

T. Kato, Z. Igarashi, K. Ikegami, C. Kubota, A. Takagi  
E. Takasaki, T. Takenaka, Y. Mori and S. Fukumoto  
National Laboratory for High Energy Physics

## ABSTRACT

Ions of  $D^+$  or  ${}^4\text{He}^{2+}$  ( $e/m = 0.5$ ) are accelerated by 4 $\pi$ -mode operation in a proton linear accelerator. Conventionally, the field distribution is modified to compensate lower transit time factors at the input end of the tank. It is shown that the ions of  $e/m = 0.5$  can be captured and accelerated in the 4 $\pi$ -mode operation for higher RF fields and for higher injection energies without changing the field distribution. For example, when the RF field is 1.3 times larger than that of the proton acceleration, about a half of injected ions may be captured at an injection energy of 555 keV. To verify the calculation, a  $\text{H}_2^+$  beam of 10 mA is injected into the KEK 20 MeV linac at an injection energy of 562 keV and a linac beam of 0.7 mA is obtained for a slightly higher RF field.

## 1. まえがき

KEKの陽子シンクロトロンでは、 $p$ の電荷対質量比も  $e/m = 1$ とした時に、 $D^+$ ,  ${}^4\text{He}^{2+}$  その他  $e/m = 0.5$ のイオンを加速する可能性を検討している。20 MeV陽子リニアックによるこれらのイオン加速は、既に Saclay の Saturne II で行われているが<sup>1)</sup>、KEKでは引き続き $p$ も加速しなければならないことから、電場分布を  $e/m = 0.5$ 用に変えてしまうのは好ましくない。そこで電場分布 (= 相対的な電場) はそのまま、強さだけを変えて加速の可能性をしらべたところ、入射エネルギーの離散的な値に対して capture の比較的広い領域があることがわかった。そこで  $\text{He}^+$ による実験を行い、計算通りの入射エネルギーで  $\text{H}_2^+$ が加速されることを確かめた。

2. 2 $\pi$  mode ( $\beta\lambda$  mode) と 4 $\pi$  mode ( $2\beta\lambda$  mode) 加速

リニアックでは加速構造とRF周波数は変えられないから、 $e/m = 0.5$ のイオンを $p$ と同じく2 $\pi$  modeで加速するには、非相対論的取扱いで加速電場を2倍にしなければならない。これは4倍のRF電力を要することを意味し、実現困難である。そこでイオンの速度を $p$ の速度の半分とする4 $\pi$  modeが用いられることになる。 $p$ とイオンを比較すると速度は $1/2$ に、質量は2倍となるため、各加速ギャップでのエネルギー利得は $1/2$ でよく、

$$E_p T_p L \cos \psi_p = 2 E_D T_D L \cos \psi_D \quad (1)$$

が満たされればよい。ここで  $E$  は平均加速電場、 $T$  は transit time factor、 $L$  は cell の長さ、 $\psi$  は安定位相である。KEKの20 MeVリニアックでは、 $T_D$  は図1のようになるため、(1)を満たす  $E_D$  は図2のようになる。向題は入射端であって、 $p$ に対してはリニアックの安定な動作のために、ここで電場を最小にしてあるのに、 $D^+$  や  ${}^4\text{He}^{2+}$  に対しては  $E_D$  を大きくしなければならない。しかも KEK では Saturne II のように  $e/m = 0.5$ の粒子の専用ではなく、パルス毎に  $p$  と  $D^+$  などを選択して加速しなければならない、tuner によって電場分布を変えるのは望ましくない。

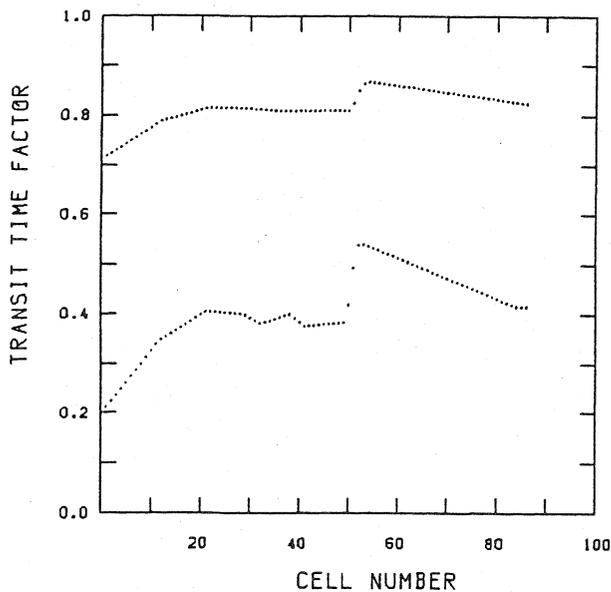


図1. pとD<sup>+</sup>に対するtransit time factor

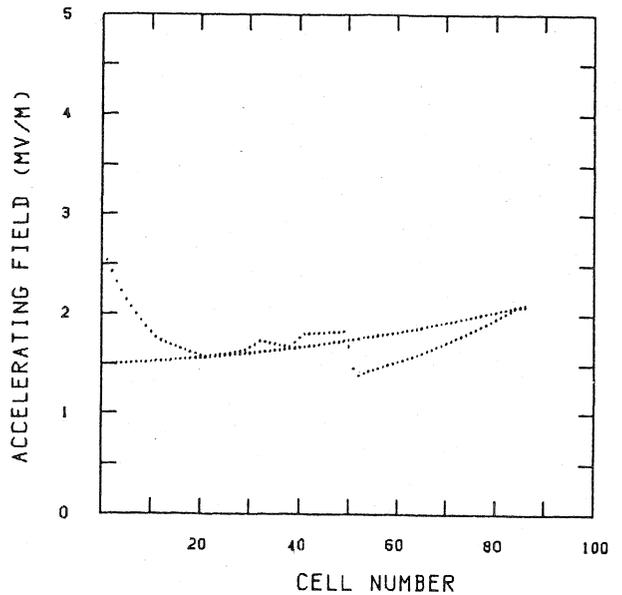


図2. pの加速電場E<sub>p</sub>と(1)式を満足E<sub>D</sub>

### 3. 電場分布を変えない4π mode 加速

pに対する分布のまゝで電場を増すと、入射エネルギーが普通の4π mode加速の750/2=375 keVより高いある値でcaptureが増えることがcomputer計算により示唆されたの<sup>2)</sup>、KEK 20 MeV リニアックについて詳細な計算を行った。その結果、図2のE<sub>p</sub>に対してはこのようなcaptureは殆んどないが、E<sub>p</sub>×1.1では555 keV入射でcaptureの領域が現れ、電場が増すにつれてこの領域が広がると共に、E<sub>p</sub>×1.3になると400 keVと660 keVの入射エネルギーでもcapture領域が現れる。そして555 keV入射では図3, 4のようにほぼ半分の粒子がリニアックで加速されることになる。また計算によれば、DTのQ磁場はpに対する値のまゝでよいことがわかった。

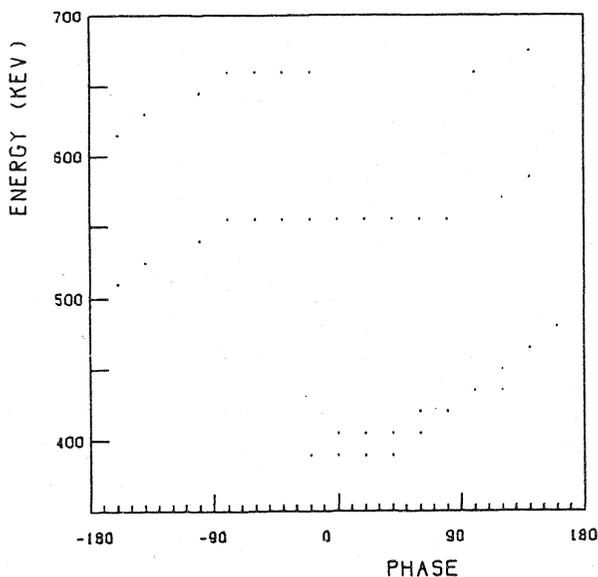


図3. 電場がE<sub>p</sub>×1.3の時のcapture領域

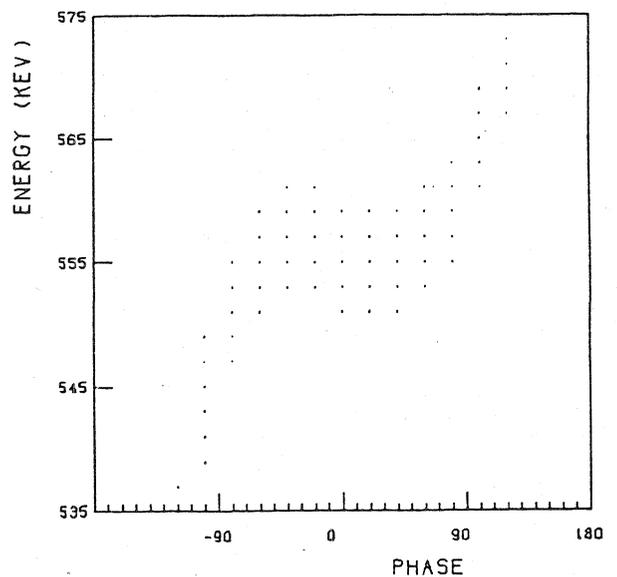


図4. 図3の555 keV入射附近の拡大図

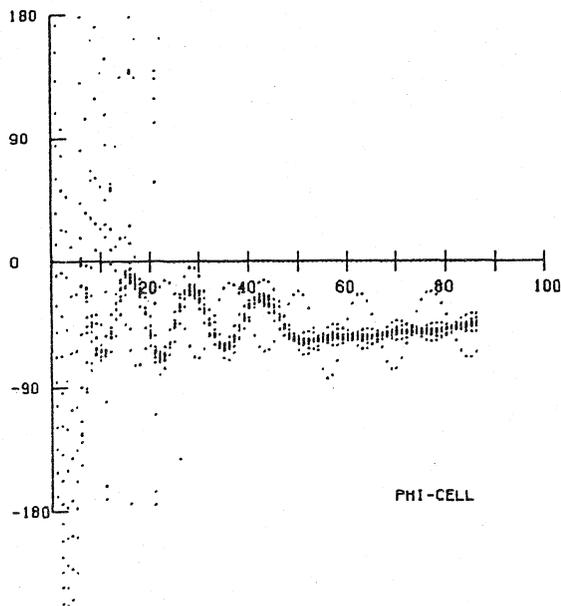


図5. 電場が  $E_p \times 1.3$  の時の位相振動

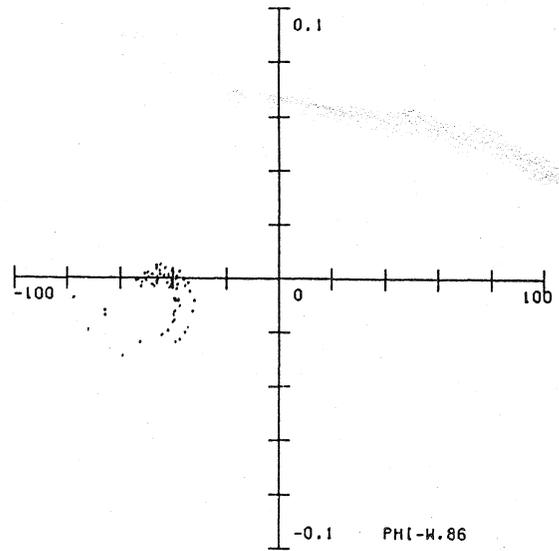


図6. 図5の場合の加速されたイオンの分布

#### 4. $H_2^+$ による 電場分布を変えない $4\pi$ mode加速 のテスト

$e/m = 0.5$  のイオンとして  $H_2^+$  を用いた加速テストでは, tank level 6.15 (普通は  $\sim 6.0$ ) の時計算値にほぼ等しい入射エネルギーで,  $H_2^+$  をリニアック出口から 4.7 m 下流のバンナモーターで検出でき(図7, 8), 562 keV 10 mA の  $H_2^+$  入射に対して 0.7 mA が得られた. Capture 効率は tank level の増加, LEBT の Q 磁石の微調整等により向上するものと予想される.

- 1) JP. Auclair et al.: Proc. 1979 Linac Conf., p.37.
- 2) S.Ohnuma et al.: Proc. 1972 Linac Conf., p.191.

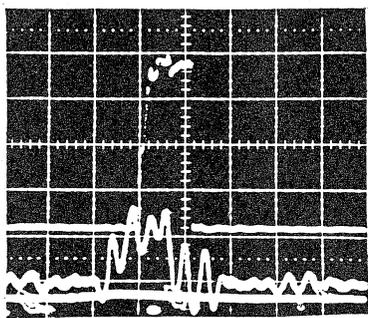


図7.  $H_2^+$  出カビーム(上)と入射ビーム(下),  $X: 5 \mu S/div$

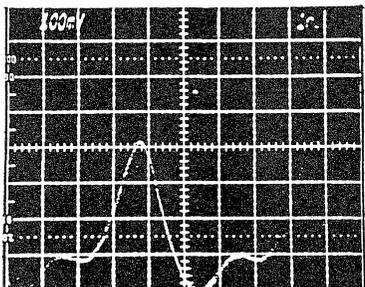


図8. バンナ波形,  $X: 1 ns/div$

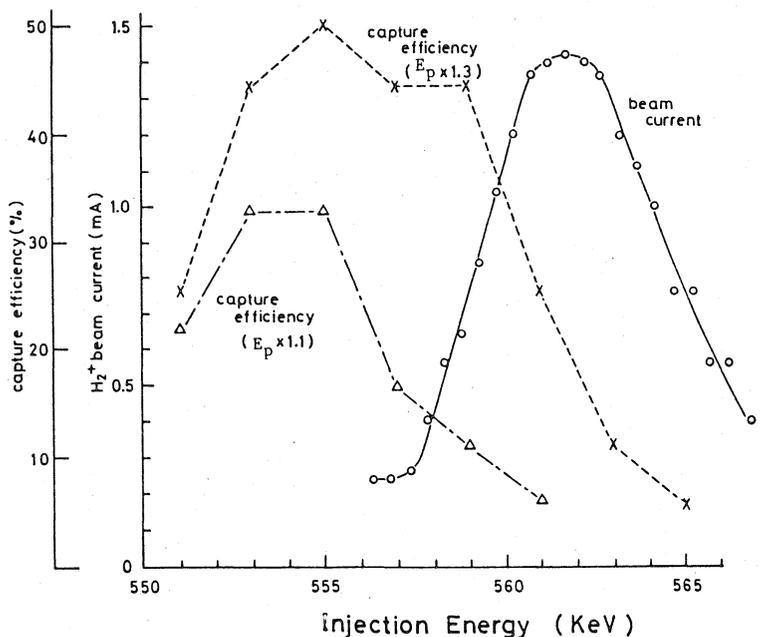


図9.  $H_2^+$  出カビーム強度の測定値と捕獲率計算値