

常伝導高電界加速研究の最前線

KEK 加速器研究施設

阿部 哲郎

tetsuo.abe@kek.jp

2018 年 (平成 30 年) 2 月 4 日

1 はじめに

常伝導加速とは、常伝導状態 (超伝導ではない状態) の金属で境界条件を与えた領域内に、高周波 (Radio-Frequency wave, 以下「RF」, マイクロ波とも言う) を投入することで励振される電界で荷電粒子を加速することである。境界条件を与える領域は円筒形状が一般的で、加速モードの共振尖鋭度 (Q 値) を高くすることで、高い加速電界を効率的に実現出来る。また、加速器の運転時には、その領域内は (超高) 真空状態にする。境界条件を与える金属には、高純度の銅が使われることが多い。

高い加速勾配による粒子加速 (高電界加速) は、高エネルギー加速器にとって重要となるばかりでなく、加速器の小型化にも繋がる。常伝導高電界加速では、金属表面のマイクロ波による発熱を抑えるため、パルス運転を行うことが多い。たとえば、RF パルス幅が 200 ns で繰り返し 50 Hz の場合では、連続波の場合と比べて、平均発熱量は $200 \times 10^{-9} \times 50 = 10^{-5}$ 倍に小さくなる。本稿では、特記しない限り、パルス運転を想定する。

常伝導加速において、より高い加速勾配を実現するための最も簡単な方法は、加速構造に投入するマイクロ波の電力を上げることである。しかし、高エネルギー加速器でよく使うクライストロンなどのマイクロ波源は発熱や耐圧などの限界により、最大出力は数十 MW のオーダーであり、入力電力を上げることには限界がある。そこで、より高い加速勾配を実現するもうひとつの方法として、周波数を上げて加速モードのエネルギー密度を高めることが考えられる。単位長さあたりの加速効率で考えても、超伝導加速の場合は最適な周波数が存在するが (空洞材料の残留抵抗が 10 nΩ で、2K の温度で運転する場合は、1.3 GHz[1])、常伝導加速の場合は、周波数を上げれば上げる程、加速効率は上がる。加速周波数の例を挙げると、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子陽電子入射器で使われている S バンド¹常伝導加速管

で 2.856 GHz、理化学研究所 (理研) と高輝度光科学研究センター (JASRI) が共同運営する日本初の X 線自由電子レーザー加速器 SACLA で使われている C バンド常伝導加速管では 5.712 GHz である。常伝導加速器では、技術の進歩により、より高い加速周波数を採用することが出来るようになってきた。しかし、大電力のマイクロ波と高い周波数を使えば、いくらでも高い加速勾配が (加速器として) 実現可能かという、そうではない。加速勾配を高くすると、加速構造内の金属表面における電界強度が上がり、それにより真空中の大放電が発生して、加速のために蓄積した電磁界エネルギーの崩壊 (以下、「ブレイクダウン」) が起きてしまう。ある RF パルス内でブレイクダウンが発生すると、それ以降のマイクロ波は全反射し、加速構造にマイクロ波を投入出来なくなる。また、後続の RF パルスでも引き続きブレイクダウンが発生することが多い。つまり、常伝導高電界加速では、いかにブレイクダウンの発生率 (ブレイクダウン率) を下げるかが最も重要な課題となる。

ブレイクダウン率を下げる方法としては、耐圧の高い金属を用いる方法も考えられる。たとえば、DC 高電圧実験の結果では²銅よりもチタンやステンレスの方が耐圧はずっと高いことが分かっている。しかし、電気伝導率、熱伝導率、加工性、値段などを総合的に評価すると、銅に勝る材料は今のところないので、常伝導加速構造には銅を用いることが一般的である。

レーザー・プラズマ加速には原理的な加速勾配の制限がなく、高エネルギー加速器への応用を目指した研究が進められている。一方で、多段加速や陽電子の加速が困難なことなどを考えると、まだまだ課題は多い。現段階で、数 TeV 領域のリニアコライダーをそう遠くない将来に実現するためには、常伝導高電界加速が有望と考えられる。CERN の CLIC 計画は、まさに常伝導高電界加速に基づくリニアコライダーであり (CLIC については、第 3 節で解説)、100 MV/m 級の高い加速勾配を想

を、それぞれ、L バンド、S バンド、C バンド、X バンドと呼ぶ。

²DC と RF で耐圧の傾向が同じかは現段階では分かっていない。

¹1-2 GHz, 2-4 GHz, 4-8 GHz, 8-12 GHz の帯域 (の高周波)

定している。100 MV/m の加速勾配を実現すれば、10 キロメートルの距離で 1 TeV の加速が出来る。また、高電界加速技術は、加速構造の小型化を可能にし、放射光源、医療用加速器、可搬型 X 線源など、広範囲な応用可能性を持っている。

本稿では、CLIC 計画を中心に展開されている常伝導高電界加速研究、および関連する基礎的研究の現状と展望について、著者の視点から解説する。

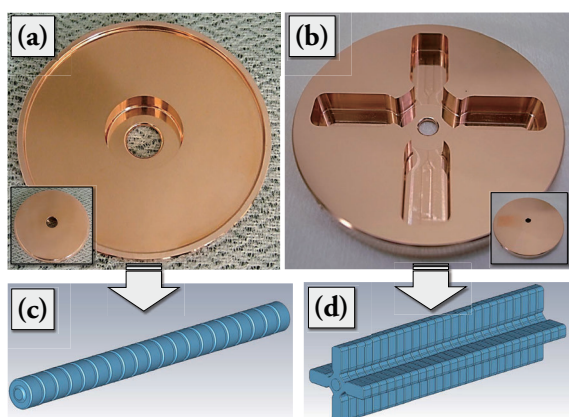


図 1: 一般的な常伝導加速管のディスクと内部領域 (加速構造)。(a) 非減衰セル (挿入図は反対側の面)。(b) 導波管型減衰セル (挿入図は反対側の面)。実機では、上下左右の導波管端にマイクロ波吸収体が装填される。(c) 非減衰加速管の内部領域。(d) 導波管型減衰加速管の内部領域。

2 常伝導加速管の構造

通常、常伝導加速管は、図 1(a) に示すような「ディスク」を数十枚スタックして接合することで、図 1(c) のように金属で境界条件を与えた領域を作り、その領域内に周期的な加速電界を立てる構造になっている (本稿では「ディスク・スタック方式」と呼ぶ)。これは一種の導波管だが、アイリス構造 (ビームが通る小穴) があることにより、マイクロ波の位相速度を光速と等しくすることができ、高エネルギーの電子 (または陽電子) をその位相速度の波に乗せて加速することを可能にする。

図 1(a),(c) にあるものは、「非減衰構造 (Undamped structure)」と呼ばれる加速管であり、ビームパンチが通過した後に残る有害な高次モードを積極的に減衰させることはない (金属表面におけるジュール発熱のみでゆっくり減衰する)。リニアコライダーのようにマルチパンチ運転が必要な場合は、高次モードを積極的に減衰させる「減衰構造 (Damped structure)」が必要となる。減衰構造には幾種類もあり、図 1(b),(d) にあるのは導波管型減衰構造と呼ばれている加速管である³。これ

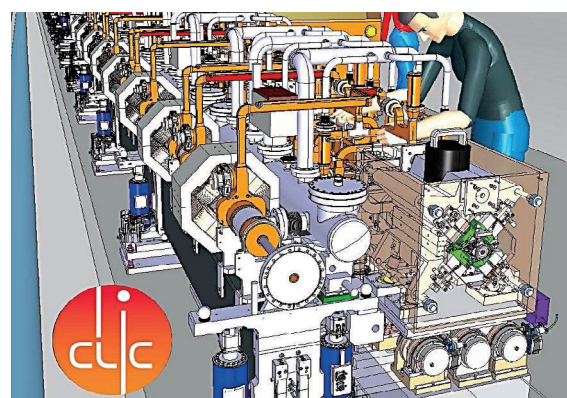
³導波管の遮断周波数を加速モード周波数の少し上に設定し、加速

は、比較的単純な構造で大きな減衰力が得られる方法で、CLIC や SuperKEKB 主リングなどの多くの常伝導加速構造で採用されている。

3 常伝導リニアコライダー CLIC

CLIC (Compact Linear Collider, 「クリック」と言う) は、その名の通り、コンパクトなこと (小さいこと) が特徴の電子・陽電子リニアコライダーである。そのコンパクト性は、高い加速モード周波数を使うことによって実現し、必然的に常伝導高電界加速が使われる。CLIC では当初、加速モード周波数として 30 GHz を採用していたが、再度最適化を検討した結果、現在の設計では 12 GHz に周波数を下げている⁴。この周波数は、かつて日本で検討されていた Global Linear Collider (GLC) や米国で検討が進められてきた Next Linear Collider (NLC) の周波数 (11.4 GHz) に近かったため、周波数が 12 GHz に変更された際に、常伝導高電界加速研究に関して、CERN (欧州)- KEK (日本)- SLAC (米国) の 3 極国際協力体制が立ち上がった⁵。

CLIC 計画は、現在、概念設計書 [2] が完成した段階である。その表紙 (図 2) からわかるように、CLIC 加速器は小さい。また、直線加速器が 2 本平行に並んでいることがわかる。これは、CLIC が「2 ビーム加速 (Two beam acceleration)」という方式を採用しているためである。図 2 の左側にあるのがドライブビームライン、右側が主ビームラインである。



A MULTI-TeV LINEAR COLLIDER
BASED ON CLIC TECHNOLOGY

図 2: CLIC の概念設計書 [2] の表紙。

図 3 に CLIC の全体図を示す。まず、初段線形加速器において、L バンド (1 GHz) のクライストロンを使って電子を 2 GeV まで加速する。ここでのパンチ間隔は

モードをセル内に閉じ込めつつ、高次モードはすべて導波管へ引き出す方式。

⁴正確には、11.994 GHz である。

⁵最近は、中国の清華大学も加わり、4 極になってきている。

0.5 GHz である。その後、Delay loops を使ってバンチ間隔を圧縮し、12 GHz のバンチ間隔を持つバンチトレインを作り、ドライブビームラインに入射する。ドライブビームラインから取り出された 12 GHz の大電力マイクロ波は、導波管を通して、主ビームラインに投入される。この 2 ビーム加速の原理実証は、CTF (CLIC Test Facility) において完了している。

表 1: CLIC の各ステージにおける主なデザインパラメータ。

	380 GeV	1.5 TeV	3 TeV
ルミノシティ [$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$]	1.5	3.7	5.9
加速勾配 [MV/m]	72	72/100	72/100
全長 [km]	11.4	29	50
パルス繰返率 [Hz]	50	50	50
バンチ間隔 [ns]	0.5	0.5	0.5
バンチ数/トレイン	352	312	312
衝突点における ビームサイズ			
σ_x/σ_y [nm]	150/2.9	60/1.5	40/1
σ_z [μm]	70	44	44
消費電力 [MW]	252	364	589

International Linear Collider (ILC) 同様、CLIC もステージングを考えており、第 1 ステージの重心系エネルギーは 380 GeV である。このエネルギーは、Higgs の物理の他、Top などの物理も行うために選ばれた [3]。その後、1.5 TeV などを経て、最終的には 3 TeV を目指している。表 1 に、CLIC の各ステージにおける主なデザインパラメータを示す。第 1 ステージでは加速勾配 72 MV/m 仕様の加速管を使い、その後のステージでは、第 1 ステージで使用した加速管を上流側へ設置、下流側に 100 MV/m 仕様の加速管を継ぎ足す。参考までに、KEK 電子陽電子入射器の S バンド常伝導加速管の運転加速勾配は 20 MV/m、SACLA の C バンド常伝導加速管は 38 MV/m、ILC の L バンド超伝導加速管では 31.5 MV/m である。CLIC の加速勾配 (100 MV/m) は、これまでの高周波加速構造の 2.5 倍以上である。

ちなみに、CLIC の建設費は、重心系エネルギー 380 GeV の場合、67 億スイスフラン (日本円で約 7700 億円) と試算されている。不確定要素が多いとは思われるが、大雑把に言えば、ILC と同程度である。また、72 MV/m の加速勾配を想定している CLIC の第 1 ステージでは、X バンド・クライストロンのエネルギー効率や RF パルス圧縮技術を向上させることで、クライストロンを使うほうが 2 ビーム加速方式よりも価格をさらに安くできる可能性が提言されている。現在はそれに

向けて 90%以上の効率を目指したクライストロンの開発 [4] や、コンパクトな多段パルス圧縮技術の開発 [5] も進められている。また、今後の予定としては、2019 ~2020 年に、European Strategy for Particle Physics において、CERN の将来プロジェクトに FCC (Future Circular Collider) か CLIC のどちらにするかを定める予定である。

CLIC の主ビームラインの加速構造 (X バンドの常伝導加速管) のベースライン設計はほぼ固まっている。図 4 は、KEK が製作した最新の CLIC プロトタイプ加速管 (TD26CC_K1) である。CLIC プロトタイプ加速管のコードネーム (開発加速管名) の最初の文字は、「T」(Travelling wave: 進行波)、または、「S」(Standing wave: 定在波) である。単位長さあたりのシャントインピーダンスで加速効率を考えれば、通常は進行波の方が有利で、CLIC の場合も進行波を使うが、研究開発段階では、低い入力電力で高い電界を作り出せる定在波型加速構造を使って高電界試験を行うことなどもあるので、これらをコードネームの最初の文字で区別している。2 番目に「D」の文字がある場合は、減衰構造 (Damped structure) 付きの加速管を表わしている。T または TD の次にある数字は、加速セル数を表わす⁶。CLIC プロトタイプ加速管の開発は 2008 年頃に 18 セルから始まり、試験の結果をフィードバックしながら、T18* \Rightarrow TD18* \Rightarrow T24* \Rightarrow TD24* \Rightarrow TD26CC*と進化してきた (図 5 の縦軸で、「*」は任意の文字列を表す)。なお、重心系エネルギー 380 GeV の CLIC の主ビームラインで使う予定の加速管は 31 セルである。セル数を表わす数字より後は、その加速管の詳細な情報である。最後の TD26CC の「CC」は Compact Coupler を表わしている。TD24*以前の加速管では、マイクロ波はビームパイプ (円形導波管) を介してセルに投入する一般的な方式である。一方、TD26CC*では、直接セルにマイクロ波を投入し、ビームパイプを介さない分、加速構造がコンパクトになる設計である。図 5 は、テストスタンドで RF コンディショニングが完了した加速管の最終性能をまとめたものである。最終的な RF パルス幅や加速勾配は各試験で異なっている。そこで、これまでの X バンド加速管の高電界試験から得られた現象論的スケール則 [6] :

$$\text{ブレイクダウン率} \propto (\text{加速勾配})^{30} \times (\text{RF パルス幅})^5 \quad (1)$$

を使って、CLIC のスペック (有効 RF パルス幅: 180 ns, 単位長さあたりのブレイクダウン率: 3×10^{-7} /pulse/m) に加速勾配をスケールして表示してある。つまり、図 5 は、CLIC 仕様のブレイクダウン率で運転した場合に達成可能な加速勾配である (但し、ここではビームローディングの効果は考慮していない)。なお、 3×10^{-7} /pulse/m

⁶ 上下流の結合セルを除いた個数。

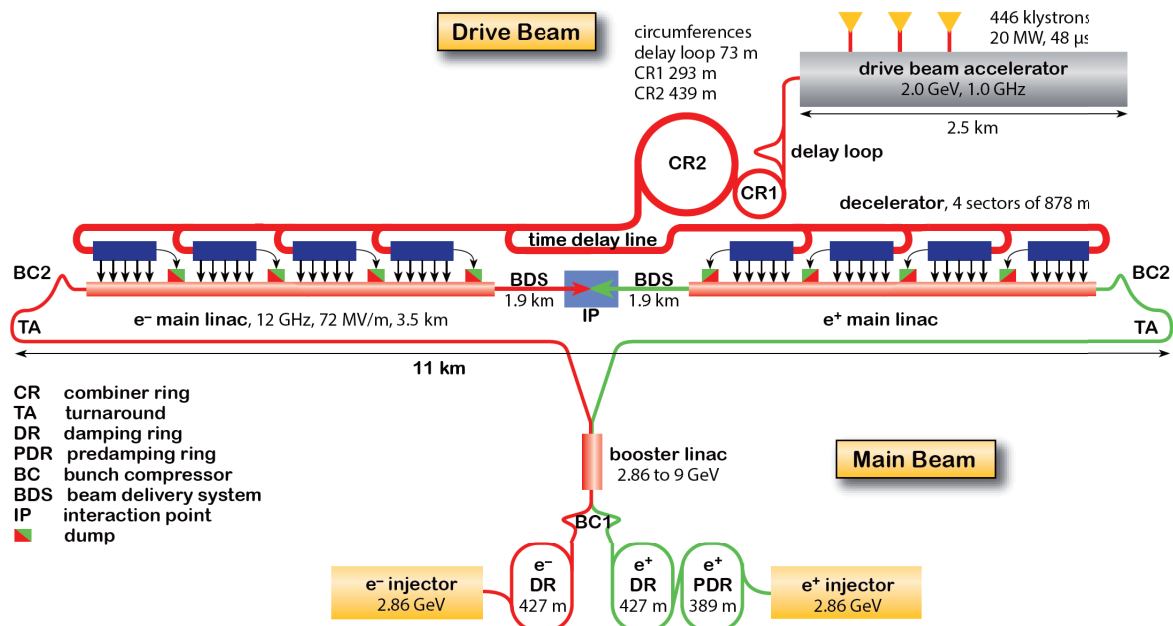


図 3: 重心系エネルギー 380 GeV における CLIC の全体図。参考文献 [3] より抜粋。

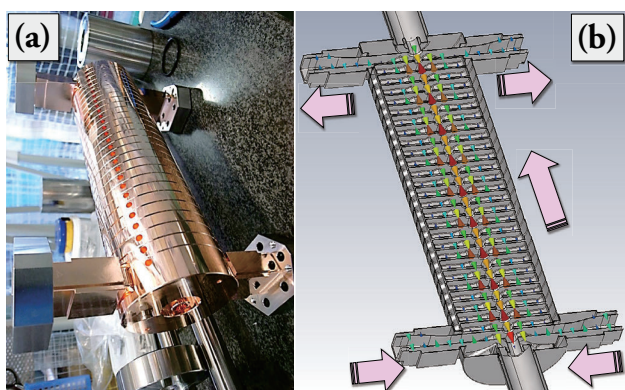


図 4: (a) KEK が製作した最新の CLIC プロトタイプ加速管 : TD26CC_K1(長さは約 30 センチメートル)。(b) TD26CC_K1 のソリッドモデル (半割) と加速モードの電界ベクトル。

というブレイクダウン率は、任意の加速管のブレイクダウンで、その RF パルス内の全バンチが失われた場合のルミノシティ低下が 1% 以内に収まるという基準である。

最初の非減衰加速管 (T18*) では、ばらつきがあるものの、目標とする加速勾配 100 MV/m を概ね達成出来そうだという結果を得られた。一般的に、減衰構造の有無で表面電界は変わらないはずであるが、T18* に減衰構造を付けた TD18* を試験したところ、性能が大きく落ちてしまった。この問題を打開したのが、「表面磁界効果の重要性の発見」であった。これまで、加速モードの表面電界 (通常の常伝導加速管では加速勾配の約 2 倍) がブレイクダウン率に大きく効くことは知られていたが、表面磁界も、表面電界と同程度にブレイクダウン率を決めていることがわかったのである [7, 8]。導波管型の減衰構造には、導波管部が開いていることにより、

CLIC Prototype Structures

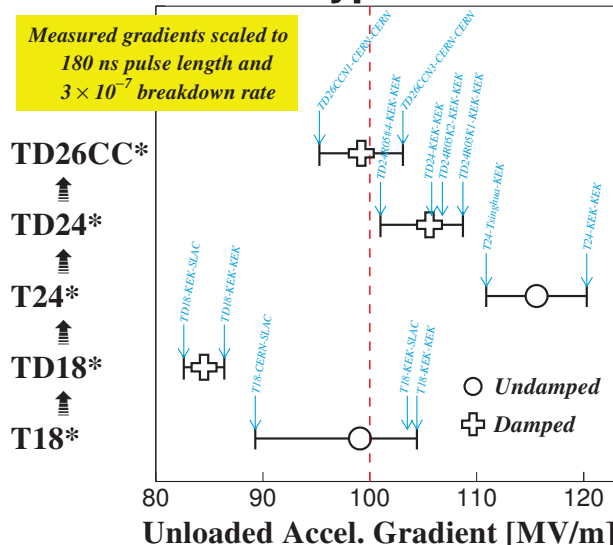


図 5: RF コンディショニング後に達成した加速勾配。CLIC のスペックにスケールして表示。プロットは平均値を示し、矢印と加速管名は、その加速管の最終的な性能を表わす。ここでの加速管名には、製作者名 (左側) と試験者名 (右側) を記載してある。

セルの側面 (図 6(a) の指し箇所) における表面磁界が、非減衰に比べて高くなるという欠点がある。表面磁界が高いということは、そこを大きい表面電流が流れるので、100 MV/m 級の加速勾配を立てた場合、 10^8 A/cm² 級の巨大な表面電流が流れることになる⁷。そして、ディスク・スタック方式の加速管では、その巨大な表面電流がディスク間の接合箇所を渡ることになる (表面電流は、

⁷人工的に発生させる表面電流密度としては、最大級であろう。

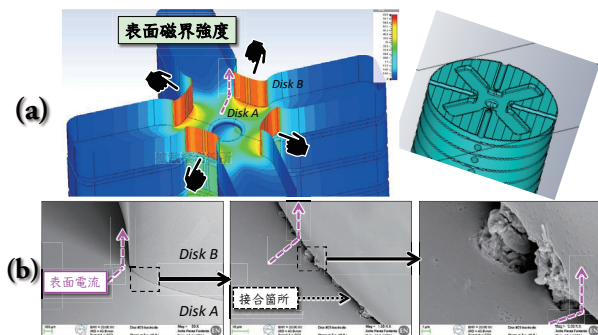


図 6: (a) 減衰構造の表面磁界強度。(b) 減衰構造のディスク間接合箇所の SEM 画像例。破線矢印は、表面電流の流れを表わす。国際ワークショップ MeVArc2015 における Anitè Pèrez Fontenla 氏の発表スライドより抜粋。

