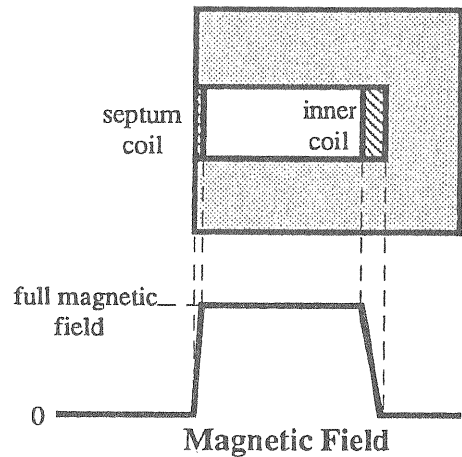
上記のような速い立ち上がり磁場を発生するマグネットを"キッカーマグネット"と呼ぶ。ところが、速い立ち上がりで強い磁場を発生できるマグネットを作製する事は現在の技術では不可能である^{注1}。そこで(図5)のようにキッカーによってビーム軌道を少し曲げ、下流のマグネットのコアギャップ内にビームを蹴り込み、その強い磁場によりビームを曲げ、ビームトランスポートラインに導くという方法を取る。このマグネットは(図6)のような断面構造と磁場分布をしており、薄いコイル板 ("セプタムコイル"と呼ぶ)を境にしてコアギャップ内には強い磁場が発生され、ギャップ外には磁場がゼロとなるものである。これを"セプタムマグネット"と呼ぶ。

^{注1} 速い立ち上がり磁場を発生させる為にはマグネットのコア材質としてフェライトを用いるが、この飽和磁場は約0.3Tであり、珪素鋼板の場合(約1T)と比べて強い磁場が発生出来ない。



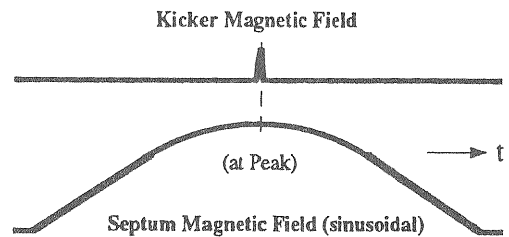
(図5) (キッカー)+(セプタム)システム

Cross section of Septum Magnet



(図6) セプタムマグネットの断面図と磁場分布

このようにセプタムマグネットの磁場は周回ビームに何の影響も与えぬので、(図7)の如くビームを引き出す前に予め立ち上げておき、そのピーク磁場になった時に、キッカーマグネットを励磁する。

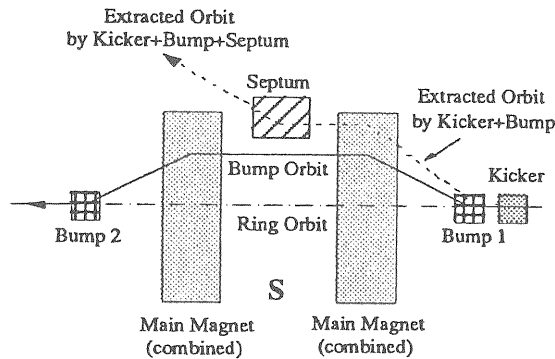


(図7) セプタムとキッカーの励磁タイミング

§ 2-3 (キッカー)+(バンブ)+(セプタム)の併用システム

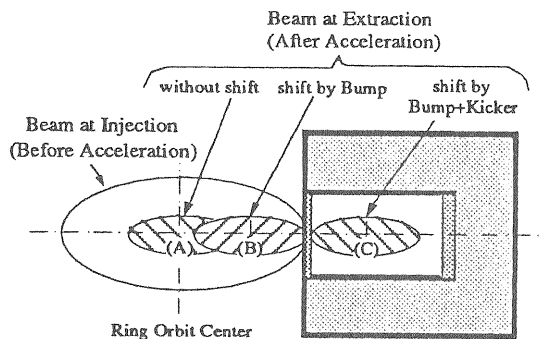
ところが、キッカーマグネットの磁場だけでは周回ビームをセプタムのギャップの中に蹴り

込めぬ場合が生じる。この場合は、(図8)のようなセプタムマグネットの配置点(S点)に対して焦点の位置にある2個の場所にそれぞれマグネット("バンプマグネット"と呼ぶ)を配し、予めそれらを励磁して周回軌道をS点の位置で膨らませる("バンプ軌道を作る"と言う)ようにする^{注1}。



(図8) バンプ軌道(実線)

というのはリングの中にビームが入射した時のビームサイズは(図9)"Beam at Injection"のようであっても、加速される内に断熱収縮が起き、"Beam at Extraction (A)"のように縮む。そこでキッカーを励磁する直前にバンプを励磁し、ビームを"Beam at Extraction (B)"の位置まで移動しておく。

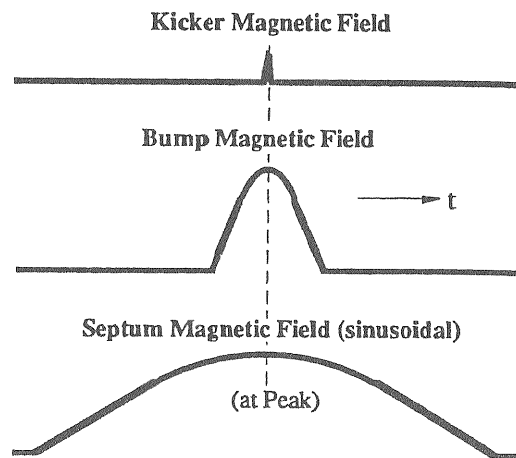


(図9) セプタム位置での入射及び加速後のビームバンプとキッカーにより移動されたビーム

この場合は、キッカーでビームを移動すべき距離はBC間となり、バンプを励磁しない場合のAC間と比べて短くなる。従ってキッカーの磁場はそれに比例して少なくて済む。バンプ磁場のピーク時にはセプタムコイルすれすれにビーム

^{注1} この配置点に限らず、周回ビームがS点でバンプ軌道を取るような方法であれば、複数個のマグネットをリング内に置く方法もある。

を周回させるわけであるから、バンプを励磁する時間は出来る限り短い方が良い。従ってキッカー、バンプ、セプタムの励磁磁場のタイミングやパターンとしては(図10)のようにする。



(図10) セプタム、バンプ、キッカーの励磁タイミング

第3章 シンクロナイゼーションシステム

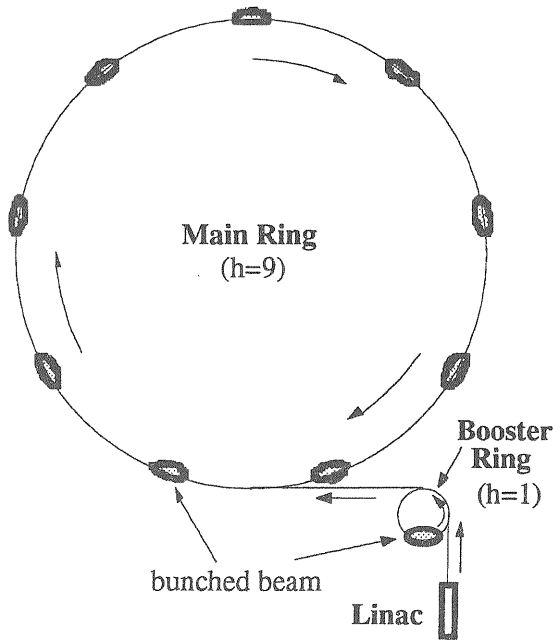
§ 3-1 概説

前述したマグネットシステムの内、§ 2-3(キッカー)+(バンプ)+(セプタム)の3種のマグネットを併用する場合は最も複雑であるので^{注1} この場合を説明する事にする。

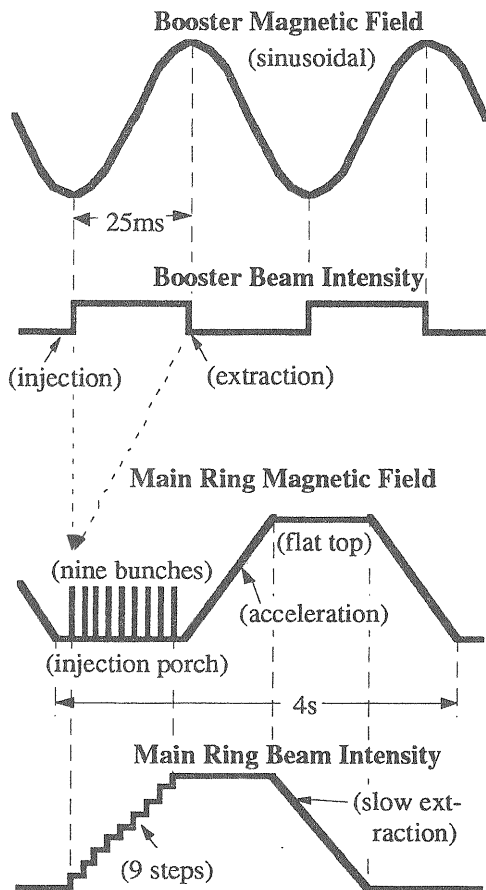
§ 3-2 ブースターリングから主リングへのバンチ輸送

(図11)のように、KEKブースターと主リングの直径比は1対9であるので、ブースターのharmonic numberが1であるのに対し主リングは9となる。ブースターの主マグネットは20Hzで励磁されているので、(図12)のように25msの間に入射・取り出しが行われ主リングに入射される。その25ms後に次のビームが主リングに入射されるが、その際、前に入射したビームと重ならないように事前に主リングRFの空きバケツを探し、タイミングを見計らって入射される。このようにして次々に9発主リングに入射された後、主リングの加速が開始される。

