

ธาตุกัมมันตรังสี และก๊าซเรดอนในธรรมชาติ

ก.1 ธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ

ธาตุต่าง ๆ ที่พบในธรรมชาติที่มีเลขอะตอมสูงกว่า 83 ล้วนเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสิ้น ธาตุเหล่านี้อยู่ในอนุกรมการสลายตัวตามธรรมชาติ โดยในดินและหินที่ประกอบเป็นเปลือกโลกนั้น มีธาตุกัมมันตรังสีอยู่ 4 อนุกรม คือ

1. อนุกรมทอเรียม (Thorium Series ($4n$))
2. อนุกรมเนปจูเนียม (Neptunium Series ($4n + 1$))
3. อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series ($4n + 2$))
4. อนุกรมแอกติเนียม (Actinium Series ($4n + 3$))

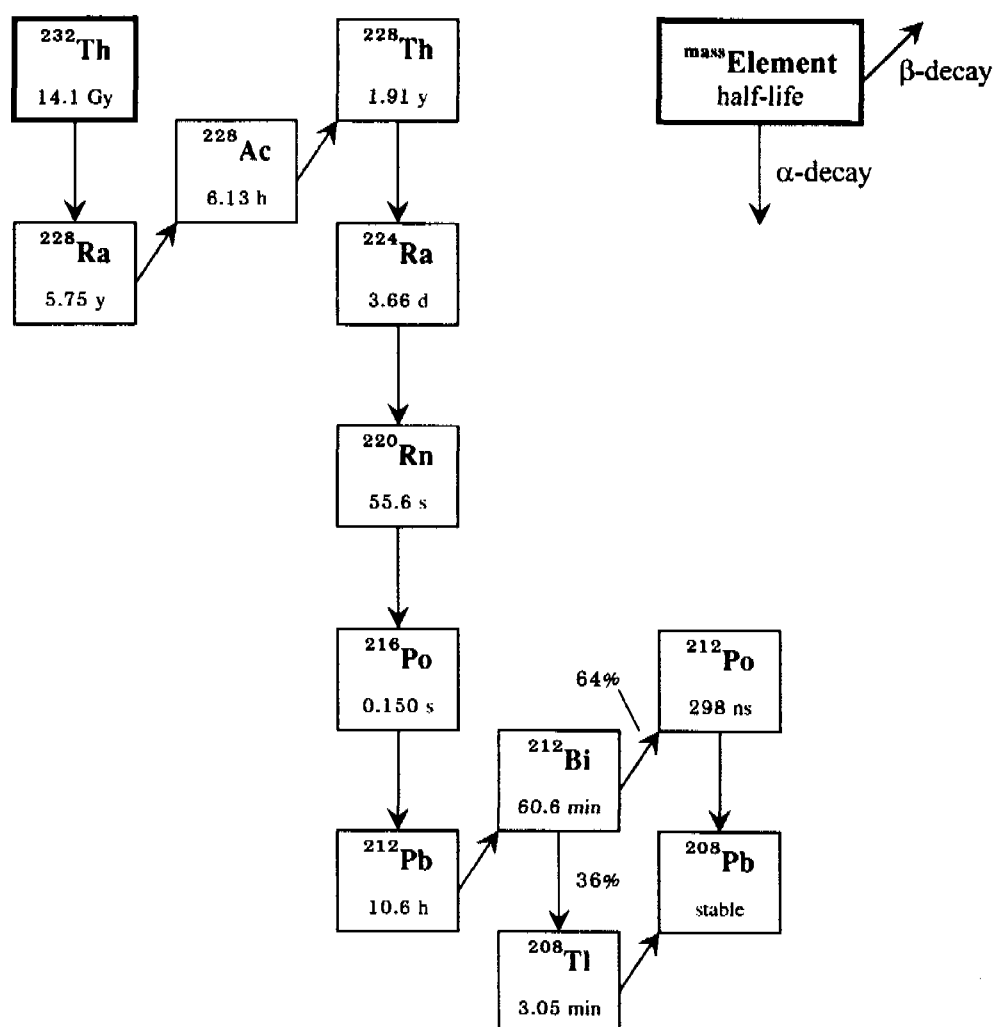
เนื่องจากอนุกรมเนปจูเนียมมีครึ่งชีวิตน้อยกว่าอายุของโลกถึง 10^3 ปี ดังนั้น จึงได้สูญหายไปจากโลกนานแล้ว จึงเหลือธาตุกัมมันตรังสีอยู่จริง ๆ 3 อนุกรมเท่านั้น ได้แก่ อนุกรมทอเรียม อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมแอกติเนียม

1. อนุกรมทอเรียม (Thorium Series ($4n$))

ธาตุทอเรียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีปนอยู่ในแร่ thorite มีอยู่ในผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 12 ส่วนในล้านส่วน มักเกิดรวมกับยูเรเนียม และ Rare – earth ทอเรียมในธรรมชาติมีไอโซโทปเดียวคือ ทอเรียม-232 มีค่าครึ่งชีวิต 1.39×10^{10} ปี

ในระยะแรก ทอเรียมได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมทำไส้ตะเกียงเจ้าพายุ อุตสาหกรรมโลหะผสม และอุตสาหกรรมทำหลอดไฟฟ้า ต่อมาภายหลัง จึงได้ทราบว่าทอเรียมมีความสำคัญทางด้านเชื้อเพลิงปรมาณู โดยพบว่า เมื่อทอเรียม-232 จับนิวตรอนพลังงานต่ำ จะเปลี่ยนเป็นยูเรเนียม-233 และยูเรเนียม-233 เมื่อจับนิวตรอนที่มีพลังงานเกือบเป็นศูนย์สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบแตกตัว ให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกับยูเรเนียม-235 และพลูโทเนียม-239 ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ มุ่งที่จะใช้ทอเรียมเป็นเชื้อเพลิงปรมาณู สำหรับเตาปฏิกรณ์แบบ Breeder Reactor

ภาพที่ ก.1
การสลายตัวของอนุกรมทอเรียม



ที่มา: Sextro, 1994.

จากภาพที่ ก.1 อนุกรมทอเรียม เริ่มต้นจากทอเรียม - 232 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เกิดเป็นเรเดียม - 228 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวต่อเนื่องกันไป จนเกิดก๊าซทอรอน (Rn-220) มีครึ่งชีวิต 54.5 วินาที ซึ่งถือว่าสั้นมาก สามารถแพร่กระจายไปได้ไม่ไกลก็สลายตัวหมดไปโดยเร็ว ดังนั้น จึงพบก๊าซทอรอนที่ผิวโลกในปริมาณค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับก๊าซเรดอนที่มีครึ่งชีวิตถึง 3.82 วัน และผลผลิตที่เกิดจากการสลายตัวของทอรอนก็ยังไม่มียางานว่าก่อให้เกิดอันตราย

ดังนั้น โทรอน จึงนับว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายเหมือนเรดอน (Rn-222) ซึ่งเป็นไอโซโทปเดียวกัน อนุกรมทอเรียมจะสิ้นสุดที่ตะกั่ว-208 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร

2. อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series ($4n + 2$))

อนุกรมนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในแร่พิทช์เบลนด์ (Pitch blende) ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสี พบอยู่บนผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 4 ส่วนในล้านส่วน ยูเรเนียม-238 มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 4.51×10^9 ปี

ในระยะแรกนั้น นักวิทยาศาสตร์สนใจเพียงแต่จะแยกเอาเรเดียมออกจากยูเรเนียมเพื่อใช้รักษาโรคมะเร็งเท่านั้น ตัวยูเรเนียมเองถือว่าไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนำไปใช้ทำสีกระเบื้องเคลือบและเครื่องแก้วเท่านั้น ในระยะหลังจึงทราบว่า ยูเรเนียม มีความสำคัญมากในด้านการใช้เป็นเชื้อเพลิงปรมาณู

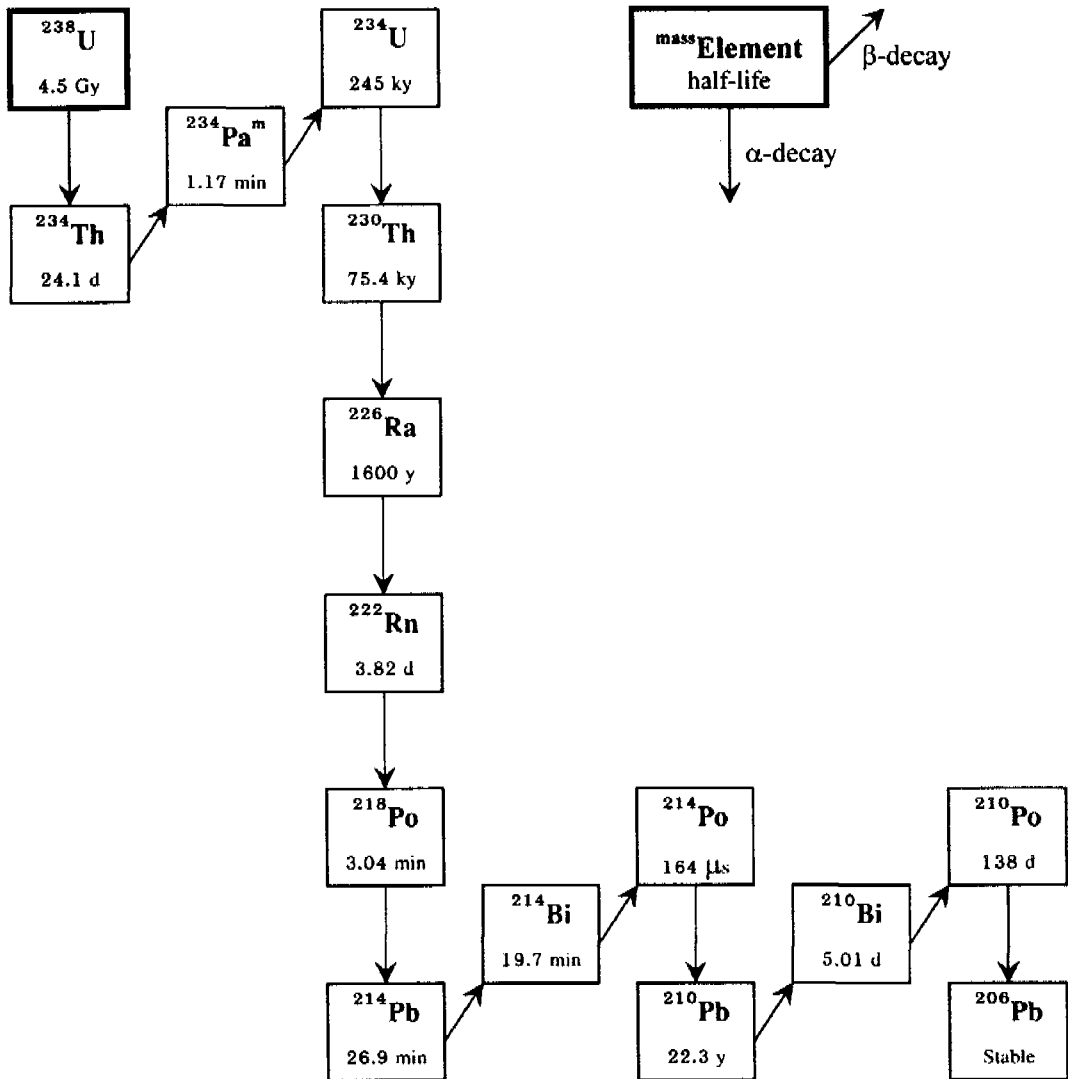
อนุกรมยูเรเนียมตั้งต้นจาก ยูเรเนียม-238 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา กลายเป็นทอเรียม-234 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวต่อเนื่องกันไปตามภาพที่ ก.2 จนถึงการเกิดก๊าซเรดอน (Rn-222) มีครึ่งชีวิต 3.82 วัน ซึ่งยาวนานพอที่จะแพร่กระจายจากใต้พื้นดินสู่บรรยากาศ ปริมาณก๊าซเรดอนบนพื้นผิวโลกจึงมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับก๊าซโทรอน ซึ่งมีครึ่งชีวิตเพียง 54.5 วินาที เมื่อเรดอนสลายตัว จะให้ผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เป็นอันตราย ดังนั้น เรดอนจึงสามารถก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์มากกว่าโทรอน (Rn-220) ซึ่งเป็นไอโซโทปเดียวกัน อนุกรมยูเรเนียมจะไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร

3. อนุกรมแอกติเนียม (Actinium Series ($4n + 3$))

อนุกรมแอกติเนียม มีเปอร์เซ็นต์ที่ปนอยู่บนผิวโลกน้อยมาก เมื่อเทียบกับอนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม โดยเริ่มจากสารตั้งต้นคือ ยูเรเนียม - 235 สลายตัวได้ Rn - 219 หรือที่เรียกกันว่า แอกตินอล มีค่าครึ่งชีวิต 4 วินาที สลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ จนไปถึงสิ้นสุดที่ตะกั่ว 207 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร ดังภาพที่ ก.3

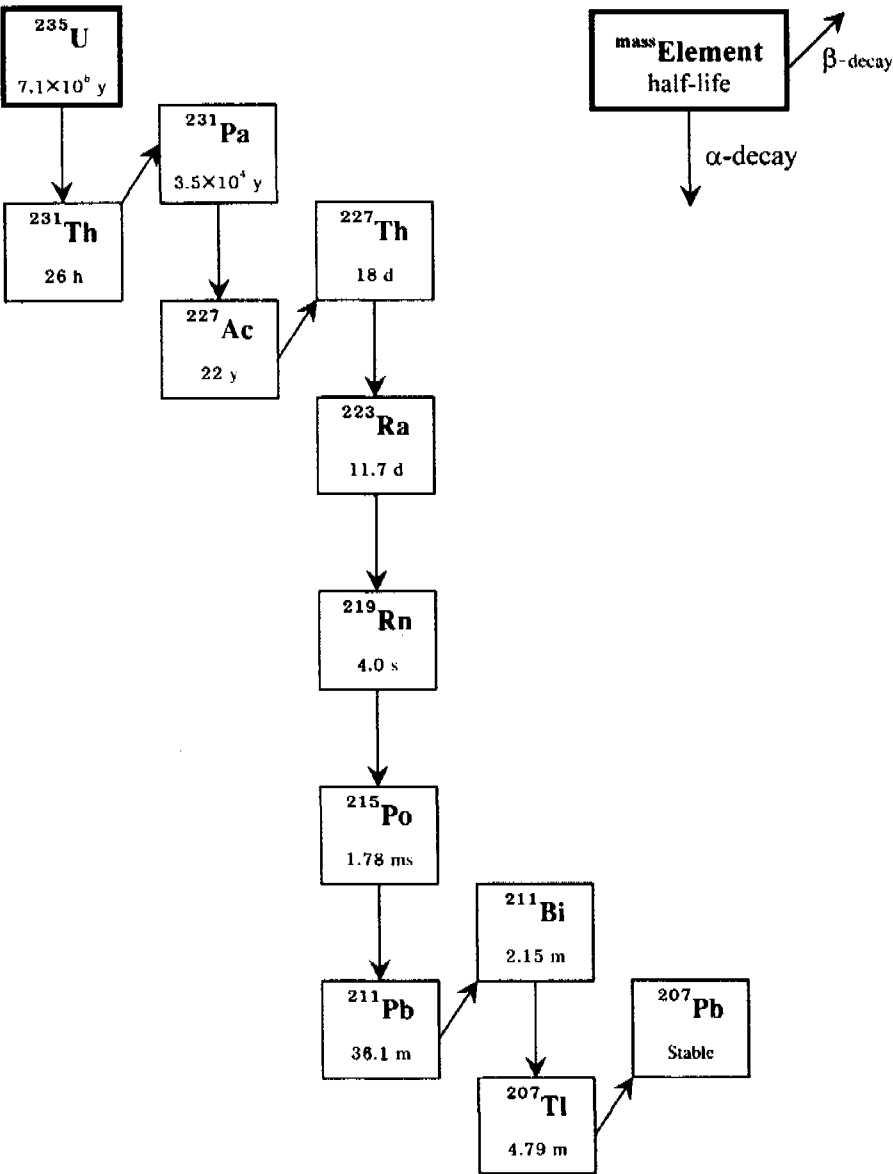
ภาพที่ ก.2

การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม



ที่มา: Sextro, 1994.

ภาพที่ ก.3
การสลายตัวของอนุกรมแอกติเนียม



ที่มา: Sextro, 1994.

ก.2 กัมมันตภาพรังสี และกฎการสลายตัว

นับเป็นเวลากว่าหนึ่งร้อยปีมาแล้ว ที่มนุษย์ได้มีการค้นพบสารตามธรรมชาติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวเองเพื่อให้เกิดความเสถียรขึ้น โดยการแผ่รังสีออกมา (radioactive decay) โครงสร้างของนิวเคลียสจะเป็นตัวกำหนดว่า นิวเคลียสนั้นจะมีการแผ่รังสีหรือไม่ การเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสนี้ อาจจะมีผลให้รังสีชนิดต่าง ๆ ออกมา เช่น รังสีอัลฟา รังสีเบตา และรังสีแกมมา นอกจากนี้ยังอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ให้รังสีชนิดอื่น ๆ บ้าง แต่มีโอกาสน้อย เช่น รังสีโพสิตรอน รังสีเอกซ์ และรังสีนิวตรอน

อนุภาค และรังสีที่แผ่ออกมาจากการสลายตัว จะมีพลังงาน ซึ่งสามารถทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม สามารถหลุดออกมาได้ กระบวนการนี้ เรียกว่า การก่อให้เกิดไอออน (ionized) และเรียกอนุภาค หรือรังสีเหล่านี้ว่า รังสีก่อไอออน (ionizing radiation)

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เป็นกระบวนการสลายตัวเฉพาะของนิวเคลียสหนึ่ง ความน่าจะเป็นของนิวเคลียสที่สลายตัวในช่วงเวลาหนึ่ง ไม่ขึ้นอยู่กับสถานะขององค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิ หรือความดันที่เกิดแก้อะตอมหรือนิวเคลียส นอกจากนี้อัตราการสลายตัวของนิวเคลียสยังไม่ขึ้นอยู่กับอายุของนิวเคลียสด้วย

กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive decay law) กล่าวว่า จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปในช่วงเวลาหนึ่ง จะเป็นปริมาณโดยตรงกับจำนวนอะตอมของธาตุที่มีเหลืออยู่ในขณะนั้น ถ้า N เป็นจำนวนอะตอมที่เหลืออยู่ในเวลาใด ๆ และ ΔN เป็นจำนวนอะตอมที่สลายไปในช่วงเวลา Δt สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (\text{สมการ ก.1})$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay Constant) ซึ่งก็คือโอกาสที่อะตอมหนึ่ง ๆ จะสลายตัวในหนึ่งหน่วยเวลา

- เครื่องหมายลบแสดงว่า การสลายตัวนี้ทำให้จำนวนอะตอมลดลง เมื่อเวลาผ่านไป

จากสมการ ก.1 ถ้าเวลา t มีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อนำระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ ก.2

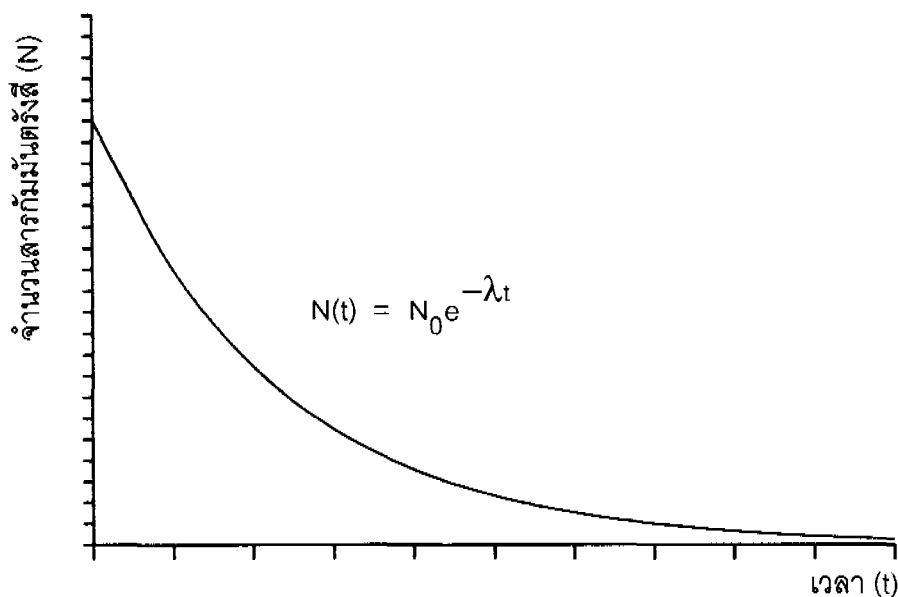
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{สมการ ก.2})$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนนิวเคลียสของสารรังสี ณ เวลาเริ่มต้น ($t = 0$)
 N คือ จำนวนนิวเคลียสของสารรังสีที่เหลือ เมื่อเวลา t ใด ๆ
 λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเวลา (t^{-1}) $= 0.693/T_{1/2}$

สมการที่ได้นี้เรียกว่า “สมการการสลายตัว” (Decay Equation) โดยแสดงถึงจำนวนสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา t ใด ๆ หากนำไปเขียนกราฟ จะได้กราฟเป็นรูปเอกซโพเนนเชียล (exponential) ดังภาพที่ ก.4

ภาพที่ ก.4

จำนวนสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา t ใด ๆ

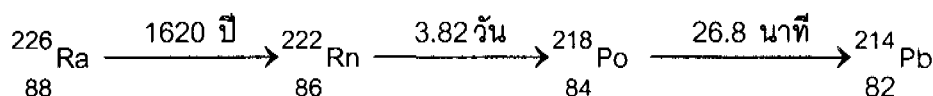


ที่มา : ธวัช ชิตตระการ, 2541. (ดัดแปลง)

นักวิทยาศาสตร์ทางนิวเคลียร์เรียกอัตราการสลายตัวนี้ว่า “กัมมันตภาพ” (activity) ใช้อักษรย่อ “A” หมายถึง อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา หน่วยของกัมมันตภาพคือ แบคเกอเรล (becquerel, Bq) โดย 1 Bq

หมายถึงการสลายตัว 1 ครั้งต่อวินาที (disintegration per sec, dps) แต่หน่วยของกัมมันตภาพที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ คูรี (curie, Ci) ซึ่งกำหนดจากการสลายตัวของ ^{226}Ra หนัก 1 กรัม โดยมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} dps

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีทั่วไปจะมีลักษณะสืบเนื่อง เช่น การสลายตัวของนิวเคลียสเริ่มต้น (นิวเคลียสแม่) ผลที่เหลือนกลายเป็น นิวเคลียสลูก ขณะเดียวกันถ้านิวเคลียสลูกเป็นสารกัมมันตรังสีก็จะสลายตัวต่อไปอีก ได้เป็นนิวเคลียสหลาน ถ้าสลายตัวต่อไปอีกก็จะได้เป็นนิวเคลียสเหลน สลายตัวเรื่อยไปจนกว่านิวเคลียสสุดท้ายจะเสถียร ดังตัวอย่างเช่น



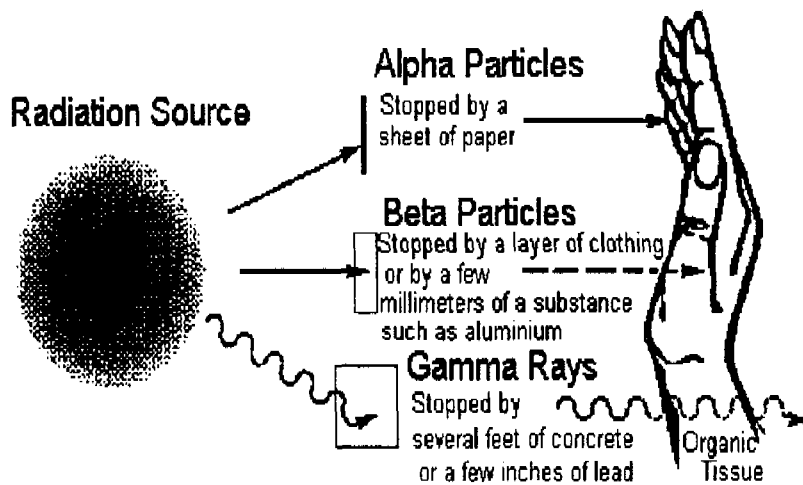
ก.3 ชนิดของรังสี

แหล่งกำเนิดรังสีตามธรรมชาติ ได้แก่ รังสีที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ซึ่งปะปนอยู่ในดินในหิน ในก๊าซธรรมชาติ หรือมาจากนอกโลก เช่น รังสีคอสมิก สรุปได้ว่าสิ่งแวดล้อมรอบตัวมนุษย์ ล้วนก่อให้เกิดรังสีได้ทั้งสิ้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของรังสีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. รังสีอัลฟา (Alpha) เป็นรังสีที่มีลักษณะเป็นอนุภาคมีอำนาจการทะลุทะลวงต่ำ แหล่งสำคัญของรังสีชนิดนี้คือ ก๊าซ เรดอน ในบริเวณที่มีหินภูเขาไฟ และเหมืองยูเรเนียม
2. รังสีเบตา (Beta) มีลักษณะเป็นอนุภาคอิเล็กตรอน มีธาตุหลายชนิดที่สามารถปล่อยรังสีชนิดนี้ได้ เบตามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอัลฟาแต่ไม่เป็นปัญหาในการสร้างเกราะป้องกัน
3. รังสีแกมมา (Gamma) มีลักษณะเป็นคลื่นพลังงานคล้ายรังสีเอกซ์ การป้องกันแกมมาต้องใช้เกราะที่มีความสามารถกันรังสีได้สูง แหล่งที่มาของรังสีชนิดนี้มีต่าง ๆ กัน แม้แต่รังสีคอสมิกจากนอกโลกก็มีรังสีแกมมาปนอยู่
4. นิวตรอน (Neutron) เกิดขึ้นเฉพาะการทำปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งตามปกติ จะไม่เล็ดลอดออกไปนอกโรงไฟฟ้า เพราะไม่สามารถอยู่โดยอิสระเป็นเวลานาน นิวตรอนที่มีพลังงานสูงจะทำลายเนื้อเยื่อของมนุษย์ได้

5. รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับรังสีแกมมา แต่แตกต่างไปจากรังสีแกมมาตรงที่ เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม หรือเรียกได้ว่า มีการเกิดขึ้นเฉพาะภายนอกนิวเคลียสของอะตอมเท่านั้น

ภาพที่ ก.5
ประเภทของรังสี

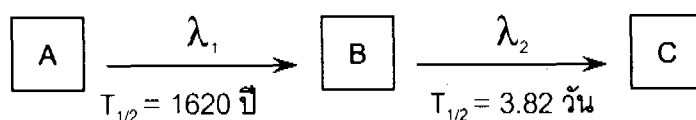


ที่มา: Environmental & Occupational Health (EOH), 2005.

ก.4 สมดุลกัมมันตรังสี

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่ต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ หากมีระยะเวลานานมากพอ ก็จะเกิดสภาวะสมดุลกัมมันตภาพของนิวไคลด์พ่อแม่ และนิวไคลด์ลูก สามารถแบ่งได้ 3 กรณี ได้แก่ สมดุลแบบชั่วคราว สมดุลแบบถาวร และไม่มีสมดุลทางกัมมันตรังสี ซึ่งในที่นี้จะขอสรุปเฉพาะกรณีการเกิดสมดุลแบบถาวร เนื่องจาก ก๊าซเรดอน จะมีการเกิดสมดุลในลักษณะเช่นนี้

สมดุลแบบถาวร (secular equilibrium) เป็นสมดุลทางรังสี ที่มีเงื่อนไขกำกับว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์พ่อแม่จะต้องมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกหลายเท่า หรือ $\lambda_1 \gg \lambda_2$ ถ้าจะให้เห็นชัดของการสมดุลแบบนี้แล้ว ความแตกต่างของค่าครึ่งชีวิตระหว่างพ่อแม่กับลูก จะต้องต่างกัน 10^4 เท่าหรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่าความแรงรังสีของพ่อแม่จะไม่เปลี่ยนแปลงเท่าไร ในขณะที่ค่าความแรงรังสีของลูกเปลี่ยนแปลงไปหลายช่วงครึ่งชีวิต

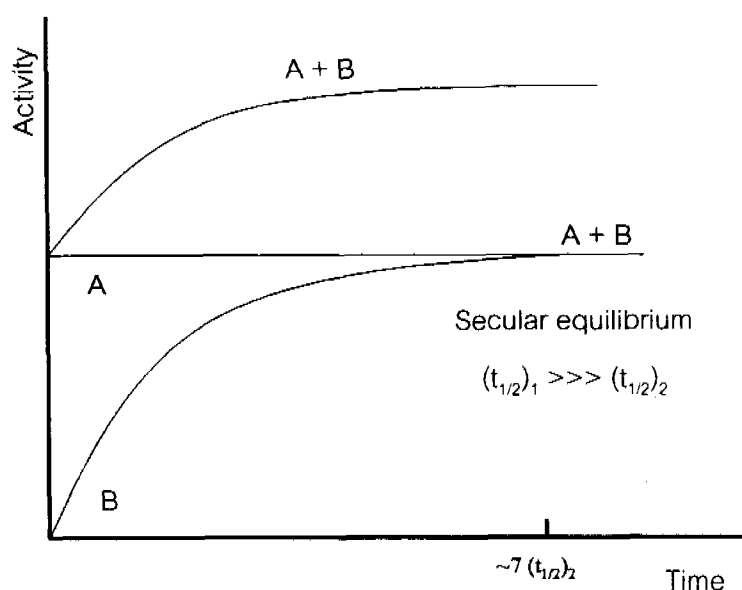


ถ้าสารกัมมันตรังสี A สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี B และสารกัมมันตรังสี B สลายตัวให้สารกัมมันตรังสี C การที่จะเกิดภาวะสมดุลแบบถาวรของสารกัมมันตรังสี A กับสารกัมมันตรังสี B ได้ก็ต่อเมื่อ ค่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี A มีค่ามาก ๆ เมื่อเทียบกับสารกัมมันตรังสี B หรือค่าคงที่ของการสลายตัวของ A มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ B ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ปริมาณของ B ก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดก็จะถึงจุดที่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายของ B ไปเป็น C ซึ่งเป็นภาวะสมดุลแบบถาวร

ตัวอย่างการเกิด และการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เมื่อเกิดภาวะสมดุลแบบถาวร ได้แก่ การเกิดสมดุลของเรเดียม-226 (Ra-226) กับ เรดอน-222 (Rn-222) โดยเรเดียม มีค่าครึ่งชีวิต 1620 ปี ส่วนเรดอนมีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน (Lederer and Shirley, 1978)

ภาพที่ ก.6

การเกิดสมดุลแบบถาวรของนิวไคลด์แม่ (A) นิวไคลด์ลูก (B)
และกัมมันตภาพรวม (A + B)



ที่มา: นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545.

ก.5 หน่วยปริมาณที่ได้รับทางรังสี

นอกจากค่ากัมมันตภาพ ซึ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแล้ว ยังมีหน่วยวัดปริมาณรังสีที่บอกสมบัติอื่น ๆ ของกัมมันตรังสี เช่น ความสามารถก่อไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีของตัวกลาง ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี โดยหน่วยงานระหว่างประเทศคือ International Commission on Radiation Unit and Measurement (ICRU) ได้กำหนดหน่วยวัดปริมาณรังสีไว้ดังนี้

1. กัมมันตภาพ (activity) คือ ความแรงของสารกัมมันตภาพรังสี เป็นหน่วยของกัมมันตภาพรังสี (radioactivity Unit) ที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี โดยมี คูรี (curie, Ci) และรัทเทอร์ฟอร์ด (rutherford) เป็นหน่วยแสดงค่ากัมมันตภาพ เมื่อ 1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

1 รัทเทอร์ฟอร์ด หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 10^6 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ rutherford} = 10^6 \text{ dps}$$

สำหรับหน่วยสากล (International System Units, SI units) กำหนดให้ เบคเกอเรล (becquerel, Bq) เป็นหน่วยของกัมมันตภาพ โดยที่ 1 เบคเกอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ dps}$$

2. เอกซีโพเชอร์ (exposure) หมายถึง การวัดปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนเมื่อรังสีผ่านไปในอากาศ โดย ICRU ได้กำหนดให้ใช้ เรินต์เกน (roentgen, R) เป็นหน่วยของเอกซีโพเชอร์

ปริมาณรังสี 1 เรินท์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศหนัก 0.001293 กรัม หรือเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐานแตกตัวเกิดประจุไฟฟ้า 1 esu

เรินต์เกนมักใช้กับรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ซึ่งเป็นการบอกถึงความสามารถของโฟตอนในการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจาก

$$\begin{aligned} 1 \text{ R} &= 1 \text{ esu} / 0.001293 \text{ g} \\ &= 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg of standard air} \end{aligned}$$

สำหรับ SI unit ใช้ C/kg แสดงค่าเอกซีโพเชอร์โดยที่

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

3. แอบซอร์บโดส (absorbed dose) ใช้ตัวย่อว่า rad หมายถึง ปริมาณพลังงานของรังสีที่ตัวกลางใด ๆ ดูดกลืนไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวกลางนั้น เมื่อรังสีผ่านเข้าไป หรือเขียนได้อีกอย่างหนึ่งคือ

$$\text{rad} = \frac{\text{พลังงานของรังสี}}{\text{น้ำหนักของตัวกลาง}}$$

ปริมาณรังสี 1 rad หมายถึง ปริมาณของรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนพลังงานไว้ได้ 100 เออร์กต่อกรัมของตัวกลาง

$$\begin{aligned} 1 \text{ rad} &= 100 \text{ erg/g} \\ &= 10^{-2} \text{ J/kg} \end{aligned}$$

SI unit กำหนดให้ จูลต่อกิโลกรัม หรือ เกรย์ (gray, Gy) เป็นหน่วยสำหรับแอบซอร์บโดส โดยที่

$$\begin{aligned} 1 \text{ J/kg} &= 1 \text{ Gy} \\ 1 \text{ Gy} &= 100 \text{ rad} \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงาน 87.7 เออร์ก ที่ถูกดูดกลืนไว้โดยอากาศ 1 กรัม จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณรังสี 1 แร็ด ดังนั้นจึงสามารถประมาณความสัมพันธ์ของหน่วยเอกซ์โพเซเจอร์และแอบซอร์บโดสได้ว่า

$$1 \text{ R} = 1 \text{ rad}$$

4. โดสอิควิวาเลนต์ (dose equivalent) แม้ว่ารังสีแต่ละประเภทจะถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางเท่ากันก็ตาม หากตัวกลางเป็นเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต ผลทางชีวภาพที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกัน เช่น นิวตรอนพลังงาน 0.01 เกรย์ ทำให้เกิดผลทางชีววิทยาได้กับรังสีแกมมา 0.1 เกรย์ แสดงว่า นิวตรอนทำให้เกิดอันตรายได้มากกว่ารังสีแกมมา 10 เท่า ดังนั้นจำเป็นต้องมีหน่วยโดสอิควิวาเลนต์ เพื่อแสดงผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้น

เรม (rem, Radiation Equivalent Man) เป็นหน่วยของโดสอิควิวาเลนต์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้งานด้านรังสีชีววิทยา (Radiation biology) และด้านการป้องกันและความปลอดภัยทางรังสี โดยพิจารณาจากแอบซอร์บโดส ร่วมกับปัจจัยทางชีววิทยา คือ การยังผลด้านชีวภาพสัมพัทธ์ (Relative biological effectiveness, RBE) ซึ่งเปรียบเทียบผลทางชีววิทยาจากปริมาณรังสีเอกซ์พลังงาน 250 kV กับปริมาณรังสีอื่น ๆ ที่ให้ผลเช่นเดียวกัน

$\text{RBE} = \frac{\text{Dose of 250 kV X-rays to produce a certain biological effect}}{\text{Dose of a given radiation to produce the same biological effect}}$

สำหรับงานด้านความปลอดภัยและการป้องกันอันตรายจากรังสีนั้น อันตรายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการได้รับรังสี ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับการดูดกลืนพลังงานจากรังสี แต่ยังขึ้นกับความไวต่อรังสี รวมทั้งการส่งผ่านพลังงานของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อนั้น ICRU ได้แนะนำให้ใช้การคำนวณโดสอิควิวาเลนต์จากปัจจัยการแจกจ่าย (Distribution factor, DF) ซึ่งแสดงถึงการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่าง ๆ และค่าปัจจัยคุณภาพ (Quality factor, QF) ซึ่งแสดงถึงคุณภาพของรังสีชนิดต่าง ๆ ซึ่งกำหนดไว้ในตารางที่ ก.2 จึงอาจคำนวณโดสอิควิวาเลนต์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{dose equivalent (rem)} &= \text{absorbed dose (rad)} \times \text{RBE} \\ &= \text{absorbed dose (rad)} \times \text{DF} \times \text{QF} \end{aligned}$$

สำหรับหน่วยสากล กำหนดให้ จูลต่อกิโลกรัม หรือซีเวิร์ต (Sivert, Sv) เป็นหน่วยของโดสอิควิวาเลนต์ โดยมีความสัมพันธ์กับเรมดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ J/kg} &= 1 \text{ Sv} \\ 1 \text{ Sv} &= 100 \text{ rem} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.1
ค่า RBE สำหรับรังสีชนิดต่าง ๆ

ชนิดของรังสี	RBE
X-rays, γ -rays	1
β - rays	1
Thermal neutron	4 – 5
Fast neutron	10
α - rays	10 - 20

ที่มา: นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545.

ตารางที่ ก.2
ค่า QF สำหรับรังสีชนิดต่าง ๆ

ชนิดของรังสี	QF
X-rays, γ -rays	1
β - rays ($E_{\max} > 0.003$ MeV)	1
β - rays ($E_{\max} < 0.003$ MeV)	1.7
Neutron, Proton, Alpha	10
Heavy recoil nuclei	20

ที่มา: นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545.

ตารางที่ ก.3
สรุปตัวคูณแฟคเตอร์ และหน่วยของการวัด

Activity	
SI units ^a : 1 becquerel (Bq)	= 1 disintegration per second (s^{-1})
1 curie (Ci)	= 3.7×10^{10} disintegrations (s^{-1})
	= 3.7×10^{10} Bq
1 picocurie (pCi)	= 0.037 Bq
	= 2.22 disintegrations (min^{-1})
Activity Concentration	
SI units : 1 Bq/m ³	= 0.027 pCi/L
1 pCi/L	= 37 Bq/m ³
SI units : 1 Bq/kg	= 0.027 pCi/g
Potential Alpha Energy Concentration (PAEC)	
PAEC	= 1.3×10^5 MeV/L
SI units :	= 2.08×10^{-5} J/m ³
	= 1 Working Level (WL)
1 mWL	= 20.8 nJ/m ³

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Progeny	
Equilibrium Equivalent Concentration (EEC)	
EEC (²²² Rn)	= 0.104 I[²¹⁸ Po] + 0.517 I[²¹⁴ Pb] + 0.379 I[²¹⁴ Bi]
EEC (²²⁰ Rn)	= 0.913 I[²¹² Pb] + 0.087 I[²¹² Bi]
(Where EEC and I[i] are in either Bq/m ³ or pCi/L)	
For ²²² Rn : EEC (Bq/m ³)	= 3700 × PAEC (WL)
PAEC (nJ/m ³)	= 5.62 × EEC (Bq/m ³)
For ²²⁰ Rn : EEC (Bq/m ³)	= 276 × PAEC (WL)
PAEC (nJ/m ³)	= 75.4 × EEC (Bq/m ³)
Equilibrium factor (F)	= EEC/I [Rn]
1 Bq/m ³ ²²² Rn	= 2.81 nJ/m ³ PAEC at F = 0.5 = 1.35 × 10 ⁻⁴ WL
1 pCi/L ²²² Rn	= 5.0 × 10 ⁻³ WL at F = 0.5
1 Bq/m ³ ²²⁰ Rn	= 3.77 nJ/m ³ PAEC at F = 0.05 ^b = 1.81 × 10 ⁻⁴ WL
1 pCi/L ²²⁰ Rn	= 6.7 × 10 ⁻³ WL at F = 0.05 ^b
Exposure	
1 working level month (WLM)	= 1 WL for 170 h
WLM	= WL × (exposure time in h/170 h)
SI units : 1 WLM	= 3.54 × 10 ³ Jh/m ³
Working 170 h per month	
For 1 year at 1 WL	= 21 WLM
Living for 1 year at WL	
(100% occupancy)	= 51.5 WLM
For 1 year exposure at 100% occupancy; F	= 0.5 for ²²² Rn; F = 0.05 ^b for ²²⁰ Rn

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Exposure (1 Bq/m ³ ²²² Rn)	=	2.81 nJy/m ³ = 2.46 × 10 ⁻⁵ Jh/m ³
	=	7.0 × 10 ⁻³ WLM
Exposure (1 pCi/L ²²² Rn)	=	0.26 WLM
Exposure (1 Bq/m ³ ²²⁰ Rn)	=	3.77 nJy/m ³ = 3.30 × 10 ⁻⁵ Jh/m ³
	=	9.7 × 10 ⁻³ WLM
Exposure (1 pCi/L ²²⁰ Rn)	=	0.35 WLM
Dose		
SI units : 1 gray (Gy)	=	1 joule per kilogram (1 J kg ⁻¹)
1 Gy	=	100 rad
Dose Equivalent		
SI units : sievert (Sv)	=	100 rem

^aMeasurement units adopted by the International System of Units.

^bEquilibrium factor for ²²⁰Rn decay products.

ที่มา: Nagda, 1994.

ก.6 ก๊าซเรดอน และคุณสมบัติ

ก๊าซเรดอน จัดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม เป็นก๊าซที่ปราศจากสี และกลิ่น มีความหนาแน่น 9.73 กรัมต่อลิตร ณ สภาวะปกติ ซึ่งถือว่ามีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซทั้งหมดในธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-71.0°C) พบว่าก๊าซเรดอนเกิดการเรืองแสงได้ โดยมีสีเหลือง และถ้าลดอุณหภูมิลงอีกก็จะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง ซึ่งด้วยคุณสมบัตินี้เอง จึงทำให้ในช่วงแรกก๊าซเรดอนถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า นิตอน (Niton) ซึ่งแปลว่า สารเรืองแสง

ก๊าซเรดอนมีไอโซโทปอยู่ 3 ไอโซโทป ได้แก่ ก๊าซแอดดินอน (Rn-219) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวในอนุกรมแอดดิเนียม จะสลายตัวให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1904 โดย Friedrich O. Giesel และ Andreloris Debierne และก๊าซโทรอน (Rn-220) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมทอเรียม สลายตัวให้รังสีอัลฟาเช่นกัน มีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ถูก

ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1899 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ R.B. Owens และ Ernest Rutherford ส่วนก๊าซเรดอน (Radon-222) เป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตนานที่สุด คือ 3.82 วัน

นอกจากนี้ก๊าซเรดอนยังสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และการละลายจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความสามารถในการละลายน้ำได้ของเรดอนนี้เองที่เป็นสาเหตุให้มีการปล่อยเรดอนเข้าสู่บรรยากาศระหว่างกิจกรรมการใช้น้ำในบ้าน เช่น การซักเสื้อผ้า การล้างจาน การอาบน้ำ เป็นต้น ในส่วนของรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซเรดอนได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4

คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซเรดอน

ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 0°C ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	9.73 g L ⁻¹
จุดเดือด ณ สภาพปกติ (1 atm)	-62 °C
ความหนาแน่นในสภาพเหลว ณ จุดเดือดปกติ	4.4 g cm ⁻³
ความสามารถในการแพร่กระจายในบรรยากาศ	0.1 cm ² sec ⁻¹
ความหนืด ณ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 20°C	229.0 micropoise
ความดันวิกฤติ	62 atm
อุณหภูมิวิกฤติ	105 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ ณ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 20°C	230 cm ³ (STP) kg ⁻¹ water
ความสามารถในการละลายในของเหลวชนิดต่าง ๆ	
ณ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 18°C	
กลีเซอริน (Glycerine)	0.21 cm ³ kg ⁻¹ liquid
เอธิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)	7.40 cm ³ kg ⁻¹ liquid
ปิโตรเลียม (Petroleum, liquid paraffin)	9.20 cm ³ kg ⁻¹ liquid
โทลูอีน (Toluene)	13.2 cm ³ kg ⁻¹ liquid
คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide)	23.1 cm ³ kg ⁻¹ liquid
น้ำมันปาล์ม (Olive oil)	29.0 cm ³ kg ⁻¹ liquid

ที่มา: NCRP, 1988. (ดัดแปลง)

ก. 7 แหล่งกำเนิดก๊าซเรดอน

แหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอน สามารถแบ่งได้ 4 แหล่งใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ยูเรเนียมในดิน

ต้นกำเนิดของก๊าซเรดอนที่แท้จริงแล้วคือ แร่ยูเรเนียม โดยสังเกตได้ว่าทุกอนุกรม ล้วนแล้วแต่มีแร่ยูเรเนียมเป็นสารตั้งต้นทั้งสิ้น ยูเรเนียม (uranium) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1789 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ต่อมา Marie Curie สามารถแยกโลหะเรเดียมออกจาก แร่ยูเรเนียมได้ และพบว่าเรเดียมนั้นให้กัมมันตรังสีรุนแรงกว่ายูเรเนียมหลายเท่า จึงได้นำเอาธาตุ เรเดียมมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง ส่วนเรดอนนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของเรเดียม

ยูเรเนียมสามารถพบแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในหินและดิน ในปริมาณเฉลี่ย 1 – 5 ส่วนในล้านส่วน และ 1 – 4 ส่วนในพันล้านส่วนในน้ำจืดและน้ำทะเล ในประเทศไทยมีแหล่ง ยูเรเนียมที่สำคัญอยู่หลายแห่งด้วยกัน เช่น แหล่งแร่ยูเรเนียมภูเวียง อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น , แหล่งแร่ยูเรเนียมคอยช้าง อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ เป็นต้น

ดังนั้น ปริมาณยูเรเนียมในดินและหิน จึงนับเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการใช้ ประเมินศักยภาพเรดอน (Radon potential) ของพื้นที่นั้น นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Joseph Duval ผู้เชี่ยวชาญเรื่องกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ ยูเรเนียมที่ผิวดิน กับค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่ตรวจวัดในอาคารที่พักอาศัย และได้ข้อสรุปใช้ เป็นเกณฑ์กำหนดศักยภาพเรดอนภายในอาคาร โดยประเมินจากความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินได้ ดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5

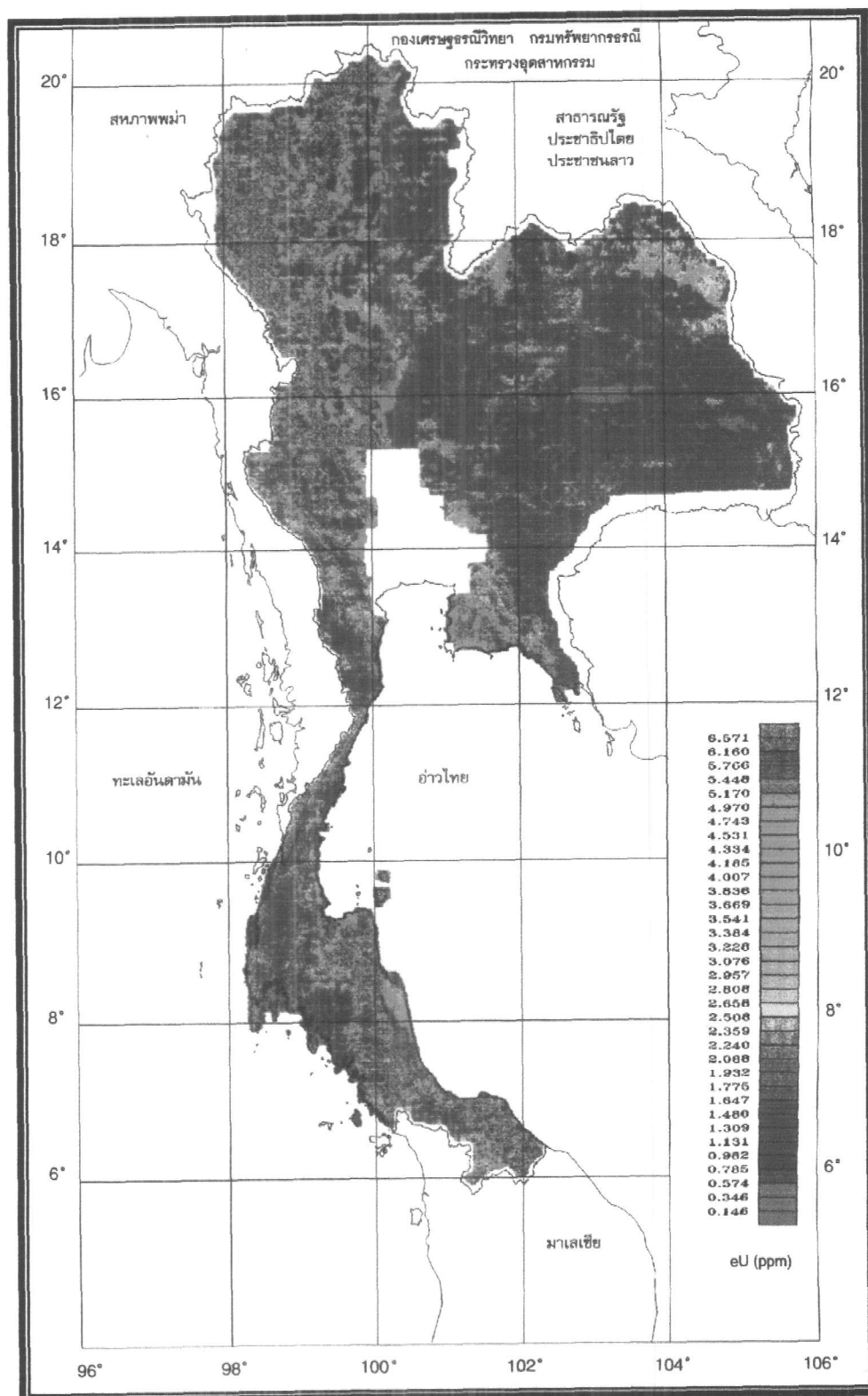
เปรียบเทียบความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินกับศักยภาพเรดอนของพื้นที่

Concentration (ppm eU)*	Radon Potential	Number of data with radon Higher than 148 Bq/m ³ Air
0.0 – 0.5	Very Low	0 %
0.5 – 1.0	Low	Less than 10 %
1.0 – 2.0	Intermediate	Less than 20 %
2.0 – 3.0	Slightly high	Less than 30 %
> 3.0	High	More than 30 %

* Part per million equivalent Uranium, unit of uranium concentration at isotopic equilibrium for Uranium-238 series.

ที่มา: Duval, 1988.

ภาพที่ ก.7
แผนที่กัมมันตรังสียูเรเนียมในประเทศไทย



ที่มา: กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, 2543.

จากตารางที่ ก.5 และภาพที่ ก.7 พื้นที่ที่มีศักยภาพเรดอนสูงนั้น จะมีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินสูงกว่า 3 ppm eU และหากทำการวัดความเข้มข้นก๊าซเรดอนในอาคารจำนวน 100 หน่วยในพื้นที่นี้ จะมีมากกว่า 30 หน่วยที่มีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงกว่า 148 Bq m⁻³ และถึงแม้ว่าอาคารใดที่ไม่ได้ตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีศักยภาพเรดอนสูง แต่หากวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ หินทราย ได้นำมาจากบริเวณพื้นที่ที่มีศักยภาพเรดอนสูงแล้ว อาคารนั้นก็จะมีโอกาสที่จะมีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงตามไปด้วย

2. เรดอนจากอากาศภายนอก

เมื่อธาตุเรเดียมที่อยู่ในดินสลายตัว ก็จะได้ผลิตภัณฑ์คือ เรดอน ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซ จึงสามารถแทรกตัวออกมาทางช่องว่างในดินสู่บรรยากาศภายนอกได้ ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นของเรดอนในบรรยากาศจึงขึ้นอยู่กับปริมาณเรดอนที่แพร่ออกมาจากดิน รวมทั้งปัจจัยของบรรยากาศ เช่น ลมที่พาเอาอากาศออกจากดิน และความแปรปรวนของลมซึ่งทำให้ความเข้มข้นของเรดอนลดลง ความเข้มข้นของเรดอนในบรรยากาศจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสถานที่ เวลา ความสูงจากพื้นดิน และสภาพอากาศ และเนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของเรดอนค่อนข้างสั้น ดังนั้นความเข้มข้นของเรดอนจึงลดลงเมื่อความสูงจากพื้นดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการสำรวจพบว่า ปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ก็มีผลเช่นกัน เช่น ในบริเวณเกาะ และบริเวณขั้วโลกจะพบเรดอนในปริมาณค่อนข้างต่ำ

3. เรดอนจากน้ำใต้

เนื่องจากเรดอนเป็นธาตุที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น การเคลื่อนที่ของเรดอนในดินจึงถูกควบคุมด้วย การแพร่กระจาย (molecular diffusion) และการไหลของน้ำใต้ดิน ตามปกติเรดอนมีการเคลื่อนที่โดยการแพร่กระจายได้ช้า แต่ถ้ามีการกวนหรือให้ความร้อนกับน้ำ จะเป็นการเร่งให้เรดอนแพร่กระจายจากน้ำมาสู่อากาศได้มากขึ้น ข้อมูลจาก U.S. Environmental Protection Agency (EPA) รายงานว่าความเข้มข้นของเรดอนในน้ำ 10,000 pCi L⁻¹ สามารถเปลี่ยนมาเป็นเรดอนในอากาศได้ 1.0 pCi L⁻¹ นอกจากนี้ จากรายงานของ UNSCEAR ในปี ค.ศ. 1993 พบว่าในน้ำใต้ดินจะมีความเข้มข้นของเรดอนสูงที่สุด รองลงมาคือน้ำบนดิน และน้อยที่สุดคือน้ำผิวดิน

4. เรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

วัสดุก่อสร้างที่มีส่วนประกอบเป็นหินและดิน หรือถูกนำมาจากพื้นที่ที่มีศักยภาพเรดอนสูง สามารถที่จะปล่อยเรดอนออกมาสู่อากาศได้ ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเข้มข้นไม่มากเท่ากับเรดอนที่ซึมผ่านรอยแตกของผนังเข้าสู่อาคาร แต่ก็สามารถทำให้ปริมาณเรดอนภายในอาคารเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

เช่น จากการตรวจวัดก๊าซเรดอนที่แพร่มาจากทรายก่อสร้างในจังหวัดสงขลา พบว่าจากตัวอย่างของทรายบางจุดมีระดับความเข้มข้นของเรดอนที่แพร่ออกมาสูงถึง 9.4 Bq kg^{-1} ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยก๊าซเรดอนที่แพร่มาจากดิน ซึ่งมีค่า 8 Bq kg^{-1} (ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และคณะ, 2544) ดังนั้น ย่อมกล่าวได้ว่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างมีผลต่อการเพิ่มปริมาณเรดอนภายในอาคารให้สูงขึ้นอย่างแน่นอน

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์การปล่อยก๊าซเรดอนออกจากวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในต่างประเทศ ซึ่งพบว่าอัตราการปล่อยของก๊าซเรดอนจากวัสดุใด ๆ นั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่กระจายของเรดอนจากวัสดุ (diffusivity) และช่องว่างภายในวัสดุนั้น ๆ (porosity) ซึ่งทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient) ที่ต่างกัน และเนื่องจากก๊าซเรดอนเกิดจากการสลายตัวของธาตุเรเดียม (Ra-226) ดังนั้นการที่จะประเมินว่าวัสดุใดมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนมากกว่ากัน จึงพิจารณาที่ปริมาณของธาตุเรเดียมที่เป็นส่วนประกอบเป็นหลัก