

บทที่ 2

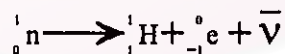
ทฤษฎี

2.1 บทนำ

2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1932 โดยนายเจมส์ แชดวิก (James Chadwick)^[6,7,8] นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ซึ่งทดลองนำพอลอเนียม (Polonium) มาไว้ร่วมกับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยออกจากพอลอเนียมชนกับแผ่นเบริลเลียม จะมีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงชนิดหนึ่งออกมา เขาตั้งชื่ออนุภาคชนิดใหม่นี้ว่า “นิวตรอน”

อนุภาคนิวตรอน ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย n หรือ 0_0n มีมวลประมาณ 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ 1.67492×10^{-24} กรัม^[9] ซึ่งมากกว่าโปรตอนเล็กน้อย มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจึงมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร จะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน (1_1H) อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา (${}^0_{-1}e$) และอนุภาคแอนตินิวตริโน ($\bar{\nu}$) โดยมีครึ่งชีวิต (half-life) ประมาณ 12 นาที^[7] เขียนในรูปสมการ ได้ดังนี้



2.1.2 ชนิดของนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ แต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ด้วยการหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) ซึ่งเป็นการลดพลังงานของนิวตรอนจากพลังงานตั้งต้น โดยการให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ และโพลิเอทิลีน เป็นต้น และเพื่อให้เข้าใจลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร จำเป็นต้องจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน^[10] ซึ่งอาจมีช่วงของพลังงานที่เหลื่อมกัน อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานหรือช่วงของพลังงาน ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน*

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0.00 eV ถึง 10^3 eV
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV ถึง 0.3 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	0.3 eV ถึง 10^4 eV
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1 eV ถึง 10^2 eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	10^3 eV ถึง 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	> 20 MeV

*ที่มา Garrett, D.A. , and Berger , H. The Technological Development of Neutron Radiography.

Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977): 130

2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง เมื่อชนกับอะตอมจึงไม่ได้รับผลจากอิเล็กตรอนในอะตอมหรือจากประจุบวกของนิวเคลียส นิวตรอนจึงผ่านกลุ่มอิเล็กตรอนเข้าทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียส กล่าวคือ อันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดขึ้นกับนิวเคลียสไม่ใช่เกิดกับอะตอม

นิวตรอนสามารถทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้หลายแบบดังนี้

ก. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) การชนแบบนี้นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สภาวะปกติ (Ground state) แล้วนิวตรอนกระเจิง (Scatter) ออกมา โดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สถานะพื้น การชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้เป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนมีค่าคงที่ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า บางครั้งเรียกว่า "Potential scattering" สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, n)

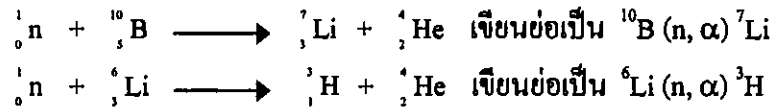
ข. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมแบบนี้มีลักษณะการชนคล้ายแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชน กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสลดพลังงานกลับสู่สภาวะ

ปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยึดหยุ่นเป็น Threshold reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นลบ เป็นอันตรกิริยาที่มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้ คือ (n, n')

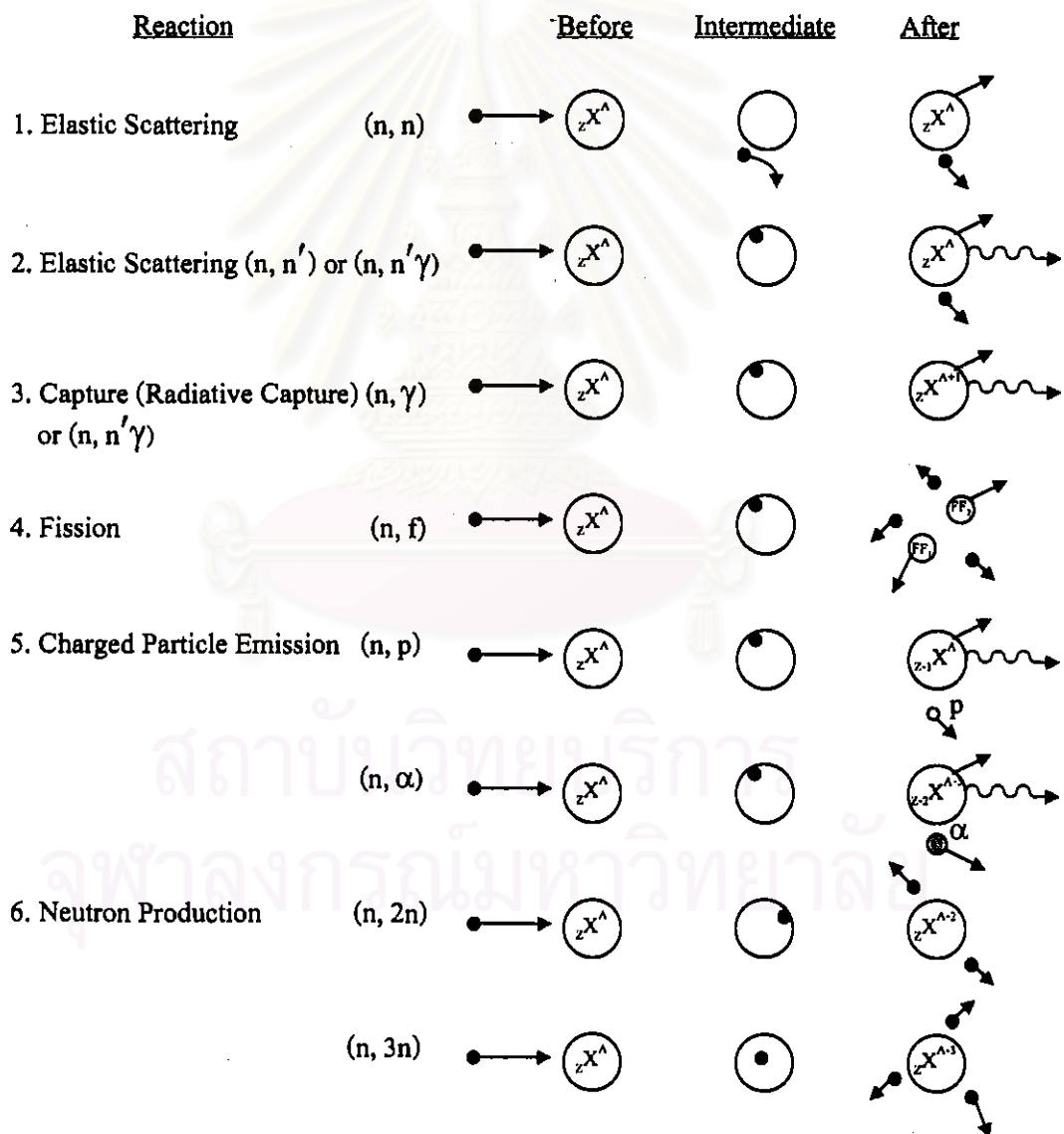
ค. อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ radiative capture) หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) อันตรกิริยานี้ นิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (compound nucleus) ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติ จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า Captured gamma - rays หรือ Neutron captured gamma - ray ซึ่งอาจมี 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน (Exothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่มากกว่าพลังงานนิวเคลียสเดิมรวมกับของนิวตรอนเสมอ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis , NAA) สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, γ) เช่น ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$, ${}^{59}\text{Co}(n, \gamma){}^{60}\text{Co}$ เป็นต้น

ง. ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, f)

จ. ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge - particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา โปรตอน ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุนี้มีทั้งแบบปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน และปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน แต่เกิดปฏิกิริยาชนิดคายพลังงานน้อย ได้แก่ ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 (${}^{10}\text{B}$) และปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 (${}^6\text{Li}$) ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดนิวตรอนและการกำบังนิวตรอน โดยเขียนในรูปสมการเคมีได้ดังนี้



ฉ. ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n, 2n) ปฏิกิริยา (n, 3n)



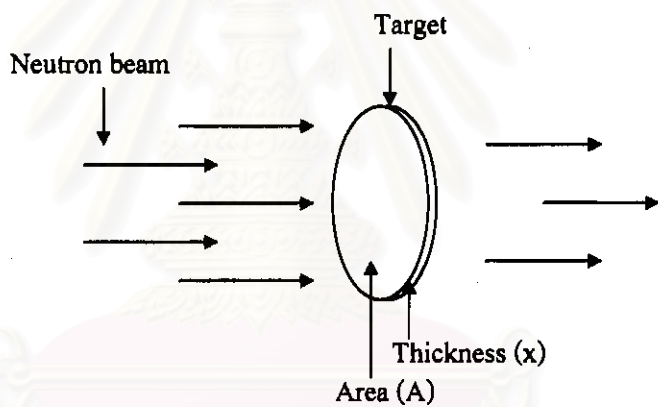
รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ

2.1.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง แสดงในเทอมของปริมาณที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (Cross section) อธิบายได้โดย พิจารณาแผ่นวัสดุบางชนิดหนึ่ง มีพื้นที่หน้าตัด A มีความหนา x และมีความหนาแน่นอะตอม N อะตอมต่อหน่วยปริมาตร โดยมีลำนิวตรอน (Neutron beam) ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.2 ถ้ามีนิวตรอนจำนวน n นิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร และมีความเร็ว v ดังนั้น

$$I = nv \dots\dots\dots(2.1)^{[9]}$$

เมื่อ I คือความเข้มของลำนิวตรอน (Intensity of neutron beam)



รูปที่ 2.2 ลำนิวตรอนตกกระทบเป้า

ถ้า n มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร v มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้น I จะมีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (neutron / cm²-sec)

จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้า พื้นที่ A ต่อวินาที เท่ากับ IA แต่จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้าไม่ได้ทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนาของเป้า และค่าภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma Ax \dots\dots\dots(2.2)^{[9]}$$

σ คือ ภาคตัดขวางจุดภาคของนิวตรอน นิยมใช้หน่วยเป็น บาร์น (barn) โดยที่
 1 บาร์น (b) = 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ
 2.1.3 ดังนั้นค่าภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับ
 นิวเคลียสของอะตอมจึงมีหลายค่าเช่นเดียวกัน ถ้าให้ σ_t เป็นภาคตัดขวางรวม (total cross section)
 ของนิวเคลียสชนิดหนึ่งต่อนิวตรอน จะได้

$$\sigma_t = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,\beta)} + \dots \dots \dots (2.3)$$

เมื่อ $\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบ

$\sigma_{(n,\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,\alpha)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา

$\sigma_{(n,p)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n,\beta)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแตกตัว

ค่าภาคตัดขวางจุดภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรก คือภาคตัดขวางการ
 กระเจิง (scattering cross section, σ_s) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่นและการชน
 แบบไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สอง คือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน (absorption cross section, σ_a) ซึ่งหมายถึง
 ภาคตัดขวางของอันตรกิริยาอื่นๆ นอกเหนือจากอันตรกิริยาในกลุ่มแรก

พิจารณาสมการ (2.2) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma_t Ax \dots \dots \dots (2.4)$$

Ax คือ ปริมาตรของเป้า

ดังนั้น จำนวนอันตรกิริยาต่อปริมาตรต่อวินาที ซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นของอันตร
 กิริยา (Collision density, F) เขียนได้ดังนี้

$$F = IN\sigma_t \dots \dots \dots (2.5)$$

ผลคูณ $N\sigma$ ใช้สัญลักษณ์เป็น Σ เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section)^(9,11) มีหน่วยเป็น ซม.⁻¹ ผลคูณของ $N\sigma_i$ ในสมการ (2.5) จึงใช้สัญลักษณ์เป็น Σ_i เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section) และสามารถเขียนสมการ (2.5) ในเทอมของภาคตัดขวางมหภาครวม ได้เป็น

$$F = I\Sigma_t \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{mix}} &= \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots\dots \\ \Sigma_{\text{mix}} &= N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots\dots\dots(2.7) \end{aligned}$$

เมื่อ Σ_{mix} คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 N_1, N_2, N_3, \dots คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ

2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron radiography)

2.2.1 ประวัติการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

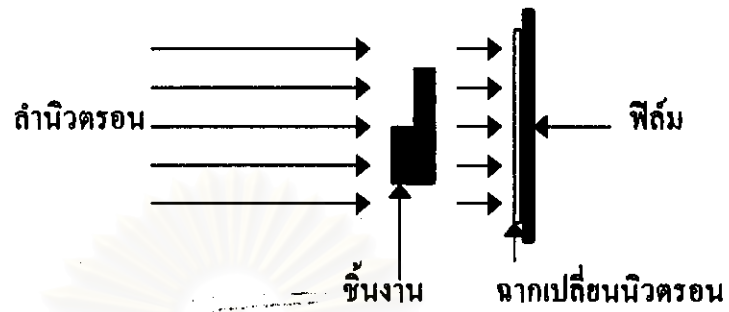
การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เริ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเรินท์เกน ค้นพบรังสีเอกซ์ ในปี ค.ศ. 1895 และเริ่มนำการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ไปใช้ในทางอุตสาหกรรมในช่วงปี ค.ศ. 1920 ถึง 1930 ซึ่งคล้ายกับในกรณีของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน หลังจากแซควิคค้นพบอนุภาคนิวตรอนในปี ค.ศ. 1932 การทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนก็เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1935 ที่ประเทศเยอรมัน โดย H. Kallmann และ E. Kuhn⁽⁶⁾ ซึ่งใช้เครื่องเร่งอนุภาคขนาดเล็กเป็นต้นกำเนิดนิวตรอน แต่ไม่ได้ตีพิมพ์ผลงานเนื่องจากเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 จนกระทั่งปี ค.ศ. 1947 จึงได้ตีพิมพ์ผลงาน แต่

O.Peter^[6] ชาวเยอรมันเช่นกัน ได้ตีพิมพ์ผลงานลักษณะเดียวกันไปก่อนแล้วในปี ค.ศ. 1946 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เป็นครั้งแรก เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1956 ที่ Harwell โดย J. Threlis และ R.T.P. Derbyshire^[6] ชาวอังกฤษซึ่งได้คุณภาพของภาพถ่ายดีกว่าของ Kallman และ Kuhn มาก และมีการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง เช่น การตรวจหารอยบกพร่องในแท่งยูเรเนียม การตรวจรอยบกพร่องในโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมกับโบรอน และการถ่ายภาพโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช เป็นต้น หลังจากนั้นการพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนก็ดำเนินไปอย่างช้าๆ และเริ่มมีการนำต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปประดิษฐ์มาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

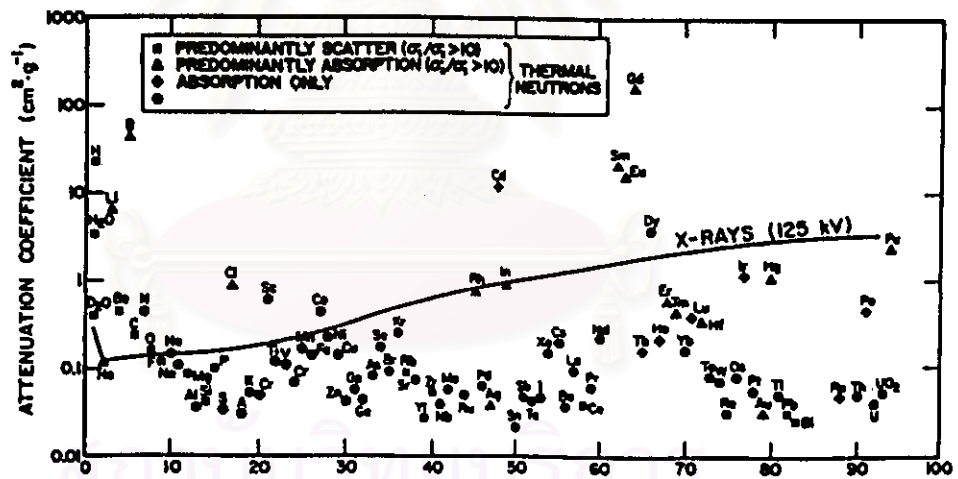
2.2.2 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีหลักการคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาคืออาศัยหลักการส่งผ่านรังสีไปยังชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อลำรังสีผ่านชิ้นงานจะเกิดการลดพลังงานและความเข้มของรังสีตามโครงสร้างภายในของชิ้นงานนั้นๆ แล้วผ่านไปยังอุปกรณ์บันทึกภาพ ซึ่งบันทึกความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านออกมาเป็นภาพฉาย (Projection) ของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่เนื่องจากรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมากับสสารเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาของธาตุต่าง ๆ จึงขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุนั้น ส่วนนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารเกิดขึ้นกับนิวเคลียสของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนของธาตุต่าง ๆ จึงขึ้นกับภาคตัดขวางของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวไคลด์ของแต่ละธาตุ ไม่ขึ้นกับเลขอะตอม ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุแสดงในตารางที่ 2.2

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีเอกซ์มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกัน ในขณะที่สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนมีค่าต่างกันมากในบางธาตุที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกัน ธาตุเบาบางธาตุ เช่น ไฮโดรเจน ลิเทียม โบรอน ธาตุกึ่งหนักบางธาตุ โดยเฉพาะแคลเซียม ซาแมเรียม ยูโรเนียม แกโดลิเนียม และ ดิสโพรเซียม มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเทอร์มัลนิวตรอนเชิงมวลสูงมาก ดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนสำหรับไอโซโทปของธาตุเดียวกันยังมีค่าแตกต่างกันด้วย เพราะไอโซโทปของธาตุเดียวกันมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน (เท่ากับอิเล็กตรอน) แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน จะทำอันตรกิริยากับนิวตรอนต่างกัน จึงทำให้การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสามารถแสดงความแตกต่างของไอโซโทปที่ต่างกันของธาตุได้ ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับไอโซโทปบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 keV และนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV กับเลขอะตอมของธาตุ^[12]

ตารางที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุ^[6]