^{注1} KEK-PSに於いて、ブースターリングからビームを引き出し、主リングに入射するシステムがこの場合に当たる。



(図11) ブースターと主リングのバンチ数



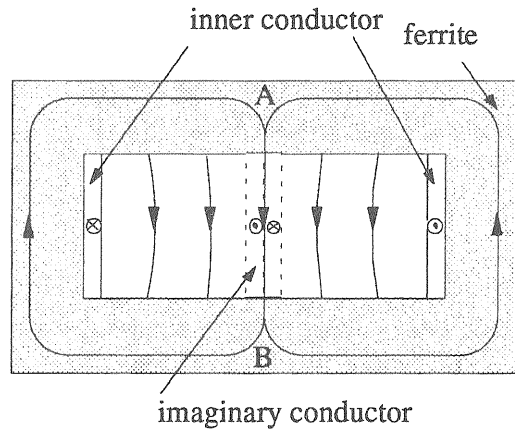
(図12) ブースターと主リングの加速モード

ブースターで加速されたバンチを次々に主リングRFの空きバケットを探しながらタイミング良く入射する為には複雑な回路システムが必要であるが詳細は省く。これ以上勉強されたい方は参考文献[1]を読んで頂きたい。

第4章 セプタムマグネット

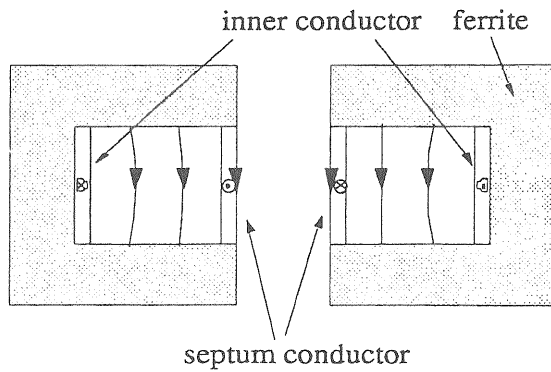
§4-1 マグネット

このマグネットのアイデアは以下のようにして生まれた。(図13)のようなwindow frame型のマグネット(コイル板には強さIの電流が流れているとする)の磁場を考えると、ギャップ中央(線AB)では磁力線は垂直となり、ABを境界にして左右にギャップを分けた時、磁力線の分布は完全に分かれてしまう。そこでこの境界にそって無限に薄い2層のコイル板を考え、それぞれ正と負のIなる電流を流しても全体の電流はゼロであるので磁力線には何等影響を与えない。



(図13) セプタムマグネットのアイデア

結局ABを境界にして左右のマグネットは完全に独立であるので、(図14)のように分断して二つのマグネットをバラバラに離しても、磁力線はセプタムコイルの場所で垂直になるのでコアギャップ中では強い磁場、セプタムコイル板の外では磁場がゼロとなる[2],[3]。このコイル板の絶縁や保持の都合上、コイルのターン数は1~数ターン程度である。電流波形は通常数msの立ち上がり時間で数kAのパルス電流であり、コア中には1T程の磁束密度が発生するので、材質としては飽和磁束密度の高いケイ素鋼板を使用し、且つ渦電流の発生を防ぐ為に薄く積層してスタックしている。



(図14) セプトムマグネット概念図

このマグネットを作製する場合の最も注意すべき点は、コイル板がパルス電流によって強く反発しあうので、如何にしてそのコイル板を保持するかという事である。又このマグネットを真空チェンバーの中で使用する場合、コイル板の冷却の為に冷却水用のパイプをコイル板に密着させ、大気側から出し入れしなくてはならぬが、電位を持ったパイプを如何にして絶縁し、保持するかも留意しなくてはならない。(詳しい説明は参考文献[4]を参照されたい。)

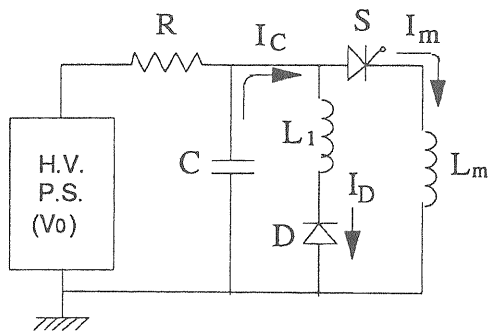
§4-2 電源

1. 基本回路

マグネットは集中定数のインダクタンス(L_m)であるので、最も簡単に出来る磁場波形は半サイン波である。今、半サイン波のピーク付近の τ 時間に $\alpha(\%)$ の精度で磁場が平坦になる必要がある場合、その半サイン波のbottom時間(T)は、

$$T = \frac{\tau \cdot \pi}{2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{\alpha}{100} \right)} \quad (1)$$

で求められる。この電流波形を作る最も簡便な回路は(図15)である。



(図15) セプトムマグネット基本回路

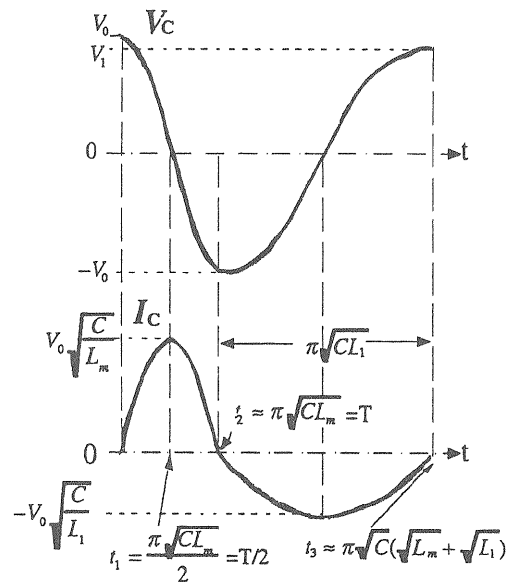
サイリスター(S)をonとする時刻をスタート時刻として、コンデンサー電圧がゼロとなる時刻を t_1 とすると($t_1 = \frac{\pi\sqrt{CL_m}}{2}$)、 $0 < t < t_1$ の時、コンデンサー(C)から流出する電流(I_C)はマグネットを流れる電流(I_m)のみであり、それはコンデンサー(C)とL_mとの成すsin波となる(図16参照)。コンデンサー電流(I_C)がゼロとなる時刻を t_2 とすると、 $t_1 < t < t_2$ の時間中、コンデンサー(C)電圧は負となるのでダイオード(D)がonとなり、L₁にも電流(I_D)が流れ、 $I_C = I_m + I_D$ となるが、 $L_m \ll L_1$ の時、 $I_D \ll I_m$ となるので、結局 $0 < t < t_2$ の時

$$I_C \approx V_0 \sqrt{\frac{C}{L_m}} \sin \frac{t}{\sqrt{CL_m}} \quad (2)$$

となる。但し、Cの値は

$$C = \frac{1}{L_m} \cdot \left(\frac{T}{\pi} \right)^2 \quad (3)$$

で求められる。



(図16) セプトム充電コンデンサーの電圧・電流波形

コンデンサー電流(I_C)が再びゼロとなる時刻を t_3 ($t_3 = \pi\sqrt{C(\sqrt{L_m} + \sqrt{L_1})}$) とすると、 $t_2 < t < t_3$ なる時間には(図16)に示すように電流が逆向きになるので、Sがoffとなり、 $I_m = 0$ となる。この時は、I_CはL₁とCとの成すsin波となり、

$$I_c = -V_0 \cdot \sqrt{\frac{C}{L_1}} \sin \frac{t}{\sqrt{CL_1}} \quad (4)$$

で求められる。

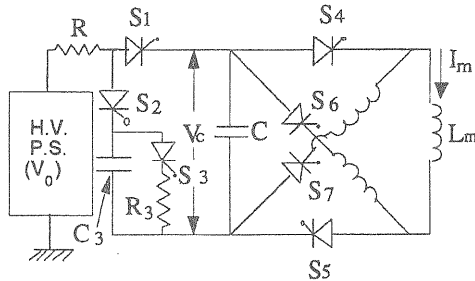
通常セプタムマグネットのパルス電流の立ち上がり時間はms程度であるから電源のスイッチング素子としてサイリスターを用いる。ところが、マグネットに流すべき電流は大きく、電圧は低いので、数100A・数100Vが適性値であるサイリスターには電流としては大き過ぎ、電圧としては小さ過ぎる。そこで(図15)の右端のサイリスター(S)とマグネット(L_m)との間にn:1の巻き下げトランスを挿入し、電源にとってはサイリスターにマッチした電流と電圧になるようにする。

2. KEK-PSで用いられている回路

上述の基本回路の欠点として、

- * t₂ < t₃ の(C)電圧の極性交換に要する時間が長過ぎて、次の励磁に間に合わぬ可能性がある。
- * t₃ < tからの(C)の再充電電圧は直流高圧電源の安定性が直接効いてくる。

