

## 話 題

## 加速器と Klystron その二

## 加速器における S バンド以外の Klystron の発展及び発振との格闘

福田 茂樹\*

## Accelerator and Klystron (II)

## Developments of Klystron other than S-band for Accelerator and Struggles against the Oscillation

Shigeki FUKUDA \*

## Abstract

Modern accelerators require the microwave technology and typical devices are klystrons. This article describes the developments of klystrons other than S-band, since developments of S-band klystron and linac were already described in the last volume of this journal. Recent progress of computer simulation enables us to manufacture tailored klystron mating with the accelerator having the desired frequency. Sometimes klystron engineers had to face to the difficulties involving the oscillations and instabilities, and spent a lot of efforts to solve them. In this article, such oscillation and instabilities which author experienced before are mentioned.

## 1. この稿の初めに

前回の解説では線形加速器の発展と不可分であった大電力 S 帯パルス Klystron の国内外での発展と筆者の関係した部分をまとめて解説した。今回は S 帯以外の周波数を用いた加速器用途の Klystron について述べたい。前の稿で述べたように加速器にとって大電力 RF 源は必須のものであるが、加速器の周波数の選択は、古くは使える Klystron が市場にあるかどうかで決まっていた、自由度が無いに等しかった。しかし 1970 年代頃から Klystron 設計に関連する計算機シミュレーションが発展したおかげで、要求があればオーダーメイドで製造が可能になった（但し開発までの費用はお高めであることは否定できないが…）。筆者はたまたま KEK における多くのプロジェクトに関わる機会に恵まれ、必然的に Klystron の開発の輪に巻き込まれたので、本稿では主に、日本国内での加速器プロジェクトと S 帯以外の Klystron について、主には筆者の周辺で展開したことを中心に述べたい。筆者の周辺といっても日本の Klystron 製造会社は数社しかなく、営業

も技術者も皆知っているので PF と TRISTAN 用が開発された 500 MHz の CW Klystron 以外の大半の Klystron は多かれ少なかれ筆者と関係があり、多くをカバーしていると思う。

S 帯以外のパルス Klystron でまず触れなければならないのは、衝突型線形加速器：リニアコライダー（LC）と関連する Klystron である。即ち、X 帯（11.424 GHz = 2.856 MHz の 4 倍の周波数：SLAC が最初に推進）や C 帯（5.712 GHz = 2.856 GHz の 2 倍の周波数：当時 KEK にいた新竹積が推進）の Klystron である。これらの開発には結構な時間がかかっている。一方で筆者は、現在の J-PARC 加速器の前身である JHF（Japan Large Hadron Facility）における L 帯 Klystron の開発に参加した。その後プロジェクトの骨組みが変わり、運転周波数も変わったために現在 J-PARC で使われている VHF 帯（324 MHz）Klystron 及び UHF 帯（972 MHz）Klystron の開発に巻き込まれた。巻き込まれたという意味は、本来は会社での設計製作で済む予定が、後述の発振現象（6.2 節及び 6.3 節）で困難に直面し、会社とタッグを組んで解決に専心しなければならなくなったから

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp)

である。筆者は JHF 及び J-PARC 加速器の RF 源を手伝った後（途中前稿で述べた KEKB の S 帯 Klystron の開発に携わったが）、GLCTA (Global Linear Collider Test Accelerator) と称する LC 計画を手伝い、X 帯 Klystron 関係を、同じころ SuperKEKB の一つの選択として C 帯 Klystron の開発に参加した。次いで 2008 年の LC における技術選択を経て超電導技術に基づく ILC 計画に参加し、RF 源の設計のお手伝いを行った。これは現在に於ける ILC 及び KEK-STF に於ける L 帯技術（周波数 1.3 GHz の Klystron 等）と結びついている。本稿では先ず出発点として、無謀にも KEK で Klystron を設計製作しようとした試みと失敗（成果もあった：例えば前稿で述べた Sub-booster Klystron の開発）について述べる。次に C 帯 Klystron と最近の LC/ERL 用 L 帯の Klystron に触れる（L 帯 Klystron は非常に順調に行った稀有な例である）。後半に非常に悩まされた発振現象や不安定現象について現象別にまとめて述べてみたい。筆者は学生時代の物理実験ではエレキは苦手で増幅器を作ろうと思うと発振器にしかならず、発振器を作ろうとすると単なる増幅器にしかならない等大いに苦労した覚えがあるが、長じても同じような宿命に見舞われたので感慨深いものがある。

## 2. Klystron の自作の試みと失敗

筆者の Klystron との関わり合いの最初は前稿で述べた日米協力事業における 150 MW-Klystron の開発に参加したことである<sup>1)</sup>。しかし当時のボスは私に短期の米国滞在しか許可せず（実際には 1 か月間と翌年の 3 か月間の 2 回）Klystron の設計自身に大きく寄与することはなかった。代わりに東芝から岡崎行男、米沢宏が参加し、設計やシミュレーションソフト開発に寄与、三菱電機 (MELCO) からは渡辺優が参加していた。1 年目の時は当時 KEK においてトラブルが頻発していた S 帯 Klystron に有効な情報集めを期待されていたので SLAC にとって客人として過ごしたに過ぎない。2 年目は私自身、Klystron 窓（前稿参照）の破壊を防ぐための Ti 薄膜を蒸着する RF スパッタリング装置を開発し（今もそれが使われていることから）それなりの寄与はしたと思うが、KEK 側からはやはり Klystron のトラブル解決のため

の情報収集の要請が多かった。

当時 KEK では Klystron Crisis という言葉が良く使われた。当時 TRISTAN 用に国内で開発された CW 1 MW の Klystron（周波数 500 MHz）が不調で、寿命が短かったり、放電したりと運用上悩まされていた。初期製造の 12 台の Klystron 中相当数がそのために仕様を満たさず、結局 VALVO 社の Klystron を導入したりしていた。一方で S 帯パルス Klystron も前稿で述べたように放電と短寿命で危機的な状態であった。ある時、KEK で Klystron 製造会社と不具合の対策会議をした。その席上その会社の工場の技師長に、「なぜ日本の真空管の性能、特に内部真空がこうも悪いのか」と聞いたところ、「米国カリフォルニア州は気候が乾燥してますから何故か違うんですよね」等と言うので口論になったことがある。結局は真空管の真空処理やプロセッシングの問題、材料管理の問題、カソード処理の問題等が累積して性能の悪いものが出来てしまったことが後から分かった。結局は、当時の米国人は基本的にやるべきことを愚直にちゃんとして行ってそれが信頼性を上げる基本であったということを確認した（当たり前のことである）。それが前稿で述べた Klystron 改良に対する取り組みへのモチーフとなっていた。

