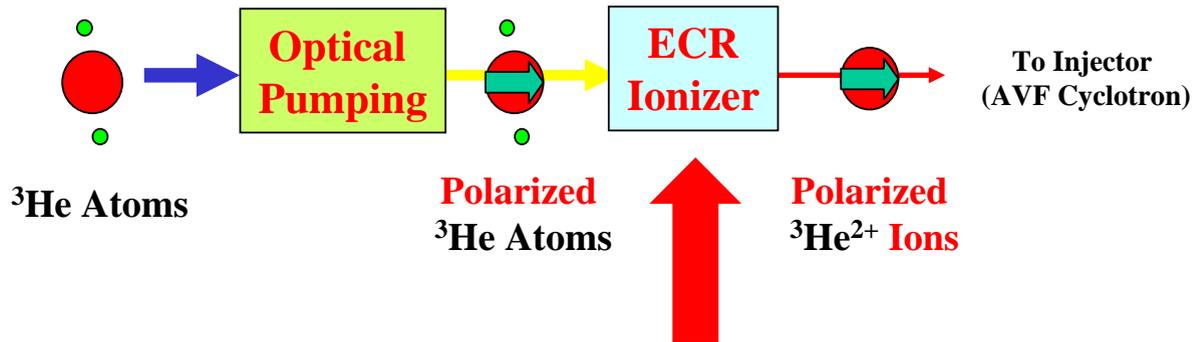


Present Status of feasibility check on Polarized ^3He Ion Source

Yasuhiro Sakemi : 2003-September-4



Depolarization in ECR plasma !
Solution to keep polarization
= High Frequency ECR Ionizer with 'adjustable mirror ratio'

軽い原子 (^3He) をイオン化するための ECR Ionizer Parameters

多価イオンの生成を目標とする ECR イオン源では、

- (1) 大きなイオン化ポテンシャルを持つ電子をはぎとるために、ECR プラズマ中の電子温度を高くし、かつ、
- (2) プラズマ中でのイオン / 電子の閉じ込め時間を長くすることで、逐次的に行われる電離を進行させる。

要点: 多価ではなく、2 個の電子を Strip すればよい。

今回は、 $^3\text{He}^{++}$ イオンの生成を目指しており、重イオン源が目指している多価イオン生成時の ECR イオン源の Operation Parameter を変更して最適化を行う。

- (1) イオン化ポテンシャルは小さいので (24.6 (eV) ($1s^2$)、54.4 (eV) ($1s^1$)、たとえば Ar^{16+} は 918 eV)、電子温度は必要以上に高すぎる必要はない。
電子温度はマイクロ波のパワーに依存するので、マイクロ波を調整することで、最適値のサーチ可能。
- (2) 2 個の電子をイオン化するのに十分な時間、ECR プラズマ中に閉じ込める必要があるが、多価イオン生成の場合のような長い閉じ込め時間は必要ない。
イオンの閉じ込め時間は、ECR 磁場のミラー比、イオン温度 (電子温度) に主に依存する。

ミラー比調節可能な磁場構造 : 閉じ込め時間、ビーム強度の最適化
マイクロ波のパワーを最適化 : 電子・イオン温度 / 閉じ込め時間の調整。

減偏極を抑える ECR イオン源のデザインと同じ方針。

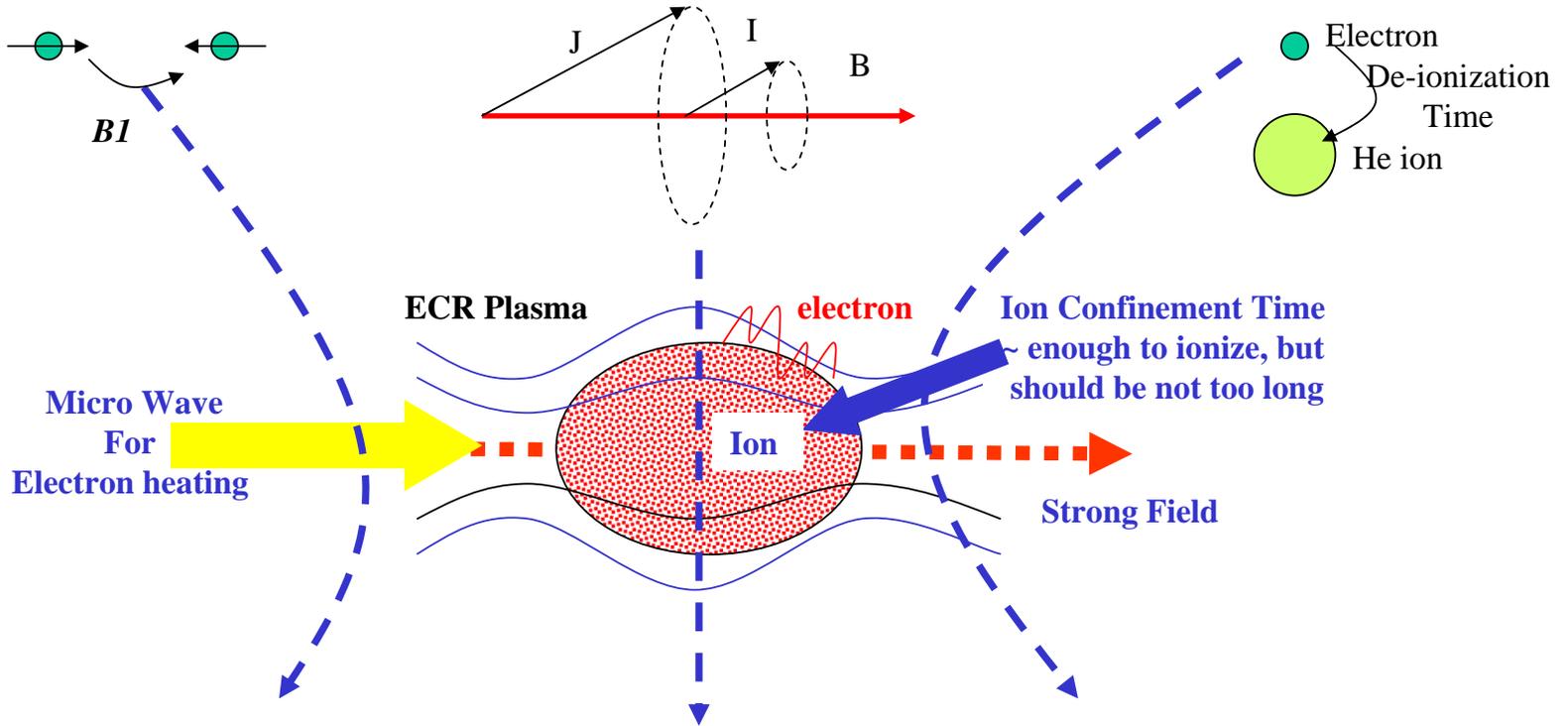
Summary of solution to each depolarization mechanism

Depolarization due to :

Electron Spin Resonance

Hyperfine Interaction in magnetic field

De-Ionization Process



Micro Wave Power

High frequency ECR Ionizer

Adjustable Mirror Ratio

Solutions to reduce depolarization in ECR plasma

Ion Confinement Time

Confinement Time measured by R.C.Pardo@ANL
with 10GHz ECR ion source by laser :
(ref: Rev.Sci.Inst. 67 (1996) 1602)

208Bi	10+	2.4 msec
	14+	5.2 msec
	18+	10 msec

Ion confinement time : depend on
mirror ratio :R, source length :l, ion temperature: Ti,
mass number :A ...:

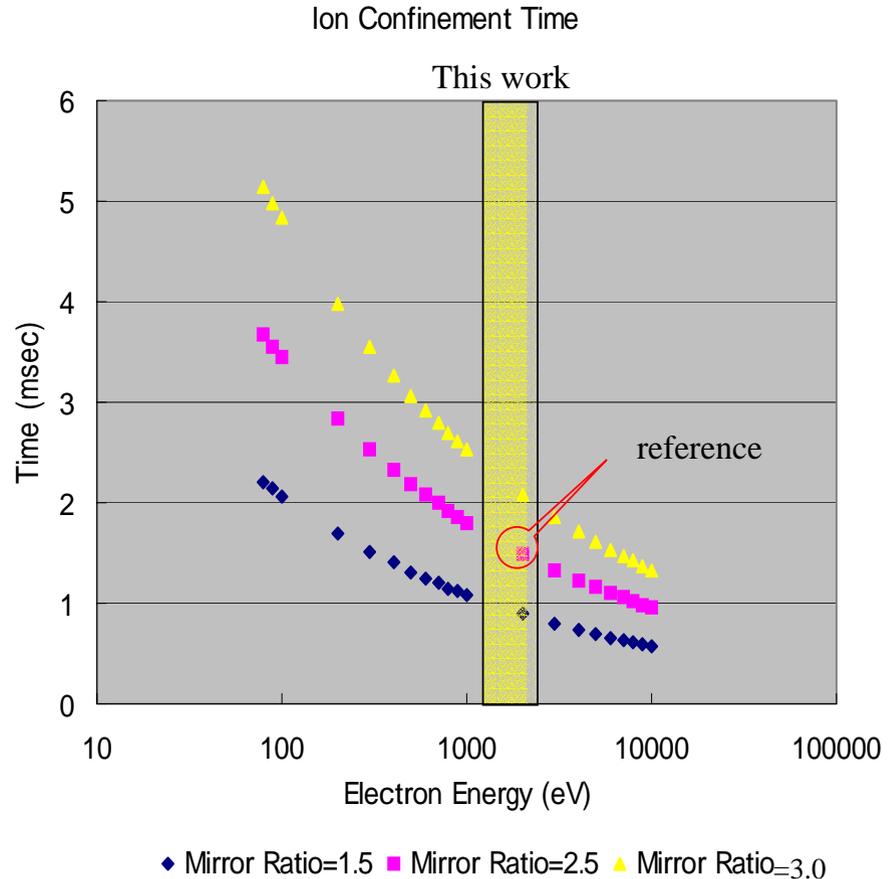
$$i = R \cdot l \cdot \sqrt{A \cdot M / (2T_i)} \exp(x)$$

where $x = ieU/T_i$

then, assuming that Ti, R, l, are same condition,
and taking into account A dependence ,
³He ion confinement time : 0.2 ~ 1.5 msec

イオン温度などを評価して (5 ~ 10 eV程度)、
イオンの閉じ込め時間を検討 : 右図
プラズマポテンシャルUの評価等、詳細は後のスライ
<detail>参照。今回は、Mirror Ratio 2.5の閉じ込め
時間が、ANLの測定値から評価した値 (上記のMax)
1.5 msecとなるようにUの値をパラメータとして決めて
評価した。ECRイオン源中の電子温度は 1~2keV程度
として、イオンの閉じ込め時間は1 ~ 2 msec 程度。

を考慮して、以下の評価では、イオン閉じ込め時間を
1.5 msec@Mirror Ratio 2.5 / 10GHz として計算。

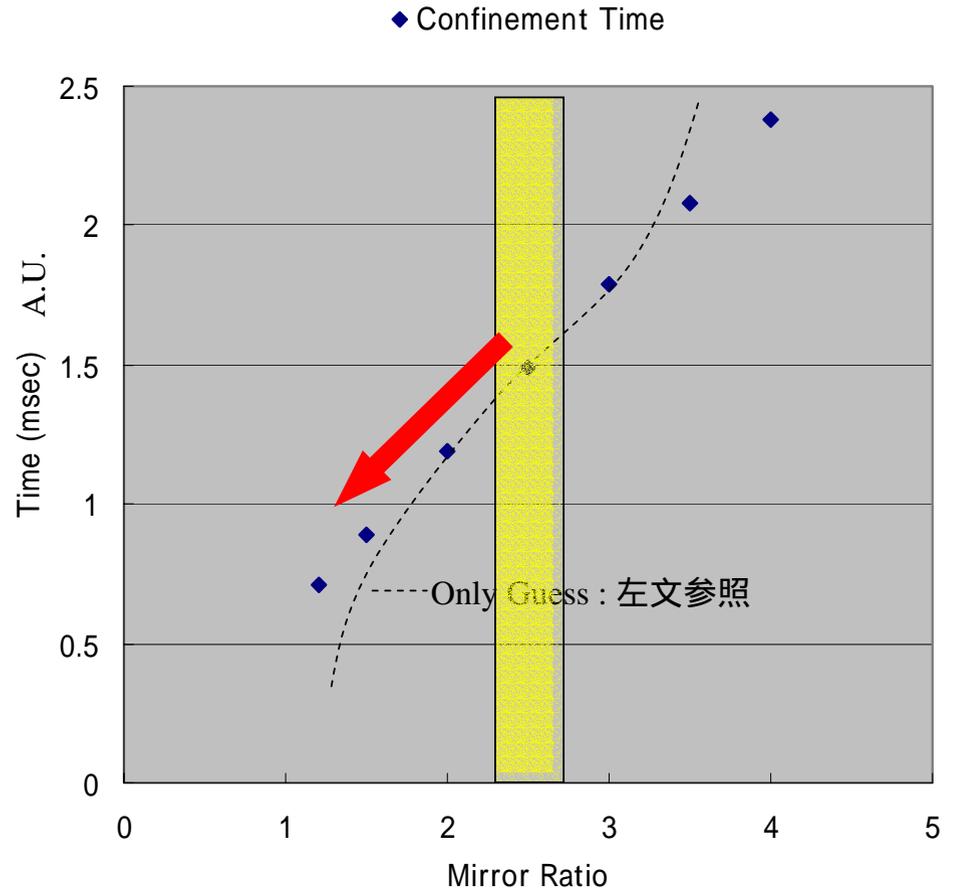
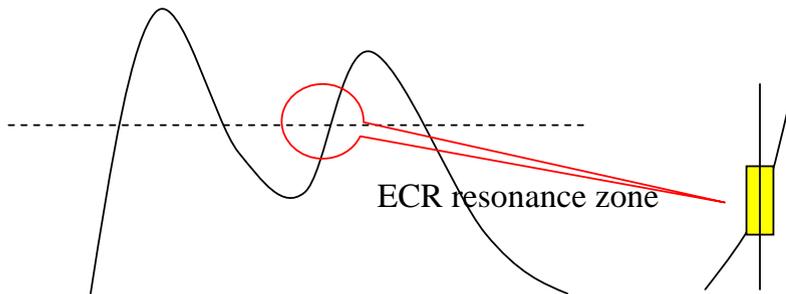


Ion Confinement Time dependence on Mirror Ratio

1. 前ページのイオン閉じ込め時間のミラー比依存性から、ミラー比を小さくすることでイオンの閉じ込め時間を短く(調整)することが可能と考えられるが、**実際のイオン源を用いた測定が必要である。**

2. ミラー比を変えることで、ECR共鳴領域でのミラー磁場の勾配が変化し、プラズマ加熱される領域の大きさが変化する。そこで電子加熱効率が変わるので、閉じ込め時間もその影響を受け、線形関係ではなくなると考えられる。(only guess ?)

