

500 MHz クライストロン

高田 耕治*

500 MHz Klystrons

Koji TAKATA*

1. はじめに

今では電子管*1のひとつであるクライストロン (klystron) は、電子リニアック、高エネルギー陽子リニアック、そして電子や陽電子の貯蔵リングなどにおける加速用高周波源に必須のものとして、よく知られる存在となっている。しかし KEK において、陽子シンクロトロンに続くプロジェクトとしての放射光源施設 (Photon Factory, 以降 PF と略称) が建設されようとした 1970 年代後半の日本においては、クライストロンは加速器にとって殆ど縁のないものであった。もちろん 1960 年に運転が始まった核研電子シンクロトロンに入射リニアックにはかなり原初的な形でのパルス出力クライストロン²⁾が開発され、使用された。しかしこれは例外的であって、容易に入手可能な数 MW 級 S バンド*2マグネトロンがもっぱら使われた。特に電子貯蔵リングに適した UHF 帯*3連続波大電力クライストロンは、海外の高エネルギー加速器研究所でちらほら使われ始めた程度で、日本では皆無であった。

筆者は 1976 年に PF 2.5 GeV リングの高周波加速系にかかわるようになった。そこでは、加速空洞、導

波管系、高周波源が重要な 3 本柱であるが、特に高周波源の中心となるクライストロンについては、上記のような状況であった。本稿では、こうした中での PF 用 180 kW 連続波クライストロン、およびそれに続くトリスタン用 1.2 MW 連続波クライストロン開発の経過をたどりたい。

ところで加速器先進国の米国では、クライストロン技術と高エネルギー加速器は密接に関係しつつ発展してきた。そこで先ず、その歴史を概観したうえで、本論に進むことにしたい。なお付録 1 には大電力クライストロンの構造のおおまかな説明を行った。また拙著³⁾にはクライストロンについて章を設け、簡単な原理の解説を行っている。

2. クライストロンと高エネルギー加速器

電子ビームの運動エネルギーを高周波エネルギーに変換するものとしては、磁場中の電子のらせん運動を利用するマグネトロンの技術が 1930 年代に実用化の域に達し、軍用レーダーの高周波源として各国で開発が進められていた。

しかし電子の直進運動を利用する機構についても米国やドイツで 1930 年代に研究が始まり、1939 年にまとまった形でほぼ同時に発表された。そのうちで、その後の実用化につなげた点も含めて、R. H. Varian, S. F. Varian 兄弟の仕事⁴⁾が最も有名である。レーダーへの応用を目的とした軍事研究であったが、出力は 1 W 以下でマグネトロンに置き変わるべくもなく、反射信号のヘテロダイン検波が目的であった。

よく知られているように、クライストロンは反射型自励発振管と直進型増幅管に大別されるが、Varian 兄弟が研究したのは前者である。クライストロンという名称は、浜辺で打ち寄せる波の砕ける様をあらわす古典ギリシャ語 $\kappa\lambda\upsilon\zeta\epsilon\iota\nu$ ⁵⁾ にちなんで彼らが命名したものであるが、密度変調されたビームが反射電極 (リペラ) で跳ね返される様子を意識したものであろう。

* 高エネルギー加速器研究機構
koji.takata@kek.jp

*1 真空管のやや専門的な名称で、電波や光の発生、増幅、変調などを電子の運動を介して行う機能を強調している。電子管一般については、例えば Gilmour の教科書¹⁾を参照のこと。なお現在では大電力用途以外はすべて半導体素子に置きかわった。

*2 2 GHz から 4 GHz までのマイクロ波をいう。特に電子リニアックに使われる 2856 MHz (米国および日本) および 3000 MHz (ヨーロッパ) が有名。なお L バンドは 1 GHz から 2 GHz まで、C バンドは 4 GHz から 8 GHz まで、X バンドは 8 GHz から 12 GHz までの周波数帯を指す。

*3 必ずしも定義は一定しないが、本稿では 300 MHz から 1 GHz までの周波数帯を指す。

さて、直進型クライストロンが大電力化、そして高エネルギー加速器への応用に無限の可能性を持っていることを見通したのは、Varian 兄弟の同僚であり、その後 SLAC の初代所長となる E. L. Ginzton である⁶⁾。

1944 年に訪問先の英国の軍事研究所でパルス出力 20 kW の試作管を見た彼は、戦後スタンフォード大学に戻るや直ちに W. W. Hansen, Varian 兄弟等とともに SLAC Mark III リニアックプロジェクト⁷⁾の一環として、S バンド 30 MW パルスクライストロンの開発にとりかかった。それは英国の球の出力を 1500 倍にも外挿したものであったが、設計からわずか 1 年半後の 1949 年には 14 MW の発生に成功した。Ginzton の先見性は、大電力のみならず、大規模リニアックにとって必須の周波数純度も、直進ビームを使うクライストロンがマグネトロンに比べ遥かに優れていることを認識したところにある。

このように大電力パルスクライストロンは高エネルギー加速器とともに生まれ、育ってきた。しかし、ここでの主題である連続波大電力クライストロンの加速器への応用は、電子貯蔵リングという新しい加速器のジャンルが成熟してきた 1970 年代以降である。もちろん連続波クライストロンの大電力化も第 2 次大戦後盛んに行われたが、それはもっぱら通信、放送を念頭に置いたものであった。とくに日本について云えば、1960 年代から 1970 年代にかけて UHF 放送用に出力 100 kW 程度までのクライストロンの開発が進められた²⁾。しかし半導体化が時代の趨勢となり、加速器で要求される更なる大電力化は、我々加速器屋自身が解決すべき課題となって久しい。