このプロセスで KEK の首脳陣は Klystron メーカーに多少の不信感を持ったことは否めない。Klystron に関する情報や図面等一切の情報を拒否するために、我々が出来る協力が出来ない場面が多かった。一方で困った時には泣きついてくるし、情報収集で SLAC への仲介をしたりもした。ということで JHF 計画が持ち上がった時に当時加速器施設長であった木原先生から KEK で Klystron を自前で製造出来るようにしたい、そして私にその任を務めよと言われた時はびっくりして固辞した。施設長は SLAC を念頭に置いていたのであろうが、技術的にも人員的にも比べものにならず、無謀であると思ったからである。しかし結果的に押し切られ、徒手空拳引き受けることになった。ターゲットは周波数 1296 MHz、出力 5 MW、パルス幅 600  $\mu$ s、繰り返し 50 pps であった。当初は福田、竹内保直、久松広美と斎藤芳男（真空コンサルタント）ぐらいで出発し一部の製造は三菱重工 (MHI) 三原工場と組み、KEK 内にも排気

炉や真空処理炉を導入して Klystron の製造の真似事を始めた。設計は KEK 側(私と一部の協力者)が責任を負うということである。勿論 Klystron のような複雑な真空管の製造を全て我々が知っている訳ではない。一方、日米協力事業で開発した 150 MW Klystron に関しては子図面に至るまで全図面が KEK に提供されていたので、これをベースに MHI と全工程の一覧表を策定し、製造の詳細を決めることが出来た。

Klystron の製造工程は複雑であり時間も多くなることは余り知られていないと思う。カソード、組立てた Klystron 等は 500°C 内外で 1 ~ 2 週間 24 時間二重真空排気炉でベーキングを行い、真空管にした後は又 2 週間近く高電圧と RF のプロセッシングを 24 時間連続で行うのである。その間スタッフの誰かは見張っていなければならないので人数が少ないことは厳しい条件である。ビームテスト管は無事試験終了したが、本番の Klystron で Chip-off し損なった。その再生管が後述のように激しいガン発振を起こし、そのプロセッシング途中でコレクターが溶融して破損した。ドーンと大きな音で電源が止まった。シーンとした現場で私は不吉な思いに駆られた。分解した Klystron 内部では内部に浸水した水が氷になっていた。再チャレンジの計画の途中で周波数が変わり J-PARC 仕様へ繋がっていく。3 年間注いだ努力はあまり実らず終わった。一方で先に述べたように KEKB 計画があり、この KEK の Klystron 製造装置では Sub-booster Klystron の一号機を作る方向に転換した。これは先に触れた通りである。

### 3. Klystron Simulation Code

1970 年代から Klystron に関する計算機シミュレーションコードが開発され始め、設計に使われ始めた。この動きを加速させた先駆けは、Tallerico による 1 次元デスクモデルの論文<sup>2)</sup> だと思う。筆者も MELCO の小野寺俊男に請われてコーディングをした。NEC の景山は空洞の相互作用も取り入れてより発展させた。これらをベースにした JPNDISK コードが、先に述べた日米協力に参加していた岡崎らにより開発された<sup>3)</sup>。一次元モデルは、ビーム径は一定であり、Disk に輪切りにされたビーム要素間で空間電荷

力を考慮する模型である。そこそこ、Klystron の利得や飽和特性などの動作を説明することができ、筆者もよく使用した。しかし前稿で述べたような収束磁場の影響などは取り込めないで自ずと限界があった。1980 年代後半になり 2.5 次元の PIC (Particle-in-cell) コードが開発され、より現実に近い解析が出来るようになった。筆者の周りに限って述べると、KEK では新竹積が FCI コードを開発し<sup>4)</sup> それを用いて私は前稿の S 帯 Klystron 開発を行った。またロシアの故 Sandarov の開発した Arsenal-MSU コードもよく利用した<sup>5)</sup>。後者は電子銃からコレクターまで一貫して収束磁場込みで扱え、動作のアニメーションも可能で使い勝手が良いものであった(図 1 参照)。

今までのコードは空洞については回路の集中定数を使用していたが、C 帯や X 帯の多空洞(進行波型)出力空洞の取り扱いには向かないのでよりリアルなシミュレーションが求められ MAGIC コードというプラズマ物理分野で使われた汎用コードによる、より精度の高い(が複雑で時間もかかる)計算もされるようになった。次に述べる C 帯 Klystron や X 帯 Klystron の KEK における設計はこれらが使われた。

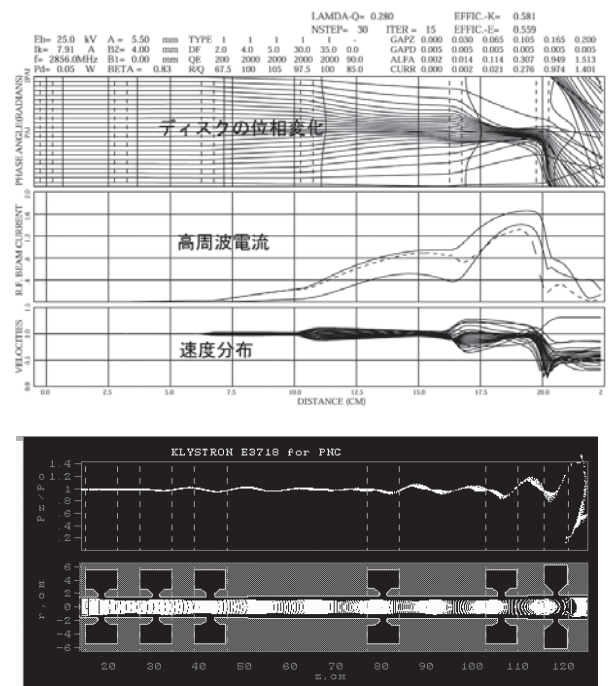


図 1 Klystron シミュレーションの例。上図は一次元 JPNDISK コード。下図は Arsenal-MSU コード。



#### 4. C 帯パルス Klystron の開発

発振等深刻な現象に見舞われなかった例として、まず C 帯パルス Klystron について述べたい。C 帯 Klystron はそもそも JLC の C 帯オプションとして新竹積により提唱され、東芝で 50 MW 級の Klystron が開発された<sup>6)</sup>。進行波型出力空洞を採用し FCI で設計された。この開発経緯には筆者は嘸んでいないので詳細は分からない。その後 SACL A の FEL 計画が進行しその C 帯システムに 64 本が採用され稼働している<sup>7)</sup>。

2003 年ごろ KEKB の将来計画としてライナックの後半を C 帯周波数化する計画が出された。これは KEKB リングでの電子雲による陽電子のブローアップを防ぐために陽電子を 8 GeV に増強しようという提案に基づいている。この時新竹より C 帯 Klystron を譲り受け試験に臨んだが同時に C 帯 Klystron の開発を MELCO と組んで始めた。何故東芝の管があるのに敢えて開発に乗り出したかという、我々の S 帯 Klystron の経験から 2 社が同等の仕様の Klystron を競い合うことで価格的にも性能的にも良い効果が出るのが分かっていたからである（但しユーザーにとっては良いが会社にとっては迷惑だったかもしれない）。

東芝から RF 的な設計は入手出来ないのは当然であるが限りなく同等のものを作る必要があった。後述のように、X 帯 Klystron の設計では MAGIC コードを用いて進行波型出力空洞の設計を行った経験があったので、それを C 帯にも応用して設計を進めた。MELCO の若手技術者、吉田清彦、中国北京の電気研究所の王勇らと我々のスタッフでチームを作り、MAGIC の使い方を伝授して MELCO での設計が進められた<sup>8)</sup>。試作品は入力空洞に起因する不安定などが見られ完全に成功したとは言えないものであり、その後この C 帯周波数化のプロジェクトが中止になったので未完のままの状態がしばらく続いた。しかし最近、MELCO はこれを完成させ、SACL A に納入した。

#### 5. L 帯 ILC/ERL 用 Klystron の開発

最近超電導技術を用いた加速器のプロジェクトがいくつか進展している。その代表的なものが ILC である。この ILC の RF 源としてベースライ

ンになっているのが L 帯 10 MW マルチビーム Klystron（通称 MBK）である。マルチビームにするのは一本のビームのパービアンスが小さいと空間電荷の反発力が小さいので RF 変換効率を高くすることが出来るからである。しかし一本のビームで所定の出力を得ようとするとも電圧が高くなりすぎ放電などの危険性が多くなるので、多ビームにする。そうすると電子銃にかかる電圧を低く抑えることが出来る。ロシアでこの技術が発展された。

ILC では DESY と Thales が TESLA/ILC 関連で最初に 10 MW、パルス幅 1.5 ms の MBK を開発した<sup>9)</sup>。日本では Y. H. Chin が主導して東芝で開発に成功し性能の良いものが製造された<sup>10)</sup>。ILC の TDR においてベースライン部品として採用になっており、又 DESY の EURO-X-FEL 以外に KEK の STF や米国 SLAC/FERMI 研でも 1 ~ 2 台稼働している。周波数 1.3 GHz は超電導加速器では一種標準の周波数となり超電導技術を用いた加速器では MBK 以外にも幾つかの Klystron が開発されている。ILC 絡みでは筆者が小型 Klystron を多用するシステム DRFS (Distributed RF System) を提唱し変調アノード付 L 帯 800 kW パルス Klystron を製造した。KEK で進められている ERL (Energy Recovery Linac) 試験機用では入射部ライナック用に、L 帯 300 kW CW Klystron が開発された。単ビームながら安定で高効率のもの (60%以上) が開発された。これらは比較的最近の成果であるが、総じてトラブルもなく順調に開発できた例である。

#### 6. Klystron の発振現象との格闘

以下の章では新しい Klystron を開発する際によく直面する不具合について説明したい。発振現象は Klystron が増幅器であるにもかかわらず、入力無しでも RF 出力が出てきたり、発振電力と増幅電力が同時に存在し且つ競合し合ったりするものである。それとは別に不安定現象と呼ばれる出力電力に波形欠けや高調波などが混じる現象がある。いずれも本来の使用には適さず原因を追究して解決（大概是製造し直し）をする必要がある。

##### 6.1 ダイオード発振 / ガン発振

ダイオード / ガン発振は前稿で述べたように日米協力の 150 MW Klystron で発生したのが筆者

にとって初めての経験であった。その後古くなった S 帯 Klystron PV3030 で観測したのが KEK での初見であった。以降何回かダイオード発振に直面し、その度に冷や汗をかきながら対策に追われた。

まず現象そのものについて説明する。Klystron に電圧を印加して動作を確認しようとするすると、RF 励振入力が無いにもかかわらず出力が観測される。また Klystron ソケット周辺から観測用ループなどで発振波形が観測される。特徴的なことは(多くの場合)設計動作周波数とは全く関係のない周波数で発振すること、又発振波形を見るとパルス波形の後半部分から成長し出すことである。閾値を超えたばかりではわずかな発振であり、時には主増幅波形と共存するが、電圧を高くすると非常に激しくなりほぼ発振波形のみになる。カソードの温度を下げて、放出電流を通常の動作域である空間電荷制限流領域から温度制限流領域にしてやると止まることがあるが、これでは定格の電流が取れないので結局実用にはならない。周波数的には高電圧パルス管では 1.5 GHz 近傍が多くこれは最低次の軸対称モードが電子銃の構造と結合して起こると思われる。その他に高調波モードでは 3.5 GHz またはそれ以上の周波数の発振を経験している。例外的にほぼ運転周波数と同じ 2.86 GHz で発振したのも経験した。

後述の通りガン発振はガン・インピーダンスが負となる領域でビームの持つ交流成分が周辺の形状で決まる共振周波数と結合して起こるので、理屈の上では外部の結合を絶つと収まる可能性がある。SLAC の 150 MW 管ではタンク内の絶縁オイル中に電波吸収体を入れて Q を下げようとしたが、それがかえって絶縁油を汚しタンク内での放電を激しく助長することになった。結局電子銃部近傍の形状を変えて試験するしかないのが実情である。予防的なシミュレーションは出来ていないのが現状であり、可能性を一つずつ潰して形状を変えたもので試験するしかない。

ダイオード発振についての古典的な論文は Tomiyasu らによるものがあり、よく引用される<sup>11)</sup>。Tomiyasu はダイオード発振が起きる条件はダイオードの陰極陽極間で十分大きな負抵抗が生じなければならないと指摘し、Llewellyn による平行電極板ダイオードにおける解析<sup>12)</sup>によれば、十

分大きな電流密度と適切な電子走行時間があれば負抵抗が実現することを指摘した。それに基づいてダイオード発振の解析を行った。また後に抑制法についての考察ノートも発表した<sup>13)</sup>。Llewellyn の Diode-equation については Chodorow による教科書で導出などが記載されている<sup>14)</sup>。なお 150 MW Klystron についてのガン発振について文献<sup>15)</sup>に報告がある。

いろいろなモードのガン発振は Stanford 大での初期の Klystron 開発で観測記録がマイクロ波研の内部資料として残っているので相当苦労したことがわかる<sup>16)</sup>。先に述べた 3.5 GHz 近傍の発振についてはすでに SLAC の報告があり、KEK も参考にした<sup>17)</sup>。電子銃電極周りの TM モードと関連し、長時間使用後のエミッション放出むらで誘起されたと思われる。一方で、ガン発振が一筋縄ではいかないことは KEK での以下の 2 つの経験からもわかる。一つは KEK での PV3030 の改善過程で経験したことである。MELCO と協力して改良に取り組んでいた時に、2 mm 程度陰極を陽極へ近づけるとパービアンスは若干上がるが同時に効率が上がるという管が出来た(これは本来、理屈に合わない)。そこで次年度 10 本程度の新 Klystron を発注した際にその変更を盛り込んだところ、半数以上がガン発振を起こした。しかも周波数は動作周波数と同じで発振電力が 20 MW 近くに達したのである。勿論使い物にならないのですべて MELCO にお願ひして元の寸法に戻したところ収まった。原因は不明である。もう一つは自前で作った L 帯の Klystron である。ガン発振の恐れがあるので 5045 という実績のある S 帯 Klystron と同じ寸法のガンを採用し、二極管でも動作を確認した上で本番 Klystron に採用した。KEK での排気ベーク中にちょっとしたミスからチップオフし損ない、MHI で潰し損ねた排気用銅管だけを交換した(カソード本体を交換しなかったのが悔やまれる)。その Klystron を KEK でエージングしていたら強力なダイオード発振に見舞われた(図 2)。周波数は 5.3 GHz と非常に高いことからガン周りの高調波モードに近いものと推定できる。実際この電子銃は SLAC や ATF などで多く使用されているし、自分も二極管試験で発振が無いことを確かめた筈なのに何故? 結局思い当たるのは排気し損ねたカソード



が一様な密度のエミッションを出せなくなったからではないかと想像した。円周方向に電子密度のむらがある場合 Llewellyn のガン方程式がどうなるか定かではないが、それによる発振の誘起と関連していると思われる。しかしながらこのような問題を学術的に追究する暇とお金がなかったためこの原因の追究は止めた儘になっている。

前稿で S 帯 150 MW Klystron が DESY で使用されたことを述べたが、どのようにガン発振を解決したのであろうか？ これについては DESY と SLAC のチームが協力してガン発振の起きない管を開発した。ガンにおける寄生発振に関する計算と RF 測定で解析を行った報告がある<sup>18)</sup>。

### 6.2 コレクター発振

J-PARC の陽子線形加速器の 200 MeV までの低エネルギー部に用いられた Klystron は周波数が 324 MHz でピーク出力 3 MW のものであった<sup>19)</sup>。定格は電圧 110 kV で出力 3 MW、パルス幅 650  $\mu$ s、繰り返し 50 Hz である。仕様書を書くに当たり、保守をどうするか、設置をどうする

かを検討した。周波数が低いこともあり、横置き型で現場に設置することにした。当時 Thales 等が CERN に納品していた横置き型 (352 MHz Klystron) を視察したりした。それでこの管は日本で初めて横置きを採用した Klystron となった (図 3 上図)。当時東芝ではこの Klystron を試験する装置がなかったため、KEK に納入されプロセッシングが行われた。納品された日、当時 J-PARC の責任者だった山崎良成氏が (所謂 Klystron Crisis を知っていたので) この Klystron にお神酒をあげて祈り、関係者で記念写真を撮ったのを覚えている。しかしながらその甲斐なく、プロセッシングが進行中印可電圧 64 kV から、急に励振電力が無いのに出力が観測された。発振である。発振周波数は運転周波数に限りなく近い 324 MHz 近傍であった。途中 71 kV から発振が止まり喜んだが 90 kV から再び発振が起きた。結局増幅器として 3 MW は達成出来ず失敗した。この発振を解明するために、ソケット部にループを設置したり、入力接栓や出力導波管からのモニターの分析をしたりした。しかし決定的だったのは出力空洞とコレクターの間にイオンポンプ用の永久磁石を近づけたところ発振の様子が大きく変化したことである。いろいろな測定を総合すると結局コレクターに捨てた一次電子が跳ね返って逆行し、これがドリフト空間を走行して入力空洞へ

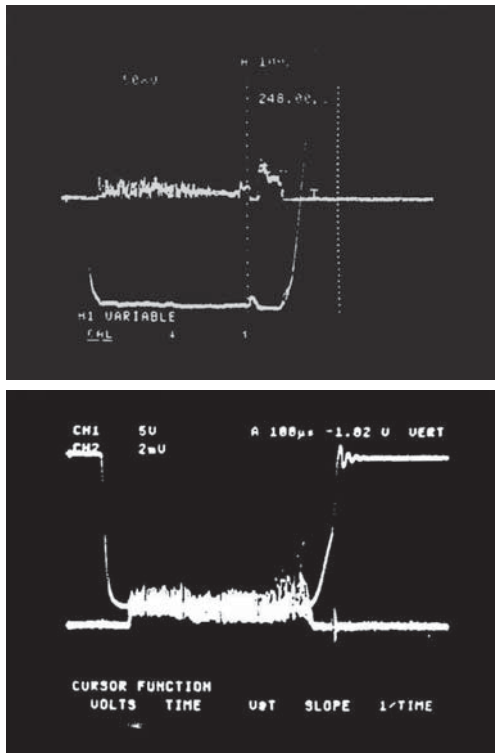


図 2 L 帯 KEK 試作管のガン発振の波形。いずれも入力 RF なし。上図の上から立ち下がる波形は印加電圧波形 (ここに発振の影響が出ている), 上図下 (中央に位置する波形) は導波管からの RF 波形。下図, オイルタンク付近でループピックアップにより発振波形を拾う。

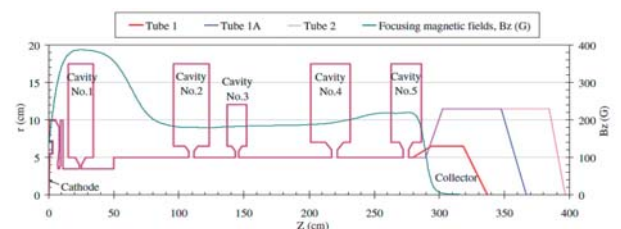
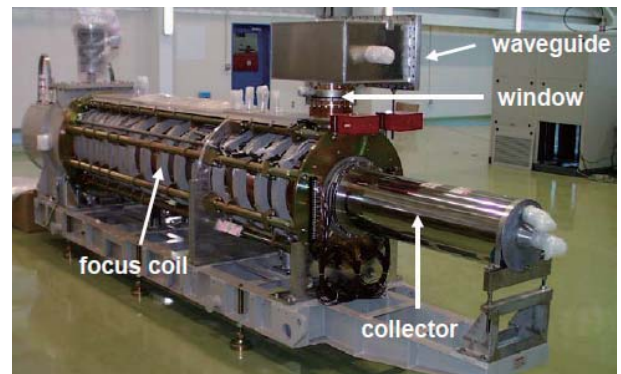


図 3 Klystron の全体写真 (上), 断面図, 空洞, コレクターのサイズ等の概略図 (下)<sup>21)</sup>

達し、この間の負帰還で発振が起こったと結論付けた。コレクター形状が若干長い #1A 号機、更に長い #2 号機ともに完全には発振を止めることは出来なかった。結局完全解決迄に 7 本の試作品を作る羽目になった (図 3 参照)。

最初の発振を受けて、KEK ではこの現象を計算機シミュレーションで解明しようとした。偶々 Klystron を研究しようとしていた私の総研大の学生、方志高君がいたので彼に解析をさせた。Klystron のコレクター内での電子ビームは銅の管壁に当たり弾性散乱や非弾性散乱、二次電子放出過程など諸々の素過程を経る。その中で入口に戻ってくる電子の確率はどれくらいあるのだろうか？ KEK では幸い EGS4 (当時) というモンテカルロ法を用いた電子線ガンマ線によるシャワー解析コードがあり、それで電子散乱や二次電子放出等がシミュレート出来た<sup>20)</sup>。これを使って方志高はコレクター内での電子軌道や逆行した電子が収束磁場内にあるドリフト管を伝わって戻る過程を運動方程式で数値計算した。コレクター内での衝突散乱の様子を見ると驚くことにコレクター内で一回だけの壁衝突で入口に戻ってくる電子が直観的に考えるより多いということが分かった。更に 2 回、3 回と多重衝突をして入口に戻る電子も多かった。単純に考えるとコレクターが長ければ戻り電子は少ないし、コレクター入口のアーチャーが小さければ戻り電子が少なくなるのは容易に分かるが、計算結果もそのようになった (図 4)。短いコレクターでは一回の散乱で戻ってくる電子の割合は戻り電子全体の半分近くになる。これからコレクターはある程度の長さが必要であることがわかる。

ドリフトチューブに戻った電子はほぼ 100% 透過して入力空洞に行くのでそこで逆行電子が空洞を励振すれば通常の動作と同じ作用で増幅に寄与し結果として発振する。方志高は戻り電子からの負帰還を考察し、発振が起きる電圧の閾値迄ほぼ正確に再現することに成功した<sup>21)</sup>。

このような解析を振り返ってみると、目から鱗ではないが、何故コレクターからの逆行電子による発振が起きたかが理解出来る。設計周波数が低いのでドリフト管の遮断周波数からアーチャーは大きく出来るし、そうすると収束磁界も低く出来る。そこで途中でドリフト管のアーチャーを

広げたい。コレクターもサイズを小さくし、材料費も節約したくなる (図 3 下図参照)。これは一概に設計者を責める訳にはいかないがそれがこのような発振現象に結び付いたことも否めない。最終的にはドリフト管径は細いアーチャーに統一した設計となった。かくして 7 本目にして安定な Klystron が出来上がり、J-PARC の前段部分の RF 源のめどがついた<sup>22)</sup>。

### 6.3 ドリフトチューブ発振

J-PARC の陽子線形加速器の後段 (陽子エネルギー 200 MeV ~ 400 MeV) の部分は低エネルギー部の周波数の 3 倍、即ち 972 MHz が採用されていた<sup>19)</sup>。出力電力は 3 MW で 324 MHz とほぼ同じ仕様の Klystron ではあるが、市場には無かったので、やはり特注ということで東芝に試作をお願いした。仕様書作成段階では、通常の縦型設置とし、ソケットへの注文 (小型化など)、RF 出力窓の構造と冷却への注文 (C 型窓は使わない等) を付けた。今度は円滑に定格を満たす試作品が出来るだろうと楽観していた。この管も東

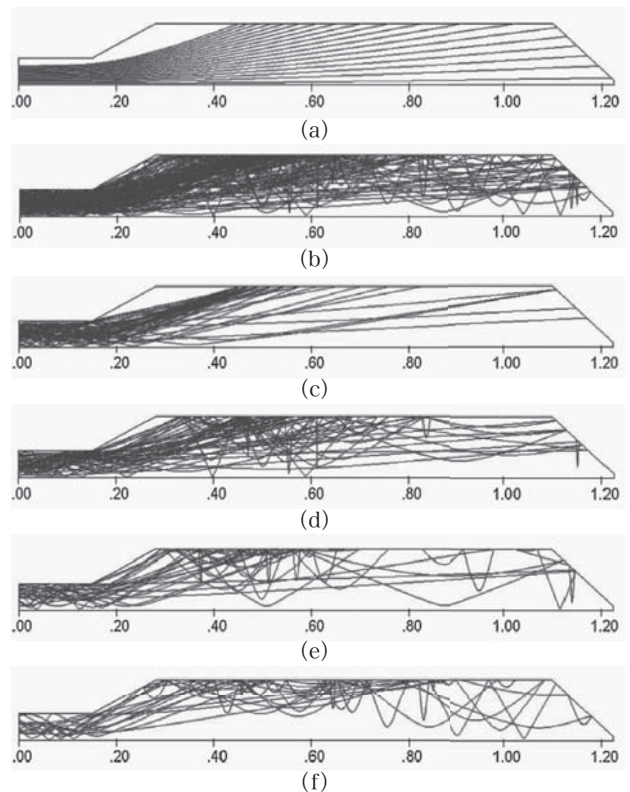


図 4 コレクターにおける電子の振舞。(a) は入射ビーム、(b) はコレクターで散乱され入口に戻る電子の全て、(c) ~ (f) はそれぞれ 1 回、2 回、3 回、4 回散乱して入口に戻る電子の軌道<sup>21)</sup>。



芝での試験電源不足の影響で今度は原科研の現場でプロセッシングを行うこととなった。しかしここで再び悪夢というか、変な現象にぶつかった。

現象だけを見ると発振である。周波数としては 3 つの周波数が異なる電圧閾値で発振した (1.46 GHz @70 kV, 3.21 GHz @90 kV, 1.3 GHz @100 kV)。ソケット部からそれらの発振成分がループなどで観測されたのでガン発振が当然疑われた。しかしながらどうも私の直観では「おかしい？」であった。発振波形を見るとパルス波形のお尻から成長してくるガン発振の特徴的な波形では無いことが一つ、そして出力空洞に発振周波数成分が余り出てこない上 102 kV 以上の電圧では出力電力がほとんど出てこないのである。発振が起きないパラメータで 2 MW 出力を見たが実用には向かなかった。東芝の技術陣はガン発振を強く疑った。前掲の Tomiyasu のダイオード式を適応して解析を行った。議論の過程ではきちんと現象を説明できなかったが、第一報はガン発振という見立てで報告をした。しかしながらこれは結果的には間違った報告をしたことになった。改修管で想定できる対策として、電子銃部に発振抑制部品を加えたりしたが効果は全く無くガン発振という線は最後には捨てられた。

現象の解明は収束磁界を各空洞に対応した所で変えたり、各空洞の離調を試みたりしたところ発振に影響を与えたこと、及びセツトを分解した時に発見したドリフト管部の焦げた跡から始まった (図 5)。第 2 空洞の高次共振モードの周波数が発振周波数に近いことも傍証となった。結論としては第 2 空洞の高次モードと結合したドリフト管発振であった。この解析については当時我々の RF グループに入ったばかりの若手、吉田光宏に解析をお願いし、見事にその発振過程を解明してくれ (図 6)<sup>23)</sup>、それから解決の処方箋が導き出された。発振のメカニズムを簡単に図式化すると第 2 空洞の高調波モード  $TM_{011}$  及び  $TM_{021}$  モードは空洞ギャップの中央で電界の向きが逆転するモードである。この共振周波数が観測された発振周波数とも一致した。このモードの Q が高くて、これらのモードが強くと誘起されると逆転した電界で電子ビームに急ブレーキがかかり、そこで放出されたエネルギーが空洞に伝搬される。すると更にこのモードが強くなるという負の循環に陥り、ビーム

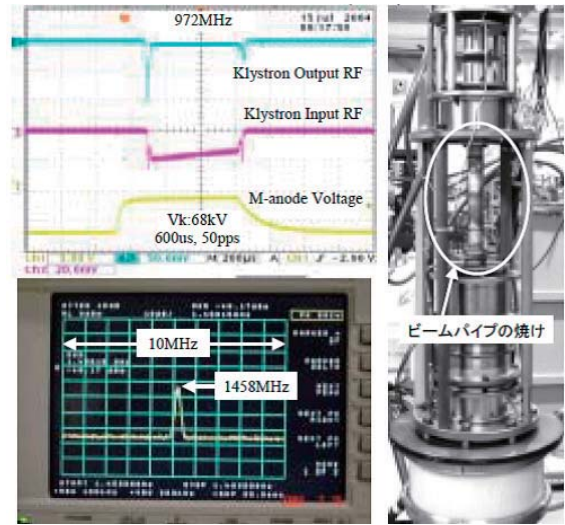


図 5 972 MHz Klystron の発振の様子 (左上), 発振周波数 (左下), ドリフト管の焦げた跡 (右)<sup>23)</sup>

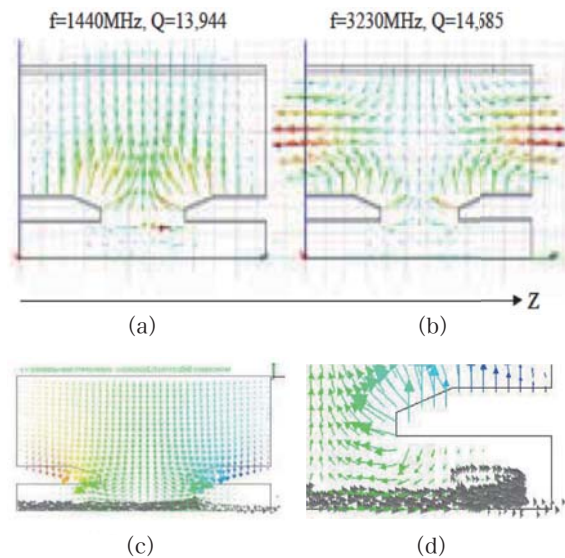


図 6 (a) (b) は第 2 空洞の高調波共振モード  $TM_{011}$  及び  $TM_{021}$ , (c) 80 kV の電子が第 2 空洞の  $TM_{011}$  モードでバンチする様子, (d) では更に進んでビームが逆走し始める<sup>23)</sup>。

が更にブロックされ、逆行し始め発振に至る。有効な発振抑制対策はギャップの形状を変える、高次モードの Q 値を下げる等で実際これが有効であった。これによる処方箋で無事 972 MHz Klystron の発振については解決を見た。当時は 400 MeV の後段ライナック部分は予算が通らず一度量産は中断されたが、2010 年に予算措置が諮られ無事 RF 源の完成を見た。私とグループのメンバーは発振解明までお手伝いしてこの仕事を



卒業した。以降は J-PARC メンバーで仕事が遂行されている。

#### 6.4 X 帯パルス Klystron と不安定現象

KEK では長らく常伝導 LC の RF 源として X 帯 (周波数は 2.856 GHz の 4 倍である 11.424 GHz) の Klystron を SLAC と組んで開発してきた。最初は故水野元を中心にしたグループで XB-72K (電子銃カソード径が  $\phi$  72 の X 帯 Klystron) を KEK で設計し東芝で製造してきた。目指すゴールは短パルス (100 ns 幅) ながら 100 MW を目指してきた。印加電圧は 500 kV 以上である。ここまで出力電力が大きいと単位空間当たりの電磁エネルギーも莫大で放電限界との勝負といった感じである。出力空洞は単空洞ではだめで進行波型多空洞にしたり, 出力窓も特殊な窓 (例えば円形モード窓) を採用したりと設計上多くの独自さと困難さを含んだ Klystron である。私自身は当初このプロジェクトには囁んでいなかったが, 途中から協力を要請されて手伝ったり, 人間関係が複雑で途中中断したりとしながら 2003 年から GLCTA<sup>24)</sup> のリーダーとして参加した。このころ XB-72K は 10 本ほど製作していたが (図 7 参照) 行き詰まっていた<sup>25)</sup>。また大電流を細く収束させるための磁石が半端でなく RF の平均出力より大きいという矛盾もあった。それで PPM 収束 (Periodic Permanent Magnet Focusing: 永久磁

石交番磁場収束) という新技術の導入を考えた (図 9 参照)。当時協力関係にあったロシアの BINP 研究所の設計で #1 号機を導入した<sup>25)</sup>。その後 Y. H. Chin を中心に KEK でも X バンド PPM Klystron を開発し始めた。この方式で 10 本 (改造を含む) ほど Klystron を製作したが, 中々完璧に製造するのは難しく, 幾多の困難に直面した<sup>26)</sup>。

これらの困難は具体的には出力電力が大きくなった時にパルス欠け現象が起きることから始まる (図 8)。進行波型出力空洞付近で放電が起きているらしいこと, その時に強い X 線が出ること, また放電音をセンスする音響センサーも反応することが分かった<sup>27)</sup>。不調となった管を分解すると進行波型出力空洞のあるセルが梨地状に荒れ, 溶融の痕跡があり, 同時にコレクターの突端にも溶融痕跡が見られた。また事態を複雑にしたのは PPM 収束について回るパスバンドの問題である。一般に数学的には Mathieu の定理で知られるように周期構造では禁制帯と通過帯が出来る。PPM 収束でも電圧の低いところは電子ビームが Stop バンドに入って通過しない。パルス運転ではパルスの立ち上がりや立ち下りの部分でビームが禁制帯に入り透過できず管壁に当たり内部を傷める (図 9)。これと先の波形欠けが関連しているようであるが明確には出来なかった。結局これは未解決となり PPM クライストロンの使える範囲は限定さ

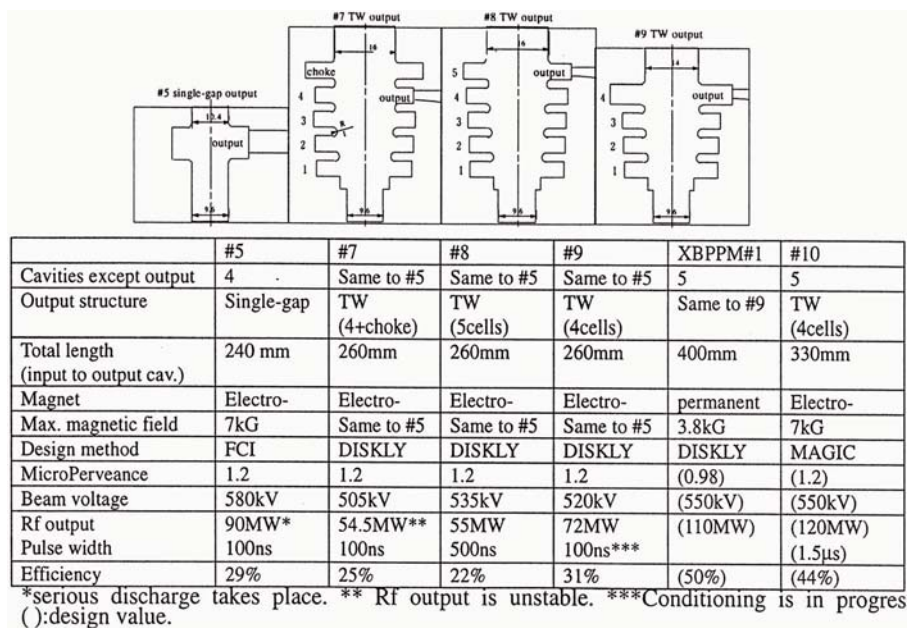


図 7 XB-72K のシリーズのうちの #5 ~ #10 と BINP 製 PPM Klystron (XBPPM#1) の諸元<sup>25)</sup>。

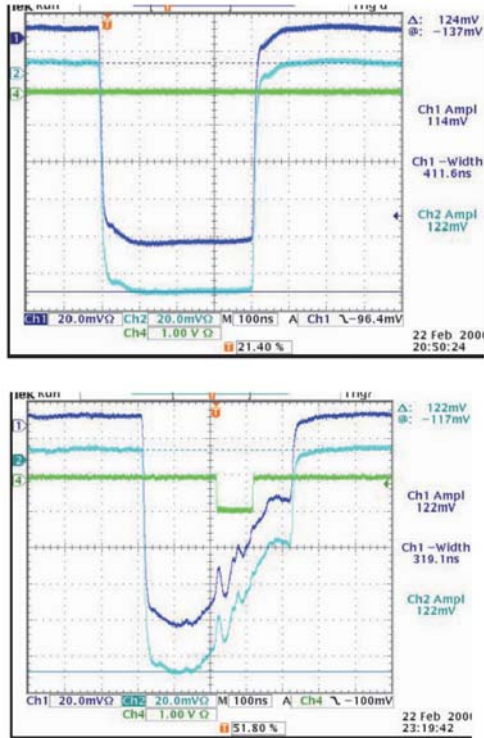


図 8 正常な波形 (上) と典型的なパルス欠けの波形 (下). 2 本の波形は 2 アームの出力導波管のそれぞれの RF 波形<sup>28)</sup>.

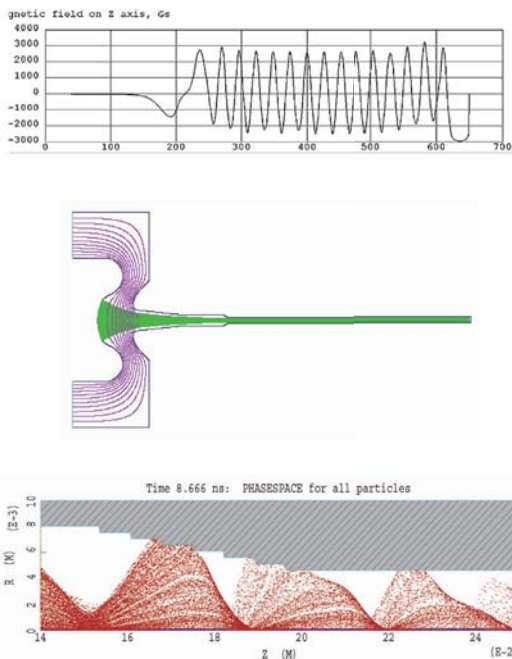


図 9 PPM 収束 Klystron の磁場とビームの関係 (上と中央). 禁制帯で通過できない電子は管壁に衝突してロス (下図)<sup>28)</sup>. 同時に管壁を傷める.

れたものとなった<sup>28)</sup>. SLAC では PPM 及び通常の電磁石収束クライストロンで 50 MW レベルまで稼働した実績があるが当初の仕様よりは下であ

る. KEK では現在 NEXTEF という R&D ステーションで稼働している.

### 6.5 その他の不安定現象について

今まで述べてきた発振や不安定現象の他にもいろいろ経験したが, 紙面も尽きてきたので簡単に触れたい. 頻繁に直面するものにマルチパクター現象が絡んだものがある. 前項で述べた RF 窓に関するトラブルは典型的であるが, (入出力) 導波管, ドリフト管などで起きて真空悪化が生じ RF 波形が不安定になる. 真空管内部のイオンが引き金となるイオン発振やイオンによるビーム収束で金属壁を溶融させるトラブルもある. コレクター部で高調波が共振し, ドリフト管 (基本波は通常遮断されている) を逆走し電子銃や入力空洞に悪さをすることもある. それぞれに面白い逸話 (本人にとっては面白くない話) があるが割愛させていただく.

