

ทฤษฎีแทรค-เอทซ์

3.1 อันตรกิริยาของฟิชชันแฟรกเมนต์ (10)

เมื่อฟิชชันแฟรกเมนต์เคลื่อนที่ไปในตัวกลาง จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ เนื่องจากไปทำให้อะตอมในตัวกลางแตกตัวเป็นไอออน (ionization) แม้ว่าฟิชชันแฟรกเมนต์จะมีพลังงานจลน์สูง แต่มีความเร็วไม่สูง ทั้งนี้เพราะว่ามีมวลมาก ในขณะที่ฟิชชันแฟรกเมนต์ ลดความเร็วลง (slowing-down) จนถึงจุดหนึ่ง อะตอมของตัวกลางจะไม่แตกตัวเป็นไอออนเพิ่ม เพราะไอออนรับอิเล็กตรอนเข้ามา ทำให้ตัวมันเองลดประจุไอออนอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดจาก U-235 (11)

คุณสมบัติ(property)	light group	heavy group
เลขมวล	~95	~139
เลขอะตอม	~38	~54
ประจุสุทธิแรกเริ่ม(initial net charge)	~+20e	~+22e
พลังงานแรกเริ่ม(initial energy), MeV	97	65
พิสัยเฉลี่ยในอากาศที่ 15 °ซ, 760 mm Hg, mm	27	21
ความเร็ว (m/s)	1.4×10^7	0.9×10^7

3.2 พิสัย (Range) ของฟิชชันแฟรกเมนต์ (12)

พิสัยของฟิชชันแฟรกเมนต์ คือระยะทางที่ฟิชชันแฟรกเมนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลสุดในตัวกลาง และมีลักษณะเป็นเส้นตรง

เบเช่ (Bethe) และ อัชกิน (Ashkin) ได้คำนวณหาค่าพิสัยของฟิชชันแฟรกเมนต์ (R) โดยกำหนดไว้ดังนี้

$$R \text{ (mg/cm}^2\text{)} = KE^{2/3} \dots\dots (3.1)$$

โดย E เป็นพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ มีหน่วยเป็น MeV
 K มีค่าเท่ากับ 0.14, 0.19 และ 0.50 [mg/cm² (MeV)^{2/3}]
 สำหรับอากาศ อะลูมิเนียม และทอง ตามลำดับ
 ส่วนพิสัยของฟิชชันแฟรกเมนต์ ตามสมการของเบ็กกิลด์ และคณะ
 (Boeggild et al.) คือ

$$R = \text{const. } A^{-1/6} E^{1/2} \dots\dots (3.2)$$

เมื่อ const. = ค่าคงที่

A = เลขมวลของแฟรกเมนต์

E = พลังงานของแฟรกเมนต์

บอร์ (Bohr) ได้ตั้งสมมุติฐานว่า ประจุ Z ของฟิชชันแฟรกเมนต์
 เป็นสัดส่วนกับเลขมวล A จากกฎการคงที่ของโมเมนตัม และจากสมการ
 (3.2) จะได้

$$A_L^3 \cdot E_L^2 = A_H^3 \cdot E_H^2 \dots\dots (3.2)$$

$$E_L/A_L = E_H/A_H \dots\dots (3.4)$$

โดย L และ H แทนฟิชชันแฟรกเมนต์กลุ่มเบา และกลุ่มหนัก ตามลำดับ

* หมายถึง ปริมาณก่อนที่นิวตรอนจะคายความร้อน (prompt neutron)

N แทน L หรือ H

จากความสัมพันธ์ของสมการ (3.2) (3.3) และ (3.4) จะได้ว่า

$$R_L/R_H = (A_L/A_H)^{1/2} \cdot (A_H^3/A_L^3) \dots (3.5)$$

3.3 อัตราสูญเสียพลังงาน (dE/dX) ของอนุภาคมีประจุ

การสูญเสียพลังงานของอนุภาคมีประจุ dE ต่อระยะทาง ที่เคลื่อนที่
 ผ่านตัวกลาง dX ตามสมการเบธ-บลอค (Bethe-Bloch equation) ซึ่ง
 เขียนไว้ดังนี้ (13)

$$dE/dX = \frac{4\pi e^4 (Z_1^{eff})^2 NB}{m_e v^2} \dots\dots(3.6)$$

m_e = มวลพัก (rest mass) ของอิเล็กตรอน

e = ประจุของอิเล็กตรอน

v = ความเร็วของอนุภาค

N = จำนวนอะตอมต่อปริมาตรของตัวกลาง

Z_1^{eff} = ประจุเอฟเฟกทีฟ (effective charge) ของอนุภาค
ในกรณีฟิชชันแฟรกเมนต์

$$Z_1^{eff} = Z_1^{1/3} \cdot (h\nu/2\pi e^2) \dots\dots(3.7)$$

เมื่อ Z_1 = เลขอะตอมของแฟรกเมนต์

h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

ν = ค่าความถี่ของการสั่นของแฟรกเมนต์

และ B คือ อะตอมมิก สตอปปีง เพาเวอร์ (atomic stopping power) ของตัวกลางที่อนุภาครีวี่งผ่าน

$$B = Z_2 [\ln(2mv^2/I) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2] \dots\dots(3.8)$$

I = ศักยภาพของการแตกตัวเป็นไอออนเฉลี่ย (excitation potential) ของตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละชนิดของตัวกลาง

$\beta = v/c$ เมื่อ c เป็นความเร็วแสง

ในกรณีที่ฟิชชันแฟรกเมนต์เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีอะตอมหนัก

$$B \approx (4Z_2^{1/3} h\nu) / 2\pi e^2 \dots\dots(3.9)$$

โดย Z_2 เป็นเลขอะตอมของตัวกลาง

แต่ในกรณีที่ฟิชชันแฟรกเมนต์เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีอะตอมเบา

$$B = Z_2 \ln[(1.123 mv^2)/(we^2 Z_1^{eff})] \dots\dots(3.10)$$

w เป็นค่าความถี่ของการสั่นเฉลี่ย (average oscillation frequency) ของอิเล็กตรอนในอะตอมของตัวกลาง



เมื่ออิเล็กตรอนของตัวกลางสูญเสียพลังงานโดยกระบวนการแตกตัวเป็นอ็อน และการกระตุ้น (ionization และ excitation) จากสมการ (3.6) ได้ค่าอิเล็กตรอนิก สตอปปีง เพาเวอร์ (electronic stopping power, $(dE/dX)_e$) คือ (14)

$$(dE/dX)_e = 0.286(Z_1^2 Z_2 / v^2 A_2) \cdot \ln[2mv^2/I] \dots (3.11)$$

โดย v = ความเร็วของฟิซชันแฟรกเมนต์ ซึ่งมีความมากกว่า $v_0 Z_1^{2/3}$
 v_0 = ความเร็วของบอร์ (Bohr velocity)
 $= 0.2227 \text{ (MeV/amu)}^{1/2}$
 A = เลขมวลของฟิซชันแฟรกเมนต์โดยมีค่า $80 \leq A \leq 150$
 Z_1, Z_2 หมายถึง เลขอะตอมของฟิซชันแฟรกเมนต์ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ในตัวกลาง และเลขอะตอมของตัวกลาง ตามลำดับ

จากทฤษฎีของลินด์ฮาร์ด-ชาร์ฟ-ไซโอเต [The Lindhard-Scharff-Schiotte (LSS) theory] จะได้ค่าสตอปปีง เพาเวอร์ เป็น

$$(dE/dX)_e = \xi_e (Z_1 \cdot Z_2 / Z \cdot A_2) (v/v_0) \dots (3.12)$$

เมื่อ $v \leq v_0 Z_1^{2/3}$
 $Z = [Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}]^{3/2}$
 ξ_e เป็น แฟคเตอร์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 2 โดยแปรผันตาม $Z_1^{1/6}$ และมี $Z_1^{eff} = Z_1^{1/2} v/v_0$

เมื่ออนุภาคมีประจุคายพลังงานส่วนหนึ่งให้อะตอม แล้วทำให้อะตอมแตกตัวเป็นอ็อน จำนวนอ็อนที่เกิดขึ้นต่อ 1 หน่วยระยะทางที่อนุภาคผ่าน เรียกว่า การเกิดอ็อนจำเพาะปฐมภูมิ (primary specific ionization) dJ/dX ซึ่ง เบเธ่ (Bethe) ได้กำหนดไว้ดังนี้

$$dJ/dX = \pi(Z_1^{eff})^2 / I_0 \beta^2 [\ln\{2m_e c^2 \beta^2 / (1-\beta^2) I_0 - \beta^2 + 3.04\}] \dots (3.13)$$

โดย Z_1^{eff} = ประจุเอฟเฟกทีฟของอนุภาค (effective charge)
 $= Z_1 \{1 - \exp(-125 \beta / Z_1^{2/3})\}$
 $\beta \approx 0.25 \times 10^{-2} Z_1^{2/3}$ สำหรับอนุภาคที่มีเลขอะตอม 2-20
 Z_1 = ประจุของอนุภาค

α = ค่าคงที่ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละตัวกลาง
 รอยของอนุภาคจะเกิดขึ้นบนตัวกลางได้ ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสีย
 พลังงาน dE/dX ของอนุภาคให้แก่ตัวกลาง มีค่ามากกว่า อัตราการสูญเสีย
 พลังงานวิกฤต (critical energy loss)

3.4 กลไกในการเกิดรอย (15) (16)

ในการเกิดรอยของอนุภาคมีประจุ เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านตัว
 กลางแล้วสูญเสียพลังงาน dE/dX ให้กับอะตอมในตัวกลาง ทำให้อะตอมใน
 ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากสมการ (3.13) อัตราการแตกตัว
 ปฐมภูมิ dJ/dX ไม่ได้ทำให้อะตอมทั้งหมดของตัวกลางแตกตัว ยังมีการทำให้
 แตกตัวเพิ่มอีก ซึ่งเป็นการแตกตัวทุติยภูมิ (secondary ionization) โดย
 รังสีเดลต้า (delta ray) โดยปกติจะเกิดขึ้นรอบ ๆ รอยของอนุภาค
 ความแตกต่างระหว่างพลังงานที่ทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออน กับพลังงานที่
 อนุภาคสูญเสียให้กับอะตอมในตัวกลาง ขึ้นอยู่กับ พลังงานที่อิเล็กตรอนที่หลุด
 ไปจากอะตอม ได้รับ

ในปี ค.ศ 1965 ฟลิสเชอร์ (Fleischer) และคณะได้นำทฤษฎี
 ion explosion spike มาอธิบายกลไกการเกิดรอย คือเมื่ออนุภาคมีประจุ
 สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในตัวกลาง แล้วทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงาน
 เพียงพอที่จะขับตัวเองหลุดจากอะตอม ทำให้อะตอมกลายเป็นประจุบวก
 บริเวณที่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน เกิดแรงผลักคูลอมบ์ระหว่างประจุบวก และเกิด
 การจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอม เพื่อให้เกิดความสมดุลย์ ทำให้บริเวณนี้แยก
 เป็นช่องว่างแคบ ๆ ขึ้นตามแนวที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

รอยที่เกิดขึ้นนี้เป็นรอยค่อนข้างถาวรสำหรับวัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติ
 เป็นฉนวน ถ้าในกรณีที่วัสดุตัวกลางมีคุณสมบัติเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำ อะตอมที่
 ขาดอิเล็กตรอนสามารถจับเอาอิเล็กตรอนเข้าไปรวมได้อย่างรวดเร็วก่อนที่จะ
 มีการจัดเรียงตัวใหม่ จึงไม่เกิดเป็นช่องว่าง

อนุภาคที่มีประจุถ่ายเทพลังงานให้ตัวกลาง (dE/dX) ต้องมีค่า
 มากกว่าค่าพลังงานวิกฤต (critical energy) ของวัสดุตัวกลางนั้น จึงจะ
 ทำให้ปรากฏรอยขึ้น ดังนั้น การเกิดรอยได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิด และพลังงาน
 ของอนุภาคมีประจุ และชนิดของวัสดุตัวกลาง

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นพลาสติกหรือโพลีเมอร์ เกิดรอยได้ง่ายกว่า
 เพราะต้องการพลังงานไปทำให้พันธเคมี (chemical bonds) ขาดจาก
 กัน น้อยกว่าพลังงานที่จะทำให้อะตอมแตกตัว ความหนาแน่นของแขนที่ขาดตาม

ทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลบริเวณนี้ลดลง และมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณนี้ได้เพิ่มขึ้น

3.5 การกักขยายรอย (19)

รอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุบนแผ่นบันทึกรอยนั้น มีขนาดเล็กมาก (มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 10-100 Å) รอยนี้ต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แต่ถ้านำมาขยายรอยให้โตขึ้นประมาณ 1000 เท่า โดยกระบวนการกักขยายรอยด้วยสารเคมีที่เหมาะสม ก็จะสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา

3.5.1 ลักษณะเรขาคณิตของรอย (track geometry)

ความเร็วของการกักขยายรอยตามแนวอนุภาคผ่าน (v_p) เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งมากกว่า ความเร็วของการกักขั้ววัสดุบันทึกรอยทั่ว ๆ ไป หรือเรียกอีกอย่างว่าความเร็วบัลค์ (bulk velocity, v_b) ซึ่งก็เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งและเป็นฟังก์ชันกับประจุมวล และพลังงานของอนุภาค จากรูปที่ 3.1 เมื่อ t เป็นระยะเวลาในการกักขยายรอย จะได้ความยาวของรอยเป็น $v_p t$ ที่ผิวของตัวกลางหนา $v_b t$ ถูกกัดออกไป รอยที่ถูกกักขยาย จะได้เป็นรูปกรวยมีมุม (cone angle) $\theta = \arcsin(v_b/v_p)$ ตามรูปที่ 3.1 ถ้ารอยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D และความยาวของรอย L ที่เวลา t จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (16)

$$D = 2 v_b t \cdot [(v_p - v_b)/(v_p + v_b)]^{1/2} \quad \dots (3.14)$$

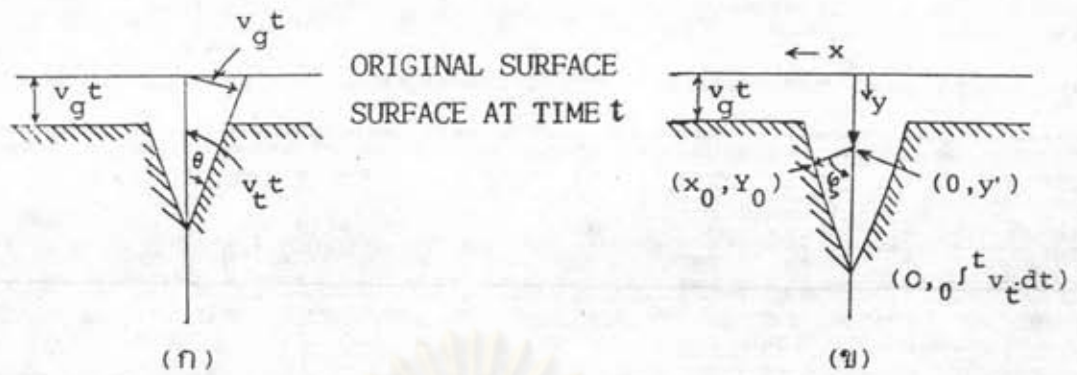
$$L = (v_p - v_b) \cdot t \quad \dots (3.15)$$

จากสมการ (3.14) และ (3.15) จะได้ตัวพารามิเตอร์ของการกักขยายรอยดังนี้

$$\begin{aligned} v_p/v_b &= 2[(D/2)^2 + (L^2/D)]^{1/2} \\ &= \csc \theta \quad \dots (3.16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_b \cdot t &= (D/2)[(D/2L) + \{(D/2)^2 + L^2\}^{1/2}/L] \\ &= (D/2)(\tan\theta + \sec\theta) \quad \dots (3.17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_p \cdot t &= [\{(D/2)^2 + L^2\}^{1/2}(D/2L)] + [\{(D/2)^2 + L^2\}^{1/2}/L] \\ &= [D \csc\theta (\tan\theta + \sec\theta)]/2 \quad \dots (3.18) \end{aligned}$$



รูปที่ 3.1 ลักษณะเรขาคณิตของรอย (18)

(ก) เมื่อ v_c คงที่ มุมกรวย $= \sin^{-1}(v_g/v_c)$

(ข) รูปร่างของรอยเมื่อถูกกัดขยาย v_c มีค่าลดลง

พิจารณาความยาวของรอยที่ถูกขยายรอย L ที่เวลา t ใด ๆ

$$L = \int_0^t v_c dt$$

ถ้าค่า θ มีค่าน้อยก็จะได้รอยที่ลึกและแคบ แสดงว่า ความไวในการบันทึกรอยจะดีมาก

จากรูปที่ 3.1(ข) ถ้าพิจารณาที่จุด $y_0(x_0)$ และได้ $v_c(y)$ เป็นความเร็วในแนวแกน y โดยที่ค่า x_0 จะได้ $y_0 = v_c \cdot t$ จะได้เวลาในการกัดขยายรอยจนถึงจุด (x_0, y_0) , t คือ

$$t = \int_0^{y'} dy/v_c(y) + [((y_0 - y')^2 + x_0^2)^{1/2}/v_g] \dots (3.19)$$

จากสมการ (3.19) เทอมแรกเป็นเวลากัดขยายรอยจาก $(0,0)$ ถึง $(0, y')$ และ เทอมที่สองเป็นเวลากัดขยายรอยจาก $(0, y')$ ถึง (x_0, y_0) เพื่อหาเวลาที่น้อยที่สุดจากระยะ $(0,0)$ ถึง (x_0, y_0) โดยอนุพันธ์ สมการ (3.19) แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y' = (y_0 - x_0) / [(v_c(y')/v_g)^2 - 1]^{1/2} \dots (3.20)$$

จากรูปที่ 3.1(ข) จะเห็นว่ามุม $\xi = \arctan [(y_0 - y')/x_0]$ และจากสมการ (3.19) และ (3.20) จะได้

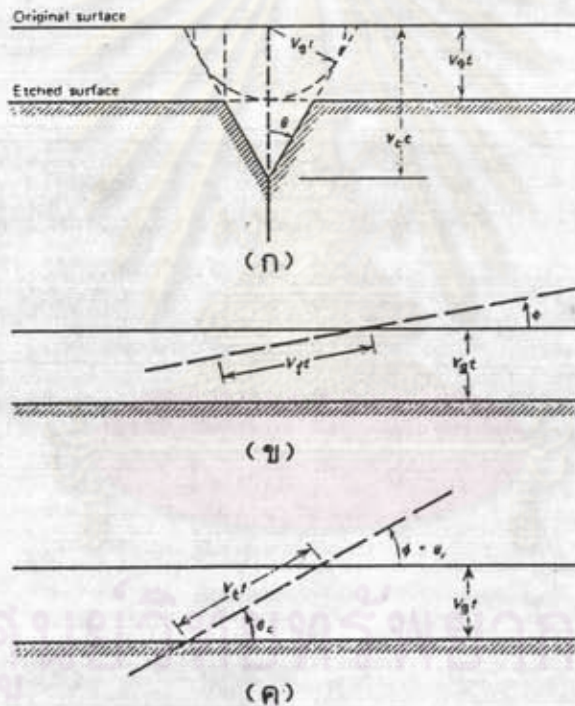
$$x_o = [(y_o - y')^2 + x_o^2]^{1/2} \sin(\zeta) \dots\dots(3.21)$$

$$y_o = y' + [(y_o - y')^2 + x_o^2]^{1/2} \cos(\zeta) \dots\dots(3.22)$$

จากสมการ (3.21) และ (3.22) จัดใหม่สำหรับทุก ๆ y' และ t คือ

$$x_o = v_g \cdot [t - \int_0^{y'} dy/v_x(y)] \cdot [1 - (v_g^2/v_x(y')^2)]^{1/2} \dots\dots(3.23)$$

$$y_o = y' + \{v_g^2/v_x(y')\} \cdot \{t - \int_0^{y'} dy/v_x(y)\} \dots\dots(3.24)$$



รูปที่ 3.2 อธิบายประสิทธิภาพของการกัดขยายรอย

- (ก) แสดงให้เห็นว่า มุม θ ขึ้นอยู่กับ v_x และ v_g
- (ข) ความเร็วของการกัดขยายรอยในแนว y ($v_x \cdot \sin\phi$) มีค่าน้อยกว่า v_g จะไม่ปรากฏรอยขึ้น อธิบายได้โดยให้ความหนาในแนวตั้ง $v_x \cdot t$ มีค่าน้อยกว่า ความหนาที่ผิวของวัสดุชั้นที่กรอย ที่ถูกกัดออก $v_g \cdot t$
- (ค) ถ้าในเงื่อนไขวิกฤต คือ $\phi_c = \theta$ ก็ยังไม่ปรากฏรอยขึ้น แต่กำลังจะเริ่มเกิดขึ้น เมื่อ $\phi > \phi_c$ และได้ สัดส่วนของการกัดขยายรอย (etching ratio) $v_x/v_g = 1/\sin\phi_c$

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของการเกิดรอยสำหรับวัสดุตัวกลางบางชนิด (17)

วัสดุตัวกลาง	เงื่อนไขในการกัด ขยายรอย	อัตราสูญเสียพลังงาน วิกฤต (dE/dX) _c (MeV.cm ² /mg)	อนภาคเบาที่ สุดที่ทำให้เกิด รอยได้
โอลิวีน	สารละลายKOH, 6 นาที, 160 °ซ 10%HF, 30 นาที, 23 °ซ, ทำ 2-3 ครั้ง	~20	
ไอเพอร์ลีน	สารละลายNaOH, 3-10 นาที, 200 °ซ		
เซอร์คอน	85%H ₃ PO ₄ , 1 นาที, 450-500 °ซ	~19	~Ca
แลบราโดไลท์	สารละลายKOH, 15 นาที, 210 °ซ		
แก้ว P ₂ O ₅	48%HF, 30 นาที, 23 °ซ		
แก้ว Na-Ca	48%HF, 3 นาที, 23 °ซ		
แก้วเทกไทต์	48%HF, 30 วินาที, 23 °ซ	~15	~S
ออร์โทเคลส	48%HF, 10 วินาที, 23 °ซ		
ควอร์ตซ์	สารละลายKOH, 10 นาที, 210 °ซ		
ไมกา	48%HF, 3 วินาที-40 นาที, 23 °ซ	~13	Si
ไมลาร์	6N NaOH, 10 นาที, 70 °ซ	~5	O
เลกซาน	6N NaOH, 8 นาที, 70 °ซ	~4	C
HBpaIT*	6N NaOH, 8 นาที, 70 °ซ		B
CAB*	6N NaOH, 12 นาที, 70 °ซ		~He
CN*	6N NaOH, 2-4 ชั่วโมง, 23 °ซ		H

* CN = เซลลูโลสไนเตรท CAB = เซลลูโลส อารีเตท บิวไทเรท
HBpaIT = โพลีเอสเตอร์ ที่ประกอบด้วย C₁₇H₃₀O₂

3.5.2 ประสิทธิภาพการกัดขยายรอย (etching efficiency)

เมื่อมุมที่อนุภาคตกกระทบผิวของวัสดุบันทึกรอย ϕ มีค่าน้อยกว่า มุมกรวย θ หรือ อัตราการกัดปกติที่ผิว $v_{\perp} \cdot \sin\theta$ น้อยกว่า v_{\perp} ที่ผิวของวัสดุบันทึกรอยที่ถูกกัดออก ผลคือจะไม่ปรากฏรอยขึ้น เมื่อผ่านการกัดขยายรอย โดยพิจารณาเป็นประสิทธิภาพของการกัดขยายรอย (η) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของรอยอนุภาคบนวัสดุบันทึกรอยซึ่งถูกกัดขยายรอยในเงื่อนไขที่เหมาะสม และซึ่งเป็นผลของลักษณะเรขาคณิตของอนุภาคที่ตกกระทบผิวของวัสดุบันทึกรอย

จากค่ามุมตกกระทบวิกฤต ϕ_c มีความสำคัญอีกอย่าง คือ เป็นค่าแสดงถึงประสิทธิภาพของการบันทึกรอย (registration efficiency) เพราะ ถ้าค่า ϕ_c ยิ่งมีค่าน้อย ย่อมหมายถึงประสิทธิภาพของการบันทึกรอยของอนุภาคยิ่งดี

3.5.3 ประสิทธิภาพในการเกิดรอย (detection efficiency)

ประสิทธิภาพในการเกิดรอยของอนุภาคบนวัสดุบันทึกรอยนั้น ได้ถูกอธิบายในรูปของมุมตกกระทบวิกฤต พิจารณาในกรณีที่เป็นต้นกำเนิดอนุภาคเป็นจุด วางแนวกับวัสดุบันทึกรอยซึ่งเป็นการจัดวางในลักษณะทางเรขาคณิตเป็น 2π (2π geometry) นั่นคือวัสดุบันทึกรอยจะได้รับอนุภาคจากต้นกำเนิดเป็นมุมตัน (solid angle), Ω จะได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพในการเกิดรอย } f = \frac{\int_0^{\phi_c} \frac{\pi}{2} d\Omega}{\int_0^{\pi/2} \frac{\pi}{2} d\Omega} = \frac{\int_0^{\phi_c} 2\pi \cos\phi d\phi}{2\pi} = 1 - \sin\phi_c \quad \dots\dots(3.25)$$

3.6 การคำนวณหาจำนวนรอย

เมื่อวางวัสดุบันทึกรอยติดกับสารที่แตกตัวได้ และจัดวางเป็นลักษณะทางเรขาคณิตเป็น 2π โดยพิจารณาว่า การเกิดการแตกตัวแต่ละครั้ง ผลิตชั้นแฟรกเมนต์วิ่งออกในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น รอยที่เกิดขึ้นบนวัสดุบันทึกรอย แต่ละรอยหมายถึง การเกิดการแตกตัวแต่ละครั้ง

จำนวนรอยทั้งหมดที่ถูกบันทึกของฟิชชันแฟรกเมนต์, T เขียนได้ดังนี้

$$T = \text{const. } n\sigma\phi t \quad \dots\dots(3.26)$$

เมื่อ $\text{const.} =$ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการบันทึกรอย และการนับรอย

$n =$ จำนวนอะตอมของสารแตกตัวได้

$\sigma =$ ภาคตัดขวางของการแตกตัว (cm^2)

$\phi =$ ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)

$t =$ เวลาที่ใช้ฉายรังสีเทอร์มัลนิวตรอน (s)

จากสมการ (3.26) จะได้ความหนาแน่นรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์

ดังนี้

$$\rho = \phi t \sigma N_0 C_u K f \quad \dots\dots (3.27)$$

$C_u =$ ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอะตอมของยูเรเนียม

$N_0 =$ ความหนาแน่นอะตอมของวัสดุบันทึกรอย

$K =$ ค่าแฟคเตอร์เรขาคณิต (geometric factor) โดยมีค่าประมาณเท่ากับพิสัยของฟิชชันแฟรกเมนต์ในวัสดุตัวกลาง

$f =$ สัดส่วนของอะตอมของยูเรเนียมที่เกิดจากการแตกตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย