บทที่ 1

พิสิกส์พื้นฐานในการศึกษาทางชีวการแพทย์

1.1 บทนำ

ก่อนที่จะทำการศึกษาขั้นตอนของวิธีการนำสารกัมมันตรังสีไปใช้ประโยชน์ในด้านสุขภาพของมนุษย์ ผู้เขียนได้รวบรวมความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีซึ่งได้ยึดถือแนวที่จะอธิบายรายละเอียดให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจด้วยตนเองให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อันเป็นรากฐานสำคัญในการศึกษาตลอดจนวิเคราะห์วิจัยในสาขาวิชานี้ต่อไป

ในบทนี้กล่าวถึงธรรมชาติของสารกัมมันตรังสี การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามคุณสมบัติของกัมมันตรังสีที่ถูกปล่อยออกมา แผนภาพแสดงการสลายตัว หน่วยที่ใช้วัดความเข้มรังสี พาหะ *(carrier)* และปฏิกริยาของอนุภาครังสีและโฟตอนต่อวัสดุกั้น ในบทสรุปได้รวบรวมส่วนสำคัญตลอดจนคำอภิปรายหรือเสนอแนะเพื่อให้ผู้อ่านได้ทบทวนความรู้และความเข้าใจซึ่งได้เสนอรายละเอียดไปแล้วในตอนต้น

1.2 ธรรมชาติของสารกัมมันตภาพรังสี

หลังจากที่ *Roentgen* ค้นพบรังสีเอ็กซ์ในปี ค.ศ. 1895 ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านพยายามค้นคว้าคุณสมบัติของมัน ในปี ค.ศ. 1896 *Becquerel* ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับสารรังสีที่เกิดตามธรรมชาติ

นักวิทยาศาสตร์ค้นพบว่าเมื่อธาตุใดๆในธรรมชาติมีสถานะของนิวคลีไอ *(nuclei)* ไม่คงตัว จะเกิดการสลายตัวปล่อยกัมมันตรังสีชนิดต่างๆ เช่น รังสีแอลฟา (α) รังสีเบต้า (β) และรังสีแกมม่า (γ) (รังสีแอลฟาและเบต้ามักเรียกเป็น "อนุภาคแอลฟา" และ "อนุภาค

เบต้า") ซึ่งต่างมีลักษณะสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน จนกระทั่งกลายเป็นนิวเคลียส์ที่คงตัวจึงจะหยุดการสลายตัว เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "นิวเคลียร์ดิสอินทิเกรชั่น" *(Nuclear disintegration)* หรือ "การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี" *(Radioactive decay)* อนึ่งการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีไม่ขึ้นกับแฟคเตอร์ใดๆ เช่น อุณหภูมิ และความดัน ซึ่งใช้ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกริยาทางเคมี อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีขึ้นกับโครงสร้างของนิวเคลียส์ที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุลย์

แต่ละธาตุจะมีจำนวนโปรตอนแน่นอนเฉพาะตัวในนิวเคลียส เช่น คาร์บอน (C) มี 6 โปรตอน ไนโตรเจน *(N)* มี 7 โปรตอน และอ็อกซิเจน *(O)* มี 8 โปรตอน เป็นต้น แต่จำนวนนิวตรอนไม่เท่ากันเสมอไป นิวคลีไอของธาตุเดียวกันแต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกันออกไปเรียกว่า "ไอโซโทป" *(Isotope)* ของธาตุนั้นๆ เช่น ไอโอดีน-131 เป็นไอโซโทปหนึ่งของไอโอดีน สำหรับธาตุที่มีได้เป็นสารรังสีเรียก "ไอโซโทปลงตัว" หรือโดยทั่วไปเรียกว่า "ไอโซโทป" ถ้ามีคุณสมบัติเป็นสารรังสีเรียก "ไอโซโทปรังสี" เช่น คาร์บอนมีไอโซโทปลงตัวคือ ^{12}C และ ^{13}C ส่วนไอโซโทปรังสีมีหลายตัว เช่น ^{11}C ^{14}C และ ^{15}C ธาตุหนักจะมีไอโซโทปรังสีมากกว่าธาตุเบา เช่น ไอโอดีนมีไอโซโทปรังสีถึง 15 ตัว ส่วนไฮโดรเจนมีเพียง 1 ตัว คือ ทริเตียม *(Tritium)* หรือ ^{3}H

นิวไคลด์รังสีแต่ละตัวจะสลายตัวด้วยอัตราคงที่ และนิยมใช้ค่าครึ่งอายุหรือฮาล์ฟ-ไลฟ์ *(Half-life)* เป็นตัวบ่งบอก สัญญลักษณ์คือ $T_{\frac{1}{2}}$ เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่ใช้พิจารณาในการเลือกไอโซโทปรังสีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

1.3 การสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี

. - อนุภาคแอลฟา (ใช้สัญญลักษณ์ α)

นิวเคลียสของธาตุหนักๆมักจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาซึ่งเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม *(Helium)* มีประจุ +2 ประกอบด้วย 2 นิวตรอนและ 2 โปรตอน มีมวลและโมเมนตัมมาก มีอำนาจทะลุทะลวงน้อย รังสีแอลฟาพลังงาน 3 *MeV* มีเรนจ์ *(range)* เพียง 1.6 ซม.ในอากาศ และถ้าผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา $1_{/100}$ มม. ความเข้มรังสีจะลดลงครึ่งหนึ่งของความเข้มเดิม

ตัวอย่างการสลายตัวของเรเดียม - 226 จะได้เรดอน-222 และอนุภาคแอลฟา

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

2. - อนุภาคเบต้า (ใช้สัญญลักษณ์ β^-)

นิวไคลด์รังสีที่มีนิวตรอนมากกว่าปกติจะสลายตัวให้อนุภาคเบต้าซึ่งมีมวลน้อยมาก ประจุ -1 เมื่อเกิดใหม่ๆมีความเร็วสูง อำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคแอลฟา

ตัวอย่าง เช่น การสลายตัวของคาร์บอน -14 จะได้ไนโตรเจน -14 และอนุภาคเบต้า

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

3. - รังสีแกมม่า (ใช้สัญญลักษณ์ γ)

เป็นการแผ่รังสีแบบแม่เหล็กไฟฟ้า มีความถี่สูง ความยาวคลื่นสั้น พลังงานมาก มีลักษณะคล้ายรังสีเอ็กซ์แต่ต่างกันที่ต้นกำเนิดและระดับพลังงาน รังสีแกมม่าเกิดจากนิวเคลียส

ของ "คอมปาวนด์นิวเคลียส" *(compound nucleus)* มีความยาวคลื่นประมาณ $1_{/10}$ เท่าของรังสีเอ็กซ์ ส่วนรังสีเอ็กซ์เกิดจากอะตอม

ตัวอย่างการสลายตัวให้รังสีแกมม่า เช่น โคบอลต์-60*m* สลายตัวได้โคบอลต์ -60 และรังสีแกมม่า

$$^{60m}Co \xrightarrow{IT\ 0.059MeV} {}^{60}Co + \gamma$$

4. - อนุภาคโพซิตรอน (*positron* ใช้สัญญลักษณ์ β^+)

เมื่อนิวไคลด์รังสีมีจำนวนโปรตอนมากกว่าปกติ จะเกิดการสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอน ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคเบต้าแต่มีประจุตรงข้าม

ตัวอย่างการสลายตัวของไนโตรเจน -13 จะได้คาร์บอน-13 และอนุภาคโพซิตรอน

$$^{13}_{7}N \longrightarrow {}^{13}_{6}C + {}_{+1}e^{0}$$

ในบางโอกาส โพซิตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับอิเล็คตรอนกลายเป็นรังสีแกมม่าตามปฏิกริยาดังนี้

$$_{+1}e^{0} + {}_{-1}e^{0} \longrightarrow \gamma$$

5. - การจับอิเล็คตรอนหรือเรียกทับศัพท์ว่าอิเล็คตรอนแค็พเช่อร์ *(electron capture)* หรือ เค-แค็พเช่อร์ *(K-capture* ใช้สัญญลักษณ์ *EC)*

เมื่อนิวเคลียส์มีโปรตอนมากกว่าปกติแต่มีพลังงานน้อยกว่า 1.02 *MeV* จึงไม่สามารถส่งโพซิตรอนออกมาได้ ดังนั้นนิวเคลียส์จะจับอิเล็คตรอนที่อยู่ใกล้สุดคือในวง *K* และอิเล็คตรอนในวงโคจรสูงกว่าจะเข้าแทนที่ตำแหน่งว่างดังกล่าวโดยคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์

ตัวอย่างปฏิกริยา เช่น ทองแดง -64 จับอิเล็คตรอน จะได้นิกเกิล -64 และรังสีเอ็กซ์

$$^{64}_{29}Cu + {}_{-1}e^{0} \longrightarrow {}^{64}_{28}Ni + x\text{-}ray$$

6. - นิวตรอน *(neutron* ใช้สัญญลักษณ์ ${}_{0}n^{1}$*)*

นิวตรอนไม่มีประจุ มีมวลประมาณ *1 amu* เมื่อนิวเคลียส์มีพลังงานเอ็กไซต์สูงมากจะส่งนิวตรอนออกมา ซึ่งการส่งตัวให้นิวตรอนมีโอกาสเกิดได้ยากเว้นแต่ในเครื่องปฏิกรณ์ - ปรมาณูซึ่งเรียกว่า "ดีเลยด์ฟิสชั่น นิวตรอน" *(delayed fission neutron)*

ตัวอย่างการส่งตัวของซีนอน -137 ผลคือได้ซีนอน-136 และนิวตรอน

$$^{137}_{54}Xe \longrightarrow {}^{136}_{54}Xe + {}_{0}n^{1}$$

7. - อินเทอร์นัล คอนเวิร์ชั่น *(internal* conversion ใช้สัญญลักษณ์ *IC)*

เป็นการส่งตัวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในนิวเคลียส์ พลังงานส่วนเกินที่ได้จากการเปลี่ยนจากระดับสูงมาต่ำจะถูกถ่ายเทให้กับอิเล็คตรอนในวงโคจร ดังนั้นจากปฏิกริยานี้จึงทำให้เกิดออร์บิทอลอิเล็คตรอน *(orbital electron)* หลุดออกมาและรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดจากอิเล็คตรอนในวงโคจรสูงกว่าเคลื่อนลงมาแทนที่ว่างนั้น

ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ *As-73* เป็นไปได้ 2 แบบ คือ อินเทอร์นัลคอนเวิร์ชั่น 100% หรือให้ทั้งรังสีแกมม่าและเกิดอินเทอร์นัลคอนเวิร์ชั่น

$$^{73}As \xrightarrow{100\ \%} IC$$
$$\gamma\ 0.0539\ (10.1\ \%) \text{และ} IC(89.9\ \%)$$

8. - ไอโซเมอริคทรานซิชั่น *(isomeric transition* ใช้สัญญลักษณ์ *IT)*

เมื่อนิวเคลียส์มีระดับพลังงานสูงกว่ากราวนด์สเตท *(ground state)* ปกติจะแผ่รังสีแล้วกลับลงสู่สถานะกราวนด์สเตททันที แต่มีบางนิวไคลด์ที่ยังคงอยู่ในระดับพลังงานดังกล่าวชั่วเวลาหนึ่งแล้วจึงสลายตัวให้รังสีแกมม่าเพื่อกลับลงสู่กราวนด์สเตทระดับพลังงานดังกล่าวเรียกว่าเมตะสเตเบิ้ลสเตท *(metastable state)* และการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเรียกว่า "ไอโซเมอริคทรานซิชั่น" *(isomeric transition)*

ตัวอย่างเช่น $I_n - 113\ m$ สลายตัวเป็น $I_n - 113$ และรังสีแกมม่า

$$^{113m}I_n \xrightarrow{IT} {}^{113}I_n + \gamma$$

1.4 สมการการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการสลายตัวของสารรังสี คือ

$$A = A_o e^{-\lambda t} \qquad (1)$$

โดย A เป็นแอ็คติวิตี้ของการสลายตัวต่อหน่วยเวลา

A_o เป็นแอ็คติวิตี้เริ่มต้น

λ เป็นค่าคงที่ของการสลายตัว *(decay constant)* มีหน่วยเป็นส่วนกลับของหน่วยเวลา

t เป็นเวลา (หน่วยเป็น ช.ม.นาที หรือวินาที เป็นต้น)

λ มีค่าน้อยมาก เช่น ^{198}Au มีค่า λ เป็น 0.01 ต่อ ช.ม. หมายความว่าสารรังสีสลายตัว 0.01 ส่วน (1%) ต่อชั่วโมง

ความสัมพันธ์ของแอ็คติวิตี้และจำนวนอะตอมคือ

$$A = AN \qquad (2)$$

โดย N คือจำนวนอะตอมกัมมันตรังสี

จากสมการที่ (1) ถ้าปริมาณแอ็คติวิตี้ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้นจะต้องใช้เวลาเท่ากับครึ่งอายุ *(half-life)* ของสารรังสีนั้นๆ ใช้สัญญลักษณ์ $T_{\frac{1}{2}}$

$$\frac{A_o}{2} = A_o e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (3)$$

ตัวอย่างที่ 1

ก. ถ้ามีโปแตสเซียม -40 (^{40}K) 1 กรัม ซึ่งปล่อยรังสีเบต้า 10^5 ต่อวินาที จงหาค่าคงที่ของการสลายตัว (λ)

วิธี

40 กรัมของ ^{40}K ประกอบด้วย 6.02×10^{23} (*Avogadro's no.*) อะตอม

∴ 1 กรัมของ ^{40}K ประกอบด้วย $\frac{6.02}{40} \times 10^{23}$ อะตอม

จาก $A = \lambda N$

$$\lambda = \frac{A}{N} = \frac{10^5}{1.50\times10^{22}} = 6.7\times10^{-18}\ sec^{-1}$$

ตอบ

ข. จงหาค่าครึ่งอายุของ ^{40}K

วิธี

จาก $$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$= \frac{0.693}{6.7\times10^{-18}\ sec^{-1}}$$

$$\approx 10^{17}\ sec$$

$$\approx \frac{10^{17}\ sec}{3.15\times10^{7}\ sec/yr}$$

$$\approx 3\times10^{9}\ \text{ปี}$$

ตอบ

หมายเหตุ ค่าที่ยอมรับในปัจจุบันคือ 4×10^9 ปี

อายุเฉลี่ย (*mean life*) ของนิวไคลด์รังสีมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าคงที่ในการสลายตัว

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad (4)$$

โดย τ แทนค่าอายุเฉลี่ย

เช่น ^{198}Au มีค่า $\lambda = 0.01$ ต่อ ช.ม.

ค่าอายุเฉลี่ยของ ^{198}Au คือ 100 ช.ม.

นอกจากนี้สามารถหาค่าอายุเฉลี่ยจากครึ่งอายุ คือจากสมการ *(3)*

$$\frac{1}{\lambda} = 1.44\, T_{\frac{1}{2}}$$

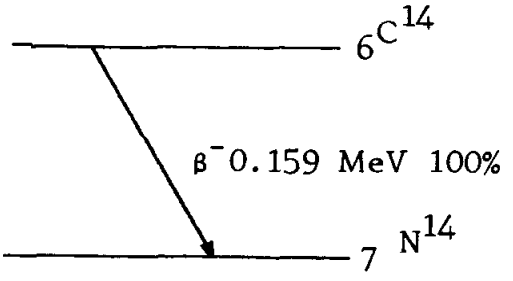
$$\tau = 1.44\, T_{\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

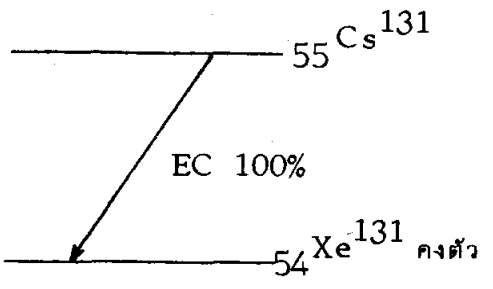
1.5 แผนภาพแสดงการสลายตัว *(Decay scheme)*

หลักการเขียนแผนภาพแสดงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี มีดังนี้

1. นิวไคลด์ลูกมีอะตอมมิคนัมเบอร์สูงกว่านิวไคลด์แม่ ใช้เส้นเอนขวา
2. นิวไคลด์ลูกมีอะตอมมิคนัมเบอร์ต่ำกว่านิวไคลด์แม่ ใช้เส้นเอนซ้าย
3. การสลายตัวให้โพซิตรอน แทนด้วยเส้นตรงและหักแทงซ้าย
4. รังสีแกมม่า แทนด้วยเส้นลูกคลื่นพุ่งตรงระหว่างสเตท *(state)* ทั้งสอง

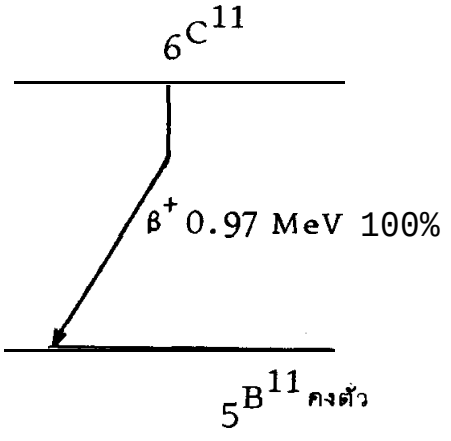
ตัวอย่างการเขียนแผนภาพสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

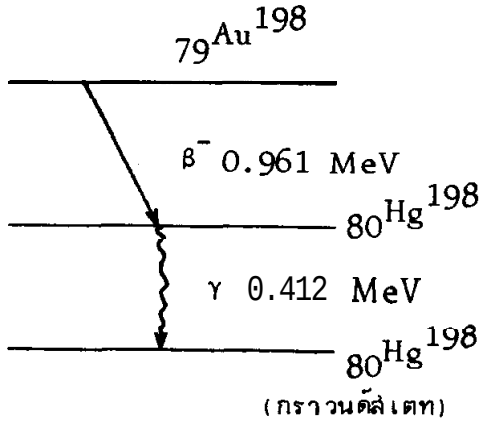




$_{6}C^{14}$ สลายตัวให้รังสีเบตา *0.159 MeV 100%* ผลคือเกิด $_{7}N^{14}$ มีอะตอมมิคนัมเบอร์สูงกว่าเดิม 1 หน่วย

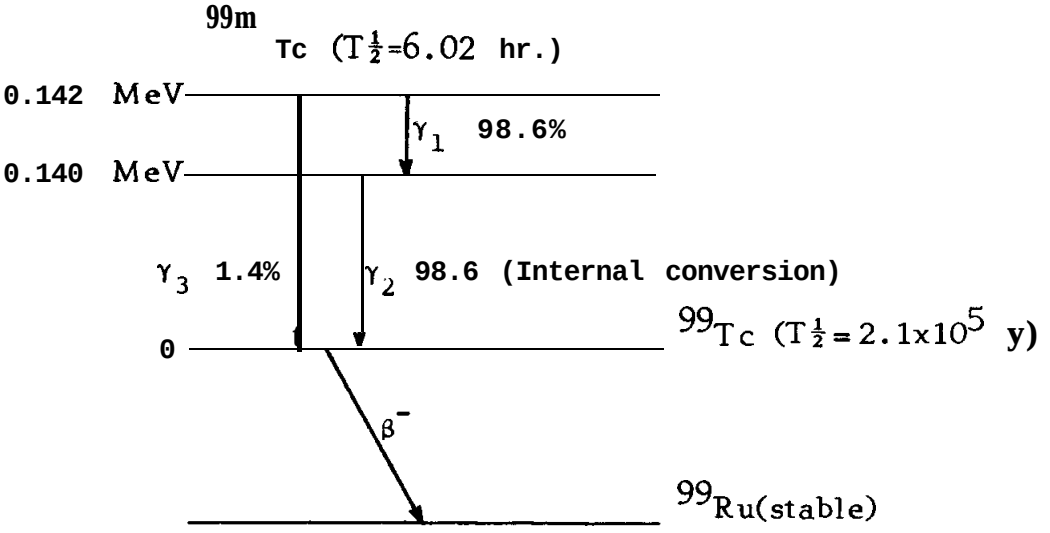
$_{55}Cs^{131}$ สลายตัวแล้วได้ $_{55}Xe^{131}$ มีอะตอมมิคนัมเบอร์ลดลง 1 หน่วย





$_{6}C^{11}$ สลายตัวให้โพซิตรอน เปลี่ยนเป็น $_{5}B^{11}$ ซึ่งอะตอมมิคนมเบอร์ลดลง 1 หน่วย

$_{79}Au^{198}$ สลายตัวได้ $_{80}Hg^{198}$ โดยการปล่อยทั้งรังสีเบตาและแกมม่า



เท็คนีเซียม - 99m มีโอกาสล่ลายตัวให้รังสีแกมม่าได้ 3 พลังงานต่างกัน

no γ_1 *0.002 MeV*

γ_2 *0.140 MeV*

γ_3 *0.142 MeV*

และอนุภาคเบตามีพลังงาน $\overline{E}_\beta$ *0.014 Mev*

1.6 หน่วยวัดความเข้มของกัมมันตรังสี

หน่วยของกัมมันตรังสีที่นิยมใช้คือคูรี *(curie)* ใช้สัญญลักษณ์ *Ci* (เดิมใช้ *c*) แล่ดงจำนวนอะตอมที่ล่ลายตัวต่อหน่วยเวลา

1 คูรี = *3.7 x 1010* ดิสอินทีเกรชั่น/วินาที
(disintegration/sec)

ปริมาณรังสีที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคมักอยู่ในหน่วยมิลลิคูรี ($m\ Ci = 10^{-3}\ Ci$) หรือไมโครคูรี ($\mu\ Ci = 10^{-6}\ Ci$) แต่ในกรณีการป้องกันอันตรายจากรังสีจะใช้หน่วยเล็กๆ เท่านั้น เช่น นาโนคูรี (*nanocurie*) โดยที่ $n\ Ci = 10^{-9}\ Ci$ และพิโคคูรี (*picocurie*) โดย $p\ Ci = 10^{-12}\ Ci$

ในปี ค.ศ. 1975 ICRU (*International Commission* on *Radiological Units*) ยอมรับ หน่วย SI (*International System*) คือหน่วยเบ็คเคอเรล(*Becquerel*) ใช้สัญญลักษณ์ *Bq*

$1\ Bq = 1$ ดิสอินทีเกรชั่น/วินาที

นั่นคือ $1\ ci = 3.7 \times 10^{10}\ Bq$

แต่เนื่องจากเบ็คเคอเรลเป็นหน่วยเล็กมาก ดังนั้นจึงบอกค่าเป็นกิโลเบ็คเคอเรล (*k Bq*) คือ 10^3 ดิสอินทีเกรชั่น/วินาที หรือเมกกะเบ็คเคอเรล (*M Bq*) คือ 10^6 ดิสอินทีเกรชั่น/วินาที และ จิกกะเบ็คเคอเรล (*G Bq*) คือ 10^9 ดิสอินทีเกรชั่น/วินาที ซึ่งการแปลงค่าจากหน่วยคูรีเป็นเบ็คเคอเรลแสดงในตารางที่ 1.1

โดยทั่วไปทางบริษัทผู้ผลิตสารกัมมันตรังสีจะแจ้งปริมาณของสารกัมมันตรังสีในภาชนะเป็นปริมาณ " สเปซิฟิคแอ็คทิวิตี้ " (*specific activity*) คือปริมาณความเข้มรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก เช่น มิลลิคูรีต่อมิลลิกรัม เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 แฟคเตอร์ในการแปลงหน่วยคูรีเป็นเบ็คเคอเรล

คูรี (Ci)			เบ็คเคอเรล (Bq)	
1000	**Ci**	1 k Ci	3.7×10^{13} Bq	37 T Bq
100			3.7×10^{12}	3.7 T Bq
10		-	3.7×10^{11}	370 G Bq
1			3.7×10^{10}	37 G Bq
10-1		100 mCi	3.7×10^{9}	3.7 G Bq
10^{-2}		10 mCi	3.7×10^{8}	370 M Bq
10^{-3}		1 mCi	3.7×10^{7}	37 M Bq
10^{-4}		100 μCi	3.7×10^{6}	3.7 M Bq
10^{-5}		10 μCi	3.7×10^{5}	370 k Bq
10^{-6}		1 μCi	3.7×10^{4}	37 k Bq

$T\ (tera) = 10^{12}$, $G(giga) = 10^{9}$, $M(mega) = 10^{6}$, $k\ (kilo) = 10^{3}$

พาหะ (carrier)

พาหะคือโมเลกุลของสารที่ไม่เป็นกัมมันตรังสีปนอยู่ในสารกัมมันตรังสี ประโยชน์คือช่วยพยุงภาวะการคงตัวของเภสัชรังสี (Radio-pharmaceuticals) ให้เสื่อมคุณภาพช้าลง แต่ผลเสียคือทำให้สารกัมมันตรังสีนั้นไม่เหมาะที่จะใช้กับงานบางอย่าง เช่น การนำไปติดฉลากบนสารประกอบอื่น หรือทางเรดิโออิมมูโนเอสเสย์

1.7 ปฏิกริยาของอนุภาครังสีและโฟตอนต่อวัสดุกั้น

อนุภาครังสีแยกเป็นอนุภาครังสีมีประจุ และรังสีนิวตรอน

1.7.1 อนุภาครังสีมีประจุ

อนุภาคดังกล่าวได้แก่ อิเล็คตรอน โพซิตรอน ซึ่งจัดเป็นอนุภาคเบา นอกจากนี้ยังมีโปรตอน ดิวเทอรอน *(deuteron)* และอนุภาคแอลฟ่า ซึ่งจัดเป็นอนุภาคหนัก ขณะที่อนุภาคเหล่านั้นเคลื่อนผ่านระหว่างอะตอมของวัสดุกั้น อาจทำให้เกิด

1). การแตกตัวออกเป็นอิออน *(ion)* ลบและบวก หรือเรียกว่าอิออนแพร์ *(ion pair)* จากปฏิกริยานี้ทำให้สามารถนับวัดอิออนอิสระในแก๊สได้ ซึ่งก็คือการนับวัดปริมาณรังสีนั่นเอง

ในการทำให้อากาศเกิดแตกตัวได้ 1 อิออนแพร์ ต้องใช้พลังงาน 34 อิเล็คตรอนโวลท์ (เช่น รังสีแอลฟ่าพลังงาน *4 MeV* ปริมาณ 1 มิลลิคูรี จะทำให้อากาศเกิด $(3.7 \times 10^{7} \times 4 \times 10^{6})/34 = 4.3 \times 10^{12}$ อิออนแพร์ต่อวินาที ซึ่งประจุหนึ่งหน่วยมีค่าเป็น 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ *(coulomb)*

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่า $= 4.3 \times 10^{12} \times 1.6 \times 10^{-19}$

$= 6.9 \times 10^{-7}$ แอมแปร์

2). การกระตุ้นอิเล็คตรอนให้ขึ้นอยู่ในระดับพลังงานสูงกว่าระดับเดิมในอะตอม เพื่อที่จะกลับลงสู่กราวนด์สเตทจะปล่อยรังสีแกมม่าออกมา

3). โมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกับแนวทางเดินของอนุภาคจะเกิดการสั่นสะเทือน

4). ทำให้รอยต่อของโมเลกุลเกิดการแตกตัว

5). เกิดการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของโฟตอน กล่าวคือ เมื่ออนุภาคถูกแรงบังคับให้เปลี่ยนแนว หรือเคลื่อนที่ช้าลง จะทำให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่า "เบรมส์ตราห์ลัง" *(bremsstrahlung)**

พลังงานที่อนุภาคสูญเสียให้แก่ตัวกลางในแต่ละหน่วยของเส้นทางที่มันเคลื่อนที่ผ่านไป เรียกว่า *"linear energy transfer"* เรียกย่อว่า *LET* มักมีหน่วยเป็นอิเล็คตรอนโวลท์ต่อไมครอน

จำนวนอิออนแพร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละหน่วยความยาวที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปเรียกว่า *"Specific ionization"*

ระยะทางที่อนุภาคมีประจุเคลื่อนผ่านวัสดุ นับจากจุดเริ่มต้นถึงจุดที่อนุภาคมิได้มีคุณสมบัติเป็นอนุภาครังสี เรียกว่า "เรนจ์" *(range)* กล่าวคือ เป็นระยะทางไกลสุดที่อนุภาคสามารถทะลุทะลวงไปได้ในวัสดุซึ่งอาจมีขนาดสั้นกว่าระยะทางเดินปกติที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ อนุภาคหนักมักมีระยะทางเดินเป็นเส้นตรง อาจมีการหักเหบ้างแต่น้อยมาก และมักจะมี "เรนจ์" ขนาดเดียวกับค่าเฉลี่ยความไกลของระยะทางเดิน ส่วนอนุภาคเบามักเป็นแนวคดเคี้ยวหรือหักเหมาก และค่าเฉลี่ยความไกลของระยะทางเดินจะมีค่ามากกว่า "เรนจ์" ประมาณ 2 เท่า

1.7.2 รังสีนิวตรอน

ปฏิกริยาของนิวตรอนต่อวัสดุกั้นแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ การกระจัดกระจาย *(scattering)* และการดูดกลืน *(absorption)*

* *Bremsstrahlung : Bremse* = b r a k e s (มาจากภาษาเยอรมัน)
(อา 4 แปลเป็น *retardation radiation*) *Strahlung* = *r a d i a t i o n*

การกระจัดกระจาย เป็นขบวนการที่อนุภาคนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของวัสดุแล้วกระจัดกระจายไป โดยทำให้พลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป ซึ่งแยกได้เป็น 2 แบบ คือการกระจัดกระจายแบบอีแลสติค *(elastic)* และอินอีแลสติค *(inelastic)* ชนิดแรกเป็นขบวนการที่นิวตรอนชนนิวเคลียสแล้วกระจัดกระจายออกมา ชนิดหลังเมื่อเกิดปฏิกริยาแล้วจะทำให้นิวเคลียสมีพลังงานเพิ่มขึ้นและจัดอยู่ในสถานะตื่นตัว *(excited state)* เมื่อจะกลับสู่สถานะปกติคือ ที่กราวนด์สเตทจะต้องปล่อยรังสีแกมม่าออกมา

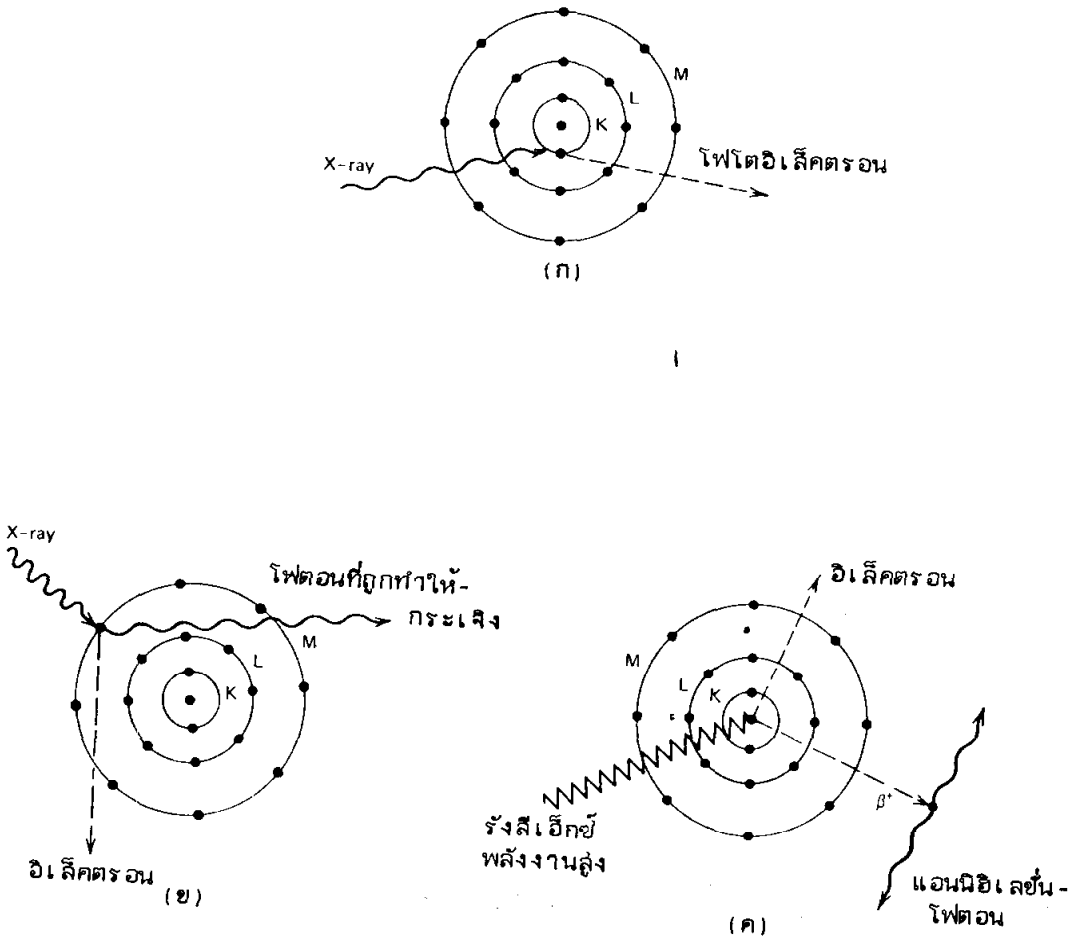
การดูดกลืน เป็นขบวนการที่นิวตรอนเข้ารวมตัวกับนิวเคลียสของอะตอมของวัสดุนั้น ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวแยกได้เป็นสองชนิดคือขบวนการรวมตัว *(capture process)* และขบวนการแตกตัว *(fission process)* ชนิดแรกเมื่อรวมตัวกันจะทำให้เกิดไอโซโทปรังสี ชนิดหลังเมื่อรวมตัวกันแล้วจะแตกตัวออกเป็น 2 เป็นอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกัน และได้พลังงานมาก

1.7.3 โฟตอน

ปฏิกริยาของโฟตอนต่อวัสดุนั้นแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ :

- การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็คทริค *(Photoelectric absorption)*
- การกระจัดกระจายแบบคอมป์ตัน *(Compton scattering)*
- การเกิดอิออนคู่ *(pair production)*

การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็คทริค เป็นขบวนการที่โฟตอนชนกับอิเล็คตรอนวงในสุดของอะตอมและจะถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็คตรอนนั้น ทำให้อิเล็คตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ปริมาณไฟฟ้าที่เกิดจากขบวนการดังกล่าวจึงเป็นค่าถูกต้องที่สุดที่จะใช้เป็นการหาปริมาณกัมมันตรังสีของสารต้นกำเนิดรังสีที่ต้องการทราบค่า



รูป 1.1 แผนภาพแสดงการเกิดขบวนการต่างๆ เมื่อโฟตอนชนวัสดุกั้น

ก) การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็คทริค

ข) การกระจัดกระจายแบบคอมป์ตัน

ค) การเกิดอิออนคู่

การกระจัดกระจายแบบคอมป์ตัน เป็นขบวนการที่โฟตอนชนกับอิเล็คตรอนที่อยู่วงนอกสุดของอะตอมของวัสดุกั้น เป็นผลให้อิเล็คตรอนหลุดออกไปจากอะตอม โฟตอนจะถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้อิเล็คตรอน และบางส่วนที่ยังคงเหลืออยู่จะมีผลทำให้โฟตอนกระจัดกระจายไปโดยการเปลี่ยนทิศทางไปจากเดิม ปริมาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงใช้แทนปริมาณกัมมันตรังสีของโฟตอนไม่ได้ เนื่องจากการชนกันแบบนี้ โฟตอนมิได้เสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็คตรอนนั่นเอง

การเกิดอิออนคู่ จะเกิดได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่า *1.02 MeV* ซึ่งเมื่อเคลื่อนเข้าใกล้นิวเคลียสจะสลายตัวเกิดโพซิตรอนและอิเล็คตรอนซึ่งมีพลังงานเท่ากันคือ *0.51 MeV* เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน ถ้าโฟตอนที่ชนมีพลังงานสูง และวัสดุกั้นมีอะตอมมิคนัมเบอร์สูง โอกาสที่จะเกิดขบวนการนี้ก็มีค่าสูง ปริมาณไฟฟ้าจากขบวนการนี้มักไม่นิยมใช้แทนปริมาณกัมมันตรังสี

ดังนั้น ในการนับวัดปริมาณรังสีแกมม่า นิยมวัดเฉพาะโฟโต้พีค *(photopeak)* เท่านั้น ส่วนสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบคอมป์ตันและการเกิดอิออนคู่จะถูกกำจัดไปโดยใช้อะนาลัยเซอร์ *(analyser)* ดังจะได้อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป

1.8 บทสรุป

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีแยกได้เป็น 8 ชนิดคือ การสลายตัวให้อนุภาคแอลฟ่า อนุภาคเบต้า รังสีแกมม่า อนุภาคโพซิตรอน อิเล็คตรอนแคปเช่อร์ นิวตรอน อินเทอร์นัลคอนเวิร์ชั่น และไอโซเมอริคทรานซิชั่น

หน่วยวัดความเข้มรังสีมีหน่วยใหญ่เป็นคูรี *(curie)* ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ย่อเป็น *Ci* โดยทั่วไป เมื่อมีการสั่งสารกัมมันตรังสี ทางบริษัทผู้ผลิตมักแจ้งเป็นปริมาณความเข้มรังสีต่อหน่วยน้ำหนักหรือต่อหน่วยปริมาตรของสารรังสีทั้งหมด เช่น ไอโอดีน -125 จำนวน 12 มิลลิคูรีต่อหนึ่ง

มิลลิลิตรในวันที่กำหนดแจ้งไว้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการละดวกในหารหาปริมาณกัมมันตรังสีที่แน่นอนในวันที่นำสารรังสีไปใช้นั่นเอง เนื่องจากสารรังสีมิได้มีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลาเช่นสารรังสีอื่น แต่จะมีปริมาณกัมมันตรังสีลดลงตามเวลาที่นานออกไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชี่ยล *(exponential)*

สารรังสีที่ใช้ในสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ซึ่งใช้ในการวินิจฉัยโรคมักจะนิยมใช้รังสีแกมม่าที่ได้จากสารรังสี ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแกมม่ามีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคเบต้า และแอลฟา เมื่ออยู่ในร่างกาย โอกาสที่สารรังสีจะถูกขับออกมาจึงมีมากกว่าอนุภาคทั้งสอง ทำให้อันตรายอันอาจเกิดกับคนไข้มีน้อยลง และจากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ปริมาณรังสีที่ใช้มีค่าน้อยและเป็นไปตามข้อตกลงความปลอดภัยตามที่ *A.E.C. (Atomic Energy Commission)* กำหนดไว้ ดังจะได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 5

ปฏิกริยาของโฟตอนต่อวัสดุกั้นแบ่งได้ 3 ขบวนการคือ การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็คทริค การกระจัดกระจายแบบคอมป์ตัน และการเกิดอิออนคู่ ที่สำคัญที่สุดคือการดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็คทริค สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากขบวนการนี้มีค่าสูงกว่าจากขบวนการอื่นทั้งสอง ในทางปฏิบัติจึงมักจะตัดสัญญาณจากการกระจัดกระจายแบบคอมป์ตันออกโดยใช้อะนาลัยเซอร์*(Analyser)*

คำถามทบทวน

1.1 "ไอโซโทปรังสี" คืออะไร อธิบายพร้อมทั้งยกตัวอย่าง

1.2 สารกัมมันตรังสีสลายตัวได้กี่แบบ อะไรบ้าง ?

1.3 ถ้านิวไคลด์รังสีมีค่าคงที่ของการสลายตัว (λ) เป็น 0.001 ต่อวัน

จงหา ก) ค่าครึ่งอายุ

ข) ค่าอายุเฉลี่ย

.4 อธิบายพอสังเขปเกี่ยวกับ

ก) "คูรี" และ "เบ็คเคอเรล" และความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง

ข) "พาหะ" ในเภสัชรังสีคืออะไร มีคุณหรือโทษอย่างใดต่อเภสัชรังสี

ค) "สเปซิฟิคแอคทิวิตี้"

ง) *LET*

จ) "เรนจ์" ของอนุภาครังสี

1.5 ปฏิกริยาของโฟตอนต่อวัสดุกั้นมีกี่ชนิด อะไรบ้าง ขบวนการใดที่ใช้แทนค่านับวัดแสดงการสลายตัวของกัมมันตรังสีที่ถูกต้อง