

線量測定用 Gaf フィルムの試験報告

神原 正

1. 概要

2019年3月の生物照射ビームタイムの際に線量測定用フィルム（米国 Ashland 社製 Gafchromic™フィルム、以下で Gaf フィルムと称する）の試験を行った。Gaf フィルムは可視光ではほとんど感光しないが、放射線を照射すると線量に従って色が変わり、それを PC 用のスキャナで読み取って解析すれば線量を推定できる。詳しくは文献 1 参照。なお今回の試験は昨年 12 月に引き続き 2 回目である。

今回の照射試験では以下の事項を行った。

1. Fe イオン照射：前回の Fe イオン照射ビームタイムは中止になった。
2. 前回より低い線量で照射：前回は 10Gy から 1000Gy の線量で照射したが、10Gy でも十分着色したのでもっと低い線量で照射した。
3. 別種の Gaf フィルムの試験：前回は高線量測定用の型番 HD-V2 を試験したが、今回はそれに加えて新たに低線量測定用の型番 EBT-3 を試験した。

カタログ上の使用可能な線量範囲は、HD-V2 で 10-1000 Gy、EBT-3 で 0.1-10 Gy であるが、これは X 線・ガンマ線に対する値と考えられる。前回の重イオン照射によると、HD-V2 で測定可能な上限は 300Gy 程度で、10Gy でも十分使用できた。

HD-V2 は感光面が露出しているので取り扱いに注意が必要であるが、ビームが感光面を直接照射するのでブラッグピーク付近でも使用できる。EBT-3 は感光膜がプラスチックの保護膜 2 枚の間に挟まれているので取り扱いが楽であるが、ビームが保護膜を通過する際に LET が変化するのでブラッグピーク付近での使用には注意が必要で、今回はデグレダなしの照射のみを行った。

ビームタイムの日時とイオン種、エネルギーを表 1 に示す。

表 1：生物照射ビームタイムの概要

日時【2019年】	イオン	エネルギー (MeV/A)
3月12日 9:00-13:00 (4h)	Ar-40	160 (IRC)
3月13日 9:00-12:00 (3h)	Fe-56	90
3月14日 9:00-15:00 (6h)	C-12	135

なお、以下では生物照射の慣例に従い、LET は水中の値を keV/μm で表す。また LET と照射線量 (Gy) は生物照射の通常の手順で測定した。

2. 照射条件

今回使用したイオンビームについて、LETとデグレーダ厚さの関係を図1に示す。線量測定によると、デグレーダなしのLETはCイオンで22.5 keV/μm、Arイオンで184 keV/μm、Feイオンで637 keV/μmである。

