

## 話 題

## 100 MW パルスクライストロン

米澤 宏<sup>\*1</sup>・三宅 節雄<sup>\*2</sup>・大久保 良久<sup>\*3</sup>

## The 100 MW Pulsed Klystron

Hiroshi YONEZAWA<sup>\*1</sup>, Setsuo MIYAKE<sup>\*2</sup> and Yoshihisa OHKUBO<sup>\*3</sup>

## はじめに

今、筆者が開発した東芝 S バンドパルスクライストロン E3712 は世界で約 40 台が稼動し、電子や陽電子を加速するマイクロ波電界を発生している。E3712 クライストロンは常用に供されているライナックを駆動するクライストロンでは世界最大のピーク出力 100 MW (パルス幅 1  $\mu$ s) 或いは 80 MW (パルス幅 4  $\mu$ s) を誇っている。E3712 クライストロンの外観写真を図 1 に示す。多くの方々の貢献と決断によって本クライストロンの開発は成功に導かれた。本稿ではその開発のあらましを記し、クライストロンあるいは加速器の開発に携わる方々の参考にしていただければ幸いである。



図 1 東芝 S バンドパルスクライストロン E3712

## 1. クライストロン開発着手に至るまで

筆者が開発に着手した 1988 年当時、(株)東芝 (以降東芝) では電子技術総合研究所向けに 21 MW クライストロン<sup>1)</sup>を年間 2-3 本生産していた程度であり、一挙にピーク電力を 5 倍にするという目標は恐ろしく高いものであった。そもそも何故にそのような大きなピーク出力電力が必要とされたのであろうか。当時放射光によるエネルギー損失のため円型加速器による電子の加速エネルギーには限界があり、直線的に加速するリニアコライダー (JLC)<sup>2)</sup>が次期高エネルギー加速器として鋭意検討されていた。現実的な敷地の制限のもとで目標とするエネルギーを実現するためには非常に大きなマイクロ波電力が必要である。マイクロ波電力を発生するクライストロン一本あたりの出力電力が小さいと単位長さあたり多数のクライストロンとその電源を配置する必要があり、電源のコスト増加ならびに占有スペース不足という問題が生ずる。電源の数を減らすためには、クライストロン単管あたりの出力電力を増やす必要があった。当時は SLAC の 5045 クライストロン<sup>3)</sup>が世界最大のピーク出力 50 MW を実現しており、その 2 倍以上の出力を実現することが目標となった。

## 2. 東芝のクライストロン

1970 年代まで東芝のクライストロンの主力は UHF 放送送信機用の出力 10~30 kW の連続波クライストロンであった。しかしながら固体素子の高周波数化、大電力化の進展に伴い、早晚放送用クライストロンの市場は無くなると見ていた。そのためマイクロ波管の技術部隊を率いていた岡本正らは電子管でなければ実

\*1 東芝電子管デバイス株式会社 (E-mail: hiroshi.yonezawa@toshiba.co.jp)

\*2 同社 (E-mail: setsuo.miyake@toshiba.co.jp)

\*3 同社 (E-mail: yoshihisa.ookubo@toshiba.co.jp)

現できない超大電力、高周波数、高信頼性の電子管の開発にシフトしていた。例えば衛星通信用進行波管であり、核融合研究用クライストロン並びにジャイロトロンであり、そして高エネルギー物理研究用クライストロンであった。放送用クライストロンの技術をもとに開発を始めたのが高エネルギー物理学研究所（以降 KEK）フォトンファクトリー（以降 PF）用 180 kW 連続波クライストロンやトリスタン用 1.2 MW 連続波クライストロンであり、これらについては既に高田耕治によって報告されている<sup>4)</sup>。一方ライナック用パルスクライストロンは社内の医療用ライナックのマイクロ波源として S バンド 8 MW 程度の製品を実用化しており、更に電子技術総合研究所向けに S バンド 21 MW のクライストロンを納入していた。しかしながら国内最大、世界でも第 2 位の規模を誇る KEK の PF 入射器ライナックは三菱電機株式会社製 30 MW クライストロンを採用しており、東芝は高エネルギー物理研究用パルスクライストロンでは大きく出遅れている状況であった。とは言え連続波クライストロン開発を通して技術と設備は徐々に蓄積されつつあった。クライストロンの内部を超高真空にする排気台も最新型の真空ポンプが装備されていた。大型の構造体を作る設計・製造ノウハウも増えていた。日米科学技術協力協定のもと、SLAC-KEK-三菱電機-東芝が参加した S バンド 150 MW クライストロン<sup>5)</sup>の開発には東芝から岡崎行男、米澤宏が派遣され、100 MW 超の世界でどのような現象が発生するのか新しい知見をもたらしていた。

