เอกสารอ้างอิง

1. Freisher, R. L., P. B. Price, and R. M. Walker, Nuclear Tracks in Solids:Principle and Application, University of California Press, Calif., 1975.
2. Arya,A. P.,Fundamentals of Nuclear Physics, Copyright 1966.
3. Harms, A. A., and D.R. Wyman, Mathematics and Physics of Neutron Radiography, D. Reidel Publishing Company, Copyright 1986.
4. Garette, D., H. Berger, A. Harms, and M. Hawkesworth, Atomic Energy Review, Vol. 15, No.2, 1977.
5. Kedem, P., "Irradiation Facilities for Research Reactors," IAEA, 1973.
6. Berger, H., Neutron Radiography,Methods,Capabilities, and Applications, Elsevier Publishing Company, 1975.
7. Kruger, P., Principles of Activation Analysis, John Wiley & Sons Inc., Copyright 1971.
8. NUMEC, "Plutonium-Beryllium Neutron Sources General Description and Price List", Nuclear Material and Equipment Corporation, Apollo, Pensylvania, 1961.
9. ประสม สุขสว่าง, "การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523.

10. ยุทธพงศ์ บุษมงคล, "การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท," รายงานโครงการวิจัย ประกาศนียบัตรบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

11. สิทธิชัย สุนันท์ศิริกูล, "ผลของการลบเลือนของรอยอนุภาคอัลฟาจากก๊าซเรดอนบนฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2528.

12. พลังงานปรมาณู, สำนักงาน. "ศัพท์นิวเคลียร์," พรว.002 (12), 2527.

13. พลังงานปรมาณู, สำนักงาน. "ศัพทบัญญัติชื่อธาตุ," ใบแนบ, 2527.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ

ภาคผนวก

1. <u>พิสิกส์ของนิวตรอน</u> (physics of neutron)

ในปี พ.ศ.2463 เซอร์รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford) เป็นบุคคลแรกที่ชี้ให้เห็นว่า มีรังสีนิวตรอนอยู่จริงในโลกนี้ จึงทำให้นายแชดวิค ศึกษาค้นคว้าจนสามารถค้นพบนิวตรอนได้สำเร็จในเวลาต่อมา

1.1 พิสัยของพลังงานนิวตรอน (ranges of neutron energy)

พิสัยของพลังงานนิวตรอน สามารถจำแนกได้เป็นระดับ ๆ ดังนี้

ตารางที่ 1.1 ชนิดและพิสัยของพลังงานนิวตรอน (2,9)

ชนิดของนิวตรอน		พิสัยของพลังงานนิวตรอน
สโลว์นิวตรอน	(slow neutrons)	0.00 ev - 1000 eV
โคลด์นิวตรอน	(cold neutrons)	น้อยกว่า 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน	(thermal neutrons)	0.01 ev - 0.30 ev
เอพิเทอร์มัลนิวตรอน	(epithermal neutrons)	0.30 ev - 10000 ev
เรโซแนนซ์นิวตรอน	(resonance neutrons)	1.00 ev - 100 ev
ฟาสต์นิวตรอน	(fast neutrons)	1000 ev - 20 Mev
รีเลทิวิสติกนิวตรอน	(relativistic neutrons)	มากกว่า 20 Mev

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 คุณสมบัติบางชนิดของนิวตรอนอิสระ (some properties of free neutron)

นิวตรอนอิสระมีคุณสมบัติที่สำคัญบางประการ คือ

ก. ประจุ (charge) นิวตรอนไม่มีประจุจึงมีคุณสมบัติเป็นกลาง ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถเดินทางไปในอากาศได้หลาย ๆ เมตร โดยปราศจากการแตกตัว (ionization) และถึงแม้ว่านิวตรอนจะมีพลังงานจลน์ที่ต่ำมาก แต่สามารถวิ่งชนนิวเคลียสได้เพราะว่าไม่ถูกกีดขวางจากอิเลคตรอน

ข. มวล (mass) ค่าของมวลนิวตรอนที่คำนวณได้และเป็นที่ยอมรับคือ

$$m(^{1}_{0}n) = 1.008665 \quad \text{หน่วยอะตอม}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับมวลโปรตรอนจะได้

$$m(^{1}_{1}H) = 1.007825 \quad \text{หน่วยอะตอม}$$

ค. สปินและแมกเนติกโมเมนท์ (spin and magnetic moment) นิวตรอนมีโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน (spin angular-momentum) เท่ากับ 1/2 $\hbar$ และมีค่าแมกเนติกโมเมนท์ เท่ากับ -1.9135 นิวเคลียร์แมกเนตัน (neuclear magnetons) โดยที่เครื่องหมายลบ แสดงทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสปิน

ง. คุณลักษณะของคลื่นและโพลาไรเซชัน (wave and polarization characteristics) นิวตรอนมีคุณสมบัติเป็นคลื่น มีความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ

$$\lambda = h/mv$$

โดยให้ h = แพลงค์คอนสแตนท์ (Planck's constant)

m = มวลของนิวตรอน

v = ความเร็วของนิวตรอน

คุณลักษณะของคลื่นหาได้โดยวิธีดิฟแฟรคชัน (diffraction methods) และจากคุณสมบัติของนิวตรอนดังกล่าว เมื่อลำนิวตรอนวิ่งผ่านแมกเนไทซ์ไอร์ออน (magnetized iron) ที่มีความเข้มสูง ๆ จะทำให้เกิดผลของโพลาไรเซชัน (polarization effects)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ. การสลายตัวของนิวตรอนอิสระ (radioactive decay of free neutrons) เมื่อนิวตรอนหนึ่งตัวเกิดการสลายตัวจะให้โปรตอน 1 ตัว และอิเลคตรอน 1 ตัว นอกจากนี้ยังมีแอนตินิวตริโน (antineutrino) และพลังงานเกิดขึ้น ดังแสดงในสมการ

$$ {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}\beta + {}^{0}_{0}\gamma + 0.782 \quad \text{Mev} $$

นิวตรอนอิสระเมื่อสลายตัวแล้วจะมีค่าครึ่งชีวิต เท่ากับ 12.0 1.5 นาที

1.3 อันตรกริยาของนิวตรอนกับสสาร (interaction of neutrons with matter)

นิวตรอนสามารถเกิดปฏิกริยาได้หลายวิธี ดังนี้

ก. การกระเจิงของนิวตรอน (scattering of neutrons)

นิวตรอนจะเกิดการกระเจิงได้ 2 ลักษณะคือ แบบอิลาสติก (elastic) และแบบอินอิลาสติก (inelastic) ซึ่งสามารถสรุปปรากฏการณ์ทั้งสองที่เกิดขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 1.3

ในการชนของทั้งสองแบบที่เกิดขึ้น จะทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงานและความเร็วไปซึ่งจะสามารถหาการกระเจิงของนิวตรอนแบบอิลาสติก ได้ดังนี้

$$ E/E_0 = v^2/v_0^2 = M^2+m^2+2Mn\cos\phi/(M+m)^2 \qquad (1.1) $$

โดยให้ E = พลังงานจลน์ของนิวตรอนกระเจิง

E_0 = พลังงานจลน์ของนิวตรอนก่อนกระเจิง

v = ความเร็วนิวตรอนหลังการชน

v_0 = ความเร็วนิวตรอนก่อนการชน

M = มวลของนิวเคลียส

m = มวลของนิวตรอน

ϕ = มุมเบี่ยงเบนของการกระเจิงของนิวตรอน

จากสมการ (1.1) สามารถเขียนให้คำนวณง่ายขึ้น และจะไม่ผิดพลาดไปมากนัก ดังนี้

$$ E/E_0 = (A^2+1 + 2A\cos\phi)/(A+1)^2 \qquad (1.2) $$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าของมุม ϕ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ θ ได้ดังนี้

$$\cos\theta = (A\cos\phi + 1)/(A^2+1 + 2A\cos\phi)^{1/2} \quad (1.3)$$

จากสมการ (1.2) นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานสูงสุด หรือกล่าวได้ว่า E จะมีค่าต่ำสุดเมื่อเท่ากับ 180 องศา ดังตัวอย่างเช่น

$$E_{min} = (E_o A^2+1 - 2A)/(A+1)^2$$

$$E_{min} = E_o\{(A-1)/(A+1)\}^2 \quad (1.4)$$

ตารางที่ 1.2 คุณลักษณะของการกระเจิงของนิวตรอนแบบอิลาสติกและอินอิลาสติก

แบบอิลาสติก	แบบอินอิลาสติก
1. ผลรวมของพลังงานจลน์นิวตรอนก่อนและหลังการชนจะมีค่าเท่ากัน	1. พลังงานจลน์ของนิวตรอนบางส่วนจะถูกใช้ ในการกระตุ้นนิวเคลียสเป้า และนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะให้รังสีแกมมา
2. ในการชนแบบอิลาสติก จะเกิดเฉพาะนิวตรอนและโปรตอนเท่านั้น	2. นิวคลีไอชนิดอื่นสามารถเกิดชนได้ทั้งแบบอิลาสติกและอินอิลาสติก
3. การถูกกระตุ้นของนิวเคลียส ที่พลังงานนิวตรอนต่ำ ๆ ประมาณ 0.1 ถึง 10 MeV ทำให้เกิดการกระเจิงแบบอิลาสติก	3. การเกิดอินอิลาสติกจะเกิดที่พลังงานสูงกว่า 10 MeV ขึ้นไป

ข. นิวตรอนแคพเจอร์ (neutron capture) การอันตรกริยาที่เกิดระหว่างนิวตรอนกับอิเลคตรอน จะเกิดได้ยากมากเพราะมีคุณสมบัติเป็นกลาง แต่แมกเนติกโมเมนท์ จะทำให้อันตรกริยาของนิวตรอน อ่อนลงมาก ถึงกระนั้นสโลว์นิวตรอน (slow neutron) ก็ยังสามารถวิ่งชนกับนิวเคลียสได้เพราะว่าไม่มีการกีดขวางของอิเลคตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งมาถึงนิวเคลียส จะเกิดนิวตรอนแคพเจอร์

ขึ้นแล้วปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในกรณีเช่นนี้ส่วนมากนิวเคลียสที่เหลือจะกลายเป็นกัมมันตรังสี และสลายตัวให้รังสีแกมมา นิวตรอนแคพเจอร์ที่เกิดกับธาตุเบา จะมีค่าภาคตัดขวาง (cross section) ต่ำ ส่วนในกรณีของสริลว์นิวตรอน นิวตรอนแคพเจอร์ที่เกิดกับธาตุหนัก จะทำให้ค่าภาคตัดขวางแคพเจอร์เพิ่มขึ้น และปรากฏการณ์ของเรโซแนนซ์แคพเจอร์ (resonance capture) ก็จะเกิดขึ้นด้วย ธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง ๆ ได้แก่ โบรอน (boron) แคดเมียม (cadmium) และแกโดลิเนียม (gadolinium) เป็นต้น

ค. การเกิดอนุภาค สำหรับธาตุเบา ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ คือ ปฏิกริยา (n,p) (n,α) และ(n,T) ส่วนรีคอยล์นิวเคลียส (recoil nucleus) ที่เกิด อาจจะเป็นวัตถุกัมมันตรังสีหรือไม่เป็นก็ได้ และในกรณีที่นิวตรอนมีพลังงานสูงกว่า 10 Mev ขึ้นไป มักจะเกิดปฏิกริยาแบบ (n,2n)

ง. การแตกตัว (fission) ในขบวนการแตกตัวนั้นจะเกิดขึ้นจากการที่ธาตุหนักแคพเจอร์นิวตรอนแล้วแตกออกเป็น 2 ซีก และคายพลังงานออกมาประมาณ 200 Mev สำหรับผู้ค้นพบการแตกตัวของนิวตรอนคือ นายฮาห์นและนายสแตรสแมน (Hahn and Strassman) ซึ่งค้นพบในปี พ.ศ.2482 จากการพบครั้งนั้นทำให้นำหลักการไปใช้งานสำคัญ ๆ ทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ได้มาก หลักการที่ว่านั้นคือ การใช้สริลว์นิวตรอนวิ่งชนธาตุยูเรเนียม (uranium) และคิดว่าส่วนที่แตกออกนั้น เป็นเรเดียมและแอกติเนียม (radium and actinium) ซึ่งจริง ๆ แล้วไม่แต่เฉพาะยูเรเนียมเท่านั้นที่สามารถแตกตัวได้ แต่ยังมีธาตุอื่น ๆ อีกหลายตัวและธาตุเบาบางตัวก็สามารถใช้ในขบวนการนี้ได้

1.4 การเกิดนิวตรอน (production of neutrons)

การเกิดนิวตรอนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ พลังงาน ความเข้มนิวตรอนและกรรมวิธีที่แตกต่างกันไป

ก. นิวตรอนจากปฏิกริยา (α,n) วิธีนี้ทำได้โดยใช้อนุภาคอัลฟา ($_2^4He$) วิ่งชนธาตุเบา ซึ่งส่วนมากจะใช้เบริลเลียมเป็นเป้า (target) แล้วจะได้นิวตรอน

ออกมาดังนี้

$$^{4}_{2}He + ^{9}_{4}Be \longrightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n + 5.71 \quad MeV \qquad (1.5)$$

ธาตุเบาอื่น ๆ ได้แก่ ลิเทียม (lithium) ฟลูออรีน (fluorine) และ โบรอน (boron) เป็นต้น ส่วนอนุภาคอัลฟามักจะได้จากเรเดียม (radium) พอโลเนียม (polonium) หรือก๊าซเรดอน (radon)

ข. นิวตรอนจากโฟโตดิสอินทีเกรชัน (neutron from photodis-integration) การเกิดนิวตรอนวิธีนี้ ได้จากปฏิกริยาแบบ $^{9}_{4}Be(\gamma,n)^{8}_{4}Be$ และ $^{2}_{1}H(\gamma,n)^{1}_{1}H$ ซึ่งพลังงานต่ำที่สุด ของทั้งสองปฏิกริยาที่ใช้ คือ 1.67 และ 2.23 Mev ตามลำดับ

ค. นิวตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาค วิธีนี้จะได้นิวตรอนที่มีพลังงานเดียว โดยมากแล้วจะใช้อนุภาคมีประจุเป็นตัวเร่งปฏิกริยา ด้วยการชนกับธาตุที่กำหนดเป็นเป้าดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$^{2}_{1}H + d \longrightarrow ^{3}_{2}He + n + 3.28 \quad MeV$$

$$^{3}_{1}H + d \longrightarrow ^{4}_{2}He + n + 17.60 \quad MeV$$

$$^{9}_{4}Be + d \longrightarrow ^{10}_{5}B + n + 4.35 \quad MeV$$

$$^{3}_{1}H + p \longrightarrow ^{3}_{2}He + n - 0.764 \quad MeV$$

$$^{7}_{3}Li + p \longrightarrow ^{7}_{4}Be + n - 1.65 \quad MeV$$

$$^{12}_{6}C + d \longrightarrow ^{13}_{7}N + n - 0.26 \quad MeV$$

ง. นิวตรอนจากปฏิกริยาสตริปปิง (neutrons from stripping reaction) การสตริปปิงของดิวเทอรอน (deuteron) ทำให้เกิดนิวตรอนพลังงานสูงหลาย ๆ ร้อย Mev ได้เมื่อลำดิวเทอรอนพลังงานสูงวิ่งชนเป้า นิวตรอนและโปรตรอน จะแยกออกจากกัน นิวตรอนจะมีพลังงาน ประมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานดิวเทอรอน และมีทิศทางตรงไปข้างหน้า ในขณะที่โปรตรอนถูกแคพเจอร์โดยนิวเคลียสเป้า

จ. นิวตรอนจากโปรตรอนพลังงานสูง การเกิดนิวตรอนด้วยวิธีนี้จะให้นิวตรอนพลังงานสูงมาก ซึ่งอาศัยการอันตรกริยาระหว่าง นิวคลีออนต่อนิวคลีออน (nucleon-nucleon interaction) โดยการใช้การชนแบบตรง ๆ ระหว่าง

โปรตอนพลังงานสูงกับนิวตรอนเดี่ยวของนิวเคลียสเป้า นิวตรอนจะถูกกระแทกอย่างแรงไปในทิศทางข้างหน้า และรับเอาพลังงาน และโมเมนตัมทั้งหมดของโปรตอนไป วิธีนี้อาจทำให้นิวตรอน มีพลังงานสูงถึง 2-3 BeV

ฉ. นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบแตกตัว วิธีต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว เป็นการผลิตนิวตรอนพลังงานสูง ที่ให้ฟลักซ์ต่ำ (low fluxes) แต่วิธีนี้สามารถผลิตนิวตรอนที่ให้พลังงานต่ำที่มีฟลักซ์สูง (high fluxes) ได้ ซึ่งประมาณได้เป็น 10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และจากการแตกตัวจะได้นิวตรอนที่พลังงานระดับต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ระดับเทอร์มัลจนถึง 18 Mev แต่พลังงานเฉลี่ยแล้วประมาณ 2 Mev

ช. นิวตรอนจากการแตกตัวเอง (self-fission) ของธาตุหนักบางชนิด การเกิดนิวตรอนวิธีนี้ เกิดจากการแตกตัวของธาตุหนัก ตั้งแต่ทอเรียมขึ้นไป ซึ่งลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะปล่อยนิวตรอนออกมาครั้งละหลาย ๆ ตัว ตัวอย่างเช่น แคลิฟอร์เนียม-252 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี จะมีการสลายตัวด้วยการแตกตัวเอง ประมาณร้อยละ 3.2 การแตกตัวแต่ละครั้งจะปล่อยนิวตรอนออกมา 3.76 ตัว แต่โดยเฉลี่ยแล้วการแตกตัวจะเท่ากับ 0.032x3.76 = 0.12 นิวตรอน ดังนั้นแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัมจะผลิตนิวตรอนได้ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาที (7)

นอกจาก Cf-252 แล้วยังมีธาตุตัวอื่น ๆ อีกหลายตัว ที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนซึ่ง ได้แก่ U-238 Pu-236 Pu-238 Pu-240 Pu-242 Pu-244 Cm-242 Cm-244 และ Cf-254 เป็นต้น

1.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron sources)

ต้นกำเนิดนิวตรอนโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

ก. วัสดุกัมมันตรังสี (radioactive sources)

ข. เครื่องเร่งอนุภาค (accelerators)

ค. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactors)

การนำต้นกำเนิดนิวตรอนมาใช้งาน ต้องพิจารณาปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ พลังงานและความเข้มของนิวตรอนและของรังสีแกมมา ราคา ขนาด ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ปัญหาการกำบังรังสี และประโยชน์โดยทั่วไป

ก. วัสดุกัมมันตรังสี (radioactive sources)

นิวตรอนแบบนี้เกิดจากปฏิกริยาที่สำคัญ 2 ปฏิกริยาคือ (α,n) และ (γ,n)

