



第12回 日本加速器学会年会
2015年8月5日(水)



ガスクラスタライオンビームのサイズ分布制御 に向けた分析装置の開発

平野 裕亮*

畠山暖太郎, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘
(長岡技術科学大学)

クラスターイオンビームの概要

研究の目的

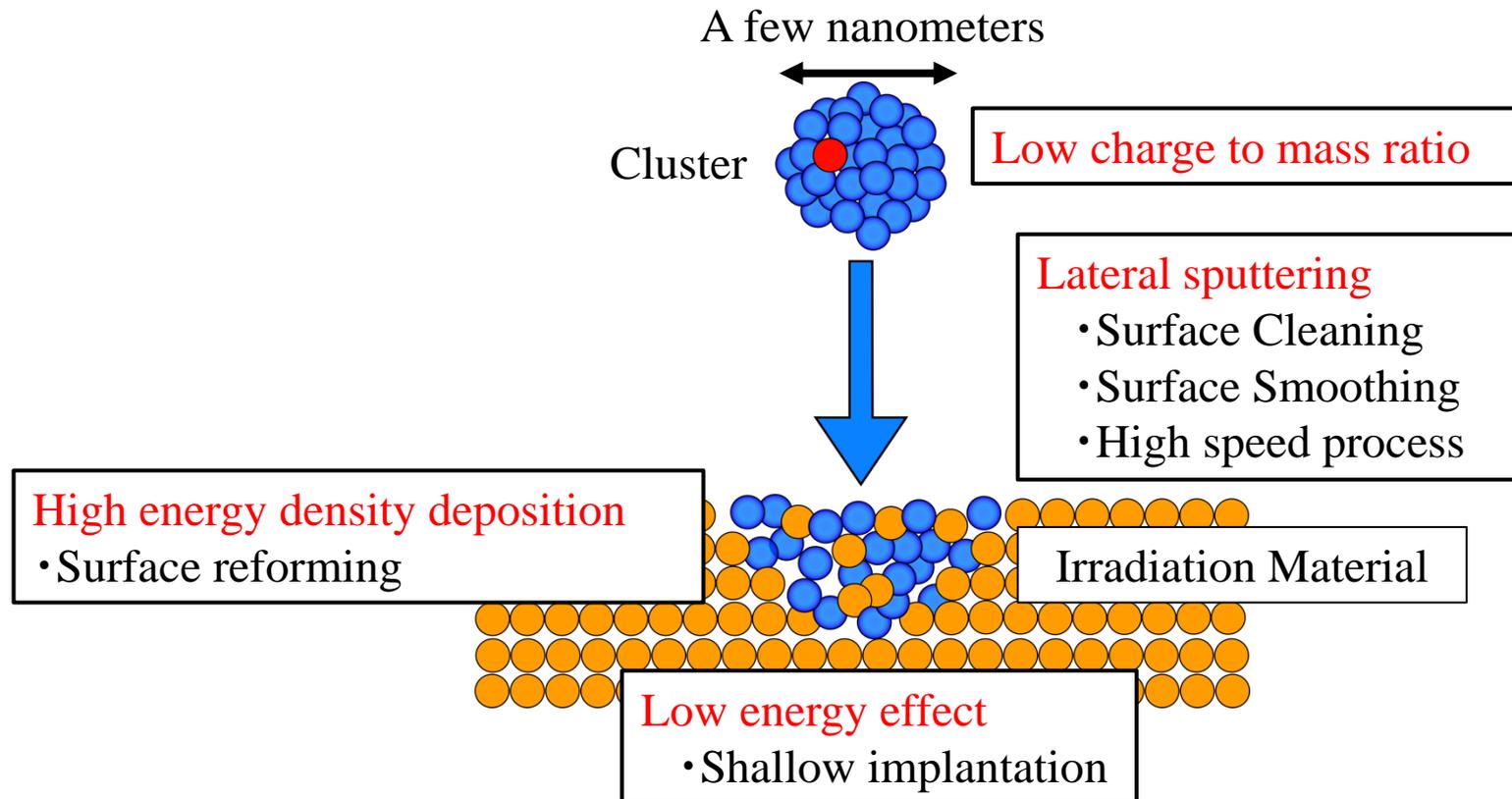
装置の設計、製作、測定

まとめ

クラスターイオンビーム(Cluster Ion Beam)

クラスター・・・数個から数千個の原子や分子の塊

<クラスターイオンビームの照射効果>



低エネルギー、大電流領域のイオンビームプロセス技術

クラスターの結合様式と生成方法*

<結合様式>

結合種類	例
ファンデルワールスクラスタ	Ar, Xe
共有結合クラスタ	C ₆₀
金属クラスタ	Au, Cu

<生成方法>

固体材料やガスからクラスターを生成

生成方法
ガス凝縮法
レーザー蒸発法
スパッタリング法
アーク放電法

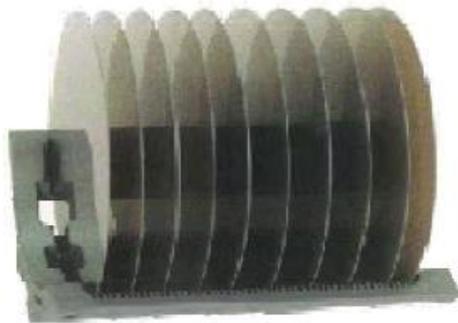
*: 山田 公(2006) “クラスターイオンビーム基礎と応用” 日刊工業新聞社

クラスターイオンビームの応用*

ナノレベル以下のプロセス技術に応用

<無損傷ナノ加工技術>

SiC surface smoothing



Ra < 0.5 nm

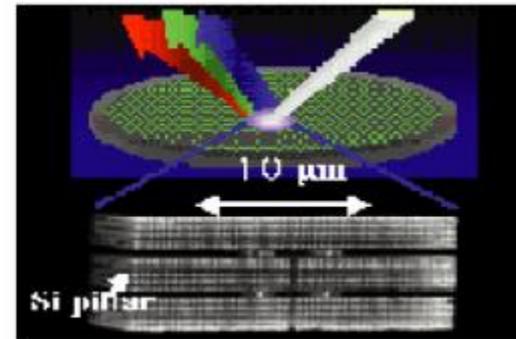
(Mitsui Engineering & Ship building Co)

硬度が大きい基盤の研磨などの加工は表面に損傷が生じる

- ・表面平坦化効果
- ・低損傷、高効率表面プロセス

<超高速・高精度ナノ加工技術>

Si photonic structure



Ra < 1 nm
Pattern width
< 100 nm

(Japan Aviation Electronics Industry)

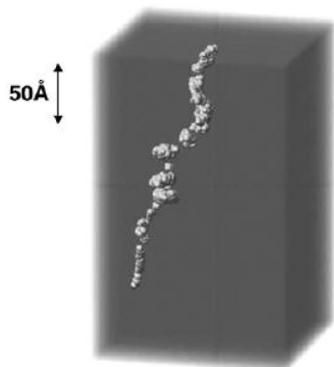
パターン幅が小さい立体形状の高精度な平坦化が必要

- ・高スパッタ率
- ・高い質量電荷比

固体表面照射効果

<クラスターイオンの低エネルギー照射効果例*>

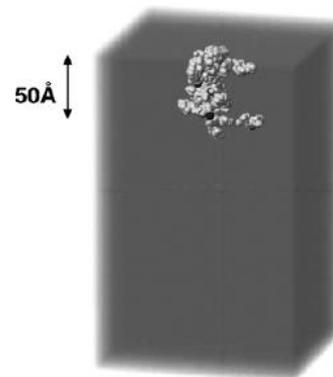
① ホウ素**1個**を5keVで注入



B₁ 5keV

モノマーの注入軌跡に沿って、イオンが侵入し**奥**深くに損傷形成が生じる

② ホウ素**10個**を5keVで注入



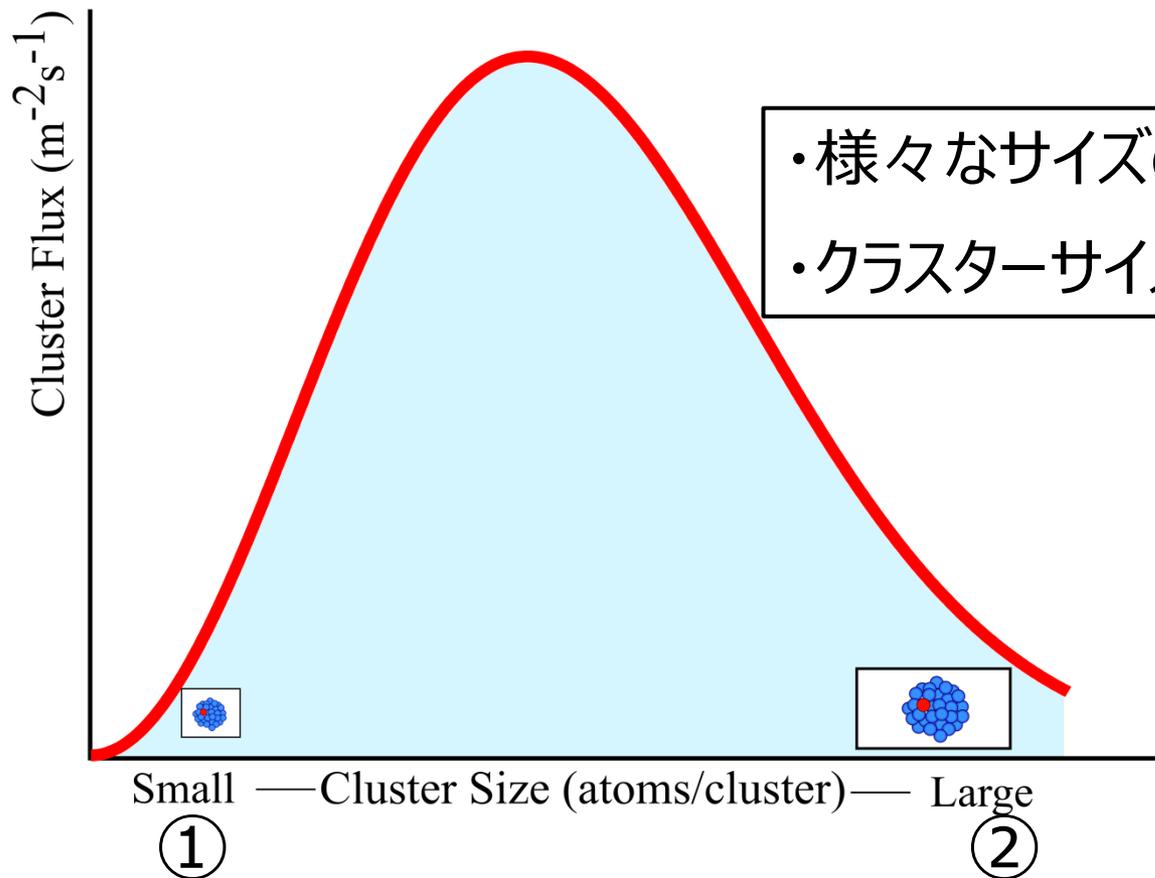
B₁₀ 5keV

B原子が基板の**表面**に留まり、高密度のSi原子の欠陥

クラスターサイズ(クラスターを構成する原子数)と**エネルギー**の違いによって照射効果が異なる

ガスクラスタリーオンビームのサイズ分布

<一般的なクラスターサイズ分布>



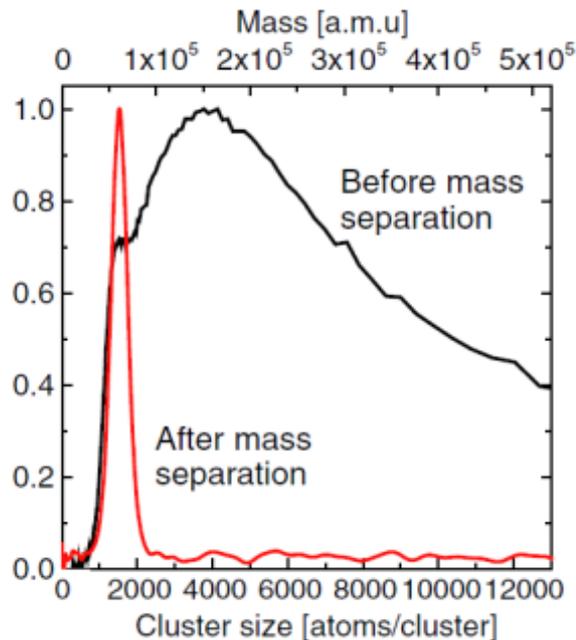
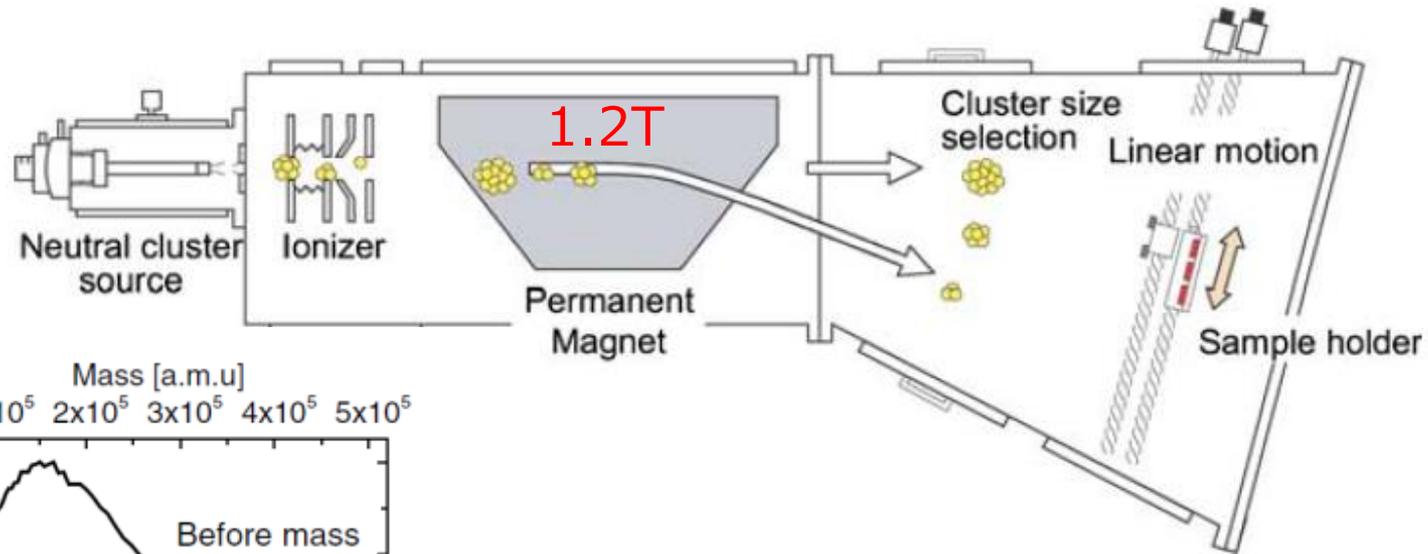
- ・様々なサイズのクラスターが生成される
- ・クラスターサイズによって照射効果が異なる

照射対象・加工種類に応じてクラスターサイズの選別・制御が必要

磁場偏向法によるクラスターサイズの分離*

<磁場偏向法>

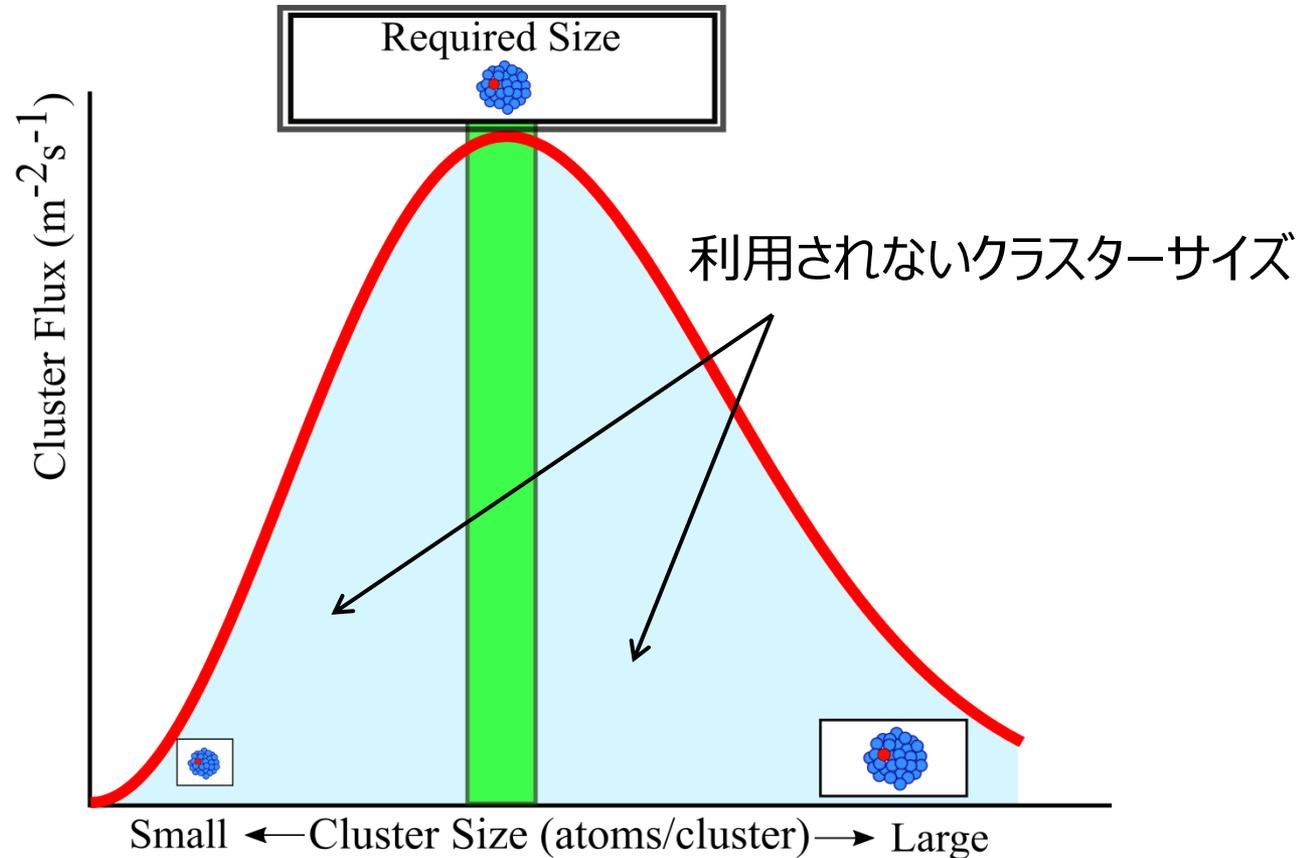
磁場を利用してそれぞれのクラスターサイズの軌道を曲げる



所望のクラスターサイズを分離して利用する

*: N. Toyoda et al. / Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B **242** (2006) 466-468

