

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี [14]

2.1.1 ชนิดของรังสี

รังสี (Radiation) คือพลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือในลักษณะของอนุภาค อาจจำแนกได้เป็น

- 1) รังสีในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ประกอบด้วย คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสงสว่าง อัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก
- 2) รังสีที่เป็นกระแสของอนุภาคความเร็วสูง (Sub-atomic particle radiation) ประกอบด้วย แอลฟา บีตา และนิวตรอน

เราอาจจำแนกรังสีตามความสามารถในการทำอันตรกิริยา (Interaction) กับสสารออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน (Non-ionizing radiation) เช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสงสว่าง และอัลตราไวโอเลต
2. รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (Ionizing radiation) เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีคอสมิก รังสีแอลฟา รังสีบีตา และนิวตรอน เป็นต้น

2.1.2 การจำแนกต้นกำเนิดรังสี จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) รังสีที่เกิดเองตามธรรมชาติ รังสีคอสมิก (Cosmic radiation) รังสีคอสมิกเป็นรังสีที่มาจากอวกาศและดวงอาทิตย์โดยที่ส่วนประกอบประมาณร้อยละ 90 ของรังสีคอสมิก เป็นอนุภาคโปรตอนที่มีพลังงานสูง รังสีคอสมิกที่มาจากดวงอาทิตย์นั้นเกิดจากปฏิกิริยาฟิวชัน (Fusion reaction) ซึ่งปล่อยรังสีและอนุภาคออกมาจำนวนมาก รังสีคอสมิกที่เกิดจากดวงอาทิตย์และแผ่มายังผิวโลกนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- 1.1) รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic radiation) เป็นรังสีที่อยู่เหนือบรรยากาศโลก ประกอบด้วย โปรตอนร้อยละ 79 อนุภาคแอลฟาร้อยละ 20 และอนุภาคอื่น ๆ ร้อยละ 1

1.2) รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic radiation) เป็นรังสีที่เกิดขึ้นภายหลังอันตรกิริยาของรังสีปฐมภูมิกับอะตอมของอากาศ ทำให้อะตอมของอากาศแตกตัวเป็นอนุภาคต่าง ๆ เช่น โปรตอน อิเล็กตรอน เป็นต้น

นอกจากรังสีคอสมิกแล้ว ดินและหินบนพื้นโลกก็ถูกพบว่าประกอบด้วยยูเรเนียมและทอเรียม โดยที่ปริมาณของก๊าซต่าง ๆ เหล่านี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของหิน โดยหินแกรนิตจะมีส่วนประกอบของธาตุกัมมันตรังสีมากกว่าหินปูนและหินทราย

2) สารรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เช่น สารรังสีที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการวินิจฉัยโรค สารรังสีที่ใช้ในการรักษา การใช้ไอโซโทปต่าง ๆ ทางการแพทย์ กากกัมมันตภาพรังสี ผลจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ เตาปฏิกรณ์ปรมาณู และเครื่องเร่งอนุภาค

รังสีที่ก่อให้เกิดไอออนจะเกิดขึ้นและอยู่ล้อมรอบมนุษย์ตลอดเวลา ซึ่งอาจจะมีมากบ้างหรือน้อยบ้างนั้น ขึ้นอยู่กับสถานที่และลักษณะการปฏิบัติงานต่าง ๆ กัน ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการสรุปค่าความแรงรังสีโดยเฉลี่ยจากต้นกำเนิดรังสีต่าง ๆ ดังตาราง 1

ตาราง 1 ระดับรังสีโดยเฉลี่ยที่มนุษย์ได้รับในรอบปี [15]

ระดับรังสีโดยเฉลี่ยที่มนุษย์ได้รับในรอบปี		
ต้นกำเนิดรังสี	ระดับรังสี (mSv/y)	ร้อยละ
<u>รังสีจากธรรมชาติ</u>		
แก๊สเรดอน	02.0	55
รังสีคอสมิก	0.27	8
รังสีจากผิวโลก	0.28	8
รังสีจากภายในร่างกาย	0.39	11
รวม	3.00	82
<u>รังสีจากกิจกรรมมนุษย์</u>		
การฉายรังสีทางการแพทย์	0.39	11
การใช้งานเวชศาสตร์นิวเคลียร์	0.14	4
ผลิตภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน	0.10	3
สถานปฏิบัติงานทางรังสี	0.01	0.30
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงฯ	0.01	0.03
ฝุ่นกัมมันตรังสี	0.01	0.03
อื่น ๆ	0.01	0.03
รวมรังสีจากกิจกรรมมนุษย์	0.63	18
รวมระดับรังสีที่มนุษย์ได้รับ	3.60	100

เนื่องจากรังสีเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นเมื่อกระทบวัสดุต่าง ๆ และสิ่งที่มีชีวิตก็ย่อมเกิดผลกระทบขึ้นได้ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของรังสี พลังงานของรังสี ปริมาณของรังสี และชนิดของอวัยวะที่รังสีตกกระทบ [16]

รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน ส่วนใหญ่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ในรูปของความร้อน (Thermal effects) ในขณะที่รังสีที่ก่อให้เกิดไอออนมีผลต่อสิ่งมีชีวิต โดยทำให้อะตอมต่อโมเลกุลของเซลล์มีการแตกตัวเป็นไอออนและทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งโครงสร้างของเซลล์มีการแตกตัวเป็นไอออนและทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งโครงสร้างของเซลล์และระบบการทำงานของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปด้วยและเกิดอาการผิดปกติในร่างกายขึ้นรังสีแต่ละชนิดนั้นก่อผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ไม่เหมือนกัน ซึ่งในทางวิชาการได้มีการศึกษาถึงความรุนแรงของผลกระทบดังกล่าว สรุปได้ในตาราง 2

ตาราง 2 คำตัวประกอบถ่วงน้ำหนักแสดงอันตรายของรังสี [17]

ชนิดของรังสี	ตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก
โฟตอนทุกพลังงาน	1
อิเล็กตรอนและมิวออนทุกพลังงาน	1
นิวตรอนพลังงานต่ำกว่า 10 KeV	5
นิวตรอนพลังงาน 10 KeV ถึง 100 KeV	10
นิวตรอนพลังงาน 100 KeV ถึง 2 MeV	20
นิวตรอนพลังงาน 2 MeV ถึง 20 MeV	10
นิวตรอนพลังงานสูงกว่า 20 MeV ขึ้นไป	5
โปรตอนพลังงานสูงกว่า 2 MeV	5
แอลฟา, พิซัน, แฟรกเมนต์, นิวไคลด์หนัก	20

ทั้งนี้โดยที่เซลล์เนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ แต่ละส่วนในร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อรังสีแตกต่างกันไป ดังนั้นแม้มนุษย์ได้รับรังสีทั่วร่างกาย แต่ผลที่เกิดขึ้นต่ออวัยวะต่าง ๆ จะไม่เท่ากันตามข้อมูลในตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของผลกระทบจากรังสีที่มีต่ออวัยวะต่าง ๆ [18]

อวัยวะ	ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของอวัยวะ
อวัยวะสืบพันธุ์ (gonad)	0.20
ไขกระดูก (Bone Marrow)	0.12
ลำไส้ (Colon)	0.12
ปอด (Lung)	0.12
กระเพาะ (Stomach)	0.12
ถุงน้ำดี (Bladder)	0.05
หน้าอก (Breast)	0.05
ตับ (Liver)	0.05
หลอดอาหาร (Oesophagus)	0.05
ต่อมไทรอยด์ (Thyroid)	0.05
ผิวหนัง (Skin)	0.01
กระดูก (Bone surface)	0.01
อวัยวะอื่น ๆ (Remainder)	0.05

2.1.3 การได้รับรังสีของมนุษย์ [19]

มนุษย์สามารถรับรังสีที่เกิดในธรรมชาติ และสารรังสีที่มนุษย์เองประดิษฐ์ขึ้นโดยการหายใจ ทางบาดแผล การซึมผ่านผิวหนัง รวมไปถึงการปนเปื้อนจากน้ำและอาหารที่รับประทานเข้าไปจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) อายุ
- 2) เพศ พบว่าเพศหญิงได้รับรังสีมากกว่าเพศชาย เพราะมีการเจริญเติบโตเร็วกว่า และมีการกินมากกว่า
- 3) การกินอยู่
- 4) แถบที่อยู่อาศัย
- 5) ประเภทของวัสดุที่นำมาปลูกสร้างที่อยู่อาศัย เช่น บ้านคอนกรีตนั้นจะได้รับรังสีมากกว่าบ้านไม้
- 6) ระบบความอบอุ่นและระบบการถ่ายเทอากาศภายในบ้าน

2.2 การสลายของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Decay) [20]

การสลายของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive decay) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสแบบเกิดขึ้นเอง ซึ่งการสลายอาจอยู่ในรูปแบบของการปลดปล่อยรังสีแอลฟา บีตา หรือแกมมาในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง หรืออาจมากกว่าหนึ่งรูปแบบพร้อม ๆ กัน

ถ้า N คือจำนวนอะตอมของกัมมันตรังสี และ $-\frac{dN}{dt}$ คือ อัตราการสลายที่เวลา t ใด ๆ

โดยเครื่องหมายลบแสดงการเปลี่ยนแปลงในทางลดลงของจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.1)$$

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

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (2.3)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (2.4)$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

จะได้

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น $t=0$, N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ , t คือ ระยะเวลาของการสลาย และ λ คือ ค่าคงตัวของการสลาย (decay constant) ซึ่งเท่ากับโอกาสของการสลายของนิวเคลียสต่อ s

2.3 ครึ่งชีวิต (Half life)

ครึ่งชีวิต (Half life), $t_{\frac{1}{2}}$ หมายถึง ระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลาย แล้วเหลือปริมาณเพียงครึ่งหนึ่งของเดิม จากสมการ (2.6)

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

เมื่อเวลา $t = t_{\frac{1}{2}}$ จะได้

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \quad (2.8)$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$-0.693 = -\lambda t_{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.11)$$

2.4 กัมมันตภาพ (Activity), A

กัมมันตภาพ (Activity), A ของธาตุกัมมันตรังสี หมายถึง อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีหรือจำนวนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายต่อหน่วยเวลา หน่วยของกัมมันตภาพ คือ เบ็กเกอร์เรล (Becquerel), Bq ซึ่ง 1 Bq หมายถึง การสลาย 1 ครั้งต่อวินาที (disintegration per sec), dps แต่หน่วยของกัมมันตภาพที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ คูรี (Curie), Ci ซึ่งกำหนดจากการสลายของ ^{226}Ra หนัก 1 g โดยมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} dps กัมมันตภาพเป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A \propto N$$

$$A = \lambda N \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.12) เมื่อคูณตลอดด้วย λ จะได้

$$\lambda A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

ดังนั้น

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

เมื่อ A_0 คือ กัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น $t=0$, A คือ กัมมันตภาพที่เวลา t ใดๆ และ t คือ ระยะเวลาของการสลาย

อัตราการสลายหรือกัมมันตรังสี (Activity), A ของการสลาย นิยมใช้เป็นหน่วย “คูรี (Curie)” เขียนย่อเป็น Ci

กัมมันตภาพ 1 Ci หมายถึง สารกัมมันตรังสีที่มีการสลาย 3.7×10^{10} dps หรือครั้งต่อวินาที ดังนี้

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

ซึ่งเท่ากับอัตราการสลายของเรเดียม-226 ปริมาณ 1 g หน่วยย่อยของ Ci คือ

$$1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

ในปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้หน่วย Bq แทน dps โดยที่

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

และในหน่วยเอสไอนิยมเขียนหน่วย dps เป็น s^{-1} อย่างไรก็ตามหน่วย Ci ยังเป็นที่ใช้กันแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน ในบางครั้งค่ากัมมันตภาพรังสี จะบอกเป็นกัมมันตภาพต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตร เช่น Ci/g หรือ $\mu\text{Ci/ml}$ เป็นต้น ซึ่งเราเรียกว่า "กัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (Specific activity)"

2.5. การสลายให้แอลฟา (Alpha Decay) [1]

การสลายโดยการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาเป็นการสลายชนิดหนึ่งที่พบบ่อยในธรรมชาติโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับธาตุหนักที่ไม่เสถียร

อนุภาคแอลฟาประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว นิวเคลียสที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟานั้นเลขมวลจะลดลงไป 4 หน่วย ดังสมการตัวอย่าง



หรือ



ถึงแม้ว่าพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการสลายของเรดอน-222 จะมีค่า 5.58 MeV แต่ว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคจะมีค่าเท่ากับ 5.48 MeV เท่านั้น พลังงานที่เหลือ 0.10 MeV นั้นได้จ่ายให้กับ ${}^{218}\text{Po}$ ถ้าไม่คำนึงถึงสัมพัทธภาพแล้วค่าพลังงานของนิวเคลียสที่กระเด็นกลับ K_d สามารถคำนวณได้จากกฎการคงตัวของพลังงานและโมเมนตัม พลังงานทั้งหมดที่ถ่ายทอดจากการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา

$$\begin{aligned} Q &= K_d + K_\alpha \\ &= \frac{1}{2}m_d v_d^2 + \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

เมื่อ Q คือ พลังงานที่เกิดจากการสลาย (Disintegration energy), K_d คือ พลังงานจลน์ของนิวเคลียสลูก และ K_α คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟา

เงื่อนไขของการสลายให้แอลฟา คือ มวลนิ่งของนิวเคลียสตั้งต้นจะต้องมากกว่าผลรวมของมวลนิ่งของนิวเคลียสลูกกับมวลนิ่งของอนุภาคแอลฟา และธาตุพ่อต้องเป็นนิวคลีไอดที่มีมวลมาก ๆ , $A \geq 200$

พลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟาหาได้จากกฎการอนุรักษ์ของโมเมนตัม คือ

$$m_\alpha v_\alpha = m_d v_d \quad (2.18)$$

และ

$$\begin{aligned} Q &= K_d + K_\alpha \\ &= \frac{1}{2} m_d v_d^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

เมื่อ V_d เป็นความเร็วของนิวเคลียสลูก และ V_α เป็นความเร็วของอนุภาคแอลฟา

2.6 ทอรอน (Thoron) หรือ Rn-220 [21]

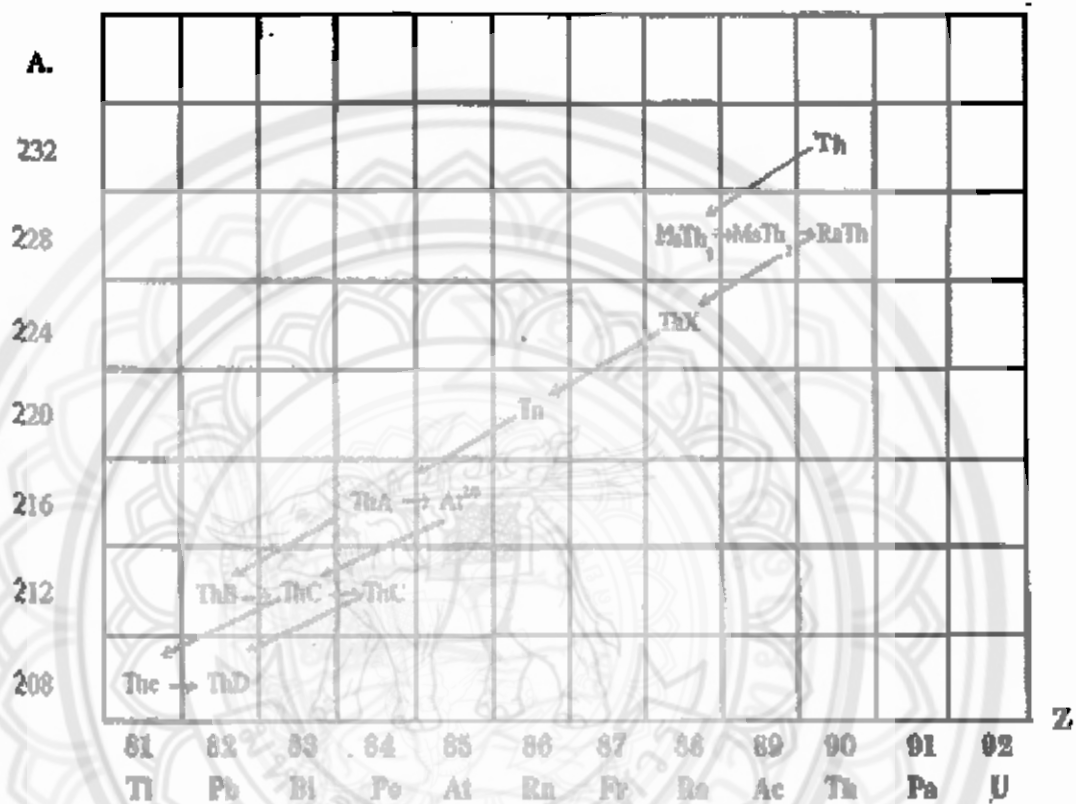
Rn-220 หรือที่เรียกว่า ทอรอน เป็นแก๊สที่มีอันตรายสูงที่ได้รับความสนใจอีกชนิดหนึ่งซึ่งค้นพบโดยรัทเทอร์ฟอร์ด แก๊สทอรอนเป็นไอโซโทปของแก๊สเรดอน, $^{220}_{86}\text{Rn}$, มีครึ่งชีวิต 55.6 s และสามารถฟุ้งกระจายไปในอากาศได้

การกำเนิดทอรอนในอนุกรมทอเรียม-232 และผลผลิตสุดท้ายคือ ตะกั่ว-208 ซึ่งเป็นธาตุที่เสถียร ดูได้จากอนุกรมการสลายของทอเรียมดังแสดงในตาราง 4 และ ภาพ 1

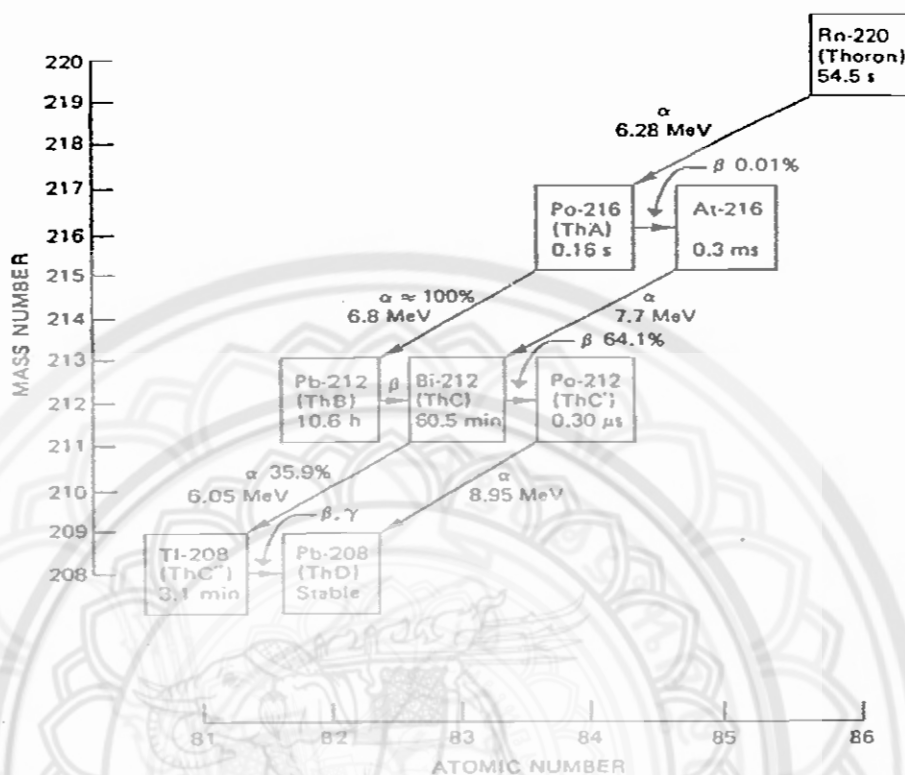
ตาราง 4 ลำดับการสลายของทอเรียม [22]

ไอโซโทป	ชื่อเรียก	อนุภาคที่ปลดปล่อย	ครึ่งชีวิต
$^{232}_{90}\text{Th}$		α	$1.40 \times 10^{10} \text{ y}$
$^{228}_{88}\text{Ra}$	(MsTh ₁)	β	5.76 y
$^{228}_{89}\text{Ac}$	(MsTh ₂)	β	6.13 h
$^{228}_{90}\text{Th}$	(RdTh)	α	1.91 y
$^{224}_{88}\text{Ra}$	(ThX)	α	3.66 d
$^{220}_{86}\text{Rn}$	(Thoron, Tn, Em)	α	55.6 s
$^{216}_{84}\text{Po}$	(ThA)	α	0.15 s
$^{212}_{82}\text{Pb}$	(ThB)	β	10.6 h
$^{212}_{83}\text{Bi}$	(ThC)	β	60.6 min
$^{212}_{84}\text{Po}$	(ThC')	α	$3.0 \times 10^{-7} \text{ s}$
$^{208}_{82}\text{Pb}$	(ThD, lead)	ไม่มี	เป็นผลผลิตสุดท้ายที่เสถียร

อนุกรมการสลายเป็นไปดังภาพ 1

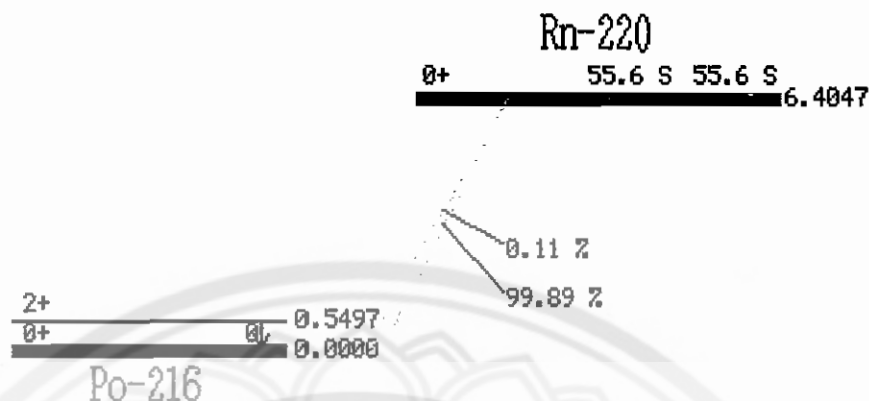


ภาพ 1 อนุกรมการสลายของทอเรียม [23]



ภาพ 2 การสลายตัวของทอรอน [24]

แก๊สทอรอนเป็นแก๊สที่มีอันตรายสูงชนิดหนึ่งซึ่งนักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจมาก และเริ่มมีการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทอรอน ในปี ค.ศ.1970 โดยพบว่าทอรอนเป็นสมาชิกในอนุกรมทอเรียมที่เป็นผลผลิตของทอเรียม-232 คล้ายกับเรดอนที่เป็นสมาชิกในอนุกรมยูเรเนียมที่เป็นผลผลิตของยูเรเนียม-238 ทอรอนมีสถานะเป็นแก๊สและไม่เสถียร ฟู่งกระจายอยู่ในอากาศทั่วไปและปะปนอยู่ตามหิน ดิน ทราวยที่อยู่ในวัสดุก่อสร้าง สามารถถ่ายเทไปในบรรยากาศได้ รวมทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคารที่หักกาศัย เมื่อทอรอนสลายตัวจะให้รังสีแอลฟา ที่มีพลังงาน 6.28 MeV โดยมีครึ่งชีวิตของการสลายที่ 55.6 s แล้วได้ผลิตผลเป็น พอลอเนียม-216 (Po-216) และพอลอเนียม-212 (Po-212) ซึ่งเป็นผลิตผลที่สำคัญต่อสุขภาพของมนุษย์ ร่างกายเราสามารถได้รับแก๊สทอรอนจากธรรมชาติได้โดยการหายใจ ทั้งสองนิวไคลด์นี้เมื่อสลายตัวให้รังสีแอลฟาแล้วจะทำให้เกิดการสะสมอยู่ในอวัยวะการหายใจคือเนื้อเยื่อปอด และสร้างความเสียหายแก่เนื้อเยื่อ ก่อให้เกิดโรคมะเร็งที่ปอดได้



ภาพ 3 แผนภาพระดับพลังงานการสลายตัวของทอรอน [25]

จากแผนภาพระดับพลังงานการสลายตัวของทอรอน ในภาพ 3 แสดงให้ทราบว่ารังสีแอลฟาของแก๊สทอรอนนั้น การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานไม่ได้ไปสู่สถานะพื้นเลยทีเดียว แต่ยังไปสู่ระดับสถานะกระตุ้นของนิวเคลียสลูก คือ ร้อยละ 99.89 ของทอรอน-220 ที่สลายตัวโดยตรงไปยังสถานะพื้นของ พอลอเนียม-216 โดยการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาพลังงาน 6.28 MeV ออกมา ในขณะที่อีกร้อยละ 0.11 ที่ปลดปล่อยรังสีแอลฟาออกมา แต่ไม่ได้ไปสู่สถานะพื้น แต่ยังคงอยู่ในสถานะกระตุ้นของ พอลอเนียม-216 ที่ระดับพลังงาน 0.5497 MeV และส่วนต่างของพลังงาน 0.597 MeV นี้จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปพลังงานอื่น ๆ [26]

ในปี ค.ศ.1990 ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อวัดความเข้มข้นแก๊สทอรอนในประเทศญี่ปุ่น พบว่าแก๊สทอรอนพบมากในบ้านที่มีการก่อสร้างด้วยไม้ ดินโคลนผสม ซึ่งมีความเสี่ยงจากแก๊สทอรอนในอาคารที่ปกอภัยค่อนข้างมาก

ในประเทศจีนจะพบทอเรียมในดิน ในวัสดุก่อสร้างบางพื้นที่ อีฐที่ทำจากพวกถ่านหรือทำจากดิน ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง สิ่งเหล่านี้จะให้แก๊สทอรอนออกมา

2.7 ทอรอนจากไส้ตะเกียงเจ้าพายุ [27]

ตะเกียงเจ้าพายุและตะเกียงแก๊ส เป็นที่นิยมใช้ตามชนบทหรือในที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าใช้ประจำ ไส้ตะเกียงเจ้าพายุนี้มีส่วนประกอบของสารกัมมันตรังสีอยู่ด้วยบางชนิด นั่นคือสารประกอบทอเรียมออกไซด์ที่ฉาบติดบนเส้นด้ายของไส้หลอดตะเกียง ซึ่งทำให้มีความคงทนต่อความร้อนและเปล่งแสงสว่างได้มากกว่าไส้หลอดธรรมดา ปริมาณกัมมันภาพในไส้หลอดดังกล่าวมีประมาณ 1-16 kBq และมีการปลดปล่อยแก๊สทอรอนออกมาด้วย

2.8 อุปกรณ์ตรวจนับรอยแอลฟา (Alpha-Track Detector) [28]

อุปกรณ์ตรวจนับรอยแอลฟา ใช้หลักการที่ว่าเมื่ออนุภาคแอลฟาชนกับวัสดุจำพวกพลาสติกบางชนิดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อพันธะทางเคมี (Chemical bonds) ซึ่งบริเวณที่เสียหายเหล่านี้สามารถตรวจสอบได้เมื่อทำการกัดขยายร่องรอยหลุมเล็ก ๆ ที่เกิดนั้นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น มีการค้นพบว่า อนุภาคแอลฟาทำให้แผ่นสารอินทรีย์เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate) และเซลลูโลสอะซิเตตบิวเรต (Cellulose acetate butyrate) เป็นรอยและพบลักษณะเช่นนี้ในพลาสติกอื่น ๆ เช่น บิสฟีนอล-เอ โพลีคาร์บอเนต (Bisphenol-A polycarbonate) และอัลลิลดิกลิคอลลคาร์บอเนต (Allyldiglycol carbonate) ในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เครื่องวัดชนิดนี้ทางการค้า ได้แก่ แผ่นฟิล์มเซลลูโลส ไนเตรต (LR-115), พลาสติกโพลีคาร์บอเนตหรือแผ่นมาโครฟอล (Makrofol), และพลาสติกโพลีแอลลิลไดกลีคอลล (Polyallyldiglycol carbonate) หรือมีตัวย่อ คือ PAD หรือ CR-39 เหมาะสำหรับการใช้งานภาคสนามโดยวางอุปกรณ์นี้ไว้ให้ได้รับแก๊สทอรอนเป็นเวลานาน ๆ เป็นเดือนเพื่อหาค่าเฉลี่ยของการวัดระยะยาว ในการนำวัสดุนี้ไปใช้วัดแก๊สทอรอนมีวิธีการสองแบบคือ แบบไม่เจาะรูด้านข้างและแบบเจาะด้านข้างแล้วพันด้วยกระดาษกรองแบบพิเศษ ในกรณีแรกตัววัดพลาสติกจะได้รับแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนไปพร้อม ๆ กัน ส่วนกรณีที่สองตัววัดพลาสติกจะได้รับแก๊สเรดอนและกระดาษกรองแบบพิเศษนั้นจะกรองลูกหลานของแก๊สทอรอน

2.9 การเกิดรอย (Track Formation Mechanism)