### 3. 開発スタート

しかしながらメーカーである以上、売れる見込みのない 150 MW クライストロンを商品化することはなかった。筆者らも核融合研究プラズマ加熱用クライストロンの開発、医療用ライナックの開発、レーダー用クライストロンの開発などを行っていた。なかなか期待通りの特性を出せない医療用ライナックの開発にやや行き詰まりの様相が見えた頃、当時の電力管技術課長である細井真理が筆者（米澤宏）を呼んだ。「60 MW のクライストロンを開発しないかと KEK から言われている。君が担当しなさい。」筆者らが所属していた電子管事業部が川崎市から栃木県大田原市に移転した翌年の 1988 年のことである。KEK に馬場斉と諫川秀を訪ねた。馬場斉が言う。「SLAC の 5045 ではパワーが足りない。2 倍の 100 MW 必要だ。ただし 5045 と寸法的には互換性があること。JLC には数百本が使われる。頑張って世界のクライストロン

を作れ」。これで開発が決まった。SLAC で学んだパルスクライストロンの技術が生かせる。パルスクライストロンでも世界一になれる絶好の機会であった。それにしてもリスクの高い開発をよくやらせてくれたと思う。皆成功に懐疑的であったことを後日知ることになるのだが。ともあれ開発はスタートした。諫川秀の指導の下、東芝側取りまとめを大家圭司、ボディ部、コレクタ部、出力窓部の設計は米澤宏、ノウハウの必要な電子銃は三宅節雄の担当となった。

### 4. クライストロン

ここでクライストロンの原理について簡単に述べる。クライストロンはライナックの逆過程である。すなわち、直流（パルスの場合もあるがマイクロ波の周期に比べて極めて長い意）で加速された電子ビームから運動エネルギーをマイクロ波という形で取り出すのである。電子銃で加速された電子ビームはボディ部に複数個配置されたマイクロ波共振空洞を通過する。最も電子銃に近い空洞には外部のマイクロ波回路が結合されており、加速空洞の中心に発生するマイクロ波電界によって電子ビームの運動エネルギーに小さな摂動が与えられる。小さな運動エネルギーの摂動は電子ビームの走行とともに電子密度の粗密の摂動に変換され、高周波電流をクライストロンの内壁に誘起する。第 2 のマイクロ波共振空洞は動作共振周波数にはほぼ等しい周波数に同調されており、動作共振周波数の成分をもつ高周波電流が流れると大きな高周波電圧を発生する。電子ビームはこの大きな高周波電圧により、更に運動エネルギーに変調が加えられ、電子密度の大きな粗密（バンチング）をもたらす。通常、空洞の共振周波数は動作周波数よりも若干高い周波数に合わせである。これは電子ビームから共振空洞を見た場合、誘導的に見える（電圧が電流よりも位相が進んでいる）ことを意味する。上流の共振空洞でバンチングされた電子ビームがこの共振空洞を通過する際、バンチングの中心が共振空洞を通過する際に高周波誘導電流は最大値をとるが、高周波電圧は位相が進んでいるから、バンチングされた電子の塊の先頭部分が共振空洞を通過する際には減速電界を、塊の後半が通過する際には加速電界が生ずる。つまりバンチングした電子の塊の前半部分の速度は遅くなり、後半部分の加速された電子に次第に追いつかれ、全体として塊の密度が高くなる。密度の高い部分は大きなマイクロ波電流を誘起するから、動作周波数に共振周波数を合わせ、かつ外部負荷のインピーダンスが電子ビームの高周波インピーダンスに整合するように設計された出力空洞を通過す

際に、大きなマイクロ波電力を発生するのである。このように書けば簡単であるが実際には共振空洞の位置や共振周波数、電子ビームの直径と電子ビームの通過するドリフト管の寸法などに、電子銃で電子ビームに与えられたエネルギーと出力空洞で発生したマイクロ波の電力の比、すなわち変換効率や、入力されたマイクロ波電力と出力電力の比、すなわち利得を最大化するためには、単純な線形計算では最適化することは難しく、電子ビームの運動と共振空洞の電磁界をシミュレートし、最適値を決めねばならない。

## 5. 設 計

開発の鍵は3つあった。すなわち、

- 耐電圧が高く、安定で発振しない電子銃。
- 何が起ころうと割れない、孔の開かない出力窓。
- 集束磁界も考慮に入れた3次元シミュレーションによる精度の高い設計。

### 5.1 電子銃

電子銃のシミュレーションは電子軌道追跡シミュレーション、電界強度解析、熱解析に分けられる。ライナック用のパルスクライストロンの電子銃を設計する際に最も注意を払うべき課題は電子銃自体がマイクロ波帯で発振する現象（ガンオシレーション）である。この現象が発生するとマイクロ波出力を変調するだけでなく、場合によっては電子銃そのものに損傷を与える。ピーク電力の大きなパルスクライストロンの電子銃はクライストロン本体の全長を短く、かつ電圧を出来るだけ低くするためにパービアンスを高く設定する。パービアンスが高い電子銃ではガンオシレーションが発生しやすく、確実な対策が不可欠である。この現象は陰極から放出された電子が陽極に達するまでに時間遅れが生ずることで発生する。高周波電界によって陰極から引き出された電子が陽極に達するまでに高周波電界の位相が逆転すれば直流電界によって加速された電子の運動エネルギーが高周波電磁界エネルギーに変換される。電子ビームによって誘起される高周波電流はパービアンスが高い程大きい<sup>6)</sup>。パービアンスが高い電子銃は電子ビームから見た電子銃の高周波インピーダンスを十分に低くしておかなければならない<sup>7)</sup>。高周波インピーダンスを下げるためには電子ビームの近辺に電界が集中しないようにする、高周波に対して損失が大きくなるように高周波での抵抗の高い材料あるいは高周波を吸収する部材を配置する方法がある。筆者らの採用した方法は電子銃の陰極と陽極が同軸構造を成すことから、これを同軸線路とみなし、同軸線路のインピーダンスができるだけ低く

なるようにすることである。共振せずに低いインピーダンスを広い周波数帯域で保つということは広帯域のアンテナになるような形状をとればよいことになる。電子ビームで発生した高周波擾乱を電子銃内部に溜め込まずに外部に放射するようになればよいのである。ただし耐電圧の制約などと両立させるためには工夫が必要で設計者の腕の見せ所でもある。

### 5.2 出力窓

出力窓はクライストロン内部の真空を保ち、同時にマイクロ波をスムーズに通過させることが要求される。真空を保つためには通常高純度アルミナ等のセラミックスが使用される。セラミックスがマイクロ波電圧によって絶縁破壊されればクライストロンの真空が保たれない。セラミックス近辺に放電の元となるような突起や高周波電流の流れを妨げるような不連続があってはならない。またセラミックスも絶縁物として求められる特性として内部にボイドや不純物の析出などがある。一般に絶縁物として理想的な特性と真空を保つために電子管の導波管と接合するために要求される条件は同じではない。絶縁物としては優れていても接合できないセラミックスでは使用できない。単純な耐電圧以外にマルチパクタリング現象\*によってセラミックスが電子衝撃によって損傷を受ける現象もある。セラミックスは一般に二次電子放出係数が1よりもかなり大きくマルチパクタリング現象が発生しやすい。このため表面に二次電子放出係数が小さいチタンなどの物質をコーティングすることが行われる。あまり薄いと効果がなく、余り厚いと一般に電気抵抗がセラミックスよりも小さなコーティング内をマイクロ波電流が流れ、やはり放電の元となる。チタンなどの窒化物が多く使用されるが、チタンは窒化物よりも酸化物になりやすく、かつ酸化物は二次電子増倍係数が大きい。表面のごく表層の特性に依存するのでセラミックス表面も十分清浄である必要もある。その当時東芝には既に連続波クライストロン出力窓のマルチパクター放電抑制用にチタンコーティング装置が導入されていた。しかしながら連続波クライストロン用は結局外部の専門業者にコーティングをお願いすることになり、装置は使われなまま埃をかぶっていた。パルスクライストロン用は何とか内製したかった。薄膜作りの専門家が要る。その時ガスレーザー管反射鏡などの薄膜成膜を担当していた権瓶勝弘が古い

\* マイクロ波電圧に同期して運動する電子が電極に衝突して入射した電子よりも多くの二次電子が発生することによって電子が増倍する現象

装置を改造して粘り強く実験し、最適なコーティング条件を求めてくれた。Sバンド用は何とか内製することができそうになったが、本当に大電力マイクロ波に耐えるか試験しなければならない。その当時 KEK の斉藤芳男がレゾナントリングで各種セラミックスの耐電力を研究していた<sup>8)</sup>。お願いしてコーティングした出力窓の大電力評価のためにレゾナントリングをお借りした。コーティング膜厚を変えたもの、スパッタ雰囲気を変えたもの等いろいろ評価させていただき、コーティング条件を決めることができた。

### 5.3 シミュレーション

クライストロンは各電極や空洞が独立しており、比較的シミュレーションしやすい。と言っても当時はシミュレーション自体が一次元モデル<sup>9)</sup>であり、バンチングした電子ビームの運動を正しくモデリングすることは難しかった。バンチングした電子は当然自らの持つ空間電荷により直径が太くなる。密度の低い部分は小さくなる。電子ビームの発散を防ぐために外部から印加される直流磁界によって電子ビームはうねりながら進んでいく。一次元モデルでは電子ビームの直径は変化しないと仮定するから大きな違いが生ずる。当時は試作クライストロンの集束コイルは複数のコイルに独立して電流を流せるようにしておき、試作クライストロンの動作状態を見ながら各コイルの電流値を決めるというのが当たり前であった。バンチングした電子ビームが出力空洞ギリギリを通る場合が最も変換効率が高いのである。何とかギリギリのところを通そうとコイルの電流を微調整していた。また電磁界の3次元解析もまだ一般化しておらず、出力空洞のQ値や特性インピーダンスを設計どおりに合わせることが難しかった。実際には電子銃からコレクタ方向に素直に流れる電子ばかりではなく、主に出力空洞の大きな電界で逆方向に加速される電子が存在する。また、出力空洞で運動エネルギーを失い（速度が遅くなり）電子の数は変わらないから空間電荷密度が大きくなるために、出力空洞の下流側に電位の谷ができ、この電位の谷を越えられずに逆行する電子もある。コレクタに吸収されずに反射されて逆行する電子もある。さらに共振空洞の内部でマイクロ波の電界の周期に同期して運動し、共振空洞内部の壁面の2次電子増倍によって大きな電流が流れる現象や、マルチパクターリング放電なども発生する。これらの現象は多くの場合集束磁界の調整で抑制可能であり磁界調整は腕の見せ所であった。その一方でクライストロンや集束コイルの試作のやり直しも避けがたく、開発にかかる費用と時間は膨大なものとなった。特に高効率や大電力などの挑戦的

な性能目標のクライストロンであるほど開発が困難になっていた。電子ビームの運動を3次的に解析する3次元のシミュレーションコードが必要だった。当時もそのようなコードは存在していたが、スーパーコンピュータでも計算時間は数日かかると言われていた。ある日、気鋭の研究者であった KEK の新竹積が筆者らにこんな話を持ちかけた。曰く、3次元の電子運動を解析できるシミュレーションコードを書いた、実際のクライストロンの動作と一致するか検証したい、クライストロンの詳細な物理パラメータと実測データを提供してくれないか、そのかわりシミュレーションコードを使っても良い。世界で初めて実用的な計算速度で3次元の電子運動を解析できるシミュレーションコード FCI<sup>10)</sup>との出会いであった。KEK の受託研究員であった筆者（米澤宏）は計算に熱中した。いままで見ることができなかった電子ビームの軌跡があつという間にコンピュータの端末に映し出された。電子ビームの運動は半径方向の位置により全く異なっていた。FCIで計算した結果100 MWの出力を安定に発生できる条件を定めることができた。それ以来クライストロンの基本的なパラメータは最初の設計から変わっていない。集束コイルも基本的に手直しなしで今に至っている。殆ど設計変更なしに目標性能を達成した初めてのクライストロンの誕生だった。FCIが無かったならばE3712クライストロンの開発には2-3年はかかっていただろう。

## 6. 試作管の試験と喜びの日

開発当初は東芝社内にフルパワーまで出力できる電源がなく、エージングと試験はATF開発用のクライストロンと電源、加速管のテストが行われていた KEK トリスタンの日光実験棟の地下4階で行なわれた。オイルタンクは5045クライストロン用のオイルタンクとパルストランスをそのまま流用することとし、電子銃が大きくなる部分を吸収するアダプターを製作した。実は試作が遅れに遅れ、クライストロンは出来たがソケットインするための吊上げ治具や試験回路を組むための導波管を支える架台の準備が不十分であった。大分お叱りを頂戴したが、ATF担当の吉岡正和、松本浩はじめとする先生方から、その程度はKEKの工作室で何とかできる、手伝うから準備しようと言っていた。涙がこぼれるほどうれしかった。X線漏洩防止設計も不十分だった。コレクタには重量200 kgを越える厚さ50 mmの鉛の鋳物をつけたが、冷却水の出入り口や出力空洞から発生する散乱X線に対するシールドは不十分だった。試験ではそ

