

## บทที่ 4

### ทฤษฎีแทรค-เอทช์

#### 4.1 ประวัติ เรื่องแทรค-เอทช์

ในปี ค.ศ. 1959 ซิลค์และบารนส์ได้พบว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุที่เป็นฉนวนบางชนิด เช่น โยกาจะเกิดรอยเล็ก ๆ ขึ้นตามทางที่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน รอยนี้มีขนาดเล็กมากจะต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงจะเห็นได้ ซึ่งต่อมาพบว่าไม่เพียงแต่โยกาเท่านั้นที่จะเกิดรอยขึ้นได้ มายลาร์ (mylar) และพลาสติกก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน ต่อมาฟลีสเชอร์ (R.L. Fleischer) ไพรส์และวอคเคอร์ (P.D. Price and R.M. Walker) ได้หาวิธีขยายรอยเหล่านี้ให้ใหญ่ขึ้น จนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา โดยนำวัสดุดังกล่าวไปแช่ในสารละลายเคมีที่เหมาะสมเพื่อกัดรอย (etch) ให้ใหญ่ขึ้น วิธีการนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาวัสดุและยังพบว่า วัสดุของแข็งทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เป็นฉนวนสามารถนำมาใช้ในการบันทึกรอยของอนุภาคที่มีประจุได้ แผ่นวัสดุบันทึกรอยดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น แทรค-เอทช์ดีเทคเตอร์ ไดอิเล็กทริก แทรคดีเทคเตอร์ (dielectric track detector) พลาสติกดีเทคเตอร์ (plastic detector) โซลิดสเตทแทรคดีเทคเตอร์ (solid state track detector หรือ SSTD) และโซลิดสเตทนิวเคลียร์แทรคดีเทคเตอร์ (solid state nuclear track detector หรือ SSNTD) เป็นต้น จึงทำให้สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง

#### 4.2 กลไกการเกิดรอย (Track Formation Mechanism)

มีนักฟิสิกส์หลายท่านได้ให้คำอธิบายกลไกในการเกิดรอยบนวัสดุตัวกลางไว้ 2 ทฤษฎีคือ

4.2.1 ทฤษฎี "ไอออนเอกซ์พลอสชันสไปค" (ion explosion spike) ซึ่งอธิบายไว้ในปี ค.ศ. 1965 ว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางจะทำให้อะตอมเกิดการสั่น (vibration) ซึ่งถ้าหากมีพลังงานเพียงพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร (ionization) เกิดประจุบวกขึ้นรอบ ๆ แนวทางที่อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่าน อะตอมที่มีประจุบวกเหล่านี้จะผลักกันทำให้อะตอมที่มีประจุเคลื่อนที่ไปเบียดกันกับอะตอมที่อยู่ถัดไป ทำให้เกิดความเครียด

ขึ้น ความเครียดนี้จะแผ่กระจายไปยังอะตอมถัดไปทุกทิศทุกทางทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันใหม่ เกิดความสมดุล และกลายเป็นช่องว่างเกิดขึ้นในบริเวณนั้นจนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูป 4.1) ขบวนการนี้จะเกิดได้กับสารจำพวกที่เป็นฉนวน เช่น แก้ว ไบคา และพลาสติก เป็นต้น แต่ถ้าเป็นตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดี เช่น โลหะ อะตอมที่กลายเป็นไอออนบวกดังกล่าวจะจับเอาอิเล็กตรอนจากบริเวณรอบ ๆ ทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นกลางกลับคืนสู่สภาพเดิม จึงไม่เกิดช่องว่างขึ้น

#### 4.2.2 ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เทอร์มัล สไปค (electronic thermal spike)

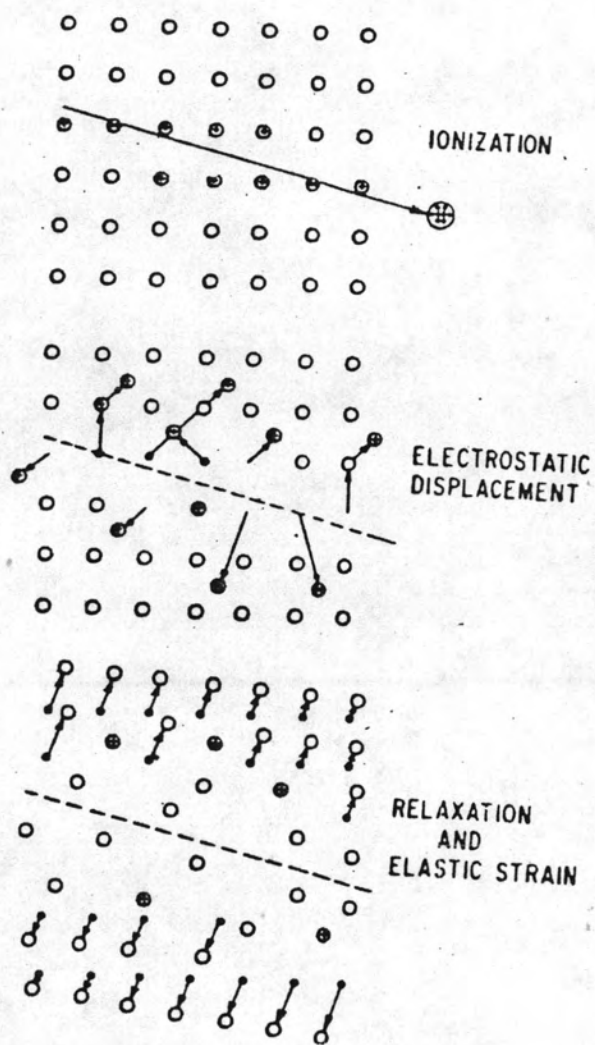
อธิบายว่า เมื่ออนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านวัตถุตัวกลางใด ๆ จะคายพลังงานให้กับวัตถุตัวกลางที่วิ่งผ่าน เกิดเป็นความร้อนขึ้น ในกรณีที่วัตถุตัวกลางเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิไม่สูงขึ้นมากนัก แต่สำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำความร้อนที่เลว ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายออกไปได้น้อยและช้า ทำให้อุณหภูมิในบริเวณนั้นสูงมากพอที่จะทำให้โครงสร้างของตัวกลางในบริเวณนั้นถูกทำลายไป เป็นผลให้เกิดรอยขึ้น

จากทฤษฎีทั้งสองที่กล่าวข้างต้น สรุปได้ว่าการเกิดรอยบนวัตถุตัวกลางนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ

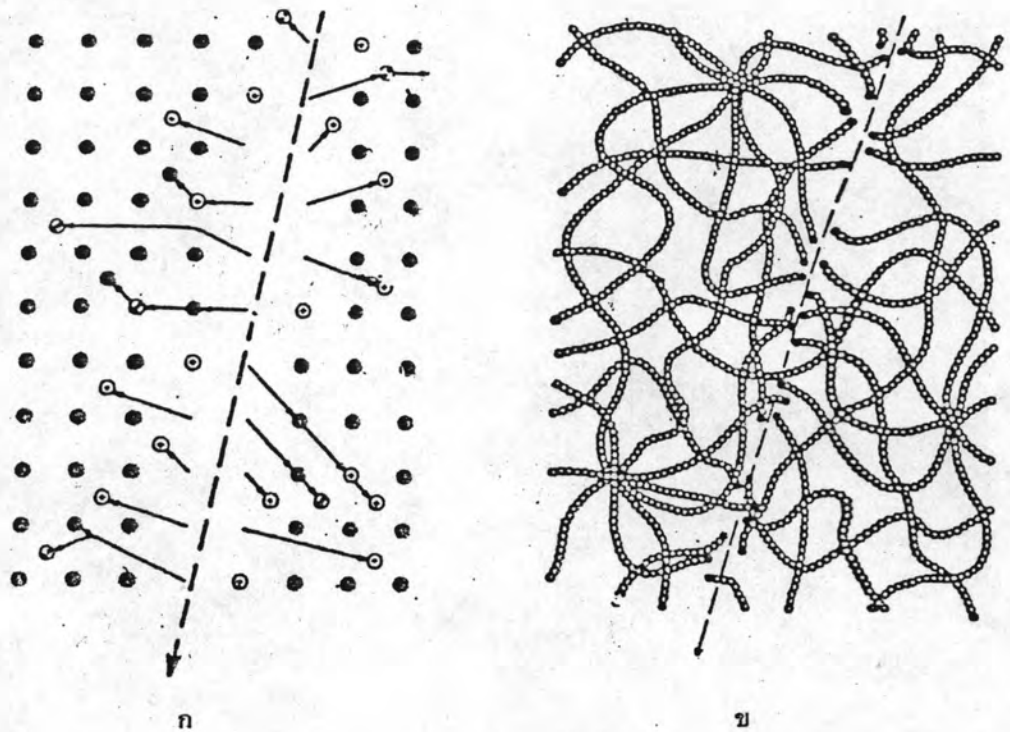
1. คุณสมบัติของอนุภาคที่มีประจุ เช่น ชนิด พลังงาน และประจุของอนุภาค
2. คุณสมบัติของตัวกลาง เช่น ชนิดของวัตถุตัวกลาง เป็นฉนวนหรือตัวนำความร้อนหรือไม่ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมมากหรือน้อย เป็นต้น

ในการเกิดรอยนี้ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุ อนุภาคมีประจุต้องถ่ายเทพลังงานให้วัสดุตัวกลางมากกว่าค่าพลังงานวิกฤติ (critical energy) ของวัสดุนั้นๆ จึงจะปรากฏรอยขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดรอยหรือไม่นั้นจึงขึ้นอยู่กับชนิดและระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุและชนิดของวัสดุที่ใช้ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1)

รอยในสารพวกโพลีเมอร์เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโดยเพียงแต่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปแล้วกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นก็จะเป็นการทำลายแขน (bond) ระหว่างโครงสร้าง



รูปที่ 4.1 (1) แผนภาพอธิบายกลไกการเกิดรอย



รูปที่ 4.2<sup>(1)</sup> แสดงภาพการเกิดรอยในฉวกลางที่เป็นพลาสติก (ก) และฉวกลางที่เป็นโพลีเมอร์ (ข)

ของโพลีเมอร์นั้น ทำให้เกิดเป็นรอยขึ้น เช่น สารเซลลูโลสไนเตท เซลลูโลสอาซิเตท เป็นต้น

ตารางที่ 4.1<sup>(3)</sup> สารละลายเคมีที่ใช้กัดรอยและค่าพลังงานวิกฤติของวัสดุบางชนิด

Material	Etchant	Critical Energy (Mev.cm <sup>2</sup> /mg)
Phosphate glass	48 % HF	15
Mica	48 % HF	15
Mylar	6 N NaOH	5
Cellulose nitrate	6 N NaOH	2

ตารางที่ 4.2<sup>(1)</sup> ความไวในการบันทึกของแผ่นวัสดุบันทึกรอยบางชนิด

A. Inorganic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Hyperathene	$\text{Hg}_{1.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Si}_2\text{O}_6$	100 MeV $^{56}\text{Fe}$
Olivine	$\text{MgFeSiO}_4$	
Labradorite	$\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{40}$	
Zircon	$\text{ZrSiO}_4$	
Bronzite	$\text{Mg}_{1.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Si}_2\text{O}_6$	
Enstatite	$\text{MgSiO}_3$	
Diopside	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	170 MeV $^{56}\text{Fe}$
Augite	$\text{CaMg}_3\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{19}$	170 MeV $^{56}\text{Fe}$
Oligoclase	$\text{Na}_4\text{CaAl}_6\text{Si}_{14}\text{O}_{40}$	4 MeV $^{28}\text{Si}$
Bytownite	$\text{NaCa}_4\text{Al}_9\text{Si}_{11}\text{O}_{40}$	4 MeV $^{28}\text{Si}$
Orthoclase	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	100 MeV $^{40}\text{Ar}$
Quartz	$\text{SiO}_2$	100 MeV $^{40}\text{Ar}$
Phlogopite Mica	$\text{KMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	
Muscovite Mica	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2 MeV $^{20}\text{Ne}$
Silica Glass	$\text{SiO}_2$	16 MeV $^{40}\text{Ar}$
Flint Glass	$18\text{SiO}_2:4\text{PbO}:1.5\text{Na}_2\text{O}:\text{K}_2\text{O}$	2-4 MeV $^{20}\text{Ne}$
Tektite Glass (Obsidian similar)	$22\text{SiO}_2:2\text{Al}_2\text{O}_3:\text{FeO}$	
Soda Lime Glass	$23\text{SiO}_2:5\text{Na}_2\text{O}:5\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$	20 MeV $^{20}\text{Ne}$
Phosphate Glass	$10\text{P}_2\text{O}_5:1.6\text{BaO}:\text{Ag}_2\text{O}:2\text{K}_2\text{O}:2\text{Al}_2\text{O}_3$	

## ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

B. Organic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Amber	$C_2H_3O_2$	Full-energy fission fragments
Phenoplaste	$C_7H_6O$	
Polyethylene	$CH_2$	Fission fragments
Polystyrene	$CH$	
Polyvinylacetochloride	$C_6H_9O_2Cl$	42 MeV $^{32}S$
Polyvinylchloride - Polyvinylethene chloride copolymer	$C_2H_3Cl + C_2H_2Cl_2$	42 MeV $^{32}S$
Polyethylene Terephthalate (Cronar, Melinex)	$C_5H_4O_2$	
Polyimide	$C_{11}H_4O_4N_2$	36 MeV $^{16}O$
Ionomeric Polyethylene (Surlyn)		36 MeV $^{16}O$
Bisphenol A-polycarbonate (Lexan, Makrofol)	$C_{16}H_{14}O_3$	0.3 MeV $^4He$
Polyoxymethylene (Delrin)	$CH_2O$	28 MeV $^{11}B$
Polypropylene	$CH_2$	1 MeV $^4He$
Polyvinylchloride	$C_2H_3Cl$	
Polymethylmethacralate (Plexiglas)	$C_5H_8O_2$	3 MeV $^4He$
Cellulose Acetate Butyrate	$C_{12}H_{18}O_7$	
Cellulose Triacetate (Cellit, Triafol-T, Kodacel TA-401 unplasticized)	$C_3H_4O_2$	
Cellulose Nitrate (Daicell)	$C_6H_8O_9N_2$	0.55 MeV $^1H$

Notes: Solid lines represent relatively clear separations; broken lines represent unclear but likely separations.

Many materials have different sensitivities depending on their exposure to oxygen, ultra-violet light, . . . . , and on the etchant used.

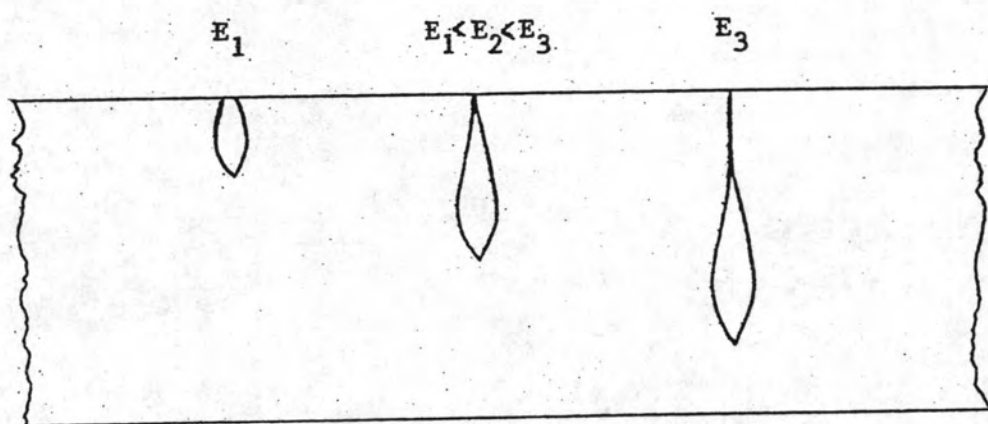
อนุภาคไม่มีประจุ เช่น นิวตรอนเร็ว ก็สามารถทำให้เกิดรอยได้ ทั้งนี้เป็นเพราะ เซลลูโลสในเครท ประกอบด้วย คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจนและไฮโดรเจน จะเกิด ปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนเร็ว ปฏิกิริยาที่สำคัญคือการกระเจิงแบบอิลาสติกและการดูดกลืน แล้วให้อนุภาคมีประจุออกมา เช่น โปรตอน แอลฟา ทำให้เกิดรอยขึ้น

#### 4.3 ลักษณะของรอยอนุภาค

การเกิดรอยของอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะอยู่ในระดับแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ระดับพลังงานจลน์ของอนุภาค อนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูงกว่าจะมีอัตราการสูญเสียพลังงาน ให้ตัวกลางน้อยกว่าและเมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ลดลงก็จะมีอัตราการสูญเสียพลังงาน เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 4.2 ทราบว่าแผ่นวัสดุบันทึกรอย เซลลูโลสในเครท จะเกิดรอย อนุภาคขึ้นได้ จะต้องใช้อนุภาคมีประจุคือ โปรตอนที่มีพลังงานจลน์ตั้งแต่ 0.55 MeV ลงไป นั่นก็หมายความว่าถ้าใช้แผ่น เซลลูโลสในเครทแล้ว จะสามารถบันทึกรอยอนุภาคโปรตอนที่มี พลังงานจลน์ตั้งแต่ 0.55 MeV ลงไปได้ อย่างไรก็ตามในกรณีที่อนุภาคโปรตอนมีพลังงาน จลน์สูงกว่า 0.55 MeV ขึ้นไป ก็สามารถทำให้เกิดรอยในแผ่น เซลลูโลสในเครทได้เช่นกัน แต่จะเป็นช่วงที่อนุภาคโปรตอนสูญเสียพลังงานไปบางส่วนก่อน จนกระทั่งมีพลังงาน เหลือ 0.55 MeV จึงจะเกิดรอยให้เห็นได้ ในกรณีเช่นนี้รอยที่เกิดขึ้นจะอยู่ลึกจากผิวของแผ่นวัสดุ บันทึกรอยลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เมื่อนำแผ่นวัสดุบันทึกรอยไปกัดรอยในสารละลายที่เหมาะสมก็จะได้รอยอนุภาค ปรากฏขึ้น โดยรอยอนุภาคที่ผิวของแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะปรากฏให้เห็นก่อน ส่วนที่อยู่ลึกจะยังไม่ปรากฏให้เห็น เมื่อใช้เวลากัดรอยมากขึ้น รอยอนุภาคที่ผิวหน้าที่มีขนาดเล็กบางรอยจะถูก กัดจนลบเลือนหายไป แต่รอยอนุภาคที่อยู่ลึกลงไปก็จะปรากฏให้เห็นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่ง เป็นการกัดรอยของอนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม เซลลูโลสในเครท

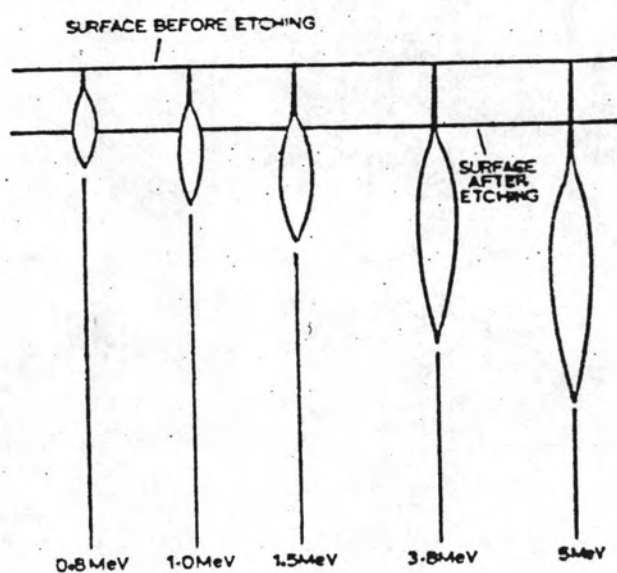
ในการกัดรอยสารละลาย เคมีจะไปกัดขยายรอยอนุภาคที่บริเวณผิวของแผ่นวัสดุบันทึก รอย จะได้รอยที่มีลักษณะ เป็นกรวยที่มีแกนกลางอยู่ในแนวที่อนุภาควิ่งผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการเกิดรอยของอนุภาคในวัสดุ

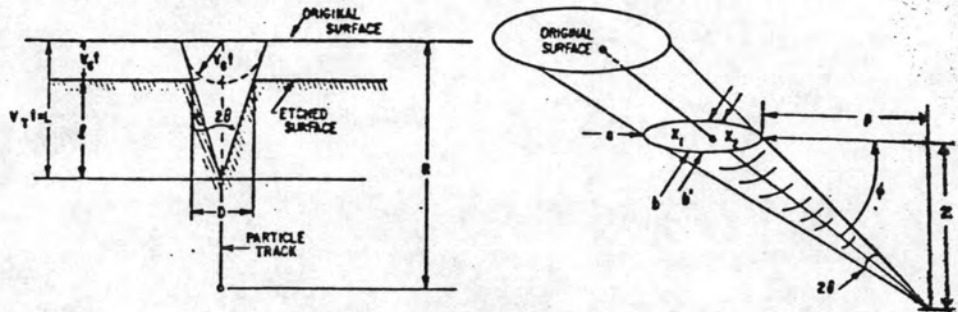
เมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ต่างกัน

(  $E$  = พลังงานจลน์ )



รูปที่ 4.4<sup>(39)</sup> แสดงการกัดรอยของรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาพลังงานต่างกันบนฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท CA80 โดยใช้ NaOH 2.5 N เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $18^{\circ}\text{C}$



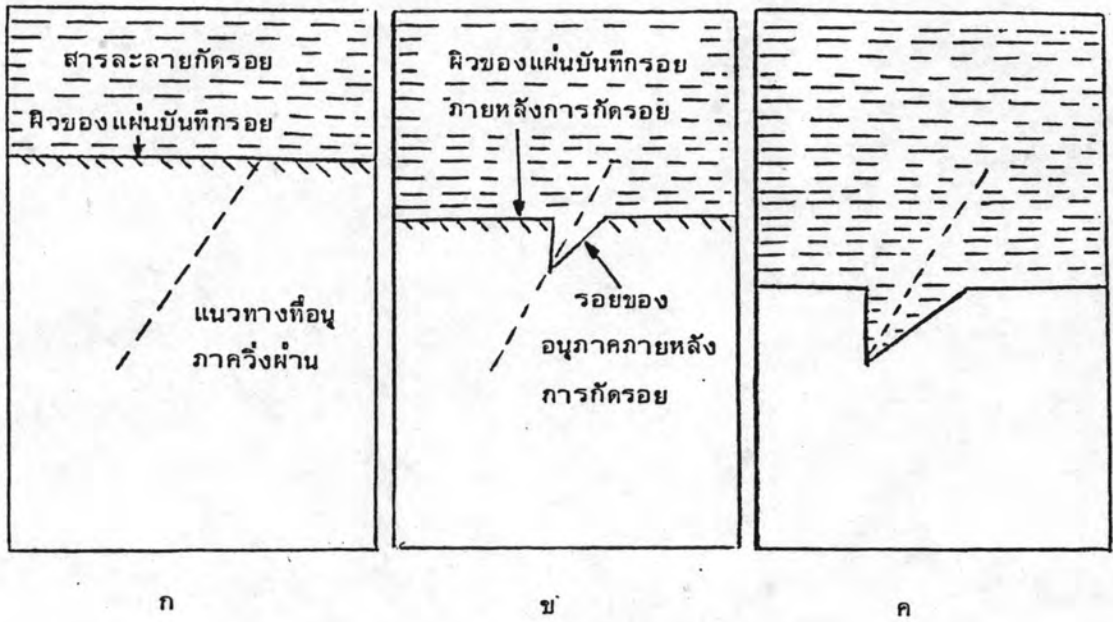


รูปที่ 4.5<sup>(1)</sup> แสดงลักษณะของรอย เมื่อนำไปทำการขยายรอยด้วยการกัดรอย

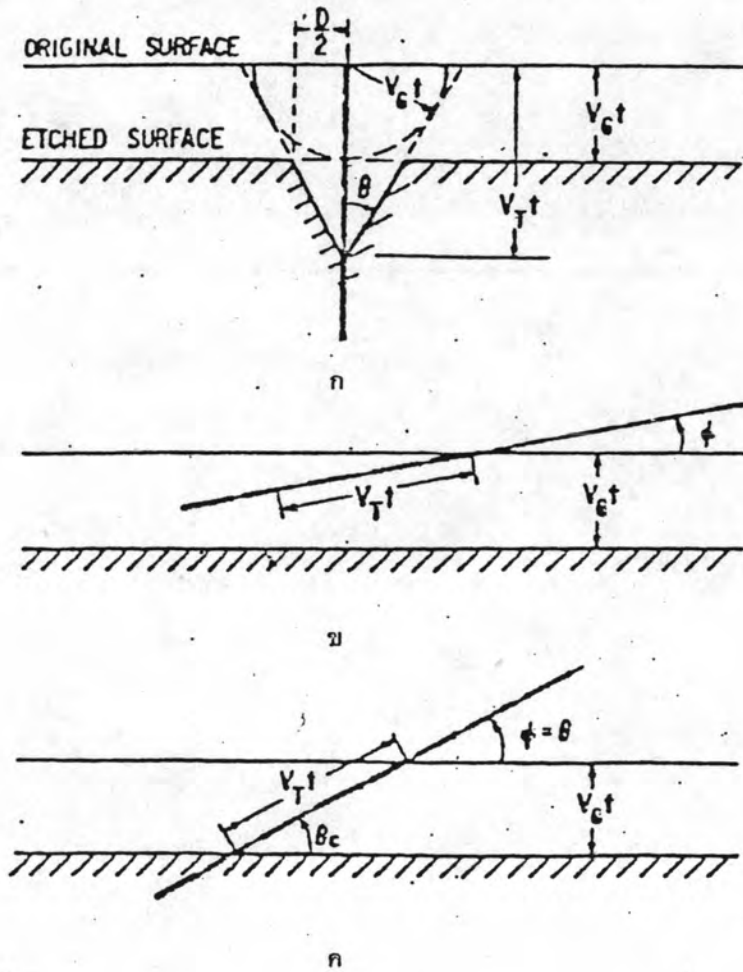
#### 4.4 การกัดรอย (etching)

รอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัตถุตัวกลางมีขนาดเล็กมาก จึงต้องส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งมีราคาสูง จำเป็นต้องขยายรอยให้ใหญ่ขึ้นโดยการกัดรอยด้วยสารละลายเคมีที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย ประมาณ 400-600 เท่า การที่จะได้รอยชัดเจนมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายเคมี ความเข้มข้น อุณหภูมิ เวลาในการกัดรอยและจะปรากฏรอยหรือไม่หลังการกัดรอยขึ้นอยู่กับมุมที่อนุภาคมีประจุทำกับวัตถุตัวกลางนั้น ๆ ดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 ก. แสดงถึงรอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุ เคลื่อนที่ดังฉากกับวัตถุตัวกลาง เมื่อกัดรอยไม่นานนักจะได้ความลึบพันซ์ของ เส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวดังสมการ

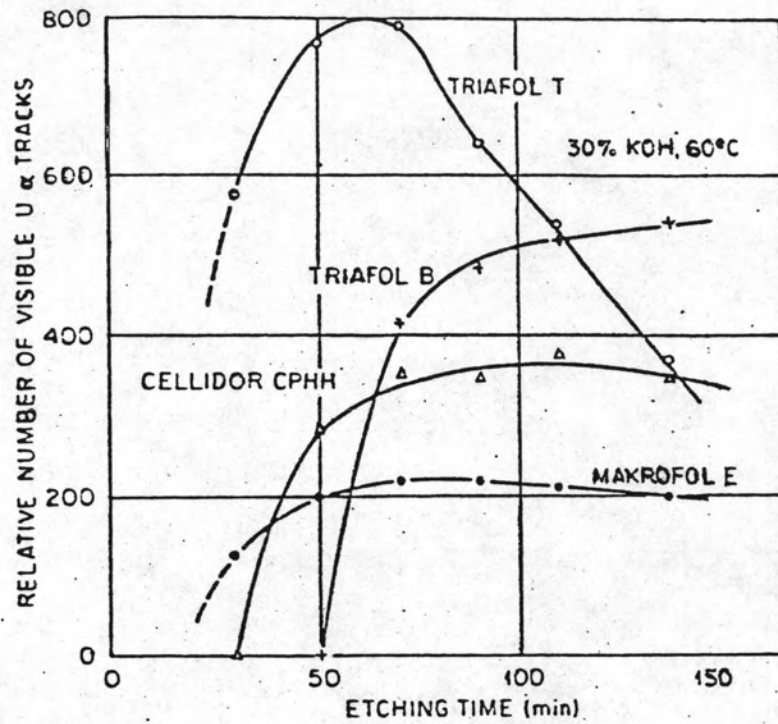


รูปที่ 4.6 (3) แผนภาพแสดงการกัดกร่อนของอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกกร่อน



รูปที่ 4.7 (1. 17)

- 4.7 ก. รูปของรอยจะปรากฏ เมื่อ  $V_T > V_G$  และ  $\phi = 90$
- 4.7 ข. รูปของรอยจะหายไปเมื่อ  $V_T \sin \phi < V_G$
- 4.7 ค. รูปของรอยเริ่มหายไปเมื่อ  $V_T \sin \phi = V_G$



รูปที่ 4.8<sup>(25)</sup> ความสัมพันธ์ของจำนวนรอยสัมผัสของอนุภาคแอลฟาบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยชนิดต่าง ๆ กับเวลาในการกัดรอย โดยใช้สารละลาย KOH 30 % ที่ 60°C

$$L = (V_T - V_G)t \quad (4.1) \quad (1)$$

$$D = 2V_G t \sqrt{(V_T - V_G)(V_T - V_G)} \quad (4.2) \quad (1)$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวมองเห็นได้

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอย

$t$  = เวลาในการกัดรอย

$V_T$  = ความเร็วของการกัดรอยตามแนวอนุภาคมีประจุ

$V_G$  = ความเร็วของการกัดรอยตามบริเวณทั่วไป มีค่าคงที่

ค่า  $V_G < V_T$  และ  $V_T/V_G$  มีค่าคงที่ตลอดเวลาในการกัดและ  $1/D$  จะหายไปเมื่อ  $V_T = V_G$

รูปที่ 4.7 ข. แสดงรอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุวิ่งทำมุม  $\theta$  กับวัตถุตัวกลางและมีค่าของ  $V_T t \sin \theta$  น้อยกว่า  $V_G t$  รอยของอนุภาคมีประจุในกรณีนี้จะหายไป เมื่อผ่านการกัดรอยเบี่ยงเวลา  $t$

รูปที่ 4.7 ค. แสดงถึงค่า  $V_T t \sin \theta = V_G t$  ซึ่งเป็นจุดที่รอยเริ่มหายไป

ในการกัดรอยแผ่นวัสดุบันทึกรายนั้น สิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งของวิธีการแทรก-เอทซ์ ก็คือการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกัดรอยซึ่งจำเป็นต้องทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในตารางที่ 4.3 เป็นตารางที่รวบรวมเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกัดรอยของพืชชั้นแฟรกเมนต์ที่ปรากฏบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยชนิดต่าง ๆ ไว้ สำหรับการกัดรอยของอนุภาคมีประจุชนิดอื่นสามารถใช้เงื่อนไขในตารางนี้เป็นแนวทางในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 4.3<sup>(1)</sup> เงื่อนไขในการกัดรอยของพืชชั้นแฟรกเมนต์

Note: Because of chemical variations within most minerals, glasses, or plastics of a given type, optimum conditions may vary somewhat from those given. Only the preferred etchant is listed.

#### A. ETCHANTS FOR MINERALS

Mineral	Etching Conditions	Reference
allanite [H <sub>2</sub> O·4(Ca,Fe)O·3(Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ]	50N NaOH, 2-60 min, 140°C	Naeser and Dodge (1969)
apatite [Ca <sub>5</sub> (F,Cl)(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]	0.25X HNO <sub>3</sub> , -1 min, 23°C, or olivine etch without oxalic acid	Bhandari et al. (1971b) Lal (unpub.)
aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	same as for calcite	
autunite [Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ·8H <sub>2</sub> O]	10X HCl, 10-30 sec, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
barite (BaSO <sub>4</sub> )	70X HNO <sub>3</sub> , 3 h, 100°C	Fleischer and Price (1964b)
barysilite (Pb <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	glacial acetic acid, 5-70 sec, 23°C	Haack (1973)
bastnäsite (CeFCO <sub>3</sub> )	20X HCl, 20-150 min, 155°C	Fleischer and Naeser (1972)
benitoite (CaTiSi <sub>3</sub> O <sub>9</sub> )	1 ml 40X HF:1 ml 65X HNO <sub>3</sub> , 5 min, 230°C	Haack (1973)
beryl (Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )	19N KOH, 9 h, 150°C	Fleischer and Price (1964b)
bismutite (Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O)	1g NaOH:1g H <sub>2</sub> O, 50 min, 140°C	Fleischer, Price and Woods (u.)
brevsterite [(Sr,Ba,Ca)O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O]	2 ml 48X HF:1 ml 95X H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 4 ml H <sub>2</sub> O, 3 sec, 230°C	Haack (1973)

## ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Mineral	Etching Conditions	Reference
calcite ( $\text{CaCO}_3$ )	olivine etch with NaOH added for pH 12, 30 min, 23°C	Lal (unpub.)
celsian ( $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	19N NaOH, 20 min, boiling	Haack (1973)
cerussite ( $\text{PbCO}_3$ )	glacial acetic acid, 10-30 min, 23°C	Fleischer et al. (1965a)
chlorite [(Mg,Fe) $_3$ (Al,Fe) $_2$ Si $_3$ O $_{10}$ (OH) $_8$ ]	48% HF, 10 min, 23°C	Debeauvais et al. (1964)
clinopyroxene [augite, $\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$ ]	2 ml 48% HF: 1 ml 80% $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 4 ml $\text{H}_2\text{O}$ , 5-20 min, 23°C	Crozaz et al. (1970)
clinopyroxene [diopside, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ]	3 g NaOH: 2 g $\text{H}_2\text{O}$ , 90 min, boiling	Lal et al. (1968)
clinopyroxene [pigeonite, $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ ] $_x$ · $(\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2)_{1-x}$ ]	3 g NaOH: 2 g $\text{H}_2\text{O}$ , 80 min, boiling	Lal et al. (1968)
cryolite ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ )	3 g NaOH: 2 g $\text{H}_2\text{O}$ , 80 min, boiling	Lal et al. (1968)
epidote [ $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$ ]	50% HI, 3 min, 23°C	Haack (1973)
eulytite [ $\text{Ba}_4(\text{SiO}_4)_3$ ]	50% NaOH, 0.5-2 h, 140°C	Naeser and Dodge (1969)
feldspar [albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	5% HCl, 60 sec, 23°C	Fleischer, Price and Woods (unpub.)
feldspar [anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ]	33% $\text{HNO}_3$ , 15 min, 23°C	Haack (1973)
feldspar [bytownite, $\text{An}_8\text{Ab}_2$ ]	3 g NaOH: 4 g $\text{H}_2\text{O}$ , 85 min, boiling	Lal et al. (1968)
feldspar [labradorite, $\text{An}_6\text{Ab}_4$ ]	3 g NaOH: 4 g $\text{H}_2\text{O}$ , 14 min, boiling	Lal et al. (1968)
feldspar [microcline; orthoclase, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ]	3 g NaOH: 4 g $\text{H}_2\text{O}$ , 19 min, boiling	Lal et al. (1968)
feldspar [oligoclase, $\text{An}_2\text{Ab}_8$ ]	3 g NaOH: 4 g $\text{H}_2\text{O}$ , 40 min, boiling	Lal et al. (1963)
fluorite ( $\text{CaF}_2$ )	5 g KOH: 1 g $\text{H}_2\text{O}$ , 80 min, 190°C	Fleischer, Price and Woods (unpub.)
garnet [pyrope, $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ]	3 g NaOH: 4 g $\text{H}_2\text{O}$ , 75 min, boiling	Lal et al. (1968)
garnet [almandine-pyrope, $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mg}_x)_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ]	98% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 10 min, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
garnet [spessartine, $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ]	50% NaOH, 0.5-2 hr, 140°C	Naeser and Dodge (1969)
garnet [andradite-grossular; $\text{Ca}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_2(\text{SiO}_4)_3$ ]	5 to 30 min 50% NaOH, boiling	Haack and Gramse (1972)
gillespite ( $\text{FeO} \cdot \text{BaO} \cdot 4\text{SiO}_2$ )	10 min, 50% NaOH, boiling	Haack and Gramse (1972)
glass (see separate list of etchants for glasses)	1 to 6 h, 75% NaOH, boiling	Haack (1973)
gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	19 N NaOH, 12 min, boiling	Haack (1973)
halite ( $\text{NaCl}$ )	5% HF, 5-10 sec, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
harmotome [ $\text{Ba}_5(\text{NaK})\text{Al}_{11}\text{Si}_{29}\text{O}_{80} \cdot 25\text{H}_2\text{O}$ ]	1 g/l $\text{HgCl}_2$ in ethanol, 30 sec, 23°C	Komarov (unpub.)
hardystonite ( $\text{Ca}_{1.99}\text{Pb}_{0.01}\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ )	2.4% HF, 30 sec, 23°C	Haack (1973)
heulandite [a zeolite, $(\text{Ca,Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ]	1 g NaOH: 1 g $\text{H}_2\text{O}$ , 20-70 min, 140°C	Price et al. (1970b)
huebnerite ( $\text{MnWO}_4$ )	10 ml aqua regia: 1 ml 48% HF, 30 sec, 23°C	Fleischer (unpub.)
kleinite ( $\text{Hg}_2\text{N}(\text{Cl,SO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )	5 g $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 5 g $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ : 5 ml $\text{H}_3\text{PO}_4$ : 20 ml $\text{H}_2\text{O}$ , 110 min, boiling	Haack (1973)
leuchtenbergite (low-iron clinocllore)	37% HCl, 7 min 23°C	Fleischer, Price and Woods (unpub.)
lithium fluoride (LiF)	49% HF, 10 min, 23°C	Debeauvais et al. (1964)
margarite [ $\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ]	$\text{H}_2\text{O}$ + .13 gm/liter LiF + 0.5 ppm Fe, -1 min, 23°C	Johnston (unpub.)
mica [biotite, $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ]	48% HF, 2 min, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
mica [lepidolite; zinnwaldite, $\text{K}_2\text{Li}_3\text{Al}_4\text{Si}_7\text{O}_{21}(\text{OH,F})_3$ ]	20% HF, 1-2 min, 23°C	Price and Walker (1962a)
	48% HF, 3-70 sec, 23°C	Fleischer and Price (1964b)

## ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Mineral	Etching Conditions	Reference
mica [muscovite, $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ ]	48X HF, 10-40 min, 23°C	Price and Walker (1962a)
mica (phlogopite; lepidomelane, $KMg_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$ ]	48X HF, 1-5 min, 23°C	Price and Walker (1962a)
microlite ( $Ca_2Ta_2O_7$ )	1 ml 48X HF; 1 ml 65X $HNO_3$ , 6 min, 23°C	Haack (1973)
minetita [ $Pb_3Cl(AsO_4)_3$ ]	33X $HNO_3$ , 3 sec, 23°C (10 $\bar{1}0$ planes)	Haack (1973)
monazite [(Ce,La,Th)( $PO_4$ , $SiO_4$ )]	98X $H_2SO_4$ , 6-8 min; 23°C †	Muralli and Rajan (unpub.)
mullite ( $Al_6Si_2O_{13}$ )	25N NaOH, 100°C, 4-5 h	Fleischer (unpub.)
nasonite [ $Pb_4(PbOH)_2Ca_4(Si_2O_7)_3$ ]	1 g NaOH: 1 g $H_2O$ , 10 min, 137°C	Fleischer, Price and Woods (unpub.)
nickel chloride; nickel bromide ( $NiCl_2$ , $NiBr_2$ )	air (40% humidity), 10 min, 20°C (submicroscopic)	Caspar (1964)
olivine [(Mg,Fe) $_2SiO_4$ ]	1 ml $H_3PO_4$ : 1 g oxalic acid: 40 g EDTA: 100 ml $H_2O$ : -4.5 g NaOH <sup>a</sup> , 2-3 h, 125°C (or 6 h, 95°C)	Krishnaswami et al. (1971)
orpiment ( $As_2S_3$ )	0.25N NaOH, 10-15 min, 23°C	Perelygin and Otgonsuren (unpub.)
orthopyroxene [bronzite, $Mg_{1-f}Fe_fSiO_3$ , (.1<f<.2)]	3 g NaOH: 2 g $H_2O$ , 40 min, boiling	Lal et al. (1968)
orthopyroxene [enstatite, $MgSiO_3$ ]	3 g NaOH: 2 g $H_2O$ , 35 min, boiling	Lal et al. (1968)
orthopyroxene [ferrohypersthene, $Mg_{1-f}Fe_fSiO_3$ , f>.5]	3 g NaOH: 2 g $H_2O$ , 70 min, boiling	Lal et al. (1968)
orthopyroxene [hypersthene, $Mg_{1-f}Fe_fSiO_3$ , (.2<f<.5)]	3 g NaOH: 2 g $H_2O$ , 42 min, boiling	Lal et al. (1968)
pennine (a chlorite)	48X HF, 5 min, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
pollucite ( $H_2O \cdot 2Ca_2O \cdot 2Al_2O_3 \cdot 9SiO_2$ )	5-8X HF, 55 sec, 23°C	Haack (1973)
pucherite ( $BiVO_4$ )	5X HCl, 90 sec, 23°C	Fleischer, Price and Woods (unpub.)
pyromorphite ( $Pb_5Cl(PO_4)_3$ )	33X $HNO_3$ , 5 sec, 23°C, (on 10 $\bar{1}0$ planes)	Haack (1973)
quartz ( $SiO_2$ )	KOH(aq), 3 h, 150°C, or 48X HF, 24 h, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
raspite ( $PbWO_4$ )	6.25N NaOH, 4 min, 23°C	Fleischer, Price, and Woods (unpub.)
sanbornite ( $BaSi_2O_5$ )	19N NaOH, 60 min, boiling	Haack (1973)
scheelite ( $CaWO_4$ )	6.25N NaOH, 90 min, 95°C	Fleischer, Price, and Woods (unpub.)
sphene ( $CaTiSiO_5$ )	conc HCl, 0.5-1.5 h, 90°C 6N NaOH, 20-30 min, 130°C	Naesser and Faul (1969) Calk and Naesser (1973)
spodumene ( $LiAlSi_2O_6$ )	48X HF, 24 h, 23°C	Fleischer and Price (1964b)
stilbite [(Ca,Na <sub>2</sub> )O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, a zeolite]	1X HF, 60 sec, 23°C	Fleischer (unpub.)
stibiotantalite [(SbO) <sub>2</sub> (Ta,Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	1 ml 48X HF: 1 ml 65X $HNO_3$ , 6 min, 23°C	Haack (1970)
talc [ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ]	48X HF, 15 min, 23°C	Walker (1963)
thorite ( $ThSiO_4$ )	$H_3PO_4$ , 1 min, 250°C	Fleischer et al. (1965a; 1966b)
torbernite [ $Cu(UO_2)_2F_2O_8 \cdot 12H_2O$ ]	10X HCl, 10 min, 23°C	Fleischer et al. (1965a)
tridymite ( $SiO_2$ )	10X HF, 1 h, 23°C	Fleischer et al. (1965a)
topaz [ $Al_2SiO_4(F,OH)_2$ ]	KOH(aq), 100 min, 150°C	Fleischer and Price (1964b)
tourmaline (complex silicate)	KOH(aq), 20 min, 220°C	Fleischer and Price (1964b)
vanadinite [ $Pb_3Cl(VO_4)_3$ ]	33X $HNO_3$ ; 1 sec, 23°C	Haack (1973)
vermiculite (biotite-derived)	48X HF, 5-10 sec, 23°C	Fleischer and Hart (unpub.)
whitlockite [ $Ca_3(PO_4)_2$ ]	0.25X $HNO_3$ , 10 sec to 2 min, 23°C, or olivine etch without oxalic acid	Fleischer et al. (1965a) Lal (unpub.)

## ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Mineral	Etching Conditions	Reference
willemitte ( $Zn_2SiO_4$ )	33X $HNO_3$ , 10 sec, 23°C	Haack (1973)
zircon ( $ZrSiO_4$ )	$H_3PO_4$ , few sec, 375-500°C, or $NaOH(aq)$ , .25 to 5 h, 220°C, or 2 ml 48X HF: 1 ml 80X $H_2SO_4$ at 180°C in a pressure bomb	Fleischer et al. (1964a) Naeser (1969) Krishnaswami et al. (1973)

\*to adjust pH to 8.0; † shallow pits

## B. ETCHANTS FOR GLASSES

Type	Etching Conditions (at 23°C if not otherwise noted)	Reference
alumino-silicate (Corning 1720)	5.7X HF, 6 min	Fleischer and Hart (1972c)
andesitic glass ( $Ab_{60}An_{40}$ )	5X HF, 3-5 min 29X $HBF_4$ : 5X $HNO_3$ : 0.5X acetic acid, 50 min	Fleischer et al. (1969a) MacDougall (1971)
basaltic glass	20X HF, 1 min 25X $HBF_4$ : 5X $HNO_3$ : 0.5X acetic acid, 10 min	Fleischer et al. (1968b) MacDougall (1971)
borate glass	$H_2O$ , 1 min	Fleischer and Price (1963b)
flint (lead-silicate) glass	5.7X HF, 3 min	Fleischer et al. (1971a)
germania glass ( $GeO_2$ )	48X HF, 6 sec	Fleischer (unpub.)
lead phosphate glass	1 ml 70X $HNO_3$ : 3 ml $H_2O$ , 2-20 min	Lal (unpub.)
obsidian	48X HF, 30 sec	Fleischer and Price (1964c)
phosphate glass	48X HF, 5-20 min	Fleischer and Price (1963b)
pumice	5X HF, 500 sec	Fleischer et al. (1965e)
silica glass (fused quartz; Vycor; Libyan Desert Glass)	48X HF, 1 min	Fleischer and Price (1963b)
soda-lime (microscope slide; cover slip; window glass)	48X HF, 5 sec (better: 5X HF, 2 min) 24X $HBF_4$ : 5X $HNO_3$ : 0.5X acetic acid, 1 h	Fleischer and Price (1963b) MacDougall (1971)
tektite	48X HF, 30 sec 24X $HBF_4$ : 5X $HNO_3$ : 0.5X acetic acid, 90 min	Fleischer and Price (1964a) MacDougall (1971)
uranium-soda glass	48X HF, 5 sec	Brill et al. (1964)
uranium phosphate glass	50X HF, 30 min	Hart (unpub.)
$V_2O_5 \cdot (P_2O_5)_5$ (semiconducting)	48X HF, 10 sec	Fleischer et al. (1965d)

## C. ETCHANTS FOR PLASTICS

Plastic (Trade Names)	Etching Conditions	Reference
amber	30 g $K_2Cr_2O_7$ : 50 ml conc. $H_2SO_4$ , 40 h, 28°C	Uzgiris and Fleischer (1971)
cellulose acetate (Kodacel; Triafol T; Cellit)†	1 ml 15X $NaClO$ : 2 ml 6.25N $NaOH$ , 1 h, 40°C 25 g $NaOH$ : 20 g $KOH$ : 4.5 g $KMnO_4$ : 90 g $H_2O$ , 2-30 min, 50°C	Price et al. (1971) Somogyi et al. (1968)
cellulose acetate butyrate†	6.25N $NaOH$ , 12 min, 70°C	Fleischer et al. (1965d)
cellulose nitrate (Diacell; Nixon-Baldwin)†	6.25N $NaOH$ , 2-4 h, 23°C	Fleischer et al. (1965b)

## ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Plastic (Trade Names)	Etching Conditions	Reference
cellulose propionate (Cellidor)	28% KOH, 100 min, 60°C	Becker (1969)
cellulose triacetate (Kodacel TA401, unplasticized; Bayer TN)†	1 ml 15% NaClO: 2 ml 6.25N NaOH, 1 h, 40°C	Price et al. (1970a)
dimethyl siloxane (crosslinked)	25N NaOH, 3 min, 115°C	Fleischer and Bergeron (unpub.)
formophenol (ambrolithe, phenoplaste)	6N NaOH, 1 h, 40°C; 48% HF, 30 sec, 40°C, in sequence	Monnin et al. (1966)
HBpaIT (polyester, C <sub>17</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> )	6.25N NaOH, 8 min, 70°C	Fleischer et al. (1965a)
ionomeric polyethylene (Surlyn)†	10 g K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> : 35 ml 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1 h 50°C	Besson et al. (1967)
polyamide (H-Film)	KMnO <sub>4</sub> (25% aq), 1.5 h, 100°C	Besson et al. (1967)
polyimide	6N NaOH solution	Fleischer (unpub.)
poly 1-4 butylene terephthalate	KMnO <sub>4</sub> in H <sub>2</sub> O	Monnin and Isabelle (1970)
polycarbonate (Lexan; Makrofol; Merlon; Kimfol)†	1 ml 6.25N NaOH: 1 ml ethanol, 24 h, 23°C	Fleischer (unpub.)
polyethylene	6.25N NaOH, 20 min, 50°C 6.25N NaOH + 0.4% Benax*, 20 min, 70°C	Fleischer and Price (1963a) Price et al. (1968a)
polyethylene terephthalate (Mylar; Chronar; Melinex; Terphane)	10 g K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> : 35 ml 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 30 min, 85°C	Monnin et al. (1967)
polymethyl methacrylate (Plexiglas; Lucite)†	6.25N NaOH, 10 min, 70°C KMnO <sub>4</sub> (25% aq), 1 h, 55°C	Fleischer and Price (1963a) Monnin et al. (1967)
polyoxymethylene (Delrin)	sat. KMnO <sub>4</sub> , 8 min, 85°C	Monnin et al. (1966)
polyphenoxide	5% KMnO <sub>4</sub> , 10 h, 60°C	Monnin et al. (1966)
polyphenylene oxide (PPO)	KMnO <sub>4</sub> (25% aq), 4 min, 100°C	Besson et al. (1967)
polypropylene (Cryovac-Y)†	KMnO <sub>4</sub> aq., sat., 24 h, 93°C	Fleischer (unpub.)
polystyrene	35 ml 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 10 g Cr <sub>2</sub> K <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , 5 min, 94°C	Besson et al. (1967)
polyvinyl acetate (Formvar)	sat. KMnO <sub>4</sub> , 2.5 h, 85°C	Monnin et al. (1966)
polyvinylaceto-chloride	10 g K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> : 35 ml, 30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 3 h, 85°C	Monnin et al. (1967)
polyvinylchloride	6.25N NaOH, 200 h, 23°C	Fleischer (unpub.)
polyvinylidene chloride (Saran)	KMnO <sub>4</sub> (25% aq.) 30 min, 100°C	Besson et al. (1967)
polyvinyl toluene	sat. KMnO <sub>4</sub> ; 2.5 h, 85°C	Monnin et al. (1966)
silicone-polycarbonate copolymer	KMnO <sub>4</sub> (25% aq.), 2 h, 55°C	Besson et al. (1967)
siloxane-cellulose copolymer	KMnO <sub>4</sub> , sat., aq., 30 min, 100°C	Fleischer and Price (unpub.)
	6.25N NaOH 20 min, 50°C	Fleischer et al. (1972b)
	8N NaOH + -0.1% Dowfax, 3 h, 85°C	Fleischer, Viertl and Holub (unpub.)

\*Dow surfactant 2A1, Dowfax, Dow Corning; presaturated with etch products (Peterson, 1970).

†Tracks of low-energy alpha particles can be revealed by etching this plastic.





#### 4.5 การนับรอย

การนับรอย เป็นการประเมินผล เพื่อดูความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึก รอย วิธีที่ใช้ทั่วไปก็คือการนับจำนวนรอยอนุภาคที่มีอยู่บนแผ่นวัสดุบันทึก รอย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมักจะนับในพื้นที่คงที่หนึ่ง ๆ และยังมีการพัฒนาวิธีการให้รวดเร็วขึ้นโดยใช้ สปราร์คเคาน์เตอร์

#### 4.6 การลบเลือนของรอยอนุภาค (Track Fading)

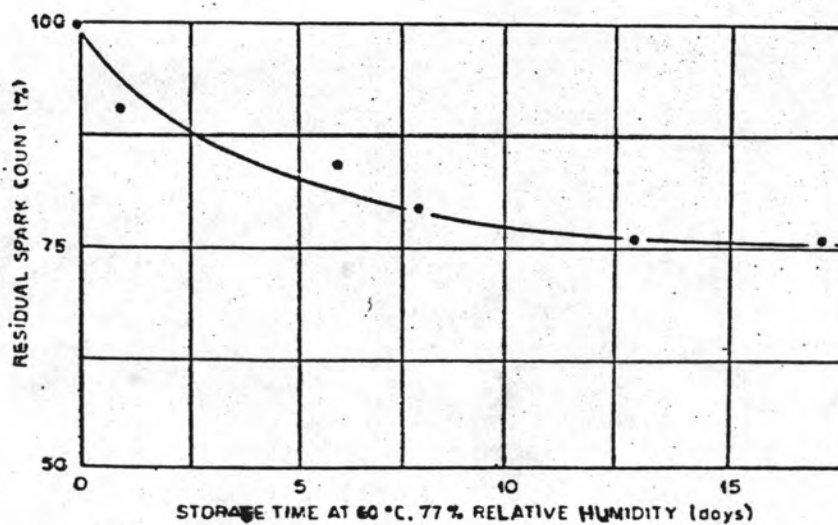
รอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึก รอยสามารถลบเลือนได้ ถ้าหากไม่นำไปกักขยาย รอย อนุภาคทันที ทั้งนี้ก็เนื่องจากอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่ใช้เก็บแผ่นวัสดุบันทึก รอยได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ เป็นต้น อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมดังกล่าวจะไปทำให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคได้ จากการศึกษาพบว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นเหตุให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึก รอย ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องหรือเป็นสาเหตุให้เกิด การลบเลือนของรอยอนุภาคที่สำคัญ ๆ มีดังนี้

4.6.1 ชนิดของแผ่นวัสดุบันทึก รอย แผ่นวัสดุบันทึก รอยบางชนิดจะมีอัตราการลบ เลือนของรอยอนุภาคที่ อุณหภูมิสูง บางชนิดก็มีอัตราการลบเลือนของรอยอนุภาคสูง ในบริเวณ ที่มีความชื้น แต่บางชนิดจะเกิดการลบเลือนได้จะต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก เช่น แผ่นวัสดุบันทึก รอย หวก  $\text{SiO}_2$  สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1000 องศาเซลเซียสจึงจะเริ่มเกิดการลบเลือนของรอย อนุภาคดังกล่าวอย่างที่แสดงในตารางที่ 4.4

4.6.2 เวลา ถ้าหากนำเอาแผ่นวัสดุบันทึก รอยที่อาบรังสีแล้วไปเก็บไว้เป็นระยะ เวลานานจะทำให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึก รอยได้ จากการทดลองนำเอา แผ่นวัสดุบันทึก รอยโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate) หนา 10 ไมครอนที่บันทึก รอยฟิชชันแฟรก เมนต์ (fission fragment) ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 77 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะ เวลาต่าง ๆ กัน แล้วจึงนำไปกักรอยฟิชชันแฟรกเมนต์พบว่า เกิดการลบ เลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4<sup>(1)</sup> แสดงผลของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการลบ เลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุ  
บันทึกรอยแต่ละชนิด

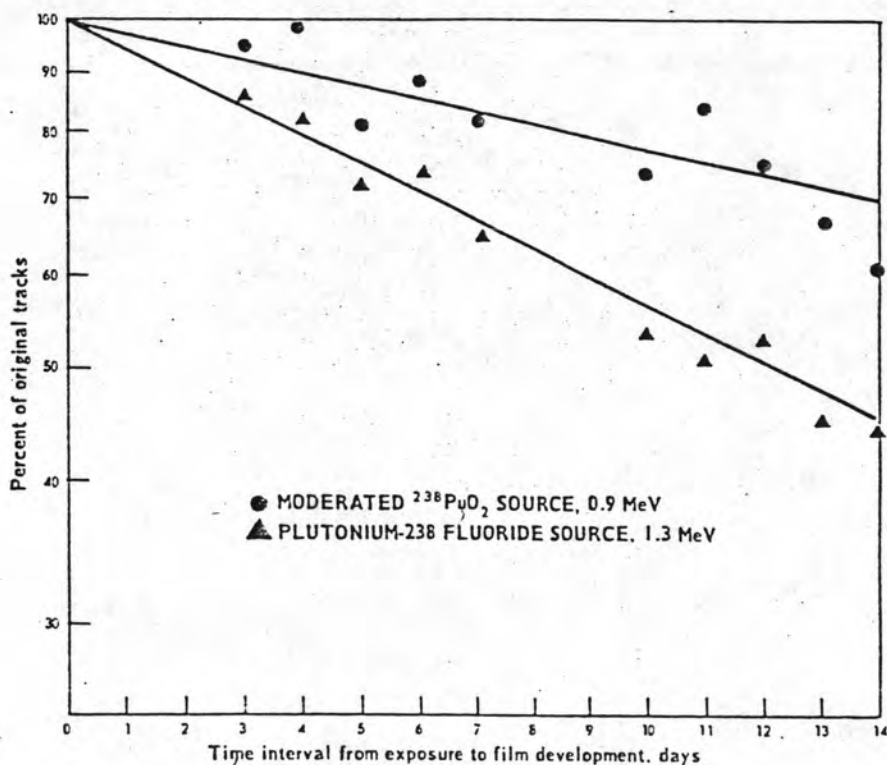
Material	1-hour annealing temperature (°C)		
	Total fading	50% track loss	Start of track loss
Apatite	530	-	400
Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	150	-	130
Cellulose acetate (Cellit-T)	165	160	100
Cellulose nitrate	147	140	110
Feldspar (Anorthite)	680	550	350
Feldspar (Bytownite)	790	750	690
Glass (Borosilicate, Pyrex)	350	302	-
Glass (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . 5P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	-	95	-
Mica (Muscovite)	540	510	450
Polycarbonate	165	-	-
Pyroxent (Diopside)	880	850	820
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	1050	-	1000



รูปที่ 4.9<sup>(25)</sup> แสดงการลบ เลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์บน kimfol foil ที่ขึ้นอยู่กับเวลา

## 4.6.3 พลังงานของอนุภาค

พลังงานของอนุภาคจะมีผลทำให้เกิดการลบเลือนไม่เท่ากัน เนื่องจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงจะทำให้เกิดรอยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารอยอนุภาคที่เกิดจากอนุภาคพลังงานต่ำ ดังนั้น รอยอนุภาคที่เกิดจากอนุภาคพลังงานสูงจึงมีโอกาสลบเลือนได้มากกว่า รอยอนุภาคที่เกิดจากอนุภาคพลังงานต่ำ เนื่องจากว่ามีขนาดเล็กกว่า Kahle, Arnett และ Meyer ได้ร่วมกันทดลองศึกษาผลของพลังงานของอนุภาคต่อการลบเลือนของรอยอนุภาคบนฟิล์ม Kodak NTA ในปี ค.ศ. 1969 ที่ Mound Laboratory โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอน 2 ชนิด ที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยนำฟิล์มแผ่นแรกไปอบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน พลูโทเนียม-238 ฟลูออไรด์ ซึ่งให้อนุภาคนิวตรอน  $1.43 \times 10^7$  นิวตรอนต่อวินาที พลังงานเฉลี่ย 1.3 MeV ส่วนฟิล์มแผ่นที่สองนำไปอบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{238}\text{PuO}_2$  ที่ใช้โพสิเทอริสสั่นท่วงนิวตรอนให้มีพลังงานลดลง โดยต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{238}\text{PuO}_2$  จะให้อนุภาคนิวตรอน  $1.32 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาที พลังงานเฉลี่ย 0.9 MeV เมื่อนำฟิล์ม Kodak NTA ไปเก็บไว้ที่เวลาต่าง ๆ กัน แล้วจึงนำไปกักรอยจะได้ผลการทดลอง ดังกราฟในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10<sup>(26)</sup> แสดงการลบเลือนของรอยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่างกัน โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน เปอร์ เซ็นต์ของรอยอนุภาคกับ เวลา

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า บนฟิล์มแผ่นที่อาบรังสีนิวตรอนพลังงานสูง จะมีอัตราการลบเลือนของรอยอนุภาคนิวตรอนสูงกว่ารอยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำกว่าบนฟิล์มอีกแผ่นหนึ่ง

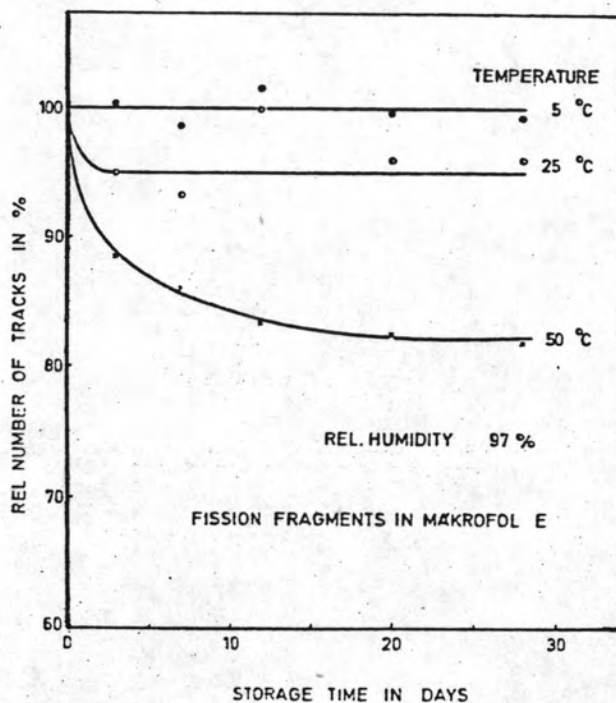
#### 4.6.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการเก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอย ก่อนการกัดรอย จะส่งผลให้เห็นได้ชัด เจนที่สุดในบรรดาปัจจัยที่มีต่อการลบเลือนของรอยอนุภาค เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย เกิดการลบเลือนมากยิ่งขึ้น

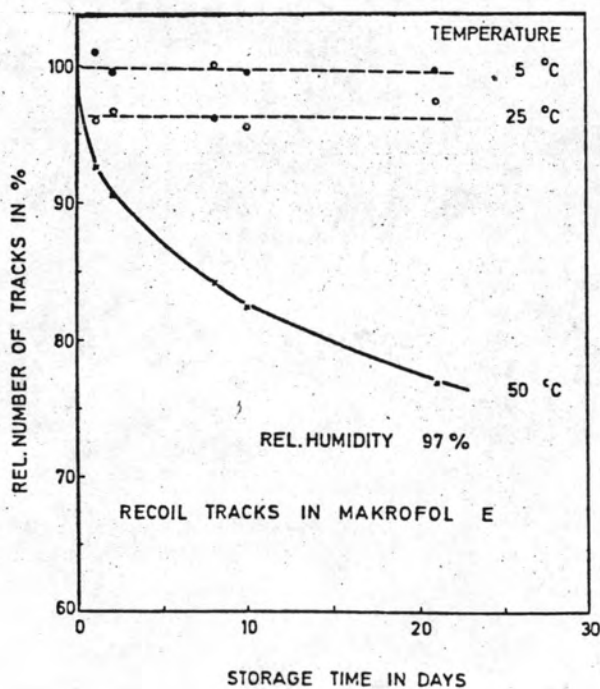
ในปี ค.ศ. 1974 Piesh และ Sayed ได้ทดลองศึกษาการลบเลือนของรอยอนุภาคเนื่องจากอุณหภูมิบนฟิล์ม Makrofol E และ Kodak NTA ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.6.4.1 และ 4.6.4.2

4.6.4.1 การทดลองหาการลบเลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์จากทอเรียมบน Makrofol E ความหนา 300 ไมครอนและการลบเลือนของรอยรีคอยล์ (recoil track) บน Makrofol E เพื่อผลของอุณหภูมิเมื่อกำหนดให้ความชื้นคงที่ โดยเก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอยดังกล่าวไว้ที่เวลาต่าง ๆ ณ ระดับอุณหภูมิหนึ่ง ๆ แล้วจึงนำไปกัดรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์ในสารละลาย KOH 35 % ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 80 นาที ส่วนแผ่นที่บันทึกรอยรีคอยล์นำไปกัดรอยในสารละลาย KOH 35 % ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

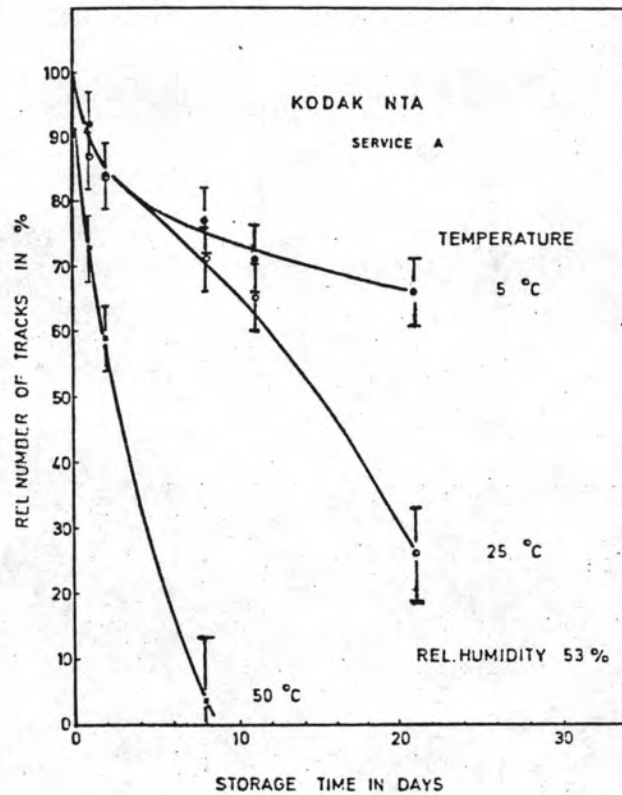
4.6.4.2 การลบเลือนของรอยอนุภาคนิวตรอนบนฟิล์ม Kodak NTA จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีอัตราการลบเลือนของรอยอนุภาคนิวตรอนมากขึ้น เมื่อกำหนดให้ความชื้นคงที่ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 (27) แสดงการลดเลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์กับระยะเวลาที่เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะพบว่า เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น จะมีอัตราการลดเลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์มากขึ้น



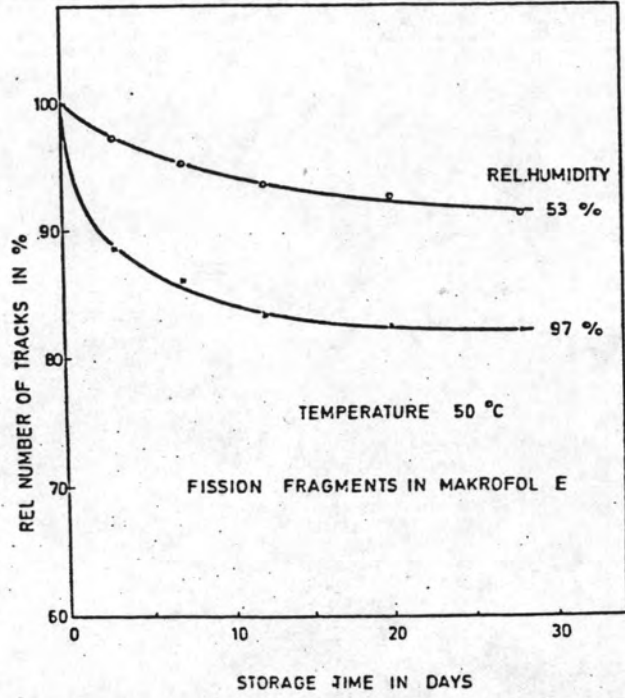
รูปที่ 4.12 (27) แสดงการลดเลือนของรอยรีคอยล์กับระยะเวลาที่เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีอัตราการลดเลือนของรอยรีคอยล์มากขึ้น



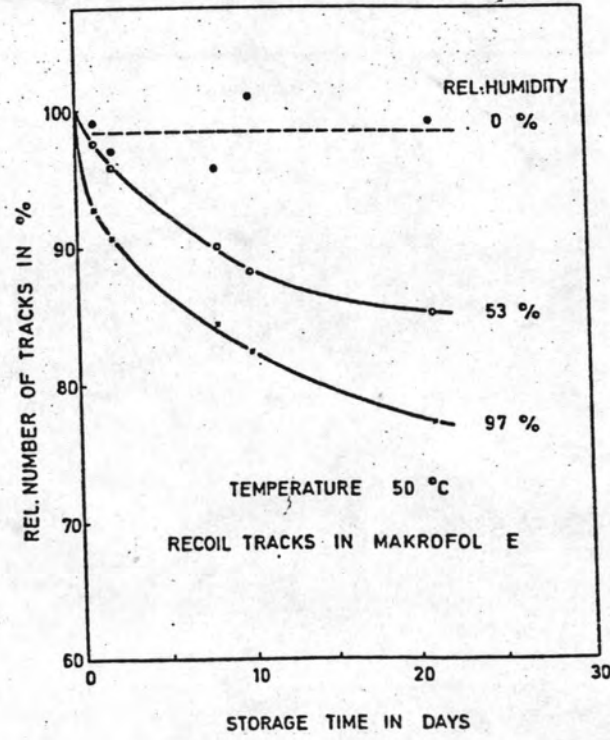
รูปที่ 4.13<sup>(30)</sup> แสดงการลบเลือนของรอยอนุภาคนิวตรอนที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 53 %

#### 4.6.5 ความชื้น

ความชื้นก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย ในปี ค.ศ. 1974 Piesch และ Sayed ได้ศึกษาการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย เนื่องจากความชื้นโดยศึกษาผลของการลบเลือนของรอยฟิชชันแฟรกเมนต์กับรอยรีคอยล์บนฟิล์ม Makrofol E หนา 300 ไมครอน โดยนำแผ่นวัสดุบันทึกรอยดังกล่าวไปเก็บไว้ที่ระยะเวลาต่างๆที่ความชื้นระดับหนึ่ง ๆ แล้วจึงนำไปกัดรอยสำหรับรอยฟิชชันแฟรกเมนต์บน Makrofol นำไปกัดรอยในสารละลาย KOH 35 % ที่ 60°C เป็นเวลา 80 นาที ส่วนรอยรีคอยล์บน Makrofol นำไปกัดรอยในสารละลาย KOH 35 % ที่ 60°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่ารอยอนุภาคจะลบเลือนมากขึ้นเมื่อระดับความชื้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 (27) แสดงการลบ เลือนของรอยฟิชชันแฟรก เมนต์กับระยะเวลาที่เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอย เมื่อนำแผ่นวัสดุบันทึกรอยไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ 50<sup>o</sup>C ณ ระดับความชื้นต่าง ๆ จะพบว่า เมื่อระดับความชื้นสูงขึ้นจะมีอัตราการลบ เลือนของรอยฟิชชันแฟรก เมนต์ มากขึ้น



รูปที่ 4.15 (27) แสดงการลบ เลือนของรอยรีคอยล์กับระยะเวลาที่เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอย เมื่อนำแผ่นวัสดุบันทึกรอย ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ 50<sup>o</sup>C ณ ระดับความ ชื้นต่าง ๆ จะพบว่า เมื่อระดับความชื้นสูงขึ้นจะมีอัตราการลบ เลือนของรอย รีคอยล์มากขึ้น

#### 4.6.6 ผลของเวลา อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

ในปี ค.ศ. 1964 ฟลีสเชอร์ และ ไพรส์ ได้ทดลองหาเวลา  $t$  ของการเกิดการลบเลือน โดยใช้อุณหภูมิในการ เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอยต่างๆ กัน จะได้ค่า  $t$  มีความสัมพันธ์กับ  $T$  ดังสมการที่ 4.3

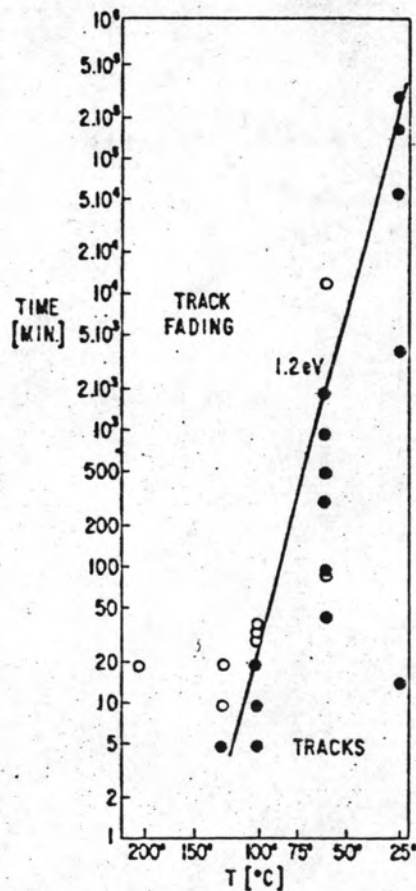
$$t = A \exp (U/kT) \quad (4.3)^{(1)}$$

เมื่อ  $U$  คือพลังงานของอนุภาค

$T$  คืออุณหภูมิที่ใช้เก็บแผ่นวัสดุบันทึกรอย (annealing time)

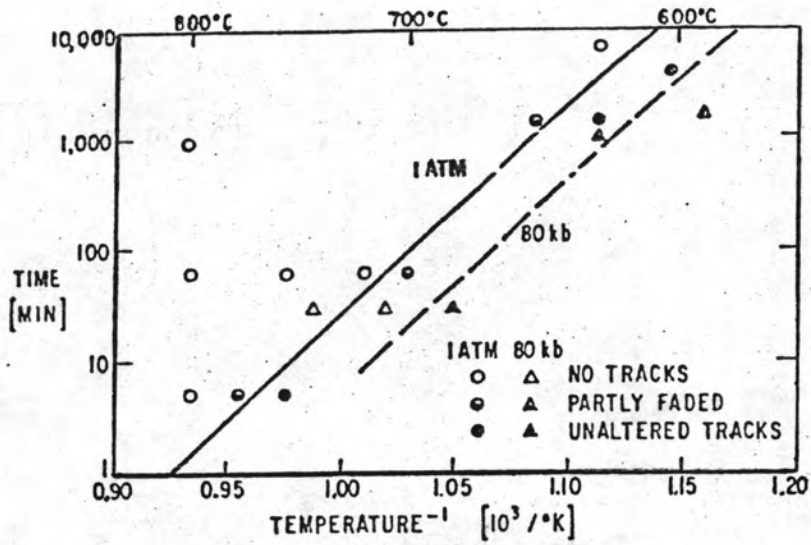
$A$  คือค่าคงที่

$k$  คือค่าคงที่โบลทซ์มานน์ (Boltzmann)



รูปที่ 4.16 <sup>(1,32)</sup> แสดงการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นแก้ว  $V_2O_5 \cdot PO_5$  จะเห็นว่า annealing time จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ  $T$  o แสดงรอยอนุภาคลบเลือน ● แสดงรอยอนุภาคปรากฏ





รูปที่ 4.17<sup>(32)</sup> แสดงการเปลี่ยนแปลงของรอยอนุภาคบนแผ่น เซอร์คอนซึ่งในการทดลองนี้ได้ กำหนดเงื่อนไขของเวลา อุณหภูมิและความดันเข้าไปในการสังเกตพฤติกรรมต่าง ๆ ด้วย

จากรูปที่ 4.17 เมื่อกำหนดให้เวลา  $t$  มีหน่วยเป็นปี เราจะหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของรอยอนุภาคบนแผ่นเซอร์คอน (zircon,  $ZrSiO_4$ ) ได้ดังสมการ

$$t = 8.5 \times 10^{-24} \exp(3.6/kT) \quad (4.4)^{(32)}$$

เมื่อ  $kT$  มีหน่วยเป็น eV

จะพบว่า เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกที่รอยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งแผ่นวัสดุบันทึกที่รอยแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 4.5<sup>(32)</sup> การลบเลือนของรอยอนุภาคเนื่องจากอุณหภูมิ

Materials	Track fading temp. (1 hr heating time) ( $\pm 25^\circ \text{C}$ )	Time before track fading (years) [ $kT$ in units of eV]	Valid temp. range ( $^\circ \text{C}$ )	Extrapolated temp. for a life of $4.5 \cdot 10^9$ years ( $^\circ \text{K}$ )	Extrapolated life at $300^\circ \text{K}$ (years)
<b>1. Crystals</b>					
Apatite	450° C				
Autunite	50° C				
Bytownite	775° C				
Calcite (36)	350° C	$1.4 \cdot 10^{-17} \exp(1.5/kT)$	250-400	295	$10^9$
Diopside	875° C	$5 \cdot 10^{-17} \exp(4.9/kT)$	700-900	700	$10^{10}$
Hornblende	550° C				
Hypersthene	475° C				
Muscovite	525° C				
Olivine	500° C	$2.4 \cdot 10^{-17} \exp(3.3/kT)$	450-550	473	$5 \cdot 10^{10}$
Phlogopite	450° C	$1.2 \cdot 10^{-17} \exp(1.8/kT)$	400-500	353	$10^{11}$
Pigeonite	525° C				
Quartz	> 700° C				
Zircon	$\left\{ \begin{array}{l} 700^\circ \text{C} \\ (675^\circ \text{ at } 80 \text{ kb}) \end{array} \right.$	$8.5 \cdot 10^{-16} \exp(3.6/kT)$	600-800	573	$10^{10}$
<b>2. Glasses</b>					
Pyrex	275° C				
Silica	700° C				
Soda-lime	370° C				
Tektite	500° C	$1.4 \cdot 10^{-9} \exp(2.51/kT)$	400-550	428	$5 \cdot 10^{11}$
	(350° at 10 kb; 250° at 30 kb; 100° at 60 kb)				
Vanadium oxide ( $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 5 \text{V}_2\text{O}_5$ )	95° C	$1.8 \cdot 10^{-11} \exp(1.2/kT)$	25-125	205	1
68 $\text{SiO}_2$ :18.5 $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 7 $\text{Na}_2\text{O}$ :6.5 $\text{K}_2\text{O}$	200° C				
<b>3. Plastics</b>					
Lexan	> 185° C				
Cellulose nitrate	~ 85° C				

4.6.7 ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย

ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่ทำให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึก รอย เช่น น้ำ จะมีผลทำให้เกิดการลบเลือนของรอยอนุภาคได้มาก รังสีอุตราไวโอเลตความ เข้มสูงก็สามารถทำให้เกิดการลบเลือนได้เช่นกัน ประจุไฟฟ้าและความดันก็อาจทำให้เกิดการ ลบเลือนของรอยอนุภาคได้

การที่จะทราบว่าแผ่นวัสดุบันทึกรอยชนิดใดจะมีการลบเลือนของรอยอนุภาค เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมใดบ้างนั้น กระทำได้โดยการทดลองหาเงื่อนไขของการลบเลือนของ รอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกศึกษาโดยใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท เพื่อประโยชน์ในการสำรวจยูเรเนียมและการวัดรังสี

#### 4.7 การประยุกต์ใช้วิธีการแทรก-เอทซ์ในงานต่าง ๆ

ในปัจจุบันวิธีการแทรก-เอทซ์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้วิธีการแทรก-เอทซ์ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

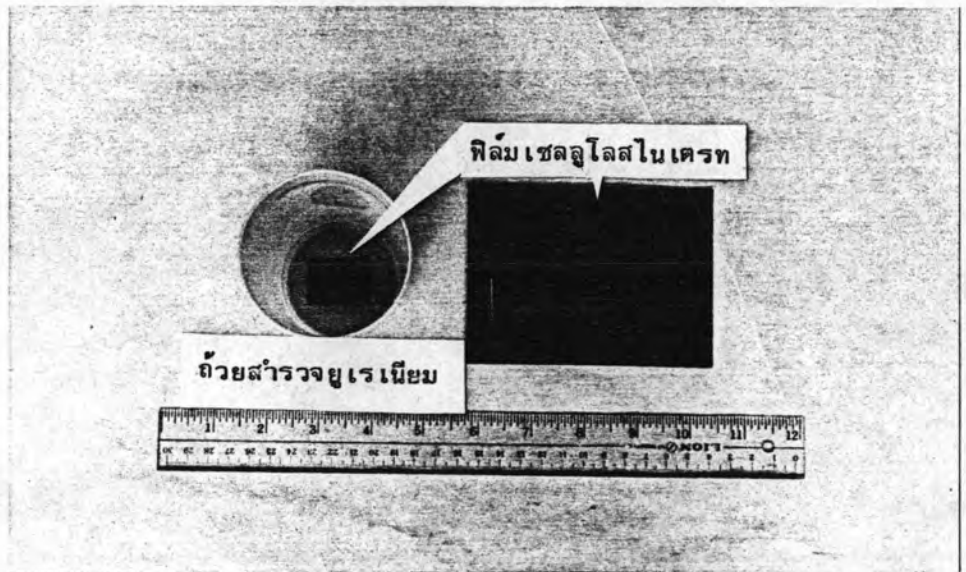
##### 4.7.1 การสำรวจยูเรเนียมโดยวิธีการแทรก-เอทซ์

วิธีสำรวจยูเรเนียมมีอยู่หลายวิธี วิธีที่สำคัญ ๆ ได้แก่ วิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสี (radiometric surveys) วิธีตรวจวัดก๊าซเรดอน (radon measurement surveys) วิธีสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (geophysical surveys) วิธีสำรวจทางธรณีเคมี (geochemical surveys) และวิธีเจาะสำรวจ (exploration drilling) วิธีตรวจวัดก๊าซเรดอน เป็นวิธีหนึ่ง ที่นิยมใช้กันมาก โดยอาศัยการตรวจวัดก๊าซเรดอนที่เกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียม-238 ใน บริเวณที่มีแร่ยูเรเนียมอยู่จะมีก๊าซชนิดนี้ฟุ้งกระจายอยู่ในดิน และในกรณีที่แร่ยูเรเนียมลงไปจากผิวดินลงไป ก๊าซเรดอนก็สามารถฟุ้งผ่านชั้นมาสู่ผิวดินเบื้องบนได้ การตรวจวัดก๊าซเรดอนที่บริเวณผิวดินจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสำรวจยูเรเนียม เพราะสามารถใช้ได้เต็มแหล่งแร่จะอยู่ลึกลงไปใต้ดิน อุปกรณ์การตรวจวัดก๊าซเรดอนมีหลายชนิด เช่น แอลฟาไมเตอร์กับวิธีการแทรก-เอทซ์

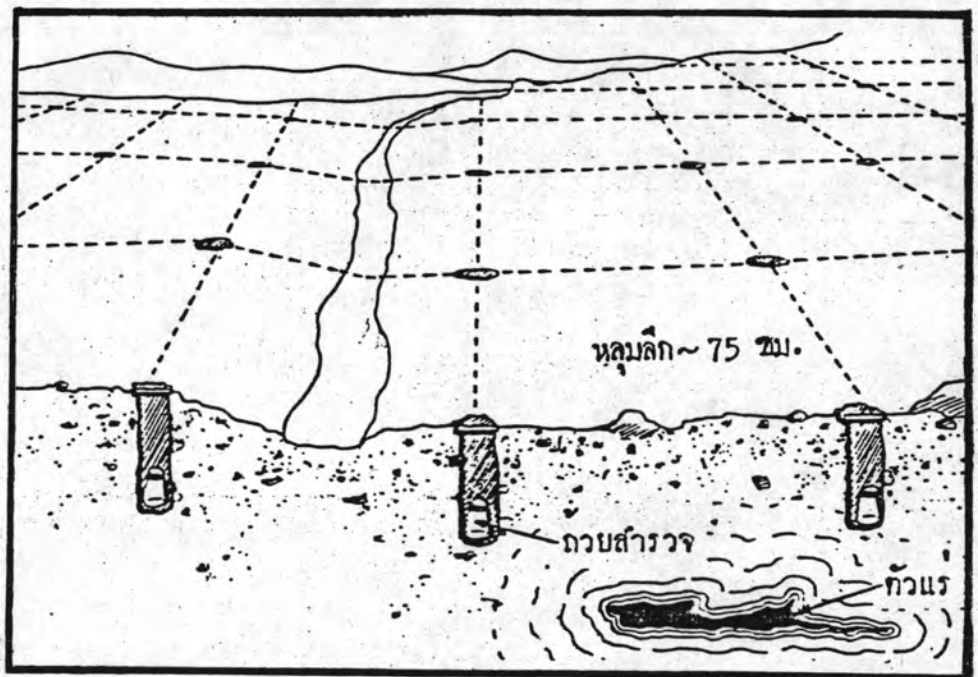
อุปกรณ์ในการสำรวจยูเรเนียมโดยวิธีการแทรก-เอทซ์ ประกอบด้วยถ้วยสำรวจ สูงมากกว่า 7 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคแอลฟาจากต้นกำเนิดอื่นรบกวน คิดแผ่นวัสดุที่มีความไวคืออนุภาคแอลฟา เช่น เซลลูโลสอะซิเตท เซลลูโลสไนเตรท และโพลีคาร์บอเนต เป็นต้น ไม้ที่กั้นถ้วยสำรวจนำไปวางไว้ในหลุมลึก 75 เซนติเมตร ในบริเวณพื้นที่สำรวจตั้งรูปที่ 4.19 ซึ่งมีอยู่มากมายเป็นตารางแบบตะแกรง โดยคว่ำปากถ้วยลงทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ถึง 1 เดือน ก๊าซเรดอนที่ฟุ้งออกมาจากตัวแร่ บางส่วนจะถูกกักไว้ในถ้วย เมื่อสลายตัวจะให้อนุภาคแอลฟาซึ่งบางตัวจะวิ่งเข้าไปชนแผ่นวัสดุบันทึกรอยที่ติดไว้ที่ก้นถ้วย โดยที่ปริมาณรอยของอนุภาคแอลฟาขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซเรดอนและปริมาณของก๊าซเรดอนขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ยูเรเนียม จึงทำให้สามารถบอกแหล่งยูเรเนียมได้

เมื่อนำเอาแผ่นวัสดุบันทึกรอยอนุภาคแอลฟามาก็คขยายรอยแล้ว นับรอยอนุภาคแอลฟาบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยแต่ละแผ่น นำข้อมูลที่ได้ไปทำแผนที่ก็จะได้บริเวณที่มีแหล่ง

แร่ยูเรเนียม นอกจากนี้แล้ววิธีนี้ยังใช้ได้กับการสำรวจแหล่งแร่ทอเร็ียมด้วย เนื่องจากทอเร็ียมจะสลายให้ก๊าซทอรอน ( $^{220}_{86}\text{Rn}$ ) ซึ่งจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาออกมา แต่จะมีปัญหาในกรณีที่แร่ทอเร็ียมอยู่ลึกกลงไปจากพื้นดินมากไม่ได้ เนื่องจาก  $^{220}_{86}\text{Rn}$  มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 55 วินาทีเท่านั้น ถ้าหากแร่ทอเร็ียมอยู่ลึกมาก  $^{220}_{86}\text{Rn}$  จะสลายตัวหมดก่อนที่จะแทรกตัวขึ้นมาอยู่ในพื้นดิน เบื้องบน



รูปที่ 4.18 แสดงถ้วยสำรวจยูเรเนียมและฟิล์ม เซลลูโลสไนเตรทที่ใช้ในการสำรวจยูเรเนียม



รูปที่ 4.19<sup>(3)</sup> แสดงการวางถ้วยสำรวจยูเรเนียมแบบแทรก-เอทซ์ ในบริเวณพื้นที่สำรวจ

#### 4.7.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเรเนียมและทอ เรียมโดยวิธีการแทรก-เอทซ์

การวิเคราะห์หาปริมาณเรเนียมและทอ เรียมโดยวิธีการแทรก-เอทซ์กระทำโดยอาศัยหลักการการใช้แผ่นอะลูมิเนียมมาก้อนอนุภาคแอลฟาจากก๊าซ เรคอนและโทรอนที่จะไปชนแผ่นวัสดุบันทึกรอย ชั้นตอนในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.7.2.1 ปรับเทียบตัวอย่างแร่กับสารมาตรฐานก่อน โดยใช้สารมาตรฐาน 2 ตัว ตัวหนึ่งทราบปริมาณเรเนียม อีกตัวหนึ่งทราบปริมาณทอ เรียม นำเอาแผ่นวัสดุบันทึกรอยอนุภาคแอลฟามาอบรังสีตัวอย่างแร่กับสารมาตรฐานทั้งสอง โดยไม่ต้องใช้แผ่นอะลูมิเนียมมาก้อน นำไปก็ตรอยแล้วนับจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยแต่ละแผ่นที่นำไปอบรังสีจากตัวอย่างแร่และสารมาตรฐานทั้งสองตามลำดับ บันทึกผลที่ได้

4.7.2.2 นำเอาแผ่นวัสดุบันทึกรอยอนุภาคแอลฟาที่กั้นด้วยแผ่นอะลูมิเนียมไปอบรังสีจากตัวอย่างแร่ และสารมาตรฐาน นำไปก็ตรอยแล้วนับรอยอนุภาคแอลฟาที่เหลือจากการกั้นบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยแต่ละแผ่นตามลำดับ

4.7.2.3 คำนวณหาปริมาณเรเนียมและทอ เรียมในแร่ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$X + Y = A \quad (4.5) \quad (36)$$

$$PX + qY = B \quad (4.6) \quad (36)$$

$$x = \frac{qA - B}{q - P} \quad (4.7) \quad (36)$$

$$Y = \frac{B - PX}{q - P} \quad (4.8) \quad (36)$$

เมื่อ X เป็นจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากก๊าซ เรคอน/มม.<sup>2</sup> กรัม .วัน  
 Y เป็นจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากก๊าซ โทรอน/มม.<sup>2</sup> กรัม .วัน  
 P เป็นอัตราส่วนจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เหลือจากการกั้นอนุภาคแอลฟาจากก๊าซ เรคอน

q เป็นอัตราส่วนจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เหลือจากการกั้นอนุภาคแอลฟา จากก๊าซไทรอน

A เป็นจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากก๊าซผสม/มม<sup>2</sup> กรัม.วัน

B เป็นจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาที่เหลือจากการกั้นก๊าซผสม/มม<sup>2</sup> กรัม.วัน

4.7.2.4 ทาค่า X และ Y จากสมการ 4.5 และ 4.6 แล้วเปรียบเทียบกับปริมาณเรเนียมและทอเรียมในสารมาตรฐาน ข้อ 4.7.2.1 ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณเรเนียมและทอเรียมในแร่ได้

#### 4.7.3 แทรค-เอทซ์ เรดิโอกราฟฟีของอนุภาคแอลฟาโปรตอนและนิวตรอน

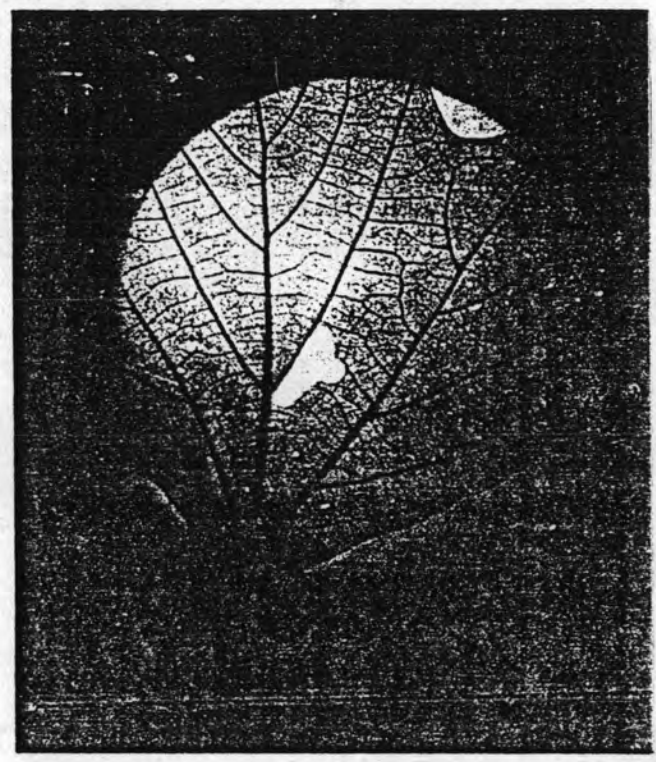
4.7.3.1 การถ่ายภาพโดยใช้อุณหภูมิของอนุภาคแอลฟา สามารถถ่ายภาพแผ่นวัตถุบาง ๆ เท่านั้น เนื่องจากอนุภาคแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ โดยจะต้องทำให้เกิดรอยอนุภาคประมาณ 1,500-2,000 รอย/ตารางเซนติเมตร จึงจะทำให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในการใช้ฟิล์ม Kodak-Pathe' LR115 Type II ไปอบรังสีจากยูเรเนียมธรรมชาติ ปรากฏว่าได้ความหนาแน่นของรอยประมาณ 13 รอยต่อตารางเซนติเมตร ต่อมาได้มีการทดลองถ่ายภาพเนื้อเยื่อกระดาษโดยใช้อุณหภูมิของอนุภาคแอลฟาจาก enriched <sup>235</sup>U foil ซึ่งให้อนุภาคแอลฟา 10<sup>6</sup> อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร ภายหลังจากล้างฟิล์มจะได้ภาพดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 (37) แสดงภาพแทรค-เอทซ์ จากการใช้อุณหภูมิของอนุภาคแอลฟาจาก <sup>235</sup>U ในภาพเป็นภาพเนื้อเยื่อของกระดาษความหนา 0.0005 นิ้ว ส่วนสีดำเป็นแผ่นโลหะที่อนุภาคแอลฟาผ่านไปไม่ได้

4.7.3.2 การถ่ายภาพโดยใช้อุณหภูมิของอนุภาคโปรตอน สามารถถ่ายได้เฉพาะแผ่นวัตถุบาง ๆ เท่านั้น จากการใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท Type 106-01 ถ่ายภาพโดยใช้อุณหภูมิ

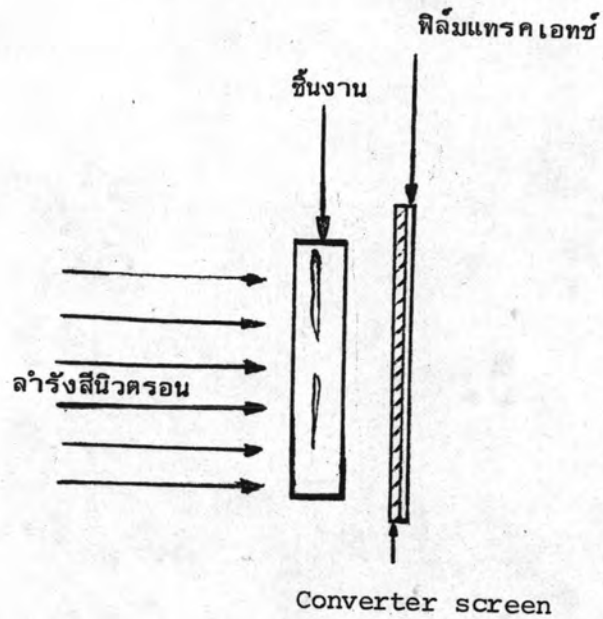
โปรตอนพลังงาน 11 MeV ความเข้ม  $3 \times 10^{11}$  โปรตอน/ซม<sup>2</sup> จะได้ภาพที่คมชัด ดังรูปที่ 4.21 เป็นภาพถ่ายของใบไม้ที่ใช้อนุภาคโปรตอน



รูปที่ 4.21<sup>(37)</sup> ภาพใบไม้ที่ถ่ายจากอนุภาคโปรตอน โดยใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท Type 106-01

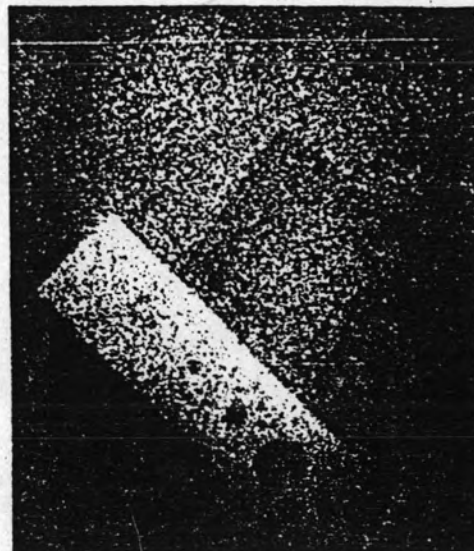
4.7.3.3 การถ่ายภาพโดยใช้อ่อนภาคนิวตรอน ใช้กับวัตถุที่มีส่วนประกอบเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ ได้แก่ พลาสติก ยาง ดินปืน สารพวกนี้เวลาถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ให้รายละเอียดไม่ดีพอแต่ถ้าถ่ายด้วยนิวตรอนจะเห็นรายละเอียดชัดเจน การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในกรณีถ่ายภาพโลหะสามารถใช้นิวตรอนเร็วหรือเทอร์มาลนิวตรอนก็ได้ ส่วนการถ่ายภาพเนื้อเยื่อจะใช้เทอร์มาลนิวตรอน

หลักการถ่ายภาพด้วยอนุภาคนิวตรอน เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนไม่มีประจุ จึงไม่มีฟิล์มชนิดใดที่ไวต่ออนุภาคนิวตรอน ดังนั้นจึงต้องใช้ converter screen เพื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วได้รังสีแอลฟา เบตาหรือแกมมา ไปทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ต่ออีกทอดหนึ่ง ในกรณีของเทคนิคแทรก-เอทซ์ converter screen เป็นสารทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วให้อนุภาคแอลฟาออกมา เช่น  $Li_2B_4O_7$ , LiF และสารประกอบอื่น ๆ ของ  $^{10}B$  และ  $^6Li$



รูปที่ 4.22 แสดงแผนภาพการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้เทคนิคแทรก-เอทซ์

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะต้องใช้นิวตรอนความเข้มสูง เช่น จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพราะจะต้องใช้นิวตรอนมากกว่า  $10^6$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร.วินาที



รูปที่ 4.23<sup>(37)</sup> ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนพลังงาน 14 MeV บนฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท CA 8015 แสดงภาพเหล็กหนา 5 มิลลิเมตร ขนาด 1x5 เซนติเมตร มีรู 4 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5, 2.5, 2 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้นิวตรอน  $2.5 \times 10^{10}$  นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร



#### 4.7.4 การหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ โดยวิธีการแทรก-เอทซ์

เนื่องจากเทอร์มาลนิวตรอนทำปฏิกิริยากับลิเทียม-6 และโบรอน-10 แล้วให้อนุภาคแอลฟาออกมา ถ้าหากสามารถบันทึกรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวได้ก็สามารถหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ของดินกำเนิดนิวตรอนนั้นได้ วัสดุที่ใช้ในการหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์คือ สารประกอบของลิเทียม-6 หรือโบรอน-10 เช่น  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  กรดบอริก เป็นต้น ประยก ตัดกับแผ่นวัสดุบันทึกรอยอนุภาคแอลฟาได้แก่ เซลลูโลสอาซิเตท เป็นต้น นิยมรอยอนุภาคแอลฟาบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ ดังสมการที่ 4.9

$$\rho = k \phi W C_{(w)} \quad (4.9)$$

เมื่อ  $\rho$  = จำนวนรอยอนุภาคแอลฟาต่อตาราง เซนติ เมตรต่อวินาที  
 $k$  = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอม ภาคตัดขวางในการอาบรังสีนิวตรอนของโบรอน-10 และความหนาแน่นของนิวตรอน = 6.56  
 $W$  = Density Thickness ของกรดบอริก  
 $C_{(w)}$  = Correction factor ได้จากการคำนวณ

เหตุที่ต้องคิดค่า  $C_{(w)}$  ด้วย เนื่องจากรอยอนุภาคแอลฟาจะเกิดน้อยกว่าที่จำนวนอนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นจริง สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 4.10

$$C_{(w)} = \frac{\rho}{k \phi W} \quad (4.10)$$

4.7.5 การหาฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วโดยวิธีการแทรก-เอทซ์ อาศัยหลักการแนวเดียวกันกับการหาเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ โดยนำเอาแผ่นวัสดุบันทึกรอยที่ไวต่อฟิชชันแฟรกเมนต์ (Lesean, Makrofol, Museovite mica, Dosimetry Glass ( $\text{Ag PO}_3$ ) หรือ Quartz) ประยกกับ fissionable material ( $^{235}\text{U} > 93 \%$ ,  $^{238}\text{U} < 200 \text{ ppm}$   $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu} > 99 \%$ ,  $^{237}\text{Np} > 99 \%$ ,  $^{232}\text{Th} > 99 \%$ ) ไปอาบรังสีนิวตรอน ณ ตำแหน่งที่ต้องการวัดนิวตรอนฟลักซ์ นำเอาแผ่นวัสดุบันทึกรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ไปก็ครอยแล้วนับรอยฟิชชันแฟรกเมนต์

ที่เกิดขึ้น นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ตามหัวข้อที่ 4.7.5.1 และ 4.7.5.2

4.7.5.1 จำนวนหาจำนวนฟิชชันที่เกิดขึ้นคือกรัมของ fissionable isotope  $A_0$

$$A_0 = N_t / R_t \quad (4.11) \quad (38)$$

เมื่อ  $N_t$  = จำนวนฟิชชัน/ตารางเซนติเมตร = จำนวนรอยต่อตารางเซนติเมตร  
 $R_t$  = น้ำหนักของ fissionable material หน่วยกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.7.5.2 จำนวนหาจำนวนนิวตรอนที่เข้าชน fissionable material

$$\phi t = N_t / (6.025 \times 10^{-23} \bar{\sigma}) (R_t / A) \quad (4.12) \quad (38)$$

เมื่อ  $\phi$  = นิวตรอนฟลักซ์ หน่วยนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร.วินาที  
 $t$  = เวลาในการอบรมรังสี หน่วยวินาที  
 $A$  = น้ำหนักอะตอมของ fissionable material  
 $\bar{\sigma}$  = Spectrum averaged cross section

จากสมการที่ 4.12 จะสามารถคำนวณหาฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วได้ ถ้าทราบค่าของ  $t$ ,  $A$ ,  $\bar{\sigma}$  และ  $A_0$

4.7.6 การวัดความแรงรังสีโดยใช้วิธีการแทรก-เอทซ์ เนื่องจากจำนวนรอยอนุภาคขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี จึงสามารถหาความแรงรังสีได้โดยนับจำนวนรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นวัสดุบันทึกรอย

4.7.7 ใช้เป็นเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล<sup>(4)</sup> เพื่อความปลอดภัยของผู้ที่ทำงานอยู่ใกล้  
 ชิคกับคัมก่า เนคของรังสี

4.7.8 ใช้ในการหาไอโซโทปโดยวิธีการแทรก-เอทซ์ เช่น หาไอโซโทป ของ  $U_{238}/U_{235}$  และไอโซโทปของ  $Pu_{240}/Pu_{239}$  เป็นต้น (2)

4.7.9 ศึกษาอนุภาคในอวกาศ โดยวิธีการแทรก-เอทซ์ เช่นศึกษาอนุภาคจากรังสีคอสมิก (1)

4.7.10 ทหาระดับพลังงานของอนุภาคโดยวัดจาก เส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของรอยอนุภาค (1,2)

4.7.11 ใช้หาอายุของหิน ฟอสซิล โดยวิธี Fission-Track Dating (1)

4.7.12 ใช้ในการทำนายแผ่นดินไหว<sup>(40,41)</sup> เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซเรดอนแปรไปตามความทรุน ความชื้น รอยแยกของหินและพื้นดิน เมื่อเกิดการเลื่อนของแผ่นดินที่อาจทำให้เกิดแผ่นดินไหวในอนาคต ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจะแปรเปลี่ยนไป จึงทำให้จำนวนรอยอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยแปร เปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ทำให้สามารถทำนายแผ่นดินไหวได้ว่าอาจจะเกิดขึ้นในช่วงใด

การประยุกต์ใช้วิธีการแทรก-เอทซ์ กับงานต่าง ๆ ดังตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังใช้กับงานอื่น ๆ อีกที่มีได้กล่าวถึง ฉะนั้นจึงควรศึกษาพัฒนาวิธีการแทรก-เอทซ์ให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับการลมหวนของรอยอนุภาคตามสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อ ๆ ไป