



PADC飛跡検出器に及ぼす陽子及び重イオン照射効果

森, 豊
坂本, 淳志
山内, 知也
小田, 啓二
安田, 仲宏

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 06:65-72

(Issue Date)

2009-07

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81001466>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001466>



PADC 飛跡検出器に及ぼす陽子及び重イオン照射効果

Effects of proton and heavy ions irradiation on PADC track detectors

森 豊*, 坂本 淳志*, 山内 知也, 小田 啓二, 安田 仲宏**
Yutaka MORI*, Atsushi SAKAMOTO*, Tomoya YAMAUCHI, Keiji ODA
Nakahiro YASUDA**

(平成 21 年 4 月 10 日受付)

Abstract

Chemical modification along ion tracks in PADC, poly(allyl diglycol carbonate), films has been studied by means of FT-IR spectrometry, which were exposed to proton and heavy ions. The damage density for loss of carbonate ester bonds per unit length of tracks were assessed for each ion, as a function of stopping power. The G values and the corresponding effective track core radii were also evaluated. It is in the tendency that G value increases gradually with stopping power of heavy ions from C to Xe ion. On the contrary to this, a reverse tendency was found for proton, He, and high energy C ions.

1 はじめに

光学材料として開発されていたポリ・アリル・ジグリコール・カーボネート (PADC) が、エッチング型固体飛跡検出器として見出されてより既に 30 年が経過している (Cartwright et al., 1978)。電源を必要としない小型かつ軽量の受動型検出器であり、高い電荷及びエネルギー分解能を有する優れた特性ゆえに、現在でも中性子線量計測、宇宙放射線計測、ラドン・トロン計測、生物照射実験、レーザー駆動荷電粒子加速などの分野で利用されている (Nikezic et al., 2004)。共重合等の手法で同検出器に改良を加えたものの研究は行われているが、根本的な意味で新しい飛跡検出器は開発されないままになっている。その原因として検出動作原理の基礎である潜在飛跡形成機構には未だ不明な点が多く残されていることがあげられる (Enge, 1995; Yamauchi, 2003)。次世代の固体飛跡検出器としては、蛍光飛跡検出器に匹敵する高い感度を有するもの (Akselrod et al., 2006)、

宇宙線に含まれる超重核の検出等、目的に応じて感度が任意に制御可能であるようなものが望まれている (Westphal et al., 1998)。そのためにも PADC 中に形成されるトラックの構造を明らかにしその形成機構を知ることは重要な課題である (Yamauchi et al., 2005a&b, 2008a&b)。

高分子材料中イオントラックのサイズや構造評価には、種々の手法が適用されてきている (Enge, 1995)。一般には、エッチングによるトラックの開口過程を電気伝導度の変化として捉える電気伝導度法や (Bean et al., 1970; Peterson et al., 1995; Apel et al., 1998; Oganessian et al., 2005; Yu et al., 2006)、透過型電子顕微鏡によってトラックのレプリカを観察する手法 (Bernaola et al., 2006; Francisco et al., 2004) がよく用いられている。一方、赤外線吸収分光法は電離放射線が高分子にもたらす効果を評価するために広く利用されている (Balanzat et al., 1995; Hama et al., 1995; Barillon et al., 2003)。イオン照射した PADC に対しても同手法による分析が行われているが、筆者らのものを除くと定量的分析に成功したものは少ない

*神戸大学大学院 海事科学研究科 海事科学専攻
**放射線医学総合研究所

(Gagnadre et al., 1993; Lounis-Mokrani et al., 2003; Phukan et al., 2003; Fink, 2004)。PADC と同じポリカーボネート系高分子であるビスフェノール A ポリカーボネート (PC) については、赤外線分光も含め、優れた定量的分析が行われている (Factor et al., 1994; Dehaye et al., 2003; Sun et al., 2003)。我々もそれらと同様な結果をこれまでに報告している (渡邊ほか 2006&2007)。

以上のような研究の現状を踏まえて、本研究では照射した PADC を赤外線分光によって系統的に分析した。陽子と Xe までの重イオン照射には放射線医学総合研究所 HIMAC の中エネルギービーム照射室を利用した。PADC におけるトラック単位長さ当たりのカルボニル基の減少数を損傷密度として評価した。さらに、これに対応する実効的トラックコア半径と放射線化学収率 (G 値) を阻止能の関数として求めた。PC について得られている結果との比較を通じて、PADC 中の G 値に特異な阻止能依存性があることを見いだした。トラック内の局所線量分布と実効的トラックコア半径との検討より (Waligórski et al., 1986)、Ne イオンより重たいイオンにおいては複数の繰り返し構造単位が損傷域に含まれているが、プロトンや He イオン等の軽いイオンでは損傷域はひとつの繰り返し構造単位に限られていることが示唆された。

2 実験

実験にもちいた PADC はフクビ化学社製の BARYOTRAK であり、これは 99.9%以上に精製した同モノマーから重合されている。透過法において未飽和の赤外線吸収スペクトルを得るために化学エッチングによって 2 μm 程度の薄膜にしている。薄膜の製法と特性については先に報告した通りである (Yamauchi et al., 2008a&b)。

照射は放射線医学総合研究所の医療用重イオン加速器 HIMAC の中エネルギービーム照射室において実施した。同ビームラインは、6 MeV/n に加速された数 cm 径の様なイオンビームを大気中で照射できる (Yasuda et al., 2005)。ビームの大気中への取り出し口であるハーバーフォイルと

試料との距離を調整することで入射エネルギーを調整した。

赤外線分光には真空密閉タイプの FT/IR-6100 (日本分光社製) を使用し、大気中の水分や二酸化炭素の影響を極力排除した。

Table 1. Conditions of ions irradiation.

Ion	Energy (MeV)	Stopping power (keV/ μm)	Fluence (ions/ cm^2)
H	5.7	9.3	$6.0 \times 10^{12} \sim 3.0 \times 10^{13}$
He	20	40.8	$2.0 \times 10^{12} \sim 1.0 \times 10^{13}$
C	25	653	$1.5 \times 10^{12} \sim 4.0 \times 10^{12}$
	58	372	$9.0 \times 10^{11} \sim 3.0 \times 10^{12}$
Ne	24	1790	$3.5 \times 10^{11} \sim 6.0 \times 10^{11}$
Ar	46	3880	$1.0 \times 10^{11} \sim 3.0 \times 10^{11}$
Fe	147	5151	$8.0 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^{11}$
Kr	219	7301	$5.0 \times 10^{10} \sim 1.0 \times 10^{11}$
Xe	200	12091	$1.0 \times 10^{10} \sim 5.0 \times 10^{10}$

3 結果と考察

3.1 照射による赤外線吸収スペクトルの変化

Fig. 1 に照射前後の PADC 薄膜の赤外線吸収スペクトルを示す。横軸は波数であり縦軸は吸光度である。この波数域における光吸収は試料を構成するある原子間の振動によるものであり、それは特定の波数で生じる。そして後述するように、吸光度は光路内にあるそのような特定の原子団の密度に比例する。同薄膜には 147 MeV の Fe イオンを 1.5×10^{11} ions/ cm^2 で照射したが、これによって 1750 cm^{-1} と 1260 cm^{-1} の吸収ピークが低下している。これらはカーボネートエステルを構成している C=O と C-O-C に帰属される吸収であり、照射によって生じたイオントラック内ではカーボネートエステル結合が失われていると理解できる。

物質による光の吸収においては一般にランベルト・ベールの法則が成り立つ。それによると吸光度 A は、考えている官能基のモル吸光係数 ϵ と、同官能基の密度 c 、試料厚さ t の積として表現される：

$$A = \epsilon c t \quad (1)$$

照射によって生じるイオントラック周辺の化学的構造変化によって、考えている官能基のおかれている周辺環境が変化した結果として、吸収の現れる波数がシフトすることが知られている。しか

し、その程度が大きくない場合にはピークの高さをもって吸光度を見なすことが許される。本研究では照射前の吸光度 A_0 に対する照射後のそれを A とし、それらの比である相対吸光度 A/A_0 を基本的な実験値としてとり扱った。それによって全ての薄膜について厚さを完全に揃える必要がなくなり、トラック近傍における密度低下を極力実験誤差が小さくなるように処理することが可能になっている。トラックの重なりが無視できるフルエンスにおいては、相対吸光度は考えている官能基の元の密度 N_0 と照射後の密度 N の比に一致する。すなわち、次式が成り立つ：

$$N/N_0 = A/A_0. \quad (2)$$

この関係に基づいて照射損傷の程度を定量的に扱うことが可能になる。

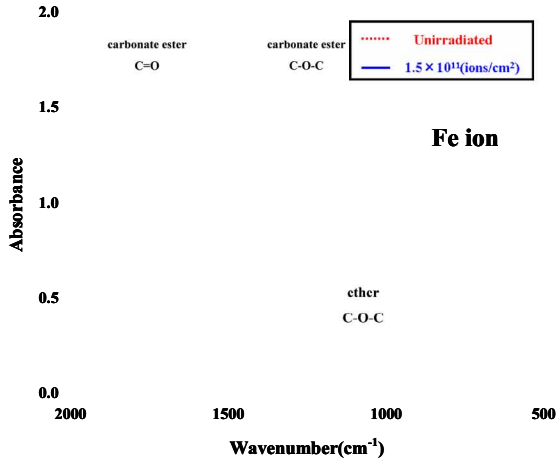


Fig. 1. FT-IR spectra of 3 μm PADC films before and after exposure to Fe ions.

Fig. 2 と Fig. 3 とはフルエンスとともに相対吸光度が低下する様子を示している。Fig. 2 に示したのはプロトンと He 及び C イオンのものであり、Fig. 3 は Ne から Xe までのイオンについての結果である。重たいイオンになるほど低いフルエンスで相対吸光度の低下が観察されているが、イオントラックの重なりがない下での理論的な予測ともよく一致して、それらは全てフルエンス F の1次関数として十分に記述できることが明らかになった。すなわち、次のような実験式が得られた：

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \sigma F \quad (3)$$

ここに σ は実験パラメータであり、トラック 1 本当たりの相対吸光度変化に相当する面積の次元をもつ量である。実際にこの値はカーボネートエステルが失われている実効的トラックコア面積であると理解してよい。

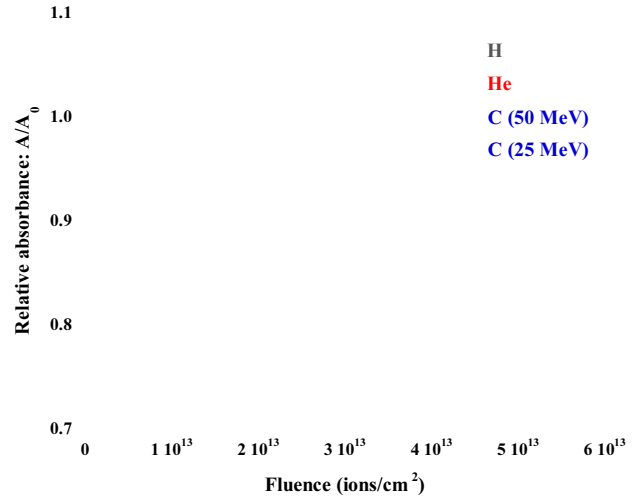


Fig. 2. Decrease of carbonate ester bonds with proton and heavy ion fluence.

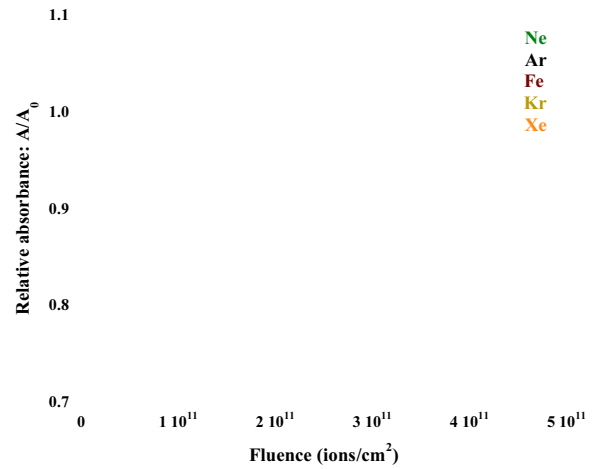


Fig. 3. Decrease of carbonate ester bonds with heavy ion fluence.

3.2 損傷密度

トラックに沿った放射線損傷を密度として表現するやり方には幾つかの方法が考えられる。最も詳しい損傷密度は、トラック近傍において失われている官能基の3次元分布を示すことだと考えられるが、これは難しい課題である。本研究では飛跡検出器としてのPADCやPCを対象としているので、トラック単位長さ当たりの損傷数が意味

を持つ。それは、原理的に固体飛跡検出器においてはトラックに沿った損傷がトラックエッチング速度として検出されるのであり、トラック単位長さあたりの損傷数がエッチング速度と直接的に関係付けられると期待されるからである。カーボネートエステルの損傷密度、すなわちトラックに単位長さあたりの損傷数 L は実験的に得られた σ とその官能基の照射前の密度 N_0 との積で容易に計算される：

$$L = N_0 \sigma \quad (4)$$

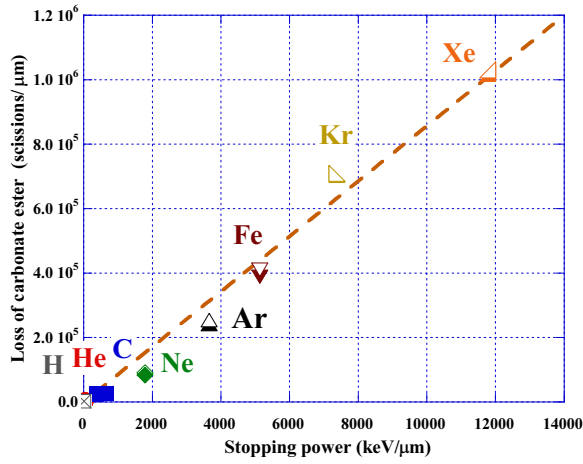


Fig. 4. Relation between the loss of carbonate ester bonds and stopping power in PADC.

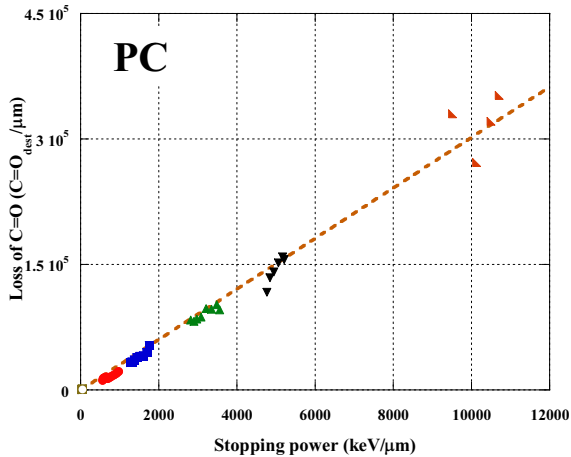


Fig. 5. Relation between the loss of C=O and stopping power in PC.

Fig. 4 はこのようにして得られた損傷密度を PADC 薄膜内の平均阻止能の関数として示したものである。阻止能が大きくなるにつれて損傷密度

が高くなることが示されているが、両者が単純に比例しているとは言い難い。この点は Fig. 5 に示した PC の結果と比較するとよく理解できる。ここに示すように、PC においてはカーボネートエステルの損傷密度は実験誤差の範囲でほぼ阻止能に比例している。これは阻止能の増加にともなって同質の損傷が単純に密度だけを増やしている結果として理解できる。PADC の場合には、イオンによってあるいは阻止能域によって、異なる性質の損傷が生じている可能性を示唆するものである。

3.3 実効的トラックコア半径

阻止能とトラック近傍に形成される放射線損傷の性状との関係は、阻止能と実効的トラックコア半径との関係を見ることによってよりはっきりさせることができる。ここでトラックコアは、その内部で着目しているカーボネートエステルが失われている半径として定義する。この場合にはトラックコア半径 r と実験で決定された σ との間には次の関係式が成り立つ：

$$\sigma = \pi r^2 \quad (5)$$

Fig. 6 に式(5)に従って評価したトラックコア半径を阻止能の関数として示す。阻止能の増加とともにトラックコア半径が大きくなっている様子が示されている。破線はフィッティング曲線であり、プロトンから C イオンまでについては、

$$r = 0.14 \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{0.34} \quad (6)$$

という関係式で表現されている。一方で、Ne から Xe イオンまでにおいては次のような関係式が得られた：

$$r = 0.02 \left(\frac{dE}{dx} \right)^{0.67} \quad (7)$$

同図だけではこのように2つの領域に分けて考える必要性が決して自明ではないが、同じ関係を両対数にしてプロットするとそれが明らかになる。Fig. 7 に示すように、プロトンから C イオンまでと Ne から Xe イオンまでの間には、はっきりと異

なるコア半径の阻止能依存性が認められる。

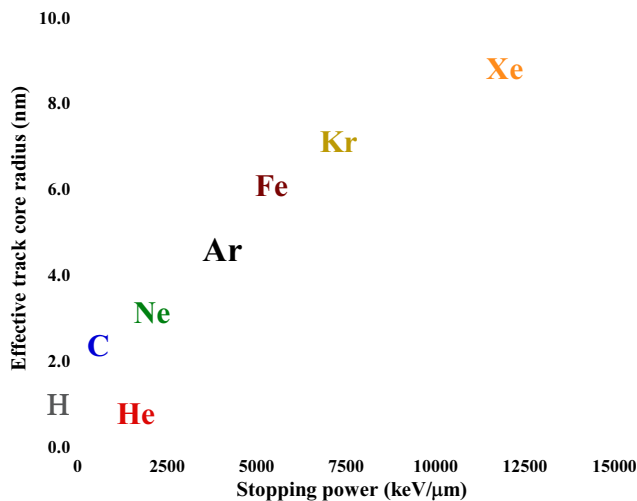


Fig. 6. Effective track core radius for the loss of carbonate ester bonds.

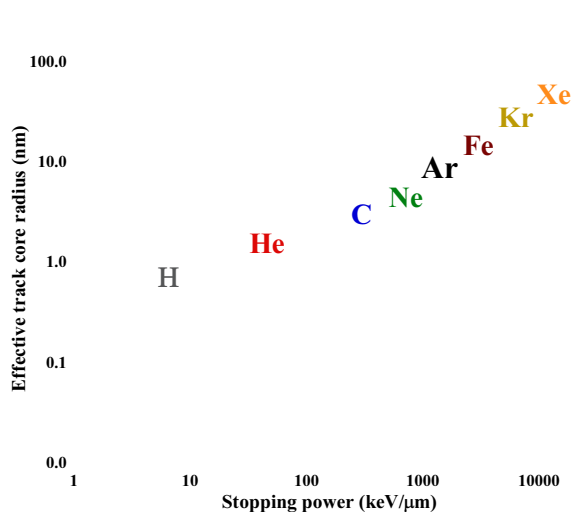


Fig. 7. Relation between the track core radii and stopping power in PADC.

Fig. 8はPCに対する阻止能とコア半径との関係であるが単一の傾向にしたがっていることが示されている。PADC中に形成されるイオントラック近傍には阻止能に応じて、あるいはイオン種に応じて、異なった性質の損傷が生じていると考えられる。比較的阻止能の低い領域でPADC中のトラックコア半径が、ほぼ阻止能の三乗根に比例することが見いだされた。先に示したPCの場合を含め、多くの高分子材料中のトラックコア半径がほぼ阻止能の平方根に比例していることからするとこれはPADCの特徴であると言える(Dehey et al., 2003; Sun et al., 2003)。紫外可視スペクトルの

フルエンス依存性とトラック重なりモデルに基づいたUV法によって、比較的阻止能の低い領域については、ほぼ阻止能の三乗根に比例するという同様な結果が得られている(Yamauchi, 2003; Yamauchi et al., 2005a)。過去に得られている結果をFig. 9に示す。図中AFM法では極短時間のエッチング後に原子間力顕微鏡を用いた表面観察を実施し微細なピットの成長パターンからコア半径を評価した。この手法において、コア半径とはトラック周辺のエッチング速度が有意に増加している領域のサイズを指す。UV法では、カーボネートエステルの減少に着目した本研究とは異なり、紫外線を過剰に吸収する原子団の生成を観察している。そのような化学構造の変成を受けた領域をトラックコアであると解釈している。

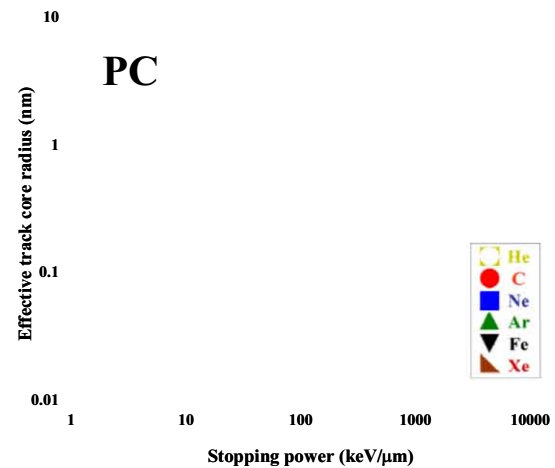


Fig. 8. Relation between the track core radii and stopping power in PC.

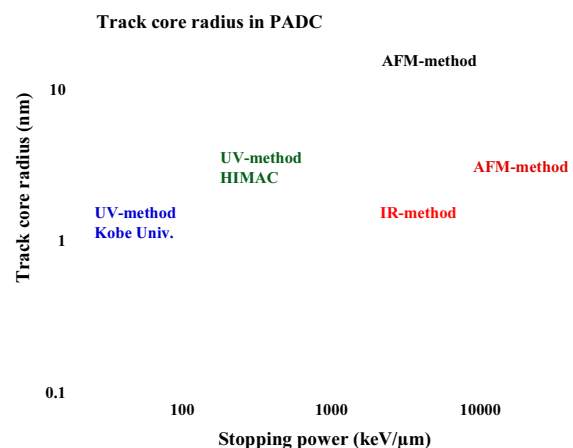


Fig. 9. Relation between the track core radii and stopping power from the three methods.

3.4 放射線化学収率

放射線化学的な観点からは、損傷の空間密度だけではなく、単位付与エネルギー当たりの反応数である放射線化学収率（G 値）を求めることが望ましい。次式に示すように単位長さあたりの損傷数すなわち損傷密度 L を PADC 内の平均阻止能で除することで、単位エネルギー付与当たりのカーボネートエステルの減少数、すなわち G 値を計算することができる：

$$G = \frac{L}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)}. \quad (8)$$

Fig.10 は式(8)に従って求めた G 値を阻止能の関数として示している。ここに示すように、阻止能の高いイオンでは G 値は阻止能の増加とともに緩やかに高くなる（Yamauchi et al., 2008a）。しかし、プロトンや He、エネルギーの高い C イオンにおいては、阻止能が低いほど G 値が高くなる傾向があることが本研究において初めて明らかにされた。

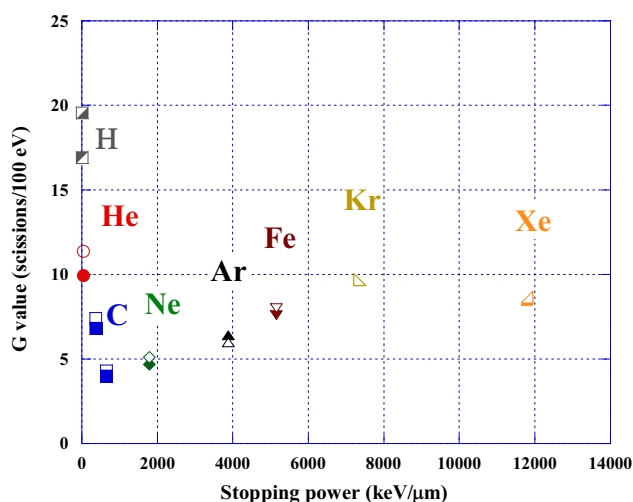


Fig. 10. Relation between G values for loss of carbonate ester bonds and stopping power in PADC.

トラックコア半径を阻止能のべき関数として表現する場合、それが阻止能の平方根に比例していると、G 値は阻止能に依存せず一定の値をもつことが容易に示される。実際に PC については、コア半径が阻止能の平方根にほぼ比例しているが、その G 値に阻止能依存性がほとんど見られ

ないことが实际的に示されている（渡邊ほか 2006&2007）。そして三乗根の場合を含め阻止能にかかるべき数が 0.5 よりも小さい時には G 値は阻止能に対して減少関数となる。これは阻止能が低い場合には、着目しているカーボネートエステルの切断が効率的に生じている結果であると考えられる。最近になって我々は ^{60}Co 線源を用いた PADC 照射を行い、一応の結果を得た（Mori et al., 2009）。ガンマ線の線エネルギー付与は 0.4 keV/μm 程度である。ガンマ線に対する PADC の G 値については、推定値こそあったが実測値としては最初のものである（O'Sullivan et al., 1981）。それによると G 値は 20 であり、本研究におけるプロトンの結果よりもやや大きな値になっている。

3.5 局所線量分布

G 値に見られた特異な阻止能依存性を理解するために、トラック内の局所線量分布理論を用い、径方向の線量分布を評価した。局所線量の計算結果を Fig. 11 に示す。横軸はイオンの軌跡中心からの距離、縦軸は局所線量を表している。それぞれにイオンのエネルギーは実験条件に一致させている。一般的な傾向としては、入射イオンの原子番号が大きいほど局所線量は高くなっており、二次電子は軌跡中心からより離れた位置まで線量を付与する。それぞれの線量曲線上のプロットは実効的トラックコア半径における局所線量を示している。C より重たいイオンについては、 10^6 Gy 程度以上の線量領域でトラックコアが形成されているといえるが、イオンが重くなるに連れて若干低下傾向にある。プロトンや He イオンではコア半径における線量は低くなっており、C と Ne イオン当りで最大の局所線量になっており、その半径はほぼ 1 nm である。PADC の繰り返し構造単位の長さが 2 nm 程度であるので、コア半径が相対的に大きな Ne 以上の、イオンでは径方向で見ても複数の繰り返し構造が損傷を受けていると考えられる。反対にプロトンや He イオンでは PADC の繰り返し構造単位の範囲内に損傷の広がりがおさまっていることが示唆される。PC についてはコア半径における局所線量にはこ

れほど大きなイオン種依存性は見られなかった(渡邊ほか 2007)。

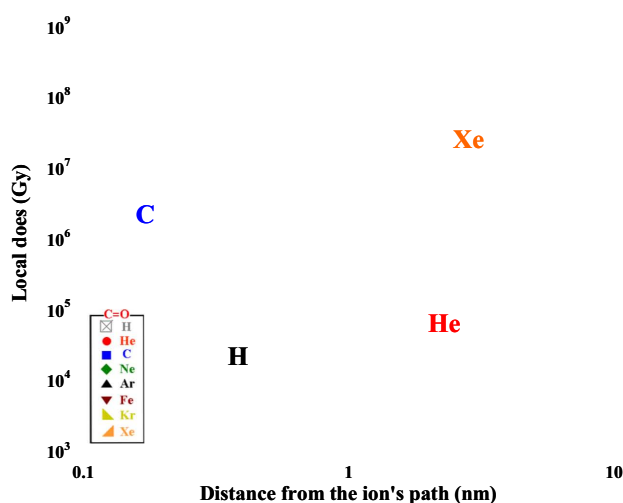


Fig. 11. Radial dose distribution around the path of heavy ions in PADC.

4 結論

高い検出感度と優れた電荷及びエネルギー分解能を有するエッチング型飛跡検出器として知られる PADC に対してプロトン及び種々の重イオンを照射し、そこに形成されるトラック内のカーボネートエステル結合の損傷を赤外線分光法によって系統的に評価し、PC に対して報告されている結果とも比較検討した。トラック単位長さ当りの損傷密度としてはカーボネートエステル結合の減少に着目したが、PC においては阻止能にほぼ比例して損傷が生じているのに対して、PADC においては阻止能に対するより複雑な依存性が確認された。次いで実効的トラックコア半径の阻止能依存性について評価したところ、PADC については阻止能の低い領域でその三乗根に比例する特異な依存性が確認された。PC については我々の分析においても、また、幾つかの研究報告においても、コア半径が分析した全阻止能領域についてその平方根にほぼ比例することが示されており、その結果として、放射線化学収率 (G 値) が阻止能にほとんど依存しないことも確認されている。PADC に対して得られた結果はこれとは対照的なものであったが、これはカーボネートエステル結合に隣接する、あるいは同結合に挟ま

れた領域の原子配列の特性が反映していると考えられる。トラック内の局所線量分布を求め実験的に評価したトラックコア半径における局所線量を評価した。その結果、コア半径が阻止能の三乗根に比例する低い阻止能の領域では損傷が PADC のモノマー毎に形成される繰り返し構造単位内に限られているのに対して、より重たいイオンでは損傷が複数の構造単位に広がっていることが確認された。以上のように PADC が阻止能の低いイオンでも高い密度の損傷を含むトラックを記録する能力を有しているというよく知られた特性が、トラック構造の特質として理解できるようになった。すなわちカーボネートエステルに隣接するあるいは挟まれた領域の分子構造を調整することで、より高い感度を有する、あるいは、ある特定の閾値を有するような検出感度が制御できるという、高分子系固体飛跡検出器の設計についてのひとつの指針が実験的に得られた。

謝辞

本研究は放射線医学総合研究所 HIMAC 共同利用研究として行われた (20P138 固体飛跡検出器中重イオントラックに沿った損傷構造、及び、17P138 高分子材料中重イオントラックに沿った損傷分布)。実験に際し、ご支援を頂いた NIRS-HIMAC のスタッフの皆さんに対しここに記して感謝の意を表す。

実験に際し、ご支援を頂いた金崎真聡院生、前田佑介院生に対しここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- Akselrod et al., "A novel Al_2O_3 fluorescent nuclear track detector for heavy charged particles and neutrons", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 247 295-306 (2006).
- Apel et al., "Track size and track structure in polymer irradiated by heavy ions", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 146 468-474 (1998).
- Balanzat et al., "Swift heavy ion modification of polymers", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 105 46-54 (1995).
- Barillon et al., "Chemical bond scission induced by $^1\text{H}^+$,

- $^{16}\text{O}^{8+}$, and γ -rays in a cellulose nitrate detector (O-082)", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 208, 336-339 (2003).
- Bean et al., "Etching of Submicron Pores in Irradiated Mica", J. Appl. Phys. 41 1454-1459 (1970).
- Bernaola et al., "Submicroscopic analysis of damage structure in nuclear tracks", Radiat. Meas. 41 247-252 (2006).
- Cartwright et al., "A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution", Nucl. Instr. Meth. 153, 457-460 (1978).
- Dehaye et al., "Chemical modifications induced in bisphenol A polycarbonate by swift heavy ions", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 209, 103-112 (2003).
- Enge "On the question of nuclear track formation in plastic material", Radiat. Meas. 25 11-26 (1995).
- Factor et al., "The chemistry of irradiated bisphenol-A polycarbonate", Polymer Degrad. Stab. 45, 127-137 (1994).
- Fink, D. ed., Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers, (Springer, Heidelberg, 2004) Springer Series in Materials Science, Vol. 63, p. 290.
- Francisco et al., "Radial variation of track damage in polycarbonate", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 218 461-465 (2004).
- Gagnadze et al., "IR spectroscopy studies of polycarbonate irradiated by H^+ and Li^+ ions", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 73, 48-52 (1993).
- Hama et al., "Inhomogeneous degradation of polymers irradiated by x-ray, gamma-ray and ion-beam as studied by micro-FT-IR", Radiat. Phys. Chem. 46 819-822 (1995).
- <http://www.srim.org/>
- Lounis-Mokrani et al., "Characterization of chemical and optical modifications induced by 22.5 MeV proton beams in CR-39 detectors", Radiat. Meas. 36, 615-620 (2003).
- Mori et al., "Radiation chemical yield for loss of carbonate ester bonds in PADC films exposed to gamma ray", Radiat. Meas (2009) in press.
- Nikezić et al., "Formation and growth of tracks in nuclear track materials", Mater. Sci. Eng. R. 46 51-123 (2004).
- O'Sullivan et al., "Correlative studies of track-etch behaviour and chemical development of lithographic polymer resists", Nucl. Tracks, 5, 344-345 (1981).
- Oganesyan et al., "Investigation of the response of thin CR-39 polymer foils irradiated with light ions", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 236 289-294 (2005).
- Peterson et al., "Energy loss dependent transversal etching rates of heavy ion tracks in plastic", Radiat. Meas. 25 43-46 (1995).
- Phukan et al., "Study of optical properties of swift heavy ion irradiated PADC polymer", Radiat. Meas. 36, 611-614 (2003).
- Sun et al., "Swift heavy ion induced amorphisation and chemical modification in polycarbonate", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 209, 188-193 (2003).
- Waligórski et al., "The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water", Nucl. Tracks Radiat. Meas. 11, 309-319 (1986).
- Westphal et al., "Evidence against stellar chromospheric origin of Galactic cosmic rays", Nature 396 50-52 (1998).
- Yamauchi "Studies on the nuclear tracks in CR-39 plastics", Radiat. Meas. 36 73-81 (2003).
- Yamauchi et al., "Track core size estimation for heavy ions in CR-39 by AFM and UV methods", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 236, 318-322 (2005a).
- Yamauchi et al., "Yields of CO_2 formation and scissions at ether bonds along nuclear tracks in CR-39", Radiat. Meas. 40, 224-228 (2005b).
- Yamauchi et al., "Structural modification along heavy ion tracks in poly(allyl diglycol carbonate) films" JJAP 47, 3606-3609 (2008a).
- Yamauchi et al., "Loss of carbonate ester bonds along Fe ion tracks in thin CR-39 films", Radiat. Meas. 43, 106-110 (2008b).
- Yasuda et al., "Dose distribution of carbon ions in air assessed using imaging plates and ionization chamber", Radiat. Meas. 40, 384-388 (2005).
- Yu et al., "Etching of nanopores in polycarbonate irradiated with swift heavy ions at 15 K", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 245 (2006) 284-287.
- 渡邊宗一郎ほか, "ポリカーボネート中重イオントラックに沿った損傷分布", 神戸大学海事科学部紀要, 3, 123-131(2006).
- 渡邊宗一郎ほか, "ポリカーボネート中重イオントラックの層構造", 神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 4, 61-70(2007).