

บทที่ 1

หลักการพื้นฐานในการศึกษาทาง ชีวการแพทย์

1.1 บทนำ

ก่อนที่จะทำการศึกษาขั้นตอนของวิธีการนำสารกัมมันตรังสีไปใช้ประโยชน์ในด้าน
สุขภาพของมนุษย์ ผู้เขียนได้รวบรวมความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีซึ่งได้ยึดถือแนวที่จะ
อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการทำความเข้าใจด้วยตนเองให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อันเป็น
รากฐานสำคัญในการศึกษาตลอดจนวิเคราะห์วิจัยในสาขาวิชาต่อไป

ในบทนี้กล่าวถึงธรรมชาติของสารกัมมันตรังสี การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีซึ่ง
แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามคุณสมบัติของกัมมันตรังสีที่ถูกปล่อยออกมา แผนภาพแสดงการสลายตัว
หน่วยที่ใช้วัดความเข้มรังสี พาหะ (carrier) และปฏิกิริยาของอนุภาครังสีและโฟตอนต่อวัสดุ
กัน ในบทสรุปได้รวบรวมส่วนสำคัญตลอดจนคำอภิปรายหรือเสนอแนะเพื่อให้ผู้อ่านได้ทบทวนความ
รู้และความเข้าใจซึ่งได้เสนอรายละเอียดไปแล้วในตอนต้น

1.2 ธรรมชาติของสารกัมมันตภาพรังสี

หลังจากที่ *Roentgen* ค้นพบรังสีเอ็กซ์ในปี ค.ศ. 1895 ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลาย
ท่านพยายามค้นคว้าคุณสมบัติของมัน ในปี ค.ศ. 1896 *Bequerel* ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับ
สารรังสีที่เกิดตามธรรมชาติ

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

เบต้า") ซึ่งต่างมีลักษณะสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน จนกระทั่งกลายเป็นนิวเคลียสที่คงตัวจึงจะหยุดการสลายตัว เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "นิวเคลียร์ดิอินทิเกรชัน" (*nuclear disintegration*) หรือ "การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี" (*Radioactive decay*) ขบวนการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีไม่ขึ้นกับแฟกเตอร์ใดๆ เช่น อุณหภูมิ และความดัน ซึ่งใช้ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีขึ้นกับโครงสร้างของนิวเคลียสที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุล

แต่ละธาตุจะมีจำนวนโปรตอนแน่นอนเฉพาะตัวในนิวเคลียส เช่น คาร์บอน (C) มี 6 โปรตอน ไฮโดรเจน (H) มี 7 โปรตอน และออกซิเจน (O) มี 8 โปรตอน เป็นต้น แต่จำนวนนิวตรอนไม่เท่ากันเสมอไป นิวคลีโอของธาตุเดียวกันแต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกันออกไปเรียกว่า "ไอโซโทป" (*isotope*) ของธาตุนั้นๆ เช่น ไอโอดีน-131 เป็นไอโซโทปหนึ่งของไอโอดีน สำหรับธาตุที่ได้เป็นสารรังสีเรียก "ไอโซโทปกัมมันตรังสี" หรือโดยทั่วไปเรียกว่า "ไอโซโทป" ถ้ามีคุณสมบัติเป็นสารรังสีเรียก "ไอโซโทปรังสี" เช่น คาร์บอนมีไอโซโทปกัมมันตรังสีคือ ^{12}C และ ^{13}C ส่วนไอโซโทปรังสีหลายตัว เช่น ^{11}C ^{14}C และ ^{15}C ธาตุหนักจะมีไอโซโทปรังสีมากกว่าธาตุเบา เช่น ไอโอดีนมีไอโซโทปรังสีถึง 15 ตัว ส่วนไฮโดรเจนมีเพียง 1 ตัว คือทริเทียม (*Tritium*) หรือ ^3H

นิวคลีอิดแต่ละตัวจะสลายตัวด้วยอัตราคงที่ และนิยมใช้ค่าครึ่งอายุหรือฮาล์ฟ-ไลฟ์ (*Half-life*) เป็นตัวบ่งบอก สมบัติทางเคมีคือ $T_{1/2}$ เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่ใช้พิจารณาในการเลือกไอโซโทปรังสีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

1.3 การสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี

1. - อนุภาคแอลฟา (ใช้สัญลักษณ์ α)

นิวเคลียสของธาตุหนักๆมักจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาซึ่งเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม (*Helium*) มีประจุ +2 ประกอบด้วย 2 นิวตรอนและ 2 โปรตอน นิวคลีและโมเมนต์ของมันสามารถทะลุทะลวงน้อย รัศมีแอลฟาพลังงาน 3 MeV นิวเคลีย (range) เพียง 1.6 ซม. ในอากาศ และถ้าผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา $1/100$ มม. ความเข้มรังสีจะลดลงครึ่งหนึ่งของความเข้มเดิม

ตัวอย่างการสลายตัวของเรเดียม - 226 จะได้เรดอน-222 และอนุภาคแอลฟา



2. - อนุภาคเบต้า (ใช้สัญลักษณ์ β^-)

นิวเคลียสที่รังสีที่มีนิวตรอนมากกว่าปกติจะสลายตัวให้อนุภาคเบต้าซึ่งมีมวลน้อยมาก ประจุ -1 เมื่อเกิดใหม่ๆมีความเร็วสูง สามารถทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคแอลฟา

ตัวอย่าง เช่น การสลายตัวของคาร์บอน -14 จะได้ไนโตรเจน -14 และอนุภาคเบต้า

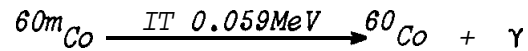


3. - รังสีแกมมา (ใช้สัญลักษณ์ γ)

เป็นการแผ่รังสีแบบแม่เหล็กไฟฟ้า มีความถี่สูง ความยาวคลื่นสั้น พลังงานมาก มีลักษณะคล้ายรังสีเอ็กซ์แต่ต่างกันที่ต้นกำเนิดและระดับพลังงาน รังสีแกมมาเกิดจากนิวเคลียส

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

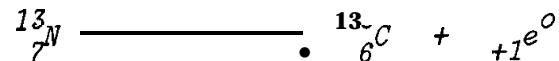
ตัวอย่างการสลายตัวให้รังสีแกมมา เช่น โคบอลต์-60m สลายตัวได้โคบอลต์ -60 และรังสีแกมมา



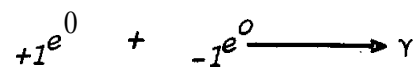
4. - อนุภาคโพซิตรอน (*positron* ใช้สัญลักษณ์ β^+)

เมื่อนิวไคลด์รังสีมีจำนวนโปรตอนมากกว่าปกติ จะเกิดการสลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอน ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคเบต้าแต่มีประจุตรงข้าม

ตัวอย่างการสลายตัวของไนโตรเจน -13 ได้คาร์บอน-13 และอนุภาคโพซิตรอน



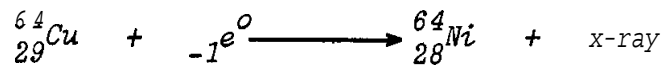
ในบางโอกาส โพซิตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนกลายเป็นรังสีแกมมาตามปฏิกิริยาดังนี้



5. - การจับอิเล็กตรอนหรือเรียกทับศัพท์ว่าอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (*electron capture*) หรือ เค-แคปเจอร์ (*K-capture* ใช้สัญลักษณ์ EC)

เมื่อนิวเคลียสมีโปรตอนมากกว่าปกติแต่มีพลังงานน้อยกว่า 1.02 MeV จึงไม่สามารถส่งโพซิตรอนออกมาได้ ดังนั้นนิวเคลียสจะจับอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้สุดคือในวง K และอิเล็กตรอนในวง K จะเข้าสู่ตำแหน่งว่างดังกล่าวโดยคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์

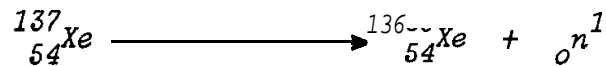
ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น ทองแดง -64 จับอิเล็กตรอน จะได้นิกเกิล -64 และรังสีเอ็กซ์



6. - นิวตรอน (neutron ใช้สัญลักษณ์ ${}_0^1n$)

นิวตรอนไม่มีประจุ มีมวลประมาณ 1 amu เมื่อนิวเคลียสมีพลังงานเอ็กซ์ไซต์สูงมาก จะส่งนิวตรอนออกมา ซึ่งการสลายตัวให้นิวตรอนมีโอกาสเกิดได้ยากเว้นแต่ในเครื่องปฏิกรณ์ - ปริมาณซึ่งเรียกว่า "ดีเลย์ด์ฟิชชั่น นิวตรอน" (*delayed fission neutron*)

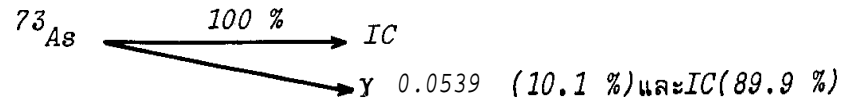
ตัวอย่างการสลายตัวของซีซัน -137 ผลคือได้ซีซัน -136 และนิวตรอน



7. - อินเทอร์เนล คอนเวอร์ชัน (internal conversion ใช้สัญลักษณ์ IC)

เป็นการสลายตัวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในนิวเคลียส พลังงานส่วนเกินที่ได้จากการเปลี่ยนจากระดับสูงมาต่ำจะถูกถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนในวง K ดังนั้นจากปฏิกิริยานี้จึงทำให้เกิดออร์บิทัลอิเล็กตรอน (*orbital electron*) หลุดออกมาและรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนในวง K สูงกว่า เคลื่อนลงมาแทนที่ว่างนั้น

ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของ $As-73$ เป็นไปได้ 2 แบบ คือ อินเทอร์เนลคอน-
เวร์ลชั่น 100% หรือให้ทั้งรังสีแกมมาและเกิดอินเทอร์เนลคอนเวร์ลชั่น



8. - ไอโซเมอร์ทรานซิชัน (*isomeric transition* ใช้สัญลักษณ์ *IT*)

เมื่อนิวเคลียสมีระดับพลังงานสูงกว่ากราวด์สเตท (*ground state*) ปกติจะแผ่
รังสีแล้วกลับลงสู่สถานะกราวด์สเตททันที แต่มีบางนิวไคลด์ที่ยังคงอยู่ในระดับพลังงานดังกล่าว
ชั่วเวลาหนึ่งแล้วจึงสลายตัวให้รังสีแกมมาเพื่อกลับลงสู่กราวด์สเตทระดับพลังงานดังกล่าวเรียก
ว่าเมตาสเตเบิลสเตท (*metastable state*) และการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเรียกว่า
"ไอโซเมอร์ทรานซิชัน" (*isomeric transition*)

ตัวอย่างเช่น $I_n - 113m$ สลายตัวเป็น $I_n - 113$ และรังสีแกมมา



1.4 สมการการสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการสลายตัวของสารรังสี คือ

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

โดย A เป็นแอมพลิจูดของการสลายตัวต่อหน่วยเวลา

A_0 เป็นแอกติวิตี้เริ่มต้น

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. หมายความว่า สารรังสีสลายตัว 0.01 ส่วน (1%) ต่อชั่วโมง

ความสัมพันธ์ของแอกติวิตี้และจำนวนอะตอมคือ

$$A = \lambda N \quad (2)$$

โดย N คือจำนวนอะตอมกัมมันตรังสี

จากสมการที่ (1) ถ้าปริมาณแอกติวิตี้ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้นจะต้องใช้เวลาเท่ากับครึ่งอายุ (*half-life*) ของสารรังสีนั้นๆ ใช้สัญลักษณ์ $T_{1/2}$

$$\frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

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

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

$$\text{จาก } A = \lambda N$$

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

ตอบ

ข. จงหาค่าครึ่งอายุของ ^{40}K

วิธี

$$\begin{aligned} \text{จาก } T_{\frac{1}{2}} &= \frac{0.693}{\lambda} \\ &= \frac{0.693}{6.7 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}} \\ &\approx 10^{17} \text{ sec} \\ &\approx \frac{10^{17} \text{ sec}}{3.15 \times 10^7 \text{ sec/yr}} \\ &\approx 3 \times 10^9 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ตอบ

หมายเหตุ ค่าที่ยอมรับในปัจจุบันคือ 4×10^9 ปี

อายุเฉลี่ย (*mean life*) ของนิวไคลด์รังสีมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าคงที่ในการสลายตัว

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

โดย τ แทนค่าอายุเฉลี่ย

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

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

นอกจากนี้สามารถหาค่าอายุเฉลี่ยจากครึ่งอายุ คือจากสมการ (3)

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

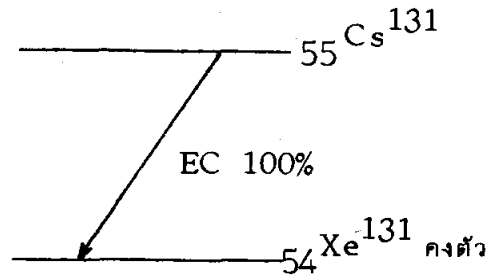
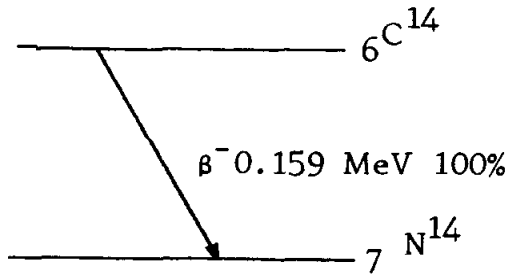
$$\tau = 1.44 T_{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

1.5 แผนภาพแสดงการสลายตัว (Decay scheme)

หลักการเขียนแผนภาพแสดงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี มีดังนี้

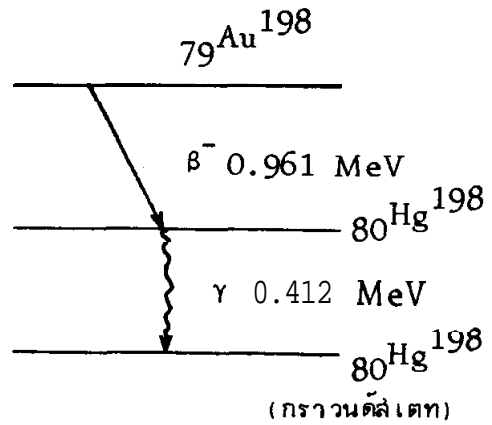
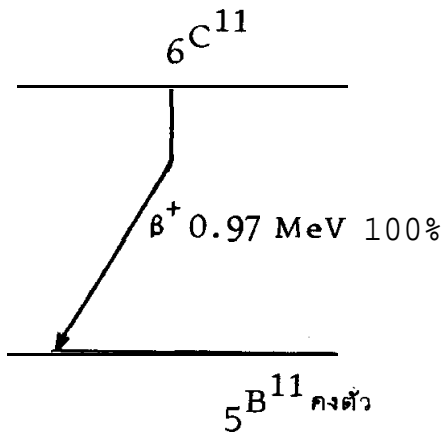
1. นิวไคลด์ลูกมีอะตอมมีค่านัมเบอร์สูงกว่านิวไคลด์แม่ ใช้เส้นเอนขวา
2. นิวไคลด์ลูกมีอะตอมมีค่านัมเบอร์ต่ำกว่านิวไคลด์แม่ ใช้เส้นเอนซ้าย
3. การสลายตัวให้โพซิตรอน แทนด้วยเส้นตรงและหักทางซ้าย
4. รังสีแกมมา แทนด้วยเส้นลูกคลื่นพุ่งตรงระหว่างสแตต (state) ทั้งสอง

ตัวอย่างการ เขียนแผนภาพสลายตัวของสารกัมมันตรังสี



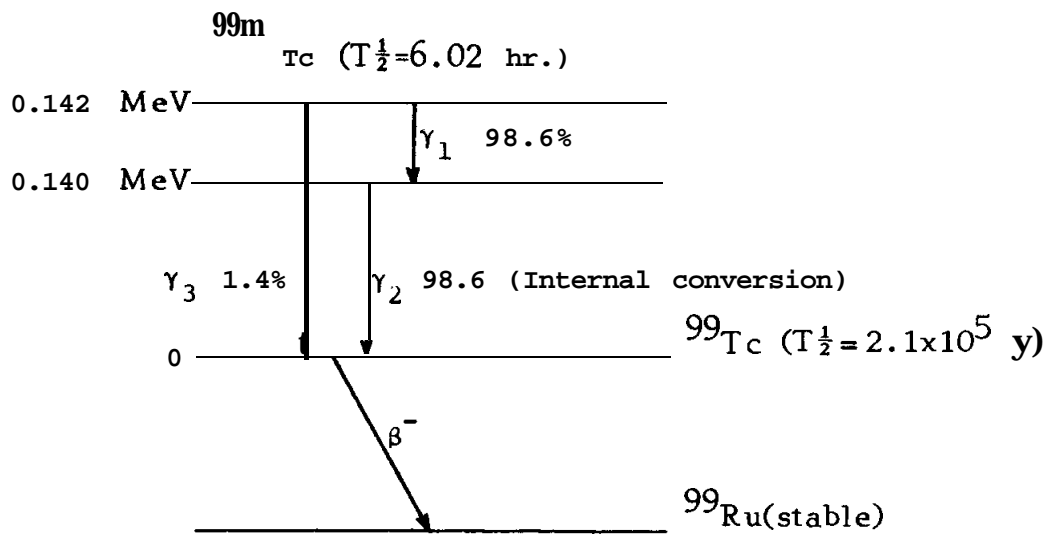
${}^6\text{C}^{14}$ สลายตัวให้รังสีเบตา 0.159 MeV 100%
ผลคือเกิด ${}^7\text{N}^{14}$ มีอะตอมมีกัมเบอร์สูงกว่าเดิม
1 หน่วย

${}^{55}\text{Cs}^{131}$ สลายตัวแล้วได้ ${}^{54}\text{Xe}^{131}$ มีอะตอม
มีกัมเบอร์ลดลง 1 หน่วย



${}^6\text{C}^{11}$ สลายตัวให้โพซิตรอน เปลี่ยนเป็น
 ${}^5\text{B}^{11}$ ซึ่งอะตอมมีกัมเบอร์ลดลง 1 หน่วย

${}^{79}\text{Au}^{198}$ สลายตัวได้ ${}^{80}\text{Hg}^{198}$ โดยการ
ปล่อยทั้งรังสีเบตาและแกมมา



เทคเนเชียม - 99m มีโอกาสสลายตัวให้รังสีแกมมาได้ 3 พลังงานต่างกัน

$$\text{no } \gamma_1 \quad 0.002 \text{ MeV}$$

$$\gamma_2 \quad 0.140 \text{ MeV}$$

$$\gamma_3 \quad 0.142 \text{ MeV}$$

$$\text{และอนุภาคเบตามีพลังงาน } \bar{E}_\beta \quad 0.014 \text{ MeV}$$

1.6 หน่วยวัดความเข้มของกัมมันตรังสี

หน่วยของกัมมันตรังสีที่นิยมใช้คือคูรี (curie) ใช้สัญลักษณ์ Ci (เดิมใช้ c)

แสดงจำนวนอะตอมที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา

$$1 \text{ คูรี} = 3.7 \times 10^{10} \text{ ดิสอินทิเกรชัน/วินาที} \\ (\text{disintegration/sec})$$

ปริมาณรังสีที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคมักอยู่ในหน่วยมิลลิวูรี ($m Ci = 10^{-3} Ci$) หรือ ไมโครคูรี ($\mu Ci = 10^{-6} Ci$) แต่ในการป้องกันการป้องกันอันตรายจากรังสีจะใช้หน่วยเล็กๆเท่านั้น 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*) ใช้สัญลักษณ์ Bq

$$1 Bq = 1 \quad \text{ดิสซินทีเกรชัน/วินาที}$$

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

แต่เนื่องจากเบ็คเคอเรลเป็นหน่วยเล็กมาก ดังนั้นจึงบอกค่าเป็นกิโลเบ็คเคอเรล ($k Bq$) คือ 10^3 ดิสซินทีเกรชัน/วินาที หรือเม็กกะเบ็คเคอเรล ($M Bq$) คือ 10^6 ดิสซินทีเกรชัน/วินาที และ จิกกะเบ็คเคอเรล ($G Bq$) คือ 10^9 ดิสซินทีเกรชัน/วินาที ซึ่งการแปลงค่าจากหน่วยคูรีเป็นเบ็คเคอเรลแสดงในตารางที่ 1.1

โดยทั่วไปทางบริษัทผู้ผลิตสารกัมมันตรังสีจะแจ้งปริมาณของสารกัมมันตรังสีในภาชนะเป็นปริมาณ " สเปซิฟิคแอ็คทิวิตี " (*specific activity*) คือปริมาณความเข้มรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก เช่น มิลลิวูรีต่อมิลลิกรัม เป็นต้น

1000	Ci	1 k Ci		37 T Bq
100				3.7 T Bq
10		-		370 G Bq
1				37 G Bq
10 ⁻¹		100 mCi		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) = 10¹² , G(giga) = 10⁹ , M(mega) = 10⁶ , k (kilo) = 10³

พาหะ (carrier)

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

