

บทที่ 2

ภาคทฤษฎี

2.1 ทฤษฎี

เมื่อเอาสารตัวอย่าง (Sample) ใส่นิวตรอน (Neutrons) ซึ่งมีฟลักซ์ (Flux) ϕ ไอโซโทป (Isotope) ของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างก็จะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) กับนิวตรอนในอัตราการเกิดของปฏิกิริยาคงสมการ (2.1)

$$R = N \phi \sigma \quad (2.1)$$

เมื่อ R เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction)
N เป็นจำนวนนิวเคลียส (Nuclei) ของไอโซโทปของธาตุนั้นและ

$$N = \frac{m N_o}{A}$$

เมื่อ m เป็นน้ำหนักของธาตุที่ต้องการหาในสารตัวอย่าง
No เป็นเลขของอะโวกาโดร (Avogadro's number)
A เป็นน้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)
 ϕ เป็นนิวตรอนฟลักซ์
 σ เป็น Cross-section/nucleus

ปฏิกิริยาของนิวตรอนช้า (Thermal neutron หรือ Slow neutron ซึ่งมีพลังงานที่ 0.025 ev ที่ 25° ซ.) ส่วนมากเป็นชนิดนิวตรอนแคปเจอร์ (neutron capture) ชนิด (n , γ) และหลังจากที่เกิดนิวตรอนแคปเจอร์ก็จะปล่อย (emit) รังสีแกมมา (gamma-rays) ออกมาในปฏิกิริยา (n , γ) นิวเคลียสที่ได้ (product nucleus) จะเหมือนกับไอโซโทปเดิม แต่ Mass number จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วย และโปรคักหนักนิวเคลียส (product nucleus) ที่ได้

จะเป็นไอโซโทปที่เสถียรภาพ (stable isotope) หรืออาจจะเป็นสารกัมมันตรังสี (radioisotope) ก็ได้ เราจะใช้กรณีหลังนี้มาใช้เกี่ยวกับ Neutron activation analysis ตัวอย่างเช่น Mg ธรมคาประกอบด้วยไอโซโทปที่เสถียรภาพ (stable isotope) 3 รูป ซึ่งมีอัตราส่วนคงที่ดังนี้ 78.0% Mg^{24} , 10.1% Mg^{25} และ 11.1% Mg^{26} และแต่ละตัวมี Thermal neutron capture cross-section เท่ากับ 0.03, 0.27 และ 0.03 บาร์น (1 barn = 10^{-24} cm²) ตามลำดับ เมื่อ Mg^{24} จับนิวตรอนไว้ก็จะทำให้เกิด Mg^{25} (stable) แทนนั้น และเมื่อ Mg^{25} จับนิวตรอนก็จะได้ Mg^{26} (stable) แต่เมื่อ Mg^{26} จับนิวตรอนจะได้ Mg^{27} ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี (radioactive) แล้ว Mg^{27} จะสลายไปให้อนุภาคบีตา (β -particles) และรังสีแกมมา (gamma rays) ระยะเวลาครึ่งชีวิต (Half-life) 9.5 นาที

ถ้านิวตรอนฟลักซ์ มีนิวตรอนเร็ว (fast neutron, มีพลังงานมากกว่า 1 Mev) อยู่ด้วย ปฏิกริยาอื่น ๆ นอกจากนิวตรอนแคปเจอร์ (neutron capture) ก็อาจจะเกิดขึ้นด้วย โดยมากปฏิกริยาของนิวตรอนเร็วคือ (n , p) , (n , α) และ (n , 2n) ในปฏิกริยา (n , p) นิวตรอนเร็วที่วิ่งชน (incident fast neutron) ก็จะถูกจับ แต่จะปล่อยโปรตอน (eject proton) ให้อย่างฉับพลัน ดังนั้น product isotope ซึ่งเสถียรภาพหรือเป็นกัมมันตรังสีก็จะมี Mass number เท่าเดิม แต่ atomic number จะลดลงไป 1 หน่วย นั่นคือจะเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่

ในปฏิกริยา (n , 2n) Product nucleus จะเหมือนกับไอโซโทปของตัวเดิม แต่ Mass number ลดลงไป 1 หน่วย

ในปฏิกริยาทั้งสามชนิดนี้ ค่า cross-section ของแต่ละไอโซโทปก็ต่างกันไป และค่า cross-section นี้ยังขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนอีกด้วย

ในขณะที่เราให้สารตัวอย่างอาบนิวตรอนนั้น Product isotope บอมสลายไปในตัว ถ้าเวลาอาบนิวตรอน (irradiation time) นานมาก พอแล้ว ก็จะทำให้เกิดภาวะสมดุล (steady state) นั่นคืออัตราการเกิด Radioisotope จะเท่ากับอัตราการสลายตัวของมัน และ Activity ของสาร ที่ให้เราเรียกว่า " Saturation activity " เมื่อเกิด Saturation activity แล้วการที่เราเพิ่มเวลาอาบนิวตรอนให้มากขึ้นอีกก็ไม่ทำให้ Activity ของ Radioisotope เพิ่มขึ้นอีกเลย

ถ้าเราเอาสารตัวอย่าง (sample) อาบนิวตรอนด้วยเวลาน้อย ๆ (ไม่ถึงกับทำให้สารตัวอย่างเกิด Saturation activity) แล้ว Activity ของ Radioisotope ก็จะน้อยกว่า Saturation activity ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$A' = N \phi \sigma \left[1 - \exp \left(- \frac{0.693t}{T_{1/2}} \right) \right] \text{ dps} \dots\dots (2.2)$$

เมื่อ A' เป็น Activity ของ Radioisotope
 t เป็นเวลาที่ให้อาบนิวตรอน (duration of neutron exposure)
 $T_{1/2}$ เป็นเวลาครึ่งชีวิต (Half-life) ของ Radioisotope
 เทอม $1 - \exp \left(- \frac{.693 t}{T_{1/2}} \right)$

ในสมการ (2.2) เรียก Saturation term

ถ้า $t = T_{1/2}$	ค่าของ Saturation term	=	1/2
$t = 2T_{1/2}$	"	=	3/4
$t = 3T_{1/2}$	"	=	7/8
$t = 4T_{1/2}$	"	=	15/16

จะเห็นว่าถ้า t มาก จะทำให้ saturation term เข้าใกล้ 1
 ทุกที นั่นคือ activity ของสารตัวอย่างเข้าใกล้ saturation Activity
 ($A = N \phi \sigma$) เพราะฉะนั้นในการเอาสารตัวอย่างอาบนิวตรอน เราต้องใช้เวลา
 อาบนิวตรอนให้พอเหมาะ นั่นคือถ้าไอโซโทปของธาตุใดมีเวลาครึ่งชีวิตสั้นก็ใช้เวลา
 อาบนิวตรอนน้อยๆ และถ้ามีเวลาครึ่งชีวิตยาวก็ใช้เวลาอาบนิวตรอนนาน ๆ ทั้งนี้
 ต้องขึ้นกับนิวตรอนฟลักซ์ และ cross-section ของไอโซโทป นั้น ๆ

เมื่อการอาบนิวตรอนยุติลง Radioisotope ของธาตุนั้นก็จะสลาย ดังนั้น
 Activity ของ Radioisotope ก็จะลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.3)

$$A_t = A' \exp \left(- \frac{0.693 t_d}{T_{1/2}} \right)$$

$$\text{หรือ} \quad A_t = N \phi \sigma \left[1 - \exp \left(- \frac{0.693 t}{T_{1/2}} \right) \right] \exp \left(- \frac{0.693 t_d}{T_{1/2}} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ} \quad A_t = \frac{m N_0 \phi \sigma}{A} \left[1 - \exp \left(- \frac{0.693 t}{T_{1/2}} \right) \right] \exp \left(- \frac{0.693 t_d}{T_{1/2}} \right)$$

เมื่อ A_t = Activity ขณะเวลาใดๆ

t_d = เวลาที่ Radioisotope สลายตัว (decay time or
 waiting time) ตั้งแต่การอาบนิวตรอนได้ยุติลงจนกระทั่ง
 ถึงเวลาที่เริ่มนับ

ในระหว่างที่นับสารตัวอย่างที่อาบรังสี (activated sample) นั้น
 Activity ของสารตัวอย่างก็ลดลง ถ้าเวลาที่ใช้นับ (t_c) น้อยกว่าเวลา
 ครึ่งชีวิตของ Radioisotope นั้นมาก ๆ จำนวนเคานท์ (counts) ต่อเวลา
 ที่ได้ก็ถือว่าเป็นอัตราการนับซึ่งเริ่มที่จุดตั้งต้นของการนับได้ ถ้าเวลาที่ใช้นับนาน
 ประมาณ 1 Half-life ของ Radioisotope เวลา plot count rate
 ก็ให้ plot ที่จุดกึ่งกลางของเวลาที่ใช้นับ แต่สำหรับการนับที่นานกว่า 1 Half-
 life ของ



Radioisotope เราจะต้องมีการแก้ไขสมการ (2.4)

$$\int_0^{t_c} C_0 e^{-\lambda t} dt = C_x \quad (2.4)$$

$$\text{หรือ } C_0 = \frac{\lambda C_x}{1 - e^{-\lambda t_c}}$$

- เมื่อ C_0 = count rate ที่แก้แล้ว (corrected count)
เมื่อเวลาเริ่มต้น ($t = 0$)
- C_x = จำนวน counts ทั้งหมดในช่วงเวลา t_c ที่ยังไม่ได้แก้
(uncorrected counts)
- λ = $0.693 / T_{1/2}$
- t_c = เวลาที่นับ

2.2 การใช่วิธีเปรียบเทียบ (Comparison technique)

จากสมการ (2.3) เราสามารถหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างใดๆได้ โดยใช้หลัก Absolute technique คือนำสารที่ทราบน้ำหนักไปอบนิวตรอนด้วยเวลาจำกัดค่าหนึ่ง จุดเวลารอก่อนที่จะนับ เมื่อทราบประสิทธิภาพของเครื่องนับ นิวตรอนฟลักซ์ และ Cross-section ของธาตุนั้น ก็สามารถหาปริมาณของธาตุใดๆ ในสารนั้นได้ วิธี Absolute technique นี้ขึ้นกับแฟกเตอร์หลายตัว เช่น ϕ , σ , t , t_d , และประสิทธิภาพของเครื่อง ถ้าค่าใดค่าหนึ่งคลาดเคลื่อนก็จะทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนได้ โดยเฉพาะ ϕ นั้น เป็นสิ่งที่ยากมากที่จะบอกว่ามีค่าเท่าใดแน่

อีกวิธีหนึ่งซึ่งสะดวกกว่าวิธีแรก คือวิธีเปรียบเทียบ โดยใช้สารที่ต้องการจะหาปริมาณของธาตุ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งทราบน้ำหนักของธาตุมาตรฐานนั้น

จากสมการ (2.3) ให้

A_S เป็น Activity ของ Radioisotope ที่ใช้เป็นมาตรฐาน
 A_X เป็น Activity ของ Radioisotope ที่ต้องการหาปริมาณ
 m_S เป็นน้ำหนักของไอโซโทปมาตรฐาน
 m_X เป็นน้ำหนักของไอโซโทปที่ไม่ใช่มาตรฐานและต้องการหาปริมาณ

$$A_S = \frac{m_S \phi \lambda}{A} \left(1 - e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} \right) e^{-\frac{0.693td}{T_{1/2}}}$$

$$A_X = \frac{m_X \phi \lambda}{A} \left(1 - e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} \right) e^{-\frac{0.693td}{T_{1/2}}}$$

เมื่อใช้เวลาอาบนิวตรอน และเวลารอก่อนนับเท่ากันที่สุดในที่สุดจะได้

$$\frac{A_S}{A_X} = \frac{m_S}{m_X} \quad (2.5)$$

หรือ

$$\frac{C_S}{C_X} = \frac{m_S}{m_X}$$

ในเมื่อ C_S , C_X เป็น Count rate ของสารมาตรฐานและสารที่ต้องการหาปริมาณ

จากสมการ (2.5) จะเห็นว่า Activity ของสารจะไม่ขึ้นกับ ϕ , หรือ σ หรือประสิทธิภาพของเครื่องนับ แต่จะขึ้นกับน้ำหนักของไอโซโทปของธาตุมาตรฐานและที่เราต้องการหา วิธีเปรียบเทียบจึงเป็นวิธีที่ควรรู้หนึ่ง

2.3 การรบกวนของรังสีจาก Radioisotope อื่น ๆ (Interference)

ขณะที่เราเอาสารตัวอย่างอาบนิวตรอนนั้น นอกจากไอโซโทปตัวที่เราต้องการหา นั้นเป็นกัมมันตรังสีแล้ว ธาตุตัวอื่น ๆ ก็อาจจะเป็นกัมมันตรังสีขึ้นได้ ซึ่งเรามีวิธีจัดการรบกวนของ Radioisotope ที่ไม่ต้องการได้ดังนี้

1. ในกรณีที่ Radioisotope ในสารตัวอย่างปล่อยอนุภาคบีตาอย่างเดี่ยว ซึ่งมีพลังงานต่างกัน เราอาจใช้แผ่น Absorber ขนาดต่างๆกันเพื่อเลือกให้อนุภาคบีตาที่มีพลังงานสูงพอยานไปได้

2. ในกรณีที่ Radioisotope ที่ต้องการหาปล่อยรังสีแกมมา การวิเคราะห์ก็สามารถทำได้โดยใช้ Single หรือ Multi-channel gamma-ray scintillation spectrometry