

CバンドRF加速器開発の現状

新竹 積^{A)}、松本 浩^{A)}、馬場 斉^{B)}、吉田 光宏^{C)}、高須 ゆう子^{D)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

^{B)} 理化学研究所、協力研究員

^{C)} 東京大学素粒子物理国際研究センター

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

^{D)} 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

概要

現在 C バンド開発グループは 500 GeV 電子・陽電子リニアコライダーに向けた性能向上に関わる技術開発と、本年度よりスタートした X 線 FEL への C バンド加速器の応用を想定した技術開発を行っている。ここでは X 線 FEL 向け C バンド加速器の建設をいかにしてリニアコライダー実現へ結びつけるのか、その戦略について述べる。

1. はじめに

C バンドグループは 1996 年春より R&D を開始し、昨年 2000 年春までにシステムに必要な構成要素のうち、パルスコンプレッサーの大電力モデルを除くすべての部分の開発を終了した¹⁾。これを表 1 にまとめた。表の中で、第 1 期と第 2 期に分けて書いているが、その概要は以下のとおりである。

第 1 期: 1996~1999 年度、各コンポーネントの開発、基本性能の確認、RF 系 1 ユニットの総合運転。

第 2 期: 2000 年~ 高信頼性、低コスト、量産化にかかわる R&D (SCSS 計画と併用)。

ここで SCSS 計画と併用とあるのは、理化学研究所・播磨研究所(SPring-8)において 2001 年 4 月に予算化された SCSS 計画(SPring-8 Compact SASE Source)の主加速器を C バンドにて実施し、小規模の施設で軟 X 線 SASE-FEL を実現する案が、現在検討されており、もし是が実現されれば、第 2 期の R&D を SCSS 計画に組み込むことが可能となる。C バンド加速器を軟 X 線 SASE-FEL に使用するメリットは、

- (1) C バンド加速器は従来の加速器と比較して 2 倍近い加速勾配を目標に設計されており、主加速器の全長を半分近くに短くでき、施設の費用を低く押さえる事ができる。
- (2) C バンド加速器はリニアコライダー向けに安定なビーム加速を実現する技術が盛り込まれ、その技術開発が終了している (Choke-Mode Cavity, RF-BPM, Smart Modulator など)。これはそのまま SASE-FEL にて大変に重要な低エミッタンスビームの加速に応用できる。

逆に C バンド加速器を実際の加速器として建設することによって得られる貴重な経験が将来、リニアコライダーを初めとする高エネルギー加速器に有益なものとなる。具体的には、

- (1) 開発の終了したコンポーネントを実機の加速器にまとめるという作業の中で、設計の見直しができる。
- (2) 精度の良いコスト評価が行われる。
- (3) ビームを通した運転によって、C バンド加速器のシステムとしての性能が評価できる。
- (4) ビーム利用者の存在する加速器として、連日運転することによって、信頼性に対する厳しい評価が行われる。

2. 開発の現状

2.1 クライストロン

1996 年より C バンド・クライストロンの開発を(株)東芝と協力して継続的に行っており、ソレノイド収束の出力 50M W クラス・C バンドクライストロンを 3 本開発した。いずれも所定の性能を満足し完成の域にある。SCSS 計画に C バンド加速器が採用になった場合、ソレノイド収束のクライストロンは安定供給可能な状態にある。

将来のリニアコライダーの建設を見込んで、システムの簡素化とコストの低減のために、周期永久磁石収束のクライストロン (PPM Klystron) の開発も行っている。2000 年度に開発製造した C-band PPM-Klystron は RF 出力 37 MW を達成した。若干の寄生発振が見られたが、電子銃から出たビームを 99% 以上の透過率でコレクターに輸送できる PPM 収束系が設計できていることや、PPM スタックの製造方法として HIP (Hot Isotatic Pressing) を使用して熱膨張率の異なる磁性 SUS の磁極と無酸素銅との積層構造を製造する技術を確立できた事が重要である²⁾ (図 1)。

¹⁾ E-mail: tsumoru.shintake@kek.jp

寄生発振の原因は、Zhigao Fang による解析によつて、ビームコレクターからの反射電子がドリフトチューブを逆走して信号を帰還させているためである事がわかっており、逆送電子を押さえる磁場の最適化を行っている^[3]。

