

1. 常伝導高周波加速構造における 革新的技術

高エネルギー加速器研究機構

阿 部 哲 郎

目 次

常伝導高周波加速構造における革新的技術

概要	1-1
第 I 部	
はじめに:金属製空洞によるマイクロ波加速	1-1
第 II 部	
新しい加速管製作法	1-3
1 従来の製作法	1-3
2 縦方向分割方式とは	1-4
3 縦方向分割方式による製作	1-6
4 応用例	1-8
第 III 部	
より高い加速周波数へ	1-11
1 なぜ周波数を上げるのか	1-11
2 どこまで行けるのか	1-12
3 どこを目指すのか	1-13
参考文献	1-15

常伝導高周波加速構造における 革新的技術

概要

本講義は、従来の（金属製）常伝導高周波加速構造に関する内容であるものの、そんな中でも、従来の常識を破るような革新的技術があることを紹介する。最初の話題は、加速構造の製作方法に関する。従来、常伝導電子加速管は、ビーム軸に直角な平面で分割した「ディスク」を数十枚積層して金属結合する「ディスク積層方式」で製作されるのが一般的である。一方、それとは直交する新しい製作方式として「縦方向分割方式」がある。その方式では、ビーム軸を含む平面で加速構造が分割されるため、主要部のパーツ数は2個（2分割）または4個（4分割）であり、ディスク積層方式と比べると、圧倒的に少ないパーツ数で済む。その他にも、加速モード電磁界による巨大な表面電流がいかなる接合箇所も渡らない、加速フィールドから見えない所で構造を接合できる等の利点もある。近年の超精密ミリング加工技術の向上により実現可能となってきた縦方向分割方式の基本と応用について説明する。ふたつ目の話題は、より高い加速周波数に関する。常伝導高周波加速構造の加速効率（単位長さあたりのシャント・インピーダンス）は、加速モード周波数の平方根に比例して高くなる。究極のマイクロ波加速とも言える数百 GHz（サブテラヘルツ）帯（波長は約 1mm）の常伝導加速器開発について、将来展望も含めて説明する。上記ふたつの研究開発は、昨今社会的に重要となっているサステナビリティの向上にも直結するものである。

第1部

はじめに：金属製空洞によるマイクロ波加速

マイクロ波は、電子レンジや携帯電話等で使われており、現代人の生活にとって必要不可欠な存在である。物理的には、マイクロ波は電磁波の一種であ

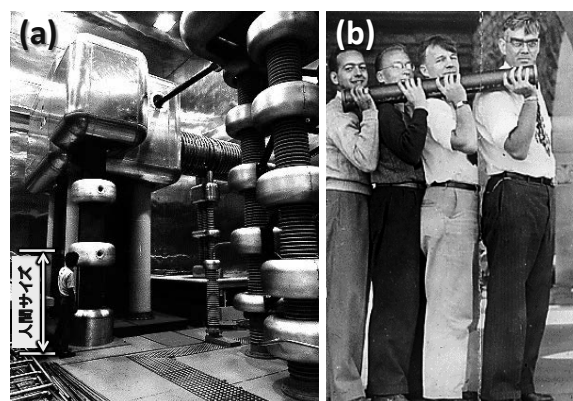


図1 初期の電子加速器。(a) KEK が製作し運用していたコッククロフト・ウォルトン型静電加速器 (750 keV)。(b) スタンフォード大学の Mark I 加速器用 S バンド加速管を担ぐ 4 人。一番右が William W. Hansen 教授で、その左の 3 名は彼の大学院生。この 1 本の加速管で 1 MeV (1000 keV) 以上加速できる。SLAC Archives, ARC127 より抜粋。

り、周波数が数百メガヘルツ (MHz) から数百ギガヘルツ (GHz) くらいである。厳密な定義はないようであるが、本稿では、マイクロ波の周波数の定義を 300 MHz (波長 1 m) から 300 GHz (波長 1 mm) としておこう。マイクロ波の上限周波数 (300 GHz) くらいになると、光学的な性質が出だしてくるので、数百 GHz (サブテラヘルツ) 帯はマイクロ波と光波の中間的周波数領域である。

マイクロ波を金属共振器である加速空洞に投入して電磁界を励振・蓄積し、その電界で荷電粒子を加速するのがマイクロ波加速であり、加速器としてよく用いられている加速方式である。一方、我々が病院でよくお世話になっている X 線管も加速器であるが、こちらは DC 電圧で加速する静電加速器であり、マイクロ波加速にあるような空洞共振器 (加速空洞) はない。静電加速器では、あまり高いエネルギーまでは加速できず、その原理的限界は 10 MeV 以下である。例えば、KEK で製作し、実際に運用されていたコッククロフト・ウォルトン型静電加速器 (図 1-(a)) で加速して得られた電子のエネルギーは 750 keV である。なぜ高いエネルギーまで加速できないかと言うと、全加速エネルギー分の電圧をどこかで受け止めなければならないからである。一方、マイクロ波を使えば、小さい電圧の積み重ねで大きな電圧を出

Higher frequency, more compact

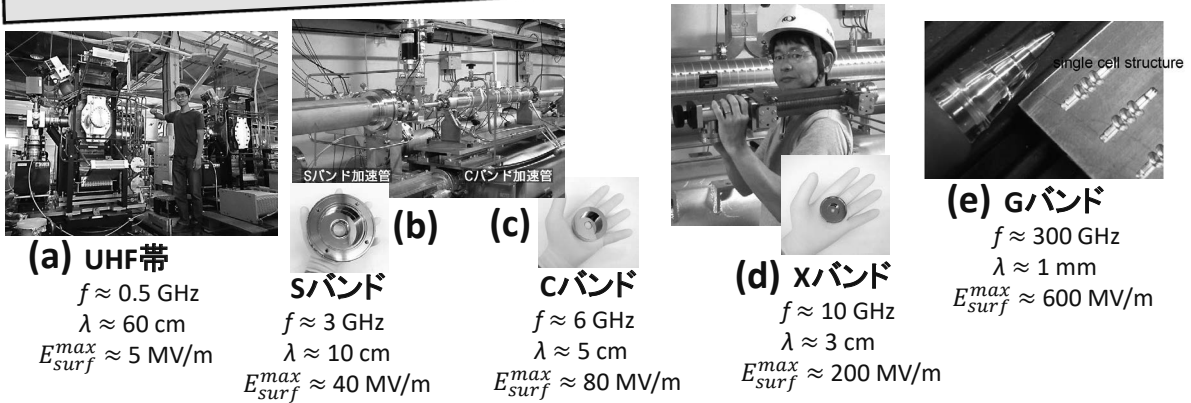


図2 (陽) 電子加速器用の常伝導加速構造の例。(a) SuperKEKB 陽電子ダンピングリング加速器用の 509 MHz 単セル空洞。(b) KEK 電子陽電子入射器で使用している S バンド加速管。(c) KEK 電子陽電子入射器で開発していた C バンド加速管。(d) CLIC[1] 用 X バンド高電界加速管のプロトタイプ。(e) SLAC が試作した 300 GHz 試験空洞。 f 、 λ 、 E_{surf}^{max} は、それぞれ典型的な、加速モード周波数、その自由空間内波長、空洞内表面上の最高電界強度である。(a) は円形加速器用(連続波)、(b) から (e) は線形加速器用(パルス波)なので、(a) と (b)~(e) を単純比較はできないことに注意。

すことができ、数 GeV 以上の高エネルギー加速器が作れるのである。

そのようなマイクロ波加速の装置(加速空洞)の大きさは、大雑把に言ってその波長くらいのサイズとなる。つまり、300 MHz を使えば 1 m 程度、300 GHz を使えば 1 mm 程度のサイズである。これくらいのサイズであれば、製造上、大きな困難はない。逆に言えば、加速空洞 1 台で数十 m もの大きさがあれば巨大過ぎて製作困難である。また、0.1 mm より小さい加速空洞の製作は野心的過ぎる。図 2 に、実際に製造された 500 MHz から 300 GHz の常伝導加速構造の例を示す。ちょうど、マイクロ波の定義のほぼ下限から上限まで存在することになる。加速構造の周波数は、加速器の目的、その時代の技術、既存の加速器で使われている周波数等により決まる。ちなみに、超伝導加速器の周波数は殆ど 1.3 GHz であり、その空洞形状も殆ど決まっている。一方、常伝導加速構造には、様々な周波数、様々な形状がある。多様性のあることが、常伝導加速器の特長と魅力であると言える。

本稿は、2024 年 9 月開催の高エネルギー加速器セミナー OHO (OHO'24) のテキストのひとつであり、

電子(または陽電子)の常伝導高周波加速における比較的新しい技術や展望に関する講義である。高周波(本講義ではマイクロ波と同義)を使った常伝導加速器は古くからある。例えば、本格的・近代的な最初の電子線形加速器として知られているのが、スタンフォード大学で 1947 年に建設された Mark I 加速器である。それは、2.856 GHz のディスク・ロード型加速管(図 1-(b))を使っており、現在でも全世界で広く使われている加速管方式である。このことは、70 年以上本質的には進化していないとも言えてしまう。ディスク・ロード型加速管が、そして、マイクロ波加速が、とてもよくできた加速方式であるという理由もあろう。加速器の使命は、実験や測定、治療等のために必要な高品質ビームを作り、供給することであるので、既に良くできた技術があれば、それを凌駕するものをあえて考えなくてもよいであろう。しかし、停滞した技術は退化に等しいことを忘れてはならない。停滞しては、必ずどこかで行き詰まる。現在の高エネルギー加速器は、そのような状況にあるのではなからうか。それを打開するためには、既存の技術を革新的に進歩させるか、または、(全く)新しい技術を開発するかである。後者は OHO'24 の他

の講師に任せるとして、本稿では、前者の取り組みの内、常伝導の電子線形加速技術に関する研究開発について、例を紹介する。

第 II 部 新しい加速管製作法

1 従来の製作法

まずは、従来の製作法について、KEK における X バンド加速管製作のレシピを基に説明しよう。第一段階は、図 3-(a) にあるようなディスクを作ることである。材料としては、通常は純銅（無酸素銅）を使う。正確な共振周波数や高い Q 値、金属接合するための良好な表面状態を得るために、超精密加工で切削する。例えば、20 個のセルから成る加速管であれば、ディスクは基本的に 20 枚必要となる。切削加工では、工具の刃で金属表面を削り取るので、マイクロな視点では、ショベルカーやブルドーザーで大地をならすようなものである。従って、切削加工された表面は、マイクロな視点では凸凹やバリがあり、機械的なダメージは数ミクロン以上深くまで影響していることもある。そこで、図 3-(b) にあるように、化学研磨により表面を平滑にする。これは、例えば銅の場合、酸性の液体で表層を溶かすのであるが、きちんとしたレシピで行わないと、逆に表面が荒れるので注意が必要である。その後、ディスクを積層（スタック）して、金属接合する（この製作方式を「ディスク積層方式」と呼ぼう）。金属接合法としては、接合媒体としてろう材を使うろう付けがよく使われるが、X バンド高電界加速管の場合、金属接合による様々な変化が小さくなるよう、（接合媒体を使わない）拡散接合を用いることがある。拡散接合の場合、ディスクとディスクの接合面の間に 1 ミクロンの隙間もあってはならない。少しでも隙間があると、機械的には一体化しても、真空リークを起こしてしまうことがある。加速管も真空容器なので、超高真空を保持できなければならない。そこで、ディスク表面は、平均粗さ (R_a): 数十 nm、平面度: $1\mu\text{m}$ という高精度で超精密加工するのである。また、拡散接合の場合、銅の融点近くまで温度を上げなければならないので、難易度とコストは高い。拡散接合する時の姿

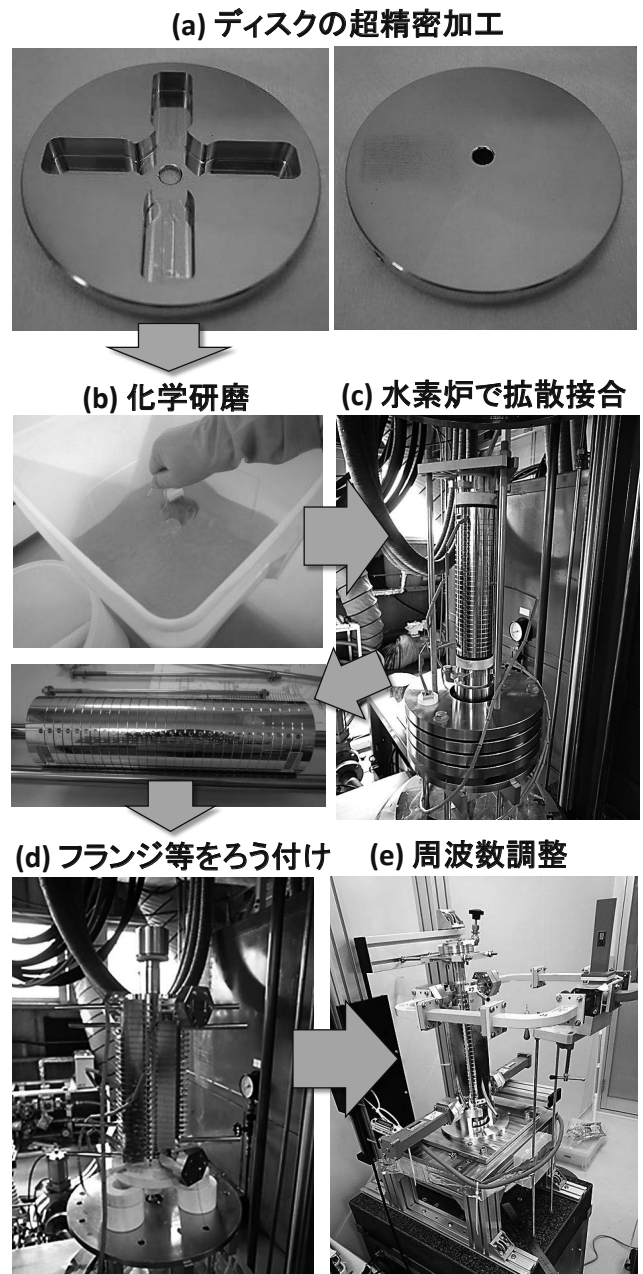


図 3 ディスク積層方式による加速管製作法の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

勢は、図 3-(c) にあるように縦置きであり、最上部に 25 kg の重りを乗せて、約 0.1 MPa の圧力をかける。そして、 1020°C (物温) を 1 時間保持すると、金属の拡散現象により接合されるのである。その後、フランジ等をろう付けし (図 3-(d))、最後に周波数調整を行う (図 3-(e))。周波数調整とは、空洞の形状を少し変えて、その共振周波数を調整することである。空洞の側面を押して潰せば周波数は上がり、逆

に引っ張って広げれば周波数は下がる。空洞の加工精度を十分上げれば、周波数調整を不要とすることは可能である。実際、海外では、そのような仕様で加速管を作っているプロジェクトもある [2]。しかし、その場合は加工に時間的・金銭的コストがかかり、本当に得をするかは、慎重に、且つ総合的に考えなければならない。

以上のように、加速管を作るのはかなり大変である。価格的には、(大雑把に言って) 加速管 1 本で高級車 1 台分くらいである。それでは、加速管をもっと簡単に作る方法はないか、それを次節から解説する。

2 縦方向分割方式とは

図 3 にあるディスク積層方式とは、ある意味直交するものとして「縦方向分割方式」がある。ディスク積層方式では、ビーム軸に垂直な平面で加速管が分割されるのに対して、縦方向分割方式では、図 4 にあるように、ビーム軸に平行な平面で分割される。「縦」という言葉は、加速器業界では通常、ビーム進行方向を意味するが、「縦方向分割」と言うと、分割面が縦方向に平行であるのか、それとも、縦方向に並んでいるのかよくわからないが、そもそも、縦方向分割方式という言葉は著者たちが付けた名前であり、まだ一般的ではないので、定義だと思って、是非皆さんで使っていただきたい*1。ちなみに、著者はその英語訳を「Longitudinally-split structure」としてみた。

さて、縦方向分割方式の最大の利点は何かということ、パーツの個数の少なさである。ディスク積層方式では、パーツ(ディスク)の個数は、セルの個数にほぼ等しく、数十個、またはそれ以上である。一方、縦方向分割方式では、セルの個数にかかわらず、加速管主要部のパーツの個数は、通常、2 個(2 分割)または 4 個(4 分割)である。この圧倒的に少ないパーツ数が加速管製作やその性能に及ぼす影響を、著者たちは研究している。その他の利点としては、加速モード電磁界による表面電流が、いかなる接合部も渡らないことがある。その表面電流はビーム軸の方向に流れるのだが、ディスク積層方式では、セルとセルの間の接合面を少なくともセルの個数(数十箇所以上)渡ることになる。低い加速勾配で運転する

加速管なら問題にはならないであろうが、加速勾配 100 MV/m 級以上の高電界加速管では、表面電流は最大 10^8 A/cm² 級で、現代の大規模集積回路中の電流密度程度である [3]。そのような状況では、エレクトロ・マイグレーション等により、金属表面が機械的に破壊される可能性が知られている。そして、そのような大表面電流により引き起こされたと考えられる加速管内の接合箇所における不具合が、CLIC 用 X バンド加速管(ディスク積層方式で製作)の高電界試験後のマイクロ観察で見つかったことがある(但し、高電界性能との関係は明らかにはなっていない)。その他、加速フィールドから見えない所で構造を接合できる利点もある。縦方向分割方式は、特に高電界加速管の高電界性能の向上にも繋がるのではないかと著者は考えている。



図 4 縦方向分割方式による加速管製作の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

KEK では、2008 年から 2009 年にかけて、18 セルの CLIC 用高電界加速管(導波管型減衰構造付き進行波管)を 4 分割タイプの縦方向分割方式で製作し、KEK の X バンド高電界試験施設 Nextef にて高電界試験を実施した。X バンド加速管は、ブレークダウン率は別として、減衰構造付きの場合でも加速勾配 100 MV/m までは RF コンディショニング

*1 「ディスク積層方式」も、著者の造語である。

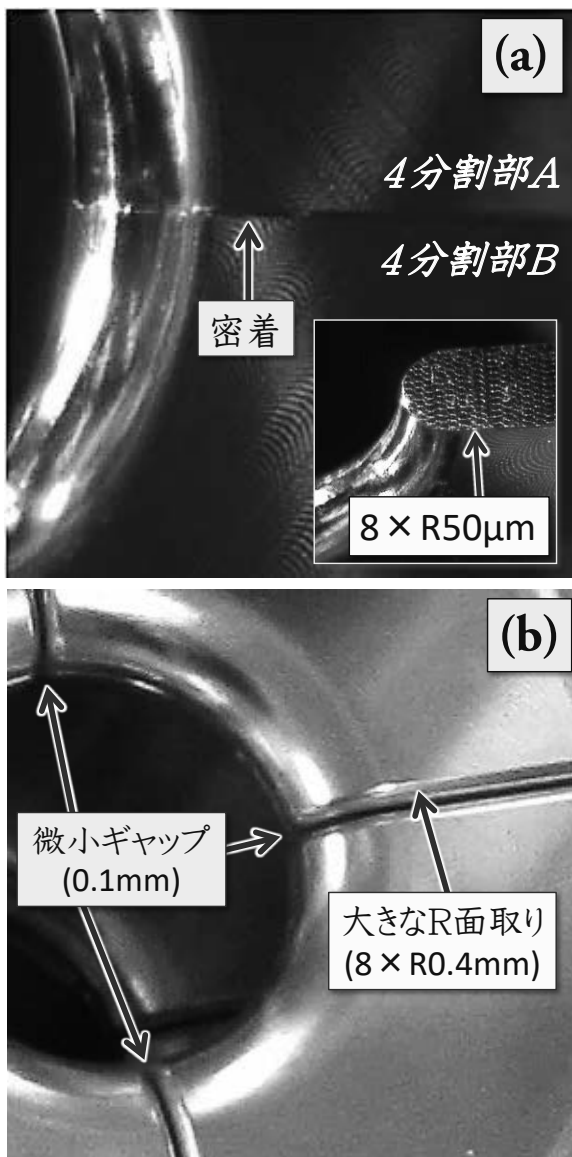


図5 KEK/Nextefで高電界試験した縦方向分割方式 Xバンド加速構造のアイリス付近の写真。(a) 初期の4分割方式 (TD18-QUAD-KEK)。写真にあるアイリス径は5.3mm。(b) 改良4分割方式 (SD1-QUAD-R04G01)。写真にあるアイリス径は8.4mm。

が出来るのが通常である。しかし、その加速管では、60 MV/m より高い加速勾配に到達することすら出来ず、当時、実験的にその原因を突き止めることも出来なかった。CLIC用の縦方向分割方式加速管の開発は、ここでしばらく止まっていたが、2011年に、KEK機械工学センター（当時）の東保男氏がもう一度挑戦しようと旗を揚げた。著者はそれに賛同し、独自のシミュレーション研究 [4] などに基づいて、従

来の縦方向分割方式について考えられるすべての欠点を克服する『改良縦方向分割方式』を考案した [5]。具体的な改良点は、図5に示してあるように、

- フィールド増大を抑えるための大きなR面取り (R0.4 mm)
- 分割部が密着する場合に発生する恐れのある仮想リークをなくす微小ギャップ (0.1 mm)

である。この新しい方式の効果を調べるため、比較的試験遂行の容易な単セル型空洞を改良縦方向分割

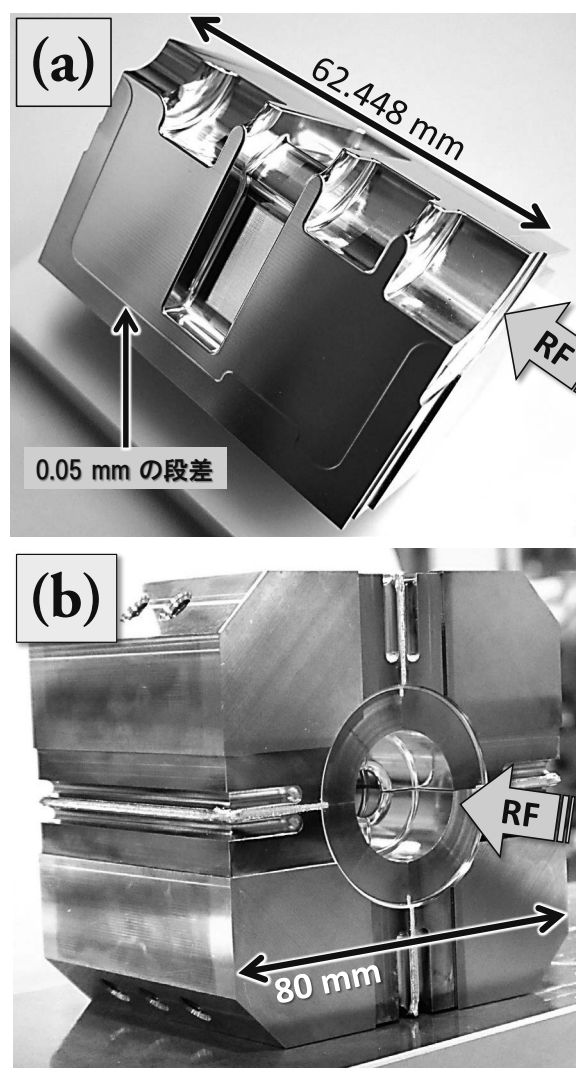


図6 KEK/Nextef1/シールドBで高電界試験した改良縦方向分割方式の単セル型試験空洞。(a) 超精密ミリング加工で製作した4分割部のひとつ。RF設計は著者が、機械設計はKEK機械工学センターの高富俊和氏が行った。(b) 4分割部4個を電子ビーム溶接で接合した直後の様子。

方式（以下では単に、縦方向分割方式と言うことにする）で製作した [6]（図 6）。ここで、分割部同士の接合には、電子ビーム溶接を用いた。これが X バンド加速構造自体を電子ビーム溶接で組み立て、問題のない高電界性能が出た最初の例となった [7]。そして、24 セルから成るフルスケール加速管（CLIC 用高電界加速管）を改良 4 分割方式で問題なく製作できることも確認した [8]。

尚、上記の「フィールド増大を抑えるための大きな R 面取り (R0.4 mm)」に関してであるが、R が円弧である限り、必ず最低 23% のフィールド増大が原理的に避けられない。それを更に小さくするには、R 部の形状を円弧でない形にすればよい。近年、クロソイド曲線（オイラー螺旋とも呼ばれる）を使った曲面にすれば、フィールド増大を 1% 程度に抑えることができることがわかってきた [9]。

3 縦方向分割方式による製作

ここで、縦方向分割方式による加速管製作の流れを、CLIC 用 X バンド高電界加速管を例に説明しよう。まず、図 7-(a) にあるように、素材となる無酸素銅の丸棒（長さ約 30 cm）から、4 分割部のだいたいの形を切削加工する。ここでは加工精度は要らないので、大きい R の刃でざっくりと削る。それでも、4 分割部 1 本あたり約 1 3 時間の加工時間がかかった。その後、R2mm の超硬エンドミルで、セル構造の形を 0.1 mm 残しで作る（4 分割部 1 本あたり約 1 8 時間）。そして、R0.75mm の超硬エンドミルを使って、最終目標加工精度 (Ra: 0.3 μ m、輪郭度: 5 μ m) を目指して、0.03 mm 残しを経て、最終仕上げ加工をする。これには実に 5 日間かかった。勿論、目標精度を下げれば、加工時間も減らせるが、CLIC はリニアコライダーなので、要求仕様が厳しい。FEL や医療・産業用加速管であれば、最終加工にかかる時間を大きく減らせるであろう。また、精度指定の仕方を工夫することでも、最終加工の時間を減らすことができると考えている。加工時間を減らすことは、加速管の製作コスト削減に直結するので、重要課題である。

加工後は、図 7-(b) にあるように組み立てる。ディスク積層方式と比べると、非常に簡単である。CMM (Coordinate Measuring Machine) で相対的

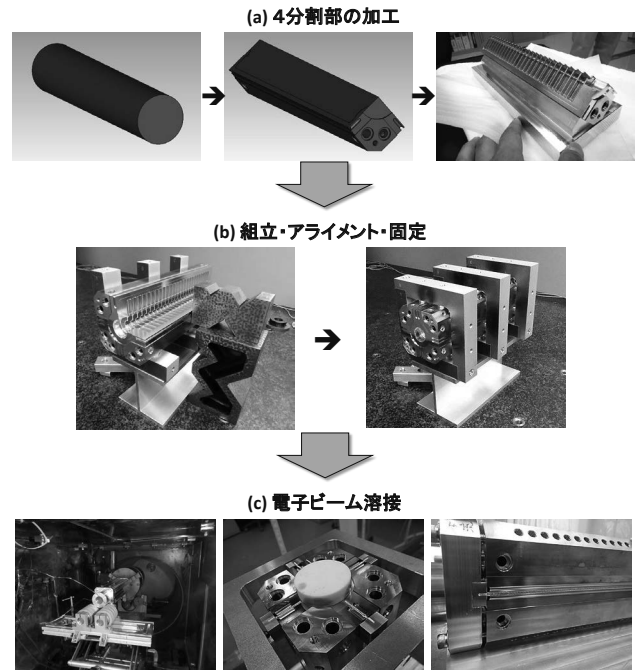


図 7 縦方向分割方式による加速管製作法の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

位置を 1 ミクロンの精度で測りながらアライメントして、拘束治具で固定した。

分割部の接合は、ろう付けでもよいが、製作コスト削減という意味で、高温処理を必要としない電子ビーム溶接を用いた (図 7-(c))。近年、電子ビーム溶接よりも簡易に行える TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接で加速管を作る試みも研究されている [10]。ディスク積層方式でも溶接を使えるが、採用をためらう程に溶接箇所が多い (少なくとも、ディスクの枚数はある)。一方、縦方向分割方式の 4 分割タイプでは、ビーム軸に沿って 4 本、各端面に 4 本だけである。しかも、実際に溶接する時間は 1 本あたりたったの数秒である (セットアップにそれなりの時間がかかることは、言うまでもないが)。電子ビーム溶接を効果的に用いるには、溶接箇所が少ないことが重要である。これは、縦方向分割方式に適している。尚、銅の場合、アニールした軟銅よりも、熱処理しない硬銅の方が耐電圧の高いことが知られている。そういった意味でも、電子ビーム溶接や TIG 溶接による接合で加速管が作れることが望ましい。しかし、溶接で加速構造を接合すると、空洞形状が歪んで、周波数等が大きく変化してしまうのではないかと懸念がある。図 8-(a) は、CLIC 用 X バンド高電界加速管を 4 分割タ

イプの縦方向分割方式で製作した時の電子ビーム溶接直後の様子だが、溶接ビードがはっきりとわかる。溶接応力はかなり大きいこともあり、加速管を歪めることができる。図 8-(c) は、電子ビーム溶接前後に測った、ビーム軸に直角方向のサイズの変化である。どこの直角方向サイズを測ったかは、図 8-(b) の同じ色の矢印で示してある。溶接応力により、平均的・全体的には約 $5\ \mu\text{m}$ の収縮となっているが、一部収縮がゼロに近い箇所もあり、少し歪んで変形していることもわかる。しかし、全てのセルの内径が $5\ \mu\text{m}$ 収縮したとしても、周波数変化は $-4\ \text{MHz}$ 程度であり、当該加速管の周波数調整範囲である $\pm 20\ \text{MHz}$ よりも十分小さい。また、図 9-(a) は、ビードプル法 [11] で測ったビーム軸上の加速モード電界強度分布である。ビードプル法では、加速管内のフィールドに小さな摂動を与えるビーズ (Xバンドの場合、 $0.1\ \text{mm}$ 程度の大きさの筒) を糸に通して加速管内に入れ、その時の加速モード周波数の変化から、そのビーズのある位置におけるフィールド強度を測る。図 9-(a) を見てみると、当該電子ビーム溶接前後で差が殆どない。以上のことは、電子ビーム溶接による加速管の変形は、少なくとも加速モードにとっては、十分小さいことを意味している。尚、溶接による変形量は、溶接時の固定の仕方にもよるので、より適切にしっかりと押さえれば、変形量をより小さくすることができる。図 8-(a) にある溶接では、そのようなことはあまり気にせず固定したので、改善の余地はある。

図 9-(a) のビードプル測定は、いずれも周波数調整前であるにもかかわらず、かなりデザインに近い。これまで、ディスク積層方式で製作してきた (導波管方式の) 減衰構造付き Xバンド加速管 (進行波管) では、図 9-(b) にあるように、周波数調整前は、かなり定在波が立っていた。もちろん、周波数調整を行えば、デザイン通りの加速フィールド分布になるのだが、周波数調整前でデザインに近いというのは、驚くべきことであった。その傾向は、近年、著者が三菱重工機械システム株式会社と共同で開発している医療用小型 Cバンド加速管 (定在波管) でも見られた [12]。これは、パーツの個数が少ないことによる縦方向分割方式の一般的な特長ではないかと、著者は考えている。また、当該共同研究で開発している小型加速管は、(ほぼ) 同じ性能仕様の加速管を、従来の

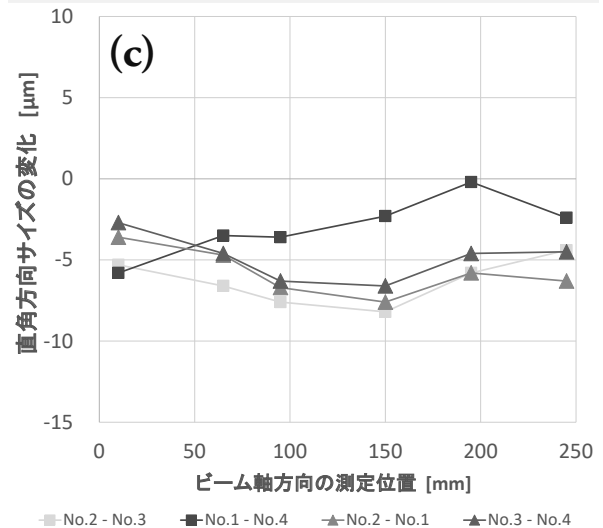
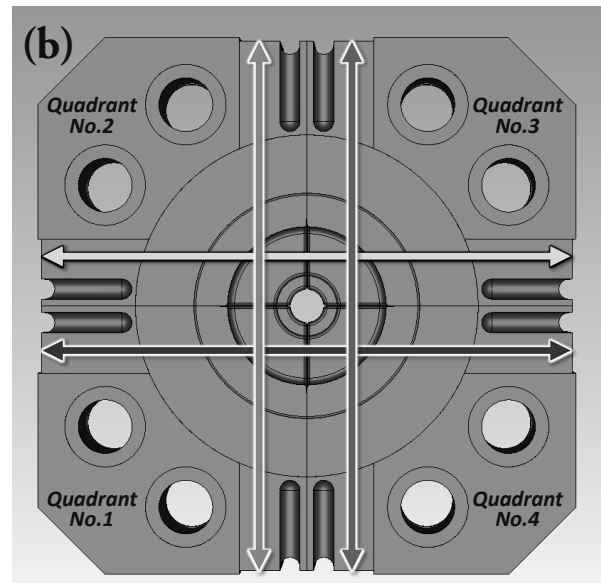
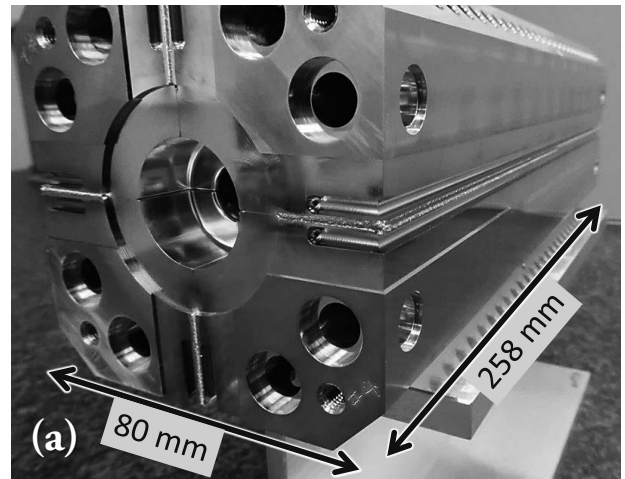


図 8 縦方向分割方式の Xバンド高電界加速管 (導波管型の減衰構造付き) の電子ビーム溶接 ([8] より抜粋)。(a) 電子ビーム溶接直後の写真。(b) ビーム軸に対して直角方向のサイズ測定箇所 (色分けした矢印で表示)。(c) 電子ビーム溶接による直角方向サイズの変化量 (負値は収縮)。プロットの色は (b) にある矢印の色に対応している。

ディスク積層方式と新しい縦方向分割方式の両方で製作することになるので、縦方向分割方式による製作コストの削減効果を量的に見積もりことが可能であり、現在、その作業を進めている。

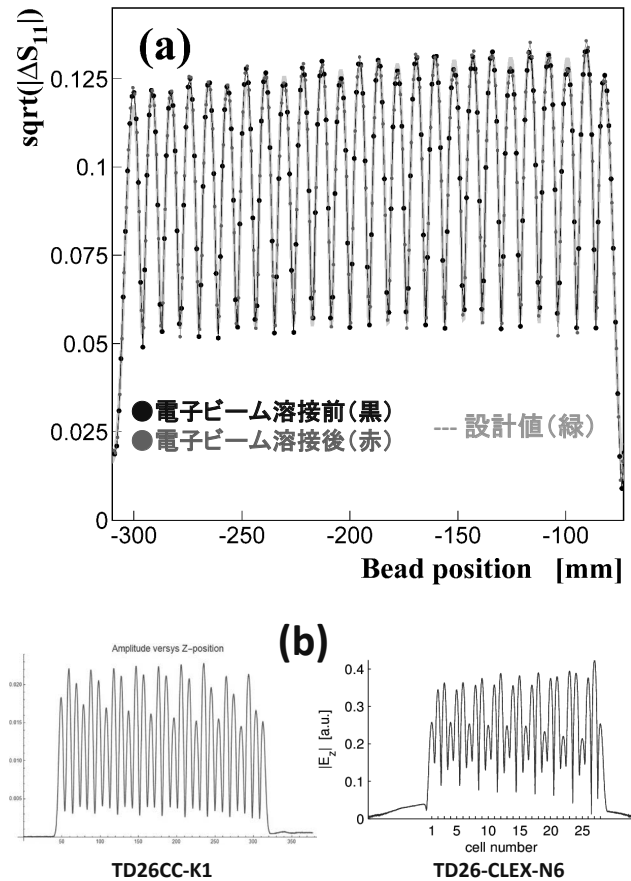


図9 CLIC用Xバンド高電界加速管(導波管方式の減衰構造付き)における、加速モードのビーム軸上電界強度分布の測定結果(ビードプル法[11]を使用)。(a)KEKが製作した縦方向分割方式加速管。(b)KEK(左図)やCERN(右図)が製作したディスク積層方式加速管。

4 応用例

(改良すれば)縦方向分割方式で高電界性能が出ることを著者たちが2017年に実証した後、様々な実用的・試験的加速構造において、縦方向分割方式が現われた。その例をいくつか紹介しよう。

4.1 CLIC

CLIC (Compact Linear Collider) [1]は、欧州の常伝導リニアコライダー計画である。そのベースライン設計では、ディスク積層方式で主線形加速管

(11.994 GHzのXバンド)を製作することになっているが、代替案として2分割タイプの縦方向分割方式も検討・設計された[13]。図10-(a)にあるのは、試験目的なので減衰構造はないが、30 cm程の長さの24セル加速管を超精密ミリング加工で製作したものである。これは、通称「CLIC-G-Open」と呼ばれている加速構造である。図10-(b)にあるように、2分割部間のギャップは1 mmと、著者が設計したもの(ギャップ0.1 mm)と比べると、かなり広い。狭いギャップでは放電を引き起こしやすいという考えから広いギャップにしているのだが、著者の経験からすると、ギャップ面に垂直な方向に大きな電界がかかるのでなければ、小さいギャップの方が(ギャップ間の)体積が小さくなるので、逆に放電しにくいと考えている。更に、ギャップが大きいと、シャント・インピーダンスも、それなりに落ちてしまう。CLIC-G-Openに関しては、CERNのXバンド大電力テストスタンドのひとつである「Xbox-2」で高電界試験が行われ(図10-(c))、ディスク積層方式の加速管に近い性能の出ることが確認された。

著者は個人的に分割部間のギャップの広さと高電界性能との関係に興味があるのだが、微小ギャップも大きいギャップも、テストスタンドにおけるビーム無しでの高電界試験では良い性能を示したので、最終的には、(ある程度の電流の)ビーム加速試験を通して評価することになるであろう。

4.2 Cool Copper Collider: C³

米国が提案している常伝導リニアコライダー: Cool Copper Collider: C³ (シー・キューブと読む)[16]の主線形加速構造(Cバンド)では、図11-(a)にある分散結合構造(Distributed Coupling Structure: DCS)という方式がとられている。加速セルの並びの横に、導波管のマニフォールドが通っており、そこから各セルにマイクロ波を給電する定在波方式である。この方式では、セル間の位相進みをどのように取っても、マイクロ波エネルギーの移動速度(群速度)は導波管内で決まるので、加速管デザインの自由度が上がる。また、マイクロ波はセルの側面から給電することになるので、ビームの通る穴の径(アイリス径)を小さくしてシャント・インピーダンスを上げることができるという特長も持っている。しかし、軸対称性を大きく破るので、リニアコライダー

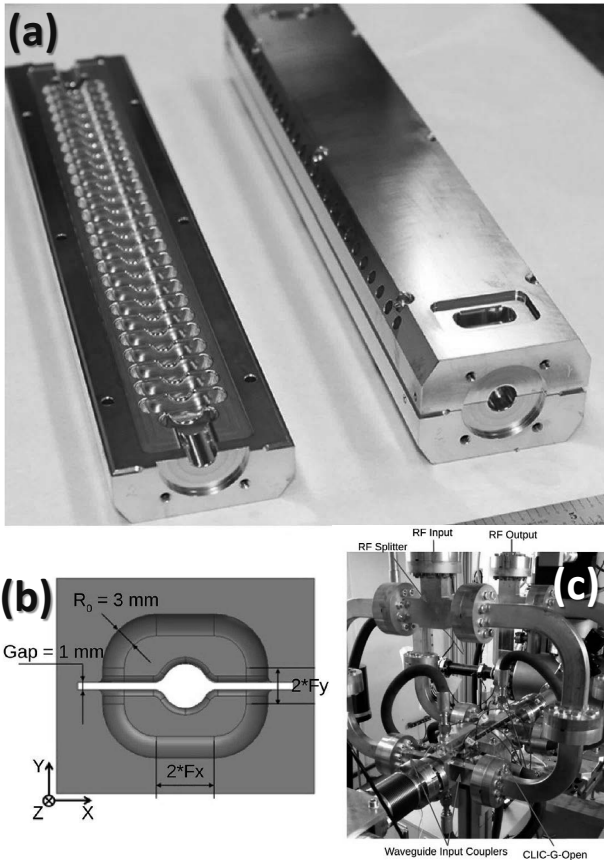


図 10 縦方向分割方式による CLIC 用 X バンド高電界加速管（周波数：11.994 GHz、減衰構造なし）。(a) 超精密ミリング加工後の写真。(b) 加速管の断面図。(c) CERN の大電力テストスタンド Xbox-2 にインストールした状態。いずれも、[13]より抜粋。

のような超低エミッタンス・ビームの加速に向いているかは疑問である。それはさておき、DCS 加速管の構造は複雑なので、これをディスク積層方式で作ろうとしたら大変である。SLAC は、ミリングや放電加工を用いて、図 11-(b) にあるような 2 分割部を製作している。放電加工で加速管を作ったという話はあまり聞かないが、以前、X バンドの DCS 加速管を放電加工で作り、2018 年、Nextef で高電界試験を行ったことがあった。リニアコライダーで要求されるような高い安定度はなかったものの、高電界加速管として使えない程悪い結果でもなかった [17]。C³ 用加速管の 2 分割構造の接合はろう付けで行っているが、その際、2 分割部のギャップを埋めるように形作ったろう材のシートを使っている。それにより、ギャップを完全に埋めてしまう狙いだが、綺麗に埋

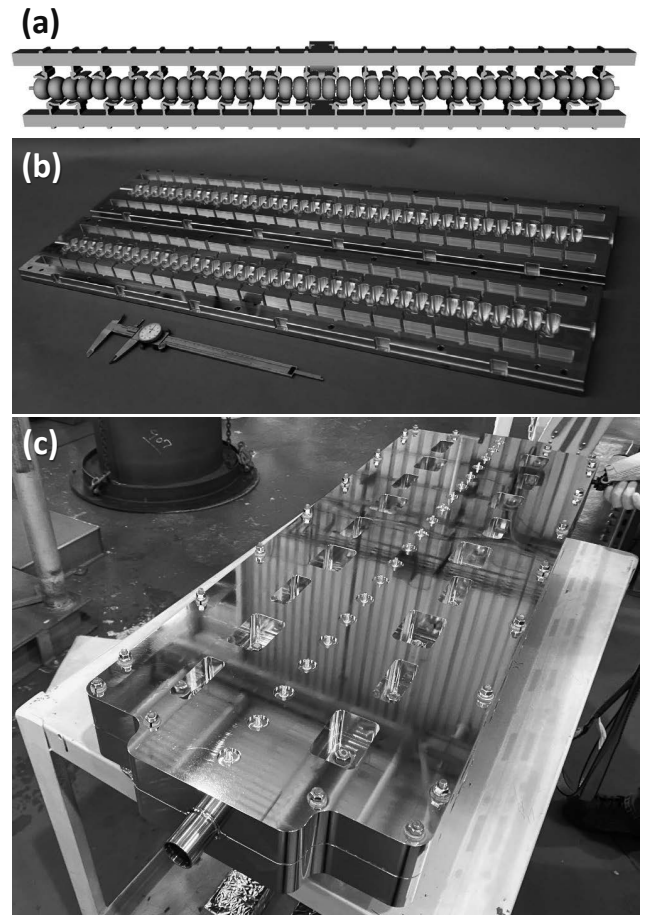


図 11 Cold Copper Collider: C³ の主加速構造。(a) 構造のソリッドモデル。(b) 超精密ミリング加工後の 2 分割部の写真。(c) ふたつの 2 分割部をろう付けした状態。(a) は [14] より、(b) と (c) は [15] より抜粋。

まるか、そして歩留まりがよいか等、課題はあると思われる。また、ギャップをろう材で埋めてしまえば、ろう材が加速フィールドのあるセル内部近くまで入り込んでしまう可能性があるため、縦方向分割方式の利点のひとつ：「加速フィールドから見えない所で構造を接合できる」が活かされない。

C³ 用 DCS 加速管は液体窒素で冷やして約 77 K で運転する。その意味で「Cool Copper」と言われている。冷やすことによって DC 抵抗が下がり、シャント・インピーダンスを上げるのだが、当然、冷やすのにコストが要るので、加速効率と冷却コストを合わせると、若干エネルギーを損することになる。しかし、大電力高周波源を削減できるということが最大の利点であり、それにより、C³ は、同じスペ

クと比較して、他のリニアコライダー（ILC[18] や CLIC）よりも安く建設・稼働できる可能性が考えられている。

4.3 医療用小型加速管

三菱重工機械システム株式会社は、医療用 C バンド小型加速管を製作してきている。約 30 cm という短い長さの中で、電子銃から出た電子のバンチ形成と 6 MeV（物質の放射化エネルギー閾値）近くまでの加速を一体構造で行う [19]。主加速部はサイドカップルという方式の陪周期構造で、全体としては安定度の高いことで知られている $\pi/2$ モードでありながら、（加速に関与しない）結合空洞がビーム軸上ではなく加速空洞の脇に位置するため、加速されるビームからは（加速効率の高い） π モード定在波管として見える。サイドカップルは小型加速管に向いている方式だが、構造が複雑であるという欠点がある。そのため、ディスク積層方式で作るのは、なかなか骨が折れる。現在、当該加速構造を 2 分割タイプの縦方向分割方式で製作するための共同研究を著者と行っている。縦方向分割方式の導入で、接合する全パーツ数は、図 12 にあるように、59 個から 25 個へと、半分以下になる。それにより、従来（図 12-(a)）の接合では 2 回に分けてろう付けする必要があるが（金ろう → 銀ろう）、新しい縦方向分割方式（図 12-(b)）では 1 回のろう付け（銀ろうのみ）で接合できる。ろう付けでは、金属のろう材が溶けるまで対象物の温度を高温炉の中で上げなければならないので（数百 °C）、時間的・金銭的成本がかかる（融点の高い金ろうでは特に）。ろう付けを 2 回から 1 回に減らせるだけでも、大量生産品の場合、大きなサステナビリティ効果があると言えよう。また、加速電界強度分布に

4.4 光陰極電子銃

今や、電子銃にまで縦方向分割方式が広がっている。まだ概念設計の段階だが、コンパクトな X バンド光陰極電子銃 [21] の例を紹介しよう。大雑把には CLIC-G-Open と同様の 2 分割構造を採用していて、2 分割間のギャップは同じく 1 mm である。光陰極電子銃では、レーザー光を陰極面に当てて光電効果により電子を放出させ、それを RF 加速空洞で引き出す仕組みになっている。通常、レーザー光は、加速空洞の側面に穴を空けてカソード面に入射するか、

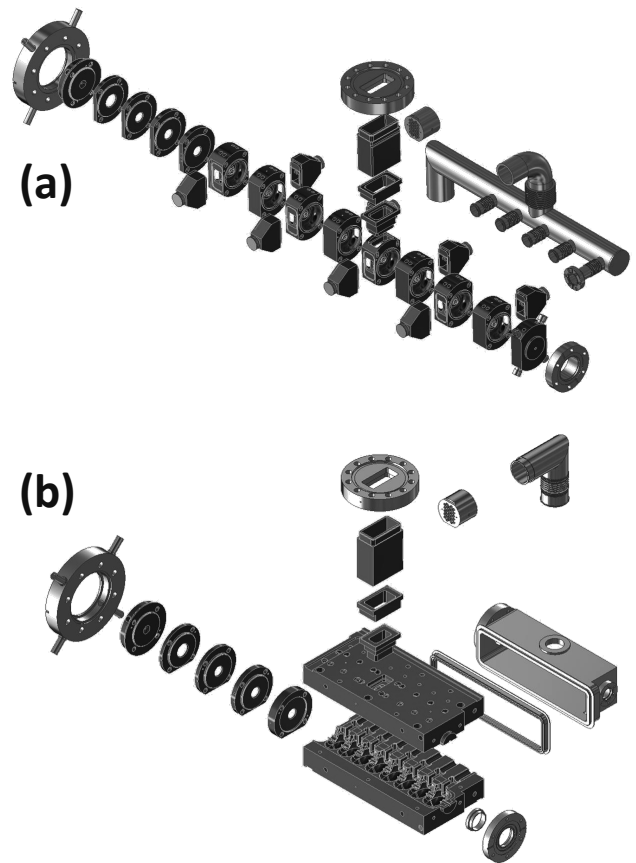


図 12 医療用小型加速管の例。全長は約 30 cm。[20] より抜粋。(a) 従来のディスク積層方式での各パーツ（59 個）。(b) 縦方向分割方式での各パーツ（25 個）。

または、（電子銃の）加速空洞内に鏡を置いて反射させてカソード面にほぼ垂直に入射する。後者が適した場合には、真空中に鏡を置く必要があるため、カソード面から取り出した電子の進行の妨げになってしまう。そこで、レーザー光を 2 分割間のギャップを通して入射することが提案された。その場合、真空中に鏡を置くことなく、垂直入射に近い角度が実現できる。尚、ギャップの 1 mm は、レーザーの波長より何桁も大きいので、単一スリット回折の効果は無視できる。今後、その試作機の製作・試験が楽しみである。

第 III 部

より高い加速周波数へ

1 なぜ周波数を上げるのか

加速空洞の内径などの加速構造の典型的な大きさは、加速周波数に反比例するので、より高い加速周波数では加速構造はより小さくなる。線形加速器では、これまで S バンド (2 ~ 4 GHz、波長: 7.5 ~ 15 cm) の加速周波数が広く使われてきた。例えば、KEK の電子陽電子入射器や ATF の入射器では、S バンド加速管が使われてきている。近年、S バンドの 2 倍の周波数である C バンド (4 ~ 8 GHz、波長: 3.7 ~ 7.5 cm) が全世界的に使われだした。自由電子レーザー加速器では、日本の SACLA、欧州の SwissFEL、中国の SXFEL で使われている。また、東北で建設が進んでいる次世代型放射光施設ナノテラスの入射器も C バンドである。

C バンドのさらに 2 倍の周波数である X バンド (8 ~ 12 GHz、波長: 2.5 ~ 3.7 cm) は、以前は一部で展開されてきたにすぎなかった。例えば、橋梁のような屋外の大規模インフラの非破壊検査のために東京大学/旧上坂研究室で開発された小型高エネルギー X 線発生装置 [22] や、X バンド高電界加速管の開発のためのテストスタンド (CERN/CLIC の X-Box[23]、SLAC の XTA[24]、KEK の Nextef[25] など) である。しかし、近年は、X バンドベースの装置や施設が世界各地で増えてきた。例えば、米国スタンフォード大学病院が中心となって開発中の次世代放射線治療装置 PHASER[26]、欧州で開発されて現在試験運転中の波長可変・テーブルトップサイズ単色硬 X 線発生装置 Smart*Light[27]、豪州メルボルン大学で建設が進んでいる加速器試験施設 X-LAB[28]、伊国フラスカティ研究所 (INFN-LNF - Laboratori Nazionali di Frascati) の EuPRAXIA@SPARC.LAB[29] などで X バンド加速管が使われだしている。少し前は「C バンド花盛り」の状態であったが、今や「X バンド花盛り」である。そして、もし CLIC が実現すれば、X バンドを大型加速器で本格的に使う最初のケースとなる。X バンド加速管がどれくらいコンパクトかは、図 13 を見ていただければ一目瞭然である。



図 13 KEK 電子陽電子入射器の地下トンネル内にて撮影。S バンド加速管は、実際に加速器の運転で使用しているもの。その前で著者が担いでいるのは、CLIC 用 X バンド加速管。どちらも 1 本で 40 MeV (定格) 加速する。

高い加速周波数を採用するメリットは、加速器がコンパクトになるだけでなく、加速効率が上がることにもある。構造が小さくなると、ビーム軸上の加速電磁界のエネルギー密度が上がり、加速効率は上がる方向になる。しかし一方で、周波数が上がると、金属表面における高周波表皮抵抗 (R_{surf}) が大きくなり、マイクロ波の電力損失が増えてしまう。実際に加速効率が上がるかどうかは、それらふたつのファクターの比で決まる。加速器科学では、単位長さあたりのシャント・インピーダンス (R_{sh}/L) で加速効率を定量的に表わす。加速勾配 E_{acc} と、加速構造の単位長さあたりに投入するマイクロ波電力 P_{in}/L とは、以下の関係にある：

$$E_{\text{acc}} = \sqrt{\frac{R_{\text{sh}}}{L} \times \frac{P_{\text{in}}}{L}} \quad (1)$$

つまり、同じ加速勾配を立てるにも、 R_{sh}/L が 2 倍大きければ、投入するマイクロ波電力は半分で済む。その意味で R_{sh}/L を加速効率と呼んでいる。常伝導では、 R_{surf} の周波数 (f) 依存性が比較的弱い (室温では $R_{\text{surf}} \propto \sqrt{f}$)、 R_{sh}/L は加速周波数の平方根に比例して大きくなる*2：

$$\frac{R_{\text{sh}}}{L} \propto \sqrt{f} \quad (2)$$

*2 一方、超伝導の場合、高い周波数では R_{surf} の周波数依存性が強い (室温では $R_{\text{surf}} \propto f^2$)、ある仮定のもとでは 1.3 GHz で加速効率が最高となり、それより周波数が高くなると加速効率は単調減少する。

つまり、Xバンド加速管(11.424 GHz)では、相似形の内部構造を持つSバンド加速管(2.856 GHz)と比べて、同じ加速勾配を立てるために必要な(単位長さあたりに投入する)マイクロ波電力は半分で済むことになる。また、式(1)からわかるように、2倍の加速勾配を立てるためには4倍のマイクロ波電力が必要になる。高い加速勾配が必要であれば、現実的にはシャント・インピーダンスも上げなければならない。高い加速周波数はそのためにも重要である。

高い加速周波数を採用するデメリットとしては、まず、加速構造の製作などにおいて高い精度が要求されることがある。しかし、例えばCLIC用Xバンド加速管で要求されるミクロンオーダーの加工精度の達成は、現在の精密加工技術であれば難しいことではない。また、加速器コンポーネントのアライメントで要求される精度も厳しくなる(CLICのXバンド加速管のアライメント要求精度は10 μm)。その他、大電力高周波源の効率や入手性の問題もある。

2 どこまで行けるのか

式(2)にあるように、常伝導金属製空洞では、周波数を上げるほど加速効率も上がる(超伝導空洞ではそうならない)。そこで、SLACの高電界加速研究チームは、図14にある110 GHz(波長:2.7 mm)の単セル型試験空洞を製作した[30]。2個の半割れ構造を超精密ミリング加工で作成し、それらを接合する縦方向分割方式を用いている。試験空洞の内径は2 mm強と、非常に小さい。シャント・インピーダンス R_{sh}/L はXバンドの場合の約3倍になる。110 GHzの大電力マイクロ波源としては、米国MITの共同研究者のジャイロトロンを使っている。ジャイロトロン(加速器でよく使う)導波管で輸送すると電力損失が大き過ぎるが、数百 GHz くらいになると光学的性質が強くなるので、レーザーでよくあるガウシアン・ビームの形で自由空間を輸送できる。それをホーンカプラーで受け、加速モード(TM₀₁)に変換して試験空洞に投入する。ジャイロトロンは精密制御が難しいため、物体の加熱には向いているが、加速器用途には向いていない。MITでの高電界試験は、システムを改造しながら進めていて、加速勾配230 MV/mに到達したとの報告があった[31]。

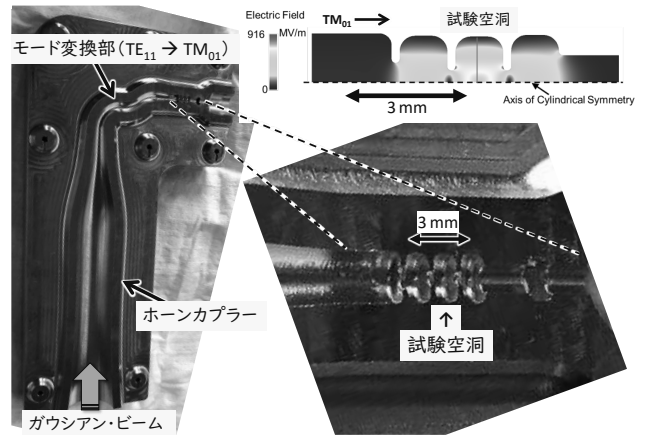


図14 SLACが製作した110 GHz 試験空洞 ([32]より抜粋)。

ここで、金属製空洞を使って、どこまで高い周波数に行けるかを加速効率の観点から考えてみる。まず、周波数を更に上げていくと、式(2)通りには加速効率は上がらなくなる。低温の場合と同様に、周波数が非常に高くなった場合も、表皮効果の深さが金属内自由電子の平均自由行程に近づき、異常表皮効果が生じる。その場合、 R_{surf} は周波数の平方根に比例するのではなく、(2/3)乗に比例して大きくなり、その結果、加速効率の周波数依存性は、

$$\frac{R_{sh}}{L} \propto f^{1/3} \quad (3)$$

となる。式(2)と比べると、周波数を上げた場合の加速効率の上がり方が鈍くなる。一方、室温における銅内自由電子の平均自由行程は約40 nmであり、周波数500 GHzにおける銅の古典的表皮効果の深さは約90 nmである。また、参考文献[33]の実験によると、750 GHz ~ 1.1 THz (= 1100 GHz)の領域は、古典的表皮効果から異常表皮効果への遷移領域とのことである。さらに、そのような高い周波数領域の加速構造の製作は、急激に難しくなる。以上のことから、少なくともマイクロ波の定義の上限である300 GHzまでは、金属製空洞を使うことに意義があると言える。300 GHzの試験空洞は、図14の110 GHzを単にスケールさせたものだが、試験空洞の内径は1 mm弱であり、超精密製作技術の限界に挑戦することになる。SLACはこの試験空洞を、放電加工で見事に製作した。その加速空洞の各種パラメータを表1に示す。

表 1 300 GHz 試験空洞の各種パラメータ

空洞内径	~1 mm
アイリス内径	~0.2 mm
Q_0	~3000
シャント抵抗	600 M Ω /m
加速勾配	~350 MV/m (RF 100 kW 投入時)
充填時間	1.6 ns

ここで、表 1 にある 300 MV/m もの高い加速勾配を金属製空洞内で立てても大丈夫であろうか、という疑問が出てくる。米国 SLAC 国立加速器研究所の FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests) で行われた実験では、120 ~ 140 GHz の周波数に対応した加速管に電子ビームを入射して、その内部に高電界を立てた。理論的考察と合わせると、加速勾配 300 MV/m くらいまでは、加速構造は深刻な損傷を受けないと結論付けている [34]。しかし、加速構造が壊れないとしても、ブレークダウン (真空放電) を起こして安定的には粒子加速をできないのではないかという疑問もある。X バンドの 100 MV/m の加速勾配でも問題になるくらいなので、当然の疑問である。これに関しては、RF パルスが加速構造に印加されている時の表面温度上昇に着目する。金属表面がマイクロ波にさらされると表面電流が流れ (CLIC 用 X バンド加速管の場合、最大 10^8 A/cm² 級で、現代の大規模集積回路中の電流密度程度 [3])、その間、金属表面 (表皮効果の深さ程度) で温度が上がり、RF パルスがなくなると戻るといったパルス加熱が起こる。これが 1 秒間に数十回から数百回繰り返され、材質の変化や破壊、また何かしらの生成によって真空放電がトリガーされて、ブレークダウンに至る。詳細メカニズムは未だ解明されていないが、電界と磁界の強度を独立に制御できる特殊な RF 空洞 Dual-mode cavity を使った SLAC の高電界試験で判明したことは、パルス加熱による表面温度上昇は、表面電界強度とともに、ブレークダウン率と強い相関のあることである [35]。CLIC 用 X バンド加速管で 100 MV/m の加速勾配を立てた場合、パルス加熱で数十度もの温度上昇になる。特に温度上昇が 50 度以上になると、X バンド加速管

では高電界性能の劣化が顕著になることが経験上わかっている。一方、フィールドの充填時間は周波数の $(-3/2)$ 乗に比例するため、300 GHz の試験空洞では、 R_{surf} が上がっても RF パルス幅がそれ以上に短くなる。そのため、パルス加熱による温度上昇は数度で済む [30]。これにより、高い高電界性能が期待できる。300 GHz では、常伝導高周波加速として、これまでにない超短 RF パルスによる加速が可能であることは、コンパクト性、高加速効率と並ぶ、第三の特長である。最先端の研究では、この特長は、常伝導加速器で非常に高い加速勾配を実現するためのキーポイントとなる可能性が指摘されている [36]。

本稿では 300 GHz をマイクロ波の上限周波数と定義している。その意味で著者は、300 GHz を「究極のマイクロ波加速」と位置づけている。そして、300 GHz くらいまで行くと、レーザー駆動のテラヘルツ光源が加速器に使える可能性が出て来る。300 GHz のジャイロトロンも存在するが、とても高価で、扱いも難しい。殆ど進歩していない電子管関係よりは、日進月歩のレーザー技術をベースにした大電力高周波源の開発が望まれる。大電力高周波源は本稿のスコープ外なので詳細は割愛するが、数百 GHz (サブテラヘルツ) 帯のレーザー駆動大電力波源の開発がテラヘルツ業界で進んでいる。著者は、近い将来、金属製空洞としては史上最高周波数での高電界試験を実現したいと願っている。

3 どこを目指すのか

数百 GHz 帯の金属製常伝導加速空洞は、これまでのマイクロ波加速の単なる延長なので、大電力源さえ開発できれば、すぐにでも高エネルギー実験に応用したいところである。しかし、実際はそう簡単ではない。加速器は加速構造のみから成っているのではなく、電磁石やビーム診断系など、さまざまなコンポーネントの統合体である。高い加速周波数を高エネルギー加速器で採用する際の問題は、著者が思いつくだけでも下記のように多くある：

1. ビーム軌道の精密制御
2. ビームの精密測定・診断
3. 加速器コンポーネントの精密アライメント
4. バンチ圧縮

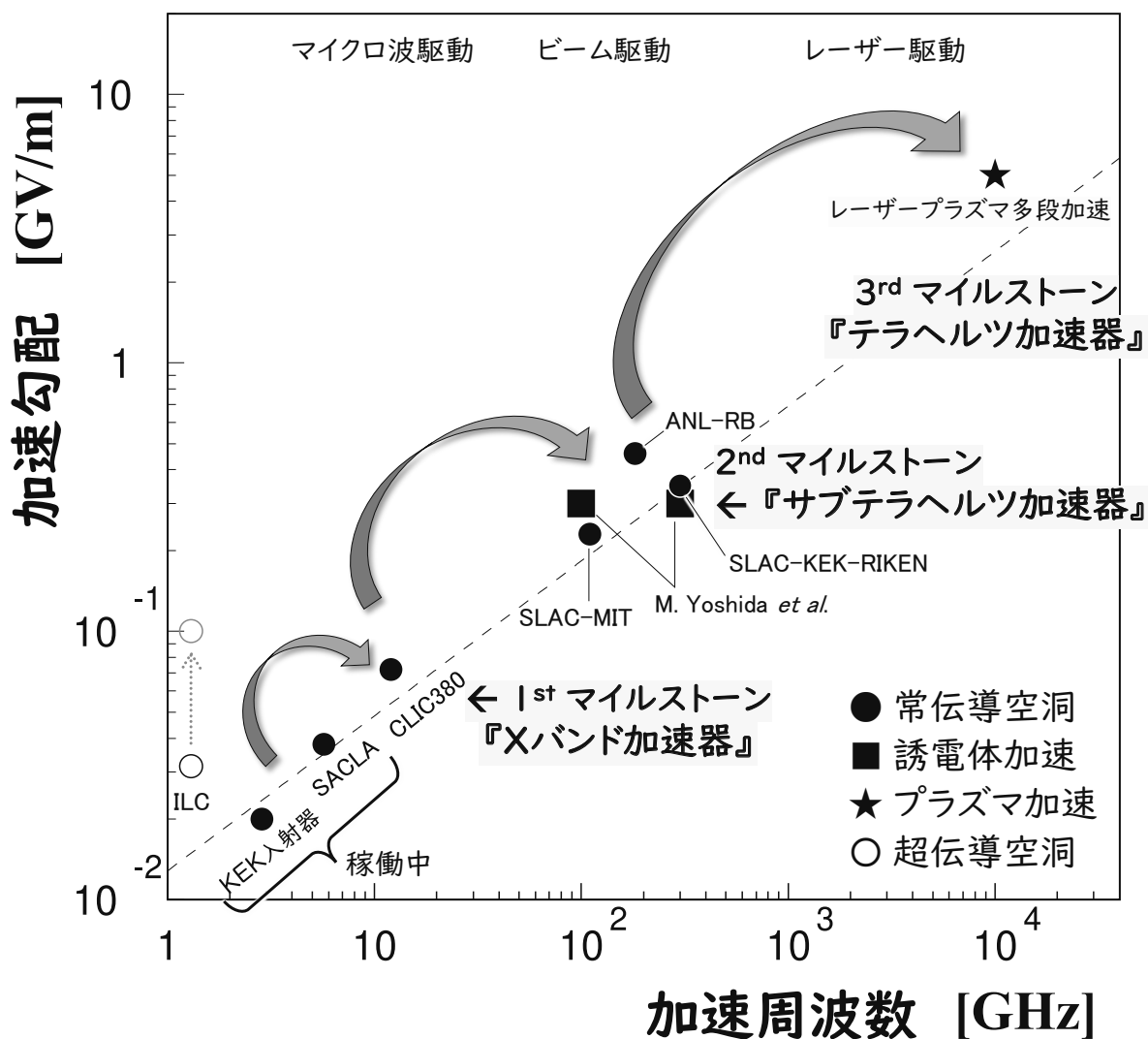


図 15 高エネルギー高電界加速技術の展望。プロットは、設計値、目標値、または到達値である。破線は $E_{acc} \propto f^n$ によるフィット。レーザープラズマ多段加速のプロットは、比較的安定して電子を加速できるプラズマ振動数と集光光学系を含む平均加速勾配。

5. ビーム不安定性を起こす航跡場の抑制・除去
6. 低エミッタンスの維持
7. 大電流加速に起因する諸問題

上記の問題は、加速周波数が上がって加速器が小さくなることによって生じる、または、より難しくなるものである。いきなり、これまでの百分の一の大きさの加速構造を扱おうとしても、無理がある。そこで、まずは『高エネルギー・Xバンド加速器』（波長：数センチ）を展開して、高度なビーム制御・診断・解析手法などを開発・発展させ、上記の問題などへ対応するための技術を磨く。並行して、次世代の加速構造のための研究開発も進める。そして、時

期がきたら『高エネルギー・サブテラヘルツ加速器』（波長：数ミリ）へ飛躍する。これを繰り返すことにより、周波数と加速勾配を桁で上げていき、将来は『高エネルギー・テラヘルツ加速器』（波長：数十マイクロン）へ到達することも可能であろう。ここで、上記1～7の全部または一部は、Xバンドからテラヘルツ加速器までの共通課題である。この展望を図15に示す。まずはXバンドで肩慣らしし、サブテラヘルツで調子を出して、満を持してテラヘルツへ、といった「ホップ-ステップ-ジャンプ型」の展望となっている。ここで「飛躍」は重要である。連続的なアップグレードでは、その速度が（限りなく）遅くなり、いつまで経ってもあるレベルを超えられなくなって

しまうであろう。思い切って飛躍するのである。

ここで、5 km の加速区間におけるエネルギーゲインを考えてみる。加速勾配 100 MV/m の X バンド加速器で 500 GeV、350 MV/m のサブテラヘルツ加速器で 1.75 TeV、5 GV/m のテラヘルツ加速器で 25 TeV である。本稿で示す展望は、十数 TeV 領域の物理実験実現へのロードマップ（案）でもある*3。また、その過程で生まれる加速器の超小型化の技術は、医療・産業分野にも革新をもたらすことは確実である。

しかしながら、その道のりは険しく遠い。また、乗り越えなければならぬ高い壁や山も多くあろう。ここで忘れてはならないことは、現在の我々がどのような選択肢を取ろうとも、未来は茨の道であることである。そうであれば、より大きく未来に展望が開けている方向へ進むべきであると主張したい。途中、紆余曲折があろうとも、方向性を失わないことである。そのためには、過去・現在・未来のつながりを意識できるような、しっかりとした展望を持つ必要があると考え、その例をここに示してみた。この他にも様々な展望がありうらと思うが、この展望が、または、この展望に基づく何かが、これからの高エネルギー加速器を導ければと願っている。

参考文献

- [1] <https://clic.cern/>.
- [2] N. Shafqat, et al.: “Fabrication, conditioning and installation of the 1st high gradient S-band accelerating module for the energy upgrade of the FERMI free electron laser linac”, Nucl. Instrum. Meth. A, **1055**, p. 168543 (2023).
- [3] 横川 慎二: “LSI 微細 Cu 配線におけるエレクトロマイグレーション信頼性に関する研究”, 学位論文 (電気通信大学) (2008).
- [4] 阿部 哲郎: “微細構造による導体表面電磁場の変化に関する研究”, 第 8 回日本加速器学会年会 (2011). TUPS086.
- [5] 阿部 哲郎、他: “高電界 X バンド単セル試験空洞の 4 分割方式による製作”, 第 9 回日本加速器学会年会 (2012). THPS095.
- [6] 阿部 哲郎、他: “4 分割方式による高電界試験用 X バンド単セル空洞の製作”, 第 11 回日本加速器学会年会 (2014). SUP042.
- [7] 阿部 哲郎、他: “4 分割方式 X バンド単セル型空洞の高電界試験の結果”, 第 14 回日本加速器学会年会 (2017). WEP039.
- [8] 阿部 哲郎、他: “改良 4 分割方式 X バンド高電界加速管の製作”, 第 16 回日本加速器学会年会 (2019). WEOH04.
- [9] R. Peacock: “Experimental Investigation of Vacuum Breakdown Triggering Mechanisms in a DC Electrode System”, PhD thesis, Lancaster University (2023).
- [10] V. A. Dolgashev, L. Faillace, B. Spataro, S. Tantawi and R. Bonifazi: “High-gradient rf tests of welded X-band accelerating cavities”, Phys. Rev. Accel. Beams, **24**, 8, p. 081002 (2021).
- [11] L. C. Maier, Jr. and J. C. Slater: “Field Strength Measurements in Resonant Cavities”, J. Appl. Phys., **23**, p. 68 (1952).
- [12] 阿部 哲郎、肥後 壽泰、木村 優志、菅野 東明、重岡 伸之、原 博史、比嘉 究作: “縦方向分割方式 C バンド小型加速管の設計・試験”, 第 21 回日本加速器学会年会 (2024). FROT05.
- [13] T. Argyropoulos, et al.: “Design, fabrication, and high-gradient testing of an X-band, traveling-wave accelerating structure milled from copper halves”, Phys. Rev. Accel. Beams, **21**, 6, p. 061001 (2018).
- [14] Z. Li: “C³ Structure Wakefield Suppression”, presented at Cold Copper Accelerator Technology and Application Workshop (2023).
- [15] A. Dhar: “Mechanical Fabrication and Vibrational Analysis of Split Block Accelerating Structures”, presented at Cold Copper Accelerator Technology and Application Workshop (2023).

*3 10 TeV くらいになると、衝突点におけるビームサイズは Oide limit[37] で決まってしまうので、それ以上の高エネルギー・コライダーで高いルミノシティが欲しければ、ハドロン・コライダーかミューオン・コライダーが必要であろう。

- [16] <https://web.slac.stanford.edu/c3/>.
- [17] S. Tantawi: “SLAC Research Activities on Normal Conducting RF Accelerators”, presented at International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2019) (2019).
- [18] <https://www2.kek.jp/ilc/>.
- [19] 神納 祐一郎: “加速器医療応用 4 - 2 ・医療応用 電子ビーム動体追尾・画像誘導放射線治療装置 VERO 用電子リニアック開発の実際例”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'12 (2012).
- [20] 木村 優志、菅野 東明、重岡 伸之、原 博史、比嘉 究作、阿部 哲郎、肥後 壽泰: “縦方向分割方式 C バンド小型加速管の製作”, 第 21 回日本加速器学会年会 (2024). FRP042.
- [21] T. Lucas, X. Stragier, P. Mutsaers and O. Luiten: “RF design of a compact, X-band travelling-wave RF photogun made from halves”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **1013**, p. 165651 (2021).
- [22] 上坂 充, 他: “可搬型 950 keV/3.95 MeV X バンド電子ライナック X 線源による産業/ 社会インフラ診断”, 「加速器」, **12**, p. 142 (2015).
- [23] M. Boronat: “CERN’ s High Gradient X-Band Test Stands: Status and Update”, presented at the 2023 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2023) (2023).
- [24] C. Limborg-Deprey, et al.: “An X-band Gun Test Area at SLAC”, Conf. Proc. C, **110328**, pp. 133–135 (2011).
- [25] S. Matsumoto, T. Abe, Y. Higashi, T. Higo and Y. Du: “High gradient test at Nextef and high-power long-term operation of devices”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **657**, 1, pp. 160–167 (2011). X-Band Structures, Beam Dynamics and Sources Workshop (XB-10).
- [26] P. G. Maxim, S. G. Tantawi and B. W. Loo: “PHASER: A platform for clinical translation of FLASH cancer radiotherapy”, Radiotherapy and Oncology, **139**, pp. 28–33 (2019). FLASH radiotherapy International Workshop.
- [27] P. Mutsaers: “Smart*Light: A compact ICS source”, presented at the 15th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2023) (2023).
- [28] M. Volpi: “X-LAB: A VERY HIGH-CAPACITY X-BAND RF TEST STAND FACILITY AT THE UNIVERSITY OF MELBOURNE”, presented at the 2024 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2024) (2024).
- [29] F. Cardelli: “X-band activities for the EuPRAXIA@SPARC-LAB Linac”, presented at the 2024 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2024) (2024).
- [30] E. A. Nanni: “Recent Experiments with High-Gradient THz Accelerators”, presented at the 12th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2019) (2019).
- [31] M. Othman: “High Power Tests of Millimeter Wave Accelerators”, presented at the 13th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2021) (2021).
- [32] 阿部 哲郎: “高エネルギー常伝導高電界加速技術の展望”, 高エネルギーニュース, **41**, 3, p. 95 (2022).
- [33] 林 賢宏, 永井 翔太郎, 真田 篤志: “0.75-1.1THz における常温異常表皮効果の実験的評価”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, **2013**, 1, p. 110 (2013).
- [34] M. Dal Forno, V. Dolgashev, G. Bowden, C. Clarke, M. Hogan, D. McCormick, A. Novokhatski, B. Spataro, S. Weathersby and S. G. Tantawi: “RF Breakdown Tests of mm-Wave Metallic Accelerating Structures”, Phys. Rev. Accel. Beams, **19**, 1, p. 011301 (2016).

- [35] F. Wang, C. Adolphsen and C. Nantista: “Performance Limiting Effects in X-Band Accelerators”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **14**, p. 010401 (2011). [Addendum: *Phys. Rev. ST Accel. Beams*15,120402(2012)].
- [36] D. Merenich, et al.: “Breakdown insensitive acceleration regime in a metamaterial accelerating structure”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **27**, 4, p. 041301 (2024).
- [37] K. Oide: “Synchrotron Radiation Limit on the Focusing of Electron Beams”, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, pp. 1713–1715 (1988).

Higher frequency, more compact

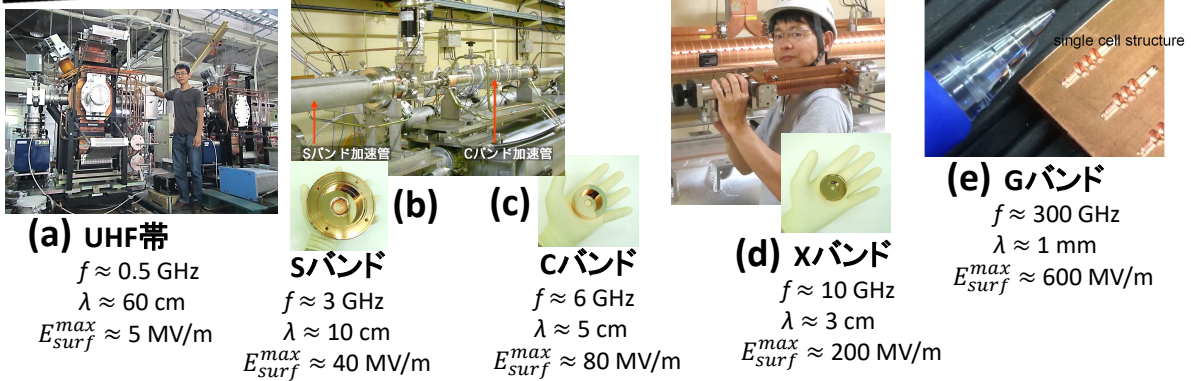


図2 (陽) 電子加速器用の常伝導加速構造の例。(a) SuperKEKB 陽電子ダンピングリング加速器用の509 MHz 単セル空洞。(b) KEK 電子陽電子入射器で使用しているSバンド加速管。(c) KEK 電子陽電子入射器で開発していたCバンド加速管。(d) CLIC[1] 用Xバンド高電界加速管のプロトタイプ。(e) SLAC が試作した300 GHz 試験空洞。 f 、 λ 、 E_{surf}^{max} は、それぞれ典型的な、加速モード周波数、その自由空間内波長、空洞内表面上の最高電界強度である。(a) は円形加速器用(連続波)、(b) から(e) は線形加速器用(パルス波)なので、(a) と(b)~(e) を単純比較はできないことに注意。

すことができ、数 GeV 以上の高エネルギー加速器が作れるのである。

そのようなマイクロ波加速の装置(加速空洞)の大きさは、大雑把に言ってその波長くらいのサイズとなる。つまり、300 MHz を使えば1 m 程度、300 GHz を使えば1 mm 程度のサイズである。これくらいのサイズであれば、製造上、大きな困難はない。逆に言えば、加速空洞1台で数十 m もの大きさがあれば巨大過ぎて製作困難である。また、0.1 mm より小さい加速空洞の製作は野心的過ぎる。図2に、実際に製造された500 MHz から300 GHz の常伝導加速構造の例を示す。ちょうど、マイクロ波の定義のほぼ下限から上限まで存在することになる。加速構造の周波数は、加速器の目的、その時代の技術、既存の加速器で使われている周波数等により決まる。ちなみに、超伝導加速器の周波数は殆ど1.3 GHz であり、その空洞形状も殆ど決まっている。一方、常伝導加速構造には、様々な周波数、様々な形状がある。多様性のあることが、常伝導加速器の特長と魅力であると言える。

本稿は、2024年9月開催の高エネルギー加速器セミナー OHO (OHO'24) のテキストのひとつであり、

電子(または陽電子)の常伝導高周波加速における比較的新しい技術や展望に関する講義である。高周波(本講義ではマイクロ波と同義)を使った常伝導加速器は古くからある。例えば、本格的・近代的な最初の電子線形加速器として知られているのが、スタンフォード大学で1947年に建設されたMark I 加速器である。それは、2.856 GHz のディスク・ロード型加速管(図1-(b))を使っており、現在でも全世界で広く使われている加速管方式である。このことは、70年以上本質的には進化していないとも言ってしまう。ディスク・ロード型加速管が、そして、マイクロ波加速が、とてもよくできた加速方式であるという理由もあろう。加速器の使命は、実験や測定、治療等のために必要な高品質ビームを作り、供給することであるので、既に良くできた技術があれば、それを凌駕するものをあえて考えなくてもよいであろう。しかし、停滞した技術は退化に等しいことを忘れてはならない。停滞しては、必ずどこかで行き詰まる。現在の高エネルギー加速器は、そのような状況にあるのではなからうか。それを打開するためには、既存の技術を革新的に進歩させるか、または、(全く)新しい技術を開発するかである。後者はOHO'24の他

の講師に任せるとして、本稿では、前者の取り組みの内、常伝導の電子線形加速技術に関する研究開発について、例を紹介する。

第 II 部

新しい加速管製作法

1 従来の製作法

まずは、従来の製作法について、KEK における X バンド加速管製作のレシピを基に説明しよう。第一段階は、図 3-(a) にあるようなディスクを作ることである。材料としては、通常は純銅（無酸素銅）を使う。正確な共振周波数や高い Q 値、金属接合するための良好な表面状態を得るために、超精密加工で切削する。例えば、20 個のセルから成る加速管であれば、ディスクは基本的に 20 枚必要となる。切削加工では、工具の刃で金属表面を削り取るので、マイクロな視点では、ショベルカーやブルドーザーで大地をならすようなものである。従って、切削加工された表面は、マイクロな視点では凸凹やバリがあり、機械的なダメージは数ミクロン以上深くまで影響していることもある。そこで、図 3-(b) にあるように、化学研磨により表面を平滑にする。これは、例えば銅の場合、酸性の液体で表層を溶かすのであるが、きちんとしたレシピで行わないと、逆に表面が荒れるので注意が必要である。その後、ディスクを積層（スタック）して、金属接合する（この製作方式を「ディスク積層方式」と呼ぼう）。金属接合法としては、接合媒体としてろう材を使うろう付けがよく使われるが、X バンド高電界加速管の場合、金属接合による様々な変化が小さくなるよう、（接合媒体を使わない）拡散接合を用いることがある。拡散接合の場合、ディスクとディスクの接合面の間に 1 ミクロンの隙間もあってはならない。少しでも隙間があると、機械的には一体化しても、真空リークを起こしてしまうことがある。加速管も真空容器なので、超高真空を保持できなければならない。そこで、ディスク表面は、平均粗さ (R_a): 数十 nm、平面度: $1\mu\text{m}$ という高精度で超精密加工するのである。また、拡散接合の場合、銅の融点近くまで温度を上げなければならないので、難易度とコストは高い。拡散接合する時の姿

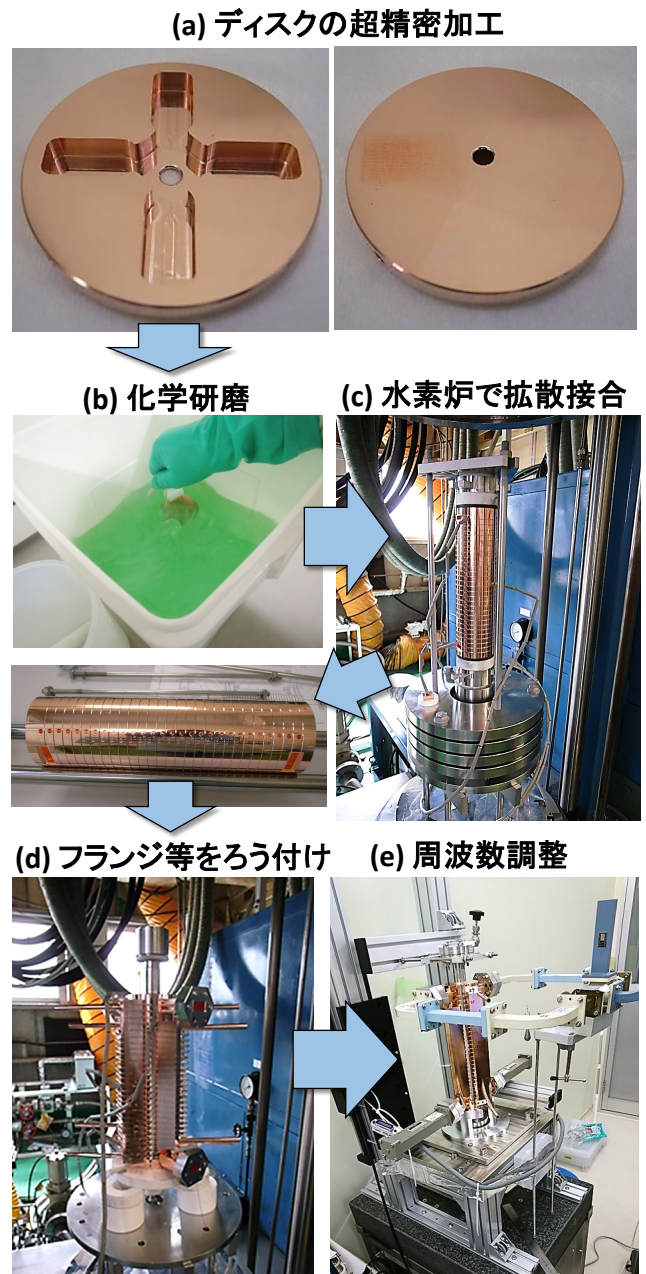


図 3 ディスク積層方式による加速管製作法の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

勢は、図 3-(c) にあるように縦置きであり、最上部に 25 kg の重りを乗せて、約 0.1 MPa の圧力をかける。そして、 1020°C (物温) を 1 時間保持すると、金属の拡散現象により接合されるのである。その後、フランジ等をろう付けし (図 3-(d))、最後に周波数調整を行う (図 3-(e))。周波数調整とは、空洞の形状を少し変えて、その共振周波数を調整することである。空洞の側面を押して潰せば周波数は上がり、逆

に引っ張って広げれば周波数は下がる。空洞の加工精度を十分上げれば、周波数調整を不要とすることは可能である。実際、海外では、そのような仕様で加速管を作っているプロジェクトもある [2]。しかし、その場合は加工に時間的・金銭的コストがかかり、本当に得をするかは、慎重に、且つ総合的に考えなければならない。

以上のように、加速管を作るのはかなり大変である。価格的には、(大雑把に言って) 加速管1本で高級車1台分くらいである。それでは、加速管をもっと簡単に作る方法はないか、それを次節から解説する。

2 縦方向分割方式とは

図3にあるディスク積層方式とは、ある意味直交するものとして「縦方向分割方式」がある。ディスク積層式では、ビーム軸に垂直な平面で加速管が分割されるのに対して、縦方向分割方式では、図4にあるように、ビーム軸に平行な平面で分割される。「縦」という言葉は、加速器業界では通常、ビーム進行方向を意味するが、「縦方向分割」と言うと、分割面が縦方向に平行であるのか、それとも、縦方向に並んでいるのかよくわからないが、そもそも、縦方向分割方式という言葉は著者たちが付けた名前であり、まだ一般的ではないので、定義だと思って、是非皆さんで使っていただきたい*1。ちなみに、著者はその英語訳を「Longitudinally-split structure」としてみた。

さて、縦方向分割方式の最大の利点は何かということ、パーツの個数の少なさである。ディスク積層方式では、パーツ(ディスク)の個数は、セルの個数にほぼ等しく、数十個、またはそれ以上である。一方、縦方向分割方式では、セルの個数にかかわらず、加速管主要部のパーツの個数は、通常、2個(2分割)または4個(4分割)である。この圧倒的に少ないパーツ数が加速管製作やその性能に及ぼす影響を、著者たちは研究している。その他の利点としては、加速モード電磁界による表面電流が、いかなる接合部も渡らないことがある。その表面電流はビーム軸の方向に流れるのだが、ディスク積層方式では、セルとセルの間の接合面を少なくともセルの個数(数十箇所以上)渡ることになる。低い加速勾配で運転する

加速管なら問題にはならないであろうが、加速勾配 100 MV/m 級以上の高電界加速管では、表面電流は最大 10^8 A/cm² 級で、現代の大規模集積回路中の電流密度程度である [3]。そのような状況では、エレクトロ・マイグレーション等により、金属表面が機械的に破壊される可能性が知られている。そして、そのような大表面電流により引き起こされたと考えられる加速管内の接合箇所における不具合が、CLIC 用 X バンド加速管(ディスク積層方式で製作)の高電界試験後のマイクロ観察で見つかったことがある(但し、高電界性能との関係は明らかにはなっていない)。その他、加速フィールドから見えない所で構造を接合できる利点もある。縦方向分割方式は、特に高電界加速管の高電界性能の向上にも繋がるのではないかと著者は考えている。

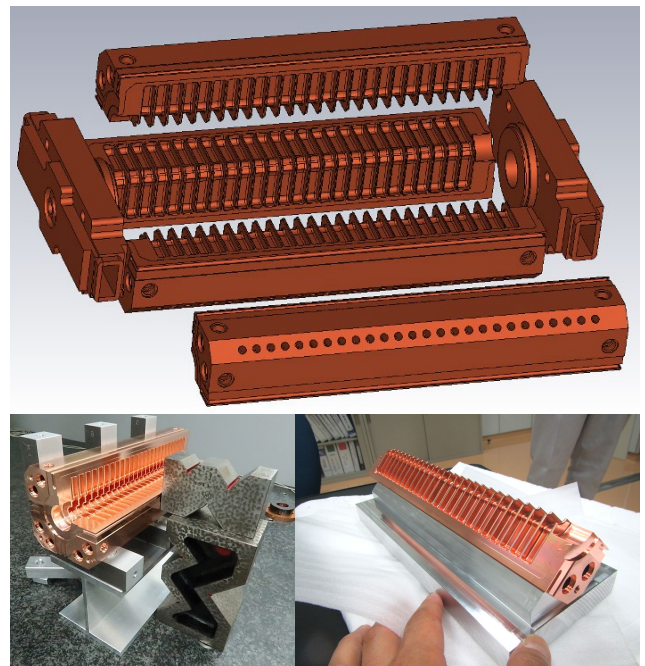


図4 縦方向分割方式方式による加速管製作の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

KEK では、2008 年から 2009 年にかけて、18 セルの CLIC 用高電界加速管(導波管型減衰構造付き進行波管)を 4 分割タイプの縦方向分割方式で製作し、KEK の X バンド高電界試験施設 Nextef にて高電界試験を実施した。X バンド加速管は、ブレークダウン率は別として、減衰構造付きの場合でも加速勾配 100 MV/m までは RF コンディショニング

*1 「ディスク積層方式」も、著者の造語である。

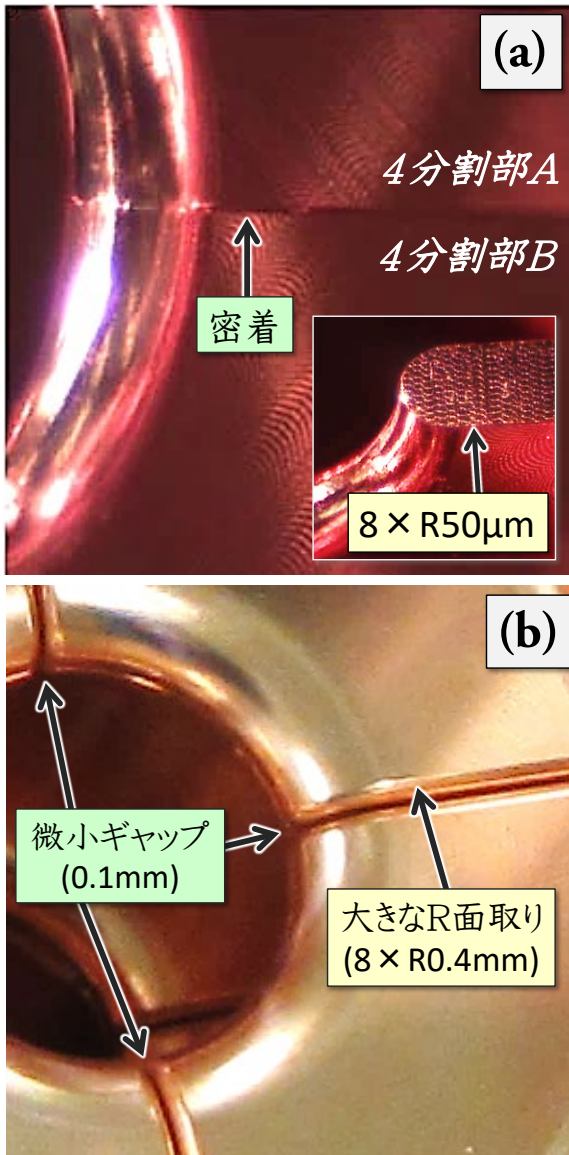


図5 KEK/Nextefで高電界試験した縦方向分割方式 Xバンド加速構造のアイリス付近の写真。(a) 初期の4分割方式 (TD18-QUAD-KEK)。写真にあるアイリス径は5.3 mm。(b) 改良4分割方式 (SD1-QUAD-R04G01)。写真にあるアイリス径は8.4 mm。

が出来るのが通常である。しかし、その加速管では、60 MV/m より高い加速勾配に到達することすら出来ず、当時、実験的にその原因を突き止めることも出来なかった。CLIC用の縦方向分割方式加速管の開発は、ここでしばらく止まっていたが、2011年に、KEK機械工学センター（当時）の東保男氏がもう一度挑戦しようと旗を揚げた。著者はそれに賛同し、独自のシミュレーション研究 [4] などに基づいて、従

来の縦方向分割方式について考えられるすべての欠点を克服する『改良縦方向分割方式』を考案した [5]。具体的な改良点は、図5に示してあるように、

- フィールド増大を抑えるための大きなR面取り (R0.4 mm)
- 分割部が密着する場合に発生する恐れのある仮想リークをなくす微小ギャップ (0.1 mm)

である。この新しい方式の効果を調べるため、比較的試験遂行の容易な単セル型空洞を改良縦方向分割

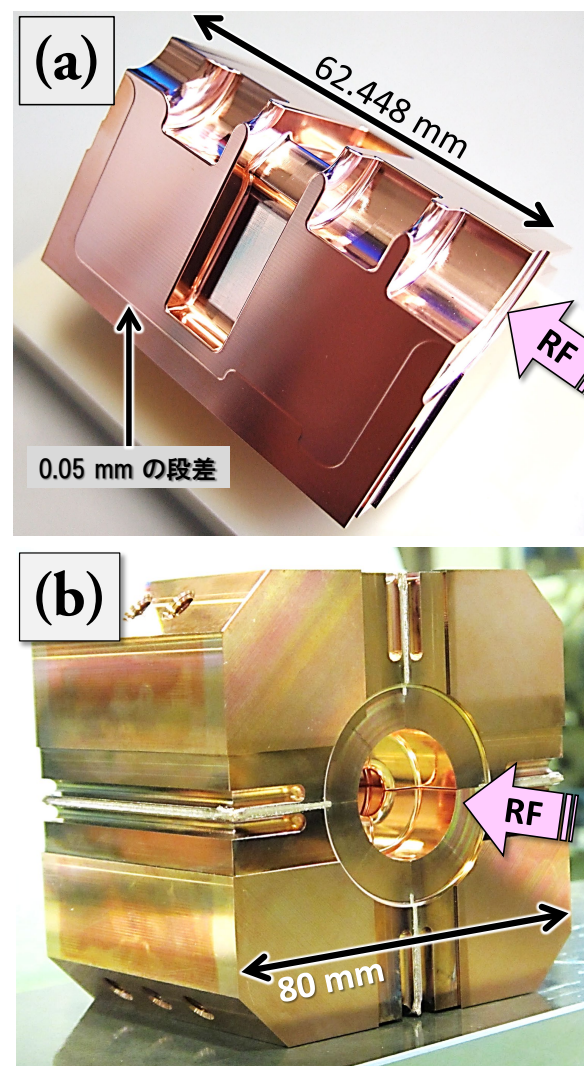


図6 KEK/Nextef1/シールドBで高電界試験した改良縦方向分割方式の単セル型試験空洞。(a) 超精密ミリング加工で製作した4分割部のひとつ。RF設計は著者が、機械設計はKEK機械工学センターの高富俊和氏が行った。(b) 4分割部4個を電子ビーム溶接で接合した直後の様子。

方式（以下では単に、縦方向分割方式と言うことにする）で製作した [6]（図 6）。ここで、分割部同士の接合には、電子ビーム溶接を用いた。これが X バンド加速構造自体を電子ビーム溶接で組み立て、問題のない高電界性能が出た最初の例となった [7]。そして、24 セルから成るフルスケール加速管（CLIC 用高電界加速管）を改良 4 分割方式で問題なく製作できることも確認した [8]。

尚、上記の「フィールド増大を抑えるための大きな R 面取り (R0.4 mm)」に関してであるが、R が円弧である限り、必ず最低 23% のフィールド増大が原理的に避けられない。それを更に小さくするには、R 部の形状を円弧でない形にすればよい。近年、クロソイド曲線（オイラー螺旋とも呼ばれる）を使った曲面にすれば、フィールド増大を 1% 程度に抑えることができることがわかってきた [9]。

3 縦方向分割方式による製作

ここで、縦方向分割方式による加速管製作の流れを、CLIC 用 X バンド高電界加速管を例に説明しよう。まず、図 7-(a) にあるように、素材となる無酸素銅の丸棒（長さ約 30 cm）から、4 分割部のだいたいの形を切削加工する。ここでは加工精度は要らないので、大きい R の刃でざっくりと削る。それでも、4 分割部 1 本あたり約 1 3 時間の加工時間がかかった。その後、R2mm の超硬エンドミルで、セル構造の形を 0.1 mm 残しで作る（4 分割部 1 本あたり約 1 8 時間）。そして、R0.75mm の超硬エンドミルを使って、最終目標加工精度 (Ra: 0.3 μ m、輪郭度: 5 μ m) を目指して、0.03 mm 残しを経て、最終仕上げ加工をする。これには実に 5 日間かかった。勿論、目標精度を下げれば、加工時間も減らせるが、CLIC はリニアコライダーなので、要求仕様が厳しい。FEL や医療・産業用加速管であれば、最終加工にかかる時間を大きく減らせるであろう。また、精度指定の仕方を工夫することでも、最終加工の時間を減らすことができると考えている。加工時間を減らすことは、加速管の製作コスト削減に直結するので、重要課題である。

加工後は、図 7-(b) にあるように組み立てる。ディスク積層方式と比べると、非常に簡単である。CMM (Coordinate Measuring Machine) で相対的

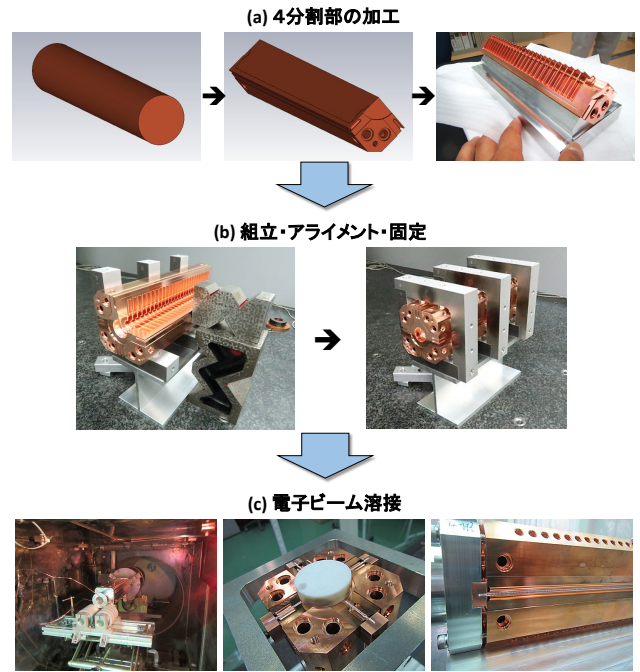


図 7 縦方向分割方式による加速管製作法の例 (CLIC 用 X バンド高電界加速管の場合)。

位置を 1 ミクロンの精度で測りながらアライメントして、拘束治具で固定した。

分割部の接合は、ろう付けでもよいが、製作コスト削減という意味で、高温処理を必要としない電子ビーム溶接を用いた (図 7-(c))。近年、電子ビーム溶接よりも簡易に行える TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接で加速管を作る試みも研究されている [10]。ディスク積層方式でも溶接を使えるが、採用をためらう程に溶接箇所が多い (少なくとも、ディスクの枚数はある)。一方、縦方向分割方式の 4 分割タイプでは、ビーム軸に沿って 4 本、各端面に 4 本だけである。しかも、実際に溶接する時間は 1 本あたりたったの数秒である (セットアップにそれなりの時間がかかることは、言うまでもないが)。電子ビーム溶接を効果的に用いるには、溶接箇所が少ないことが重要である。これは、縦方向分割方式に適している。尚、銅の場合、アニールした軟銅よりも、熱処理しない硬銅の方が耐電圧の高いことが知られている。そういった意味でも、電子ビーム溶接や TIG 溶接による接合で加速管が作れることが望ましい。しかし、溶接で加速構造を接合すると、空洞形状が歪んで、周波数等が大きく変化してしまうのではないかと懸念がある。図 8-(a) は、CLIC 用 X バンド高電界加速管を 4 分割タ

タイプの縦方向分割方式で製作した時の電子ビーム溶接直後の様子だが、溶接ビードがはっきりとわかる。溶接応力はかなり大きいこともあり、加速管を歪めることができる。図 8-(c) は、電子ビーム溶接前後に測った、ビーム軸に直角方向のサイズの変化である。どこの直角方向サイズを測ったかは、図 8-(b) の同じ色の矢印で示してある。溶接応力により、平均的・全体的には約 $5\ \mu\text{m}$ の収縮となっているが、一部収縮がゼロに近い箇所もあり、少し歪んで変形していることもわかる。しかし、全てのセルの内径が $5\ \mu\text{m}$ 収縮したとしても、周波数変化は $-4\ \text{MHz}$ 程度であり、当該加速管の周波数調整範囲である $\pm 20\ \text{MHz}$ よりも十分小さい。また、図 9-(a) は、ビードプル法 [11] で測ったビーム軸上の加速モード電界強度分布である。ビードプル法では、加速管内のフィールドに小さな摂動を与えるビーズ (Xバンドの場合、 $0.1\ \text{mm}$ 程度の大きさの筒) を糸に通して加速管内に入れ、その時の加速モード周波数の変化から、そのビーズのある位置におけるフィールド強度を測る。図 9-(a) を見てみると、当該電子ビーム溶接前後で差が殆どない。以上のことは、電子ビーム溶接による加速管の変形は、少なくとも加速モードにとっては、十分小さいことを意味している。尚、溶接による変形量は、溶接時の固定の仕方にもよるので、より適切にしっかりと押さえれば、変形量をより小さくすることができる。図 8-(a) にある溶接では、そのようなことはあまり気にせず固定したので、改善の余地はある。

図 9-(a) のビードプル測定は、いずれも周波数調整前であるにもかかわらず、かなりデザインに近い。これまで、ディスク積層方式で製作してきた (導波管方式の) 減衰構造付き Xバンド加速管 (進行波管) では、図 9-(b) にあるように、周波数調整前は、かなり定在波が立っていた。もちろん、周波数調整を行えば、デザイン通りの加速フィールド分布になるのだが、周波数調整前でデザインに近いというのは、驚くべきことであった。その傾向は、近年、著者が三菱重工機械システム株式会社と共同で開発している医療用小型 Cバンド加速管 (定在波管) でも見られた [12]。これは、パーツの個数が少ないことによる縦方向分割方式の一般的な特長ではないかと、著者は考えている。また、当該共同研究で開発している小型加速管は、(ほぼ) 同じ性能仕様の加速管を、従来の

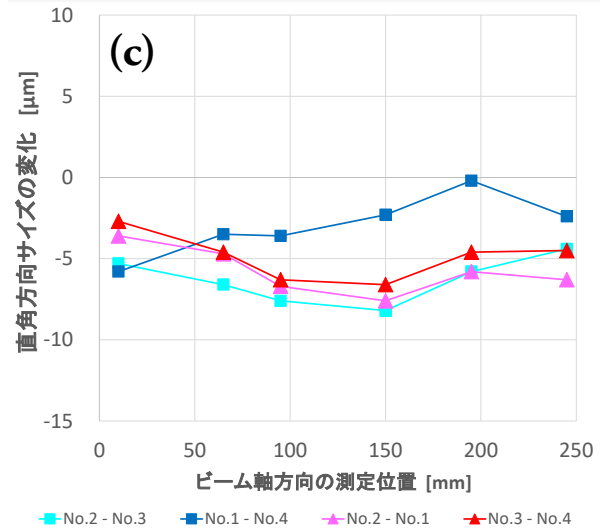
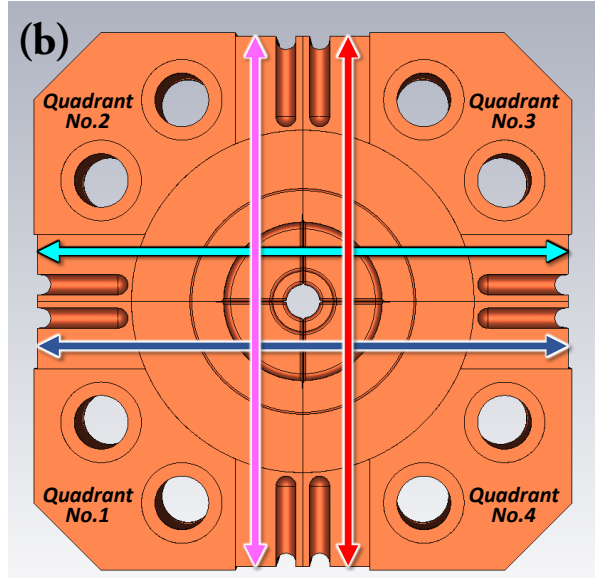
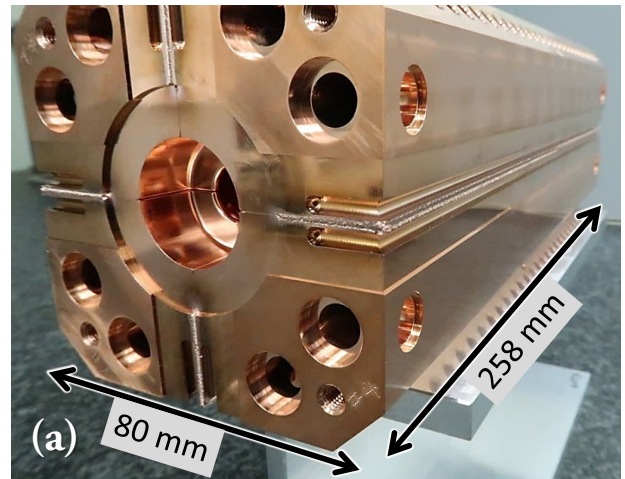


図 8 縦方向分割方式の X バンド高電界加速管 (導波管型の減衰構造付き) の電子ビーム溶接 ([8] より抜粋)。(a) 電子ビーム溶接直後の写真。(b) ビーム軸に対して直角方向のサイズ測定箇所 (色分けした矢印で表示)。(c) 電子ビーム溶接による直角方向サイズの変化量 (負値は収縮)。プロットの色は (b) にある矢印の色に対応している。

ディスク積層方式と新しい縦方向分割方式の両方で製作することになるので、縦方向分割方式による製作コストの削減効果を量的に見積もりことが可能であり、現在、その作業を進めている。

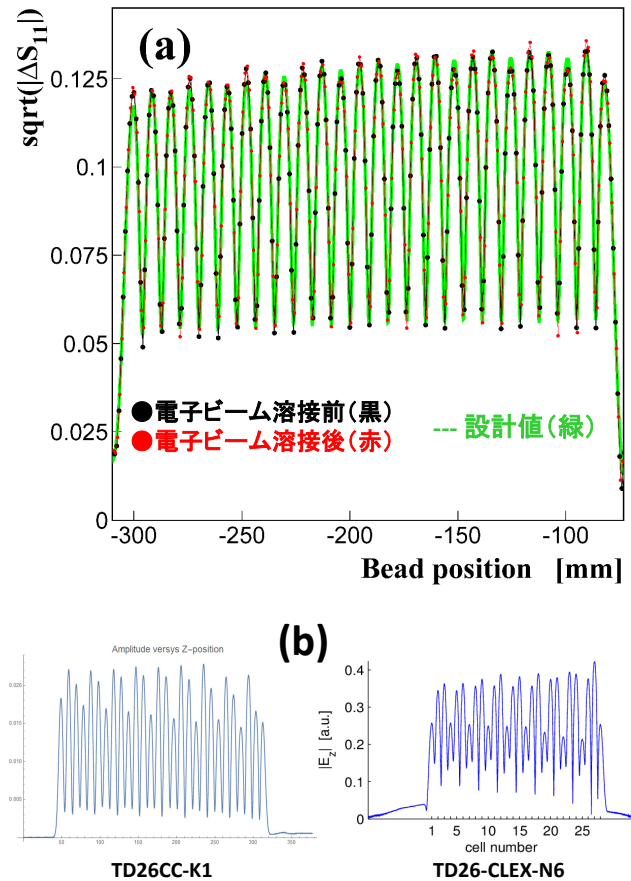


図9 CLIC用Xバンド高電界加速管(導波管方式の減衰構造付き)における、加速モードのビーム軸上電界強度分布の測定結果(ビードプル法[11]を使用)。(a) KEKが製作した縦方向分割方式加速管。(b) KEK(左図)やCERN(右図)が製作したディスク積層方式加速管。

4 応用例

(改良すれば)縦方向分割方式で高電界性能が出ることを著者たちが2017年に実証した後、様々な実用的・試験的加速構造において、縦方向分割方式が現われた。その例をいくつか紹介しよう。

4.1 CLIC

CLIC (Compact Linear Collider) [1]は、欧州の常伝導リニアコライダー計画である。そのベースライン設計では、ディスク積層方式で主線形加速管

(11.994 GHzのXバンド)を製作することになっているが、代替案として2分割タイプの縦方向分割方式も検討・設計された[13]。図10-(a)にあるのは、試験目的なので減衰構造はないが、30 cm程の長さの24セル加速管を超精密ミリング加工で製作したものである。これは、通称「CLIC-G-Open」と呼ばれている加速構造である。図10-(b)にあるように、2分割部間のギャップは1 mmと、著者が設計したもの(ギャップ0.1 mm)と比べると、かなり広い。狭いギャップでは放電を引き起こしやすいという考えから広いギャップにしているのだが、著者の経験からすると、ギャップ面に垂直な方向に大きな電界がかかるのでなければ、小さいギャップの方が(ギャップ間の)体積が小さくなるので、逆に放電しにくいと考えている。更に、ギャップが大きいと、シャント・インピーダンスも、それなりに落ちてしまう。CLIC-G-Openに関しては、CERNのXバンド大電力テストスタンドのひとつである「Xbox-2」で高電界試験が行われ(図10-(c))、ディスク積層方式の加速管に近い性能の出ることが確認された。

著者は個人的に分割部間のギャップの広さと高電界性能との関係に興味があるのだが、微小ギャップも大きいギャップも、テストスタンドにおけるビーム無しでの高電界試験では良い性能を示したので、最終的には、(ある程度の電流の)ビーム加速試験を通して評価することになるであろう。

