

第9回  
学術大会  
(広島)

## 招待講演 1

## Progress in Silicon Microdosimetry

千代田テクノ大洗研究所  
篠崎和佳子, 山本 幸佳

オーストラリアのウオロンゴン大学 (University of Wollongong) 医学放射線物理学センター (Centre for Medical Radiation Physics) のローゼンフェルト教授 (Prof. Anatoly Rosenfeld) により行われた “Progress in Silicon Microdosimetry” と題する特別講演の内容について報告する。

## 1. はじめに

CMRP (Centre for Medical Radiation Physics) は、2002年にオーストラリアのウオロンゴン大学工学物理学科の中に設立された、放射線防護の臨床への応用、放射線腫瘍学、核医学、また、高エネルギー物理への適用のための半導体検出器と線量計の開発を専門とする研究チームである。CMRP では、細胞サイズのボリューム内における放射線のエネルギー損失の測定のために、現在の組織等価型比例計数管 (TEPC) に取って代わる可能性を提供するシリコンベースのマイクロシメーターの研究開発を精力的に行っている。ここでは当学会で発表されたその研究内容について概略を紹介する。

## 2. マイクロシメトリー

電離放射線の生物学的効果を知することは、放射線医療、航空・宇宙の放射線防護にとって重要な問題である。放射線の吸収線量は、放射線影響の指標として用いられるが、低 LET 放射線のみに適応できる。異なる LET を持つ電離放射線の生物学的効果 (RBE) を等価な放射線の量で表す指標として “線量当量” の概念が導入された。この概念は、細胞レベル (直径約 2~5  $\mu\text{m}$ ) における、荷電粒子の確率的なエネルギー付与のパターンの測定に基づいて決定される。このアプローチはマイクロシメトリーと呼ばれる。

マイクロシメトリーにおける線量当量は、次式より得ることができる。

$$H = \int Q(y) y^2 f(y) d \log y$$

ここで  $y$  は放射線の線エネルギー (Lineal Energy),  $Q(y)$  は ICRU および ICRP で定義された組織に対する線質係数,  $f(y)$  は実験的に測定された線エネルギースペクトルである。この技術の利点は、線量当量の測定を、様々な任意の種類の放射線混在場において行い得るということである。

マイクロシメトリーにおいて従来から使用されている測定器は、組織等価ガスと組織等価の壁を用いた比例計数管 (Tissue Equivalent Proportional Counter; TEPC) で、それらは通常球形で用いられる。ガス圧を調整することで、エネルギー付与に注目する領域をさまざまなサイズに設定して測定することが可能である。しかし、TEPC は検出器サイズが大きく (~2 cm) 放射線場に影響を及ぼす可能性があること、空間分解能が悪い、低線量率でしか使用できない、配列された複数の細胞を模擬できない、といった測定上不利な点がある。

## 3. SOI マイクロシメーター

CMRP では、最近の10年間で、TEPC の代わりとなるマイクロシメトリーの検出器として、SOI (Silicon on Insulator) ピクセル検出器を提案し、開発してきた。SOI 技術は、電離により解放された電荷を収集する際に、ミクロンオーダーのサイズの SV (sensitive volume) を定義できるという利点を持つ。特に、SOI マイクロシメトリーを用いた線量当量の定量は、以下の点で非常に有利である。

- サイズが小さい (測定の目的位置に正確に設置できる)
- 確立された線質係数  $Q(y)$  (ICRU 40) が使用できる
- 広範囲の線エネルギーについて測定できる (1.0–1000 keV/ $\mu\text{m}$ )

CMRP はこれまでに2世代のマイクロシメーターを開発し、イオンマイクロビームを用いて 1–1000 keV/ $\mu\text{m}$  の LET 範囲における荷電粒子に対するミクロンオーダーの空間分解能での電荷収集特性および放射線によるダメージについて、また、ハドロンセラピー、航空・宇宙での放射線防護への適用の可能性について調査してきた。

第1世代の検出器は、2~10マイクロメートルの厚さの p 型 SOI に直角平面 SV を互いに近接させた  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  サイズの配列構造になっている。パルス波形解析技術を用いることによって、生物学的ターゲットの様々なサイズをモデリングするために、SV の有効サイズを  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  まで調節することが可能である。

第2世代として開発した SOI マイクロシメーターには、3D 円筒型 mesa CCV を利用した。この検出器の利点は、荷電粒子のエネルギー損失によって付与された電荷の収集率がほぼ100%であること、及び、半径 2

$\mu\text{m}$ , 高さ  $2\mu\text{m}$  という小さいサイズであり, マイクロドシメトリーの応答性を向上できることである. また, SV 配列とそれらの間隔の特別なパターンによって, 個々の“セル”間のクロストーク効果を防ぐことができる.

SOI マイクロドシメーターについて, プロトンビームや BNCT, 高速中性子治療ビームのマイクロドシメトリー, 陽子線治療の照射内・外の線量当量と平均線質係数  $Q$  の算出への適用を調べた. また, Cf-252, Pu-Be 中性子線源, 深宇宙への応用の観点での重イオン場について, CERN の CERF 航空・宇宙リファレンス中性子場を用いて測定した. それらの結果を TEPC と比較したところ, ほとんどのケースで, SOI マイクロドシメーターの応答は TEPC とよく一致した.

また, Si  $\Delta E$ -E モノリシックテレスコープの応答を利用した混在放射線場における RBE 測定の新しいアプローチの導入と,  $0.5\text{ mm}$  以上の空間分解能での,  $100\text{ MeV}$  プロトンの Bragg peak に沿った RBE 測定への適用が紹介された.

#### 4. 今後の展望

現在, 第3世代の SOI マイクロドシメトリー検出器

を開発中であり, この検出器は CCV 内の制御可能な電荷増幅機能により  $0.01\text{ keV}/\mu\text{m}$  程度の低い線エネルギーの測定に利用できる. さらに, 読み取りの電子回路を同一チップ上に製作する予定である. この検出器は個人線量当量モニタリングでの使用を目標としている.

最後に, そろそろ Si Micro-Nano-dosimetry の国際的クラブが設立される時期に来ていると述べられた.

