

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

กัมมันตภาพรังสี [3] เป็นกระบวนการที่นิวเคลียสเปลี่ยนแปลงโดยตนเอง ไปเป็นนิวเคลียสใหม่หรือนิวเคลียสเดิมแต่พลังงานลดลง โดยคายอนุภาคหรือรังสีออกมา

ไอโซโทปของธาตุต่างๆ มีหลายตัว สามารถแยกออกเป็นสองชนิดคือไอโซโทปเสถียร (Stable Isotope) และไอโซโทปที่ไม่เสถียรหรือไอโซโทปรังสี (Radioisotope)

กัมมันตภาพ (Activity) คืออัตราการสลายตัวของไอโซโทปรังสี เพื่อปรับตัวเองให้ไปสู่สภาวะที่เสถียรกว่า เป็นผลให้มีการปลดปล่อยอนุภาคต่างๆ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา บีตา โปรตอน นิวตรอน และรังสีแกมมา เป็นต้น

สารกัมมันตรังสี (Radioactive material) คือสารที่ประกอบด้วยนิวเคลียสที่ไม่เสถียรที่มีการสลายตัวตลอดเวลาและมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสี (Radiation)

รังสีที่แผ่ออกมา แบ่งตามคุณสมบัติของความสามารถในการทะลุทะลวง ความสามารถในการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) และอื่นๆ ได้เป็นดังนี้

1. รังสีแอลฟา (Alpha ray) [4] มีอำนาจการทะลุทะลวงต่ำสามารถเขาผ่านกระดาษบางๆ กันได้ เมื่อผ่านอากาศหรือแก๊ส จะทำให้อากาศหรือแก๊ส แตกตัวเป็นไอออนในอัตราที่สูงมาก มีประจุเป็นบวก ปกติเมื่อแผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีจะมีความเร็วอยู่ในช่วง $\sim 1.5 \times 10^7$ m/s ถึง $\sim 2.2 \times 10^7$ m/s เมื่อผ่านอากาศจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง เพียง 3-4 cm เท่านั้น เนื่องจากเราสามารถหาประจุและมวลของมันได้ จึงควรเรียกว่า อนุภาคแอลฟา (Alpha particle) มวลของอนุภาคแอลฟาเท่ากับ $4u$ และประจุเท่ากับ $+2e$ เมื่อ e คือประจุอิเล็กตรอน ดังนั้น อนุภาคแอลฟาจึงเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม He^{2+}

2. รังสีบีตา (Beta ray) มีอำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคแอลฟา ~ 100 เท่าสามารถทะลุผ่านแผ่นอลูมิเนียมที่หนา 2-3 mm ได้ แต่ความสามารถในการทำให้อากาศหรือแก๊ส แตกตัวเป็นไอออนน้อยกว่ามาก มีประจุเป็นลบ เมื่อแผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีจะมีความเร็วสูงถึง $0.99c$ เมื่อ c เป็นอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ ($c = 3 \times 10^8$ m/s) รังสีบีตา เรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า อนุภาคบีตา (Beta particle) จากการวัดมวลและประจุพบว่าอนุภาคบีตาคืออิเล็กตรอน ความเร็วสูง

3. รังสีแกมมา (Gamma ray) มีอำนาจการทะลุทะลวงสูงมาก ต้องใช้ตะกั่วหนาหลายๆ นิ้วจึงกันได้ ความสามารถในการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนน้อยกว่ารังสีบีตา ~100 เท่า แต่มีอำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีบีตามาก รังสีแกมมาไม่มีประจุ มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อาจกล่าวได้ว่ารังสีแกมมาเป็นรังสีเอ็กซ์หรือโฟตอนที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก อยู่ระหว่าง $\sim 1.7 \times 10^{-8}$ m/s ถึง $\sim 4.1 \times 10^{-6}$ m/s ความเร็วของรังสีแกมมาเท่ากับความเร็วแสง

ไอโซโทปรังสี (Radioisotope)

ไอโซโทปรังสี [5] อาจจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ ไอโซโทปที่มีอยู่ในธรรมชาติและแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น

1. ไอโซโทปรังสีในธรรมชาติ (Natural Radioisotope)

ไอโซโทปรังสีในธรรมชาติ มีแหล่งกำเนิดอยู่ 2 แหล่งคือ

1.1 รังสีคอสมิก (Cosmic rays)

รังสีคอสมิก เป็นรังสีที่มาจากนอกโลก มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และแกแลกซี รังสีคอสมิกส่วนใหญ่จะถูกชั้นบรรยากาศเบื้องบนของโลกกรองไว้ ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านลงมายังพื้นผิวโลกในระดับพื้นดิน ปริมาณรังสีจากภายนอกร่างกาย (External exposure) ที่ประชาชนได้รับจากรังสีคอสมิกจะค่อนข้างคงที่ไม่ว่าจะอยู่ที่ทวีปใด กล่าวคือมีค่าประมาณ 30 nGy/h แต่ระดับปริมาณรังสีนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากหากอยู่ในพื้นที่ที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล โดยจะเพิ่มสูงขึ้นถึงสองเท่าที่ระดับ 1,500 m เหนือระดับน้ำทะเล สำหรับผู้ที่เดินทางโดยเครื่องบินไอพ่น จะมีโอกาสได้รับปริมาณรังสีในอัตรา 1.35 ถึง 9 $\mu\text{Sv/h}$ และสำหรับผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่บางแห่งที่อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลมาก เช่นที่นครเม็กซิโก และเตหะราน ประเทศอิหร่าน จะได้รับปริมาณรังสีสูงกว่าปกติ ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า

นอกจากนี้ รังสีคอสมิกยังก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีที่สำคัญอีก 4 ชนิด คือ ^3H ^{14}C ^7Be และ ^{22}Na ซึ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกาย และมีผลต่ออวัยวะต่างๆ โดยคิดเป็นปริมาณรังสีในรอบปี ประมาณ 0.01 μSv สำหรับ ^3H , 12 μSv สำหรับ ^{14}C , 3 μSv สำหรับ ^7Be และ 0.2 μSv สำหรับ ^{22}Na

ตาราง 2 แสดงระดับปริมาณรังสีคอสมิก ตามระดับความสูงของพื้นที่ [17]

ระดับความสูง (ft)	ปริมาณรังสีคอสมิก (mSv/y)
30,000	1.76
10,000	0.76
2,000	0.36
ระดับน้ำทะเล	0.26

1.2 แหล่งกำเนิดรังสีจากพื้นดิน (Terrestrial Sources of Radiation)

รังสีที่ได้รับจากธรรมชาติ [5] นอกจากรังสีคอสมิกแล้ว ยังมีรังสีจากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ไอโซโทปรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกทำปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุในชั้นบรรยากาศของโลก ^3H , ^{14}C และ ไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ ^{40}K , U และ Th โดยที่ไอโซโทปรังสีเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาว จึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบัน ยูเรเนียม และ ทอเรียม เป็นไอโซโทปรังสีที่มีลูก (Progeny) เป็นไอโซโทปรังสีเช่นกันจึงมีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นห่วงโซ่เรียกว่าอนุกรม ซึ่งจะไปถึงสุดท้ายที่ไอโซโทปเสถียร ซึ่งมีอยู่ 4 อนุกรมดังนี้

อนุกรมทอเรียม (4n Series)	เริ่มต้นจาก	$^{232}_{90}\text{Th}$	ไปถึงสุดท้ายที่	$^{208}_{82}\text{Pb}$
อนุกรมยูเรเนียม (4n + 2 Series)	เริ่มต้นจาก	$^{238}_{92}\text{U}$	ไปถึงสุดท้ายที่	$^{206}_{82}\text{Pb}$
อนุกรมแอกติเนียม (4n + 3 Series)	เริ่มต้นจาก	$^{235}_{92}\text{Th}$	ไปถึงสุดท้ายที่	$^{207}_{82}\text{Pb}$
อนุกรมเนปจูเนียม (4n + 1 Series)	เริ่มต้นจาก	$^{235}_{92}\text{Th}$	ไปถึงสุดท้ายที่	$^{209}_{83}\text{Bi}$

อนุกรมเนปจูเนียม มีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่าอายุของโลกถึง 10^3 y ดังนั้นจึงไม่มีไอโซโทปรังสีที่อยู่อนุกรมนี้ในปัจจุบัน คงเหลือแต่ไอโซโทปที่เสถียร ส่วนอนุกรมแอกติเนียมมีเปอร์เซ็นต์ที่ปนอยู่บนพื้นผิวโลกน้อยมาก เพราะฉะนั้นอนุกรมกัมมันตรังสีที่สำคัญจริงๆ จึงมีอยู่ 2 อนุกรมเท่านั้น คือ อนุกรมทอเรียม และ อนุกรมยูเรเนียม

1. อนุกรมทอเรียม (Thorium Series)

ทอเรียม [6] เป็นกัมมันตรังสี มีปนอยู่ในแร่ทอไรต์ (Thonite) มีในผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 12 ppm มักเกิดรวมกับยูเรเนียม และพวงธาตุหายาก (Rare – Earth) ทอเรียมในธรรมชาติ มีไอโซโทปเดียว คือ ทอเรียม-232 มีครึ่งชีวิต 1.39×10^{10} yr

ในระยะแรก ทอเรียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทำไส้ตะเกียงเจ้าพายุ อุตสาหกรรมโลหะผสม และอุตสาหกรรมทำไส้หลอดไฟฟ้า เป็นต้น ต่อมาภายหลังจึงทราบว่า ทอเรียมมีความสำคัญทางด้านเชื้อเพลิงปรมาณู เมื่อพบว่า ทอเรียม-232 จับนิวตรอนพลังงานต่ำ จะเปลี่ยนเป็นยูเรเนียม-233 และยูเรเนียม-233 เมื่อจับนิวตรอนที่มีพลังงานเกือบเป็นศูนย์สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบแตกตัวให้พลังงานออกมา เช่นเดียวกับยูเรเนียม-235 และพลูโทเนียม-239

อนุกรมทอเรียมเริ่มต้นจากทอเรียม-232 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เกิดเป็นเรเดียม-228 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวต่อเนื่องกันไป จนกระทั่งถึง แก๊สทอรอน (Rn-220) มีครึ่งชีวิต 54.5 s ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นมากและการแพร่กระจายไปได้ไม่ไกลก็สลายตัวหมดไปโดยเร็ว ปริมาณทอรอนบนผิวโลกจึงมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับเรดอนที่มีครึ่งชีวิต 3.825 วัน อนุกรมทอเรียมจะสิ้นสุดที่ตะกั่ว-208 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร

2. อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series)

ยูเรเนียม [6] ค้นพบครั้งแรกในพิทช์เบลนด์ (Pitch Blende) ยูเรเนียมเป็นกัมมันตภาพรังสี มีอยู่บนผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 4 ppm ยูเรเนียม-238 มีครึ่งชีวิต 4.51×10^9 ปี ในระยะแรกนักวิทยาศาสตร์จะแยกเรเดียม จากยูเรเนียม เพื่อนำไปใช้ในการรักษาโรคมะเร็งเท่านั้น ส่วนยูเรเนียมถือว่าไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนำไปใช้ให้สแกกกระเบื้องเคลือบ และเครื่องแก้ว ในระยะหลังจึงทราบว่า ยูเรเนียมมีความสำคัญมากในด้านเป็นเชื้อเพลิงปรมาณู

ยูเรเนียม-238 เมื่อจับนิวตรอนพลังงานต่ำ จะเปลี่ยนไปเป็นพลูโทเนียม-239 ซึ่งพลูโทเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูที่มนุษย์ผลิตขึ้น เมื่อยูเรเนียม-238 จับนิวตรอนที่มีพลังงานเกือบเป็นศูนย์ สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบแตกตัว ให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกับยูเรเนียม-235

อนุกรมยูเรเนียมตั้งต้นจากยูเรเนียม-238 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เกิดเป็นทอเรียม-234 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดเรดอน (Rn-222) มีครึ่งชีวิต 3.825 วัน ซึ่งยาวพอที่จะแพร่กระจายจากใต้พื้นดินขึ้นสู่บรรยากาศ ปริมาณเรดอนบนพื้นโลกจึงมากกว่าทอรอน ซึ่งมีครึ่งชีวิต 54.5 วินาที เรดอนเมื่อสลายตัวให้ พอลอเนียม-218 (Po-218) และผลิตผลอื่นๆ คือ ตะกั่ว-214 (Pb-214) พอลอเนียม-210 (Po-210) โดยนิวไคลด์ทั้ง 3 นี้ เมื่อสลายตัวให้รังสีแอลฟา

และมีค่าครึ่งชีวิตยาวพอที่จะมีโอกาสสะสมอยู่ในร่างกายและสร้างความเสียหายแก่เนื้อเยื่อได้ ดังนั้นเรดอนจึงนับว่าก่อเกิดอันตรายแก่มนุษย์มากกว่า ทอรอน-220 (Rn-220) ซึ่งเป็นไอโซโทปเดียวกัน อนุกรมยูเรเนียมสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร

ตาราง 3 แสดงปริมาณรังสีที่คนส่วนใหญ่ได้รับจากธรรมชาติ [3]

แหล่งกำเนิดรังสี	ไอโซโทปรังสี	ปริมาณรังสีที่ได้รับ ($\mu\text{Sv/y}$)
การแผ่รังสีจากภายนอก (External radiation)		410
การแผ่รังสีจากภายใน (Internal radiation)	K-40	180
	Rb-87	6
	อนุกรมยูเรเนียม	5
	Th-230	7
	Ra-226	7
	Ra-222	1100
	Th-232	3
	อนุกรมย่อยของเรเดียม-228 (^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra)	13
	อนุกรมย่อยของเรดอน-220 (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl)	160

การแผ่รังสีจากภายนอก (External radiation) หมายถึงรังสีจากพื้นดินและที่อยู่อาศัย

การแผ่รังสีจากภายใน (Internal radiation) หมายถึงการแผ่รังสีที่มาจากสารกัมมันตรังสีที่เข้ามาอยู่ในร่างกายของเรา

สรุปแล้วปริมาณรังสีที่คนได้รับจากธรรมชาติโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้มีค่าประมาณ 2.4 mSv/y นอกจากนี้ ลักษณะการดำเนินชีวิตรวมทั้งการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรบางอย่างก็อาจเป็นสาเหตุให้ได้รับรังสีที่เกินจากค่าปกตินี้ได้ ดังกล่าวต่อไปนี้

1. วัสดุก่อสร้าง (Construction materials) วัสดุก่อสร้างบางชนิดอาจจะมีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ตามธรรมชาติในปริมาณค่อนข้างสูง เช่น มีโพแทสเซียม-40 เรเดียม-226 หรือ ทอเรียม-232 ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ที่อยู่อาศัยได้รับรังสีจากภายนอก นอกจากนี้ เรเดียม-226 ยังทำให้เกิดแก๊สเรดอนซึ่งหากการระบายอากาศภายในอาคารไม่ดีพอจะทำให้ผู้อยู่อาศัยได้รับรังสีจากแก๊สเรดอนที่เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ

2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) แก๊สธรรมชาติและถ่านหินจากแหล่งต่างๆ อาจมีปริมาณของสารกัมมันตรังสีแตกต่างกันไป ที่พบในแก๊สธรรมชาติมักจะเป็นเรดอน-222 ตะกั่ว-210 และพอลิเนียม-210 ส่วนในถ่านหิน พบยูเรเนียม-238

3. น้ำแร่ (Mineral water) ในน้ำแร่อาจมีเรเดียมและธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเรเดียม

4. การใช้ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate fertilizer) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตก็อาจนำไปสู่การได้รับรังสีจากการแผ่รังสีจากพื้นดิน และจากการสะสมในพืช และเข้าสู่ร่างกายโดยการรับประทานพืช

2. แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made sources of radiation)

ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่สองเป็นต้นมา คนทั่วไปเริ่มรู้จักสารกัมมันตรังสี โดยขั้นต้นคือ สารกัมมันตรังสีที่เป็นผลผลิตของการแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียม (Fission products) ต่อมาเมื่อมีการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในทางสันติ จึงมีการผลิตสารกัมมันตรังสีชนิดอื่นๆ ขึ้น นอกจากนี้ยังมีเครื่องกำเนิดรังสี อาทิ เครื่องเอกซเรย์และเครื่องเร่งอนุภาคด้วย ดังนั้นอาจจะแบ่งที่มาของแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้เป็น

2.1 แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในทางการแพทย์ ได้นำเอาสารกัมมันตรังสีมาใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งด้านการตรวจวินิจฉัย (Diagnosis) และการรักษา (Therapy) เมื่อมีการประมวลแล้วพบว่าปริมาณรังสีเฉลี่ยที่คนได้รับเป็นอันดับสองรองจากปริมาณรังสีตามธรรมชาติ ก็คือปริมาณรังสีจากการแพทย์นั่นเอง

2.2 แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันนี้ การนำเทคโนโลยีนิวเคลียร์มาใช้ในอุตสาหกรรมกำลังเป็น เทคโนโลยีที่นำหน้า ทั้งนี้เพราะผลการดำเนินงานหลาย

อย่างได้พิสูจน์แล้วว่าคุ้มค่า สามารถทำให้ประหยัดได้ และสำหรับงานบางอย่างไม่สามารถดำเนินการได้โดยไม่ใช้นิวเคลียร์เทคโนโลยี เช่น การตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ด้วยแก๊สคริปทอน-85 เป็นต้น

2.3 ระเบิดนิวเคลียร์ ภายหลังจากการใช้ระเบิดนิวเคลียร์ในสงครามโลกครั้งที่สองแล้วยังมีการทดลองระเบิดนิวเคลียร์อีกหลายครั้ง จนกระทั่งมีการลงนามยุติการทดลองระเบิดในบรรยากาศ แต่สารกัมมันตรังสีที่ตกค้างอยู่และมีครึ่งชีวิตยาวจะคงมีผลอยู่ แม้ว่าจะมีการสลายตัวไปมากแล้ว

2.4 การผลิตพลังงานโดยนิวเคลียร์ การนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า เริ่มตั้งแต่ การสำรวจแหล่งแร่ การทำเหมือง การถลุงให้บริสุทธิ์ การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และการจัดการกากที่เหลือ กระบวนการเหล่านี้จะต้องมีการจัดการที่เหมาะสม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปได้รับรังสีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (As Low As Reasonably Achievable, ALARA) และต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดที่เรียกว่าขีดจำกัดโดส (Dose limit)

2.5 เครื่องใช้และอุปกรณ์ต่างๆ

2.5.1 แหล่งกำเนิดแสงแบบแก๊สทริเทียม (Gaseous tritium light sources) ปัจจุบันมีการใช้กว้างขวางมาก เช่น ในหน้าปัดนาฬิกาแบบดิจิตอล ดังนั้น การใช้และการทิ้งจึงควรมีการดูแล

2.5.2 เครื่องตรวจวัดควันแบบไอออไนซ์เช่นแซมเบอร์ (Ionization chamber smoke detectors) หรือสายล่อฟ้า ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี อาทิ อะเมริซิเทียม-241 นิเกิล-63 หรือในสมัยก่อนใช้ เรเดียม-226 ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากเผาไหม้ หรือรั่วกระจาย

กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Decay Law of Radioactive Substance)

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี [4] คือกระบวนการที่นิวเคลียสคายอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมา หรือจับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมไว้ในนิวเคลียส นิวไคลด์กัมมันตรังสีก่อนสลายตัว เรียกว่าแพเรนต์ (Parent) หลังสลายตัวจะเป็นนิวไคลด์ใหม่เรียกว่า ดอเตออร์ (Daughter) ดอเตออร์นี้อาจเสถียรหรือไม่เสถียร มีการสลายตัวต่อไปอีกได้ ถ้าการสลายตัวเป็นไปอย่างต่อเนื่องเป็นทอดๆ เรียกการสลายตัวนี้ว่าโซ่การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive decay chain)

1. การสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดเดียว

ทุกนิวเคลียสไอจะมีโอกาส (Probability) ที่จะสลายตัว โดยที่โอกาสของการสลายตัว $P(dt)$ ในช่วงเวลา dt จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับช่วงเวลา dt ถ้าช่วงเวลา dt สั้นจะมีผลให้ $P(dt) \ll 1$ ถ้ากำหนดให้ λ เป็นค่าคงที่ เรียกว่า ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay constant) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละนิวไคลด์ของการสลายตัวแต่ละแบบ โอกาสของการสลายตัวในช่วงเวลา dt คือ

$$P(dt) = \lambda dt \quad (2-1)$$

การคำนวณหาโอกาสที่นิวเคลียสหนึ่งจะยังเหลือเป็นนิวเคลียสเดิมในช่วงเวลา t โดยการแบ่ง ช่วงเวลา t ให้เป็นช่วงเวลาน้อยๆ จำนวน n ช่วง

โอกาสที่จะเหลืออยู่ในเวลาช่วงแรกคือ $1 - P(dt)$

โอกาสที่จะเหลืออยู่ในเวลาช่วงเวลาที่สองคือ $[1 - P(dt)]^2$

โอกาสที่จะเหลืออยู่ในเวลาช่วงเวลาที่ n คือ $[1 - P(dt)]^n$

ซึ่งถ้าแทน $P(dt)$ ด้วยสมการ (2-1) แล้วจะเขียนได้ว่า

$$[1 - P(dt)]^n = \left[1 - \frac{\lambda t}{n}\right] \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{dt \rightarrow 0} e^{-\lambda t} \quad (2-2)$$

สมการนี้คือโอกาสของนิวเคลียสอันหนึ่งจะยังเหลืออยู่ ถ้าให้ N_0 เป็นจำนวนของนิวเคลียสชนิดเดียวกันที่มีอยู่ในเริ่มแรก เมื่อเวลาผ่านไป t จำนวนของนิวเคลียสไอที่จะยังเหลืออยู่ คือ

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-3)$$

การแก้สมการนี้ทำได้โดยการกำหนดว่า ถ้า N คือจำนวนของนิวเคลียสไอที่มีอยู่ในปัจจุบัน แล้ว จำนวนโอกาสในการสลายตัวในช่วงเวลา dt คือ

$$-dN = P(dt)N \quad (2-4)$$

$$= \lambda N dt \quad (2-5)$$

ด้วยเหตุที่ทุกๆ ครั้งของการสลายตัวจะทำให้จำนวน N ลดลง จึงปรากฏเครื่องหมายลบในสมการ การแก้สมการนี้ สมมติให้เวลาเริ่มต้น $t=0$ ของการสลายตัว จำนวนนิวคลีไอ มี N_0 แล้วแก้สมการโดยการอินทิเกรต

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \quad (2-6)$$

จะได้

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

การวัดสารกัมมันตรังสี ปกติจะไม่วัดเป็นจำนวนนิวเคลียส แต่จะวัดการแผ่รังสีของนิวเคลียส เมื่อมันสลายตัวแทน โดยวัดเป็น กัมมันตภาพ (Activity, A) ความหมายของกัมมันตภาพ จำกัดความได้ว่าเป็นจำนวนครั้งของการสลายตัวต่อหนึ่งหน่วยเวลาของสารกัมมันตรังสี จากสมการ (2-3)

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = \lambda N \quad (2-8)$$

หน่วยของกัมมันตภาพปกติใช้เป็นหน่วยคูรี (Curie, Ci) โดยที่ $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ ครั้งของการสลายต่อวินาที หรือหน่วยรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford, R) โดย $1 \text{ R} = 10^6$ ครั้ง ต่อวินาที

2. ครึ่งชีวิต (Half-Life)

ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) [4] ของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีหมายถึงช่วงระยะเวลาที่จำนวนนิวเคลียสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของจำนวนเดิม (หรือกัมมันตภาพที่มีอยู่เดิม A_0 ลดลงเหลือ $A_0/2$) หาได้จากการแทน $N = N_0/2$ และ $t = t_{1/2}$ ลงในสมการ (2-3)

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2-9)$$

หรือ

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2-10)$$

$$-\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad (2-11)$$

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2} \quad (2-12)$$

$$0.693 = \lambda t_{1/2} \quad (2-13)$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2-14)$$

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} \quad (2-15)$$

หน่วยของ $t_{1/2}$ เป็น s หน่วยของ λ เป็น s^{-1}

สูตรการสลายตัวในสมการ (2-3) แสดงให้เห็นว่าถ้านิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีสลายตัวหมดจะต้องใช้เวลานานนับอนันต์ (Infinity) เพราะฉะนั้นอายุของการเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีจึงอยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞ ฉะนั้นจึงพูดถึงอายุของการดำรงเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีอยู่ได้ในความหมายของอายุเฉลี่ย

3. อายุเฉลี่ย (Mean Life)

อายุเฉลี่ย (Mean life), τ [4] หมายถึงเวลาเฉลี่ยของการเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีจนกระทั่งสลายตัวหมด

$$\tau = \frac{t_1 dn_1 + t_2 dn_2 + t_3 dn_3 + \dots}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots} \quad (2-16)$$

ในสมการนี้ dN_1 คือนิวไคลด์ที่มีอายุ t_1 และ dN_2 คือนิวไคลด์ที่มีอายุ t_2 ตามลำดับ โดยที่ $dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots = N_0$ สมการ (2-16) เขียนให้อยู่ในรูปอินทิกรัล (Integral) เป็น

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} \quad (2-17)$$

แทน dN ด้วยสมการ (2-3) และทำการอินทิเกรตจะได้

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} \quad (2-18)$$

$$= \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2-19)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2-20)$$

หน่วยวัดปริมาณรังสี (Dose Unit)

หน่วยวัดปริมาณรังสี [2] สามารถบอกสมบัติของกัมมันตรังสีต่างๆ เช่นความสามารถก่อไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีของตัวกลาง ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับรังสี หน่วยงานระหว่างประเทศ คือ International Commission on Radiation Unit and measurement (ICRU) ได้กำหนดหน่วยวัดปริมาณรังสี ไว้ดังนี้

1. กัมมันตภาพ (Activity)

กัมมันตภาพหรือความแรงของสารรังสี คือการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นคูรี (Curie), Ci โดยที่

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที

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

สำหรับหน่วยสากล (International System Unit) , SI Unit กำหนด เบ็คเคอเรล [5] (Becquerel) , Bq เป็นหน่วยของกัมมันตภาพ โดยที่

1 เบ็คเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 1 ครั้งต่อวินาที

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

หน่วยเบ็คเคอเรลมักจะใช้ในการวัดกัมมันตภาพน้อยๆ เช่น การวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

2. โดสการเปิดรับ (Exposure dose)

ICRU ได้กำหนดให้เรินต์เกน (Roentgen), R เป็นหน่วยของการเปิดรับ ซึ่งหมายถึง การวัดปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนเมื่อรังสีผ่านไปในอากาศ ปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศหนัก $0.001293 \text{ g. (1 cm}^3\text{)}$ สูญหุมิ และความดันมาตรฐานแตกตัวเกิดประจุไฟฟ้า 1 esu

เรินต์เกนมักใช้กับรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา ซึ่งเป็นการบอกถึงความสามารถของโฟตอน ในการแตกตัวเป็นไอออน สำหรับ SI Unit ใช้ C/kg แสดงค่าการเปิดรับ (Exposure)

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

3. โดสดูดกลืน (Absorbed dose)

โดสดูดกลืน (Absorbed dose) มีหน่วยเป็น rad ซึ่งเป็นค่าออกมาจาก Radiation Absorbed Dose หมายถึง ปริมาณพลังงานของรังสีที่ตัวกลางใดๆ ดูดกลืนไว้ ต่อหนึ่งหน่วย น้ำหนักของตัวกลางนั้น เมื่อรังสีผ่านเข้าไป

$$\text{rad} = \text{พลังงานของรังสีที่ดูดกลืน/น้ำหนักของตัวกลาง}$$

ปริมาณรังสี 1 แรด หมายถึง ปริมาณของรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนพลังงานไว้ได้ 100 เอิร์ก ต่อกรัมของตัวกลาง

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

ในปัจจุบัน SI Unit ซึ่งใช้หน่วยใหญ่คือ MKS เป็นมาตรฐานให้หน่วยแอบซอร์บโดส (Absorbed Dose) จากหน่วยของพลังงานเป็นจูล และหน่วยของมวลเป็นกิโลกรัม โดยใช้ชื่อ เฉพาะว่า เกรย์ (Gray, Gy) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

4. โดสอิกควิวาเลนต์ (Dose equivalent)

เป็นหน่วยที่ใช้สำหรับงานป้องกันอันตรายจากรังสีเท่านั้น โดยนำเอาผลทาง ชีววิทยาของรังสีเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่าง แอบซอร์บโดส (Absorbed

Dose) เท่าๆ กันของรังสีหลายชนิด ปรากฏว่า รังสีถ่ายเทพลังงานต่อหน่วยระยะทางที่ผ่านไป ในวัตถุมาก ก็จะมีผลทางชีววิทยามาก

หน่วยเดิมของโดสอิควิวาเลนต์ (Dose equivalent) เรียกว่า เรม (Rem) มีค่าเท่ากับ แอมซอร์บโดส (rad) $\times Q$ โดยที่ Q เป็น ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) แปรผันตามค่า การถ่ายเทพลังงานรังสีต่อหน่วยระยะทางในน้ำ (LET)

ในปัจจุบันหน่วยโดสอิควิวาเลนต์ (Dose equivalent) ในหน่วย SI ใช้ ซีเวิร์ต (Sievert, Sv) และมีค่าเท่ากับ แอมซอร์บโดส (Gy) $\times Q$ ดังนั้น

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

อันตรกิริยาของรังสีต่อสสาร

รังสีที่ได้จากสารกัมมันตรังสีมีทั้งที่เป็นอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (แกมมา รังสีเอกซ์) ชนิดที่เป็นอนุภาค ยังสามารถแยกออกเป็นอนุภาคที่มีประจุ (โปรตอน บีตา แอลฟา อิเล็กตรอน เป็นต้น) และอนุภาคที่ไม่มีประจุ (นิวตรอน) เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะเสียพลังงานในการชนกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ทำให้อะตอมเกิดการกระตุ้น (Excitation) และ/หรือทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ผลของการเกิดอันตรกิริยา สามารถนำไปใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดปริมาณรังสีต่าง ๆ การคำนวณและออกแบบเครื่องกำบังรังสี ตลอดจนศึกษาอันตรายของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

ตาราง 4 แสดงสมบัติของรังสี [7]

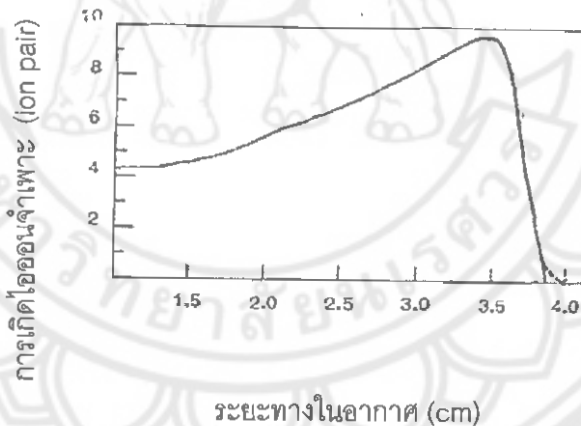
ชนิด	ประจุ	มวล (u)	การแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะ (ion pair)/cm	พิสัย (cm)	ชนิดการเกิดไอออน
แอลฟา	+ 2	4	50,000	8	โดยตรง
บีตา	± 1	1/1840	30-300	13	โดยตรง
นิวตรอน	0	1	ต่ำมาก	ยาว	ทางอ้อม
แกมมา	0	0	1.5	ยาวมาก	ทางอ้อม

1. อันตรกิริยาจากอนุภาคแอลฟา

อนุภาคแอลฟา [7] คือ นิวเคลียสของฮีเลียมมวล $4u$ และมีประจุ $+2$ เนื่องจากแอลฟามีมวลและประจุมาก เมื่อวิ่งผ่านตัวกลางจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ในการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยดึงอิเล็กตรอนของอะตอมของตัวกลางให้หลุดออกจากวงโคจร ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยได้โดยตรง ทำให้ค่าการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะ ดังแสดงในตาราง 4 จนพลังงานจลน์หมดสิ้นไป อนุภาคก็จะหยุดการเคลื่อนที่และถูกสสารดูดกลืนไว้ในที่สุด ทำให้พิสัยในตัวกลางต่างมีค่าน้อย ไอออนลบหรืออิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ จะไปทำอันตรกิริยากับอะตอมอื่นๆ ของสสารต่อไปอีก ทำให้เกิดการแตกตัวแบบทุติยภูมิติดตามมา

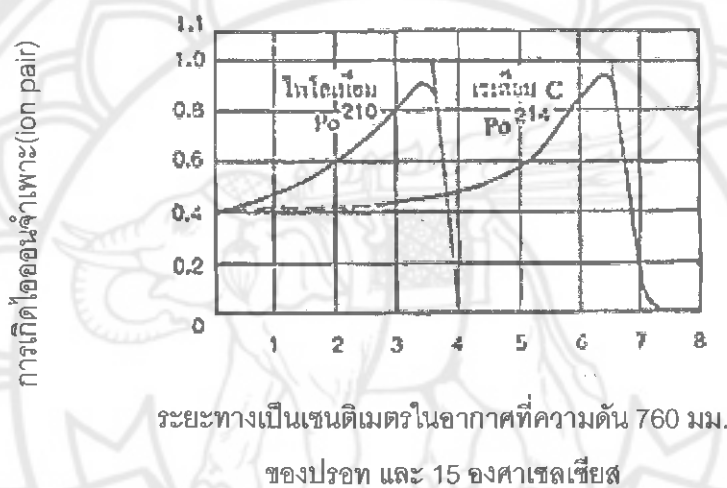
2. พิสัยของอนุภาคแอลฟาในอากาศ

การเกิดไอออนจำเพาะในอากาศที่อนุภาคแอลฟาที่วิ่งผ่านเมื่อวัดเทียบกับระยะจากต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาถึงตำแหน่งต่างๆ ในอากาศ จะได้กราฟเป็นเส้นโค้งนี้ลักษณะเหมือนดังภาพ 3 เรียกเส้นโค้งนี้ว่า เส้นโค้งของแบรค (Bragg curve) [8]



ภาพ 2 การเกิดไอออนจำเพาะในอากาศโดยอนุภาคแอลฟาที่มีพิสัยปานกลาง เทียบกับระยะจากต้นกำเนิดแอลฟาถึงตำแหน่งต่างๆในอากาศ [8]

เส้นโค้งในกราฟได้มาจากการทดลองของฮอลโลเวย์ (Holloway) และลิฟวิงสตัน (Livingston) ซึ่งระยะไกลที่สุดที่อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ไปได้ในอากาศหรือพิสัยของอนุภาคแอลฟาในอากาศ คือ ประมาณ 3.8 cm พิสัยนี้ขึ้นกับพลังงานของอนุภาคแอลฟาดังจะดูได้จากภาพที่ 4 ซึ่งแสดงไอออนจำเพาะในอากาศ เทียบกับระยะห่างจากต้นกำเนิดที่เป็น ^{210}Pb ซึ่งอนุภาคที่แผ่ออกมามีพลังงาน 5.3 MeV และ ^{214}Pb อนุภาคที่แผ่ออกมามีพลังงาน 7.68 MeV จะเห็นว่าพิสัยของอนุภาคแอลฟาจาก ^{210}Pb คือ 3.87 cm และ ของอนุภาคแอลฟาจาก ^{214}Pb คือ 6.95 cm



ภาพ 3 แสดงการเกิดไอออนจำเพาะในอากาศโดยอนุภาคแอลฟา เป็นฟังก์ชันของระยะห่างในอากาศจากต้นกำเนิด [8]

กระบวนการกัดรอยอนุภาค (Particle Track Etching)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุที่มีพลังงานสูง ผ่านเข้ามาในวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น พลาสติก แก้ว หรือผลึก ทำให้วัตถุนั้นแตกตัวเป็นไอออนและเกิดรอยขนาดเล็กบนวัตถุ [9] เมื่อล้างกับสารละลายกัดผิวที่เป็นสารละลายกรดหรือด่างเข้มข้น เนื้อวัสดุตรงที่เกิดรอย จะมีอัตราการละลายเร็วกว่าส่วนอื่น ทำให้รอยมีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถสังเกตเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

รูปร่างและขนาดของรอยอนุภาค แปรผันตามชนิดและพลังงานของอนุภาค วัสดุที่ใช้บันทึกรอยอนุภาค รวมทั้งเงื่อนไขที่ใช้ในการล้างกัดรอย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการล้างกัดรอย

การศึกษาการกัดรอยอนุภาคทางนิวเคลียร์ (Nuclear track etching) มีการประยุกต์ในด้านต่างๆ หลายด้าน เช่น การตรวจวัดปริมาณแก๊สเรดอน ซึ่งเป็นแก๊สที่ให้รังสีแอลฟาในธรรมชาติ โดยวัดความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม CR-39 การตรวจวัดอนุภาคจากรังสีคอสมิกบนฟิล์มพลาสติก เพื่อการศึกษาทางดาราศาสตร์ การหาอายุทางธรณีวิทยา โดยคำนวณจากความหนาแน่นของรอยอนุภาคจากปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียมในผลึก ซึ่งเรียกว่าการหาอายุจากรอยบนฟิชชัน (Fission track dating) รวมทั้งการใช้อนุภาคที่มีประจุพลังงานสูงวิ่งทะลุผ่านแผ่นฟิล์มบาง เพื่อใช้ในการกรองสิ่งต่างๆ ที่ต้องการประสิทธิภาพสูง

ตาราง 5 แสดงสารละลายเคมีที่ใช้ในการกัดรอยและค่าพลังงานวิกฤตของวัสดุบางชนิด [9]

วัสดุ	สารกัดผิว	ค่าพลังงานวิกฤต (MeV.cm ² /mg)
แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass)	48 % HF	15
ไมกา (Mica)	48 % HF	15
ไมลาร์ (Mylar)	6 N NaOH	5
เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate)	6 N NaOH	2

ทฤษฎีการกัดรอย (Track Etched Theory)

1. กลไกการเกิดรอยในผลึก

เมื่อประจุเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในตัวกลาง จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลาง ซึ่งถ้าพลังงานมากพอ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกไป เกิดประจุบวกขึ้นตามทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ ประจุเหล่านี้จะออกแรงผลักซึ่งกันและกันทำให้ต้องจัดเรียงอะตอมใหม่เพื่อให้เกิดสมดุล จึงมีช่องว่างเกิดขึ้นหรือเกิดรอยอนุภาคนั่นเอง

2. กลไกการเกิดรอยอนุภาคในโพลีเมอร์

กระบวนการที่สำคัญในการทำให้เกิดรอยอนุภาคในโพลีเมอร์ [9] คือกระบวนการไอออนไนซ์ โดยการเกิดรอยอนุภาคในโพลีเมอร์นั้น เกิดลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ที่เกิดจากการจับตัวกันของไฮโดรคาร์บอนเป็นสายยาว เมื่อมีอนุภาคที่มีพลังงานวิ่งเข้าไปในโพลีเมอร์ จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้สายโซ่ของพันธะถูกตัดขาดออกจากกัน และกัน ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วย ดังนั้นการทำให้ค่าอัตราการขยายรูในบริเวณที่เกิดรอยอนุภาค (V_T) มีค่าสูงกว่าอัตราการขยายรูในบริเวณที่เกิดรอยอนุภาค (V_G)

3. กลไกการกัดขยายรอย

เนื่องจากรอยอนุภาคที่ได้จากการบันทึกในวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นมีขนาดเล็ก ($< 50 \text{ \AA}$) จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อทำการขยายขนาดรอยอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งปี ค.ศ. 1962 Price and Walker ได้ค้นพบว่ารอยอนุภาคสามารถขยายให้ใหญ่ขึ้นได้ โดยใช้กระบวนการกัดขยายขนาดรูด้วยสารเคมี (Track etching technique)

การกัดขยายขนาดรูบนแผ่นฟิล์มขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิด คือ

3.1 อัตราการกัดผิว (Track etch rate), V_T คือ อัตราการละลายของฟิล์มในทิศทางของรอยอนุภาคนิวเคลียร์ โดยคำนวณจากความชันของกราฟ ที่ระบุข้อมูลระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรู

3.2 อัตราการกัดผิวเชิงปริมาตร (Bulk etch rate), V_G คือ อัตราการละลายของฟิล์มในบริเวณที่ไม่เกิดอนุภาคนิวเคลียร์โดยคำนวณได้จากความชันของกราฟที่ระบุข้อมูลระหว่างความยาวของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้การกัดขยายรู

ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร V_T และ V_G จะสามารถบอกรูปร่างของรอยที่เกิดขึ้นภายหลังการกัดขยายรอยได้ โดยจะบอกเป็นค่าการตอบสนองของการกัดรอย (Etching responded) (V_T/V_G) ได้ดังนี้

ถ้า V_T/V_G มีค่ามากหมายถึง รอยอนุภาคจะเป็นรูปกรวยแคบและยาว หรือ V_T/V_G มีค่าต่ำสุด คือ เท่ากับ 1 หมายถึงไม่มีการเกิดรอยอนุภาคขึ้นบนผิวของแผ่นฟิล์ม หากนำ เวลาที่ใช้ในการกัดขยายรูมาเกี่ยวข้องกับตัวแปร V_T และ V_G จะสามารถบอกความสัมพันธ์ได้อีกเช่นกัน คือ $V_T \cdot t$ หมายถึง ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกตามแนวรอยอนุภาค และ $V_G \cdot t$ หมายถึง ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกบริเวณผิวทั่วไป ค่า $V_T \cdot t$ และ $V_G \cdot t$ จะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติเฉพาะของโพลีเมอร์แต่ละชนิดได้

กลไกการเกิดรอย (Track Formation Mechanism)

กลไกการเกิดรอยในวัสดุตัวกลางมี 2 ทฤษฎี [9] คือ

1. ทฤษฎี “ไอออนเอกซ์ปริชันสไปค์” (Ion Explosion Spike Theory)

เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางจะทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Vibration) ซึ่งถ้าหากมีพลังงานเพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรหรือเรียกว่าอะตอมแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) เกิดประจุรอบๆ แนวที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน อะตอมที่มีประจุบวกเหล่านี้จะผลักกัน ทำให้อะตอมที่มีประจุเคลื่อนที่ไปเบียดกับอะตอมที่ถัดไปทำให้เกิดความเครียดขึ้น ความเครียดนี้จะแผ่กระจายไปยังอะตอมถัดไปทุกทิศทางทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดความสมดุลและกลายเป็นช่องว่างเกิดขึ้นในบริเวณนั้นจนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังแสดงในรูป 2.1 ขบวนการนี้เกิดขึ้นได้กับสารจำพวกที่เป็นฉนวน เช่น ไมกา และพลาสติก เป็นต้น แต่ถ้าเป็นตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดี เช่น โลหะ อะตอมที่กลายเป็นไอออนบวกดังกล่าว จะจับเอาอิเล็กตรอนจากบริเวณรอบๆ ทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นกลางกลับคืนสู่สภาพเดิม จึงไม่เกิดช่องว่าง

2. ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เทอร์มัลสไปค์ (Electronic Thermal Spike)

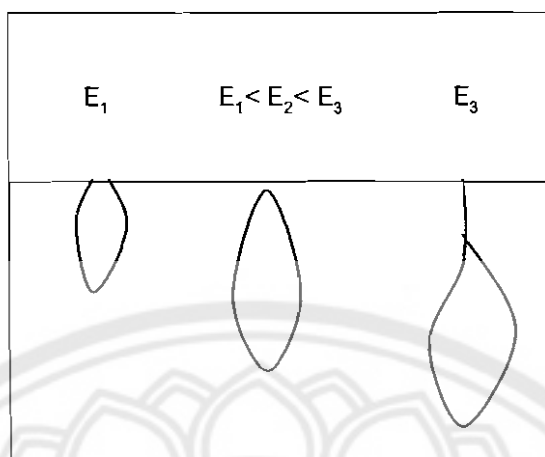
เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ จะคายพลังงานให้กับวัสดุตัวกลางที่วิ่งผ่านเกิดเป็นความร้อนขึ้นในกรณีที่ว่าวัสดุตัวกลางเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่กระจายไปอย่างรวดเร็วทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างของตัวกลางในบริเวณนั้นถูกทำลายไป เป็นผลให้เกิดรอยขึ้น

จากทฤษฎีทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าการเกิดรอยบนวัสดุตัวกลางนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ

2.1 คุณสมบัติของอนุภาคที่มีประจุ เช่น มวล พลังงาน เลขประจุ

2.2 คุณสมบัติของตัวกลาง เช่น ชนิดของวัสดุตัวกลางเป็นฉนวนหรือตัวนำความร้อนหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมมากหรือน้อย เป็นต้น

ในการเกิดรอยนี้ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุ อนุภาคมีประจุต้องถ่ายเทพลังงานให้วัสดุตัวกลางมากกว่าค่าพลังงานวิกฤต (Critical energy) ของวัสดุชิ้นนั้นจึงจะปรากฏรอยขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดรอยหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดและระดับพลังงานของอนุภาคที่มีประจุและชนิดของวัสดุที่ใช้



ภาพ 4 แผนภาพแสดงกลไกการเกิดรอย

3. ลักษณะของรอยอนุภาค

การเกิดรอยของอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยนั้นจะมีความลึกของรอยอยู่ในระดับที่แตกต่างกันออกไป [9] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของอนุภาค ที่พุ่งเข้าชนวัสดุบันทึกรอยนั้น ถ้าอนุภาคที่ชนมีพลังงานจลน์มาก อัตราการสูญเสียพลังงานให้ตัวกลางก็จะน้อย แต่ถ้าอนุภาคมีพลังงานจลน์น้อยอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ให้ตัวกลางก็จะมาก เช่น ถ้าเราใช้วัสดุตัวกลางเป็นเซลลูโลสในเตรต อนุภาคที่ทำให้เกิดรอยบนแผ่นตัวกลางชนิดนี้ได้จะมีพลังงานจลน์ในช่วงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.55 MeV แต่ถ้าอนุภาคโปรตอนมีพลังงานมากกว่า 0.55 MeV พุ่งเข้าชนตัวกลาง จะต้องรอให้โปรตอนนั้นเสียพลังงานไปบางส่วนก่อน จนกระทั่งเหลือ 0.55 MeV จึงจะทำให้เกิดรอยบนตัวกลาง ดังนั้นรอยที่เกิดขึ้นจึงอยู่ลึกลงไปอีกในแผ่นวัสดุตัวกลาง ดังแสดงในภาพ 4

เมื่อนำแผ่นตัวกลางไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม ก็จะปรากฏรอยขึ้นบนแผ่นวัสดุ ถ้าใช้เวลานานในการกัดรอยนานก็จะเห็นรอยของอนุภาคที่อยู่ลึกลงไปอีกระดับ และรอยที่อยู่ตื้นก็จะถูกลบเลือนไป



ภาพ 5 แสดงการเกิดรอยของอนุภาคบนวัสดุ เมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ต่างๆ กัน [9]

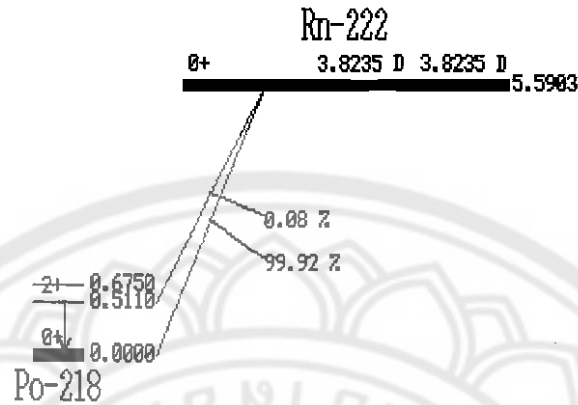
สมบัติของเรดอนและปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของเรดอน

เรดอนมีสมบัติ ดังต่อไปนี้

สัญลักษณ์	:	Rn
เลขอะตอม	:	86
เลขมวล	:	222.0 amu
จำนวนโปรตอน/อิเล็กตรอน	:	86
จำนวนนิวตรอน	:	136



1. ผังการสลายตัวของเรดอน



ภาพ 6 แสดงแผนผังการสลายตัวของเรดอน-222 (Rn-222) [10]

2. ความเข้มข้นของเรดอนในบรรยากาศ (Outdoor Concentration)

เรดอนเป็นแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นหนักเป็นเจ็ดเท่าครึ่งของอากาศ เมื่อเรเดียมในดินสลายตัวเรดอนที่ได้ จะแพร่กระจายของดินออกสู่บรรยากาศอิสระ โอกาสที่เรดอนบางส่วนจะถูกดูดซับอยู่ในชั้นของดินก็ยังมีมาก หากเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม นอกจากนี้เรดอนบางส่วนจะสลายตัวไปก่อนที่จะมีโอกาสหลุดรอดออกไปสู่บรรยากาศได้ จากการวิจัยพบว่า ร้อยละ 1 - 80 ที่จะมีโอกาสหลุดรอดออกเป็นอิสระได้ การเคลื่อนที่ออกไปนั้นอาศัยขบวนการแพร่กระจายหรือการซึมผ่าน และขบวนการเคลื่อนที่โดยอาศัยความดันของอากาศที่แตกต่างกันระหว่างตัวกลางหรือการพา ซึ่งจะเกิดมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของสภาพอากาศ พื้นที่ ของบริเวณที่เรดอนจะฟุ้งกระจายออกมา (Area exhalation rate) [1]

ความเข้มข้นของเรดอนในอากาศมีค่าไม่คงที่ และเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับสถานที่ เวลา ความสูงของพื้นที่จากระดับน้ำทะเลหรือจากระดับพื้นดิน ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ ของสภาพอากาศ เช่น ความเร็วลม ความชื้น อุณหภูมิ ความกดอากาศ เนื่องจากเรดอนอยู่ในสถานะของแก๊ส และเกิดมาจากพื้นดิน รวมทั้งมีครึ่งชีวิตค่อนข้างสั้น ดังนั้นหากพื้นที่ที่อยู่สูงจากระดับพื้นดินมากขึ้นเท่าใด ปริมาณความเข้มข้นของเรดอนก็จะยิ่งลดน้อยลงเท่านั้น ความเร็วลมมากการฟุ้งกระจายก็ยิ่งมาก ความเข้มข้นก็ลดลง ความชื้นสูงเรดอนก็จะมีโอกาสสะสมอยู่ได้มาก แต่ถ้าพื้นดินมีปริมาณความชื้นน้อย พื้นดินแห้ง โอกาสหลุดรอดของเรดอนออกสู่บรรยากาศก็มากขึ้น ฤดูกาลก็มี

ส่วนทำให้ความเข้มข้นต่างไป นอกจากพื้นดินแล้ว เรายังมาจากมหาสมุทร น้ำใต้ดิน แก๊สธรรมชาติ การเผาไหม้ถ่านหิน และเหมืองแร่ต่างๆ โดยเฉพาะแร่ฟอสเฟต

3. ความเข้มข้นของเรดอนในอาคาร (Indoor Concentration)

เรดอนภายในอาคาร [1] มาจาก พื้นดิน หิน รอบๆ ของใต้อาคาร วัสดุก่อสร้าง ท่อ น้ำ แก๊ส และจากอากาศภายนอกที่ไหลเวียนเข้ามาภายในอาคาร ส่วนเรดอนจากพื้นดินผ่านเข้าสู่อาคารโดยการซึมผ่าน และจากความกดอากาศ (Pressure driven) ที่แตกต่างกันระหว่างตัวกลาง ทำให้เรดอนสามารถผ่านรูพรุนรอยต่อ หรือรอยแตกของพื้นผนัง ตลอดจนจุดเชื่อมต่อของพื้นผนัง ตลอดจนจุดเชื่อมต่อของพื้นและท่อต่างๆ พบว่าการกระจายของเรดอนเข้าสู่ภายในอาคารเกิดโดยแรงดัน เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดอากาศมากกว่าการซึมผ่านปกติ และการซึมผ่านนั้นจะผ่านเข้าทางรอยรั่วรอยร้าวมากกว่าผ่านทางพื้นคอนกรีตโดยตรง บ้านติดพื้นดินจะมีความเข้มข้นของเรดอนในบ้านมากกว่าบ้านที่มีพื้นสูงจากพื้นดิน

ปริมาณของเรเดียมในดิน ความชื้น รูพรุน อัตราการระเหยของความชื้นในดิน ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในภายนอกอาคาร กระแสลม สิ่งเหล่านี้ล้วนมีส่วน ทำให้ความกดอากาศภายในและภายนอกอาคารแตกต่างกันไป จึงทำให้เกิดแรงดันให้มีการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งรวมไปถึงปริมาณความเข้มข้นของเรดอนในอาคารมีการแปรเปลี่ยนได้

4. วัสดุก่อสร้าง

วัสดุที่นำมาใช้เป็นพื้นผนังของอาคารมีหลายชนิด โดยปกติมักจะเป็นคอนกรีต อิฐ หรือไม้ สำหรับไม้ประเภทต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจะให้เรดอนต่อผู้อยู่อาศัยน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่น คอนกรีตและอิฐมีปริมาณของเรดอนแพร่กระจายออกมามากกว่า [1] ทั้งนี้โดยขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตเป็นคอนกรีตหรืออิฐ เช่น ในประเทศสวีเดนมีการนำหินที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมสูง (Alum shale) มาใช้เป็นคอนกรีต บ้านเรือนประมาณแสนถึงเจ็ดแสนหลังใช้วัตถุดิบนี้ในการก่อสร้าง ซึ่งพบว่าหินประเภทนี้มีสารกัมมันตรังสีสูงมาก ซึ่งจะทำให้ผู้อาศัยในบ้านเรือนดังกล่าว ได้รับรังสีสูงกว่าปกติตามไปด้วย ต่อมาจึงได้เลิกผลิตคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของหินประเภทนี้ วัสดุอื่นๆ เช่นพวกหางแร่ต่างๆ หรือฟอสฟอริบซัม (Phosphogypsum) ก็มักจะนำมาใช้ทำคอนกรีตหรือซีเมนต์ เนื่องจากทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง แต่มีผลทำให้ผู้อาศัยได้รับปริมาณรังสีสูงขึ้น

การจะลดปริมาณของเรดอนภายในอาคารจากแหล่งกำเนิดประเภทวัสดุก่อสร้าง ที่ได้มี การศึกษาและใช้กันคือการทาสีเคลือบผิวหน้าของพื้นหรือผนัง การใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทับฝา ผนังบ้าน ซึ่งพบว่าการทับฝ้าผนังด้วยแผ่น อลูมิเนียมในบริเวณบ้านที่ก่อสร้างอยู่บนพื้นซึ่งมีรังสี สูง สามารถลดปริมาณรังสีลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งก่อนมีการทับ

5. อากาศภายนอก

ระดับความเข้มข้นเรดอนภายในอาคารมีผลมาจากเรดอนภายนอกอาคารด้วย ทั้งนี้จากการเปิดประตูหน้าต่าง การถ่ายเทหมุนเวียนอากาศจากเครื่องปรับอากาศ เครื่องดูด ควัน และอื่นๆ ลักษณะรูปร่างของอาคารบ้านเรือนมีผลต่อความเข้มข้นของเรดอนเป็นอย่างมาก บ้านไม่ได้ตื้นสูง มีระดับรังสีต่ำกว่าบ้านคอนกรีตติดกับพื้น แต่หากเป็นบ้านที่ยกพื้นไม่สูงนัก บริเวณใต้ถุนอันขึ้นมาก โอกาสของเรดอนที่อยู่ในพื้นดินใต้ถุนบ้านก็สามารถแทรกซึมเข้าสู่ในบ้าน ได้มากกว่าบ้านที่มีการถ่ายเทอากาศ หรือการหมุนเวียนอากาศดีกว่า ในประเทศแถบยุโรปหรือ อเมริกาในบริเวณกลางทวีป มีความเข้มข้นของเรดอนในอาคารบ้านเรือนสูงประมาณแปดเท่าจาก ภายนอกอาคาร ทั้งนี้เพราะบ้านเรือนในแถบนั้นมีการถ่ายเทอากาศไม่ดี และต้องการประหยัด พลังงานในการทำความอบอุ่นให้แก่บ้าน จึงสร้างบ้านในลักษณะป้องกันกรไหลเวียน หรือการเล็ด ลอดของอากาศภายนอกเข้าภายในมากที่สุด และส่วนใหญ่บ้านเรือนในประเทศแถบนั้น มักจะ สร้างด้วยคอนกรีต หรืออิฐ ประเภทต่างๆ รวมทั้งมีห้องใต้ดินที่ค่อนข้างคับชื้น เมื่อมีรอยรั่วต่อ ระหว่างท่อหรือชั้นต่างๆ จึงทำให้เรดอนจากดินพุ่งเข้าสู่ในบ้านและโอกาสที่จะกระจายออกนอก บ้านมีน้อยกว่าที่ควร

6. การถ่ายเทอากาศ

การถ่ายเทอากาศนับว่ามีความสำคัญ เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการที่ผู้อยู่ อาศัยจะได้รับรังสีสูงมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้เพราะการเปิดประตู หน้าต่าง การเปิดพัดลม เครื่องดูด ควัน เครื่องระบายอากาศ ล้วนทำให้มีการถ่ายเทและไหลเวียนของอากาศภายในและภายนอกได้ มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ระดับความเข้มข้นรังสีในอาคารลดลงได้

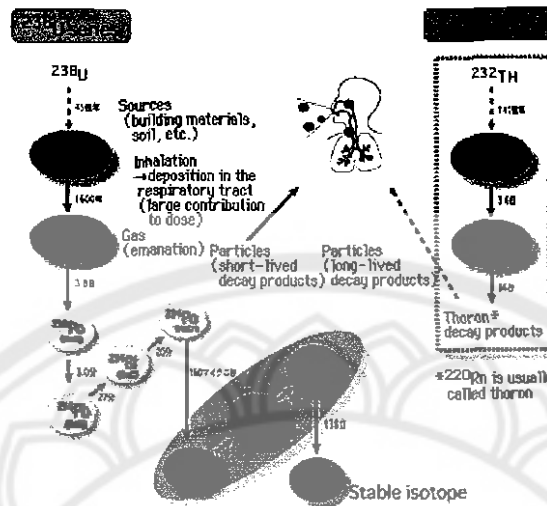
อันตรายต่อมนุษย์

อันตรายของเรดอนไม่ได้เกิดจากแก๊สเรดอนโดยตรง จะเกิดจากอนุภาคที่เป็นผลผลิตจาก การสลายตัวของเรดอน ผลผลิตนี้ได้แก่ อนุภาคพอลิเนียม-214 และพอลิเนียม-218 (Po-214 ,

Po-218) ซึ่งเป็นไอออนอิสระ (Free ion) เมื่อเรดอนสลายตัวให้ Po-214, Po-218 เกิดขึ้น โมเลกุลของน้ำ และแก๊สอื่นๆ จะเข้ามาอยู่รอบๆ ทำให้เกิดโมเลกุลใหญ่ขึ้น (Molecular cluster) ขนาดประมาณ 2-20 nm Po-214, Po-218 ในสภาพโมเลกุลใหญ่และเล็กต่างก็เป็น ไอออนอิสระจึงเคลื่อนที่ได้เร็วภายในเวลา 10 -100 วินาที ก็จะเกาะติดเข้ากับละอองในอากาศ ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 50 -500 nm ส่วนที่ไม่ได้ติดกับละอองก็จะร่วงตกลงติดกับผาผนังหรือพื้นห้อง และจะถูกพัดพาออกจากอาคาร หรือสลายตัวต่อไปเป็นตะกั่ว-214 (Pb-214) การจะเกาะติดหรือร่วงตกลงอย่างไร นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของห้อง ซึ่งทั้งพอไลเนี่ยมและตะกั่วมีคุณสมบัติในการเกาะติดกับละอองต่างๆ เหมือนกัน โดยอัตราความเร็วจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยประกอบอื่นๆ เช่น การถ่ายเทอากาศ ความชื้น ขนาดของพื้นที่ของพื้นห้อง และผาผนัง ซึ่งโดยเฉลี่ยจะมีการเกาะติดประมาณสองถึงสามร้อยอนุภาคต่อชั่วโมง เมื่ออนุภาคเหล่านี้แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศรอบๆ โอกาสการหายใจเข้าสู่ปอดของมนุษย์ก็จะมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคทั้งสองมีขนาดเล็ก จึงสามารถผ่านระบบป้องกันและกำจัดฝุ่นของจมูกเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจเข้าไปเกาะในส่วนลึกของปอด ซึ่งอนุภาคจะแผ่รังสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งรังสีแอลฟา ทำลายเนื้อเยื่อบริเวณที่อนุภาคเกาะติดอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่น่าไปสู่การเกิดมะเร็งที่ปอด

หลักฐานชิ้นสำคัญของการเป็นมะเร็งปอดอันเนื่องมาจากแก๊สเรดอน ได้จากการศึกษาทางระบาดวิทยาของคนงานเหมืองแร่หลายพันคนทั่วโลก โดยใช้ระยะเวลาการศึกษากว่า 50 ปี ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาการเป็นมะเร็งปอดในกลุ่มประชากรต่าง ๆ ในพื้นที่ที่ต่างกัน ล้วนแล้วแต่ให้ผลการศึกษา การก่อมะเร็งที่ตรงกัน นอกจากเรดอนจะเป็นปัจจัยเสี่ยงโดยตรง ต่อการเกิดมะเร็งปอดแล้ว จากการศึกษาในคนงานทำเหมือง ยังพบว่า ตัวแปรอื่น ๆ เช่น อายุ ระยะเวลาการสัมผัส ระยะเวลา นับตั้งแต่เริ่มสัมผัส และการสูบบุหรี่ มีความสัมพันธ์กับการเกิดมะเร็งปอดด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสูบบุหรี่จะเพิ่มความเสี่ยง ของการเกิดมะเร็ง เป็นหลายเท่าตัว

ในปี ค.ศ.1988 องค์การระหว่างประเทศ เพื่อการวิจัยโรคมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer) แห่งองค์การอนามัยโลก ได้จัดประชุมผู้เชี่ยวชาญทั่วโลก และได้ข้อสรุปเป็นเอกฉันท์ว่ามีหลักฐานแน่ชัด ยืนยันได้ว่า เรดอนเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ และสัตว์ เช่นเดียวกับการประชุมนักวิทยาศาสตร์ ชี้นำทั่วโลก ซึ่งจัดโดย National Academic of Sciences, International Commission on Radiological Protection และ National Council on Radiation Protection and Measurement ได้สรุปว่า เรดอนเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งปอดในมนุษย์



ภาพ 7 แสดงการเข้าสู่ร่างกายของแก๊สเรดอน [11]

การตรวจวัดแก๊สเรดอน

การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนสามารถทำได้ 3 วิธี [12] คือ

11.1 การวัดแบบสะสม (Integrative sampling) เป็นการวัดแบบสะสม โดยเป็นการเฉลี่ยค่าความเข้มข้นแก๊สเรดอนตลอดระยะเวลาที่ทำการตรวจวัด

11.2 การวัดตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (Grab sampling) เป็นการวัดความเข้มข้นแก๊สเรดอนหรือตรวจวัดผลิตผลจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนที่เวลาช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่เนื่องจากระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนอาจแปรเปลี่ยนอย่างมากที่เวลาต่างๆ ด้วยปัจจัยหลายประการเทคนิคการวัดแบบนี้จึงนิยมใช้ในการตรวจสอบในโรงงานอุตสาหกรรม

11.3 การวัดแบบต่อเนื่อง (Continuous active sampling) เป็นการวัดแบบซ้ำเป็นจังหวะต่อเนื่องอัตโนมัติตลอดช่วงเวลาที่กำหนด วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง จะใช้ต่อเมื่อการวัดแบบอื่นมีปัญหาเนื่องจากมีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนสูง

ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการกักรอยนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของวิธีการวัดแบบสะสม (Integrative sampling) โดยใช้แผ่นพลาสติก CR-39 ซึ่งเป็นพลาสติกจำพวก Diethylenglycol bis allylcarbonate , ACD เป็นตัวตรวจจับอนุภาค ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอน เมื่ออนุภาคแอลฟาชนแผ่นพลาสติก จะทำให้อนุภาคสูญเสียพลังงาน และเกิดรอยแฝง

ตามทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน รอยที่เกิดขึ้นไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จึงต้องทำการกัดขยายรอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อที่จะสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์

สูตรค่าตัวประกอบการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration Factor)

ในการปรับเทียบมาตรฐานครั้งนี้ จะหาจากสมการ (2-21) , (2-22) ซึ่งเป็น สมการการเปิดรับเรดอนบนแผ่น CR-39 และสมการ (2-23) ,(2-24) ซึ่งเป็นสมการการเปิดรับทอรอง โดยแก้สมการเพื่อหาค่าตัวประกอบการปรับเทียบมาตรฐาน จากนั้นนำค่าตัวประกอบการปรับเทียบมาตรฐาน แทนลงในสมการ (2-45) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นแก๊สเรดอน

สมการการเปิดรับเรดอน [31]

$$A_{Rn} = Q_{Rn} CF_{Rn_1} T + Q_{Tn} CF_{Tn_1} T + B_1 \quad (2-21)$$

$$A_{Tn} = Q_{Rn} CF_{Rn_2} T + Q_{Tn} CF_{Tn_2} T + B_2 \quad (2-22)$$

เมื่อ

A_{Rn} คือ จำนวนรอยแทรคที่เกิดจากเรดอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น track/cm²

A_{Tn} คือ จำนวนรอยแทรคที่เกิดจากทอรองบนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น track/cm²

Q_{Rn} คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานเรดอนมีหน่วยเป็น Bq/m³

Q_{Tn} คือ ความเข้มข้นแก๊สทอรองที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานเรดอนมีหน่วยเป็น Bq/m³

CF_{Rn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดเรดอน มีหน่วยเป็น track/cm²/Bq/m³h⁻¹

CF_{Tn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดทอรอง มีหน่วยเป็น track/cm²/Bq/m³h⁻¹

T คือ เวลาที่ใช้ในการเปิดรับเรดอน มีหน่วยเป็น h

B คือ ค่าแบคกราวด์ ของ CR-39 มีหน่วยเป็น track/cm²

สมการการเปิดรับทอรอง [31]

$$B_{Rn} = Q'_{Rn} CF_{Rn_1} T + Q'_{Tn} CF_{Tn_1} + B_3 \quad (2-23)$$

$$B_{Tn} = Q'_{Rn} CF_{Rn_2} T + Q'_{Tn} CF_{Tn_2} + B_4 \quad (2-24)$$

เมื่อ

B_{Rn} คือ จำนวนรอยแทรคที่เกิดจากเรดอน บนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น track/cm²

B_{Tn} คือ จำนวนรอยแตรคที่เกิดจากทอรอนบนแผ่น CR-39/พื้นที่ มีหน่วยเป็น track/cm²

Q_{Rn} คือ ความเข้มข้นแก๊สเรดอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานทอรอนมีหน่วยเป็น Bq/m³

Q_{Tn} คือ ความเข้มข้นแก๊สทอรอนที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานทอรอนมีหน่วยเป็น Bq/m³

CF_{Rn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดเรดอน มีหน่วยเป็น track/cm²/Bq/m³ h⁻¹

CF_{Tn} คือ ประสิทธิภาพในการวัดทอรอน มีหน่วยเป็น track/cm²/Bq/m³ h⁻¹

T คือ เวลาที่ใช้ในการเปิดรับทอรอน มีหน่วยเป็น h

B คือ ค่าแบคกราวด์ของ CR-39 มีหน่วยเป็น track/cm²

จัดสมการเพื่อหาค่า CF_{Rn} และ CF_{Tn} โดยกำหนด

$$k_1 = Q_{Rn}C + Q_{Rn}D \quad (2-25)$$

$$k_2 = Q_{Rn}E + Q_{Tn}F \quad (2-26)$$

$$k_3 = Q_{Rn}'C + Q_{Tn}'D \quad (2-27)$$

$$k_4 = Q_{Rn}'E + Q_{Tn}'F \quad (2-28)$$

โดยที่

$$k_1 = (A_{Rn} - B_1)/T_1 \quad (2-29)$$

$$k_2 = (A_{Tn} - B_2)/T_2 \quad (2-30)$$

$$k_3 = (B_{Rn} - B_3)/T_3 \quad (2-31)$$

$$k_4 = (B_{Tn} - B_4)/T_4 \quad (2-32)$$

และ

$$C = CF_{Rn1} \quad (2-33)$$

$$D = CF_{Tn1} \quad (2-34)$$

$$E = CF_{Rn2} \quad (2-35)$$

$$D = CF_{Tn2} \quad (2-36)$$

แก้สมการโดยใช้กฎของแครมเมอร์ (Cramer's Rule) ได้

$$CF_{Rn1} = \frac{k_1 Q'_{Tn} - k_3 Q_{Tn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2-37)$$

$$CF_{Tn1} = \frac{k_3 Q_{Rn} - k_1 Q'_{Rn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2-38)$$

$$CF_{Rn2} = \frac{k_2 Q'_{Tn} - k_4 Q_{Tn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2-39)$$

$$CF_{Tn2} = \frac{k_4 Q_{Rn} - k_2 Q'_{Rn}}{Q_{Rn} Q'_{Tn} - Q'_{Rn} Q_{Tn}} \quad (2-40)$$

เมื่อได้ค่า CF_{Rn1} , CF_{Tn1} , CF_{Rn2} , CF_{Tn2} แทนในสมการ (2-21), (2-22), (2-23), (2-24) จากนั้นแก้สมการโดยใช้ กฎของแครมเมอร์ (Cramer's Rule) จะได้

$$Q_{Rn} = \frac{k_1 F - k_2 D}{CF - ED} \quad (2-41)$$

$$Q_{Tn} = \frac{k_2 C - k_1 E}{CF - ED} \quad (2-42)$$

$$Q'_{Rn} = \frac{k_3 F - k_4 D}{CF - ED} \quad (2-43)$$

$$Q'_{Tn} = \frac{k_4 C - k_3 E}{CF - ED} \quad (2-44)$$

จากนั้นหาค่า เรตอน จากการทำ CR-39 วางในอาคารบ้านเรือน จากสมการ

$$Q_{Rn} = \frac{\left[\left(\frac{A_{Rn} - B_1}{T_1} \right) (CF_{Tn2}) \right] - \left[\left(\frac{A_{Tn} - B_2}{T_1} \right) (CF_{Rn1}) \right]}{\left[(CR_{Rn1}) (CF_{Tn2}) \right] - \left[(CF_{Rn2}) (CF_{Tn1}) \right]} \quad (2-45)$$

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ไพฑูรย์ วรรณพงษ์ และคณะ [12] ได้ทำวิจัยเรื่อง เปรียบเทียบการวัดระดับแก๊สเรดอน ในอาคาร 2 วิธี โดยทำการเปรียบเทียบผลการวัดแก๊สเรดอนภาคสนามในอาคารบ้านที่อยู่อาศัยจำนวน 188 หลัง ที่อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น, ระหว่างอุปกรณ์วัดแบบถ่านกัมมันต์กับแบบพลาสติก CR-39 เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยหา, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่ามัธยฐานและพิสัยของระดับแก๊สเรดอนในอาคารแยกตามตำบล พบว่ามีความแตกต่างโดยนัยสำคัญทางสถิติของการตรวจในทุกตำบล และในค่ารวมทั้งอำเภอ ระดับความแตกต่างระหว่างการตรวจทั้ง 2 วิธีอยู่ในเกณฑ์ $1-42 \text{ Bq/m}^3$ (ค่ามัธยฐาน 8 Bq/m^3 ; ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $9.35 \pm 7.31 \text{ Bq/m}^3$) ผู้ทำวิจัยสรุปว่าวิธีวัดแบบถ่านกัมมันต์ยังมีประโยชน์ใช้ตรวจวัดแก๊สเรดอนในอาคารได้

2. ไพฑูรย์ วรรณพงษ์ และคณะ [13] ได้ทำวิจัยเรื่องการสำรวจระดับแก๊สเรดอนด้วยอุปกรณ์บันทึกรอยอนุภาคแอลฟา โดยได้ทำวิจัยในจังหวัดที่คาดว่าจะมีแก๊สเรดอนระดับสูงสามแห่งคือที่อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่ และอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา ผลการสำรวจพบว่า ระดับแก๊สเรดอนในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อน 21 ± 7 , 21 ± 6 และ $52 \pm 17 \text{ Bq/m}^3$ ตามลำดับ ในบางจุดสำรวจได้ทำการตรวจวัดระดับรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อม และในบางจุดสำรวจได้ทำการรวบรวมแบบสอบถามสำหรับสภาพที่อยู่อาศัย ผลสำรวจชี้ให้เห็นว่าแก๊สเรดอนและระดับรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาพปกติ

3. สมชัย บวรกิตติ และคณะ [14] โดยผู้วิจัยได้ทำการสำรวจแก๊สเรดอนในอาคารบ้านเรือนจำนวน 2,537 หลัง ใน 19 อำเภอของจังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีแก๊สเรดอน ในทุกอาคารที่ทำการตรวจวัด (พิสัย $0.04 - 9.087 \text{ Bq/m}^3$, และค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $15.22 \pm 9.23 \text{ Bq/m}^3$) ความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของแก๊สระหว่างบางอำเภอ (ค่าพินัยน้อยกว่า 0.05) และระหว่างอาคารที่มีเครื่องปรับอากาศกับไม่มี (ค่าพินัยเท่ากับ 0.02) มีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัสดุก่อสร้างของอาคาร ความสูงของพื้นบ้านจากพื้นดิน การระบายอากาศในตัวอาคาร และการสูบบุหรี่ ไม่สัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในเชิงสถิติ

4. โกวิท ญ นคร [6] ได้ทำการวิจัยเรื่องระดับความเข้มข้น ไอโซโทปรังสี ที่มีครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอน และทอรอน ภายใน-ภายนอกอาคาร โดยได้คำนวณหาสมการวัด

กัมมันตภาพรังสี ใน 5 ช่วงเวลาคือ จาก 2 ถึง 5, 6 ถึง 20, 21 ถึง 30, 90 ถึง 180 และ 180 ถึง 240 นาที ภายหลังจากการดูดอากาศนานเป็นเวลา 60 นาที เพื่อใช้ในการวัดระดับความเข้มข้นไอโซโทปรังสี ที่มีครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอน และทอรอน ภายใน-ภายนอกอาคาร ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น จากนั้นได้คาดคะเนความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ครึ่งชีวิตสั้นของเรดอนและทอรอนกับอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันอากาศ นอกจากนี้ยังได้ประเมินอันตราย จำนวนประชากรตายด้วยโรคมะเร็ง จากระดับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ครึ่งชีวิตสั้นของเรดอนโดยใช้ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดที่วัดได้จากการศึกษา

5. ไตรภพ ผ่องสุวรรณและคณะ [12] ได้ทำวิจัยเรื่องการประเมินความเสี่ยงต่อเรดอน ภายในและภายนอกอาคารในพื้นที่ชุมชน เขตลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา โดยที่ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนภายในบ้านเรือนในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา จำนวนทั้งสิ้น 2, 161 หลังคาเรือน มีค่าอยู่ในช่วง 9-1, 307Bq/m³ แก๊สเรดอนเฉลี่ย ของจังหวัดสงขลา และจังหวัดพัทลุง เท่ากับ 225 และ 268 Bq/m³ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับมาตรฐาน USEPA คือ 148 Bq/m³ แต่ต่ำกว่าระดับ 269 Bq/m³ ที่เป็นระดับมาตรฐานปฏิบัติของ US NCRP

จากการตรวจวัดระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในบ้านเรือนในเขต จังหวัดสงขลา พบว่ามีเพียงร้อยละ 17.7 ที่มีระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในบ้านเรือนต่ำกว่า 148 Bq/m³ และ ร้อยละ 64.7 มีค่าต่ำกว่า 296 Bq/m³ ส่วนในจังหวัดพัทลุง พบว่ามีบ้านเรือนร้อยละ 49.5 ที่มีระดับต่ำกว่า 148 Bq/m³ และร้อยละ 75.2 ต่ำกว่า 296 Bq/m³ จากการตรวจสอบจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอด พบว่า จำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอดในจังหวัดสงขลาอันเนื่องจากแก๊สเรดอนประเมินไว้ที่ 2,718 คน ซึ่งสูงกว่าจำนวนผู้ป่วยมะเร็งปอด 426 คน จากข้อมูลหน่วยมะเร็งของโรงพยาบาล แสดงว่าผู้เป็นมะเร็งปอดเนื่องจากแก๊สเรดอนอาจมีจำนวนต่ำกว่า 2,718 คน หรือจำนวนผู้ป่วย 426 คน ยังต่ำกว่าความเป็นจริงอยู่มาก

6. พงศ์เทพ วิวรรณะเดช [15] ได้ทำวิจัยเรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สเรดอน ในที่อยู่อาศัย และมะเร็งปอด โดยที่การศึกษาวินิจฉัย เป็นการศึกษาระเบิดเชิงวิเคราะห์แบบย้อนหลัง (Case-Control Study) โดยมีกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มผู้ป่วยมะเร็งปอด ที่อาศัยอยู่ในอำเภอสารภี และได้ขึ้นทะเบียนไว้กับหน่วยมะเร็ง คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ.2536 ถึง 2541 ทั้งยังมีชีวิตอยู่ และเสียชีวิตไปแล้ว จำนวน 201 คน และกลุ่มควบคุม ใน 2 อำเภอ ได้แก่ ผู้ที่อาศัยอยู่ในอำเภอสารภี ที่ไม่เป็นโรคมะเร็งปอด อยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับผู้ป่วย และมีอายุ

ใกล้เคียงกัน จำนวน 225 คน และผู้ที่อาศัยอยู่ในอำเภอจอมทอง โดยมีอายุอยู่ในช่วงเดียวกัน ผู้ป่วย อีกจำนวน 193 คน กลุ่มควบคุมทั้งหมด ได้รับการถ่ายภาพรังสีทรวงอก ณ โรงพยาบาลชุมชน เพื่อคัดเอาผู้ที่มีผล การอ่านฟิล์มเข้าได้ หรืออาจเข้าได้กับโรคมะเร็งปอด ออกจากการศึกษา ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล ตั้งแต่วันที่ 23 มิถุนายน 2543 ถึงวันที่ 18 พฤศจิกายน 2543

ผลการศึกษา พบว่า กลุ่มศึกษา (ผู้ป่วย) มีสัดส่วนชายต่อหญิงเป็น 1.07:1 พิสัย 36-85 ปี อายุเฉลี่ย 63.0 ± 9.0 ปี ร้อยละ 8.3 มีประวัติของญาติเป็นมะเร็งปอด ลักษณะบ้านส่วนใหญ่ เป็นบ้านไม้มีใต้ถุน พื้นบ้านเป็นปูน ส่วนของบ้านที่ผู้ป่วยใช้เวลาส่วนใหญ่ คือ ห้องนั่งเล่น หรือห้องรับแขก โดยมีความสูงของพื้นห้อง อยู่ในช่วง 0-1 เมตร ระบบการระบายอากาศส่วนใหญ่ ร้อยละ 84.5 ทางประตู และ/หรือ หน้าต่าง ด้านประวัติการสูบบุหรี่ ส่วนใหญ่เคยสูบบุหรี่ที่สูบบ่อยส่วนมาก คือ บุหรี่ชี่โย โดยมีระยะเวลาการสูบบุหรี่เฉลี่ย 35.6 ± 17.2 ปี ระดับเรดอนในบ้านอยู่ในช่วง $6.6-150.3 \text{ Bq/m}^3$ ค่าเฉลี่ย 26.41 Bq/m^3 เมื่อเทียบกับ 18.32 Bq/m^3 ของกลุ่มควบคุม อำเภอจอมทอง อำเภอสารภี จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ ระหว่างโอกาสการเกิดมะเร็งของ ผู้ป่วยมะเร็งปอด อำเภอสารภี เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมทั้งสองกลุ่ม กับปัจจัยเสี่ยงต่างๆ ด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่า ปัจจัยเสี่ยงที่ให้ผลตรงกัน คือ ปัจจัยเสี่ยงด้านระดับเรดอน และระยะเวลาของการสูบบุหรี่/เคยสูบบุหรี่ มีความสัมพันธ์ กับการเกิดมะเร็งปอด อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะระดับเรดอน มีอิทธิพลต่อการเกิดมะเร็งปอดมากที่สุด

7. Pomsri P. Polphong et al. [17] ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Radon In Human Environment โดยได้ทำเริ่มการศึกษาวิจัยในปี 1990 โดยได้สำรวจในอาคาร 14 หลัง ใน 3 จังหวัด โดยใช้เทคนิคการกักตรอยนิวเคลียร์ (CR-39) ได้ค่าเฉลี่ย $34.7 \pm 26.03 \text{ Bq/m}^3$ ในปี 1992-1994 ได้ใช้ถ่านกัมมันต์ (Charcoal Canister) สำรวจระดับความเข้มข้นแก๊สเรดอนในอาคาร 258 หลัง ใน 7 จังหวัด ได้ค่าความเข้มข้นแก๊สเรดอน 36.81 Bq/m^3