

## บทที่ 2

### นิวตรอนฟลักซ์

#### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

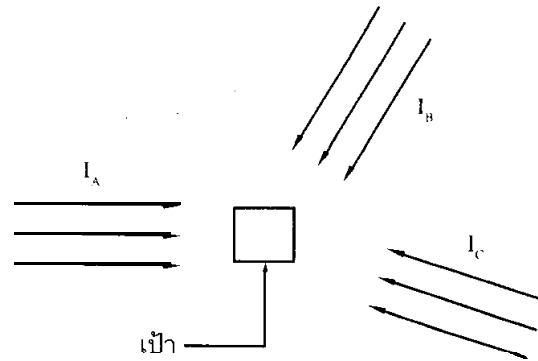
1. คำนวณหาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนเข้าชนเป้าได้
2. นำค่าฟลักซ์นิวตรอนมาใช้ในการคำนวณหาความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากการอบรังสีได้

## 2.1 ความหมาย

นิวตรอนฟลักซ์หมายถึงปริมาณนิวตรอนที่วิ่งเข้ามาทุกทิศทาง กระทบเป้าพื้นที่  $.1$  ตารางหน่วย ใน 1 หน่วยเวลา, หน่วยของฟลักซ์ คือ นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที ใช้สัญลักษณ์  $\phi$

ถ้า  $n$  คือความหนาแน่นของนิวตรอน, มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ซม.<sup>3</sup>  
 $v$  คือ ความเร็วของนิวตรอน, มีหน่วยเป็น ซม./วินาที  
 $\phi = nv$  ..... (2.1)

ปริมาณ  $nv$  เรียก นิวตรอนฟลักซ์



รูปที่ 2.1 แสดงลำแสงนิวตรอนเข้าชนเป้าทุกทิศทาง

จากสมการ (1.4), อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดคือ

$$F = \sum_i I_i \quad \text{..... (2.2)}$$

เมื่อ  $\sum_i$  คือภาคตัดขวางมหัพภาคทั้งหมด (total macroscopic cross section)

พิจารณาเป้าเล็กๆ ถูกอาบด้วยลำแสงนิวตรอน ความเข้มของลำแสงต่างกัน สมมุติว่า นิวตรอนในแต่ละลำแสงมีพลังงานเท่ากัน จากความจริงที่ว่า การเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอนกับนิวคลีไอไม่ขึ้นกับมุมที่นิวตรอนชนกับนิวคลีไอ อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด คือ

$$F = \sum_i (I_A + I_B + I_C + \dots) \quad \text{..... (2.3)}$$

นิวตรอนมีพลังงานเดียว ใช้สมการ (1.1) จะเขียนได้ว่า

$$F = \sum_i (n_A + n_B + n_C + \dots)v \quad \text{..... (2.4)}$$

เมื่อ  $n_A, n_B, \dots$  เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนในแต่ละลำแสง และ  $v$  เป็นความเร็วของนิวตรอน

เนื่องจาก  $n_A + n_B + n_C + \dots = n$

ความเข้มของนิวตรอนทั้งหมดที่ชนเป้าในสมการ (2.4) คือ

$$F = \sum_i n v \quad \text{..... (2.5)}$$

เนื่องจากนิวตรอนเคลื่อนที่ไปทุกทิศทาง สมการ (2.5) จึงใช้ได้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อ  $n$  เป็นความหนาแน่นของนิวตรอน ณ จุดที่จะหาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ปริมาณ  $n v$  ในสมการ (2.5) เรียก ฟลักซ์นิวตรอน ในกรณีนี้ นิวตรอนมีพลังงานเดียว ใช้สัญลักษณ์  $\phi$ , ดังนั้น

$$\phi = n v \quad \text{..... (2.6)}$$

หน่วยของฟลักซ์ จะเหมือนกับหน่วยของความเข้มของลำแสง คือ นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที ในเทอมของฟลักซ์, ความหนาแน่นของการชน คือ

$$F = \sum_i \phi \quad \text{..... (2.7)}$$

ถ้าจะนำสูตรนี้มาใช้กับนิวตรอนที่มีการแจกแจงพลังงาน โดยกำหนดให้

$n(E)$  เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนพลังงาน  $E$

$n(E) dE$  คือจำนวนนิวตรอน/ซม.<sup>3</sup> ที่มีพลังงานระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$  จากสมการ (2.5),

อัตราการเกิดปฏิกิริยา หาได้จาก

$$dF = \sum_i (E) n(E) dE \times v(E) \quad \text{..... (2.8)}$$

จะเห็นว่าทุกตัวพารามิเตอร์ในสูตร เป็นเทอมที่ขึ้นกับพลังงาน ซึ่งเขียนไว้อย่างชัดเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด หาได้จากการอินทิเกรต

$$\begin{aligned} F &= \int_0^\infty \sum_i (E) n(E) v(E) dE \\ &= \int_0^\infty \sum_i (E) \phi(E) dE \quad \text{..... (2.9)} \end{aligned}$$

เมื่อ  $\phi(E) = n(E) v(E) \quad \text{..... (2.10)}$

เรียก ฟลักซ์ที่ขึ้นกับพลังงาน

ขอบเขตของการอินทิเกรตสมการ (2.9) จะคิดจากศูนย์จนถึงอนันต์ เป็นการรวมนิวตรอนทุกพลังงาน

สมการ (2.9) เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด, อัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับแต่ละปฏิกิริยาจะหาได้คล้ายๆ กัน ดังนั้น จำนวนการชนแล้วกระเจิง ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที คือ

$$F_s = \int_0^\infty \Sigma_s(E) \phi(E) dE \quad \dots (2.11)$$

จำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืน/ชม.<sup>3</sup>/วินาที คือ

$$F_a = \int_0^\infty \Sigma_a(E) \phi(E) dE \quad \dots (2.12)$$

ต่อไปพิจารณาว่า นิวตรอนที่มีการกระเจิงนั้น เป็นนิวตรอนพลังงานเดียว และการแพร่ของนิวตรอนพลังงานเดียวจะได้พิจารณาในบทต่อไป

## 2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนกระทบเป้า

พิจารณาลำแสงนิวตรอนความหนาแน่น  $n$  นิวตรอน/ชม.<sup>3</sup>

นิวตรอนมีความเร็ว  $v$  ชม./วินาที

จำนวนนิวตรอนที่ตกกระทบพื้นที่ของเป้า 1 ชม.<sup>2</sup>/วินาที คือ  $nv$

ถ้า พื้นที่ที่แท้จริง ต่อ 1 นิวเคลียสของเป้าที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนตกกระทบ คือ

$\sigma$  ชม.<sup>2</sup> (สำหรับแต่ละปฏิกิริยา)

กำหนดพื้นที่ที่แท้จริง (ที่มีหน่วยเป็น ชม.<sup>2</sup>) ของทุกๆ นิวเคลียส ต่อ ชม.<sup>3</sup> ของเป้า คือ  $\Sigma$

จำนวนปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียส คือ  $\Sigma nv$  ต่อเป้า 1 ชม.<sup>3</sup> ต่อวินาที (แต่ละนิวตรอน ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ 1 ครั้ง)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนกระทบเป้า =  $\Sigma nv$  นิวตรอน/ชม.<sup>3</sup>/วินาที ..... (2.13)

$\Sigma$  คือภาคตัดขวางมหัพภาค สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

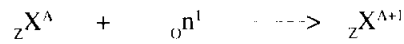
สมการ (2.13), เขียนได้ว่า

อัตราการเกิดปฏิกิริยา =  $\Sigma \phi$  นิวตรอน/ชม.<sup>3</sup>/วินาที ..... (2.14)

## 2.3 การอาบลำแสงนิวตรอน

(Neutron Activation)

การนำธาตุเข้าไปอาบลำแสงนิวตรอน จะต้องใช้ธาตุที่มีเสถียรภาพ ไม่เป็นธาตุกัมมันตรังสี แล้วให้ธาตุที่มีเสถียรภาพนั้นจับนิวตรอน เพื่อให้เกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสี



ถ้า N คือจำนวนนิวคลีไอของธาตุกัมมันตรังสี มีหน่วยเป็น นิวคลีไอ/ซม.<sup>3</sup>

ธาตุกัมมันตรังสีจะเกิดขึ้นตามเวลาการอาบรังสี แต่ขณะเดียวกัน ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก็จะสลายไป

อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น =  $-\lambda N$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลาย มีหน่วยเป็น วินาที<sup>-1</sup>

อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเมื่ออาบรังสีนาน T วินาที คือ

$$\frac{dN}{dT} = \Sigma \emptyset - \lambda N \quad (2.15)$$

จำนวนอะตอมที่เกิดขึ้นเมื่ออาบลำแสง นาน T จะหาได้ในหัวข้อต่อไป

## 2.4 การคำนวณหาความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากอาบรังสี

ถ้าแผ่นฟอล์บางๆ ถูกอาบด้วยลำแสงนิวตรอน นาน T วินาที จากสมการ (2.15),

อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นคือ

$$\frac{dN}{dT} = \Sigma \emptyset - \lambda N \quad \dots (2.16)$$

$$\frac{dN}{dT} + \lambda N = \Sigma \emptyset$$

คูณด้วย  $e^{\lambda T}$ , แล้วจัดใหม่, จะได้

$$d(Ne^{\lambda T}) = \Sigma \emptyset e^{\lambda T} dT$$

โดยการอินทิเกรต,

$$Ne^{\lambda T} = \frac{\Sigma \emptyset e^{\lambda T}}{\lambda} + C$$

$$N = \frac{\Sigma \emptyset}{\lambda} + C e^{-\lambda T} \quad \dots (2.17)$$

ขอบเขตเงื่อนไข, เมื่อ  $T = 0$ ,  $N = 0$  คือยังไม่มีธาตุกัมมันตรังสีเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการอาบรังสี = 0, จะได้

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

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

$$N = \frac{\Sigma \emptyset}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (2.18)$$

หรือ  $A(T) = \Sigma \emptyset (1 - e^{-\lambda T}) \quad (2.19)$

เมื่อ  $N\lambda$  คือ ความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเมื่ออาบลำแสงนาน  $T$  แทนด้วย  $A(T)$

$\Sigma \emptyset$  คืออัตราการเกิดธาตุกัมมันตรังสีโดยการจับนิวตรอน

ถ้าอาบรังสีเป็นเวลานานมาก เรียก สภาวะคงตัว (steady state) จากสมการ (2.15),  $\frac{dN}{dt} = 0$

หมายถึงสภาวะที่อัตราการเกิดธาตุกัมมันตรังสี  $N$  เท่ากับอัตราการสลายของธาตุ  $N$  คือ

$$\Sigma \emptyset = N\lambda$$

$$N = \frac{\Sigma \emptyset}{\lambda}$$

ถ้ากำหนดให้จำนวนอะตอม/ซม.<sup>3</sup> ที่เกิดขึ้นมากที่สุด =  $N_0$

$$N_0 = \frac{\Sigma \emptyset}{\lambda} \quad \dots (2.20)$$

อัตราการส่งอนุภาคของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัว =  $\lambda N_0$  อนุภาค/ซม.<sup>3</sup>/วินาที

$$\lambda N_0 = \Sigma \emptyset \quad \dots (2.21)$$

$\Sigma \emptyset$  คือ ความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมากที่สุด เรียก ความแรงอิ่มตัว (saturation activity) ของธาตุที่อาบลำแสงนิวตรอนแล้ว

ถ้านำธาตุที่อาบลำแสงนิวตรอนแล้วออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์ ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นนั้นจะสลายไปตามเวลา ทำให้ปริมาณลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากสมการที่ (2.19) คือ

$$A(T) = \Sigma \emptyset (1 - e^{-\lambda T}) \quad \dots (2.22)$$

ถ้า  $A(t)$  คือความแรงที่วัดได้ในเวลา  $t$  ต่อมา

$$A(t) = \Sigma \emptyset (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t} \quad \dots (2.23)$$

หรือ  $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$

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

$A_0$  คือความแรงทันทีที่นำออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์

โดยการใช้วัสดุที่ทราบค่าภาคตัดขวางสำหรับการอาบรังสี จะหานิวตรอนฟลักซ์ได้

การอาบรังสี มักใช้แผ่นฟอล์ยบางๆ ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนนิวตรอน อาบลำแสง

นิวตรอน, ใช้เวลานานพอเพียงเพื่อที่จะสมมุติว่าได้เกิดสภาวะคงตัวขึ้นแล้ว การใช้แผ่นฟอล์ยบางๆ ก็เพื่อให้ได้รับฟลักซ์นิวตรอนอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่นที่ใช้ดูดกลืน

ในการศึกษาการอาบรังสี มักเลือกธาตุ ที่มีค่าภาคตัดขวางในการอาบรังสีสูง แล้วปล่อยให้จมน้ำร้อนอิมตัว จะได้ความแรงมากพอที่จะวัดค่าได้อย่างถูกต้อง และอัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ต้องไม่สูงนัก เพราะจะทำให้มีการสลายอย่างรวดเร็วหลังจากนำออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์แล้ว ธาตุที่เหมาะสมในการหานิวตรอนฟลักซ์โดยการอาบรังสีคืออินเดียม, ทอง, เงิน, แมงกานีส และโรเดียม โดยทำเป็นแผ่นฟอล์ยบางๆ อินเดียมเป็นธาตุที่เหมาะสมในการศึกษาเรื่องการอาบรังสีมากที่สุด เพราะครึ่งชีวิต 54.2 นาที, นับว่านานพอที่จะนำออกมาวัดได้อย่างถูกต้อง และไม่นานเกินไปที่จะปล่อยให้มีความแรงอิมตัว

ในการคำนวณจะต้องจำไว้ว่า ธาตุที่นำเข้าไปอาบลำแสงนิวตรอน ต้องเป็นธาตุที่มีเสถียรภาพ การจับนิวตรอนเป็นปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ เมื่อมีนิวตรอนฟลักซ์ =  $\phi$ , ปฏิกิริยาการจับนิวตรอนที่เกิดขึ้นคือ  $\Sigma \phi$  นิวตรอน/ชม.<sup>3</sup>/วินาที, เมื่ออาบลำแสงนาน T ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากการจับนิวตรอนจะสลายไป  $\Sigma \phi e^{-\lambda T}$

ดังนั้น ทันทีที่นำธาตุกัมมันตรังสีออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์ความแรงที่เกิดขึ้นจึงเป็น

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

## 2.5 ทางเดินเฉลี่ย

(Mean Free Path)

สัญลักษณ์ของทางเดินเฉลี่ยคือ  $\lambda$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตร มีความหมายว่า เป็นระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปก่อนที่จะเข้าชนเพื่อเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสอื่นต่อไป

ถ้า  $v$  เป็นความเร็วของนิวตรอน คือระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ได้ต่อ 1 วินาที

ค่าเฉลี่ยของจำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อวินาที คือ  $\frac{v}{\lambda}$

ถ้าลำแสงนิวตรอนมี  $n$  นิวตรอน/ชม.<sup>3</sup>

จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น/ชม.<sup>3</sup>/วินาที คือ  $\frac{nv}{\lambda}$

กล่าวได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} &= \frac{nv}{\lambda} \quad \text{นิวตรอน/ชม.}^3/\text{วินาที} \\ &= \frac{\phi}{\lambda} \end{aligned} \tag{2.24}$$

สมการ (2.14), อัตราการเกิดปฏิกิริยา =  $\Sigma \phi$

สมการ (2.14) = สมการ (2.24)

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

$$\Sigma = \frac{1}{\lambda}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \quad \dots (2.25)$$

ถ้าจะหาทางเดินเฉลี่ย จากลำแสงนิวตรอนที่ผ่านออกมาจากเป้า จะใช้สมการ (1.17) คือ

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

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

$\frac{I}{I_0}$  คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านระยะทาง  $x$  โดยไม่เกิดการชน ถ้าให้ปริมาณ  $p(x)dx$  เป็น ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะมีการชนครั้งแรกในระยะ  $dx$  (ซึ่งเป็นระยะทางต่อจาก  $x$ ),  $p(x) dx$  คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนยังคงอยู่ตลอดระยะทาง  $x$  โดยไม่เกิดการชน คูณกับ ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะเกิดการชนในระยะทาง  $dx$  ต่อมา เนื่องจาก  $\Sigma$  เป็นความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น  $p(x) dx$  จะเขียนได้ดังนี้

$$p(x) dx = e^{-\Sigma x} \cdot \Sigma dx$$

$$= \Sigma e^{-\Sigma x} dx$$

แต่  $\lambda$  คือค่าเฉลี่ยของระยะทาง  $x$  ที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปโดยไม่เกิดการชน และจะชนกับนิวเคลียสอื่นในระยะทาง  $dx$  ต่อไป ดังนั้น

$$\lambda = \int_0^{\infty} x p(x) dx$$

$$= \Sigma \int_0^{\infty} x e^{-\Sigma x} dx$$

$$= \frac{1}{\Sigma} \quad \dots (2.26)$$

### ตัวอย่างที่ 2.1

จงหาระยะทางเฉลี่ย ที่นิวตรอนเร็วจะเคลื่อนที่ไปใน ยูเรเนียม-235 ความหนาแน่น 19.0 กรัม/ซม.<sup>3</sup> ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวเคลียสต่อไป กำหนดค่าภาคตัดขวางจุลภาคของทุกปฏิกิริยา =  $4.76 \times 10^{-24}$  ซม.<sup>2</sup>

ระยะทางเฉลี่ยนั้นคือ  $\lambda$

$$\Sigma_t = N \sigma_t$$

$$N = \frac{\rho N_A}{A}$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{19.0 \times 0.602 \times 10^{24}}{235} \\
&= 0.0486 \times 10^{24} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3 \\
\Sigma_t &= 0.0486 \times 10^{24} \times 4.76 \times 10^{-24} \\
&= 0.23 \quad \text{ซม.}^{-1} \\
\lambda_t &= \frac{1}{\Sigma_t} = \frac{1}{0.23} \\
\text{ทางเดินเฉลี่ย} &= 4.34 \quad \text{ซม.}
\end{aligned}$$

### ตัวอย่างที่ 2.2

อาบรังสีทองแผ่นบางๆ หนัก 0.1 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ นาน 1 วัน เกิดทอง-198 ครึ่งชีวิต 2.7 วัน เมื่อนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ แล้วปล่อยให้ อยู่นาน 1 ชั่วโมง พบว่ามีความแรง 1.73 มิลลิวูรี่

กำหนดค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับทอง-197 เท่ากับ 94 บาร์น จงหาฟลักซ์นิวตรอน

$$\begin{aligned}
\text{จำนวนอะตอมของทอง, } N &= \frac{\rho N_A}{A} \\
&= \frac{0.1 \times 0.602 \times 10^{24}}{197} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3 \\
\Sigma &= N\sigma \\
\sigma = 94 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2, & \\
\Sigma &= \frac{0.1 \times 0.602 \times 10^{24} \times 94 \times 10^{-24}}{197} \\
&= \frac{0.0287}{V} \quad \text{ซม.}^{-1} \\
\lambda &= \frac{0.693}{2.7} \quad \text{วัน}^{-1} \\
\text{เวลาอาบรังสี } T = 1 \text{ วัน} & \\
\lambda T &= \frac{0.693 \times 1}{2.7} = 0.2566 \\
e^{-0.2566} &= 0.7736 \\
\text{นำออกมา 1 ชั่วโมง จึงเข้าเครื่องวัด} & \\
t &= \frac{0.693 \times 1}{2.7 \times 24} = 0.0106
\end{aligned}$$

$$e^{-0.0106} = 0.9894$$

อาบรังสีนาน 1 วัน แล้วปล่อยทิ้งไว้นาน 1 ชั่วโมง จึงวัดความแรงได้ 1.73 มิลลิคูรี

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

$$\frac{1.73 \times 3.7 \times 10^7}{6.401 \times 10^7} = \frac{0.0287 \cdot \phi (1 - 0.7736) 0.9894}{\phi}$$

$$6.401 \times 10^7 = 0.0287 \phi \times 0.2264 \times 0.9893$$

$$= 0.0287 \times 0.2240 \phi$$

$$= 6.428 \times 10^{-3} \phi$$

$$\phi = \frac{6.401 \times 10^7}{6.428 \times 10^{-3}}$$

$$= 9.957 \times 10^{10}$$

$$= 10^{10} \text{ นิวตรอน/ชม.}^2/\text{วินาที}$$

### ตัวอย่างที่ 2.3

ไอโอดีน-127 ความหนาแน่น 4.93 กรัม/ชม.<sup>3</sup> นำไปอาบลำแสงนิวตรอน ซึ่งมีนิวตรอนฟลักซ์ =  $10^{10}$  นิวตรอน/ชม.<sup>2</sup>/วินาที เกิดเป็น ไอโอดีน-128 สลายด้วยครึ่งชีวิต 25.0 นาที ถ้ากำหนดค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนที่พลังงานเดียวกันเท่ากับ 7.0 บาร์น จงหา

(ก) นานเท่าไรจึงจะเกิด ไอโอดีน-128 มากที่สุด

(ข) อาบรังสีนาน 10 นาที ทันทีที่นำออกมา มีความแรงเท่าไร

(ค) หลังจากอาบรังสีแล้วนำออกมา นาน 20 นาที จะวัดความแรงได้เท่าไร

$$N = \frac{\rho N_A}{A} = \frac{4.93 \times 0.602 \times 10^{24}}{127} = 0.0233 \times 10^{24} \text{ อะตอม/ชม.}^3$$

$$\begin{aligned} \Sigma_a \phi &= N \sigma_a \phi \\ &= 0.0233 \times 10^{24} \times 7 \times 10^{-24} \times 10^{10} \\ &= 0.1631 \times 10^{10} = 1.63 \times 10^9 \text{ อะตอม/ชม.}^3/\text{วินาที} \end{aligned}$$

(ง) เกิด ไอโอดีน-128 มากที่สุด คือไม่มีการสลายอีกต่อไป หรือเวลา  $T > 10$  เท่าของครึ่งชีวิต

ดังนั้น เวลา =  $10 \times 25.0 = 250$  นาที = 4 ชั่วโมง 10 นาที

(ข) อาบรังสีนาน  $T = 10$  นาที

$$\lambda = \frac{0.693}{25.0}$$

$$\lambda T = \frac{0.693}{25.0} \times 10 = 0.2772$$

$$e^{-\lambda T} = 0.7579$$

$$\begin{aligned} A(T) &= \Sigma \emptyset (1 - e^{-\lambda T}) \\ &= 1.63 \times 10^9 (1 - 0.7579) \\ &= 1.63 \times 10^9 \times 0.2421 \\ &= 0.3946 \times 10^9 \end{aligned}$$

เมื่อนำออกมามีความแรง =  $3.9 \times 10^8$  อะตอม/ ซม.<sup>3</sup>/วินาที

(n) ปล่อยให้เวลานาน 20 นาที จึงเข้าเครื่องวัด

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

จากข้อ (ข),  $A(T) = 3.9 \times 10^8$

$$\lambda t = \frac{0.693}{25} \times 20 = 0.5544$$

$$e^{-\lambda t} = 0.5744$$

$$\begin{aligned} A(t) &= 3.946 \times 10^8 \times 0.5744 \\ &= 2.26 \times 10^8 \text{ อะตอม/ ซม.}^3\text{/วินาที} \end{aligned}$$

## สรุป

1. ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนกระทบเป้า หาได้จาก

$$F = \Sigma \phi \quad \text{อะตอม/ซม}^3/\text{วินาที}$$

ฟลักซ์เป็นปริมาณสเกลาร์ ฟลักซ์ ณ ตำแหน่งใดๆ หาได้โดยการรวมปริมาณของฟลักซ์ที่เข้าชนเป้าพื้นที่ 1 เซนติเมตร<sup>2</sup> ทุกทิศทาง ในเวลา 1 วินาที

2. ในการอาบลำแสงนิวตรอน จะต้องนำธาตุที่มีเสถียรภาพ เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อนิวตรอนฟลักซ์ผ่านธาตุ จะเกิดปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลง ทำให้ธาตุที่มีเสถียรภาพกลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี

ถ้าใช้เวลานาน T วินาที ในการอาบรังสี เมื่อนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะมีความแรง  $A(T) = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T})$

ถ้านำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์แล้วปล่อยทิ้งไว้เวลานาน t จึงเข้าเครื่องวัด จะวัดความแรงได้  $A(T)e^{-\lambda t}$

ถ้าปล่อยธาตุนั้นไว้ในเครื่องปฏิกรณ์นานมาก จะมีความแรง  $= \Sigma \phi$  อะตอม/ซม.<sup>3</sup>/วินาที เป็นค่าความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น

3. ระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปในตัวกลางจนเกิดการชนอีกครั้งหนึ่งเรียกระยะทางเฉลี่ย  $\lambda$ , มีค่าเฉพาะสำหรับแต่ละปฏิกริยา เช่นระยะทางเดินเฉลี่ยกระเจิง =  $\lambda_s$ , ระยะทางเดินเฉลี่ยดูดกลืน ก็คือระยะทางที่นิวตรอน เคลื่อนที่ไปได้ในตัวกลางจนกว่าจะถูกจับ

$$\lambda_u = \frac{1}{\Sigma_a}$$

## แบบฝึกหัด

ข้อ 2.1 จงหานิวตรอนฟลักซ์ที่เกิดจากลำแสงนิวตรอน พลังงาน 1 เมออีวี ความหนาแน่น  $10^5$  นิวตรอน/ซม.<sup>3</sup>

ข้อ 2.2 จงหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อลำแสงนิวตรอนฟลักซ์  $10^9$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เข้าชนเป้าทำด้วยเงิน-107 ความหนาแน่น 10.5 กรัม/ซม.<sup>3</sup> ภาคตัดขวางของเงิน-107 เท่ากับ 63 บาร์น มวลอะตอมของเงิน = 107.88

ข้อ 2.3 แผ่นทองหนา 0.02 เซนติเมตร อาบรังสีเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ ความแรง  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เกิดทอง-198 มีครึ่งชีวิต 2.7 วัน จากปฏิกิริยา  $Au^{197}(n,\gamma)Au^{198}$  ความหนาแน่นของทอง = 19.3 กรัม/ซม.<sup>3</sup> ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา เท่ากับ  $98.7 \times 10^{-24}$  ซม.<sup>2</sup> จงหา

- (ก) จำนวนอะตอมของทอง-198 ที่เกิดขึ้นต่อ ซม.<sup>2</sup> ของแผ่นทอง
- (ข) ความแรงของแผ่นทองที่อาบรังสีแล้ว

ข้อ 2.4 อาบรังสีไอโอดีน-127 ความหนาแน่น 4.93 กรัม/ซม.<sup>3</sup> จำนวน 2 ซม.<sup>3</sup> ด้วยเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $10^8$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที ทำให้เกิดไอโอดีน-128 ครึ่งชีวิต 25 นาที, ภาคตัดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับเทอร์มาลนิวตรอน เท่ากับ 7.0 บาร์น จงหา

- (ก) ความแรงของไอโอดีน-128 เมื่ออาบรังสีนาน 10 นาที
- (ข) ความแรงเมื่อนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ แล้วปล่อยทิ้งไว้ 5 นาที
- (ค) ความแรงสูงสุดที่จะเกิดขึ้นในหน่วย มิลลิวูรี

ข้อ 2.5 แทนทาลัมฟอสฟอรัสหนา 0.02 เซนติเมตร ความหนาแน่น 16.6 กรัม/ซม.<sup>3</sup> อาบลำแสงเทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์  $10^{12}$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง เกิดแทนทาลัม-182 ครึ่งชีวิต 114 วัน จากปฏิกิริยา  $Ta^{181}(n,\gamma)Ta^{182}$  และแผ่นที่เกิดขึ้นมีความแรง 0.33 มิลลิวูรีต่อ ตารางเซนติเมตร ทันทีหลังจากการอาบรังสี จงหา

- (ก) จำนวนอะตอมของแทนทาลัม-182 ที่เกิดขึ้น
- (ข) ค่าภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา

ข้อ 2.6 จงหาทางเดินเฉลี่ยดูดกลืนและทางเดินเฉลี่ยกระเจิงในน้ำหนัก  $D_2O$  ความหนาแน่น  $0.0331 \times 10^{24}$  โมเลกุล/ซม.<sup>3</sup> กำหนดค่าภาคตัดขวางดูดกลืนและภาคตัดขวางกระเจิงที่

พลังงานเดียวกัน = 0.001 และ 13.6 บาร์นตามลำดับ

ข้อ 2.7 จงหาระยะทางเฉลี่ยที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งไปได้จนกระทั่งถูกจับไปในตัวกลางที่เป็นยูเรเนียม กำหนดความหนาแน่นของยูเรเนียม = 19.1 กรัม/ซม.<sup>3</sup> ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน = 7.59 บาร์น