ミラー比:小:磁場勾配:緩やか
 電子温度:高 閉じ込め:短
 ミラー比:大:磁場勾配:急
 電子温度:低 閉じ込め:長

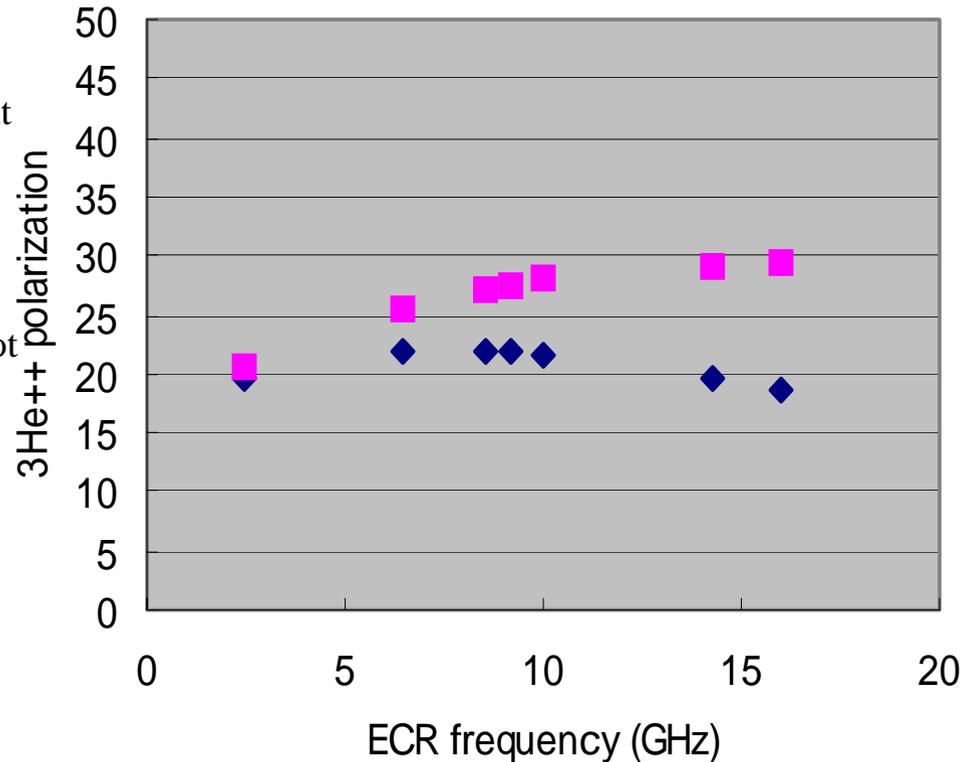


Conclusion : Obtained Polarization

1. Polarization ~ 30 % will be achieved with Polarized ^3He gas : 50 % input
2. Ion Confinement Time : 1.5 msec input
3. Depolarization due to ionization, de-ionization effects : included
4. Depolarization due to ESR effects ~ not included for the reason described later slide
5. Others ...

^3He Gas Polarization = 50 %

Calculation with Tanaka-Model



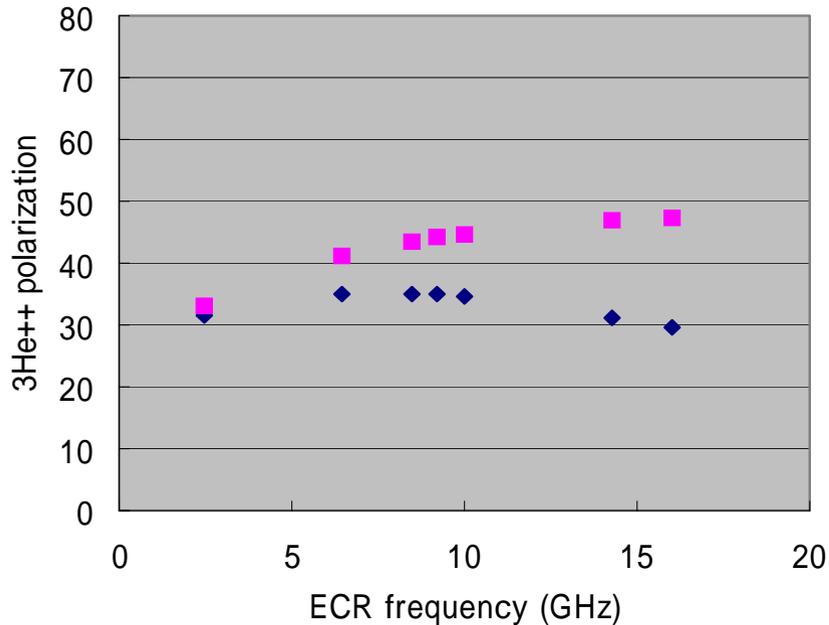
◆ neutral density = 7×10^{11} ■ neutral density = 5×10^{10}

Additional Information

If we apply nice Mainz ^3He polarizer,
 High polarized ^3He gas : 80 % is obtained !
 (Ion Confinement Time = 1.5 msec)

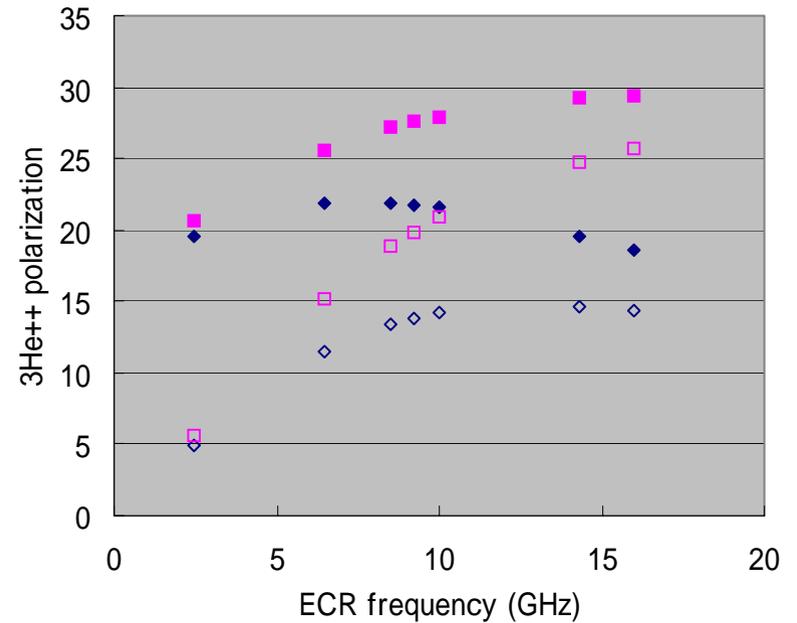
ESR effects ~ what should be checked:
 Can be neglected or should be included ?
 (Ion Confinement Time = 1.5 msec)

3He Gas Polarization 80 %



◆ neutral density = $7 \cdot E11$ ■ neutral density = $5 \cdot E10$

3He Gas Polarization 50 %



◆ W/O ESR + neutral density = $7 \cdot E11$ /cm³
 ■ W/O ESR + neutral density = $5 \cdot E10$ /cm³
 ◇ ESR + neutral density = $7 \cdot E11$
 □ ESR + neutral density = $5 \cdot E10$

Comparison with Prof.Tanaka-san's parameters

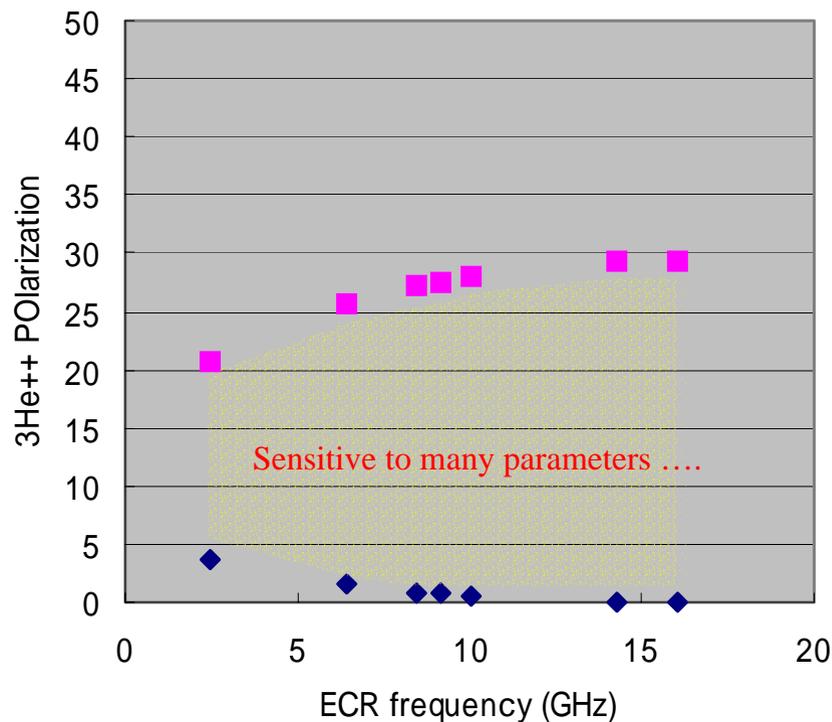
Parameter	Prof. Tanaka	This work	Comments
Confinement Time	10 msec @10GHz	1.5 msec @10GHz	
Neutral Density	7×10^{11}	5×10^{10}	
Excitation – de-excitation cycle time	4 msec	55 msec	Extracted from neutral density
ESR effect	Include	Neglect	後ろの考察参照

今回の評価では、田中さんの入力パラメータと比較して、
 短い閉じ込め時間:前ページの議論から
 中性原子密度を小さく:イオン源の他のReferenceで多く
 採用されている値を選択

パラメータを用いて評価したため、High frequencyでも、電子の再結合をおこす確率が小さくなり、脱イオン化による減偏極の効果が小さくなる。

偏極度は閉じ込め時間と残留ガス(中性原子)密度に敏感である。

Comparison of Obtained Polarization



◆ Prof.Tanaka ■ This estimation

What should be careful !

イオン化効率:

イオン化を効率よく行うためには、電子温度は比較的低いほうがよい。
イオン化反応率から、電子温度は300eV ~ 600eV程度。イオン化に要する時間が短くなる。
P.Sortais : Rev.Sci.Inst 67(1996)867 参照。(後のスライド detail参照)

減偏極の抑制:

減偏極を抑えるためには、イオンの閉じ込め時間が、イオン化に十分な時間であり、かつ、電子の再結合を避けるために可能な限り、短くする必要がある。

イオンの閉じ込め時間は、ミラー比とイオン温度(つまり電子温度)に依存しており、ミラー比を小さくする、あるいは、イオン温度をあげる(電子温度を低くして、電子・イオン弾性散乱反応確率をあげる)ことで、短くできる。

脱イオン化(電子との再結合)による減偏極は、残留ガスと ^3He イオンとの反応によるので、真空度をよくすることで、脱イオン化に要する時間が長くなる。

イオン化に十分な時間であり、かつ、脱イオン化に必要な時間から比較すると、非常に短い閉じ込め時間を実現できれば減偏極は抑制できる。

電子の閉じ込め:

^3He のイオン化効率、および、減偏極の抑制、という観点からみると、ミラー比を小さくし、電子温度を比較的lowにすることが考えられる。

しかし、ミラー比を小さくすることは、電子の閉じ込め時間も短くし、また、電子温度を下げることは、電子・電子の弾性散乱反応確率を高くし、電子の閉じ込め時間を短くすることになる。

つまり、イオン化効率と減偏極を追及しすぎると、電子の閉じ込めがイオンの閉じ込め時間より短くなって、そもそもイオン生成ができない状況が生じる。

まとめ:

以上のことから、ミラー比は小さくしてイオンの閉じ込め時間を調節するが、電子温度は、イオン化をさせるために十分なだけ電子が閉じ込められるエネルギーを持つ必要がある。(1 keV ~ 2 keV 程度?)
残留ガスの密度(ECRチェンバー内の真空度)が減偏極に非常に影響する。

Conclusion at Present

1. ECRイオン源を、強磁場、かつ、ミラー比を調節可能にすることで、減偏極を抑えることは可能。
ミラー比を調節(小さく)することで、イオン化するのに十分な時間だけ閉じ込める。
この方式で継続して検討する価値あり。
2. 厳密には、各 Charge Stateの非線形のバランス方程式を解く必要がある。
詳細は以下のスライド参照(Detail)。.
行うか？ 我々はプラズマ物理を目標としているのではないが。。。
3. プラズマの不安定性等、複雑なプラズマの状態に依存するので、モデル・数値計算のみで評価するのは困難、Feasibility Testのための測定が必要。
イオンの閉じ込め時間、ビーム強度のミラー比、マイクロ波パワーの依存性を測定。
理研のECRイオン源を用いた測定を検討中：Hatanaka, Tamii, Sakemi
偏極³He原子をECRイオン源の中にいれて、減偏極測定の検討。：Sakemi
4. 偏極³Heガス(原子)生成方法の検討。 9月
LKB@Paris、Keopsys@Lannion、Mainz、IC-automation@Mainz ~ 9月
Feasibility Testのための装置を準備。
5. Physicsの検討。 ~ 重要！
6. LOI作成 ~ 11月10日のP-PACを目指す。

Ionization Cross Section

1. Electron-Impact Ionization Cross section :
 (Lotz formulae : ref Z.Phys. 216 (1968) 241)

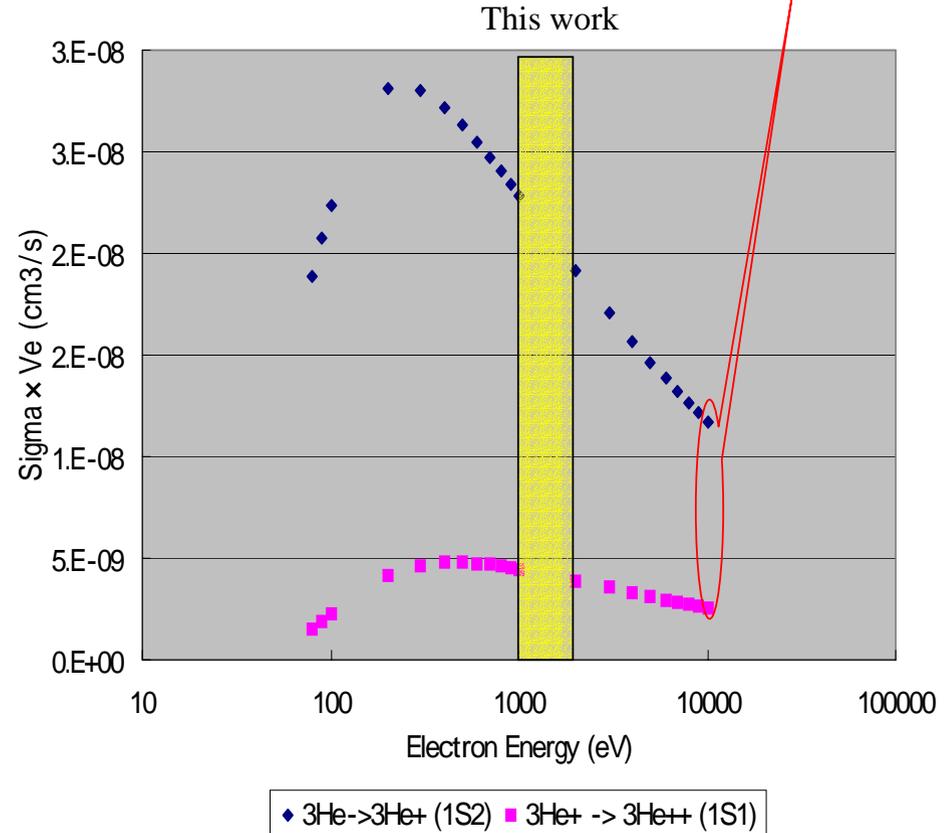
$$= a_i q_i \ln(E/P_i)/(EP_i) \{1 - b_i \exp[-c_i(E/P_i - 1)]\}$$

2. Ionization Energy :
 He (1S²) : 24.6 eV : He → He⁺
 He (1S¹) : 54.4 eV : He⁺ → He⁺⁺

3. Electron energy for Ionization
 電子温度が高すぎると、イオン化反応率が小さくなる。
 P.Sotais (ref: Rev.Sci.Inst. 67 (867) 1996) では、Arの場合の各charge stateをすべてとりこんだ Rate equationを評価しているが、電子温度が100 eVのMaxwell分布をとるとしたときに、Ar⁸⁺(イオン化エネルギー 148 eV) のcharge state distribution が confinement time (10 usec ~ 1 msec) を長くするとともにsaturateしている。後のスライド参照。
 一方、電子温度を低くすると、イオン化を起こすための電子の閉じ込め時間が短くなる。後のスライド参照。
 以上をふまえて、以下の評価で電子エネルギーは1~2 keV とする。

4. Others

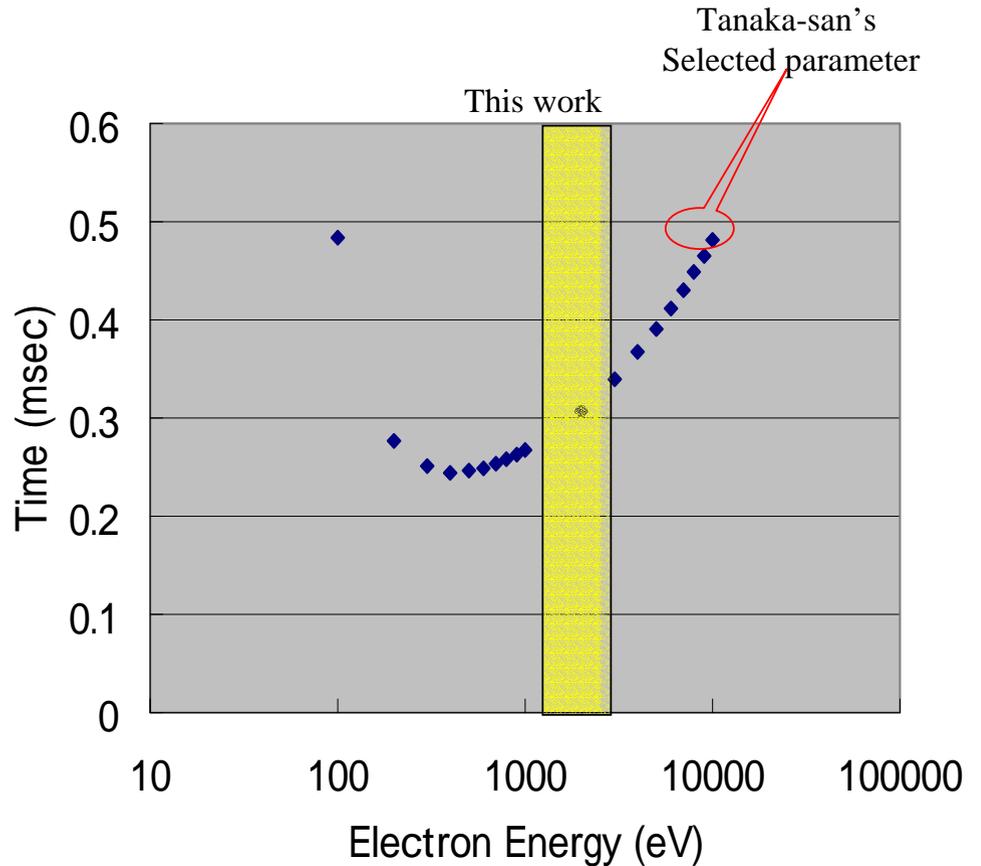
Tanaka-san's
 イオン化反応率(断面積×電子速度) Selected parameter



Ionization Time

1. Ionization Time =

$$1 / (n_e \times V_e \times \sigma_{\text{He}^- \rightarrow \text{He}^+}) + 1 / (n_e \times V_e \times \sigma_{\text{He}^{++} \rightarrow \text{He}^{++}})$$
 where : n_e : electron density $\sim 10^{12} / \text{cm}^3$
2. イオン化に要する時間は0.3 msec 程度。
3. イオン化に十分な時間、イオンを閉じ込めて脱イオン化が起こる確率が高ならないよう、脱イオン化に必要な時間よりはできるだけ短くイオンをプラズマ中から引き出せればよい。
4. 脱イオン化時間は、プラズマ中の中性原子(残留ガス)密度に依存する。残留ガス密度(ECRチェンバー内の真空度)を小さくできれば、脱イオン化時間は長くなり、イオンの閉じ込め時間内に電子の再結合による減偏極の影響は少なくなる。
5. イオンの閉じ込めは、ミラー磁場(ミラー比)、イオン温度(電子温度)に依存する。



◆ Ionization Time (msec)

De-Ionization Cross Section

1. De-ionization (charge exchange) Cross Section
Ref: Phys.Lett A59(1976)19, 62(1977)391

Single exchange :

$$i^{ex} = 1.43 \cdot 10^{-12} (i^{1.17} / I_0^{2.76})$$

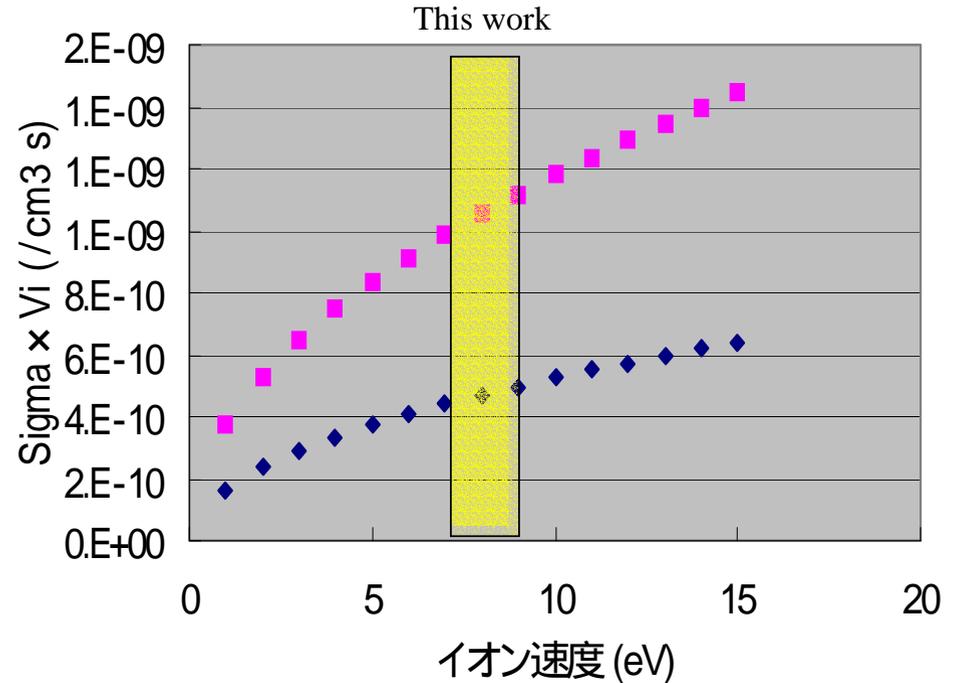
Double exchange :

$$i^{2ex} = 1.08 \cdot 10^{-12} (i^{0.71} / I_0^{2.80})$$

Where I_0 : ionization energy

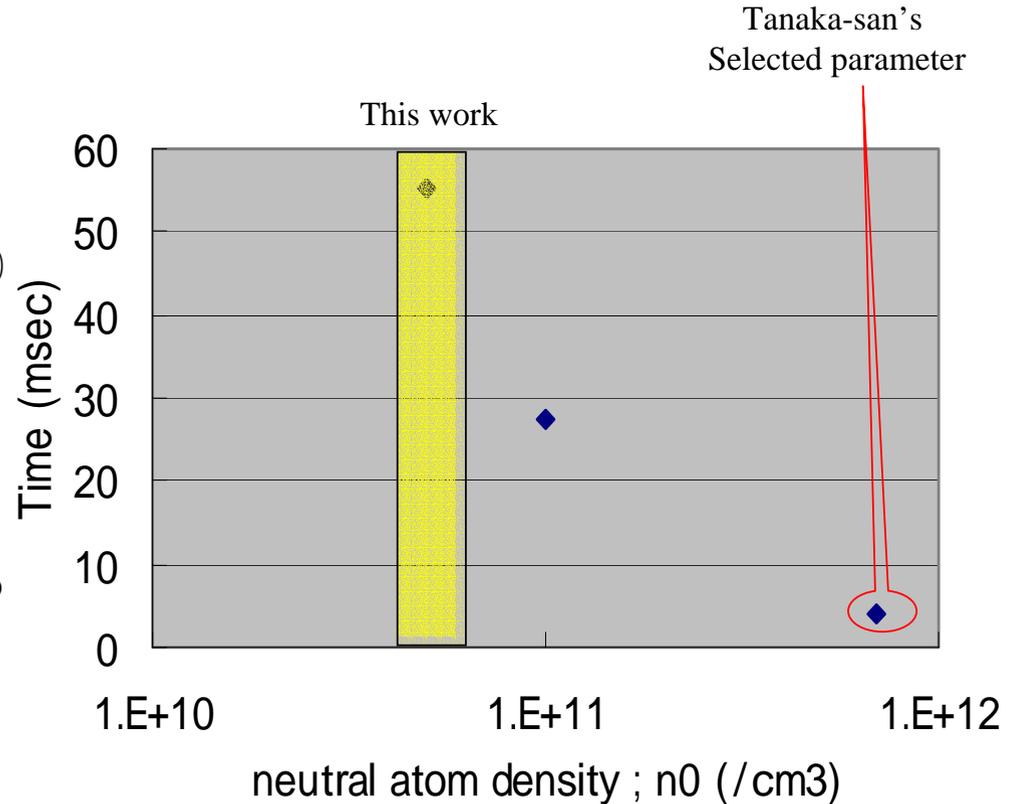
2. Ionization rateのほぼ一桁落ち。

De-ionization Rate (断面積×イオン速度)



De-ionization Time

1. De-Ionization Time =
$$\frac{1}{(n_0 \times V_i \times \sigma(\text{He}^{++} \rightarrow \text{He}^+))} + \frac{1}{(n_0 \times V_i \times \sigma(\text{He}^{+-} \rightarrow \text{He}))}$$
2. 脱イオン化時間は、残留ガス(中性原子)密度に敏感。ECRイオン源内の真空度はどの程度まで達成可能か？ 確認。
3. 以下の評価では、ECRイオン源のPublicationで多く用いられている中性原子密度を参考に、 $5 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ とした。
4. 脱イオン化の時間が長ければ、閉じ込め時間内に電子が再結合する頻度は少なく、脱イオン化による減偏極の影響は少なくなる。



◆ De-ionization Time (msec)

Input Parameters

以下で検討するイオン・電子の温度、閉じ込め時間などは、厳密には、各 charge state すべてを考慮した非線形のRate Equationを解く必要がある。(あとのスライド参照)

今回は、イオン・電子の温度、閉じ込め時間の変数を可能な限り現実的な(実験値、半経験式を含む)値を用いて評価する。また、電子の温度は、Maxwell分布をもつとして評価する必要があるが、以下の計算では簡単のため、 $E_e=2\text{keV}$ として評価する。現在、分布をとりいれた計算中。

Parameters		Unit	Value	Comments
Electron density	N_e	cm^{-3}	10^{12}	
Neutral atom density	N_0	cm^{-3}	5×10^{10}	
Electron temperature	T_e	eV	2000	Maxwell distribution (should be updated)
Others				

Ion (^3He) Confinement Time and Temperature

イオン・電子の弾性散乱によりエネルギーが高くなったイオンのうち、プラズマ電子から作られるポテンシャルエネルギーより大きい分布がECR中からでていく。この寄与がDominant。以下、この式を用いる。

$$i = R \cdot l \cdot \sqrt{A \cdot M / (2T_i)} \exp(x)$$

$$\text{where } x = ieU/T_i$$

イオン・イオン、イオン・中性原子との衝突による寄与、 に比べて寄与は小さい。

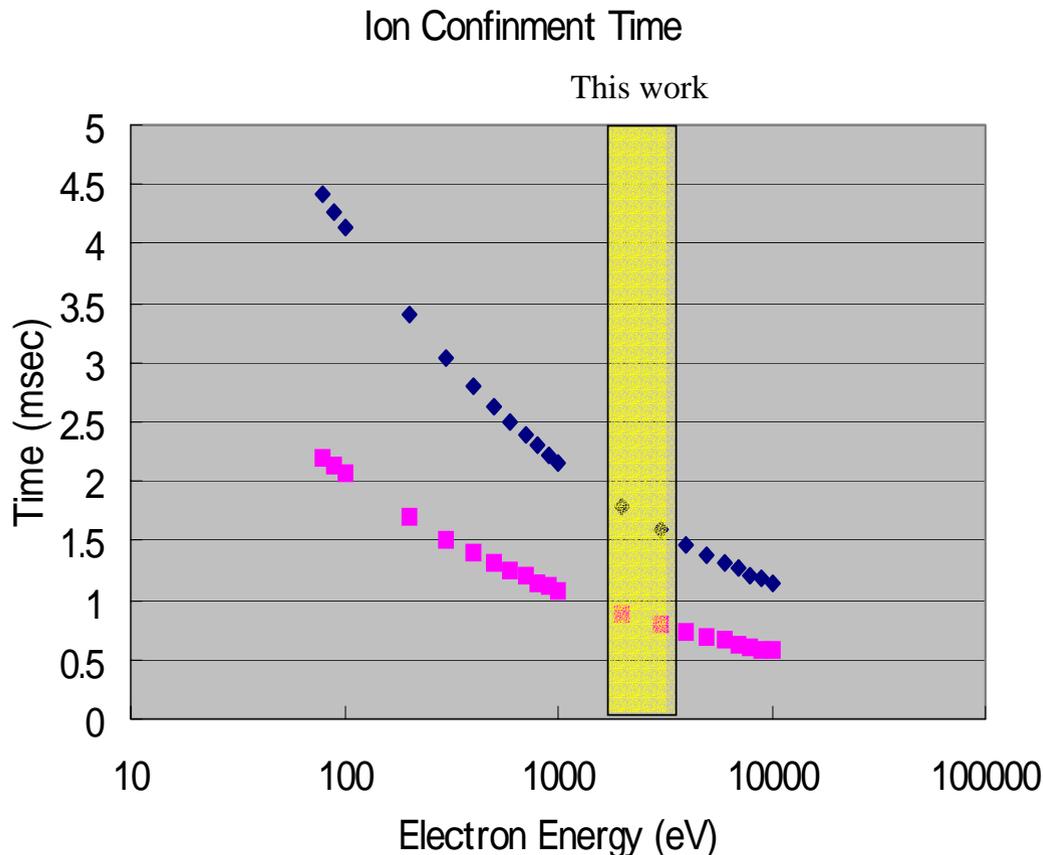
$$i = Gx^2 \exp(x) / ((1+x)(i_k + i_0))$$

$$\text{where } G = \sqrt{(R+1) \ln(2R+2) / 2R}$$

課題: プラズマポテンシャル: U は、プラズマ中のイオンと電子のカレントの条件:

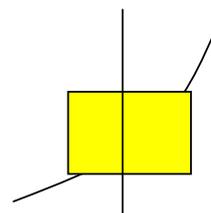
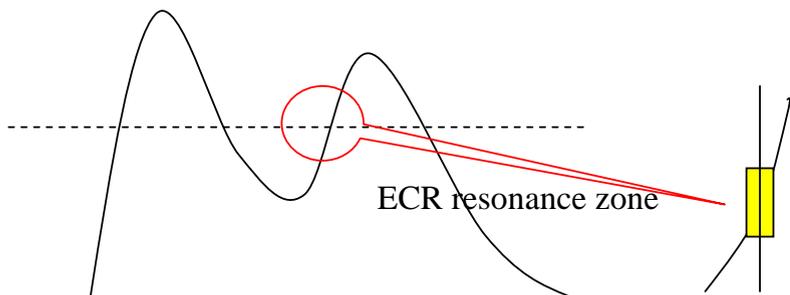
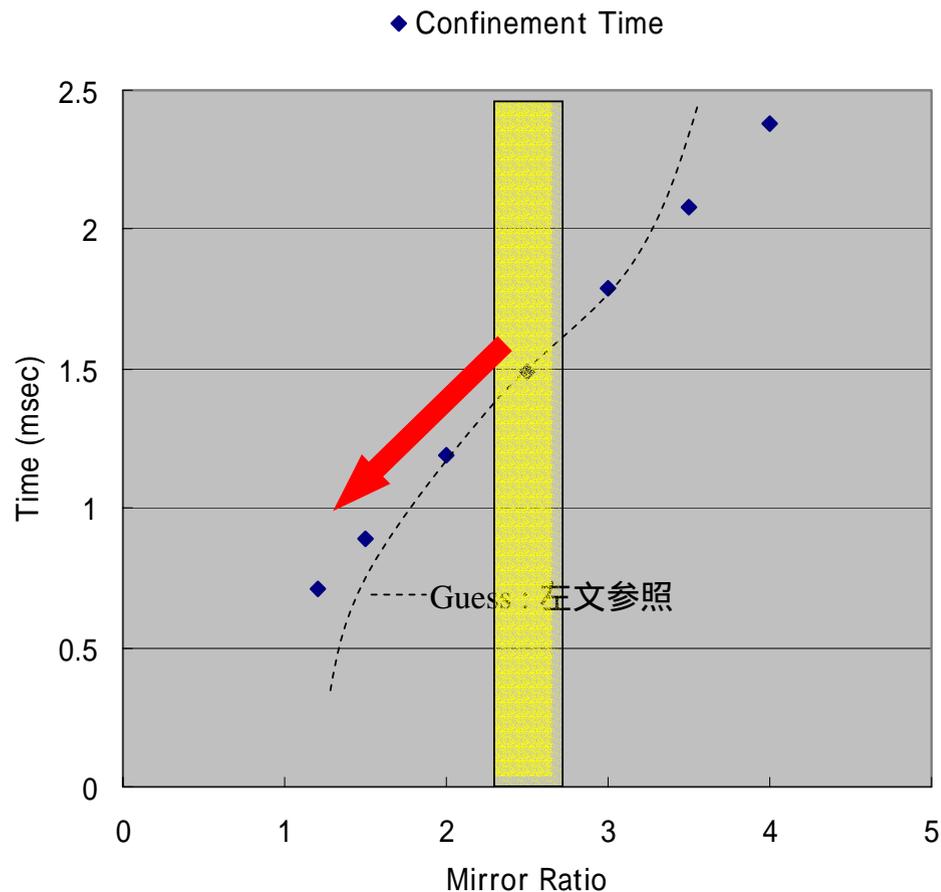
$$in_i / i = n_e / e$$

で評価できる。今回は、Mirror Ratio 2.5の時の閉じ込め時間が、ANLの実験値から評価した値: 1.5 msec になるように決めて評価した。具体的な評価方法、検討中。



Ion Confinement Time dependence on Mirror Ratio

1. 前ページのイオン閉じ込め時間のミラー比依存性から、ミラー比を小さくすることでイオンの閉じ込め時間を短く(調整)することが可能と考えられるが、**実際のイオン源を用いた測定が必要である。**
2. ミラー比を変えることで、ECR共鳴領域でのミラー磁場の勾配が変化し、プラズマ加熱される領域の大きさが変化する。そこで電子加熱効率が変わるので、閉じ込め時間もその影響を受け、線形関係ではなくなると考えられる。(only guess)
 - ミラー比:小:磁場勾配:緩やか
 - 電子温度:高 閉じ込め:短
 - ミラー比:大:磁場勾配:急
 - 電子温度:低 閉じ込め:長



Electron Confinement Time

$$\tau_e = 1.48 (\ln R + \sqrt{\ln R}) / \nu_{ee}$$

where $\nu_{ee} = \nu_{ee} + \nu_{ei} + \nu_{e0}$

$$\nu_{ee} = (4 \pi^2 r_e^2 m_e^2 c^4 n_e L e e) / (T_e^3 m_e)$$

...

イオン閉じ込め時間を短くするためにミラー比を小さくすると、電子の閉じ込め時間も上式にしたがって短くなる。

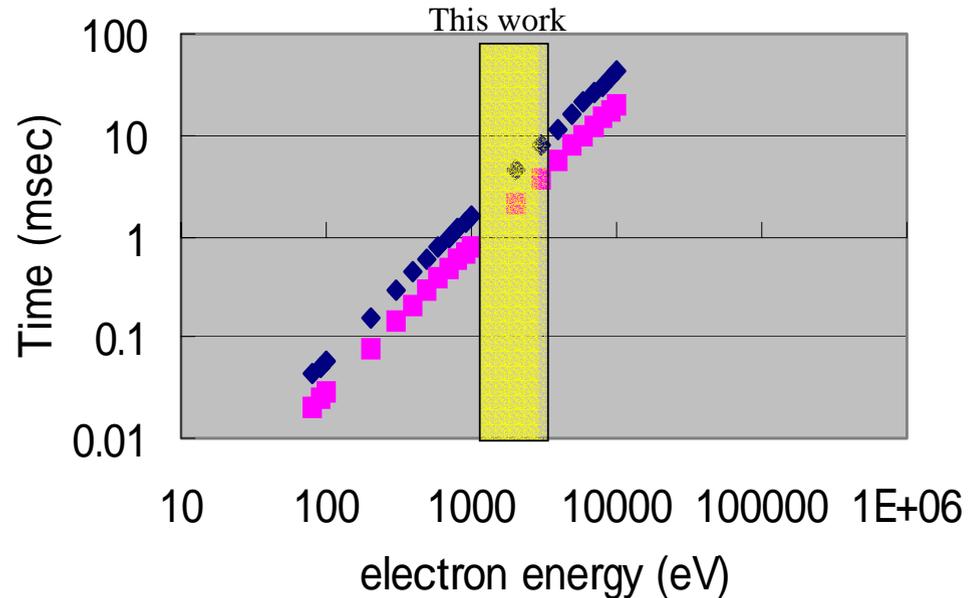
イオン化するのに要するに十分な時間は、電子はプラズマ中に閉じ込められる必要がある。

電子の閉じ込めから抜け出すのは、電子が電子・イオン・中性原子との弾性散乱によりその運動量ベクトルがECRイオン源のロスコーンにはいった場合。電子の閉じ込め時間は、電子・電子 (ν_{ee})、電子・イオン (ν_{ei})、電子・中性原子 (ν_{e0})の弾性散乱頻度の逆数となる。電子・電子の反応がDominant。

電子温度が低くなると、閉じ込め時間が短くなる。したがって、イオン化時間を短くする条件と、イオン化させるのに十分な電子の閉じ込め時間をとる条件の2つの条件を満たす必要がある。

そこで、この評価では、電子温度として、イオン化反応率を考慮した場合より高い2keV を使用した。

Electron Confinement Time

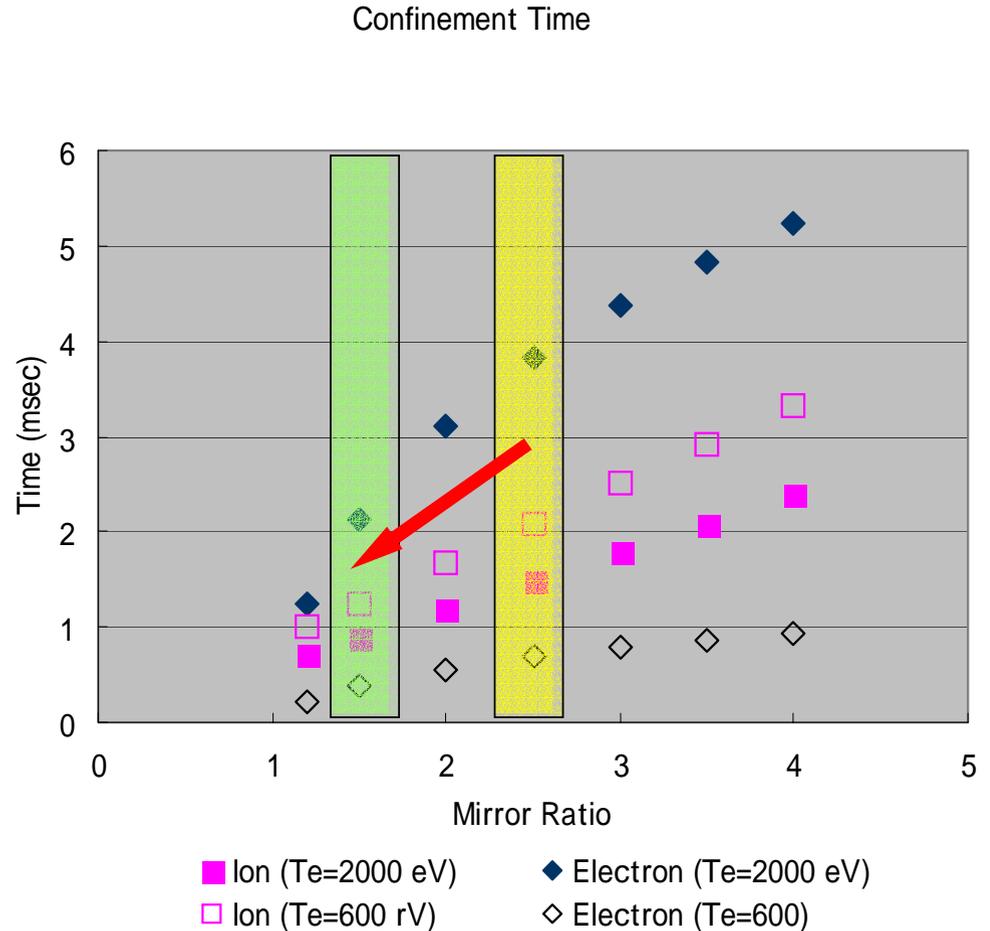


Comparison of Ion and Electron Confinement Time

電子温度に依存して、電子の閉じ込め時間が変化するが、電子温度が低すぎると、十分にイオン化される前に、電子がプラズマ中からにげていく可能性がある。

電子とイオンの閉じ込め時間の関係について、慎重に検討する必要あり。

マイクロ波のパワーと電子温度について調べる必要あり。



Charge State Density : n_i

厳密には以下の各charge state densityに対するRate Equationを解くことで、各パラメータを決定することが可能。評価方法、検討中。

Rate equation of each charge state density :

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} = & n_e n_{i-1} \langle i-1 \rightarrow i \rangle^{ioni} e > + n_0 n_{i+1} \langle i+1 \rightarrow i \rangle^{exc} i > \\ & - n_0 n_i \langle i \rightarrow i-1 \rangle^{exc} i > - n_e n_i \langle i \rightarrow i+1 \rangle^{ioni} e > \\ & - n_i / \tau_i \end{aligned}$$

under the condition : Charge neutrality of the plasma :

$$in_i = n_e$$

Input Parameters :

electron density : n_e : 電子分布に対するrate equation を解く事で求めることも可能。

electron temperature : $T_e \sim e$

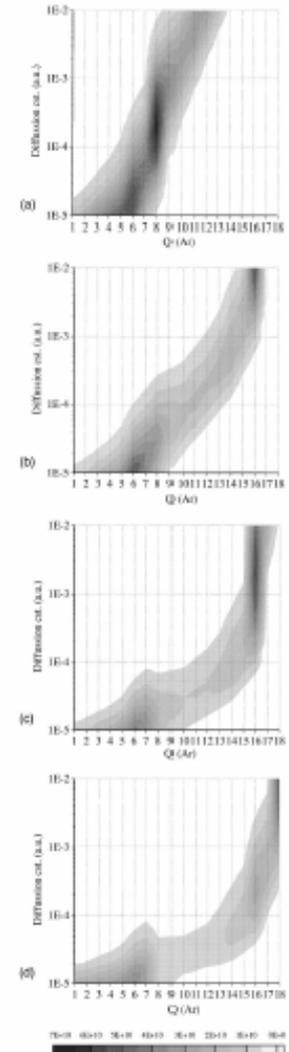
neutral density : n_0

Ion Confinement Time: τ_i : イオン温度に対するbalance equationから、イオン温度、および、電子によるプラズマポテンシャルを決定し、それらから、イオン閉じ込め時間(前ページ参照)を決定することも可能。

右図は、上記のRate Equationのうち、イオン閉じ込め時間をパラメータとして、10 usec ~ 10 msec までぶってArの各charge state distributionを求めた結果。

平均電子温度 100eV のときに、Ar8+(イオン化エネルギー148eV)の生成が saturate している。

平均電子温度 1keVになると、どのcharge stateの生成もPoorになる。これは、low charge state では電子温度が高すぎ、high charge state では、閉じ込め時間が短かすぎるためと考えられる。



Extracted Beam Intensity

Beam Intensity :

$$J_i = i \cdot n_i \cdot v_i \quad i \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$$

Charge State Distribution : n_i を評価する必要があり、厳密には、前ページの非線形のRate Equationを解いて、 n_i を各 charge state ごとに求めて、上記の式で評価することになる。

ラフには、「イオン化に十分な閉じ込め時間がECRプラズマ内であれば」、閉じ込め時間が短くなるほど、イオンのビーム強度は増大すると考えられる。

ビーム強度の評価、検討中。

Spin Flip due to ESR effect

メールで連絡した内容が現状：
電子温度とマイクロ波のパワーの関係について現在調べ中、
まとめて、後日、送付。

What should be checked/done further

1. Non-linear Rate equation solve ?
2. Potential from electron plasma estimation
3. Micro wave power and electron temperature
4. ANL mirror ratio ?
5. Vacuum in ECR ion source