บทที่ 2

2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน

หมายถึงแหล่งที่ผลิตอนุภาคนิวตรอน ซึ่งนิวตรอนเกิดขึ้นได้จากปฏิกริยานิวเคลียร์ต่างๆดังนี้คือ

(1) ปฏิกริยาฟิชชั่น (**Fission** reaction) เช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{236} + \gamma$$

$$_{92}U^{236} \longrightarrow FP_1 + FP_2 + k\,{}_{0}n^{1} + \text{Energy}$$

(FP_1, FP_2 = Fission products)

(2) ปฏิกริยาที่ใช้รังสีแกมม่ายิงเข้าไปยังธาตุ เช่น

$$_{4}Be^{9} + \gamma \longrightarrow {}_{4}Be^{8} + {}_{0}n^{1}$$

(3) ปฏิกริยาที่ใช้อนุภาคที่มีประจุ(แอลฟ่า โปรตอน) ยิงเข้าไปยังธาตุแล้วเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ให้อนุภาคนิวตรอน

$$_{3}Li^{7} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow {}_{4}Be^{7} + {}_{0}n^{1} - 1.63\text{MeV}$$

$$_{4}Be^{9} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1} + 5.7\ \text{MeV}$$

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้นิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกริยา (α, n) ตัวที่ให้อนุภาคแอลฟ่าได้แก่ Ac^{227}, Am^{241}, Ra^{226}, Pu^{238}, Cm^{242}, Th^{228} ส่วนธาตุที่จะใช้เป็นเป้า มักนิยมใช้เบอริลเลียม เพราะว่าให้นิวตรอนยีลด์ (Yield) สูง เช่น

เบอริลเลียมที่หนาๆจะให้นิวตรอนเกือบ 4 เท่าของที่ได้จากโบรอน ถ้าเทียบกับฟลูออรีน เบอริลเลียมจะให้นิวตรอนยืดค์มากกว่า 6 เท่า

	^{227}Ac	^{241}Am	^{242}Cm	^{226}Ra	^{228}Th	^{238}Pu
Half life	21.8	433	163	1600	1.913	87.75
Target	Be	Be	Be	Be	Be	Be
Neutron emission n/sec per Ci	1.5×10^{7}	2.2×10^{6}	2.5×10^{6}	1.3×10^{7}	2×10^{7}	2.2×10^{6}
γ-exposure rate mR/h at 1m/Ci	120	<2.5	2.5	780	600	<1

Ac^{227} = Actinium Am^{241} = Americium Cm^{242} = Curium

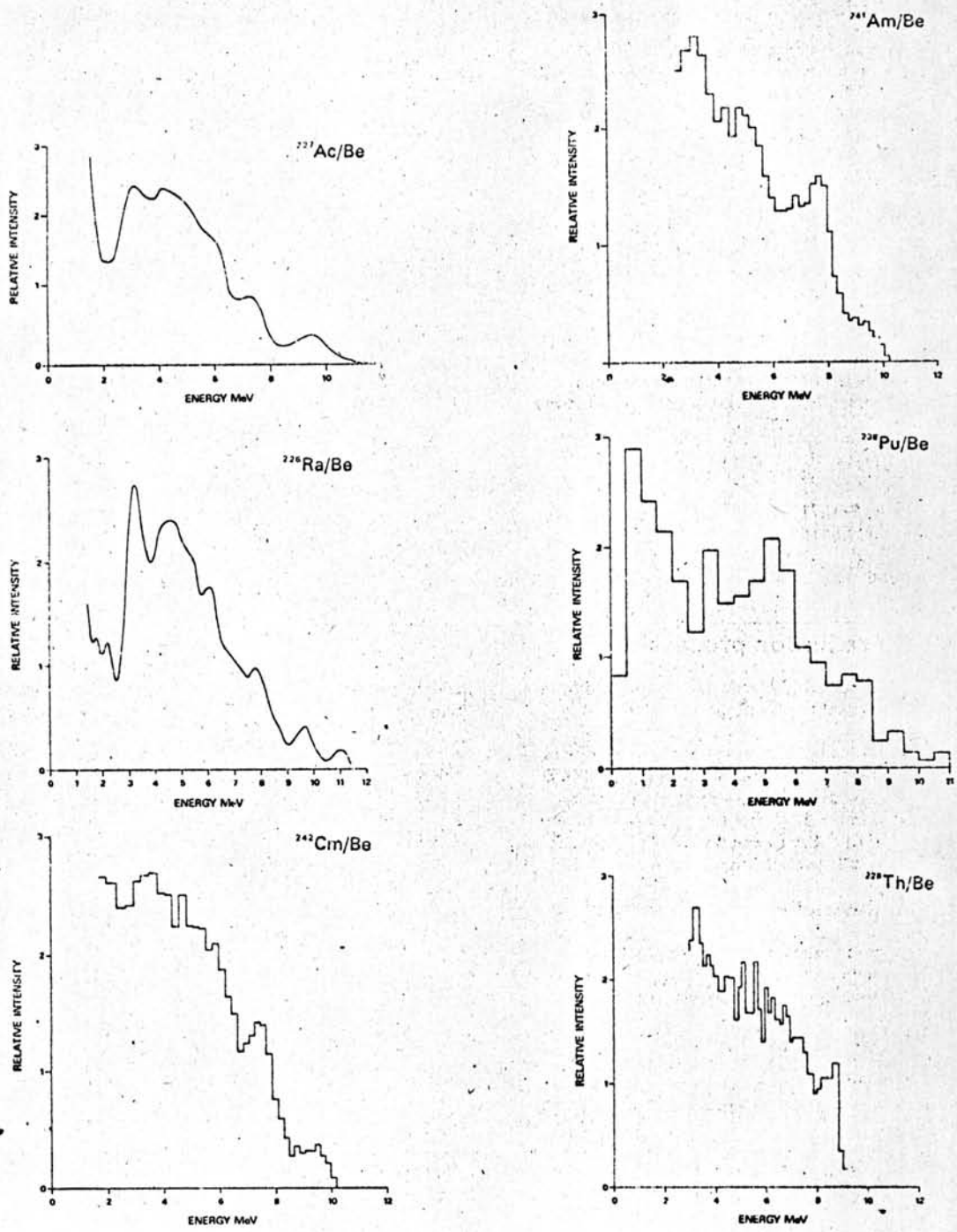
Ra^{226} = Radium Th^{228} = Thorium Pu^{238} = Plutonium

ตาราง 2.1 แสดงถึงแกมม่าและนิวตรอนที่ออกจากต้นกำเนิดชนิดต่างๆ[1] จากตารางจะเห็นว่าพลูโตเนียม-เบอริลเลียม ให้นิวตรอนออกมาน้อย แต่มีข้อดีคือให้ γ- exposure rate ต่ำ ทำให้มีอันตรายน้อย ดังนั้นจึงเหมาะใช้เป็น (α, n) source

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดพลูโตเนียม-เบอริลเลียม (Pu-Be source)

พลูโตเนียม-เบอริลเลียม (Pu-Be) อยู่ในรูปสารประกอบกึ่งโลหะ มีความหนาแน่น 3.78 กรัม/ลูกบาศ์กเซนติเมตร พลูโตเนียม-เบอริลเลียมให้อนุภาคแอลฟ่ามีพลังงาน 5.14 มิลเลี่ยนอีเลคตรอนโวลต์ และให้นิวตรอนได้สูงสุดประมาณ 6 x 10 นิวตรอน/วินาที นิวตรอนสเปคตรัมเริ่มจากที่พลังงาน 0 ถึงประมาณ 10.6 มิลเลี่ยนอีเลคตรอนโวลต์ พลังงานเฉลี่ยประมาณ 4.2 มิลเลี่ยนอีเลคตรอนโวลต์ รูปร่างของ

1 The Queen s Award to Industry. 1974. Radiation Source for Laboratory and Industrial use. England: The Radiochemical Centre Ltd. page 91.



Spectra reproduced by courtesy of:

^{227}Ac/Be — GEIGER, K. and VAN DER ZWAN, L.
Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, **24**, 167, 1973.

^{241}Am/Be, ^{242}Cm/Be, — LORCH, E. A.
Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, **24**, 588–9, 1973.

^{238}Pu/Be — BLOCK, S. *et al*
Health Physics, **13**, 1027, 1967.

^{226}Ra/Be — KLUGG, H.
Z. Naturforschung, **24A**, 1290, 1969.

The ^{241}Am/Be, ^{242}Cm/Be and ^{228}Th/Be sources were made and measured at The Radiochemical Centre using a stilbene crystal and pulse shape discrimination.

Note:
(α,n)Be neutron sources also emit a significant number of low energy (<1MeV) neutrons.

Figure 54

รูป 2.1 แสดงสเปคตรัมของแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดต่างๆ

จากหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 8

พลูโตเนียม-เบอริลเลียมเป็นรูปทรงกระบอก ถ้าใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม.และสูง 3 ซม. จะได้นิวตรอนยีลด์ประมาณ 10^6 นิวตรอน/วินาที จากการทดลองของสจ้วต ใช้พลูโตเนียม 13 กรัมผสมกับเบอริลเลียม 7 กรัม วัดนิวตรอนยีลด์ได้ 1.2×10^6 นิวตรอน/วินาที ส่วนพลูโตเนียม-เบอริลเลียม ที่ใช้ศึกษาอยู่นี้ พลูโตเนียมอยู่ในรูปออกไซด์ (PuO_2) Pu หนัก 0.311 กรัม Be หนัก 7.0 กรัม มีความแรง 5.34 คูรี่ จะปล่อยนิวตรอน 1.11×10^7 นิวตรอน/วินาที นิวตรอนเอจ (Ages of neutron) ในน้ำประมาณ 52.8 ตารางเซนติเมตร

2.3 อนุภาคนิวตรอน

เป็นอนุภาคที่อยู่ในนิวเคลียสของปรมาณู ไม่มีประจุ มีมวลนิ่ง 1.00898 amu หรือ 1.675×10^{-24} กรัม แบ่งนิวตรอนออกเป็นพวกๆตามพลังงานของมันได้ดังนี้

(1) นิวตรอนช้า (Slow neutrons) มีพลังงานตั้งแต่ 0 -- 1000 eV

(2) นิวตรอนชนิดกลางๆ (Intermediate neutrons) มีพลังงานตั้งแต่ 10^3 - 5×10^5 eV

(3) นิวตรอนเร็ว (Fast neutrons) มีพลังงานตั้งแต่ 0.5 - 10 MeV

(4) นิวตรอนชนิดเร็วมาก (Very fast neutrons) พลังงานตั้งแต่ 10 - 50 MeV

(5) นิวตรอนชนิดเร็วมากๆ (Ultra fast neutrons) มีพลังงานตั้งแต่ 50 MeV

สำหรับนิวตรอนช้านี้ อาจจะแบ่งได้เป็น 3 พวกดังนี้

(1) นิวตรอนเย็น (Cold neutrons) มีพลังงานน้อยกว่า 0.002 eV นิวตรอน ชนิดนี้มีอำนาจทะลุทะลวงผลึกของสารได้อย่างดี

(2) เทอร์มอลนิวตรอน (Thermal neutrons) นิวตรอนพวกนี้มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานเฉลี่ยของอะตอมในตัวกลาง

(3) อีพิเทอร์มาลนิวตรอน (Epithermal neutrons) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนเล็กน้อย นิวตรอนในช่วงที่ทำให้การกระจายของนิวตรอนตามพลังงานไม่เป็นไปตามแมกซ์เวลล์ดิสทริบิวชั่น (Maxwell distribution) เป็นอีพิเทอร์มาลนิวตรอน

สำหรับนิวตรอนที่ได้จาก Pu-Be ที่แช่อยู่ในน้ำ พลังงานจะอยู่ในช่วงนิวตรอนเร็วถึงเทอร์มาลนิวตรอน ดังนั้นการหานิวตรอนฟลักซ์ ก็จะหาเฉพาะเทอร์มาลนิวตรอนและนิวตรอนเร็ว

2.4 การลดความเร็วของนิวตรอน (Moderation of neutron)

นิวตรอนที่วิ่งออกจากตัวกำเนิดนิวตรอน Pu-Be เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงอยู่ในช่วงมิลเลี่ยนอีเลคตรอนโวลต์ เมื่อมันวิ่งออกมาจากตัวกำเนิด จะมีการชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง ซึ่งเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ในการชนกับนิวเคลียสแต่ละครั้ง นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่ให้กับนิวเคลียสที่ถูกชน ทำให้ความเร็วของนิวตรอนลดลง ตัวกลางที่ลดความเร็วของนิวตรอนเรียกว่า โมเดเรเตอร์ (Moderator) และวิธีการเรียกว่า Moderation หรือ Thermalzation เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของตัวกลางแบบยืดหยุ่น จะได้

(1) โมเมนตัมคงที่ (Momentum conserved)

(2) พลังงานจลน์คงที่ (Kinetic energy conserved)

การพิจารณาวัสดุที่ใช้สำหรับลดความเร็วของนิวตรอนต้องคำนึงถึงข้อต่อไปนี้

(1) ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (Microscopic scattering cross section = σ_s)

(2) ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (Microscopic absorption cross section = σ_a)

(3) พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่ลดลงต่อการชน 1 ครั้ง

พิจารณาการชนอย่างจัง (head on) ระหว่างนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางที่มี mass number เท่ากับ A

E_o = พลังงานของนิวตรอนก่อนชน

E = พลังงานของนิวตรอนหลังชน

จากโมเมนตัมและพลังงานจลน์คงที่ จะได้

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \qquad \text{.....(2.1)}^1$$

สมการ (2.1) จะเกี่ยวข้องกับพลังงานที่สูญหายไปมากที่สุดในการชน 1 ครั้ง ในกรณีของไฮโดรเจน A=1 ถ้าเป็นการชนอย่างจัง นิวตรอนจะหยุดทันที ในกรณีของคาร์บอน A=12 อัตราส่วนของพลังงานที่หายไปมากที่สุดต่อการชน 1 ครั้ง เป็น 28 เปอร์เซนต์ ในกรณีของยูเรเนียม A=238 จะลดพลังงานได้เพียง 2 เปอร์เซนต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนนิวเคลียสหนักๆ พลังงานของมันจะไม่เปลี่ยนแปลง ตรงกันข้าม ถ้านิวตรอนชนสารประกอบที่มี A น้อย พลังงานจะลดลงอย่างมาก จนกระทั่งมีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานเฉลี่ยของตัวกลาง นอกจากนี้นิวตรอนอาจจะหมดฤทธิ์โดยปฏิกริยานิวตรอนแคปเจอร์ (Neutron capture) คือ ขณะที่นิวตรอนวิ่งเข้ามาชนกับนิวเคลียสแบบยืดหยุ่นแล้ว ความเร็วลดลงจนกระทั่งพลังงานอยู่ที่ระดับหนึ่ง ซึ่งนิวเคลียสที่ชนนั้นมีภาคตัดขวางของการดูดกลืนสูง นิวตรอนก็จะถูกจับเกิดปฏิกริยานิวตรอนแคปเจอร์ เช่นผ่านนิวตรอนเร็วลงไปในสารละลาย $CaCl_2$ นิวตรอนถูกทำให้ช้าเนื่องจากชนกับน้ำแบบยืดหยุ่น จนกระทั่งมีพลังงานประมาณ 0.178 eV มันจะถูกนิวเคลียสของแคดเมี่ยมจับไว้

เนื่องจากการชนแต่ละครั้งอาจจะไม่ชนอย่างจังเสมอ บางครั้งจะทำมุมต่างๆ

---

1 Richard Stephenson. 1958. Introduction to Nuclear Engineering. Tokyo: Kogakusha Company, L T D. page 69

กัน พลังงานที่เสียไปในการชนแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน ถ้าชนอย่างจังพลังงานจะเสียไปมากที่สุด แต่เฉลี่ยแล้วพลังงานที่เสียไปในการชน 1 ครั้งจะน้อยกว่าในสมการ

ξ = Average logarithmic energy decrement per collision

$$= \ln \frac{E_o}{E}$$

A = Mass number ของนิวเคลียสที่ถูกนิวตรอนชน

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{4A} \ln \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

ในกรณีที่ $A > 10$

$$\xi = \frac{2}{A + 2/3}$$

ถ้าโมเดเรเตอร์เป็นสารประกอบ ค่าเฉลี่ยของ ξ จะหาได้จากสมการ

$$\bar{\xi} = \frac{\sigma_{s_1}\xi_1 + \sigma_{s_2}\xi_2 + \cdots \sigma_{s_n}\xi_n}{\sigma_{s_1} + \sigma_{s_2} + \cdots \sigma_{s_n}}$$

σ = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (microscopic scattering cross section) เช่น น้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม

$$\bar{\xi}_{H_2O} = \frac{2\,\sigma_s(H) + \sigma_s(O)\xi(O)}{2\,\sigma_s(H) + \sigma_s(O)} \qquad (\xi_H = 1)$$

ξ จะลดลงเมื่อแมสของนิวเคลียสที่ถูกชนมากขึ้น จำนวนการชนกับนิวไคล์ของตัว

กลางเมื่อลดพลังงานของนิวตรอนจาก 2 MeVถึง 0.025eV จะหาได้จาก

จำนวนการชนเฉลี่ยเพื่อลดพลังงานของนิวตรอนจาก 2 Mev ถึง 0.025 eV

$$= \frac{\ln\left(\frac{2 \times 10^6}{0.025}\right)}{\xi}$$

$$= \frac{18.2}{\xi}$$

Element	Mass No	α	ξ	Collisions to Thermalize
Hydrogen	1	0	1.000	18
Deuterium	2	0.111	0.725	25
Helium	4	0.360	0.425	43
Berylium	9	0.640	0.206	86
Carbon	12	0.716	0.158	114
Uranium	238	0.983	0.000838	2172
Water	–	–	0.948	19
Heavy water	–	–	0.570	32

ตาราง 2.2 แสดง Scattering properties of nuclei[1]

จากตารางถ้า ξ มีค่ามาก จำนวนการชน (เพื่อให้นิวตรอนเร็วเป็นเทอร์มาลนิวตรอน) จะน้อยลง และ ξ ของไฮโดรเจนมีค่ามาก แสดงว่าจำนวนการชนเพื่อให้นิวตรอนเร็วเป็นเทอร์มาลนิวตรอนจะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้เป็น

1 Samuel Glasstone, and Alexander Sesonske. 1967. Nuclear Reactor Engineering. New York: D.Van Nostrand Co.

วัสดุสำหรับลดความเร็ว การที่จะพิจารณา ξ อย่างเดียวนั้นยังไม่ถูกต้อง ต้องพิจารณาภาคตัดขวางมหภาคของการกระเจิงด้วย

$\xi\Sigma_s$ = The slowing down power of material ซึ่งแสดงถึง logarithm เฉลี่ยของพลังงานนิวตรอนที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง ถ้าสารใดมี slowing down power และภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนสูง มันจะไม่เหมาะที่จะใช้เป็นโมเดเรเตอร์ เพราะว่าเทอร์มาลนิวตรอนจะถูกดูดกลืนหมด ดังนั้นการพิจารณาสารที่ใช้เป็นโมเดเรเตอร์ สารต้องมี slowing down power สูง ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนต่ำ

$$\text{Moderating Ratio} = \frac{\text{The slowing down power}}{\text{The microscopic absorption cross section}}$$

$$= \frac{\xi\Sigma_s}{\Sigma_a}$$

$$= \frac{\xi N\sigma_s}{\xi N\sigma_a}$$

$$= \frac{\xi\sigma_s}{\xi\sigma_a}$$

Σ_a = ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน (Macroscopic absorption cross section)

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน (Microscopic absorption cross section)

N = จำนวนอะตอมใน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของโมเดเรเตอร์

Moderator	Slowing down power	Moderating Ratio
Water	1.28	58
Heavy water	0.18	21000
Helium	10^{-5}	45
Beryllium	0.16	130
Graphite	0.065	200

ตาราง 2.3 แสดง Slowing down properties of moderators[1]

จากตารางจะเห็นว่า Heavy water มี Moderating Ratio สูงสุด เหมาะที่จะใช้เป็นโมเดเรเตอร์ แต่ราคาสูง ส่วนเบอริลเลียมและการ์บอนนั้นมีประสิทธิภาพในการลดพลังงานของนิวตรอนได้น้อย น้ำเหมาะที่จะใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ enriched fuel นอกจากนี้น้ำยังเป็นตัว reflector ทำให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กลง ส่วนยูเรเนียมที่ความดันสูงๆ จะใช้เป็นทั้งโมเดเรเตอร์และตัวระบายความร้อน ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ศึกษาอยู่นี้ใช้น้ำเป็นโมเดเรเตอร์ เนื่องจากว่า น้ำมีราคาถูกและหาง่าย Slowing down power สูง แต่ค่า Moderating Ratio มีค่าต่ำ ดังนั้น เทอร์มาลไลซ์จะน้อย จึงไม่ค่อยจะเหมาะใช้ในงานวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่มีความไว (sensitivity) ต่ำๆ

---

1 Samuel Glasstone, and Alexander Sesonske. 1967. Nuclear Reactor Engineering. New York: D. Van Nostrand Co.