

ทฤษฎีทั่วไปของการวิเคราะห์กัมมันตรังสี

2.1 การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis)

สารกัมมันตรังสีทุกชนิด จะมีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลา อัตราการสลายตัวเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

หรือ 
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนนิวคลีไอของสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา  $t$  ใดๆ

$N_0$  คือ จำนวนนิวคลีไอของสารนั้นเมื่อเวลา  $t = 0$

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว มีค่าเท่ากับ  $\frac{0.693}{T_{1/2}}$

เมื่อ  $T_{1/2}$  คือ เวลาครึ่งชีวิต

ในขณะที่กำลังอาบนิวตรอนแก่สารตัวอย่าง เพื่อให้กลายเป็นสารกัมมันตรังสี อะตอมบางส่วนของสารนั้นที่กลายเป็นสารกัมมันตรังสีแล้ว จะเริ่มสลายตัวทันที ในขณะที่เดียวกัน อะตอมบางส่วนจะกลายเป็นสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารกัมมันตรังสี = อัตราการเกิดขึ้น - อัตราการสลายตัว

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N \quad (3)$$

$P$  คือ อัตราการเกิดขึ้น หรือเขียนได้ว่า

$$\lambda N = P (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

นั่นคือ อัตราการสลายตัว (activity)  $A = \lambda N$

$$A = P (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

พบว่าในการอาบนิวตรอนแก่สารตัวอย่างนั้น อัตราการเกิดเป็นสารกัมมันตรังสีเขียนได้ว่า

$$P = \frac{\phi \sigma N_0 W f}{M} \quad (6)$$

จากสมการ (5) เขียนใหม่ได้ว่า

$$A = \frac{\phi \mathcal{V} N_0 w f}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (7)$$

อย่างไรก็ตาม ค่าจำนวนที่นับได้จากสมการ (7) เป็นค่าที่วัดได้เมื่อเสร็จสิ้นการอาบรังสี ซึ่งโดยทางปฏิบัติ การวัดไม่สามารถกระทำทันทีเมื่อเอาสาร ออกจากการอาบรังสีได้ จำเป็นต้องมีเวลา รอคอย (decayed time) ซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นกับคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสีนั้น ฉะนั้นจึงต้องแก้ไขเนื่องจากการสลายตัวไปก่อนของสารกัมมันตรังสีด้วยแฟกเตอร์  $e^{-\lambda T}$  สมการ (7) จึงกลายเป็น

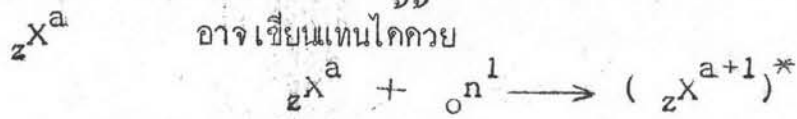
$$A = \frac{\phi \mathcal{V} N_0 w f}{M} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda T} \quad (8)$$

- เมื่อ
- $\phi$  คือ ฟลักซ์ ของนิวตรอนมีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที
  - $\mathcal{V}$  คือ คาภาคตัดขวางของนิวตรอนในการแอกติเวชันมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
  - $w$  คือ น้ำหนักของธาตุนั้นในสารตัวอย่างที่ใช้อาบรังสีมีหน่วยเป็นกรัม
  - $M$  คือ อะตอมมิกแมสของธาตุนั้น
  - $f$  คือ เปอร์เซ็นต์ของไอโซโทปของธาตุนั้น (abundance)
  - $N_0$  คือ เลขของอะโวกาโดร  
มีค่าเท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอมต่อกรัมโมเลกุล
  - $T$  คือ เวลาของการรอคอย
  - $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี
  - $\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว

## 2.2 ปฏิริยาของนิวตรอน กับสารต่าง ๆ

เมื่อให้นิวตรอนเข้าทำปฏิริยากับนิวเคลียสของสารต่าง ๆ อนุภาคนิวตรอนจะวิ่งเข้าไปอยู่ข้างในนิวเคลียส หรือเพียงวิ่งเฉียดเข้าไปใกล้ ๆ ก็ได้ ทั้งนี้ เป็นเพราะนิวตรอนไม่มีประจุ

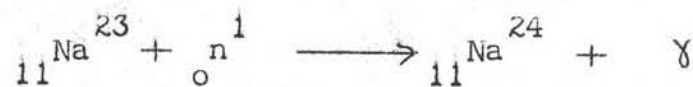
ทำให้ไม่มันลจากแรงดึงดูดมาเกี่ยวข้อง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นแบบการกระเด็นเจออกไป (scattering) หรือแบบถูกจับ (capture) ปฏิกิริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียส



เมื่อ  $({}_Z X^{a+1})^*$  แทนนิวเคลียสประกอบ (compound nucleus) ที่อยู่ในภาวะ excited state พร้อมทั้งจะคายพลังงานออกมาในรูปต่าง ๆ กัน นิวเคลียสประกอบจะคงอยู่ในภาวะนี้ในเวลาสั้น ๆ ประมาณ  $10^{-12}$  ถึง  $10^{-20}$  วินาทีเท่านั้น

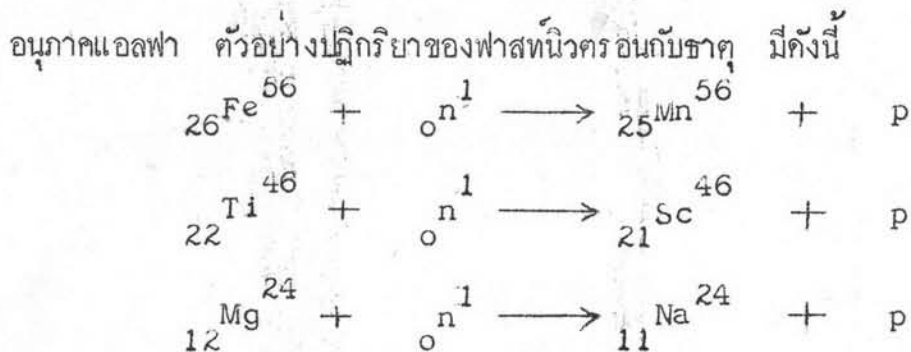
ในกรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบถูกจับนิวเคลียสประกอบจะคายพลังงานในรูปของพลังงานจลน์ของอนุภาคต่าง ๆ ดังนี้

ก. ปฏิกิริยาแบบนิวตรอน - แกมมา (n,  $\gamma$  reaction) ปฏิกิริยาแบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า radiative capture เป็นแบบที่เิกมากที่สุด โดยเกิดจากเทอร์มัลนิวตรอน เข้าทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุเกือบทุกธาตุ เช่น



ข. ปฏิกิริยาแบบนิวตรอน - โปรตอน (n, p reaction)

นิวตรอน - แอลฟา ฯลฯ ปฏิกิริยาแบบนี้ อนุภาคที่มีประจุ จะถูกส่งออกมาจากนิวเคลียสประกอบโดยที่อนุภาคเหล่านั้นจะต้องมีพลังงานสูงกว่ากำแพงกั้น (Coulomb barrier) ของนิวเคลียส ปฏิกิริยาแบบนี้มักเกิดระหว่างนิวเคลียสของธาตุเบา ๆ กับฟาสทนิวตรอน ยกเว้นธาตุ ลิเทียม - 6 กับโบรอน - 10 เท่านั้น ที่เกิดปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอนแล้วให้



### 2.3 การวิเคราะห์เหล็กในดิน

ดินเป็นสารผสมของธาตุหลายธาตุ ถ้านำดินลงอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู แล้วนำมาตรวจรังสีด้วยสเปกโตรมิเตอร์ จะไม่พบรังสีจากอะตอมของเหล็กที่มีมันตรังสี ที่เกิดจากปฏิกิริยา (n,  $\alpha$ ) ระหว่างเหล็ก กับเทอร์มัลนิวตรอน เพราะว่าเหล็กประกอบด้วยไอโซโทปหลายชนิด และมีเหล็ก - 58 เท่านั้น ที่จะเกิดอะตอมที่มีมันตรังสีได้ คือกลายเป็นเหล็ก - 59 แต่เหล็ก - 58 มีอยู่เป็นส่วนน้อย และค่าภาคตัดขวางต่ำ นอกจากนั้น ปริมาณรังสีที่แผ่จากเหล็ก - 59 ก็น้อย ที่มีมันตรังสีเล็กน้อยจากเหล็กในดิน จึงถูกกำบังภาพรังสีจากธาตุอื่น ๆ เช่น อลูมิเนียม, แมงกานีส, โซเดียม กลบเสียหมด แม้เหล็ก - 59 จะมีอายุยาว การรอคอยให้รังสีจากธาตุอื่น ๆ ที่กล่าวสลายหมดไปเอง ก็ไม่ช่วยให้วิเคราะห์เหล็กได้ เพราะยังมีรังสีจากสแกนเดียม - 46 ซึ่งมีอายุยาวเช่นกัน กลบรังสีของเหล็กไว้หมด

ดังนั้น ถ้าจะวิเคราะห์เหล็กด้วยนิวตรอน ต้องอาศัยฟอสฟอรัสที่นิวตรอนซึ่งทำปฏิกิริยากับเหล็ก - 56 ให้ธาตุที่มีมันตรังสีแมงกานีส - 56 นอกจากนี้ ภาคตัดขวางของธาตุต่าง ๆ ที่มีต่อฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่าภาคตัดขวางที่มีต่อเทอร์มัลนิวตรอน และโดยทั่วไปฟลักซ์ของฟอสฟอรัสนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ มักน้อยกว่าฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน นอกจากนั้นในดินจะมีแมงกานีส - 55 อยู่เสมอ ซึ่งจะเกิดแมงกานีส - 56 จากปฏิกิริยา (n,  $\alpha$ ) จึงจำเป็นต้องแยกให้ได้ว่ารังสีจากแมงกานีส - 56 เกิดจากเหล็กเท่าใด จากแมงกานีสเท่าใด จึงจะสามารถวิเคราะห์เหล็กได้

แคดเมียม เป็นธาตุที่ขวางกั้นเทอร์มัลนิวตรอนได้ ถ้าใช้แคดเมียมหุ้มก๊อกลงก่อนแล้วอานิวตรอน จะลดปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  ลงไปได้มาก เพราะนิวตรอนที่มีพลังงาน  $0 - 0.5 \text{ ev.}$  จะทะลุผ่านแคดเมียมเข้าไปไม่ได้ แต่ก็ยังมีนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า  $0.5 \text{ ev.}$  ผ่านแคดเมียมเข้าไปทำปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  ได้ และเมื่อนำก๊อกลงมาในแคดเมียมมาตรวจรังสีของแมงกานีส - 56 ก็ยังไม่สามารถทราบได้ว่าเกิดจากเหล็กเท่าใด เกิดจากแมงกานีสเท่าใด

วิธีการที่จะแก้ปัญหาข้างกล่าว อาจทำได้โดยอานิวตรอนกัมมันตรังสีต่อไปนี้

ก. อานแมงกานีสบริสุทธิ์  $m$  กรัม โดยไม่หุ้มแคดเมียม สมมุติว่ารังสีได้  $x$

ข. อานแมงกานีสบริสุทธิ์  $m$  กรัม โดยหุ้มแคดเมียม สมมุติว่ารังสีได้  $y$

ค. อานก๊อกลง  $w$  กรัม โดยไม่หุ้มแคดเมียม สมมุติว่ารังสีได้  $A$

ง. อานก๊อกลง  $w$  กรัม โดยหุ้มแคดเมียม สมมุติว่ารังสีได้  $B$

เรียกว่า แคดเมียมเรโซ (cadmium ratio) ของแมงกานีส  
ให้เท่ากับ  $R = \frac{x}{y}$

ดังนั้น  $A$  คือ จำนวนที่นับได้เนื่องจากแมงกานีส - 56 ในก๊อกลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอน กับแมงกานีส - 55 (สมมุติ =  $P$ ) รวมกับที่เกิดจากปฏิกิริยา  $(n, p)$  ระหว่างฟาสท์นิวตรอน กับเหล็ก - 56 (สมมุติให้เท่ากับ =  $Q$ )

ส่วน  $B$  คือ จำนวนที่นับได้เนื่องจากแมงกานีส - 56 ในก๊อกลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนที่สามารถทะลุผ่านแคดเมียมเข้าไปกับแมงกานีส - 55 รวมกับที่เกิดจากปฏิกิริยา  $(n, p)$  ระหว่างฟาสท์นิวตรอนกับเหล็ก - 56

$$\therefore A = P + Q \quad (9)$$

$$\therefore B = \frac{P}{R} + Q \quad (10)$$

จากสมการ (9) และ (10) จะได้ว่า

$$\text{รังสีที่เกิดจากเหล็กในก๊อกลงอย่างเดียว} \quad Q = \frac{BR - A}{R-1} \quad (11)$$

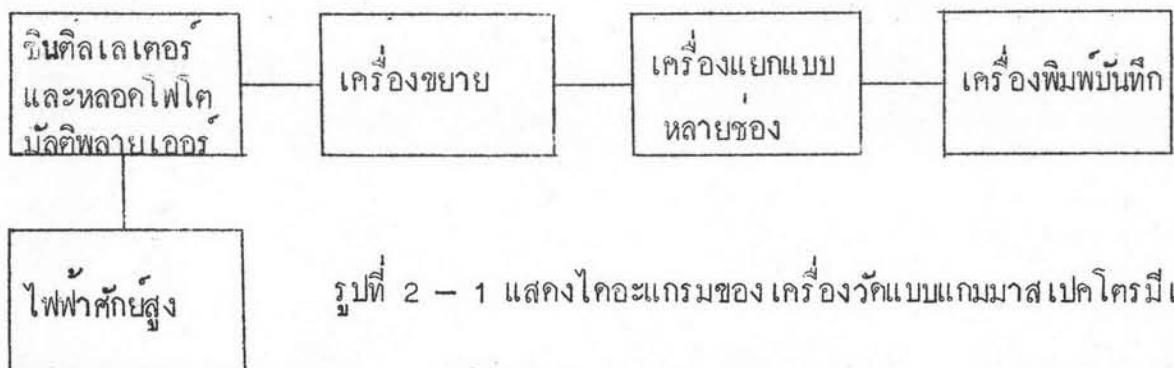
จากสมการ ( 11) จะสามารถหาวัสดุของแมงกานีส - 56 ที่เกิดจากเหล็ก - 56 ในดินเป็นเท่าใด เมื่อต้องการจะหาเป็นน้ำหนักของเหล็กในดิน  $w$  กรัม นั้น จะต้องใช้เหล็กบริสุทธิ์ซึ่งอาจนิเวศรอนโดยหุ้มแคดเมียม แล้ววัดรังสีจากเหล็กกับมันตรังสี เป็นค่ามาตรฐาน ใช้เปรียบเทียบในการคำนวณ

#### 2.4 การวิเคราะห์ไทเทเนียมในดิน

การวิเคราะห์ไทเทเนียมในดิน อาศัยหลักการ เกี่ยวกับการวิเคราะห์เหล็กดังกล่าวแล้ว ปฏิกริยา  $(n,p)$  ระหว่างฟอสฟอรัสและไทเทเนียม - 46 จะทำให้เกิดสแกนเทียม - 46 แต่ในขณะเดียวกัน จะมีสแกนเทียม - 46 ซึ่งเกิดจากสแกนเทียม - 45 เข้าทำปฏิกริยากับเทอร์มัลนิวตรอนด้วย ดังนั้น การคำนวณหาฟอสฟอรัส - 46 จากปฏิกริยา  $(n,p)$  ระหว่างฟอสฟอรัสกับไทเทเนียม - 46 มีค่าเป็นเท่าใด จะหาได้จากสมการ ( 11) ในหัวข้อ 2.3 และเมื่อเอาไทเทเนียมบริสุทธิ์ไปอานิวตรอนโดยหุ้มแคดเมียม จะสามารถหาค่ามาตรฐานในการ เปรียบเทียบหาน้ำหนักของไทเทเนียมในดินได้

#### 2.5 เครื่องมือวัดรังสีแบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องมือวัดรังสีแบบนี้ ประกอบด้วยหัวเครื่องนับ ซึ่งเป็นผลึกของโซเดียมไอโอไดด์ ( $NaI$  crystal) เรียกว่า Scintillator ต่ออยู่กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ โดยมีไฟฟ้าศักย์สูงช่วย (high voltage power supply) ทั้งหมดต่อไปยังเครื่องขยาย (amplifier) , เครื่องแยกแบบหลายช่อง ( multichannel analyzer) และเครื่องพิมพ์บันทึก (type writer) ดังโคอะแกรม



รูปที่ 2 - 1 แสดงโคอะแกรมของเครื่องวัดแบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

กลไกการทำงานของเครื่องชนิดนี้ คือ เมื่อรังสีแกมมาหรือโฟตอนเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของโซเดียมไอโอไดค์แล้ว จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นสามชนิด คือ ปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก (photo-electric effect) แบบคอมป์ตัน (compton effect) และแบบเกิดอิเล็กตรอนคู่ (pair production) ในแต่ละกระบวนการพลังงานของรังสีแกมมา จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในอะตอมของโซเดียมไอโอไดค์ ซึ่งเป็นสารเรืองแสง (phosphor) วัตถุประสงค์ของปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก และแบบคอมป์ตัน ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งสอง จะเกิดแสงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน พลังงานของแสงเป็นปฏิกิริยากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ถ้าเป็นปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริก รังสีแกมมาจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ดังนั้น แสงที่เกิดจึงเป็นปฏิกิริยากับพลังงานของรังสีแกมมา ถ้าเป็นปฏิกิริยาแบบคอมป์ตัน รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานส่วนเดียวให้แก่อิเล็กตรอน ในการเกิดปฏิกิริยา 1 ครั้ง

พลังงานแสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (voltage pulse) โดยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ขยายให้สัญญาณโตขึ้นโดยเครื่องขยาย แล้วถูกส่งเข้าเครื่องเลือกความสูงของสัญญาณ (pulse height analyzer) จากนั้นจะถูกส่งเข้าระบบความจำ (memory system) ตามของต่าง ๆ ของเครื่องวัด จำนวนเลขที่ของช่องจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาด้วย สัญญาณที่เครื่องวัดรับไว้จะส่งเข้าเครื่องออสซิลโลสโคป (oscilloscope) หรือเครื่องพิมพ์บันทึกต่อไป