

[A17p01]

C-band Accelerator Development for Linear Collider and Industrial Applications

Tsumoru Shintake

KEK: High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, 305 Japan

Abstract Hardware R&D on the C-band (5712 MHz) RF-system for the electron/positron linear collider started in 1996 at KEK. During two years R&D, we have developed 50-MW C-band klystrons (TOSHIBA E3746), the "Smart Modulator", a new-type rf-pulse compressor and a traveling-wave resonator (TWR). A C-band accelerating structure, which uses the choke-mode cavity for HOM-damping and Matsumoto-coupler for symmetric power feed, is under development. The HOM damping performance will be tested using short-bunched beams in the ASSET beam-line at SLAC in this year. Since the C-band system is optimized to accelerate a high-current beam at high accelerating gradient > 35 MV/m, there are various applications beside the linear collider project. For example, we can build an injector linac for a SR-ring within a limited site length, and electron or positron beam sources for various physics experiments requiring higher beam-current. Since the C-band components are compact, it is also suitable for industrial applications, such as the electron-beam radiotherapy machine, or the compact non-destructive X-ray inspection system.

C-band RF 加速器の技術開発、Linear Collider と産業応用をめざして

1. C-band R&D Project 概要

1996年4月より、Linear Colliderの技術開発としてC-band周波数(5712MHz = 2 x 2856MHz、S-bandの2倍周波数)を用いたMain Linacの加速RF-systemの開発をKEKにて開始した。現在(1998年7月)までに、50 MW C-band klystron(E3746)1号機と2号機、クライストロン用パルス・モジュレータ電源(Smart Modulator)1台、レゾナント・リング、RF-pulse compressor(コールド・モデル)、さらにRF-BPM(空洞型の25 nm高分解能ビーム位置検出器)の開発を終了した。現在、周期永久磁石収束(PPM

focusing)を用いたC-band klystronと、Choke-Mode Cavityを用いた高調波のない加速管を開発中である。

図1にC-band Main LinacのRF systemの1ユニットを示す。重心系エネルギー500 GeVを目標とするLinear Colliderでは、電子・陽電子の両ライナックで1790台ものRFユニットを要する。従って、これに使用するハードウェアは量産性が良く、信頼性が高い事が重要である。なぜC-bandがベストかについては2節に概説したが、要点を再確認すると、

「C-bandを使用すれば、klystron、電源、加速管などの

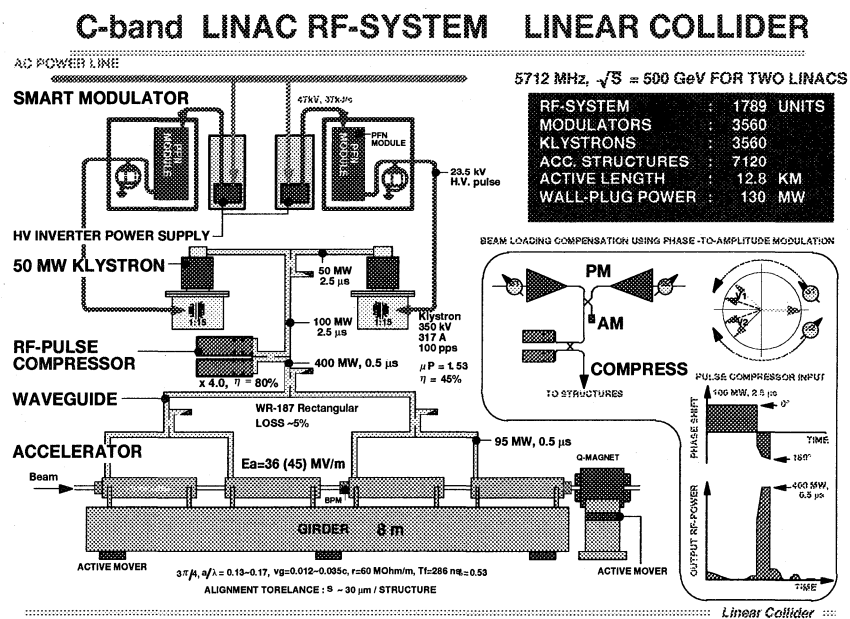


図1 C-band RF-System

製造が容易でありながら 36 MV/m という十分な加速電界を得ることが出来る」という事である。

ところで、C-band の周波数 5712 MHz を電子線型加速器で使用するのは世界的にも今回が初めてのケースである。したがって、真空仕様の大電力導波管をはじめほとんどすべての RF コンポーネントを KEK および協力メーカーで独自開発する必要があった。これは大変に手間のかかる仕事であるが、一方、従来の S-band 帯で問題が多かった部品や、近代化のおくれた部分などを、すべて刷新するチャンスに恵まれたともいえる。

現在までに加速管と pulse compressor のホットモデルを除くすべての部分が開発を一応終了し、C-band R&D はほぼ予想通りに順調に進行している。

2. C-band (5712 MHz)を採用した理由

リニアコライダーの主加速器の加速周波数としてなぜ C-band を採用したかにつき若干述べる必用があろう。

リニアコライダーに特に要求される性能として

- (i) 加速器全長を短くするために高電界での加速、
 - (ii) 低エミッタンス・ビームを安定に加速、
 - (iii) 大量の部品を使用するので、高信頼性、低建設コスト、低運転費用、高メンテナンス性、
- があげられる。これを達成するために我々が C-band を選んだ主な理由は、

(1) C-band では、加速管に要求される加工精度が現在の加工技術からかけ離れて困難なものではなく、十分に対応できる範囲である。

(2) C-band ではクライストロン電源のパルス幅が約 3.5 μsec となり、従来のパルス・モジュレータ電源を使用できる事。また、その技術は十分に検証されている事。

(3) 現在までに S-band klystron で培われた技術をもって C-band klystron を開発できる事。

これらの要点を図 2 に示した。

リニアコライダーをはなれて、純粋に加速器技術の開発という視点から言えば、C-band R&D とは、「半世紀近くも前に完成した S-band の加速器技術がもう古いので、周波数を引き上げて性能アップをはかる。ただしその製造に無理がない範囲で」ということである。

また C-band R&D を実践するうえの基本方針は、現在の技術を順次拡張して開発に対応し（大きなジャンプはしない）、少しずつではあるが着実に前に進む。これによって各 R&D の段階ごとに担当された各製造メーカーからすぐれた製品が生まれて、これを現在の加速器に使っていただき、これから利益を生み、それによってまた

What makes the C-band system simple & reliable.

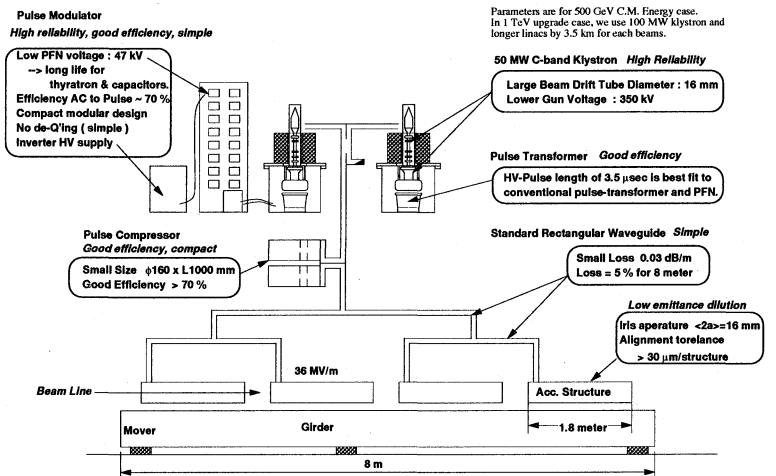


図 2 なぜ C-band が最適か。

少しだけ目標を上にした開発を継続してゆく。これならメーカーの方々に多大な御無理と御迷惑をおかけしないで済み、息長く付き合っていただける。時がくればリニアコライダーに予算がおりるかもしれない。

以下、順に具体的に説明する。

(1) Wakefield から決まる加速管の寸法精度

まず(i)の要求から出来るだけ高い加速電界が望ましい。ところで加速管のシャントインピーダンスは $f^{0.5}$ に比例するので高い RF 周波数を使った方がより効率良くビームを加速できるはずである。しかし困った事に高い周波数では加速管の穴径(アイリス径 $2a$) が小さくなり、その結果として加速管に発生する single-bunch transverse wakefield が $f^{3.5} (= a^{-3.5})$ に比例して厳しくなり、ビームが“しぼ”から曲がってエミッタンスが大きくなり、最終的に Luminosity が大きく低下する。項目(ii)の要求を満たさない。この対策として、高い周波数では、加速管のアイリス径を広げて wakefield を小さくする必要があるが、これによってシャントインピーダンスが低下するので、高い周波数を選んだメリットを失いかねない。C-band では無理にアイリス径を大きくする必要はない。

ところで wakefield の基本的な性質から、ビームが加速管のちょうど真ん中を走る時には transverse wakefield が発生しないのでビームのエミッタンスは低下しない。逆に軌道が中心からずれてしまうとエミッタンスをこわしてしまう。従って、ビームをできるだけ加速管の中心に通す必要がある。またできるだけ真直ぐな加速管を製造するという事が必用となる。

実際に C-band の加速管のパラメータを設計し、具体的にアラインメント精度を計算したところ、真直度 40 μm (最大曲がりりが 40 μm 、標準偏差 30 μm) となった。これは現在の加工技術の範囲で注意深く製造すれば、達成

可能なレベルである。

なお、マルチバンチに対する安定性は long-range wakefield で決定されるが、後述するように choke-mode cavity を使用して強力に減衰させるので、全く問題とならない。

(2) RF パルスの幅とパルス・モジュレータ技術 (C-band klystron 用のモジュレータが容易である事)

RF パルスの幅も実際の RF-System を設計する上で重要なパラメータのひとつである。進行波型の加速管に RF を満たす時間 Filling time は 周波数が高くなると $f^{-1.5}$ に比例して急速に短くなる。S-band では通常 700 nsec、C-band 250 nsec、X-band 90 nsec 程度である。エネルギーの利用率を損ねないように beam pulse の長さを Filling time 程度に選ぶと加速管に入力すべき RF パルスの幅は C-band で 500 nsec 程度となる。RF pulse compressor の時間圧縮率 5 を仮定すると (5~6 あたりが power gain、効率ともに無理がないため)、klystron が発生すべきパルス幅は 2.5 μ sec となる。これをドライブする高電圧パルスの幅は、立ち上がりと下がりを入れると 3.5 μ sec 程度となる。

このパルス幅は、Single-line PFN (Pulse Forming Network) を使った従来型のクライストロン用パルス電源 (modulator 電源) を使えば容易に発生できる。

より高い周波数では発生すべき RF パルスの幅が短くなり、modulator 電源にきわめて高速の立ち上がり、たち下がり特性が要求され、新たな R&D が必要となる。高速のパルスは、大電流のインパルス状のノイズを発生するので、ややもすれば modulator の回路部品 (保護ダイオードや制御回路) を破損する原因となる場合があり注意が必要である。項目 (iii) の信頼性を損ねる可能性がある。

(3) Pulse Klystron の技術

C-band の pulse klystron が S-band での技術を延長して開発可能である事を説明しよう。

一般に、pulse klystron の RF 出力エネルギー (peak power とパルス幅の積 $P\tau$) は周波数とともに f^{-2} に比例して低下する。これは、klystron のなかを走る電子ビームのパルス当たりのエネルギー許容値が、ドリフトチューブの面積に比例すると推測されるためである (面積あたりの熱量密度の限界)。

S-band での実績からスケールして、C-band にて安全なパルスエネルギーは 300~400 J/pulse であろうと予測した。Modulator での立ち上がりと下がり時間を考慮して高電圧パルスの幅を 3.5 μ sec とし、電力効率 45% を仮定して、RF Peak Power の安全レベルとして 40~50 MW が得られる。

これを元に Linear Collider の RF-system を設計してみると、35 MV/m という十分な加速ゲインをもつシステム

の構築が可能である事がわかった。

さて電子銃に印加する高電圧も C-band では安全な範囲に設計できる事を示そう。カソード電圧は klystron 全体の信頼性を大きく支配する。無理をして高い電圧を印加すれば、電子銃や出力空洞でのスパークの発生確率が急速におおきくなる。S-band の実績として最も信頼がおけるのは、SLAC の 5045 klystron と TOSHIBA の E3712 であろう。前者の電圧は 350 kV、後者は 375 kV (4 μ sec long-pulse mode のとき) である。そこで電子銃電圧として 350 kV 程度が手堅いものと仮定した。

大きなカソードを使えば低い電圧で大電流を取り出せるのが、高い周波数の球ではドリフトチューブが細くなり、その中へビームを集束させるのが困難となる。では逆にカソードの面積を小さくしてビーム集束を優先させるとパービアンスが小さくなり電子銃電圧が上昇する。幸い、C-band の周波数では、ドリフトチューブの径はそれほど小さくなく、直径 75 mm のカソードを用いて比較的大きなパービアンス $1.5 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ のビームが得られ、これを容易に直径 15 mm のドリフトチューブに入射できる事がシミュレーションによって判明した。これによってビームパラメータとして、350 kV、317 A が確定した。電圧に無理がなく、またパービアンスも手頃な値であり、klystron の設計に携わった者が見れば、これは現在の技術で充分に実現でき、信頼性にも問題ないと断言できるパラメータなのである。

以下、具体的に開発の現状を報告したい。

3. 平坦パルスを発生する RF pulse compressor 開発

1996 年の 1 月に C-band R&D の Go サインを菅原 KEK 所長からいただいた時には、RF pulse compressor について具体的にいいアイデアがなく、じつのところ「困ったことになってしまった」と思った。SLAC がその当時完成させていた SLED-II 型の pulse compressor は、マルチバンチ加速に不可欠な平坦なパルスが出力できるすばらしいアイデアであったが、Delay-line として単純なパイプを使用していたため、X-band でも全長 30 m にもなった。C-band でこれを作ると RF パルス幅の関係から 100 m 近くにもなる。ロスが少ない銅製のパイプを真空仕様で 100 m も接続し、その温度管理もするとなれば明らかにコストがかさむ。これは現実的ではない。

