

トカマクプラズマの自由電子レーザ加熱計画

Tokamak Heating by Free Electron Laser

志 甫 諒*

Makoto Shiho

1. はじめに

最近、自由電子レーザ (FEL) を用いてトカマクプラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) を行なうという、世界でも初めての試みが、米国ローレンス・リバモア国立研究所 (L.L.N.L.) で始められている。この計画はMTX (Microwave Tokamak Experiment) と呼ばれ、日米核融合研究協力の一環として、日本原子力研究所もこの計画に参加し、協力して実験研究を進めることになっている。実験はETA (Experimental Test Accelerator) と呼ばれる大型の誘導型線形加速器 (インダクション・ライナック) を使ったFELにより、140GHz、250GHzの大出力の発振を行わせ、平均MW級の出力をAlcator-Cというトカマク装置に入射して行う。

ECRHは局所的にプラズマ中の電子を加熱する事が出来る唯一の方法であり、核融合研究にとっては重要な加熱法であるが、高出力のジャイロトロン等の開発がなかなか困難である事もあって、100GHz以上の帯域でMW級のパワーを必要とする現在の大型トカマク装置 (表1参照) ではまだ実験的研究が行われてお

らず、小、中型装置で、100GHz以下の帯域で実験的研究が行われているにとどまっていた。

FELは、その大きな電磁波に対する増幅能力のため、KW級の小さな励振入力でMW級のミリ波を出力させる事が出来、ここ当分はほとんど不可能であろうかと考えられていた。100GHz以上の帯域で、MW級のパワーでのECRHを可能にし、又周波数可変性能をもつため同じ装置で発振波長を容易に変える事が出来る等、核融合研究にとっては今までに無かった革新的研究手段となり得る可能性を有している。この可能性を実験的に確めるのが、MTX計画の目的である。

本稿ではこのMTX計画の背景となるECRH研究の意義、ミリ波大出力FELの現状にふれつつ、MTX計画の概要、物理的課題等を紹介したい。なお本稿ではFELの動作機構の詳細¹⁾²⁾、及びECRH研究に関係の深い大出力発振管の今後の開発動向³⁾についてはあまりふれなかった。詳細な解説があるので、これらについては、参照していただきたい。

2. 核融合におけるECRH研究の重要性

プラズマ中の磁場をB(T)とする時、電子のサイクロトロン周波数 ω_{ce} は、

$$\omega_{ce} / 2\pi = 2.8 \times 10^{10} B(T) \text{ Hz} \quad \dots\dots 1)$$

で与えられる。 ω_{ce} の整数倍の周波数をもつ電磁波をプラズマ中に入射してやると、電磁波のエネルギーは共鳴的に電子に移行してゆき加熱が起きる。これが電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) の原理である。多くの場合 ω_{ce} ないしは $2\omega_{ce}$ で加熱を行う。⁴⁾⁵⁾

トカマク装置の場合、プラズマ中の磁場はトロイダル磁場が支配的でありその強度はプラズマ中で

$$B = B_0 R_0 / R \quad \dots\dots\dots 2)$$

に従って変化する。(図-1) ここで B_0 はプラズマ中心でのトロイダル磁場強度、 R_0 はトーラスの回転中心軸からプラズマ中心までの距離である。1) 2) 式から、図-1中に模式的に示した様に、入射電磁波の周

表1 主なトカマク型装置の諸元

		主半径 (cm)	小半径 (cm)	トロイダル磁場 (プラズマ中心) (T)
中型 トカマク	D-III (米)	150	45	2.6
	ASDEX (独)	164	40	2.8
	JET-2M (日)	131	35×53	1.5
	T-10 (ソ連)	150	36	4.5
大型 トカマク	TFTR (米)	250	85	5.2
	JET (欧)	280	130×200	3.5
	JET-60 (日)	300	100	4.5
	T-15 (ソ連)	240	70	10.0
MTX計画	Alcator-C	16	64	10
次期 装置	CIT (米)	175	55	10
	FER (日)	450	160	5
	ITER (国際協力)	580	220	5

* 日本原子力研究所核融合研究部主任研究員
〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

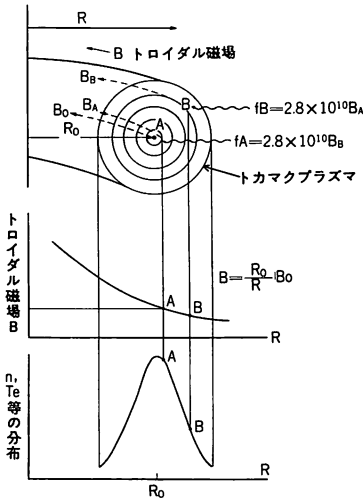


図-1 ECRHの原理。周波数の異なる f_A , f_B のミリ波はプラズマ中の異なった場所に吸収される。

波数を変えれば、プラズマ中の共鳴点を変える事が出来る。これがECRHはプラズマの局所的電子加熱が出来ると言う意味である。

最近トカマクでのECRH研究の重要性に対する認識が増して来た理由には次の二つがある。その第一の点としては、Asdex (独)⁶⁾, D-III (米)⁷⁾, JFT-2 M

(日)⁸⁾等の中型トカマク装置での研究により、プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには電子温度分布の制御が大変重要であるという事がわかってきた事である。

第二の点としては、TFTR (米), JET (政), JT-60 (日)等のいわゆる大型トカマク装置では、プラズマに投入するエネルギーと、プラズマから出てくるエネルギーがバランスする、いわゆる臨界に近い状態が達成されており(図-2)、この結果、トカマク型核融合研究では、次のステップ、すなわち、核融合反応によって出てくる3 MeV以上のヘリウム粒子によってプラズマ自身が加熱され、この結果核融合反応が持続する自己点火状態を作り出すための次世代装置の研究が盛んになって来ている事である。

プラズ加熱の場合、入射エネルギーが最初にプラズマ中のイオンに入る場合と、電子に入る場合をそれぞれイオン加熱系、電子加熱系と呼ぶ事になると、現在のトカマクでの主加熱法である中性粒子加熱(NBH)、低域混成波加熱(LHRH)、イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRH)は皆イオン加熱系となっている。⁴⁾⁵⁾ところが、自己点火状態での高速(3.52 MeV)のヘリウムによるプラズマの加熱は電子加熱系となる。

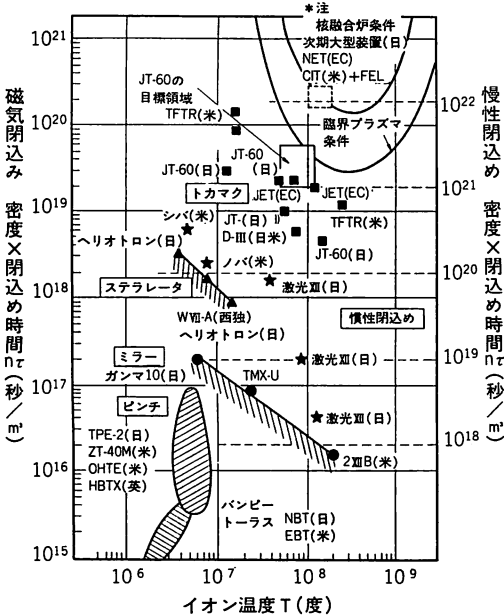


図-2 トカマクについては1989年, その他は1986年の数値である。

Heビームによる自己点火プラズマの加熱

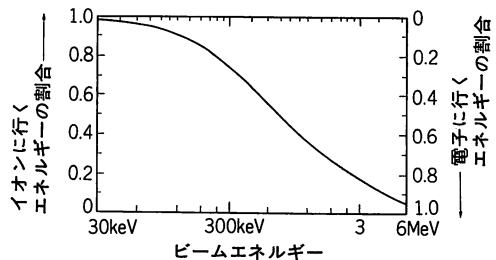


図3 HeビームによるTe~20keVのプラズマの加熱。3 MeV程度であるとエネルギーのほとんどは電子に入る。

プラズマにヘリウム粒子を入射した場合、そのエネルギーがどのような割合でイオンと電子に行くかを計算⁴⁾⁵⁾してみたのが図-3である。この場合電子温度は10~20keV程度としている。3 MeV以上のエネルギーでは、エネルギーのほとんどはまず電子に行き、通常のNBHのエネルギーである100keV程度ではエネルギーはまずイオンに行く。ことがわかる。自己点火プラズマの生成のシナリオを考えてみると、自己点火状態へもっていくまではNBH等イオン加熱系でプラズマを加熱し、いったん自己点火状態にもっていった後は、プラズマの加熱のメカニズムは3.52 MeVのヘリウム

表2 各国におけるジャイロトン管の開発状況

	周波数(GHz)	出力(MW)	パルス幅	効率(%)	現 状	
米 国	MIT	120-240	0.60	short pulse	step-tuning achieved, TE15,2,2	
	VARIAN	140	0.40	60 msec		
		110	1.00			
NRL	95-130	0.15	13 μsec	11	achieved, QO	
ソ 連 ヨッフエ研究所	83	1.00	short pulse	50	prototype, achieved prototype, achieved prototype, achieved for T-10 achieved	
		1.50		36		
	180	0.50	50 msec	35		
	83	0.50	0.5 sec	35		
E C	ABB社	100	0.09	10 msec	12	achieved
	カールスルーエ研究所	140	0.20	0.5ms		prototype, achieved
	Valvo社	140	0.20			ind. 1 prototype
日 本	東芝	120	0.18	10 msec	23	achieved, TE03
		120	0.5	1 msec		achieved, TE12,2,1
	三菱電機	120	0.15	10 msec	22	achieved, TE03
		120	0.18	0.29 msec	23.4	achieved, step-cavity
		120	0.20	100 msec	31	under const.

による電子加熱系へと変る事になる。実は我々は、自己点火状態に近い、10keV以上のプラズマで、この電子加熱系の状態をまだ深く研究してはならず、次世代表装置の建設までには、少なくとも現在の大型トカマク装置で高温での電子加熱系の研究を充分行なわなければならないと考えられる。

表1で示した様に、大型トカマク装置のトロイダル磁場は3.5~4.5T程度であり、対応する周波数は100~280GHz (ω_{ce} , $2\omega_{ce}$ 加熱を考えている)となる。表2に現時点での100GHz以上の帯域の各国でのジャイロトン管の開発状況をまとめてみた。トカマクの加熱実験では、最低プラズマのジュール加熱パワー(大型トカマクで数MW)程度で、しかも、閉じ込め時間(大型トカマクで数100ms)と同じか、その数倍の持続時間をもつ加熱源が必要であるが、表2から見ても、現状では大型トカマク装置でのECRH研究は、発振管からの制約により、すぐには着手出来ない現状である。

3. 大出力ミリ波自由電子レーザ (FEL)

自由電子レーザとは、相対論的エネルギー領域の電子ビームが周期的に変化する磁場(ウィグラーと呼ばれる)の中を通る時、ウィグラー磁場及びその中に存在する電磁波と共鳴的な相互作用をする結果、強力なコヒーレントな電磁波を放射する物をいう。¹⁾²⁾この様な系が強い制動輻射光を発生し、波長可変の光源になる事は1950年代のはじめの頃から知られていたが、⁹⁾1976年、米国スタンフォード大学において、¹⁰⁾ある条件下では、発振増巾を起こす事が実験的に見出されて以来、この系の研究が盛んになってきた。特に、

1986年に、米国ローレンス・リバモア国立研究所(L.L.N.L)で、¹¹⁾35GHzにおいて、ピークパワー1GWの大出力ミリ波発振に成功して以来、このFELを核融合のECRH研究に用いようという事が真剣に考えられるようになった。

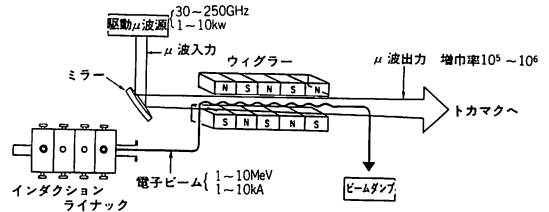


図-4 FELの模式図、ミリ濃帯では共振器を用いない場合が多い。

図-4にFELの模式図を示すが、電子ビームの進行方向の相対論的因子を γ 、ウィグラーの周期を l 、電磁波の波長を λ とする時、近似的に

$$\lambda = \frac{l}{2\gamma^2} \dots\dots\dots 3)$$

という式が成立つ時、電子ビームはウィグラー中の電磁波と共鳴的に相互作用をして発振が起きる。¹⁾²⁾FELの特徴としては、①増幅媒質が電子ビームそのものであるため、ガラスレーザ等の場合のようにパワーによる損傷等の問題がなく、発振パワーに原理的な限界はない。②電子ビームのエネルギーを変える事により、発振波長を容易に変える事が出来る。(3式参照)等の点が挙げられる。これらの特徴は、ECRHソースとして非常に魅力のある点となっている。

先ほど述べたL.L.N.Lの実験では、¹¹⁾同研究所のE.T.A.(Experimental Test Accelerator)と呼ばれ

る。誘導型線型加速器 (Induction Linac) からの、ビームエネルギー 6 MeV, 電流値 3 ~ 6 kA, パルス巾 50ns の電子ビームを、磁場 5 kG, 周期約 10cm, 全長 3 m のウィングラを通し、35GHz で約数 kW の励振用ミリ波を入力し、これが 1 GW に増幅された事を確認した。入射ミリ波の増幅率 ~ 10^6 , 電子ビームのエネルギー変換効率約 35% であった。

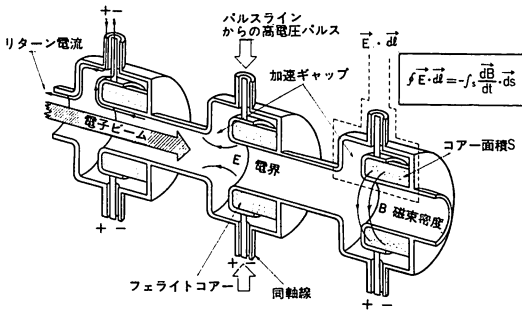


図-5 誘導型線形加速器の加速電場は、電磁誘導の法則によって生じる。

図-5 に誘導型線形加速器の動作原理を示す。これは一種のトランスであり、フェライト等のトロイダルコアの 1 次側に高電圧、大電流のパルスを入力してやる事により、2 次側に同程度の電圧を発生させこれを加速電場として用いる。実際の電圧は図中に加速ギャップと書かれている部分に生じる。2 次側電流は電子ビームである。通常 1 つのコアで 250kV ほどを発生させ、これを多数直列に並べて、高エネルギーを得る。パルス巾はフェライト等のコア材の磁氣的飽和特性できまり E.T.A では 50ns 程度である。パルスは 1 次側のパルス発生回路を工夫する事により繰り返し発生する事が出来、実際 E.T.A では現在約 100ms の間、5 kHz の割合でパルスが発生する事ができる。この誘導型線型加速器は、比較的低エネルギーで、むしろ大電流、大パワーの電子ビームをとり出すのに適しており、高繰り返しが原理的に可能である事もあり、現在のところ、ECRH のソースとしての大出力ミリ波 FEL には最も適した加速器と考えられている。

理論的検討等¹²⁾によれば ETA クラスの誘導型線型加速器を用いた場合、100GHz ~ 300GHz の領域でも $10^5 \sim 10^6$ 程度の増巾率が予想され、励振用のミリ波源として数 kW 程度の入力により、ピークパワー 1 ~ 10 GW の発振出力が得られる事が期待される。パルス巾を 50ns ~ 100ns として、繰り返しを 5 kHz ~ 10 kHz にしてやる事が出来れば、平均 MW 級の出力が得られる

事になる。ETA では、先にも述べた様に、約 100ms 程度の間、5 kHz の割合のパルス繰り返しを実現しているが、小、中型装置用 ECRH ソースとしてはこの値で十分であるが、大型装置用 ECRH ソースとしては 1 秒程度の継続時間がはしく、この辺りが今後重要な開発項目となっている。

高繰り返しの誘導型線形加速器を用いた FEL のシステムでは 1 ~ 10 kW 程度の比較的低出力の発振管を励振用に用いる事により、平均 MW 級の出力のミリ波が得られるという事を述べたが、これは少なくとも、300GHz 程度までであれば、現在の技術での実現性の高い値である。つまり、核融合研究にとって、ここ当分は不可能であろうと考えられて来た 100 ~ 300GHz 帯で、MW 級のミリ波源を、比較早く手に入れる事が出来そうであるという事が、ミリ波大出力 FEL が注目されている点である。

4. MTX 計画とその物理的課題

MTX 計画では、3 章で述べた E.T.A. を用いた FEL により、140GHz, 250GHz の二つの周波数において、ピークパワー GW 級のミリ波発振を行い、これを Alcator-C というトカマク装置に入射して実験が行なわれる。

表 3 MTX 計画のスケジュール

項目	Phase I	Phase II	Phase III
ビーム：(月/年)	(10/88)	(12/89)	(1/91)
エネルギー (MeV)	6	7.5	10
電流 (kA)	2	2	3
パルス幅 (ns)	20	35	50
パルス周期	—	5kHz	5kHz
繰返し数	1	50	50 ~ 2500
FEL：(月/年)	(4/89)	(4/90)	(3/91)
周波数 (GHz)	140	140	140
ピーク電力 (GW)	2.4	3.8	11
rf エネルギー (kJ)	0.05	6.6	26 ~ 1287
(1 ショット当り)			

表 3 に MTX 計画のスケジュールを示す。実験は 3 期に分かれ、第 1 期は 140GHz, 1 パルス、トカマクの B = 4.5T, の条件で ω_{ce} 入射実験を、第 2 期は 140GHz, 5 kHz * 10ms 間、第 3 期はトカマクの B を 4.5 ~ 9 T として、140GHz, 250GHz, 5 kHz * 500ms 間の入射を行い ω_{ce} , 2 ω_{ce} 加熱の実験を行う。ETA では現在 100ms 程度までのパルス継続時間が達成されているが、MTX 計画と並行して増力が行われ、実験の第 3 期ではパルス継続時間を 500ms までもっていく。

この実験に使うトカマク装置である Alcator-C は、もともとは、米国マサチューセッツ工科大学にあった

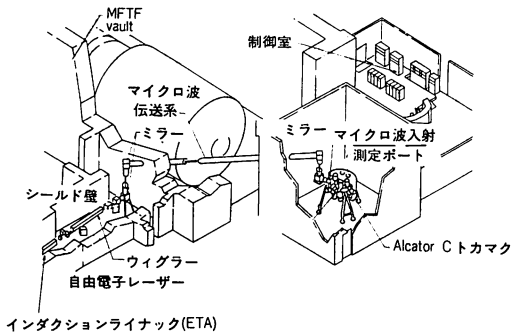


図-6 MTXの実験系

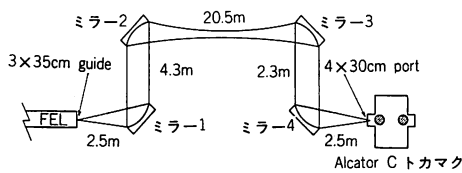


図-7 MTXのミリ波伝送系

トカマクで、大半径0.64m、小半径0.16m、最大トロイダル磁場10T、最大プラズマ電流550kA、最大プラズマ密度 $\sim 10^{15}/\text{cm}^3$ という中型トカマク装置並みの性能を有する装置で(表1参照)、このMTX計画のために、いったん解体されてL.L.N.Lにはこぼれ、ETAの近くの実験室に組み立てられたものである。実験系の概要を図-6に示す。

FELからのミリ波は、図-7に模式的に示した様に、4枚の鏡を使って、トカマクまで約30m以上の距離を伝送され、最終的にトカマクプラズマの表面では約30 cm^2 のスポットに集光される。鏡には非球面補正がほどこされ、結像の収差をできるだけ小さくする工夫がされており、プラズマ直近におかれた約5cm×6cmのスリットを通してミリ波ビームのエネルギーの95%以上がプラズマ中に入射される。入射パルスのパワーを10GWとすると、プラズマ表面でのパワー密度は50MW/ cm^2 、プラズマ中の電界強度は500kV/cm程度となる。もしCW型の平均出力MW級のソースを使ったとした場合の電界強度は数kV/cm程度となる事を考えると、FELを加熱源として用いる場合、非常に高い振動電界がプラズマ中にかかる事になるが、この様な高電界に対するプラズマの挙動については、我々にとっては未知の領域であり、この様な条件下での加熱の素過程を研究し、又、プラズマとしてどのような状態の時に加熱が最も効率良く行われるかという点を実験的に明らかにしていく事が、まさにMTX計画の最も大きな物理的課題となっている。この点は非常に大事な点

であるので、以下に多少詳しくFEL加熱のメカニズムを考えてみることにする。

図-8にAlcatraz-Cの平均的な運転パラメータである、 $T_e = 1\text{keV}$ 、 $n_e = 10^{14}/\text{cm}^3$ の場合の、典型的なプラズマ諸定数を示す。プラズマ中の電子は磁力線のまわりにジャイロ運動をしながら磁力線に沿って、トロイダル方向に、1周期約300nsで周回している。入射領域の径は5~6cmであり電子の入射領域通過時間は約8ns程度である。

$T_e = 1\text{keV}$, $n_e = 10^{14}\text{cm}^{-3}$	
FELパルス繰返し時間	$T_{\text{FEL}} \sim 200\mu\text{s}$
電子衝突時間	$\tau_{\text{col}} \sim 10\mu\text{s}$
電子トラス周回時間	$\tau_{\text{turn}} \sim 300\text{ns}$
FELのパルス幅	$\tau_{\text{FEL}} \sim 50\text{ns}$
電子共鳴域通過時間	$\Delta t_{\text{tr}} \sim 10\text{ns}$

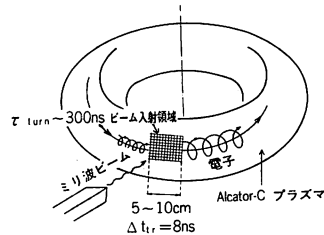


図-8 MTXのFEL加熱時のプラズマの諸定数を計算したもので、Alcatraz-Cは $T_e = 1\text{keV}$ 、 $n_e = 10^{14}/\text{cm}^3$ としている。

入射領域に入った電子は、入射されているミリ波の位相と自己のジャイロ運動の位相により加速または減速をうけ入射領域を出て行くが、実際のプラズマ粒子間には相互の衝突があり、入射領域を出てトラスを周回するうちに、変化をうけた粒子のエネルギーは熱化される。この過程はミリ波入射中何度もくり返され、平均的にはミリ波のエネルギーはプラズマ中の電子へと移行する。

数kV/cm程度の振動電界のかかる、CW型のジャイロトロン等を使ったECRHの場合、電子が一回の入射領域通過によって受けるエネルギー変化は電子の熱エネルギーに比べてはるかに小さく、又入射領域滞在中、電子は連続的に加速または減速をうける。

FELによる加熱の場合、1回の入射パルス中は50ns程度と短い、それでも電子の入射領域通過時間(～8ns)よりは長い時間ミリ波は入射されている。電界強度は500V/cm程度とCW型の加熱の場合より2桁ぐらい高い。この時、電子は入射領域を通過する短い時間の間でも非常に強く加速され、通常のCW型の加熱の時には見られない効果、すなわち相対論的効果により、一程度以上加速されると質量が増大し、サイ

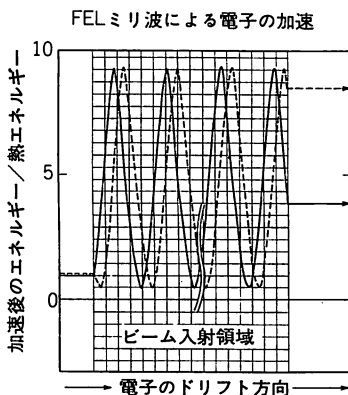
クロトロン共鳴の条件から外れて来て減速位相に転ずるという現象がおきる。(1)式で言えば係数の 2.8×10^6 という数値が変ってくるという風に考えていただきたい)ある程度以上減速されると、又共鳴状態にもどり加速をうける。電子がミリ波の入射領域にいる間に何回も加速と減速とがくり返される。このプロセスでのエネルギーの振れ幅を ΔW 、加速と減速の繰り返し周期を Δt とすることこれからは次の式で表わされる。¹⁹⁾

$$\Delta W = Te \frac{\pi me C^2 e E v_{\parallel} k_{\perp} \rho e}{\sqrt{2} Te^2 \Omega e} \quad \text{‰} \quad \dots\dots 4)$$

$$\Delta t = \frac{2 \pi me C^2}{\Delta W \Omega e} \quad \dots\dots 5)$$

ここで k_{\perp} は入射ミリ波の波数、 Ωe は電子の静止質量に対するサイクロトロン周波数、 $\rho e = v_e / \Omega e$ は電子の熱速度に対するラーマ半径、 me は電子の静止質量、 C は光速、 e は電子の電荷、 E はミリ波の電界、 v_{\parallel} は電子の磁力線方向の速度、 Te は電子温度である。Alcator-Cの場合、入射パワー $\sim 10\text{GW}$ として、 $\Delta W \sim 7\text{keV}$ 、 $\Delta t \sim 0.3\text{ns}$ となり、電子は入射領域を通る間に、数10回の加速、減速を受ける。この様子を図-9に示す。加速位相で入った電子も減速位相で入った電子も、一回の入射領域通過の間に、平均的には熱エネルギーよりはるかに高いエネルギーを得て、入射領域から出ていく。5kHzのパルス繰り返し入射では、次のパルスが来るまでに約200 μs の間電子はトラス方向に何回も周回し、その間に電子の得たエネルギーは熱化する。

このエネルギー吸収のメカニズムに付随して、パラメトリック不安定性の誘起等プラズマへの悪影響も



電子は、入射領域に入った時の位相のちがいによって、それぞれ異なったエネルギーを得て入射領域を出て行く。

図-9 大出力ミリ波($\sim 10\text{GW}$)による電子の加速減速の様子。

想定されるが、どんな条件下でそれらを抑えられるか等は、今後の実験で明らかにされていくであろう。

現在、MTX実験は、Alcator-Cが300kA、5Tの運転に入っており、FELは140GHzの発振実験を完了し、このミリ波をトカマク容器へ伝送する実験を終えた段階で、この秋から本格的な加熱実験が始められる。原研では Te 測定、FELミリ波の特性診断、中性子計測、プラズマ中の電界測定等を担当する事になっており、いくつかの計測器は稼働を開始した。これらの結果については機会をあらためて報告したい。

5. おわりに

MTX計画は、核融合とFELという、従来別々に、しかも急激に技術開発が進んでいる分野が最新の成果をもちよって、新たな技術開発を行っているという意味で興味深い。両分野とも研究的な発展が著しく、来年には、本稿で述べた事が新しい事実によって塗り変えられるかも知れなく、又ある意味でその方が望ましい状況であるとも言える。その意味では本稿では述べなかった、CW型FEL、ペニオトロン等。³⁾他の高効率の発振系の開発動向にも注意をむけておく事が非常に大切である事を付言して本稿を終りたい。

謝辞：本稿をまとめるに当って、L.L.N.LのK.Thomassen, B.Hooper 両博士、原研、前田彦祐、永島永、小田島和男、岸本泰明、星野克道、恒岡まさき、坂本慶司、前原直、氏達より貴重な助言をいただいた事を感謝し、又吉川允二、田中正俊、島本進氏達からはプロジェクト遂行のため多大な助力をいただいた事を記し謝辞としたい。

参考文献

- 1) 三間罔興、今崎一夫：応用物理57 (1988) 1468
- 2) T. C. Marshal : Free Electron Lasero, Macmillon Pub. Comp.(1985)
- 3) 横尾邦義、小野昭一：応用物理58 (1989) 1173
- 4) 宮本健郎：核融合のためのプラズマ物理、岩波書店 (1976)
- 5) 高村秀一：プラズマ加熱基礎論、名古屋大学出版会 (1986)
- 6) F. Wagver et al : Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408
- 7) J. Lohr et al : Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 2630
- 8) K. Hoshino et al : Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 770
- 9) H. Motz : J.appl. Phys. 24 (1953) 826
- 10) D. A. G. Deacon et al : Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 892
- 11) T. J. Orzechowsky et al : Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2172
- 12) R. A. Jorg : Conf. Dig. 13th Int. Conf. IRand MM Waves, Honolulu. 1988. p79
- 13) W. M. Nevins et al : Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 60