



บทที่ ๒

ทฤษฎี

๒.๑ การสูญเสียพลังงานของอนุภาคหนัก (Energy Loss of Ionization by Heavy Charged Particles)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟา หรือ อีออนของธาตุหนักทั้งหลายผ่านวัตถุแล้วจะทำอันตรกริยากับอิเล็กตรอนของอะตอมในวัตถุ อนุภาคจะเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในของอะตอมที่เป็นไปได้

- ๑. อิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในชั้นระดับพลังงานสูงขึ้น
- ๒. อิเล็กตรอนจะหลุดออกไปจากอะตอมเดิม เกิดเป็นอีออนปฐมภูมิ (primary ionization) ถ้าอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปมีพลังงานสูงพอ ก็สามารถจะทำให้เกิดเป็นอีออนได้อีก เรียกว่าเกิดการเป็นอีออนทุติยภูมิ (secondary ionization) ส่วนอิเล็กตรอนตัวนี้เรียกว่า รังสีเดลตา (delta rays)

อนุภาคที่เข้ามาจะเสียพลังงานไป จะเคลื่อนที่ช้าลงตามลำดับ เมื่อความเร็วพอกับความเร็วของอิเล็กตรอนในอะตอมก็จะจับกับอิเล็กตรอน (electron capture) ทำให้ประจุไฟฟ้าในตัวอนุภาคลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหยุดนิ่งในวัตถุนั้นหรือผ่านทะลุออกไป

เบท (Bethe) สามารถหาสมการอัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคต่อหน่วยระยะทาง (dE/dx) ได้เป็นสมการดังนี้ (๑)

$$\frac{dE}{dx} = \frac{c_1 z^{*2}}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{w_{max}^2}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad (1)$$

โดยที่  $c_1 = \frac{2\pi n_e e^4}{m_0 c^2}$ ;  $n_e$  = จำนวนอิเล็กตรอนในแถบพื้นที่รอยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$m_0$  = มวลหยุดนิ่งของอิเล็กตรอน

$z^*$  = จำนวนประจุสุทธิ (a net positive charge)

$$W_{\max} = 2 m_0 c^2 \beta^2 \gamma^2 ; \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

$$\beta = v/c$$

เมื่อ  $v$  = ความเร็วของอนุภาค

$c$  = ความเร็วของแสง

$\phi$  = การแก้ไขเนื่องจากโพลาไรเซชันของตัวกลางที่ความเร็วสัมพัทธภาพ  
(correction for effect of polarization of medium at relativistic velocity)

$U$  = การแก้ไขความเร็วต่ำของอิเล็กตรอนในวงจรชั้นใน (low velocity correction for non-participation of inner electron shells)

$I$  = ค่าเฉลี่ยศักย์การแตกตัวเป็นไอออนของตัวกลาง (mean ionization potential of the medium)

รอยนี้จะเกิดขึ้นให้เห็นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยระยะทาง  $(\frac{dE}{dx})$  ของอนุภาคในแผ่นมันทีกรอยมีความมากกว่าอัตราการสูญเสียพลังงานซึ่งเริ่มต่อหน่วยระยะทาง หรือ  $(\frac{dE}{dx})_{\text{cri}}$  (critical energy loss) ซึ่งเป็นค่าคงที่แน่นอนในแผ่นมันทีกรอยแต่ละชนิดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๒-๑ (๘)

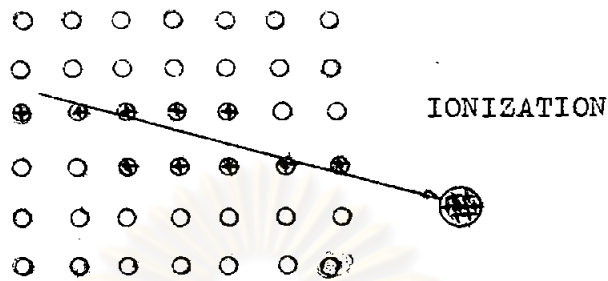
แสดงค่า  $(\frac{dE}{dx})_{cri}$  ของแผ่นบันทึกรอยที่เป็นวัสดุชนิดต่าง ๆ

Material	Critical rate of energy loss (MeV mg <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> )	Lightest detectable particle
Olivine	~20	
Zircon	~19	Ca
Tektite glass	~15	S
Mica	~13	Si
Mylar		O
Lexan	~4	C
Polyester of composition C <sub>17</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub>		B
Cellulose acetate butyrate	1.41 <sup>(6)</sup>	He
Cellulose nitrate	0.86 <sup>(6)</sup>	H

๒.๒ กลไกของการเกิดรอย (Mechanism of Track Formation)

วิธีที่จะอธิบายถึงกลไกของการเกิดรอยในแผ่นบันทึกชนิดที่เป็นผลึกสารอนินทรีย์ มีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะอธิบายถึงวิธีที่สอดคล้องกับการทดลองได้มากที่สุด เพียงวิธีเดียวคือ ทางระเบิดของไอออน (Ion explosion spike) ซึ่งจะอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

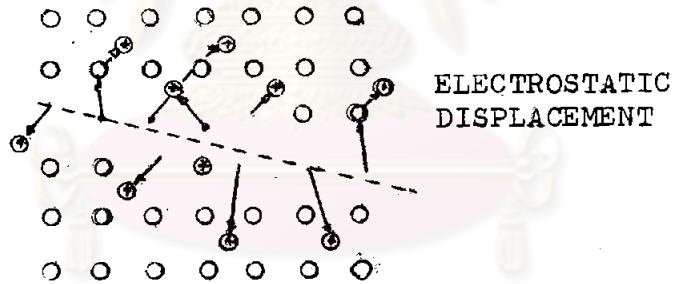
๑. เกิดการเป็นไอออน (ionization) เมื่อมีอนุภาคหรือไอออนวิ่งผ่านเข้าไปในโครงสร้างผลึกของเนื้อสารจะทำให้บริเวณที่มันผ่านเกิดสภาพการแตกตัวให้อนุภาคที่มีประจุเกิดขึ้น ตามรูป ๒.๑



รูปที่ ๒.๑ กลไกของการเกิดรอยขณะเกิดการเป็นไอออน

๒. เกิดการขจัดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic displacement)

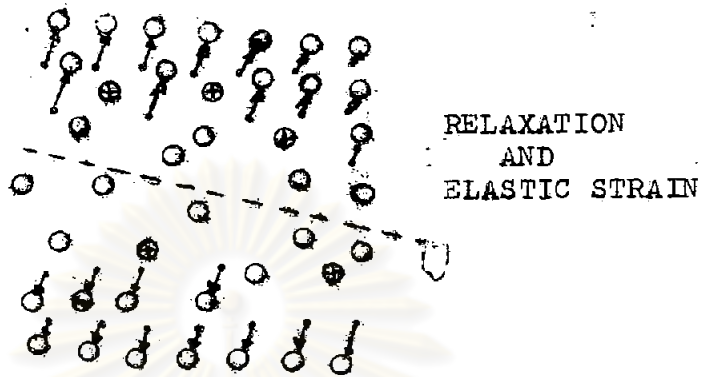
เมื่ออนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดขึ้นใกล้กันจะเกิดแรงผลักกัน ทำให้อนุภาคที่มีประจุนั้นเคลื่อนที่ได้ และไปเบียดผลัดกันไป เกิดความเครียดขึ้นตามรูป ๒.๒



รูปที่ ๒.๒ กลไกของการเกิดรอยขณะเกิดการขจัดทางไฟฟ้าสถิต

๓. เกิดการผ่อนคลายความเครียด (relaxation and elastic strain)

ความเครียดที่เกิดจากตอน ๒. จะแผ่กระจายไปยังผลัดกัน ๆ ไปทุกทิศทุกทาง และถึงร่องรอยทางถูกทำลายให้ปรากฏ ตามรูป ๒.๓

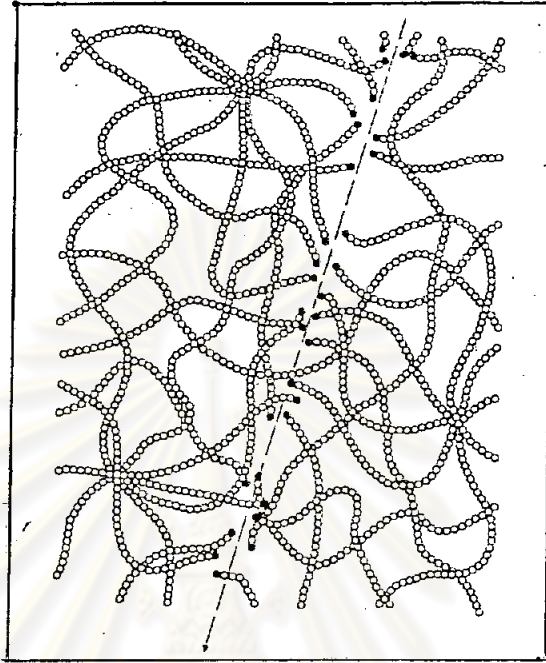


รูปที่ ๒.๓ กลไกของการเกิดรอยขณะเกิดการผ่อนคลายความเครียด

กลไกการเกิดรอยตามวิธีนี้จะเกิดในแถบพันธะที่รอยที่มีคุณสมบัติดังนี้คือ

๑. ต้องมีค่าความแข็งแรงระหว่างพันธะ (bonding strength) และค่าคงที่ วิชาขุมขิม (dielectric constant) น้อย ๆ จึงจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
๒. มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจำกัดไม่มากกว่า  $10^{20}$  อิเล็กตรอน/ลบ.ซม. เพื่อจะได้เวลาที่อิเล็กตรอนไปแทนที่อิเล็กตรอนที่ขาดไปในอะตอมที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นนั้นได้ช้าอย่างน้อยที่สุดประมาณ  $10^{-9}$  วินาที ความเครียดจึงจะแผ่กระจายให้เป็นร่องกว้าง
๓. การเคลื่อนที่ของหลุม (hole) ต้องไม่เร็วมาก เพราะถ้าเคลื่อนเร็วมากจะไปจับอิเล็กตรอนได้เร็วขึ้น ทำให้บริเวณรอยทางเกิดเป็นกลาง ความเครียดก็จะมี การแผ่กระจาย

ส่วนรอยที่เกิดในสารพวกโพลีเมอร์ทั้งหลายพบว่าเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า เพียงแต่อุณหภูมิประจุวิ่งผ่านเข้าไปในเนื้อสารไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้น ก็จะเท่ากับไปทำลายพันธะ (bond) ทำให้โครงสร้างตามแนวทางที่อุณหภูมิวิ่งผ่านไปเนื้อสารเสียไปทันที รอยความเสียหายก็จะปรากฏตัวอย่างเช่น แถบเซลล์โลสในเทรท เป็นต้น

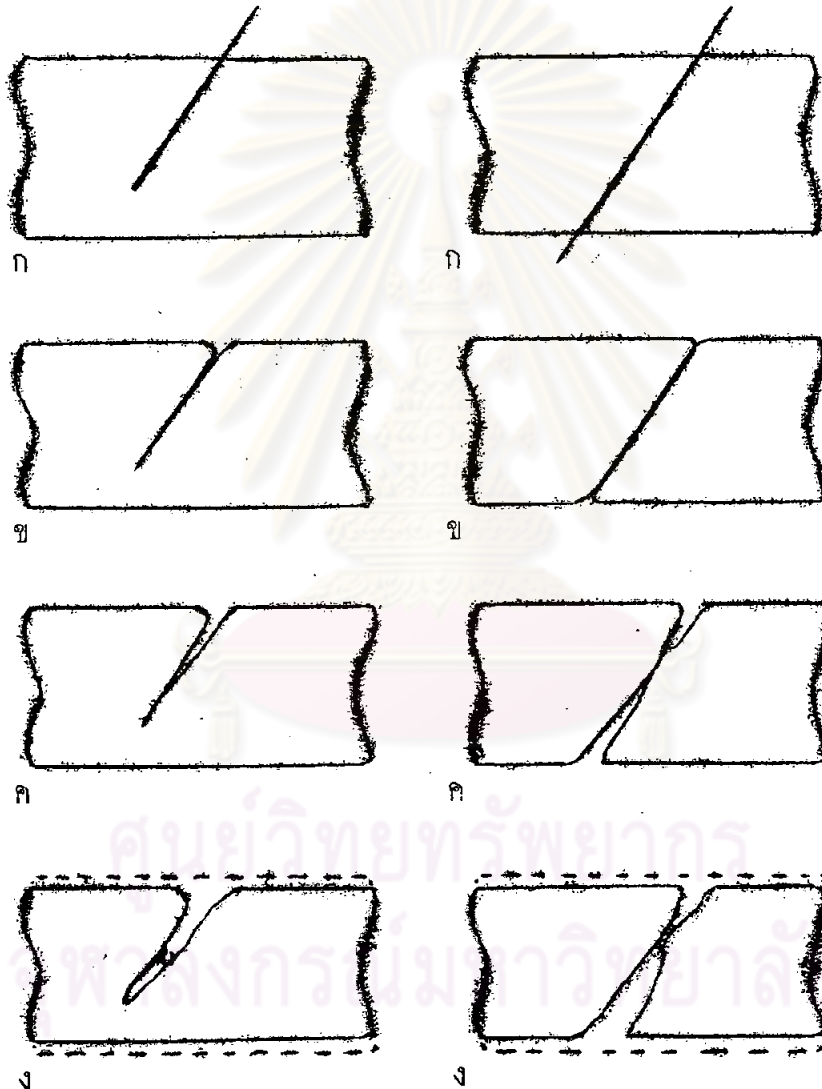


รูปที่ ๒.๔ แสดงถึงการถูกทำลายโครงสร้างของสารพอลิเอทิลีน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ๒.๓ การกัดรอยทางเคมี

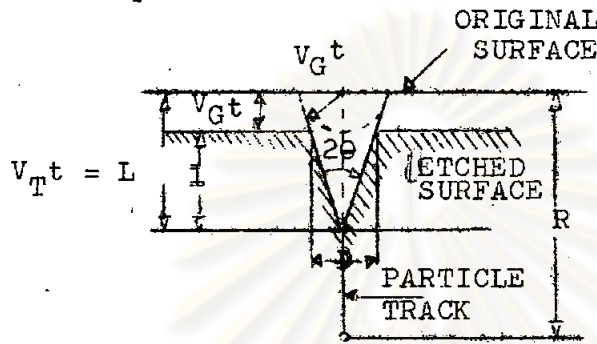
การจะศึกษารอยในแผ่นมันที่กรอยชนิดโซลิด-สเตท โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ชนิดใช้แสงธรรมดาได้นั้น จะต้องนำแผ่นมันที่กรอยไปกัดรอย (etch) ให้มีขนาดโตขึ้น โดยแช่ในสารละลายเคมีก่อน



- รูปที่ ๒.๕ รอยที่เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคเข้าไปหยุดนิ่งอยู่ในแผ่นมันที่กรอย (ซ้าย) และรอยที่เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคผ่านทะลุออกไป (ขวา)
- (ก) เป็นตอนที่แสดงรอยที่เกิดขึ้นที่แท้จริง
- (ข) และ (ค) แสดงถึงระหว่างการกัดรอยขยายรอยให้โตขึ้น
- (ง) รูปลักษณะของรอยที่ปรากฏหลังจากผ่านการกัดรอยทางเคมีแล้ว

สารละลายเคมีที่จะใช้กัดรอยนี้ ต้องมีคุณสมบัติสามารถกัดรอยในแนวลึกตามแนวรอย (linear etching, track etching) เร็วกว่าแนวขวาง (bulk etching) จึงจะทำให้รอยยังปรากฏอยู่

พิจารณารูป ๒.๖ (๑)



รูปที่ ๒.๖ รูปเรขาคณิตของรอยที่ผ่านการกัดรอยแล้ว

ให้แนวรอยของอนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในแผ่นบันทึกรอยในแนวตั้งฉากกับผิวหน้า

- $V_T$  = ความเร็วของการกัดรอยของสารละลายเคมีตามแนวลึกของรอย
- $V_G$  = ความเร็วของการกัดรอยของสารละลายเคมีตามแนวขวาง
- $L$  = ระยะความลึกจากผิวหน้าเดิม (original surface) ถึงที่กัดลึกลงไป
- $l$  = ระยะความลึกจากผิวหน้าที่ถูกกัดแล้ว (etched surface) ถึงที่กัดลึกลงไป
- $R$  = ระยะความลึกจากผิวหน้าเดิมถึงตำแหน่งที่อ่อนเคลื่อนลึกลงไป
- $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอย
- $t$  = เวลาของการกัด (etching time)

ถ้า  $V_T$  คงที่โดยตลอดแนวรอยลึกลงไป

$V_G$  เท่ากันหมดทุกทิศทางหรือสมลักษณะ (isotropic)



จะได้  $\frac{V_G}{V_T} = \cos \theta$

$$\text{จากรูป} \quad \frac{V_G}{V_T} = \sin \theta \quad (2.1)$$

$$1 = (V_T - V_G)t \quad (2.2)$$

คำนวณหา D ได้ดังนี้

$$\text{จากรูป} \quad \sin \theta = \frac{D/2}{\sqrt{(D/2)^2 + 1^2}}$$

$$= \frac{V_G}{V_T}$$

$$\frac{D/2}{\sqrt{(D/2)^2 + 1^2}} = \frac{V_G}{V_T}$$

ยกกำลังสองทั้ง ๒ ข้าง แล้วย้ายข้าง

$$(D/2)^2 = \left( \frac{V_G}{V_T} \right)^2 \left[ (D/2)^2 + 1^2 \right]$$

$$(D/2)^2 \left[ \frac{V_T^2 - V_G^2}{V_T^2} \right] = 1^2 \left( \frac{V_G^2}{V_T^2} \right)$$

แทนค่า 1 แล้วยก  $V_T^2$  ทั้งสองข้าง,

$$(D/2)^2 (V_T^2 - V_G^2) = (V_T - V_G)^2 t^2 V_G^2$$

$$(D/2)^2 = \frac{(V_T - V_G)^2}{(V_T - V_G)(V_T + V_G)} \cdot V_G^2 t^2$$

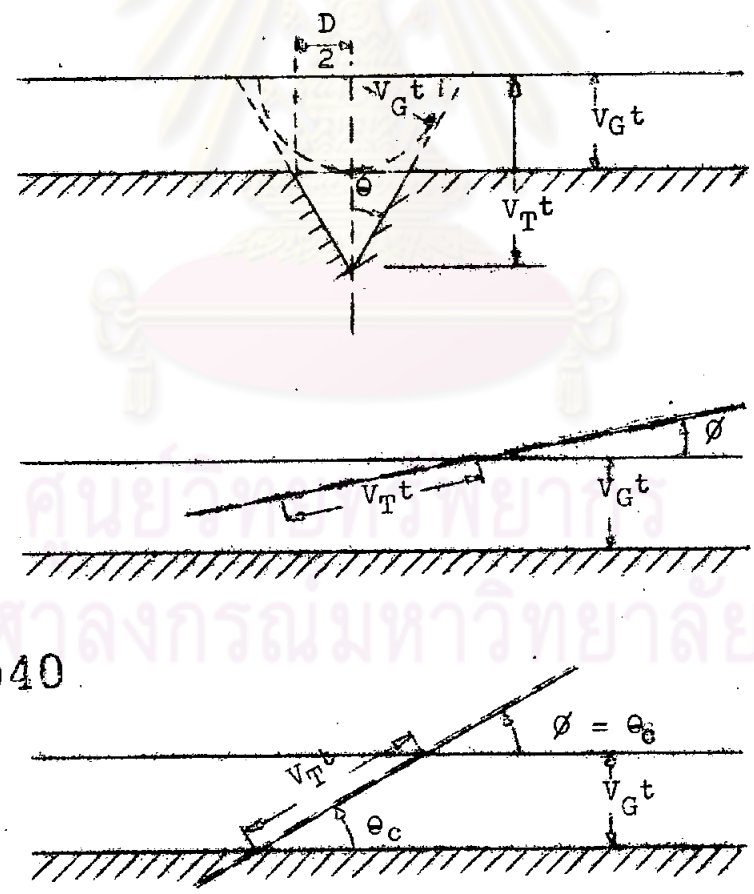
$$= \left( \frac{V_T - V_G}{V_T + V_G} \right) V_G^2 t^2$$

$$\therefore D = 2V_G t \sqrt{(V_T - V_G)/(V_T + V_G)} \quad (2.3)$$

จากสมการ (๒.๒) และ (๒.๓) จะเห็นว่ารอยลึกลงจะยังปรากฏอยู่ถ้า  $V_T > V_G$  และ ทั้ง 1 และ D จะหายไปถ้า  $V_T = V_G$

โดยธรรมชาติแล้ว  $V_T$  และ  $V_G$  ไม่ได้เป็นค่าคงที่ที่เท่ากัน  $V_T$  อาจจะมีเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อสารละลายเคมีเจือจางลงไป อย่างไรก็ตามยังถือว่า  $V_T$  คงที่ได้ ถ้าให้เวลาของการกักไม่นานนัก ส่วน  $V_G$  จะคงที่เฉพาะในของแข็งสมลักษณะ เช่น แก้วเท่านั้น

ในกรณีอนุภาคที่มีประจุวิ่งเข้าไปในแผ่นมันที่ทรอยในแนวทำมุม  $\theta$  กับแนวผิวของแผ่น การกักทรอยจะยังปรากฏอยู่หรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะมุม  $\theta$  ด้วย ดังรูปที่ ๒.๓



๐๐๒๐๔๐

รูปที่ ๒.๓ รูปบนแสดงถึงรอยจะปรากฏอยู่เมื่อ  $V_T > V_G$  โดยมีมุม  $\theta = 90^\circ$   
รูปกลางแสดงถึงรอยจะหายไปเพราะค่า  $V_T \sin \theta < V_G$   
รูปล่างแสดงถึงรอยจะเริ่มหายไปเพราะค่า  $V_T \sin \theta_c = V_G$

จากการศึกษาพฤติกรรมทางเคมีของสารละลายเคมีที่มีต่อรอยในแผ่นบันทึกรอย สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (V) ซึ่งอาจจะพิจารณาเป็นค่า  $V_T$  หรือ  $V_G$  เฉพาะค่าใดกับอุณหภูมิดังนี้: (๗,๘)

$$V = A e^{-\Delta F/kT} \tag{2.4}$$

- เมื่อ T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเคมี ( $^{\circ}K$ )
- k = ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ =  $8.67 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
- A = ค่าคงที่
- $\Delta F$  = พลังงานการก่อกัมมันต์ของสารละลายเคมี (activation energy)

สรุปแล้วการกัดรอยเพื่อให้รอยยังปรากฏอยู่นั้นขึ้นอยู่กับสิ่งเหล่านี้

- ๑. ส่วนผสมและความเข้มข้นของสารละลายเคมี
- ๒. อุณหภูมิระหว่างการแช่ลงในสารละลาย
- ๓. เวลาที่แช่อยู่ในสารละลายเคมี

ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ ๒-๒

ตารางที่ ๒-๒

ตัวอย่างแสดงเงื่อนไขของการกัดรอยของ ฟิชชันแฟรกเมนต์ (fission fragments) ในแผ่นบันทึกรอยชนิดโซลิด-สเตทแบบต่าง ๆ (๑)

ชนิดของแผ่นบันทึกรอย	เงื่อนไข
ควอทซ์ (Quartz; $SiO_2$ )	KOH(aq), 3 hr., $150^{\circ}C$ หรือ HF48%, 24 hr. $23^{\circ}C$
แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass)	HF48%, 5-20 min.
เซลลูโลสอะซิเตทบิวทิเรท	NaOH 6.25N, 12 min., $70^{\circ}C$

เงื่อนไขเหล่านี้เป็นผลมาจากการทดลอง ไม่ได้กำหนดตายตัว อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย