

고체飛跡檢出器의 特性和 그 應用

—CR-39에 의한 窒素이온 檢出과 線量測定—

慶北大學校 物理學科

姜 榮 浩

大邱大學校 物理學科

金 道 聖

초 록

Allyl diglycol carbonate(CR-39)에 照射된 60 MeV의 질소이온을 검출하기 위한 최적부식 조건을 부식시간에 대한 비적밀도와 비적직경의 변화를 고려하여 70°C, 20% NaOH 용액에 대해 부식시간 130분으로 정하였다. 이 조건에서 검출가능한 최대비적밀도는 $1.7 \times 10^7 \text{tr/cm}^2$ 였으며 入射된 질소이온의 총전하량의 증가에 따라 비적밀도가 선형적으로 증가하였다. 또한 2 μm 의 금박에 의한 질소이온의 산란을 點線源에 의한 Rutherford 산란으로 고려함으로써 측정된 상대산란확률이 이론치와 일치하여 선량측정이 가능하였으며 12nC~100 nC의 入射 질소이온의 전하에 대해 54~41%의 검출효율을 얻었다.

서 론

고체飛跡檢出器는 대부분의 유전체가 荷電粒子的 통과로 인한 방사선손상을 飛跡으로 기록하며 이 飛跡이 적절한 화학용액으로 腐蝕되어 확대됨으로 광학현미경 정도의 배율로서 관측이 가능하다는 것을 원리로 한다^{1,2)}.

일반적으로 2,000 $\Omega\text{-cm}$ 이상의 비저항을 갖는 반도체나 운모, 수정등의 결정체, 플라스틱등의 중합체와 같은 대부분의 유전체는 荷電粒子的 飛跡을 검출할 수 있다³⁾. 이러한 고체飛跡檢出器는 β 線이나 γ 線이 함께 하는 혼합장에서 荷電粒子만을 선택적으로 검출할 수 있으며, 플라스틱 飛跡檢出器는 光學的 투명도와 에너지 분해능이 높으므로 飛跡運動學(track kinetics), 입자관별, 入射粒子的 위치검출등의 연구에 매우 유용하다^{4,5,6)}.

특히 allyl diglycol carbonate(CR-39)는 최근에 cartwright 등에 의하여 개발된 비적검출제로서⁷⁾,

* 이 논문은 1984년도 분교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

광학적 투명도와 등방·균질성이 높은 열경화성 플라스틱으로 $0.7 \times 10^{-3} \text{MeV} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ 의 매우 낮은 이온화임계치를 가지므로⁸⁾ 重이온뿐만 아니라 輕이온의 검출에도 매우 효과적이다. 이러한 CR-39는 高에너지의 重粒子 檢出과 線量測定⁹⁾, 宇宙線研究¹⁰⁾, 核反應研究¹¹⁾, 中性子檢出등¹²⁾에 널리 이용되고 있다. 또한 He으로부터 U에 이르는 重이온에 의한 박테리아 포자의 不活性化(inactivation)의 연구에서 CR-39와 같은 플라스틱 飛跡檢出器에 의해 측정된 入射 重이온의 위치와 照射된 重이온의 量은 중요한 정보를 제공한다^{13,14,15)}.

본 연구에서는 사이크로트론에서 가속된 60 MeV의 N이온을 CR-39로 검출하여 그 특성을 조사하며, N이온의 탄성산란을 고려하여 照射된 N이온의 量과 검출되는 飛跡密度와의 관계를 조사함으로써 CR-39에 의한 重이온 검출의 기초를 마련하고자 한다.

실험장치 및 방법

본 실험에서는 일본 理化學研究所(RIKEN)의 사이크로트론에서 가속된 60 MeV의 N이온을 CR-39에 照射하였다. Fig. 1은 N이온을 照射하기 위한 산란함의

60MeV N-Ions from Cyclotron

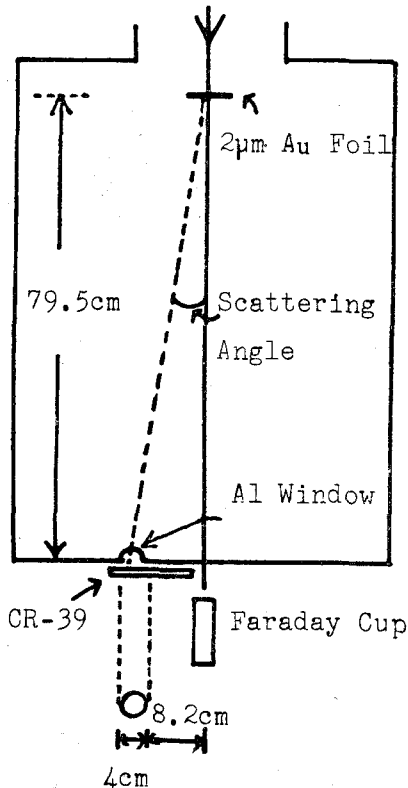


Fig. 1. Schematics of N-ion irradiation

개형이다. 산란함은 $\sim 10^{-6}$ torr 로 진공을 유지하고 2 μm 의 금박을 scattering foil로 하여 入射 N이온을 산란시켰으며, 산란함의 뒷쪽에는 Faraday Cup을 설치하여 入射 N이온의 충전하를 측정하였다.

CR-39는 산란함의 Al window의 뒷면에 설치하였으며 Scattering foil과 CR-39와의 거리는 79.5 cm였다. 직경 4 cm의 구형 Al window는 N이온 빔의 중심으로부터 10.2 cm에 그 중심이 위치하므로 CR-39에 의하여 실험실제의 산란각 $4.8^\circ - 8.7^\circ$ 에서 산란되는 N이온을 검출할 수 있었다. 또한 照射된 N이온의 량과 각 산란각에서의 飛跡密度와의 관계를 조사하기 위하여 12 nC, 30 nC, 50 nC, 100 nC의 60 MeV N이온을 각각 照射하였다.

본 실험에서는 1.7 mm의 CR-39(Solar Optical Japan Co.)를 사용하였으며 이의 物理化學의 특성은 Table 1과 같다⁸⁾.

N이온이 照射된 CR-39는 70°C 의 20% NaOH 용액으로 化學腐蝕하고 腐蝕時間에 따른 N이온의 비적점

Table 1. Physical and chemical properties of CR-39

Chemical Composition	$\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$ (allyl diglycol carbonate)
Specific Gravity	1.32(25°C)
Index of Refraction	1.504(n_D), 1.501(n_c), 1.510(n_F)
Transmissivity of Light	89~92% (for 1/4 inch thickness)
Absorption of UV	15~20% (for 1.7 mm thickness)
Coefficient of Linear Expansion($\text{cm}/^\circ\text{C}$)	$8.1 \times 10^{-5}(-40 - +25^\circ\text{C})$
	$11.4 \times 10^{-5}(-25 - +75^\circ\text{C})$

출 특성을 조사하였으며, 化學腐蝕된 飛跡은 400배 광학현미경으로 촬영한 현미경사진으로부터 飛跡의 特性과 飛跡密度를 측정하였다.

결과 및 고찰

A) 飛跡檢出特性

Fig. 2는 CR-39를 70°C , 20% NaOH 용액으로 화학부식한 60 MeV N이온비적의 부식시간의 증가에 따른 상대비적밀도의 변화이다(상대비적밀도는 부식시간 130분에서의 비적밀도를 기준으로 한 것이다). 40분 이하

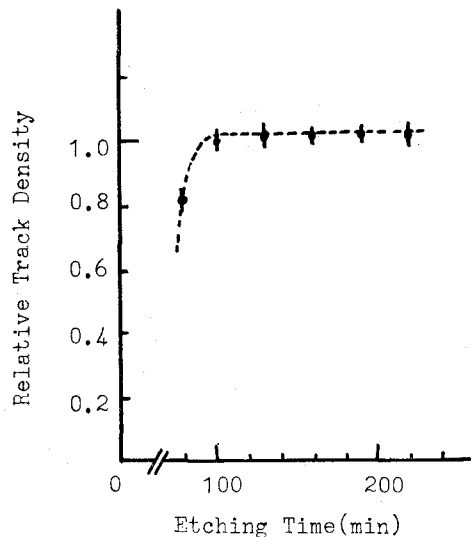


Fig. 2. The variation of relative track density due to the increase of etching time, etched with 70°C , 20% NaOH

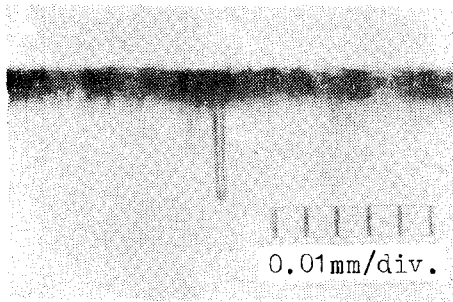


Photo. 1. Track profile of 60 MeV N-ion in CR-39, etched for 100 min with 70°C, 20% NaOH.

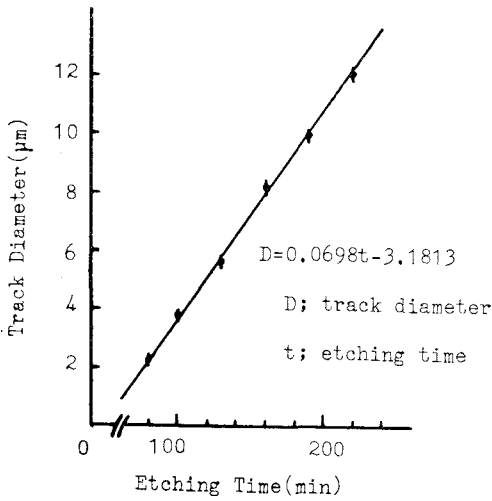
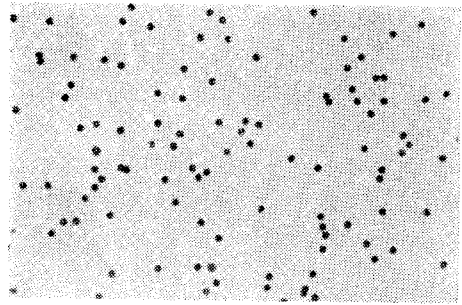


Fig. 3. The variation of track diameter due to the increase of etching time, etched with 70°C, 20% NaOH.

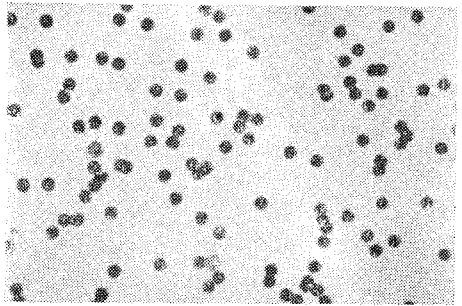
의 부식에서는 飛跡을 관측할 수 없었으며 100분 이상의 부식에서 飛跡密度가 거의 동일하게 나타났다.

Photo 1은 70°C의 20% NaOH 용액으로 100분간 부식한 N이온 비적의 단면(track profile)으로써 CR-39를 microtome으로 절단하여 검출기의 측면을 촬영한 것이다. 이때 비적직경은 3.9 μm, 부식된 비적의 길이(track length)는 28.5 μm였으며 이러한 비적단면에 관한 정보는 입자판별과 에너지분해에 이용될 수 있다¹⁶⁾.

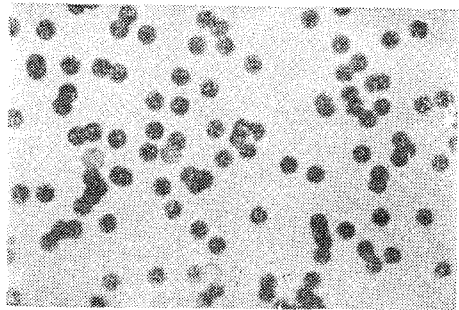
Fig. 3은 부식시간(t)의 증가에 따른 비적직경(D)의 변화로서, 부식시간의 증가에 따라 비적직경이 거의 선형적으로 증가하였으며 이 결과를 최소자승법으로 직선으로 fitting한 결과 $D(\mu\text{m}) = 0.0698 t(\text{min}) - 3.1813$ 이었다. 사진 2는 CR-39의 동일 검출부분에



(a)



(b)



(c)

0.05mm

Photo. 2. Increase of track diameter of N-ions in CR-39, etched for (a) 100 min, (b) 160 min and (c) 220 min with 70°C, 20% NaOH.

서 촬영한 부식시간에 따른 비적직경의 증가이며 160분 이상의 부식에서 임의적으로 분포된 飛跡이 점차적으로 증첩됨을 알 수 있다.

따라서 CR-39에 의하여 60 MeV의 N이온을 검출할 때 비적밀도의 변화와 비적의 증첩, 비적계수의 편차

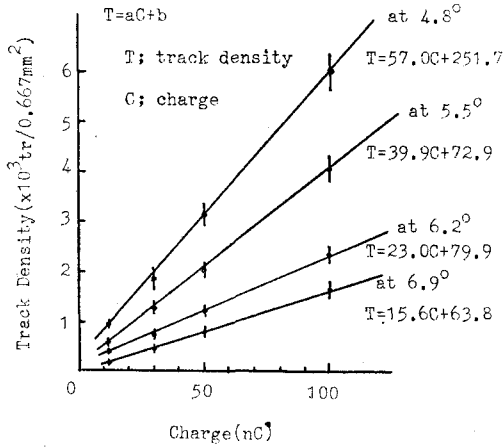


Fig. 4. The variation of track density due to the total charge of incident 60 MeV N-ions at each scattering angle

Table 2. The calculated and measured relative scattering probability of 60 MeV N-ions by 2 μm Au foil

Scattering Angle(°)	Relative Scattering Probability	
	calculated	measured
4.8	2.78	2.47±0.19
5.5	1.61	1.73±0.19
6.2	1.00	1.00
6.9	0.65	0.68±0.16

성을 고려하여 70°C, 20% NaOH 용액에서 부식시간 130분을 최적조건으로 결정하였다. 본 실험에서의 모든 CR-39는 이 조건에서 화학부식하였으며 또한 이 조건에서 비적의 분포가 균일하다고 가정하면 비적직경이 약 5.9 μm 로써 중첩되지 않는 최대비적수로부터 측정가능한 최대비적밀도는 1.7×10⁷tr/cm²임을 알 수 있다.

B) 線量測定

Fig. 4는 측정된 산란각에서의 入射 N이온 총전하에 대한 飛跡密度의 변화이다. 入射 N이온의 총전하량(c)의 증가에 대해 飛跡密度(T)는 모든 산란각에서 선형적인 증가를 보였으며 이것을 최소자승법에 의해 직선으로 fitting 하여 산란각 6.9°에서 T=15.6C + 63.8, 6.2°에서 T=23.0C+79.9, 5.5°에서 T=39.9C+72.9, 4.8°에서 T=57.0C+251.7을 얻었다. 이때 각 직선의 기울기의 비는 2 μm 금박에 의한 N이온의

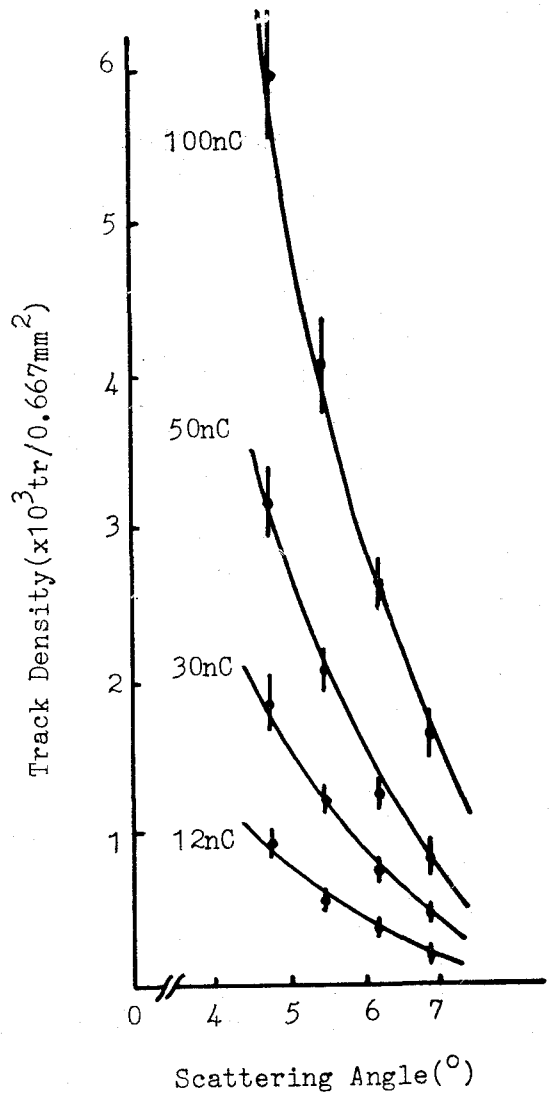


Fig. 5. The variation of track density at the various scattering angles(Indicated values are total charge)

상대산란확률을 나타낸다.

한편 Fig. 1에서의 산란장치에서 2 μm의 금박에 의한 N이온의 산란을 點線源에 의한 단일 Rutherford 산란으로 고려하면 산란확률 P는 산란각 θ에서

$$P \propto \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \dots\dots\dots(1)$$

이다.

Table 2는 (1)식으로 계산한 상대산란확률과 飛跡密度로부터 측정된 상대산란확률이다(상대산란확률은 검출기의 중심인 산란각 6.2°에서의 산란확률을 기준으

Table 3. The detection efficiency of CR-39 for 60 MeV N-ions scattered at the angle of 6.2° by 2 μm Au foil

Charge (nC)	Track Density (tr/0.667mm ²)		Efficiency (%)
	Calculated	Measured	
12	807	434	54
30	2,018	846	42
50	3,363	1,400	42
100	6,727	2,725	41

로 하였다). 측정된 상대산란확률은 오차범위 내에서 이론치와 일치함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5는 각각의 入射된 N이온의 총전하에 대한 산란각(θ)에서의 비적 밀도(T)의 변화로서 $T \propto 1/\sin^4(\theta/2)$ 의 관계를 가지므로 (1)식의 관계를 잘 만족하였다.

한편 60 MeV의 N이온의 유효전하는 6.53으로서¹⁸⁾ 1 nC의 N이온의 전하에 대해

$$1 \text{ nC} = 9.56 \times 10^8 \text{ particles} \dots\dots\dots(2)$$

이다. 그리고 N이온의 탄성산란을 고려하면 산란각 6.2°에서의 이론적인 산란입자의 수는 1 nC의 N이온에 대해

$$1 \text{ nC} = 76.684 \text{ particles}/0.667 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(3)$$

이다(이때 0.667 mm²는 CR-39에서의 검출면적이다).

Table 3은 산란각 6.2°에서의 N이온의 탄성산란에 의한 이론적인 비적밀도와 측정된 비적밀도로서 검출효율은 12 nC~100 nC의 입사 N이온의 전하에 대해 54~41%였다. 이것은 CR-39검출기 자체의 검출효율의 제한에 의한 것이 아니고 산란함의 Al window에서의 2차적인 산란에 의한 것으로 생각되며 scintillation 검출기에 의한 측정결과와 거의 일치한다¹⁹⁾.

결 론

CR-39에 검출된 60 MeV의 N이온의 비적을 70°C, 20% NaOH 용액으로 화학부식하여 비적밀도는 부식시간 100분 이상에서 거의 일정하였으며 비적직경(D)은 부식시간(t)의 증가에 따라 $D(\mu\text{m}) = 0.0698 t(\text{min}) - 3.1813$ 의 선형적인 관계를 보였다. 따라서 飛跡密度와 비적직경의 변화를 고려하여 CR-39에 의한 60 MeV N이온 검출의 최적부식조건을 70°C, 20% NaOH 용액에 대해 부식시간 130분으로 결정하였다.

또한 照射된 N이온의 총전하량(C)의 증가에 따라 비적밀도(T)가 선형적으로 증가하여 산란각 6.2°(검출기의 중심)에서 $T = 23.0 C + 79.9$ 의 관계를 보였다. 그

리고 2 μm의 금박에 의한 N이온의 산란을 點線源에 의한 Rutherford 산란으로 고려하므로 산란각에 대한 비적밀도의 변화가 이론치와 잘 일치하여 선량측정이 가능하였다. 본 실험에서의 조건에서 CR-39의 검출효율은 12 nC~100 nC의 60 MeV의 N이온의 전하에 대해 54~41%였으며 이러한 결과는 重이온 檢出과 重이온에 의한 생물체 세포의 不活性化등의 연구와 비적단면(track profile)에 의한 입자판별과 에너지분해능의 연구에 도움이 될 것이다.

본 연구의 수행에 많은 도움과 助言을 주신 일본 理化學研究所 사이크로트론研究室와 高橋 且博士께 심심한 謝意를 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) R.L. Fleischer and P.B. Price, Science, **140**, 1221(1963)
- 2) R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, Nuclear Tracks in Solids, U. California Press (1975)
- 3) R.L. Fleischer, et al., J. Appl. Phys., **36**, 3645 (1965)
- 4) R.L. Fleischer, Nucl. Instru. Meth., **147**, 1 (1977)
- 5) G.Somogyi, et al., Nucl. Instru. Meth., **147**, 11(1977)
- 6) K.K. Dwivedi and S. Mukherji, Nucl. Instru. Meth., **161**, 317(1979)
- 7) B.G. Cartwright, E.K. Shirk and P.B. Price, Nucl. Instru. Meth., **153**, 457(1978)
- 8) T. Hayashi, Oyo Butsuri, **49**(7), 705(1980)
- 9) M. Schafer, H. Bucker, R. Fabius and D. Hildebrand, Proc. 9th Int. Conf. on SSNTD, Neuberberg, Vol. II, 1291(1977)
- 10) T. Hayashi, R. Hamasaki and T. Doke, Nucl. Tracks, **6**(1), 1(1982)
- 11) Y.H. Kang, C.K. Ahan and D.S. Kim, Res. Rev. Kyungpook Nat'l Univ. **37**, 19(1984)
- 12) A.U. Haque, C.B. Besant and B.W. Hooton, Nucl. Instru. Meth., **197**, 435(1982)
- 13) T. Takahashi, et al., RIKEN Acc. Prog. Rep. **17**, 116(1983)
- 14) M. Schäfer, R. Fabius and H. Bucker, Proc. 10th Int. Conf. on SSNTD, Lyon, 1055(1979)

- 15) M. Schäfer, R. Fabius, K. Beltschkat and H. Bückner. 7th Sym. on Microdosimetry, 89(1980)
16) R.L. Fleischer et al., Science, 181, 436(1973)
17) J.B. Marion and F.C. Young, Nuclear reaction Analysis, North Holland (1968)
18) J.W. Mayer and E. Rimini, Ion Beam Handbook for Material Analysis, Academic Press (1979)
19) T. Takahashi and F. Yatagai, Private Communication.

Characteristics and Applications of Solid State Nuclear Track Detectors

—The Detection and Dosimetry of N-Ions by CR-39—

Yung-Ho Kang

Dept. of Physics, Kyungpook National University

Do-Sung Kim

Dept. of Physics, Daegu University

=Abstract=

The optimum etching condition of allyl diglycol carbonate (CR-39) for detecting the 60 MeV N-ions was determined as 70°C, 20% NaOH for 130min, by considering the variations of track density and diameter. Under these conditions, the maximum detectable track density was $1.7 \times 10^7 \text{tr/cm}^2$.

Track densities were linearly increased with increase of the total charge of the incident 60 MeV N-ions. By considering the scattering of N-ions as the Rutherford elastic scattering of point source, the measured relative probability was well consistent with the calculated value. The detection efficiency of CR-39 was in the range of 54-41% for 60 MeV N-ions of 12 nC-100 nC.