Disk-loaded 型加速管のような遅波回路を使えば、数メートルでもいいはず。がしかし、

time-delay \rightarrow slow-wave \rightarrow narrow bandwidth

\rightarrow dispersion \rightarrow waveform distortion

という破り難い因果関係の壁にぶちあたる。これは非常にこまる。いったいマルチセル空洞からは平坦なパルスが出せないのだろうか？そこで個体物理関係の書籍や論文を読みあさった。どこかに、異常分散を示した実験データがあるはずだ。結晶格子の周期構造と電気回路の周期

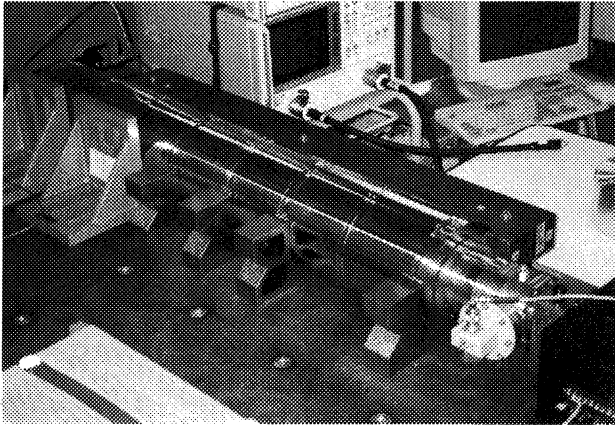


図3 RF pulse compressor using 3-cell coupled-cavity。全長1 m。加工上の都合から約15cm長のシリンダ7個を直列に積み、間にdisk 2枚をいれて仕切り3セルの空洞とした。右端は矩形から円形TE01へのモード変換器。

構造は基本的小おなじである。てがかりがほしい。不純物のドーピングによって Brillouin Curve が2分され不連続になった例や、左右非対称なカーブ、多種多様のカーブを見たが、目的の傾きの小さい直線（群速度が小さく分散も小さい）、または逆分散カーブ（ゆがみが逆）は見当たらない（もっともこれは物理的に不可能なんでしょうが）。とにかく自然界にはそんなものは存在しないらしい。したがって空洞で実現する事は、おそらく不可能。

空洞をいくら工夫してもだめとわかったので、入力マイクロ波をいじってパルスの歪みを補正してしまえと考えた。空洞に蓄えられた波は勝手に振動しているから自由にいじれないが、位相反転した後に klystron から送り出す波は、振幅でも位相でも自由にこっちの思い通りに変化させられる。pulse compressor の出力波は、空洞からの放射と今 klystron から出てアイリスで跳ね返ってくる波の合成だ。ある程度の範囲で出力波形を調整できるはずだ。

こうやって、考えたのが図3のような 3-cell coupled cavity を使った pulse compressor である。要点は

- (1) 入力パルスの位相を 180 度いきなり反転させず、ゆっくりと出力が平坦になるように反転する。
- (2) dispersion の対称性から $\pi/2$ -mode を使用（transient 波形に対しても位相が回転しない）。
- (3) 全長 1 m の 3-cell の delay-line である。
- (4) TE01n の低損失モードを使用。
- (5) アイリス径を調整してカップリング係数 k_{12} と k_{23} とをアンバランスにし、3 番目の空洞に大きなエネルギーを蓄え、出力パルスの後半に大きなエネルギーを集めて、エネルギーゲインを高める。

詳細は参考文献にゆずる事にして、1996年にコールドモデルを作成して図4の様な波形を得た。実際の仕事は

大変であった。空洞の設計には KEK の赤坂君がモード解析を行い、まるで藁の中から針を探すごとくに、多数のモードからたった1本のモードTE0,1,15を探してくれた。

さて1996年の末にSLACにて開かれたLC-96 meetingの席上、コールドモデルの試験結果を発表した。平坦なパルス波形を見たSLACの研究者たちの顔に驚きがありありと現われた。30 mもあったSLED-IIが、長さがたった1 mの空洞に置き換わったのである。びっくりしないはずがない。

その後、Shintake のは電力効率がよろしくないという意見がだされたので、いろいろ考えていたが、昨年の暮れになって、「そうだ modulator 波形の立ち上がり部分のエネルギーも pulse compressor に蓄えられたら、もっと電力利用率が良くなるはずだ」そう考えて、実際の modulator 波形を積分して見積もってみると、約30%もの system 効率の改善が期待されるとわかった。もし pulse compressor の効率に取り込んで換算すれば、 $70 \times 1.3 = 91\%$ となる。しかし、現実には modulator pulse の立ち上がり部分での klystron の位相回転がじゃまをする。

最近になって元気な学生、吉田君が C-band R&D を手伝ってくれる事となり、吉田君が得意とするコンピュータ・コントロールによって klystron の入力位相をパルス変調して、出力位相をまっすぐに補正可能である事を見ごとく実証してみせてくれた。現在、システム全体を含めた位相フィードバックの検討を行っている。

なお、pulse compressor の大電力モデルは、予算と人員の不足のため98年現在まで作成していない。都合がつけば実行するが、S-band での経験からして、pulse compressor の場合にはコールドでうまく行けばホットモデルでも新たな問題は発生しないものと予想される。

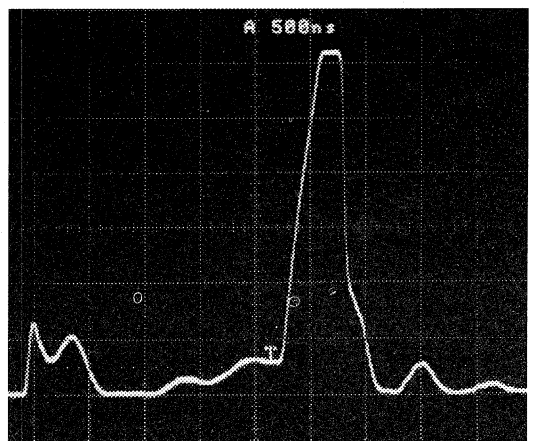


図4 Pulse compressor のコールドモデル試験結果。約 3.3 倍に圧縮増強された RF 出力波形。横軸: 0.5 $\mu\text{sec}/\text{div}$ 。縦軸: 任意（クリスタル検波器の特性のため、パワーに比例していないので注意）斜めの立ち上がり波形は、加速管での beam loading effect を補正する。

4. C-band Klystron の開発

新しい周波数の RF 加速システムを開発するさいに最も重要なコンポーネントは、もちろん信頼性のある klystron の開発である。とくに Linear Collider のような大規模プロジェクトを目標に置いた場合には、信頼性、量産性、電力効率、寿命そして価格などの点をすべて考慮しなくてはならない。しかし短期の R&D でこれらすべての条件を満足する klystron を開発する事は不可能なので、次のように、おおまかに 3 段階にわけて開発する事とした。

第 1 期：従来技術の 50 MW klystron 開発

E3746 1号機.....(1996年度)

第 2 期：高電力効率化、安定化

E3746 2号機：進行波出力空洞....(1997年度)

PPM 収束管.....(1998年度)

第 3 期 量産化、低価格化

設計の再検討

1996 年よりスタートした C-band R&D では、第 1 期として TOSHIBA E3746 1号機を開発して、所定の目標を達成した。これを受けて 1997 年から第 2 期の高効率化に取りかかり、まず出力回路に進行波空洞を用いたクライストロン TOSHIBA E3746 2号機を開発。本年 1998 年 4 月の試験で、安定な出力 54 MW、効率 44% を達成。さらに本年(1998年)からは集束ソレノイド磁石の不要な PPM 収束(Periodic Permanent Magnet Focusing) klystron の開発に取りかかっている。

