

氏 名 内藤 孝

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1037 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 ストリップライン電極を用いた高速キッカーシステムの開発

論文審査委員 主 査 教授 平松 成範
教授 佐藤 康太郎
教授 浦川 順治
助教授 菊谷 英司
助教授 早野 仁司
XFEL 計画推進 熊谷 教孝（理化学研究所）
本部副本部長
教授 安東 愛之輔（兵庫県立大学）

論文内容の要旨

1980年代後半から進められて来た電子・陽電子衝突型加速器リニアコライダーの研究開発は2004年8月、ITRP(International Technology Recommendation Panel)の答申によって、それまで主に常伝導の加速管を使用した方式と超伝導の加速管を使用した方式が提案されていたが、超伝導の加速管の技術を使用することが決定された。この技術方式を使用して国際協力によって世界に一つのリニアコライダー(ILC International linear collider)を建設することをICFA(The International Committee for Future Accelerators)によって決定された。

ILCの加速器構成の中でダンピングリング(DR)は高エネルギー実験の精度に関係するパラメーターLuminosityを決定する上で重要な役割をになう。Luminosity増加のためには衝突粒子のEmittance(粒子の一団が位相空間中に占める面積)を小さくすることが不可欠であるが、Emittanceの減衰はDRによって行われる。従って、DRの性能がILC加速器性能を大きく決定づける。このDRのパラメーターを決定する上で重要な問題の一つは、周長の決定である。ITRPの決定は超伝導加速管の特性を十分に活用するためにバンチ数2820(5640)、バンチ間隔308(154)nsという長いバンチトレインを加速するパラメーターを選択した。そのため、そのままではバンチトレインは300kmの長さになりダンピングリングの周長もその長さが必要になる。この様な長大な周長のDRを建設する事は現実的ではないため、ILCの設計ではバンチトレインをDRに入射する際、バンチ間隔を圧縮し、エミッタンス減衰したビームをDRから取り出す際に再び元のバンチトレインの間隔に戻すことが考えられている。DRの周長を短くした場合、ダンピングタイムを短くする点でも有利であり、ダンピングタイムを短くするためのウイグラーマグネットの数を減らす事が出来る等の利点がある。DRの周長を制限しているのは、electron cloud や impedance などによるInstabilityによってバンチ間隔が制限されることと、バンチトレインの中の個々のバンチごとに入射/取り出しの操作を行う特殊なキッカーの性能である。Instabilityに関しては研究が進められており、KEKBではelectronに関しては 7×10^{10} electrons/bunch までの電流がblowupすることなく蓄積されており、positronのelectron cloudに関してはKEKBでは6または8nsのバンチ間隔で 6×10^{10} electrons/bunch までInstabilityを抑える事に成功している。これらの結果からILC DRではpositron ringに関しては6ns、electron ringに関しては3nsまでバンチ間隔を狭め、周長6.7kmのDRが想定されている。

これに対しキッカーの開発に関しては、いくつかのproposalがなされているだけであり、実現に向けた実験データはほとんど示されていない。現在設計が進められている周長6.7kmのDRでは、バンチ間隔 ~ 3 nsの時間内に、ビーム軌道を変えるための電磁場を変化させなければならない。このキッカーのパラメーターは、既存の蓄積リングで使われているキッカーシステムの技術の延長では実現することが不可能であり、全く新しい方式のキッカーを開発する必要がある。

本研究では、ストリップライン電極に高速のパルスを加えることによって生成される電磁場によってビームをキックする、ストリップラインキッカーを提唱し開発を行った。ストリップラインは、ビームモニタやビーム振動の抑制等に使われているが、ビーム軌道の変更に使われた例はあまりない。また、ILCパラメーターの様な高速の特性に関する測定がなされた例はない。ストリップラインキッカーの時間応答は、ストリップライン電極の長さやパルス電源の特性に依存するが、現存するパルス電源の性能ではILCのパラメーターを十分満たす時間特性を得る事が難しく、時間特性をさらに改善する必要がある。ストリップラインキッカーの時間特性を改善するために waveform compensator を提唱し、評価実験を行った。 waveform compensator を使用する事に依ってILCのパラメーターを十分満たす時間特性が得られたことを確認し、 waveform compensator の有用性を実証することに成功した。

論文の審査結果の要旨

ILC 計画においては、電子・陽電子のダンピングリングの実現性が極めて重要であり、その実現のためにはリングへのビームの入射キッカーの実現性が鍵を握っているといつて過言ではない。周長 6km のダンピングリングを想定すると、ダンピングリング中のビームバンチ間隔は約 3nsec となり、ILC のバンチトレインにマッチさせるためには入射キッカーは繰り返し 3MHz 以上 (5640 又は 2820 周期のバーストモード)、立ち上がり 3.08nsec 以下でビームハンドリングすることが必要となる。このような高速で動作するキッカーは例がなく、これまでにフリーエ・シリーズ・キッカー、ビーム・ビーム・キッカー、RF キッカー等が提案されてきたが、技術的に極めて大きな困難が予想され、実現性に乏しいのが実情であった。そこで、内藤氏はストリップライン型キッカーを用いることで高速性の問題を解決することを考え、これまでに例のない極めて高速で動作するキッカーシステムを、現在の技術レベルでいかにして実現するかと云う問題に、初めて現実的な回答を与えた。

高速性を満たすためストリップライン電極型キッカーを採用するものとして、ビームバンチ間隔 3nsec を想定すると、ビームのトランジットタイム及びパルス電圧の利用効率よりキッカー長は 30cm が最適となる。したがって、1 台のキッカーでは必要なキック角 $\sim 0.6\text{mrad}$ を得ることが困難であるため、20 台程度のキッカーを配置することでキック角の要求を満たすものとしている。当然キッカーを駆動するパルス電源には 3nsec 以下の立ち上がり/立ち下がり特性のものが必要となる。内藤氏は種々の電源を入念に調査するとともに試作を行い、5kV、3MHz バーストモード、5Hz 繰り返しの運転が可能で、出力立ち上がり約 2.2nsec と云う、現在入手可能な最高性能の高電圧パルス電源を探し当て、キッカーシステムの実現に道を開いた。本電源を使用した場合キック力の立ち上がりは約 3.2nsec となり、ほぼ必要性能に近い立ち上がりを得ることが可能となるが、トレランスがなく実用には極めて厳しいと考えられる。そこで内藤氏は、更に少数台のキッカーを追加し、それらを僅かに速いタイミングにて逆極性パルスで駆動すると云う、波形補償用キッカー (waveform compensator) を提唱し、これにより立ち上がり 2.2nsec、立下がり 2.4nsec という、極めて速い立上り/立下り特性を実現できることを実証した。実証実験は、KEK ATF リングにて 1 組のキッカーと補償用キッカーシステムを構築して行われ、BPM を駆使してキッカー励起によるワンターンのビーム軌道及びベータートロン振動振幅を観測することで、実効的なキック力の強さ及びその時間構造を精密に観測した。これにより、waveform compensator が有効であることを実証し、実際に予想通りの速いビームキックが実現可能であることを示した。

以上のように内藤氏は、これまでにない 3nsec 以下の立ち上がりで繰り返し 3MHz と云う極めて先進的なビーム入射及び出射用キッカーシステムを実現した。これは周長 6km の ILC ダンピングリングの実現性に極めて大きなインパクトを与えるものであり、高く評価される。更に ILC に限らず、種々の加速器コンプレックス等におけるビーム振り分け技術に大きな自由度を開くものであり、審査員全員一致で加速器科学専攻の博士論文として十分な内容であると判定し、合格とする。