3. PF リング用クライストロン前史

筆者の実験ノートに現れる PF に関する最初の記述は、リング責任者の富家雄 (敬称略、以降も同じ) が 1976 年 4 月 15 日に筆者に行った PF 高周波系についての概要説明のメモである。それによれば、500 MHz 前後の周波数、200 kW 乃至 250 kW の電力の高周波で 6 台の空洞を駆動し、電流約 500 mA を貯める。高周波源には NEC のクライストロン (連続出力 80 kW) やフランスのトムソン社のクライストロン (連続出力 250 kW) がある、というものであった。

この富家説明で言及された NEC のクライストロン^{*4)}は NHK 大阪局で 1970 年に始められた UHF テ

レビ実験放送のために開発されたものである。生駒山山頂の送信所から 13 チャンネル (470 MHz-476 MHz) の電波を発信した。1976 年にこの実験放送が終わったことを知った我々は、クライストロン、電源、導波管の一切を譲っていただけないか、NHK に問い合わせた。幸いにも了承され、同年 10 月 KEK に搬入の運びとなった。この球は約 2 年間放置していたにもかかわらず、1978 年 6 月の初通電時に無事高電圧が印加でき、一ヶ月以内に 476 MHz で 70 kW 以上の出力を得た。以降約 2 年の間、貯蔵リング高周波加速系には必須の大電力サーキュレーター開発に決定的な役割を果たした。

4. 1977 年当時の外国の情況

1997 年春、筆者は欧米の代表的な高エネルギー物理研究所を訪問する機会に恵まれた。主目的はもちろん電子貯蔵リングの高周波加速系についての情報収集である。ここで特にクライストロンについて当時の情況をまとめておく。

4.1 米国スタンフォード線形加速器センター (SLAC)

SLAC では現在にいたるまで、使用する全てのクライストロンの設計、製作は研究所内で行うのが伝統である。1972 年に完成した SPEAR は 4.2 GeV 電子・陽電子衝突リング SPEAR II に増強され、周波数 358 MHz、出力 125 kW の球が 4 本使用されていた⁸⁾。訪問時には建設中の 18 GeV 電子・陽電子衝突リング PEP で 12 本使われる予定の周波数 353 MHz、出力 500 kW 球の開発の真っ最中であった⁹⁾。設計は、5 空洞型 (入力空洞 + 3 個の増幅空洞 + 出力空洞)、電圧 63 kV、マイクロパービアンズ^{*5)} $\mu P = 0.75$ 、効率 70% で 500 kW 出力を得ようとするものであった。試作球では設計電圧で 500 kW を出したが、ビームが加速空洞の間をつなぐ細い管 (ドリフト管という) にあたったり、効率が $\eta = 60\%$ 止まりであったので、対策を検討中であった。

この球の開発担当は G. Konrad であったが、筆者の質問すべてに大変丁寧に対応してくれた。特に殆ど

^{*5)} 殆どの電子銃では電圧 V と電流 I の関係について $I = PV^{3/2}$ という Child-Langmuir の空間電荷則¹⁰⁾が良くあてはまる。ここで電圧をボルト、電流をアンペアで表したときの比例定数 P をパービアンズ (perveance) という。特にそれに 10^6 乗じた数値をマイクロパービアンズといい、 μP で表す。大電力クライストロンの場合、効率など総合性能は μP が 0.7 から 1.0 の辺りで最適化されるようである。

^{*4)} 型番名 1AV80

全寸大の組立断面図を快く手渡されたのには非常に感激した。現今の社会経済の仕組みのなかでは、技術情報の広く自由な活用には難しい点が多々あり、クライストロンなどの電子管技術はその典型的な例のひとつである。そういう意味で、この図面は貴重なものであった。彼の自慢は費用を抑えるために、市販の料理鍋用として量産されているステンレスのプレス品に銅メッキし、ヘリアークで縫い合わせて空洞にするというものであった。やや話が細くなるが、その他の仕様も追記すると、電子銃は油浸、直径 127 mm のカソードからは 90 mA/cm² の密度で電流を取出す、収束磁場は約 180 ガウスである、などである。

4.2 ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY)

1973 年完成の衝突リング DORIS¹¹⁾ は電子用と陽電子用の 2 リングからなり、当時 3.5 GeV で運転されていた。高周波源として、仏国トムソン社の 500 MHz クライストロン TH-CSF F2055 が各リング 3 本ずつ配置されていた。この球では 42 kV、16 A で 250 kW の出力が得られていた。初期の寿命は機械的な問題で約 3000 時間であったが、当時は 2 万時間を越えていて、カソードによる寿命はないとのことであった。また放電によるトリップは 1 日 1、2 回程度のものであった。実験室には予備球が 2、3 本寝かしてあったが、無使用状態で会社の保証期間は 18 ヶ月であるので、運転中の球と順次置き換えて使用しているとのことであった。

一方、19 GeV 電子・陽電子衝突リング PETRA¹²⁾ が SLAC の PEP と踵を接して建設中であった。これにはハンブルグにある Valvo 社の 500 MHz クライストロン YK1300 が 8 本使われる予定であった。この球は 60 kV、15 A で 600 kW という高出力を狙ったものであった。理由の一つは仏国トムソン社の球 2 本を束ねるより 1 本の球にしたほうが安価であるということであった。発注後約 1 年で、試作第 1 号機はすでに 520 kW を達成していた。電子銃は変調用アノード電極^{*6}を備えない単純な 2 極管で、大気中使用という仕様であった。

4.3 英国ダーズベリー (Daresbury) 研究所

マンチェスター近くの Daresbury に建設中の放射光リング SRS はエネルギーが 2 GeV と PF よりやや低い、多くの点で手本となるものであった。予想される所要高周波電力 380 kW を賄う高周波源に関し、100 MHz から 500 MHz の範囲でいくつもの板極管、クライストロン候補をあげ、それらの詳細な検

討^{*7}がなされていた¹³⁾。

その結果、加速空洞をほどほどの寸法に収め、かつバンチ長を短くすること、リニアック周波数 3000 MHz の分数調波であることなどを考慮して周波数を 500 MHz とし、そこで動作する公称出力 250 kW の Varian 社クライストロン VKP-8259 を選んだ。訪問時は最初の球の検収直前であった。記録によれば 1978 年 8 月に電圧 43 kV 電流 15 A で連続出力 255 kW が得られている。

4.4 イララスカチ (Frascati) 国立核物理学研究所と仏オルセー (Orsay) 線形加速器研究所

ローマ近郊 Frascati の 1.5 GeV 電子貯蔵リング ADONE は、その加速周波数が 8.45 MHz と低く、加速空洞は巨大なものであった。しかし、訪問時には周波数を 50 MHz に変更中であった。

パリ近郊 Orsay の 0.54 GeV 電子貯蔵リング ACO でも加速周波数は 25 MHz と低く、やはり 100 MHz に高める計画を持っていた。

5. PF リング用クライストロンの基本パラメーター設定

上のような外国の情報、資料をもとに PF2.5 GeV リング用クライストロンの基本パラメーター設定への作業を本格的に始めた。リング 1 周当たりのシンクロトロン放射損失 V_s は 400 kV (ウィグラー挿入時 510 kV) であり、前提とされていた貯蔵電流 500 mA ではビーム加速電力だけで 200 kW (同 255 kW) の電力が必要である。これに加速空洞の壁損 (周波数に依存するがビーム加速に近い量と考えておくと無難) を加えたものが、高周波源に最低要求される電力である。

さてまず決めなければならないのは、周波数帯の選択である。大きく分ければ、100 MHz 前後のいわゆる VHF 帯か、UHF 帯かである。使用する電子管は、前者では 3 極管、4 極管などの板極管、後者ではクライストロンと殆ど自動的に決まる。ここで VHF が優位に立つのは恐らくピーク加速電圧が小さくてすむ^{*8}ことでだけであろう。むしろ多くの問題点があ

^{*7} PF についても 1976 年ごろに同様な議論をし、板極管を候補にする意見もあった。

^{*8} 放射光放出の反作用で電子は加速高周波バケツのなかで暴れ、一部はこぼれ落ちる (量子寿命)。従って、ビームの貯蔵時間を十分長くするためにはバケツの深さであるピーク加速電圧を V_s の数倍にする必要があるが、加速周波数が低いほどその条件は緩やかになる。

^{*6} 付録 1 参照。

る。バンチ長が長くなるのは光源としての性能からは不利である。加速空洞の直径（高周波波長のほぼ8割）が大きすぎる。板極管の電力増幅率はせいぜい10 dB程度で、数段の増幅回路が必要となり、複雑で安定性に欠ける。また電波の伝送に同軸管を使わざるを得ない。断面寸法が半波長以上となる導波管は大きすぎて実用的でないからである。しかし同軸管では内部導体の冷却が構造上むづかしく、短区間を別にして大電力伝送には全く不適である。

こうしてクライストロンが対応できる約350 MHz以上に絞られてくる。ここで電子貯蔵リングとして考えなければならないのは、ビーム入射時の軌道の拡がりであって、ビームパイプの内径はそれより若干大きくしなければならぬ。とくにPFリングの場合、空洞のビーム出入口の内直径は10 cmが必要とされた。ところが空洞の直径がこれより十分に大きくなければ、加速電場分布がビームパイプ開口部で乱され、シャント・インピーダンスが低下する。従って周波数は大体700 MHz以下に納めたい。そこでDESYとDareburyで実績のある500 MHzが有力となる。

ここで問題となるのは、リング入射効率を損なわないために、PF電子リニアックの周波数2856 MHzの分数調波476 MHzであるべきか否かである。実際、3000 MHzのリニアック入射器を使うDESYやDareburyでは、分数調波の条件を満たすために500 MHzを選んでいる。しかし鎌田進等の検討¹⁴⁾の結果、この軛から解放されることになった。従っていざとなればDORISやSRSと同じ球を導入すれば良い訳である。

次にそれでは、市民生活で云うと上水道源に相当する大電力高周波源を国内技術として確立するか、あるいは外国の企業に任せるか、それが思案のしどころとなる。大電力高周波源に制約があれば、どの高エネルギー加速器でも設計、運転、調整に関する自由度が大幅に失われる。また1977年には大電力高周波源が必須のトリスタンプロジェクトの設計検討がかなり進み、その実現も確実に間近であろうと見られていた。このような理由から、多大の負担を覚悟しつつ大電力連続波クライストロンの国内開発に向かった。

ところで大電力電子管技術の開発は高周波源の安定確保以上の意味を持つことを強調したい。電磁場でビームを加速するか、ビームを減速して電磁場を生成するかは場の位相の違いだけであって、本質は同じである。従って大電力電子管も「小さな加速器」ということが出来る。大電力電子管は高電圧電子銃、高温の大口径カソード、大電力高周波取出し窓、コレクター

と呼ばれる大電力ビーム捨て場などからなる超高真空封じきりシステムである。その中高エネルギー密度のビームと電磁場が行き交っている。ビーム軌道は電磁場で大きく擾乱されるが、コレクター以外で壁に衝突してはいけない。ビームと強い相互作用をもつ電磁場は、その周波数とモード（姿態）が厳密に目的にかなうものでなければならない。これらを満足させるには、高純度の金属材料やセラミック、異種金属間あるいは絶縁物との高度な鑲付け技術、無酸素銅の超精密加工による共振空洞製作、ビーム軌道や電磁場の精密なシミュレーションコードなど、広範囲の最先端技術が要求される。そして、いったん封じきった電子管は発射台をはなれたロケットと同じで、製作過程の少しの瑕疵でも取り返しがつかない事態をひきおこす。このように、大電力電子管技術は高エネルギー加速器を建設しようとする国の基盤技術の高さを象徴するものといつてよい。

さて、最後の問題はクライストロン出力をいくらに設定するかであった。もしもPFだけの問題であれば、当時の日本のレベル100 kW前後を少し上回るものでよかった。しかし後に控えるトリスタンでは全体で約30 MWの所要高周波電力が予想された。これに対応するには、PETRTAの600 kWでも力不足で、是非1 MWを越える球が望ましい。結局、当時の到達実績である100 kWの3 dB上であれば1 MWにつながるかと考え、出力を180 kWないし200 kWとして開発を始めた訳である。

筆者はこれらの検討も踏まえて高周波加速系のパラメーターを見直し、KEKレポート¹⁵⁾にまとめた。その冒頭部分は上の検討過程に直接関係しているの、末尾の付録2に再現した。なおPFリングのパラメーターが最終的なものに固まったのは1978年6月で、筆者のノートには木原元央が提示した基本数値として、周長185.84 m、運動量コンパクション数0.0346、ハーモニック数310、加速周波数500.08 MHzという記録が残っている。

6. PF用180 kW連続波クライストロン開発

以上のような方針にもとづいて180 kWク連続波クライストロン開発^{*9)}の作業に入った。入札で会社は東芝に決まり、同社堀川町工場（川崎市）の岡本正、大家圭司を中心とするチームが担当することとなった。

6.1 ビーム設計

とりあえず電圧40 kV、電流8 Aのビームで高周波

*9) 型番 E3774

出力 180 kW を得る（効率 55%）ことを目標として高周波設計を始めた。

シミュレーションコードには、当時最先端であった 1 次元円板モデルにもとづく大電力信号解析コードが用いられた^{16,17}。円板モデルとは入力空洞直前の電子ビームを薄い円板の連続的なつながりとみなし、円板の形は崩れない（剛体）との仮定のもとに、それ以降の軸方向運動の追跡をおこなう。これが 1 次元モデルと云われる所以である。また大電力信号解析とは、空洞間隙通過中の円板速度変化と励起された電磁場振幅が互いに矛盾しない解を求めることである。なお、より正確な解を求めるには電子速度の動径依存性も計算に入れる 2 次元以上のコードになるが、これが必要となるのは遥かに電子密度が大きいパルスクライストロンにおいてである。

入力空洞と出力空洞を除く増幅空洞の数を 3 とし、それらの配列と共振周波数を微調しながら、高効率出力と短距離ビーム集束を可能とする条件を探した。その結果、入力空洞・出力空洞間が 1035 mm という短い間隔で目標の効率が達成できる解を得た。なおマイクロパービアンスは 0.83、利得は 42 dB であった¹⁸。

6.2 構造設計

電圧は高くても 40 kV を若干越える程度であるので、大気中絶縁で十分であるとした。そこで管球は、電子銃を天、コレクターを地側とする直立構造とした。電子リングではビーム電流量やエネルギーにより高周波電力が大幅に変わる。従って電子銃は変調アノード電極も入れた 3 極管型とした。クライストロン主電源の電圧を変えずに、殆ど電流を取らない変調アノード電極の電圧を動かすだけで、クライストロンのビーム電流を制御できるからである。コレクターは流量 400 l/min の強制水冷型とした。また収束コイル磁場は 250 gauss に設定した。

初期の球については出力空洞を除き、大気中に外付けする空洞とした。球本体は空洞間隙部分をセラミック円筒とし、球の封じきり後、セラミックを囲うように寸法可変の空洞を取り付ける。こうして各増幅空洞の共振周波数を変えながら、出力が極大になる条件を実験的に決めてゆくわけである。精度の良い空洞電磁場シミュレーションコード^{*10}がなかった時代では、これ以外の簡単な手段がなかった。出力空洞からの電

力取出しはループ結合した同軸管を用いる。同軸管のもう一方の端はアンテナ型開放端とし、それをセラミック円筒で真空封じた。出力窓であるこのセラミック円筒に WG1500 型導波管^{*11}を取り付け、アンテナからの出力を加速空洞へ伝送する。当然 HFSS などの電磁波伝搬解析コードがない時代であったから、導波管変換部の整合をとることは大変な作業であった。

6.3 製造と運転

製造過程で遭遇した問題には、電子銃や出力窓に使う大型で高純度のセラミック円筒の入手が容易でなかったこと、カソード裏面に裏打ちされたセラミックに埋込まれたヒーターの断線などがある。しかし、内部導体を水冷しなければならない出力同軸管は、いくつもの小さい部品に分かれていて、それらの繋ぎが最も難しいものであった。

運転試験では、増幅空洞の調整は上に述べたように比較的容易であった。問題は寸法調整が不可能な出力空洞である。とくに効率に直接関係する外部 Q 値を最適化するには何本かの球による試行錯誤が必要であった。

しかし、1979 年に 1 号機で出力 140 kW が得られ、

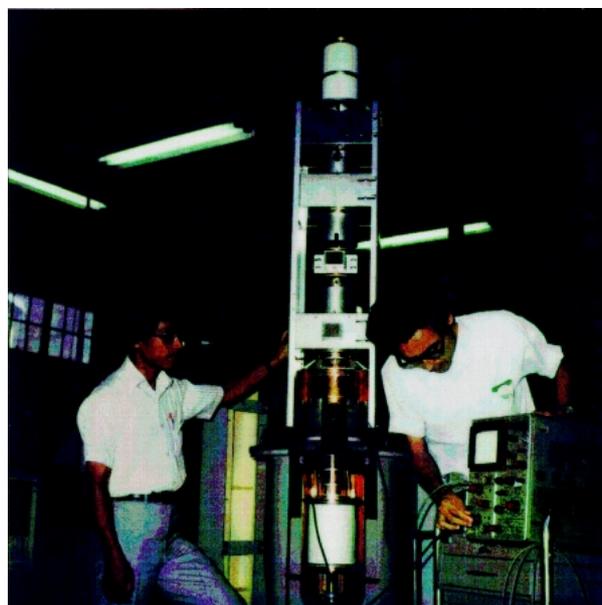


図 1 最終組立直後の 180 kW 連続波クライストロン 1 号機最上部は電子銃。中央最下部のセラミック出力窓の周波数測定を行っているのは山崎良成。左は筆者。1979 年 7 月東芝堀川町工場にて大家圭司撮影。

*10 SUPERFISH が SLAC ならびに米国ロスアラモス国立研究所、同ブルックヘヴン国立研究所から KEK に導入されたのは 1979 年から 1980 年にかけてである。

*11 横幅 381 mm 高さ 190.5 mm の矩形導波管。なお管内雰囲気は大気である。

1983年には190 kWを記録^{*12}するに至った¹⁹⁾。PFリングには1981年8月から順次4本の球の設置が始まった。なお同リングに2.51 GeVの電子ビームが貯蔵されたのは翌年3月11日である。以降、現在まで約30本が製造され、PFのみならずその他二三の光源リングでも使われている。使用時間はおよそ2~4万時間である²⁰⁾。

7. トリスタン・KEKB用1.2 MW連続波クライストロン開発

トリスタン用1 MW級の球の開発は同じ東芝チームと組んで1981年度から始まった。そのころには原研JT60のプラズマ高周波加熱用として2 GHz, 1 MW, 10秒パルスのクライストロンがNEC, 東芝で開発されていた。同じ1 MWという未踏の領域での、原研担当者との数年にわたる情報交換には大変心強いものがあつた。

7.1 基本パラメーターの設定

この球^{*13}のビームパラメーターは、180 kWクライストロンの実績を踏まえ、電圧90 kV, 電流20 A (マイクロパービアンズ0.74)に設定した。しかし周波数については若干の変更があつた。1981年6月9日の筆者のノートには、木村嘉孝からの下問として、トリスタン主リングのハーモニック数5120に相当する508.581 MHzか同4960に相当する492.688 MHzのいずれかを検討、選択せよとある。これはトリスタン電子リングで、陽子シンクロトロンからの陽子ビームとの衝突実験の可能性が未だ生きていたからである^{*14}。そこでWG1500導波管の遮断周波数からより遠く、出力窓の導波管変換部の整合が取りやすいという岡本正の意見を入れて508.581 MHzとすることにした。

7.2 構造設計

電子銃については180 kWクライストロンと同様に変調用アノード電極付きの3極管構造とし、カソードは直径70 mmに拡大した。電圧が90 kVと高く、大気中絶縁は無理であるので、油浸方式を採ることにした。その結果、油タンクに浸かる電子銃は地側、コレクターは天側となった。最大2 MWの熱流入があるコレクターについては、強制水冷方式では水量、水

圧、乱流等の問題を解決するのが容易ではないと判断し、蒸発冷却方式を採用した。それはNukiyama Curveとして知られる^{21,22)}、臨界温度領域で沸騰水がもつ高熱伝達特性を利用したものである。

空洞系は180 kWクライストロンと同じ5空洞型とし、円板コードで最適化した。とりあえず1号機では、入力空洞とそれに続く2つの増幅空洞を大気中外付け型とした。しかし電圧の高い最終増幅空洞および出力空洞は管球と一体化した真空内蔵型とした。なおこの時点ではSUPERFISHコードが使えるようになっていた。出力方式についても180 kWクライストロンと同じく、円筒セラミック窓で終端された同軸管とした。

最終的な構造は全長4.35 m, その内高周波路長は1.8 mという大きなものになり、重量も1.15トンに達した。

7.3 大電力試験

1号機は1982年3月に高電圧試験が開始され、同年8月には出力350 kWに達した。しかし以降2年有余にわたり様々な問題に遭遇し、約20本の球は早世に終わった。現象としては、電子銃の耐電圧不良、溶接部劣化によるリーク、円筒セラミック出力窓の不均一な温度上昇による破壊などに大別される²³⁾。

電子銃の耐電圧については様々な検討の後、カソードからの過剰なバリウム(Ba)の蒸発が電子銃のセラミック碍子を汚すためであると分かった。カソードは多孔性のタングステン母材にバリウムを含浸(impregnated)させた標準的なもので、もっぱら米国Semicon社から供給される。バリウムの役割はカソード表面に単原子層を作って仕事関数を大幅に下げることである。しかし事前に過剰なバリウムを高温炉で十分に焼き出しておかなければならない。その処理条件が明確ではなかったため、電子銃全体を汚染することになったのである。この手順が確立し、また真空排気系がoil-free化されると、90 kVの電圧は問題ではなくなった。

大電力クライストロンでは高真空に接する本体の壁には冷却水路が多数貫通している。そういうところがステンレス鋼であると真空リークが頻発した。これはステンレス鋼に含まれる炭素が水と反応し、溶接部での脆性破壊をもたらすためである。結局、真空溶解処理を経た低炭素ステンレス鋼316 Lに置換し、問題を解決した。またこの低炭素ステンレス鋼を電子銃の電極の一部にも採用し、残存ガス放出の抑止と耐電圧性の向上をはかった。

円筒セラミック出力窓の問題は、温度上昇の原因と

*12 このとき、ビーム電圧45 kV 電流6.9 A, マイクロパービアンズ0.72

*13 当初の型番はE3786。電子銃外形の若干の改変後はE3732。

*14 しかしこれらの周波数が選ばれた理由は資料が散逸し不明である。



図2 トリスタン・KEKB用1.2 MW連続波クライストロンの外観。機械構造が改良され、空洞も全て内蔵型になっているが、出力セラミック窓は未だ円筒型のもの。右は竹内保直。撮影は1984年ごろ。

その均一化という2つにさらに分かれる。温度上昇は諫川秀と竹内保直（KEK）が詳細な試験を行い、セラミック表面での電界放出電子のone-side-multipactingによるものと断定した。また同時に、それを抑止するための、厚さ100 Å程度の窒化チタン薄膜蒸着の技術を確認した。

セラミックの不均一な温度上昇を解決するために、田中次郎らによって円板型セラミック窓²⁴⁾への転換がはかられた。この型ではセラミックを電場がどうしても不均一になる導波管端部から遠ざけ、電場がより均一な同軸管部に置く。ただし、同軸管の内部導体と外部導体の距離が十分にとれないので耐電圧が心配される。これが当初円筒型セラミック窓を選んだ理由であった。しかし上述の諫川らの窒化チタン薄膜蒸着技術を応用することにより、その心配は解消された。この型の窓を含む導波管変換装置はドアノブ型と呼ばれ、KEKBの常伝導、超伝導空洞の入力部分にも使われている。

また機械構造設計の大幅な見直しが田中次郎の指導のもとに大家圭司により進められ、全ての空洞が内蔵

一体型の堅牢な球に改良された。

このような開発努力の結果、1984年12月26日に810 kWの安定な出力が得られ、この周波数帯の連続波クライストロンとして世界のトップレベルに躍り出た²⁵⁾。また1986年にはビーム電圧94.2 kV、効率64.8%で連続出力1.3 MWの世界記録を達成した。

7.4 Valvo社クライストロンの並行開発

このように東芝球の開発初期に困難が長引いたので、そのバックアップとしてDESYで実績のあるValvo社との開発も1983年末から始まった。同社はPETRA用600 kWクライストロンYK1301の改良型である800 kW級YK1302の開発にとりかかった。その1号機は1985年2月にKEKに納入されるやその翌月には770 kWの出力を達成した。また1 MW級に増強したYK1303も同年12月に納入され、直ちに1.1 MWを記録した。

7.5 長期運転での問題点

以上のような経過をたどって、KEKでは両社の球が並行運転されて現在に至っている。今までに東芝により納入された管球数は60本強、Valvo社によるものはその半数である。また現在KEKBで運転に使用されているのは、東芝球22本、Valvo球4本である。平均寿命は東芝球で約3万5千時間（最長は7万6千時間でまだ稼働中）であるが、Valvo球では1万5千時間程度である。東芝球の寿命が圧倒的に長いのは、熱負荷のかかるコレクターまわりの構造が単純、堅牢であるとともに、出力窓の冷却性能改善の結果である²⁶⁾。

大電力クライストロンでは、電子ビームの安定性が重要な問題である。パルスクライストロンでは、空洞や電子銃に寄生する高調波共振モードがやすやすとビームを偏向させる。従って高調波の離調、減衰が大問題である。しかし、幸いにもここで述べた連続波クライストロンでは特別な手だてを要することもなく、安定出力が確保されている。

そうは云うものの、長期運転では、いくつかの問題が出てきた。変調アノード電流にしばしばスパイク状発振やヒステリシス効果が観測されるのは、その典型的な例である。多数の事例からそのような不安定現象は、カソード表面からわずかではあるが蒸発しつづけるバリュウムが、電子銃を中心に電極やセラミック表面に堆積した結果であると説明できるようである。

上述したように、カソード単体の高温焼き出し処理で、球に封じ込んだ直後の大量のバリュウム蒸発はなくなった。しかし高温のカソード表面からの蒸発は微量ではあるが恒常的に続く。そのバリュウム蒸気がま

ず降り積もる先は、カソードを取り囲んで静電収束場をつくるウェーネルト電極表面である。その過程でバリウム結晶がエピタキシャル成長し、針状突起を作る。そこからの電界放出電子が対向する変調アノード電極に衝突し、2次電子を発生させる。そしてその結果として、変調アノード電流のスパイク状発振やヒステリシスがひきおこされるようである。これらの現象は高周波出力に側波発振をもたらしたり、最悪の場合、電子銃での放電と耐電圧劣化につながる。

これを解決するために、カソード表面へ特殊な金属薄膜を蒸着し²⁷⁾、仕事関数をさらに下げる試みがなされた。Valvo球では希土類金属であるオスミウムとルビジュームの合金、東芝球ではイリジウムを使う。普通のバリウム含浸カソードの動作温度は約1050°Cであるが、これらの特殊金属蒸着により100°C近く低温で同等のビーム電流が得られる。現在、約半数の球はこの型のカソードが仕込まれ、動作安定化と長寿命化の効果が出ている。もちろん問題が全くないわけではない。オスミウムとルビジウムは有毒金属で、取扱いが難しい。一方、イリジウム型カソードではその点は安全であるが、電子放出特性が落ち着くのに2000時間程度かかるという欠点がある。しかしより低温で動作するカソードとより放出ガス量を減らした電極で構成された電子銃が、今後の大電力クライストロンには必須のものとなろう。それでも電極に堆積してゆくバリウムその他の原子層の除去には、放電洗浄という毒をもって毒を制する手法を確立する必要があるかもしれない²⁸⁾。

8. 終わりに

以上のような500 MHz連続波クライストロンの開発は、加速器に応用される大電力管の製造技術を世界レベルに引き上げるとともに、加速器研究者の間にも多くの専門家を育てることになった。この成果をもとにKEKでは1990年代以降、リニアコライダー用として大電力パルスクライストロンがS^{*15}、C^{*16}、X^{*17}の各バンドで開発され、ほぼ完成の域に達した訳である。ただしそれには、3次元的なビームシミュレーションのコードが発達し、必ずしも相対論的でない「柔らかな」ビームと大振幅空洞電磁場との相互作用の精

密な解析が可能になったことも大きい。

今では加速器研究者は高周波源として様々なオプションを手にするようになった。しかし本当に安定な性能を確保するには、高温、高電圧、大電流という条件下での超高真空機器である電子銃に再度立ち帰る必要があるように思える。それは20世紀初頭にタングステン電球内部での気体の解離、循環の平衡サイクルを発見したラングミュアの仕事の現代版に相当するものであろう。それとともに、より低温で働くカソードの開発など、材料物性のさらなる発展にも強く期待したい。

参考文献

- 1) Jr. A. S. Gilmour. *Microwave Tubes*. Artech House, 1986.
- 2) 日本電子機械工業会電子管史研究会編. 電子管の歴史. オーム社, 1987.
- 3) 高田耕治. 加速器の基本概念, KEK Report 2003-10, 2004.
- 4) R. H. Varian and S. F. Varian. *Proc. IEEE*, Vol. 61, p. 299, 1939.
- 5) R. Warnecke and P. Guénard. *Les Tubes Électroniques a Commande par Modulation de Vitesse*. Gauthier-Villars, Paris, 1951.
- 6) A. G. Cottrell and L. Cottrell, editors. *Times to Remember—The Life of Edward L. Ginzton*. Blackberry Creek Press, Berkeley, 1995.
- 7) M. Chodorow, et al. *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 26, p. 134, 1955.
- 8) M. A. Allen, et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-22, p. 1269, 1975.
- 9) G. T. Konrad. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-24, p. 1689, 1977.
- 10) I. Langmuir and K. B. Blodgett. *Phys. Rev.*, Vol. Ser. 2, vol. 22, p. 347, 1923.
- 11) D. Degèle, et al. *Proc. 9th Int. Conf. High Energy Accelerators*, p. 43, 1974.
- 12) G. A. Voss. *Proc. 10th Int. Conf. High Energy Accelerators*, p. 448, 1977.
- 13) G. Saxon and T. E. Swain, The Choice of Radio Frequency for the Daresbury Storage Ring, Daresbury Laboratory Report DL/SRF/R6, 1975.
- 14) S. Kamada, et al. Lattice Design of KEK Photon Factory Storage Ring, KEK Report KEK-77-16, 1977.
- 15) K. Takata, RF Parameters of the PF Storage Ring, KEK Report KEK-ACCELERATOR-78-1, 1978.
- 16) 島田隆司. 電子通信学会論文誌, Vol. 56-B-5, p. 176, 1973.
- 17) 影山隆雄. 電子通信学会論文誌, Vol. 59-B-1, p. 17, 1976.
- 18) T. Okamoto, et al. *Proc. 3rd Symposium on Acc. Sci. and Tech.*, p. 217, Osaka Univ, 1980.
- 19) 高田耕治. 第8回リニアック研究会報文集, p. 179, 東大核研, 1983.

*15 周波数 2856 MHz, ピーク出力 80 MW, パルス幅 4 μ s, 繰返し 50 Hz

*16 周波数 5712 MHz, ピーク出力 50 MW, パルス幅 2.8 μ s, 繰返し 50 Hz

*17 周波数 11.424 GHz, ピーク出力 75 MW, パルス幅 1.7 μ s, 繰返し 60 Hz

- 20) 坂中章吾. 私信, 2004年8月.
- 21) トムソン社特許. 非等温熱消散構造体, 日本国特許公報 昭44-13744, 1969.
- 22) S. Nukiyama. Maximum and minimum values of heat q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. *J. Soc. Mech. Eng. Jpn.*, Vol. 37, p. 53, 1934.
- 23) K. Akai, et al. *Proc. of 13th Int. Conf. High Energy Accelerators*, Vol. 2, p. 303, 1986.
- 24) S. Isagawa, et al. *Proc. 1987 Particle Accelerator Conference*, 1987.
- 25) 諫川 秀. *KEK High Energy Quarterly*, Vol. 1-3, p. 1, 1985.
- 26) S. Isagawa. *Proc. 14th Symposium on Accelerator Science and Technology*, p. 341, 2003.
- 27) W. H. Kohl. *Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices*. Reinhold Publishing Co. New York, 1967.
- 28) 諫川 秀. 私信, 2004年8月.
- 29) R. E. Collin. *Foundations for Microwave Engineering, 2nd edition*. McGraw-Hill, 1992.

7. アノード電極 (接地電位)
8. 入力空洞
9. ドリフト管
10. 増幅空洞 (普通 2~3 個)
11. 出力空洞 (大出力管では 2~3 セルの結合空洞を用いる場合もある)
12. コレクター (外部は冷却水に浸かる)
13. ビーム
14. 入力用導波管 (同軸管の場合も多い)
15. 入力用セラミック真空窓
16. 出力用セラミック真空窓 (出力レベル, 周波数に応じて様々な形状をとる)
17. 出力用導波管 (本稿で述べたクライストロンでは, 出力空洞から出力用セラミック真空窓の間は同軸管)
18. 電子銃セラミック碍子
19. 収束コイル (周期的に磁極が反転する永久磁石列の場合もある)

付録 1: クライストロンの構造

図 3 は直進型クライストロン断面の概念図である. 動作周波数や出力レベルにより, 部分的には構造がかなり異なることもあるが, 原理は変わらない. それでは同図に付された各番号についての説明を以下に行う.

