

ACCELERATION OF ATOMIC CLUSTERS IN THE MEV ENERGY RANGE BY THE 1 MV TANDETRON ACCELERATOR

Kimikazu Sasa^{#, A, B)}, Satoshi Ishii^{A)}, Shigeo Tomita^{B)}, Hiroshi Kudo^{A, B)}

A) Tandem Accelerator Complex, University of Tsukuba (UTTAC)
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

B) Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

Abstract

Atomic clusters of B_n , C_n , Al_n , Si_n and Cu_n can be accelerated in the MeV energy range by using the 1MV Tandetron accelerator at the University of Tsukuba. The negative cluster ions are generated by a Cesium sputtering ion source and extracted by the energy of 20 keV. The charge exchange from negative to positive cluster ion is achieved by collision with stripper gas in a gas cell at the high voltage terminal. It is necessary to accelerate cluster ions as the same energy ratio (MeV/atom) for the interaction experiment between cluster ions and the target. The terminal voltage of the 1MV Tandetron accelerator is possible to be varied from 0.1 to 1.0 MV. We select the accelerating energy to 0.24 MeV/atom for small cluster ions ($n \leq 8$). Experimental results obtained with accelerating C_n cluster ions are reported.

1 MV タンデトロン加速器による MeV エネルギー原子クラスター加速

1. はじめに

MeV エネルギーの高速原子クラスター照射は、単原子の場合と比較して、局所的な領域内に大きな運動エネルギーを付与できる特徴を持つ。高速原子クラスターの照射によって固体内に誘起される衝突関連現象の特徴は、クラスター原子数 n についての非線形効果という形をとり、単原子イオンでは実現されない衝突過程の知見をもたらすと考えられる^[1,2]。クラスター照射によるスパッタリング、損傷等の核的阻止能に起因する効果が従来の単原子イオンにおける常識とは違うことに対応して、電子的阻止能すなわち固体電子系へのエネルギー移行に起因する現象にもクラスター特有の効果が現れる。高速原子クラスターの照射では、初期条件としての励起・電離過程が単原子イオンと異なる。それらの素過程の解明によって、照射誘起効果の新たな展開がもたらされる可能性が高いと考えられる。この非線形な照射効果は、物理的興味の対象である同時に、新機能素材の開発等に利用出来る新たな手段として期待されている。

クラスタービームの研究では、数十 keV 程度以下の低速原子クラスターによるイオン注入や表面加工技術への応用が行われ、既に産業技術として認められる段階に入っている^[3]。それに対して、1990 年代以降、タンデム型静電加速器による MeV エネルギーの高速原子クラスターの研究が急速に発展してきている。分子イオンや H_n クラスターによるクーロン爆発等の基礎的な研究は、既に 1980 年前後からアメリカの Argonne 研究所^[4]などで、また日本では東京工業大学^[5]等で行われていた。1993 年にフラ

ンスの IPN-Orsay MP-9 タンデム加速器(ターミナル電圧 14 MV)による 36.2 MeV の C_{60}^{3+} 加速^[6]を契機として、高速原子クラスターの照射効果に関する研究が、世界中で展開されるようになった。初期の段階では、高速原子クラスターの照射効果に対する物理的興味が先行していたが、最近では材料開発等への応用に興味が移行しつつある。

日本では、日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所の TIARA 3 MV タンデム加速器(9SDH-2)による MeV エネルギー原子クラスター加速研究^[7]が先行している。筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門においても、1 MV タンデトロン加速器による高速原子クラスター加速研究を開始している。本報告では、筑波大学における高速原子クラスター加速の現状を紹介する。

2. 1 MV タンデトロン加速器

筑波大学の 1 MV タンデトロン加速器は、1998 年に電子技術総合研究所より移管され、1999 年にビーム供給を開始した。ターミナル電圧は 0.1 MV から 1 MV の範囲において、kV 単位で電圧調整が可能である。主に物質分析の為に RBS や PIXE 分析等に使用されている。図 1 に筑波大学 1 MV タンデトロン加速器の概略図を示す。He 加速用のデュオプラズマトロン型負イオン源と Cs スパッター型負イオン源の 2 台のイオン源を備えている。イオン源で生成された負イオンは、20 keV のエネルギーで 30° 偏向されて加速器に入射する。ビームコースは 4 本あり、高速原子クラスター実験は主に 11° コース (B コース) と 15° コース (C コース) で行われている。

[#]ksasa@tac.tsukuba.ac.jp

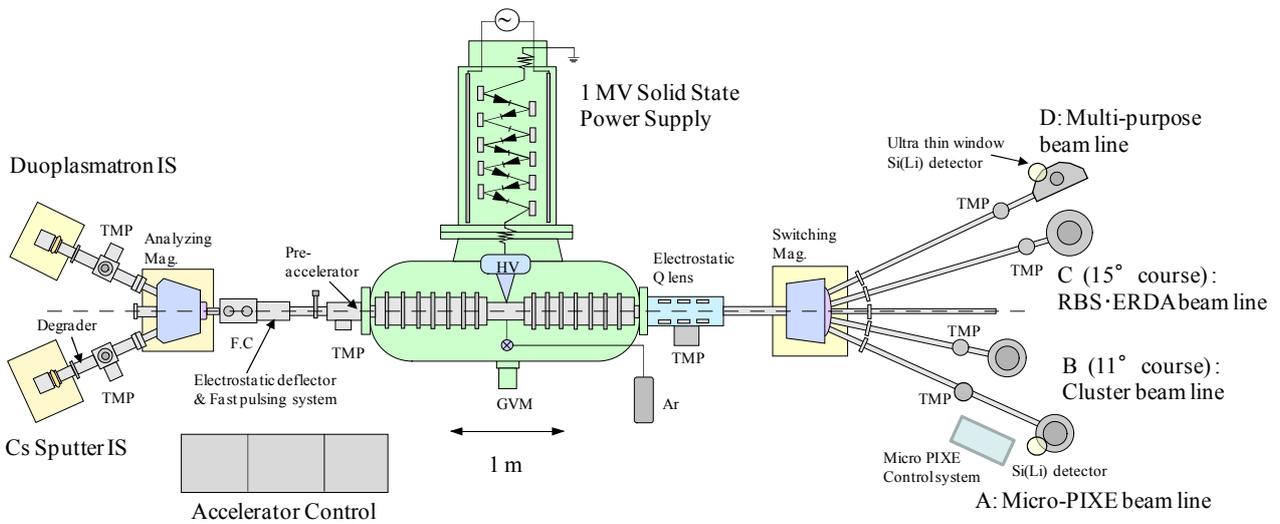


図 1 : 筑波大学 1 MV タンデトロン加速器概略図

3. 原子クラスターの生成と加速

3.1 Cs スパッター型負イオン源を用いた負クラスターイオンの生成

原子クラスターは、Cs スパッター型負イオン源により 1 価の負クラスターイオンとして生成される。1 MV タンデトロン加速器では、イオン源として General Ionex Corp. Model 860A を用いている。図 2 にグラファイト試料を用いて、イオン源から 20 kV で引き出された C_n^- クラスターの電流値計測結果を示す。但し、 $n = 11$ 以上の C_n^- クラスターについては、Cs (133 amu) とのクラスター (CsC_n^-) が混在していることが判明している。

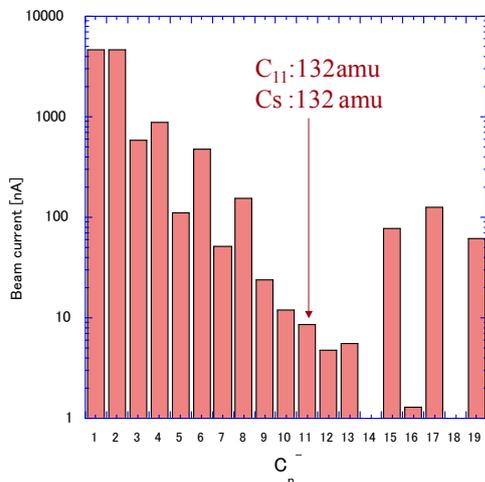


図 2 : Cs スパッター型負イオン源からの C_n^- クラスターのビーム電流値

3.2 原子クラスターの MeV エネルギー加速

イオン源から引き出された 1 価の負クラスターイオンは、加速器ターミナル中の荷電変換ガスセルで正クラスターイオンとなる。ターミナル電圧を V_t [MV]、イオン源引き出し電圧が 20 kV より、価数 q のクラスターイオンの加速エネルギー E [MeV] は、式(1)となる。なお元のクラスター質量を M_A 、荷電変換ガスでのクラスター分裂後の質量を M_B とする。

$$E \text{ [MeV]} = (M_B / M_A) (V_t + 0.02) + qV_t \quad (1)$$

高速原子クラスターと物質間の相互作用実験では、1 原子当りのエネルギーを揃えて、クラスターサイズによる効果を確認する必要がある。筑波大学 1 MV タンデトロン加速器のターミナル電圧 V_t は、下限が 0.1 MV、上限が 1 MV であり、 $n \leq 8$ のクラスターサイズについて 0.24 MeV/atom を基準として加速を行っている。

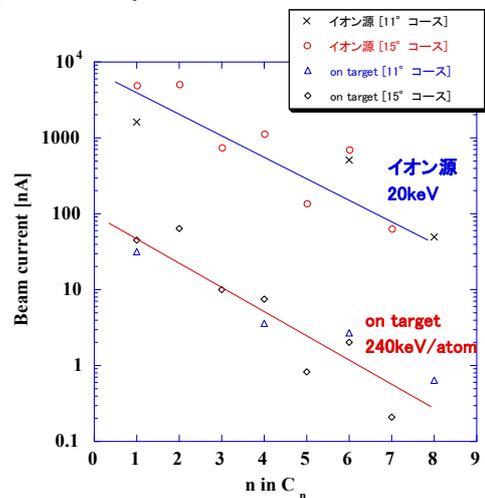


図 3 : C_n^- クラスターの加速結果

図3に C_n ($n = 1 - 8$) クラスターの 0.24 MeV/atom での加速結果を示す。使用したビームコースは、 11° コースと 15° コースである。ビーム電流値を計測するファラデーカップ(FC)上流には、 11° コースに $\phi 1.7$ mm、また 15° コースに $\phi 3$ mm のスリットが設置されている。イオン源からビームコースまでの透過率は、 $n=1$ から 8 まで、ほぼ 1%程度ということがわかる。またイオン源及び加速された原子クラスターに偶奇性の存在が確認出来る。これは C_n クラスターの構造に依存していると考えられる。

図4に C_8^- クラスターを加速器に入射して、 C_8^+ 加速 ($V_t = 0.95$ MV, $E = 1.92$ MeV, イオン源 FC: 73 nA) に最適化したときのスペクトル図を示す。図1の加速器出射側の振分電磁石の磁場を変更して測定をおこなった。荷電変換ガスにより、 C_8 クラスターが分裂をおこし、 $n \leq 8$ の C_n クラスターが生成されている。またこれまでに 2 価の原子クラスターイオンの加速に成功している。図5に C_6^- クラスターを加速して、生成した分裂破片から C_5^{2+} を得た際のスペクトル図を示す。2 価のクラスターはビーム電流値としては pA 程度であり、物質間相互作用に関する基礎的な物理研究に利用されている。

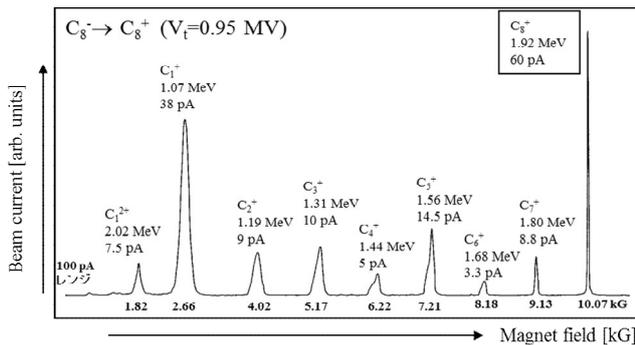


図4 : C_8^+ (1.92 MeV) 加速に最適化したときの加速クラスターの分裂破片 ($V_t = 0.95$ MV, $E = 1.92$ MeV, イオン源 FC: 73 nA)

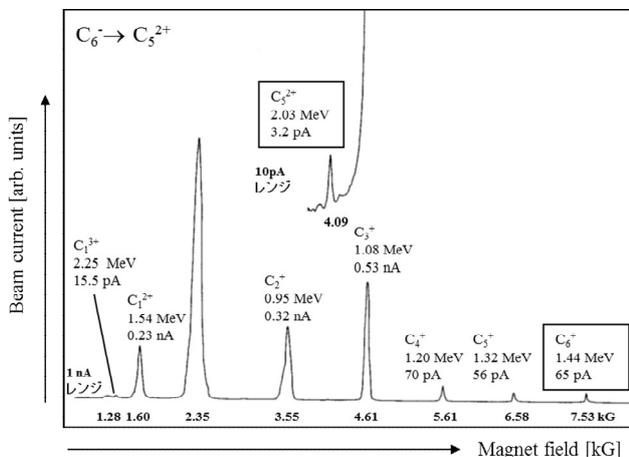


図5 : $C_6^- \rightarrow C_5^{2+}$ (2.03 MeV) 加速に最適化したときの加速クラスターの分裂破片 ($V_t = 0.71$ MV, $E = 2.03$ MeV, イオン源 FC: 400 nA)

表1に筑波大学 1 MV タンデトロン加速器による原子クラスターの加速結果をまとめる。これまでに、 C_n クラスターの他に、 B_n 、 Al_n 、 Si_n 、 Cu_n 等の MeV エネルギー原子クラスターの加速に成功している。

表1 : 筑波大学 1 MV タンデトロン加速器による原子クラスター加速の現況

コース	Energy		$^{11}B_1^+$	B_2^+	B_3^+	B_4^+							
15°	29 keV/u	0.32 MeV/atom	●	●	●	●							
	44 keV/u	0.48 MeV/atom	●	●	●	●							
コース	Energy		$^{12}C_1^+$	C_2^+	C_3^+	C_4^+	C_5^+	C_6^+	C_7^+	C_8^+			
11°	20 keV/u	0.24 MeV/atom	●	●	●	●	●	●	●	●			
	30 keV/u	0.36 MeV/atom	●	●	●	●	●	●	●	●			
	42 keV/u	0.50 MeV/atom	●	●	●	●	●	●	●	●			
コース	Energy		$^{27}Al_1^+$	Al_2^+	Al_3^+	Al_4^+	Al_5^+						
11°	8.9 keV/u	0.24 MeV/atom	●	●	●	●	●						
コース	Energy		$^{28}Si_1^+$	Si_2^+	Si_3^+	Si_4^+							
11°	8.6 keV/u	0.24 MeV/atom	●	●	●	●							
コース	Energy		$^{63}Cu_1^+$	Cu_2^+	Cu_3^+								
15°	7.6 keV/u	0.48 MeV/atom	●	●	●								

4. まとめ

筑波大学 1 MV タンデトロン加速器による原子クラスターの MeV エネルギー加速の研究現状について紹介した。原子クラスター加速実験用に、ビームパルス化装置及びビーム強度減衰の為のアッテネーターも設置されており、MeV エネルギー原子クラスターの物質間相互作用の研究を進めている。これまでに 2 次電子分光実験などにより、高速原子クラスター照射によって、固体中に高電離ナノ領域が形成されている可能性を見出している^[8, 9]。その他、高速クラスターイオン照射には、帯電抑制・絶縁破壊防止効果があることが報告されている^[10]。高速クラスタービームの応用として、絶縁試料への元素注入、材料表面の特性改善等、さまざまな分野での利用が期待される。

参考文献

- [1] D. Jacquet, Y. Le Beyec, Nucl. Instrum. Methods B 193 (2002) 227.
- [2] E. Parilis, Nucl. Instrum. Methods B 193 (2002) 240.
- [3] T. Takagi, Materials Science and Engineering A 253 (1998) 30.
- [4] D.S. Gemmell, Chem. Rev., 80 (1980) 301.
- [5] H. Kobayashi and N. Oda, Phys. Rev. A30 (1984) 1294.
- [6] Proc. Conf. on Polyatomic ion impact on solids and related phenomena, Nucl. Instr. and Meth. B88 (1994).
- [7] Y. Saitoh et al., Nucl. Instr. and Meth. A 452 (2000) 61.
- [8] S. Tomita, S. Yoda, R. Uchiyama, S. Ishii, K. Sasa, T. Kaneko, H. Kudo, Phys. Rev. A, 73 (2006) 060901(R) (1-4).
- [9] H. Kudo, W. Iwazaki, R. Uchiyama, S. Tomita, K. Shima, K. Sasa, S. Ishii, K. Narumi, H. Naramoto, Y. Saitoh, S. Yamamoto, T. Kaneko, Jpn. J. Appl. Phys. 45, (2006) L565-568.
- [10] K. Hirata, Y. Saitoh, K. Narumi, Y. Kobayashi, Nucl. Instrum. Methods B 206 (2003) 47