れが露呈し、これも KEK の先生方が鉛の袋を集束コイルの上面に積み上げて下さり何とかデータを取れるようになった。最終的には集束コイルの X 線シールドやクライストロン出力空洞周りの鉛板を強化して対応した。1989 年に試験した試作 1 号機はオイルタンクに十分オイルを入れなかったというミスで壊してしまっただが、それでも 72 MW まで出力することができた<sup>11,12)</sup>。試作 2 号機で所定の出力を出すことができた<sup>13)</sup>。ATF グループの皆さんと乾杯をした。皆さん喜んでいて、うれしかった。ただただ、うれしかった。この皆さんとならば何事も可能だと思った。KEK には大きな目標にチャレンジする機会を作っていた。そして何としてもリニアコライダーを実現するのだという気迫と熱気があった。お陰で KEK-東芝のそれぞれいろいろな技術の背景をもった技術者研究者がクライストロンのために協力することができた。発注者、受注者の壁を越えて協力し合えるような雰囲気は何事にも変えがたい快感をもたらした。

## 7. 苦闘の日々—試験電源の整備

世界最大の出力のクライストロンがうまく動いたとの情報が入った時、当時の電子管技術部長であった白井信行は「これは絶対売れる」と確信した。設備予算を申請するから申請書を書けと言う。担当している筆者は嬉しさ半分、本当に売れるのか半信半疑のまま申請書を書いた。白井信行は 2 億円と見積もられた試験電源を整備する予算を取ってきてくれた。JLC がいつから建設されるのか、何本管球が売れるかよく分からない時期である。英断だと思う。減価償却に何年かかるのか、収支が黒字になるのに何年かかるのか、様々な反対の声もあったと思われるが、白井信行は予算を分捕ってきた。

クライストロンの開発は電源の開発でもある。通常、加速器の開発に先行してクライストロンの開発は始まる。この時点では電源も開発試作品で電源メーカーも試行錯誤の末、形にしていく。しかも東芝に設置する電源はクライストロンのエージングが目的である。クライストロンは放電を無数に繰り返しながら徐々に定格に達する、それがエージングであり不可欠な工程だった。放電することは例外である実機運転電源とは大きく異なる。電源電圧の可変範囲も大きく取らねばならない。E3712 クライストロンの試験電源の開発も難航した。

パルストランスを作ってくれるメーカーが無い。KEK に日本電磁工業株式会社の影島恵吉を紹介していただいた。パルストランスをいれるオイルタンクを

含め念入りに作っていただいたが、電圧を上げると放電して高圧 2 次巻き線のベーク板が焦げてしまう。クライストロンが放電した際の異常電流によるものか、2 次巻き線の巻き枠が割れる、巻き枠に接着された二次巻き線が剥がれて浮き上がってくる。クライストロンの納期は迫っており修理に出す時間はない。絶縁油の中に手をいれて焦げたベーク板を削った。作業服に絶縁油の匂いが染み付いたが、何とか使えるようになった。パルストランス一次側の回路は 6 本の同軸線を並列接続しており、リターン側を油タンクから浮かすためにプラスチックのボルトで止めてあった。ある日プラスチックのボルトがパルスの振動で疲労破壊し、オイルタンクから絶縁油が滔々と流れ出した。地下浸透を避けるための油受けで絶縁油は止まり大事には至らなかった。折れたボルトをはずし、今度はステンレスのボルトで止めた。それ以来トラブルが無くなった。

高圧パルス電源は古矢勝彦率いるニチコン株式会社が開発してくれた。この高圧パルス電源にも手こずった。そもそもエージング用の電源はクライストロンを放電させて耐電圧を上げることが目的である。それは十分に理解していただいた上で設計・製造していただいたが、クライストロンが放電し短絡状態が継続すると充電チョークに大きな電流が流れ、鉄心が飽和すると更に大きな電流が流れる。IVR を回す歯車が割れた。過大な電流による電磁力が回転軸を回す歯車を真っ二つにしたのだ。IVR は元來電車の制御用に設計されたもので負荷の頻繁な短絡が発生するような使い方は想定していないという。幸いにも巻き線には異常がなく、歯車を補強することになった。大至急で現象を解析し、修理、補強してもらい、クライストロンの納期に大きな影響をださずに済んだ。その後故障することなく電力を供給してくれている。

パルス電源はコンデンサーに充電された電力をサイラトロンで高速放電して高圧パルスを形成する。サイラトロンには泣かされた。当初設計の米国製サイラトロンは耐電圧 100 kV とカタログには書いてあるが 40 kV 程度で耐電圧が持たずに放電してしまう。E3712 クライストロンの試験には耐電圧 60 kV が必要だった。共振充電方式だったのでクライストロンに高圧パルスを出力すると次のパルスのために PFN への充電が自動的に始まってしまう。サイラトロンの耐電圧が持たないと、本来のパルスのタイミングよりも早く高圧パルスが出てしまう。これはクライストロンにとっても困る。サイラトロンにとってもエージング中のクライストロンはしょっちゅう放電し、その度に

サイラトロンに逆電圧がかかる。サイラトロンにとっても過酷な動作条件である。サイラトロンやクライストロンに加わる逆電圧がなるべくかからないようにするためにシャント回路の抵抗を小さくしたりしたが、なかなか改善されない。JLCで量産するためにと試験電源も無人で24時間稼働できるようにニチコンに制御系を組んでもらったが、安全のために直流過電流の場合には手動復帰させるように制御器をプログラムしていた。しょっちゅう直流過電流が発生するので目が離せない。ずっと人をつけておかねばならず人件費がオーバーした。この問題は一年後にEEV社のサイラトロンを採用するまで頭痛の種だった。EEV社のサイラトロンは規格どおりの耐電圧があった。ヒーターやリザーバー電圧の変化に対しても安定だった。それでも4-5年は持つはずのサイラトロンが1年もせずに持たなくなる。一本3百万円もするのでこれには参った。経理は金額が大きいから固定資産にしろうという、当方は寿命が一年もないから消耗品だと反論する。結局EEV社から保証寿命6ヶ月という文書ももらって消耗品ということにしてもらった。頻繁なサイラトロンの異常放電はサイラトロンのドライバー回路にも及ぶ過大なストレスを生む。G1回路のパルストランスの絶縁紙が焦げてパルスが出ない。これも新品を取り寄せては間に合わないので手巻きで直した。パルストランスの出力をサイラトロンのグリッド端子に結ぶ同軸ケーブルも絶縁破壊し、焦げる。これも自分で直した。100 kVの充電電圧をコンデンサーに伝えるケーブルも絶縁劣化を起こした。煙を出して工場長にお目玉を頂戴したこともある。高周波をモニターするクリスタル検波器も高圧パルス電流が流れるのか、頻繁に感度不良になった。電源の新設や改良のための投資金額はクライストロンの単価と数量からすればかなり大きな金額になる。その時、その時の経営幹部の理解を得ることによりかなり苦労はしたが何とか整備してきた。KEKの先生方にも機器の貸与や、回路手直しについてご助言をいただくなど大変お世話になった。

## 8. Postech—最初に使うと言った男

これでクライストロンの製造体制は整えられたが、JLCはまだ予算が着かず、なかなかまとまってお買い上げいただけない。他の加速器も実績のないクライストロンは使えないとのことでお買い上げいただけない。高額な部品でしかもライナックの動作に直結している重要部品であるから当然である。しかし使っただけなことには実績も出ないと途方に暮れた。有

り難いことにKEKの先生方には機会あるたびに紹介していただいた。その時、Postechに大韓民国初の放射光施設 Pohang Light Source (PLS) 計画<sup>14)</sup>が持ち上がった。計画を率いるのは Won Namkung であった。彼の考えは蓄積リング入射器を限られた予算で実現しようとするならば常識的には小型ライナックとシンクロトロンブースターの組合せだが、より望ましいフルエネルギー入射可能な大型ライナックを同等以下のコストで建設することができるのだというものだった。大出力クライストロンを採用して電源の個数を半減し、安価な加速管を採用すればコストを下げられる。クライストロンの本数と電源の数を半減するための選択肢はふたつあった。SLAC5045クライストロンか、東芝E3712クライストロンであった。E3712クライストロンは80 MW、5045クライストロンは当時67 MWも可能と言われていた。5045クライストロンの方が使用実績が多く、何と言ってもSLACは世界最大のライナックであり、そこで取ったデータは誰もが認める重みがあった。当方のE3712クライストロンはまだATFに2-3本しか納入しておらず、ATFでの稼働時間も短く信頼性データが乏しかった。当方は全く不利であった。それにも関わらず、Won NamkungはE3712クライストロンを選択した。もっともすんなり事が進んだわけではない。契約交渉でもっともめめたのは保証期間であった。当方は通常のある1000時間をお願いしたが、先方はより長時間の保証を主張されて、話が平行線をたどる。とうとうWon Namkungは席を蹴って(本当に蹴って)会議室を出ていこうとした。これを東芝の営業が必死で引き止める間、白井信行と米澤宏は何時間までならば保証できるのかと額を寄せて相談。何とか席についていただいたWon Namkungに清水の舞台から飛び降りる思いで時間比例保証を提案し何とか納得していただいた。一旦話しがまとまるとWon Namkungはクライストロンの取り扱いを慎重に行いトラブルが起きないようにPLSの技術陣に厳重に指示してくれた。また筆者らを客分として扱っていただき、インストールのために出張した折には韓国大統領も宿泊したという迎日台という宿舎を手配していただいた。個人的には僭越ながらいぶん深い信頼関係を築けたと信じている。よく酒を飲んで共に酔い交友を深めることができた。クライストロンの話をしただけではない。山登りの話、教育制度の話、日韓の歴史の話など。当時助教授のMoo-Hyun Choには同年齢ということもあり、友人のように接していただけた。仕事ではバイタリティの塊、酒を飲んで陽気な議論、しかしながら長幼

の序を忘れず、Postechの先生方は筆者が始めて接した韓国人であるが、酒を飲んで共に酔い、抱き合って親交を確かめることができると私に確信させてくれた人々である。

## 9. 量産と手直し

E3712 クライストロンの出力導波管とダミーロードは内部を真空にして動作させる。出力窓にピンホールが開くことがあった。出力窓の外も真空であるからクライストロン内部の真空度も悪くならない。それと気づかずにエージングを続け、最終試験が終わってやれやれと思いながら出力導波管を取り外すために大気を導入するとクライストロンのイオンポンプ電流が音もなくペンレコーダーに横の線を描く。当初は導波管の真空度をイオンポンプの電流でモニターし、メカニカル接点でインターロックをかけていたのでクライストロンの高圧電圧が切れるまで0.2-0.3秒かかり、大きな放電が発生しても次々とパルスが入っていた。これは遅いと電子式のインターロックに替えてこれで大丈夫と安心していたら、また孔があく。当初E3712クライストロンの立会い試験は出力がでているところをご確認いただいておわりだった。立会いが終わり先方が帰ってから導波管に窒素ガスを導入するとクライストロンのイオンポンプ電流が増える。あわてて立会い試験に見えた先生に連絡し、再びお越しいただいてお詫びし、事後処置をご相談させていただいたこともあった。当方としてはただひたすら頭を下げるしかない。放電モニターの速度向上も何度か対策したが今ひとつ効果ははっきりしない。いろいろ検討したがある時期からセラミックスの品質が低下したという結論に達した。そこで思い切ってセラミックスを変えた。これはかなり勇気が必要な乱暴な決断だった。セラミックスはかなり微妙な品物で何よりも実績を重んじていたからである。当初採用していた海外製のセラミックスは決してレベルの低いものではなかったと思うが、80 MWのパワーに耐えるセラミックスにはそれ以上のものが求められていたのだと思う。日本特殊陶業株式会社製のセラミックスを採用した。幸いなことに孔の開く出力窓は大きく減少した。しかしながら必ずしも完璧ではない。試験で孔の開いたセラミックスもあった。顕微鏡で仔細に表面を観察した。透過光で見ると小さな輝点が見えた。0.2~0.3 mm ぐらいの閉じた穴である。入り口が小さく、内部が丸くふくらんでいることから「きんちゃく」と呼んでいた。穴があると電界が集中して放電し易くなる。メーカーに聞くと原料粉末に混じていた有機物ゴミが焼成過程でガス化

してできた空洞とのこと。ゴミが混入する経路もほぼ特定でき、改善された。セラミック窓の設計と組み立てには何倍も気を使っていたが、セラミックスの検査は不十分だった。セラミックスの目視検査は標準化され、一枚一枚観察記録を残している。アルミナセラミックスは使いやすさという点では替わるものがない。ほとんど研究されつくしたのか、新しい製品が出ていないが、品質レベルが維持向上されるように切に祈る。

## 10. その後

E3712 クライストロンはSPRING-8の入射器ライナック<sup>15)</sup>に大量に採用していただけた。FEL研では長パルス動作向けに改良したクライストロン<sup>16)</sup>を採用していただいた。何よりも東芝であれば従来不可能と考えていたクライストロンもできるかもしれないと思っていただけようになったことは幸いである。念願のKEK入射器ライナックにもKEK-B計画の入射器増強でSバンド50 MWクライストロン<sup>17)</sup>を納入させていただいた。JLCの主加速器用としてXバンドクライストロン<sup>18)</sup>、Cバンドクライストロン<sup>19)</sup>の開発のお手伝いもさせていただいている。またJ-PARC用クライストロン用UHFクライストロン<sup>20)</sup>の開発にも携わることができた。かならずしもストレートに開発できたわけではなく、先生方に大変ご心配をいただいた製品もある。叱責をいただいた製品もある。苦戦もしているが、電力管技術部長の関英治、電力管技術第一グループ長の林健一の指導の下にご期待にそえるクライストロンを開発すべく日夜努力している。

## おわりに

日本加速器学会誌の編集委員からパルスクライストロン開発の裏話を書かないかとお誘いを戴いた。本誌第2号にユーザーである加速器研究者から見た連続波クライストロン開発の経緯を紹介する記事が載っている。加速器用クライストロンの開発をメーカー側から見た経緯を書かないかということである。一介の技術屋である筆者にとって真に光栄なお話であり、また加速器を支えるクライストロンの製造メーカーの実状を諸兄にご理解いただきたく、お受けすることとした。単にクライストロンの開発の技術的側面の歴史としてだけでなく、ひとつのエポックメイキングな製品として結晶するのに関わった様々な方々の人間模様を読み取っていただけたならば幸いである。E3712クライストロンは事業としての突破口を開いたものではあるが、技術は長年の東芝の多くの先輩方が蓄積し

た電子管開発, 製造の土台にシンクロトロン加速器用クライストロンやプラズマ加熱用クライストロンで悪戦苦闘の末, 獲得した新技術を積み重ねたものである. その技術を発揮する機会を与えていただいた KEK 初め加速器科学の諸先生方の英断に深く感謝するものである. また科学技術用クライストロンという技術的な壁が高く, ために事業として甚だ成果が不透明な目標に挑むことを決断し, 長年にわたる筆者を含む人材と研究開発, 開発設備に多額の投資を行ってくれた東芝の経営陣の慧眼は賞賛されるべきである. 今後とも東芝の電子管事業を継承した東芝電子管デバイス㈱のクライストロンをはじめとする電子管をご愛顧いただき, それを支える若い技術者, 技能者にご指導, ご鞭撻を賜るようお願い申し上げる次第である.

15 年余の歳月で記憶もおぼろげになり, 資料も一部散逸してしまった. クライストロンの開発同様, 多くの方々に助けていただいて本稿を書き上げることができた. 改めて深謝申し上げます.

#### 参考文献

- 1) T. Tomimasu et al., Proc. 12th Linear Accelerator Meeting in Japan pp188-190, Aug. 1987.
- 2) JLC Group. JLC-I, KEK Report 92-16 (1992) December.
- 3) T. G. Lee et al., SLAC-PUB-3214, Sept. 1983 (A).
- 4) 高田耕治, 500 MHz クライストロン「加速器」vol. 1, No. 2, 2004 (109-118).
- 5) T. G. Lee et al., THE DESIGN AND PERFORMANCE OF A 150MW KLYSTRON AT S-BAND, SLAC-PUB-3619, April 1985.
- 6) 柴田幸男. 真空電子工学, pp. 109-113, コロナ社, 1980.
- 7) 米澤他. 電通学会電子デバイス研究会, ED85-115, Dec. 1985.
- 8) 斎藤芳男, 他: 真空, 30 (1987) 406.
- 9) H. Yonezawa and Y. Okazaki, SLAC TN-1984-5 (1984).
- 10) T. Shintake, 1989 Particle Accelerator Conference (Chicago) 1989 D-3.
- 11) H. Yonezawa et al., Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. High Energy Accelerators, Part IV (219-224), Tsukuba, Japan, 1989.
- 12) Hiroshi Yonezawa et al., Proc. 14<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, pp (228-230), Sept. 7-9, 1989, Osaka University.
- 13) Y. Ohkubo et al., Proc. 15<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 236-238, Sept, 1990.
- 14) W. Namkung et al., Linac 92, Ottawa, Canada, Aug., 1992.
- 15) H. Yokomizo et al., Proc. 20th Linear Accelerator Meeting in Japan pp112-114, Sept 1995.
- 16) Y. Ohkubo et al., Proc. 20th Linear Accelerator Meeting in Japan pp72-74, Sept 1995.
- 17) M. Sakamoto et al., Proc. 20th Linear Accelerator Meeting in Japan pp284-286, Sept 1995.
- 18) 水野元他. 次世代加速器用大電力クライストロン, 東芝レビュー Vol. 52 No. 9 (1997) pp. 63-66.
- 19) Y. Ohkubo et al., Linac 98, Chicago, USA, 1998.
- 20) K. Tetsuka et al., Proc. 30th Linear Accelerator Meeting in Japan pp372-374, July 2003.