## 7. まとめと謝辞

加速器と Klystron の関係の第 2 回目として S 帯 Klystron 以外の国内での Klystron の開発とそれに付随した発振や不安定などについて述べてきた. 原稿の分量が多くなり申し訳ないと思うのですが, ご容赦願いたい. 又ここまで読んだ皆さんからは「失敗ばかりしているじゃないか!」と言われそうであり, またそれを否定するつもりはないが, 不安定や発振をシミュレーションで予想することは困難であることもご理解いただきたい. 結局これらを避けたり, 効率よく解決するには経験や勘が重要ではないかと思うわけであり, また本稿がもしかしたら, 今後の関係者に参考になれば幸いです. 事実今の若い技術者が経験していないことが書かれていると思う. ここまでの仕事を書いてみて多くの方に感謝しなければと思い始めた. 以上の仕事をする機会を与えてくれた穴見昌三氏, KEK ライナックの RF グループの皆さん, 東芝と三菱電機の Klystron 製造関係者に感謝します. また, KEK に泊まり込んでいて家のことを顧みなかった時期を思い出すと, 家族 (妻と子) にも感謝しなければと思う次第です.

### 参考文献

- 1) T. G. Lee, G. T. Konrad, Y. Okazaki, M. Watanabe



- and H. Yonezawa, "Design and Performance of a 150-MW Klystron at S Band", IEEE Trans. on PS, PS-13, 6, pp.545-552, 1985.
- 2) P. J. Tallerico, "Design Considerations for High-power Multicavity Klystron", IEEE Trans. on ED, ED-18, pp.374-382, 1971.
  - 3) H. Yonezawa and Y. Okazaki, "A One-dimensional Disk Model Simulation for Klystron Design", SLAC-TN-84-5, 1984.
  - 4) T. Shintake, "Klystron Simulation and Design Using the Field Charge Interaction (FCI) Code", Nucl. Instr. and Methods in Phy. Research, A 363, pp.83-89, 1995.
  - 5) A. N. Sandarov, V. M. Pikunov and V. E. Rodyakin, "High Efficiency Conventional and Relativistic Klystrons", Proc. of RF96, pp.175-184, 1996/ KEK Proceedings 97-1, 1997.
  - 6) Y. Ohkubo, H. Yonezawa, T. Shintake, H. Matsumoto and N. Akasaka, "The C-band 50 MW Klystron Using Traveling-wave Output Structure", Proc. of LINAC 98, pp.932-934, 1998.
  - 7) T. Shintake, et. al., "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", Nature Photon., 2, pp.555-559, 2008.
  - 8) K. Yoshida, et. al., "Development of a C-band 50 MW Pulse Klystron Using Traveling-wave-type Output Structure", 第3回日本加速器学会報文集, pp.841-843, 2006.
  - 9) A. Beunas and G. Faillon, "10 MW/1.5 ms, L-band multi-beam Klystron", Proc. Conf. Displays and Vacuum Electronics, Germany, April 29-30, 1998.
  - 10) Y. H. Chin, K. Hayashi, M. Y. Miyake and Y. Yano, "Development of 10 MW L-Band Multi-Beam Klystron (MBK) for European X-FEL Project", Proc. of PAC 07, pp.2098-2100, 2007.
  - 11) K. Tomiyasu and M. P. Forrer, "Diode Oscillations in High Voltage Klystron", IRE Trans. On Electron Devices, Vol. ED 8-5, p.381, 1961.
  - 12) F. B. Llewellyn and A. E. Bowen, "The Production of Ultra-high Frequency Oscillations by Means of Diodes", Bell Sys. Tech. J., vol. 18, pp.280-291, 1939.
  - 13) K. Tomiyasu, "A Proposed Method for Suppressing Diode Oscillation in High-Voltage Klystrons", Correspondence, IRE Trans. On Electron Devices, Vol. ED 10-2, p.95, 1963.
  - 14) M. Chodorow and C. Susskind, "Fundamentals of Microwave Electronics", McGraw-Hill, New York, USA, ch. 5, "Llewellyn Diode Equations", 1964.
  - 15) 米沢宏, 岡崎行男, 渡部優, "ライナック用 150MW パルスクライストロンについて", 電子通信学会技術研究報告, ED85-115, pp.7-14, 1985.
  - 16) G. Gilbert and J. Jasberg, "Summary of Information on the 12-centimeter Oscillation Problem in Accelerator Klystrons", Internal Mem., ML Report 564, 1950.
  - 17) G. Merdianian, J. M. Jasberg and J. V. Lebacqz, "High Power, Permanent Magnet Focused, S-band Klystron for Linear Accelerator Use", Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Hiperfrequency Tubes, Paris, 1964/ SLAC-PUB-48, 1964.
  - 18) B. Krietenstein, K. Ko, T. Lee, U. Becker, T. Weiland and M. Dohlu, "Spurious Oscillations in High Power Klystrons", Proc. of PAC 95, pp.1533-1535, 1995.
  - 19) S. Yamaguchi, et. al., "Overview of the RF System for the JAERI/KEK High Intensity Proton Linac", Proc. of LINAC2002, pp.452-454, 2002.
  - 20) W. R. Nelson and Y. Namito, "The EGS4 System", SLAC-PUB-5193, 1990.
  - 21) Z. Fang and S. Fukuda, "Instability Caused by Backstreaming Electrons in Klystron", Proc. of APAC'01, pp.505-507, 2001/ Z. Fang and S. Fukuda, "Analysis of Spurious Oscillations in Klystron Due to Backstreaming Electron from Collector", Jpn. J. Appl. Phys. 48, pp.116501.1-116501.16, 2009.
  - 22) S. Fukuda, et. al., "Performance of a 324-MHz Klystron for a High-intensity Proton Linac", Proc. of LINAC2002, pp.718-720, 2002.
  - 23) M. Yoshida, S. Fukuda, E. Chishiro, M. Yamazaki, T. Hori, S. Yamaguchi, S. Anami, H. Urakata, K. Hayashi and M. Sakamoto, "Oscillation Analysis of J-PARC 972-MHz Klystron", 第2回日本加速器学会報文集, pp.281-283, 2005.
  - 24) S. Fukuda, et al., "R&D Plan of RF Source in KEK GLCTA", 第1回日本加速器学会報文集, pp.75-77, 2004.
  - 25) K. Takata, et. al., "X-Band Klystron Development in KEK", Proc. of BEAMS'98, pp.153-156, 1998.
  - 26) S. Matsumoto, S. Fukuda, S. Kazakov, S. Tokumoto, M. Yoshida, V. Vogel and T. Kariya, "Development of PPM-focused X-band Pulse Klystron", 第2回日本加速器学会報文集, pp.269-271, 2005.
  - 27) M. Yoshida, S. Michizono, H. Katagiri, S. Matsumoto and S. Fukuda, "Study of Klystron RF Pulse Shortening and Development of Waveform Diagnostic FPGA Board", 第2回日本加速器学会報文集, pp.308-310, 2005.
  - 28) S. Matsumoto, et. al., "Study of PPM-focused X-band Pulse Klystron", Proc. of Linac'06, pp.628-631, 2006.