

<원저>

400 MeV/u 탄소 이온에 대한 방사선치료 선량 측정용 고체비적검출기의 교정
- Calibration of CR-39 for Hadron Radiotherapy using 400 MeV/u C ions -

1)청주대학교 방사선학과 · 2)한국천문연구원

김성환¹⁾ · 남옥원²⁾ · 이재진²⁾ · 박원기²⁾ · 표정현²⁾ · 문봉곤²⁾

— 국문초록 —

본 연구에서는 탄소이온을 이용한 고LET 방사선 치료시 CR-39 고체비적검출기(SSNTD)를 선량계로 사용하기 위하여 일본 중입자속기연구소(HIMAC)의 400 MeV/u 탄소 이온을 이용한 교정실험을 수행하였다. 탄소 이온을 조사한 CR-39 검출기는 일본 우주항공연구개발기구(JAXA)의 고체비적검출기 전처리 프로토콜에 따라 화학적 에칭을 하였고, 에칭된 CR-39 검출기의 표면에 형성된 트랙은 디지털 카메라로 촬영한 후 Image J를 이용하여 분석하였다. 분석결과 400 MeV/u 탄소 이온의 \bar{y}_F 와 \bar{y}_D 는 각각 8.5 keV/ μ m 및 10.1 keV/ μ m이었으며, 이 결과는 한국천문연구원의 조직등가비례계수기(TEPC)로 측정된 값 및 GEANT4 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 값과 잘 일치하였다. 본 연구를 통하여 CR-39의 선량 및 LET 교정인자를 결정할 수 있었으며, 고LET 방사선 치료시 CR-39를 이용한 선량평가의 가능성을 확인하였다.

중심 단어: 고 LET, CR-39, 탄소이온, 고체비적검출기, 방사선치료

I. 서 론

방사선치료는 인체의 정상조직을 보호하면서 암을 치료할 수 있는 장점으로 인하여 수술 및 화학요법과 더불어 암 환자 치료에 흔히 사용되고 있다. 현재 방사선치료는 고에너지 X선을 주로 사용하고 있지만, 최근 고에너지 양성자 빔이나 탄소 이온빔들과 같은 고LET(linear energy transfer) 방사선이 암의 치료에 활용되기 시작하고 있다^{1,2)}. 고LET 방사선은 저LET 방사선인 고에너지 X선이나 고에너지 전자선에 비하여 암치료시 산소효과비가 낮고, 세포분열주기 의존성이 낮으며, RBE(relative biologic effect)가 클 뿐만 아니라, Bragg 피크로 인하여 정상조직의 피폭선량을 경감하면서 암 치료효과를 극대화할 수 있는 장점이 있다³⁾. 국내의 경우 국립암센터의 양성자치료방사선치료가 시행 중이며, 서울삼성병원 양성자치료기 현재 구축 중에 있고, 동

남권원자력사업에서 중입자선 방사선치료가 가능한 가속기를 건설하고 있다.

본 연구에서는 대표적인 수동형 검출기인 CR-39 고체비적 검출기(SSNTD; solid state nuclear track detector)를 사용하여 고LET 방사선 치료시 등가선량 평가를 위한 기초 연구를 수행하였다. CR-39 고체비적 검출기는 방사선에 의해 검출기 표면에 나타난 트랙을 측정하여 등가선량을 측정하는 검출기로서 인체조직과 구성 성분이 유사하여 인체 흡수선량을 직접 평가할 수 있고, 경량, 소형으로 가격이 저렴할 뿐만 아니라 전원이 불필요한 장점을 가지고 있다⁴⁻⁶⁾. 반면 측정된 결과를 실시간으로 확인할 수 없고, 화학적 에칭과 같은 후처리 과정에 따라 측정 결과의 오차가 나타날 수 있으며, 검출기 표면에 나타난 트랙을 측정하여 선량을 평가하기 때문에 저 LET 방사선 측정에 적합하지 않고 10 keV/ μ m 이상의 방사선 측정에 주로 응용되고 있으며^{7,8)},

라돈 선량에 흔히 사용되고 있다^{9,10}. 본 연구에서는 CR-39 고체비적검출기를 사용한 고 LET 방사선에 대한 선량측정을 위하여 일본 중이온가속기 연구소(HIMAC; Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)의 400 MeV/u 탄소 이온에 대하여 교정을 시행하고, 그 결과를 검증하여 고LET 방사선 치료 측정용으로서 CR-39의 활용가능성을 살펴보았다.

II. 재료 및 방법

1. 고체비적검출기와 선량평가 절차

본 실험에서는 크기가 가로 7 cm, 세로 2 cm, 두께 0.9 cm 인 CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$, Baryotrak Lot. 130131-25) 고체비적검출기를 사용하였다. CR-39 검출기에 대하여 일본 중입자가속기연구소 (HIMAC)에서 400 MeV/u 탄소 이온을 조사한 후 측정된 파고스펙트럼으로부터 입사 방사선에 대한 선량 및 LET 교정을 시행하였다.

그림 1은 일본 중입자가속기연구소의 중이온 조사 실험실 (Bio. Laboratory in HIMAC)의 사진이다. 교정을 위하여 사용된 고에너지 탄소 이온은 알루미늄 윈도우를 통하여 1.6 Pb 필터 및 0.215 mm Ta 필터를 거쳐 CR-39 검출기와 TEPC(Tissue Equivalent Proportional Counter) 검출기에 동시에 조사하였으며, TEPC 검출기에서 측정된 선량을 기준으로 교정을 실시하였다. 그림 1의 왼쪽 그림은 가속기 Al 윈도우 방향에서 본 CR-39 및 TEPC 검출기로서 그림 1에서 보는 바와 같이 두 개의 검출기에 대하여 동시에 탄소

이온을 조사하였다. 이때 교정에 사용된 탄소 이온의 에너지와 선속은 각각 400 MeV/u 및 $150 \text{ particles/cm}^2\text{-speal}$ 이었다.

고체비적검출기는 고 LET 방사선에 의해 검출기 표면에 형성된 트랙을 계수함으로써 방사선을 측정하는 검출기이다. 이때 방사선에 의해 형성된 트랙의 크기가 너무 작기 때문에 적절한 화학적 에칭을 통하여 트랙의 크기를 확대하고, 확대된 영상에서 트랙의 크기와 단위면적당 트랙의 수를 파악함으로써 방사선량을 평가할 수 있다. 트랙의 크기를 확대하기 위해 주로 화학적 에칭 과정을 거치는데 이 과정에서 에칭 수용액의 농도, 에칭 시간 등 에칭 조건에 따라 측정 결과의 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 일본 우주항공연구개발기구 (JAXA; Japan Aerospace Exploration Agency)에서 제시한 에칭 조건으로 실험을 수행하였다¹¹. 400 MeV/u 탄소 이온이 조사된 CR-39 고체비적검출기를 6.7 N 농도의 수산화나트륨 수용액에서 70°C로 19시간 에칭한 후 후지 디지털 현미경을 사용하여 형성된 트랙의 디지털영상을 확대 촬영하고, 촬영된 영상은 미국 국립보건원(NIH; National Institute of Health)의 Image J (ver. 1.48)을 이용하여 분석하였다¹². 그림 2는 에칭된 CR-39고체비적검출기의 트랙을 해석하는 절차를 보여주고 있다. 배경과 방사선에 의해 형성된 트랙을 분리하기 위하여 역치값을 설정한 후 노이즈를 감소하여 트랙의 모양과 크기를 Image J에서 트랙의 크기에 따라 분류하였다. 이때 입사 방사선이 검출기에 대하여 수직으로 입사할 경우 트랙의 모양이 거의 원형에 가깝지만, 입사각이 작아질수록 트랙의 모양은 타원형으로 변하게 된다. 따라서 트랙의 원형도(circularity)를 평가하면 백그라운드 노이즈 신



Fig. 1 Experimental setup of CR-39 in Bio. Laboratory of HIMAC

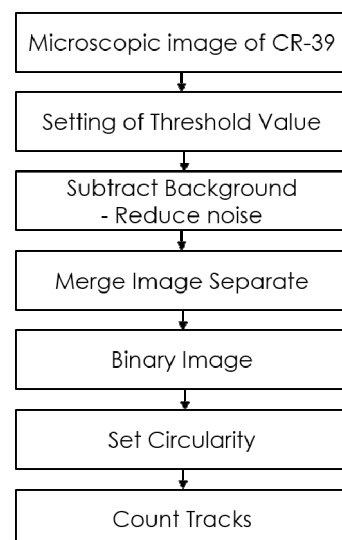


Fig. 2 Image analysis process of 400 MeV/u C ion irradiated CR-39 SSNTD.

호와 검출기 신호를 구별할 수 있을 뿐만 아니라 하전입자의 입사 방향도 분석할 수 있다. CR-39 검출기에서 측정된 트랙의 원형도는 촬영된 디지털 영상에서 관측된 트랙의 장축에 대한 단축의 비로 결정하였으며, 원형도가 0.2 ~ 1.0 인 트랙만을 탄소이온에 의한 것으로 판정하였다. 이렇게 탄소 이온에 의해 형성된 것으로 판단되어 분류된 트랙의 크기와 계수치로 파고스펙트럼을 결정하고, 결정된 파고스펙트럼으로부터 선형에너지 스펙트럼 [yd(y)]을 결정하였으며, 이 스펙트럼을 분석하여 400 MeV/u 탄소 이온에 대한 선량 및 LET 교정을 시행하였다.

CR-39 고체비적검출기의 경우 LET가 높은 방사선일수록 검출기 표면에 손상을 크게 주게 되므로 촬영된 디지털 영상에서 직경이 큰 트랙으로 검출되며, LET가 낮은 방사선은 작은 직경의 트랙으로 검출된다. 트랙의 크기에 따른 트랙의 수를 측정하여 파고스펙트럼을 결정할 수 있다. 이때 에칭률(F)은 측정된 파고스펙트럼으로부터 식 (1)로 결정할 수 있다¹³⁾.

$$F = \frac{dN}{dAd\Omega} = (2\pi Ac^2\delta_{cut})^{-1} \frac{dN}{dLET} \quad (1)$$

여기서, A는 CR-39 검출기에서의 트랙을 스캔한 면적이며, dN은 검출된 트랙의 수, δ_{cut} 은 형성된 트랙의 파여진 각도로 검출기의 검출효율을 결정해 준다. 또한 선량은 결정된 에칭률(F)과 파고스펙트럼으로부터 다음 식 (2)로 결정할 수 있다¹³⁾.

$$Dose = 4\pi \times 1.6 \times 10^{-9} \times \bar{y}_F \times F \quad (2)$$

2. 몬테칼로 시뮬레이션 및 조직등가비례계수기 (TEPC)를 이용한 교정실험

측정 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 GEANT4 (ver. 10.1.1)를 이용하여 몬테칼로 시뮬레이션을 시행하였으며¹⁴⁾, 아울러 한국천문연구원(KASI; Korea Astronomy and Space Science Institute)의 조직등가비례계수기(TEPC)를 활용하여 교정결과를 교차 평가하였다. 조직등가비례계수기는 직접적으로 방사선의 LET 스펙트럼을 측정하여 인체 등가선량을 결정할 수 있는 능동형 방사선 계측기로서 한국표준과학연구원(KRISS; Korea Research Institute of Standards and Science)에서 Cf-252 2.54 MeV중성자 빔에 대하여 교정을 시행하였다¹⁵⁾.

그림 3은 GEANT4몬테칼로 시뮬레이션을 위해 코딩된 중이온가속기연구소의 중이온 조사장치의 기하학적 조건이다. 가속기에서 가속된 400 MeV/u 탄소이온은 Al 윈도우를 통하여 조사된 이후 1.6 mm Pb 필터와 0.215 mm Ta 필터를 거친 후 약 6 m 거리를 지나 고체비적검출기와 TEPC 검출기에 동시에 조사된다. 이 조건에서 몬테칼로 시뮬레이션을 시행하고, 계산된 결과와 TEPC 검출기로 측정된 결과를 이용하여 CR-39 검출기의 선량 및 LET 교정을 실시하였다.

그림 4는 교정 실험에 사용된 한국천문연구원에서 우주 방사선 측정 마이크로 도시메트리(micro-dosimetry) 용도로 개발한 조직등가비례계수기(TEPC) 검출기의 내부 사진이다. 방사선의 입사방향에 따른 의존성을 줄이기 위하여 구형으로 설계되어 있으며, 구형 비례계수기는 외경 40 mm, 내경 30 mm의 A-150(수소 10.2%, 탄소 77.6%, 산소

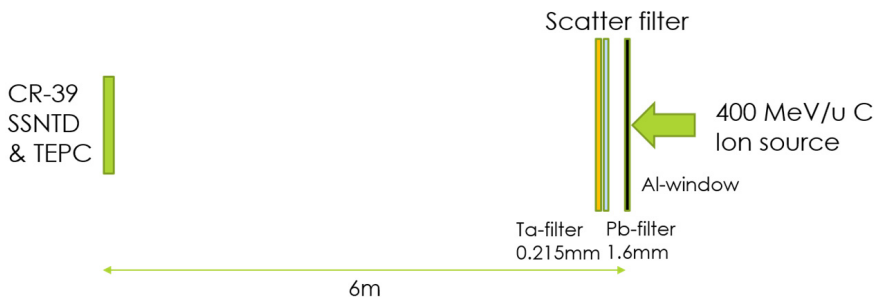


Fig. 3 Geometry for Monte Carlo simulation using GEANT4 in HIMAC experiment

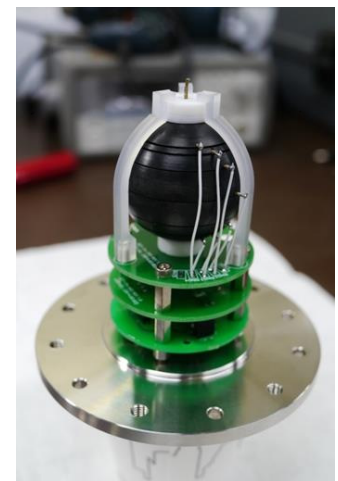


Fig. 4 Drawing and photograph of multi-segmented spherical TEPC made by KASI

5.2%) 조직등가물질(tissue equivalent material)로 제작되어, 인체의 등가선량을 직접 측정할 수 있도록 개발되었다. 검출기 내부는 인체조직등가 기체인 프로판(C₃H₈ 100%) 가스가 충전되어 있으며, 프로판 가스의 압력을 17.6 torr로 유지하여 인체 조직의 2 μm에 흡수되는 에너지를 시뮬레이션 하여 등가선량을 평가할 수 있다¹⁶⁾.

TEPC 검출기로 측정된 파고 스펙트럼으로부터 frequency-mean lineal energy (\bar{y}_F), dose-mean lineal energy (\bar{y}_D) 및 ICRP 103에 근거하여 평균 방사선하중계수(radiation weighting factor) Q값을 다음 식으로 결정할 수 있다¹⁷⁾.

$$\bar{y}_F = \frac{\sum_{i=1}^n y_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (1)$$

$$\bar{y}_D = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^n y_i N_i} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q(y_i) N_i}{\sum_{i=1}^n y_i N_i} \quad (3)$$

여기서, y_i 는 i 채널의 선형에너지(lineal energy, keV/μm)이며, N_i 는 i 채널의 계수값, Q_i 는 i 채널에 해당되는 방사선하중계수 (radiation weighting factor)이다. 이 결과로부터 흡수선량(D)와 등가선량(H)은 아래 식으로 결정할 수 있다¹⁷⁾.

$$D = \frac{3 y_F d_{\text{site_diameter}} \sum_{i=1}^n N_i}{2 \rho_g V_g} \quad (4)$$

$$H = D \times Q \quad (5)$$

여기서, \bar{y}_F 는 식(1)에서 결정한 frequency-mean lineal energy이며, d 는 TEPC 검출기로 시뮬레이션하는 인체조직의 미소체적의 내경 (site diameter), ρ_g 및 V_g 는 각각 TEPC 검출기 내부의 가스 압력 및 검출기 체적이다. 식 (5)의 등가선량(H)는 흡수선량(D)에 국제방사선방호위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)에서 권고하는 방사선하중계수 (Q; radiation weighting factor)를 곱하여 결정할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. CR-39 고체비적검출기의 트랙 해석

그림 5는 400 MeV/u 탄소 이온을 조사한 후 화학적 에칭을 거친 후 현미경으로 확대 촬영된 CR-39 고체비적검출기의 디지털 영상과 이를 Image J로 분석한 것이다. 그림 5위 왼쪽 그림은 에칭된 CR-39 고체비적검출기의 현미경 확대 영상이며, 오른쪽 그림은 촬영된 디지털영상을 Image J를 사용하여 바이너리 영상으로 변환한 후 해석하는 그림이다. 확대 에칭된 트랙의 크기와 수는 Image J에서 자동적으로 분류하여 계수하였다. 측정결과 트랙의 개수와 각 트랙의 크기에 해당되는 면적(area), 트랙의 장축(major), 단축(minor) 및 원형도(circurity)를 획득하였으며, 이 결과를 분석하여 선량 및 LET 교정을 시행하였다.

그림 6은 CR-39 고체비적검출기에 측정된 트랙 분석의 사례를 보여주고 있는 그림이다. 그림 6에서 보는 바와 같

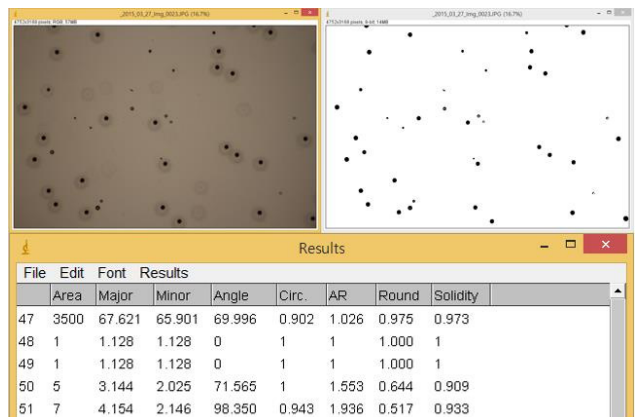


Fig. 5 Analysis of etched tracks on 400 MeV/u C ions irradiated CR-39 surface using Image J

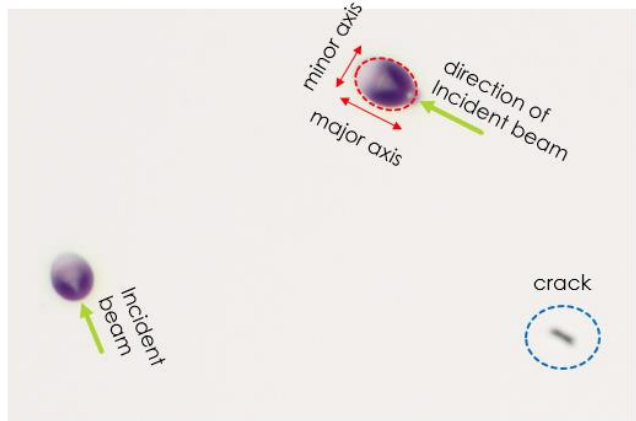


Fig. 6 Analysis of circularity of etched tracks on etched CR-39

이 검출기의 면과 입사방사선이 수직이 아닌 경우 트랙의 모양이 타원형으로 나타난다. 입사 지점에서부터 타원형과 타원형 내부의 원뿔형 분포로부터 방사선의 입사방향을 결정할 수 있으며, 이 타원의 장축과 단축의 비로서 트랙의 입사각도와 에칭율을 추정할 수 있다. 그림 우측 아래 방사선 검출 트랙이 아닌 검출기 표면의 결합 또한 원형도를 평가함으로써 배제된다.

2. 400 MeV/u 탄소 이온의 선형에너지스펙트럼

그림 7은 측정된 중이온가속기연구소의 400 MeV/u 탄소 이온에 대하여 CR-39 및 TEPC 검출기로 측정된 선형에너지 스펙트럼 (lineal energy spectrum)과 GEANT4 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 결과이다. TEPC 검출기로 측정된 결과와 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 결과 선형에너지 스펙트럼 상에서 저LET 방사선에서 다소 차이는 있지만, 주 피크인 11 keV/μm 부근에서 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 선량을 또한 TEPC로 측정된 3.4 mSv/hr와 몬테칼로 시뮬레이션에서 계산된 3.3 mSv/hr로 거의 같은 결과를 얻었다. TEPC 검출기와 시뮬레이션으로 결정된 400 MeV/u 탄소 이온의 LET 값은 중이온가속기연구소에서 교정한 400 MeV/u 탄소 이온의 LET 값인 10.9 keV/μm와 거의 일치하는 결과로서 TEPC 검출기 및 시뮬레이션 결과가 충분한 의미를 가짐을 확인할 수 있다. 이때 측정된 400 MeV/u 탄소 이온의 \bar{y}_F 는 8.5 keV/μm, \bar{y}_D 는 11.0 keV/μm, 선질계수 Q는 1.6이었다. 한편, CR-39로 측정된 트랙의 크기와 각 트랙의 면적별 빈도수로 히스토그램을 결정하고,

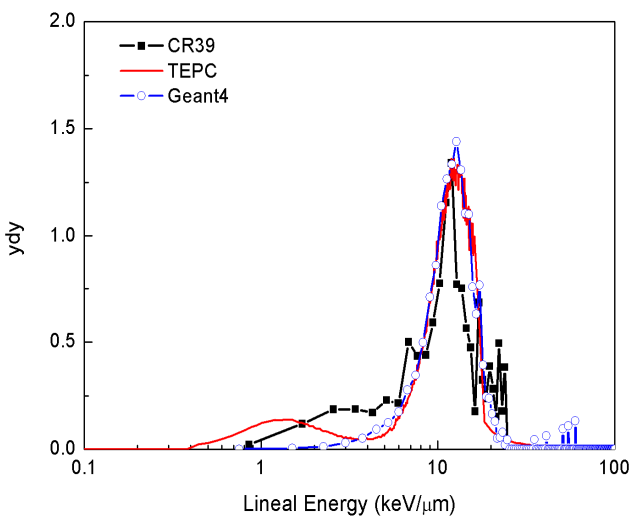


Fig. 7 Lineal energy spectra for 400 MeV/u C ions measured by using CR-39 SSNTD and TEPC, and, calculated by GEANT4 Monte Carlo simulation

결정된 히스토그램에 대하여 TEPC 검출기와 몬테칼로 시뮬레이션에서 결정된 피크 값을 교정하여 LET 교정인자를 결정하였다. 그림 7에서는 LET 교정인자로 교정한 CR-39 선형에너지 스펙트럼을 보여주고 있으며, TEPC와 시뮬레이션으로 결정된 스펙트럼과 유사한 모양을 보였다. 여기서 CR-39로 측정된 \bar{y}_F 가 7.0 keV/μm, \bar{y}_D 는 10.1 keV/μm로 TEPC 및 시뮬레이션으로 결정된 값과 비교하였을 때 역시 의미있는 결과를 나타내었다. 이상의 실험결과로 결정된 CR-39 고체비적검출기의 선량교정인자와 LET 교정인자는 각각 6.84×10^{-2} mSv/h-counts 및 0.039 keV/μm-pixel²이었다

IV. 결 론

본 연구에서는 수동형 방사선검출기로 사용되는 CR-39 고체비적검출기를 활용하여 고 LET 방사선의 등가선량을 평가하기 위하여 중이온가속기연구소의 400 MeV/u 탄소 이온에 대한 CR-39 검출기의 교정을 시행하였다. 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 계산치 및 TEPC 표준 조직등가비례계수기로 측정된 측정 결과를 활용하여 CR-39고체비적검출기의 선량 및 LET 교정인자를 결정하였다. 교정실험 결과 CR-39 고체비적검출기의 크기가 충분히 작고, 구성성분이 인체조직등가물질로 구성되어 있으므로 양성자나 탄소 이온 등 강입자 방사선 치료시 인체의 등가선량 평가에 충분히 활용할 수 있을 것으로 사려된다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIP) (No. 2011-0020918).

REFERENCES

1. C. Maschi, J. Thariat, J. Herault et al.: Tumour Response in Uveal Melanomas Treated with Proton Beam Therapy, *Clinical Oncology*, 28(3), 198–203, 2016

2. Eiichi Takada, HIMAC group: Carbon Ion Radiotherapy at NIRS-HIMAC, Nuclear Physics A, 834(1-2), 730-735, 2010
3. Niemantsverdriet M., van Goethem M.J., Bron R. et al.: High and Low LET Radiation Differentially Induce Normal Tissue Damage Signals, International Journal of Radiation Oncology, 83(4), 1291-1297, 2012
4. Lanh, Ngoc-Tu, Se-Young An, Sang-Hee Suh, Jin-Sang Kim; High Performance of SWIR HgCdTe Photovoltaic Detector Passivated by ZnS, Journal of Sensor Science and Technology, 13(2), 128-132, 2004
5. J. A. Caffrey, D. M. Hamby: A review of instruments and methods for dosimetry in space, Advance in Space Research, 47, 563-574, 2011
6. D. Zhoua, E. Semones, Weyland M., Benton E.R.: LET calibration for CR-39 detectors in different oxygen environments, Radiation Measurement, 42, 1499-1506, 2007
7. J.L. Kim, J.W. Ha, Y.C. Yoon: Energy and Angular Response of CR-39 Neutron Track Detector, Journal of Korean Nuclear Society, 20(2), 71-79, 1988
8. V. Kumar, R. G. Sonkawade, A. S. Dhaliwal: Optimization of CR-39 as a Neutron Detector, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 48, 466-469, 2010
9. J.M.C. Brown, S. Solomon, R.A. Tinker: Development of an energy discriminate CR-39 nuclear track etch dosimeter for Radon-220 gas measurements, Journal of Environmental Radiation, 102(10), 901-905, 2011
10. [10] N.F. Santos, P.J. Iunes, S.R. Paulo, S. Guedes, J.C. Hadler: CR-39 alpha particle spectrometry for the separation of the radon decay product ^{214}Po from the thoron decay product ^{212}Po , Radiation Measurement, 45(7), 823-826, 2010
11. A. Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Kumagai, H. Tawara: Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo, Radiation Measurement, 59, 84-93, 2013
12. <http://imagej.nih.gov/ij/> (retrieved on Oct. 2, 2012).
13. D. Zhou, E. Semones, S. Guetersloh, N. Zapp, M. Weyland, E.R. Benton: The experimental and simulated LET spectrum and charge spectrum from CR-39 detectors exposed to irons near CRaTER at BNL, Radiation Measurement, 45, 916-922, 2010
14. <https://geant4.web.cern.ch/geant4/> (retrieved on Dec. 4, 2015).
15. U.W. Nam, W.K. Park, J.J. Lee et. al.: Development and Characterization of Multi-Segmented Tissue Equivalent Proportional Counter for Microdosimetry, Journal of Sensor Science Technology, 24(2) 101-106, 2015
16. Majid Farahmand, A novel Tissue-Equivalent Proportional Counter Based on a Gas Electron Multiplier, Delft University Press, 17-19, 2004
17. ICRP Report 103: 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, International Commission on Radiological Protection, Elsevier, 2007.

•Abstract

Calibration of CR-39 for Hadron Radiotherapy using 400 MeV/u C ions

Sunghwan Kim¹⁾·Uk-Won Nam²⁾·Jaejin Lee²⁾·Won-Kee Park²⁾·Jeonghyun Pyo²⁾·Bong-Kon Moon²⁾

¹⁾*Cheongju University*

²⁾*Korea Astronomy and Space Science Institute*

In this study, equivalent dose and LET (Linear Energy Transfer) calibration of CR-39 SSNTD (Solid State Nuclear Track Detector) were performed using 400 MeV/u C heavy ions in HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) for high LET radiation therapy. The irradiated CR-39 SSNTDs were etched according the etching condition of JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). And the etched SSNTDs were analyzed by using Image J. Determined frequency mean dose (\bar{y}_D) and dose-mean linear energy (\bar{y}_F) of 400 MeV/u C are about 8,5keV/mm and 10,1 keV/mm, respectively by using the CR-39 SSNTD. This value is very similar to the results calculated by GEANT4 Monte Carlo simulation and measured with TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter) active radiation detector. We could determine the equivalent dose and LET calibration factors of CR-39. And we confirmed that the CR-39 SSNTD was useful for high LET radiation dosimetry in hadron radiotherapy.

Key Words : High LET, CR-39, Carbon ion, SSNTD, Radiotherapy