

話 題

加速器と Klystron その一

電子線形加速器用 S バンドパルス Klystron の発展

福田 茂樹*

Accelerator and Klystron (I)

Developments of S-Band Pulsed Klystron for Electron Linear Accelerator

Shigeki FUKUDA *

Abstract

Modern accelerators require the microwave technology. Especially electron linear accelerators need the powerful microwave sources. In this paper, S-band pulsed klystron developments are reviewed along with the development history of linear accelerator. In this history, Stanford University and SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) played an important role to improve the klystron technology. Reviews from klystron used in Mark-III linac in Stanford University to klystron for SLC are made. Then, klystron developments performed in Japan are described. Mainly this was conducted with many projects in KEK. This article is written the first one of the three series, and the continued reports will be shown in next volume.

1. はじめに

加速器と高周波源 (RF 源) は多くの場合切っても切れない関係がある。高エネルギーの電子、陽子加速器の場合、使用される高周波の周波数帯は概ね 300 MHz 以上のマイクロ波 (RF) と呼ばれる領域であり、また使用するマイクロ波出力はパルス尖頭値で数 MW 以上、連続波出力で数十 kW 以上である。そこで使用される大半のマイクロ波デバイスは Klystron (クライストロン) と呼ばれる増幅用真空管である。Klystron は線形加速器の発展と深い関係があった。よく知られたように線形加速器のアイデアは古く 1920 年代の Ising/Widereo や 1947 年の Alvalez¹⁾ によって考案され歴史的には古いものであるが、その実用化にはいつとき、時間がかかっている。それは必要とされる大電力の高周波源が当時無かったためである。それが急激に発展したのは、第二次世界大戦の時に進展したレーダー技術のおかげである。その時に、数マイクロ秒の大電力パルスマイクロ波を標的に当てるためのパルス電源技術と Magnetron (磁電管) がレーダー技術に使用され

た。その後、加速器用途として大電力 RF 波源が Magnetron から Klystron に置き換えられたのは、主に Stanford 大学における線形加速器の発展と不可分である。これに関しては本稿の第 3 章で述べるが、Stanford 大学の Hansen RF 研究所で線形加速器の開発と同時に大電力 Klystron が精力的に進められた。その結果、線形加速器 Mark-III が成功した。それ以降、Klystron が加速器の RF 源の位置を獲得したとあって良い。

筆者は 1978 年に高エネルギー加速器で放射光施設の 2.5 GeV 線形加速器の建設に携わって以来、Klystron の開発にも関わり、多くのプロジェクトで必要な Klystron の開発に参加してきた。放射光施設の 2.5 GeV 線形加速器に必要な Klystron は出力 30 MW の定格であったが、当時はそれを満足するものはなく、三菱電機とともに開発する必要があった。アメリカでは SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) で尖頭値 38 MW の Klystron XK-5 が 2 マイル電子線形加速器に使用されていた。そこでそこから情報をもらいつつ開発を開始した。しかしそれは第 4 章で述べるように簡単なものではなく、完成まで多く

* 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)

の時間を費やした。その後、多くのプロジェクトと、それが必要とする Klystron の開発に関与したが、それらを今回から 3 回に分けて紹介したい。

第 1 回は電子線形加速器の進展と切っても切れない S 帯 Pulse Klystron について、アメリカ（主に Stanford 大学と SLAC）の進展の歴史、そして日本で KEK を中心として行った S-band Pulse Klystron の開発経緯を紹介する。第 2 回目には、S 帯以外の Klystron の開発の状況及び開発に伴って経験したトラブル、特に発振現象とその抑制に関する試みについての紹介、そして第 3 回目として、高価な（少なくとも 1000 万円以上する）Klystron を使いこなすためのポイントについて解説したいと思う。

2. Klystron の動作原理

Klystron に馴染みのない人のためにその動作原理を簡単に示す²⁾。Klystron（ここでは直進型 Klystron の場合のみ紹介する）の簡単な構成と名称に関しては図 1 に示した。Klystron の日本名は速度変調管と言われる。入力空洞（リエントラント型空洞）の空洞間隙に励起された電界で電子の速度が変調される（図 1 の②）。それがドリフト空間を走行するうちに速い電子が遅い電子に追いつくなどして密度変調に代わる（図 1 の③）。バンチ状の密度の濃い電子群（図 1 の④）は豊富な周波数成分を有して出力空洞で共振させることで入力空洞に入れた電力より格段大きい電力

が得られる。通常 Klystron は中間に集群用空洞、効率を上げるための Penultimate 空洞（出力空洞の一つ手前の空洞）など複数の空洞を持ち、大雑把に利得は空洞の数だけ増加する。N 個の空洞からなる Klystron は $N \times 10$ dB の利得を持ち 1 個のデバイスで大きな増幅利得が得られるのが特徴である。その他に大きな特徴として Klystron は電圧駆動型デバイスであり（入力空洞に入る直流電子ビーム（図 1 の①）のエネルギーで仕様がほぼ決まる）、出力の高周波の位相（入出力間の時間差に対応）は電圧で一義的に決まる。加速器で重要な電力と位相の安定性は電圧を安定化することでまずは実現できるのが大きな利点である（第 3 回目で詳しく述べる）。

図 1 に、Klystron の電子銃、RF 空洞、コレクター、入出力の RF 回路（導波管等）、真空窓等が示されているが、更に、収束電磁石、真空系も必要である。Klystron におけるビーム発生や収束などのメカニズムは加速器の物理と全く同じであり、多くの人には馴染みがある筈であるが日本では何故か Klystron は会社任せという風潮があった。加速器と大きく異なるのは扱う電子ビームが低エネルギー（ < 500 keV）、大電流（ $< 500 \sim 600$ A）であるために本質的に空間電荷力を考慮した解析が必要であるということである。詳しい内容は、第 2 回目の Klystron の解析コードの発展のところで述べる。

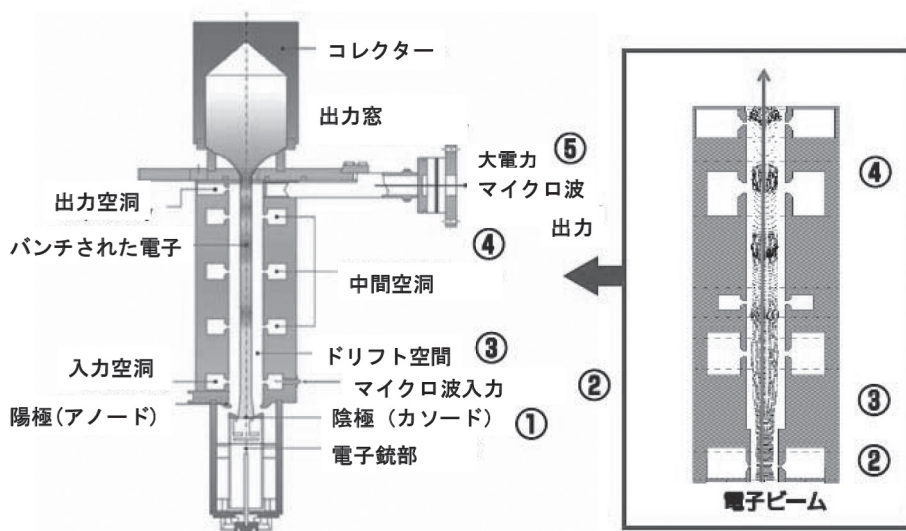


図 1 Klystron の構成図。左図は各部名称を表し、右図は電子ビームの集群の様子を表す。

3. 米国における Klystron と線形加速器の発展

Klystron のアイデアは Hahn 及び Varian 兄弟により出され、Varian 兄弟はそれを製品化した³⁾。その当時米国 Stanford 大学では Hansen を中心とした Microwave Lab. で大型線形加速器のプロジェクトが検討されていた。使用周波数は人間が扱いやすい S-band (波長 10 cm 帯) が選ばれた。具体的には周波数は 2856 MHz である (何故かアメリカと日本はこの周波数、欧州は 2998 MHz を採用している)。ここで大きな問題はどのような遅波回路導波管 (加速管) を線形加速器に応用するかという問題の他に、RF 源をどうするかという問題があった。電子を加速するエネルギー源としての大電力 RF 電力源 (10 MW 程度の出力) が無かったということである。前者の問題は Hansen Lab. を中心に今ではお馴染みの進行波型線形加速器の空洞の開発、測定法の確立等強力に進められた。一方で、後者の RF 源に関しては当時あった Magnetron や Varian 社の Klystron は 10 kW 程度の出力のものしかなかった。そこで Hansen Lab. では電力が何と 3 桁も大きい Klystron の開発を自分たちで行うことを決心し、そして見事それを成し遂げた。この辺の事情は Ginzton の「われら電子を加速せり」という本に生き生きと描かれている⁴⁾。3 桁大きい出力の Klystron を開発するというのは言うは易いが実質は大変な作業であった。しかもそれを 1950 年代に行ったわけで、彼らのチャレンジ精神とその努力には頭が下がる思いである。この結果は Chodorow らによる報告⁵⁾があり、また完成した Mark-III という線形加速器で行われた電子散乱実験で、R. Hofstadter が陽子の内部構造を初めて明らかにした⁶⁾。彼はこれで 1961 年に Nobel 賞を受賞した。大型加速器による素粒子実験の嚆矢と言えよう。

引き続きアメリカでは更に大型の線形加速器建設のプロジェクト (2-Mile 線形加速器) が SLAC で立案された⁷⁾。ここでもネックになったのは大電力 Klystron である。必要とされた電力は 35 ~ 40 MW であった。しかも総数 240 台にも上る Klystron が必要であった。保守を楽にするために永久磁石で Klystron の大電流ビームを収束する

こととし、Klystron 内部真空維持もコスト削減のために内蔵イオンポンプを使わず、ゲッターを使用した。当時は多くの会社 (Varian, RCA, Litton, Sperry, ITT 等) が Klystron を製作していたので各社に分割発注したが、結局 SLAC が要求した仕様はどこの会社も満たすことは出来なかった。そこで SLAC 内にある Test Lab. と呼ばれる建屋で SLAC 自らが Klystron を製造し始めた。これを可能にしたのはまず以下の 3 点を満たしたからである。① SLAC 内に製造に必要なインフラストラクチャと有能な技術者がいたこと、② Palo Alto 近辺にあったマイクロ波管の会社との緊密な技術協力、そして③ Hansen Lab. の流れをくんだ高度なマイクロ波技術と支える研究者/技術者の存在である。①については大型から小型にわたる 10 台近い水素ロー付け炉、数台の大型真空排気ベーク炉、真空ベーク炉、電子カソード処理炉を所有し、高度のロー付け技術を有した技術者がいたことが挙げられる。②は Varian 社や Eimac 社等との協力がある。そもそも Varian 兄弟は Stanford 大出身であったし、電子管技術者も大学と付近の各会社の間を行ったり来たりしていた。

SLAC でのクライストロン開発は Mark-III の時と違い高々 2 ~ 3 倍出力を上げることであったが、各構成要素の技術的限界 (例えば放電等) に近づいてきて容易ではなかった。大電力を得るためには 5 空洞程度ある空洞の配列と離調周波数の最適な組み合わせが重要であるが、一方で電子ビームを収束する永久磁石の磁場プロファイルにも大きく依存した。当時はコンピューターシミュレーションが発展してなくて大変だった上に、試作品を評価するのに数か月はかかったので一気に結果を出すことは難しかった。また開発に伴う多くの不安定現象の解決 (発振, Multi-pactoring 現象, 内部 RF 放電等) 及び大電力に伴う高電圧化にかかわる電子銃の陰極陽極間の絶縁碍子の放電破壊などの解決が必要であった。中でも大きな問題は出力導波管部にあった RF 窓である (図 1 の⑤)。Klystron は真空管であるから大電力マイクロ波を取り出すためには何か絶縁物で仕切られた構造で内部の真空と外部を分離する必要がある。ここには高純度のセラミックを Pill-box の中に装荷した構造を用いているがこれがよく破損し

た。大電力 RF が通過する時の放電による破損の他に、Multi-pactoring による発熱で引き起こされた破損も頻繁に起きた。この解決法はセラミック表面に 50 Å 程度の TiN 薄膜をコーティングすることで解決したが、一個一個導波管共振リングで評価をし、尖頭値 200 MW 程度の電力通過試験に合格したもののみ使用された。このようなプロジェクトは Test Lab. のリーダー G. K. Merdinian と後任の J.V. Lebacqz の下で完成した⁸⁾。数年間、多くの種類の XM シリーズを製作評価して、最後に XK-5 という型式の Klystron が完成した(図 2)。これが 2-Mile 加速器の RF 源として採用された⁹⁾。この辺の事情については青本と呼ばれる SLAC 2-Mile Accelerator に簡単に触れられている⁷⁾。又 SLAC の技術者向けのレポートが教育上有用と思われるので入手に難があるかもしれないがここに引用をしておきたい¹⁰⁾。

1980 年代から更に SLAC では高エネルギー化を狙って SLC (SLAC Linear Collider) プロジェクトが立てられた。ここでも計画のキーとなったのは Klystron である。当初 2 つの Klystron 即ち尖頭電力 120 MW の Klystron か、又は尖頭電力 50 MW Klystron (平均電力 45 kW) – 所謂後に 5045 と呼ばれるもの – と SLED と呼ばれる Energy Doubler の組み合わせが候補となった。後者は引退した Lebacqz を中心として開発され

たのに対して、前者は後任の Konrad を中心に日米協力で進められた。筆者は第 1 回目と 2 回目の日米協力員として短期間参加、その他日本からは三菱電機、東芝の技術者が 3 年間参加した。3 年間の設計と製造の結果を経て 1983 年に試験を開始したが、非常に強いダイオード発振に見舞われ、それを基本的に完全には解決出来ずに終わった(発振については 2 回目の報告で触れる)¹¹⁾。5045 も開発には困難を極めたが SLAC 内で何回も試作が繰り返され最終的に完成し、SLC の RF 源の Klystron として採用された⁹⁾。これは S 帯 Pulse Klystron の定番として名高いものである(図 3)。次章との関係で二つの大事な特徴について触れておく。この時の Klystron のビーム収束方式は XK-5 の時の経験を踏まえ(永久磁石収束は技術的に難しいところが多いため;次章参照)電磁石収束を採用したことと電子銃の大型陰極として Dispenser Cathode (いわゆる Ba 含浸型陰極など)を初めて本格的に採用したことである。

SLAC では次計画として 1990 年代から Linear Collider 計画の電子線形加速器開発に着手した。これは S バンドの 4 倍周波数である X バンド帯の 11.424 GHz を採用した。ここでも加速管の開発と同時に大電力 Klystron の開発が必須であった。開発は日米協力で行われた。これについては 2 回目で触れることとする。

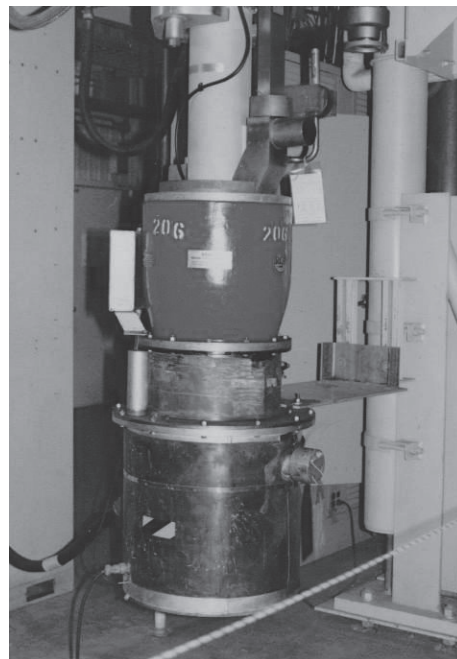
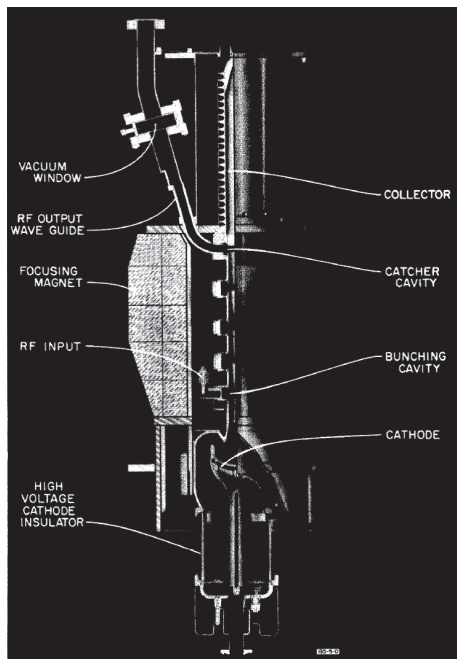


図 2 左図は XK-5 と永久磁石の概念図、右図はその写真。

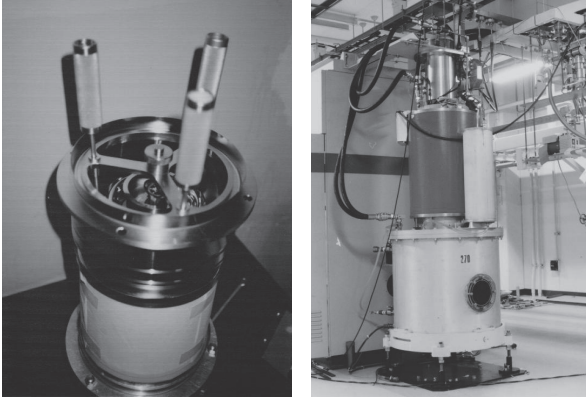


図 3 左図は 5045-Klystron の製造風景 (電子銃部のアライメント). 右図は KEK で使用された 5045 アセンブリ.

4. 日本 (KEK) における Klystron と線形加速器の発展

4.1 PF ライナック以前と PF Klystron の仕様

筆者が KEK に職を得て放射光実験施設 (PF) 用入射器ライナックの建設に携わり始めたのは 1980 年からである. まず, それ以前の日本国内における線形加速器と Klystron について触れよう. 嚆矢は核研電子シンクロトロンの入射器用 6 MeV ライナックである. ここでは三菱電機 (MELCO) 製の 6 MW Klystron MK3005/PV2012 が開発された¹²⁾. 純正の MK3005 がうまくいかず Thomson 社の TV2012 の導入等を検討した記

録がある (1964 ~ 1965 年). 後に PV3105 となった. 同じく東京電子試験所 (後の電総研) の電子ライナックでは東芝製 Klystron (M4628 : 6.5 MW) が使われた (1966 年)¹³⁾. PF が始まる前の比較的大きな電子ライナックとしては東北大核理研の公称 300 MeV ライナックがあった (1967 年). ここでは 5 台の 20 MW 級の S 帯 Klystron があった. 仏国 Thomson CSF と技術提携した三菱電機の PV-2014 が使用された. デューティが 1/1000 と高いために蒸発冷却コレクターを有し, 又 2 つの出力導波管ポートを持ったものであった¹⁴⁾. 少し遅れて原研に 200 MeV ライナックが建設された (1972 年). ここでは 5 本の 20 MW Klystron (RCA 8568) が使用されていた. これは前章で述べたように SLAC が会社に開発させたものである¹⁵⁾.

PF では電子入射器のエネルギーは 2.5 GeV で全長は 400 m であった. 必要とする Klystron は 42 本で最大尖頭出力 30 MW, 常用出力 21 MW, RF パルス幅 2.5 μ s, 繰り返し 50 pps がその仕様であった¹⁶⁾. また, SLAC と同じように保守性と故障率を考慮して, 永久磁石収束の Klystron とした (図 4).

当時 Commercial に入手出来るものはなく, 少し出力の低いものを ITT 社が製造していた (SLAC 計画と関連したもの). それを 1 本購入したが途中で Klystron ソケットの設計ミス (筆者の責任) であえなく壊してしまった. 一方で米国製という

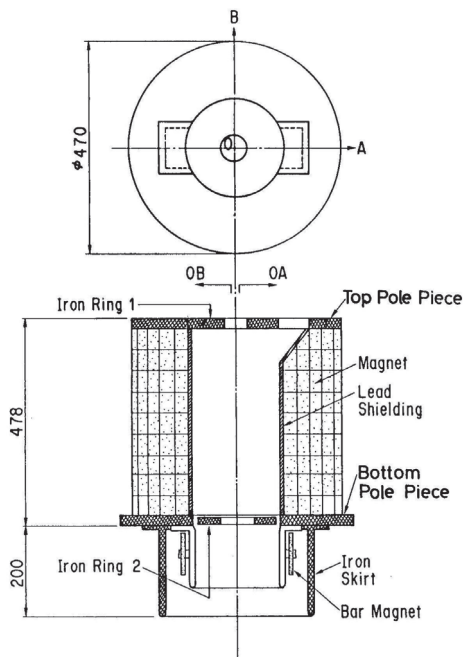
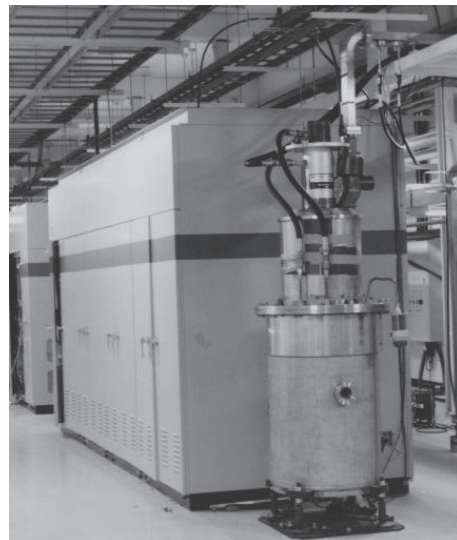


図 4 左図は永久磁石断面図. 右図は永久磁石に組み込んだ Klystron アセンブリ.



ことは製造や技術情報の交換上非常に具合が悪かった(特に永久磁石を使用する際の磁場情報). そこで KEK では MELCO と組んで 30 MW Klystron を開発することにした. 但し, 条件として MELCO では電磁石収束で出荷試験を行う, KEK では電磁石の代わりに永久磁石に入れ替えて試験評価をするという条件で開発した. MELCO は Thomson の Klystron をベースにした PV2014B (後に PV3030 に発展) を自主製造し, 工場試験で 30 MW に達した. しかしながら KEK で永久磁石収束にしたときは 60% 程度の出力しか得られないという惨憺たる結果であった.

4.2 永久磁石収束 Klystron との格闘

永久磁石収束方式を仕様に取り入れたのは当時責任者の一人だった佐藤勇氏が SLAC に調査に行った際に感銘を受けてきて採用したものである. 電磁石収束では多くの電源を使い, 冷却水も多く使うためにそれに付随した故障が避けられない. 一方永久磁石はアクティブなものはないので, トラブルが避けられるという点で, 国内で初めての大型加速器を作る側としては, 目的に合致したものに見えた. しかし後述のように永久磁石収束方式は実は非常に難しいものであった. 事実, 後年私が SLAC に行って Konrad 氏に尋ねたところ, 彼は佐藤氏に「永久磁石収束は難しいから止めた方が良い」と忠告したという. 多分それを聞き逃したのだろうと思う. 通常多くの Klystron を利用する人にとって, 集束磁石の磁場分布等に注意をする人は殆どいないし又大抵の場合必要がない. しかし KEK では以下に述べるように Klystron に最適な磁場分布はどういうものか, いつも測定して考えなければならなかったのである.