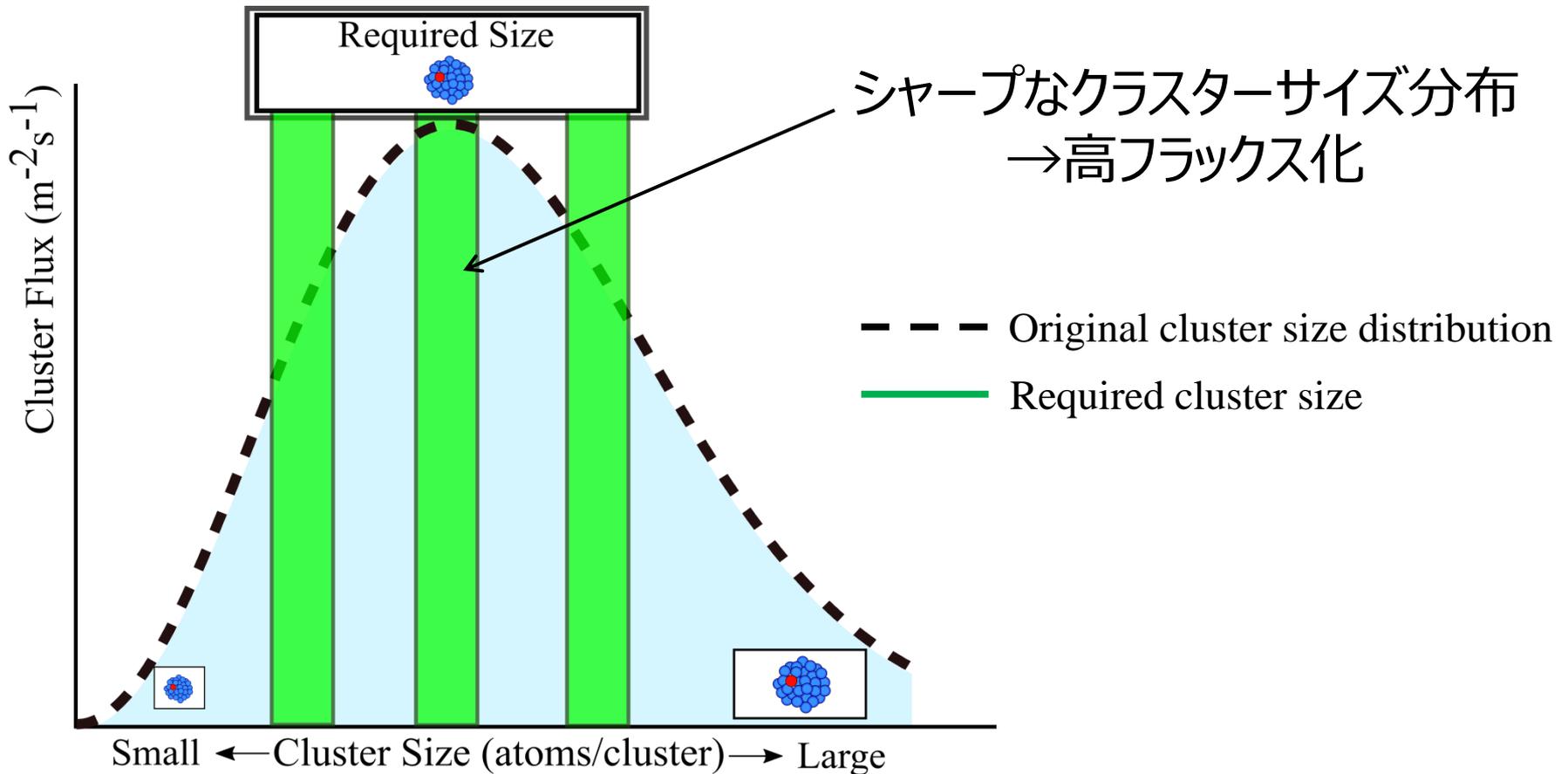
照射時のクラスターサイズ分布の欠点



利用されないクラスターサイズが多いためクラスターの利用効率が悪い

理想的なガスクラスターサイズの制御方法

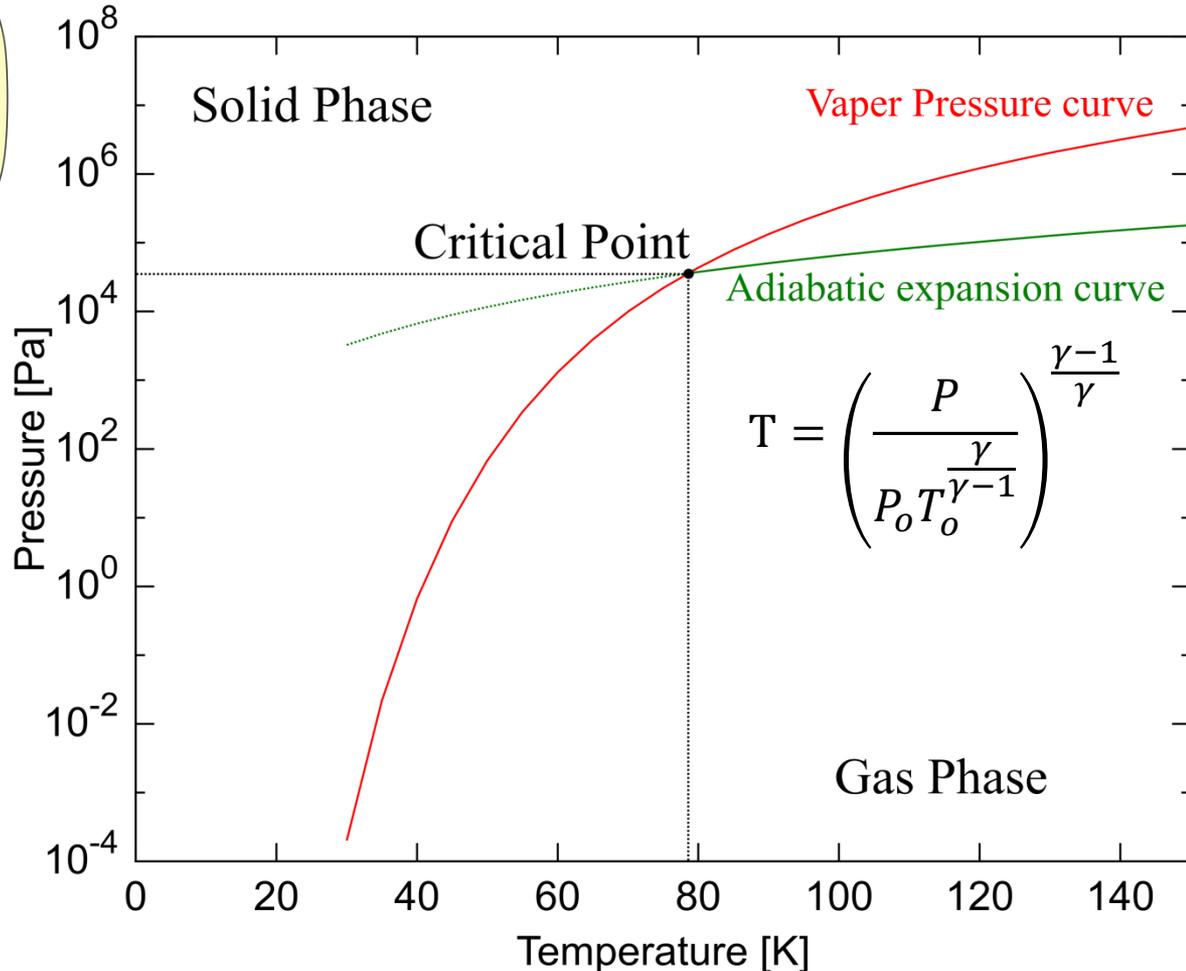
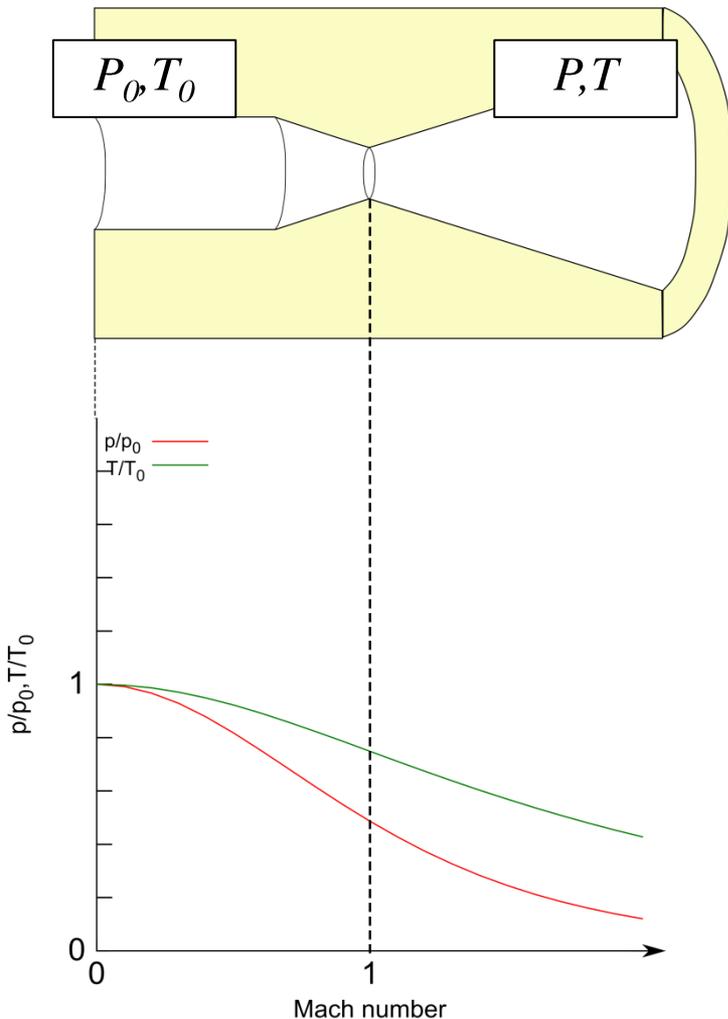
クラスターを高効率で利用
⇒要求されるクラスターサイズだけを生成



高フラックス化に向けてクラスターの生成方法に注目

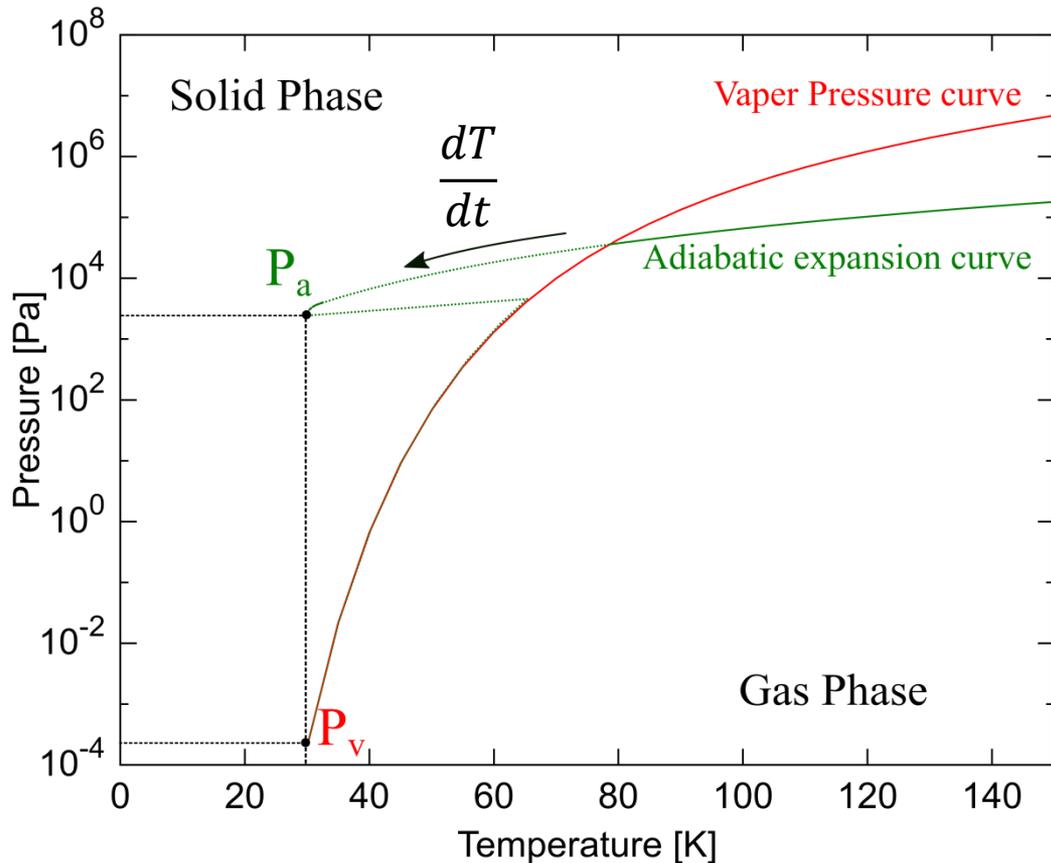
ガス凝縮法によるガスクラスターの生成

- ガス凝縮法には、超音速ノズルを用いる
→ 膨張に伴う断熱冷却による凝縮過程でクラスターが形成



ガスクラスターの生成過程

- 凝縮に伴って生じる**潜熱**の放出によって生成は終了



過飽和度

$$S = \frac{P_a}{P_v}$$

冷却速度

$$\frac{dT}{dt}$$

核生成の式*

$$I = Zn_1 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{KT}\right)$$

Z:係数

n_1 :気体密度

K:ボルツマン定数

T:温度

σ :表面張力

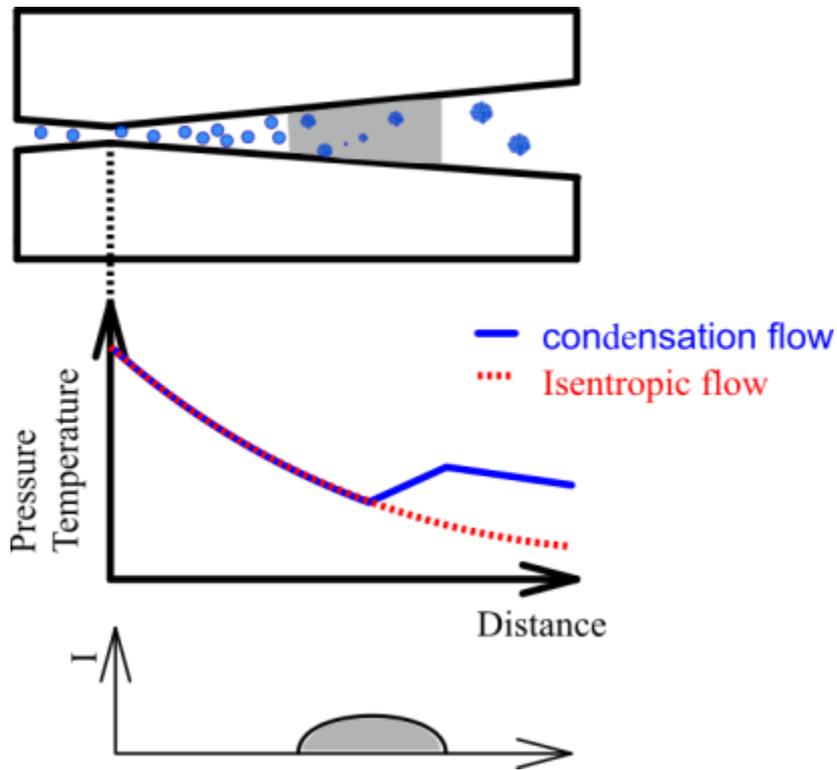
$$\Delta G^* = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{V_l}{KT \ln(S)} \right)^2 \sigma^3$$

- 初期圧力・温度が等しければ気相での温度・圧力の変化は同じ
- 冷却速度**により過飽和度の上限が変化し、凝縮核の単位時間・空間あたりの生成数が変化

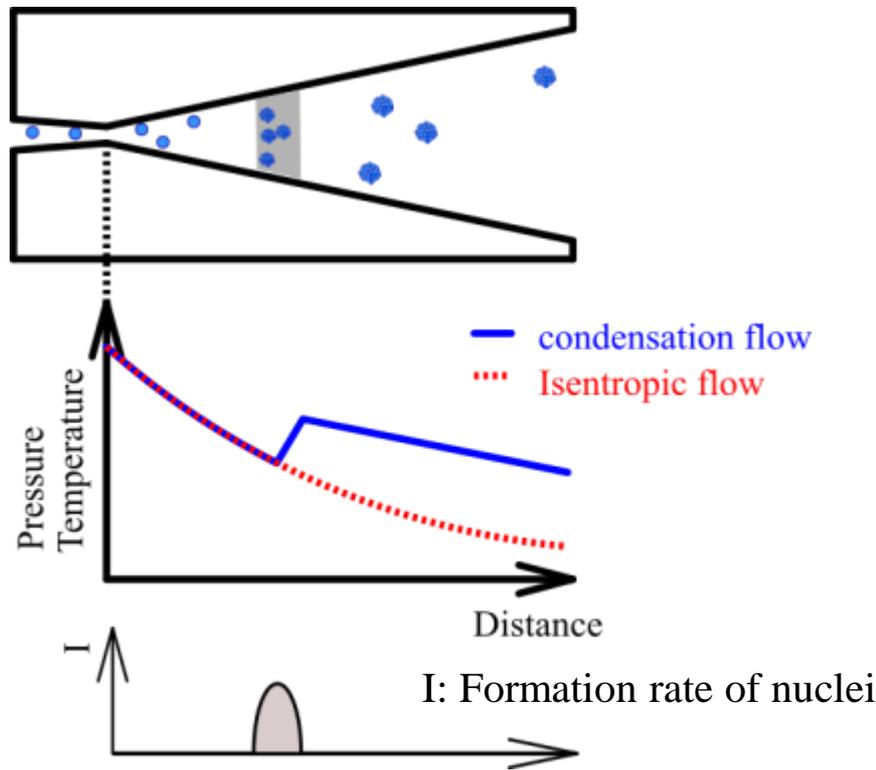
*:Yuri A. Ryzhov, Ul'yan G. Pirumov, Vladimir N. Gorbunov, "Nonequilibrium Condensation in High-Speed Gas Flows" (Gordon and Breach Science Publishers, New York,1989)

超音速ノズルによるクラスターの生成

<ノズル角度小(冷却速度小)>



<ノズル角度大(冷却速度大)>



ノズル角度が大きいほど急激にクラスターの生成開始と終了が起こる
⇒クラスター成長の開始位置の差が小さい



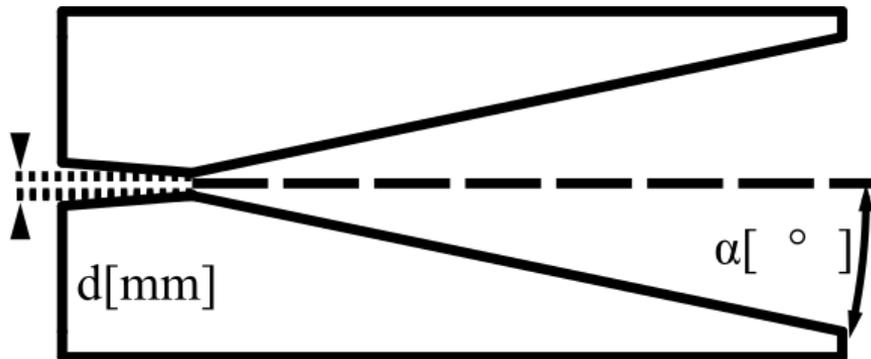
ノズル形状によるサイズ分布制御の可能性

クラスター生成及び分析装置の構築・測定試験を行う



平均クラスターサイズの経験的スケージング則*による
予測値と計測結果の比較を行う

<超音速ノズルによるクラスター生成>



Γ^* : スケージングパラメータ

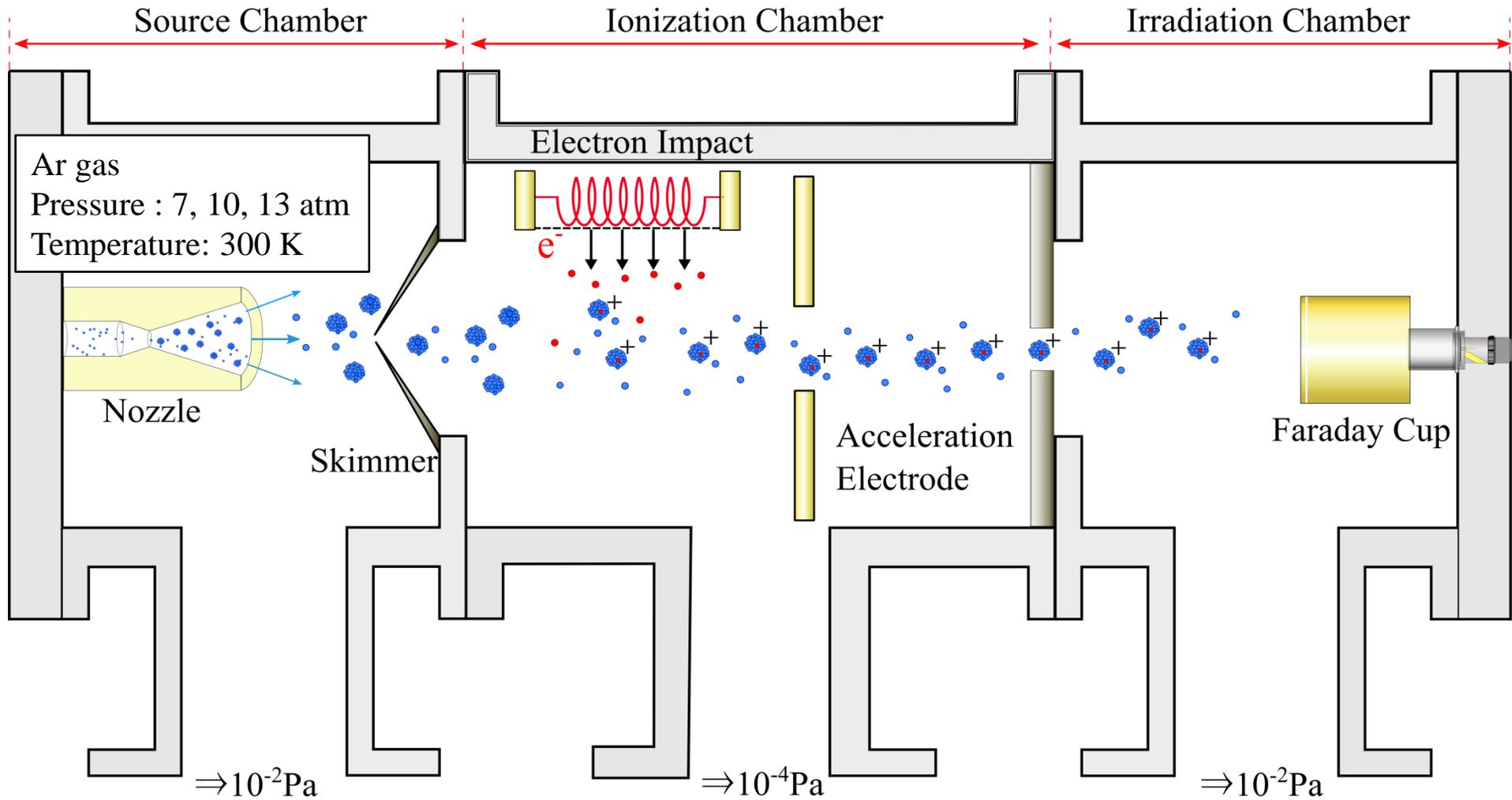
$$\Gamma^* = K \frac{P_0 [\text{mbar}]}{(T_0 [\text{K}])^{2.29}} \left(\frac{0.74 d [\mu\text{m}]}{\tan \alpha} \right)^{0.85}$$

\bar{N} : 平均クラスターサイズ

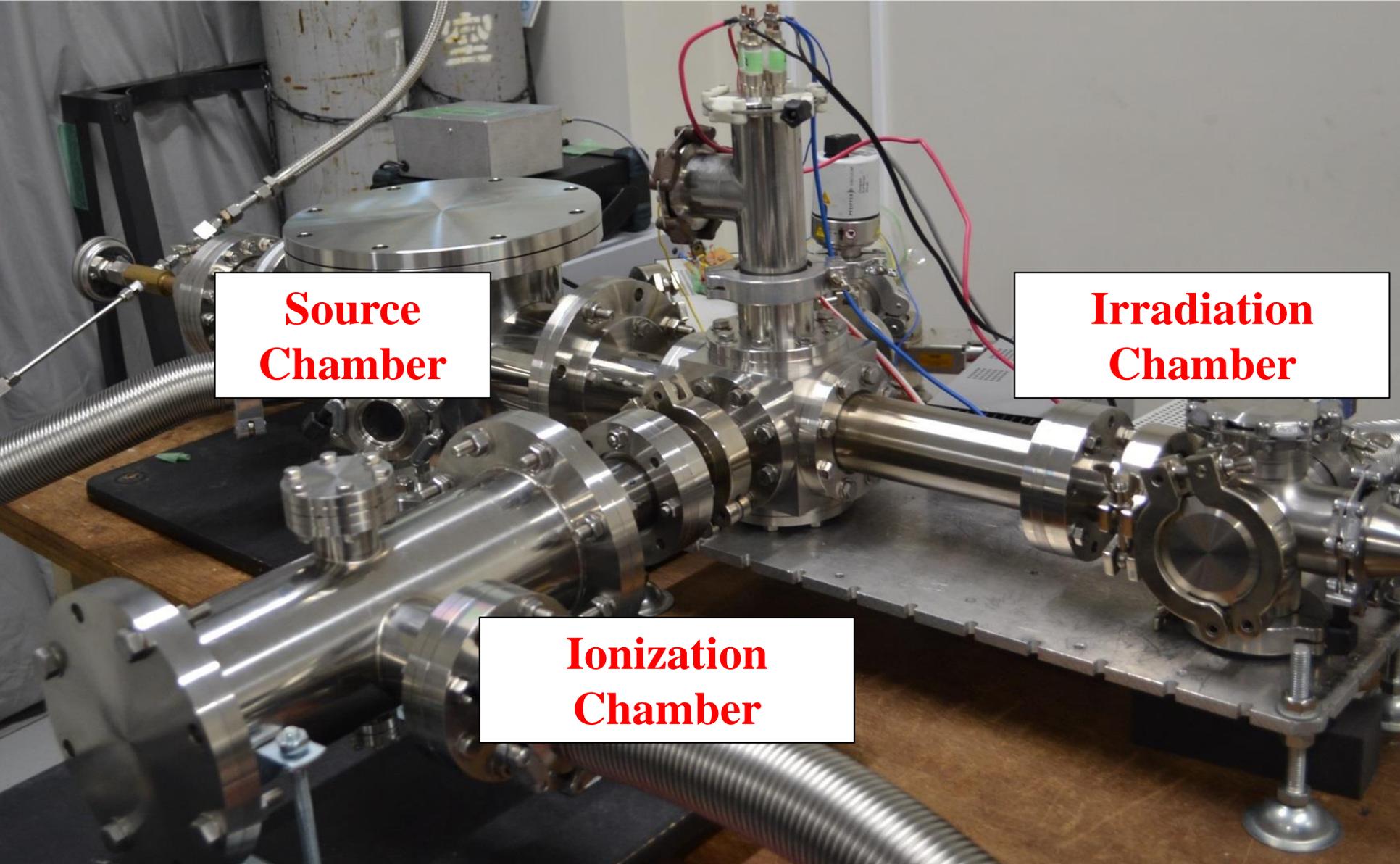
$$\bar{N} = 33 \left(\frac{\Gamma^*}{1000} \right)^{2.35}$$

K: 比例定数 P_0 : 導入圧力 T_0 : 導入温度

ガスクラスタートイオンビーム実験装置



実験装置の写真



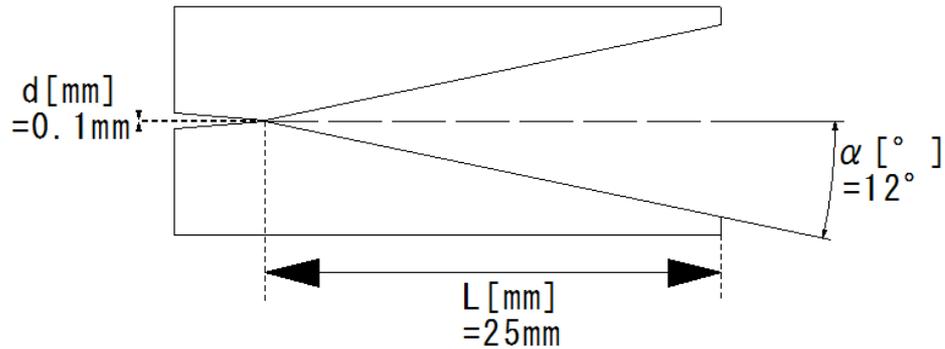
**Source
Chamber**

**Irradiation
Chamber**

**Ionization
Chamber**

設計したノズル

<測定で使用するノズル>



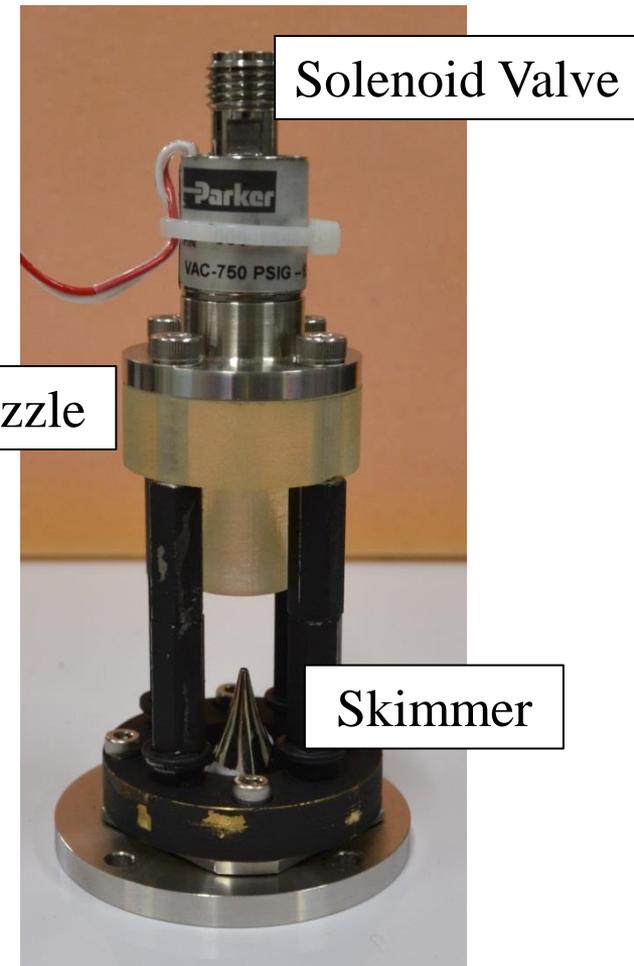
<平均クラスターサイズの計算式>

$$\Gamma^* = K \frac{P_0 [\text{mbar}]}{(T_0 [\text{K}])^{2.29}} \left(\frac{0.74 d [\mu\text{m}]}{\tan \alpha} \right)^{0.85} \quad \bar{N} = 33 \left(\frac{\Gamma^*}{1000} \right)^{2.35}$$

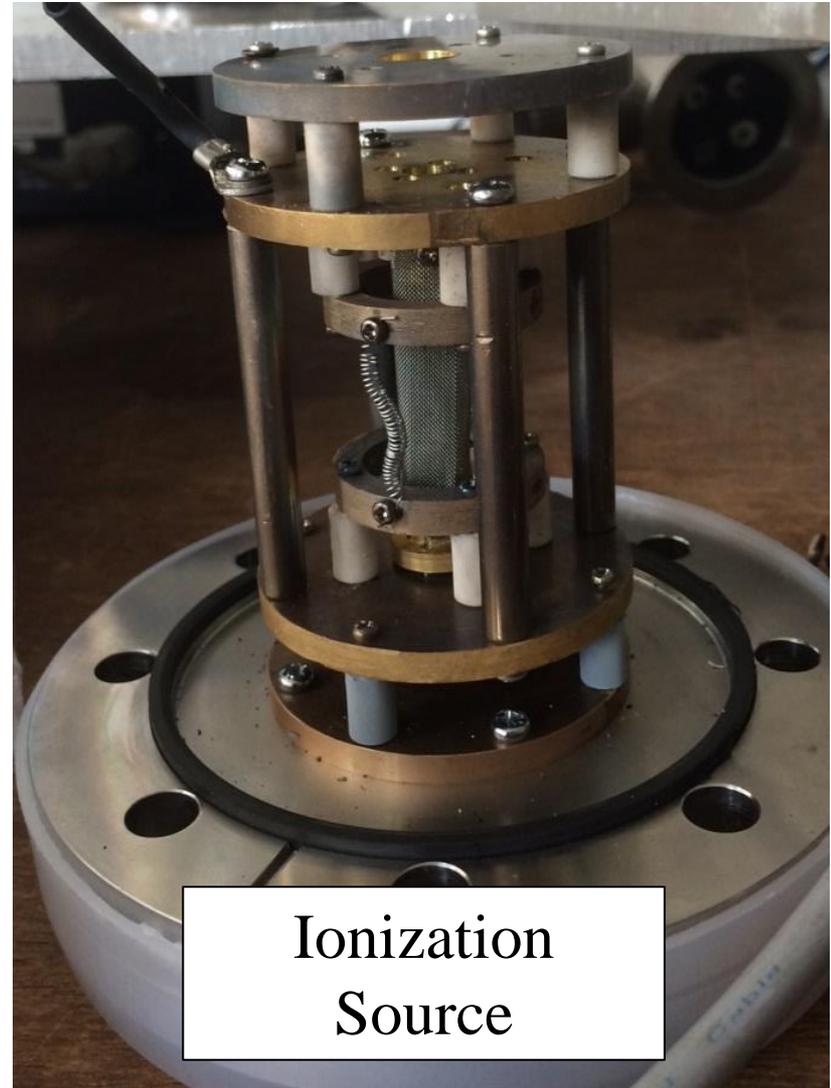
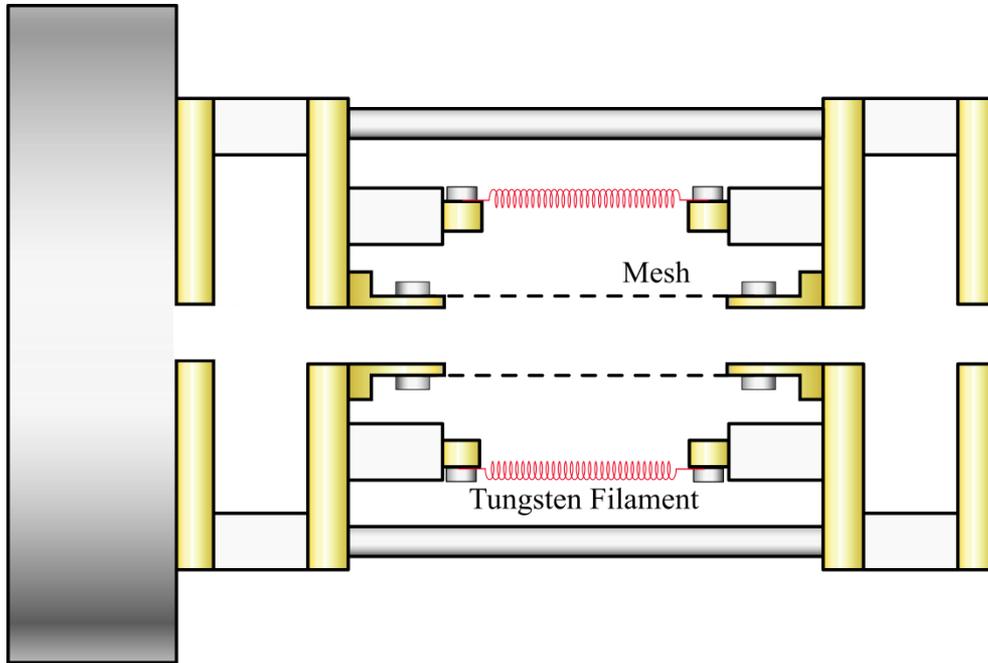
P_0 : 導入圧力 T_0 : 導入温度 d : スロート径
 α : ノズル角度 \bar{N} : 平均クラスターサイズ

<実験条件>

P_0 [atm]	7	10	13
\bar{N} [atoms/cluster]	665	1538	2850



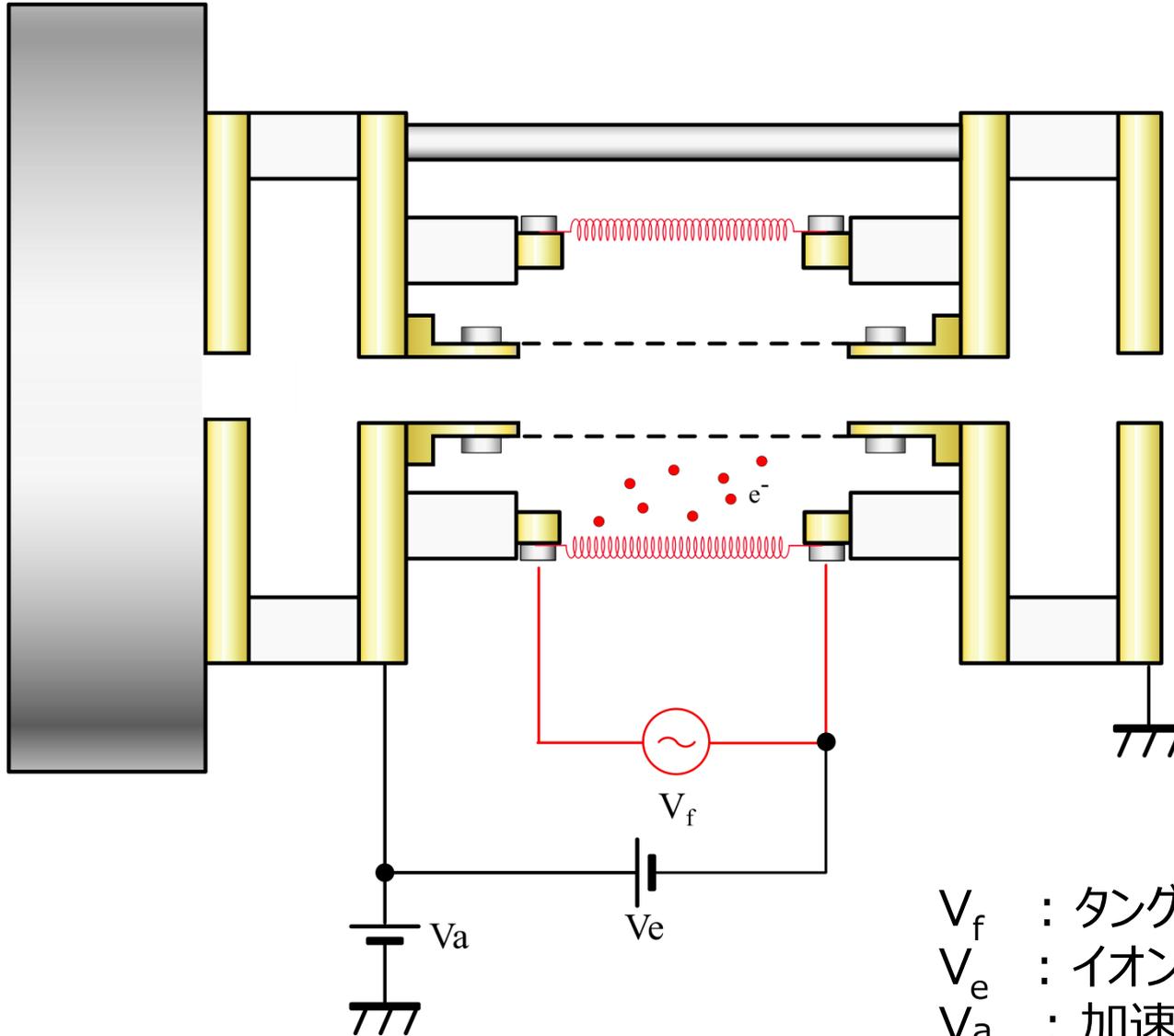
イオン化電極構造



Ionization
Source

イオン化方法

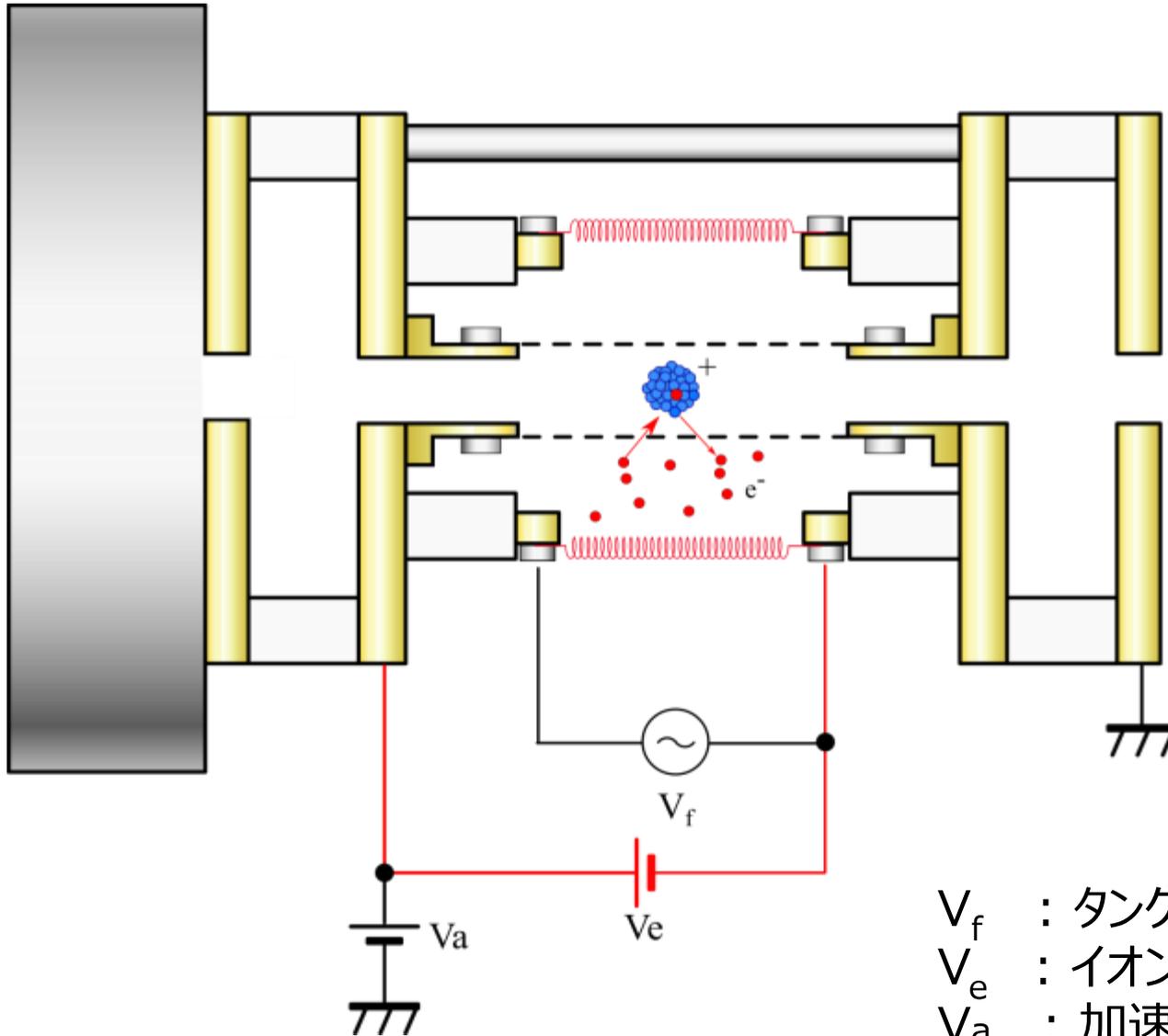
<電子衝撃法>



- V_f : タングステンフィラメント加熱電圧
- V_e : イオン化電子電圧
- V_a : 加速電圧

イオン化方法

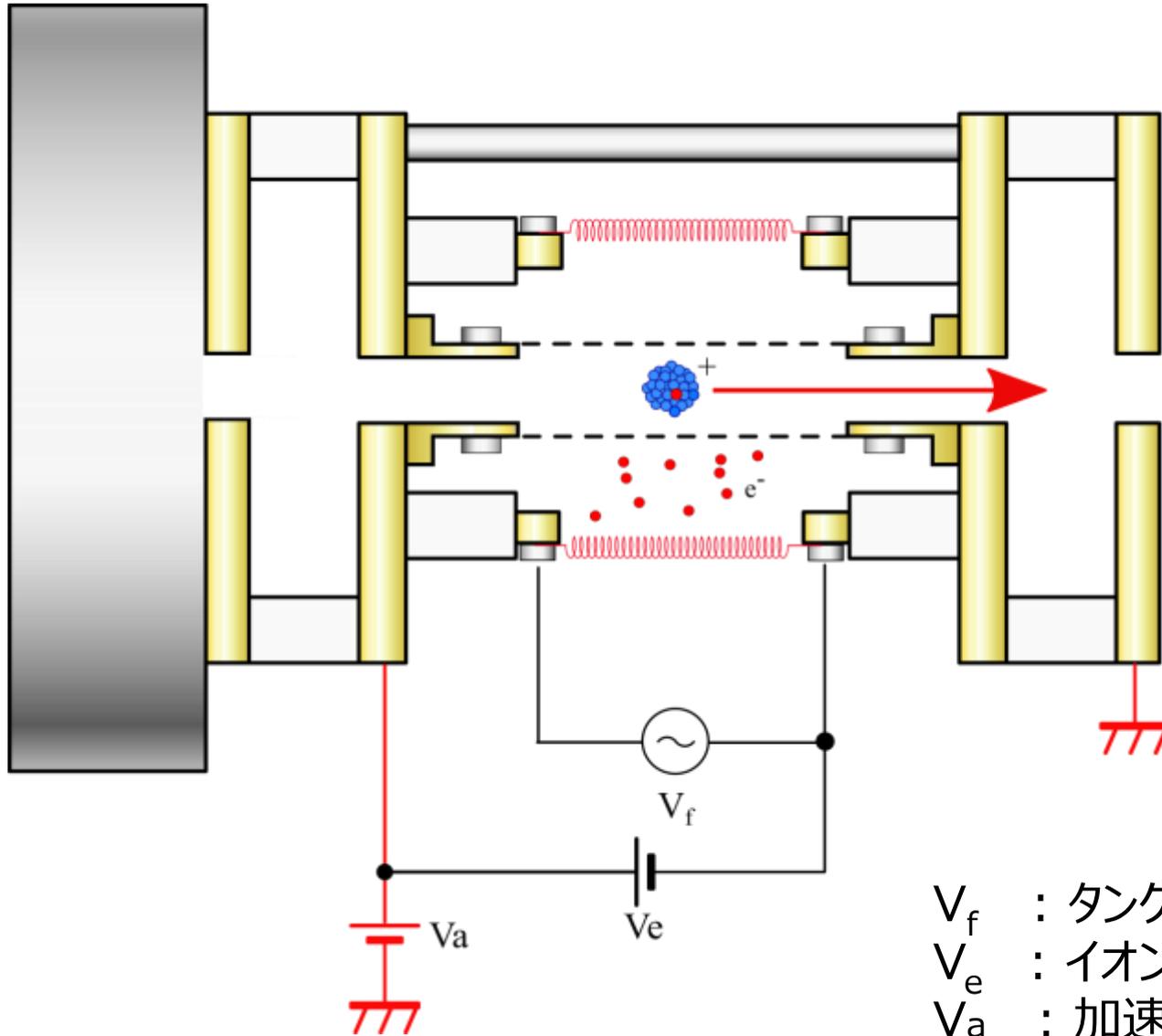
<電子衝撃法>



- V_f : タングステンフィラメント加熱電圧
- V_e : イオン化電子電圧
- V_a : 加速電圧

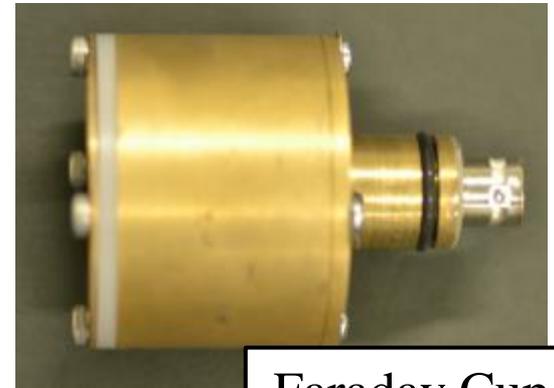
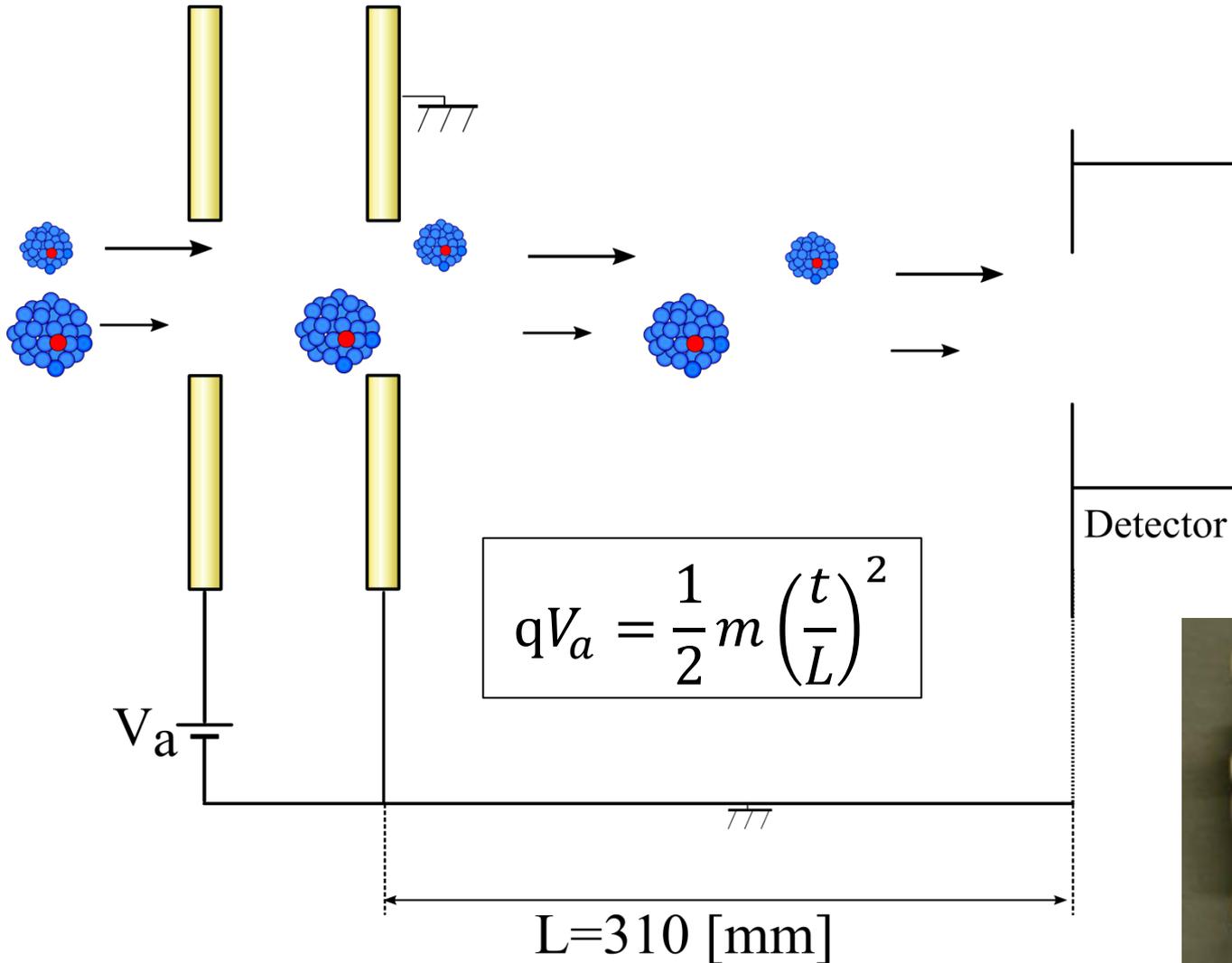
イオン化方法

<電子衝撃法>



クラスターサイズ測定方法

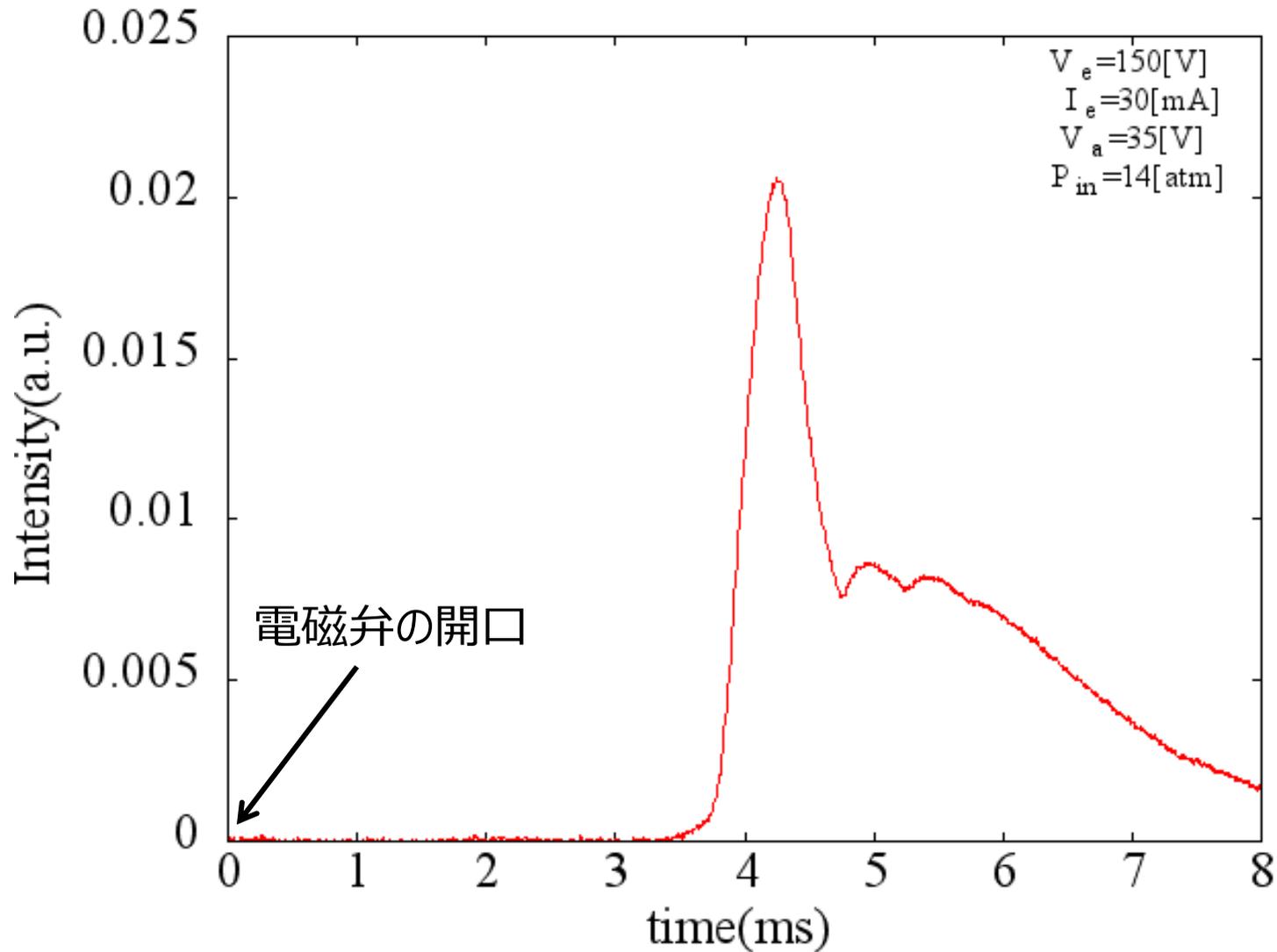
<飛行時間(Time-of-Flight)法>



Faraday Cup

q:素電荷 m:クラスターの質量 t:到達時間

クラスター生成の確認

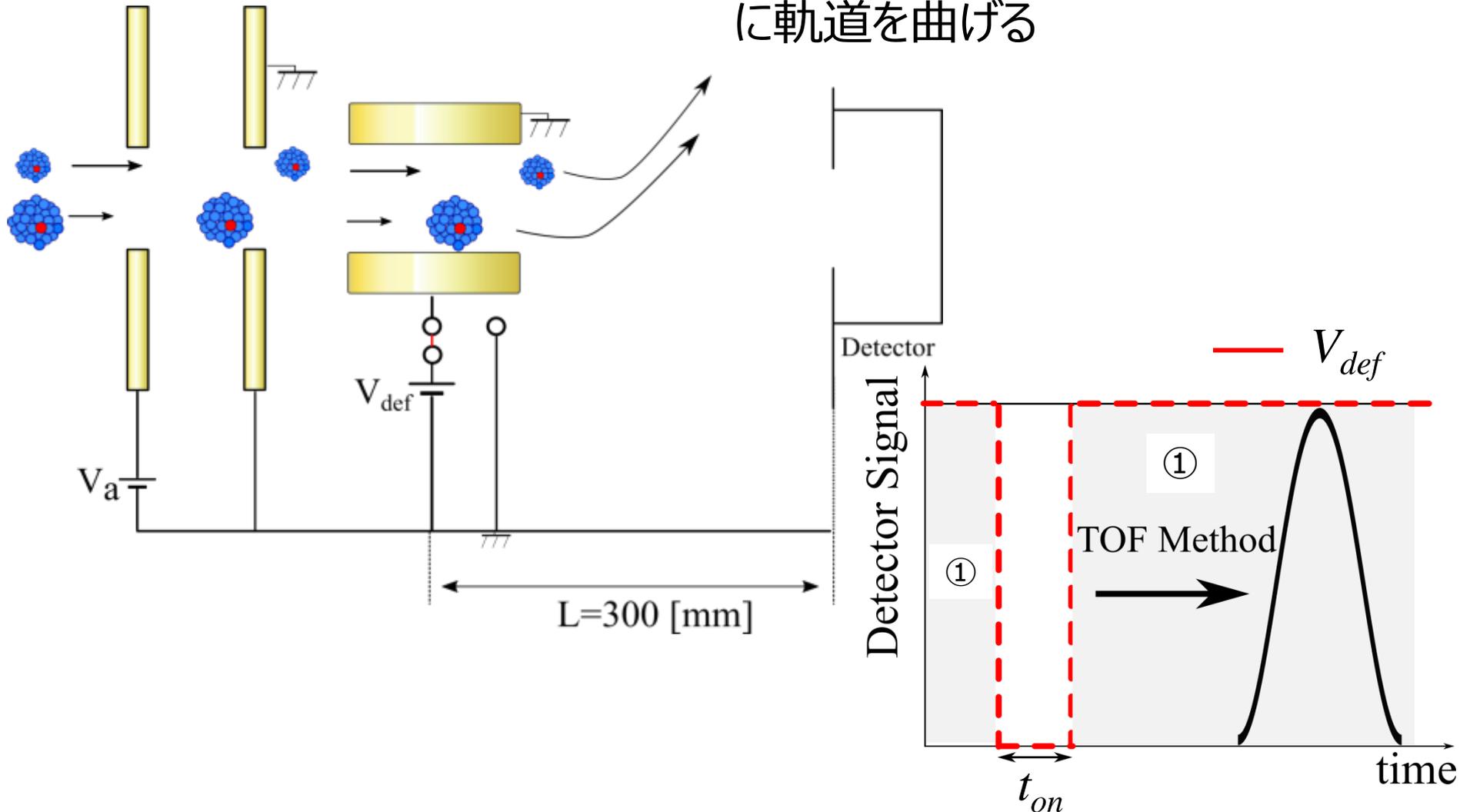


クラスターイオンが生成されていることを確認

クラスターサイズ測定方法

<静電偏向>

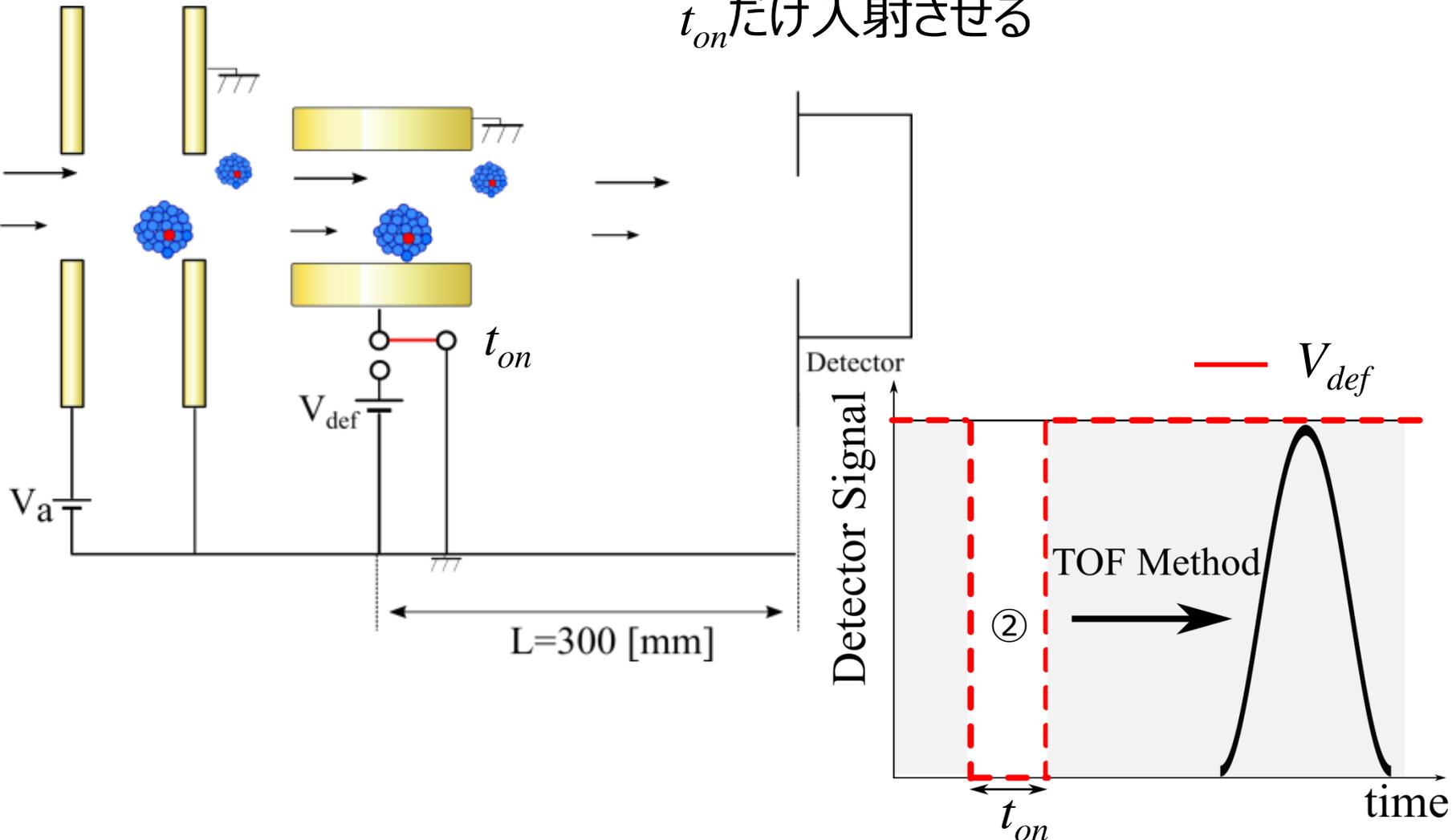
① ファラデーカップに入らないように軌道を曲げる



クラスターサイズ測定方法

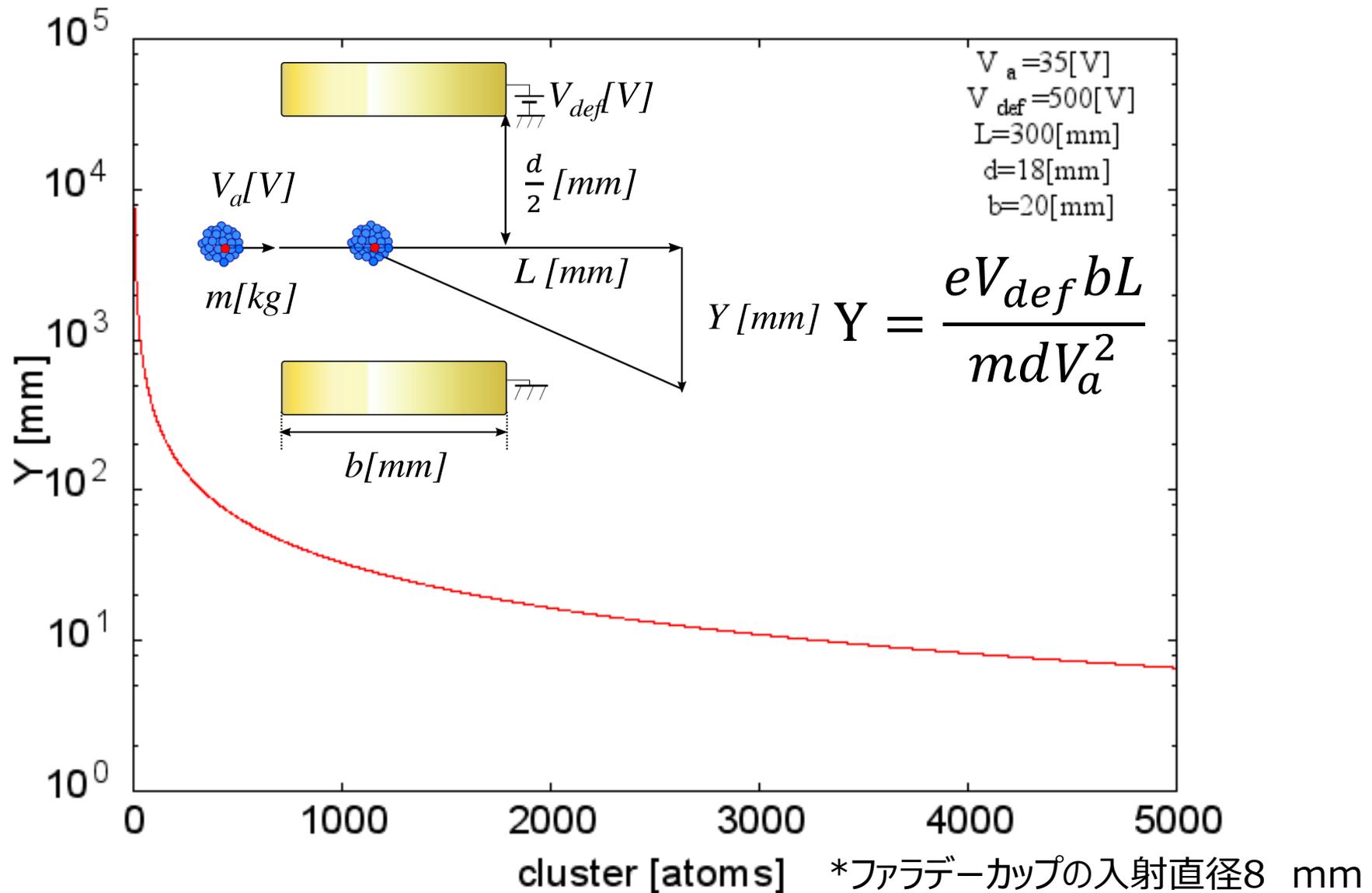
<静電偏向>

②ファラデーカップにクラスターを
 t_{on} だけ入射させる



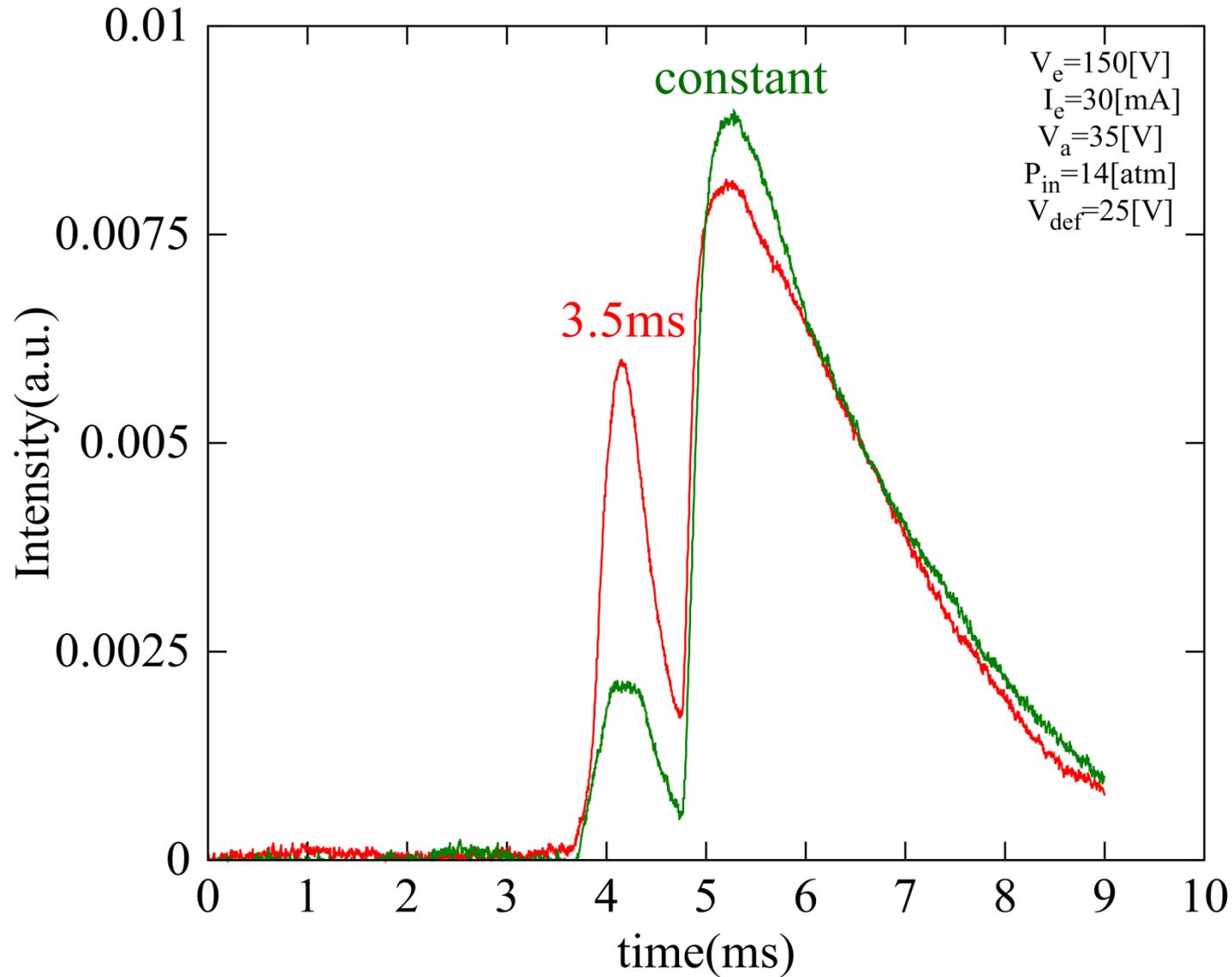
静電偏向を組み込み、測定開始時間と距離を決定する

静電偏向の見積もり

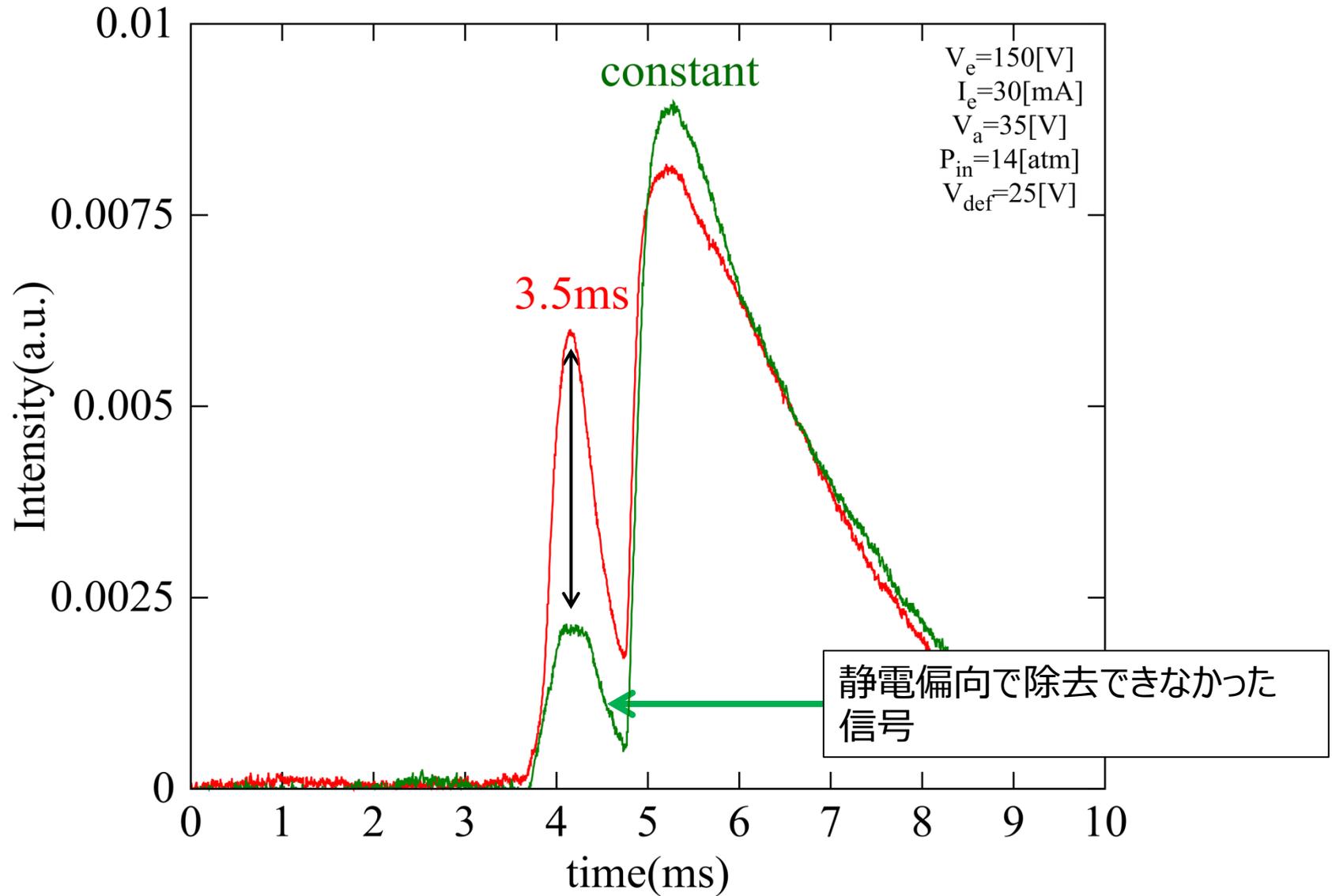


5000 atoms/cluster以下のクラスターのサイズであれば偏向可能

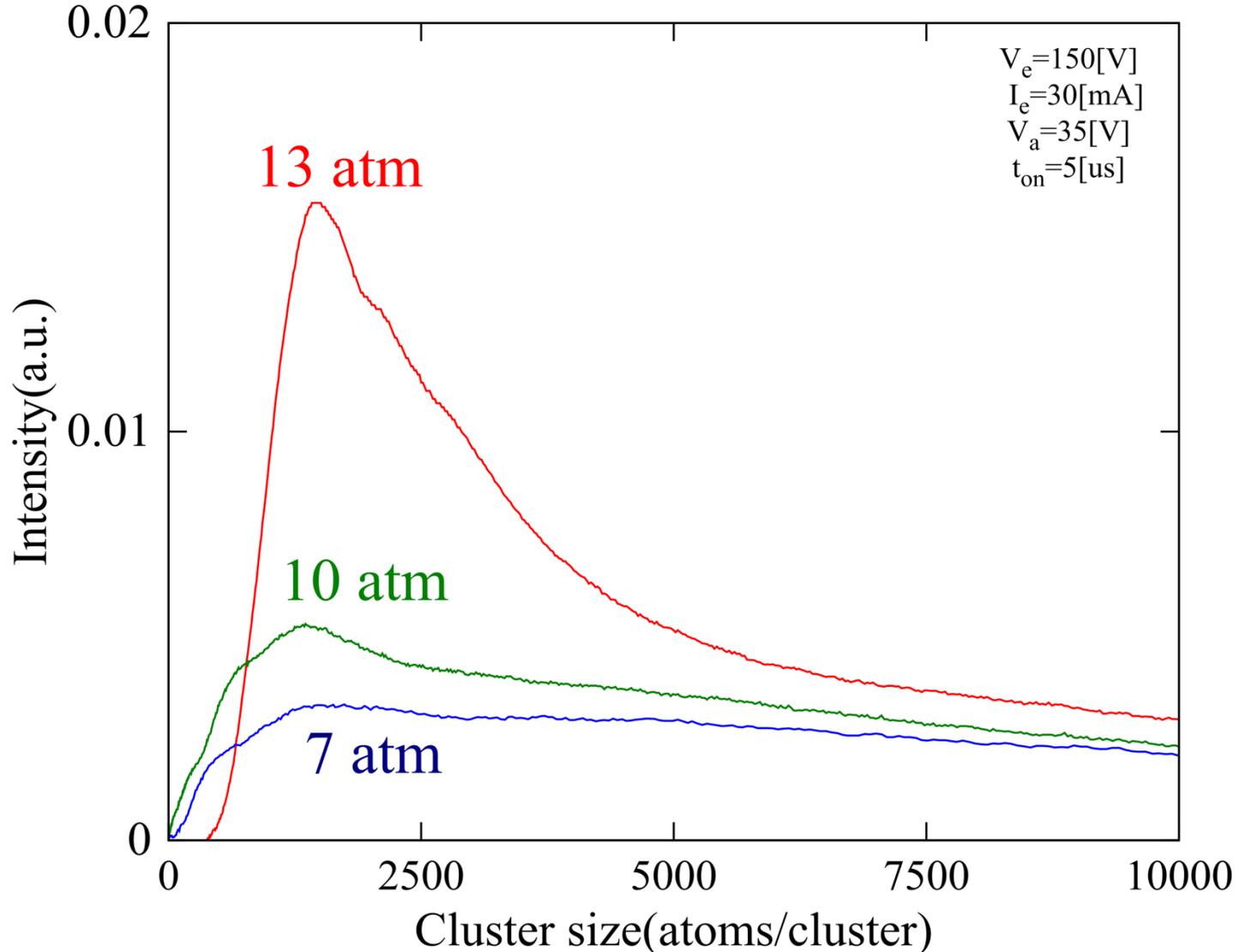
静電偏向によるクラスターイオンビームの結果



静電偏向によるクラスターイオンビームの結果

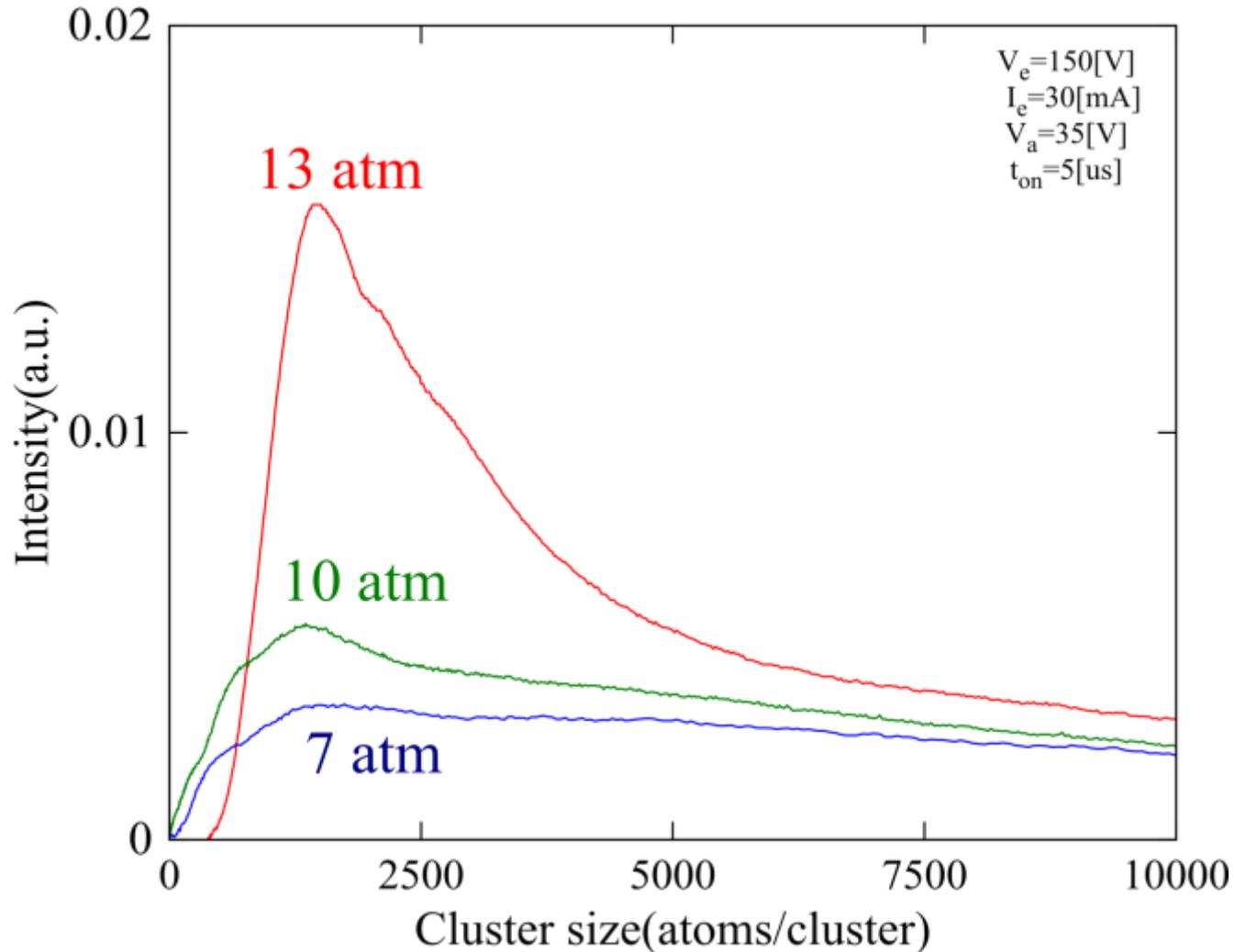


クラスターサイズ分布の依存性



圧力に対してクラスターサイズの依存性があることを確認

クラスターサイズ分布の依存性



- 7 , 10 atmはスケージングで計算される平均クラスターサイズより大きい
- 13 atmでは小さくなった

まとめ

- クラスタ生成及び分析装置の設計と製作
 - 中性クラスタを生成するための超音速ノズルの製作
 - クラスタをイオン化するためのイオン源の製作
 - サイズ分布を測定及び分析するための装置の製作
- クラスタイオンビームの測定
 - ファラデーカップでクラスタイオンビームを測定
 - 静電偏向を組み込み、粒子軌道が曲がっていることを確認
 - クラスタサイズ分布の測定を行い、圧力に対する依存性があることを確認
- 今後の方針
 - 静電偏向の粒子変位量の増加(装置の改良)
 - ノズル角度を変化させたときのクラスタサイズ分布測定
 - 高フラックスのクラスタイオンビームの実現

ご清聴ありがとうございました。