

บทที่ 2

ทฤษฎี



### 2.1 การสลายตัวของกัมมันตรังสี (Radioactive Decay)

กฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี กล่าวว่า "จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปในช่วงเวลาหนึ่ง จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอมของธาตุนั้นที่เหลืออยู่ขณะนั้น" ถ้า  $N$  เป็นจำนวนอะตอมที่เหลืออยู่ในเวลาใด ๆ และ  $\Delta N$  เป็นจำนวนอะตอมที่สลายไปในช่วงเวลา  $\Delta t$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (2.1)$$

โดยที่  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay Constant) ซึ่งคือโอกาสที่อะตอมหนึ่งๆ จะสลายตัวในหนึ่งหน่วยเวลา

- เครื่องหมายลบแสดงว่าการสลายตัวนี้ทำให้จำนวนอะตอมลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

ในสมการที่ (2.1) ถ้าเวลา  $t$  น้อยมาก สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) ได้ดังนี้

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.2)$$

แล้วทำการอินทิเกรต (Integral) สมการ (2.2) ได้เป็น

$$\ln ( N_0 / N ) = \lambda t$$

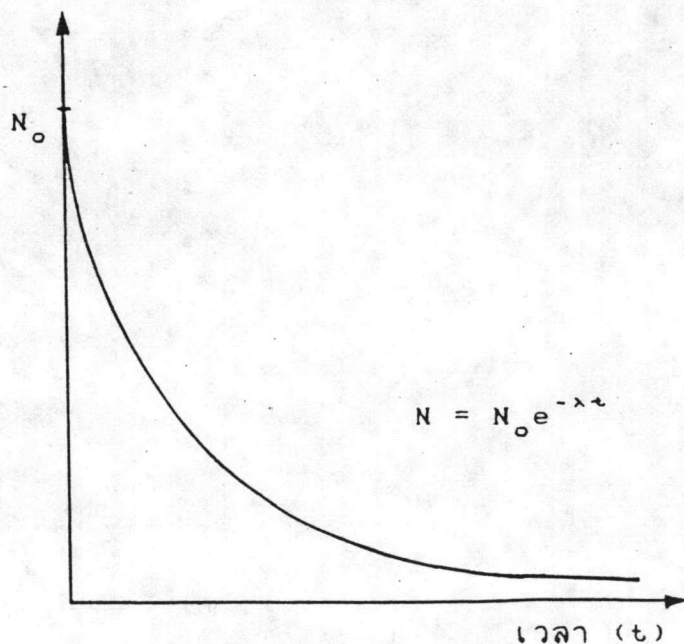
$$\text{หรือ} \quad N = N_0 \text{Exp}(-\lambda t) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $N_0$  เป็นจำนวนอะตอมเริ่มแรกในการสลายตัว ถ้าเวลาผ่านไป  $T_{1/2}$  จำนวนอะตอมจะเหลืออยู่เพียงครึ่งหนึ่งของอะตอมเริ่มแรก คือ เหลือเป็น  $N_0/2$  แล้ว  $T_{1/2}$  จะเรียกว่า "เวลาครึ่งชีวิต" (Half-life) ซึ่งคำนวณได้โดยการแทนค่า  $t = T_{1/2}$  และ  $N = N_0 / 2$  ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.3) มีชื่อว่า "สมการการสลายตัว" (Decay Equation) โดยแสดงถึงจำนวนสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา  $t$  ใดๆ ถ้านำไปเขียนกราฟจะได้กราฟเป็นรูปเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) ดังรูปที่ 2.1

จำนวนสารกัมมันตรังสี (N)



รูปที่ 2.1 จำนวนสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา  $t$  ใดๆ

นักวิทยาศาสตร์ทางนิวเคลียร์เรียกอัตราการสลายตัวนี้ว่า "กัมมันตภาพรังสี" (Radioactivity) ใช้ตัวย่อว่า "A" จะเขียนค่ากัมมันตภาพรังสีเป็นรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$A = dN/dt \quad (2.5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) และ (2.5) จะได้ว่า

$$A = \lambda N$$

และจากสมการที่ (2.3) เมื่อเอา X คูณทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\lambda N = \lambda N_0 \text{Exp}(-\lambda t)$$

หรือ 
$$A = A_0 \text{Exp}(-\lambda t) \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) แสดงถึงกัมมันตภาพรังสีเมื่อเวลา  $t$  โดย เมื่อทราบจำนวนกัมมันตภาพรังสีเริ่มต้น ( $A_0$ ) จะหากัมมันตภาพรังสีเมื่อเวลาผ่านไปได้เช่นเดียวกับสมการการสลายตัว

## 2.2 การสลายตัวแบบอนุกรม (Serial Decay)

การสลายตัวแบบอนุกรมนี้เป็นการสลายตัวแบบเป็นระบบ โดยกล่าวว่าเมื่อสารกัมมันตรังสี A สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี B ซึ่งจะสลายตัวต่อไปอีก ในระบบนี้จะมีทั้งการสลายตัว และ มีการเกิดของสารขึ้นด้วย กระบวนการนี้เรียกว่า "การเกิดและการสลายตัวทางรังสี" (Radioactive Build-up and Decay)

การสลายตัวแบบนี้เกิดขึ้นกับสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ และสารกัมมันตรังสีที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น สารกัมมันตรังสีธรรมชาติที่มีการสลายตัวแบบอนุกรม ได้แก่ การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม , ทอเรียม , และแอกติเนียม ส่วนสารกัมมันตรังสีที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น ได้แก่ สารที่มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชัน (Fission) เช่น สตรอนเชียม-90 (Sr-90) ซึ่งเกิดมาจากคริปทอน-90 (Kr-90)

การสลายตัวแบบอนุกรมนั้น จะเกิดภาวะสมดุลได้ 2 แบบ คือ

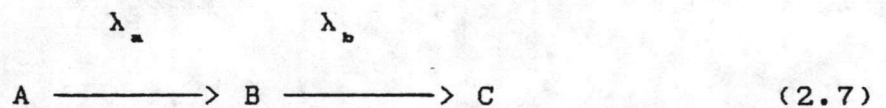
2.2.1 ภาวะสมดุลแบบถาวร (Secular Equilibrium)

2.2.2 ภาวะสมดุลแบบไม่ถาวร (Transient Equilibrium)

การเกิดภาวะสมดุลทั้งสองแบบนี้อธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

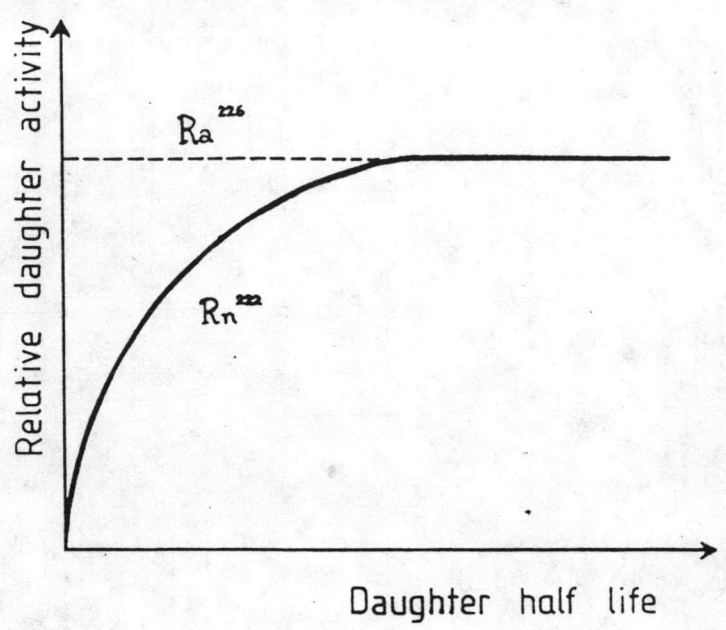
2.2.1 ภาวะสมดุลแบบถาวร

ถ้าสารกัมมันตรังสี A สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี B และสารกัมมันตรังสี B สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี C ดังสมการที่ (2.7)



การที่จะเกิดภาวะสมดุลแบบถาวรของสารกัมมันตรังสี A กับ สารกัมมันตรังสี B ได้ก็ต่อเมื่อ ค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี A มีค่ามาก เมื่อเทียบกับค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี B [ $(T_a) \gg (T_b)$ ] ดังนั้นค่าคงที่ของการสลายตัวของ A จะมีค่าน้อยๆ เมื่อเทียบกับ B นั่นคือ  $\lambda_a \ll \lambda_b$  เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ปริมาณของ B ก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการสลายตัวของ B เป็น C เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดจะถึงจุดที่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายของ B ไปเป็น C ซึ่งเป็นภาวะสมดุลแบบถาวร ตัวอย่างการเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเมื่อเกิดภาวะสมดุลแบบถาวร ได้แก่ การเกิดสมดุลของเรเดียม-226 (Ra-226) กับ เรดอน-222

(Rn-222) โดยเรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิตเป็น 1600 ปี ส่วนเรดอน-222 มีค่าครึ่งชีวิตเป็น 3.82 วัน (C.M.Lederer and V.S.Shirley, 1978) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดสมดุลแบบถาวรของเรเดียม กับ เรดอน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 28 วัน หรือ 672 ชั่วโมง

จากสมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี จะได้ว่า

อัตราที่เปลี่ยนไป = อัตราการเกิด - อัตราการสลาย

โดยที่ อัตราที่เปลี่ยนไป หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสี B ในขณะใดขณะหนึ่ง

อัตราการเกิด หมายถึง อัตราการเกิดของสารกัมมันตรังสี B หรือ อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี A นั้นเอง

อัตราการสลาย หมายถึง อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี B

จากสมการการสลายตัวข้างต้น (R.D.Evans, 1965) จะเขียนเป็นรูปสม

การได้ว่า

$$dN_b/dt = N_a \lambda_a - N_b \lambda_b \quad (2.8)$$

ถ้าเริ่มต้นมี จำนวนอะตอมของ A เป็น  $N_0$  ที่เวลา  $t$  เป็นศูนย์ จะได้

$$N_a = N_0 \text{Exp}(-\lambda_a t) \quad (2.9)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.9) จะทำให้สมการ (2.8) เป็น

$$dN_b/dt = N_0 \lambda_a \text{Exp}(-\lambda_a t) - N_b \lambda_b \quad (2.10)$$

ซึ่งจะหาค่าจำนวนอะตอมของ B ( $N_b$ ) ในรูปของเวลา  $t$  โดยฟังก์ชันของ Explicit Function ได้ว่า

$$N_b = N_0 (h_a e^{-\lambda_a t} + h_b e^{-\lambda_b t}) \quad (2.11)$$

เอาสมการ (2.11) ไปแทนในสมการ (2.10) เพื่อหาค่า  $h_a$  และ  $h_b$  ได้

$$e^{-\lambda_b t} (-h_a \lambda_a - \lambda_a + h_b \lambda_b) = 0 \quad (2.12)$$

ค่า  $e^{-\lambda_b t}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะเวลา  $t$  ของการสลายตัวเกิดขึ้นตลอดเวลาจึงมีค่าเสมอ ดังนั้นจากสมการ (2.12) จะได้ว่า

$$-h_a \lambda_a - \lambda_a + h_b \lambda_b = 0$$

$$h_a (\lambda_b - \lambda_a) = \lambda_a$$

$$h_a = \lambda_a / (\lambda_b - \lambda_a)$$

ส่วนค่า  $h_b$  ถูกกำหนดขึ้นโดยจำนวนอะตอมของ B ที่เวลา  $t$  เป็น 0 จะได้จากสมการที่ (2.11) ว่า

$$h_a + h_b = 0$$

$$h_a = -h_b \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.11) จะได้จำนวนอะตอมของ B ( $N_b$ ) จึงเป็น

$$N_b = N_0 X_a (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t}) / (\lambda_b - \lambda_a) \quad (2.15)$$

เพราะฉะนั้นจำนวนกัมมันตภาพรังสีของ B คือ

$$N_b \lambda_b = N_0 \lambda_a \lambda_b (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t}) / (\lambda_b - \lambda_a) \quad (2.16)$$

หรือ

$$N_b \lambda_b = (N_a \lambda_a) \lambda_b [1 - e^{-(\lambda_b - \lambda_a)t}] / (\lambda_b - \lambda_a) \quad (2.17)$$

การเกิดสมมูลของเรเดียม-226 กับ เรดอน-222 ดังที่กล่าวมาแล้วเราจะสามารถหาจำนวนอะตอมของเรดอน-222 หรือ กัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 เมื่อทราบจำนวนอะตอมของเรเดียม-226 ถ้าเราให้จำนวนอะตอมของเรเดียม-226 เป็น  $N_a$  และค่าเวลาครึ่งชีวิตเป็น  $T_a$  ส่วนจำนวนอะตอมของเรดอน-222 เป็น  $N_b$  และค่าเวลาครึ่งชีวิตเป็น  $T_b$  เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อ เรเดียม-226 ในรูปของค่าเวลาครึ่งชีวิตจากสมการ

(2.17) ได้เป็น

$$\frac{N_u \lambda_u}{N_u \lambda_u} = \frac{T_u [1 - \text{Exp}(-[(T_u - T_b)/T_u] \lambda_u t)]}{T_u - T_b} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) เราจะกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อ เรเดียม-226 ว่าเป็นค่า " Build-up Factor " ดังแสดงในตารางในภาคผนวก ก โดยเริ่มจากเรเดียม-226 สลายตัวเป็นเรดอน-222 ตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไปจนถึงภาวะสมดุล ซึ่งในทางปฏิบัติกำหนดว่าที่จุดสมดุลจะพิจารณาภายหลังจากเวลาผ่านไปเท่ากับ 7 เท่าของค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นใหม่ หรือของเรดอน-222 คือ ประมาณ 28 วัน ( หรือ 672 ชั่วโมง )

ดังนั้นที่จุดสมดุล สามารถเขียนได้ว่า

$$N_u \lambda_u = \frac{N_u \lambda_u}{\lambda_u}$$

หรือ

$$N_u \lambda_u = N_u \lambda_u \quad (2.19)$$

### 2.2.2 ภาวะสมดุลแบบไม่ถาวร

การที่จะเกิดภาวะสมดุลแบบไม่ถาวรนั้น เมื่อค่าเวลาครึ่งชีวิตของสารตั้งต้นมีค่ามากกว่าค่าเวลาครึ่งชีวิตของผลผลิตไม่มากนัก ( $T_u > T_b$ ) หลังจากอยู่ในภาวะสมดุลแบบไม่ถาวรแล้ว กัมมันตภาพรังสีของ B จะลดลงด้วยค่าครึ่งชีวิตของ A ตัวอย่างการสลายตัวแบบเกิดภาวะสมดุลอย่างไม่ถาวรนี้ได้แก่ การสลายตัวของเรดอน-222 เป็นผลผลิตครึ่งชีวิตสั้น  $RaA$  ,  $RaB$  ,  $RaC$  ,  $RaC'$  ดังแผนภูมิข้างล่างนี้

(R.D.Evans , 1972)



ไอโซโทปรังสี	$Rn_{222}$	$\xrightarrow{\alpha}$	$RaA$	$\xrightarrow{\alpha}$	$RaB$	$\xrightarrow{\beta}$	$RaC$	$\xrightarrow[0.0004\lambda]{0.0036\beta}$	$RaC'$
เวลาครึ่งชีวิต (T)	3.82		3		26.8		19.7		$1.64 \times 10^{-4}$
	day		min.		min.		min.		sec.
สัญลักษณ์	A	$\longrightarrow$	B	$\longrightarrow$	C	$\longrightarrow$	D	$\longrightarrow$	E
ค่าคงที่การสลาย	$\lambda_a$		$\lambda_b$		$\lambda_c$		$\lambda_d$		$\lambda_e$
ตัวในหน่วย $10^{-4}$ วินาที	0.021		37.9		4.31		5.86		$4 \times 10^{11}$
กัมมันตภาพรังสี ส่วนเกิน(%)			0.054		0.54		0.89		0.85

เมื่อเวลา  $t > 4$  ชั่วโมงขึ้นไปจะเกิดภาวะสมดุลขึ้นดังสมการการสลายตัวอย่างต่อเนื่องของเบทแมน (Bateman Equation) ซึ่งมีเงื่อนไขว่าเมื่อเริ่มต้น  $t = 0$  จะมีแต่อะตอมของธาตุแรกเท่านั้น คือ อะตอมของ  $A_0$  ส่วนอะตอมของธาตุอื่นๆ โดย  $A, B, C, \dots, M, N$  เป็นศูนย์หมด และกำหนดให้  $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \dots, \lambda_m, \lambda_n$  เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของธาตุ  $A, B, C, \dots, M, N$  ตามลำดับ เมื่อเวลา  $t$  โดยจำนวนอะตอมของ  $N$  จะหาได้จากการอินทิเกรตสมการ

$$dN/dt = M\lambda_m - N\lambda_n \quad (2.20)$$

ซึ่ง  $M$  ถูกกำหนดค่ามาจาก สมการการสลายตัวแบบอนุกรมเหมือนสมการที่ (2.20) สำหรับผลบวกของผลผลิตทั้งหมด  $N$  ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.20) เป็น

$$N = A_0 (h_a e^{-\lambda_a t} + h_b e^{-\lambda_b t} + \dots + h_m e^{-\lambda_m t} + h_n e^{-\lambda_n t}) \quad (2.21(a))$$

และค่าคงที่ของสมการ (2.21) หาได้จากค่าคงที่ของการสลายตัว ดังนี้

$$h_a = \frac{\lambda_a}{(\lambda_n - \lambda_a)} \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} \dots \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_a)}$$

$$h_b = \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_b)} \frac{\lambda_b}{(\lambda_n - \lambda_b)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_b)} \dots \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_b)}$$

(2.21(b))

$$h_m = \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_m)} \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_m)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_m)} \dots \frac{\lambda_m}{(\lambda_n - \lambda_m)}$$

$$h_n = \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_n)} \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_n)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_n)} \dots \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_n)}$$

จากเงื่อนไขที่กล่าวว่า เมื่อ  $N = 0$  ที่เวลา  $t = 0$  จะได้ว่า ค่าคงที่ในสมการ 2.21(b) มีผลรวมเป็นศูนย์ ดังสมการต่อไป

$$h_a + h_b + h_c + \dots + h_m + h_n = 0 \quad (2.21(c))$$

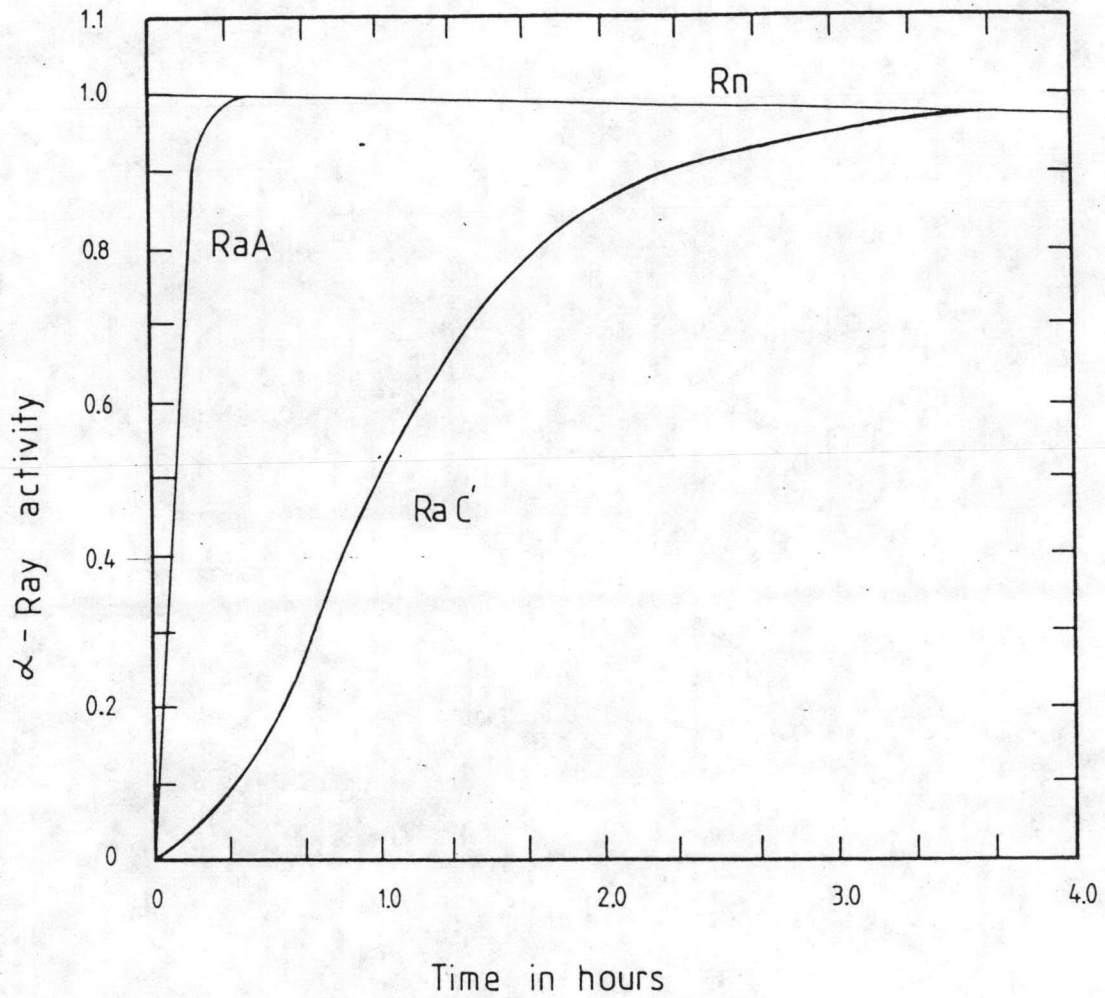
ในสมการที่ (2.21) กล่าวได้ว่าเป็นสมการทั่วไปของเบทแมน และจากตัวอย่างสมการการสลายตัวของเรดอน-222 เป็นผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นของเรดอนตามที่กล่าวมาแล้วตามแผนภูมิข้างต้น เราสามารถหาค่าจำนวนอะตอมของ D ( หรือ จำนวนอะตอมของ RaC ) ในเทอมของ  $\text{Exp}(-\lambda_a t)$  ได้ดังนี้

$$D = \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_b)} \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_c)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} [A_0 \text{Exp}(-\lambda_a t)] \quad (2.22)$$

ถ้ากำหนดให้ค่ากัมมันตภาพรังสีของ D คือ  $N_d X_d$  และของ A คือ  $N_a X_a$  จะสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ใหม่ในรูปอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของ D ต่อ A เป็น

$$\begin{aligned} \frac{N_d \lambda_d}{N_a \lambda_a} &= \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_c)} \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} \frac{\lambda_d}{(\lambda_d - \lambda_a)} \\ &= \frac{T_a}{(T_a - T_b)} \frac{T_a}{(T_a - T_c)} \frac{T_a}{(T_a - T_d)} \\ &= 1.0089 \end{aligned} \quad (2.23)$$

ค่าอัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของ D ต่อ A สามารถหาได้เมื่อเวลา  $t$  มีค่าต่าง ๆ กันตั้งแต่ 0 ถึง ภาวะสมดุล (ประมาณ 4 ชั่วโมง) ค่ากัมมันตภาพรังสีที่สะสมเพิ่มขึ้นของ  $RaA$ ,  $RaB$  และ  $RaC$  ที่เวลาต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 2.1 และกราฟแสดงการเกิดการสะสมของกัมมันตภาพรังสีแอลฟาของ  $RaA$  และ  $RaC$  เมื่อเปรียบเทียบกับกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 เมื่อเวลาเริ่มต้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดการสะสมของกัมมันตภาพรังสีของ RaA และ RaC' เมื่อเปรียบเทียบกับกัมมันตภาพรังสีของเรดอนที่เวลาเริ่มต้น

ตารางที่ 2.1 การเกิดผลผลิตครึ่งชีวิตของเรดอนที่เวลาต่าง ๆ กัน  
(ในหน่วย ไมโครไมโครคูรี ของ เรดอน)

TIME (minutes)	RaA	RaB	RaC	Total
	Micromicrocuries			
1.....	0.2035	0.0027	0.0000	0.2062
2.....	0.3655	0.0101	0.0000	0.3756
3.....	0.4946	0.0210	0.0000	0.5156
4.....	0.5975	0.0346	0.0000	0.6321
5.....	0.6794	0.0510	0.0003	0.7307
6.....	0.7448	0.0672	0.0026	0.8146
7.....	0.7967	0.0852	0.0048	0.8867
8.....	0.8382	0.1041	0.0081	0.9504
9.....	0.8712	0.1234	0.0114	1.0060
10.....	0.8975	0.1430	0.0159	1.0564
20.....	0.9900	0.3306	0.0837	1.4043
30.....	0.9995	0.4832	0.1823	1.6653
40.....	1.0054	0.6023	0.2916	1.8944
50.....	1.0054	0.6908	0.3995	2.0909
60.....	1.0054	0.7651	0.4989	2.2546
120.....	1.0054	0.9545	0.8649	2.8200
180.....	1.0054	0.9946	0.9740	2.9692
240.....	1.0054	1.0031	1.0009	3.0046
300.....	1.0054	1.0049	1.0071	3.0126
360.....	1.0054	1.0053	1.0084	3.0143
420.....	1.0054	1.0054	1.0089	3.0138



### 2.3 เรดอนฟลักซ์ (Radon Flux)

Kaye P.Strong และ Desmond M.Levins (1982) ได้เสนอสมการเกี่ยวกับการแพร่ของเรดอนผ่านตามท่อที่มีความยาวไว้ดังนี้

$$\frac{d^2C(x)}{dx^2} - \frac{\lambda C(x)}{D} + \frac{E\lambda\rho_e R}{De} = 0 \quad (2.24)$$

เมื่อ  $C(x)$  คือ ปริมาณเรดอนที่แทรกอยู่ในตัวอย่าง ( $Bq/m^3$ )

$x$  คือ ความสูงของตัวอย่างในท่อ (m)

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของเรดอน ( $2 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ )

$E$  คือ radon emanation coefficient

$R$  คือ ปริมาณ Ra-226 ในตัวอย่าง ( $Bq/kg$ )

$\rho_e$  คือ ความหนาแน่นของการบรรจุตัวอย่างในท่อ ( $Kg/m^3$ )

$e$  คือ ความพรุนของตัวอย่าง

$D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเรดอนในตัวอย่าง

ในการศึกษาเรื่องการแพร่ของเรดอน สามารถหาค่าฟลักซ์ (flux) ของเรดอนได้โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความพรุนของตัวอย่าง ( $e$ ) แต่จะใช้ค่าความสูง ( $H$ ) ของตัวอย่างแทน ภายใต้ขอบเขตของเงื่อนไขว่า

$$C(H) = 0 \quad (2.25)$$

และ

$$\left. \frac{dC(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.26)$$

ดังนั้นจากการแก้สมการ (2.24) โดยมีเงื่อนไขตามสมการ (2.25) และ (2.26) จะได้ค่าฟลักซ์ที่ผิวหน้าของตัวอย่าง (Surface flux) เป็น

$$J = -De \frac{dC}{dx} \Big|_{x=H}$$

$$= E_p R(DX) \tanh H (X/D) \quad (2.27)$$

V.C.Rogers และ R.F.Overmyer (1982) ได้ทำการศึกษาทดลองหาค่าการแพร่ของเรดอนในทางแร่ใยหินที่มีความชื้นต่างกัน และได้รายงานว่าสามารถคำนวณค่าการแพร่เรดอนได้เมื่อทราบค่าความชื้นของทางแร่ ดังสมการ

$$D = 1.06 \times 10^{-5} \text{Exp}(-0.261m) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $m$  คือ ค่า moisture content ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ค่า  $D$  จะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วง moisture content ต่ำกว่า 12 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่ moisture content ต่ำ น้ำจะถูกดูดกลืนเข้าไปภายในรูพรุนของตัวอย่าง ตัวอย่างที่อุ้มน้ำอยู่นั้นจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เรดอน  $D$  หรือ เรดอนฟลักซ์เลย จนกระทั่งตัวอย่างดูดน้ำเข้าไปจนอิ่มตัวแล้วจะทำให้ น้ำที่เหลือ (free water) รอบๆตัวอย่างไปแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวอย่างกับช่องว่าง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เรดอนลดลง

นอกจากนี้ J.Hartley (1985) ได้เสนอสมการเพื่อการคำนวณค่าของเรดอนฟลักซ์ ตามสมการข้างล่างนี้

$$J \text{ (pCi/m}^2\text{-sec)} = C\lambda/EA(e^{-\lambda t_2})(1-e^{-\lambda t_1}) \quad (2.29)$$

- เมื่อ  $J$  คือ ค่าเรดอนฟลักซ์ (pCi/m<sup>2</sup>-sec)  
 $C$  คือ ค่าอัตราการนับสุทธิ (cpm)  
 $X$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของเรดอน ( $2 \times 10^{-6}$  sec<sup>-1</sup>)  
 $E$  คือ ประสิทธิภาพของซินทิลเลชันเซลล์ (cpm/pCi)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุตัวอย่าง (m<sup>2</sup>)  
 $t_1$  คือ เวลาตั้งแต่เริ่มปิดผนึกตัวอย่างจนกระทั่งก่อนการ emanate radon (sec)  
 $t_2$  คือ เวลาที่ทำการ emanate radon ใสในตัวตรวจวัดฯ (sec)

#### 2.4 คุณสมบัติของเรดอน (Radon Characteristics)

เรดอนเป็นแก๊ซกัมมันตรังสีธรรมชาติที่จัดอยู่ในกลุ่มแก๊ซโนเบล หรือ แก๊ซเฉื่อย เรดอนเป็นแก๊ซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น หนักกว่าอากาศ 7.5 เท่า และหนักกว่าไฮโดรเจน 10 เท่า มีจุดเดือดที่ -61.8 องศาเซลเซียส หรือ -80 องศาฟาเรนไฮต์ และมีจุดหลอมเหลวที่ -71 องศาเซลเซียส หรือ -96 องศาฟาเรนไฮต์

เรดอนมีปนอยู่ในบรรยากาศทั่วไปโดยแพร่กระจายออกมาจากพื้นผิวโลก จากการสลายตัวของเรเดียมในดิน, หิน, ทราย เรดอนในธรรมชาติประกอบด้วย 3 ไอโซโทป คือ เรดอน-219, เรดอน-220 และ เรดอน-222 ซึ่งมาจากการสลายตัวของ ธูเรียม แอคติเนียม, ทอเรียม และยูเรเนียม ตามลำดับ เรดอน-222 เป็นไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สุด คือ มีค่าครึ่งชีวิต 3.823 วัน ถูกค้นพบเมื่อปี คศ. 1900 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Friedrich E. Dorn โดยปัจจุบันชื่อเรดอนนี้ใช้เรียกเมื่อหมายถึงไอโซโทป 222 ส่วนไอโซโทป 220 จะถูกเรียกว่า "ทอรอน" (Thoron) และไอโซโทป 219 จะถูกเรียกว่า "แอกตินอน" (Actinon)



แก๊ซทอรอน หรือ เรดอน-220 สลายตัวให้รังสีแอลฟาเช่นกัน และมีค่าครึ่งชีวิต 51.5 วินาที ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี คศ.1899 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ R.B.Owens และ Ernest Rutherford ซึ่งสังเกตจากสารกัมมันตรังสีทอเรียมซึ่งเป็นสารประกอบบางตัว ส่วนแก๊ซแอกติโนน หรือ เรดอน-219 นั้น สลายตัวให้รังสีแอลฟาด้วยค่าครึ่งชีวิต 3.92 วินาที ถูกค้นพบเมื่อปี คศ.1904 โดย Friedrich O.Giesel และ Andreloris Debierne

เนื่องจากอะตอมของเรดอนมีจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ 8 จึงไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอื่นๆ แต่เรดอนก็ไม่ใช่แก๊ซเฉื่อยที่สมบูรณ์ เพราะมีสารประกอบเกิดขึ้นเป็น เรดอนฟลูออไรด์ (Radon Fluoride) เหมือนกับแก๊ซเฉื่อยบางตัว เช่น คริปตรอน (Krypton) และ ซีโนน (Xenon) ซึ่งสารประกอบนี้ถูกค้นพบเมื่อ คศ.1962 นี้เอง (Encyclopaedia Britannica VIII)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรดอน

Property	Value
Volume of 1 Bq of $^{222}\text{Rn}$ at NTP	$1.6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3$
Boiling point	$- 61.8^\circ \text{ C}$
Melting point	$- 71^\circ \text{ C}$
Vapour pressure at	
- $144^\circ \text{ C}$	0.13 kPa
- $126.3^\circ \text{ C}$	1.3 kPa
- $111.3^\circ \text{ C}$	5.3 kPa
- $99^\circ \text{ C}$	13 kPa
- $71^\circ \text{ C}$	53 kPa
- $61.8^\circ \text{ C}$	100 kPa
Density at NTP	$9.96 \text{ kg m}^{-3}$
Coefficients of solubility <sup>a/</sup> at atmospheric pressure	
in water at	
0 <sup>o</sup> C	0.507
10 <sup>o</sup> C	0.340
20 <sup>o</sup> C	0.250
30 <sup>o</sup> C	0.195
37 <sup>o</sup> C	0.167
50 <sup>o</sup> C	0.138
75 <sup>o</sup> C	0.114
100 <sup>o</sup> C	0.106
	at 18 <sup>o</sup> C
in glycerine	0.21
aniline	3.80
absolute alcohol	6.17
acetone	6.30
ethyl acetate	7.35
petroleum (liquid paraffin)	9.20
xylene	12.75
benzene	12.82
toluene	13.24
chloroform	15.08
ether	15.08
hexane	16.56
carbon bisulphide	23.14
olive oil	29.00
	at 0 <sup>o</sup> C
	-
	4.45
	8.28
	7.99
	9.41
	12.6
	-
	-
	18.4
	20.5
	20.09
	23.4
	33.4
	-

<sup>a/</sup> The solubility coefficient or partition coefficient in water is defined as the ratio  $x_w/x_a$ , where  $x_w$  and  $x_a$  are the radon concentrations in water and air, respectively.

แหล่งที่มา : UNSCEAR (1982) หน้า 182