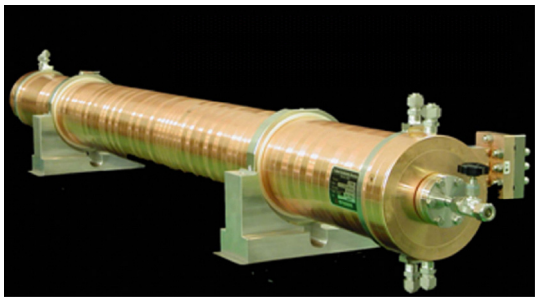
“X線自由電子レーザ”を支えるCバンド加速器

C-band Accelerator for X-ray Free Electron Laser



沖平 和則*1 Kazunori Okihira
三浦 禎雄*2 Sadao Miura
池田 直昭*3 Naoaki Ikeda
井上 典亮*4 Fumiaki Inoue
柱野 竜臣*1 Tatsuomi Hashirano

核物理や素粒子物理研究などで利用される加速器には，電子，陽電子，陽子などの粒子を高エネルギーの状態まで加速する加速空洞（又は加速管）が用いられる．当社では，新しい研究や実験に必要な加速空洞・加速管を提供するために様々な製造技術の開発を続けている．X 線自由電子レーザ施設 SACLA に組み込まれている C バンド加速器はその技術の一つである．ここでは当社 C バンド加速器製品及びその製作を実現する技術について紹介する．

1. はじめに

(1) C バンド加速器の概要

C バンド加速器は，周波数帯域が C バンドと呼ばれる高周波技術に基づいた高加速電界を持つ電子ビーム加速器システムである．従来の電子ビーム加速器システムでは，共進周波数が 2856MHz である S バンド加速管が主加速器として用いられていた．一方 C バンド加速管は，共振周波数が S バンド加速管の2倍となる 5712MHz である．C バンド加速管を主加速器として用いることで，高い加速勾配（35MV/m 以上）が実現され，加速器部全長が短くできる．また，投入する高周波の周波数が高くなると波長が短くなるため，周辺機器が小型化され，占有面積がコンパクトになるという利点がある．

(2) 当社 C バンド加速器の適用先

当社 C バンド加速器は，兵庫県播磨科学公園都市の（独）理化学研究所 播磨研究所内の大型放射光施設 SPring-8 に隣接する X 線自由電子レーザ（XFEL：X-ray Free Electron Laser）施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)[(1)]の主加速器部に適用されており，当社は，2007 年から 2009 年に掛けて，C バンド加速管 128 本と C バンドパルス圧縮器 64 台を納入した．SACLA における当社の製作範囲を図1中に示す．

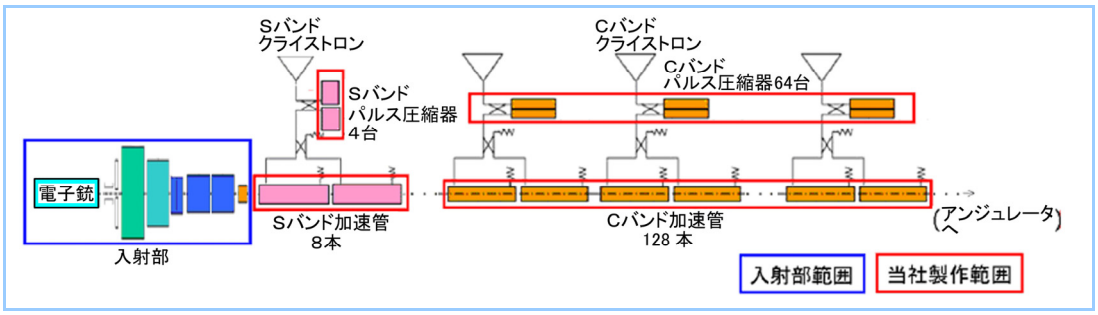


図1 XFEL 電子加速器システムブロック概略

*1 機械・鉄構事業本部先端機器事業推進部
*2 機械・鉄構事業本部先端機器事業推進部主席技師 博士（工学）
*3 機械・鉄構事業本部先端機器事業推進部グループ長
*4 機械・鉄構事業本部先端機器事業推進部主席チーム統括