なぜ難しいかということを理解してもらうために電子ビームを収束するのに必要な要件をまず説明したい. 円筒軸対称座標系で軸対称の陰極から発生した電子ビームが軸対称な一様磁場内を輸送されながら一定の径内に収束される (confine) 条件を見よう¹⁷⁾. この系では一種の角運動量保存則に相当する Bush の法則が成立する. これによると電子流の占める面積を横切る磁束は保存される. つまり電子銃の陰極上に有限の磁場を有した電子銃から出たビームと大きい一定磁場で収束された後の細い電子流の間には一定の関係がある.

電磁石と永久磁石の決定的な違いは, 磁石本体

での磁力線が反転することである (図 5). それは電子銃部分の微妙な磁場分布調整に対して両者の間では大きな違いが出る. 更に電磁石の場合は電子銃上の漏れ磁場の情報を詳しく知らなくても主磁場の電流を変化させれば大概主磁場が変わり整合が取れ, 電子ビームを収束できる. 一方永久磁石は一度調整した後の主磁場は変化出来ないのので, 逆に電子銃近傍の微小な漏れ磁場を調整して収束する条件を整えなければならない. これらのことが永久磁石を用いた集束方式では面倒な手続きが要求される所以である. SLAC では電子銃近傍に細い棒磁石を配列してそれを上下にずらして所定の磁場範囲に合わせた. 一方, KEK では合わせるための一定磁場が定かではなかった. 一つには MELCO で製造した Klystron の性能のばらつきが大きくて一定の範囲に入らなかったのである. そこで筆者が行ったのは電子銃近傍に小さい

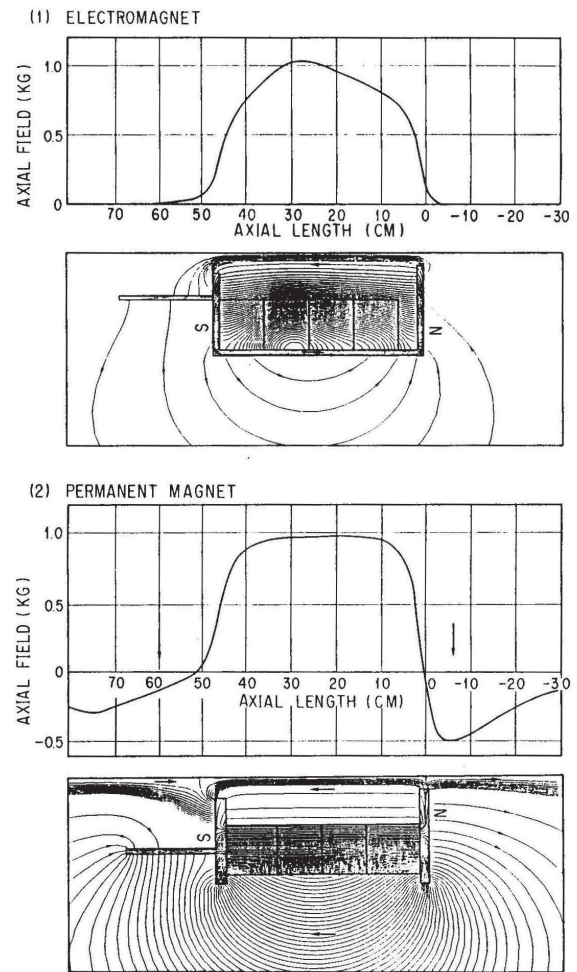


図 5 電磁石 (1) と永久磁石 (2) の軸上分布及び磁力線の様子. 永久磁石では磁石の両端に強い逆磁場が存在する¹⁸⁾.

電磁石を挿入し一度 Klystron に HV を印可して出力電力を測定する。その時の最適電流値が作る磁場に合うようにセットを一度分解して棒磁石を仕込んで調整するのである。これは順調に調整が進んでも二度手間となる。以上主磁場に要求される調整について述べたが、更に深刻であったのは磁場の軸対称性の問題である。もともと SLAC 仕様から軸対称性は軸上磁場の 1.5% 以下にせよという指針があった (図 6)。KEK では当時最高級の ALNCO-9 という異方性磁性体の棒磁石多数を一様に配置、固定して軸対称性を上げるように考慮していた。しかし、着磁器で着磁したときに棒磁石群が若干動くのと、永久磁石は開放系であるので電源筐体 (鉄製) の影響を受けたりする。そのため動作時には軸対称性が一部数%に達する。これによる顕著な現象は出力電力が印可電圧を上げても頭打ちになることである (後からの理解では、出力空洞付近での電子バンチは横方向にも大きく振動しているが、偏磁で管壁に衝突してしまう)。図 6 に電磁石の場合と永久磁石の場合の偏磁成分の大きさと出力電力の関係を示した。永久磁石では何もしないと明らかに出力が頭打ちになるのが分かる。この解決は我々 RF グループメンバーが「鉄片調整」という文字通り鉄片 (Iron

Shunt) を永久磁石外周の適当な所に張り付けて電力が大きくなるように調整する方法を取った。この手法を見出すには裏話がある。解決の見通しが立たず RF グループメンバーが試験中の Klystron のそばで深刻に議論していた時に、グループリーダーの穴見氏がやけになって近くにあった鉄片を投げつけるようにくっ付けたのである。そうすると、あら不思議！電力がぐっと増加した。それを見ていた我々は色めき立った。結局その鉄片で磁場の偏磁が改善されたのである。よくよく SLAC でその後調べるとその様な手法は彼らも経験していたことが分かった。

4.3 Klystron 内部での放電との格闘

4.2 節での経験は永久磁石収束方式と関係のない人には他所ごとのように感ずるかもしれない。しかし、我々を悩ました Klystron 内部での放電の問題はもっと広範囲の人にも関連する普遍的な問題であった。KEK では 42 台の Klystron を運転して PF へ電子を入射していたが、当時 10 分に 1 回ぐらいは Klystron の放電でどれかの運転が止まった。ビーム入射時に重なった場合は入射を中断せざるを得なかった。10 分に 1 回とは Klystron 1 本あたり 400 分に 1 回 (約 7 時間に 1 回) 放電するということである。更に Klystron の寿命 (原因は放電破損, RF 窓破損等いろいろであった) が短くて 10,000 時間以下であった。これは年間 4,000 時間運転したとして毎年 1000 万円近い Klystron を平均 16 本以上購入する必要があった。結局原因の多くは電子銃の陽陰極間での放電に多く起因することが分かった (図 7)。更に分解して内部を調べながら原因を精査すると、①陰極、陽極表面の電位傾度が高すぎることに起因する放電と、②当時主流であった酸化物被覆陰極の真空処理等の拙さによる Ba 等の蒸発に起因する放電、の 2 つがあることが分かった。①についてはすでに SLAC の 5045 で低電位勾配型電極 (Low Gradient Electrode) の設計が主流でその線を変更し始めた。②については、解決はそう簡単ではなかった。酸化物被覆陰極は当時真空管で主流のもので安価だが大電流が容易に取れる優れたものであった。しかし管内の残留ガスに非常に敏感でそれによりすぐエミ減と呼ばれる電流減少に見舞われた。特に水蒸気成分は Ba 水酸化物を生成して再生不能なダメージを与えた。陰

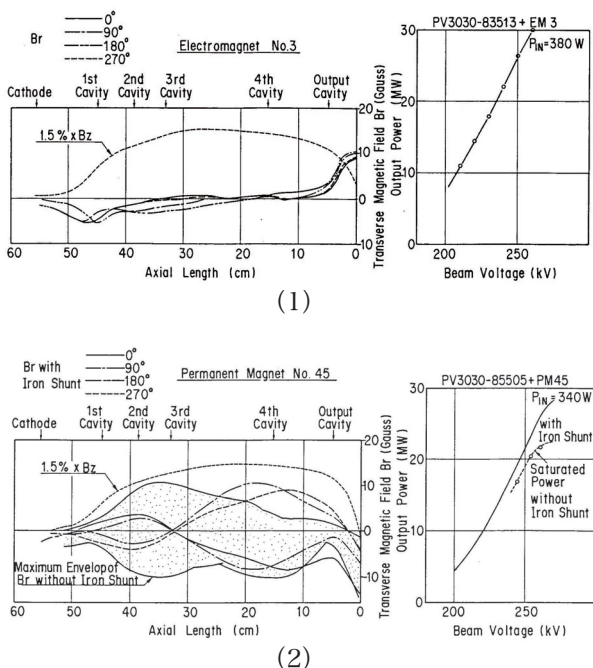


図 6 偏磁成分と Klystron 出力の関係。(1) は電磁石の場合。(2) は永久磁石の場合。0 度から 90 度毎の軸に直角な方向磁場成分を示した¹⁸⁾。

