

慣性静電閉じ込め核融合における荷電粒子の運動

システム科学技術学部 機械工学科

1年 平田 美智子

指導教員 システム科学技術学部 知能メカトロニクス学科

准教授 高山 正和

1. はじめに

核融合反応とは、2つ以上の軽い原子核が結合して1つの原子核になる反応で、この反応の時に質量欠損により膨大なエネルギーが発生する。現在、核融合反応を利用してエネルギーを得る核融合炉の研究が進められていて、核融合炉としては磁場閉じ込め方式が主に研究されている。磁場を用いず電界のみで閉じ込めを達成する慣性静電閉じ込め方式（IEC）は、エネルギーを得るためというよりは中性子源としての活用が期待されている⁽¹⁾。原理的に、IECは電界により重水素の正イオンを加速し、加速された正イオン同士が衝突することで核融合反応を引き起こすものである。IECのメリットとして、規模が小さくできる点、仕組みが単純で電界だけで構成できる点、核融合反応断面積を得るためのエネルギーが他の方法の約1/4でよい点などが挙げられる。

今回の研究では、円筒型の装置を想定して進める。円筒型の装置はリング型の陰極と円形平板の陽極で構成される（図1）。装置内で発生したグロー放電により、生成された正イオン・電子は電界により加速され、陰極方向に加速されるが陰極に衝突しない正イオンは両端の陽極間を往復し、陰極リング中央部付近で衝突して核融合反応が生起されると考えられる。正イオンの移動が球型装置では等方向的であるが、円筒型装置では直線方向であるため、衝突によって生じた中性子の方向が限定されるという利点があると考えられる。今回の研究では、慣性静電閉じ込め方式での荷電粒子の動きのシミュレーションを行うために必要な三次元電界分布の詳細を得ることを目的とする。それにより、荷電粒子の動きのシミュレーションを正確に行うことができるようになると考えられる。そのために必要な慣性静電閉じ込め装置に関する基礎知識の習得、必要なソフトウェアの選定および操作方法の習得をおこなう。

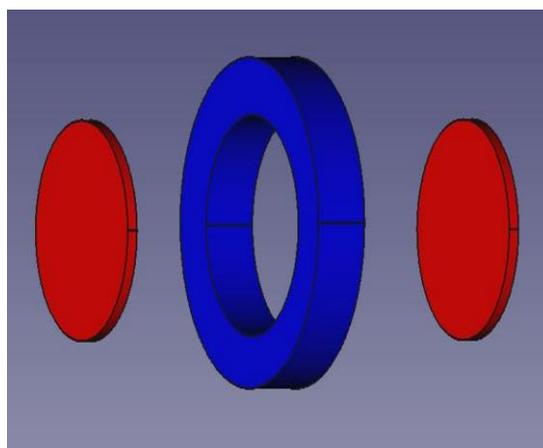


図1 円筒形装置の電極構造、陰極（リング）と陽極（円形平板）を示す。

2. 計算方法

電界計算の方法としては有限要素法 (FEM) を用いる。FEM は、等価な積分方程式を導出し、解析領域内を小さな多面体あるいは多角形に分割し、その節点において定義される変数を用いて積分方程式を近似的に評価する方法である⁽²⁾。

今回使用したソフトは FreeCAD 0.19、Salome 9.3.0、ElmerGUI、ParaView 5.8.1 の 4 つである。これらはいずれもフリーソフトである。

FreeCAD 0.19 は電極および計算領域のモデル制作に使用した。Salome 9.3.0 はモデルにメッシュを切るために使用した。ElmerGUI は FEM による電界計算に用いた。これを選んだのは軸対称オプションが付いていて、他のソフトと比べて軸対称系に簡単に対応できるためである。ParaView 5.8.1 は結果を可視化するために使用した。

3. 計算手順

電界計算を以下のように進めた。

- 1) FreeCAD で解析モデル (図 2) を製作した。今回のモデルは、陰極が外径 15 cm、内径 10 cm、幅 5 cm のリング、陽極が径 10 cm、厚さ 1 cm の円形平板とした円筒形装置である。各電極の中心間距離は 20.5 cm、計算領域の半径は 40 cm である。
- 2) Salome で空間メッシュの作成を行った (図 3)。空間メッシュは電極付近では細かく、計算領域の端では粗くして計算時間の短縮を図った⁽³⁾。
- 3) ElmerGUI で電位と電界の計算を行った⁽³⁾。装置内部は真空であることから、比誘電率を 1 とし、陽極には 10 k V、陰極には -10 k V を印加し、半球面を無限境界とした。
- 4) Paraview で計算された電位と電界を確認した。

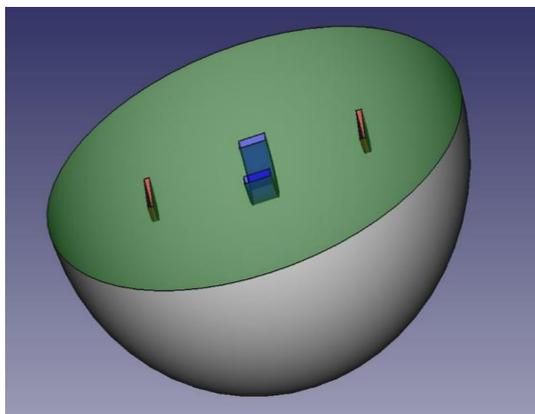


図 2 解析モデル

陰極 (リング)、陽極 (円形平板)、半球状の計算領域を示す。

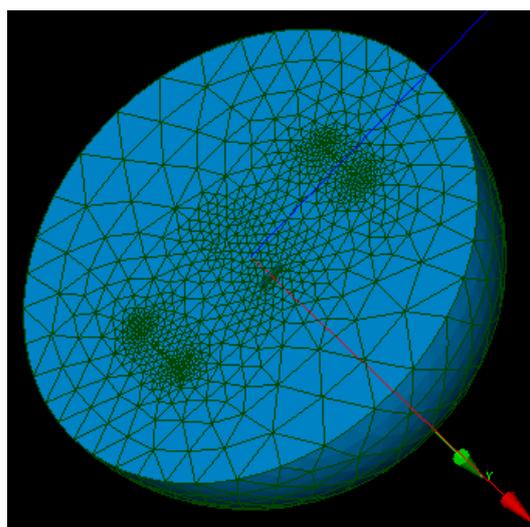


図 3 空間メッシュ 4 面体で空間メッシュを構成した。

4. 結果

図4に電位の分布を、図5に z 方向の電界を、図6に x 方向の電界を示す。 x 、 y 、 z の各向きは図中に示す通りである。電位 ϕ と電界 E の関係は式 (1) で表され、電界を x 、 y 、 z の各成分に分けると式 (2) のようになる。

$$E = -\nabla\phi \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial\phi}{\partial x} \\ \frac{\partial\phi}{\partial y} \\ \frac{\partial\phi}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2)$$

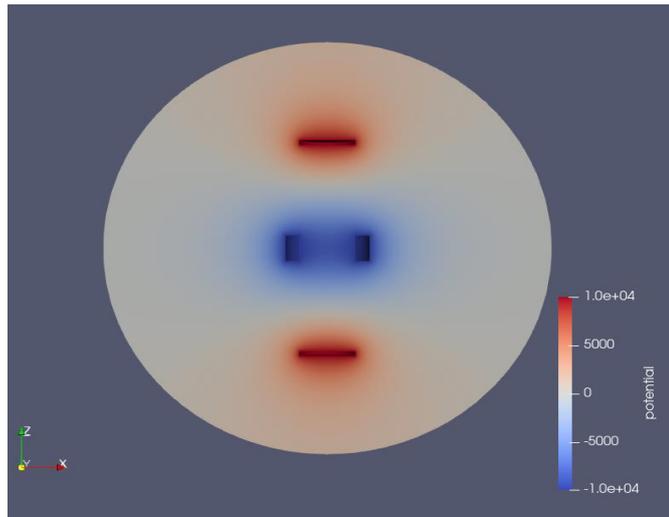


図4 電位の分布

図4より電位の分布は、赤い部分が正の値で大きく、青い部分が負の値で小さくなっている。陽極が最大値 10 k V でありそこから陰極 (最小値 - 10 k V) に行くに従って電位が小さくなっていることが分かった。

図5より、電界も赤い部分が正の値で、青い部分が負の値になっている。式 (1)、(2) から電界の向きを考えると、 z 方向の電界は陽極から陰極の向きに生じていることが分かった。また、図6より、陽極と陰極の端に x 方向の電界が生じていることが分かった。

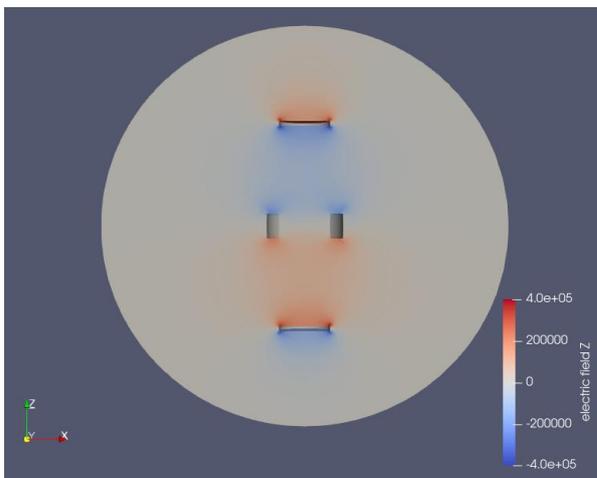


図5 z 方向の電界成分 E_z

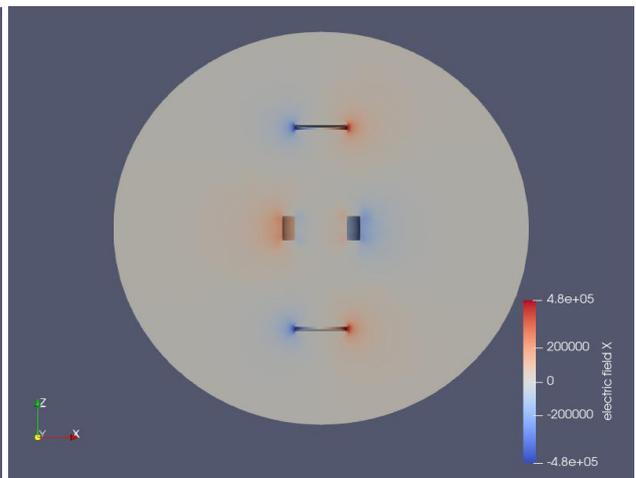


図6 x 方向の電界成分 E_x

5. 考察

荷電粒子の運動方程式は荷電粒子の質量を m 、速度を v 、電荷を q 、電界を E とすると、式 (3) で表される。

$$m \frac{dv}{dt} = qE \quad (3)$$

式 (3) より、正イオンは電界の向きと同じ方向に力を受けることがわかる。

電界計算結果より、主に陽極から陰極の向きに電界が生じることから、一方の陽極付近に存在する正イオンはこの電界により陰極方向に加速され、陰極へ向かう。この正イオンが陰極に衝突しないとき、逆側の陽極へ近づいていくがそこでは逆方向の電界が存在するため結局、正イオンは両端の陽極間を往復すると考えられる。したがって、閉じ込めに必要な電界が生じると考えられる。また、陽極と陰極の端に x 方向の電界が生じていることから、正イオンがそこに到達した場合、両端の陽極間に生じている閉じ込め電界から外れて装置の外側へ移動してしまう可能性が考えられる。それを防ぐための対策として、陽極の平板を陰極のリングより大きくして端に行かないようにする方法が考えられる。

6. 結論

今回の電界計算では、陽極から陰極に行くに従って電位が小さくなっていること、 z 方向の電界としては陽極・陰極間にそれぞれ逆向きの電界が生じること、陽極と陰極 x 方向の端にも電界が生じていることが分かった。そこから、装置内に閉じ込めに必要な電界が生じていること、正イオン・電子が両端の陽極間に生じている閉じ込め電界から外れて外側に移動してしまう可能性が考察できた。

参考文献

- (1) 吉川潔、山本靖、増田開、他：慣性静電閉じ込め核融合研究の現状、プラズマ・核融合学会、J. Plasma Fusion Res.、83、 p.795 (2007)
- (2) 矢川元基、吉村忍：計算力学と CAE シリーズ 1 有限要素法、培風館、p.2 (1991)
- (3) Elmer による静電場計算例：

<http://>

freeplanets.ship.jp/NumericalSimulation/FEM/ElmerTutor/StatElec/ElmerTutorStatElec.html (参照日：令和 3 年 11 月 4 日)