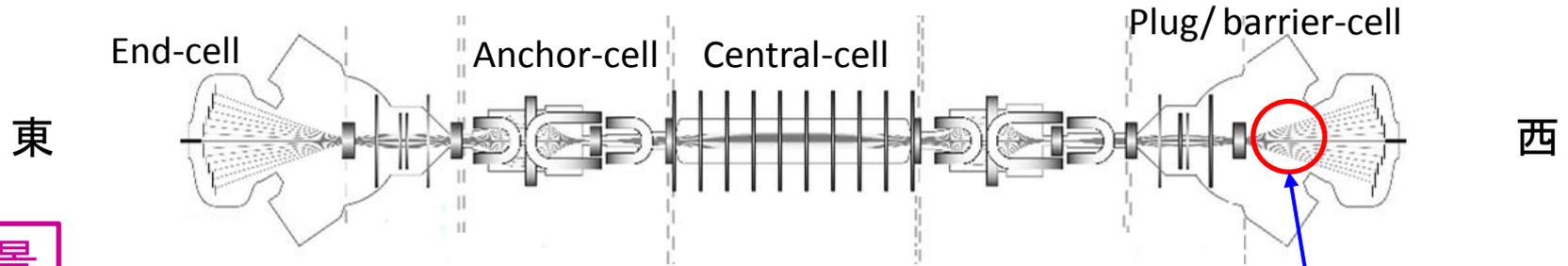


# GAMMA 10西エンド部における背景プラズマ コードの数値計算シミュレーション

筑波大学プラズマ研究センター  
武田寿人、中嶋洋輔、飯田洋平  
GAMMA 10 Gr.

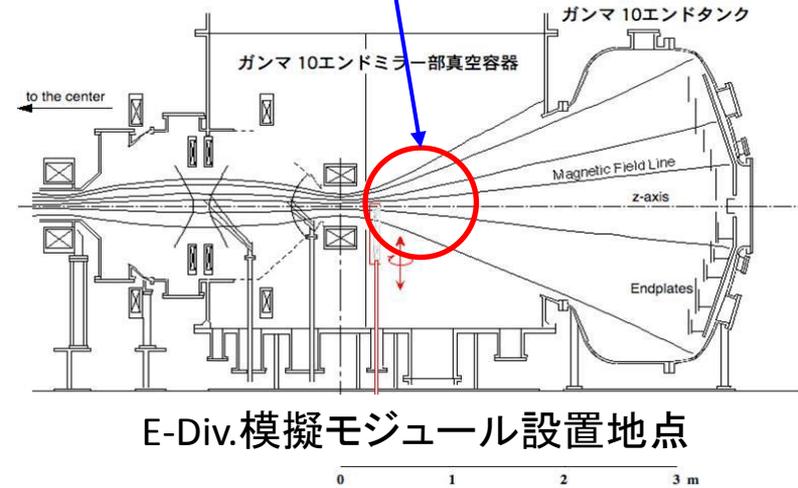
1. 研究目的
2. シミュレーションモデル
3. 計算結果
4. まとめ

# 1. 研究目的・背景



## 背景

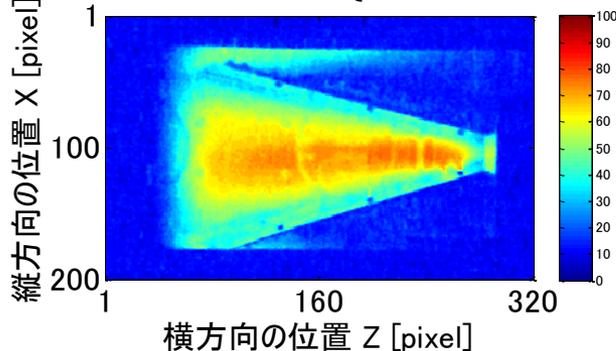
タンデム・ミラー型装置GAMMA 10では、西エンド部の開放端磁場配位を利用する事により、ダイバータ模擬実験を行おうとしています。このダイバータ模擬実験の目的は、不純物をプラズマ中に入射する事で起こされる、放射冷却についての物理的知見を得ることです。その為、下図の様なターゲットにArガス等を封入する実験を行っています。



E-Div. 模擬モジュール設置地点

例

高速カメラ画像 (Arフィルター有)



## 目的

そこで、実験的側面からだけでは無く数値計算シミュレーションの観点からも研究が始められました。

本発表では、Arガスを入射した場合におけるプラズマパラメータの応答を見る為の初段階として、Ar中性原子の励起のみの影響を組み込んだ結果について発表します。

## 2. シミュレーションモデル (2.1 支配方程式)[1]

密度連続の式

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{u}) = \underline{S_n}$$

$S_n$ : イオン生成・損失項

運動量バランスの式

$$\frac{\partial}{\partial t}(mnu) + \nabla \cdot (nm\vec{u}\vec{u}) - \vec{\eta} \cdot \nabla u_{||} = -\nabla p + \underline{S_{mu}}$$

$S_{mu}$ : 運動量生成・損失項

拡散式

$$v = -D_n \frac{\partial}{\partial y} (\ln n)$$

$D_n$ : ボーム拡散係数

電子エネルギーバランス式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{5}{2} n\vec{u}T_e - \kappa^e \nabla T_e \right) \right] = \vec{u}_e \cdot \nabla p_e - k(T_e - T_i) + \underline{S_E^e}$$

$S_E^e$ : 電子エネルギー生成・損失項

イオンエネルギーバランス式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_i T_i + \frac{1}{2} nmu_{||}^2 \right) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{5}{2} n\vec{u}T_i + \frac{1}{2} mn\vec{u}\vec{u}_{||} \right) - \nabla \left( \kappa^i T_i + \frac{1}{2} \eta u_{||}^2 \right) \right] = -\vec{u}_e \cdot \nabla p_e + k(T_e - T_i) + \underline{S_E^i}$$

