

加速器と電子管技術

高エネルギー加速器研究機構

福田 茂樹



Accelerator Laboratory

RF源としての電子管

主にクライストロン・ついでOTについて簡単な原理・現状・使用
状況・メンテなど紹介する



加速器に適したRF源

- 加速器のRF源に要求される因子

1. 周波数レンジ- 0.3 GHz以上の周波数帯ではクライストロンが最適のRF源である。0.3 GHz以下の場合、半導体増幅器、IOT 及び板極管などが使用される。安定度の面からMagnetronやTWTはあまり使用されない。半導体増幅器を除くとほとんどが電子管デバイスである。
2. 尖頭電力値—エネルギー利得と関連: 大きければ短いライナックですみ、コストが安い。印加電圧が高くなるので、管内、加速管内での放電を以下に抑えるかが重要。
3. 平均電力値—デューティサイクルやパルス繰り返し率と関連。CW加速器でも重要。
4. 利得—励振増幅器と関連する。高利得であることが望ましい。一般にクライストロンは高利得で50dBは容易である。一方IOTでは大体20~25dBである。板極管などは更に定利得である。電力用とロードでは5-6dB位しかない。
5. 位相安定性—クライストロンは電圧駆動型デバイスであり、印加電圧が安定であれば出力電力の位相もまた安定である。加速器では重要な項目。
6. システムの簡便さ、有用性、そして長寿命性: クライストロンは非常に成熟したデバイスでありこれらの要求を満たす。

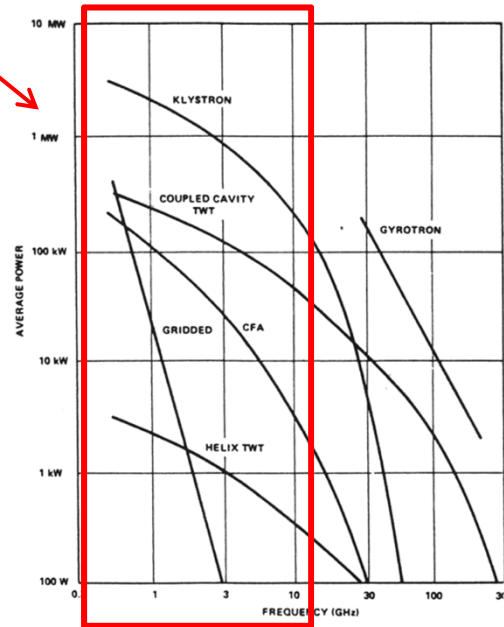


可能なRF源 - 現状

加速器に適した周波数範囲

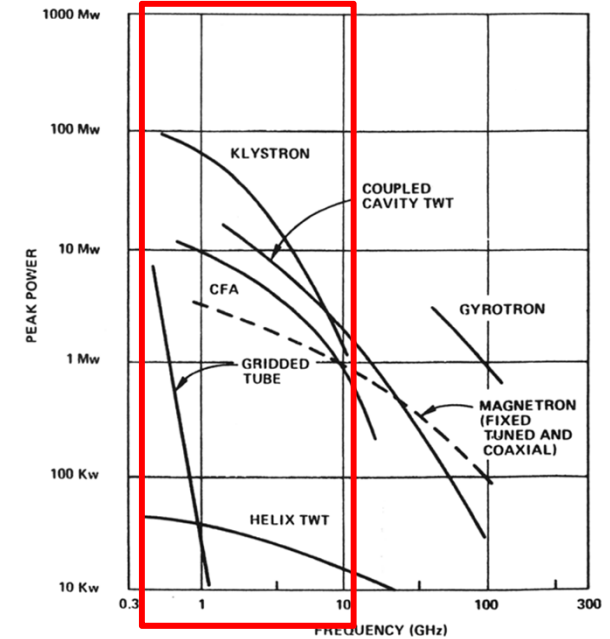
加速器用途の可能なRF源の中ではクライストロンが平均出力、パルス尖頭出力の点でも最適なデバイスである。

AVERAGE POWER CAPABILITY OF MICROWAVE AMPLIFIER TUBES



平均電力 対 周波数

PEAK POWER CAPABILITY OF MICROWAVE AMPLIFIER TUBES



パルス尖頭電力 対 周波数

各種RF源の比較

	Efficiency (%)	Bandwidth (%)	Gain (dB)	Relative Operating Voltage	Relative Complexity of Operation
Gridded Tube	10-50	1-10	6-15	Low	1
Klystron	30-70	1-5	40-60	High	2
Magnetron	40-80			High	3
Helix TWT	20-40	30-120	30-50	High	3
Coupled Cavity TWT	20-40	5-40	30-50	High	3
Gyratron	10-40	1	30-40	Low	5

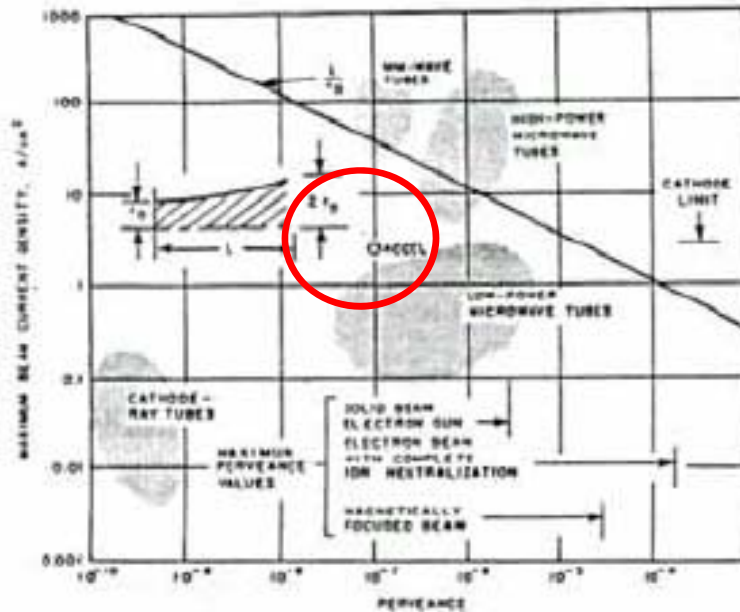


Accelerator Laboratory, KEK

電子管での重要なパラメーター; Perveance

Perveanceの定義

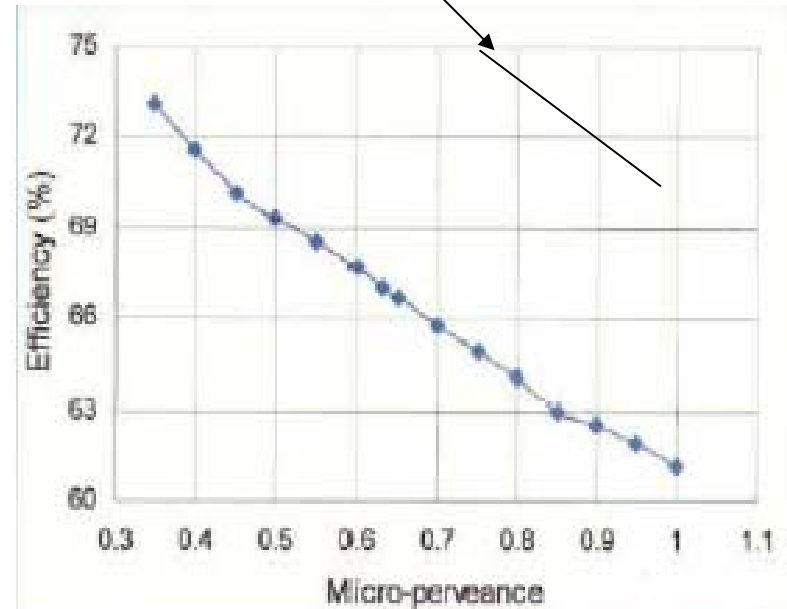
$$K(\mu\text{perv}) = I/V^{3/2} \times 10^6$$



これは空間電荷力を特徴付けるもので、電子の集群過程に深く関係する。効率を左右する。

サイモンの式

$$\eta(\%) = 90 - 20 \times K(\mu\text{perv})$$



低 perveance クライストロンは高効率であるが印加電圧は高い



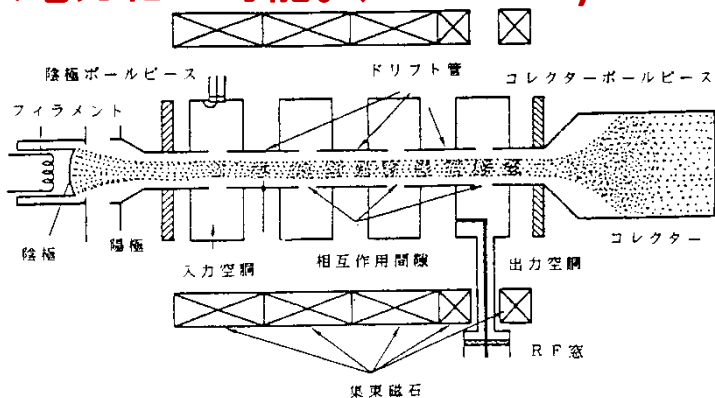
何故ライナックのRF源はクライストロンか

周波数が324MHz(J-Park)以上ではクライストロンがRF源として使用されている。

ゲインが高く(40~50dB)構成が簡単(右図)電圧駆動型で位相、振幅とも制御しやすい。

TWTのように広帯域ではないが加速器は狭帯域で十分。

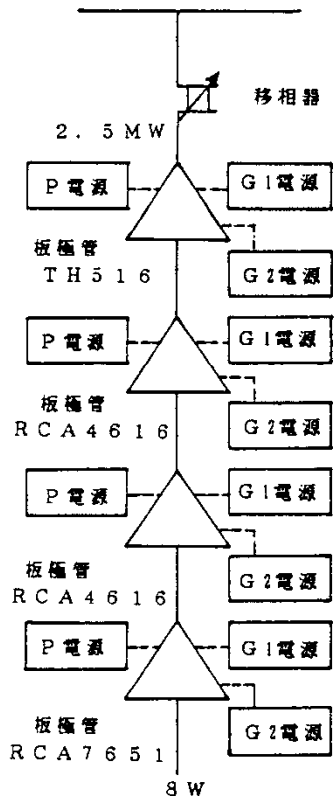
大電力化が可能。(~150MW)



クライストロンの概念図

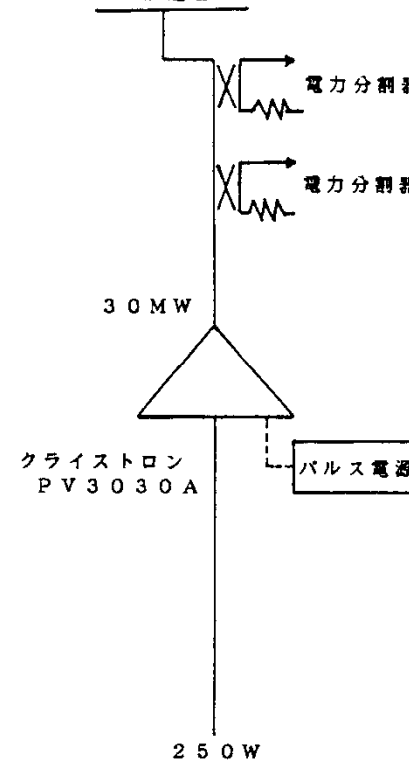
真空管式とクライストロンの場合のシステムの違い

(a) 陽子線形加速器
周波数 200MHz
加速管タンク



利得が低いために複雑な多段構成

(b) 電子線形加速器
周波数 2856MHz
加速管



単純な構成



Accelerator Laboratory

クライストロンの簡単な動作原理

クライストロンの構造と動作原理

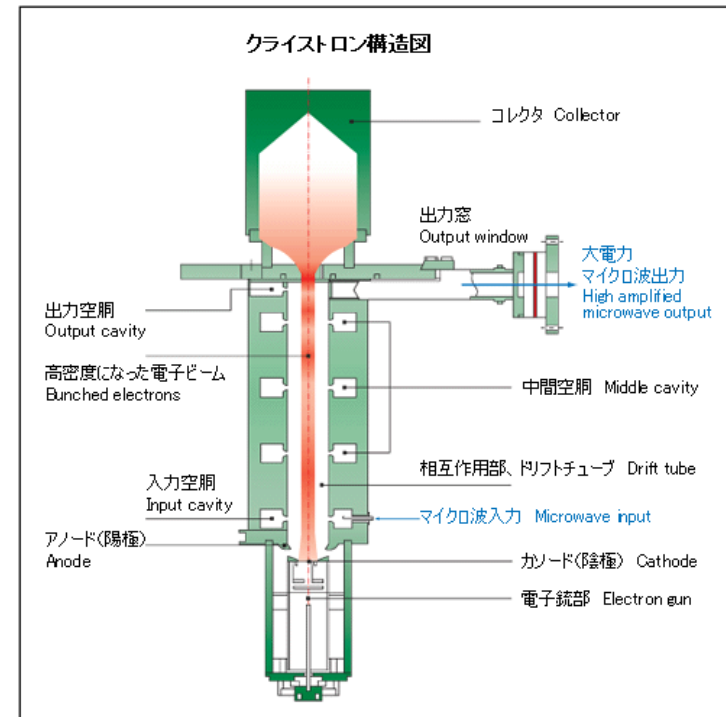
□ クライストロンの重要なパート

- 電子銃
- RF空洞
- ドリフト管
- RF窓
- ビームコレクター
- 集束磁石
- 冷却システム

□ クライストロンの基本的なメカニズム

- 電子は入力空洞で **速度変調** を受ける
- ドリフト空間で集群し密度変調に変わる
- 集群した電子は出力空洞で減速を受ける
 ---> ビームの失ったエネルギーはrf電力に変わる

注目: 加速器における加速メカニズムと逆のプロセスである
 加速器 ----> rf 電力がビームエネルギーへ変換





ビームの集群に関する理論

◆ クライストロンの基本的な動作機構(線形理論/小信号理論)

- 電子は入力空洞で **速度変調** を受ける
 - ドリフト空間で集群し密度変調に変わる
 - このバンチングのメカニズムに関しては、簡単な線形理論(小信号理論)が教育的である。
二つの違ったアプローチがある。
 - 弾道理論: 入力空洞で速度変調を受けた電子は他の電子と相互作用せず弾道のように空間を走行する。
 - 空間電荷波理論:
 - 電子全体が一種の波のように扱われる。全体が密度で決まる空間電荷力に支配される。従って走行するときに電子管の空間電荷による反発力などは自動的に含まれる。
- いずれも変調成分が小信号で変調の一次のオーダーの定式化

◆ よりリアリスティックな解析 (大信号解析)

- 出力空洞の近くでの電子と電磁場の相互作用についてはもはや小信号理論は成立せず、大信号解析による非線形の取り扱いが必要。
- 1次元解析: ディスク模型
- 2.5次元解析: 磁場との相互作用を含めたParticle in cell Analysis
- 3次元解析: MAFIA / MAGIC code
-



クライストロン: 弾道理論(1)

互いに相互作用しない個々の電子の運動の取り扱い

初期電子エネルギー:

$$\frac{1}{2}mu^2 = eV_0$$

入力空洞での電子の速度変調:

$$\frac{1}{2}mu^2 - \frac{1}{2}mu_0^2 = eV_1 \sin \omega t$$

$$u = u_0 \left(1 + m \frac{V_1}{V_0} \sin \omega t\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$u = u_0 \left(1 + m \frac{V_1}{2V_0} \sin \omega t\right)$$

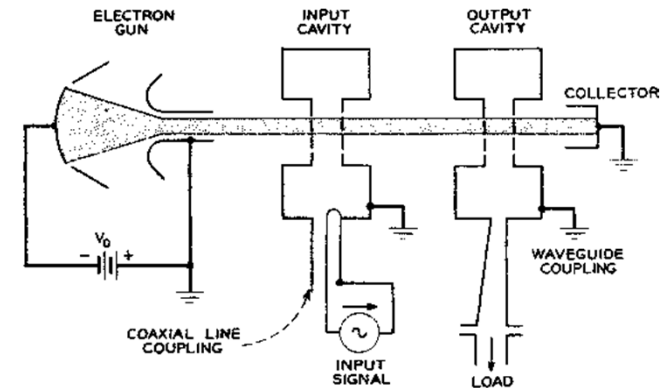
$V_1 \ll V_0$ を仮定: 線形化

第2空洞での到達時間 t_2 は 第1空洞(無限小の間隙を仮定)の出発時間 t_1 の関数である:

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{u} = t_1 + \frac{1}{u_0 \left(1 + \frac{mV_1}{2V_0} \sin \omega t_1\right)} = t_1 - \frac{1}{2u_0} - \frac{mV_1}{2u_0 V_0} \sin \omega t_1$$

又は $\omega t_2 = \omega t_1 + \theta_0 - X \sin \omega t_1$ 但し $\theta_0 = \frac{\omega}{u_0}$ (走行角)

$$X = \frac{\theta_0 m V_1}{2V_0} \quad (\text{バンチングパラメータ})$$





クライストロン: 弾道理論(2)

電荷保存則:

入力空洞における時刻 t_1 と t_1+dt_1 間の電荷は出力空洞における時刻 t_2 and t_2+dt_2 間の電荷に等しい

$$I_1 dt_1 = I_2 dt_2 \quad \text{with} \quad \frac{dt_2}{dt_1} = 1 - X \cos \omega t_1 \quad \text{and} \quad I_2 = I_1 \frac{dt_2}{dt_1}$$

従って

$$I_2 = \left| \frac{I_1}{1 - X \cos \omega t_1} \right|$$

出力空洞における電流 I_2 をFourier変換する

$$I_2 = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n(\omega t_2 - \theta_0) + b_n \sin n(\omega t_2 - \theta_0)]$$

$$a_n = (1/\pi) \int_{\theta_0 - \pi}^{\theta_0 + \pi} I_2 \cos n(\omega t_2 - \theta_0) d(\omega t_2) \quad b_n = (1/\pi) \int_{\theta_0 - \pi}^{\theta_0 + \pi} I_2 \sin n(\omega t_2 - \theta_0) d(\omega t_2)$$

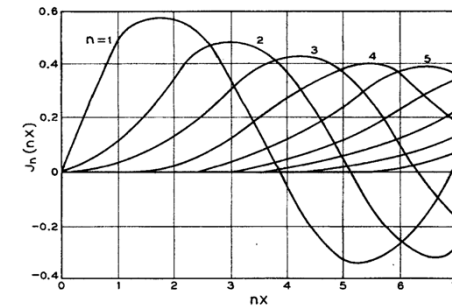
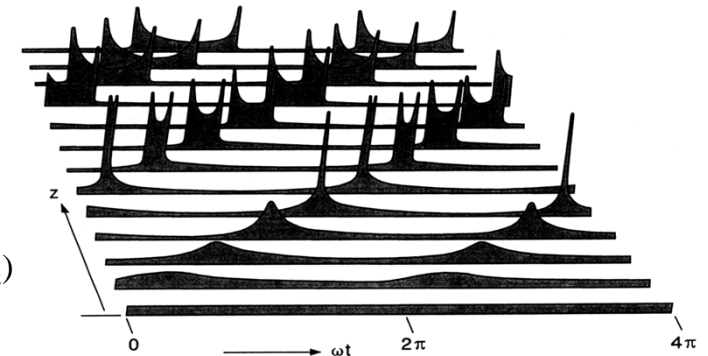
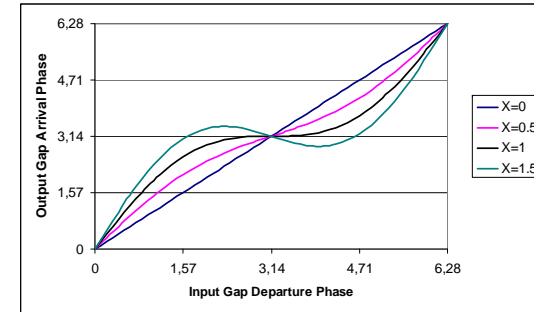
$$a_n = (I_0/\pi) \int_{-\pi}^{\pi} \cos n(\omega t_1 - X \sin \omega t_1) d(\omega t_1)$$

$$b_n = (I_0/\pi) \int_{-\pi}^{\pi} \sin n(\omega t_1 - X \sin \omega t_1) d(\omega t_1) = 0$$

$$I_2 = I_0 + 2I_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(nX) \cos n(\omega t_1 - \theta_0) \quad \text{with } J_n \text{ Besselfunction of the } n\text{-th order}$$

$$I_{\omega} = \frac{2 I_0 J_1(X)}{\cos(\omega t - \theta_0)}$$

$$P_{\omega} = I_{\omega} V_{\omega} = 2 \times 0.58 (I_0 / \sqrt{2}) (V_0 / \sqrt{2}) = 0.58 P_{Beam}$$



Bessel functions of various orders. The maximum value of J_1 occurs at $X = 1.84$ and is equal to 0.582.



クライストロン: 空間電荷波理論

- 空間電荷が電子の集群を妨げる働きをする
- 広がった電子ビームに摂動を与えると次の**プラズマ周波数**を持つ振動が励起される.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e \rho_0}{m_0 \epsilon_0}}$$

- 次式で与えられる2個の位相定数を持つ波の重ね合わせとなる

$$\beta_{e1} = \beta_e (1 + \omega_p / \omega) \quad \text{および} \quad \beta_{e2} = \beta_e (1 - \omega_p / \omega) \quad , \quad \text{但し} \quad \beta_e = \omega / u_e$$

- 従ってそれぞれの速度 $u_{e1} = u_e / (1 + \omega_p / \omega) \quad u_{e2} = u_e / (1 - \omega_p / \omega)$
- 及び群速度は $u_g = d\omega / d\beta_e = u_e$
- 速度変調は次式で与えられる波長距離ごとに現れる. $\lambda_p = 2\pi u_e / \omega_p$

この式から空間電荷を考慮すると最適なドリフト管長又は空洞間距離はプラズマ周波数(クライストロン電流)と電子速度(クライストロン電圧)で決まる.それは次式で与えられる

$$\lambda_p / 4$$

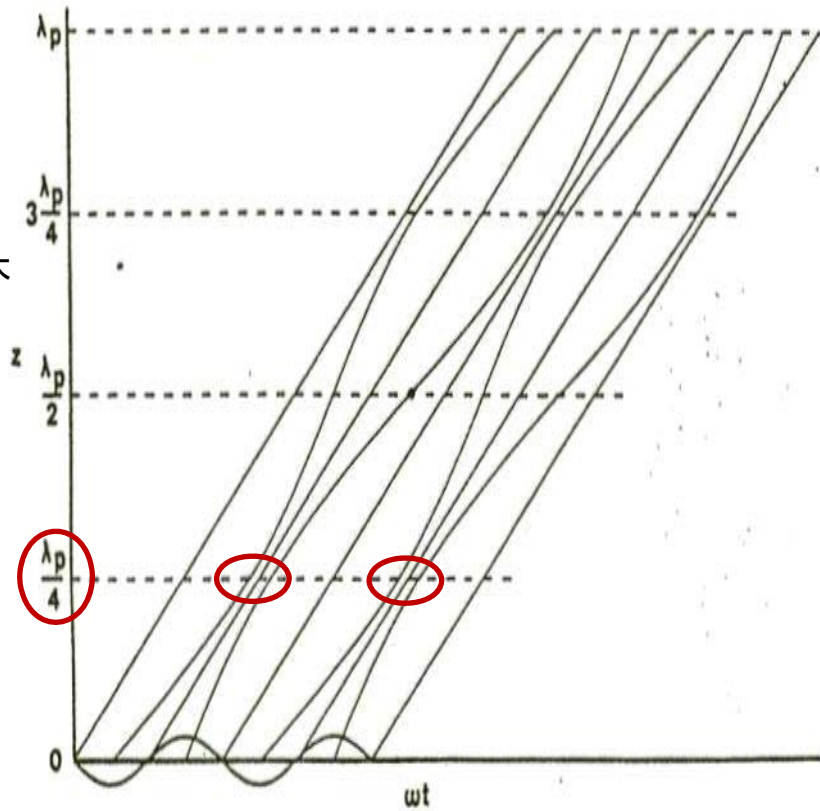
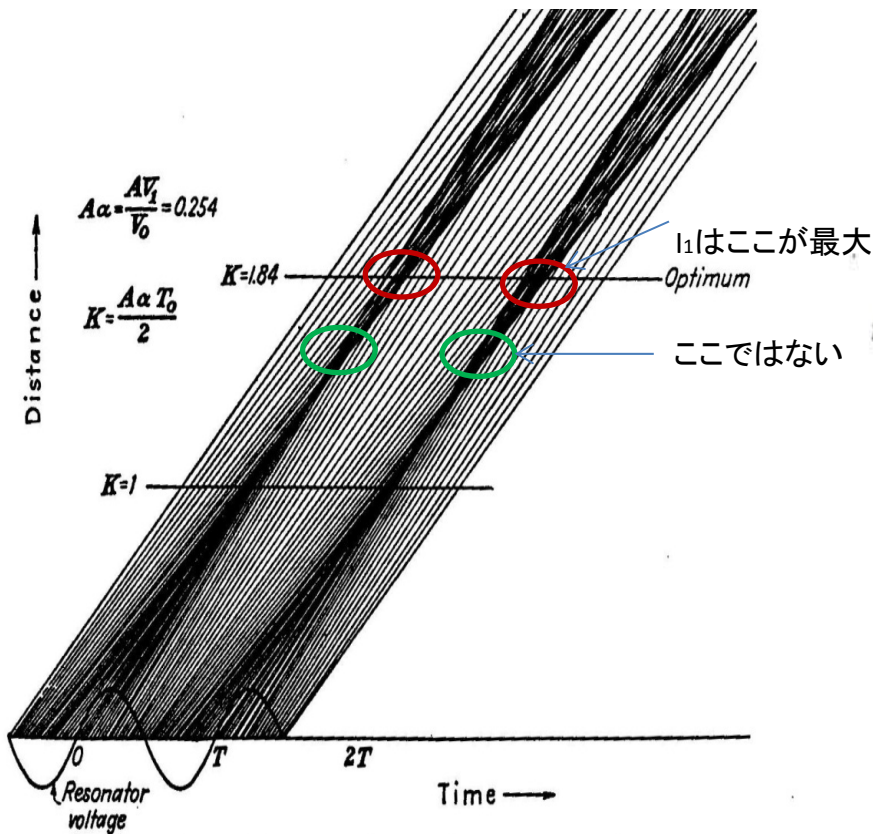
もう少しリアリスティックなアプローチ:金属導体中の電子の空間電荷は鏡面電荷のために実効的に減る.それを組み入れるためにプラズマ周波数低減因子を導入する.この分だけ減った**低減プラズマ周波数(波長)**でクライストロンの最適な長さが求まる.



2つの解析手法によるビームトレースの比較

弾道理論的手法
空間電荷の相互作用は考慮せず

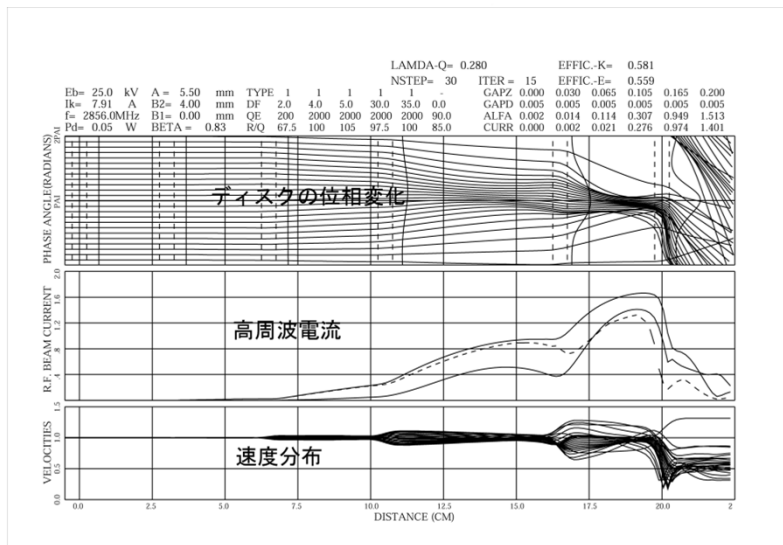
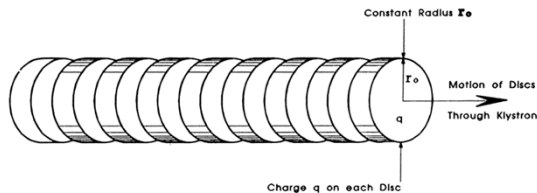
空間電荷波理論的手法
空間電荷による反発力を考慮



クライストロンのよりリアリスティックな解析

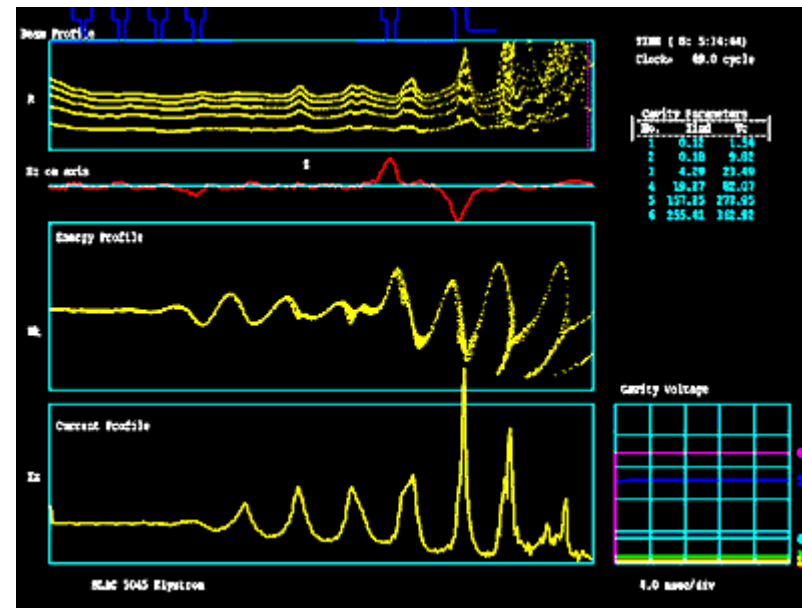
一次元ディスク模型

- ビーム径が一定の電子ビームは分割された一連のディスクで表され、弾道的なふるまいで動く。
- ディスク間では空間電荷力による相互作用を考慮
- 空洞と電子ビームの層が作用は適当に考慮する
- 集束磁界の影響は考慮しない



2.5 次元 PIC プログラム

- 電子ビームの粒子は3次元的取扱い
- 電磁界方程式を軸対称のもとで解く
- 空間電荷力と集束磁界効果は含む
- リアリスティックな手法でシミュレーションと試験結果は比較的良好に一致している。



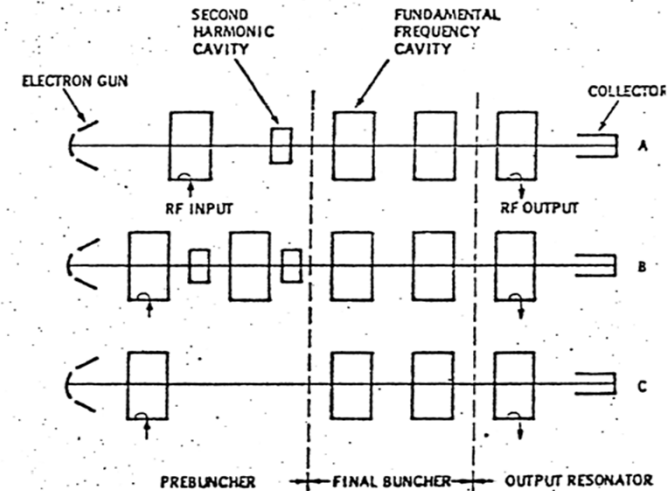
クライストロンの大電力化・耐圧・効率の向上

- 最近のクライストロンの動向
 - 大電力化に伴い印加電圧を上げる方向（例えば印加電圧が400kV～500kV）
 - 電子銃、絶縁セラミックの耐圧の向上が求められる
 - 電子銃陰極、陽極の低電界型設計
 - 電子銃の陰極材料の処理の適切化による電極の劣化の防止
 - 連続波クライストロンの高電力化に伴い効率の向上を目指す。
 1. 高調波空洞の導入
 2. マルチビームクライストロンの開発



クライストロンの効率向上のアプローチ

- クライストロンの効率は高デューティ用途及びCW加速器用途のクライストロンにとって重要である。どうすれば高効率化できるか？
 - **低パービアンスビームクライストロンは効率が**高い(低電流であるために空間電荷による反発が小さい)
 - しかし通常の設計では(単一ビーム管)低パービアンスとは高電圧・低電流を意味し、高電力用途では、電圧が高い場合は電子銃近傍での放電の危険性がある
 - 多ビーム化して電圧は高くしない設計手法がある。(近年盛んになった手法)
 - **高調波空洞(または等価な効果を持つ空洞配列)を用いる方法**
 - 鋸歯状の電圧変調は高効率を与えるという基本的な事実
 - 2倍3倍・・・という高調波に分解できる
 - 最も一般的な方法はクライストロンのバンチング部に2倍の高調波空洞を用いる方法
 - もっと高次の高周波空洞を入れた複雑な配置のある
 - コンピュータシミュレーションにより、広帯域同調クライストロンや効率80%にも及ぶクライストロンが製作された



高調波空洞を用いた高効率クライストロンの概念

等価な別法: 長いドリフト管を用いて、走行中での、空間電荷による反発でスプリットさせ、実質的に2倍の高調波成分を取り込む

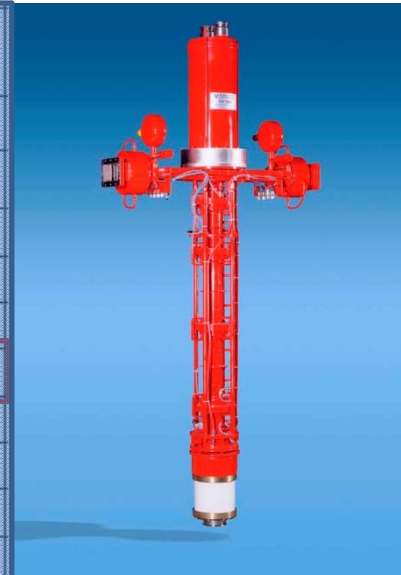


多ビームクライストロン

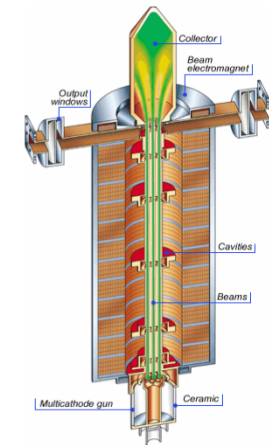
- 低パービアンスクライストロン
=> 効率は高いが電圧も高く、耐圧の面で難がある
- 低パービアンスだが電圧も高くないクライストロン
=> 効率は高いが、出力電力も小さい
- 解** - たくさんの低パービアンスビームを持つクライストロン
=> 個々のビームは高効率なので全体としても高効率となる

各社のマルチビームクライストロンの仕様の比較表

仕様項目	単位	TH1801 Thales	E3736 Toshiba	VKL-8301 CPI
運転周波数	MHz	1300	1300	1300
最大 RF 先頭出力	MW	10	10	10
平均出力電力	k W	150	150	150
ビーム電圧	k V	110	115	114
ビーム電流	A	130	132	131
効率	%	65	>65	65-67
RF パルス幅	ms	1.5	1.5	1.5
飽和利得	dB	48	47	47
電子ビーム数		7	6	6
ビームパービアンス	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	3.5	3.38	3.4
空洞数		6	6	6
カソードローディング	A/cm^2		<2.1	<2.0



THALES TH1801





クライストロンの実際

- クライストロンは加速器のRF源としては幅広く用いられており、必須のものである。
- 一方で**非常に高価**なものである(ちょっとした家一軒分以上の値段がする。サイクロトロン^注の値段より一桁高い)が取り扱いを間違えるとすぐに破損する危険性がある。不注意な運転で寿命が想定より短くなることもある。
- 電源を含めた設計、動作点の選び方、運転の仕方でビームの性能が大きく変わるので注意が必要である。
- KEKでの経験からクライストロンの扱い方、維持管理、寿命管理等について紹介したい。
- 古くから使用している(特に海外製の)クライストロンに関しては代替がきかないものもある。その辺の事情にも触れる。
- 多少の破損に対してゲリラ的な対応で凌いで、調達に備えることも必要であり講演者の経験等も紹介したい。



私に関連したクライストロン

短パルスクライストロン(電子ライナック用)

- S-バンド 50-MW Klystron for KEKB (KEKで開発)
-> **Toshiba** and **MELCO**
- S-バンド 80-kW Driver Klystron for KEKB (KEKで開発) -> **MHI** and **MELCO**
- S-バンド 150MW クライストロン/5045 クライストロン -> **SLAC(USA)**
- S-バンド 50MW クライストロン-> **IHEP(中国)**
- C-バンド 50MW Klystron for Super KEKB
-> **Toshiba** developed it for JLC.(新竹)
-> 互換性のある管を KEK で設計、**MELCO** で製作、進行波出力空洞
- C-バンド 80kW Driver Klystron for SuperKEKB
-> **MELCO** が気象用を改変
-> 使用的に合わず断念、計画頓挫
-> マルチビーム型を提案設計
- X-バンド 75-MW PPM Klystron for GLCTA
-> **KEK & Toshiba**

CW クライストロン(ERL用)

- 1.3GHz 300kW クライストロン → **Toshiba**
- 1.3GHz 30kW クライストロン → **Toshiba**
- IOT 30kW (**CPI**)、20kW (**L3**)

長パルスクライストロン(陽子ライナック用及び ILC用等)

- 1.3GHz 5MHz クライストロンの自主開発 (JHF)-失敗
- 432MHz クライストロンの試験 (JHF)
- 324-MHz 3-MW Klystron for JPARC
-> **Toshiba** design and developed. KEK 開発試験と発振究明.
- 972-MHz 3-MW Klystron for JPARK
-> **Toshiba** design and developed. KEK 開発試験と発振究明.
- L-band 5-MW Klystron for STF(ILC)
-> STFのために **Thares** クライストロン.
- 10-MW MBK を導入 (**Toshiba**)
- DRFSを提唱—800kW 1.3 GHz クライストロンの開発

クライストロンの特性

- チャイルドラングミュアの法則

空間電荷制限領域における電圧とエミッション電流の間には次の関係式が成立する

$$I = P_{\mu} V^{3/2}$$

但し P_{μ} はパービアンス、 I はエミッション電流、 V は印加電圧である

- 出力電力は

$$P = I \cdot V = P_{\mu} V^{5/2}$$

- 電圧の変動で出力がどう変化するかは次式で与えられる

$$\frac{\delta P}{P} = \frac{2.5 P_{\mu} V^{3/2} \delta V}{P_{\mu} V^{5/2}} = \frac{5}{2} \frac{\delta V}{V}$$

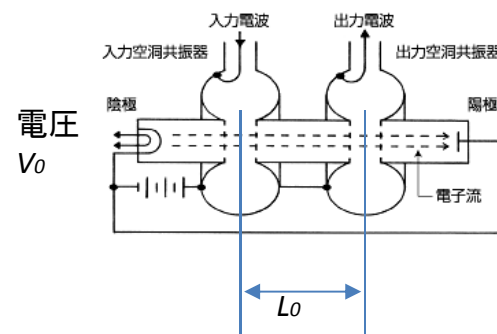
- クライストロンのインピーダンスは次式で与えられる

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{P_{\mu} V^{3/2}} = \frac{1}{P_{\mu} \sqrt{V}}$$

従ってクライストロンのインピーダンスは電圧により変化する。従って動作点ごとに電源との整合条件が変化する。パルス立ち上がり時、立下り時のどのトランジェントな時にも影響する

クライストロンと移相・安定度など

- 加速器においては位相が重要な役割を果たすが、線形加速器では波乗り加速の原理から特に位相が最も重要な因子である。
- 一方でクライストロンは原理から分かる通り電圧駆動型の電子デバイスである。電圧の変動は入力空洞から出力空洞までの電子走行時間を変化させるために、その変化が位相として現れる。
 - これはライナックのビーム要求から逆算して、パルス電源の電圧変動に対する仕様を決める
 - パルス電圧のパルス平坦度のリップルに対する仕様も決める
- クライストロンの出力電力の位相を変える要因にはさらにいくつかの要素がある。そのうち重要なものはクライストロンのバンチャー部の冷却水温度の変化であり、これが少なからず位相を変化させる要因となる。





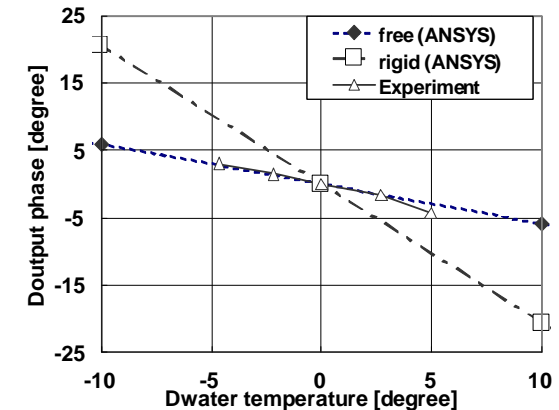
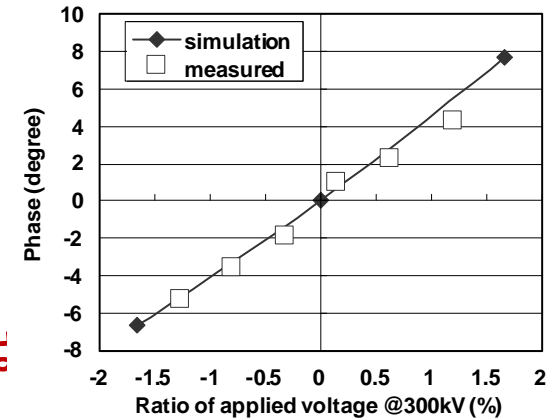
クライストロンからのRF電力の位相変動

- ライナックではRFの位相安定度は非常に重要である. というのも、位相変動は直接加速エネルギーのばらつき ΔE に関係するからである.
- Since クライストロンは電圧駆動型デバイスであり、印加電圧で電子の速度が決まり、空洞間を走行する時間で位相が決まる. 前のスライドの図より

$$\Delta\theta = \frac{2\pi L_0}{u_0} = \frac{2\pi L_0}{c \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{eV_0}{mc^2})^2}}} \quad \text{及び} \quad \frac{\Delta\theta}{(\Delta V/V)} = 6-8 \quad (\text{deg}/\% \Delta V)$$

- 通常のSバンドクライストロンでは印加電圧が大体300kVレンジである. この時の位相変動は大体 **6-8 deg./(dV/V%)** で与えられる.
もしエネルギー変動が $\Delta E / E = 0.1\%$ 必要であるならば **電圧変動と平坦度は 0.025% 必要である.**

- クライストロンのボディの冷却水温度の変動もまた位相変動をもたらす.
これは利得空洞(第1~第3空洞)の同調周波数を変化させ、電子の集群中心を元の値からずれるために起きる..
 - この変動は大ざっぱに(右図参照)
0.5-1 度.位相/1 度 水温変化
電子ライナックでのクライストロン冷却は $\Delta T = 0.2^\circ\text{C}$ 以下が必要





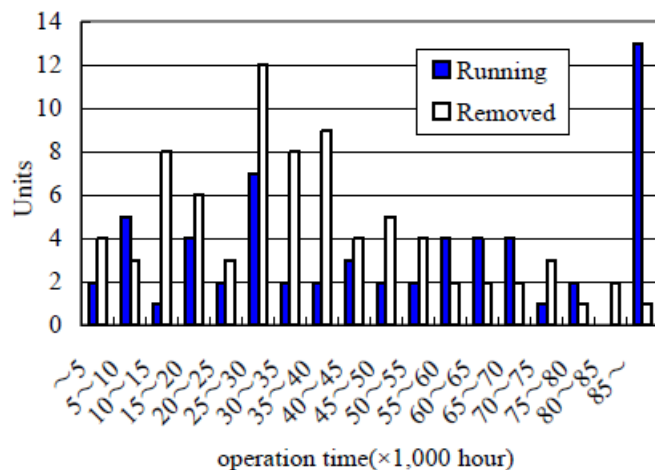
KEKにおけるSバンドクライストロンの寿命

生産年月日	合計	準備中 その他	準備中	その他	待機中 稼動中	待機中	稼動中	平均運転時間	使用 不能	エミッ ション	窓	その他 の故障	寿命	総運転時間累計	MTBF
	Total	Unused			Living				Failed			other		Cumulative	
								(hours)					(hours)	(hours)	(hours)
1993	14	1	0	1	4	3	1	32,458	9	1	6	2	30,275	402,307	44,701
1994	13	2	0	2	2	2	0	63,565	9	2	4	3	18,224	291,146	32,350
1995	23	1	0	1	4	0	4	97,647	18	11	3	4	25,268	845,409	46,967
1996	15	0	0	0	7	2	5	80,879	8	5	2	1	32,622	827,126	103,391
1998	20	1	0	1	10	5	5	66,310	9	2	3	4	40,107	1,024,063	113,785
1999	15	0	0	0	9	3	6	63,793	6	2	4	0	22,182	707,232	117,872
2000	12	0	0	0	7	1	6	63,883	5	3	0	2	26,402	579,191	115,838
2001	12	0	0	0	11	3	8	38,015	1	1	0	0	39,804	457,967	457,967
2002	12	0	0	0	10	2	8	25,103	2	1	0	1	42,051	335,134	167,567
2003	9	0	0	0	8	0	8	19,442	1	0	0	1	14,190	179,132	179,132
2004	5	0	0	0	5	0	5	10,559	0	0	0	0		52,794	
2005	4	2	2	0	2	0	2	14,326	0	0	0	0		28,653	
2006	4	3	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0		0	
2007	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
2008	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
2009	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
2010	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
2011	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
2012	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
Total	158	10	5	5	80	21	59	48,275	68	28	22	18	28,392	5,730,153	84,267

最近の寿命の主因はエミッション減であり、人間でいうところの老衰に当たる。近年どんどん寿命が延びているため予備管が多く新規購入はやめている。新しいロットほどMTBFは伸び15万時間を超えている。

KEKにおけるSバンド クライストロンの故障内容

クライストロンの運転使用時間分布@Up to2012



現在使用中のクライストロンの平均運転時間
～49000時間
故障クライストロンの平均運転時間
～36000時間

クライストロン
が原因

2000年以降のクライストロンの交換の原因

年度	アセンブリ交換数	交換理由							
		エミッション減少	クライストロン発振等	クライストロンヒータ断線 高周波窓リーク (撤去後確認)	集束電磁石不具合	絶縁油劣化	PI不具合	その他	
2000	9	2	0	0	1(4)	0	0	4	2
2001	9	1	1	0	2(2)	2	0	3	0
2002	10	0	2	0	1(2)	0	3	3	1
2003	8	2	0	0	1(1)	3	0	2	0
2004	6	3	0	1	0(2)	1	0	0	1
2005	6	2	0	1	0(1)	2	0	1	0
2006	5	3	0	0	0(1)	2	0	0	0
2007	7	1	1	0	0(1)	1	0	0	4
2008	1	0	0	0	0(0)	1	0	0	0
2009	13	0	0	0	0(0)	9	0	0	4
2010	1	0	0	0	0(0)	0	0	0	1
2011	4	0	0	1	1(0)	1	0	0	1
計	79	14	4	3	6(14)	22	3	13	14

クライストロン
以外の原因

一般的なクライストロンの寿命を決める要因と対策

• クライストロンの寿命を決める要因

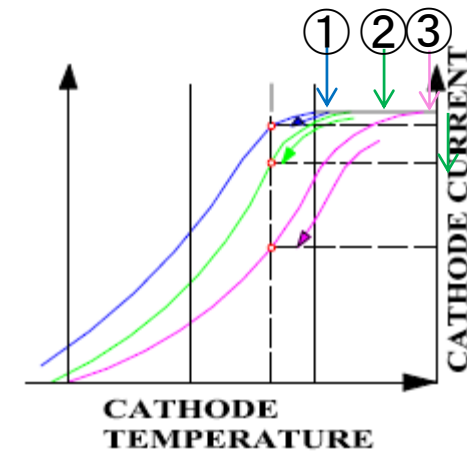
1. **エミッション減少** :長時間の使用により陰極から電流が取れなくなる
2. **RF窓のトラブル** : RF放電によるピンホール(尖頭値が高い)、クラックや割れ(熱的要因)、アルミナへのTiN(O)膜不良でロス増加
3. **真空リーク** :セラミック部の破損(高圧碍子、窓、ヒーター部碍子、IP碍子)、ロー付け部からのリーク
4. **放電、耐圧劣化** :電子銃部陽極-陰極間での放電(電子銃の処理不良などによる)、電子銃部高圧碍子での放電(内部の汚れ、絶縁油の汚れ、水での混濁)
5. **ヒーター関係の故障** :ヒーター断線(衝撃に弱い)、ヒーター短絡
6. **RFに関連した放電** :出力空洞間隙での放電、Multipactor
7. **Mechanical Failure** :製造時のミス、ロー付不良、磁石やタンクとの嵌合性の悪さ
8. **RFの不安定** : 寄生発振、イオン振動、パルス欠け
9. **内蔵イオンポンプのトラブル** :IP端子内導体のショート、IPエレメントの汚れ
10. **コレクターの溶融** :集束磁界不良(特に集束磁界外部)

- 新規に開発した場合には上記のいずれも起きうるが、完成度の高いクライストロンでは1、2が主な要因となる



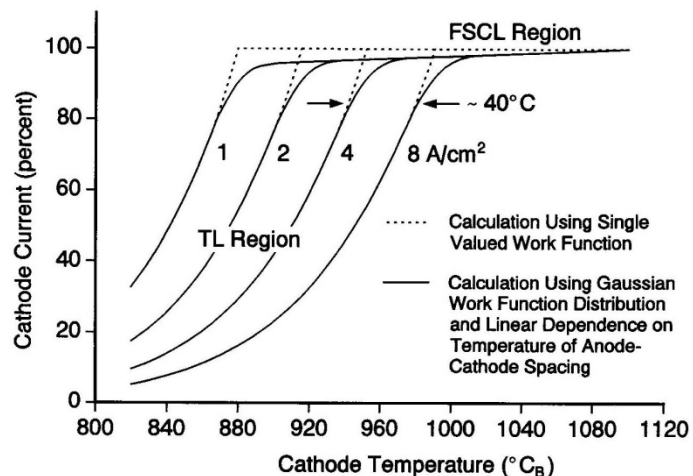
Klystronとメンテナンス:ヒータ調整の仕方①

- クライストロンの故障原因は多岐にわたるが最終的に多くのトラブル原因が解決されたクライストロンではカソードからのエミッション電流が減るいわゆるエミ減が寿命を決める。
- クライストロンに使用されるカソードは熱陰極型でありヒーター電流を流して陰極面を適切な温度にしている。高すぎるとBa等の蒸発を促進し寿命は短くなる。低すぎると空間電荷制限領域で使用できなくなり動作が不安定となる。
- **いつでもエミッション電流を最適に保つことで寿命を長期化させることができる。**
- 使用時間が長くなると陰極表面の活性度が下がるために(右図で、青→緑→ピンクと変化する)最初と同じ温度でもエミッション電流は減少する。すなわち、使用時間が長くなると少しずつ動作点を上げ(ヒーター電流を①②③と増加させ)適切な値に保つ必要がある。
- 適切な値とは所定電圧動作時に所定のパービアンスが得られることである。
- 方法はヒーター電流を低い所から上げながらエミッション電流を測る簡単なものであるが、1点1点ごとにカソードが温度一定になるまで15分程度待つ必要がある。この調整は若干注意を要する。ヒータが低いときは温度制限領域となりライン型パルス電源では不整合状態になり電圧が変化するうえに、異常に電圧が上がり放電を招くこともある。



Klystronとメンテナンス:ヒータ調整の仕方②

- 横軸にヒーター電圧又はカソード温度、縦軸にエミッション電流をとったプロットは電子銃カソードの活性度とヒーターの動作点決定のために重要な情報を与える。これをMiram Plotと呼ぶ。



TL: 温度制限領域

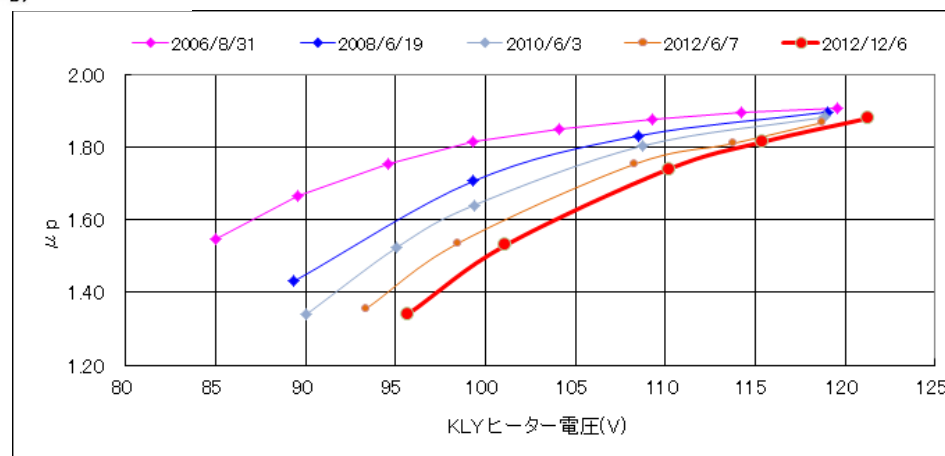
FSCL: Fully空間電荷制限領域

動作点はFSCL領域に入って数%
温度の高い所にする。

右図は実際のMiram Plot 例 @ 300kV

1点の測定には温度平衡に達するのを待つ
ので15-20分程度、**1クライストロンで半日
程度の時間を要する。**

右図から時間が経過すると肩が高いほうに
移動する。





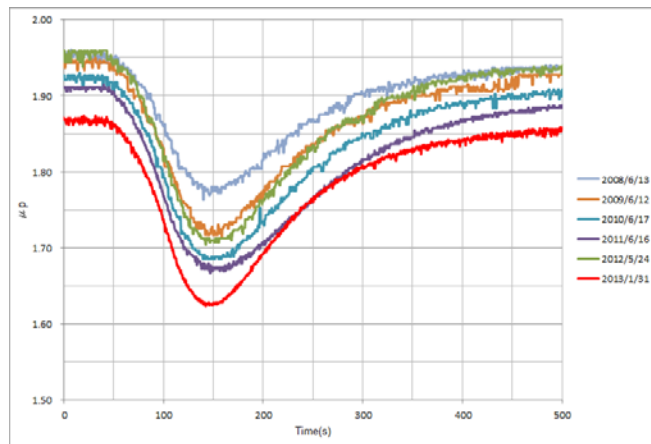
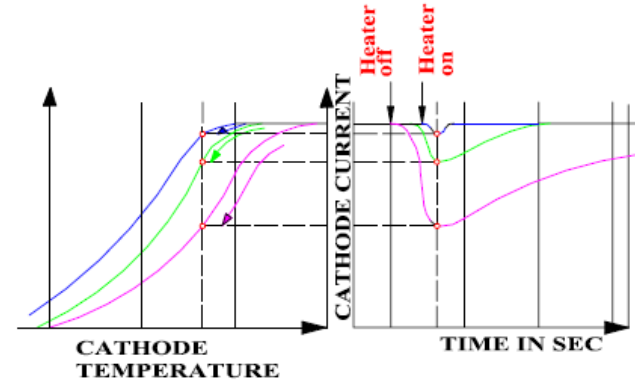
Klystronとメンテナンス 迅速な測定・ディップ法

- ディップ法の原理

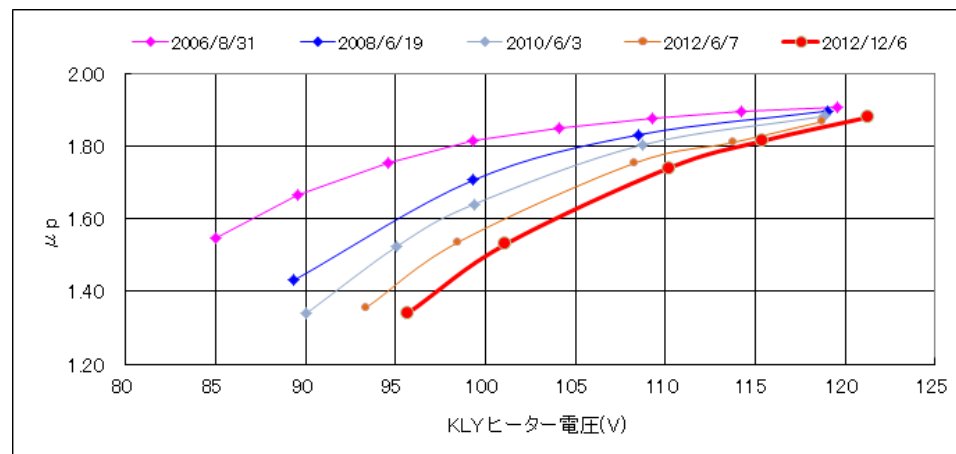
高電圧をかけてエミッションを取っている状態でヒータをオフするとカソードの温度が下がってエミッションも下がる。一定の時間の後ヒータを再度点灯するとエミッションは再び増える。これを記録するとディップの深さからカソードの活性度が推定できる。

ディップが深い → カソードの寿命が近い

On-Off時間は5分程度、1クライストロン30分以内で測定終了で迅速な測定が可能である。



ディップ測定の一例



対応するエミッション測定 (Miram Plot)

Klystronを長時間使用した時の 末期的な症状

- クライストロンを長時間使用した時いろいろと不都合な症状が散見され始める。これは主にカソードからのエミッションの劣化に伴うものと推察される。
 - ① **電子銃近辺からの放射線量が増加する。**追加の鉛シールドなどを設置しないと放射線安全上問題がでる。
 - 原因:長時間使用の結果、又は前述のヒーター調整で温度を上げたといった結果としてBa等の蒸発が促進されビーム収束電極やアノードに付着しそこからエミッションが非正規の軌道を通ることによる。
 - ② **発振が起きる。ダイオード発振**と呼ばれるものでRF励振入力が無くてもRFが発生する。KEKの経験ではモノポール型でなくAnnular方向に節を持つ高次の発振が起きた。
 - 原因:カソード表面のエミッションむら。非一様な分布に起因すると思われる。
→対策は無し。交換するべきだがどうしても運転したければヒーターを下げて温度制限領域で使用(但し出力は下がる)
 - ③ 本体部分の腐食による**水漏れ**が散見され始める
 - ④ **RF窓からX線が出始める。**これも放射線安全上から追加シールドでRF窓をカバーする必要がある。
 - 原因:窓のアルミナ材料の経年変化で局所的なマルチパクターなど起きている可能性あり

Klystronとメンテナンス 窓の管理

- RF窓の両側の雰囲気は真空—真空の場合には窓材であるアルミナにTiN(O)の薄膜を作り、Multipactorを防ぐ。TiN(O)の薄膜の最適化は現在はKlystron Vendorに任せてよい。
- KEKではクライストロン納入の際に、試験時の窓表面の写真を義務付けている。KEKでアセンブリを組み立て試験をするときはビデオカメラで発光の有無を確認している。
- クライストロンの下流に更に導波管窓を設置しているが、この窓はレゾナントリングで必ず大電力評価を行っている。
- RF窓にピンホールが開いて真空リークしているときは、すぐ外部を引き戻し出来ればそのまま使用。外して予備にするときは短時間で引き口付きメクラフランジをつけて外部を真空引きし、かつIPで内部も引いて圧力が上がらないように試みる。(再流用の可能性を持たせる→関連のトラペン参照)
- 導波管高周波窓は定期的に交換している。
主に漏えいX線が大きくなったのを目安とする。

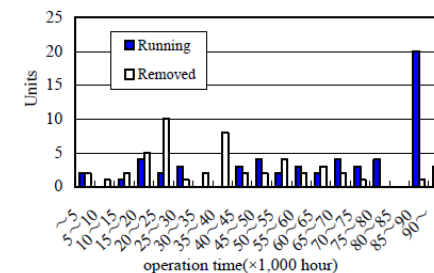


図4：導波管高周波窓運転使用時間分布

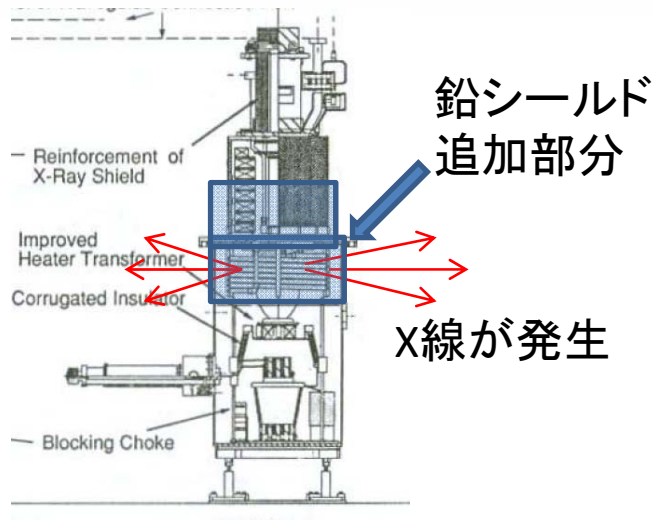
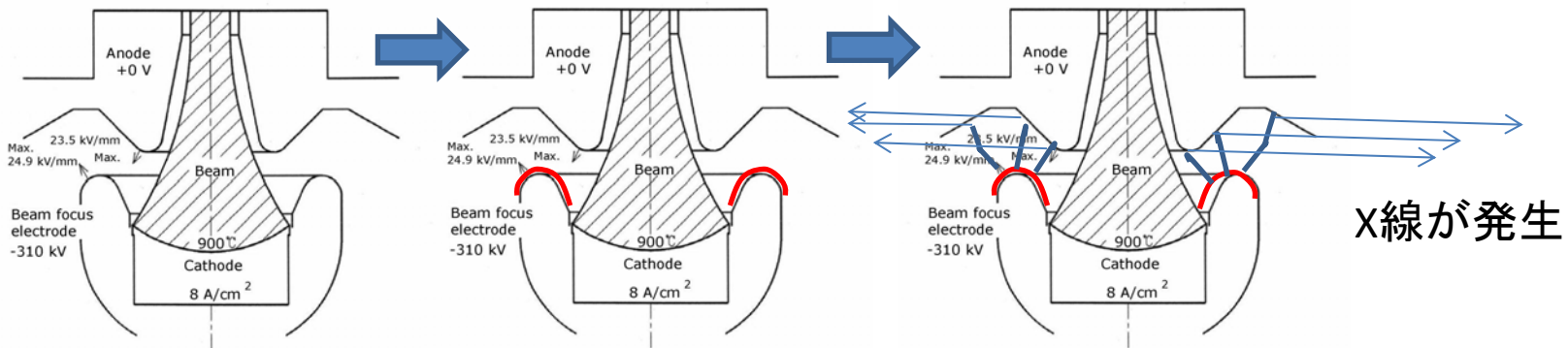
Klystronとメンテナンス 窓の管理(続き)

- RF窓の両側の雰囲気は真空—大気/ガスの場合には、それが加圧かガス置換(大気圧)なのかで取り扱いが異なる。一般に周波数が低いクライストロン(VHF/UHF帯)では導波管が大きく3MW位までは乾燥空気/窒素雰囲気である(J-PARC、KEKB)
- 通常長パルスまたはCWの場合が多く、窓での発熱が無視できない。外部から風を送って窓のセラミックに直接吹き付けて冷却するのは効果的である。同軸型窓の場合は特に内外導体の水冷とともに風を送るのは有効である。インターロックとフィルターに留意すること。
- 5MW(1msパルス/ILC-Lバンド)以上ではSF₆ガスが有効であるが、最近は大気汚染を避けるために使用されなくなった。乾燥窒素/乾燥空気の加圧雰囲気を使用する。
- 加圧に耐えうる気密型フランジの使用が不可欠である。機密型フランジに関してその気密性は自分で確認することが望ましい。

Klystronとメンテナンス カソード劣化と放射線増加

陰極物質Baが蒸発して付着

そこからのエミッションがアノードへ





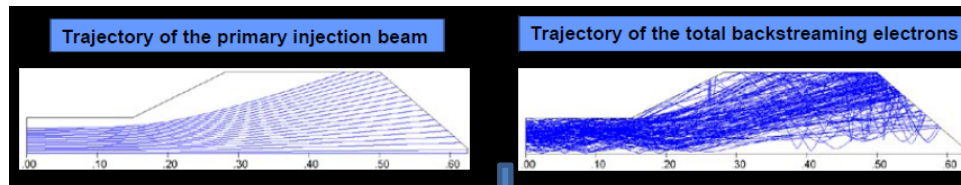
予期せぬトラブルとしての発振

- クライストロンを開発する場合に往々にして遭遇するのが発振である。演者が経験したものでは以下の発振がある。完成品を購入する場合はエミ減時のみ注意。

① **ダイオード発振**: 電子銃のGun領域のカソード・アノード間のインピーダンスが負になりそこに発振のモードが重なった時に生ずる自励発振。通常は軸対称のモノポール型発振であるが場合によってAnnular方向に節を持つ高次の発振もある。

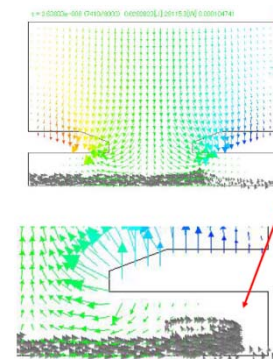
- a. 例1 S-band 150MW クライストロン (日米協力:SLAC) 周波数1.5GHzくらい
- b. 例2. S-band 30-50MW PV3030(50) (MELCO) 周波数1.5GHzくらい
- c. 例3. L-band 5MW 自作 (KEK-MHI) 周波数
- d. 例4. S-band 30MW PV3030 (MELCO) 周波数 3.4GHz位 TM02 モード型

② **コレクターからの戻り電子による発振 (J-PARC:324MHz 3MW)**



戻り電子が入力空洞まで逆走して発振: ほぼ同一周波数、非常に強い発振

③ **ドリフト管発振 (J-PARC:972MHz 3MHz)**
Gain空洞の一部の高調波成分とビームが結合
(軸方向に節を持ち、強くブレーキがかかり空洞にエネルギーをためる)



f=1448MHz
発振周波数
=1458MHz
電子が逆走
壁に当たる

④ その他いろいろ

クライストロントラブル・真空関連

- クライストロンは電子管デバイスであるために真空的なトラブルがあると致命的である。以下に2～3の例を述べる。対症的な方法で凌ぐこともできるので冷静に対処するのが肝要。
- よくある真空トラブル
 - ① ロー付け不良による真空リーク
 - ② 放電あるいは不用意に物体をぶつけることによるセラミックの破損、またはピンホール
 1. 電子銃部高圧セラミックの碍子 : 絶縁油レベル低下によるピンホール、磁石等を含めた外部コロナシールの不良、不適切な設計
 2. ヒーター電極用のセラミック碍子 : 工具等をぶつける
 3. RF窓 : RF放電によるピンホール、クラック
 4. イオンポンプの高圧導入端子部セラミック : イオンポンプケーブルの脱着時のミス、窓の導波管への接続時に滑って工具をぶつける。
 5. コレクターが本体から浮いている場合の絶縁セラミック
 6. 同軸構造出力導波管のRF窓 : 取付時複雑なために内導体に力がかかる
 7. ビームの収束不良による内部導体の溶融 : イオン収束など、コレクター外部磁界の不適切な場合



クライストロントラブル・真空関連・余談

- もし虎の子のクライストロンに穴が開いてRF源が無くなりそうな状況に落ち行った時 → ちょっと待って下さい。
- RF源が0本である時と、調子が悪いが取り敢えず生きている場合では大きな違いがある。
 - ① 0本の時: 電子はそのクライストロンが接続された加速管でRFを誘起(減速される: マイナス効果)
 - ② 例えば本来50MWのクライストロンがあったとする → 加速への寄与 $\sqrt{50\text{MW}}=7$
 - ③ 真空トラブルを措置して半分の電力が出せたとする → 加速への寄与 $\sqrt{25\text{MW}}=5$
半分に減っても0本よりずっとましである!

- 例えば運転中に

オイルタンク中の絶縁セラミックにピンホールが開いたらしい
又は
RF窓にピンホールが開いたらしい

あわてずにヒーター通電を止める(カソードへのダメージを避けるため)

冷却されたらとにかく窓に穴が開いた場合IPを強力電源で稼働させ、外部からも排気する。内部真空度を良くしてやると窓の前後が真空-真空なら再度使用可能

絶縁セラミックの場合、バックシール(大きいときはアラルダイトでも可)で穴をふさぐ。使用可能である。定格の半分くらいで運転してみよう。

RF窓に穴の開いたクライストロンを窓の外から排気しながら海外の研究所に寄付したことあり。

クライストロントラブル・水及びそれと関連したこと

- 長年使用してきたクライストロン及びそのアセンブリでは、経年変化により冷却水周りのトラブルが増えてくる。10年ぐらいをめどにシステムのチェックが必要である。
- クライストロン本体の冷却水トラブル
 - クライストロンのコレクター冷却やボディ冷却の冷却水経路にガスねじ(G型/PT)などで接続している場合、使用しているテフロンシールテープの放射線劣化により水漏れを起こす。定期的メンテ及びテフロンシールテープから**カーボンシールテープ**への変更をする。
 - 比較的Swagelock型水接栓は信頼度が高い。**たけのこ型接線とホースの繋ぎはSwagelockのホース以外は厳禁**
 - 本体のロー付け部の不良による水漏れ/KEKではGねじテーパー部のねじ込のストレスに起因した割れによるものが最近頻発され始めた。真空中に絡まない場合は補修可能。
- 電磁石にの水漏れ
 - 電磁石内部のモールド内で水ヘッダーと各パンケーキ又はその冷却との繋ぎのロー付け部から水漏れ→コイルの対地絶縁抵抗の低下で使えなくなる
ヘッダー一部を内部から外に引き出して外から修理可能な構造にする
- ソケット・オイルタンク内の水漏れ
 - 油中にある冷却水経路がロー付けでつながっている場合：経年変化で相当の確率で水漏れを起こす。**油中でのロー付けは厳禁**。Swagelockはより信頼性高い。
 - 海外製などで入手不可能な継手の経年変化による水漏れも頻発する。出来れば日本で入手可能な信頼性のあるものに事前交換する



クライストロンメンテ・絶縁油管理・清掃

- クライストロン・ソケットタンク内の管理、及び絶縁油の管理も重要で経年変化に耐えるようにしなければならない
- 絶縁油の取り扱い
 - 大概のタンク内の電気的な設計基準は絶縁油の絶縁耐圧30kV/2.5mmに準拠しているが、新品油は60kV/2.5mm位あるので問題ない。
 - 但し、水分の混入(乳濁)やごみ埃の混入、気泡の混入等で絶縁油耐圧は下がる。再利用絶縁油の場合はフィルター付きポンプなどを使用する場合あり。
 - 真空脱泡は必要か？
 - KEKでは、ポンプによる注入と1昼夜放置、注入後真空脱泡、真空にして絶縁油を吸い込む等いろいろな形を採用している。大きなタンク(特に四角の形状)では補強場ない場合の排気は危険である。注入後の1昼夜以上の放置で気泡を少なくする程度で経験上はOKである。
 - 構造内にエアだまりが出来るような設計では、エア抜き穴の追加。
 - 定期的な油交換、タンク内の清掃は重要である。その際に内部の点検、水漏れの有無などを確認する。10年以上ではタンク内にスラッジやぬるが溜り良い環境とは言えない。絶縁油の色つき(黄色っぽい色)、酸化なども好ましくないので定期交換する。
 - 放電による煤やトランスの局部短絡による金属ペーストの蓄積なども起こりうる。これらに気付かないとクライストロンの絶縁碍子を破損することになる。これらも絶縁油が古くなって誘起する場合があるので定期点検は必須である。

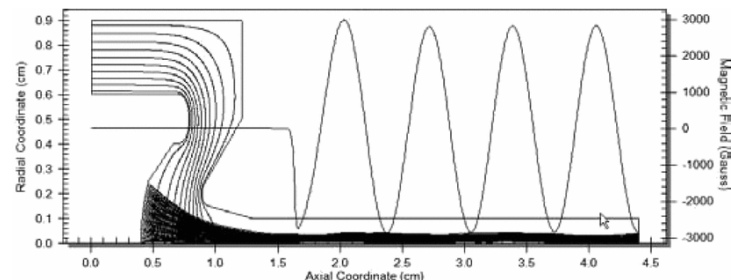


周波数の高いクライストロンの の先行き①

- 現在ライナック用途で一番多く使用されているのはs-バンドクライストロンである。しかしより加速器の小型化、高電界加速を求めて周波数の高い領域が検討されている。SACLAでは50MW-cバンドクライストロンが80台使用され始めた。ここではさらに高い周波数のクライストロン(Xバンド)について先行きを考察する。
- Xバンド50MWクラスはLC計画の常電導版で開発された(SLAC)。主な特徴は以下の通り
 1. 大強度ビームを遅く収束させなければならないが、そうすると強い収束磁場が必要でその電力がRF出力より大きくなる。それを避けるために永久磁石による交番磁界(PPM収束)を採用
 2. 出力空洞のエネルギー密度が大きく電界も高いので放電が発生しやすい。それを避けるために進行波型多空洞出力空洞を採用
 3. 出力窓の電界強度および放電を防ぐために円筒モード(TE01)を採用し前後にモード変換をつける

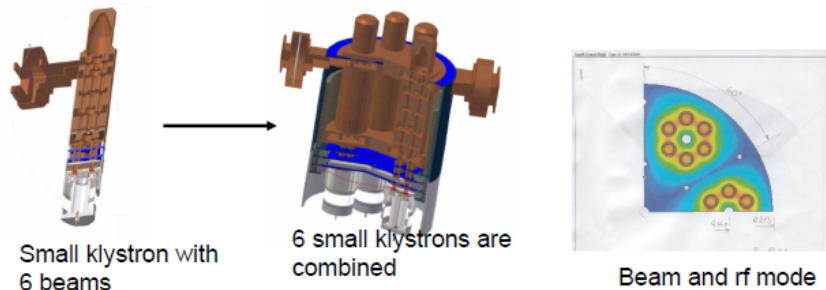
周波数の高いクライストロンの の先行き②

- Ppm収束はそこそこ成功(右図)したが、周期境界条件から生ずるパスバンドから外れたビームはすべてアノードに衝突しドリフト管を痛める。
- 出力空洞付近の高電界による放電、それに付随する不安定性などで長パルス(数 μ 秒)での信頼性に欠ける。
- 完成度を上げるためには更なるR&Dが必要である
- (右図はkekで製作したPPMクライストロンである)



Xバンドの先行き(私の独断的予想)

1. PPM収束を避けるためにはマルチビーム化が必要である。この単一ビームの収束に必要な磁界が十分低いような磁界にして、その分ビーム数を増やす。このドリフト管径は十分細くする
2. 相互作用空洞はマルチビームと相互作用する
3. 出力空洞の設計が少し難しい、
4. 下図: Xバンドで設計を試みたマルチビームクライストロン例



自分で組み立てよくアセンブリの ことを知ろう

- RF源一式を会社から購入しBlackboxでそのまま使用している場合も多いと思われるが、高い信頼性のもとで使用するためには、中身を理解し出来れば自分で組み立てや清掃など1度はしてみるべきである。
- 事故やトラブルは些細なところから生じて大きなトラブル(クライストロン破損)につながる。
 - 実例:クライストロンのヒーター端子などのバネ接触不良による放電と炭化によるタンク内汚染
 - 目視または触って接触を確認
 - 実例:外部の冷却水の些細な水漏れを見もらす→これがタンク内に混入し絶縁油の耐圧を下げる
 - 実例:運転中にタンク付近での光や音に注する。放電音、金属音、パルスの刻む音が時々欠ける場合はタンク内で異常が生じているかもしれない。
 - 実例:特に海外製のものを購入した際に注意しなければならないのは、代理店の人がシステムを理解しているかということ必ずしもそうではない。大きな会社(ex.日立、三菱、住友etc.)が組み立てたとしても10年後はその技術者はいなくて対応できない場合がある。Vendorの技術者を呼ぶ場合には高額のコストが掛かる場合がある。
 - 経験がなく困っている場合は同業の技術者に相談する事も一手段である。KEKではすべて自分で組んでいるので相談に乗ることはできる。大学支援事業もあるので協力は出来るであろう。

KEKでのクライストロンの受け入れからの取り扱い一覧①

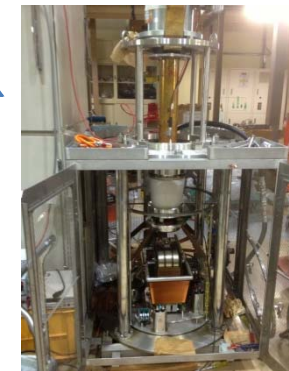
以下に述べる手順は一番本数の多いSバンド50MW管に関してであり、その他の場合は一部プロセスを省略