ビーム軸方向に流れるため)。これがよくないと考えられる事実の例が図 6(b) である。この図は、高電界試験を終えた導波管型の減衰加速管のセルの側面を Scanning Electron Microscope (SEM) で観察した画像で、ふたつの隣接するセルの接合箇所(隙間)にミクロンサイズの怪しい物体が見える。高電界試験前には見られないので、大きな表面電流が流れたことで発生したものである⁸。TD24*では、セルの側面形状などを工夫し、表面磁界の均一化を図った。これにより、表面磁界のピーク値が下がった。それが功を奏し、TD24*加速管では、100 MV/m を超える加速性能を達成した。また、TD24*の非減衰版である T24 では、110~120 MV/m の加速勾配を出せることがわかった。最新版である TD26CC*は、まだ統計が少ないが、100 MV/m 級の性能を実現している。

これまで述べてきた導波管型の減衰構造の他に、高次モードを減衰させる構造として、SACLA の C バンド加速管で採用されているチョークモード型の減衰構造があり、X バンド版の加速管の開発も進められている。チョークモード型の減衰構造の利点としては、

- ディスクを旋盤だけで加工可能(ミリングは不要)
- 導波管型減衰構造では、図 6(a) の指さし箇所で表面磁界(表面電流)の増大があるが、チョークモード型の減衰構造には、表面磁界の増大はない

ということが挙げられる。逆に、欠点としては、

- チョーク構造があることにより、機械的に弱い
- チョーク構造は比較的複雑なので、その中での放電を避けるのが難しい
- チョーク構造内に電磁界が(少し)入り込む分、Q 値が低い

⁸これがブレイクダウン率と関係するかは、今のところわかっていない。

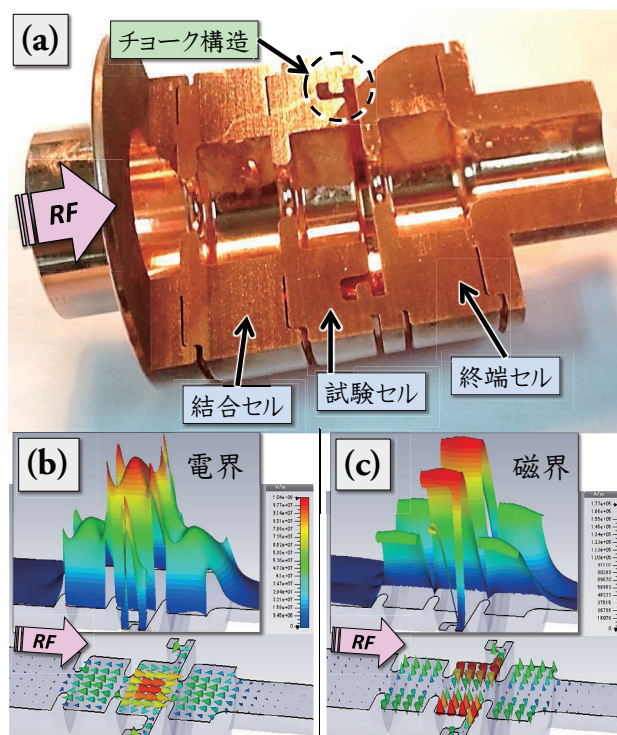


図 7: 清華大学製の X バンド・チョークモード型減衰構造を持つ単セル型試験空洞(定在波)。(a) 試作機のカットモデル。(b) 電界の強度(上)とベクトル(下)。(c) 磁界の強度(上)とベクトル(下)。中央の試験セルにフィールドが集中するように設計してある。

がある。チョークモード型加速管の開発は清華大学(中国)のグループが担当しており、図 7 に示すような単セル型試験空洞を製作して、KEK の試験施設(Nextef [9], New X-band Test Facility)で高電界試験を行った(2016~2017 年)。初期の設計ではチョーク構造内で深刻な放電が発生したが[10]、その後の改良で放電の問題は改善された[11]。

4 KEK における研究

KEK における常伝導 X バンド加速管開発は、Japan Linear Collider (JLC) 時代に始まり、SLAC との共同研究を通じて、GLC の時代には 60 cm 管の製作・試験までを行っていた。しかし、その後、世界共通のリニアコライダを設計する動きが起こり、2004 年の International Technology Recommendation Panel (ITRP) による勧告に添って、超伝導加速を軸にした ILC 計画が立ち上がった。この勧告により、KEK で常伝導加速研究開発を進めていた試験施設 Global Linear Collider Test Accelerator (GLCTA) が解体されることになった。この時、GLCTA にあった X バンド加速管開発のための資源を KEK 加速器の福田茂樹氏、肥後壽泰氏、松本修二氏たちが中心となって、KEK 電子陽電子入射器棟の加速管組立室へ

移設し、Nextef として生まれ変わった [12]。丁度その頃、CLIC の周波数が 30 GHz から X バンド (12 GHz) へ下がったこともあり、CLIC 用プロトタイプ加速管を Nextef で試験する話が出始めた。KEK は機構として CLIC 計画に参加している訳ではないが、CERN との覚書 (ICA-JP-0103) に基づいた共同研究を立ち上げ、X バンド高電界加速管開発の研究を進めることになった。

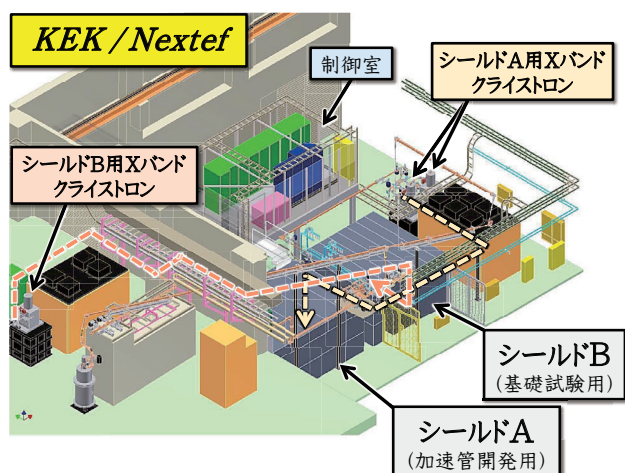


図 8: KEK における X バンド高電界試験施設 Nextef。

4.1 Nextef

高電界試験施設 Nextef の全体図を図 8 に示す。Nextef には 2 つの試験エリア (シールド A とシールド B) がある。シールド A はマルチセル空洞の試験を行えるだけの十分な空間があるので、プロトタイプ加速管の高電界試験に使用している。また、シールド B はプロトタイプ加速管の試験を行うには狭いので、単セル型空洞の試験などを通して基礎的な高電界試験を行っている。試験に使うマイクロ波源は、GLC 用に開発した 50 MW 級 X バンド Periodic Permanent Magnet (PPM) クライストロンを使っている。シールド A は、2 台のクライストロンの出力を合成し、最大で 100 MW の RF パルスを供給出来る。また、シールド B で使用する単セル型空洞を定在波空洞として設計することで、1 台のクライストロンで供給出来る程度の出力で試験に必要な加速勾配が得られるように工夫している。

シールド A では、これまで 9 本の CLIC プロトタイプ加速管の高電界試験を行った。図 5 にある加速管名を見てもわかるように⁹、KEK / Nextef の CLIC プロトタイプ加速管開発への貢献度は高い。

一方、シールド B における単セル型空洞の本格的な高電界試験の開始は、シールド A よりも新しく 2016 年で、最初に行ったのは、第 3 節の最後に触れた清華大学製のチョークモード型減衰空洞の試験であった。その後、

⁹印刷物では見にくいので、Web 上で公開している PDF ファイルで確認していただきたい。http://www.jahep.org/hepnews/

KEK で独自に開発・製作した 4 分割方式の導波管型減衰空洞の試験を行った。これについては、次の第 4.2 節で解説する。

4.2 4 分割方式加速管開発

加速管は、これまで述べてきたようなディスク・スタック方式で製作されることが一般的だが、この第 4.2 節では、それとは「直交」するビーム軸方向に分割したパーツを製作・接合する方式に関する開発の現状を紹介する。その製作方式は、「4 分割方式」(非減衰の場合は 2 分割方式)と呼ばれるもので、図 9 にその例を示す。4 分割方式の最も大きな利点は、加速モード電磁界による表面電流が接合箇所を渡ることがないことである (表面電流はビーム軸方向に流れるため)。また、ディスク・スタック方式では、何十枚ものディスクを超精密加工し、スタックして接合しなければならないが、4 分割方式では、多セルをミリングで一気に加工でき、その後の組立も簡単である。近年、超精密ミリング加工技術が向上したこともあり、4 分割方式を採用することで、ディスク・スタック方式と比べ、加速管の製作コストを大きく削減出来ることが期待されている。

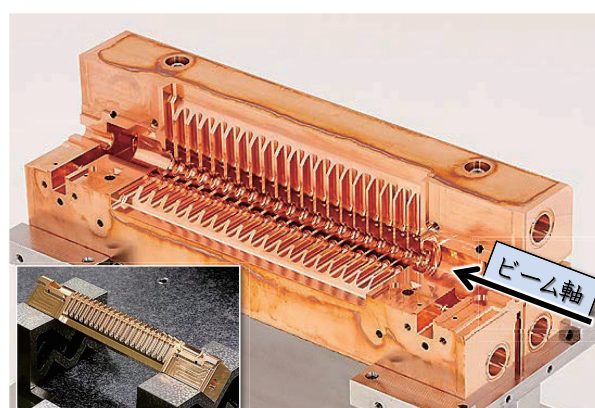


図 9: 4 分割方式加速管の例 (TD18_QUAD_KEK)。4 個の 4 分割部のひとつを取り除いた状態。挿入図は 1 個の 4 分割部。

KEK では、2008 年から 2009 年にかけて、18 セルの CLIC プロトタイプ加速管 (導波管型減衰構造付き) を 4 分割方式で製作・試験した (図 9 にある加速管)。X バンド加速管は、通常、ブレイ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 まではコンディショニングが出来る。しかし、この 4 分割方式加速管は、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。4 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 4 分割方式に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

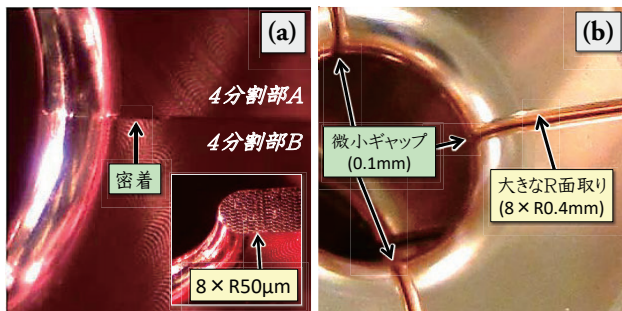


図 10: KEK/Nextef で高電界試験した 4 分割方式 X バンド加速構造のアイリス付近の写真。(a) 初期の 4 分割方式 (TD18_QUAD_KEK)。写真にあるアイリス径: 5.3 mm。(b) 改良 4 分割方式 (SD1_QUAD-R04G01)。写真あるアイリス径: 8.4 mm。

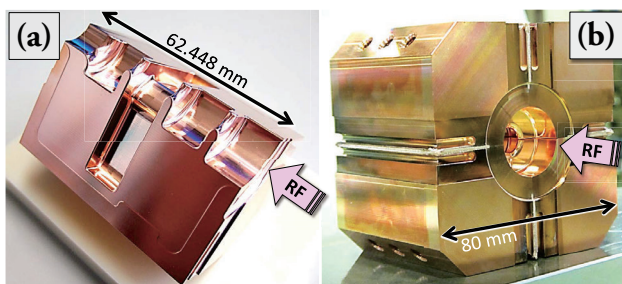


図 11: Nextef/シールド B で高電界試験した改良 4 分割方式の単セル型減衰空洞。(a) 超精密ミリング加工で製作した 4 分割部のひとつ。RF 設計は著者が、機械設計は KEK 機械工学センターの高富 俊和氏が行った。(b) 4 分割部 4 個を電子ビーム溶接で接合した直後。

シオン研究 [13] などに基づいて、従来の 4 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 4 分割方式』を考案した [14]。具体的な改良点は、図 10 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 (0.4 mm)
- 4 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減衰空洞を改良 4 分割方式で製作した [15](図 11)。ここで、4 分割部の接合には、電子ビーム溶接を使った。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、問題がない高電界性能が出た最初の例となった。

著者達は、KEK/Nextef 施設にて、改良 4 分割方式の単セル型減衰空洞 (定在波) の高電界試験を行い、目標の 100 MV/m を大きく上回る 120 MV/m 超の加速勾配まで RF コンディショニングを行うことに成功した。図 12 に、RF コンディショニング後に行ったブレイクダウン率の測定結果を示す。式 (1) でスケールすると、

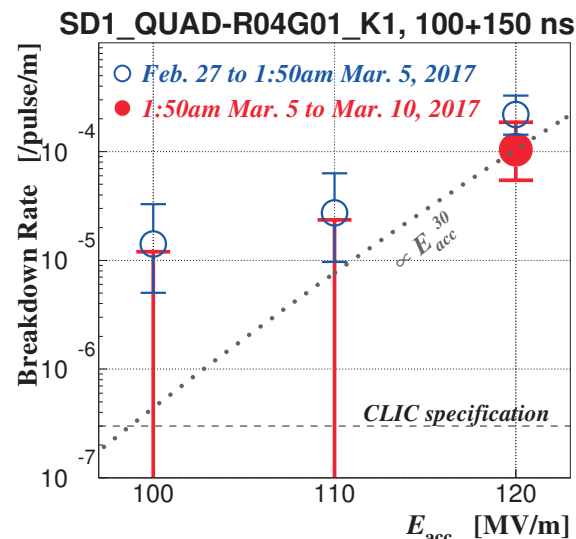


図 12: 改良 4 分割方式の単セル型減衰空洞のブレイクダウン率の測定結果。 E_{acc} は、加速勾配を表す。測定期間後半は、110 MV/m 以下の加速勾配ではブレイクダウンはまったく発生しなかったため、その期間中にブレイクダウンが 2 回発生した時の値を上限として示してある。

CLIC の仕様を満たす見込みがあることが分かった。試験期間が限られていたため、ここでは試験の最後の期間でのブレイクダウン率を使って空洞の性能を評価したが、この試験中、最後までブレイクダウン率は着実に下がっていったことを考えると、さらにコンディショニングを進めれば、ブレイクダウン率がさらに低くなる可能性があったことを指摘しておく。以上により、新しい 4 分割方式の効果と可能性を確認することができた [16]。

現在、24 セルから成る CLIC プロトタイプ加速管 (TD24*, 進行波) を改良 4 分割方式で製作中で、2018 年度中に高電界試験を行う予定である。

5 SLAC における研究

SLAC にも、Nextef に相当する高電界試験施設 ASTA (Accelerator Structure Test Area) がある。そこでは、50 個以上の X バンド加速構造 (おもに、単セル型) を試験してきた。そこでの試験結果は、「表面磁界効果の重要性の発見」に大きく貢献した。本節では、最近の成果として、常伝導低温空洞試験を紹介する [17]。ASTA において、図 13 にあるクライオスタット内に単セル型非減衰空洞を入れ、45 K にて高電界試験を行った。結果を図 14 に示す (Cu@45K)。室温における試験結果 (Soft Cu, Hard Cu, Hard CuAg) と比べると、45K の低温では格段に高い加速性能が出た。これは、銅の硬度に関係していると考えられている。そもそも、ブレイクダウン率の加速勾配依存性 (図 14 にある傾き; ここでは単に「傾

き」と言う)は、ブレイクダウンの物理に関係している。ろう付けなどの高温処理をして鈍った軟銅 (Soft Cu) よりも焼き鈍しのない硬銅 (Hard Cu) の方が傾きは急である。銅に銀を少量混ぜた合金はさらに硬くなることが知られており、傾きはさらに急である。材料である銅の硬度がブレイクダウンの物理に影響しているといえる。そして、低温にすることで最も硬くなり、これまでの常伝導加速構造の中で最高の加速性能を示した。45K における傾きが銅合金のものと同程度、または、それより急な傾きであると仮定すると、45K における試験結果は、CLIC の仕様に対して、200 MV/m を超える加速勾配に相当する。材料の硬度とブレイクダウン率との関係はまだ仮説であるが、現在、フルチョークモード型空洞 [18] と呼ばれる特殊な単セル型試験空洞と高出力パルスレーザーを使って、その仮説の検証を日米協力 (おもに、SLAC-KEK) で行っている。

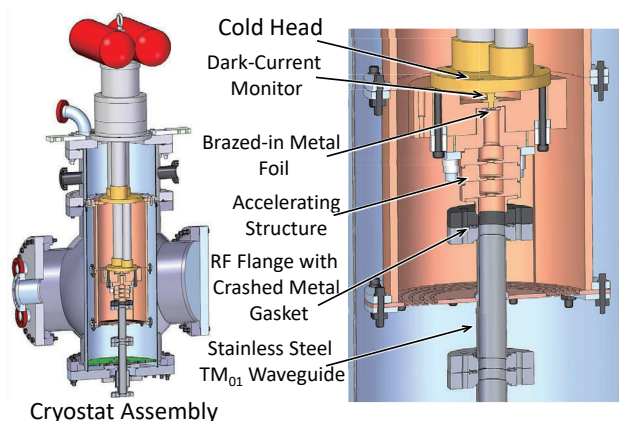


図 13: 常伝導低温試験用クライオスタット。SLAC 提供。

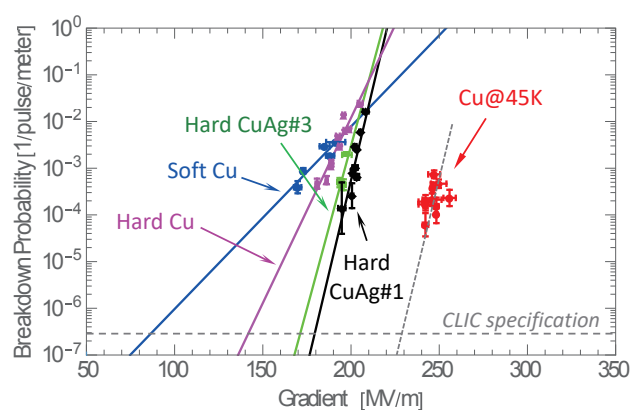


図 14: SLAC / ASTA で行われた高電界試験の結果 [17]。45K における低温試験の結果 (Cu@45K) の他、軟銅 (Soft Cu)、硬銅 (Hard Cu)、銅と銀の合金 (Hard CuAg) から製作した単セル型非減衰空洞に対する常温での試験結果も示してある。RF 設計 (空洞の幾何学的形状) はすべて同じである。

6 ブレイクダウン・トリガー機構の解明研究

常伝導加速構造のブレイクダウンは、その内部で発生する真空放電によって起こる。しかし、その真空放電がどのようなメカニズムで引き起こされるかについては、未だ解明されていない。つまり、ブレイクダウンを引き起こす仕組み (ブレイクダウン・トリガー機構) を解明することで、常伝導高電界加速性能を格段に引き上げることが可能になるかも知れない。現在、CLIC 計画があることもあり、様々なブレイクダウン・トリガー機構の解明研究が行われており、本節では、そのいくつかを紹介する。

6.1 理論的研究

ブレイクダウンは、マイクロなスケールの現象から発生すると考えられ、完全な理解のためには、原子・分子レベルで考える必要がある。そこで、ヘルシンキ大学 (フィンランド) の理論グループは、図 15 に示すようなマルチスケールのシミュレーションを開発している。分子動力学や運動学的モンテカルロなどの手法を使って第一原理でブレイクダウンを理解しようとする野心的試みである。現時点では、計算機の能力に限界があり、DC 放電に関してのみシミュレーションが可能であるが、銅表面にナノメートル・サイズの突起があり、そこに高い電界がかかった場合、どのような条件がそろえば真空放電に至るかを詳細に調べることが可能となっている。詳しくは、この研究を統括している Flyura Djurabekova 氏 (ヘルシンキ大学) の発表スライド [19] を参照いただきたい。また、この他にも多くの理論的研究があり、関連ワークショップ [20] などで詳しい情報を得ることが出来る。

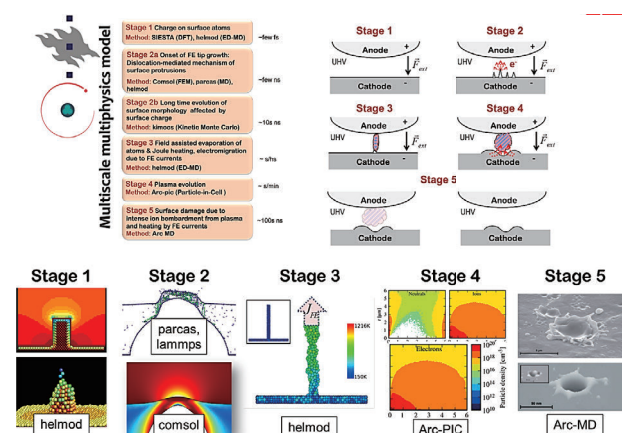


図 15: ヘルシンキ大学 (フィンランド) の理論グループが開発している、ブレイクダウンのマルチスケール・シミュレーションの全体像。ヘルシンキ大学提供。

6.2 実験的研究

ブレイクダウンの実験的研究は、加速構造などの高電界試験により行われる。ここでは、ブレイクダウンに伴って発生する反射波、電流フラッシュ、X線、光、音響放射などを観測し、加速勾配やRFパルス幅などの相関を調べる。また、高電界試験が終了した加速管を切って、内部をSEMなどで観察する。しかし、我々が最も知りたいのは、ブレイクダウンのトリガー(源)である。上記観測量やSEM観察の結果は、どれもブレイクダウンの結果発生する2次的なものであり、ブレイクダウン・トリガーを突き止めるには遠回りであるという考えもある。そこで近年、高電界試験の試験体内部を直接観察し、ブレイクダウンの瞬間前後を視覚的にとらえる実験が行われている。「百聞は一見にしかず」である。

6.2.1 DC放電実験における直接観察

西安交通大学(中国)の研究グループは、真空中の電極(ギャップ: 0.5~5 mm)に数十kVのDC高電圧をかけて、直接観察実験を行っている。図16は、高速度カメラでブレイクダウンの瞬間前後をとらえた例である。上側に銅製の突起状カソード(マイナス電極)があり、下側に銅の平板のアノード(プラス電極)がある。ブレイクダウンを検出した瞬間($\Delta t = 0$)、カソード上で小さな発光が始まり、その後($\Delta t = 200$ ns), アノード側の発光が開始・拡大するのが見られる¹⁰。これは、カソード上にトリガーがあり、カソードからアノードに向かって流れた電子がアノードに衝突した結果、アノードが熱せられて発光したと理解出来る。この実験結果は、上記ヘルシンキ大学のシミュレーションのよいインプットとなる。理論・実験双方の今後の展開が期待される。

6.2.2 509 MHz 連続波空洞試験における直接観察

RFブレイクダウンのトリガー機構解明のステップとして、上記の理論や実験で示したようなDCブレイクダウンの理解は重要であるが、常伝導加速にはマイクロ波を使うので、最終的にはRFブレイクダウンを見なければならぬ。著者は、SuperKEKBの陽電子ダンピングリング用の509 MHz常伝導高周波加速空洞(連続波)の開発・製造に携わってきたが[21]、この第6.2.2節では、著者が提案し、その実機2号機のRFコンディショニングに寄生する形で行った直接観察実験を紹介する。そこでの加速勾配は数MV/m程度とパルス運転と比べると低い。連続波であるため、加速空洞には大きな負荷がかかることになる。空洞内を観察するため、図17に示

¹⁰これも印刷版では見にくいので、Web上で公開しているPDFファイルを参照いただきたい。http://www.jahep.org/hepnews/

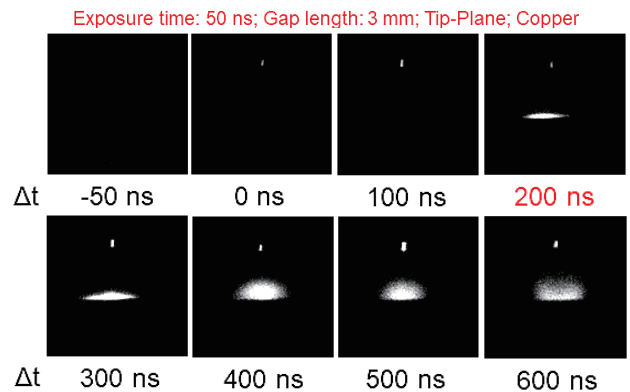


図16: DCブレイクダウンの瞬間前後を高速度カメラで撮影した例。上側に銅製カソードの突起(マイナス電極)、下側にアノードの銅平板(プラス電極)がある。国際ワークショップMeVArc2017 [20]におけるZhenxing Wang氏(中国・西安交通大学)の発表スライドより抜粋。

すように、3台のTVカメラによるセットアップを構築した。

試験開始当初、RFブレイクダウンの瞬間には、稲妻のような激しい事象が起こった。しかし、このような事象は、試験の最初だけで、RFコンディショニングが進むと見られなくなった。観測された合計205回のブレイクダウン事象を統計的に解析してみても、ブレイクダウンの瞬間に加速空洞内で火花や稲妻のような派手な事象が起こったのは全体のうち約10%と少なく、起こったのもRFコンディショニングの初期期だけであった。最も多かった事象は、ブレイクダウンの瞬間、電極に相当する空洞端板上で突然小さな爆発が起こる「スポット型爆発」で、これは全体の約40%あった。図18にその一例を示す。次に多かったのは、大電力試験中に安定的に発光していた端板上の「輝点」が、ブレイクダウンの瞬間に爆発・消滅した事象で、これは全体の約25%あった。図19にその一例を示す。輝点の存在は昔から知られていたが、それがブレイクダウンの源のひとつであることは、今回の観測で初めて判明した。詳しくは、KEK加速器研究施設トピックス(Web記事)[22]や原著論文[23]を参考にさせていただきたい。

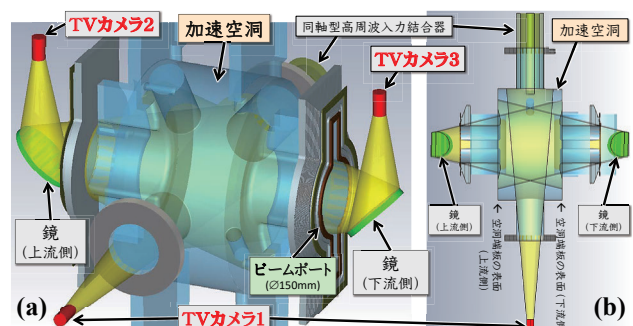


図17: 509 MHz連続波空洞の直接観察実験における3台のTVカメラのセットアップ図。

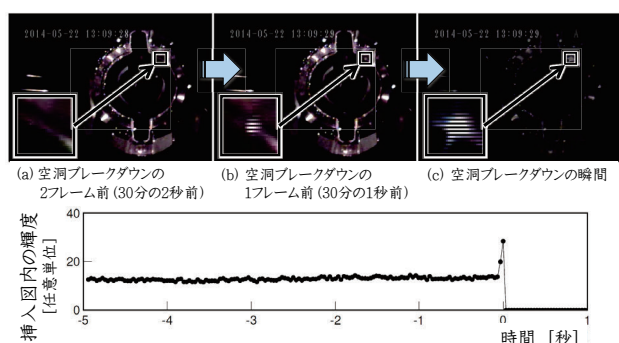


図 18: ブレイクダウンの瞬間とその直前のスナップショット (図 17 の TV カメラ 3 で撮影)。この例では、ブレイクダウンの瞬間、空洞端板上でスポット型爆発を観測した。挿入図は、爆発箇所拡大図。下のプロットは、挿入図内の輝度の変化。

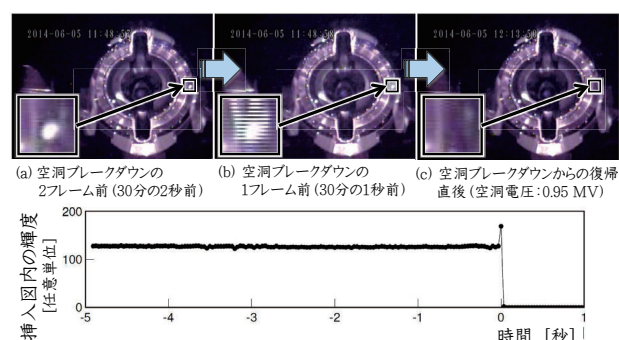


図 19: ブレイクダウンの瞬間前後のスナップショット (図 17 の TV カメラ 3 で撮影)。この例では、大電力試験中に空洞端板上で安定的に発光していた輝点の一つが (超新星爆発の如くに) 爆発⇒消滅し、その瞬間、加速空洞がブレイクダウンした。挿入図は、爆発した輝点の場所の拡大図。下のプロットは、挿入図内の輝度の変化。

この第 6.2.2 節で紹介した研究は、509 MHz・連続波の加速空洞に関するものであり、常伝導高電界加速構造 (より高い周波数でパルス運転) におけるブレイクダウンのメカニズムと同じかどうかはわからない。しかし、現在までのところ、著者達が Nextef/シールド B において単セル型空洞を使って行っている高電界試験では、ブレイクダウンの瞬間、スポット型の発光が多く観測されている。また、Sバンドのフォトカソード電子銃にレーザーを当ててブレイクダウンを誘発させる実験でも、ブレイクダウンの瞬間に輝点が観測された [24]。これらのことから、輝点がブレイクダウン・トリガー機構を理解するための鍵になると考えられる。現在、著者達は、科研費を使った研究で輝点の正体を解明中である。

7 おわりに

ITRP による勧告以降、表面磁界効果の重要性の発見や、CLIC 計画を中心とした国際共同研究の努力が実り、GLC 時代の加速勾配 65 MV/m から CLIC の 100 MV/m 級へと、常伝導高電界加速研究は着実な進歩を遂げている。さらなる飛躍のポテンシャルとして、チョークモード型減衰構造、硬い銅合金材料の使用、新しい製作方式 (4 分割方式) などがある。

SLAC の常伝導低温空洞試験の結果は、CLIC 仕様のブレイクダウン率にて、加速勾配 200 MV/m を超える高電界加速が可能であることを実験的に示唆している。ブレイクダウン・トリガー機構の解明が進み、室温でその性能を達成出来れば、ILC の 7 倍程度の加速勾配を持つリニアコライダーの実現可能性が見えて来るという意味で、大きなインパクトがある。

本稿で紹介出来なかった関連研究は数多くある。最後に、この研究分野における主な会議を紹介するので、興味のある方は、参考にしていただきたい。

- 「CLIC ワークショップ」

毎年 CERN で行われている CLIC 計画全般 (加速器, 測定器, 物理) に関するワークショップ。前回は、2018 年月 1 月に開催された [25]。
- 「International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology」

常伝導高電界加速に関する国際ワークショップである。2012 年までは CERN, KEK, SLAC の持ち回りで開催し、2013 年以降は他の研究機関や大学で開催されている。第 1 回は、2007 年に CERN で開催され、その時の会議名は「The X-Band Accelerating Structure Design and Test-Program Workshop」であったが、2012 年に KEK で開催した際に、上記の会議名となった (肥後氏の命名)。著者が 2015 年に参加した時には、100 人近い出席者がいた。前回 (10 回目) は、2017 年 6 月、バレンシア (スペイン) で開催された [26]。
- 「International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs」

通称 MeVArc と呼ばれる国際ワークショップで、真空放電現象全般の実験と理論をカバーしている。CLIC 計画が背景にあるが、幅広い分野からの参加がある。著者が 2015 年に参加した時には、50 人程の出席者がおり、盛況であった。前回 (6 回目) は、2017 年 3 月、エルサレム (イスラエル) で開催された [20]。

謝辞

原稿を丁寧に読んでいただき、多くのご指摘をくださった KEK 加速器の肥後壽泰氏に感謝の意を表します。

CERN/CLIC グループの共同研究者 Walter Wuensch 氏と Jan Paszkiewicz 氏からは、CLIC プロトタイプ加速管のデータ、および図の使用許可をいただきました。また、Valery Dolgashev 氏 (SLAC), Jiaru Shi 氏 (清華大学), Flyura Djurabekova 氏 (ヘルシンキ大学), Zhenxing Wang 氏 (西安交通大学) から図の使用許可をいただきました。重ねて感謝の意を表します。

509 MHz 連続波空洞の直接観察実験は、SuperKEKB-RF/アレス空洞グループで行いました。本研究にご理解とご協力をいただき、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 阪井 寛志, “超伝導加速空洞”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'15 テキスト
http://accwww2.kek.jp/oho/oho15/OHO15.txt/07_Sakai_Hiroshi_3.pdf (2015).
- [2] M. Aicheler, *et al.*, “A Multi-TeV Linear Collider Based on CLIC Technology”, CERN-2012-007, SLAC-R-985, KEK-Report-2012-1, PSI-12-01, JAI-2012-001(2012).
- [3] A. Winter, “Physics Potential of CLIC Operation at 380 GeV”, CLICdp-Conf-2017-009(2017).
- [4] D. A. Constable, “High Efficiency Klystron Development for Particle Accelerators”, in Proceedings of eeFACT2016 (2016) WET3AH2.
- [5] P. Wang, *et al.*, “The RF Design of a Compact, High Power Pulse Compressor with a Flat Output Pulse”, in Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2016) TH-PMW022.
- [6] A. Grudiev, S. Calatroni and W. Wuensch, “New Local Field Quantity Describing the High Gradient Limit of Accelerating Structures”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **12** (2009) 102001. [Erratum, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **14** (2011) 099902].
- [7] V. Dolgashev, *et al.*, “Geometric Dependence of Radio-Frequency Breakdown in Normal Conducting Accelerating Structures”, Applied Physics Letters, **97** (2010) 171501.
- [8] F. Wang, *et al.*, “Performance Limiting Effects in X-Band Accelerators”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **14** (2011) 010401. [Addendum, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **15** (2012) 120402].
- [9] 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** (2011) 160–167.
- [10] X. Wu, T. Abe, H. Chen, T. Higo, S. Matsumoto, J. Shi and H. Zha, “High-Gradient Breakdown Studies of X-Band Choke-Mode Structures”, in Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2017) TUPAB010.
- [11] X. Wu, “Design and Experiment of X-band High-Gradient Choke-Mode Accelerating Structure”, PhD thesis, 清華大学 (2017).
- [12] 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 (2007) TO03.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Cahill, V. Dolgashev, J. Rosenzweig, S. Tantawi and S. Weathersby, “Ultra High Gradient Breakdown Rates in X-Band Cryogenic Normal Conducting RF Accelerating Cavities”, in Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2017) THPIK125.
- [18] A. Yeremian, V. Dolgashev and S. Tantawi, “RF Choke for Standing Wave Structures and Flanges”, Conf. Proc., **C100523** (2010) TH-PEA065.

- [19] F. Djurabekova, “Multiscale Simulation Model of Electrical Breakdown: Current Status and Perspectives”, <https://indico.cern.ch/event/521667/contributions/2475391/> (2017).
- [20] “The 6th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc2017)”, <https://indico.cern.ch/event/521667/> (2017).
- [21] 阿部 哲郎, “SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用の高周波加速空洞実機 1 号機が完成”, KEK 加速器研究施設トピックス 2013/9/5, <http://www2.kek.jp/accl/topics/topics130905.html> (2013).
- [22] 阿部 哲郎, “高周波加速空洞のブレイクダウンの瞬間を「見た」!”, KEK 加速器研究施設トピックス 2016/10/5, <http://www2.kek.jp/accl/topics/topics161005.html> (2016).
- [23] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi and K. Yoshino, “Breakdown Study based on Direct In Situ Observation of Inner Surfaces of an RF Accelerating Cavity during a High-Gradient Test”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **19** (2016) 102001.
- [24] J. Shao, *et al.*, “Observation of Temporal Evolution Following Laser Triggered RF Breakdown in Vacuum”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **17** (2014) 072002.
- [25] “CLIC Workshop 2018”, <https://indico.cern.ch/event/656356/> (2018).
- [26] “The 10th International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology”, <https://indico.cern.ch/event/589548/> (2017).