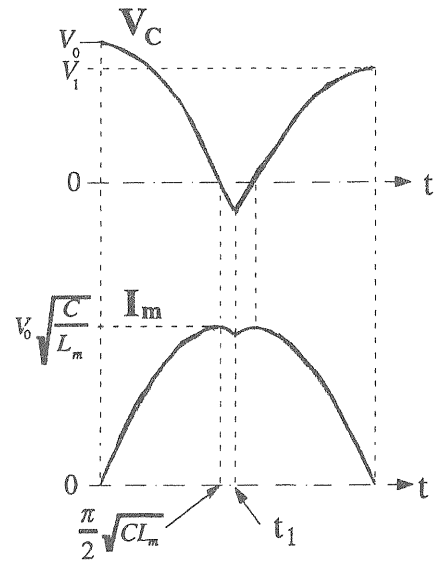
これ等の欠点を克服する為の回路には色々考えられるが、ここではKEK-PSのブースター引き出し用と主リング入射用のセプタムで、現在採用している回路を紹介するに留める。



(図17) PSで使用中のセプタム電源

(図17)のサイリスター(S₄)とS₅とをonにすると、(図18)下図のようにマグネットに流れる電流(I_m)はCとL_mとの成すsin波となる。ところがCの電位(V_c)が負になってほんの少し経った時(t₁)に、S₆とS₇とをonにすると、S₄とS₅には逆向きの電流が誘起されてoffとなり、I_mはS₆とS₇とを通じてCに流れ込み、Cは再び正の符号で充電され始める。結局Cの電圧(V_c)は(図18)上図のような波形となる。最終的にCの電圧はV₁となるが、その値はケーブルや素子の抵抗により当初のV₀より

低くなる。次の励磁までにこのロス分を補わなくてはならぬが、その方法として先ずS₁をonにし、Cへの再充電を開始する。分圧抵抗でCの電圧をモニターしておき、所定の電圧に達したらS₂をonにする。S₁には逆電流が流れるのでoffとなりCへの充電は停止する。S₂はC₃が充電されてしまったら電流が流れなくなるので独りでoffとなる。次の励磁までにこのC₃を放電する必要があるので、S₃をonしC₃の電荷をR₃を通して放電させる。C₃の電荷がなくなればS₃は独りでoffする。これが一発分のサイクルであり、50ms毎にこのサイクルが繰り返される[5]。



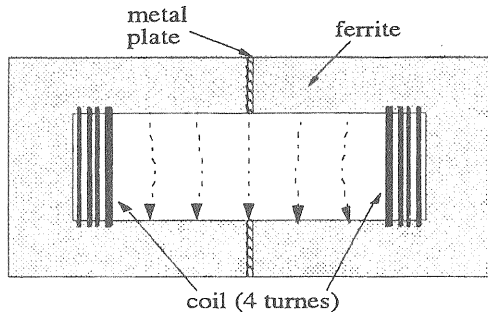
(図18) KEK-PSで使用中のセプタム電源のコンデンサー電圧とマグネット電流

第5章 パンプマグネット

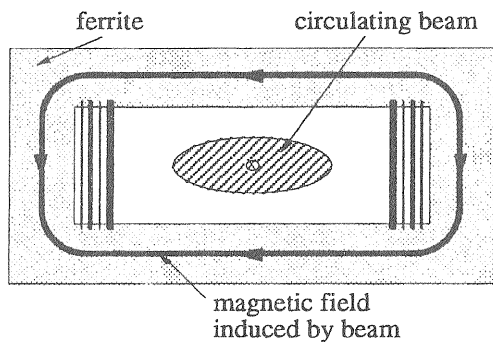
§5-1 マグネット

このマグネットは磁場の強さ・立ち上がり時間もセプタムとキッカーの中間をなすものである。即ち、通常数10μsの立ち上がり時間で、1~3kGの磁束密度を発生するので、コアの材質としてはフェライトを用い、コイルの巻き数は(図19)のように数ターン程である。コイル板にかかる力もセプタムに比べて弱くて短時間であるので、このマグネットの場合はコイル板の保持や冷却にそれ程留意する必要はない。しかし、このマグネットを真空チェンバー内に設置し、そのギャップ内を周回ビームが通過する場合、(図20)のようにビームが作り出す磁場がフェライ

ト内を一周するので、ビーム電流にとって大きなインダクタンスとなり、ビーム不安定性を引き起こす。又、フェライト内のヒステリシス損によって発熱が起り、フェライトからのアウトガスで真空が悪くなる。この為(図19)のようにフェライト中央に金属板を挿入し、渦電流で磁束を遮蔽してコア内を磁束が一周しないようにする。金属板の挿入が不可能な場合、コイル板の両端をC+Rで結合してアースに落とし、ビームにより誘起された壁電流をダンプする[6]。



(図19) パンプマグネットの断面図
(コイルが4ターンの場合)

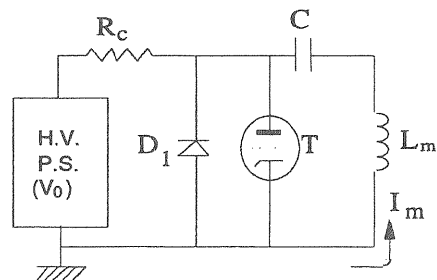


(図20) 周回ビームによるフェライト中の磁束

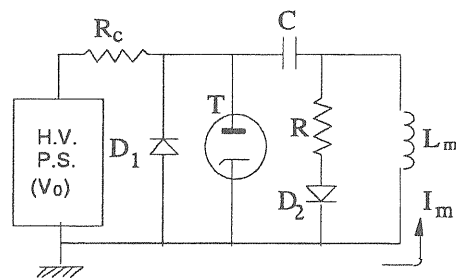
§ 5-2 電源

電流の立ち上がりが数 $10\mu\text{s}$ であるのでスイッチング素子としてサイラトロンを用いる。安価なサイラトロンの定格は数 10kV 、数 100A であるので、セプタムの場合と同様電源とマグネットとの間に $n:1$ の巻き下げトランスを挿入し、マグネットの要求値を電源にとって都合の良い電圧と電流に変換する。KEK-PSブースター引き出し用パンプ電源回路としては(図21)か(図22)を用いている。前者の場合はマグネットに1周期分のサイン波電流が流れるが(図23実線)、後者の場合は $\sqrt{\frac{L_m}{C}} = 2R$ というCritical Dumpingの条件にしてい

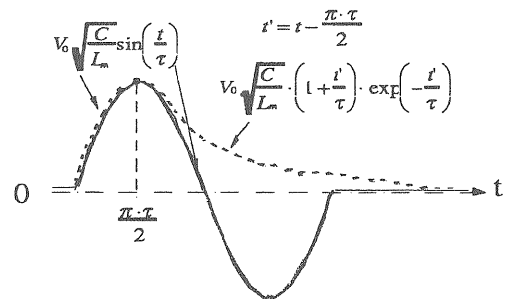
るので、振動する事無く、ダンピング電流が流れる(図23破線)。前者のメリットとしてはコンデンサー(C)に再充電が行われるので、直流高圧電源からの充電電流が少なく済むが、デメリットとしては再充電時によけいな電流がマグネットコイルを流れるが、それに起因するコイルの振動や発熱は殆ど無視出来る。これに対して後者の回路は電流は一度だけしかマグネットコイルを流れないというメリットを持つが、ダンピング抵抗(R)でコンデンサーに充電された電荷を完全に消費するので、直流高圧電源からの充電電流が大きくなる。又、充電時間が増加するので、励磁周期が短い時は十分な飽和電圧に達しないというデメリットを持つ。



(図21) パンプ電源 (sin波形)



(図22) パンプ電源 (ダンピング波形)



(図23) パンプマグネット電流波形 ($\tau=(CL_m)^{1/2}$)
実線: sin波形(図21の回路)
破線: ダンピング波形(図22の回路)

第6章 キッカーマグネット[7]

§6-1 キッカーマグネット諸値の計算法

1. 必要な発生磁場

今、 $B\rho$ [Tm]なるリジディティータを持つビームを全部で角度 θ_T [r]だけ蹴る必要がある時、キッカーマグネットを設置するのに許されるビーム方向(z軸)の長さが a_T [m]であれば、キッカーが発生しなくてはならない磁場[B(T)]は

$$B = \frac{(B\rho)}{a_T} \cdot \theta_T \quad (5)$$

2. 1台のキッカーマグネットの蹴り得る角度

長さ a [m]なるマグネットのギャップ内に B [T]なる磁場を発生させた時、 $B\rho$ [Tm]なるリジディティータを持つビームを蹴る角度 θ [r]は

$$\theta = \frac{a}{\rho} = \frac{a}{(B\rho)} \cdot B \quad (6)$$

ギャップ高 h [m]なるキッカーマグネット(1ターン)に I [A]なる電流を流すと、発生する磁場 B [T]は

$$B = \frac{\mu_0}{h} \cdot I \quad (7)$$

ところでキッカー電流 I [A]はPFN充電電圧を V_{PFN} [V]とし、マグネットの特性インピーダンスを Z [Ω]とすると、

$$I = \frac{V_{PFN}/\alpha}{Z} \quad (8)$$

但し、この α は係数で、後述するキッカーシステムにより、1か2の数字が入る。

ところで、マグネットのインダクタンス L [H]と、マグネットコアギャップ形状(幅 w [m]・高さ h [m]・長さ a [m])の関係は(巻き数1ターンの時)、

$$L = \frac{\mu_0 a w}{h} \quad (9)$$

又、ビームのバンチとバンチの間の空きスペース時間を τ_s [s]、キッカーマグネット電流導入端子入り口での入力パルス電流の立ち上がり時間を τ_r [s]とすると、マグネットの入り口から出口まで電流が伝わる伝搬時間 τ_m [s]の最大値は

$$\tau_m = \tau_s + \tau_r \quad (10)$$

この値と、マグネットの特性インピーダンス Z [Ω]とインダクタンス L [H]との関係は

$$L = Z \cdot \tau_m \quad (11)$$

(7)から(11)までの式を(6)に代入して整理する

と、マグネットの蹴り角 θ [r]を、ビーム性質($B\rho$)やPFN充電電圧(V_{PFN})、マグネット形状(w)、マグネットギャップ内伝搬時間(τ_m)から求める式は

$$\theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{\alpha w} \cdot \tau_m \quad (12)$$

となる。ここで興味深いのは、外部の前提条件からビームの蹴り角(θ)を求める場合、その式はマグネットコアギャップ幅(w)に依存するが、ギャップ高(h)には依存しない事である。

3. 1台のキッカーマグネット長

マグネット長さ a [m]は以下の3式から計算した値の内、最も大きい値を取らねばならない。

* 伝搬時間 (τ_m [s]) が大きい時、

$$a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m \quad (13)$$

* ギャップ内飽和磁束密度(B [T])が小さい時、(例 $B < 0.3$ [T])

$$a = \frac{V_{PFN} \tau_m}{\alpha w} \cdot \frac{1}{B} \quad (14)$$

* サイラトロン電流(I [A])が小さい時、(例 $I < 6 \cdot 10^3$ [A])

$$a = \frac{LV_{PFN} h}{\alpha w \mu_0 Z} \cdot \frac{1}{I} = \frac{V_{PFN} h \tau_m}{\alpha w \mu_0} \cdot \frac{1}{I} \quad (15)$$

4. キッカーマグネットの必要設置台数

ビームを蹴らねばならぬ角度は θ_T [r]であるのに対し、1台のキッカーが蹴り得る角度は θ [r]であるので、設置しなければならないマグネットの台数 N は

$$N \geq \theta_T / \theta \quad (N \text{ は自然数}) \quad (16)$$

5. キッカーマグネットを設置するのに必要なビーム方向(z軸)スペース

1台のキッカーマグネットを設置する為には電流入出力用の端子や各マグネット間の放電防止用のスペースが必要である。それ等のスペースを a_s [m]とすると、 N 台のマグネットを設置する総スペース a_T [m]は

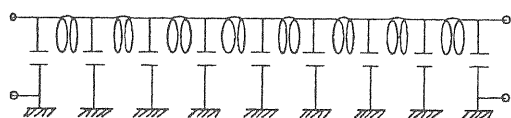
$$a_T = N \cdot (a + a_s) \quad (17)$$

§6-2 キッカーシステムの部品説明

以下に全てのシステムに共通な部品の説明を行う。

1. PFN

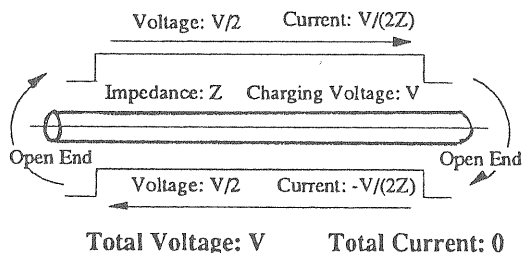
Pulse Forming Network (分布定数網)の略で、コイルの両端にコンデンサーを π 型に接続し、それを連結する事により特性インピーダンス ($Z=(L/C)^{1/2}$) 回路を形成するが(図24参照)、KEK-PSでは同軸ケーブルで代用している。



(図24) PFNの等価回路

2. 両端open時のPFN中の電流と電圧

特性インピーダンスが Z なるPFN中を、 $V_{PFN}/2$ なる電圧を持ち、 $V_{PFN}/(2Z)$ なる電流を持つパルス電流トレインが両端で反射されながらクルクルと周回している描像を描く(図25参照)。これを外から見ると、電圧は V_{PFN} (つまりPFN充電電圧)で、電流は0(つまり流れない)という事になる。



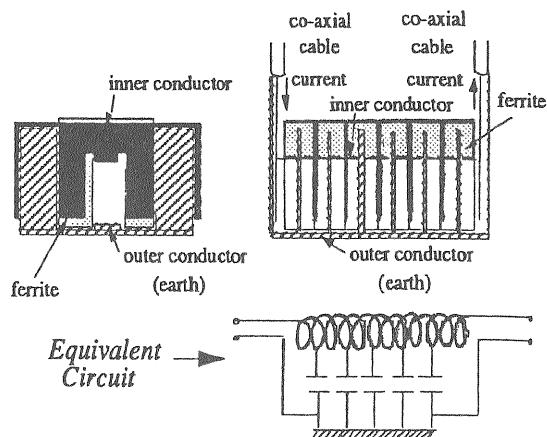
(図25) 電圧(V)に充電された同軸ケーブル中の電流と電圧パルストレイン

3. サイラトロン

高電圧高速スイッチ用真空管(グリッドヘトリガーパルス電圧を印加する事により、ある立ち上がり時間(τ_r)でON状態となる)。

4. 分布定数型キッカーマグネット(図26参照)

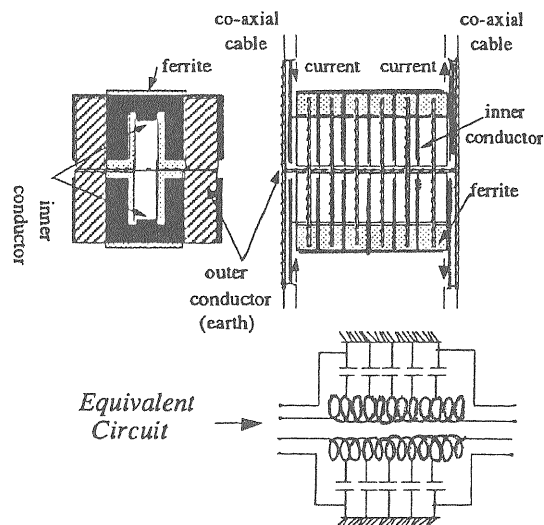
キッカーのフェライトコアをビーム方向に10程度に等分割し、その分割された各コア両端で、コイル板に接続された電極板とアース板とに接続された電極板とで形成されるコンデンサーと、その分割されたコア部でコイル板が作るインダクタンスとで π 型回路(PFN)が作られる。その特性インピーダンス(Z)を伝送同軸ケーブルのインピーダンスに一致させて、パルス電流を反射せずコイル板中に伝送する。



(図26) 分布定数型キッカーマグネット

5. 双方向分布定数型キッカーマグネット(図27参照)

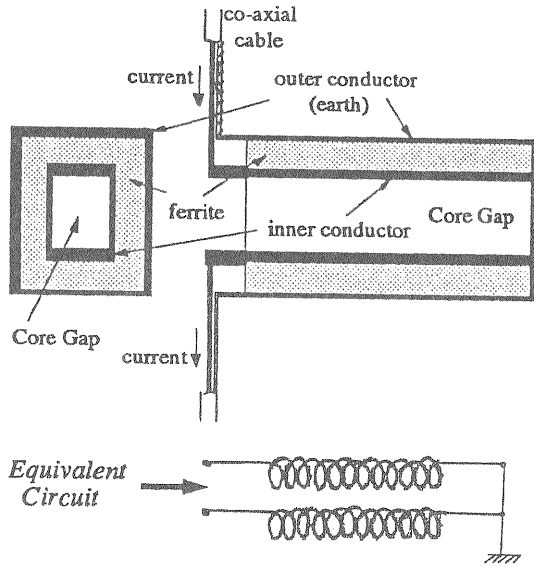
上述の分布定数型キッカーマグネット2台が互いに向き合って対称的に並べられており、外部コイル板はアース電位で共通であるが、内部コイル板にはそれぞれ独立に電源ケーブルが接続され、絶対値は同じ大きさであるが、符号は反対の電流が供給される。



(図27) 双方向分布定数型キッカーマグネット

6. 集中定数型キッカーマグネット(図28参照)

いわゆる普通のタイプのマグネットである。即ち、ウィンドフレーム型のフェライトコアを所定のビーム方向の長さにはスタックし、そのコアギャップの中にコイル板を固定する。(但し、図28のシステムの場合、入力端と逆側の端点はアースされている)



(図28) 集中定数型キッカーマグネット

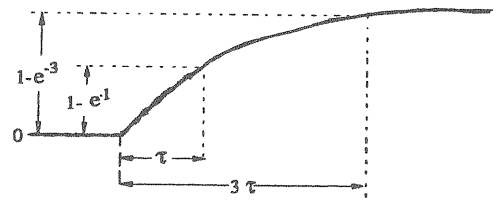
§ 6-3 集中定数型キッカーよりも
分布定数型キッカーが優れている理由

インピーダンスがZの同軸ケーブルに集中定数型キッカーマグネット(L_m)を接続し、矩形電流を入力した場合、マグネットを流れる電流の立ち上がり波形は(図29)上図に示すように指数関数的になる[8] (但し、 $\tau=L_m/Z$)。即ち、 τ 時間後に full currentの $1-e^{-1}$ (63%)、 3τ 時間後に full currentの $1-e^{-3}$ (95%)となり、マグネットに目標の電流値が流れ、コアギャップ内が設計通りの磁場で満たされる為には約 3τ 時間必要となる。

