บทที่ 2

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคนิวตรอน

อะตอมและนิวตรอน

ภายในอะตอมของธาตุ ประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ คือ อิเล็กตรอนชั้นนอกและนิวเคลียส อนุภาคอิเล็กตรอน เป็นอนุภาคซึ่งมีประจุลบ มีประจุเท่ากับ 1.16×10^{16} คูลอมบ์ และมีมวลเท่ากับ 9.10908×10^{-31} กิโลกรัม อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส จำนวนอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมเท่ากับจำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียส และเท่ากับเลขอะตอมของธาตุนั้น ๆ (atomic number ; Z) ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน มีการจัดเรียงตัวเป็นวงชั้นพลังงาน (shell) และจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ภายในแต่ละวง น้อยกว่าหรือเท่ากับ $2n^2$ เมื่อ n คือ ควอนตัมที่มีค่าประจำสำหรับวงชั้นพลังงานแต่ละชั้น โดยวงชั้นในสุดหรือ K-shell มีเลขควอนตัม 1 วงชั้นถัดไปเรียกว่า L, M, N, O และ P-shell ตามลำดับ

ถัดจากวงชั้นอิเล็กตรอนในสุดเข้าไป เป็นส่วนที่เรียกว่านิวเคลียส นิวเคลียสของแต่ละอะตอมจะอยู่กึ่งกลางภายในอะตอมนั้น ๆ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-13} เซนติเมตร ภายในนิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ อีก 2 ชนิด (หรือมากกว่านั้น) คือ โปรตอนและนิวตรอน โปรตอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นบวก มีประจุเท่ากับ 1.16×10^{16} คูลอมบ์ และมีมวล 1.67252×10^{-27} กิโลกรัมหรือเท่ากับ 1.007276 u (atomic mass unit) นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ แต่มีมวลเท่ากับ 1.66×10^{-27} กิโลกรัมหรือเท่ากับ 1.008665 u (ดังตารางที่ 2.1) โปรตอนและนิวตรอนอยู่รวมกับภายในนิวเคลียสโดยมีแรงนิวเคลียร์ (nuclear force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวซึ่งมีค่ามาก ตามปกตินิวเคลียสจะอยู่ในสภาวะเสถียร แต่ถ้ามีสิ่งรบกวนในนิวเคลียส ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับนิวตรอนและโปรตอน นิวเคลียสจะปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งมีระดับสูงมาก อยู่ในช่วงมากกว่าล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) เรียกว่า "พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear energy)"

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบมวลและประจุของอนุภาคอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน

อนุภาค	มวล (u)	ประจุ (Coulomb)
อิเล็กตรอน	0.000549	-1.16×10^{16}
โปรตอน	1.007276	$+1.16 \times 10^{16}$
นิวตรอน	1.008665	-

คุณสมบัติบางประการของนิวตรอน

คุณสมบัติของนิวตรอนที่จะกล่าวถึงในที่นี้ เป็นคุณสมบัติของนิวตรอนอิสระ ซึ่งนิวตรอนอิสระจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากนิวตรอนในอะตอม

1. ประจุ นิวตรอนมีประจุเป็นกลาง ด้วยเหตุนี้นิวตรอนจึงสามารถวิ่งผ่านไปในอากาศได้หลายเมตรโดยไม่ทำให้เกิดไอออนแพร์ (ion pair) รวมทั้งสามารถวิ่งผ่านในก้อนวัตถุได้เป็นระยะทางไกลกว่าอนุภาคที่มีประจุอื่น ๆ เนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมบ์ขัดขวางระหว่างการเดินทาง

2. มวล มวลของนิวตรอนมีค่าใกล้เคียงกับมวลของโปรตอน ดังนี้

$$m\left({}_0n^1\right) = 1.008665 \text{ u}$$

และ

$$m\left({}_1H^1\right) = 1.007825 \text{ u}$$

3. สปินและโมเมนต์แม่เหล็ก (spin and magnetic moment) นิวตรอนมีสปินหรือโมเมนต์เชิงมุม 1/2 $\bar{h}$ และมีโมเมนต์แม่เหล็ก -1.9135 นิวเคลียร์แมกเนตอน (nuclear magneton)

4. คลื่นและคุณสมบัติโพราไรเซชัน นิวตรอนแสดงคุณสมบัติความเป็นคลื่นเช่นเดียวกับอนุภาคเบาอื่น ๆ โดยมีความยาวคลื่นสัมพันธ์กับความเร็ว ดังสมการ

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad (1)$$

โดย λ : ความยาวคลื่น

h : ค่าคงที่ของแพลงค์ (6.62559×10^{-34} Js)

m : มวลของนิวตรอน (1.008665 u)

v : ความเร็วของนิวตรอน

คุณสมบัติความเป็นคลื่นของนิวตรอนแสดงให้เห็นจาก ปรากฏการณ์การหักเหของนิวตรอน (neutron diffraction) และคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของนิวตรอนก็คือ โพราไรเซชัน (poralization) เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กที่แรง (strong magnetized ion) แล้วจะเกิดโพราไรเซชันขึ้น เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุแต่มีโมเมนต์แม่เหล็ก

5. การปลดปล่อยกัมมันตรังสีของนิวตรอนอิสระ (Radioactive decay of free neutron) เมื่อเปรียบเทียบมวลของโปรตอนและนิวตรอน พบว่ามวลของนิวตรอนมีค่ามากกว่าโปรตอนเล็กน้อย และเมื่อให้นิวตรอนมีพลังงานสูงถึงระดับหนึ่ง นิวตรอนก็จะแตกตัวให้โปรตอนและอิเล็กตรอน รวมทั้งแอนตินิวตริโนออกมาด้วย (antineutrino) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลของนิวตรอนที่เกินมานั้น เป็นของอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน ซึ่งสมการการปลดปล่อยเป็นไปดังสมการ

$$ {}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}\beta^0 + {}_0\vartheta^0 + 0.782 \ \text{MeV} $$

ค่าครึ่งชีวิตของนิวตรอนอิสระที่ปลดปล่อยกัมมันตรังสีประมาณ 12 นาที

<u>พลังงานของนิวตรอน</u> (Curtiss, 1969; Das et al., 1989)

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งออกตามระดับพลังงานได้ดังนี้

1. นิวตรอนช้า (Siow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0-1 keV แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ๆ ดังนี้

1.1 เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.01-0.3 eV ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง พลังงานที่พบมากที่สุด ของนิวตรอน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียล คือ 0.0253 eV การกระจายของพลังงานชนิดนี้จะเป็นไปตามการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) ดังนี้

$$ N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi kT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} \qquad (2) $$

เมื่อ N(E) : จำนวนนิวตรอนที่พลังงานใด ๆ ต่อหน่วยปริมาตร

N : จำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

k : ค่า Boltzman's constant = 8.617 x 10^{-5}eV/K

T : อุณหภูมิของตัวกลาง เป็นเคลวิน (K)

1.2 อิพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.05 - 1.0 eV

1.3 รีโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1.0 - 1000 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดจะมีการจับนิวตรอนที่อยู่ในช่วงพลังงานนี้ได้ดี ซึ่งเรียกว่ามี "resonance absorption"

2. อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 MeV.

3. นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 KeV ขึ้นไป

<u>ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน</u>

นิวตรอนที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ผลิตขึ้นมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งแตกต่างกันตามความเหมาะสมของความเข้ม และพลังงานของนิวตรอนที่ต้องการ ปฏิกิริยาและวิธีผลิตนิวตรอน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (α,n) นิวตรอนถูกผลิตขึ้นโดยการยิงอนุภาคแอลฟาไปที่เป้าซึ่งเป็นธาตุเบา และปลดปล่อยนิวตรอนออกมา ต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาที่นิยมใช้ได้แก่ เรเดียม (Ra) พลูโตเนียม (Pu) หรืออะเมริเซียม (Am) ส่วนธาตุเบาที่นิยมใช้ได้แก่ ลิเธียม (Li) ฟลูออรีน (F) โบรอน (B) และเบริลเลียม (Be) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (α,n) ของเบริลเลียม จะได้นิวตรอนผลิตออกมาจากปฏิกิริยาดังนี้

$$_2He^4 + _4Be^9 \rightarrow _6C^{12} + _0n^1$$

2. นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตดิสอินติเกรชัน (Photodisintegration Reaction) ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอน ได้แก่ ${}_4Be^9$ (γ,n) ${}_4Be^8$ และ ${}_1H^2$ (γ,n) ${}_1H^1$ พลังงานเทรชโฮล์ด (threshold energy) ของปฏิกิริยาทั้งสอง คือ 1.67 MeV และ 2.23 MeV ตามลำดับ ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่สำคัญ ได้แก่ ^{124}Sb-Be นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้เป็นนิวตรอนพลังงานเดี่ยว (monoenergetic) มากกว่านิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา (α,n)

3. นิวตรอนที่เกิดจากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) โดยการเร่งอนุภาคที่มีประจุเข้าไปชนเป้าซึ่งเป็นธาตุเบา วิธีนี้ใช้เพื่อผลิตนิวตรอนพลังงานเดี่ยว ตัวอย่างสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$ {}_1H^2 + d \rightarrow {}_2He^3 + n + 3.28 \text{ MeV} $$
$$ {}_1H^3 + d \rightarrow {}_2He^4 + n + 17.6 \text{ MeV} $$
$$ {}_4Be^9 + d \rightarrow {}_5B^{10} + n + 4.35 \text{ MeV} $$
$$ {}_1H^3 + p \rightarrow {}_2He^3 + n - 0.764 \text{ MeV} $$
$$ {}_3Li^7 + d \rightarrow {}_4Be^7 + n - 1.65 \text{ MeV} $$
$$ {}_6C^{12} + d \rightarrow {}_7N^{13} + n - 0.26 \text{ MeV} $$

สองปฏิกิริยาแรกรู้จักกันดีในชื่อ ปฏิกิริยา DD (DD reaction) และปฏิกิริยา DT (DT reaction) ซึ่งใช้ผลิตนิวตรอนเร็วที่มีพลังงาน 2.5 และ 14 MeV ตามลำดับ

4. นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาสตริพปิง (Stripping Reactions) ผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ (หลายร้อย MeV) จากการสตริพปิงดิวเทอรอน (${}_1H^3$) โดยที่ภายในดิวเทอรอนหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยนิวตรอนและโปรตอน ซึ่งยึดกันอยู่ด้วยพลังงานประมาณ 2.2 MeV ถ้าดิวเทอรอนถูกทำให้มีพลังงานสูงมาก ๆ และวิ่งเข้าชนเป้า ดิวเทอรอนจะแตกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนมีพลังงานเท่ากับครึ่งหนึ่งของดิวเทอรอน โดยนิวตรอนจะมีทิศทางไปข้างหน้า ส่วนโปรตอนก็จะถูกจับโดยนิวเคลียสของเป้า

5. นิวตรอนที่เกิดจากโปรตอนพลังงานสูง (High energy protons) ผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ โดยให้โปรตอนที่มีพลังงานสูงมาก ๆ วิ่งเข้าชนนิวตรอนเดี่ยวของนิวเคลียสของ

เป้า นิวตรอนซึ่งมีพลังงานไม่สูงนักจะรับพลังงานจากโปรตอนเกือบทั้งหมด และวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยวิธีนี้อาจได้นิวตรอนพลังงานสูงถึง 2 ถึง 3 MeV

6. นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิสชัน (fission reaction) ที่สำคัญได้แก่ นิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear fission reactors) นิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถูกผลิตขึ้นโดยขบวนการฟิสชัน นิวเคลียสของธาตุที่สามารถเกิดฟิสชันได้ (fissionable nucleus) จับนิวตรอนหนึ่งตัว จากนั้นนิวเคลียสแตกเป็น 2 ส่วน พร้อมกับให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว นิวตรอนที่ถูกผลิตออกมานี้ ก็จะทำให้เกิดฟิสชันต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) พลังงานของนิวตรอนที่ออกมามีค่าตั้งแต่เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ถึง 18 MeV ค่าพลังงานโดยเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 2 MeV ข้อดีของการผลิตนิวตรอนโดยวิธีนี้ คือ สามารถผลิตทั้งนิวตรอนพลังงานต่ำและพลังงานสูง ได้ในปริมาณ ฟลักซ์ที่สูงประมาณ 10^{14} n/cm^2-sec ซึ่งสูงกว่าการผลิตโดยวิธีอื่น ๆ ทั้งสิ้น

นอกจากนี้ยังมีไอโซโทปบางชนิด ที่แตกตัวเกิดปฏิกิริยาฟิสชันได้เอง (self fission) โดยแบ่งตัวเองออกเป็นสองส่วน แล้วให้นิวตรอนออกมาด้วย ที่สำคัญได้แก่ แคลิฟอร์เนียม-252 (Cf-252)

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (isotopic neutron source) สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (α-emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (α,n) โดยการผสมธาตุกัมมันตรังสีหนัก ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น ^{226}Ra, ^{238}Pu, ^{241}Am กับธาตุเป้าซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคนิวตรอนต่ำหรือธาตุเบา เช่น ^{9}Be, ^{10}B และ ^{2}D (deuterium) เป็นต้น โดยมากจะใช้เบริลเลียม (Be) เป็นธาตุเป้า เนื่องจากให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงสุดถึง 80 นิวตรอน ต่อจำนวนอัลฟาที่วิ่งเข้าไป 1 ล้านตัว จากปฏิกิริยา (α,n) อนุภาคนิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 Mev และมีความเข้มนิวตรอน อยู่ในช่วง 10^5 - 10^7 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี คุณสมบัติของไอโซโทปชนิดต่าง ๆ ที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เพื่อทำเป็นต้นกำเนิดนิวตรอน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา ชนิดใช้ Be เป็นธาตุเป้า (Ehmann, 1991)

Nuclide	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของอัลฟา (MeV)	ความเข้มของนิวตรอน ($n\ s^{-1}Ci^{-1}$)	พลังงานของนิวตรอน (Mev)
^{238}Pu	89 yr	5.50	2.8×10^6	4.0
^{239}Pu	24.36 yr	5.14	1.6×10^6	4.59
^{210}Po	138 d	5.30	2.5×10^6	4.54
^{241}Am	458 yr	5.48	2.2×10^6	4.46
^{244}Cm	18.1 yr	5.79	3×10^6	4.31
^{242}Cm	163 d	6.10	4×10^4	4.16
^{226}Ra	1620 yr	7.69	1.1×10^7	3.94
^{277}Ac	22 yr	7.36	1.5×10^7	3.87

2. ไอโซโทปชนิดสลายตัวให้อนุภาคแกมมา (γ-emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (γ,n) โดยการผสมธาตุกัมมันตรังสีหนักซึ่งสลายตัวให้โฟตอน หรือรังสีแกมมา เช่น ^{124}Sb, ^{88}Y เป็นต้น กับเป้าธาตุเบา เช่น ^{9}Be เป็นต้น แต่ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปชนิดนี้มีใช้ทั่วไปเพียงแบบเดียวคือ ^{124}Sb- Be ซึ่ง ^{124}Sb สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.691 MeV (49%) และ 2.091 MeV (6%) ทำให้เกิดนิวตรอนที่มีพลังงาน 24 kV (ซึ่งต่ำกว่าชนิดสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา) และเมื่อใช้ไอโซโทป ^{124}Sb ที่มีกัมมันตภาพรังสีแกมมา 1 คูรี สามารถผลิตนิวตรอนด้วยอัตราประมาณ $3x10^6$ นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี (ดังตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบสลายตัวให้อนุภาคแกมมา (Ehmann, 1991)

ต้นกำเนิด	ค่าครึ่งชีวิต	พลังงานของนิวตรอน (Mev)	ความเข้มของนิวตรอน ($ns^{-1}Ci^{-1}$)
^{88}Y-^{9}Be	106.6 days	0.16	$1x10^5$
^{124}Sb-^{9}Be	60.2 days	0.02	$3x10^6$

3. ไอโซโทปชนิดมีการแตกตัวเองของนิวเคลียส (self fission หรือ spontaneous fission) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกของนิวเคลียส พร้อมทั้งให้นิวตรอนออกมาด้วย ตัวอย่างเช่น ^{252}Cf ให้นิวตรอนโดยเฉลี่ย 3.75 ตัวต่อการแตกตัวของนิวเคลียส 1 ครั้ง และมีความเข้มนิวตรอนที่ออกมาประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม นิวตรอนที่ได้มีพลังงานโดยเฉลี่ย 2.14 Mev ข้อได้เปรียบคือ ต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf มีขนาดเล็ก ให้จำนวนฟลักซ์ของนิวตรอนสูง มีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดอื่น แต่อายุการใช้งานสั้นเนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตเพียง 2.646 ปี ในการใช้งานจะต้องเปลี่ยนต้นกำเนิดเมื่อความแรงรังสีอ่อนลง ดังนั้นในการลงทุนเพื่อที่จะนำมาใช้งานจึงต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจด้วย

<u>อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร</u>

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุใด ๆ อาจเกิดอันตรกิกริยาได้หลายแบบ ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยา (n,n') เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียส แล้วถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับนิวเคลียส โดยไม่ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น (exited state) นิวตรอนจะกระเจิงออกมาโดยมีพลังงานลดลง ปฏิกิริยานี้เรียกว่า "ปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)" ซึ่งมีความสำคัญในการหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็ว สมการของปฏิกิริยา คือ

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} $$

2. ปฏิกิริยา (n,n') เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนแล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสนั้นอยู่ในสภาวะกระตุ้น และกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) โดยการให้รังสีแกมมาออกมา ปฏิกิริยานี้เรียกว่า "ปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)" ของนิวตรอน สมการของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}X^{A(m)} + {}_{0}n'^{1} $$

ตัวอย่างเช่น

อะลูมิเนียม :

$$ {}_0n^1 + Al \rightarrow {}_0n^1 + Al^{(m)} $$
$$ Al^{(m)} \rightarrow Al + \gamma \ \text{(1.014 MeV)} $$

ซิลิกอน :

$$ {}_0n^1 + Si \rightarrow {}_0n^1 + Si^{(m)} $$
$$ Si^{(m)} \rightarrow Si + \gamma \ \text{(1.779 MeV)} $$

เหล็ก :

$$ {}_0n^1 + Fe \rightarrow {}_0n^1 + Fe^{(m)} $$
$$ Fe^{(m)} \rightarrow Fe + \gamma \ \text{(0.847 MeV)} $$

3. ปฏิกิริยา (n,2n) ปฏิกิริยานี้จะให้นิวตรอนเพิ่มออกมาอีก 1 ตัว เนื่องจากนิวตรอนที่เข้าชนมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้ นิวตรอนในนิวเคลียสที่ถูกชนหลุดออกมาได้ ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม สมการของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ

$$ {}_ZX^A + {}_0n^1 \rightarrow {}_ZX^{A+1} + 2\left({}_0n^1\right) $$

4. ปฏิกิริยา (n,p) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียส แล้วถูกจับหายไปในนิวเคลียส พร้อมทั้งให้อนุภาคโปรตอนออกมา จะได้ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ สมการของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ

$$ {}_ZX^A + {}_0n^1 \rightarrow {}_{Z-1}Y^A + {}_1H^1 $$

ตัวอย่างเช่น

$$ {}_{13}Al^{27} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{12}Mg^{27} + {}_1H^1 $$

เขียนย่อว่า $^{27}Al(n,p)^{27}Mg$

$$ {}_{26}Fe^{58} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{25}Mg^{58} + {}_1H^1 $$

เขียนย่อว่า $^{58}Fe(n,p)^{58}Mn$

5. ปฏิกิริยา (n, α) คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในข้อ 3. แตกต่างกันที่ให้อนุภาคแอลฟาออกมา สมการของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-3} + {}_{2}He^{4}$$

ตัวอย่างเช่น

$$_{3}Li^{6} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{1}H^{3} + {}_{2}He^{4}$$

เขียนย่อว่า $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$

6. ปฏิกิริยา (n, γ) จากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด จะเกิดขึ้นเมื่อ นิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนนิวเคลียส แต่สำหรับนิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์มัลนิวตรอนนั้น เมื่อเข้าชนจะรวมกับนิวเคลียส พร้อมทั้งให้รังสีแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่า ไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นของธาตุเดิม มีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และส่วนใหญ่จะเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี ปฏิกิริยานี้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันมากที่สุด สมการของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}X^{A+1} + \gamma$$

เมื่อ $_{Z}X^{A}$: ไอโซโทปกัมมันตรังสีเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และ
มีเลขมวล A

$_{0}n^{1}$: อนุภาคนิวตรอน

$_{Z}X^{A(m)}$, $_{Z}X^{A+1}$, $_{Z}X^{A-1}$, $_{Z-1}Y^{A}$, $_{Z-2}Y^{A-3}$: ไอโซโทปกัมมันตรังสี
ของธาตุเดิม (X) และธาตุใหม่ (Y) ซึ่ง m แสดงว่าเป็น metastable state

$_{1}H^{1}$, $_{2}He^{4}$ และ γ : อนุภาคโปรตอน, อนุภาคอัลฟา และรังสีแกมมา

ตัวอย่างเช่น

$$_{17}Cl^{37} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{17}Cl^{38} + \gamma$$

$$_{58}Ce^{140} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{58}Ce^{141} + \gamma$$

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (Prompt gamma ray from inelastic scattering neutron)

ปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน เกิดขึ้นโดยนิวตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนนิวเคลียสแบบไม่ยืดหยุ่น และนิวตรอนเปลี่ยนทิศทางไปเป็นมุม θ ระหว่างการชนนิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) และปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาทันที (prompt gamma ray) เพื่อกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นิวเคลียสอาจยกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นระดับ 2 (2^{nd} excited state) ระดับ 3 (3^{rd} excited state) หรือระดับสูงขึ้นไปได้ถ้านิวตรอนมีพลังงานสูงพอ ตัวอย่างรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ได้แก่

- คาร์บอน-12 (C-12) มีสภาวะถูกกระตุ้นระดับ 1 (1^{st} excited state) เท่ากับ 4.43 MeV
- ซิลิกอน มีสภาวะถูกกระตุ้นระดับ 1 เท่ากับ 1.786 MeV
- เหล็ก มีสภาวะถูกกระตุ้นระดับ 1 เท่ากับ 0.847 MeV

ตัวอย่างรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ของธาตุซิลิกอนและเหล็ก (Sowerby, 1979)

Element	γ-ray energy (MeV)	I_γ*
Si	1.779	927
	1.273	65
	2.838	33
	2.028	14
	2.426	<6
Fe	0.847	1709
	1.238	259
	1.811	133
	1.038	66
	1.408	57
	2.113	64

* อัตราการนับรังสีพรอมต์แกมมา (หน่วย 10^{-3} cps / wt%)

ธาตุที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และจะเห็นได้ว่าเทคนิคการวิเคราะห์นี้ ผลผลิตของปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องเป็นไอโซโทปรังสี

ตารางที่ 2.5 ธาตุชนิดที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (Yates, 1978)

Element	γ-ray energy (keV)	Detection limit (g)*	Element	γ-ray energy (keV)	Detection limit (g)*
Na	440	0.18	Y	1745	0.65
Mg	1369	0.76	Zr	934	1.48
Al	1014	0.62	Nb	950	1.87
Si	1780	0.64	Mo	787	1.98
P	1270	0.48	Pd	434	0.84
S	2240	2.43	Ag	325	2.50
Cl	1763	0.93	Cd	556	2.13
Ti	983	0.27	Sn	1230	1.45
V	320	0.30	Sb	160	4.99
Cr	1434	0.60	Te	839	0.88
Mn	858	1.57	I	203	0.67
Fe	847	0.43	Ba	1436	1.09
Co	1192	1.19	La	166	1.15
Ni	1454	0.95	Ta	482	4.35
Cu	962	1.28	W	738	5.69
Zn	992	0.85	Pt	328	3.68
As	279	0.80	Hg	439	1.90
Se	666	0.68	Pb	803	4.51
Sr	1837	0.61	Bi	896	3.13

* ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ เมื่อใช้นิวตรอนพลังงาน 2.5 MeV

<u>การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน</u>
(Neutron captured prompt-gamma ray)

เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน เป็นการวัดรังสีพรอมต์แกมมาที่ปลดปล่อยออกมา ในขณะที่มีการอาบรังสีนิวตรอน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอน กับนิวเคลียสของธาตุที่วิเคราะห์ นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นมีเลขมวลเพิ่มขึ้นจากเดิม 1 โดยมวลของนิวเคลียสใหม่นี้น้อยกว่า มวลของนิวเคลียสเดิมบวกกับมวลของนิวตรอนเสมอ ซึ่งส่วนที่หายไปนี้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานของนิวไคลด์ และเมื่อเป็นพลังงานของนิวไคลด์ที่เพิ่มขึ้น จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ปฏิกิริยานี้จึงเป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน (exothermic reaction) ซึ่งทำให้เกิดรังสีแกมมาออกมาจากปฏิกิริยาทันที ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ คือน้อยกว่า 10^{-14} วินาที เรียกรังสีแกมมานี้ว่า "รังสีพรอมต์แกมมา (prompt gamma ray)" และไม่จำเป็นว่าผลผลิตของปฏิกิริยาจะเป็นไอโซโทปรังสีหรือไม่ ธาตุบางชนิดที่มีความไวสูงต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตัวอย่างเช่น

- ไฮโดรเจน-1 (H-1) เมื่อเกิดปฏิกิริยา $^{1}H(n,\gamma)^{2}H$ ได้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 2.223 MeV ออกมา ซึ่ง ^{2}H เป็นไอโซโทปที่เสถียรของไฮโดรเจน
- ไนโตรเจน-14 (N-14) ได้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 10.828 และ 6.321 MeV ออกมา
- แคลเซียม-40 (Ca-40) ได้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 6.42, 4.42 และ 1.94 MeV ออกมา
- เหล็ก-56 (Fe-56) ได้รังสีพรอมต์แกมมาพลังงาน 9.298, 7.646 และ 7.632 MeV ออกมา

พิพิธภัณฑ์ สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 ธาตุชนิดที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (Duffey, 1969)

Element	Cross section, σ (barns)	Atomic mass (A)	Energy (MeV)	Intensity (photons/100 neutrons)	Sensitivity ($I\sigma$/A)
B	752	10.811	0.478	47	3269
Na	0.534	2.989	6.395	25.69	0.592
			5.617	5.99	0.139
			3.982	21.58	0.501
			3.879	6.23	0.148
			3.588	17.31	0.402
			3.371	4.03	0.0936
			3.098	9.67	0.225
			3.062	4.01	0.0931
Al	0.235	26.981	7.724	20.10	0.175
			7.694	4.17	0.0363
			4.734	3.49	0.0304
			4.260	4.07	0.0354
			4.134	4.26	0.0371
			3.466	4.30	0.0374
			3.034	5.82	0.0507
Cl	33.2	35.45	7.790	6.63	6.22
			7.414	8.52	7.99
			6.620	10.00	9.38
			6.111	15.78	14.8
			5.715	4.62	4.33
			4.980	3.82	3.58
			3.062	3.73	3.50

Element	Cross section, σ (barns)	Atomic mass (A)	Energy (MeV)	Intensity (photons/100 neutrons)	Sensitivity ($I\sigma/A$)
Ca	0.430	40.08	6.420	28.09	0.301
			5.901	3.07	0.0329
			5.515	1.74	0.0187
			4.750	1.98	0.0212
			4.419	10.79	0.116
			3.760	1.90	0.0204
			3.610	4.58	0.0491
			3.586	1.65	0.0177
			1.94	72.5	0.7778
Fe	2.62	55.847	9.298	3.85	0.181
			7.646	22.14	1.04
			7.632	27.19	1.27
			7.279	4.60	0.216
			6.018	8.08	0.379
			5.921	8.29	0.389
Ag	63.0	107.87	6.056	1.16	0.677
			5.793	1.04	0.607
			5.700	1.56	0.911
Gd	39100	157.25	0.750	1.32	3.28
Au	99.6	196.97	6.457	2.24	1.13
			6.319	3.47	1.75
			6.252	5.42	2.74
Pb	0.170	207.19	7.368	94.77	0.0777

การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation technique)

การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน อาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ปฏิกิริยา (n,γ) ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน มีข้อดีคือ ทำได้สะดวกและมีความไวสูงกับธาตุหลายธาตุ ดังแสดงไว้ในตาราง 2.7

ตารางที่ 2.7 ธาตุชนิดที่มีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (แม้น, 1992)

Element	Atomic number	Isotopes	Abundance (%)	Reaction	Half-life of reaction produce	Estimated detection limits (μg)
Al	13	^{27}Al	100	$^{27}Al(n,\gamma)^{28}Al$	2.31 min	0.02
As	33	^{75}As	100	$^{75}As(n,\gamma)^{76}As$	26.8 hr	0.002
Cd	48	^{114}Cd	28.93	$^{114}Cd(n,\gamma)^{115}Cd$	43 d, 2.2 d	0.05
		^{116}Cd	7.61	$^{116}Cd(n,\gamma)^{117}Cd$	3.0 hr	0.1
Ca	20	^{44}Ca	2.06	$^{44}Ca(n,\gamma)^{45}Ca$	161.4 d	7
		^{48}Ca	0.185	$^{48}Ca(n,\gamma)^{49}Ca$	8.75 min	3
Cl	17	^{37}Cl	24.47	$^{37}Cl(n,\gamma)^{38}Cl$	37.12 min	0.04
Cu	29	^{63}Cu	69.09	$^{63}Cu(n,\gamma)^{64}Cu$	12.88 hr	0.003
Au	79	^{197}Au	100	$^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$	2.7 d	0.0003
I	53	^{127}I	100	$^{127}I(n,\gamma)^{128}I$	25 min	0.003
Fe	26	^{58}Fe	0.31	$^{58}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$	46.5 d	10
Ni	28	^{58}Ni	67.88	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	9.2hr,71.3d	-
		^{60}Ni	26.23	$^{60}Ni(n,p)^{60}Co$	5.26 yr	-
		^{64}Ni	1.08	$^{64}Ni(n,\gamma)^{65}Ni$	2.553 hr	0.4
P	15	^{31}P	100	$^{31}P(n,\gamma)^{32}P$	14.5 d	0.04
Hg	80	^{196}Hg	0.146	$^{196}Hg(n,\gamma)^{197}Hg$	24 hr, 2.7d	0.006
		^{202}Hg	29.80	$^{202}Hg(n,\gamma)^{203}Hg$	46.9 d	0.02
		^{204}Hg	6.85	$^{204}Hg(n,\gamma)^{205}Hg$	5.1 min	0.9
Si	14	^{30}Si	3.09	$^{30}Si(n,\gamma)^{31}Si$	2.64 hr	0.1
Ag	47	^{107}Ag	51.35	$^{107}Ag(n,\gamma)^{108}Ag$	2.42 min	0.0001
		^{109}Ag	48.65	$^{109}Ag(n,\gamma)^{110}Ag$	253d.24.5s	0.3

การคำนวณในเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน สามารถทำได้โดยง่ายดังนี้

เมื่อธาตุถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน จะมีบางของอะตอมของธาตุนั้นเกิดเป็นสารกัมมันตรังสีขึ้น อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสี ขึ้นอยู่กับปริมาณของนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา (neutron cross-section) ของธาตุที่นำเข้าอาบรังสีจำนวนของธาตุที่ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน รวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติดังสมการ

$$P = N\sigma\phi \qquad (3)$$

เมื่อ P : อัตราการเกิดของไอโซโทปรังสี

N : จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่นำเข้าอาบรังสี

σ : ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ มีหน่วยเป็น barn (10^{-24} cm^2)

ϕ : ความเข้มของนิวตรอน มีหน่วยเป็น neutron/cm^2 /sec

ถ้าอัตราการเกิดของไอโซโทปรังสีมีค่าคงที่ อัตราการเพิ่มของสารกัมมันตรังสี จะเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราการเกิด และอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ดังสมการ

$$\frac{dN}{dT} = P - \lambda N \qquad (4)$$

เมื่อ $\frac{dN}{dT}$ = อัตราการเพิ่มของไอโซโทปรังสี

λ = ค่าคงตัวในการสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น (decay constant) มีค่าเท่ากับ 0.693 / $T_{1/2}$

$T_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิต (half-life) ที่เกิดขึ้น

จากสมการ (4) จะได้

$$N = P/\lambda\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad (5)$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอะตอมของไอโซโทปรังสีที่มีอยู่เมื่อเริ่มแรก

t = ช่วงเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

เนื่องจากความแรงรังสีที่เกิดขึ้น A = λ N ดังนั้น

$$A = P\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad (6)$$

จากสมการ (4) และ (6) จะได้ความแรงรังสีไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น

$$A = N\sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad (7)$$

จำนวนอะตอม (N) ของ stable isotope ของธาตุที่นำเข้าอาบรังสีคำนวณได้จากน้ำหนักทั้งหมดของธาตุ

$$N = \frac{N_0 W f}{M} \qquad (8)$$

เมื่อ N_0 = ค่าคงที่ของอโวกาโดร (Avogadro' s number) (6.02×10^{23} atom/mole)

W = น้ำหนักของธาตุทั้งหมด หน่วยเป็นกรัม

f = สัดส่วนของไอโซโทปของธาตุนั้นในธรรมชาติ (abundance) หน่วยเป็นร้อยละ

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

ดังนั้นเมื่อแทนค่า N ลงในสมการ (7) จะได้เป็นสมการของ neutron activation คือ

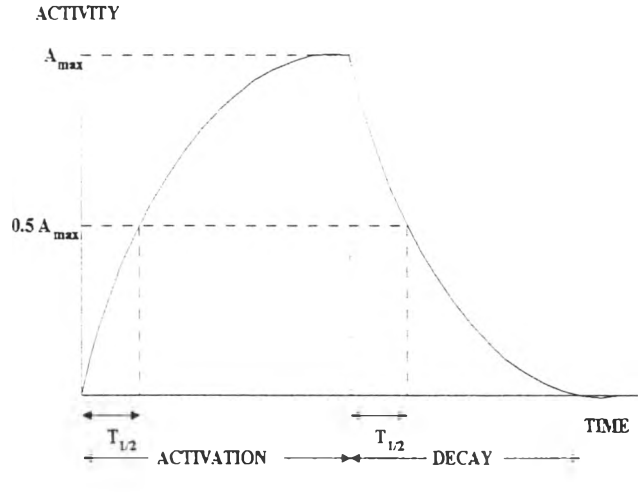
$$A = N_0 W f \sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda t}\right) / M$$

หรือ $$W = MA / N_0 W f \sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad (9)$$

ความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากถูกยิงด้วยนิวตรอนแล้วที่เวลา t ใด ๆ ไอโซโทปรังสีจะสลายตัวด้วย $e^{-\lambda t}$

ดังนั้น $$A = N_0 W f \sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda t}\right)e^{-\lambda t} / M$$

หรือ $$W = MAe^{\lambda t} / N_0 f \sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad (10)$$



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความแรงรังสี ขณะที่อาบรังสีและปล่อยให้สลายตัว

จากรูปเมื่อพิจารณาด้านซ้ายมือจะเห็นว่า specific activity (A/W) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยจนถึงค่าสูงสุด ซึ่งค่า maximum activity นี้จะเกิดเมื่อเราใช้เวลาในการอาบรังสีมากกว่า 10 เท่าของค่า half-life ส่วนทางด้านขวาของรูป แสดงถึงการสลายตัวของไอโซโทปรังสีในช่วงเวลา T (จะได้เป็นกราฟเส้นตรงถ้า plot แบบ Semi-log ระหว่าง log (A/W) กับเวลา)

จากความแรงรังสีที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มของนิวตรอน (ϕ) ในระหว่างการอาบรังสีมีค่าเปลี่ยนแปลงได้และความสามารถในการจับนิวตรอน (σ) ของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้องแน่นอน (จากตารางอ้างอิงมีค่าความผิดพลาด ~10%) ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน จึงนิยมใช้วิธีเปรียบเทียบความแรงรังสีที่วัดได้ในสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน โดยนำสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีในตำแหน่งและระยะเวลาเดียวกันกับสารตัวอย่าง แล้ววัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกันจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน}} \qquad (11)$$

สมการ (11) นี้ สามารถนำไปใช้ได้กับการวิเคราะห์ธาตุทุกชนิดในตัวอย่าง

ในกรณีที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น มีค่าครึ่งชีวิตสั้น และได้อัตราการนับรังสีแกมมาต่ำ สามารถนำตัวอย่างไปทำการอาบรังสีซ้ำ แล้ววัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นใหม่รวมกับการวัดครั้งก่อน โดยใช้เวลาในการอาบรังสี และเวลาในการวัดรังสีเท่า ๆ กันทุกครั้ง เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ดีขึ้น เทคนิคนี้เรียกว่า "ซายคลิกนิวตรอนแอกติเวชัน" (cyclic neutron activation)