



飛跡検出器としてのポリエチレンテレフタレート中に形成されるイオントラックの検出閾値近傍の損傷評価

千葉, 昌寛 ; 楠本, 多聞 ; 金崎, 真聡 ; 小田, 啓二 ; 小平, 聡 ; 山内, 知也

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 16:46-55

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011873>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011873>



飛跡検出器としてのポリエチレンテレフタレート中に形成される イオントラックの検出閾値近傍の損傷評価

**A study on latent track structure in polyethylene terephthalate, PET,
as an etched track detector around the detection threshold.**

千葉 昌寛*, 楠本 多聞**, 金崎 真聡*, 小田 啓二*,
小平 聡**, 山内 知也*

**Akihiro Chiba,* Tamon Kusumoto*, Masato Kanasaki*, Keiji Oda*,
Satoshi Kodaira**, Tomoya Yamauchi***

(令和元年7月12日 受付)

Abstract

This study aims to understand the modified structure around latent tracks in polyethylene terephthalate, PET, as an etched track detector, which makes it as an etchable one. Two different types of PET films from the same industrial company were used for the determination of radiation chemical yield for the loss of aromatic-ring (2.5 μm in thickness) and for etching test in 6 M KOH solution kept at 40 $^{\circ}\text{C}$ (13 μm). These films were exposed to B-11 ion, as well as Ar and Fe ions at an incident energy of about 6 MeV/u. The radiation chemical yield is evaluated by Fourier transform infrared FT-IR measurement both before and after the exposures. We have found a clear step-like changes in radiation chemical yield for loss of aromatic-ring in PET along B-11 ion at the stopping powers between 250 and 270 eV/nm, as reported for B-10 ions in the previous study. Etch pits are observed for Ar and Fe ions after the chemical etching, but any etch pits are not observed for B-11 ions even at the higher stopping power where the damage is clearly enhanced. Further study is progressing to clear the difference of the response between two types of PET films with the different thickness.

(Received 12 July 2019)

1. 序論

高分子材料中をイオン（荷電粒子）が通過すると、その軌跡に沿って高分子鎖が切断される。これはイオンによる直接電離と、その電離によって生じる多数の二次電子がもたらす局所的なエネルギー付与によるものであると解釈されている。このイオントラックは材料分子構造に生じるナノスケールの放射線損傷であるが、強アルカリ溶液などの化学薬品でエッチングすることにより、損傷が拡大され円錐形の穴（エッチピット）になる。そのエッチピットの大きさや幾何形状、個数などを分析することで、入

射粒子の電荷やエネルギー、入射方向、フルエンスなどの情報を得られる。このようにして放射線に関する様々な情報を得ることのできる検出器を固体飛跡検出器（Solid State Nuclear Track Detector）という。その中でも CR-39 の商品名で知られるポリアリルジグリコールカーボネート（PADC）は数 MeV のプロトンも記録する感度を持っていることから（Cartwright et al., 1978）、固体飛跡検出器の中では最も一般的な検出器として用いられている。

近年、原子間力顕微鏡などの周辺技術の発達により、固体飛跡検出器は宇宙放射線計測、レーザー駆動イオン加速実験など多様な分野への応用が期待されている。このような放射線計測の現場においては、宇宙物理学にとって有用な

* 神戸大学大学院海事科学研究科

** 量子科学技術研究開発機構 QST

情報を持つ超重核にのみ感度を有するような重イオンの弁別、あるいはレーザー駆動イオン加速実験などの放射線混成場で特定の核種のみを検出するような検出器の応用も期待されており、検出感度が制御可能な次世代の固体飛跡検出器の開発が望まれている。

例として、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所の西内氏らによって行われたイオン加速実験について、概略図を Fig.1.1 に示す (Nishiuchi et al.)。

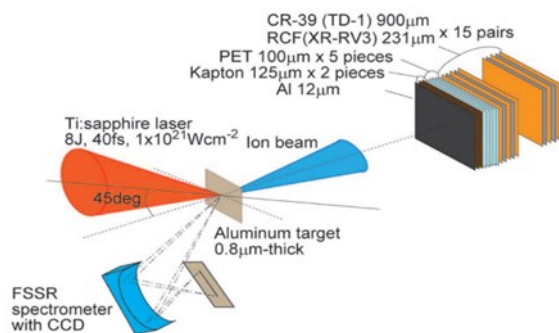


Fig.1.1 Schematic of ion acceleration experiment using the J-KAREN laser.

この実験では高強度レーザーをアルミニウムターゲットに集光してイオンの加速を行っている。このような実験手法においてはイオンと共に電子やX線が発生するため、これらの放射線に不感でイオンにのみ感度を有する検出器を用いる必要がある。この例ではポリイミド (PI) とポリエチレンテレフタレート (PET)、PADC のスタックが活用され、Fe イオンをプロトンやCイオンと弁別して計測することに成功している。本研究はこれに応用されている PET 中のイオントラックの構造分析と感度分析を行うものである。

PET は PADC や PC などと比べ非常に感度が低く、検出閾値の高い飛跡検出器として研究されている (Bhattacharyya et al., 2016; Drach et al., 1987; Somogyi et al., 1976)。また、ナノポアメンブレンの研究においても PET はその母材として広く研究されてきている (Apel, 2001; Siwy et al., 2003)。重イオン照射の後の紫外線照射によってサブ nm のポアを形成する手法が開発され、そのポアがアルカリ金属イオンに対して高い選択性

を有することも報告されているなど、現在も活発な研究が進められている (Wen et al., 2016)。

固体飛跡検出器の応答特性を制御する、或いは膜材料中のポアサイズを制御するためには、潜在飛跡構造についての基礎的研究が不可欠である。これまでも数多くの赤外線分光法を用いた研究が行われてきている (Biswas et al., 1999; Liu et al., 2000; Steckenreiter et al., 1997; Zhu et al., 2002) が、比較的最近の研究において我々は He と C イオンの間で損傷構造や放射線化学収率にステップ状の変化があることを見出し

(Yamauchi et al., 2012)、その後さらに明瞭なステップ状の変化を B イオンのトラックに見出した (Yamauchi et al., 2018)。本研究はこれに続く研究であり、そのステップと検出感度との関係に焦点を当てている。

2. 実験概要

我々の研究室では、量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所のがん治療用重粒子加速器 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) の中エネルギービーム照射室にて PET 薄膜に様々なイオンを照射し、赤外分光法を用いて PET の各官能基の損傷の評価が行われてきた (上野, 2014&2016)。Fig.2.1、2.2 はそれぞれ、PET 中のカルボニル基とエチレン基の G 値と阻止能の関係を表したものである。

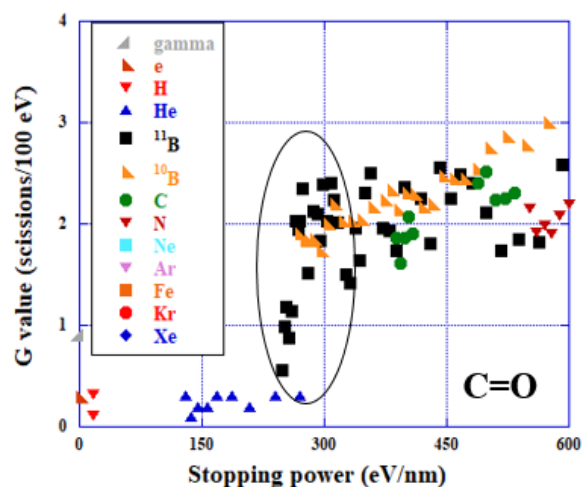


Fig. 2.1. Relationship between G value and the stopping power (C = O).

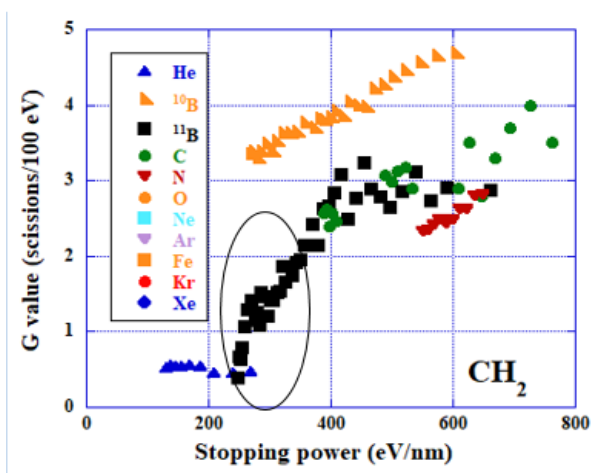


Fig. 2.2. Relationship between G value and the stopping power (CH_2).

G 値とは、単位エネルギーが付与されたときに生成、あるいは消失した分子の個数を表したものであり、本研究では単位エネルギーとして 100 eV を用いている。これらの両図から、阻止能 250 eV/nm 付近に明確なステップ状の変化が存在することが見て取れる。

つまり阻止能 250 eV/nm 付近から損傷が増大するという事であり、このことは PET の検出閾値と深く関わっていることが考えられる。そのため本研究では、以下の二つの実験を行い検出閾値周辺における PET の損傷構造の解明を行った。

- ①. 先行する研究では得られなかったアロマティックリングのステップ状の変化を解明するためステップ周辺の阻止能域で PET 薄膜に B-11 イオンを照射し赤外分光法で G 値の評価を行った。
- ②. 同素材でより厚い薄膜にエッチングテストを行い、エッチピット生成の有無を確認した。

3. ポリエチレンテレフタレート試料 (PET)

実験で用いた PET について、一般的な情報を記す。Fig.3.1 は PET の構造式である。

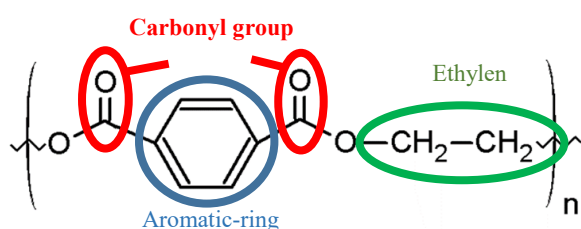


Fig. 3.1. Structural formula of PET.

