

高電界加速研究の動向

阿部 哲郎*・東 保男*・肥後 寿泰*・松本 修二*

Trend of Research toward High Gradient Acceleration

Tetsuo ABE, Yasuo HIGASHI, Toshiyasu HIGO, Shuji MATSUMOTO*

Abstract

In recent years, the acceleration at 100MV/m at X-band frequency range with travelling-wave accelerator structure is being realized, based on the Linear Collider R&D and recent research advancement. This X-band technology has now been started to be considered as candidates for many accelerators worldwide.

Here we describe the world-wide trend through the recent three international meetings,

November 2010: X-band international workshop (XB10) at UK

May 2011: 5th X-band accelerator structure design and test program at SLAC

June 2011: International workshop on mechanisms on vacuum arcs at Helsinki

In this report, we also describe the issues and view points, which we should address to understand the physics needed for the further advancement.

1. 序

Xバンド帯 (8.2 ~ 12.4 GHz) の RF 応用技術は警察のレーダー等で一般にもなじみが深い。小型の加速器として 9.3 GHz の応用例は多少あったが、加速器への応用を目指した大きな展開はリニアコライダー (LC : Linear Collider) への展開を検討されてからである。KEK での X バンドをベースにした LC 開発で出発した高電界開発研究については、以前に発行した加速器学会誌記事¹⁾で詳しく述べてある。2004 年の ITRP (International Technology Recommendation Panel) 勧告までは 50 MV/m の加速電界実現を目指して開発してきたが、現在は CLIC (Compact Linear Collider)²⁾ プロジェクトとの共同研究として、更に高い、100 MV/m 級の加速を実現すべく研究が進展してきていて、加速管を形成する銅材の真空中での放電限界に近づいているとの認識も深めつつある。こうした高エネルギー加速器への適用研究として、ディスクロード型構造の X バンド CLIC プロトタイプ加速管試験では、加速勾配 80 MV/m での放電頻度 (Break Down Rate: 以下 BDR と略す) が十分低く、実用に耐えることが実証されている。しかしマルチバンチの安定加速のための HOM (Higher Order Modes) 減衰構造をもつ加速管では BDR が増大することがわかり、今後は実機仕様の加速管で 100 MV/m 級の安定運転実現が課題になっている。

このように高エネルギー加速器指向の研究から始まった研究テーマは現在、放電の発生メカニズムの研究、CLIC への技術確立を目指した開発研究、更には 100 MV/m を優に超える運転の可能性を探る研究、またこれら X バンド技術を基礎に数十 MV/m 級の加速電界に抑えたコンパクトな FEL 加速器、コンパクトな医療用加速器、非破壊検査機器への応用、等に広がっている。

本稿では、このようにリニアコライダーへの適用を目的に高電界化を目指した X バンド加速の研究開発に基礎を置き、今や多くの応用が実用化してきている世界的動向について、最近の X バンドに関連する下記 3 つの国際会議での議論を通じて述べる。

① X バンド国際ワークショップ (XB10)³⁾

2010 年 11 月 英国@ Cockcroft Institute

X バンド関連の総合的会議 : 高電界, 応用, RF 源, 等々

② 第 5 回 X バンド加速管, 国際共同研究会議⁴⁾

2011 年 5 月 米国@ SLAC 国立加速器研究所
主に高エネルギー加速器のための加速管に特化した高電界研究とそのための共同研究会議

③ 真空アークのメカニズムに関する国際ワークショップ⁵⁾

2011 年 6 月 フィンランド@ ヘルシンキ大学
放電現象の物理メカニズムの解明に焦点をあてた基礎的議論に集中した会議

* 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

2. Xバンド国際ワークショップ (XB10)

X-Band Structures, Beam Dynamics and Sources Workshop は2010年11月30日から12月3日まで英国マンチェスター郊外 Daresbury にある Cockcroft Institute of Accelerator Science and Technology で開催された³⁾. 2008年開催の第一回目に引き続き, 今回も Daresbury 研究所がホストしたこの会議のテーマは, 会議のウェブサイトにあるように, Xバンド加速器にかかわる全般, すなわち個々のRF技術や加速器のビームダイナミクスまでふくめた包括的なものである. 具体的には, 個々の加速管およびパワーソースの開発研究や稼働している各種試験施設の報告, また, X線源や近年検討され始めたFELなどの加速器将来計画が議論された. ここではいくつかの発表を引用しながら, 会議を概括する.

Xバンド帯RF高電界加速技術開発のそもそもの動機は, リニアコライダーを目指した室温高電界加速器である. 実証的研究状況は, CERNのW. Wuensch氏により報告された. そのなかで, ①ここ数年来のCLICプロトタイプ加速管試験では, 日常的に100 MV/mを上回る加速勾配での運転がされている. ②Disk Load構造の加速管では, 加速勾配80 MV/mでのBDRは十分低いことが実証され, ③今後, マルチバンチ加速のためのHOM減衰構造をもつ加速管で同様の特性が出せるよう, 更に開発を進めることになる, ということが述べられた.

このような状況をふまえて, 世界各地でXバンド加速に基づく加速器が検討され始めている. Xバンド加速器は, 高い周波数のおかげでビーム加速部分の機器のサイズが小さくできることから, 超伝導高電界加速器と比較して小型化が可能になり, 医療用照射加速器や非破壊検査機器などへの応用が検討・開発されている.

X線源としての小型加速器研究はいろいろなところで始まっている. 東大の上坂氏により, 950 keV加速器により発生させたX線を使った構造体検査(コンビナートのパイプ配管や橋梁などが対象)や医療応用の開発研究の報告がされた. また, ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)のHartemann氏は, レーザーコンプトン散乱を用いて単色X線を発生させ, 蛍光核共鳴吸収による核物質の有無を判定する貨物コンテナの透視検査計画の開発状況を報告した. 加速部分のみでなく, 電子源としてもXバンドRF電子銃を採用し, 低エミッタンスビームを発生させる設計である.

イタリア, トリエステ・シンクロトロン研究所のG. D'Auria氏からは, FERMI@Elettra FELプロジェクトにおけるXバンドを用いたビームエネルギーのリニアライザーや, Xバンド加速によるビームエネルギーの増強計画についての報告があった. SLACの

C. Adolphsen氏やオランダ, グローニンゲンKVIのBeijers氏らは, RF電子銃を始め, 主加速もXバンドを用いたコンパクトなXFELの検討を紹介した. またTERA FoundationのDegiovanni氏は, TERAプロジェクトが目指すハドロンセラピー用, 陽子・炭素ビームを, Sバンド, 更にはCバンドの定在波加速管による線形加速を用いて, これまで日本が牽引してきたシンクロトロンでの加速に代わるコンパクトなハドロンビーム加速器への展開可能性を紹介した. このように, Xバンド加速器を生かしたいろいろな加速器が検討され始めており, 今後ますます検討が広がっていくような雰囲気であった.

一方アメリカでは, 150 MV/m加速勾配の加速器開発のための基礎研究を, アメリカ各地の研究機関が協力して進めている. Xバンド帯高電界加速の基礎研究として, 加速管の形状, 材質をテストする, また新しい加速構造として, PBG (photonic band gap), 誘電体装荷 (Dielectric-loaded) 遅波構造, などの研究が進行中であることが, この共同研究活動の代表である, SLAC, S. Tantawi氏によって報告された.

このほかにも, 加速管構造設計や高電界に関する基礎的研究のセッションなどが並行してあったが, それらの内容は, 本稿の2番目, 3番目で取り上げるワークショップでも議論され紹介されているのでここでは割愛する. (すべての発表スライドはウェブサイト³⁾に上がっている.)

さて, Xバンド帯では, 典型的な導波管(WR90: 横寸法=22.86 mm × 10.16 mm)をみれば明らかのように, 断面サイズが小さくなりコンパクトになる反面, 長距離のRFパワー搬送では銅導波管1 mあたり2%ものロスになり無視できない. このため, 低損失のTE₀₁モード円形導波管等を用いた損失を減らす工夫がなされる. このためには, 矩形~円形のモード変換器など, 各種の新しいRFコンポーネントが必要になる. これらのハイパワーXバンドコンポーネントは, コマーシャルベースでの供給はなされていないものが多い.

コマーシャルベースで機器が得られないという事情がRF源としての高出力パルスクライストロンにもあり, その供給がXバンドをベースとする計画での一つの懸念にあげられている. 世界的にみても高電界加速器駆動用の高出力クライストロンは, SLACや東芝等, 供給元が限られていて, 手に入りにくい. この辺の事情から, Paul Scherrer 研究所では, 次期FEL計画にCバンドを選択したとのことである. リニアコライダー開発研究の過程でSLACにより開発された電磁石ソレノイド集束の50 MW級高出力パルスクライストロン(名称XL-4)は, 実機として使用可能であるが, 供給元はSLACのみであり, 会議でも工業界への働きかけが重要だと認識を共有した.

筆者の一人、松本は、KEK では Nextef と呼ばれる試験施設で 2007 年以降、毎年数千時間の運転を確保してきていることを紹介した。高電界加速管の国際共同研究の拠点の一つであり、長期にわたる高稼働率の維持が必須である。これに使用しているのはリニアコライダー用に特化されて開発された周期永久磁石集束型 X バンドクライストロンであり、40 MW、数百ナノ秒程度での運転にはかなりの長期の使用にも耐えることが報告された。これをベースに実用 RF 源の開発にもつながる可能性を示唆している。

3. 第 5 回 X バンド加速管、国際共同研究会議

本会議⁴⁾は、X バンド帯 RF 高電界加速管を次世代常伝導リニアコライダー向けに開発することを目的として、主に加速管の設計・製作・評価に関して CERN-SLAC-KEK の 3 研究機関を中心とした共同研究会議である。現在の主目標には、当然 CLIC²⁾ のための高電界加速管があがる。第 1 回目の会議は 2007 年に CERN で開かれ、その後、KEK、SLAC と毎年持ち回りで開催され今回は 5 回目である。KEK では 2008 年⁶⁾に続き、今年 (2011 年) 開催することになっていたが、3 月 11 日の東日本大震災により KEK での開催を断念、急遽 SLAC での開催となった。大震災の影響とはいえ急遽開催地が変更となり、SLAC の関係者の方々には心より感謝の意を表します。なお、2012 年 5 月には日本での開催を予定している。

会議は 5 月 16 日から 18 日の 3 日間、SLAC 国立加速器研究所にて開催され、40 人程の研究者が集まった。急遽開催場所が変わったせいか、米国内からの参加者が多く見受けられた。

CLIC 用加速管開発

(1) CLIC プロジェクト

CLIC は、現在の ILC (International Linear Collider) を超える 500 GeV ~ 3 TeV のエネルギー領域を目指した次世代常伝導リニアコライダー計画で、「2 ビーム加速」という新しい RF 加速方式が採用されている²⁾。この加速方式では、PETS (Power Extraction and Transfer Structure) と呼ばれる部分で大電流駆動ビームから RF パワーを取り出し、モジュール内に近接する高電界加速構造 (Accelerating Structure: AS) に輸送して主ビーム加速を行う (図 1)。このスキームにより、TeV 領域のリニアコライダーにも対応できる RF システムの高効率化を実現する。

W. Wuensch 氏 (CERN) の発表によると、殆どの Feasibility issues について検証がされてきており、現在、CDR (Conceptual Design Report) の作成が進められている。CERN のしっかりとしたサポートがあり、

CERN 中期計画に沿ってプロジェクトが進行している。RF 加速構造に関しては、コンパクト・カプラや HOM ロードを除いて、殆ど基本設計ができている状況である。本会議では、加速管以外にも導波管コンポーネントや PETS 関連の報告も多数あった。

(2) 加速管製作

G. Riddone 氏 (CERN) より CERN での加速管製作についての報告があった。現在は「TD24」(T: Travelling wave, D: Damping ポート付, 24: セル数) と名付けられた共同開発加速管を製作中である。その前のバージョンである「TD18」に比べて、RF パルス内表面温度上昇を低く抑えた設計とした。CLIC の 2 ビーム加速構造モジュールへの組み込み・試験のための検討・準備が進んでいる。ベースラインのデザイン以外に、R. Jones 氏の DDS (Damped Detuned Structure) や J. Shi 氏の Radial choke damping 構造も並行して検討されている。

(3) 加速管高電力試験

初期の設計である、T18 と TD18 の 18 セル加速管に関する BDR を比較したものが図 2 である。これから明らかに見えることは、HOM 減衰構造を付加 (TD18) するととたんに BDR が二桁も跳ね上がることである。この増加を抑制することは CLIC にとって最も大きな問題の一つである。TD18 における高い表面温度上昇が災いしているのではないかと推定があり、加速管内のパラメータプロファイルを変更することで、抑えた設計をしたのが T24 や TD24 型である⁷⁾。

会議では本稿著者の一人、肥後から 3 月 11 日の大震災発生瞬間まで行われていた KEK/Nextef での「T24」(ディスクロード型構造) 加速管に対する高電力試験結果の発表があり、非常に低い BDR まで到達していたことが報告された (図 3)。初期に得られた BDR の加速電界依存性を仮定すると、1744 時間のコンディショニング後の BDR は、CLIC の仕様 (100 MV/m, 250 ns パルス幅で、 3×10^{-7} 以下) を十分満たす状態に到達したと判断できる。この結果により、次に試験予定の TD24 加速管 (HOM 減衰構造付) への期待が一気に膨れ上がった。

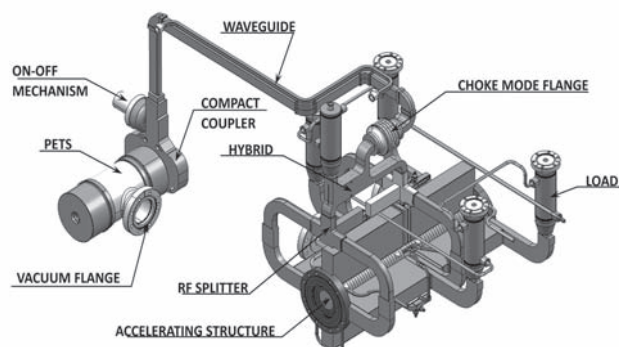


図 1 CLIC 2 ビーム加速構造の基本モジュール

(4) 課題

加速管の長さは 30 cm 程度なので, $BDR=3 \times 10^{-7}$ times/pulse/m が統計的に有意の値と見なせる回数, 例えば, 10 回発生するには 600 時間強かかり, 1 パラメータでの運転時間が 1 カ月にもなる. 更に, 加速管の個性ばらつきをふまえた評価をするには, 試験加速管の本数は 100 本超となろう. この試験を実現するには試験を並行して行えるよう, 十分な数のテストスタンドが必要になるが, 現在稼働できる高電力試験用テストスタンド (KEK/Nextef, SLAC/NLCTA・ASTA, CERN/CTF3) では十分でないことは明らかである. そこで, 例えば高繰り返しの 5 MW 級クライストロンを開発し, パルス圧縮を併用して多数加速管の同時試験ができる, という提案を I. Syrathev 氏 (CERN) が報告した. 実現すれば, FEL や医療等, 他分野への応用にも適したシステムにつながりそうである.

基礎実験

高電界常伝導加速管の性能が何によって制限されているか, 物理的描像はわかっていない. これを探る基礎実験は並行して行われている. ここでは今回報告された 2 モード空洞と単セル空洞の 2 つの実験を紹介しよう.

(1) 2 モード空洞

2002 年くらいから, それまで通常考えられてきている BDR は表面電場によって決まっているだけではなく, 表面磁場も大きく関与して決まっているのではないかという仮説が議論され始めた. 実際, 高電力試験を終えた加速管の中を見てみると, 表面磁場が高いところにも大きな変化が見られる. 実際の加速管では磁場と電場が混在しているため, 磁場の効果だけを切り離して調べるのは困難であり, 分離して試験すべく, 2 モード空洞 (Dual-mode cavity)⁸⁾ が考案された. ひとつの試験セル内に, 縮退した TM_{01} モードと TE_{01} モードの両方を励振することができる. TE_{01} モードに表面電場はないので, 磁場と電場の効果を切り離して調べることのできる実験である. 今回 D. Yeremian 氏 (SLAC) より, 磁場が BDR に効くとの発表があった.

(2) 単セル空洞試験

V. Dolgashev 氏 (SLAC) らが行ってきている一連の実験である. 単一セルのみに電磁場を集中するシンプルな構成で, 試験は SLAC のクライストロン・ラボで行われている. これまで, 形状, 材料, 表面処理等を変えて数多くの試験が行われてきた. 現在は 34 番目で, Photonic Band Gap (PBG) 構造のセルを試験中とのことだった. PBG 構造では, 2 平面間に細い円柱状の金属ロッドを周期的に挿入して加速モードをトラップする構造になっている. 初期試験では, 表面磁場の強いロッドには, パルス内表面温度上昇によると思われるダメージが大きく, BDR も高いことがわかった. これに対して今回は, 問題のロッドの断面形状を楕円にし, パルス内表面温度上昇を抑える工夫がされている. パルス内表面温度上昇はほぼパルス幅の平方根に比例するので, パルス幅を変えて BDR がどう変化するかを試験した. 今回の試験では, パルス内表面温度上昇との明確な相関は見られなかった. 尚, 同様の実験環境を KEK/Nextef にも今年度立ち上げる予定であることが紹介された.

関連するシミュレーションによる研究

(1) Ace3P

2 ビーム加速ユニットはとても複雑である. 各コンポーネントがうまく設計されていても, 組み立てて全体として動かしてみると色々と問題が発生するかも知れない. ひと昔前であったら, モックアップ等を作っ

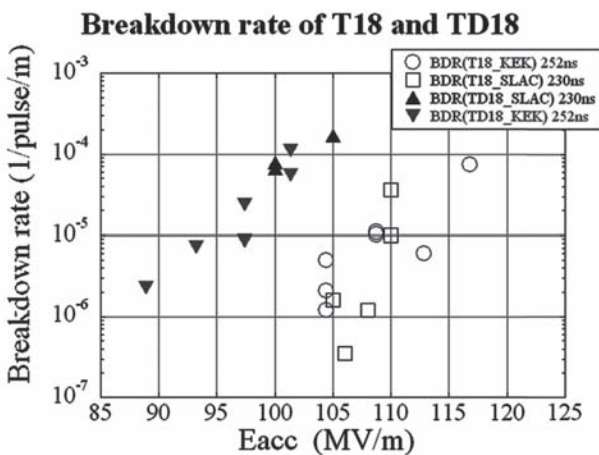


図 2 HOM 減衰構造有無に関する BDR の比較 (T18 と TD18)

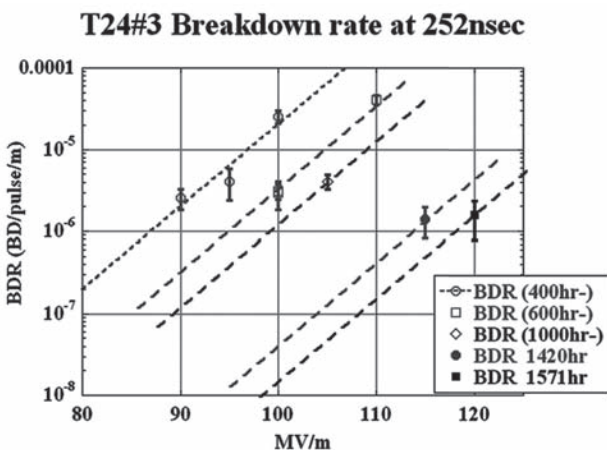


図 3 KEK (Nextef) における T24 加速管高電力試験の結果

て実世界で試験する必要があったのだが、近年のコンピュータ技術の進歩のお陰で、そのような複雑・大規模な構造全体をそのままシミュレーションに託してバーチャル世界で「試験」することが可能になってきている。その例とも言えるのが、SLACが中心となって開発している3次元電磁場シミュレーションコードAce3P (Advanced Computational Electromagnetics 3D Parallel) である。固有モード、Sパラメータ、ウェーク、熱構造解析等、殆どのことのできるスイートで、スーパーコンピュータ上で動くので大規模問題も難なく扱える。まさに、State-of-the-Art Simulationである。A. Candel氏 (SLAC) より、2ビーム加速の基本構成である1 PETS + 2 AS + 導波管回路に対して、PETSにドライブ・ビーム・パンチ($Q=8.34$ nC, $\sigma_z = 3$ mm)を入れた場合のシミュレーション結果が報告された⁹⁾。結果の1例を図4に示す。フル形状に対する初めてのシミュレーションで、ウェーク・フィールドの単極モードに関しては問題ないが、双極モードが意外に大きく危なそうであることがわかり、PETSからASへのWR90導波管の途中にスロット式のHOM減衰構造を入れるという提案 (I. Syratchev氏による) に繋がった。

(2) 微小構造表面での電磁場評価

本稿著者の一人、阿部は、微小な突起付近での電場増強の話はよくあるが、逆にへこんだ形状の場合にフィールドがどれだけ増強されるかという話をした。CLICで検討されている4分割方式の加速管の合わせ面をモデル化したものであり、合わせラインの角に $R50 \mu\text{m}$ の丸みがついている場合、接合させた際にそのRの分のへこみがある形状である。電場はCST STUDIO SUITE¹⁰⁾を使って数値計算した。ずれや隙間がなく完璧に接合したとしても、Rの分のへこみでフィールド増倍率は約20%と意外に大きいことが示された。

「へこみ付近での表面電流はどうなるのか?」という質問があったが、 $50 \mu\text{m}$ 級の構造では今回の取り扱いのように銅を完全導体として扱う、表皮深さ(δ)ゼロの近似が妥当である。しかしBDRの理解やBreakdown (BD) 自身のメカニズムに迫るには、対象となる構造がミクロン級の結晶構造や欠陥等で生ずる同様の効果を考える必要があり、 $\delta = 1 \mu\text{m}$ 弱のXバンドでは、表面電流がどう流れるのかも問題になりそうである。昼食の席では、Ace3P + スーパーコンピュータを使って表皮効果を第一原理的に計算してみたらどうか、ということが話題になった際、「古典的な表皮効果を最新鋭のスーパーコンピュータで計算するということか」というコメントもあった。ミクロな現象を理解した上で初めて安定な高電界の実現につながるの思いを新たにした。

(3) BDのシミュレーション

そもそも、太古の昔から人間は放電現象を利用して

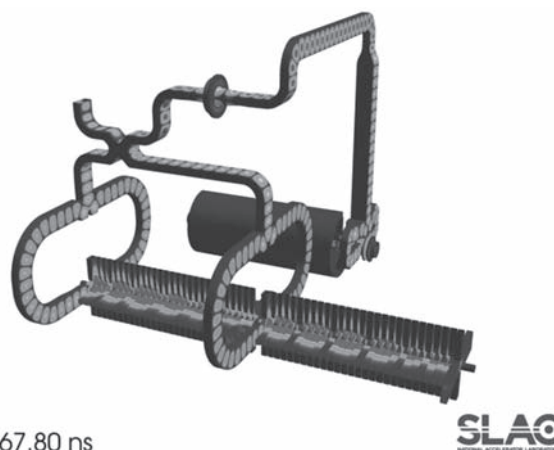


図4 CLIC, 2ビーム加速基本構成に対するフル・シミュレーション例

きたが、それがどのような物理プロセスで発生するかはわかっていない。これを理解するためのBDの物理現象を第一原理的にシミュレーションするという壮大なプロジェクトについて、K. Nordlund氏 (ヘルシンキ大学) より発表があった。このアプローチに関しては、3番目のワークショップで精力的に議論されており、そちらを参考にいただきたい。

その他

学術的な研究の他に、株式会社アキュセラ (神奈川県) によるXバンド加速システムを使った小型・高精度放射線がん治療装置の話や、L-3 Communications (米国カリフォルニア州) によるXバンド (9.3 GHz) 各種RFコンポーネントの開発商品の紹介等、企業からの発表も多くあった。以前からあるXバンド技術に立脚して出発して高電界指向のリニアコライダーに向けて最近までに開発されてきたXバンド加速技術が再度民間にも広まりつつあることを感じた。ここに紹介したのは発表の一部であり、詳細は本会議のウェブサイトをご覧ください。

4. 真空アークのメカニズムに関する国際ワークショップ

本会議⁵⁾は、CLICプロジェクトが常伝導Xバンド高電界加速管開発においてターゲットとしている100 MV/mの加速勾配を達成するためにはどうしても高電界における真空放電現象を理解する必要があることから開催されたと言っても過言ではない。昨年は、CERNで行われた経緯がありKEKからも参加した。会議名は、International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcsで、ヘルシンキ (フィンランド) にて2011年6月27日～30日に開催された。

6月末のフィンランドはほぼ白夜で、日が沈むのは

午前0時過ぎで午前3時には昼間のようにであった。ヘルシンキ大学は観光スポットのど真ん中にあり、大学周辺の観光地は観光客であふれていた。この大学は放電に関するシミュレーションのメッカで、学生を含めると総勢10名以上が取り組んでいた。彼らの主催した会議は、通常の加速器開発グループの発表と異なり分子、原子レベルのシミュレーションがほとんどで、他研究所・大学からの発表内容もミクロな立場からの材料表面の報告が多かったように感じた。会議は3日間開催され、総勢約50名（USA, ヨーロッパがほとんど、アジアからは少ない）の参加者があった。発表は、オーラル30件以上、ポスター10件であった。以下、印象に残ったトピックについて項目別に述べる。

(1) 高電界 X バンド加速管 (発表件数 5 件)

会議の最初の発表で CERN/CLIC グループから放電に関する今までの高電界試験結果から、BDR は加速勾配の 30 乗、パルス幅の 5 乗に比例することを述べ、参加者にこの物理現象を問いかけた。