極材料も高純度の Ni 基盤を始めとする材料面での要求が高かった。Klystron は電子銃の真空処理、ロー付け、Forming-gas (Ar + H₂ 混合気体) 中での高温焼くという処理を経て真空管になるが、その途中の真空処理プロセスにも問題があった。RF グループの斎藤芳男氏を中心に MELCO の製造設備の排気系の改善、Forming Gas 炉から二重真空排気炉への変更などに取り組んだ。これにより、次第に放電の確率は少なくなり寿命の長化も見られた。しかし、陰極材質については最後まで問題が残った。MELCO が当時採用していた Mash カソードという酸化物被覆カソードタイプは小型真空管やブラウン管では良好であったが、大型カソードでは Ba 等の蒸発が多く、それが電子銃での放電を完全に解決出来ない原因となっていた。そこで酸化物カソード信仰者であったボスの目を盗んで新日本無線と当時導入され始めた Ba 含浸型カソードを故障 Klystron に組み込んで評価試験等やり始めた。最終的には次節で述べるように Scandate カソードという Ba 含浸型カソードを採用して、酸化物被覆陰極の問題点を解決した。

更に前章で述べた SLAC での RF 窓放電は KEK でも深刻であった。これによる破損を防ぐための研究が斎藤芳男、道園振一郎らによりすすめられ

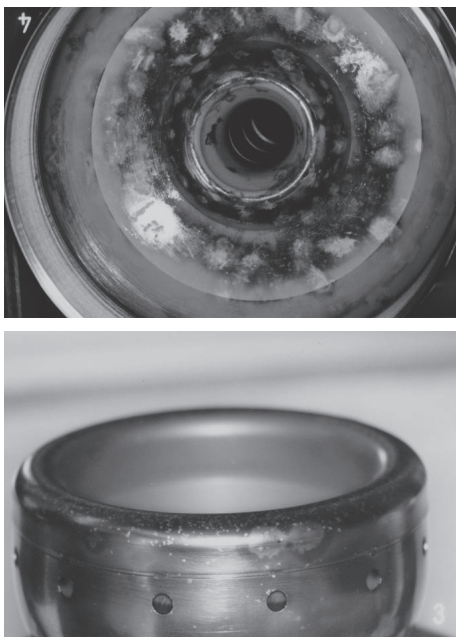


図 7 電子銃部での放電写真。上はアノードノーズにおける放電痕、下は電子銃の陰極における放電痕。

た。図 8 に放電で破損した写真を示す。この問題は TiN の薄膜を高純度セラミックにコーティングすることで解決した^{19, 20}。薄膜の厚さは図 9 に示すような膜厚を変えて、共振リング内で高い

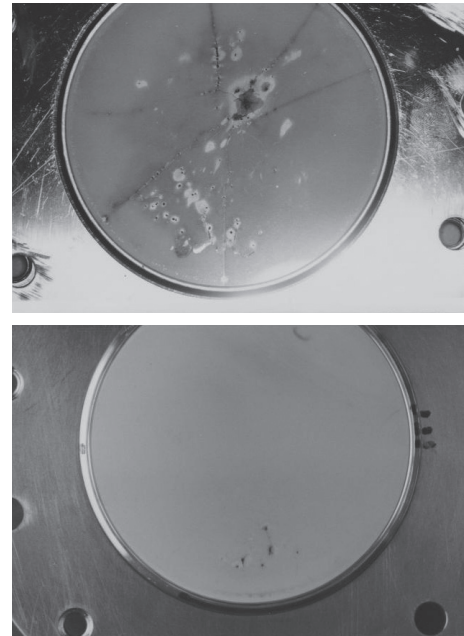


図 8 RF 窓の破損写真。上は発熱(マルチパクター)等で生じた割れ、下は高電界により生じたピンホール。

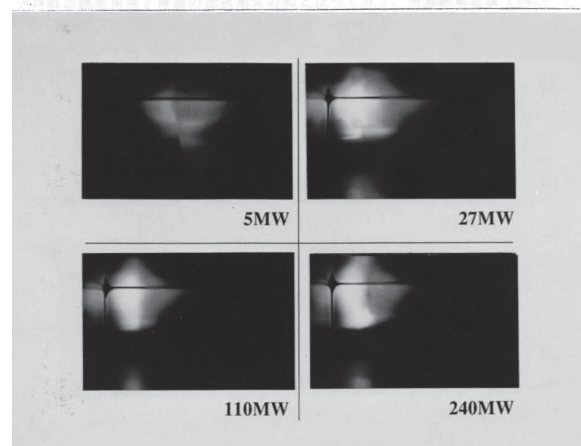
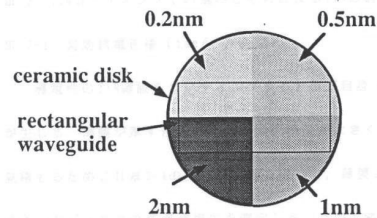


図 9 共振リングでの TiN 薄膜の厚さと発光の関係調べた実験。90 度ごとに厚さを変えて発光具合を観測した¹⁹。

尖頭値を持つ電力を透過させて発光具合を観測して条件出しを行った。

4.4 KEKB プロジェクトと 50 MW Klystron 開発

2000 年頃から KEKB プロジェクトが始まった。入射器ライナックに要求された仕様は電子エネルギー 8 GeV, 陽電子 3.5 GeV であった。電子に関してはエネルギーを 3 倍強に増強する必要があった。これを現有する敷地を最大限に利用するということから計画は、① J 型ライナックにする、② RF 源のパルス幅を $4 \mu\text{s}$ に広げて Energy Doubler を使用する、③ Klystron の出力を 50 MW に増強する、の 3 本柱を中心とした²²⁾。ここに更に難しい要求が課された。建設は年の半分で、残り半分は PF への電子入射を行い、3 年で完成させるというものであった。Klystron に関しては、東芝、三菱から 60 MW Klystron の自主開発の提案があり試作品が製作された。KEK 内では 5045 を SLAC から購入したらという案もあった。当時、筆者は次回で述べる大型ハドロン計画用の Klystron を自主開発していたが、KEKB プロジェクトのため新たにこの計画用の Klystron を検討し始めた。既にこのプロジェクトでは難しい永久磁石収束方式は止めて、電磁石収束方式を採用することにしていた。筆者は Stringall 等により報告された SLAC の一つの Report²¹⁾ に着目した。KX-5 を開発する過程で SLAC でも電磁石でいろいろな性能試験を行っていたのである。磁場を適切に変えれば、印可電圧の広い範囲で効率がどこでもほぼ最大にできると解せる図 (図 10) がその論文にあった。普通は例えば 30 MW 出力用に設計された Klystron の場合、設計値 (この場合 270 kV の印可電圧) で最適になり最大効率 40%

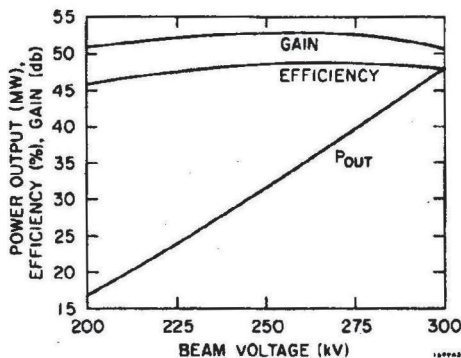


図 10 筆者が着目した、SLAC における電磁石による XM シリーズの試験結果²¹⁾。印加電圧を変えても効率がほぼ一定である。

程度が得られる。それ以外の動作点ではその設計値から外れているので効率は悪くなると信じられていた。しかし図 10 のグラフは、印可電圧に対応して適切に磁場分布を変化させればどの電圧でも最大効率近くが得られることを意味している。それならば PV3030 も電圧を上げれば効率を落とさず、40 MW, 50 MW の出力が得られるのではないかと考えた。次回で述べるように、当時ようやく 2.5 次元のシミュレーションコードが使えるようになったのでさっそく応用した。すると磁場を変えると電圧を上げれば 50 MW でも 70 MW でも効率を維持しながら可能なことが分かった。問題はどうかこれを実証するかである。たかがシミュレーションであり、説得力を持たせるには実証する必要があるが、一方で最大定格を超えた電圧を印可することは高価な Klystron を破損する恐れがあった。事実計画を打ち明けたらボスの穴見氏にダメ出しをされた。そこで密かに隠れて試験を試みた。もちろん慎重にということで、電源や RF のパルス幅を狭くし、パルス繰り返しも 1 Hz ぐらいにした。適切に磁場を変化させるとシミュレーション通りではないが、30 MW Klystron で 42 MW (290 kV 印可時) を得た (図 11 参照)。この結果は穴見氏、佐藤勇氏とも喜んでくれた。この試験が際どかったのは、結果を三

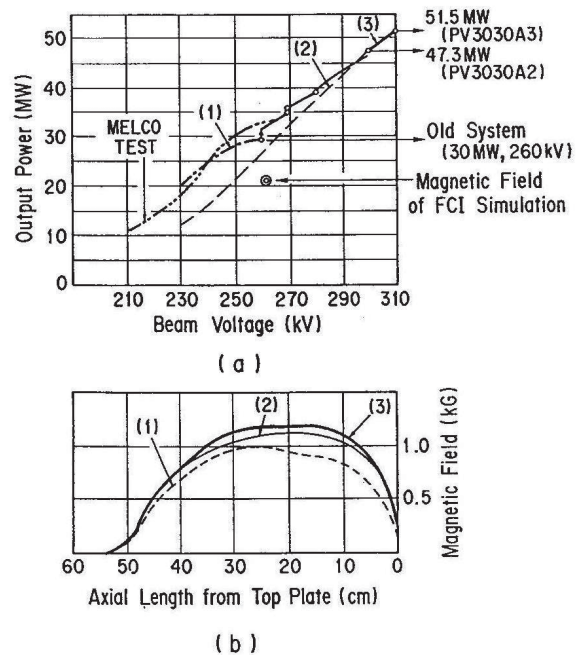


図 11 シミュレーションを元に集束磁界を変えて出力電力を試験した結果。(b) は対応する磁場分布²²⁾。

三菱電機に報告したら早速彼らが追試したのだが、高圧碍子を破損してしまっただけから分かる。しかし、この結果から方向性は決まった。Klystronの相互作用領域（RF空洞のある部分）はXK-5のまま、電子銃、高圧碍子、コレクターを電力増強に合わせて増強すればよい。ポイントは放電問題を避けるように低電界型の電子銃を導入することであった。低電界型電子銃を設計して組み込んだ（図12）。電磁石は基本的にPositron Generator時に導入した電磁石と同じでよい。これから二つのKlystronを設計した。一つはPV3030A2で電子銃と碍子を補強したが全長も太さも同じもの、二つ目は更に大きい電子銃と碍子、電子銃と入力空洞間距離を延ばし全長を40mm長くしたが電磁石のサイズを互換的にしたものでPV3050と称するものである（図13）。両方とも50MWの出力が可能で、サイズ的にも互換性がある。更にパルストランスとソケットもミニ改造を行い、旧型と完全互換とした²²⁾。これにより建設しながらPF運転を行うという難しい課題は克服できただけでなく、新しいKlystron、パルストランスとソケット、出力導波管の変更を伴う新規導入が避けられ、10億円程度の建設費が節約できた。50MW Klystronは本体部がXK-5と同等で基本的にそのパラメータが公開されているので東芝も参入した（E3730）。ほぼ三菱製PV3050と東芝のE3730は完全互換であり、またほぼ半数ずつ納品されている。購入に際しては

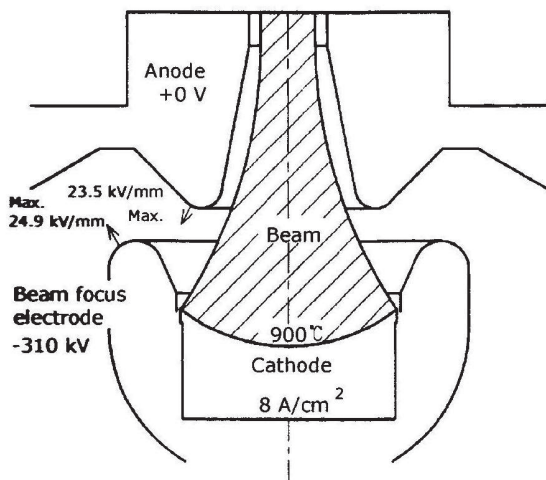


図12 50 MW Klystronの低電界型電子銃。最初の30 MW Klystronと比較すると印加電圧が高くなっているが陰極、陽極両方の電界が低くなっている²³⁾。

三菱、東芝2社で熾烈な入札を繰り返した。おかげで価格も安くなり、KEKとしては、財政的にも大いに助かった。XK-5と異なる点を二三挙げると、陰極材料としては、SLACで十分吟味されつくした、Scandate陰極を用いた。電子銃電極設計はKEKで設計した低電界型を採用した（図12）。最適磁場形状は5045や後述の東芝80 MW Klystronと異なり出力空洞に行くほど磁場強度の強い標準型となっている。図14にPV3030A1/PV3030A2と50 MW Klystron（PV3050-三菱電機及びE3730-東芝）の写真を示す。

このプロジェクトでもう一つ追記する。50 MW Klystronを8台励振する60 kW Pulse Klystron（通称Sub-booster Klystron）を自作したことである。当時KEKではSLACのようにKlystronを自前で設計出来るようにしたいという動きがあった（次回に触れる）。一方でKEKB計画では励振用小型Klystronも必要であり、国内のKlystron製造会社に打診をしたが、製造コストが高い見積もりしか頂けなかった（所謂ご辞退価格というやつである）。そこで止むを得ず筆者が設計し、製造は三菱重工、排気バーク及びチップオフとプロセッシングはKEK（筆者）が行うということにした²⁴⁾。大変であったが良い経験