$S_E^i$ : イオンエネルギー生成・損失項

$n$ : プラズマ密度,

$T_i, T_e$ : イオンと電子温度,

$u$ : 流速,

$p_i, p_e$ : イオンと電子の圧力 ( $p = p_i + p_e$ )

$\eta$ : 粘性係数,  $\kappa$ : 熱伝導係数,  $k$ : エネルギー緩和係数,  $D_n$ : 拡散係数

これらの方程式の、境界値問題の定常解を算出している。

# 2.2 原子分子過程

方程式中で使用している各生成・損失項は、以下の様に定義している。

## イオン生成・損失項

$$S_n = n_0 \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} - n_e \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.}$$

電子衝突電離

再結合

## 電子エネルギー生成・損失項

$$S_E^e = n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} \cdot \delta_e - n_e \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot T_e$$

電子衝突電離

$\because \delta_e = -25 \text{ eV}$

再結合

## イオンエネルギー生成・損失項

$$S_E^i = n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} \cdot E_{n0} - n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx} \cdot (T_i - E_{n0}) - n_i \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot T_i$$

電子衝突電離

荷電交換反応

再結合

## 運動量生成・損失項

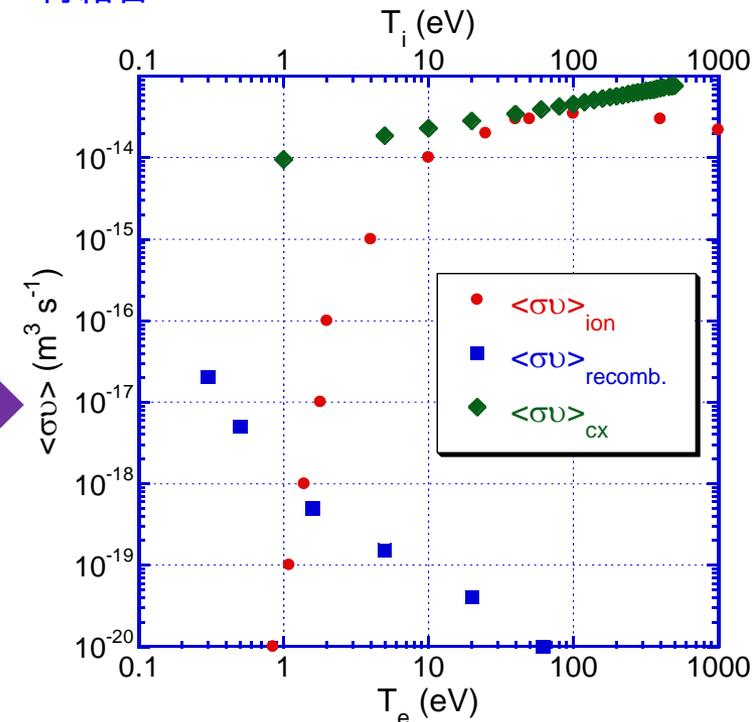
$$S_{mu} = -\langle \sigma v \rangle_{cx} \cdot n_0 \cdot n_i \cdot (u_i - u_0) \cdot m - \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot n_i \cdot n_i \cdot u_i \cdot m$$

荷電交換反応

再結合

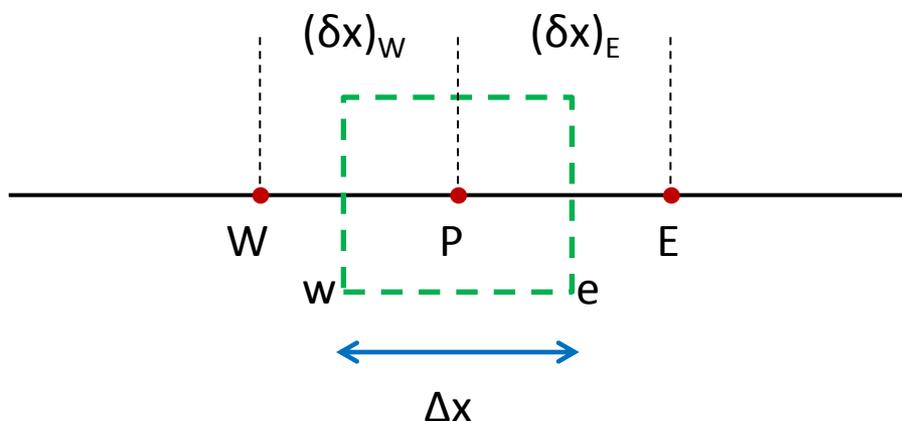
- 電子による衝突電離の速度係数  $\langle \sigma v \rangle_{ion.}$ 、
- 荷電交換反応の速度係数  $\langle \sigma v \rangle_{cx}$ 、
- 電子-イオン間の再結合の速度係数  $\langle \sigma v \rangle_{recomb.}$

は、右図に示すように定義したものをを用いている。



# 2.3 使用した計算スキーム

有限体積法を用いて、支配方程式を計算している。



   : 検査体積。

W, E: 各物理量が定義される点。

w, e: 検査体積の境界面。

計算される5つの方程式は、検査体積内において差分化し計算されている。

物理量:  $\phi$

風上差分法

$$\phi_E = \phi_P \quad (u_e > 0)$$

$$\phi_E = \phi_E \quad (u_e < 0)$$

中心差分法

$$\phi_E = \frac{\phi_E + \phi_P}{2}$$

ハイブリッド法 • 風上差分と中心差分の良い性質を利用したスキーム。  
• 非常に安定。

風上差分

$$|P_e| = \frac{F_e}{D_e} > 2$$

$$F_e = \rho_e u_e \phi$$

中心差分

$$|P_e| = \frac{F_e}{D_e} < 2$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{(\Delta x)_e}$$

## 2.4 計算順序 (イオン1種の場合)

各方程式中の生成・消滅項を計算する。

運動量バランス式を解く事により、流速  $u_{//}$  を計算する。

拡散の式を満たす様に、磁力線に垂直方向速度  $v$  を計算する。

$n$ ,  $u_{//}$ , と  $v$  の離散式を連立させる事により、圧力の補正值に対する式(離散化した密度連続の式)を解く。(SIMPLEアルゴリズム)

電子とイオンのエネルギーバランス式を解いて、それぞれの数値解を得る。

連続の式をもう一度解き、密度、速度を補正する。

其々の解が収束するまで、反復計算を行う。

# 2.5 メッシュ構造と境界条件

背景プラズマコードのメッシュ構造は、GAMMA 10西エンド部の磁場構造に適合した形に軸対称を仮定して作成されている。これにより、各方程式は2次元で解かれている。

計算領域:

X 軸方向 : 0 ~ 15 cm

Z 軸方向 : 0 ~ 70 cm

総メッシュ数: 3300

X 軸方向 : 50, Z 軸方向 : 66

境界条件

Z 軸 : 対称境界条件

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial T_e}{\partial x} = \frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{\partial u_{//}}{\partial x} = 0$$

ダイバータ境界条件

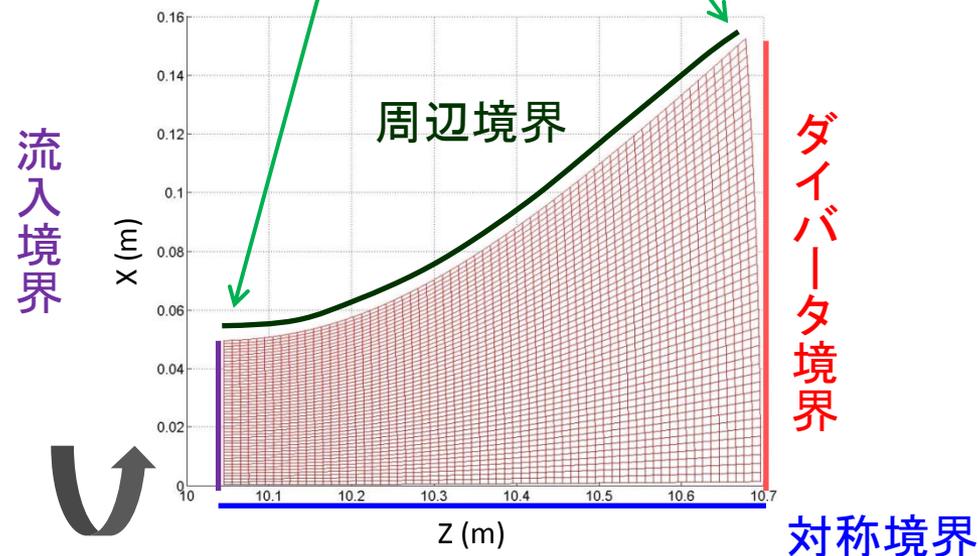
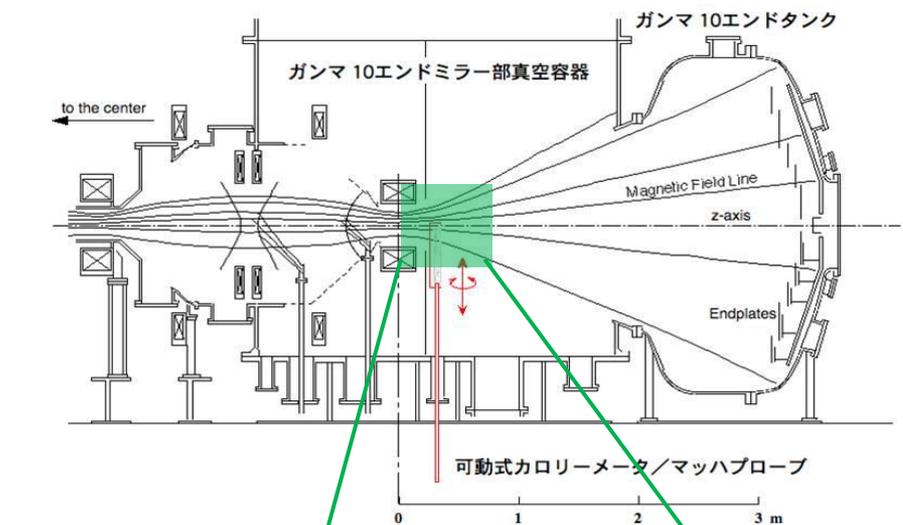
$$u_{//} = \sqrt{(T_i + T_e)/m}, Q_j = \alpha_j n u_{//} T_j, (j = i, e)$$

上流 : ディレクレ境界条件

$$T_i = 100eV \quad T_e = 30eV \quad n = 1.0 \times 10^{19} m^{-3}$$

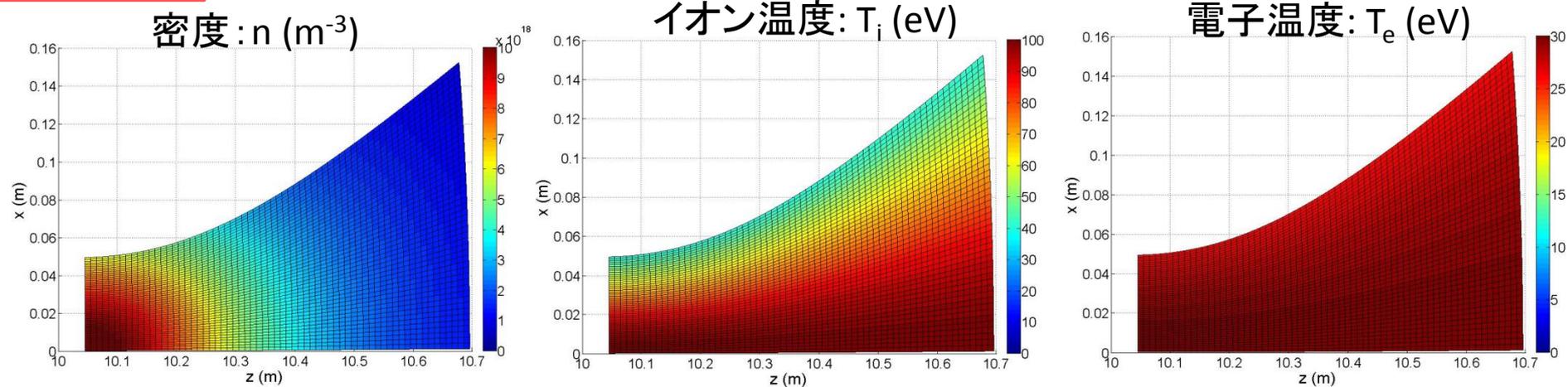
周辺 : ノイマン境界条件 & ディレクレ条件

$$\frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{\partial T_e}{\partial x} = 0 \quad n: \text{初期条件で固定}$$



# 2.6 初期条件と中性粒子モデル

## 初期条件



これらの初期条件は、実際の計測で推定された空間分布のデータを参考にして決定している。

## 中性粒子モデル

仮定： 中性粒子速度は一定。

→ 上記の仮定を元に、一次元での中性粒子における密度連続の式を解くことで、中性粒子密度分布を定義した。

$$\frac{\partial(n_n u_n)}{\partial z} = -n_n \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion} - n_n \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx} \leftrightarrow \frac{\partial n_n}{\partial z} = -n_n \cdot \frac{\{n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion} + n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx}\}}{u_n} = -n_n \cdot \frac{1}{\lambda} \leftrightarrow n_n = \exp\left\{-\int_L^z dz \frac{1}{\lambda}\right\}$$

$$n_n(z) = n_0 \cdot \exp\left\{-\int_L^z dz \frac{1}{\lambda}\right\} \quad \because \lambda = \frac{u_n}{n_e \cdot \{\langle \sigma v \rangle_{ion} + \langle \sigma v \rangle_{cx}\}}$$

# 2.7 Ar励起モデル[2]

現在GAMMA 10では、電子冷却効果をさらに促進する為に、プラズマ中に不純物ガスであるAr中性粒子を導入する実験が行われている。その為、シミュレーションコード中にもこの不純物による効果を取り込んだ。



衝突により電子から失われるエネルギー  
= 電子衝突励起 / 脱励起に必要なエネルギーの総和+電離エネルギー

衝突輻射損失の速度係数

$$\varepsilon_{Ar} = \frac{P_z}{n_e \cdot n_z} \quad \text{W/m}^3$$

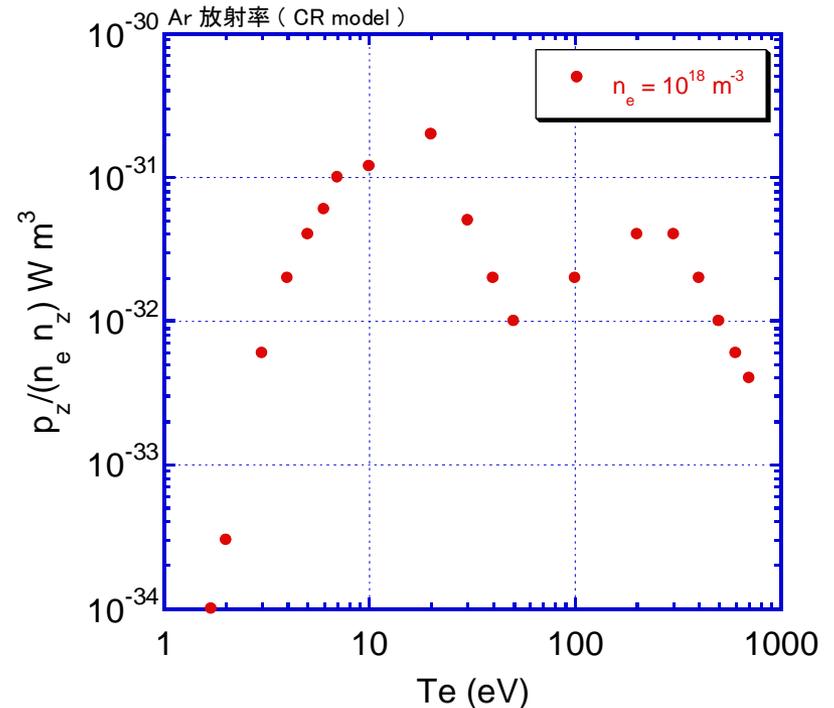
Ar原子のみを考えている(イオンは現段階では無視)。

電子生成・損失項にのみ作用させた。

電子エネルギー生成・消滅項

$$S_E^e = n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} \cdot \delta_e - n_e \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{recimb.} \cdot T_e - \varepsilon_{Ar} \cdot n_e \cdot n_{Ar}$$

衝突輻射モデルで計算された軽元素不純物の放射率



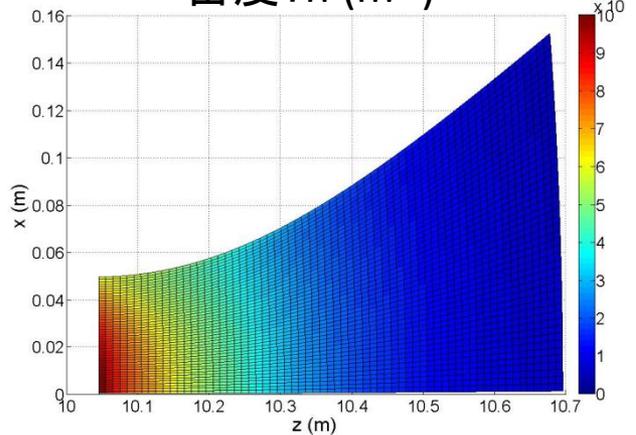
[2]: D. E. Post J. Nucl. Mate, 220-222, (1995), 143-157.

# 3.1 計算結果 (3.1.1 Ar入射有無比較)

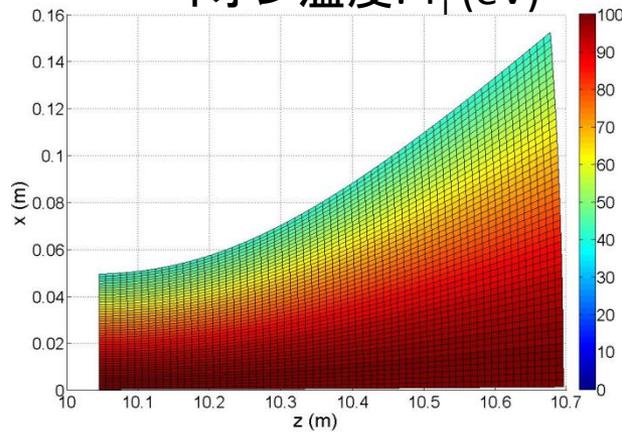
Ar中性ガスを導入した場合と導入なしの場合の計算結果を比較した。

## Ar 入射無し時の計算結果

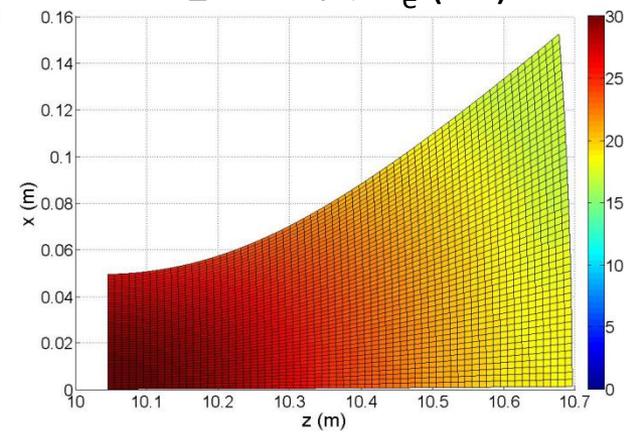
密度:  $n$  ( $\text{m}^{-3}$ )



イオン温度:  $T_i$  (eV)

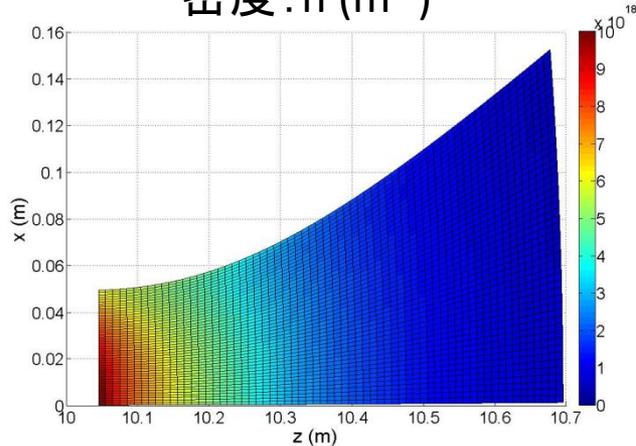


電子温度:  $T_e$  (eV)

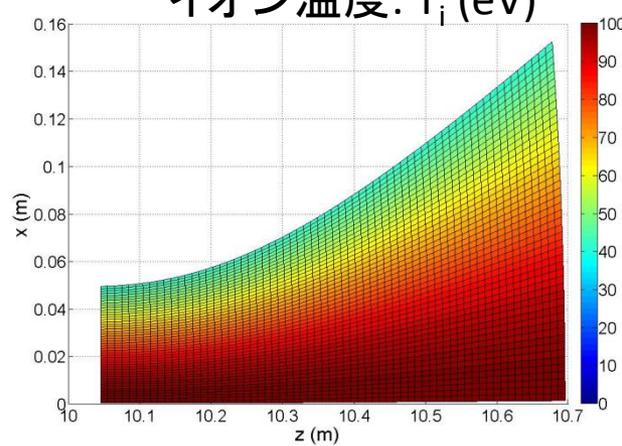


Ar 導入時の計算結果 (Ar中性粒子密度:  $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$  で計算系内に一様に分布させている。)

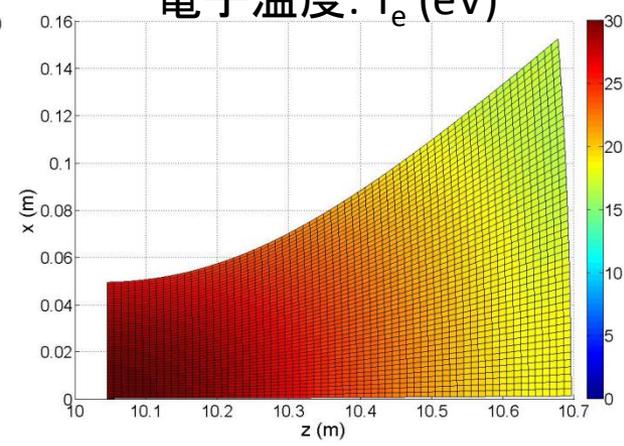
密度:  $n$  ( $\text{m}^{-3}$ )



イオン温度:  $T_i$  (eV)

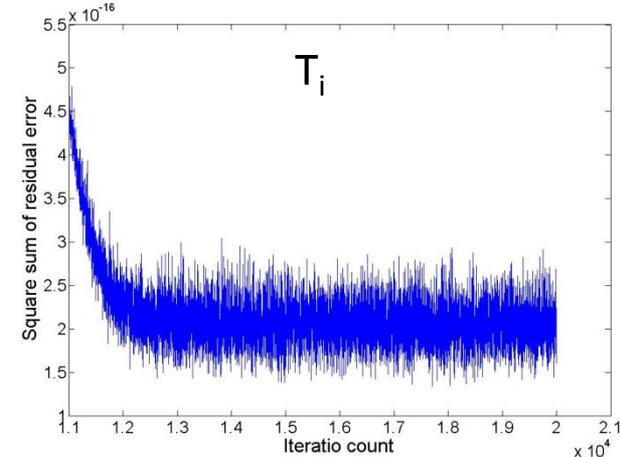
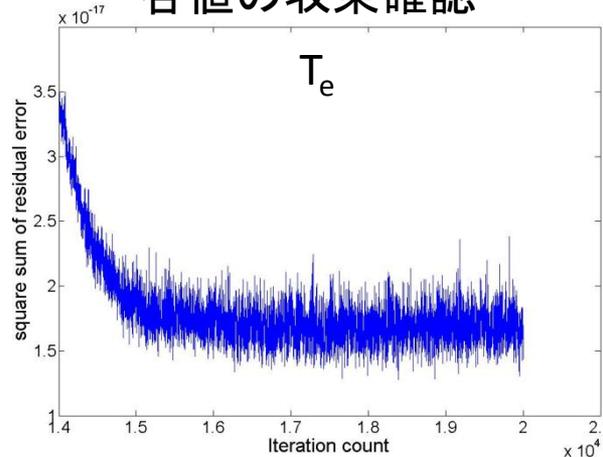
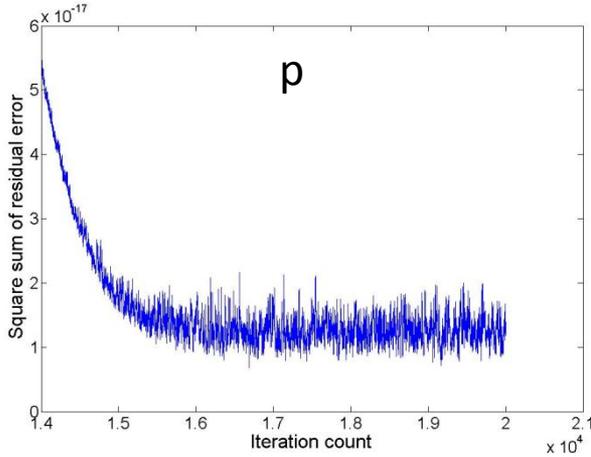


電子温度:  $T_e$  (eV)

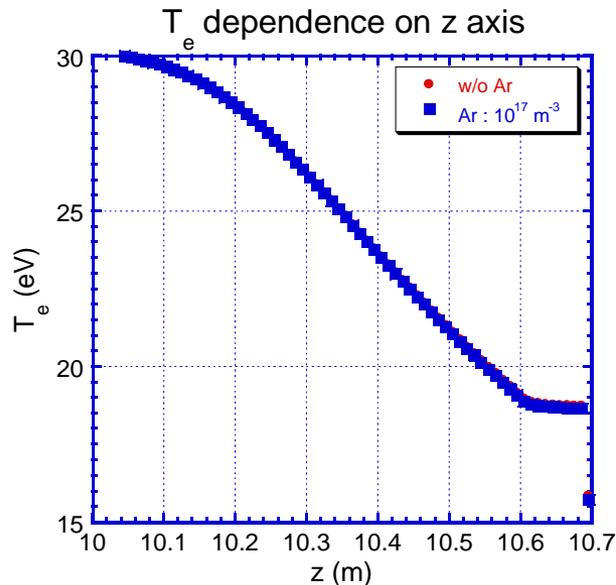


# 3.1.2 計算結果

各値の収束確認



各パラメータの残差二乗和平均は、オーダーとして $\sim 10^{-16} \sim 10^{-17}$ 程となり、計算は収束していると考えられる。



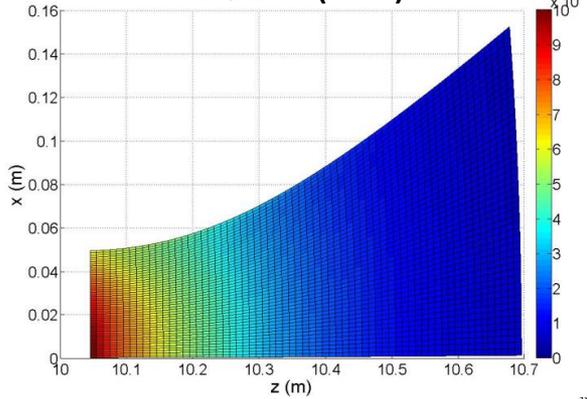
Ar中性ガス導入前後で、電子温度はほとんど変化が見られなかった。

通常、実験室系での実験では、不純物中性粒子密度が約1 Pa以上導入された時に電子冷却効果が大きく効いてくる事が知られている。

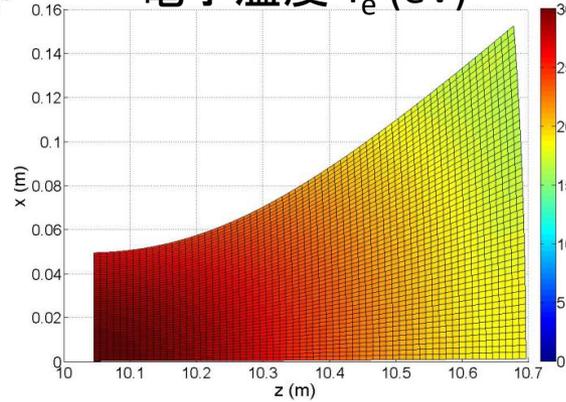
$1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \approx 0.001 \text{ pa}$ である為、Ar中性粒子密度が薄く、効果が小さい。

# 3.1.3 Arガス密度依存性

密度  $n$  ( $\text{m}^{-3}$ )

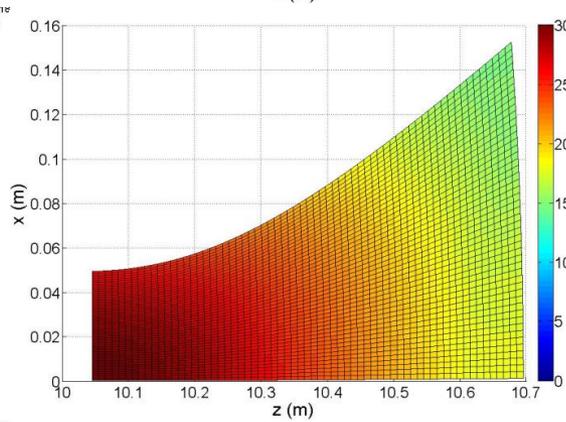
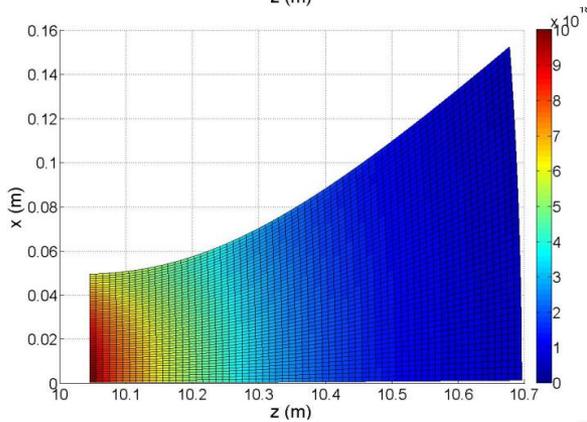


電子温度  $T_e$  (eV)



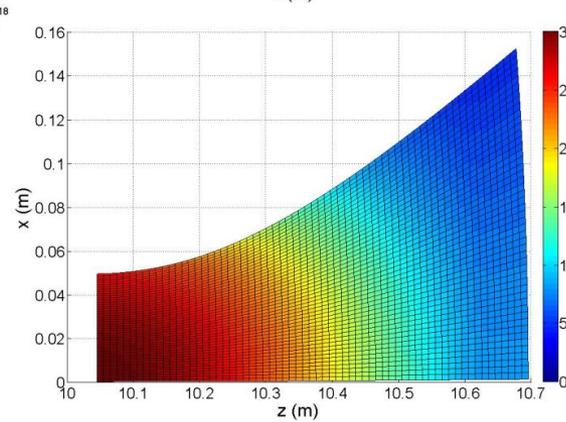
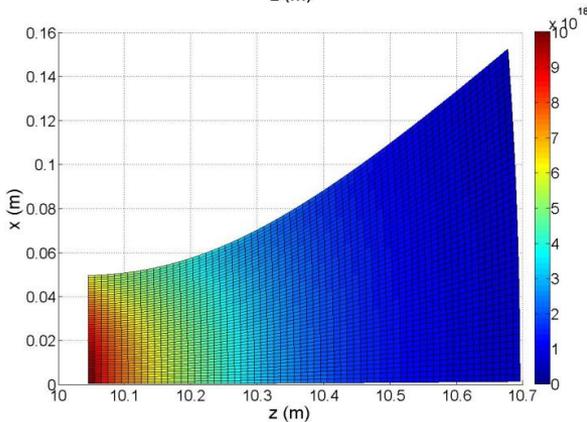
Ar中性粒子密度は、計算系内に一様に分布させている。この密度を変化させ計算を行った。

Ar中性粒子密度:  $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$



Ar中性粒子密度:  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

電子温度の $z$ 軸方向における、減少効果が見える。



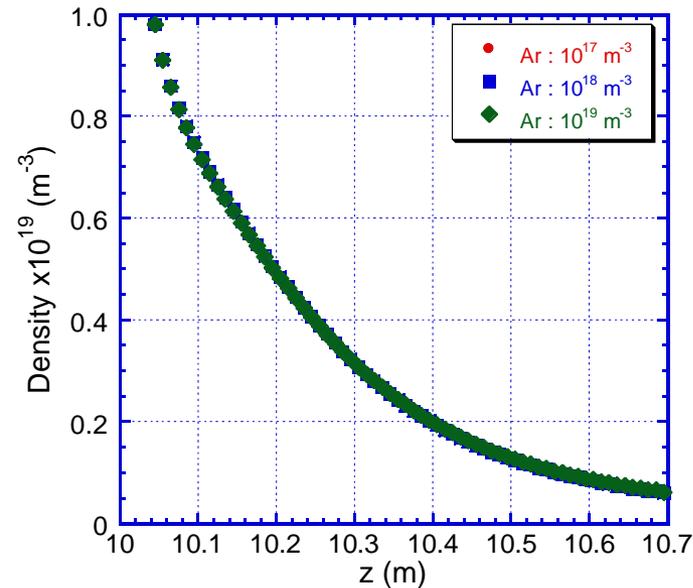
Ar中性粒子密度:  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

電子温度冷却効果は、大きく効いている事が分かる。

密度は、径方向の減少を見せ始めているが大きな変化は見られない。

# 3.1.4 Arガス密度依存性

Density dependence on z axis



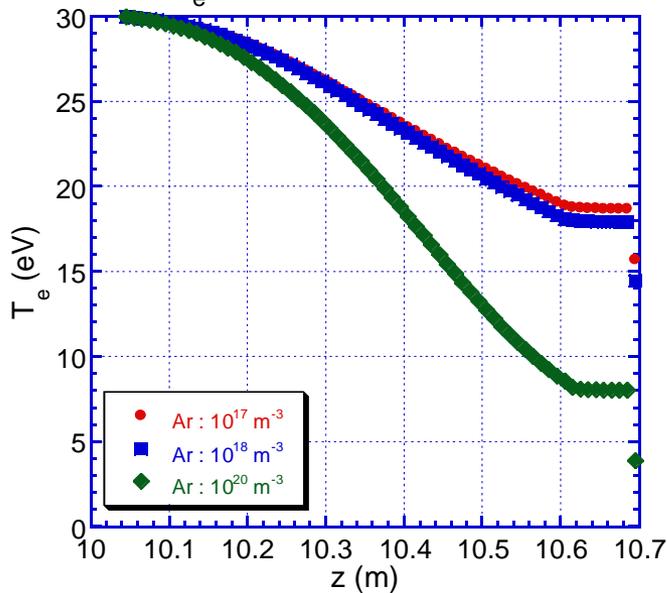
電子温度とプラズマ密度のz軸上分布を、左図に示す。  
密度

プラズマ密度は、z軸方向にはAr中性粒子入射量に対する依存性は殆ど見られない。

→ 今回の計算でのAr中性粒子入射量(10<sup>17</sup>~10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>)において、電子温度は約18~9 eV程までしか減少していない。

→ 電子電離衝突による水素イオン生成に、大きな差異が生じていない事が考えられる。

T<sub>e</sub> dependence on z axis



電子温度

Ar中性粒子1 x 10<sup>17</sup>m<sup>-3</sup>入射時でも、電子温度の値は、1 x 10<sup>18</sup>導入時と大きな変化がない。

Ar中世粒子を1 x 10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>入射時に大きな電子温度減少が見られる。

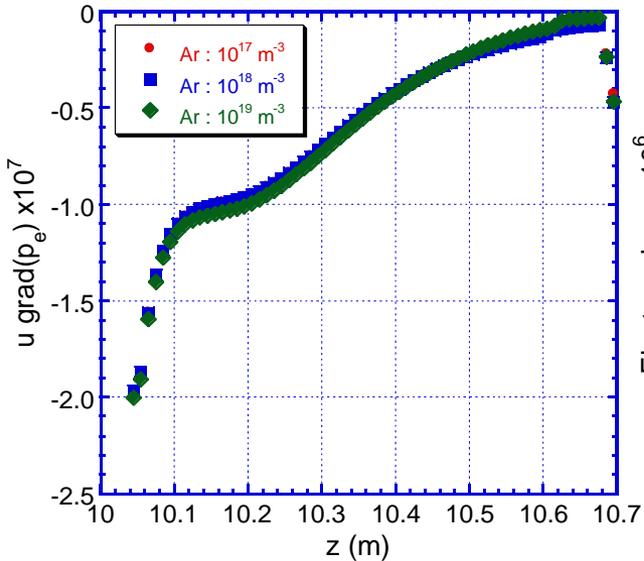
電子温度は、z軸方向に行くに伴い減少していくが、ある所まで下がると一定値を取る傾向が有る。

# 3.1.4 Arガス密度依存性

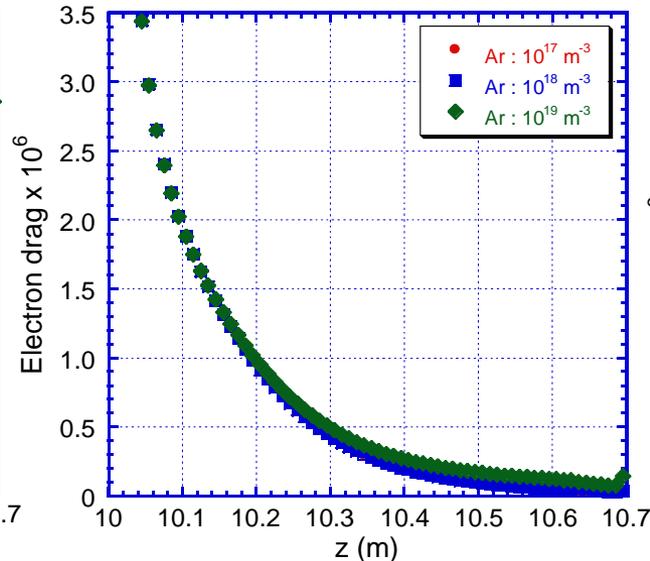
電子のエネルギーバランス式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{5}{2} n \bar{u} T_e - \kappa^e \nabla T_e \right) \right] = \underbrace{\bar{u}_e \cdot \nabla p_e}_1 - \underbrace{k(T_e - T_i)}_2 + \underbrace{s_E^e}_3$$

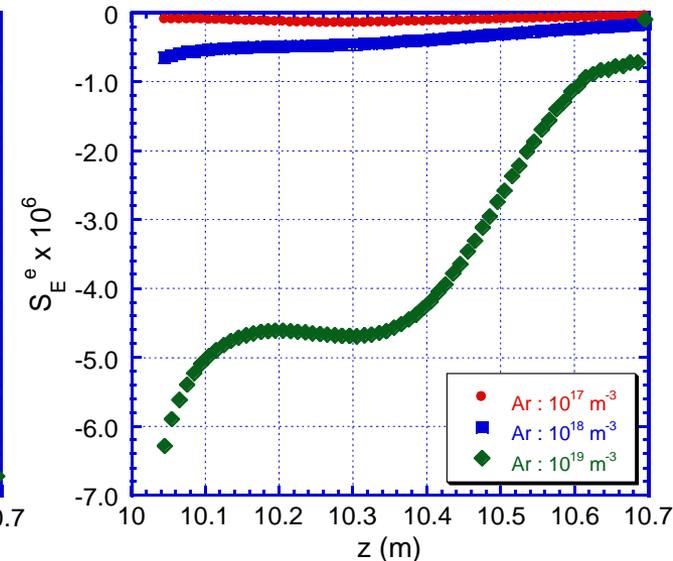
1項のz軸分布



2項のz軸分布



3項のz軸分布



電子エネルギーバランス式右辺

第一項、第二項、第三項の和が、 $z=10.6$  m付近で傾きがなだらかになる。最もAr中性粒子密度に対する依存性が強い第三項で顕著。

→ 結果的に右辺の値が一定の値をとる為、電子温度が一定になると考えられる。

## 4. まとめ

プラズマ中にAr中性原子を導入した場合の効果を記述するための初段階として、Ar中性原子励起による影響のみを考え、計算コードに組み込み計算を行った。

- Ar中性原子励起による電子温度減少効果が、計算コード中に反映されていることが確認された。
- Ar中性原子分布を一様だと仮定した場合、その密度が上昇するにつれ電子温度の減少が見られた。
- Ar中性原子を $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 導入した場合でも、境界条件等の影響か電子温度が約8 eV程までしか減少し無かった。

### 今後の課題

- Arが電離する過程まで含めたモデルに拡張する事。
- 中性粒子分布に関してより正確に記述する為に、モンテカルロ計算等によって計算させた結果を反映させること。