

# บทที่ 9

## นิวตรอน

### NEUTRON

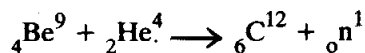
#### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

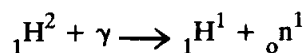
1. อธิบายคุณสมบัติของนิวตรอน และผลที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนกระทบสาร
2. กำหนดหาความแรงของธาตุที่นำออกมาจากการอาบรังสีนิวตรอนได้
3. นำความรู้ที่ได้ในบทนี้ไปใช้ในการป้องกันรังสีได้

## 9.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source)

นิวตรอนเกิดขึ้นได้โดยการใช้อุณหภูมิสูงจากธาตุโพโลเนียมยิงเข้าไปในธาตุเบา ๆ เช่น  $\text{Be}^9$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ



ถ้าใช้รังสีแกมมา พลังงานมากกว่า 2 เมออีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสของดิวทีเรียม จะได้นิวตรอนพลังงานเดียว (monoenergetic) ดังสมการ



เรียกปฏิกิริยา  $(\gamma, n)$  หรือปฏิกิริยาที่เป็นต้นกำเนิดของโฟตอนิวตรอน (photon neutron source) ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ เมื่อพลังงานของรังสีแกมมา มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียส เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับธาตุดิวทีเรียม มีค่าน้อย (ประมาณ 2.2 เมออีวี) จึงทำให้นิวตรอนหลุดออกมาได้ง่าย ในทำนองเดียวกัน อาจใช้  $\text{Be}^9$  เป็นเป้าก็จะได้นิวตรอนเหมือนกัน พลังงานยึดเหนี่ยวของ  $\text{Be}^9$  มีค่าประมาณ 58.16 เมออีวี สำหรับธาตุหนักอื่น ๆ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน มีค่าสูงประมาณ 8 เมออีวี จึงเกิดนิวตรอนได้เมื่อใช้รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง พลังงานของนิวตรอนที่หลุดออกมาจากนิวเคลียส มีค่าเท่ากับค่าแตกต่างระหว่างพลังงานของโฟตอน กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสของเป้า

มวลของนิวตรอนมีค่าประมาณ 1.0086654 เอเอมยู มีค่ามากกว่ามวลของโปรตอนเล็กน้อย จึงเชื่อว่า นิวตรอนเป็นอนุภาคกัมมันตรังสี มีการสลายไปเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน แล้วปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 เมออีวี เชื่อกันว่า การส่งอนุภาคเบตาจากนิวเคลียส น่าจะมีรากฐานมาจากการเปลี่ยนแปลงจากนิวตรอนไปเป็นโปรตอนในนิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีก็ได้

นิวตรอนที่มีพลังงานสูง เรียกว่านิวตรอนเร็ว (fast neutron) นิวตรอนพวกนี้มีพลังงานสูงประมาณ 1 เมออีวี เมื่อผ่านตัวกลางลดความเร็ว (moderator) จะสูญเสียพลังงาน โดยการชนแล้วกระเจิงแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของสาร จนในที่สุด จะอยู่ในลักษณะสมดุลของพลังงานกับสิ่งแวดล้อม (thermal equilibrium) เรียก เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)

## 9.2 ปฏิกริยาระหว่างนิวตรอนกับสาร

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง จึงไม่มีผลต่ออิเล็กตรอนในอะตอม หรือโดยประจุบวกของนิวเคลียส ดังนั้น นิวตรอนจึงผ่านเมฆอิเล็กตรอน เข้าทำปฏิกิริยา (interact) โดยตรงกับนิวเคลียส พูด่างๆ ก็คือ นิวตรอนจะชนกับนิวเคลียสโดยตรง ไม่ได้ชนกับอะตอม นิวตรอนอาจทำปฏิกิริยากับนิวคลีไอด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

### (1) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

ในกระบวนการนี้ นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียส ซึ่งอยู่ที่สภาวะกราวน์ หลังเกิดปฏิกิริยา นิวตรอนกระเด็นออกมา นิวเคลียสยังคงอยู่ที่สภาวะกราวน์ กรณีนี้เรียก การกระเจิงแบบยืดหยุ่นโดยนิวเคลียส ปฏิกริยานิวเคลียร์นี้ ใช้สัญลักษณ์  $(n,n)$

### (2) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

กระบวนการนี้คล้ายกับการกระเจิงแบบยืดหยุ่น นอกจากว่า นิวเคลียสที่เหลือจะถูกทิ้งไว้ที่สภาวะที่ถูกกระตุ้น เพราะพลังงานยังคงถูกเก็บไว้โดยนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาที่ต้องให้พลังงานเข้าไปในปฏิกิริยา หรือปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic interaction) ใช้สัญลักษณ์  $(n,n')$  นิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะสลายโดยการส่งรังสีแกมมา เนื่องจากรังสีแกมมาเหล่านี้ มีกำเนิดมาจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น จึงถูกเรียกว่า รังสีแกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic  $\gamma$ -rays)

### (3) การจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Radiative capture)

เมื่อนิวตรอนถูกจับเข้าไปในนิวเคลียส และมีรังสีแกมมาตัวหนึ่งหรือหลายตัวส่งออกมา เรียก การจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (capture  $\gamma$ -rays) เป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงานออกมาหรือปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic interaction) ใช้สัญลักษณ์  $(n,\gamma)$  เนื่องจากมีต้นกำเนิดจากนิวตรอนถูกดูดกลืน กระบวนการนี้ จึงเป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เรียก ปฏิกริยาการดูดกลืน

### (4) ปฏิกริยาที่ให้อนุภาคที่มีประจุ (Charge-particle reactions)

ในปฏิกิริยาชนิดนี้ นิวตรอนจะหายไปจากผลของการดูดกลืน แล้วส่งอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$  อาจเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนหรือคายความร้อน

### (5) ปฏิกริยาการผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction)

ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอน เช่น  $(n, 2n)$  และ  $(n, 3n)$  เกิดขึ้นกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูง มักเป็นปฏิกิริยา ดูดกลืนความร้อน ในปฏิกิริยา  $(n, 2n)$  จึงมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกผลิต

ออกมากับนิวตรอนที่เข้าชน ส่วน  $(n,3n)$  จะมีนิวตรอนถึงสองตัว ถูกผลักออกมากับนิวตรอนที่เข้าชน ปฏิกิริยา  $(n,2n)$  เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยน้ำหนัก ( $D_2O$ ) หรือ เบริลเลียม เนื่องจาก  $H^2$  และ  $Be^9$  เป็นพวกที่นิวตรอนเกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ ดังนั้น นิวตรอนจึงถูกส่งออกมาโดยง่าย

### (6) การแบ่งแยกตัว (Fission)

นิวตรอนเป็นต้นกำเนิดให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวกับธาตุหนัก ๆ เช่น  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  และ  $U^{233}$  เมื่อนิวตรอนชนกับนิวคลีไอ ทำให้นิวเคลียสแตกออก เรียก การแบ่งแยกตัว เป็นต้นกำเนิดที่สำคัญของพลังงานนิวเคลียร์

### (7) ผลิตไอโซโทปที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัว

ไอโซโทปของธาตุบางชนิด เมื่อจับนิวตรอนแล้ว ทำให้เกิดธาตุใหม่ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวต่อไป เช่น  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  เรียกธาตุทั้งสองนี้ว่าเป็นพวกเฟอร์ไทล์ไอโซโทป (Fertile isotope)

## 9.3 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนเร็วจะมีพลังงานลดลงได้เมื่อชนกับตัวกลาง เป็นการชนแบบยืดหยุ่น ทำให้พลังงานลดลงโดยไม่ทำให้อะตอมแตกตัวหรือถูกกระตุ้น กระบวนการที่ให้นิวตรอนเร็วมีพลังงานลดลงจนเป็นเทอร์มาลนิวตรอน เรียกกระบวนการ เทอร์มาไลซ์ (thermalized) จำนวนครั้งเฉลี่ยที่นิวตรอนชนกับอะตอมของตัวกลาง จนทำให้พลังงานลดลงจาก  $E_i$  จนเป็น  $E_f$  หาได้จาก

$$N = \frac{\ln \frac{E_i}{E_f}}{\xi}$$

เมื่อ  $E_i$  = พลังงานเดิมของนิวตรอน

$E_f$  = พลังงานสุดท้ายของนิวตรอน

และ  $\xi \approx \frac{2}{A + \frac{2}{3}}$

เมื่อ  $A > 10$

สำหรับไฮโดรเจน  $\xi = 1.000$ , ถ้า  $E_i = 2 \times 10^6$  อิเล็กตรอนโวลต์,  $E_f = 0.025$  อิเล็กตรอนโวลต์ นิวตรอนจะต้องเข้าชนอะตอมของไฮโดรเจน 18 ครั้ง จึงจะทำให้ความเร็วลดลงจาก 2 เมมอีวี เป็น 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์

## 9.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

เมื่อนิวตรอนกระทำปฏิกิริยากับนิวคลีไอ ปฏิกิริยาจะเกิดได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับปฏิกิริยานั้นกับธาตุนั้น และยังขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนด้วย ภาคตัดขวางแบ่งออกเป็น

### (1) ภาคตัดขวางจุลภาค $\sigma$ (E)

#### (Microscopic cross section)

หมายถึง พื้นที่สำหรับ 1 นิวเคลียส ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร, ส่วนมากมักใช้หน่วยเป็น บาร์น โดยกำหนดว่า

$$1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ ซม.}^2$$

นอกจากนี้ ยังมีหน่วยเป็น มิลลิบาร์น (mb) และ ไมโครบาร์น ( $\mu\text{b}$ )

### (2) ภาคตัดขวางมหภาค ( $\Sigma$ )

#### (Macroscopic cross section)

หมายถึง ค่าภาคตัดขวางของนิวคลีไอทั้งหมด ต่อ ซม.<sup>3</sup> มีหน่วยเป็น ซม.<sup>-1</sup>

ถ้าธาตุที่ใช้เป็นเป้า มีเลขมวล = A

ความหนาแน่น =  $\rho$  กรัม/ซม.<sup>3</sup>

จำนวนกรัมอะตอม/ซม.<sup>3</sup> =  $\frac{\rho}{A}$

จำนวนนิวคลีไอ/ซม.<sup>3</sup> หาได้ โดยคูณด้วยเลขอาโวกาโดร ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.602 \times 10^{24}$

ดังนั้น จำนวนอะตอม หรือนิวคลีไอ/ซม.<sup>3</sup> คือ

$$N = \frac{\rho \cdot Na}{A} \quad \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม.}^3} \quad \dots (9.1)$$

$$\text{และ} \quad \Sigma = N\sigma \quad \text{ซม.}^{-1} \quad \dots (9.2)$$

สำหรับน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบ M (Compound molecular weight) ความหนาแน่น  $\rho$  จำนวนอะตอมชนิดที่ i ต่อ ซม.<sup>3</sup> หาได้จาก

$$N_i = \frac{\rho_i Na}{M} v_i \quad \dots (9.3)$$

เมื่อ  $v_i$  เป็นจำนวนอะตอมชนิดที่  $i$  ในโมเลกุลของสารประกอบนั้น  
ค่าภาคตัดขวางมหภาคสำหรับธาตุต่าง ๆ ในสารประกอบที่เป็นเป้า คือ

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{i=N} N_i \sigma_i \\ &= \frac{\rho \text{ Na}}{M} \sum_{i=1}^{i=N} v_i \sigma_i \end{aligned} \quad \dots (9.4)$$

เมื่อ  $\sigma_i$  เป็นภาคตัดขวางจุลภาคของธาตุที่  $i$

$$\text{ดังนั้น } \Sigma = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + \dots$$

สำหรับสารประกอบ

$$\Sigma = \frac{\rho \text{ Na}}{M} (v_1 \sigma_1 + v_2 \sigma_2 + \dots) \quad \dots (9.5)$$

### ตัวอย่างที่ 9.1

ภาคตัดขวางจุลภาค สำหรับการจับเทอร์มาลนิวตรอน โดยไฮโดรเจน มีค่าเท่ากับ 0.33 บาร์น สำหรับออกซิเจน เท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  บาร์น จงคำนวณหาค่าภาคตัดขวางมหภาคสำหรับการจับเทอร์มาลนิวตรอนโดยโมเลกุลของน้ำ

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ (M) = 18

ความหนาแน่น ( $\rho$ ) = 1.0 กรัม/ซม.<sup>3</sup>

1 โมเลกุล มีไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม  
จากสมการ (9.5)

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{1 \times \text{Na}}{18} [2 \sigma_{\text{H}} + \sigma_{\text{O}}] \\ &= \frac{0.602 \times 10^{24}}{18} [(2)(0.33) + 2 \times 10^{-4}] 10^{-24} \\ &= 0.022 \quad \text{ซม.}^{-1} \end{aligned}$$

สำหรับของผสม ที่มีทั้งธาตุและสารประกอบที่มีคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ต่างกัน จะหาค่าภาคตัดขวางมหภาคได้ดังนี้

$$\Sigma = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + \dots \quad \dots (9.6)$$

## ตัวอย่างที่ 9.2

โดยไม่คิด  $U^{234}$  ธาตุยูเรเนียมธรรมชาติ มี  $U^{238}$  อยู่ 99.28 เปอร์เซ็นต์ (ค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนเท่ากับ 2.71 บาร์น) และ  $U^{235}$  0.72 เปอร์เซ็นต์ (ค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนเท่ากับ 683 บาร์น) ความหนาแน่นของธาตุยูเรเนียมธรรมชาติเท่ากับ 19.0 กรัม/ซม.<sup>3</sup> จงหาภาคตัดขวางมหภาคและภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมดสำหรับการดูดกลืนของธาตุนี้

ธาตุยูเรเนียมธรรมชาติ 1 ซม.<sup>3</sup> มี

$$U^{238} = (19.0) (0.9928) \quad \text{กรัม}$$

$$U^{235} = (19.0) (0.0072) \quad \text{กรัม}$$

$$N_{238} = \frac{(19.0) (0.9928) (0.602 \times 10^{24})}{238} \quad \text{นิวคลีไอ/ซม.}^3$$

$$= 4.77 \times 10^{22}$$

และ  $N_{235} = \frac{(19.0) (0.0072) (0.602 \times 10^{24})}{235}$

$$= 3.5 \times 10^{20} \quad \text{นิวคลีไอ/ซม.}^3$$

$$\Sigma (\text{ยูเรเนียมธรรมชาติ}) = N_{238} \sigma_{238} + N_{235} \sigma_{235}$$

$$= (4.77 \times 10^{22}) (2.71 \times 10^{-24})$$

$$+ (3.5 \times 10^{20}) (683 \times 10^{-24})$$

$$= 0.368 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

ภาคตัดขวางจุลภาค หาได้จาก

$$\sigma (\text{ยูเรเนียมธรรมชาติ}) = \frac{\Sigma (\text{ยูเรเนียมธรรมชาติ})}{N_{238} + N_{235}}$$

$$= \frac{0.368}{4.80 \times 10^{22}} = 7.7 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2$$

$$= 7.7 \quad \text{บาร์น}$$

## 9.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนกระทบเป้า (Rates of Neutron Reactions)

พิจารณาลำแสงนิวตรอน ความหนาแน่น  $= n$  นิวตรอน/ซม.<sup>3</sup>

นิวตรอนวิ่งด้วยความเร็ว  $= v$  ซม./วินาที  
 จำนวนนิวตรอนที่ตกกระทบเป้า  $= nv$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที  
 พื้นที่ที่แท้จริงที่จะเกิดปฏิกิริยา (effective area) ต่อ 1 นิวเคลียส  $= \sigma$  ซม.<sup>2</sup>  
 ทุกนิวเคลียสไอของเป้า ต่อ ซม.<sup>3</sup> มีพื้นที่ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา  $= \Sigma$  ซม.<sup>-1</sup>

จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างนิวตรอน กับนิวเคลียสไอของเป้า ต่อ ซม.<sup>3</sup> ต่อ วินาที คือ  $\Sigma nv$   
 ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับนิวตรอนและเป้า  $= \Sigma nv \frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม.}^3 \text{ วินาที}}$  ... (9.7)

สมการ (9.7) เป็นการหาจำนวนนิวตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยากับธาตุที่เป็นเป้า 1 ซม.<sup>3</sup> ในเวลา 1 วินาที

บางทีจะใช้คำว่า นิวตรอนฟลักซ์ แทนความหนาแน่นของนิวตรอน โดยใช้คำจำกัดความว่า

นิวตรอนฟลักซ์ หมายถึง จำนวนนิวตรอนที่วิ่งเข้ามากระทบเป้า พื้นที่ 1 ซม.<sup>2</sup> ในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็น นิวตรอน ต่อ ซม.<sup>2</sup> ต่อ วินาที นั่นคือ

$$\phi = nv \quad \dots (9.8)$$

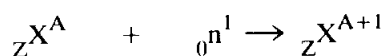
สมการ (9.7) จึงเขียนได้ว่า

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา (neutron interaction)} = \Sigma \phi \frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม.}^3 \text{ วินาที}} \quad \dots (9.9)$$

## 9.6 การหาค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนโดยการอาบรังสี (Cross section determination by activation method)

โดยการใช้วิธีอาบรังสี เพื่อหาค่าภาคตัดขวางสำหรับการจับนิวตรอน จะต้องใช้นิวไคลด์ของธาตุที่มีเสถียรภาพ คือนิวไคลด์ที่ไม่เป็นกัมมันตรังสี จับนิวตรอน เพื่อให้เกิดเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี

เมื่ออะตอมของสารจับนิวตรอน จะเกิดเป็นสารกัมมันตรังสี ตามสมการ



อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสี คือ  $\Sigma \phi$   $\frac{\text{นิวเคลียสไอ}}{\text{ซม.}^3 \text{ วินาที}}$



สารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมีการสลายด้วยครึ่งชีวิตของมันเอง, การสลายขึ้นกับจำนวนอะตอมที่เกิดขึ้น นั่นคือ

$$\text{อัตราการสลาย} = -\lambda N$$

$$\text{ขณะที่อาบรังสี นิวตรอนฟลักซ์มีค่า} \quad \varnothing \quad \frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ชม.}^2 \text{ วินาที}}$$

ดังนั้น อัตราการสลายของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น เมื่อเวลาใด ๆ จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dN}{dT} = \Sigma \varnothing - \lambda N \quad \dots (9.10)$$

เมื่อ T เป็นเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

และ N เป็นจำนวนอะตอม/ชม.<sup>3</sup> เมื่อเวลา T

เมื่ออาบรังสีเป็นเวลานานพอเพียง จะเกิดสภาวะคงที่ (steady state) หมายถึง ขณะที่อัตราการเกิด และอัตราการสลาย มีค่าเท่ากัน

$$\text{ในสภาวะนี้, ความแรง} = \Sigma \varnothing \quad \dots (9.11)$$

อัตราการสลายโดยการส่งอนุภาคในสภาวะนี้คือ  $\lambda \cdot N$  อะตอม ต่อชม.<sup>3</sup> ต่อวินาที เมื่อ N มีหน่วยเป็นอะตอม/ชม.<sup>3</sup> เรียก  $\Sigma \varnothing$  ว่า ความแรงที่มีค่าอิ่มตัว (saturation activity) คือไม่มีการสลายอีกต่อไป เป็นความแรงสูงสุดของสารในการอาบรังสี

เมื่อนำธาตุที่อาบรังสีแล้วออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์ อัตราการสลายจะเป็นไปตามสมการ

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad \dots (9.12)$$

เมื่อ A(t) คือความแรงที่วัดได้ หลังจากนำออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์เป็นเวลา t

ค่าภาคตัดขวางที่หาได้โดยการอาบรังสี จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละกระบวนการเท่านั้น

ถ้าทราบค่าภาคตัดขวางสำหรับการอาบรังสี จะหานิวตรอนฟลักซ์ได้โดยวิธีที่กล่าวมาแล้ว นิวตรอนฟลักซ์ที่ได้ จะไม่ใช่ฟลักซ์ทั้งหมด แต่จะเป็นฟลักซ์เฉพาะนิวตรอนแต่ละพลังงาน

การอาบรังสี มักใช้แผ่นธาตุบาง ๆ (thin foil) เป็นตัวดูดกลืน เพราะฟลักซ์นิวตรอนจะผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อนำแผ่นบาง ๆ นี้้อาบรังสีเป็นเวลานานพอ จะทำให้เกิดสภาวะคงตัว (steady state) ธาตุที่ใช้ควรเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางสำหรับการอาบรังสีสูงสำหรับนิวตรอนที่จะศึกษา เพื่อจะได้ความแรงสูง เป็นการสะดวกต่อการวัดความแรง ทำให้มีความแม่นยำดี อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นต้องไม่เร็วหรือช้าเกินไป คือเมื่อนำออกมา

จากนิวตรอนฟลักซ์แล้วจะไม่สลายเร็วเกินไป ชาติที่เหมาะสมในการหาคำนวณนิวตรอนฟลักซ์โดยวิธี  
 ออบรังส์ คือ อินเดียม, เงิน, แมงกานีส และโรเดียม มักใช้อินเดียม เพราะมีครึ่งชีวิตไม่สั้น  
 มากนัก คือ 54 นาที นับว่านานพอที่จะนับได้อย่างถูกต้อง และใช้เวลาไม่มากนักเพื่อจะทำให้  
 ได้ความแรงสูงสุด

จากสมการ (9.10) ถ้าคูณด้วย  $e^{\lambda T}$  ทั้งสองข้างแล้วจัดสมการใหม่ จะได้

$$\frac{dN}{dT} e^{\lambda T} + \lambda N e^{\lambda T} = \Sigma \phi e^{\lambda T}$$

เมื่อ T เป็นเวลาที่ใช้ในการอบรังสี,  
 โดยการอินทิเกรต จะได้

$$N e^{\lambda T} = \frac{\Sigma \phi}{\lambda} e^{\lambda T} + C$$

$$N = \frac{\Sigma \phi}{\lambda} + C e^{-\lambda T}$$

ถ้าตั้งเงื่อนไขว่า เมื่อ T = 0, N = 0  
 จะได้

จึงได้ว่า

$$C = -\frac{\Sigma \phi}{\lambda}$$

$$N = \frac{\Sigma \phi}{\lambda} - \frac{\Sigma \phi}{\lambda} e^{-\lambda T}$$

หรือ

$$N\lambda = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$$

นั่นคือ

$$A(T) = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) \quad \dots (9.13)$$

เมื่อ A(T) = ความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น เมื่ออบรังสีนาน T มีหน่วยเป็น อัตรา  
 การส่งอนุภาค ต่อ ซม.<sup>3</sup>

เมื่อนำแผ่นที่อบรังสีแล้ว ออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์ แล้วนำไปเข้าเครื่องวัด  
 เมื่อเวลา t ต่อมา ความแรงจะหาได้จากสูตร

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

เมื่อ  $A_0 = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$   
 ดังนั้น

$$A = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} \quad \dots (9.14)$$

ในการทำโจทย์ ควรจะพิจารณาที่มาของสูตรก่อนว่า สัญลักษณ์แต่ละตัวในสูตรนั้น มีความหมายอย่างไร และเมื่อแทนค่าลงไปแล้ว จะได้หน่วยอย่างไร จากสมการที่ (9.13)

$$A(T) = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$$

หมายความว่า ความแรงของธาตุที่นำไปอบรังสีโดยใช้นิวตรอนฟลักซ์  $\phi$  เป็นเวลานาน  $T$  ในเครื่องปฏิกรณ์ เดิมทีเดี่ยวธาตุที่จะนำไปอบรังสีไม่ใช่เป็นธาตุกัมมันตรังสี แต่เมื่อถูกอบด้วยลำแสงนิวตรอน (neutron activation) ก็จะกลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี จึงมีการสลายตัวด้วยค่าคงที่ของการสลาย  $\lambda$  นั่นคือ ถ้าเกิดธาตุกัมมันตรังสี  $= \Sigma \phi$  ก็จะสลายไป  $= \Sigma \phi e^{-\lambda T}$ , ค่าความแรงที่เกิดขึ้นจึงเป็น  $A(T) = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$

ในกรณีที่ใช้เวลาในการอบรังสีนานมาก,  $e^{-\lambda T}$  จะมีค่าน้อยลงจนใกล้ศูนย์ แสดงว่าธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะมีความแรงสูงสุด เพราะไม่มีการสลายอีกต่อไป นั่นคือ

$$A_{\max} \approx \Sigma \phi \quad \dots (9.15)$$

สมการ (9.15) จึงเป็นความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่ออบรังสีเป็นเวลานานมาก มีหน่วยเป็น

อะตอม  
ชม.<sup>3</sup> วินาที

ยังมีหน่วยที่ใช้วัดความแรงอีกหน่วยหนึ่ง จะเรียกว่าเป็นค่าความแรงเฉพาะ (specific activity) มีหน่วยเป็นคูรี ต่อกรัม.

จากสมการ (9.13),  $A(T)$  จะเป็นค่าความแรงที่วัดทันทีเมื่อนำออกมาจากฟลักซ์ แต่ถ้าเครื่องวัดอยู่ไกลออกไปต้องใช้เวลาเคลื่อนย้ายไปยังเครื่องวัดนาน  $t$ , ธาตุกัมมันตรังสีก็จะสลายไปตามสมการ (4.4) นั่นคือ ความแรงที่วัดได้จะเป็น  $A(t) = A(T) e^{-\lambda t}$  นั่นคือ สูตรในสมการที่ (9.14) คือ

$$A = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}$$

**ตัวอย่างที่ 9.3**

แผ่นทองบาง ๆ หนัก 100 มิลลิกรัม อบรังสีนิวตรอน มีนิวตรอนฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ชม.<sup>2</sup>/วินาที ในเครื่องปฏิกรณ์ จงหาความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างนี้ เมื่อกำหนดค่าภาคตัดขวางในการอบรังสี สำหรับเทอร์มาลนิวตรอนของทอง เท่ากับ 94 บาร์น

$$\begin{aligned}
\text{ความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น } A &= \Sigma \emptyset \\
\text{จำนวนอะตอมของทอง } N &= \frac{W \cdot N_A}{A} = \frac{0.1 \times 0.602 \times 10^{24}}{197} \\
&= 3.0558 \times 10^{-4} \times 10^{24} \quad \text{อะตอม} \\
N \sigma &= 94 \times 3.0558 \times 10^{-4} = 0.02872 \frac{\text{อะตอม} \cdot \text{ซม.}^2}{\text{อะตอม}} \\
A &= 0.02872 \times 10^{12} \\
&= 2.87 \times 10^{10} \frac{\text{อะตอม}}{\text{วินาที}}
\end{aligned}$$

บางทีเครื่องวัดมีประสิทธิภาพ (counter efficiency) ในการวัดค่า จำนวนที่นับได้เป็นครั้งต่อนาที หรือครั้งต่อวินาที (counts/minute or counts/sec) จึงมีค่าต่างจากจำนวนอะตอมที่สลายได้ (atoms/minute or atoms/sec) แต่ถ้าแก้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับเรียบร้อยแล้ว แสดงว่าจำนวนที่เครื่องนับนับได้จะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายได้

ในการคำนวณ ถ้าโจทย์ไม่กำหนดค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับ แสดงว่า ได้แก้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับเรียบร้อยแล้ว

#### ตัวอย่างที่ 9.4

แผ่นอินเดียมบาง ๆ ขนาด 1 ซม.<sup>2</sup> ความหนาแน่น 1 มิลลิกรัม/ซม.<sup>2</sup> อาบรังสีเทอร์มาลนิวตรอน เป็นเวลานาน 20 นาที หลังจากที้นำออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์แล้ว 3 ชั่วโมง จึงนำ  $\text{In}^{116}$  (ครึ่งชีวิต 54.2 นาที) ที่เกิดขึ้น มาเข้าเครื่องวัด ที่แก้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับเรียบร้อยแล้ว ปรากฏว่า ได้อัตราการสลาย 30,000 ครั้ง/นาที, จงหาค่านิวตรอนฟลักซ์ กำหนดค่าภาคตัดขวางสำหรับการอาบรังสีของอินเดียม-115 สำหรับเทอร์มาลนิวตรอนเท่ากับ 130 บาร์น, ธาตุอินเดียม มีอินเดียม-115 อยู่ 96 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned}
\text{มวลของแผ่นอินเดียม-115} &= 1 \times 1 \times 10^{-3} \quad \text{กรัม} \\
\text{จำนวนนิวคลีไอของธาตุอินเดียม} &= \frac{0.96 \times 10^{-3} \times 0.602 \times 10^{24}}{115} \\
&= 5.025 \times 10^{-6} \times 10^{24} \\
\text{ถ้าปริมาตรของแผ่นอินเดียม} &= V \quad \text{ซม.}^3 \\
\Sigma &= N \sigma = \frac{5.025 \times 10^{-6} \times 10^{24} \times 130 \times 10^{-24}}{V} \\
\Sigma &= \frac{6.533 \times 10^{-4}}{V} \quad \text{ซม.}^{-1}
\end{aligned}$$

ความแรงของแผ่นอินเดียม ปริมาตร V ซม.<sup>3</sup> ที่นำไปอาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลานาน 20 นาที

(T) และวัดในเวลา 3 ชั่วโมงต่อมา (t) ค่าความแรงที่วัดได้เท่ากับ 30,000 ครั้ง/นาที แทนค่าในสมการ (9.14) จะได้

$$30,000 = V \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}$$

เมื่อ  $V \Sigma$  มีค่าเท่ากับ  $6.533 \times 10^{-4}$

$$\text{และ } \lambda = \frac{0.693}{54.2} = 1.278 \times 10^{-2} \text{ นาที}^{-1}$$

โดยการแทนค่า จะหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ได้

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{30,000}{(6.533 \times 10^{-4}) [1 - e^{-(1.278 \times 10^{-2})(20)}] [e^{-(1.278 \times 10^{-2})(180)}]} \\ &= \frac{30,000}{(6.533 \times 10^{-4}) [1 - e^{-0.2556}] [e^{-2.300}]} \\ &= \frac{30,000}{(6.533 \times 10^{-4}) [1 - 0.7744] [0.1002]} \\ &= \frac{30,000}{(6.533 \times 10^{-4}) [0.2255] [0.1002]} \\ &= \frac{30,000 \times 10^4}{0.1476} = \frac{0.3 \times 10^9}{0.1476} \\ &= 2.03 \times 10^9 \quad \text{นิวตรอน/ชม.}^2/\text{นาที} \\ &= 3.38 \times 10^7 \quad \text{นิวตรอน/ชม.}^2/\text{วินาที} \end{aligned}$$

### ตัวอย่างที่ 9.5

ในการใช้ธาตุแมงกานีส อบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีเทอร์มาลฟลักซ์ เฉลี่ย  $10^{11}$  นิวตรอน/ชม.<sup>2</sup>/วินาที ปล่อยให้วุ้นจนกระทั่งไม่สลายต่อไปอีกแล้ว จะเกิด  $Mn^{56}$  นำมาเข้าเครื่องวัด ที่วัดได้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ของรังสีที่ส่งออกมา ค่าที่วัดได้เท่ากับ 80 ครั้ง/นาที จงหา

ปริมาณของธาตุแมงกานีสที่ใช้เป็นสารตัวอย่างนี้ กำหนดค่าภาคตัดขวางสำหรับการอาบรังสีที่พลังงานนี้เท่ากับ 13 บาร์น

ความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น  $A = \Sigma \phi$   
 เครื่องวัด วัดความแรงได้ 20  $\frac{\text{ครั้ง}}{\text{นาที}}$ , ความแรงที่  $\text{Mn}^{56}$  สลายที่แท้จริงคือ 100  $\frac{\text{อะตอม}}{\text{นาที}}$

ดังนั้น วัดความแรงได้ 80  $\frac{\text{ครั้ง}}{\text{นาที}}$ , ความแรงที่  $\text{Mn}^{56}$  สลายที่แท้จริงคือ  $\frac{100 \times 80}{20}$   $\frac{\text{อะตอม}}{\text{นาที}}$

นั่นคือ ความแรงของ  $\text{Mn}^{56}$   $= \frac{5 \times 80}{60}$   $\frac{\text{อะตอม}}{\text{วินาที}}$

ถ้า  $\text{Mn}^{55}$  ที่นำไปอาบรังสีหนัก W กรัม  
 จำนวนนิวคลีไอ N  $= \frac{W}{55} \times 0.602 \times 10^{24} = 1.09 \times 10^{-2} \times 10^{24}$  W

โดยการแทนค่าในสูตร  $A = N \sigma \phi$   
 6.66  $= (1.09 \times 10^{-2} \times 10^{24} W) (13 \times 10^{-24}) (10^{11})$

$$W = \frac{6.66}{1.09 \times 10^{-2} \times 13 \times 10^{11}}$$

$$= \frac{6.66 \times 10^{-9}}{14.17}$$

$$= 4.7 \times 10^{-10} \text{ กรัม}$$

มวลของแมงกานีส-55 ที่ใช้ในการอาบรังสีคือ  $4.7 \times 10^{-10}$  กรัม

## 9.7 การหาค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนโดยการให้ลำแสงผ่านเป้า

**(Cross-section determination by the transmission method)**

วิธีนี้เป็นการวัดลำแสงนิวตรอนที่ผ่านออกมาหลังจากถูกดูดกลืนจากธาตุที่ใช้เป็นเป้า โดยให้นิวตรอนวิ่งเป็นลำแคบ ๆ เข้ามาในทิศทางตั้งฉากกับเป้า มีความหนา x

ถ้าพิจารณาลำแสงนิวตรอนที่ตกกระทบเป้าหมายเพียง dx , ความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านออกมามีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับ

N = จำนวนอะตอม/ซม.<sup>3</sup> ของเป้า

$I_0$  = ความเข้มของลำแสง และ

$dx$  = ความหนาของเป้า

ถ้า  $\sigma$  = ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับปฏิกิริยา (ขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนและธาตุที่ใช้เป็นเป้า)

$$-dI = N \sigma I dx$$

$$\frac{-dI}{I} = N \sigma dx$$

โดยการอินทิเกรต จะได้

$$\ln I = -N \sigma x + C$$

เมื่อ  $x = 0, I = I_0$

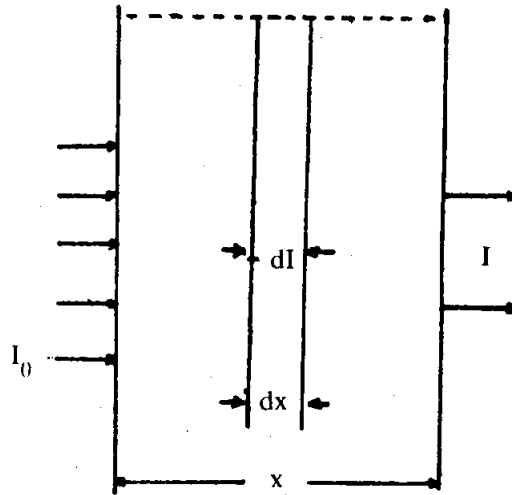
$$C = \ln I_0$$

แทนค่าจะได้

$$\ln \frac{I}{I_0} = -N \sigma x$$

$$I = I_0 e^{-N \sigma x}$$

$$\text{หรือ } I = I_0 e^{-\Sigma x} \dots (9.16)$$



รูปที่ 9.1 แสดงความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาเมื่อผ่านเป้า

เมื่อ  $I$  คือลำแสงที่ผ่านออกมา

$I_0 - I = I_0(1 - e^{-\Sigma x})$  คือ ลำแสงที่หายไปจากลำแสงเดิม (ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในเป้า)

การหาค่าภาคตัดขวางโดยวิธีนี้ เป็นการหาค่าภาคตัดขวางทั้งหมด เพราะจำนวนนิวตรอนที่ผ่านเป้าออกมาเข้าเครื่องวัดนั้น เป็นนิวตรอนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาทั้งการกระเจิงและการดูดกลืนในสารนั้นเลย ( $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ ) ขึ้นกับการจัดเครื่องมือด้วย ดังนั้นนิวตรอนส่วนที่ทำปฏิกิริยาจึงหาได้จาก  $I_0 - I$

หรือ 
$$I_0 - I = I_0(1 - e^{-\Sigma x}) \quad \dots (9.17)$$

มักใช้ในการป้องกันรังสี (shielding) ส่วนในการอาบรังสีนั้น จะใช้สมการที่ (9.13), หรือ (9.14) หรือ (9.15)

### ตัวอย่างที่ 9.6

ในการหาจำนวนนิวคลีไอของทอง-198 ที่เกิดขึ้น ต่อวินาที โดยการใช้แผ่นทองหนา 0.3 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 5 ซม.<sup>2</sup> ผ่านรังสีเทอร์มาลนิวตรอน ที่มีค่านิวตรอนฟลักซ์ 10<sup>7</sup> นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที ค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนของทอง-197 เท่ากับ 99 บาร์น (โดยไม่คิดปฏิกิริยาอื่นที่เกิดขึ้นกับทอง) และความหนาแน่นของทองเท่ากับ 19.3 กรัม/ซม.<sup>3</sup>, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 197.2

$$\begin{aligned} N &= \frac{19.3}{197.2} \times 6.02 \times 10^{23} \\ &= 5.89 \times 10^{22} && \text{นิวคลีไอ/ซม.}^3 \\ x &= 0.03 && \text{ซม.} \\ I_0 &= 5 \times 10^7 && \text{นิวตรอน/วินาที} \end{aligned}$$

จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  $I_0 - I$

$$\begin{aligned} &= I_0 (1 - e^{-\Sigma x}) \\ &= 5 \times 10^7 (1 - e^{-5.89 \times 10^{22} \times 99 \times 10^{-24} \times 0.03}) \\ &= 5 \times 10^7 (1 - e^{-0.1749}) && = 5 \times 10^7 (1 - 0.8395) \\ &= 5 \times 10^7 \times 0.160459 && = 8.02 \times 10^6 \\ &= 8.0 \times 10^6 && \text{นิวคลีไอ/วินาที} \end{aligned}$$

จะเกิดทอง-198 จำนวน  $8.0 \times 10^6$  นิวคลีไอ/วินาที

## 9.8 ทางเดินเฉลี่ยของนิวตรอน

### (Mean free path)

ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสาร บางทีจะมีคำว่า ทางเดินเฉลี่ย (mean free path) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



ทางเดินเฉลี่ย หมายถึง ระยะทางเฉลี่ย (เป็นปริมาณสเกลาร์) ที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยา (มีค่าเฉพาะสำหรับแต่ละปฏิกิริยา ถ้าทุก ๆ ปฏิกิริยา ก็จะเป็นระยะทางเฉลี่ยทั้งหมดสำหรับทุกปฏิกิริยา) ถ้ากำหนดให้  $v$  เป็นความเร็วของนิวตรอน,  $v$  จะเป็นระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ใน 1 หน่วยเวลา

จำนวนเฉลี่ยของการเกิดปฏิกิริยาต่อวินาที คือ  $\frac{v}{\lambda}$   
 สำหรับลำแสงนิวตรอนที่มี  $n$  นิวตรอน/ซม.<sup>3</sup>  
 จำนวนกิริยา/ซม.<sup>3</sup>/วินาที ก็คือ  $\frac{n v}{\lambda}$  ... (9.18)  
 หรือ อัตราการเกิดกิริยา =  $\frac{n v}{\lambda}$

จากสมการ (9.9) และ (9.18) จะได้ว่า  $\lambda = \frac{1}{\Sigma}$  ... (9.19)

ดังนั้น ทางเดินเฉลี่ยของนิวตรอนสำหรับแต่ละปฏิกิริยาจะเป็นส่วนกลับกับภาคตัดขวางมหภาค สำหรับปฏิกิริยานั้น

$$\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a}, \lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$$

$\lambda$  จึงมีหน่วยเป็น ซม. เพราะ  $\Sigma$  มีหน่วยเป็น ซม.<sup>-1</sup> สำหรับการดูดกลืนลำแสงนิวตรอน,  $\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a}$

$\lambda_a$  เป็นระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปได้ก่อนที่จะถูกดูดกลืน ถ้าแทนสมการ (9.19) ในสมการ (9.16) จะได้

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

ถ้าธาตุที่ใช้กั้นรังสี หนาเท่ากับทางเดินเฉลี่ย ( $x = \lambda$ )

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{e}$$

ดังนั้น เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านความหนาของเป้าเท่ากับทางเดินเฉลี่ย จะมีส่วนของนิวตรอนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ  $\frac{1}{e}$  ของนิวตรอนที่วิ่งเข้ามา

## สรุป

จากการศึกษาบทนี้พอที่จะสรุปได้ว่า

1. นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้นิวตรอนที่มีพลังงานสูง

2. การคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำสารเข้าไปอบรังสีโดยใช้เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ สามารถทำได้โดยอาศัยสมการที่ (9.13) นั่นคือ

ความเข้มเมื่อนำธาตุเข้าไปอบรังสีนาน  $T$ , เมื่อนำออกมาจะมีความเข้ม

$$A(T) = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$$

แต่ถ้าปล่อยไวนาน  $t$ , หลังจากนำออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์แล้ว จะวัดความเข้มได้ตามสมการที่ (9.14) คือ

$$A = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}$$

แต่ถ้าปล่อยไวนานจนธาตุกัมมันตรังสีนั้นไม่สลายต่อไปอีกแล้ว จะได้ความเข้มสูงสุดตามสมการที่ (9.15) คือ

$$A_{\max} = \Sigma \phi$$

3. การคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อลำแสงนิวตรอนกระทบเป้า ทำได้โดยใช้สมการที่ (9.17) คือ

$$I_0 - I = I_0 (1 - e^{-\Sigma x})$$

เมื่อความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาโดยไม่เกิดปฏิกิริยาคือ  $I$ , หาได้โดยใช้สมการที่ (9.16) คือ

$$I = I_0 e^{-\Sigma x}$$

มักใช้ในการป้องกันรังสี

## แบบฝึกหัดบทที่ 9

9.1 สารทองแดงกลืนลำแสงนิวตรอน ด้วยอัตรา  $10^{10}$  นิวตรอน/วินาที เกิดปฏิกิริยา  $Au^{197}(n,\gamma)Au^{198}$ , นิวไคลด์  $Au^{198}$  สลายด้วยครึ่งชีวิต 2.7 วัน จะเกิด  $Au^{198}$  เท่าไร

(ก) ในเวลา 2 วัน

(ข) เมื่อเกิดสมดุลทางรังสี (equilibrium)

$$e^{-0.5133} = 0.5984$$

9.2 แผ่นทองหนา 0.02 ซม. อาบรังสีเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เป็นเวลานาน 5 นาที นิวไคลด์  $Au^{198}$  ครึ่งชีวิต 2.7 วัน จะเกิดขึ้น จากปฏิกิริยา  $Au^{197}(n,\gamma)Au^{198}$  ความหนาแน่นของทอง = 19.3 กรัม/ซม.<sup>3</sup> และภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา =  $98.7 \times 10^{-24}$  ซม.<sup>2</sup>

(ก) จะมี  $Au^{198}$  เกิดขึ้นกี่อะตอม/ซม.<sup>2</sup>/วินาที

(ข) จงหาความแรงที่เกิดขึ้น ในหน่วย มิลลิวูท/ซม.<sup>2</sup>

9.3 จงหาอัตราการสลายของ  $Au^{198}$  ที่เกิดจากทอง 10 มิลลิกรัม อาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เป็นเวลา 1 วัน กำหนดให้ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการจับนิวตรอนของทองที่พลังงานนี้ มีค่า 98.8 บาร์น, ครึ่งชีวิตของ  $Au^{198}$  = 2.7 วัน

9.4  $Au^{197}$  100 มิลลิกรัม อาบรังสีนิวตรอนฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที ในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการอาบลำแสงเทอร์มาลนิวตรอนของทอง = 98 บาร์น, ครึ่งชีวิตของทอง = 2.7 วัน จงหา

(ก) ความแรงสูงสุด

(ข) ความแรงที่วัดเมื่ออาบรังสีแล้ว 1 ชั่วโมง และนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์นาน 1 วัน

$$\text{กำหนด } e^{-0.01069} = 0.9893, \quad e^{-0.2566} = 0.7736$$

9.5 ใช้โบรมีนเป็นสารตัวอย่าง หนัก 1 กรัม อาบรังสีนาน 36 ชั่วโมง โดยใช้เทอร์มาลฟลักซ์  $9 \times 10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที จงหาความแรงในหน่วย มิลลิวูท เมื่อเลิกอาบรังสีแล้ว

9.6 แคดเมียม-113 มีในธรรมชาติ 12.2 เปอร์เซ็นต์ ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน = 20,000 บาร์น จงหาส่วนของเทอร์มาลนิวตรอนที่จะผ่านออกมา เมื่อใช้แคดเมียมฟออสฟอรัสธรรมชาติ หนา 0.3 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 8.6 กรัม/ซม.<sup>3</sup>

- 9.7 จงหาความหนาของแคดเมียม ที่จะใช้ลดความเข้มของลำแสงเทอร์มาลนิวตรอน ได้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์
- 9.8 (ก) จงหาจำนวนอะตอมของ  $\text{Co}^{60}$  ที่เกิดขึ้น โดยใช้  $\text{Co}^{59}$  10 มิลลิกรัม อบรังสีเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $2 \times 10^{13}$  อนุภาค/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เป็นเวลานาน 2 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์  
(ข) จงหาอัตราการสลายของโคบอลต์ หลังจากอบรังสีแล้ว 3 ชั่วโมง
- 9.9 จงหาค่าความแรงจำเพาะสูงสุด (Maximum specific activity) ในหน่วย มิลลิวรี ต่อกรัม จาก  $\text{Co}^{60}$  โดยการใช้เทอร์มาลฟลักซ์  $7 \times 10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที จะต้องนำ  $\text{Co}^{59}$  อบรังสีนานเท่าไร จึงจะมีความแรง 75 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสูงสุด
- 9.10 ใช้ทองแดงเป็นสารตัวอย่าง นำไปอบรังสีเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $2 \times 10^{13}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที นานเท่าไร จึงจะเกิดเป็น  $\text{Cu}^{64}$  1% ของค่าสูงสุดที่จะเกิดขึ้น
- 9.11 อินเดียม-115 มีในธรรมชาติ 95.8 เปอร์เซ็นต์ ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับนิวตรอนที่พลังงาน 1.44 อิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าเท่ากับ 145 บาร์น จงหาความหนาของอินเดียม-ฟอสฟอรัสธรรมชาติ ความหนาแน่น 7.28 กรัม/ซม.<sup>3</sup> เพื่อใช้ดูดกลืนลำแสงเทอร์มาลนิวตรอนได้ 10% ที่พลังงานนี้
- 9.12 อบรังสี  $\text{P}^{31}$  1 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้เทอร์มาลฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที  
(ก) จะต้องใช้เวลานานเท่าไร หลังจากนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์แล้ว 10 วัน จึงจะมีความแรง 1 คูรี และทันทีที่นำออกมา มีความแรงเท่าไร  
(ข) ถ้าอบรังสีนานมาก ทันทีที่นำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ จะมีความแรงเท่าไร
- |                          |               |                 |
|--------------------------|---------------|-----------------|
| กำหนด $\log e = 0.4343,$ | $\log 15.8$   | <b>= 1.181</b>  |
| $e^{-0.4846} = 0.6159$   | $e^{-2.7298}$ | <b>= 0.0652</b> |
- 9.13 ในการทดลอง ต้องการให้เกิด  $\text{P}^{32}$  8 มิลลิวรี หลังจากที้นำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์แล้ว 10 วัน ถ้าใช้เทอร์มาลฟลักซ์  $7 \times 10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที จะต้องอบรังสีสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม นานเท่าไร และเมื่อนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ สารตัวอย่างนี้ มีความแรงเท่าไร
- 9.14 การสลายของธาตุ  $\text{Sb}^{124}$  มีค่าคงที่ของการสลาย  $0.01115 \text{ วัน}^{-1}$  จงหาครึ่งชีวิต และเวลาที่จะสลายไป 0.1 เปอร์เซ็นต์ ของความแรงเดิม

9.15 แทนทาลัมฟอสเฟต หนา 0.02 ซม. ความหนาแน่น 16.6 กรัม/ซม.<sup>3</sup> อาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยลำรังสีเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เกิดกัมมันตรังสี Ta<sup>182</sup> มีครึ่งชีวิต 114 วัน จากปฏิกิริยา Ta<sup>181</sup>(n,  $\gamma$ )Ta<sup>182</sup> และแผ่นที่เกิดขึ้นมีความแรง 12.3 รัทเธอร์ฟอร์ด ต่อ ซม.<sup>2</sup> ทันทีหลังจากการอาบรังสี จงหา

(ก) จำนวนอะตอมของ Ta<sup>182</sup> ที่เกิดขึ้น

(ข) จงหาค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับปฏิกิริยา

$$\text{กำหนด } e^{-5.06 \times 10^{-4}} = 0.99949$$