บทที่ ๒

ทฤษฎี

๒.๑. ทฤษฎีเบื้องต้น [๔]

เมื่อเอาสารตัวอย่างไปอาบรังสีด้วยอนุภาคนิวตรอนซึ่งมี flux ϕ ไอโซโทป (isotope) แต่ละตัวที่อยู่ในสารนั้นจะเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์กับอนุภาคนิวตรอน ดังสมการ

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกริยา} = N\phi\sigma \quad \text{---} \quad \text{.....(๒.๑)}$$

ในเมื่อ ϕ = flux ชุดุงนิวตรอน ซึ่งหมายถึงจำนวนนิวตรอนต่อพื้นที่ที่อาบรังสีต่อวินาที

N = จำนวนนิวเคลียสของธาตุในสารที่จะอาบรังสี

σ = cross-section หรือ โอกาส (probability) ที่จะเกิดปฏิกริยากับนิวตรอน มีหน่วยเป็นตารางเซ็นติเมตร หรือ บาร์น (barns)

และ $N = \frac{mN_0}{A} \times$ % ของ abundance

ในเมื่อ m = น้ำหนักเป็นกรัมของธาตุในสาร

N_0 = Avogadro's number

A = น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น

๒.๒. ปฏิกริยากับเทอร์มอลนิวตรอน (Thermal neutron reaction) [๔,๕,๗]

ปฏิกริยาที่นิวเคลียสของธาตุทำกับเทอร์มอลนิวตรอน (พลังงานประมาณ ๐.๐๒๕ ev.) ที่จะเกิดขึ้นได้ก็คือ เกิดปฏิกริยา (n,γ) เมื่อเอาธาตุใดก็ตามไปอาบรังสี นิวไคลด์ (Nuclide)ของธาตุนั้นจะจับเทอร์มอลนิวตรอนไว้กลายเป็น Compound nucleus Atomic number ของนิวเคลียสจะไม่เปลี่ยน แต่ mass number จะเพิ่มขึ้นหนึ่ง สมการโดยทั่วไปเป็นดังนี้

$$_ZX^A \; (n,\gamma) \; _ZX^{A+1}$$

หรือ

$$_ZX^A + {}_0n^1 \longrightarrow {}_ZX^{A+1} + Q \quad \text{.....(๒.๒)}$$

$_ZX^A$ = นิวเคลียสของธาตุที่อาบรังสี มีมวล A และประจุ Z

$_ZX^{A+1}$ = นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้น มีมวล A+1 และประจุ Z เท่าเดิม

Q เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาส่วนมากจะเป็นพลังงานของรังสีแกมม่า

Compound nucleus ที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นไอโซโทปอยู่ตัว (stable isotope) หรือไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) ไอโซโทปที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี Activation ก็คือ ไอโซโทปกัมมันตรังสี ซึ่งจะปล่อยรังสีออกมา อาจจะเป็นรังสีแกมม่าอย่างเดียว หรือมีทั้งรังสีแกมม่าและรังสีเบต้า หรือรังสีเบต้าอย่างเดียวก็ได้ ตัวอย่างเช่น เหล็ก มีไอโซโทปที่อยู่ตัว (stable isotope)ในธรรมชาติสี่ตัวคือ๕.๘๑ % Fe^{54}, ๙๑.๖๖% Fe^{56} ๒.๑๙ % Fe^{57}และ ๐.๓๓ % Fe^{58}และมี thermal neutron cross-section ๒.๕, ๒.๗, ๒.๕ และ ๑.๐ บาร์น ตามลำดับ เมื่อเอาเหล็กอายรังสี Fe^{54}จะกลายเป็น Fe^{55}ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี, Fe^{56} กลายเป็น Fe^{57} ซึ่งเป็นไอโซโทปอยู่ตัว, Fe^{57}กลายเป็น Fe^{58}ซึ่งเป็นไอโซโทปอยู่ตัว และFe^{58}กลายเป็น Fe^{59}ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี ปล่อยรังสีทั้งรังสีเบต้าและรังสีแกมม่าด้วย half-life ๔๕ วัน

