

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



本学会でのお話の内容

- 電子管の昨今
- 関連する電子管簡単な原理・現状・メンテなど、加速器で使用される電子管の主なものをユーザーサイド目線でお話ししたい。
 - 熱電子カソード
 - ◎サイラトロンとその取扱い方
 - ◎クライストロンとその取扱い方
 - その他〇IOT/(板極管/Magnetron/Gyratron)



電子管技術の現状

- 電子管は現在時代遅れの的で世間一般では使用頻度は少なくなってきたが、加速器分野では、半導体で代替えされない部分でまだ電子管又は関連技術が使用されている。

(用途的住み分け: 電子管: 高電圧にかかわるもの ⇔ 半導体: 大電流)

- 主な用途:

- 熱電子の発生: 電子銃カソード

TVのブラウン管の衰退により熱電子銃陰極の調達が非常にやりにくくなった。加速器用途では海外メーカーが頼り

- 大電力・大電流SW素子: サイラトロン

- 大電流マイクロ波源: 板極管・IOT・クライストロン・ジャイラトロンその他のデバイス

(多くの会社が撤退した。米国では日本よりも電子管分野は健闘している。あまり廃業しているところは少ないようである。Military-useの関係もあるように思える)

電子管技術が廃れたことによる 問題点

- 電子管メーカーが採算取れなくなり、廃業、部門縮小等で生産を中止：メーカーが減少（日本）
- 一方で高電圧下でのデバイス運転による、SWや大電力マイクロ波源発生の用途では電子管のニーズは続くと思われる。 ⇔ 世の中一般の経済的ニーズと加速器のニーズの間にずれが生ずる
- このままの現状が続くと、数少ない会社も撤退し、調達が不可能になる恐れがある。
- どうするか??
- 何れ必要な電子管デバイスは加速器のように自分で設計して製作する時代が来るかもしれないそれは可能か？→設計は可能である！
 - 電子管デバイスの動作原理等は物理的な内容が豊富である。
 - 加速器研究者にとってなじみ安いものである⇒ 一方で若い人は寄り付かないために知識不足に陥りやすい。
(従来から電子管分野は会社任せ、ブラックボックスで扱ってきた)
- 一方で電子管全盛時代に確立した技術の維持は難しい。これは信頼性のある電子管デバイスを作るのが難しいということを意味する。(金属工学、表面物性物理など)
- 現在ですら、昔のような信頼性の高いデバイスの入手が段々困難になっている。
勝手使用したデバイスで同じ会社の同じ型名でも昔と同じでない！！
- カタログに有っても問い合わせると製造中止となっている(この辺の事情は海外でも同様である)



Accelerator Laboratory

電子銃・カソード

電子管と言えはまず必要なコンポーネントは電子銃カソードである。
熱陰極、例陰極いろいろあるがその辺の事情はどうか

ブラウン管の消滅が与えた影響

- TV業界は現在プラズマDisplay・液晶Display・有機LEDと変遷が激しい。ブラウン管が消えて久しい。このような状況で手頃に入手できる熱陰極カソードの製造メーカーは日本では激減している。
- 私は熱陰極カソードを使い加速器の教材などを作ったことがあるが、その時に使用した安く入手できる熱陰極カソードメーカーは既になく入手困難である。
- 電子加速器では電子銃が必須でありRF電子銃が盛んになったとはいえ、熱電子銃へのニーズは高い。この分野では米国をはじめ日本でもカソードの供給メーカーは健在であり、十分に供給の要望にこたえてくれているので心強い。米国では電管分野が日本と比べて廃れているとは言えない状況である。Military Demand 等幅広い需要がある事、若い研究者・技術者もそれなりにいる点が日本と違うところである。
- 米国では Eimac 社、Spectramat社、Semicon社、Heatwave社 等がカソードを供給している。国内でも東芝社を始め、製造しているところはいくつかある



現在電子管や加速器に使われている カソード

- 20～30年前に使用されていた**酸化物被覆陰極**はその比較的低温でのエミッション特性が良くすぐれたものであったが、真空雰囲気中の残留ガスに敏感であり、また水分に弱くエミッションが減少する欠点から次第に使われなくなった。
- **Ba含浸型カソード(BIカソード)**と呼ばれるBaO、CaO、Al₂O₃などをWベースの多孔質に吸着させたものが酸化物カソードに置き換わり、動作点は高いが安定な陰極として使われ始めた(**B型カソード**、**S型カソード**)。
- その後、Ba含浸型カソードの表面に希土類の元素をコーティングして動作温度を下げる試みが始まり、**Irコート**や**Osコート**したカソードで動作温度が低いものが開発され、それが主流となった。(Osは人体に有害なために日本では使用されない)
- 電子ライナックの電子銃にはEimac社のBIカソードが良く使用される。一部には**LaB₆カソード**も使われる。
- 大電力パルスクライストロンではSLACが1980年代に採用した、**Scandateカソード**(Sc₂O₃とアルミナのMixをWベースのポーラスに吸着させたもの)が使用され始めた。KEKでも使用するクライストロンにこれを採用したので、現在多くのパルス管ではScandateカソードが使用されている。これは**FSCL領域**(Fully Space-charge Limited)にならない特性を持っている。
- 最近の加速器の電子銃はRF電子銃が多く採用され、熱陰極型カソードのニーズは減少している。管球などの製造にあたっては長納期部品なので要注意。



Accelerator Laboratory

サイラトロン

代表的な電子管スイッチングデバイスであるサイラトロンについて
現状、技術的な取扱いで重要なものについて述べる

ここでは主に加速器に用いる大電力用のサイラトロンについて述べる

何故サイラトロンか？

KEKの規模と統計から言えること

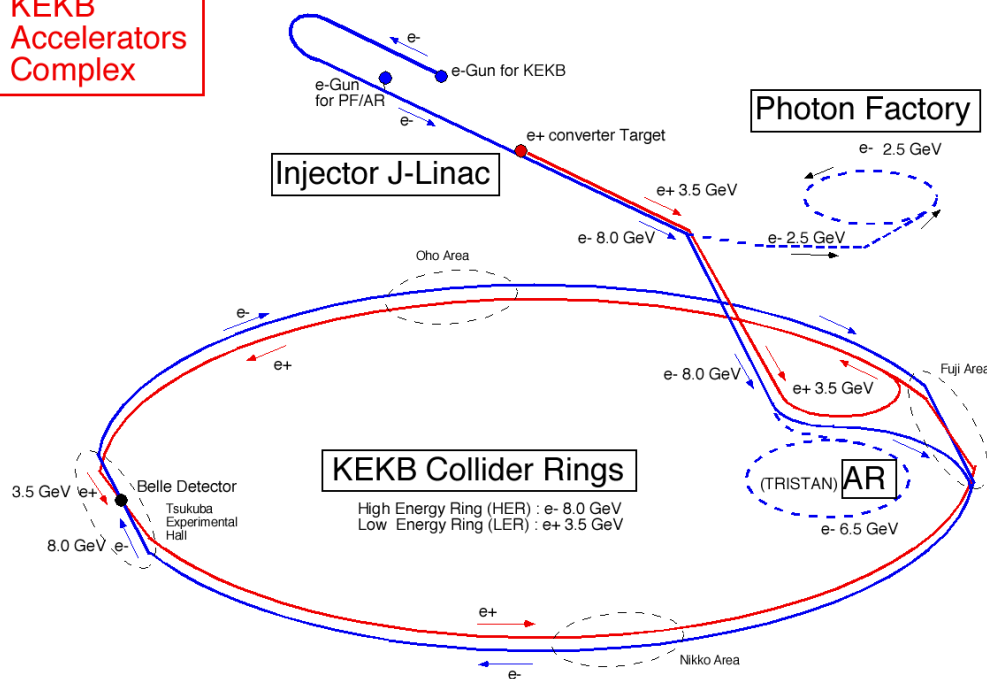
- KEKは加速器の規模が大きいので電子管の管種、運転の統計(故障統計、寿命統計、維持管理統計)などの蓄積がある。この辺から何が重要な因子か推測がつく。
- 電子ライナックの運転において、RF源の故障が一番多く、その中でもRF電源トラブルが多い。以下に示すようにその中でサイラトロンの占める位置が大きい。また、サイラトロンはクライストロンまでは行かないまでも値段が高価であり、なるべく寿命を長く持たせながら使用を続けることが重要である。



Accelerator Laboratory

KEK電子・陽電子入射器

KEKB
Accelerators
Complex



上空から見たKEK

- ・B中間子・反B中間子を大量に作り、その崩壊過程を観察してそこにCP対称性の破れがあるかどうかを検証する。(99年より実験開始)
- ・ CP対称性の破れを証明。
- ・前人未踏のルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成。

入射ビーム

Ring	HER	LER	PF	PF-AR
粒子	電子	陽電子	電子	電子
エネルギー	8 GeV	3.5 GeV	2.5 GeV	2.5 GeV
バンチ当りの電荷	1 nC	0.6 nC	0.2 nC	0.2 nC
パルス幅	シングルバンチ			1 ns
蓄積電流	1150 mA	1250 mA	400 mA	40 mA
つぎたし開始電流	~700 mA	~900 mA	~250 mA	0 mA
入射時間	1 min	5 min	3 min	2 min
入射間隔	1 h	1 h	24 h	8 h



Accelerator Laboratory

KEKB 電子陽電子ライナックのRF源

旧型電源

Klystron Specifications

OutputPower	46MW
RF Pulse Width	4.0 μ s
Efficiency	45%
Perveance	2.1 μ A/V ^{3/2}
Beam Voltage	298kV
RepetitionRate	50Hz

Modulator Specifications

Max. Peak OutputPower	108MW
Max. Average OutputPower	30kW
Pulse Transformer Ratio	1:135
Primary OutputVoltage	225 kV
Primary OutputCurrent	4.8 kA
Total PFN Capacitance	0.6 μ F
Pulse Rise time(10-90%)	0.8 μ s
Pulse Flatness(P-P)	0.3 %
Pulse Width	5.6 μ s
ThyratronAnode Voltage	45kV
ThyratronAnode Current	4.8 kA
ThyratronAverage Anode Current	1.3 A
RepetitionRate	50Hz



SLED

Klystron

新型コンパクト電源

Pulse Modulator

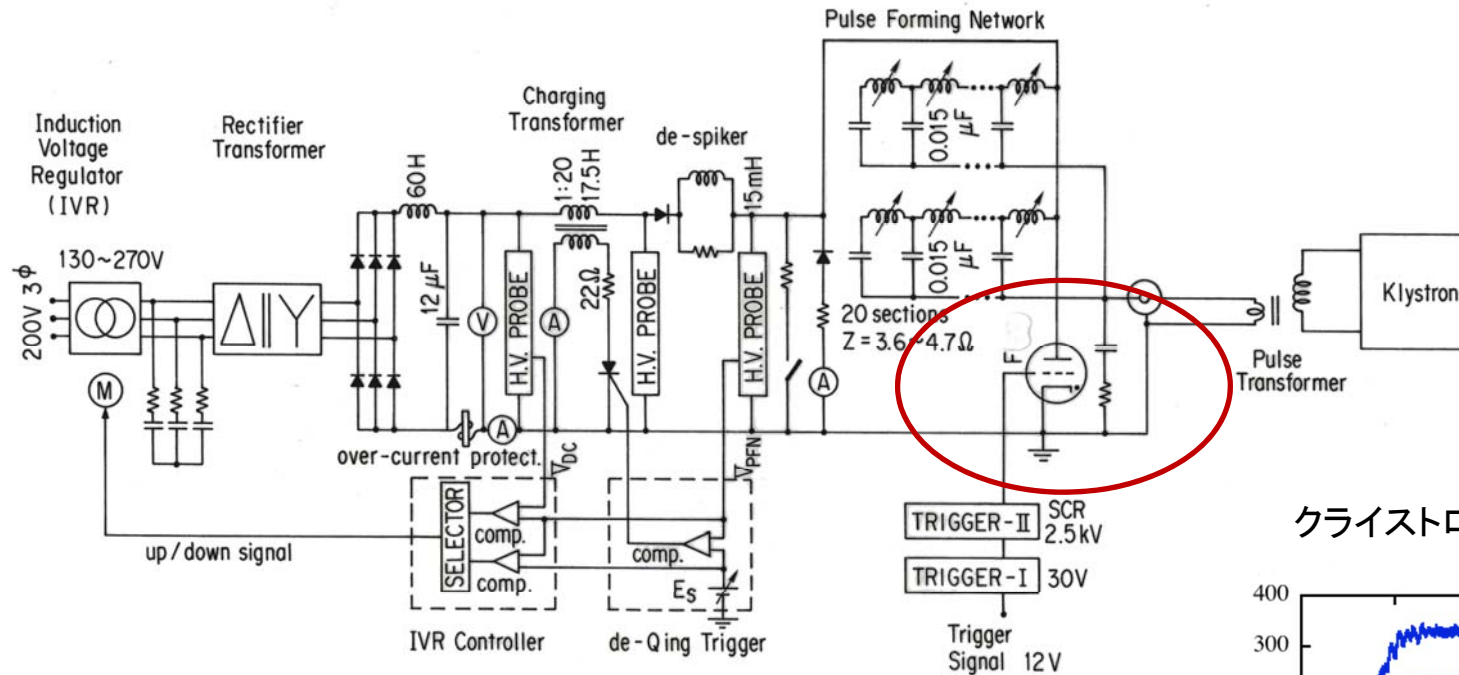
Pulse Transformer Tank



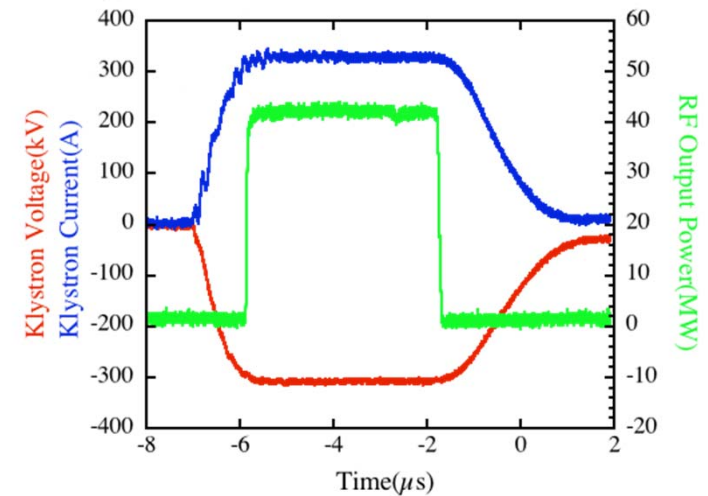
KEKBリニアックRF源 : 60台使用



Circuit Diagram of KEKB Modulator



クライストロン電圧・電流、RF波形

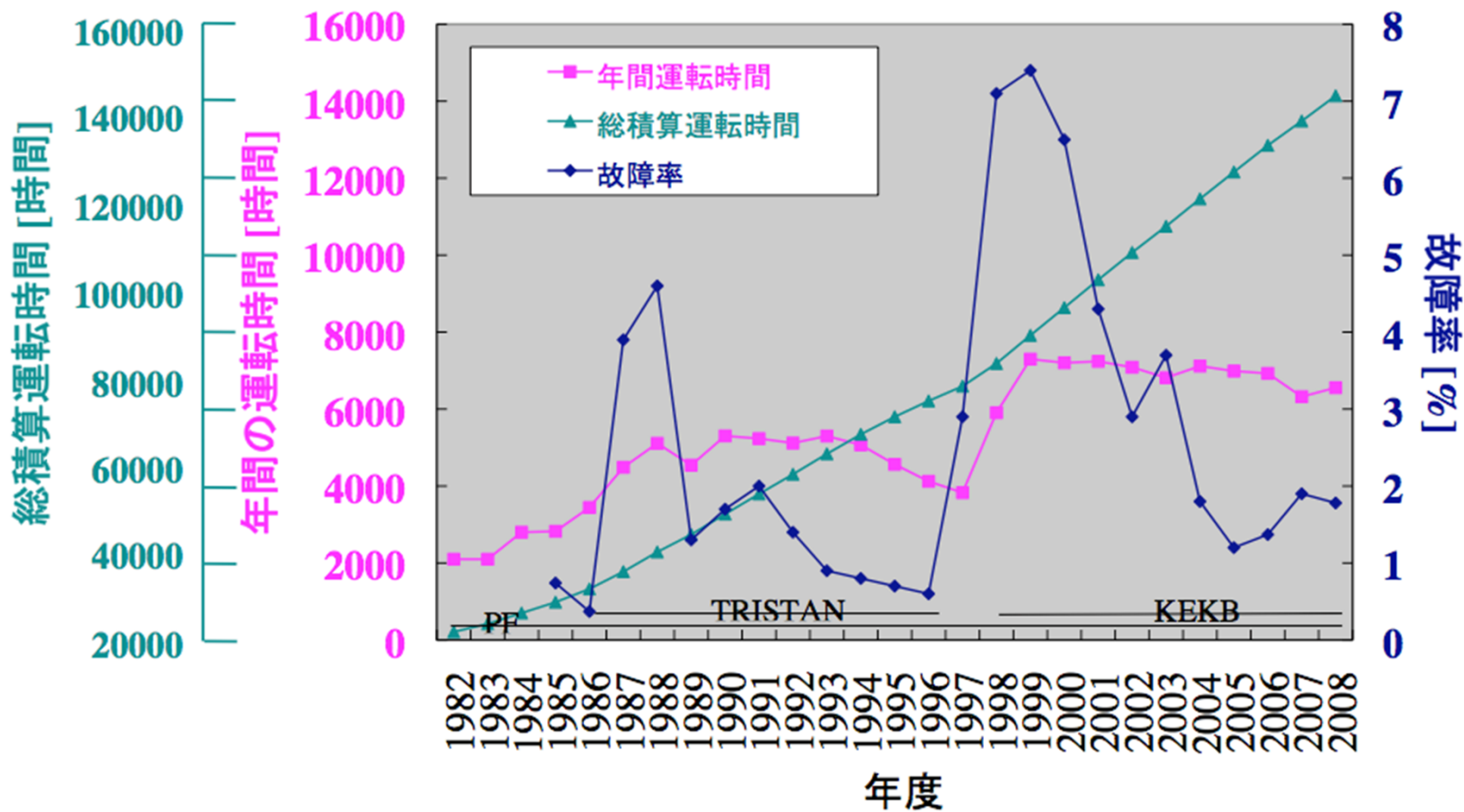




運転時間と故障率の履歴

KEKB用の総運転時間(高圧印加時間): 約75,000時間(2009年7月)

KEK 電子・陽電子入射器の運転時間と故障率の履歴



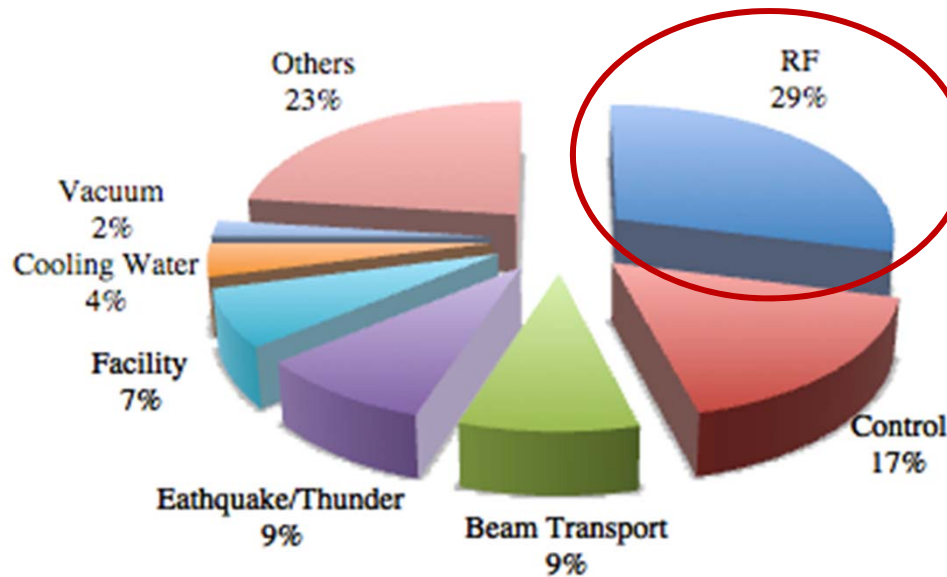


RF系及びクライストロン電源のトラブル解析

(FY2007)

• ライナックの故障内訳

運転時間全体 : 6322 Hours
機械故障時間 : 114 Hours

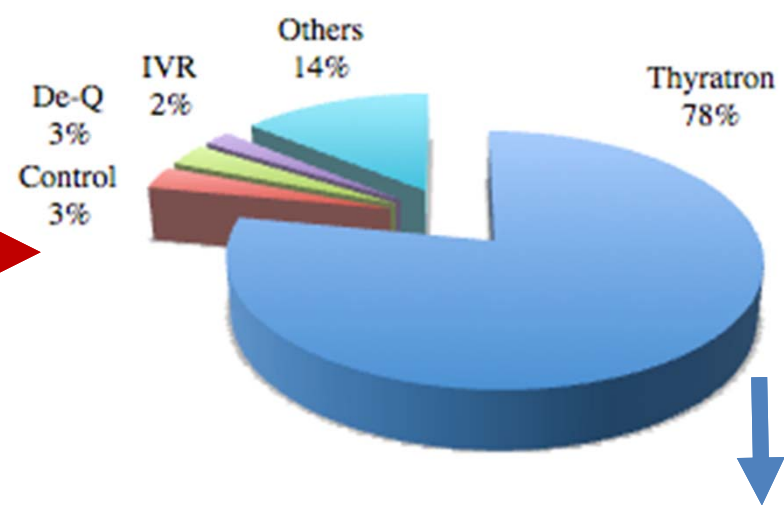


RF源の信頼性は直接的にライナックの信頼性に直結する

• 電源の故障内訳

電源の故障時間= 17.6 Hours

53% of RF failure



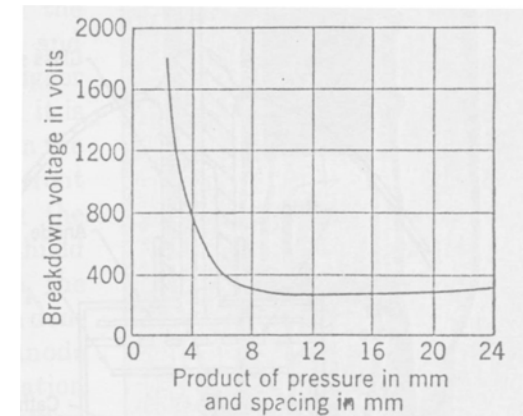
- Keep-alive 電流調整
- Thyratron 故障
- Air cooling fan

電源の稼働率=0.997



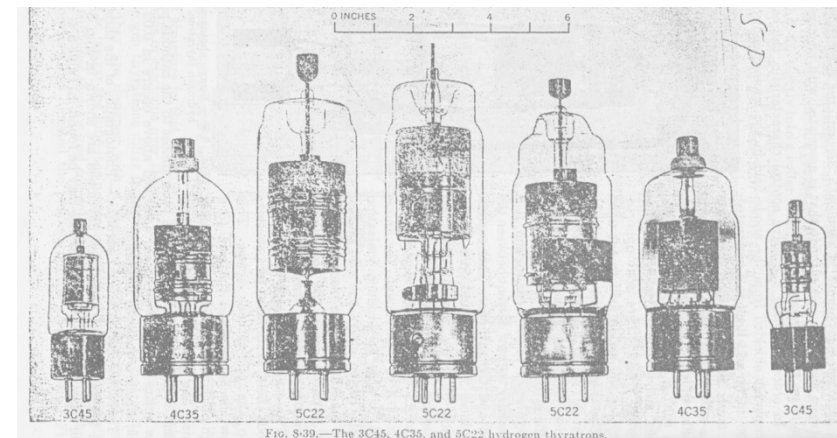
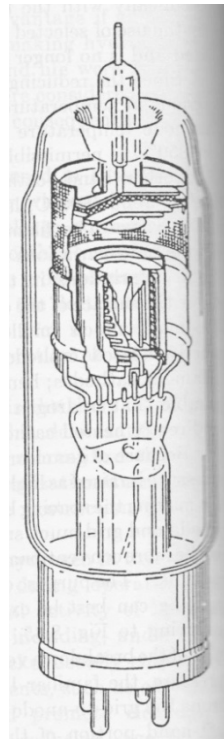
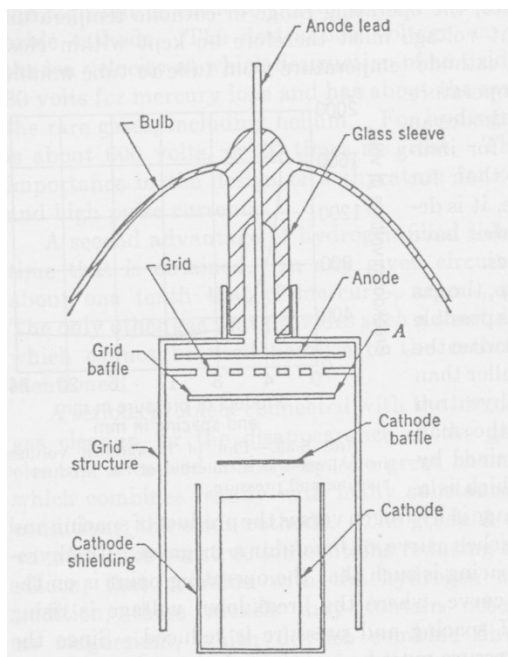
サイラトロンの動作原理

- ガスを封入した電子管などで電圧をかけた時の気体放電特性を利用したものである
- ガス入り放電管に電圧をかけると、初めは**タウゼンド放電**と呼ばれる電圧につれてわずかに放電電流が増加する現象が起きる。ある閾値の電圧(**絶縁破壊電圧**)を超えると急に放電電流が増え電極間電圧が下がる**グロー放電領域**となる。さらに電圧をかけると放電が進む**アーク放電領域**となる。この特性は管内ガス圧 p ×電極距離 d と放電電圧の関係を示した右図(**パッシェンの法則**)となる。
- 熱陰極を用い適当なガスを封入し(サイラトロンの場合水素封入が多い)アーク放電を持続させたものがサイラトンである。
- 通常はGridが入りこのG電極電位をから陽極電位に近づけると放電が開始される。放電電流は大きく、電極間電圧は低いのでSwの役割を果たす。
- **臨界格子電圧**を超えてから放電が完成するまではかなり時間を要し、これを**イオン化時間**と呼ぶ。
- 放電を停止させるには、中で生じた正イオンが再結合して消滅することが必要で(**消イオン時間**)イオン化時間より長い



水素入りサイラトロン①

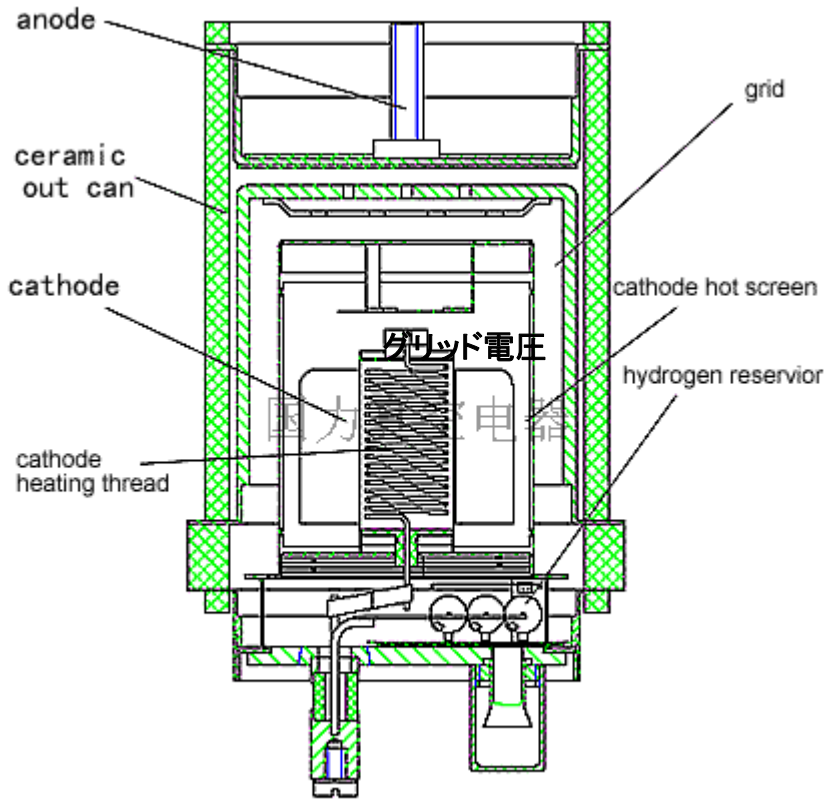
- 下図に水素入りサイラトロンを示す。
- 初期はガラス真空管で出来たサイラトロンが多かった。現在セラミック管が多い



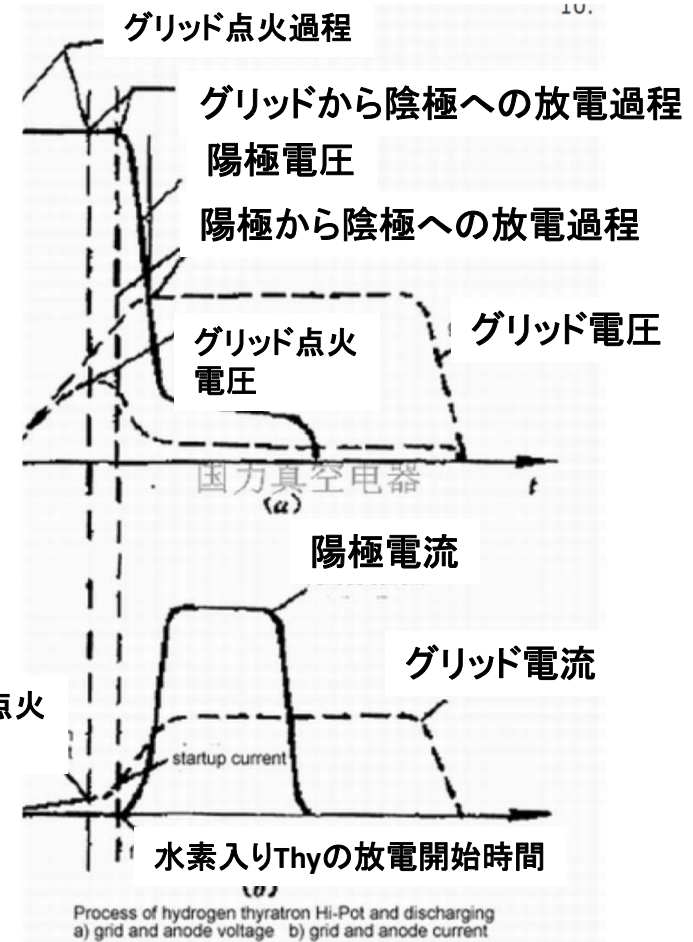
一部のものの仕様は後で表にて示す



水素入りリサイラトロン②



Structure of Hydrogen Thyatron

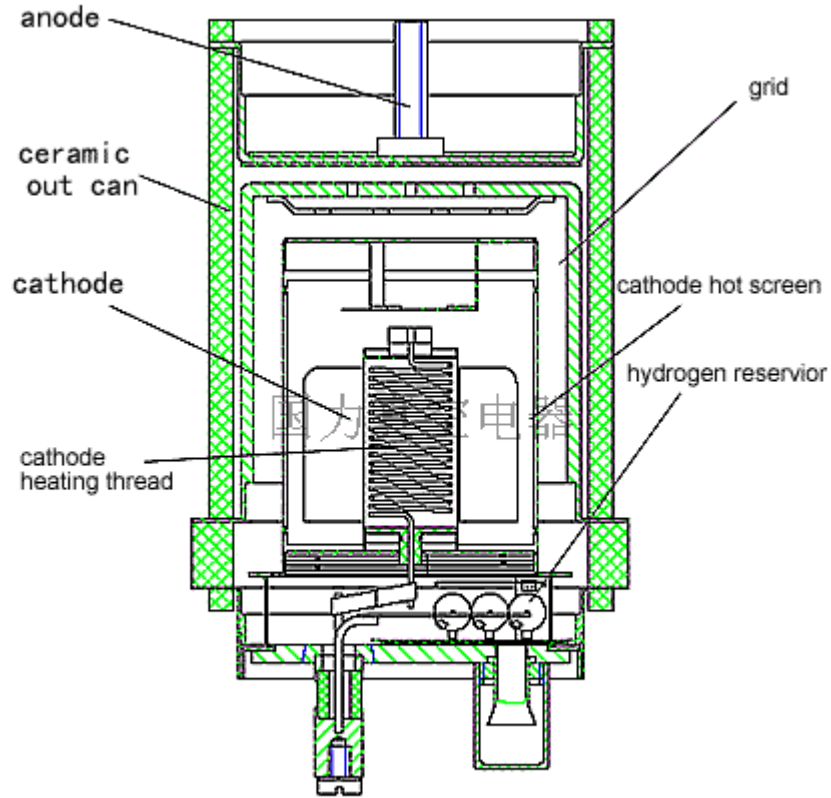


Process of hydrogen thyatron Hi-Pot and discharging
a) grid and anode voltage b) grid and anode current

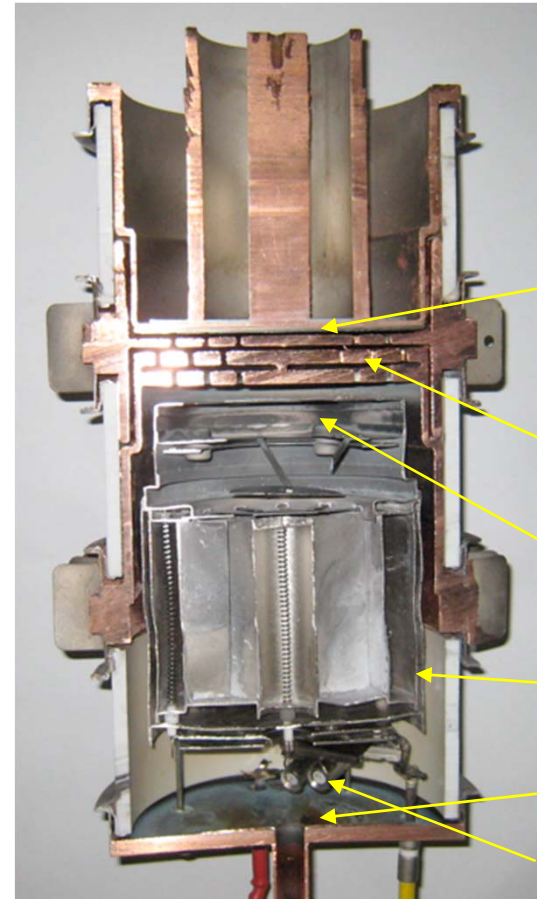


Accelerator Laboratory

サイラトロンの構造



Structure of Hydrogen Thyatron



F241の内部構造
寿命時間:41,458H

パルス電源のSW素子としてのサイラトロン

- レーダやクライストロンのパルス電源に用いられるSW素子として当初Spark Gapや真空SW(イグナイトロン)を使っていたが仕様に合わなかった。1963年代に当時出始めた水素入りサイラトロンを採用し始め現在につながった。
- いろいろな水素入りサイラトロン

品名	陽極逆耐電圧	陽極順耐電圧	ピーク陽極電流	トリガー電圧	入力インピーダンス	フィラメント電圧	フィラメント電流
単位	kV	kV	A	V	Ω	V	A
3G45 (1G45P)	3	3	35	>150	<100	6.3	2.5
4C35 (1G35P)	8	8	90	>150	<100	6.3	6.3
5C22 (2G22P)	16	16	325	200-300	500	6.3	10
5948	25	25	1000	700-1000	20-50	6.3	30
1257	33	33	2000	1320-2500	20-50	6.3	40
8479 (KU275A)	50	50	4000	1500	100	6.3	75

- 現在の大きいサイラトロンの実際 → 次スライド参照



Accelerato Laboratory

ライナックで使用されるサイラトン

サイラトンF-241の規格と使用値

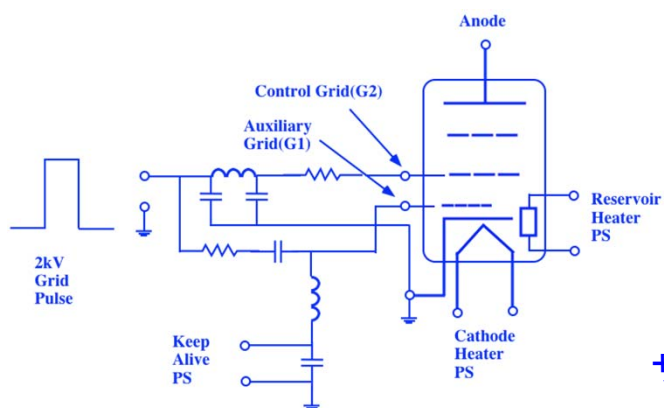
ヒータ電圧	6.3 V
ヒータ電流	70 A(最大)
リザーバ電圧	2.5~6.0 V
リザーバ電流	20 A(最大)
ピークアノード電圧	45 kV (最大50 kV)
ピークアノード電流	4.8 kA(最大10 kV)
平均アノード電流	1.3 A(最大8 A)
アノード電流立上り率	5 kA/μs(最大10kA/μs)
ピーク制御グリッド電圧	1.0~4.0 kV
制御グリッドパルス幅	2 μs(70%値で)



Litton
L4888B

E2V
CX2410K

ITT
F-241



Driver circuit

•Keep alive has ~250 mA dc current at 100 V



サイラトンの設置

	CX2410K	F241	L4888B
Heater (Vac/Aac)	6.3/75	6.3/65	6.3/70
Reservoir (Vac/Aac)	5.0/17.5	4.5/15	4.5/20
Max. Peak Anode Voltage(kV)	60	50	50
Max. Peak Anode Current(kA)	15	10	10
Max. Average Anode Current(A)	10	8	8
Max. Anode Heating Factor($10^9 \cdot V \cdot A \cdot pps$)	300	250	400

サイラトロンの機能 及び加速器運転に与える影響

- サイラトロンの機能
 - サイラトロンはスイッチング素子であり、PFNに充電された電荷をサイラトロンを通じて放電させ、**パルス波形を生成**する。
 - ▶ サイラトロンの電子管機能(カソード、電極間耐圧、冷却)
 - 放電タイミングを与えるトリガー信号ですぐにパルスを発生させ、**パルス遅れやジッターを極力小さく**する。
 - ▶ 管内水素分圧調整(リザーバ電圧)、Keep-alive機能
 - SWオフの管はPFNに対する充電の高電圧に十分耐えなければならない。
 - ▶ サイラトロンの耐圧(各電極間のセラミックの耐圧:クリーニング)
 - パルス放電後に逆充電等起こさずに速やかに次のパルス生成に備える。
 - ▶ サイラトロン周辺の回路、パルス電源の動作点(負荷整合等)
- **サイラトロンのメンテナンスは上記の機能を正常に保つことを念頭に置いて行う。**

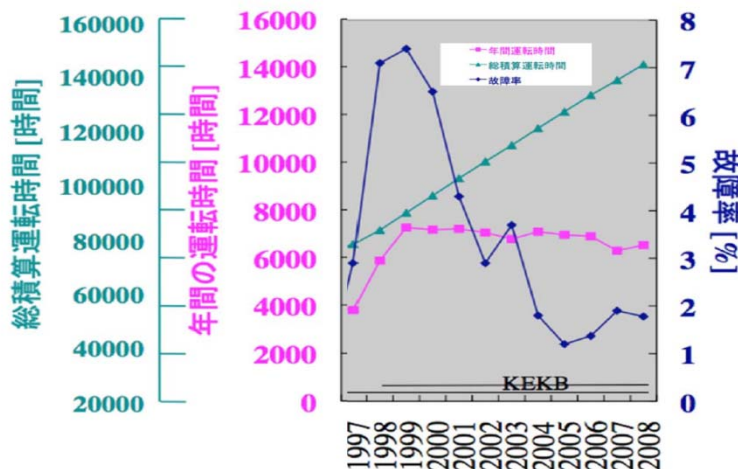


Accelerator Laboratory

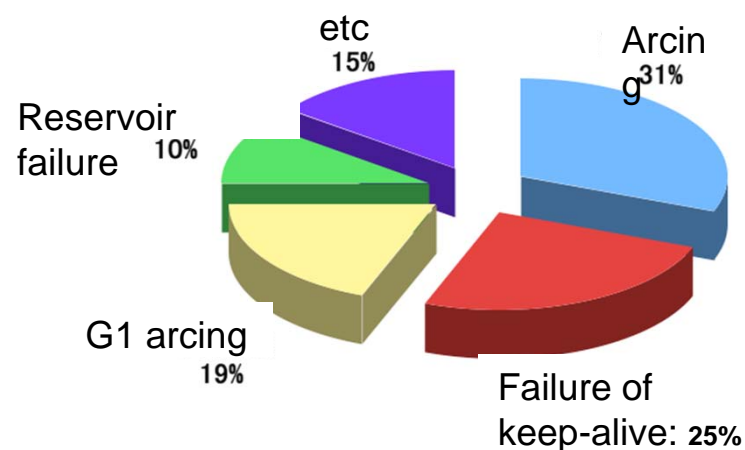
KEKにおけるサイラトロンの運転状況、故障内訳及び寿命

・統計期間(1998・9月～2008・2月)

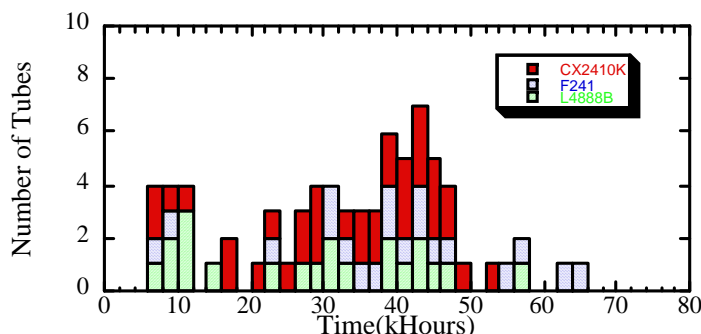
サイラトロンの運転時間



サイラトロンの故障(Fault)内訳



サイラトロンの寿命分布: 全管数=74



性能、寿命はロット毎、会社ごとに異なる。
寿命は平均で33,400時間となった。

KEKで確立したサイラトロンのメンテ等の取り組み

- ・納入後使用前に全数受け入れ高圧試験
- ・重要な所では早めに交換を行う(2年ごと、12000時間目安)
- ・運転上・重要度の低い所は交換した中古品使用
- ・あらかじめ寿命の予想を行い交換計画を立てる
(keep-aliveの故障モード、リザーバ設定履歴から判断)
- ・長期シャットダウン時のメンテナンス
(リザーバ電圧調整、ジッターやパルスタイミングチェック、清掃)

サイラトロンのメンテナンス作業

サイラトロンの 平均故障間隔(MTTF) : 33,400 時間 (2月. 2008)

かかるコストを最小にして寿命をなるべく伸ばす

KEKでの取組み

- 受け入れ試験 (Acceptance Test)
 - 会社(vendor)では必ずしもフル定格では出荷試験はやってくれない。
 - 100時間運転でBreak down rate が 0.05/ 1 hour 以下であることを確認
 - Switching Jitter が 10 ns以下であることを確認
 - Anode delay timeの確認
- 予備的に故障前に交換を実施
 - KEKライナック60ユニットのうち、運転上重要な部分(バンチャー部、入射部、陽電子変換部直後等)では2年の運転時間 (~14,000 時間) を目安に新品のサイラトロンの交換する。
 - 交換されたものは比較的重要度の低いユニットで再利用を行う。
- 点検や調整を定期的に行う
 - Reservoir voltage、keep-alive current, switching jitter
- 補助グリッド電圧の調整 異常時に
- 定期的メンテナンス(夏冬2階のシャットダウン時実施)
 - サイラトロンのレンジングと不良品の交換。電極間セラミックの清掃。インターロック動作履歴、リザーバ電圧、補助グリッド電圧の調整履歴の確認



サイラトロンの受け入れ試験

•2004年度より実施

• $E_s=42$ kV、リザーバ電圧値はメーカ指定値で2時間以上のエージング後、連続運転して下記の事項を同時に満足したサイラトロンを合格とする。

1. Break Down率 < 0.05 回/hour であること。
2. Jitter < 20 nsであること。
3. Anode Delay Timeの特性が正常であること。
 - ・時間変動しないこと。
 - (リザーバ電圧によって大きく変動しないこと)

•受入れ試験結果

2001年度(CX2410K)	合格率27%(3/11)
2003年度(CX2410K)	合格率73%(8/11)
2004年度(L4888B)	合格率93%(14/15)
2005年度(L4888B)	合格率100%(15/15)

•サイラトロンの工場試験

CX2410Kの場合

- 50kV, 6.5 μ s(FWHM), 6kA, 100pps pulse.
- Reliability test > 8 hours (Run time ~ 17 hours)

サイラトロンのレンジング・ キープアライブの調整

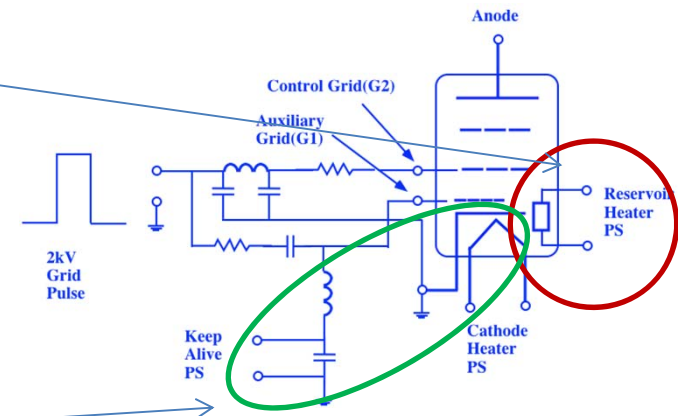
- サイラトロンの性能を最大限に保つためには切れの良いスイッチングを保つことである。
→トリガーパルスで速やかに管内で放電が起きなければならない。

- Reservoir 調整**

それを左右するのは管内に封じ込まれた水素の分圧を常時最適に保つ。館内には水素リザーバという水素吸蔵素子があり、電圧を加えることで水素分圧を変えることができる。

水素分圧が高い---放電しやすい。しまいには連続放電する
水素分圧が低い---放電しにくい。放電しても時間的に安定でないためにジッターが多くなる。

レンジング調整—水素分圧を丁度良い電圧に保つ



- Keep-alive 機能**

速やかにトリガーパルスに反応するためにKeep-alive電極というものがあり、ここに電圧をかけることにより常時カソードとKeep-alive電極間で予備的な放電を継続させている(Keep-alive機能)

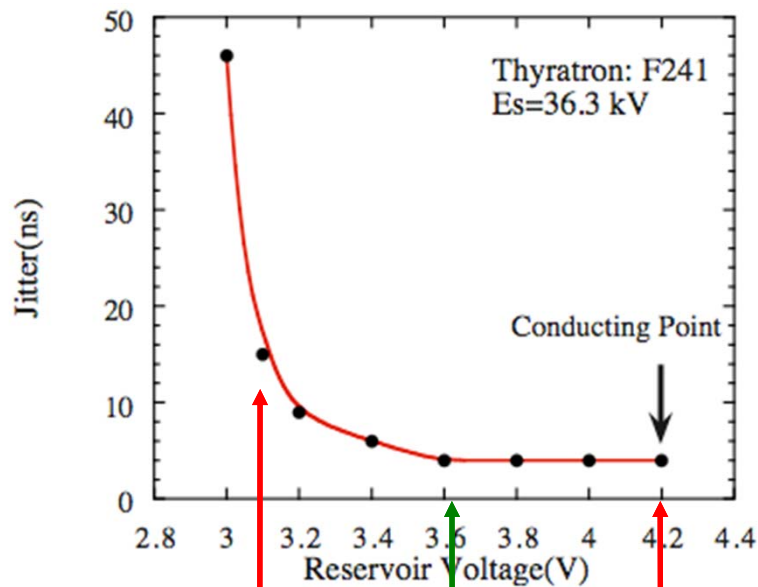
場合によってはここにPre-triggerパルスの本トリガー前にかけてKeep-alive機能を確実化させる場合もある。これによりパルスジッターが大幅に減少させることができる。

適切なkeep-alive電圧をかける必要がある。経年変化があるので調整も必要である。



サイラトロン[®]の動作点の調整

レンジング(リザーバ電圧調整)の例 ガス圧の調整

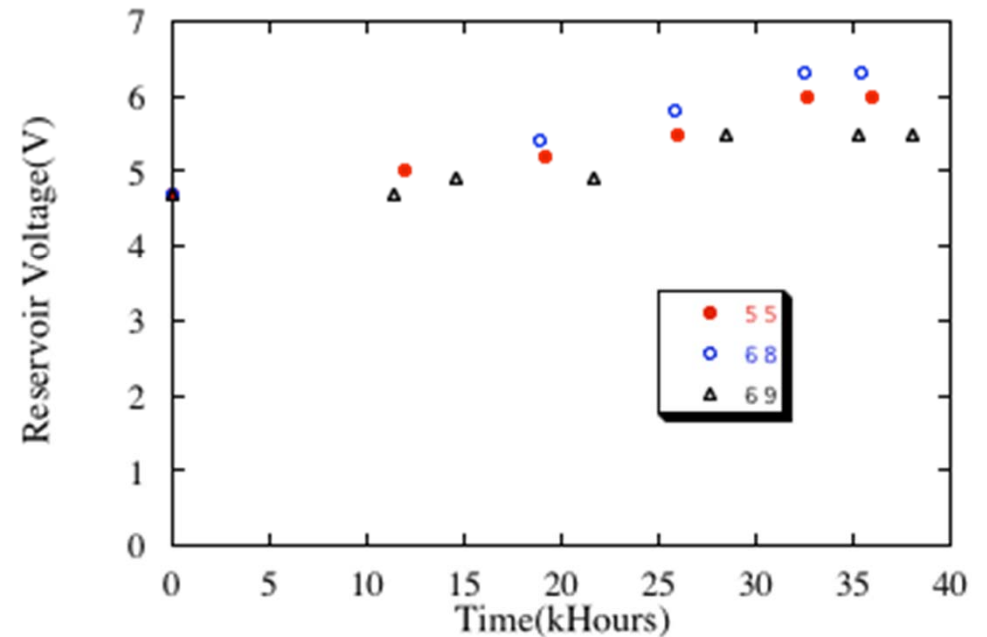


下限値

設定値

上限値

レンジング記録の例 Tube Type: CX2410K



S/N: 68(95)

- 96-10-11: 5-2取り付け
- 02-11-12: HV-ON時でIkeep(H,L)ITL
- 02-11-18: HV-ON時でIkeep(H,L)ITL
- 03-01-08: 運転時Ikeep流れない

S/N: 55(95)

- 96-10-11: 5-1取り付け
- 03-01-30: HV-ON時でIkeep流れない

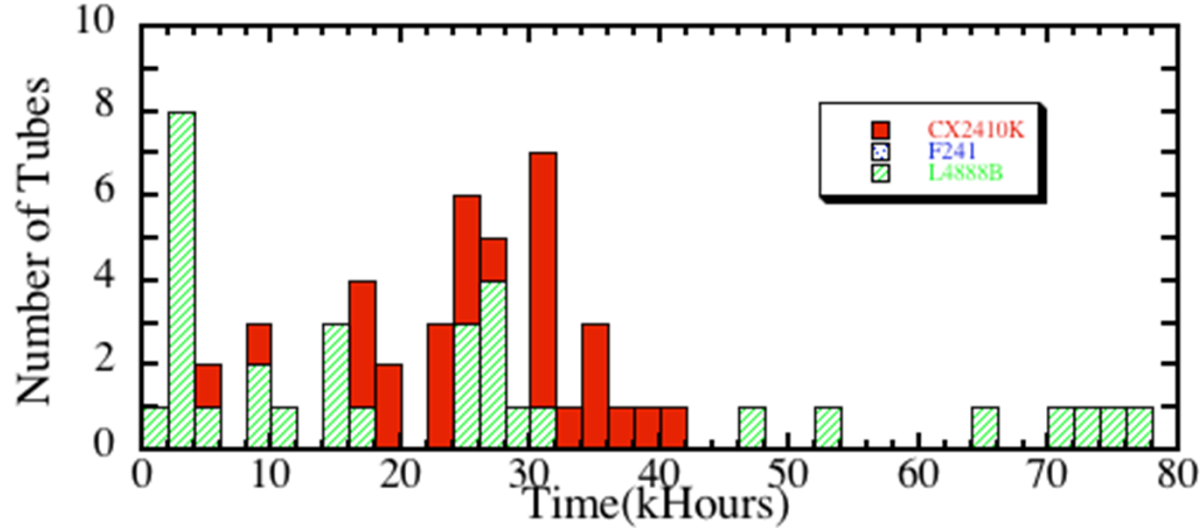
S/N: 69(95)

- 96-10-11: 3-4取り付け
- 02-11-29: HV-ON時でIkeep(H,L)ITL
- 03-01-07: Ikeep流れない

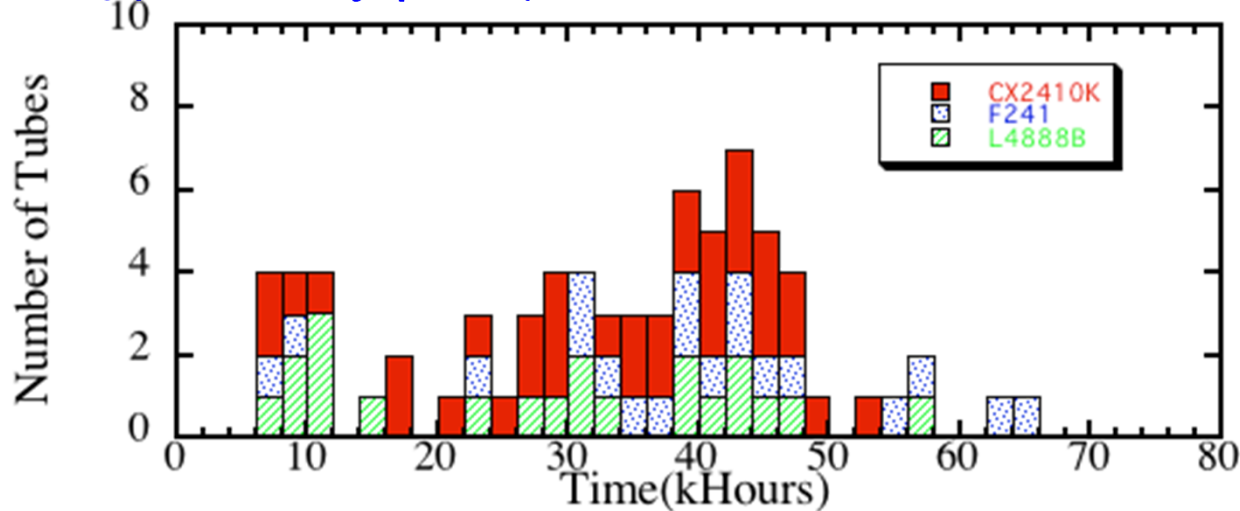


サイラトロンの使用時間と寿命分布 (2008年2月現在)

現在運転中のサイラトン使用時間 : 60本



サイラトロンの寿命 : 74本

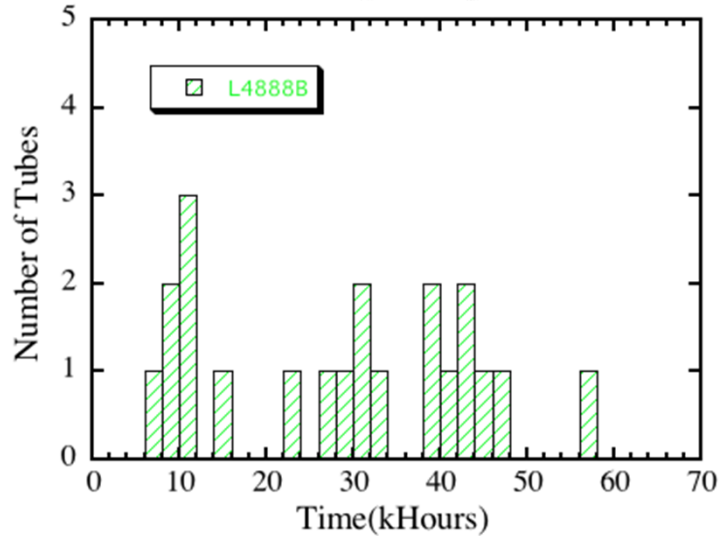
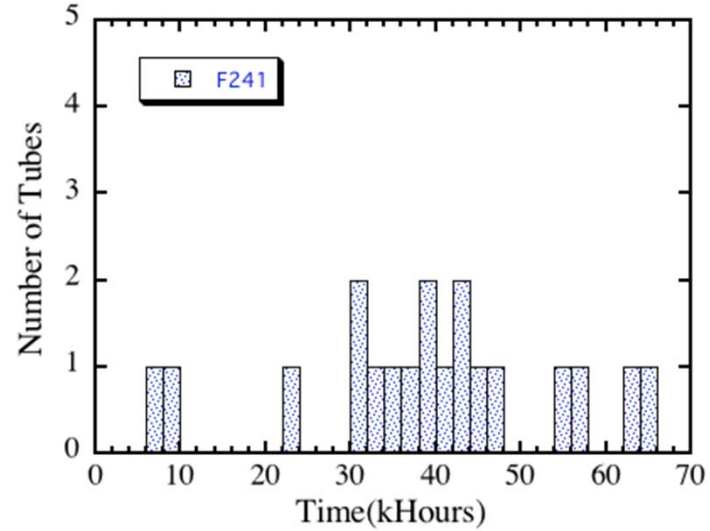
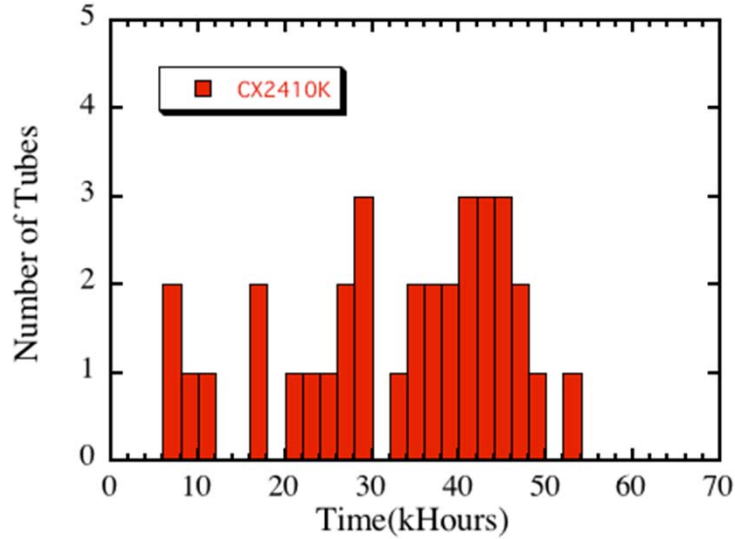


- 運転期間
1998年9月～2008年2月
- 製造上及び取り扱い上の不良
使用中の使い方の不適、不注意
などによるものは除いた。

品質に大きなバラツキがある



各サイラトロンの寿命分布 (2008年2月現在)

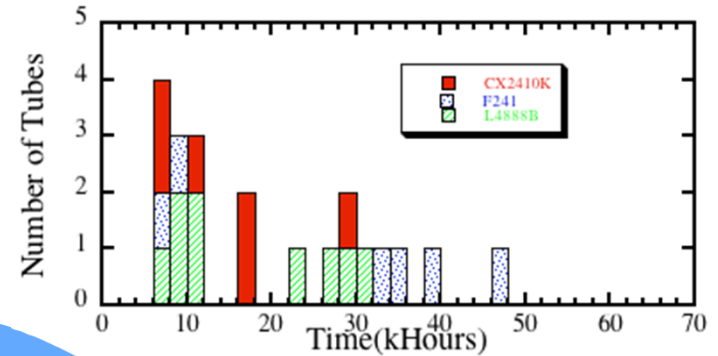
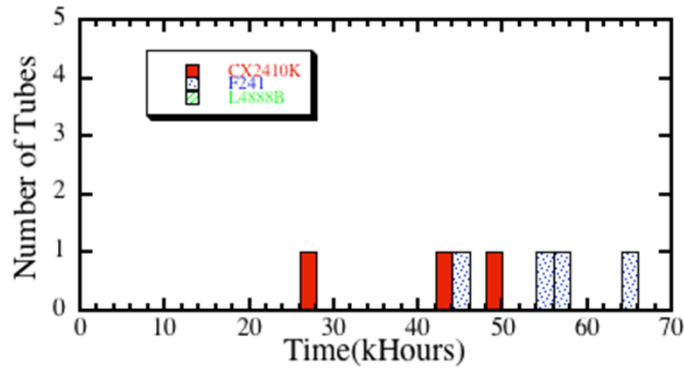


	CX2410K	F241	L4888B
Minimum HV(kHours)	6.0	6.4	7.9
Maximum HV(kHours)	52.3	66.0	57.5
Number of Thyratrons	34	19	21
Mean(kHours)	32.8	38.9	28.5

全体平均寿命 = 33.4k 時間
毎年延びている

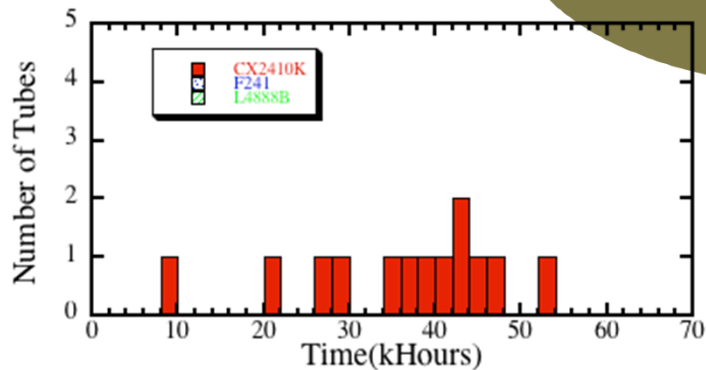


サイラトロンの故障モードと寿命



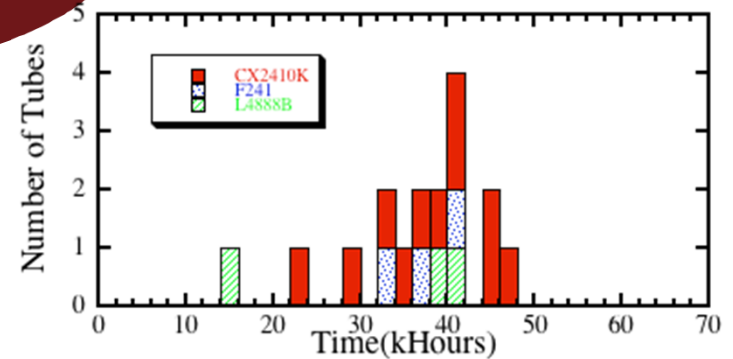
リザーバ故障(7%)

G1放電(13%)



耐圧不良(32%)

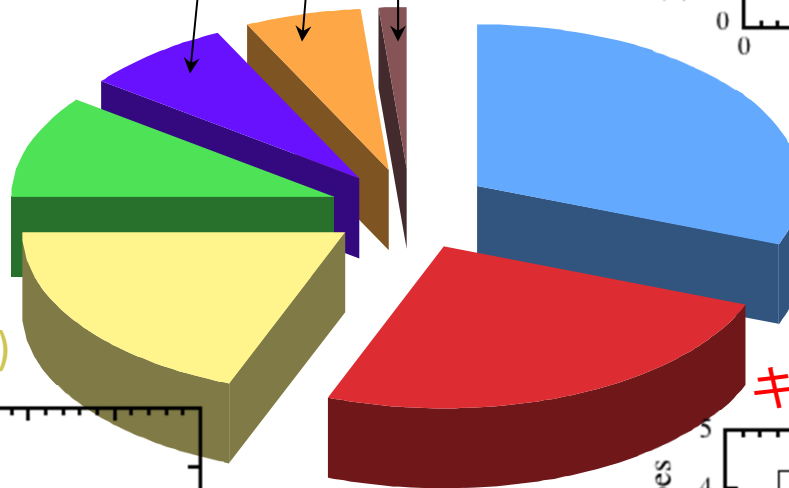
キープアライブ故障(25%)



点弧不安定(7%)

ヒータ関係(6%)

アノード
放電(1%)



耐圧不良サイラトロン内部

Tube Type: CX2410K
S/N: 65-9605
Lifetime: 18,432 Hours



Anode Gap



Cathode



Anode



Lower Gap



Grid 1



Accelerator Laboratory

G1での放電と改善

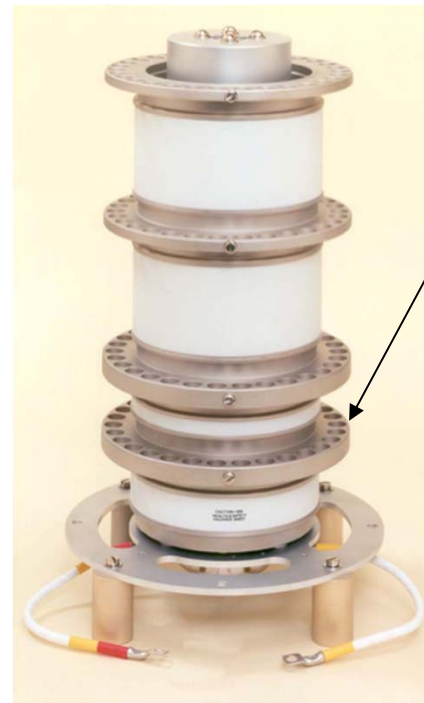
Tube Type: CX2410K
S/N: 85-98450
Lifetime: 21,510 Hours



G1接続端子での放電痕

原因

- G1カソードの構造に起因した問題でカソードからG1をサポートする小さな3mm程度のセラミック絶縁物にアーク放電が起きる。



G1電極
セラミック管の側面に電極を置く構造。

セラミック絶縁の長さ
75 mm

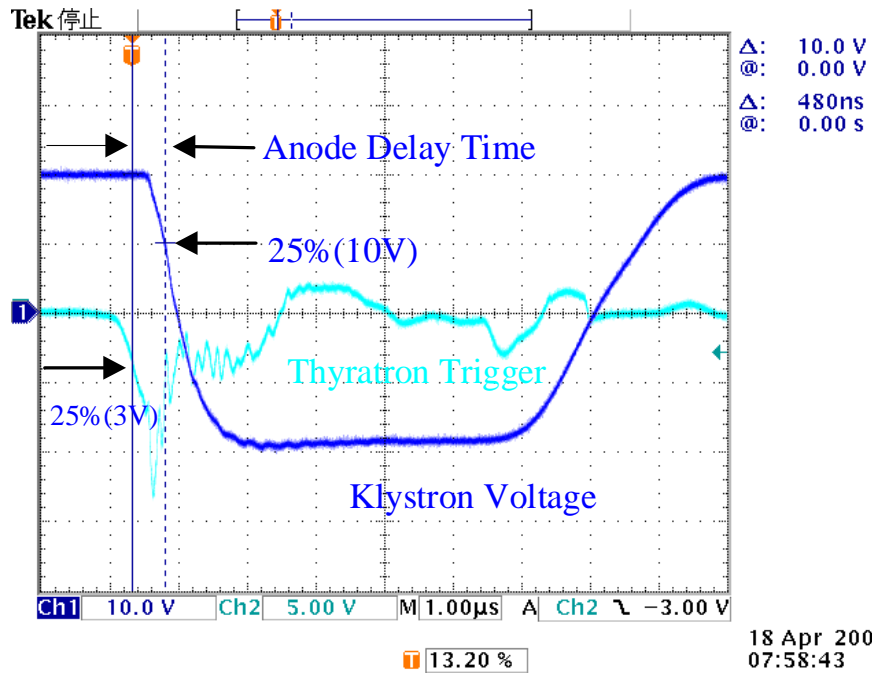
G1放電を改善した
CX2411



Anode Delay Time

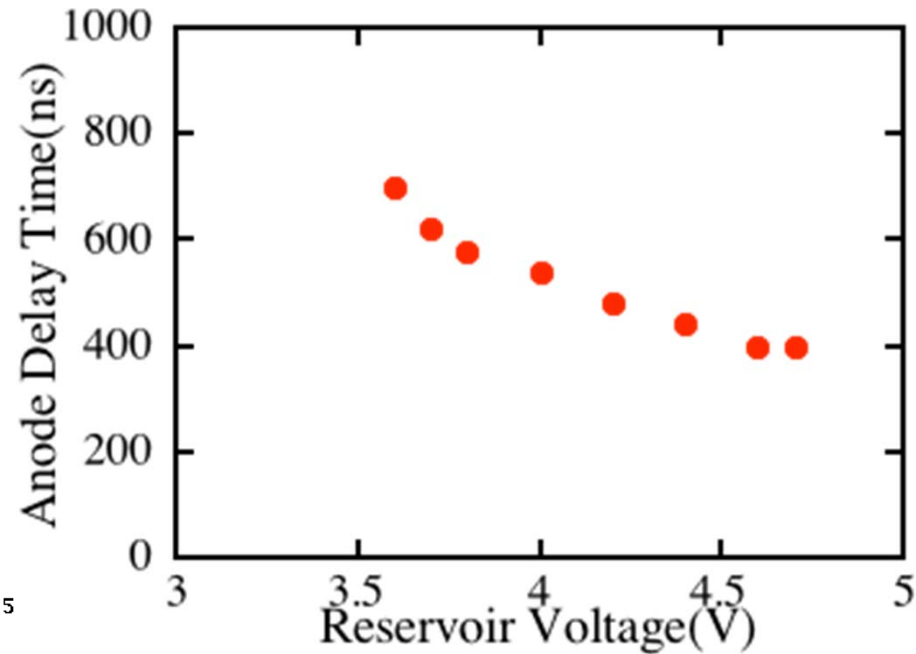
正常サイクロロン

Grid Trigger & Klystron Voltage Waveforms



Rsv = 4.6 V
(Recommended Rsv=4.6 V)

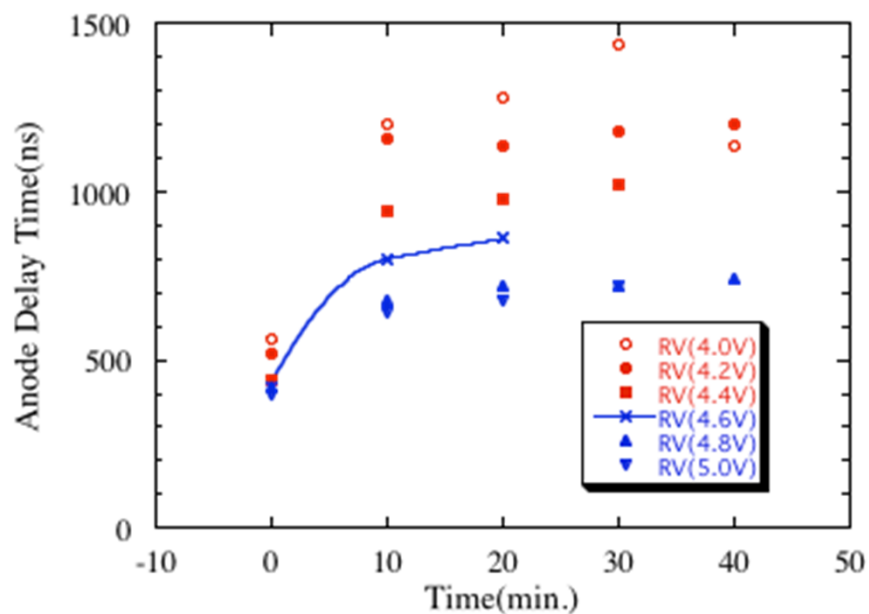
Anode Delay Time vs Reservoir Voltage



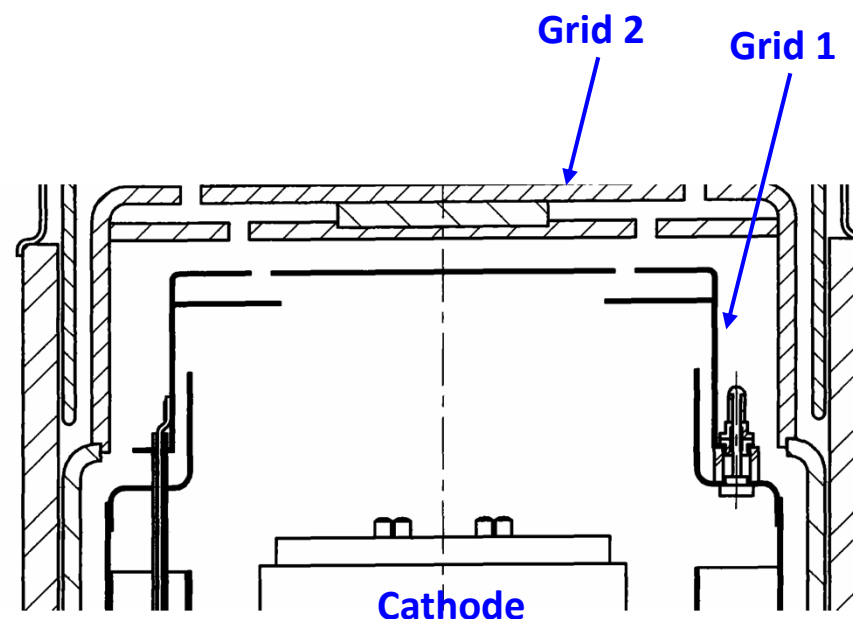
Anode Delay Timeの異常特性の例

CX2410Kで最近みられるようになった現象

Anode delay time vs Time



Thyratron Cathode and Grid



Grid1とGrid2の距離を変更したことが原因?
→ 解決済

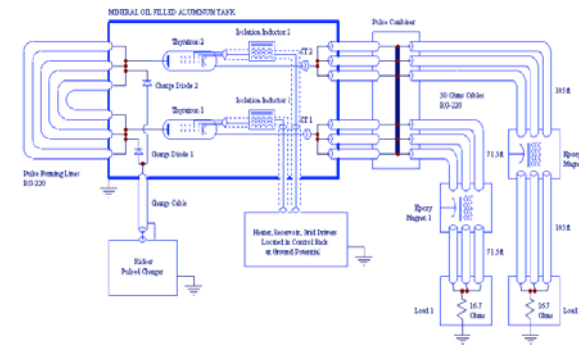


Kicker等々に使用されるサイラトロン

- 加速器におけるサイラトロンの他の使用例は円形加速器における、入射や取り出しのKickerに使用されるものである。ここではKEKのATF及びKEKBに使用されているものを紹介する。
- ここで使用されるサイラトロンの特徴はパルス幅が狭く速い立ち上がりが要求されることである。
- ATFで使用されているサイラトロン: 基本的にSLACと同じシステムを使用している

- 入射Kicker CX-1671D x 2
- 取り出しKicker CX-1671D x 2
(パルス平坦部: 300ns & 60 ns)

使用時間および繰り返しが低いために現在まで故障例はない



取り出しKickerでのdouble kicker system

KEKBにおけるサイラトロン

	使用 本数	定格電圧 (運転電圧)	電源 定格 電流	型番
入射キッカー 電磁石電源 (LER/HER)	12本	35kV (12kV LER 20kV HER)	2kA	CX1826A CX1154C CX1174
アボートキッカー 電磁石電源(LER)	1本	20kV(LER)	1.3kA 1.7kA	CX1154 CX1154C
アボートキッカー 電磁石電源(HER)	1本	35kV (HER)	3.6kA 2.7kA	CX1175
ビーム調整用 垂直方向キッカー	2本	30kV (5kV)		CX1174



保守

- 夏期保守点検を毎年行っている
- 入射キッカー電源のサイラトロンの寿命
 - CX1154C: 3-4年 (50Hz max)
 - CX1826A, CX1174は、CX1154Cの2倍以上
- アポートキッカー
 - HER CX1175は、1度交換した
 - LER CX1154 (CX1154C)は、サイラトン故障のため 2回交換



問題点

- CX1154Cは、ダブルパルストリガーで使用する事によって、タイムジッター、トリガータイミングのドリフトが押さえられるようになった。
- SuperKEKBでは、入射頻度が格段に上がるため、より寿命の長いサイラトロンをテスト(候補 CX1174,CX1826A)
 - これとは別に、半導体スイッチへの置き換えのR & Dも行っている。



Accelerator Laboratory

サイラトロン[®]の半導体化

Structure of SI Thyristor

SIサイリスタ



SI Thyristor

Type : RS1600PA40T1

Repetitive peak off-state voltage:
4000V

Reverse conducting type

Non-alloyed Flat-wafer pellet

Press-pack ceramic housing

High reliability

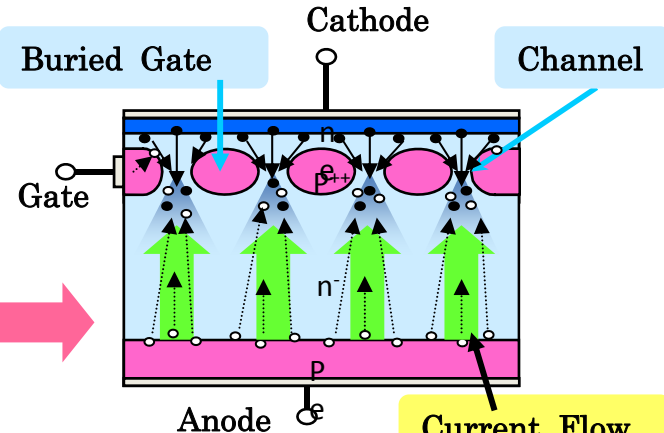
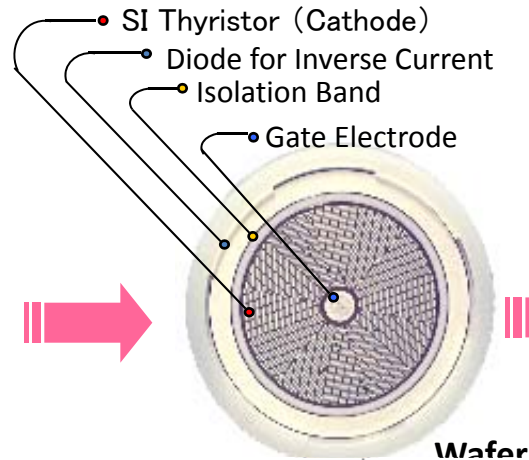
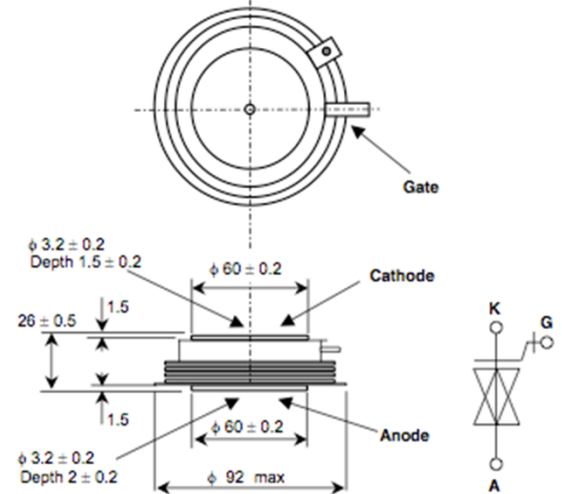


Diagram of the on-state SI thyristor



- Voltage 4.0 kV
- Turn off current 600A
- RMS current 600A
- di/dt 150kA/μs

- Normally-on type device
Vg = -20V

- 西沢潤一氏の発明
- 現在は製造されていない



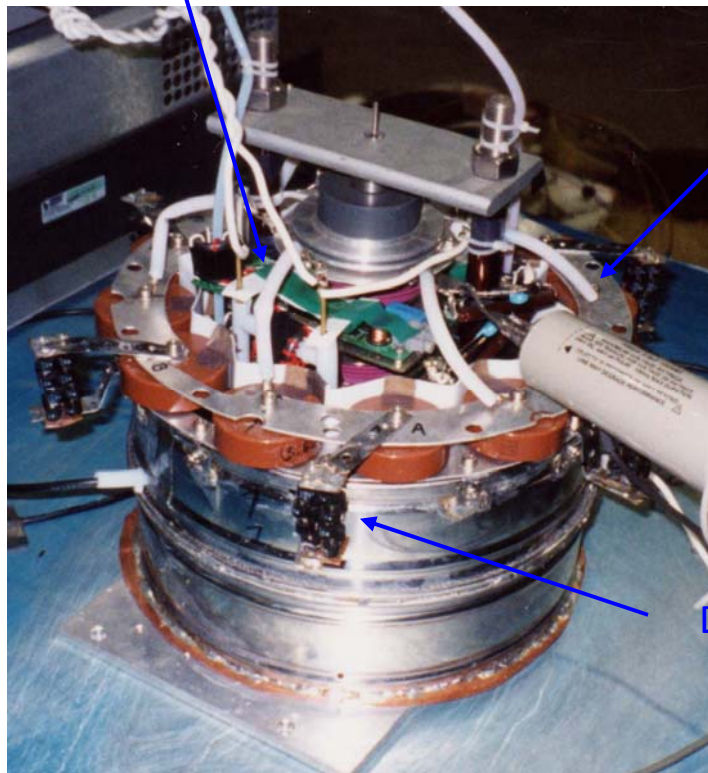
Accelerator Laboratory

SIサイリスタの性能評価試験

ターンオン特性の評価装置

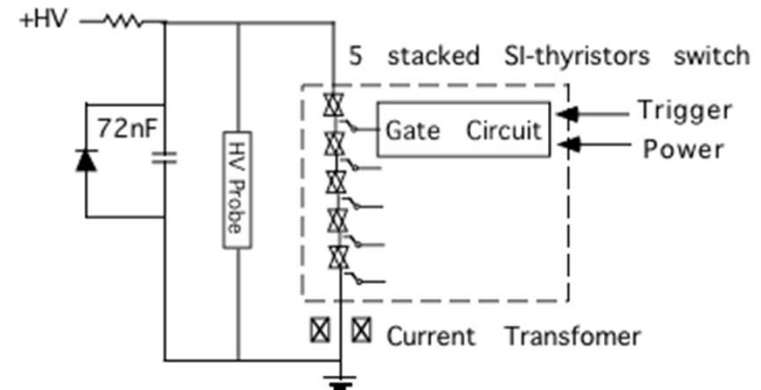
SI-Thyristor and Gate driver circuit

低インダクタンス得るために
同軸構造



Capacitor

Diodes



Equivalent circuit



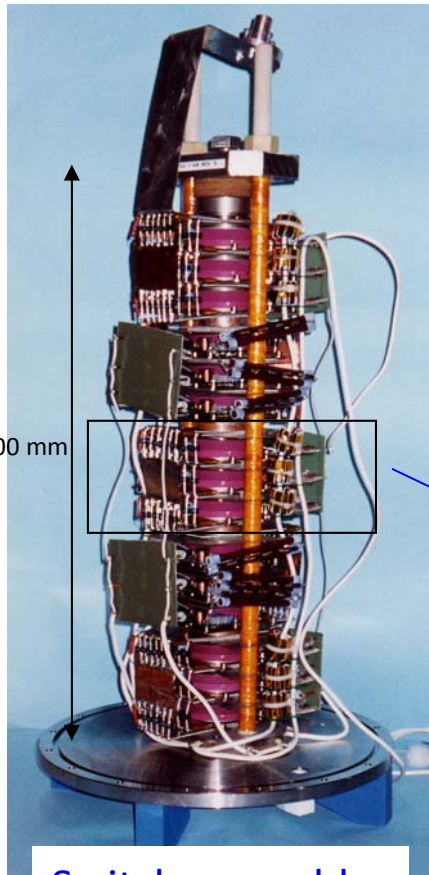
Photography of the test circuit

Circuit inductance(~136nH)



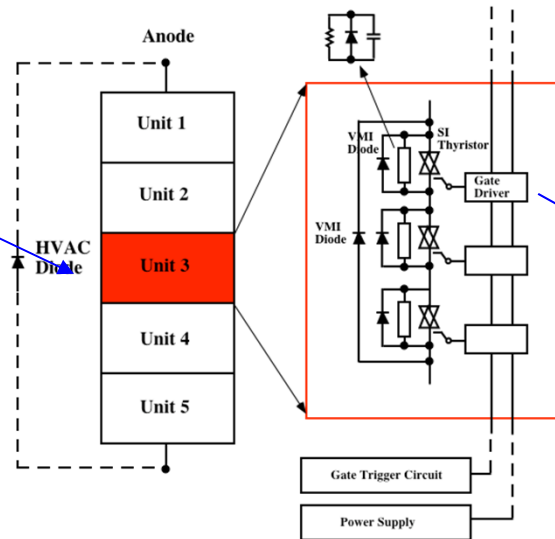
45kV SIサイリスタスイッチ

SIサイリスタ 15素子直列接続



Switch assembly

- Hold-off voltage 45 kV
- Peak current 6,000 A
- Pulse width 6 μ s
- Repetition rates 50 pps
- Device SI-Thyristor[NGK
:RS1600PA40T1(4kV)]
- Connection 15 devices in series
- Insulation Oil
- Cooling Forced oil cooling



Basic circuit diagram

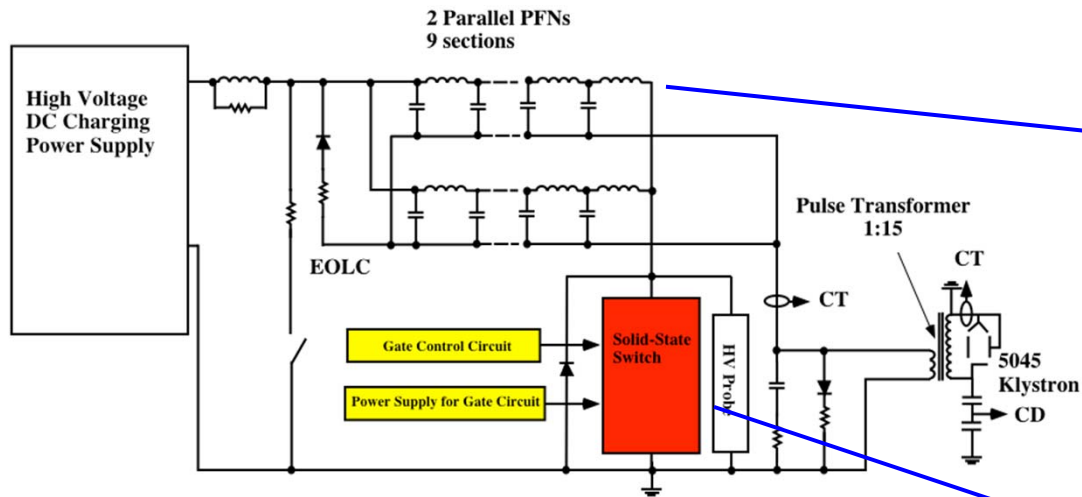


Gate driver circuit and SI-thyristor



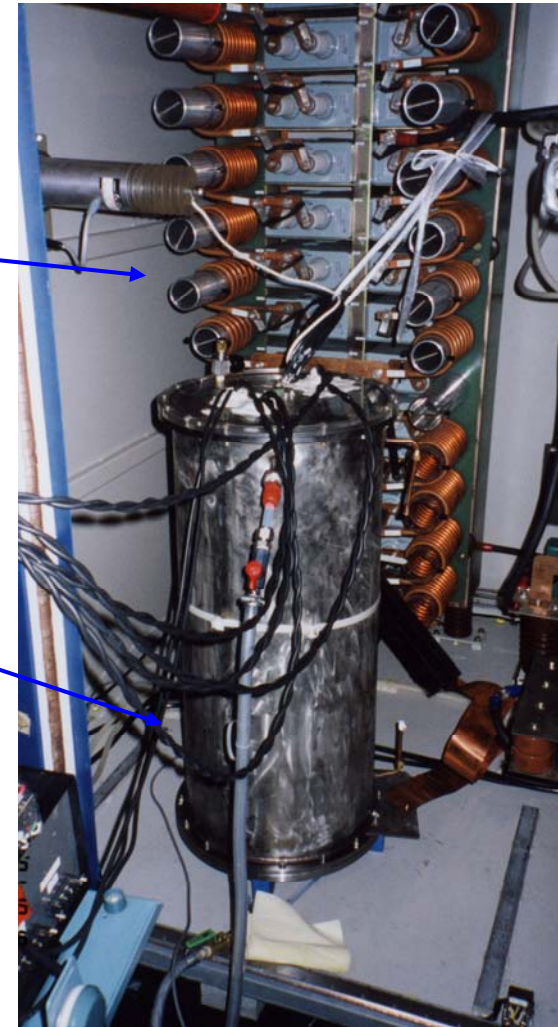
SIスイッチの試験

ATFで実機での性能試験



Operation Parameters

- Peak output power 136 MW
- Hold-off voltage 45 kV
- Peak current 6 kA
- Pulse width 6 μ s
- Repetition rates 25 pps
- di/dt 10 kA/ μ s

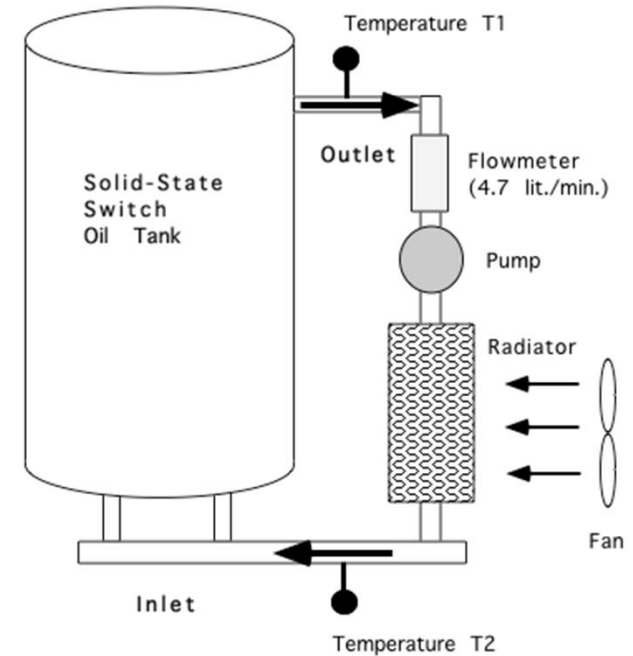




SIスイッチのスイッチロスの測定

• Measurement of switch losses by means of calorimetry

PFN Voltage (kV)	PFN Stored energy (J/pulse)	Switch Losses (J/pulse)	Details of switch losses		
			Balance resistors (J/pulse)	Gate Circuits (J/pulse)	Devices (J/pulse)
20	162	9.4(5.8%)	0.98(10.5%)	0.8(8.5%)	7.6(81.0%)
30	365	21.3(5.8%)	1.92(9.0%)	0.8 (3.8%)	18.6(87.2%)
40	648	32.8(5.1%)	2.77(8.5%)	0.8 (2.4%)	29.2(89.1%)
45	820	41.1(5.0%)	3.10(7.4%)	0.8 (2.4%)	37.2(90.7%)



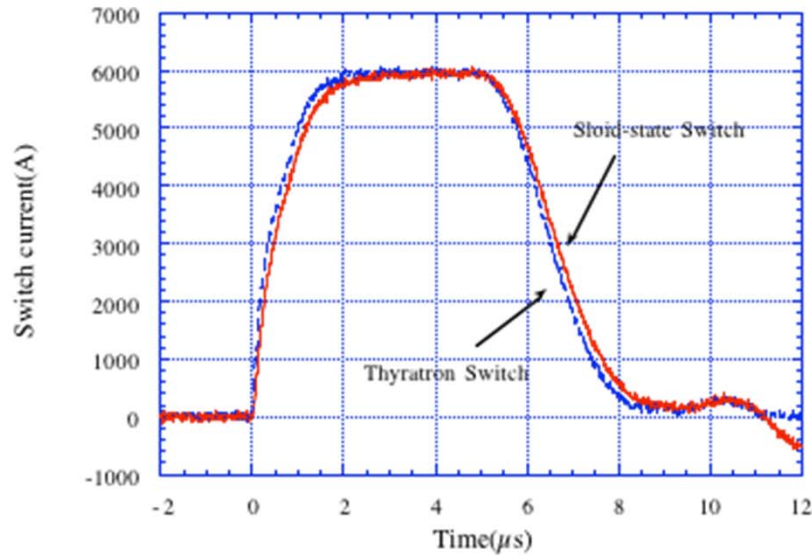
45kVで5 % のスイッチング損失(課題)

130 W/°C



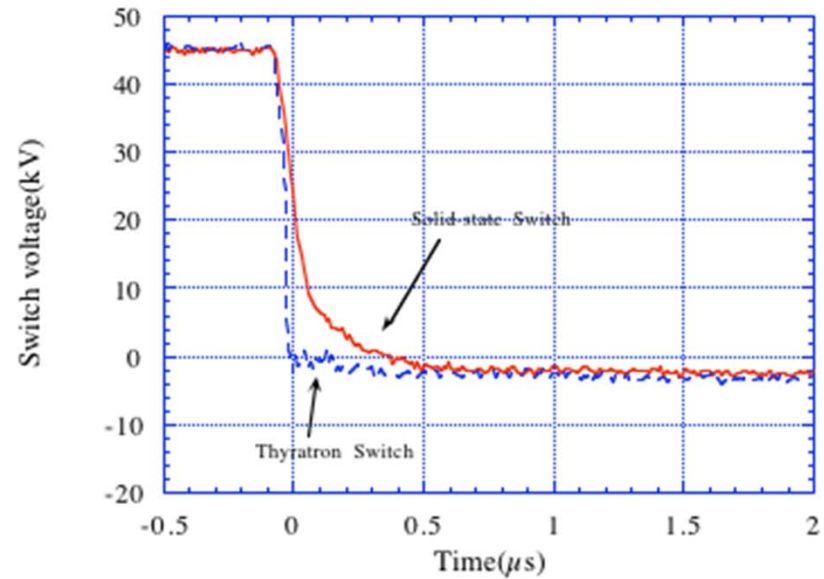
サイラトロンとSIスイッチの比較

Switching Current



Thyatron : EEV CX1536

Switching Voltage



Thyatron Switching Time(90-10%): 40 ns
Solid-State Switching Time(90-10%): 208 ns

サイラトロンの価格

- サイラトロンの寿命は20K~30k時間程度である。時にはそれ良いずっと短い時間で使用不能になる。
- 電子ライナック用のサイラトロンは概ねどこでもKEKと同じような型式のものを使用している。
- KEKは毎年10本近いサイラトロンを入札で購入しているが、大学や小さい研究所では1~2本ずつ位しか購入できず、KEKより高い価格で購入せざるを得ない。
- 価格は150~200万円/本である。
- 過去にKEKの入札にあわせて、大学で購入時期をきめ代理店にKEKの数量の価格での購入を行ったことがる。このような仕組みを作ると大学等で安くサイラトロンの調達が可能となる。



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

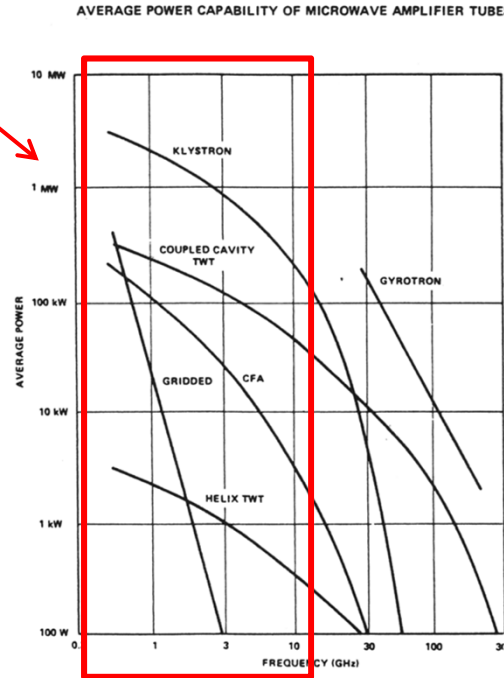
1. 周波数レンジ- 0.3 GHz以上の周波数帯ではクライストロンが最適のRF源である。0.3 GHz以下の場合、半導体増幅器、IOT 及び板極管などが使用される。安定度の面からMagnetronやTWTはあまり使用されない。半導体増幅器を除くとほとんどが電子管デバイスである。
2. 尖頭電力値—エネルギー利得と関連: 大きければ短いライナックですみ、コストが安い。印加電圧が高くなるので、管内、加速管内での放電を以下に抑えるかが重要。
3. 平均電力値—デューティサイクルやパルス繰り返し率と関連。CW加速器でも重要。
4. 利得—励振増幅器と関連する。高利得であることが望ましい。一般にクライ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。



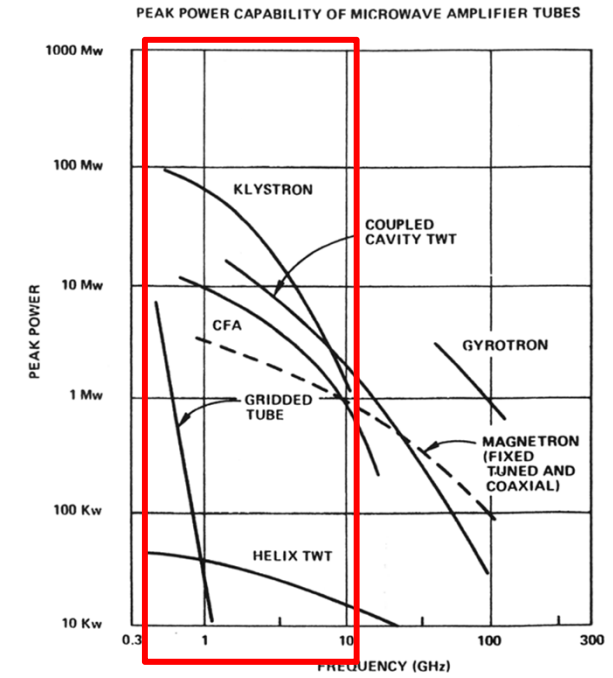
可能なRF源 - 現状

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。



平均電力 対 周波数



パルス尖頭電力 対 周波数

各種RF源の比較

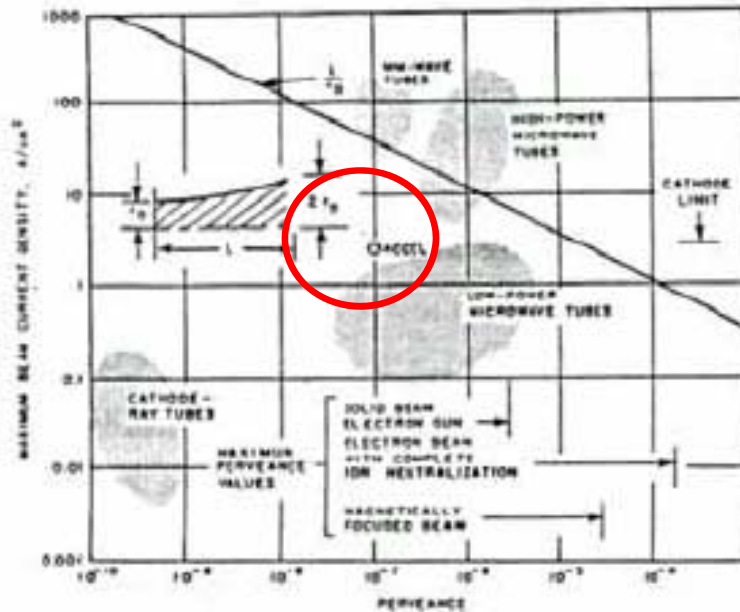
	Efficiency (%)	Bandwidth (%)	Gain (dB)	Relative Operating Voltage	Relative Complexity of Operation
Gridded Tube	10-50	1-10	6-15	Low	1
Klystron	30-70	1-5	40-60	High	2
Magnetron	40-80			High	3
Helix TWT	20-40	30-120	30-50	High	3
Coupled Cavity TWT	20-40	5-40	30-50	High	3
Gyratron	10-40	1	30-40	Low	5



電子管での重要なパラメーター; Perveance

Perveanceの定義

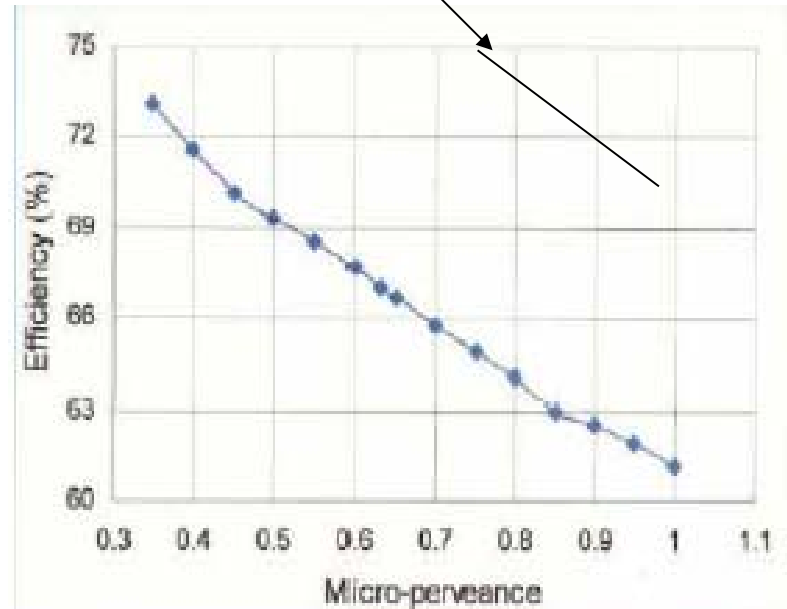
$$K(\mu\text{perv}) = I/V^{3/2} \times 10^6$$



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

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



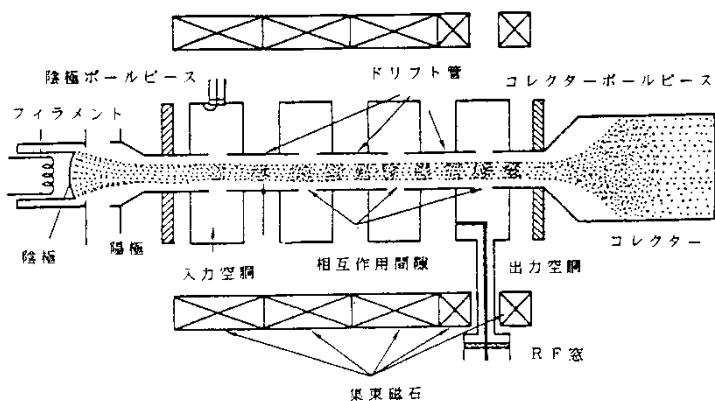
低 perveance クライストロンは高効率であるが印加電圧は高い



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。

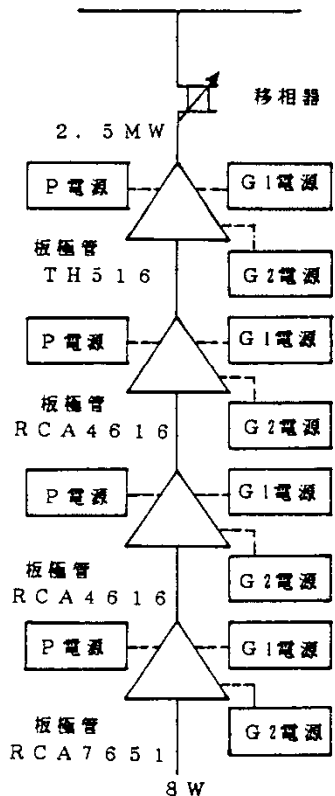
ゲインが高く(40~50dB)構成が簡単(右図)
電圧駆動型で位相、振幅とも制御しやすい。
TWTのように広帯域ではないが加速器は
狭帯域で十分。
大電力化が可能。(~150MW)



クライストロンの概念図

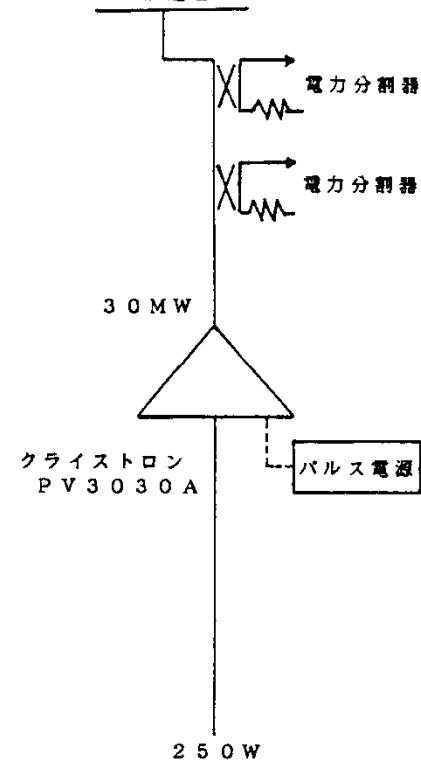
真空管式とクライストロンの場合のシステムの違い

(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