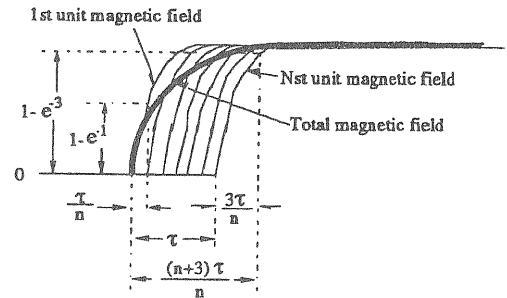
これに対し、分布定数型キッカー(ユニット数: n)の場合は(図29)下図に示すように各ユニット内では $3\tau_0$ (但し、 $\tau_0=L_m/(nZ)=\tau/n$)で電流がほぼ full currentに立ち上がる。この電流が全てのユニットに次々に伝わり、最後のユニットに伝わるまでの時間は $n\tau_0(=\tau)$ である。そこで、コアギャップ内全体が設計通りの磁場で満たされる為には図中の太実線の様に、 $3\tau_0+n\tau_0(=\tau*(1+3/n))$ 時間となる。故に分布定数型は集中定数型に比べ $\frac{1+3/n}{3}$ 倍だけ短くなる。今、 $n=10$ とすると、43% (半分弱) となる。

このように分布定数型は集中定数型に比べて磁場の立ち上がり時間の短縮という点で優れているが、構造は複雑になり、製作コストや放電が起きやすいという点では不利となる。

1) Lumped Kicker magnet



2) Distributed Kicker magnet

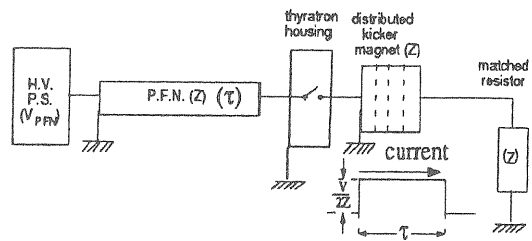


(図29) 1) 集中定数型の電流立ち上がり波形
2) 分布定数型の電流立ち上がり波形
[実線]各ユニット内の電流波形
[太実線]ユニット全体の平均電流波形

§ 6-4 各キッカーシステムの説明と
その長所と短所

我々はより強いキッカー磁場を発生する為に、色々なキッカーシステムを考えた。システムの短所を改善して次々に新しいものを考えて行った我々の軌跡に沿って、以下に各システムの説明を行う。但し、各システムで長所・短所の項に於ける*印は、直前に述べられた型(システム)より、改善または改悪された点である。*印は、直前の型と同じ長所・短所である。

1. 従来型 (PS主リング入射型) (図30参照)



(図30) 従来型システム
(KEK-PSブースター引き出し&主リング入射型)

(システム説明)

このシステムでは、PFNや伝送ケーブルの特性インピーダンスはキッカーの場合と同様 Z となっている。サイラトロンがONとなると、PFNからサイラトロン方向に走っているパルス電流トレイン(電流値： $V_{PFN}/(2Z)$)がサイラトロンから引き出され、伝送ケーブルを伝わってマグネットに流れる。その電流は、最終的にマグネットの出口に接続されたインピーダンス・マッチングした終端抵抗(Z)で完全に消費される。この場合 $\alpha=2$ となるから、

(計算式)

$$* \text{蹴り角} : \theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{2w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット長} : a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット内磁場充足時間} : \tau_T = \tau_m + \tau_r$$

(但し、 τ_r は入力電流立ち上がり時間)

(長所)

- * システムの構造が簡単。
- * マグネットへの印加電圧がPFN充電電圧の半分しかかからず、放電の恐れが少ない。

(短所)

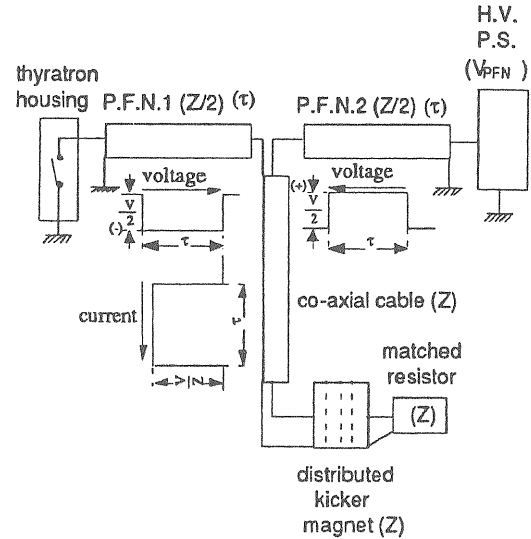
- * サイラトロンのカソードが電氣的に浮いているのでヒーターやリザーバー電源、トリガー回路を高電圧に耐えられるよう浮かさなくてはならない。
- * マグネットへはPFNへ充電した電圧の半分の電圧を特性インピーダンスで除した電流値しか流れない。

2. ブルムライン型 (図31参照)

(システム説明)

このシステムではPFN1と2の特性インピーダンスは $Z/2$ 、伝送ケーブルはキッカーと同じ Z となっている。サイラトロンがONとなると、PFN1のサイラトロン側の端で $-V_{PFN}/2$ なるパルス電圧トレインが発生し右側に伝わっていく。PFN1を外から見ると、そのトレインと、サイラトロン方向(左方向)に行く $V_{PFN}/2$ のパルス電圧トレインとが重なって、電圧0(即ち、ショート)の状態が次第に右方向に伝わっていくように見える。これが中央部(PFN1と2と伝送ケーブルの接合部)に

来た時、PFN1に接合している伝送ケーブルの外皮には $-V_{PFN}/2$ 、PFN2に接合している中心導体には $V_{PFN}/2$ のパルス電圧トレインが発生して、キッカー方向に伝わっていく。従って、キッカーには V_{PFN}/Z なるパルス電流トレインが流れ、最終的には終端抵抗で消費される。



(図31) ブルムライン+分布定数型磁石

この場合 $\alpha=1$ だから

(計算式)

$$* \text{蹴り角} : \theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット長} : a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット内磁場充足時間} : \tau_T = \tau_m + \tau_r$$

(長所)

- * サイラトロンのカソードがアース電位となるのでヒーター回路やリザーバー回路、トリガー回路等を高圧に浮かせる必要が無くなる。
- * PFN充電電圧を特性インピーダンスで除した電流値がマグネットへ流れる。(即ち、1.従来型の2倍の磁場が発生する)

(短所)

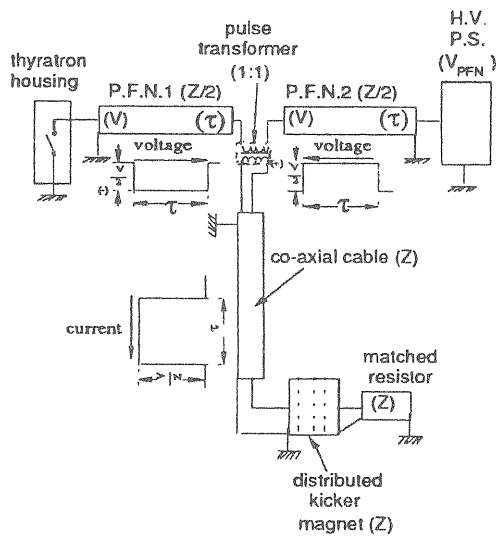
- * マグネットへの伝送ケーブルの外皮がアースから浮いているので浮遊静電容量が加わり、パルス波形が悪影響を及ぼされる恐れがある。
- * PFNの充電中、マグネットへの伝送ケーブルの外皮には V_{PFN} が印加されるので危険である。

* PFNの充電中、マグネットの外部導体にも V_{PFN} が印加されてチェンバーとの放電の危険性があるし、パルス電圧トレインが伝わって来た時は、マグネットの外部コイル板と内部コイル板との電圧差は V_{PFN} となるので耐圧に工夫しなければならぬ。(即ち、1.従来型の2倍の耐圧が必要となる。)

3. ブルムライン+トランス (図32参照)

(システム説明)

このシステムはPFN1&2と伝送ケーブルの接合部にトランスを挿入した以外は原理的に2.ブルムライン型と全く同様である。



(図32) ブルムライン+トランス
+分布定数型磁石

(計算式)

$$* \text{蹴り角} : \theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット長} : a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット内磁場充足時間} : \tau_T = \tau_m + \tau_T$$

(長所)

* サイラトロンのカソードがアース電位となるのでヒーター回路やリザーバー回路、トリガー回路等を高圧に浮かせる必要が無くなる。

* トランスの2次側は1次側から絶縁され、マグネットへの伝送ケーブルの外皮はアースに落とせるので、外皮に高電圧が加わる恐れもない。

ければ、パルス波形が悪影響を及ぼされる恐れもない。

* PFN充電電圧を特性インピーダンスで除した電流値がマグネットへ流れる。(即ち、1.従来型の2倍の磁場が発生する)

