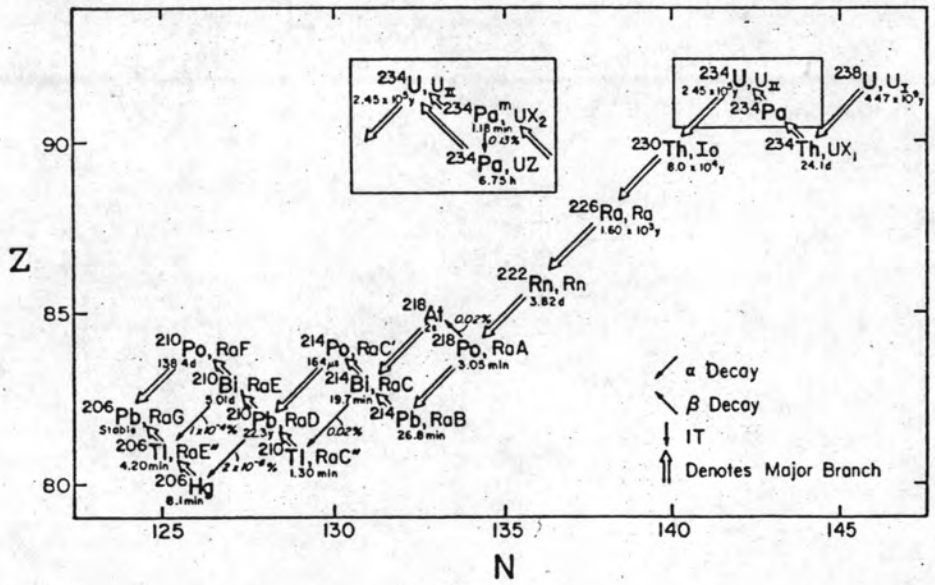
บทที่ 3

ก๊าซเรดอน ($^{222}_{56}Rn$) และก๊าซโทรอน ($^{220}_{86}Rn$)

3.1 ก๊าซเรดอน

ก๊าซเรดอนหรือเรดอน-222 เป็นก๊าซกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาได้พอโลเนียม-218 เกิดขึ้น ก๊าซเรดอนจะพบได้ในบริเวณที่มีแหล่งแร่ยูเรเนี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากยูเรเนี่ยมจะสลายตัวเป็นอนุกรมต่อเนื่องมาจนถึงก๊าซเรดอน ($^{222}_{86}Rn$) จากรูปที่ 3.1 เป็นการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม โดยตั้งต้นจากยูเรเนี่ยม-238 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาเกิดเป็นทอเรี่ยม-234 ทอเรียม-234 เป็นสารกัมมันตรังสีจะสลายตัวต่อเนื่องไปจนสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206 ซึ่งเป็นธาตุที่เสถียร (Stable)



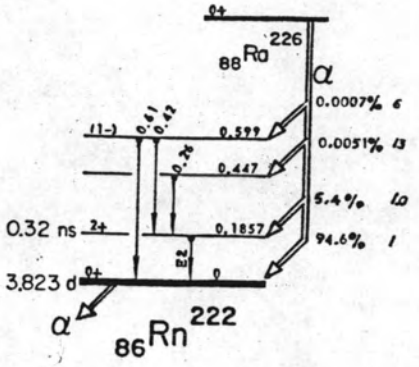
รูปที่ 3.1 [11] การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1[3,10] กัมมันตภาพรังสีจากอนุกรมยูเรเนี่ยม

Radioactive species	Nuclide	Half-life	Major radiations, approximate energies (MeV) and intensities (%)	
Uranium I (UI)	$^{238}_{92}U$	4.51×10^{9} y	alpha	4.30 (75%), 4.15 (25%)
Uranium X_1 (UX_1)	$^{234}_{90}Th$	24.10 d	beta	0.191 max
Uranium X_2 (UX_2)	$^{234}_{91}Pa$	1.175 m	beta	2.29 max
Uranium Z (UZ)	$^{234}_{91}Pa$	6.75 h	beta	1.13 max
			gamma	0.100 (50%), 0.126 (26%), 0.22 (14%), 0.36 (13%), 0.56 (15%) 0.70 (24%), 0.90 (70%), 108(12%)
Uranium II (U II)	$^{234}_{92}U$	2.47×10^{5} y	alpha	4.77 (72%), 4.72 (28%)
Ionium (Io)	$^{230}_{90}Th$	7.5×10^{4} y	alpha	4.68 (76%), 4.62 (24%)
Radium (Ra)	$^{226}_{88}Ra$	1622 y	alpha	4.78 (95%), 4.60 (6%)
			gamma	0.186 (4%)
Ra Emanation (Rn)	$^{222}_{86}Rn$	3.825 d	alpha	5.49 (100%)
Radium A (RaA)	$^{218}_{84}Po$	3.05 m	alpha	6.00 (100%)
Radium B (RaB)	$^{214}_{82}Pb$	26.8 m	beta	1.03 max (6%), 0.67 max
			gamma	0.242 (4%), 0.295 (19%) 0.352 (36%)

1791738X



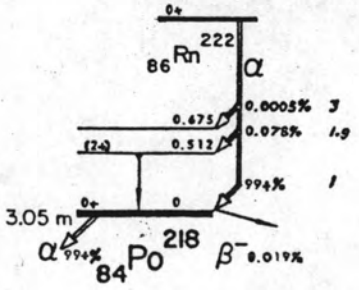
รูปที่ 3.2[10] แผนผังการสลายตัวของเรเดียม-226 ได้ เรดอน-222

เรดอน-222 เกิดจากการสลายตัวของเรเดียม-226 ให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 4.782 MeV 94.6 เปอร์เซ็นต์ 4.599 MeV 5.4 เปอรเซ็นต์ 4.340 MeV 0.005 เปอร์เซ็นต์ และ 4.194 MeV $7x10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

เรดอน-222 จะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 5.490 MeV เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ 4.987 MeV 0.078 เปอร์เซ็นต์ และ 4.827 MeV $5x10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์ ได้ธาตุพอโลเนียม-218 ดังรูปที่ 3.3

$$^{222}_{86}Rn \longrightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}He$$



รูปที่ 3.3[10] แสดงการสลายตัวของเรดอน-222 ได้ พอโลเนียม-218

3.1.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอน-222 ในพื้นดิน

เรดอน-222 เป็นก๊าซกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน จะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เนื่องจากเรดอน-222 เป็นก๊าซมันจะแทรกตัวขึ้นมาอยู่เหนือพื้นดิน ดังนั้นเราจะใช้ประโยชน์ในการตรวจวัดอนุภาคแอลฟาที่ได้จากการสลายตัวของก๊าซเรดอนที่ขึ้นมาในพื้นดิน เพื่อสำรวจหาแหล่งแร่ยูเรเนียมเช่นใช้วิธีแทรค-เอทช์ แอลฟามิเตอร์ เป็นต้น จากการทดลองพบว่า เรดอน-222 จะมี diffusion length น้อยกว่า 25 เซ็นติเมตร ในดินที่มีความชื้นแต่ถ้าเป็นเรดอน-220 จะมี diffusion length เพียง 3 มิลลิเมตรเท่านั้น

Kristiansson และ Malmqvist ได้ทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ Garpenberg ในเหมืองแร่ตอนกลางของสวีเดนพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนขึ้นอยู่กับระดับความลึกจากผิวดิน ความพรุนของดินและการแพร่กระจายของก๊าซในดิน

การทดลองแรกใช้ถ้วยสำรวจยูเรเนียม 16 ถ้วย ฝังไว้เป็นตารางสี่เหลี่ยมห่างกันด้านละ 2 เมตร ลึก 0.1 ถึง 0.7 เมตร บนพื้นที่ขนาด 6x6 ตารางเมตร โดยฝังไว้เป็นเวลา 15 วัน

การทดลองที่สองใช้ถ้วยสำรวจยูเรเนียม 25 ถ้วย ฝังไว้เป็นตารางสี่เหลี่ยมห่างกันด้านละ 2 เมตร ลึก 0.1 ถึง 0.5 เมตร บนพื้นที่ขนาด 8x8 ตารางเมตร โดยฝังไว้เป็นเวลา 19 วัน

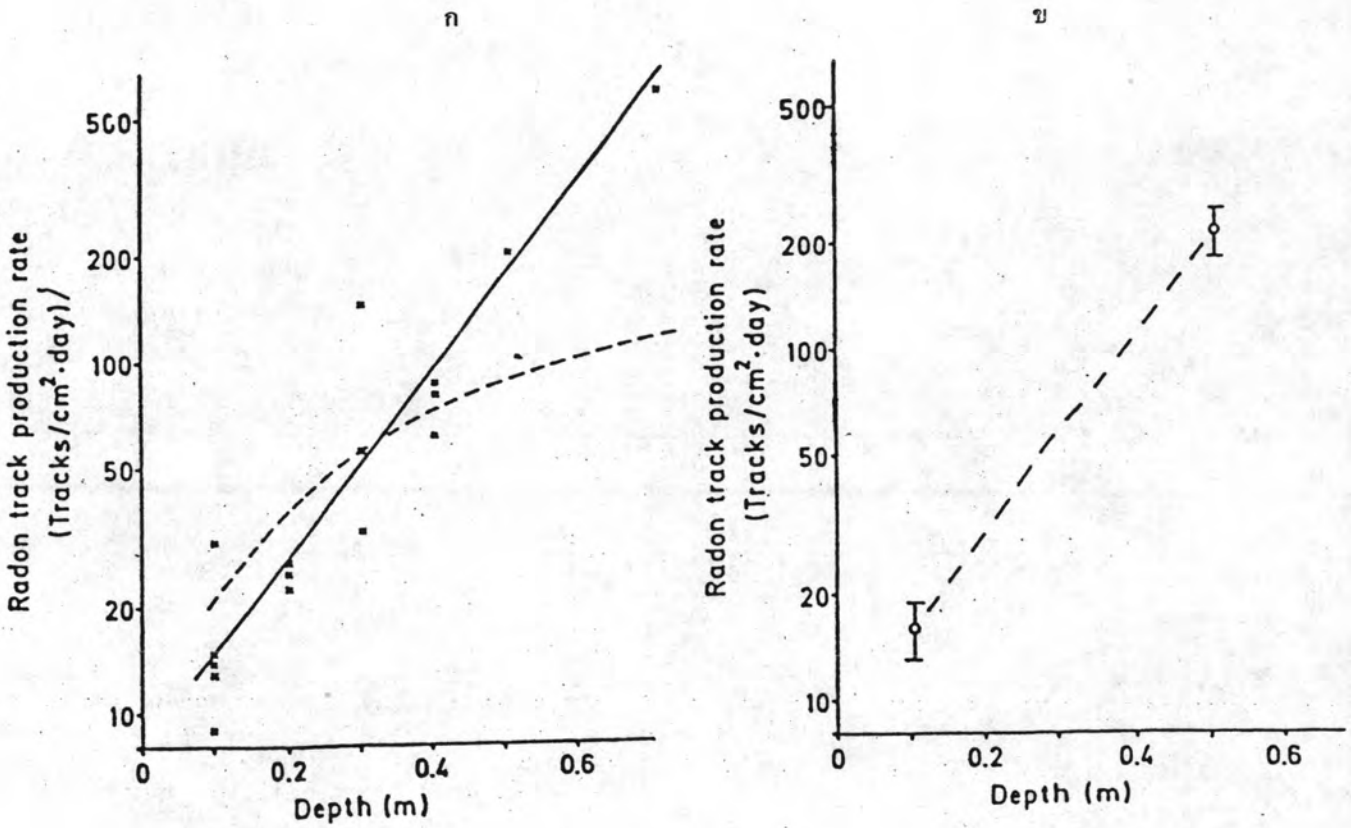
ผลที่ได้จากการทดลองทั้งสองครั้ง จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซเรดอนกับความลึก ดังรูปที่ 3.4 ในการทดลองนี้จะมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 10-15 % เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนทางสถิติ ค่าคลาดเคลื่อนจากการกัดรอย และค่าคลาดเคลื่อนจากการนับรอยบนฟิล์ม Kodak LR115 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจะเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3.1

$$C(z) = C_o e^{-\frac{\ell n 2}{L_{1/2}}} \qquad (3.1)$$ (23)

เมื่อ $C(z)$ คือความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ความลึก z

C_o และ $L_{1/2}$ เป็นค่าคงที่

$L_{1/2}$ ขึ้นอยู่กับความลึก z ซึ่งทั้งสองการทดลอง ดังในกราฟรูปที่ 3.4 จะมีค่า 11 และ 12 เซ็นติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.4[23] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซเรดอนกับความลึก ก. เป็นค่าที่วัดที่ระยะห่างกัน 2 เมตร เส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ส่วนเส้นประแสดงความลึกคาดหมายโดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราการเกิดคงที่ของก๊าซ โดยมีค่า diffusion length 1.2 เมตร
ข. เป็นการวัดที่จุด 2 จุด โดยใช้ค่าจาก 25 ถ้วย สำรวจเส้นประ จะมีความชันเช่นเดียวกับเส้นทึบในรูป ก. ซึ่งแสดงว่า ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนขึ้นอยู่กับความลึก

ถ้าอัตราการเกิดก๊าซเรดอนและการแทรกตัวของก๊าซเรดอนในดิน เป็นไปอย่างสุ่ม เส้นประในรูป 3.4 ก. จะบอกความลึกซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนตามที่คาดหมายไว้ ถ้าหากยอมรับข้อสมมติฐานดังกล่าว ก็จะได้สมการ 3.2

$$C(z) = C_o(1-e^{-\frac{2}{L_D}}) \qquad (3.2)^{23)}$$

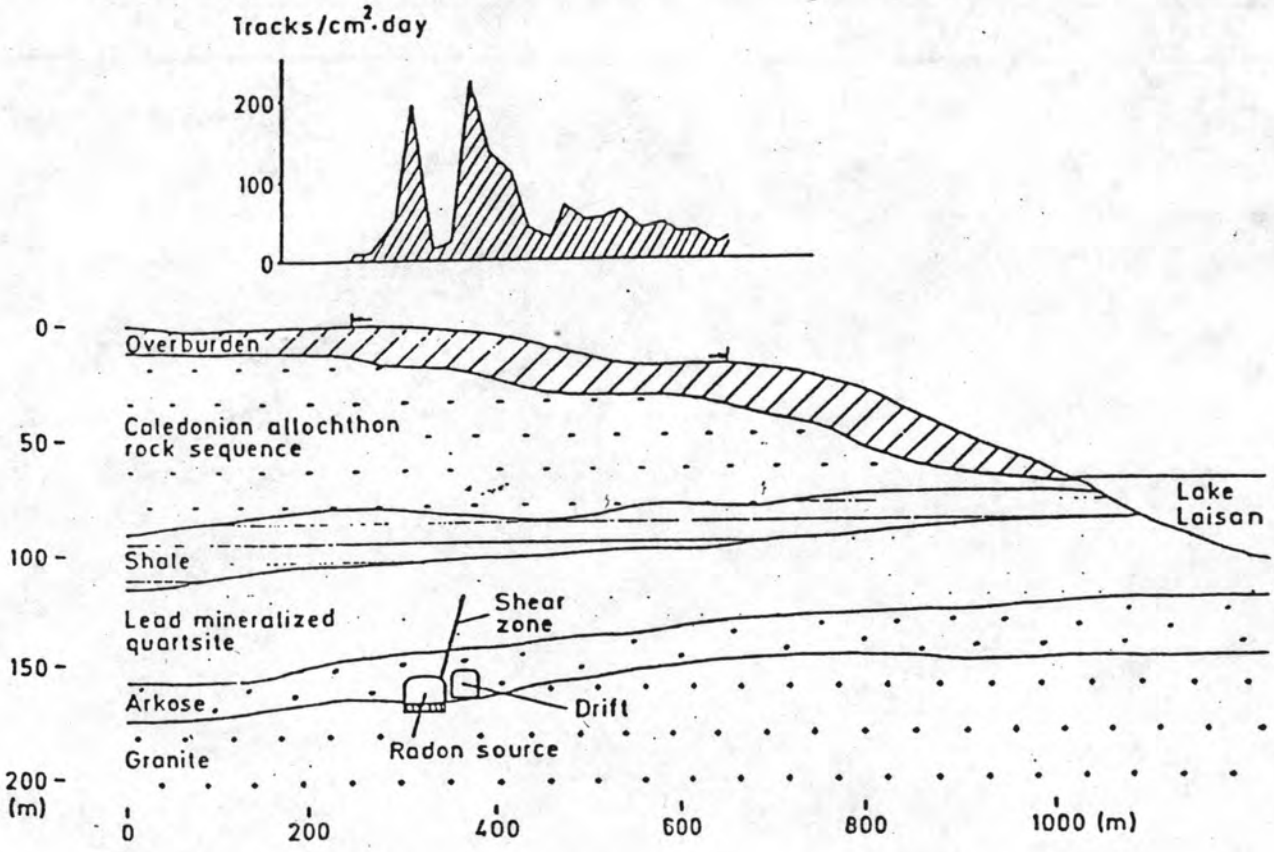
เมื่อ $C(z)$ เป็นความเข้มข้นของก๊าซที่ระดับความลึก z

C_o เป็นค่าคงที่

L_D เป็นค่า diffusion length ซึ่งเราเลือกใช้ที่ 1.2 เมตร

3.1.2 การทดลองวัดก๊าซเรดอนที่ Laisvall

ในการศึกษา long-distance transport ของก๊าซเรดอน ได้กระทำที่ Laisvall ซึ่งเป็นเหมืองตะกั่วในภาคเหนือของสวีเดน โดยทำการวัดก๊าซเรดอนที่ความลึก 0.5 เมตร ทิ้งถ้วยสำรวจไว้ในดิน 114 วัน ระยะระหว่างถ้วย 20 เมตร ดังแผนผังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5[23] แสดงแผนผังในการวัดก๊าซเรดอนที่พื้นดินเหนือต้นกำเนิดก๊าซเรดอนในเหมืองตะกั่วที่ Laisvall

โดยการแก้ปัญหาสมการ transport 1 มิติ กำหนดให้อัตราการเกิดของก๊าซเรดอนคงที่ ส่วนค่าการแพร่และความเร็วในการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับขอบเขตของการทดลอง จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ดังในสมการ 3.3

$$C(z) = C_1 \exp\left|\sqrt{\left(\frac{V\varepsilon}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\varepsilon}{D}} - \frac{V\varepsilon}{2D}\right| Z +$$

$$C_2\left|1-\exp-\left\{\sqrt{\left(\frac{V\varepsilon}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\varepsilon}{D}} + \frac{V}{2D}\right\} Z\right| \qquad (3.3)^{(23)}$$

เมื่อ $C(z)$ = ความเข้มของ $^{222}_{56}Rn$ คือจำนวนอะตอมของ Rn ต่อ unit volume of soil gas

C_1, C_2 = ค่าคงที่

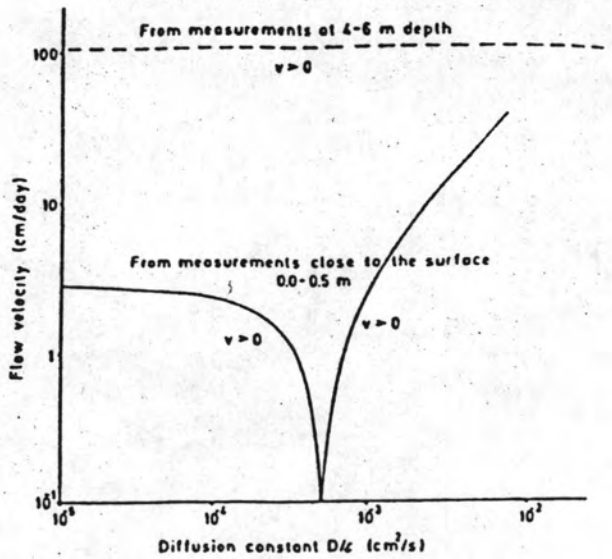
D = ค่าคงที่ bulk diffusion

ε = ค่าความพรุนของดิน (soil porosity) เป็นอัตราส่วนของปริมาณก๊าซในดินกับ bulk volume

V = อัตรการไหลในดิน, V มีค่าเป็นบวกในทิศขึ้น

λ = ค่าคงที่การสลายตัวของ $^{222}_{86}Rn$

Z = ระยะตั้งฉากกับพื้น, Z จะมีค่าบวกเมื่อมีทิศลง



รูปที่ 3.6[23] แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง vertical gas flow velocity V กับ D/ε

ในรูปที่ 3.4 เป็นการทดลองหาความลึกในช่วง $0.1<Z<0.5$ m. ความสัมพันธ์ที่หาได้คือสมการ 3.1 และยังสามารถหาค่า $\frac{\ln 2}{L_{1/2}}$ ที่น่าเชื่อถือในการประมาณดีพอสมควร ดังในสมการ 3.4

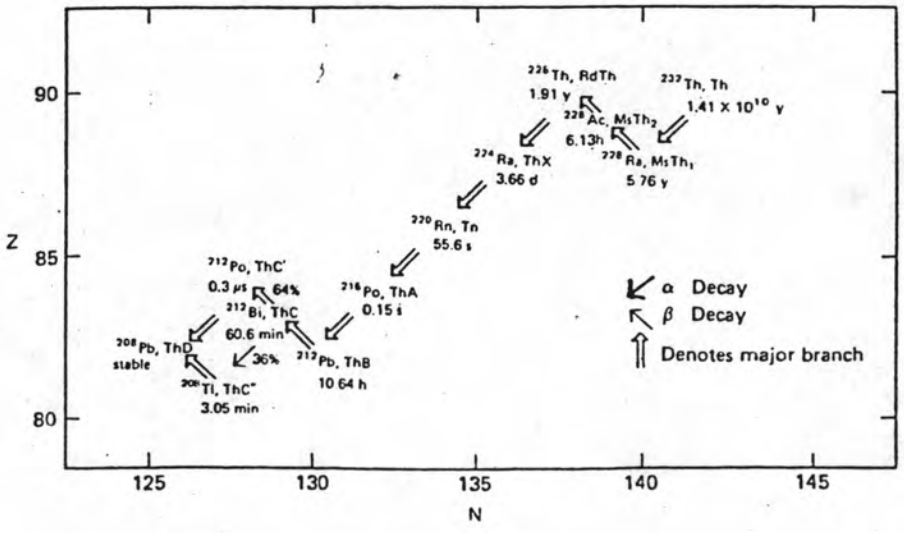
$$\frac{\ln 2}{L_{1/2}} = \sqrt{\left(\frac{V\varepsilon}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\varepsilon}{D}} - \frac{V\varepsilon}{2D} \qquad (3.4)^{(23)}$$

พิจารณาสมการ 3.3 จะพบว่า เทอมที่ 2 ของสมการจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเทอมที่ 1 ในกรณีการเกิดของก๊าซเรดอนเป็นไปอย่างอิสระในบริเวณที่มีเนื้อที่และความลึกน้อย

$$C_2\left|1-\exp-\left\{\sqrt{\left(\frac{V\varepsilon}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\varepsilon}{D}} + \frac{V\varepsilon}{2D}\right\} Z\right| \ll \exp\left|\sqrt{\left(\frac{V\varepsilon}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\varepsilon}{D}} - \frac{V\varepsilon}{2D}\right| Z \qquad (3.5)^{(23)}$$

3.2 ก๊าซโทรอน ($^{220}_{86}Rn$)

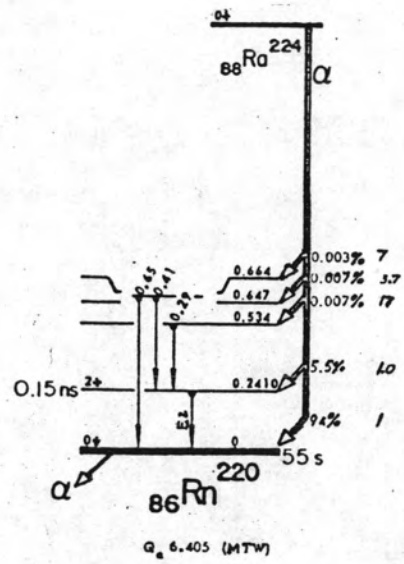
ก๊าซโทรอนหรือเรดอน-220 เป็นก๊าซกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิต 55 วินาที สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาได้ พอโลเนี่ยม-216 เกิดขึ้น ก๊าซโทรอนจะพบได้ในบริเวณที่มีแหล่งแร่ทอเรี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากทอเรียมจะสลายตัวเป็นอนุกรม ต่อมาจนถึงก๊าซโทรอน ($^{220}_{86}Rn$) รูปที่ 2.33 เป็นการสลายตัวของอนุกรมทอเรี่ยม โดยตั้งต้นจากทอเรี่ยม-232 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เกิดเป็นเรเดียม-228 เรเดียม-228 เป็นสารกัมมันตรังสีจะสลายตัวต่อเนื่องกันไปจนสิ้นสุดที่ตะกั่ว-208 ซึ่งเป็นธาตุที่เสถียร



รูปที่ 3.7[11] การสลายตัวของอนุกรมทอเรี่ยม

ตารางที่ 3.2[10] กัมมันตภาพรังสีจากอนุกรมทอเรียม

Radioactive species	Nuclide	Half-life	Major radiations, approximate energies (MeV) and intensities (%)	
Thorium (Th)	$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10} y	alpha	4.01 (76%), 3.95 (24%)
Mesothorium 1(MsTn 1)	$^{228}_{88}Ra$	6.7 y	beta	0.05 max
Mesothorium 2(MsTh 2)	$^{228}_{89}Ac$	6.13 h	beta	2.11 max
			gamma	0.32 (15%), 0.908 (25%), 0.96 (20%)
Radiothorium (RdTh)	$^{228}_{90}Th$	1.910 y	alpha	5.43 (71%), 5.34 (28%)
Thorium X (ThX)	$^{224}_{88}Ra$	3.64 d	alpha	5.68 (94%), 5.45 (6%)
			gamma	0.241 (3.7%)
Th Emanation (Tn)	$^{220}_{86}Rn$	54.5	alpha	6.29 (100%)
Thorium A (ThA)	$^{216}_{84}Po$	0.145 s	alpha	6.78 (100%)
Thorium B (ThB)	$^{212}_{82}Pb$	10.64 h	beta	0.58 max
			gamma	0.239 (47%), 0.300 (3.2%)
Thorium C (ThC)	$^{212}_{83}Bi$	60.60 m	alpha	6.09 (10%), 6.05 (25%)
			beta	2.25 max
			gamma	0.727 (7%), 0.785 (1.1%), 1.620 (1.8%)
Thorium C' (ThC')	$^{212}_{84}Po$	3.0×10^{-7} s	alpha	3.78 (100%)
Thorium C" (ThC")	$^{208}_{81}Tl$	3.10 m	beta	1.80 max
			gamma	0.511 (23%), 0.583 (86%), 0.860 (12%), 2.614 (100%)
Thorium D (ThD)	$^{208}_{82}Pb$	stable		



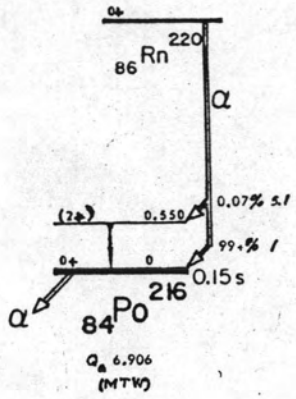
รูปที่ 3.8[10] แสดงการสลายตัวของเรเดียม-224 ให้อนุภาคแอลฟาได้ เรดอน-220

ก๊าซโทรอน ($^{220}_{86}Rn$) เกิดจากการสลายตัวของเรเดียม-224 ให้อนุภาคแอลฟา พลังงาน 5.684 MeV 94 % 5.447 MeV 5.5 % 5.159 MeV 0.007 % 5.049 MeV 0.007 % และ 5.032 MeV 0.003 % ดังรูปที่ 3.8

$$^{224}_{88}Ra \longrightarrow {}^{220}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

ก๊าซโทรอน ($^{220}_{86}Rn$) จะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 6.287 MeV 99.03 % และ 5.747 MeV 0.07 % ได้ธาตุพอโลเนียม-216

$$^{220}_{86}Rn \longrightarrow {}^{216}_{84}Po + {}^{4}_{2}He$$



รูปที่ 3.9[10] แสดงการสลายตัวของเรดอน-220 ให้อนุภาคแอลฟาได้พอโลเนียม-216