บทที่ 3

การสร้างสมการเพื่อใช้ในการคำนวณ

ในการศึกษาเกี่ยวกับกากฟิสชันชนิดกาซ ได้ทำการสร้างสมการต่อเนื่องจากการซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิงสู่น้ำ จากน้ำสู่อากาศในห้อง และจากห้องออกนอกห้องโดยผ่านระบบระบายอากาศ เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณต่างๆ ตามที่ต้องการ

3.1 ปริมาณกาซที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง

ให้ P เป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ มีหน่วยเป็นวัตต์ (watt)

Q เป็นปริมาณกาซที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงเมื่ออยู่ในสภาพสมดุลย์ (equilibrium) มีหน่วยเป็นคูรี (curie)

Y เป็นฟิสชันยีลด์รวม มีหน่วยเป็นร้อยละ และมีค่าเท่ากับ ฟิสชันยีลด์โดยตรง, Y_{indep} + ฟิสชันยีลด์โดยอ้อม, Y_{dep}

เนื่องจาก เครื่องปฏิกรณ์ที่มีกำลัง 1 วัตต์ ได้จากการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียม 3.1×10^{10} ครั้ง/วินาที

ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ที่มีกำลัง P วัตต์ ได้จากการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียม $3.1 \times 10^{10} P$ ครั้ง/วินาที

นั่นคือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีกำลัง P วัตต์ ทำให้เกิดกาซ $3.1 \times 10^{10} P \times \frac{Y}{100}$ อะตอม/วินาที

เนื่องจาก กาซที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงเป็นกาซกัมมันตรังสี

ดังนั้น จึงมีการสลายตัว $Q \times 3.7 \times 10^{10}$ อะตอม/วินาที

ในสภาพสมดุลย์ อัตราการเกิดของกาซ เท่ากับอัตราการสลายตัวของกาซ

นั่นคือ $3.1 \times 10^{10} P \times \frac{Y}{100} = Q \times 3.7 \times 10^{10}$

ดังนั้น $Q = \frac{3.1P}{3.7} \times \frac{Y}{100}$ .....(3.1.1)

3.2 อัตราที่กาซซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิง

ให้ R เป็นอัตราที่กาซซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที (picocurie/min)

λ_1 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) ของกาซ มีหน่วยเป็นต่อนาที

M_1 เป็นปริมาณกาซที่มีอยู่ในน้ำเมื่ออยู่ในสภาพสมดุลย์ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี

A เป็นอัตราที่กาซหนีจากน้ำขึ้นสู่อากาศ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

เนื่องจาก อัตราการซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิง = อัตราที่กาซสลายตัวในน้ำ + อัตราที่กาซหนีจากน้ำขึ้นสู่อากาศ

ดังนั้น $R = \lambda_1 M_1 + A$ .....(3.2.1)

เมื่อ $\lambda_1 = \frac{0.693}{T_{1/2}}$

โดยที่ $T_{1/2}$ คือครึ่งชีวิต (half life) ของกาซ มีหน่วยเป็นนาที

3.3 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างโดสเรท (Dose Rate) กับปริมาณกาซที่มีอยู่ในน้ำเมื่ออยู่ในสภาพสมดุลย์</u>

ให้ D_s เป็นโดสเรทของรังสีแกมมาที่ผิวน้ำ มีหน่วยเป็นแรด/วินาที (rad/sec)

V_w เป็นปริมาตรของน้ำในบ่อปฏิกรณ์ มีหน่วยเป็นลบ.ซม.

C_1 เป็นปริมาณกาซที่มีอยู่ในน้ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่ออยู่ในสภาพสมดุลย์ มีหน่วยเป็นคูรี/ลบ.ซม.

E เป็นพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อกาซสลายตัว มีหน่วยเป็น ล้านอิเล็กตรอนโวลต์/ดิสอินทิเกรชัน (millionelectronvolt/disintegration)

เนื่องจาก โดสเรทเป็นปริมาณรังสีที่คนหรือวัตถุอาบรังสีรับไว้ในกำหนดเวลาอันหนึ่ง

ดังนั้น $D_s = \frac{1}{2}\left[C_1 \frac{Ci}{cm^3} \cdot \frac{3.7\times10^{10}\,dis/sec}{1\,Ci} \cdot \frac{E\ MeV}{1\,dis} \cdot \frac{1.6\times10^{-6}\,erg}{1\,MeV} \cdot \frac{1\,rad}{100\,erg/gm}\right]$

เนื่องจาก น้ำปริมาตร 1 ลบ.ซม. (cm^3) หนัก 1 กรัม (gm)

ดังนั้น $$D_s = \frac{1}{2}\frac{(C_1 x 3.7\times10^{10})(E)(1.6\times10^{-6})}{100} \quad .....(3.3.1)$$

3.4 <u>อัตราการซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิงของกาซชนิดต่างๆ</u>

ถือว่า อัตราการซึมของกาซต่อหนึ่งหน่วยปริมาณกาซที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง เท่ากันทุกกาซ

ดังนั้น $\frac{R}{Q} \times 100$ เท่ากันทุกกาซ .....(3.4.1)

3.5 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราที่กาซหนีจากน้ำขึ้นสู่อากาศกับปริมาณกาซที่มีอยู่ในน้ำ</u>

ถือว่า ในสภาพสมดุลย์ อัตราที่กาซหนีจากน้ำขึ้นสู่อากาศต่อปริมาณกาซที่มีอยู่ในน้ำ มีค่าคงที่ทุกกาซ

ดังนั้น $$\frac{A}{M_1} = K \qquad .....(3.5.1)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่

3.6 <u>สมการแสดงการสลายตัวแบบต่อเนื่องของกาซในอากาศ เมื่อมีการดูดอากาศออกจากห้อง</u>

การสลายตัวแบบต่อเนื่องของกาซเป็นไปดังสมการ

$$N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3$$

เมื่อ N_1 เป็นความเข้มข้น (concentration) ของอะตอมแม่ (parent atom) ที่มีอยู่ในอากาศ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี

N_2 เป็นความเข้มข้นของอะตอมลูก (daughter atom) ที่ได้จากการสลายตัวของอะตอมแม่ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี

N_3 เป็นความเข้มข้นของอะตอมที่เสถียรที่ได้จากการสลายตัวของอะตอมลูก มีหน่วยเป็นปิโคคูรี

λ_1 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของอะตอมแม่ มีหน่วยเป็นต่อนาที

λ_2 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของอะตอมลูก มีหน่วยเป็นต่อนาที

ถ้าให้ F เป็นอัตราการดูดอากาศออกจากห้อง มีหน่วยเป็นลบ.เมตร/นาที

V_a เป็นปริมาตรของห้องกักอากาศ มีหน่วยเป็นลบ.เมตร

A เป็นอัตราที่กาซหนีจากน้ำขึ้นสู่อากาศ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

จะได้ อัตราการเพิ่มของ N_1 คือ

$$\frac{dN_1}{dt} = A - \lambda_1 N_1 - \frac{F}{V_a} N_1 \qquad .....(3.6.1)$$

อัตราการเพิ่มของ N_2 คือ

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - \frac{F}{V_a} N_2 \qquad .....(3.6.2)$$

เมื่อ $\lambda_1 N_1$ เป็นอัตราการสลายตัวของอะตอมแม่ ซึ่งเท่ากับอัตราการเกิดของอะตอมลูก มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

$\lambda_2 N_2$ เป็นอัตราการสลายตัวของอะตอมลูก มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

$\frac{F}{V_a} N_1$ เป็นอัตราการเล็ดลอดออกนอกห้องของอะตอมแม่ มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

$\frac{F}{V_a} N_2$ เป็นอัตราการเล็ดลอดออกนอกห้องของอะตอมลูก มีหน่วยเป็นปิโคคูรี/นาที

ในสภาพสมดุลย์ จะได้ค่า N_1 และ N_2 ดังนี้

$$N_1 = \frac{A}{\lambda_1 + F/V_a} \qquad .....(3.6.3)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1 A}{(\lambda_1 + F/V_a)(\lambda_2 + F/V_a)} \qquad .....(3.6.4)$$

3.7 <u>โคสเรทของรังสีแกมมาในอากาศทั่วๆไปเนื่องจากมีสารกัมมันตรังสีอยู่ในอากาศ</u>

ให้ D_a เป็นโคสเรทของรังสีแกมมาในอากาศทั่วๆไป มีหน่วยเป็นแรด/ชม.

V_a เป็นปริมาตรของห้องดักอากาศ มีหน่วยเป็นลบ.เมตร

C เป็นปริมาณกาซที่มีอยู่ในอากาศต่อปริมาตร มีหน่วยเป็นคูรี/ลบ.เมตร

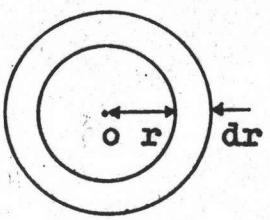
E เป็นพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อกาซมีการสลายตัว มีหน่วยเป็น MeV/dis

r เป็นระยะระหว่างคนหรือวัตถุกับผิวด้านในของวงแหวนทรงกลม (ดูรูปที่ 3-1) มีหน่วยเป็นเมตร

dr เป็นความหนาของวงแหวนทรงกลม มีหน่วยเป็นเมตร

R′ เป็นค่าโดยประมาณของครึ่งหนึ่งของความกว้าง ยาว สูง ของห้องกักอากาศ มีหน่วยเป็นเมตร

μ เป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (absorption coefficient) รังสีแกมมาของอากาศ มีหน่วยเป็นต่อเมตร



รูปที่ 3-1 แสดงส่วนตัดของวงแหวนทรงกลมในอากาศซึ่งมีสารกัมมันตรังสีกระจายอยู่โดยทั่ว

เนื่องจากคนหรือวัตถุมีขนาดเล็กมากจนคิดว่าเป็นจุด เมื่อเทียบกับห้องกักอากาศ ปริมาณรังสีที่คนหรือวัตถุรับไว้จากทุกทิศทุกทางที่อยู่ในช่วง r ถึง r+dr เป็นไปดังสมการ

$$d(D_a) = \frac{0.54CE.4\pi r^2 dr.e^{-\mu r}}{r^2}$$

ดังนั้นปริมาณรังสีที่คนหรือวัตถุรับไว้ทั้งหมด เป็นไปดังสมการ

$$D_a = 0.54CE.\frac{4\pi}{\mu}\left[-\int_0^{R'} e^{-\mu r} d(-\mu r)\right]$$

$$D_a = \frac{(4\pi)(0.54)CE}{\mu}\left[1 - e^{-\mu R'}\right]$$

แทนค่า $R' = 10$ เมตร

$\mu = 0.0065$ เมตร$^{-1}$

จะได้ $$D_a = \frac{(4\pi)(0.54)CE}{0.0065} \times 0.06 \qquad .....(3.7.1)$$

3.8 <u>ซีนอน-135</u>

ซีนอน-135 มีภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าสูงถึง 3.5×10^6 บาร์น ซึ่งสูงกว่าของกาซชนิดอื่นๆมาก ซีนอน-135 จะดูดนิวตรอนช้าที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวในแท่งเชื้อเพลิง การหาปริมาณซีนอน-135 ที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงจึงต้องคำนึงถึงภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าด้วย ส่วนปริมาณอื่นๆก็คำนวณได้เช่นเดียวกับกาซชนิดอื่นๆ

3.8.1 <u>สมการที่ใช้หาปริมาณซีนอน-135 ที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง</u>

พิจารณาการสลายตัวแบบต่อเนื่องของไอโอดีน-135[1]

$$I^{135} \longrightarrow Xe^{135} \longrightarrow Cs^{135} \longrightarrow Ba^{135} \text{ (stable)}$$

6.7 hr 9.2 hr 2×10^4 yr

002131

---

[1] S. Glasstone, <u>Principles of Nuclear Reactor Engineering</u> (London: Macmillan and Company, Inc., 1956)

ซีนอน-135 อาจเกิดจากการสลายตัวของไอโอดีน-135 ดังสมการหน้า 15 โดยมีฟิสชันยีลด์โดยอ้อมร้อยละ 6.0 และอาจเกิดจากการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียม โดยมีฟิสชันยีลด์โดยตรงร้อยละ 0.3

ให้ X เป็นความเข้มข้นของซีนอน-135 มีหน่วยเป็นอะตอม/ลบ.ซม.

λ_X เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของซีนอน-135 มีหน่วยเป็นต่อวินาที

I เป็นความเข้มข้นของไอโอดีน-135 มีหน่วยเป็นอะตอม/ลบ.ซม.

λ_I เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของไอโอดีน-135 มีหน่วยเป็นต่อวินาที

γ_X เป็นฟิสชันยีลด์โดยตรงของซีนอน-135 มีหน่วยเป็นส่วนของร้อย

γ_I เป็นฟิสชันยีลด์โดยตรงของไอโอดีน-135 มีหน่วยเป็นส่วนของร้อย

σ_X เป็นภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าของซีนอน-135 มีหน่วยเป็น ตร.ซม.

ϕ เป็นฟลักซ์ (flux) ของนิวตรอนช้า มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ตร.ซม./วินาที

Σ_f เป็นภาคตัดขวางการแตกตัวช้าแบบมหภาค (macroscopic thermal fission cross section) ของยูเรเนียม มีหน่วยเป็นต่อซม.

จะได้ อัตราการเพิ่มความเข้มข้นของซีนอน-135 เป็นไปดังสมการ

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_X \Sigma_f \phi + \lambda_I I - \lambda_X X - \sigma_X \phi X \quad .....(3.8.1.1)$$

เมื่อ $\Sigma_f \phi$ เป็นอัตราการแตกตัว (fission rate) ของนิวเคลียสของยูเรเนียม มีหน่วยเป็นฟิสชัน/ลบ.ซม./วินาที

$\lambda_I I$ เป็นอัตราการสลายตัวของไอโอดีน-135 ซึ่งเท่ากับอัตราการเกิดซีนอน-135 มีหน่วยเป็นอะตอม/ลบ.ซม./วินาที

$\lambda_X X$ เป็นอัตราการสลายตัวของซีนอน-135 มีหน่วยเป็น อะตอม/ลบ.ซม./วินาที

$\sigma_X \phi X$ เป็นอัตราการดูดนิวตรอนช้าของซีนอน-135 มีหน่วยเป็น อะตอม/ลบ.ซม./วินาที

จากสมการ (3.8.1.1) จะได้ความเข้มข้นของซีนอน-135 ที่เวลา t ใดๆ เป็นไปดังสมการ

$$X(t) = X_0(1 - e^{-\lambda_X^* t}) + \frac{\lambda_I I_0}{\lambda_X^* - \lambda_I}(e^{-\lambda_X^* t} - e^{-\lambda_I t}) \quad .....(3.8.1.2)$$

เมื่อ X_0 เป็นความเข้มข้นของซีนอน-135 เมื่ออยู่ในสภาพสมดุลย์ ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$X_0 = \frac{\lambda_I I_0 + \sigma_X \Sigma_f \phi}{\lambda_X^*} = \frac{(\sigma_I + \sigma_X)\Sigma_f \phi}{\lambda_X^*} \quad ..(3.8.1.3)$$

และ $$\lambda_X^* = \lambda_X + \sigma_X \phi \quad .....(3.8.1.4)$$

ในสภาพสมดุลย์ อัตราการเกิดซีนอน-135 = อัตราการสลายตัวของซีนอน-135

จะได้ $$Q = \frac{\lambda_X X_0 V}{3.7 \times 10^{10}} \quad .....(3.8.1.5)$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณกาซที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นคูรี

3.8.2 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแตกตัวและกำลังของเครื่องปฏิกรณ์</u>

ให้ P เป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ มีหน่วยเป็นวัตต์

V เป็นปริมาตรของแกนเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นลบ.ซม.

$\Sigma_f\phi$ เป็นอัตราการแตกตัว มีหน่วยเป็นฟิสชัน/ลบ.ซม./วินาที

จะได้

$$P = \frac{V\Sigma_f\phi}{3.1\times10^{10}} \qquad .....(3.8.2.1)$$