
CFD-ACE+ Plasma: CCPリアクター中の 電磁波効果モデル

電磁場とプラズマのカップリング

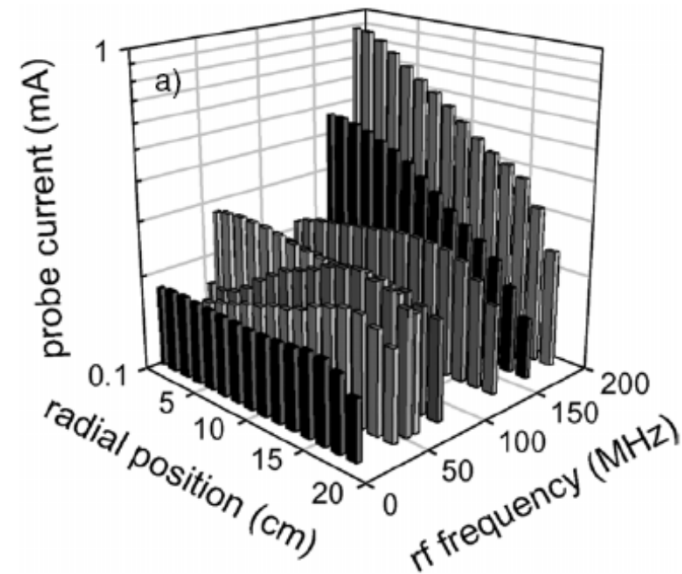
WAVE FRONT

概要

- 電磁波(定在波)の影響とは
- モデル概要
- モデル形状と計算条件
- 結果
 - ベースケース
 - パワー依存性
 - 周波数依存性
- 結論

定在波の影響とは

- 半導体、太陽電池製造用CCPリアクタの動向
 - 放電用RF波の高周波数化
 - ウェファーの大口径化
 - フィーチャーの微細化
- 放電における電磁波(定在波)の影響は最早無視する事が出来なくなる
- プラズマと電磁場の相互作用の解明は必ずしも信頼性があるとは言えない

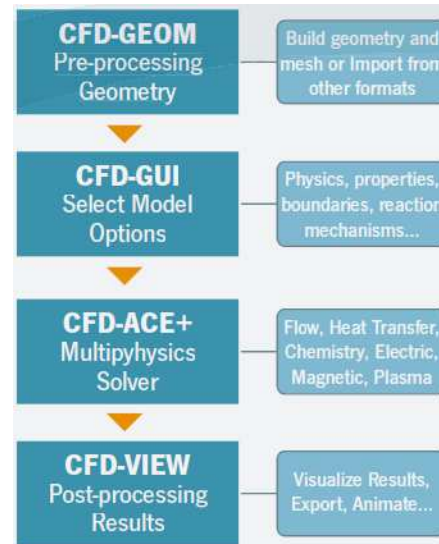
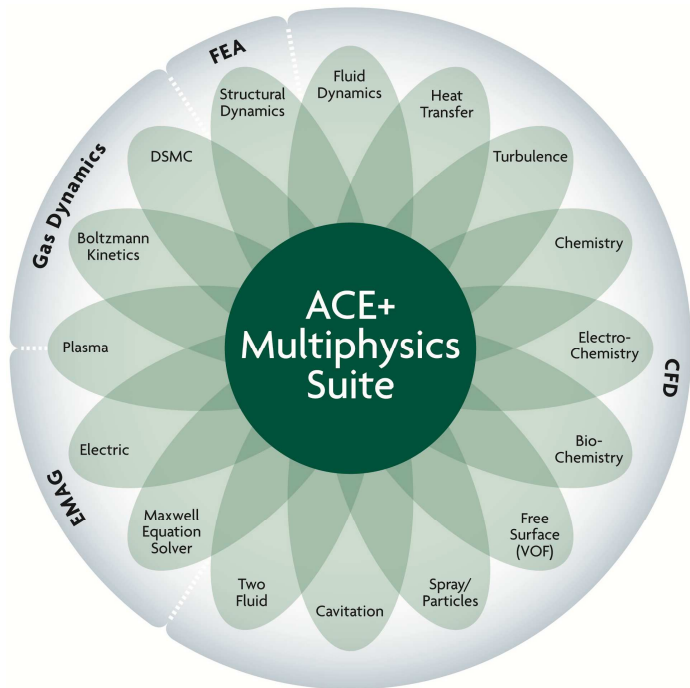


G. A. Hebner et al, Plasma Sources Sci. Technol., 15, 879(2006)

プラズマ中の定在波の影響をモデル化した、プロセス、リアクタ設計を支援するモデリングツールが求められている

WAVE FRONT

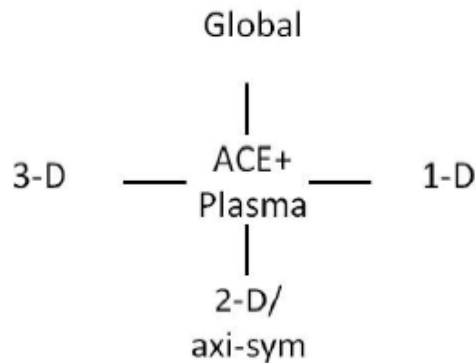
ACE+マルチフィジックススイート



ACE+:リアクタ、プロセス設計をシミュレーションにて支援する計算モデリングプラットフォーム

ACE+ plasma サポート

- 曲面構造、混合格子
- 高並列化性能
- ICP, CCPモデル
- 反応機構、物性データベース
- 2温度アークモデル
- 熱プラズマ



WAVE FRONT

定在波モデル - 1

- 旧モデルではスカラーポテンシャルの勾配から計算した電場を用い、荷電粒子の輸送方程式を計算する

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_i(\vec{E}, n_i) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \sum_i q_i n_i$$

- ACE+では定常状態をタイムマーチングスキームを用いて計算する
- しかし、高放電周波数、大口径ウェファーでは、電磁波の1/4波長が基板と同程度の寸法となり、電磁波(定在波)の影響を考慮する必要がある

CCP放電モデルにおける従来のポアソンアプローチは、電磁波(定在波)の効果が無視できなくなる場合には、不十分である

WAVE FRONT

定在波モデル - 2

- 新モデルでは旧モデルに加え、ベクトルポテンシャルを計算

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla^2 A = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial \nabla \phi}{\partial t} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi - \sigma \vec{u} \times \vec{B} - \vec{J}_s$$

- クーロンゲージを仮定 $\nabla \cdot A = 0$

- 電場はスカラー、ベクトル双方のポテンシャルから計算

$$\vec{E} = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi$$

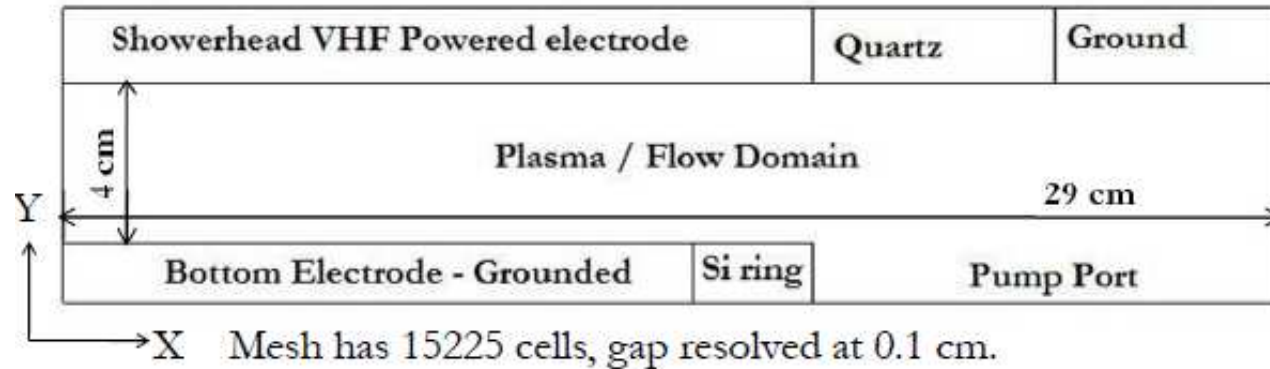
- プラズマ吸収パワーは静電場、誘導場の寄与から計算

$$P = P_{ES} + P_{EM} = - \int_V J \cdot \nabla \phi dV + \int_V \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^2 dV$$

ACE+の拡張モデルではベクトルポテンシャルを計算する

WAVE FRONT

リアクタ形状と計算条件



Geometry – 3-D sector CCP reactor similar to [5].
shown on X Y plane in the figure.

Gas, Pressure – Ar, 100 sccm, 100 mTorr.

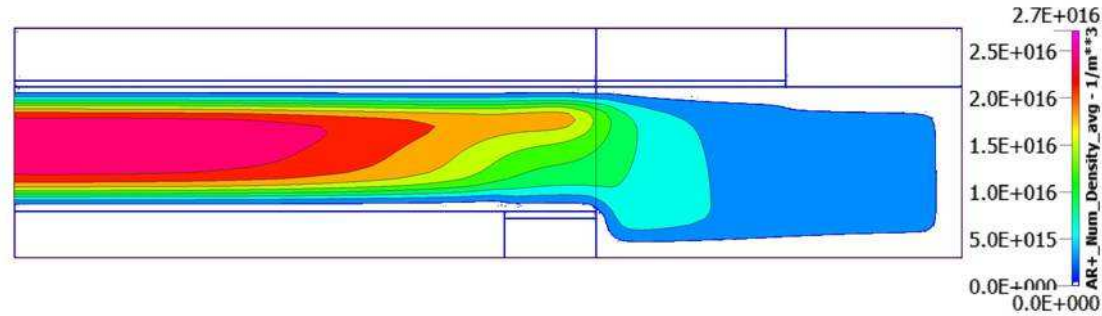
Power – 100 W at 180 MHz for the base case.

Si ring – $\epsilon_r = 12$, $\sigma = 1$ S/m ; Quartz – $\epsilon_r = 4$

Rauf, et al, PSST, 17, 035003 (2008)より
引用

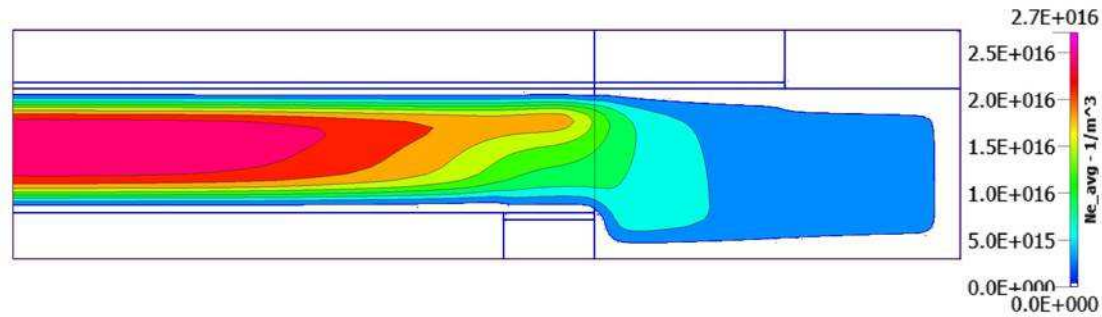
WAVE FRONT

新モデルの計算結果 - 1

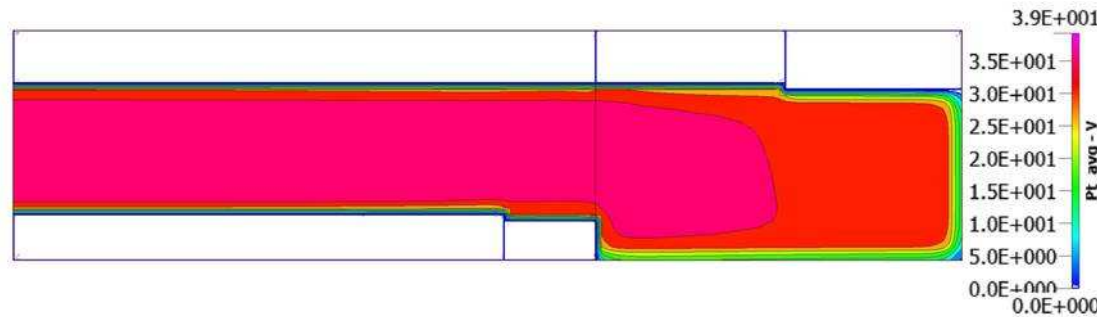


Ar⁺密度分布

リアクタ中心の最大プラズマ密度: $2.7 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$



電子密度分布



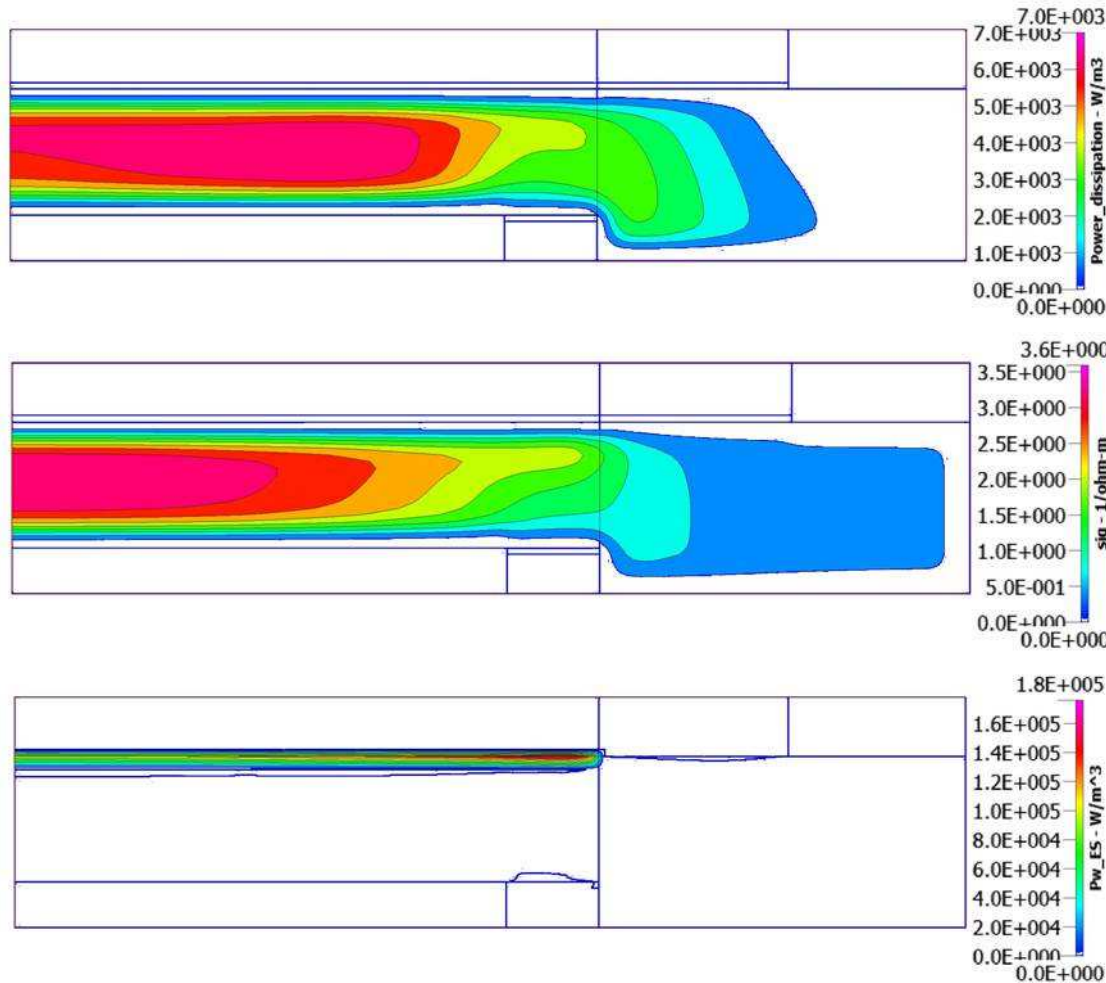
電位分布

リアクタ中心の最大平均電位 : 39 V

Ar, 180 MHz, 100 mTorr, 100 sccm, 100 W

WAVE FRONT

新モデルの計算結果 - 2



電磁場のピークにて顕著なパワー吸収が見られる

プラズマ電導度はプラズマ密度に呼応し、中心にピークを持つ

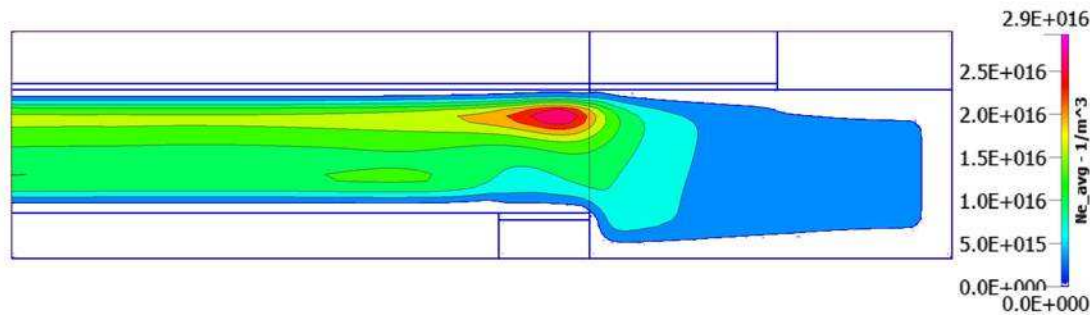
静電パワー吸収は給電電極近傍のシース領域に局在化している

Ar, 180 MHz, 100 mTorr, 100 sccm, 100 W

WAVE FRONT

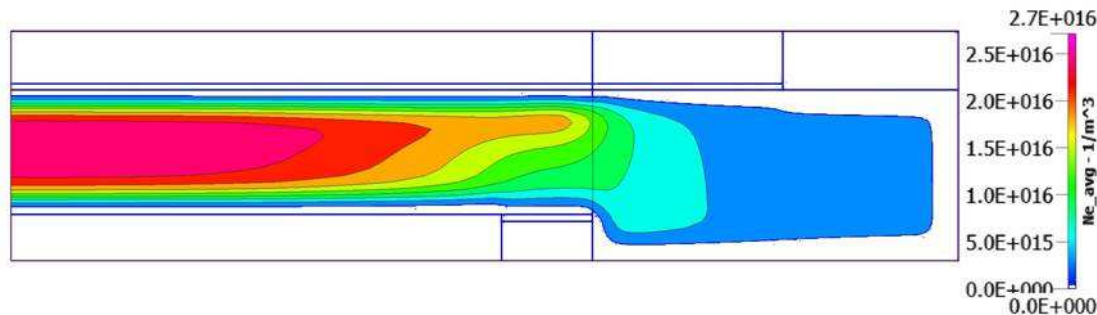
新モデルとの比較

➤ 従来のポアソンアプローチ



電子密度分布は電場の影響から周辺にピークが見られる

➤ 定在波を考慮した拡張モデル

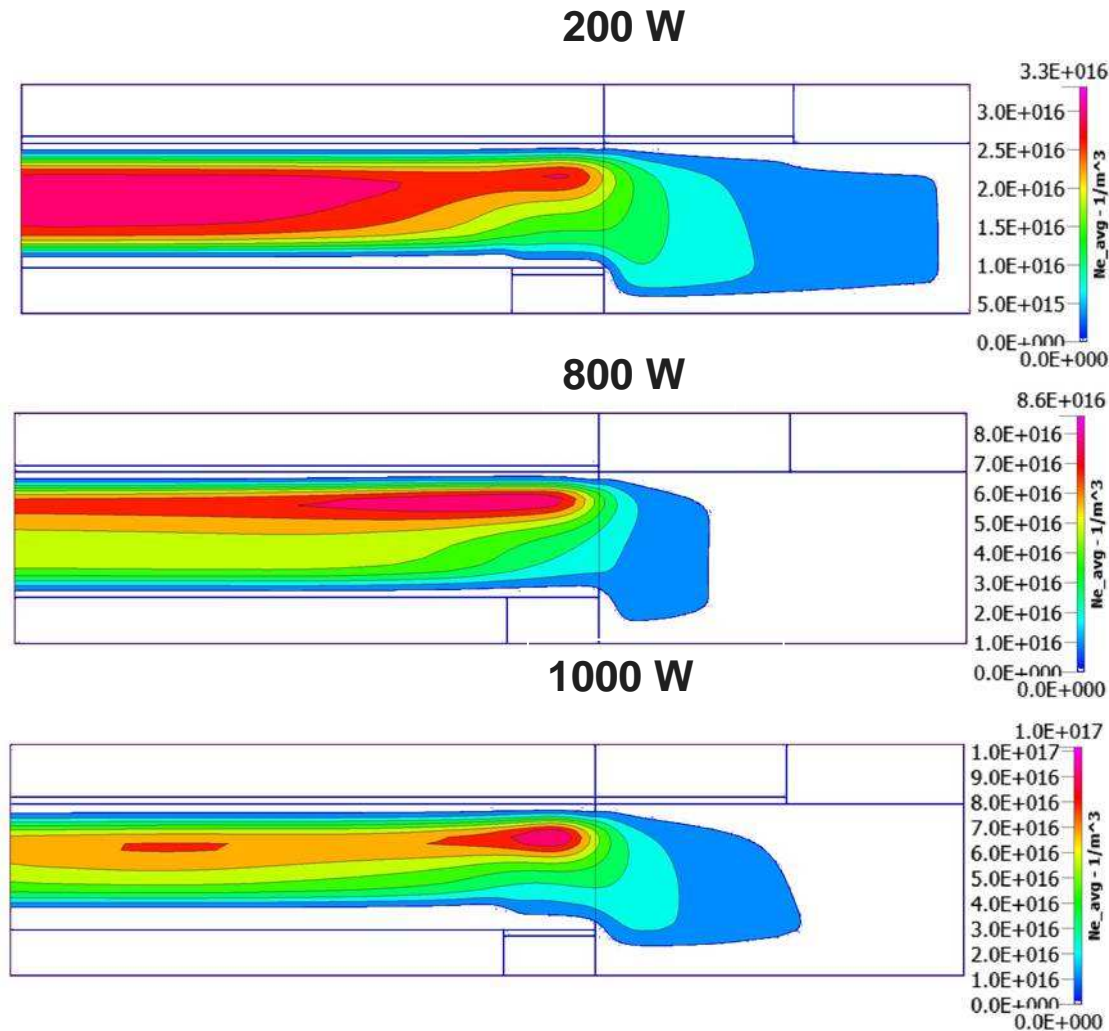


顕著な電磁場パワー吸収から中心にピークが見られる

Ar, 180 MHz, 100 mTorr, 100 sccm, 100 W

WAVE FRONT

電子密度分布のパワー依存性



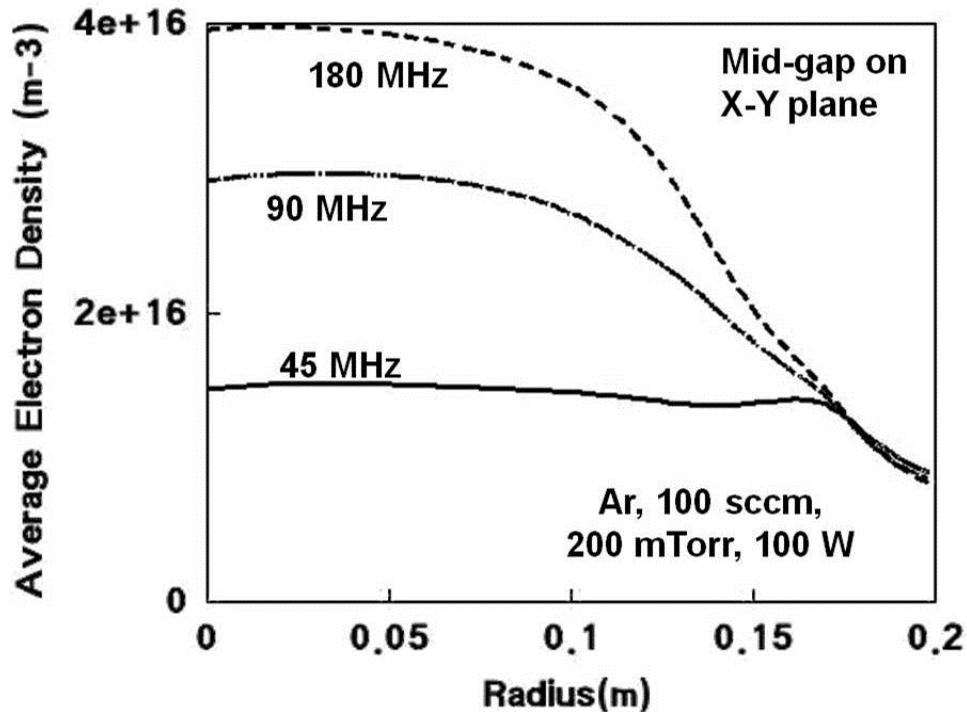
200 Wでは周辺部に電子密度のピークが出現する

電磁場パワーの吸収が大きくなると共に、プラズマは中心から周辺に移動する

傾向はRauf et al, PSST, 17, 035003 (2008)に類似する

Ar, 180 MHz, 100 mTorr, 100 sccm
WAVE FRONT

電子密度分布の周波数依存性



Ar, XX MHz, 200 mTorr, 100 sccm

固定パワー: 100W

周波数が180MHzから45MHzに減少するにつれ、ギャップ中央の電子密度分布は中心ピークから平坦に変化する

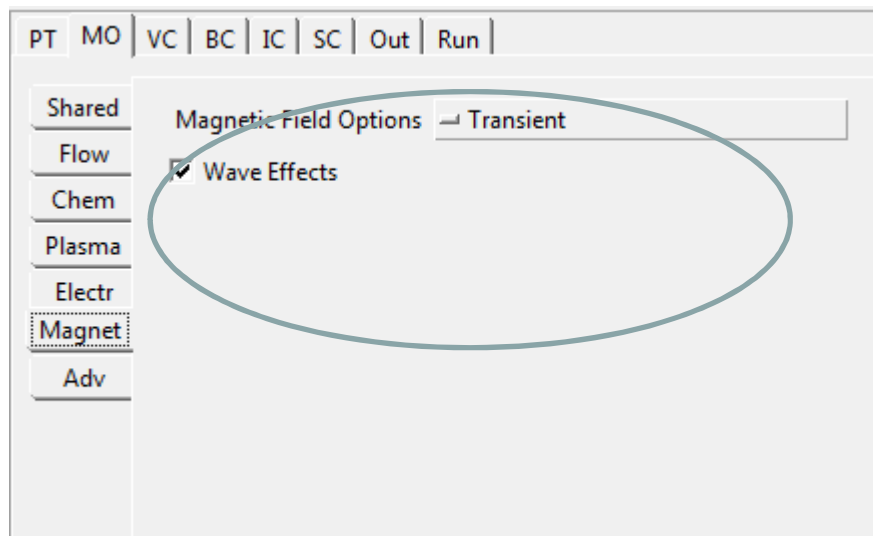
これは電磁場からのパワー吸収が周波数の二乗に比例する事による

低周波数に於いては電磁波の影響は重要でないと考えられる

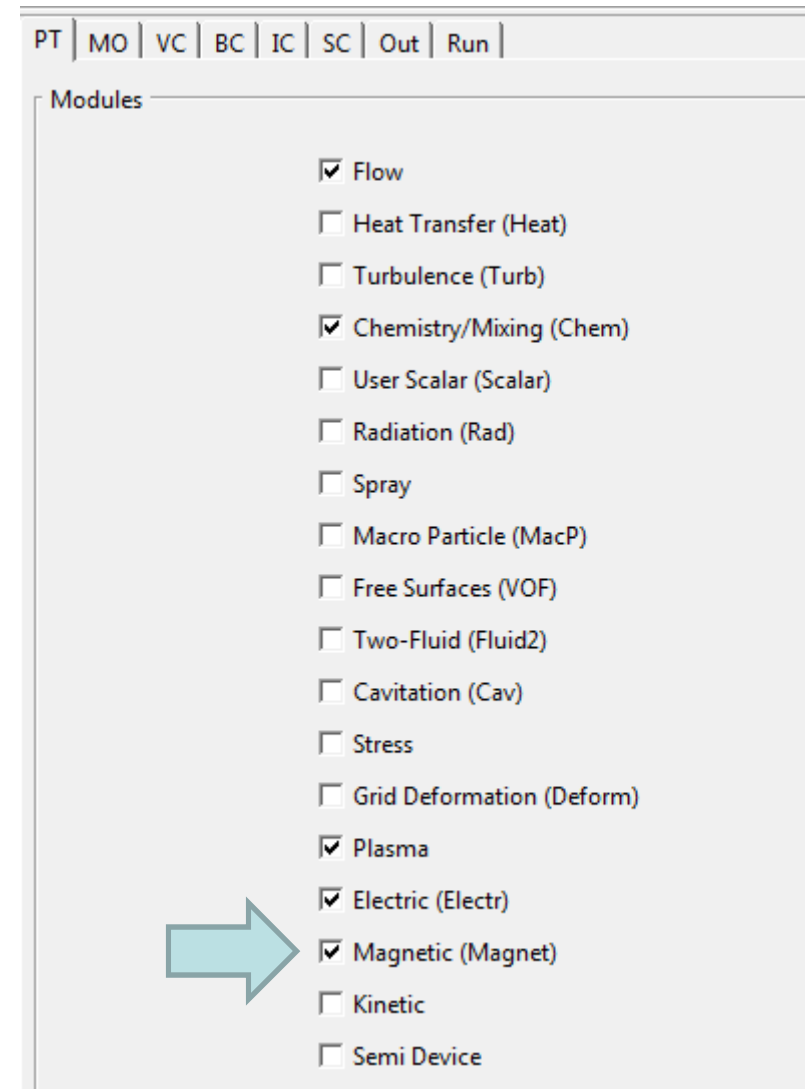
WAVE FRONT

電磁波効果 (Wave Effect) モデルの使用法

- CCPモードにて設定
- MAGNETICモジュールの使用を追加
- MO/Magnetタブにて
 - Transientを選択
 - Wave Effectsをチェック



WAVE FRONT



結論

- 大領域、高放電周波数のCCPリアクタ内に発生する電磁波効果をモデル化したACE+ Plasmaの拡張機能
- スカラーポテンシャルに加えてベクトルポテンシャルを計算する拡張アプローチ
- Rauf, et al , PSST, 17, 035003 (2008)のモデルを用い、結果の妥当性を検証
- パワー吸収とプラズマ密度の空間分布の傾向は文献、御客様の実測を再現
- 拡張モデルは、種々の動作周波数、低圧力、及び2周波リアクタに於いても、電磁波効果の重要性を示すために使用