บทที่ 2

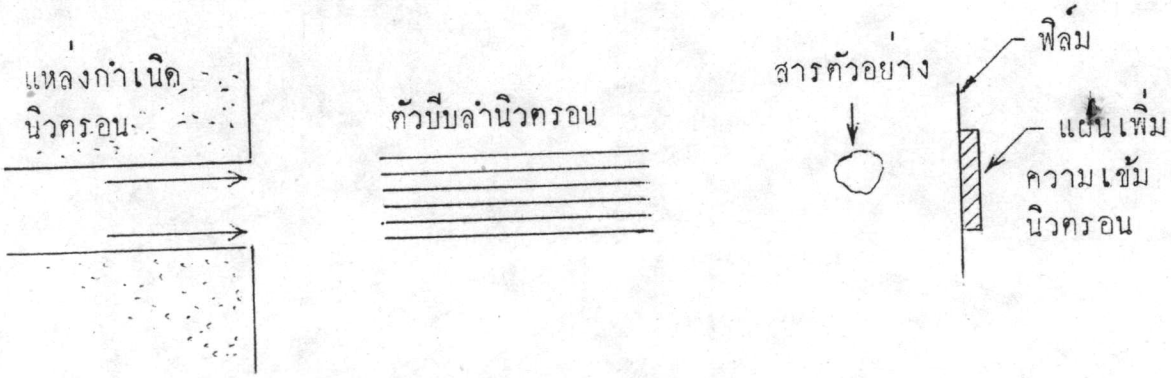
ทฤษฎี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 หลักของการถ่ายภาพด้วยอนุภาคนิวตรอน

เมื่อลำของอนุภาคนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับวัตถุใด ๆ ก็ตาม จะมีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างพลังงานและวัตถุ ส่วนหนึ่งของพลังงานจะถูกดึงออกจากลำนิวตรอนและพลังงานซึ่งยังคงอยู่ในลำของนิวตรอนที่เหลือนั้นจะปรากฏออกมาเพื่อให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างภายใน ซึ่งจะอยู่ในรูปของการกระจายความเข้มในรูปตั้งฉากต่อลำของนิวตรอน การกระจายในแนวราบที่ได้นี้เรียกว่า ภาพถ่าย ซึ่งจะแสดงความหมายในรูปความเกี่ยวพันธ์ของโครงสร้างของวัตถุ

รูปที่ 2.1 แสดงถึงวิธีและชี้ให้เห็นว่าหลักการส่วนมากมีส่วนเหมือนกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา แหล่งกำเนิดนิวตรอนจะปล่อยนิวตรอนวิ่งไปชนสารตัวอย่างที่นำมาถ่ายภาพ ซึ่งนิวตรอนนี้จะถูกลดลงด้วยความหนาของโครงสร้าง และส่วนประกอบของสารตัวอย่าง จากนั้นก็จะผ่านไปยังเครื่องอุปกรณ์บันทึกภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดภาพขึ้น อย่างไรก็ตามจะต้องมีการบังคับลำของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดด้วย เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบตัวบีบลำนิวตรอน (collimator) เพื่อให้มีนิวตรอนพอเพียงในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน



รูปที่ 2.1 แสดงวิธีการวางตำแหน่งในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

2.2 ปริมาณของนิวตรอนที่หายไปเนื่องจากสสาร (attenuation of neutrons by matter)

ส่วนได้เปรียบส่วนใหญ่ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนคือ ในวัตถุที่มีส่วนผสมที่แน่นอนของหลาย ๆ ธาตุ ถ้าใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนตรวจสอบโครงสร้างภายในจะสามารถตรวจสอบได้อย่างง่ายและให้รายละเอียด ที่เป็นดังนี้เพราะเนื่องจากค่าความแตกต่างของนิวตรอนแอทเทนูเอชัน ตัวอย่าง ธาตุที่มีค่า แอทเทนูเอชันสูงต่อเทอร์มัลนิวตรอน เช่น ไฮโดรเจน ลิเธียม โบรอน แคดเมียม และ แรเอิร์ท (rare earths) ซึ่งธาตุเหล่านี้พร้อมที่จะกั้นเทอร์มัลนิวตรอน แม้แต่ธาตุเหล่านี้ผสมเป็นรูปร่างรวมอยู่ในโลหะที่เป็นธาตุหนัก เช่น เหล็ก ทะกั่ว บิสมัท หรือ ยูเรเนียม ซึ่งจะตรวจสอบได้ยากมากในการใช้ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ แต่ถ้าใช้วิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะสามารถตรวจสอบได้ดี

จากส่วนได้เปรียบอันนี้ แสดงในรูป 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า mass attenuation coefficient ($\frac{\mu}{\rho}$) กับค่าของเลขอะตอม (atomic number) ของธาตุต่าง ๆ สำหรับรังสีเอกซ์ (พลังงานประมาณ 120 keV) และเทอร์มัลนิวตรอน จะเห็นว่ามีความแตกต่างอย่างมากของค่าแอทเทนูเอชัน

ความสำคัญอย่างหนึ่งที่ควรพิจารณาจากรายละเอียดของภาพถ่ายด้วยรังสี คือ ความเกี่ยวข้องของความเข้มรังสีซึ่งทะลุผ่านวัตถุที่ตรวจสอบ เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = I_o e^{-\mu x} = I_o e^{-\frac{\mu}{\rho}\rho x}$$

เมื่อ I = ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุไปได้

I_o = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบบนวัตถุ

μ = a linear attenuation coefficient

x = ความหนาของวัตถุ

ρ = ความหนาแน่นของวัตถุ

สำหรับนิวตรอนนิยมใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = I_o e^{-N\sigma X} = I_o e^{-\varepsilon X}$$

เมื่อ I = ความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุไปได้

I_o = ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุ

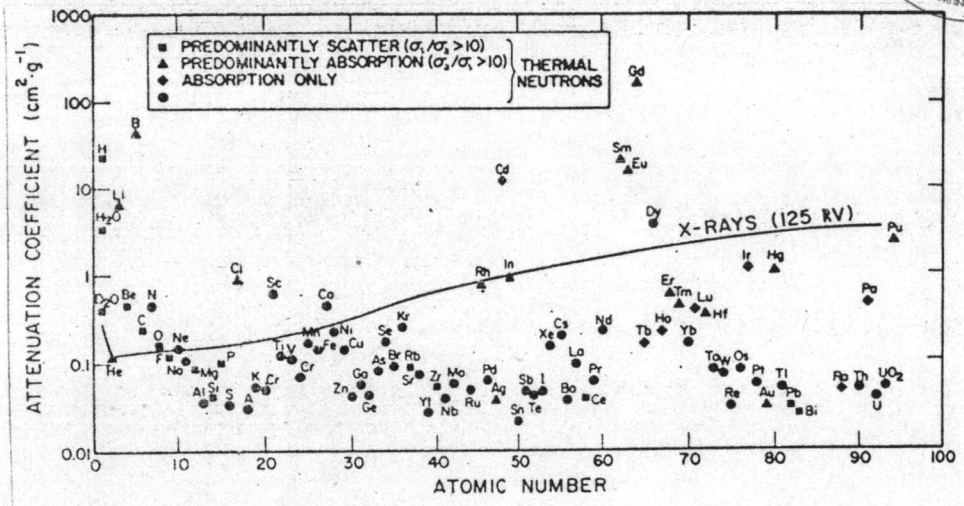
N = จำนวนนิวไคลด์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของวัตถุที่เป็นเป้า

σ = microscopic cross section

X = ความหนาของวัตถุ

ε = macroscopic cross section (cm^{-1})

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2[1] แสดงถึงการเปรียบเทียบของ mass attenuation coefficients ของธาตุต่าง ๆ สำหรับรังสีเอกซ์ และเทอร์มัลนิวตรอน

2.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่มีกำลังมากกว่า 1 กิโลวัตต์ ถ้าได้รับการออกแบบให้เหมาะสม สามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน และในทำนองเดียวกันถ้ากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ยิ่งสูง ก็ย่อมจะมีความเข้มของนิวตรอนมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้ผลดียิ่งขึ้นด้วย