4.2 Cool Copper Collider: C^3

米国が提案している常伝導リニアコライダー: Cool Copper Collider: C^3 (シー・キューブと読む)[16]の主線形加速構造(Cバンド)では、図11-(a)にある分散結合構造(Distributed Coupling Structure: DCS)という方式がとられている。加速セルの並びの横に、導波管のマニフォールドが通っており、そこから各セルにマイクロ波を給電する定在波方式である。この方式では、セル間の位相進みをどのように取っても、マイクロ波エネルギーの移動速度(群速度)は導波管内で決まるので、加速管デザインの自由度が上がる。また、マイクロ波はセルの側面から給電することになるので、ビームの通る穴の径(アイリス径)を小さくしてシャント・インピーダンスを上げることができるという特長も持っている。しかし、軸対称性を大きく破るので、リニアコライダー

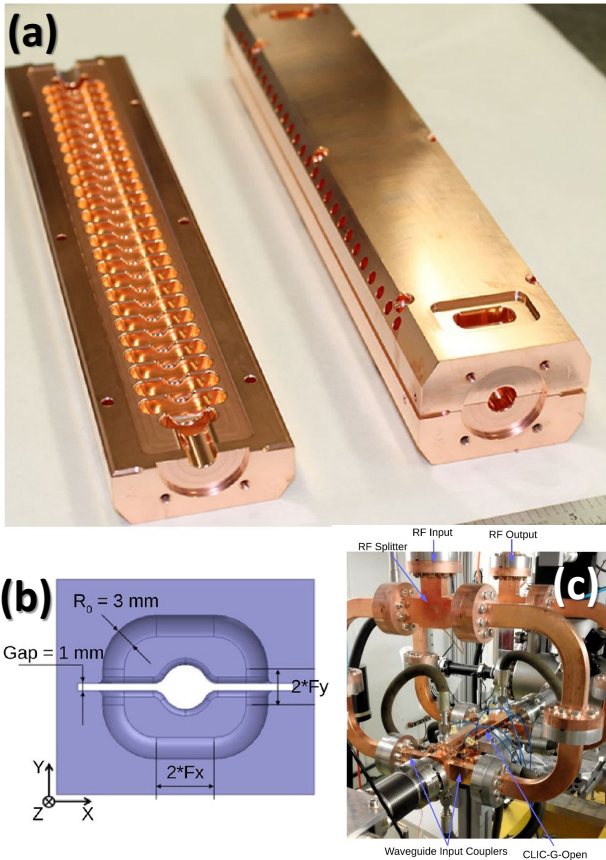


図 10 縦方向分割方式による CLIC 用 X バンド高電界加速管（周波数：11.994 GHz、減衰構造なし）。(a) 超精密ミリング加工後の写真。(b) 加速管の断面図。(c) CERN の大電力テストスタンド Xbox-2 にインストールした状態。いずれも、[13]より抜粋。

のような超低エミッタンス・ビームの加速に向いているかは疑問である。それはさておき、DCS 加速管の構造は複雑なので、これをディスク積層方式で作ろうとしたら大変である。SLAC は、ミリングや放電加工を用いて、図 11-(b) にあるような 2 分割部を製作している。放電加工で加速管を作ったという話はあまり聞かないが、以前、X バンドの DCS 加速管を放電加工で作り、2018 年、Nextef で高電界試験を行ったことがあった。リニアコライダーで要求されるような高い安定度はなかったものの、高電界加速管として使えない程悪い結果でもなかった [17]。C³ 用加速管の 2 分割構造の接合はろう付けで行っているが、その際、2 分割部のギャップを埋めるように形作ったろう材のシートを使っている。それにより、ギャップを完全に埋めてしまう狙いだが、綺麗に埋

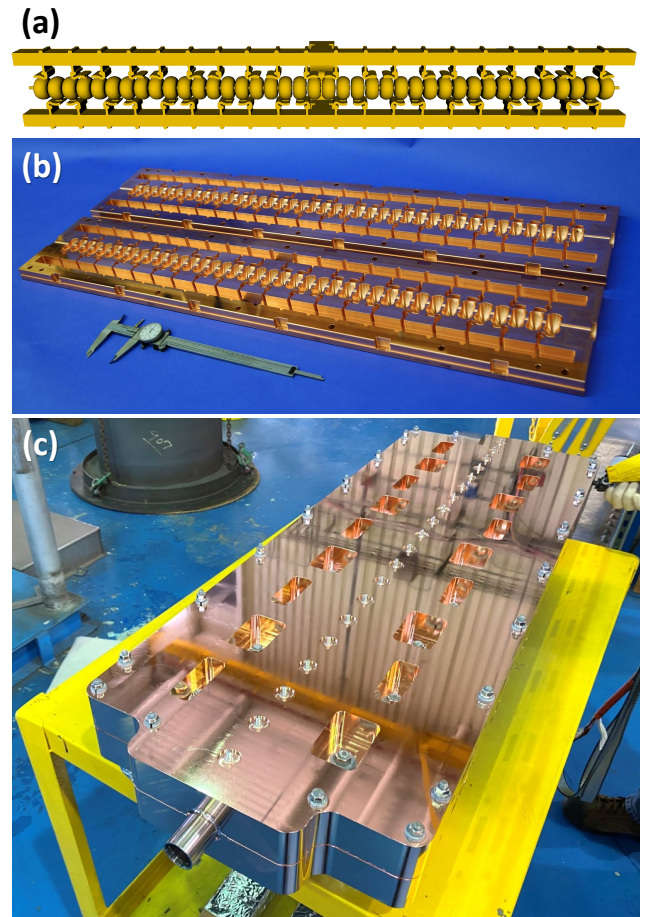


図 11 Cold Copper Collider: C³ の主加速構造。(a) 構造のソリッドモデル。(b) 超精密ミリング加工後の 2 分割部の写真。(c) ふたつの 2 分割部をろう付けした状態。(a) は [14] より、(b) と (c) は [15] より抜粋。

まるか、そして歩留まりがよいか等、課題はあると思われる。また、ギャップをろう材で埋めてしまえば、ろう材が加速フィールドのあるセル内部近くまで入り込んでしまう可能性があるため、縦方向分割方式の利点のひとつ：「加速フィールドから見えない所で構造を接合できる」が活かされない。

C³ 用 DCS 加速管は液体窒素で冷やして約 77 K で運転する。その意味で「Cool Copper」と言われている。冷やすことによって DC 抵抗が下がり、シャント・インピーダンスを上げるのだが、当然、冷やすのにコストが要るので、加速効率と冷却コストを合わせると、若干エネルギーを損することになる。しかし、大電力高周波源を削減できるということが最大の利点であり、それにより、C³ は、同じスペ

クと比較して、他のリニアコライダー（ILC[18] や CLIC）よりも安く建設・稼働できる可能性が考えられている。

4.3 医療用小型加速管

三菱重工機械システム株式会社は、医療用 C バンド小型加速管を製作してきている。約 30 cm という短い長さの中で、電子銃から出た電子のバンチ形成と 6 MeV（物質の放射化エネルギー閾値）近くまでの加速を一体構造で行う [19]。主加速部はサイドカップルという方式の陪周期構造で、全体としては安定度の高いことで知られている $\pi/2$ モードでありながら、（加速に関与しない）結合空洞がビーム軸上ではなく加速空洞の脇に位置するため、加速されるビームからは（加速効率の高い） π モード定在波管として見える。サイドカップルは小型加速管に向いている方式だが、構造が複雑であるという欠点がある。そのため、ディスク積層方式で作るのは、なかなか骨が折れる。現在、当該加速構造を 2 分割タイプの縦方向分割方式で製作するための共同研究を著者と行っている。縦方向分割方式の導入で、接合する全パーツ数は、図 12 にあるように、59 個から 25 個へと、半分以下になる。それにより、従来（図 12-(a)）の接合では 2 回に分けてろう付けする必要があるが（金ろう → 銀ろう）、新しい縦方向分割方式（図 12-(b)）では 1 回のろう付け（銀ろうのみ）で接合できる。ろう付けでは、金属のろう材が溶けるまで対象物の温度を高温炉の中で上げなければならないので（数百 °C）、時間的・金銭的成本がかかる（融点の高い金ろうでは特に）。ろう付けを 2 回から 1 回に減らせるだけでも、大量生産品の場合、大きなサステナビリティ効果があると言えよう。また、加速電界強度分布に

4.4 光陰極電子銃

今や、電子銃にまで縦方向分割方式が広がっている。まだ概念設計の段階だが、コンパクトな X バンド光陰極電子銃 [21] の例を紹介しよう。大雑把には CLIC-G-Open と同様の 2 分割構造を採用していて、2 分割間のギャップは同じく 1 mm である。光陰極電子銃では、レーザー光を陰極面に当てて光電効果により電子を放出させ、それを RF 加速空洞で引き出す仕組みになっている。通常、レーザー光は、加速空洞の側面に穴を空けてカソード面に入射するか、

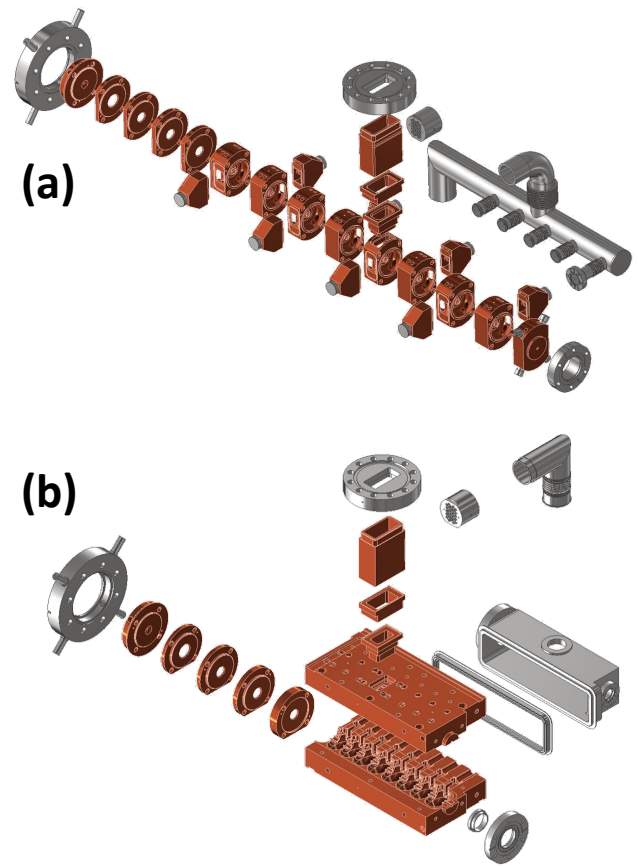


図 12 医療用小型加速管の例。全長は約 30 cm。[20] より抜粋。(a) 従来のディスク積層方式での各パーツ（59 個）。(b) 縦方向分割方式での各パーツ（25 個）。

または、（電子銃の）加速空洞内に鏡を置いて反射させてカソード面にほぼ垂直に入射する。後者が適した場合には、真空中に鏡を置く必要があるため、カソード面から取り出した電子の進行の妨げになってしまう。そこで、レーザー光を 2 分割間のギャップを通して入射することが提案された。その場合、真空中に鏡を置くことなく、垂直入射に近い角度が実現できる。尚、ギャップの 1 mm は、レーザーの波長より何桁も大きいので、単一スリット回折の効果は無視できる。今後、その試作機の製作・試験が楽しみである。

第 III 部

より高い加速周波数へ

1 なぜ周波数を上げるのか

加速空洞の内径などの加速構造の典型的な大きさは、加速周波数に反比例するので、より高い加速周波数では加速構造はより小さくなる。線形加速器では、これまで S バンド (2 ~ 4 GHz、波長: 7.5 ~ 15 cm) の加速周波数が広く使われてきた。例えば、KEK の電子陽電子入射器や ATF の入射器では、S バンド加速管が使われてきている。近年、S バンドの 2 倍の周波数である C バンド (4 ~ 8 GHz、波長: 3.7 ~ 7.5 cm) が全世界的に使われだした。自由電子レーザー加速器では、日本の SACLA、欧州の SwissFEL、中国の SXFEL で使われている。また、東北で建設が進んでいる次世代型放射光施設ナノテラスの入射器も C バンドである。

C バンドのさらに 2 倍の周波数である X バンド (8 ~ 12 GHz、波長: 2.5 ~ 3.7 cm) は、以前は一部で展開されてきたにすぎなかった。例えば、橋梁のような屋外の大規模インフラの非破壊検査のために東京大学/旧上坂研究室で開発された小型高エネルギー X 線発生装置 [22] や、X バンド高電界加速管の開発のためのテストスタンド (CERN/CLIC の X-Box[23]、SLAC の XTA[24]、KEK の Nextef[25] など) である。しかし、近年は、X バンドベースの装置や施設が世界各地で増えてきた。例えば、米国スタンフォード大学病院が中心となって開発中の次世代放射線治療装置 PHASER[26]、欧州で開発されて現在試験運転中の波長可変・テーブルトップサイズ単色硬 X 線発生装置 Smart*Light[27]、豪州メルボルン大学で建設が進んでいる加速器試験施設 X-LAB[28]、伊国フラスカティ研究所 (INFN-LNF - Laboratori Nazionali di Frascati) の EuPRAXIA@SPARC_LAB[29] などで X バンド加速管が使われだしている。少し前は「C バンド花盛り」の状態であったが、今や「X バンド花盛り」である。そして、もし CLIC が実現すれば、X バンドを大型加速器で本格的に使う最初のケースとなる。X バンド加速管がどれくらいコンパクトかは、図 13 を見ていただければ一目瞭然である。



図 13 KEK 電子陽電子入射器の地下トンネル内にて撮影。S バンド加速管は、実際に加速器の運転で使用しているもの。その前で著者が担いでいるのは、CLIC 用 X バンド加速管。どちらも 1 本で 40 MeV (定格) 加速する。

高い加速周波数を採用するメリットは、加速器がコンパクトになるだけでなく、加速効率が上がることにもある。構造が小さくなると、ビーム軸上の加速電磁界のエネルギー密度が上がり、加速効率は上がる方向になる。しかし一方で、周波数が上がると、金属表面における高周波表皮抵抗 (R_{surf}) が大きくなり、マイクロ波の電力損失が増えてしまう。実際に加速効率が上がるかどうかは、それらふたつのファクターの比で決まる。加速器科学では、単位長さあたりのシャント・インピーダンス (R_{sh}/L) で加速効率を定量的に表わす。加速勾配 E_{acc} と、加速構造の単位長さあたりに投入するマイクロ波電力 P_{in}/L とは、以下の関係にある：

$$E_{\text{acc}} = \sqrt{\frac{R_{\text{sh}}}{L} \times \frac{P_{\text{in}}}{L}} \quad (1)$$

つまり、同じ加速勾配を立てるにも、 R_{sh}/L が 2 倍大きければ、投入するマイクロ波電力は半分で済む。その意味で R_{sh}/L を加速効率と呼んでいる。常伝導では、 R_{surf} の周波数 (f) 依存性が比較的弱いため (室温では $R_{\text{surf}} \propto \sqrt{f}$)、 R_{sh}/L は加速周波数の平方根に比例して大きくなる*2：

$$\frac{R_{\text{sh}}}{L} \propto \sqrt{f} \quad (2)$$

*2 一方、超伝導の場合、高い周波数では R_{surf} の周波数依存性が強い (室温では $R_{\text{surf}} \propto f^2$)、ある仮定のもとでは 1.3 GHz で加速効率が最高となり、それより周波数が高くなると加速効率は単調減少する。

つまり、Xバンド加速管(11.424 GHz)では、相似形の内部構造を持つSバンド加速管(2.856 GHz)と比べて、同じ加速勾配を立てるために必要な(単位長さあたりに投入する)マイクロ波電力は半分で済むことになる。また、式(1)からわかるように、2倍の加速勾配を立てるためには4倍のマイクロ波電力が必要になる。高い加速勾配が必要であれば、現実的にはシャント・インピーダンスも上げなければならない。高い加速周波数はそのためにも重要である。

高い加速周波数を採用するデメリットとしては、まず、加速構造の製作などにおいて高い精度が要求されることがある。しかし、例えばCLIC用Xバンド加速管で要求されるミクロンオーダーの加工精度の達成は、現在の精密加工技術であれば難しいことではない。また、加速器コンポーネントのアライメントで要求される精度も厳しくなる(CLICのXバンド加速管のアライメント要求精度は10 μm)。その他、大電力高周波源の効率や入手性の問題もある。

2 どこまで行けるのか

式(2)にあるように、常伝導金属製空洞では、周波数を上げるほど加速効率も上がる(超伝導空洞ではそうならない)。そこで、SLACの高電界加速研究チームは、図14にある110 GHz(波長:2.7 mm)の単セル型試験空洞を製作した[30]。2個の半割れ構造を超精密ミリング加工で作成し、それらを接合する縦方向分割方式を用いている。試験空洞の内径は2 mm強と、非常に小さい。シャント・インピーダンス R_{sh}/L はXバンドの場合の約3倍になる。110 GHzの大電力マイクロ波源としては、米国MITの共同研究者のジャイロトロンを使っている。ジャイロトロン(加速器でよく使う)導波管で輸送すると電力損失が大き過ぎるが、数百 GHz くらいになると光学的性質が強くなるので、レーザーでよくあるガウシアン・ビームの形で自由空間を輸送できる。それをホーンカプラーで受け、加速モード(TM₀₁)に変換して試験空洞に投入する。ジャイロトロンは精密制御が難しいため、物体の加熱には向いているが、加速器用途には向いていない。MITでの高電界試験は、システムを改造しながら進めていて、加速勾配230 MV/mに到達したとの報告があった[31]。

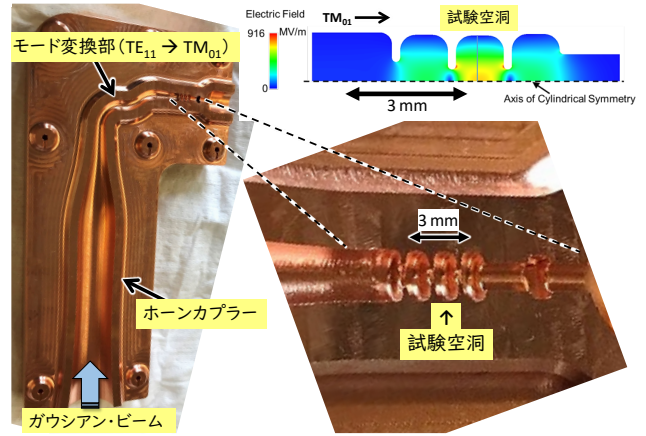


図14 SLACが製作した110 GHz 試験空洞 ([32]より抜粋)。

ここで、金属製空洞を使って、どこまで高い周波数に行けるかを加速効率の観点から考えてみる。まず、周波数を更に上げていくと、式(2)通りには加速効率は上がらなくなる。低温の場合と同様に、周波数が非常に高くなった場合も、表皮効果の深さが金属内自由電子の平均自由行程に近づき、異常表皮効果が生じる。その場合、 R_{surf} は周波数の平方根に比例するのではなく、(2/3)乗に比例して大きくなり、その結果、加速効率の周波数依存性は、

$$\frac{R_{sh}}{L} \propto f^{1/3} \quad (3)$$

となる。式(2)と比べると、周波数を上げた場合の加速効率の上がり方が鈍くなる。一方、室温における銅内自由電子の平均自由行程は約40 nmであり、周波数500 GHzにおける銅の古典的表皮効果の深さは約90 nmである。また、参考文献[33]の実験によると、750 GHz ~ 1.1 THz (= 1100 GHz)の領域は、古典的表皮効果から異常表皮効果への遷移領域とのである。さらに、そのような高い周波数領域の加速構造の製作は、急激に難しくなる。以上のことから、少なくともマイクロ波の定義の上限である300 GHzまでは、金属製空洞を使うことに意義があると言える。300 GHzの試験空洞は、図14の110 GHzを単にスケールさせたものだが、試験空洞の内径は1 mm弱であり、超精密製作技術の限界に挑戦することになる。SLACはこの試験空洞を、放電加工で見事に製作した。その加速空洞の各種パラメータを表1に示す。