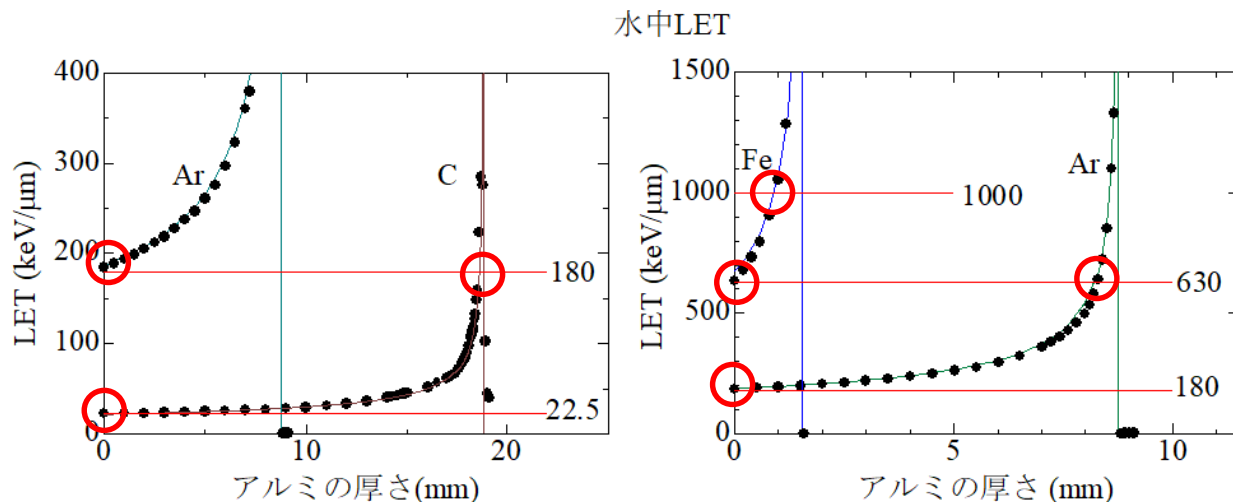


図1：照射したイオンとLET、赤丸は今回の照射条件。

まずHD-V2フィルムに対する照射条件を表2に示す。それぞれのイオンでデグレーダなしの照射を行い、さらに同じLETで異なるイオン核種を比較するため、CイオンのLETをArイオンのデグレーダなしとほぼ同じ179keV/μmに、ArイオンのLETをFeイオンのデグレーダなしとほぼ同じ673keV/μmに設定して照射し、さらに高いLETとして1061 keV/μmのFeイオンの照射も行った。なお表2の中のエネルギー値と水中飛程長はLETの測定値からSRIM-2013を用いて逆算した。

表2：HD-V2フィルムの照射条件

イオン	LET (keV/μm)	デグレーダ (mm)	エネルギー (MeV/A)	水中飛程 (mm)	線量 (Gy)	線量率 (Gy/s)
C-12	22.5	なし	121	36.345	1, 2, 5, 10	0.12 - 0.16
	179	18.6	9.7	0.387	10, 20, 50, 100, 200, 300	3.3 - 7.9
Ar-40	184	なし	150	18.79	1, 2, 5, 10, 20, 50	0.12 - 0.15
	673	8.4	25.5	0.901	2, 5, 10, 20, 50, 100	0.4 - 0.54
Fe-56	637	なし	69.4	3.58	10, 20, 50, 100, 200	1.6 - 2.1
	1061	1	34.6	1.119	10, 20, 50, 100, 200	2 - 3.9

使用したイオンの水中飛程は最短でも380 μmで感光膜の厚さ12 μmより十分長いので、感光膜内のイオン減速によるLET変化は重要ではない。

次にEBT-3フィルムに対する照射条件を表3に示す。Cイオン、Arイオン、Feイオンのデグレーダなしで線量は0.2 Gyから10 Gyの範囲である。イオンは感光膜までに厚さ125 μmの保護膜を通るが、イオンの飛程はそれより十分長いので通過によるLETの変化は重要ではない。

表 3 : EBT-3 フィルムの照射条件

イオン	LET (keV/μm)	デグレーダ (mm)	エネルギー (MeV/A)	線量 (Gy)	線量率 (Gy/s)
C-12	22.5	なし	121	0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10	0.05 - 0.16
Ar-40	184	なし	150	0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10	0.06 - 0.15
Fe-56	637	なし	69.4	0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10	0.06 - 0.5

3. 試料と装置の設定

Gaf フィルムは 4cm×5cm の長方形に切って、写真 1 のように試料用カセットに貼り付けた。ビームは写真の手前側から照射される。HD-V2 フィルムでは感光膜側をビーム上流に向けた。また照射中の室内環境放射線の効果を見るために、イオン照射をしない参照用試料を 1 枚取り付けた。

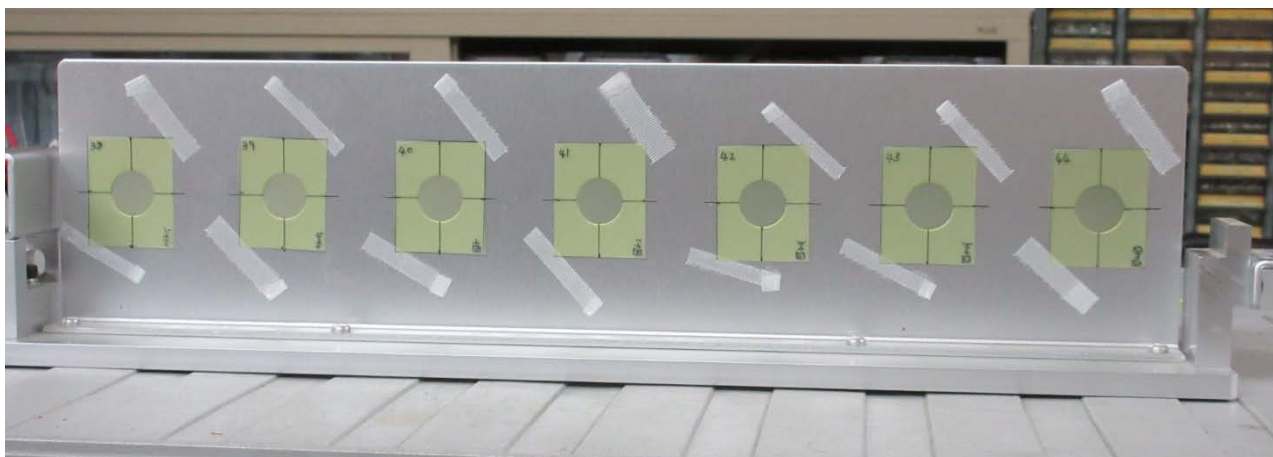


写真 1 : 照射前の試料カセット

写真 2 は生物照射装置で、ビームは別途製作した厚さ 10mm の真鍮製コリメータ（蛍光板の左）の中心にある直径 20mm の円形開口を通して試料に照射された。



写真 2 照射装置とコリメータ

4. 照射後の Gaf フィルムの見た目

照射後の Gaf フィルムの写真を以下に示す。写真 3 は Ar ビーム照射後で、後列は $184\text{keV}/\mu\text{m}$ で照射した EBT-3 フィルム、中列は $673\text{keV}/\mu\text{m}$ 、前列は $184\text{keV}/\mu\text{m}$ で照射したいずれも HD-V2 フィルムである。線量は左から右に向かって高くなるが、一番右の Gaf フィルムはビーム照射なしの参照用である。



写真 3 : Ar ビームで照射したフィルム。

Gaf フィルムは線量が高いほど変色している。前列と後列のデグレーダなし照射では変色域がコリメータの開口と同じ大きさであるが、中列のそれはそれよりも大きく広がっている。図 2 にデグレーダあり・なしで Ar ビームの 50Gy を照射した HD-V2 フィルムを比較する。右側の Gaf フィルムのビーム像がぼやけているのは、エネルギーを $\text{LET}=673\text{keV}/\mu\text{m}$ に対応する約 25.5MeV/A まで下げたために厚さ約 8.4mm のデグレーダを通したので、ビームが多重散乱で広がったためと考えられる。

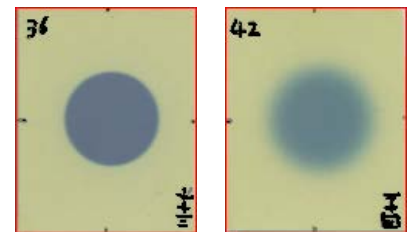


図 2 : Ar イオンで 50Gy 照射した HD-V2 フィルム、左はデグレーダなし、右は 8.4mm のデグレーダあり。

5. 結果

Gaf フィルムは照射効果で光の吸収（吸光度）が大きくなり、色が暗くなる。照射による吸光度の変化で線量を推定するため、照射前と照射後に Gaf フィルムの画像をスキャナ（CANOSCAN9000F）で取り、画素ごとに赤緑青の三原色それぞれを数値化した。それを文献 1 に従って吸光度に変換し、照射後と照射前の吸光度の差（吸光度差）を求めた。画像ファイルの解像度は 75dpi なので Gaf フィルム面上の吸光度差の 2 次元分布が位置分解能 0.3mm で得られる。三原色それぞれに対する吸光度差が得られるが、以下ではその中で最も見栄えがよい緑色の結果を示す。

5.1 HD-V2 フィルム

位置依存性

照射された HD-V2 フィルム上で、図 3 の赤色長方形のようにビームスポット中心を通る帯をとり、その y 方向の幅 11 画素（=約 3.7mm）で吸光度差を平均して、x の関数としてプロットした結果を図 4 に示す。図中で左のグラフは C イオン、中央は Ar イオン、右は Fe イオンで、それぞれ上はデグレーダなし、下はデグレーダありの結果である。

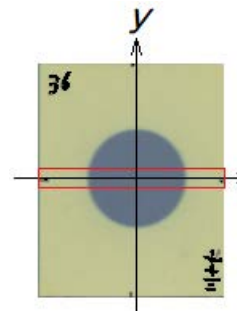


図 3: 赤枠は吸光度差の x 依存性を取った範囲

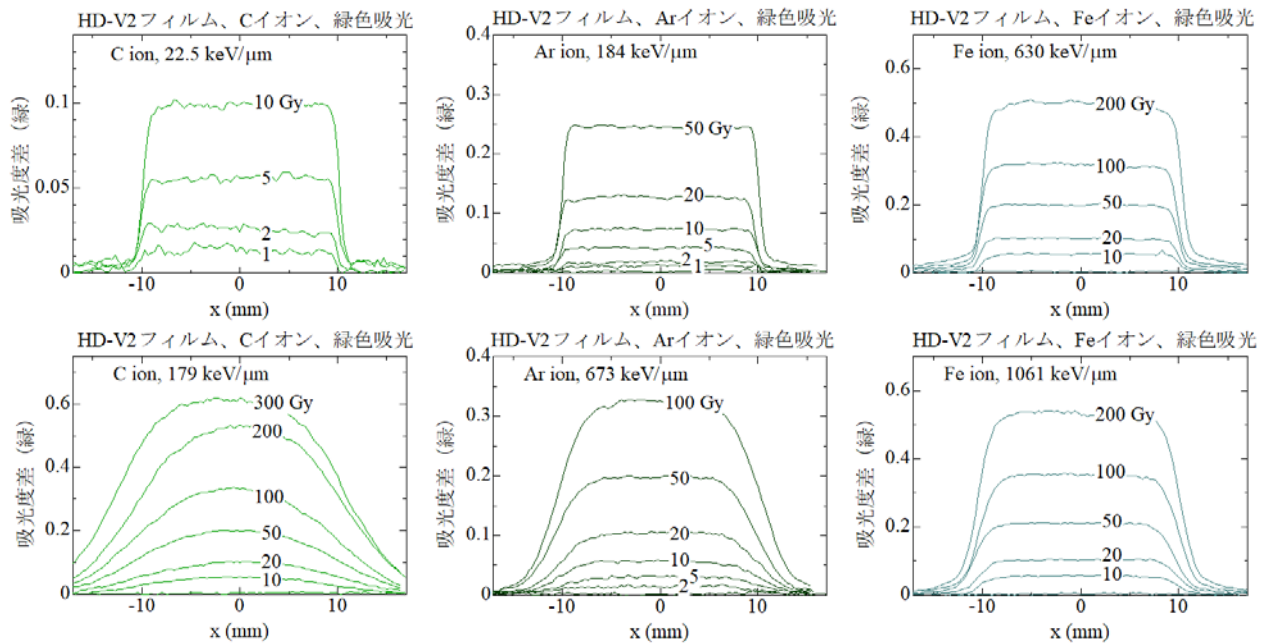


図 4: 緑色の吸光度差の水平方向分布

吸光度差の位置分布には以下のような傾向がある。

- デグレーダなしの照射（上半分のグラフ）ではコリメータの開口部（±10mm）の範囲内で吸光度差はほぼ一定で、その外では急速に減少する。ただし外側でも少し裾を引いているが、これは

コリメータ板中の核破砕反応で生成して板を通過してきた p、 α などの軽い二次核種による可能性がある。

- デグレーダありの 179 keV/ μm の C イオン照射では、ビームスポットの裾が直径 30mm 以上まで広がって、スポット中心付近でも平らにならない。これはビームが厚さ 18.6mm のデグレーダで多重散乱されて角度広がりが大きくなったためと思われる。
- デグレーダありの Ar イオンと Fe イオンの照射では、コリメータ開口部の範囲内にほぼ平らになるところがあり、外側ではデグレーダなしよりも高い裾を引いている。これもやはりデグレーダ中の多重散乱によると思われる。

照射線量依存性

ビームスポット中心に描いた一辺 4.4mm の正方形内で吸光度差の平均値を求め、照射線量の関数としてプロットした結果を図 5 に示す。図 5 の左は測定結果全体、右は 55Gy 付近までの部分の拡大図である。ただし 179keV/ μm の C イオンではビームスポット中心で吸光度差の分布が平らでないの、紫線で示した平均値は過小評価の可能性がある。図中の破線は 2018 年 12 月の測定結果である。

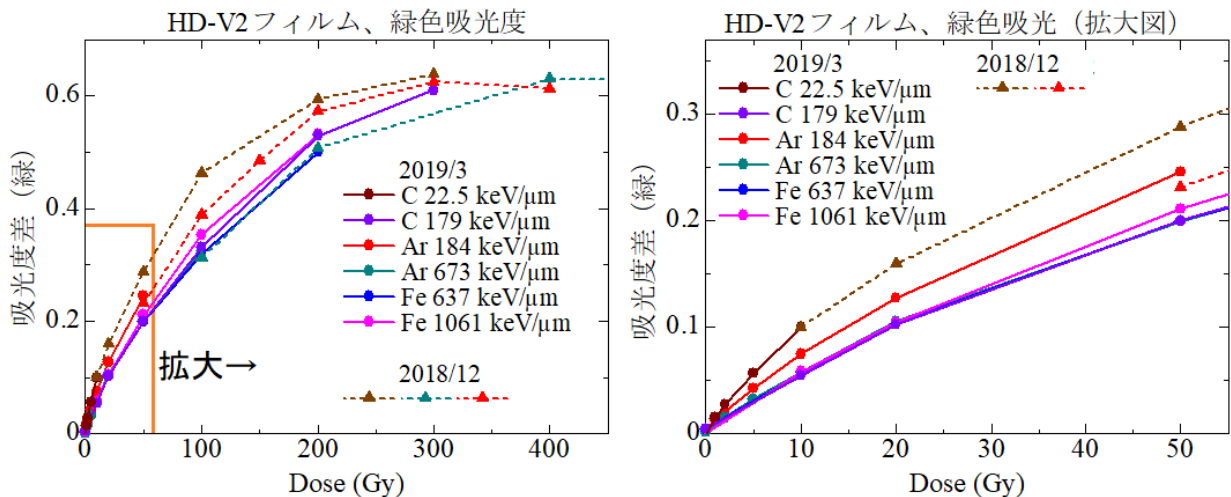


図 5 : HD-V2 フィルムのビームスポット中心付近で平均した緑色の吸光度差の照射線量依存性で左は全体、右は拡大図。図中の破線は 2018 年 12 月の測定結果。

吸光度差は照射線量に従って増加し、200Gy 付近で飽和する。吸光度差をイオン種と LET 別にみると、22.5keV/ μm の C イオンが一番大きく、次が 184keV/ μm の Ar イオンで、それ以外はほぼ同じ値となる。照射条件により LET は 50 倍近く異なるが、吸光度差のちがいは 50%程度であり顕著ではない。また破線で示した 2018 年 12 月の測定結果と今回の結果はよくつながるので、Gaf フィルムの線量測定も生物照射の線量測定も再現性がいいと言える。

HD-V2 フィルムの取扱説明によると Dynamic Dose Range は 10-1000 Gy であるが、今回の測定によれば高速重イオンに対する実用的な測定範囲は 1Gy から 200 Gy くらいの間と思われる。

なお、ここでは緑色の解析結果のみを示したが、赤色・青色でも同様の解析ができる。それによると赤色は緑色より感度が高いが 100Gy 付近で飽和する。また青色は緑色より感度が低く、10Gy 以下の低線量では測定できないが、300Gy 程度まで飽和しない。

LET 依存性

同じ照射線量で LET 依存性を見るために、異なる照射条件で 50Gy 照射したフィルムの各色の吸光度差を図 6 に比較した。ただし 22.5 keV/μm の C イオンの吸光度差は 2018 年 12 月に測定された値である。また青色の吸光度差は低いので見やすくするため 3 倍している。いずれの色でも吸光度差は LET に緩やかに依存性し、LET が 500keV/μm 以上ではほぼ一定でそれ以下ではやや高い。ただし 180keV/μm の吸光度差はどの色でも C イオンより Ar イオンのほうが高いが、C イオンのビームスポットが多重散乱で広がっていたため吸光度差が過小評価された可能性があり、今後さらに確認する必要がある。

もし吸光度差がイオンの種類によらず LET と照射線量のみで決まるのであれば、吸光度差の実測値に対して LET で適当な補正をすれば、照射線量を 20% くらいの精度で得ることは可能と思われる。

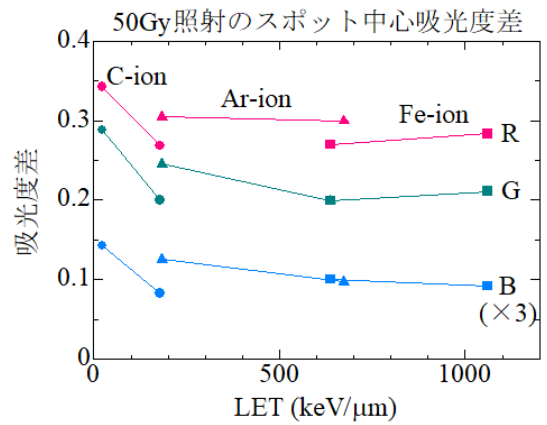


図 6 : 50Gy の照射線量で LET 依存性

5.2 EBT-3 フィルム

EBT-3 フィルムで HD-V2 フィルムと同様の解析を行った。

位置依存性

EBT-3 フィルムで測定した緑色に対する吸光度差の水平方向位置(x)依存性を図 7 に示す。図中左のグラフは C イオン、中央は Ar イオン、右は Fe イオンでいずれもデグレーダなしである。

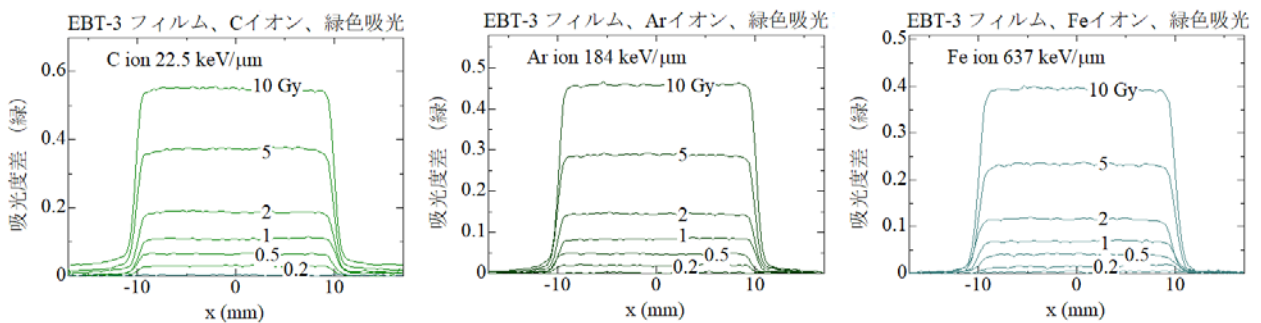


図 7 : EBT-3 フィルムの吸光度差の水平方向分布。

EBT-3 フィルムではコリメータ開口部内で吸光度差の分布が平らで、高さは 10Gy まで単調に増加している。C イオンでは開口部の外に裾を引いているが、Ar イオンと Fe イオンでは裾がほとんど見えない。同じ条件で照射した HD-V2 フィルムでは裾が見えているが、その違いが何によるかは不明である。

照射線量依存性と LET 依存性

ビームスポット中心に描いた一辺 4.4mm の正方形内で吸光度差を平均し、照射線量および LET の関

数としてプロットした結果を図 8 に示す。吸光度差は 10Gy まで照射線量とともに増加する。また HD-V2 フィルムと同様に LET が低いイオンほど吸光度差が大きく、22.5 keV/ μm の C イオンでは 637keV/ μm の Fe イオンに比べて 40% くらい高い。

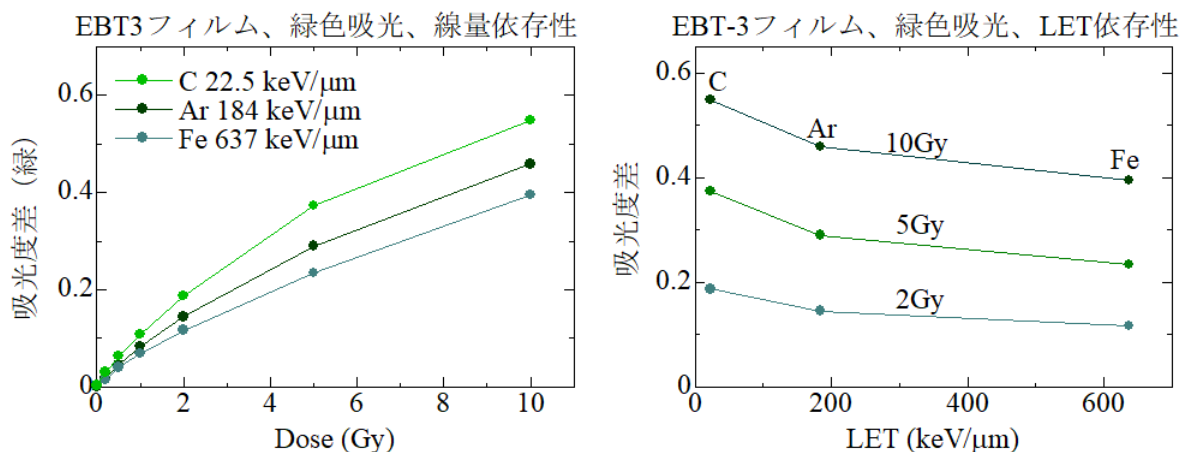


図 8 : EBT3 フィルムのビームスポット中心付近で平均した吸光度差の照射線量依存性 (左) と LET 依存性 (右)。

7. まとめ

Gaf フィルムを使用すると、重イオンビームの照射線量とその 2 次元分布を、複雑な装置や回路なしで簡便に測定できる。LET が 22.5 – 1000keV/ μm の範囲で適当な補正をすれば、HD-V2 フィルムでは 1-200 Gy の範囲、EBT-3 フィルムでは 0.1-10 Gy の範囲の照射線量を $\pm 20\%$ の精度で推定し、また線量の 2 次元相対分布を 0.3mm あるいはそれ以上の分解能で測定できると期待される。

Gaf フィルムはハサミで任意の大きさ・形状に切り、サインペンで表面に文字を書くことができる。また持ち運びや保存が容易で、市販の PC 用スキャナで画像データを取り込むことができる。したがって、たとえば遮光性の袋に封入した Gaf フィルムを照射試料と一緒に照射して保存すれば、後日必要になった時に線量値を推定できる。ただし照射前と照射後に取った画像データの吸光度の差を求めるため、PC 上で専用のソフトが必要である。

Gaf フィルムの納品時サイズは 20cm \times 25cm で、2019 年 4 月現在の価格 (税抜き) は、HD-V2 フィルムが 5 枚 1 箱で 68,850 円、EBT-3 フィルムが 25 枚 1 箱で 96,050 円である。今回使用した 4cm \times 5cm の 1 枚あたりに換算すると HD-V2 フィルムが 551 円、EBT-3 フィルムが 154 円となる。たとえば線量測定を目的として一辺 25mm の正方形にするなら HD-V2 フィルムが 173 円、EBT-3 フィルムが 48 円となる。

参考文献

1. 上松 敬、花屋博秋、小嶋拓治：「Gaf フィルム線量計とイメージスキャナを組み合わせた簡便なイオンビームの 2 次元線量相対分布計測システム」、RADIOISOTOPES, **57**, 87 (2008)