

Numerical Simulations of Ion Beam Optics and Grid Erosion for Ion Engine Systems

中野 正勝

東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

E-mail: mnakano@kouku-k.ac.jp

イオンエンジンの研究・開発においてシミュレーションが果たしている役割を紹介するとともに、加速グリッド系の損耗評価の研究例を紹介する。イオンエンジンは推進剤をプラズマ化することによりイオンを作り出し、電位差を加えた加速グリッド系にてイオンを高速に噴射することで推進力を得る電気推進機であり、少ない推進剤で効率よく加速できるという指標(比推力)が高いという特徴を有している。加速グリッド系からイオンビームを放出する際には、加速効率のよいグリッド系を構築する必要があるが、この加速系は多数の孔からなる薄い板で構成されており、実験によってグリッド孔径やグリッド間隔、印加電圧を変えてパラメトリックに評価することは現実的かつ効率的な方法ではない。そこでシミュレーションにより加速グリッド系の設計・評価等が行われてきた。本講演の前半部では、それらの例を示しながらシミュレーションの果たした役割について述べる。後半部では、イオンエンジンの加速グリッド系の寿命評価に焦点を当てる。イオンエンジンのグリッドは、高速なイオンの噴射の副産物である遅いイオンや大きな発散角を持ったイオン、また中性粒子の衝突を受け損耗を受ける。それら損耗を評価するためのシミュレーション法と適用例を示す。

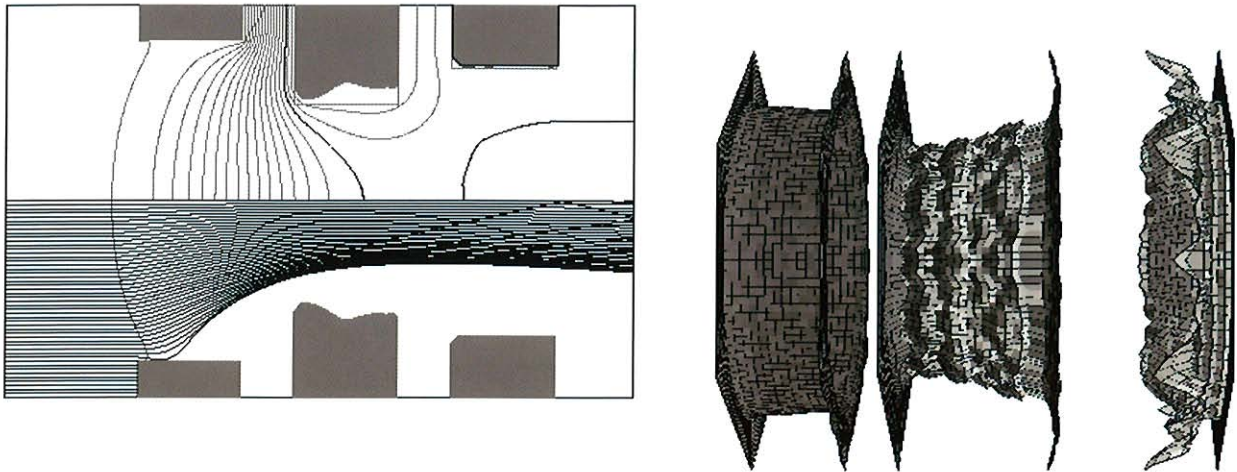


図13 枚グリッドの損耗の様子 [(左)2次元軸対称モデル, (右)3次元モデル]

Numerical Simulations of Ion Beam Optics and Grid Erosion for Ion Engine Systems

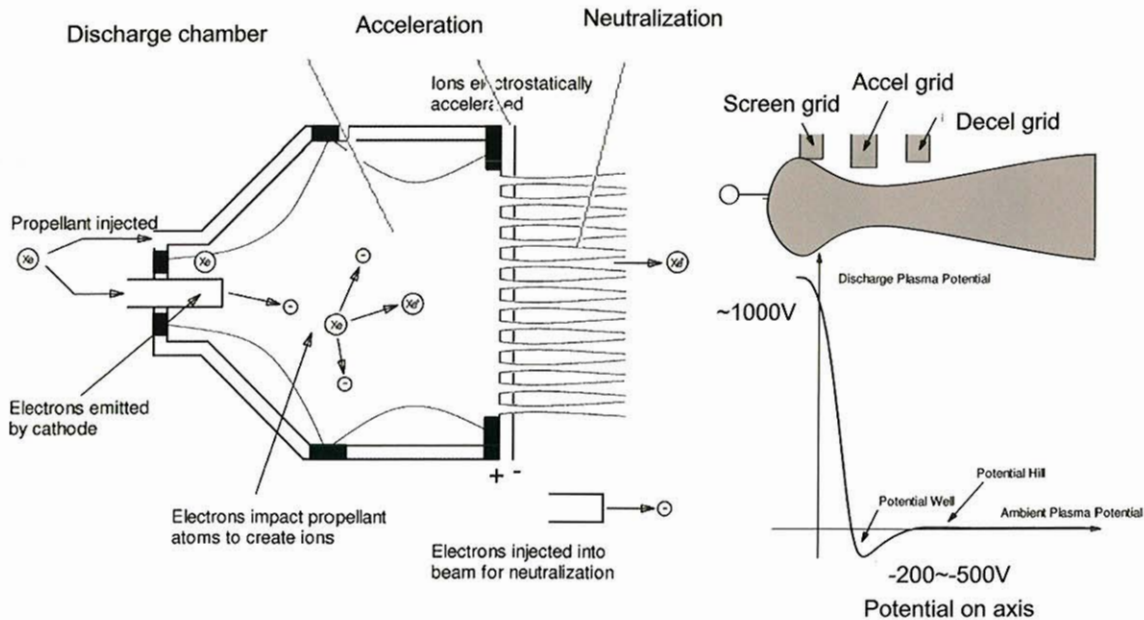
Masakatsu Nakano

Tokyo Metropolitan College of Aeronautical Engineering

Outline

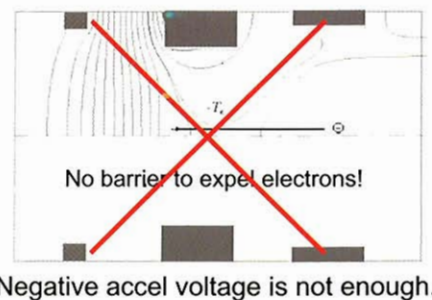
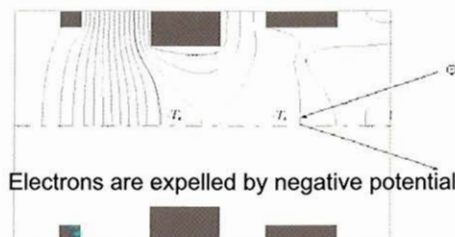
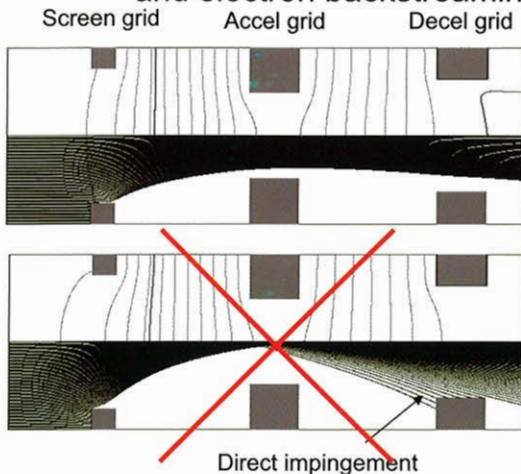
- Simulation needs
 - Optics design
 - Achieve higher thrust performance
 - Avoid direct impingement, electron backstreaming
 - Lifetime evaluation
 - Grid erosion
- New 3-D simulation code
 - Ions from elastic collisions
 - Neutrals
 - Redeposition (sticking effect)

Ion engine system



Simulation needs

- Parametric study
 - Grid optics design
 - Achieve higher thrust performance
 - Avoid direct impingement and electron backstreaming

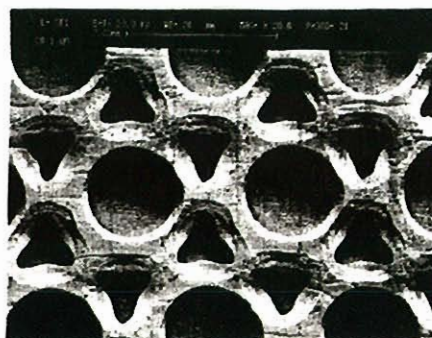
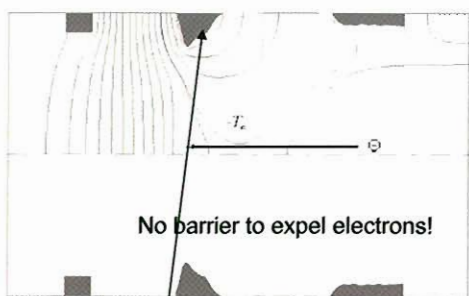
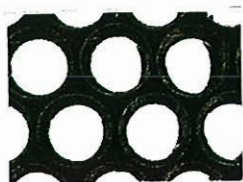


Simulation needs

- Lifetime estimation of the grids

- Electron backstreaming
- Structural failure

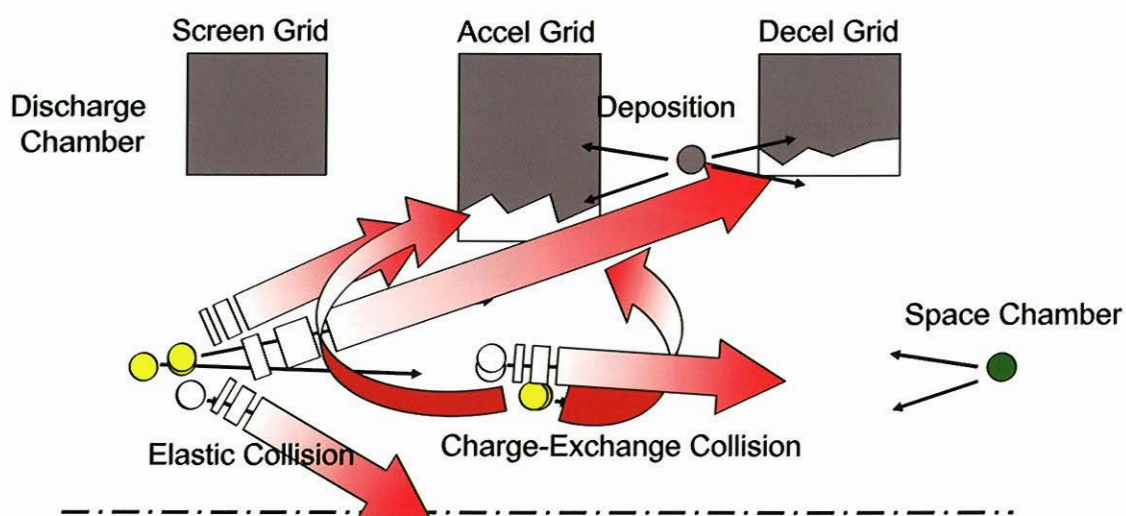
← Erosion



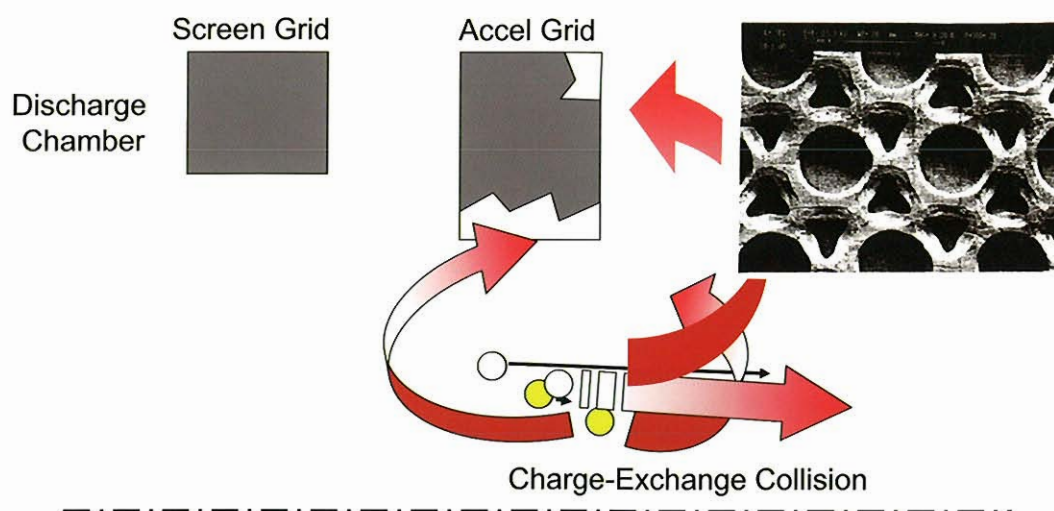
Downstream side of the accel grid

The accel grid is too eroded to apply negative voltage.

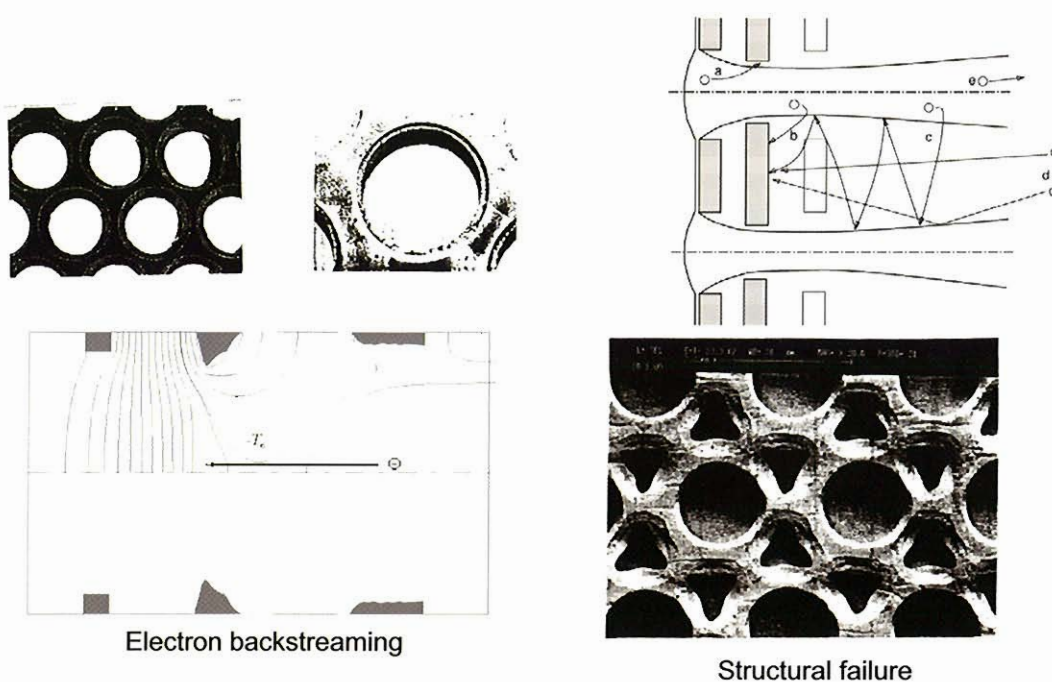
Grid erosion (3-grid system)



Grid erosion (2-grid system)



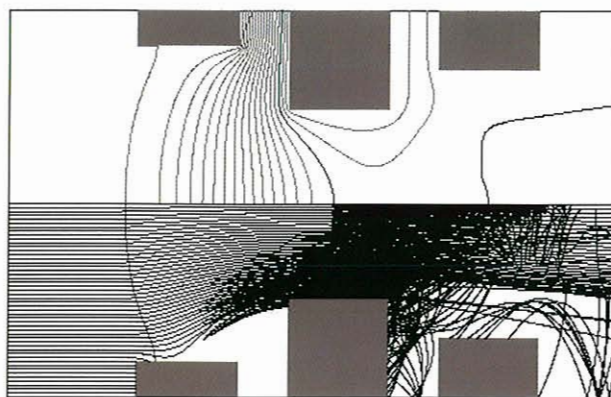
Lifetime estimation of the grids



Grid life simulation for 3-grid system

Geometry change of the grid system

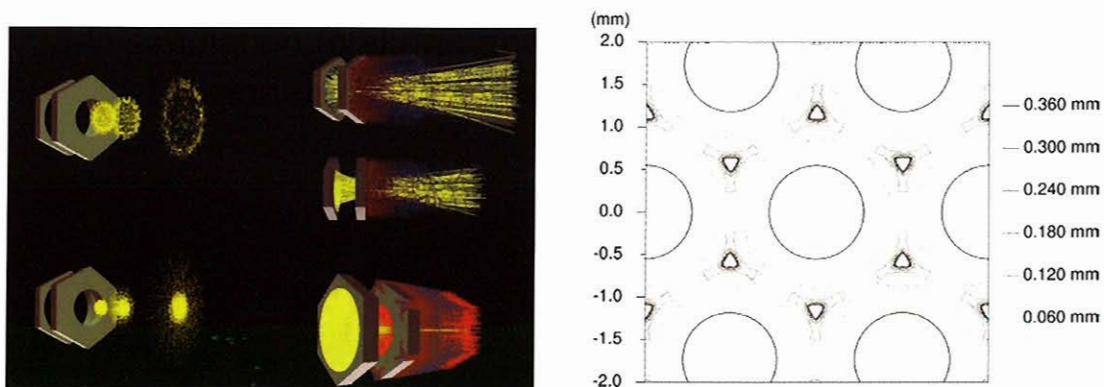
- 2-D asymmetric model (Nakano and Arakawa(1999))
- Erosion due to the sputtering of CE ions



Grid life simulation for 2-grid system

3-D simulation (Nakano and Arakawa(1999))

- Erosion due to the sputtering of CE ions



New optics code

• Motivation

- More correct and reliable lifetime estimation
 - Geometry change of the grid system by erosion and redeposition
 - More accurate model
 - Tracking following particles
 - » Mainstream ions
 - » Ions and neutrals from elastic collisions
 - » Charge exchange ions and neutrals
 - Sticking effect of sputtered atoms
- Design tool
 - Simple
 - Ions, neutrals and atoms are considered as beams
 - Electron density is calculated from Boltzmann relationship

Model

• Potential and densities

- $\nabla\phi = -(\rho_i - \rho_e)/\epsilon$
 - $\rho_i = \sum J_k / v_{izk} / S$
 - $\rho_e = \rho_{e0} \exp(-e\phi / k_B T_e)$

• Beam trajectories

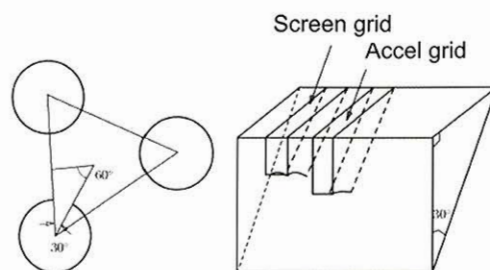
- $M \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = -q \nabla \phi$

• Collisions

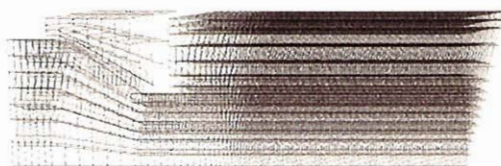
- $J_{ce} = \sum J_k |\mathbf{v}_{jk} - \mathbf{v}_n| n_n \sigma_{ce} \Delta t_k$
- $J_{els} = \sum J_k |\mathbf{v}_{jk} - \mathbf{v}_n| n_n \sigma_{els} \Delta t_k$

• Sputtering

- $m_i = J/e \times Y(E, q)$

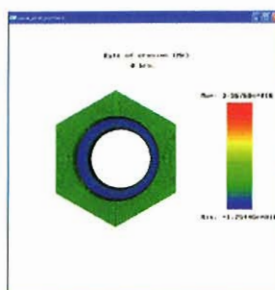
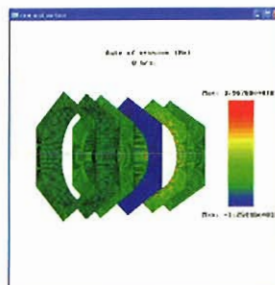
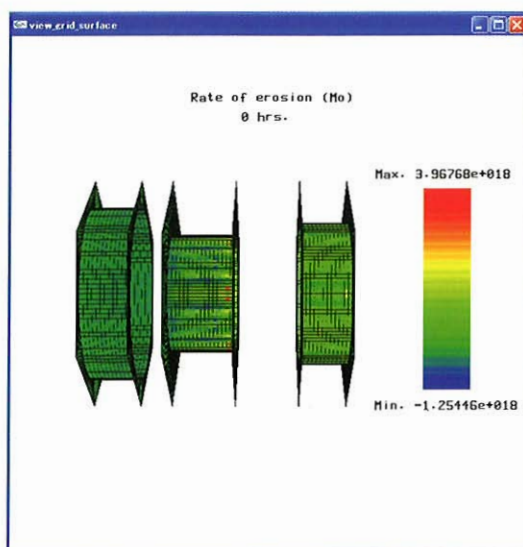


Simulation domain



Grid geometry change from BOL to 10000hrs

Discharge chamber

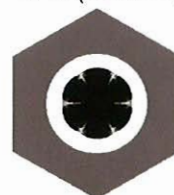
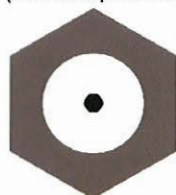


A-A'(Accel upstream)

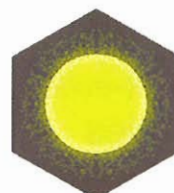
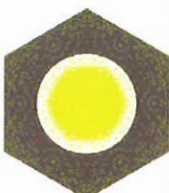
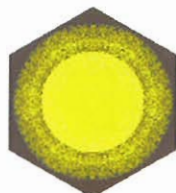
B-B'(Accel downstream)

C-C'(Decel upstream)

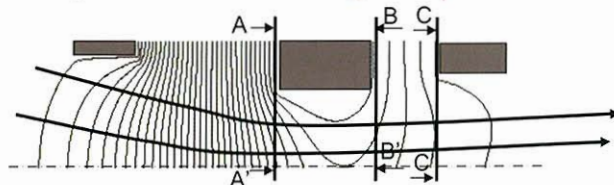
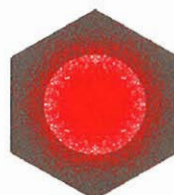
Mainstream ions



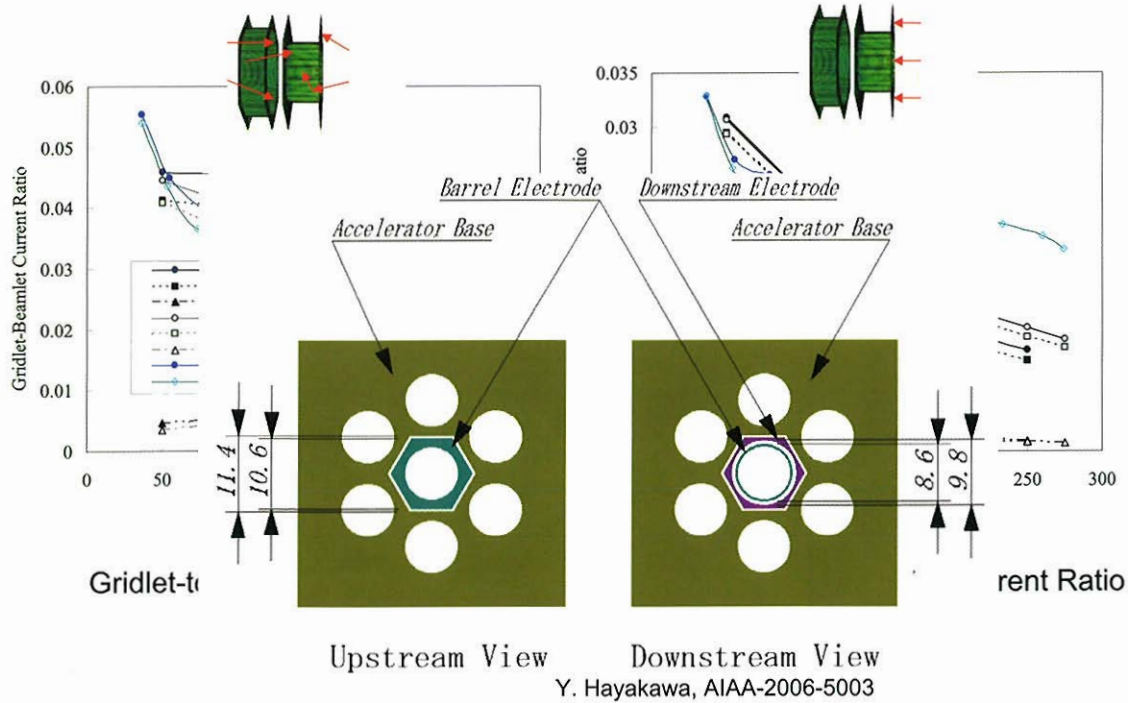
Charge-exchange ions



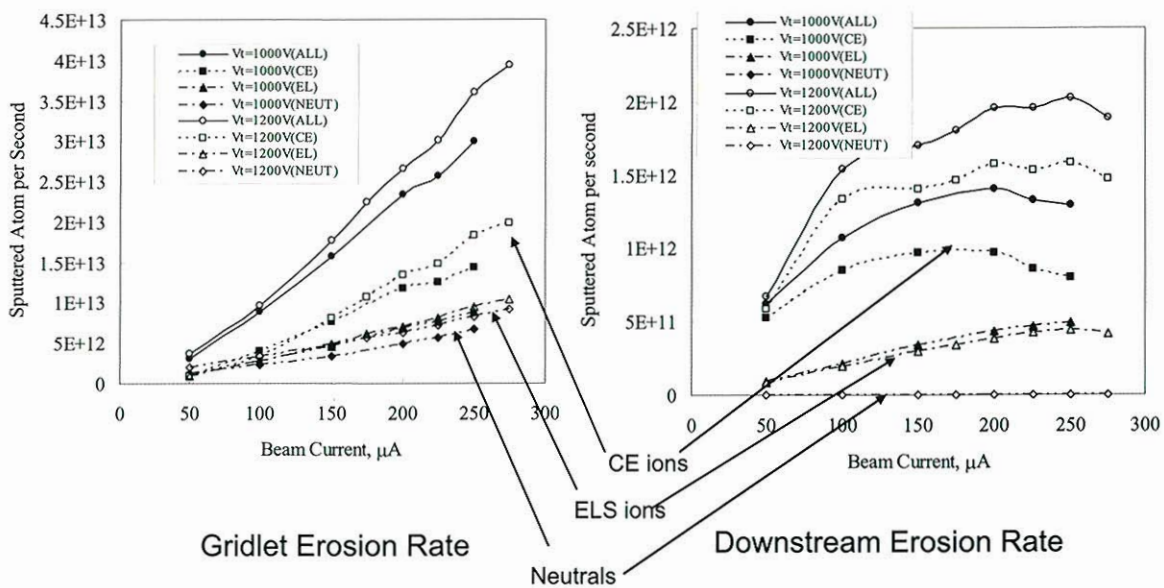
Ions from elastic collisions



Comparison of accel grid current

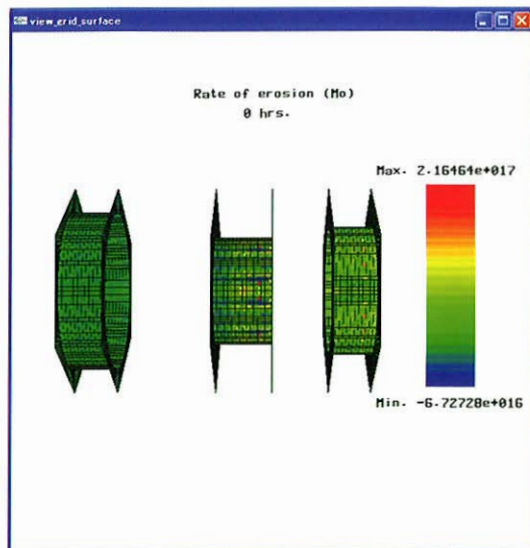


Effect of elastic ions and neutrals on erosion

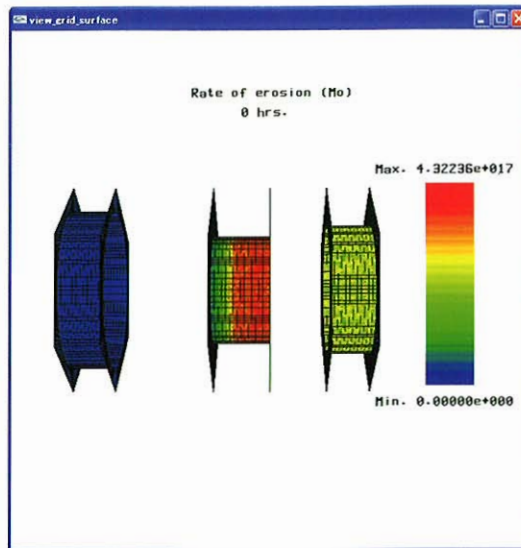


Effect of redeposition

NAL 3-grid system from BOL to 40,000hrs



With sticking effect



Without sticking effect

Summary

- Simulation
 - Grid optics design
 - Lifetime estimation
- New simulation code
 - Elastic collision
 - Neutrals
 - Sticking effect
- Need more reliable database
 - Sputtering yield
 - Collision cross section
 - Sticking factor
 - Electron model
 - Electrons behave as $\rho_e = \rho_{e0} \exp(-e\phi/k_B T_e)$?