

บทที่ 11

การวิเคราะห์ทางเคมีรังสี (Radiochemical Methods of Analysis)

หลักการวิเคราะห์ทางเคมีรังสีนั้น เป็นการวิเคราะห์ที่อาศัยสมบัติพิเศษทาง Radioactivity ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของธาตุกัมมันตรังสี (radioisotopes) โดยมีการสลายตัวให้รังสีซึ่งมีพลังงานและมีค่าครึ่งชีวิต (half-life) เฉพาะธาตุ ธาตุกัมมันตรังสีที่กล่าวนี้ อาจได้จากการศึกษาทางปฏิกิริยานิวเคลียร์ของธาตุที่เสถียร หรืออาจได้จากธรรมชาติ เทคนิคต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์นี้ ได้แก่ Nuclear Activation Analysis หรือ Neutron Activation Analysis (NAA) Isotope Dilution Analysis (IDA) และ Radiometric Analysis ซึ่งเป็นเทคนิคของการวิเคราะห์ที่ให้ความเที่ยงและแม่นยำ มีสภาพไวสูง และขีดจำกัดการตรวจหา (limit of detection) ต่ำมาก ๆ และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

แต่ก่อนที่กล่าวถึงเทคนิคเหล่านี้ โคร้ขอกล่าวถึงความรู้ขั้นพื้นฐานที่จำเป็นเกี่ยวกับทางเคมีรังสีเสียก่อน เพื่อช่วยให้ผู้ศึกษาทำความเข้าใจได้ง่ายและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ อาจช่วยให้มองเห็นในมุมมองกว้างของการนำไปประยุกต์ต่อไปด้วย

11.1 องค์ประกอบของนิวเคลียส (Composition of Nucleus)

นิวเคลียสของธาตุทุกชนิดประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐานที่สำคัญ คือ โปรตอนและนิวตรอน ซึ่งเรียกรวมกันว่า นิวคลีออน (nucleons) ยกเว้นนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนซึ่งมีเฉพาะโปรตอนเท่านั้น สมบัติที่สำคัญของอนุภาคต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอะตอมแสดงในตารางที่ 11.1

ตารางที่ 11.1 แสดงสมบัติของอนุภาคพื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม

ชื่อ	สัญลักษณ์	มวล amu	ประจุ หน่วย*	ขนาดของรัศมี (ซม.)
อิเล็กตรอน	e	0.00055	- 1	2.8×10^{-13}
โปรตอน	p, ${}^1_1\text{H}$	1.00728	+ 1	1.45×10^{-13}
นิวตรอน	n, ${}^1_0\text{n}$	1.00867	0	1.45×10^{-13}

*ประจุ 1 หน่วย = 4.8×10^{-10} esu (electrostatic unit)

ถ้าอะตอมของธาตุที่เป็นกลางจะมีจำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอนเท่ากัน จำนวนโปรตอนที่มีในนิวเคลียสเรียกว่า เลขอะตอม (atomic number, Z) ผลรวมของจำนวนโปรตอน (Z) และจำนวนนิวตรอน (N) ในนิวเคลียสเรียกว่า เลขมวล (mass number, A)

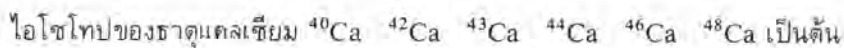
$$A = Z + N$$

ดังนั้น ในการเขียนสัญลักษณ์ชนิดของธาตุทางนิวเคลียร์จึงเขียนได้เป็น A_ZX เช่น

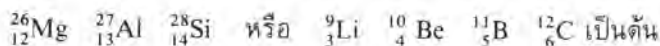


จะเห็นว่าธาตุชนิดเดียวกันจะมีค่า Z เท่ากัน แต่ถ้าต่างชนิดกันจะมีค่า Z ต่างกัน จากการที่ธาตุต่าง ๆ มีจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนแตกต่างกันหรือเหมือนกัน ทำให้มีการเรียกชื่อหรือมีการจัดกลุ่มของอะตอมของธาตุเหล่านั้นเป็นแบบต่าง ๆ กันดังนี้

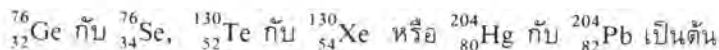
ไอโซโทป (Isotopes) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากัน แต่เลขมวลต่างกัน นั่นคือ อะตอมของธาตุเหล่านี้จะมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน เช่น



ไอโซทอน (Isotones) หมายถึง ชนิดอะตอมของธาตุที่มีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสเท่ากัน แต่มีจำนวนโปรตอนต่างกัน ดังนั้นจะเห็นว่าไอโซทอนนั้นเป็นกลุ่มธาตุต่างชนิดกัน เช่น



ไอโซบาร์ (Isobars) หมายถึง ชนิดอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลเท่ากัน แต่มีเลขอะตอมต่างกัน เช่น



ไอโซเมอร์ (Isomers) หมายถึง ชนิดอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลและเลขอะตอมเท่ากัน แต่มีสมบัติทางนิวเคลียร์ต่างกัน เช่น มีระดับพลังงานต่างกัน มีชีวิต (life time) ยาวต่างกัน เช่น ${}^{121}\text{Sb}$ มีถึง 3 ไอโซเมอร์ คือ ไอโซเมอร์แรกมีครึ่งชีวิต (half-life) 60 วัน ไอโซเมอร์ที่สองมีครึ่งชีวิต 1.5 นาที และไอโซเมอร์ที่สามมีครึ่งชีวิต 21 นาที เป็นต้น

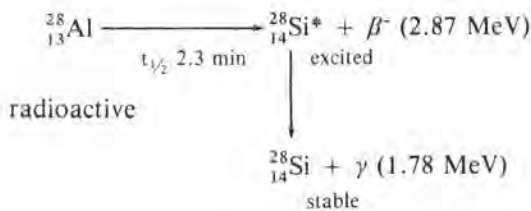
เมื่อก้าวถึงไอโซโทป ยังแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

1. **ไอโซโทปที่เสถียร (Stable Isotopes)** ซึ่งเป็นชนิดของธาตุต่าง ๆ ที่พบในธรรมชาติโดยไม่มีการสลายตัว (decay) ธาตุบางชนิดอาจมีหลายไอโซโทปที่เสถียรก็ได้ และแต่ละไอโซโทปที่มีจะแสดงเป็น % abundance หรือ isotopic abundance เช่น

^{24}Mg มี 78.70%	^{54}Fe มี 5.82%
^{25}Mg มี 10.13%	^{56}Fe มี 91.66%
^{26}Mg มี 11.17%	^{57}Fe มี 2.19%
รวม 100.00%	^{58}Fe มี 0.33%
	รวม 100.00%

และธาตุบางชนิดที่เกิดในธรรมชาติมีเพียงไอโซโทปเดียว ดังนั้น % abundance จึงเป็น 100% เช่น ^9Be , ^{19}F , ^{23}Na , ^{27}Al , ^{31}P , ^{59}Co เป็นต้น

2. ไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioisotopes) เป็นไอโซโทปที่มีการสลายตัว (decay หรือ disintegrate) ให้รังสีบางชนิด เช่น รังสีแอลฟา (α -particle หรือ α -rays) หรือรังสีบีตา (β -particle หรือ β -rays) หรือรังสีแกมมา (γ -rays) ออกมาอย่างเดี่ยวหรือหลายอย่างก็ได้ และหลังจากมีการสลายตัวแล้ว ในที่สุดจะกลายเป็นไอโซโทปที่เสถียร ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะตัว คือ มีค่าครึ่งชีวิตเฉพาะ และพลังงานของรังสีที่ให้ออกมาก็มีพลังงานเฉพาะ ซึ่งสมบัติทั้งสองอย่างนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ว่าเป็นไอโซโทปของธาตุอะไร ตัวอย่างเช่น



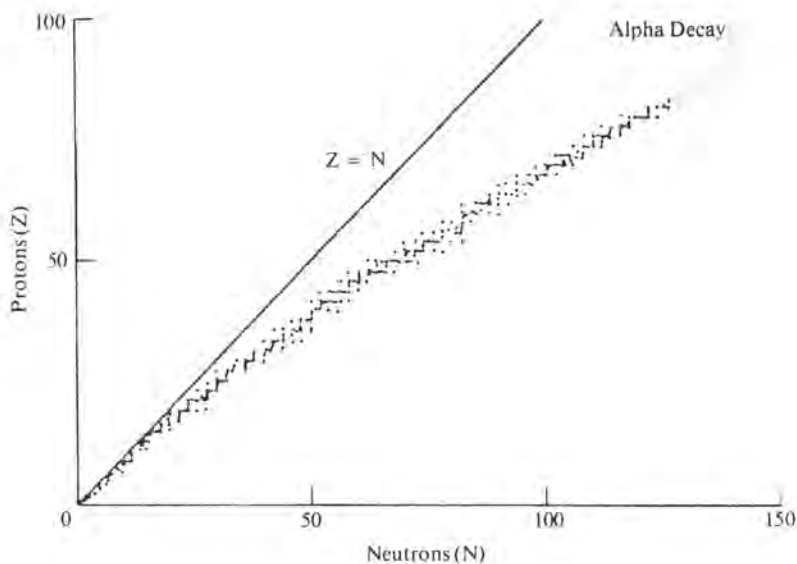
รังสีหรืออนุภาคที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีมีสมบัติที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 11.2

ตารางที่ 11.2 แสดงสมบัติที่สำคัญของอนุภาคและรังสีพื้นฐาน

ชื่อ	สัญลักษณ์	ประจุ (หน่วย)	มวล (amu)	หมายเหตุ
แอลฟา	α , ${}^4_2\text{He}$	+ 2	4.0015	เป็นนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม
บีตา หรือเนกาตรอน	β^- , e^-	- 1	0.00055	มีสมบัติเหมือนอิเล็กตรอน แต่ต้นกำเนิดต่างกัน
โพสิตรอน	β^+ , e^+	+ 1	0.00055	สมบัติเหมือนบีตา แต่ประจุต่างกัน
แกมมา หรือโฟตอน	γ	0	0	เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง
นิวตริโน	ν	0	$< 2 \times 10^{-7}$	เกิดขึ้นเมื่อมีการให้ e^- หรือ e^+ หรือ E.C.

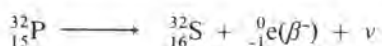
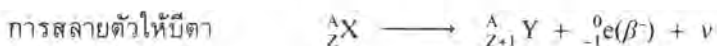
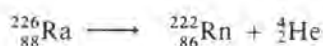
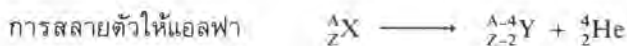
E.C. = electron capture คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนใน K-shell ถูกจับด้วยนิวเคลียส

ไอโซโทปของธาตุจะเสถียรหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส และยังขึ้นอยู่กับพลังงานนิวเคลียส หรือสถานะกระตุ้น (state of excitation) ของนิวเคลียส ดังนั้น ถ้าเขียนกราฟระหว่างเลขอะตอมของไอโซโทปที่เสถียรทุกชนิดกับจำนวนนิวตรอนที่มีในนิวเคลียส จะได้กราฟดังรูปที่ 11.1

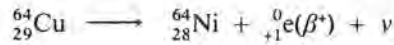


รูปที่ 11.1 แสดงแผนภูมิของนิวไคลด์ (nuclides) ต่าง ๆ แต่ละจุดแสดงถึงไอโซโทปที่เสถียร

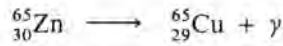
ไอโซโทปใดที่ไม่ได้อยู่ในเส้นโค้งนี้ (รูปที่ 11.1) แสดงว่าไม่เสถียร จะมีการสลายตัวให้อนุภาคที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในเส้นโค้ง ถ้าไอโซโทปที่มีโปรตอนมากจะสลายตัวด้วยการให้โพซิตรอน (β^+) หรือด้วยวิธีการจับอิเล็กตรอน (electron capture) จะเห็นว่าด้วยวิธีการสลายตัวแบบนี้จะทำให้โปรตอนลดลงและนิวตรอนเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้อัตราส่วนของ Z/N เข้าใกล้ 1 แต่ถ้าเป็นไอโซโทปที่มีนิวตรอนมาก (neutron-rich) จะมีการสลายตัวให้บีตาหรือเนกาตรอน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มโปรตอนและลดนิวตรอนลง สำหรับพวกไอโซโทปหนัก ๆ จะใช้วิธีสลายตัวด้วยการให้อนุภาคแอลฟาเพื่อจะลดทั้งโปรตอนและนิวตรอน ตัวอย่างการเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี



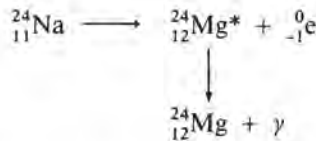
การสลายตัวให้โพซิตรอน ${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e(\beta^+) + \nu$



การสลายตัวแบบ E.C. ${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + \gamma$



การสลายตัวให้แกมมา ${}^A_ZX^* \longrightarrow {}^A_ZX + \gamma$
พลังงานสูง



11.2 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Decay)

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีเป็นแบบ first order process ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

อัตราการสลายตัว α จำนวนอะตอมที่มีอยู่

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

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{-----(11.1)}$$

N = จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่เมื่อเวลา t

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็น sec^{-1} หรือ min^{-1}

$-\frac{dN}{dt}$ = จำนวน disintegration ต่อเวลา

จากสมการ 11.1 เขียนใหม่ $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ -----(11.2)

จากการ integration $\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \text{-----(11.3)}$$

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{-----(11.4)}$$

$$\therefore N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{-----(11.5)}$$

N_0 = จำนวนอะตอมของธาตุเมื่อเวลาเริ่มต้น $t = 0$

N_t = จำนวนอะตอมที่เหลือหลังจากทิ้งไว้เป็นเวลา t

ถ้า $\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{2}$ $t = t_{1/2}$ เรียกว่า half-life

$$\therefore \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$t_{1/2} = \frac{(\ln 2)}{\lambda}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \text{-----(11.6)}$$

ถ้าเราทราบค่า λ ก็จะสามารถหาค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ได้

เนื่องจาก $-\frac{dN}{dt}$ เป็นอัตราการสลายตัวของอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี เราอาจเรียกสั้น ๆ ว่าเป็นกัมมันตภาพ (activity)

$$\therefore A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{-----(11.7)}$$

11.2.1 หน่วยต่าง ๆ ที่ใช้บอกปริมาณกัมมันตภาพ

หน่วยที่นิยมใช้บอกปริมาณของกัมมันตภาพ (activity) นั้นมีหลายอย่าง คือ

(1) บอกเป็น disintegration ต่อหน่วยเวลา เช่น

dps (disintegration per sec.)

dpm (disintegration per min.)

(2) บอกเป็นคิวรี (curie, Ci) หรือมิลลิคิวรี (mCi) หรือไมโครคิวรี (μ Ci)

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

(3) บอกเป็นหน่วยเบคเคอเรล (Becquerel, Bq.)

$$1 \text{ Bq.} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$= 2.7 \times 10^{-11} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

$$= 1 \text{ dps}$$

โดยทั่วไป ถ้าต้องการทราบปริมาณของกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง เราจะใช้เครื่องวัด (ที่ทราบค่า detector coefficient) แล้วผลที่วัดได้จะเป็น count rate อ่านเป็น count

$$c = \frac{\text{cps}}{\text{dps}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}} \quad \text{-----(11.8)}$$

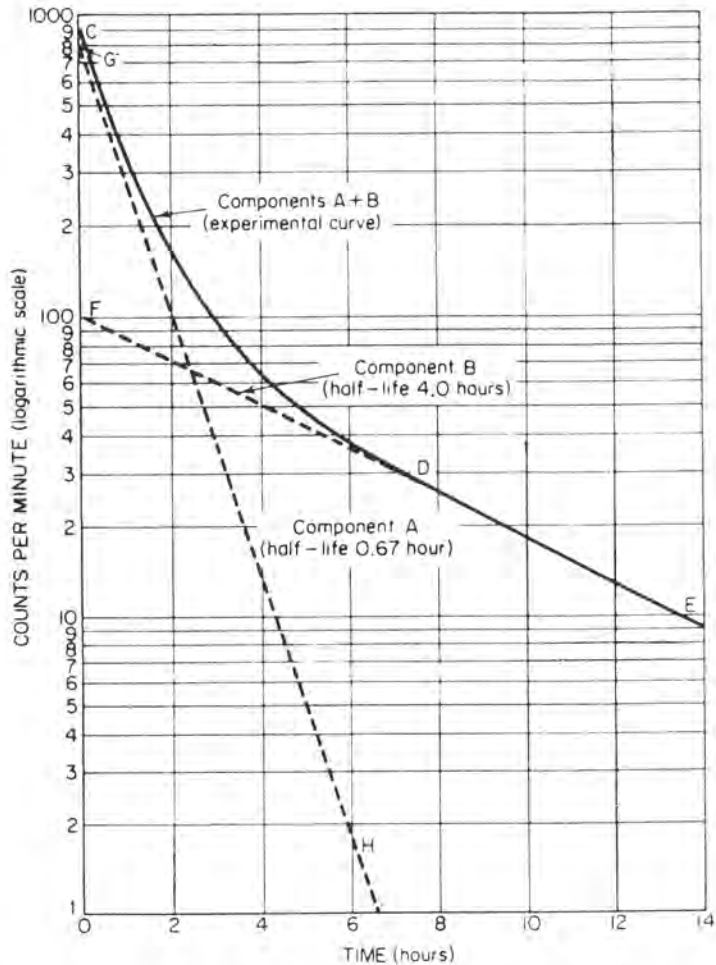
$c =$ detector coefficient

$$\therefore \text{activity} = \frac{\text{count rate}}{\text{detector coeff.}}$$

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นของผสมของสารกัมมันตรังสี ดังนั้น activity ที่วัดได้รวมกันจะเป็น

$$A_{\text{total}} = \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3 + \dots \quad \text{-----(11.9)}$$

ถ้าสารกัมมันตรังสีนั้นมีครึ่งชีวิตต่างกัน เราสามารถทำการวิเคราะห์หากัมมันตภาพของแต่ละชนิดได้ หรือหา $t_{1/2}$ ของแต่ละสารได้ ดังแสดงในรูปที่ 11.2 โดยทำการวัดกัมมันตภาพของสารตัวอย่างนั้นในช่วงเวลา



รูปที่ 11.2 แสดงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีผสม 2 ชนิด คือ A และ B

ต่าง ๆ กัน สารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นจะสลายตัวหมดไปเหลือแต่สารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวกว่า เมื่อ extraporate ออกไป จะหากัมมันตภาพของสารที่มีครึ่งชีวิตยาวได้ เมื่อนำไปหักออกจากกัมมันตภาพรวมก็จะหากัมมันตภาพและครึ่งชีวิตของสารที่สองได้ เทคนิคนี้เรียกว่า “Stripping technique” ถ้าจะให้ ได้ผลดี สารผสมไม่ควรเกิน 3 สาร และครึ่งชีวิตควรต่างกันอย่างน้อย 2 เท่า

11.2.2 การหาครึ่งชีวิต (half-life) ของธาตุกัมมันตรังสี

วิธีหา $t_{1/2}$ ของธาตุกัมมันตรังสีนั้นสามารถทำได้ง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) ถ้าเป็นสารเดี่ยว อาจใช้วิธีคำนวณจากค่ากัมมันตภาพที่วัดได้ในช่วงเวลาต่างกัน เช่น
 ที่เวลา t_1 วัดกัมมันตภาพได้ = A_1
 ที่เวลา t_2 วัดกัมมันตภาพได้ = A_2

จากสูตร $A_t = A_0 e^{-\lambda t}$

$$\therefore A_2 = A_1 e^{-\lambda(t_2 - t_1)}$$

จะสามารถหาค่า λ ได้

$$\therefore t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

ค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ก็จะได้

- (2) ถ้ามีสารเดี่ยวหรือเป็นของผสม ก็สามารถหาได้จากการวัดกัมมันตภาพในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน แล้วนำไปเขียนกราฟดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 11.2.1 รูปที่ 11.2

- (3) ถ้าสารกัมมันตรังสีตัวอย่างมี $t_{1/2}$ ยาวมาก นั่นคือ การวัดกัมมันตภาพแต่ละครั้งจะไม่ต่างกัน จึงไม่สามารถหาได้โดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 แต่สามารถหาได้จากการคำนวณโดยจะต้องทราบมวลอะตอมของธาตุที่ต้องการหา $t_{1/2}$ เพื่อจะใช้คำนวณหาจำนวนอะตอมจากปริมาณของธาตุที่มีอยู่

จากสูตร $\lambda = \frac{\text{จำนวนอะตอมที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา}}{\text{จำนวนอะตอมที่มีอยู่}}$

จำนวนอะตอมที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา = จำนวนอนุภาคที่ให้ออกมาต่อหน่วยเวลาซึ่งวัดได้

ดังนั้น $\lambda = -\frac{dN}{dt} / N$

เมื่อทราบค่า λ แล้ว $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

11.3 การเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคและรังสีกับสสาร (Interaction of Radiation with Matter)

รังสีและอนุภาคแบ่งออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ

11.3.1 พวกการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) ได้แก่ พวกรังสีแกมมา (γ -ray) และรังสีเอกซ์ (X-ray)

11.3.2 พวก Corpuscular radiation ได้แก่ พวกรังสีที่มีประจุและมีมวล คือพวกรังสี α , β^- , β^+ , d, p และ e ทั้งนี้ให้รวมนิวตรอนเข้าไปด้วย เพราะเป็นอนุภาคที่มีมวล

11.4 การเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

เนื่องจากรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์มีพลังงานจลน์มาก เมื่อเกิดการชนกับวัตถุจึงสามารถทำให้เกิดอันตรกิริยากับสสารได้หลายแบบด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีนั้น ๆ แต่ที่สำคัญ คือ การชนกับอิเล็กตรอน หรือการชนกับนิวเคลียส สำหรับรังสีแกมมาจะเกิดการชนกับอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นพลังงานเกือบทั้งหมดถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนเมื่อชนกันครั้งแรก และมีลักษณะเป็น exponential law

การดูดกลืนรังสีแกมมาด้วยวัตถุนั้น วัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (absorption coefficient) หรือมีค่า half thickness เฉพาะ ดังแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{-----(11.10)}$$

I_0 = ความเข้มของลำแสงแกมมาเริ่มต้น

I = ความเข้มของลำแสงแกมมาหลังจากผ่านสารดูดกลืนแล้ว (absorber)

x = ความหนาของสารดูดกลืนเป็น ซม.

μ = absorption coefficient ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและสารดูดกลืน

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

เมื่อ $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}}$

half value thickness $x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \text{HVL} \quad \text{-----(11.11)}$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{10} \text{ เรียก Tenth Value Thickness (TVL) } = \frac{2.303}{\mu}$$

μ_1 = linear absorption coefficient, cm^{-1}

μ_m = mass absorption coefficient, cm^2/g

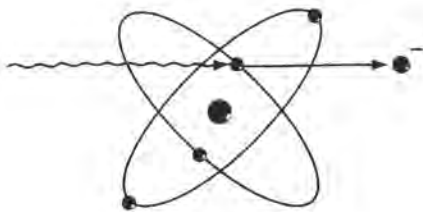
$$= \mu_1/\rho = \text{cm}^{-1}/\text{g}/\text{cm}^3$$

$$= \text{cm}^2/\text{g}$$

$$\rho = \text{density ของ absorber, g}/\text{cm}^3$$

ความจริงแล้ว รังสีแกมมาหรือ X-ray เมื่อผ่านวัตถุสามารถทำให้เกิดไอออไนเซชันได้บ้าง เมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน หรือ β^- แล้วจะน้อยมากอาจเป็น $\frac{1}{10} - \frac{1}{100}$ เท่าของอิเล็กตรอน หรือ β^- เมื่อมีพลังงานเท่ากัน

เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำถูกดูดกลืนจะทำให้เกิดผลที่เรียกว่า “Photoelectric Effect” ซึ่งเป็นกระบวนการที่รังสีแกมมา หรือ X-ray ชนกับอิเล็กตรอนในออร์บิทัล แล้วถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนทั้งหมด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากออร์บิทัล ดังรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.3 แสดง photoelectric effect

$$E \text{ ของอิเล็กตรอน} = E_\gamma - E_b \quad \text{-----(11.12)}$$

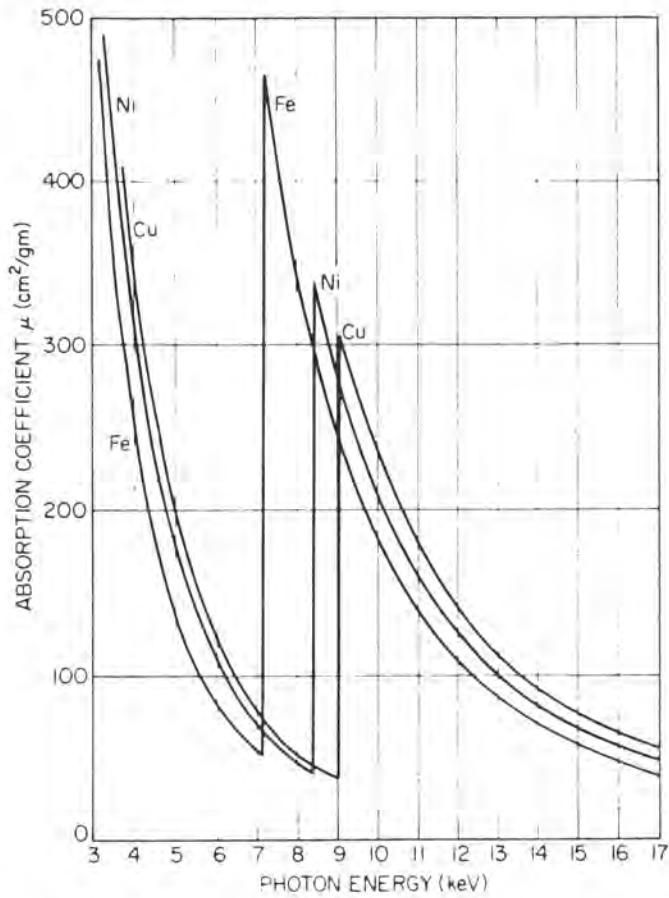
E_b = binding energy ของอิเล็กตรอน

E_γ = energy ของแกมมา

อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้พบว่าเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนใน K-shell มากกว่าใน L-shell photoelectric effect จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อพลังงานของแกมมาสูงกว่าพลังงานของ binding อิเล็กตรอน การเกิด photoelectric effect จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าเพิ่มเลขอะตอมของตัวดูดกลืน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

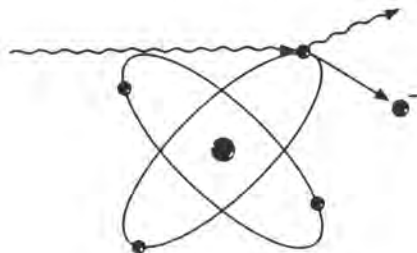
$$\text{Probability ของการดูดกลืนแบบ photoelectric} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}}$$

การเกิด photoelectric effect จะมี K-X-rays เกิดขึ้นด้วยทุกครั้ง ลักษณะการดูดกลืนรังสีแกมมาด้วยโลหะมีลักษณะดังรูปที่ 11.4 ณ จุด sharp absorption edges อาจใช้หาพลังงานของรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ได้



รูปที่ 11.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Mass Absorption Coefficient (μ_m) ของ Fe, Ni และ Cu กับพลังงานงานโฟตอน (Kev)

สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานปานกลาง เมื่อชนกับอิเล็กตรอนแล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้อิเล็กตรอน โฟตอนเองจะกระเจิงออกไปด้วยพลังงานที่เหลือเรียกว่า เกิด Compton Scattering หรือ Compton Effect ดังแสดงในรูปที่ 11.5



รูปที่ 11.5 แสดง Compton Scattering ของโฟตอน

$$\text{energy ของ } \gamma \quad E_\gamma = E_c + E_e \quad \text{-----(11.13)}$$

compton scattering เป็นกระบวนการที่สำคัญซึ่งจะเกิดขึ้นกับโฟตอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 MeV ค่า mass absorption coefficient ของการเกิด compton scattering เปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของเลขอะตอมของสารดูดกลืน แต่จะมีการเสียพลังงานอย่างมากถ้าโฟตอนมีพลังงานสูง

$$\text{Probability ของการเกิด compton scattering} \propto \frac{1}{E}$$

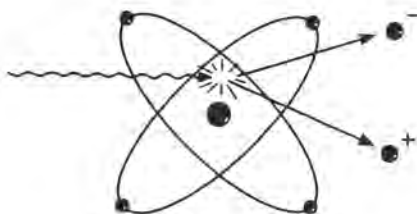
ถ้าโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า $2 \times 0.51 \text{ MeV}$ รั้งสีแกมมาจะถูกดูดกลืนด้วยวัตถุทำให้เกิด Pair Production โดยที่รั้งสีแกมมามีพลังงานมากนี้จะผ่านเข้าไปใกล้นิวเคลียสมาก ทำให้เกิดการผลิต β^+ และ β^- เรียกว่า pair production เมื่อเกิด β^+ สิ่งที่จะติดตามมาอีกก็คือ การเกิด annihilation โดยที่ β^+ จะรวมกับ e แล้วเกิด 2γ และแต่ละตัวจะมีพลังงาน 0.51 MeV

$$\beta^+ + e^- = 2\gamma$$

$$E_\gamma = E_c + E_p + 2mc^2$$

$$> 1.02 \text{ MeV} \qquad \qquad \qquad 1.02 \text{ MeV}$$

electron-positron pair



จะเห็นว่าอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะจากกระบวนการเหล่านี้ เมื่อมันถูกลดพลังงานลงในสนามของนิวเคลียส จะทำให้ได้โฟตอนเกิดขึ้น เรียกว่าเกิด Bremsstrahlung

11.5 การเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคที่มีมวลและมีประจุไฟฟ้ากับสสาร

อนุภาคที่มีมวลมากและมีประจุ เช่น แอลฟา โปรตอน หรือดิวเทรียม เมื่อผ่านเข้าไปในวัตถุจะมีการชนกับอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่ แต่มีน้อยมากที่จะเข้าไปชนกับนิวเคลียส เมื่อชนกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนตัวที่รับพลังงานมีผลเกิดขึ้นติดตามมาอาจเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างพร้อม ๆ กันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคเหล่านั้น ดังนี้

1. ถ้าอนุภาคนั้นมีพลังงานต่ำ เมื่อชนกับอิเล็กตรอนอาจทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (excited state)
2. ถ้าอนุภาคมีพลังงานสูง เมื่อไปชนกับอิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอมหรือโมเลกุล เรียกว่าเกิดไอออนไนเซชันขึ้นได้ไอออนบวกและอิเล็กตรอน เรียกว่า ion-pair พลังงานโดยเฉลี่ยที่จะต้องเสียไปในการทำให้เกิด ion-pair หนึ่ง ๆ เท่ากับ 35 อิเล็กตรอนโวลท์ (35 eV) โดยประมาณ
3. เมื่อการสูญเสียพลังงานของอนุภาคมีมาก ๆ เข้า เหลือความเร็วเท่า ๆ กับความเร็วอิเล็กตรอนใน K-shell อนุภาคนั้นจะไปจับเอาอิเล็กตรอนออกมาจากอะตอมหรือจากสารประกอบนั้น ๆ อนุภาคนั้น

ก็จะถูกดูดกลืนไป ทำให้เราสามารถหาค่า stopping power ของวัตถุนั้น ๆ ต่ออนุภาคต่าง ๆ หรือหา range ของอนุภาคในวัตถุต่าง ๆ ได้

4. ถ้าอนุภาคมีพลังงานสูงอาจจะชนกับโมเลกุลของสสาร ทำให้สสารนั้นเกิดการแตกตัว (dissociation) หรือเกิดเรดิคัล (radicals) ได้ ซึ่งสามารถหาความรู้เพิ่มเติมได้จากวิชาเคมีรังสี

อันตรกิริยาของอนุภาคแอลฟาและอนุภาคโปรตอนซึ่งมีประจุบวกและมีมวล โดยอนุภาคแอลฟามีมวลประมาณ 4 เท่า ก็จะเป็น 4 เท่าของอนุภาคโปรตอนเช่นกัน ดังนั้น range ของอนุภาคแอลฟาจะเท่ากับ range ของอนุภาคโปรตอน อนุภาคแอลฟาจะต้องมีพลังงานเป็น 4 เท่าของอนุภาคโปรตอน

$$\text{การสูญเสียพลังงานของอนุภาค} \propto Z^2$$

ถ้าทราบ range ของโปรตอนที่พลังงานหนึ่ง เราสามารถคำนวณหาค่า range ของอนุภาคอื่นได้ เมื่อทราบประจุ มวล และพลังงานโดยคำนวณจากสูตร

$$R_{Z,M,E} = \frac{M}{Z^2} R_{p,E/M} \quad \text{-----(11.14)}$$

R = range = ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากจุดเริ่มต้นถึงจุดที่อนุภาคนั้นไม่สมมติเป็นอนุภาคอีกต่อไป

Z = ประจุของอนุภาค

E = พลังงาน (MeV)

M = มวลของอนุภาค

p = โปรตอน

โดยทั่วไป range ที่ทราบและหากันได้พอดี คือ range ในอากาศ แต่ถ้าจะหา range ในวัตถุอื่น ๆ ซึ่งมีประโยชน์มากกว่าค่อนข้างจะทำได้ยาก แต่ก็สามารถคำนวณหาได้เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ดังนี้

$$R \text{ ของแข็ง, ความหนาแน่น } \rho = \frac{3.2 \times 10^{-4} R \times A^{1/2}}{\rho} \quad \text{-----(11.15)}$$

R = range in air (mg/cm²)

A = มวลของวัตถุนั้น

11.6 การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน (β^- , e^+) กับสสาร

สำหรับอนุภาคอิเล็กตรอนหรือรังสีบีตาซึ่งมีมวลน้อยมากและมีประจุ การสูญเสียพลังงานของมันเมื่อชนกับวัตถุก็เช่นเดียวกับของอนุภาคแอลฟาหรืออนุภาคอื่น ๆ คือ จะมีการสูญเสียพลังงานประมาณ 35 eV ในการทำให้เกิด 1 ion-pair ในอากาศ แต่การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับวัตถุหรือสสารจะต่างจากของแอลฟา ดังนี้

1. การเกิดไอออนในเซชันของแอลฟาดีกว่าอิเล็กตรอนเมื่อมีพลังงานเท่ากัน สำหรับอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 146 eV หรือมีความเร็วเป็น 0.024 ของความเร็วแสง จะมี specific ionization สูงที่สุด และถูกหยุด

(stop) เมื่อมีพลังงาน 12.5 eV

2. การสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนมีน้อยกว่าของแอลฟา แต่จะเกิดการกระเจิง (scattering) มากกว่า

3. อิเล็กตรอนเมื่อมีการสูญเสียพลังงานจะทำให้เกิด Bremsstrahlung ซึ่งเป็นโฟตอน จึงทำให้การหา range เกิดมี tailing

ในบางกรณี การที่เราทราบค่า range ของรังสีบีตาในอะลูมิเนียม ทำให้เราสามารถคำนวณหรืออ่านจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาพลังงาน E_{max} ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการตรวจพิสูจน์เพื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างที่สลายตัวให้รังสีบีตา สูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$R = 0.543 E - 0.160 \quad \text{-----(11.16)}$$

R = range ของอิเล็กตรอนในอะลูมิเนียม mg/cm^2

E = E_{max} ในหน่วย MeV

สูตรนี้จะใช้ได้ดีเมื่ออิเล็กตรอนหรือรังสีบีตามีพลังงานสูงกว่า 0.7 MeV แต่ถ้าต่ำกว่าควรจะต้องอ่านจากกราฟมาตรฐาน

11.7 การสะท้อนกลับ (Back Scattering) และการดูดกลืน (Absorption) ของรังสีบีตา

เนื่องจากอิเล็กตรอนหรือรังสีบีตามีมวลน้อย เมื่อกระทบกับวัตถุโดยเฉพาะโลหะจะเกิดการสะท้อนกลับ และถ้าเพิ่มความหนาขึ้นยิ่งจะสะท้อนกลับได้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้ควรจะต้องระมัดระวัง โดยเฉพาะในการวัดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีชนิดที่สลายตัวให้รังสีบีตา ภาชนะรองรับสารกัมมันตรังสีที่ใช้ อาจเป็นสาเหตุให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดได้ ถ้าไม่ได้มีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ back scattering

อีกอย่างหนึ่งของการวัดกัมมันตภาพที่เราจะต้องคำนึงถึง คือ การดูดกลืนรังสีด้วยตัวของมันเอง (self-absorption) ในกรณีที่มีการแยกสารตัวอย่าง หรือเตรียมสารตัวอย่างเพื่อนำไปวัดรังสี สารตัวอย่างจะต้องไม่มากเกินไปหรือหนาเกินไป มิฉะนั้นแล้วการวัดอาจผิดพลาดได้ ถ้าได้มีการแก้ไขให้ถูกต้อง (correction) ในการวัดสารตัวอย่างแต่ละครั้งก็จะเป็นเรื่องที่ต้องจะต้องทำ

จากตารางที่ 11.3 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงความสามารถของอนุภาคแอลฟา โปรตอน และรังสีบีตาหรืออิเล็กตรอนในการเคลื่อนที่ในตัวกลาง หรือ range ของมันเมื่อมีพลังงานต่างกัน

ตารางที่ 11.3 แสดง range ของอนุภาคแอลฟา โปรตอนและอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 8 MeV และ 1 MeV ในอากาศและน้ำ

อนุภาค	พลังงาน (MeV)	range ในอากาศ (ซม.)	range ในน้ำ (มม.)
แอลฟา (α)	8	7.3	0.1
โปรตอน (p)	8	77	1.1
โพซิตรอน (β^+)	8	3440	41
แอลฟา	1	0.5	0.007
โปรตอน	1	2.3	0.03
โพซิตรอน	1	350	5.2

11.8 การเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคนิวตรอนกับสสาร

เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนไม่มีประจุ มีมวลพอ ๆ กับอนุภาคโปรตอน การเกิดอันตรกิริยากับสสารจึงแตกต่างกันอย่างมาก อนุภาคนิวตรอนไม่มีผลจาก Coulombic force เลย และมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนน้อยมาก ซึ่งถือได้ว่าอนุภาคนิวตรอนไม่ก่อให้เกิดการไอออไนเซชัน แต่จะเกิดการชนกับนิวเคลียสมากที่สุด การเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารอาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. เป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น (elastic collision) โดยที่ผลรวมของพลังงานจลน์ของนิวตรอนและของนิวเคลียสก่อนและหลังการชนกับมีค่าเท่ากัน
2. เป็นการชนกับแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) โดยที่พลังงานจลน์ของนิวตรอนบางส่วนถูกถ่ายเทไปให้กับสสาร เกิด excitation ส่วนอนุภาคนิวตรอนก็จะเกิดเบี่ยงเบนไปเป็นมุม θ การชนกันแบบนี้ อนุภาคนิวตรอนจะถูกลดพลังงานลงไปเรื่อย ๆ พลังงานที่เหลืออยู่ของอนุภาคนิวตรอนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E \text{ (พลังงานที่เหลือ)} = \frac{E_0[(A+1)^2 - 2A(1 - \cos \phi)]}{(A+1)^2} \quad \text{-----(11.17)}$$

E = พลังงานที่เหลือของอนุภาคนิวตรอน

E_0 = พลังงานเริ่มต้นของอนุภาคนิวตรอน

A = mass number ของนิวเคลียส

θ = เป็นมุมที่อนุภาคนิวตรอนเบี่ยงเบนไป

ϕ = เป็นมุมที่นิวเคลียสเบี่ยงเบนไป

พลังงานของนิวตรอนจะเหลือน้อยที่สุด ถ้า $\phi = 180^\circ$

$$\begin{aligned} \therefore E_{\min} &= \frac{E_0[(A+1)^2 - 4A]}{(A+1)^2} \\ &= E_0 \left[\frac{A-1}{A+1} \right]^2 \end{aligned} \quad \text{-----(11.18)}$$

จะเห็นได้ว่า ถ้าเป็นการชนกับนิวเคลียสของธาตุหนัก $E_{\min} \approx E_0$ นั่นคือ ในการชนแต่ละครั้งอนุภาคนิวตรอนเสียพลังงานน้อยมาก แต่ถ้า $A = 1$ นั่นคือชนกับนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจน $E_{\min} = 0$ แสดงว่าอนุภาคนิวตรอนเมื่อชนกับนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนจะลดพลังงานลงได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น โดยทั่วไปจึงนิยมใช้พาราฟินและน้ำซึ่งมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่มากเป็นตัวลดพลังงาน (slowed down) ของนิวตรอน

3. เป็นการชนแบบถูกจับ (captured) ในนิวเคลียส เมื่ออนุภาคนิวตรอนมีพลังงานต่ำ ๆ เช่น เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron, energy 0.025 eV) ส่วนใหญ่จะถูกจับด้วยนิวเคลียสเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เรียกว่า (n, γ) reaction แต่ถ้าอนุภาคนิวตรอนยังมีพลังงานสูงอยู่ก็อาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นแบบ (n, p), (n, α) หรือ (n, 2n) reaction ได้ ทั้งนี้ปฏิกิริยานิวเคลียร์จะเป็นแบบไหนย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสของธาตุ cross section มีหลายอย่าง แล้วแต่จะใช้ในเรื่องใด ถ้าเป็น cross section ของธาตุในปฏิกิริยานิวเคลียร์หมายถึง effective area ของธาตุนั้น ๆ ต่อการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาค หรือหมายถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิด (probability) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุกับอนุภาคนั้น ๆ

11.9 การวิเคราะห์ซึ่งก่อกัมมันตภาพรังสี (Activation Analysis)

ในการศึกษาวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้นั้น อาจจำแนกออกไปเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. หลักการที่สำคัญต่าง ๆ (basic concept, principles)
2. เทคนิคต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ (techniques)
3. วิธีวิเคราะห์ (methods of analysis)
4. ข้อผิดพลาด (errors)
5. ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ (limitations)
6. ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของวิธีนี้ (advantages และ disadvantages)

11.9.1 หลักการของ Activation Analysis

Activation analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์อย่างหนึ่งที่สำคัญการทำให้ธาตุที่จะวิเคราะห์หรือสารที่จะวิเคราะห์กลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี (radioactive nuclides) ด้วยการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคบางชนิด จากการวัดปริมาณของกัมมันตภาพ (radioactivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับสถานะ เมื่อนำค่าที่วัดได้ไปเทียบกับสารมาตรฐานก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้ ถ้าพิจารณาว่าเมื่อเอาสารตัวอย่างไปอาบรังสี (irradiate, activate) จะได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 R_F &= \phi N \sigma \\
 &= \frac{\phi w N_o f \sigma}{M} \quad \text{-----(11.19)}
 \end{aligned}$$

- R_F = rate of formation
 N = จำนวนอะตอมของธาตุในสารตัวอย่าง
 σ = cross section ในหน่วย ซม.²
 ϕ = flux หรือจำนวนอนุภาคต่อ ซม.² ต่อวินาที
 w = มวลของธาตุที่จะวิเคราะห์
 N_o = เลขอวกาโตร
 M = มวลอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์
 f = % abundance

$$\text{อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี} \quad -\frac{dN}{dt} = \lambda N^* \quad \text{-----(11.20)}$$

$$\text{net rate of formation} \quad \frac{dN^*}{dt} = \phi N \sigma - \lambda N^* \quad \text{-----(11.21)}$$

$$\text{จากการทำ integration} \quad N^* = \frac{\phi \sigma N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$\lambda N^* = \phi N \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{-----(11.22)}$$

$$\boxed{A_t = \phi \sigma \frac{w}{M} N_o f (1 - e^{-\lambda t})} \quad \text{-----(11.23)}$$

ปริมาณของกัมมันตภาพที่ได้หลังสิ้นสุดการฉายรังสี แต่ถ้าทิ้งไว้สักระยะเวลาหนึ่ง กัมมันตภาพจะวัดได้เป็น

$$A_t = \phi \sigma \frac{w}{M} N_o f (1 - e^{-\lambda t_a}) (e^{-\lambda t_w}) \quad \text{-----(11.24)}$$

- t_a = activation time
 t_w = waiting time

\therefore น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่างที่คำนวณได้ คือ

$$\therefore W = \frac{M A_t e^{\lambda t_w}}{\phi \sigma N_o f (1 - e^{-\lambda t_a})} \quad \text{-----(11.25)}$$

ในกรณีที่สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เป็นธาตุกัมมันตรังสี ดังนั้น อัตราการลดลงของธาตุกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างจำเป็นต้องคิดทั้งส่วนที่เกิดการสลายตัว (decay) และส่วนที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

นั่นคือ อัตราการลดลงของธาตุกัมมันตรังสีในสารตัวอย่าง $= -\frac{dN}{dt}$

$$\therefore -\frac{dN}{dt} = \lambda N + \phi \sigma N \quad (11.25)$$

$$= N(\lambda + \phi \sigma) \quad \text{-----}(11.26)$$

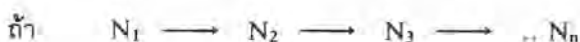
$$= N \Lambda \quad \text{-----}(11.27)$$

$$\Lambda = \text{modified decay constant} = \lambda + \phi \sigma$$

$$-\frac{dN}{N} = \Lambda dt$$

เมื่อ integrate จะได้ $N_t = N_0 e^{-\Lambda t}$ -----(11.28)

ถ้าเราพิจารณาถึงคู่ parent-daughter คือเมื่อ parent หายไป ทั้งจากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และจากการสลายตัว ส่วน daughter ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการสลายตัวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น



$$\therefore -\frac{dN_1}{dt} = (\lambda_1 + \phi \sigma) N_1$$

$$= \Lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \Lambda_2 N_2$$

หรือ $\frac{dN_{i+1}}{dt} = \lambda_i N_i - \Lambda_{i+1} N_{i+1}$ -----(11.29)

ความจริงแล้วเราต้องการทราบเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เปลี่ยนจากสารหนึ่งไปเป็นอีกสารหนึ่งเรื่อย ๆ ไป รวมทั้งการสลายตัวของผลที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยน λ เป็น Λ โดยที่ $\Lambda = \lambda + \phi \sigma$ ส่วน $\Lambda^* = \phi \sigma$

ถ้าตอนเริ่มต้นถือว่า $N_2^0 = N_3^0 \dots N_n^0 = 0$

Bateman ได้แก้สมการเพื่อหาค่า N_n ได้ดังสมการ

$$N_n = c_1 e^{-\Lambda_1 t} + c_2 e^{-\Lambda_2 t} + \dots + c_n e^{-\Lambda_n t} \quad \text{-----}(11.30)$$

$$C_1 = \frac{\Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{n-1}^*}{(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_3 - \Lambda_1) \dots (\Lambda_n - \Lambda_1)} N_1^0$$

$$C_2 = \frac{\Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{n-1}^*}{(\Lambda_1 - \Lambda_2)(\Lambda_3 - \Lambda_2) \dots (\Lambda_n - \Lambda_2)} N_1^0$$

ตัวอย่างที่ 1 จงคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพของ ^{24}Na ที่เกิดขึ้นจากการใช้ Na_2CO_3 หนัก 1.0 mg ไปอบรังสีเป็นเวลา 15 นาที ในเทอร์มัลนิวตรอน ฟลักซ์ 10^{12} n/cm²-sec ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และถ้าทิ้งไว้ 5 ชม. จะมีกัมมันตภาพเหลืออยู่เท่าใด

กำหนดให้

(Na = 23, C = 12, O = 16, $t_{1/2}$ ของ Na^{24} = 15 hr

σ ของ ^{23}Na = 0.54 b % abundance ของ Na = 100%)

กัมมันตภาพของ ^{24}Na หลังจากทิ้งไว้ 5 ชม.

$$A_t = N\sigma\phi f (1 - e^{-\lambda t_a})(e^{-\lambda t_w})$$

$$N = \text{จำนวนอะตอมของ Na} = \frac{1}{1000} \times \frac{46}{106} \times \frac{1}{23} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom}$$

$$\sigma \text{ ของ Na } 0.54 \text{ b} = 0.54 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\phi \text{ flux} = 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{-sec}$$

$$t_a = 15 \text{ min}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{15 \times 60} \text{ min}^{-1}$$

$$t_w = 5 \times 60 \text{ min}$$

$$\text{Activity หลังจากการอบรังสี} = \frac{46}{106} \times \frac{6.02 \times 10^{20}}{23} \times 0.54 \times 10^{-24} \times 10^{12} \times (1 - e^{-\lambda t_a})$$

$$= 6.13 \times 10^6 (1 - e^{-\frac{0.693 \times 15}{15 \times 60}})$$

$$= 6.13 \times 10^6 (0.004)$$

$$= 8.58 \times 10^4 \text{ dps}$$

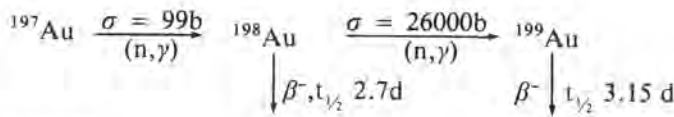
หลังจากทิ้งไว้ 15 ชม. จะมีกัมมันตภาพเหลืออยู่ = $8.58 \times 10^4 \times e^{-\lambda t_w}$

$$= 8.58 \times 10^4 \times e^{-\frac{0.693}{15} \times 5}$$

$$= 8.58 \times 10^4 \times .796$$

$$= 6.83 \times 10^4 \text{ dps}$$

ตัวอย่างที่ 2 จงคำนวณหาปริมาณของ ^{199}Au ซึ่งมี $t_{1/2}$ 3.15 วัน จาก ^{197}Au หนัก 1 กรัม โดยนำไปอาบรังสีด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนที่มีฟลักซ์ 10^{14} n/cm²-sec. เป็นเวลา 30 ชม. จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่กำหนดให้ต่อไปนี้



จากสูตร

$$\therefore N_{199} = \Lambda_{197}^* \Lambda_{198}^* N_{197}^0 \left[\frac{e^{-\Lambda_{197}t}}{(\Lambda_{198} - \Lambda_{197})(\Lambda_{199} - \Lambda_{197})} + \frac{e^{-\Lambda_{198}t}}{(\Lambda_{197} - \Lambda_{198})(\Lambda_{199} - \Lambda_{198})} + \frac{e^{-\Lambda_{199}t}}{(\Lambda_{197} - \Lambda_{199})(\Lambda_{198} - \Lambda_{199})} \right]$$

$$t = 30 \text{ ชม.} = 1.08 \times 10^5 \text{ วินาที}$$

$$\phi = \text{flux} = 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{-sec.}$$

$$\sigma_{197} = 9.9 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{198} = 2.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

$$N_{197}^0 = \frac{6.02 \times 10^{23}}{197} \times 1.0 = 3.05 \times 10^{21} \text{ อะตอม}$$

$$\Lambda_{197}^* = \Lambda_{197} = \phi \times \sigma_{197} = 9.9 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$$

$$\Lambda_{198} = \lambda_{198} + \phi \sigma_{198} = 3.0 \times 10^{-6} + 2.6 \times 10^{-6}$$

$$= 5.6 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$\Lambda_{198}^* = \phi \sigma_{198} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$\Lambda_{199} = \lambda_{199} = 2.55 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$\therefore N_{199} = 7.85 \times 10^7 \left[\frac{e^{-0.00107}}{(5.6 \times 10^{-6} \times 2.55 \times 10^{-6})} + \frac{e^{-0.605}}{(5.6 \times 10^{-6} \times 3.05 \times 10^{-6})} \right]$$

$$- \left. \frac{e^{-0.275}}{(2.55 \times 10^{-6} \times 3.05 \times 10^{-6})} \right]$$

$$= 7.85 \times 10^7 (6.99 \times 10^{10} + 3.20 \times 10^{10} - 9.77 \times 10^{10})$$

$$= 3.3 \times 10^{17} \text{ อะตอม}$$

$$\therefore \text{จะได้จำนวนอะตอมของ } ^{199}\text{Au} = 3.3 \times 10^{17} \text{ อะตอม}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าจะคำนวณหากัมมันตภาพ } ^{199}\text{Au} &= \lambda_{199} N_{199} \\ &= 2.55 \times 10^{-6} \times 3.3 \times 10^{17} \\ &= 8.4 \times 10^{11} \text{ dps} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณ Au¹⁹⁸ จะมีเท่าใดก็สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned} N_{198} &= \Lambda_{197}^* N_{197}^0 \left[\frac{e^{-\Lambda_{197}t}}{(\Lambda_{198} - \Lambda_{197})} + \frac{e^{-\Lambda_{198}t}}{(\Lambda_{197} - \Lambda_{198})} \right] \\ &= 9.9 \times 10^{-9} \times 3.05 \times 10^{21} \left[\frac{e^{-0.00107}}{5.6 \times 10^{-6}} + \frac{e^{-6.605}}{(-5.6 \times 10^{-6})} \right] \\ &= 2.87 \times 10^{13} \left(\frac{0.999 - 0.546}{5.6 \times 10^{-6}} \right) \\ &= 2.32 \times 10^{18} \text{ อะตอม} \\ A_{198} &= \lambda_{198} N_{198} = 2.32 \times 10^{18} \times 3.0 \times 10^{-6} \\ &= 6.96 \times 10^{12} \text{ dps.} \end{aligned}$$

จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณ ¹⁹⁸Au จะมากกว่า ¹⁹⁹Au ประมาณ 10 เท่า แต่ถ้าดูถึงค่า cross section ระหว่าง ¹⁹⁷Au และ ¹⁹⁸Au ซึ่งต่างกันอย่างมากมาย แต่จำนวนอะตอมก็ยังมากกว่าถึง 10 เท่า ความจริงแล้วถ้าค่า cross section ไม่ต่างกันมากมายนัก ปริมาณของธาตุที่เกิดขึ้นครั้งแรกและครั้งที่สองจะต่างกันอย่างมาก และเราถือว่าปริมาณของธาตุที่เกิดจากปฏิกิริยาที่สองนั้นน้อยมาก ตัดทิ้งเสียได้

11.9.2 เทคนิคต่าง ๆ ของ Activation Analysis นั้นมีด้วยกันหลายแบบ คือ

(1) ถ้าใช้ออนุภาคนิวตรอนเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เรียกว่า Neutron Activation Analysis (NAA) แล้วนำมาใช้วิธีการทางเคมี เช่น ทำ chemical separation เป็นต้น จะเรียกว่า Radiochemical Neutron Activation Analysis (RNAA) แต่ถ้าไม่มีการใช้วิธีทางเคมีเลย คือ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือตลอด ซึ่งเป็นแบบ non-destructive เรียกว่า Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) และอนุภาคนิวตรอนที่ใช้ยังแบ่งออกได้เป็น slow neutrons หรือ thermal neutrons ซึ่งนิวตรอนมีพลังงาน

0.025 eV บางครั้งอาจใช้ epithermal neutrons ซึ่งมีพลังงานมากกว่า 0.1 eV และใช้ fast neutrons ซึ่งมีพลังงาน 14 MeV

(2) ใช้ออนุภาคที่มีประจุ (charged particles) เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น ใช้ออนุภาคโปรตอน ดิวเทรียม หรืออนุภาคแอลฟา เป็นต้น เรียก CPAA เทคนิคนี้โดยทั่วไปจะต้องมีเครื่องเร่งอนุภาคซึ่งอาจเป็น ion accelerator เช่น ไซโคลตรอน (cyclotron) เป็นต้น

(3) ใช้วิธีการ activate ด้วยรังสีแกมมา ซึ่งเรียกว่า PAA (Photon Activation Analysis) โฟตอนหรือรังสีแกมมานี้ต้องมีพลังงานสูงกว่า 5 MeV ซึ่งได้จากเครื่องเบตาทรอน สำหรับ activation analysis ที่ใช้แบบที่ 2 และแบบที่ 3 นั้น ในประเทศของเรายังทำไม่ได้ เพราะไม่มีอุปกรณ์และ facilities ที่จะทำได้ ปัจจุบันจึงเพียงแต่ทำได้เฉพาะแบบแรกเท่านั้น

11.9.3 เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA)

ในการจะตัดสินใจเลือกใช้เทคนิค NAA นั้น ควรจะต้องพิจารณาตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

11.9.3.1 การเลือกปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้เหมาะสม โดยคำนึงถึง

- ก. สภาพไว (sensitivity)
- ข. การแทรกสอด (interferences)
- ค. ความพร้อมของอุปกรณ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 11.4 แสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ (n, γ) ของธาตุต่าง ๆ โดยใช้ Thermal Neutrons และค่า Estimated Detection Limits

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Ac	89	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—
Al	13	^{27}Al	100	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	2.31 min	$^{28}\text{Si}, ^{31}\text{P}$	^{26}Mg	0.02
Sb	51	^{121}Sb	57.25	$^{121}\text{Sb}(n,\gamma)^{122}\text{Sb}$	3.3 min, 2.75 days	^{122}Te	—	0.005
		^{123}Sb	42.75	$^{123}\text{Sb}(n,\gamma)^{124}\text{Sb}$	21 min, 1.3 min, 60.1 days	$^{124}\text{Te}, ^{127}\text{I}$	^{122}Sn	0.1
Ar	18	^{36}Ar	0.337	$^{36}\text{Ar}(n,\gamma)^{37}\text{Ar}$	34.3 days	^{40}Ca	—	0.2
		^{38}Ar	0.063	—	—	—	—	—
		^{40}Ar	99.600	$^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$ $^{41}\text{Ar}(n,\gamma)^{42}\text{Ar}$	1,827 hr 32.9 yr	$^{41}\text{K}, ^{44}\text{Ca}$	—	0.01 —
As	33	^{75}As	100	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	26.8 hr	$^{76}\text{Se}, ^{79}\text{Br}$	^{74}Ge	0.002
At	85	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Ba	56	^{130}Ba	0.101	$^{130}\text{Ba}(n,\gamma)^{131}\text{Ba}$	11,52 days	—	—	2.0
		^{132}Ba	0.097	—	—	—	—	—
		^{134}Ba	2.42	—	—	—	—	—
		^{135}Ba	6.59	—	—	—	—	—
		^{136}Ba	7.81	—	—	—	—	—
		^{137}Ba	11.32	—	—	—	—	—
		^{138}Ba	71.66	$^{138}\text{Ba}(n,\gamma)^{139}\text{Ba}$	82.9 min	$^{139}\text{La}, ^{142}\text{Ce}$	—	0.04
				$^{139}\text{Ba}(n,\gamma)^{140}\text{Ba}$	12.8 days	—	—	—
		$^{140}\text{Ba}(n,\gamma)^{141}\text{Ba}$	18.3 min	—	—	—		
Be	4	^9Be	100	^{10}Be Too stable for analyses	2.7×10^6 yr	—	—	—
Bi	83	^{209}Bi	100	$^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$	5 days	None apparent	—	—
B	5	^{10}B	19.61	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	Stable (α -counting used)	^6Li	—	—
		^{11}B	80.39	—		—	—	—
Br	35	^{79}Br	50.537	$^{79}\text{Br}(n,\gamma)^{80}\text{Br}$	4.37 hr, 17.55 min	^{80}Kr	—	0.002
		^{81}Br	49.463	$^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$	35.344 hr	$^{82}\text{Kr}, ^{85}\text{Rb}$	^{80}Se	0.007
Cd	48	^{106}Cd	1.24	—	—	—	—	—
		^{108}Cd	0.87	—	—	—	—	—
		^{110}Cd	12.32	—	—	—	—	—
		^{111}Cd	12.67	—	—	—	—	—
		^{112}Cd	24.15	—	—	—	—	—
		^{113}Cd	12.21	—	—	—	—	—
		^{114}Cd	28.93	$^{114}\text{Cd}(n,\gamma)^{115}\text{Cd}$	43 days, 2.2 days	$^{115}\text{In}, ^{118}\text{Sn}$	—	0.05
		^{116}Cd	7.61	$^{116}\text{Cd}(n,\gamma)^{117}\text{Cd}$	3.0 hr	^{120}Sn	—	0.1
Ca	20	^{40}Ca	96.97	—	—	—	—	—
		^{42}Ca	0.64	—	—	—	—	—
		^{43}Ca	0.145	—	—	—	—	—
		^{44}Ca	2.06	$^{44}\text{Ca}(n,\gamma)^{45}\text{Ca}$	161.4 days	$^{45}\text{Sc}, ^{48}\text{Tl}$	—	?
		^{46}Ca	0.0033	—	—	—	—	—
		^{48}Ca	0.185	$^{48}\text{Ca}(n,\gamma)^{49}\text{Ca}$	8.75 min	—	—	3
C	6	^{12}C	98.893	—	—	—	—	—
			1.107	$^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$	5685 yr	$^{14}\text{N}, ^{17}\text{O}$	—	1700
Ce	58	^{136}Ce	0.193	—	—	—	—	—
		^{138}Ce	0.250	—	—	—	—	—
		^{140}Ce	88.48	$^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$	32.5 days	$^{141}\text{Pr}, ^{144}\text{Nd}$	^{139}La	0.007
		^{142}Ce	11.07	$^{142}\text{Ce}(n,\gamma)^{143}\text{Ce}$	33.4 hr	^{146}Nd	—	0.2
		$^{143}\text{Ce}(n,\gamma)^{144}\text{Ce}$	284.3 days	—	—	—		

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Cs	55	^{133}Cs	100	$^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134}\text{Cs}$	3.15 hr, 2.05 yr	^{134}Ba	—	0.01
Cl	17	^{35}Cl	75.53	—	—	—	—	—
		^{37}Cl	24.47	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$	37.12 min	^{38}Ar , ^{41}K	^{36}S	0.04
Cr	24	^{50}Cr	4.31	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	27.8 days	^{54}Fe	—	0.005
		^{52}Cr	83.76	—	—	—	—	—
		^{53}Cr	9.55	—	—	—	—	—
		^{54}Cr	2.33	$^{54}\text{Cr}(n,\gamma)^{55}\text{Cr}$	3.52 min	^{55}Mn , ^{58}Fe	—	0.8
Co	27	^{59}Co	100	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	10.47 min, 5.26 yr	^{60}Ni , ^{63}Cu	^{60}Co	0.0005
Cu	29	^{63}Cu	69.09	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	12.88 hr	^{64}Zn	^{62}Ni	0.003
		^{65}Cu	30.91	—	—	—	—	—
Dy	66	^{156}Dy	0.0524	—	—	—	—	—
		^{158}Dy	0.0902	—	—	—	—	—
		^{160}Dy	2.294	—	—	—	—	—
		^{161}Dy	18.9	—	—	—	—	—
		^{162}Dy	25.53	—	—	—	—	—
		^{163}Dy	24.97	—	—	—	—	—
		^{164}Dy	28.18	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$	1.25 min, 139 min	^{165}Ho , ^{168}Er	—	0.002
Er	68	^{162}Er	0.136	—	—	—	—	—
		^{164}Er	1.56	—	—	—	—	—
		^{166}Er	33.41	—	—	—	—	—
		^{167}Er	22.94	—	—	—	—	—
		^{168}Er	27.07	$^{168}\text{Er}(n,\gamma)^{169}\text{Er}$	9.6 days	^{169}Tm , ^{172}Yb	—	0.03
		^{170}Er	14.88	$^{170}\text{Er}(n,\gamma)^{171}\text{Er}$	7.52 hr	^{174}Yb	—	0.02
Eu	63	^{151}Eu	47.82	$^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152}\text{Eu}$	9.2 hr	^{152}Gd	^{152}Eu	0.00003
		^{153}Eu	52.18	$^{153}\text{Eu}(n,\gamma)^{154}\text{Eu}$	16 yr	—	—	—
			$^{154}\text{Eu}(n,\gamma)^{155}\text{Eu}$	1.811 yr	—	—	—	
			$^{155}\text{Eu}(n,\gamma)^{156}\text{Eu}$	14 days	—	—	0.04	
F	9	^{19}F	100	$^{19}\text{F}(n,\gamma)^{20}\text{F}$	11.36 s	^{23}Na , ^{20}Ne	—	0.3
Fr	87	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—
Gd	64	^{152}Gd	0.205	—	—	—	—	—
		^{154}Gd	2.23	—	—	—	—	—
		^{155}Gd	15.10	—	—	—	—	—
		^{156}Gd	20.60	—	—	—	—	—
		^{157}Gd	15.70	—	—	—	—	—
		^{158}Gd	24.50	$^{158}\text{Gd}(n,\gamma)^{159}\text{Gd}$	18.0 hr	^{159}Tb , ^{162}Dy	—	0.02
		^{160}Gd	21.60	$^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd}$	3.73 min	^{164}Dy	—	0.1

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Ga	31	^{69}Ga	60.4	$^{69}\text{Ga}(n,\gamma)^{70}\text{Ga}$	21.37 min	^{70}Ge	^{68}Zn	0.009
		^{71}Ga	39.6	$^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$	14.12 hr	$^{72}\text{Ge}, ^{75}\text{As}$	$^{70}\text{Zn}, ^{70}\text{Ge}$	0.005
Ge	32	^{70}Ge	20.52	—	—	—	—	—
		^{72}Ge	27.43	—	—	—	—	—
		^{73}Ge	7.77	—	—	—	—	—
		^{74}Ge	36.51	$^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75}\text{Ge}$	49 s, 79 min	$^{75}\text{As}, ^{78}\text{Se}$	—	0.05
		^{76}Ge	7.76	$^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77}\text{Ge}$	53.6 s, 11.3 hr	^{80}Se	—	0.4
Au	79	^{197}Au	100	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	2.7 days	^{198}Hg	$^{196}\text{Pt}, ^{198}\text{Au}$	0.0003
				$^{199}\text{Au}(n,\gamma)^{200}\text{Au}$	48.4 min	—	—	—
Hf	72	^{174}Hf	0.18	$^{174}\text{Hf}(n,\gamma)^{175}\text{Hf}$	70 days	—	—	0.06
		^{176}Hf	5.20	—	—	—	—	—
		^{177}Hf	18.50	—	—	—	—	—
		^{178}Hf	27.14	$^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}$	19 s	—	—	—
		^{179}Hf	13.75	$^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180}\text{Hf}$	5.5 hr	^{182}W	—	—
		^{180}Hf	35.24	$^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$	42.4 days	$^{181}\text{Ta}, ^{184}\text{W}$	—	0.03
He	2	^3He	0.000137	Product stable	—	—	—	—
		^4He	99.999863	No reaction	—	—	—	—
Ho	67	^{165}Ho	100	$^{165}\text{Ho}(n,\gamma)^{166}\text{Ho}$	27.3 hr	$^{166}\text{Er}, ^{169}\text{Tm}$	^{164}Dy	0.0003
H	1	^1H	99.985	—	—	—	—	—
		^2H	0.015	$^2\text{H}(n,\gamma)^3\text{H}$	12.262 yr	$^6\text{Li}, ^3\text{He}$	—	3×10^3
In	49	^{113}In	4.28	$^{113}\text{In}(n,\gamma)^{114}\text{In}$	1.2 min, 50 days	^{114}Sn	—	0.1
		^{115}In	95.72	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$	13.4 s, 54 min	^{116}Sn	—	0.03
I	53	^{127}I	100	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$	25 min	^{128}Xe	—	0.003
Ir	77	^{191}Ir	37.3	$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$	1.45 min, 74.4 days	^{192}Pt	^{190}Os	0.002
		^{193}Ir	62.7	$^{193}\text{Ir}(n,\gamma)^{194}\text{Ir}$	19.7 hr	—	—	0.0001
Fe	26	^{54}Fe	5.84	—	—	—	—	—
		^{56}Fe	91.68	—	—	—	—	—
		^{57}Fe	2.17	—	—	—	—	—
		^{58}Fe	0.31	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	46.5 days	$^{59}\text{Co}, ^{62}\text{Ni}$	—	10
Kr	36	^{78}Kr	0.35	$^{78}\text{Kr}(n,\gamma)^{79}\text{Kr}$	34.92 hr	—	—	1
		^{80}Kr	2.27	—	—	—	—	—
		^{82}Kr	11.56	—	—	—	—	—
		^{83}Kr	11.55	—	—	—	—	—
		^{84}Kr	56.90	$^{84}\text{Kr}(n,\gamma)^{85}\text{Kr}$	4.5 hr, 10.76 yr	$^{85}\text{Rb}, ^{88}\text{Sr}$	—	0.1

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
		^{86}Kr	17.37	$^{86}\text{Kr}(n,\gamma)^{87}\text{Kr}$ $^{87}\text{Kr}(n,\gamma)^{88}\text{Kr}$	1.3 hr 2.805 hr	^{87}Sr —	— —	1 —
La	57	^{138}La	0.089	—	—	—	—	—
Ni	28	^{58}Ni	67.88	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	9.2 hr, 71.3 days	—	—	—
		^{60}Ni	26.23	$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	5.26 yr	—	—	—
		^{61}Ni	1.19	—	—	—	—	—
		^{62}Ni	3.66	—	—	—	—	—
		^{64}Ni	1.08	$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$ $^{65}\text{Ni}(n,\gamma)^{66}\text{Ni}$	2.553 hr 54.8 hr	^{65}Cu , ^{68}Zn —	^{63}Cu —	0.4 —
Nb	41	^{93}Nb	100	$^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb}$ $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y}$	6.29 min 64.3 hr	^{94}Mo ^{89}Y , ^{90}Zr	— —	0.01 —
N	7	^{14}N	99.6337	—	—	—	—	—
		^{15}N	0.3663	$^{15}\text{N}(n,\gamma)^{16}\text{N}$	7.352 s	—	—	2×10^4
Os	76	^{184}Os	0.018	—	—	—	—	—
		^{186}Os	1.59	—	—	—	—	—
		^{187}Os	1.64	—	—	—	—	—
		^{188}Os	13.3	—	—	—	—	—
		^{189}Os	16.1	—	—	—	—	—
		^{190}Os	26.4	$^{190}\text{Os}(n,\gamma)^{191}\text{Os}$	14.6 days	^{191}Ir , ^{194}Pt	—	0.003
		^{192}Os	41.0	$^{192}\text{Os}(n,\gamma)^{193}\text{Os}$ $^{193}\text{Os}(n,\gamma)^{194}\text{Os}$	31.0 hr 1.9 yr	^{193}Ir , ^{196}Pt —	^{193}Os —	— —
O	8	^{16}O	99.59	—	—	—	—	—
		^{17}O	0.037	—	—	—	—	—
		^{18}O	0.204	$^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$	29.1 s	—	—	6×10^3
Pd	46	^{102}Pd	0.69	—	—	—	—	—
		^{104}Pd	10.97	—	—	—	—	—
		^{105}Pd	22.23	—	—	—	—	—
		^{106}Pd	27.33	—	—	—	—	—
		^{108}Pd	26.71	$^{108}\text{Pd}(n,\gamma)^{109}\text{Pd}$	4.69 min, 13.45 hr	^{109}Ag , ^{112}Cd	—	0.005
		^{110}Pd	11.81	—	—	—	—	—
P	15	^{31}P	100	$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$	14.5 days	^{32}S , ^{35}Cl	^{30}Si	0.04
Pt	78	^{190}Pt	0.0127	—	—	—	—	—
		^{192}Pt	0.78	$^{192}\text{Pt}(n,\gamma)^{193}\text{Pt}$	4.4 days	^{196}Hg	—	0.04
		^{194}Pt	32.9	$^{194}\text{Pt}(n,\gamma)^{195}\text{Pt}$	3.5 days	^{198}Hg	^{193}Ir	0.4
		^{195}Pt	33.8	—	—	—	—	—
		^{196}Pt	25.3	$^{196}\text{Pt}(n,\gamma)^{197}\text{Pt}$	18.0 hr	^{197}Au , ^{200}Hg	—	0.1
		^{198}Pt	7.21	$^{198}\text{Pt}(n,\gamma)^{199}\text{Pt}$ $^{199}\text{Pt}(n,\gamma)^{200}\text{Pt}$	30 min 11.5 hr	— —	— —	0.1 —

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Pu	94	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—
Po	84	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—
K	19	^{39}K	93.10	—	—	—	—	—
		^{40}K	0.012	—	—	—	—	—
		^{41}K	6.88	$^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$	12.58 hr	$^{42}\text{Ca}, ^{43}\text{Sc}$	^{40}Ar	0.07
		^{139}La	99.911	$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$ $^{140}\text{La}(n,\gamma)^{141}\text{La}$	40.27 hr 3.85 hr	^{140}Ce	^{138}Ba	0.002
Pb	82	^{204}Pb	1.37	$^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}$	52.1 hr	—	—	—
		^{206}Pb	25.0	—	—	—	—	—
		^{207}Pb	21.2	—	—	—	—	—
		^{208}Pb	52.4	$^{208}\text{Pb}(n,\gamma)^{209}\text{Pb}$	3.31 hr	^{209}Bi	—	90
Li	3	^6Li	7.42	$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	12.262 yr	$^2\text{H}, ^3\text{He}$	—	—
		^7Li	92.58	$^7\text{Li}(n,\gamma)^8\text{Li}$	0.847 s	—	—	0.02
Lu	71	^{175}Lu	97.40	$^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176}\text{Lu}$	3.71 hr	^{176}Hf	—	—
		^{176}Lu	2.60	$^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$	6.8 days	$^{176}\text{Yb}, ^{177}\text{Hf}$ $^{180}\text{Ta}, ^{180}\text{Hf}$	—	0.002
Mg	12	^{24}Mg	78.70	—	—	—	—	—
		^{25}Mg	10.13	—	—	—	—	—
		^{26}Mg	11.17	$^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$ $^{27}\text{Mg}(n,\gamma)^{28}\text{Mg}$	10.0 min 20.88 hr	$^{27}\text{Al}, ^{30}\text{Si}$	—	1
Mn	25	^{55}Mn	100	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	2.586 hr	$^{56}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}$	^{54}Cr	0.0006
Hg	80	^{196}Hg	0.146	$^{196}\text{Hg}(n,\gamma)^{197}\text{Hg}$	24 hr, 2.7 days	—	—	0.006
		^{198}Hg	10.02	—	—	—	—	—
		^{199}Hg	16.84	—	—	—	—	—
		^{200}Hg	23.13	—	—	—	—	—
		^{201}Hg	13.22	—	—	—	—	—
		^{202}Hg	29.80	$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203}\text{Hg}$	46.9 days	$^{203}\text{Tl}, ^{206}\text{Pb}$	—	0.02
		^{204}Hg	6.85	$^{204}\text{Hg}(n,\gamma)^{205}\text{Hg}$	5.1 min	$^{205}\text{Tl}, ^{208}\text{Pb}$	—	0.9
Mo	42	^{92}Mo	15.84	—	—	—	—	—
		^{94}Mo	9.04	—	—	—	—	—
		^{95}Mo	15.53	—	—	—	—	—
		^{96}Mo	16.53	—	—	—	—	—
		^{97}Mo	9.46	—	—	—	—	—
		^{98}Mo	23.78	$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$	67 hr	^{102}Ru	—	0.1
		^{100}Mo	9.63	—	—	—	—	—

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Nd	60	^{142}Nd	27.11	—	—	—	—	—
		^{143}Nd	12.17	—	—	—	—	—
		^{144}Nd	23.85	—	—	—	—	—
		^{145}Nd	8.30	—	—	—	—	—
		^{146}Nd	17.20	$^{146}\text{Nd}(n,\gamma)^{147}\text{Nd}$	11.06 days	^{150}Sn	—	0.01
		^{148}Nd	5.73	$^{148}\text{Nd}(n,\gamma)^{149}\text{Nd}$	1.8 hr	^{152}Sn	—	0.1
		^{150}Nd	5.62	—	—	—	—	—
Ne	10	^{20}Ne	90.92	—	—	—	—	—
		^{21}Ne	0.26	—	—	—	—	—
		^{22}Ne	8.82	$^{22}\text{Ne}(n,\gamma)^{23}\text{Ne}$	37.5 s	$^{23}\text{Na}, ^{26}\text{Mg}$	—	1
Np	93	No stable isotopes	—	—	—	—	—	
Pr	59	^{141}Pr	100	$^{141}\text{Pr}(n,\gamma)^{142}\text{Pr}$	19.0 hr	^{142}Nd	—	0.002
				$^{142}\text{Pr}(n,\gamma)^{143}\text{Pr}$	13.659 days	—	—	—
				$^{143}\text{Pr}(n,\gamma)^{144}\text{Pr}$	17.27 min	—	—	—
Pm	61	No stable isotopes	—	—	—	—	—	
Pa	91	No stable isotopes	—	—	—	—	—	
Ra	88	No stable isotopes	—	—	—	—	—	
Rn	86	No stable isotopes	—	—	—	—	—	
Re	75	^{185}Re ^{187}Re	37.07 62.93	$^{185}\text{Re}(n,\gamma)^{186}\text{Re}$	3.7 days	^{186}Os	—	0.0007
				$^{187}\text{Re}(n,\gamma)^{188}\text{Re}$	16.74 hr	$^{188}\text{Os}, ^{191}\text{Ir}$	^{186}W	0.0006
				$^{188}\text{Re}(n,\gamma)^{189}\text{Re}$	150 days	—	—	—
Rh	45	^{103}Rh	100	$^{103}\text{Rh}(n,\gamma)^{104}\text{Rh}$	4.41 min, 44 s	$^{104}\text{Pd}, ^{107}\text{Ag}$	—	0.001
				$^{104}\text{Rh}(n,\gamma)^{105}\text{Rh}$	45 s, 36.5 hr	—	—	—
Rb	37	^{85}Rb ^{87}Rb	72.15 27.85	$^{85}\text{Rb}(n,\gamma)^{86}\text{Rb}$	18.66 days	$^{86}\text{Sr}, ^{89}\text{Y}$	^{89}Kr	0.03
				$^{87}\text{Rb}(n,\gamma)^{88}\text{Rb}$	17.7 hr	^{88}Sr	^{86}Kr	0.3
				$^{88}\text{Rb}(n,\gamma)^{89}\text{Rb}$	14.9 min	—	—	—
Ru	44	^{96}Ru	5.51	—	—	—	—	—
		^{98}Ru	1.87	—	—	—	—	—
		^{99}Ru	12.72	—	—	—	—	—
		^{100}Ru	12.62	—	—	—	—	—

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
		^{101}Ru	17.07	—	—	—	—	—
		^{102}Ru	31.61	$^{102}\text{Ru}(n,\gamma)^{103}\text{Ru}$	39.4 days	^{103}Rh , ^{106}Pd	—	0.1
		^{104}Ru	18.58	$^{104}\text{Ru}(n,\gamma)^{105}\text{Ru}$ $^{105}\text{Ru}(n,\gamma)^{106}\text{Ru}$	4.44 hr 1 yr	^{108}Pd	—	0.1
Sm	62	^{144}Sm	3.09	—	—	—	—	—
		^{147}Sm	14.97	—	—	—	—	—
		^{148}Sm	11.24	—	—	—	—	—
		^{149}Sm	13.83	—	—	—	—	—
		^{150}Sm	7.44	—	—	—	—	—
		^{152}Sm	26.72	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$	47.0 hr	^{153}Eu , ^{156}Gd	—	0.0005
		^{154}Sm	22.71	$^{154}\text{Sm}(n,\gamma)^{155}\text{Sm}$	21.9 min	^{158}Gd	—	0.02
Sc	21	^{45}Sc	100	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$ $^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$	19.5 s, 83.9 days 12.358 hr	^{46}Ti	—	0.0006
Se	34	^{74}Se	0.87	$^{74}\text{Se}(n,\gamma)^{75}\text{Se}$	120.4 days	^{78}Kr	—	0.5
		^{76}Se	9.02	—	—	—	—	—
		^{77}Se	7.58	—	—	—	—	—
		^{78}Se	23.52	—	—	—	—	—
		^{80}Se	49.82	$^{80}\text{Se}(n,\gamma)^{81}\text{Se}$	62.0 min, 18.6 min	^{81}Br , ^{84}Kr	—	0.04
		^{82}Se	9.19	$^{82}\text{Se}(n,\gamma)^{83}\text{Se}$	69 s, 25 min	^{86}Kr	—	2
Si	14	^{28}Si	92.21	—	—	—	—	—
		^{29}Si	4.70	—	—	—	—	—
		^{30}Si	3.09	$^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}$	2.64 hr	^{31}P , ^{34}S	—	0.1
Ag	47	^{107}Ag	51.35	$^{107}\text{Ag}(n,\gamma)^{108}\text{Ag}$	2.42 min	^{108}Cd	—	0.0001
		^{109}Ag	48.65	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$	253 days, 24.5 s	^{110}Cd , ^{113}In	^{108}Pd	0.3
Na	11	^{23}Na	100	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	15.05 hr	^{24}Mg , ^{27}Al	—	0.006
Sr	38	^{84}Sr	0.56	$^{84}\text{Sr}(n,\gamma)^{85}\text{Sr}$	1.17 hr, 63.9 days	—	—	10
		^{86}Sr	9.86	$^{86}\text{Sr}(n,\gamma)^{87}\text{Sr}$	2.80 hr	^{90}Zr	—	0.1
		^{87}Sr	7.02	—	—	—	—	—
		^{88}Sr	82.56	$^{88}\text{Sr}(n,\gamma)^{89}\text{Sr}$ $^{89}\text{Sr}(n,\gamma)^{90}\text{Sr}$ $^{90}\text{Sr}(n,\gamma)^{91}\text{Sr}$	53.6 days 28 yr 9.67 hr	^{89}Y , ^{92}Zr	^{87}Rb	3
S	16	^{32}S	95.0	—	—	—	—	—
		^{33}S	0.76	—	—	—	—	—
		^{34}S	4.22	$^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S}$	86.73 days	^{35}Cl , ^{38}Ar	—	50
		^{36}S	0.0136	$^{36}\text{S}(n,\gamma)^{37}\text{S}$	5.07 min	^{37}Cl , ^{40}Ar	—	1
Ta	73	^{180}Ta	0.0122	—	—	—	—	—
		^{181}Ta	99.9878	$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}$ $^{182}\text{Ta}(n,\gamma)^{183}\text{Ta}$	115.1 days 5 days	^{182}W , ^{183}Re	^{180}Hf	0.1

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
Tc	43	No stable isotopes	—	—	—	—	—	—
Te	52	^{120}Te	0.089	—	—	—	—	—
		^{122}Te	2.46	—	—	—	—	—
		^{123}Te	0.89	—	—	—	—	—
		^{124}Te	4.74	—	—	—	—	—
		^{125}Te	7.03	—	—	—	—	—
		^{126}Te	18.72	$^{126}\text{Te}(n,\gamma)^{127}\text{Te}$	105 days, 9.35 hr	$^{127}\text{I}, ^{130}\text{Xe}$	—	0.1
		^{128}Te	31.75	—	—	—	—	—
		^{130}Te	34.72	$^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te}$	1.20 days, 24.8 hr	^{134}Xe	—	0.2
Tb	65	^{159}Tb	100	$^{159}\text{Tb}(n,\gamma)^{160}\text{Tb}$	72.3 days	^{160}Dy	—	0.003
				$^{160}\text{Tb}(n,\gamma)^{161}\text{Tb}$	7.20 days	—	—	—
Tl	81	^{203}Tl	29.50	$^{203}\text{Tl}(n,\gamma)^{204}\text{Tl}$	2.78 yr	^{204}Pb	^{202}Hg	0.01
		^{205}Tl	70.50	$^{205}\text{Tl}(n,\gamma)^{206}\text{Tl}$	4.26 min	$^{206}\text{Pb}, ^{209}\text{Bi}$	—	0.3
Th	90	^{232}Th	100	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}$	22.12 min	^{236}U	—	0.004
				$^{233}\text{Th}(n,\gamma)^{234}\text{Th}$	24.1 days	—	—	—
Tm	69	^{169}Tm	100	$^{169}\text{Tm}(n,\gamma)^{170}\text{Tm}$	129 days	^{170}Yb	^{166}Er	0.002
				$^{170}\text{Tm}(n,\gamma)^{171}\text{Tm}$	1.9 yr	—	—	—
Sn	50	^{112}Sn	0.96	—	—	—	—	—
		^{114}Sn	0.66	—	—	—	—	—
		^{115}Sn	0.35	—	—	—	—	—
		^{116}Sn	14.30	—	—	—	—	—
		^{117}Sn	7.61	—	—	—	—	—
		^{118}Sn	24.03	—	—	—	—	—
		^{119}Sn	8.58	—	—	—	—	—
		^{120}Sn	32.65	$^{120}\text{Sn}(n,\gamma)^{121}\text{Sn}$	28.2 hr, > 5 yr	$^{121}\text{Sb}, ^{124}\text{Te}$	—	10
		^{122}Sn	4.72	—	—	—	—	—
		^{124}Sn	5.94	—	—	—	—	—
Ti	22	^{46}Ti	7.93	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	83.9 days	^{45}Sc	^{46}Ca	—
		^{47}Ti	7.28	—	—	—	—	—
		^{48}Ti	73.94	$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	1.833 days	^{57}V	^{46}Ca	—
		^{49}Ti	5.51	—	—	—	—	—
		^{50}Ti	5.34	$^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$	5.80 min	$^{51}\text{V}, ^{54}\text{Cr}$	—	0.1
W	74	^{180}W	0.14	—	—	—	—	—
		^{182}W	26.41	—	—	—	—	—
		^{183}W	14.40	—	—	—	—	—
		^{184}W	30.64	—	—	—	—	—
		^{186}W	28.41	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	24.0 hr	$^{187}\text{Re}, ^{190}\text{Os}$	—	0.002
				$^{187}\text{W}(n,\gamma)^{188}\text{W}$	69.5 days	—	—	—

ตารางที่ 11.4 (ต่อ)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction (1, 2)	Half-Life of Reaction Product (2)	Potential Interfering Elements		Estimated Detection Limits $\mu\text{g}(2,3)$
						Primary	Secondary	
U	92	^{234}U	0.0056	—	—	—	—	—
		^{235}U	0.7205	—	—	—	—	—
		^{238}U	99.2739	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$	6.75 days	—	—	0.01
V	23	^{50}V	0.24	—	—	—	—	—
		^{51}V	99.76	$^{51}\text{V}(n,\gamma)^{52}\text{V}$	3.77 min	$^{52}\text{Cr}, ^{55}\text{Mn}$	^{50}Ti	0.002
Xe	54	^{124}Xe	0.096	—	—	—	—	—
		^{126}Xe	0.090	—	—	—	—	—
		^{128}Xe	1.919	—	—	—	—	—
		^{129}Xe	26.44	—	—	—	—	—
		^{130}Xe	4.08	—	—	—	—	—
		^{131}Xe	21.18	—	—	—	—	—
		^{132}Xe	26.89	$^{132}\text{Xe}(n,\gamma)^{133}\text{Xe}$	5.65 days	$^{133}\text{Ce}, ^{136}\text{Ba}$	—	0.003
		^{134}Xe	10.44	$^{134}\text{Xe}(n,\gamma)^{135}\text{Xe}$	9.13 hr	^{138}Ba	—	0.9
Yb	70	^{136}Xe	8.87	$^{136}\text{Xe}(n,\gamma)^{137}\text{Xe}$	3.8 min	—	—	0.01
		^{168}Yb	0.135	—	—	—	—	—
		^{170}Yb	3.191	—	—	—	—	—
		^{171}Yb	14.40	—	—	—	—	—
Y	39	^{172}Yb	21.90	—	—	—	—	—
		^{173}Yb	16.2	—	—	—	—	—
		^{174}Yb	31.6	$^{174}\text{Yb}(n,\gamma)^{175}\text{Yb}$	4.2 days	$^{175}\text{La}, ^{178}\text{Hf}$	—	0.001
		^{176}Yb	12.60	—	—	—	—	—
		^{89}Y	100	$^{89}\text{Y}(n,\gamma)^{90}\text{Y}$	64.3 hr	$^{90}\text{Zr}, ^{93}\text{Nb}$	—	1
Zn	30	^{90}Y	—	$^{90}\text{Y}(n,\gamma)^{91}\text{Y}$	58.8 days	—	—	—
		^{64}Zn	48.89	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$	245 days	—	^{63}Cu	1
		^{66}Zn	27.81	—	—	—	—	—
		^{67}Zn	4.11	—	—	—	—	—
		^{68}Zn	18.57	$^{68}\text{Zn}(n,\gamma)^{69}\text{Zn}$	13.9 hr, 58.5 min	$^{69}\text{Ga}, ^{72}\text{Ge}$	—	—
Zr	40	^{70}Zn	0.62	—	—	—	—	—
		^{90}Zr	51.46	—	—	—	—	—
		^{91}Zr	11.23	—	—	—	—	—
		^{92}Zr	17.11	—	—	—	—	—
		^{94}Zr	17.40	$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$	65.2 days	^{98}Mo	—	5
^{96}Zr	2.80	$^{96}\text{Zr}(n,\gamma)^{97}\text{Zr}$	17.0 hr	^{100}Mo	—	5		

หมายเหตุ a. เอกสารอ้างอิง

1. R.C. Koch, "Activation Analysis Handbook, Academic Press, N.Y., 1960.
2. B. Bruch, "Transl Israel Program Hand book of Nuclear Data for Neutron Activation Analysis"
3. W.S. Lyon, Jr. Ed. "Guide to Activation Analysis" D. Van Nostrand. N.Y., 1964.

Estimated detection limits นี้ได้จากการคำนวณ โดยกำหนดให้

Thermal n flux 10^{14} n/cm²-sec saturation factor = 0.50 detector efficiency = 100%
 detectable counting rate of 40 dps t_w = waiting time = 0

ตารางที่ 11.5 แสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ของธาตุต่างๆ โดยใช้ fast neutrons และค่า estimate detection limits

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
Ac	89	No stable isotopes	—	—	—	—
Al	13	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	10.0 min	$^{26}\text{Mg}, ^{30}\text{Si}$	—	0.06
		$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15.05 hr	^{24}Mg	^{23}Na	0.03
Sb	51	$^{121}\text{Sb}(n,2n)^{120}\text{Sb}$	16.2 min	^{120}Te	$^{119}\text{Sn}, ^{120}\text{Sn}, ^{123}\text{Te}$	0.03
		$^{123}\text{Sb}(n,2n)^{122}\text{Sb}$	2.75 days, 3.3 min	^{122}Te	$^{122}\text{Sn}, ^{125}\text{Te}$	0.03
Ar	18	$^{40}\text{Ar}(n,p)^{39}\text{Ar}$	1.42 min	—	—	0.3
		$^{40}\text{Ar}(n,\alpha)^{37}\text{S}$	5.07 min	—	—	0.3
		$^{40}\text{Ar}(n,d)^{39}\text{Cl}$	55.5 min	—	—	1.8
As	33	$^{75}\text{As}(n,p)^{75}\text{Ge}$	79 min, 49 s	$^{78}\text{Se}, ^{74}\text{Ge}, ^{76}\text{Ge}$	—	0.6
		$^{75}\text{As}(n,\alpha)^{72}\text{Ga}$	14.12 hr	$^{72}\text{Ge}, ^{71}\text{Ga}$	—	1.0
		$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	17.74 days	^{74}Se	$^{73}\text{Ge}, ^{74}\text{Ge}$	0.009
At	85	No stable isotopes	—	—	—	—
Ba	56	$^{136}\text{Ba}(n,2n)^{135}\text{Ba}$	28.7 hr	—	—	0.3
		$^{138}\text{Ba}(n,2n)^{137}\text{Ba}$	2.57 min	—	—	0.02
Be	4	$^9\text{Be}(n,p)^9\text{Li}$	0.169 s	—	—	2.0
		$^9\text{Be}(n,\alpha)^6\text{He}$	0.80 s	—	—	0.1
Bi	83	$^{209}\text{Bi}(n,p)^{209}\text{Pb}$	3.31 hr	—	—	29.0
		$^{209}\text{Bi}(n,\alpha)^{206}\text{Tl}$	4.26 min	$^{203}\text{Tl}, ^{206}\text{Pb}$	—	32.0
B	5	$^{11}\text{B}(n,p)^{11}\text{Be}$	13.57 s	—	—	0.5
		$^{11}\text{B}(n,\alpha)^8\text{Li}$	0.847 s	—	—	0.05
Br	35	$^{79}\text{Br}(n,2n)^{78}\text{Br}$	6.5 min	^{78}Kr	$^{77}\text{Se}, ^{78}\text{Se}$	0.02
		$^{81}\text{Br}(n,p)^{81}\text{Se}$	18.6 min, 62.0 min	—	—	0.8
		$^{81}\text{Br}(n,2n)^{80}\text{Br}$	17.5 min, 4.37 hr	^{80}Kr	$^{80}\text{Se}, ^{83}\text{Se}$	0.04
Cd	48	$^{111}\text{Cd}(n,p)^{111}\text{Ag}$	7.6 days	—	—	5
		$^{112}\text{Cd}(n,p)^{112}\text{Ag}$	3.2 hr	—	—	6
		$^{116}\text{Cd}(n,2n)^{115}\text{Cd}$	2.2 days, 43 days	—	—	0.2
Ca	20	$^{44}\text{Ca}(n,p)^{44}\text{K}$	22.3 min	—	—	8
		$^{44}\text{Ca}(n,\alpha)^{41}\text{Ar}$	1.827 hr	—	—	8
C	6	$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	20.74 min	—	^{11}B	0.3
Ce	58	$^{140}\text{Ce}(n,2n)^{139}\text{Ce}$	60 s	—	—	0.02
		$^{142}\text{Ce}(n,2n)^{141}\text{Ce}$	32.5 days	—	—	0.1

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
Cs	55	$^{133}\text{Cs}(n,p)^{133}\text{Xe}$	5.65 days	—	—	1
		$^{133}\text{Cs}(n,2n)^{132}\text{Cs}$	6.48 days	—	—	0.01
Cl	17	$^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$	86.73 days	^{34}S , ^{36}S , ^{38}Ar	—	0.05
		$^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$	14.5 days	^{31}P , ^{32}S	—	0.06
		$^{35}\text{Cl}(n,2n)^{34}\text{Cl}$	32.4 min, 1.588 s	—	—	0.5
		$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	5.07 min	^{36}S , ^{40}Ar	—	0.6
		$^{37}\text{Cl}(n,\alpha)^{34}\text{P}$	12.40 s	—	—	0.4
Cr	24	$^{52}\text{Cr}(n,p)^{52}\text{V}$	3.77 min	^{51}V , ^{55}Mn	—	0.08
		$^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$	27.8 days	—	—	0.03
Co	27	$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	46.5 days	^{58}Fe , ^{62}Ni	—	0.1
		$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	2.586 hr	^{55}Mn , ^{56}Fe	—	0.3
		$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$	9.2 hr, 71.3 days	—	—	0.02
Cu	29	$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$	10.47 min	—	—	0.4
		$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	9.76 min	—	^{61}Ni	0.03
Dy	66	$^{162}\text{Dy}(n,\alpha)^{159}\text{Gd}$	18.0 hr	—	—	24
		$^{163}\text{Dy}(n,p)^{163}\text{Tb}$	7 min	—	—	29
		$^{164}\text{Dy}(n,\alpha)^{161}\text{Gd}$	3.73 min	—	—	17
		$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$	2.36 hr, 1.25 min	^{165}Ho , ^{165}Er	—	10
Er	68	$^{166}\text{Er}(n,2n)^{165}\text{Er}$	9.5 hr	—	—	0.07
		$^{168}\text{Er}(n,2n)^{167}\text{Er}$	2.5 s	—	—	0.4
		$^{170}\text{Er}(n,2n)^{169}\text{Er}$	9.6 days	—	—	0.1
Eu	63	$^{151}\text{Eu}(n,2n)^{150}\text{Eu}$	14.0 hr	—	—	0.08
		$^{153}\text{Eu}(n,p)^{153}\text{Sm}$	47 hr	—	—	5
		$^{153}\text{Eu}(n,\alpha)^{150}\text{Pm}$	2.7 hr	—	—	4
		$^{153}\text{Eu}(n,2n)^{152}\text{Eu}$	9.2 hr	—	—	0.05
F	9	$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$	29.1 s	^{18}O , ^{22}Na	—	0.1
		$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	7.325 s	—	—	0.08
		$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	1.87 hr	—	^{17}O , ^{18}O , ^{21}Ne	0.06
Fr	87	No stable isotopes	—	—	—	—
Gd	64	$^{160}\text{Gd}(n,2n)^{159}\text{Gd}$	18 hr	^{159}Tb , ^{162}Dy	—	0.06
		$^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd}$	3.73 min	^{164}Dy	—	5
Ga	31	$^{69}\text{Ga}(n,p)^{69}\text{Zn}$	13.9 hr, 58.5 min	^{72}Ge , ^{68}Zn , ^{70}Zn	—	0.6
		$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$	67.7 min	—	^{67}Zn , ^{68}Zn	0.02
		$^{71}\text{Ga}(n,2n)^{70}\text{Ga}$	21.37 min	^{70}Ge	^{70}Zn , ^{73}Ge	0.03
		$^{71}\text{Ga}(n,\alpha)^{68}\text{Cu}$	30 s	—	—	0.4

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
Ge	32	$^{70}\text{Ge}(n,p)^{70}\text{Ga}$	21.37 min	$^{69}\text{Ga}, ^{71}\text{Ga}$	^{70}Zn	0.8
		$^{70}\text{Ge}(n,2n)^{69}\text{Ge}$	1.65 days	—	^{69}Ga	0.09
		$^{72}\text{Ge}(n,p)^{72}\text{Ga}$	14.12 hr	$^{71}\text{Ga}, ^{75}\text{As}$	—	0.8
		$^{76}\text{Ge}(n,2n)^{75}\text{Ge}$	49 s, 79 min	$^{78}\text{Se}, ^{75}\text{As}$	—	0.1
Au	79	$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	6.2 days, 9.7 hr	^{196}Hg	$^{196}\text{Pt}, ^{199}\text{Hg}$	0.02
Hf	72	$^{179}\text{Hf}(n,2n)^{178}\text{Hf}$	4.8 s	—	—	0.2
		$^{180}\text{Hf}(n,2n)^{179}\text{Hf}$	19.0	—	—	0.1
He	2	No fast-neutron reactions	—	—	—	—
Ho	67	$^{165}\text{Ho}(n,p)^{165}\text{Dy}$	2.36 hr	—	—	0.5
		$^{165}\text{Ho}(n,2n)^{164}\text{Ho}$	36.5 min	—	—	0.008
H	1	Forms stable products	—	—	—	—
In	49	$^{115}\text{In}(n,2n)^{114}\text{In}$	50 days, 1.2 min	—	—	0.01
		$^{115}\text{In}(n,n)^{115}\text{In}$	4.4 hr	—	—	0.04
I	53	$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	13.1 days	^{126}Xe	$^{133}\text{Te}, ^{126}\text{Te}, ^{129}\text{Xe}$	0.01
Ir	77	$^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$	3.2 hr	—	—	0.2
		$^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$	2.8 min	—	—	4
Fe	26	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	313.5 days	^{55}Mn	$^{53}\text{Cr}, ^{54}\text{Cr}$	0.4
		$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2.586 hr	$^{59}\text{Co}, ^{55}\text{Mn}$	—	0.07
		$^{56}\text{Fe}(n,2n)^{55}\text{Fe}$	2.60 yr	—	—	0.02
Kr	36	No fast-neutron reactions	—	—	—	—
La	57	$^{139}\text{La}(n,p)^{139}\text{Ba}$	82.9 min	$^{138}\text{Ba}, ^{142}\text{Ce}$	—	4
Pb	82	$^{208}\text{Pb}(n,2n)^{207}\text{Pb}$	0.797 s	—	—	0.04
Li	3	$^6\text{Li}(n,p)^6\text{He}$	0.80 s	—	—	0.2
		$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	12.262 yr	$^2\text{H}, ^3\text{He}$	—	0.5
Lu	71	$^{175}\text{Lu}(n,2n)^{174}\text{Lu}$	165 days	—	—	0.02
		$^{175}\text{Lu}(n,p)^{175}\text{Yb}$	4.2 days	—	—	7
Mg	12	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	15.05 hr	$^{27}\text{Al}, ^{23}\text{Na}$	—	0.02
		$^{25}\text{Mg}(n,p)^{25}\text{Na}$	1.0 min	—	—	0.6
		$^{26}\text{Mg}(n,p)^{26}\text{Na}$	1.03 s	—	—	1
		$^{26}\text{Mg}(n,\alpha)^{23}\text{Ne}$	37.5 s	—	—	0.3

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
Mn	25	$^{55}\text{Mn}(n,p)^{55}\text{Cr}$	3.52 min	—	—	0.1
		$^{55}\text{Mn}(n,\alpha)^{52}\text{V}$	3.77 min	^{51}V , ^{52}Cr	—	0.2
		$^{55}\text{Mn}(n,2n)^{54}\text{Mn}$	313.5 days	—	—	0.008
Hg	80	$^{200}\text{Hg}(n,\alpha)^{197}\text{Pt}$	18.0 hr	—	—	68
		$^{200}\text{Hg}(n,p)^{200}\text{Au}$	48.4 min	—	—	32
Mo	42	$^{92}\text{Mo}(n,2n)^{91}\text{Mo}$	15.7 min	—	—	0.8
		$^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$	67 hr	^{102}Ru	—	0.07
Nd	60	$^{142}\text{Nd}(n,2n)^{141}\text{Nd}$	2.42 hr, 63.9 s	—	—	0.05
		$^{148}\text{Nd}(n,2n)^{147}\text{Nd}$	11.06 days	—	—	0.2
		$^{150}\text{Nd}(n,2n)^{149}\text{Nd}$	1.8 hr	—	—	8
Ne	10	No fast-neutron reactions	—	—	—	—
Np	93	No stable isotopes	—	—	—	—
Ni	28	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	9.2 hr, 71.3 days	—	—	0.04
		$^{58}\text{Ni}(n,np) + (n,d) + (n,pn)^{57}\text{Co}$	67 days	—	—	0.02
		$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	10.47 min, 5.26 yr	—	—	0.3
Nb	41	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nb}$	10.16 days	—	—	0.03
		$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{89}\text{Y}$	16.5 s	—	—	0.05
N	7	$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	9.965 min	—	^{13}C , ^{16}O	0.3
Os	76	$^{188}\text{Os}(n,p)^{188}\text{Re}$	16.74 hr	—	—	22
		$^{190}\text{Os}(n,p)^{190}\text{Re}$	2.8 min	—	—	48
O	8	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	7.352 s	^{15}N , ^{19}F	—	0.06
Pd	46	$^{104}\text{Pd}(n,p)^{104}\text{Rh}$	44 s	^{107}Ag , ^{103}Rh	^{104}Rh	1
		$^{105}\text{Pd}(n,p)^{105}\text{Rh}$	36.5 hr	^{104}Rh	^{104}Rh	0.09
		$^{110}\text{Pd}(n,2n)^{109}\text{Pd}$	13.45 hr, 4.69 min	—	—	0.06
P	15	$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$	2.64 hr	^{30}Si , ^{34}S	—	0.05
		$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	2.31 min	^{27}Al , ^{28}Si	—	0.03
		$^{31}\text{P}(n,2n)^{30}\text{P}$	2.497 min	—	^{30}Si , ^{29}Si , ^{33}S	0.5
Pt	78	$^{198}\text{Pt}(n,2n)^{197}\text{Pt}$	18.0 hr, 80 min	^{197}Au , ^{200}Hg	—	0.2
Pu	94	No stable isotopes	—	—	—	—
Po	84	No stable isotopes	—	—	—	—

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
K	19	$^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$	7.66 min, 0.946 s	—	^{38}Ar	2
		$^{41}\text{K}(n,p)^{41}\text{Ar}$	1.827 hr	$^{40}\text{Ar}, ^{44}\text{Ca}$	—	1
		$^{41}\text{K}(n,\alpha)^{38}\text{Cl}$	37.12 min	$^{37}\text{Cl}, ^{38}\text{Ar}$	—	2
Pr	59	$^{141}\text{Pr}(n,2n)^{140}\text{Pr}$	3,4 min	—	$^{140}\text{Ce}, ^{143}\text{Nd}$	0.01
Pm	61	No stable isotopes	—	—	—	—
Pa	91	No stable isotopes	—	—	—	—
Ra	88	No stable isotopes	—	—	—	—
Rn	86	No stable isotopes	—	—	—	—
Re	75	$^{187}\text{Re}(n,2n)^{186}\text{Re}$	3.7 days	—	—	0.02
Rh	45	$^{103}\text{Rh}(n,p)^{103}\text{Ru}$	39.4 days	—	—	0.9
		$^{103}\text{Rh}(n,\alpha)^{100}\text{Tc}$	16 s	^{100}Ru	^{100}Mo	1
		$^{103}\text{Rh}(n,\gamma)^{104}\text{Rh}$	44 s	$^{104}\text{Pd}, ^{107}\text{Ag}$	—	1
Rb	37	$^{85}\text{Rb}(n,\alpha)^{82}\text{Br}$	35.344 hr	—	—	0.1
		$^{85}\text{Rb}(n,2n)^{84}\text{Rb}$	33 days	—	—	0.01
		$^{87}\text{Rb}(n,2n)^{86}\text{Rb}$	18.66 days	$^{86}\text{Sr}, ^{89}\text{Y}$	^{86}Kr	0.03
Ru	44	$^{96}\text{Ru}(n,2n)^{95}\text{Ru}$	1.65 hr	—	—	0.3
		$^{102}\text{Ru}(n,p)^{102}\text{Tc}$	4.5 min, 5 s	—	—	6
Sm	62	$^{144}\text{Sm}(n,2n)^{143}\text{Sm}$	8.6 min, 2.3 min	—	—	0.4
		$^{154}\text{Sm}(n,2n)^{153}\text{Sm}$	47.0 hr	$^{153}\text{Eu}, ^{156}\text{Gd}$	—	0.1
Sc	21	$^{45}\text{Sc}(n,p)^{45}\text{Ca}$	161.5 days	—	—	0.1
		$^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$	12.358 hr	—	—	0.1
		$^{45}\text{Sc}(n,2n)^{44}\text{Sc}$	3.92 hr, 2.44 days	—	—	0.04
Se	34	$^{76}\text{Se}(n,2n)^{75}\text{Se}$	120.4 days	—	—	0.1
		$^{80}\text{Se}(n,\alpha)^{77}\text{Ge}$	11.3 hr	^{76}Ge	—	0.6
		$^{80}\text{Se}(n,2n)^{79}\text{Se}$	3.91 min	—	—	0.2
		$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81}\text{Se}$	18.6 min, 62 min	$^{81}\text{Br}, ^{84}\text{Kr}$	—	0.08
Si	14	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	2.31 min	$^{27}\text{Al}, ^{31}\text{P}$	—	0.02
		$^{29}\text{Si}(n,p)^{29}\text{Al}$	6.56 min	—	—	0.8
Ag	47	$^{107}\text{Ag}(n,2n)^{106}\text{Ag}$	24 min, 8.3 days	^{106}Cd	$^{105}\text{Pd}, ^{106}\text{Pd}$	0.05
		$^{109}\text{Ag}(n,2n)^{108}\text{Ag}$	2.42 min	^{108}Cd	$^{108}\text{Pd}, ^{111}\text{Cd}$	0.04
Na	11	$^{23}\text{Na}(n,p)^{23}\text{Ne}$	37.5 s	$^{22}\text{Ne}, ^{26}\text{Mg}$	—	0.09
		$^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$	11.36 s	—	—	0.02

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
		$^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$	2.58 yr	—	^{22}Ne , ^{25}Mg	0.1
Sr	38	$^{86}\text{Sr}(n,2n)^{85}\text{Sr}$	63.9 days, 1.17 hr	—	—	0.4
		$^{88}\text{Sr}(n,p)^{88}\text{Rb}$	17.7 min	^{87}Rb	—	0.8
		$^{88}\text{Sr}(n,\alpha)^{85}\text{Kr}$	4.50 hr	^{85}Rb , ^{64}Kr	—	0.2
		$^{88}\text{Sr}(n,2n)^{87}\text{Sr}$	2.80 hr	—	—	0.07
S	16	$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$	14.5 days	^{31}P , ^{35}Cl	—	0.02
		$^{32}\text{S}(n,t)^{30}\text{P}$	2.497 min	—	—	0.4
		$^{34}\text{S}(n,p)^{34}\text{P}$	12.40 s	^{37}Cl	—	1
		$^{34}\text{S}(n,\alpha)^{31}\text{Si}$	2.64 hr	^{30}Si , ^{31}P	—	0.8
Ta	73	$^{161}\text{Ta}(n,2n)^{160}\text{Ta}$	8.15 hr	^{180}W	^{180}Hf	0.02
Tc	43	No stable isotopes	—	—	—	—
Te	52	$^{128}\text{Te}(n,p)^{128}\text{Sb}$	10 hr, 10.3 min	—	—	0.08
		$^{128}\text{Te}(n,2n)^{127}\text{Te}$	9.35 hr	^{127}I , ^{130}Xe	—	0.08
		$^{130}\text{Te}(n,2n)^{129}\text{Te}$	1.2 hr, 41 days	^{132}Xe	—	0.2
Tb	65	$^{159}\text{Tb}(n,2n)^{158}\text{Tb}$	11 s	—	—	0.1
Tl	81	$^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$	12 days	^{204}Pb	^{201}Hg , ^{202}Hg	0.08
		$^{205}\text{Tl}(n,2n)^{204}\text{Tl}$	3.78 yr	—	—	0.02
Th	90	$^{232}\text{Th}(n,2n)^{231}\text{Th}$	25.64 hr	—	—	0.02
Tm	69	No fast neutron reactions	—	—	—	—
Sn	50	$^{118}\text{Sn}(n,2n)^{117}\text{Sn}$	14 days	—	—	0.05
Ti	22	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	83.9 days	^{45}Sc	^{46}Ca	0.3
		$^{48}\text{Ti}(n,pn)^{47}\text{Sc}$	3.45 days	—	—	0.5
		$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	1.833 days	^{51}V	^{48}Ca	0.1
W	74	$^{182}\text{W}(n,2n)^{185}\text{W}$	120 days	—	—	0.04
		$^{184}\text{W}(n,2n)^{183}\text{W}$	5.1 s	—	—	0.1
		$^{186}\text{W}(n,2n)^{185}\text{W}$	1.6 min, 75.8 days	—	—	0.04
U	92	$^{238}\text{U}(n,2n)^{237}\text{U}$	6.75 days	—	—	0.04
V	23	$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$	5.80 min	^{50}Ti , ^{54}Cr	—	0.3
		$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	1.833 days	^{48}Ti	^{48}Cr	0.2
		$^{51}\text{V}(n,n\alpha) + (n,\alpha n)^{47}\text{Sc}$	3.45 days	^{48}Ti	^{47}Ti , ^{46}Ca	0.2

ตารางที่ 11.5 (ต่อ)

Element	Atomic Number	Reaction (1, 2, 3)	Half-Life (1)	Interfering Elements (2, 3)		Estimated Detection Limits (mg)
				Primary	Secondary	
Xe	54	No fast-neutron reactions	—	—	—	—
Yb	70	$^{176}\text{Yb}(n,2n)^{175}\text{Yb}$	42 days	—	—	0.4
Y	39	$^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$	53.6 days	—	—	0.5
		$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	105 days	—	—	0.01
		$^{89}\text{Y}(n,n,\gamma)^{89}\text{Y}$	16.5 s	—	—	0.03
Zn	30	$^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$	12.88 hr	^{63}Cu , ^{65}Cu	^{64}Ni	0.08
		$^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$	38.4 min	—	^{63}Cu	0.2
		$^{66}\text{Zn}(n,p)^{66}\text{Cu}$	5.10 min	^{65}Cu , ^{69}Ga	—	0.4
Zr	40	$^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$	3.53 hr	—	—	3
		$^{92}\text{Zr}(n,\alpha)^{89}\text{Sr}$	53.6 days	—	—	7
		$^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$	20.35 min	—	—	7

หมายเหตุ a. เอกสารอ้างอิง

1. B. Benny, Transl. Israel Program for Scientific Translations. Handbook of Nuclear Data for Neutron Activation Analysis. 1970.
2. J. Perdijon Anal. Chem. 39, 448., 1967.
3. R.C. Koch. Activation Analysis Handbook, Academic Press, N.Y., 1960.
4. W.S. Lyon, Jr., Ed. "Guide to Activation Analysis, D. Van Nostrand. N.Y., 1964.

Estimated sensitivities นี้ได้จากการคำนวณจากสิ่งที่กำหนดให้ต่อไปนี้

A fast neutron flux of 10^{11} n/cm²-sec.

detectable counting rate 40 dps.

counting time 1 sec.

saturation factor $0.5 = 1 - e^{-\lambda t}$

σ value from reference 1

100% efficiency in measuring dps.

$t_w = 0$

11.9.3.2 การเลือก irradiation facilities ให้เหมาะสม

จะเห็นว่าหลักการที่จะใช้เป็นวิธีเลือกเมื่อมี facilities หลาย ๆ อย่าง เช่น มีทั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องเร่งอนุภาค หรือเครื่องกำเนิดอนุภาคอย่างอื่น ดังนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาว่าจะเลือกใช้ facility ใดก็จะอยู่ที่ flux intensity เพราะถ้า flux สูงจะให้เซนซิวิตีสูง ส่วนพลังงานของอนุภาคจะเลือกอย่างไรก็ดูที่ flux และ interferences และค่า cross section ด้วย

11.9.3.3 การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

ลักษณะของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA สารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน ควรจะต้องมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคล้ายกันมากที่สุด องค์ประกอบในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรใกล้เคียงกัน การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรคำนึงในสิ่งต่อไปนี้

(1) ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรเป็นของแข็งจะดีกว่าที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส เพราะเมื่อนำไปอบรังสีอาจมีความร้อนเกิดขึ้นแล้วทำให้ภาชนะที่ใช้บรรจุเกิดการระเบิดได้ แล้วจะทำให้มีปัญหาติดตามมาเป็นอย่างมากเกี่ยวกับ contamination และ decontamination

(2) การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานต้องระวังและป้องกันการ contamination ที่สุด เพราะเทคนิคนี้ให้เซนซิวิตีสูงมาก

(3) ต้องคำนึงถึงการสลายตัวของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานด้วยเมื่อเวลานำไปอบรังสี โดยเฉพาะพวกสารอินทรีย์

(4) ขนาดของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะต้องใกล้เคียงกันเพื่อป้องกันความแตกต่างของการดูดกลืนรังสีในการอบรังสีและการวัดรังสี

(5) ปริมาณของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่จะนำไปอบรังสีจะต้องไม่มากเกินไป แต่จะต้องมากพอจะให้ได้กัมมันตภาพหลังจากอบรังสีแล้วพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง ถ้าใช้สารตัวอย่างมากไป ปริมาณของกัมมันตภาพที่ได้หลังจากอบรังสีจะสูง ทำให้การวิเคราะห์ทำได้ยากและเป็นอันตราย

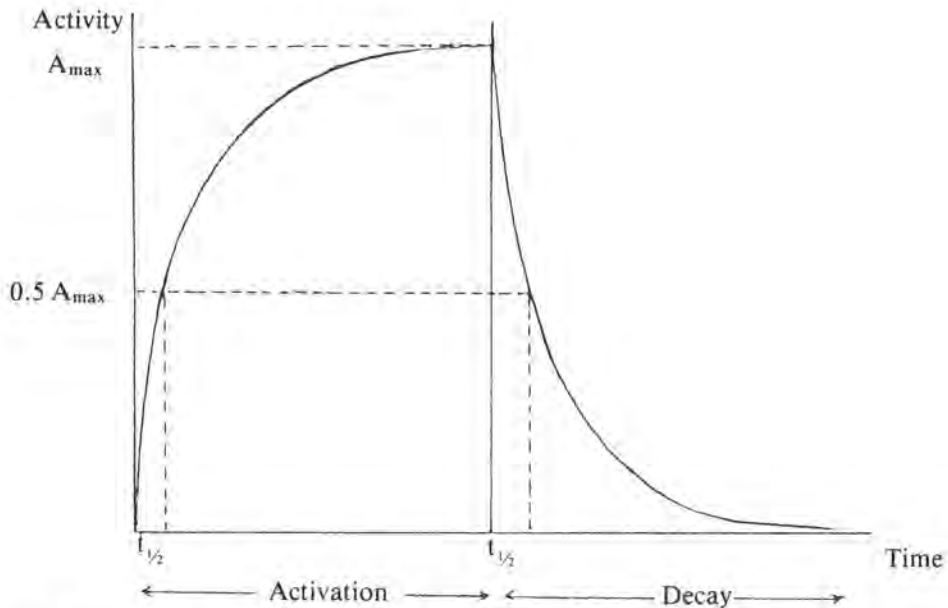
(6) การเตรียมสารตัวอย่าง บางครั้งจำเป็นต้องทำ pretreatment ก่อน ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่นิยมทำ เพราะเป็นการไปเพิ่มสารเจือปน หรือทำให้สารตัวอย่างเกิด contamination

(7) สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว ใส่ในภาชนะเป็น polyethylene vial แล้วจะต้องปิดให้สนิทก่อนนำไปอบรังสี

(8) ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ควรจะต้อง inert ทนความร้อนและความกดดันได้พอสมควร ต้องสะอาด บริสุทธิ์ polyethylene vials เหมาะที่จะใช้บรรจุสารเมื่อใช้เวลาอบรังสีสั้น ๆ ถ้าอบรังสีนาน ๆ ควรใช้ quartz tube หรือ Al. foil

11.9.3.4 การเลือกใช้เวลาในการอบรังสี

การใช้เวลาในการอบรังสีสารตัวอย่างนั้นมีความสำคัญมาก ในการพิจารณาว่าจะใช้เวลานานเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ นั่นคือ กัมมันตภาพที่จะได้จากการอบรังสีขึ้นอยู่กับ saturation factor $(1 - e^{-\lambda t_a})$ หรือ $t_a/t_{1/2}$ ซึ่งจะต้องใช้เวลานานพอที่ได้กัมมันตภาพพอจะวัดได้อย่างถูกต้อง ถ้าใช้เวลาอบรังสีนาน ปริมาณของกัมมันตภาพก็จะได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11.6 ถ้าใช้เวลาอบรังสีนานเกินไป กัมมันตภาพจะได้น้อยลง ซึ่งทำให้เสียเวลาและยังก่อให้เกิดการแทรกสอดอีกด้วย เพราะธาตุที่มี $t_{1/2}$ ยาว ๆ ก็เกิดกัมมันตภาพด้วย ซึ่งอาจไปแทรกสอดการวิเคราะห์ธาตุที่ต้องการหาได้ รวมทั้งยังเป็นอันตรายและยากแก่การดำเนินงาน โดยทั่วไป ในการอบรังสีมักใช้เวลาประมาณ $3t_{1/2}$ ของธาตุที่ผลิตขึ้น ในการทำการวิเคราะห์จริง ๆ อาจต้องใช้วิธีการอบรังสีหลายช่วงเวลา มีการอบรังสีเวลาสั้น นานขึ้น ๆ ตาม $t_{1/2}$ ของธาตุที่จะวัด ถ้าอบรังสีนาน ๆ อาจจะต้องทิ้งไว้สักระยะหนึ่ง (cool) เพื่อให้พวกธาตุกัมมันตรังสีที่มี $t_{1/2}$ สั้น ๆ สลายตัวหมดไปเสียก่อน จึงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ธาตุที่มี $t_{1/2}$ ยาว เป็นต้น ในทางปฏิบัติ สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรอบรังสีพร้อมกัน เวลานานเท่ากัน เพื่อตัดปัญหาเรื่องฟลักซ์แตกต่างกัน



รูปที่ 11.6 แสดงกัมมันตภาพที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสีและกัมมันตภาพที่ลดลงจากการทิ้งไว้ให้สลายตัวหลังการอาบรังสี

การอาบรังสีโดยใช้เวลาสั้น ๆ สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่เตรียมไว้แล้วนั้น นำมาใส่ในภาชนะพลาสติกที่เรียกว่า "rabbits" แล้วส่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยใช้ท่อลม (pneumatic tube)

11.9.3.5 การวัดปริมาณของรังสีจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

ในการวัดปริมาณของกัมมันตภาพ (activity) จากสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน หลังจากอาบรังสีแล้ว ถ้าปริมาณของกัมมันตภาพแรงมากไปจำเป็นจะต้องทิ้งไว้ (cool) ก่อนมิฉะนั้นจะวัดไม่ได้ เพราะเครื่องวัดมี dead time ดังนั้น ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจึงต้องอาบรังสีหลายช่วง และวัดปริมาณของกัมมันตภาพก็ต้องวัดหลายช่วงเวลาเช่นเดียวกัน ถ้าธาตุที่จะวิเคราะห์ไม่มีสารแทรกสอด ก็สามารถวัดกัมมันตภาพได้โดยตรงเลย เป็น INAA แต่ถ้ามีสารแทรกสอด (interferences) ก็จำเป็นที่จะต้องใช้ทำ radiochemical separation เสียก่อนเป็น RNAA แล้วจึงจะนำไปวัดกัมมันตภาพ

ในการวัดกัมมันตภาพ จำเป็นจะต้องเลือกดีเทคเตอร์ให้ถูกต้อง (ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป) โดยจะต้องคำนึงถึง detector efficiency และ resolution ด้วย ในบางครั้งก่อนที่จะวัดสารตัวอย่างจำเป็นจะต้องเปลี่ยนภาชนะบรรจุใหม่ ถ้าขนาดของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานต่างกันจะต้องคำนึงถึง self absorption และ back scattering เมื่อเป็น RNAA ก็จะต้องคำนึงถึง yield ของการแยกด้วย

11.9.3.6 การวิเคราะห์หีมล

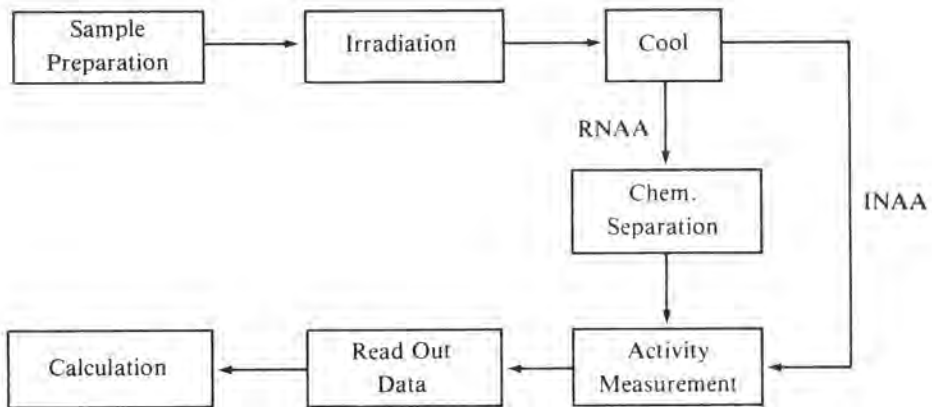
ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุทั้ง INAA และ RNAA นั้น ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบ comparison method โดยทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องทำให้ยู่ที่สภาวะเดียวกัน เช่น ฟลักซ์, counting time, decay time, activation time, % yield เสียก่อน แล้วจึงจะเปรียบเทียบกันได้ดังสมการ

$$W_u = W_s \times \frac{A_u}{A_s} \quad \text{-----(11.31)}$$

W_u และ W_s = น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่างและในสารมาตรฐาน

A_u และ A_s = count rate ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

โดยสรุป ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง NAA นั้นเกี่ยวข้องกับหลายอย่าง ส่วนที่เป็น random ก็จำเป็นต้องใช้สถิติเข้าช่วยเพื่อลดข้อผิดพลาด ที่สำคัญ สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะต้องมีองค์ประกอบเหมือนกันหรือคล้ายกันที่สุด ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในแผนภาพที่ 11.7

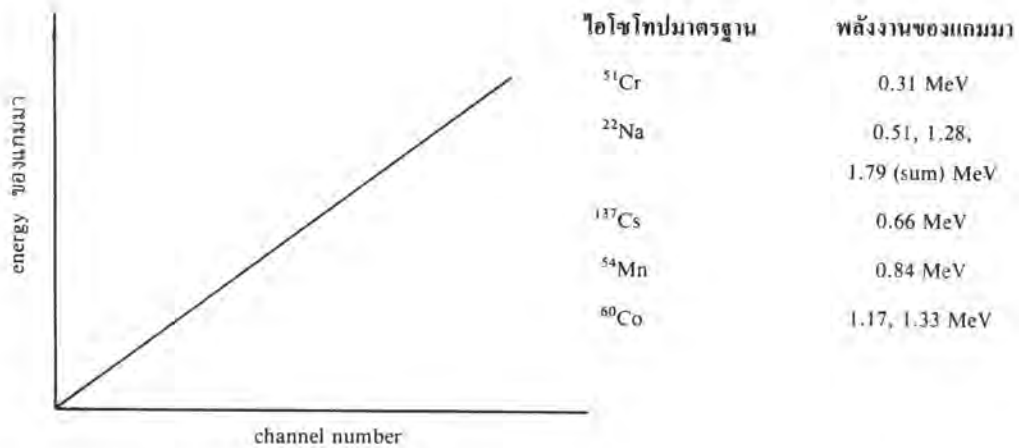


รูปที่ 11.7 แสดงแผนภาพขั้นตอนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA

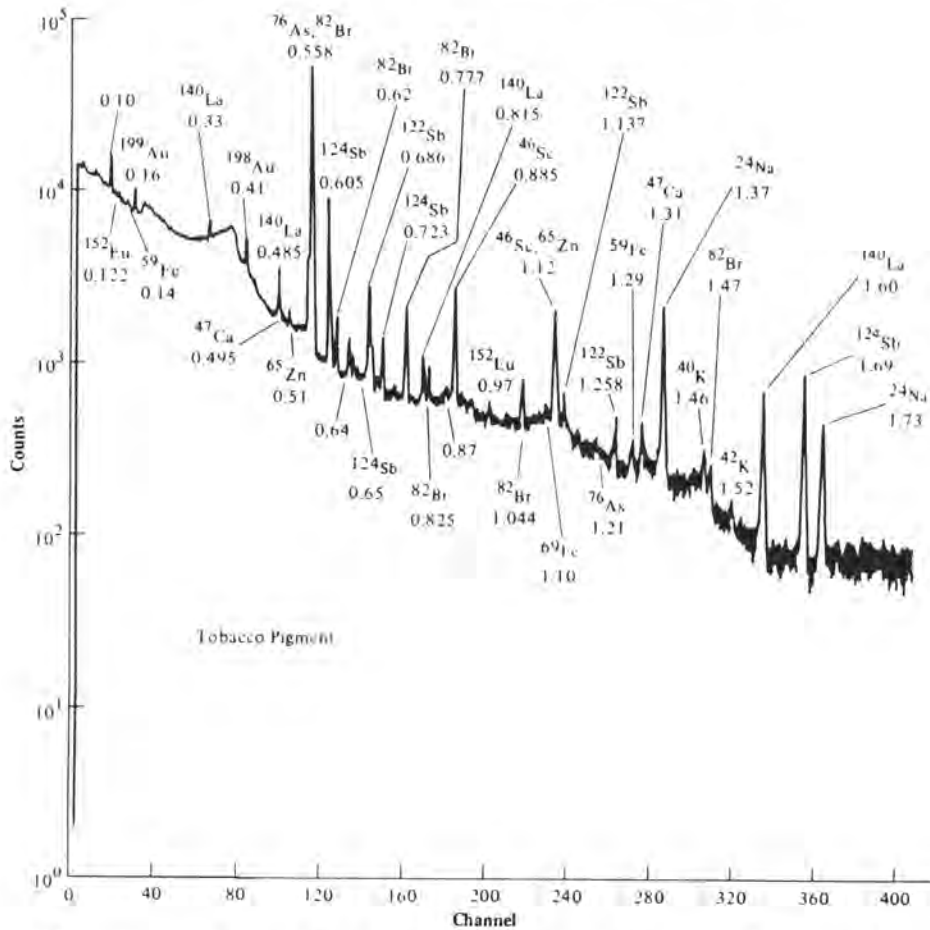
การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis)

ในการที่จะวิเคราะห์ว่าสารตัวอย่างมีธาตุใดบ้างเป็นองค์ประกอบ หรือสารตัวอย่างนี้เป็นธาตุอะไรนั้น เทคนิคทาง NAA สามารถบอกได้โดยอาศัยสมบัติที่พิเศษของธาตุก็ัมมันตรังสีที่ผลิตขึ้น ซึ่งแต่ละธาตุจะไม่เหมือนกันเลย นั่นคือ ครึ่งชีวิต (half-life) และพลังงานของรังสีที่ธาตุนั้นสลายตัวให้ออกมา (ดูตารางที่ 11.6) สำหรับธาตุที่สลายตัวให้รังสีแกมมา ปัจจุบันมีเครื่องมือที่มีสมรรถนะสูงในการที่วิเคราะห์รังสีแกมมาที่ปนกันอยู่ได้ดีเพราะมี resolution สูงมาก เรียกว่า เครื่องแกมมา สเปกโทรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดเป็น Ge (Li) (ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป) เมื่อวัดสารตัวอย่างจะได้แกมมาสเปกตรัม ดังรูปที่ 11.9 ซึ่งแต่ละพีกสามารถบอกได้ว่ามีพลังงานเท่าใดได้โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หรืออาจจะวิเคราะห์เองก็ได้ โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานซึ่งสร้างขึ้นจากสารมาตรฐานที่ทราบพลังงานแน่นอนแล้วจากเครื่องเดียวกัน และปรับให้มีสถานะเหมือนกัน กราฟมาตรฐานที่เขียนขึ้นจากความสัมพันธ์ของพลังงานของแกมมากับจำนวนช่อง (channel number) ดังนั้นถ้าทราบพีกอยู่ที่ channel เท่าไรก็จะหาพลังงานได้ทันที ดังรูปที่ 11.8

สำหรับสารตัวอย่างที่สลายตัวให้รังสีบีตา (β -emitter) นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นไอโซโทปของธาตุใด โดยหาค่า range แล้วนำไปหาค่า $X_{1/2}$ (half-thickness) หาค่า E_{max} ดังได้กล่าวมาแล้ว รวมทั้ง $t_{1/2}$ ก็วิเคราะห์ได้ ถ้ามี β หลายตัวปนกันอยู่ และจะหาว่ามีอะไรบ้างจะต้องทำ absorption study โดยใช้ Al. absorber ก็วิเคราะห์ได้ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 11.8 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานกับจำนวนช่อง



รูปที่ 11.9 แสดงลักษณะ high resolution ของแกมมาสเปกตรัมที่ได้จากสารที่สกัดจากยาสูบอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และใช้ Ge (Li) ดีเทคเตอร์

ตารางที่ 11.6 แสดงพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้จากสารสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดจากการอบรังสีด้วยอนุภาคนิวตรอน (Salmon, 1959; Mateosian and Mc Keown, 1960)

γ -Energy (MeV)	Nuclide	Half-life	Associated energies
0.041	Nb ^{94m}	6.6 min	
0.042	Os ¹⁹¹	15 days	0.129
0.068	Ta ¹⁸²	111 days	1.20, 1.12, 0.23, 0.150, 0.100
0.069	Sm ¹⁵³	47 hours	0.103
0.070	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.71, 0.54, 0.48, 0.32, 0.197
0.072	Os ^{191m}	14 hours	
0.073	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.37, 0.32, 0.28, 0.25, 0.139
0.074	U ²³⁹	23.5 min	
0.077	Pt ¹⁹⁷	18 hours	
0.080	Ho ¹⁶⁶	27.3 hours	1.53, 1.36
0.080	Ce ¹⁴⁴	285 days	0.134
0.084	Tm ¹⁷⁰	127 days	
0.087	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.96, 0.89, 0.41, 0.29, 0.20
0.087	Pd ¹⁰⁹	13.6 hours	
0.088	Te ^{123m}	104 days	0.159
0.089	Lu ^{176m}	3.7 hours	
0.091	Nd ¹⁴⁷	11.6 days	0.52
0.094	Dy ¹⁶⁵	140 min	0.36, 0.27
0.100	Se ^{81m}	56.5 min	
0.100	Nd ¹⁴⁹	2.0 hours	0.65, 0.54, 0.44, 0.21
0.100	Ta ¹⁸²	111 days	1.20, 1.12, 0.23, 0.150, 0.068
0.103	Sm ¹⁵³	47 hours	0.069
0.105	Sm ¹⁵⁵	23.5 min	
0.106	Te ^{129m}	33 days	
0.110	Te ^{125m}	58 days	
0.110	Yb ¹⁶⁹	33 days	
0.110	Pm ¹⁵¹	27.5 hours	0.21
0.111	Er ¹⁷¹	7.5 hours	0.31, 0.29
0.113	Lu ¹⁷⁷	7.0 days	0.21
0.114	Yb ¹⁷⁵	4.2 days	0.40, 0.28
0.115	Gd ¹⁵⁹	18.0 hours	0.36, 0.170
0.117	Nd ¹⁵¹	15 min	0.42
0.120	Ba ¹³¹	13 days	0.62, 0.49, 0.24, 0.21
0.120	Eu ¹⁵²	13 years	0.34
0.122	Eu ¹⁵²	9.2 hours	0.97, 0.85, 0.34
0.122	Eu ¹⁵⁴	16 years	0.24
0.128	Cs ^{134m}	3.1 hours	
0.129	Os ¹⁹¹	15 days	0.042
0.130	Ru ¹⁰⁵	4.5 hours	0.73
0.132	Hf ¹⁸¹	46 days	0.48
0.133	Hg ^{197m}	23 hours	0.164
0.134	Ce ¹⁴⁴	285 days	0.080
0.134	W ¹⁸⁷	23.9 hours	0.68, 0.48
0.137	Re ¹⁸⁶	3.70 days	
0.139	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.37, 0.32, 0.28, 0.25, 0.073
0.140	Tc ^{99m}	6.04 hours	
0.140	Se ⁷⁵	127 days	0.27
0.145	Te ¹³¹	24.8 min	0.59, 0.45
0.145	Ce ¹⁴¹	33 days	
0.147	Yb ¹⁷⁷	1.8 hours	1.23, 1.08
0.150	Ta ¹⁸²	111 days	1.20, 1.12, 0.23, 0.100, 0.068
0.150	Cd ^{111m}	48.6 min	0.25
0.152	Sr ^{85m}	70 min	0.23

ตารางที่ 11.6 (ต่อ)

γ -Energy (MeV)	Nuclide	Half-life	Associated energies
0.154	Ta ^{182m}	16.5 min	0.180
0.155	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	1.13, 0.93, 0.83, 0.63, 0.48
0.159	Te ^{123m}	104 days	0.088
0.159	Au ¹⁹⁹	3.15 days	0.21
0.160	Sn ^{117m}	14 days	
0.162	Ba ¹⁴⁰	12.8 days	0.30
0.163	Ba ¹³⁹	85 min	
0.164	Hg ^{197m}	23 hours	0.133
0.170	Gd ¹⁵⁹	18.0 hours	0.36, 0.115
0.180	Mo ⁹⁹	67 hours	0.78, 0.74, 0.36
0.180	Ta ^{182m}	16.5 min	0.154
0.190	In ^{114m}	49 days	0.72, 0.55
0.197	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.71, 0.54, 0.48, 0.32, 0.070
0.20	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.96, 0.89, 0.41, 0.29, 0.087
0.21	Ge ⁷⁷	12 hours	1.09, 0.79, 0.71, 0.62, 0.54, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21
0.21	Ba ¹³¹	13 days	0.62, 0.49, 0.24, 0.120
0.21	Nd ¹⁴⁹	2.0 hours	0.65, 0.54, 0.44, 0.100
0.21	Pm ¹⁵¹	27.5 hours	0.110
0.21	Lu ¹⁷²	7.0 days	0.113
0.21	Hf ^{180m}	5.5 hours	0.44, 0.33
0.21	Au ¹⁹⁹	3.15 days	0.159
0.21	Np ²³⁹	2.33 days	0.28
0.22	Ru ⁹⁷	2.44 days	
0.23	Sr ^{95m}	70 min	0.152
0.23	Ta ¹⁸²	111 days	1.20, 1.12, 0.150, 0.100, 0.068
0.24	Ba ¹³¹	13 days	0.62, 0.49, 0.21, 0.120
0.24	Eu ¹⁵⁴	16 years	0.122
0.25	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.37, 0.32, 0.28, 0.139, 0.073
0.25	Cd ^{111m}	48.6 min	0.150
0.26	Ge ⁷⁷	12 hours	1.09, 0.79, 0.71, 0.62, 0.54, 0.41, 0.36, 0.21
0.27	Se ⁷⁵	127 days	0.140
0.27	Dy ¹⁶⁵	140 min	0.36, 0.094
0.28	Pm ¹⁴⁹	54 hours	
0.28	I ¹³¹	8.14 days	0.36
0.28	Np ²³⁹	2.33 days	0.21
0.28	Ce ¹⁴¹	33 hours	
0.28	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.37, 0.32, 0.25, 0.139, 0.073
0.28	Yb ¹⁷⁵	4.2 days	0.40, 0.114
0.29	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.96, 0.89, 0.41, 0.20, 0.087
0.29	Er ¹⁷¹	7.5 hours	0.31, 0.111
0.30	Tc ¹⁰¹	14.0 min	
0.30	Ba ¹⁴⁰	12.8 days	0.162
0.31	Er ¹⁷¹	7.5 hours	0.29, 0.111
0.31	Ir ¹⁹²	74 days	0.60, 0.47
0.31	Pa ²³³	27.4 days	
0.32	Ti ⁵¹	5.8 min	
0.32	Cr ⁵¹	27.8 days	
0.32	Rh ¹⁰⁵	36.5 hours	
0.32	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.37, 0.28, 0.25, 0.139, 0.073, 40.0
0.32	Ir ¹⁹⁴	19 hours	
0.32	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.71, 0.54, 0.48, 0.197, 0.070
0.33	La ¹⁴⁰	40.0 hours	2.50, 1.60, 0.81, 0.49
0.33	Hf ^{180m}	5.5 hours	0.44, 0.21
0.34	Eu ¹⁵²	9.2 hours	0.97, 0.85, 0.122
0.34	Eu ¹⁵²	13 years	0.122

ตารางที่ 11.6 (ต่อ)

γ -Energy (MeV)	Nuclide	Half-life	Associated energies
0.36	Ge ⁷⁷	12 hours	1.09, 0.79, 0.71, 0.62, 0.54, 0.41, 0.26, 0.21
0.36	Mo ⁹⁹	67 hours	0.78, 0.74, 0.180
0.36	I ¹³¹	8.14 days	0.28
0.36	Gd ¹⁵⁹	18.0 hours	0.170, 0.115
0.36	Dy ¹⁶⁵	140 min	0.27, 0.094
0.37	Ni ⁸⁵	2.56 hours	1.49, 1.12
0.37	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.46, 0.32, 0.28, 0.25, 0.139, 0.073
0.39	Sr ⁸⁷	2.8 hours	
0.39	Sn ¹¹³	112 days	
0.40	Yb ¹⁷⁵	4.2 days	0.28, 0.114
0.41	In ^{116m}	54.3 min	2.09, 1.49, 1.27, 1.09
0.41	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.96, 0.89, 0.29, 0.20, 0.087
0.41	Au ¹⁹⁸	2.7 days	
0.41	Ge ⁷⁷	12 hours	1.09, 0.79, 0.71, 0.62, 0.54, 0.36, 0.26, 0.0.21
0.42	Nd ¹⁵¹	15 min	0.117
0.44	Zn ^{69m}	13.8 hours	
0.44	Nd ¹⁴⁹	2.0 hours	0.65, 0.54, 0.21, 0.100
0.44	Hf ^{180m}	5.5 hours	0.33, 0.21
0.45	Ag ¹¹⁰	270 days	1.52, 1.39, 0.88, 0.68
0.45	I ¹²⁸	25 min	
0.45	Te ¹³¹	24.8 min	0.59, 0.145
0.46	Os ¹⁹³	31 hours	0.56, 0.37, 0.32, 0.28, 0.25, 0.139, 0.073
0.47	Ir ¹⁹²	74 days	0.60, 0.31
0.48	Hf ¹⁸¹	46 days	0.132
0.48	W ¹⁸⁷	23.9 hours	0.68, 0.134
0.48	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	1.13, 0.93, 0.83, 0.63, 0.155
0.48	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.71, 0.54, 0.32, 0.197, 0.070
0.49	Ba ¹³¹	13 days	0.62, 0.24, 0.21, 0.120
0.49	La ¹⁴⁰	40.0 hours	2.50, 1.60, 0.81, 0.33
0.50	Ru ¹⁰³	39.8 hours	
0.51	Cu ⁶⁴	12.8 hours	
0.51	Zn ⁶⁵	250 days	1.12
0.51	Sr ⁸⁵	65 days	
0.51	Ru ¹⁰⁶	1.0 year	0.62
0.51	Nd ¹⁴⁷	11.6 days	0.091
0.54	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.71, 0.48, 0.32, 0.197, 0.070
0.54	Te ¹²⁹	72 min	
0.54	Ge ⁷⁷	12 hours	1.09, 0.79, 0.71, 0.62, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21
0.54	Nd ¹⁴⁹	2.0 hours	0.65, 0.44, 0.21, 0.100
0.55	As ⁷⁶	26.8 hours	1.20, 0.64
0.55	Br ⁸²	36.0 hours	1.30, 1.03, 0.77
0.55	In ^{114m}	49 days	0.72, 0.190
0.56	Os ¹⁹³	31 hours	0.46, 0.37, 0.32, 0.28, 0.25, 0.139, 0.073
0.57	Sb ¹²²	2.8 days	0.68
0.59	Te ¹³¹	24.8 min	0.45, 0.145
0.60	Cs ¹³⁴	2.3 years	0.79
0.60	Ir ¹⁹²	74 days	0.47, 0.31
0.61	Sb ¹²⁴	60 days	2.10, 1.69
0.62	Ru ¹⁰⁶	1.0 years	0.51
0.62	Ge ⁷⁷	12 hours	0.19, 0.79, 0.71, 0.54, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21

ตารางที่ 11.6 (ต่อ)

γ -Energy (MeV)	Nuclide	Half-life	Associated energies
0.62	Br ⁸⁰	18 min	
0.62	Ba ¹³¹	13 days	0.49, 0.24, 0.21, 0.120
0.63	Ga ⁷²	14.3 hours	2.50, 2.20, 0.83
0.63	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	1.13, 0.93, 0.83, 0.48, 0.155
0.64	As ⁷⁶	26.8 hours	1.20, 0.55
0.65	Nd ¹⁴⁹	2.0 hours	0.54, 0.44, 0.21, 0.100
0.66	Cs ¹³⁷	30 years	
0.67	Nb ⁹⁷	74 min	
0.68	Ag ¹¹⁰	270 days	1.52, 1.39, 0.88, 0.45
0.68	Sb ¹²²	2.8 days	0.57
0.68	W ¹⁸⁷	23.9 hours	0.48, 0.134
0.69	Pr ¹⁴⁴	17.0 min	2.19, 1.50
0.71	Ge ⁷⁷	12.0 hours	1.09, 0.79, 0.62, 0.54, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21
0.71	Pt ¹⁹⁹	29 min	0.54, 0.48, 0.32, 0.197, 0.070
0.72	In ^{144m}	49 days	0.55, 0.190
0.73	Ru ¹⁰⁵	4.5 hours	0.130
0.74	Mo ⁹⁹	67 hours	0.78, 0.36, 0.180
0.75	Zr ⁹⁵	65 days	
0.75	Zr ⁹⁷	17.0 hours	
0.77	Br ⁸²	36.0 hours	1.30, 1.03, 0.55
0.77	Nb ⁹⁵	35 days	
0.78	Mo ⁹⁹	67 hours	0.74, 0.36, 0.180
0.79	Cs ¹³⁴	2.3 years	0.60
0.79	Ge ⁷⁷	12.0 hours	1.09, 0.71, 0.62, 0.54, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21
0.80	Po ²¹⁰	138.4 days	
0.81	La ¹⁴⁰	40.0 hours	2.50, 1.60, 0.49, 0.33
0.82	Mn ⁵⁶	2.58 hours	2.06, 1.77
0.83	Ga ⁷²	14.3 hours	2.50, 2.20, 0.63
0.83	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	1.13, 0.93, 0.63, 0.48, 0.155
0.84	Mg ²⁷	9.45 min	1.02
0.85	Eu ¹⁵²	9.2 hours	0.97, 0.34, 0.122
0.88	Ag ¹¹⁰	270 days	1.52, 1.39, 0.68, 0.45
0.89	Sc ⁴⁶	85 days	1.12
0.89	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.96, 0.41, 0.29, 0.20, 0.087
0.90	Rb ⁸⁸	17.8 min	1.86
0.93	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	1.13, 0.83, 0.63, 0.155
0.96	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 1.18, 0.89, 0.41, 0.29, 0.20, 0.087
0.97	Eu ¹⁵²	9.2 hours	0.85, 0.34, 0.122
1.02	Mg ²⁷	9.45 min	0.85
1.03	Br ⁸²	36.0 hours	1.30, 0.77, 0.55
1.04	Cu ⁶⁶	5.1 min	
1.08	Rb ⁸⁶	19.5 days	
1.08	Yb ¹⁷⁷	1.8 hours	1.23, 0.147
1.09	Ge ⁷⁷	12.0 hours	0.79, 0.71, 0.62, 0.54, 0.41, 0.36, 0.26, 0.21
1.09	In ^{116m}	54.3 min	2.09, 1.49, 1.27, 0.41
1.10	Fe ⁵⁹	45 days	1.28
1.12	Sc ⁴⁶	85 days	0.89
1.12	Ni ⁶⁵	2.56 hours	1.49, 0.37
1.12	Zn ⁶⁵	250 days	0.51
1.12	Ta ¹⁸²	111 days	1.20, 0.23, 0.150, 0.100, 0.068

ตารางที่ 11.6 (ต่อ)

γ -Energy (MeV)	Nuclide	Half-life	Associated energies
1.13	Re ¹⁸⁸	16.7 hours	0.93, 0.83, 0.63, 0.48, 0.155
1.17	Co ⁶⁰	5.27 years	1.33
1.18	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.27, 0.96, 0.89, 0.41, 0.29, 0.20, 0.087
1.20	As ⁷⁶	26.8 hours	0.64, 0.55
1.20	Ta ¹⁸²	111 days	1.12, 0.23, 0.150, 0.100, 0.068
1.23	Yb ¹⁷⁷	1.8 hours	1.08, 0.147
1.26	Si ³¹	2.62 hours	
1.27	In ^{116m}	54.3 min	2.09, 1.09, 0.41
1.27	Tb ¹⁶⁰	73.5 days	1.18, 0.96, 0.89, 0.41, 0.29, 0.20, 0.087
1.28	Fe ⁵⁹	45 days	1.10
1.30	Br ⁸²	36.0 hours	1.03, 0.77, 0.55
1.33	Co ^{60m}	10.1 min	
1.33	Co ⁶⁰	5.27 years	1.17
1.36	Ho ¹⁶⁶	27.3 hours	1.53, 0.080
1.37	Na ²⁴	14.9 hours	2.75
1.39	Ag ¹¹⁰	270 days	1.52, 0.88, 0.68, 0.45
1.49	In ^{116m}	54.3 min	2.09, 1.27, 1.09, 0.41
1.49	Ni ⁶⁵	2.56 hours	1.12, 0.37
1.50	Pr ¹⁴⁴	17.0 min	2.19, 0.69
1.52	Ag ¹¹⁰	270 days	1.39, 0.88, 0.68, 0.45
1.53	K ⁴²	12.5 hours	
1.53	Ho ¹⁶⁶	27.3 hours	1.36, 0.080
1.53	Ho ¹⁶⁶	27.3 hours	1.36, 0.080
1.57	Pr ¹⁴²	19.2 hours	2.10
1.60	Cl ³⁸	37.3 min	2.15
1.60	La ¹⁴⁰	40.0 hours	2.50, 0.81, 0.49, 0.33
1.69	Sb ¹²⁴	60 hours	2.10, 0.61
1.77	Mn ⁵⁶	2.58 hours	2.06, 0.82
1.86	Rb ⁸⁸	17.8 min	0.90
2.06	Mn ⁵⁶	2¼58 hours	1.77, 0.82
2.09	In ^{116m}	54.3 min	1.49, 1.27, 1.09, 0.41
2.10	Pr ¹⁴²	19.2 hours	1.57
2.15	Cl ³⁸	37.3 min	1.60
2.19	Pr ¹⁴⁴	17.0 min	1.50, 0.69
2.20	Ga ⁷²	14.3 hours	2.50, 0.83, 0.63
2.50	Ga ⁷²	14.3 hours	2.20, 0.83, 0.63
2.50	La ¹⁴⁰	40.0 hours	1.60, 0.81, 0.49, 0.33
2.75	Na ²⁴	14.9 hours	1.37
3.10	Ca ⁴⁹	8.5 min	4.05
4.05	Ca ⁴⁹	8.5 min	3.10

N.B. Some of the low-energy γ -rays are not actually emitted, as they are fully converted internally. Many of the energies are the subjects of disagreement between different workers.

11.9.4 ข้อผิดพลาดของการวิเคราะห์ทาง NAA (Errors in NAA)

ในการวิเคราะห์ทาง NAA นี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปแล้วว่าเป็นวิธีที่ให้ sensitivity สูง แต่ผลของการวิเคราะห์ก็อาจผิดพลาดได้ง่ายด้วย สาเหตุที่ทำให้ผลของการวิเคราะห์ผิดพลาดพอจะสรุปได้

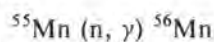
ดังต่อไปนี้

(1) สาเหตุจากการทำให้สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เกิดการปนเปื้อน (contamination) หรือทำให้สารตัวอย่างสูญเสียไป หรือแม้แต่ภาชนะที่ใช้บรรจุก็จำเป็นต้องทดสอบเสียก่อนว่าบริสุทธิ์หรือไม่ โดยการอบรังสีควบคู่ไปด้วย

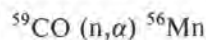
(2) สาเหตุจากการเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไม่ดีพอ ดังนั้น ควรเตรียมสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์และสารมาตรฐานหลาย ๆ ตัวอย่างเพื่อใช้ในการตรวจสอบ

(3) สาเหตุจากนิวตรอนฟลักซ์ไม่ homogeneous หรือเกิด self-shielding ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการหุ้มสารตัวอย่างขณะนำไปอบรังสี และควรใช้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

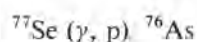
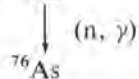
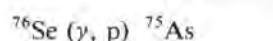
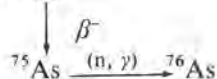
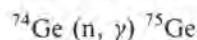
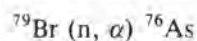
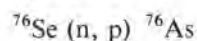
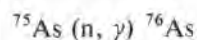
(4) สาเหตุจากการแทรกสอดทางปฏิกิริยานิวเคลียร์ (interfering nuclear reactions) เมื่อฟลักซ์ที่ใช้ไม่ homogeneous จึงทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้หลายอย่าง โดยเฉพาะกับธาตุที่อยู่ใกล้ ๆ กัน เช่น ในการวิเคราะห์หาปริมาณ Mn โดยใช้ปฏิกิริยา (n, γ) ทำให้เกิด Mn^{56} ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมามีพลังงาน 0.84 MeV แต่ถ้านิวตรอนฟลักซ์นั้นมีทั้ง thermal และ fast neutrons ปฏิกิริยาอาจเกิดจากธาตุต่าง ๆ ได้ดังนี้



ถ้าสารตัวอย่างมี Fe จะทำให้เกิด ^{56}Mn ได้ $^{56}Fe(n,p) ^{56}Mn$ และถ้าสารตัวอย่างมี Co ก็อาจทำให้เกิด ^{56}Mn ได้เช่นกัน



หรือในการหาปริมาณของอาร์เซนิก (Arsenic) โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (n, γ) แต่อาจมีปฏิกิริยาอื่น ๆ ก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ เช่น



แต่ทั้งนี้ขอให้พิจารณาค่า cross section ของธาตุเหล่านั้นด้วย เพราะจะเกิดการแทรกสอดเล็กน้อยแตกต่างกันได้ ดังนั้น ก่อนทำการวิเคราะห์ควรจะต้องศึกษาลักษณะของสารตัวอย่างให้ดีกว่า

(5) สาเหตุจากการวัดกัมมันตภาพ ซึ่งอาจเนื่องมาจากความผิดพลาดทางสถิติ (statistical errors) ดังจะได้กล่าวต่อไป เช่น

วัดกัมมันตภาพได้	% ความผิดพลาด
10^2	10
10^3	3.0
10^4	1.0
10^6	0.1

นอกจากนี้ยังเกี่ยวกับ counting geometry, self-absorption, dead time ของเครื่องวัด เป็นต้น

(6) สาเหตุจากเวลาการอาบรังสีและการนับรังสีของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอาจแตกต่างกัน ดังนั้น ในการอาบรังสีจึงนิยมใช้อาบรังสีพร้อมกันทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

(7) สาเหตุจาก spectral interferences เนื่องจากดีเทคเตอร์ไม่สามารถแยกสเปกตรัมได้ วิธีแก้ อาจทำได้โดยใช้วิธีแยกทางเคมี (chemical separation) หรือถ้ามี $t_{1/2}$ ต่างกัน อาจจะต้องทิ้งไว้ให้สารที่มี $t_{1/2}$ สั้นตายเสียก่อนก็ได้

11.9.5 ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ทาง NAA (Limitations in NAA)

เทคนิคทาง NAA ก็เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ๆ ย่อมจะต้องมีขีดจำกัดเหมือนกัน ดังต่อไปนี้

(1) ธาตุบางธาตุไม่เหมาะที่จะใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์ เพราะ nuclides ที่ผลิตได้มีครึ่งชีวิตที่สั้นหรือยาวเกินไป ขาดต่อการวัดกัมมันตภาพให้ได้ผลถูกต้อง

(2) ลักษณะและสมบัติของสารตัวอย่างไม่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์ เพราะอาจเกิดอันตรายได้เมื่อนำไปอาบรังสี

(3) สารตัวอย่างที่มี cross-section สูงมาก ๆ เมื่อนำไปอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ อาจกระทบกระเทือนต่อฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้

11.9.8 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของ NAA (Advantages and Disadvantages of NAA)

ข้อได้เปรียบ (Advantages)

ข้อได้เปรียบที่นับว่าเด่นมากก็คือ sensitivity ซึ่งได้มีการคำนวณโดยค่าบางค่าแตกต่างกัน เช่น บางแห่งอาจใช้ detectable activity 40 dps หรือ Bq. บางแห่งใช้ 3.7 Bq หรือ 3.7 dps นิวตรอนฟลักซ์ และเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี ซึ่งเป็น 1 half-life (saturation factor = 0.5) บางแห่งใช้ 10 half-life หรือ 100 ชั่วโมง สำหรับค่า sensitivity ที่จะกล่าวต่อไปนี้ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่านิวตรอนฟลักซ์ $10^{18} \text{ n m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ หรือ $10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เวลาที่ใช้อาบรังสี 10 half-life หรือ 100 ชั่วโมง หรืออาจสั้นกว่า โดยถือว่าอาบรังสีจน saturate ($A = N\sigma\phi$) detectable activity เท่ากับ 3.7 Bq. และใช้ decay time เป็น 0 ($t_w = 0$) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ธาตุที่ insensitive หรือไม่เหมาะที่จะใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์ ได้แก่

B, Be, C, H, He, Li, N, Ne, Pb

ธาตุที่มี sensitivity 1–100 ng. ได้แก่

Bi Fe S Si Tl Zr สำหรับ F และ O ใช้ fast neutron activation

ธาตุที่มี sensitivity 10 pg–1 ng ได้แก่

Ag Ca Cd Ce Cl Cr Cs Gd Ge Mg Mo Nb Nd Ni Os P Pt Rb Ru Se
Sn Ta Tb Te Th Ti Tm Y Zn

ธาตุที่มี sensitivity 1–10 pg ได้แก่

Al Ar As Ba Br Co Cu Er Ga Hg I In Kr Na Pd Pr Sb Sc U W Xe Yb

ธาตุที่มี sensitivity น้อยกว่า 1 pg ได้แก่

Au Dy Eu Hf Ho In Ir La Mn Re Rh Sm V

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งก็คือ NAA ใช้เป็นวิธีทำคุณภาพวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ เพราะแต่ละธาตุมีสมบัติเฉพาะตัว ทั้งค่าครึ่งชีวิตและพลังงานของแกมมาหรือเบตา โดยอาจใช้ gamma spectrometry หรือ radiochemistry ซึ่งเทคนิคอื่น ๆ ทำได้ยากกว่า รวมทั้งให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องดี ค่าความแม่นยำ (precision) ในการวิเคราะห์สารปริมาณน้อย (trace analysis) เป็น ± 5 ถึง 10% แต่ถ้าทำโดยระมัดระวังอาจทำให้ความแม่นยำขึ้นเป็น ± 1 ถึง 2% ในบางกรณีอาจทำได้ถึง $\pm 0.3\%$

นอกจากนี้ NAA สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีหลาย ๆ ธาตุปนกันได้อย่างดี อาจทำได้ถึง 45 ธาตุที่ปนกัน โดยใช้ delay period 2–3 ครั้ง ประกอบกับในปัจจุบันมีเทคนิคเดอริทให้ resolution ดีมาก ทำให้การวิเคราะห์ได้เที่ยงและแม่นยำขึ้นกว่าเดิม

ข้อเสียเปรียบ (Disadvantages)

ข้อเสียเปรียบของ NAA โดยเฉพาะเมื่อใช้ INAA มีดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์ได้ช้ากว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี เพราะต้องใช้เวลาในการอบอุ่นรังสี เวลาที่ต้องทิ้งไว้ (delay period) ตลอดจนเวลาที่ต้องใช้ในการวัดกัมมันตภาพ อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดสามารถทำได้รวดเร็วกว่าเสียด้วยซ้ำไปถ้ามี neutron source ในห้องปฏิบัติการอยู่แล้ว

2. บางธาตุไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วย NAA

3. ค่าใช้จ่ายค่อนข้างแพง และ facilities ต่าง ๆ ค่อนข้างมีจำกัด ซึ่งต่างจากเทคนิคอื่นที่ facilities หาได้ง่ายกว่า

11.9.7 การใช้ประโยชน์ของ NAA (Applications of NAA)

NAA เป็นเทคนิคที่ให้ sensitivity สูง สามารถนำไปใช้เป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะพวก trace elements ในสารเกือบทุกชนิด ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างที่มีผู้นำเอาเทคนิคทาง NAA ไปใช้วิเคราะห์ธาตุในสารต่าง ๆ กัน คือ

(1) ใช้วิเคราะห์ธาตุใน pure materials และ semiconductors เช่น ในการวิเคราะห์ Silicon บริสุทธิ์ 99.9999% สามารถวิเคราะห์ได้ตั้ง 40–50 ธาตุ โดยใช้ radiochemistry ช่วยด้วยได้อย่างดี แต่ในการวิเคราะห์ธาตุใน Ge บริสุทธิ์ ให้ผลเป็นที่น่าพอใจน้อยกว่า

(2) ใช้ในการวิเคราะห์ trace elements ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เช่น ใน Al, Nb, Zr Graphite นอกจากนี้ยังใช้วิเคราะห์ธาตุบริสุทธิ์ใน Ag, Ba, Bi, Ga, Mg, P, Pb, S, Se, Sn, Ti และ Zn

(3) ใช้ในงานทาง Earth Science มีผู้วิจัยหลายท่านได้นำ NAA ไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของสารมาตรฐานเคมี-ธรณีวิทยา ให้มีความเที่ยงและแม่นยำขึ้น เช่น สารมาตรฐานพวกแร่ต่าง ๆ ในลูกอุกกาบาต (meteorites) สารตัวอย่างจากพระจันทร์, ดินตะกอน (sediments) ถ่านหิน และปิโตรเลียม และอื่น ๆ เป็นต้น

(4) ใช้ในงานทาง Life Sciences เมื่อเร็ว ๆ นี้ IAEA Symposia ได้รวบรวมผลงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์สารพวก metalloproteins และ subcellular fractions ได้นำ NAA มาใช้วิเคราะห์ถึง 65 ธาตุ ใน Biological reference materials ทางพฤกษศาสตร์ได้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ ในเนื้อเยื่อทางสัตวศาสตร์ได้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์พวกอาหารสัตว์ อีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุต่าง ๆ ได้แก่ Al, Ca, Cl, K, Mg, Mn, N, Na, P และ U ในร่างกายทั้งหมดของสัตว์เลือดอุ่น และเลี้ยงลูกด้วยนม

ในทางวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์ Ba, Br, Hg, Mn, Pb, Se, Sr และ V ในอาหารและของเสียที่ร่างกายถ่ายออกมา ในการศึกษาเกี่ยวกับความสมดุลของร่างกาย สำหรับส่วนต่าง ๆ ของร่างกายที่ได้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์คือ เส้นผม เล็บ กระดูก ฟัน เลือด ดับ และซีรัม เป็นต้น

(5) ใช้ในการศึกษาทางสภาวะแวดล้อม (Environmental Science) ได้มีผู้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ ในอากาศ น้ำ ดิน และตะกอน ที่ประเทศนอร์เวย์ได้มีกลุ่มวิจัยทำการศึกษาสภาวะแวดล้อมเป็นพิษในทะเลเหนือ โดยทำการวิเคราะห์พวกพืชที่มีเมล็ด ตะไคร่น้ำ พวกเห็ดและรา และขนแกะ เป็นต้น ด้วยเทคนิค NAA นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ As, Hg, Cd, Pb และ U ในตัวอย่างต่าง ๆ ที่เก็บมาจากสิ่งแวดล้อม

(6) ใช้ในการพิสูจน์หลักฐานหรือนิติเวชศาสตร์ มีตัวอย่างเป็นจำนวนมากที่ได้ทำการตรวจพิสูจน์ด้วยเทคนิค NAA เช่น ยา ยาเสพติด สี เศษกระจก ดินปืน เส้นผม เลือด ตลอดจนชิ้นส่วนของร่างกายของอาชญากรว่าตรงกับชิ้นส่วนที่พบหลักฐานหรือไม่

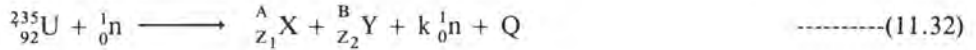
(7) ใช้ในการศึกษาทางโบราณคดี (Archaeology) ได้มีการใช้ NAA ทำการวิเคราะห์ซากวัตถุโบราณ เช่น ภาชนะต่าง ๆ หินไฟ โลหะ เหรียญต่าง ๆ ตลอดจนซากกระดูกเพื่อศึกษาหาอายุความเป็นมา ตลอดจนถึงการวิวัฒนาการในสมัยนั้น ๆ เป็นต้น

11.10 แหล่งผลิตนิวตรอน (Neutrons Sources)

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA จำเป็นจะต้องมีแหล่งผลิตนิวตรอนเพื่อนำไปใช้ในการอาบรังสี มีดังต่อไปนี้

11.10.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นแหล่งผลิตอนุภาคนิวตรอนที่สำคัญโดยอาศัยกระบวนการฟิชชัน (fission process) ของธาตุยูเรเนียม $^{235}_{92}\text{U}$ ดังปฏิกิริยา



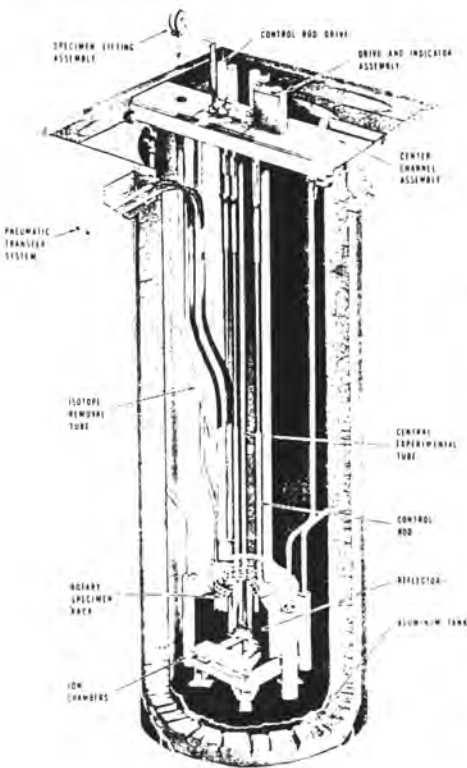
ในที่นี้

$$A + B + k = 236$$

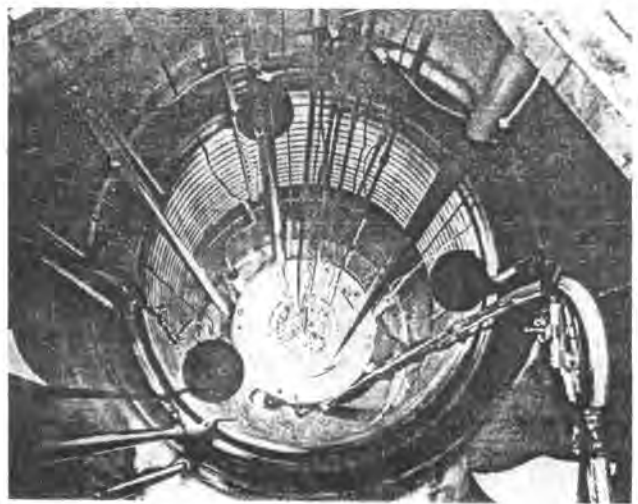
$$Z_1 + Z_2 = 92$$

ค่าเฉลี่ยของการเกิดนิวตรอนต่อฟิชชัน = 2.5 ($k = 2.5$) และมีพลังงานต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1–10 MeV ซึ่งเป็น fast neutrons แต่หลังจากผ่าน moderators หรือ thermalizer (moderator เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำให้พลังงานของนิวตรอนลดลง จาก fast neutrons ลงมาสู่ thermal neutrons โดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับน้ำ, D_2O หรือแกรไฟต์ ซึ่งมีค่า neutron absorption cross-section ต่ำ แต่มีค่า scattering cross-section สูง)

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ สามารถผลิต neutron flux ได้ถึง 10^{14} n/cm²-sec ดังรูปที่ 11.20



Cutaway scale diagram of TRIGA.

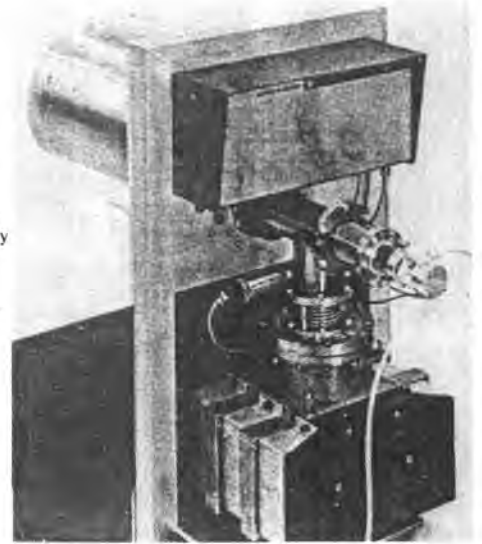
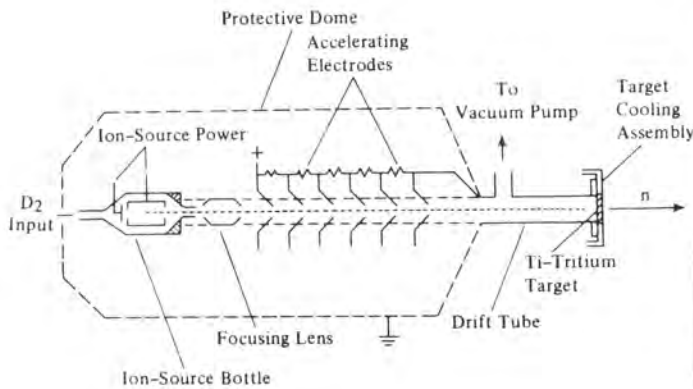


TRIGA, top view through pool to core.

รูปที่ 11.20 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งเป็นชนิด Triga และมีระบบท่อลมสำหรับส่งสารตัวอย่างอบรังสี

11.10.2 Neutron Generators

เครื่องผลิตนิวตรอนชนิดนี้ที่ใช้กันมาก ได้แก่ Cockcroft-Walton Neutron Generator ซึ่งมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 11.21 แสดงแผนภาพของเครื่อง Cockcroft-Walton Neutron Generator

เครื่องชนิดนี้ได้จากการทำให้โมเลกุลของดีวเทอเรียม ไฮโดรเจน หรือฮีเลียม เกิดการไอออไนส์ แล้วเร่งด้วยสนามไฟฟ้า (electrostatic field) ไปชนกับ target ซึ่งเป็น tritium หรือธาตุอื่น ๆ จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้นิวตรอน ดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยานิวเคลียร์	พลังงานของนิวตรอน (MeV)
${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	2.45
${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$	14.05
${}^9\text{Be}(\alpha,n){}^{12}\text{C}$	5.3
${}^{12}\text{C}(d,n){}^{13}\text{N}$	3.4 KeV
${}^{13}\text{C}(\alpha,n){}^{16}\text{O}$	2.07
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	29.9 KeV

อนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นนี้นำไปยิงสารตัวอย่างทำให้เกิด fast neutron activation โดยทั่วไปฟลักซ์ที่ได้ประมาณ $10^7 - 10^8 \text{ n/cm}^2 - \text{sec}$

11.10.3 Photo Neutron Sources ($^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$)

แหล่งผลิตนิวตรอนชนิดนี้ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจาก photon หรือรังสีแกมมา จากสารกัมมันตรังสีให้ชนกับ target ที่เป็นธาตุ Be จะได้นิวตรอน ดังสมการ $^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$ เช่น

source	$t_{1/2}$	พลังงานของนิวตรอน	ฟลักซ์
$^{124}\text{Sb}-^9\text{Be}$	60 วัน	2.4 KeV	$\sim 10^6$
$^{226}\text{Ra}-\text{Be}$	1622 ปี	200 KeV	$\sim 10^6$

11.10.4 Isotopic Neutron Sources

เป็นแหล่งผลิตนิวตรอนอีกชนิดหนึ่ง แต่ใช้กันไม่กว้างขวางนัก เพราะฟลักซ์ที่ได้ค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปมักจะนำมาใช้สำหรับการทดลองในห้องทดลอง ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดนิวตรอน คือ ธาตุกัมมันตรังสีหนักสลายตัวให้รังสีแอลฟา แล้วรังสีแอลฟาทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ Be ได้นิวตรอน ดังสมการ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ เช่น

source	$t_{1/2}$	พลังงานของนิวตรอน	ฟลักซ์ n/cm ² -sec-Ci
$^{239}\text{Pu}-\text{Be}$	2.4×10^4 ปี	up to 11 MeV	10^7
$^{241}\text{Am}-\text{Be}$	433 ปี	3 – 5 MeV (เฉลี่ย 4 MeV)	10^6
$^{210}\text{Po}-\text{Be}$	138 วัน	up to 11 MeV (เฉลี่ย 4.2 MeV)	10^6
$^{226}\text{Ra}-\text{Be}$	1622 ปี	up to 13 MeV (เฉลี่ย 4.0 MeV)	10^7
^{252}Cf (spont fission)	2.65 ปี	เฉลี่ย 2.35 MeV	10^9

นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นพวก fast และ epithermal ถ้าต้องการทำให้เป็น thermal neutrons สามารถทำได้โดยใช้พาราฟินหรือขี้ผึ้งเป็น moderator (ดังได้กล่าวมาแล้ว)

11.10.5 Flux Monitors

ในการวิเคราะห์ด้วย NAA บางครั้งต้องการทราบค่าของ neutron flux หรือจะตรวจสอบดูว่าฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ สามารถทำการวัดได้ ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณและใช้เปรียบเทียบกันได้ ธาตุที่ใช้วัดฟลักซ์เรียกว่าเป็น Flux monitors ดังแสดงในตารางที่ 11.7 ซึ่งอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์คำนวณหาฟลักซ์จากการใช้สมการที่ 11.23

ตารางที่ 11.7 แสดงการใช้ flux monitors วัด thermal และ fast neutron flux

ชนิดของนิวตรอน	เวลาที่ใช้ในการยวบรวม (t ₀)	ปฏิกิริยา	ครึ่งชีวิต t _{1/2}	cross-section (σ)
Thermal (slow)	0-5 นาที	⁵¹ V (n,γ) ⁵² V	3.76 นาที	4.5 ± 0.9b
	5 นาที-2 ชม.	¹¹⁵ In (n, γ) ¹¹⁶ In	54.1 นาที	145 ± 15 b
	> 2 ชม.	¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	2.7 วัน	96 ± 10 b
Fast	0-1 นาที	²⁸ Si(n,p) ²⁸ Al	2.3 นาที	220 ± 30 mb
		³¹ P(n,α) ²⁸ Al	2.3 นาที	150 ± 30 mb
	1-10 นาที	⁶³ Cu(n,2n) ⁶² Cu	9.8 นาที	150 ± 100 mb
	> 10 นาที	²⁷ Al(n,α) ²⁴ Na	15.8 ชม.	118 ± 20 mb

11.11 นิวเคลียร์ ดีเทคเตอร์ (Nuclear Detector)

เครื่องมือสำหรับตรวจวัดรังสีนั้น โดยทั่วไปจะมีส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีที่เกิดอันตรกิริยากับดีเทคเตอร์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (electrical signal) คือ voltage pulse เรียก transducer ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ต่อไปนี้ได้อย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง คือ

ก. จำนวน voltage pulse ที่เกิดขึ้นจะต้องเป็นปฏิภาคกับจำนวนโฟตอนหรือจำนวนอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยากับดีเทคเตอร์

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่หายไปเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาในดีเทคเตอร์กับ amplitude ของ voltage pulse หรือ pulse height ควรจะเป็นสภาพเชิงเส้น (linearity)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้ใน NAA แบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ ๆ คือ

1. พวกดีเทคเตอร์ที่บรรจุด้วยแก๊ส (Gas Filled หรือ Gas-Ionization Detectors) ดีเทคเตอร์พวกนี้อาศัยหลักการทำให้แก๊สเกิดไอออน ดังนั้น ดีเทคเตอร์พวกนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ตรวจวัดรังสีหรืออนุภาคที่มีประจุ เช่น β- α β⁺ ได้แก่

Ionization chambers

Proportional counters

Geiger-Müller counters หรือ G.M. counters

2. พวกซินทิลเลชัน ดีเทคเตอร์ (Scintillation Detectors) ดีเทคเตอร์พวกนี้อาศัยหลักการที่รังสีบางชนิดถูกดูดกลืนด้วยสารที่เรียกว่าฟอสฟอรัส (Phosphors) หรือฟลูออรัส (Fluors) หรือซินทิลเลเตอร์ (Scintillators) แล้วเกิดโฟตอนขึ้นแล้วผ่านเข้าไปในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (P.M. tube) อีกครั้งหนึ่ง คล้ายกับการวัดแสงยูวี-วิสิเบิลดังได้กล่าวมาแล้ว ดีเทคเตอร์พวกนี้นิยมใช้วัดรังสีบีตาและแกมมา แบ่งออกเป็น

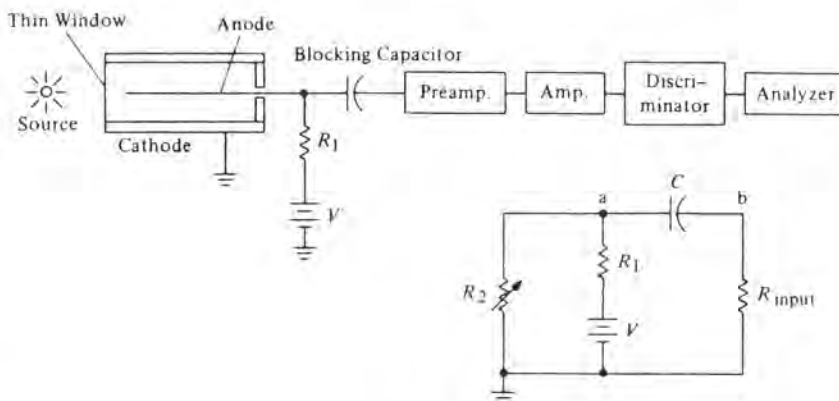
Single Channel Analyzer (SCA)

Multichannel Analyzer (MCA)

Liquid Scintillation Counter

3. พวคดีเทคเตอร์แบบ **Solid State** หรือ **Semi-Conductor (SSD)** ดิเทคเตอร์ประเภทนี้อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับ gas ionization detector โดยใช้สารกึ่งตัวนำ (solid semiconductor) เช่น Ge (Li) หรือ Si (Li) แทนแก๊ส (จะได้กล่าวโดยละเอียดภายหลัง) ดิเทคเตอร์พวกนี้เหมาะสำหรับวัดรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์

11.11.1 ดิเทคเตอร์ที่บรรจุด้วยแก๊สหรือแก๊สไอออไนเซชัน ดิเทคเตอร์ (Gas Filled Detector หรือ Gas-Ionization Detector) ดิเทคเตอร์ประเภทนี้จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 อันที่มีศักย์ต่างกัน ระหว่างขั้วไฟฟ้าจะมีแก๊สเฉื่อยอยู่ ครั้นเมื่อรังสีผ่านแก๊สจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้อิเล็กตรอนและไอออนบวก เรียกว่า ion-pair เมื่อไอออนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้ได้ voltage pulse ที่สามารถวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 11.22



รูปที่ 11.22 แสดงภาพของระบบ Gas-Ionization Detector และ Electrical Analog อย่างง่าย ๆ

ลักษณะของแก๊สไอออไนเซชัน ดิเทคเตอร์ นั้นประกอบด้วยกระบอกโลหะบรรจุแก๊สเฉื่อยไว้ตรงกลางเป็นขั้วบวกทำด้วยเส้นลวด แก๊สที่ใช้บรรจุอาจเป็นแก๊สผสมของ Ar 90% CH₄ 10% หรืออาจใช้แก๊ส Ar ผ่านเข้าไปอย่างช้า ๆ ก็ได้ window ทำด้วยวัสดุที่บางมาก ๆ อาจเป็น Mylar, แผ่น Al หรือแผ่น beryllium

การทำงานของดิเทคเตอร์ จะเป็นดังนี้

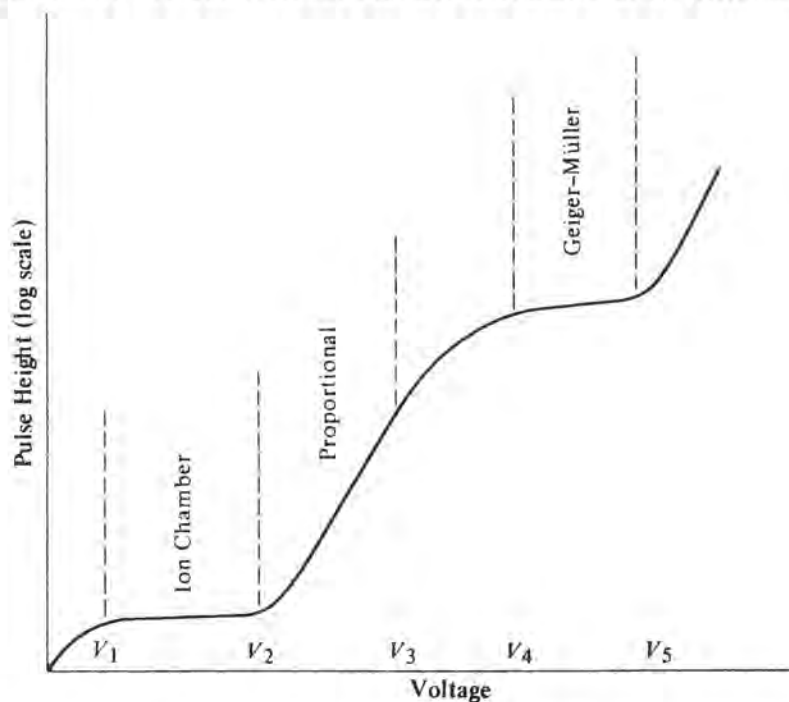
เมื่อไม่มีรังสีผ่านเข้ามา แก๊สที่บรรจุอยู่จะกลายเป็นฉนวนและมีความต้านทานสูง (R₂) จึงทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านหลอดดิเทคเตอร์ จากแผนภาพที่ 11.22 จะเห็นว่า Voltage ที่จุด "a" จะเท่ากับ bias voltage V. จากแบตเตอรี่หรือจาก regulated power supply ตัวเก็บประจุ (capacitor) C จะทำหน้าที่กั้น voltage นี้ไม่ให้ถึงจุด "b" ดังนั้น voltage ที่ R input (voltage ที่จะเข้าไปยัง amplifier) เป็นศูนย์ แต่ถ้า

มีอนุภาคที่สามารถไอออไนส์แก๊สได้ผ่านเข้าไปในดีเทคเตอร์จะทำให้เกิด ion-pairs ขึ้นมาจำนวนหนึ่ง และไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่มีประจุลบจะไปยังขั้วบวก และไอออนที่มีประจุบวกจะไปยังขั้วลบ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกจะต้องผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก คือ R_1 และ V . ขณะที่จำนวนอิเล็กตรอนที่เท่ากันจะเคลื่อนที่จากแคโทดไปยังขั้วลบเพื่อทำลาย (neutralize) ไอออนที่มีประจุบวก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความต้านทานของแก๊ส (R_2) ที่บรรจุไว้ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น voltage ที่จุด "a" จะลดลงอย่างรวดเร็วจาก V เหลือ v

$$\therefore v = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{-----(11.33)}$$

เมื่อ R_2 เป็นค่าความต้านทาน (effective resistance) ของแก๊สที่บรรจุในดีเทคเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวน ion-pairs ที่เกิดขึ้น ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง voltage อันรวดเร็วที่จุด "a" จะได้ออกมาเป็นพีกแหลม ๆ (sharp spike) และจะไปยัง preamplifier เป็น negative voltage pulse ความสูงของพีกแหลมนี้เรียกว่า pulse height (PH)

ไอออไนเซชัน ดีเทคเตอร์ ทั้งสามแบบนี้แตกต่างกันที่ชนิดหรือลักษณะของแก๊สที่ใช้บรรจุ และขนาดของ applied bias voltage (V) ดังรูปที่ 11.23 ซึ่งแสดงการเขียนกราฟระหว่าง PH กับ applied bias voltage ค่า PH ที่วัดได้จะเป็นปริมาณกับจำนวน ion-pairs ที่ไปยังขั้วไฟฟ้า แต่ไม่ใช่ขึ้นอยู่กับจำนวน ion-pairs ทั้งหมด เพราะมันอาจจะกลับรวมกันได้ขณะที่มันเคลื่อนที่ไป (recombination)

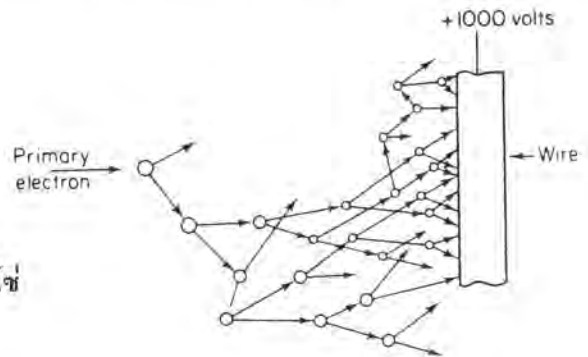


รูปที่ 11.23 แสดงความสัมพันธ์ของ pulse height (PH) กับ Applied Bias Voltage สำหรับแก๊สไอออไนเซชัน ดีเทคเตอร์

Ion-pairs ที่เกิดขึ้นนี้มี 2 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดของมัน พวกแรกเรียก primary ion-pairs อีกพวกหนึ่งเรียก secondary ion-pairs

Primary ion-pairs เป็นชนิดของไอออนที่เกิดจากอันตรกิริยาโดยตรงของรังสีกับแก๊สที่บรรจุไว้ จำนวน ion-pairs ที่เกิดขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีที่หายไป ดังนั้น ถ้าพลังงานทั้งหมดของรังสีหายไป จำนวน primary ion-pairs จะเป็นปริมาณโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ผ่านเข้ามา

Secondary ion-pairs นั้นเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (ได้จาก primary ionization เรียก primary electrons) ทำให้เกิด secondary ionization เมื่อใช้ applied voltage ให้สูงขึ้น อิเล็กตรอนก็จะวิ่งเร็วขึ้น และชนกับโมเลกุลของแก๊สมากขึ้น ion-pairs ก็จะถูกผลิตมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 11.24



รูปที่ 11.24 แสดงการเกิดไอออนในเซนชันแบบลวดโซ่

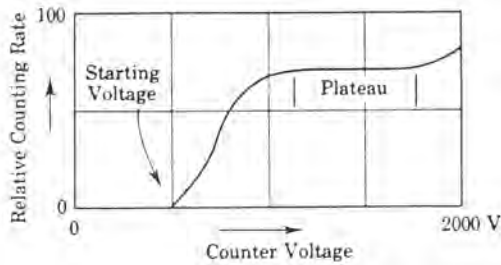
ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 11.23 โดยสมมติว่ามีรังสีเข้ามายังดีเทคเตอร์ตัวหนึ่งและมีการสูญเสียพลังงานทั้งหมด ทำให้เกิด primary ion pairs เท่ากับ 1000 ถ้าหากใช้ voltage ต่ำกว่า V_1 จะมี ion-pairs เพียงบางส่วนเท่านั้นที่ไปถึงขั้วไฟฟ้า เพราะบางส่วนของ ion-pairs เกิดการรวมตัวกลับไปใหม่ (recombination) แต่ถ้าใช้ voltage ให้สูงขึ้น แต่น้อยกว่า V_1 จำนวน primary ion-pairs ก็จะไปถึงขั้วไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ได้ pulse height สูงขึ้นในช่วง V_1 ถึง V_2 ค่า pulse height จะไม่เพิ่มขึ้น แต่กลับคงที่ แสดงว่าจำนวน ion-pairs เกือบทั้งหมดมีพลังงานสูงพอที่จะไปถึงขั้วไฟฟ้า แต่ก็มีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด secondary ion-pairs ในช่วงนี้ pulse height จะไม่ขึ้นกับการใช้ voltage หรือมีค่า gas amplification factor เป็นหนึ่ง แต่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่สูญเสียไปในดีเทคเตอร์โดยตรง ช่วงนี้เรียก ion-chamber region และใช้สำหรับทำดีเทคเตอร์ที่เรียกว่า ion-chamber detectors แก๊สที่ใช้บรรจุในหลอดมีอยู่หลายชนิด แม้แต่อากาศก็อาจใช้ได้ โดยทั่วไปก็ใช้แก๊สอาร์กอน pulse height ที่ได้ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ $0.001 \mu\text{V}$)

ถ้าใช้ voltage ให้สูงขึ้นมากกว่า V_2 primary electrons นั้นจะอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง และทำให้อิเล็กตรอนนั้นมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้แก๊สที่บรรจุอยู่เกิด secondary ion pairs ในช่วง V_2 ถึง V_3 จำนวน ion-pairs ทั้งหมดจะไปถึงขั้วไฟฟ้า ค่า pulse height จะเป็นปริมาณตรงกับ Voltage ที่ใช้ และพลังงานที่สูญเสียในดีเทคเตอร์ช่วงนี้เรียกว่า proportional region ซึ่งเป็นช่วง voltage ที่ใช้สำหรับวัดรังสีแอลฟาและบีตา pulse height ที่ได้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1–100 mV และมีค่า gas amplification factor ตั้งแต่ประมาณ $10-10^4$ ซึ่งสูงพอที่จะทำการวัดได้โดยง่าย ดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดรังสีในช่วง voltage

นี้เรียกว่า “Proportional Counter” สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ “detector dead-time” ซึ่งถือว่าสั้นมาก (เพียง 2–3 microseconds) ดังนั้น ในการวัดรังสีที่แรง ๆ สามารถวัดได้โดยไม่ต้องแก้ไขเกี่ยวกับ detector dead-time ที่เสียไป

เมื่อใช้ voltage สูงกว่า V_3 สนามไฟฟ้าจะแรงมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ทำให้ค่า pulse height ไม่เป็นปกติภาคกับการสูญเสียพลังงานในดีเทคเตอร์ จึงไม่นิยมนำมาใช้สำหรับทำดีเทคเตอร์ในช่วง V_3 ถึง V_4 สำหรับในช่วง $V_4 - V_5$ pulse height จะไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานในดีเทคเตอร์ของรังสีหรืออนุภาคที่เข้าไป แต่อาจจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มการใช้ voltage ในช่วง voltage นี้เรียกว่า Geiger-Müller region ดีเทคเตอร์ที่ใช้ในช่วงนี้เรียกว่า G.M. counters แก๊สที่ใช้บรรจุในหลอดดีเทคเตอร์เป็นแก๊สผสมของฮีเลียมหรืออาร์กอน และ 2–3% เป็นพวกไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้ หรือฮาโลเจน แก๊สเป็น quenching gas G.M. counter เป็นดีเทคเตอร์ที่มีผู้นิยมใช้มาก เพราะราคาถูกและใช้งานได้ดี มีค่า gas amplification factor ประมาณ 10^8 dead time อยู่ในราว 100–500 μsec . G.M. counter ให้ voltage pulse ที่ใหญ่ จึงอาศัยการขยายสัญญาณภายนอกน้อย เครื่องมือนี้อาจแยกขนาดพลังงานของอนุภาคหรือรังสีได้

ถ้ามีการใช้ voltage เกิน V_5 แก๊สที่บรรจุอยู่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เพราะใช้ voltage สูง และจะเกิดการ discharge ขึ้น หลอด G.M. จะเสียได้ จึงไม่ควรใช้ voltage สูงเกินไป โดยทั่วไป มักจะใช้ voltage ที่อยู่ตรงกลางของ plateau ดังรูปที่ 11.25



รูปที่ 11.25 แสดงลักษณะของ count rate เมื่อเทียบกับ voltage



รูปที่ 11.26 แสดงลักษณะของหลอด G.M. tube

11.11.2 ซินทิลเลชัน ดีเทคเตอร์ (Scintillation Detector)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า รังสีเมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัตถุแล้วจะเกิด ion-pairs ขึ้น และอิเล็กตรอนยังสามารถทำให้เกิด secondary ionization อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้อะตอมเกิดการกระตุ้น (excitation) ได้ และเมื่อลดระดับของพลังงานลงสามารถให้แสง (light quanta) ออกมาได้ สารที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า phosphors หรือ fluors หรือ scintillators แสงที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยากับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืน ดังนั้น สารเหล่านี้จึงสามารถนำมาใช้สำหรับทำดีเทคเตอร์ได้ และยังใช้บอกความแตกต่างของพลังงานของรังสีได้อีกด้วย ดีเทคเตอร์ประเภทนี้เรียกว่า ซินทิลเลชัน ดีเทคเตอร์

Scintillators มีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่

Scintillators ที่เป็นของแข็งและเป็นผลึก คือ

NaI (TI)		ใช้สำหรับทำรังสีแกมมา ดีเทคเตอร์
CsI (TI)	„	„
Stilbene	„	บีตา „
Anthracene	„	บีตา „
p-terphenyl	„	บีตา „
ZnS + Cd หรือ Ag	„	แอลฟา ดีเทคเตอร์

Scintillators ที่เป็นของเหลวหรือที่นิยมใช้กัน คือ liquid scintillation counter ซึ่งเหมาะแก่การวัดรังสีบีตา (β^-) โดยเฉพาะรังสี β^- ที่มีพลังงานต่ำมาจากไอโซโทป ^{14}C , ^{35}S และ ^3H Scintillators ที่ใช้พวกนี้เป็นสารอินทรีย์ ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ครั้นเมื่อถูกรังสี β จะให้แสงในช่วงยูวีออกมาได้แก่ พวก

Anthracene

p-terphenyl

2,5 diphenyl oxazole (PPO)

α -naphthyl phenyl oxazole (NPO)

phenyl biphenyl oxadiazole (PBD)

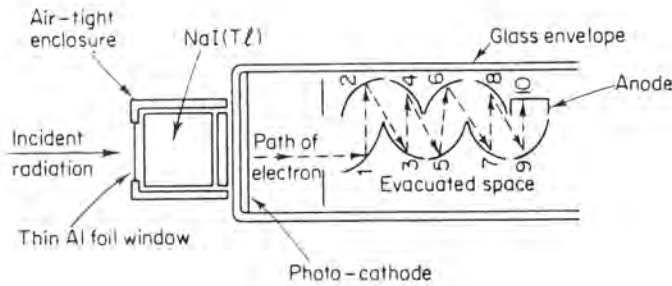
โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้ผสมกับ scintillator ตัวที่สอง ซึ่งเมื่อถูกกับแสงยูวีจะเกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้แสงออกมาอยู่ในช่วงวิสิเบิล scintillators ตัวที่สอง ได้แก่

1,4 bis-2-(5-phenyl oxazolyl)-benzene มีชื่อย่อว่า POPOP

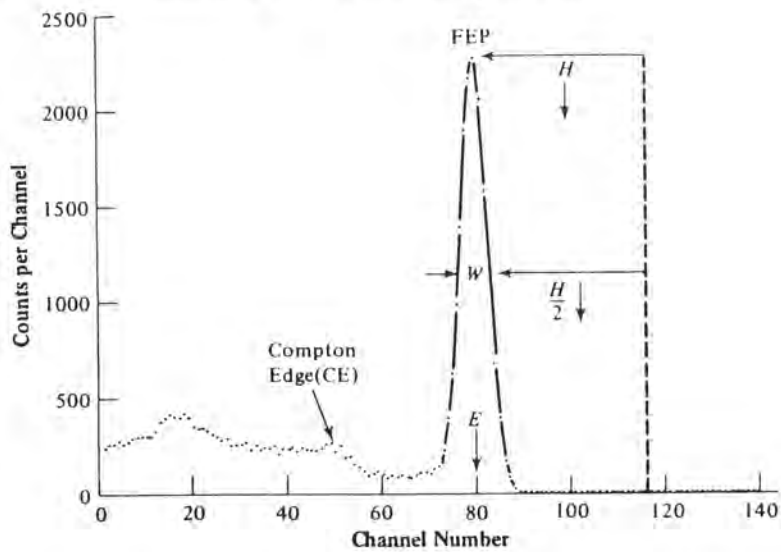
สำหรับ liquid scintillation counter นี้นิยมใช้ scintillator POP 5 g/L และ 0.3 g/L POPOP ละลายในโทลูอีน

Scintillation detectors ประกอบด้วย scintillator หรือ phosphor อย่างหนึ่ง ซึ่งอาจเป็น solid หรือ liquid อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานของรังสีที่สูญหายไปให้เป็นแสงเมื่อมากระทบดีเทคเตอร์ ดังรูปที่ 11.27 แสงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกรวบรวมให้เข้าไปยังโฟโตแคโทด (photocathode) ของโฟโตมัลติพลายเออร์ โฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกขยายขึ้นเป็นแฟกเตอร์ 10^5 ถึง 10^6 สัญญาณที่ได้จะเป็น

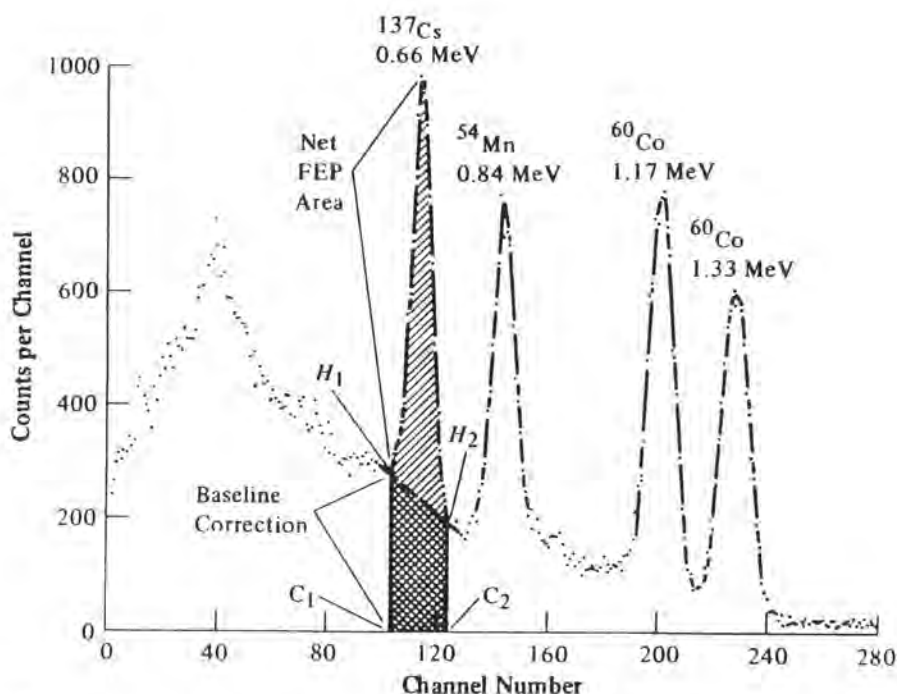
ปฏิภาคกับแสงที่เกิดขึ้น และก็เป็นปฏิภาคกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ ดังนั้น ฟอสฟอริจึงต้องมีความหนาแน่นสูง ๆ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงมากที่สุด



รูปที่ 11.27 แสดงลักษณะของ NaI (Tl) scintillation detector ที่ต่อเข้ากับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ รังสีแกมมาที่มีพลังงานต่าง ๆ กัน จะมีการถ่ายเทพลังงานแตกต่างกัน ทำให้ได้ขนาดของ pulse แตกต่างกันไป ตามลักษณะเฉพาะของรังสีแกมมา นั้น ๆ ถ้าเราตรวจสอบสารตัวอย่างด้วย multichannel analyzer (MCA) กับ scintillation detector เช่น ใช้ 400-channel analyzer ซึ่งได้ calibrate ไว้แล้ว จำนวน counts ที่วัดได้แต่ละช่อง (channel) ในช่วงเวลาที่ใช้นำมาเขียนกราฟกับ Channel number (ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน) จะได้ออกมาเป็นรังสีแกมมาสเปกตรัม ดังรูปที่ 11.28 และรูปที่ 11.29



รูปที่ 11.28 แสดงรังสีแกมมาสเปกตรัมของ ^{137}Cs วัดด้วย $4'' \times 4''$ NaI (Tl) scintillation detector



รูปที่ 11.29 แสดงรังสีแกมมาสเปกตรัมของ ^{137}Cs , ^{54}Mn และ ^{60}Co และการหาพื้นที่ของ พีก (full energy peak = FEP) ซึ่งเป็นปฏิภาคกับปริมาณกัมมันตภาพ

ลักษณะของรังสีแกมมา สเปกตรัม จะเริ่มจากรังสีที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งเป็นพวกรังสีเอกซ์, backscattered photons, compton edge (CE) อาจเรียกรวม ๆ กันว่า compton continuum และ photo peak หรือ full energy peak (FEP) สำหรับในทางเคมี วิเคราะห์ photo peak เป็นส่วนที่สำคัญ เพราะเป็น photo electric effect บางส่วนอาจเป็น compton scattering พลังงานที่ photo peak ก็คือ พลังงานของ รังสีแกมมาจริง พื้นที่ใต้พีกเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณกัมมันตภาพ (activity) ซึ่งอาจคำนวณได้โดย

$$\text{FEP หรือ photo peak area} = \xi \int_0^{t_c} A_0 e^{-\lambda t} dt \quad \text{-----(11.34)}$$

$$R_{t_c} = \xi \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad \text{-----(11.35)}$$

R_{t_c} = total count rate

ξ = ประสิทธิภาพของระบบการวัด (efficiency of counting system)

t_c = เวลาที่ใช้ในการวัด

A_0 = ปริมาณของกัมมันตภาพเมื่อเริ่มต้นวัด ($t_c = 0$)

$$\% \gamma = \frac{W}{E_\gamma} \times 100 \quad \text{-----(11.36)}$$

% r = % resolution

w = width ของ FEP ซึ่งเป็นความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค (FWHM)

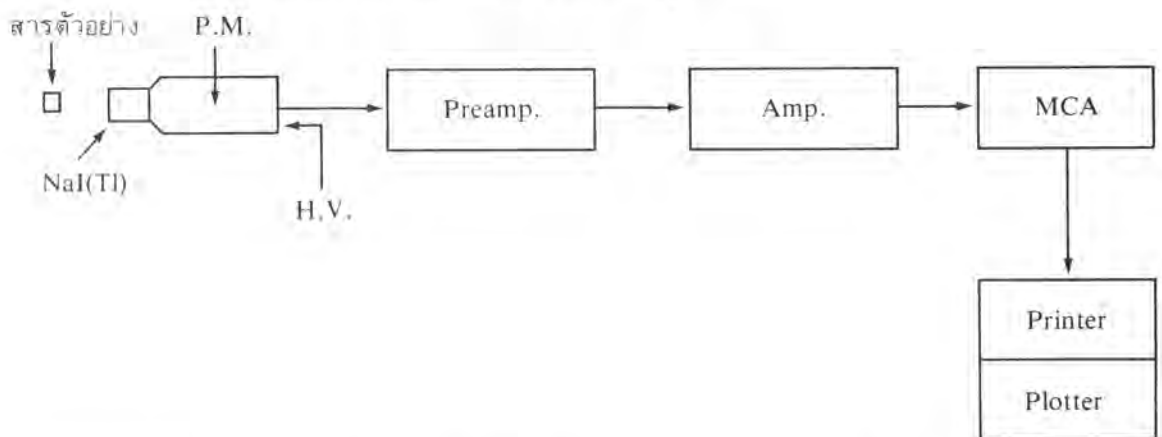
E_γ = พลังงานของรังสีแกมมา

สำหรับ NaI (TI) detector จะมีค่า % r ประมาณ 8% สำหรับ 1.33 MeV FEP ของ ^{60}Co ในการหาพื้นที่ใต้พีคจากสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่มาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีหลาย ๆ ชนิดปนกัน ซึ่งทำให้ได้สเปกตรัมยุ่งยากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้ baseline subtraction ทั้งนี้ photopeak นั้นจะต้องไม่มีพีคอื่นเข้ามาแทรกสอด ดังรูปที่ 11.29

$$\text{photopeak area (counts) หรือ FEP} = \left(\text{total area วัดจาก } C_1 \rightarrow C_2 \right) - \left(\frac{H_1 + H_2}{2} \right) (C_2 - C_1 + 1) \text{ -----(11.37)}$$

ในทางปฏิบัติ จะต้องหา channel C_1 และ C_2 ให้ได้ โดยเลือก channel number ที่ base line ทั้งสองข้างของพีค หาผลรวมของ count rate จาก channels ต่าง ๆ ตั้งแต่ C_1 ถึง C_2 จะได้พื้นที่ทั้งหมด แล้วลบออกเสียด้วยส่วนที่ช่วยเสริม (ส่วนสี่เหลี่ยม) โดยใช้ count rate ที่ $H_1 + H_2$ หารด้วย 2 จะได้ค่าเฉลี่ย เมื่อคูณด้วยจำนวนช่องทั้งหมด คือ $(C_2 - C_1 + 1)$ จะเป็นพื้นที่ส่วนล่างทั้งหมด

ส่วนประกอบของเครื่อง MCA ดังแสดงในรูปที่ 11.30



รูปที่ 11.30 แสดงส่วนประกอบของ Multichannel Gamma Spectrometer กับดีเทคเตอร์ NaI (TI)

11.11.3 Solid State Detector หรือ Semiconductor Detector (SSD)

เป็นดีเทคเตอร์ที่ได้รับความนิยมสูงมาก เพราะเป็นดีเทคเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในปัจจุบันดีเทคเตอร์ประเภทนี้ได้ผลดีออกสู่ตลาด ได้แก่ lithium-drifted silicon detector, Si(Li) ซึ่งเป็นดีเทคเตอร์ที่เหมาะสมแก่การใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ และอีกแบบหนึ่งได้แก่ lithium drifted germanium detector, Ge(Li) ซึ่งเป็นดีเทคเตอร์ที่เหมาะสมแก่การใช้วัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง ๆ สำหรับ Intrinsic semiconductor detectors กำลังได้รับความนิยมมาก

ผลึกของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ (ideal semiconductor crystal) นั้นจะต้องเป็นจำนวนที่สมบูรณ์จริง ๆ ที่อุณหภูมิใกล้ 0 K และจะต้องไม่มีตัวพาหะประจุไฟฟ้า เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในผลึกจะทำให้เกิดไอออนที่มีประจุบวกและลบ (ได้แก่ อิเล็กตรอนและ positive holes) เท่า ๆ กัน ถ้านำขั้วไฟฟ้า 2 อันมาต่อเข้ากับผลึกคนละด้าน แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้ผลึกนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้นจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิภาคกับพลังงานของรังสีที่สูญเสียไปในผลึกนั้น พลังงานที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.81 eV สำหรับ Si แต่ถ้าเป็น Ge จะมีค่าเฉลี่ย 2.98 eV ที่อุณหภูมิ 77 K (เท่ากับอุณหภูมิจนในโตรเจนเหลว) ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่ได้จากดีเทคเตอร์พวกนี้จะมากกว่าที่ได้จาก gas ionization detector (ใช้พลังงาน 40 eV) หรือที่ได้จาก scintillation detector (ใช้พลังงาน 300 eV) ประมาณ 10–100 เท่า และยังให้ resolution ที่ดีกว่าด้วย โดยจะต้องมีการควบคุมเกี่ยวกับสถิติของความไม่แน่นอนของการเกิดอิเล็กตรอนและหลุม และสัญญาณรบกวนจะต้องน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ นั่นคือ จะต้องลดตัวพาหะประจุ (free electrical carriers) หรืออะตอมที่เจือปนอยู่ ซึ่งเป็นตัวทำให้ประจุเคลื่อนที่ได้ สารที่จะมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงค่อนข้างจะหายาก ดีเทคเตอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำนี้ โดยมากจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนเป็นประเภทตรงกันข้ามนำมาต่อกันเข้า เช่น ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบ p (มีหลุมบวก, positive holes เหลืออยู่) มาต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำอีกแบบที่เป็นแบบ n (อิเล็กตรอนเหลือ) ดังนั้น ที่ 0 K อิเล็กตรอนจะแพร่จากแถบ n ไปยังแถบ p และหลุมบวก (positive holes) จะแพร่เข้าทางแถบ n จึงทำให้เกิดบริเวณที่หลุมและอิเล็กตรอนเท่ากัน และไม่สามารถให้ประจุเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบดีพลีชัน (depletion region) ถ้าต่อขั้วบวกเข้ากับแถบ n เรียกว่า ทำให้เกิด reverse bias จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น และมีผลทำให้แถบดีพลีชันเพิ่มขึ้นสูงสุดอีก 2 มม. ดังนั้น จากผลของการแพร่ร่อนนี้ออกไปได้นำมาใช้สำหรับทำเป็นดีเทคเตอร์ของพวกรังสีที่ทำให้เกิดประจุทั้งที่เป็น primary และ secondary ionization ในแถบดีพลีชัน (sensitive หรือ active volume) แล้วไอออนที่มีประจุบวกจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ดีเทคเตอร์ประเภทนี้ใช้ p-n junction โดยมี depletion layer อยู่ที่ผิวหน้าเพื่อรับรังสี ผิวหน้านั้นควรจะต้องการหนากว่า 2 มม. เพื่อให้ใช้สำหรับวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับดีเทคเตอร์ที่มีปริมาณมากน้อย ได้แก่ p-i-n junction ซึ่งมีการผลิตออกจำหน่ายโดยการให้ lithium ions แพร่เข้าไป (diffusing หรือ drifting) ในผลึก germanium หรือ silicon แบบ p ในสนามไฟฟ้าแรง ๆ พร้อมกับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นด้วย กระบวนการนี้ช่วยทำให้ผลึกนั้นมีความต้านทาน (resistivity) สูงขึ้น ดังนั้น Ge(Li) หรือ Si(Li) detectors จึงประกอบด้วยส่วนที่ใช้วัดรังสี (active volume) โดยมีผลึกที่เป็นแบบ p (undrifted) อยู่ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นผลึกที่เป็นแบบ n (Li drifted) ดังแสดงในรูปที่ 11.31 ดีเทคเตอร์แบบนี้จะทำหน้าที่เหมือนกับ p-n detector ที่มี reverse bias สำหรับแบบ planar เป็นแบบที่ง่ายที่สุด แต่จะให้ Lithium แพร่เข้าไปในผลึก Ge ขนาด 15 มม. นั้นทำได้ยาก จึงทำให้ active volume ค่อนข้างจำกัด ถ้าเพิ่มพื้นที่ให้มากขึ้นเท่ากับเป็นการเพิ่ม capacitance แต่จะไปลด resolution แต่สำหรับแบบ Coaxial นั้นจะช่วยเพิ่ม sensitive volume ได้ ซึ่งถ้าเป็น Ge อาจทำได้ถึง 100 cm³ แต่ราคาค่อนข้างแพง อย่างไรก็ตาม โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว Ge(Li) detector จะมี active volume เพียง 40–60 cm³ เท่านั้น แบบ planar ให้ resolution ดี และเหมาะแก่การใช้วัดโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ แต่

ถ้าต้องวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงใช้ coaxial Ge(Li) detector จะดีกว่า Si(Li) detector นั้น นิยมใช้กับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่วัดรังสีเอกซ์ หรือรังสีบีตาที่มีพลังงานสูง

ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาในเรื่องดีเทคเตอร์มากขึ้น โดยสามารถทำผลึกที่บริสุทธิ์มาก ๆ เรียกว่า hyperpure germanium ซึ่งมีสารเจือปนน้อยกว่า 1×10^{10} อะตอมต่อ cm^3 ถ้าได้ผลึกที่บริสุทธิ์มาก ๆ เช่นนี้ อาจไม่จำเป็นต้องทำ Li drift และอาจเก็บไว้ได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อจะใช้งานจึงจะแช่ในโตรเจนเหลว

ตัวอย่าง solid state detectors ที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ คือ

Si(Li) detector

พื้นที่ 10–80 mm^2

depth 3 มม.

window หนา $\frac{1}{2}$ – 1 mil (1 mil = 0.001 นิ้ว หรือ 25.4 ไมครอน)

ในโตรเจนเหลวใช้ประมาณ 1.2 ลิตร/วัน

ถังที่ใส่ในโตรเจนเหลวสำหรับแช่ดีเทคเตอร์ มีขนาด 5–15 ลิตร

ลักษณะของ Si(Li) detector ดังแสดงในรูปที่ 11.31 (a)

Ge(Li) detector มีอยู่ 2 แบบ คือ

ก. แบบธรรมดา เป็นแบบที่ต้องแช่ในโตรเจนเหลวตลอดเวลา

ข. แบบไอเปอร์เพียว Ge(Li) สามารถเก็บไว้ได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเวลาใช้งานจึงจะนำไปแช่ในโตรเจนเหลว ดีเทคเตอร์ชนิดนี้ ผลึก germanium บริสุทธิ์มาก มีสารเจือปนเพียง 1×10^{10} อะตอม/ cm^3

Ge(Li) detector มี area 25 – 50 mm^2

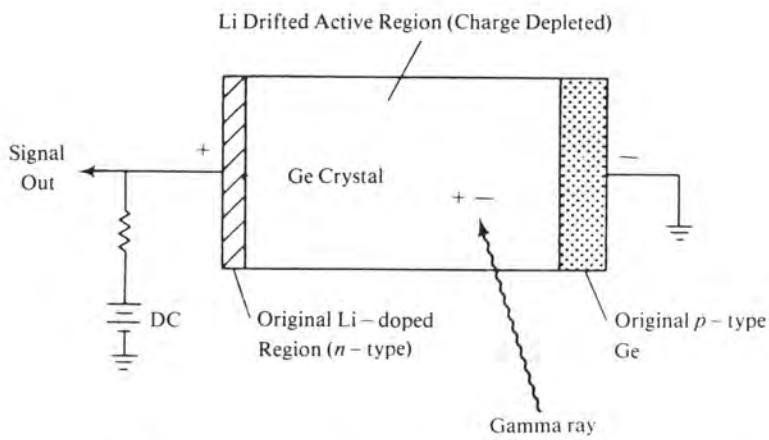
diam 5.6 – 8 มม.

depth 5 มม.

window 1.3 – 2.3 mil

ลักษณะของ Ge(Li) detector ดังแสดงในรูปที่ 11.31 (b)

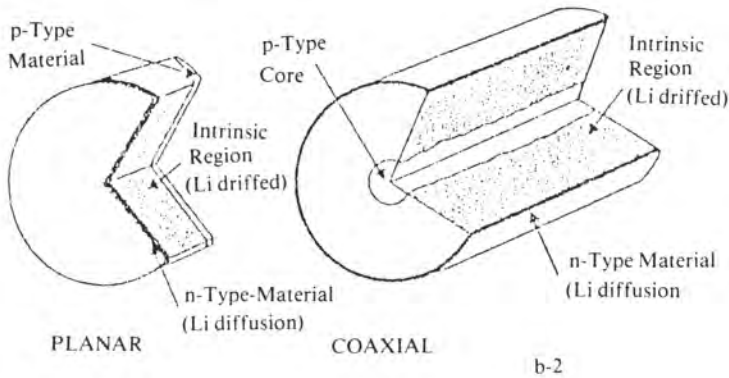
ลักษณะของ Solid state detector ที่ใช้ควบคู่กับ multichannel analyzer ดังแสดงในรูปที่ 11.32 และลักษณะสเปกตรัมของรังสีแกมมา ซึ่งตรวจวัดด้วย Ge(Li) detector แสดงในรูปที่ 11.9



b-1 Schematic Diagram of a Ge(Li) Detector.



(a) Si(Li) Detector

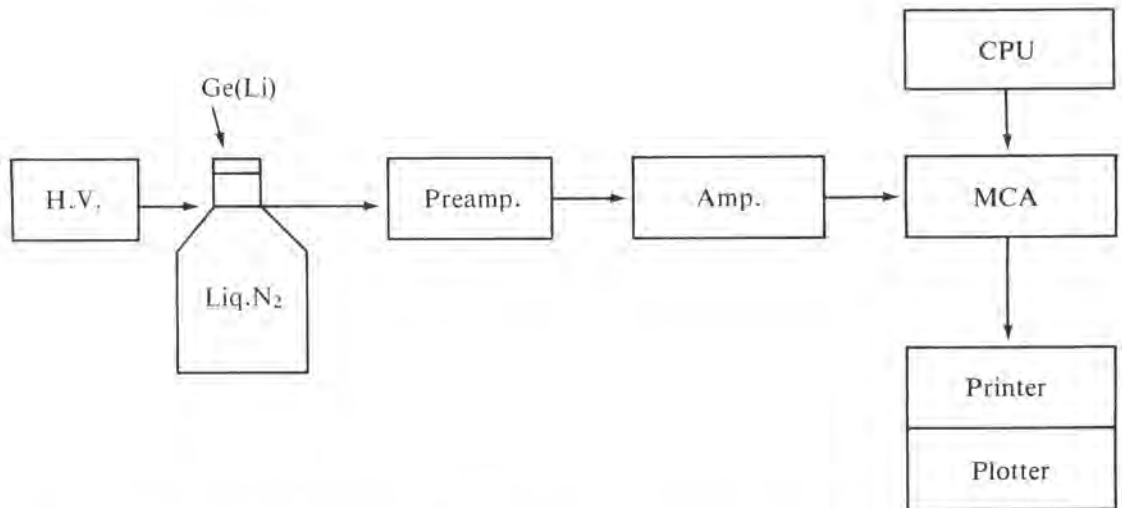


b-2



(b-3) Vertical Cryostat Ge(Li) Detector

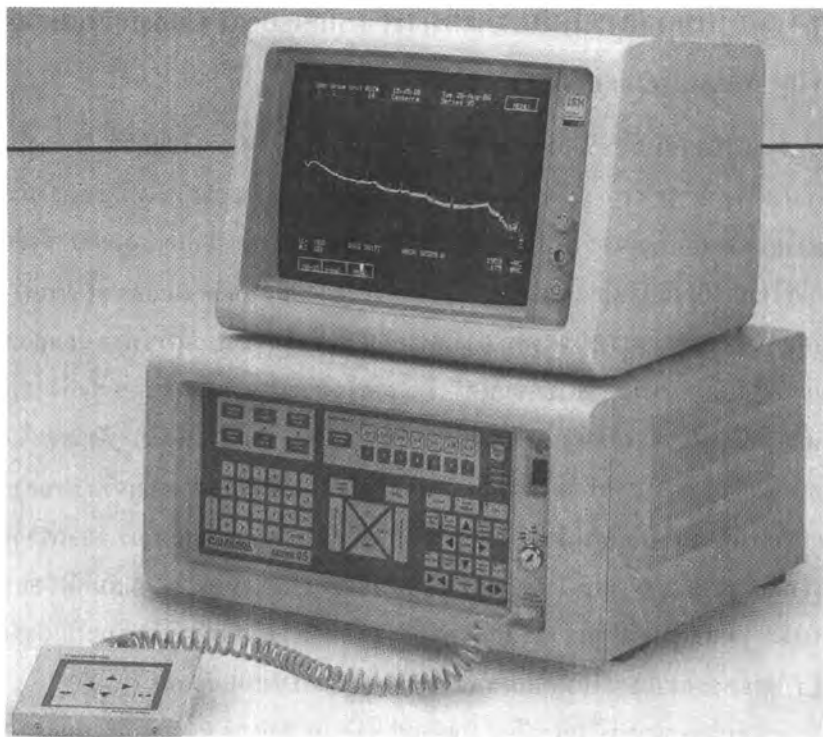
รูปที่ 11.31 แสดงลักษณะของดีเทกเตอร์ (a) Si(Li) และ (b) Ge(Li)



รูปที่ 11.32 แสดงแผนภาพของเครื่อง Gamma Multichannel Analyzer ที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และใช้ Ge(Li) เป็นดีเทคเตอร์

สิ่งที่สำคัญที่ควรจะต้องคำนึงถึงเกี่ยวกับดีเทคเตอร์ โดยเฉพาะดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดรังสีแกมมา ก็คือ resolution และ efficiency คำว่า resolution ของดีเทคเตอร์ หมายถึง ความสามารถของดีเทคเตอร์ที่จะแยกรังสีแกมมาต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กัน หรือมีพลังงานใกล้เคียงกันกับรังสีแกมมาที่ต้องการให้ออกมาอย่างเห็นได้ชัด สำหรับ efficiency หรือประสิทธิภาพของดีเทคเตอร์เป็นความสามารถของดีเทคเตอร์ที่จะวัดรังสีแกมมาที่เข้ามายังดีเทคเตอร์ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าสามารถวัดได้มากแสดงว่าดีเทคเตอร์นั้นมีประสิทธิภาพสูง ทั้ง resolution และ efficiency ของดีเทคเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้มักจะเกิดการขัดแย้งกันเสมอ นั่นคือ ถ้าดีเทคเตอร์ไหนมี resolution ต่ำ มักจะมีประสิทธิภาพต่ำ และถ้าดีเทคเตอร์ไหนมีประสิทธิภาพ หรือ efficiency สูง มักจะมี resolution ต่ำ ดังนั้น ในการเลือกใช้ดีเทคเตอร์จึงมีความสำคัญไม่น้อย เช่น ในกรณีที่มีสารกัมมันตรังสีตัวอย่างอันหนึ่งให้รังสีแกมมาออกมาเยอะ ๆ ควรจะเลือกดีเทคเตอร์ที่มี resolution สูง ๆ เช่น Ge(Li) detector (ดังแสดงในรูปที่ 11.33) แต่ถ้าสารกัมมันตรังสีตัวอย่างมีรังสีแกมมาออกมาน้อย หรือค่อนข้างบริสุทธิ์ ถ้าต้องการวัดกัมมันตภาพ ควรจะเลือกใช้ดีเทคเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า เช่น เลือกใช้ 3" × 3" NaI(Tl) scintillation detector เป็นต้น

ลักษณะของเครื่อง MCA และ MCA ที่ใช้คอมพิวเตอร์ร่วมมีลักษณะดังรูปที่ 11.33 และ 11.34



รูปที่ 11.33 แสดงเครื่อง Multichannel Analyzer Series 95 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Canberra Industries, Inc.



รูปที่ 11.34 แสดงเครื่อง Multichannel Analyzer ควบคู่กับเครื่อง IBM Personal Computer ซึ่งผลิตโดยบริษัท Canberra Industries, Inc.

11.12 หลักทางสถิติของการวัดกัมมันตภาพ (Statistical Considerations in Radioactivity Measurements)

ในการทดลองเกี่ยวกับการวัดกัมมันตภาพ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าจะต้องมีความผิดพลาดอันหนึ่งเสมอ เพียงแต่เราสามารถทำให้ความผิดพลาดนั้นน้อยลงเท่านั้น จะไม่ให้มีเลยคงไม่ได้ ทั้งนี้เพราะการสลายตัวของไอโซโทป กัมมันตรังสีเป็นกระบวนการแบบสุ่ม (random process) จึงต้องนำ law of probability มาใช้ในการวัดกัมมันตภาพ และหาขีดจำกัดของความผิดพลาด (limits of error) ของค่าที่วัดได้ บางครั้งความผิดพลาดยังมาจากระบบของเครื่องวัดหรืออื่น ๆ ซึ่งไม่ใช่แบบสุ่ม (non-random)

จากการวัดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิตยาว และทุกครั้งที่เราวัดอยู่ภายใต้สภาวะเดียวกัน จะเห็นว่าค่าที่วัดได้จะแตกต่างกันไป และกระจายอยู่ใกล้ ๆ กับค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 11.9 ถ้าใช้ law of probability หาค่าที่วัดได้นั้นถูกต้องดีหรือไม่ โดยคิดจากค่าเฉลี่ยจริง (true average value) ค่าที่ต่างกันของการวัดแต่ละครั้งกับค่าเฉลี่ยจริงเรียกว่า เป็นค่าความผิดพลาด (error) ของการวัด และสามารถหาความถี่ของความผิดพลาดในขนาดหนึ่งได้ กฎที่เกี่ยวกับการกระจายเพื่อหาความสัมพันธ์ของความถี่ของความถี่ของความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยจริงกับจำนวนการทดลองหรือการวัดมีอยู่หลายกฎด้วยกันดังต่อไปนี้

11.12.1 การกระจายแบบไบนอมิยัล (The Binomial Distribution)

การกระจายแบบไบนอมิยัลเป็นพื้นฐานของการกระจายความถี่ที่เป็นแบบสุ่ม เช่น การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

$$\begin{aligned} \text{ถ้าให้ } N_0 &= \text{จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี เมื่อ } t = 0 \\ N &= \text{จำนวนอะตอมที่มีอยู่ เมื่อเวลา } t \\ n &= \text{จำนวนอะตอมที่สลายตัวในเวลา } t \\ \therefore n &= N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} \\ &= N_0(1 - e^{-\lambda t}) \end{aligned} \quad \text{-----(11.38)}$$

∴ Probability ของ n อะตอมที่สลายตัวในเวลา t (P_n) คือ

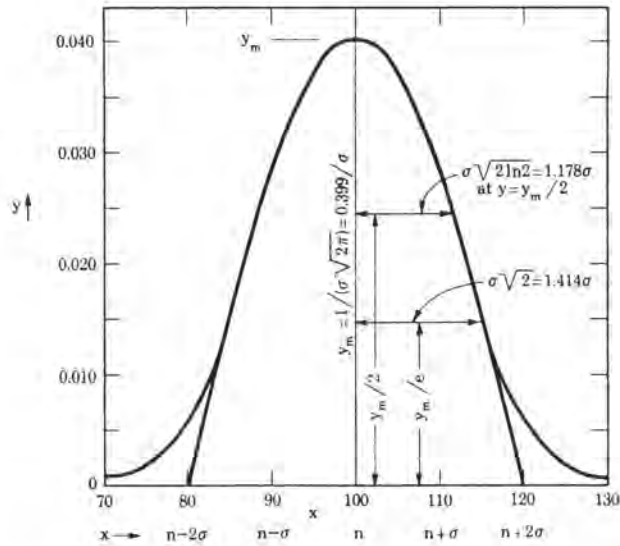
$$P_n = \frac{N_0!}{n! (N_0 - n)!} (\lambda t)^n (1 - \lambda t)^{N_0 - n} \quad \text{-----(11.39)}$$

11.12.2 การกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian หรือ Normal Distribution)

การกระจายแบบเกาส์เซียนเป็นการทำให้การกระจายแบบไบนอมิยัลง่ายขึ้น โดยสามารถใช้ได้ในกรณีที่มีการทดลองมาก (n มาก) ดังแสดงในรูปที่ 11.35 เมื่อ $n = 100$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) $\sigma = 10$ ถ้าพิจารณาจุดต่าง ๆ ที่น่าสนใจดังนี้

- (1) เส้นสัมผัสของ distribution curve ที่ inflection points ตัดแกน X ที่ $(x - n) = \pm 2\sigma$
- (2) ที่จุดครึ่งหนึ่งของความกว้าง (half width) มีค่าเท่ากับ $\sigma\sqrt{2\ln 2} = 1.776$

$$y = y_{m/2} \text{ (half max)}$$



รูปที่ 11.35 แสดง Gaussian Distribution โดยมีค่าจำนวนกลาง $n = 100$, $\sigma = 10$

11.12.3 การกระจายแบบพัซซอง (Poisson Distribution)

การกระจายแบบพัซซองใช้อธิบายได้ทุกกระบวนการแบบสุ่ม ซึ่งมีค่า probability ของการเกิดนั้นมีน้อยและคงที่ การกระจายแบบพัซซองจึงเป็นกรณีจำกัดของการกระจายแบบไบโนเมียล นั่นคือ เมื่อ $\lambda t \ll 1$, $n_0 \gg 1$ เมื่อ $n \ll N_0$

\therefore Probability $W(n)$ ที่ n อะตอมจะสลายตัวในเวลา t

$$W(n) = \frac{N_0!}{(N_0 - n)! n!} (1 - e^{-\lambda t})^n (e^{-\lambda t})^{N_0 - n} \quad \text{-----(11.40)}$$

\therefore ค่าเฉลี่ยจริงของจำนวนอะตอมที่สลายตัวในเวลา t คือ

$$\bar{n} = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{-----(11.41)}$$

และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ หาได้จาก

$$\sigma^2 = (\bar{n} - n)^2 \quad \text{-----(11.42)}$$

$$\sigma = (\bar{n} e^{-\lambda t})^{1/2} \quad \text{-----(11.43)}$$

$$\text{เมื่อ } \lambda t \ll 1 \quad \sigma = (\bar{n})^{1/2} \quad \text{-----(11.44)}$$

โดยปกติเราวัดค่า n แทนที่จะเป็น \bar{n} จึงต้องสมมติให้ $n \approx \bar{n}$

$$\therefore \sigma = (n)^{1/2} \quad \text{-----(11.45)}$$

$$W(n) = \frac{(\bar{n})^n (e^{-\bar{n}})}{n!} \quad \text{-----(11.46)}$$

สมการที่ได้นี้เป็นกฎการกระจายที่หาได้ง่ายขึ้น และใช้อย่างได้ผลดี เมื่อ N_0 มีค่าน้อยประมาณ 100 (หรือ low counting rate) และ λt มีค่ามากกว่า 0.01

ในทางปฏิบัติ เราไม่ทราบค่าเฉลี่ยจริง (\bar{n}) แต่เราทราบค่า n ซึ่งได้จากการวัด และอาจแตกต่างจากค่า \bar{n} ถ้าต้องการจะหาค่าความผิดพลาดจากการวัดนั้น ๆ ในทางปฏิบัติเราให้ความผิดพลาดเป็น $K\sqrt{n}$ โดยที่ K ใช้จากตารางที่ 11.8

ตารางที่ 11.8 แสดงค่าความผิดพลาดต่าง ๆ ที่ใช้ในทางสถิติ

ชื่อความผิดพลาด	k	ความผิดพลาด $= k\sqrt{n}$	หมายเหตุ
probable error	0.6745	$0.6745(n)^{1/2}$	ใช้ในทางวิทยาศาสตร์ทั่วไป
standard deviation (σ)	1.000	$1.000(n)^{1/2}$	ใช้ในทางสถิติทั่วไป
nine-tenths error	1.645	$1.645(n)^{1/2}$	ใช้ในการนับกัมมันตภาพ
ninety-five hundredths error	1.96	$1.96(n)^{1/2}$	ใช้ในทางสถิติทั่วไป
ninety-nine hundredths error	2.576	$2.576(n)^{1/2}$	ใช้ในทางสถิติทั่วไป

*หมายเหตุ ตารางนี้ได้มาจาก Gaussian distribution ตารางนี้จะใช้ได้ถ้า $n < 10$

ตัวอย่างแสดงการคำนวณหาค่าทางสถิติต่าง ๆ ของการวัดกัมมันตรังสีด้วยเครื่อง G.M. counter ดังแสดงในตารางที่ 11.9

ตารางที่ 11.9 แสดงค่าทางสถิติของการวัดกัมมันตภาพจากสารกัมมันตรังสีในช่วงเวลาหนึ่งที่สภาวะเดียวกัน จำนวน 20 ครั้ง ด้วย G.M. counter

ครั้งที่	จำนวนนับ (counts)	$n - \bar{n} = \Delta$	Δ^2
1	2058	- 20	400
2	2069	- 9	81
3	2124	+ 46	2116
4	2128	+ 50	2500
5	2070	- 8	64
6	2094	+ 16	156
7	2199	+121	14641
8	2030	- 48	2304

ตารางที่ 11.9 (ต่อ)

ครั้งที่	จำนวนนับ (counts)	$n - \bar{n} = \Delta$	Δ^2
9	2140	+ 62	3844
10	2078	0	0
11	2000	- 78	6084
12	2090	+ 12	144
13	2029	- 49	2401
14	2088	+ 10	100
15	2032	- 26	676
16	2023	- 55	3025
17	2047	- 31	961
18	2082	+ 4	16
19	1098	+ 20	400
20	2057	- 21	441
		$\Sigma \Delta = -4$	$\Sigma \Delta^2 = 40354$

จากจำนวนนับที่ได้แต่ละครั้งนี้ เราสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

(1) จำนวนนับเฉลี่ย (\bar{n}) = ผลรวมของจำนวนนับทั้งหมด หารด้วยจำนวนครั้งที่นับ (N)

$$\bar{n} = \frac{\Sigma n}{N} = \frac{41560}{20} = 2078$$

(2) หาคความเบี่ยงเบนของจำนวนนับแต่ละครั้งกับค่าเฉลี่ย ได้

$$\Delta = n - \bar{n}$$

(3) หากำลังสองของความเบี่ยงเบนได้ (Δ^2)

(4) หาคความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \Sigma \Delta^2\right)} = \sqrt{\frac{1}{20} \times 40354} = 45$$

(5) หาผลรวมของความเบี่ยงเบนทางพีชคณิต ($\Sigma \Delta$) ได้ (ค่านี้ควรเข้าใกล้ศูนย์)

(6) หาค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบน ($\bar{\Delta}$) ได้

$$\bar{\Delta} = \frac{\Sigma \Delta}{N} = \frac{686}{20} = 34.3$$

จากข้อมูลนี้จะเห็นว่าเป็นไปตาม Poisson distribution โดยสามารถตรวจสอบได้ทางสถิติ คือ

(1) Square root ของจำนวนนับเฉลี่ย (\sqrt{n}) จะมีค่าใกล้เคียงกับความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ)

(2) อัตราส่วนของความเบี่ยงเบนเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) ต่อความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) = $\frac{\bar{\Delta}}{\sigma}$ จะต้องได้

ประมาณ 4/5 หรือ 0.797 ซึ่งจากตารางที่ 11.9 จะได้ค่า $\frac{\bar{\Delta}}{\sigma} = \frac{34.3}{45} = 0.76$

(3) จำนวนครั้งที่มีความเบี่ยงเบนมากกว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะพบว่ามีค่าประมาณหนึ่งในสาม หรือ 31.7% ของจำนวนครั้งทั้งหมด นั่นคือ จากการทดลองค่า Δ มากกว่า 45 มี 8 ครั้ง เมื่อคิดเป็นร้อยละของจำนวนครั้งทั้งหมดจะเท่ากับ 40% ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎี

11.12.4 การหาความผิดพลาดในการวัด counting rate

ในการวัดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีนั้น โดยทั่วไปนิยมวัดเป็น dps (disintegration/sec.) หรือ dpm หรือ cpm (count/min.) ซึ่งเรียกว่า counting rate (R)

$$R = \frac{n}{t} \quad \text{-----(11.47)}$$

(t = เวลาในการวัด)

$$\begin{aligned} \therefore \text{ความผิดพลาดในการวัด (q)} &= K\sqrt{n} \\ &= K\sqrt{Rt} \quad \text{-----(11.48)} \end{aligned}$$

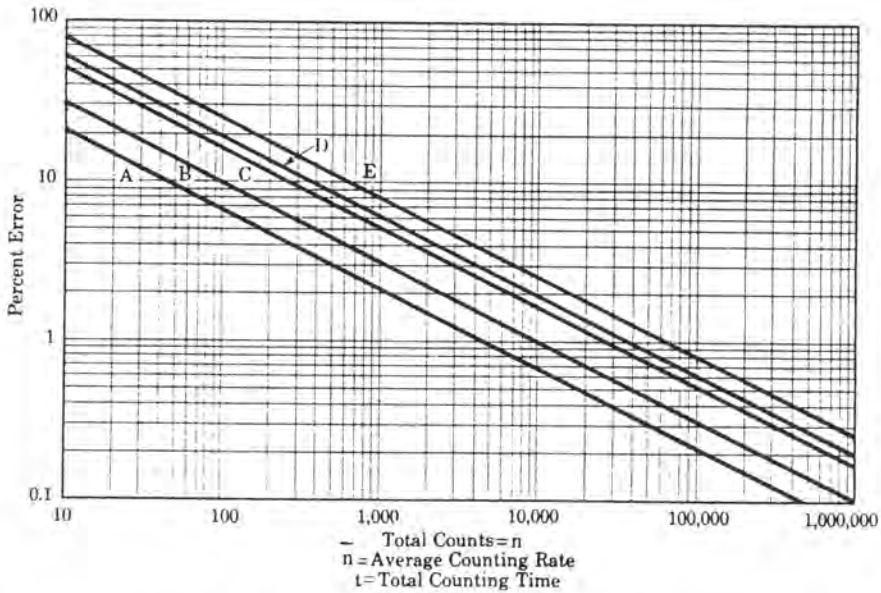
$$\begin{aligned} \text{ความผิดพลาดของ counting rate (Q)} &= q/t \\ &= \frac{K\sqrt{Rt}}{t} \\ &= K\sqrt{R/t} \quad \text{-----(11.49)} \end{aligned}$$

ตัวอย่างเช่น การหา % error จาก standard deviation (เส้น B ในรูปที่ 11.36)

จำนวนนับวัดได้	% error
10^6	0.1
10^4	1.0
100	10.0

หรืออาจจะคำนวณได้จากตารางที่ 11.8 ความผิดพลาด = $1.000\sqrt{n}$

$$\text{ถ้าวัดได้ } 10^6 \text{ counts \% error} = \frac{100\sqrt{10^6}}{10^6} = 0.1$$



- รูปที่ 11.36 แสดงกราฟสำหรับหาความผิดพลาดของการวัดกัมมันตภาพจากจำนวนนับที่ได้
- เส้น A ใช้หา probable error หรือ 50% confidence level
 - เส้น B ใช้หา standard deviation หรือ 67% confidence level
 - เส้น C ใช้หา nine-tenths error หรือ 90% confidence level
 - เส้น D ใช้หา ninety-five hundredths error หรือ 95% confidence level
 - เส้น E ใช้หา ninety-nine hundredths error หรือ 99% confidence level

11.12.5 ความผิดพลาดเนื่องจาก background

ในทางปฏิบัติ count rate ที่แท้จริงของสารกัมมันตรังสี เราไม่สามารถจะวัดได้โดยตรง แต่จะหาได้จากการคำนวณเท่านั้น โดยการลบ count rate ของตัวอย่างด้วย count rate ของ background background rate เป็นจำนวนนับต่อเวลาที่เกิดจากรังสีคอสมิกและรังสีที่มาจากแหล่งอื่น ๆ ในบริเวณดีเทคเตอร์โดยไม่มีสารตัวอย่างกัมมันตรังสี

ความผิดพลาดของการวัด background rate (Q_b)

$$Q_b = K\sqrt{R_b/t_b} \quad \text{-----}(11.50)$$

ความผิดพลาดของการวัด count rate ตัวอย่าง (Q_s)

$$Q_s = K\sqrt{R_s/t_s} \quad \text{-----}(11.51)$$

$$\therefore \text{counting rate ที่ถูกต้องของตัวอย่าง } R_c = R_s - R_b \quad \text{-----}(11.52)$$

ความผิดพลาดของการวัด counting rate ตัวอย่าง

$$(Q_s^2 + Q_b^2)^{1/2} = K \left(\frac{R_s}{t_s} + \frac{R_b}{t_b} \right)^{1/2} \quad \text{-----(11.53)}$$

11.12.6 การหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการวัดกัมมันตภาพ

ถ้ามีเวลาจำกัดในการวัดรังสีของสารตัวอย่างและ background โดยให้มีความผิดพลาด

น้อยที่สุด

ถ้าให้ T = เวลาทั้งหมดที่มีอยู่ในการวัดกัมมันตภาพของตัวอย่าง และ background

t_s = เวลาที่ใช้วัดสารตัวอย่าง

t_b = เวลาที่ใช้วัด background

$$\therefore T = t_s + t_b \quad \text{-----(11.54)}$$

ให้ y = ความผิดพลาด และน้อยที่สุด

$$\begin{aligned} \therefore \frac{dy}{dt_s} &= 0 \\ &= \frac{d}{dt_s} K \left(\frac{R_s}{t_s} + \frac{R_b}{t_b} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad \text{-----(11.55)}$$

$$= K \frac{\left(\frac{R_b}{t_b^2} - \frac{R_s}{t_s^2} \right)}{\left(\frac{R_s}{t_s} + \frac{R_b}{t_b} \right)} \quad \text{-----(11.56)}$$

เมื่อ y มีค่าน้อยที่สุด

$$\begin{aligned} \frac{R_b}{t_b^2} - \frac{R_s}{t_s^2} &= 0 \\ \therefore \frac{t_s}{t_b} &= \left(\frac{R_s}{R_b} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad \text{-----(11.57)}$$

11.12.6 การแก้ปัญหากเกี่ยวกับ Dead Time

เครื่องวัดรังสีหรือดีเทคเตอร์ โดยทั่วไปจะมี dead time อยู่ช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งดีเทคเตอร์นั้นไม่สามารถรับรังสีได้ ทำให้วัดผิดได้ หรือแตกต่างกันไปตามค่า dead time เพื่อที่จะทำให้ count rate ถูกต้อง ต้องใช้ dead time มาแก้ไข คือ

$$R_c = \frac{R}{1 - R\tau} \quad \text{-----(11.58)}$$

R_c = count rate ที่แก้ไขถูกต้อง

R = count rate ที่จริงของสารตัวอย่าง

τ = dead time ของดีเทคเตอร์

11.13 การวิเคราะห์โดยใช้หลักการไอโซโทปโดลูชัน (Isotope Dilution Analysis, IDA)

เมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้พบสารกัมมันตรังสีและสมบัติพิเศษของมัน ทำให้มีผู้นำเอาไอโซโทปนั้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เป็นอันมาก สำหรับทางด้านเคมี ครั้งแรกได้ใช้ radioisotopes ในการทำ labeled compounds เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการละลายของสารที่ละลายยาก ๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1932 Havesy และ Hobbie เป็นผู้ใช้ radioactive Pb ไปหาปริมาณของ Pb ในหิน โดยวิธี Electro deposition เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ จึงต้องใช้ radioactive Pb ใส่ลงไปเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการแก้ให้ถูกต้องขึ้น และในปี ค.ศ. 1934 Havesy และ Hofer เป็นผู้เริ่มใช้ isotope dilution technique มาใช้แก้ปัญหาในการวิเคราะห์ แต่ขณะนั้นก็ยังไม่ใช่ที่ยอมรับกัน จนกระทั่งปี ค.ศ. 1940 Rittenburg และ Foster ได้ส่งเสริมการใช้ isotope dilution และชี้ให้เห็นถึงประโยชน์จนเป็นที่ยอมรับกัน

ความจริง เทคนิค IDA สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งธาตุที่อยู่ตัวและธาตุกัมมันตรังสี โดยให้ sensitivity สูง หลักการกว้าง ๆ ของ IDA ก็คือ ใช้วิธีเติมไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เป็นชนิดเดียวกับสารที่ต้องการหาปริมาณลงไป โดยทราบปริมาณที่แน่นอน ทั้งน้ำหนักและกัมมันตภาพ หลังจากผสมกันอย่างดีแล้ว จนได้สมดุล แล้วแยกเอาสารที่ต้องการออกมาให้บริสุทธิ์ แม้จะเป็นบางส่วนก็ใช้ได้ จากน้ำหนักของสารกัมมันตภาพที่แยกออกมาได้ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณของสารที่ต้องการได้

11.13.1 แฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้ IDA ก็คือ

- (1) การเลือกใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี หรือ labeled compounds และการจัดหา
- (2) อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ เช่น เครื่องวัดกัมมันตภาพ
- (3) ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์
- (4) ค่าใช้จ่าย

IDA ที่จะกล่าวต่อไปนี้จะมียู่ด้วยกัน 4 วิธีการ ซึ่งล้วนแต่อาศัยหลักของการเปลี่ยนแปลง specific activity (S)

$$\text{specific activity} = \frac{\text{กัมมันตภาพ (activity)}}{\text{มวล (mass)}}$$

$$S = \frac{A}{W} \quad \text{-----(11.59)}$$

ถ้า carrier-free radioisotope ซึ่งมีอะตอมมิกแมส M และมีน้ำหนักเป็น W*

$$W^* = \frac{N^*}{N_a} M \quad \text{-----(11.60)}$$

N^* = จำนวนอะตอมที่เป็นกัมมันตภาพรังสี

N_a = Avogadro number

$$\therefore S = \frac{AN_a}{N^*M} \quad \text{-----(11.61)}$$

$$A = \lambda N^* = \frac{0.693}{t_{1/2}} N^* \quad \text{-----(11.62)}$$

$$\therefore S = 0.693 \frac{N_0}{t_{1/2} M} = 4.17 \times 10^{23} \times \frac{1}{t_{1/2} M} \text{ dps/g}$$

หน่วยต่าง ๆ ที่นิยมใช้วัด specific activity มี

$$\mu \text{ ci/g} = \text{ไมโครคูรี/กรัม}$$

$$\text{m ci/m mole} = \text{มิลลิคูรี/มิลลิโมล}$$

$$\text{dps/mL} = \text{disintegration/sec./mL}$$

สำหรับ S.I. unit ใช้ Bq/Kg = เบคเคอเรล/ กิโลกรัม

11.14 Direct Isotope Dilution Analysis (Direct IDA)

วิธีนี้ใช้เติมธาตุที่เป็นกัมมันตรังสี หรือใช้ isotopically labeled compound ที่ทราบปริมาณแน่นอนลงไปในการละลายตัวอย่าง แล้วผสมกันให้ดี นำไปแยกเอาสารที่ต้องการหาปริมาณออกมาบางส่วนให้บริสุทธิ์พอที่จะสามารถหาน้ำหนักได้ หรือน้ำหนักและวัดกัมมันตภาพของสารที่แยกออกมาให้ได้ ก็จะสามารถคำนวณน้ำหนักของสารตัวอย่างได้

ให้ W_x = น้ำหนักของสารที่ต้องการหาเป็นกรัม

W_o = น้ำหนักของ radioisotope หรือ labeled compound ที่เติมลงไป โดยมีกัมมันตภาพเป็น a_o และมี specific activity S_o

เมื่อผสมกันดีแล้ว แยกสารที่ต้องการได้ W_1 กรัม และวัดกัมมันตภาพได้ a_1

$$\therefore \text{specific activity เริ่มต้น } S_o = \frac{a_o}{W_o} \quad \text{-----(11.63)}$$

$$\text{specific activity หลัง dilution } S_1 = \frac{a_1}{W_o + W_x} \quad \text{-----(11.64)}$$

จากการทดลอง specific activity หลัง dilution

$$S_1 = \frac{a_1}{W_1}$$

แต่ปริมาณของกัมมันตภาพก่อน dilution = ปริมาณของกัมมันตภาพหลัง dilution -----(11.65)

$$\therefore W_o S_o = (W_x + W_o) S_1$$

$$W_x S_1 = W_o(S_o - S_1)$$

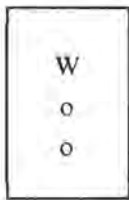
$$W_x = W_o \left(\frac{S_o - S_1}{S_1} \right)$$

$$W_x = W_o \left(\frac{S_o}{S_1} - 1 \right) \quad \text{-----(11.66)}$$

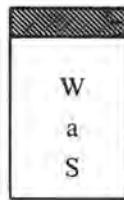
ถ้า $W_x \ll W_o$ หรือ $S_o \gg S_1$ จะได้สมการเป็น

$$W_x = W_o \frac{S_o}{S_1} \approx W_1 \frac{a_o}{a_1} \quad \text{-----(11.67)}$$

เพื่อให้ดูง่ายขึ้น ได้แสดงเป็นแผนภาพ โดยถือว่า



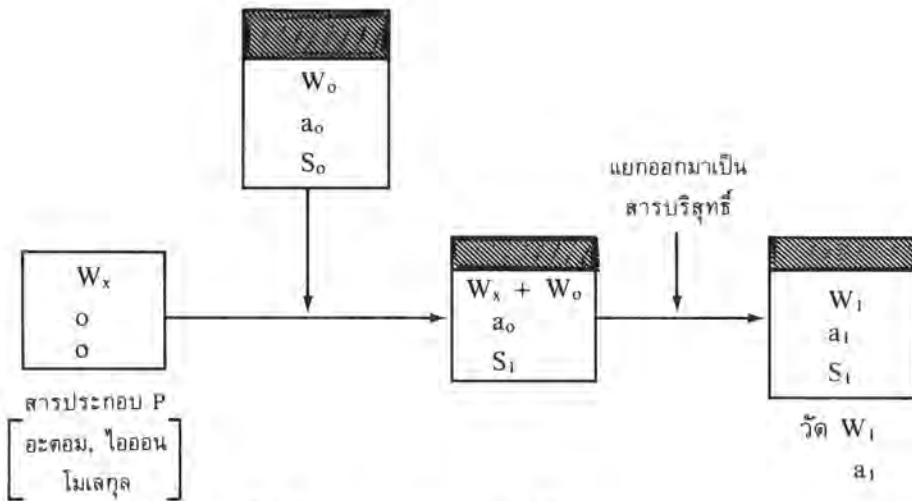
ไม่มีไขมันตกภาพ



เป็น radioactive มีไขมันตกภาพ

- และให้ a = activity
- S = specific activity
- W = มวล หรือน้ำหนัก

สารประกอบตัวอย่าง P*



specific activity เริ่มต้น $S_o = \frac{a_o}{W_o}$

specific activity หลัง dilution $S_1 = \frac{a_o}{W_x + W_o}$ } เท่ากัน

specific activity หลังแยก $S_1 = \frac{a_1}{W_1}$

$$\therefore W_x = W_o \left[\frac{a_o}{W_o} \cdot \frac{W_i}{a_i} - 1 \right] = W_o \left[\frac{S_o}{S_i} - 1 \right] \text{-----(11.68)}$$

ดังนั้น ปริมาณของสารตัวอย่าง W_x ก็หาได้

11.14.1 สิ่งที่ต้องระวังในการใช้ Direct IDA

- (1) การผสมระหว่าง P และ P* จะต้องให้เข้ากันดีและสมดุล
- (2) P และ P* จะเป็นสารเคมีที่เหมือนกัน คืออยู่ในรูปเดียวกัน ox.state เท่ากัน เช่น MnO_4^- กับ $MnO_4^{* -}$ แต่จะไม่ใช้ Mn^{2+} กับ MnO_4^-
- (3) จะต้องไม่มีการแลกเปลี่ยนธาตุที่เป็นกัมมันตรังสี
- (4) การหาค่า W_i อาจใช้วิธีใดก็ได้ การชั่ง, สเปกโทรสโกปี หรือโพลารोगราฟี่ เป็นต้น
- (5) พยายามเลือกธาตุกัมมันตรังสีที่มี $t_{1/2}$ ยาวพอที่จะทำการทดลองได้สะดวก specific activity ควรจะสูง ๆ
- (6) ความผิดพลาดของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ W_o/W_x

% ความผิดพลาด	อัตราส่วนของ W_o/W_x
10	9
3	2
1.5	0.5
1.1	0.1
1.01	0.01

ซึ่งจะเห็นว่าถ้าสารตัวอย่างมีน้อยอยู่แล้วทำให้ยากแก่การวิเคราะห์และมีความผิดพลาดสูง

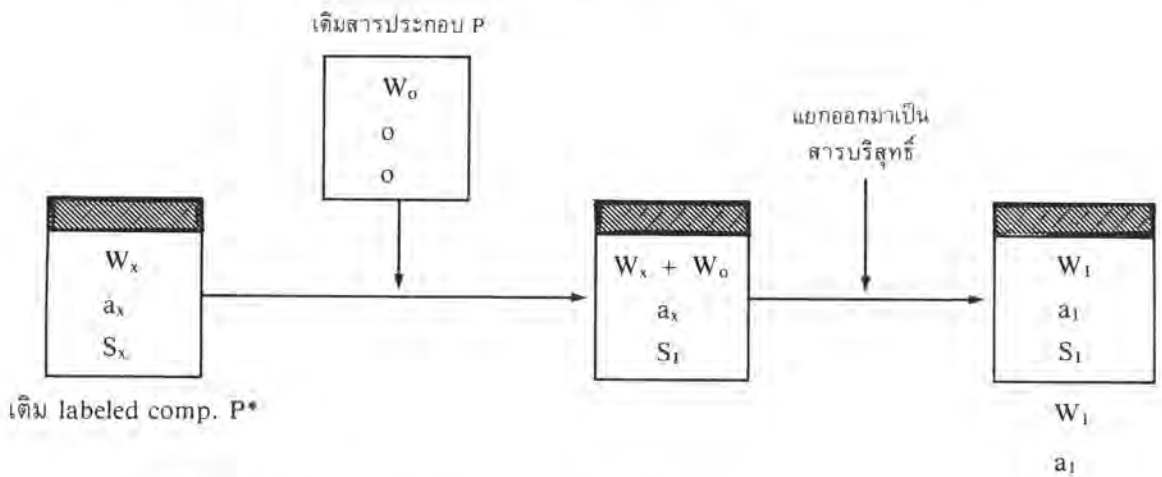
11.14.2 ข้อดีของเทคนิค Direct IDA

- (1) ใช้เป็นวิธีแก้ปัญหาทางวิเคราะห์ได้ดีเมื่อวิธีอื่นใช้ไม่ได้
- (2) สารที่ทำการแยกไม่จำเป็นต้อง quantitative
- (3) เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว
- (4) เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องดี แต่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ W_o/W_x
- (5) ปัญหาเกี่ยวกับการแทรกสอดไม่มี
- (6) ใช้เป็นวิธีวิเคราะห์หาสารปริมาณน้อย ๆ

11.15 Inverse หรือ Reverse IDA

วิธีนี้มีลักษณะตรงข้ามกับวิธีแรก ซึ่งสารที่จะทำการวิเคราะห์เป็นสารกัมมันตรังสี ดังนั้น สารที่จะเติมลงไปทำให้หาได้สะดวก เพราะเป็นสารที่อยู่ตัวธรรมดา

ดังนั้น W_x ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีที่จะวิเคราะห์มี activity เป็น a_x และ specific activity S_x สารที่เติมลงไป W_o เป็นสารที่เสถียร ดังแสดงในแผนภาพ



specific activity เริ่มต้น $S_x = \frac{a_x}{W_x}$

specific activity หลัง dilution $S_i = \frac{a_x}{W_x + W_o}$

specific activity หลัง dilution จากการศึกษาทดลอง $S_i = \frac{a_1}{W_1}$ } เท่ากัน

$\therefore \frac{a_x}{W_x + W_o} = \frac{a_1}{W_1}$

$$W_x = W_o \left[\frac{a_x W_1}{a_1 W_o} \right] - 1$$

.....(11.69)

$$a_x = a_1 \left[\frac{W_x + W_o}{W_1} \right]$$

ถ้า $W_o \gg W_x$

$$a_x = a_1 \left[\frac{W_o}{W_1} \right]$$

หรือ $S_x W_x = S_1 (W_x + W_o)$

$$W_x (S_x - S_1) = W_o S_1$$

$$\therefore W_x = \frac{W_o S_1}{S_x - S_1}$$

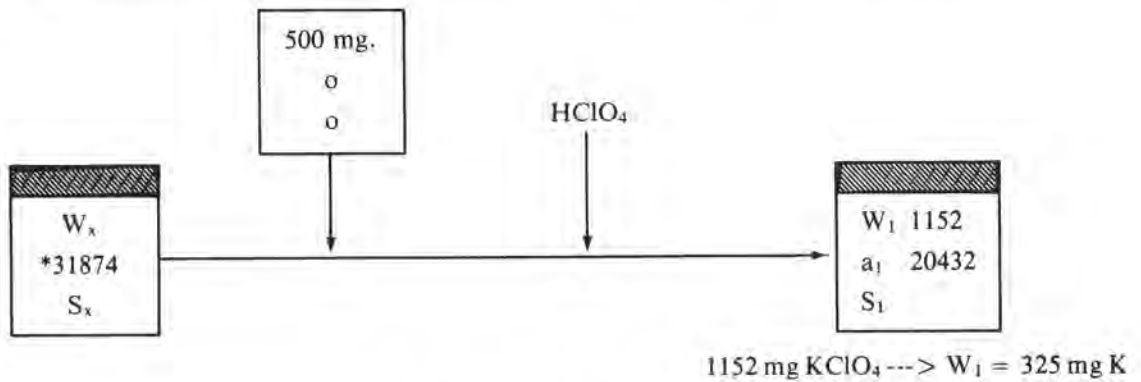
$$W_x = W_o \left[\frac{S_1}{S_x - S_1} \right] \quad \text{-----(11.70)}$$

ดังนั้น ปริมาณของสารตัวอย่าง W_x ก็จะสามารถหาได้

11.15.1 ข้อดีของ Reverse IDA

- (1) สามารถนำไปใช้หาปริมาณของสารที่มีน้อย ๆ ได้ดีกว่าวิธีแรก
- (2) ได้ผลมีความถูกต้องดี เพราะเติมลงไปได้มาก
- (3) สารที่เติมลงไปเป็นสารที่เสถียร ทำให้หาได้ง่าย สะดวก

ตัวอย่าง ในการหาปริมาณของ ^{42}K เมื่อนำสารละลายมาจำนวนหนึ่ง วัดกัมมันตภาพได้ 31874 cpm. เมื่อนำมาเติมสารละลาย K ลงไป 500 mg. ผสมให้เข้ากัน แล้วเติม HClO_4 เพื่อตกตะกอน KClO_4 ได้ตะกอนเมื่อทำให้แห้งหนัก 1152 mg. วัดกัมมันตภาพได้ 20432 cpm. ดังแสดงในแผนภาพ



$$W_x = W_o \left[\frac{a_x W_1}{a_1 W_o} - 1 \right]$$

$$= 500 \left[\frac{31874}{20432} \times \frac{325}{500} - 1 \right] = 7 \text{ mg.}$$

ถ้า $W_x \ll W_o$ ถ้าต้องการตรวจสอบจะดูได้จาก a_x คือ $W_x = 7$ mg. $W_o = 500$ mg.

$$\therefore a_x = a_1 \left[\frac{W_x + W_o}{W_1} \right] = 20432 \left[\frac{7 + 500}{325} \right]$$

$$= 31874 \text{ cpm}$$

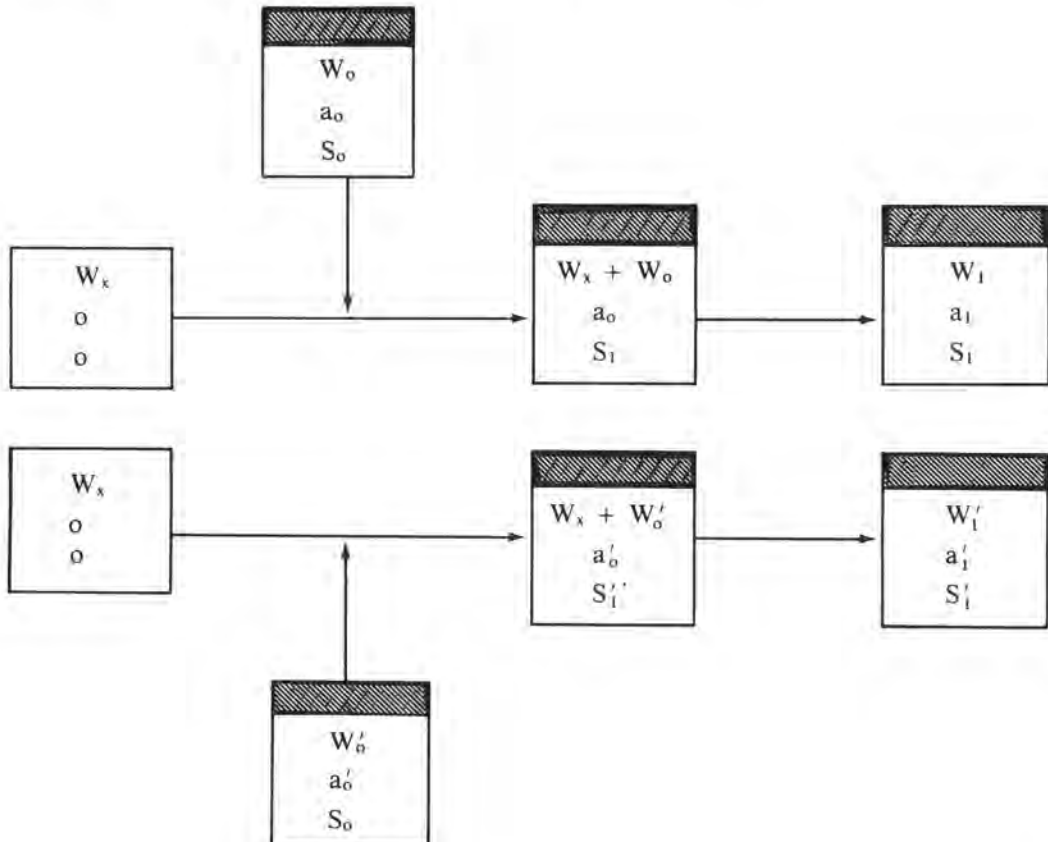
$$a_x = a_1 \frac{W_o}{W_1} = 20432 \frac{500}{325} = 31433 \text{ cpm.}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่คำนวณได้เท่ากับหรือใกล้เคียงกันกับสารที่ใช้จริง

11.18 Double IDA หรือ Double-Direct IDA

จะเห็นได้ว่าเทคนิคทั้งสองที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จำเป็นจะต้องทราบค่า specific activity (S_o) แต่ถ้าค่า specific activity ที่จะเติมลงไปในการตัวอย่างนั้นไม่ทราบ เราก็สามารถหาได้ทั้งปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง และ specific activity ของสารที่เติม โดยแบ่งสารตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน แล้วนำมาเติมธาตุกัมมันตรังสี หรือ labeled compound ลงไปในปริมาณที่ต่างกัน (W_o และ W'_o) แต่ specific activity เท่ากัน จากนั้นนำไปแยกให้ได้สารบริสุทธิ์จำนวนหนึ่ง วัดปริมาณและกัมมันตภาพของสารที่แยกออกมาได้ ก็จะสามารถหาปริมาณของสารตัวอย่าง (W_x) และกัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีได้

หรือในกรณีที่สารตัวอย่างที่ต้องการหาเป็นธาตุกัมมันตรังสี และไม่ทราบ specific activity เราสามารถหาได้ทั้งปริมาณธาตุและค่า specific activity ด้วยการทำเช่นเดียวกัน เพียงแต่เติมสารที่เป็น inactive หรือสารที่เสถียรลงไป หลักในการคำนวณก็เช่นเดียวกัน ดังแสดงในแผนภาพ



$$\therefore S_1 = \frac{a_0}{W_x + W_0} = \frac{a_1}{W_1}$$

$$S_1' = \frac{a_0'}{W_x + W_0'} = \frac{a_1'}{W_1'}$$

$$S_0 = \frac{a_0}{W_0}$$

$$S_0' = S_0 = \frac{a_0'}{W_0'}$$

$$W_x = W_0 \left[\frac{a_0}{W_0} \cdot \frac{W_1}{a_1} - 1 \right] \quad \text{-----(11.71)}$$

$$= W_0 \left[\frac{S_0}{S_1} - 1 \right] \quad \text{-----(11.72)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$W_x = W_0' \left[\frac{a_0'}{W_0'} \cdot \frac{W_1'}{a_1'} - 1 \right] \quad \text{-----(11.73)}$$

$$= W_0' \left[\frac{S_0'}{S_1'} - 1 \right] \quad \text{-----(11.74)}$$

จากสมการ 11.72 และ 11.74 สามารถคำนวณหา W_x และ S_0 ได้

ถ้าทำ W_1 และ W_1' ให้เท่ากัน

$$W_x = \frac{W_0 W_0' [a_1' - a_1]}{a_1 W_0' - a_1' W_0} \quad \text{-----(11.75)}$$

ในการทำให้ W_1 และ W_1' เท่ากันนั้น ใช้หลักเกณฑ์ที่เรียกว่า Saturation Analysis ดังนั้น เราไม่จำเป็นต้องทราบค่า W_1 และ S_0

$$\therefore W_x = W_0 \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

$$S_0 = \frac{a_0}{W_0}$$

$$S_1 = \frac{a_1}{W_1}$$

$$\therefore \frac{S_0}{S_1} = \frac{a_0}{W_0} \cdot \frac{W_1}{a_1}$$

$$\text{แต่ } W_1 = W_0$$

$$\therefore W_x = W_0 \left(\frac{a_0}{a_1} - 1 \right) \quad \text{-----}(11.76)$$

ข้อดีของวิธีนี้ คือ

1. เพียงแต่วัดกัมมันตภาพเท่านั้น
2. W_1 ไม่จำเป็นต้องทราบ
3. สามารถนำไปใช้หาปริมาณของธาตุที่มีน้อย ๆ ได้
4. วิธีการนี้สามารถนำ IDA ไปใช้ได้โดยการแยกสารออกมาส่วนหนึ่ง ไม่จำเป็นต้อง quantitative

11.17 Substoichiometric IDA

เทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1964 โดยได้นำมาใช้ทั้งในการวิเคราะห์ทาง NAA และ IDA คือ Ruzicka และ Sary จากการใช้หลัก IDA ธรรมดา คือ

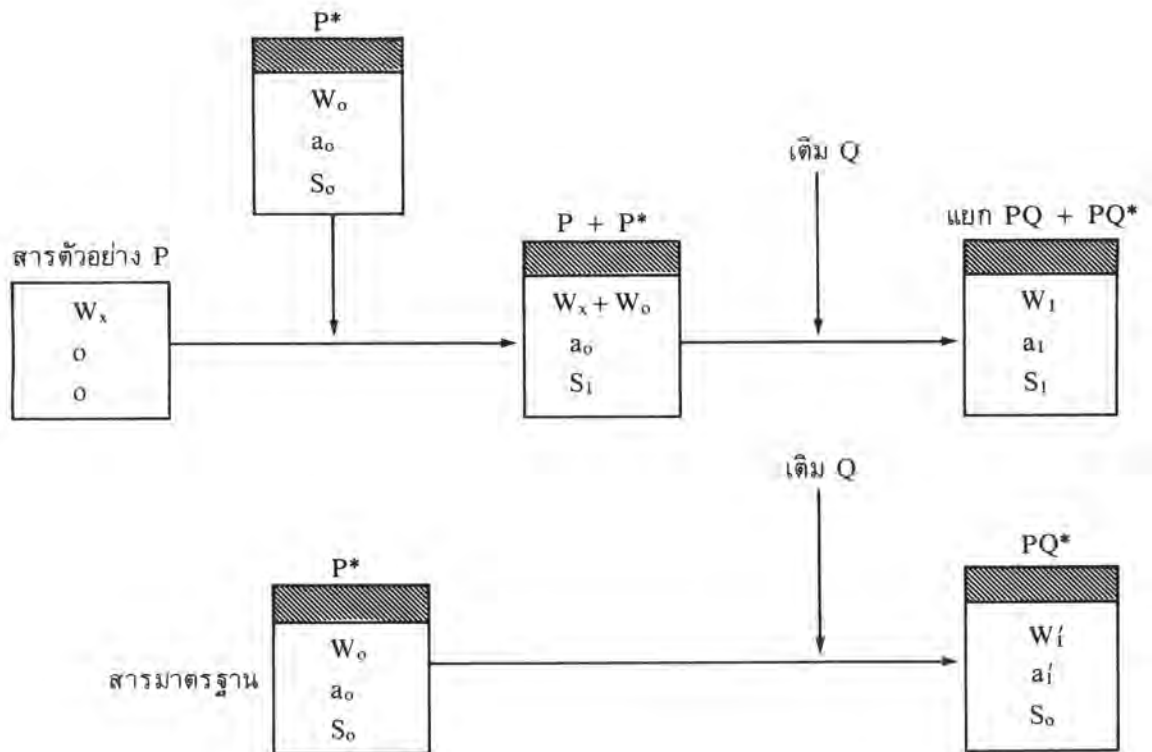
$$W_x = W_0 \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

$$S_0 = \frac{a_0}{W_0}$$

$$S_1 = \frac{a_1}{W_1}$$

สำหรับ substoichiometric IDA นั้นเราจะทำให้ $W_0 = W_1$ เพื่อจะได้ไม่ต้องนำมาคิดโดยใช้วิธีสกัดหลังจากเติม chelating agent ลงไปเป็นจำนวนจำกัด เมื่อนำไปสกัดด้วยสารละลายเท่ากันจะแยกสารนั้นออกมาหมด และได้ปริมาณเท่ากัน ดังนั้น เราจึงแต่เพียงวัดกัมมันตภาพรังสีเท่านั้น แล้วคำนวณหา W_x ได้จาก

$$W_x = W_0 \left(\frac{a_0}{a_1} - 1 \right) \quad \text{-----}(11.77)$$



ในที่นี้ $W_i = W'_i$

$$W_x = W_o \left[\frac{a'_i}{a_i} - 1 \right]$$

ข้อควรระวัง

1. ในการแยกสารด้วยการสกัดนั้นจะต้องเช็คเกี่ยวกับ reproducibility ให้ดี
2. ความเข้มข้น, pH ของสารละลายที่ใช้แยกจะต้องเลือกให้ถูกต้อง
3. ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ใช้ควรเป็น carrier free และมี specific activity สูง

ข้อดีของ Substoichiometric IDA

1. การแยกธาตุที่ต้องการออกจากพวกธาตุที่รบกวนสามารถใช้ได้โดยไม่ต้อง quantitative
2. อุปกรณ์และเครื่องใช้ต่าง ๆ สามารถหาได้ง่าย และราคาถูก
3. ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ใช้ก็ต้องการเพียงเล็กน้อย
4. เป็นวิธีที่ให้ sensitivity สูง
5. ใช้หาปริมาณของธาตุที่ยากแก่การหาปริมาณด้วยวิธีธรรมดา
6. สามารถทำได้รวดเร็ว

บรรณานุกรม

1. Bernard G. Harvey, "Introduction to Nuclear Physics and Chemistry" 2nd Edition. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
2. G. Friedlander, J.W. Kennedy and J.M. Miller, "Nuclear and Radio-Chemistry" 3rd Edition. Wiley, N.Y., 1976.
3. J. Kohl, R.D. Zentner and H.R. Lukens, "Radioisotope Applications Engineering", D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, 1961.
4. ศลักษณ์ ทรรพนันทน์, "เคมี นิวเคลียร์" สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
5. D.A. Skoog, "Principles of Instrumental Analysis", 3rd Edition. Saunders College Publishing Japan, 1985.
6. G.D. Christian and J.E. O'Reilly, "Instrumental Analysis" 2nd Edition. Allyn and Bacon, Inc. Boston, 1986.
7. R.D. Braun, "Introduction to Instrumental Analysis" Mc Graw-Hill Book Co., N.Y., 1987.
8. G.H. Morrison, "Trace Analysis" Interscience Publishers. John Wiley and Sons. N.Y. 1967.
9. R.C. Koch, "Activation Analysis Handbook" Academic Press. N.Y., 1960.
10. H.J.M. Bowen and D. Gibbons, "Radioactivation Analysis" Oxford University Press, 1963.
11. C.E. Crouthamel, "Applied Gamma Ray Spectroscopy" Pergamon Press, Oxford, 1960.
12. Laboratory Manual for Nuclear Science. 4th Edition. Canberra. Industries, Inc. Connecticut USA.