

遅延回路を用いた集団加速器の研究

円城寺 博

Study of a Collective Accelerator with a Delay Line

Hiroshi ENJOJI

It is very important to develop an extraordinarily intense beam of energetic particles for secondary injection heating of fusion plasmas. This can be done with a beam of powerful cluster ions.

Collective acceleration of cluster ions is considered to be one of the powerful methods that can accelerate cluster ions energetically.

In this paper, the theory of a collective acceleration of deuterium cluster ions by accelerating potential waves and the design of a collective accelerator which converts moving potential waves through a delay line into powerful accelerating potential waves proceeding on the coaxial of accelerating electrodes are described.

1. 緒言

現在、世界では大型トカマク核融合試験炉でプラズマの研究が行われており、プラズマの追加熱には中性粒子ビーム入射が用いられている。しかし、将来の商業ベースの大出力核融合炉には、重水素クラスターイオン入射加熱が、ビームの等価電流密度が極めて大きく、又、燃料補給も兼ねていて有望なものと思われる。

そこで考えられるのは、重水素クラスターイオン入射加熱である。ここで云うクラスターイオンとは気体原子が数個から^(1,2,3) 10^4 個集まった原子集団であり、このイオンを^(4,5)クラスターイオンと云う。クラスターイオンビームの等価電流は原子イオンビームの等価電流と比べると、けた違いに大きくなし得る可能性があり、入射加熱に使用する場合にはビーム本数は激減し、従って入射口の個数とその面積は甚だしく小さくなり、商業ベース核融合炉に適用可能と考えられる。

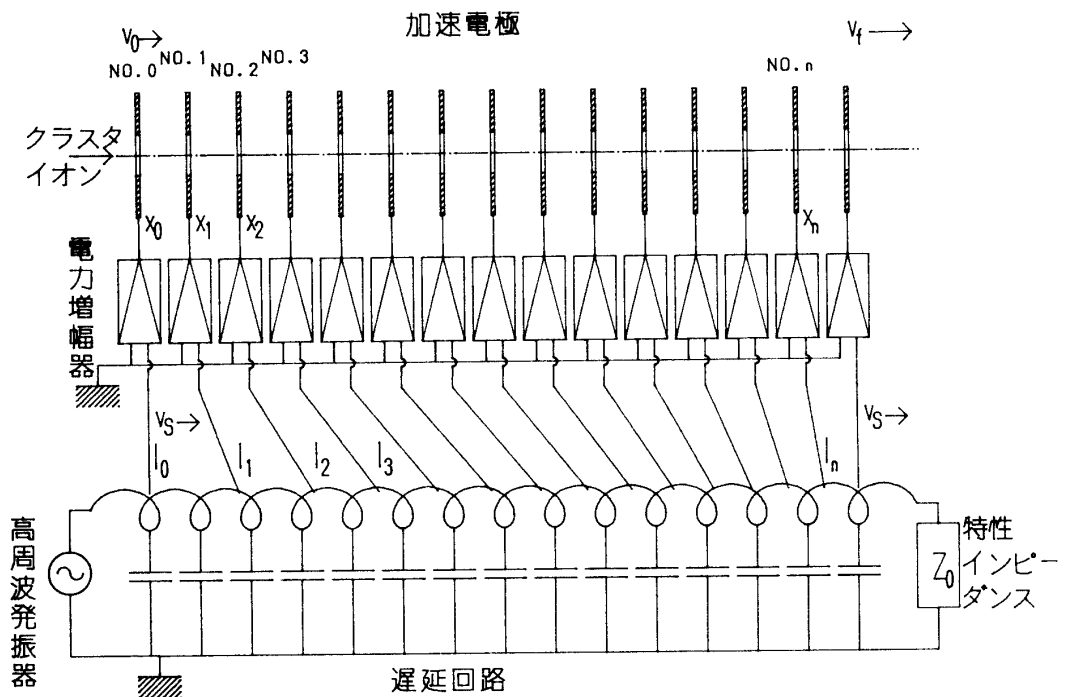
しかし、クラスターイオンビームの中に含まれるクラスターイオンの質量は広い範囲に分布するので、従来の加速器のような電界加速は不適當である。何故ならばクラスターイオンの質量の大小により、プラズマへの加速入射後、分解した構成原子イオンのエネルギーに甚大なる差異を生じ、予定した入射エネルギーから大きく逸脱するものを生じ加熱効率が低下するからである。

この集団加速は、遅延回路と多数の加速電極により形成された加速ポテンシャル進行波の谷に大小さまざまなクラスターイオンを捕捉し、谷の加速と共に加速し、多く

の構成原子に予定したエネルギーを与えるものである。この集団加速法については既に国際学会に^(6,7,8)発表したが、本論文では遅延回路の用法を改善したこと及び加速領域の長さを決定するのに新しい概念を導入したことを述べてある。

II. 加速ポテンシャル進行波の発生

この加速ポテンシャル進行波は遅延回路、中央にクラスターイオンビームが通過する孔を明けた金属円盤を等間隔、同軸上に並べた加速電極群及び各電極に接続されている電力増幅器とによって発生する。各電極の電力増幅器の入力端子は遅延回路のコイル上の定められた位置にそれぞれ接続されている。遅延回路を進行する微弱なポテンシャル信号はこの電力増幅器によって大きなパワーの信号となり電極に与えられる。以上の状況を第1図に示す。



第1図 集団加速器の加速電極と遅延回路の接続

加速電極 No.0 の位置を $x_0=0$ とし、電極間隔を Δx とすると、No.n 電極の位置 $x_n=n \cdot \Delta x$ となる。今、No.0 電極の増幅器入力端子と遅延回路入口とを導線で接続し、この電極群同軸上に

$$v = v_0 + \alpha t \quad (1)$$

の位相速度を持つ加速ポテンシャル進行波を発生させる。 v_0 (m/s) は初期位相速度、 α (m/s/s) はその加速度、 t (s) は経過時間を示し、 $t=0$ でこの進行波の位相 θ が丁度 $x=0$ にあるとする。以上の関係から位相 θ の速度 v と同軸上の位置 x との関係を求めると、

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x} = v(x) \quad (2)$$

となる。

今、位相速度 v_0 (一定) の遅延回路の適当な巻き数位置 C_n (回目) と、第 n 番目の加速電極 (電極 No. n の位置 $x=x_n$) とを連結 (この電極の電力増幅器入力端子に連結することを意味する。今後は単に「電極と連結する」と簡単に表現することとする) して、これら一群の電極上に加速ポテンシャル進行波を走らせるとする。但し $C_0=0$ である。

No. n . と No. $(n+1)$ の電極間を位相 θ の点が通過するに要する時間を Δt_n とすると、

$$\Delta t_n = \int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{dx}{\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x}} = \frac{\Delta l_n}{v_0} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

但し Δl_n は C_n と C_{n+1} の巻き数位置間の距離であり、 l_n は C_n の遅延回路上の位置であり、 $l_0=0$ である。 l_n は C_n と比例関係にあり、遅延回路の単位長当たりの巻き数を n_0 とすると $n_0 \cdot l_n = C_n$ (4)

(3) 式から Δl_n を求めると、

$$\Delta l_n = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_{n+1}} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n}) \quad (5)$$

今 n に $0 \sim n$ までの数値を入れると、

$$n=0, \quad \Delta l_0 = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_1} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_0}), \quad (6-1)$$

$$n=1, \quad \Delta l_1 = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_2} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_1}), \quad (6-2)$$

$$n=2, \quad \Delta l_2 = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_3} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_2}), \quad (6-3)$$

$$\vdots$$

$$n=n-1, \quad \Delta l_{n-1} = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_{n-1}}), \quad (6-n-1)$$

$$n=n, \quad \Delta l_n = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_{n+1}} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n}), \quad (6-n)$$

以上の式において左辺の和、

$$\Delta l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_{n-1} + \Delta l_n = l_{n+1} \quad (7)$$

右辺の和は

$$l_{n+1} = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_{n+1}} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_0}), \quad (8)$$

即ち

$$l_n = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n} - \sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_0}), \quad (9)$$

ところが $x_0=0$ であるから

$$l_n = \frac{v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n} - v_0) \quad (10)$$

又、(4) 式から

$$C_n = \frac{n_0 v_0}{\alpha} (\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x_n} - v_0) \quad (11)$$

(11) 式は互いに連結すべき遅延回路上の巻き数位置 C_n と電極位置 x_n との関係を示す式である。又、式 (10) は C_n の遅延回路上位置 l_n と x_n との関係を示す式である。

(10) または (11) 式の関係に従って遅延回路と加速電極とを結べば加速電極同軸上に初速度 v_0 、加速度 α の位相速度の加速ポテンシャル進行波を形成することができる。今、遅延回路中の進行波の位相速度 (定速度) を v_m として、そのポテンシャルを V_m とすると

$$V_m = V_m \cos(k_m l - \omega t + \theta_m) \quad (12)$$

但し、 l は遅延回路軸上位置、 $\omega=2\pi f$ 、 f は V_m の振動数、 k_m は位相定数であつて $k_m=2\pi/\lambda_m$ 、 λ_m はその進行波の波長であり、 V_m は振幅である。

さて、 T_m を周期(s)とすると

$$k_m l = \frac{2\pi}{\lambda_m} l = \frac{2\pi}{T_m} \cdot \frac{l}{v_m} = \frac{2\pi}{T_m} \int_0^x \frac{dx'}{\sqrt{v_0^2 + 2\alpha x'}} \quad (13)$$

但し、 $\lambda_m = T_m v_m$ 、 x は l と対応する加速電極同軸上の位置である。 $(l_n$ と x_n とが対応するように)。(13)式を更に変形すると、 f は遅延回路入力端子につながる高周波電源の周波数であり、遅延回路軸上定速進行波と電極群同軸上加速進行波に共通するものであるので、

$$k_m l = \int_0^x \frac{2\pi dx'}{\sqrt{\lambda_0^2 + \frac{2\alpha}{f} x'}} = \int_0^x \frac{2\pi}{\lambda(x')} dx' = \int_0^x k(x') dx' \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} T_m &= f^{-1}; \quad v_m = f \lambda_m; \quad \frac{2\pi}{\lambda(x')} = k(x) \\ \lambda(x) &= \sqrt{\lambda_0^2 + \frac{2\alpha}{f} x}; \quad \lambda(0) = \lambda_0 = \frac{v_0}{f} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$\lambda(x)$ は電極群同軸上の加速進行波の波長であり、位置 x の関数である。 λ_0 は $x=0$ における波長である。以上の結果から(12)式は(13)~(15)式により

$$V_m = V_m \cos \left(\int_0^x k(x') dx' - \omega t + \theta_m \right) \quad (16)$$

即ち、遅延回路軸上の定速進行波は電極群同軸上では加速進行波になっていることが判る。何故ならば(15)式により波長 $\lambda(x)$ が x とともに長くなり位相速度 $v(x)=f\lambda(x)$ が x とともに増大するからである。今、 $V_m=V$ 、 $\theta_m=\theta$ とすると加速進行波の表式は(16)式より

$$V = V_m \cos \left(\int_0^x k(x') dx' - \omega t + \theta \right) \quad (17)$$

と書ける。

III. 遅延回路長と電極群同軸長とが等しいための条件

この条件は加速部の構造上必要なものである。このためには v_m が v_0 と $v(l)$ との平均位相速度でなければならない。即ち、

$$v_m = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2\alpha l}}{2} = \frac{v_0 + v(l)}{2} \quad (18)$$

IV. 集団加速器加速部の概念設計

(1) 基本的ファクター

超高温プラズマを追加熱して核融合反応を起こすためには、100keV以上のエネルギーを持った粒子をこのプラズマに入射しなければならない。従つて1個のクラスターイオンに与えるべきエネルギーは100keVに構成原子数を乗じたものになる。今、試験的に1素電荷に対する構成原子数が一番大きいもの、即ち、比構成原子数を最大1000原子/素電荷とする。そしてビーム強度を1000Aeq.とする。クラスターイオンの初速度 v_{c0} はクラスターイオンを直流100万Vで加速して求めることとする。この初速度は比構成原子数 S 、重水素原子質量を m_0 、正素電荷を e 、直流加速電圧を V_a とすると、

$$v_{c0} = \sqrt{\frac{2eV_a}{Sm_0}} \quad (19)$$

から求められる。(19)式の変数にそれぞれの数値を与えると、 $v_{e0}=3.10 \times 10^5$ (m/s) となる。この速度を加速進行波の初速度とする。即ち、 $v_0=v_{e0}$ とする。この時、1個の構成原子に付き、1keVのエネルギーを与えたことになる。次にポテンシャル進行波の加速度 α を、 $\alpha=2 \times 10^{10}$ (m/s/s) とする。 α を大きくすると、この進行波の振幅が数万Vに達し、加速電極縁辺などで高周波放電が起こる危険性がある。そこで、振幅は $V_m=1 \times 10^4$ V とし、周波数を $f=5 \times 10^6$ Hz とする。以上を第1表にまとめて示す。

第1表：クラスターイオン集団加速器仕様

(1) 直流加速電圧	$V_d=1 \times 10^6$ volts
(2) 重水素クラスターイオン	
1. 最大構成原子数:	$N=1000$ atoms/cls.ion
2. 最大比構成原子数:	$S=1000$ atoms/elem.charge
3. ビーム等価電流:	$I_{eq.}=1000$ Aeq.
4. 重水素原子質量:	$m_0=3.34 \times 10^{-27}$ kg
(3) 加速ポテンシャル進行波	
1. 振幅	$V_m=1 \times 10^4$ volts
2. 周波数	$f=5 \times 10^6$ Hz
3. 初期位相速度	$v_0=3.10 \times 10^5$ m/s (1 keV)
4. 最終位相速度	$v_f=3.10 \times 10^6$ m/s (100keV)
5. 位相速度の加速度	$\alpha=2 \times 10^{10}$ m/s/s

このまま加速をつずけても1個の構成原子に付き100keVのエネルギーを得る以前に波長が著しく伸び、ポテンシャルの谷内部の電界が弱くなり加速は不可能⁽⁹⁾となる。故に加速電極群をいくつかの領域に分断し、各領域の同軸長を集団加速に必要な最小限の電界にまで低下する長さに等しくすることが必要となる。そして何段かの領域を経て最終速度 3.10×10^6 m/s に達するべきである。この最小限の電界 E_0 は

$$E_0 = \frac{\alpha S m_0}{e} \quad (20)$$

より求められる。各変数に所定の数値を入れると $E_0=417500$ (V/m) となる。この時の電界の振幅 $E_m(x)$ は式(17)を x で微分して得られ

$$E_m(x) = \frac{2\pi V_m}{\sqrt{\lambda_0^2 + \frac{2\alpha}{f^2}x}} \quad (21)$$

となる。 x が大きくなるほど $E_m(x)$ が小さくなることが判る。そこで E_0 まで低下する距離 l_1 を求めると

$$l_1 = \frac{f^2}{2\alpha} \left\{ \left(\frac{2\pi V_m}{E_0} \right)^2 - \lambda_0^2 \right\} \quad (22)$$

そして $l_1=11.74$ (m)

となる。第1段の加速距離は11.74mで、この位置における位相速度は $v(l_1)=7.52 \times 10^5$ m/s となる。これ以上のところではクラスターイオンはポテンシャルの谷から逸脱する。

第2段の加速においては V_m をより大きくするか、または f を大きくして E_0 にまで低下した電界を十分な大きさに回復してやらねばならない。しかし V_m を大きくすると、前述のように高周波放電が起きるので f を増加して電界を回復することとする。 f を2倍に増加する。同様に(22)式から l_2 を求めると、 $l_2=42.50$ m となる。そして第2段の最終速度 $v_2(l_2)$ は $v_2(l_2)=1.51 \times 10^6$ m/s となる。第3段では $f_3=2f_2=4f=20 \times 10^6$ Hz, $l_3=168.24$ m, $v_3(l_3)=3.00 \times 10^6$ m/s となる。これは目的の 3.10×10^6 m/s より少々小さいので $f_3=5f=25 \times 10^6$ Hz とし、 $v_3(l'_3)=3.10 \times 10^6$ m/s と置いて逆に l'_3 を求めると $l'_3=183.25$ m となる。以上で全加速距離 l は

$$l=l_1+l_2+l_3=11.74+42.50+183.25=237.29(\text{m})\approx 238(\text{m})$$

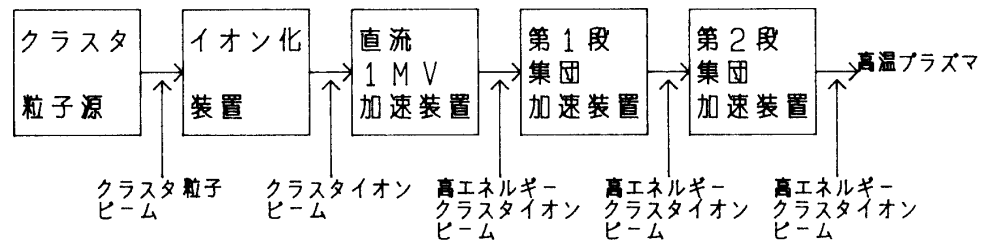
※
 となった。加速度 α を一定として計算したので l が 238m にほぼ等しくなるのは当然である。

即ち、この集団加速器の加速領域は3段に分割され、各段の性能は第2表に示す通りとなる。これらの加速領域の模式図を第2図に示す。

第2表：各段加速領域の性能

(加速ポテンシャル進行波の振幅 $V_m=1.0\times 10^4$ volts)

	第1段加速領域	第2段加速領域	第3段加速領域
周波数(Hz)	5.0×10^6	1.0×10^7	2.5×10^7
加速領域長(m)	11.74	42.50	183.25
初期位相速度(m/s)	3.10×10^5	7.52×10^5	1.51×10^6
最終位相速度(m/s)	7.52×10^5	1.51×10^6	3.10×10^6



集団加速器加速領域模式図

V. 結 言

種々の比構成原子数の重水素クラスターイオンを含むクラスターイオンビームを加速して核融合プラズマを追加熱する集団加速法を考案した。そして、その加速領域の概念設計を試みた。それは、これらの大小様々のクラスターイオンを加速ポテンシャル進行波の谷にトラップして谷の加速により加速するものである。

第1表に示す条件で、最大比構成分子数1000 atoms/ele.chargeの重水素クラスターイオンを含むビームの等価電流1000 Aeq.において、構成原子のエネルギーを1keVから100keVにまで加速するのに238 mの加速領域を必要とすることが判った。

加速を1keVから100keVまで一定加速度 2×10^{10} m/s/sで行うこととした。ここで、一挙100keVに加速することは、加速ポテンシャル進行波の波長伸張に基くポテンシャルの谷の電界低下により不可能なので、加速領域を3段階に分けて加速した。各段の加速領域の長さ、即ち、加速電極群同軸長は各段の初期位相速度と加速ポテンシャル進行波の電源周波数及び加速可能の最小限電界4175V/cmで定まる。第1段の長さ11.74m、第2段の長さ42.50m、第3段183.25mとなり、総計237.49mでほぼ所定の238mとなった。

ポテンシャルの谷にトラップされた各種大きさのクラスターイオンはそれぞれのバ

ランス点に静止していると仮定している。

以上の集団加速器を設計するに際しては更にトラップの条件、クラスターイオン同志の衝突に基づくクラスターイオン及び中性クラスター粒子の損失、中性クラスター粒子の再イオン化、⁽¹⁰⁾クラスターイオンビームの集束等の問題を解決することが重要である。

終

参 考 文 献

- (1) "INTOR, INTERNATIONAL TOKAMAK REACTOR, PHASE ONE": Report of the International Tokamak Reactor Workshop held in Seven Sessions in Vienna during 1980 to 1981 I.A.E.A. Vienna 1982 p.38, 39
- (2) JET JOINT UNDERTAKING ANNUAL REPORT 1983 EUR 9348 EN EUR-JET-AR6 JUNE 1984 p.15-17
- (3) "CONSTRUCTION OF THE JT-60 NBI SYSTEM" Y.Ohara et al. Japan Atomic Energy Research Institute, 13th SOFT, Varese 24 to 28 Sept. 1984 2P-38
- (4) "CLUSTER BEAM INJECTION" F.Bottiglioni, J.Coutant & M.Fois, DPh-PFC-SCP EUR-CEA-FC-931 NOV.1977
- (5) F.Bottiglioni, J.Coutant & M.Fois: Nucl. Fusion, Vol.14 pp.365-375(1974)
- (6) H.Enjoji: Proc.Int.Conf. on Plasma Phys., Fusion Research Association of Japan, Nagoya (1980) Vol.1, p.291
- (7) H.Enjoji: Proc. of 11th SOFT, Oxford (1980) Vol.2 pp.1119-1125 (Pergamon, Oxford 1980)
- (8) H.Enjoji, H.Suzuki & M.Kawaguchi: Proc. of 13th SOFT, Varese(1984), p.721-726 (Pergamon, Oxford 1984)
- (9) M.Kawaguchi, H.Suzuki & H.Enjoji: Jpn.J.Appl.Phys. Vol.25 pp.89-495(1986)
- (10) K.Yano, S.H.Be, H.Enjoji & K.Okamoto: Jpn.J.Appl.Phys., Vol.14 pp.526-532(1975)

※:(2)式において、 $v=3.10 \times 10^8$ (m/s), $v_0=3.10 \times 10^8$ (m/s), $\alpha=2 \times 10^{10}$ (m/s/s) として、 x を求めると $x=237.8$ (m) となる。

(平成2年10月16日 受理)