

軟 X 線照射におけるアラニンラジカル生成効率の X 線エネルギー依存性 Efficiency of alanine radical yield on radiation energy of X-rays

中川清子^{1,*}, 横谷明德², 大原麻希², 宇佐美徳子³

¹ 東京都立産業技術研究センター, 〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-10

² 量子科学技術研究開発機構, 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

³ 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

Seiko NAKAGAWA^{1,*}, Akinori YOKOYA², Maki OHARA² and Noriko USAMI³

¹ Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 2-4-10 Aomi, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan

² National Institutes for Quantum Science and Technology, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-City, Chiba 263-8555, Japan

³ High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

1 はじめに

アラニン線量計は、放射線照射により生成するラジカル量を電子スピン共鳴装置 (ESR) で測定する事で線量評価が可能であり、 γ 線や高エネルギーX線の線量測定に広く利用されている。一方、軟 X 線照射では、表面近傍で光子が吸収され、光電効果により放出される数 keV 以下の電子により高密度にエネルギーが付与されるため、イオンビーム照射のような高 LET 照射であると推測される。そこで、PF の BL-27 実験ステーションで 2~7keV の単色 X 線を照射し、X 線のエネルギーとアラニンラジカル生成効率の関係を調べた。

2 実験

予め自由空気型電離箱線量計で線量測定し、ガフクロミックフィルム (International Specialty Products) でビームサイズを確認後、ガフクロミックフィルムにアラニンペレット線量計 (Far West Technology) または L-アラニン-d4 の粉末 (CDN Isotopes) を両面テープで張り付けて X 線照射した。アラニンペレット線量計は、Mn マーカーとともに室温で CW-ESR 測定 (JEOL, JES FA-200) した。L-アラニン-d4 の粉末は、ESR 試料管に真空脱気封印後、60 K で ($\pi/2$ - π) パルスによるスピンエコーを観測 (Bruker, E680) し、電子スピン-スピン緩和時間を求めた。4 keV および 7 keV で照射したアラニンペレット線量計は、ESR イメージング測定 (Bruker, E580) し、ラジカル分布を求めた。

3 結果および考察

X 線照射におけるアラニンラジカル生成効率 (単位線量あたりのラジカル生成量) は、X 線エネルギーが低下すると減少し、線量の増加に伴って減少した。特に、4.5 keV 以下の X 線照射では、1 kGy 以下

の線量域でラジカル生成効率が線量増加に伴って顕著に減少した。また、X 線のエネルギーが低下するに従い、電子スピン-スピン緩和時間が短くなり、高密度でラジカルが生成していることが示唆される。

ESR イメージング測定結果から、X 線の侵入深さ方向に対するラジカル分布を求めたところ、試料表面付近のラジカル量が相対的に少ないことがわかった。軟 X 線の吸収は、試料の最表面が極大で、深度に対して指数関数的に減少するため、表面近傍でラジカルが高濃度で生成後、ラジカル再結合で消失しているためと考えられる。7 keV の X 線照射では、照射線量が増加すると、ラジカル分布が深さ方向に引き延ばされた形状になっている。試料内部でのラジカル再結合が、線量の増加が原因で起きていることを意味する。一方、4 keV の X 線照射では、0.72 kGy 以上で表面から 0.4 mm 付近でのラジカル量が相対的に減少し、ラジカル生成効率が急激に減少する線量域に対応する。X 線のエネルギーが低下すると放出される光電子のエネルギーも低下し、高 LET 照射となり、試料内部でもラジカルがより高濃度で生成するが、再結合により消失するため、相対的にラジカル濃度が減少したと考えられる。

謝辞

パルス ESR 測定および ESR イメージング測定は、分子研のマテリアル先端リサーチインフラ事業 (JPMXP1222MS0001, JPMXP1223MS1021) を利用した。また、測定において、分子研の浅田瑞枝博士、藤原基靖博士、中村敏和教授にご尽力いただいた。イメージング測定装置は、名古屋大・石川健治教授のご厚意で使用させていただいた。

成果

1. 成果の詳細は、下記論文に記載した。

S. Nakagawa et al., Radiat. Phys. Chem., 214,
111304 (2024).

* nakagawa.seiko@iri-tokyo.jp