1. ปฏิกริยาแบบ (α,n)

ตารางที่ 1.3 การเกิดนิวตรอนจากปฏิกริยา (α,n) (6)

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (half-life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี	รังสีแกมมาที่เกิด
^{210}Po-Be	138.0 วัน	3.0×10^{6}	เล็กน้อย
Rn-Be	-	1.5×10^{7}	สูง
^{226}Ra-Be	1,620.00 ปี	1.5×10^{7}	สูง
^{226}Ra-Be	1,620.00 ปี	6.8×10^{6}	สูง
^{227}Ac-Be	21.80 ปี	1.5×10^{7}	ต่ำ
^{228}Th-Be	1.91 ปี	2.0×10^{7}	ต่ำ
^{238}Pu-Be	86.40 ปี	1.6×10^{6}	เล็กน้อย
^{239}Pu-Be	2.43 ปี	1.6×10^{6}	เล็กน้อย
^{241}Am-Be	458.00 ปี	2.2×10^{6}	เล็กน้อย
^{241}Am-Cm-Be	163.00 วัน	2.3×10^{6}	เล็กน้อย
^{242}Cm-Be	163.00 วัน	2.5×10^{6}	เล็กน้อย
^{242}Cm-Be	18.10 วัน	2.5×10^{6}	เล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ปฏิกริยาแบบ (ɣ,n)

ตารางที่ 1.4 การเกิดนิวตรอนจากปฏิกริยา (ɣ,n) (6)

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (half-life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี	พลังงานรังสีแกมมา
^{24}Na-Be	14.80 ชั่วโมง	1.3×10^{5}	2.76
^{24}Na-D_2O	14.80 ชั่วโมง	2.7×10^{5}	2.76
^{56}Mn-Be	2.59 ชั่วโมง	2.9×10^{4}	1.18,2.13,2.70
^{56}Mn-D_2O	2.59 ชั่วโมง	3.1×10^{3}	2.70
^{72}Ga-Be	14.10 ชั่วโมง	5.0×10^{4}	1.87,2.21,2.51
^{72}Ga-D_2O	14.10 ชั่วโมง	6.0×10^{4}	2.51
^{88}Y-Be	87.00 วัน	1.0×10^{5}	1.90,2.80
^{88}Y-D	87.00 วัน	3.0×10^{3}	2.80
^{116}In-Be	54.00 นาที	8.2×10^{3}	1.80,2.10
*^{124}Sb-Be	60.00 วัน	1.9×10^{5}	1.70
^{140}La-Be	40.00 วัน	3.0×10^{3}	2.50
^{140}La-D_2O	40.00 วัน	8.0×10^{3}	2.50
MsTh-Be	6.70 ปี	3.5×10^{4}	1.80,2.62
MsTh-D2O	6.70 ปี	9.5×10^{4}	2.62 (ThC")

จากตารางที่ 1.4 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่น่าสนใจมากคือ Sb-Be เพราะให้ผลผลิตนิวตรอนต่อคูรีสูง แต่พลังงานที่ให้ต่ำเพียง 25 KeV

ยังมีต้นกำเนิดนิวตรอน ที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่งคือ แคลิฟอร์เรียม-252 (Cf-252) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดฟาสต์นิวตรอน (fast neutron) แบบแตกตัวเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างต่อเนื่องและไม่จัดอยู่ในปฏิกริยาแบบใดเลย

ข. เครื่องเร่งอนุภาค (accelerators)

เครื่องเร่งอนุภาค ที่ใช้ผลิตนิวตรอนมีหลายแบบ ส่วนมากจะนิยมใช้ประจุบวกจากโปรตรอนหรือดิวเทอรอนเป็นตัววิ่งชนเป้าชนิดต่าง ๆ ดังตัวอย่างปฏิกริยาดังต่อไปนี้

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}n + 3.28 \quad MeV$$

$$^{3}_{1}T + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}n + 17.60 \quad MeV$$

$$^{9}_{4}Be + \gamma \longrightarrow 2\,^{4}_{2}He + ^{1}n - 1.67 \quad MeV$$

$$^{9}_{4}Be + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{9}_{5}B + ^{1}n - 1.85 \quad MeV$$

$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}n + 4.35 \quad MeV$$

ส่วนปฏิกริยาที่ใช้โปรตรอน ได้แก่ $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ และ $^{2}H(p,n)^{3}He$

ค. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactors)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มสูงที่สุด มีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลายเครื่อง ที่ผลิตความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนสูง ในระดับ 10^{6} ถึง 10^{8} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งจะสูงกว่าต้นกำเนิดแบบวัสดุกัมมันตรังสีและแบบเครื่องเร่งอนุภาค คือเท่ากับ 10^{4} และ 10^{6} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ

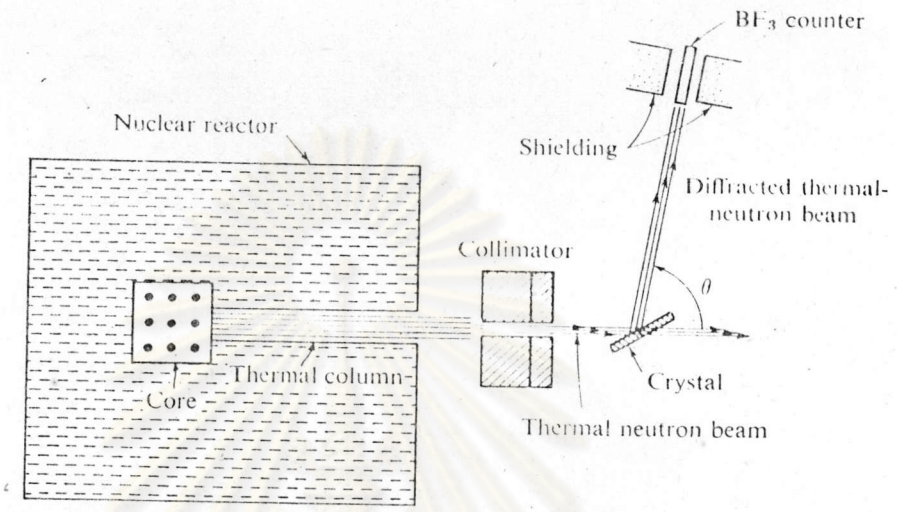
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ส่วนมากจะเป็นแบบสระน้ำ (swimming pool type) ฟลักซ์ที่ได้ส่วนมากประมาณ 10^{12} ถึง $5x10^{14}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และพลังงานเทอร์มัลอยู่ในช่วง 250 กิโลวัตต์ถึง 50 เมกกะวัตต์

1.6 ดิฟแฟรคชันของนิวตรอน (diffraction of neutrons)

นายเอลซ์สเซอร์และนายวิค (Elsasser and Wick) ได้ริเริ่มศึกษารูปแบบของดิฟแฟรคชัน เป็นคนแรก โดยใช้ หลักการกระเจิงของเทอร์มัลนิวตรอน

และสมมติฐานเดอบ์รอกลี (deBroglie-hypothesis) ที่กล่าวว่าถ้านิวตรอนมีมวล m ความเร็ว v และพลังงาน E จะสามารถหาความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$\lambda = h/mv = h/2\sqrt{2mE} \qquad (1.6)$$



รูปที่ 1.1 แผนภาพของนิวตรอนดิฟแฟรคชันจากผลึก

ในรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็น แผนภาพของนิวตรอนดิฟแฟรคชัน อันเกิดจากผลึกที่มีมุมของดิฟแฟรคชัน (θ) ซึ่งแบรกก์คอนดิชัน (Bragg's condition) ระบุไว้ว่า

$$n\lambda = 2\,d\sin\theta \qquad (1.7)$$

กำหนดให้ d = ช่องว่างระหว่างระนาบต่างๆ ของอะตอมในผลึก

n = จำนวนเลขยกกำลังของดริฟแฟรคชัน

จากการสังเกตนิวตรอนดิฟแฟรคชัน จะใช้ค่า n=1 และเมื่อรวมสมการ (1.6) กับ (1.7) จะได้

$$E = h^2/8\,md^2\sin^2\theta \qquad (1.8)$$

นายมิทเชลล์ และนายเพาเวอร์ (Mitchell and Powers) กับนายฮัลบัน และนายพรีซเวอร์ค (Halban and preiswerk) เป็นกลุ่มแรกที่สร้างชุดทดลองเรื่องนิวตรอนดิฟแฟรคชันขึ้น โดยการใช้ แคลเซียมฟลูออไรด์ (calaium

fluoride) ลิเทียมฟลูออไรด์ (lithium fluoride) และแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) เป็นผลึก เพื่อศึกษาในเรื่องจำนวนดิฟแฟรคชันของลำสริลว์นิวตรอน ซึ่งประโยชน์ของนิวตรอนดิฟแฟรคชันนั้น แต่เดิมใช้ศึกษาทดลองในเรื่อง well-defined energy ต่อมาภายหลังได้นำมาศึกษาในเรื่องโครงสร้างของผลึก

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 ต้นกำเนิดรังสี

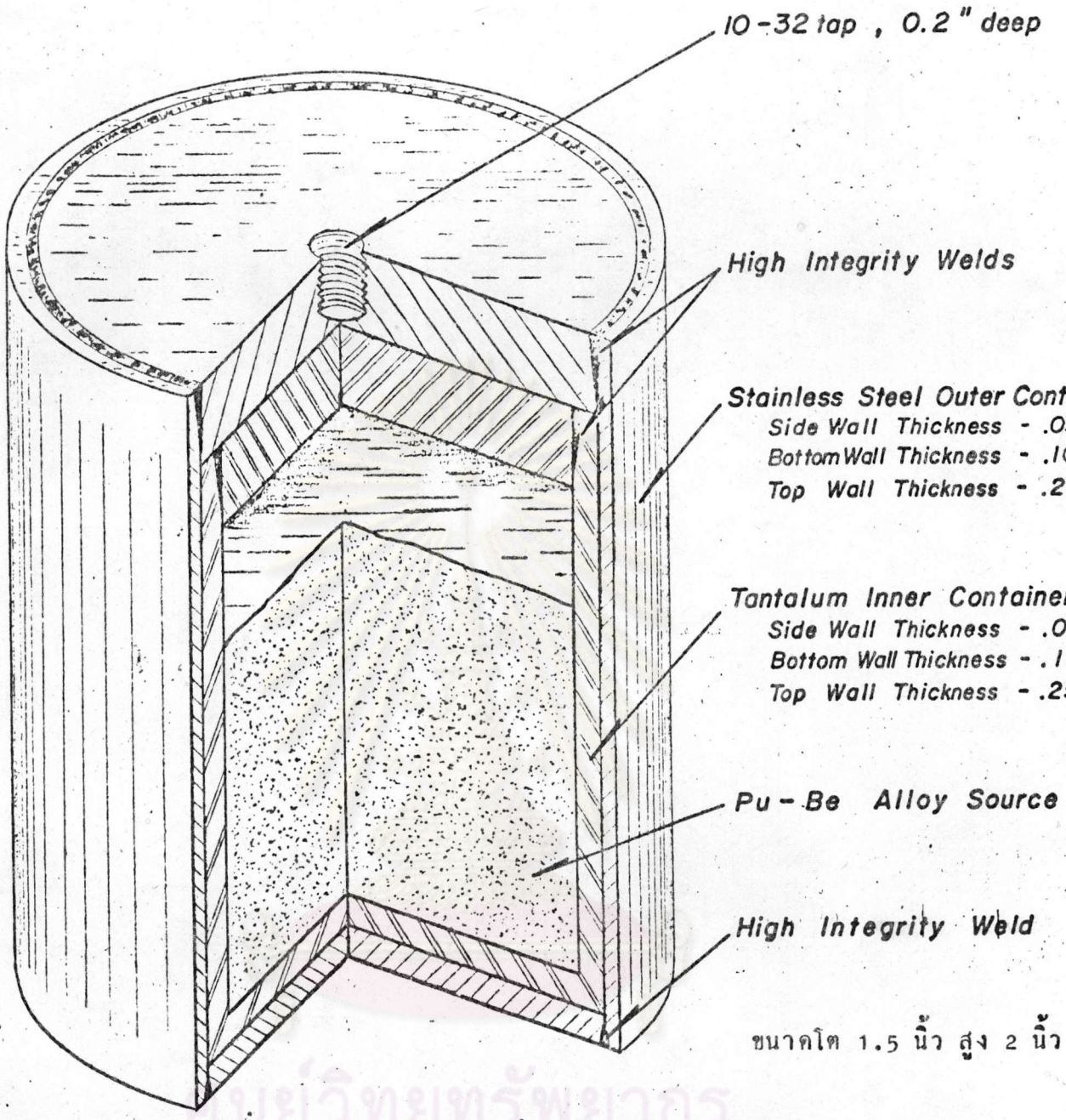
2.1.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

ก. ต้นกำเนิดนิวตรอนจากพลูโทเนียม-เบริลเลียม (^{239}Pu-Be) มีความแรงรังสี 5 คูรี รูปร่างทรงกระบอกขนาดโต 1.5x2.0 นิ้ว อัตราการแตกตัวของนิวตรอน (fission rate) คือ 7×10^{6} นิวตรอนต่อวินาที (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)

ข. ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 หรือ ปปว-1/1 (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) มีชื่อว่า "ทริกา มาร์ค III (TRIGA Mark III)"เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ที่เหมาะแก่การวิเคราะห์วิจัยและผลิตไอโซโทป สามารถเดินเครื่องที่สภาวะต่าง ๆ ได้ 3 แบบ คือ แบบคงที่ (steady state) แบบสแควร์เวฟ (square wave) และแบบพัลส์ (pulsing) ในการทดลองนี้ใช้การเดินเครื่องแบบคงที่ ที่ระดับกำลัง 1 เมกะวัตต์ความร้อน และเป็นแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯเบอร์ที่ 6 (core no.6)

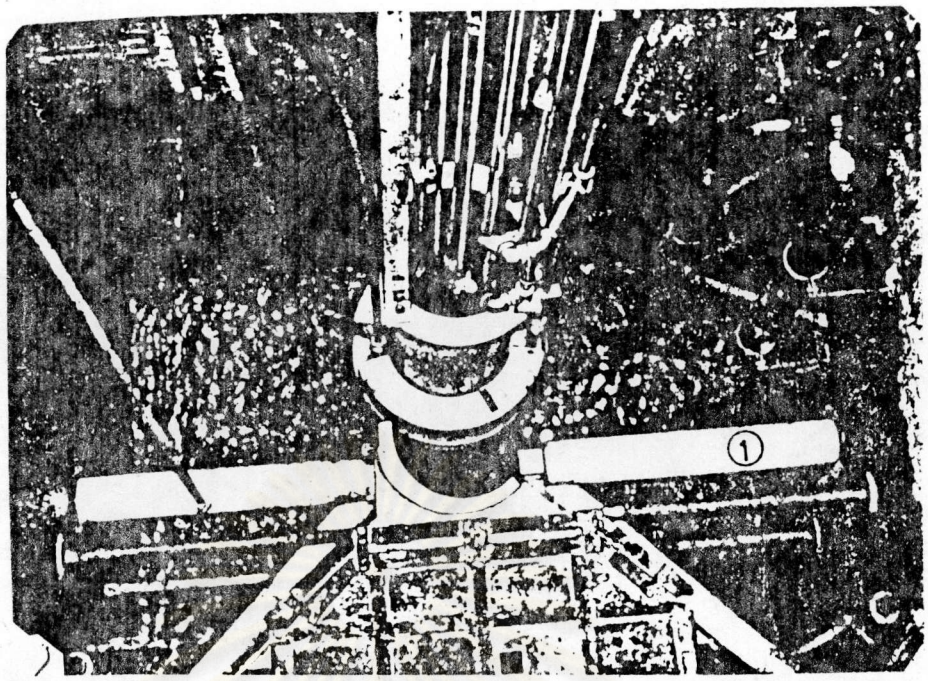
2.1.2 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-rays machine)

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้มีชื่อว่า แอนเดรกซ์ (Andrex) Model 1622 ของประเทศเดนมาร์ก ให้พลังงานสูงสุด 200 กิโลโวลท์ (kVp) ตั้งกระแสได้ 5 มิลลิแอมป์ (mA) เวลา 9 นาที (ดังแสดงในรูปที่ 2.3)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโทเนียม (239)-เบริลเลียม



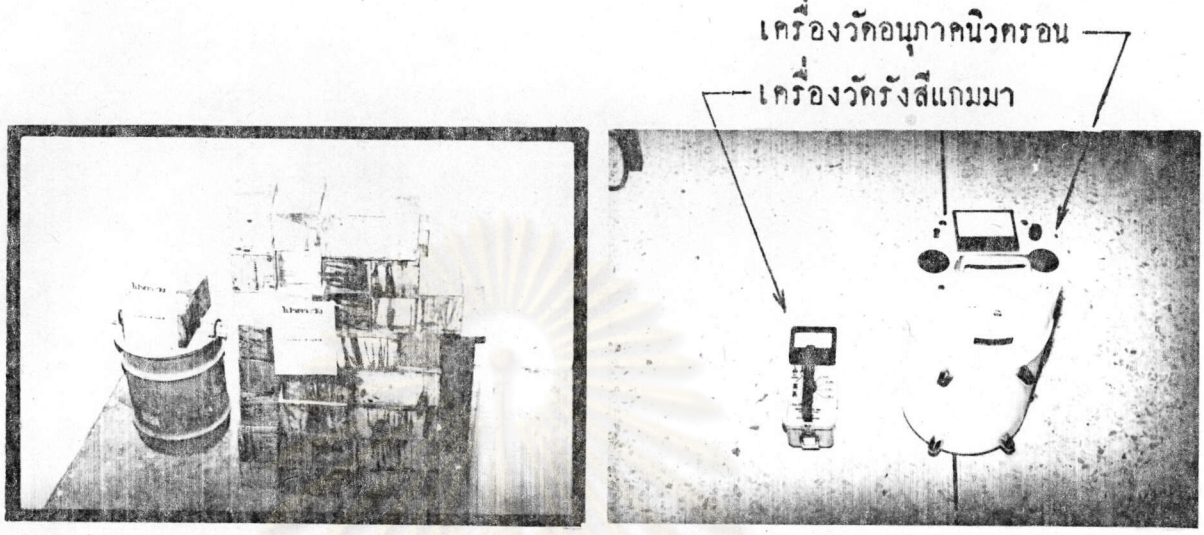
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

① คือ ท่อบังคับลำนิวตรอนขนาด 8 นิ้วที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 2.2 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1

รูปที่ 2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

2.2 อุปกรณ์และเครื่องใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากต้นกำเนิดพลูทเนียม-เบริลเลียม



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากต้นกำเนิดพลูทเนียม-เบริลเลียม และเครื่องวัดรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมา

จากรูปที่ 2.4 จำนวนก้อนพาราฟินผสมโบรอน ร้อยละ 30 ที่ใช้กำบังรังสีทั้งสิ้นรวม 65 ก้อน แบ่งเป็นขนาด 15x15x25 เซนติเมตร 40 ก้อน และขนาด 15x15x30 เซนติเมตร 25 ก้อน

2.3 อุปกรณ์และเครื่องใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

2.3.1 ท่อบังคับลำนิวตรอนทำด้วยอลูมิเนียมผสม มีขนาดของความรัตภายใน 8 นิ้ว (20 เซนติเมตร) ความยาว 2 เมตร ภายในท่อบรรจุด้วยไม้สักกลม มีความรัตนอก 7 นิ้ว ด้านในตรงกลาง ทำเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 3x3 นิ้วยาวตลอดท่อ

2.3.2 อุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ศึกษาทดลองในเรื่อง นิวตรอนดิฟแฟรคชัน-

สเปคโตรมิเตอร์ (neutron diffraction spectrometer) ได้แก่ แผ่นเลื่อนปิดเปิดทำด้วยตะกั่วขนาด 10x20x2.5 เซนติเมตร อุปกรณ์ติดตั้งโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) เป็นต้น

2.3.3 ถ้ำบังคับลำนิวตรอน (ชุดที่ 2) ซึ่งทำด้วยไม้สักกลมรัดนอก 14 เซนติเมตร ด้านในเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 7.5x7.5 เซนติเมตร

2.3.4 อุปกรณ์ช่วยยึดและเลื่อนตลับบรรจุฟิล์ม และชิ้นงานเข้าออกเพื่อเพิ่มความสะดวกและปลอดภัยจากรังสี

2.3.5 ชุดกำบังรังสี (shielding system) ประกอบด้วยคอนกรีตชนิดหนัก (heavy concrete) ขนาด 15x15x30 เซนติเมตร จำนวน 190 ก้อน ก้อนพาราฟินผสมโบรอนร้อยละ 30 ซึ่งบรรจุอยู่ในกล่องไม้อัด ขนาด 15x15x30 เซนติเมตร จำนวน 100 ก้อน และก้อนตะกั่วขนาด 5x10x20 เซนติเมตร จำนวน 80 ก้อน

2.3.6 ตลับอลูมิเนียมสำหรับบรรจุฟิล์ม (cassettes) ของโกดัก มีขนาด 23x28 เซนติเมตร จำนวน 2 ตลับ

2.4 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 2.6)

2.4.1 ชิ้นงานตัวอย่าง "S-1" ซึ่งทำขึ้นเอง ทำด้วยปลอกทองเหลืองรูปทรงกระบอกขนาด 1.3x7.2x0.5 เซนติเมตร ภายในบรรจุวัสดุ 6 ชนิด มีลักษณะเป็นผง (powder) เรียงลำดับจากปากไปถึงส่วนล่างคือไม้คอร์ก (corks) โบรอนไนไตรด์ (boron nitride) คาร์บอน (carbon) ลิเทียมฟลูออไรด์ (lithium fluoride) แมงกานีส (manganese) และขี้เลื่อย ตามลำดับ

2.4.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา อิริเดียม-192 (Ir-192) มีความแรง 16 คูรี และอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบ จำนวน 1 ชุด

2.4.3 ก้อนโพลีเอทีลีนผสมโบรอนร้อยละ 5 (boron-polyethylene 5%) มีขนาด 1.4x2.0x0.6 เซนติเมตร จำนวน 1 ชิ้น

2.4.4 ก้อนโพลีเอทีลีนผสมโบรอนร้อยละ 32 (boron-polyethylene 32%) มีขนาด 1.2x2.8x0.6 เซนติเมตร จำนวน 1 ชิ้น

2.4.5 แผ่นแคดเมียมขนาด 1.0x3.5x0.05 เซนติเมตรซึ่งเจาะรูโต 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 11 รู มีขอบของแต่ละรูห่างกันเป็นระยะตั้งแต่ 0.1 ถึง 3.0 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น

2.4.6 แผ่นอินเดียม (indium foils) กลมบาง มีขนาดโต 1.27 เซนติเมตร น้ำหนัก 119.3 และ 118.9 กรัม จำนวน 2 แผ่น

2.4.7 แผ่นทอง (gold foils) กลมบาง มีขนาดความโต 1.27 เซนติเมตร น้ำหนัก 70.5 และ 70.9 กรัม จำนวน 2 แผ่น

2.4.8 ฝาแคดเมียม (cadmium covers) กลม มีขนาดโต 1.25x0.02 และ 1.27x0.02 เซนติเมตร จำนวน 1 คู่

2.7.9 พลาสติกทดสอบ (plastic step wedge) มีลักษณะเป็นขั้นบันได 6 ขั้น ทำด้วยพลาสติกใน ขนาด 1.0x6.3 เซนติเมตร มีความหนาขั้นละ 0.2 เซนติเมตร จำนวน 1 ชิ้น

2.5 ชนิดของฟิล์มที่ใช้

2.5.1 ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทของโกดัก แบบ CN85 TYPE B ขนาดของฟิล์มเท่ากับ 9x12 เซนติเมตร ที่ผิวของฟิล์มเคลือบด้วยผงลิเทียมเตตราบอเรต ($Li_2B_4O_7$) ซึ่งมีสีขาวทั้งสองด้าน

2.5.2 ฟิล์มเอกซเรย์ของโกดัก แบบ industrex AA-5 พร้อมซองฟิล์มและแผ่นสกรีน (lead screens) มี 2 ขนาด คือขนาด 3.5x8.5 นิ้ว และขนาด 3.5x8.5x17 นิ้ว

2.6 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างภาพที่ถ่ายด้วยนิวตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.7)

2.6.1 เตาไฟฟ้าแบบปรับอุณหภูมิได้ (hot plate) มีชื่อว่า FISHER

THERMIX STIRING HOT PLATE Model 210T

2.6.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 10 (10% NaOH) ปริมาณ 900 มิลลิลิตร

2.6.3 ถ้วยตวง (beakers) ขนาด 400 600 และ 1000 มิลลิลิตร จำนวนอย่างละ 2 ถ้วย

2.6.4 ชุดพัดลมดูดอากาศ 1 ชุด (fume hood)

2.6.5 อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ 0-100 องศาเซลเซียส คีม (forcet) แท่งแก้ว (stiring rod) ที่ตากฟิล์มขนาด 21x26 เซนติเมตรจำนวน 2 อัน กระดาษลิตมัส กระดาษกรองและอุปกรณ์ที่ใช้จับยึด

2.7 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างภาพที่ถ่ายจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

2.7.1 ห้องมืด (dark room) สำหรับเตรียมฟิล์มและล้างฟิล์ม

2.7.2 ไฟส่องสว่างที่ใช้เฉพาะกับห้องมืด (safety lights)

2.7.3 น้ำยาล้างฟิล์มซึ่งประกอบด้วย น้ำยาสร้างภาพ (developer) น้ำธรรมดา (stop bath) และน้ำยาคงสภาพ (fixer) บรรจุในถังสเตนเลส

2.7.4 อุปกรณ์ทำความเย็นและควบคุมอุณหภูมิ ให้กับน้ำยาล้างฟิล์ม

2.7.5 อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์ ที่วัดอุณหภูมิได้ 0-100 องศาเซลเซียส กรรไกรตัดฟิล์ม ตัวอักษรตะกั่ว นาฬิกาจับเวลา (stop watch) ที่ตากฟิล์มขนาด 36x42 เซนติเมตรจำนวน 3 อัน

2.8 อุปกรณ์ที่ใช้อ่านผลและพัฒนาผลของฟิล์ม

2.8.1 ไฟอ่านฟิล์ม

2.8.2 เครื่องวัดความเข้มของฟิล์ม (densitrometer) ของบริษัท NUCLEAR ASSOCIATES INC. วัดความเข้มของฟิล์มได้ ตั้งแต่ 0.00 ถึง 4.00

2.8.3 กล้องจุลทรรศน์ชื่อว่า OLYMPUS BH-2 Ser.BHS 217213

2.8.4 เครื่องอัดภาพขาวดำ DURST D659

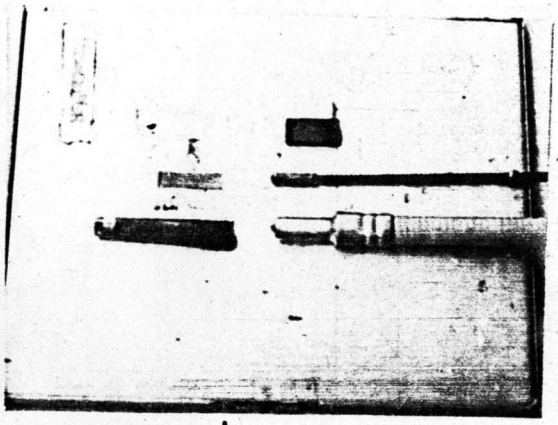
2.8.5 เครื่องปรับความเข้มของแสงไฟ (dimmer)

2.8.6 อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวในหัวข้อ 2.7

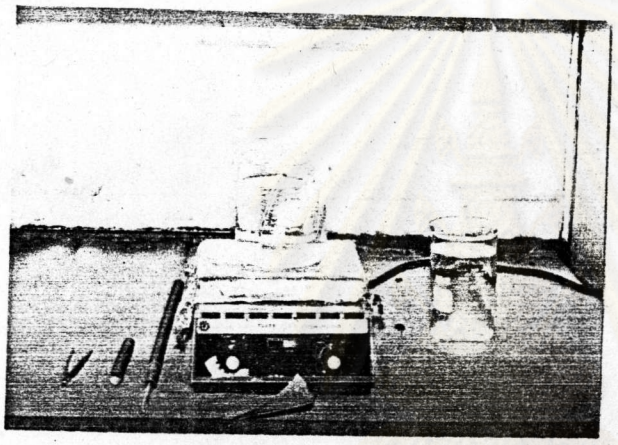
3. หน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ (2)

ชื่อหน่วย	อ่านว่า	เป็นหน่วยของ	เปรียบเทียบหน่วย
eV	อิเลคตรอนโวลท์	พลังงาน	1 eV = 1.60210×10^{-19} จูล
			1 keV = 1×10^{3} eV
			1 MeV = 1×10^{6} eV
amu	เอเอ็มยู	มวล	1 amu = 1.610432×10^{-27} กิโลกรัม
Kw	กิโลวัตต์	พลังงาน	1 Kw = 1×10^{3} วัตต์
			1 Mw = 1×10^{6} วัตต์
emu/g	อีเอ็มยูต่อกรัม	ประจุต่อน้ำหนัก	1 emu = 1.758796×10^{9} คูลอมบ์ต่อกรัม
barns	บาร์น	ภาคตัดขวางของการดูดกลืนและการกระเจิง	1barn = 1×10^{-24} เซนติเมตร
um	ไมโครเมตร	ความยาว	1 um = 1×10^{-6} เมตร
u_N	นิวเคลียร์แมกเนตัน	แมกเนติกโมเมนท์	1 u_N = 5.05050×10^{-27} จูลต่อเวลา
A^0	อังสตรอม	ความยาวคลื่น	1 A^0 = 1×10^{-10} เมตร
dps	ดิสอินทีเกรชันต่อวินาที	ความแรงรังสี	1 dps = 3.7×10^{-10} คูรี

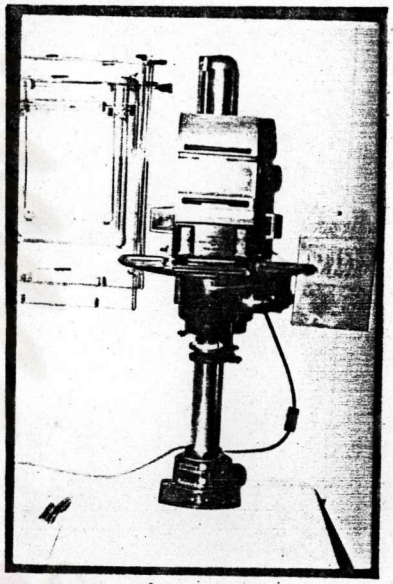
รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7

รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ฯ

รูปที่ 2.6 ชิ้นงานต่าง ๆ ที่ใช้ถ่ายภาพ

รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ที่ใช้กัดขยายรอยอนุภาค

รูปที่ 2.8 เครื่องอัดภาพขาวดำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายนิวัฒน์ ตะวินทอง เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จากวิทยาลัยเทคนิคและอาชีวศึกษา (วิทยาเขตเทเวศร์) เมื่อปีการศึกษา 2525 ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่ง วิศวกรนิวเคลียร์ กองปฏิกรณ์ปฏิบัติ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคนิคและการพลังงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย