

บทที่ 4 การผลิตนิวไคลด์รังสี

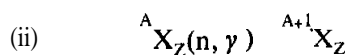
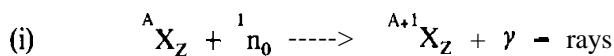
ใน ค.ศ.1896 Henry Becquerel ค้นพบว่าธาตุยูเรเนียม (Uranium) คือสารกัมมันตรังสี หลังจากนั้นไม่นานนักได้มีการค้นพบนิวไคลด์รังสีอื่น ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น เรเดียม (Radium) และโปโลเนียม (Polonium) โดยทั่วไป นิวไคลด์รังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะมีอายุยาว (มากกว่า 1,000 ปี) ซึ่งไม่อาจนำมาใช้ในงานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ได้ ส่วนใหญ่ที่มีใช้อยู่มักจะเป็นสารกัมมันตภาพรังสีที่ถูกสร้างขึ้นมา โดยอาศัยวิธีการพื้นฐาน 3 วิธี ดังนี้ :

- (1) อปรังสีนิวไคลด์เสถียรในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor) จึงเป็นวิธีการผลิตโดยอาศัยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู
- (2) อปรังสีนิวไคลด์เสถียรในเครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) หรือไซโคลตรอน (Cyclotron) ซึ่งเรียกวิธีการผลิตเช่นนี้ว่า การผลิตโดยอาศัยเครื่องเร่งอนุภาค หรือ ไซโคลตรอน
- (3) การทำให้นิวไคลด์หนักกว่าเกิดแตกตัวเรียกวิธีการนี้ว่าการผลิตโดยการแตกตัว (Fission Produced)

วิธีการผลิตนิวไคลด์รังสี

การใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

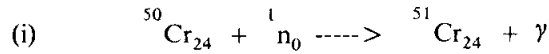
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในเรื่องการผลิตโดยการแตกตัว) เป็นต้นกำเนิดที่ให้ Thermal neutrons ออกมาหาศาล ความหมายของ "Thermal neutron" คือนิวตรอนที่มีพลังงานจลน์น้อยมาก (ประมาณ 0.025 eV ซึ่งเท่ากับพลังงานจลน์ของอะตอมหรือโมเลกุล ณ อุณหภูมิห้อง) นิวตรอนดังกล่าวจะมีโอกาสถูกนิวไคลด์เสถียรจับได้มาก เนื่องจากนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคไม่มีประจุไม่เกี่ยวข้องกับแรงผลักกูลอมบ์ของนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวก ปฏิกิริยาในการจับนิวตรอนของนิวไคลด์ A_ZX แทนด้วยสมการต่อไปนี้



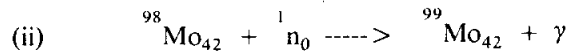
ทั้งสมการ (i) และ (ii) ต่างใช้แทนปฏิกิริยาก่อนการจับนิวตรอน (ด้านซ้ายของลูกศร) และหลังการจับนิวตรอน (ด้านขวาของลูกศร) ซึ่งสมการ (ii) เป็นการย่อปฏิกิริยาที่เขียนในสมการ (i) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานิวเคลียร์ลักษณะนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเชิงอะตอมของนิวไคลด์ใหม่แต่เลขเชิงมวลเพิ่มขึ้น 1 หน่วย และเนื่องจากปฏิกิริยานี้มีการเพิ่มนิวตรอน นิวไคลด์ที่เกิดขึ้น (ถ้าเป็นกัมมันตรังสี) มักสลายตัวโดยปล่อยอนุภาค β^- บางกรณีการจับ

นิวตรอนอาจได้ผลลัพธ์เป็นธาตุใหม่ที่เสถียรก็ได้ เช่น $^{12}\text{C}_6(n, \gamma) \text{ } ^{13}\text{C}_6$ รูปแบบอื่นจากการผลิตนิวไคลด์วิธีการนี้คือสารใหม่จะไม่มีลักษณะปลดพาหะ (carrier free) ซึ่งถ้าเป็นตัวอย่างปลดพาหะจะปรากฏเฉพาะนิวไคลด์รังสีอยู่เท่านั้น ไม่มีไอโซโทปอื่น ๆ ปนอยู่เลย ตัวอย่าง $^{131}\text{I}_{53}$ จะเรียกว่าเป็นตัวอย่างปลดพาหะต่อเมื่อไม่มีไอโซโทปรังสีของไอโอดีนอยู่ในสารตัวอย่าง

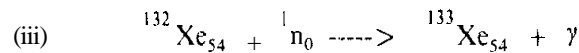
ตัวอย่างการผลิตโดยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เพื่อใช้ในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์มีดังนี้



^{51}Cr ใช้ในการติดตามกลไกเซลล์เม็ดเลือดแดงและการสแกนม้าม



^{99}Mo เป็นต้นกำเนิดของ ^{99m}Tc ซึ่งใช้ประโยชน์อย่างยิ่งในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ขณะนี้

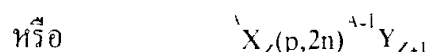
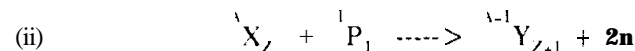
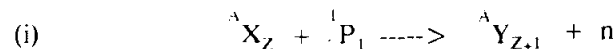


^{133}Xe ใช้ในการศึกษาการทำงานของปอด (lung ventilation studies)

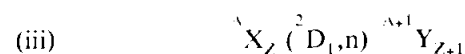
การใช้เครื่องเร่งอนุภาคหรือไซโคลตรอน

เครื่องเร่งอนุภาคหรือไซโคลตรอน เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคพลังงานสูง (ในช่วง MeV) เช่น โปรตอน (protons) นิวตรอน (neutrons) ฮีเลียม-3 (helium-3) และอนุภาคอัลฟา (alpha particles) โอกาสในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของอนุภาคที่มีประจุหนาแน่น (อย่างมาก) กับพลังงานของอนุภาคที่เป็นตัวชน ซึ่งแต่ละอนุภาคที่มีประจุและเป้าแต่ละตัวจะมีพลังงาน threshold ซึ่งเป็นค่าพอดีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ถ้าต่ำกว่าค่าดังกล่าวจะไม่เกิดปฏิกิริยาตามต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากแรงผลักรวมระหว่างอนุภาคมีประจุบวกกับประจุบวกของนิวไคลด์เป้า โดยทั่วไปพลังงาน threshold อยู่ในช่วง MeV

ปฏิกิริยาทั่วไปของโปรตอนมีดังนี้



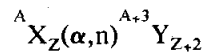
ปฏิกิริยาทั่วไปของนิวตรอน (${}^2_1\text{D}$) ซึ่งเป็นที่รู้จักดีว่าเป็นไฮโดรเจนหนัก (heavy hydrogen) มีดังนี้



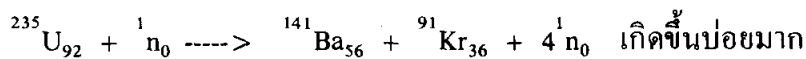
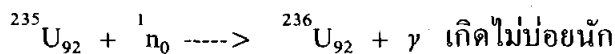
ปัญหาต่อไปคือการแยกนิวไคลด์รังสีที่เกิดขึ้นออกจากนิวไคลด์ของสารที่ใช้ทำเป้า จากปฏิกิริยาดังกล่าวอาจแยกได้โดยวิธีทางเคมี เนื่องจากนิวไคลด์ผลิตภัณฑ์มีเลขเชิงอะตอมต่างจากของเป้า ดังนั้นนิวไคลด์รังสีจากปฏิกิริยาของอนุภาคมีประจุ จะมีคุณสมบัติปลอดพาหะ (carrier free) โดยทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มโปรตอนจึงมักเป็น β^+ หรือนิวไคลด์รังสีจาก K-capture

การผลิตโดยการแตกตัว

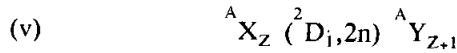
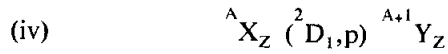
นิวไคลด์รังสีที่เกิดตามธรรมชาติ เช่น $^{226}\text{Ra}_{88}$, $^{232}\text{Th}_{90}$ หรือ $^{210}\text{Po}_{84}$ สามารถใช้เป็นต้นกำเนิดอนุภาคอัลฟาได้ดี ปฏิกิริยาของอนุภาคอัลฟาที่ทำให้เกิดนิวตรอน ได้แก่



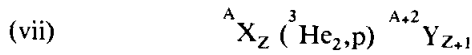
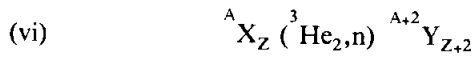
แต่พวกนิวคลีไอ (nuclei) ที่หนัก ๆ ($A \sim 200$) พบว่ามีการจับนิวตรอนแทนที่จะผลิตนิวไคลด์อื่นที่หนักกว่า ผลดังกล่าวเกิดเมื่อนิวไคลด์รังสีมีเลขเชิงมวล (mass number) ประมาณครึ่งหนึ่งของนิวไคลด์เป้า ตัวอย่างเช่น ^{235}U



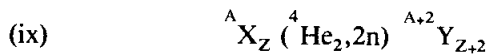
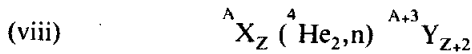
เห็นได้ว่า ขบวนการนี้เป็นการแบ่งแยกนิวเคลียสหนักกว่าออกเป็นสองนิวคลีไอเล็ก ๆ (เมื่อเทียบกับนิวเคลียสแม่) จึงเรียกชื่อเป็นขบวนการแตกตัวหรือทับศัพท์ว่า “ฟิชชัน” (fission) ในการแตกตัวมิได้เกิดเฉพาะแบเรียม (barium) และคริปตอน (krypton) เท่านั้น ปัญหาที่จะจัดแบ่งได้อย่างไรว่า ธาตุใดจะเกิดการแตกตัวดังกล่าวได้บ้าง คำตอบคือ โดยทั่วไปทุกธาตุตั้งแต่สังกะสี ($Z = 30$) จนถึงดิสโปรเซียม (dysprosium) ($Z = 66$) แต่นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นนิวไคลด์รังสี (มีธาตุที่อยู่ระหว่างค่า $Z = 33$ ถึง 66) คือการผลิตนิวตรอนจำนวนมหาศาลหนึ่งนิวตรอนจะเริ่มก่อการแตกตัวโดยมันถูกจับเก็บไว้ จากนั้นจะเกิดมีอีกหลายนิวตรอนในช่วงการแตกตัว นิวตรอนพิเศษเหล่านี้จะก่อให้เกิดการแตกตัวต่อไปอีก ผลคือเกิดนิวตรอนปริมาณมหาศาล ขบวนการนี้เกิดในลักษณะลูกโซ่ ในทางทฤษฎีจะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยจนสารที่ป้อนเพื่อให้เกิดการแตกตัวหมดลง ปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารที่สามารถแตกตัวได้ซึ่งไม่สามารถทำการควบคุมได้คือระเบิดอะตอม (atomic bomb) แต่กรณีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้นสามารถควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ ซึ่งจัดเป็นแหล่งกำเนิดที่ดีของนิวตรอนปริมาณมาก ๆ และพลังงานจำนวนมหาศาล (เพื่อการผลิตไฟฟ้า) ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์ได้ใช้ ^{131}I ซึ่งเป็นผลิตผลจากการแตกตัว ตัวอย่างอื่นของการผลิตนิวไคลด์รังสีที่ถูกผลิตโดยปฏิกิริยาการแตกตัวคือ ^{99}Mo ซึ่งเป็นนิวไคลด์แม่ของ ^{99m}Tc นิวไคลด์รังสีที่ถูกผลิตโดยวิธีการแตกตัวจะมีคุณสมบัติปลอดพาหะ เช่นเดียวกับนิวไคลด์รังสีจากโซ่โคตรอนหรือจากเครื่องเร่งอนุภาค



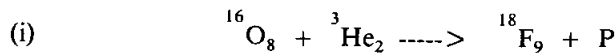
ปฏิกิริยาทั่วไปของฮีเลียม -3 มีดังนี้



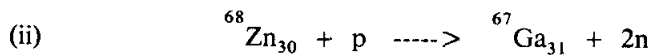
ปฏิกิริยาทั่วไปของอนุภาคแอลฟา (หรือ ${}^4 He_2$) มีดังนี้



ปฏิกิริยาทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นเกิดในช่วง 5-30 MeV ถ้าอนุภาคที่เป็นตัววิ่งชนยังมีพลังงานเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นจะเกิดขึ้น บางครั้งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการผลิตนิวไคลด์รังสี ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นการผลิตนิวไคลด์รังสีโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคหรือไซโคลตรอน ซึ่งเป็นนิวไคลด์รังสีที่ใช้ทั่วไปในเวชศาสตร์นิวเคลียร์



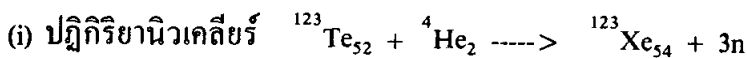
${}^{18} F$ ใช้ในการสแกนกระดูก (bone scanning)



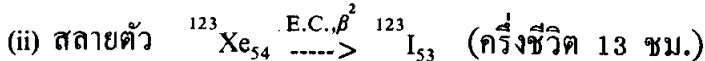
${}^{67} Ga_{31}$ ใช้ทั่วไปในการวินิจฉัย soft tumor และ abscess

ตามตัวอย่างข้างต้น นิวไคลด์รังสีถูกสร้างโดยตรงจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ บางกรณีนิวไคลด์รังสีเหล่านี้ อาจถูกสร้างแบบทางอ้อมโดยเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นก่อน จากนั้นเกิดการสลายตัวของนิวไคลด์รังสี ตัวอย่างเช่น การผลิต ${}^{123} I$ และ ${}^{201} Tl$ มีรายละเอียดดังนี้

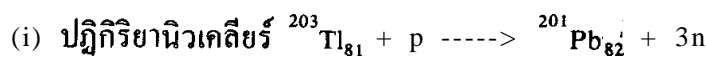
(1) การผลิต ${}^{123} I$



${}^{123} Xe_{54}$ ครึ่งชีวิต 2 ชม.



(2) การผลิต ${}^{201} Tl$



${}^{201} Pb_{82}$, ครึ่งชีวิต 9.4 ชม.



หลักพิจารณาทั่วไปในการผลิตนิวไคลด์รังสี

ปริมาณกัมมันตภาพรังสี R_t ที่เกิดขึ้นในเวลา t ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นกับองค์ประกอบต่อไปนี้ คือ

- (1) จำนวนอนุภาคที่ใช้เป็นตัวชน/วินาที/ ซม.² เรียกเป็น “ฟลักซ์” (flux, I)
- (2) จำนวนนิวคลีโอไออนเป้าหมายทั้งหมดที่ถูกอาบรังสี มีค่าเป็น $(n \times V)$ โดย n เป็นจำนวนนิวไคลด์เป้าใน 1 ซม.³ และ V เป็นปริมาตรของสารเป้าหมายที่ถูกอาบรังสี
- (3) เวลาในการอาบรังสี t
- (4) ครึ่งชีวิต หรือค่าคงที่การสลายตัวของนิวไคลด์รังสีที่ถูกผลิตขึ้น $T_{1/2}$ หรือ λ
- (5) โอกาสของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เรียกเป็นพื้นที่ภาคตัดขวาง σ หน่วยเป็นบาร์น (barn)- ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-24} ซม.²

ถ้าเป็นปฏิกิริยาจับนิวตรอน (คือเป็นนิวไคลด์รังสีที่ถูกผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั่นเอง) สามารถเขียนความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ดังนี้

$$R_t = \sigma \cdot I \cdot n \cdot V \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (1)$$

ถ้านิวไคลด์รังสีมีครึ่งชีวิตนาน (เป็นวัน) สามารถลด $(1 - e^{-\lambda \cdot t})$ ในสมการ (1) ได้เป็น

$$R_t = \sigma \cdot I \cdot n \cdot V \cdot \lambda \cdot t \quad (2)$$

สมการทำนองเดียวกันนี้สามารถใช้ได้กับอนุภาคมีประจุในปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้เช่นเดียวกัน ในทางปฏิบัติฟลักซ์ของอนุภาคมีประจุ จะถูกวัดในหน่วย μAmp (หน่วยของกระแสไฟฟ้า) โดยทั่วไป ปริมาณกัมมันตภาพที่ผลิตได้ด้วยปฏิกิริยานี้มีหน่วยเป็น $\text{mCi}/\mu\text{Amp}/\text{hr}$ เรียกเป็น “ยิลด์” (yield) ของปฏิกิริยา ซึ่งคือผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยานั่นเอง ปฏิกิริยานิวเคลียร์ใดมียิลด์สูง แสดงว่าง่ายในการผลิตนิวไคลด์รังสีปริมาณมาก ๆ

การจะเลือกวิธีการผลิตนิวไคลด์รังสีที่ดีที่สุดจะต้องคำนึงถึง

- (1) ยิลด์ ซึ่งจัดเป็นการคำนึงด้านเศรษฐศาสตร์
- (2) ความบริสุทธิ์และกัมมันตภาพจำเพาะ (specific activity) ของนิวไคลด์รังสี ซึ่งเป็นการคำนึงด้านชีววิทยาหรือในแง่เภสัชศาสตร์ ดังนั้น ย่อมขึ้นกับการใช้ประโยชน์ของนิวไคลด์รังสี

การผลิตนิวไคลด์รังสีอายุสั้นโดยใช้เจเนอเรเตอร์

สืบเนื่องจากจุดประสงค์หลักคือไม่ต้องการให้โครงสร้างปริมาณมากต่อคนไข้ ดังนั้นการตรวจทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์จึงเลือกใช้นิวไคลด์รังสีที่มีอายุสั้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือมีการสลายตัวเร็ว ซึ่งก่อกำหนดของเวลาในการขนส่ง การเก็บและการควบคุมคุณภาพ ตัวอย่างเช่น ^{18}F มีค่าครึ่งชีวิต 100 นาที ใช้ในการสแกนกระดูก แต่ไม่แพร่หลายเนื่องจากอายุสั้นมาก ทำนองเดียวกับ ^{11}C (ครึ่งชีวิต 20.3 นาที) ^{13}N (ครึ่งชีวิต 10

นาที) และ ^{15}O (ครึ่งชีวิต 2 นาที) เจเนอเรเตอร์หรือตัวผลิตนิวไคลด์รังสี ดังจะอธิบายต่อไปนี้ (รวมทั้ง “COW” ด้วย) ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น และเอื้ออำนวยในการใช้นิวไคลด์ ณ สถานที่ห่างไกลจากแหล่งผลิต เช่น ไซโคลตรอนหรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

หลักการของเครื่องเจเนอเรเตอร์

เจเนอเรเตอร์ ของนิวไคลด์รังสีจะผลิตอนุกรมของสารรังสีทั้งสองและสามอนุกรมก็ได้ ซึ่งนิวไคลด์รังสีอายุยาว (อาจเรียกเป็นนิวไคลด์แม่) เป็นตัวสลายให้เกิดนิวไคลด์รังสีอายุสั้น (อาจเรียกเป็นนิวไคลด์ลูก) ลักษณะทั่วไปของเจเนอเรเตอร์ดังกล่าวอาจแยกได้ 3 แบบ ดังนี้

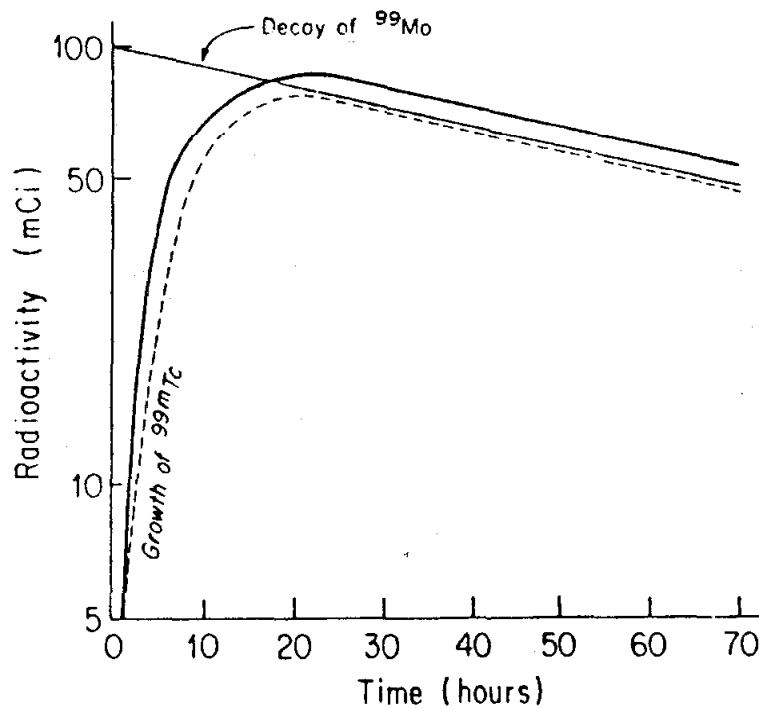
- (1) ระบบที่นิยมใช้ทั่วไปในปัจจุบัน
- (2) ระบบที่นิยมใช้ในงานซึ่งมีสภาพภูมิประเทศไม่สะดวกในการคมนาคมซึ่งมีปัญหาในการขนส่งสารนิวไคลด์รังสี
- (3) ระบบที่ยังอยู่ระหว่างการพัฒนาซึ่งกำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากมีข้อได้เปรียบพิเศษสำหรับการถ่ายภาพโพซิตรอนโทโมกราฟี
- (4) เจเนอเรเตอร์ใช้ผลิต $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ซึ่งใช้ศึกษาการทำงานของปอด

ตัวอย่างของสารนิวไคลด์รังสีที่ได้จากเจเนอเรเตอร์

(i)	^{99}Mo ----->	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ ----->	^{99}Tc ----->	^{99}Ru
ครึ่งชีวิต	67 ชม	6 ชม.	นาน	เสถียร
(ii)	^{113}Sn ----->	$^{113\text{m}}\text{In}$ ----->	^{113}In	
ครึ่งชีวิต	115 วัน		เสถียร	
(iii)	^{68}Ge ----->	^{68}Ga ----->	^{68}Zn	
ครึ่งชีวิต	275 วัน	1.1 ชม.	เสถียร	
(iv)	^{81}Rb ----->	$^{81\text{m}}\text{Kr}$ ----->	^{81}Kr	
ครึ่งชีวิต	4.7 ชม.	$T_{1/2} = 29.7$	เสถียร	

ในขบวนการสลายตัวแบบอนุกรมของสารรังสี นิวไคลด์รังสีลูกจะถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยการสลายตัวของนิวไคลด์รังสีแม่ และในเวลาเดียวกันตัวนิวไคลด์รังสีลูกจะลดปริมาณลงเรื่อย ๆ เนื่องจากการสลายตัวของมันเองด้วย ถ้านิวไคลด์รังสีแม่มีครึ่งชีวิตนานกว่าของรังสีลูก ย่อมเกิดปรากฏการณ์สำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานของเจเนอเรเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน และภายใต้ข้อกำหนดดังกล่าวในเวลาต่อเนื่องกันย่อมเกิดสภาพสมดุลระหว่างนิวไคลด์รังสีทั้งสอง ซึ่งในสถานะดังกล่าวอัตราส่วนปริมาณ (จำนวนนิวไคลด์รังสีที่มีปรากฏอยู่) ของนิวไคลด์รังสีทั้งสองจะเป็นค่าคงที่และจะเป็นอัตราส่วนคงที่ (ใกล้เคียงค่า 1) ไม่ขึ้นกับเวลา แม้ว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีทั้งสองจะต่างกันโดยสิ้นเชิง แท้จริงแล้วนิวไคลด์รังสีลูกสลายตัวโดยมีค่าครึ่งชีวิตปรากฏเป็น

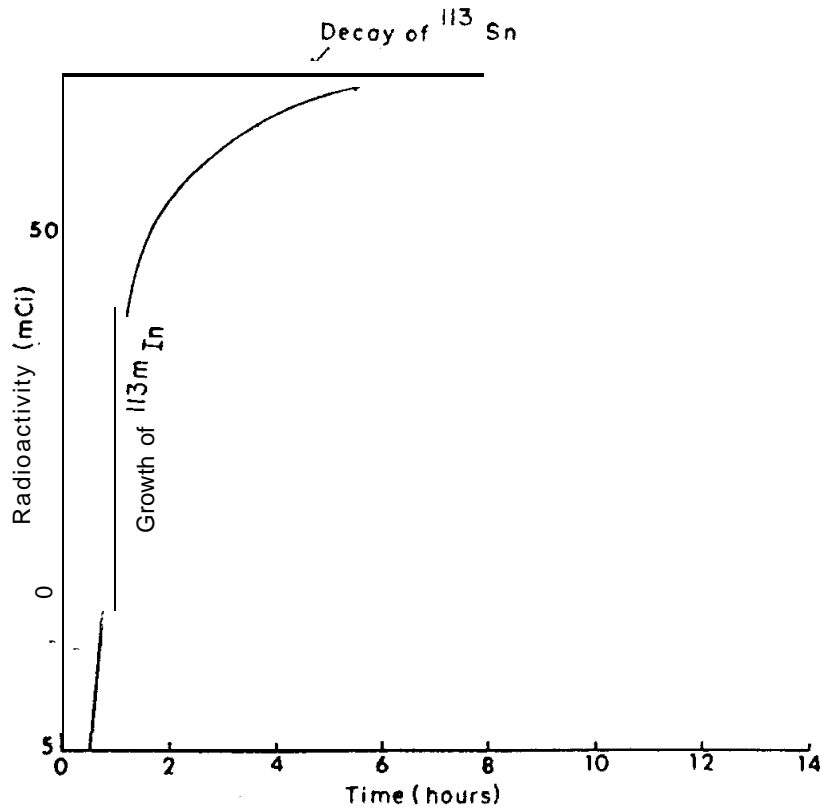
ไปตามค่าของนิวไคลด์แม่ (ซึ่งไม่ใช่ค่าครึ่งชีวิตของตัวเอง) ตัวอย่างเช่น เจเนอเรเตอร์ $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$ กัมมันตภาพรังสี $^{99\text{m}}\text{Tc}$ จะมีสภาพสมดุลเมื่อ ^{99}Mo สลายตัวด้วยค่าครึ่งชีวิต 67 ชม. มากกว่าจะเป็น 6 ชม. การจะบ่งชี้การเกิดและการสลายตัวของสารรังสีลูกในเจเนอเรเตอร์ต้องอาศัยกฎการสลายตัวดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ในรูปที่ 4-1 และ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพรังสีและเวลาด้วยเส้นกราฟ ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการเข้าใจมากกว่าสมการที่ยุ่งยากทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเจเนอเรเตอร์ทั้งสองเป็นที่นิยมใช้ทั่วไปในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ถ้าพิจารณาทั้งสองรูปดังกล่าวจะเห็นว่าต้องใช้เวลาประมาณ 4 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกจึงจะอยู่ในสภาพสมดุลซึ่งเจเนอเรเตอร์ $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ ใช้เวลาประมาณ 24 ชม. ส่วนเจเนอเรเตอร์



รูป 4-1 การเกิดและการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีของ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ จาก ^{99}Mo สภาพสมดุลที่เกิดขึ้นจะต้องใช้เวลาประมาณ 24 ชม. กราฟเส้นทึบนั้นสมมุติว่าการสลายตัวทั้งหมดของ ^{99}Mo ก่อให้เกิดเทคนิคเชิงสถานะกึ่งเสถียร คือ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ กราฟเส้นประแสดงกัมมันตภาพรังสีของ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ตามความเป็นจริงทั่วไป เนื่องจากการสลายตัวของ ^{99}Mo 92% เท่านั้นที่เกิด $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ส่วนที่เหลืออีก 8% ของการสลายตัวจะก่อให้เกิด ^{99}Tc ในสถานะพื้นหรือไอโซเมอร์อายุสั้นอื่น ๆ

$^{113}\text{Sn}-^{113\text{m}}\text{In}$ ประมาณ 6.5 ชม. และจากเส้นกราฟทั้งสองเช่นกัน เห็นได้ชัดว่าการเกิดกัมมันตภาพรังสีลูกไม่มีลักษณะเส้นตรงเมื่อเทียบกับเวลา สำหรับภาพสมดุลอาจแบ่งได้ 3 ระดับ คือ ถ้าใช้เวลา 1 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีลูกจะมีค่าประมาณ 50% ถ้า 2 ครึ่งชีวิต (ของนิวไคลด์รังสีลูก) จะมีค่าประมาณ 75% และถ้า 3 ครึ่งชีวิตจะมีค่าประมาณ 87%

ดังได้กล่าวข้างต้นว่าเปรียบเทียบเจเนอเรเตอร์เสมือนแม่วัว ถ้ามีการแยกกัมมันตภาพรังสี (ด้วยวิธีการทางเคมี) จะเปรียบเสมือนการรีดนมวัว ซึ่งเป็นการรบกวนภาวะสมดุล กัมมันตภาพรังสีหลังจากมีการแยกกัมมันตภาพรังสีออกแล้ว กัมมันตภาพรังสีลูกจะเกิดอีก และย่อมก่อสภาพสมดุลเช่นกัน (ใช้เวลาประมาณ 4 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีลูก) แต่ ณ ระดับใหม่ หรืออาจกล่าวได้ว่า ทุกช่วงเวลา 4 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีลูก



รูป 4-2 การเกิดและสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีของ ^{113m}In จากการสลายตัวของ ^{113}Sn สภาวะสมดุล จะใช้เวลาประมาณ 6.5 ชม.

ผู้ใช้จะได้นิวไคลด์รังสีลูกที่ใหม่ ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องรอจนครบเวลา 4 ครึ่งชีวิตดังกล่าวก็ได้ อาจแยกกัมมันตภาพรังสีได้ตามความต้องการของผู้ใช้แต่ถ้าครบ 4 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีลูกจะได้ยิลด์สูงสุดจากเจเนอเรเตอร์ ตัวอย่างเช่น หลังจากช่วง 1 ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีลูก ถ้าทำการแยกสารกัมมันตภาพรังสีลูกออกมาจะได้ปริมาณรังสีประมาณ 50% ของกัมมันตภาพรังสีลูกสูงสุดที่จะเกิดได้

บางกรณีได้แยกสภาวะสมดุล ระหว่างนิวไคลด์รังสีแม่และลูกเป็น 2 ประเภท คือ ช่วงและยาวนาน โดยลักษณะช่วงเป็นกรณีที่ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีแม่ไม่ยาวนานเมื่อเทียบกับของนิวไคลด์รังสีลูก ตัวอย่างเช่น เจเนอเรเตอร์ $^{99}\text{Mo} - ^{99m}\text{Tc}$ และ $^{87}\text{Y} - ^{87m}\text{Sr}$ นอกจากนี้ข้อแตกต่างของสภาวะสมดุล ทั้งสองคือ ลักษณะช่วง จะมีกัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์รังสีลูกค่อนข้างสูงกว่าของนิวไคลด์รังสีแม่ แต่ถ้าลักษณะยาวนาน จะมีปริมาณกัมมันตภาพรังสีใกล้เคียงกัน แต่ในทางปฏิบัติ ข้อแตกต่างของลักษณะสมดุล ทั้งสองไม่มีความสำคัญใด ๆ ตัวอย่างของลักษณะสมดุล ยาวนานคือเจเนอเรเตอร์ $^{113}\text{Sn} - ^{113m}\text{In}$ และ $^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn}$ ผลผลิตจากเจเนอเรเตอร์ถูกแยกออกจากนิวไคลด์รังสีแม่ด้วยวิธีทางเคมี ดังนั้นนิวไคลด์รังสีลูกจึงมีลักษณะเกือบจะปลอดพาหะ

Radioactivity

Gloss Frit

Eluting Vial
(Daughter Radioactivity)