4.1 第 1 期：従来技術のクライストロン開発 (E3746 Klystron 1号機)

従来技術の C-band klystron 開発の目的は

- (1) 動作が安定な電子銃の開発
- (2) 50 dB 以上のゲインを確保できる空洞配置の決定
- (3) 電力効率 40% 以上を確保できる空洞配置の決定
- (4) 50 MW 取り出しに耐える出力空洞の開発
- (5) 50 MW 取り出しに耐えるセラミック窓の開発

であった。

すでに述べたように、電子銃のビームパラメータは、S-band klystron の実績からスケールした安全設計であり、350 kV, 317 A、パーピアンズ $1.53 \mu\text{A}/\text{V}^{1/2}$ である。効率が 45% なら出力 50 MW となる設定である。

この C-band 周波数としては世界初となる大電力 klystron の開発は 1996 年夏に東芝(株) 那須電子管工場と KEK との共同でスタートした。KEK は主にコンピュータ・シミュレーションを担当、東芝が具体的な設計作業をおこなった。具体的な設計パラメータは末尾の参考文献にゆずるとして、この TOSHIBA E3746 1号機(図 5) は 1997 年 8 月めでたくその設計目標の 50 MW RF 出力

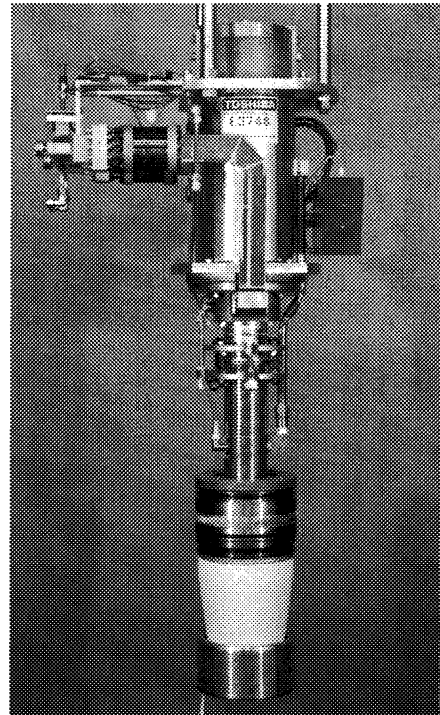


図 5. E3746 Klystron 1号機 (全長 1.2 m)
2号機の外観も全く同じ

を達成した。試験結果を表 1 に示す。

開発着手からわずか 1 年弱で 1 号機の開発に成功したことは快挙であった。これは長年の klystron 開発によって東芝那須電子管工場に電子管製造のノウハウが十分に蓄積されていた事が最も大きい成功の要因であるが、C-band 周波数の klystron が、より高い周波数のそれにくらべて、技術的に困難な点が少ない事も大きな理由である。

図 5 は E3746 の外観図である。長さ 1.2 m と小振りながら、46 MW, 2.5 μsec , 50 pps という S-band klystron 顔負けの大出力 RF を安定に発生し続けた。

なお RF 窓には KEK の赤坂展昌君のアイデアによる long-pillbox window を採用している。これにより真空を仕切っているセラミック板付近の電界強度が低く押さえられ、RF 放電の危険性をなくしている(ref.12)。赤坂君の設計した窓は単純な構造となっており、製造が容易かつ加工上の許容誤差が大きい事が特徴であり、量産性を見込める。

表 1 E3746 の試験結果

| | E3746 #1 | E3746 #2 |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| | Single Gap Output | Traveling Wave |
| Output Peak Power | 46.4 MW | 53.9 MW |
| Power Efficiency | 41.5% | 43.9% |
| Pulse Width (μsec) | 2.5 μsec | 2.0 μsec |
| Repetition Rate | 50 pps | 50 pps |
| Gun Voltage | 351.2 kV | 368.7 kV |
| Focusing Magnet | Solenoid | Solenoid |
| Focusing Power | 6.38 kW | 4.55 kW |

4.2 第2期：高効率化、高安定化 E3746Klystron 2号機（進行波型出力空洞）

上に述べたように、E3746 1号機の成功によって、従来技術を用いたC-band klystronは一応完成したものと判断。第2期の高効率化と高安定化にとりかかった。

クライストロンの電力効率を向上させるにはいくつかの方法が考えられるが、まず1997年度は進行波によって電子の運動エネルギーを効率よくマイクロ波に変換する出力回路：進行波型出力空洞(Traveling-wave output structure)の開発を行う事とした。

進行波型出力空洞を用いるメリットは、

(1) 進行波によって電子の速度に合わせながら減速させるので、電子のパンチ形状（位相面積）がこわれにくく、電子の運動エネルギーを効率よくマイクロ波に変換できる。

(2) 複数の空洞で電子ビームの運動エネルギーを取り出すので、1セル当たりの空洞電圧が低くなり高電圧放電が発生しにくい。

(3) 同じ理由で空洞のシャントインピーダンスは低くても良く、ドリフトチューブ径を大きくできる。その結果、電子ビームのハローなどが空洞壁に衝突せず、ビーム衝突に伴う高電圧放電を防止できる。

(4) 進行波とビームの速度が近いので、電子から見た空洞電界の半径方向変化が小さくなる。ノーズやdisk先端に集中した電界はたくさんの空間高調波の重ね合わせからなっているが、電子から見ると位相スリップのためほとんどがキャンセルし、基本波のみが電子ビームを減速させるのに有効となる。この基本波の半径方向変化は緩やかなため、エネルギー変換効率が電子ビームの太さによらなくなる。すなわち、集束磁場の変化などに鈍感であり、動作は安定となる。

(5) ビームとカップルする基本波は径方向の電界 E_r が小さいので、空洞を通過して低エネルギーとなったビームが発散せず、ビーム衝突に伴う高電圧放電を防止できる。

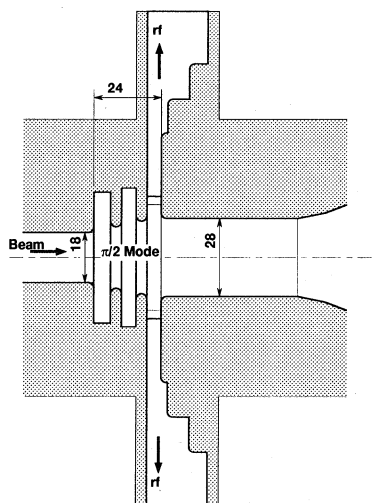


図6 E3746 2号機に搭載した進行波型出力空洞。

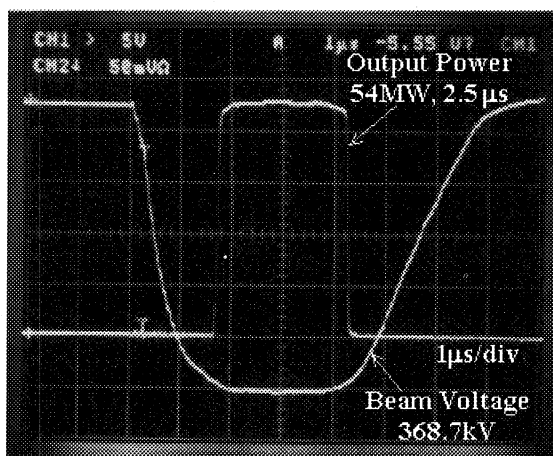


図7 進行波出力空洞を用いたC-band Klystron E3746 2号機のRF出力波形とクライストロン電圧波形

さて、出力空洞にマルチセル空洞を用いる事は、SLACに於いてLinear ColliderのX-band R&Dの一環として長年研究されており、近年になって50 - 70 MWクラスのX-band klystronですばらしい成功を修めている。がしかし、

(a) 空洞パラメータを最適に設計する確たる指針が未だに確立していない（コンピュータ・シミュレーションを用いてtry-and-errorで設計している）、

(b) 寄生発振現象に対してもtry-and-errorに近い（マルチセル空洞は基本的に発振しやすい）、

などの問題が残っており、C-band R&Dの一環として独自にマルチセル空洞の開発に取り組み、この問題を解決することが重要であると判断した。

そこで開発の基本方針として

(a) 等価回路によりマルチセル空洞を解析し、最適設計手法を確立する。

(b) できるだけ空洞数を減らして発振の危険性を回避するために、進行波モードを実現できる最低のセル数3を選ぶ。それでも発振が見られる場合には、高調波を積極的に減衰させるためChoke-Mode Cavityの採用を検討する。

(c) モードの解析が最も容易な $\pi/2$ モードを採用。

等価回路による進行波出力空洞の設計については、本会合に大久保氏が発表しているのでそちらを参照していただきたい。

図6に2号機に搭載した出力空洞を示す。3セルの $\pi/2$ -mode進行波空洞である（ビームが存在する時に進行波を形成する）。出力空洞下流のドリフトチューブ直径は28mmと大きく1号管の1.4倍と余裕があり、電界強度は1号管の2/3に低減され、高電圧放電とビームロスに対して大きな安全率が確保されている。

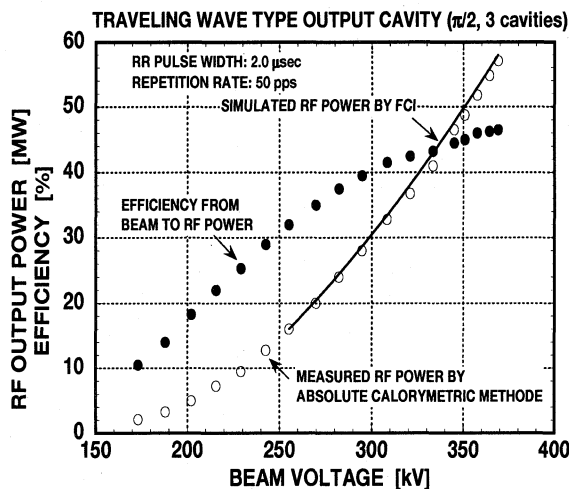


図8 E3746 2号機の試験結果。各点が試験データ、実線がFCIシミュレーション。両者は1%以内で合致した。

図7に出力波形を、表1に試験データを示す。2号機では電力効率が44%まで引き上げられている事がわかる。表には示されていないが、実際には2号機の方が動作が非常に安定であり、集束磁場強度を設計値の80%にまで下げても性能に変化は見られなかった。

図8は電子銃電圧にたいするRF出力の変化であり、FCIシミュレーションの結果とよく合致しており(誤差約1%)、今後の高効率化に期待がもてる。

4.3 大電力RFパワーの精密測定について

ピークRF出力が50MWにもおよぶpulse klystronの出力パワーを正確に測定することは高度の技術と細心の注意を要する。またクライストロンRF出力の実験値はプロジェクトの成否に関わる問題なので、最大限の努力を払う必要がある。我々は現在考えられ得る最も信頼できる方式「絶対熱量測定」を用いて測定したデータを発

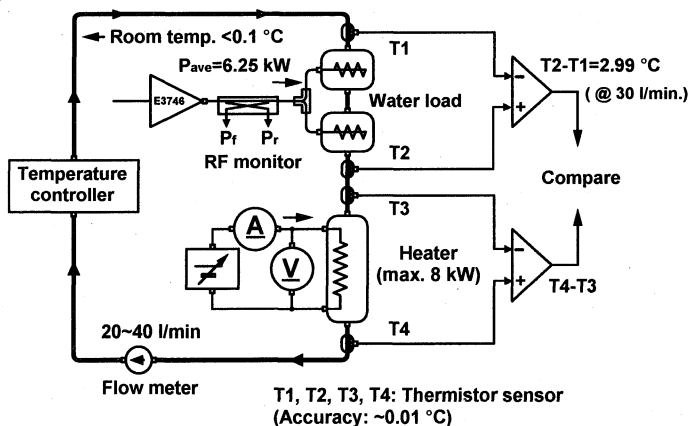


図9 絶対熱量測定による精密RF電力測定方式

表している。なお結合度が -60 dB と極度に小さいBethe-hole couplerを用いた電力測定は信頼性に乏しい。

我々の絶対熱量測定システムを図9に示す。要点は、

- (1) RF出力をWater-loadに吸収させ、冷却水の温度上昇 T_2-T_1 を測定。
- (2) DC電源を抵抗負荷(液体加熱用ヒーター)につなぎ、冷却水の温度上昇 T_4-T_3 を測定。
- (3) 両者が等しくなるように、DC電源を調整し、
抵抗発熱=マイクロ波平均電力

$$VI = f_{rep} \tau P_{rf}$$

によってピークRF出力を決定する。

各種の誤差要因をATC社の西谷数春氏に綿密に測定検討していただいた。その結果、総合誤差は約1%程度である事がわかった。

この方式は、ヒーターが発生する熱量を極めて精度の高い直流の電圧・電流から決定し、これをRFの平均電力と比較するという最も信頼できる方法であり、一種の電力基準にもなり得る。RF電力を精度良く測定する必要があるならば、ぜひこの方式をおすすめしたい。

5. パルスモジュレータ(Smart Modulator)の開発

すでに述べたように、C-bandで求められるクライストロン高電圧のパルス幅は $3.5\text{ }\mu\text{sec}$ であり、これには従来のSingle-line PFNを用いたモジュレータが最適である。我々は、従来技術のモジュレータ電源からスタートして、高信頼性、高メンテナンス性、低価格化を目指した開発を行う事とした。

手始めとして、従来の電源で意外にコストと手間をとり、かつ大きな体積を占めていた高電圧充電部の改善から取りかかった。そこで、韓国PAL-POSTECH研究所(Pohang Accelerator Laboratory)のProf. M. H. ChoとKEKの松本浩によって1993年に提案された新しい世代のパルスモジュレータ電源(Smart Modulator)の方式をC-bandではいち早く取り入れた。その1号機を日本高周波(株)にて製造し、1997年8月に試験運転に成功した。Smart Modulatorとはその充電部にインバーター方式による高電圧電源を採用する事により、小型化と単純化を目指したパルスモジュレータ電源であり、将来は低価格、高効率、高信頼性の理想モジュレータ電源へと発展してゆくはずのものである。

Smart Modulatorの開発にあたり、幸いにPAL-POSTECH研究所の所長Prof. Won Namkungの協力を得ることができ、電子入射器のモジュレータ電源の責任者であるMr. Jong Seok Ohが1996年9月より6ヶ月間KEKに滞在し、Smart Modulatorの基本設計とC-band RF-System全体の電力効率の解析を行ってくれた(ref.9,10)。これをもとにSmart Modulator 1号機を日本高周

波(株)にて製作した。

図10に Smart Modulator 1号機をしめす(ref.11)。インバータ電源をモジュレータ電源の充電部に使用するのは国内では今回が初めてであり、この方式の電源が安定に動作するかどうかを検証することを主目的とし、過剰な小型化は行わないこととした。それでも1号機は従来のものに比べてかなり小型になっており、外形幅 1600 mm、高さ 2000 mm、奥行き 1200 mm である。完成した電源のまえに立ってみると、これが 50 MW クラスの klystron を最大 100 pps で駆動する電源であるとは思えないくらいに小さい。今回使用したインバータ電源は米国 EMI 社製、横幅 19 インチ(483 mm)、高さ 12 インチ(311 mm)と非常に小型で EIA 標準ラックに収まりながら、最高電圧 50 kV の高電圧を 1 台で平均電力 30 kW 供給可能。このように超小型化を可能としたものは、最近の電力スイッチング半導体の進歩、とくに IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の発達によるものである。

図 11(a)はインバータ電源が定電流動作によって Pulse Forming Network(PFN)のコンデンサを直線的に充電する様子を示している。充電電圧が 46 kV に達すると充電が停止し電圧一定となり、波形の最後でサイラトロンが外部トリガにより放電し PFN コンデンサに蓄積されたエネルギーを 111 MW、5 μ sec のパルスとして一気に放出する。図 11(b)がクライストロンへの出力電圧波形であり、-350 kV のパルスがきれいに発生している事がわかる。我々の Smart Modulator ではサイラトロン回りと PFN コンデンサのグランド回路を銅板で作成し、インダクタンスを低くおさえ、漏洩ノイズは極めて小さい。静かなノイズ環境は Linear Collider で必要となる高精度の BPM (ビーム位置検出器) やオートマチックなエネルギー補正フィードバックが確実に動作するための必須の条件である。C-band klystron E3746 の 2 号機は、この電源で試験を

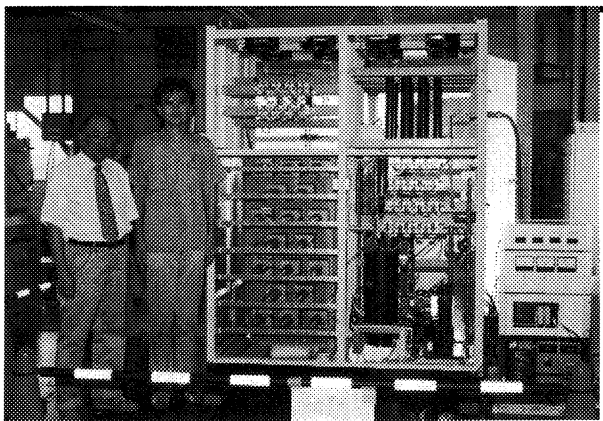
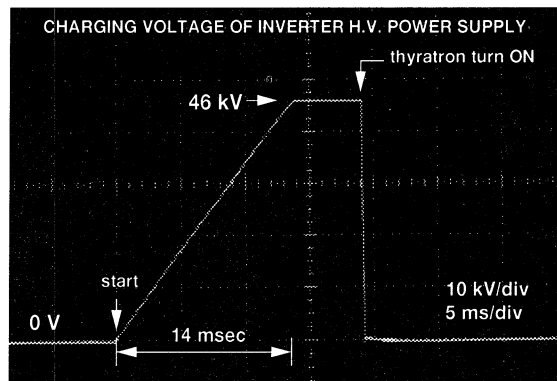
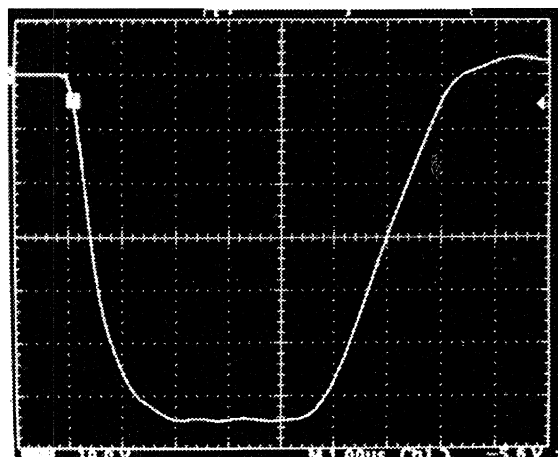


図 10. Smart Modulator 1号機。人物は左から馬場斉名誉教授と佐藤和行氏(両名とも日本高周波(株)、電源の設計・製造をお願いした)。右下すみに見える黒い小さい箱がインバータ電源である。



(a) PFN コンデンサの充電電圧波形



(b) 出力パルス波形(クライストロン電子銃電圧)
(Vpeak = -350 kV, Horizontal: 1. μ sec/div)

図 11. Smart Modulator 試験結果

行った。インバータ方式の電源は低い電圧から連続的にパルスが発生でき、高電圧プロセッシングにも有用である事がわかった。

6. 加速管の開発

図 12 に開発中の加速管を示す。この加速管は

- (1) Higher order mode (HOM)を減衰させるために、Choke-Mode Cavity を使用。
- (2) Input/Output Coupler での不要な横電場を消すために、2つの Input irisを持つ Matsumoto-type の double-feed coupler を使用。
- (3) ビームを軸中心にアラインメントするための RF-BPM 型ビーム位置モニターを内蔵。

これらは、すべて Linear Collider 用の加速管に求められる特殊な要求「低エミッタンス・ビームの安定な加速」を実現するために必用なのである。以下、順にやや詳しく説明する。

6.1 Choke-Mode Cavity

これは、1992年に筆者が提案した新しい形状の加速空洞であって、加速モード以外の全てのモードを電波吸収

体によって減衰消滅させ、multi-bunch beam に対するビーム不安定性を根底から無くしてしまおうというアイデアである。ここで、少々、このアイデアを思いついたいきさつをお話したい。

Linear Collider 用の加速管として、それ以前から higher-order mode を減衰させるアイデアは各種提案されていたが、そのほとんどが構造が複雑で、繊細なフライス加工を要するため線形加速器には不適であった。

なにか良い方法はないものかと常々考えていた。1996年のこと、次の様に連想してこのアイデアを考えだした。

- 広帯域ノイズをすぐ減衰
- >電波暗室での電磁放射
- >Open Space
- > Open Cavity
- >空胴壁に大きな穴を開ける
- >空胴を2分割にする

が、これでは、肝心の加速マイクロ波も逃げてしまい、加速管にならない。加速モードだけは空胴に閉じこめる必要がある。そこで、

- TM010-mode trapping
- > 固体中の電子の禁止帯
- >Brillouin curve の外側
- >周期構造の stop-band
- >円周状の周期的スロット
- > Brillouin curve のエッジ
- > 円周状の1個のスロットで遮断

と連想して、これはいわゆるゆるチョークではないだろうかと思いついた。

そうやって、考えたのが図13の Choke-Mode Cavity(その後いろんな人から、こりゃ変な名前だなと言われて、

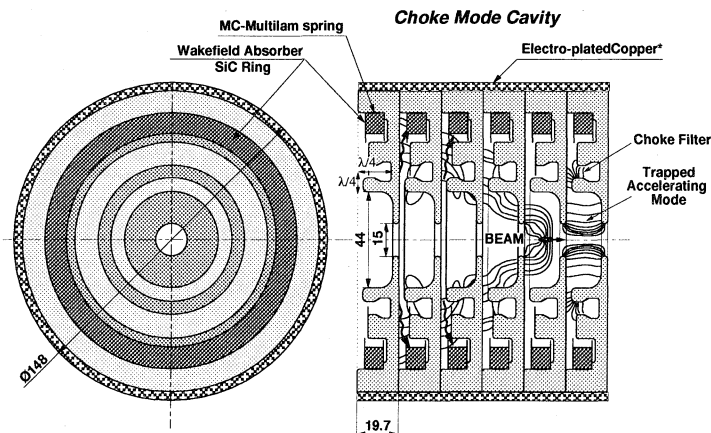


図13 Choke-Mode Cavity

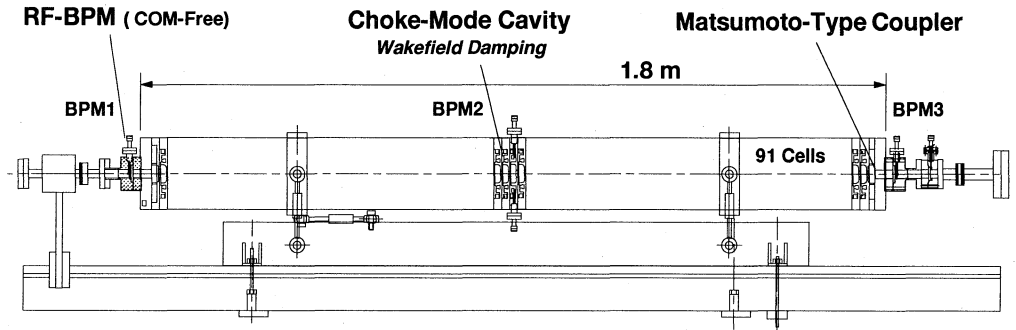


図12 C-band 加速管、完成後は SLAC-ASSET にて Wakefield を測定する。

この命名はちょっとまずかったのかもしれない...)。さて図の1セルの形状を SUPERFISH に入れてモードを計算したところ、本当に思った通りの空胴に閉じこめられたモードが存在する事がわかった。すぐに、同僚の生出、横谷、松本に電界プロットを見せたところ、みんなこれはいけるぞと喜んでくれた。

さっそくコールドモデルを作り Network Analyzer のスペクトルを見て、HOM が消滅している事を確認し自信をもった。論文発表や国際会議での発表などいろいろ行ったが、「本当に RF パワーが漏れないのか?」「チョークが放電するんじゃないか」とか、いろんなありがたいご指摘をいただき「とにかく high-power でビームを加速してみなくちゃ信用できない」という事になり、1994年に S-band の 0.5 m 長の加速管を作り KEK-ATF で試験を行った。実際に電子ビームを加速し、下流のエネルギー・アナライザーにてゲインを測定、ほぼ計算どおりの加速勾配が発生している事を確認した。また 120 MW (加速電界にして 50 MV/m) までのパワーで試験を行い、放電等の異常がない事を確認した。

図14に、現在製作中の C-band 加速管用の Choke-Mode Cavity セルを示す。チョーク部のリング状の溝寸法はすべてのセルに共通であり、5712 MHz の周波数を遮断する。加速空胴部はセルごとに穴径(2a)と円筒径(2b)が異なり Constant-gradient を実現している。加速空胴部のみを精密旋盤によって鏡面加工。各セルは 2b 寸法を精密加工し

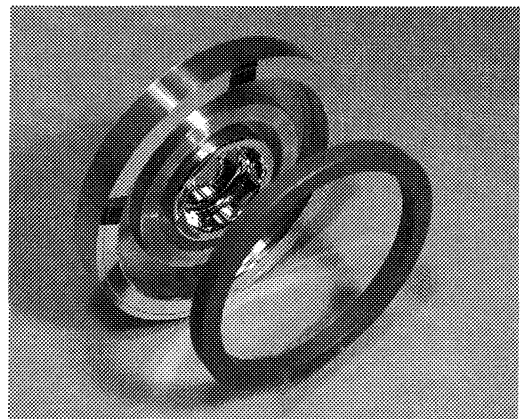


図14 C-band 加速管の無酸素銅セル。灰色のリングは HOM 吸収用の SiC。

て周波数調整を行なった後、積み上げて電鍍し、加速管とする。

マイクロ波吸収体は SiC リングを用い、リング状のスプリングによってセルに固定している。将来は低温ロウ接によって接合する予定である。

Wakefield の減衰特性は、本年末の SLAC-ASSET 実験にてビームを用いて測定する予定。

6.2 ダブルフィード型カップラー

C-band 加速管の入出力カップラーは、KEK の松本浩氏発案による Double-Feed Coupler (Matsumoto-type couler) である (図 15 左)。これはシンプルな構造でありながら対称な電界を発生できるユニークなアイデアであり、ここで少々説明をしておきたい。

Disk-loaded 型の加速管に RF パワーを入出力するカップラー空洞では、円筒空洞の側面に結合用のアイリスを開けるため、どうしても電界分布がアイリスの方に引きずられて非対称となる。これによって、仮にビームが中心軸上を通過した場合でも、非対称性に伴う電界または磁界の横成分によって、横方向にキック力を受けビームのエミッタンスをこわしてしまう事が知られている。

これを避けるため、アイリスと反対側の空洞壁にわざとへこみを持たせて電場をしみださせ、アイリスによるしみだしをバランスさせて電場を対称にする対策がしばしば行われてきた。しかし、Linear Collider で要求されるエミッタンスが従来のものよりはるかに小さいため、わずかの非対称性もゆるされない。ここで最も問題となるのは、空洞電界が対称でも、RF パワーの流れは非対称なことである。カップラー空洞内部の電磁界は、定在波 (空洞の基本モード TM_{010}) と RF パワーを流している進行波の重ねになっており、それらとビームとの相互作用を厳密に評価する事は容易ではない。したがって、Linear Collider の開発では、対称な位置に 2 つアイリスを設けて、それぞれ半分づつの RF パワーを対称に供給する方法が

研究されてきた。例えば、

(1) SLAC の NLC 計画では、T 字型の分岐 (Magic-T) を用いて、いったん入力マイクロ波を 2 分し、各々を左右 2 つのアイリスから供給する方式を開発 (図 15 中央)、

(2) DESY の SBLC 計画では、SLAC の方式を進化させて、音叉を上下逆さまにしたような分岐導波管を用いて、やはり左右 2 つのアイリスからマイクロ波を供給する方式を採用 (図 15 右)。導波管系を小型化するために、導波管の側面 (H 面という) にアイリスを設けている。

さて 1993 年のこと、松本氏が SBLC 計画の研究協力のため DESY を訪問。SBLC のグループがちょうど彼らが開発した新しい逆音叉型 double-feed coupler のコールド試験を行っているところに立ち会った。確かに電磁気的に対称であり、また機械構造的にもそれなりに製作しやすいように考えられていた。が「なにかが最適化されていない」と松本はひっかかったそうである。確かに説明はわかるが、SLAC の設計と大差はない。まだまだシンプルではないし、導波管部品数も多い。

そして DESY 滞在中に図 15 に示すアイデアを思いついたそうである。要点は、

- (1) J 型の導波管を用いて部品数を減らす。
- (2) 2 個の同一形状のアイリスを上下に設ける。
- (3) アイリスどうしの距離を $n\lambda$ だけ離す。
- (4) 2 番目のアイリスの先を $\lambda/4$ だけ離れた所でショートする。

図を見ると一見、非対称に見えるが、実は電磁気的には対称である事がこのアイデアの“みそ”である。ここではあえて説明はしない。皆さんで考えてみてください。きっと楽しめるはずです。

C-band 加速管では、J 型の導波管とカップラー空洞を 2 枚の銅製円盤の間にフライス加工と旋盤とで製作し、小型化と部品数の低減を計っている (図 16)。

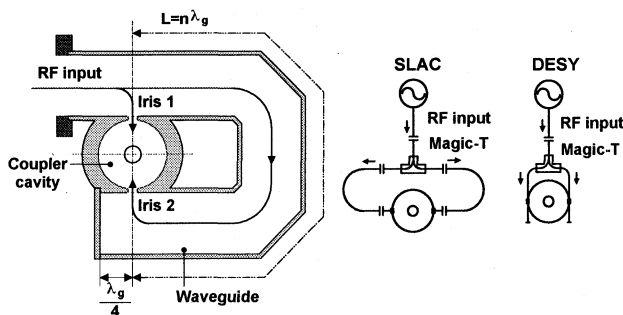


図 15 Matsumoto-type の double-feed coupler. SLAC, DESY-type と比較。

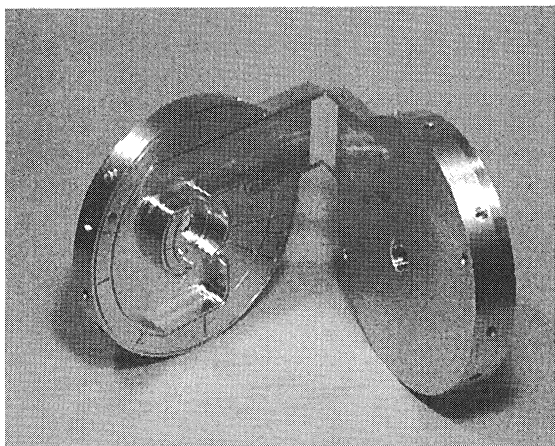


図 16 C-band 加速管用 Matsumoto-coupler.

7. C-band R&D の今後について

今後は、C-band RF-System の1ユニット(加速管4本、エネルギーゲイン 320 MeV)を KEK-B などの入射器に設置して定常運転に使用し、その信頼性評価を行うとともに、我々の加速器業界にたいして広くその価値を問いかける事が重要と考える。この試験の実現のため、ぜひ関係の方々のご協力をいただきたい。

しかしリニアコライダは長期の計画であり、それが現実のものとなるかどうか、世界の経済状況など外的要因によるものが大きい。従って、C-band の R&D はあくまでもリニアコライダを目標にするが、そこで開発された技術を各種の加速器で採用していただきながら、さらに性能アップを計ってゆくのが得策でありましょう。例えば、高電界の加速性能を生かして放射光リング用の入射器を短くして設備費を削減するとか(1 GeV, 25 m)、C-band の部品が小さい事を生かして電子線治療器をコンパクトにするとか、またコンパクトな非破壊検査装置など、各種の応用が考えられます。C-band の加速器を少しでも広く使っていただき、さらに性能を良くしていただければ幸いに思います。

謝辞

以上に述べた各種の開発は、すべて以下に列記しますメーカー各社の方々の大変なご苦勞と熱意によって達成させたものであり、ここに深く感謝いたします。(順不同) 日本高周波株式会社、株東芝電子デバイス事業部(那須管技術部)、三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所、日立電線株式会社、大塚製作所、株式会社 ATC、その他各社。

また、C-band グループに参加していただいている KEK のスタッフ、学生の方々に感謝いたします。

参考文献

C-band System 全般

- [1] T. Shintake, et al., "C-band Linac RF System for e+e- Linear Collider", PAC95, KEK Preprint 95-49, 1995
- [2] K. Yokoya, et al., "C-band Linear Collider with C.M. Energy 500 GeV to 1 TeV", EPAC96, KEK Preprint 96-68, 1996
- [3] T. Shintake, et al., "C-band Main Linac RF System for e+e- Linear Collider of 0.5 to 1.0 TeV C.M. Energy", LINAC96, KEK Preprint 96-122, 1996
- [4] T. Shintake, et al., "C-band (5712MHz) RF-System R&D Status", 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, September 9-11, 1997, KEK Preprint 97-124, 1997
- [5] T. Shintake, et al., "C-band RF-System Development for e+e- Linear Collider", APC98, KEK Tsukuba, Japan, March 1998, KEK Preprint 98-30.

Klystron 関係

- [6] T. Shintake, et al., "Development of C-band 50 MW Pulse Klystron for e+e- Linear Collider", PAC97, KEK Preprint 97-47, 1997
- [7] H. Matsumoto, et al., "Operation of the C-band 50 MW Klystron with Smart Modulator", APC98, KEK Tsukuba, Japan, March 1998, KEK Preprint 98-31.
- [8] T. Shintake, "Klystron simulation and design using the Field Charge Interaction (FCI) code", Nucl. Instrum. Method in Physics Research A 363 (1995) 83-89

Modulator 電源関係

- [9] J. S. Oh, et al., "Efficiency Issue in C-band Klystron-Modulator System for Linear Collider", PAC97, KEK Preprint 97-51, 1997
- [10] J. S. Oh, et al., "Efficiency Analysis of the First 111-MW C-band Klystron-modulator for Linear Collider", APC98, KEK Tsukuba, Japan, March 1998, KEK Preprint 98-32.
- [11] H. Baba, et al., "Pulsed Modulator for C-band Klystron", APC98, KEK Tsukuba, Japan, March 1998, KEK Preprint 98-33.

レゾナント・リング、導波管関係

- [12] H. Matsumoto, et al., "Development of C-band(5712MHz) High Power Waveguide Components", PAC97, KEK Preprint 97-50, 1997

加速管関係

- [13] H. Matsumoto, et al., "C-band Choke-Mode Accelerating Structure for the Linear Collider", EPAC96, KEK Preprint 96-70, 1996
- [14] K. Kubo, et al., "Alignment Issues for C-band Linear Collider", EPAC96, KEK Preprint 96-66
- [15] N. Akasaka, "Dark Current Simulation in High Gradient Accelerating Structure", EPAC96, KEK Preprint 96-65
- [16] T. Shintake, "The Choke Mode Cavity", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992) pp. L1567-L1570, Nov. 1992

RF pulse compressor 関係

- [17] T. Shintake, et al., "A New RF Pulse-Compressor Using Multi-Cell Coupled-Cavity System", EPAC96, KEK Preprint 96-71, 1996
- [18] T. Shintake, et al., "Development of C-band RF Pulse Compression System for e+e- Linear Collider", PAC97, KEK Preprint 97-48, 1997