

# DT プラズマ中の重陽子ビームの減速と損失に対する 核弾性散乱の影響

Effect of nuclear plus interference scattering on deuterium-beam  
slowing down and loss in DT plasmas

九大院工 ○松浦秀明、 澤田大輔、 中尾安幸

MATSUURA Hideaki, SAWADA Daisuke, NAKAO Yasuyuki  
Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

## 【はじめに】

プラズマ中の高速イオンは、Coulomb 及び核弾性散乱 (NI (nuclear plus interference) scattering) [1] を介してエネルギーを失う。核弾性散乱断面積は、実験で測定される散乱断面積から、Coulomb 散乱断面積を差し引いたものとして定義される。核弾性散乱は、大角度の散乱過程であり、Coulomb 散乱と比較して、衝突頻度は小さいが、衝突当たりの輸送エネルギーが大きい。イオンのエネルギーが高くなると、その影響が大きくなり、およそ 1 MeV のエネルギー領域で、Coulomb 及び核弾性散乱を介したバルクイオンへの輸送エネルギーが同程度となることが知られている。

従来、核弾性散乱に伴う、バルクイオン分布関数上のノックオンテイルの形成、及びこれを利用したプラズマ診断法[2]が検討されている。核燃焼特性への影響（核弾性散乱を無視した場合に、プラズマ加熱[3]や核融合反応率にどのように影響が及ぶのか等）に関しても多数の研究がおこなわれているが、そのほとんどは、高速イオンとの衝突による「バルク」イオン分布関数の Maxwell 分布からの歪みに注目したものである。高速イオンが核弾性散乱を介してバルクイオンにエネルギーを付与し、バルクイオン分布関数上にノックオンテイルが形成される場合、高速イオン自身もエネルギーを失い、その減速分布関数にも歪みが生じるはずである。核弾性散乱を無視した場合は、高速イオンの減速効果を過少評価することになり、分布関数上の高速成分の存在割合を過大に見積もってしまう。この場合は、(a)高速イオンの炉心からの損失や、(b)不安定性励起確率も過大に評価することになる[4]。

本研究では、DT プラズマに入射された重陽子 beam を対象として、Boltzmann-Fokker-Planck (BFP)モデル[3]に基づき、核弾性散乱を無視した場合の、重陽子の高速成分存在比率の過大評価の度合いを調べた。今回は、特に、核弾性散乱を無視した場合に、プラズマからの高速重陽子の損失をどの程度過大に見積もるのかを定量的に評価したので報告する。

## 【解析結果】

図 1 に、核弾性散乱を考慮した場合（実線）、及び無視した場合（点線）に対する入射重陽子 beam 分布関数を示す。計算では、background イオン（重陽子、トリトン）及び電子分布関数に、温度 20 keV の Maxwell 分布を仮定し、重陽子の入射パワーを 20 MW、電子密度を  $6.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、閉じ込め時間を  $\tau_E = (1/2) \tau_P = 3 \text{ sec}$  とした。核弾性散乱を無視した場合は、同散乱を介した高速イオンからバルクイオンへのエネルギー付与過程が無視されるため、高速重陽子の減速が過少に評価される。これに伴い、平衡状態において、分布関数上の高速成分の存在割合が過大に評価される。図 2 に、重陽子の、減速途中の粒子輸送及び速度空間における拡散に伴う、損失パワーを、核弾性散乱を考慮した場合  $P_{\text{loss(trans+diff)}}^{\text{NI}}$  と無視した場合  $P_{\text{loss(trans+diff)}}^{\text{nonNI}}$  について比較した。例えば  $T = 30 \text{ keV}$ 、 $E_{\text{NBI}} = 1 \text{ MeV}$  において、核弾性散乱を無視した場合に対する、減速途中のエネルギー損失の過大評価の度合いは、約 8% となることがわかった。

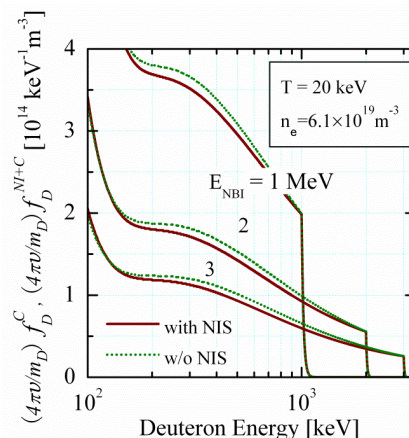


図 1：入射重陽子 beam 分布関数  
(実線：核弾性散乱考慮、点線：無視)

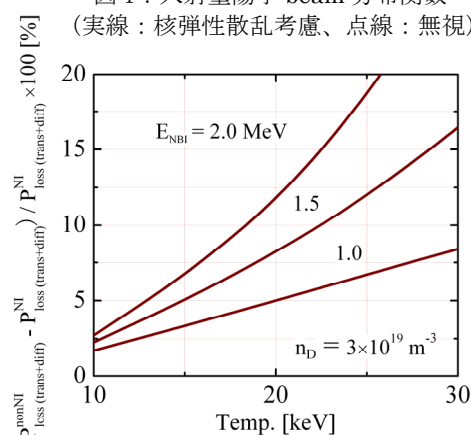


図 2：核弾性散乱を無視した場合の  
損失エネルギーの増加割合

- [1] J.J. Devaney and M.L. Stein, Nucl. Sci. Eng. **46** (1971) 323. [2] L. Ballabio, et al., Phys. Rev. E **55** (1997) 3358.  
[3] H. Matsuura, et al., Phys. Plasmas **13** (2006) 62507. [4] H. Matsuura, et al., Plasma Fusion Res. **6** (2011) 2405086.