บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ฟิชชัน (Fission)

ฟิชชันคือการที่นิวเคลียสแตกตัวออกเป็นสองส่วน ซึ่งเรียกว่าไบนารีฟิชชัน (Binary fission) มีบางโอกาสที่แตกตัวออกเป็นสามส่วนซึ่งเรียกว่าเทอร์นารีฟิชชัน (Ternary fission) แต่โอกาสเช่นนี้มีน้อยมาก เพียงหนึ่งในล้านเมื่อเทียบกับการเกิดแบบแรก การแตกตัวเกิดได้ดีกับนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมสูงใกล้เคียง 100 เช่น ยูเรเนียม-235 พลูโตเนียม-239 ธอเรียม -232 การทำให้เกิดการแตกตัวทำได้โดยยิง นิวตรอน โปรตอน ดิวทีรอน ไอออนของฮีเลียม รังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ ที่มีพลังงานพอเหมาะ ไปยังนิวเคลียสของธาตุที่ใช้เป็นเป้า นิวเคลียสของธาตุเบา เช่นบิสมัท ทอง ตะกั่ว แทนทาลัมและพวกธาตุหายาก (rare earth) บางธาตุก็เกิดการแตกตัวได้ แต่ต้องยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงขนาด 50 ถึง 420 Mev ธาตุที่หนักมาก ๆ สามารถเกิดการแตกตัวได้เอง[2] อัตราการแตกตัวได้เองมีตั้งแต่ 4×10^{-5} ครั้งต่อกรัมต่อวินาทีสำหรับธอเรียม -232 ไปจนถึง 10^{4} ครั้งต่อกรัมต่อวินาที สำหรับคาลิฟอร์เนียม-252

ตัวอย่างของปฏิกริยาการแตกตัวที่สำคัญ เช่น ปฏิกริยาการแตกตัวของยูเรเนียม-235 ที่ถูกกระทำโดยนิวตรอนช้า (slow neutron) ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปฏิกริยาแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

---

[1] G. Friedlander and J.W. Kennedy, Nuclear and Radiochemistry (New York; John Wiley & Sons, Inc., 1949) pp. 72-77.

[2] Ibid, pp. 179-181

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{236} \longrightarrow {}_{Zx}X^{Ax} + {}_{Zy}Y^{Ay} + 2.5\,{}_{0}n^{1} + \text{พลังงาน}$$

ขบวนการของการแตกตัวอธิบายได้โดยทฤษฎีหยดของเหลว[3] (Liquid Drop Model) โดยถือว่านิวเคลียสมีลักษณะเหมือนหยดของเหลว เมื่อยิงนิวตรอนเข้าไปจะทำให้นิวคลีออนสั่น (excited) โดยที่นิวเคลียสไม่เปลี่ยนรูปร่าง หรืออาจจะทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนรูปร่างไป โดยไม่ไปรบกวนนิวคลีออน ในกรณีหลังถ้าพลังงานนี้มีค่าเท่ากับ "พลังงานขีดเริ่ม" (threshold energy) ของการแตกตัวแล้วจะทำให้นิวเคลียสยืดตัวยาวออกจนถึงจุดที่เรียกว่า "จุดขีดเริ่ม" (threshold point) คือแรงผลักระหว่างโปรตอนมีค่าสูงกว่าแรงนิวเคลียร์ นิวเคลียสจะแตกออกจากกันโดยมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นส่วนของนิวเคลียสที่แตกออกทั้งสอง จะกลับเข้าสู่สภาพเดิม คล้ายตอนที่ยังไม่แตกออกคือกลับเข้าสู่สภาพที่มีพลังงานน้อยที่สุดโดยการคายพลังงานออกมาในรูปของนิวตรอนและแกมมา แล้วคืนรูปเป็นทรงกลมตามเดิม พลังงานทั้งหมดที่ถูกคายออกมาหลังจากการแตกตัวคำนวณได้โดยใช้สมการของไอน์สไตน์ คือ $E = \Delta mc^2$ เมื่อ Δm คือมวลที่ลดลงหลังจากการแตกตัว และ c คือความเร็วแสง

2.1.1 ฟิชชันแฟรกเมนต์ (Fission fragment)

ในการแตกตัวของนิวเคลียส ส่วนที่แตกตัวออกมาเรียกว่าฟิชชันแฟรกเมนต์ มีขนาดเกือบเท่ากัน มีเลขมวลต่างกัน ส่วนหนึ่งจะมีเลขมวลต่ำเรียกว่า พวกเบา ("light" group) อีกส่วนหนึ่งจะมีเลขมวลสูงเรียกว่า พวกหนัก ("heavy" group) ตัวอย่าง กรณีการแตกตัวของยูเรเนียม-235 ซึ่งปฏิกริยาการแตกตัวมี

---

[3] I. Kaplan, Nuclear Physics (London; Addison-Wesley Company, Inc., 1958) pp. 448-510.

ได้กว่า 80 แบบ[4] ส่วนที่แตกตัวจะมีเลขอะตอมในช่วง 30 ถึง 65 และเลขมวลในช่วง 72 ถึง 161 ส่วนที่แตกตัวพวกเบาที่มีเลขมวล 95 และพวกหนักที่มีเลขมวล 138 จะมีอยู่มากที่สุด ส่วนที่แตกตัวที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นไอออนจึงแยกออกจากกันด้วยความเร็วสูงมาก เนื่องจากไม่มีเสถียรภาพจึงสลายตัวโดยการแผ่รังสีเบต้า เพื่อจะกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีเสถียรภาพ ปฏิกริยาการแตกตัวแบบหนึ่งของยูเรเนียม -235 ส่วนที่แตกตัวคือ สตรอนเตียม -94 และซีนอน -140 ซึ่งไม่มีเสถียรภาพจะสลายตัวกลายเป็นเซอคอนเนียม -94 และซีเรียม -140 ดังไดอะแกรมต่อไปนี้

$$Sr^{94}_{38} \xrightarrow{\bar{\beta}} Y^{94}_{39} \xrightarrow{\bar{\beta}} Zr^{94}_{40} \text{ (มีเสถียรภาพ)}$$

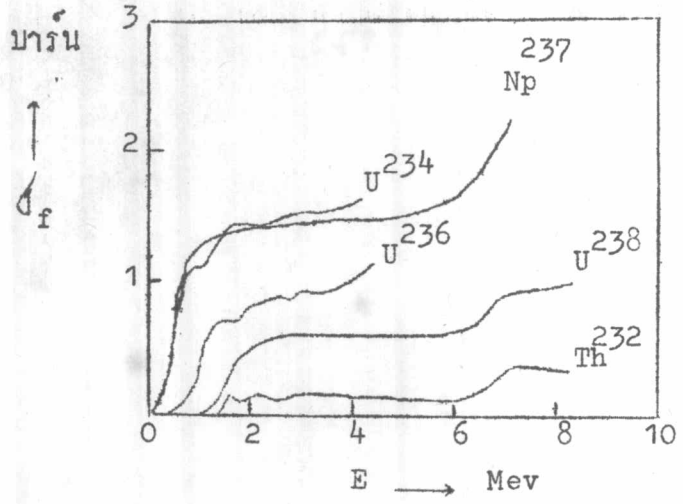
$$Xe^{140}_{54} \xrightarrow{\bar{\beta}} Cs^{140}_{55} \xrightarrow{\bar{\beta}} Ba^{140}_{56} \xrightarrow{\bar{\beta}} La^{140}_{57} \xrightarrow{\bar{\beta}} Ce^{140}_{58} \text{ (มีเสถียรภาพ)}$$

2.1.2 <u>ภาคตัดขวางของการแตกตัว</u> (Fission cross section)

โอกาสหรือความไวต่อการแตกตัวของนิวเคลียสแต่ละธาตุ เมื่อถูกชนด้วยนิวตรอนจะไม่เท่ากัน และแสดงได้ด้วยค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัว ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัวนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนที่พุ่งเข้าชน ดังแสดงในรูป 2-1

---

[4] G. Friedlander, and Others (Comp.), <u>op.cit.</u>, p.312.

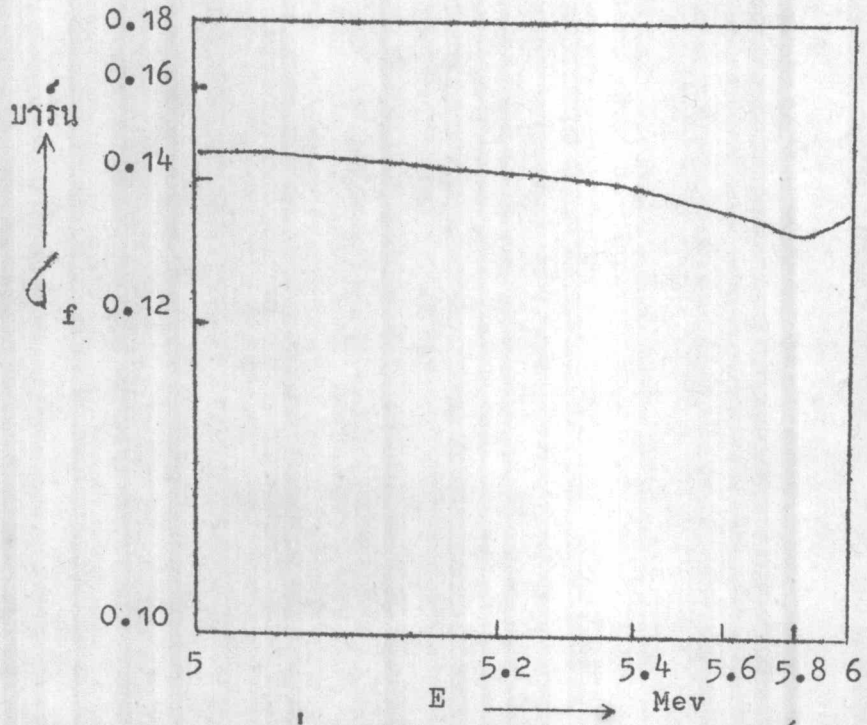


รูป 2–1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัว σ_f ของธาตุบางธาตุกับพลังงาน E ของนิวตรอน[5]

จากรูป 2–1 ยูเรเนียม – 234 มีค่าพลังงานขีดเริ่มที่ 0.26 Mev , เนปจูเนียม – 237 มีค่า 0.32 Mev , ยูเรเนียม – 236 มีค่า 0.70 Mev , ยูเรเนียม – 238 มีค่า 1.3 Mev และธอเรียม – 232 มีค่า 1.5 Mev , จึงเกิดการแตกตัวได้เฉพาะกับนิวตรอนเร็ว (fast neutron) เท่านั้น มีนิวเคลียสของธาตุบางธาตุเช่น ยูเรเนียม – 235 หรือ พลูโตเนียม – 239 มีค่าพลังงานขีดเริ่มต่ำกว่า 0.025 ev จึงเกิดการแตกตัวได้ทั้งกับนิวตรอนช้า และนิวตรอนเร็ว ในรูป 2–2 แสดงค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัวของธอเรียม – 232 ที่ช่วงพลังงานของนิวตรอน 5–6 Mev ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 0.1 บาร์น

---

5 K.H. Beckurts and K. Wirtz, Neutron Physics (New York, Springer - Verlag, 1964) p. 63.



รูป 2-2 แสดงค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัว σ_f ของ ยูเรียม -232 ที่ช่วงพลังงาน E ของนิวตรอน5-6 Mev[6]

2.1.3 <u>อัตราการแตกตัว</u>[7] (fission rate)

ในกรณีที่นิวตรอนวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของสารที่แตกตัวได้ มีพลังงานเท่ากัน อัตราการแตกตัวเขียนได้เป็น

$$R = N\sigma_f\Phi \qquad \text{.....(2.1)}$$

---

[6] J. Hughes and A. Hervey, <u>Neutron Cross Sections</u> (New York, Associated Universities Inc., 1955) p.279

[7] S. Glasstone, <u>Principles of Nuclear Reactor Engineering</u> (New York, D. Van Nosland Company, Inc., 1957) p. 109

เมื่อ R คืออัตราการแตกตัว มีหน่วยเป็นฟิชชันต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

N คือจำนวนนิวเคลียสของสารที่แตกตัวได้ มีหน่วยเป็นนิวเคลียสต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

Φ คือฟลักซ์ทั้งหมด (total flux) ของนิวตรอน มีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

σ_f คือภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัวของนิวตรอนมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (1 บาร์น = 10^{-24} ตารางเซนติเมตร)

ฟลักซ์ทั้งหมด Φ ของนิวตรอนที่มีความเร็วเท่ากันเป็นผลคูณของความเร็วกับความหนาแน่นของนิวตรอน

$$\Phi = nv \qquad \text{----------} \quad (2.2)$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของนิวตรอนมีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

v คือความเร็วของนิวตรอน มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที

โดยทั่วไปแล้วนิวตรอนที่มีความเร็วเดียวกันมักจะไม่ค่อยปรากฏ ส่วนใหญ่จะมีความเร็วต่าง ๆ กัน เช่น นิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และจากต้นกำเนิดนิวตรอน พลังงานของนิวตรอนจึงมีค่าต่างกันด้วย ดังนั้นค่าฟลักซ์ทั้งหมดในสมการ (2.1) จะต้องเป็น

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi(E)\, dE \qquad \text{---------} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\Phi(E)$ คือดิฟเฟวเรนเชียลฟลักซ์ (Differential flux) หมายถึงนิวตรอนฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยช่วงพลังงานที่ E

$\Phi(E)\, dE$ เป็นนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงพลังงาน E และ E+dE

ค่าดิฟเฟอเรนเชียลฟลักซ์ สำหรับนิวตรอนเร็วจะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าของพลังงานของนิวตรอน ดังนั้นสมการ (2.3) อาจจะเขียนได้ว่า

$$\Phi = \int_0^\infty n(E)v\,dE \qquad \text{----------} \quad (2.4)$$

เมื่อ $n(E)$ คือความหนาแน่นของนิวตรอนในหนึ่งหน่วยช่วงพลังงาน

$n(E)dE$ คือความหนาแน่นของนิวตรอนในช่วงพลังงาน E และ $E+dE$

จากคำจำกัดความของความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน

$$\bar{v} = \frac{\int_0^\infty n(E)\,v\,d\,E}{\int_0^\infty n(E)\,d\,E} \qquad \text{----------} \quad (2.5)$$

ดังนั้นฟลักซ์ทั้งหมดอาจเขียนได้เป็น

$$\bar{\Phi} = n\bar{v} \qquad \text{----------} \quad (2.6)$$

ภาคตัดขวางของการแตกตัว σ_f หมายถึงพื้นที่ละม้ายของนิวเคลียสที่นิวตรอนพุ่งเข้าชนแล้วและเกิดปฏิกริยาการแตกตัว ค่า σ_f จะขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนและชนิดของสารแตกตัวได้ ดังแสดงในรูป (2.1) ดังนั้นค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการแตกตัว ที่ใช้ในสมการ (2.1) จะต้องเป็นค่าเฉลี่ย (average fission cross section)

$$\bar{\sigma}_f = \frac{\int_0^\infty \sigma_f(E)n(E)\,dE}{\int_0^\infty n(E)\,v\,d\,E} \qquad \text{----------} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7) อัตราการแตกตัวในกรณีที่นิวตรอนมีพลังงานต่าง ๆ กันเขียนได้เป็น

$$R = N\bar{\sigma}_f\bar{\Phi} \qquad \text{----------} \quad (2.8)$$

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source)

ต้นกำเนิดนิวตรอน[8] หมายถึงตัวหรือแหล่งที่แผ่อนุภาคนิวตรอนออกมา วิธีการที่จะได้นิวตรอนออกมานั้น ได้มาจากปฏิกริยาทางนิวเคลียร์ทั้งสิ้น ดังนั้นต้นกำเนิดนิวตรอนจึงมีหลายแบบแล้วแต่ปฏิกริยาที่นำมาใช้ ซึ่งแบ่งออกเป็นพวก ๆ ได้ดังนี้คือ ปฏิกริยาแบบ (α, n), (d, n), (γ, n) และการแตกตัว ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใหญ่ที่สุดและให้นิวตรอนมากที่สุดคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งนิวตรอนที่ได้เกิดจากปฏิกริยาการแตกตัว ในที่นี้จะกล่าวถึงต้นกำเนิดนิวตรอนแบบ (α, n) ซึ่งใช้ประโยชน์มากที่สุด ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบนี้ให้อนุภาคอัลฟาซึ่งได้จากเรดิโอไอโซโทปที่แผ่รังสีอัลฟา เช่น โพโลเนียม – 210, เรเดียม – 226, พลูโตเนียม – 239, อะเมอริเซียม – 241 วิ่งเข้าชนนิวเคลียสของธาตุบางธาตุเช่น เบอริลเลียม, อะลูมิเนียม, โบรอน, ลิเธียม, ไนโตรเจน, ฟลูออรีน, โซเดียม, แมกนีเซียม เป็นต้น อนุภาคอัลฟาจากเรดิโอไอโซโทปมีพลังงานไม่เกิน 5 Mev ซึ่งธาตุที่นิยมใช้เป็นเป้ามากที่สุดคือ เบอริลเลียมเพราะให้นิวตรอนได้มาก

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์เรื่องนี้คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนอะเมอริเซียม–เบอริลเลียม[9] โดยใช้อะเมอริเซียมผสมกับเบอริลเลียมในรูปของโลหะผสม $Am - Be_{13}$ อัดให้เป็นเม็ดแล้วหุ้มด้วยโลหะอีกชั้นหนึ่งหรือสองชั้นเพื่อป้องกันการรั่วไหลออกข้างนอก อะเมอริเซียมมีครึ่งชีวิต ประมาณ 470 ปี การสลายตัวของไอโซโทปจะให้อนุภาคอัลฟาออกมามีพลังงานประมาณ 4–5 Mev และมีรังสีแกมมาที่มีพลังงานช่วง 20 ถึง 60 Kev ออกมาด้วย ปฏิกริยา (α, n) ซึ่งอนุภาคอัลฟาทำให้เกิดนิวตรอนจากเบอริลเลียมเขียนได้เป็น

$$ {}_{4}^{9}Be + {}_{2}^{4}He \longrightarrow {}_{6}^{12}C + {}_{0}^{1}n + 5.7 \text{ Mev} $$

---

[8] K.H. Beckurts and Others (comp.) , op.cit., p.22

[9] L.F. Curtiss, Introduction to Neutron Physics (New Delhi, Affiliated East-West Press PVT. LTD., 1969), pp. 93-94.

พลังงานของนิวตรอนที่ออกมาจากปฏิกริยาอยู่ในช่วง 5 Mev ถึง 12 Mev ขึ้นอยู่กับว่านิวตรอนที่ถูกคายออกมาอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการตกกระทบบนเป้าของอนุภาคอัลฟา หรืออยู่ในทิศทางตรงกันข้าม

2.3 <u>ธอเรียม</u> (Thorium)

ธาตุธอเรียม[10,11] มีอยู่ในเปลือกโลกประมาณ 0.001 ถึง 0.002% ปรากฏอยู่ในแร่หลายชนิด มักพบปะปนอยู่กับยูเรเนียมและออกไซด์ของโลหะจำพวกหายากเป็นองค์ประกอบสำคัญของแร่ธอไรท์ (Thorite) และธอเรียนไนท์ (Thorianite) แต่แร่พวกนี้หายาก ธอเรียมเพียงส่วนน้อยที่ได้จากแร่สองชนิดนี้ ส่วนใหญ่ได้จากแร่โมนาไซท์ (Monazite) ซึ่งพบอยู่เกือบทั่วไป

โมนาไซท์เป็นแร่ที่สำคัญที่สุดในการใช้ผลิตธอเรียม เป็นฟอสเฟตของออกไซด์ของโลหะจำพวกหายาก ธอเรียมและยูเรเนียม. มีสูตรทางเคมี (Ce, La, Y, Th) PO_4 เป็นแร่ที่เปราะ พบแร่นี้ได้ในลักษณะเป็นเม็ดกลม สีน้ำตาล น้ำตาลแดง น้ำตาลออกเหลือง เหลือง เหลืองออกสีน้ำผึ้งหรือเขียว มีความแข็งตามความแข็งมาตรฐาน 5 ถึง 5.5 ความถ่วงจำเพาะ 4.6 ถึง 5.3 หรือประมาณ 5 เท่าของน้ำ ถ้าเป็นโมนาไซท์ชนิดที่ได้จากลานแร่จะมีลักษณะสัณฐานหน้าผลึกและตัวผลึกแบบ ออโธรอมบิค (orthorhombic) แร่โมนาไซท์มักพบในหินแกรนิต หินไนซ์ แต่ปริมาณมีน้อยประมาณไม่เกิน 0.1% ที่มีมากจะปนอยู่ในทรายตามก้นแม่น้ำและชายหาด แหล่งของทรายโมนาไซท์ที่พบเป็นแหล่งใหญ่ ๆ ของโลกมี 5 แห่งคือ ในประเทศบราซิล, อินเดียและลังกา, อินโดนีเซีย มาเลเซีย และออสเตรเลีย, สหรัฐอเมริกาและอาฟริกา โมนาไซท์จากอินเดียมีปริมาณของธอเรียมออกไซด์สูงสุดคือ9.9% บราซิลมีถึง 6 ถึง8% และสหรัฐอเมริกา 3.7% แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ถ้ามี 5 ถึง 8% ก็ถือว่า

---

[10] F.L. Cuthbert, <u>Thorium Production Technology</u>(Massachusetts, Addison Wesley, company, Inc.,1968), pp. 1-7.

[11] โพยม อรัณยกานนท์ "แร่กัมมันตรังสี" <u>เอกสารโลหกิจสำหรับประชาชน</u>, 3(2500), 25.

มีมากแล้ว ส่วนประกอบของทรายโมนาไซท์ที่มีอยู่ในบริเวณที่สำคัญ ๆ แสดงในตาราง 2-1

ส่วนประกอบ	ช่วงของปริมาณ (%)			
	บราซิล	อินเดียและลังกา	สหรัฐฯ	มาเลเซียและออสเตรเลีย
ThO_2	1.1–10.0	7.9–10.8	1.2–7.0	3.4–8.4
Ce_2O_3	31.2–32.5	26.7–31.9	31.4–37.3	25.5–33.7
P_2O_5	25.5–29.3	24.6–27.7	18.4–29.3	23.7–27.9
SiO_2	0–10.1	0.9–2.5	0.3–6.4	0.9–2.2
ZrO_2	0–5.7		0–3.2	
TiO_2	0–2.6		0–4.7	
Fe_2O_3	0–4.2	0.8–1.5	0–7.8	0.4–2.8
Al_2O_3	0–0.8	0.1–0.7	0–2.5	0.03–0.8
$(La,Di)_2O_3$	26.0–36.0	28.5–33.5	0–31.6	30.3–35.5
CaO	0–1.1	0.1–0.8	0–1.2	0.2–0.9
H_2O	0–0.9	0.2–2.2	0–0.2	0.5–1.3
อื่น ๆ	0–1.2	0–2.7	0–7.7	

ตาราง 2-1 ส่วนประกอบของทรายโมนาไซท์

ซีโนทายม์ (Xenotime) เป็นแร่อีกชนิดหนึ่งที่พบรวมอยู่กับแร่โมนาไซท์ ในลานแร่ดีบุก มีสูตรทางเคมี YPO_4 แร่นี้มักมีธอเรียมประกอบอยู่ด้วยเสมอ และอาจมียูเรเนียมเข้าไปปะปนอยู่ด้วยไม่น้อยกว่าธอเรียม ลักษณะและสีคล้ายแร่โมนาไซท์ แต่ที่พบบ่อยมักมีสีอ่อนกว่า บางครั้งเนื้อเป็นเม็ดละเอียดคล้ายเนื้อหินทราย ผลึกอยู่ในหมวดเตตระโกนาล (Tetragonal) ยอดปลายผลึกทั้งสองคล้ายปิระมิดประกบกันอยู่ และหดสั้นแฟบลงมาจนมองดูสัณฐานผลึกเป็นแบบแปดหน้าคือออกตะฮีดรอน (Octahedron)

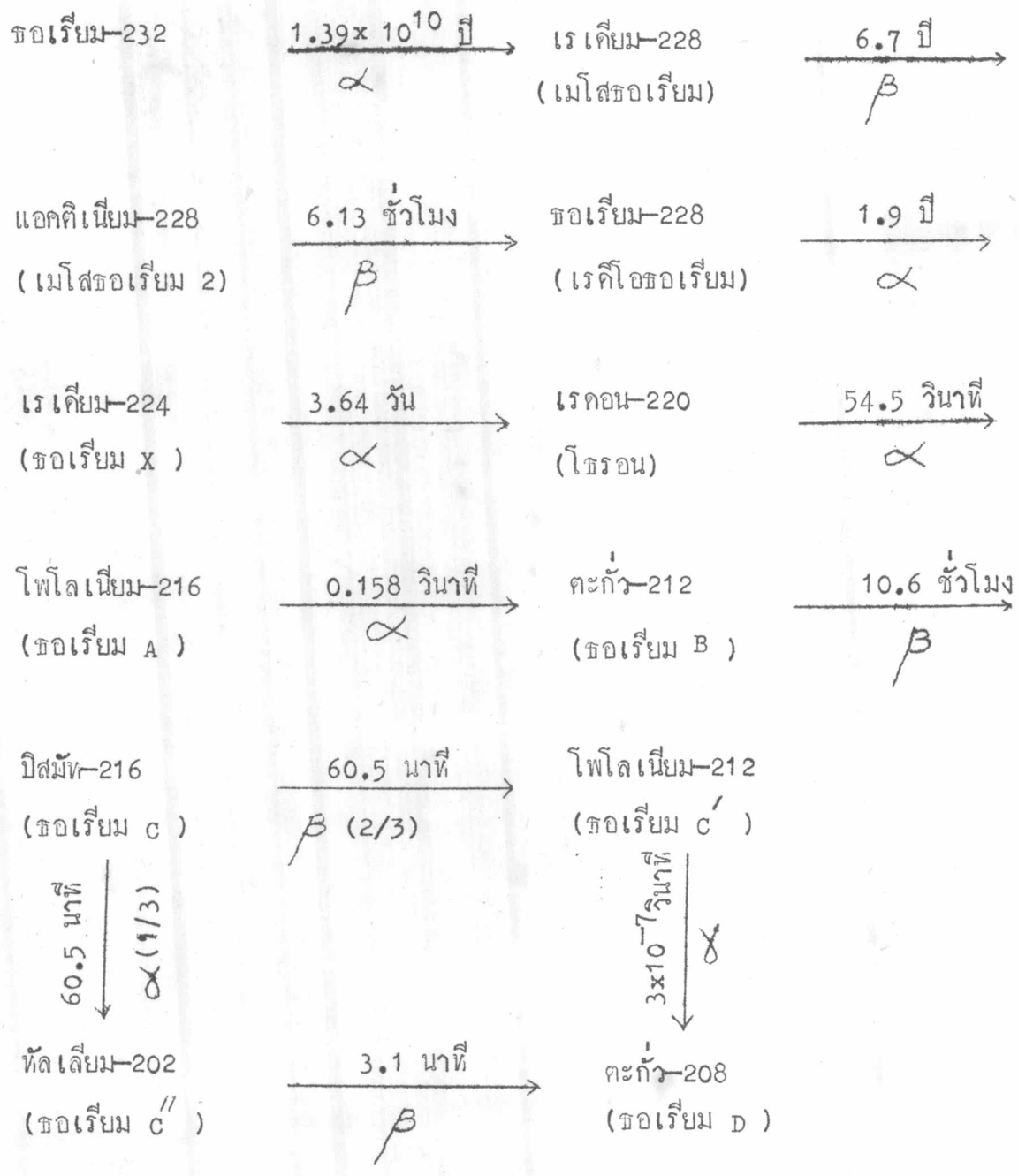
ธอไรท์ (Thorite) มีสูตรทางเคมี $ThSiO_4$ ในแร่ธอไรท์มีธอเรียมออกไซด์ประมาณ 25-26% ปะปนอยู่กับซิลิเกตของยูเรเนียม, เหล็ก, มังกานีส, ทองแดง, มักนีเซียม, ตะกั่ว, ดีบุก, อะลูมิเนียม, โซเดียมและโปตัสเซียม ธอไรท์ที่มียูเรเนียมออกตะออกไซด์ประกอบอยู่มากกว่า 5% เรียกว่า ยูเรโนธอไรท์ (Uranothorite) แร่ธอไรท์ที่พบมักมีสีดำ, เขียวปนดำ, หรือน้ำตาล ดูสดใสคล้ายแก้ว มีสัณฐานที่ไม่แน่นอน ปกติสัณฐานผลึกคล้ายผลึกของเซอคอนหรือเพทายซึ่งอยู่ในหมวดเตตระโกนาลอย่างเดียวกัน บางครั้งยอดผลึกทั้งสองหดสั้นลงมาทำให้ดูคล้ายแบบออกตะฮีดรอน มีความถ่วงจำเพาะ 4.0-6.0 มีแร่ธอไรท์อีกชนิดหนึ่งสีเหลืองปนส้มเรียกว่าโอแรงไกท์ (Orangite) มีธอเรียมออกไซด์อยู่สูงถึง 72% มีความถ่วงจำเพาะ 5.13 ถึง 5.4 แร่ธอไรท์มีปนอยู่ในหินแกรนิต, หินพวกที่คล้ายหินแกรนิตและกรวดทราย แหล่งที่สำคัญที่รู้จักกันคือ ในนิวซีแลนด์, ใจกลางของแคลิฟอเนียและบางแห่งในแถบทางตะวันตกของสหรัฐอเมริกา

ธอเรียนไนท์ (Thorianite) มีสูตรทางเคมี $(Th, U)O_2$ เป็นแร่ที่มีปริมาณของธอเรียมอยู่มากที่สุด แต่ที่พบมักมียูเรเนียมปนอยู่ด้วยเสมอ อาจมีปริมาณธอเรียมออกไซด์ 55-90% และยูเรเนียมออกตะออกไซด์ 0-33% ในธรรมชาติจะปรากฏเป็นผลึกรูปลูกเต๋า สีมักดำสนิท เนื้อแววววาวคล้ายโลหะ มีอยู่ในหินเปคมาไทม์ (Pegmatite), แกรนิตและไนซ์ มีความแข็ง 5-7 ซึ่งเกือบเท่าเหล็ก มี