PET は一つの繰り返し構造内にエチレン基、アロマティックリング、そして二つのカルボニル基を有している。組成式は $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ 、分子量 192 の重合体で密度は約 1.39 g/cm^3 である。本研究で用いた PET 薄膜の製品情報は Tabel.3.1 に示すとおりである。

Table 3.1. Product information of PET used in this experiment.

製造企業	公称厚さ	製品型番
GoodFellow	2.5 μm (赤外分光法)	ES301025
	13 μm (エッチング)	ES301130

赤外分光法を用いた実験には GoodFellow 社製の公称厚さ 2.5 μm の PET 薄膜を用いたが、この厚さのものをエッチングするのは難しいため、エッチングテスト用には可能な限り同質な素材と思われる、同社製の 13 μm 厚の薄膜を用いた。

4. HIMAC の概要

先にも述べたが、HIMAC は重粒子線を用いた癌治療を目的として量子科学技術研究開発機構放射線総合医学研究所に設置された重粒子加速器である。HIMAC では治療用ビームとして C イオンが利用されているが、照射できるイオン種は多岐にわたり、現在は proton から Xe イオンまでが加速可能である。

HIMAC では Fig.4.1 に示すように、シンクロトロンの前段に加速器として RFQ ライナック、アルバレイナックの 2 種類のライナックが用いられており、イオンは 6 MeV/u にまで加速された後に主加速器であるシンクロトロンによって 800 MeV/u まで加速される。

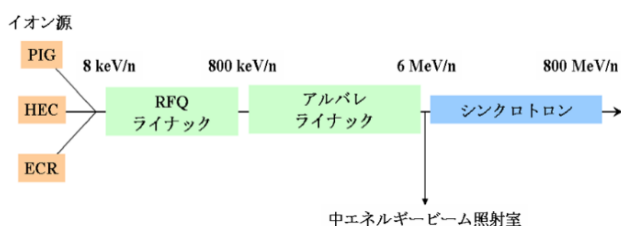


Fig. 4.1. Arrangement of ion source and accelerators and acceleration energy at each step.

今回実験に用いた中エネルギービーム照射室は、シンクロトロン加速器にイオンを入射する前にスイッチングマグネットによりその進路を変更し、6 MeV/u のエネルギーで照射することができる設備である。照射室内には四重極磁石、ビームシャッター、真空チェンバがビームラインに取り付けられている。我々の研究において、試料に照射したフルエンスを知る際には、この真空チェンバ内上流に位置する SEM

(Secondary Electron Monitor) を用いる。Fig.4.2 に示すように、SEM は 1 μm のアルミニウム膜 3 枚で構成されている。

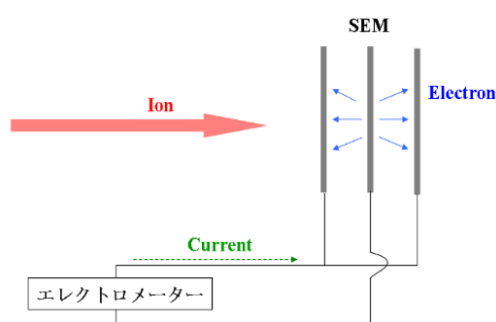


Fig.4.2. Principal of Secondary Electron Monitor (SEM).

これら 3 枚のアルミニウム膜は両端の 2 枚がアースされており、中央のアルミニウムには -30 V の電圧が与えられている。Fig.4.2 のように SEM にイオンが通過するとアルミニウム膜に電離が生じ、中央のアルミニウム膜で発生した電子は電場の影響で両端のアルミニウム膜に衝突する。この時電流が発生するが、発生した電荷量と SEM を通過するイオンの数（フルエンス）は比例しているはずである。そこで発生した電荷を、エレクトロメータを用いて読み取ることでターゲットに入射したイオンのフルエンスをモニターすることが可能となっている。

5. 実験概要

①赤外分光法

赤外分光法を用いた実験では、イオン照射前後の PET 試料の赤外線吸収スペクトルを FT/IR-6100 (Fig.5.1) の MCT 検出器を用い測定し、吸光度変化を求めた。MCT 検出器は光子に対する素子の反応率が従来の実験で用いられていた

TGS 検出器よりも高く、高感度に赤外光を検出することが可能である。なお測定は真空中で行った。

Fig.5.2 は MCT 検出器を用いて測定した PET の赤外線吸収スペクトルであり、主要な官能基の吸収ピークは Tabel 5.1 に示すとおりである。



Fig. 5.1. FT/IR-6100.

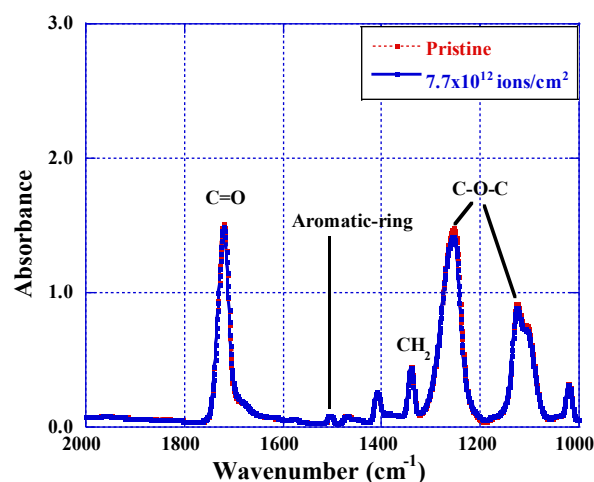


Fig. 5.2. Infrared absorption spectra of PET film before and after ion irradiation.

Table 5.1. Assignment of infrared absorption peaks of PET.

帰属	振動の種類	波数(cm^{-1})
C=O	伸縮振動	1720
Aromatic-ring	縮合骨格平面振動	1505
CH ₂	面外変角運動	1341
C-O-C	対称伸縮運動	1254
C-O-C	対称伸縮運動	1126

Fig.5.2 から、照射前後で主要な官能基のピークは照射の前後で低下していることが確認できる。これまでの研究ではカルボニル基やエチレン基などのピークでステップが確認できていたため、今回の実験では 1505 cm^{-1} のアロマティックリングのピークに着目して吸光度の測定を行った。

②エッチングテスト

厚さ $13\text{ }\mu\text{m}$ の PET フィルムをスタックしたものに、B-11 イオンと比較的重い Ar,Fe イオンを HIMAC の中エネルギービーム照射室にて照射し、エッチングテストを行いエッチピット生成の有無を調べた。エッチングには 40°C の 6 M-KOH 溶液を用いた。なお、B-11 イオンは実験概要で述べた $250\sim 270\text{ eV/nm}$ あたりの阻止能をカバーできるように照射を行った。Ar と Fe イオンに関しては、今回 $13\text{ }\mu\text{m}$ の PET 薄膜をエッチングするのが初めてであったため、エッチングテストが可能どうかを確かめるために照射を行った。

・照射体系

赤外分光法用には $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚の PET 薄膜をスタックしたものを、エッチングテスト用には $13\text{ }\mu\text{m}$ の薄膜をスタックしたものをそれぞれ複数セット用意し、HIMAC の中エネルギービーム照射室にてそれぞれ異なるフルエンスで様々な核種を照射した。薄膜をスタックしたのは連続した阻止能で実験結果を得るためである。なお照射の際、薄膜へ入射するエネルギーを可能な限り高めるため、Fig.5.3 に示すようにビーム照射口に PET ス

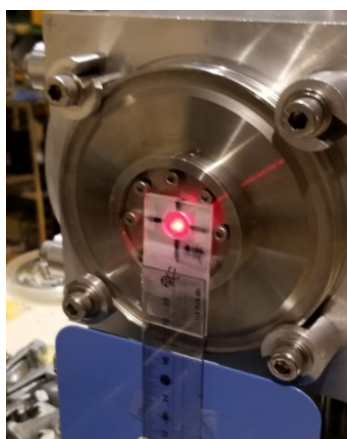


Fig. 5.3. A beam port with 6 MeV/u in HIMAC.

タックを張り付けるような形でビームの照射を行った。入射時のエネルギー、フルエンス、阻止能の範囲は Tabel 5.2、5.3 に示すとおりである。

Table 5.2. Irradiation conditions
(Infrared spectroscopy).

	B-11
入射時のエネルギー	5.45 MeV/u
フルエンス	3×10^{12} 4×10^{12} 6×10^{12} ions/cm ²
阻止能	258 eV/nm ~ 311 eV/nm

Table 5.3. Irradiation conditions
(Etching test).

	B-11	Ar	Fe
入射時のエネルギー	5.45 MeV/u	4.09 MeV/u	3.57 MeV/u
フルエンス	4×10^5 ions/cm ²	4×10^5 ions/cm ²	4×10^5 ions/cm ²
阻止能	250 eV/nm ~ 320 eV/nm	2504 eV/nm ~ 3250 eV/nm	4840 eV/nm ~ 5770 eV/nm

6. 実験結果

①赤外分光法

Fig.6.1、6.2 はそれぞれ、PET 試料のビーム照射面から 1 枚目と 10 枚目のアロマティックリングの相対吸光度変化と照射フルエンスの関係をグラフにしたものである。

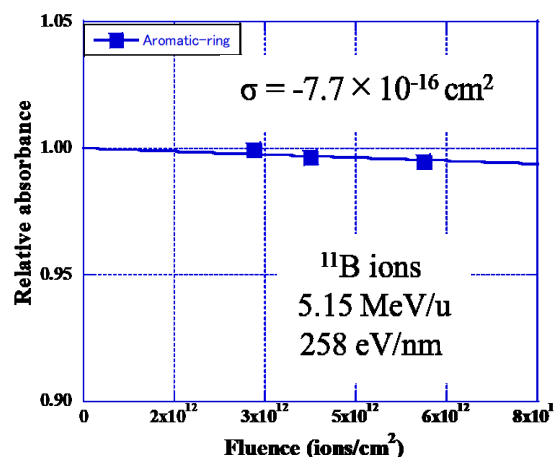


Fig. 6.1. Relationship between relative absorbance and fluence of aromatic-ring (First film).

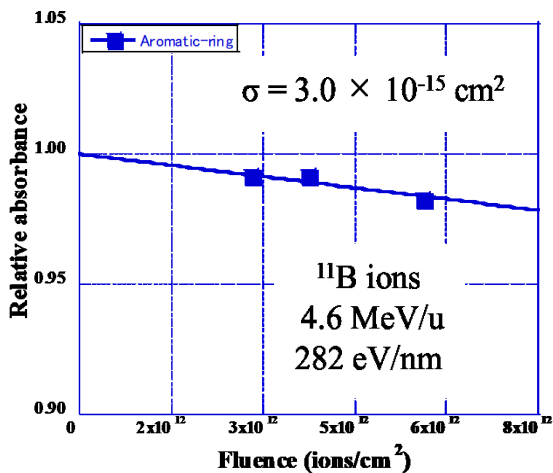


Fig. 6.2. Relationship between relative absorbance and fluence of aromatic-ring (10th film).

一般に、異なるイオントラックの重なりが無視できるフルエンス領域においては、この2つの関係は次式で表すことができる。(Yamauchi et al., 2012)

$$A/A_0 = 1 - \sigma F \quad (1)$$

式中の A/A_0 は相対吸光度、 σ は除去断面積、 F はフルエンスを表す。除去断面積とはイオントラック一本あたりに官能基が失われる断面積を表しており、グラフでは相対吸光度変化とフルエンスの関係の傾きに相当する。今回の結果から Fig.6.1 と Fig.6.2 に表されるように、薄膜へ入射した際の阻止能が 260~270 eV/nm を超えたあたりから除去断面積の値が急増したことが確認できた。

この除去断面積(σ)とイオンが入射した際の阻止能($-dE/dx$)と照射後の官能基密度 (N_0) を次式の右辺に適用しアロマティックリングの G 値を求めた。その結果を Fig.6.3 に示す。

$$G = \sigma N_0 / (-dE/dx) \quad (2)$$

アロマティックリングに関しては、260~270 eV/nm 付近で G 値が急増するという結果が得られた。以前我々の研究室では B-10 でアロマティックリングのステップが見られたと報告したが、今回は新たに B-11 イオンでステップ状の変化を以前より詳細に得られた。このステップ状の変化は PET の検出閾値に大きく関わっていると推測されるので、次のエッチングテストでこのステップ付近の阻止能で照射した薄膜をエッチングしエッチピット生成の有無を確認した。

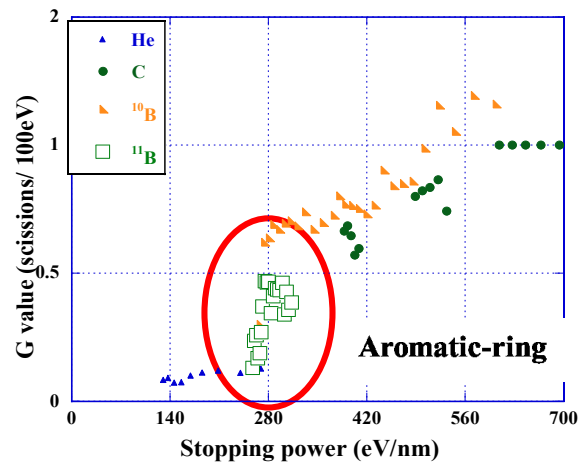


Fig. 6.3. Relationship between G value and the stopping power (aromatic-ring, 1505 cm^{-1}).

②エッチングテスト

PET フィルムをエッチングし、厚さ 13 μm から 6 μm になるまで適宜 100 倍率の光学顕微鏡で観察を行った。

まず B-11 イオンの結果を示す。Fig.6.4 はエッチング前の PET フィルムの表面、Fig.6.5 はエッチング後の PET フィルムの表面である。

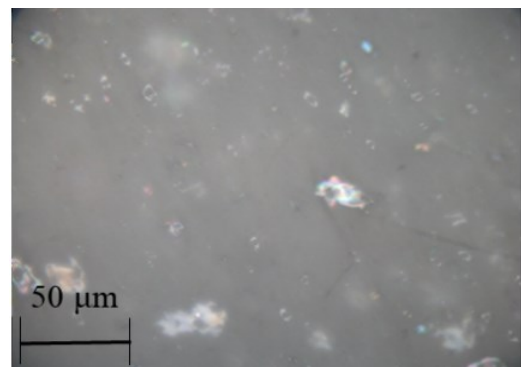


Fig.6.4. PET surface before etching (320 eV/nm).

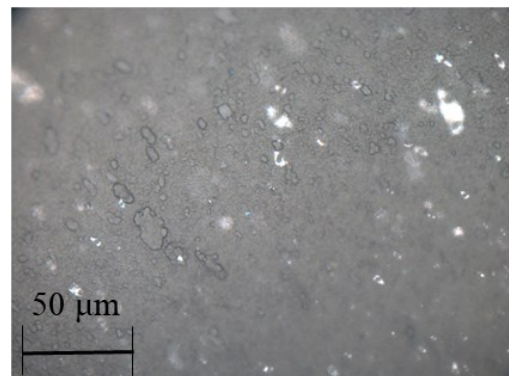


Fig.6.5. PET surface after etching with a removed thickness of 3.5 μm (320 eV/nm).

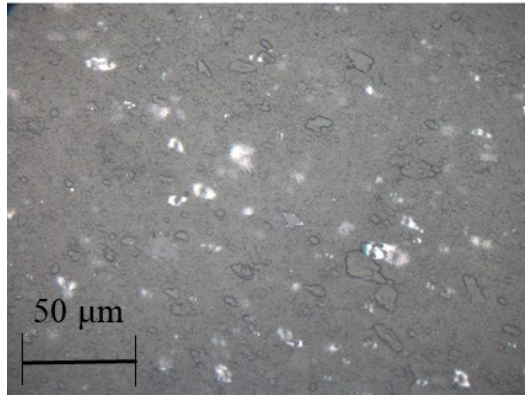


Fig.6.6. PET surface after etching with a removed thickness of 3.5 μm (unirradiated).

Fig.6.6 は比較のため何も照射しなかった試料を同時にエッチングしたものである。

今回のエッチングテストでは、エッチピットは観測することができなかった。この結果から、270 eV/nm 周辺のステップ状の変化はそのまま検出閾値に対応しているのではなく、ステップ状の変化を経てさらに損傷が広まることで閾値に達する、或いは 2.5 μm と 13 μm の薄膜では製造工程が異なっており、閾値も異なるという二つの可能性が考えられる。

なお、Fig.6.4 の PET 試料は、表面に穴が開いているように見えるが、これは PET の特性として表面の溶出の仕方が不均一なためであると考えられる。先行する研究から、準結晶性を持つ PET はアモルファス構造を持つ Kapton 等と比べエッチング後に表面が荒れやすいという事が分かっている (Siwy et al., 2003)。次に Ar、Fe イオンのエッチングテストの結果を示す。Fig.6.7、6.8 は Ar イオンを、Fig.6.9、6.10、は Fe イオンを照射した試料のエッチングを進めた結果である。こちらの両イオンでは、エッチピットの生成を確認することができた。また、両者のエッチピットの大きさにはあまり差が見られなかった。しかし、Fig.6.8 や 6.10 に示すように、エッチングを初めて時間が経ち、溶出厚が大きくなるにつれ整ったエッチピットが崩れていき、輪郭が白っぽく乱反射するようになった。

さらにエッチングを進めた際の Fe イオンのエッチピットの写真を Fig.6.11、6.12 に示す。

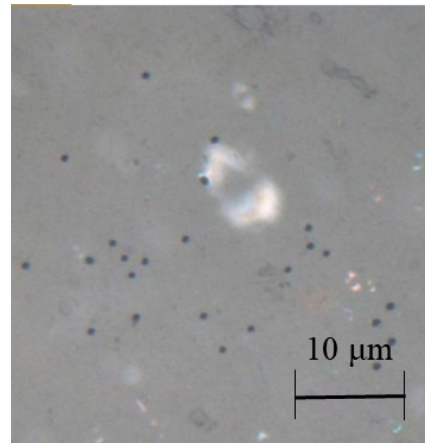


Fig.6.7. Ar ion, etched for 30 minutes with a removed thickness of 0.5 μm (2604 eV/nm).

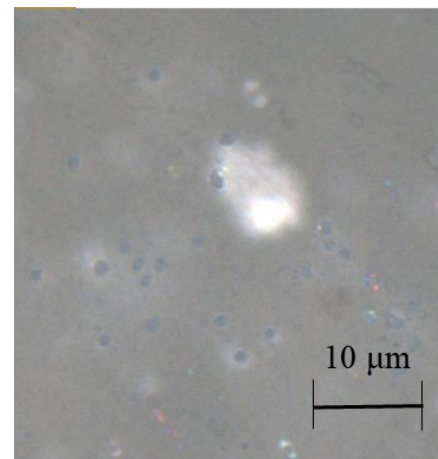


Fig.6.8. Ar ion, etched for 60 minutes with a removed thickness of 1 μm (2604 eV/nm).

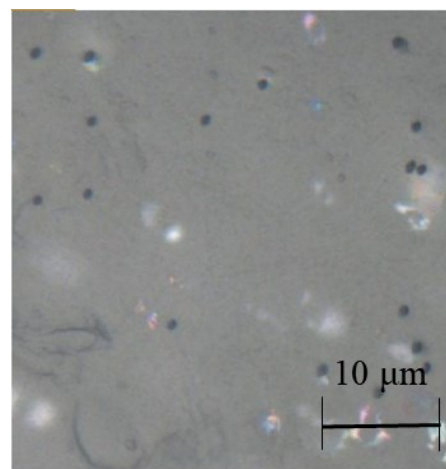


Fig.6.9. Fe ion, etched for 30 minutes with a removed thickness of 0.5 μm (4840 eV/nm).

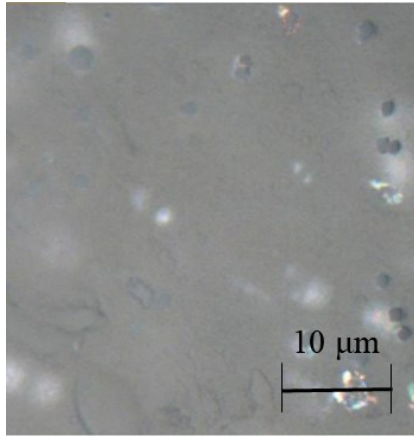


Fig.6.10. Fe ion, etched for 60 minutes with a removed thickness of 1 μm (4840 eV/nm).

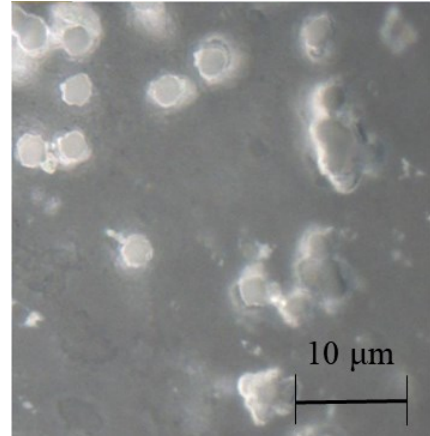


Fig.6.12. Fe ion, etched for 150 minutes with a removed thickness of 2.5 μm (4840 eV/nm).

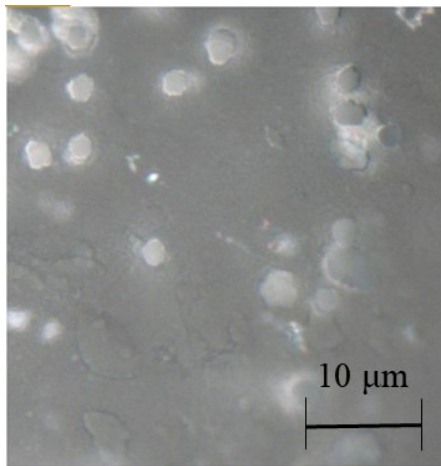


Fig.6.11. Fe ion, etched for 120 minutes with a removed thickness of 2 μm (4840 eV/nm).

エッチング時間とともにエッチピット半径が大きくなっていったが、同時に表面の荒れも大きくなり、内部が完全に白く乱反射するエッチピットが見られるようになった。Ar イオンでも同様の結果となった。これは、Fig.6.13 に示すように、エッチピットができ始めたころは整った円錐形であるが、溶出速度が所々異なるためにエッチピットのふちが不均一に溶けたためだと考えられる。このことから、本実験で用いた 13 μm 厚の PET 薄膜は検出器として用いるには不向きだといえる。

7. まとめ・今後の課題

赤外分光法を用いた実験では、PET 薄膜のスタックに B-11 イオンを照射し、Aromatic-ring の吸光度変化を調べた。その吸光度の低下から G 値を導出した結果、260~270 eV/nm 付近にステップ状の変化を新たに確認した。

そのステップ状の変化がエッチピット生成に関わっているのかを確かめるべく、13 μm 厚の PET に B-11、Ar、Fe イオンを照射し、エッチピット生成の有無を確認した。その結果、B-11 イオンを照射した試料ではステップ状の変化を経た後の阻止能域でもエッチピットを観察することはできなかった。Ar、Fe イオンに関しては、エッチピット生成を確認することはできたが、エッチングを進めていくにつれエッチピットの形が不均一になったため、検出器として 13 μm 厚の PET 試料を用いるのは不向きだといえる。

今後、C、O イオンなどを照射し、13 μm 厚の PET の検出閾値を求めていくとともに、13 μm 厚の PET を赤外分光法が用いることのできる厚さまで薄く溶かし、その際発生する損傷が 2.5 μm 厚のものと同じかどうかを確認していく必要があると考えられる。

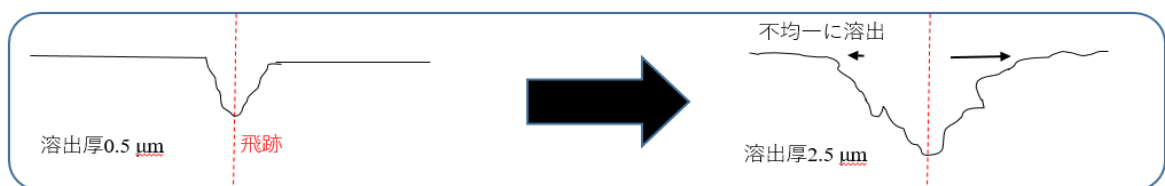


Fig.6.13. Schematic view of etch pit growth.

• 参考文献

- Apel, P, et al., “Track etching technique in membrane technology”, *Radiat. Meas.*, 34(2001)559-566.
- Bhattacharyya, R., et al., “Determination of the detection threshold for Polyethylene Terephthalate (PET) Nuclear Track Detector (NTD)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.*, (2006)63-66.
- Biswas, A., et al., The effects of swift heavy ion irradiation on the radiochemistry and melting characteristics of PET”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 159(1999)40-51.
- Cartwright, B.G. et al., “A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution”, *Nucl. Instrum. Methods.*, 153(1978)457.
- Drach, J., et al., “Characteristics of CRONAR polyethylene terephthalate track detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.*, 28(1987)49-52.
- Fujii, M., et al., “Ageing effects on a new polymeric track detector SR-90 and a model of the nuclear track formation”, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 22(1993)199.
- Fukuda, Y., et al., “Energy Increase in Multi-MeV Ion Acceleration in the Interaction of a Short Pulse Laser with a Cluster-Gas Target”, *Phys. Rev. Lett.*, 103 (2009) 165002.
- Fukuda, Y., et al., “Identification of high energy ions using backscattered particles in laser-driven ion acceleration with cluster-gas targets”, *Radiat. Meas.*, 50 (2013) 92.
- Konishi, T., et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 76(2005)114302.
- Liu, C., et al., “Molecular conformation changes of PET films under high-energy Ar ion bombardment”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.*, 169(2000)72-77.
- Nishiuchi, M., et al., “Laser-driven multicharged heavy ion beam acceleration”, *Proceedings of the SPIE 9515.*, (95151D).
- Ogura, K., et al., “Proton response of high sensitivity CR-39 copolymer”, *Radiat. Meas.*, 28(1997)197.
- Ogura, K., et al., “Properties of TNF-1 track etch detector”, *Nucl. Instrum. Methods.*, B 185(2001)222.
- Somogyi, G., et al., “Revision of the concept of registration threshold in plastic track detectors”, *Nuclear Instruments and Methods.*, 134(1976)129-141.
- Steckenreiter, T., et al., “Chemical modifications of PET induced by swift heavy ions”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.*, 131(1997)159-166.
- Siwy, Z., et al., “Ion transport through asymmetric nanopores prepared by ion track etching”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.*, 208(2003)143–148.
- Wen, Q., et al., “Highly Selective Ionic Transport through Subnanometer Pores in Polymer Films”, *Adv. Funct. Mater.*, 26(2016)5796-5803.
- Yamauchi, T., et al., “Track core size estimation for heavy ions in CR-39 by AFM and UV methods”, *Nucl. Instrum. Methods.*, B 236(2005a)318.
- Yamauchi, T., et al., “Yields of CO₂ formation and scissions at ether bonds along nuclear tracks in CR-39”, *Radiat. Meas.*, 40(2005b)224.
- Yamauchi, T., et al., “Structural modification along heavy ion tracks in poly(allyl diglycol carbonate) films”, *JJAP.*, 47(2008a)3606.
- Yamauchi, T., et al., “Loss of carbonate ester bonds along Fe ion tracks in thin CR-39 films”, *Radiat. Meas.*, 43(2008b)106.
- Yamauchi, T., et al., “Thresholds of Etchable Track Formation and Chemical Damage Parameters in Poly(ethylene terephthalate), Bisphenol A polycarbonate, and Poly(allyl diglycol carbonate) Films at the Stopping Powers Ranging from 10 to 12,000keV/ μ m”, *Jpn.J.Appl.Phys.*, 51(05631) (2012), 1-5.
- Yamauchi, T., et al., “Distinct step-like changes in G values for the losses of typical functional groups in poly(ethylene terephthalate) along boron ion tracks around the detection threshold”, *Radiation Measurements.*, 116 (2018) 51-54.
- Yasuda, N., et al., *Radiat.Meas.*, 40(2005a)384.

Zhu, Z., et al., “Modification of polyethylene terephthalate under high-energy heavy ion irradiation”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research., 191(2002)723-727.

上野琢也 “重イオン弁別型飛跡検出器開発のための PET の特性評価” 修士論文” 神戸大学 (2016)

上野琢也, “高閾値検出器としてのポリエチレンテレフタレート の特性研究” ,卒業論文,神戸大学(2014)

森豊 "ポリアリルジグリコールカーボネート検出器中に形成されるプロトン及び重イオントラックの構造" 博士論文 神戸大学 (2014).

森本彰, “ポリエチレンテレフタレート中重イオントラックの特性評価” , 修士論文,神戸大学 (2011)

近藤正春・篠崎善治(1980)『放射線科学』コロナ社

堀口博 (2007)『赤外吸光図説総覧』三共出版