

## RECENT STATUS OF KEK DIGITAL ACCELERATOR

T. Iwashita<sup>#1</sup>, T. Adachi<sup>1,2</sup>, T. Arai<sup>1</sup>, Y. Arakida<sup>1,2</sup>, K. Okazaki<sup>3</sup>, K. Okamura<sup>1,2</sup>, E. Kadokura<sup>1</sup>, M. Kawai<sup>1</sup>, T. Kawakubo<sup>1</sup>, T. Kubo<sup>1</sup>, T. Kubo<sup>1</sup>, K. Koyama<sup>1</sup>, W. Jian<sup>4</sup>, H. Someya<sup>1</sup>, A. Takagi<sup>1,2</sup>, K. Takayama<sup>1,2,5</sup>, H. Nakanishi<sup>1</sup>, M. Hashimoto<sup>1</sup>, L. K. Wah<sup>2</sup>, and M. Wake<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

<sup>2</sup>Graduate University of Advanced Studies (KEK), Tsukuba, Ibaraki, Japan

<sup>3</sup>Nippon Advanced Technology Co. Ltd. (NAT), Tokaimura, Ibaraki, Japan

<sup>4</sup>Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Niigata, Japan

<sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology, Nagatsuda, Kanagawa, Japan

### Abstract

The KEK PS-Booster which had finished thirty years of operation in 2006 is currently under renovation as a digital accelerator (DA). The first plan of us is to accelerate an argon ion beam using the induction acceleration system which was developed at KEK [1][2]. The DA is expected to open up new areas of research because it can provide any ion beam from hydrogen to Uranium without an injector. Status of the construction of KEK-DA is reported.

## KEK デジタル加速器開発の現状

### 1. はじめに

2006年のJ-PARC計画の完成に伴い、KEK PS 500 MeV ブースター加速器はその運転を終了した。以降、世界初のデジタル加速器 (Digital Accelerator, DA) として改装中である。これは KEK で 2000年に提案され[1]、2006年に 12GeV PS を用いて原理実証がなされた誘導加速シンクロトロン方式 [2]によって重イオンを加速できるように旧ブースターを再利用する計画である。DA は水素からウランまであらゆるイオンを大型の入射器なしに一台の加速器で加速可能であるという特長を持っており [3]、様々な応用が期待されている。本稿では改装作業の詳細と現状について報告する。

### 2. デジタル加速器

誘導加速シンクロトロンは正弦波を用いず、デジタル制御されたパルス電圧で加速することからデジタル加速器とも呼ばれる。デジタル加速器では誘導加速セルと呼ばれる 1:1 のトランスを介してイオンに加速電圧を与える。加速セルを駆動するためのパルス電流は、高性能の半導体スイッチング素子 (MOS-FET) で構成されたブリッジ回路で DC 充電器の供給する電圧をスイッチすることで得られる。MOS-FET のゲート信号は周回するイオンビームのバンチ信号から生成されデジタル的に制御されている。このため、加速電圧は常にイオンビームの周回に同期して発生する。従って、デジタル加速器は RF 加速と異なり、共鳴空洞や RF アンプの帯域を全く気にすることなく、非常に速度の遅い粒子から光速まで、広い周回周波数を持つイオンでも加速可能 (スイッチング素子の能力により上限あるが) という特長を持つ。このような特性から、水素からウランのような重い粒子の加速にも応用可能と期待され

ている [3]。

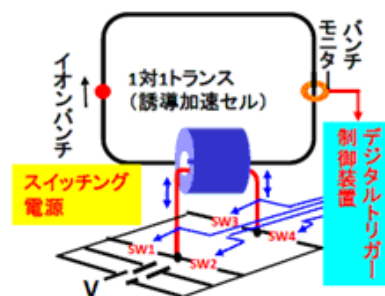


図 1: デジタル加速器の概念図

### 3. KEK デジタル加速器の建設

KEK ブースターからデジタル加速器への主な改造点には以下の通りである。

1. ECR イオン源の導入
2. 200kV 高圧ターミナルの建設
3. LEBT (Low Energy Transport Line) の整備
4. 入射機器の開発
5. 20Hz 運転から 10Hz 運転に磁場パターンを変更、入射磁場を下げる
6. 高周波加速空洞を誘導加速装置に置き換える
7. セラミックダクト新造、磁石等の機器を真空外へ出し高真空化

上記 2、4、5、6 は完了し、残りについては現在も進行中である。それぞれについて以下の節で詳述する。

#### 3.1 ECR イオン源と高圧ターミナル、LEBT

KEK-DA 第一期のイオン源として永久磁石方式の

9.4GHz ECR イオン源を開発した。2010年8月現在、ヘリウム、酸素、ネオン、アルゴンなどのイオンの取り出しに成功している。図2はアルゴンイオンスペクトルを入射マイクロ波のパワー(100W~600W)ごとに示したものである。

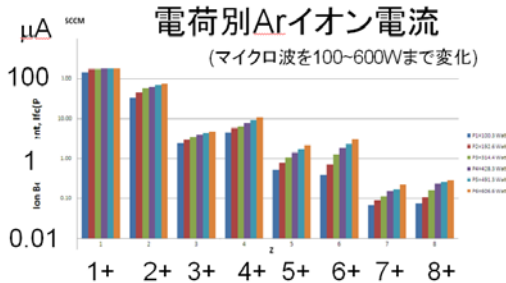


図2: ECR イオン源で得られた Ar イオン強度

この ECR イオン源を 200 kV に昇圧された高圧ターミナル (図 3) 内部に据え付け、ターミナルと外部 (接地) を結ぶセラミック加速管で加速し取り出す。取り出されたイオンは LEBT (Low Energy Transport Line) と呼ばれる伝送ラインを經由し DA リングに入射される。LEBT は必要な価数のイオンのみを選択する分析電磁石、イオンビームを DA リングの入射角度に合わせる偏向電磁石、および収束電磁石からなる。LEBT 上の電磁石の大部分は旧ブースター時代の再利用であり、Optics もそれに類似する

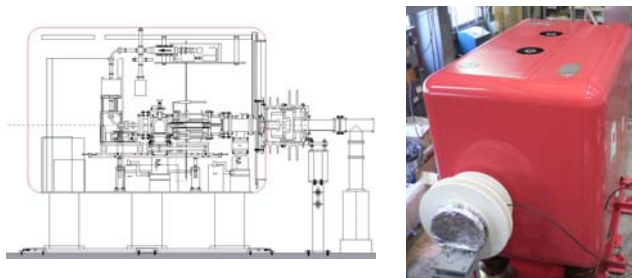


図3: 200kV 高圧ターミナル内部配置 (左) と外観写真 (右)

### 3.2 入射用静電キッカー

DAリングへのイオンビーム入射のために静電キッカーを開発した。入射時の $Ar^{8+}$ の周回周期は約14 $\mu s$ である。キッカー電圧が入射終了後のビーム周回軌道に影響を与えないように、数 $\mu s$ 以内にオフにする。この要求のため、DC電源から約100m長の50 $\Omega$ 伝送ケーブルを通してキッカーに20kVの電圧を印加しておき、入射終了後サイラトロンを励起して伝送ケーブルの電荷を50 $\Omega$ マッチング抵抗に吸収させる。実際の観測波形を図4右に示した。

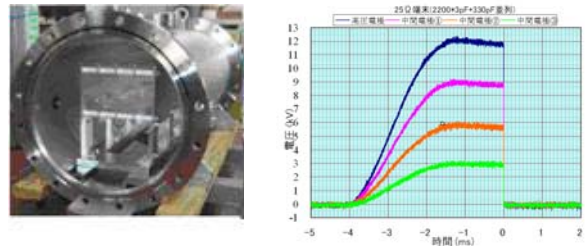


図4: 左は主リングへのイオン入射用静電キッカー。右は電圧波形。複数の波形は電場整形電極の分圧波形である。

### 3-3. 主電磁石改造

主リング電磁石は旧500 MeV ブースター時代のものを再利用する。ただし大型の入射器のないKEK デジタル加速器では200kV入射に合わせて入射磁場は2.8 kGから0.4 kG程度まで下げる。また、加速電圧負担を減らすために20 Hz 運転から10 Hz 運転に変更した。



図5: KEK-DA リング

### 3-4. 誘導加速装置と加速シナリオ

デジタル加速器では主電磁石の励磁とイオンの周回に同期させ、イオンバンチ長より長い加速電圧を発生し、イオンを加速する。

ただし、誘導加速セルの基本的動作の制約 (固定電圧1~2 kV、最大パルス長2 $\mu s$ 、最大繰り返し周波数1MHz) のため、パルス密度変調運転、複数誘導加速セルの間歇運転を行う。

最大動作繰り返しの限界は主に使用するスイッチング素子をマウントした素子基板の発熱処理能力の限界によって決まっている。一方、デジタル加速器では加速終了時にイオンの周回周波数が1 MHz を超えるのでこの周波数での動作が要求される。これに対応するために、2組のセルを用意し、各々を間歇運転し交互に使用することによって、1MHz以下のスイッチング周波数で1MHzを超える加速を実現する。図6-1、2、3に加速シナリオの模式図を示す。

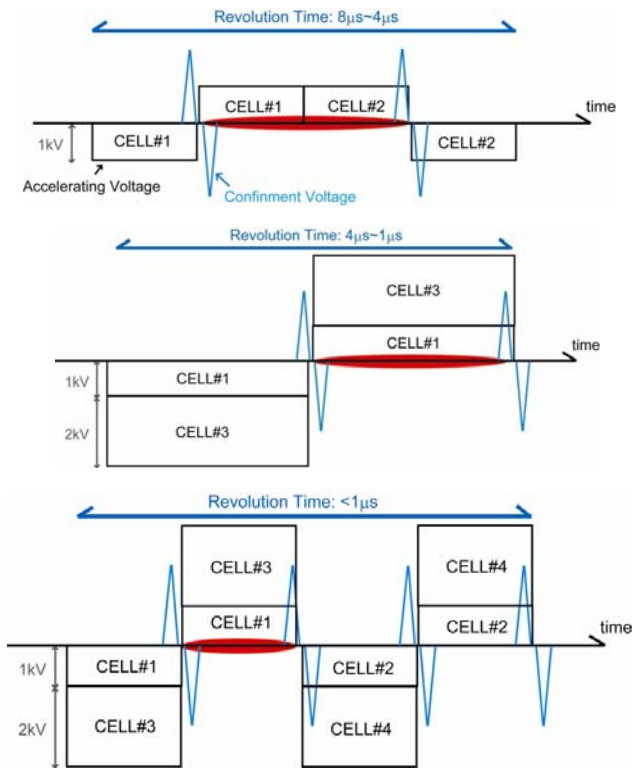


図 6：誘導加速シナリオの模式図。時間軸上に並ぶ矩形が加速電圧、三角が閉じ込め電圧、楕円が加速されるイオンバンチを示す。6-1：第一段階では DC 入射のビームを効率的に加速するため長い加速電圧が必要である。このため 2 台の加速装置で長いパルスをつくる。電圧は低くてよい。6-2：第二段階では高い加速電圧が必要になるので、2 台の加速装置を同時に on/off する。6-3：第三段階は必要なスイッチング周波数が 1MHz を超える段階である。加速装置のスイッチング周波数の制限を超えるため、2 セットの電源を交互にオペレーションする。

### Ar<sup>8+</sup> 加速シミュレーション

前述の加速方式の正当性の確認や、効率的なトリガーの手法を追求するため、デジタル加速器内の加速粒子のシミュレーションを開発した[4]。ここでは Ar<sup>8+</sup>イオンの加速と閉じ込めの 1 加速周期 (50ms) に渡るシミュレーションを行った。図 7 は進行方向における位相空間 ( $\Delta p/p, t$ ) 内の粒子の時間発展である。上から入射直後、25msec 後、取り出し直前 (50msec 後) をそれぞれ示す。入射イオンバンチの初期条件はパルス幅 4  $\mu$  sec に最大運動量幅  $\Delta p/p=1\%$  を仮定している。閉じ込め電圧で捕捉されたイオンバンチが、安定に加速終了まで保持されていることがわかる。

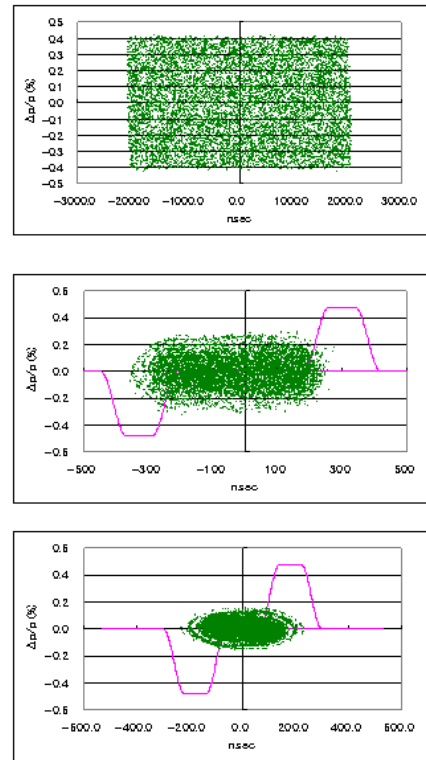


図 7：縦方向位相空間における粒子分布の時間的推移。上から入射直後、25msec 後、取り出し直前。

### 3-5. 取り出しビームライン

イオンビーム取り出しは加速終了後、既存のキッカー磁石を用いて軌道を外に膨らませ 2 台のセプタム電磁石で引き出す。真空度改善のため、ダクトを新造し、セプタム電磁石は真空中ではなく大気中で運転する。図 8 に大気仕様のセプタムの写真を示す。



図 8：大気仕様に改造されたセプタム電磁石

## 4. KEK デジタル加速器で供給予定のイオン種

KEK-DA の第一期計画 (9.4 GHz ECRIS、 $B_{\max}=0.84$  Telsa) で供給予定のイオンパラメータを表 1 に示す。イオン個数は 500 MeV 陽子ブースターとして稼働していた際の陽子の最大ビーム強度から空間電荷効果を考慮し、外挿し求めている。

KEK-DAの第二期計画では主電磁石の交流電源を新調し、電磁石の許す最大磁場強度 1.1 Teslaを実現する。又、レーザーアブレーションイオン源を導入し、フルストリッピングされたガス系イオンと質量の大きい高電価数のイオン種（金属イオンを含む）の供給を想定している。

表 1：KEK-DA（第一期）で供給予定のイオンパラメータ。最大磁場強度 0.84 T、10 Hz 運転、200 kV 入射時。

核種	価数	エネルギー (MeV/u)	イオン個数/秒
He	2+	88.0	$2.1 \times 10^{11}$
O	6+	50.4	$7.0 \times 10^{11}$
Ne	6+	32.6	$7.0 \times 10^{11}$
Ar	8+	14.6	$5.3 \times 10^{10}$

## まとめ

KEK デジタル加速器は世界初の誘導加速方式を用いた重イオンシンクロトロンである。運転を停止した KEK ブースター加速器の再利用計画として現在建設を進めている。ECR イオン源と高圧ターミナル開発はほぼ終了しイオンの取り出しに成功している。主電磁石電源改造、誘導加速装置移設、入出射機器設置を完了し現在 LEBT を整備中である。KEK デジタル加速器は 2010 年度内のコミッショニングを予定している。研究プロジェクトに関する詳細な情報は以下の web-site を参照下さい。

<http://www-accps.kek.jp/Superbunch/>

## 謝辞

ECR イオンの開発に当たっては初期段階に東條栄喜氏に、後半では篠塚勉、湧井崇志（東北大サイクロトロンセンター）の両氏にはアドバイスを頂いた。研究プロジェクトの初期は科学研究費・学術創成研究「誘導加速シンクロトロンの実証研究・スーパーバンチ加速と応用」（15GS0217）によって支援され、現在は基盤研究(S)「誘導加速方式によるデジタル加速器の実現」（S20224004）による支援を得ている。

## 参考文献

- [1] K.Takayama and J.Kishiro, "Induction Synchrotron", Nucl. Inst. Meth. A 451, 304 (2000).  
K.Takayama and R.Briggs, Chapters 11 and 12, in "Induction Accelerators", (Springer, Oct 2010) 印刷中
- [2] K.Takayama, Y.Arakida, T.Dixit, T.Iwashita, T.Kono, E.Nakamura, K.Otsuka, Y.Shimosaki, K.Torikai, and M.Wake, "Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron", Phys. Rev. Lett., 98, p054801-4 (2007)
- [3] K.Takayama, Y.Arakida, T.Iwashita, Y.Shimosaki, T.Dixit, K.Torikai, "All-ion Accelerators: An Injector-free Synchrotron", J. of Appl. Phys. 101, p063304-7 (2007).
- [4] T.Dixit, T.Iwashita, and K.Takayama, "Induction

Acceleration Scenario from an Extremely Low Energy in the KEK All-ion Accelerator", Nucl. Inst. Meth. A, 602 326 (2009).

特許一覧：

- 高山、鳥飼、下崎、荒木田, 特許 3896420 「全種イオン加速器とその制御方法」  
下崎、鳥飼、高山, 特許 3924624 「シンクロトロン振動数制御装置及びその制御方法」  
鳥飼、高山、下崎、木代、荒木田, 特許 403562 「誘導加速装置及び荷電粒子ビームの加速方法」  
鳥飼、高山、下崎、木代、荒木田, 特許 4110253 「誘導電圧制御装置及びその制御方法」