コンパクト X 線 FEL を支える 高電界線形加速器技術*

High Gradient C-band Linear Accelerator Technology for X-ray FEL

新竹 積**
Tsumoru SHINTAKE

Key words C-band, linear accelerator, high gradient

1. はじめに

XFEL/SPring-8 では、日本独自の C バンド帯 (5712 MHz) をドライブ周波数とする線形加速器を採用しており、実用機では世界最高の加速電界 35 MV/m を目指している。われわれが 2004~2005 年に建設した SCSs 試験加速器において 40 MV/m での実用運転を 2 年以上にわたり実施しており、その高い信頼性が実証されている。

C バンド周波数帯が高電界線形加速器に最適であることは、筆者等が 1990 年代前半から指摘し¹⁾、その技術開発を 1996 年より 4 年間、KEK 高エネルギー加速器研究機構において実施し、基本的な構成要素の開発に成功した。すなわち出力 50 MW のパルスクライストロン、これを駆動するクライストロン電源 (モジュレータ電源ともいう)、超高真空仕様の導波管系、RF パルスコンプレッサー、そして電子ビームを安定加速する高次ノイズ減衰機構を有する加速管を開発した。すべての部分を独自設計し、日本の技術で製造した。この独自設計の目的は単に学術的な独自性を主張するためではなく、すでに半世紀もの歴史のある電子線形加速器の技術を近代化し、日本の優れた工業技術に適合するように設計を基本的な部分から見直し最適化を行うためであった。

電子線形加速器では、加速に使用するマイクロ波の周波数を高くすると、加速効率が高くなること、そして安定な運転に障害となる高電圧放電を引き起こしにくくなる傾向があることが知られていた。このため 1980 年代後半から、より高い周波数の技術開発競争が各国の高エネルギー関係の研究所で盛んに行われた。これらは高エネルギー物理学

研究の将来構想であった電子・陽電子リニアコライダーの実現を目指したものであり総額 100 億円規模の多大な投資がなされた。しかし残念なことに、この時期に諸外国で行われた高い周波数帯を目指す研究開発は、学術的な優位性を追求しすぎるあまり、各部に無理な設計を取り入れたため、10 年以上の開発期間を費やしたにもかかわらず、すべて挫折の憂き目を見ている。現在の時点で実用レベルに到達できたのは、日本の C バンド技術のみである。これはわれわれの選択した C バンド周波数帯が最適であったこと、そして設計の最適化が現在の工業技術レベルに正しく適合したことを示している。

さてマイクロ波を増幅するクライストロン管、マイクロ波を運ぶ導波管、マイクロ波から加速電界を発生する加速管、これらすべての断面寸法はマイクロ波の波長と比例関係にある。したがって加速に使うマイクロ波の周波数を高くすると、これに反比例して、その波長が短くなり、上記のすべての構造断面が小さくなり、より高いレベルの製造技術が要求される。また断面を通過するマイクロ波のエネルギー密度が高くなり、高電圧放電や場合によっては発熱による構造体の損傷が問題となる。したがって、理論的に高い周波数の方が加速効率が高いことが分かっている。上記エンジニアリングの制限からおのずと上限がある。この理由からわれわれは、従来の S バンド周波数 (2856 MHz) の 2 倍にあたる 5712 MHz の C バンド周波数帯を選択し、その技術開発を行い、期待どおりの成果を得たのである。

KEK で開発されたこの C バンド技術を、X 線自由電子レーザーに応用し、諸外国のプロジェクトに比較して加速器の長さを数分の一に小型化することができ、建設予算もこれに比例して低く抑えられたのである。

2. C バンドシステム構成

図 1 が C バンド 1 ユニットの構成である。左から右へ向かってエネルギーが流れ、最後に右端の加速管中を走行する電子を加速する。われわれが独自に開発した高精度高電圧 PFN 充電器は、クライストロン電源に内蔵された

*原稿受付 平成 21 年 9 月 30 日

**理化学研究所 放射光科学総合研究センター
(兵庫県作用郡佐用町光都 1-1)

新竹 積

1983 年九州大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。専門は電子加速器の全般にわたる基礎理論と製造技術、加速管、クライストロン、パルス電源、ビーム位置モニター、レーザーを用いたモニター、およびビームシミュレーションなど。

図1 Cバンドシステム構成 (1ユニット)

PFN コンデンサに 50 kV の高電圧を急速充電する。1 秒間に 60 回の充放電を繰り返し、その平均電力は 35 kW である。X 線 FEL では、加速エネルギーの安定度が非常に重要であるが、このようなパルス繰り返し動作をする電源において、従来達成されていた電圧安定度は 0.1% (1000 ppm) レベルであった。C バンドシステムでは、独自の回路構成によって 50 ppm までの安定化に成功している。これを用いた SCSS 試験加速器 (UV-FEL) の安定度は、ドイツの同様の FEL に比較して格段に優れた安定度を達成している。昨年ヨーロッパより SCSS 試験加速器を用いる利用実験に参加した研究者たちが、UV-FEL 光の優れた安定度に驚嘆したことが話題となったことから、その優位性が理解されよう。

次にクライストロン電源であるが、従来、最もトラブルの多い構成要素として知られていた。その主な原因は、

- (1) スイッチ素子の放電破壊、不安定動作
- (2) 外気温、湿度の影響を受けやすい
- (3) コロナ放電や、スパーク放電の誘発
- (4) 大きな電磁ノイズの発生。

そこでこれらの問題に対処するため、われわれは図1に示すように鉄製タンクの中にパルス電源の構成部品を納め、絶縁油にて高電圧放電を防止する設計とした。回路の内部発熱が数キロワットもあり、この熱除去にはタンク内の冷却パイプに温度管理された冷却水を導入することで、効率よく対処している。鉄製タンクは厚さ 25 mm の鉄板からフレームを加工、溶接し、ガスケット溝やタップ加工の後、ニッケルメッキ仕上げとした。メンテナンス窓には

ゴム O リング入れて冷却板つきのパネルを取り付け、絶縁油をシールするとともに、電磁ノイズ放射を防止している。16 段の PFN コンデンサに 50 kV で充電し、サイクロトロンをスイッチ動作すると 5000 A の強力なパルス電流が発生するが、外部への信号線に誘導するリークノイズは実測で、コモンモード 5 V 程度であり、まったく障害とならないレベルとなっている。

3. C バンド・クライストロン

RF 出力 50 MW の大電力パルスクライストロンを(株)東芝と KEK の協力により開発した。クライストロンはマイクロ波の大電力増幅用の真空管である。その動作媒体には電子銃から 350 kV に加速された電流 300 A の電子ビームを使用する。従来、クライストロンはパルス電源の次にトラブルの多いコンポーネントであった。主なトラブルは、

- (1) 電子銃のセラミック製絶縁部品が高電圧放電により破壊される。
- (2) 電子銃のカソード材料が放電により内部に飛散し、電子銃のセラミック製絶縁部品耐電圧を劣化させる。
- (3) 電子銃のカソードとアノード間の耐電圧不良、放電
- (4) 信号入力部の寄生発振 (マルチパクタ現象)
- (5) RF 出力部の共振空洞の高電圧放電
- (6) RF 出力部セラミック窓の高電圧放電
- (7) 寿命劣化

これらの問題は、セラミック材料の進歩と、空洞部の材料に高純度の無酸素銅を使用することにより格段に改善さ

図2 設置されたCバンド加速管，導波管，RFパルスコンプレッサー部

図3 Cバンド加速管向け銅セル13000枚の加工完了

れた。またKEKで開発された数値計算コードにより動作中の電子ビームを精度良く評価することが可能となり，問題の多かったRF出力部を最適設計したことにより，関連の問題がほとんど解決された。これらの努力により，現在の日本のメーカーでは，ほぼ設計どおりの性能をもつクライストロンを短期間に設計，量産することが可能となった。平均寿命も3万時間以上が達成されている。XFEL/SPRING-8では合計70本のクライストロンを必要とするが，現在，その量産が順調に進行している。

図2に，Cバンド高電界加速器のXFELトンネルへの設置の様子を示す。2010年夏には設置を終了し，運転準備に入る予定である。

4. 高電界加速管

従来の線形加速器における実用加速電界は20 MV/m程度が常識的なレベルであった。それがCバンド加速器においては，設計軸上電界35 MV/m，そして試験加速器において実証された最高軸上電界は40 MV/mであり，日常的に，まったく支障がなく運転されている。このすばらしい進歩の背景には，電子管向け無酸素銅の高品質化が大きく貢献している。特に内部に残留する酸素成分，CO成分

図4 左：加速セルの超精密加工。精密旋盤にて，単結晶ダイヤモンドバイトにて加速管内面を鏡面仕上げ加工。右：空気軸受けはZ方向の位置決めが不安定であり，これをレーザー距離計で常時モニターし加工量を補正している。

図5 上：超精密加工が終了し，SiCリング（高調波電磁波吸収体）を装着。下：加速セルを積み上げ，周波数測定を行った後，真空炉にてロウ付けし，加速管製品とする。

を除去することが電子管の性能向上に重要であるが，幸い(株)日立電線において，連続真空溶接炉が長年にわたり無酸素銅を安定供給している。われわれは，Cバンド加速管のみならず，クライストロン，RFパルスコンプレッサー等にも無酸素銅を採用することができ，極めて信頼性の高いシステムを実現しているのである。

またXFEL/SPRING-8では138本のCバンド加速管を必要としているが，1本あたり92個の加速セルを使用するので全体では13000枚の加速セルを大量生産する必要がある。これには，(株)日立電線の銅材料の加工に特化した

チームが精力的に取り組み、2009 年 6 月までの 1 年半でその量産を終了している。図 3 は、その大量生産の完了を記念した写真である。製造された加速セルの寸法精度は極めて高く、直径 150 mm に対して 20 μm に収まっており、量産を通して寸法精度はもちろんのこと、表面粗さや清浄度が大変安定していた。日本の生産現場の方々は、自ら常に良い製品を作りたいという向上思考が強く、量産になると品質が予想以上に良くなる場合が多い。

図 4 は、(株)三菱重工での加速セルの精密加工の様子である。線形加速器の加速管は、電気的には空洞共振器をシリーズに 100 個ほどつないだ遅延回路を形成しているので、わずかの寸法誤差によって、加速管内部を進行するマイクロ波の位相が次第にずれてしまい、電子の速度に同期して加速することができなくなり、加速エネルギーが低下する。このため、空洞共振器の内面円筒部には最も厳しい 1 μm 以下という寸法精度が要求される。これを直接に精密旋盤にて実現することは不可能に近いので、いったん鏡面加工した加速セルの周波数を測定して、共振周波数の目標周波数からのずれから、内径寸法を補正するための追加工をすることで達成している。

鏡面加工された表面粗さは平均 30 nm 程度である。このような鏡面は高電界を得るために必要なのではなく、要求される寸法精度を満足するようにダイヤモンドバイトを使って精密加工すると、必然的に鏡面が得られるのである。最終的なロウ付けによる接合プロセスを経ると、鏡面は失われて結晶粒が表面に析出してざらついた表面となってしまうが、高電界特性は劣化しない。

図 5 上は、精密加工が終了した加速セルに、高調波ノイズを吸収するための SiC リングを装着した様子であり、図 5 下は、加速セルを V ブロックに積み上げているところである。無酸素銅はやわらかい材料であり、加速セルを不用意に V ブロックや他のセルに当てると容易に変形するため、この作業は極めて注意深い根気の要る工程である。優れた工員たちがこのような現場の技術を支えており、日本の工場には幸いに少なからず職人気質が備わった人材がそろっている。

日本の優れた技術を将来にわたって継承するには、このような優れた人材が確保されることが肝要である。

5. ま と め に

日本オリジナルの C バンド加速器技術を用いた大型線

形加速器が完成する間近となった。2010 年夏より加速器の予備運転を開始し、2011 年春より X 線波長の自由電子レーザー発振調整にはいる予定である。

参 考 文 献

- 1) T. Shintake et al., C-band Linac RF-System for e+e- Linear Collider, IEEE Particle Accelerator Conference (PAC 95), Dallas, Texas, 1-5 May 1995
- 2) J.W. Wang and G.A. Loew, RF Breakdown Studies in Copper Electron Linac Structures, IEEE Particle Accelerator Conference (PAC 89), March 20-23, 1989, Chicago, IL

略 語 解 説

XFEL X-ray Free Electron Laser の略であり、X 線波長での動作が可能な自由電子レーザー。X 線の波長では、光共振器を形成するための鏡が存在しないため、共振器を用いない 1 回通過型の高ゲイン増幅方式が用いられる。ここでは X 線波長の自然放射を増幅し飽和させて利用するため、この方式を特に SASE: Self Amplified Spontaneous Emission Laser サセ型レーザーと呼んでいる。

FEL Free Electron Laser の略であり自由電子レーザーと呼ぶ。真空中を自由に走行する電子ビームを動作媒体とするレーザー。1971 年、John M.J. Madey 等により Stanford 大学において最初の FEL 発振が実証された。これに対して、通常のレーザーは、固体（半導体やガラスなど）や気体（ヘリウム、ネオンレーザー）の中を伝導する電子によって動作する。FEL では、加速器によって電子ビームを高エネルギーとしこれを周期磁場構造（アンジュレータ）に通して光を発生させる。

PFN 充電器 大電力のクライストロン増幅管を動作させるには、電圧 300 kV 以上の高電圧パルスが必要である。このため、コンデンサに 50 kV 程度の高電圧を充電し、高速スイッチ素子によりパルスを発生させる方式が用いられる。このとき出力パルスを平坦な矩形波とするために、多数のコンデンサをインダクタにて接続した Pulse Forming Network (PFN 回路) が用いられる。この PFN コンデンサに充電する高電圧電源を PFN 充電器と呼んでおり、この電圧精度が加速器のエネルギー精度に大きく影響する。