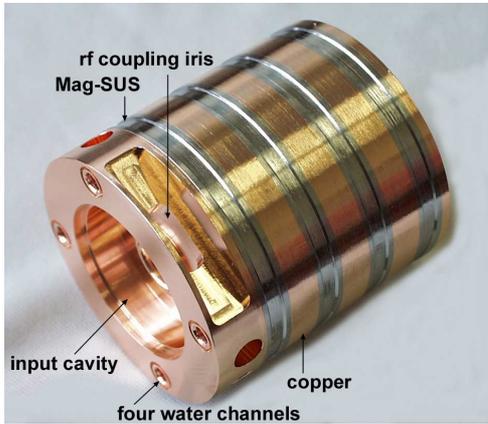


図 1 : PPM クライストロンのボディー部品。磁性 SUS と無酸素銅の積層を HIP 法により製造する技術を開発した。

2.2 クライストロンモジュレータ

1997 年にインバータ充電方式を国内でいち早く取り入れたクライストロン・モジュレータ電源(Smart Modulator 1 号機)の開発に成功した。その後、継続的に C バンドクライストロンの性能評価と寿命試験に使用しており、インバータ電源をモジュレータのような強烈なパルス電圧を発生する機器と組み合わせて使用しても、設計が適切であれば何ら問題ないことが実証された。このインバータ充電方式の導入によってモジュレータが小型化、簡素化された。

現在さらに小型化、安定化を目指した開発を行っており、目標として密閉型モジュレータを開発中である。これは PFN、サイラトロン、保護回路を一つの油タンクに収めた設計となっている(図 2)。

またモジュレータ開発の一環として、静電容量型高電圧モニターを開発中である(図 3)。これは分圧用のコンデンサとして高純度セラミックを用いて

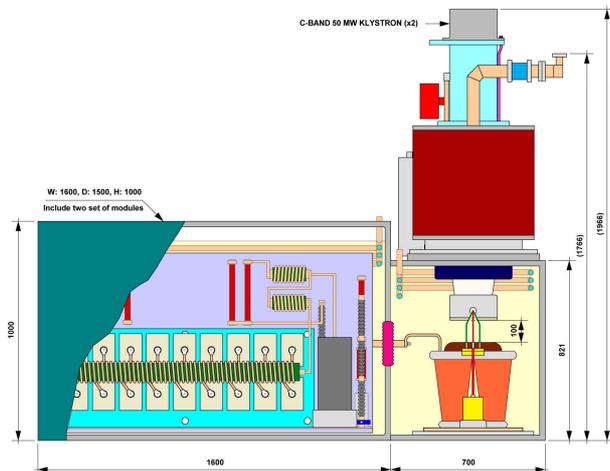


図 2 : 密閉型クライストロン・モジュレータ

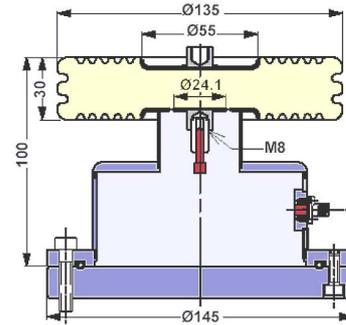


図 3 : セラミックを用いた静電容量型高電圧モニター

おり、温度安定度、校正値の長期安定性が期待される。

2.3 パルスコンプレッサー

C バンドでは 3 連結空胴をエネルギー貯蔵に用いた独自のパルスコンプレッサーを提案しており、1996 年にコールドモデル試験により、マルチバンチ運転に必要な平坦な圧縮出力パルスの生成に成功した。その後、予算不足のため大電力試験が先送りとなってきた。

現在、低熱膨張率を有するスーパーインバー材料を用いた RF 空胴を開発中であり、これを用いて 2001 年にパルスコンプレッサーを製造し、大電力試験を行う予定である(図 4)。これによって、共振周波数が安定となり、冷却システムを簡素化できるものと期待される。

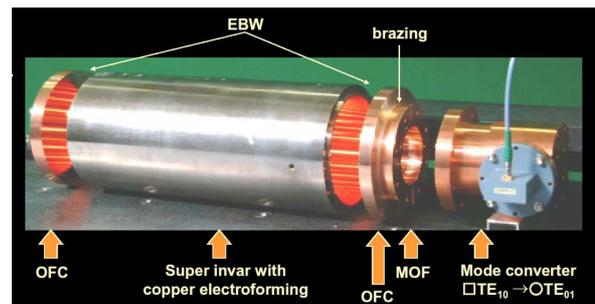


図 4 : スーパーインバーを用いたパルスコンプレッサー空胴の開発。TE_{0,1,15} 試験空胴。

2.4 加速管

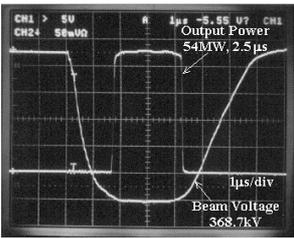
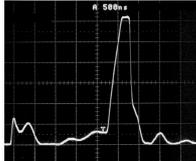
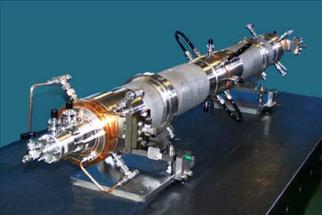
我々は C バンド加速管 1 号機を 1998 年に開発し、SLAC-ASSET 施設にてビームを用いて wake-field の測定を行い、choke-mode cavity が HOM を設計どおりに減衰させていることを確認した。

C バンド加速管の大電力試験は、KEK において放射線シールドハットの確保が出来なかったために先送りとなってきた。幸い、SPring-8 にて SCSS 計画に C バンドを採用する可能性が検討されており、この一環として 2002 年に SPring-8 内にて大電力試験を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake et al., "Phase-I R&D Summary and Phase-II Proposal on C-band Linac for 500 GeV e+e- Linear Collider", Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 200.
- [2] H. Matsumoto et al., "Development of the C-band (5712MHz) 50 MW Class PPM Klystron", 本研究会
- [3] Z. Fang et al., "Simulation of returning electrons from a klystron collector", Proc. 20th Int. Linac Conference (LINAC200), Monterey, CA, USA, Aug. 2000.
- [4] 馬場 齊、他、"C-band 50 MW クライストロン用コンパクト密閉型変調器電源の開発"、本研究会
- [5] 高須ゆう子、他、"C-band クライストロン用セラミック容量性分圧型パルス電圧モニターの開発"、本研究会
- [6] 吉田 光宏、他、"低熱膨張材を用いた C-band RF パルスコンプレッサーの開発"、本研究会

表 1 : C バンド R&D 第 1 期の成果と第 2 期の課題

項目 (500-GeV 向け開発)	第 1 期 R&D の成果 (1996~1999)	第 2 期 R&D の課題 (SCSS 計画と併用)
クライストロン 	◎No.1,2,3 号機すべて 50 MW 出力達成、パルス幅 2.5 μ sec、50 pps。 3 号機、効率 47% を達成 収束磁石電力 4.6 kW 寿命試験 2 号機 5000 時間超 現在 3 号機、寿命試験中 ◎PPM Klystron1 号機は出力 37 MW。寄生発振を伴っているため対策中。	◎量産化、低価格化  50 MW 出力波形 (E3746 No.3) ◎PPM Klystron No.2、2002 年開発予定
クライストロン電源 	◎Smart Modulator 1 号機 クライストロンの寿命試験に連続使用中、電力効率 52.4%、350 kV、2.5 μ sec 幅の高電圧パルスを安定に供給	◎Smart Modulator 2 号機 <ul style="list-style-type: none"> ・インバータ電源の国産化 ・密閉型設計 (全油中絶縁、冷却) ・コストの低減 ・電力効率を 60% 以上に ・固体スイッチ開発は人員、資金不足により当面、見送り
RF パルス・コンプレッサ 	◎コールドモデル試験結果 ゲイン 3.25、効率 65% ◎High Power 試験は 2001 年に実施予定	◎安定化技術、運転技術開発 <ul style="list-style-type: none"> ・クライストロン位相変調による、立ち上がり部の利用方式を確立 ・低熱膨張材 (インバー) による空洞周波数の安定化技術開発中
加速管 	◎チョークモード型加速管の特性試験を SLAC にて行い、所定の減衰特性を確認。 ◎大電力試験は 2002 年に実施予定	◎量産化に向けて設計詳細の見直し <ul style="list-style-type: none"> ・Wake-field の最適化 ・セル加工工程の見直し (低価格化) ・製造のスピードアップ
アラインメント技術  RF-BPM	◎HOM-Free 型 RF-BPM 分解能 < 1 μ m 原点精度 < 10 μ m を達成	◎Q-BPM, Structure BPM, Undulator BPM, として SCSS に実装 <ul style="list-style-type: none"> ・量産化、信号処理回路の低価格化 ・マルチバンチ化