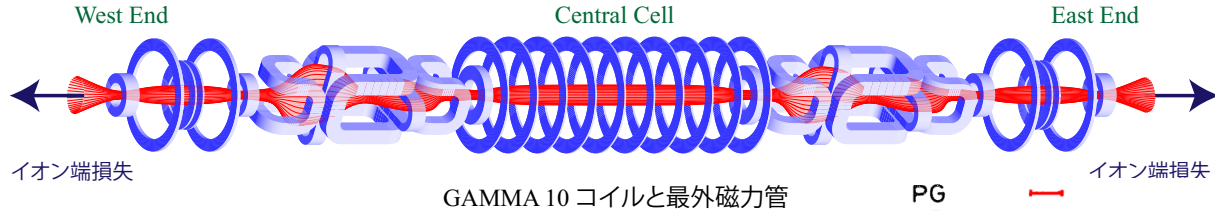


## GAMMA10 装置におけるダイバータ配位

片沼 伊佐夫

筑波大学、プラズマ研究センター

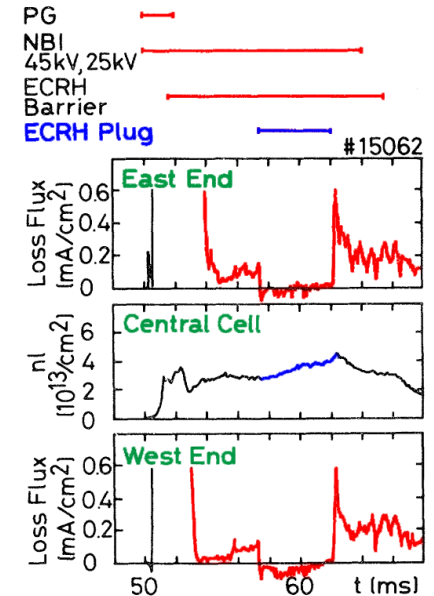


1980年代はタンデムミラー活性期で、イオンの端損失抑制に関する実験結果が TMX-U, GAMMA10 等で相次いで報告された。

FIG.2. Time variations of central-cell line density and end-loss fluxes measured near the end walls.

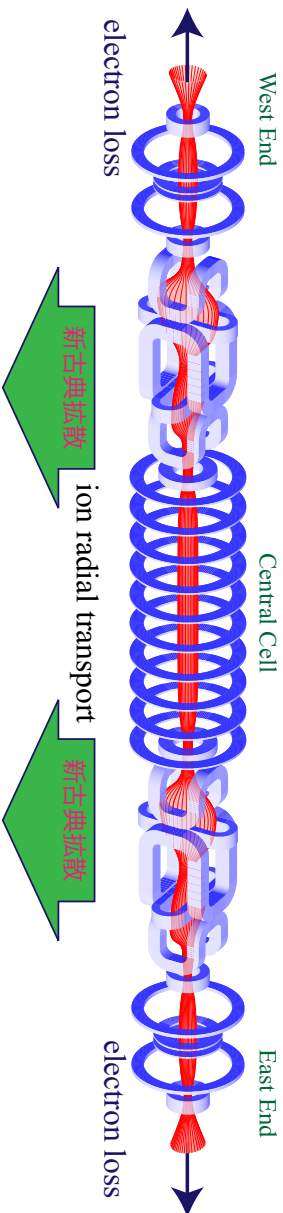
Inutake, et al., Phys. Rev. Lett. Vol.55, No.9 (1985) pp.939-942.

これ以降、タンデムミラーは径方向輸送制御の方向で実験が進んでいった。



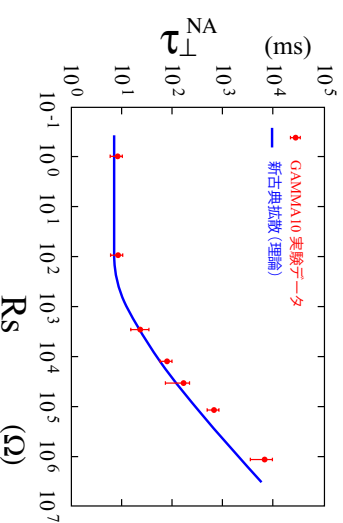


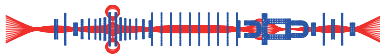
GAMMA10 でのイオンの径方向閉じ込め時間



GAMMA10 は軸方向に一様ではない為、異常輸送（両極性拡散）を実験的に計測するのは困難でまだ成功していない。  
 新古典拡散（非両極性拡散）は電子の端損失を計測すれば、それがイオンの径方向損失量（新古典輸送量）になる。

I.Katanuma, et.al., Nucl. Fusion, **27**, 2041(1987),  
 and see also in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, (Proceedings of the 11th International Conference, Kyoto, 1986), Vol.2, IAEA, Vienna (1987) pp.243-250.





## GAMMA10 のイオンの径方向輸送量の評価

GAMMA 10 実験では

$$n_i(r) = n_i(0) \left( 1 - \left( \frac{r}{20} \right)^2 \right), \quad T_i(r) = T_i(0) \left( 1 - \left( \frac{r}{20} \right)^2 \right)$$

ただし  $n_i(0) \simeq 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ,  $T_i(0) \simeq 1 \text{keV}^*$ . GAMMA 10 中央ミラー部の長さは  $10^3 \text{cm}$  なので、全粒子数  $N_i$  および全エネルギー量  $E_i$  はそれぞれ

$$N_i = 10^3 \text{cm} \int_0^{20 \text{cm}} n_i(r) 2\pi r dr = 2\pi \times 10^{17}$$

$$E_i = 10^3 \text{cm} \int_0^{20 \text{cm}} n_i(r) T_i(r) 2\pi r dr = \frac{4\pi}{3} \times 10^{17} \text{keV} = 6.7 \times 10^1 \text{Joule}$$

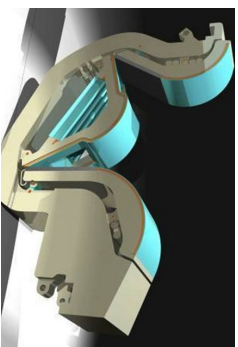
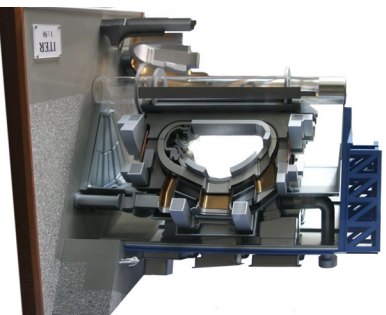
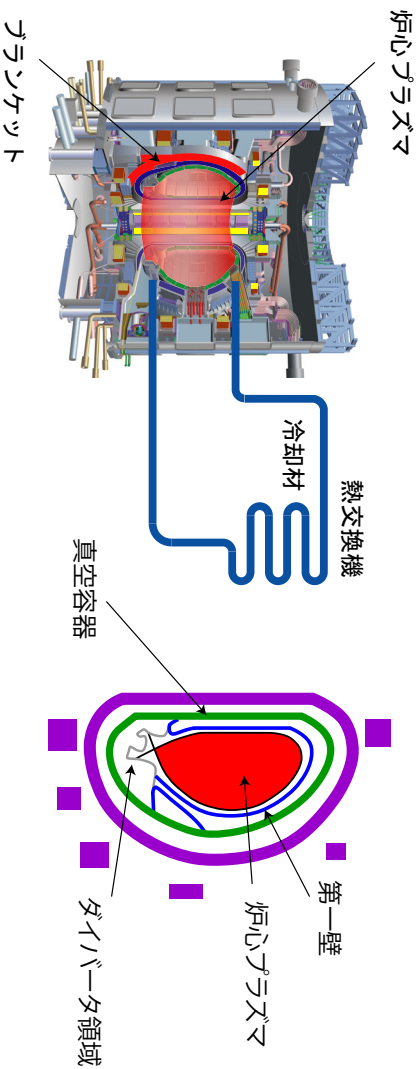
1keV の水素の熱速度は  $v_i \simeq 3.1 \times 10^7 \text{cm/sec}$ 、GAMMA 10 の軸方向のバウンス時間は  $\tau_b \simeq 2 \times 2 \times 10^3 \text{cm} / v_i \simeq 1.3 \times 10^{-1} \text{msec}$ 。バウンス時間が径方向輸送時間より充分短いので磁力線方向には熱的定常状態が実現していると考え事が出来る。径方向へ逃げるイオン粒子フラックス  $\Gamma_i^{ToT}$  とエネルギーフラックス  $\Gamma_E^{ToT}$  は

$$\Gamma_i^{ToT} = \frac{N_i}{\tau_p} = \frac{2\pi \times 10^{17}}{1.0 \times 10^{-2} \text{sec}} \simeq 6.3 \times 10^{19} / \text{sec} = 1.0 \times 10^1 \text{Ampere}$$

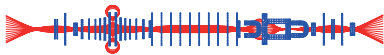
$$\Gamma_E^{ToT} = \frac{E_i}{\tau_E} = \frac{\frac{4\pi}{3} \times 10^{17} \text{keV}}{1.0 \times 10^{-2} \text{sec}} \simeq 4.2 \times 10^{19} \text{keV/sec} = 6.7 \times 10^3 \text{Joule /sec}$$

\*実際の温度は  $T_{i\perp} \neq T_{i\parallel}$  の非等方分布をしているが、簡単のために等方分布を仮定する。

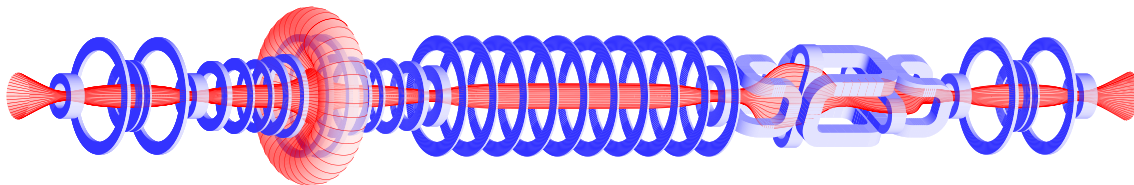
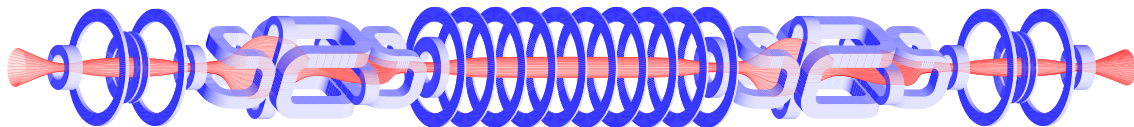
ITER divertor



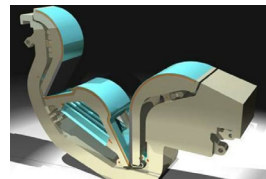
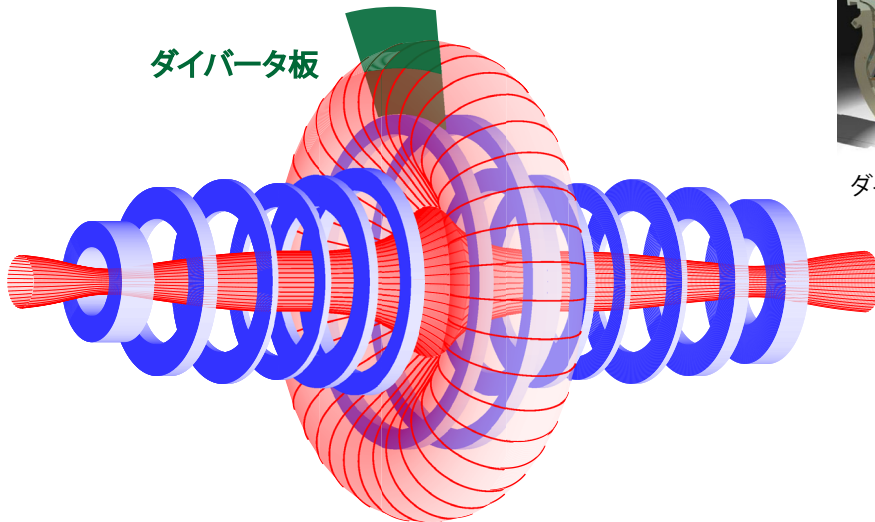
ダイバータ板の構造物



GAMMA10 アンカー・ダイバータ (A-divertor)



ダイバータ板



ダイバータ板の構造物



ダイバータ部へ設置されたダイバータ板への熱負荷

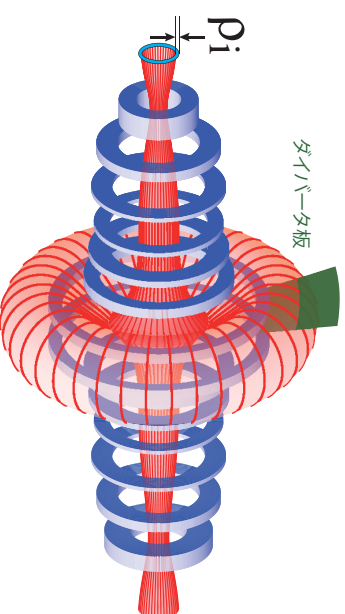
ダイバータ部に設置するダイバータ板の形状と大きさに関してはまだ未定であるが、例えば  $10\text{cm}^2$  の面積を持ったダイバータ板を設置したと仮定すると、ダイバータ板に流入するイオンの粒子束と熱粒子束の総量はイオン径方向輸送量に等しいので、単位面積当たりには粒子束  $= 6.3 \times 10^{18} \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 1.0 \times 10^4 \text{Ampere m}^{-2}$ ) および熱粒子束  $= 4.2 \times 10^{18} \text{keV sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 6.7 \times 10^6 \text{Joule sec}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) のイオンが流入すると評価される。

上記の事が上手くいく為には、イオンのバウンス時間 ( $\approx 1.3 \times 10^{-1} \text{msec}$ ) がイオン径方向輸送時間 ( $\approx 10 \text{msec}$ ) に比べて充分短い事と、径方向に損失したイオンが全てダイバータ板に吸収される必要がある。

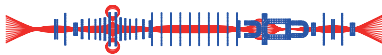
1keV の水素イオンの磁場強度 4kG 中でのラーモア半径は  $\rho_i \approx 0.81 \text{cm}$  なので GAMMA10 セントラルセル換算での単位面積あたりの粒子フラックス  $\Gamma_i$  とエネルギーフラックス  $F_E$  は、 $r = 20\text{cm}$  の周辺で厚み  $\rho_i$  の領域内に均等に分布して磁力線方向に損失すると仮定すると

$$\Gamma_i = \frac{\Gamma_i^{Tot}}{2\pi \times 20\text{cm} \times \rho_i (\text{cm})} \approx 6.2 \times 10^{17} \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$$

$$F_E = \frac{\Gamma_i^{Tot} E}{2\pi \times 20\text{cm} \times \rho_i (\text{cm})} \approx 4.1 \times 10^{17} \text{keV sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$$

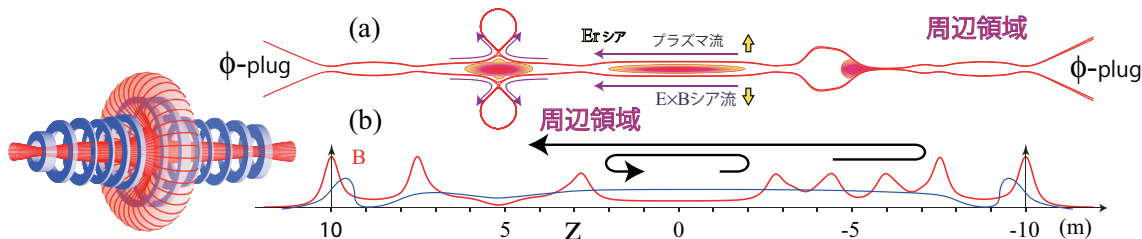


で評価される量のイオンがダイバータミラーセルのラーモアト部から x-point へ流入すると期待される。



## 周辺磁力管上からダイポール部へかけてのイオンの運動

ダイバータ・ミラー部を設置して x-point を導入したことで、プラズマは x-point を通じて積極的に径方向に輸送される



定常プラズマ流 (ICRFのみ入射)

パルスプラズマ流 (ICRF+ECRH入射)

● divertor 部周辺領域

環状系ダイバータ部のプラズマ流

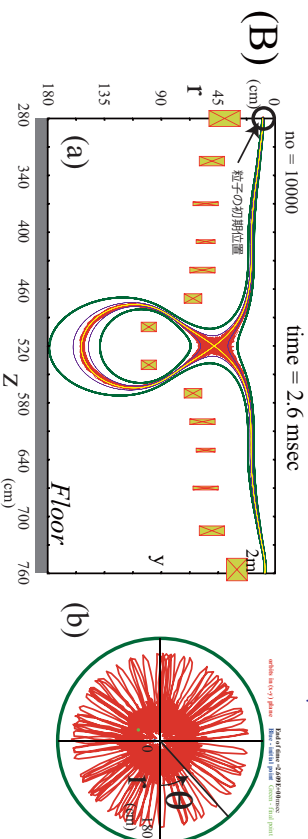
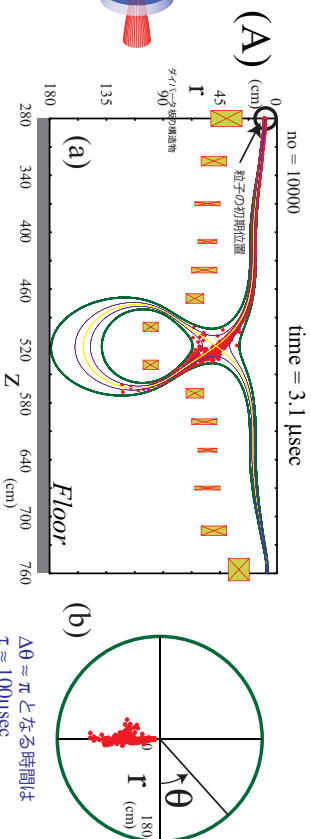
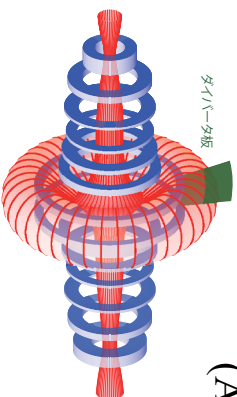
● central 部周辺領域

環状系周辺部の磁気シア流  $\leftrightarrow$   $E \times B$  シア流

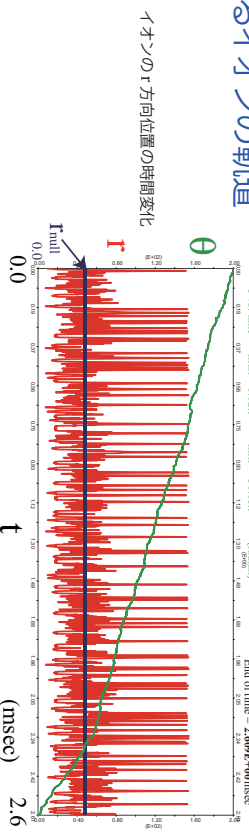
### 磁場ヌル点の役割

- 磁場ヌルに沿って非磁化電子が自由に動く事が出来て、電位に対して short circuit 効果をおよぼす
- Separatrix magnetic flux tube 上では等電位面で、静電揺動はこの separatrix 上で安定化される
- コア領域から径方向に輸送されてきたイオンは、separatrix 上で磁力線に沿って移動して磁場ヌルから dipole 領域へ逃げていく
- 磁場ヌルはプラズマを閉じ込めている磁力管に穴を開ける役割をする
- 磁場ヌル近傍ではイオンの磁気モーメント保存が破れて、ダイポール領域との間を自由に行き来できる

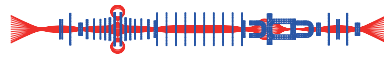
ダイバータ板にどのようにイオンが流れ込んでいくか



あるイオンの軌道







### ダイバータ板への熱負荷についてのまとめ

$T_i = 1\text{keV}$  のイオンに関しては、バウンス時間 ( $\approx 1.3 \times 10^{-1}\text{msec}$ )、イオン径方向輸送時間 ( $\approx 10\text{msec}$ )、径方向に損失したイオンがダイバータミラースロート部からダイポール部へ設置されたダイバータ板に吸収されるまでの時間 ( $\approx 1.2\text{msec}$  for ダイバータ板の方位角方向厚み  $\Delta\theta = 30^\circ$ )、なので

ダイポール部に設置するダイバータ板の形状と大きさに関してはまだ未定であるが、例えば  $10\text{cm}^2$  の面積を持ったダイバータ板を設置したと仮定すると、ダイバータ板に流入するイオンの粒子束と熱粒子束の総量はイオン径方向輸送量に等しいので、単位面積あたりには**粒子束**  $= 6.3 \times 10^{18}\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$  ( $\approx 1.0 \times 10^4\text{Ampere m}^{-2}$ ) および**熱粒子束**  $= 4.2 \times 10^{18}\text{keV sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$  ( $\approx 6.7 \times 10^6\text{Joule sec}^{-1}\text{m}^{-2}$ ) のイオンが流入すると評価される。

セパトリティクス (磁場ヌルを通る磁力線の集まり) 上のイオンは磁場ヌル点上での滞在時間が長く複雑な運動をした後にダイバータ弁へ吸収される。



$\Gamma_i \sim 1.3 \times 10^{19} / \text{cm}^2 \text{sec}$     $n_{i1} \sim 10^{11} / \text{cm}^3$     $T_i = 0.1 \sim 1.0 \text{ keV}$     $T_e = 0.01 \sim 1.0 \text{ keV}$   
 周辺からプラズマ流が供給される

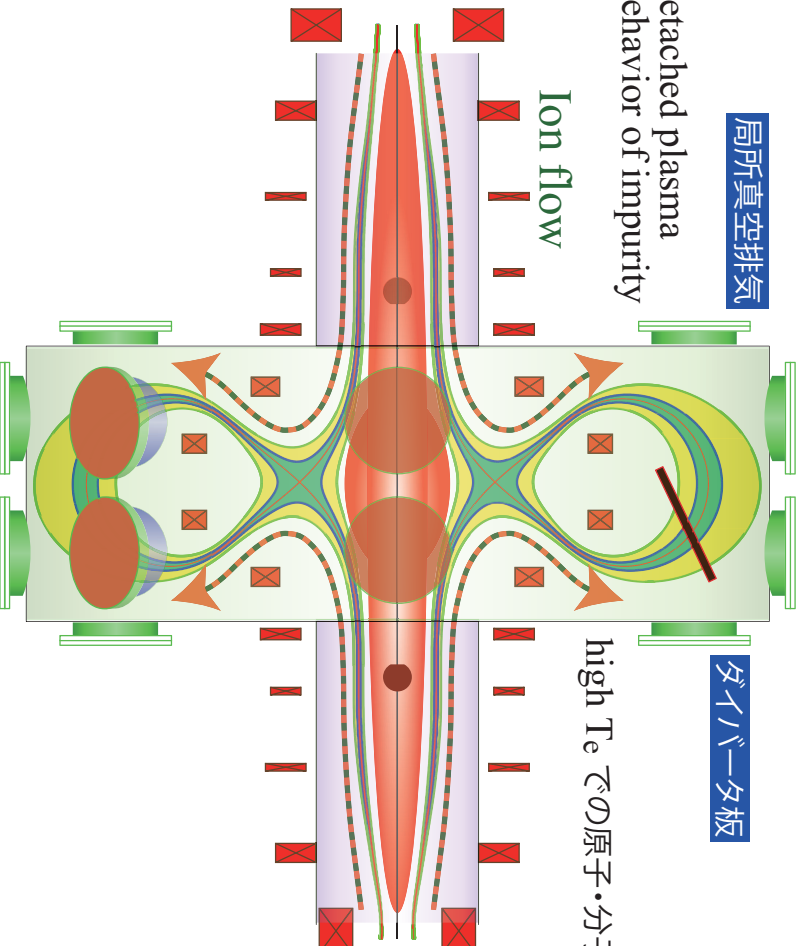
局所真空排気

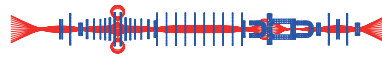
ダイバータ板

detached plasma  
behavior of impurity

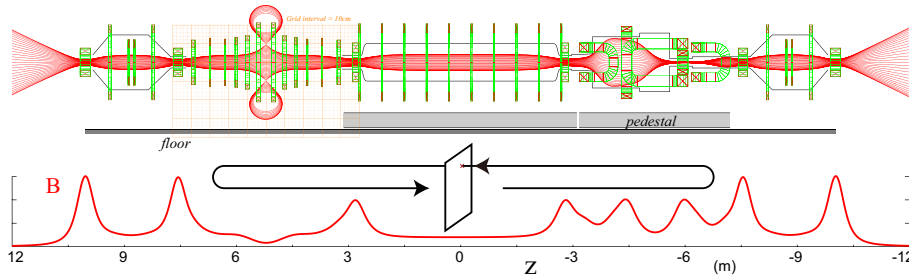
high  $T_e$  での原子・分子過程

Ion flow

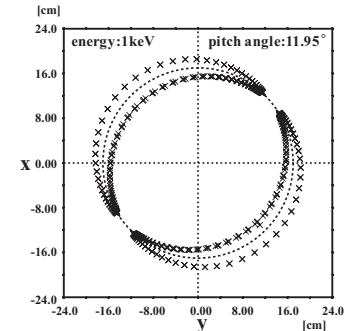
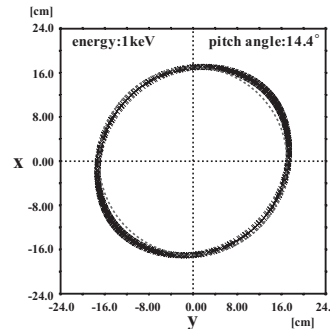




A-divertor の新古典拡散



A-divertor の新古典拡散の検討に関しては現在進行中である。右図は 1keV の共鳴イオンの中央ミラー部 mid-plane でのポアンカレ写像の図である。片側に非軸対称アンカー磁場がある為に一バウンス時間の間  $\Delta\theta \approx \pi$  だけ回転する粒子が磁場の非等方性と共鳴を起こして大きなバナナ軌道を描く。GAMMA10 に比べて共鳴粒子が非軸対称ミラー部を通過するときの方位角方向ドリフト量が小さい為に、磁場の非軸対称性の影響をより大きく受けるので、GAMMA10 に比べて新古典拡散量 ( $\sim a^2/\tau_b$ ) はさほど変わらない事が予想される。現在計算が進行中である。





ダイポール部内の粒子軌道 (運動可能領域)

軸対称ミラー磁場内の粒子軌道は、方位角方向の角運動量  $p_\theta$  が保存するので

$$p_\theta = m_i r^2 \frac{d\theta}{dt} + \frac{q}{c} \psi = \frac{q}{c} \psi_0, \quad \psi = r A_\theta$$

と書ける事に注意する (ただし再び  $\mathbf{B} = \nabla\psi \times \nabla\theta$ ) と、イオンの運動方程式は

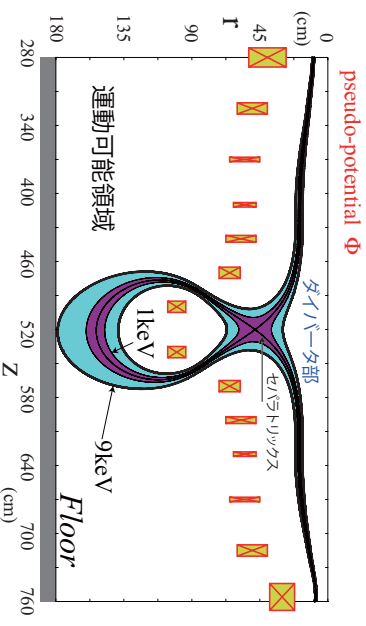
$$m_i \frac{d^2 r}{dt^2} = - \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad m_i \frac{d^2 z}{dt^2} = - \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad \Phi = \frac{q^2}{2m_i c^2} \left( \frac{\psi - \psi_0}{r} \right)^2$$

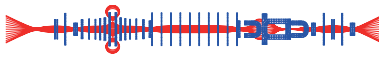
上式は擬ポテンシャル場  $\Phi$  中の粒子の運動を記述する式と等価であり、次のように

$$\frac{m_i}{2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{m_i}{2} \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 + \Phi = Const.$$

と擬ポテンシャル場中でのエネルギー保存形式で書き直すことが出来る。

$p_\theta$  中の  $q\psi_0/c$  はイオンの角運動量であるが、そのイオンがラーモア運動をしてる時は  $d\theta/dt = 0$  の位置が径方向の案内中心なので  $\psi_0$  が  $(\psi, \theta, \chi)$  座標系での案内中心位置と考える事が出来る。





### GAMMA10 A-divertor のまとめ

- GAMMA10 について。
  - 磁力線方向の閉じ込めは非常に良い。
  - 径方向の閉じ込めは良くない (磁気面が無い為?)。
  - 新古典拡散では最短 10msec の径方向閉じ込め時間が実現する。
- GAMMA10 A-divertor は GAMMA10 で径方向に輸送されたイオンを全てダイバータ板へ排気する為に改良された実験装置である。特に、 $10\text{cm}^2$  の面積を持つダイバータ板に対して
  - 粒子束 =  $6.3 \times 10^{18} \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 1.0 \times 10^4 \text{Ampere m}^{-2}$ )
  - 熱流速 =  $4.2 \times 10^{18} \text{keV sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 6.7 \times 10^6 \text{Joule sec}^{-1} \text{m}^{-2}$ )
  - $T_i = 1\text{keV}$  のイオン、 $\tau_{\text{bounce}} \approx 1.3 \times 10^{-1} \text{msec}$ 、 $\tau_{\text{radial}} \approx 10\text{msec}$ 、 $\tau_{\text{dipole}} \approx 1.2\text{msec}$  for  $\Delta\theta = 30^\circ$ 。
- 磁気ヌルは最外磁力管に粒子の逃げ道を開けた役割を演じる。よってコア領域から径方向に逃げてくるプラズマは全て磁気ヌルを通過して、ダイポール領域に入ってくる。GAMMA10 A-divertor は ICRF や ECRH によってイオンや電子および minority He を直接加熱する事が可能である。
  - High Te での原子・分子過程の実験が可能。
  - (長時間運転をする事で) 材料照射実験が可能。
  - ダイバータ前面での impurity の振る舞い (ダイバータをさかのぼる現象等) の実験が可能。
  - detached plasma in front of divertor の実験が可能。
- 開放端系の実験装置としての観点からは、軸対称化タンデムミラーの可能性を模索する事ができる実験装置である。開放端系コミュニティでの存在感を維持できる。
- 磁場ヌルの領域を持つので、他の双極子磁場 RT-1 や FRC 等のコミュニティとも共同研究の道が開ける。特に、GAMMA10 A-divertor は環状系と開放端系を合体した実験装置である。