

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

โดย นายประดิษฐ์ มีสุข

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สงขลา

ความนำ

การวิเคราะห์เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ค้นหาข้อเท็จจริงทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหา และสร้างความก้าวหน้าในสาขาวิชาการต่างๆ ทั้งในทางการแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม ฯลฯ การวิเคราะห์ธาตุเริ่มมีมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 5-6 อันเป็นยุคของการเล่นแร่แปรธาตุ (alchemy period) โดยใช้ประสาทสัมผัส ต่อมาเมื่อวิชาฟิสิกส์เจริญมากขึ้นทำให้มีวิธีการวิเคราะห์ธาตุอย่างมีหลักเกณฑ์เกิดขึ้นมากมาย เช่น กราวิเมตริก (gravimetric) คอโลริเมตริก (colorimetric) สเปกโตรกราฟิก (spectrographic) และแมสสเปกโตรสโคปี (mass spectroscopy) แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยกว่า 10^{15} อะตอมได้

ต่อมาปี ค.ศ. 1936 ยอร์จ เฮเวซี (George Hevesy) ซึ่งขณะนั้นทำงานอยู่ที่สถาบันฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ ได้พบวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุเป็นสำคัญ นับเป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นงานแขนงหนึ่งในสาขาวิชาเคมีรังสี อันเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความไวสูงคือสามารถตรวจหาธาตุที่มีปริมาณเพียง 10^9 อะตอมหรือขนาด 10^{-6} กรัมได้ และเรียกการวิเคราะห์นี้ว่าการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน (activation analysis)

การใช้อิออนภาคบางชนิด เช่น โปรตอน อัลฟา และรังสีแกมมาเป็นตัวยิงเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุจะต้องใช้พลังงานมาก เพื่อเร่งอนุภาคเหล่านั้นให้มีความเร็วเพียงพอที่จะผ่านเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุได้ แต่ถ้าใช้อิออนภาคนิวตรอนเป็นตัวยิงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากนัก เพราะนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ นักวิทยาศาสตร์จึงนิยมใช้นิวตรอนเป็นตัวยิงมากที่สุด เรียกเทคนิคการวิเคราะห์นี้ว่า "การวิเคราะห์แบบนิวตรอน - แอคติเวชัน (neutron activation analysis) หรือ NAA

ต่อมาในปี ค.ศ. 1949 จี.อี.บอยด์ (G.E. Boyd) อภิปรายและจัดพิมพ์ผลงานเกี่ยวกับ NAA ขึ้นเป็นเหตุให้มีผู้สนใจการวิเคราะห์แบบนี้มาก ทำให้การวิเคราะห์แบบ NAA ได้ขยายขอบเขตอย่างกว้างขวาง มีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยได้ตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยขึ้นที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ซึ่งตั้งอยู่ที่ถนนศรีบริษฏ อำเภอบางเขน กรุงเทพฯ เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ. 2505

ปัจจุบันนี้ NAA นำไปใช้เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น วิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยในดินและพืช เพื่อศึกษาการขาดสารอาหารของพืช โรคพืช และความสมบูรณ์ของดิน

ในทางเกษตรกรรม วิเคราะห์เขม่าดินปืนที่ตกค้างอยู่ในมืออาชญากรในทางอาชญาวิทยา การหาความไม่บริสุทธิ์ของพลาสติก และโลหะผสมในทางอุตสาหกรรม

กรรม และวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยที่มีอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์และสัตว์ในทางการแพทย์ เป็นต้น

ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

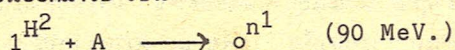
การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันถือหลักที่ว่า เมื่อนำสารตัวอย่างเข้าอบรังสีนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน อะตอมของธาตุในสารตัวอย่างบางอะตอมจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ เรียกว่า การเปลี่ยนนิวเคลียส (nuclear transformation) เกิดเป็นไอโซโทปของธาตุเดิมหรือไอโซโทปของธาตุใหม่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิง ส่วนมากไอโซโทปที่เกิดขึ้นเป็นไอโซโทปชนิดที่มีรังสี (radioisotope) ถ้าสามารถนับรังสีจากไอโซโทปเหล่านั้น เทียบกับสารมาตรฐานก็จะทราบถึงปริมาณธาตุให้สารตัวอย่างซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{\text{ปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในสารมาตรฐาน}}$$

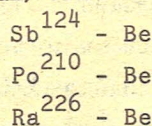
แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้กับ NAA

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูสามารถผลิตนิวตรอนได้ 3 ประเภท คือ นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) มีพลังงานมากกว่า 0.1 MeV. นิวตรอนปานกลาง (epithermal neutron) มีพลังงานระหว่าง 0.1 MeV. ถึง 1 eV. และนิวตรอนช้า (slow neutron) หรือ เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า 1 eV. ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะมีเทอร์มัลนิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV. มากที่สุด

2. เครื่องเร่งอนุภาค (accelerator) ใช้ยิงอนุภาคโปรตอน, ดิวเทอเรียม, ไตรเทียมและแอลฟา ให้มีพลังงานสูง แล้วใช้ยิงเป้าเพื่อให้ได้นิวตรอนออกมาใช้ เช่น



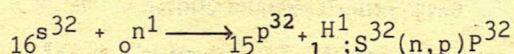
3. แหล่งไอโซโทป (Isotopic Source) ใช้เรดิโอไอโซโทปชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคอัลฟา หรือรังสีแกมมา แล้วให้นิวตรอนซึ่งมีพลังงานระดับต่าง ๆ สามารถนำมาใช้กับ NAA ได้เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู แต่ต้องมี เบอริลเลียม (Be) เป็น เป้า Target material) เช่น



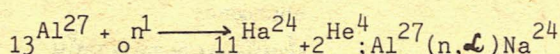
การเปลี่ยนแปลงนิวเคลียส

เมื่อนิวเคลียสของอะตอมของธาตุทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิง จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายแบบ คือ

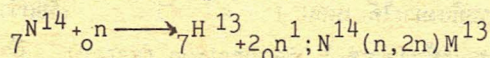
ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ เพราะว่ปฏิกิริยา (n,p) ทำให้เกิดไอโซโทปของธาตุใหม่ขึ้นมา ซึ่งสามารถแยกให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



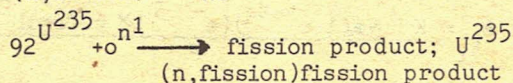
3. ปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา เขียนย่อเป็น (N, α) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยา (N, α) ต้องใช้นิวตรอนเร็ว เช่นเดียวกับปฏิกิริยา (n,p) จึงไม่ค่อยนิยมใช้ใน NAA ตัวอย่างปฏิกิริยา (n, α)



4. ปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน เขียนย่อเป็น (n,2n) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใหม่พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยานี้ต้องใช้นิวตรอนเร็วเป็นตัวยิง ตัวอย่างปฏิกิริยา (n,2n) คือ



5. ปฏิกิริยานิวตรอน-ฟิชชัน เขียนย่อเป็น (n,fission) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้วเกิดผลิตภัณฑ์ฟิชชัน ปฏิกิริยานี้ถ้าเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{235}$ และ ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ เทอร์มัลนิวตรอนก็มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{91}\text{Pa}^{231}$ และ ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ต้องใช้นิวตรอนเร็วจึงจะเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างปฏิกิริยา (n,fission) คือ



อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่อนำสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ไปอบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน จะเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นในขณะเดียวกันไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมา ดังนั้น การผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ได้ จะเป็นไปตามสมการ [1]

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^* \dots\dots\dots [1]$$

เมื่อ P = อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี

$$\frac{dN^*}{dt} = \text{อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี}$$

$$\lambda = \text{ค่าคงที่ของการสลายตัว}$$

$$N^* = \text{จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่ผลิตได้}$$

ถ้านำสารตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา t_1 โดยที่ค่า P ไม่เปลี่ยนแปลง เราอาจใช้วิธีอินทิเกรตดิฟเฟอเรนเชียล (integrating-factor method) หาค่า $N_{t_1}^*$ จากสมการ [1] ได้ดังนี้

$$\frac{dN^*}{dt} t_1 = P - N^* t_1 \dots\dots\dots [2]$$

คูณสมการ [2] ด้วย $e^{-\lambda t_1}$ จะได้

$$e^{-\lambda t_1} \frac{dN^*}{dt} t_1 = P e^{-\lambda t_1} - N^* t_1 e^{-\lambda t_1}$$

$$e^{-\lambda t_1} \frac{dN^*}{dt} t_1 + N^* t_1 e^{-\lambda t_1} = P e^{-\lambda t_1}$$

$$\frac{d}{dt} (N^* t_1 e^{-\lambda t_1}) = P e^{-\lambda t_1}$$

$$\begin{aligned}
 d(N_{t_1}^* e^{-t_1}) &= P e^{-t_1} \\
 N_{t_1}^* e^{-t_1} &= \int P e^{-t_1} dt \\
 N_{t_1}^* e^{-t_1} &= P e^{-t_1} + C \\
 N_{t_1}^* &= P + C e^{t_1} \dots \dots [3]
 \end{aligned}$$

เมื่อ $t_1 = 0$, จะได้ว่า $C = -P$

แทนค่า C ในสมการ [3] จะได้

$$N_{t_1}^* = P (1 - e^{-t_1}) \dots [4]$$

ในทางปฏิบัติเราต้องการทราบปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ $N_{t_1}^*$ ปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งสมมุติให้มีค่า A_{t_1}

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ [4]} \quad N_{t_1}^* &= P(1 - e^{-t_1}) \\
 A_{t_1} &= P(1 - e^{-t_1}) \dots [5]
 \end{aligned}$$

สิ่งที่ต้องการทราบต่อไปคือ P ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่าง ไปอบรังสีนิวตรอน โอกาสที่นิวตรอนหนึ่งอนุภาคจะชน และเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่างหาได้จากสูตร

โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อหนึ่งนิวตรอน = $\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียสในเป้า}}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของเป้า}}$

$$= \frac{N}{a}$$

เมื่อ N = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดในเป้า
 $=$ พื้นที่หน้าตัดสำหรับเทอร์มัล-นิวตรอนแอดดิชัน เป็น บาร์น
 (1 barn = 10^{-24} cm^2)

ถ้า σ เป็นจำนวนนิวตรอนที่ชนเป้าในแนว

ตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาที

จะได้ว่า จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อวินาที = $\frac{N}{a} \sigma a$

.∴ อัตราการผลิตไอโซโทปกับมันตรังสี = $N \sigma \dots [6]$

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียสทั้งหมดที่นำไปอบรังสี

สามารถหาได้จาก (47)

$$N = \frac{N_O w k}{A t. w t.} \dots \dots \dots [7]$$

เมื่อ N_O = Avogadro's number

w = น้ำหนักของธาตุเป็นกรัม

k = fractional isotopic abundance

$A t. w t.$ = น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น

แทนสมการ [6] และ [7] ในสมการ [5] จะได้

$$A_{t_1} = \frac{6.02 \times 10^{23} w k \phi (1 - e^{-t_1})}{A t. w t.} \dots [8]$$

—จากสมการ [8] จะเห็นได้ว่าเราสามารถเปลี่ยนระยะเวลาการอบรังสีเพื่อให้ได้ค่า (แอดคิวิตี) ตามต้องการได้ เทอม $1 - e^{-t_1}$ เรียกว่า แซจเรชชันแฟกเตอร์ (Saturation factor) ถ้า $t_1 \gg T_{1/2}$ แล้วค่าปัจจัยอิ่มตัว จะเข้าใกล้ 1 ดังนั้นที่เวลาอิ่มตัว (เวลาที่อัตราการผลิตและอัตราการสลายตัวของอะตอมกัมมันตรังสีมีค่าเท่ากัน) ค่าแอดคิวิตีของไอโซโทปกับมันตรังสีจะมีค่าสูงสุดตามสมการ

$$A = N \phi \dots \dots \dots [9]$$

โดยทั่วไปจะเริ่มศึกษา แอดคิวิตีได้ภายหลังจากยิงอนุภาคเป็นเวลา T อะตอมกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวเป็นแฟกเตอร์ ของ e^{-t} ดังนั้นสมการ [8] อาจเขียนใหม่เป็น

$$A_{t_1} = \frac{K w \phi (1 - e^{-t_1}) (e^{-T})}{M} \times 6.02 \times 10^{23}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณของธาตุคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{MA_t e^{-\lambda T}}{K(1 - e^{-\lambda T})} \dots [10]$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้วได้นำเอาสมการมาตรฐาน ซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนเข้าอาบรังสี พร้อมกับสารตัวอย่าง ฉะนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณจึงเหลือเพียง

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เป็นปรากฏการณ์แบบสุ่ม (Random phenomena) คือไม่สามารถบอกได้ว่าวันที่อะตอมใดจะสลายตัว หรือให้รังสีออกมา แต่เมื่อคำนึงถึงอะตอมเป็นจำนวนมาก อะตอมตามหลักวิชาสถิติทำให้กล่าวได้ว่าจะมีอะตอมที่จะสลายตัวในนาที่นี้ จากการทดลองพบว่าอัตราการให้อนุภาคของสารกัมมันตรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่ขณะนั้น และเป็นเช่นนั้นตลอดไป ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงลดลงตลอดเวลา เพราะว่าปริมาณของนิวเคลียสกัมมันตรังสีลดลงอยู่เรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการสลายตัว จนกระทั่งกลายเป็นไอโซโทปชนิดเสถียร เรดิโอไอโซโทปแต่ละชนิดใช้เวลาในการสลายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติประจำตัวของธาตุไอโซโทปที่เรียกว่าครึ่งชีวิต (Half life) เมื่อทั้งสารกัมมันตรังสีไว้เป็นเวลา ครึ่งชีวิตจะพบว่าปริมาณของนิวเคลียสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณตั้งต้น การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีในทางจลศาสตร์ (Kinetic) ถือว่าเป็นกระบวนการลำดับที่หนึ่ง (first - order process)

ถ้าจำนวนอะตอม ΔN สลายตัวในระยะเวลา Δt และ N เป็นอะตอมที่ยังเหลืออยู่ จะได้ว่า $-\frac{\Delta N}{\Delta t} N$ (ใช้เครื่องหมายลบเพราะว่าเป็นอัตราการลดลง)

$$\therefore \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

เมื่อ λ = ค่าคงที่ของสารสลายตัว (decay constant)

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \text{แอดคทีวิตี ของไอโซโทปกัมมันตรังสี}$$

ถ้าใช้วิชาแคลคูลัสเข้าช่วย เมื่อ $t \rightarrow 0$ จะแทนได้ดังนี้

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \dots \dots \dots [1]$$

ถ้าให้จำนวนของอะตอมที่ขณะตั้งต้นการ

ทดลอง = N_0 เราก็อ้างหาค่า N คือจำนวนของอะตอมที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป = t ได้จากการอินทิเกรตสมการ [1] นั่นคือ

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \dots \dots \dots [2]$$

$$2.303 \log \frac{N}{N_0} = -\frac{\lambda t}{2.303} \dots \dots \dots [3]$$

$$\log N = \log N_0 - \frac{\lambda t}{2.303} \dots \dots \dots [4]$$

จากสมการ [3] ถ้า $t =$ ครึ่งชีวิต = $T_{1/2}$,

N จะ = $\frac{1}{2} N_0$ เราจะได้

$$2.303 \log \frac{1}{2} = -\frac{\lambda T_{1/2}}{2.303}$$

$$\text{หรือ } T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

สมการ [4] เป็นสมการเส้นตรง ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log N$ (ส่วนมากจะใช้แทนเป็นปริมาณกัมมันตรังสี หรือที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ

จำนวน "นับ" เพราะทั้งสองจำนวนนี้เป็นปฏิกภาคตรง
กับจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่นั้น) และเวลา
 t โดยให้ $\log N$ เป็นแกน Y เวลา t
เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรงโดยมี $\log N_0$
เป็น Intercept บนแกน Y และมีความชัน
(slope) = $-\frac{2.303}{T_{1/2}}$ ถ้าเราต้องการหา $T_{1/2}$ ของ
ไอโซโทปต่าง ๆ หาได้โดยการเขียนกราฟดังกล่าว
และหาช่วงเวลาที่ลดลงปริมาณกัมมันตรังสีลงเหลือ
เพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณที่มีอยู่ ณ เวลาใดก็ได้

หน่วยกัมมันตภาพรังสี

ความเข้มของกัมมันตภาพรังสี วัดได้จาก
จำนวนอะตอมของสารที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา หน่วย
มาตรฐานของกัมมันตภาพรังสีคือ คูรี (Curie)

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegrations/sec (dps)}$$