

第13回 若手科学者によるプラズマ研究会  
「プラズマ加熱・制御技術の進展と展望」  
2010.3.10-12

# 負イオン静電加速器に おける電極熱負荷の解析

水野 貴敏

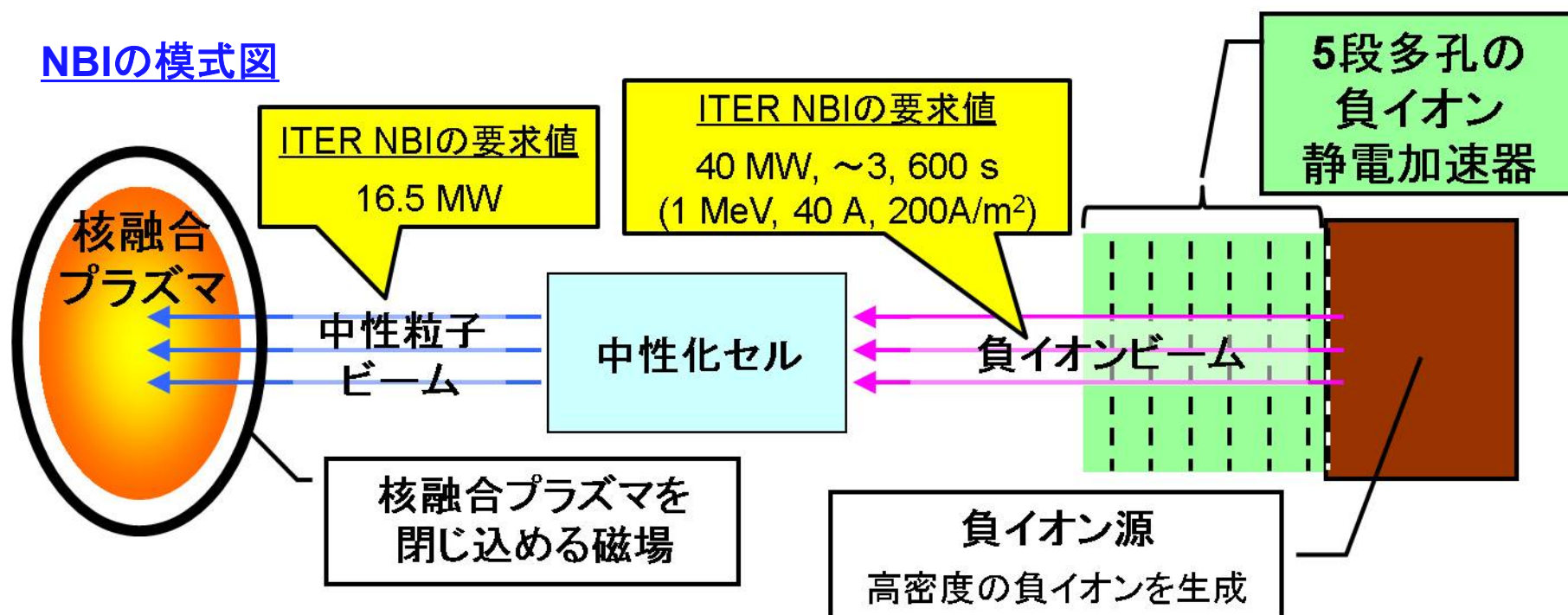
日本原子力研究開発機構  
那珂核融合研究所

# ITER NBI用負イオン静電加速器

NBI(中性粒子入射装置: Neutral Beam Injector)

- 核融合プラズマの加熱
- プラズマの安定維持のための電流駆動

## NBIの模式図

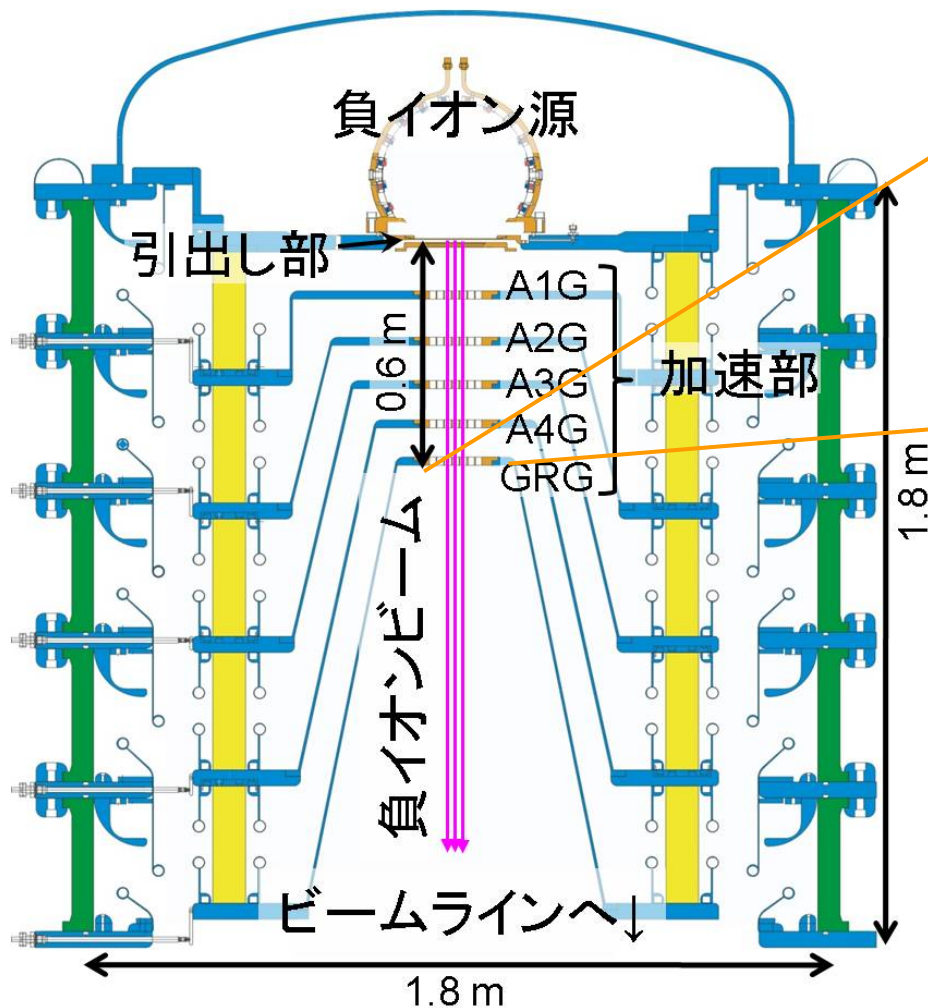


ITERにおいて 1 MeV, 40 A (200 A/m<sup>2</sup>)の負イオンビームを 3,600 sに渡り加速するためには、電極熱負荷の低減が重要。

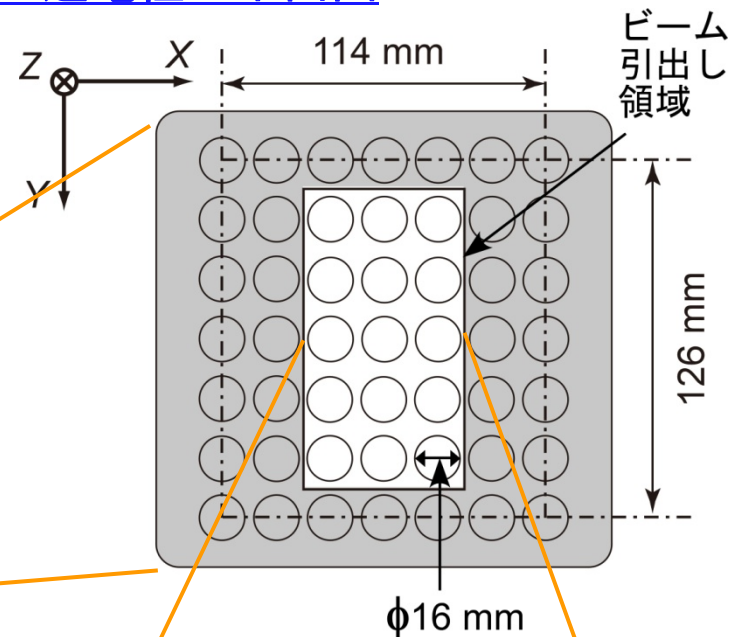
# MeV級加速器

## MeV級加速器の開発目標

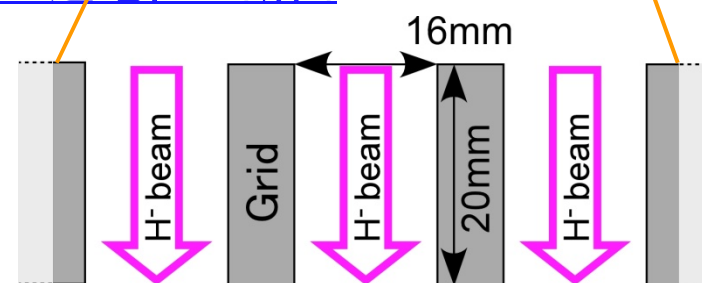
1 MeV, 200 A/m<sup>2</sup>の長パルス(~数十 s)  
負イオンビーム加速



## 加速電極の平面図

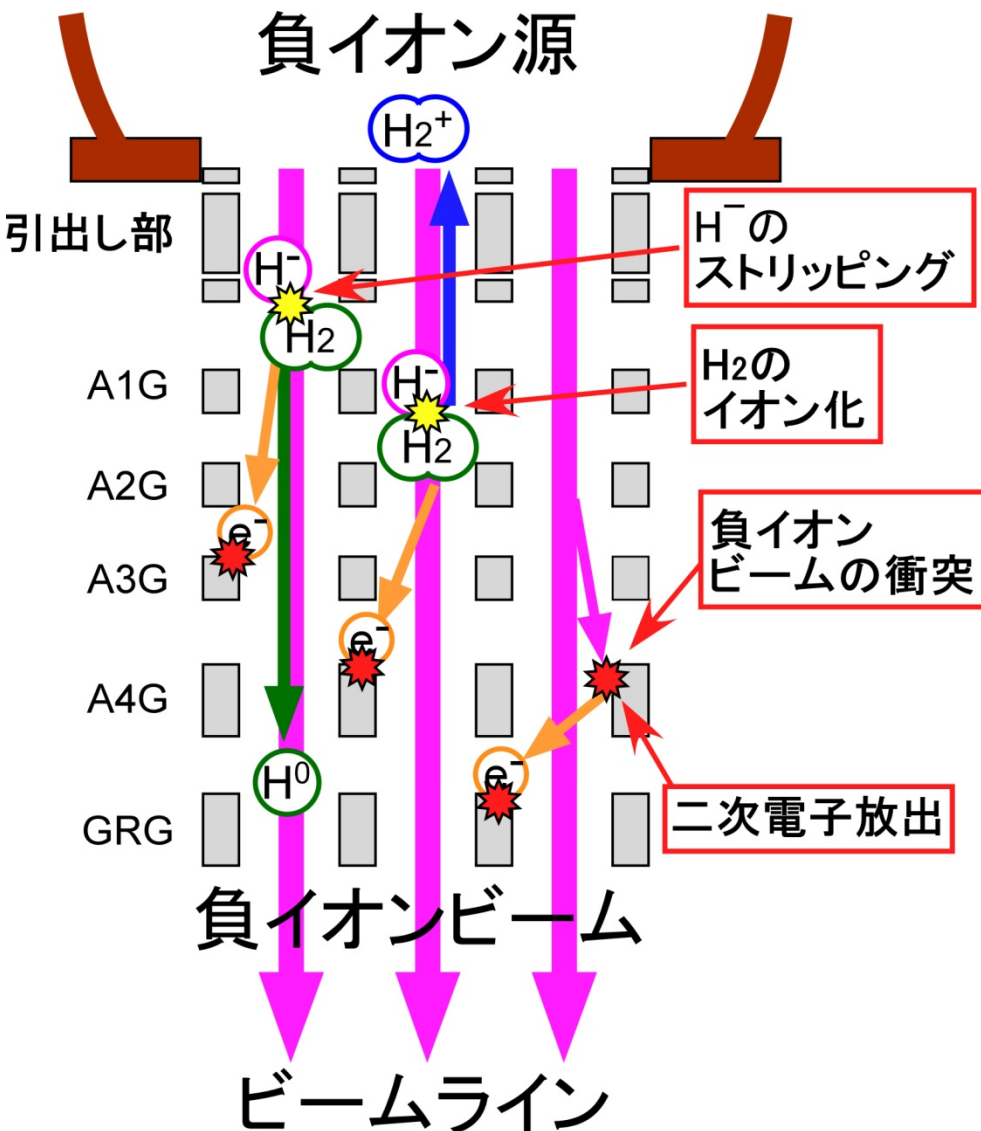


## 加速電極の断面



# 長パルス負イオンビーム加速における課題

## 加速器内の粒子挙動



## 電極熱負荷の原因

- 負イオンビームの直接衝突
- 負イオン加速途中に発生する二次粒子(剥離電子、 $H^0$ 、正イオン、二次電子)の衝突

## ITER NBIに向けた二次粒子挙動解析[1]

電極1枚あたり2 MW  
(ITERの設計許容値: 1.5 MW)

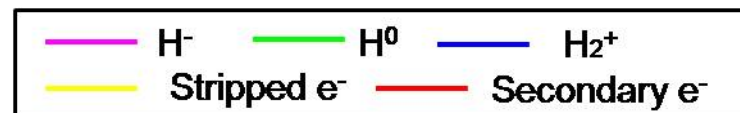
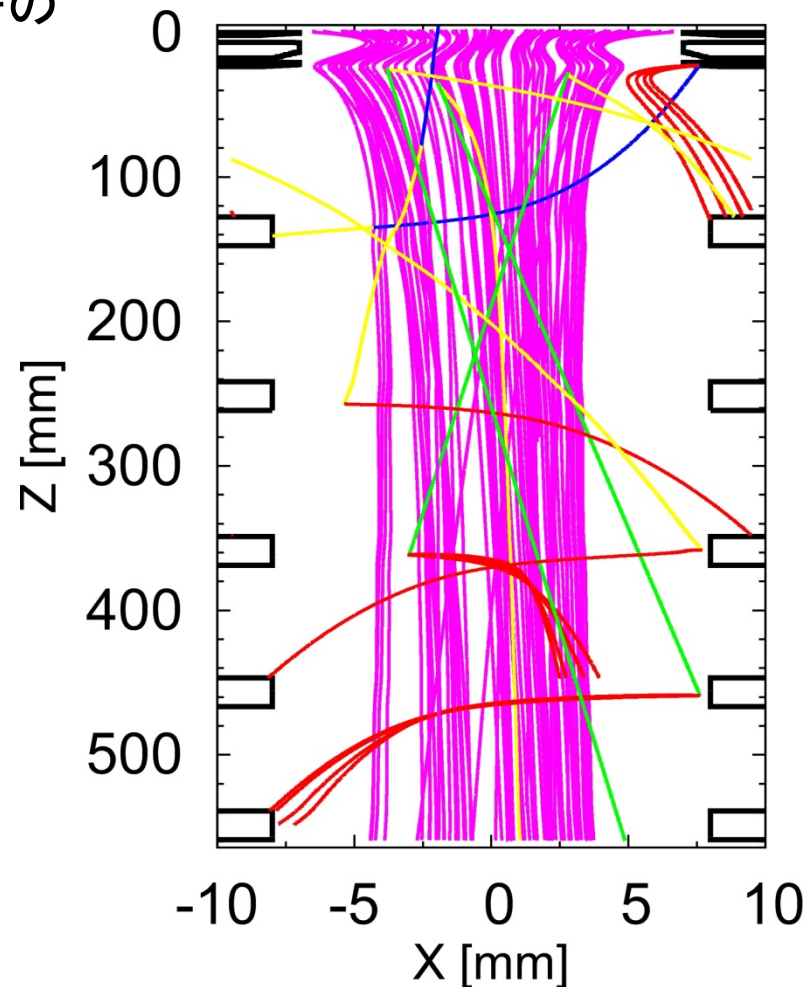
二次粒子の挙動を解析し、  
二次粒子による電極熱負荷の  
低減することを目的とする。

[1] G. Fubiani, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 014202 (2008)

運動方程式を解いて、負イオン及び二次粒子の軌道を追跡。

- **ポテンシャル** (SLAC-CADコード)
  - 電極への印加電圧
  - 負イオンビームの空間電荷
- **磁場** (Multipole fieldコード)
  - 電子抑制用磁石 (引出し部に設置)
- **負イオン及び二次粒子と電極との衝突**
  - 反射または吸収
  - 二次電子の発生
- **負イオンと水素残留ガスの衝突**
  - Hの中性化反応
  - H<sub>2</sub>のイオン化反応
- **H<sub>2</sub> 密度分布** (3次元ガス解析コード)

負イオン及び二次粒子の軌道解析例



# 解析結果：電極熱負荷の内訳

EAMCCコードを用いてMeV級加速器の電極熱負荷を解析。

## 解析条件

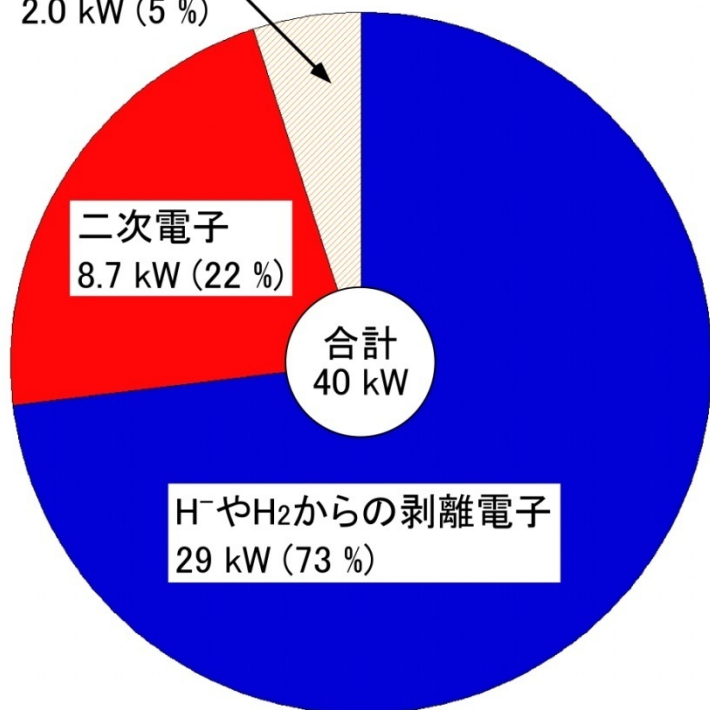
$$V_{\text{acc}} = 1 \text{ MV}, V_{\text{ext}} = 7.3 \text{ kV},$$

$$J_{\text{H}^-} @ \text{PG entrance} = 275 \text{ A/m}^2, J_{\text{H}^-} @ \text{GRG exit} = 200 \text{ A/m}^2$$

$$P_{\text{source}} = 0.16 \text{ Pa}, P_{\text{beamline}} = 0.09 \text{ Pa} (\text{ストリッピング率 } 27 \%)$$

## 加速電極の熱負荷の発生源

$\text{H}^0, \text{H}^+, \text{H}_2^+$   
2.0 kW (5%)



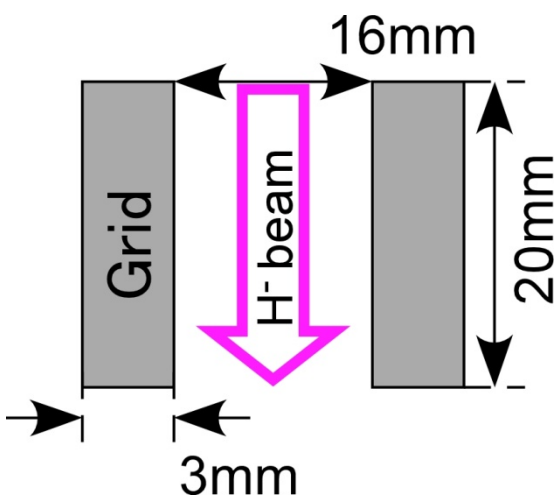
- 熱負荷の73%は剥離電子の衝突が原因  
→ 運転ガス圧に依存するため不可避。
- 熱負荷の22%は二次電子の衝突が原因  
→ 電極形状の改良により二次電子の発生の抑制が可能。

# 二次電子の発生を抑制する電極形状

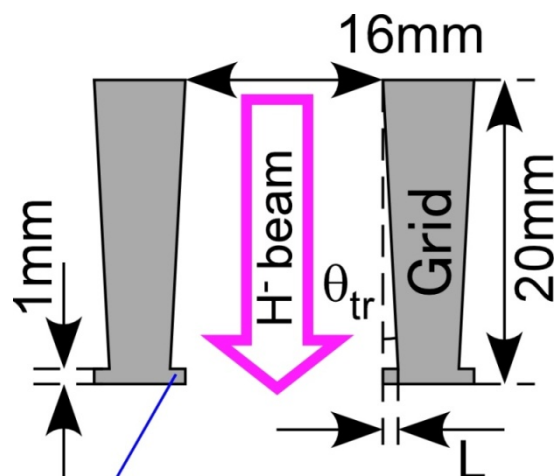
粒子の電極への衝突を抑制するために

- 電極孔にテーパ付ける。
- 電極の厚みを薄くする。

従来の電極



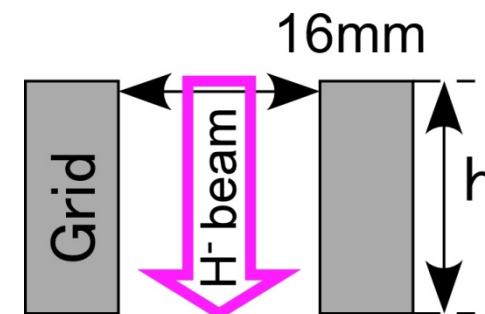
テーパ付き電極



電子トラップ  $\theta_{tr} = 1.5, 3.0, 4.2 \text{ deg}$ ,  
 $L = 0.5, 1.0, 1.4 \text{ mm}$

テーパ角  $\theta_{tr}$  及び電子トラップ  $L$   
 の大きさを変更。

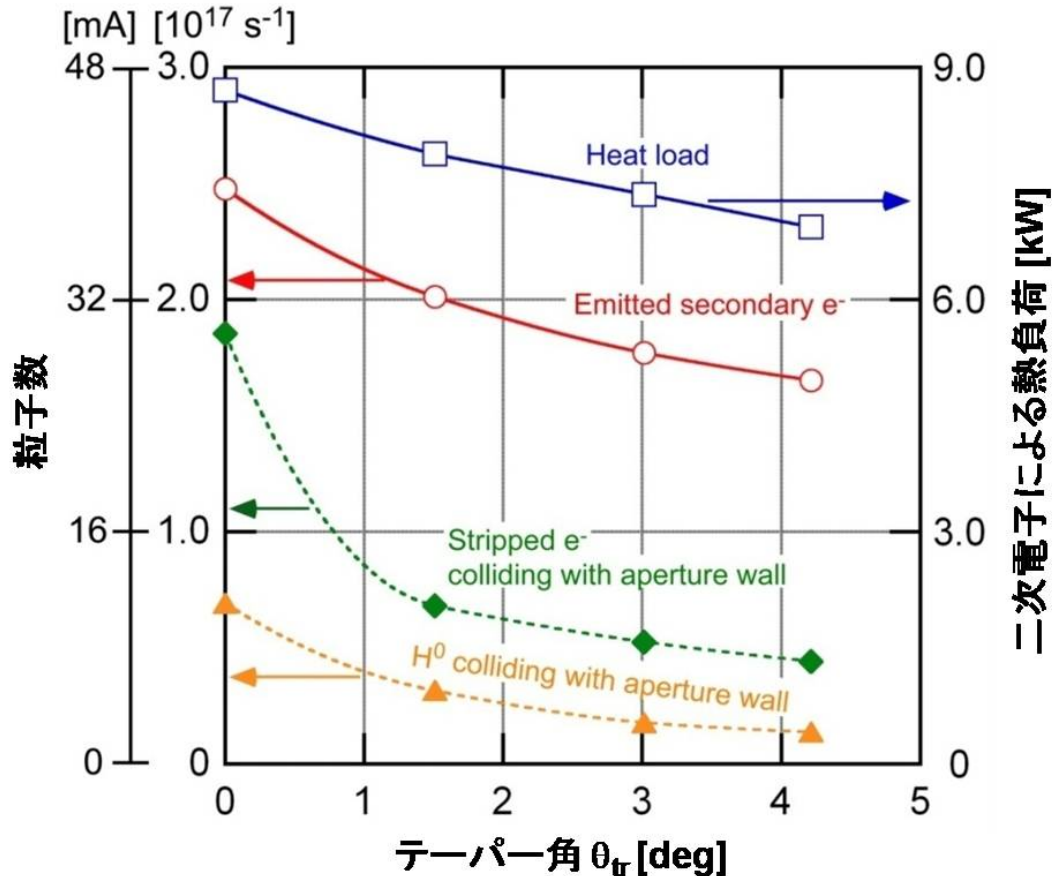
薄型電極



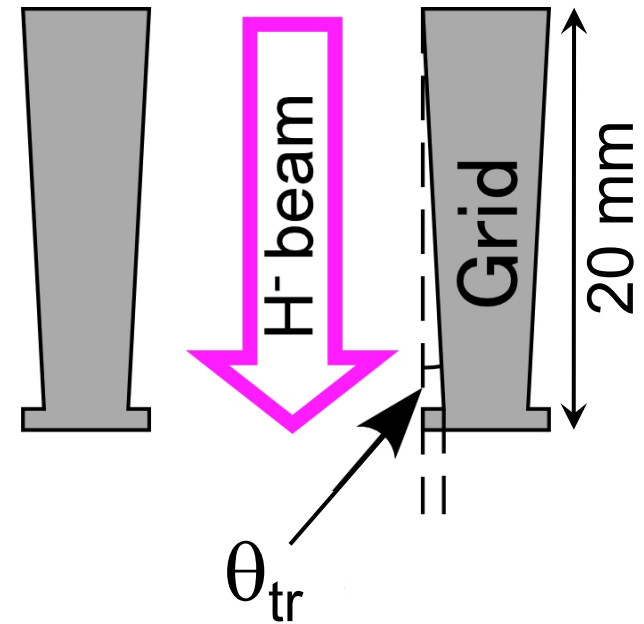
$h = 5, 10, 15 \text{ mm}$   
 電極の厚み  $h$  を変更

EAMCCコードを用いて電極熱負荷を解析。

# 解析結果1) テーパー付き電極



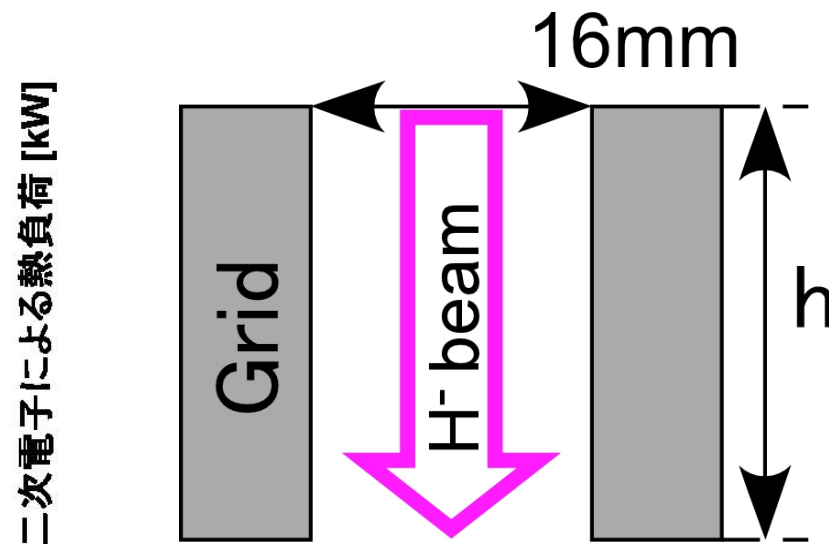
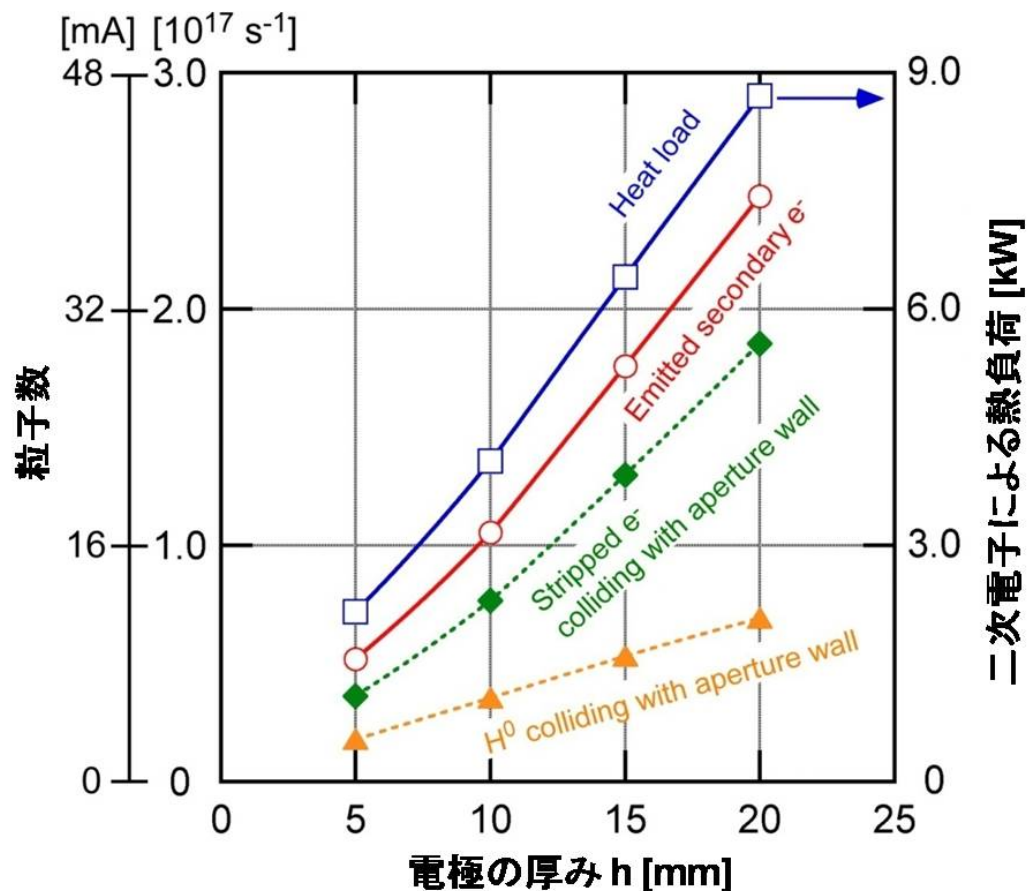
二次電子による熱負荷 [kW]



- テーパー角 $\theta_{tr}$ を大きくするほど、剥離電子や $H^0$ の衝突が減少。
- その結果、二次電子の発生及び二次電子による熱負荷が減少。
- 4度以上のテーパーを付けると、8.7 kW から 6.9 kWへ約 20 % 低減。



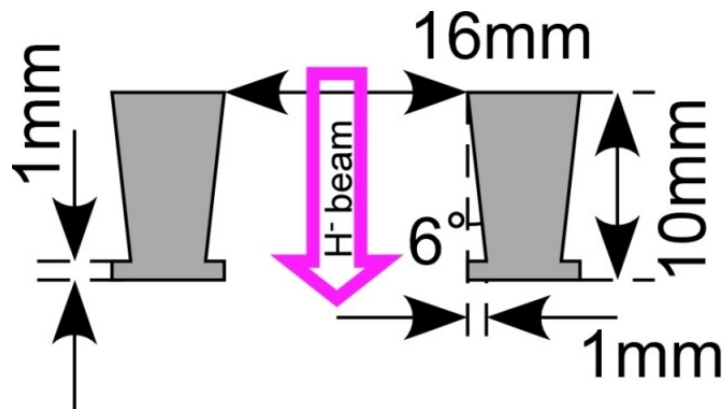
# 解析結果2) 薄型電極



- 電極の厚み  $h$  を薄くするほど、剥離電子や $H^0$ の衝突が減少。
- その結果、二次電子の発生及び二次電子による熱負荷が減少。
- 電極の厚みを20 mmから5 mmにすると、8.7 kW から2.2 kWへ約75 %低減。
- テーパーを付けるより熱負荷低減の効果が大きい。

# テーパ付薄型電極

## 二次電子の発生を抑制する新電極

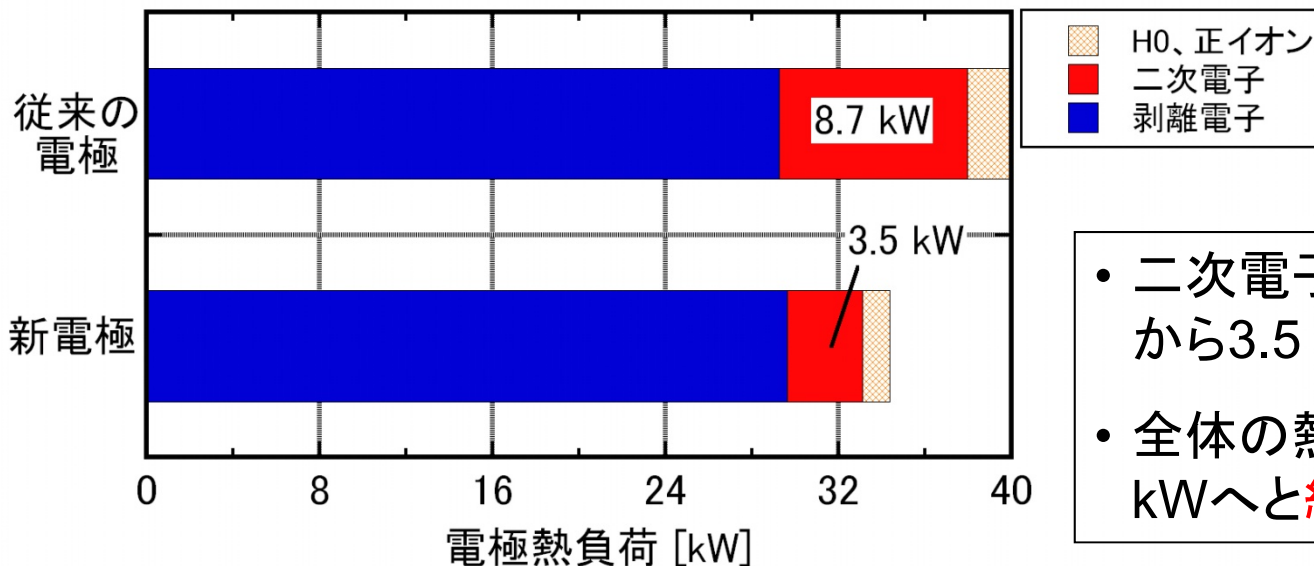


- 二次電子による熱負荷はテーパ角を大きくするほど、電極の厚みを薄くするほど低減できる。

- 冷却水配管を考慮して、以下のような電極形状を考案。

- 電極の厚み10 mm
- テーパー角 6 度
- 電子トラップ

## 電極熱負荷の比較



- 二次電子による熱負荷が8.7 kWから3.5 kWへ低減。
- 全体の熱負荷は40 kWから34 kWへと約15%低減。

## まとめ

- ITER NBIに向けて電極熱負荷を低減するため、二次電子の発生を抑制するような電極形状の改良を検討した。
- テーパー角を大きくするほど、電極を薄くするほど、**二次電子の発生が抑制され、電極熱負荷の低減**が可能であることが判明した。
- 電極厚を10mm、6度のテーパーと電子トラップを付ける電極形状を考案した。この改良により**全体の電極熱負荷を約15%低減出来る**ことが明らかになった。
- MeV級加速器で実験検証を進めると共に、ITER機構にこの電極形状の改良を提案している。