

■ 研究紹介

高エネルギー常伝導高電界加速技術の展望

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) / 加速器研究施設

阿部 哲郎

tetsuo.abe@kek.jp

2022 年 (令和 4 年) 11 月 4 日

1 はじめに

近年、応用加速器が注目されている。特定の分野・目的のために開発されてきた加速器技術を社会還元する研究である。その中でも特に、超伝導または常伝導のリニアコライダー向けに開発された加速管の技術を、医療・産業分野に応用する研究がある。例えば、原子炉を使う従来の方法では安定的な製造・入手が困難になってきている短寿命の放射性医薬品の原材料を大量に製造する超伝導加速器がある [1]。また、常伝導では、博物館や大学において簡単に設置できるほど小型・安価であり、波長可変な単色 X 線源 (レーザーコンプトン散乱) 用加速器がある [2]。このような応用加速器においては、超伝導は大電流ビームが重要なケースに、常伝導は高加速勾配 (高電界加速) が重要なケースに応用され、相補的な展開が図られている。しかし、大型の高エネルギー加速器、特に、リニアコライダー (最初の概念提案は 1965 年 [3]) の場合にどちらが適しているかは難しい。なぜなら、リニアコライダーにとっては、大電流ビームと高加速勾配の両方が重要だからである。歴史的にみると、2004 年以前は、常伝導ベースで進められていた米国の Next Linear Collider (NLC) (X バンド) や日本の Global Linear Collider (GLC) (C, X バンド) といった常伝導リニアコライダー計画があったが、2004 年の International Technology Recommendation Panel (ITRP) の勧告により、超伝導加速を軸にした International Linear Collider (ILC) 計画 [4] が立ち上がった。一方、2007 年に、欧州の常伝導リニアコライダー計画である Compact Linear Collider (CLIC) [5] の加速周波数が 30 GHz (Ka バンド) から 12 GHz (X バンド) に降りてきた。そこで、NLC・GLC 向けの研究開発の成果をベースにした CLIC 用高電界加速管の開発が、CERN (欧州) - SLAC (米国) - KEK (日本) の 3 極国際共同研究体制で立ち上がった。また、2017 年頃から、米国の高エネルギーコミュニティが Cool Copper Collider (C³) [6] を提案している。

しかしながら、文部科学省の ILC に関する有識者会

議 (第 2 期, 2022 年) の答申では、ILC 準備研究所の設立は時期尚早と判断された [7]。また、CLIC は、欧州で主軸が Future Circular Collider (FCC) 計画に移ったこともあり、棚上げ状態である。C³ に関しては、現在開発段階にあるため明確なことは言えないが、ILC や CLIC に対して圧倒的に優位な技術という訳ではない。エネルギー拡張性を有するリニアコライダーは、高エネルギー物理学の将来にとって極めて重要であることは誰もが認めることであろう。それがなかなか実現できないことは遺憾千万である。

本稿では、そのような逆境の中で光明を見出すのが『より高い加速周波数』という方向性であることを述べたい。



図 1: 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。

2 より高い加速周波数へ

加速構造の典型的な大きさ (加速空洞の内径など) 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。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。近年は、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ている。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、これまで小型の加速器で一部展開されてきたにすぎなかった。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 1 を見ていただければ一目瞭然である。

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もある。構造が小さくなると、ビーム軸上の加速電磁場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) で加速効率を表す。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、

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

の関係にある。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¹:

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

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

¹一方、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 (ため $R_{\text{surf}} \propto f^2$)、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。

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。

以下に、今後展開が期待される X バンド、及び、それ以上の周波数の加速構造について解説する。

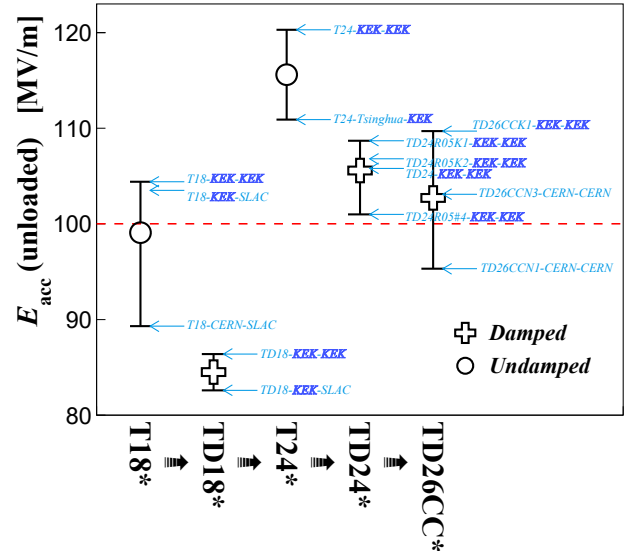


図 2: CLIC 用 X バンド加速管 (プロトタイプ) の高電界試験の結果 [8]。矢印は各加速管の試験結果。十字形 (丸形) プロットは、高次モード減衰構造のある (ない) 加速管の各世代の平均値。

2.1 X バンド (8 ~ 12 GHz)

X バンド高電界加速管の開発研究が日本 (KEK) で本格的に行われ出したのは、1990 年代の GLC の時代にさかのぼる。そこでは、SLAC-KEK の共同研究で、加速勾配 65 MV/m 仕様の 60 cm 加速管 (11.424 GHz) を開発した [9]。2004 年の ITRP 勧告直後の数年間は迷走期になったが、それまでの資産、知識、経験を基に、Nextef (New X-band Test Facility) [10, 11] を KEK 電子陽電子入射器棟内に立ち上げた。2007 年から 2020 年までは、CERN-KEK 間の協定に基づき、CLIC 用高電界加速管の共同開発研究を行った。最終的な成果としては、CLIC のルミノシティ低下が仕様内におさまるブレイクダウン (真空絶縁破壊) 率 (3×10^{-7} /pulse/m 以下) を満たす、加速勾配 100 MV/m 仕様の 30 cm 加速管の開発に成功した。このような高加速勾配・高安定度が要求される加速管の高電界性能は、真空放電に起因するブレイクダウンの発生率で決まっている。図 2 は、CERN, SLAC, KEK (Nextef) における高電界試験の

結果をまとめたものである。縦軸は、CLICの運転条件に合わせて、 3×10^{-7} /pulse/m以下のブレークダウン率で出せる最高加速勾配である。横軸は、プロトタイプ加速管の世代であり、左が古く、右が新しい。約10年かけて、合格ラインとなる100 MV/mの加速勾配を安定的に出せるようになった。図2には、加速管の名称の後に、「製作者-試験場所」を記載しているが、実に三分の二がKEKであり、KEK (Nextef)の貢献度の高さがわかる。この共同研究を通して、KEKでは、Xバンド加速管や関連部品の製作、調整、試験、評価の一通りのプロセスをKEK内で、またはKEK主導・監督のもと国内で行えるようになった。また、KEKでは、従来の製作方法と比べて加工や組立が容易で、かつ組立後の調整が少なく済む新しい製法（「4分割方式」または「縦方向分割方式」と呼ぶ）を独自開発しており、2017年、その基本性能を実証した[12]。現在は、応用加速器という新機軸で新たな展開を図っているが、高エネルギー指向も維持している。

KEKにおけるXバンド高電界加速管の開発の歴史については、参考文献[13]が詳しい。また、近年の状況の詳細については、参考文献[8]を参考にいただきたい。

2.2 ミリ波帯 (110 ~ 300 GHz)

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。そこで、SLACの高電界加速研究チームは、図3にある110 GHz (波長: 2.7 mm)の単セル型試験空洞を製作した[14]。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。 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。ジャイロトロンを出力を(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、ミリ波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[15]。

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

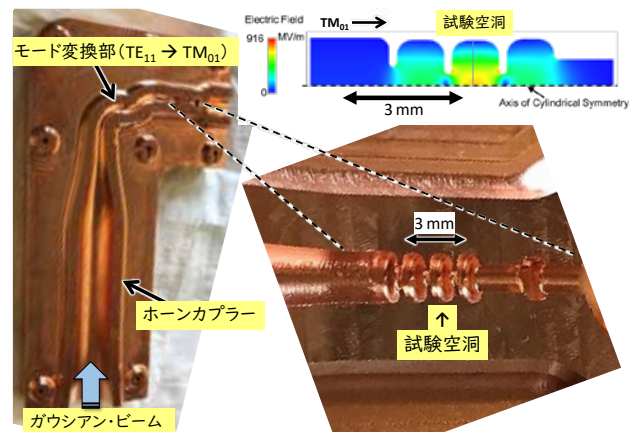


図 3: SLAC が製作した 110 GHz 試験空洞。Emilio Nanni 氏 (SLAC) 提供。

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[16]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。以上のことから、少なくともミリ波帯の上限である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3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、超精密加工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。

300 GHzの高電界試験で問題となるのは、大電力源である。300 GHzの商用ジャイロトロンは存在するが、非常に高価であるため、入手は簡単ではない。そこで、将来の加速器への応用も見据えて、レーザー駆動のテラヘルツ光源を300 GHz用に開発する研究が理化学研究所(理研)/光量子工学研究センターのテラヘルツ光源研究チーム(チームリーダー:南出泰重氏)で進んでいる。通常のテラヘルツ光源は、1 THz以上で効率がでて高出力となる装置である。それを、サブテラヘルツ(300 GHz)で高い効率が出るよう開発する研究である。大電力300 GHz波は、近赤外パルスレーザー光源と非線形光学結晶を用いた多段パラメトリック波長変換により発生させる[17]。実際に理研で開発が進んでいる装置を図4に示す。波長1064 nmのNd:YAGパルスレーザーを励起光源とし、その出力光の一部を用いた光

注入型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振 (BW-TPO) により波長 1065 nm 帯のアイドラー光を発生させる。そして、得られたアイドラー光と Nd:YAG レーザー出力光との差周波発生 (DFG) により、周波数 300 GHz の大電力パルス波を得る構成になっている。目標の尖頭出力は 100 kW であり、それで単セル型空洞内に約 350 MV/m の加速勾配を立てることができる。日米科学技術協力事業 (日米事業) に基づく SLAC-KEK-理研の共同研究チーム (日本側の代表は著者) では、SLAC の 300 GHz 空洞とこの光源を使い、金属製空洞としては史上最高周波数での高電界試験の実施を目指している。

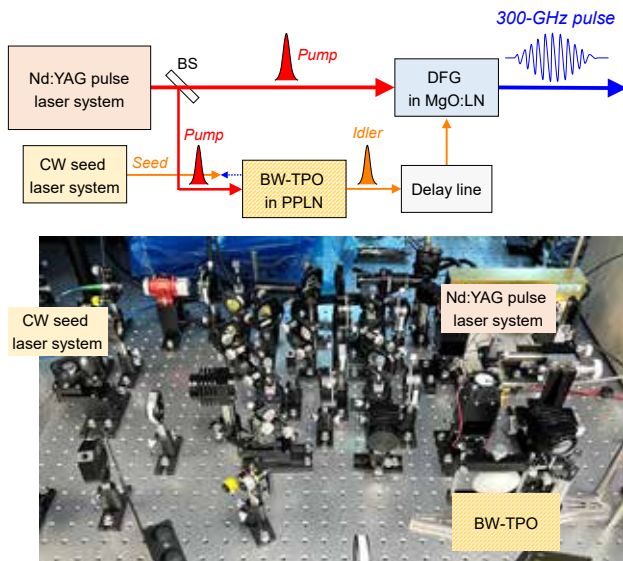


図 4: 開発中のレーザー駆動 300 GHz 大電力光源。瀧田佑馬氏 (理研) 提供。

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だろうか。SLAC の FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests) で行われた実験では、120 ~ 140 GHz の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 [18]。しかし、加速構造が壊れないとしても、ブレークダウン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 [19])、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う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。詳細メカニズムはまだ解明されていないが、電場と磁場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、表面電場強度とともに、ブレークダウン率と強い相関のあることである [20]。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、300 GHz の試験空洞では、 R_{surr} が上がっても RF パルス幅がそれ以上に短くなる効果で、パルス加熱による温度上昇は数度で済む [14]。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、これまででない超短 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。

これまでは金属製空洞に限った話であったが、ここで、誘電体加速について少し触れたい。誘電体には高い耐電圧性があるので、誘電体を用いた加速構造は、金属製空洞と比べて、(場合によっては) 高い高電界性能が期待できる。但し、誘電体上の帯電やマルチパクタ放電などの問題もある。誘電体加速には様々な方式があるが、KEK では理研などと共同で、高変換効率テラヘルツ光源を使ったミリ波帯 Dielectric Lined Circular Waveguide (DLW) 加速構造 (レーザー駆動、電子駆動) の研究開発が進んでいる [21]。図 5 は、KEK 電子陽電子入射器ヘインストールされた DLW 試験構造である。ビームは、内径 2 mm のガラス管の中を通り加速される。

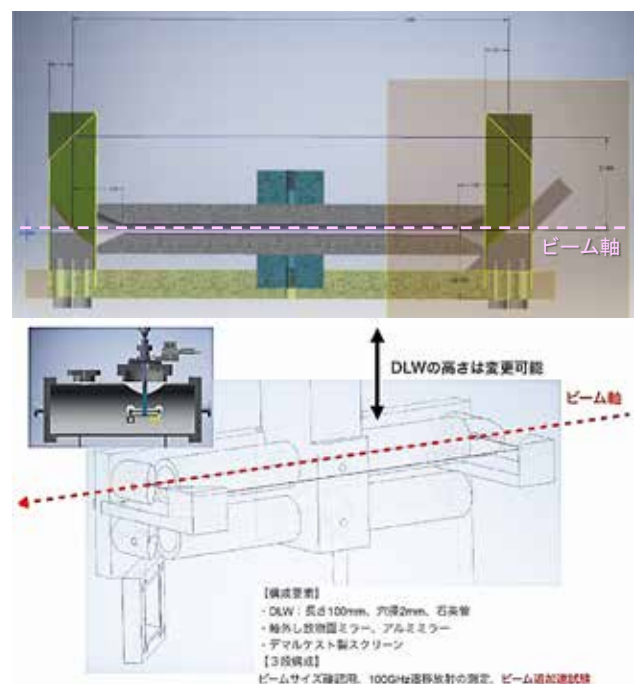


図 5: 共振型 DLW 加速構造 (参考文献 [21] より抜粋)。

本節で紹介したミリ波帯の加速構造は、現時点ではまだまだ開発段階だが、技術的にはこれまでの高周波加速の延長上にあり、または延長上にあるような形態にでき、既存の加速器との親和性が高い。そう遠くない将来、高エネルギー加速器への応用に期待したい。また、これらは広い意味ではテラヘルツ加速器になるが、次節で解説するものと区別するため、本稿では「サブテラヘルツ加速器」と呼ぶ。

2.3 テラヘルツ帯 (~10 THz)

極高加速勾配に着目すれば、レーザーや電子ビームで駆動されるプラズマ航跡場加速（ここでは単に「プラズマ加速」）は、テラヘルツ加速の代表格と言える。プラズマ加速は、プラズマ中の急峻な疎密波によって生成される高電界を使い、加速周波数としてはプラズマ振動の数十テラヘルツである（波長は数十ミクロン）。金属や誘電体を用いた加速構造と比べると、加速勾配を何桁も上げることができる。しかし、今後の高エネルギー実験で望まれる数百 GeV 以上まで加速するには、長距離にわたって安定で、粒子損失が極めて少ない多段加速ができればならない。そこでは、ミクロンオーダーのビーム制御やアライメント、フェムト秒オーダーの時間同期などの高精度技術が必要となる。

プラズマ加速は革新的な技術であるがゆえに、これまでの高周波加速器との親和性が少ないが、その延長上に乗るような展望を次節で示す。

3 将来展望

ミリ波帯の金属製常伝導加速空洞は、これまでの高周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、著者が思いった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
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

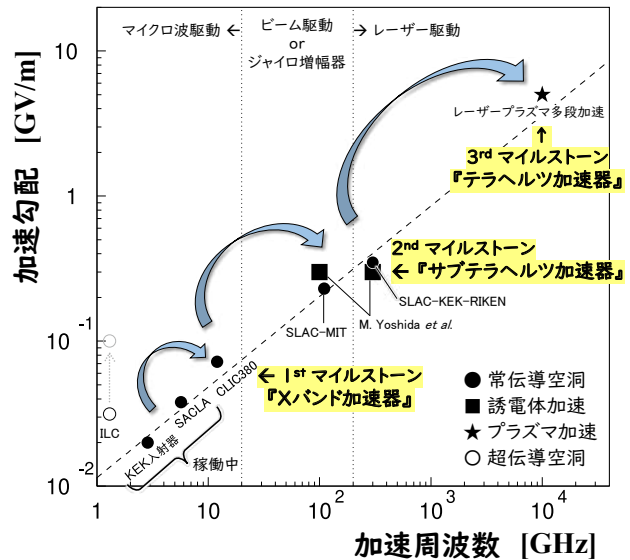


図 6: 高エネルギー高電界加速技術の展望。プロットは、設計値、目標値、または到達値である。破線は $E_{acc} \propto f^n$ によるフィット。レーザープラズマ多段加速のプロットは、比較的安定して電子を加速できるプラズマ振動数と集光光学系を含む平均加速勾配。

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：数十ミクロン）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6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、数十 TeV 領域の物理実験実現へのロードマップ（案）でもある。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。

4 おわりに

2004年のITRP勧告後、Xバンド常伝導高電界加速技術は躍進した[8]。また近年、ミリ波帯の常伝導高電界加速の研究が始まっている。テラヘルツ加速の一種であるプラズマ加速の研究では、例えば、自由電子レーザーなどを狙ったレーザー駆動による低エミッタンス量子ビーム加速器の開発と実証が展開されている[22]。このような状況や、これまでの経緯から、『高い加速周波数 & 高い加速勾配』の方向に大きく展望が開けていることを示した。そして、そのための重要な第一歩が「Xバンド加速器の展開」である²。また並行して、次(々)世代「(サブ)テラヘルツ加速器」のための加速構造の研究開発も推し進め、将来の飛躍に備えることも重要である。

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。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、本稿にて私見を示させていただいた。この展望が、または、この展望に基づく何か、これからの高エネルギー物理学を導ければと願って筆をおく。

謝辞

KEK加速器の榎本嘉範氏と肥後壽泰氏からは、専門的な見地からの確なご指摘をいただきました。日米事業の共同研究者であるSLACのEmilio Nanni氏からは、図3のご提供をいただきました。同じく日米事業の共同研究者である理研の南出泰垂氏および瀧田佑馬氏は、テラヘルツ光源について丁寧にご説明いただき、また図4をご提供いただきました。大阪大学・理研の細貝知直氏には、レーザープラズマ加速の現状に関して詳しいご説明をいただきました。関係者の皆様にお礼と感謝を申し上げます。

²展開の場としては、例えばKEKでの場合、ATF入射器、電子陽電子入射器、赤外自由電子レーザー加速器のXバンド化が考えられる。

参考文献

- [1] KEK, 株式会社アクセルレーター, 「超伝導加速器による医療用RI製造実験開始 - モリブデン99の国内供給体制の確立を目指して -」, プレスリリース (2019).
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191018.pdf>
- [2] W. Wuensch, “High-Gradient X-Band Technology: from TeV Colliders to Light Sources and More”, CERN Courier, 23 March (2018).
<https://cerncourier.com/a/high-gradient-x-band-technology-from-tev-colliders-to-light-sources-and-more/>
- [3] M. Tigner, “A Possible Apparatus for Electron Clashing-Beam Experiments”, Nuovo Cim. **37**, 1228-1231 (1965).
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02773204>
- [4] <https://linearcollider.org/>
- [5] <https://clic.cern/>
- [6] S. Dasu, *et al.*, “Strategy for Understanding the Higgs Physics: The Cool Copper Collider”, in Proceedings of 2022 Snowmass Summer Study (2022).
<https://inspirehep.net/literature/2052501>
- [7] 国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議 (第2期), 「国際リニアコライダー (ILC) 計画の諸課題に関する議論のまとめ」 (2022).
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/064/toushin/220214.htm
- [8] 阿部 哲郎, 「常伝導高電界加速研究の最前線」, 高エネルギーニュース, **36**, 4, p. 168 (2018).
<http://www.jahep.org/hepnews/2017/17-4-2-Jodendo.pdf>
- [9] J. Wang and T. Higo, “Accelerator Structure Development for NLC / GLC”, ICFA Beam Dyn. Newslett., **32**, pp. 27-46 (2003).
<https://inspirehep.net/literature/646498>
- [10] 松本 修二, 明本 光生, 工藤 昇, 設楽 哲夫, 中島 啓光, 肥後 壽泰, 福田 茂樹, 松下 英樹, 横山 和枝, 吉田 光宏, 「KEK X-Band RF 試験施設 (Nextef) について」, 第4回日本加速器学会年会, TO03 (2007).

- https://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32/contents/PDF/TO/TO03.pdf
- [11] S. Matsumoto, T. Abe, Y. Higashi, T. Higo and Y. Du, “High Gradient Test at Nextef and High-Power Long-Term Operation of Devices”, *Nucl. Instrum. Meth.*, **A657**, pp. 160–167 (2011). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211011867>
- [12] 阿部 哲郎, 高富 俊和, 肥後 寿泰, 松本 修二, 荒木 田 是夫, 「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, WEP039 (2017). <https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2017/1727/1727038.pdf>
- [13] 肥後 寿泰, 松本 修二, 上野 健治, 「KEK における X バンド高電界加速への研究開発」, 「加速器」, **6**, 3, p. 202 (2009). <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki/cgi?articles%2F6%2Fp202.pdf>
- [14] 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). <https://indico.cern.ch/event/766929/contributions/3439344/>
- [15] M. Othman, “High Power Tests of Millimeter Wave Accelerators”, presented at the 13th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology (HG2021) (2021). <https://indico.fnal.gov/event/22025/contributions/210494/>
- [16] 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).
- [17] H. Minamide and Y. Takida, “Intense Multicycle Terahertz-Wave Generation for Electron Acceleration”, presented at the 11th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources (WIRMS2022) (2022).
- [18] 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). <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.011301>
- [19] 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). <https://ci.nii.ac.jp/naid/500000435601/>
- [20] F. Wang, C. Adolphsen and C. Nantista, “Performance Limiting Effects in X-band Accelerators”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **14**, p. 010401 (2011). <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.14.010401>
- [21] 吉田 光宏, 「THz 加速, 誘電体加速」, 高エネルギー将来計画委員会: 第 7 回 勉強会 (2021). <https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/getFile.py/access?contribId=2&resId=0&materialId=slides&confId=1639>
- [22] 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」, JST 未来社会創造事業 (2017~). <https://lpa.ims.ac.jp/>