1. カソードおよびヒーター入力
2. ヒーター入力
3. ヒーター
4. カソード
5. ウェーネルト電極 (カソードと同電位)
6. 変調用アノード電極 (カソードとアノードの中間の電位)

カソードから出た電子ビームはウェーネルト電極, 変調用アノード電極, アノード電極の間にできる静電場の内向き成分と, 収束コイルの作る外縁磁場の両方で絞られ, 細いドリフト管に入る. 一様に進むビームは入力空洞に励起されている高周波電磁場の軸方向電場加減速され, でわずかな速度変調を受ける. 最初の増幅空洞に入る頃に, 速度変調はある程度の密度変調に転化する. この密度変調は増幅空洞に同じ周波数の高周波電磁場を励起する. その電場は自身にはね返ってさらに大きな速度変調が生まれ, 次の増幅空洞に入る. このような経過を繰返し, 十分に密度変調されたビームになったところに出力空洞において, 電力をとりだす.

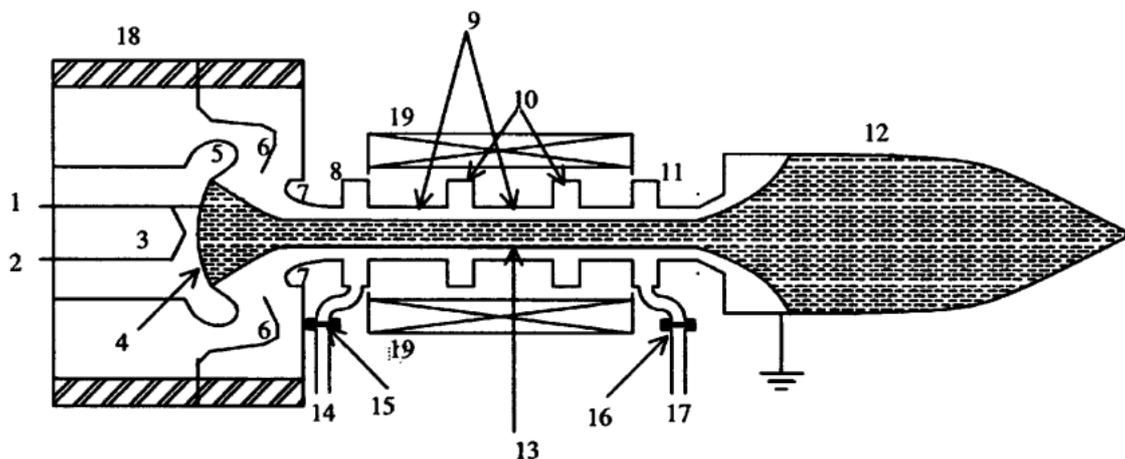


図 3 クライストロン断面概念図. 詳しい説明は付録 1 に記述.

反射型クライストロンは接地電位にある単一の空洞の片側に負電位のカソード，反対側にさらに深い負電位の反射電極（リペラー：repeller）を置いた構造を取る。カソードから出た電子は空洞を通過した後，リペラーの手前で跳ね返り再度空洞を通過する。このとき，空洞に存在する高周波電磁場のうち，その周期と空洞を再度通過するまでの時間に適当な比例関係²⁹⁾がある成分だけが電子ビームからエネルギーを貰い，成長する。このように反射型クライストロンは自励発振管であるが，リペラー電位を深くすればより早く電子が戻るので，発振周波数が高くなる。

付録 2

“RF Parameters of the PF Storage Ring”の題目のもとに KEK-ACCELERATOR-78-1 (April 1978) として出版した筆者の論文¹⁵⁾のうち，本稿に関係する冒頭部分および参考文献を再現しておく。

Abstract

The radio frequency is chosen to be 499.65 MHz and the harmonic number h to be 300. These are changed from the original design values 476.0 MHz and 256. The RF power relations are calculated for typical cavity conditions. The synchrotron oscillation number ν_s will be about 0.04.

1. Introduction

Initially we chose the radio frequency for the storage ring at 476 MHz, just the one-sixth of the accelerating frequency of the 2.5 GeV injection linac. This was because the 2856 MHz bunches can be injected in exact synchronization with the ring RF bucket. Recently 500 MHz instead of 476 MHz becomes

preferred because of the following reasons. First, the Varian klystron VKP-8259¹⁾, which operates at 499.65 MHz, is already in use at DESY²⁾, and will be used by Daresbury Laboratory³⁾. The Japanese manufacturers, however, have not yet developed tubes with an output more than 120 kW at CW rating around this frequency. Therefore they are obliged to make some investments to get a tube with a desired output of 180 kW⁴⁾. Second, by modulating the injection gun of the linac a good efficiency of trapping in the ring will be obtained and, even a single bunch storage will not be difficult at any frequency⁵⁾.

Considerable changes were made also with respect to the mean radius and momentum compaction factor in the recent designing of the ring lattice⁶⁾. In the following are presented the modifications of the results in a previous report⁴⁾. 以下略。

なおこの論文に引用された文献は次のようなものである。

- 1) *Tentative VKP 8259 Klystron Specification*, Varian Ass. (Jan., 1978).
- 2) *Specification of DESY 500 MHz-klystron*, **DESY B2. 395** (Jan., 1973).
- 3) *Specification for a High Power 500 MHz klystron*, **DL/SRS/S/12** (Aug., 1975).
- 4) K. Takata: *Note on the RF System of the 2.5 GeV Electron Storage Ring for the Photon Factory Project*, **KEK-77-15** (Nov., 1977).
- 5) T. Suzuki: *private communications*.
- 6) S. Kamada et al: *Lattice Design of KEK Photon Factory Storage Ring*, **KEK-77-16** (Dec., 1977).