

フラレン加速用 APF-1H 型線形加速器

高橋康之^{1,A)}、服部俊幸^{A)}、林崎規託^{A)}、柏木啓次^{A)}、畑 寿起^{A)}、
山本和男^{A)}、青木 学^{A)}、菅井 勲^{B)}、野田耕司^{C)}

^{A)} 東京工業大学原子炉工学研究所
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{C)} 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

これまでに 200kV 高電圧加速装置による C_{60} フラレンビームと $1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 炭素薄膜との相互作用実験を行ってきたが、さらにビームのエネルギーを上げて炭素薄膜を通過した C_{60} フラレンの阻止能測定やフラグメンテーションに関する研究を行うために、電荷対質量数 = $1/720$ (C_{60}^+) の C_{60} フラレンを $0.28\text{keV}/u$ から $3.0\text{keV}/u$ まで加速する APF-1H 型線形加速器を設計したので報告する。

1. はじめに

最近、クラスターイオンビームを固体へ衝突させたときに起こる、単粒子イオンビームとは異なる様々な現象（阻止能、有効電荷、二次電子・二次イオン放出、損傷効果など）を調べるための研究が注目されている^[1-5]。特に C_{60} フラレンは、幾何学的に極めて安定な球殻構造をもつということから、 C_{60} イオンを固体に衝突させたときの振る舞いに大きな関心が寄せられている^[6-8]。

C_{60} ビームは通常の炭素ビームとは異なる様々な特徴をもつ。まず、電荷と質量数の比が小さいため、空間電荷効果が非常に小さく、ビームの収束が比較的容易であることが挙げられる。さらに、 C_{60} ビームは通常の炭素ビームでは得ることが出来ない非常に高い粒子密度や電流密度、極めて短いパルス幅を持ちながら固体に入射し、その多数個の構成炭素原子は C_{60} の径に匹敵する高々数 の微小領域の標的原子と衝突する。1 パルス中における原子間距離が固体中の原子間距離と同程度に接近して入射する C_{60} ビームの固体内原子衝突では、個々の衝突が独立に起こる線形な衝突過程とは異なった近接作用による集団的な非線形の衝突過程となる。

このような特徴をもつ C_{60} ビームを炭素薄膜ターゲットに衝突させた場合に、炭素ビームとは異なる相互作用をすることが予想され、 C_{60} の物理的性質を解明するうえで非常に興味深い。そこで数 MeV のエネルギー領域まで加速して相互作用実験を行うために、フラレン加速用線形加速器を設計した。

2. C_{60} イオンの生成・200KV 加速装置

図 1 に示すように、イオン源は坩堝ヒーターにより加熱されたアルミナ製坩堝から昇華した C_{60} フラレンをタンタル線フィラメントからの熱電子を加速し電子衝撃で C_{60} フラレンをイオン化する電子衝撃型である。アルミナ製坩堝と熱電子発生フィラメントは、独立に電圧が掛かる構造となっており、発生イオンのエネルギーを一定にしてボンバード電子のエネルギーを変えることができる。アルミナ製坩堝は 300V に昇圧しており、イオン化された C_{60} フラレンは引き出し電極へ加速され、引き出される。

図 2 に C_{60} フラレン加速装置の全体図を示す。イオン源、分析系、真空排気系とそれぞれの電源を 4 本の碍子で絶縁された架台の上に乗せた高圧ターミナルを 200kV まで昇圧する。現在 100kV まで昇圧し C_{60}^{3+} で 300keV 加速に成功している。

イオン源から引き出されたイオンビームは高周波チョッパーにより静電的に偏向させられ、アインツェル・レンズで収束後、 45° 分析磁石で電荷と質量の比によって選別され、スリットでパルス化される。

その後 200kV 加速管で加速された C_{60} パルスビームは、3 連静電 4 重極レンズで収束後、第 2 分析磁石で 15° 偏向して炭素薄膜 ($1\sim 5\mu\text{g}/\text{cm}^2$) と相互作用する。炭素薄膜ターゲットを通過したビームは、二次電子増倍管セラトロンにより検出される。

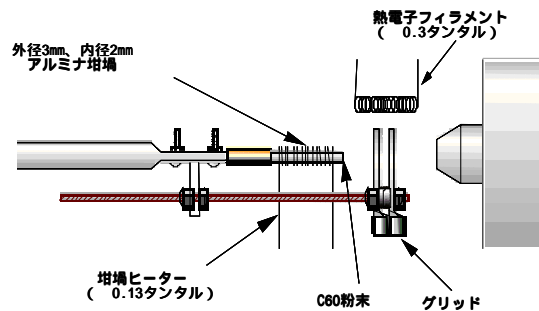


図 1 電子衝撃型イオン源

¹ E-mail: yasuo@es.titech.ac.jp

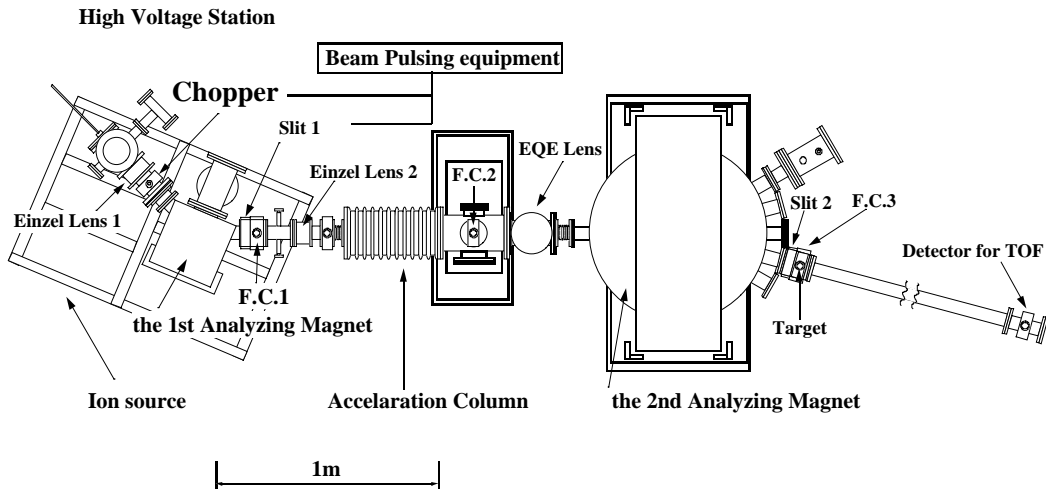


図 2 : フラーレン 200kV 加速装置

3 . フラーレン加速 APF-IH 型線形加速器

現在使用しているフラーレン加速装置では、200kV 加速を考えても質量数が 720 と非常に重い C_{60}^+ の 1 価イオンでは 0.28keV/u の非常に低いエネルギーしか得ることができない。そこでさらにエネルギーを上げた C_{60}^+ ビームと炭素薄膜との相互作用実験を行うため、ビームの収束として APF (Alternating Phase Focus) 収束を利用し、IH (Interdigital-H) 型構造をもつ APF - IH 型線形加速器の設計を行った。

図 2 に示すように、IH 構造は Transverse 方向に高周波電場を励振させたものである。ドリフトチューブ間のギャップには モードの高周波電場がたつ。これにより低・中エネルギー領域においては他の線形加速器と比較すると 5~20 倍強の加速電力効率の向上と同時に、小型化が可能となる^{[9][10]}。

C_{60}^+ フラーレンの場合、空間電荷効果が影響するほどのビーム電流が入射しないので、ビーム収束には APF 収束を採用した。粒子が加速ギャップを通過するとき、高周波電場から Transverse 方向には次のような力が働く。

$$\Delta_{RF} = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda}$$

V は加速電圧、T は transit time factor、E は加速される粒子のエネルギー、 λ は高周波の自由空間波長、 ϕ は高周波の位相である。つまり高周波の位相がプラスならば収束、またマイナスならば発散の方向へ力が働く。この収束・発散を組み合わせるこ

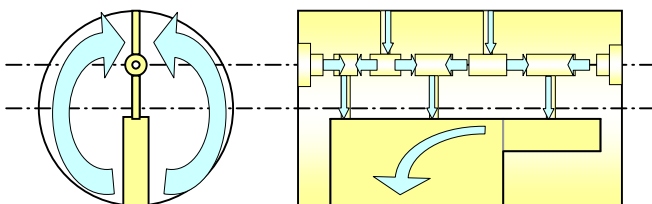


図 1 : APF-IH 構造

とにより、Longitudinal 方向及び Transverse 方向にビーム収束を行うことが可能である^[11]。

フラーレン加速用線形加速器は、入射粒子として 200kV で前段加速された電荷対質量数 = 1/720 の C_{60}^+ イオンを想定して設計を行った。

加速器に入射する C_{60}^+ イオンのエネルギーは非常に低く、またドリフトチューブ型加速構造から入射セル長は最低 10mm 以上必要であるため、加速周波数は 10MHz と仮定した。このような低い加速周波数を採用した場合、IH 型空洞共振器は非常に大きな空洞径を必要とするが、図 2 に示す現在我々の研究室が所有している中で最大の直径をもつ重イオン注入機用 IHQ 型線形加速空洞(直径 200cm)を内部ドリフトチューブの改造により利用することを考えた。その結果加速長は 65cm 以内となる。

加速電圧は図 3 に示すように、0.28keV/u から 3.0keV/u まで速度が増加するにしたがって電圧が増加する傾斜型電圧分布を採用した。



図 2 : 加速空洞外観

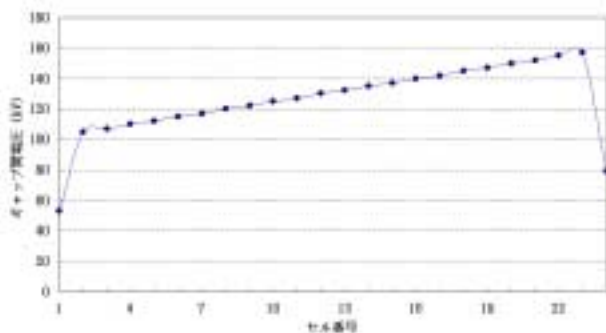


図3：傾斜型電圧分布

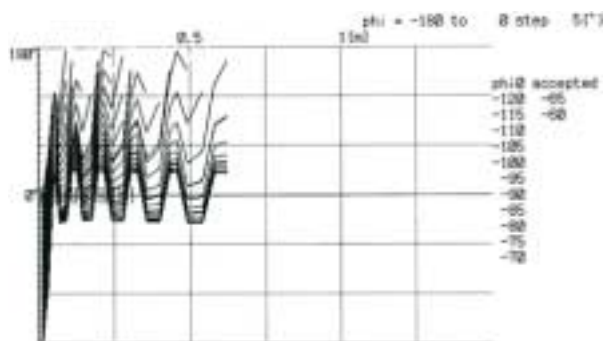


図4：位相シーケンスによる粒子の位相振動

粒子の収束には APF の位相シーケンスによる計算を行うが、電圧分布の安定性を考慮して \pm とする 0° を中心とする同位相を採用することにした。しかし最初の加速ギャップではビームのパンチング効果をもたせるため、 -90° を挿入した計算を行った。

表1にフラレン加速用 APF-IH 型線形加速器の主要パラメータを示す。

軌道計算の結果、 -90° 、 -30° 、 30° 、 30° の位相シーケンスでは、Longitudinal 方向のアクセプタンスが 40° 、Transverse 方向のアクセプタンスが $107\pi\text{mm mrad}$ であることがわかった。図4に位相シーケンスによる粒子シミュレーションの位相振動のデータを示す。

4. まとめと今後の予定

フラレン 200kV 加速装置の後段加速として、電荷対質量数 = $1/720$ (C_{60}^+) の C_{60} フラレンを 0.28keV/u から 3.0keV/u まで加速する APF-IH 型線形加速器を設計した。APF 収束を用いても非常に重い C_{60} フラレンを十分に加速できることがわかった。

今後、加速空洞として用いる重イオン注入機用 IHQ 型線形加速空洞の内部ドリフトチューブを改造することによりフラレン加速 APF-IH 型線形加速器を製作し、 2MeV の C_{60} ビームと炭素薄膜との相互作用実験を行い、炭素薄膜を通過した C_{60} フラレンの阻止能測定や C_{60} フラレンのフラグメンテーションに関する研究を行う予定である。

Acceleration Particle (q/A)	C_{60}^+ (1/720)
Input Energy	0.28keV/u
Output Energy	3.0keV/u
Operation Frequency	10MHz
Synchronous Phase	$-90^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Number of Cell	24
Cavity Length	104cm
Cavity Diameter	200cm
Focusing Sequence	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Transverse Acceptance	$107\pi\text{mm mrad}$
Longitudinal Acceptance	40°
Transmission	60% by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	53 ~ 157kV
Acceleration Rate	3.8MV/m

表1：フラレン加速用 APF-IH 型線形加速器の主要パラメータ

参考文献

- [1] A.Brunelle, et al: Phys. Rev. A59(1999)4456.
- [2] K.Toghofer, et al: Nucl. Instr. and Meth. B88(1994)44.
- [3] P.Sigmund, et al: Nucl. Instr. and Meth. B112(1996)1.
- [4] I.Yamada, et al: Nucl. Instr. and Meth. B148(1999)1.
- [5] N.V.de Castro Faria, et al: Phys. Rev. A46(1992)R3594.
- [6] D.D.N.Barlo Daya, et al: Nucl. Instr. and Meth. B106(1995)38.
- [7] B. Tsipinyuk, et al: J. Chem. Phys 106(1997)2449.
- [8] M.Kerford, R.P. Wwbb : Nucl. Instr. and Meth. B153(1999)270.
- [9] T.Hattori, et. al: Nucl. Instr. and Meth. B99(1995)807-809.
- [10] K.Isokawa, T.Hattori, et. al: Nucl. Instr. and Meth. A145 (1998)287-290.
- [11] D.A.Swenson: Proc. 1976 Proton Linear Accelerator Conference (1976)234-237.