



บทที่ 2

รังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา

2.1 รังสีนิวตรอน (Neutron) (4 - 9)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุมีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (โดยใช้ Physical atomic weight scale) มีค่ามากกว่ามวลของไฮโดรเจนอะตอม ซึ่งมีค่า 1.0078252 หน่วยมวลอะตอม นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรสลายตัวให้อนุภาคโปรตรอน อิเล็กตรอน และ แอนตินิวตริโน เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุตั้งนั้นในการวัดจำนวนนิวตรอนจึงต้องอาศัยปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ที่ส่งอนุภาคอื่นที่มีประจุออกมา

เมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง นิวตรอนจะชนกับนิวเคลียสโดยตรงทำให้เกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบ ได้แก่ การชนแบบยืดหยุ่น การชนแบบไม่ยืดหยุ่น การจับนิวตรอนแล้วส่งรังสีแกมมาออกมา การจับนิวตรอนแล้วให้อนุภาคที่มีประจุออกมา ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน ปฏิกิริยานิวชัน

นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานในการชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักน้อยกว่านิวเคลียสของธาตุเบาเนื่องจากเหตุผลที่ว่า ในการที่นิวตรอนเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง นอกจากจะมีการชนแบบยืดหยุ่นแล้ว นิวตรอนยังมีการสูญเสียพลังงาน ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นด้วยซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดทั้งการถอยของนิวเคลียสและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของนิวเคลียสที่เป็นเป้า จากสภาวะพลังงานต่ำสุด (ground state) มาเป็นสภาวะพลังงานที่ถูกกระตุ้น (excited state) สำหรับนิวเคลียสของธาตุเบา ค่าพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) สำหรับการชนแล้วเกิดการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นมีพลังงานสูงหลายเมกะอิเลคตรอนโวลต์ตั้งนั้นปฏิกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นจึงไม่เกิดขึ้นกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน ตั้งนั้นการลดพลังงานของนิวตรอนโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่มีเลขมวลต่ำจึงไม่ค่อยสำคัญ สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูง ๆ พลังงานเทรชโฮลด์ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าต่ำการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นอันตรกิริยาที่สำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอน

การลดพลังงานของนิวตรอนจะคำนวณในเทอมของ เลทาร์จี (lethargy) ซึ่ง เลทาร์จีคือเนเจอร์ลลอ็อก (natural log, ln) ของอัตราส่วนพลังงานที่ลดลงเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลางและเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ใช้แทนพลังงานของนิวตรอนที่

เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการชน ซึ่งใช้สัญลักษณ์ U

$$U = \ln (E_0/E) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

E_0 เป็นพลังงานสูงสุดของนิวตรอนเริ่มต้นที่เกิดขึ้นในระบบ

E เป็นพลังงานของนิวตรอนขณะนั้น

จากสมการ (2.1) จะเห็นว่าเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงค่าเลขาร์จีจะต่ำและเมื่อนิวตรอนลดพลังงานลงค่าเลขาร์จีจะสูงขึ้น

เลขาร์จีของการชนแบบยืดหยุ่น

$$U = U_2 - U_1 = \ln (E_1/E_2) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

U_1 เป็นเลขาร์จีที่พลังงาน E_1 ซึ่งเป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนที่จะมีการชนแล้วกระเจิงไป

U_2 เป็นเลขาร์จี ที่พลังงาน E_2

จากสมการ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้

$$E = E_0 e^{-U} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

จากสมการ (2.3) สามารถสร้างกราฟระหว่างพลังงานและเลขาร์จีได้กราฟรูปเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ตามรูปที่ (2.1)

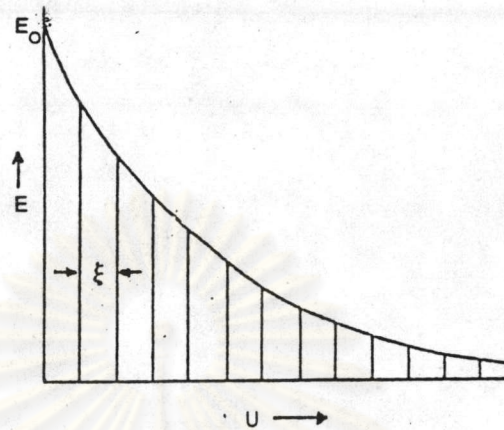
จากรูปที่ 2.1 เส้นตรงตามแนวราบห่างกัน ξ ความสูงของเส้นแทนค่าเฉลี่ยของพลังงานของนิวตรอนที่สูญเสียไปในการชน ดังนั้น ξ จะสามารถเขียนในรูปสมการ

$$\xi = \ln (E_1/E_2) \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

E_1 เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนชน

E_2 เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังชน

จากรูปที่ (2.1) และสมการ (2.4) จะเห็นว่านิวตรอนจะสูญเสียพลังงานเฉลี่ยเมื่อเริ่มมีการชนมากกว่าที่จะเสียไปในช่วงท้าย แสดงว่าขณะที่ความเร็วลดลงเลขาร์จีจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและเลขทาร์จ

2.1.2 จำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วพลังงานลดลง

เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลาง นิวตรอนจะถูกลดพลังงานลง ดังนั้นถ้าให้ N แทนจำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วทำให้พลังงานของนิวตรอนมีพลังงานลดลงจาก E_i เป็น E_f ค่า N ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

$$N = \frac{\ln \left(\frac{E_i}{E_f} \right)}{\ln \left(\frac{E_i}{E_i} \right)_{av}} \dots\dots\dots (2.5)$$

จากสมการ (2.4) และ (2.5) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$N = \frac{\ln \frac{E_i}{E_f}}{\xi} \dots\dots\dots (2.6)$$

ในการคำนวณหา ξ จะต้องคำนึงถึงโอกาสที่นิวตรอนจะมีพลังงานระหว่าง E_1 และ αE_1

$$\begin{aligned} \xi &= \int_{\alpha E_1}^{E_1} \ln \frac{E_i}{E_1} F(E) dE \\ \xi &= 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

E_1 เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนชน

E_2 เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังชน

$F(E)$ เป็นโอกาสที่นิวตรอนจะมีพลังงานระหว่าง E และ $E + dE$

สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลมากกว่า 10 สมการ (2.7) สามารถเขียนใหม่ได้

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \dots\dots\dots (2.8)$$

ตารางที่ 2.1 ค่า ξ และจำนวนครั้งที่นิวตรอนชนนิวเคลียสแล้วลดพลังงานลงจาก 1 MeV เป็น 0.0253 eV

นิวเคลียส	เลขมวล	ξ	N^{**}
H	1	1.000	18
H ₂ O	-	0.920*	19
D	2	0.725	25
D ₂ O	-	0.509*	35
Be	9	0.209	84
C	12	0.158	111
O	16	0.120	146
Na	23	0.0825	-
Fe	56	0.0357	490
U	238	0.00838	2087

หมายเหตุ * ค่าประมาณ

** จำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงานลงจาก 1 MeV เป็น 0.0253 eV

2.1.3 ความสามารถของตัวกลางที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอน

สัดส่วนของการลดพลังงาน (moderating ratio) เป็นตัวเลขแสดงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ลดลงต่อภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน ซึ่งแสดงคุณสมบัติของตัวนำพลังงานนิวตรอน สัดส่วนของการลดพลังงานนิวตรอนคำนวณได้จาก

$$\text{Moderating ratio} = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a} \dots\dots\dots(2.9)$$

$\xi \Sigma_s$ เป็นพลังงานที่ลดลง (Slowing down power)

Σ_a เป็นภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน (Macroscopic absorption cross section)

ธาตุที่มีสัดส่วนของการลดพลังงานต่ำ จำนวนครั้งที่จะทำให้พลังงานของนิวตรอนลดลงจะมีค่าน้อยดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของธาตุเบา ๆ ที่มักใช้เป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอน

ธาตุ	ξ	จำนวนครั้งที่นิวตรอนพลังงาน 1 MeV เข้าชนกับนิวเคลียส เพื่อให้เป็นเทอร์มาลนิวตรอน	Moderating ratio
H ₂	1.000	18	66
H ₂ O	0.920	19	67
¹ D ₂	0.725	25	< 5820
D ₂ O	0.509	35	5820

2.2 รังสีแกมมา (Gamma Ray)

รังสีแกมมา เป็นรังสีแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมีความยาวคลื่นสั้นและ

พลังงานสูง มีลักษณะเหมือนรังสีเอ็กซ์แต่ต่างกันว่าแหล่งกำเนิดกล่าวคือรังสีแกมมาเกิดจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ส่วนรังสีเอ็กซ์เกิดภายนอกนิวเคลียสของอะตอม

2.2.1 การวัดความเข้มรังสีที่ส่งผ่าน

การวัดความเข้มรังสีแกมมาที่ส่งผ่าน อาศัยหลักการคือเมื่อรังสีแกมมาวิ่งที่ส่งผ่านวัสดุใด ๆ แล้วจะทำให้พลังงานของรังสีที่ส่งผ่านวัสดุนั้นลดลงตามสมการต่อไปนี้ (10 , 11)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \dots\dots\dots(2.11)$$

- I_0 ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนผ่านเข้าไปในวัตถุ
- I ความเข้มของรังสีแกมมาที่ส่งผ่านออกมา
- x ความหนาของวัตถุ (ซม.)
- μ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงเส้น (ซม⁻¹)
- μ/ρ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวล (ซม²/กรัม)
- ρx มวลต่อพื้นที่ของตัวกลาง (กรัม/ซม²)

สำหรับวัตถุที่เป็นของผสม สมการ (2.10), (2.11) เขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu_A + \mu_B + \mu_C + \dots\dots\dots)x} \dots\dots\dots(2.12)$$

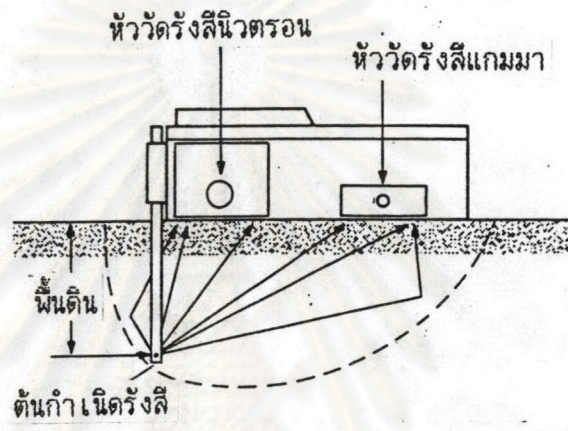
หรือ

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu_A/\rho_A + \mu_B/\rho_B + \mu_C/\rho_C + \dots\dots)(\rho x)} \dots\dots\dots(2.13)$$

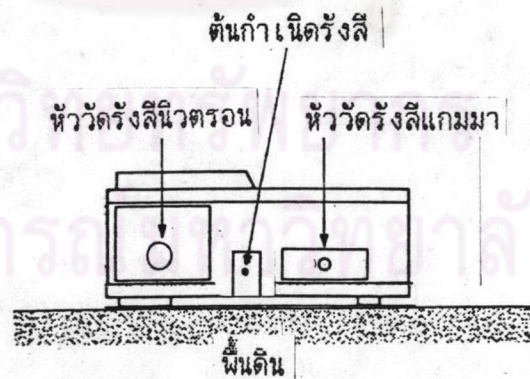
- $\mu_A + \mu_B + \mu_C + \dots\dots$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นสำหรับวัตถุที่เป็นของผสม
- $\mu_A/\rho_A + \mu_B/\rho_B + \mu_C/\rho_C + \dots\dots$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลสำหรับวัตถุที่เป็นของผสม

2.3 การจัดอุปกรณ์วัดความชื้นและความหนาแน่น

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความชื้นและความหนาแน่นที่ใช้งานอยู่มีการออกแบบแตกต่างกันออกไป มีทั้งแบบที่ใช้สำหรับวัดความชื้นและความหนาแน่นบริเวณพื้นผิว (Surface gauge) และแบบที่ใช้สำหรับวัดความชื้นและความหนาแน่นในระดับลึก (Subsurface gauge) ดังรูปที่ 2.2 ก. และ ข.



(ก) ในระดับลึก

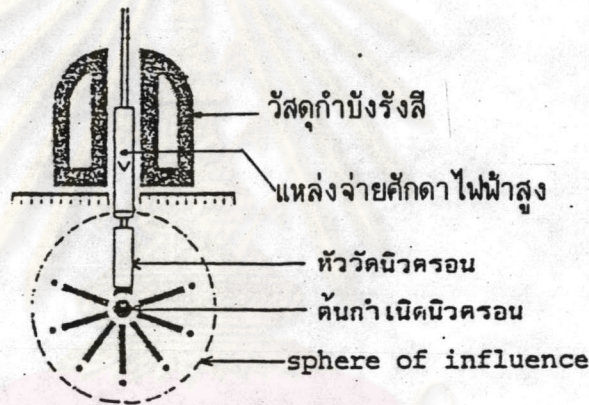


(ข) บริเวณพื้นผิว

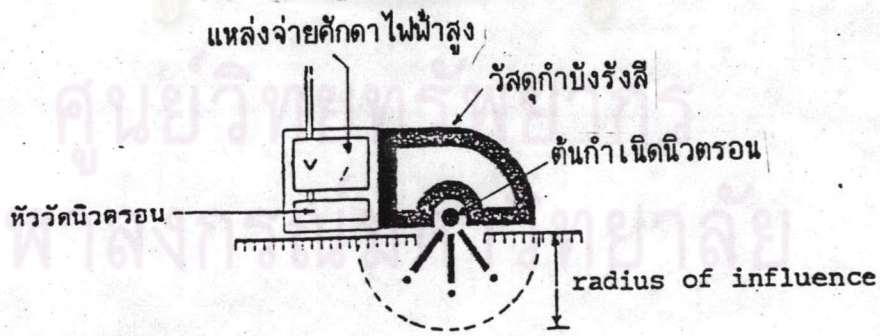
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์วัดความชื้นและความหนาแน่น

2.3.1 ความหนาและพื้นที่วิกฤต

รังสีนิวตรอนจะกระจายออกจากต้นกำเนิดในทุกทิศทาง ความเข้มของรังสีนิวตรอนที่บริเวณต้นกำเนิดและบริเวณใกล้เคียงที่เวลาใด ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของวัสดุซึ่งอยู่บริเวณรอบ ๆ ต้นกำเนิดถ้าค่อย ๆ เพิ่มปริมาตรของวัสดุรอบ ๆ ต้นกำเนิดขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง ความเข้มของนิวตรอนจะมีค่าสูงสุดและไม่เพิ่มขึ้นอีก ปริมาตรของวัสดุที่น้อยที่สุดในรูปของทรงกลมที่อยู่รอบต้นกำเนิดซึ่งให้ค่าความเข้มของนิวตรอนสูงสุด เรียกว่าความหนาวิกฤต (Sphere of Influence) และเรียกรัศมีของทรงกลมนี้ว่าพื้นที่วิกฤต (Radius of Influence) หมายความว่าถ้าเอาวัสดุนอกบริเวณพื้นที่วิกฤตออกจะไม่มีผลต่อความเข้มของนิวตรอนบริเวณต้นกำเนิดและบริเวณใกล้เคียง



(ก) หัววัดความชื้นในระดับลึก



(ข) หัววัดความชื้นบริเวณพื้นผิว

รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของอุปกรณ์วัดความชื้นในระดับลึกและพื้นผิว