

# ALL-ION ACCELERATOR: A NEW TURN OF THE INDUCTION SYNCHROTRON

Ken Takayama<sup>A,B)</sup>, Kota Torikai<sup>A,C)</sup>, Yoshito Shimosaki<sup>A)</sup>, Yoshio Arakida<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies

Hayama, Kanagawa, 240-0193

<sup>C)</sup> Kyushu University, Faculty of Engineering, Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering

6-10-1 Hakozaki, Fukuoka, Fukuoka 812-8581

## Abstract

A recently proposed circular accelerator capable of accelerating all species of ion is described. The accelerator employs a strong focusing lattice for ion-beam guiding and induction acceleration and longitudinal capture, which is driven with a novel switching power supply. All ions from proton to uranium with a possible and arbitrary charge number are accelerated in a single strong focusing synchrotron. Typical parameters are given, which are obtained for cases that the idea is realized in the KEK 500MeV Booster and 12 GeV PS.

## 全種イオン加速器：誘導加速シンクロトロンの新たな展開

### 1. はじめに

誘導加速シンクロトロン本来のアイデア<sup>[1]</sup>からの外挿と、昨秋から今年に掛けて、段階的に進捗しているKEK12GeVPSでの誘導加速実験の成果<sup>[2]</sup>、特に誘導電圧発生の制御法<sup>[3]</sup>の確立を踏まえて、全てのイオンを1台のシンクロトロンで加速出来る事を認識するに至った。これを日本語で全種イオン加速器と呼ぶ。シンクロトロンの入射器として静電加速器や線形誘導加速器等のイオンの質量数(A)・電価数(Z)に依存しないで加速出来る物を採用し、その出口でのイオンビームのエネルギーを制御出来れば、一定の磁場パターンでランプするシンクロトロン一台で陽子からウランまで加速出来る万能の加速器<sup>[4,5]</sup>が可能になるだろう。

超相対論的なエネルギー域まで加速されたイオンの加速には特別な工夫を必要としない。入射域と加速終了域でのビームの周回周波数の変動は僅かであり、従来の高周波シンクロトロンで十分である。実際、RHICでは同じ高周波加速装置を使って陽子、銅、金イオンを加速しているし、LHCでは陽子以外に鉛イオンの衝突実験が予定されている。しかし、これらの超高エネルギー加速器はそれを使った実験が「知のフロンティア」を開拓するという意味以外の存在価値を見出しにくいので、世界に一つあれば十分である。

一方、多方面での利用が期待されている核子当たり数MeVから数GeV程度の、まだ十分に相対論的なエネルギーに至っていないレベルまでのイオン加速は以下の理由で厄介である。

- A, Zの決まった一種のイオンだけを加速する場合、加速開始から終了までの周回周波数の変動は通常一桁であるので、ハーモニック数の

選択で対応出来るが、取り出しに必要なバンチ間隔等を考慮すると、徒に高いハーモニック数が使えるわけではない。(これを克服するには別途バリアー電圧で加速開始前にスーパーバンチを作っておき、断熱的に高周波バケツでハーモニックバンチ形状にビームを捕捉し、その状態で加速する方法があるが、ハイブリッド方式は不可欠である。又、この場合高いハーモニック数に比例した高周波電圧を必要とする。)

- 同じリングを仮定すると、陽子(A=1, Z=1)から最小電価数のウランイオン(A=238, Z=1)では周回周波数が2桁以上異なる。例えば10kHzから10MHzに及ぶ。

前者の理由から低いハーモニックを使っての高周波加速を行うのが望ましいが、可能な全てのイオンに対応しようとする、用いる空洞・高周波源を含めた高周波加速装置全体として、2桁以上にわたる可変のバンド幅を有する必要がある。しかし、これだけの周波数域をカバーするのは現実的ではない。

一方これまで、低、中エネルギーまでのイオンの加速に使われてきたサイクロトロンではZ/Aに関する周波数の制限はあったが、連続ビームの取り出しという特徴からハーモニックの制限は無い。しかし、イオンガイド用磁石の大きさ・強さの物理的限界から、得られるエネルギーは制限される。サイクロトロンはこの限界は60年前にシンクロトロンが登場する動機でもあった。

エネルギー制限を解消し、全てのイオンに対応出来るシンクロトロンが最近提案されているスイッチング電源で駆動する誘導加速を用いたシンクロトロンである。ここでは、粒子の周回をバンチモニターで検出し、その信号を元に加速・閉じ込め用のス

トップ電圧発生を制御するので、原理的にはいかに低速の粒子でも加速・閉じ込めが可能になる。前述の様にこの加速器を全種イオン加速器と呼び、その特徴と、KEKの500MeV Boosterと12GeVPSに適用した場合に得られるビームパラメーターを以下に示す。

## 2. 全種イオン加速器の構成

その全体構成は図1に見られる様に、通常のシンクロトロンとの構成と大差はない。

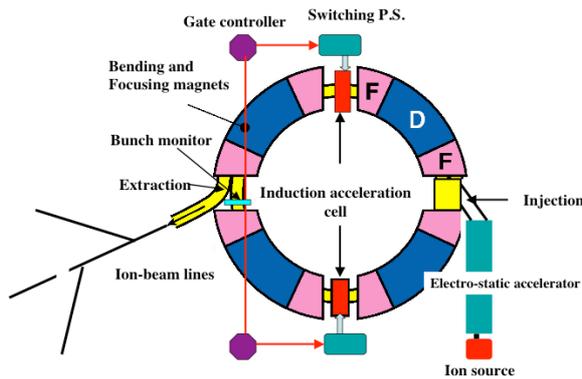


Figure 1. Schematic view of the all-ion accelerator

全種イオン加速を目差すので、入射器は静電タイプが必要である。しかし、特殊なイオンのみであれば、既存Alvarezタイプの線形加速器が使える。加速・閉じ込めにはスイッチング電源で駆動する別々の誘導加速セルを用いる。ゲートコントロールシステムを経由して処理したバンチモニターの信号を、スイッチング電源のゲート親信号として使用する。スイッチング電源のバンクコンデンサーには常に一定電圧が供給されており、スイッチゲート信号の到来に従って、パルス電圧は伝送線を経由して、誘導加速セルに送り込まれる。

## 3. 加速

### 3.1 加速電圧と磁場のランプ

シンクロトロンでは先ず磁場のランプパターンを決めて、ビーム中心が設計軌道を維持する様に加速を追随させるのが普通でもっとも簡単である。この追随の条件は水平方向の力のバランスと、周回当たり平均的加速方程式から一意に求まり、以下で与えられる。

$$V_{acc}(t) = \rho \cdot C_0 \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $V_{acc}(t)$ は周回当たりの加速電圧、 $\rho$ と $C_0$ は偏向磁石の曲率半径と加速器リングの周長、 $B$ は磁束密度である。必要な加速電圧は偏向磁場の時間勾配で決まる。

### 3.2 周回周波数と加速エネルギー

磁場のランプに従ってエネルギーが増大していくイオンの周回周波数  $f(t)$  は時間的に以下の式に従って変動する。

$$f = \frac{c}{C_0} \sqrt{\frac{D}{1+D}}$$

$$D \equiv \left( \frac{\rho}{R} \right)^2 = \left( \frac{Z}{A} \frac{e}{mc} \right)^2 B^2(t)$$

一方、運動エネルギーもこの周回周波数を用いて

$$T = A \cdot mc^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{f \cdot C_0}{c} \right)^2}} - 1 \right]$$

と書ける。全て、 $B(t)$ の関数である事が重要である。

### 3.3 スイッチング周波数

式(1)から共振電源で励磁されるRapid Cycle Synchrotronでは必要な加速電圧は加速時間帯にダイナミックに変化する事が理解される。これを一定の誘導ステップ電圧  $V_0$  で対処するために、「ゲート信号の間欠生成」という技術が確立された。毎周電圧を発生させるのではなく、ある有限な時間幅(周回幅)の中で磁場のランプに追随する様に発生させる。即ちゲート信号密度を以下の式に従って変える。

$$g(t) = V_{acc}(t) \cdot f(t) / V_0$$

Slow Cycle Synchrotronでは加速開始・終了時を除くと時間的に直線で加速されるので、一定電圧を毎周発生させる。過渡期はRapid Cycle Synchrotronと同じである。既にKEK 12GeV PSを用いた誘導加速試験で実証された。

## 4. KEK 500MeV Boosterと12GeV PSへの応用

全種イオン加速器のアイデアをKEK 500MeV Boosterと12GeV PSに適用してみる。先ず、各加速器のパラメーターを表1に示す。

表1

	記号	500MeV Booster		C:12GeV PS (slow cycle)
		A:rapid cycle	B:slow cycle	
周長 (m)	$C_0$	340/9	340/9	340
曲率半径 (m)	$\rho$	3.3	3.3	24.6
最小/大磁束	$B_{mi}$	2	1	0.146

密度 (T)	$\beta_{max}$	1.1	1.7	1.7
ランプ時間 (sec)	$\square$	0.05	0.8	0.8
加速電圧 (kV)	$V_{acc}$	7.05 (max)	0.25	16.3
運転サイクル (Hz)	$f$	20	0.5	0.5

先ずAのケースについてH(1, 1), U(238, 39), U(238, 5)のイオンの周回周波数を図2に示した。始めに言及した様に、一種のイオンに着目すれば周回周波数は1桁程度変動する。ここでは陽子とウランのデータを示したので、他のイオンはこの幅の中にほぼ納まる。二桁強の広がりを持つ事が判る。

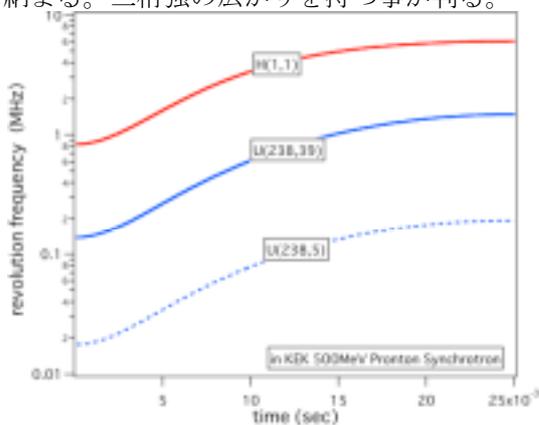


Figure 2. Revolution frequency for three ions

次に、A, B, Cの三つのケースについてフルストリップの陽子、酸素、キセノンイオンの核子当たりの到達エネルギーと必要なゲートスイッチング周波数 $g(t)$ を図3に示す。

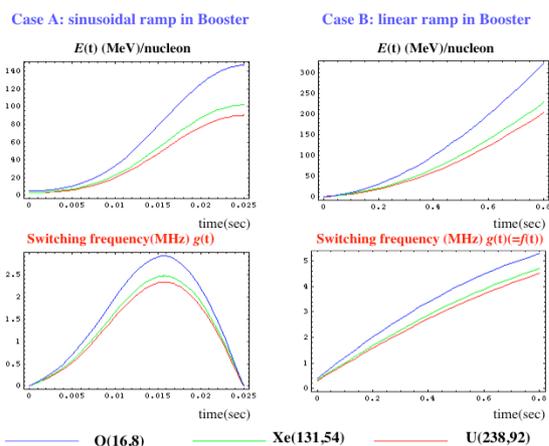


Figure 3. Kinetic energy and switching frequency

スイッチング周波数が既に我々の手の届く処にある事がこの図から読み取れる。又、slow rampingにして $B_{max}$ を1.7Tまで励磁できれば、得られるエネルギーも極めて魅力的な値である。次に12GeV PSでの加速を図4に示す。フルストリップを仮定して

いるので、ここに示す軽、中、重イオンにさほど依存しない。スイッチング周波数にも大差は無い。

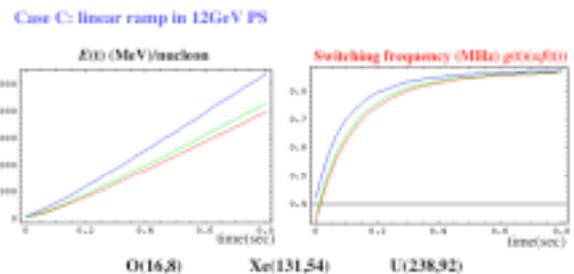


Figure 4. Kinetic energy and switching frequency 得られるイオンビーム電流については詳細に述べるスペースがないが、陽子ビームでの実績とLaslett limitを用いた評価によれば、全てのイオンに関してCaseAで22A、CaseCで1.3Aが期待出来る<sup>[5]</sup>。

## 5. サイクロトロンとの比較

低、中エネルギーのイオンの加速ではサイクロトロンと比較すると面白い。例として理研で稼働しているリングサイクロトロンでの実績と比較する。図5はリングサイクロトロンで加速された結果とKEK Boosterと12GeV PSでフルストリップのイオンを加速した場合とを比較した。

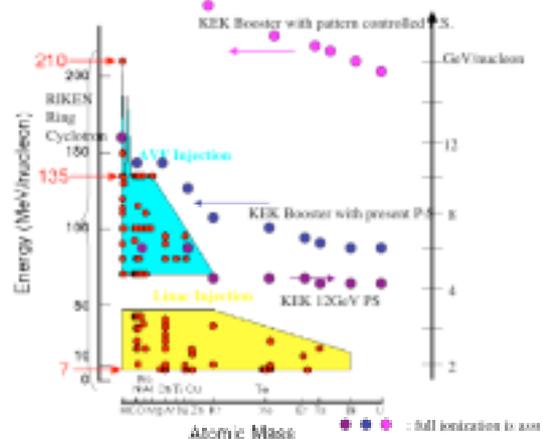


Figure 5. Experimental results for the Cyclotron and theoretically expected values この研究は科学研究費学術創成研究 (15GS0217) によって支援された。

## 参考文献

- [1] K.Takayama and J.Kishiro, *Nucl. Inst. Meth.* **A451**, 304 (2000).
- [2] K.Takayama *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 144801 (2005).
- [3] 鳥飼幸太、荒木田是夫、下崎義人、木代純逸、高山健、特願(2005).
- [4] 高山健、鳥飼幸太、荒木田是夫、下崎義人、特願2005-129387
- [5] K.Takayama, K.Torikai, Y.Shimosaki, and Y.Arakida., submitted for publication (2005).