Atomic number	Element	Density g.cm ⁻³	Nuclei cm ⁻³ .10 ²⁴	Macroscopic cross-section, cm ⁻¹			Absorption coefficient cm ² .g ⁻¹		
				Absorption	Scattering	Total	Absorption	Scattering	Total
1	H	8.99x10 ⁻³	5.37x10 ³	1.7x10 ⁻⁵	2x10 ⁻³	10x10 ⁻³	0.189	22.2	22.38
2	He	1.78x10 ⁻⁴	2.68x10 ³	2x10 ⁻⁷	2.1x10 ⁻³	2.1x10 ⁻³	0	0.1	0.1
3	Li	0.534	0.046	3.27	0.065	3.33	6.1	0.1	6.2
4	He	1.84	0.123	1.24x10 ⁻³	0.865	0.865	0.0067	0.47	0.48
5	B	2.45	0.136	104.3	0.549	104.8	42.57	0.22	42.78
6	C	1.60	0.080	2.6x10 ⁻⁴	0.385	0.385	0.00018	0.24	0.24
7	N	1.25x10 ⁻³	5.38x10 ³	9.9x10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴	6x10 ⁻⁴	0.081	0.43	0.51
8	O	1.43x10 ⁻³	5.38x10 ³	-	2.1x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁴	<7x10 ⁻⁴	0.16	0.16
9	F	1.7x10 ⁻³	5.39x10 ³	10 ⁻⁷	2x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁴	<3x10 ⁻⁴	0.12	0.12
10	Ne	9.0x10 ⁻⁴	2.69x10 ³	2.6x10 ⁻⁵	6.2x10 ⁻³	8.9x10 ⁻³	0.0009	0.072	0.073
11	Na	0.971	0.025	0.013	0.102	0.115	0.0139	0.10	0.11
12	Mg	1.74	0.043	3x10 ⁻³	0.155	0.158	0.0016	0.089	0.091
13	Al	2.7	0.060	1.4x10 ⁻²	8.4x10 ⁻²	9.8x10 ⁻²	0.0053	0.031	0.036
14	Si	2.35	0.050	7x10 ⁻³	8.9x10 ⁻²	9.6x10 ⁻²	0.0034	0.036	0.039
15	P	1.83	0.036	7x10 ⁻³	0.177	0.184	0.0039	0.10	0.10
16	S	2.1	0.040	1.9x10 ⁻²	4.3x10 ⁻²	6.2x10 ⁻²	0.0098	0.021	0.031
17	Cl	3.21x10 ⁻³	5.45x10 ³	2x10 ⁻³	8x10 ⁻⁴	2.8x10 ⁻³	0.58	0.27	0.85
18	Ar	1.78x10 ⁻³	2.68x10 ³	2.6x10 ⁻⁵	3.9x10 ⁻³	5.5x10 ⁻³	0.0099	0.02	0.03
19	K	0.87	0.013	2.6x10 ⁻³	2x10 ⁻³	4.7x10 ⁻³	0.0318	0.023	0.053
20	Ca	1.54	0.020	1x10 ⁻²	7x10 ⁻²	8x10 ⁻²	0.0066	0.046	0.053
21	Sc	3.0	0.034	1.089	0.941	1.59	0.36	0.31	0.67
22	Ti	4.5	0.057	0.328	0.226	0.555	0.072	0.05	0.12
23	V	5.96	0.071	0.359	0.352	0.711	0.059	0.059	0.118
24	Cr	6.92	0.080	0.238	0.247	0.485	0.036	0.035	0.071
25	Mn	7.42	0.081	1.04	0.181	1.22	0.141	0.025	0.166
26	Fe	7.86	0.085	0.215	0.933	1.15	0.0282	0.12	0.15
27	Co	8.71	0.089	3.38	0.509	3.89	0.38	0.057	0.44
28	Ni	8.75	0.090	0.42	1.6	2.02	0.047	0.18	0.23
29	Cu	8.94	0.085	0.313	0.611	0.924	0.036	0.068	0.104
30	Zn	7.14	0.066	7x10 ⁻²	0.237	0.307	0.0102	0.033	0.043
31	Ga	5.90	0.051	0.142	0.204	0.346	0.0241	0.036	0.060
32	Ge	5.46	0.045	0.105	0.134	0.239	0.02030	0.025	0.045
33	As	3.70	0.030	0.189	0.277	0.466	0.035	0.048	0.083
34	Se	4.5	0.034	0.431	0.403	0.835	0.089	0.084	0.173
35	Br	3.12	0.024	0.155	0.41	0.296	0.052	0.045	0.097
36	Kr	3.71x10 ⁻³	2.67x10 ³	7.3x10 ⁻⁴	7x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻³	0.22	0.052	0.27
37	Rb	1.53	0.011	8x10 ⁻³	0.13	0.138	0.051	0.039	0.044
38	Sr	2.54	0.018	2x10 ⁻²	0.175	0.195	0.0083	0.069	0.077
39	Y	5.51	0.037	4.8x10 ⁻²	0.112	0.160	0.0089	0.0203	0.0292
40	Zr	6.44	0.043	8x10 ⁻³	0.338	0.346	0.0012	0.053	0.054
41	Nb	8.4	0.055	6x10 ⁻²	0.272	0.333	0.0075	0.032	0.039
42	Mo	10.2	0.064	0.16	0.448	0.608	0.017	0.044	0.061
43	Tc				0.13				
44	Ru	12.1	0.072	0.179	0.436	0.615	0.016	0.035	0.05
45	Rh	12.4	0.073	11	0.36	11.4	0.88	0.029	0.91
46	Pd	12.2	0.069	0.551	0.248	0.799	0.045	0.020	0.065

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Atomic number	Element	Density g.cm ⁻³	Nuclci cm ⁻³ .10 ²⁴	Macroscopic cross-section, cm ⁻¹			Absorption coefficient cm ² .g ⁻¹		
				Absorption	Scattering	Total	Absorption	Scattering	Total
47	Ag	10.5	0.059	3.63	0.325	3.98	0.349	0.033	0.382
48	Cd	8.65	0.046	116.7	0.264	117.0	13.5	0.031	13.53
49	In	7.28	0.038	7.42	0.10	7.52	1.02	0.014	1.03
50	Sn	7.29	0.037	2x10 ⁻²	0.132	0.152	0.0031	0.020	0.023
51	Sb	6.22	0.031	0.182	0.142	0.324	0.0282	0.0213	0.0495
52	Te	6.02	0.028	0.133	0.148	0.281	0.0221	0.024	0.046
53	I	4.94	0.024	0.157	0.084	0.241	0.034	0.017	0.051
54	Kc	5.85x10 ⁻³	2.68x10 ⁻³	10 ⁻³	1.2x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻³	0.34	0.020	0.36
55	Cs	1.87	8.5x10 ⁻¹	0.246	0.170	0.416	0.128	0.032	0.160
56	Ba	3.5	0.015	1.8x10 ⁻¹	0.123	0.141	0.0052	0.035	0.040
57	La	6.15	0.027	0.239	0.403	0.642	0.0386	0.040	0.079
58	Ge	6.9	0.030	2.1x10 ⁻¹	0.262	0.283	0.0031	0.012	0.015
59	Pr	6.48	0.028	0.324	0.116	0.44	0.048	0.017	0.065
60	Nd	6.96	0.029	1.33	0.464	1.79	0.208	0.066	0.274
61	Pm						0.249	-	0.249
62	Sm	7.54	0.032	170.78	0.56	172.8	23	-	23
63	Eu	5.22	0.021	96.6	0.168	96.8	18.5	0.032	18.53
64	Gd	7.95	0.031	1479	3.86	1482.8	187.2	0.74	188
65	Tb	8.33	0.032	1.39	-	1.39	0.18	-	0.18
66	Dy	8.56	0.032	29.8	2.86	32.7	3.5	0.34	0.384
67	Ho	8.76	0.032	2.078	0.275	2.353	0.236	0.031	0.267
68	Er	4.77	0.017	5.44	0.495	5.98	0.58	-	0.58
69	Tm	9.35	0.033	3.49	0.22	3.71	0.37	0.0237	0.40
70	Yb	7.01	0.024	0.878	0.293	1.17	0.128	0.04	0.17
71	Lu	9.74	0.036	3.62	-	3.62	0.38	-	0.38
72	Hf	13.3	0.045	4.71	0.359	5.07	0.341	0.27	0.61
73	Ta	16.6	0.055	1.18	0.277	1.46	0.070	0.017	0.087
74	W	18.9	0.062	2.21	0.316	1.53	0.063	0.016	0.079
75	Re	29.15	0.095	5.58	0.93	6.51	0.28	0.045	0.33
76	Os	22.5	0.073	1.05	0.783	1.83	0.049	0.049	0.098
77	Ir	22.4	0.078	30.2		30.2	1.37	-	1.37
78	Pt	21.4	0.066	0.535	0.660	1.19	0.027	0.031	0.058
79	Au	19.3	0.060	5.9	0.46	6.36	0.305	0.0238	0.329
80	Hg	13.6	0.041	14.7	0.814	15.5	1.12	0.06	1.18
81	Tl	11.9	0.035	0.115	0.489	0.604	0.010	0.041	0.051
82	Pb	11.1	0.033	6x10 ⁻³	0.363	0.369	4.9x10 ⁻⁴	0.032	0.032
83	Bi	9.7	0.028	10 ⁻³	0.264	0.265	9.8x10 ⁻³	0.026	0.026
84	Po	9.24	0.027						
85	At								
86	Rn	9.73x10 ⁻³	2.64x10 ⁻³						
87	Fr								
88	Ra	5	0.013	0.266		0.266	0.053	-	0.053
89	Ac						1.35	-	1.35
90	Th	11.5		0.205	0.366	0.571	0.019	0.032	0.051
91	P	15.4		10.4	-	10.4	0.675	-	0.675
92	U	18.7	0.047	0.364	0.397	0.761	0.0193	0.0209	0.0402

ตารางที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด^[13]

Element	A	% Abundance	σ_s	σ_a
Li	natural		1.40	70.5
	6	7.5	0.98	940
	7	82.5	1.44	0.0454
B	natural		5.01	767
	10	20	0.98	3837
	11	80	5.8	0.006
Al	27	100	1.506	0.231
Fe	natural		11.66	2.56
	54	5.8	2.2	2.3
	56	91.72	12.8	2.6
	57	2.20	<1.0	2.5
	58	0.28	28.0	1.28
Cd	natural		5.7	2520
	106	1.25		1.0
	108	0.89		1.1
	110	12.51		11.0
	111	12.81		24.
	112	24.13	7.0	2.2
	113	12.22		20600.
	114	28.72	5.3	0.34
	116	7.47	6.5	0.07
In	natural		2.75	194
	113	4.28	3.8	12.
	115	95.72	2.6	202.
Gd	natural			49000
	152	0.2		1100.
	154	2.1		85.
	155	14.8		60900.
	156	20.6		1.5
	157	15.7		254000.
	158	24.8		2.0
	160	21.8		0.77
Pb	natural		11.11	0.17
	204	1.4		0.66
	206	24.1		0.0305
	207	22.1		0.709
	208	52.4		0.0049

เมื่อนิวตรอนผ่านวัตถุตัวอย่างความเข้มของนิวตรอนจะลดลงตามภาคตัดขวาง และความหนาของวัตถุ ดังสมการ

$$-\frac{d\phi}{dx} = \phi\sigma N \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

เมื่อ ϕ คือ ความเข้มของนิวตรอน (Neutron intensity) หรือจำนวนนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ($n/cm^2.s$)

x คือ ความหนาของวัตถุตัวอย่าง (cm)

σ คือ ภาคตัดขวางจุลภาค

N คือ จำนวนนิวไคลด์ต่อปริมาตร ($atoms/cm^3$) ของธาตุในวัตถุตัวอย่าง

เขียนสมการ (2.8) ในรูปของสมการเอกซโปเนนเชียลได้ ดังนี้

$$\phi = \phi_0 e^{-N\sigma x} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

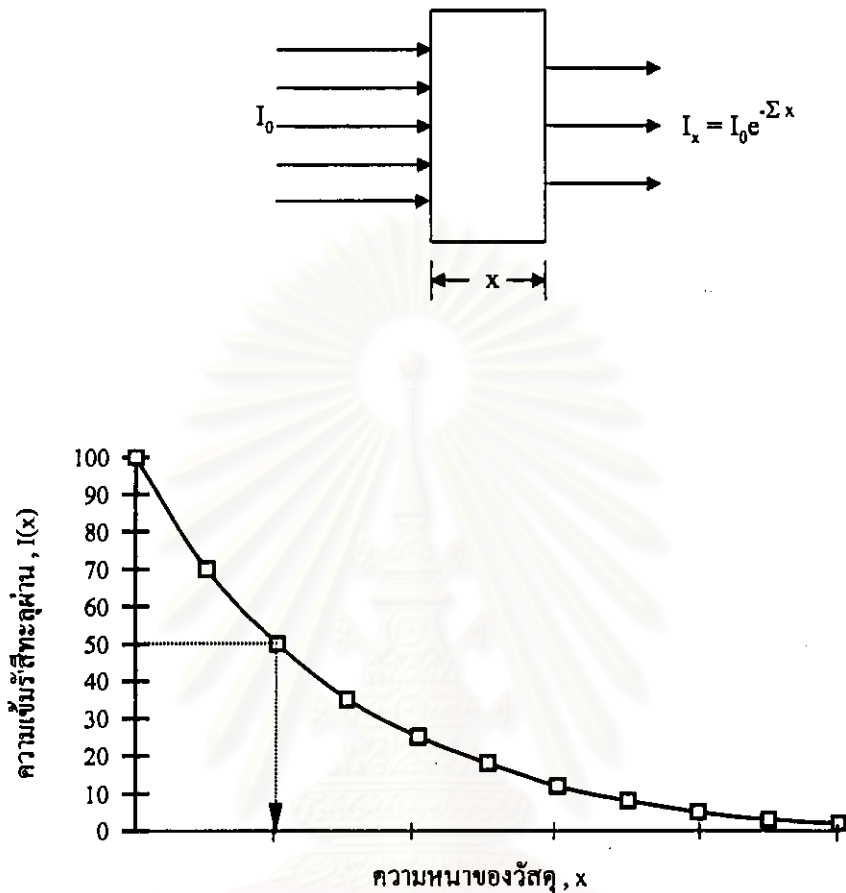
เมื่อ ϕ คือ ความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง ($n/cm^2.s$)

ϕ_0 คือ ความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุตัวอย่าง ($n/cm^2.s$)

$$\phi = \phi_0 e^{-\Sigma x} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ Σ คือ ภาคตัดขวางมหภาคเป็นค่าแสดงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัตถุขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่น ρ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) จะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) เป็น

$$\mu_m = \Sigma/\rho \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

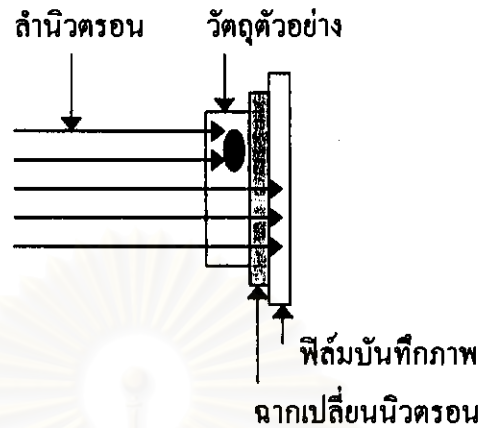


รูปที่ 2.5 แผนภาพและกราฟแสดงการลดความเข้มของรังสีเมื่อผ่านวัสดุ

2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การเลือกใช้เทคนิคในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนขึ้นอยู่กับลักษณะของนิวตรอน วัตถุประสงค์ที่ต้องการตรวจสอบ ความแรงของรังสีแกมมา ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน และคุณภาพของภาพถ่ายที่ต้องการ เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแยกตามวิธีการในการบันทึกภาพได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ ดังนี้

(1) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง (Direct technique) เป็นการถ่ายภาพโดยวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนประกอบไว้ด้านหลังฟิล์มบันทึกภาพ ในบริเวณที่ลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน โดยมีวัตถุที่ต้องการตรวจสอบวางไว้หน้าฟิล์มบันทึกภาพ ดังรูปที่ 2.6

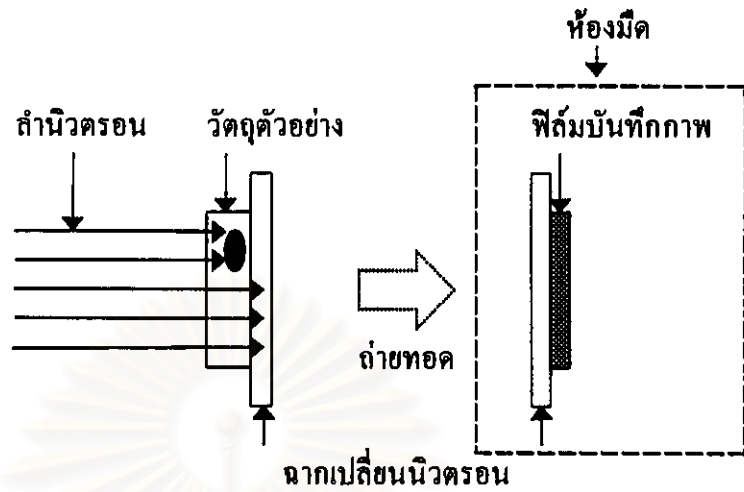


รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง

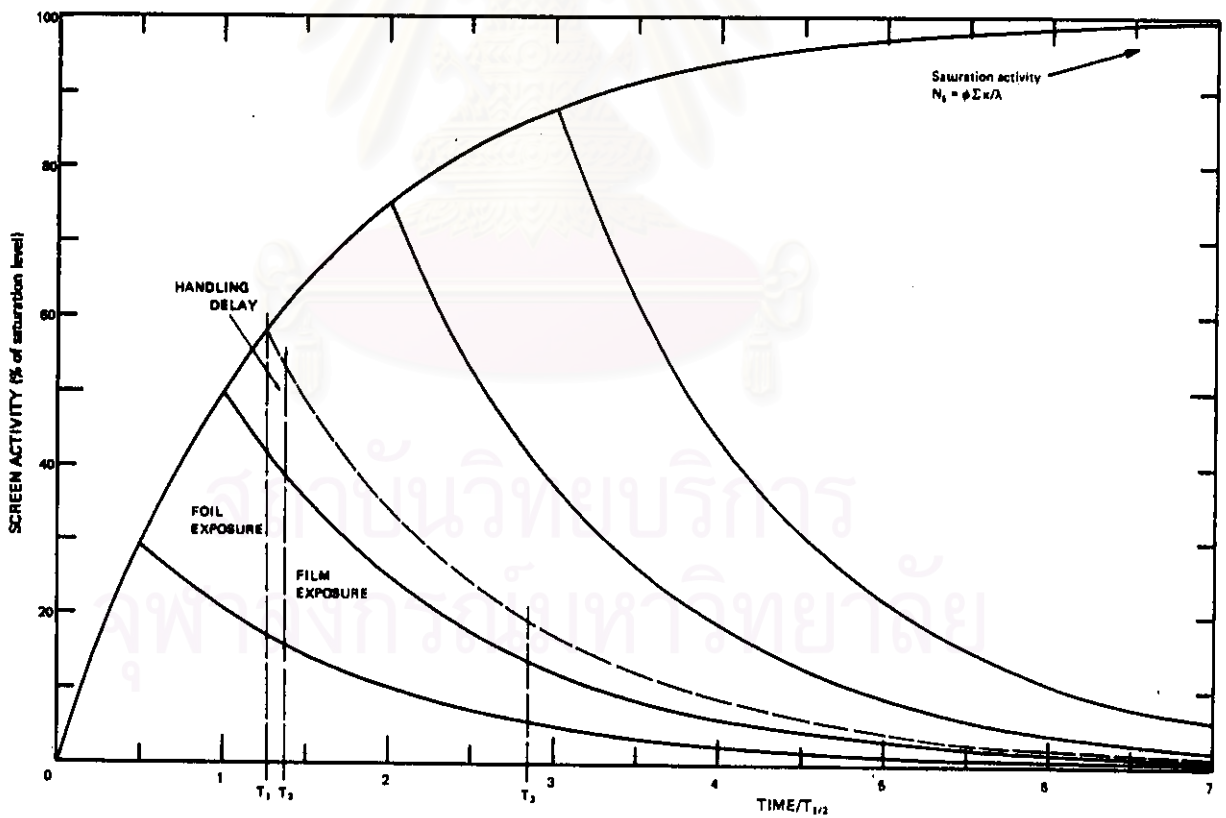
เมื่อลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุและฟิล์มมาตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมา ทำให้เกิดภาพแฝง (Latent image) บนแผ่นฟิล์ม ในขณะที่อยู่ในตำแหน่งของลำนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้กับการถ่ายภาพโดยเทคนิคถ่ายตรงนี้ จึงเป็นชนิดที่ปลดปล่อยรังสีออกมาแบบฉับพลันเมื่อดูดกลืนนิวตรอน เช่น ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gd) ฉากโลหะแคดเมียม (Cd) และฉากเรืองแสง (Scintillation convertor screen)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรงมีวิธีปฏิบัติง่าย และสามารถทราบผลได้รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดในกรณีที่ต้องการถ่ายภาพวัตถุที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือในตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพมีรังสีแกมมาปะปนสูง ความเข้มของรังสีแกมมาจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้ฟิล์มขุ่นเนื่องจากรังสีแกมมา (Gamma fogged) ความเปรียบต่างและความคมชัดของภาพจึงลดลง

(2) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด (Transfer technique) เป็นการถ่ายภาพโดยวางเฉพาะฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหลังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบในบริเวณที่ลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อลำนิวตรอนผ่านวัตถุและทำปฏิกิริยากับฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะทำให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีกัมมันตรังสี แล้วจึงนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนไปประกบกับฟิล์ม ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนได้มากจะมีกัมมันตภาพรังสีสูง ทำให้ฟิล์มดำมาก และฉากเปลี่ยนนิวตรอนบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนน้อยจะมีกัมมันตภาพรังสีต่ำ ทำให้ฟิล์มดำน้อย



รูปที่ 2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยเทคนิคถ่ายภาพ



รูปที่ 2.8 กัมมันตภาพรังสีบนฉากเปลี่ยนนิวตรอนขณะถ่ายภาพ และการสลายตัวของธาตุ
กัมมันตรังสีภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพ^[14]

เมื่อฉากเปลี่ยนนิวตรอนได้รับนิวตรอนจะมีกัมมันตภาพรังสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ได้รับนิวตรอน สามารถคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีได้จาก

$$A = \phi N \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ A คือ กัมมันตภาพรังสีของฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน

N คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่นำมาใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน

σ คือ ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนเท่ากับ $0.693/T$

เมื่อ T คือ ค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน

t คือ เวลาในการอาบรังสี (เวลาในการถ่ายภาพ)

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพชนิดนี้ ต้องใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีคุณสมบัติให้กัมมันตภาพรังสี เมื่อได้รับนิวตรอน ซึ่งได้แก่ ฉากโลหะดิสโพรเซียม (Dy) ฉากโลหะอินเดียม (In) และฉากโลหะทอง (Au) เป็นต้น ส่วนฟิล์มที่ใช้ในการบันทึกภาพจำเป็นต้องใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิดความไวสูง (High speed film) เนื่องจากรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากโลหะแต่ละชนิดมีกัมมันตภาพรังสีจำกัด ตามครึ่งชีวิตของแต่ละไอโซโทป

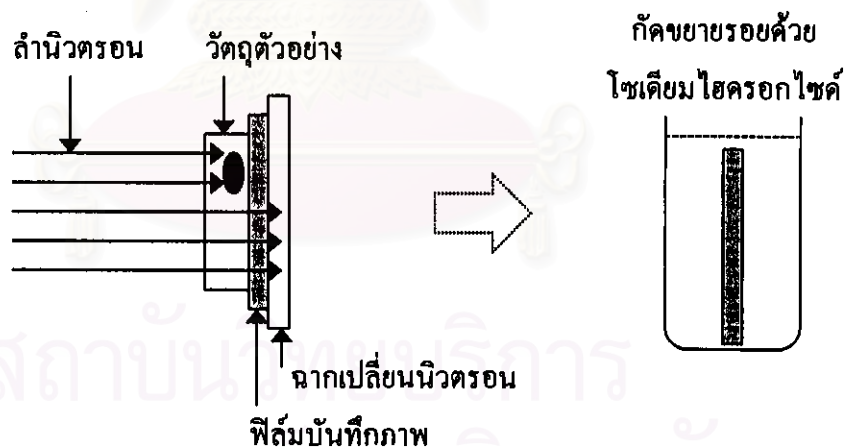
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีนี้มีประโยชน์ในการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสี เช่น ดันกำเนิดรังสีต่าง ๆ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และสามารถถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในบริเวณที่มีปริมาณรังสีแกมมาสูงๆ ได้ เนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยากับรังสีแกมมา

(3) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ (Track-etch technique) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ มีกระบวนการคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพตรง แต่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนต่างชนิดกัน การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์อาศัยหลักการที่ไอออน (อนุภาคมีประจุ) พลังงานสูงวิ่งผ่านวัสดุบางชนิด เช่น ไมกา แก้ว และพลาสติก แล้วทำให้วัสดุนั้น ๆ เกิดรอย (Track) ถ้านำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอย (Etching) ด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นรอยชัดเจนขึ้น

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ผลิตจากวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา ส่วนฟิล์มบันทึกภาพ ใช้ฟิล์มพลาสติก เช่น ฟิล์มไนโตรเซลลูโลส หรือ ฟิล์มโพลีคาร์บอเนต

การกัดขยายรอยฟิล์มพลาสติกชนิดไนโตรเซลลูโลสและโพลีคาร์บอเนต ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2.5 นอร์มัล (2.5 N NaOH) กัดขยายรอย อุณหภูมิในการกัดขยายรอย 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นใช้น้ำสะอาดล้างสารละลายออกและหากจำเป็นก็สามารถนำมากัดขยายรอยได้อีก ส่วนวัสดุไมกาและแก้ว ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) หรือกรดกัดแก้ว เป็นสารกัดขยายรอยอนุภาค

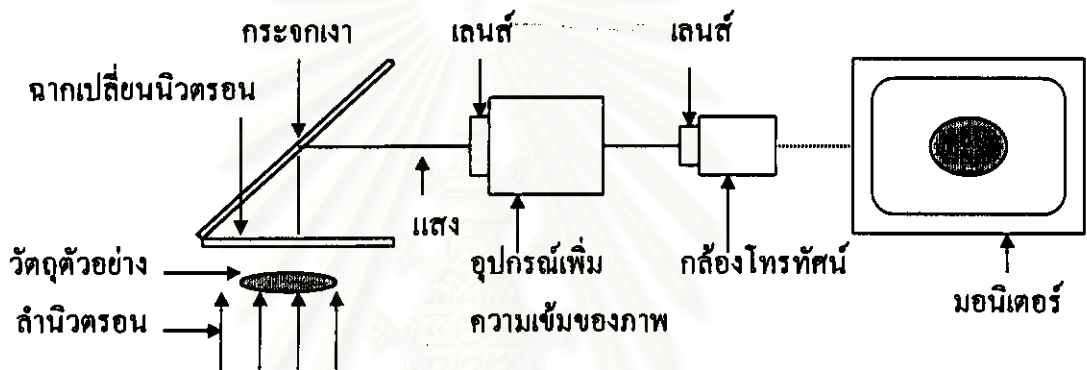
เนื่องจากฟิล์มบันทึกภาพที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์ไม่ไวต่อรังสีแกมมา จึงสามารถถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือถ่ายภาพในบริเวณที่มีรังสีแกมมาสูงได้ เช่นเดียวกับเทคนิคถ่ายภาพแต่มีข้อดีกว่า คือ ใช้เวลาน้อยกว่า เนื่องจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง และผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับรังสีจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน นอกจากนี้ยังสามารถอ่านฟิล์มและบันทึกภาพได้หลายระดับ เนื่องจากสามารถล้างฟิล์มเคมีซ้ำได้หลายครั้ง



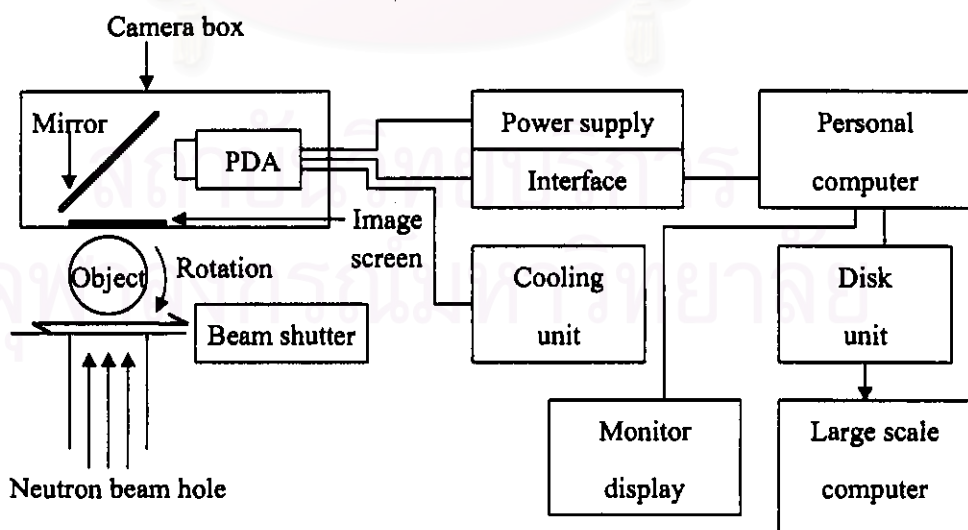
รูปที่ 2.9 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์

นอกจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทั้ง 3 เทคนิคที่กล่าวมาแล้วปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคการถ่ายด้วยนิวตรอนโดยนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาประกอบในการบันทึกภาพหรือประมวลผลภาพ เช่น การถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน (Dynamic imaging methods) และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคโทโมกราฟี (Tomography) การถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอนใช้

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแบบเรืองแสงที่มีประสิทธิภาพสูง เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพิ่มความเข้มของภาพ (Image intensifier) เพื่อให้สามารถถ่ายและบันทึกภาพด้วยกล้องโทรทัศน์หรือกล้องวิดีโอได้ ส่วนการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคโทโมกราฟี มีหลักการเช่นเดียวกับการถ่ายภาพ โทโมกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ โดยการถ่ายภาพหลาย ๆ ภาพอย่างต่อเนื่องรอบวัตถุตัวอย่าง แล้วนำข้อมูลของแต่ละภาพมาประมวลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่างซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดโครงสร้างภายในวัตถุตัวอย่างตามแนวระนาบที่ต้องการได้



รูปที่ 2.10 ระบบถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน

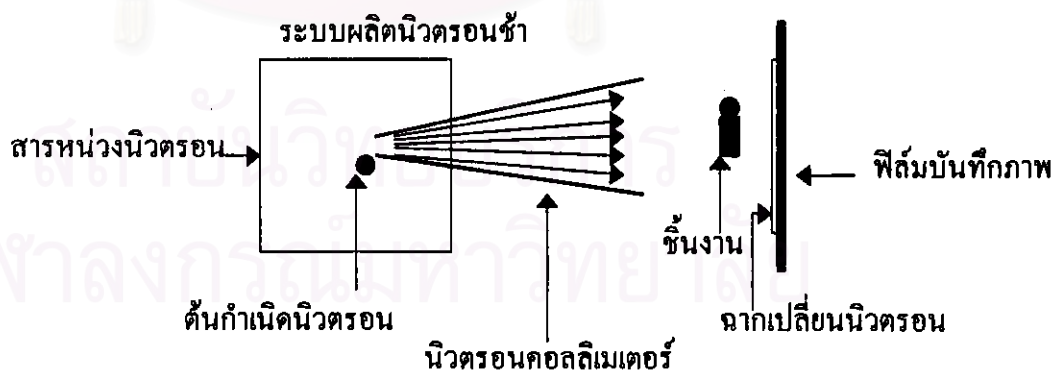


รูปที่ 2.11 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคโทโมกราฟี^[15]

2.2.4 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังนี้

- (1) ระบบผลิตนิวตรอนช้า ประกอบด้วย ดันกำเนิดนิวตรอนเร็วชนิดโคเซนดริ่งและ สารหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) ทำหน้าที่ลดพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า เนื่องจากนิวตรอนที่ได้จากดันกำเนิดนิวตรอนมีพลังงานสูงมาก ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการนิวตรอนพลังงาน 0.03-10 keV เท่านั้น
 - (2) นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) คือท่อสำหรับนำลำนิวตรอนออกมาจากระบบผลิตนิวตรอนช้า เพื่อใช้ในการถ่ายภาพ
 - (3) ชั้นงานที่ต้องการตรวจสอบ
 - (4) ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนที่ทะลุผ่านชั้นงานให้เป็นแสง รังสีทิวติงกูมิหรืออนุภาคที่เหมาะสมกับฟิล์มหรืออุปกรณ์บันทึกภาพ
 - (5) ฟิล์มและอุปกรณ์บันทึกภาพ ทำหน้าที่บันทึกภาพหรือแสดงภาพ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชั้นงาน
- การจัดระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจัดระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากดันกำเนิดนิวตรอน

2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ลำนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้มาจากต้นกำเนิด 3 ประเภทได้แก่

- (1) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)
- (2) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerators)
- (3) ไอโซโทปรังสี (Radioisotopes)

นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้มีพลังงานสูงระหว่าง 2 MeV (สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู) และ 14 MeV (สำหรับเครื่องเร่งอนุภาค) ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการนิวตรอนในช่วงพลังงาน 0.01 ถึง 10 keV เท่านั้น จึงจำเป็นต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงเทอร์มัลหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้สารหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) ที่เหมาะสม ซึ่งมี ภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ เบริลเลียม โพลีเอทิลีน และใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimators) ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ลำนิวตรอนที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

การที่นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดถูกลดพลังงานลงโดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอนจะทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วงนิวตรอนลดลงเหลือประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มข้นนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์” (Thermalization factor) โดย

$$\text{เทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm}^2\text{-s)}}$$

ค่าเทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

ก. ชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วต่างชนิดกันจะปลดปล่อยนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานต่างกัน ในสารหน่วงนิวตรอนชนิดเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าจะให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนสูงกว่า เมื่อมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเท่ากัน ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14

ข. ชนิดของสารหน่วงนิวตรอน

ธาตุที่สามารถหน่วงพลังงานนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ ไฮโดรเจน ดังนั้น สารหน่วงนิวตรอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน ที่มีความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนสูง จะให้ความเข้มสูงสุดของนิวตรอนช้าสูงกว่า ดังรูปที่ 2.15

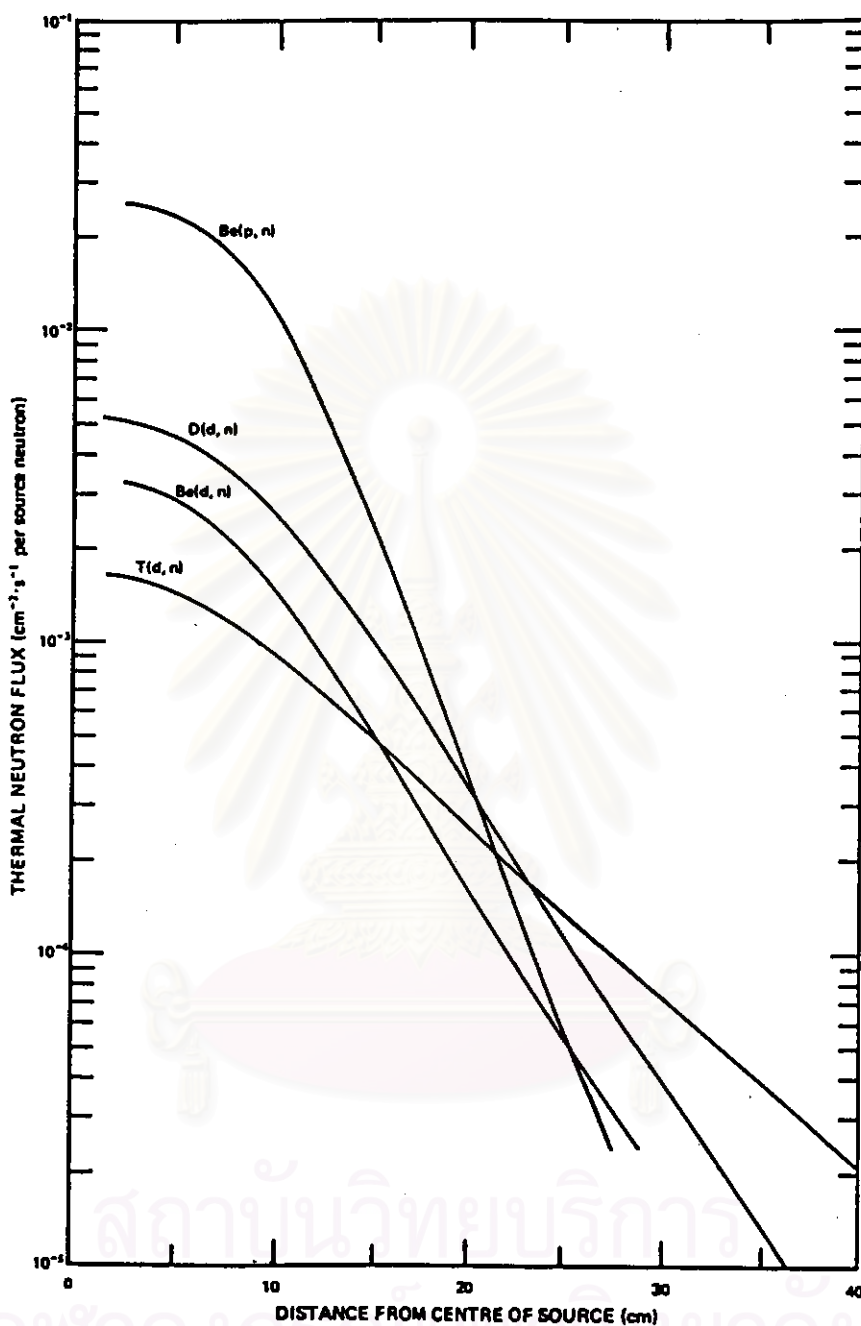
ตารางที่ 2.4 ค่าเทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด⁽⁷⁾

พลังงานนิวตรอน	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์
0.024 MeV	$^{124}\text{Sb-Be}$	$^9\text{Be} (\gamma, n) \text{Be}$	50
2 MeV	^{252}Cf	self fission	100
4.5 MeV	$^{241}\text{Am-Be}$	$^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$	200
6.5 MeV*	เครื่องเร่งอนุภาค	$^9\text{Be} (d, n) ^{10}\text{B}$	300
14 MeV**	เครื่องเร่งอนุภาค	$^3\text{T}^9 (d, n) ^4\text{He}$	650

หมายเหตุ * เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 2.8 MeV

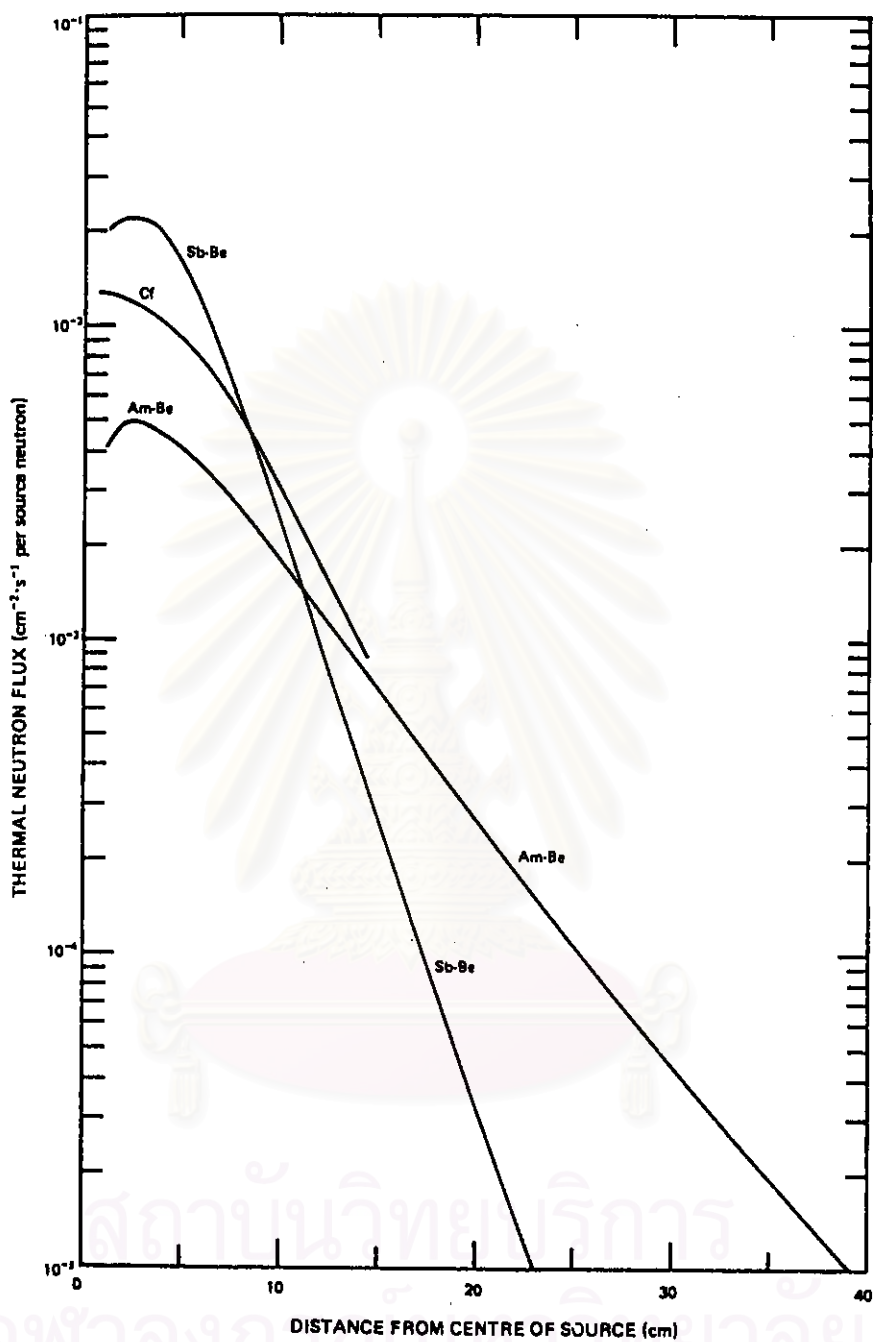
**เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 150 MeV

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



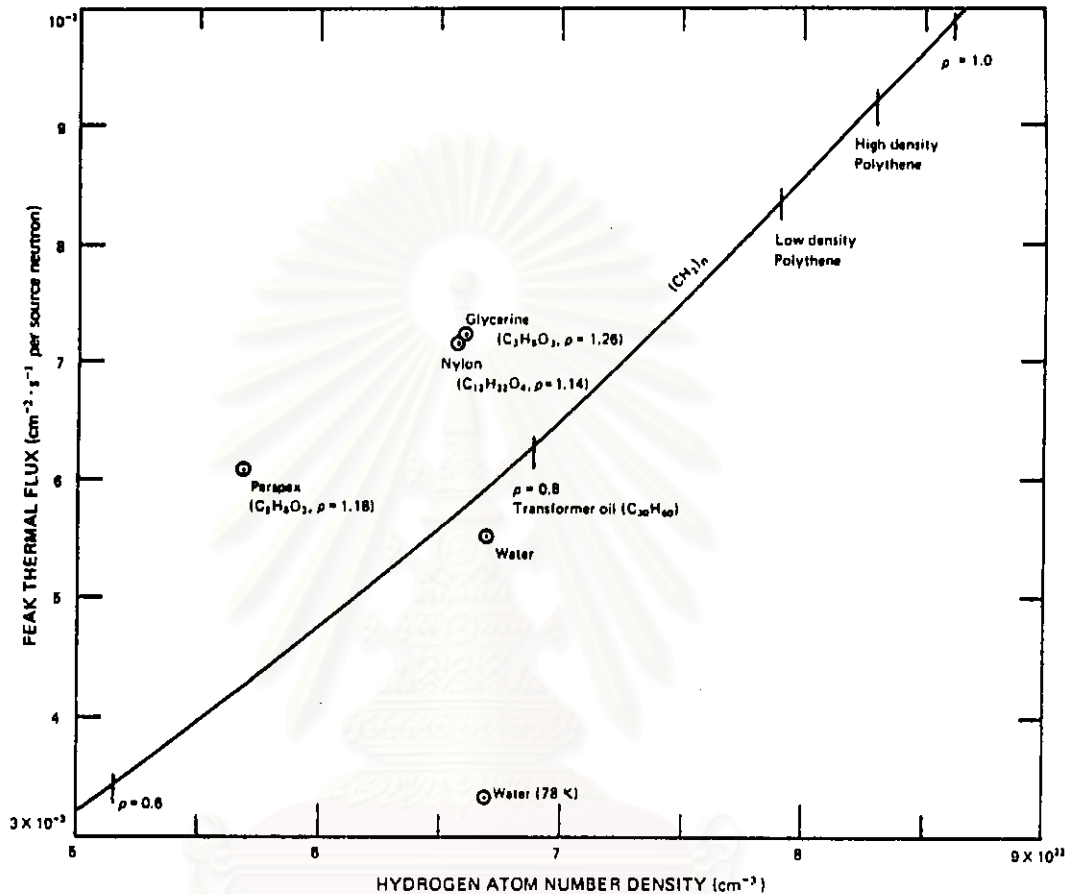
Thermal neutron flux distributions (experimental) produced by various accelerator neutron sources in a water moderator. The beryllium-target reactions refer to a bombarding ion energy of 2.8 MeV and a thick stainless-steel target chamber of 6 cm outside diameter, the hydrogen-target reactions refer to a bombarding energy of 150 keV and a light aluminum target chamber 2.5 cm in outside diameter.

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค^[14]



Thermal neutron flux distributions (experimental) produced by various radiolotope neutron sources in a water moderator. The source strengths used were 0.05 Ci (Sb-Be), 10 m Ci (²⁵²Cf), and 1 Ci (Am-Be), the larger sources required for neutron radiography will depress the normalized centre flux considerably in the case of Sb-Be and Am-Be but not in the case of ²⁵²Cf.

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิด
แบบไอโซโทปรังสี^[14]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน^[14]

การเลือกต้นกำเนิดนิวตรอนสำหรับใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น พลังงานและความเข้มของนิวตรอนและรังสีแกมมา ราคา ขนาด ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และปัญหาในการกำบังรังสี เป็นต้น นิวตรอนฟลักซ์ ข้อดี และข้อจำกัดบางประการของต้นกำเนิดนิวตรอนแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.5

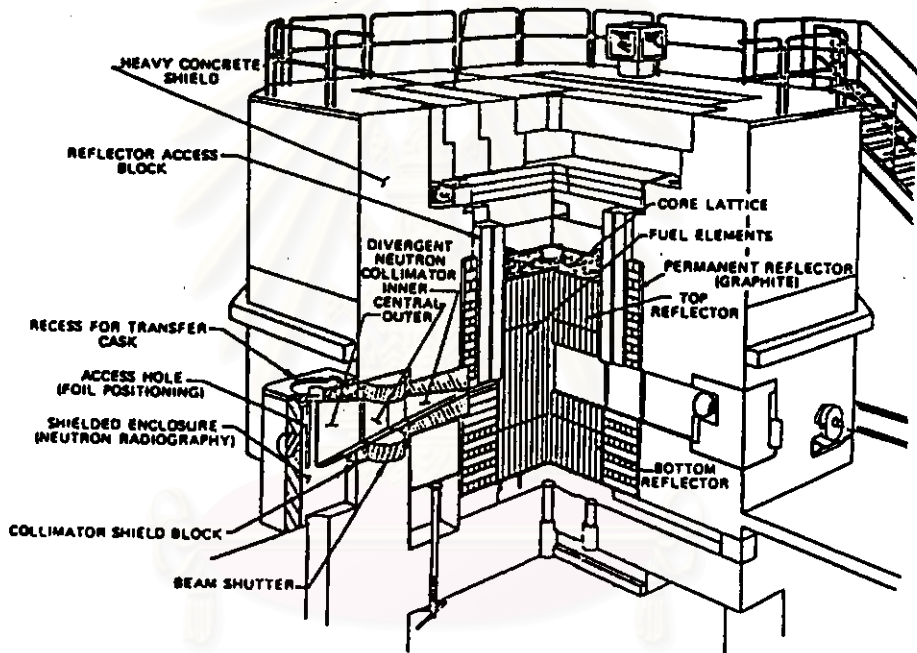
ตารางที่ 2.5 เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ข้อดี และข้อจำกัดที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค และไอโซโทปริงส์^[6]

ต้นกำเนิดนิวตรอน	นิวตรอนฟลักซ์ (n/cm ² ·s)	ข้อดี	ข้อเสีย
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	10 ¹⁰ -10 ¹⁵	-ความเข้มข้นนิวตรอนสูง -ให้ภาพคมชัดมาก -อายุการใช้งานนาน	-ราคาสูงมาก -ใช้งานยาก -ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้
เครื่องเร่งอนุภาค	10 ⁷ -10 ¹⁰	-ความเข้มข้นนิวตรอนปานกลาง -สามารถปรับให้เครื่องทำงานหรือหยุดทำงานได้ -สามารถเคลื่อนย้ายได้	-ราคาสูง -อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น -ใช้งานค่อนข้างยาก -ความเข้มข้นของนิวตรอนไม่สม่ำเสมอ
ไอโซโทปริงส์	10 ⁵ -10 ⁹	-ขนาดเล็ก -ใช้งานง่าย -ใช้งานนอกสถานที่ได้ -ความเข้มข้นของนิวตรอนสม่ำเสมอ	-ความเข้มข้นนิวตรอนต่ำ -ภาพถ่ายไม่ค่อยคมชัด -ให้รังสีตลอดเวลา

2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)

มีความแตกต่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอื่นมาก และเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ ความเข้มข้นของนิวตรอนสูงที่สุด เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบเทอร์มัลที่ใช้ในงานวิจัย (Thermal nuclear research reactor) ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัวของ ยูเรเนียม-235 กับนิวตรอนช้า การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทำได้โดยการนำนิวตรอนออกจากกระบวนการ ซึ่งเป็นการหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) นิวตรอนถูกนำออกจากกระบวนการ โดยการสอดแท่งวัสดุสำหรับดูดกลืนนิวตรอนเข้าไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ และปรับระยะของการใส่แท่งวัสดุให้เหมาะสมเพื่อรักษากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้สม่ำเสมอ นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวมีพลังงานประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานเป็นเทอร์มัลนิวตรอน โดยสารหน่วงนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งได้แก่ น้ำ แกรไฟต์ หรือน้ำ

มวลหนัก ระดับนิวตรอนฟลักซ์ หรือความเข้มข้นนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 10^{10} ถึง 10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตนิวตรอนเร็ว และนิวตรอนช้า รังสีแกมมา และอนุภาคมีประจุในปริมาณสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูกับต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอื่นแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ดีที่สุดและมีการใช้แพร่หลายที่สุดสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในปัจจุบัน เพราะสามารถนำนิวตรอนช้าในช่วงความเข้มข้นสูง 10^5 ถึง 10^8 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที มาใช้ในการถ่ายภาพ จึงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้นโดยให้ความคมชัดของภาพสูง



รูปที่ 2.16 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู^[16]

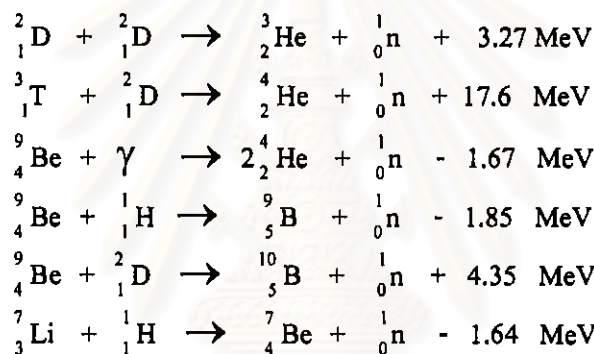
ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้แก่

1. แกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor core)
2. นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) ซึ่งบางครั้งรวมอยู่กับอุปกรณ์กรองนิวตรอน (Neutron filtering device)
3. ระบบชัตเตอร์ (Shutter system)
4. สถานที่สำหรับถ่ายภาพ รวมทั้งอุปกรณ์กำบังลำรังสี

ในการตรวจสอบวัตถุที่มีกัมมันตภาพรังสี เครื่องมือในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนส่วนใหญ่จะติดตั้งไว้ใต้น้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor pool) ส่วนการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแบบแห้ง (Dry neutron radiography) ใช้สำหรับการถ่ายภาพวัตถุอื่น ๆ ซึ่งใช้ลำนิวตรอนที่ออกมาจากท่อลำนิวตรอน หรือนิวตรอนคอลลิเมเตอร์จากแกนเครื่องปฏิกรณ์

2.3.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาค เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแรงสูงเร่งอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูงและควบคุมให้เข้าชนกับวัตถุที่เป็นเป้า (Target) ซึ่งจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่ใช้ยิงกับอนุภาคที่เป็นเป้าปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



เครื่องเร่งอนุภาคหลายประเภทถูกนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron generator) เครื่องเร่งอนุภาคที่เป็นพื้นฐานของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็ว (Fast neutron generator) และอุปกรณ์สำหรับกั้นนิวตรอนเร็วเพื่อหน่วงนิวตรอนภายในนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เครื่องเร่งอนุภาคที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมากที่สุด ได้แก่

- (1) เครื่องเร่งอนุภาคคิกคาไฟฟ้าต่ำ (Low voltage accelerator)
- (2) เครื่องเอกซเรย์พลังงานสูง (High-energy x-ray machine)
- (3) เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดกร๊าฟฟ์ (Van de Graaff accelerator)
- (4) เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นพลังงานสูง (High-energy linear accelerator) และไซโคลตรอน (Cyclotrons)

(1) เครื่องเร่งอนุภาคคิกคาไฟฟ้าต่ำ หรือ (DT) generator อาศัยปฏิกิริยา ${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ ผลิตนิวตรอนพลังงาน 14 MeV จากการเร่งอนุภาคดิวทีรอน (Deuteron) ซึ่ง

คือนิวเคลียสของดิวทีเรียม (Deuterium, ${}^2_1\text{D}$ หรือ ${}^2_1\text{H}$) ให้ชนเป้าตรีเทียม (${}^3_1\text{T}$ หรือ ${}^3_1\text{H}$) ปฏิกิริยานี้เกิดได้ดีแม้ดิวทีเรียมมีพลังงานต่ำเพียง 120-150 keV ให้ยึดค้ของนิวตรอนเร็วประมาณ 10^{10} ถึง 10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีแต่นิวตรอนมีพลังงานสูงมาก จึงมีค่าเทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์มากดังแสดงในตารางที่ 2.4 และเนื่องจากนิวตรอนมีพลังงานสูงถึง 14 MeV ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มนิวตรอนได้ โดยนำโลหะบางชนิด เช่น ตะกั่ว ยูเรเนียม ล้อมรอบบริเวณใกล้ส่วนปลายของเครื่องเร่งอนุภาคใกล้ตำแหน่งเป้าโลหะในสารหน่วงนิวตรอนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา $(n,2n)$, $(n, 3n)$ และสำหรับยูเรเนียมมีปฏิกิริยา (n, f) ด้วย เมื่อใช้โลหะยูเรเนียมธรรมชาติจะให้ความเข้มของนิวตรอนซ้ำเพิ่มขึ้นอีก 5-6 เท่า

(2) เครื่องเอกซเรย์พลังงานสูง ดันกำเนิดนิวตรอนโดยปฏิกิริยา (x, n) คือดันกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงานสูง เช่น เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (Linear accelerators) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้ผลิตนิวตรอนได้โดยการใส่เป้าทุติยภูมิ (Secondary target) ที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เป้าเบริลเลียม ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 2.67×10^{-13} จูลน์ (1.67 MeV) เมื่อนิวเคลียสของเป้าเบริลเลียมได้รับรังสีเอกซ์พลังงานสูงกว่านี้ก็จะปลดปล่อยนิวตรอนออกมา เบริลเลียมจึงเป็นไอโซโทปที่สำคัญสำหรับใช้เป็นเป้าของเครื่องเร่งอนุภาคในการผลิตนิวตรอน การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนกระทำที่พลังงาน 8.8×10^{-13} จูลน์ (5.5 MeV) ของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ $0.17 \text{ c/kg} \cdot \text{min}$ (650 R/min) ที่ระยะ 1 เมตร (3 ฟุต) เวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนจากการปลดปล่อยนิวตรอนไปเป็นการปลดปล่อยรังสีเอกซ์สำหรับดันกำเนิดชนิดนี้เพียง 1 ชั่วโมงเท่านั้น ความเข้มของลำนิวตรอนสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของดันกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้เป็น 5×10^4 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เมื่อมีการบังคับลำนิวตรอนอย่างเหมาะสม

(3) เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดอกราฟฟ์ การเพิ่มความเข้มของรังสีให้มากขึ้นสามารถทำได้โดยการเร่งดิวทีเรียมให้ชนกับเป้าเบริลเลียมในแวนเดอกราฟฟ์เยเนอเรเตอร์ (Van de Graff generator) ที่ระดับพลังงาน 3.2×10^{-13} จูลน์ (2.0 MeV) ให้ความเข้ม 1.2×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (โดยการบังคับลำนิวตรอนปานกลาง) และสามารถคำนวณได้ว่าที่แรงดันของการเร่งอนุภาค 4.8×10^{-13} จูลน์ (3.0 MeV) จะทำให้ความเข้มของลำนิวตรอนสูงขึ้นประมาณ 6 เท่า

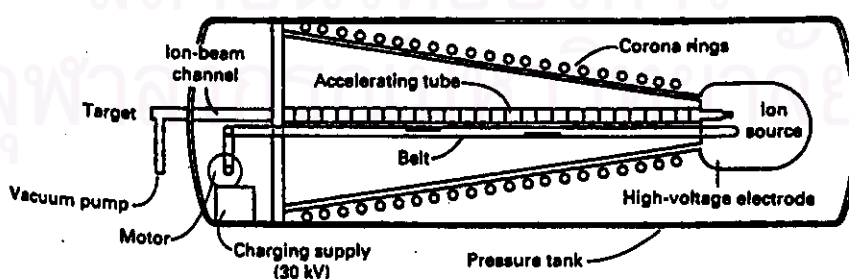
หลักการของเครื่องแวนเดอกราฟฟ์แสดงในรูปที่ 2.17 สายพานที่หมุนจะลำเลียงประจุจากแหล่งจ่ายไปยังเทอร์มินอลแรงดันไฟฟ้าสูง (High voltage terminal) แหล่งกำเนิดไอออนในเทอร์มินอลจะถูกหล่อเลี้ยงด้วยก๊าซดิวทีเรียมจากแหล่งเก็บซึ่งโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในเทอร์มินอลระบบความถี่คลื่นวิทยุ (Radio-frequency system) จะทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน แล้วไอออนบวกจะถูกแยกเข้าไปในท่อเร่งอนุภาค (Accelerating tube) แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลประมาณ 3 เมกกะวัตต์ จะถูกจ่ายออกไปโดยโซ่ตัวต้านทาน (Resistor chain) ผ่านท่อเร่งอนุภาคซึ่งมีช่องว่างมากกว่า

บวกรจะถูกแยกเข้าไปในท่อเร่งอนุภาค (Accelerating tube) แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลประมาณ 3 เมกกะวัตต์ จะถูกจ่ายออกไปโดยโซ่ตัวต้านทาน (Resistor chain) ผ่านท่อเร่งอนุภาคซึ่งมีช่องว่างมากกว่า 80 ช่อง และทุกส่วนที่กล่าวมาจะถูกบรรจุในภาชนะความดันซึ่งเติมด้วยก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 2.0 MPa , หรือ 290 psi)

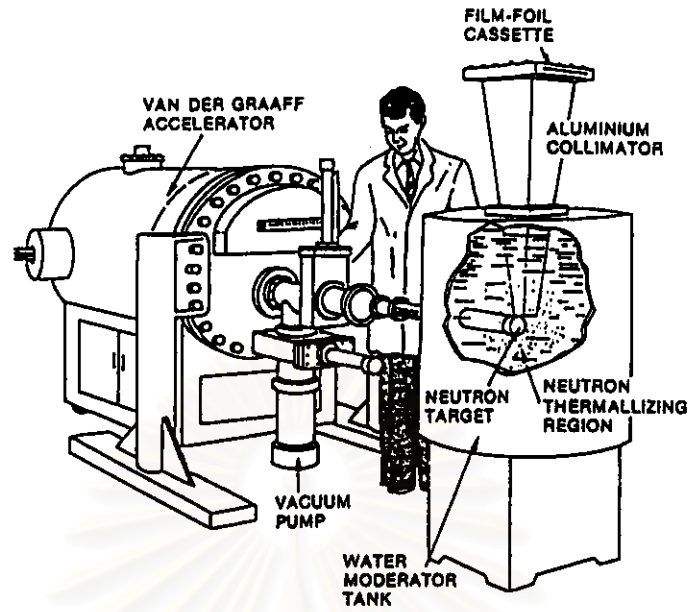
ถ้าอนุภาคจะถูกแยกไปตามท่อที่ผ่าน ในปฏิกิริยาของนิวตรอนตามปกติถ้ารังสีจะยิงกระทบเป้าเบริลเลียมที่หล่อเย็นด้วยน้ำในบริเวณกลางถึงน้ำซึ่งใช้เป็นสารหน่วงนิวตรอนและทำหน้าที่กำบังรังสีบางส่วนด้วย เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงที่กล่าวข้างต้นสามารถผลิตนิวตรอนได้ 10^{13} นิวตรอนต่อวินาที แล้วถูกหน่วงพลังงานและบังคับลำนิวตรอนอย่างเหมาะสมได้ความเข้มของลำนิวตรอนในระดับ 10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ปัจจุบันเครื่องแวนเดอกราฟฟ์พลังงาน 4.8×10^{-13} จูลน์ (3.0 MeV) ถูกนำมาใช้งานในการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอน ในระบบแวนเดอกราฟฟ์ที่ออกแบบสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คิวทิตรอน (4.8×10^{-13} จูลน์ หรือ 3 MeV ; 280 μ A) จะถูกเร่งไปยังเป้าโลหะเบริลเลียมแผ่นกลมซึ่งหล่อเย็นด้วยน้ำ ปลดปล่อยนิวตรอนในช่วง 3.2 ถึง 9.6×10^{-13} จูลน์ (2-6 MeV) ออกมาในทิศทางไปข้างหน้าเป็นจำนวนมากและถูกหน่วงด้วยน้ำ ชีลด์ 5×10^{10} นิวตรอนต่อวินาที ให้เทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุด 2×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ที่อัตราส่วนนิวตรอนคอถลิเมเตอร์ 36:1 เวลาในการถ่ายภาพโดยทั่วไปสำหรับฟิล์มคุณภาพสูง (3×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร) ประมาณ 2 ชั่วโมง

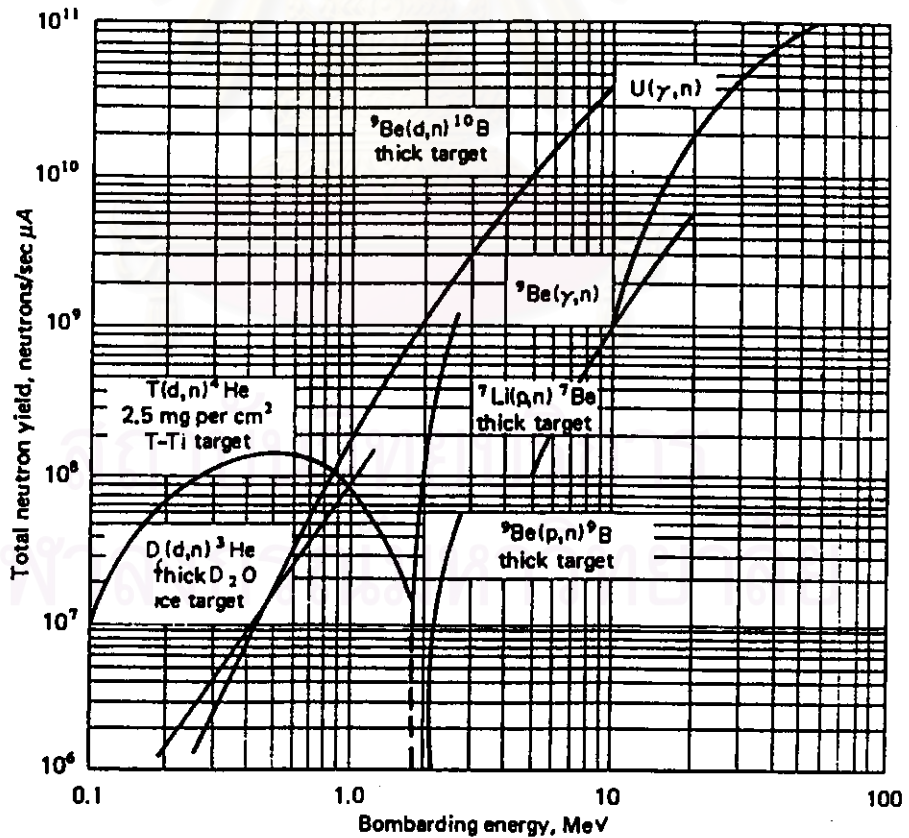
เครื่องเร่งอนุภาคเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มนิวตรอนสูงรองจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ใช้งานได้สะดวกกว่า คุณภาพของภาพถ่ายที่ได้อยู่ในระดับพอใช้ถึงระดับดี แต่มีข้อเสียในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของความเข้มนิวตรอน และต้องเปลี่ยนเป้าตามอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.17 หลักการของเครื่องแวนเดอกราฟฟ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[17]



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดกร๊าฟท์เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน^[6]



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างยิลด์ของนิวตรอนกับพลังงานของอนุภาค^[18]

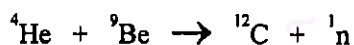
ตารางที่ 2.6 ยields ของนิวตรอน (Neutron Yield) ของเครื่องเร่งอนุภาคจากปฏิกิริยาบางชนิด⁽¹⁸⁾

Reaction	Q(MeV)	Target	Yield*
${}^7\text{Li} (p,n) {}^7\text{Be}$	-1.64	Li salt	$10^7 \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 2.3 MeV H^+
${}^2\text{D} (d,n) {}^3\text{He}$	3.27	D_2O ice	$7 \times 10^7 \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 1.0 MeV D^+
${}^3\text{H} (d,n) {}^4\text{He}$	17.6	${}^3\text{H}$ in Ti	$2 \times 10^{10} \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 0.1 MeV D^+
${}^9\text{Be} (d,n) {}^{10}\text{B}$	3.79	Be metal	$2 \times 10^{10} \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 7.0 MeV D^+
${}^9\text{Be} (d,n) {}^{10}\text{B}$	-1.67	Be metal	$10^9 \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 10 MeV e^-
$\text{U} (\gamma, \text{fp})$	-5.1	U metal	$10^{11} \text{ n s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ for 40 MeV e^-

*1 $\mu\text{A}^{-1} = 6.24 \times 10^{12}$ single-charged ions per second.

2.3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ (Radioisotope neutron source) มี 3 ประเภท ได้แก่

(1) ประเภท (α , n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α , n) ประกอบด้วยไอโซโทปริงส์ที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น พอลอเนียม-210 (${}^{210}\text{Po}$) เรเดียม-226 (${}^{226}\text{Ra}$) พลูโทเนียม-238 (${}^{238}\text{Pu}$) อะเมริเซียม-241 (${}^{241}\text{Am}$) โดยสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 4-6 MeV ผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบริลเลียม และโบรอน โดยเฉพาะเบริลเลียม-9 เป็นไอโซโทปของธาตุเบริลเลียมที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV จึงนิยมใช้เบริลเลียม มีปฏิกิริยาดังนี้



นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้ จะมีค่าพลังงานหลากหลาย สูงสุดถึง 13 MeV เนื่องจากพลังงานของอนุภาคอัลฟาจากธาตุกัมมันตรังสีมีหลายค่า และอัลฟายังถูกลดพลังงานลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ โดยเฉลี่ยแล้วต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้สามารถผลิตนิวตรอนได้ 2 ถึง 3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ประเภท (α , n) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n)^[6,14, 17, 19]

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (Half-life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี
²¹⁰ Po-Be	138.00 วัน	3.0×10^6
Rn-Be	-	1.5×10^7
²²⁶ Ra-Be	1,620.00 ปี	1.5×10^7
²²⁶ Ra-Be	1,620.00 ปี	6.8×10^6
²²⁷ Ac-Be	21.80 ปี	1.5×10^7
²²⁸ Th-Be	1.91 ปี	2.0×10^7
²³⁸ Pu-Be	86.40 ปี	2.2×10^6
²³⁹ Pu-Be	2.43 ปี	1.6×10^6
²⁴¹ Am-Be	458.00 ปี	2.2×10^6
²⁴¹ Am- ²⁴² Cm-Be	163.00 วัน	2.3×10^6
²⁴² Cm-Be	163.00 วัน	2.5×10^6
²⁴⁴ Cm-Be	18.10 ปี	2.5×10^6

ข.ประเภท (γ, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ, n) มีปฏิกิริยาดังนี้



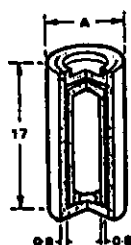
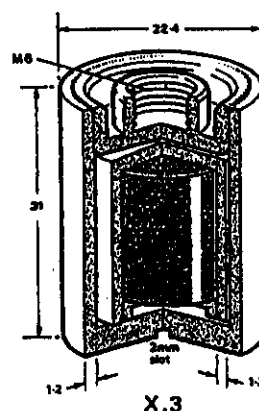
นิวตรอนจากปฏิกิริยานี้ ผลิตโดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV กับเบริลเลียม-9 เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียม-9 จะทำให้นิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 (Antimony-124, ¹²⁴Sb) ให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.7 MeV ผสมกับเบริลเลียม อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี ¹²⁴Sb-Be ประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของ ¹²⁴Sb ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมากและมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน แต่สามารถผลิตได้ง่ายจากการนำ ¹²³Sb ไปอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อผลิต ¹²⁴Sb จากปฏิกิริยา ¹²³Sb (n, γ) ¹²⁴Sb และแม้ว่า ¹²⁴Sb จะสลายตัวเร็วแต่สามารถนำไปอบรังสีนิวตรอนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (γ, n) แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ดันกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงสี่ประเภท (γ, n)^[2]

ดันกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (Half-life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม
²⁴ Na-Be	14.80 ชั่วโมง	1.3×10^5
⁵⁶ Mn-Be	2.59 ชั่วโมง	2.9×10^4
⁷² Gd-Be	14.10 ชั่วโมง	5.0×10^4
⁸⁸ Y-Be	87 วัน	1.0×10^5
¹¹⁶ In-Be	54.00 นาที	8.2×10^3
¹²⁴ Sb-Be	60 วัน	1.9×10^5
¹⁴⁰ La-Be	40 วัน	3.0×10^3
MsTh-Be	6.70 ปี	3.5×10^4

ก. ประเภทแตกตัวเอง (Self fission หรือ Spontaneous fission) ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิดตั้งแต่ ทอเรียม ขึ้นไป ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะให้นิวตรอนออกมาครั้งละหลายตัว เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252, ²⁵²Cf) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี จะมีการสลายตัวด้วยการแตกตัวเองประมาณร้อยละ 3.2 การแตกตัวแต่ละครั้งจะปล่อยนิวตรอนออกมาเฉลี่ย 3.76 ตัว อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 สูงกว่าดันกำเนิดนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) คือประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัมของแคลิฟอร์เนียม-252 หรือประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาที ต่อแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัม จากกราฟรูปที่ 2.14 สำหรับดันกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ระยะ 5 เซนติเมตร เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำมีค่าเท่ากับ 10^{-2} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ถ้าดันกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 มีความแรง 1 กรัม เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับ $10^{-2} \times 4.3 \times 10^9 = 4.3 \times 10^7$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

นอกจากแคลิฟอร์เนียม-252 แล้ว ยังมีธาตุอื่นที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้ ได้แก่ พลูโทเนียม-236 (²³⁶Pu) พลูโทเนียม-238 (²³⁸Pu) ยูเรเนียม-238 (²³⁸U) พลูโทเนียม-240 (²⁴⁰Pu) พลูโทเนียม-242 (²⁴²Pu) กูเรียม-242 (²⁴²Cm) พลูโทเนียม-244 (²⁴⁴Pu) กูเรียม-244 (²⁴⁴Cm) และ แคลิฟอร์เนียม-254 (²⁵⁴Cf) เป็นต้น

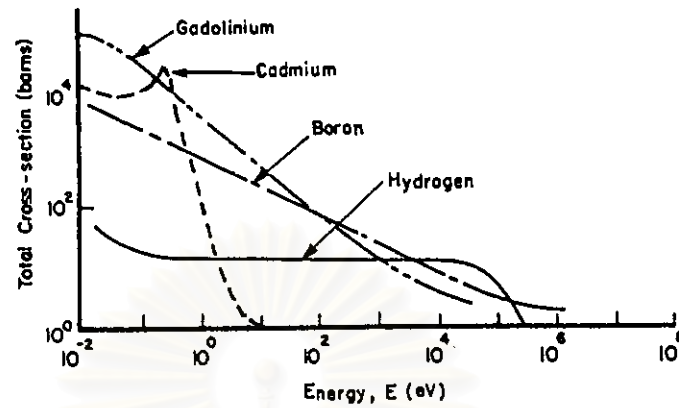

 ^{252}Cf (500 μg -3mg)

 $^{241}\text{Am-Be}$ (25 Ci)

รูปที่ 2.20 ลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf และ $^{241}\text{Am-Be}$ [18, 20]

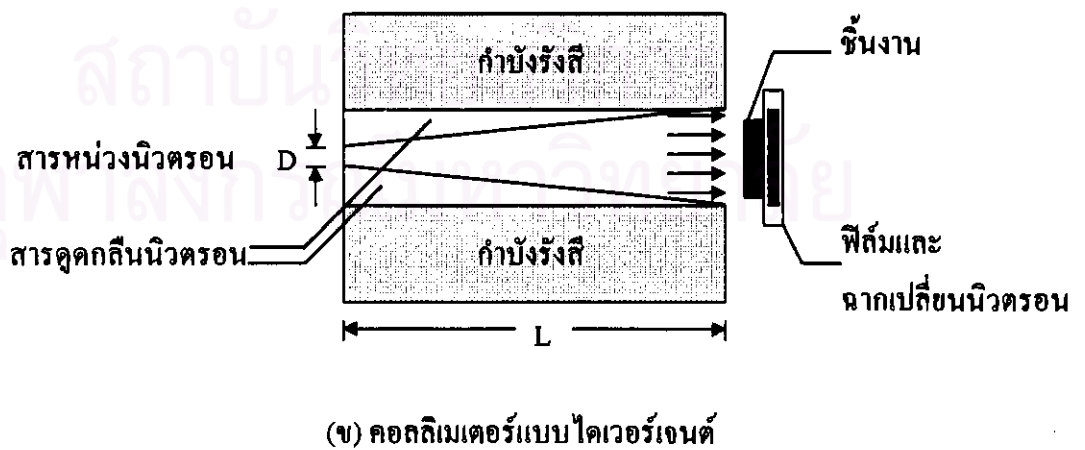
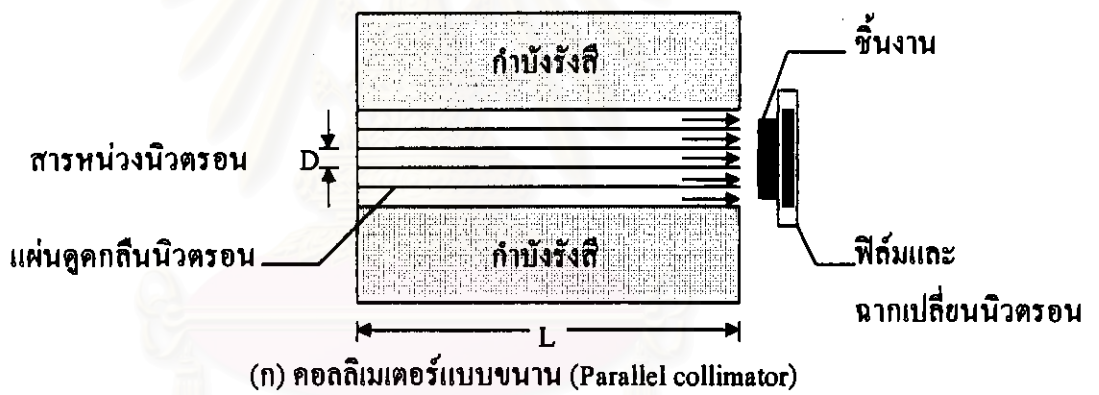
2.4 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator)

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทำหน้าที่นำลำนิวตรอนจากระบบห่วงนิวตรอนของต้นกำเนิดนิวตรอนออกมาใช้ในการถ่ายภาพ การใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่ดีในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเปรียบเสมือนการลดขนาดโฟคอลสปอต (Focal spot) ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทำให้ได้ภาพถ่ายที่คมชัดขึ้น รูปแบบของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วตามการพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ในช่วงปีต้น ๆ ของการประยุกต์การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีแนวคิดว่ลำนิวตรอนแบบขนานจะทำให้วัตถุที่ต้องการถ่ายภาพได้รับฟลักซ์ของลำนิวตรอนที่เหมาะสม แต่ต่อมาในต้นปี ค.ศ. 1967 J.P.Barion^[21] ได้ค้นพบว่า ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (Divergent collimator) จะให้รายละเอียดของภาพสูงกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

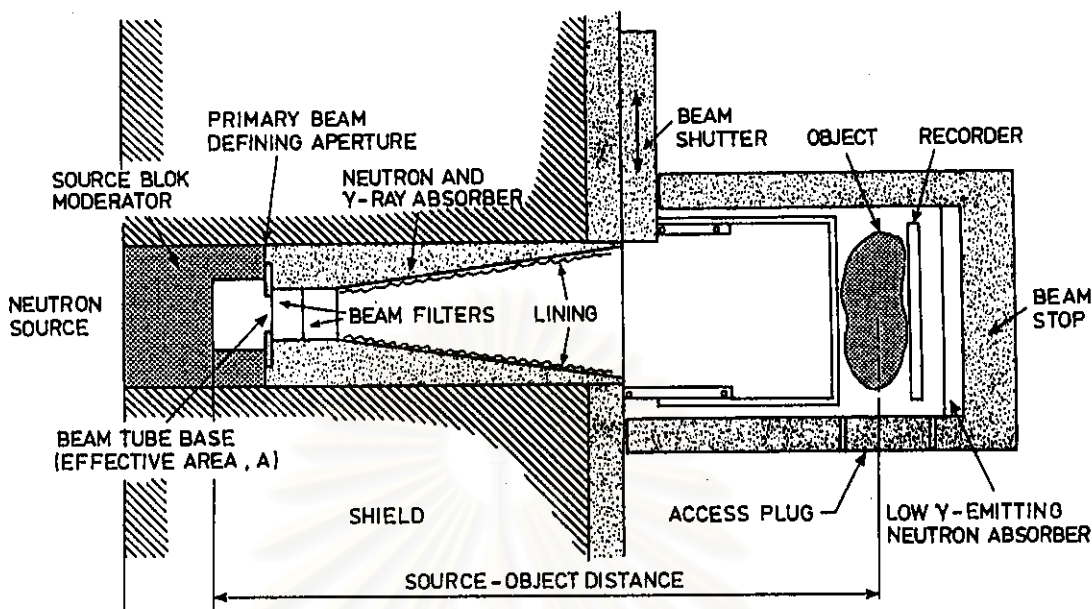
ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ มีลักษณะเป็นกรวยหรือพีรามิดตัด ปลายด้านที่อยู่ในสารห่วงนิวตรอนมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้านนอกที่อยู่ใกล้ชิ้นงาน โดยพื้นที่หน้าตัดอาจเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือวงกลม ผนังของคอลลิเมเตอร์ผสมด้วยสารดูดจับนิวตรอน เช่น โบรอน ลิเทียม แคลเมียม แกโดลิเนียม เพื่อดูดจับนิวตรอนไม่ให้เข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้างและผนังด้านในของคอลลิเมเตอร์อาจฉาบด้วยสารดูดจับนิวตรอนเพื่อดูดจับนิวตรอนในคอลลิเมเตอร์ที่ชนผนังไม่ให้กระเจิงกลับเข้าไปในคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่วิ่งออกมาตามแนวแกนนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ในลักษณะลำแสงที่บานออกวิ่งไปกระทบชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน^[22]



รูปที่ 2.22 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์



รูปที่ 2.23 ตำแหน่งของคอลลิเมเตอร์และส่วนประกอบหลักในระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[6,14]



รูปที่ 2.24 แสดงภาพวาดอย่างง่ายของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และความยาวของคอลลิเมเตอร์ L^[6]

จากรูปที่ 2.24 สามารถคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) ที่ปลายคอลลิเมเตอร์ตรงตำแหน่งใช้งานได้จาก

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \dots\dots\dots(2.13)^{[6]}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าสู่คอลลิเมเตอร์

สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบวงกลม

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots(2.14)$$

ดังนั้นสมการ (2.14) สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = \frac{\phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\phi_0}{16} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \dots\dots\dots(2.15)^{(6)}$$

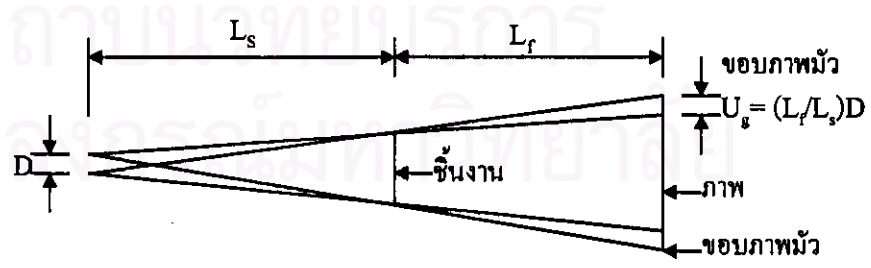
L/D เรียกว่า อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ (Collimator ratio) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละคอลลิเมเตอร์

อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทางเข้าและทางออกของคอลลิเมเตอร์ เป็น

$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\phi_0}{\phi} = 16 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \dots\dots\dots(2.16)^{(6)}$$

จากสมการ (2.16) จะเห็นได้ชัดว่านิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์จะลดลง เมื่อคอลลิเมเตอร์มีความยาว (L) เพิ่มขึ้น และ ขนาดของทางเข้า (D) ลดลง

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ระยะเวลาสั้น จำเป็นต้องให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบวัตถุมีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของคอลลิเมเตอร์ และเพิ่มขนาดทางเข้าของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายลดลง



- L_s คือ ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงชิ้นงาน
- L_f คือ ระยะห่างจากชิ้นงานถึงฟิล์ม
- D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางทางเข้าของนิวตรอนสู่คอลลิเมเตอร์
- U_v คือ ขนาดของขอบภาพที่มืด

รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน⁽⁶⁾

จากรูปที่ 2. 25 จะได้

$$U_s = \frac{D}{L_i} L_r \quad \dots\dots\dots(2.17)^{[6]}$$

โดยปกติจะวางฟิล์มติดกับชิ้นงาน ทำให้ $L_r \ll L_i$ และ $L_i \approx L$ ดังนั้นสมการ (2.17) สามารถเขียนได้เป็น

$$U_s = \left(\frac{D}{L} \right) L_r \quad \dots\dots\dots(2.18)^{[6]}$$

จะเห็นได้ว่า ขนาดของขอบภาพที่มีว ขันอยู่กับอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ L/D โดยที่ขนาดของขอบภาพที่มีวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพถ่ายนิวตรอนที่คมชัด จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์และวางวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพให้อยู่ชิดกับฟิล์มบันทึกภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) หรือ ลดขนาดทางเข้าของนิวตรอน (D) ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ มีผลทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์ลดลง จึงต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น

ในกรณีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนต่ำ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์มีค่าต่ำ ความคมชัดของภาพจึงไม่ค่อยดี เนื่องจากถ้าเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานลดลง อย่างไรก็ตาม ถ้าส่วนของคอลลิเมเตอร์ด้านใกล้ต้นกำเนิดรังสีทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เช่น พาราฟิน โพลีเอทิลีน ฯลฯ โดยไม่มีส่วนผสมของสารดูดกลืนนิวตรอนเหมือนกับส่วนอื่น จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากที่คำนวณจากสมการ (2.15) เป็น

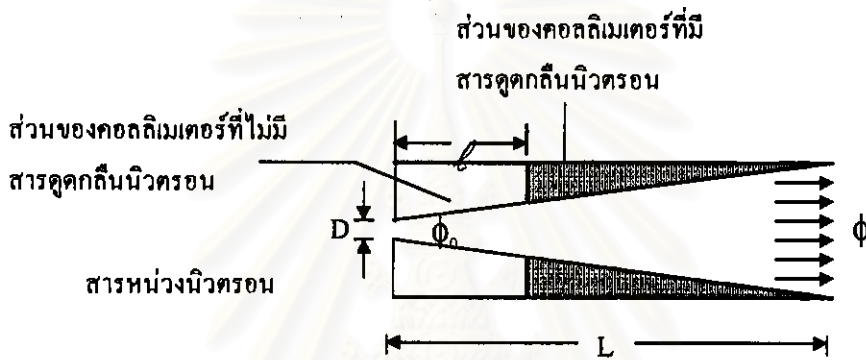
$$\phi = \left[\frac{\phi_0}{16(L/D)^2} \right] \left[1 + \frac{2\ell}{L} \right] \dots\dots\dots(2.19)^{[18]}$$

เมื่อ ℓ คือ ความยาวของคอลลิเมเตอร์ส่วนที่ไม่มีสารดูดกลืนนิวตรอน

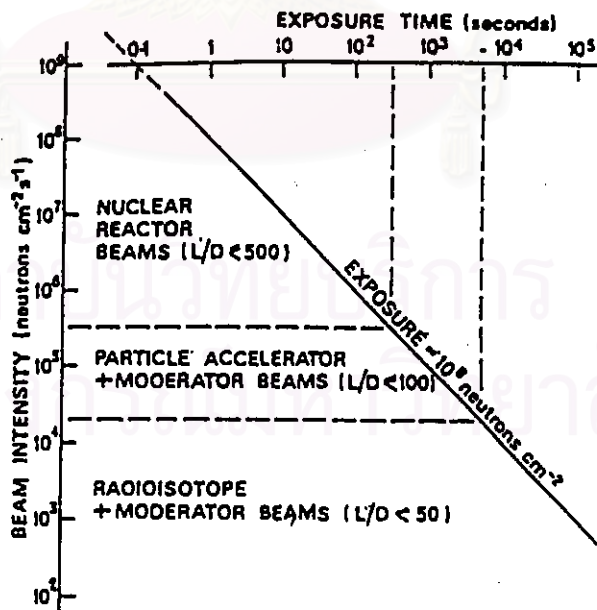
ถ้า l มีค่าเป็น 2 เท่าของ D สมการ (2.19) จะเปลี่ยนเป็น

$$\phi = \left[\frac{\phi_0}{16(L/D)^2} \right] \left[1 + \frac{2 \times 2D}{L} \right]$$

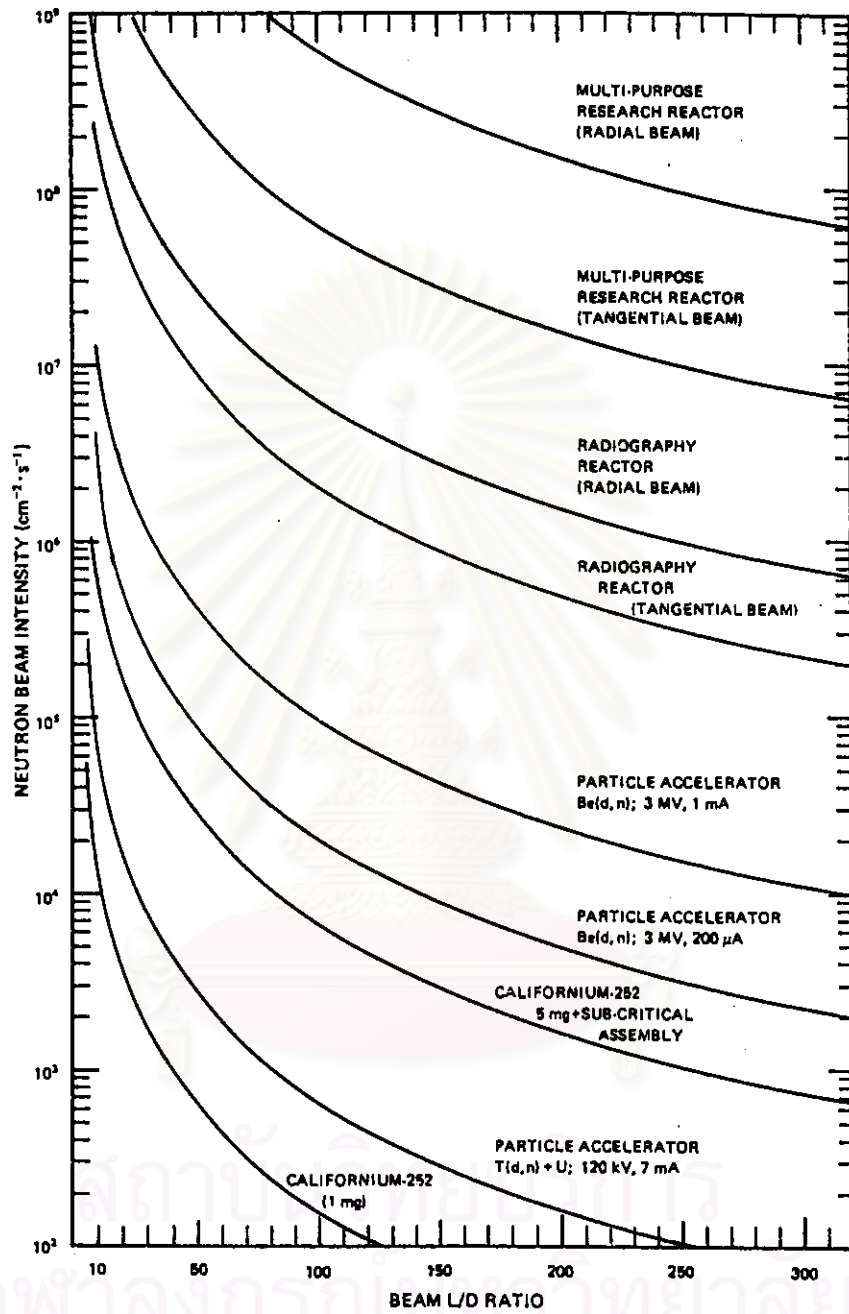
$$\phi = \frac{\phi_0}{16} \left[\left(\frac{D}{L} \right)^2 + 4 \left(\frac{D}{L} \right) \right] \dots\dots\dots(2.20)$$



รูปที่ 2.26 ลักษณะของคอลลิเมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์⁽¹⁸⁾



รูปที่ 2.27 ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทต่างๆ⁽⁶⁾



รูปที่ 2.28 ความเข้มของนิวตรอนและค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่างๆ^[14]

ตารางที่ 2.9 ลักษณะเฉพาะของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนบางชนิด^[14]

Source	Collimator position	Collimator base flux (cm ⁻² -s ⁻¹)	Typical beam characteristics		
			Intensity (cm ⁻² -s ⁻¹)	L/D ratio	Cd ratio
Multi-purpose research reactor	Radial	10 ¹⁴	10 ⁸	250	2-5
	Tangential	10 ¹³	10 ⁷	250	10-50
	Cold source	2 x 10 ¹¹	10 ⁶	100	∞
Radiography reactor	Radial	10 ¹²	10 ⁶	250	2-5
	Tangential	4 x 10 ¹¹	2 x 10 ⁶	100	10-50
Be (d,n) ; 3 MeV, 400 μA	Radial	3 x 10 ⁹	2 x 10 ⁵	33	5-20
Be (γ,n) ; 5.5 MeV, 100 μA	Radial	4 x 10 ⁸	8 x 10 ⁴	18	5-20
T(d,n) + U ; 120 keV, 7 mA	Radial	10 ⁸	2 x 10 ⁴	18	5-20
²⁵² Cf ; 5 mg+sub-critical reactor assembly	Radial	3 x 10 ⁹	2 x 10 ⁵	18	5-20
²⁵² Cf ; 1 mg	Radial	2 x 10 ⁷	10 ⁴	12	5-20

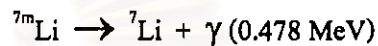
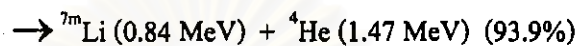
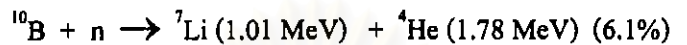
2.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นรังสีชนิดอื่นที่สามารถทำปฏิกิริยากับฟิล์มบันทึกภาพได้ เนื่องจากฟิล์มบันทึกภาพโดยทั่วไปไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับนิวตรอน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนต้องมีคุณสมบัติ ดูดกลืนนิวตรอนได้ดี และสามารถปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ (Secondary radiation) ที่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีบีตา หรือรังสีอัลฟา เมื่อรังสีทุติยภูมิตกกระทบฟิล์มซึ่งประกอบอยู่กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพบนฟิล์มได้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้มี 3 ประเภท ตามลักษณะการปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ ดังนี้

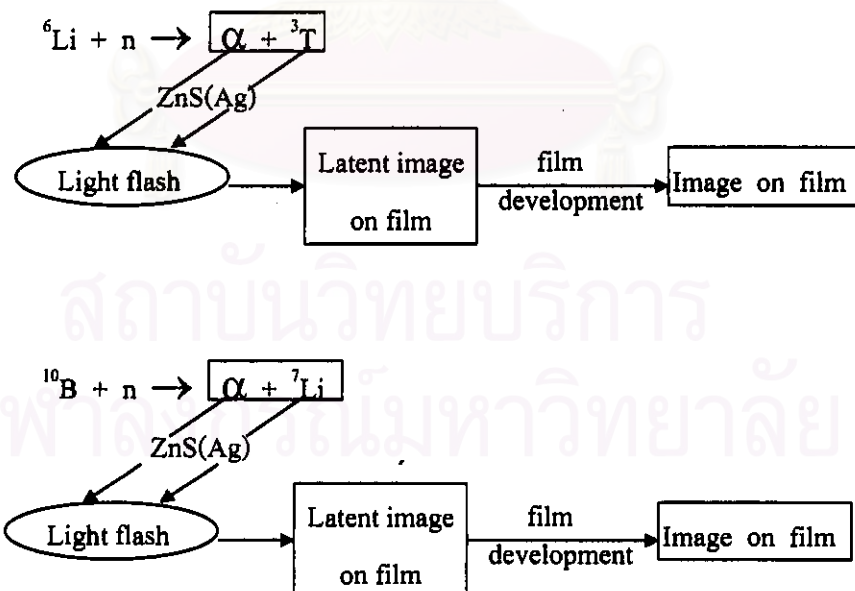
2.5.1 ฉากปลดปล่อยแสง (Light-emitting screen)

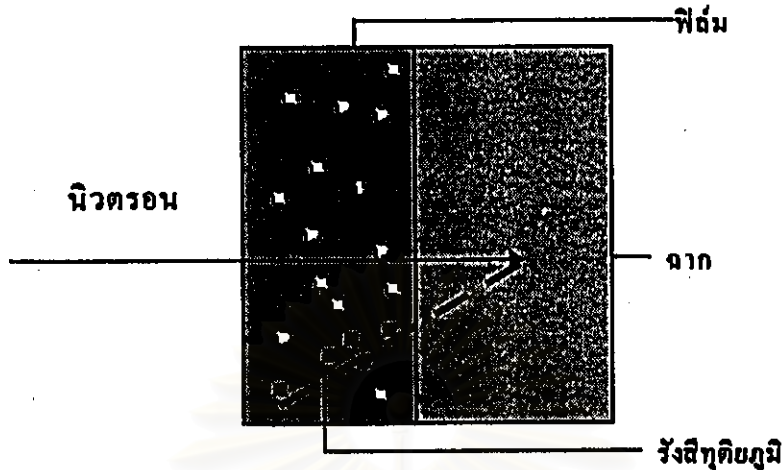
ฉากเรืองแสงเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรกและเป็นฉากที่ให้ความไวในการถ่ายภาพสูงที่สุด ประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 2 ชนิด

คือ สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorber material) และสารเรืองแสง (Phosphorescent material) สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ลิเทียม-6 (${}^6\text{Li}$) และโบรอน-10 (${}^{10}\text{B}$) เนื่องจากดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีอัลฟาพลังงานสูง แต่มีพิสัยต่ำ โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



ส่วนสารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) [$\text{ZnS}(\text{Ag})$] ซึ่งให้แสงในช่วงแสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ภายหลังจากการถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลฟาจากลิเทียม-6 หรือโบรอน-10 แสงที่มีความยาวคลื่นช่วงนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับฟิล์มไวแสงชนิดออร์ทอโครมาติก (Orthochromatic photographic film) หรือฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-radiographic film) สามารถเขียนอธิบายกระบวนการตั้งแต่การดูดกลืนนิวตรอนจนถึงการเกิดภาพบนฟิล์มได้ดังนี้





- หมายถึง ผลึกเงินเฮไลด์ (silver halide) ที่ไม่ได้รับรังสีแกมมา
- หมายถึง ผลึกเงินเฮไลด์ที่ได้รับรังสีแกมมา

รูปที่ 2.29 ภาพจำลองการเกิดภาพแฝงบนฟิล์ม

ตัวอย่างของฉากเรืองแสงนี้ได้แก่ NE-421, NE-425, NE-426 ผลิตโดยบริษัท Nuclear Enterprises Ltd. (ชื่อเดิมของบริษัท NE Technology Inc.) ประเทศอังกฤษ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนทั้ง 3 ชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ ใช้ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ที่เพิ่มความเข้มข้นของลิเทียม-6 เป็นสารดูดกลืนนิวตรอน และใช้สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) เป็นสารเรืองแสง แต่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ส่วนสารยึดเหนี่ยวที่ใช้สำหรับฉาก NE-425 และ NE-426 คือ โพลีเอทีลิน

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนานำธาตุหายาก (Rare earth elements) มาผลิตฉากเปลี่ยนนิวตรอน หลังจากค้นพบว่า ออกซิซัลไฟด์ของธาตุหายาก (Rare earth oxysulphides) สามารถเรืองแสงได้ดี ฉาก $Gd_2O_2S(Tb)$ หรือเรียกว่า ฉาก GTS ซึ่งดูดกลืนนิวตรอนได้สูงกว่าฉากที่ใช้ลิเทียมเป็นสารดูดกลืนนิวตรอน จึงให้รายละเอียดของภาพสูง แต่มีข้อจำกัดคือ ความไวต่ำกว่าฉาก NE ทั้ง 3 ชนิดและไวต่อรังสีแกมมา นอกจากนี้ เทอร์เบียม (Tb) ที่ใช้เป็นสารเรืองแสงในฉากชนิดนี้ยังให้แสงในช่วงแสงสีเขียว ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร จึงต้องใช้ฟิล์มบันทึกภาพชนิดพิเศษที่ไวต่อแสงสีเขียว (Green-sensitive film) ตัวอย่างฉากอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ NE-905 ประกอบด้วยลิเทียม-6 ปริมาณสูงถึง 6% และใช้ cerium oxide-activated silicate glass เป็นสารเรืองแสง ซึ่งให้แสงในช่วงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ข้อดีของฉากชนิดนี้ คือเป็นฉากที่ให้ความไวสูงเหมาะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนความเข้มต่ำ ช่วยให้ประหยัดเวลาในการถ่ายภาพ

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติบางประการของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน^[14]

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่สำคัญ	ครึ่งชีวิตของรังสีที่ปลดปล่อย	ชนิดและพลังงานของรังสี	ชนิดขององค์ประกอบสำหรับฉาก
${}^6_3\text{Li}$	0.90 mm^{-1} (NE-426)	(n, α)	0	α 2.05; T 2.74 MeV	${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$ 250 μm
${}^{10}_5\text{B}$	44.8 mm^{-1} (B_4C)	(n, α)	0	α 1.47; Li 0.84 MeV	${}^{10}\text{B}_4\text{C}$ 5 μm
Nat ${}_{64}\text{Gd}$	140.3 mm^{-1}	(n, γ)	0	IC β^- 71 keV (main)	metal foil 100 μm
Nat ${}_{66}\text{Dy}$	3.01 mm^{-1}	(n, γ)	2.3 ชั่วโมง	β^- 1.28 MeV (max)	metal foil 100 μm
Nat ${}_{49}\text{In}$	0.73 mm^{-1}	(n, γ)	54 นาที	β^- 1.00 MeV (max)	metal foil 250 μm

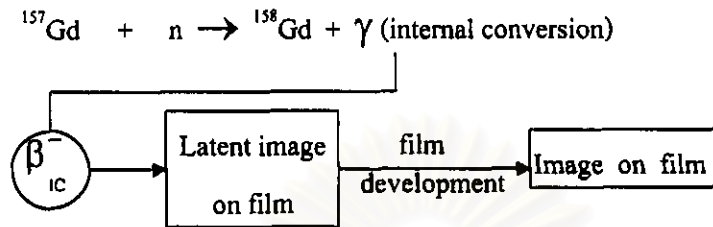
ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะบางประการของฉากเปลี่ยนนิวตรอน^[14]

ชนิดของฉาก	ความหนา (มม.)	ประสิทธิภาพในการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน (%)	ความไม่คมชัด (ไมโครเมตร)	ฟิล์มที่ใช้บันทึกภาพ
NE-421 (เม็ดยา)	0.65	30	1,000	ฟิล์มรังสีเอกซ์ (ฉากทั้งหมด)
NE-426 (เม็ดยา)	0.25	20	400	ฟิล์มรังสีเอกซ์ (ฉากทั้งหมด)
NE-905 (แก้ว)	1.0	80	400	ฟิล์มรังสีเอกซ์ (ฉากทั้งหมด)
ฉากโลหะแกโดลิเนียม	0.025	25	<100	ฟิล์มรังสีเอกซ์ (ฉากตะกั่ว)
ฉากโลหะดิสโพรเซียม	0.10	10	200	ฟิล์มรังสีเอกซ์ (ฉากตะกั่ว)

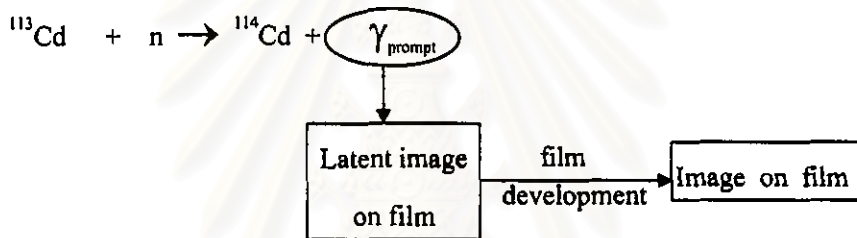
2.5.2 ฉากโลหะ (Metal foil screen) เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ให้รังสีทุติยภูมิในรูปของรังสีแกมมา รังสีเบตา และอิเล็กตรอน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามเทคนิคในการถ่ายภาพ คือ

(1) ฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง ได้แก่ ฉากโลหะแกโดลิเนียม และฉากโลหะแคดเมียม มีภาคตัดขวางของการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนเท่ากับ 254,000 บาร์น และ 20,000 บาร์น ตามลำดับ โดยทั่วไปโลหะแกโดลิเนียมจะเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาออกมาทันที แต่รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ทำให้เกิดความดำบนฟิล์มโดยตรง ความดำบนฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากอินเทอร์นัลคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน (Internal conversion electron) ที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาอินเทอร์นัลคอนเวอร์ชันของรังสีแกมมา ซึ่งมี

พลังงานหลายค่า ได้แก่ 71, 81, 131, 173 keV แต่จากการศึกษาพบว่า ความดำบนแผ่นฟิล์มส่วนใหญ่เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงาน 71 keV กระบวนการที่สำคัญอธิบายได้ดังนี้



สำหรับฉากโลหะแคดเมียมจะทำให้เกิดความดำบนฟิล์มโดยปฏิกิริยา (n, γ) ดังนี้



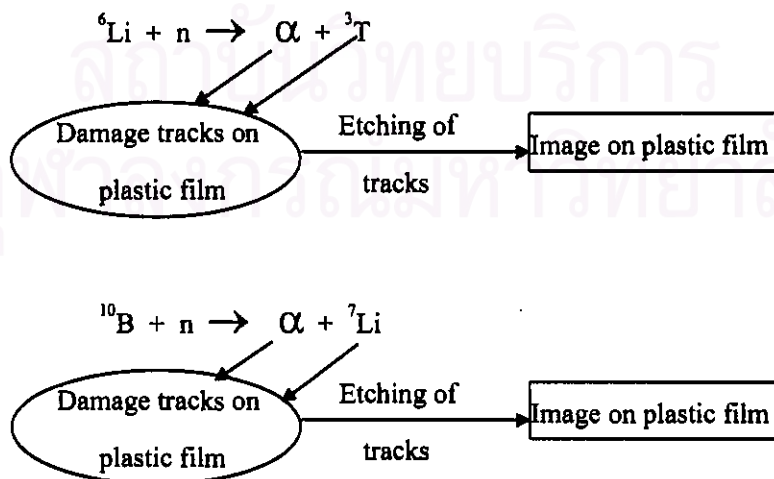
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากโลหะนี้ จะให้ภาพถ่ายที่มีความคมชัด และรายละเอียดสูงกว่าฉากเรืองแสง แต่มีความไวในการถ่ายภาพต่ำกว่า และมีราคาแพง

(2) ฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองแสงหรือฉากโลหะสำหรับเทคนิคถ่ายตรง มีข้อจำกัดในกรณีถ่ายภาพวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือบริเวณที่ถ่ายภาพมีรังสีแกมมาปะปนสูง ภาพถ่ายที่ได้จะถูกรบกวนด้วยรังสีแกมมา ทำให้ภาพถ่ายมีคุณภาพต่ำ แต่สำหรับฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอดนั้น สามารถลดปัญหาเรื่องการรบกวนของรังสีแกมมาได้ จึงมีประโยชน์ในการถ่ายภาพวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสี เช่น แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เป็นต้น วัสดุที่ใช้ผลิตฉากชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนสูง แล้วให้รังสีที่มีครึ่งชีวิตเหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดภาพบนฟิล์ม ตัวอย่างเช่น อินเดียม (In) ดิสโพรเซียม (Dy) ทอง (Au) และยูโรเพียม (Eu) ซึ่งมีคุณสมบัติบางประการดังตารางที่ 2.12 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากชนิดนี้ ถ้าต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้มีความเข้มต่ำจะทำให้ภาพถ่ายมีคุณภาพไม่ดี ขาดความคมชัด ฟิล์มบันทึกภาพที่เหมาะสมสำหรับฉากชนิดนี้คือ ฟิล์มรังสีเอกซ์

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติบางประการของฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิค
ถ่ายทอด^[14]

screen metal	activation cross-section (mm ⁻¹)	absorption in 100 μm screen (%)	λ (s ⁻¹)	thermal neutron beam intensity for exposure times 10 ³ s (cm ⁻² s ⁻¹)	activity after 10 ³ s in beam of 10 ⁷ cm ⁻² s ⁻¹ (μCi cm ⁻²)
In	0.73	7.3	2.14x10 ⁻⁴	4x10 ⁵	4.2
Dy	3.01	26	8.25x10 ⁻⁵	10 ⁵	5.8
Au	0.58	5.6	2.98x10 ⁻⁶	5x10 ⁵	0.05
Eu	8.90	59	2.09x10 ⁻⁵	4x10 ⁴	3.3

2.5.3 ฉากแทรก-เอตช์ (track-etch screen) เป็นฉากที่นำคุณสมบัติการดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้อนุภาคอัลฟาของลิเทียม-6 และโบรอน-10 มาใช้ ในรูปของสารประกอบลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) และโบรอนคาร์ไบด์ (B₄C) โดยมีทั้งชนิดที่ใช้ลิเทียมธรรมชาติ (Natural Lithium) โบรอนธรรมชาติ (natural Boron) ลิเทียมเสริมสมรรถนะ (Enriched Lithium) และโบรอนเสริมสมรรถนะ (Enriched Boron) ซึ่งมีประสิทธิภาพต่างกันตามปริมาณของลิเทียมหรือโบรอน เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านฟิล์มบางของวัสดุบางชนิด เช่น ไมกา แก้ว และพลาสติก จะเกิดรอยอนุภาค และเมื่อนำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นภาพถ่ายชัดเจนขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดรอยเมื่อใช้ฉากแทรก-เอตช์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คือ



ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติบางประการของสารประกอบที่นำมาทำฉากแทรก-เอ็กซ์¹⁴¹

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

2.6 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงภาพ

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน นิยมใช้ฟิล์มที่มีความไวแสง รังสี หรืออนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน เป็นอุปกรณ์รับภาพ เนื่องจากมีขั้นตอนการปฏิบัติไม่ยุ่งยากและสามารถเก็บไว้เป็นหลักฐานได้

ส่วนประกอบสำคัญของฟิล์มถ่ายภาพ ได้แก่

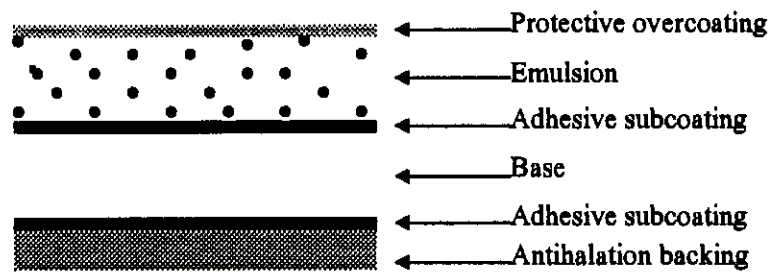
(1) ฐานรองรับตัวยาไวแสง (Base) ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) เป็นสารประกอบที่ทำมาจากใยผ้าขบริสุทธิ (Cotton) และเยื่อไม้ที่เลือกสรรแล้วมาผสมกับปิโตรเคมี (Petrochemical)

(2) ตัวยาไวแสง (Photosensitive emulsion) เป็นส่วนที่ได้มาจากการผสมกันระหว่างผลึกเงินเฮไลด์ (Silver halide) เช่น เงินคลอไรด์ (Silver chloride) เงินโบรไมด์ (Silver bromide) กับกาวหนังสัตว์ เรียกว่า เจลาติน (Gelatin) แล้วนำไปเคลือบบางๆ บนส่วนฐาน ผลึกเงินเฮไลด์ที่ใช้มีขนาด (Grain) ตั้งแต่ 0.1-3 ไมครอน แล้วแต่ชนิดของฟิล์มซึ่งเป็นผลให้ฟิล์มแต่ละชนิดมีรายละเอียดและความไวต่างกัน

(3) ตัวกลางเชื่อมหน้ายาไวแสงกับฐาน (Adhesive subcoating) เป็นสารจำพวกเซลลูโลสเอสเตอร์ (Cellulose ester) ทำหน้าที่ยึดตัวยาไวแสงให้เกาะติดแน่นกับฐานรองรับตัวยาไวแสง

(4) ผิวหน้าของฟิล์ม (Protect overcoating) เคลือบสารป้องกันการขูดขีด (Antiabrasion) ในขณะทำการถ่ายภาพ หรือในระหว่างการล้างฟิล์ม

(5) สารป้องกันไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ (Antihalation backing) ซึ่งเคลือบไว้ด้านหลังของฟิล์ม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดวง (Flare) ในกรณีที่ถ่ายภาพวัตถุที่มีการสะท้อนแสงมากๆ



รูปที่ 2.30 ภาคตัดขวางของฟิล์ม

ฟิล์มแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- (1) ฟิล์มเนกาทีฟ (Negative film) เมื่อล้างแล้วจะได้ภาพที่มีน้ำหนักราคาขาวหรือมีสีตรงข้ามกับความเป็นจริง ต้องนำมาอัดหรือขยายอีกครั้งจึงจะได้ภาพตรงตามความจริง
- (2) ฟิล์มโพซิทีฟ (Positive film) ใช้สำหรับอัดภาพ (Print) จากฟิล์มเนกาทีฟ เมื่อผ่านกระบวนการล้างฟิล์มแล้วจะได้ภาพที่มีน้ำหนักราคาขาวหรือมีสีตรงกับวัตถุจริง
- (3) ฟิล์มรีเวอร์ซัล (Reversal film) เป็นวัสดุที่มีเยื่อไวแสงเนกาทีฟ และโพซิทีฟรวมกัน เมื่อล้างตามกระบวนการแล้วจะได้ภาพที่มีสีตรงตามความเป็นจริง เช่น ฟิล์มสไลด์

ฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน อาจแบ่งตามประเภทจากเปลี่ยนนิวตรอน 3 ประเภทดังนี้

(1) ฉากร่องแสง สามารถใช้ได้ทั้งฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film) ฟิล์มโพลารอยด์ (Polaroid) และฟิล์มรังสีเอกซ์ ในปัจจุบันฟิล์มถ่ายรูปความไวสูง เช่น ASA 400, 800, 1600 และฟิล์มโพลารอยด์ซึ่งมี ASA 3200 สามารถหาซื้อได้ง่าย แต่การใช้ฟิล์มความไวสูง จะให้ภาพที่มีความคมชัดและมีรายละเอียดน้อยลง เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา การใช้ฟิล์มถ่ายรูปหรือฟิล์มไวแสงมีข้อดีกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์ คือไวต่อรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาน้อยกว่ามาก ภาพที่ได้จึงมีการรบกวนจากรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาน้อย เนื่องจากชั้นอิมัลชันของฟิล์มถ่ายรูปบางกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์มากนั่นเอง

(2) ฉากร่องแสง ปรอทปล่อยรังสีบีตา อิเล็กตรอน หรือรังสีแกมมา ซึ่งสามารถใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial x-ray film) บันทึกภาพได้ รังสีบีตาและอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดภาพสูงกว่ารังสีแกมมา เพราะมีอำนาจในการทำให้เงินโบรไมด์แตกตัวเป็นประจุสูงกว่า ความเร็วเปรียบเทียบ (Relative speed) ของฟิล์มรังสีเอกซ์บางชนิดที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.15

(3) ฉากแทรก-เอตซ์ ใช้ฟิล์มพลาสติกในการบันทึกภาพ โดยทั่วไปใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า ฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ได้จากปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับกรดไนตริก (HNO_3) และกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งในระยะแรกใช้ผลิตภัณฑ์ระเบิดทางการทหาร ต่อมาใช้ผลิตพลาสติกสังเคราะห์ ได้แก่ เซลลูลอยด์ ปัจจุบันการใช้งานเน้นทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การผลิตแลคเกอร์ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ การผลิตหมึกพิมพ์ กาว สีและพลาสติก ไนโตรเซลลูโลสชนิดนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ระเบิดมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงกว่าไนโตรเจนเซลลูโลสที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามไนโตรเซลลูโลสที่ใช้ในอุตสาหกรรมยังคงเป็นสารที่ติดไฟง่าย การขนส่งและการใช้งานจึงต้องปฏิบัติด้วยความระมัดระวัง

ตารางที่ 2.14 ฟิล์มสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆ

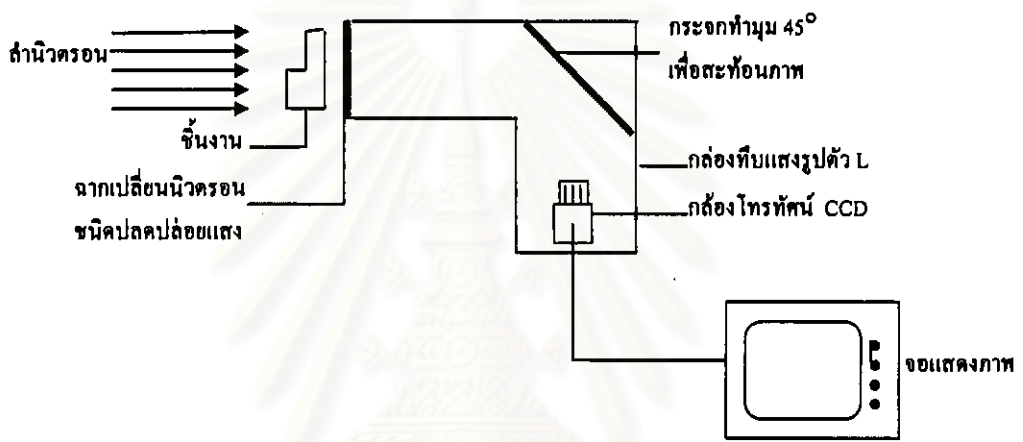
ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ฟิล์มบันทึกภาพ
ฉากเรืองแสง	ฟิล์มรังสีเอกซ์ ฟิล์มถ่ายรูป
ฉากโลหะ	ฟิล์มรังสีเอกซ์
ฉากแทรก-เอตซ์	เซลลูโลสไนเตรต เซลลูโลสอะซิเตต

ตารางที่ 2.15 ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[6]

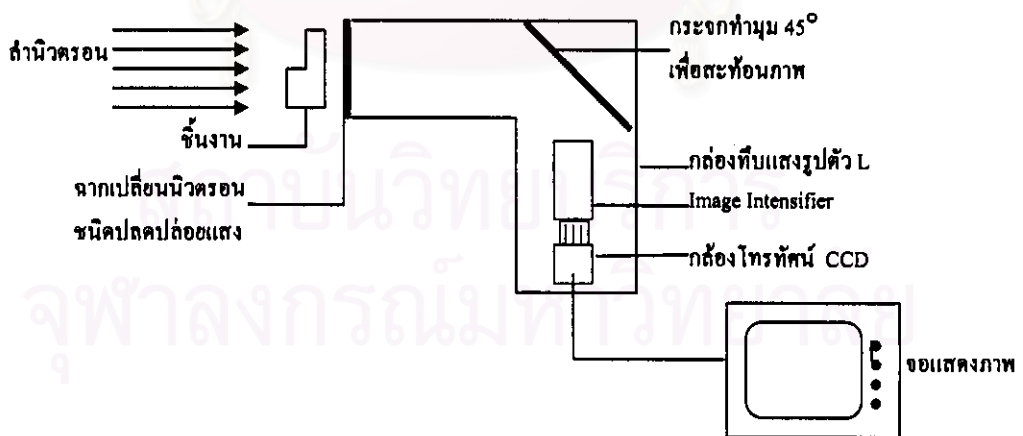
Kodak	Relative Exposure Time	Agfa	Relative Exposure Time	Du Pont	Relative Exposure Time
AA	100	D7	1.0	NDT 75	1.0
T	180	D5	1.6	NDT 55	2.5
M	400	D4	2.8	NDT 35*	9.3
SR*	1600	D3	5.0		
		D2	10.0		

*single coated film

สำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเรืองแสง นอกจากจะใช้ฟิล์มถ่ายรูป ฟิล์มโพลาไรซ์ และฟิล์มรังสีเอกซ์ในการบันทึกภาพแล้ว ยังสามารถใช้ระบบโทรทัศน์วงจรปิดแสดงภาพบนจอให้เห็นได้ทันที ในกรณีที่นิวตรอนมีความเข้มสูง เช่น กล้อง CCD (Charge Couple Device Camera) จับภาพบนฉากเปลี่ยนนิวตรอน เพื่อแสดงภาพบนจอได้โดยตรง ส่วนในกรณีที่ความเข้มนิวตรอนต่ำ เช่น นิวตรอนจากนิวตรอนเซนเซอร์ และจากไอโซโทปรังสี จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ (Image intensifier) เพิ่มความเข้มของแสงจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนก่อนเข้าสู่กล้องโทรทัศน์ ดังรูปที่ 2.31 และ 2.32

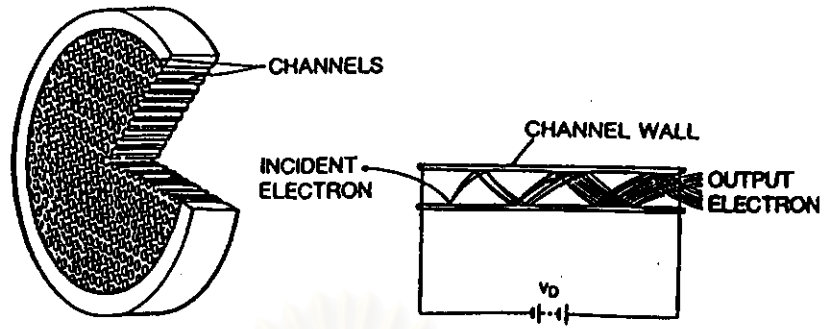


(ก) สำหรับนิวตรอนความเข้มสูง

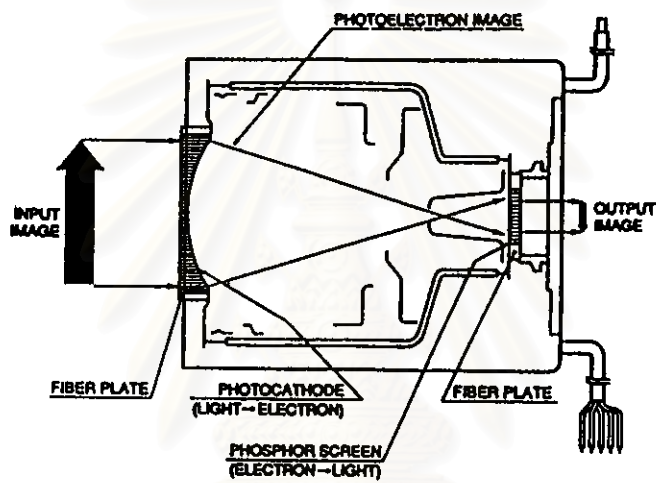


(ข) สำหรับนิวตรอนความเข้มต่ำ

รูปที่ 2.31 แผนภาพของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่แสดงผลทางจอภาพ



(ก) Microchannel Plate (MCP)



(ข) Large-Diameter Image Intensifier

รูปที่ 2.32 อุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ^[18]

2.7 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน

ภาพถ่ายด้วยนิวตรอน คือ ภาพที่แสดงรูปร่างและลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการศึกษาวิเคราะห์ ภาพถ่ายที่มีคุณภาพจะทำให้สามารถศึกษาวิเคราะห์วัตถุตัวอย่างได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ภาพถ่ายที่ดีคือ ภาพถ่ายที่คมชัด มีความเปรียบต่างสูง มีความดำพอเหมาะ และไม่บิดเบือน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

2.7.1 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย

การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย ได้แก่ ความคมชัดของขอบวัตถุและรอยต่อของวัตถุต่างๆ ที่ปรากฏบนฟิล์ม ความคมชัดของภาพถ่ายขึ้นกับชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน ชนิดของรังสี พลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน และลักษณะการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ

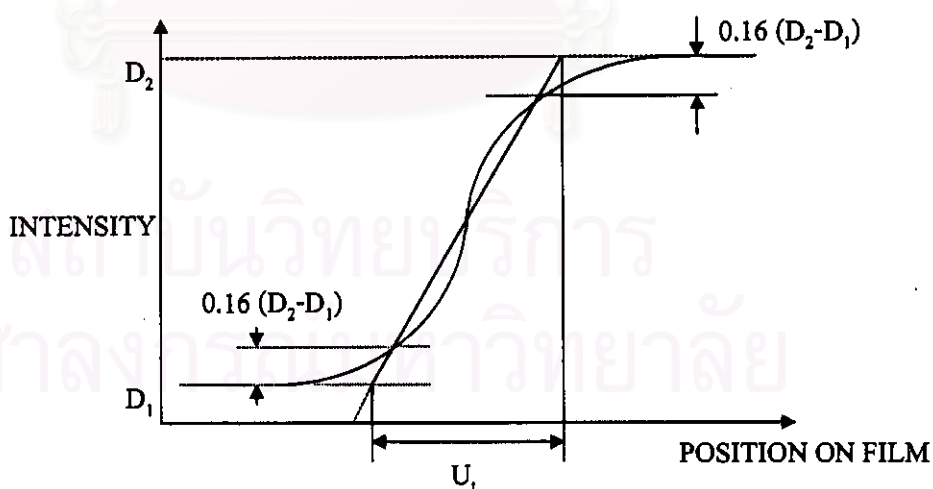
การตรวจสอบความคมชัดสามารถทำได้โดยใช้วิธีของคลาเซนส์ (Klasens' method) โดยการถ่ายภาพแผ่นวัสดุที่เป็นสารดูดกลืนนิวตรอน เช่น แคลเมียม โบรอน แกโดลิเนียม ที่มีขอบตัดตรง สแกน (Scan) อ่านความค่าของพื้นที่รอยต่อระหว่างบริเวณที่ปิดและไม่ปิดด้วยแผ่นดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะได้กราฟระหว่างความค่ากับตำแหน่งบนฟิล์มดังรูปที่ 2.33 ค่าความชันของกราฟในช่วง $D_2 - 0.16 (D_2 - D_1)$ คือความไม่คมชัด (Unsharpness, U)

ให้ U_t คือ ความไม่คมชัดรวม

U_g คือ ความไม่คมชัดเนื่องจากปัจจัยทางเรขาคณิต

U_r คือ ความไม่คมชัดเนื่องจากฟิล์มและฉากเปลี่ยนนิวตรอน

$$\text{จะได้ } U_t = (U_g^3 + U_r^3)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(2.21)$$



รูปที่ 2.33 กราฟระหว่างความค่ากับตำแหน่งบนฟิล์มที่ใช้ในการตรวจสอบความคมชัด
โดยวิธีของคลาเซนส์^[14]

2.7.2 การตรวจสอบความเปรียบต่างของภาพถ่าย

ความเปรียบต่าง คือ ผลต่างของค่าความดำของฟิล์ม ณ จุด 2 จุดบนฟิล์มบันทึกภาพเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความเปรียบต่างของความเข้มรังสีที่ตกกระทบฟิล์ม ความเปรียบต่างของชิ้นงาน (Subject contrast) และความเปรียบต่างของฟิล์ม (Film contrast)

ความเปรียบต่างของรังสีที่ตกกระทบฟิล์ม คือปริมาณรังสีที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุภายในตัวอย่าง พลังงานของรังสี และความเข้มของรังสีที่กระเจิง

ความเปรียบต่างของฟิล์ม มีค่าเป็นไปตามความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม ซึ่งขึ้นกับชนิดของฟิล์ม ชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และกระบวนการล้างฟิล์ม ดัชนีความเปรียบต่าง (Contrast index) สามารถหาได้โดยวิธีง่ายๆ คือ อ่านค่าความดำของฟิล์ม ณ จุด 2 จุดที่มีความดำต่างกัน นำค่าความดำของจุด 2 จุดที่อ่านได้ลบกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือดัชนีความเปรียบต่าง โดยมีข้อกำหนดว่า จุดที่เลือกทั้ง 2 จุดนั้นต้องมีค่าความดำอยู่ในช่วงเส้นตรงของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม

2.7.3 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม

การวัดค่าความดำบนฟิล์มเป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของอนุภาครังสี หรือแสง กับฟิล์ม หรือในกรณีของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ค่าความดำบนฟิล์มที่เกิดขึ้นหมายถึงความสามารถในการเปลี่ยนรังสีนิวตรอนเป็นรังสีทุติยภูมิของฉาก หรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างรังสีทุติยภูมิกับผลึกเงินเฮไลด์ของฟิล์ม อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม คือ เครื่องเดนซิโตมิเตอร์ (Densitometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความทึบแสงของวัตถุให้เป็นค่าที่อ่านได้โดยใช้หลักการทะลุผ่าน (Transmission) ของแสง เรียกค่าความดำนี้ว่าออปติคัล เดนซิตี (Optical Density, OD) หาได้จากสูตร

$$\text{optical density} = d = 0.43 Na \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเม็ดของเงินเฮไลด์ที่เกิดการสร้างภาพ (grain/cm²)

a คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ตัดขวางของเม็ดเงินเฮไลด์ 1 เม็ด (cm²)

หรือหาได้จาก

$$\text{optical density} = d = \log I_0 / I \dots\dots\dots(2.23)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม

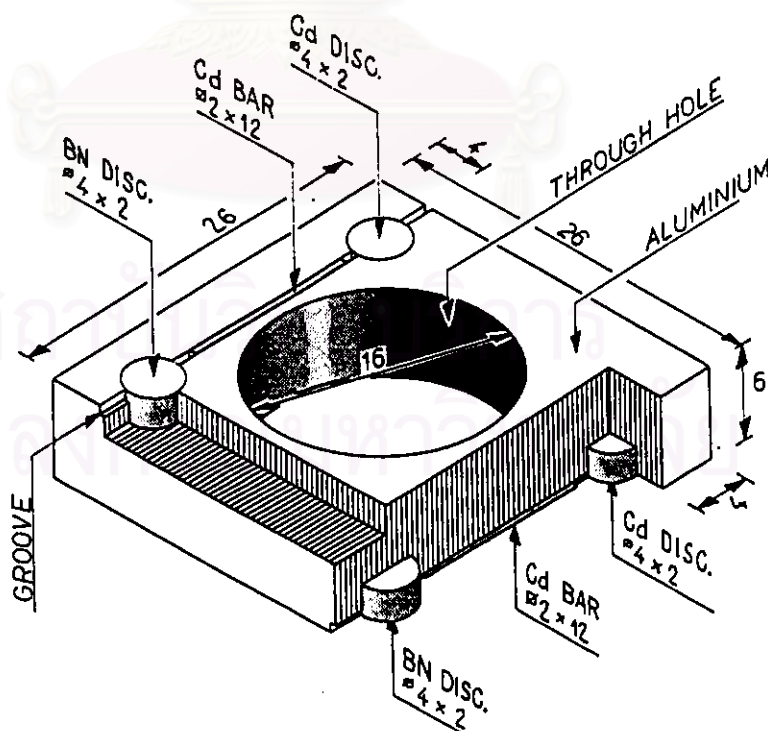
I คือ ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฟิล์ม

2.7.4 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน

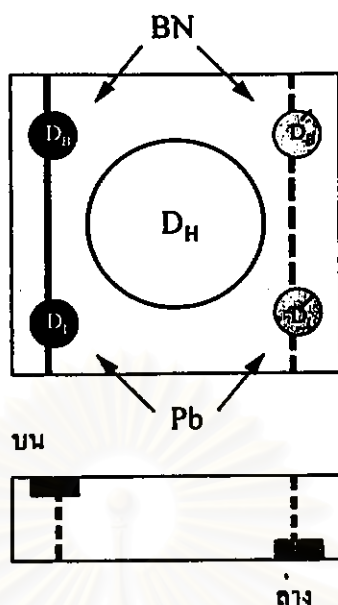
วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวัตถุตัวอย่างที่ได้รับการออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI) Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B

(1) การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator

Beam Purity Indicator เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบความบริสุทธิ์ของลำนิวตรอน ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตรหนา 8 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะเป็นรูกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.9 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว ลักษณะเป็นเหรียญกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร 2 คู่ ฝังอยู่บริเวณมุมด้านบนและด้านล่างด้านละ 1 คู่ โดยอยู่คนละฝั่งของรูกลาง และมีวงแคดเมียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร วางพาดด้านบนและด้านล่างยาวตลอด BPI ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 Beam Purity Indicator ^[6]



รูปที่ 2.35 ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI^[6]

การวิเคราะห์ทำโดยการถ่ายภาพ BPI แล้ววัดความดำแต่ละตำแหน่งบนฟิล์มดัง
รูปที่ 2.35 โดย

- D_B คือ ความดำของฟิล์มที่ตำแหน่งโบรอนไนไตรด์
- D_L คือ ความดำของฟิล์มที่ตำแหน่งตะกั่ว
- D_H คือ ความดำของฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- D_T คือ ความดำของฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- ΔD_L คือ ผลต่างของความดำที่ตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- ΔD_B คือ ผลต่างของความดำที่ตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

- 1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron content, NC)

$$NC = \frac{D_H - (\text{high}D_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

- 2) ปริมาณนิวตรอนกระเจิง (Effective scatter neutron content, S)

$$S = (\Delta D_B/D_H) \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

- 3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = (D_T - \text{low}D_L)/(D_H) \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

4) ปริมาณของรังสีจาก Pair production (Effective pair production content, P)

$$P = (\Delta D_L / D_H) \times 100 \dots \dots \dots (2.27)$$

(2) การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole) ที่เจาะเป็นช่องกลม และช่องว่าง (Gap) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้

อุปกรณ์วัดความไว SI ของ ASTM ประกอบด้วยวัสดุหลักต่าง ๆ คือ อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียม และตะกั่ว โดยมีความหนาขนาดของรูและช่องว่างต่าง ๆ กัน ตารางที่ 2.16 แสดงขนาดช่องว่างที่เล็กที่สุดที่ต้องมองเห็นในภาพถ่ายนิวตรอนทุกช่วงความหนา และตารางที่ 2.17 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูที่กว้างที่สุดที่ต้องมองเห็นในความหนาต่าง ๆ กันของ SI

ตารางที่ 2.16 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

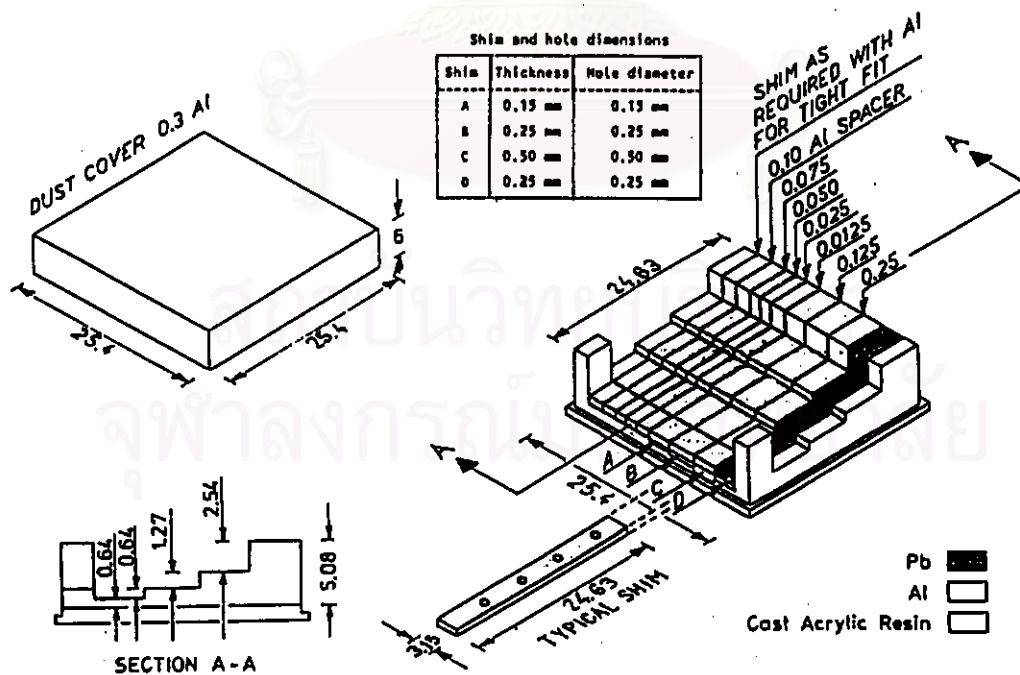
Value of G	Gap size, mm.*
1	0.25
2	0.13
3	0.10
4	0.076
5	0.051
6	0.025
7	0.013

* เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงความหนาของภาพ ASTM SI

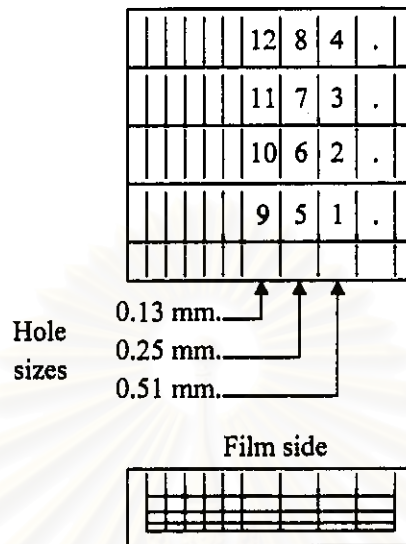
ตารางที่ 2.17 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI

Value of H	Gap size, mm.*	Absorber thickness, mm.
1	0.51	0.64
2	0.51	1.27
3	0.51	2.54
4	0.51	5.08
5	0.25	0.64
6	0.25	1.27
7	0.25	2.54
8	0.25	5.08
9	0.13	0.64
10	0.13	1.27
11	0.13	2.54
12	0.13	5.08

*เป็นขนาดของรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากที่สุดที่มองเห็นได้ในภาพถ่าย ASTM SI



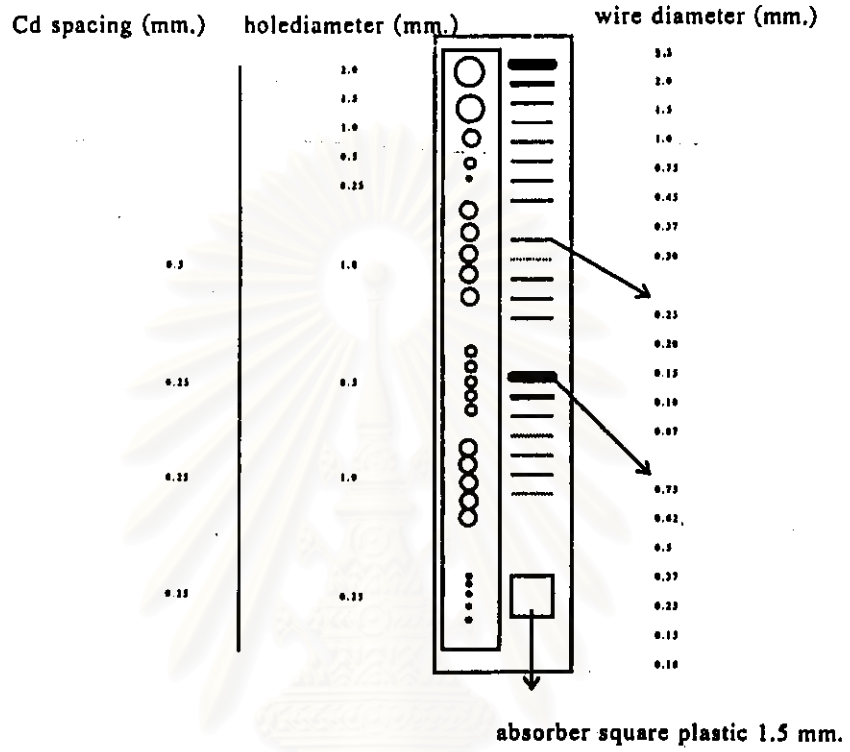
รูปที่ 2.36 ASTM Sensitivity Indicator^[6]



รูปที่ 2.37 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM ST^[6]

(3) การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไวของการถ่ายภาพด้วย Test strip B

Test strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัดและความแปรปรวนของภาพ จากขนาดของวัตถุที่มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตรเป็นฐาน แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตรเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 มิลลิเมตร 1 ชุด และเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0, 0.5, 1.0, 0.25 มิลลิเมตร ขนาดละ 5 รู ขนาดของรูที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ คือ รีโซลูชันของภาพ เส้นพลาสติกยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 13 เส้น ได้แก่ 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.45, 0.37, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.07 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้นำมาพิจารณา รีโซลูชันและความแปรปรวนต่างของภาพ เส้นแคดเมียมความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งนำมาพิจารณาความแปรปรวนต่างของภาพ



รูปที่ 2.38 Test strip B

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย