



ทฤษฎีแตรีก-เอตซ์, อนุภาคอัลฟาและเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

2.1 ทฤษฎีแตรีก-เอตซ์ (track-etch theory) (1)

เมื่อปี พ.ศ.2502 ที่ซาร์เวลล์ นายซิลค์และนายบาร์เนส (Silk and Barnes) สองนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้พบรอยอนุภาคบนแผ่นไมกา (mica) ซึ่งเกิดจากส่วนที่แตกออก ของการแตกตัวของยูเรเนียม-235 รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เขาทั้งสองได้สรุปปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า "เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์ใด ๆ วิ่งผ่านวัสดุที่เป็นฉนวนบางชนิดเช่น แก้ว ไมกา มายลาร์ (mylar) และพลาสติก เป็นต้น จะทำให้เกิดรอยเล็ก ๆ เป็นแนวบนพื้นผิวของวัสดุ" จากการค้นพบในครั้งนั้นแล้ว ต่อมาก็ได้พบวิธีขยายรอยเล็ก ๆ เหล่านี้ให้ดูชัดเจนขึ้น

ในปี พ.ศ.2503-2505 นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มได้ทดลองศึกษาเรื่องการเกิดรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม และต่อมาในปี พ.ศ.2506 นายฟรีเชอร์และนายไพร์ซ์ (Friesher and Price) ได้ศึกษาเรื่อง การกัดขยายรอยอนุภาคบนแผ่นไมกาให้ใหญ่ขึ้น ด้วยการนำแผ่นไมกาจุ่มลงในสารละลายเคมีที่เหมาะสม ทำให้มองเห็นรอยอนุภาคเหล่านี้ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา จำนวนรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนอนุภาคมีประจุที่วิ่งผ่าน จากการค้นพบเทคนิคอันนี้ ทำให้นำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.1.1 การเกิดรอยอนุภาค (track mechanism)

การเกิดรอยอนุภาค มีการกล่าวไว้หลายลักษณะ แต่ที่มีเหตุผลน่าเชื่อถือได้มีเพียง 2 ทฤษฎีเท่านั้นคือ

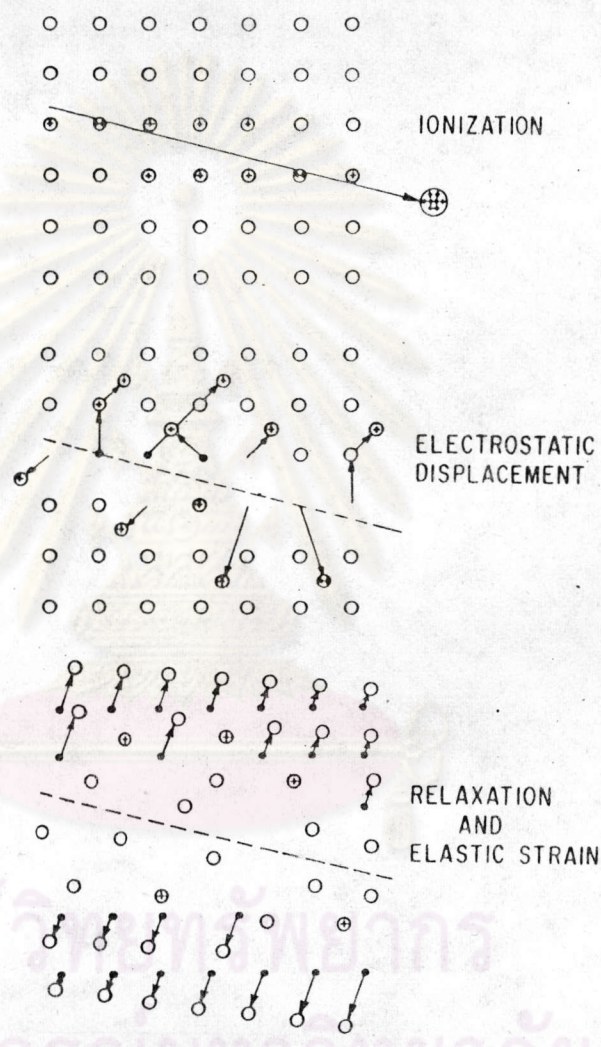
1. ทฤษฎีเทอร์มัลสไปค (thermal spike) (1)

ทฤษฎีนี้กล่าวว่า "เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุใด ๆ จะเกิดการแตกตัวและการกระตุ้น (ionization and excitation) อย่างรุนแรง ตามแนวทางที่อนุภาควิ่งผ่าน ทำให้เกิดความร้อน และอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าวัตถุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จะสามารถกระจายความร้อนไปสู่บริเวณรอบ ๆ พื้นที่ได้ ทำให้อุณหภูมิที่จุดนั้นไม่สูงมากนัก แต่ถ้าวัตถุนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่เลวความร้อนก็จะไม่สามารถแผ่กระจายไปสู่พื้นที่รอบ ๆ ได้ ทำให้จุดนั้นร้อนจัด เกิดความเครียดขึ้น และเกิดการขยายตัวมากกว่าพื้นที่รอบ ๆ โครงสร้างที่จุดนั้นถูกทำลายไป เกิดรอยอนุภาคขึ้นมาแทน"

2. ทฤษฎีไอออนเอกซ์พลอสชันสไปค (ion explosion spike) (1,12)

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า "เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัตถุใด ๆ จะเกิดการสั่นสะเทือนของอะตอม ถ้าอะตอมเหล่านั้นได้รับพลังงานมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นรอบ ๆ แนวทางที่อนุภาค เคลื่อนที่ผ่าน และเกิดการผลักกัน ทำให้อะตอมเหล่านั้นไปเบียดกับอะตอมที่อยู่ถัดไป เกิดความเครียดแผ่กระจายออกไป ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขึ้นหลังจากที่โมเลกุลได้จัดเรียงตัวจนเกิดความสมดุลแล้ว"

การเกิดช่องว่างหรือรอยของอนุภาคนี้ จะมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) วัสดุที่จะเกิดกับขบวนการนี้ได้ ต้องเป็นฉนวนความร้อน ได้แก่ แก้ว โม่กา และพลาสติก เป็นต้น แต่ถ้าหากเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีเช่น โลหะ อะตอมที่เป็นไอออนบวกดังกล่าว จะจับอิเล็กตรอนที่บริเวณรอบ ๆ แล้วกลายสภาพเป็นกลางกลับสู่สภาพเดิมได้ จึงไม่เกิดช่องว่างขึ้น

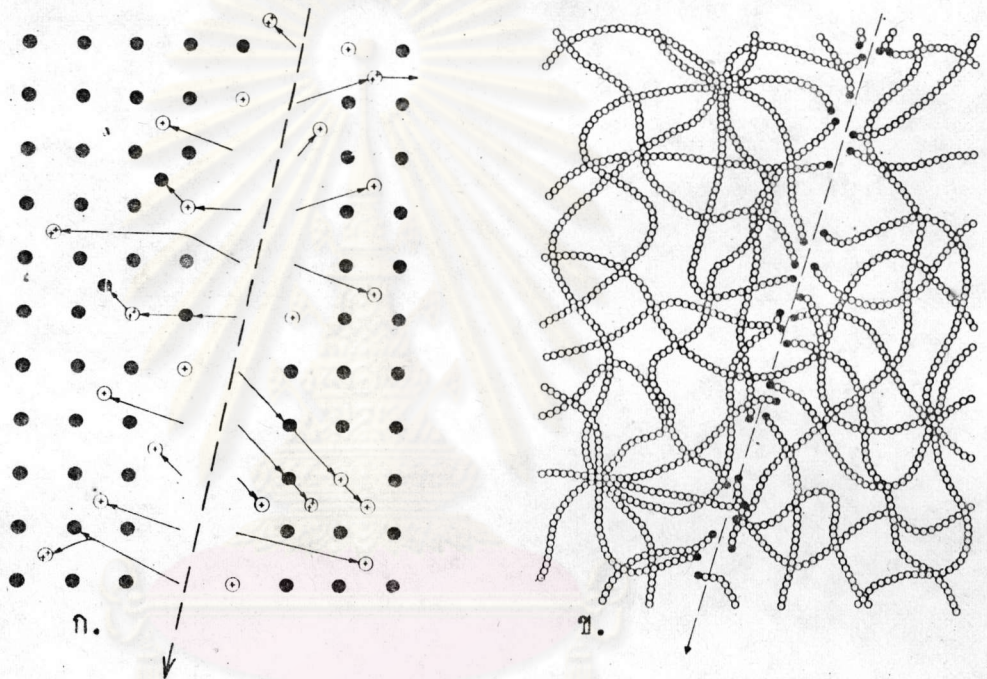


รูปที่ 2.1 การเกิดรอยอนุภาคตามทฤษฎีไอออนเอกซ์โพสิชันสเปคต์

- จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นขั้นตอนการเกิดรอยอนุภาคตามลำดับขั้น คือ
- ก. ขั้นที่ 1 เกิดไอออนไนเซชันหลังจากอนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน
 - ข. ขั้นที่ 2 อะตอมที่อยู่ถัดไปถูกชนและถูกแทนที่
 - ค. ขั้นที่ 3 เกิดความเครียดแผ่กระจายกว้างออกไป

รอยอนุภาคบนผลึกที่ยังไม่ได้กัดขยายรอยเหล่านี้ ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องดูจึงจะสามารถมองเห็นได้

ในวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดัดนั้น จะไม่สามารถเกิดรอยอนุภาคได้ ต้องเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนเท่านั้น รอยอนุภาคที่เกิดมักเป็นรอยแคบ ๆ (ขนาดไม่เกิน 50 อังสตรอม) มีความคงสภาพ และนำมากัดขยายรอยได้ดีกว่า ในการเกิดรอยอนุภาคสามารถแยกได้เป็นวัตถุอินทรีย์ได้แก่ โพลีเมอร์ (polymer) วัตถุอนินทรีย์ได้แก่ ผลึกและแก้ว เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะของรอยอนุภาคในอะตอมของ (ก) ผลึก (ข) โพลีเมอร์

การเกิดรอยของผลึก จะประกอบด้วยช่องว่างของแลตทิซ (lattices) และไอออน (ions) หรืออะตอมไม่มีสี ส่วนในโพลีเมอร์จะมีลักษณะเป็นลูกโซ่

ในรูปที่ 2.3 รอยอนุภาคเกิดจากส่วนที่แตกออก ของแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์

- รูปซ้ายมือคือ แก้วอินทรีย์ (organic glass) เลกซานโพลีคาร์บอเนต (lexan polycarbonate) และโพลีเมอร์
- รูปกลางคือ อินออร์แกนิกโซดาไลม์กลาสส์ (inorganic sodalime

glass)

- รูปขวามือคือ พลิก ออร์โทเคลส (orthoclase) และแร่หินพื้นผ้า



รูปที่ 2.3 ลักษณะรอยอนุภาคหลังจากถูกกัดขยายรอยด้วยสารละลายเคมี

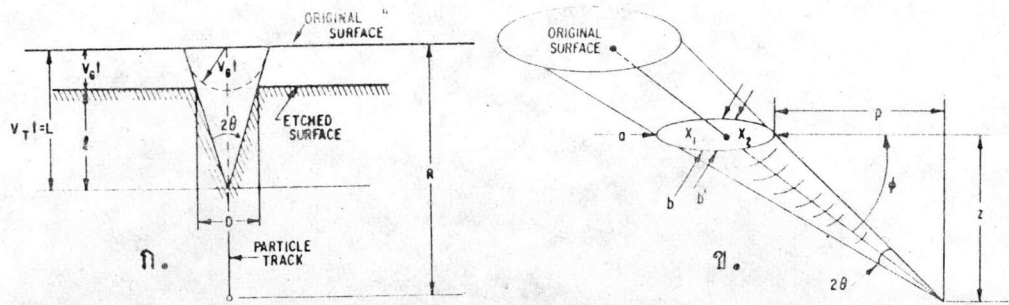
2.1.2 รูปทรงของรอยอนุภาค (track geometry)

2.1.2.1 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ V_T คงที่

งานขบวนการกัดขยายรอยนั้น จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกัน 2 ขั้นตอน หากที่ รอยอนุภาคขยายใหญ่ขึ้น ขั้นตอนดังกล่าวคือ

ก. ความเร็วในการกัดขยายรอยอนุภาค ด้วยสารละลายเคมี ตามแนว อนุภาค กำหนดให้เป็น V_T

ข. ความเร็วของการกัดขยายรอยอนุภาค ด้วยสารละลายเคมี บนพื้น ผิวทั่วไปและบนพื้นผิวภายในของรอยอนุภาคอีกเล็กน้อย กำหนดให้เป็น V_G



รูปที่ 2.4 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ความเร็ว V_T และ V_G คงที่

(ก) อนุภาคห้ามุมแนวตั้ง

(ข) อนุภาคห้ามุม ϕ

จากรูปที่ 2.4 แสดงการเกิดรอยอนุภาครูปทรงกรวย ซึ่งมีรอยอนุภาคเดิมตามแกนเส้นประและสมมติให้

1. V_T เป็นค่าคงที่ตามแนวรอยที่เกิด
2. V_G เป็นค่าคงที่และไอโซทรอปิก (isotropic)
3. V_G/V_T มีค่าคงที่ และประมาณว่าที่ระยะเวลาการกัดขยายรอยสั้น ๆ

เป็นจริง มีระยะเท่ากับ $V_T t$ (t = เวลาในการกัดขยายรอย)

4. L = ความยาวรอยอนุภาค
5. D = เส้นผ่าศูนย์กลางรอยอนุภาค

จากรูปที่ 2.4ก เวลาที่ใช้กัดขยายรอยเดียวกัน ผลที่เกิดจากค่าของ V_T และ V_G สามารถเขียนในเทอมของพารามิเตอร์ (parameter) การกัดขยายรอยได้ดังนี้

$$l = (V_T - V_G)t \quad (2.1)$$

$$d = 2V_G t \sqrt{(V_T - V_G)/(V_T + V_G)} \quad (2.2)$$

ถ้าเขียนในรูปปริมาณการวัด จะได้

$$\begin{aligned} V_T/V_G &= 2\sqrt{(D/2)^2 + l^2}/D \\ &= \text{CSC}.\theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} V_G t &= (D/2)(D/2l + \sqrt{(D/2)^2 + l^2}/l) \\ &= (D/2)(\tan\theta + \sec\theta)/2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}
 V_{Tt} &= \sqrt{(D/2)^2 + 1^2} \cdot (D/2 + \sqrt{(D/2)^2 + 1^2} / 1) \\
 &= D \cdot \csc\theta (\tan\theta + \sec\theta) / 2 \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

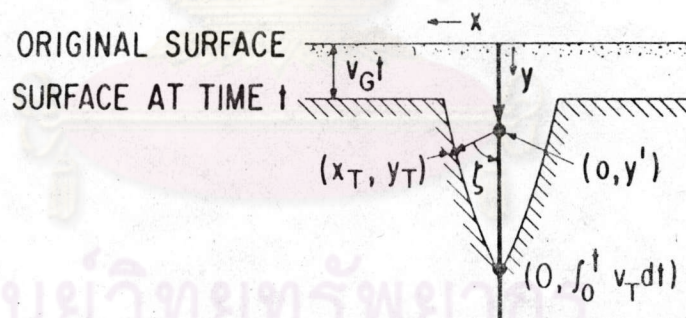
และจากในรูป 2.4 ข แสดงรอยอนุภาคทามุม ϕ กับพื้นผิว รอยอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปไข่ (ellipse) มุมรูปกรวยของรอยอนุภาคเป็น θ จากความสัมพันธ์ของมุมเหล่านี้ อาจเขียนได้อันรูปสมการ

$$\theta = \arcsin \frac{[\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a+p)^2 + Z^2} - p^2 - ap - Z^2]^{1/2}}{2\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a+p)^2 + Z^2}} \quad (2.6)$$

$$L = (Z + V_G t) / \sin\phi \quad (2.7)$$

2.1.2.2 รูปทรงของรอยอนุภาคที่ V_T ไม่คงที่

เมื่อ V_T ไม่คงที่ มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความยาวของรอยอนุภาคย่อมทำให้เกิดความซับซ้อนในรอยอนุภาคที่ถูกกัดขยาย ซึ่งวัสดุส่วนมากไม่ว่าจะเป็นพลาสติก แก้วหรือผลึก ค่า V_T จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการแตกตัว



รูปที่ 2.5 รูปทรงรอยอนุภาคที่เกิดเมื่อค่า V_T เพิ่มขึ้น (รอยอนุภาครัดงอกมากขึ้น)

จากรูปที่ 2.5 จะพบว่า

$$V_T(y) = \text{ความเร็วในการกัดขยายรอยอนุภาค ซึ่งไม่คงที่ตามแนวแกน } Y$$

$$(X_T, Y_T) = \text{รูปด้านข้างของรอยอนุภาค ที่เกิดจากรยะเวลากัดขยายรอย}$$

ในการหาค่า L คำนวณได้จาก

$$t = \int_0^L dy / V_T(y) \quad (2.8)$$

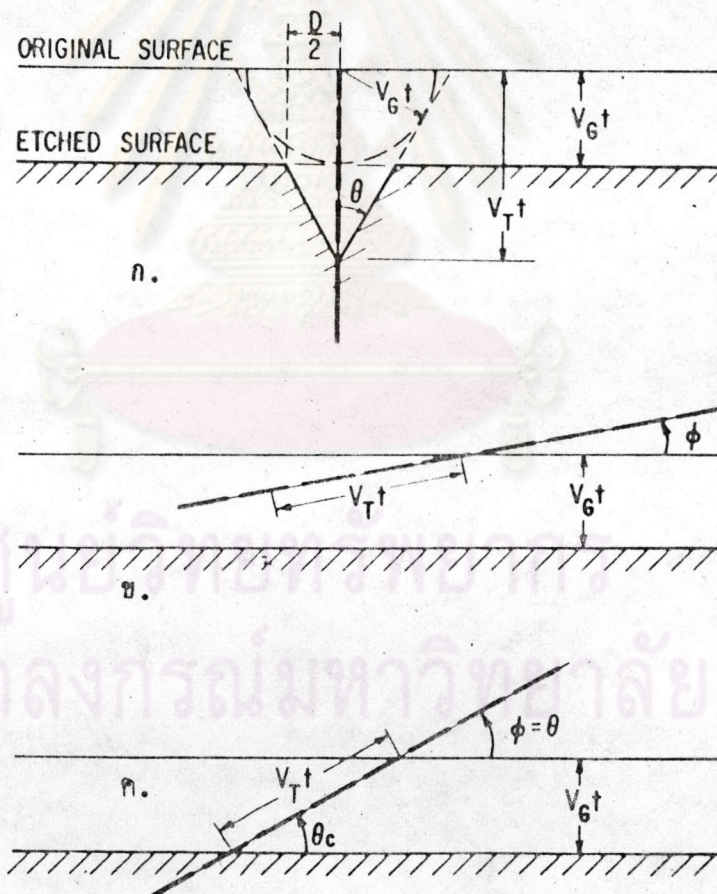
และเวลาที่ใช้กัดขยายรอยจนถึงจุด (X_t, Y_t) คือ

$$t = \int_0^{y'} dy/v_T(y) + [(Y_t - y')^2 + x^2]^{1/2}/v_G \quad (2.9)$$

2.1.3 ประสิทธิภาพการกัดขยายรอย (etching efficiency)

ประสิทธิภาพในการกัดขยายรอยสมมติให้เป็น n ซึ่ง

$$n = \frac{\text{ความหนาของพื้นผิววัสดุก่อนกัดขยายรอย}}{\text{ความหนาของพื้นผิววัสดุหลังกัดขยายรอย}} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.6 รูปร่างของรอยอนุภาคที่ถูกกัดขยายในลักษณะต่าง ๆ

- จากรูปที่ 2.6 ก. แสดงให้เห็นว่ามุม θ ขึ้นอยู่กับค่า V_T และ V_G
- ข. แสดงให้เห็น พื้นผิวที่ถูกกัดขยายรอยตามแนวอนุภาค ($V_T \sin \phi$) น้อยกว่า V_G (การกัดขยายรอยบนพื้นผิวทั่วไป) นั่นคือเมื่อ V_T น้อยกว่า V_G จะไม่เกิดรอยอนุภาค
- ค. แสดงให้เห็นว่าเมื่อ $\phi = 0$ รอยอนุภาคจะเริ่มถูกกัดหายไป

2.1.4 เทคนิคการกัดขยายรอย (etching techniques)

การกัดขยายรอยอนุภาค ต้องเลือกใช้สารละลายที่เหมาะสม กับชนิดของวัสดุและเงื่อนไขต่าง ๆ หลักสำคัญทั่วไปที่ช่วยในการเลือกเงื่อนไขการกัดขยายรอยมีดังนี้

1. วัสดุที่กัดขยายรอยจะเกิดรอยอนุภาคบนพื้นผิวได้ ซึ่งต้นกำเนิดนิวตรอนแบบกัมมันตรังสีที่นิยมใช้คือแคลิฟอร์เนียม-252 ที่มีอัตราการแตกตัวประมาณ 10^5 ฟิชซ์/วินาที จากพื้นที่ 0.2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถจะเกิดรอยอนุภาคได้แน่นอน
2. วัสดุละลายเคมี หากการกัดขยายรอยผิววัสดุอย่างช้าๆ ในอัตราคงที่จนกระทั่งรอยที่ถูกกัดขยายใหญ่ขึ้นเพียงพอที่จะมองเห็น
3. ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลาย สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่ต้องไม่รวดเร็วเกินไปและจะต้องควบคุมการกัดขยายรอย ให้อยู่ในอัตราที่เหมาะสม
4. สารละลายที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ โดยเฉพาะผลึกแต่โดยทั่วไปแล้วจะสามารถเกิดรอยได้
5. พื้นผิวที่กัดขยายรอย จะต้องเรียบเมื่อมองด้วยตาเปล่า และส่วนที่ถูกกัดขยายรอยออกมาของผลึกหรือแก้ว จะต้องมีส่วนผิวที่เหมาะสม ไม่มีผลต่อวัสดุที่ถูกกัดขยายรอย

ลักษณะและรูปร่างของรอยอนุภาคที่ถูกกัด ขึ้นอยู่กับมุมกรวย ซึ่งในตารางที่ 2.1 แสดงค่าของมุมกรวย ที่เกิดจากส่วนที่แตกออกและการกัดขยายรอย

2.1.5 การเพิ่มคอนทราสต์ของรอยอนุภาค (enhancing track contrast)

การเติมสารทึบแสงชนิดต่าง ๆ เช่นโลหะ น้ำยาย้อม และหมึก บนรอยอนุภาคที่ถูกกัดขยายหรือการเคลือบรอยอนุภาค ด้วยแผ่นโลหะบาง ๆ ทึบแสง จะทำให้เพิ่มคอนทราสต์ ซึ่งมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ส่วนวัสดุจากพวกแร่ และแก้ว จะใช้สารละลายของเงินเป็นตัวแทรกเข้าไปในรอยอนุภาคที่ถูกกัด และก่อนที่จะส่องดูรอยอนุภาค จะต้องใช้กรดไนตริก (nitric acid) เช็ดชั้นของเงินที่ผิววัสดุออกก่อน แต่ถ้าหากต้องการเห็น การแยกรายละเอียดที่ดีกว่านี้ ต้องมองผ่านเลนส์ที่จุ่มในน้ำมัน และถ้าหากต้องการกัดขยายรอยต่อไปอีก ก็สามารถทำได้ ยังมีวิธีที่จะทราบจำนวนรอยอนุภาคได้ โดยผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 3 นั่นคือใช้แสงสะท้อนรอยอนุภาคบนพื้นผิวไมกาที่มีเงินเกาะอยู่ วิธีอื่น ๆ ได้แก่การฉายน้ำยาเรืองแสงกับรอยอนุภาค แล้วมองด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light) การใช้แสงที่มีการสั่นทางเดียวผ่านรอยอนุภาค จะเห็นแสงที่กระเจิง มาจากรอยอนุภาคที่ถูกกัด และการใช้ฟิล์มที่มีสีมองผ่านฟิลเตอร์ (filter) ทึบแสง ที่ความยาวคลื่นสามารถผ่านได้

2.1.6 การนำเทคนิคแทรก-เอตซ์ไปประยุกต์ใช้งาน

การเกิดรอยอนุภาคบนวัสดุนั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นับตั้งแต่ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ งานวิศวกรรมนิวเคลียร์ ความปลอดภัยในเหมืองแร่ การสำรวจแร่ยูเรเนียม งานความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ค่าของมัมกรวยที่เกิดกับวัสดุชนิดต่าง ๆ (1)

ชนิดวัสดุ		มัม (องศา)
แร่ (กับสารละลายบางชนิด)	ลิเทียมฟลูออไรด์และเซอร์คอน (ที่มีมัม 70 องศา)	0 - 5
แก้ว	โรซดา หินปูน บอเรต ฟลินท์ บอโรซิลิเกต เทคไทท์ ออบซิเดียน เบซอลติก และลูนาร์	20 - 70
	ซิลิกา	13 - 19
	แก้วฟอสเฟต	1 - 5
พลาสติก	พลาสติกชนิดต่าง ๆ	0 - 5

2.2 อนุภาคอัลฟา (alpha particles)

โดยปกติแล้วอนุภาคอัลฟา จะทำให้แก๊สแตกตัวเมื่อมันวิ่งผ่าน และจะสูญเสียพลังงานและความเร็ว เมื่อความเร็วของอนุภาคอัลฟาตกลงมา จะดูดจับอิเล็กตรอน (electron) ไว้ แล้วกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลาง อนุภาคอัลฟานั้นส่วนมาก จะมีความเร็วอยู่ระหว่าง 1.4×10^7 ถึง 2.2×10^7 เมตรต่อวินาที และงานการวัดเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างประจุกับมวลของอนุภาคอัลฟา จะใช้วิธีหักเหจนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่า

$$e/m = 4,823 \text{ emu/g (2)}$$

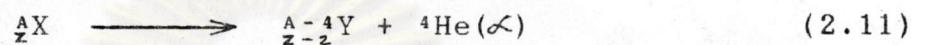
ส่วนของไฮโดรเจนมีค่า $e/m = 9,560 \text{ emu/g (2)}$

จากการวัดค่า e และ e/m พบว่าอนุภาคอัลฟามีมวล 4 amu และอิเล็กตรอนมีมวล

2 หน่วยประจุ

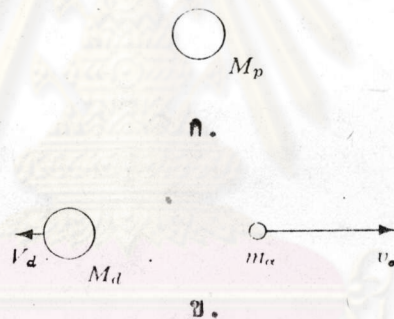
2.2.1 การสลายตัวของอนุภาคอัลฟา (alpha decays)

จำนวนการสลายตัวนิวเคลียสต้น (parent nucleus) จะสลายตัวสูญเสียโปรตอนไป 2 ตัว ทำให้มวลและประจุ ลดลง 4 หน่วยและ 2 หน่วยตามลำดับ ดังตัวอย่างเช่น ถ้า $A = -4$ และ $Z = -2$ จะได้ว่า



ก. สถานะการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง (spontaneous decay)

นิวเคลียส A_ZX มีมวล M_p สลายตัวแล้วให้นิวเคลียส ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ มีมวล M_d และยังมีอนุภาคอัลฟามีมวล m_α



รูปที่ 2.7 การสลายตัวของอนุภาคอัลฟา

(ก) รูปนิวเคลียสต้นก่อนการสลายตัว

(ข) รูปนิวเคลียสรองและอนุภาคอัลฟาซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อรักษาสมมูลย์ของโมเมนตัมเชิงเส้น

ถ้าให้ $E_i =$ พลังงานก่อนการสลายตัว

$E_f =$ พลังงานหลังจากสลายตัวแล้ว

จากหลักการคงสภาพของพลังงาน

$$E_i = E_f \quad (2.12)$$

$$\text{หรือ } M_p c^2 = M_d c^2 + K_d + M_\alpha c^2 + K_\alpha \quad (2.13)$$

โดยที่ K_d = พลังงานจลน์ของนิวเคลียสรอง (daughter nucleus)

K = พลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟา

ค่าการสลายตัวของอนุภาคพลังงาน Q หาได้จาก

$$\begin{aligned} Q &= K_d + K_\alpha \\ &= (M_p - M_d - M_\alpha) c^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

ค่า Q ในการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง จะมีค่าเป็นบวกเสมอ และถ้าเขียนในรูปของมวลอะตอมจะได้

$$Q = [M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - m(4, 2)] c^2 \quad (2.15)$$

ข. พลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟา

จากกฎการคงสภาพของโมเมนตัมและพลังงาน (ดูในรูปที่ 2.7)

$$m_\alpha v_\alpha = M_d V_d \quad (2.16)$$

และ

$$\begin{aligned} Q &= K_d + K_\alpha \\ &= 1/2 M_d V_d^2 + 1/2 m_\alpha v_\alpha^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

ซึ่งกำหนดให้ v_α = ความเร็วของอนุภาคอัลฟา

V_d = ความเร็วของนิวเคลียสรอง

จากสมการ (2.16) แทนค่าในสมการ (2.17) จะได้

$$\begin{aligned} Q &= 1/2 M_d (m_\alpha v_\alpha / M_d)^2 + 1/2 m_\alpha v_\alpha^2 \\ &= 1/2 m_\alpha v_\alpha^2 (m_\alpha / M_d + 1) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\text{หรือ } Q = K_\alpha (m_\alpha / M_d + 1) \quad (2.19)$$

$$\text{หรือ } K = Q / 1 + (m_\alpha / M_d) \quad (2.20)$$

2.2.2 พิสัยและการแตกตัว (ranges and ionization) (2)

พิสัยของอนุภาคอัลฟา คือ ระยะทางที่อนุภาคอัลฟาเดินจากต้นกำเนิดไปถึงจุดที่พลังงานจลน์ของมันมีค่าเท่ากับศูนย์ พิสัยมี 3 แบบใหญ่ ๆ คือ

ก. แบบเอกซ์ตราโพล (extrapolated range) มีค่าพิสัยเท่ากับ 3.897 เซนติเมตร

ข. แบบพิสัยเฉลี่ย (mean range) มีค่าพิสัยเท่ากับ 3.842 เซนติเมตร

ค. แบบการแตกตัว (ionization range) มีค่าพิสัยเท่ากับ 3.870 เซนติเมตร

ค่าของพิสัยขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุที่ดูดกลืน และพลังงานจลน์เริ่มต้นของอนุภาคมีประจุ ซึ่งวัสดุดูดกลืนมาตรฐานได้ถูกกำหนดไว้ คือ อากาศที่อุณหภูมิ 15 เซลเซียส มีความดัน 760 มิลลิเมตร-ปรอท

เมื่ออนุภาคมีประจุ เคลื่อนที่ผ่านวัสดุดูดกลืน และสูญเสียพลังงานไป ซึ่งเกิดจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของอะตอมวัสดุดูดกลืน - ถ้าอิเล็กตรอนหนึ่งตัวถูกชนและได้รับพลังงานเพียงพอ ก็จะหลุดออกไปจากอะตอม แต่ถ้าไม่หลุดก็จะอยู่ในชั้นเอกไซต์ (excited state) ซึ่งจากทั้งสองสถานะของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิด "การแตกตัว" ได้ พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการแตกตัวนี้ เรียกว่า "โพเทนเชียลไอออไนเซชันเฉลี่ย (average potential ionization, I)"

2.2.3 การหยุดพลังงานและพิสัย (stopping power and range)

การหยุดพลังงานหมายถึง จำนวนพลังงานของอนุภาคที่สูญเสียไปต่อหน่วยความยาวในวัสดุใด ๆ ที่กำหนด นั่นคือ

$$S(E) = - dE/dX = wI \quad (2.21)$$

กำหนดให้ $S(E)$ = องค์ประกอบของพลังงานจลน์ (E) ของอนุภาค ซึ่งมีความแตกต่างกันในวัสดุต่าง ๆ

I = การแตกตัวจำเพาะเฉลี่ย (average specific-ionization)

ซึ่งอยู่ในรูปของจำนวนไอออนแพร์ (ion pairs) ต่อหน่วยความยาว

w = พลังงานที่ใช้สร้างไอออนแพร์ 1 ตัว

ถ้ารู้ค่าการหยุดพลังงานแล้วจะหาพิสัยเฉลี่ยได้ด้วยการคำนวณดังนี้

$$\bar{R} = \int_0^{\bar{R}} dx = \int_0^E (-dE/dx)^{-1} = \int_0^E dE/S(E) \tag{2.22}$$

และถ้าหากรู้ค่าพิสัยเฉลี่ย \bar{R} จะสามารถคำนวณหาพลังงานได้คือ

$$E = \int_0^{\bar{R}} wI dR = \int_0^{\bar{R}} (-dE/dx) dR \tag{2.23}$$

เมื่อรู้ค่าพิสัยแล้วก็หาการหยุดพลังงานในวัสดุได้คือ

$$dR/dE = 1/S(E) \tag{2.24}$$

2.2.4 ความสัมพันธ์ของพิสัยกับพลังงาน (range and energy relationship)

พิสัยและพลังงานของอนุภาคอัลฟา สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\bar{R} = \int_0^{\bar{R}} dx = \int_0^E (-dE/dx)^{-1} dE \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad E &= \int_0^{\bar{R}} wI dR \\ &= \int_0^{\bar{R}} (-dE/dx) dx \end{aligned} \tag{2.26}$$

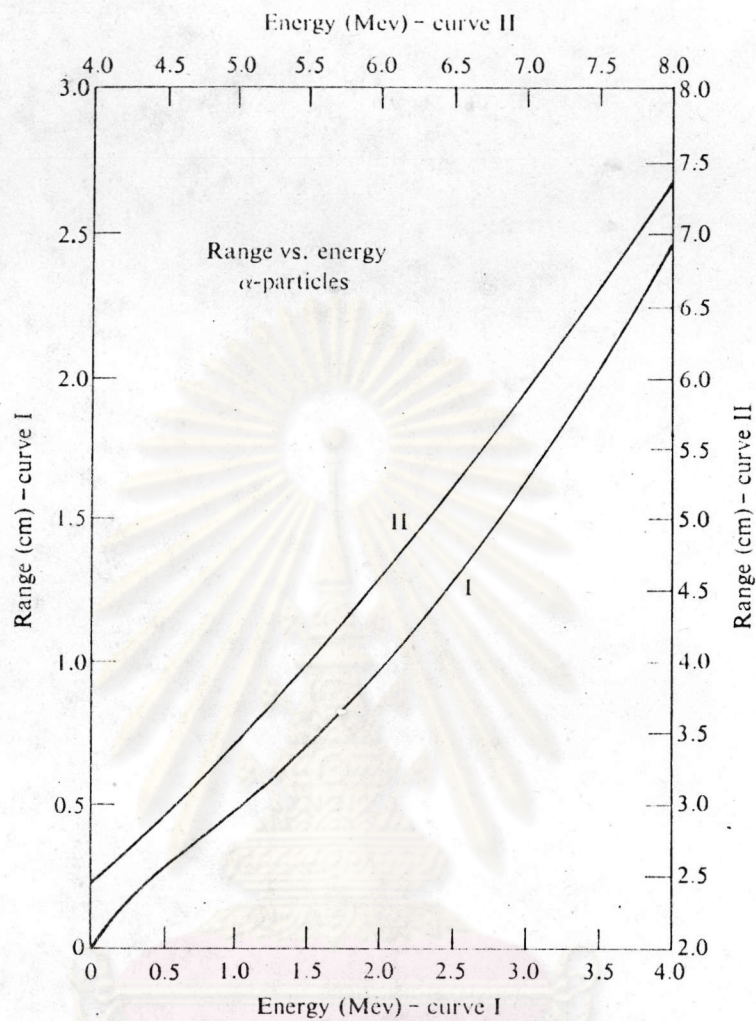
การคำนวณพลังงานของอนุภาคอัลฟา ที่มีพิสัยระหว่าง 3 ถึง 7 เซนติเมตร หาได้จาก

$$\bar{R} = 0.318 E^{3/2}$$

โดยให้ E = พลังงาน หน่วยเป็น MeV

$$\bar{R} = \text{พิสัยเฉลี่ยหน่วยเป็นเซนติเมตร ที่อากาศ 15 เซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตร-ปรอท}$$

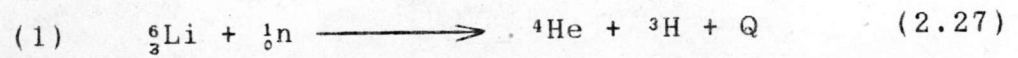
นอกจากนี้ค่าพิสัยและพลังงาน ยังหาได้จากกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งพลังงานได้จากการวัด ในช่วงประมาณ 5 ถึง 10 MeV และค่าพิสัยในอากาศจาก 5 ถึง 12 เซนติเมตร



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ของพิสัยกับพลังงานของอนุภาคอัลฟา
ที่อุณหภูมิ 15 เซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตร-ปรอท

2.2.5 รอยอนุภาคอัลฟาจากปฏิกิริยา (n, α) (1,2)

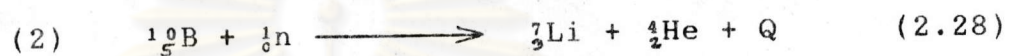
มีปฏิกิริยาสำคัญ 2 ปฏิกิริยา ที่ทำให้เกิดอนุภาคอัลฟา ซึ่งหาค่าจากกราฟ
ได้ในช่วงพลังงานต่ำ ๆ ปฏิกิริยาที่ว่าคือ



$$\text{กำหนดให้ } Q = 4.788 \pm 0.023 \quad \text{MeV}$$

$$E_\alpha = 2.057 \pm 0.010 \quad \text{MeV}$$

$$\bar{R} = 1.040 \pm 0.002 \quad \text{เซนติเมตร}$$



$$Q = 2.316 \pm 0.006 \quad \text{MeV}$$

$$E_\alpha = 1.414 \pm 0.004 \quad \text{MeV}$$

$$\bar{R} = 0.720 \pm 0.015 \quad \text{เซนติเมตร}$$

การเกิดปฏิกิริยา (n, α) เช่น ${}^6\text{Li}$ และ ${}^{10}\text{B}$ นั้น สามารถใช้พลาสติก
วัดความเข้มที่ต่ำมาก ๆ ของไอโซโทป (isotopes) ที่มีภาคตัดขวางการดูดกลืน
(absorption cross section) สูงได้ เพราะว่าพลาสติกสามารถเกิดปฏิกิริยา
ได้ดี กับอนุภาคอัลฟาพลังงานต่ำ จนทางตรงกันข้าม ถ้าต้องการวัดเทอร์มัลฟลักซ์
(thermal fluxes) และเอพิเทอร์มัลฟลักซ์ (epithermal fluxes) ก็จะใช้
พลาสติก (ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคอัลฟาได้) ประกอบติดกับฟอยล์ (foil)
ที่ประกอบด้วย Li หรือ B หรือใช้พลาสติกซึ่งเคลือบด้วย Li หรือ B ทั้งแผ่นก็ได้

สำหรับภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n, α) นั้น ที่ระดับพลังงานต่ำ ๆ จะ
แปรผกผันเป็นสัดส่วนกับความเร็ว ส่วนที่พลังงานเทอร์มัล ภาคตัดขวางของโบรอน
เท่ากับ 3,840 บาร์น (barns) และลิเทียมเท่ากับ 950 บาร์น ความไวในการ
รับของหัววัด (n, α) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Li หรือ B ในเรดิเอเตอร์
(radiator) ส่วนคุณสมบัติในการบันทึกรอยของพลาสติก ถ้าหากเลือกใช้โบรอน
ทั้งอนุภาคอัลฟา และรีคอล์ยของลิเทียม (lithium recoil) จะถูกบันทึกไว้ด้วย
เซลลูโลสพอลิเมอร์ (cellulosic polymer) แต่ถ้าลิเทียมถูกนำมาใช้ อนุภาค
อัลฟาจะบันทึกรอยของรีคอล์ยที่มีการแตกตัวต่ำ ๆ ได้ จนอนุภาคนั้นเคลื่อนที่ไปหลาย

ไมโครเมตรจนพ้นจุดปล่อย การใช้เซลลูโลสไนเตรทหรือเซลลูโลสอะซิโตนบิวทิลเอท (cellulose nitrate or cellulose acetobutyrate) กับแผ่นโบริอนที่มีความหนา 0.2 เซนติเมตรวัดนิวตรอน ที่มีการกระจายเป็นมุมกว่า 360 องศา จะสามารถเกิดรอยอนุภาคได้ 0.013 รอยต่อนิวตรอนหนึ่งตัว

จากคุณสมบัติของเทคนิคแตรีก-เอตซ์ และปฏิกิริยา (n, α) ดังกล่าวแล้ว สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อตรวจสอบวัสดุได้ โดยอาศัย หลักการเกิดรอยอนุภาคบนวัสดุฉนวนที่เหมาะสม ซึ่งเรียกว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้วยเทคนิคแตรีก-เอตซ์

2.3 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (non destructive testing, NDT) หมายถึงการนำวัสดุ ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ และอื่น ๆ มาตรวจสอบด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ และภายหลังจากการตรวจแล้ว วัสดุชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์เหล่านั้น ยังคงอยู่ในสภาพเดิมเหมือนก่อนนำมาตรวจสอบ การตรวจสอบแบบนี้ กระทำเพื่อค้นหาตำแหน่งจุดบกพร่อง เช่น รอยขีดข่วน รอยแตกร้าว ฟองอากาศ หรือวัสดุแปลกปลอมที่เข้าไปปนอยู่ในบางครั้งจะใช้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งของโครงสร้างภายใน หรือส่วนประกอบทางเคมี

ในตารางที่ 2.2 ได้สรุปกรรมวิธีต่างๆของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย และเปรียบเทียบข้อดี ข้อจำกัดไว้โดยย่อ



ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบกรรมวิธีต่าง ๆ ของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (4)

กรรมวิธี	คุณลักษณะ การตรวจสอบ	ข้อดี	ขีดจำกัด
<p>การตรวจสอบ ด้วยสายตา (visual- optical)</p>	<p>ใช้ตรวจสอบลักษณะ ภายนอกทั่วไปของ ชิ้นงานเช่น ความ เรียบร้อย รอยขีดข่วน รอยร้าวหรือดูจากสี ผิว ความเครียดใน วัสดุโปร่งใส</p>	<p>ง่าย สะดวกรวดเร็ว ถูกที่สุด ใช้ตรวจสอบ วัสดุได้ทุกชนิด</p>	<p>ตรวจสอบได้เฉพาะ พื้นผิวภายนอก หรือ ที่มีทางเปิดออกสู่ผิว หรือวัสดุโปร่งใส เท่านั้น</p>
<p>นํ้ายาแทรกซึม (liquid penetrant)</p>	<p>ใช้ตรวจสอบรอยร้าว ตามด ตะเข็บ หรือ รอยพับต่างๆโดยการ ใช้ของเหลวแทรกซึม เข้าไปในรอยบกพร่อง ที่เปิดสู่ผิวชิ้นงานแล้ว ตรวจสอบด้วยสายตา</p>	<p>ราคาไม่แพง ใช้ง่าย เคลื่อนย้ายสะดวก หาจุดบกพร่องเล็ก ๆ บนพื้นผิววัสดุได้ดีและ อ่านผลง่าย</p>	<p>ใช้ตรวจสอบเฉพาะ จุดบกพร่องที่ผิวด้าน ไม่เหมาะกับวัสดุที่มี รูพรุน</p>
<p>คลื่นเสียง ความถี่สูง (ultra- sonics)</p>	<p>ใช้หลักส่งผ่านและการ สะท้อนของคลื่นเสียง เข้าไปสู่ชิ้นงาน แล้ววัดการส่งผ่านและ การสะท้อนของคลื่น เสียงเปรียบเทียบกัน</p>	<p>ใช้ตรวจสอบวัสดุได้ ทุกชนิด ตรวจสอบ วัสดุที่หนาหลายๆ ได้ และใช้ตรวจสอบรอย ร้าวได้ดีมาก อ่านผล ได้รวดเร็ว มีความ ไวสูง</p>	<p>ต้องใช้อุปกรณ์เป็น ชุดประกอบกัน และ ต้องอาศัย ความ ชำนาญสูง</p>

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

กรรมวิธี	คุณลักษณะ การตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อจำกัด
การถ่ายภาพ ด้วยรังสี (radio- graphy)	อาศัยความแตกต่าง ในการดูดกลืนรังสีของ วัสดุเนื่องจากความ หนาแน่นของวัสดุ เนื่องจากโพรงอากาศ การรวมตัวของสิ่ง แปลกปลอมและวัสดุ ต่างชนิด	ใช้ตรวจสอบวัสดุได้ หลายชนิดหลายขนาด และที่หนา ๆ คล่องตัว ดี บันทึกผลด้วยฟิล์ม ซึ่งสามารถเก็บไว้ได้ นาน	ต้องป้องกันอันตราย จากรังสี ค่าใช้จ่าย สูงและใช้ตรวจสอบ รอยร้าวได้ยาก
อนุภาค(ผง) แม่เหล็ก (magnetic particles)	ใช้หลักการเหนี่ยวนำ ให้เกิดสนามแม่เหล็ก ขึ้นงาน แล้วริยผง เหล็กหาจุดบกพร่องที่ ผิวหรือใกล้ผิว ได้แก่ รอยร้าว โพรงอากาศ การรวมตัวกับสิ่งแปลก ปลอมและการเปลี่ยน แปลงของรูปทรง	ราคาไม่แพง ใช้ตรวจ สอบข้อบกพร่องได้ดี ทั้งที่ผิวและบริเวณ ใกล้เคียง	ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่ เป็นสารแม่เหล็ก ต้องเตรียมชิ้นงาน ก่อนและหลังการ ตรวจสอบ
กระแสไหล เวียน(eddy current)	อาศัยหลักการเปลี่ยน แปลงความนำทางไฟ ฟ้าอันเนื่องจากจุดบก พร่องของชิ้นงานแล้ว ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	ใช้งานสะดวก ราคา ปานกลาง และเหมาะ สมกับงานที่มีรูปร่าง จำกัด	ใช้กับวัสดุที่เป็นตัว นำและไม่สามารถ ตรวจสอบที่ความลึก มาก ๆ ได้

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนแบบต่าง ๆ (4)

ต้นกำเนิดนิวตรอน	นิวตรอนฟลักซ์	ประสิทธิภาพในการถ่ายภาพ	เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเฉลี่ย	คุณสมบัติเฉพาะตัว
วัสดุแก๊สมันตรังสี	$10^1 - 10^4$	ไม่ดีถึงพอใช้	นาน	การทำงานคงที่ ค่าลงทุนปานกลาง เคลื่อนย้ายสะดวก
เครื่องเร่งอนุภาค	$10^3 - 10^6$	ดีพอใช้	ปานกลาง	ค่าใช้จ่ายเปิด ควบคุมการทำงาน ค่าใช้จ่ายสูง - ปานกลาง เคลื่อนย้ายสะดวก
เครื่องผลิตนิวตรอนที่ต่ำกว่าวิกฤติ	$10^4 - 10^6$	ดี	ปานกลาง	การทำงานคงที่ ค่าใช้จ่ายในการ- ลงทุนสูง เคลื่อนย้ายได้ยาก
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	$10^5 - 10^8$	ดีมาก	สั้น	การทำงานคงที่ ค่าใช้จ่ายในการ- ลงทุนสูง เคลื่อนย้ายได้ยาก- มาก

2.4 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (neutron radiography technique)

นิวตรอนที่ใช้ถ่ายภาพอาจได้มาจาก วัตถุแกมมันดริงส์ เครื่องเร่งอนุภาค เครื่องผลิตนิวตรอนที่ต่ำกว่าวิกฤติ (sub-critical assemblies) หรือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งในตารางที่ 2.3 แสดงต้นกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนไว้ 4 แบบที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพ

2.4.1 อุปกรณ์ที่สำคัญของระบบ (principal components)

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

ก. ลานิวตรอนที่เหมาะสม

‘ ลานิวตรอนที่ใช้ส่วนมาก จะได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แบบแตกตัว ซึ่งมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ

- ความเข้มนิวตรอน (neutron intensity)
- สเปกตรัมของพลังงานนิวตรอน (spectrum of neutron energy)
- การบังคับลานิวตรอน (neutron collimation)

ข. วัสดุหรือชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบ

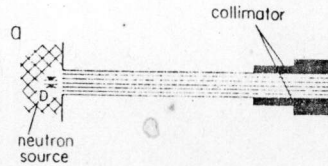
ค. อุปกรณ์บันทึกความเข้มลานิวตรอนที่วิ่งผ่านชิ้นงาน (ฟิล์ม)

2.4.2 การบังคับทิศทางของลานิวตรอน (neutron beam collimation)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (research reactors) ต้องกำหนดทิศทางลานิวตรอนให้วิ่งออกไป เฉพาะในทิศทางที่มีชิ้นงาน และฟิล์มรองรับอยู่เท่านั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานไปในทางอื่น เพื่อประหยัดเวลาในการถ่ายและได้รายละเอียดของภาพสูงขึ้น ลักษณะลานิวตรอนที่ถูกบังคับทิศทาง โดยมากจะมีลักษณะขนาน (parallel neutron beam) หรือให้มีมุมขยาย

ออกเพียงเล็กน้อย (small divergent angle) และต้องมีคุณสมบัติเป็นเอกพันธ์ (homogeneous) ด้วย โดยทั่วไปตัวบังคับลำนิวตรอนที่นิยมใช้มี 3 แบบ (5) คือ

1. ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบมัลติสลิต (multislit collimator)

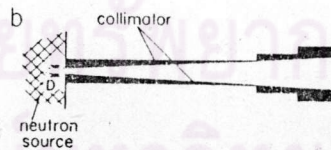


รูปที่ 2.9 ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบมัลติสลิต

จากรูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพอย่างง่าย ของตัวบังคับลำนิวตรอนแบบมัลติสลิต ในภาพส่วนทางซ้ายมือ คือต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ส่วนกลางคือสลิต ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น ๆ วางเรียงตามแนวนอนเป็นชั้น ๆ มีระยะห่างเท่ากับ D สำหรับแผ่นวัสดุที่ใช้ได้แก่ เหล็ก แคดเมียมเป็นต้น ส่วนทางด้านขวามือคือตัวบังคับลำนิวตรอน การเลือกใช้ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบนี้ให้รายละเอียดของภาพถ่ายดี แต่ต้องใช้นิวตรอนฟลักซ์สูง ๆ เพื่อแก้ไขอุปสรรค 2 ประการคือ

- ก. การรั่วไหลของนิวตรอนออกนอกตัวบังคับลำนิวตรอน
- ข. การปรากฏเป็นรอยของสลิตบนภาพถ่าย ทำให้รายละเอียดของภาพไม่สม่ำเสมอ

2. ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบไดเวอร์เจนท์ (divergent collimator)

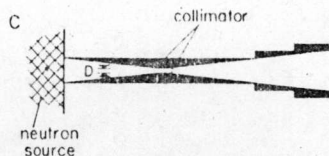


รูปที่ 2.10 ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบไดเวอร์เจนท์

จากรูปที่ 2.10 ตัวบังคับลำนิวตรอนมีลักษณะแผ่ขยายออก โดยที่ตรงช่องออกของลำนิวตรอนมีขนาดเล็ก ระยะห่างเท่ากับ D ที่ระยะห่างออกมาจะมีขนาดโตขึ้นตามลำดับ ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบนี้ไม่มีอุปสรรคเหมือนแบบที่ 1 แต่มีข้อจำกัดในเรื่องช่องทางออกของนิวตรอนมีขนาดเล็ก ฟลักซ์ที่ได้จึงต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้

รายละเอียดของภาพไม่ดี เสียเวลาในการถ่ายมากขึ้น

3. ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบหลอด (plain tube collimator)



รูปที่ 2.11 ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบหลอด

ตัวบังคับลำนิวตรอนแบบนี้ เป็นการนำเอาข้อดีของแบบที่ 1 กับแบบที่ 2 เข้าด้วยกันทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเป็นเอกพันธ์ และให้รายละเอียดของภาพดี

2.4.3 ความไม่คมชัดของภาพ (unsharpness)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้น จุดสำคัญอยู่ที่การแยกรายละเอียดของภาพได้ดี ดังนั้นจึงต้องอาศัยองค์ประกอบต่อไปนี้

ก. อัตราส่วนของ D/L โดยกำหนดให้

D = ความโตของช่องทางออกนิวตรอน

L = ระยะระหว่างช่องทางออกนิวตรอนถึงชิ้นงานที่จะตรวจสอบ

ข. ระยะของ L_F ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงแผ่นฟิล์ม

ค. ความหนาของคอนเวอ์เตอร์สกรีน

ง. ระยะห่างระหว่างคอนเวอ์เตอร์สกรีนกับแผ่นฟิล์ม

จ. ขนาดความละเอียดของเนื้อฟิล์ม (grain size of the film)

ความไม่คมชัดของภาพถ่าย (unsharpness) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะต่าง ๆ ของ D, L และ L_{oc} ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปสมการ

$$U = D \cdot L_{oc} / L$$

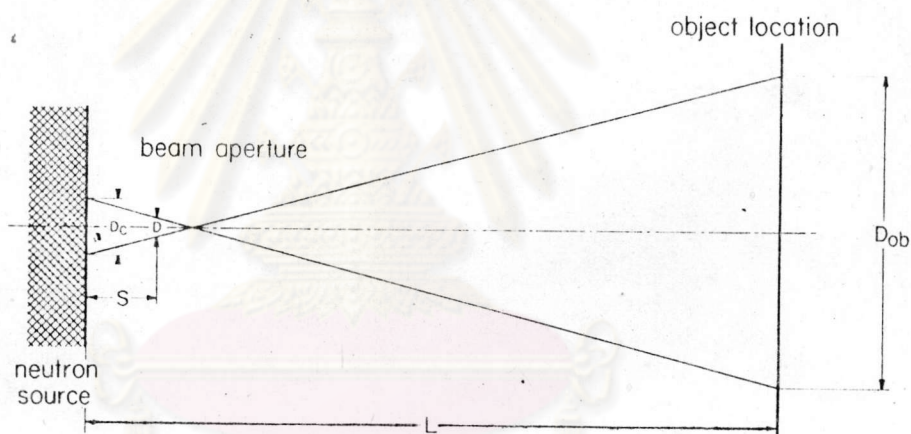
โดยกำหนดให้ U = ความไม่คมชัดของภาพที่เกิดขึ้น

2.4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่าย (5)

วิธีเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำได้ 2 วิธี คือ

1. ปรับปรุงค่า D/L ด้วยการหาค่าเทอร์มัลฟลักซ์ ที่ตกกระทบชิ้นงาน (สมมติให้ฟลักซ์ที่แกนเครื่องคองที่) หาเวลาที่ใช้ในการถ่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับ D/L ดังนั้นการเพิ่มค่า D/L จะช่วยลดเวลาในการถ่ายได้ แต่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อรายละเอียดของภาพด้วย.

2. ปรับปรุงพื้นที่ของลำนิวตรอน โดยการขยายให้โตขึ้น สามารถถ่ายภาพชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ วิธีนี้จะได้ผลต่อเมื่อ จัดวางช่องทางของลำนิวตรอนให้ห่างออกมาจากพื้นผิวของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ๗ เป็นระยะ S



รูปที่ 2.12 ลักษณะลำนิวตรอนที่ได้จากตัวบังคับลำนิวตรอนแบบเพลนทิวบ์

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นระบบของลำนิวตรอน (beam system) ซึ่งเมื่อทดลองถ่ายไป 1 ครั้งแล้ว จะทราบถึงรายละเอียดของภาพได้ ดังนั้นถ้าให้ค่า D/L คงที่ ระยะ L จะถูกจำกัดด้วยความหนา ของผนังบ่อเครื่องปฏิกรณ์ ๗ และขนาดของอาคาร จะคำนวณหาค่า D ได้ หากความโตของชิ้นงานที่สามารถถ่ายได้ขึ้นอยู่กับขนาดของคอนเวอเตอร์สกรีน นอกจากนี้ยังมีค่า D_c คือความโตของต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ (ความโตของช่องปล่อยนิวตรอน)

$$S = L(D_c - D)/D_{ob} + D_c$$

ถ้าระยะจากช่องปล่อยนิวตรอน ถึงวัตถุลดลงเหลือเท่ากับ L-S ให้ค่า D/(L-S) คงที่ ความเร็ว Dc ในรูปที่ 2 จะต้องเล็กกว่าความเร็ว Dc ของช่องปล่อยนิวตรอนที่พื้นผิวของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ

2.4.5 คอนเวอร์เตอร์สกรีน (converter screen) (4)

มีอุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน นั่นคือ "คอนเวอร์เตอร์สกรีน" หรือ แผ่นเพิ่มความเข้ม (intensifying screen) ซึ่งเป็นตัวรับนิวตรอน แล้วเปลี่ยนให้เป็นรังสีที่เหมาะสมกับฟิล์ม ทำให้ฟิล์มเกิดภาพได้ เช่น อนุภาคมีประจุ แสง หรือรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

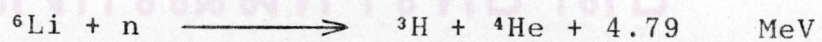
คอนเวอร์เตอร์สกรีนจะต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการคือ

1. เป็นวัสดุธาตุหนัก
2. ดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนสูง
3. มีประสิทธิภาพในการปล่อยรังสีขั้นที่สองได้สูง

วัสดุที่ใช้ทำคอนเวอร์เตอร์สกรีนได้แก่ ลิเทียม ภิรอน แคดเมียม แกโดลิเนียม อินเดียม และดีสปรเซียม ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 2.4

ก. คอนเวอร์เตอร์สกรีนชนิดให้แสง (light emitting screen)

คอนเวอร์เตอร์สกรีนชนิดนี้ ใช้สะเก็ดและรวดเร็วที่สุด ประกอบด้วยส่วนผสมระหว่าง สารดูดกลืนนิวตรอนกับฟอสฟอรัส (phosphor) ส่วนธาตุที่น่าสนใจคือ ลิเทียมและภิรอน เพราะให้อนุภาคอัลฟา (หลังจากดูดกลืนนิวตรอน) ที่พลังงานสูงสุดแต่มีพิสัยต่ำ ดังตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ ต่อไปนี้



นายสเต็ดแมน (Stedman) ได้ริเริ่มศึกษาเรื่องส่วนผสมระหว่างลิเทียมกับซิงค์ซัลไฟด์ (Li+ZnS) เพื่อใช้ทำคอนเวอร์เตอร์สกรีน โดยการผสม LiF ZnS และเพอร์สเพกซ์ (perspex) เข้าด้วยกัน ในอัตราส่วน 1:2:1 พลิก ZnS ทำหน้าที่ให้โฟตอน (photons) ของแสงออกมามากมาย และเพอร์สเพกซ์เป็นตัวช่วยให้แสงวิ่งผ่านมาสู่พื้นผิวได้สะดวก ข้อจำกัดของคอนเวอร์เตอร์สกรีน แบบนี้คือ



ให้รายละเอียดของภาพไม่ดี

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของคอนเวอเตอร์เตอร์สกรีน (4)

วัสดุ	สปส.การดูดกลืน เทอร์มัลนิวตรอน (บาร์น)	ปฏิกิริยา นิวเคลียร์	ค่าครึ่ง ชีวิต	ชนิดรังสีและ พลังงาน	ส่วนประกอบของ คอนเวอเตอร์เตอร์สกรีน
${}^6_3\text{Li}$	945	n, α	0	$\alpha, 2.05; T, 2.7 \text{ MeV}$	${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$, 250 μm
${}^{10}_5\text{B}$	3,837	n, α	0	$\alpha, 1.47; \text{Li}, 0.84 \text{ MeV}$	${}^{10}\text{BC}$, 5 μm
${}^{nat}_{48}\text{Cd}$	20,000	n, α	0	$\beta^-, 0.58 \text{ MeV (max)}$	metal foil, 635 μm
${}^{nat}_{64}\text{Gd}$	46,000	n, γ	0	IC, $\beta^-, 71 \text{ keV (min)}$	metal foil, 25 μm
${}^{nat}_{49}\text{In}$	191	n, γ	54 นาที	$\beta^-, 1.00 \text{ MeV (max)}$	metal foil, 250 μm
${}^{nat}_{66}\text{Dy}$	950	n, γ	2.3 ชม.	$\beta^-, 1.28 \text{ MeV (max)}$	metal foil, 100 μm

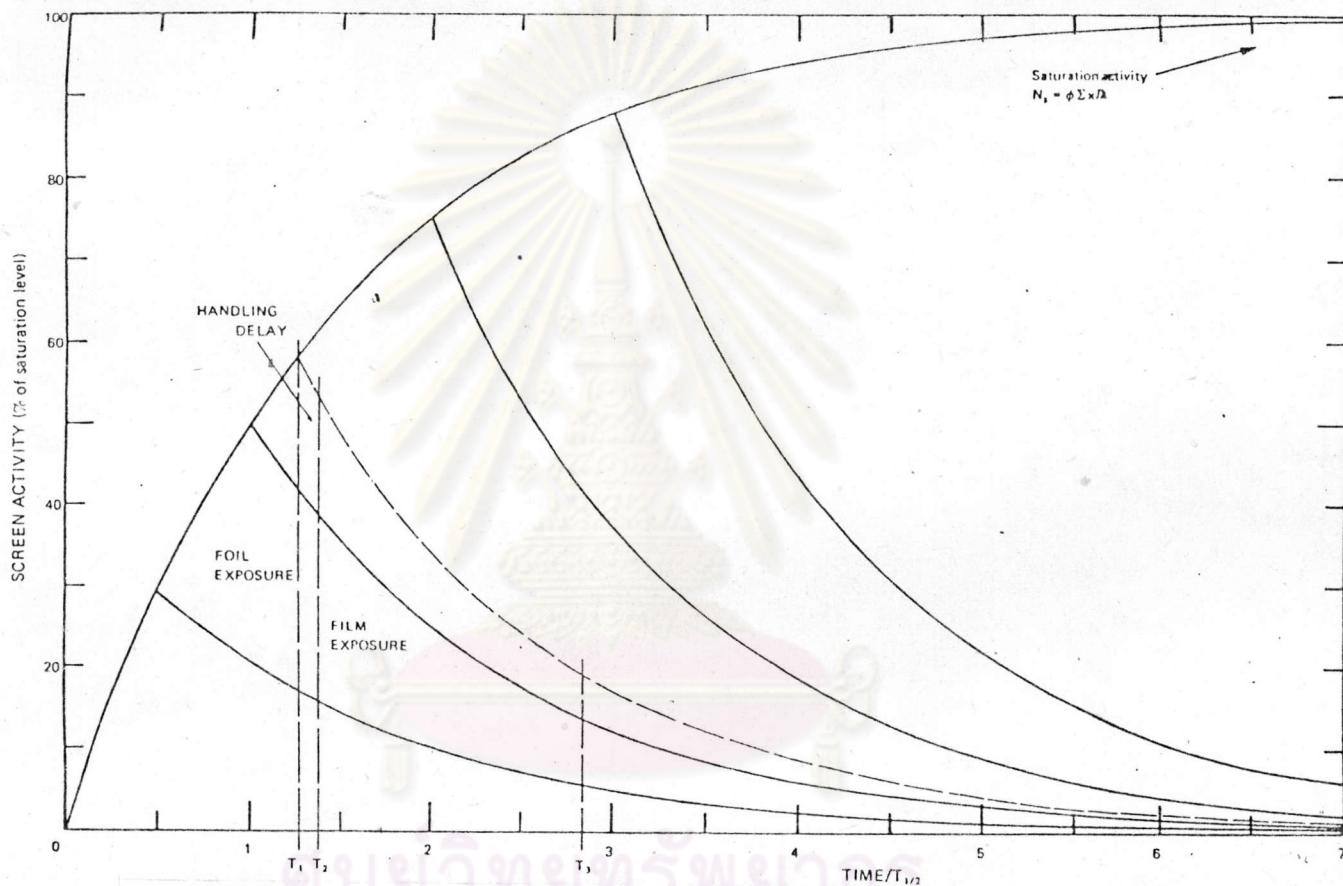
ข. คอนเวอเตอร์เตอร์สกรีนสำหรับวิธีถ่ายตรง

การเกิดปฏิกิริยา (n, α) ลิเทียมและโบรอนที่ต่ำ จะมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10-15 ไมครเมตรในสารไวแสง ทำให้คอนเวอเตอร์เตอร์สกรีนชนิดนี้ให้รายละเอียดของภาพได้ดี และสำหรับปฏิกิริยา (n, γ) มีวัสดุธาตุหนักอยู่ 2 ชนิด ที่น่าสนใจมาก เพราะมีคุณสมบัติการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนสูง นั่นคือ แคดเมียม (2,450 บาร์น) และแกโดลิเนียม (49,000 บาร์น) ซึ่งสามารถดูดกลืนได้สูงที่สุด โดยที่ความหนา 10 ไมครเมตร สามารถดูดกลืนลิวเทอร์มัลนิวตรอน ได้ถึงร้อยละ 75 นอกจากนี้ ยังให้รายละเอียดของภาพดีมากด้วย

ค. คอนเวอเตอร์เตอร์สกรีนสำหรับวิธีถ่ายทอด

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่กล่าวมาแล้ว จะให้ความเข้มรังสีแกมมาสูง แต่สำหรับวิธีนี้วัสดุที่ต่ำทำคอนเวอเตอร์เตอร์สกรีน จะต้องมีการดูดกลืนนิวตรอนสูง แล้ว

ๆ ที่ครึ่งชีวิต (half life) เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดภาพ แต่ใช้เวลาสั้นที่จะสะดวกต่อการอ่านผล และนำกลับมาใช้ได้ อีกวัสดุที่วาคือ อินเดียม (indium) และดิสโปรเซียม (dysprosium) ซึ่งเป็นโลหะชนิดคงที่นำมาทำได้ให้เป็นแผ่นบางๆ ขนาดใหญ่ได้ มีความหนาเท่ากันตลอด พื้นผิวมีความเรียบดี นอกจากนี้ยังมีทอง (gold) และ ยูโรเปียม (europium) ที่สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพได้แต่ค่อนข้างมีน้อย



รูปที่ 2.13 การดูดกลืนนิวตรอนและการสลายตัวของคอนเวร์เตอร์สกรีน

เมื่อคอนเวร์เตอร์สกรีน ถูกอาบด้วยนิวตรอนเป็นเวลานาน T_1 จำนวนอะตอมต่อหน่วยพื้นที่ของคอนเวร์เตอร์สกรีนจะเป็น

$$N_1 = \int_0^{\infty} \phi(E) (1 - e^{-\Sigma(E)x}) dE (1 - e^{-\lambda T_1}) / \lambda \quad (2.29)$$

- กำหนดให้ N_1 = จำนวนอะตอมของคอนเวอเตอร์สกรีนต่อพื้นที่
 $\phi(E)$ = ความเข้มข้นนิวตรอนซึ่งสมมติให้คงที่ในเวลาที่กำหนด
 $\Sigma(E)$ = ค่าภาคตัดขวางขณะที่อาบนิวตรอน
 x = ความหนาของคอนเวอเตอร์สกรีน
 λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว ($\ln 2/T_{1/2}$)
 T_1 = เวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน

จากรูปที่ 2.13 คอนเวอเตอร์สกรีน มีความบางมากเมื่อเทียบกับ $1/\Sigma$ และเวลาที่อาบก็สั้นมากเมื่อเทียบกับค่าครึ่งชีวิต จึงสามารถเขียนสมการ (2.29) ให้ง่ายขึ้น คือ

$$N_1 = \phi \Sigma x T_1 \quad (2.30)$$

ถ้าใช้เวลาที่อาบนิวตรอนมากกว่าค่าครึ่งชีวิตมาก ๆ ค่าัมัตว์ต่อพื้นที่ กำหนดให้เป็น N_s จะได้

$$N_s = \phi \Sigma x / \lambda \quad (2.31)$$

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นนิวตรอนที่ใช้ในวิธีถ่ายภาพ (4)

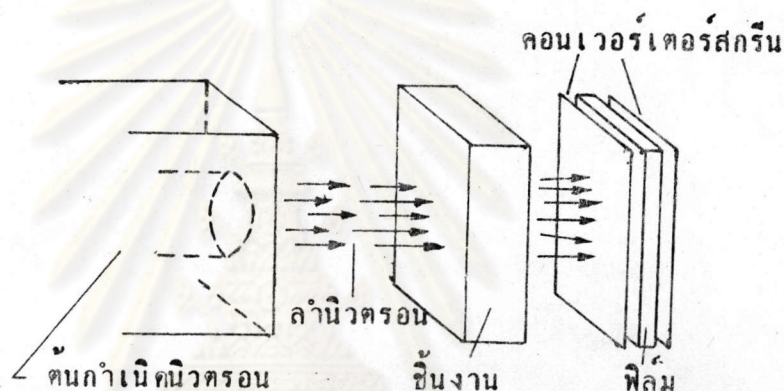
Screen metal	Activation cross-section (mm ⁻¹)	Absorption in 100 μ m screen (%)	λ (s ⁻¹)	Minimum thermal beam intensity for exposure times of (cm ⁻² ·s ⁻¹)			Activity after 10 ³ s in beam of 10 ⁷ cm ⁻² ·s ⁻¹ (μ Ci·cm ⁻²)
				10 ³ s	10 ⁴ s	10 ⁵ s	
In	0.73	7.3	2.14×10^{-4}	4×10^5	9×10^4	8×10^4	4.2
Dy	3.01	26	8.25×10^{-5}	10^5	2×10^4	8×10^3	5.8
Au	0.58	5.6	2.98×10^{-6}	5×10^5	5×10^4	6×10^3	0.05
Eu	8.90	59	2.09×10^{-5}	4×10^4	5×10^3	10^3	3.3

2.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้วยเทคนิคแตรีก-เอตซ์ (track-etch technique)

แม้ว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพ จะมีประโยชน์มาก แต่หากความเข้มข้นนิวตรอนไม่พอภาพถ่ายที่ได้จะไม่ดี ขาดความคมชัด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีถ่ายภาพที่ใช้แกมมาดีเอ็นเอด้วยปัญหานี้จึงมีผู้ที่ค้นคิดเทคนิคแตรีก-เอตซ์ ซึ่งเป็นเทคนิค

ๆ หม่อมมาใช้เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว

จากหลักที่ว่า เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งผ่านวัสดุบางชนิดเช่น ไม้กา แก้ว และพลาสติกจะเกิดรอยอนุภาคขึ้น ถ้านำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอย ด้วยสารละลายลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นรอยนั้นชัดเจนขึ้น แต่หลักการอันนี้ใช้ได้เฉพาะกับไอออนหนัก ๆ และโปรตอนเท่านั้น ถ้าเป็นเทอร์มัลนิวตรอน อิเล็กตรอนและโปรตอนอื่น ๆ จะทำไม่ได้ วัสดุที่จะใช้ทำคอนเวอเตอร์เทอร์สกรีน เพื่อให้ได้รังสีที่เหมาะสม เช่น อนุภาคอัลฟานั้นต้องเป็นวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้ดี ทำให้เกิดภาพที่หารายละเอียดดี มีความคมชัด และไม่ทำให้เกิดรังสีแกมมาเลย



รูปที่ 2.14 แผนผังอย่างง่ายของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์

นายเบอร์เกอร์ (Berger) และทีมงานได้เริ่มนำเทคนิคแทรก-เอตซ์มาใช้กับเทอร์มัลนิวตรอน เขาใช้ฟิล์มโพลีคาร์บอเนต (poly carbonate) ลักษณะเป็นพลาสติกเป็นตัวบันทึกภาพ และใช้วัสดุที่แตกตัวได้เป็นคอนเวอเตอร์เทอร์สกรีนเช่น ยูเรเนียม-235 ผลที่ได้คือ ค่าใช้จ่ายสูง การควบคุมลำบาก ปริมาณอนุภาคอัลฟาอันตรายสาธาณชน จึงไม่ประสบผลดังที่ตั้งใจ

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า Li-6 และ B-10 เหมาะสมที่สุด กับการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน และวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนเวอเตอร์เทอร์สกรีน คือ ฟลูออไรด์ (fluoride) และคาร์ไบด์ (carbide) ตามลำดับ ฟิล์มที่นิยมใช้กันมากคือ เซลลูโลสไนเตรท (cellulose nitrate) เพราะบันทึกรอยอนุภาคได้ดีกว่าโพลีคาร์บอเนต (poly carbonate)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของลิเทียมฟลูออไรด์, โบรอนคาร์ไบด์คอนเวอร์เตอร์สกรีน (4)

Material	ρ (Nat) (g·cm ⁻³)	Active isotope	Natural abundance (%)	$\Sigma(n, \alpha)$		α -range (μ m)	Neutron absorption	
				Natural (mm ⁻¹)	Enriched (mm ⁻¹)		Natural (%)	Enriched (%)
LiF	2.64	⁶ Li	7.42	0.43	5.9	7.5	0.3	4.3
B ₄ C	2.52	¹⁰ B	19.6	8.8	45	5.8	4.6	23

จากตารางที่ 2.6 โบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide) ถูกนำมาใช้กับงานเทอร์มินัลนิวตรอนมากกว่า เพราะมีการดูดกลืนนิวตรอน สูงกว่าประมาณร้อยละ 20 ต่อสกรีน แต่จะเกิดรอยอนุภาคบนฟิล์ม ยากกว่าลิเทียมฟลูออไรด์ (lithium fluoride) เมื่อเกิดอนุภาครีคอล์ย (recoils) จะปล่อยไฮดรอนซึ่งมีพิสัยอยู่ในช่วงที่ประเมินได้

ในการกัดขยายรอยพลาสติก ชนิดโพลีคาร์บอเนตและเซลลูโลสไนเตรท จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (6.5N NaOH) กัดขยายรอย จากรายงานของนายเบอร์เกอร์ ซึ่งอธิบายในการกัดขยายรอย 70 เซลเซียส (celcius) ที่เวลา 40 นาที หรือที่ 55 เซลเซียส จะใช้เวลา 4 นาที จากนั้นใช้น้ำสะอาดธรรมดา ล้างสารละลายออก และถ้าหากจำเป็นก็จะนำมา กัดขยายรอยใหม่ได้อีก สำหรับวัสดุไมกาและแก้ว จะใช้กรดซัลฟูริก (sulphuric acid) เป็นสารกัดขยายรอยอนุภาค

เทคนิคแทรก-เอตซ์ มีข้อจำกัดคือ ภาพถ่ายที่ได้จะมีคอนทราสต์ต่ำ (low contrast) จึงไม่ควรจะอ่านผลโดยตรง แต่ให้ใช้เทคนิคการอัดภาพแบบธรรมดาเข้าช่วย เช่นใช้ฟิล์มชนิดที่มีคอนทราสต์สูง ใช้แสงไฟเพิ่มคอนทราสต์ จะทำให้การอ่านผลของฟิล์มดีขึ้น