สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎี

แนวคิดและทฤษฎี

การวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอนจากวัสดุภัณฑ์ก่อสร้างนี้จะทำการวัดความเข้มข้นของเรดอน-222 โดยจะวัดรังสีแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอน-222 ซึ่งเป็นธาตุที่ได้มาจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม สำหรับการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียมนี้เป็นการสลายตัวแบบอนุกรม

2.1 การสลายตัวแบบอนุกรม (Decay Series)

การสลายตัวแบบอนุกรม คือ การที่ธาตุกัมมันตรังสีตั้งต้นตัวหนึ่งสลายตัวให้ธาตุกัมมันตรังสีลูกตัวหนึ่ง และธาตุลูกนี้ก็มีการสลายตัวให้ธาตุกัมมันตรังสีตัวอื่นต่อไปเรื่อยๆ เช่น การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และอนุกรมแอคติเนียม เป็นต้น ซึ่งจะมีสมการทั่วไปของอนุกรมการสลายตัวดังนี้

A ⟶ B ⟶ C ⟶ ⟶ ⟶ stable

สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เป็นดังสมการ

อัตราการเปลี่ยนแปลง = อัตราการเกิด-อัตราการสลายตัว

จากสมการ Bateman จะได้

$$N_{Rn} = C_{Ra}e^{-\lambda_{Ra}t} + C_{Rn}e^{-\lambda_{Rn}t} \quad (1)$$

เมื่อ

$$C_{Ra} = \frac{\lambda_{Ra} \times \lambda_{Rn}}{(\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra})} N_{Ra}^{0} \quad (2)$$

$$C_{Rn} = \frac{\lambda_{Ra} \times \lambda_{Rn}}{(\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})} N_{Ra}^{0} \quad (3)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณของเรดอนในขณะใดขณะหนึ่ง ได้ดังสมการ

$$\frac{dN_{Rn}}{dt} = \lambda_{Ra}N_{Ra} - \lambda_{Rn}N_{Rn} \quad (4)$$

โดยที่ $\frac{dN_{Rn}}{dt}$ คือ ปริมาณของเรดอนขณะใดขณะหนึ่ง

$\lambda_{Ra}N_{Ra}$ คือ อัตราการเกิดเรดอนหรืออัตราการสลายตัวของเรเดียม

$\lambda_{Rn}N_{Rn}$ คือ อัตราการสลายตัวของเรดอน

ที่เวลาเริ่มต้น (t=0) จำนวนอะตอมของเรเดียมเป็น N_{Ra}^{0} จะได้

$$N_{Ra} = N_{Ra}^{0} e^{-\lambda_{Ra} t} \tag{5}$$

แทนค่าจากสมการ (2) ลงในสมการ (1) จะได้

$$\frac{dN_{Rn}}{dt} = \lambda_{Ra} N_{Ra}^{0} e^{-\lambda_{Ra} t} - \lambda_{Rn} N_{Rn} \tag{6}$$

และเมื่อแก้สมการจะสามารถหาค่าจำนวนอะตอมของเรดอนได้ ดังสมการ

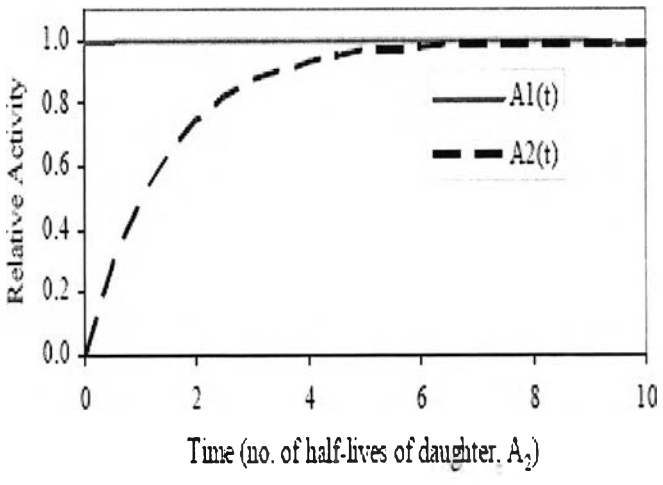
$$N_{Rn} = \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^{0} \left[e^{-\lambda_{Ra} t} - e^{-\lambda_{Rn} t} \right] \tag{7}$$

2.2 สมดุลกัมมันตรังสี (Radioactive Equilibrium)

เมื่อธาตุกัมมันตรังสีมีการสลายตัวต่อเนื่องหรือก็คือเกิดอนุกรมการสลายตัวขึ้นและค่าครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีแม่มากกว่าค่าครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีลูก ณ ที่เวลาหนึ่งก็จะเกิดสมดุลขึ้น ซึ่งสมดุลที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังนี้

2.2.1 ภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์ (Secular Equilibrium)

สมดุลนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่ค่าครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีตั้งต้นมีค่าครึ่งชีวิตมากกว่าค่าครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีตัวลูกประมาณ 10^{4} เท่าหรือมากกว่า เช่น เรเดียม-226 มีค่าครึ่งชีวิต 1,600 ปีสลายตัวให้เรดอน-222 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน ซึ่งการเกิดสมดุลแบบนี้นั้นเมื่อเวลาผ่านไปจนเข้าสู่สมดุลแล้ว พบว่าความแรงรังสีของธาตุกัมมันตรังสีตั้งต้นจะเท่ากับความแรงรังสีของธาตุกัมมันตรังสีตัวลูก การเข้าสู่สมดุลแบบถาวรมีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงกัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่และลูกที่เกิดภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์[8]

เมื่อเข้าสู่สมดุลแบบถาวร พบว่าจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = ... \quad (8)$$

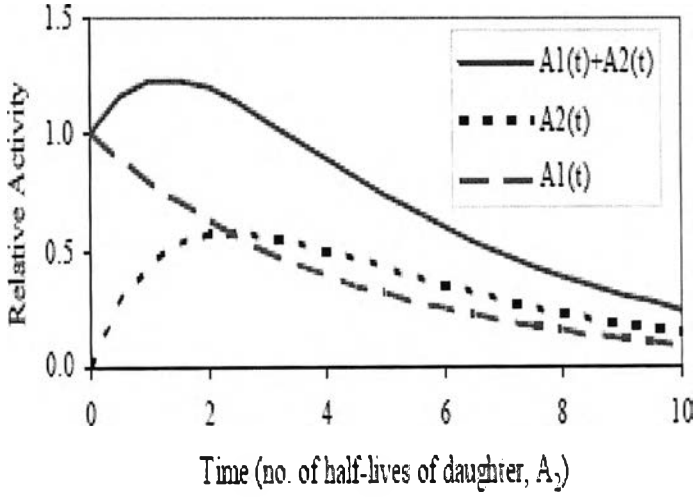
หรือจะได้

$$\lambda_{Ra} N_{Ra} = \lambda_{Rn} N_{Rn} \quad (9)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลแบบถาวรแล้ว ทำให้สามารถหาค่าจำนวนอะตอมของเรดอนได้ง่ายขึ้น

2.2.2 ภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์ (Transient Equilibrium)

ภาวะสมดุลแบบนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่สารกัมมันตรังสีตั้งต้นมีค่าครึ่งชีวิตมากกว่าค่าครึ่งชีวิตของตัวลูกอยู่เล็กน้อย เช่น กรณีที่เรดอน-222 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วันสลายตัวให้โปโลเนียม-218 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.10 นาที ลักษณะของการเข้าสู่สมดุลแบบนี้เป็นดังรูปที่2.2



รูปที่ 2 .2 กราฟแสดงกัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่และลูกที่เกิดภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์[8]

เมื่อเข้าสู่สมดุลแบบทรานเซียนต์ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_A} \quad (10)$$

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B - \lambda_A N_B \quad (11)$$

$$\frac{\lambda_A N_A}{\lambda_B N_B} = 1 - \frac{\lambda_A N_B}{\lambda_B N_B} \quad (12)$$

$$= \frac{\lambda_B N_B - \lambda_A N_B}{\lambda_B N_B} \quad (13)$$

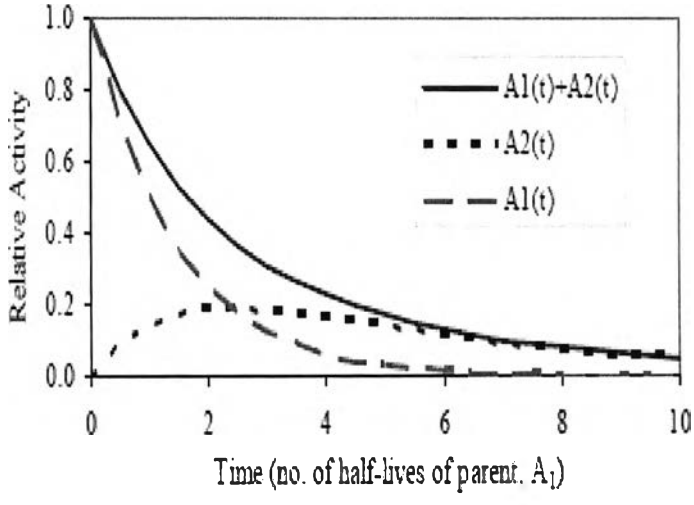
ดังนั้น จะได้สมการ

$$A_A = A_B - \lambda_A N_B \tag{14}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเข้าสู่สมดุลแบบทรานเซียนต์ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของการเกิดธาตุกัมมันตรังสีตัวลูกและการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีตัวลูกคงที่

2.2.3 ไม่เกิดสมดุล (No Equilibrium)

สำหรับกรณีที่ธาตุกัมมันตรังสีแม่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นกว่าธาตุกัมมันตรังสีลูกพบว่า สมดุลกัมมันตรังสีไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น การสลายตัวของโปโลเนียม-218 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 3.1 นาที ไปเป็นตะกั่ว-214 ที่มีค่าครึ่งชีวิต 26.8 นาที ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่2.3



รูปที่ 2.3 แสดงภาวะที่ไม่มีการเข้าสู่สมดุล[8]

2.3 เรดอน

เรดอนเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดมาจากการสลายตัวของเรเดียม ซึ่งจะมี 3 ไอโซโทปด้วยกันคือ เรดอน-219 หรือเรียกอีกชื่อว่า "แอคตินอน (Actinon)", เรดอน-220 เรียกอีกอย่างว่า "ทอรอน (Thoron)" และเรดอน-222 เรียกอีกชื่อว่า "เรดอน" พบว่าแอคตินอนนั้นจะสลายตัวมาจากอนุกรมการสลายตัวแอคติเนียม(Actinium Series) ที่จะมียูเรเนียม-235 เป็นธาตุตั้งต้น จะพบได้น้อยมากในธรรมชาติเนื่องจากยูเรเนียม-235 มีน้อยมากในธรรมชาติ และนอกจากนี้แอคตินอนก็ยังมีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 5 วินาทีเท่านั้น ดังนั้นโอกาสที่จะมีแอคตินอนเกิดขึ้นและหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงน้อยมาก ดังนั้นแอคตินอนจึงไม่ใช่ไอโซโทปที่ก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อม ส่วนทอรอนจะสลายตัวมาจากอนุกรมทอเรียม(Thorium Series) ที่มีธาตุตั้งต้นคือทอเรียม-232 ถึงแม้ว่าทอเรียม-232 จะพบมากในธรรมชาติ แต่ทอรอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้นแค่ 55

วินาทีจึงมักมีการสลายตัวไปก่อนที่จะหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นทอรอนจึงไม่ใช่ไอโซโทปที่ก่อปัญหาในสิ่งแวดล้อมเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาเรดอนพบว่า เรดอนจะสลายตัวมาจากอนุกรมยูเรเนียมที่มียูเรเนียม-238 เป็นธาตุตั้งต้น จึงจะเห็นได้ว่านอกจากยูเรเนียม-238 จะพบมากในธรรมชาติแล้วนั้น เรดอนยังเป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวที่สุดคือ 3.82 วัน จึงสามารถฟุ้งกระจายไปในอากาศก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาเรื่องเรดอนจึงมักพิจารณาแค่เรดอน-222 เท่านั้น สำหรับอนุกรมการสลายตัวของอนุกรมทั้ง 3 จะแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม(Uranium Series)[9]

Nuclide	Manner of decay	Half-life
^{238}U	α	4·51 x 10^9 years
^{234}Th	β^-	24·10 days
^{234m}Pa	β^-	1·175 min
^{234}Pa	β^-	6·66 h
^{234}U	α	2·48 x 10^5 years
^{230}Th	α	8·0 x 10^4 years
^{226}Ra	α	1622 years
^{222}Rn	α	3·8229 days
^{218}Po	α, β^-	3·05 min
^{214}Pb	β^-	26·8 min
^{218}At	α, β^-	1·5-2 sec
^{214}Bi	β^-, α	19·7 min
^{218}Rn	α	0·019 sec
^{214}Po	α	1·64 x 10^{-4} sec
^{210}Tl	β^-	1·32 min
^{210}Pb	β^-	19·4 years
^{210}Bi	β^-, α	5·013 days
^{206}Tl	β^-	4·19 min
^{210}Po	α	138·401 days
^{206}Pb	stable	—

ตารางที่ 2.2 นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมแอคติเนียม(Actinium Series)[9]

Nuclide	Manner of decay	Half-life
^{235}U	α	7.1×10^{8} years
^{231}Th	β^-	25.64 h
^{231}Pa	α	3.43×10^{4} years
^{227}Ac	β^-, α	21.6 years
^{223}Fr	β^-, α	22 min
^{227}Th	α	18.17 days
^{219}At	α, β^-	0.9 min
^{223}Ra	α	11.68 days
^{215}Bi	β^-	8 min
^{219}Rn	α	3.92 sec
^{215}Po	α, β^-	1.83×10^{-3} sec
^{211}Pb	β^-	36.1 min
^{215}At	α	$\sim 10^{-4}$ sec
^{211}Bi	α, β^-	2.16 min
^{207}Tl	β^-	4.79 min
^{211}Po	α	0.52 sec
^{207}Pb	stable	—

ตารางที่ 2.3 นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมทอเรียม(Thorium Series)[9]

Nuclide	Manner of decay	Half-life
^{232}Th	α	1.39×10^{10} years
^{228}Ra	β^-	6.7 years
^{228}Ac	β^-	6.13 h
^{228}Th	α	1.910 years
^{224}Ra	α	3.64 years
^{221}Rn	α	51.5 sec
^{216}Po	α	0.158 sec
^{212}Pb	β^-	10.64 h
^{212}Bi	β^-, α	60.5 min
^{208}Tl	β^-	3.10 min
^{212}Po	α	3.04×10^{-7} sec
^{208}Pb	stable	—

คุณสมบัติทางเคมีของเรดอน พบว่าเรดอนมีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นก๊าซเฉื่อยแต่ก็ไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยสมบูรณ์ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับฟลูออไรด์เกิดเป็นเรดอนฟลูออไรด์(Radon Fluoride) ได้ เช่นเดียวกับก๊าซเฉื่อยบางตัว เช่น คริปตอน(Krypton) และซีนอน(Xenon) และเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุหมู่ 8 ตัวอื่นๆ พบว่าเรดอนเป็นธาตุที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงที่สุด คือจะมีจุดเดือด -61.8 °C และจุดหลอมเหลวเท่ากับ -71.0 °C

คุณสมบัติทางฟิสิกส์เรดอน พบว่าเรดอนสามารถละลายน้ำได้แต่ความสามารถในการละลายจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ โดยเรดอนจะละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าน้ำที่อุณหภูมิสูง และเรดอนยังสามารถละลายได้ดีมากในตัวทำละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ว่าเรดอนจะไม่มีสีในอุณหภูมิปกติ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเยือกแข็งเรดอนจะเปล่งแสงสีเหลืองสุกใส และเมื่อลดอุณหภูมิลงอีกเรดอนจะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง

2.4 แหล่งกำเนิดเรดอน[10]

2.4.1 แหล่งกำเนิดเรดอนภายนอกอาคาร

2.4.1.1 ดิน จากการสำรวจพบว่า ค่าเฉลี่ยของก๊าซเรดอนที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศทั่วโลกประมาณ 80 % มาจากพื้นดินชั้นบน ซึ่งการฟุ้งกระจายของเรดอนมีส่วนสัมพันธ์กับเรเดียมและยูเรเนียมในดิน แม้ว่าธาตุเหล่านี้จะมีในดินและหินเกือบทุกชนิดแต่ปริมาณจะแปรผันตามพื้นที่และวัสดุทางธรณีวิทยา โดยทั่วไปความเข้มข้นของยูเรเนียมจะแสดงในหน่วยหนึ่งในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (ppm) หรือในเทอมของกัมมันตรังสีจำเพาะ (specific activity) แสดงในหน่วย pCi ของ U-238 ต่อกรัมของวัสดุ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของยูเรเนียมในหิน พบว่าหินแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมแตกต่างกัน เช่น หินแกรนิตจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูงโดยจะมีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 1.6 pCi/g หินบะซอลต์จะมีความเข้มข้นยูเรเนียมประมาณ 0.3 pCi/g ส่วนหินในชั้นเปลือกโลกจะมีความเข้มข้นยูเรเนียมเฉลี่ยประมาณ 1 pCi/g และในแร่บางชนิดอาจมีค่ามากกว่านี้ สำหรับอัตราการฟุ้งกระจายของเรดอนในแต่ละที่จะไม่เท่ากันขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้นเรเดียมและค่าความสามารถในการซึมผ่านของดิน นอกจากนี้ปริมาณน้ำในดินก็มีผลต่ออัตราฟุ้งกระจายด้วยคือ ในบริเวณที่มีปริมาณน้ำต่ำจะมีการฟุ้งกระจายของเรดอนได้มากกว่าบริเวณที่มีปริมาณน้ำสูง รวมทั้งบริเวณที่มีความดันบรรยากาศสูงก็จะทำการฟุ้งกระจายลดลงด้วย ดังนั้นอัตราการปลดปล่อยเรดอนจะแปรปรวนขึ้นกับเวลาและสถานที่

2.4.1.2 น้ำใต้ดิน แหล่งกำเนิดเรดอนที่ฟุ้งกระจายในสิ่งแวดล้อมที่สำคัญเป็นอันดับสองคือน้ำใต้ดิน เนื่องจากน้ำใต้ดินจะเชื่อมกับหินในชั้นเปลือกโลก และแทรกซึมไปตามรูพรุนและช่องว่างในดินและหิน จึงทำให้เรดอนที่ฟุ้งกระจายในช่องว่างนั้นละลายมากับน้ำ เมื่อน้ำขึ้นมาถึงผิวดินเรดอนส่วนใหญ่ก็ถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ สำหรับความเข้มข้นของเรดอนนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหินในบริเวณนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบเรดอนที่ถูกปลดปล่อยจากน้ำใต้ดินสู่บรรยากาศนั้นพบว่ามีค่าน้อยมาก คือประมาณหนึ่งในห้าของปริมาณเรดอนที่ถูกปลดปล่อยจากดิน

2.4.1.3 แหล่งอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยเรดอนจากน้ำทะเลอีกด้วย แต่ความเข้มข้นของยูเรเนียมและเรเดียมในน้ำทะเลมีค่าน้อยกว่าในดินและหิน แม้ว่าจะมีความเข้มข้นยูเรเนียมกับเรเดียมต่ำแต่เรดอนมีความสามารถในการละลายน้ำสูง จึงทำให้มีการปลดปล่อยเรดอนจากผิวน้ำทะเลสู่บรรยากาศได้แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม

2.4.2 แหล่งกำเนิดเรดอนภายในอาคาร

2.4.2.1 วัสดุก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุก่อสร้างนั้นทำมาจากหิน ทราย ผลิตผลจากแร่ ซึ่งมียูเรเนียมและเรเดียมเป็นองค์ประกอบ และวัสดุก่อสร้างหลายชนิด เช่น อิฐ กระเบื้องปูผนัง และคอนกรีตจะมีรุพรุน ดังนั้นมีเรดอนจากวัสดุก่อสร้างหลุดออกสู่อากาศได้

2.4.2.2 น้ำใต้ดิน เรดอนและเรเดียมมีความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อมีน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ผ่านดินและหินที่มีเรเดียมอยู่ เรเดียมก็จะสามารถละลายและเคลื่อนที่ไปกับน้ำได้ ดังนั้นเมื่อทำการสูบน้ำใต้ดินที่มีเรดอนมาใช้จะทำให้มีเรดอนหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.4.2.3 ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากก๊าซธรรมชาตินั้นถูกผลิตขึ้นที่ใต้ดินซึ่งจะมีเรดอนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เมื่อมีการเผาไหม้ก๊าซก็จะมีเรดอนถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ปริมาณของเรดอนที่มาจากก๊าซธรรมชาติจะไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณเรดอนในอาคาร เนื่องจากบริเวณห้องครัวจะเป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทของอากาศ

2.4.2.4 ดิน ในสภาวะปกติปริมาณเรดอนภายในอาคารที่ฟุ้งกระจายมาจากดินนั้นจะมีอัตราการฟุ้งกระจายขึ้นกับความเข้มข้นของเรเดียมและความดันบรรยากาศในบริเวณนั้น เมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้นอากาศที่มีความเข้มข้นของเรดอนต่ำจะถูกดันเข้าไปในดิน และเมื่อความดันลดลงอากาศในดินที่มีปริมาณเรดอนสูงก็จะออกมาจากดิน จะเห็นได้ว่าอาคารบ้านเรือนที่ตั้งอยู่บนพื้นดินจึงเปรียบเสมือนเป็นทางผ่านของเรดอน การปลดปล่อยเรดอนโดยตรงจากดินเข้าสู่อาคารนั้นจะมีคอนกรีตปิดทับดินอยู่จึงทำให้มีปริมาณเรดอนที่สามารถผ่านคอนกรีตออกมาได้น้อยมาก แต่หากอาคารมีรอยแตกเรดอนก็จะสามารถเล็ดลอดออกมาได้เช่นกัน

2.5 วิธีการวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอน

2.5.1 วิธีแทรก-เอตซ์ (Track Etch Method)

วิธีการนี้จะใช้ฟิล์มไปวางไว้ในบริเวณที่ต้องการวัดความเข้มข้นของเรดอน จากนั้นจึงนำฟิล์มมาล้างกัดรอยแล้วจึงส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อนับรอยของอนุภาคแอลฟาของเรดอน ทำให้ทราบความเข้มข้นของเรดอน วิธีการนี้มีข้อดีคือเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียคือต้องทิ้งฟิล์มวัดรังสีไว้นานถึง 3-4 สัปดาห์และยังมีความแปรปรวนในการนับรอยด้วย แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการประยุกต์วิธีการนับรอยที่สะดวกรวดเร็วขึ้น เช่น การใช้สปาร์คเคาน์เตอร์(spark counter) การนับรอยจากภาพโดยคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

2.5.2 วิธีการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Charcoal Method)

เทคนิคนี้จะทำการเก็บตัวอย่างอากาศไว้ในภาชนะตัวอย่าง เช่น ถุงพลาสติก, กระป๋อง หรือเครื่องแก้ว ที่มีปริมาตรระหว่าง 5-20 ลิตร จากนั้นจึงนำตัวอย่างกลับมาวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ หากตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีความเข้มข้นเรดอนต่ำจะต้องทำการเก็บตัวอย่างมาในภาชนะที่มีปริมาตรมาก จากนั้นทำการอัดตัวอย่างไปในภาชนะเก็บตัวอย่างที่มีปริมาตรเล็กลงเพื่อทำการนับรังสี สำหรับความเข้มข้นของเรดอนนั้นหาได้จากการปล่อยอากาศผ่านถ่านกัมมันต์ที่เก็บอยู่ภายใต้อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว เนื่องจากที่อุณหภูมินี้เรดอนจะถูกจับไว้ในถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ไปเก็บจนถึงสภาวะสมดุลก่อนนำมาวัดรังสี ซึ่งทำได้โดยการนำถ่านกัมมันต์ไปให้ความร้อนเรดอนก็จะไหลออกมาเข้าสู่ระบบนับรังสีที่นำมาใช้ซึ่งอาจจะใช้ Lucas counting cell หรือ ionization chamber ก็ได้

ข้อดีของวิธีการนี้คือวิธีการวัดรังสีไม่ยุ่งยากและสามารถนำถ่านกัมมันต์มาใช้ใหม่ได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถวัดเรดอนที่มีความเข้มข้นต่ำได้ และมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากการวัดรังสีแกมมาจากนิวไคลด์ลูกของเรดอนที่ต้องการวัดนั้นมีรังสีแบคกราวด์ของระบบวัดรังสีแกมมาอยู่แล้ว จึงต้องทำอุปกรณ์กำบังรังสีให้ดี

2.5.3 วิธีการใช้ภาชนะเคลือบสารเรืองรังสี (Scintillation Chamber Method)

วิธีการนี้เป็นวิธีดั้งเดิมและง่ายที่สุดในการวัดหาปริมาณเรดอน ซึ่งถูกพัฒนาโดย Lucas จึงเรียกอีกอย่างว่า Lucas cell โดยใช้สังกะสีซัลไฟด์[ZnS(Ag)] ฉาบผนังภายในภาชนะทรงกระบอกที่ทำด้วยแก้วหรือพลาสติก ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนของหัววัด จากนั้นทำการเชื่อมต่อหัววัดเข้าหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ เมื่อต้องการวัดความเข้มข้นของเรดอนก็ผ่านตัวอย่างอากาศที่ต้องการทราบความเข้มข้นของเรดอนเข้าสู่หัววัด เมื่ออนุภาคแอลฟาที่ถูกปลดปล่อยจากเรดอนชนกับผนังที่เคลือบสังกะสีซัลไฟด์ก็จะทำปฏิกิริยาให้แสงออกมา จากนั้นจึงใช้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์(Photomultiplier Tube) มาเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อวัดแสงที่ออกมา สำหรับประสิทธิภาพของหัววัดอยู่ที่ 70%-80% และจะมีแบคกราวน์ต่ำ เหมาะสำหรับ

การวัดเรดอนในอาคารและในสิ่งแวดล้อม แต่วิธีการนี้ก็มีข้อเสียที่จะต้องทำการเปลี่ยนสังกะสีซัลไฟด์บ่อยๆ เนื่องจากเกิดการปนเปื้อน และจะต้องจัดระบบให้อยู่ในที่มืด

2.5.4 วิธีการวัดด้วย liquid scintillator

เทคนิคนี้จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการนับแสงแต่จะใช้ liquid scintillator แทน ZnS(Ag) วิธีนี้จะเป็นการผสมเรดอนลงใน scintillator โดยจะทำการปล่อยอากาศที่มีเรดอนผ่านสารละลายอินทรีย์ ซึ่งเรดอนจะละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำๆ จากนั้นนำสารละลายผสมเรดอนบรรจุลงในขวดแก้วเล็กๆ เพื่อทำการวัดด้วย liquid scintillator ซึ่งจะมีการสลายตัวของเรดอน-222 ออกมาเรื่อยๆ นอกจากนี้ยังสามารถวัดสัญญาณแสงของรังสีที่ออกมาได้อีก 4 อนุภาคด้วยกันคือ อนุภาคแอลฟาที่มาจากการสลายตัวของโปโลเนียม-218 และโปโลเนียม-214 และรังสีบีตาจากการสลายตัวของตะกั่ว-214 และบิสมัส-214 แต่ในการวัดสัญญาณแสงด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถแยกแยะพลังงานทั้ง 5 พลังงานได้

2.5.5 วิธีการวัดด้วย ionization chamber

เทคนิคนี้จะทำการวัดอนุภาคแอลฟาจากการสลายตัวของเรดอนและนิวไคลด์ลูกภายใน ionization chamber ซึ่งจะเป็นการวัดสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากการเรืองรังสี เทคนิคนี้สามารถทำการนับแต่ละสัญญาณที่เกิดการสลายตัวได้ หรือจะทำการวัดกระแสที่เกิดจากการผลรวมของการสลายตัวทั้งหมดก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม สำหรับงานห้องปฏิบัติการการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมมักจะนิยมใช้การนับสัญญาณที่เกิดจากการสลายตัว แต่สำหรับห้องปฏิบัติการมาตรฐานมักจะใช้การวัดกระแสรวม แต่การใช้ ionization chamber มีราคาแพง ในการวัดความเข้มข้นเรดอนจึงมักจะใช้ Lucas cell เป็นหลัก

2.5.6 วิธีการใช้กระดาษกรอง (Filter Method)

วิธีการนี้จะทำการดูดอากาศบริเวณที่ต้องการทราบความเข้มข้นของเรดอนผ่านกระดาษกรอง จากนั้นจึงนำกระดาษกรองนั้นไปวัดรังสีของนิวไคลด์ลูกที่เกิดจากเรดอนในอากาศที่ติดอยู่ที่กระดาษกรอง ซึ่งสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของเรดอนได้ แต่วิธีการนี้จะต้องกำหนดระยะเวลาเก็บตัวอย่างอากาศและการวัดรังสีแอลฟาหรือรังสีบีตาเป็นระยะๆ

2.6 **การประมาณผลกระทบของเรดอนต่อสุขภาพ**[10]

การหายใจเอาเรดอนเข้าไปนั้นจะมีผลผลิตเรดอนเข้าไปติดอยู่ที่ผนังปอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณหลอดลม เมื่ออะตอมเหล่านี้สลายตัวจะให้แอลฟาออกมากระทบเนื้อเยื่อปอดตลอด ซึ่งอาจทำให้เซลล์เป็นมะเร็งได้ โดยอัตราของการเป็นมะเร็งโดยทั่วไปขึ้นกับชนิด จำนวนและบริเวณที่อะตอมของรังสีติดอยู่ในปอด โดยสิ่งเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ รวมทั้งความเข้มข้นของเรดอนในอากาศ สัดส่วนของความเข้มข้นของผลผลิตเรดอนกับความเข้มข้นของเรดอน

จำนวนผลผลิตเรดอนที่ติดอยู่กับอนุภาคฝุ่นและขนาดของอนุภาคฝุ่น อัตราการหายใจ และอัตราของผลผลิตเรดอนที่ติดอยู่ที่ส่วนต่างๆ ของปอด หากนำข้อมูลจากปัจจัยเหล่านี้มาใช้กับแบบจำลองของปอดก็สามารถคำนวณหาปริมาณรังสีที่ปอดได้รับได้ ซึ่งปริมาณรังสีของเรดอนจะเป็นตัวบอกถึงผลกระทบต่อสุขภาพโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับปริมาณรังสีที่มาจากแหล่งกำเนิดรังสีอื่น แม้ว่าค่าที่ได้จะไม่สมบูรณ์เท่าที่ควรแต่ก็เป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับการหาปริมาณรังสีในปอดที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นของเรดอนในอากาศ

ปริมาณรังสีของเรดอนจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบต่อสุขภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีแหล่งอื่น แม้ว่าการประมาณจำนวนของผู้เป็นมะเร็งปอดจากเรดอนจะเป็นค่าที่ไม่แน่นอน (เนื่องจากมะเร็งปอดทำให้ตายได้ จึงมีความแตกต่างกันระหว่างการเป็นมะเร็งปอดและการตายด้วยมะเร็งปอด) ปัจจุบันการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างมะเร็งปอดและความแรงของการปล่อยเรดอน ส่วนมากมักอาศัยการประเมินค่าจากประสบการณ์ของผู้ที่ทำงานในเหมืองยูเรเนียมและเหมืองแร่อื่นๆ พบว่าผู้ที่ทำงานในเหมืองที่มีการปล่อยเรดอนสูงจะมีอัตราการเป็นมะเร็งปอดสูงด้วย ซึ่งสามารถแปลงเป็นการคำนวณอัตราของเป็นมะเร็งต่อปริมาณรังสีที่ได้รับซึ่งจะสามารถใช้คำนวณหาในบริเวณที่มีการปล่อยเรดอนระดับต่ำเช่นเดียวกับในบ้านส่วนใหญ่ได้อีกด้วย

ผลจากเรดอนจะทำให้มีความไม่แน่นอนหลายๆ อย่างทั้งจากกระบวนการนี้และจากการประมาณการตายจากผลของเรดอน นอกจากนี้การสูบบุหรี่ก็จะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ช่วยเสริมให้เกิดมะเร็งปอดได้มากขึ้น โดยที่ความไม่แน่นอนเหล่านี้จะอยู่ภายใต้การประเมินค่าของปริมาณรังสีที่ได้รับโดยผู้ทำงานในเหมืองและในบ้าน ซึ่งจำนวนของมะเร็งปอดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ได้รับ

เมื่อพิจารณาถึงปัญหาของเรดอน พบว่าสามารถพิจารณาจาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ สาเหตุแรกเมื่อเปรียบเทียบการปล่อยรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีต่างๆ ที่มีผลต่อร่างกาย พบว่าเรดอนเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย แต่หากพิจารณาถึงผลต่อการเป็นมะเร็งปอด พบว่าเรดอนจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเป็นมะเร็งปอด ในขณะสาเหตุหลักของการเกิดมะเร็งปอดมาจากนิวไคลด์ลูกของเรดอน ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้สามารถใช้เพื่อพิจารณาการเป็นมะเร็งปอดด้วยเช่นกัน

สำหรับค่าอัตราการปลดปล่อยเรดอนที่ ICRP กำหนดคือต้องไม่เกิน 2 pCi หรือ 74 mBq และจากการสำรวจในปัจจุบัน พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเรดอนในบางประเทศเท่ากับ 1.5 pCi/l ต่อครอบครัว ซึ่งความเข้มข้นเรดอน 1 pCi/l เท่ากับความเข้มข้นของผลผลิตเรดอนประมาณ 0.005 Working Level(WL) (Working Level คือ ระดับความอันตรายของเรดอนเมื่อเข้าสู่ปอดและมีการสลายให้นิวไคลด์ลูกของเรดอนที่เนื้อเยื่อปอด) และเท่ากับมีการปล่อยรังสีไป

ยังปอดทั้งหมดประมาณ 0.2 Working Level Month(WLM) ต่อปี ปริมาณรังสีที่ได้รับที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อร่างกายทั้งหมด รวมถึงที่สามารถก่อให้เกิดการตายจากโรคมะเร็งนั้น พบว่า อยู่ที่ประมาณ 300 mrem ต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณรังสีสุทธิที่ร่างกายได้รับจากเรดอนสามารถเทียบได้กับปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ รวมกัน ซึ่งจากการสำรวจที่ประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับจากเรดอนทั้งหมดจะมีค่าอยู่ในช่วง 100-800 mrem ต่อปี และเมื่อพิจารณาปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีอื่นๆ พบว่าปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติทั้งหมดรวมทั้งรังสีคอสมิก นิวไคลด์รังสีจากพื้นดิน และนิวไคลด์รังสีธรรมชาติจากร่างกาย จะมีประมาณ 100 mrem ต่อปี ปริมาณรังสีที่ได้รับจากการรักษาทางการแพทย์ซึ่งจะมีประชากรประมาณครึ่งหนึ่งที่จะได้รับประมาณ 200 mrem ต่อปี ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับจากการรักษาทางการแพทย์ทั่วไปจึงมีค่าประมาณ 100 mrem ต่อปี ดังนั้นเรดอนจึงเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่มีการปล่อยรังสีมากที่สุดและประชากรจะได้รับมากกว่าจากแหล่งกำเนิดรังสีอื่นๆ