

## 国際協力

## 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

松本 修二\*1・肥後 壽泰\*1・上野 健治\*2

### International Collaboration discussed at the 2nd Collaboration Meeting on X-Band Accelerator Structure Design and Test Program

Shuji MATSUMOTO\*1, Toshiyasu HIGO\*1 and Kenji UENO\*2

#### 1. はじめに

去る5月13日から15日まで、International Committee for Future Accelerator (ICFA) Beam Dynamics Panel 協賛の ICFA Mini-Workshop として、2nd Collaboration Meeting on X-Band Accelerator Structure Design and Test Program と題する国際研究協力会議が KEK 主催で開催された（会議ホームページ：<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=30911>）。この会議の趣旨は、Xバンド帯 RF による次世代常伝導電子リニアックの高電界加速管について、その設計、製作試験、及び評価方法に関する国際的な研究協力強化について協議することにある。第一回目の会議は、昨年6月にCERNで、そして第二回目の今回は KEK で開催された。今後も持ち回りで年一回の開催が予定されている。

そもそも Xバンド（周波数 11.424 GHz）に基づく高電界電子リニアックの開発研究は、超伝導加速器技術に基づく国際リニアコライダー計画（ILC）が始まる2004年までの十数年間、KEK および SLAC を中心とした常伝導リニアコライダー計画（GLC/NLC）の開発研究として行われてきた。リニアコライダーのような TeV 級電子リニアックを実現する上では、低いフォールト頻度での高い加速勾配（数 10~100 MV/m）の実現が必須である。2004年の時点で、複数台の GLC/NLC プロトタイプ加速管は、百万パルスに一回程度の放電頻度で、ビーム無しで 65 MV/m の加速電界まで到達した。

CERN CLIC (Compact Linear Collider) グループ

は、彼らが開発研究を進めている Multi-TeV の電子陽電子リニアコライダーについての最適化を行い、2006年12月、加速周波数をそれまでの 30 GHz から 12 GHz に、また、加速電界の目標をおなじく 150 MV/m から 100 MV/m とした。このうち CLIC グループは、KEK および SLAC の Xバンド研究グループに対し、1) Xバンド加速管の精密加工技術や組み立てなどの加速管製作上の研究成果の共有化とそれを利用した試験用加速管の共同開発、2) 少なくとも CERN 試験施設の建設完了までの間、KEK および SLAC に現存する試験施設を使っての加速管試験について提案した。一方、KEK, SLAC 側は、CLIC 加速器用加速管開発に協力することを通じて、自らの Xバンド研究上、具体性のある研究課題が得られるメリットを考え、周辺の基礎研究もふくむ高電界加速管の開発という点に特化した新たな国際的な研究協力体制が発足した。

昨年6月にCERNで第一回目の研究協力会議を開催し、高電界試験用加速管（名称 T18\_VG2.4\_Disk）の設計、製作、また既存試験設備でのそれら加速管の試験を分担して行う共同開発プログラムを決定した。昨年から今年にかけてこのタイプの加速管がすでに二本製作され、このうちの一本は SLAC にて試験中である（もう一本は KEK で試験予定）。その良好な試験結果の中間報告が今回の会議での主要なトピックの一つになった。

この会議を今回 KEK で開催した理由は、1) KEK には、機械工学センターを中心に、長年培ってきた Xバンド加速管超精密加工技術の蓄積があり、その

\*1 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 Accelerator Laboratory, KEK  
(E-mail: shuji.matsumoto@kek.jp, E-mail: toshiyasu.higo@kek.jp)

\*2 高エネルギー加速器研究機構機械工学センター Mechanical Engineering Center, KEK  
(E-mail: kenji.ueno@kek.jp)

経験を生かして、すでに T18\_VG2.4\_Disk の製作に直接の貢献を行っているほか、CLIC 型の 4 分割加速管の加工技術の開発研究にも着手していること、2) KEK にある、現在試験運転中の 100 MW 級 X バンド加速管試験施設では、T18\_VG2.4\_Disk の試験を近々開始する予定であること、の二点であろう。試験施設が立ち上がりつつあるこの時期に会議を KEK で開催すれば、共同開発プログラムの議論をはじめ、これに関連した議論を有意義に行うことができるとの判断があった。

今回の会議では、主要議題の共同開発プログラムの下での試験用加速管による研究の現状と今後の具体的研究内容などに関する議論をおこなったほか、SLAC および KEK の現存 X バンド試験施設の運用状況や将来計画などの報告、CLIC に建設予定の新施設計画の紹介、また高電界加速管での放電現象の理解に向けた種々の基礎研究についても数多く報告された。また、KEK 内の X バンド関連施設の見学ツアーも行われた。活発な議論で盛況な 3 日間の会議であったと思う。

登録参加者数は総計 70 名。このうち海外（主として CERN, SLAC）からは 18 名、国内からは、ホストの KEK や国内各研究機関、大学、また企業所属の方々とあわせて 30 名以上の参加があった。共同議長を、肥後寿泰 (KEK), Sami Tantawi (SLAC), Walter Wuensch (CERN) の三氏がつとめ、KEK 加速器研究施設および機械工学センターの X バンド研究関係者が運営にあたった。以下、会議主催の側からの視点も交えた会議の報告を行う。

## 2. プログラム

神谷 KEK 加速器研究施設長の開会の辞につづき、Wuensch, Tantawi, Higo の三氏が、それぞれ CERN, SLAC および US 高勾配加速器コラボレーション、KEK での X バンド研究状況のレビューを行なった。その後、加速管設計→加速管製作→試験設備現状と将来計画→各種試験結果→今後の戦略、の順序で 3 日間にわたる一連のセッションが行われた。共同研究の趣旨から、会議全体を通じ、基本的なパラメータ群は CLIC を基準としている。下記に加速管共同開発のプログラムに直接関係する内容を掲げた。括弧内は報告者の名前。なおここにあげた以外に、直接共同開発研究にはなっていない研究（たとえば PETS = 2-beam 加速方式での RF 発生加速管の設計）や加速管の工学設計、また CERN に整備予定の試験施設についてなどの発表もあった。興味のある方は会議ホームページ

をご覧ください。

### 2.1 CLIC 加速管の設計 (A. Grudiev, R. Jones)

HOM に対して  $Q \sim 10$  程度が必要だが、磁場結合のみのダンピングでも可能である。従って、輪切りのディスクに減衰導波管を加えた GLC/NLC 時代の構造でも可能性がでてきた。GLC/NLC での設計である  $Q \sim 1000$  の設計での可能性もあり、今後の宿題とした。

### 2.2 CLIC 加速管の製作技術

CLIC では加速管を縦に四分割する、四分割型加速管が基本になっているが、その製作を行った報告があった (G. Riddone)。その切削加工に関して、CERN のコントラクター VDL 社でのダイヤモンド加工では  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  の精度を達成できたことが報告された (R. Zoetewey)。すばらしい結果に感動した人も多かった。

KEK でも四分割型加速管の試作を初めて行い (図 2 参照)、数  $\sim 10 \mu\text{m}$  程度の精度が達成できた (T. Takatomi)。

Zr を 0.16% 入れた無酸素銅 C150 で金属疲労を逃れることが検討されているが、実際の製造方法への取り入れは今後であり、特に熱処理による材料特性の変化などへの配慮が必要であることが議論された。

### 2.3 高電界試験設備

下記に掲げる試験設備を加速管の高電界試験に積極的に用いることができることが報告された。

SLAC (S. Tantawi, C. Adolphsen)

- NLCTA (NLC Test Accelerator) の 2 つのステーション：X バンド 50 MW クライストロン 2 本のパワーを合成して使用するステーションが 2 台稼働中。加速管試験を長期に継続している。
- ASTA (Accelerator Structure Test Area) : NLC-TA 同様、X バンド 50 MW クライストロン 2 本のパワーを合成して使用する。建設を終了し、近々立ちあげに入る。パルス圧縮しないで使用すると 100 MW 級だが、パルス圧縮を行うとピークパワーは 500 MW 級になる。
- このほか 50 MW クライストロン 1 本による 50 MW 級ステーションが 2 箇所あり、それぞれシングルセルの試験およびパルスヒーティングの研究に使用されている。

KEK (T. Higo, S. Matsumoto)

- KT-1 (Klystron Test station #1) : 50 MW クライストロン 1 本使用の 50 MW 級試験施設。定常的に稼働している。現在、狭導波管試験を行っている。

- **Nextef** (New X-band Test Facility) : 50 MW クライストロン 2 台のパワーを合成して使用する 100 MW 級の施設. 現在調整運転中で, 定格の半分程度のパワーまで確立した. こちらは, 共同開発加速管の試験に使用される. これを早急に立ち上げるのが重要であるとの認識を国内外の人が持つことになった.

## 2.4 高電界試験結果のレビュー (C. Adolphsen, S. Doebert)

### H75VG4S18 加速管 (図 3)

放電頻度  $BDR = 6 \times 10^{-6}$ @加速電界 = 100 MV/m, RF 幅 150 ns を達成. 無酸素銅製 GLC/NLC 加速管で, 100 MV/m 級の加速勾配の実現可能性の根拠になっている加速管.

### T18\_VG2.4\_Disk #1 加速管 (図 4)

昨年の 1 回目の会議で開発決定した三本の加速管の一本目. 無酸素銅製 Disk Loaded Structure (ダンピングのためのスロットはない). 現在 NLCTA (SLAC) で試験継続中. 230 ns の RF 幅で 100 MV/m の加速電界時に放電頻度  $3 \times 10^{-6}$  以下を達成して, 今回の会議での話題の一つとなった. 100 MV/m のビーム加速の実現に向けて, かなり有望な結果が得られている (S. Doebert).

なお, この加速管は, 電気設計を CERN, 機械設計と製作を KEK, 接合と真空処理を SLAC が行ったが, 得意な分野をワークシェアした共同開発研究の出発点になっている.

### その他の基礎試験

SLAC でのパルス温度上昇の試験, シングルセル高電界試験等のデータがたまり始め, 実際の加速管での評価との関連が具体的に議論できる段階にきた (V. Dolgashev, Y. Higashi, L. Laurent ら). KEK でも狭導波管試験が始まり, 比較可能なデータになりつつある (K. Yokoyama).

### 現象論的パラメータ化 (A. Grudiev) :

また, 多くの加速管の高電界特性を評価するパラメータとして, ある複素ポインティングベクトル量をとると, 進行波加速管だけでなく定在波加速管の試験結果も統一的に評価できそうであるとの報告があった. 今後の試験結果を含めてこの類の現象論的解析が有効に機能すれば, 今後の設計に大きな力を発揮できるかもしれない.

## 2.5 今後の高電界試験の戦略

以上の議論に基づいて, 今後の試験計画につき議論を行った. GLC/NLC 加速管や T18\_VG2.4\_Disk の好結果を受けるも, 最終仕様の 100 MV/m 加速管は,

CLIC で考えているような四分割かもしれないし, 材料も C150 のような純無酸素銅以外の必要もありそうで, 現状から最終仕様までの道はそんなに平坦ではない. 高電界加速管の開発上, 今後 2~3 年のスケールでは, 以下の三点を並行して評価する事が必要であろう. すなわち,

1. 現状, または近未来に実用可能な最大加速電界での長期運転
2. CLIC (100 MV/m) 級の加速の実現
3. 物質で決まる放電限界の評価

CERN は 2 項を, SLAC は 2, 3 項を目指すであろうし, KEK は 3 項に協力しながら, まず 1 項, できれば 2 項にも重点を置くことになろうかと思われる. スタンスの違いはあるが, 今後も協力をして研究を行ってゆくことを確認し, 具体的な研究内容については三者間で適宜議論を継続してゆくことにした.

例えば CERN-SLAC 間では, C10 シリーズと銘打って寸法パラメータを変えた 10 レギュラーセルを再使用可能なカプラーにつけて比較試験することを始めているが, 今回 KEK の加工経験を生かしたセルを用いてダンピング特性を評価する計画を具体的に進めることに合意した.

今回の共同開発管 T18\_vg2.4\_Disk の製造法は, これまで GLC/NLC 加速管と同じ方法を踏襲している. T18\_vg2.4\_Disk のこれまでの試験結果のみならず, GLC/NLC 加速管の中によい成績のものもあることから, この加速管製作法が高電界加速管の実現にはひとまず有望であるとみなされた. KEK での T18\_vg2.4\_Disk #2 の結果が #1 の結果を再現するか否かが注目されている. これにより, 加速管の製造上のばらつきに対する知見がえられると思われる.

今会議では報告はなかったが, SACLAY に X バンド高電力施設の建設が検討されていることや, US コラボレーションとして米国内で, SLAC 以外の施設で X バンド帯などでの各種試験が進められていること. 日本国内の研究協力体制への展開を図りたい意向などを受けて, 共同研究体制の将来について, 現時点で直接関与している三者以外にも参加機関を広げてゆくことが議論された.

会議の結論としては, この CLIC 仕様加速管の共同研究を今後も進めることが確認され, また会議の成果としては, 以下の三点が参加者の間で認知された.

- 1) これまでの数々の重要な結果についてレビューし, GLC/NLC 加速管の高電界の限界で起こった表面の損傷状況などをあらためて確認した.
- 2) 現時点での高電界限界を決めている要因を,



図1 会議参加者

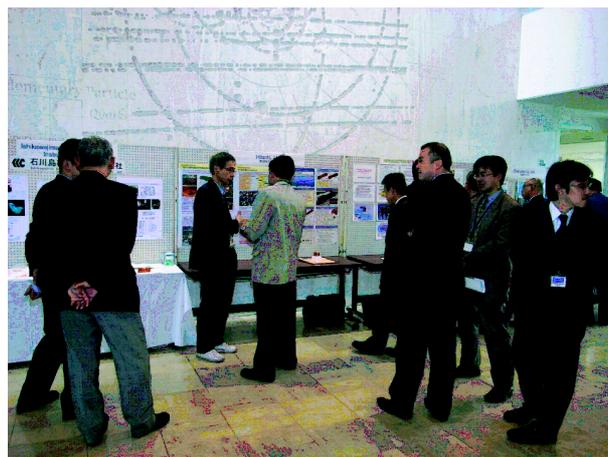


図5 展示会の様子

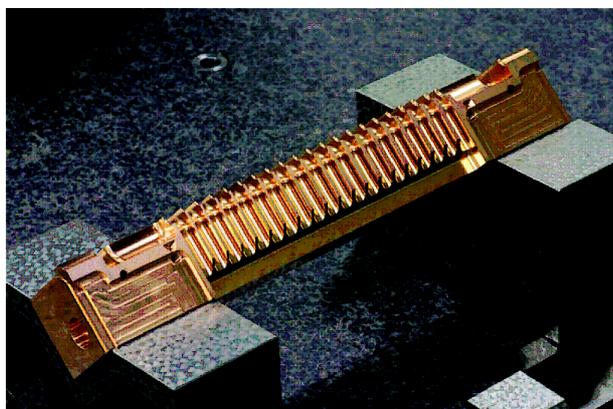


図2 加工試験された四分割加速管

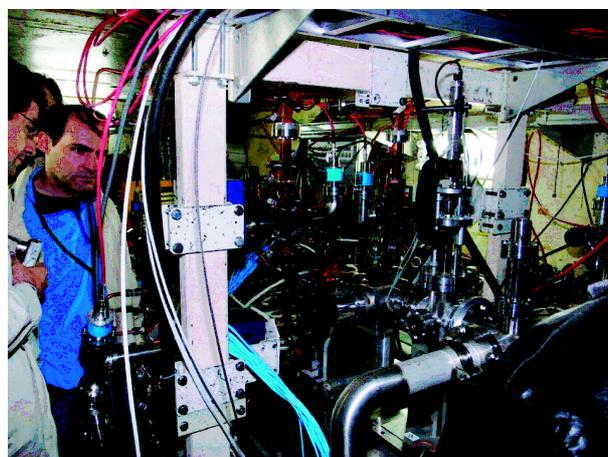


図6 ツアーの様子：Nextef シールド内部

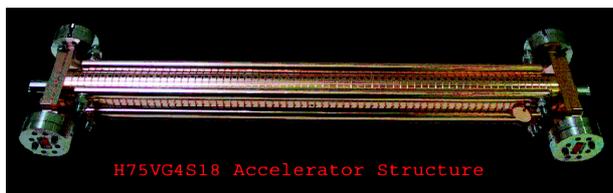


図3 GLC/NLC 加速管



図7 ツアーの様子：超精密加工室内

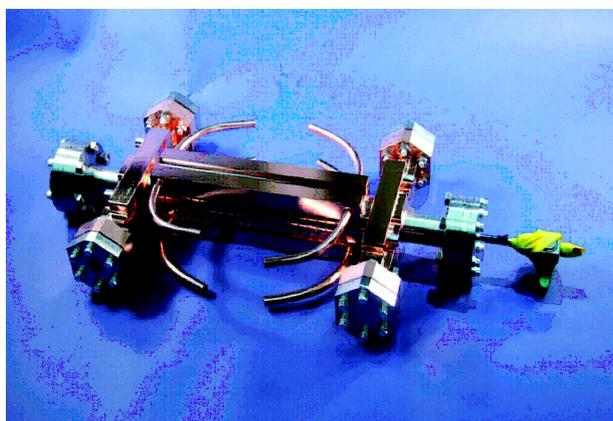


図4 T18\_VG2.4\_Disk 加速管

今後の実験や理論的考察を通じてよりよく理解することが必要である。CLIC仕様(100 MV/m 加速勾配)にいたる有効な方策を見出すことができるであろうと考える。

3) これまで各研究所等で独自に行われてきた高電界に関する実験について、今後はできるだけ定量的な比較が可能な形で進める必要がある。

### 3. 企業展示

会議の初日の午後、セミナー会場前のロビーにて、Xバンド関連技術で協力関係にある国内各企業の展示会を催した(図5)。これは、日本における加速管装置、部品の超精密加工技術のポテンシャル高さの紹介、世界に定評のある高電界加速管の素材、加速器運転用のクライストロン製作技術及び小型加速器のシステム技術の紹介等を意図したもので、1グループを含む9件の積極的な企業参加を受けた。各社得意とする技術の紹介を特に実例を基に参加者へ説明し、新たな質問等には自信のある議論をしていただいた。企業展示のもう一つの目的が、海外の研究者に日本の企業の名前を直接聞き知っていただくことであったが、予想以上に十分な反応があったと思う。海外参加者の中には、企業の参加者も含まれており、国際協力といえ各社自負する技術については、セミナー会場外での熱心な議論がされていた。

### 4. 施設ツアー

本会議は、参加者の顔ぶれが新しく、またかつてKEKに来所したこともある参加者も、時間が相当経

過していることから、会議二日目午後に高電界加速管にかかわる、三ヶ所の現場を見学先として、ツアーを企画した。三ヶ所とは、①NextefとKT-1、②加速管の加工と加工直後のRF特性評価をする超精密加工室、および③加速管の部品、加速管自体の精密測定を行なっている超精密測定室。

Nextefでは、モジュレーター、クライストロンのパワーソース系、シールド内加速管試験エリア内の機器等、施設すべてを公開した(図6)。KT-1では、高電界時の放電現象を調べる狭導波管の試験のため稼動中のところを見ていただいた。また、超精密加工室では、超精密加工機及び測定機関連を見学していただき、これまで製作してきたXバンドディスク等の超精密加工について紹介した(図7)。

ツアーには、海外からの参加者は全員、国内の方も参加され、総勢27名の見学者であった。実際の加速管等の部品、データを基に活発な議論していただき貴重な意見を受けたりした。三か所のいずれも、比較的小規模の目立たない施設ではあるが、KEKでのXバンド加速管研究現場の現状理解という観点から、よく見ていただけたように思う。

### 謝辞

今回の会議では、関係各企業の方々にも展示会を中心として加わっていただき当会議がより実りあるものにできた。また、会議運営には、KEK加速器研究施設、機械工学センター、他の関連部門の方々の協力、特に秘書の方々には多大な尽力をしていただいた。この場を借りて感謝致します。