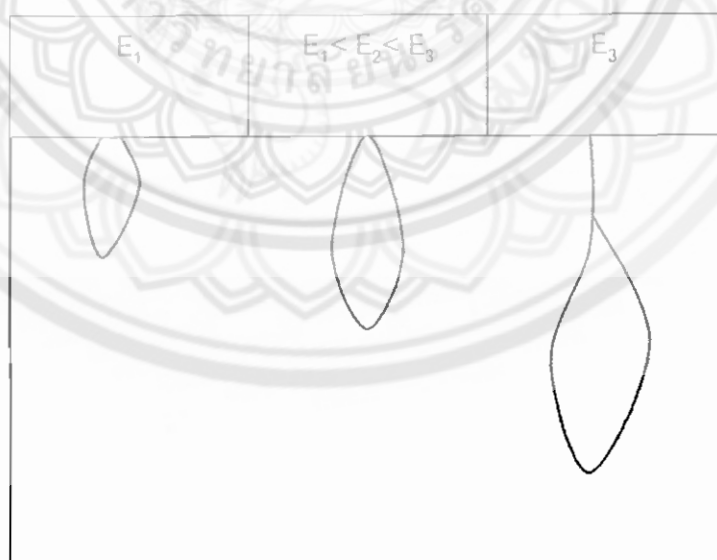
เมื่ออนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟาหรือนิวเคลียสของธาตุอื่นวิ่งผ่านเข้าไปในวัตถุของแข็งที่เป็นฉนวน มันจะคายพลังงานให้แก่อะตอมของวัตถุตามทางที่เคลื่อนที่ไป ทำให้โครงสร้างของวัตถุในบริเวณที่เกิดไอออนได้รับความเสียหายเกิดเป็นรอยขึ้นมา สำหรับวัตถุที่เป็นฉนวนรอยจะปรากฏอยู่อย่างถาวร แต่รอยนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียพลังงาน $\frac{dE}{dx}$ ของอนุภาคต่อวัตถุมีค่ามากกว่าอัตราการสูญเสียพลังงานวิกฤต (Critical energy loss) $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ เท่านั้น มิฉะนั้นจะไม่ปรากฏรอยเกิดขึ้น วัตถุแต่ละชนิดจะให้ค่า $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ ต่าง ๆ กัน วัตถุที่ให้ค่า $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ น้อย ๆ จะเกิดรอยกับนิวเคลียสไฮโดรเจน (Light nuclei) นักฟิสิกส์ได้อธิบายกลไกการเกิดรอยในวัสดุตัวกลางไว้ 2 ทฤษฎี คือ

2.9.1 ทฤษฎีไอออนเอกซ์ปlosionสปีก (Ion Explosion Spike) [29]

เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางจะทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Vibration) ซึ่งถ้าหากมีพลังงานเพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร (Ionization) เกิดประจุรอบ ๆ แนวที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน อะตอมที่มีประจุบวกเหล่านี้จะผลักรัน ทำให้อะตอมที่มีประจุเคลื่อนที่ไปเบียดกับอะตอมที่ถัดไปทำให้เกิดความเครียดขึ้น ความเครียดนี้จะแผ่กระจายไปยังอะตอมถัดไปทุกทิศทางทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดความสมดุลและกลายเป็นช่องว่างเกิดขึ้นในบริเวณนั้นจนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพ 2.4 ขบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้กับสารจำพวกที่เป็นฉนวน เช่น ไมกา และพลาสติก เป็นต้น แต่ถ้าเป็นตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดี เช่น โลหะ อะตอมที่กลายเป็นไอออนบวกดังกล่าวจะจับเอาอิเล็กตรอนจากบริเวณรอบ ๆ ทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นกลางกลับคืนสู่สภาพเดิมจึงไม่เกิดช่องว่าง

2.9.2 ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เทอร์มัลสปีก (Electronic Thermal Spike)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ จะคายพลังงานให้กับวัตถุตัวกลางที่วิ่งผ่านเกิดเป็นความร้อนขึ้นในกรณีที่ว่าตัวกลางเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายไปอย่างรวดเร็วทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างของตัวกลางในบริเวณนั้นถูกทำลายไปเป็นผลให้เกิดรอยขึ้น ดังภาพ 4



ภาพ 4 แสดงกลไกการเกิดรอย

จากทฤษฎีทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าการเกิดรอยบนวัตถุตัวกลางนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. คุณสมบัติของอนุภาคที่ประจุ เช่น ชนิดพลังงาน และประจุของอนุภาค
2. คุณสมบัติของตัวกลาง เช่น ชนิดของวัตถุตัวกลางเป็นฉนวนหรือตัวนำความร้อนหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมมากหรือน้อย เป็นต้น

ในการเกิดรอยนี้ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุ อนุภาคมีประจุต้องถ่ายเทพลังงานให้วัสดุตัวกลางมากกว่าค่าพลังงานวิกฤต (Critical energy) ของวัสดุชิ้นนั้นจึงจะปรากฏรอยขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดรอยหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดและระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุและชนิดของวัสดุที่ใช้

2.10 ขอบเขตและพลังงาน (Range and Energy)

อนุภาคแอลฟาเมื่อหลุดออกจากแหล่งกำเนิด จะเคลื่อนที่ไปด้วยพลังงานเริ่มต้นค่าหนึ่ง ถ้าอนุภาคมีพลังงานเริ่มต้นสูง การเคลื่อนที่ผ่านเครื่องกีดขวาง เช่น อะตอมหรือโมเลกุลของสิ่งแวดล้อมก็จะเคลื่อนที่ไปได้ระยะไกล ซึ่งเราเรียกว่า พิสัย (Range), R ซึ่งพิสัยหรือขอบเขตของแอลฟานี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานและชนิดของสิ่งกีดขวาง อนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจากนิวเคลียสของอะตอมของฮีเลียมประกอบด้วย โปรตอนสองตัวและนิวตรอนสองตัว ดังนั้นอนุภาคแอลฟาจึงมีประจุไฟฟ้าบวก โดยมีประจุเป็นสองเท่าและน้ำหนักอะตอมเป็นสี่เท่า อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ประมาณ $19,200 \text{ km/s}$ หรือประมาณ 1 ใน 15 เท่า ของความเร็วแสงในสุญญากาศ

เนื่องจากอนุภาคนี้นค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่น มันจึงไม่สามารถทะลุผ่านเนื้อวัสดุง่ายเหมือนอนุภาคอื่น ๆ แต่จะสามารถถูกกั้นให้หยุดได้ โดยใช้กระดาษ 1 ชั้น หรือ 2 ชั้น โดยปกติเคลื่อนที่ได้ไม่เกินกว่า 9 cm ในอากาศเมื่ออนุภาคแอลฟาชนอะตอมหรือโมเลกุลของวัตถุใดจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นสาเหตุให้เกิดไอออน

ในช่วงพลังงานต่ำ ๆ ที่ไม่ต้องคำนึงถึงช่วงสัมพันธ์ภาพ พลังงาน (E) ของอนุภาคแอลฟาจะสัมพันธ์กับความเร็วเริ่มต้น คือ

$$E = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ m เป็นมวลของอนุภาคแอลฟา ใช้หน่วยเป็นกรัม V_0 มีหน่วยเป็น cm/s และ V_0 สัมพันธ์กับพิสัยในอากาศ ดังสมการที่ 2.21 คือ

$$V_0^2 = 1.03 \times 10^{27} R \quad (2.21)$$

ซึ่งได้ขอบเขตจำกัดเมื่ออนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานต่ำในช่วงหนึ่งเท่านั้น คือ 4 ถึง 7 MeV ที่พลังงานต่ำกว่านี้และพลังงานสูงกว่านี้เราจะพบว่า $R \propto E^{\frac{3}{4}}$

เมื่ออนุภาคสูญเสียพลังงานของอนุภาคแอลฟาต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้นน้อย ๆ ในสารตัวกันเรียกว่า กำลังหยุดยั้ง (Stopping power, $-\frac{dE}{dx}$) อัตราส่วนระหว่างกำลังหยุดยั้งในอากาศต่อกำลังหยุดยั้งในของแข็งที่เป็นตัวกันเรียกว่า กำลังหยุดยั้งสัมพัทธ์ (relative stopping power) แต่ทั้งนี้อนุภาคแอลฟาต้องมีพลังงานช่วงเดียวกัน

สมการที่แสดงให้เห็นพิสัยของอนุภาคแอลฟาในตัวกันที่เป็นของแข็งโดยประมาณได้มาจากความสัมพันธ์แบรก-คลีแมน (Bragg-Kleeman Relation) ดังนี้

$$R_s = \left(3.2 \times 10^{-4} R A^{\frac{1}{2}} \right) / \rho \quad (2.22)$$

โดยที่ R_s คือ พิสัยในของแข็งที่มีความหนา ρ และมีเลขมวล A และมีค่าพิสัยในอากาศเท่ากับ R

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยในอากาศกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตที่นักชีววิทยาและนักวิทยาศาสตร์การแพทย์สนใจ ประมาณค่าคร่าว ๆ ได้ดังสมการ (2.23)

$$R_{air} \rho_{air} = R_{tissue} \rho_{tissue} \quad (2.23)$$

2.11 ทฤษฎีแทรค-เอทซ์ (Track Etched Theory) [30]

2.11.1 กลไกการเกิดรอยในผลึก (Ion explosion spike model)

อาศัยหลักการเกิดสนามไฟฟ้า เนื่องจากความไม่สมดุลของประจุตามแนวที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน คือ เมื่อประจุเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในตัวกลาง จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางซึ่งถ้าพลังงานมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกไปเกิดประจุบวกขึ้นตาม

ทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ ประจุเหล่านี้จะออกแรงผลักซึ่งกันและกัน ทำให้ต้องจัดเรียงอะตอมใหม่ เพื่อให้เกิดสมดุล จึงมีช่องว่างเกิดขึ้นหรือเกิดรอยอนุภาคนั้นเอง

2.11.2 กลไกการเกิดรอยอนุภาคในโพลิเมอร์

กระบวนการที่สำคัญในการทำให้เกิดรอยอนุภาคในโพลิเมอร์ คือ กระบวนการไอออนไนซ์ โดยการเกิดรอยอนุภาคในโพลิเมอรรันเกิดลักษณะโครงสร้างของโพลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ที่เกิดจากการจับตัวกันของไฮโดรคาร์บอนเป็นสายยาว เมื่อมีอนุภาคที่มีพลังงานวิ่งเข้าไปในโพลิเมอร์จะเกิดการไอออนไนซ์เชนทำให้สายโซ่ของพันธะถูกตัดขาดออกจากกันและทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วย ดังนั้นทำให้ค่าอัตราการขยายรอยในบริเวณที่เกิดรอยอนุภาค (V_r) มีค่าสูงกว่าอัตราการขยายรอยที่บริเวณไม่เกิดรอยอนุภาค (V_G)