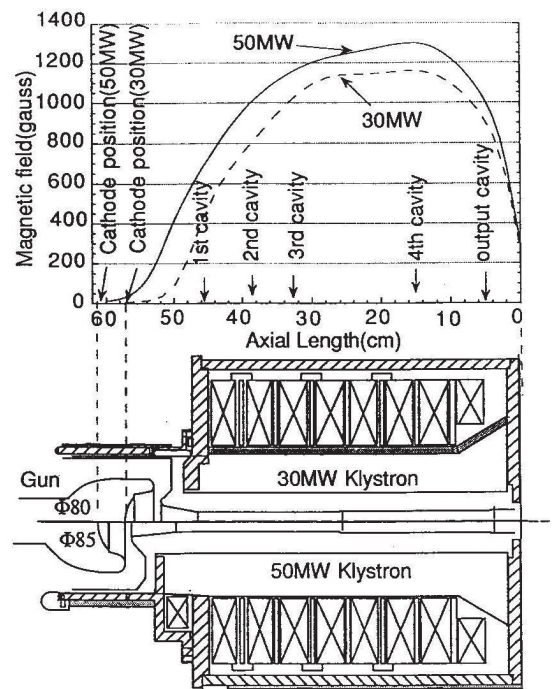


図13 PV3030 (30 MW) と PV3050 (50 MW) の比較（下図）。共通の磁石（本体）使用²²⁾。

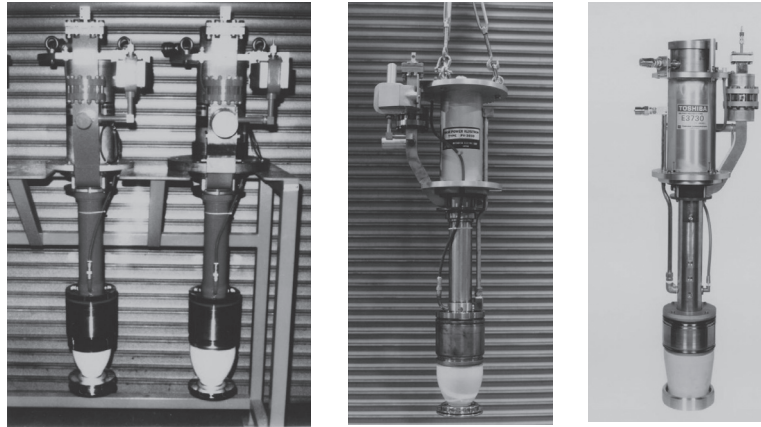


図 14 PF ライナックから KEKB にかけての Klystron の変遷. 左から PV3030A1 (30 MW), PV3030A2 (50 MW 可能), PV3050 (50 MW), E3730 (50 MW). 印加電圧が上がるに従い絶縁セラミックが大きくなっている.

をした. その後 8 本を三菱重工で製作し近年まで使用していた. 製作途中 (チップオフ) のプロセスと完成写真を図 15 に示す.

4.5 PV3030 の所外放出, 海外との技術協力

KEKB 計画は 2000 年から開始したが, それまで PF の運転も建設しながら継続していた. 運転が可能であったのは 30 MW Klystron と形状的に互換性のあった PV3050/E3730 が出来たためである. 少しずつ交換した PV3030A1 は KEK では不要になった. しかし Klystron は Fragile であるが高価であり小さな加速器施設では委譲希望があった. 日大の LEBRA では FEL のために長パルス (パルス幅 $10 \sim 20 \mu s$) の Klystron を必要としており, Rating (印可電圧と繰り返し) を下げれば可能であろうと (相当数) 委譲した. 京都大化研では RCA の Klystron を利用していたが予算不足で新たな Klystron の購入が見込めず, 矢張り委譲希望があった. RCA の電磁石には PV3030 は挿入可能であったので, 磁場分布を PV3030A1 に合わせることを指導して委譲した. 米国の Cornell 大から保守品が無いと緊急の委譲依頼が来て RF 窓にピンホールが開いたものであるが適当に処理して空輸し, 無事使用に至った. また当時交流し始めた中華人民共和国北京の IHEP も Klystron について大きな問題を抱えていて, 8 本ほど委譲し無事使用出来ただけでなく中国人に日本の Klystron が優れていることを認識させることに成功した. 但し, ここで委譲というのが会計上は我々が不用で廃棄したものを適当に利用するという形をとっている.

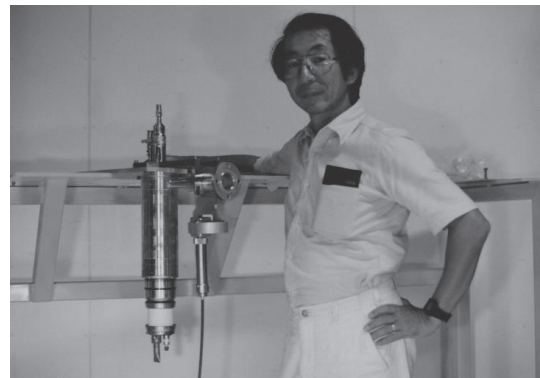
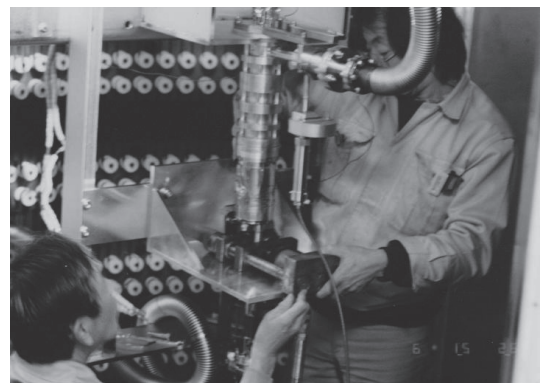


図 15 上図: KEK の排気ベーク炉で処理後チップオフをしているところ. 下図: 完成して保管中の Klystron と筆者.

1990 年代中ごろから私自身は中国といろいろな交流を始めていたが, 彼らは Klystron の品質に大きな問題を抱えていた. 丁度我々が Klystron を使用し始めた 1980 年代よりもっと以前の段階のように見えた. 日本の東芝に相当する 4404 公司という会社が大型 Klystron を製作していて, IHEP (北京), 国家輻射実験所 (合肥), 原子核研 (上海) などに納入していたが私の目から見て

もお粗末なものであった。私は IHEP 電子線形加速器の裴国璽や洪波とともに武漢付近の 4404 公司を視察し、MELCO を指導したのと同じことを繰り返したが急には改善出来ない。BEPC-II (Beijing Electron Positron Collider) の運転に支障をきたすようになったので前述のように PV3030A1 を委譲したのである。その後何回も訪中し技術協力をした。彼らは 5045 を SLAC から、Thomson 社から 50 MW Klystron を購入したがうまくいかなかった。結局最後は私の助言に従って、入札で我々の管である 50 MW (E3730) を 20 本弱導入した (図 16)。合肥の放射光施設も同じようにした。一方で彼らは国産の大電力 Klystron に執念を燃やしており、5045 と同等のものを製造しようと長年取り組んで来た。私もその技術顧問的な立場で協力を行っている。

海外協力といえば、インドとも行っている。インドの RRICAT では INDUS-II シンクロトロンに入射するライナックの増強を図っており Klystron の選択を相談された。国産の種々の Klystron を性能 / コストから比較の上、KEK と同じ 50 MW Klystron を薦め、採用となった。インド工科大学のムンバイ校では医療用 & 産業用ライナックを開発するための協力を行っており、電源や Klystron に関する指導を行っている。

4.6 より大きい出力の S-band Klystron

日大に委譲した Klystron は FEL 用でありパルス幅が長い ($\sim 10 \mu$ 秒以上)。これを単一出力窓で取り出すのはかなりきつい条件であり破損確率も大きかった。それに対し境氏は内蔵のイオンポンプ位置を窓に近い部分に持っていく、出力フランジ直

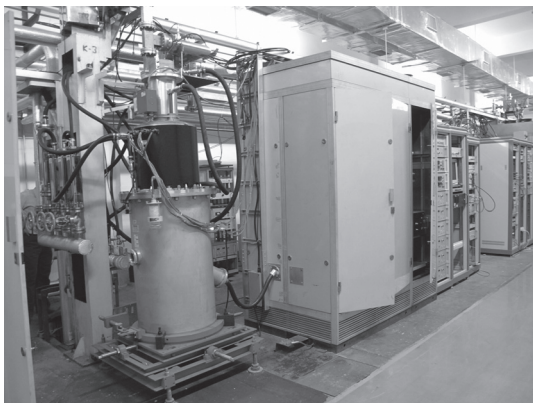


図 16 IHEP の BEPC-II 入射器ライナックに使用されている 50 MW Klystron E3730。磁石とパルストランスタンクは KEK 設計のものを使用している。

後にもイオンポンプを配置して、窓近辺の真空を局所的に改善することで破損を減らすことに成功した。これは PV3040 という型名で使用し始めた²⁵⁾。

筆者が直接関係してはいないが S-band Klystron で今まで述べた以上の出力を持つものを二つ紹介する。両方とも Linear Collider と関係している。一つは JLC (Japan Linear Collider) の RF 源として 5045 より大きい出力を狙ったもので出力 80 ~ 100 MW のものが東芝で開発された (E3712)²⁶⁾。設計思想や電磁石の磁場など 5045 の影響を受けている。価格が高く、50 MW ほど普及はしていないが SP8 や ATF-KEK で使用されている。電源が高価なのでつい出力の大きいものを追求しがちであるが予備を含めた総合特性からは得かどうかは判断の分かれるところである。この管を改変して FEL 用の長パルス RF 用にしたものもある。二つ目はドイツにおける TESLA 計画の前に SLAC-DESY で S 帯 LC 用に開発された 150 MW Klystron である²⁷⁾。現在は FLASH で数台使われているだけである。図 17 に 80 MW/150 MW の写真を示した。

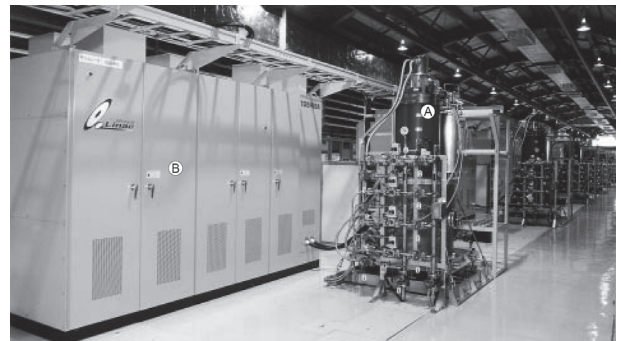


図 17 上図は SP-8 における 80 MW Klystron²⁸⁾。下左図は 150 MW Klystron の電子銃。下右図は SLAC から CPI に技術移転された 150 MW Klystron (VKS-8333A)²⁹⁾。

5. ま と め

加速器と Klystron の関係の第 1 回目として代表的な S 帯電子線形加速器と Klystron について述べた。50 MW Klystron が広く使われ嬉しい限りである。以上の記述から分かるように、過去においては加速器の仕様が決まり、必要な Klystron の出力が決まった時、市場にそれに合ったものが無ければ、計画そのものを諦めるか、開発するしかなかったことが分かる。難しい要求がある時は、会社での開発はリスクも考えると非常に高価につき、当事者が開発する必要があった。Stanford/SLAC から始まり初期の KEK での状況はまさにそういう状況であった。現代は計算機シミュレーションも進み、任意の周波数で設計が可能となり、状況は昔と変わりつつある。それを踏まえて、第 2 回目では S 帯以外の Klystron の進展について述べる。同時にシミュレーションで予言出来ない困難、つまり不安定動作と発振に対するチャレンジなどについて述べたい。

参考文献

- 1) P. M. Lapostolle and A. L. Septier, "Linear Accelerator", Chap. I and its references, North-Holland, 1970.
- 2) 道園真一郎, "高周波源", OHO セミナー '02/福田茂樹, "クライストロンとその周辺", OHO セミナー '88.
- 3) R. Varian and S. Varian, "A High Frequency Oscillator and Amplifier", J. Appl. Phys. p.321, 1939/W. Hahn and G. Metcalf, "Velocity Modulated Tubes", IRE, p.106, 1939.
- 4) E・ギンツトン (大沢寿一訳), "われら電子を加速せり", 岩波書店, p.126, 1997.
- 5) M. Chodorow, E. L. Ginzton, I. R. Neilsen and S. Sonkin, "Design and Performance of High-Power Pulsed Klystron", Proc. of I.R.E., p.1584, 1953.
- 6) R. Hofstadter, "Electron Scattering and Nuclear Structure", Rev. Mod. Phys. 28, p.214, 1956.
- 7) R. B. Neal, "The Stanford Two-Mile Accelerator", Benjamin, New York, 1968.
- 8) G. Merdianian, J. M. Jasberg and J. V. Lebacqz, "High Power, Permanent Magnet Focused, S-band Klystron for Linear Accelerator Use", Proc. of 5th Int. Conf. on Hiperfrequency Tubes, Paris, 1964/SLAC-PUB-48, 1964.
- 9) G. T. Konrad, "High Power RF Klystrons for Linear Accelerators", Proc. of LINAC '84, pp.293-297, 1984. この文献に 5045 と 150 MW のパラメータも纏められている。
- 10) J. W. Coldwell, "Fundamentals of Klystron Testing", SLAC TN-78-2, 1978.
- 11) T. G. Lee, G. T. Konrad, Y. Okazaki, M. Watanabe and Y. Yonezawa, "The Design and Performance of a 150-MW Klystron at S Band", IEEE Trans. On Plasma Science, PS-13, No. 5, p.545, 1985.
- 12) 西川哲治, 田中治郎, 私信.
- 13) 富増多喜男, 岡本正, 畝村幸雄, 第 5 回リニアック研究会報告集, つくば, p.50, 1980.
- 14) 岡田武雄, 小野寺俊夫, 利岡勝司, 神生忠興, 家喜洋司, "S バンド 25 MW パルスクライストロン PV-2014", 三菱電機技報, 第 41 巻, 12 号, p.1510, 1967.
- 15) H. Takekoshi, et al., JAERI 1238, 1975.
- 16) S. Anami, R. Bissonnette, S. Fukuda, H. Honma, Y. Saito, T. Shidara and J. Tanaka, "The RF System of the Photon Factory Injector Linac", Linac '81, pp.177-179, 1981.
- 17) 例えば A.G. Gilmour, Jr., "Principles of Traveling Wave Tubes", Artech House, INC., London, 1994.
- 18) S. Fukuda, T. Shidara, Y. Saito, H. Hanaki, K. Nakao, H. Homma, S. Anami and J. Tanaka, "Performance of High Power S-band Klystrons Focused with Permanent Magnet", KEK Report 86-9, 1987.
- 19) 道園真一郎, "高周波窓の破壊現象と TiN 薄膜コーティングによる破壊抑止に関する研究", 博士論文, 1992.
- 20) 齊藤芳男, 道園真一郎, 穴見昌三, 金原繁, 小林真一, 真空 34, p.29, 1991.
- 21) R. L. Stringall and J. V. Lebacqz, "High Power Klystron Development at the Stanford Linear Accelerator Center", 8th Int. Conf. on Microwave and Optical Generation and Amplification, Netherland, 1970/SLAC-PUB-804, 1970.
- 22) S. Fukuda, S. Michizono, K. Nakao, Y. Saito and S. Anami, "Design and Evaluation of a Compact 50-MW RF Source of the PF Linac for KEKB Project", Nucl. Instr. and Methods A, vol. 368, 3, pp.561-571, 1996.
- 23) S. Fukuda, K. Hayashi, S. Maeda, S. Michizono and Y. Saito, "Performances of a High-power Klystron Using a BI Cathode in KEK Electron Linac", Applied Surface Science 146, pp.84-88, 1999.
- 24) S. Fukuda, S. Michizono, K. Nakao, Y. Saito and S. Anami, "Performance of RF Source for KEK-B Linac", Proc. of 8th Int. Linear Accelerator Conference, Geneva, Switzerland, pp.187-189, 1996.
- 25) T. Sakai, et al., "S-band Klystron For Long Pulse Operation", Proc. of LINAC2002, Pohan, Korea, 2002.
- 26) Y. Ohkubo, et al., "100 MW S-band Klystron", Proc. of 15th Linac Acc. Meeting in Japan, pp.236-238, 1990.
- 27) D. Sprehn, G. Caryotakis and R.M. Phillips, "150-MW S-band Klystron Program at the Stanford Linear Accelerator Center", Proc. of RF 96, pp.91-99, 1994.
- 28) H. Yokomizo, "Commissioning of Spring-8 Linac", Spring-8 Information, Vol. 1, No. 4, 1996.
- 29) PPT File presented at CLIC Workshop 2013, <http://indico.cern.ch/event/204269/session/10/material/slides/1?contribId=52>