

解 説

KEK における X バンド 高電界加速への研究開発

肥後 寿泰*1・松本 修二*2・上野 健治*3

R&D toward X-band High-gradient Acceleration at KEK

Toshiyasu HIGO*1, Shuji MATSUMOTO*2 and Kenji UENO*3

Abstract

The research and development of X-band acceleration has been conducted at KEK since 1989. The activity proceeded as the KEK's main task force until the ITRP in 2004, aiming at the linear collider. Even after the ITRP chose the superconducting technology, KEK has continued the research of normal conducting X-band technology as one of the basic researches for high gradient acceleration at high frequency. In this report, some relevant achievements were reviewed such as the PPM klystron and the HOM-suppressed accelerating structure operated at 100 MV/m. Then, we discuss how we proceed this research in near future by taking into account the status of the linear collider research in the world.

1. はじめに

今後数年内には、LHC 実験からのメッセージを読み取り、次の電子陽電子リニアコライダー (LC: Linear Collider) に必要とされる衝突エネルギーが明確に議論されるだろう。500 GeV 領域までは現在国際共同開発で進められている超伝導加速器技術を用いる ILC (International Linear Collider)¹⁾ がカバーできるであろう。我々はマルチ TeV のエネルギーが必要と判断された場合に対応可能な技術の候補として常伝導高電界加速を研究している。現在は、この方式を採用した CLIC (Compact Linear Collider)²⁾ にひとつの設計案が出されているのでそこに基準を置き、100 MV/m 級の加速の実現性を評価しようとしている。また、その際に重要となる真空放電現象等の高電界加速に直結した現象を理解すべく、基礎的な研究も並行して進めている。これらの研究は、これまでの X バンド加速器開発の遺産を大いに活用するとともに、現在では SLAC や CERN と共同研究体制をとって進めている。

本稿では、現在に至る技術確立の歴史をたどり、現状を紹介して、今後の展望を述べる。

2. 開発の歩み

KEK における X バンド加速技術開発研究の出発点は、苦難の道乗り越えて世界最高エネルギーの衝突型加速器となったトリスタン加速器³⁾ の人材と技術である。これを基盤に、エネルギーフロンティアでの高エネルギー物理実験を目指した電子陽電子リニアコライダーへの技術として研究開発が始まった⁴⁾。

LC 加速器には、1. 衝突ルミノシティを上げるため小さいエミッタンスのマルチバンチビームを加速すること、2. 電力を抑えて高いエネルギーに到達するための、パルス毎に必要な加速電磁波の蓄積エネルギーを小さく抑えること、故に小さい領域に閉じ込められる高い周波数の加速構造とすること、3. 膨大な建設費を抑えるため安価な量産に耐える設計であること、等の外すことができない設計上の要求がある。

これらを考慮するも、なお加速周波数には選択⁵⁾の余地がある。1990 年代初頭、LC 発案の地ロシアでは、加速周波数 14 GHz で加速電界 100 MV/m 級、ドイツでは S バンド (3 GHz) で 17 MV/m、米国では X バンド (11.424 GHz) で 100 MV/m 級での妥当性をそれぞれ探っていた。KEK でも JLC (Japan Linear Collider) 計画として検討を重ね、確実に進められるであろう S バンド案 (2.856 GHz)、S バンド

*1 Accelerator Laboratory, KEK (E-mail: toshiyasu.higo@kek.jp)

*2 Accelerator Laboratory, KEK (E-mail: shuji.matsumoto@kek.jp)

*3 Mechanical Engineering Center, KEK (E-mail: kenji.ueno@kek.jp)

技術の延長線上で早期実現が可能であろう C バンド案 (5.712 GHz), それに X バンド案 (11.424 GHz) が共存していた. 技術的見通しにたって一本化すべき段階には至らないまま, 三者が同時進行で研究され, 当時の報告書には並記されている⁶⁾.

この中で, 最も高いエネルギーに到達できるが, 技術的には一番ハードルが高い, という意味で野心的なのは X バンド帯の選択である. 幸いなことに X バンド帯は S バンド周波数の 4 倍で, まだ S バンドでの設計, 製造, そして加速器運転の経験から技術的見通しを立てられる周波数帯である. 例えば, 波長は 2 cm 余り, つまり RF 構造物の基本寸法は 1 cm 級であり, 当時 nm 級を目指していた工業界の精密加工技術を取り入れて, 総合的には μm 級の制御で X バンド帯加速システムを完成させられるとの勝算に基づいた判断であった.

この信念の元に KEK での LC に向けた X バンド開発が 1989 年頃より始まった. 米国で中心的に進めていた SLAC の NLC 計画と同じ X バンド帯を選択したことにより, この頃に端を発しその後現在まで 20 年にわたり KEK, SLAC 間の共同開発研究が継続している. 因みに, 現在では CERN の LC プロジェクト CLIC⁷⁾でも X バンド帯を最適解としたことにより, 三者間の共同開発研究^{8,9)}に発展している.

X バンドでの実現に対して, 主眼をおくべき開発

要素は次の 5 項目である.

1. パルス高圧電源
2. 高電力クライストロン
3. パルス圧縮・分配・輸送
4. 高電界加速管
5. 低電力 RF 制御

この中で, 大電力・高電界のハードウェアを真っ先に開発することが肝要と考え, 開発研究は, 2 項と 4 項から出発した.

第一期 (1990 年代前半, 開発黎明期)

高電力, 高電界 RF 技術の開発にまず着手すべきと考え, 500 kV 級の高電圧短パルスモジュレータ, 100 MW 級のソレノイド収束高電力短パルスクライストロン, 100 MV/m 級のディスクロード型高電界加速管, 高電力試験用 SLED 型パルス圧縮器, 真空導波管コンポーネント, 等の開発を進めた. まず, 高電力 RF の実用に不可欠の矩形導波管 (WR90, 又は日本規格 WRJ10) 用真空フランジとして, S バンド導波管での経験のある Merdianian 型フランジを基礎に開発し, 現在においても実用に供している. クライストロンでは, まず 500 kV, 300 A 級のダイオード特性を確立し, その後 XB72K と名付けられたクライストロンで, RF 出力 35 MW 級を達成した¹⁰⁾. 加速管では, セルの精密製作技術と拡散接合による精密組立を組み合わせ, チューニング不要の, 量産対応可能な精密製作技術の基盤を確立した¹¹⁾. また, 初期の 20 cm 加速管において, SLED パルス圧縮による三角波形の尖頭値ではあるが, 100 MV/m の発生に成功し, ひとまず高電界化への見通しも得た¹²⁾.

第二期 (1990 年代後半~2000 年頃, 高ピークパワーとウェーク場の抑制)

この頃より SLAC/NLC (Next Linear Collider) との共同開発に本格的に入る^{13,14)}. 特に加速管開発では設計製作で分業を行い, DDS (Damped Detuned Structure) 構造の加速管でウェーク場抑制を実証¹⁵⁾し, マルチバンチ加速の確証を得た. 一方, 初期の高電界試験結果より, 放電による加速管の劣化等の問題がクローズアップされてきており, 如何に高電界を安定に実現するかの問題に次第に軸足を移すことになる¹⁶⁾. クライストロンは, KEK と SLAC との間で情報交換が定期的になされてはいたが, ほぼ独立にソレノイド収束クライストロンを開発していた. この間, パルス圧縮により高ピークパワーを得る RF システムの採用が決まり, クライストロン出力への要求仕様は, 当初の短パルス高ピークパワー (200 ns~400 ns, 100 MW 級) から, 長パルス (1.5 μs , 50 MW 級)

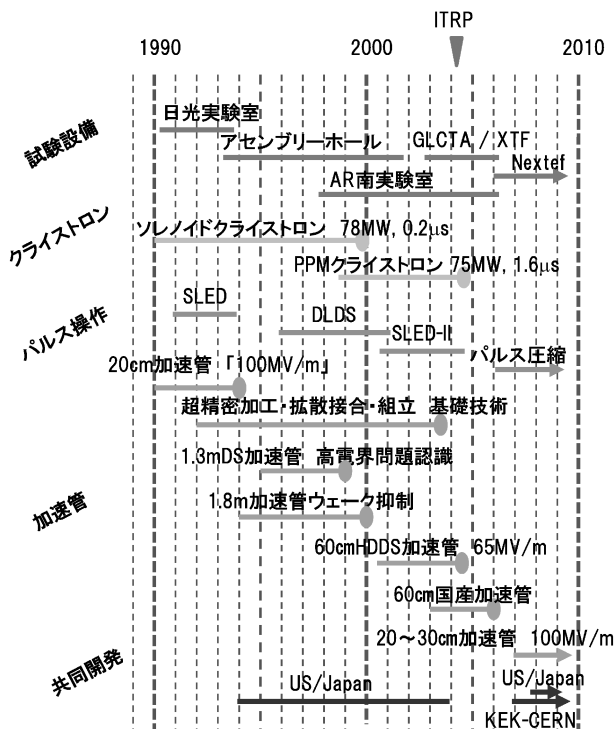


図 1 KEK の X バンド開発研究の歴史

に変更された. KEK の XB72K 9号機は, 短パルスでは 78 MW, 400 nsec, 長パルスでは, 53 MW, $1.5 \mu\text{s}$ を達成した. SLAC でも 50 MW, $1.6 \mu\text{s}$ 出力の XL-4 を開発した. クライストロン研究はこの後, LC に必須の電力効率の飛躍的改善のため, PPM (Periodic Permanent Magnet) 収束型クライストロンの開発に移行した¹⁷⁾.

第三期 (2000年初頭~2004年夏, LC システム試験期)

LC 用システムとしての実証をすべき段階に入り, RF パルス圧縮は, KEK から提唱した高効率の DLDS (Delay-Line Distribution System) 方式¹⁸⁾や SLAC の提唱する RF ユニットとして構成しやすい SLED-II 方式を共同で評価した. 最終的には, 高電界加速システムを早く実証するため SLED-II 方式を採用し, KEK と SLAC は共同して SLAC において 8-pack 計画と称するシステム試験を展開した¹⁹⁾. この時点では, PPM クライストロンはまだ数が足りなかったもので, ソレノイドクライストロンを使用することになった. しかしこの段階で, PPM クライストロンは, 設計値 (75 MW, $1.6 \mu\text{s}$) に到達しており, システム試験への供与を検討した. このため, KEK で製作したクライストロンを SLAC に持ち込み試験を行って, クライストロン開発でも実質上の共同開発に踏み出した.

このシステム試験では, クライストロンの長パルス出力を SLED-II で圧縮し, 500 MW, 400 ns 級の短パルスを発生させ, それを 8 台の 60 cm 加速管に供給して, 連続運転実績を示した. これにより, 加速管での放電現象の発生頻度 (以後「放電頻度」と呼ぶ) に関しても 65 MV/m 運転にて LC の仕様を満たすことを実証した. 同時期に KEK では, 高電力・高電界試験設備, GLCTA (Global Linear Collider Test Accelerator), を展開した²⁰⁾. 2 台のクライストロンパワーを合成し加速管にフィードして長期の高電界試験を実施して, 安定な高電界運転の確証を得た. 更に, 実機システムを念頭に, 2 台のクライストロンを同時に 150 Hz で駆動できる, インバータ電源駆動の小型・高電圧パルスモジュレータを開発した²¹⁾. クライストロン自体の開発も粘り強く進められ, 75 MW, $1.6 \mu\text{s}$ の長期運転試験を行った²²⁾. この時担当者内では, 長パルス運転で発生するパルス欠けの不安定性を理解し抑制すべきである, という課題が残っていることを認識していた²³⁾.

第四期 (2004年夏~2007年, LC 技術のフォローアップ期)

2004年夏の ITRP (International Technology Recommendation Panel) 勧告²⁴⁾に基づき, KEK の LC 開発は, L バンド超伝導技術に方向転換した. しかし X バンドに携わってきた核となるスタッフは, それまでに積み上げてきた X バンド技術を途絶えさせるべきではないと考え, それまでの蓄積を有効に活用し, 更に発展・展開に向けて努力し始めた. ITRP 前数ヶ月で急速に展開した設備 (GLCTA: Global Linear Collider Test Accelerator) を, じっくり試験進めることのできる KEKB 入射器開発エリアに移し, 加速器研究施設の RF 加速技術基礎研究として進めることにした. この高電力高電界試験設備は, Nextef (New X-band Test Facility) として展開され現在に至っている²⁵⁾. Nextef での柱の一つは高電界加速であり, 「加速管の高電界性能をどこまで上げられるか?」を重要な研究課題とした. また, 長パルスでの不安定性をもつ PPM 型クライストロンを長期運転することを通じて, 長期性能評価と, フォールトメカニズムを理解し, 改善を試みることにした. また, これまで分業して製作してきた LC 用加速管を純国産で製作した. 図 2 の写真は, HOM 抑制を盛り込んだ 60 cm HDDS (High-phase-advance Damped Detuned Structure) 型加速管 KX03 である. これらの加速管に関する放電頻度を計測し結果は図 9 に示した²⁶⁾. 400 ns, 65 MV/m の運転においては, LC の放電頻度要求を満たすことをここでも確認できた.

第五期 (2007年~現在, 再び LC に向けて)

2006年12月には, それまで加速周波数を 30 GHz, 加速電界を 150 MV/m としてきた CLIC が設計を見直し, 高電界の早期実現とコスト低減から 12 GHz, 100 MV/m を基本設計とした⁷⁾. しかし数 TeV を狙う CLIC では, 高電力 RF を高効率で得ることが最重要で, そのためにドライブビームを減速して RF を得るいわゆる「2 ビーム方式」を採用している. そのため現状では, 最重要課題の一つである高電界加速の実証のために必要な高電力試験設備が全く不足している. そこで, 周波数は若干違うが, 既に高電力 RF をクライストロンから発生し試験に供与できる施設を有する SLAC と KEK に協力要請がきた. KEK の X バンドグループも, この機会に共同開発を通じて, 更に高い加速電界の実現に必要な研究開発を進め, 放電問題を実用的な視点から評価できると判断して, 共同研究を行うことにした. 2008年には, KEK-CERN の共同研究覚え書きに具体的テーマとし

て付記されるに至っている²⁷⁾。

ITRP 以降の LC 番外編

LC 目的以外では、Xバンド技術の応用可能性を探ってもきた。具体的には、小型の逆コンプトンX線発生源への応用²⁸⁾や、可搬小型1 MeV非破壊検査用加速器²⁹⁾の実現に貢献した。また、超精密加工や拡散接合の技術は、Cバンド加速器の製作³⁰⁾やSバンドRFガンの改良³¹⁾に展開されている。Xバンド加速器本体は小型化が可能であり、医療への応用の可能性³²⁾も大きいはずだが、KEKのXバンドグループとしては実際その分野への踏み出しは実現していない。一方、高エネルギー加速器での主加速以外への応用³³⁾も議論され、今後更に具体的な可能性を検討すべきと考えている。

2.1 加速管の製作技術開発と機械工学センターの取り組み

1990年代からKEKの機械工学センター(当時は工作センターと称す)は、加速管製造技術開発に積極的に取り組んでいる。特筆すべき技術は、加速管ディスクの超精密加工技術と、拡散接合をベースにした加速管の精密組立技術である^{34,35)}。

LCの主線形加速器に用いる加速管に必要なのは、次の3項である。

1. 高電界加速, 2. ウェーク場の抑制,
3. 低価格での量産性

電力効率を維持しながらLCのルミノシティを確保するためには、マルチバンチ運転が有効である。RFパルス幅を長くさせないために、バンチ間隔は数RFパケットしかない。そこで横方向のウェーク場は、この間にほぼ100分の1に落とす必要があり、HDS(Heavy Damped Structure)のように、最もインピーダンスの大きいTM₁₁₀型モードのQ値を10程度まで減衰させるか、DDS(Damped Detuned Structure)のようにQ値は1000程度で周波数分散を併用するか、の二つの方法がある。前者はCLICで正規設計に採用されていて、現在高電界加速との共存が可能であるかの見極めを行おうとしている。後者はGLC(Global Linear Collider)³⁶⁾で採用され実証されているので、CLICでも可能性を検討を始めている。

GLCの方法では、各セルに小さいダンピングポートを開けてQ~1000を確保するとともに、HOMモード周波数を分布させることにより実現する。このためには、加速モードとHOM周波数を同時にコントロールする必要がある。そのため我々は、精密ミリング加工を施した後に超精密旋盤加工を施してセルを形成し、その機械精度を維持できる拡散接合を用いて

組立した³⁷⁾。ミリング加工と旋盤加工の位置合わせを誤差数 μm で行い、またセルの裏表を $1\mu\text{m}$ の精度で合わせることを通じ、バリやキズのない安定した品質のディスク加工を実現することは、容易ではなかった。機械工学センターでは、メーカーとの議論とカットアンドトライを通じて必要な機械性能を明確にし、技術情報を共有することによりこれを実現した。図2に示した加速管セルはこのような工夫をいれて製作されたものである。

このように製作された加速管のウェーク場はSLACのASSETにて計測し、計算と合致することを確認した¹⁵⁾。膨大な計算もさることながら、それを実現できることを実証したこの技術は、CLICへの応用も検討中である。このDDS方式では、前節に述べたパルス内表面温度上昇がHDSに比較して抑制できるので、高電界を得るのに有効であろうと考えている。実際この型の加速管の高電界性能は、図2で示したセルや加速管に対して計測されている。図9の一部に示した特性がそれで、許容放電頻度を加速管1m当たり100万パルスに1回とすると、KX03加速管で400 ns, 65 MV/m, H75VG4S18加速管で100 ns, 100 MV/mが可能であることが判る。つまりこのDDS方式で、65~100 MV/m級の進行波型加速管の実現が可能であると判断できた。

加速管製造はITRPまでは、KEKはSLACとの共同で開発してきた。そこでは、KEKがセルの精密加工、及び真直度を要求される実機加速管の組立を実証^{38,39)}し、SLACが化学洗浄と水素炉処理をベースにしたクリーニングと組立を実証するという分業で進めてきた。ITRP以降、この技術にのっとり、図2に示したように、国内での製作経験もできた。今後更に安定して高電界を得るために、放電の基礎研究を進め、必要な技術の見極めを行っていくことが必要であると考える。この際、現在KEK-CERN-SLACの三者共同体制で製作、試験を進めているが、これらの工程分析や試験結果を共有して、開発の迅速化を狙う。具体例として、新たなコンセプトによる4分割管の製造技術開発⁴⁰⁾がある。この加工は、高精度を維持するために、温度制御された環境下での多軸ミリング加工が必須であり、メーカーと共同開発を推進してきた。図3に示したように第一号機は製作され、KEK内で組立後、真空チェンバーに収められ、現在Nex-tefでの高電界試験に入っている。

国内では、機械工学センターが中心になり、大学をコアにしたセル製作技術の開発を始めている⁴¹⁾。また、ラボ間で機械設計情報をCADでやりとりし、国

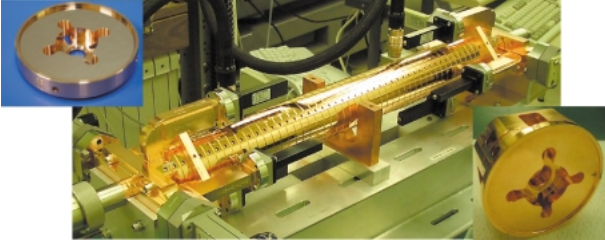


図2 KEKの製作による60 cm HDDS型加速管 KX03と構成セル

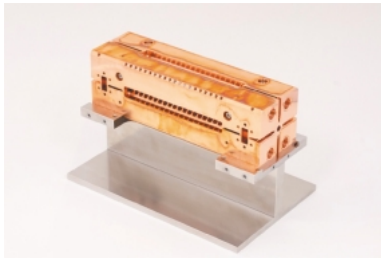


図3 四分割管の組立状況

内メーカーに直接3D加工を依頼するなど、国際共同開発で進める素地を築きつつある。更に拡散接合の低価格化、量産化に対して、2005年にパルス拡散接合技術を開発し、10 mm厚みのディスクに対して、加速管長さ方向の狂いが $1\mu\text{m}$ 以内に収まることをモデル管で実証した⁴²⁾。

2.2 クライストロンの開発

PPM収束方式は、TWTなど電子管では古くからおなじみであるが、これを大電力パルスクライストロンへ応用できるかは自明ではなかった。2000年から開発研究を開始し2006年までに開発球を8本製作、原理的に $1.6\mu\text{s}$ 、75 MWの性能が可能であることを実証した。

しかし、これまでの開発試験や、同様の開発に臨んだSLACの結果から読み取れるのは、「LCで要求される高いピークパワー(75 MW)と長いRFパルス幅($1.6\mu\text{s}$)を十分安定に出力できるPPMクライストロンはまだ存在しない⁴³⁾」ということである。これまでの研究から、出力空洞部での放電が原因でRF出力の不安定性が起こることが分かっている。ただ放電の具合はRFパルス幅とピーク電力により大きく変わるので、出力、幅を選べば実用運転は可能である。実際Nextefでは、安定領域である50 MW、400 nsでの長期運転を継続している。

一方SLACでのXバンド試験施設では、すべてソレノイド収束クライストロンXL-4が定格50 MW、

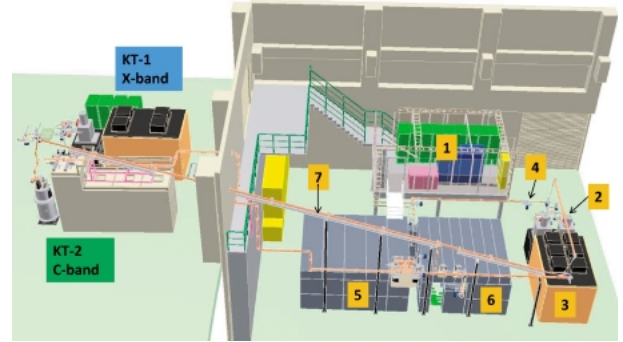


図4 KEKでの高電力試験設備 (Nextef & KT-1)
Nextef: 1. 制御, 2. クライストロン二台, 3. モジュレータ, 4. 低損失伝送導波管, 5. シールドA, 6. シールドB, 7. パルス圧縮用遅延導波管,
KT-1: 単独クライストロン試験スタンド

$1.6\mu\text{s}$ で使用されている。試験施設では、電力効率は問題ないので、より安定な出力を確保できるソレノイドクライストロンを使用できる。我々も、1999年以前に開発製造されたソレノイドクライストロンを保有しており、そのうちのいくつかはGLCTAにおいてパワーソースとして使用され、十分な性能を発揮した実績がある。

2.3 現在の研究方針

まず現状を一言で述べると、「GLCの遺産とKEKB入射器のインフラをベースにNextefで高電界加速の試験を開始し、国際的に比較可能な評価を出し始めたところである。更に基礎的な開発試験へも踏み込もうとしている。」ということになる。これを踏まえて今後2~3年の方針は、「高電界試験に必要な安定な高電力を常時発生させ、LC用実機相当の加速管の長時間試験を行う。安定化のため、また更に高い電界での試験を可能にすべく、パルス圧縮を展開して現システムを拡張する。この技術と設備をフルに生かして、実機相当加速管の高電界試験とともに、放電現象の基礎的な理解を深め、更に高い加速勾配実現への研究を遂行する。」である。

これを遂行するにあたり、CERNやSLACとの共同開発研究は重要かつ不可欠である。この共同研究は、我々の高電界加速実現への大きな原動力になり、LCで常伝導が必要とされた時にも素早く対応できる基盤技術を確認することにつながる。また、将来更に高いエネルギーへ向かう足がかりとして、更に高い加速勾配への基礎研究となる。これに付随して得られる放電に関する理解と技術は、LC以外の高電界加速の安定性にも寄与すると考える。

次節より、この方針に沿って進めてきている研究開

表 1 Nextef 及び KT-1 の設備

施設	Nextef	KT-1
ピークパワー	100 MW, 400 ns (加速管入力 75 MW)	50 MW, 400 ns
パルス圧縮時 (将来)	150 MW, 300 ns	—
繰返し周波数	50 pps	
運転	入射器運転中は 24 時間運転可能.	
用途	シールド A にパワー供給. 加速管試験専用.	クライストロン試験とその出力を使った実験など.

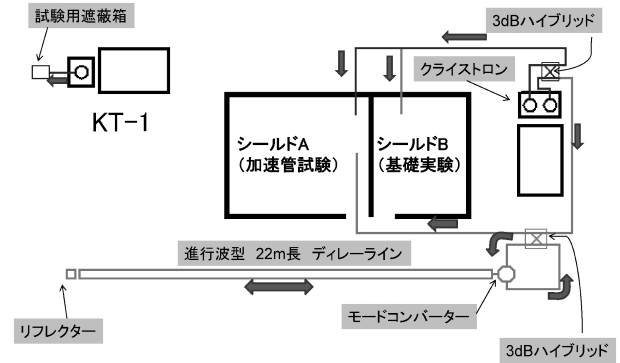


図 5 Nextef 及び KT1 の近未来配置

発の現状, 特に高電界試験関連の設備確立と試験結果, 及び今後の展望について述べる.

2.4 高電界試験の展開

X バンド高電界加速管および高電力クライストロン開発のための試験施設は, 第一期より現在まで, 場所と形態を変えつつも継続的に運用されてきた. LC 向け X バンド開発が 2004 年の ITRP 勧告以後終息したのち, 当時アセンブリーホール内で稼働していた X バンド試験施設 GLCTA (のちに XTF と呼称変更) を, KEKB 入射器棟内の試験エリアに展開したのが図 4 に示す現在の施設である. 加速管試験施設: Nextef と単一クライストロン施設: KT-1 で構成される. 施設のパラメータを表 1 に掲げた.

Nextef は, X バンド加速管の試験研究を行う目的で 2007 年より定常的に稼働している. Nextef は, SLAC の NLCTA や ASTA とともに, 現在世界的に二ヶ所しかない高繰返しで運転できる設備であり, 100 MW 出力のステーションとしての整備後, 高勾配加速管についての KEK-CERN-SLAC 三者共同研究の試験拠点の一つとなっている. 現在は, 共同研究で開発される加速勾配 100 MV/m を目指す加速管の高電力試験を進めている. KT-1 は, 2006 年に運用を開始し, クライストロン開発がひと段落した現在, 基礎実験用 50 MW ステーションとして, 高電界下での放電研究用として稼働している.

三者共同研究では当初より同一設計の加速管を SLAC と KEK で同時期に比較可能な形で試験する方針である. これは, 両方の結果を比較確認することで, 同じ設計で, 同一製造工程で製作した加速管性能の再現性に関する知見を得るためである. また, KEK/Nextef と SLAC/NLCTA の両試験施設間での「相互較正」もできる.

RF 源として用いる PPM クライストロンは, 長い

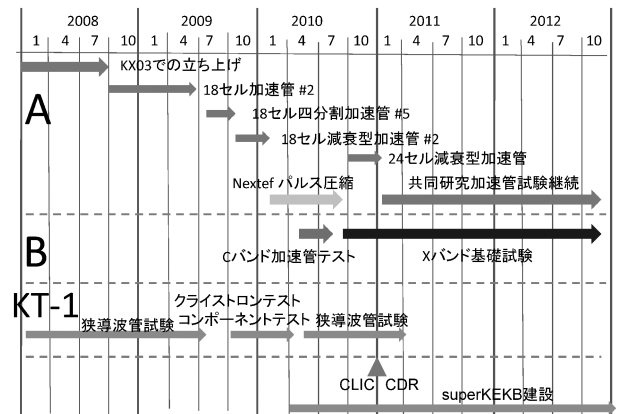


図 6 X バンド高電力・高電界試験計画

パルス運転時に不安定性が見られる. Nextef での使用に先立ち, GLCTA にてほぼ一年間にわたり加速管施設のパワーソースとして稼働させた結果, Nextef で予定する定格での長期運転は問題ないことが判明した. 実際 Nextef でこれまで 2 年, 数千時間以上の運転で, 大きなトラブルには見舞われていない.

現行の加速管試験には, 十分な性能を発揮しているが, 今後はオーバースペックでの試験を遂行するためにも, ピークパワーの増強は必須と考えている. クライストロンのピークパワーを今以上に上げることはできないので, 進行波単一デイレーライン型パルス圧縮システム⁵⁰⁾の導入整備を今年度計画している. PPM クライストロンの長パルス側の安定領域を使って, クライストロン 1 本あたり 25 MW, 1.5 μs 出力をパルス圧縮することにより, 合成出力で現在の 5 割増, すなわち 150 MW, 300 ns のピークパワーを得る見通しである.

ピークパワー増強のほかに, 試験施設自体の機能性アップのため, 図 4 に示す新規シールドルーム B を既存のシールド A に隣接して設置した. 来年には,

図5に示す配置で運転することを計画している. シールド A は今後も三者共同の高電界加速管試験施設としての役割を担い, 一方, シールド B では新たに基礎的な試験を開始する.

3. 試験結果ハイライト

KEK が進めている高電界試験の結果を述べて, 開発試験の現状を述べる.

3.1 LC 用加速管の試験結果 (100 MV/m への見通し)

LC を目指した進行波型加速管で 100 MV/m 級の加速の可能性を確認する. 三者共同研究の T18 シリーズは, 放電によるダメージが少なく, おそらく放電頻度も少ないことを狙って, 加速管の群速度は光速の 2% 以下におさえた加速管であり, そのパラメータ⁴⁴⁾を図7に示す. 平均加速電界 100 MV/m をビームローディング無しで実現したとき, 最大表面電界は 260 MV/m に達するが, これが可能であることをまず示そうとした.

加速管の製作は, かつての KEK/GLC と SLAC/NLC との LC 共同研究での製作方法を踏襲すべきと判断した. 実際の工程管理を統一すべく, 構成部品の製作は KEK が担当し, 以後の組立, セルの化学洗

浄, 水素炉による接合, 650°C での真空ベーキングは SLAC において行った. 先に述べた, 三者共同研究の方針に則り, 図8に示されたような, 全く同じに製作した加速管の双子を Nextef, NLCTA で一台ずつ高電界試験を実施した.

KEK での試験結果⁴⁵⁾を図9の緑色 (400 ns), 赤色 (250 ns) で示した. CLIC で許される放電頻度は 250 ns で 3×10^{-7} 以下とされているが, 100 MV/m で満足していることが分かる. SLAC での試験結果では, 放電頻度がプロセッシング時間とともに減少してくるのをとらえており, 1200 時間の運転の後, KEK の放電頻度より低い頻度まで到達した. この後加速管中央付近での放電が頻発し始め, 図9に示した KEK の放電頻度と同程度になった⁴⁶⁾. この KEK・SLAC の 2 例から, 100 MV/m 運転の可能性が実証されたと評価している. 全く同じ製作方法で再度双子を製作し, その比較試験を行う予定である. これにより, 製造法の安定度と加速管性能の再現性を評価する.

セル内表面の表層下サブミクロンを流れる表面電流による発熱は, 1 μ s 以下のパルスでは表層のみを温めるため, これによる温度上昇をパルス内表面温度上

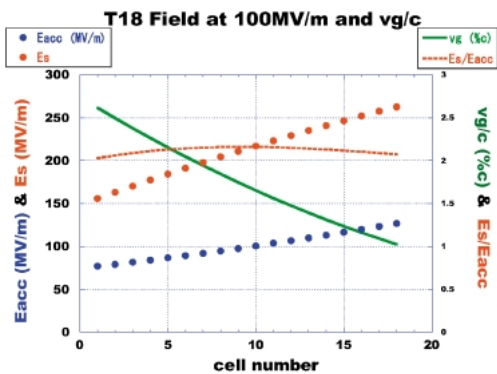


図7 T18 加速管パラメータ

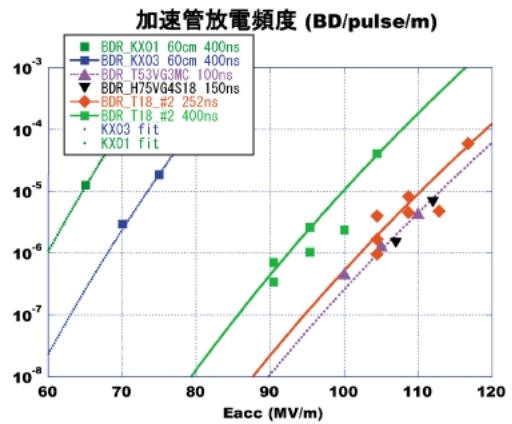
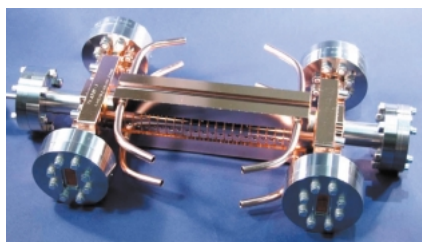
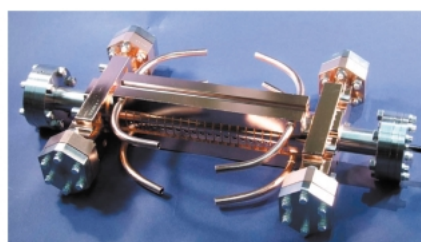


図9 加速管の放電発生頻度 (ラインは Eacc³⁰⁾ のフィットライン)



T18 #1 tested at SLAC



T18#2 tested at KEK

図8 T18 双子の加速管写真

昇と称する。実際の LC 用の加速管には HOM 減衰用のポートが仕込まれている必要があり、ポートを開けた所で、パルス内表面温度上昇が増加する。この上昇による放電頻度の増加があるかを確認するのが今後の重要な課題である。この懸念は、3.3 に述べる単セルの定在波型試験加速構造での試験結果を踏まえた考察による。今年末までには結果を出せるよう、ポートを有する加速管の製作を進めているところである。

3.2 狭導波管を用いた基礎研究

加速管は、必要な耐電圧性能が確保されるよう、材料や加工方法、表面処理等を適切に選択し注意深く製作される。こうしてできた加速管であっても、運転の際には、加速管表面電界強度や RF パルス幅、さらには加速管内の真空度などに応じて、ある頻度で放電が

発生する。この放電現象を調べるため、加速勾配 100 MV/m と同じオーダーの電界を狭導波管と名付けた実験用導波管内に発生させ、そこで起こる放電を研究している。

標準矩形導波管の断面寸法を縮めた狭窄部を作ると、図 10 に示したように狭窄部は周囲よりも電界強度が高くなる。狭導波管は、構造が単純なので、製造が容易で安価であり、実験結果の解析も加速管ほど複雑でない。また、必要な RF パワーも加速管に比べると少なく、また放射線の遮蔽も簡単なもので済むので実験もしやすい。2006 年より KT-1 で、無酸素銅製とステンレス (316L) 製の狭導波管の比較実験を行った。RF パラメータは表 2 に示した。

実験装置と方法の詳細は文献⁴⁷⁾に譲る。RF パルスあたりの放電発生率 (Breakdown Rate; BDR) の結果は図 11 に示した。BDR データを電界強度 E の累乗 E^a にあてはめてみると、SUS003 は、おおむね指数 $a \sim 20$ となる。一方、CU005 は、データがばらつ

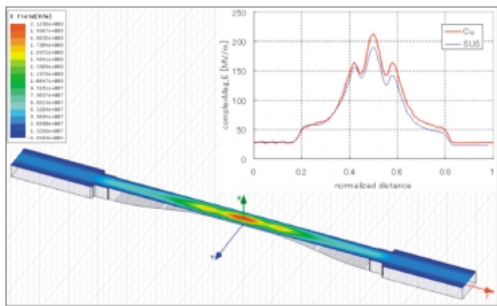


図10 狭導波管の狭窄部形状と電界の増大 (計算)

表 2 試験狭導波管の特性

製造番号	SUS003	CU005
材料	ステンレス (SUS316L)	無酸素銅
Loss (実測値)	1.83 dB (1.56 dB)	0.26 dB (0.28 dB)
最大 E-field@50 MW	134 MV/m	150 MV/m

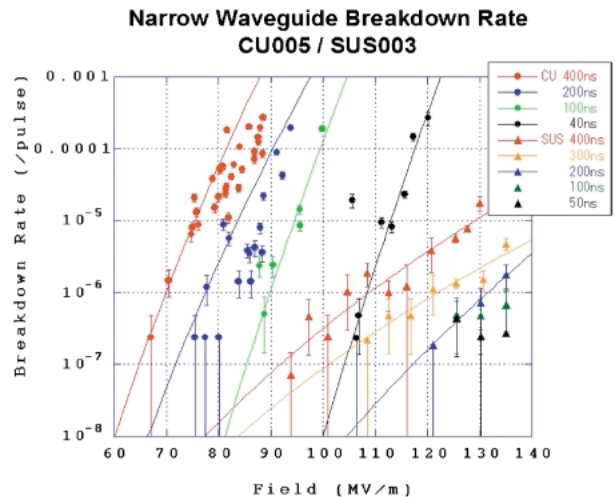


図11 無酸素銅製狭導波管 (CU) とステンレス製狭導波管 (SUS) の放電頻度比較

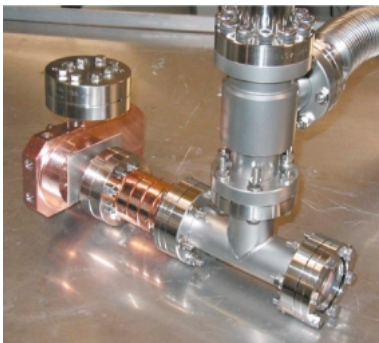


図12 単セル試験空洞例

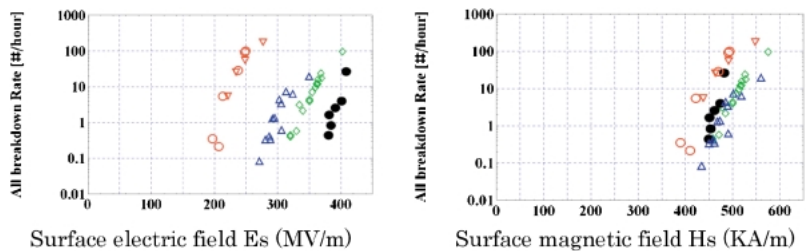


図13 SLAC での単セル高電界試験結果⁴⁹⁾より引用

いているので、BDR が低い方でフィットした累乗曲線を高いところまで単純に外挿してみることで、おおまかな傾向を見ると、 $a \sim 40$ ないし ~ 50 となり、 E に対する急峻な依存性を持っていることが分った。また $E > 80$ MV/m で見ると、SUS003の方がCU005より桁違いにBDRが低いので、この結果からは、ステンレスの方が圧倒的に優れているといえる。一方、BDRがずっと低いところ、又は $E < 70$ MV/m では両者の差はなくなるか逆転する傾向が見えていて、領域により材料の特性優劣が異なる可能性も考えられる。

この実験では、無酸素銅ではBDRの再現性が悪く、RF印加履歴によりBDRが変動するとみられ、放電に至る条件の複雑さを反映している。一方、RFパルス先頭付近での放電発生頻度は常に小さいことが分かり、放電発生メカニズムの一端を伺わせるデータも得られている。このように、材料比較にとどまらず、電界強度やRFパルス幅の違いによるBDRの変化を追うことで、高電界下でのRF放電に対する基礎的研究を進めている。

3.3 パルス内表面温度上昇の放電への影響

ここに述べる一連の単セル高電界試験は、放電は何故起きるか、放電限界はどこにあるか、抑制する手立ではあるか、100 MV/m よりずっと高い加速電界に向かうにはどうしたらいいか、に答えるための基礎試験である。現在までは、機械工学センターが中心になって図12のような種々の試験セルを製作し、SLACで試験を行ってきた⁴⁸⁾。加速電界は150 MV/m オーダー、即ち表面電界で200~400 MV/m の領域で、3.1, 3.2での放電頻度より3~4桁も放電頻度が高い状態での評価試験であり、同じ現象を見ていないという面もあろう。しかし無酸素銅の試験空洞でビームホール径を大きく動かし、インピーダンスを変えた試験結果を図13に示したが、ここから重要な知見が得られている。即ち、「放電頻度は、加速電界や表面電界より、パルス表面温度上昇に支配されていると見える⁴⁹⁾。これが何を意味しているのか、放電のメカニズムとどう関係しているのか、に我々は関心があり、KEKでもこの手の試験を進めるべく計画している。これは、3.1で進めている100 MV/m を目指す実機加速管でも、表面温度上昇の影響に関してBDRを定量的に評価すべきである、との見解につながっている。

4. 今後の展望

2009年7月に、KEKのXバンド研究に関する機構内のレビュー⁵⁰⁾が実施され、我々の方針をベースにその妥当性や戦略が議論された。現在答申待ちであ

るが、現時点での我々の描く今後の展開方針に関して概略を述べる。

現在の高電力試験設備をできる限り整備し、継続運転をして、加速管の高電界加速に関する基礎研究を行う。この研究開発には、三者(KEK/SLAC/CERN)を基軸とした共同研究体制を最大限活用する。CERNとは、CLICの主加速器を想定した実機相当の加速管を100 MV/m 級で運転できるかの見極めを行うことに主眼をおく。またSLACとは、高電界に起因する諸現象の理解と放電抑制試験に注力し、更に高い加速勾配を狙う方向で研究を続けることになろう。

これに向けて、機械工学センターは加速器グループと共同で現在までの確立できている技術の維持と新たな技術開発へ向け積極的に取り組んでいく。現状では極小人数の担当者で動いているので、今後技術伝承を考慮して若い人材の確保が急務であると考えている。

2012年頃には、LHCからの物理の結果が出始め、ILCもCLICも、LCとして次の方向を議論する段階に入るであろう^{51,52)}。その時に採用できる常伝導での実用的加速勾配の知見を得ることを目標に、Nextefを中心に現在遂行している開発・試験を展開すべきと考えている。

その頃には、三者での開発研究をベースに、CLICは二ビーム方式で100 MV/m 級の加速の可能性を議論しているであろうし、SLACはおそらく更に高い加速勾配での設計を提出するのではないかと想像している。我々も同じタイミングで、それまでの加速管高電界試験に根ざしたパラメータでの設計案を立てるが、この際RF源としては、各RFユニット毎にクライストロンとパルス圧縮を有するシステムを基軸に考える。このためエネルギーリーチはおそらく300 GeV 程度の衝突加速器⁵³⁾を想定するのが妥当であろう。しかしこれが実現すれば、更に高いエネルギーを目指す突破口にもなるはずである。

これに適用するクライストロンを得るには開発が必須である。そもそもクライストロン開発は、LC用、LC以外用を問わず、将来にわたって継続的な課題である。これまで開発してきた高電圧の球に対して、電源の小型化やRFの安定化の可能性をもつ低電圧での設計を目指す方向もあり、例えば、マルチビーム化がある。通常のクライストロンの一本ビームを、多数の小電流ビーム(ビームレット)に分割し、大電力ビームのパワーを多数のビームレットに分散させる。ビームレットの数を十分増やせば、ビーム電力を保ったままカソード電圧を下げるなど利点は多くあり、Xバンドの応用に対する技術開発としては重

要になる。しかし、電子銃、ビーム収束系、RF回路いずれも軸対称でない構造となり複雑になる。Xバンドでの基礎設計は行った⁵⁴⁾が、試験開発は、現状のリソースを考えると、使用する目的が定まってからの開発にならざるを得ない。一方、収束電磁石を超伝導仕様にする等の処置で、ソレノイド収束型クライストロンを実用上復活させる選択肢を検討し始める。

Xバンドの実加速器への応用としては、高エネルギー加速器の一部に使用して、エネルギー圧縮やエネルギー上昇等、応用可能なシステムの具体化を目指した検討を行い、実用化の例を創出できるよう努力する。この際、高い加速勾配は必須では無く、扱うビームによって勾配を低く抑えた効率的な設計でよい。しかし、同じ技術を用いて展開し、システムとしてXバンド技術が成熟することを目的とする。

Xバンド加速器技術は、純応用への展開の機会を常に念頭に置くべきと考えている。LCのパラメータは応用でのものとかかなり食い違うことが多いが、Xバンド加速器システムを今後いろいろな分野に展開して、小型化、可搬化、等のメリットを生かす応用を検討していくことは加速器の発展にとって重要であると考える。この際、LCで築いた技術はそのまま展開できるところも多いはずである。これまでの経験、技術を基盤に、メーカーの方々も大いに応用の芽を探ってもらいたいと願いつつ、筆を置くことに致します。

謝辞

これまでKEKのXバンド加速器の開発には、実に多くの方々に協力を頂き、推進されてきました。ここにその一部ではありますが、名前を挙げさせて頂き、感謝の意を表します。また今後の協力もお願い致します。

石川島播磨重工業㈱、三菱重工業㈱、日本高周波㈱、東芝電子管デバイス㈱には、立ち上げ時期から多方面にわたりお力を頂きました。

加速管セルの製作には、エスエイテック㈱、森川製作所㈱、ユーコーポレーション㈱、日立製作所、等、多くの加工メーカーの参加を頂き進めて参りました。

国内研究機関との連携では、精密加工、接合技術を確立していった際、岡山県工業技術センター、大阪大学、東北大学、神戸大学の精密加工部門に大きく関与頂き、感謝致します。

また国外の研究所との協力により推進できた面も大いにあります。まず1990年代に、人材やハードウェアの行き来を含めた共同研究開発を大いに進めたロシアのBINP Protvinoの寄与は非常に大きく、今日も

KEKを含めた世界中の各ラボに分散したロシア産ブレーンとなり、大いに感謝しています。また、長年にわたる協力関係を築けたSLAC、一時は大きな協力関係を結びつつあったFNAL、最近ではCERN、等、共同研究を支えて頂いたマネージメントレベルから現場の方々までに、多大な感謝を致します。

参考文献

- 1) <http://www.linear-collider.org/>
- 2) <http://clic-study.web.cern.ch/clic-study/>
- 3) TRISTAN “トリスタン計画報告書”, KEK Report 96-2, 1996年9月.
- 4) G. Horikoshi, Y. Kimura and T. Nishikawa, “KEK Plans for a Linear Collider R&D”, KEK Report 88-73, Nov. 1988.
- 5) R. Ruth for NLC of SLAC, K. Takata for JLC of KEK, T. Weiland for S-band LC of DESY, W. Schnell for CLIC of CERN, D. Proch for SC LC TESLA of DESY, and V. Balakin for VLEPP of Russia, the presentations in LC91, third International Workshop on Linear Colliders, LC91, BINP, Russia, 1991.
- 6) JLC-1, KEK Report 92-16, Dec. 1992.
- 7) H. H. Braun, “Towards a Multi-TeV Linear Collider; Drive Beam Generation with CTF3”, APAC07, FRY-MA02, RRCAT, Indore, India, 2007.
- 8) 肥後寿泰, 「KEKにおけるXバンド加速の研究現状と展望」, WOOPF01, 第6回加速器学会年会発表, 東海, 2009年8月.
- 9) 上野健治他, 「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 Vol. 5, No. 2, p164, 2008年.
- 10) H. Mizuno et al., “X-Band Klystron for Japan Linear Collider”, KEK Pre-print 92-102, Sep. 1992.
- 11) “JLC Design Study”, KEK Report 97-1, Apr. 1997.
- 12) T. Higo et al., “High Gradient Performance of X-band Accelerating Sections for Linear Colliders”, Particle Accelerators, 1994, Vol 48, pp. 43-59.
- 13) “Zeroth-order Design Report for the Next Linear Collider, SLAC-Report 474”, 1996.
- 14) “International Study Group Progress Report on Linear Collider Development”, KEK Report 2000-7, and SLAC R-559, April 2000.
- 15) C. Adolphsen, et al., “Measurement of Wake-Field Suppression in a Detuned X-Band Accelerator Structure”, Phys. Review Letters, vol27, p2475, 1995.
- 16) R. Loewen, “KEK M2 Structure Test at ASTA”, ISG3, WG3, SLAC, Jan. 1999, <http://www-project.slac.stanford.edu/lc/ilc/ISG-Meetings/ISG3/PDF%20Files/WG3%20Lowen.pdf>
- 17) D. Sprehn, et al., “PPM focused X-Band Klystron Development at the Stanford Linear Accelerator Center”, SLAC-PUB 7231; Y. H. Chin et al., “X-Band PPM Klystron Development for JLC”, PAC01, Chicago, USA, 2001.
- 18) H. Mizuno and Y. Otake, “A New RF Distribution

- System for X-Band Linac Equivalent to an RF Pulse Compression Scheme of Factor 2^n ", LINAC94, KEK Pre-print 94-112, Oct. 1994.
- 19) C. Adolphsen, "RF System Overview", ITRP meeting at SLAC, Apr. 2004, <http://www-project.slac.stanford.edu/lc/ITRP/>
 - 20) K. Watanabe et al., "High Gradient Test of X-Band Accelerating Structure at GLCTA", Proc. 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2004, Funabashi, Japan.
 - 21) M. Akemoto et al., "Pulse Modulator for X-Band Klystron at GLCTA", 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, 2004.
 - 22) S. Matsumoto et al., "Development of PPM-focused X-Band Klystron", 2nd Annual Meeting of Accelerator Society of Japan, Tosu, Japan, 2005.
 - 23) S. Matsumoto et al., "Study of PPM-Focused X-Band Pulse Klystron", LINAC06, Knoxville, USA, 2006.
 - 24) ITRP International Technology Recommendation Panel, presented in Beijing, China, 2004, <http://www.interactions.org/cms/?pid=1014290>.
 - 25) S. Matsumoto et al., "100MW-class X-band accelerator structure test facility, Nextef", 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima, Japan, 2008.
 - 26) T. Higo et al., "Normal Conducting High-Gradient Studies at KEK", THP038, LINAC06, Knoxville, Tennessee, USA, 2006.
 - 27) Appendix 2 to the "Agreement of Collaborative Work between CERN and KEK", ICA-JP-0103, 2009.
 - 28) F. Sakamoto et al., "X-band Thermionic Cathode RF Gun and Multi-Beam Compton Scattering Monochromatic Tunable X-ray Source", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, p286, 2006.
 - 29) T. Natsui et al., "Experiment of X-ray Source by 9.4 GHz X-band LINAC for Non-Destructive Testing System", PAC07, PAC07, THPMN031, Albuquerque, NM, USA, 2007.
 - 30) T. Kamitani et al., "Status of C-band Accelerator Module in the KEKB Injector Linac", PAC07, THPMN027, Albuquerque, NM, USA, 2007.
 - 31) A. Murata et al., "Improvement of an S-Band RF-Gun cavity with a Cs-Te Photo-cathode", Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p975, Hiroshima, Aug. 2008.
 - 32) R. Zennaro, <http://www.cockcroft.ac.uk/events/X-Band/>, CI, Daresbury, UK, Dec. 2008.
 - 33) T. Kamitani et al., "Energy Equalization by using S-band and X-band Accelerator Modules", APAC 2007, TUPMA066, RRCAT, Indore, India, 2007.
 - 34) 人見宣輝, 加速器と機械工学—ものづくりからの加速器研究者への要望—, 「加速器」Vol. 2, No. 3, 2005.
 - 35) 東 保男, 加速器関連開発と精密工学, 12 GeV シンクロトロン建設時からの技術革新を応用した「もの作り」, 「加速器」Vol. 3, No. 4, 2007.
 - 36) "GLC Project", KEK Report 2003-7, Sep., 2003.
 - 37) T. Higo et al., "Meeting Tight Frequency Requirement of Rounded Damped Detuned Structure", LINAC2000, TUA02, Monterey, USA, Aug., 2000.
 - 38) Y. Higashi et al., "Studies on High-precision Machining of Accelerator Disks of X-band Structure for a Linear Collider", KEK Report 2000-1, May 2000.
 - 39) Y. Higashi et al., "Study on High-precision Diffusion Bonding for X-band Accelerator Structure", KEK Report 2000-2, April 2000.
 - 40) 高富俊和 他「Fabrication and High Power Test Setup of X-Band Quadrant Structure」第6回加速器学会年会, FPACA27, 東海, 2009年8月.
 - 41) 平成21年度, 高エネルギー加速器研究機構共同開発研究, 2009-20, 東北大学, 「Xバンド加速管の性能向上のためのナノ精度加工技術開発とその評価方法の研究」.
 - 42) 石川政幸 他「パルス通電による加速管用無酸素銅ディスクブランクの60枚接合」, 溶接学会論文集 第23巻 第2号, 2005年.
 - 43) D. Sprehn, et al., "Latest results in SLAC 75MW PPM klystrons", SLAC-PUB-11733.
 - 44) R. Zennaro, private communication, and A. Grudiev, presentation at 2nd Collaboration Meeting on X-band Accelerator Structure Design and Test-Program, KEK, Japan, May 2008, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=30911>
 - 45) T. Higo et al., "Study of 100 MV/m on X-Band accelerator structure", FPACA24, 6th Annual Meeting of Japanese Accelerator Society, Tokai, Aug. 2009.
 - 46) C. Adolphsen, "Performance Review of CLIC-Design Structures Tested at NLCTA", US High Gradient Collaboration Workshop, ANL, March 2009, <http://www.hep.anl.gov/ushighgradient/>
 - 47) K. Yokoyama, et al., "High-Gradient RF Breakdown Studies with Narrow Waveguide", TU5PFP028, Proc. of PAC09, Vancouver, B. C., Canada, May 2009.
 - 48) V. Dolgashev et al., "Status of High power Tests of Normal Conducting Single-Cell Structures", EPAC08, MOPP083, Genoa, Italy, 2008.
 - 49) V. Dolgashev, presentation on pulse heating and breakdown rate, Talk at ICFA Mini-Workshop on Novel Concepts for Linear Accelerators and Colliders, SLAC, July 2009, <http://www-conf.slac.stanford.edu/RobertSiemann/>
 - 50) KEK内のXバンドレビュー, 2009年7月30日, <http://kds.kek.jp/conferenceDisplay.py?confId=3532>
 - 51) "ILC R&D Plan for the Technical Design Phase", Release 3, ILC-Report-2008-013, Feb. 2009, http://ilc.kek.jp/TDP/TD_Phase_RD_ReportV2.pdf
 - 52) J. P. Delahaye, "CLIC progress and perspectives Follow-up from last ACE meeting", Fouth CLIC Advisory Committee, CLIC-ACE, May 2009, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=58072>
 - 53) R. Belusevic and G. Jikia, "Higgs Self-Coupling in $\gamma\gamma$ Collisions", hep-ph/0403303, KEK Preprint 2004-5.
 - 54) V. Teryaev, "Design of Multi-beam Klystron", Talk at the Technical Meeting in KEK Injector Group, Jan. 28, 2009.