๒.๓. <u>ปฏิกริยานิวตรอนเร็ว</u> (Fast neutron reaction) [๔,๕,๗]

นิวตรอนเร็วหมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า ๐ Mev.ถ้าอายรังสีสารด้วยนิวตรอนเร็ว จะเกิดปฏิกริยา (n,p), (n,α) และ(n,2n) ปฏิกริยา (n,p) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนเร็วถูกจับแล้วเกิด compound nucleus ใหม่ พร้อมทั้งโดโปรตอนออกมา ๑ ตัว ทำให้ไอโซโทปที่เกิดใหม่จะอยู่ตัวหรือเป็นกัมมันตรังสีก็ตามสมการเป็นดังนี้

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{I} \longrightarrow {}_{Z-I}Y^{A} + {}_{I}H^{I} + Q \quad \text{.....(๒.๓)} $$

หรือ $ {}_{Z}X^{A}\,(n,p)\,{}_{Z-I}Y^{A} $

นิวเคลียสที่เกิดใหม่จะมี mass number เท่าเดิม แต่มี atomic number ลดลง ๑ตัว กลายเป็นสารใหม่ ถ้าธาตุที่เกิดใหม่เป็นธาตุกัมมันตรังสี มันจะสลายตัวปล่อยรังสีออกมา อาจจะเป็นเบต้าบวก(β^{+})เบต้าลบ (β^{-}) หรือแกมม่าก็ได้

ปฏิกริยา (n,α) มีสมการดังนี้

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{I} \longrightarrow {}_{Z-2}Y^{A-3} + {}_{2}He^{4} \quad \text{.....(๒.๔)} $$

หรือ $ {}_{Z}X^{A}\,(n,\alpha)\,{}_{Z-2}Y^{A-3} $

เมื่อเกิดปฏิกริยาระหว่างนิวตรอน และนิวเคลียส ได้ compound nucleus ซึ่งมี mass number ลดลง ๓ และ atomic number ลดลง ๒ กลายเป็นธาตุใหม่ พร้อมทั้งได้อนุภาคแอลฟ่าออกมา ๑ ตัว

ปฏิกริยา (n,2n) นิวตรอนเข้าไป ๑ ตัว ได้นิวตรอนใหม่ออกมา ๒ ตัว ปฏิกริยานี้เป็นดังนี้

$$ {}_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{Z}X^{A-1} + 2{}_{0}n^{1} \quad \text{.....(๒.๕)} $$

หรือ $ {}_{Z}X^{A}\ (n,2n)\ {}_{Z}X^{A-1} $

atomic number ของนิวเคลียสไม่เปลี่ยน แต่ mass number ลดลง ๑

ปฏิกริยาที่สำคัญในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี activation ก็คือปฏิกริยา (n,γ) เพราะปฏิกริยานี้มักจะมี cross-section สูง

ถ้านิวไคลด์ที่เกิดใหม่ในกรณีที่กล่าวมาแล้วเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclide) ในขณะที่กำลังอาบรังสีอยู่ นิวไคลด์บางตัวจะสลายตัวปล่อยรังสีออกมาในขณะเดียวกัน ถ้าการอาบรังสียังคงมีต่อไปอีกนาน อัตราการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอยู่ในภาวะที่เท่ากับอัตราการสลายตัวพอดี ภาวะเช่นนี้เรียกว่า "กัมมันตภาพรังสีถึงจุดอิ่มตัว" (saturation activity) ถึงแม้จะอาบรังสีต่อไปอีกนานเท่าใดก็ตามก็จะไม่เพิ่มกัมมันตภาพรังสีอีก ถ้า flux ของนิวตรอนยังคงมีค่าเท่าเดิม

แต่ถ้าการอาบรังสีไม่นานพอจนถึงจุดอิ่มตัว กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการดังนี้

$$ A_0 = N\phi\sigma\left[1 - \exp\left(-0.693 \frac{t_i}{t_{\frac{1}{2}}}\right)\right] \text{dps.} \quad \text{... (๒.๖)} $$

t_i = เวลาที่ใช้อาบรังสี

$t_{\frac{1}{2}}$ = half-life ของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

เทอมในวงเล็บ (saturation term) จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ๑ เมื่อ t_i มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ถ้าเวลาที่ใช้อาบรังสีเป็น ๑,๒,๓,๔ เท่าของ half-life เทอมในวงเล็บก็จะมีค่าเป็น $\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \frac{15}{16}$ ซึ่งเกือบจะถึงจุดอิ่มตัวอยู่แล้ว เพราะฉนั้นเวลาที่ใช้อาบรังสีจึงควรจะมีค่าประมาณ ๒ หรือ ๓ เท่าของ half-life ของธาตุกัมมันตรังสีที่จะเกิดขึ้น ถึงแม้จะอาบรังสีนานกว่านั้นก็ไม่ทำให้ผลดีขึ้น ผลดีขึ้น กลับทำให้เกิดการรบกวนจากพวกที่มี half-life ยาวๆมากกว่า เพราะฉนั้นเวลา

การอาบรังสีของพวก half-life สั้นๆควรจะสั้น และพวก half-life ยาวก็ควรจะมาก่อนตามด้วย

๖.๔. <u>การสลายตัวหลังจากการอาบรังสี</u> [๔]

เมื่อเอาสารเข้าไปอาบรังสีนิวตรอนแล้ว ก่อนที่จะเอาออกมานับ นิวไคลด์เหล่านั้นจะสลายตัวไปเรื่อยๆตาม half-life ของมัน ฉนั้นเมื่อเอาออกมานับกัมมันตรังสีที่นับได้จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$A_t = A_o \left[\exp(-0.693 \frac{t_d}{t_{\frac{1}{2}}})\right] \quad \ldots\ldots\ldots (๖.๖)$$

A_t = กัมมันตภาพรังสีที่ควรจะนับได้ (activity)

t_d = เวลาที่สารจะสลายตัวหลังจากอาบรังสีแล้ว

ในระหว่างการนับรังสี การสลายตัวมีอยู่เรื่อยๆ ถ้า t_c เป็นเวลาที่ใช้นับรังสีมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับ half-life ค่าอัตราการนับ (count rate) ถือว่าเป็นค่าที่นับได้ที่จุดแรกหลังจากการรอแล้ว แต่ถ้าเวลาที่ใช้นับนาน เช่น ประมาณเท่ากับ half-life t_d ที่แท้จริงจะต้องเอา $t_{c/2}$ ไปบวกเข้าไป และถือว่า count rate ที่นับได้เป็น count rate ที่จุดกึ่งกลางของช่วงเวลาการนับ

๖.๕. <u>การหาปริมาณของธาตุโดยการเปรียบเทียบ</u> [๔]

เพื่อหลีกเลี่ยงค่าต่างๆเช่น เปอร์เซ็นต์ของ abundance , cross-section, flux ของนิวตรอน และเวลาที่ใช้อาบรังสี ซึ่งมีค่าไม่แน่นอน จึงนิยมใช้วิธีเปรียบเทียบโดยการเอาสารตัวอย่างที่รู้น้ำหนักที่แน่นอนอาบรังสีพร้อมกับสารมาตรฐาน ภายใต้ภาวะอย่างเดียวกัน แล้วเอาออกมานับด้วยเวลาเท่ากัน ค่าของ count rate ที่นับได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ก็สามารถหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้

$$m_x = \frac{c_x}{c_s} \cdot m_s \quad \ldots\ldots\ldots (๖.๗)$$

m_x = น้ำหนักของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่ต้องการหา

c_x = count rate ของสารตัวอย่าง

c_s = count rate ของสารมาตรฐาน

m_s = น้ำหนักของธาตุที่มีอยู่ในสารมาตรฐาน