

氏 名 DIXIT, Tanuja Sushant

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1194 号

学位授与の日付 平成 20 年 9 月 30 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 Acceleration scenario and necessary devices for the KEK
Digital Accelerator

論文審査委員 主 査 教授 春日 俊夫
教授 高山 健
准教授 安達 利一
准教授 菊谷 英司
准教授 増澤 美佳
教授 堀岡 一彦（東京工業大学）

論文内容の要旨

A novel ion accelerator referred to as a digital accelerator, which is based on the induction synchrotron concept, is discussed here. Its operational performance is the same as that of the induction synchrotron, where acceleration and confinement of ions in the propagation direction are implemented independently with a pulsed voltage and the so-called barrier voltages. These voltage pulses are generated in the induction acceleration cell energized by the switching power supply, which is triggered with a trigger signal manipulated by an ion-bunch signal. In the digital accelerator, any ion species with its possible charge state can be accelerated since the acceleration voltage pulse generation is always synchronized with the ion circulation. Acceleration of argon ions is planned as a proof-of-principle experiment at KEK. The detailed aspects of the digital accelerator are described, including theoretical backgrounds such as beam dynamics.

The KEK-PS booster synchrotron is under renovation, aiming to become the first digital accelerator. The KEK Booster is a rapid-cycle synchrotron where the acceleration voltage amplitude changes dynamically throughout the acceleration period. The existing induction cells can provide a peak output voltage of 2 kV in 250 nsec pulse width at a maximum repetition rate of 1 MHz. Once the peak output voltage is fixed, it is difficult to change its magnitude in the same acceleration cycle. The main purpose of this thesis is to propose the realization of a dynamically changeable acceleration voltage by employing the induction acceleration system. In fact, this idea has been developed for the KEK digital accelerator. The acceleration period is divided into stages, where different acceleration voltages, pulse widths, and repetition rates are required. A novel technique, which consists of staging of the acceleration period, systematic sorting of the induction acceleration cells, and intermittent operation of the induction acceleration systems, has been developed. Particle tracking simulations in the longitudinal direction were performed in order to verify the feasibility of the scheme. The acceleration scheme has been verified experimentally for the first two stages of the acceleration period by using a beam simulator signal. The results will be presented here and the perspectives of this technique will be discussed.

論文の審査結果の要旨

Tanuja DIXIT氏の論文は誘導シンクロトロン (induction synchrotron:IS) の原理に基づくKEKデジタル加速器 (Digital Accelerator:DA) 実現のための基礎研究に関するものである。

ISの原理実証は、運転を終了した高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロン (P S) を用いて2006年3月になされているが、最初のDAとして同PSのブースターリング (BR) を改修することが想定されている。DAにおいては、いかなるイオン種のいかなる電荷状態でも加速できる。それはイオンの周回に同期した加速電圧を発生させることができるからであるが、これは通常の高周波加速空洞を用いたシンクロトロンでは困難なことである。KEK-DAでは実証試験としてアルゴンイオンの加速が計画されている。

Dixit氏は、どのような構成であれば上記の条件 (改修したBRでアルゴンイオンを加速する) を満足するDAを実現できるかを考察した。最初に、IS内でのイオンの縦方向運動学の検討を行い、イオンを縦方向の位相空間のある領域 (バケット) 内に閉じ込めるための条件を検討している。これにより、イオン閉じ込めのための誘導セル (IC、通常のシンクロトロンの加速空洞の役目を果たす装置) に要求される電圧を見積もっている。現在既に原理実証に用いたICは存在するが、これ一台により得られる加速電圧はKEK-DAで想定している10Hzの加速サイクルには不十分であるので、複数台のICを同時に動作させ必要電圧を得ることが不可欠である。また、想定している入射時のアルゴンイオンのパンチの長さは4 μ s程度であるが、既存のICの時定数で決まる電圧ドループにより、この長さのパンチ全体に均等な加速電圧を与えることは不可能である。加速電圧の犠牲のもとに、巻き数が1ターンであったICを2ターンに改造することにより時定数を4倍長くし、さらに時系列的に動作する複数台のICを用い必要なパルス幅の加速電圧を得ることができることを見いだししている。複数台の加速空洞を用い必要な加速電圧を得ることは通常のシンクロトロンで良く行われることであるが、ICの時系列的動作と同等な動作をさせることは通常の高周波シンクロトロンでは不可能である。時系列的動作等の特徴を有するICであるが、加速途中において加速パルスの電圧を変化させることは困難である。一方加速に要する電圧はISの閉軌道をつくる磁石系の磁場パターンにより一意的に決まっている。それ故何らかの方法で実効的な加速電圧を制御しなければならない。このような場合にはICを動作させる頻度を変化させれば目的が達成できることは原理的にはISの実証試験の段階で見いだされていた。今回の研究対象であるKEKブースターの様な高速繰り返しシンクロトロン(RCS)では、必要な加速電圧は正弦関数的に変動する。その様な加速電圧のダイナミックな変動をICの動作頻度でどう対応するかは全くの白紙の状態であった。Dixit氏は最新のデジタル信号処理技術を駆使し、複数のICを複雑かつ巧妙に制御することによって、RCSに対してもISを実現できることを示した。

Dixit氏は複雑に制御しなければならないIS でイオンが正常に加速できるかを先ずシミュレーションによって確かめている。ICのためのパルス発生器はIC本体からある距離だけ離れて設置され、両者は伝送路でつながれている。ICのインピーダンスは周波数特性を持つため、伝送路の特性インピーダンスと完全な整合をとることができず、加速電圧パルスは伝送路内の反射の影響が避けられない。シミュレーションにおいて、想定される反射によ

る影響は問題がないことを見いだしている。ICはバンチ通過時にモニターされるバンチ信号を基に、多段に構成されたDSP等のデジタル信号処理回路を経由して作った信号によりトリガされ、パルス電圧を発生する。この場合、DSP等での時間的な動作ジッターは不可避である。これらのジッターの最大値の関数として、閉じ込めタイミングエラーによるビームロスを実験シミュレーションで確認し、現在のシステムの持つ最大10ns程度のジッター振幅ではロスはない事を確認している。

ISにおいては複数のICの動作を複雑に制御しなければならない。Dixit氏はデジタル信号処理技術をもちいてこの制御が実現できることを見だし、実際に加速サイクルの一部のための制御装置を構成している。任意関数発生器を用いて、想定されるアルゴンイオンビームを模擬し、構成した制御装置より正常なICへの制御信号が発生することを確認している。DAの成否はIC本体の性能のみならず、複数のICの複雑な制御の成否に係っている。Dixit氏はIC本体の改良測定を行うのみならず、この制御装置の研究開発をおこなっており、その成果を詳細に本論文としてとりまとめている。以上により本論文は総合研究大学院大学の博士論文に十分値するものと判断し、審査員全員一致にて合格と判定した。