1. 納入時検査

- ① 外観検査、メーカーによっては振動計のチェック、ヒーター導通試験、IPを接続して真空度確認
- ② 保管は**保管用架台**に取り付け常時IPで排気

2. 試験ベンチでの各種試験

- ① 低圧エミッションベンチでDC1kVを印加してエミッション試験：
1kVでのMiramカーブを取得し製造会社のデータと比較する。
- ② パルストランス(PT)を取り付けた**模擬ソケットタンク**で接触確認と高さ調整を行い、またヒータトランス(HT)の一次二次較正データを記録する
- ③ 実際に使用するタンクにPTセット、絶縁油注入、給電やモニター等の接続確認、アセンブリの完成、**試験ベンチ**で高圧印加のもとで定格のRF出力を確認しデータを取る。
 - a. 印加電圧対出力RF電力カーブ
 - b. 入力RF電圧対出力RF電力カーブ
 - c. 300kVエミッション測定
 - d. 利得が取付先のセットに合わない場合は集束電磁界を調整して希望利得に合わせる。
 - e. RF出力窓の発光具合を確認する



クライストロンの調達・修理と将来の見通し

- クライストロンは高価である
 - クライストロンの値段のベースは本体の大きさや周波数ではなく、基本的に技術者にかかる費用で決まる。
 - (参考)KEKのSバンド80kWパルスクライストロンと50MWクライストロンで値段は拮抗。
 - 数量が出るSバンド50MWクラスで1000～1500万円、LバンドCWクライストロンやILC用MBKでは5000万円以上する。
 - 一方で不注意な取扱いをするとすぐ破損する。
 - 不注意な取扱いは簡単に真空リークにつながる。
 - 振動等はヒーター断線につながる
 - 過大なヒーター給電、過大な入力励振電力等も性能劣化につながる。
 - 長年使用してきたクライストロンが不調でもその型のモデルが廃止され代替品がないこともあるし、Vendorそのものが廃業している場合もある。国内メーカーに相当品がなく新規設計では非常に高価になる。
 - 海外では電子管に関する修理ビジネスが盛んである。裏返すと軍や民間など圧倒的にニーズが多いためであろう。国内でも日本の会社を補完する意味で経験者などでこのような企業の立ち上げが必要かもしれない

クライストロン以外の加速器におけるRF源

- クライストロンは内部にいくつかの空洞を持っており、その大きさは波長に比例する。従って周波数が低くなるとサイズも大きくなる。現実上はサイズから来るリミットは大体300MHz位である (See: CERN)

板極管・4極管等の真空管

- 陽子ライナックの低 β セクションで、例えば200MHzを採用しているところでは4極管 (or 3極管) が使われている。G電極にもRF回路を要し使い方は複雑である。最集団の電力段では利得が低く、6dB程度にもなり多段増幅システムとなる。製造メーカーは現在非常に限られている。

IOT(Klystrode)

- 100-1300 MHz レンジの周波数帯で出力が 100kW (peak or cw)くらいでは、IOT (又はKlystrode)が使用されている。60%程度の高効率が達成可能である。飽和特性を示さずLLRF制御のもとでも高効率が期待できる。定利得であるために励振段に適切な増幅器が必要である。

半導体増幅器

- IOTと同じ周波数帯で将来性のあるデバイスである



IOT (Klystrode)について

*最近日本の加速器でも使用され始めたIOTの
ついて簡単な原理・使用状況・今後について
紹介する*



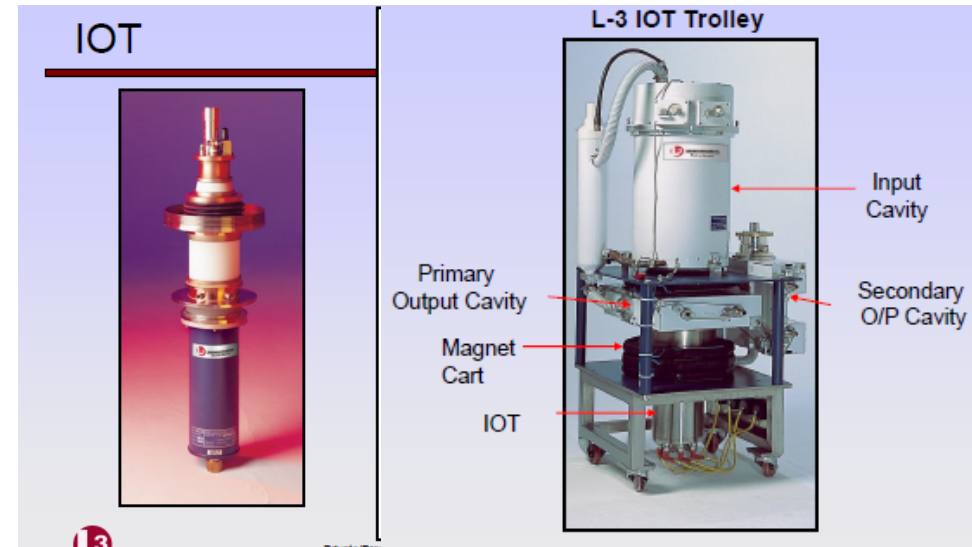
UHF帯の中電力増幅器 としてのIOT

- 1960年台にTVサービスが始まって以来UHF増幅器に対するニーズが高まった。主な電子デバイスはKlystron、半導体、4極管であった。Pyrolytic graphiteのgridが開発された1990年台からIOTが次第に盛んになった。
- 欧米では放送局の送信管としてIOTが多く使用された。一方日本は送信は殆ど半導体であったためにIOTが国内生産ベースには乗らなかった。
- IOT(Inductive Output Tube)は別名Klystrodeといい、3極管構造に出力空洞を加えた構造をしている。陰極・Grid間にRFが発生し電子を速度偏重する。そのまま取り出したバンチが出力空洞に達してRFを出す。
- 特徴:単純な構造、高効率管、低利得が難点



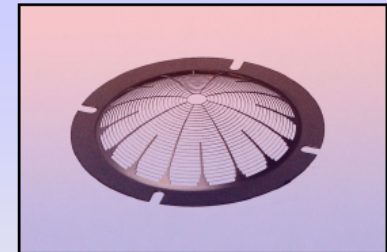
IOTの特徴①

- IOTは基本的に3極管でK-G間にRFがかかり、電子が変調される。Gridから出た電子はすでにバンチ状であり、これが出力空洞に達してRF電力に変換される。
- G-K間で減速された電子の逆走を防ぐためにはRFの1サイクルの時間に電子が走る距離に比べてG-K間距離が十分小さくなければならない（電子走行角が小さい）。
- 必然的にグリッドが熱陰極に近くなり高熱でも変形のしないグリッド材質が必要である。Pyrolytic Graphiteの採用でこれが解決された。
- 入力空洞はカソード電位と同じく高電圧。



IOT - Pyrolytic Graphite Grid

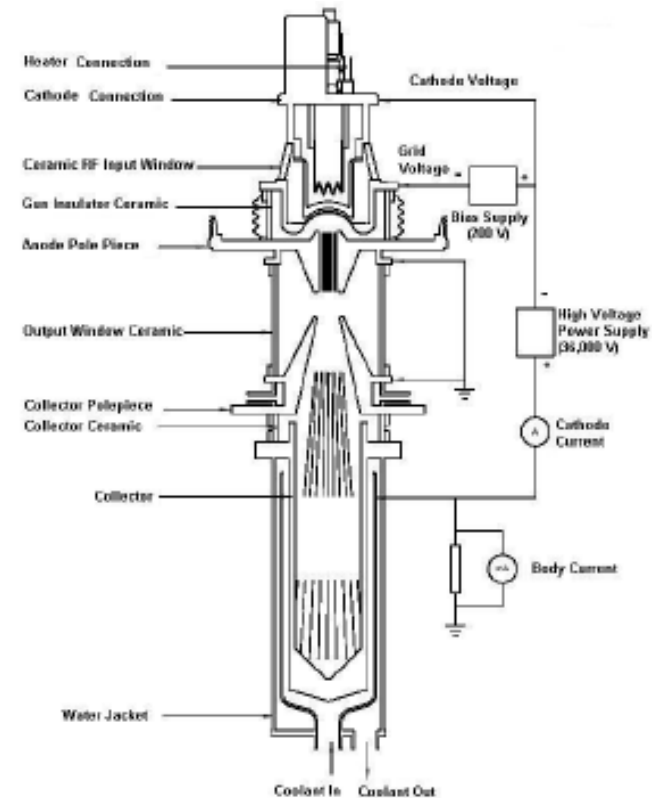
- Enabling technology for high power operation of IOTs and CEAs.
 - Thermal conductivity greater than that of silver.
 - Electrical resistivity comparable to copper
 - Thermal expansion is negligible.
 - Grid maintains its geometry at all RF powers.





IOTの特徴②

- IOTはK-G間にかかるRFで変調される。変調の大きさは入力電力に比例し、それに伴って出力が増加する。
- 初めからバンチングしていてRFへの変換効率は高い。効率は60%くらいになる。
- 飽和特性が顕著でなく入力RFの広い範囲で効率が低い。これは長パルス運転やCW運転でのLLRFのフィードバックをかける際にメリットとなる。
- クライストロンと比べると2空洞構成であるために利得が低い。大体20~25 dB (Cf. クライストロンは53 dBくらい)。
- 入出力空洞の周波数を可変にすることで動作周波数にも幅が持たせられる。
- G-K間隔は電子走行角を小さくする要求と放電耐圧の問題から、高い周波数に不向きである。実質的な上限周波数は1.3GHz前後である。



IOTの断面図

IOTと加速器・今後の展望

- 世界的にCW用途、中電力用途ではIOTが加速で使用されている。
- 最近KEKでもERL (Energy Recovery Linac)計画がありここでは20kW弱のRF源を大量に使用するために(～500台)IOTが注目されている。cERL試験ベンチでLバンド16kW・IOTと35kW・IOTを購入し試験に供した。
- 国内メーカーにもIOT開発を持ちかけた(動機はパイログラファイトが調達できなくなったため):現状:MELCOでLバンドIOTを開発・ μ sオーダで30kW出力に成功。CW的には熱的問題で中断。グリッドはTWTで実績のあるMoを使用している。
- IOT採用に関する損得勘定
 - IOTの値段(L帯CW16kW:～750万円/L帯CW35kW～1500万円)
 - それ以外に電源(～2000-2500万円) cf 半導体アンプ(電源不要)
- 加速器用途としてのIOTの将来:より大電力化か?(100～300kW)
MWクラスになるとクライストロンにかなわないのではないか
大電力化へのチャレンジ: CPIにおけるマルチビームIOTの試み



30kW IOT 1.3GHz for ERL Use



30kW IOT (CPI)

Specification

- RF output power (CW) 5 - 35 kW
- Heater requirements..... max 9.5 A
- Beam voltage 15 - 34 kV
- Beam current (max output) 1.6 A
- Grid bias voltage with respect to cathode - 80 to -150 V
- Drive power <500 W
- Conversion efficiency (max power) 64.0 %

原研のものはCHK1320W

Typical Operating Characteristics

Voltage(V)	Current(A)	Drive(W)	Output(kW)	Gain(dB)	EFF(%)
24	0.79	208	10.0	17	52.7
25	1.10	293	15.1	19	54.9
26	1.46	381	20.6	21	54.3
32	1.35	192	25.7	21	59.5
34	1.39	263	30.2	21	63.8



Accelerator Laboratory

ご清聴ありがとうございました