บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ชนิดของนิวตรอนอันตรกิริยาและต้นกำเนิดนิวตรอน

ในปีพ.ศ. 2475 นายแชดวิด (Chadwick) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษเป็นผู้ค้นพบอนุภาคนิวตรอนซึ่งมีน้ำหนัก 1.00867 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit) หรือ 1.6744×10^{-24} กรัม มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง อำนาจในการทะลุทะลวงสูง มีค่าครึ่งชีวิต (half life) ประมาณ 12 วินาที การสลายตัวของอนุภาคนิวตรอนจะได้อนุภาคโปรตรอน อนุภาคอิเล็กตรอน และอนุภาคนิวตริโน

2.1.1 ชนิดของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน

ชนิดของนิวตรอน	พลังงาน
นิวตรอนเย็น(cold neutron)	< 1 eV.
เทอร์มัลนิวตรอน(thermal neutron)	0.01 eV.-0.03eV.
อิพิเทอร์มัลนิวตรอน(epithermal neutron)	0.025 eV. ที่ 25 $^{\circ}$ c 1 eV.
นิวตรอนช้า(slow neutron)	0.03 eV.- 1 1eV.
นิวตรอนปานกลาง(intermediate neutron)	100 eV.- 10 keV.
นิวตรอนเร็ว(fast neutron)	10 keV - 10 MeV.
นิวตรอนพลังงานสูง(high energy neutron)	>10 MeV.

2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอน (neutron interaction)

โอกาสในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุขึ้นอยู่กับขนาดของภาคตัดขวาง (cross section)ของธาตุนั้นๆมีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดย 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร ภาคตัดขวางทั้งหมดของการเกิดอันตรกิริยา (total cross-section) มีค่าเท่ากับ ผลบวกของภาคตัดขวางของการดูดกลืน(absorption cross-section)กับภาคตัดขวางของการกระเจิง (scattering cross-section) ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละธาตุและแต่ละพลังงานของนิวตรอน

2.1.2.1 การชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลางที่สถานะพื้น(ground state) แล้วสะท้อนออกมา โดยที่นิวเคลียสนั้นยังอยู่ที่สถานะพื้น ในกรณีนี้พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอน และนิวเคลียสก่อนชนและหลังชนมีค่าคงที่ สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n,n)

2.1.2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) มีลักษณะคล้ายการชนแบบยืดหยุ่น แต่ภายหลังการชนนิวตรอนจะรวมตัวกับนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ แล้วปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสถานะกระตุ้น(excited state) แล้วจึงลดพลังงานมาอยู่ในสถานะพื้นโดยปล่อยรังสีแกมมา ในกรณีนี้พลังงานจลน์ก่อนชนและหลังชนมีค่าต่างกัน สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ คือ (n,n′)

2.1.2.3 ปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน (neutron capture) หรือ (radiative capture) นิวตรอนจะถูกจับเข้าไปรวมกับนิวเคลียสของตัวกลาง กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพื้นแล้วจึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ คือ (n,γ)

2.1.2.4 ปฏิกิริยาแบบให้อนุภาคที่มีประจุ (charged particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของตัวกลางบางชนิด และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบจะปลดปล่อยอนุภาคบางชนิด เช่น อัลฟา โปรตรอน โดยนิวเคลียสเชิงประกอบต้องมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) และศักย์คูลอมบ์ (coulombic potential) ดังนั้นปฏิกิริยาประเภทนี้ จะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง ประมาณ 10 MeV หรือมากกว่า สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ คือ (n,α) หรือ (n,p)

2.1.2.5 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (neutron producing reaction) ปฏิกิริยานี้จะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง ประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ คือ (n,2n) หรือ (n,3n)

2.1.2.6 ปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด แล้วเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้าย มากกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ ทำให้นิวเคลียสแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ คือ (n,f)

2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source)

นิวตรอนผลิตขึ้นมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ได้แก่

2.1.3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน จากปฏิกิริยาระหว่าง อัลฟา และเบริลเลียม (α-Berryllium source) มีปฏิกิริยาดังนี้

$$^{4}He + {}^{9}Be \rightarrow {}^{12}C + {}^{1}n$$

โดยอัลฟา (^{4}He) ได้จากการสลายตัวตามธรรมชาติของธาตุกัมมันตรังสี ได้แก่ เรเดียม-226 , พอโลเนียม-210, พลูโตเนียม-238และอเมริเซียม-241 นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้ จะมีค่าพลังงานหลากหลาย สูงสุดถึง 13 MeV เนื่องจากพลังงานของอัลฟาจากธาตุกัมมันตรังสีมีหลายค่า และอัลฟายังถูกลดพลังงานลงตามระยะทางเคลื่อนที่ โดยเฉลี่ยแล้ว ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้สามารถผลิตนิวตรอนได้ 2 ถึง 3×10^{6} นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี

2.1.3.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาระหว่างแกมมากับเบริลเลียม (photoneutron source) มีปฏิกิริยาดังนี้

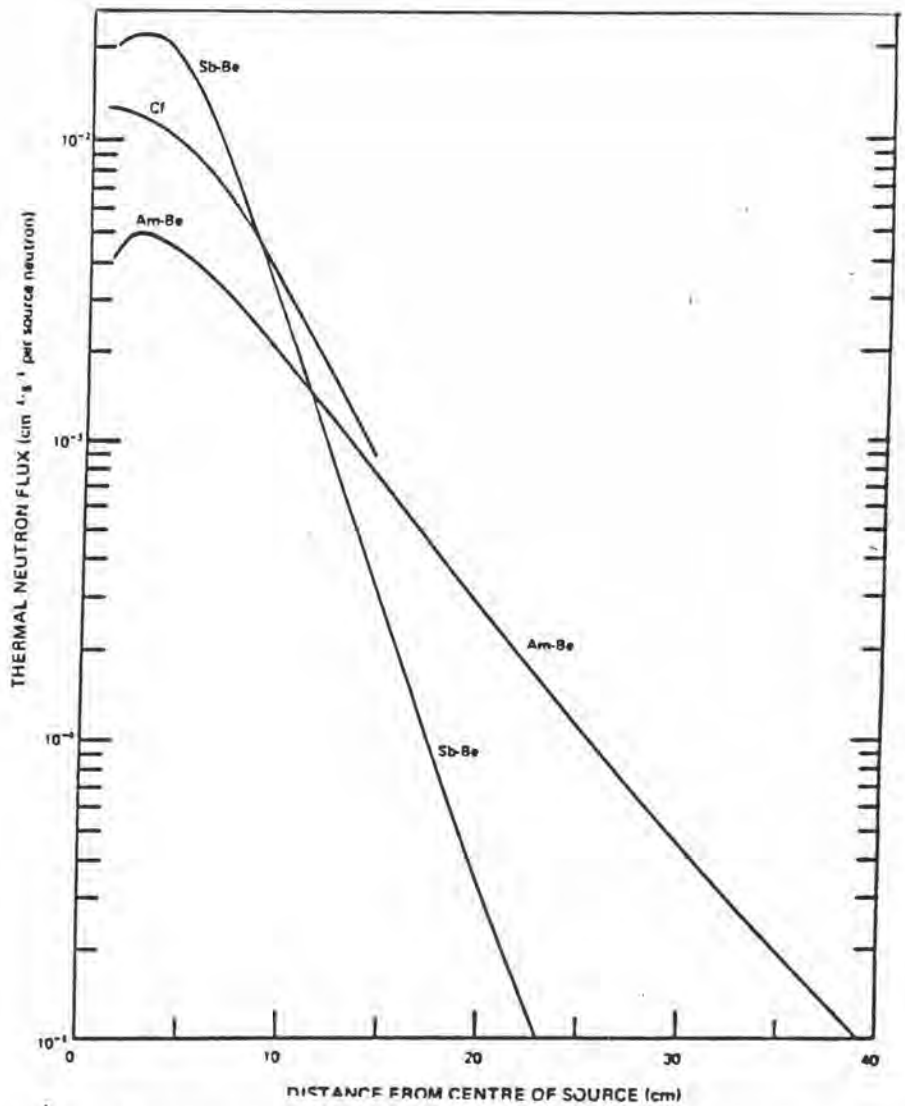
$$\gamma + {}^{9}Be \rightarrow {}^{8}Be + {}^{1}n$$

โดยแกมมา (γ) ได้จากการสลายตัวตามธรรมชาติ ของธาตุกัมมันตรังสีที่ผสมรวมอยู่กับเบริลเลียม-9 ได้แก่ โซเดียม-24 (Na-24), พลวง-124 (Sb-124) ซึ่งภายหลังเกิดปฏิกิริยากับเบริลเลียม-9 แล้ว จะให้นิวตรอนออกมา พลังงานประมาณ 0.8 MeV และ 24 MeV ตามลำดับ

2.1.3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากการแตกตัวของธาตุกัมมันตรังสี (spontaneous fission) ได้แก่ แคลิฟอร์เนียม-252 ซึ่งในการแตกตัว 1ครั้งจะให้นิวตรอน 4 ตัว พลังงานตั้งแต่ 1-3 MeV และอัตราการผลิตนิวตรอนเท่ากับ 2.3×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัมของแคลิฟอร์เนียม-252 หรือ 4.3×10^{9} นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของแคลิฟอร์เนียม-252

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติบางประการของธาตุกัมมันตรังสีที่นำมาใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยา	ครึ่งชีวิต	คุณสมบัติ
^{124}Sb-Be	(γ,n)	60 วัน	ครึ่งชีวิตสั้น รังสีแกมมาสูง ราคาถูก ให้นิวตรอนพลังงานต่ำ
^{210}Po-Be	(α,n)	138วัน	ครึ่งชีวิตสั้น รังสีแกมมารบกวนน้อย ราคาถูก
^{238}Pu-Be	(α,n)	87.4 ปี	ครึ่งชิวิตยาว
^{241}Am-Be	(α,n)	458 ปี	ครึ่งชีวิตยาว ราคาแพง ป้องกันการรบกวนจากรังสีแกมมาง่าย
^{241}Am-, ^{242}Cm-Be	(α,n)	163วัน	ครึ่งชีวิตสั้น ความเข้มนิวตรอนสูง ราคาปานกลาง
^{252}Cf	fission	2.65 ปี	ครึ่งชีวิตยาว ความเข้มนิวตรอนสูง ให้นิวตรอนพลังงานต่ำ และต้นกำเนิดมีขนาดเล็ก ราคาแพง



รูปที่ 2.1 ปริมาณของนิวตรอนซึ่งผลิตจากธาตุกัมมันตรังสีที่ระยะทางต่างๆ

2.1.3.4 เครื่องเร่งอนุภาค (accelerators) ใช้หลักการของการเร่งอนุภาคได้แก่ โปรตอน ดิวทิเรียม ทริเทียม หรืออัลฟา ให้มีพลังงานสูง เพื่อวิ่งไปกระทบเป้า(target) ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำ แล้วให้นิวตรอนออกมา ตัวอย่างของ ปฏิกิริยาได้แก่

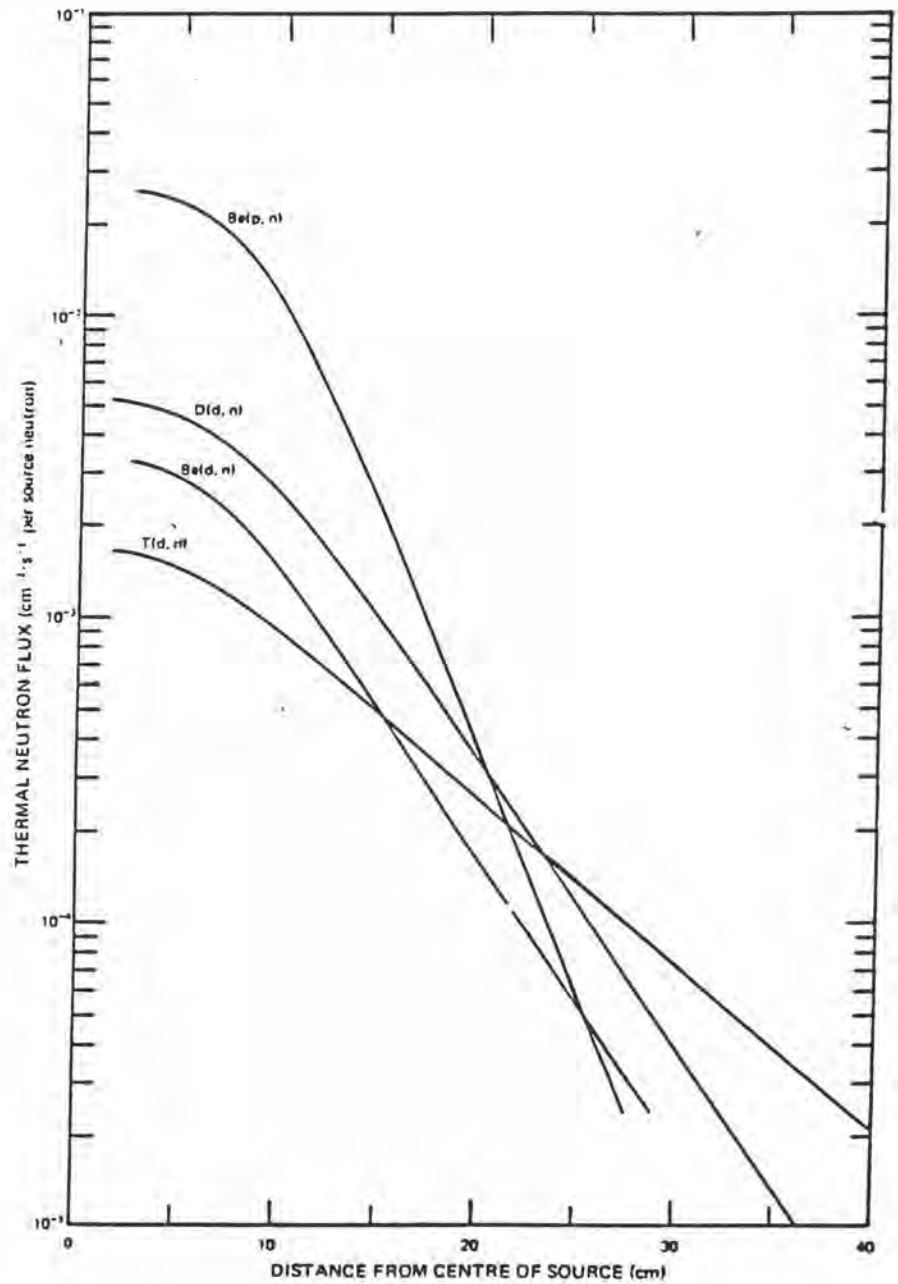
$$_1D^2 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + 3.28\ MeV$$

$$_1T^3 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17.6\ MeV$$

$$_4Be^9 + {}_1H^1 \rightarrow {}_5B^9 + {}_0n^1 - 1.85\ MeV$$

$$_4Be^9 + {}_1D^2 \rightarrow {}_5B^{10} + {}_0n^1 + 4.35\ MeV$$

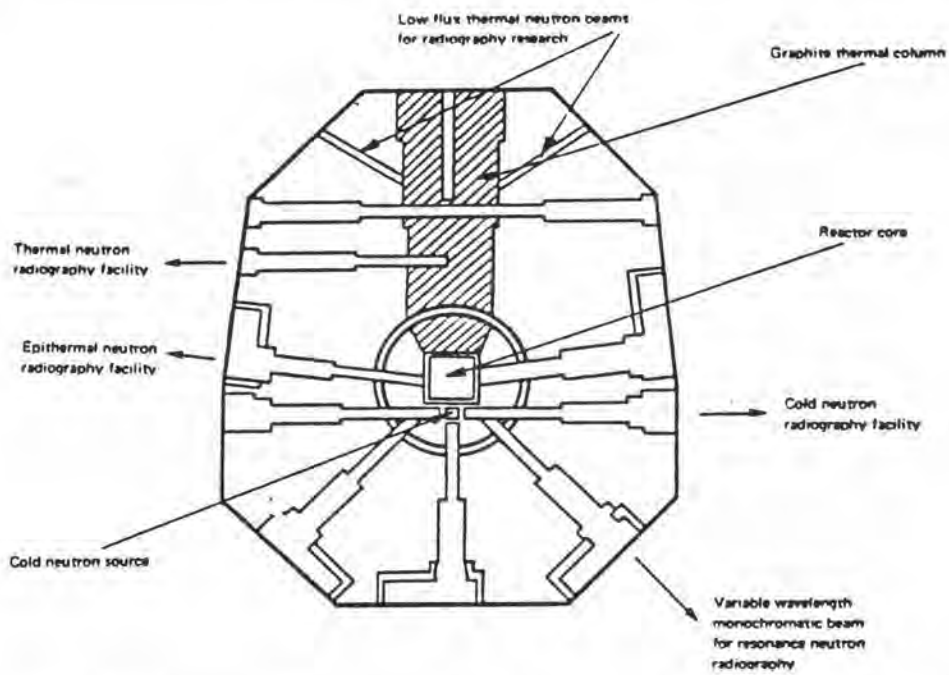
$$_3Li^7 + {}_1p^1 \rightarrow {}_4Be^7 + {}_0n^1 - 1.6\ MeV$$



รูปที่ 2.3 ปริมาณของนิวตรอนซึ่งผลิตขึ้นจากเครื่องเร่งอนุภาค ที่ระยะต่างๆ

2.1.3.5 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์(nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มนิวตรอนสูงสุดคือประมาณ 10^{12}-10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แล้วแต่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งจะทำให้คุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนดีที่สุด แต่ข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ฯ คือ เคลื่อนย้ายไม่ได้ ราคาแพง และการปฏิบัติงานกับ

เครื่องปฏิกรณ์ฯต้องใช้ความรอบคอบ ระมัดระวัง รวมทั้ง ผู้ปฏิบัติต้องได้รับใบอนุญาตเดิน เครื่องปฏิกรณ์ฯ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ประกอบด้วย อุปกรณ์หลัก คือ มัดเชื้อเพลิง สาร หน่วงนิวตรอน ระบบน้ำหล่อเย็น และแท่งควบคุมปฏิกิริยาฟิชชั่นระหว่างเชื้อเพลิงกับ นิวตรอนช้า จากสารกัมมันตรังสีเป็นผลให้ได้ฟิชชั่นแฟรคเมนต์,อนุภาคมีประจุ,รังสีแกมมา และนิวตรอนเร็วจำนวนมาก เมื่อนิวตรอนเร็วพลังงานประมาณ 2 MeV จากแกนเครื่อง ปฏิกรณ์ฯ เคลื่อนที่ผ่านสารหน่วงนิวตรอน จะสูญเสียพลังงานโดยการชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) กลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) พลังงานประมาณ 0.03 eV ซึ่งเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานเหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน



รูปที่ 2.4 ลักษณะการนำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มาใช้ในงานถ่ายภาพ

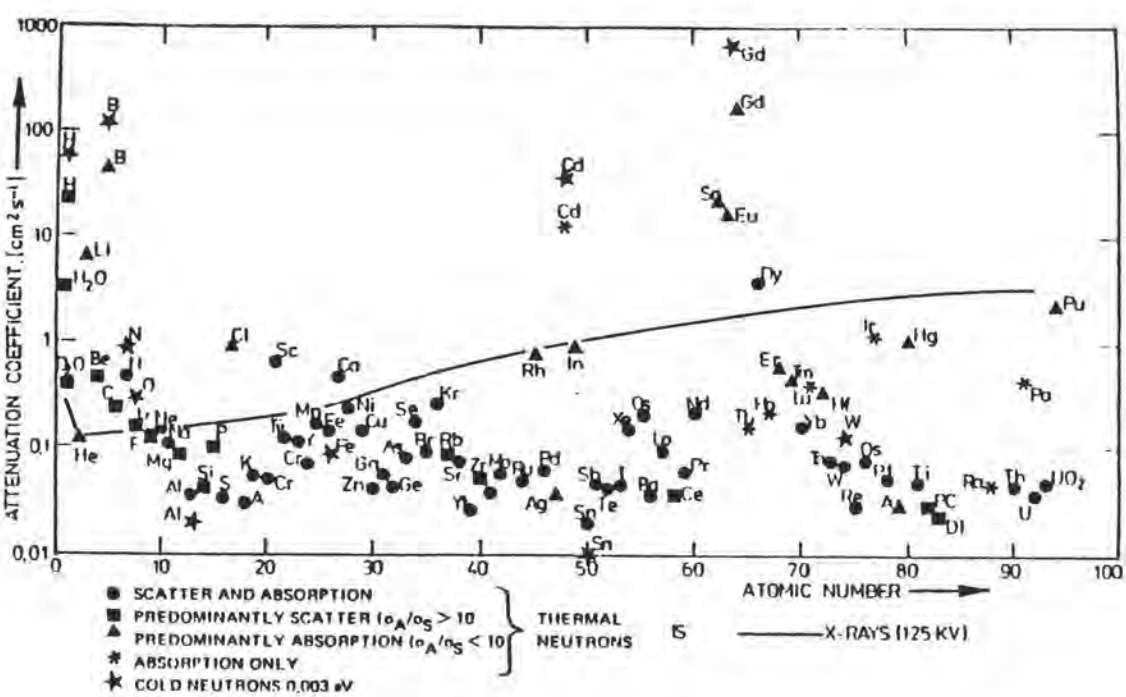
2.2 หลักของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

2.2.1 ทฤษฎีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เมื่อลำอนุภาคนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับวัตถุใดๆ จะเกิดอันตรกิริยาระหว่าง นิวตรอนและอนุภาคของตัวกลาง ทำให้พลังงานและความเข้มของนิวตรอนเปลี่ยนไปตาม โครงสร้างของตัวกลาง ซึ่งจะปรากฏในรูปของการกระจายความเข้ม ในลักษณะตั้งฉากกับ

ลำอนุภาคนิวตรอน ถ้าใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมบันทึกการกระจายความเข้มของนิวตรอนที่ส่งผ่านชิ้นงานก็จะทำให้เห็นเป็น ภาพฉาย (project) สองมิติ ของชิ้นงานนั้น

หลักการของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คล้ายกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา คือ ต้นกำเนิดรังสีจะปล่อยรังสีกระทบชิ้นงานที่ต้องการทราบโครงสร้างภายใน เกิดการลดพลังงานและลดความเข้มของรังสี จากนั้นผ่านไปยังอุปกรณ์บันทึกภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดภาพที่มีความเข้มต่างกันตามโครงสร้างภายในของชิ้นงาน แต่เนื่องจากความสามารถในการทะลุผ่านวัตถุของรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ต่างจากนิวตรอน จึงเกิดการนำไปใช้ประโยชน์กับวัตถุต่างชนิดกัน วัตถุซึ่งประกอบด้วยธาตุหนัก ได้แก่ เหล็ก ตะกั่ว บิสมัส หรือ ยูเรเนียม สามารถตรวจสอบโครงสร้างภายในได้ โดยการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ สำหรับธาตุเบา ได้แก่ ไฮโดรเจน ลิเทียม โบรอน แคดเมียม และธาตุหายากหลายชนิด แม้เป็นส่วนผสมในธาตุหนักก็สามารถตรวจสอบโครงสร้างภายในได้โดยการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนของธาตุต่างๆเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุไม่ขึ้นกับเลขอะตอม



รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficients)ของธาตุต่างๆสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนและรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกันจะเป็นผลให้ความเข้มของนิวตรอนลดลงไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงความเข้มของนิวตรอนเป็นผลให้เกิดค่าความดำบนอุปกรณ์รับภาพต่างๆกัน การเปลี่ยนแปลงความเข้มของนิวตรอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ คำนวณได้จาก

$$I/Io = e^{-N\sigma_t x} = e^{-\sum_t x} \quad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ I = ความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุไปได้

I_o = ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุ

N = จำนวนนิวไคลด์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของวัตถุที่เป็นเป้า

σ_t = total microscopic cross section (cm^{-2})

X = ความหนาของวัตถุ (cm)

$\sum t$ = total macroscopic cross section (cm^{-1})

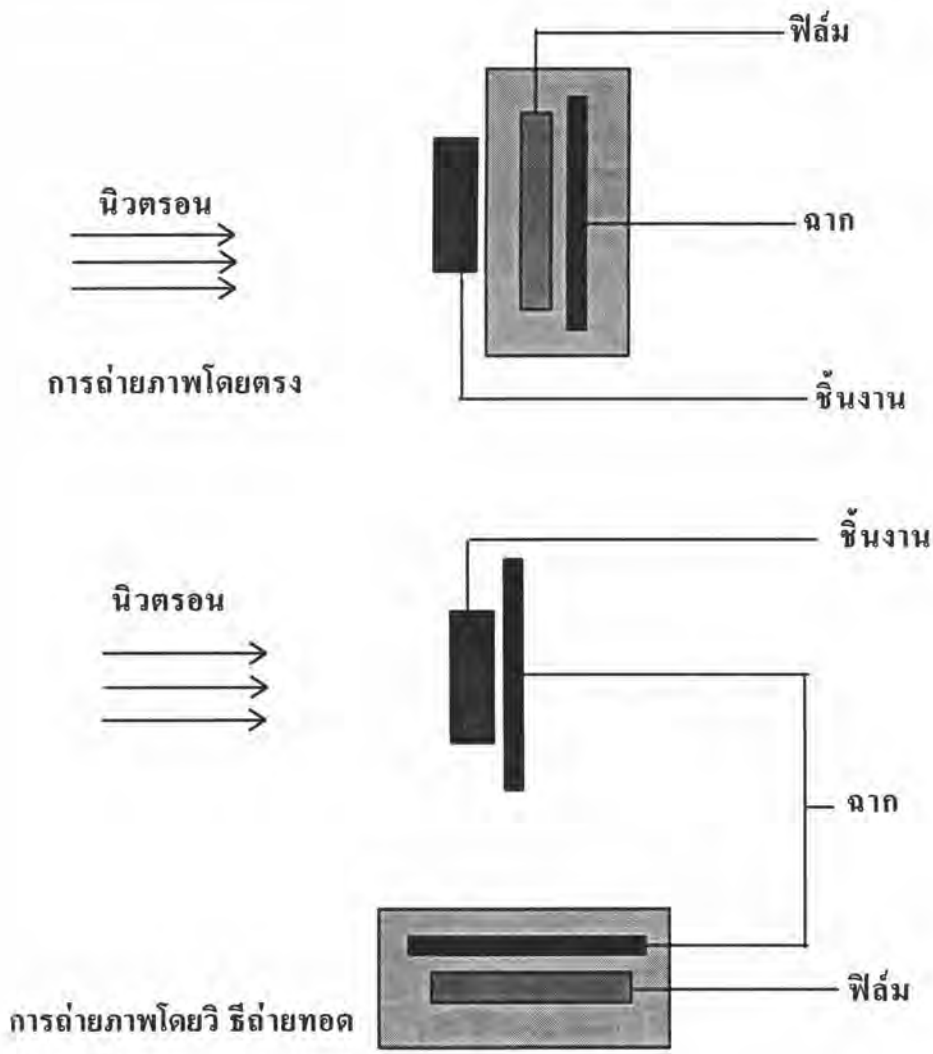
จากสมการที่ (1) ถ้าวัตถุใดประกอบด้วยธาตุซึ่งมีค่า σ_t กับนิวตรอนสูง นิวตรอนจะทะลุผ่านวัตถุนั้นได้น้อยเพราะนิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยากับวัตถุดังกล่าวได้มาก ในทางกลับกันถ้าวัตถุมีค่า σ_t น้อยนิวตรอนก็จะทะลุผ่านวัตถุได้มากทำให้อุปกรณ์รับภาพมีความเข้ม แตกต่างกัน แต่ความเข้มที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการกระทำโดยตรงของนิวตรอนกับอุปกรณ์รับภาพ หรือนิวตรอนกับตัวกลาง แต่เกิดจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับวัสดุที่ใช้ทำฉาก ทำให้เกิดความไม่เสถียร ของวัสดุที่ใช้ทำฉากแล้วปล่อย อนุภาคหรือรังสี หรือให้แสงสว่างออกมาซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์รับภาพอีกทีหนึ่ง

2.2.2 วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแยกตามวิธีการปฏิบัติได้ 2 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีประโยชน์และมีความเหมาะสมกับงานต่างกัน วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทั้ง 2 วิธี ได้แก่ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยตรง (direct technique) และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีการถ่ายทอด (transfer technique)

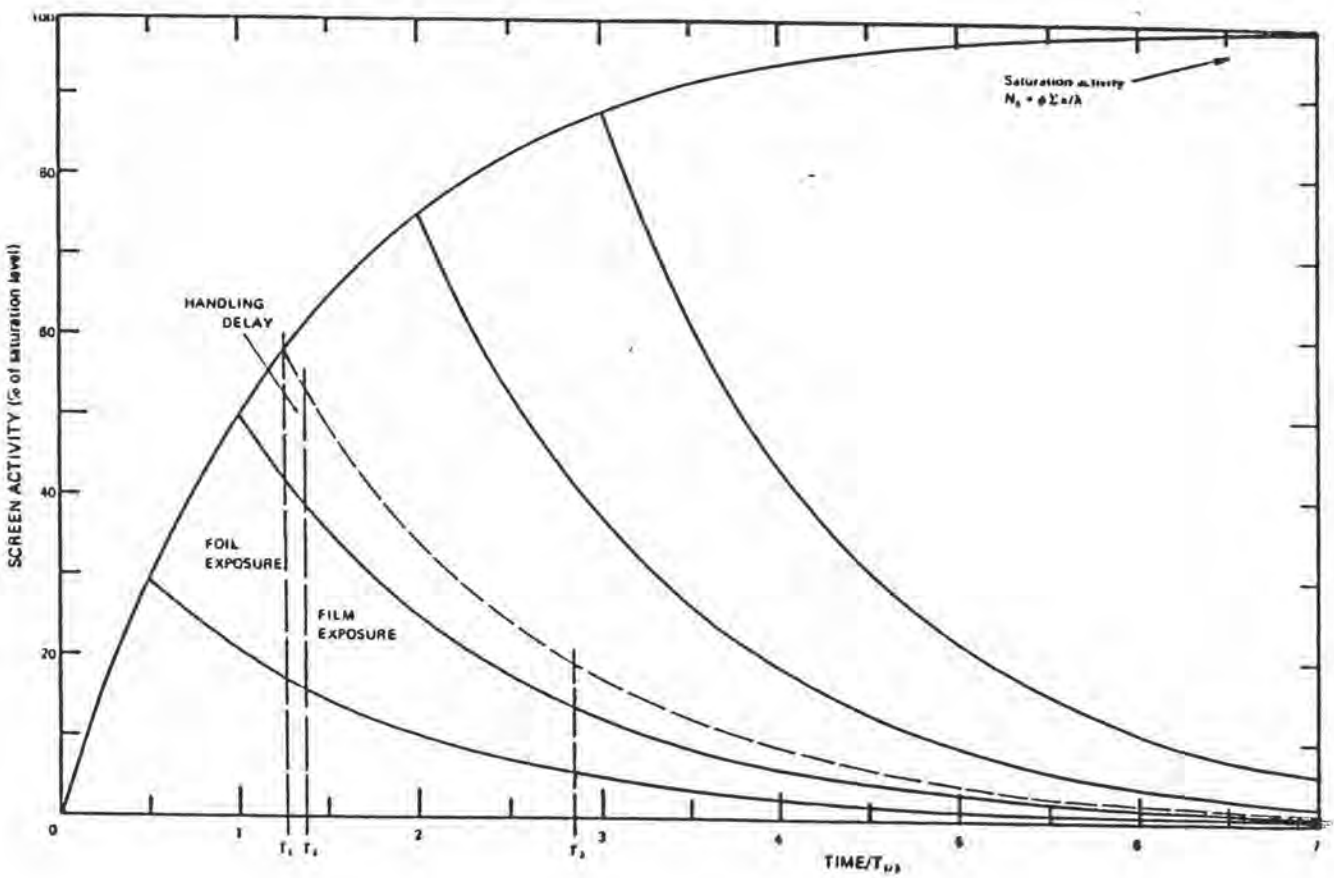
2.2.2.1 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยตรง (direct technique) คือวิธีการถ่ายภาพ โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับฉาก แล้วให้อนุภาคหรือรังสีหรือให้แสงสว่างออกมาซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดกับฟิล์มทันทีขณะถ่ายภาพ ดังนั้นในการถ่ายภาพต้องวาง

แผ่นฟิล์มให้ติดสนิทกับฉาก โดยมีชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบมาวางไว้ข้างหน้าแผ่นฟิล์มดังรูปที่ 2.5 เมื่อลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุก็จะทำให้เป็นภาพปรากฏบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งบนแผ่นฟิล์มนั้นจะแสดงรายละเอียดของภาพด้วยระดับความขาวดำ โดยส่วนที่ดำมากหมายถึงปริมาณนิวตรอนทะลุผ่านวัตถุนั้นได้มากและส่วนที่ดำน้อยกว่าหมายถึงปริมาณนิวตรอนทะลุผ่านวัตถุ นั้นได้น้อย วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยตรงนั้นมีวิธีปฏิบัติง่ายและประหยัดเวลา แต่จะมีปัญหาเรื่องการรบกวนของรังสีแกมมาในขณะถ่ายภาพ ทำให้ฟิล์มขุ่น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขุ่นเนื่องจากรังสีแกมมา (gamma fogged) ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยตรง จึงไม่เหมาะกับการใช้ฟิล์มเอกซ์เรย์ถ่ายภาพวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสี



รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีการถ่ายโดยตรงและโดยวิธีถ่ายทอด

2.2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด (Tranfer techique) เป็นวิธีการถ่ายภาพ โดยนิวตรอนวิ่งผ่านวัตถุที่ใช้ตรวจสอบแล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับฉาก ทำให้ฉากเกิดไอโซโทปรังสีขึ้น แล้วจึงนำฉากมาประกบกับแผ่นฟิล์ม ดังนั้นฉากบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนได้มากจะมีกัมมันตภาพรังสีสูง มีผลให้ฟิล์มดำมาก และฉากบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนน้อยจะมีกัมมันตภาพรังสีต่ำมีผลให้ฟิล์มดำน้อย



รูปที่ 2.7 กัมมันตภาพรังสีบนฉากขณะทำการถ่ายภาพ และการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด

จากรูป 2.7 สามารถคำนวณหากัมมันตภาพรังสี (activity) หรืออัตราการสลายตัวต่อเวลาภายหลังการอาบรังสี ของธาตุที่นำมาใช้ทำฉากได้จาก

$$S = N\sigma \varnothing (1 - e^{-\lambda T}) \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ S คือ อัตราการสลายตัวต่อเวลา (dps)

N คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่นำมาใช้ทำฉาก

σ คือ ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา

$\varnothing$ คือ นิวตรอนฟลักซ์

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัว เท่ากับ $0.693/\tau$

τ คือ ค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่นำมาใช้ทำฉาก

T คือ เวลาที่ใช้ในการอาบรังสีของฉาก

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีนี้มีประโยชน์ในการถ่ายภาพวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสี เช่น ต้นกำเนิดรังสีต่างๆ , เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และในกรณีบริเวณที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีปริมาณรังสีแกมมาสูง

การพัฒนาการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีคุณภาพดีต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการได้แก่ (1)ต้นกำเนิดนิวตรอน (2) การออกแบบและประสิทธิภาพของท่อบังคับลำรังสีนิวตรอน (3)ฟิล์มและกระบวนการล้างฟิล์ม (4)การวางตำแหน่งในการถ่ายภาพ และ (5) ชนิดและคุณสมบัติของฉาก

2.3 ฉากที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ฉาก(screen) เป็นอุปกรณ์สำคัญชิ้นหนึ่งในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพของฉาก โดยเฉพาะฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน ซึ่งเป็นฉากที่ให้ความไวในการถ่ายภาพสูงได้มีการพัฒนาโดยนักวิทยาศาสตร์ตามลำดับดังนี้

G.Matsumoto, M.Teramra, K.Okubo and Y.IKeda ปีพ.ศ. 2527 ได้ผลิตฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน ชนิดที่ใช้โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นสารดูดกลืนนิวตรอน แล้วปล่อยรังสีอัลฟา และใช้สังกะสีซัลไฟด์(เงิน)เป็นสารเรืองแสง สำหรับใช้ในงานถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยมีต้นกำเนิดรังสีเป็นเครื่องเร่งอนุภาค และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ซึ่งให้นิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ $1x10^5$ ถึง $1x10^6$ $n/cm^2/s$ ที่ประเทศญี่ปุ่น การทดลองแบ่งออก

เป็น 2 ช่วง คือ การหาสัดส่วนโดยน้ำหนักที่ เหมาะสมระหว่างสารที่นำมาทำฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนได้แก่ โบรอนไนไตรด์(BN),สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) (ZnS(Ag)) และ โพลีเอธิลีน แล้วนำมาทดสอบคุณภาพของฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน แต่ละแผ่นโดยนำไปถ่ายภาพกับฟิล์มเอกซ์เรย์หนา 0.8 มิลลิเมตร และทำการเปรียบเทียบรายละเอียดของภาพถ่ายโดยใช้การประเมินค่าจาก IQIs การทดลองได้ผลดังนี้

1.สัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับผลิตฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน BN/ZnS(Ag) เท่ากับ 1.5/1 และปริมาณของโพลีเอธิลีนต้องมากกว่า 10 %ของน้ำหนักทั้งหมด

2. ความไวของฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน BN/ZnS(Ag) ต่ำกว่าฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน NE-426 เล็กน้อย

3.ฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน BN/ZnS(Ag) ให้รายละเอียดดีกว่าฉากเรืองรังสีนิวตรอน NE-426

4. คุณภาพของภาพถ่ายจากการใช้ฉากเรืองรังสีนิวตรอน BN/ZnS (Ag) ดีกว่าฉากเรืองรังสีนิวตรอน NE-426

M.Maeda, N. Watanabe, Kanagawa ปีพ.ศ.2529 ทำการผลิตฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมดังนี้คือ (1) ยางโอลิฟีน (olefin rubber) 100 ส่วน (2) สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) 100-600 ส่วน (3) สารอินทรีย์ในรูปสารประกอบลิเทียมหรือโบรอน ได้แก่ โบรอนไนไตรด์หรือลิเทียมฟลูออไรด์ในปริมาณ 100-400 ส่วน และ (4)สารอินทรีย์พวกเปอร์ออกไซด์หรือกำมะถันประมาณ 0.1-10 ส่วน แล้วนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ทริการ่น 2 (Triga model 2)ซึ่งให้นิวตรอนฟลักซ์ออกมาที่ตำแหน่งถ่ายภาพเท่ากับ $1.0x10^{6}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยใช้ฟิล์มโกดัก ชนิด AA ผลที่ได้จากทดลองพบว่า ฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนที่ผลิตขึ้นนี้ให้ความไวและรายละเอียดของภาพดีมาก เป็นฉากที่มีความแข็งแรง ทนทานและราคาต้นทุนการผลิตต่ำ

Y.Suzuki , N.Miura , E.Hiraoka , M.Fujishiro , S.okuda , R.Taniguchi , S.Tazama ,K.Yoneda , K.okamoto , T.Tsujimoto and K.Katsurayama ปีพ.ศ. 2533 ได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนาฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน 2 ชนิด คือ ^{6}LiF/ZnS(Ag) และ

Gd_2O_3/ZnS(Ag) โดยทำการผสมสารดังกล่าวในอัตราส่วนต่างๆกัน ถึง 50 ตัวอย่างแล้วนำมาทดสอบคุณภาพกับฟิล์ม เซลลูโลสอะซิเทต หนา 5 ไมครอน ส่วนต้นกำเนิดรังสีที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และเครื่องเร่งอนุภาค จากผลการทดลอง พบว่าฉากรังสีนิวตรอนชนิด ^{6}LiF/ZnS(Ag) ที่ผลิตขึ้นมานั้นเป็นฉากที่มีความไวสูงกว่าฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน Gd_2O_3/ZnS(Ag) 50 เท่า และมีความไวสูงกว่าฉากโลหะแกโดลิเนียม 100 เท่า พบว่า ความคมชัดของภาพถ่ายจากฉาก ^{6}LiF/ZnS(Ag) เพิ่มขึ้นจนถึง 90%ของฉากโลหะแกโดลิเนียม ดังนั้น ฉากชนิดนี้จึงมีความไวสูงกว่า และให้คุณภาพของภาพถ่ายดีกว่า NE-426

ฉากเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนนิวตรอนให้อยู่ในรูปที่สามารถทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์บันทึกภาพ ซึ่งในที่นี้คือ ฟิล์ม จึงเรียกฉากว่าเป็นแผ่นเปลี่ยนรังสี (converter screen) และเมื่อเลือกชนิดของฟิล์มให้เหมาะกับชนิดของฉากแล้ว ผลผลิตจากฉากดังกล่าว หรือรังสีทุติยภูมิ จะมีผลต่อความเข้มบนแผ่นฟิล์มสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ฉากที่นิยมใช้มี 3 ประเภท ตามลักษณะการปล่อยรังสีทุติยภูมิ ดังนี้

2.3.1 ฉากเรืองแสง (light emitting screen หรือ scintillation converter screen) เป็นฉากให้ความไวในการถ่ายภาพสูงสุดใช้ได้ดีแม้กับต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีความเข้มของนิวตรอนต่ำๆ ฉากชนิดนี้ประกอบด้วย สารดูดกลืนนิวตรอน และ สารเรืองแสง (phospor) สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ได้แก่ ลิเทียม-6 และโบรอน-10 เนื่องจากภายหลังเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนกับนิวตรอนแล้ว จะให้รังสีอัลฟาพลังงานสูงแต่มีพิสัยต่ำ ดังปฏิกิริยา

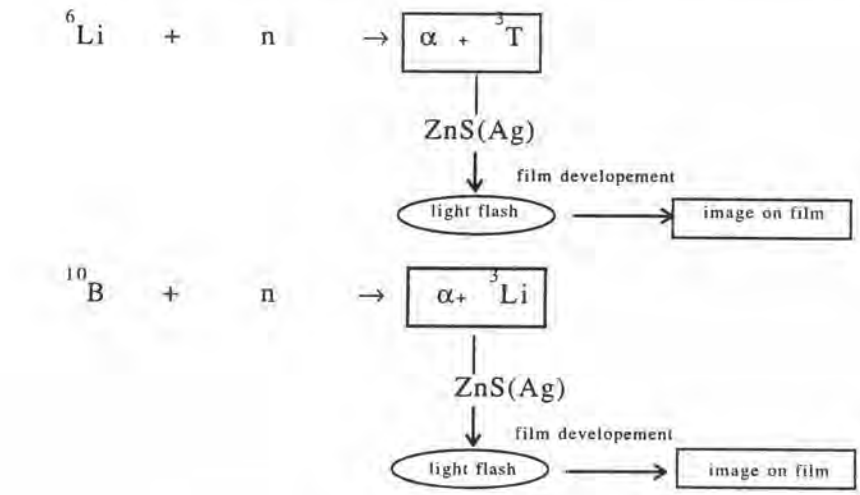
$$^{6}\text{Li} + n \rightarrow {}^{3}\text{H}(2.675\ \text{MeV}) + {}^{4}\text{He}(2.111\ \text{MeV})$$

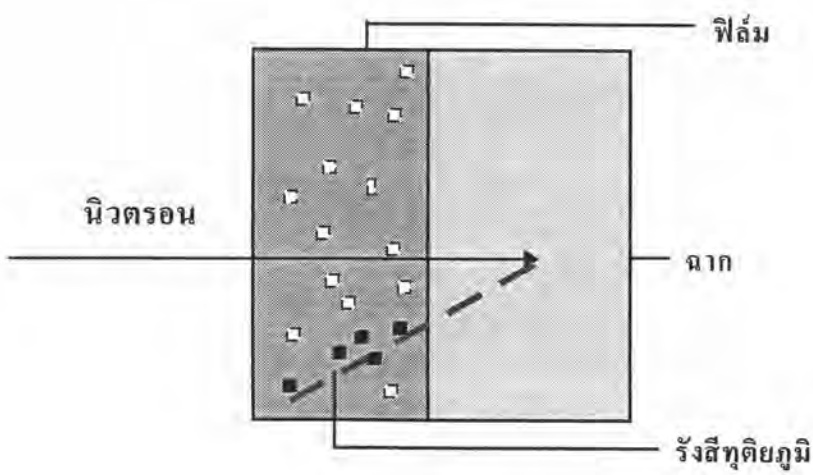
$$^{10}\text{B} + n \rightarrow {}^{7}\text{Li}(1.01\ \text{MeV}) + {}^{4}\text{He}(1.78\ \text{MeV})\ (6.1\%)$$

$$\rightarrow {}^{7m}\text{Li}(0.84\ \text{MeV}) + {}^{4}\text{He}(1.47\ \text{MeV})\ (93.9\%)$$

$$^{7m}\text{Li} \rightarrow {}^{7}\text{Li} + \gamma\ (0.478\ \text{MeV})$$

ส่วนสารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) ซึ่งจะให้แสงออกมาในช่วงแสงสีน้ำเงินความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร ภายหลังการถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคอัลฟา จากลิเทียม-6 หรือโบรอน-10 ดังนั้น ฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นดังกล่าว คือ ฟิล์มไวแสงชนิดออโธโครมาติก (orthochromatic photographic film) หรือฟิล์มเอกซเรย์ (X-radiographic film) ปฏิกิริยาการเกิดภาพบนฟิล์มของฉากชนิดนี้ คือ





รูปที่ 2.8 ภาพจำลองการทำให้เกิดความดำขึ้นบนแผ่นฟิล์ม โดยฉากเรืองแสง

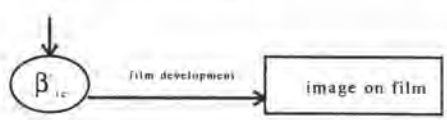
ตัวอย่างของฉากชนิดนี้ได้แก่ NE-421 , NE-425 , NE-426 ซึ่งผลิตโดยบริษัท NE Technology ประเทศอังกฤษ ฉากทั้ง 3 ชนิดนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ ใช้ลิเทียมฟลูโอไรด์ (LiF) ที่เพิ่มความเข้มข้นของ ลิเทียม-6 เป็นสารดูดกลืน

นิวตรอน และ ใช้สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) เป็นสารเรืองแสง ส่วนสารยึดเหนี่ยวที่ใช้สำหรับ NE-421 คือ เพอร์สเปก (perspex) และสารยึดเหนี่ยวสำหรับ NE-425 และ NE-426 คือ โพลีเอธิลีน นอกจากนั้นยังมีฉาก $Gd_2O_2S(Tb)$ หรือ เรียกว่า ฉาก GTS เป็นฉากที่มีความไวต่ำกว่าฉาก NE ทั้ง 3 ชนิด แต่ให้รายละเอียดของภาพสูงกว่า เนื่องจากมีโลหะแกโดลิเนียมเป็นสารดูดกลืนนิวตรอนและ เทอร์เบียม(Tb) เป็น สารเรืองแสง ซึ่งจะให้แสงในช่วงแสงสีเขียว ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ตัวอย่างอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ NE-905 ประกอบด้วย ลิเทียม-6 ในปริมาณสูงถึง 6 %และใช้ cerium oxide -activated silicate glass เป็นสารเรืองแสง ซึ่งจะให้แสงในช่วงแสงสีน้ำเงิน ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ข้อดีของฉากชนิดนี้ คือ เป็นฉากที่ให้ความไวสูงสุดเหมาะกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนพลังงานต่ำทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการปฏิบัติงานแต่ฉากชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ให้ความคมชัดและรายละเอียดของภาพไม่ดี

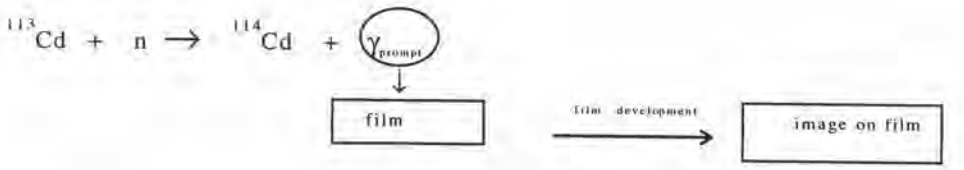
2.3.2 ฉากโลหะ (metal foil screen) เป็นฉากที่ให้รังสีทุติยภูมิในรูปของรังสีแกมมา , รังสีเบตา , และอิเล็กตรอน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.3.2.1. ฉากโลหะสำหรับงานถ่ายภาพโดยตรง ตัวอย่างของฉากชนิดนี้ได้แก่ ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gd)และฉากโลหะแคดเมียม(Cd) มีภาคตัดขวางของการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนของ ^{157}Gd เท่ากับ 254,000 บาร์น และ ^{113}Cd เท่ากับ 20,000 บาร์น โดยทั่วไปถึงแม้โลหะแกโดลิเนียมจะเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาออกมาทันทีแต่รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ทำให้เกิดความดำบนฟิล์มโดยตรง ความดำบนฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากอิเล็กตรอนที่ได้ภายหลังปฏิกิริยา internal conversion ของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันทีเรียกว่า internal conversion electrons มีค่าพลังงานหลายค่า ได้แก่ 71,81,131,173 keV แต่จาก การศึกษาพบว่า ความดำบนแผ่นฟิล์มส่วนใหญ่เกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 71 keV

$$^{157}Gd + n \longrightarrow {}^{158}Gd + \gamma(\text{internal conversion})$$



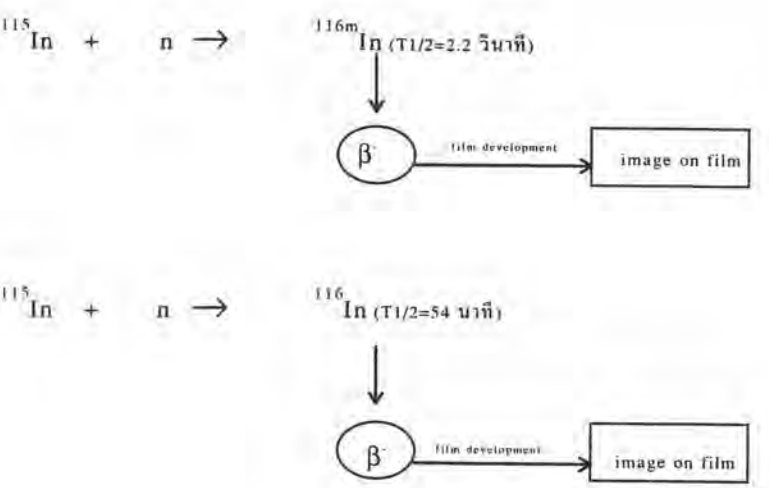
ส่วนโลหะแคดเมียมจะทำให้เกิดความดำบนแผ่นฟิล์มโดยปฏิกิริยา(n,γ) ดังนี้

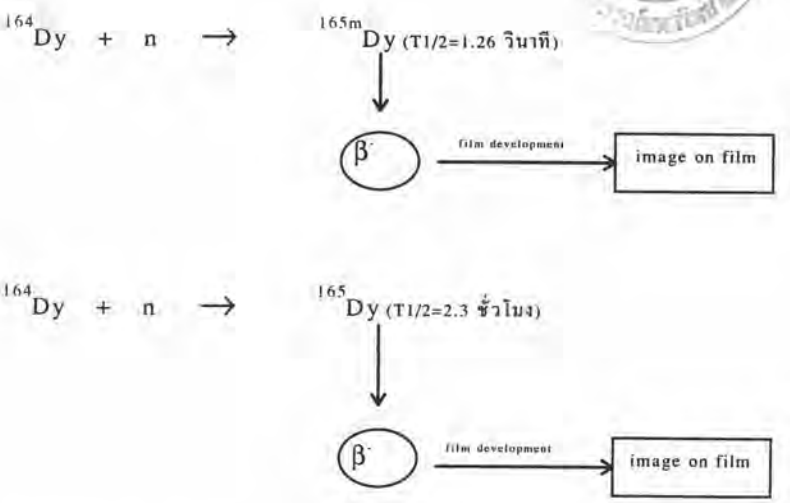


ฉากชนิดนี้ สามารถใช้ในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแล้วทำให้ได้ภาพถ่ายที่มีความชัดและรายละเอียดของภาพสูงกว่าฉากเรืองแสง แต่ความไวในการถ่ายภาพต่ำกว่า นอกจากนั้นฉากชนิดนี้ยังมีราคาแพง

ฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับฉากชนิดนี้ คือ ฟิล์มเอกซ์เรย์ เช่น Kodax Type R และ Agfa - Gevaert D2 เป็นต้น

2.3.2.2 ฉากโลหะสำหรับงานถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอด โดยปกติเมื่อนำฉากเรืองแสง หรือฉากโลหะไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ภาพถ่ายที่ได้จะถูกรบกวนด้วยรังสีแกมมา ทำให้ได้ภาพถ่ายมีคุณภาพต่ำ แต่ถ้าใช้ฉากโลหะสำหรับงานถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอด จะตัดปัญหาเรื่องการรบกวนของรังสีแกมมามีประโยชน์สำหรับใช้ถ่ายภาพวัสดุซึ่งมีกัมมันตภาพรังสี เช่น แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เป็นต้น วัสดุที่ใช้เป็นฉากชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนสูง แล้วให้รังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตเหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดภาพบนแผ่นฟิล์ม ตัวอย่างเช่น อินเดียม(In), ดิสโปรเซียม(Dy), ทอง(Au) และยูโรเพียม (Eu) ปฏิกิริยาการให้รังสีทุติยภูมิของฉากชนิดนี้ คือ





เทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้ฉากโลหะสำหรับการถ่ายทอดนี้ ถ้าใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีความเข้มต่ำจะทำให้ภาพที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ขาดความคมชัด ส่วนฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับฉากชนิดนี้ คือ ฟิล์มเอกซ์เรย์

ตารางที่2.3คุณสมบัติบางประการของฉากโลหะสำหรับงานถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอด

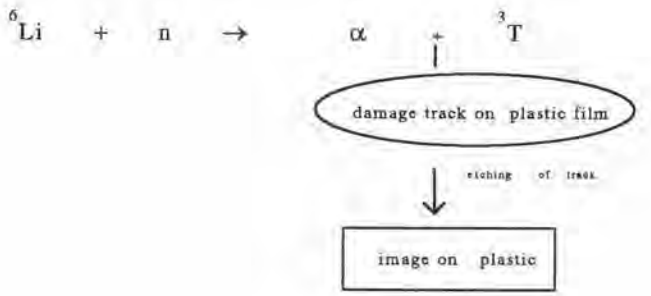
screen metal	activation cross-section (mm-1)	absorption in 100 μm screen (%)	$\lambda(s^{-1})$	thermal neutron beam intensity for exposure times of 10^3 s(cm^{-2} s^{-1})	activity after 10^3 s in beam of $10^7 cm^{-2} s^{-1}$ ($\mu Ci \cdot cm^{-2}$)
In	0.73	7.3	2.14×10^{-4}	4×10^5	4.2
Dy	3.01	26	8.24×10^{-5}	10^5	5.8
Au	0.58	5.6	2.98×10^{-6}	5×10^5	0.05
Eu	8.90	59	2.09×10^{-5}	4×10^4	3.3

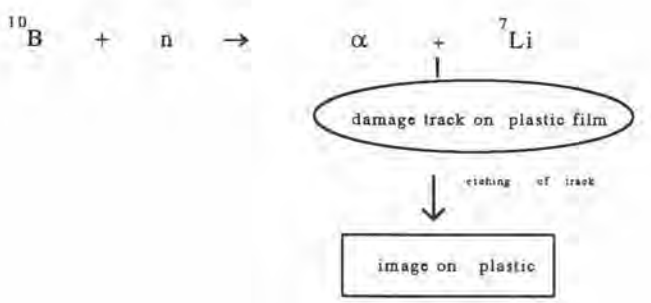
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติบางประการของสารเคมีที่นำมาใช้ทำฉากแทรก-เอดช์

material	ρ(nat.) (g/cm^{-3})	active isotope	natural abundance	$\Sigma(n,\alpha)$ natural (mm-1)	$\Sigma(n,\alpha)$ enriched (mm-1)	α-range (μm)	neutron natural (%)	absorption enriched (%)
LiF	2.64	^6Li	7.42	0.43	5.9	7.5	0.3	4.3
B_4C	2.52	^{10}B	19.6	8.8	45	5.8	4.0	23

2.3.3 ฉากแทรก-เอตช์ (track-etch screen) เป็นฉากที่นำคุณสมบัติการดูดกลืนนิวตรอน แล้วให้อนุภาคอัลฟาของสารประกอบ ลิเทียม-6 และโบรอน-10 มาใช้ ในรูปของสารประกอบ ลิเทียมฟลูออไรด์(LiF) และโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) ฟิล์มที่นิยมใช้กันมาก คือ เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) หรือ ฟิล์มโกดักซีเอน 85 ชนิด B (Kodax CN85 type B) ซึ่งเคลือบผิวฟิล์มไว้ด้วย สารประกอบลิเทียมเตตราบอเรต ($Li_2B_4O_7$)คุณสมบัติบางประการ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

การถ่ายภาพโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ อาศัยหลักการ เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุบางชนิด เช่น ไมกา แก้ว และพลาสติกจะเกิดรอยอนุภาคขึ้น ถ้านำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นรอยนั้นชัดเจนขึ้นปฏิกิริยาการเกิดรอย(track) ระหว่าง ฉากแทรก-เอตช์ กับนิวตรอนคือ





การกัดขยายรอยพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนตและเซลลูโลสไนเตรตจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 6.5 นอร์มัลกัดขยายรอยใช้อุณหภูมิในการกัดขยายรอย 70 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที หรือที่ 55 องศาเซลเซียส นาน 4 นาที จากนั้นใช้น้ำสะธรรมดาล้างสารละลายออก และถ้าหากจำเป็นก็นำมากัดขยายรอยใหม่ได้อีก สำหรับวัสดุ

ไมกาและแก้ว จะใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid,HF) เป็นสารกัดขยายรอยอนุภาค

เทคนิคแทรก-เอตช์ มีข้อจำกัด คือ ภาพถ่ายที่ได้จะมีคอนทรัสต์ต่ำ (low contrast) จึงไม่ควรอ่านผลโดยตรง แต่ให้ใช้เทคนิคการอัดภาพแบบธรรมดาเข้าช่วย เช่น ใช้ฟิล์มที่มีคอนทรัสต์สูง ใช้แสงไฟเพิ่มคอนทรัสต์จะทำให้อ่านผลของฟิล์มดีขึ้น

2.4 ฟิล์ม

ในปัจจุบันไม่มีฟิล์มสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเฉพาะ ดังนั้น ในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอนยังคงต้องใช้ฟิล์มเอกซ์เรย์ หรือ ฟิล์มไวแสง (photographic film) เป็นอุปกรณ์รับภาพ ที่มีขั้นตอนการปฏิบัติไม่ยุ่งยาก ประหยัดเวลา สามารถเห็นผลได้ทันที และสามารถเก็บไว้เป็นหลักฐานได้

2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญของฟิล์มถ่ายภาพประกอบด้วย

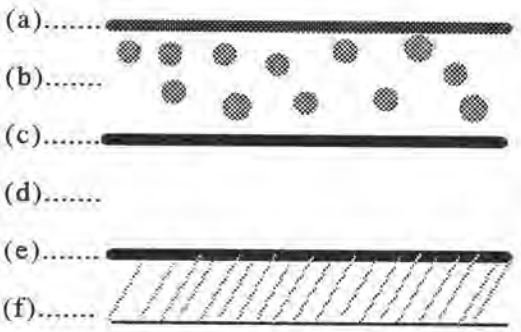
2.4.1.1 ฐานรองรับตัวยาไวแสง(base) ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเทต (cellulose acetate) เป็นสารประกอบที่ทำมาจากใยฝ้ายบริสุทธิ์(cotton) และเยื่อไม้ที่เลือกสรรแล้วมาผสมกับปิโตรเคมีคอล (petrochemical)

2.4.1.2 ตัวยาไวแสง (photosensitive emulsion) เป็นส่วนที่ได้มาจากการผสมกัน ระหว่างผลึกเงินเฮไลด์ (silver halide) เช่น เงินคลอไรด์ (silver chloride) ,เงินโบรไมด์ (silver iodide) กับกาวหนังสัตว์ เรียกว่า เจลาติน (gelatin) แล้วนำไปเคลือบบางๆบนส่วนฐาน ผลึกเงินเฮไลด์ที่ใช้มีขนาด(grain) ตั้งแต่ 0.1 - 3 ไมครอน แล้วแต่ชนิดของฟิล์ม ซึ่งเป็นผลให้ฟิล์มแต่ละชนิดมีรายละเอียดและความไวต่างกัน

2.4.1.3 ตัวกลางเชื่อมตัวยาไวแสงกับฐาน(adhesive subcoating) เป็นสารจำพวก เซลลูโลสเอสเตอร์(celluose ester) ทำหน้าที่ยึดตัวยาไวแสงให้เกาะติดแน่นกับฐานรองรับตัวยาไวแสง

2.4.1.4 ผิวหน้าของฟิล์ม (protective overcoating) เคลือบสารป้องกันการขูดขีด (antiabrasion) ในขณะที่ทำการถ่ายภาพ หรือ ในขั้นตอนการล้างฟิล์ม

2.4.1.5 ด้านหลังของฟิล์มเคลือบไว้ด้วยสารป้องกันไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับ(antihalation backing) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงๆ (flare) ในกรณีที่ถ่ายภาพวัตถุที่มีการสะท้อนแสงมากๆ



รูปที่ 2.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม

โดย (a) คือ protective overcoating
(b) คือ emulsion
(c),(e) คือ adhesive subcoating
(d) คือ base
(f) คือ antihalation backing

2.4.2 ประเภทของฟิล์ม แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.4.2.1 ฟิล์มเนกาทิฟ (negative film) เมื่อล้างแล้วจะได้ภาพที่มีน้ำหนักดำ ขาวหรือมีสีตรงข้ามจากความจริงต้องนำมาอัดหรือขยายอีกครั้งจึงจะได้ภาพตรงตามความจริง

2.4.2.2 ฟิล์มพอซิทิฟ (positive film) ใช้สำหรับอัดภาพ (print) จากฟิล์มเนกาทิฟ เมื่อล้างครบตามกระบวนการจะได้ภาพที่มีน้ำหนักดำขาวหรือมีสีตรงกับวัตถุจริง

2.4.2.3 ฟิล์มรีเวอร์เซล (reversal film) เป็นวัสดุที่มีเยื่อไวแสงเนกาทิฟ และโพสิทิฟรวมกัน เมื่อล้างตามกระบวนการแล้วจะได้ภาพมีสีตรงตามจริง เช่น ฟิล์มสไลด์

2.4.3 ความไวแสงของฟิล์ม หมายถึง ประสิทธิภาพของฟิล์มต่อการทำปฏิกิริยากับแสงสว่างได้มากน้อยเพียงใด ฟิล์มที่มีความไวแสงมากย่อมจะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับแสงสว่างได้ดีกว่าฟิล์มที่มีความไวแสงน้อย การบอกค่าความไวแสงของฟิล์มเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งาน มีวิธีใช้อยู่ 3 วิธี คือ

2.4.3.1 American Stardard Association (ASA) เป็นระบบวัดความไวแสงที่นิยม แพร่หลายทั่วไป ระบบนี้ง่ายต่อการคิดคำนวณ เช่น ฟิล์มที่มีค่า 100 ASA จะมีความไวแสงมากเป็นสองเท่าของฟิล์มที่มีค่า 50 ASA เป็นต้น

2.4.3.2 Deutsche Industrie Norm (DIN) ถ้าค่าความไวแสงของฟิล์มในระบบนี้มี ค่าตัวเลขต่างกันเท่ากับ 3 แสดงว่าความไวแสงต่างกัน 2 เท่า เช่น ฟิล์มที่มีค่า 21 DIN จะมีค่าความไวแสงมากเป็นสองเท่าของฟิล์มที่มีค่า 18 DIN ค่าความไวแสง DIN ที่มีค่าเพิ่มหรือลดเป็นสเกลล็อก (log scale) มีความสัมพันธ์กับ ASA ดังนี้

$$DIN = 1 + 10 \log (ASA)$$

2.4.3.3 International Standard Organization (ISO) เป็นระบบวัดความไวแสงของ ฟิล์มที่ตกลงให้ใช้เป็นหน่วยเดียวกันในปัจจุบัน โดยมีลักษณะการรวมระบบ ASA และ DIN เข้าไว้ด้วยกัน ตัวอย่าง เช่น ISO32/16° เลข 32 หมายถึง ASA เดิม และ 16 หมายถึง DIN เดิม ดังนั้น ความไวแสงที่เขียนว่า ASA32/16 DIN จะหายไป

ค่าความไวแสงของฟิล์ม อาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับ (1) ขนาดของผลึกเงินเฮไลด์ (2) ความหนาของเยื่อไวแสง และ(3) กระบวนการล้างฟิล์ม

2.4.4 กระบวนการสร้างภาพบนฟิล์ม

การบันทึกลักษณะของวัตถุลงบนฟิล์ม เริ่มตั้งแต่เมื่ออนุภาครังสี หรือ แสงส่องผ่านวัตถุแล้วตกกระทบชั้นอิมัลชั่น (emulsion) ของฟิล์ม ซึ่งมีผลึกเงินเฮไลด์ กระจัดกระจายอยู่ บริเวณใดที่แสงตกกระทบก็จะทำให้ไอออนเงิน (Ag^+) ถูกรีดิวซ์ กลายเป็นโลหะเงิน(Ag) เกาะอยู่บนฟิล์มตามลักษณะของวัตถุนั้นเรียก ภาพแฝง (latent image)

อนุภาค ,รังสี,แสง ~~> $AgX \rightarrow Ag^+ + X^-$

เมื่อนำภาพแฝงนี้ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม โดยเคมีภัณฑ์ที่เหมาะสมจะทำให้ไอออนเฮไลด์ และ ไอออนเงินที่ไม่ถูกรีดิวซ์ หลุดจากแผ่นฟิล์มเหลือไว้แต่โลหะเงินเกาะติดอยู่บนแผ่นฟิล์ม ดังนั้น อนุภาค รังสีหรือแสง เมื่อตกกระทบบริเวณใดของฟิล์มก็จะทำให้บริเวณนั้นดำ

$$Ag^+ + X^- + (developer)^- \rightarrow Ag^0 + X^- + developer$$

2.4.5 กระบวนการล้างฟิล์ม

แบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอนดังนี้

2.4.5.1 การล้างฟิล์มโดยใช้น้ำยาสร้างภาพ (developer solution) มีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เป็นขั้นตอนในการทำให้ไอออนเงินกลายเป็นโลหะเงิน เกาะติดอยู่บนแผ่นฟิล์ม ทำให้ฟิล์มบริเวณนั้นมีสีดำ โดยปกติจะใช้เวลาในการล้างฟิล์มอยู่ในช่วง 5-8 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ในการปฏิบัติจริง เวลาในการสร้างภาพ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาสร้างภาพ ความเข้มข้นของน้ำยาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งต้องศึกษาตามคู่มือ สำหรับน้ำยาสร้างภาพแต่ละชนิด

2.4.5.2 หยุดการสร้างภาพโดยใช้น้ำ (stop bath) เป็นการหยุดการสร้างภาพบนแผ่นฟิล์ม คือ หยุดการเกิดโลหะเงิน

2.4.5.3 การคงสภาพ โดยใช้น้ำยาคงสภาพ (fixer) ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นด่างอ่อน ทำหน้าที่ละลายไอออนเงินที่ไม่ถูกแสงสว่าง หรือ เฮไลด์ไอออนออกจากแผ่นฟิล์ม เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีพื้นใส

2.4.5.4 การล้างน้ำ (washing) เป็นการล้างน้ำยาคงสภาพให้หลุดออกจากแผ่นฟิล์มให้หมด มิฉะนั้นน้ำยาคงสภาพที่เหลือติดอยู่บนฟิล์ม จะทำให้แผ่นฟิล์มเป็นคราบสีเหลืองและเสียไปในที่สุด

2.4.5.5 การทำให้แห้ง (drying) ต้องทำให้ฟิล์มแห้งสนิทก่อนที่จะนำไปเก็บรักษาไว้เป็นหลักฐานต่อไป

2.5 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่าย

การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายเป็นกระบวนการใช้ทดสอบคุณภาพของระบบและอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ ในปัจจุบันมีการตรวจสอบที่นิยมใช้กำหนดคุณภาพของภาพถ่ายดังนี้

2.5.1 ค่าความดำบนฟิล์ม เป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของอนุภาค ,รังสี หรือแสงกับฟิล์ม หรือในกรณีของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ค่าความดำบนฟิล์มที่เกิดขึ้น หมายถึงความสามารถในการเปลี่ยนรังสีนิวตรอนเป็น รังสีทุติยภูมิหรือ แสงของฉากหรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างรังสีทุติยภูมิ กับผลึกเงินเฮไลด์ของ

ฟิล์ม อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม คือ เครื่องเดนซิโตมิเตอร์ (densitometer)เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความทึบแสงของวัตถุให้เป็นค่าที่อ่านได้โดยใช้หลักการทะลุผ่าน (transmission) ของแสงเรียกว่าค่า ออปติคอล เดนซิตี (optical density)หาได้จากสูตร

optical density = d = 0.43Na .....(2.3)

เมื่อ N คือ จำนวนเม็ดของเงินเฮไลด์ที่เกิดการสร้างภาพ (grain/cm^2)

a คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ตัดขวางของเม็ดเงินเฮไลด์ 1 เม็ด(cm^2)

หรือหาได้จาก

optical density = d = log Io/I .....(2.4)

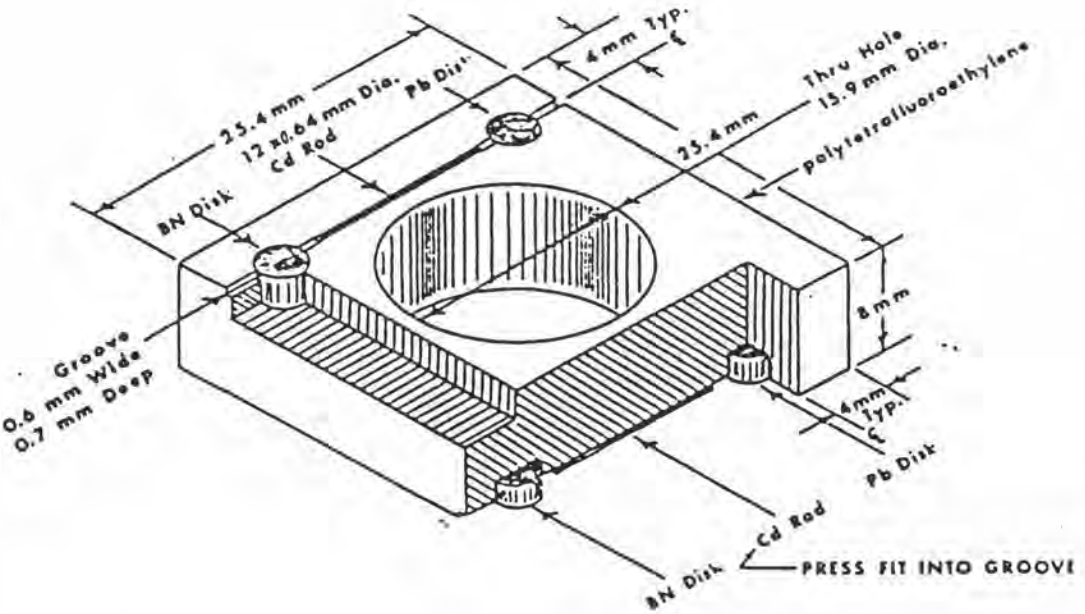
เมื่อ Io คือ ความเข้มของแสงที่ออกจากต้นกำเนิดแสงและยังไม่ผ่านฟิล์ม

I คือ ความเข้มของแสงเมื่อผ่านแผ่นฟิล์มแล้ว

2.5.2 การทดสอบความไว(sensitivity)ของภาพถ่าย

แยกพิจารณาการทดสอบเป็น 2 แบบ คือ (1) การทดสอบในเชิงปริมาณ และ (2) การทดสอบในเชิงคุณภาพ

2.5.2.1 การทดสอบในเชิงปริมาณ (quantitative determination) เป็นการทดสอบ โดยใช้วิธีกำหนดคุณภาพของลำรังสีนิวตรอนเป็นเกณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ คือ beam purity indicator (BPI) จัดเป็น Image Quality Indicator หรือ เรียกว่า IQIs ชนิดหนึ่ง ผลิตโดย The American Society for Testing and Material (ASTM) ประกอบด้วยวัสดุหลัก คือ เตตราฟลูออโรคาร์บอน (TFE) รูปร่างเป็นท่อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส หนา 8 มิลลิเมตร ขนาด 25.4 x 25.4 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะช่องกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ที่บริเวณมุมทั้ง 4 ของท่อนเตตราฟลูออโรคาร์บอน ประกอบด้วย แผ่นโบรอนไนไตรด์ (BN) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร 2 ชิ้น และแผ่นตะกั่วขนาดเท่ากัน และเส้นแคดเมียม หนา 0.6 มิลลิเมตรยาว 12 มิลลิเมตร 2 เส้น ในแนวระหว่างแผ่นโบรอนไนไตรด์ กับแผ่นตะกั่ว ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 beam purity indicator

ภาพหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแล้วนำฟิล์มไปอ่านค่าความดำที่บริเวณต่างๆ แล้วนำไปคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

สัดส่วนของเทอร์มัลนิวตรอนที่อยู่ในลำรังสีนิวตรอน (effective thermal neutron content ,NC)

$$NC = \frac{Dh - (\text{highest } Db + \Delta Dl)}{Dh} \times 100 \quad \text{.....(2.5)}$$

สัดส่วนนิวตรอนที่กระเจิง ในลำรังสีนิวตรอน(effective scatter neutron content,S)

$$S = (\Delta Db/Dh) \times 100 \quad \text{.....(2.6)}$$

สัดส่วนรังสีแกมมาในลำรังสีนิวตรอน (effective gamma content ,γ)

$$\gamma = [(Dt - \text{lowest } Dl)Dh] \times 100 \quad \text{.....(2.7)}$$

สัดส่วนการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในลำรังสีนิวตรอน (effective pair production content,P)

$$P = (\Delta Dl/Dh) \times 100 \quad .....(2.8)$$

โดย Db คือ ค่าความดำบนแผ่นฟิล์มบริเวณที่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโบรอน

Dl คือ ค่าความดำบนแผ่นฟิล์มบริเวณที่นิวตรอนที่ผ่านแผ่นตะกั่ว

Dh คือ ค่าความดำบนแผ่นฟิล์มบริเวณกลางของช่องกลาง

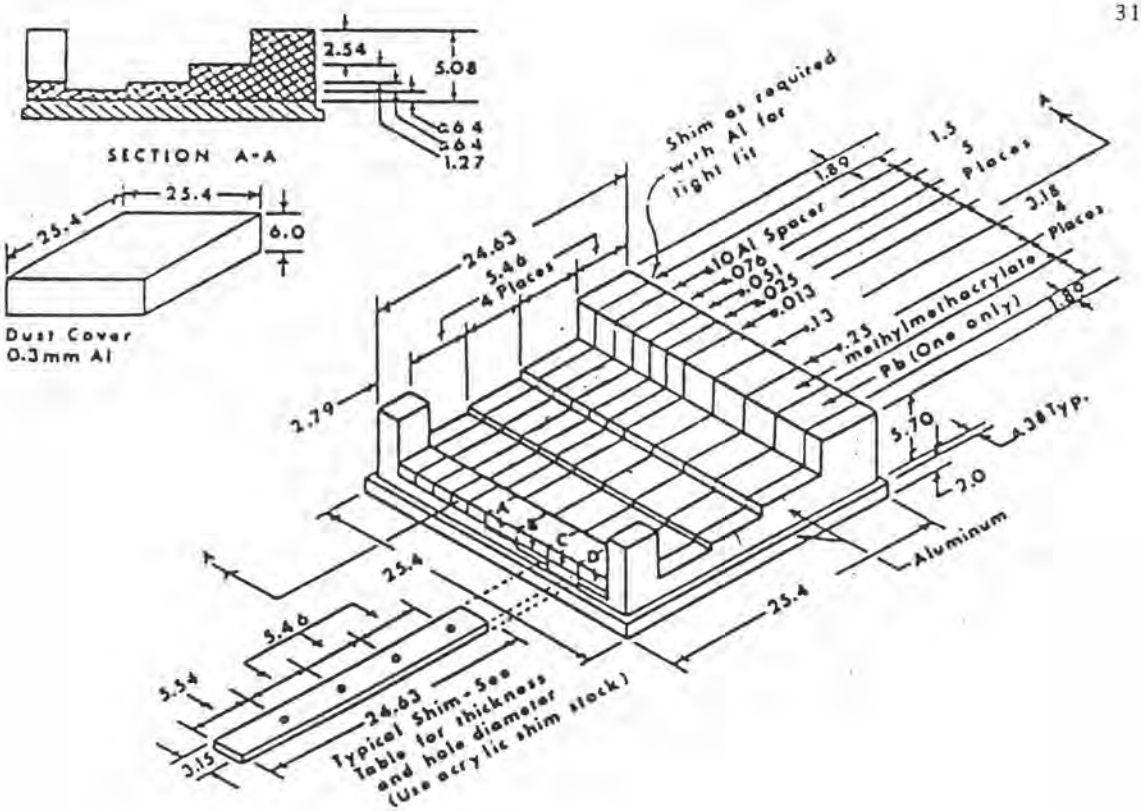
Dt คือ ค่าความดำบนแผ่นฟิล์มบริเวณที่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านเตตระฟลูออโรคาร์บอน

ΔDl คือความแตกต่างระหว่าง Dl

ΔDs คือความแตกต่างระหว่าง Dp

การทดสอบเชิงปริมาณวิธีนี้จะทำให้ทราบ การกระจายตัวของโฟตอนพลังงานต่ำ, คอนทรัสต์(contrast), การกระจายตัวของการเกิด pair production, ความไม่คมชัดของภาพ(unsharpness)

2.5.2.2 การทดสอบเชิงคุณภาพ(qualitative determination) โดยใช้ความไวในการมองเห็นและค่ารีโซลูชัน (resolution) ของภาพเป็นตัวกำหนด อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ คือ sensitivity indicator (SI) ซึ่งจัดเป็น Image Quality Indicators (IQIs) ชนิดหนึ่งผลิตโดย ASTM SI ประกอบด้วย อะครีลิก เรซิน รูปขั้นบันได (acrylic step wedge) ขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 0.64, 0.64, 1.27, 2.54 และ 5.08 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระหว่างขั้นบันไดทุกขั้น จะมีเส้นอะลูมิเนียมความหนาต่างๆกัน วางพาดจากชั้นสูงสุดถึงชั้นต่ำสุด ด้วยระยะห่างระหว่างเส้นต่างๆกัน และเส้นตะกั่ว 1 เส้นทางด้านซ้ายของ SI นอกจากนั้น ส่วนประกอบ SI อีกชิ้นหนึ่ง คือ แผ่นอะครีลิก เรซินขนาด 3.15x24.63 ตารางมิลลิเมตร เจาะรูขนาด 0.25 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู ซึ่งสอดไว้ในช่องซึ่งเรียกว่า shim D ดังรูป ที่ 2.11



รูปที่ 2.11 sensitivity indicator

การกำหนดระดับความไวในการมองเห็นโดยใช้ SI พิจารณาจากขนาดของรู (hole) ที่เห็นได้ชัดที่ความหนาของอะครีลิก เรซินเท่าใด จึงนำมาเปรียบเทียบกลับเป็นระดับความไวในการมองเห็นของภาพถ่ายนั้นๆ

ตารางที่ 2.5 การกำหนดค่า H

value of H	hole 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	5.081

ตารางที่ 2.6 การกำหนดค่า G

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

ตารางที่ 2.7 neutron radiography categories

category	NC	H	G	S	γ	P
I	65	6	6	5	3	3
II	60	6	6	6	4	4
III	55	5	5	7	5	5
IV	50	4	5	8	6	6
V	45	3	5	9	7	7

2.5.3 การหาความไวในการเกิดภาพ (sensitivity) จากค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม

จากนิยาม ความไว (sensitivity)หมายถึง ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของนิวตรอนกับฉากและฟิล์ม แล้วทำให้เกิดความดำบนแผ่นฟิล์ม เท่ากับ 1 มีหน่วยเป็น 1/ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร

$$\text{sensitivity} = S = OD./\phi T_{exp}$$

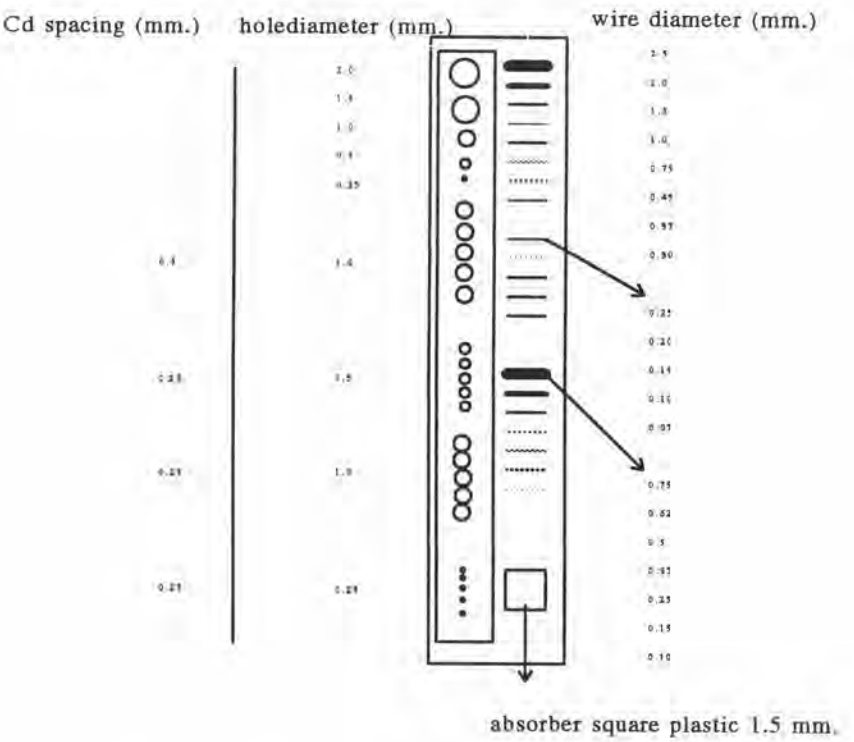
โดย ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

T_{exp} คือ เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ(วินาที)

O.D. คือ ความดำบนแผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ ϕ และเวลาในการถ่ายภาพเท่ากับ T_{exp}

2.5.4 การหาค่ารีโซลูชัน(resolution) และคอนทรัสต์(contrast)ของภาพ

โดยใช้อุปกรณ์ IQIs ชนิด strip B IQIs strip B ประกอบด้วย (1) แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตรเป็นฐาน (2) 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 ชุด ขนาดของช่องที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้คือรีโซลูชันของภาพ (3) เส้นพลาสติก ซึ่งมีความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆกัน 13 เส้น ได้แก่ 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.45, 0.37, 0.30, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 0.07 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ นำมาพิจารณา รีโซลูชันของภาพ และ คอนทรัสต์ (4) เส้นแคดเมียมความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆกัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มิลลิเมตร และ(5)แผ่นพลาสติกจัตุรัสขนาด 1.5 x1.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งนำมาพิจารณาคอนทรัสต์



รูปที่ 2.12 IQIs strip B