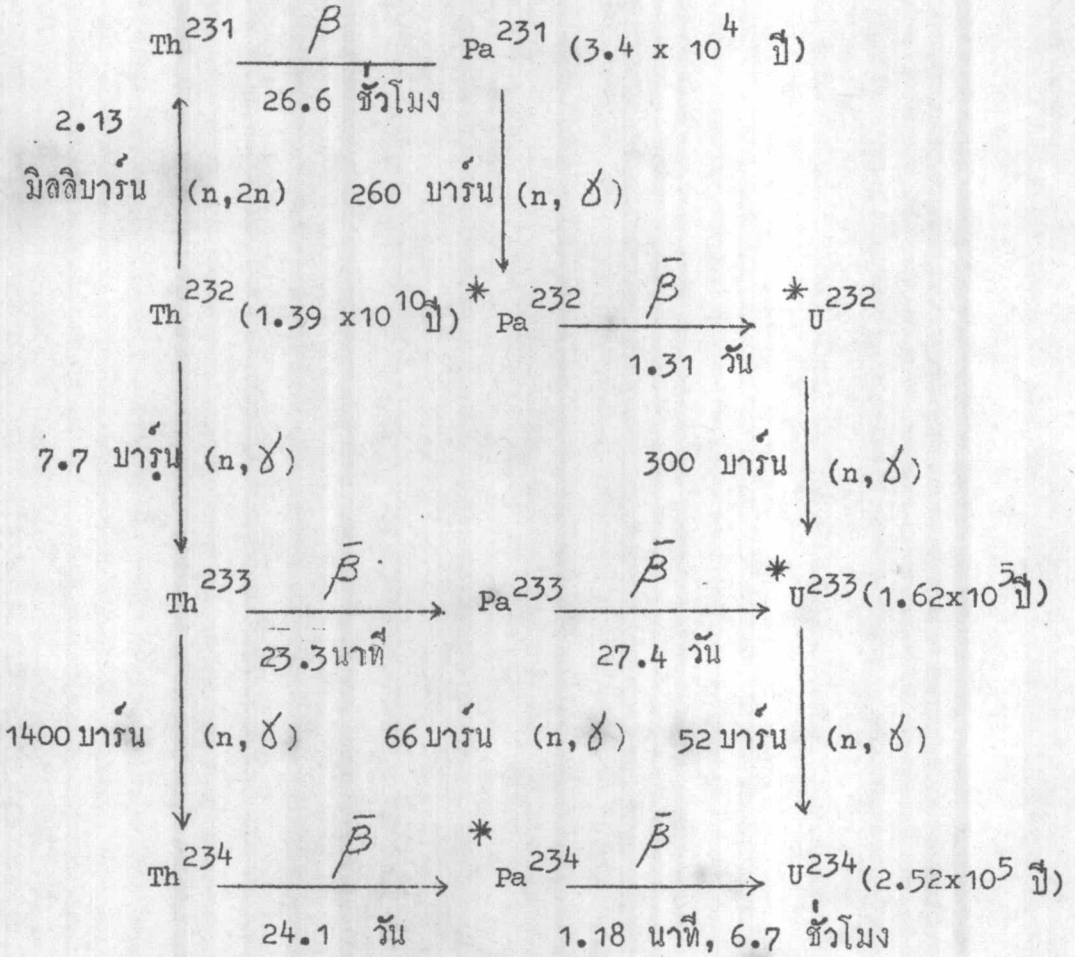
ความถ่วงจำเพาะ 9 หรือมากกว่า เป็นสารกัมมันตรังสีอย่างอ่อน ๆ อ่อนกว่าแร่ฟิชเบลนด์ แร่ธอเรียไนท์ชนิดที่มียูเรเนียมปนอยู่สูง ๆ ที่รู้จักกันเช่น ยูเรโนธอเรียนไนท์ (Uranothorianite) แหล่งแร่ธอเรียนไนท์ที่สำคัญเช่น มาดากัสคา (Madagascar) อลัสก้าและแคนาดา ในบริเวณที่มีทองและดีบุกในลังกาและทรานส์ไบคาเลีย (Transbaikalia) ก็เคยพบ แหล่งที่เคยพบในใต้ฟื้นทรายและกรวดคือ เซาท์ไอซ์แลนด์ (South Island) นิวซีแลนด์ แคลิฟอเนียและมอนตานา (Montana)

ธอเรียมที่ปรากฏในธรรมชาติมีเลขอะตอม 90 และเลขมวล 232 เป็นสารกัมมันตรังสี มีการสลายตัวโดยปล่อยรังสีอัลฟาและกลายเป็นธาตุอื่น ซึ่งสลายตัวต่อเป็นทอด ๆ จนในที่สุดกลายเป็นตะกั่วที่มีเลขมวล 208 ดังแสดงในแผนผังดังต่อไปนี้

000269


ธอเรียม–232
1.39x 10^10 ปี
α
เรเดียม–228
(เมโสธอเรียม)
6.7 ปี
β
แอคติเนียม–228
(เมโสธอเรียม 2)
6.13 ชั่วโมง
β
ธอเรียม–228
(เรดิโอธอเรียม)
1.9 ปี
α
เรเดียม–224
(ธอเรียม X)
3.64 วัน
α
เรดอน–220
(โธรอน)
54.5 วินาที
α
โพโลเนียม–216
(ธอเรียม A)
0.158 วินาที
α
ตะกั่ว–212
(ธอเรียม B)
10.6 ชั่วโมง
β
บิสมัท–216
(ธอเรียม C)
60.5 นาที
β (2/3)
โพโลเนียม–212
(ธอเรียม C′)
60.5 นาที
α (1/3)
3x10^-7 วินาที
α
ทัลเลียม–202
(ธอเรียม C″)
3.1 นาที
β
ตะกั่ว–208
(ธอเรียม D)

ธอเรียม -232 เป็นธาตุเฟอร์ไทล์ (fertile element) กล่าวคือ เมื่อทำปฏิกริยาจับนิวตรอนจะได้ธาตุใหม่ที่แตกตัวได้เช่นเดียวกับยูเรเนียม -235 และพลูโตเนียม -239 ซึ่งปฏิกริยาการจับนิวตรอนดังกล่าวเขียนเป็นแผนผัง[11] ได้ดังข้างล่างนี้ ธาตุที่อยู่ใต้เครื่องหมายดอกจันทน์ในแผนผังเรียกว่า ธาตุแตกตัวได้ (fissionable element)



---

[11] R. Stephenson, Introduction to Nuclear Engineering (2nd ed., Tokyo, Mc Graw-Hill Book company, Inc., 1954) ,p.57.

2.4 รอยบนแผ่นแก้ว

2.4.1 การเกิดรอย

การเกิดรอยบนแผ่นแก้วอาศัยหลักที่ว่าเมื่ออนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านฉนวนที่เป็นของแข็ง มันจะคายพลังงานส่วนหนึ่งให้แก่อะตอมของวัตถุ ทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออน จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นต่อ 1 หน่วยระยะทางที่อนุภาคผ่าน เรียกว่าการเกิดไอออนจำเพาะปฐมภูมิ (primary specific ionization) $\frac{dJ}{dx}$ ซึ่งเบเธ่ (Bethe) ได้หาสูตรไว้ดังนี้[12]

$$\frac{dJ}{dx} = \propto Z_{eff}^2 \beta^2 \left[\ln \left\{ \frac{2m_e c^2 \beta^2}{(1-\beta^2) I_o} \right\} - \beta^2 + 3.04 \right] \quad ..(2.9)$$

เมื่อ Z_{eff} คือประจุละม้ายของอนุภาคที่เข้ามา

$$= Z \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-125 \beta}{Z^{2/3}} \right) \right\} \quad .....(2.10)$$

β คืออัตราส่วนของความเร็วของอนุภาคที่เข้ามาต่อความเร็วแสง

m_e คือมวลของอิเลคตรอน

I_o คือพลังงานที่จะทำให้อิเลคตรอนวงนอกสุดของอะตอมหลุดออก

Z คือประจุจริงของอนุภาคที่เข้ามา

$\propto$ คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่อนุภาควิ่งผ่าน

C คือค่าความเร็วของแสง

โครงสร้างของวัตถุบริเวณที่มีการเกิดไอออนจะได้รับความเสียหาย ทำให้เกิดเป็นรอยขึ้นมา รอยนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียพลังงาน $\frac{dE}{dx}$ ของอนุภาคแก่วัตถุมากกว่าอัตราการสูญเสียพลังงานวิกฤต (critical energy

---

[12] R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, "Critirion for Registration in Dielectric Track Detector" The Physical Review., 156 (1967)353

loss) $\frac{dE}{dx}$ cri มิฉะนั้นจะไม่มีรอยเกิดขึ้น ค่า $\frac{dE}{dx}$ cri สำหรับวัตถุแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน สำหรับของแก้ว[13] ประมาณ 15 Mev ต่อมิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอนุภาคที่เบาที่สุดจะทำให้เกิดรอยบนแผ่นแก้วได้คือ ก๊าซมะถัน เพราะจากการทดลองอนุภาคที่เบากว่านี้ไม่มีช่วงพลังงานที่จะทำให้ค่า $\frac{dE}{dx}$ มากกว่า $\frac{dE}{dx}$ cri ได้

สำหรับการทำให้เกิดรอยบนแผ่นแก้วโดยให้นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของสารที่แตกตัวได้ที่ติดไว้บนแผ่นแก้ว ส่วนที่แตกตัวส่วนหนึ่งจะวิ่งเข้าชนแก้ว อีกส่วนหนึ่งจะวิ่งออกไปในทิศทางตรงกันข้ามตามกฎการอนุรักษ์ของโมเมนตัม ส่วนที่วิ่งเข้าชนจะทำให้เกิดรอยขึ้น ดังนั้นการแตกตัวของนิวเคลียส 1 นิวเคลียสจะทำให้เกิดรอยเพียง 1 รอยเท่านั้น

2.4.2 การคำนวณหาจำนวนรอย

จำนวนรอยที่เกิดขึ้นตามความจริงทางทฤษฎีเขียนเป็นสูตร[14, 15] ได้ดังนี้

$$\rho_t = \phi \sigma_f N \quad \text{---------- (2.11)}$$

เมื่อ ρ_t คือจำนวนรอยต่อตารางเซนติเมตรตามความเป็นจริง

ϕ คือนิวตรอนฟลูเอนซ์ (neutron fluence) มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร

---

[13] R.L. Fleischer, P.B. price and R.M Walker, loc.cit.

[14] S.Elleman and C. Kesler, "Application of Fission Fragment Etch-Pit Techniques in Uranium Detection", Nuclear Application & Technology.,7 (1969) 170

[15] P.B. Price and R.M. Walker, "A New Track Detector for Heavy Particle Studies", Physical Review Letter., 3(1962)113

σ_f คือภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอนในการแตกตัว มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

N คือจำนวนอะตอมของสารที่แตกตัวได้ต่อตารางเซนติเมตร

จำนวนรอยที่ได้จากสมการ (2.11) จะมากกว่าที่ได้จากการสังเกต เพราะรอยที่เกิดขึ้นจากส่วนที่แตกตัวพวกที่ชนกับผิวแก้วทำมุมน้อยกว่ามุมวิกฤต (critical angle) θ_c จะไม่มีเนื่องจาก

ก. ส่วนที่แตกตัวกระเจิง (scattering) ออกไปจากแผ่นแก้ว

ข. ทางที่ส่วนที่แตกตัววิ่งผ่านอยู่ตื้นและเกือบขนานกับผิวของแผ่นแก้ว จึงหลุดติดไปกับส่วนหน้าของผิวแก้วที่ถูกกัดออกไประหว่างทำปฏิกริยาเคมี

ค. รอยที่เกิดขึ้นจางจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้

มุมวิกฤตของวัตถุแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน มุมวิกฤตของแก้วประมาณ 50 องศา ดังนั้นจำนวนรอยที่ได้จากการสังเกตสามารถเขียนเป็นสูตรได้

$$\rho_o = \Phi \sigma_f N (1 - \sin \theta_c) \quad \text{_____ (2.12)}$$

เมื่อ ρ_o คือจำนวนรอยต่อตารางเซนติเมตรที่ได้จากการสังเกต

$(1-\sin \theta_c)$ เรียกว่าแฟคเตอร์ทางเรขาคณิต (geometry factor) มีค่าน้อยกว่า 1

ในกรณีที่ความหนาของสารที่ติดอยู่บนแผ่นแก้วมีค่ามากกว่าพิสัยรีคอยล์ของการแตกตัว (fission recoil range) ค่าของ N ในสมการ (2.11) และ (2.12) จะมีค่า

$$N = N_o R_{eff} \quad \text{_____ (2.13)}$$

เมื่อ N_o คือจำนวนอะตอมของสารที่แตกตัวได้ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$R_{eff} = \frac{R \cos^2 \theta_c}{1-\sin \theta_c} \quad \text{----------} \quad (2.14)$$

เมื่อ R_{eff} คือพิสัยละม้ายของส่วนที่แตกตัว (effective fission fragment range)

R คือพิสัยจริงของส่วนที่แตกตัว (actual fission fragment range)

2.4.3 เทคนิคในการขยายรอย

การขยายรอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยนำแผ่นแก้วไปทำปฏิกริยากับสารเคมีนั้น สารเคมีที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับชนิดของแก้ว และเงื่อนไขของการทำปฏิกริยาจะมีแฟคเตอร์ 3 ตัว คือ ความเข้มข้นของสารเคมี อุณหภูมิในการทำปฏิกริยาและเวลาในการทำปฏิกริยา เงื่อนไขในการทำปฏิกริยาสำหรับแก้วชนิดต่าง ๆ[16] แสดงในตาราง 2-2

ชนิดของแก้ว	เงื่อนไขของการทำปฏิกริยา
Photo glass	2.5% HF, 23 นาที, 19°C
P_2O_2 glass	48% HF, 30 นาที, 23°C
Na-Ca glass	48% HF, 3 วินาที, 23°C
Tektite glass	48% HF, 30 วินาที, 23°C

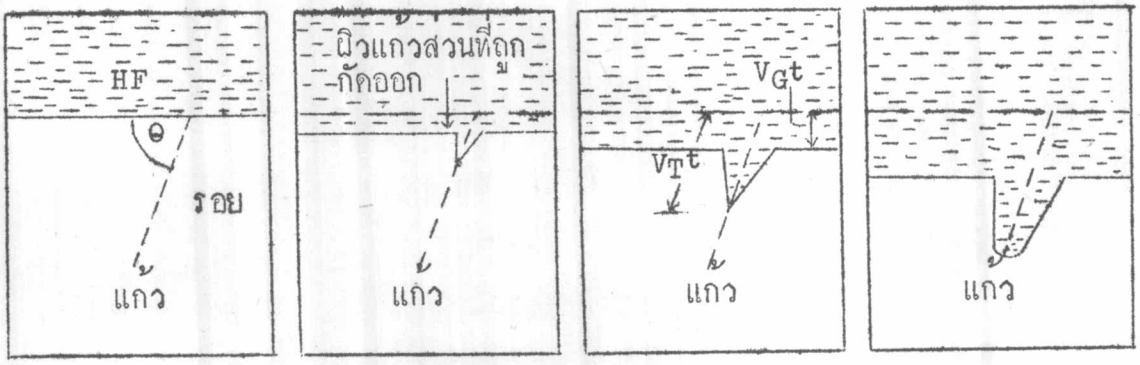
ตาราง 2-2 แสดงเงื่อนไขในการทำปฏิกริยาเคมีสำหรับแก้วชนิดต่าง ๆ

---

[16] R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, "Solid-State Tracks Detectors Applications to Nuclear Science and Geophysics", Annual Reviews , 15 (1965)1

เงื่อนไขในตาราง 2–2 นั้นเป็นผลมาจากการทดลอง ซึ่งไม่ได้กำหนดตายตัวอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม

ผิวแก้วที่ถูกกัดออก (etch) ขณะทำปฏิกริยากับกรดไฮโดรฟลูออริค (HF) จนรอยมีขนาดใหญ่ขึ้นแสดงให้เห็นดังในรูป 2–3



ก. เวลา = 0 ข. เวลา = $\frac{t}{2}$ ค. เวลา = t ง. เวลา = 2t

รูป 2–3 แสดงลักษณะของผิวแก้วที่ถูกกัดขณะทำปฏิกริยากับกรดไฮโดรฟลูออริค

ในรูป 2–3 ผิวแก้วบริเวณที่ไม่ได้ถูกทำให้เสียหายเป็นรอยจะถูกกัดออกโดยกรดไฮโดรฟลูออริคด้วยอัตราการถูกกัดออก V_G และผิวแก้วบริเวณที่เสียหายเป็นรอยจะถูกกัดออกตามแนวรอยด้วยอัตราการถูกกัดออก V_T ถ้าเวลาในการทำปฏิกริยานานจนผิวแก้วถูกกัดออกจนถึงจุดสิ้นสุดของรอยแล้ว ปลายของรอยจะหุบดังรูป ง.

ดังนั้นหลังจากทำปฏิกริยาแล้ว ความยาว (Length) ของรอยรูปกรวยที่มองเห็นส่วนหนึ่งจะหายไปโดยติดไปกับผิวส่วนหน้าของแผ่นแก้วที่ถูกกัดออกไป ความยาวส่วนที่หายไป ΔL จะเป็นไปตามสูตรดังนี้

$$\Delta L = V_G t \csc \theta \qquad (2.15)$$

000269

เมื่อ θ คือมุมที่ส่วนที่แตกตัวตกกระทบบนผิวแก้ว

$$\theta_C = \sin^{-1}\left(\frac{V_G}{V_T}\right) \quad \text{---------- (2.15)}$$

ความยาวที่แท้จริง L ของรอยรูปกรวยจะเป็นไปตามสูตร

$$L = \int_0^t V_T \, dt \quad \text{---------- (2.16)}$$

เมื่อ t คือเวลาในการทำปฏิกริยา

เมื่อต้องการหยุดปฏิกริยา ไม่ให้รอยมีขนาดใหญ่ขึ้นอีก ทำได้โดยนำแผ่นแก้วไปล้างด้วยน้ำธรรมดา โดยปล่อยให้น้ำไหลผ่านอย่างช้า ๆ (slow runing water) เป็นเวลานาน ๆ จนสารเคมีถูกชะออกไปหมด แล้วจึงเช็คเบา ๆ ด้วยกระดาษหรือผ้าที่นุ่มและสะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้ขอบของรอยบิ่น