

## CESR-TA プログラムへの国際協力

ジョン フラナガン\*・末次 祐介\*

## International Collaboration on CESR-TA Program

John FLANAGAN\* and Yusuke SUETSUGU\*

## Abstract

An international collaboration on the CESR-TA (Cornell Electron Storage Ring—Test Accelerator) program, which is a program to investigate electron cloud instability (ECI) issues in the positron damping ring of the ILC (International Linear Collider), is currently underway at Cornell University. KEK is supporting the program through the development of an X-ray beam profile monitor system to measure the extremely small beam size, and through the development of clearing electrodes to mitigate the ECI.

## 1. CESR-TA プログラムとは

CESR-TA (Cornell Electron Storage Ring—Test Accelerator) とは, ILC (International Linear Collider) の陽電子ダンピングリング (Damping Ring, DR) で問題となる電子雲不安定性 (Electron Cloud Instability, ECI) の研究をコーネル大学の CESR を利用して行うプログラムである<sup>1)</sup>. ILC の陽電子 DR は, 当初, バンチ間隔をあけて電子雲の影響を低減するために二つのリングを用いる設計であった. しかしその後, ECI のシミュレーション技術が向上し, また緩和技術の開発が進み, ある程度 ECI を制御できる可能性が高まった. その結果, 最新の設計ではリング数が一つとなっている. この設計変更は, ILC の建設費用削減にも大きく寄与する. ただし, 前提となったこれらシミュレーションの妥当性や緩和技術の有効性を早急に実証する必要がある. そこで, 世界各所の研究施設から DR を模擬する加速器運転プログラムが提案された. CESR-TA はその一つであり, ILC の Global Design Effort (GDE) R&D Board がそれらの中から最もタイムリーで有効であるとして選定したものである. 現在 ILC の Technical Design Phase I (TDP-I) までの最優先の R&D 項目と位置付けられており, National Science Foundation (NFS), Department of Energy (DOE) から主に資金を得, また

KEK を含めた国際協力のもとプログラムが進行中である.

CESR が選ばれた理由は, 超低エミッタンス (垂直方向 2 pm) を実現できるオプティクス設計が可能であること, 中身がよく理解された加速器であること, 十分に経験のある加速器屋がいること, 測定機器が揃っていることなどからである. また, ビームエネルギー, エミッタンスが比較的容易に変更可能であり, 同じリングで電子と陽電子が運転できるのも特徴である. ただ, 当初, CESR-TA プログラムには, ILC の電子・陽電子 DR のラティスデザイン, 2 pm 以下の垂直方向エミッタンスの実現, インピーダンスに起因するシングルバンチ不安定性の実験も含まれていたが, 2008 年の DOE の ILC 関連予算削減により計画が見直され, これらが省かれたという経緯がある. この予算削減もあって, 専門家 (実験屋, 理論屋) の参加, シミュレーション解析の支援, 資金など, KEK や CERN からの国際的な協力が重要となっている.

本プログラムの目的は, ILC 陽電子 DR での電子雲成長機構や電子雲のビームダイナミクスへの影響を評価すること, 提案されている ECI 緩和技術の有効性を確認することにある. したがって, CESR-TA では, これまでの CESR のラティス等を一部変更して ILC DR に近いビームパラメータで運転する. ビームエネルギー, バンチの構成, バンチ電流, バンチ長,

\* 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
(E-mail: john.flanagan@kek.jp, yusuke.suetsugu@kek.jp)

エミッタンス，バンチトレイン間隔なども ILC の DR に近いものとする．参考までに CESR-TA の主な運転パラメータを表 1 に示している<sup>1)</sup>．とは言え，リングの大きさが異なる（DR よりもはるかに小さい）など全く同一とはならないので，CESR-TA で得られた

測定結果を DR の実際のパラメータに外挿しなければならない．そのためには，広いパラメータ範囲で信頼できるシミュレーション技術の確立が必要である．これらのことから，CESR-TA プログラムでは特に，リングの主要な場所（特にウィグラー電磁石や四極電磁石の中）の電子雲の成長，不安定性が発生する閾値や提案されている ECI 緩和技術の効果などを，シミュレーションで重要となるパラメータの広い範囲にわたって詳細に測定し，電子雲成長やビーム不安定性のシミュレーションコードの精度向上を図る．当然，電子密度や不安定性を精密に測定する技術開発も同時に要求される．CESR-TA での成果は ILC DR だけに留まらず，将来の高ルミノシティ加速器にとって非常に重要なものとなる．興味のある方は，CESR-TA のホームページ，<https://wiki.lepp.cornell.edu/ilc/bin/view/Public/CesrTA/>を参照されたい．

表 1 CESR-TA の主なビームパラメータ

Parameters	Typical Values
Energy	2.0 GeV
Circumference	768 m
$N_{\text{wiggler}}$	12
$B_{\text{max}}$	1.9 T
$\epsilon_x$ (geometric)	2.3 nm
$\epsilon_y$ (geometric) Target	20 pm
$\tau_{x,y}$	56 ms
$\sigma_E/E$	$8.1 \times 10^{-4}$
$Q_z$	0.070
RF Frequency	500 MHz
Total RF Voltage	7.6 MV
$\sigma_z$	8.9 mm
$\alpha_p$	$6.2 \times 10^{-3}$
$N_{\text{particles/bunch}}$	$2 \times 10^{10}$
$\tau_{\text{Touschek}}$	10 s of minutes
Bunch Spacing	Multiples of 4 ns and 14 ns

## 2. 具体的には何をするのか

本プログラムには，約 240 日の運転日が見込まれており，この短い期間に上記目標を達成する必要がある．大まかには，2009 年半ばまでに，まず低エミッタンスを実現するためにリングの各コンポーネントの再構成・アップグレード，低エミッタンス実験用測定装置の組み込みを行う．また，ウィグラー電磁石，偏向電磁石，四極電磁石，ドリフト部での電子雲測定用ビームチェンバーや空間分解能を持つ RFA (Retarding Field Analyzer) の設置を行う．そして，電子密度の測定，ECI 緩和技術の実証実験を開始する．平行

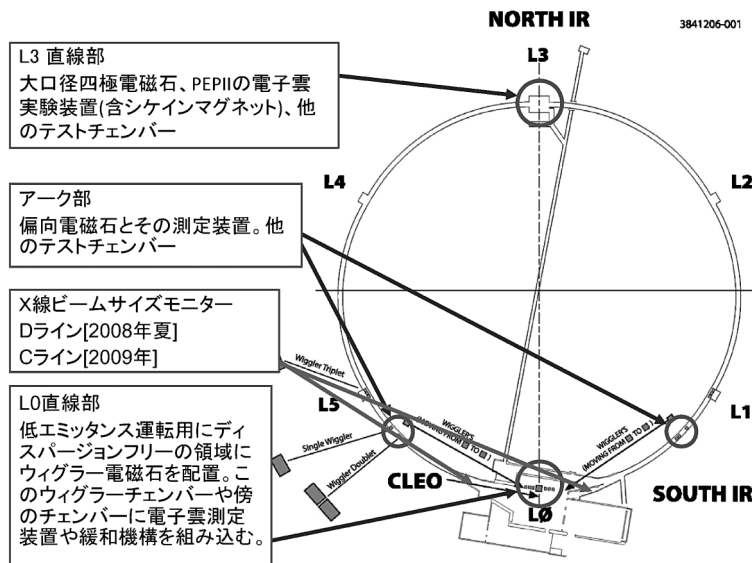


図 1 CESR-TA 用の各種試験装置のレイアウト

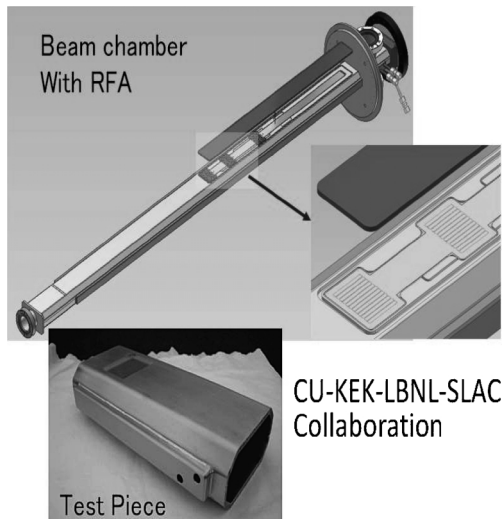


図2 RFA 付きのウィグラー用ビームパイプ

して各種シミュレーションコードのベンチマークテストを進め、測定結果との照合を試みることになっている。そして2010年4月1日までに、さらに低いエミッタンスの実現、ECI緩和技術の完成を目指す。達成でき得る低エミッタンスで電子雲のビームダイナミクスの測定実験を広範囲の運転パラメータで行い、シミュレーションの精度を高めていく予定である。CESR-TAのレイアウトと、今回のプログラムで変更したり新たに設置したりする主要装置の配置を図1に示す。

### 2.1 電子雲測定

電子雲の測定では、これまであまり報告が無いウィグラー電磁石、偏向電磁石や四極電磁石内部での測定が主となる。L0と呼ばれる直線部には超電導ウィグラーがあり、ウィグラー電磁石内に電子雲測定装置付きチャンバーを設置する。図2に製作するウィグラーチャンバーの模式図を示す。電子雲測定装置は、水平方向に12分割されたストリップ状コレクターを持つRFAである。このウィグラーチャンバーの製作全般に関してKEKが協力している。チャンバー素材の提供はSLAC、最終組み立てはコーネル大学である。RFAは3つあり、ウィグラー電磁石の中心、少し端の磁場勾配がある場所、そして電磁石コアの境目の3か所の電子雲を同時に測定する。アーク部の偏向電磁石には、同じくRFAを組み込んだチャンバーを設置する。L3直線部には大口径の四極電磁石を置きRFAを組み込んだチャンバーを設置する。また、ここには、SLACのPEPIIでの実験に使用されていたRFA付きの試験チャンバーとシケイン電磁石を移設する予定である。その他、ドリフト部にも測定装置を置き電子密

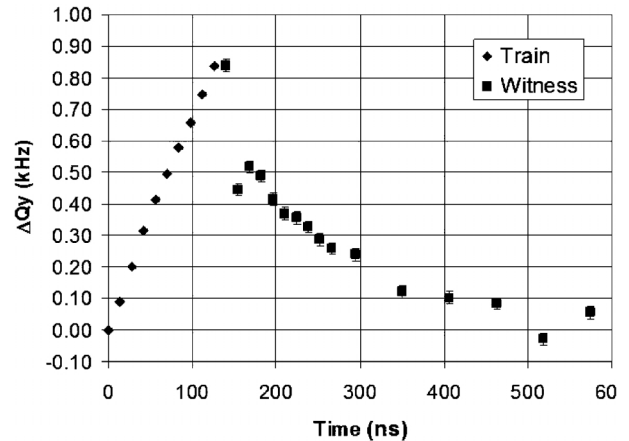


図3 先行バンチ (Train) の後ろに置かれた試験バンチ (Witness) のチューンシフト測定例

度を測定する。マイクロ波を使った電子密度測定も試みる予定である。最終的には、これらの測定を同時に行い、リングの主要各部の電子密度、そしてリング全体の電子密度を評価・推定できるようにする。得られたデータはシミュレーションを検証するための重要なデータを提供することになる。

### 2.2 緩和技術

ECIの緩和技術としては、チャンバー内面に二次電子放出率の小さい薄膜 (TiNとかNEG) をコーティングする方法、内面にビーム方向に沿って多数の溝 (グループ) を掘る方法、チャンバー内部に電子除去電極 (Clearing electrode) を組み込む方法、チャンバー外部からソレノイド磁場を印加する方法、などが提案されている。この緩和技術もウィグラー電磁石、偏向電磁石や四極電磁石部に適応できるものを主に開発する。実験では、上述した電子雲測定装置を配置した場所に、これら対策を施したチャンバーを設置してその効果を見ることになる。例えば、L0の超電導ウィグラーチャンバーには、LBNL、SLACが協力してTiNコーティングが施される。電子除去電極に関してはKEKが協力する予定である (後述)。L3に設置される予定の、SLACのPEPIIで試験していたチャンバー内面には、グループ状の加工が施してある。その他、ドリフト部にはソレノイドを巻いてその効果も評価する。もちろん、これら緩和技術を組み込んだビームチャンバーの製作技術の確立も重要な課題である。

### 2.3 ビームダイナミクス測定

不安定性の測定方法としては、例えば、電子雲を発生させる先行バンチトレイン (Driving bunch) の後ろに測定用バンチ (Witness bunch) を置き、先行バ

ンチの強度や試験バンチの場所を変えることで試験バンチ部での電子密度をコントロールして、試験バンチの振る舞いを測定する方法が提案されている。先行バンチトレイン、および、その後ろの試験バンチでの垂直方向チューンシフト測定例を図3に示す。上に述べたウィグラーチェンバーや偏向電磁石のチェンバーで試験バンチ部での電子密度を測定すると同時に、試験バンチの不安定性の閾値やビームサイズの成長を、運転パラメータを変えて測定する。つまり、バンチトレインに沿った不安定性の測定やビームサイズ増大を、ビームエミッタンス、バンチ電荷、バンチ間隔、バンチトレイン間隔、真空度などを変えて調べる。また、電子と陽電子の場合の結果を比べて不安定性発生機構を区別したり、電子ビームに対する効果を調べる。可能であれば、Fast Ion Instability (FII) の研究も行う予定である。そのためには、非常に低いエミッタンスにおけるバンチの状態を測定できる装置が重要となる。バンチ毎に測定できる、X線をういた高分解能ビームプロファイルモニターがKEKと協力で開発中である(後述)。

#### 2.4 シミュレーションコード

電子雲のシミュレーションコードとしては、ECLLOUD、POSINST、およびCLOUDLANDが現在世界的には使用されている<sup>2)</sup>。これらは、計算手法や二次電子放出機構の仮定が異なっている。そこで、まずは、ドリフト部(磁場なし)や偏向電磁石内(磁場あり)で同一のパラメータを用いて同等な結果が得られるか、から検証を始める必要がある。シミュレーションにとって重要な、光電子放出特性、二次電子放出特性をベンチテスト(実験室)で詳細に測定することも重要である。そして、CESR-TAでの測定で得られた電子密度やその分布、不安定性成長の閾値などをシミュレーションで再現できるかどうか検証する。一方、測定に用いられるRFA自身のシミュレーションも、測定データを正確に解析する上で重要であり、そのコードの開発も並行して進める必要がある。

#### 2.5 現状

2008年11月現在、リングの再構成は終了し運転が再開されている。L0ウィグラーチェンバーにはRFAを組み込んだチェンバーが設置され、電子雲測定装置のコミッショニングが始まっている。DCモードでは電子電流を測定できることが確認された。解析は途上であるが電子の空間分布やエネルギー分布のデータも得られている。また、この直線部では、マイクロ波を使った電子密度測定も始まった。L3にPEPIIのテストチェンバーを設置する準備も進んでいて、2009年

2月に設置される予定である。さらに、X線プロファイルモニター用の光学系が整備され、各社の測定素子の基本性能を検証中である。低エミッタンスオプティクスの試験も準備中である。また、シミュレーションコードのベンチマークテストも進みつつある。二次電子放出を無視し、光電子のみを考えた場合には、上記3種類のシミュレーションコードはほぼ同じ結果を与えるが、二次電子の効果を入れると明らかな違いがでることがわかってきた。二次電子放出の効果をどう入れるか、が今後の問題であろう。

### 3. KEK との国際協力

ここでは、KEKと共同で開発が進んでいる、ビームダイナミクスの詳細測定に必須となるX線ビームサイズモニターと、ECI緩和技術の一つである電子除去電極について紹介する。

#### 3.1 X-ray Beam Size Monitor (XBSM)

この開発研究は、コーネル大学、ハワイ大学、およびKEKの共同で行われている。目標は、高分解能でバンチ毎にビームサイズを測定するための広帯域、高速のX線ビームプロファイルモニターを開発することである。開発中の光学系は、符号化開口結像法(Coded aperture imaging)を基本としている。この方法はX線天文学で用いられてきた技術で、小開口の角度的な解像度を維持しながら集合領域を増やすことによって、再生像のSN比を改善するのに用いられる。ピンホールの配列(符号化開口)によって対象物の符号化された像を造り、それを既知の開口パターンを使って復号し元の対象物を再構成するものである。この手法は、ピンホールカメラの解像度を保ちつつフラックスを最大50%増大できるもので、ビームプロファイルを描画するために要する積分時間を最低限に抑えることができる。試験用のマスク(スリット)についてCESR-TAでの試験が始まっている。そのマスクの一つと、幾つかのビームサイズに対する測定器の像(計算値)を図4および図5に示している。高速のデータ読み込み技術についての開発も進んでいる。

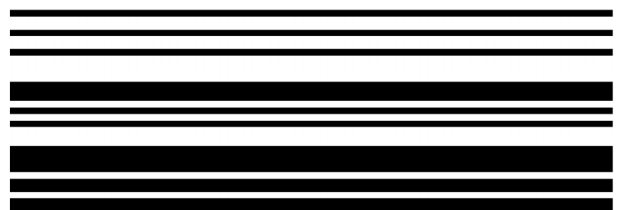


図4 符号化されたスリットの例(幅:1 mm, 高さ:310 μm)。最小のスリット高さは10 μmである

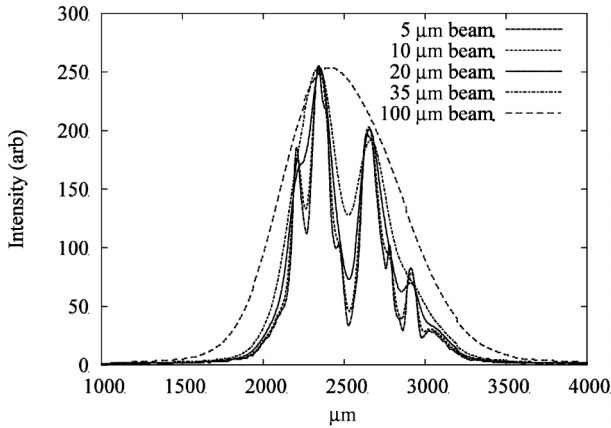


図5 幾つかのビームサイズにおける測定パターン [計算]

### 3.2 電子除去電極

ビームチャンバー内に電子除去電極 (Clearing electrode) を設置する方法は、直接的で効果も大きく、また電磁石内でも使用可能な有望な電子雲対策法である。しかし、これまで陽子リングで用いられたことはあるものの、高ビーム電流の陽電子リングではインピーダンスや発熱の問題などから採用されなかった。KEKでは、ビームパイプ内表面に薄い絶縁層と金属層を直接形成する方法を提案し、実際に試作電極を製作してKEK Bファクトリー (KEKB) 陽電子リングにてビーム試験を行った<sup>3)</sup>。図6は試作した電極である。絶縁体、金属層の厚みを非常に薄くすることによりビームインピーダンスを小さく、かつ熱伝導を高めることができる。この電極および電子数測定器 (RFA) を備えた試験チャンバーをリングのウィグラー電磁石内 (0.77 T) に設置し、電子雲に対する効果を調べた。図7は、水平方向電子数分布の電極の電圧 ( $V_{elec}$ ) に対する変化の一例である。電子数は  $V_{elec}$  とともに単調に減少し、ビーム軌道付近 (Collector No. 4) では  $V_{elec} = +300$  V時に約1/100程度と大幅に減少した。この結果は、電子除去電極が電子雲不安定性の抑制に有効であることを陽電子リングでは初めて実証したものである。CESR-TAでは、この電極構造を基本とした電子除去電極をウィグラーチャンバーに組み込み、ビームを使った試験を来年にも

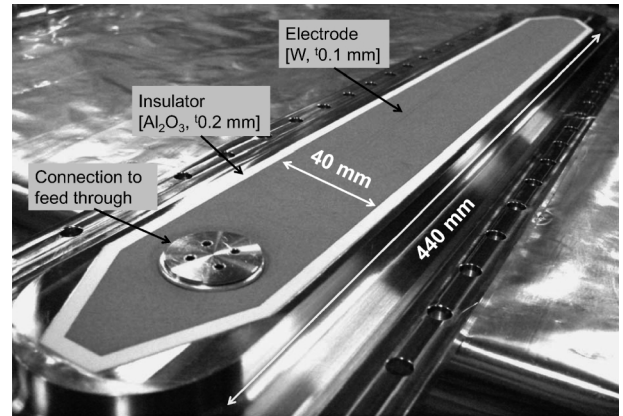


図6 KEK で試作された電子除去電極

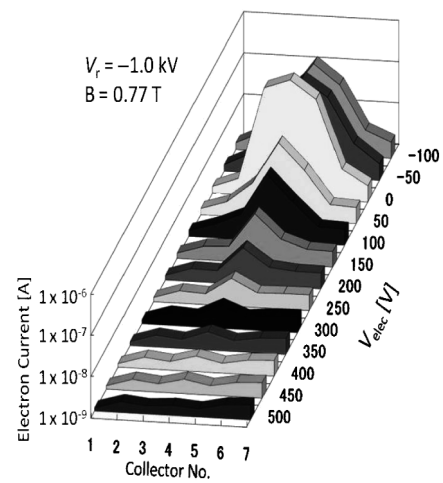


図7 電子数分布の電極電圧 ( $V_{elec}$ ) 依存性

共同で行う計画が進んでいる。予定では、チャンバ素材はSLACのPEPIIのチャンバーを利用し、電極の形成をKEKで、チャンバーの溶接をLBNLで、そして全体組立をCornell大学で行う予定である。

### 参考文献

- 1) M. Palmer and D. Rubin, presented in ILC DR workshop, July 8-10, Cornell Univ., 2008
- 2) G. Dugan, presented in ILC DR workshop, July 8-10, Cornell Univ., 2008
- 3) Y. Suetsugu et al., NIM-PR-A, 598 (2008) 372.