CLIC 用加速管に対する試験から、特に RF 磁場の高い場所で微小なギャップや形状欠陥等により放電を誘発していることを疑わせる SEM 像の報告があった。また、高電場による放電痕の SEM 観察では、“Wormlike” と呼んでいる過去に観察されたことのない「蜘蛛の巣」状の表面変化を特殊な SEM により見出した。これらの物理化学的な理解は得られていない。

SLAC は手のひらに乗るような定在波単空洞を製作し、30 個以上の空洞の高電界テスト結果から RF 磁場による Pulse Heating (パルス内表面温度上昇) で空洞材料表面が疲労を起し損傷に至ることが放電のトリガーになるのではないかと報告した。また、空洞材料の純度、表面処理法の異なる空洞をテストした結果、150 MV/m 級の高電界特性に関しては、初期のプロセッシング時間が短い以外には、高純度材料、クリーン表面等の優位性はほとんどないと結果を報告した。Pulse Heating による材料損傷を In-situ で観察したことの報告もあった。クラックが増殖していくのが明瞭に見て取れたが、放電のトリガーの理解につながる情報は得られていない。これらの実験は日米協力としての KEK の貢献が大きい。

(2) 放電現象 (発表件数 7 件)

Argonne National Lab. (USA) からの発表で、1904 年に Lord Kelvin が電界蒸発の局所電界： $\beta E \sim 10 \text{ GV/m}$ であることを発表し、1964 年に実験的に確かめられたと報告があった。この値は、現在、到達可能な加速勾配や放電頻度を評価する時の一つの指標となる。高電界をリミットする要因として、表面ダメージ、表面欠陥、プラズマ発生とその成長等が現実の空洞には起こりえるからだとの報告があった。

ドイツの ABB 社の報告では真空中における高電圧遮断器の開発を行っていて、供給電圧 100 kV、電流 63 kA 以上でギャップは 10–20 μm に設定され、電界強度として 10 GV/m に耐えることがこの装置の仕様である。達成するためには放電が大きな問題であり、そのメカニズムの研究を行っていて、関連する文献を検討しながら仕様を満たす装置開発を懸命に行っている。紹介した文献の中に KEK の斎藤芳男氏と埼玉大学の小林信一氏とで行っている DC 放電実験のスライドがあったのが興味深かった。

(3) 放電のモデリング (発表件数 10 件)

ヘルシンキ大学が取り組んでいる高電界中における放電現象のマルチスケールモデリングについて紹介する。導体表面での電荷分布計算から始まり、表面分子の分子力学的挙動、最終的にはプラズマを介して放電に至るまで、5 ステージにわたるマルチスケール・シミュレーションである。原子レベルのシミュレーションとしては、密度関数理論 (DFT)、分子動力学 (MD)、モンテカルロ法 (KMC) を用い、Stage 1: 表面電界分布計算、Stage 2: 原子運動、蒸発及びジュール加熱 (電子運動) 計算、Stage 3: 突起成長、転移運動及び電場分布による表面形態の計算、Stage 4: プラズマ、アーク発達計算、また Stage 5: プラズマからのイオンボンバードメントによる表面ダメージの計算、との全発展過程を計算する試みである。彼らの計算結果は、DC 放電試験や X バンド加速空洞の高電界試験との整合性を見ながらシミュレーションの精度を上げようとしている。本発表では、電磁場による微小な突起の成長や、サイズは実験結果とは異なるものの、放電で発生した微小なクレタ形状の再現に成功したとの報告があった。

(4) ミクロスコピックな物性 (発表件数 3 件)

強電磁場による Whisker (ウイスキー) や Protrusion (突起) の成長がなぜ発生するかをテーマにしてシミュレーションを行っている報告がヘルシンキ大学のグループからあった。例えば、表面直下に空孔 (直径 50 nm オーダ) を仮定し、数 GPa の引っ張り力が働けば転移による突起が表面で成長すると計算結果や、電荷移動によってポイドや Whisker が成長する計算結果が報告された。その他、転移によるフォノン、自由電子の散乱の報告もあった。

(5) フィールドエミッション試験, DC 放電試験 (発表件数 6 件)

これらの目的は材料欠陥等により表面電場の高くなる個所の存在を実験的に確認したり、材料による耐放電電圧がどう変化するかの研究である。

スウェーデン・ウプサラ大学では、SEM に W (アノード) と Cu (カソード) を装着し、フィールドエミッションおよびその局所電場増倍係数の測定を試みている。

アノード先端半径 $\sim 5 \mu\text{m}$, ギャップ $\sim 1 \mu\text{m}$ および $0 \sim 1 \text{ kV}$ のバイアスが可能である。また、装置の立ち上げ段階に見えたが、放電後、W アノード先端にカソード材の Cu が付着したような SEM 像が報告されたのが興味深かった。

日本から唯一出席した東 (KEK) は、開発中である Scanning Field Emission Microscope をテーマにして発表を行った。ウプサラ大学の装置との違いは、高真空 (10^{-6} Pa)、アノード先端半径が $1 \mu\text{m}$ 以下、Bias 電圧が約 200 V であること。実験としては、OFHC クラス 1 を鏡面加工、 600°C でアニールした表面の任意の場所で F-N プロットを得るための測定である。場所による F-N プロットの形が異なること、それから $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ の面積を $10 \mu\text{m}$ で走査した時のフィールドエミッション分布を測定した結果、面の粗さに関係なくエミッションの大きい場所があること、等を報告した。

CLIC グループでは、DC 放電試験の報告で、各種材料の耐放電電圧のランキングをまとめた結果を報告した。代表的な材質を耐放電電圧の高い順に並べると、Stainless Steel (SS), Ti, Co, Cr, Mo, Nb, WC, Ta, W, Cu, Al, CuZr, C である。ちなみに、SS, Cu は 800 MV/m および 200 MV/m であり、SS を用いることで電界特性の向上の可能性のあることを示唆している。これらの結果を受け、単空洞試験での評価のため、KEK ではアイリス部を SS や Mo 材料、高硬度 Cu 等にした単空洞を製作中である。

(6) 会議のまとめ

放電現象を理解することが本研究会の目的であり、理解できれば高電界加速空洞における放電対策が講じられよう。全体的にまだ、基礎的、ミクロスコピックな研究段階で、高電界加速空洞開発に貢献するにはまだ時間がかかる感じであったが、将来的には現象の理解と高電界化に貢献するだろう。

5. 研究開発の現状サマリー

短波長の RF 線形加速器での高電界化は、ディスクロード型の簡単な構造をベースに CLIC を目指した 100 MV/m 級の高電界加速が実現しつつある¹¹⁾。そもそも GLC (Global Linear Collider) を目指していた 2004 年頃には、 50 MV/m のビーム加速を指標として、ビーム無し時の 65 MV/m を目指していた。CLIC 相当の短パルス幅 (GLC の $400 \text{ nsec} \times 2/3$) にすると、成績の良いダンピング無しの 53 cm 加速管等は既に CLIC の要求をほぼ満たす BDR であることが知られていた。またダンピング有りの 75 cm 加速管でもそれに近い BDR を実現していたのである。その意味で、同じ技術を用いた現在の 25 cm 級 CLIC プロトタイプ加速管が、 100 MV/m 級で低い BDR 運転を実現できることは当然

とも言える。但し、2004 年から現在までに、放電に関する現象論的理解は格段に高まっている。例えば、表面電界だけの問題ではなく、表面磁場 (H_s) の影響も大きいことは知られていたが、それらを統一的に評価する新しいパラメータ、複素ポインティングベクトル (S_c)¹²⁾ を指標にできることがわかった。GLC 時代から最近の X バンド CLIC 加速管全てを含めて、同じ BDR に換算した $\sqrt{S_c}$ を求めると、ファクター ~ 2 におさまる。これは運転可能な電界がファクター 2 程度で評価でき、成績のよい加速管は 100 MV/m が可能であるはずとの推定ができるようになったことを意味する。しかし現状ではまだ、加速勾配でファクター 2 程度は加速管によってばらつくことを念頭に置く必要があり、これを克服し安定し、 100 MV/m を達成できるよう研究・開発中である。最新の CLIC 加速管設計では S_c や H_s を抑えて最適化しているので、ばらつきはあるものかなり歩留まり良く安定し、 100 MV/m に迫る高電界特性を得ているのである。

筆者らの実情分析では、 80 MV/m の加速は CLIC にも適用できる段階に到達しているが、 100 MV/m 級の加速となると、特に強減衰構造を有する、表面磁場の増大が設計上避けられない構造では更なる進展が必要である¹³⁾。これを進展させるには、放電の発生メカニズムを理解することが必須であり、様々な理論的、実験的な試みが進んでいる。並行して、表面磁場の増大が抑制できるチョークモード加速管の適用や、構造の複雑性は避けられないが定在波型でのブレイクスルーを狙った研究¹⁴⁾が進んできている。

常伝導 LC としては、2011 年末までに CDR¹⁵⁾ をまとめようとしてきた。多少遅れているがこれをまとめることにより、CERN の今後数年間の開発に続けようとしている。2012 年 \sim 2016 年にかけて 5 年プログラムでは、RF 関連で 40 MCHF/5 年のプランを提示した。実際の展開の現実性はともかく、CERN は数億円/年級のリソースを直接 CLIC RF 加速に投入して R&D を続けようとしている¹⁶⁾。高電界化の進展と、加速モジュールの設計試作を通した加速ユニットの具体化とコストダウンを検討し始めている。

筆者らは、超高エネルギー加速器への展開を視野にいれつつ、加速ユニットとしてはクライストロンベースの加速器の実現性が大きいとみており、場合によっては CLIC の前段階として、数百 GeV クラスの加速器の可能性も考えるべきだと思っている。KEK では CLIC の加速管製作&高電界試験を通して、その可能性を追求しつつ、高電界に関係する基礎研究を継続している¹⁷⁾。一方米国では、 100 MV/m を優に超える加速器へのスタディを堅持しており、定在波型の可能性の追求、銅以外の物質を配置して電界を上げられるかの基礎研究を行っ

ている。DOE (米国エネルギー省) の下に SLAC が牽引役になり、米国高電界協力体制を組織して進めている。

これら高エネルギー指向の研究開発の結果を取り入れ、各種の X バンド加速器が実現、又は計画されてきている。例を挙げれば、小型化の可能性を追求した可搬型非破壊検査装置¹⁸⁾、数 m 級の治療室での X 線ガン治療加速器¹⁹⁾、トレーラーに積載可能な核物質透視用逆コンプトン方式 X 線源²⁰⁾、数百メートル級 FEL 加速器²¹⁾、コンパクトなガン治療用重イオン加速器²²⁾、等々、多数の応用が日本、米国、欧州で現実には始まっている。これらに必要な安定・安価な RF 源が未だ未整備な状況が議論されており、1990 年台から LC 開発で目指した数十 MW 級だけでなく、数 MW 級のクライストロン²³⁾ とパルス圧縮技術の組み合わせでの応用展開が検討されてきている。

以上で 3 つの国際会議を基に X バンド高電界関連の世界的な現状と応用展開の状況を述べた。まとめると、加速器を駆動する RF 源として、高エネルギー指向の巨大加速器には 2 ビーム方式、小規模コンパクトな応用には数~数十 MW 級のクライストロンや現状ではマグネトロンを使用しているが、これらの RF 源を安定に長期運転できることが重要であることを認識している。しかし現存の 50 MW 級のクライストロンを数万時間運転できることは実証されており、それをういれば加速管では 80 MV/m 級の加速は既に達成可能であり、CLIC の目指す 100 MV/m にはあと一歩、放電理解と開発が必要であろう。150 MV/m 以上の可能性も研究が進んできてはいるが、恐らく無酸素銅をベースにした進行波管では RF 閉じ込めの限界に到達していると著者らはほぼ理解しており、定在波モードでの運転や無酸素銅以外の放電劣化の少ない物質の適用が必要になろう。

参考文献

- 1) 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」, 加速器学会誌, Vol.6 No.3 2009 年 10 月 31 日発行
- 2) CLIC 概観, <http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/> 及び CLIC-NOTE-764.
- 3) XB10, “X-Band Structures Beam Dynamics and Sources 2010 Workshop”, Cockcroft Institute, Daresbury, UK, Dec. 2010. <http://www.cockcroft.ac.uk/events/XB10/index.html>
- 4) 5th Collaboration Meeting on X-band Structure Design and Test Program, SLAC, USA. May 2011. https://slacportal.slac.stanford.edu/sites/ad_public/events/5th_collabmeet_xband_accel/
- 5) International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc), Helsinki, Finland, 2011. <http://beam.acclab.helsinki.fi/hip/mevarc11/programme.php>
- 6) 松本修二, 肥後寿泰, 上野健治; “X バンド加速管の設計と試験プログラムに関する国際協力”, 加速器学会誌, Vol.5 No.2, 2008 年 7 月 31 日発行.
- 7) A. Grudiev, “Update on structure optimization procedure, input and results. CLIC reference structure”, 2nd collaboration meeting on X-band structure, KEK, May 2008.
- 8) S. Tantawi, “Experimental Evaluation of Magnetic Field Effects on Breakdown Rates”, CERN Breakdown Physics Workshop, May 2010.
- 9) A. Candel et. al, “Numerical Verification of the Power Transfer and Wakefield Coupling in the CLIC Two-Beam Accelerator,” SLAC-PUB-14439, Proc. PAC 2011.
- 10) <http://www.cst.com/>
- 11) T. Higo et al., “ADVANCES IN X-BAND TW ACCELERATOR STRUCTURES OPERATING IN THE 100 MV/m REGIME”, THPEA013, IPAC2010, Kyoto, 2010.
- 12) A. Grudief et al., “New local field quantity describing the high gradient limit of acceleratoing structures”, PRST-AB, 12, 102001 (2009)
- 13) 「強減衰構造に起因する高電界特性の変化」 THPS 030, 加速器学会, つくば, 2011 年 8 月
- 14) J. Neilson, “Update on Design of Parallel Feed System for Standing-wave Accelerator Structure”, 文献 4
- 15) J-P. Delahaye, “CLIC progress and perspectives”, IWLC 2010, International Workshop on Linear Colliders 2010, <https://espace.cern.ch/LC2010/default.aspx>
- 16) W. Wuensch, “CLIC rf Structure Program”, 文献 4
- 17) S. Matsumoto et al., “High Gradient tests at the KEK Nextef Facility”, 文献 3 及び S. Matsumoto, et al., “HIGH GRADIENT TEST AT NEXTEF AND HIGH-POWER LONG-TERM OPERATION OF DEVICES”, Nucl. Instr. and Meth. A (2011), doi:10.1016/j. nima. 2011. 06. 062
- 18) 上坂充, “A compact X-band linac for NDE and Medical Applications”, 文献 3
- 19) E. Tanabe, “The Next Generation of the Compact X-Band Linac for Medical and Industrial Applications”, 文献 4
- 20) F. V. Hartemann, “Application of X-band Accelerator Technology to Compton Scattering Gamma-Ray Sources”, 文献 3, 4
- 21) H. Beijers, “A compact, soft X-ray FEL at KVI”, 文献 3
- 22) U. Amaldi, et al., “Accelerators for Hadrontherapy: From Lawrence Cyclotron to Linacs”, NIM A 620 (2010), 563-577
- 23) I. Syratchev, “Application of moderate (5 MW) X-band power sources for the CLIC accelerating structures testing program and other projects”, 文献 4