2.11.3 กลไกการกัดขยายรอย

เนื่องจากรอยอนุภาคที่ได้จากการบันทึกในวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นมีขนาดเล็ก (<50 Å) จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อทำการขยายขนาดรอยอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งในปี ค.ศ.1962 ไพรซ์และวอลท์เกอร์ได้ค้นพบว่ารอยอนุภาคสามารถขยายใหญ่ขึ้นได้โดยใช้กระบวนการกัดขยายขนาดรอยด้วยสารเคมี

การกัดขยายรอยขนาดรอยบนแผ่นพลาสติกขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิด คือ

1. อัตราการกัดผิว (Track etch rate), V_r , คือ อัตราการละลายของฟิล์มในทิศทางของรอยอนุภาคนิวเคลียร์ โดยคำนวณจากความชันของกราฟที่ระบุข้อมูลระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอย

2. อัตราการกัดผิวเชิงปริมาตร (Bulk etch rate), V_G , คือ อัตราการละลายของฟิล์มในบริเวณที่ไม่เกิดอนุภาคนิวเคลียร์โดยคำนวณได้จากความชันของกราฟที่ระบุข้อมูลระหว่างความยาวของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอย

ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร V_r และ V_G จะสามารถบอกรูปร่างของรอยที่เกิดขึ้นภายหลังการกัดขยายรอยได้ โดยจะบอกเป็นค่าตอบสนองการกัดผิว (Etching respond) (V_r/V_G) ดังนี้

ถ้า (V_r/V_G) มีค่ามาก หมายถึง รอยอนุภาคจะเป็นรูปกรวยแคบและยาว หรือ

(V_r/V_G) มีค่าต่ำสุด คือเท่ากับ 1 หมายถึง ไม่มีการเกิดรอยอนุภาคขึ้นบนผิวของแผ่นฟิล์ม

ถ้านำเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอยมาเกี่ยวข้องกับตัวแปร V_r และ V_G จะสามารถบอกความสัมพันธ์ได้อีกเช่นกัน คือ

$V_r t$ หมายถึง ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกตามแนวรอยอนุภาค

V_{Gt} หมายถึง ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกบริเวณผิวทั่วไป
 ค่า V_{Gt} และ V_{Gt} จะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติเฉพาะของโพลิเมอร์แต่ละชนิดได้

2.12 ลักษณะของรอยอนุภาค

การเกิดรอยของอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยนั้นจะมีความลึกของรอยอยู่ในระดับที่แตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของอนุภาคที่พุ่งเข้าชนวัสดุบันทึกรอยนั้น ถ้าอนุภาคที่ชนมีพลังงานจลน์มาก อัตราการสูญเสียพลังงานให้ตัวกลางก็จะน้อย แต่ถ้าอนุภาคมีพลังงานจลน์น้อย อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ให้ตัวกลางก็จะมาก เช่น ถ้าใช้วัสดุตัวกลางเป็นเซลลูโลสในเตรต อนุภาคที่ทำให้เกิดรอยบนแผ่นตัวกลางชนิดนี้ได้จะมีพลังงานจลน์ในช่วงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.55 MeV แต่ถ้าอนุภาคโปรตอนมีพลังงานมากกว่า 0.55 MeV พุ่งเข้าชนตัวกลางจะต้องรอให้โปรตอนนั้นเสียพลังงานบางส่วนก่อนจนกระทั่งเหลือ 0.55 MeV จึงจะทำให้เกิดรอยขึ้นบนตัวกลาง ดังนั้นรอยที่เกิดขึ้นจึงอยู่ลึกลงไปอีกในแผ่นวัสดุตัวกลาง ดังภาพ 5

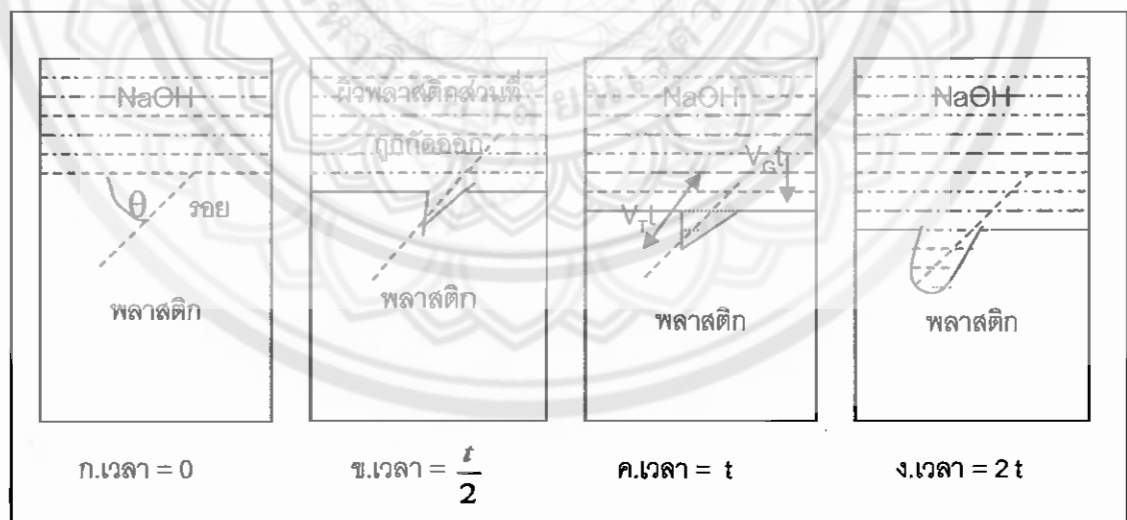


ภาพ 5 แสดงการเกิดรอยของอนุภาคบนวัสดุเมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ต่าง ๆ กัน

1.3782566 02 สำนักหอสมุด

รอยของอนุภาคที่ปรากฏในวัตถุจะมองเห็นได้ต่อเนื่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แต่มีวิธีที่จะขยายรอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา ทำได้โดยนำวัตถุนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิดว่าเหมาะสม เรียกว่า นำไปกัดฉีก (Etching) โดยเงื่อนไขของการทำปฏิกิริยาจะมีตัวประกอบ 3 ตัว คือ

- สำหรับวัตถุที่เป็นแผ่นพลาสติก เมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) NaOH ซึ่งเรียกว่า ขบวนการกัดผิวและผิวพลาสติกที่ถูกกัดออกขณะทำปฏิกิริยาจะเป็นไปดังภาพ 6



ภาพ 6 แสดงลักษณะของผิวพลาสติคที่ถูกกัดขณะทำปฏิกิริยากับ NaOH

จากภาพ 6 ผิวนวพลาสติกบริเวณที่ไม่ได้ถูกทำให้เสียหายเป็นรอยจะถูกกัดออกโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยอัตราการกัดออก V_G และผิวนวพลาสติกบริเวณที่เสียหายเป็นรอยจะถูกกัดออกตามแนวรอยด้วยอัตราการกัดออก V_r ถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยานานจนผิวนวพลาสติกถูกกัดออกจนถึงจุดสิ้นสุดของรอยแล้ว ปลายของรอยจะทุ้งรูป ง.

ดังนั้น หลังจากการทำปฏิกิริยาแล้ว ความยาว (Length) ของรอยที่มองเห็นส่วนหนึ่งจะหายไปโดยติดไปกับผิวนวของแผ่นพลาสติกที่ถูกกัดออกไป ความยาวส่วนที่หายไป ΔL จะเป็นไปตามสูตร ดังนี้

$$\Delta L = V_G t \csc \theta \quad (2.24)$$

เมื่อ t คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา และ θ คือ มุมที่อนุภาคตกกระทบบนแผ่นพลาสติก

มุมที่อนุภาคตกกระทบแผ่นพลาสติกจะต้องมากกว่ามุมวิกฤต (Critical angle), θ_c ไม่เช่นนั้นหลังจากกัดผิวแล้วจะไม่เห็นรอยอันเนื่องมาจากมุมตกกระทบน้อยเกินไปทำให้อนุภาคจึงกระเจิง (scattering) ออกไป แทนที่จะวิ่งเข้าไปในพลาสติกหรือทางที่อนุภาควิ่งผ่านอยู่ต้นเกือบขนานกับพลาสติกจึงหลุดติดไปกับส่วนหน้าของผิวแก้วที่ถูกกัดออกไประหว่างทำปฏิกิริยาเคมีหรือรอยที่เกิดขึ้นต้นจางจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้

2.14 สูตรค่าตัวประกอบการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration Factor)

ในการปรับเทียบมาตรฐานครั้งนี้จะหาจากสมการ (2.25), (2.26) ซึ่งเป็นสมการของจำนวนรอยเรดอนบนแผ่นพลาสติก CR-39 และสมการ (2.27), (2.28) บนซึ่งเป็นสมการของจำนวนรอยทอเรดอนบนแผ่นพลาสติก CR-39

การเปิดรับเรดอน

$$A_{Rn} = Q_{Rn} CF_{Rn1} T_1 + Q_{Tn} CF_{Tn1} T_1 + B_1 \quad (2.25)$$

$$A_{Tn} = Q_{Rn} CF_{Rn2} T_1 + Q_{Tn} CF_{Tn2} T_1 + B_2 \quad (2.26)$$

การเปิดรับทอเรดอน

$$B_{Rn} = Q'_{Rn} CF_{Rn2} T_2 + Q'_{Tn} CF_{Tn2} T_2 + B_3 \quad (2.27)$$

$$B_{Tn} = Q'_{Rn} CF_{Rn2} T_2 + Q'_{Tn} CF_{Tn2} T_2 + B_4 \quad (2.28)$$

เมื่อ A_{Rn} คือ จำนวนรอยที่เกิดจากเรดอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น tracks/cm^2

A_{Tn} คือ จำนวนรอยที่เกิดจากทอรอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น tracks/cm^2

B_{Rn} คือ จำนวนรอยที่เกิดจากเรดอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น tracks/cm^2

B_{Tn} คือ จำนวนรอยที่เกิดจากทอรอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น tracks/cm^2

Q_{Rn} คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานเรดอนมีหน่วยเป็น Bq/m^3

Q_{Tn} คือ ความเข้มข้นแก๊สทอรอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานทอรอนมีหน่วยเป็น Bq/m^3

Q'_{Rn} คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานเรดอนมีหน่วยเป็น Bq/m^3

Q'_{Tn} คือ ความเข้มข้นแก๊สทอรอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานทอรอนมีหน่วยเป็น Bq/m^3

CF_{Rn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดเรดอน มีหน่วยเป็น $\text{tracks/cm}^2/\text{Bq/m}^3\text{h}^{-1}$

CF_{Tn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดทอรอน มีหน่วยเป็น $\text{tracks/cm}^2/\text{Bq/m}^3\text{h}^{-1}$

T คือ เวลาที่ใช้ในการรับรังสี มีหน่วยเป็น h

B คือ ค่าเบคกราวด์ของ CR-39 มีหน่วยเป็น tracks/cm^2

เมื่อกำหนดให้ CF_{Rn1} , CF_{Tn1} , CF_{Rn2} และ CF_{Tn2} เป็นตัวแปร คือ C, D, E และ F ตามลำดับ จะได้สมการ คือ

สมการเมื่อเปิดรับเรดอน

$$A_{Rn} = Q_{Rn}CT_1 + Q_{Tn}DT_1 + B_1 \quad (2.29)$$

$$A_{Tn} = Q_{Rn}ET_1 + Q_{Tn}FT_1 + B_2 \quad (2.30)$$

สมการเมื่อเปิดรับทอรอน

$$B_{Rn} = Q'_{Rn}ET_2 + Q'_{Tn}FT_2 + B_3 \quad (2.31)$$

$$B_{Tn} = Q_{Rn}ET_2 + Q'_{Tn}FT_2 + B_4 \quad (2.32)$$

จาก (2.29) และ (2.30) ย้ายข้างสมการจะได้

$$\frac{A_{Rn} - B_1}{T_1} = Q_{Rn}C + Q_{Tn}D \quad (2.33)$$

$$\frac{A_{Tn} - B_2}{T_1} = Q_{Rn}E + Q_{Tn}F \quad (2.34)$$

$$\frac{B_{Rn} - B_3}{T_2} = Q'_{Rn}C + Q'_{Tn}D \quad (2.35)$$

$$\frac{B_{Tn} - B_4}{T_2} = Q'_{Rn}E + Q'_{Tn}F \quad (2.36)$$

กำหนดให้

$$K_1 = \frac{(A_{Rn} - B_1)}{T_1} \quad (2.37)$$

$$K_2 = \frac{(A_{Tn} - B_2)}{T_1} \quad (2.38)$$

$$K_3 = \frac{(B_{Rn} - B_3)}{T_2} \quad (2.39)$$

$$K_4 = \frac{(B_{Tn} - B_4)}{T_2} \quad (2.40)$$

ตามลำดับ จะได้สมการ

$$K_1 = Q_{Rn}C + Q_{Tn}D \quad (2.41)$$

$$K_2 = Q_{Rn}E + Q_{Tn}F \quad (2.42)$$

$$K_3 = Q'_{Rn}C + Q'_{Tn}D \quad (2.43)$$

$$K_4 = Q'_{Rn}E + Q'_{Tn}F \quad (2.44)$$

และ

$$C = CF_{Rn1} \quad (2.45)$$

$$D = CF_{Tn1} \quad (2.46)$$

$$E = CF_{Rn2} \quad (2.47)$$

$$F = CF_{Tn2} \quad (2.48)$$

ใช้กฎของคราเมอร์ (Cramer's Rule) ในการแก้สมการจากสมการ (2.41) คูณด้วย Q'_{Tn} และ สมการ (2.43) คูณด้วย Q_{Tn} จะได้

$$Q_{Rn}Q'_{Tn}C + Q_{Tn}Q'_{Tn}D = K_1Q'_{Tn} \quad (2.49)$$

$$Q'_{Rn}Q_{Tn}C + Q'_{Tn}Q_{Tn}D = K_3Q_{Tn} \quad (2.50)$$

สมการ (2.49) และ (2.50) จะได้

$$C = \frac{K_1Q'_{Tn} - K_3Q_{Tn}}{Q_{Rn}Q'_{Tn} - Q'_{Rn}Q_{Tn}} \quad (2.51)$$

และทำนองเดียวกันจะได้

$$D = \frac{K_3Q_{Rn} - K_1Q'_{Rn}}{Q_{Rn}Q'_{Tn} - Q'_{Rn}Q_{Tn}} \quad (2.52)$$

จากสมการ (2.42) คูณด้วย Q'_{Tn} และสมการ (2.44) คูณด้วย Q_{Tn} จะได้

$$Q_{Rn}Q'_{Tn}E + Q_{Tn}Q'_{Tn}F = K_2Q'_{Tn} \quad (2.53)$$

$$Q'_{Rn}Q_{Tn}E + Q'_{Tn}Q_{Tn}F = K_4Q_{Tn} \quad (2.54)$$

สมการ (2.53) และ (2.54) ได้

$$E = \frac{K_2Q'_{Tn} - K_4Q_{Tn}}{Q_{Rn}Q'_{Tn} - Q'_{Rn}Q_{Tn}} \quad (2.55)$$

และทำนองเดียวกันจะได้สมการ

$$F = \frac{K_4Q_{Rn} - K_2Q'_{Rn}}{Q_{Rn}Q'_{Tn} - Q'_{Rn}Q_{Tn}} \quad (2.56)$$

ดังนั้น จากสมการ (2.53), (2.54), (2.55), (2.56) จะได้สมการ

$$CF_{Rn1} = \frac{K_1 Q'_{Tn} - K_3 Q_{Tn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2.57)$$

$$CF_{Tn1} = \frac{K_3 Q_{Rn} - K_1 Q'_{Rn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2.58)$$

และทำนองเดียวกัน จะได้

$$CF_{Rn2} = \frac{K_2 Q'_{Tn} - K_4 Q_{Tn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2.59)$$

$$CF_{Tn2} = \frac{K_4 Q_{Rn} - K_2 Q'_{Rn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2.60)$$

หาค่า Q_{Rn}, Q_{Tn}, Q'_{Rn} และ Q'_{Tn} จากสมการ (2.41) (2.42) (2.43) และ (2.44) ใช้กฎของคราเมอร์อีกครั้งแต่เปลี่ยนคู่สมการเป็น (2.41) กับ (2.42) และ สมการ (2.43) กับ (2.44) จาก (2.41) คูณด้วย F และสมการ (2.42) คูณด้วย D เมื่อ F และ D เป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้น

$$CFQ_{Rn} + DFQ_{Tn} = K_1 F \quad (2.61)$$

$$EDQ_{Rn} + DFQ_{Tn} = K_2 D \quad (2.62)$$

จากสมการ (2.61) และ (2.62) จะได้

$$\begin{aligned} CFQ_{Rn} - EDQ_{Rn} &= K_1 F - K_2 D \\ Q_{Rn} (CF - ED) &= K_1 F - K_2 D \\ \therefore Q_{Rn} &= \frac{K_1 F - K_2 D}{CF - ED} \end{aligned} \quad (2.63)$$

ทำนองเดียวกัน

$$\therefore Q_{Tn} = \frac{K_2 C - K_1 E}{CF - ED} \quad (2.64)$$

จาก (2.43) คูณด้วย F และสมการ (2.44) คูณด้วย D เมื่อ F และ D เป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้น

$$CFQ'_{Rn} + DFQ'_{Tn} = K_3 F \quad (2.65)$$

$$EDQ'_{Rn} + DFQ'_{Tn} = K_4 D \quad (2.66)$$

จากสมการ (2.65) และ (2.66) จะได้

$$\begin{aligned} CFQ'_{Rn} - EDQ'_{Rn} &= K_3 F - K_4 D \\ Q'_{Rn} (CF - ED) &= K_3 F - K_4 D \\ \therefore Q'_{Rn} &= \frac{K_3 F - K_4 D}{CF - ED} \end{aligned} \quad (2.67)$$

ทำนองเดียวกัน

$$\therefore Q'_{Tn} = \frac{K_4 C - K_3 E}{CF - ED} \quad (2.68)$$

ดังนั้น สมการหาค่าทอรองจากการนำ CR – 39 วางในอาคารบ้านเรือน คือ

$$\therefore Q_{Tn} = \frac{K_2 C - K_1 E}{CF - ED} \quad (2.64)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.64) ลงในสมการ (2.65) จะได้สมการ

$$\therefore Q_{Tn} = \frac{\left[\left(\frac{A_{Tn} - B_2}{T_2} \right) (CF_{Rn1}) - \left(\frac{(A_{Rn} - B_1)}{T_1} \right) (CF_{Rn2}) \right]}{[(CF_{Rn1})(CF_{Tn2})] - [(CF_{Rn2})(CF_{Tn1})]} \quad (2.69)$$

สมการ (2.69) ที่ได้นี้ เป็นสมการที่นำไปใช้ในการหาค่าของความเข้มข้นของทอรอน

2.15 อันตรายจากรังสี [31]

อันตรายจากรังสีมี 4 แบบ คือ

2.15.1 ได้รับปริมาณรังสีทั้งตัวโดยทยอยรับทีละน้อยอย่างต่อเนื่องกัน กลุ่มคนที่ได้รับรังสีประเภทนี้ คือ บุคลากรที่ทำงานด้านรังสี ดังนั้นกลุ่มบุคคลดังกล่าวจะต้องทำงานภายใต้กฎระเบียบและการกำกับดูแลอย่างเคร่งครัด ต้องรู้จักหลักในการป้องกันอันตรายจากรังสี และรู้วิธีการตรวจวัด เพื่อให้ได้รับรังสีอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิดอันตรายทั้งต่อตนเองและพันธุกรรม กฎระเบียบต่าง ๆ เหล่านี้เป็นมาตรฐานสากลกำหนดโดยองค์การระหว่างประเทศ หลายองค์การร่วมกัน ได้แก่ ICPR, IAEA และ WHO โดยทั่ว ๆ ไปบุคลากรในกลุ่มนี้จะถูกกำหนดให้ได้รับรังสีโดยใช้หลักการของ ALARA (As low as reasonably achievable) ทั้งนี้เพราะในแต่ละประเทศจะมีความแตกต่างกันในด้านกำลังคน เทคโนโลยีและเศรษฐกิจ ซึ่งประเทศที่ร่ำรวยแล้วจะมีเทคโนโลยีสูงกว่า อาจกำหนดขีดจำกัดและการได้รับปริมาณรังสีไว้ต่ำกว่าประเทศที่กำลังพัฒนา แต่ทั้งนี้ทั่วร่างกายต้องได้รับรังสีไม่เกิน 5 rem หรือ 50 mSv/y

2.15.2 ได้รับปริมาณรังสีสูงทั่วตัวแบบเฉียบพลัน ได้แก่ การได้รับรังสีจากกรณีอุบัติเหตุทางรังสี (ทั้งนี้เพราะโดยการปฏิบัติงานปกติ จะไม่มีโอกาสเกิดอันตรายประเภทนี้) ตัวอย่างเช่น จากการที่หัวโคบอลต์ 60 ถูกขโมยเพื่อนำเอาตะกั่วที่หุ้มหัวเครื่องและแคปซูลไปขาย หรือการระเบิดของโรงงานพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศรัสเซียหรือการทิ้งระเบิดนิวเคลียร์ในประเทศญี่ปุ่นโดยสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ผู้ป่วยที่ได้รับรังสีรูปแบบนี้จะเป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 ได้รับรังสีไม่เกิน 400 cGy อวัยวะสำคัญที่มีผลกระทบ คือ ไชกระดูกทั่วร่างกาย ดังนั้น จะก่อให้เกิดกลุ่มอาการทางโลหิตวิทยา (Hematological syndrome) ผู้ที่ได้รับรังสีจะมีอาการ อ่อนเพลีย ผอมร่าง การทำงานของไขกระดูกลดน้อยลง ความดันโลหิตต่ำ และมีไข้จากการติดเชื้อได้ง่าย การตรวจวินิจฉัยจากประวัติดังกล่าวและการตรวจทางโลหิตวิทยาทั้งนี้ เพราะมีการต่ำลงของเม็ดเลือดขาว เม็ดเลือดแดง เกล็ดเลือด ความรุนแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ สภาพร่างกาย สภาพไขกระดูกก่อนได้รับรังสีของบุคคล การรักษาผู้ป่วยจะเป็นการรักษาตามอาการและการประคับประคอง เช่น ให้ผู้ป่วยพักผ่อน ให้เลือด ให้สารอาหาร ให้

ยาปฏิชีวนะ เป็นต้น และถ้ามีข้อบ่งชี้ก็อาจให้การรักษาโดยการปลูกถ่ายไขกระดูกผู้ป่วยในกลุ่มนี้ ถ้าได้รับรังสีน้อยกว่า 300 cGy มักจะกลับคืนภาวะปกติภายใน 3-4 สัปดาห์ แต่ถ้าได้ปริมาณรังสีตั้งแต่ 300 cGy ขึ้นไป มีโอกาสเสียชีวิตได้ประมาณร้อยละ 50

กลุ่มที่ 2 ได้รับปริมาณรังสีมากกว่า 400 cGy แต่น้อยกว่า 10,000 cGy ผู้ป่วยเกิดกลุ่มอาการจากความผิดปกติของอวัยวะในระบบทางเดินอาหาร เรียกว่า gastrointestinal syndrome ผู้ป่วยกลุ่มนี้นอกจากจะมีอาการจากระบบทางเดินอาหารแล้วยังมีอาการทางระบบโลหิตวิทยาาร่วมด้วย โดยมีอาการท้องเสียอย่างรุนแรงและไม่สามารถบรรเทาได้ด้วยการรักษา ในปัจจุบันร่วมกับการติดเชื้ออย่างรุนแรงผู้ป่วยทุกคนจะเสียชีวิตภายใน 2 สัปดาห์ การรักษาผู้ป่วยโดยการรักษาตามอาการและการประคับประคอง เป็นต้น แต่คนไข้เสียชีวิตทุกคน

กลุ่มที่ 3 ได้รับรังสีตั้งแต่ 10,000 cGy ขึ้นไป ผู้ป่วยจะเสียชีวิตอย่างรวดเร็วอาจทันที โดยการสูญเสียการทำงานของสมองจึงเรียกกลุ่มนี้ว่า CNS syndrome คนไข้สูญเสียการทำงานของกล้ามเนื้อ ระบบหายใจ ชัก สูญเสียความรู้สึกตัว หหมดสติและถึงแก่ชีวิต การรักษาพยาบาลเป็นการรักษาตามอาการและประคับประคอง คนไข้จะเสียชีวิตทุกคนเช่นกัน

2.15.3 ได้รับรังสีปริมาณน้อยเฉพาะที่แต่ในระยะเวลาจำกัดกลุ่มผู้ได้รับรังสีระดับนี้เป็นผู้ป่วยซึ่งใช้รังสีรักษาโรคอื่นไม่ใช่โรคมะเร็ง ตัวอย่างเช่น การฉายรังสีรักษาโรคปอดแดงในเด็ก การฉายรังสีป้องกันการเกิดแผลเป็น การรักษาโรคคอพอกเป็นพิษด้วยน้ำแร่ เป็นต้น การรักษาวิธีนี้เกิดผลข้างเคียงน้อยที่สุดเพราะใช้ปริมาณรังสีน้อยมากแต่ในระยะเวลายาวนานมาก (มักเกิน 5 y ขึ้นไป) อาจเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งในบริเวณที่ได้รับรังสีได้ โอกาสเกิดโรคมะเร็งจากสาเหตุนี้น้อยมากจนไม่สามารถประเมินเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ เพียงแต่ให้หลักการพยากรณ์ว่าอาจเป็นสาเหตุได้เท่านั้น

2.15.4 ได้รับรังสีปริมาณสูงเฉพาะที่แต่ในระยะเวลาจำกัดซึ่ง ได้แก่ การให้รังสีรักษาในโรคมะเร็งด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน สามารถกำหนดขอบเขตของลำรังสีและวิธีการให้รังสีได้สามารถพยากรณ์ความทนได้ของอวัยวะต่อรังสีและแพทย์ทราบถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่จะทำ คนไข้ไวต่อรังสีเพิ่มขึ้น ดังนั้น การให้รังสีรักษาจึงมีผลข้างเคียงอยู่ในเกณฑ์ที่คนไข้ยอมรับได้และยังมีคุณภาพชีวิต ผลข้างเคียงจากรังสีจะปรากฏในรูปแบบของการอักเสบของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเฉพาะบริเวณที่ได้รับรังสีเท่านั้น ดังนั้น อาการของคนไข้จึงเป็นการอักเสบเฉพาะที่ ตัวอย่างเช่น ถ้าฉายรังสีบริเวณช่องปาก จะมีการอักเสบของเยื่อช่องปาก คนไข้จะมีอาการเจ็บในปากและลำคอ อาการจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเนื้อที่และปริมาตรการฉายรังสี ปริมาณรังสีและอายุของผู้ป่วย สภาพร่างกายและอื่น ๆ ผลข้างเคียงจากการรักษาด้วยรังสีวิธีนี้คือ การรักษาตามอาการ [32]

และการปรับประคองในผู้ป่วย ซึ่งแพทย์พยากรณ์ว่าอาจมีผลข้างเคียงจากการฉายรังสีสูงเกินไป แพทย์จะพิจารณาลดปริมาณรังสีลง แต่จะเปลี่ยนมาเป็นการให้รังสีร่วมกับวิธีการรักษาอื่น ๆ เช่น การผ่าตัด ยาสารเคมี หรือฮอร์โมน เป็นต้น

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qiuju GUO et al. [33] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแก๊สทอรอนจากสี่พื้นที่ในประเทศจีนคือ Beijing, Guangzhou, Zhuhai and Pingliang โดยวิธีการอ่านรอย (Track) จาก CR-39 ที่ติดตั้งเป็นเวลา 3 เดือน

ผลที่ได้พบแก๊สทอรอนสูงคือ Guangzhou, Zhuhai ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยที่ทำให้แก๊สเรดอน มีปริมาณสูงโดยกำหนดจากลักษณะชนิดของบ้าน 3 ลักษณะ คือ บ้านที่ทำจากอิฐ คอนกรีต และ ทำจากอิฐที่ทำจากถ่านหิน ทั้งนี้อาจมีเรื่องของฤดูกาล ลักษณะการก่อสร้างของอาคารที่พักอาศัย หรือความชื้นของอากาศด้วย

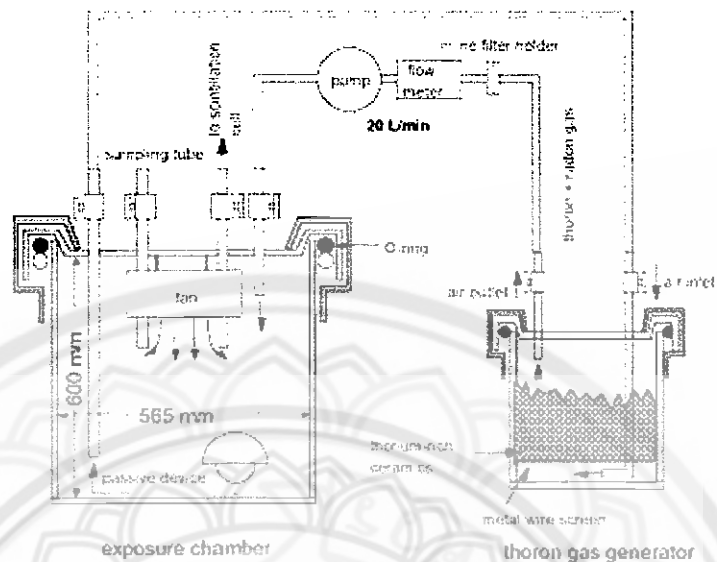
K.Kozak et al. [34] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแก๊สทอรอน (Rn-220) ในธรรมชาติที่มีส่วน คล้ายกับแก๊สเรดอน (Rn-222) เนื่องจากการสลายในช่วงเวลาที่สั้นมาก แต่อย่างไรก็ตาม ผลกระทบในพื้นที่ที่มีแก๊สทอรอนสูงนั้นมีความสำคัญมาก

วิธีการวัดแก๊สทอรอนโดยทั่วไปจะได้ค่าที่น้อย จึงได้มีการวัดที่เป็นแบบรวดเร็วยิ่งขึ้น คือ วิธี Two ionization chambers AlphaGUARD PQ200 by Genitron GmbH

เป็นวิธีการวัดที่ซับซ้อนขึ้น มี 2 แบบ คือ แบบการกระจายและแบบการไหลเวียน โดยมีการร่วมมือกับมหาวิทยาลัยของซิลีเซีย (Silesia) ซึ่งได้ทำการทดสอบใช้ค่าเรดอน 600-dm³ ในการ ปรับเทียบและใช้ แหล่งกำเนิดทอรอนโพลอน (Pylon thoron source) และใช้เครื่องมือวัด RAD7 วัดค่า

หลักสำคัญคือ การใช้เครื่องมือเฉพาะในการรวบรวมและการปล่อยรังสีแอลฟา เพื่อให้ได้ ความถูกต้องแม่นยำสูง จากที่ทำการทดลองอย่างต่อเนื่องพบว่า ผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวัด ค่าแก๊สทอรอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ และได้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง

Shinji Tokonami et al. [35] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแก๊สทอรอน โดยใช้ระบบแชมเบอร์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แชมเบอร์สำหรับเปิดรับรังสี (expost chamber) และตัวให้กำเนิดแก๊ส ทอรอน (Thoron gas generator) ดังภาพ 7



ภาพ 7 การศึกษาเกี่ยวกับแก๊สทอรอน ของชินจิ ไทโกนามิ, เวโห เซา, มาซาฮิโด้
ฟูรุกา วา และยูจิ ยามาตะ

โดยให้แก๊สทอรอนไหลจากแหล่งกำเนิดทอรอน หลังจาก que ที่เชื่อมต่อกับแอมเบอ์เปิดรับ
รังสี (exposure chamber) และเครื่องมือวัด ให้แก๊สทอรอนไหลเวียนโดยระบบปั๊ม 20 l/min ใช้เวลา
4 d ได้ค่าเฉลี่ยแก๊สทอรอน 2530 Bq/m³ และได้ค่าเฉลี่ยแก๊สเรดอน 230 Bq/m³ จากการศึกษาค่า
ให้ได้ค่าของแก๊สทอรอนและแก๊สเรดอนตามตาราง 5

ตาราง 5 ข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลอง

เครื่องมือวัด	เรดอน (tracks/mm ² /(Bq/m ³ -d))	ทอรอน (tracks/mm ² /(Bq/m ³ -d))
German monitor (CR-39)	10.14×10^{-4}	4.51×10^{-4}
Radon-Thoron discriminative dosimeter (upper hemisphere)	2.40×10^{-4}	1.22×10^{-4}
Radon-Thoron discriminative dosimeter (lower hemisphere)	2.82×10^{-4}	0.26×10^{-4}
Electrostatic integrating Radon-222 monitor	189.4×10^{-4}	No sensitivity

โกวิทย์ ณ นคร [36] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นไอโซโทปรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายของเรดอนและทอรอนภายในและภายนอกอาคาร เพื่อศึกษาหาสมการมาตรฐานสำหรับการวัดระดับความเข้มข้นของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน และศึกษาการวัดระดับความเข้มข้นผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดขึ้นจากการสลายของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนที่มีอยู่ในอากาศทั้งภายในและภายนอกอาคาร และเพื่อมีไว้ซึ่งข้อมูลระดับมาตรฐาน ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญทางวิทยาศาสตร์

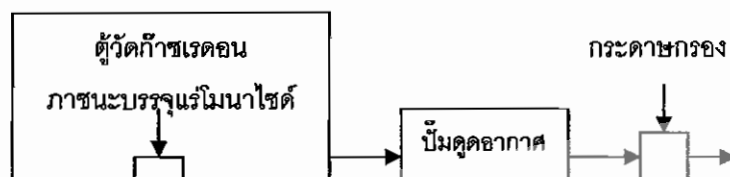
วิธีทำการวิจัยโดยดูดอากาศผ่านกระดาษกรองเป็นเวลา 60 min ในระหว่างนั้นจดบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความดันอากาศ ตรวจสอบประสิทธิภาพและวัดค่าแบคกราวด์ (background) ของเครื่องมือ เพื่อให้แน่ใจว่าอยู่ในสภาพปกติพร้อมที่จะดำเนินการวัดได้

ผลที่ได้ คือ ภายในอาคารมีความเข้มข้นของผลผลิตครึ่งชีวิตที่เกิดจากการสลายของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนมากกว่าภายนอกอาคาร ที่เป็นดังนี้นำสรุปได้ว่า การหมุนเวียนของอากาศภายในห้องไม่ดีเท่าภายนอกห้อง เพราะฉะนั้นภายในห้อง แก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนก็จะไม่ฟุ้งกระจายเหมือนภายนอกห้อง

จรัญ พรมสุวรรณ [37] ได้ทำการวิเคราะห์หยาบโดยการใช้กระดาษกรองของอนุภาคแอลฟาบนแผ่นพลาสติก การดำเนินการโดยนำแผ่นเซลลูโลส อาซีเตท ไปรับอนุภาคแอลฟาจากเรดอน-222 ที่ฟุ้งกระจายออกมาจากผงตัวอย่างที่มียูเรเนียมเจือปนที่ระยะห่างจากผงตัวอย่าง 10 cm ภายในครอบแก้ว เป็นเวลา 30 d หลังจากนั้นนำเซลลูโลส อาซีเตท มาสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH ความเข้มข้น 6 N อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 36 min แล้วนับรอยที่เกิดขึ้นโดยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ หาปริมาณยูเรเนียมได้โดยการเปรียบเทียบจำนวนรอยกับของผงสารมาตรฐานและเปรียบเทียบปริมาณยูเรเนียมที่หาได้จากวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี ผลที่ได้ปรากฏว่าให้ความแตกต่างอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 นอกจากบางตัวอย่างที่มีทอเรียนปนอยู่ ผลการวิเคราะห์นี้ให้ความแม่นยำพอใช้ได้

ไพฑูรย์ วรรณพงษ์ และคณะ [38] ได้ทำการสำรวจระดับแก๊สเรดอนด้วยอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา ซึ่งได้ใช้อุปกรณ์แบบนับรอยอนุภาคแอลฟา (Alpha-track detector) เป็นอุปกรณ์การนับรอย ได้กระทำขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2544-2545 โดยเลือกแหล่งที่มีความสำคัญตามแหล่ง ได้แก่ ที่อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น, อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลาและอำเภอสาร์ภี จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา มีแนวโน้มสูงกว่าจุดสำรวจอีกสองจุด

สกันธ์ รัตนบุษยาพร [39] ได้ทำการประเมินค่ากัมมันตรังสีในอากาศเนื่องจากธาตุลูกของทอรอนในบริเวณที่มีปริมาณธาตุลูกของทอรอน จากแร่โมนาไซต์แตกต่างกัน โดยใช้ตัววัดแก๊สเรดอน ขนาดกว้าง 0.667 m สูง 0.417 m แร่โมนาไซต์หนัก 424.13 g ความหนาแน่น 3.167 g/cm^3 บั๊มดูดอากาศ กระดาษกรองและแผ่นตรวจันับแอลฟา (Alpha counter) ประสิทธิภาพร้อยละ 47 เริ่มจากเปิดฝาภาชนะบรรจุแร่โมนาไซต์และวางไว้ในตัววัดแก๊สเรดอน 1 d จากนั้นใช้บั๊มดูดอากาศผ่านกระดาษกรองด้วยอัตราการไหลผ่าน 4 l/min เป็นเวลา 1 h จะได้ขั้นตอนการทดลองดังภาพ 8



ภาพ 8 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าทอรอนในบริเวณที่มีปริมาณธาตุของทอรอน
จากแร่โมนาไซต์แตกต่างกัน โดยใช้ตัววัดแก๊สเรดอน

เมื่อครบ 1 h นำกระดาษกรองที่ผ่านการดูดอากาศมาทำการนับวัดด้วยแผ่นตรวจนับแอลฟา [ZnS(Ag)] ด้วยเครื่องวัด Pylon AB-5 ครั้งละ 5 min เป็นเวลา 22 h แล้วนำค่าอัตราที่นับได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อัตราการนับเพื่อแสดงผล ผลที่ได้จากการวัด 2 ช่วง

ช่วงแรก นับวัดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลา 300 min ได้ค่า WL (Working level) = 1.1207

ช่วงหลัง นับวัดหลังจากที่ปิดฝาภาชนะบรรจุแร่โมนาไซต์ไว้ เป็นเวลา 4 d ได้ค่า WL = 0.0029 ซึ่งในช่วงหลังได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐาน คือ WL = 1.2

จากการทดลองและผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า WL ในแต่ละสถานะแวดล้อมที่แตกต่างกัน คือในบริเวณที่มีกิจกรรมหรือการทำงานที่เกี่ยวข้องกับวัตถุที่มีส่วนประกอบของธาตุทอเรียม-232 และไม่มีการป้องกันที่ดีจะมีค่า WL สูงกว่าในบริเวณที่มีกิจกรรมหรือการทำงานที่เกี่ยวข้องกับวัตถุที่มีส่วนประกอบของธาตุทอเรียม-232 ซึ่งมีการป้องกันที่ดีและสถานะแวดล้อมทั่ว ๆ ไปมาก