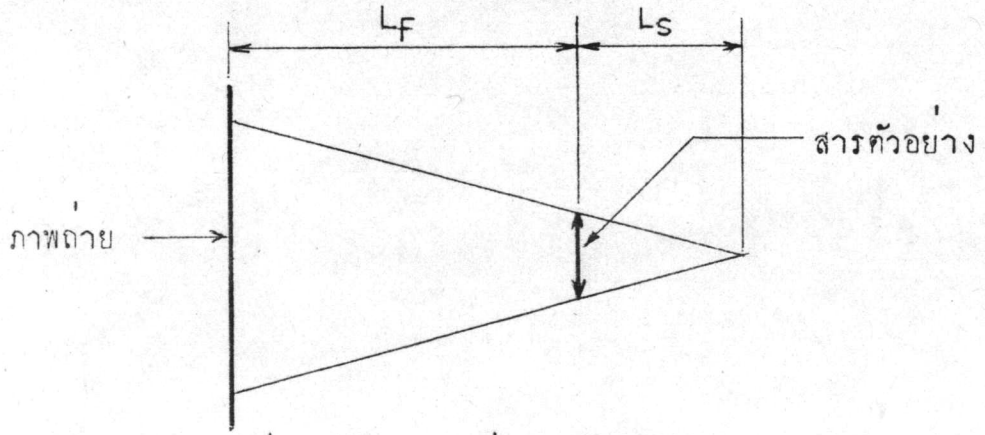
ภาพที่ถ่ายด้วยรังสีจะมีคุณภาพสูง ต้องประกอบด้วยความเข้มเฉลี่ยที่กระทบฟิล์ม ประมาณ 10^9 ควอนตา (quanta) หรือ 10^9 จำนวนบันทึกต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามความเข้มขนาด10^4 ควอนตา ก็พอเพียงที่ให้ภาพถ่ายในการตรวจสอบวัตถุต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ดังนั้นถ้าเรามีเครื่องบันทึกภาพ เช่น ฟิล์ม ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 10 เปอร์เซนต์ ก็จำเป็นจะต้องให้อนุภาคนิวตรอนที่จะตกกระทบบนแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วงระหว่าง 10^5 ถึง 10^{10} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

ลำของอนุภาคนิวตรอนที่พุ่งออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อจะไปชนและทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบสร้างเป็นพิเศษ ซึ่งเรียกว่า ท่อบังคับลำนิวตรอน (collimator) และจะต้องมีคุณสมบัติเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของ $L/_D$

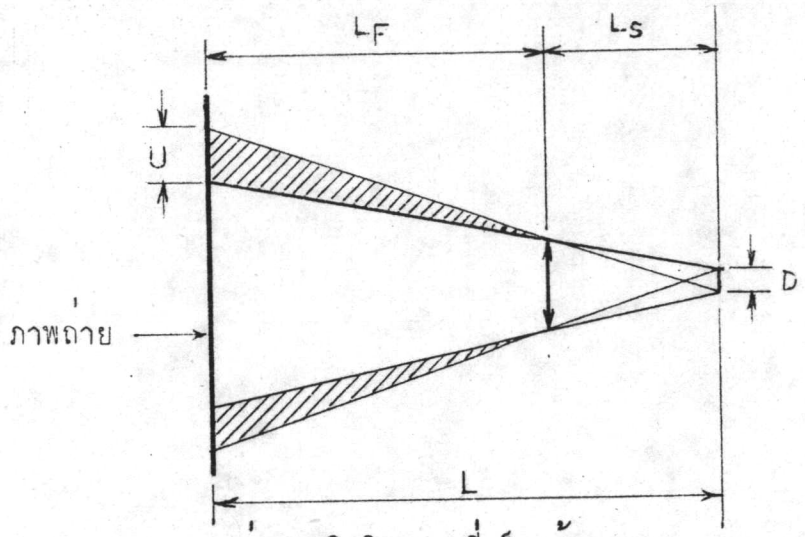
เมื่อ L = ระยะทางจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนถึงตัวบันทึกภาพ (ฟิล์ม)

D = ความกว้างของรูปล่อยนิวตรอน (source aperture)

ถ้าค่าของอัตราส่วน $L/_D$ มีค่ามากจะทำให้ระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมี resolution ดี นั่นคือภาพจะให้รายละเอียดมาก ดูรูปที่ 2.3 ภาพของสารตัวอย่างที่หนาจะถ่ายให้รายละเอียดมากและภาพคมเมื่อได้ปรับปรุงท่อบังคับลำนิวตรอน แต่ในทางตรงกันข้ามก็มีผลทำให้ลดค่าความเข้มของนิวตรอนด้วย



แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เป็นจุด (point source)



แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เป็นเส้น (line source)

รูปที่ 2.3 แสดงถึงการจัดท่อบังคับลำนิวตรอน

จากความสัมพันธ์ดังรูปจะได้ $U = \frac{L_F D}{L_s}$

เมื่อ U = ความไม่คมของภาพเนื่องจากการจัดระบบ

D = ความกว้างของรูปล่อยนิวตรอนตรงแหล่งกำเนิด

L_s = ระยะทางจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนไปยังสารตัวอย่าง

L_F = ระยะทางจากสารตัวอย่างไปยังฟิล์ม

อิพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) สามารถใช้ในการถ่ายภาพได้ และที่ใช้กันมากที่สุดคือในการถ่ายตรวจสอบความเข้มข้นของแท่งเชื้อเพลิงปรมาณู ซึ่งจะเห็นว่าอิพิเทอร์มัลนิวตรอนมีอำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอนประมาณ 40 เท่า ดังนั้นสามารถถ่ายให้เห็นรายละเอียดภายในของแท่งเชื้อเพลิงได้ดี

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน และจะให้ภาพที่มีคุณภาพดีต้องมีความเกี่ยวข้องกับหลาย ๆ อย่าง เช่น (1) อัตราส่วนของท่อบังคับลำนิวตรอน (2) การออกแบบและประสิทธิภาพของท่อบังคับลำนิวตรอน (3) ความเข้มของนิวตรอน (4) สัดส่วนของการรบกวนของรังสี เช่น นิวตรอนกระเจิง และรังสีแกมมา (5) คุณสมบัติของแผ่นเพิ่มความเข้ม (6) คุณสมบัติของฟิล์ม และ (7) การวางตำแหน่งในการถ่ายภาพ

ความสัมพันธ์ต่าง ๆ นี้ที่นิยมและถือเป็นพื้นฐานดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 [2] ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนที่แหล่งกำเนิด นิวตรอน/ซม^2/วินาที	อัตราส่วนของท่อบังคับลำนิวตรอน	ความเข้มนิวตรอนที่สารตัวอย่าง นิวตรอน/ซม^2/วินาที	อัตราส่วนของนิวตรอนต่อรังสีแกมมา n/cm^2-mR	วิธีการถ่ายภาพและเวลาในการถ่ายภาพ
10^{12}	1 : 300	10^6	3×10^6	แกโดลิเนียม, Fine grain film (20 นาที)
10^{11}	1 : 100	10^6	3×10^6	แกโดลิเนียม, Fine grain film (20 นาที)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การบันทึกภาพที่ถ่ายด้วยนิวตรอน (neutron image recorders)

การบันทึกภาพที่ถ่ายด้วยนิวตรอนมีใช้กันอยู่หลายอย่างและเปลี่ยนแปลงเสมอแต่วิธีการหนึ่งที่ใช้กันและธรรมดาที่สุดคือการใช้แผ่นเพิ่มความเข้ม (intensifying screen) หรือบางทีก็เรียกว่า converter foil จุดประสงค์ที่ใช้แผ่นเพิ่มความเข้มนี้ก็เพื่อให้แผ่นนี้ดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนที่วิ่งเข้ามาชน หลังจากนั้นแผ่นนี้ก็จะปล่อยรังสีออกมาในรูปของอนุภาคที่มีประจุหรือรังสี

มีโลหะหลายชนิดที่สามารถทำเป็น แผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนซึ่งโลหะพวกนี้จะต้องมีค่าการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนสูงกับมีประสิทธิภาพในการปล่อยรังสีทุติยภูมิ (second radiation) ภายหลังการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนแล้ว

รายละเอียดของแผ่นเพิ่มความเข้มที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2[3] รายละเอียดคร่าว ๆ ทางนิวเคลียร์ของโลหะบางชนิดที่ใช้เป็นแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอน

วัตถุ	ค่าภาคตัดกลืนสำหรับเทอรมัลนิวตรอน (บาร์น)	ปฏิกิริยานิวเคลียร์	ครึ่งชีวิต	ชนิดและพลังงานของรังสี	ส่วนประกอบของแผ่น
$^{6}_{3}Li$	945	n,α	0	α,2.05;T,2.74MeV	$^{6}LiF+ZnS$, 250 μm
$^{10}_{5}B$	3837	n,α	0	α,1.47;Li,0.84MeV	$^{10}B_4C$, 5 μm
$^{Nat}_{64}Gd$	46000	n,γ	0	IC,β^-,71 keV (main)	แผ่นโลหะ, 25 μm
$^{Nat}_{66}Dy$	950	n,γ	2.3 ชม.	β^-,1.28 MeV (max)	แผ่นโลหะ, 100 μm
$^{Nat}_{49}In$	191	n,γ	54 นาที	β^-,1.00 MeV (max)	แผ่นโลหะ, 250 μm
$^{Nat}_{48}Cd$	20000	n,γ	0	β^-,0.58 MeV (max)	แผ่นโลหะ, 635 μm

003793

ตารางที่ 2.3[3] คุณสมบัติบางประการของแผ่นเพิ่มความเข้มเทอร์มัลนิวตรอน*

ชนิดของแผ่น	ความหนา (มม)	ประสิทธิภาพในการบันทึกเทอร์มัลนิวตรอน (%)	ความไม่ชัดที่อยู่ในตัวเอง (μm)	ฟิล์มที่เป็นประโยชน์	อัตราส่วนของนิวตรอนตอแกมมาสำหรับ90%n/10%γimage ($n.cm^{-2}.mR^{-1}$)
NE421 (granular)	0.65	30	1000	X-ray (แผ่นทังสเตท)	5×10^4
NE426 (granular)	0.25	20	400	X-ray (แผ่นทังสเตท)	5×10^4
NE905 (glass)	1.0	80	400	X-ray (แผ่นทังสเตท)	2×10^5
Gadolinium foil	0.025	25	<100	X-ray (แผ่นตะกั่ว)	10^6
Dysprosium foil	0.10	10	200	X-ray (แผ่นตะกั่ว)	0

* แผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนต้องใช้แนบกับฟิล์มและอยู่ด้านหลังของฟิล์ม

2.5 คุณสมบัติในการอาบรังสี (signal exposure characteristics)

การถ่ายภาพด้วยรังสีเหมือนกับในเรื่องอื่น ๆ มากมาย นั่นคือ คุณสมบัติของเครื่องบันทึกต้องขึ้นอยู่กับรังสีที่ตกกระทบ และการรับเอาไว้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = \int_0^T \phi(t)\, dt$$

เมื่อ S = จำนวนนิวตรอนที่ได้ นิวตรอน ต่อ ซม^2

$\phi(t)$ = นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบ นิวตรอน ต่อ ซม^2 ต่อวินาที

T = เวลาในการอาบรังสี วินาที

จากการใช้ฟิล์มที่มีความไวต่อแสงเป็นเครื่องบันทึกจะหาค่าความเข้มของรังสีได้จากความดำของฟิล์ม

ดังนั้น

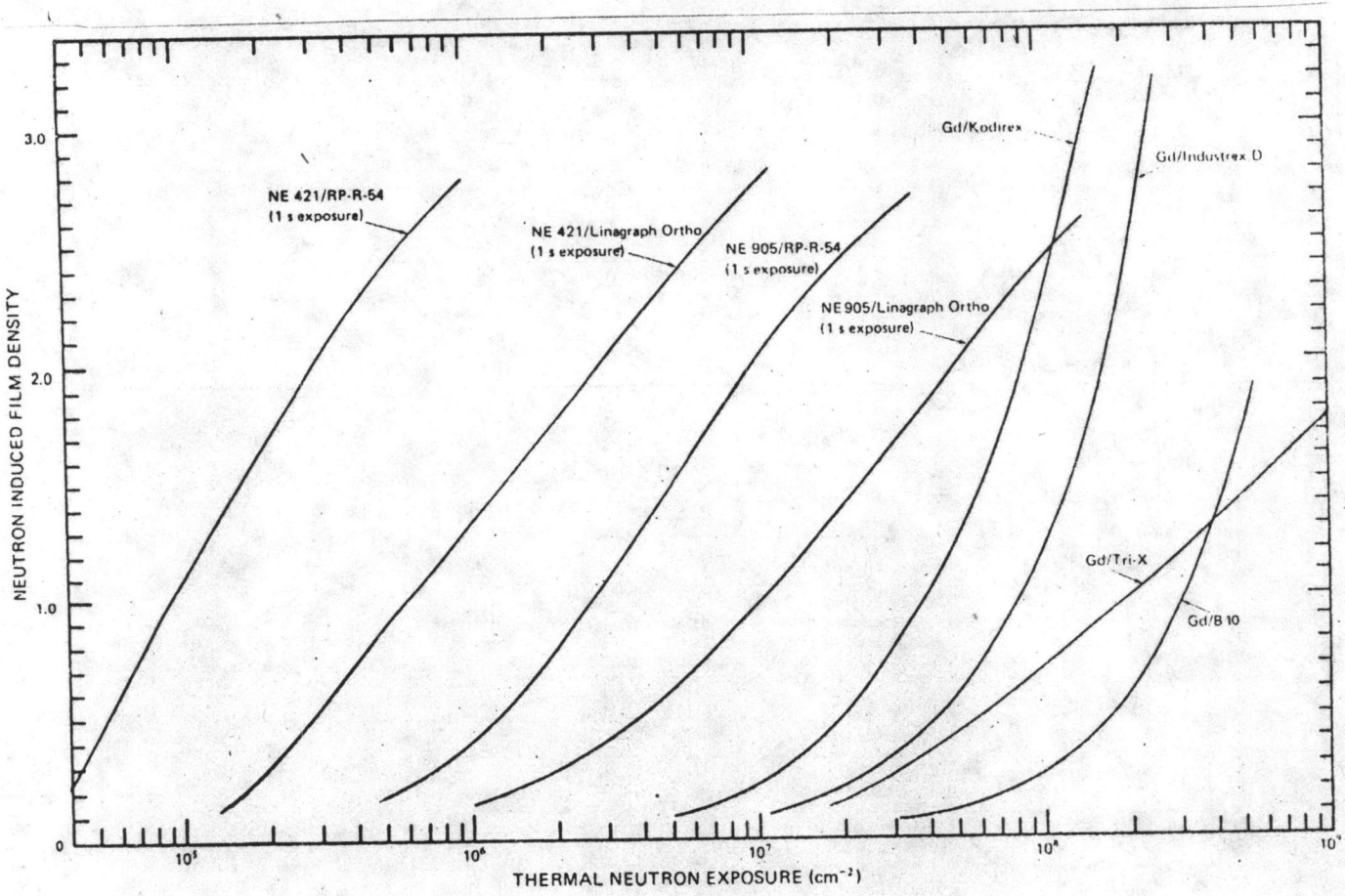
$$D = \log \left(\frac{I_o}{I} \right)$$

D = ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

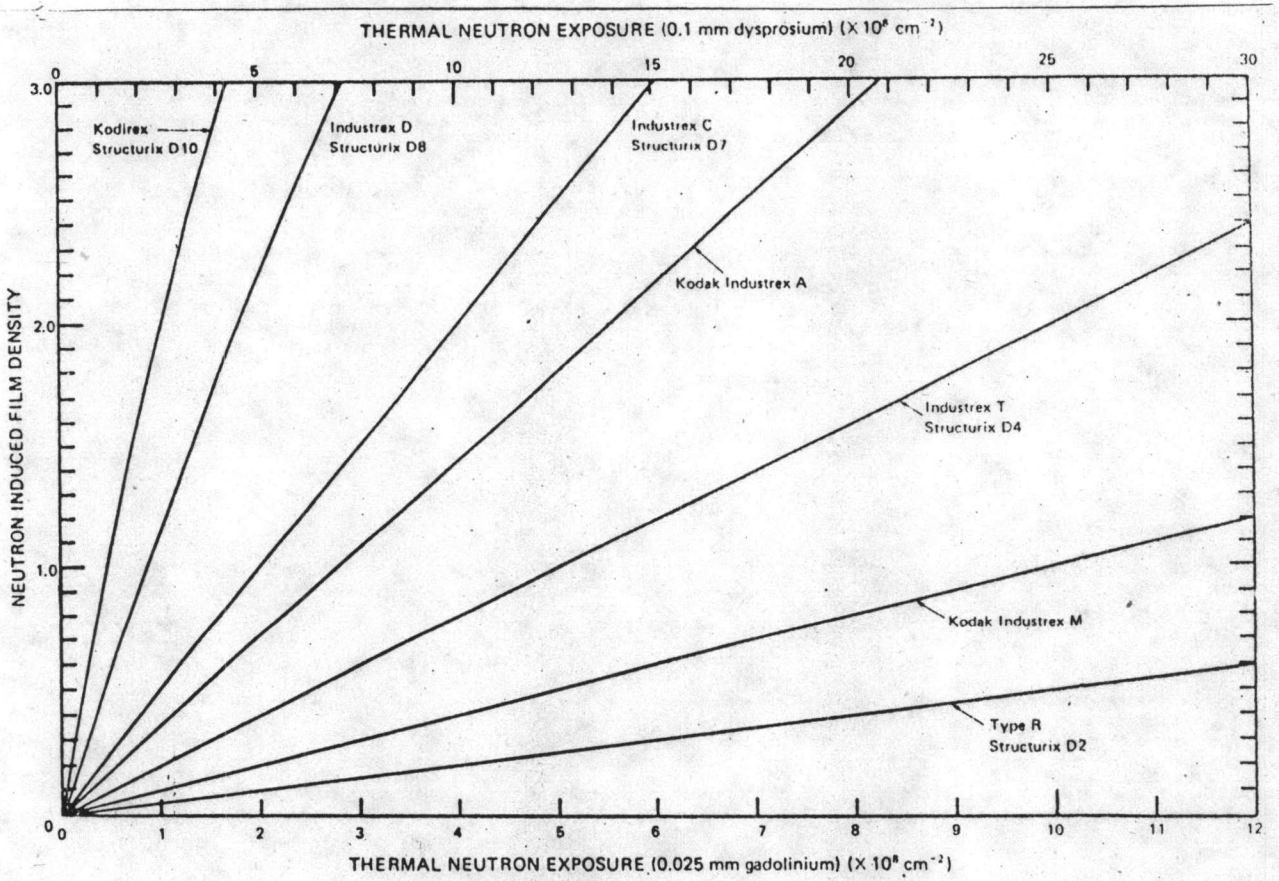
I_o = ความเข้มของแสงที่ตกลงบนฟิล์ม

I = ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฟิล์ม

ความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอน ชนิดของฟิล์ม และความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม แสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 (3) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มชนิดต่าง ๆ โดยวิธีถ่ายภาพโดยตรง

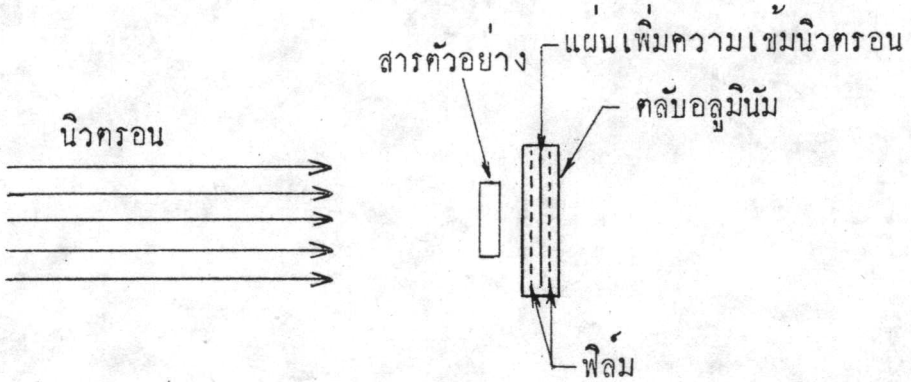


รูปที่ 2.5 (3) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มชนิดต่าง ๆ โดยใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมหนา 0.025 มม. โดยวิธีถ่ายภาพโดยตรง และใช้แผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียมหนา 0.1 มม. สำหรับวิธีถ่ายทอด

โดยทั่ว ๆ ไปในการถ่ายภาพด้วยอนุภาคนิวตรอนนั้น แผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนจะต้องวางให้แนบสนิทกับแผ่นฟิล์มระหว่างที่ทำการอาบรังสีนิวตรอน ซึ่งเราเรียกวิธีการแบบนี้ว่า วิธีถ่ายภาพโดยตรง (direct technique) ดูรูปที่ 2.6

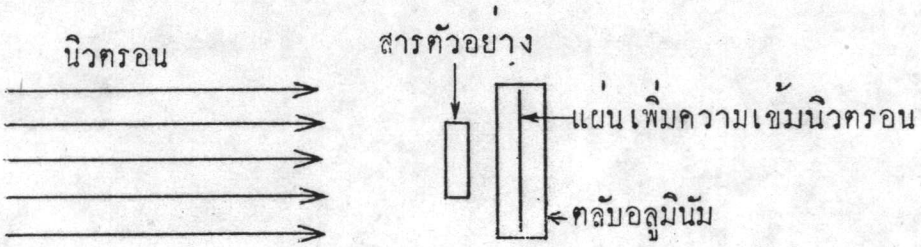
มีอีกวิธีหนึ่งนั่นคือ วิธีถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอด (transfer technique) ซึ่งจะใช้แผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนให้ทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน ทำให้แผ่นนี้เป็นสารรังสีและมีค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสม ซึ่งวิธีแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นฟิล์มประกบกับแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนในขั้นแรก แต่จะใช้แผ่นฟิล์มประกบกับแผ่นเพิ่มความเข้มในห้องมืด ภายหลังจากได้ถ่ายภาพโดยวิธีทางตรงแล้ว ดูรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

วิธีการถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอดนี้มีประโยชน์เป็นอย่างมากในการใช้ถ่ายแห่งเชื้อเพลิงปรมาณูที่ใช้แล้ว และสารรังสีที่มีรังสีในตัวเอง ซึ่งทั้งสองอย่างที่กล่าวมานี้ไม่สามารถถ่ายภาพเพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในโดยวิธีทางตรงได้เพราะกัมมันตภาพรังสีในสารตัวอย่างเหล่านี้จะมีผลไปทำให้ฟิล์มเกิดอาการมัวและจะไม่สามารถเห็นรายละเอียดภายในของสารตัวอย่างเหล่านี้

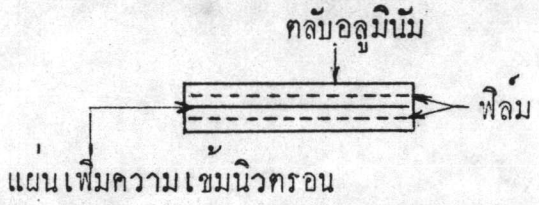


รูปที่ 2.6 วิธีการถ่ายภาพโดยตรง

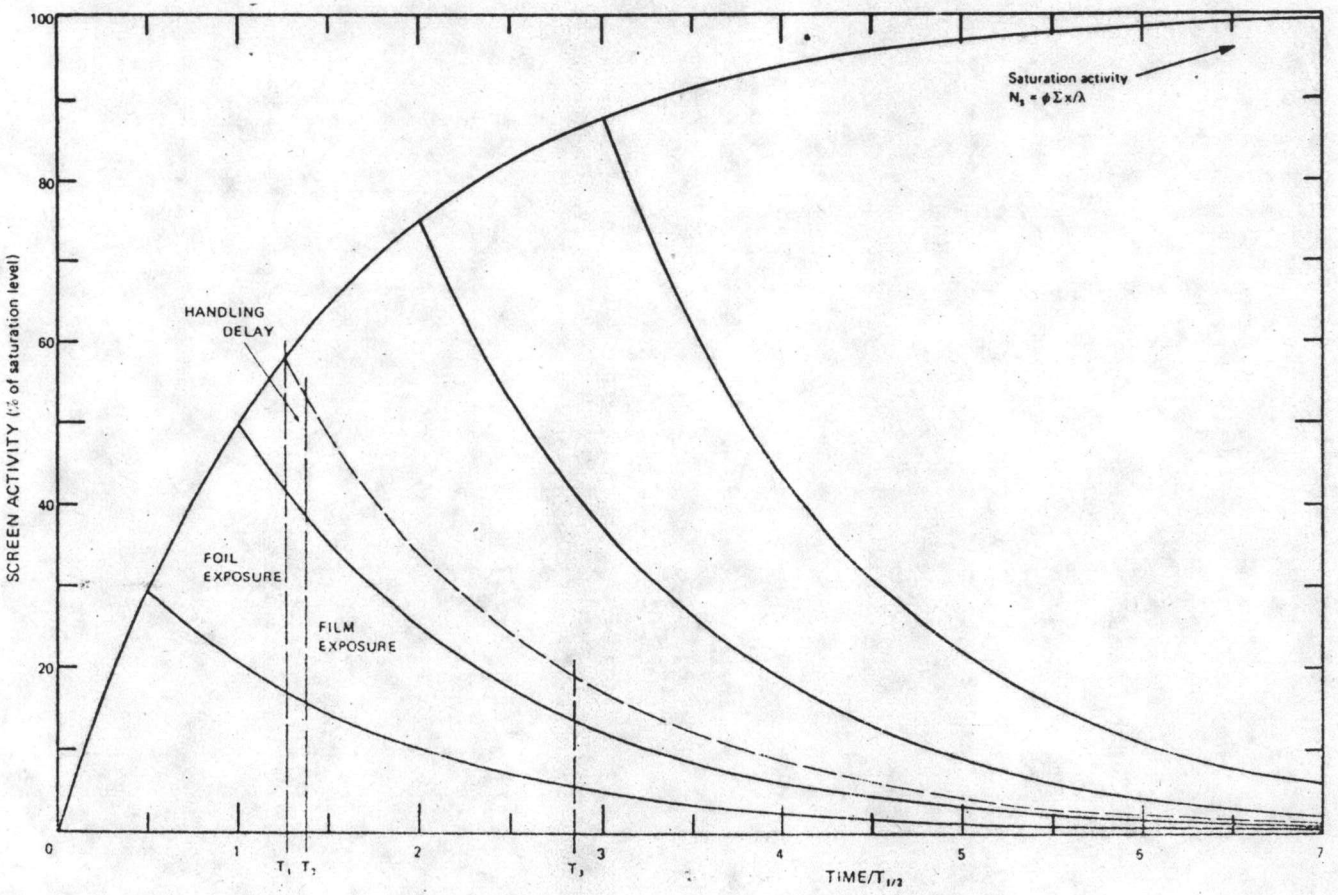
ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนและสารตัวอย่างมาอาบนิวตรอน



ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นฟิล์มมาอาบรังสีที่เกิดขึ้นจากแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอน



รูปที่ 2.7 วิธีการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอด



รูปที่ 2.8[3] แสดงถึงความแรงรังสีที่เพิ่มขึ้นและการสลายตัวของแผ่นเพิ่มความเข้มสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด