บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เรดอน (Radon)

เรดอนเป็นธาตุที่มีสถานะปกติเป็นกาซ มีเลขอะตอม เป็น 86 เรดอนมีไอโซโทปทั้งหมด 14 ตัว ซึ่งมีเลขมวล เป็น 209–222[1] ส่วนในธรรมชาติมีอยู่ 3 ไอโซโทป คือ Rn–219, Rn–220 และ Rn –222 และไอโซโทปทั้งสามนี้เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี Rn–222 เป็นไอโซโทปที่มีเวลาครึ่งชีวิต ยาวที่สุดในไอโซโทปกัมมันตรังสีทั้งสามนี้ คือ 3.8 วัน ดังนั้นในธรรมชาติจึงมีปริมาณความเข้มข้นของ Rn–222 มากที่สุด ด้วยเหตุนี้เมื่อพูดถึง "เรดอน" ส่วนมากจึงหมายถึง Rn –222 Rn–222 เกิดจากการสลายตัวของ Ra –226 ซึ่งเป็นสมาชิกของอนุกรมยูเรเนียม ดังมีรายละเอียดในตารางที่ (2 – 1)

Rn–220 มีชื่อสามัญว่า "โธรอน" (thoron) มีเวลาครึ่งชีวิต 54.5 วินาที มีในบรรยากาศน้อยกว่าเรดอนประมาณ 50–100 เท่า[2] ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาครึ่งชีวิตสั้นกว่าเรดอนมาก โธรอนเกิดจากการสลายตัวของ Ra–224 ซึ่งเป็นสมาชิกของอนุกรมธอเรียม ดังมีรายละเอียดในตารางที่ (2 – 2)

Rn–219 มีชื่อสามัญว่า "แอคตินอน" (actinon) มีในบรรยากาศน้อยมาก เพราะมีเวลาครึ่งชีวิตสั้นมาก เพียง 3.92 วินาที และยังไม่มีหลักฐานว่ามีผู้ใดเคยวัดความเข้มข้นในบรรยากาศเอาไว้ แอคตินอนเกิดจากการสลายตัวของ Ra–223 ซึ่งเป็นสมาชิกของอนุกรมแอคติเนียม ตามรายละเอียดในตารางที่ (2 – 3)

---

[1] D. Van Nostrand, "Radon" Van Nostrand's Scientific Encyclopedia (New Jersey, D. Van Nostrand Co., Inc., 1968), pp. 1481

[2] Merril Eisenbud, Environmental Radioactivity (New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963), pp. 156

ส่วนไอโซโทปที่เหลือตัวอื่น ๆ นั้น เป็นไอโซโทปที่เกิดจากการสร้างของมนุษย์ และเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีทั้งหมด มีเวลาครึ่งชีวิตสั้นมากกว่าไอโซโทปทั้งสามดังกล่าว จึงถือได้ว่าไม่มีเสถียรภาพ

<u>ตารางที่</u> (2 – 1) อนุกรมยูเรเนียม

Classical name	Isotope	Half life	Classical name	Isotope	Half life
Uranium I(UI)	${}_{92}U^{238}$	4.49×10^{9} yr	Radium C(RaC)	${}_{83}Bi^{214}$	19.7 min
Uranium $X_1(UX_1)$	${}_{90}Th^{234}$	24.10 day	Radium C'(RaC')	${}_{84}Po^{214}$	1.637×10^{-4} sec
Uranium $X_2(UX_2)$	${}_{91}Pa^{234}$	1.175 min	Radium C"(RaC")	${}_{81}Tl^{210}$	1.5 min
Uranium II(UII)	${}_{92}U^{234}$	2.5×10^{5} yr	Radium D (RaD)	${}_{82}Pb^{210}$	22 yr
Ionium (Io)	${}_{90}Th^{230}$	8.0×10^{4} yr	Radium E (RaE)	${}_{83}Bi^{210}$	5.02 day
Radium (Ra)	${}_{88}Ra^{226}$	1622 yr	Polonium(RaForPo)	${}_{84}Po^{210}$	138.3 day
Radon (Rn)	${}_{86}Rn^{222}$	3.825 day	– –	${}_{81}Tl^{206}$	4.19 min
Radium A(RaA)	${}_{84}Po^{218}$	3.05 min	Uraniumlead(RaG)	${}_{82}Pb^{206}$	Stable
Radium B(RaB)	${}_{82}Pb^{214}$	26.8 min			
– –	${}_{85}At^{218}$	1.5 to 2.0 sec			

ตารางที่ (2 - 2) อนุกรมธอเรียม

Classical name	Isotope	Half life	Classical name	Isotope	Half-life
Thorium (Th)	$_{90}Th^{232}$	1.39×10^{10} yr	Thorium B(ThB)	$_{82}Pb^{212}$	10.6 hr
Mesothorium I(MsThI)	$_{88}Ra^{228}$	6.7 yr	- -	$_{85}At^{216}$	3×10^{-4} sec
MesothoriumII(MsThII)	$_{89}Ac^{228}$	6.13 hr	Thorium C(ThC)	$_{83}Bi^{212}$	60.5 min
Radiothorium(RdTh)	$_{90}Th^{228}$	1.90 yr	ThoriumC'(ThC')	$_{84}Po^{212}$	3.04×10^{-7} sec
Thorium X (ThX)	$_{88}Ra^{224}$	3.64 day	ThoriumC"(ThC")	$_{81}Tl^{208}$	3.1 min
Thoron (Tn)	$_{86}Rn^{220}$	54.5 sec	Thorium Lead(ThD)	$_{82}Pb^{208}$	Stable
Thorium A (ThA)	$_{84}Po^{216}$	0.158 sec			

ตารางที่ (2 – 3) อนุกรมแอคติเนียม

Classical name	Isotope	Half life	Classical name	Isotope	Half life
Actino-Uranium(AcU)	$_{92}U^{235}$	7.13×10^{8} yr	ActiniumA(AcA)	$_{84}Po^{215}$	1.83×10^{-3} sec
Uranium Y (UY)	$_{90}Th^{232}$	25.64 hr	ActiniumB(AcB)	$_{82}Pb^{211}$	36.1 min
Protactinium (Pa)	$_{91}Pa^{231}$	3.43×10^{10} yr	– –	$_{85}At^{215}$	10^{-4} sec
Actinium (Ac)	$_{89}Ac^{227}$	22.0 yr	ActiniumC(AcC)	$_{83}Bi^{211}$	2.15 min
Radioactinium(RdAc)	$_{90}Th^{227}$	18.6 day	ActiniumC'(AcC')	$_{84}Po^{211}$	25 sec
Actinium K (AcK)	$_{87}Fr^{223}$	21 min	ActiniumC"(AcC")	$_{81}Tl^{207}$	4.79 min
Actinium X (AcX)	$_{88}Ra^{223}$	11.2 day	Actinium Lead(AcD)	$_{82}Pb^{207}$	Stable
Actinon (An)	$_{86}Rn^{219}$	3.92 sec			

หมายเหตุ ตารางที่ (2-1), (2-2), (2-3) คัดลอกจากหนังสือ Environmental radioactivity หน้า 137 – 143

2.2 กฎการสลายตัว

กฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีกล่าวไว้ว่า จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปในช่วงเวลาหนึ่ง จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอมของธาตุนั้นที่เหลืออยู่ในขณะนั้น ถ้า N เป็นจำนวนอะตอมที่เหลืออยู่ในเวลาใด ๆ และ ΔN เป็นจำนวนอะตอมที่สลายไปในช่วงเวลา Δt เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \qquad \text{------------ (2.1)}$$

โดยที่ λ เป็นค่าคงที่ของการสลายตัว

เครื่องหมายลบ แสดงว่าการสลายตัวนี้ทำให้จำนวนอะตอมลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น

สมการ (2.1) ถ้าเวลา Δt น้อยมาก เราสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้ดังนี้

$$dN = -\lambda N dt \qquad \text{------------ (2.2)}$$

สมการ (2.2) เราอินทิเกรต ได้เป็น

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

หรือ

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \qquad \text{-------- (2.3)}$$

เมื่อ N_0 เป็นจำนวนอะตอมเริ่มแรกในการสลายตัว ถ้าเวลาผ่านไป T จำนวนอะตอมเหลืออยู่เพียงครึ่งหนึ่งของอะตอมเริ่มแรก คือเหลือเป็น $N_0/2$ แล้ว เวลา T จะเรียกว่า เวลาครึ่งชีวิต ซึ่งคำนวณได้โดยแทนค่า $t = T$ และ $N = N_0/2$ ลงในสมการ (2.3) เราจะได้

$$T = 0.693/\lambda$$

2.3 การสลายตัวเป็นอนุกรม

ในธรรมชาติมีธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวแล้ว ธาตุที่ได้จากการสลายตัวครั้งแรกยังสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดถึงธาตุที่มีเสถียรภาพ จึงไม่สลายตัวต่อไป เราจะพิจารณากรณีธาตุ A สลายตัวให้ธาตุ B และธาตุ B สลายตัวให้ธาตุ C ธาตุC ยังสลายตัวต่อไป (เพื่อความสะดวกจึงคิดเพียง 3 ตัว)

กำหนดให้ N_a เป็นจำนวนอะตอมขณะเวลาใด ๆ ของธาตุ A ซึ่งมีค่าคงที่การสลายตัวเป็น λ_a

N_b " " B " λ_b

N_c " " C " λ_c

เราสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของอะตอมของธาตุทั้งสามชนิดได้ดังนี้

$$\frac{dN_a}{dt} = -\lambda_a N_a \qquad \text{--------- (2.4)}$$

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \qquad \text{--------- (2.5)}$$

$$\frac{dN_c}{dt} = \lambda_b N_b - \lambda_c N_c \qquad \text{--------- (2.6)}$$

ถ้าเรามีเงื่อนไขว่า

$N_a(0) = N_o$, $N_b(0) = 0$ และ $N_c(0) = 0$ แล้ว สมการ (2.4),(2.5) และ (2.6) จะเป็น

$$N_a(t) = N_o \exp(-\lambda_a t) \qquad \text{--------- (2.7)}$$

$$N_b(t) = \lambda_a N_o \left[\frac{\exp(-\lambda_a t)}{\lambda_b - \lambda_a} + \frac{\exp(-\lambda_b t)}{\lambda_a - \lambda_b} \right] \qquad \text{--------- (2.8)}$$

$$N_c(t) = \lambda_a \lambda_b N_o \left\{ \frac{\exp(-\lambda_a t)}{(\lambda_b-\lambda_a)(\lambda_c-\lambda_a)} + \frac{\exp(-\lambda_b t)}{(\lambda_a-\lambda_b)(\lambda_c-\lambda_b)} + \frac{\exp(-\lambda_c t)}{(\lambda_a-\lambda_c)(\lambda_b-\lambda_c)} \right\} \text{----(2.9)}$$

2.4 การสลายตัวเป็นอนุกรม เมื่อมีการเพิ่มจำนวนอะตอมตลอดเวลา

เนื่องจากปริมาณกัมมันตภาพรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอม ดังนั้น สมการ (2.2) เราสามารถเขียนในรูปกัมมันตภาพรังสี ได้เป็น

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda A \qquad \text{------------------ (2.10)}$$

โดยที่ A คือกัมมันตภาพรังสี

เมื่อมีการเพิ่มจำนวนอะตอมตลอดเวลา สมการ (2.10) จะต้องเพิ่มพจน์ที่แสดงถึงการเพิ่มจำนวนอะตอมเข้าไปด้วย เช่น สมมุติว่าในอากาศมีสารกัมมันตรังสีอยู่ 3 ชนิดปะปนอยู่ คือ สาร A, B และ C โดยที่ สาร A สลายตัวให้สาร B และสาร B สลายตัวให้สาร C และสมมุติว่าสารทั้งสามนี้เป็นอนุภาคลอยอยู่ในอากาศ เมื่อสูบอากาศผ่านกระดาษกรอง สาร A,B และ C ต่างก็มาสะสมอยู่บนกระดาษกรองตลอดเวลา เมื่อทราบอัตราดูดของเครื่องสูบอากาศ ก็ย่อมจะหาความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่กัมมันตภาพรังสี ของสารทั้งสามชนิดบนกระดาษกรอง ณ เวลาใด ๆ ได้ดังนี้

2.4.1 พิจารณาเมื่อสาร C ถูกดูดมาติดกระดาษกรอง

$$\frac{d\,C_{c1}}{dt} = FA_c - \lambda_c C_{c1} \qquad \text{------------------ (2.11)}$$

เมื่อ A_c = กัมมันตภาพรังสีของสาร C ในอากาศหนึ่งหน่วยลูกบาศก์

C_{c1} = กัมมันตภาพรังสีของสาร C บนกระดาษกรอง

F = อัตราการดูดอากาศของเครื่องสูบอากาศ

λ_c = ค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร C

ถ้ามีเงื่อนไขว่า $C_{c1}(0) = 0$ (ก่อนดูดอากาศไม่มีสาร C บนกระดาษกรอง) สมการ (2.11) ย่อมจะแก้ได้เป็น

$$C_{c1}(t) = \frac{F A_c}{\lambda_c}\left[1 - \exp(-\lambda_c t)\right] \qquad \text{-------- (2.12)}$$

2.4.2 เมื่อพิจารณาสาร B ถูกดูดมาติดบนกระดาษกรอง สาร B ก็ย่อมสลายตัวได้สาร C ดังนั้น กรณีนี้บนกระดาษกรองจึงมีทั้งกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากสาร B และจากสาร C ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้

$$\frac{d\,C_{b1}}{dt} = F A_b - \lambda_b C_{b1} \qquad \text{------ (2.13)}$$

$$\frac{d\,C_{c2}}{dt} = \lambda_b C_{b1} - \lambda_c C_{c2} \qquad \text{------- (2.14)}$$

โดยที่ A_b = กัมมันตภาพรังสีของสาร B ในอากาศหนึ่งหน่วยลูกบาศก์

C_{b1} = กัมมันตภาพรังสีของสาร B บนกระดาษกรอง

C_{c2} = กัมมันตภาพรังสีของสาร C บนกระดาษกรอง

λ_b = ค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร B

λ_c = ค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร C

F = อัตราการดูดอากาศ

ถ้าก่อนดูดอากาศ บนกระดาษกรองไม่มีสาร B และสาร C นั่นคือ $C_{b1}(0) = 0$ และ $C_{c2}(0) = 0$ แล้ว สมการ (2.13) และ (2.14) จะแก้ได้เป็น

$$C_{b1}(t) = \frac{F A_b}{\lambda_b}\left\{1 - \exp(-\lambda_b t)\right\} \qquad \text{------ (2.15)}$$

และ

$$C_{c2}(t) = \frac{F A_b}{\lambda_c}\left\{1 - \exp(-\lambda_c t)\right\} + \frac{F A_b}{\lambda_c - \lambda_b}\left[\exp(-\lambda_c t) - \exp(-\lambda_b t)\right] \qquad (2.16)$$

2.4.3 เมื่อพิจารณาสาร A ถูกดูดมาติดบนกระดาษกรอง สาร A สลายตัวให้สาร B และสาร B สลายตัวให้สาร C ดังนั้นกรณีนี้ บนกระดาษกรองจะมีกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากทั้งสาร A, B และ C ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้

$$\frac{d\,C_a}{dt} = F A_a - \lambda_a C_a \qquad \text{---------- (2.17)}$$

$$\frac{d\,C_{b2}}{dt} = \lambda_a C_a - \lambda_b C_{b2} \qquad \text{---------- (2.18)}$$

$$\frac{d\,C_{c3}}{dt} = \lambda_b C_{b2} - \lambda_c C_{c3} \qquad \text{---------- (2.19)}$$

โดยที่ A_a = กัมมันตภาพรังสีของสาร A ในอากาศหนึ่งหน่วยลูกบาศก์

C_a = " " A บนกระดาษกรอง

C_{b2} = " " B "

C_{c3} = " " C "

λ_a = ค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร A

λ_b = " " B

λ_c = " " C

F = อัตราการดูดอากาศ

เรามีเงื่อนไขว่า $C_a(0) = 0$, $C_{b2}(0) = 0$ และ $C_{c3}(0) = 0$ ดังนั้นสมการ (2.17),(2.18) และ (2.19) สามารถแก้ได้เป็น

$$C_a(t) = \frac{F A_a}{\lambda_a}\left[1 - \exp(-\lambda_a t)\right] \qquad \text{------- (2.20)}$$

$$C_{b2}(t) = \frac{F A_a}{\lambda_b}\left[1-\exp(-\lambda_b t)\right] + \frac{F A_a}{\lambda_b - \lambda_a}\left[\exp(\lambda_b t)-\exp(-\lambda_a t)\right] \qquad \text{---(2.21)}$$

และ

$$C_{c3}(t) = \frac{F A_a}{\lambda_c}\left[1-\exp(-\lambda_c t)\right] + \frac{F A_a \lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)}\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(-\lambda_a t)\right]$$

$$+ \frac{F A_a \lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_b)}\left[\exp(-\lambda_b t)-\exp(-\lambda_c t)\right] + \frac{F A_a}{\lambda_c - \lambda_b}\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(-\lambda_b t)\right]$$

$$\text{----- (2.22)}$$

2.5 <u>การสลายตัวของเรดอน (Rn -222) ในอากาศ</u>

จากหัวข้อ 2.1 เราทราบว่า เรดอน สลายตัวให้ RaA แล้ว RaA สลายตัวต่อไปได้ RaB และ RaB สลายต่อไปได้ RaC ซึ่งยังคงมีการสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ RaA, RaB และ RaC เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะล่องลอยอยู่ในอากาศ บางทีอนุภาคเหล่านี้ก็เกาะกับฝุ่นละอองในอากาศโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้า จนกว่าจะตกลงสู่พื้นดิน

ถ้าใช้เครื่องสูบอากาศ ผ่านกระดาษกรอง RaA, RaB และ RaC จะสะสมบนกระดาษกรองมากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันก็จะสลายตัวเรื่อย ๆ เช่นกัน จนกระทั่งภาวะสมดุลย์ คือ อัตราการสลายตัวไปนี้ค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มจำนวนบนกระดาษกรอง กัมมันตภาพรังสีที่ได้จากกระดาษกรองจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสมการ (2.12) (2.15), (2.16), (2.20), (2.21) และ (2.22) โดยคิดกัมมันตภาพรังสีทุกอย่างที่ปล่อยออกมา RaA ให้รังสีแอลฟา RaB ให้รังสีบีตา และ RaC ให้รังสีบีตา ถ้าเรามีเครื่องมือวัดรังสีที่สามารถวัดรังสีได้ทุกชนิด และทุกพลังงาน ก็ย่อมจะได้ผลตรงกับผลรวมของสมการ (2.12), (2.15), (2.16), (2.20), (2.21) และ (2.22) แต่ปกติเครื่องวัดเกเกอร์ โดยทั่วไปจะตัดรังสีบีตาพลังงานสูง ๆ ได้ดี ดังนั้นถ้านำกระดาษกรองไปวัดรังสี (ขณะที่เครื่องสูบทำงานอยู่) จะได้ผลรวมของสมการ (2.12), (2.16) และ (2.22) เท่านั้น ทั้งนี้เป็นการคิดเฉพาะรังสีบีตา จาก RaC เพียงอย่างเดียว

เมื่อ λ_a เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของ RaA มีหน่วยเป็นต่อนาที

λ_b " " RaB "

λ_c " " RaC "

A_a เป็นกัมมันตภาพรังสีของ RaA ในอากาศหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร

A_b " RaB "

A_c " RaC "

t เป็นช่วงเวลาที่ทำการสูบอากาศเป็นนาที

สมการ (2.12) + (2.16) + (2.22) จะได้

$$C_{c1}(t) + C_{c2}(t) + C_{c3}(t) = \frac{F}{\lambda_c}(A_a+A_b+A_c)\left[1-\exp(-\lambda_c t)\right] + \frac{F(A_a+A_b)}{\lambda_c-\lambda_b}$$

$$X\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(\lambda_b t)\right] + \frac{F\,A_a\,\lambda_b}{(\lambda_b-\lambda_a)(\lambda_c-\lambda_a)}\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(-\lambda_a t)\right]$$

$$+ \frac{F\,A_a\,\lambda_b}{(\lambda_b-\lambda_a)(\lambda_c-\lambda_b)}\left[\exp(-\lambda_b t)-\exp(-\lambda_c t)\right] \qquad \text{------------------ (2.23)}$$

กำหนดให้ A_o เป็นกัมมันตภาพรังสีของเรดอนใน 1 ลูกบาศก์เมตร ถ้ากัมมันตภาพรังสีในอากาศสมดุลย์ จะทำให้ $A_a = A_b = A_c = A_o$

และถ้าให้ $A(t) = C_{c1}(t) + C_{c2}(t) + C_{c3}(t)$ แล้ว สมการ (2.23) จะกลายเป็น

$$A(t) = \frac{3F}{\lambda_c}A_o\left[1-\exp(-\lambda_c t)\right] + \frac{2F\,A_o}{\lambda_c-\lambda_b}\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(-\lambda_b t)\right]$$

$$+ \frac{F\,\lambda_b\,A_o}{(\lambda_b-\lambda_a)(\lambda_c-\lambda_a)}\left[\exp(-\lambda_c t)-\exp(-\lambda_a t)\right] + \frac{F\,\lambda_b\,A_o}{(\lambda_b-\lambda_a)(\lambda_c-\lambda_b)}\left[\exp(-\lambda_b t)\right.$$

$$\left.-\exp(-\lambda_c t)\right] \qquad \text{---------- (2.24)}$$