表 1 300 GHz 試験空洞の各種パラメータ

空洞内径	~1 mm
アイリス内径	~0.2 mm
Q_0	~3000
シャント抵抗	600 M Ω /m
加速勾配	~350 MV/m (RF 100 kW 投入時)
充填時間	1.6 ns

ここで、表 1 にある 300 MV/m もの高い加速勾配を金属製空洞内で立てても大丈夫であろうか、という疑問が出てくる。米国 SLAC 国立加速器研究所の FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests) で行われた実験では、120 ~ 140 GHz の周波数に対応した加速管に電子ビームを入射して、その内部に高電界を立てた。理論的考察と合わせると、加速勾配 300 MV/m くらいまでは、加速構造は深刻な損傷を受けないと結論付けている [34]。しかし、加速構造が壊れないとしても、ブレークダウン (真空放電) を起こして安定的には粒子加速をできないのではないかという疑問もある。X バンドの 100 MV/m の加速勾配でも問題になるくらいなので、当然の疑問である。これに関しては、RF パルスが加速構造に印加されている時の表面温度上昇に着目する。金属表面がマイクロ波にさらされると表面電流が流れ (CLIC 用 X バンド加速管の場合、最大 10^8 A/cm² 級で、現代の大規模集積回路中の電流密度程度 [3])、その間、金属表面 (表皮効果の深さ程度) で温度が上がり、RF パルスがなくなると戻るといふパルス加熱が起こる。これが 1 秒間に数十回から数百回繰り返され、材質の変化や破壊、また何かしらの生成によって真空放電がトリガーされて、ブレークダウンに至る。詳細メカニズムは未だ解明されていないが、電界と磁界の強度を独立に制御できる特殊な RF 空洞 Dual-mode cavity を使った SLAC の高電界試験で判明したことは、パルス加熱による表面温度上昇は、表面電界強度とともに、ブレークダウン率と強い相関のあることである [35]。CLIC 用 X バンド加速管で 100 MV/m の加速勾配を立てた場合、パルス加熱で数十度もの温度上昇になる。特に温度上昇が 50 度以上になると、X バンド加速管

では高電界性能の劣化が顕著になることが経験上わかっている。一方、フィールドの充填時間は周波数の $(-3/2)$ 乗に比例するため、300 GHz の試験空洞では、 R_{surf} が上がっても RF パルス幅がそれ以上に短くなる。そのため、パルス加熱による温度上昇は数度で済む [30]。これにより、高い高電界性能が期待できる。300 GHz では、常伝導高周波加速として、これまでにない超短 RF パルスによる加速が可能であることは、コンパクト性、高加速効率と並ぶ、第三の特長である。最先端の研究では、この特長は、常伝導加速器で非常に高い加速勾配を実現するためのキーポイントとなる可能性が指摘されている [36]。

本稿では 300 GHz をマイクロ波の上限周波数と定義している。その意味で著者は、300 GHz を「究極のマイクロ波加速」と位置づけている。そして、300 GHz くらいまで行くと、レーザー駆動のテラヘルツ光源が加速器に使える可能性が出て来る。300 GHz のジャイロトロンも存在するが、とても高価で、扱っても難しい。殆ど進歩していない電子管関係よりは、日進月歩のレーザー技術をベースにした大電力高周波源の開発が望まれる。大電力高周波源は本稿のスコープ外なので詳細は割愛するが、数百 GHz (サブテラヘルツ) 帯のレーザー駆動大電力波源の開発がテラヘルツ業界で進んでいる。著者は、近い将来、金属製空洞としては史上最高周波数での高電界試験を実現したいと願っている。

3 どこを目指すのか

数百 GHz 帯の金属製常伝導加速空洞は、これまでのマイクロ波加速の単なる延長なので、大電力源さえ開発できれば、すぐにでも高エネルギー実験に応用したいところである。しかし、実際はそう簡単ではない。加速器は加速構造のみから成っているのではなく、電磁石やビーム診断系など、さまざまなコンポーネントの統合体である。高い加速周波数を高エネルギー加速器で採用する際の問題は、著者が思いつくだけでも下記のように多くある：

1. ビーム軌道の精密制御
2. ビームの精密測定・診断
3. 加速器コンポーネントの精密アライメント
4. バンチ圧縮

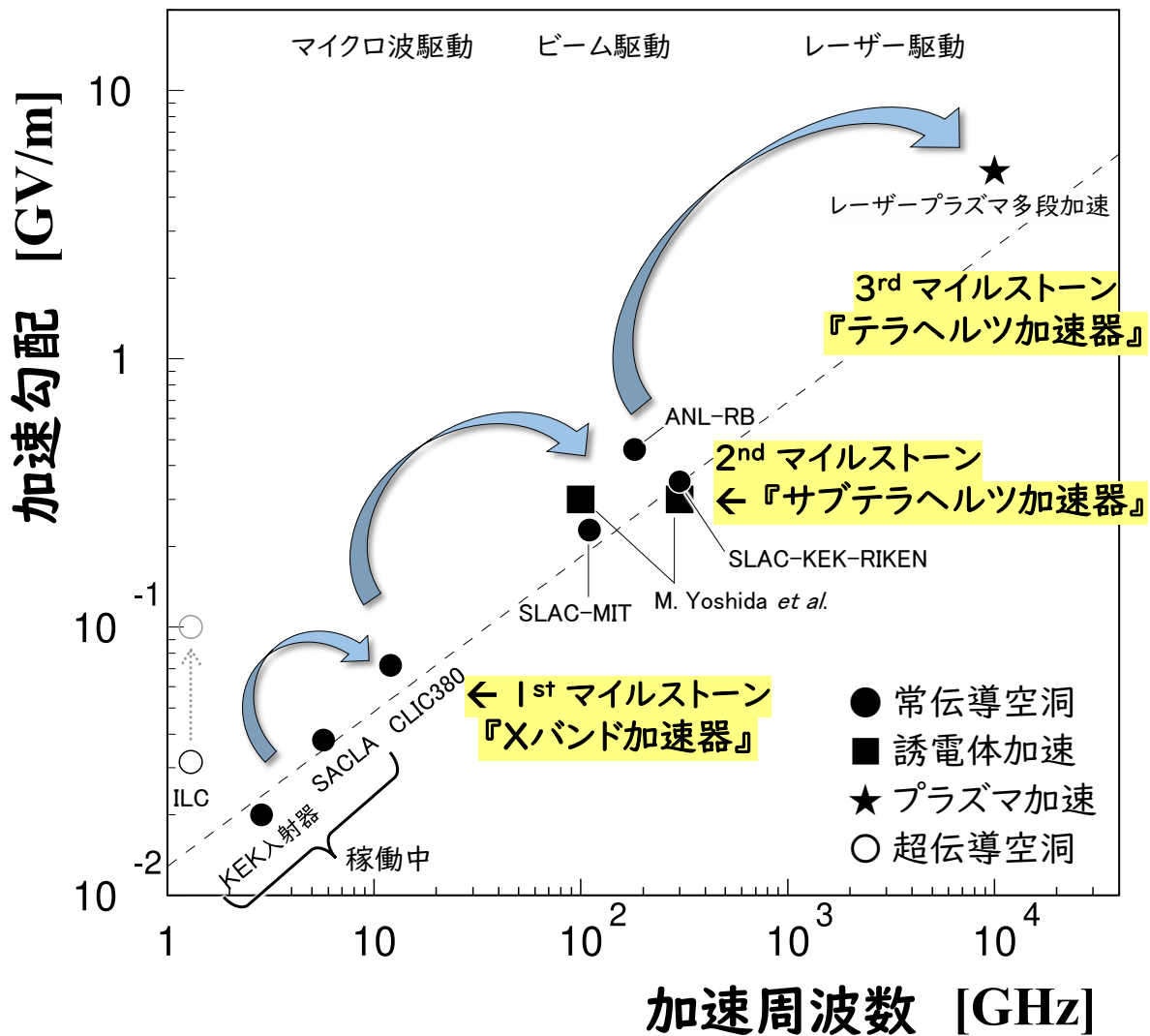


図 15 高エネルギー高電界加速技術の展望。プロットは、設計値、目標値、または到達値である。破線は $E_{acc} \propto f^n$ によるフィット。レーザープラズマ多段加速のプロットは、比較的安定して電子を加速できるプラズマ振動数と集光光学系を含む平均加速勾配。

5. ビーム不安定性を起こす航跡場の抑制・除去
6. 低エミッタンスの維持
7. 大電流加速に起因する諸問題

上記の問題は、加速周波数が上がって加速器が小さくなることによって生じる、または、より難しくなるものである。いきなり、これまでの百分の一の大きさの加速構造を扱おうとしても、無理がある。そこで、まずは『高エネルギー・Xバンド加速器』（波長：数センチ）を展開して、高度なビーム制御・診断・解析手法などを開発・発展させ、上記の問題などへ対応するための技術を磨く。並行して、次世代の加速構造のための研究開発も進める。そして、時

期がきたら『高エネルギー・サブテラヘルツ加速器』（波長：数ミリ）へ飛躍する。これを繰り返すことにより、周波数と加速勾配を桁で上げていき、将来は『高エネルギー・テラヘルツ加速器』（波長：数十マイクロン）へ到達することも可能であろう。ここで、上記1～7の全部または一部は、Xバンドからテラヘルツ加速器までの共通課題である。この展望を図15に示す。まずはXバンドで肩慣らしし、サブテラヘルツで調子を出して、満を持してテラヘルツへ、といった「ホップステップジャンプ型」の展望となっている。ここで「飛躍」は重要である。連続的なアップグレードでは、その速度が（限りなく）遅くなり、いつまで経ってもあるレベルを超えられなくなって

しまうであろう。思い切って飛躍するのである。

ここで、5 km の加速区間におけるエネルギーゲインを考えてみる。加速勾配 100 MV/m の X バンド加速器で 500 GeV、350 MV/m のサブテラヘルツ加速器で 1.75 TeV、5 GV/m のテラヘルツ加速器で 25 TeV である。本稿で示す展望は、十数 TeV 領域の物理実験実現へのロードマップ（案）でもある*3。また、その過程で生まれる加速器の超小型化の技術は、医療・産業分野にも革新をもたらすことは確実である。

しかしながら、その道のりは険しく遠い。また、乗り越えなければならない高い壁や山も多くあろう。ここで忘れてはならないことは、現在の我々がどのような選択肢を取ろうとも、未来は茨の道であることである。そうであれば、より大きく未来に展望が開けている方向へ進むべきであると主張したい。途中、紆余曲折があろうとも、方向性を失わないことである。そのためには、過去・現在・未来のつながりを意識できるような、しっかりとした展望を持つ必要があると考え、その例をここに示してみた。この他にも様々な展望がありうと思うが、この展望が、または、この展望に基づく何かが、これからの高エネルギー加速器を導ければと願っている。

参考文献

- [1] <https://clic.cern/>.
- [2] N. Shafqat, et al.: “Fabrication, conditioning and installation of the 1st high gradient S-band accelerating module for the energy upgrade of the FERMI free electron laser linac”, Nucl. Instrum. Meth. A, **1055**, p. 168543 (2023).
- [3] 横川 慎二: “LSI 微細 Cu 配線におけるエレクトロマイグレーション信頼性に関する研究”, 学位論文（電気通信大学）（2008）.
- [4] 阿部 哲郎: “微細構造による導体表面電磁場の変化に関する研究”, 第 8 回日本加速器学会年会

(2011). TUPS086.

- [5] 阿部 哲郎、他: “高電界 X バンド単セル試験空洞の 4 分割方式による製作”, 第 9 回日本加速器学会年会 (2012). THPS095.
- [6] 阿部 哲郎、他: “4 分割方式による高電界試験用 X バンド単セル空洞の製作”, 第 11 回日本加速器学会年会 (2014). SUP042.
- [7] 阿部 哲郎、他: “4 分割方式 X バンド単セル型空洞の高電界試験の結果”, 第 14 回日本加速器学会年会 (2017). WEP039.
- [8] 阿部 哲郎、他: “改良 4 分割方式 X バンド高電界加速管の製作”, 第 16 回日本加速器学会年会 (2019). WEOH04.
- [9] R. Peacock: “Experimental Investigation of Vacuum Breakdown Triggering Mechanisms in a DC Electrode System”, PhD thesis, Lancaster University (2023).
- [10] V. A. Dolgashev, L. Faillace, B. Spataro, S. Tantawi and R. Bonifazi: “High-gradient rf tests of welded X-band accelerating cavities”, Phys. Rev. Accel. Beams, **24**, 8, p. 081002 (2021).
- [11] L. C. Maier, Jr. and J. C. Slater: “Field Strength Measurements in Resonant Cavities”, J. Appl. Phys., **23**, p. 68 (1952).
- [12] 阿部 哲郎、肥後 壽泰、木村 優志、菅野 東明、重岡 伸之、原 博史、比嘉 究作: “縦方向分割方式 C バンド小型加速管の設計・試験”, 第 21 回日本加速器学会年会 (2024). FROT05.
- [13] T. Argyropoulos, et al.: “Design, fabrication, and high-gradient testing of an X-band, traveling-wave accelerating structure milled from copper halves”, Phys. Rev. Accel. Beams, **21**, 6, p. 061001 (2018).
- [14] Z. Li: “C³ Structure Wakefield Suppression”, presented at Cold Copper Accelerator Technology and Application Workshop (2023).
- [15] A. Dhar: “Mechanical Fabrication and Vibrational Analysis of Split Block Accelerating Structures”, presented at Cold Copper Accelerator Technology and Application Workshop (2023).

*3 10 TeV くらいになると、衝突点におけるビームサイズは Oide limit[37] で決まってしまうので、それ以上の高エネルギー・コライダーで高いルミノシティが欲しければ、ハドロン・コライダーかミューオン・コライダーが必要であろう。

- [16] <https://web.slac.stanford.edu/c3/>.
- [17] S. Tantawi: “SLAC Research Activities on Normal Conducting RF Accelerators”, presented at International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2019) (2019).
- [18] <https://www2.kek.jp/ilc/>.
- [19] 神納 祐一郎: “加速器医療応用 4 - 2 ・医療応用 電子ビーム動体追尾・画像誘導放射線治療装置 VERO 用電子リニアック開発の実際例”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'12 (2012).
- [20] 木村 優志、菅野 東明、重岡 伸之、原 博史、比嘉 究作、阿部 哲郎、肥後 壽泰: “縦方向分割方式 C バンド小型加速管の製作”, 第 21 回日本加速器学会年会 (2024). FRP042.
- [21] T. Lucas, X. Stragier, P. Mutsaers and O. Luiten: “RF design of a compact, X-band travelling-wave RF photogun made from halves”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **1013**, p. 165651 (2021).
- [22] 上坂 充, 他: “可搬型 950 keV/3.95 MeV X バンド電子ライナック X 線源による産業/ 社会インフラ診断”, 「加速器」, **12**, p. 142 (2015).
- [23] M. Boronat: “CERN’ s High Gradient X-Band Test Stands: Status and Update”, presented at the 2023 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2023) (2023).
- [24] C. Limborg-Deprey, et al.: “An X-band Gun Test Area at SLAC”, Conf. Proc. C, **110328**, pp. 133–135 (2011).
- [25] S. Matsumoto, T. Abe, Y. Higashi, T. Higo and Y. Du: “High gradient test at Nextef and high-power long-term operation of devices”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **657**, 1, pp. 160–167 (2011). X-Band Structures, Beam Dynamics and Sources Workshop (XB-10).
- [26] P. G. Maxim, S. G. Tantawi and B. W. Loo: “PHASER: A platform for clinical translation of FLASH cancer radiotherapy”, Radiotherapy and Oncology, **139**, pp. 28–33 (2019). FLASH radiotherapy International Workshop.
- [27] P. Mutsaers: “Smart*Light: A compact ICS source”, presented at the 15th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2023) (2023).
- [28] M. Volpi: “X-LAB: A VERY HIGH-CAPACITY X-BAND RF TEST STAND FACILITY AT THE UNIVERSITY OF MELBOURNE”, presented at the 2024 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2024) (2024).
- [29] F. Cardelli: “X-band activities for the EuPRAXIA@SPARC-LAB Linac”, presented at the 2024 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2024) (2024).
- [30] E. A. Nanni: “Recent Experiments with High-Gradient THz Accelerators”, presented at the 12th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2019) (2019).
- [31] M. Othman: “High Power Tests of Millimeter Wave Accelerators”, presented at the 13th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2021) (2021).
- [32] 阿部 哲郎: “高エネルギー常伝導高電界加速技術の展望”, 高エネルギーニュース, **41**, 3, p. 95 (2022).
- [33] 林 賢宏, 永井 翔太郎, 真田 篤志: “0.75-1.1THz における常温異常表皮効果の実験的評価”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, **2013**, 1, p. 110 (2013).
- [34] M. Dal Forno, V. Dolgashev, G. Bowden, C. Clarke, M. Hogan, D. McCormick, A. Novokhatski, B. Spataro, S. Weathersby and S. G. Tantawi: “RF Breakdown Tests of mm-Wave Metallic Accelerating Structures”, Phys. Rev. Accel. Beams, **19**, 1, p. 011301 (2016).

- [35] F. Wang, C. Adolphsen and C. Nantista: “Performance Limiting Effects in X-Band Accelerators”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **14**, p. 010401 (2011). [Addendum: *Phys. Rev. ST Accel. Beams*15,120402(2012)].
- [36] D. Merenich, et al.: “Breakdown insensitive acceleration regime in a metamaterial accelerating structure”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **27**, 4, p. 041301 (2024).
- [37] K. Oide: “Synchrotron Radiation Limit on the Focusing of Electron Beams”, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, pp. 1713–1715 (1988).