(短所)

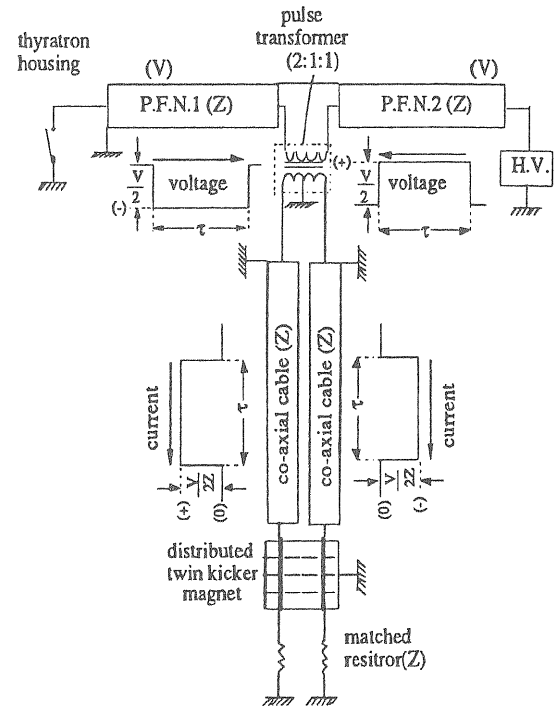
* マグネットの外部コイル板はアース電位となるが、内部コイル板との電位差は V_{PFN} となるので耐圧に工夫しなければならぬ。(即ち、1.従来型の2倍の耐圧が必要となる。)

* パルス電流がトランスの1次側から2次側へ伝わる間にパルス立ち上がり時間が増加したり、フラットトップ部の平坦さが損なわれる可能性がある。

* トランスの製作コストが付け加わる。

4. ブルムライン+トランス

+双方向型キッカーマグネット (図33参照)



(図33) ブルムライン+トランス+双方向型磁石
+マッチング抵抗

(システム説明)

PFN1&2と伝送ケーブルの接合部にトランスを挿入するのは3.ブルムライン+トランス型と同様であるが、前型は1:1の巻き線比であったのに対し、今型は2:1:1の巻き線比である。2次と2次の線の一方を結合してアースに落として伝送ケー

ブルの外部に接続し、他方の線をそれぞれの伝送ケーブルの芯線に接続している。これらはもう一つの端末で双方向型キッカーの各々の内部コイル板に接続される。PFN1で発生した $-V_{PFN}/2$ なるパルス電圧トレーンはトランスの2次巻き線により双方向型キッカーの一方の内部コイル板に伝わり、PFN2で発生した $+V_{PFN}/2$ なるパルス電圧トレーンはトランスの2次巻き線により双方向型キッカーのもう一方の内部コイル板に伝わる。最終的にはこれらの電圧トレーンは終端抵抗で消費される。従ってキッカーの対向コイル板間には V_{PFN} のパルス電圧トレーンが伝わる事になる。このシステムは1.従来型を2台向かい合わせにして配置しているに過ぎないから $\alpha=2$ である。但し、1個当たりのマグネットギャップ幅は $w/2$ (w をマグネット口径の幅と定義している)となるので、以下の計算式となる。

(計算式)

$$* \text{蹴り角} : \theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット長} : a = \frac{2Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m$$

$$* \text{マグネット内磁場充足時間} : \tau_T = \tau_m + \tau_r$$

(長所)

* サイラトロンのカソードがアース電位となるのでヒーター回路やリザーバー回路、トリガー回路等を高圧に浮かせる必要が無くなる。

* トランスの2次や2次側は1次側から絶縁され、マグネットへの伝送ケーブルの外皮はアースに落とせるので、外皮に高電圧が加わる恐れもなければ、パルス波形が悪影響を及ぼされる恐れもない。

* マグネットの2個の内部コイル板にはそれぞれ $V_{PFN}/2$ なる大きさを持つ正と負のパルス電圧トレーンが加わるのでマグネットに於けるアースに対する耐電圧の要求は前システムの半分となる。但し、対抗するコイル板の電圧差は V_{PFN} のままである。

* マグネットギャップ内では1.従来型と同様の磁束しか発生しないが、1台当たりのギャップ幅は従来の半分であるので、インダクタンスが半分となる。従って、電流がマグネット内を伝搬する速度が2倍となり、従来型と同じ伝搬時間を許容するとマグネット長を2倍に出

来る。従って、全体のビーム蹴り角は1.従来型の2倍となる。

(短所)

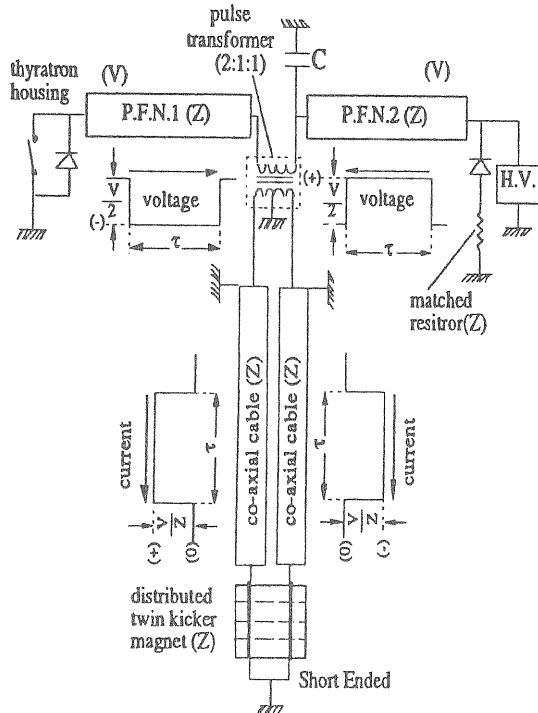
- * トランスの製作コストが付け加わる。
- * パルス電流がトランスの1次から2次や2次側へ伝わる間に、パルス立ち上がり時間が増加したり、フラットトップ部の平坦さが損なわれる可能性がある。
- * マグネット長が、今までのシステムと比べて2倍となる。

5. ブルムライン+ダイオード付き終端抵抗+トランス+双方向型キッカー+マグネット+終端ショート (図34参照)

(システム説明)

殆どのシステムは前型の4.ブルムライン+トランス+双方向型キッカー ($\alpha=1$)と同様であるが、前型がキッカー終端にマッチング抵抗をつけて、励磁電流を完全に消費したのに対し、今型はキッカー終端をショートする。この場合、絶対値 $V_{PFN}/2$ なるパルス電圧トレーンはキッカー終端で符号が変わって反対向きに流れ出す(反射電流)ので、それぞれのキッカーコイルには前型の2倍(V_{PFN}/Z)のパルス電流トレーンが流れる事になる。この反射電流は伝送ケーブルを経由して、PFN1と2を伝わり、それぞれその端末のサイラatronや充電電源結合部まで行き、そこで再び反射され、又キッカーの方へ行くという反射を繰り返す。これを除去する為、PFN2の端末にダイオード付き(反射電流しか流さないようにする為)終端抵抗を接続し、ここで反射電流を消費する。(但し、PFN1方面の反射電流が残る為、反射を繰り返しながら、最終的にPFN2の端末のダイオード付き終端抵抗でダンプする。)

尚、サイラatronのアノードに負電位が印加せぬようダイオードを並列に入れる。キッカーギャップの内部では前型までの2倍の磁界が発生するが、コイル板中を伝わる電流伝搬時間は行きと帰りの2倍となる為、前型までの磁場立ち上がり時間より長くなる。従って、マグネットの長さを半分とし、伝搬時間を従来と同様にする。但し、(磁界*マグネット長)に比例するビーム蹴り角はマグネット長を減少する前の半分になるので、結局 1.従来型と同じマグネット長でありながら、ビームのキック量は2倍になる。



(図34) プルムライン+ダイオード付終端抵抗+トランス+双方向型磁石+終端ショート

(計算式)

$$\text{* 蹴り角: } \theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{w} \cdot \tau_m \quad (18)$$

$$\text{* マグネット長: } a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m \quad (19)$$

$$\text{* マグネット磁場充足時間: } \tau_T = \tau_m + \tau_r \quad (20)$$

(長所)

- * サイラトロンのカソードがアース電位となるのでヒーター回路やリザーバー回路、トリガー回路等を高圧に浮かせる必要がなくなる。
- * トランスの2次側は1次側から絶縁され、マグネットへの伝送ケーブルの外皮はアースに落とせるので、外皮に高電圧が加わる恐れもなければ、パルス波形が悪影響を及ぼされる恐れもない。
- * マグネットの2個の内部コイル板にはそれぞれ $V_{PFN}/2$ なる大きさを持つ正と負のパルス電圧トレインが加わるのでマグネットに於けるアースに対する耐電圧の要求は3.プルムライン+トランス型の半分となる。但し、対抗するコイル板の電圧差は V_{PFN} のままである。
- * P.F.N.充電電圧を特性インピーダンスで除した

値の電流がマグネットへ流れる。(即ち1.従来型や4.プルムライン+トランス型+双方向型キッカーマグネットの2倍の磁場を発生し、1.従来型と同じマグネット長でありながら、ビームを2倍キックする事が出来る)

(短所)

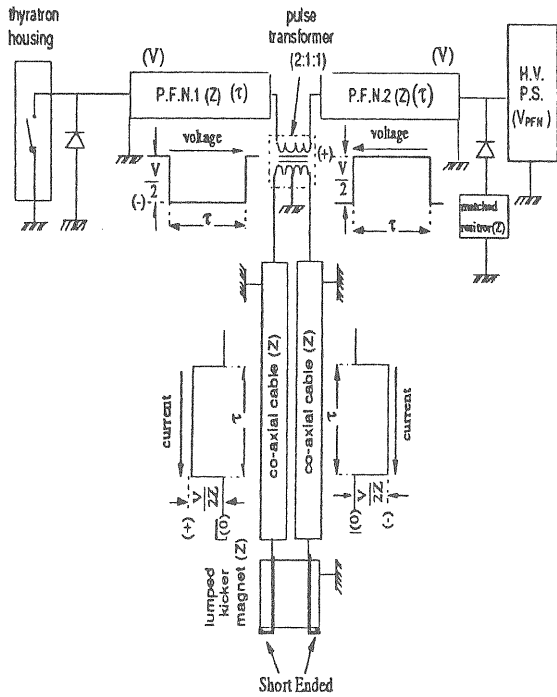
- * トランスの製作コストが付け加わる。
- * パルス電流がトランスの1次から2次や2次側へ伝わる間にパルス立ち上がり時間が増加したり、フラットトップ部の平坦さが損なわれる可能性がある。
- * 伝搬時間としては、電流パルスがマグネットを往復する時間を必要とし、従来型の2倍となるので、この欠点を解消する為にマグネット長を半分にして、伝搬時間を従来と同様にしなくてはならない。→従って、マグネットのビーム蹴り角は1.従来型の2倍であり、4.プルムライン+トランス型+双方向型キッカーマグネットと同じ値になる。
- * 片方のP.F.N.端末に終端抵抗とダイオードを付属しなければならぬので、製作コストが高くなる。
- * サイラトロンのアノードに反射波による負のパルストレインが加わるので、アノード破壊を防止する為にサイラトロンと並列にダイオードを入れる必要があり、コストが高くなる。

6. プルムライン+ダイオード付終端抵抗+トランス+集中定数型キッカーマグネット (図35参照)

(システム説明)

殆どのシステムは5.プルムライン+ダイオード付き終端抵抗+トランス型+双方向型キッカーマグネット+終端ショートと同様であるが、前型が分布定数型の双方向型キッカーマグネットであったのに対し、今型は集中定数型のマグネットである。この場合、反射電流により実質電流値が2倍になる事[8]や、ダイオード付き抵抗でその反射電流が消費される事等、全て前型と同様である。異なる所は§6-3で説明したように、磁場がマグネットギャップに充足する時間が前型に比べて

$\frac{3}{1+3/n}$ 倍になる。今ユニット数(n)を10段とすると、2.3倍となる。



(図35) プルムライン+ダイオード付終端抵抗
+トランス+集中定数型磁石

(計算式)

* 蹴り角： $\theta = \frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{V_{PFN}}{w} \cdot \tau_m$

* マグネット長： $a = \frac{Zh}{\mu_0 w} \cdot \tau_m$

* マグネット内磁場充足時間：

$$\tau_T = \frac{3}{1+3/n} * \tau_{im} + \tau_T$$

(長所)

- * サイラトロンのカソードがアース電位となるので高圧に浮かせる回路を考える必要がなくなる。
- * トランスの2次側は1次側から絶縁され、マグネットへの伝送ケーブルの外皮はアースに落とせるので、外皮に高電圧が加わる恐れもなければ、パルス波形が悪影響を及ぼされる恐れもない。
- * マグネットの2個の内部コイル板にはそれぞれ $V_{PFN}/2$ なる大きさを持つ正と負のパルス電圧トレインが加わるのでマグネットに於けるアースに対する耐電圧の要求は 3. プルムライン+トランス型 の半分となる。但し、対抗するコイル板の電圧差は V_{PFN} のままである。

* マグネットへPFNへ充電した電圧を特性インピーダンスで除した値電流が流れる。(即ち、1. 従来型や4. プルムライン+トランス型+双方向型キッカーマグネットの2倍の磁場が発生する)

* マグネットの構造が非常に簡単になるので、放電の恐れが減少し、製作コストも安くなる。

(短所)

- * トランスの製作コストが付け加わる。
- * パルス電流がトランスの1次から2次や2'次側へ伝わる間にパルス立ち上がり時間が増加したり、フラットトップ部の平坦さが損なわれる可能性がある。
- * 磁場がマグネットギャップに充足する時間が前項までの分布定数型に比べて約2.3倍となる。
- * 終端抵抗にダイオードを付属しなければならぬので、製作コストが高くなる。
- * サイラトロンのアノードに反射波による負のパルストレインが加わるので、アノード破損を防止するためにサイラトロンと並列にダイオードを入れる必要があり、コストが高くなる。

§ 6-5 具体的な設計例

前章に述べたシステムの内、最善のシステムと思われる 5. プルムライン+ダイオード付き終端抵抗+トランス+双方向型キッカーマグネット+終端ショートのシステムをPS主リング取り出しに適応した場合の設計例を述べる。

1. 前提条件

* キック磁場の立ち上がり時間($\tau_T = \tau_s$): 155[ns]^{注1}

^{注1} 現在主リングはHarmonic Numberが9で運転しているが、加速終了直後のバンチとバンチの間の空白時間は約30[ns]である。この時間ではキッカーの磁場立ち上がりにとって短すぎるので、9バンチの内1バンチを最初から入射しない方法を取る。これにより、キッカーの立ち上がりに許される時間間隔は155[ns]となる。但しこの方法では物理ユーザーに供せられる陽子数は8/9と減少する。この欠点を補う為にHarmonic Numberを6とするとバンチとバンチの空白時間が100[ns]となり (PS-RFグループ二宮氏談)、この空白時間なら1バンチを抜かずとも、何とかキッカー磁場が立ち上がるかも知れない。

- * キック磁場の平坦時間(τ_F): 1.1[μ s] (←主リング内を周回している最大9発のバンチしたビームを引き出す為に 125[ns] * 9[発] - 30[ns] = 1.1[μ s]となる)
- * 総蹴り角(θ_T): $5 \cdot 10^{-3}$ [r]
- * 蹴り出し時のビームエネルギー (E): 12[GeV]
- * ビームリジディティ (Bp): 43.04[Tm]
- * マグネットインピーダンス (Z): 12.5[Ω]
- * PFN充電電圧 (V_{PFN}): $70 \cdot 10^3$ [V] (←このシステムに使用予定であるサイラトロンCX2171の最大定格は90kV, 10kAであるので、運転時は余裕を見てこの値に留める。)
- * マグネット総設置スペース (a_T): 2[m]

2. PFN用同軸ケーブル

- * 印加電圧: 70kV
- * 特性インピーダンス: 12.5[Ω] (←25[Ω]ケーブルを2本並列にする)
- * 1ユニットに必要なケーブル長: 110[m] (←電流伝搬速度は1m当たり5[ns]であるので、1.1[μ s] (=220m分) のパルス幅を作るには折り返しの分を考えて220mの半分となる)
- * ケーブルのLとC: 1ユニット当たりL=6.9[μ H], C=44[nF] (← $(L/C)^{1/2}=12.5$ [Ω], $(L \cdot C)^{1/2}=0.55$ [μ s]より求める)

3. 充電回路 [9] (図40参照)

- * 充電電圧: 70[kV]
- * 必要電源電圧: 75.2[kV]
- * 充電電力: 107.8[w] (←PFNケーブルは2ユニットあるので $C=2 \cdot 44=88$ [nF], 電力は $P=1/2 \cdot CV^2 \cdot f$ で求められる。但しfは充電回数で1/2[回/s]である。)
- * 必要充電電力: 215.6[w] (充電抵抗 R_0 で消費される電力も含めて必要電力の2倍)
- * 充電抵抗: 4.5[M Ω] (107.8[w]用)
- * ピーク電流: 17[mA]

4. サイラトロンハウジング

- * アノード印加電圧: 70[kV]
- * カソード電圧: 接地
- * サイラトロンパルス電流: 5.6[kA], 1.1[μ s]のパルス長

5. パルストランス

- * 巻き数比: 1次:2次:2'次=2:1:1
- * 対接地耐圧: 1次は70[kV]、2次と2'次は35[kV]

- * 立ち上がり時間: 30[ns]
- * サグ: 1.1[μ s]のパルス長で1[%]以下

6. 電流伝送同軸ケーブル

- * 特性インピーダンス: 12.5[Ω]
- * 印加電圧 (絶対値): 35[kV] (但し、符号は2本のケーブルにそれぞれ正と負が印加)
- * 必要なケーブル長: 電源と主リング配置マグネット間 (約300m)

7. マグネット

- * 特性インピーダンス: 12.5[Ω]
- * ギャップ口径: 高さ(h)=55[mm]
横幅(w)=110[mm]
- * ギャップ内磁場 (B): (5)式に前提条件を入れて計算すると、0.11[T]
- * 電流伝搬時間 (τ_m): 伝送線からやって来る電流パルスレーンの立ち上がり時間 (τ_T)を95[ns]とすると、(10)式より60[ns]である。
- * ビーム蹴り角 (θ): (18)式より0.89[mr]
- * キッカー台数 (N): (16)式より6[台]
- * コア長さ (a): (19)式より $298 \cdot 10^{-3}$ [m]
- * マグネット設置必要総距離 (a_T): $a_s=50 \cdot 10^{-3}$ [m]とすると、(17)式より $a_T=2.088$ [m] この値は許容スペースの2mを若干越えるが、このくらいなら何とか納まるだろう。

8. 終端抵抗 (ダイオード付)

- * 特性インピーダンス: 12.5[Ω]
- * ピーク電流: 2.8[kA], 1.1[μ s]のパルス長 (その後次第に減衰する反射電流有り)
- * 耐圧: 70[kV]

第7章 参考文献及び付記

- [1] Y. Kimura et.al., "Synchronous Transfer of Beam from the Booster to the Main Ring in the KEK Proton Synchrotron", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24 (1977) No.3, p1461-1463
- [2] R.L. Keizer, "Calculation of DC Operated Septum Magnets, Magnetic Field Calculations" CERN/SI/Int. MAE/71-2, 10.3. (1971)
- [3] M.H. Foss et. al., "Septum Magnet Coil Design Principles", Argonne N.L., Accelerator Report, ACC-7 (Jan.4, 1979)

[4] T. Kawakubo et.al., "An Improved Septum Magnet in the KEK Proton Synchrotron (in Japanese)" KEK-79-5, (Apr. 1979)

[5] 安河内徹・他「陽子シンクロトン加速器のビームトランスポート用パルス電源」サンケン技報（昭和51年11月）第8巻 第1号 p62-66

[6] 二宮重史 「Booster入射後20msの不安定性の原因はStudy Bumpであった」KEK-PS-SR-335 (Oct.12, 1995)

[7] K. Takata et.al., "Full Aperture Kicker Magnets for KEK Proton Synchrotron (in Japanese)" KEK-76-21 (March 1977)

[8] 集中定数型マグネットの電流と電圧

特性インピーダンス(Z_0)なる同軸ケーブルの端末に集中定数型キッカーマグネット（インダクタンス(L ））が接続された場合のマグネットに流れる電流と電圧を計算する。

先ず、特性インピーダンス(Z_0)に(Z_T)なる同軸ケーブルが接続された場合の電流の反射と透過を考える。(図36)のように、特性インピーダンス(Z_0)ケーブルの左より、電圧(V_f)、電流(I_f)なるパルストレインが来て、ケーブルの継ぎ目で電圧(V_r)、電流(I_r)なる反射トレインが発生したとする。今、反射係数を ρ とすると、

$$V_r = \rho V_f \quad (R1)$$

$$I_r = \rho I_f \quad (R2)$$

なる関係がある。又、特性インピーダンス(Z_T)ケーブルの方に透過して来る電圧トレインは、

$$V_T = V_f + V_r = V_f(1+\rho) \quad (R3)$$

電流トレインとしては

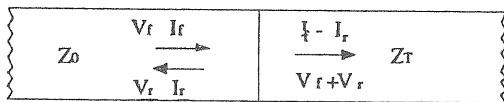
$$I_T = I_f - I_r = I_f(1-\rho) \quad (R4)$$

である。従って、特性インピーダンス(Z_0)中では、

$$Z_0 = V_f / I_f \quad (R5)$$

特性インピーダンス(Z_T)中では

$$Z_T = V_T / I_T = (V_f + V_r) / (I_f - I_r) = (V_f(1+\rho)) / (I_f(1-\rho)) = Z_0(1+\rho) / (1-\rho) \quad (R6)$$



$$Z_0 = V_f / I_f$$

$$Z_0 = V_r / I_r$$

$$Z_T = \frac{V_f + V_r}{I_f - I_r}$$

(図36) インピーダンスミスマッチング点での反射

今、 $s=Z_T/Z_0$ とすると、

$$s = (1+\rho) / (1-\rho) \quad (R7)$$

又は、

$$\rho = (s-1) / (s+1) \quad (R8)$$

今、(図37)のような回路を考える。関数Aのラプラス変換後の値を[A]とすると、この回路の Z_T は純粹のインダクタンス(L)であるから、

$$[Z_T] = LS \quad (R9)$$

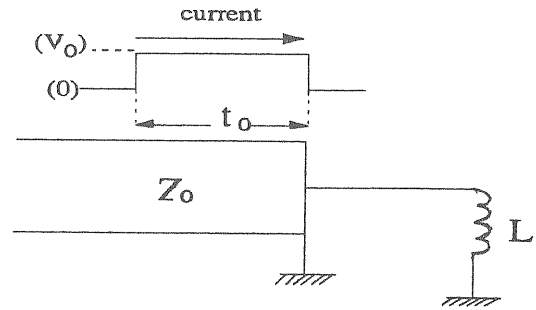
但し、 S はラプラス演算子である。

ところで、(R4)、(R8)より

$$I_T = I_f(1-\rho) = I_f \{1 - (s-1)/(s+1)\} = 2I_f / (s+1) = 2V_f / (Z_0(Z_T/Z_0 + 1)) = 2V_f / (Z_T + Z_0)$$

両辺のラプラス変換をすると、

$$[I_T] = 2[V_f] / ([Z_T] + Z_0) \quad (R10)$$



(図37) 同軸ケーブルと集中負荷（純インダクタンス）

V_f は矩形形で来るとしてステップ $(u(t)-u(t-t_0))$ 関数のラプラス変換をして、

$$[V_f] = V_0 \{1 - \exp(-t_0 S)\} / S \quad (R11)$$

(R9)、(R11)を(R10)に代入して

$$[I_T] = 2V_0 \{1 - \exp(-t_0 S)\} / (S(LS + Z_0)) = 2V_0 \{1 - \exp(-t_0 S)\} / Z_0 \{1/S - 1/(S + Z_0/L)\} \quad (R12)$$

両辺のラプラス逆変換をすると、

$$I_T = 2V_0 / Z_0 \{ [1 - \exp(-t/\tau)] - [1 - \exp(-(t-t_0)/\tau)] u(t-t_0) \} \quad (R13) \quad (\text{図38参照})$$

但し、以下の関係が成り立つ。

$$\tau = L / Z_0 \quad (R14)$$

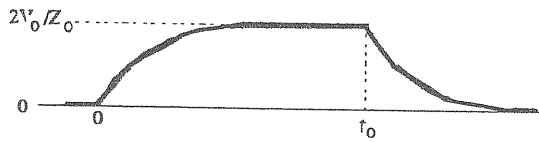
従って、 $t=\infty$ の時には I_T は V_0/Z_0 の2倍となる。

(R6)とラプラス変換を用いて、

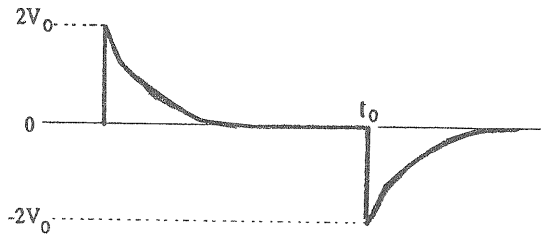
$$[V_T] = Z_T [I_T] = LS * 2V_0 \{1 - \exp(-t_0 S)\} / (S(LS + Z_0)) = 2V_0 \{1 - \exp(-t_0 S)\} / (S + Z_0/L) \quad (R15)$$

両辺のラプラス逆変換を取って、

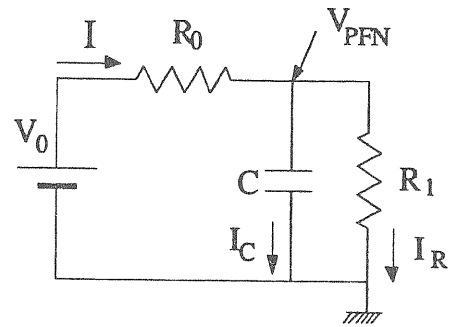
$$V_T = 2V_0 [\exp(-t/\tau) - \{\exp(-(t-t_0)/\tau)\} u(t-t_0)] \quad (R16) \quad (\text{図39参照})$$



(図38) コイルに流れる電流



(図39) コイル両端電圧



(図40) PFN充電回路

[9] DC充電用電源電圧とPFN電圧との関係

(図40) の回路に於いて V_0 は充電電源の電圧、 R_0 は充電抵抗、コンデンサー(C)はPFN用同軸ケーブルの持っている静電容量、 V_{PFN} はPFNの電圧、 R_1 はサイラトロンのアノードと各グリッドに付属されている分割抵抗の和である。この時、Cに流れる電流を I_C 、 R_1 に流れる電流を I_R とすると、

- 1) アノード分割抵抗電流

$$I_R = \frac{V_0}{R_0 + R_1} \cdot (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (R17)$$

- 2) コンデンサー電流

$$I_C = \frac{V_0}{R_0} \cdot \exp(-t/\tau) \quad (R18)$$

- 3) 充電抵抗電流

$$I = I_R + I_C = \frac{V_0}{R_0 + R_1} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_0} \exp(-t/\tau) \right) \quad (R19)$$

- 4) PFN印加電圧

$$V_{PFN} = \frac{V_0 R_1}{R_0 + R_1} \cdot (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (R20)$$

- 5) 時定数

$$\tau = \frac{C R_0 R_1}{R_0 + R_1} \quad (R21)$$