赤線囲み範囲の加速空胴，加速管を当社にて製作した．さらに全体システム最上流部の電子銃から C バンド補正加速管までの“入射部”範囲の一部の機器の製作と据付けを担当した．その他に，当社の放射線治療装置（TM-2000）にも C バンド加速管が利用されている．本稿では，当社 C バンド加速管及びその製作を実現する当社の技術について紹介する．

2. Cバンド加速管の構成及び特徴

C バンド加速器システムの構成を図2に示す．主加速管2本と，主加速管に電子を加速するための高周波を供給するクライストロン（図2壁の外側に設置），クライストロンと主加速管を結ぶ導波管，そして，加速管に供給される高周波のパワーを増幅する C バンドパルス圧縮器で構成される．ここでは，当社で製作した C バンド加速管及び C バンドパルス圧縮器の構成及び特徴について述べる．

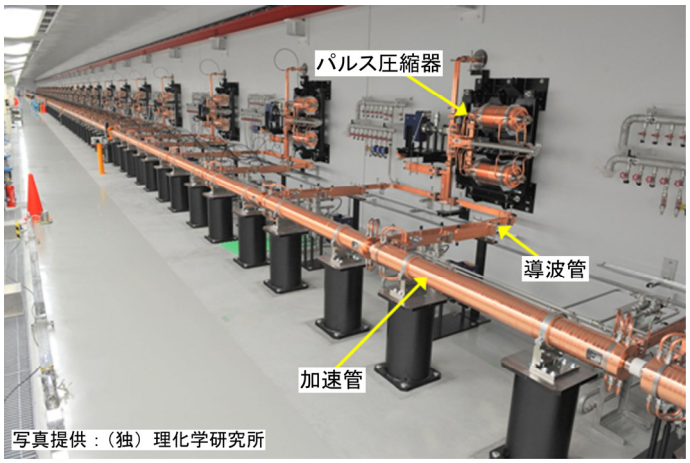


図2 SACLA の C バンド加速器システム
C バンド加速器システムの構成を示す．

(1) C バンド加速管

SACLA で使用される C バンド加速管は，図3に示すチョーク型加速管[2]と呼ばれるタイプのもので，チョーク型加速管構造は加速空胴，チョークフィルター，高調波吸収体からなる．C バンドの加速周波数を持つ大電力高周波はチョークフィルターにより加速空胴内部に閉じ込められるが，一方でビームが加速空胴を通過すると，加速周波数よりも帯域の広い高調波と呼ばれるノイズ電磁波が誘起される．このノイズ電磁波はチョークフィルターを通り抜け，加速空胴外周に配置された SiC（炭化シリコン）製の高周波吸収体に吸収される．このように，チョーク型加速管は加速管で誘起されるノイズ電磁波を減衰させ，後続のビームがノイズの影響を受けず，ビームを安定に加速できるという特徴を持つ．

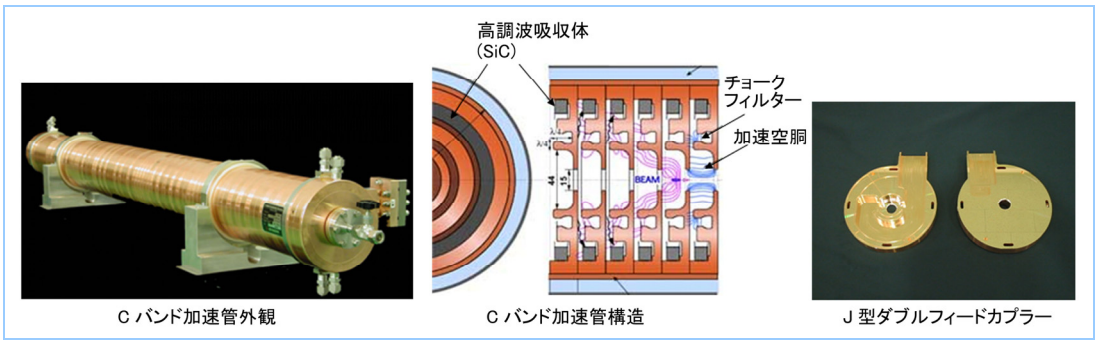


図3 C バンドチョーク型加速管
C バンドチョーク型加速管の外観・構造詳細を示す．

C バンドチョーク型加速管は89個のレギュラーセルと2個のカプラーセルで構成される．材質は高純度無酸素銅で，HIP（Hot Isostatic Pressing：熱間等方圧加圧）処理を施している．要求される加速勾配 35MV/m を実現するために，各セルの寸法精度を数 μm オーダーで管理し，

さらに，セル内面の表面粗さを0.1μm以下（鏡面仕上）に抑えている．各セルにはSiCリングがはめ込まれ，加速管の中を通る電子ビームが誘起するノイズ電磁波を減衰させる．加速管の最上流部と最下流部にはカプラーセル（結合セル）が配置され，加速管と導波管からの出力を接続する． C バンドチョーク型加速管では，要求性能を満たすために J 型ダブルフィードカプラー[3]と呼ばれる特別な設計を用いている．

C バンドチョーク型加速管の詳細仕様を表1に示す．

(2) C バンドパルス圧縮器

C バンドパルス圧縮器は，クライストロンから供給される高周波パルスを圧縮し，ピークパワーを倍増するための機器であり，2対の共振空胴，2対のモードコンバータ，3dB 分配器で構成される（図4）．クライストロンから出力されたパルス状の高周波は，3dB 分配器で 90 度の位相差を持って等分され共振空胴に分配される．3dB 分配器と共振空胴の間にはモードコンバータが配置され，高周波の伝播モードが3dB 分配器内面の矩形モードから共振空胴内面の円筒モードに変換される．変換された高周波は共振空胴内で蓄積・圧縮され，入力高周波の位相を反転することで，C バンドパルス圧縮器の高周波出力ピークパワーが倍増される．

クライストロンから出力された高周波を高いピークパワーに圧縮するためには，C バンドパルス圧縮器の高周波蓄積効率（Q 値）が十分高い（Q≧180000）必要がある．要求される Q 値を満足するためには，共振空胴の共振周波数には目標周波数（5712MHz）に対し±10kHz（0.01MHz）以下の精度が要求される．また，2対の共振空胴の共振周波数の差異が大きいと，クライストロン側に反射する高周波が増大しクライストロンの動作に悪影響を及ぼすため，その差異を 10kHz 以下に抑える必要がある．空胴寸法に対する共振周波数の感度は約 10kHz/μm であるため，1μm 以下の両空胴の寸法管理が必要となる．

C バンドパルス圧縮器の詳細仕様を表2に示す．

製作した C バンドチョーク型加速管，及び C バンドパルス圧縮器の性能を実証するため，（独）理化学研究所にてテストベンチでのハイパワー試験が実施された．クライストロンの高周波（出力パワー48MW，パルス幅 2.5μs）を C バンドパルス圧縮器で倍増し，C バンドチョーク型加速管に供給することで，加速管内の加速勾配が XFEL 計画での要求値 35MV/m を大きく上回り，最大 42MV/m に到達することが確認された[4]．

表1 C バンドチョーク型加速管スペック

項目	仕様
構造	チョークモード構造
加速電界	35MV/m（設計値）
Q 値	10000
周波数	5712MHz
長さ	1.8m
位相シフト	3π/4

表2 C バンドパルス圧縮器スペック

項目	仕様
構成	共振空胴×2，モードコンバータ×2 集積型立体回路，支持架台
主要材質	無酸素銅（OFC-CLASS1&2） SUS304，SS400
RF フランジ	A-DESY タイプ
共振周波数	5712MHz（@30℃，真空）
共振モード	TE 0,1,15
Q 値	≧180000
カップリング係数	β=9～9.5
VSWR	≦1.10
RF 運転条件	入力：50MW，パルス幅：2.5μs パルス繰り返し：60Hz
チューニング機構	精密差動ネジ駆動ダイヤフラム方式
集積型立体回路	3dB 分配器：結合度 3dB，方向性≧25dB RF モニタ：結合度 60dB，方向性≧25dB

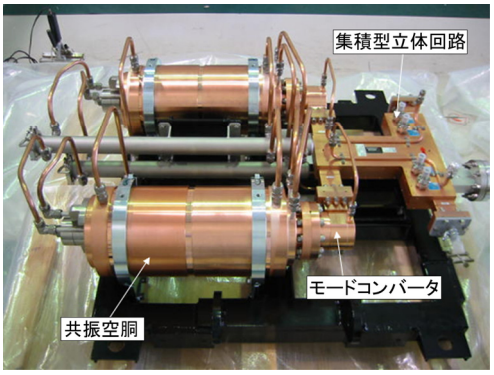


図4 C バンドパルス圧縮器

C バンドパルス圧縮器の外観・主な構成部品を示す．

3. 当社製造技術と高周波測定技術

C バンド加速器システムの要求性能を実現する当社製造技術の特色を以下に記す.

(1) 超精密旋盤による超精密加工技術

C バンドチョークモード型加速管は，超精密加工前までの機械加工を素材メーカで行っている. 素材メーカでは，超精密加工面取り代を 0.03mm 残し，寸法精度±0.01mm までの機械加工を行う. その後，社内にて，加速管1本あたり 91 枚のセルの内面を図5に示す超精密旋盤で鏡面仕上げし，表面粗度 0.1μm(最大高さ)に仕上げる. しかしながら，空胴の厚さのばらつき及び機械の軸方向変動により，修正加工時に削り過ぎや不足を生じることになる. このため，オンマシンにて空胴端面をレーザ側長して位置補正して加工する方法をとり，寸法誤差 2～3μm 以下に仕上げている.

一方，C バンドパルス圧縮器(およそφ220mm×L440mm)は C バンドチョークモード型加速管各セル(およそφ160mm×L20mm)と比較してサイズが大きく，共振空胴を機械加工のみで目標とする周波数に追い込むことは困難となる. そのため，共振空胴は加工面取り代を 0.1mm 残し，寸法精度±0.01mm までの機械加工を行い，その後，社内にて共振空胴の周波数測定を行い，仕上加工寸法に反映する. ただし，仕上加工時も寸法精度が±0.01mm，すなわち周波数精度が±100kHz であるため，3項(2)に示す要求値±10kHz を満足していない. そのため，共振空胴には周波数を調整するためのチューナを取り付け，空胴寸法1μm 以下(周波数 10kHz 以下)の調整を行っている.

(2) UHF 帯から X バンド帯までの幅広い帯域での高周波測定技術

C バンドチョークモード型加速管，C バンドパルス圧縮器ともに，最終仕上加工前に高精度高周波測定を行い(図6)，仕上加工やチューナによる最終調整にフィードバックしている. 高周波測定にはネットワークアナライザを使用している. 当社では，周波数 238MHz(UHF 帯)から 11.4GHz(X バンド帯)までの加速器の製作・高周波測定実績があり，幅広い周波数帯域の機器に対応可能である. 今回の C バンドチョーク型加速管の高周波測定及び調整に当たっては，特別な構造のカプラーセルを使用しているため，通常のカプラーセル調整方法は適用できない. そのため，当社ではカプラーセルの新しい調整方法[5]開発し，適用している.

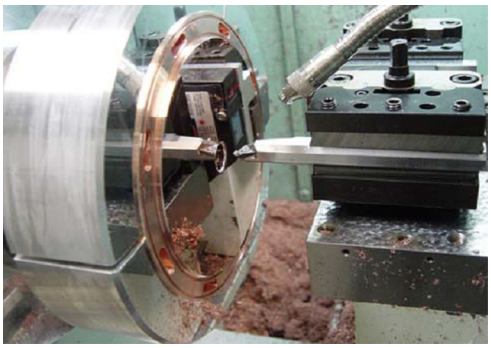


図5 C バンドチョーク型加速管超精密加工
精密旋盤による C バンドチョーク型加速管の加工を示す.

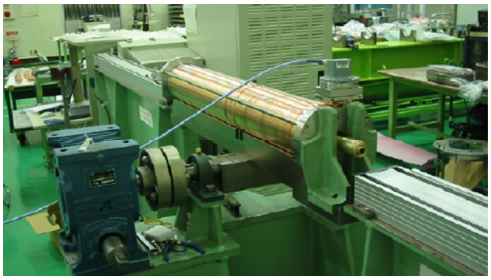


図6 C バンドチョーク型加速管の高周波計測

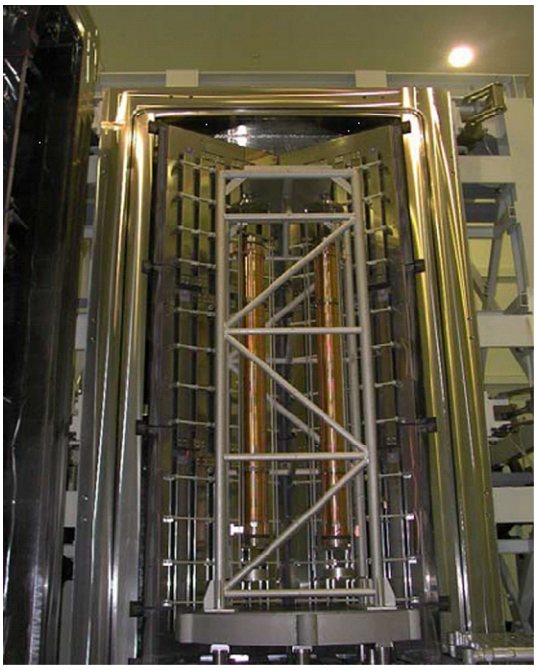


図7 C バンドチョーク型加速管のろう付け炉
国内最大級の真空ろう付け炉による C バンドチョーク型加速管のろう付けを示す.

(3) 国内最大級の真空ろう付け炉による低歪のろう付け技術

C バンドチョーク型加速管は，91 枚のセルを並べ，図7に示す大型の真空炉でろう付けする．C バンドチョーク型加速管は全長が約2m，直径が約 160mm と細長い形状であるため，ろう付けの炉内の熱やワーク姿勢により変形や曲がりが生じやすい．そのため，専用治具を用いて炉内の熱やワーク姿勢による歪を抑制している．当社では国内最大級（直径 1.3m，高さ 3.5m）の加速器専用の真空ろう付け炉を保有しており，様々なサイズのろう付けに対応可能である．

4. まとめ

当社製造技術を活用し，C バンドチョーク型加速管と C バンドパルス圧縮器を製作した．製品は(独)理化学研究所が実施したハイパワー試験の結果，要求値を上回る高加速勾配が確認された．また，SACLA では C バンド加速器全数が設計どおりの 35MV/m 以上の加速電界で日々運転されており，当社 C バンド加速器が世界最短波長のレーザーの実現に貢献した．今後，国内/海外加速器研究施設や医療機関への C バンド加速器の普及が期待されており，積極的に取り組んでいく所存である．

参考文献

(1) (独)理化学研究所，http://www.riken.jp/XFEL/
(2) Shintake, T., The Chork Mode Cavity, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992) pp.L1567-L1570, Part2, No.11A, 1 Nov. 1992.
(3) Matsumoto, H. et al., Fabrication of the C-band (5712MHz) Choke-Mode Type Damping Accelerating Structure, Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan
(4) 櫻井辰幸ほか，XFEL/SPring-8 での C-band 加速器システム量産品の大電力試験 http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/P_5PM/P_EH_5PM/THPS023.pdf
(5) 三浦禎雄，進行波加速管の精密インピーダンス調整方法，総研大博士申請論文，2006 年