บทที่ 2

นิวตรอนและอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

2.1 นิวตรอน

2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุไฟฟ้า มีมวลเท่ากับ 1.67492×10^{-24} กรัม เป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตรอน อิเลกตรอน และ แอนตินิวตริโน (antineutrino) พร้อมปลดปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV ค่าครึ่งชีวิตของนิวตรอนมีค่าประมาณ 12 วินาที คุณสมบัติตามลักษณะของคลื่นของนิวตรอนแล้ว นิวตรอนพลังงานประมาณ 1 eV จะมีความยาวคลื่นเดอบรอย (de Broglie) ขนาดเดียวกับขนาดของช่องว่างระหว่างอะตอมของผลึกสามารถหักเห (diffract) เมื่อผ่านผลึกคล้ายรังสีเอกซ์

เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ จึงไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นอิออน (ionization) แต่สามารถวัดได้โดยทางอ้อม โดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้อนุภาคที่มีประจุออกมา ดังปฏิกิริยาที่แสดงไว้ในสมการที่ 2.1

$$^{6}Li + ^{1}n \rightarrow ^{3}H + ^{4}He + 4.8\ Mev \qquad \text{..... (2.1)}$$

ตัวอย่างเช่น เมื่อวัดนิวตรอนช้าได้โดยอาศัยปฏิกิริยาในสมการที่ (1) นิวตรอนช้าเข้าสู่หัววัดที่บรรจุ ^{6}Li ในรูปของ glasses (Li - glass Scintillator) ทำให้เกิด ^{3}H ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นแสงและสัญญาณทางไฟฟ้าตามลำดับ

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน [8,12,18]

ตามธรรมชาติมีนิวตรอนพุ่งออกมาจากอวกาศภายนอกโลกมาสู่โลก นิวตรอนอิสระที่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศนั้น เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาของอนุภาคปฐมภูมิในรังสีคอสมิก กับ

นิวเคลียสของธาตุในบรรยากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นออกซิเจนและไนโตรเจน นิวตรอนเหล่านี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) ผลิตนิวตรอนจากปฏิกริยาการแตกตัวของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม - 235

2.2.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron Generator) ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาการรวมตัว (fusion reaction) ของตริเตียม (tritium, ^{3}H) หรืออาจผลิตจากเครื่องโซโคลตรอน (Cyclotron) ซึ่งเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่เร่งอนุภาคให้มีพลังงานพอเหมาะเข้าไปในเป้าแล้วให้นิวตรอนพลังงานเดียวที่มีพลังงานต่าง ๆ กัน เช่น ปฏิกริยา $^{9}Be\ (d,n)^{10}B$ และ $^{7}Li\ (p,n)^{7}Be$

2.2.3 ธาตุกัมมันตรังสีที่แตกตัวได้เอง (Self - Fission) ธาตุหนักบางชนิดสามารถเกิดการแตกตัวได้เอง พร้อมทั้งปลดปล่อยนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ตัวอย่างของต้นกำเนิดประเภทนี้ได้แก่ แคลิฟอร์เนียม - 252 (Californium - 252, ^{252}cf) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิสชั่นด้วยตัวเอง (Spontaneous Fission)

2.2.4 ต้นกำเนิดที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α,n)หรือ (γ,n) ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีแอลฟา เช่น อเมอริเซียม - 241 (Americium-241, ^{241}Am) เรเดียม -226 (Radium-226, ^{226}Ra)หรือต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงานสูง เช่น พลวง-124 (Antimony-124, ^{124}Sb) ผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบอริลเลี่ยม (Beryllium, Be)

ตัวอย่างต้นกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ในการวัดนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่นิยมใช้กัน [7,16]

ต้นกำเนิด	ชนิด	พลังงานนิวตรอนเฉลี่ย(MeV)	ครึ่งชีวิต	ยิลด์นิวตรอน/วินาที.คูรี	คำอธิบาย
^{124}Sb - Be	แกมมา,นิวตรอน	0.024	60 วัน	1.6×10^{6}	-ครึ่งชีวิตสั้น -แกมมาแบคกราวน์สูง -พลังงานนิวตรอนต่ำ ข้อดีสำหรับ Ther-malizagtion -ปริมาตรใหญ่
^{124}Cm - Be	แกมมา,นิวตรอน	4	163 วัน	4×10^{6}	
^{244}Cm - Be	แกมมา,นิวตรอน	4	18.1 ปี	3×10^{6}	
^{238}Pu - Be	แกมมา,นิวตรอน	4	89 ปี	2.8×10^{6}	
^{241}Am - Be	แกมมา,นิวตรอน	4	458 ปี	2.0×10^{6}	-ครึ่งชีวิตยาว -กำบังแกมมาได้ง่าย
^{226}Ra - Be	แกมมา,นิวตรอน	3.6	622 ปี	15×10^{6}	-ยิลด์นิวตรอนสูง -แกมมาแบคกราวน์สูง
^{239}Pu - Be	แกมมา,นิวตรอน	4.5	24360 ปี	2.0×10^{6}	
^{252}Cf	แกมมามาจากรุ่นลูก	2.3	2.65 ปี	4400×10^{6}	-ครึ่งชีวิตปานกลาง -ยิลด์นิวตรอนสูง -พลังงานต่ำ

2.3 อันตรกิริยาของนิวตรอน (Neutron Interaction) [13,14]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง อันตรกิริยาจะเกิดขึ้นกับนิวเคลียสโดยตรงเพราะสามารถวิ่งผ่านอิเลกตรอนที่อยู่รอบนอกนิวเคลียสได้ ดังนั้นเมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังต่อไปนี้

2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) การชนแบบนี้เป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมเท่านั้น ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (Ground State) ส่วนนิวตรอนจะกระเจิงออกมา (Scatter) โดยมีทิศทางและความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงเดิม ใช้สัญญลักษณ์ (n,n)

2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การชนแบบนี้จะมีการรวมตัวกันของนิวตรอนและนิวเคลียสเป็นนิวเคลียสรวม (Compound nucleus) แล้วได้นิวตรอนตัวใหม่จะถูกปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา พลังงานจลน์รวมมีค่าต่างจากเดิม คือ พลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์หลังจากปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาการชนแบบนี้นิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (Excited State) ปฏิกริยาแบบนี้นิวตรอนต้องมีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป การชนแบบนี้จึงเรียกได้ว่าเป็นการชนแบบเทรชโฮลด์ (Threshold Reaction) และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic Reaction) ใช้สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,n')

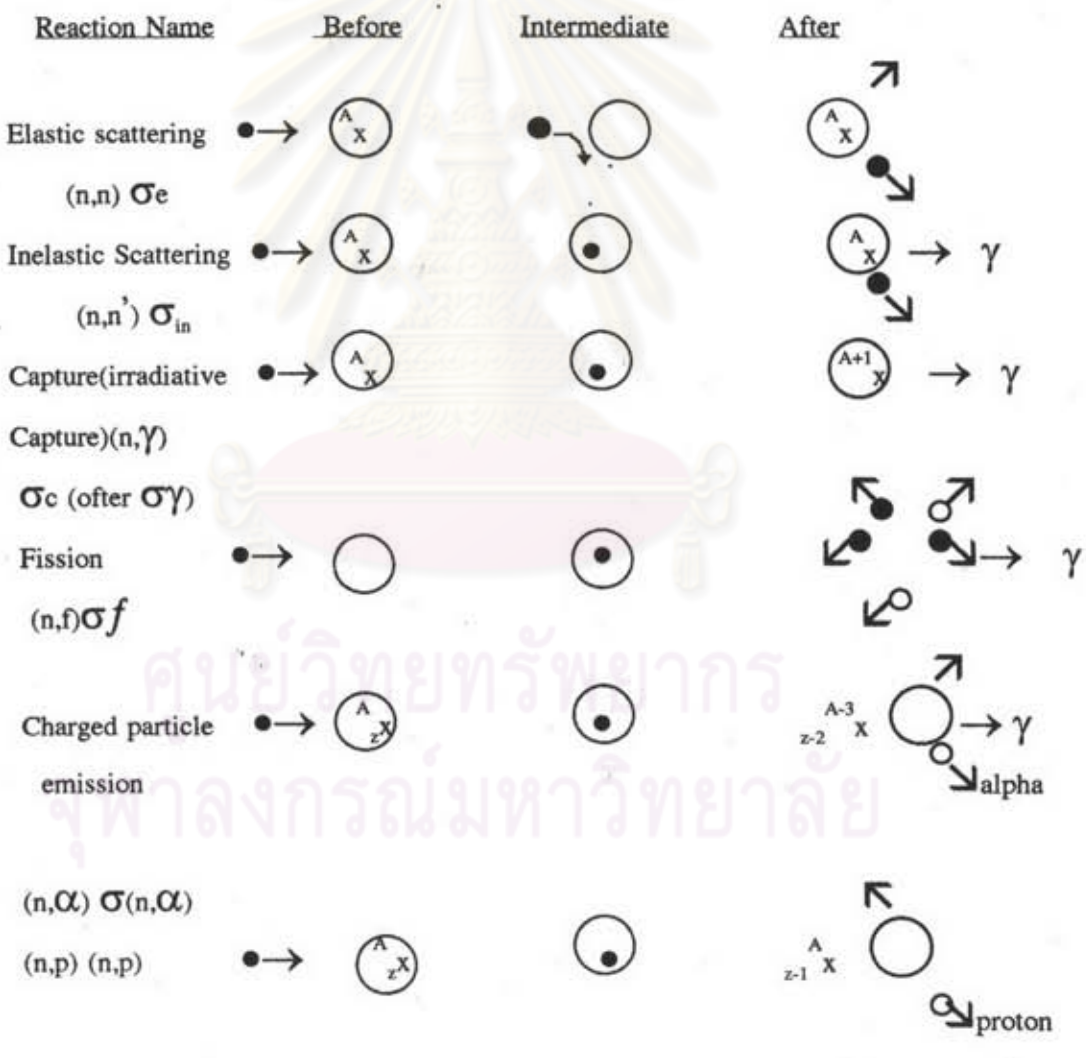
2.3.3 การจับนิวตรอน (Neutron Capture) หรือเรียกว่า เรดิเอทิฟแคปเจอร์(Radiative Capture)หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron-absoption Reaction) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสจะถูกจับไว้ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะทำให้ปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาทันที (Capture Gamma-rays) หรือ Neutron Capture Gamma-rays ปฏิกิริยาจะเป็นแบบปลดปล่อยพลังงาน (Exothermic Reaction) สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,γ) เช่น $^{3}H(n,\gamma)^{2}H$; $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$

2.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชั่นหรือปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เมื่อนิวตรอนไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เกิดเป็นนิวเคลียสรวมจากนั้นจะแบ่งตัวเป็น 2 ส่วน แตกออกมาได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิมพร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัว หลุดออกมาด้วย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สัญญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f) ธาตุหนักที่เกิดปฏิกริยาฟิชชั่นกับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม- 238 พลูโตเนียม -239 เป็นต้น

2.3.5 ปฏิกริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charge Particle Emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังการเกิดนิวเคลียสรวมแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ

ออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตรอน นิวตรอน ดังกล่าวจะต้องมีพลังงานสูงกว่า 10 Mev ตัวอย่างของปฏิกิริยาได้แก่ $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$; $^{16}O(n,p)^{16}N$; $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ เป็นต้น

2.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron Producing Reaction) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n,2n),(n,3n) ปฏิกิริยา (n,2n) นับว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรามณูชนิดที่ใช้น้ำชนิดหนัก (Heavy Water) แผนภาพแสดงอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ [14]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ภาคตัดขวาง (Cross Section) [14,15]

ภาคตัดขวางจุลภาค (σ, microscopic cross section) คือ โอกาสที่นิวเคลียสจะทำอันตรกิริยากับอนุภาคเคลื่อนเข้าชน มีหน่วยเป็นบาร์น (Barn) โดยที่ 1 บาร์น = 10^{-24} ตร.ซม.

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสประกอบด้วย ค่าภาคตัดขวางของ 2 อันตรกิริยา คือ

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_s \qquad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (Microscopic Absorption Cross Section)

= ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอนที่ทำให้เกิดการแตกตัวการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุและการผลิตนิวตรอน

σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (Microscopic Scattering Cross Section)

σ = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้ามีจำนวนนิวเคลียส N ตัว/ลบ.ซม. ผลคูณ N กับσ เรียกว่า "ภาคตัดขวางมหภาค" ($\sum$, Macroscopic Cross Section) มีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$

$$\sum = N\sigma \qquad \text{.....(2.3)}$$

ภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่จะเกิดปฏิกริยาเมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไป

ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่งๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นสำหรับอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Differential Cross Section ($\sigma(E)$) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวาง $\bar{\sigma}$ มีค่าเท่ากับ

$$\bar{\sigma} = \int_0^\infty \phi(E)\sigma(E)d(E) \,/\, \int_0^\infty \phi(E)dEx \qquad \text{.....(2.4)}$$

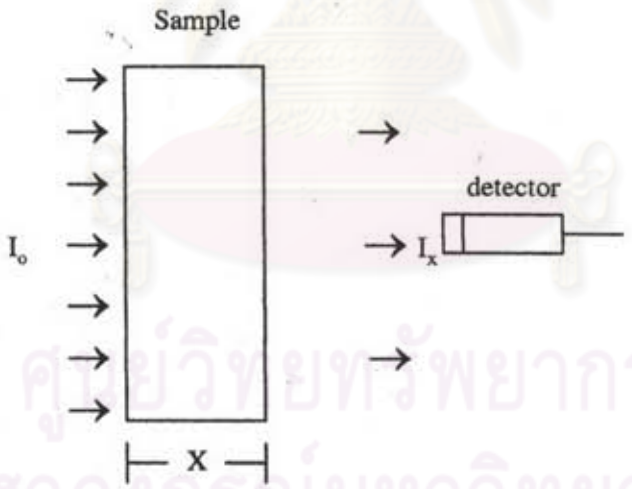
2.5 กฎการลดทอนของรังสี (Attenuation Law of the Radiation)

เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา X มีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนเท่ากับ σ และมีความหนาแน่นอะตอม (Atom Density) เท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคนิวตรอนที่เกิดอันตรกิริยากับตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

จำนวนอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาต่อหนึ่งหน่วย = $\sigma I_o NX$ .....(2.5)

เมื่อ I_o = ความเข้มของอนุภาคขาเข้าหรือจำนวนอนุภาคที่วิ่งเข้าหาตัวกลางต่อหน่วยพื้นที่ในหนึ่งวินาที

จากสมการที่(6) ค่า σ (Cross-section) นั่นเป็นค่าภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่ออนุภาคชนกับสารตัวอย่างดังนั้นจึงเรียกค่าภาคตัดขวางนี้ว่าค่าภาคตัดขวางรวม (Total Cross-section)ใช้สัญญลักษณ์ σ_t ส่วน $N\sigma$ ผลคูณ เรียกว่า ค่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic Cross-section)



รูปที่ 2.2 แสดงภาพการลดทอน (Attenuated) ของรังสีเมื่อรังสีผ่านวัสดุตัวกลาง

จำนวนของอนุภาคที่สามารถไปจนถึงหัววัด โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ กับสารตัวอย่างสามารถคำนวณได้ ดังนี้

สมมติให้ I(x) เป็นความเข้มของอนุภาคนิวตรอนที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ ที่ระยะ x ในตัวกลาง (ดูรูปที่ 2.2) ดังนั้นเมื่อวิ่งผ่านต่อไปด้วยระยะทาง dx จำนวนของอนุภาคที่ไม่เคยเกิด

อันตรกิริยาใด ๆ จะลดลง จำนวนของอนุภาคที่ได้เกิดอันตรกิริยาในส่วนบาง ๆของสารตัวกลางที่มีความหนา dx และมีพื้นที่ 1 ตร.ซม.

ดังนั้นจากสมการที่(6) ความเข้มของอนุภาคที่ลดลงไปใน 1 วินาที เมื่อผ่านตัวกลางที่มีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรและหนา dxคือ

$$-dI(0) = \sigma_t N I(0) dx$$

และเมื่อตัวกลางจะคิดตลอดทั้งความหนาของตัวกลางได้ดังนี้

$$-\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI(x)}{I(0)} = \int_0^x N\sigma_t dx$$

$$I_x = I_0 e^{-N\sigma_t x} \qquad \text{.....(2.6)}$$

นั่นคือ ความเข้มของลำอนุภาค (จำนวนอนุภาค/cm^2.s)ที่ไม่เคยเกิดอันตรกิริยาใด ๆ เลยที่ผ่านสารตัวอย่างออกมาจะลดลงอย่างเป็นเอกซ์โพเนลเชียล(Exponential)กับความหนาของสารตัวกลาง

ส่วนการลดทอนพลังงานของนิวตรอนนั้นแตกต่างจากรังสีที่มีประจุที่ทำอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลาง แต่นิวตรอนจะทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง ค่าผลรวมของภาคตัดขวาง σ_t ก็คือ ผลรวมของค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่นิวตรอนทำกับนิวเคลียสของตัวกลางดังหัวข้อ 2.3 ดังนั้นสมการการลดทอนพลังงานของนิวตรอนจึงคล้ายคลึงกับสมการที่ (7) นั่นคือ

$$I_X = I_0 e^{-N\sigma_{nt} X} \qquad \text{.....(2.7)}$$

เมื่อ σ_{nt} = ค่าภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาต่างๆ ของนิวตรอนต่อนิวเคลียสของตัวกลาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การลดพลังงานของนิวตรอน (Neutron Moderation) [1,6,15]

การลดความเร็วหรือพลังงานของนิวตรอน ทำได้โดยให้นิวตรอนชนกับนิวเคลียสวัสดุบางชนิด วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อย ๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดี ได้แก่ น้ำธรรมดา (H,O) น้ำชนิดหนัก (D,O)เบอริลเลียม คาร์บอนพาราฟิน โพลีเอทธิลีน ฯลฯ

เมื่อนิวตรอนชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่หยุดนิ่ง นิวตรอนจะกระเจิงออกมาพลังงานจลน์ของนิวตรอนจะลดลงส่วนนิวเคลียสจะกระเจิงออกไป พลังงานจลน์ของนิวตรอนและนิวเคลียสภายหลังการชนสามารถคำนวณได้จากกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

ถ้าให้ E,P และ E', P' เป็นพลังงานจลน์และโมเมนตัมของนิวเคลียสก่อนชนและที่กระเจิงไปภายหลังถูกนิวตรอนชนตามลำดับ

θ และ ϕ เป็นมุมที่นิวตรอนและนิวเคลียสกระเจิงออกไปจากแนวเดิมดังในรูปที่ 2.3

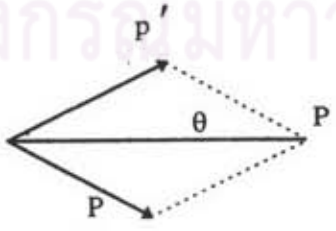
รูปที่ 2.3 การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน

จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะได้

$$E = E' + E_A \qquad \text{.....(2.8)}$$

และจากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมได้

$$p = p' + P \qquad \text{.....(2.9)}$$



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของโมเมนตัม [14,11]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 2.4 จะได้

$$p^2 = p^2 + (p')^2 - 2Pp'\cos\theta \qquad \text{.....(2.10)}$$

เพราะว่า $P = MV = M(2E_A/M)^{1/2}$

ดังนั้น $p^2 = 2ME_A$

ทำนองเดียวกัน $p^2 = 2mE$ และ $p'^2 = 2mE'$

(เมื่อ M,m เป็นมวลของนิวเคลียสและนิวตรอนตามลำดับ)

แทนค่า P,p,p′ ในสมการ (2.10) จะได้

$$ME_A = mE + mE' - 2m(EE')^{1/2}\cos\theta \qquad \text{.....(2.11)}$$

$$M/m(E_A) = E + E' - 2(EE')^{1/2}\cos\theta \qquad \text{.....(2.12)}$$

เนื่องจากค่า M/m = A (เลขมวลของนิวเคลียส) ดังนั้น

$$AE_A = E + E' - 2(EE')^{1/2}\cos\theta \qquad \text{.....(2.13)}$$

แทนค่า $E_A = E - E'$ ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$(A+1)E' - 2(EE')^{1/2}\cos\theta - (A-1)E' = \phi$$

ดังนั้น

$$E' = E/(A+1)^2\,[\cos\theta + (A^2 - \sin^2\theta)^{1/2}]^2 \qquad \text{.....(2.14)}$$

พิจารณา สมการที่ (2.14) ถ้า $\theta=\phi$ จะได้ $E = E'$ หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนให้แก่นิวเคลียส ถ้า $\theta=\pi$ หรือ 180° ค่า E' มีค่าต่ำสุด (E'_{min}) (ยกเว้นกรณีที่นิวตรอนชนกับไฮโดรเจนซึ่งจะกล่าวโดยเฉพาะต่อไป

เมื่อ $\theta = \pi; (E'_{min}) = [(A-1)/(A+1)]^2$ $E = \alpha E$ .....(2.15)

เมื่อ $\alpha = [(A-1)/(A+1)]^2$ .....(2.16)

ค่า α เรียกว่า พารามิเตอร์ของการชน(Collision Parameter) ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งได้แสดงค่า α ของนิวเคลียสบางชนิดไว้

การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสไฮโดรเจนนั่น เนื่องจากนิวตรอนมีมวลใกล้เคียงกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนมาก ดังนั้นจึงแตกต่างไปจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสอื่น ๆ นิวตรอนที่ระเจิงออกไปภายหลังการชนกับนิวเคลียส ไฮโดรเจนจะกระเจิงออกไปด้วยมุมที่ไม่เกิน $\pi/2$ เรดียน หรือ 90° ดังนั้น $(E')_{min}$ ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\phi = \pi/2$

เมื่อ $\theta = \frac{\pi}{2}$; $(E')_{min} = 0$

ปรากฏว่าผลที่ได้มีค่าเท่ากับการแทนค่า A = 1 ลงในสมการ (2.14) ดังนั้นสมการที่ (2.15) จึงสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสทุกชนิดรวมทั้งไฮโดนเจนด้วยค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากการชนกับพวกนิวเคลียสเบารวมทั้งไฮโดนเจนสามารถประมาณได้จาก

$$E' = \frac{E}{2(1+\alpha)} \qquad \text{.....(2.17)}$$

เมื่อ E' เป็นพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากนิวเคลียสดังนั้นค่าการสูญเสียพลังงานเฉลี่ย ($\Delta \bar{E}$) เป็น

$$\Delta \bar{E} = E - E'$$

$$= \frac{E}{2(1-\alpha)} \qquad \text{.....(2.18)}$$

และ $\Delta \bar{E}/E = (1-\alpha)/2$ .....(2.19)

ค่า $\Delta \bar{E}/E$ เรียกว่า Average Fractional Energy Loss

สมการ (2.18) และ (2.19) นั้นสามารถใช้ได้กับนิวเคลียสหนัก แต่ใช้ได้ในช่วงพลังงานต่ำ ตัวอย่างเช่น ในการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียส ^{238}U สามารถใช้สมการที่ (2.18)ถึง(2.19)ได้ในช่วงพลังงานของนิวตรอนไม่เกิน 100 KeV ถ้านิวตรอนพลังงานสูงขึ้นค่าพลังงานที่สูญเสียไปของนิวตรอนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่(2.18)

ถ้าพิจารณาค่า α จะเห็นว่ามีค่าตั้งแต่ 0 สำหรับไฮโดรเจน แล้วเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อค่าเลขมวลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าใกล้เคียง 1 แทนค่า α ลงในสมการ (2.19) จะเห็นว่า $\Delta \bar{E}/E = 1$ หมาย

ความว่าในการชนระหว่างนิวตรอนกับไฮโดรเจนนั้น พลังงานของนิวตรอนจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งโดยเฉลี่ย เมื่อเลขมวลของนิวเคลียสมีค่าเพิ่มขึ้นค่า $\Delta \overline{E}/E$ จะลดลงจาก 1 ตัวอย่างเช่น สำหรับคาร์บอน (A=12) , $\Delta \overline{E}/E = 0.14$ และ ยูเรเนียม (A=238), $\Delta \overline{E}/E$ เท่ากับ 0.01 หมายความว่า ในการชนนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานไป 14 % และ 1% ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนและยูเรเนียม ด้วยเหตุนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรามณูจึงใช้สารประกอบของธาตุที่มีเลขมวลต่ำเป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (Moderator) เช่น น้ำ (H_2O) น้ำชนิดหนัก (D_2O) เป็นต้น

นิวตรอนอาจสูญเสียพลังงานไปโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น แต่สำหรับการชนกับธาตุเบา พลังงานเทรชโฮลด์ (Threshold Energy) สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าสูงมาก และจะไม่เกิดขึ้นกับไฮโดรเจน ดังนั้นการลดพลังงานของนิวตรอนโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวเคลียสที่มีเลขมวลต่ำจึงไม่ค่อยสำคัญ สำหรับนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูง ๆ พลังงานเทรชโฮลด์ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นมีค่าต่ำ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นอันตรกริยาที่สำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอน

การลดพลังงานของนิวตรอนจะคำนวณในเทอมของ เลทาร์จี (Lethargy) ซึ่งเลทาร์จี คือ Natural log, ln ของอัตราส่วนพลังงานที่ลดลงเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง และเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยใช้แทนพลังงานของนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการชน ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ U

$$U = \ln(E_M/E) \qquad \text{.....(2.20)}$$

เมื่อ E_M เป็นพลังงานสูงสุดของนิวตรอนในระบบ

E เป็นพลังงานของนิวตรอน

จากสมการ(2.20) จะเห็นว่าเมื่อนิวตรอนพลังงานสูง ค่าเลทาร์จีจะต่ำและเมื่อนิวตรอนลดพลังงานลงค่าเลทาร์จีจะสูงขึ้น

เลทาร์จีของการชนแบบยืดหยุ่น

$$U = U_2 - U_1 = \ln (E_1/E_2) \qquad \text{.....(2.21)}$$

U_1 เป็นเลทาร์จี ที่พลังงาน E_1ซึ่งเป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนที่จะมีการชนแล้วกระเจิงไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

U_2 เป็นเลทาร์จี ที่พลังงาน E_2

จากสมการ(20)สามารถเขียนใหม่ได้

$$E = E_M e^{-U} \qquad \text{.....(2.22)}$$

จากสมการ (23) สามารถสร้างกราฟระหว่างพลังงานและเลทาร์จีได้กราฟรูปเอกซ์-โพเนนเชียล ตามรูปที่ 2.5 เส้นตรงตามแนวราบห่างกัน ความสูงของเส้นแทนค่าเฉลี่ยของพลังงานของนิวตรอนที่สูญเสียไปในการชนดังนั้น จะสามารถเขียนในรูปสมการ

$$\xi = \ln (E_1/E_2)\ av \qquad \text{.....(2.23)}$$

เมื่อ E_1 เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนชน

E_2 เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังชน

จากรูปที่ 2.5 และสมการ (2.23) จะเห็นว่านิวตรอนจะสูญเสียพลังงานเฉลี่ย เมื่อเริ่มมีการชนมากกว่าที่จะเสียไปในช่วงท้าย แสดงว่าขณะที่ความเร็วลดลง เลทาร์จีจะเพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและเลทาร์จี [14]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับจำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนกับนิวเคลียสแล้วพลังงานลดลง เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลาง นิวตรอนจะถูกลดพลังงานลง ดังนั้นถ้าให้ N แทนจำนวนครั้งที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วทำให้พลังงานของนิวตรอนมีพลังงานลดลงจาก E_1 เป็น E_f ค่า N ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

$$N = [\ln (E_1/E_f)] / [\ln (E_1/E_2)av] \quad \text{.....(2.24)}$$

จากสมการ(2.23)และ(2.24) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$N = [\ln (E_1/E_f)] / \xi \quad \text{.....(2.25)}$$

ในการคำนวณ ξจะต้องคำนึงถึงโอกาสที่นิวตรอนจะมีพลังงานในระหว่าง E_1และ αE_1 ค่า ξ ของนิวเคลียสบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

$$\xi = \int_{\alpha E1}^{E1} \ln (E_1/E_2) F(E)\, dE$$
$$= 1-[(A-1))^2/2A] \ln[(A+1)/(A-1)] \quad \text{.....(2.26)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ในการชนกับนิวตรอนของนิวเคลียสบางชนิด [6,14]

นิวเคลียส	เลขมวล (mass No.)	α	ξ	N**
ไฮโดรเจน (H)	1	0	1.000	18
น้ำ (H_2O)		-	0.920*	19
ดิวทิเดียม (D)	2	0.111	0.725	24
น้ำชนิดหนัก (D_2O)		-	0.509*	34
เบอริลเลียม (Be)	9	0.640	0.209	84
คาร์บอน (C)	12	0.716	0.158	111
ออกซิเจน(O)	16	0.779	0.120	146
โซเดียม (Na)	23	0.840	0.0825	-
เหล็ก (Fe)	56	0.931	0.0357	490
ยูเรเนียม (U)	238	0.983	0.00838	2087

* ค่าประมาณ

** จำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงานจาก 1 MeV คงเหลือ 0.0253 eV

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอน

เมื่อนิวตรอนเร็วชนกับอะตอมของตัวกลาง ในที่สุดจะมีพลังงานลดลงเป็นนิวตรอนช้า ซึ่งจะมีพลังงานต่ำเท่ากับพลังงานของอนุภาคหรืออะตอมของตัวกลางที่อุณหภูมินั้นๆ จึงเรียกว่า "เทอร์มาลนิวตรอน" (thermal neutron) พลังงานของเทอร์มาลนิวตรอนมีการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (Macwellian distribation)กับพลังงานจลน์ของอนุภาคอะตอมหรือโมเลกุลของกาซ ตามสมการดังนี้ คือ

$$N(E) = \frac{2\pi N E^{1/2} e^{-E/KT}}{(\pi KT)^{3/2}} \qquad \text{.....(2.27)}$$

เมื่อ N(E) เป็นจำนวนนิวตรอนที่พลังงานใดๆ ต่อหน่วยปริมาตร

N เป็นจำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

K เป็น Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-6} ev/k

T เป็นอุณหภูมิของตัวกลางเป็นเคลวิน (Kelvin, k)

ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือเท่ากับ 293 เคลวิน เทอร์มาลนิวตรอนมีพลังงานมากที่สุด (most probable energy) เท่ากับ 0.0253 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt,ev)

ดังที่กล่าวมาแล้ว หลังจากที่นิวตรอนเร็วสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปในการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของไฮโดรเจน ผลที่เกิดขึ้นก็คือ จำนวนนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็เกิดจากการที่นิวตรอนเร็วชนกับไฮโดรเจนต้นกำเนิดจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาทุกทิศทางอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาดังนั้นการวัดความเข้มของนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น หรือความเข้มของนิวตรอนที่เร็วลดลงสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความชื้นของวัสดุต่าง ๆ ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย