

2.1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

ในปี ค.ศ. 1896 Becquerel ได้พบว่าสินแร่ยูเรเนียมมีคุณสมบัติเป็นสารกัมมันตรังสี และต่อมา Mme. Curie และนักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ ก็พบธาตุกัมมันตรังสีอีกจำนวนมาก เช่น โพลอเนียม (Polonium) เรเดียม (Radium) ฯลฯ เป็นต้น จากการศึกษาต่อ ๆ มาพบว่าลักษณะการสลายตัว (decay) ของสารกัมมันตรังสีนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารรังสีที่มีอยู่ ให้

N_0 = จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ตอนเริ่มแรก

N = จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีที่เวลา t ใด ๆ

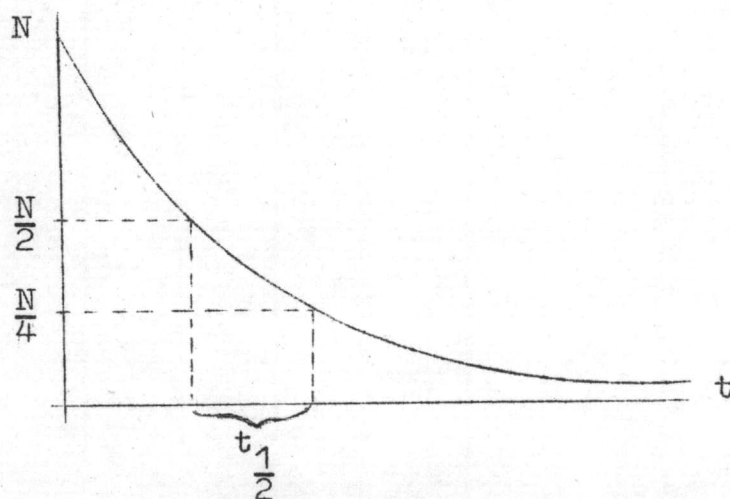
λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-1)$$

จะเห็นได้ว่าลักษณะการสลายตัวจะมีลักษณะดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีและค่าครึ่งชีวิต

ช่วงระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของของเดิมเรียกว่าครึ่งชีวิต (half life); $t_{\frac{1}{2}}$

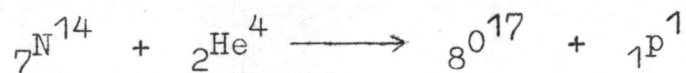
$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \\ t_{\frac{1}{2}} &= \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} \text{ให้ } A &= \text{ความแรงของสารกัมมันตรังสี} \\ A &= \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \\ N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ A &= A_0 e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (2-3)$$

ดังนั้น ในกรณีที่เราทราบความแรงที่ขณะใด ๆ ย่อมจะหาความแรงที่เวลาตั้งต้นใด ๆ ได้

2.1.1 ไอโซโทปกัมมันตรังสีประดิษฐ์

ในปี ค.ศ. 1919 Rutherford สามารถสร้างปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยการยิง (bombard) อนุภาคอัลฟา (α , ${}^2\text{He}^4$) เข้าไปในกลุ่มธาตุไนโตรเจน ซึ่งมีผลทำให้เกิดธาตุใหม่เป็นออกซิเจนตามสมการ



ซึ่งจะเขียนสมการนิวเคลียร์นี้ย่อ ๆ ว่า $\text{N}^{14}(\alpha, p) \text{O}^{17}$

จากการศึกษาต่อ ๆ มา พบว่านอกจากอนุภาคอัลฟาแล้ว ยังสามารถใช้อนุภาคอื่น ๆ เช่น อนุภาคนิวตรอน (n), โปรตอน (p), ดิวเทอรอน (d) และรังสีแกมมา (γ) ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์มีการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ให้กลายเป็นสารกัมมันตรังสีได้ ปฏิกิริยาเหล่านี้ได้แก่ (n, γ), (n, p), (n, α), (n, 2n), (p, n), (p, γ), (d, p), ((d, n),

(α, p) , (α, n) , (d, α) , (γ, n) อนุภาคหรือรังสีตัวแรกในวงเล็บ หมายถึงอนุภาคที่ใช้เป็นตัวยิงและตัวหลังหมายถึงผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

แหล่งที่จะให้อนุภาคที่ใช้เป็นตัวยิงแล้วเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังกล่าว ได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาค (Particles Accelerators), ต้นกำเนิดอนุภาคต่าง ๆ (Sources) หรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขนาดต่าง ๆ (Reactors)

2.1.2 การเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่อสารกัมมันตรังสีถูกสร้างขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ สารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นย่อมจะมีการสลายตัวตลอดเวลากว

ให้ P = อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสี

t = เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N$$

$$N = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + N_0 e^{-\lambda t}$$

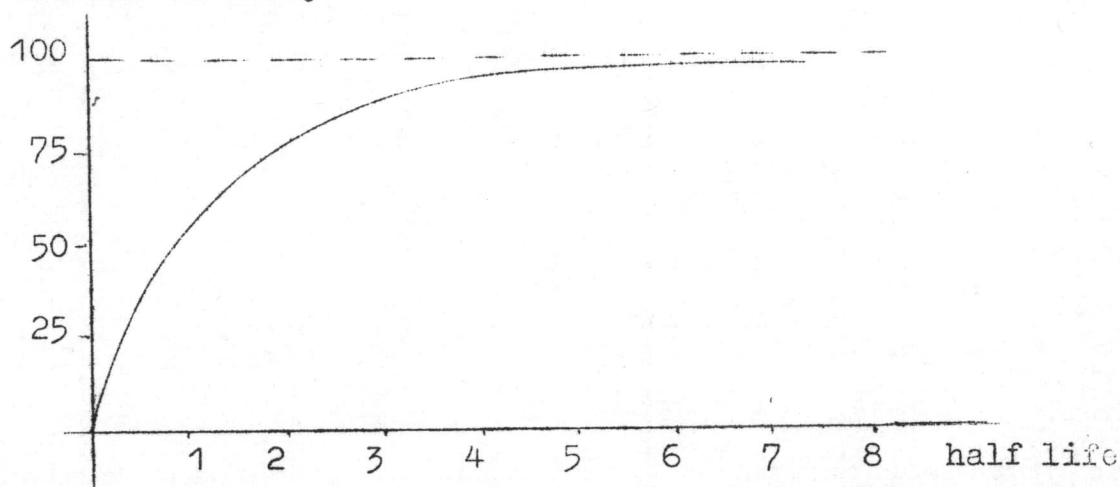
ในกรณีที่ตั้งต้นจากสารที่ไม่มีรังสีเลย $N_0 = 0$

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

$$A = \lambda N = P (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2-4)$$

ลักษณะการเกิดสารกัมมันตรังสีจะเป็นไปดังรูปที่ 2-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสีจะมีค่ามากในตอนแรกและอัตราการเกิดจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงค่าอิมิตัว

% Saturation activity



รูปที่ 2-2 การเกิดสารกัมมันตรังสีเทียบกับครึ่งชีวิต

2.2 การวิเคราะห์โดยนิวตรอนแอคติเวชัน

ตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1.1 อนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้

ในปี ค.ศ. 1936 George Havesy และ H.Levi ได้เริ่มใช้อนุภาคนิวตรอนยิงสารผสมของธาตุหายาก (Rare earth mixture) เพื่อการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ การยิงอนุภาคนิวตรอนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสของธาตุนี้เรียกว่า นิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation) ในที่นี้จะจำแนกอนุภาคนิวตรอนออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal Neutron) เป็นนิวตรอนที่อุณหภูมิปกติมีพลังงาน 0.025 eV ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ)
2. นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนที่วิ่งเร็ว (Epithermal and Fast Neutron) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, p) , (n, α) ได้ และถ้าพลังงานยิ่งสูงขึ้นจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบ เช่น ถ้านิวตรอนมีพลังงานถึง 10 MeV จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบ $(n, 2n)$
ถ้านิวตรอนมีพลังงานถึง 30 MeV จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบ $(n, 3n)$

2.2.1 นิวตรอนแอคติเวชัน

ให้ P = อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสี

ϕ = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อ cm^2 ต่อวินาที

σ = ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์จากนิวตรอนของธาตุ เรียกว่า activation cross section มีหน่วยเป็น cm^2

N = จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุ

$$\text{จะได้ } P = N\phi\sigma \quad (2-5)$$

$$\text{จากสมการ (2-4) } A = P(1 - e^{-\lambda t})$$

$$A = N\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2-6)$$

$$= \frac{\sigma\phi W f}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \times 6.02 \times 10^{23} \quad (2-7)$$

เมื่อ W = น้ำหนักของธาตุ, M = atomic mass

f = จำนวนของไอโซโทปของธาตุนั้นในธรรมชาติ (abundance)

6.02×10^{23} = Avogadro's number

จากสมการ (2-3) ความแรงของสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลาผ่านไป T

$$A = \frac{\sigma\phi f W}{M} \times 6.02 \times 10^{23} (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda T} \quad (2-8)$$

$$\text{หรือ } W = \frac{MA e^{\lambda T}}{\sigma\phi f (1 - e^{-\lambda t}) \times 6.02 \times 10^{23}} \quad (2-9)$$

พิจารณาสมการ (2-9) จะเห็นว่า ค่าทางขวามือ คือ M, λ, T, f, t เป็นค่าที่ทราบได้ และ A เป็นค่าที่จะหาได้จากเครื่องวัด แต่เนื่องจาก σ

และ ϕ เป็นค่าที่ไม่สามารถจะหาค่าได้อย่างถูกต้องแน่นอน ถ้าแทนค่า ϕ และ ϕ ลงไปแล้ว ค่าของ w ที่ได้ก็จะเป็นค่าที่ไม่แน่นอนไปด้วย

ดังนั้นในการหาปริมาณของธาตุในสารผสมวิธีที่ศึกษาคือ ใช้วิธีเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของธาตุที่ต้องการจะหาปริมาณ โดยการอาบรังสีทั้งสารที่ต้องการหาและสารมาตรฐานในเวลาเดียวกัน แล้ววัดปริมาณรังสีที่เกิดจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานหลังการอาบรังสีแล้ว

ให้ w_x = น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง

w_s = น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน

C_x = จำนวนการนับรังสีของสารตัวอย่างที่ต้องการจะหาปริมาณธาตุ

C_s = จำนวนการวัดรังสีของสารมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบที่เวลาเดียวกับ C_x จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{w_x}{w_s} = \frac{C_x}{C_s}$$

$$w_x = \frac{w_s C_x}{C_s} \quad (2-10)$$

2.2.2 เทคนิคของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์โดยนิวตรอนแอกติเวชันมี 2 แบบ คือ

1. การวิเคราะห์โดยไม่อาศัยวิธีทางเคมี (Non-Destructive Neutron Activation Analysis) คือการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันโดยตรง ไม่จำเป็นต้องมีการแยกสารตัวอย่างจากรูปเดิมเลย แต่อาจจะเปลี่ยนรูปร่างเพื่อความเหมาะสมโดยบาง เช่น บดให้เป็นผง เป็นต้น เมื่ออาบรังสีแล้วก็สามารถนำมาวัดรังสีเปรียบเทียบกันได้เลย

2. การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีทางเคมีเข้าช่วย (Destructive Neutron Activation Analysis) คือการนำกรรมวิธีทางเคมีมาช่วยแยกธาตุต่าง ๆ

ออกจากรูปข้างก่อนหรือหลังการอาบรังสี เนื่องจากสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีธาตุหลายธาตุที่ให้อัตราที่มีพลังงานขนาดเท่ากัน, ใกล้เคียงกัน หรือรบกวนกันในขณะนำมาวัดรังสีโดยวิธีแรก ทำให้ไม่สามารถจะหาปริมาณที่แน่นอนได้ หรือต้องใช้เวลารอให้ธาตุที่ไม่ต้องการหาย สลายตัวไปหมดจนเกินไป จึงแยกธาตุออกจากกันเสียก่อน แล้วจึงดำเนินการอาบรังสี หรือวัดรังสีเพื่อเปรียบเทียบหาปริมาณต่อไป

2.2.3 ความไวและข้อดีของการวิเคราะห์หาธาตุด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

ในการอาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลานาน ๆ หลาย ๆ เท่าของค่าครึ่งชีวิตของธาตุเทอม $(1 - e^{-\lambda t})$ จะมีค่าใกล้ 1 ซึ่งเรียกว่าเทอมอิ่มตัว (saturation factor)

ถ้าวัดความแรงของธาตุในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เทียบกับค่าครึ่งชีวิตของธาตุนั้นแล้ว ค่าของ $e^{-\lambda T}$ จะเข้าใกล้ 1

นำหนักของธาตุตัวอย่างจากสมการ (2-9) จะเขียนได้เป็น

$$W = \frac{MA}{\sigma \phi f 6.02 \times 10^{23}} \quad (2-11)$$

จากสมการ (2-11) นี้ จะเห็นได้ว่าค่าความไวของวิธีวิเคราะห์โดยนิวตรอนแอกติเวชันนี้จะมีค่ามากขึ้น ถ้าประสิทธิภาพของเครื่องวัดสูง ซึ่งจะทำให้ค่า A วัดได้ยิ่งละเอียดดังสมการ

$$\text{ความแรงของรังสี, } A = \frac{\text{ค่าที่นับได้ต่อวินาที}}{\text{ประสิทธิภาพของเครื่องวัด}} \times 100 \quad (2-12)$$

นอกจากนี้ จะเห็นว่าค่าความไวจะมีมากขึ้น ถ้า M มีค่าน้อย σ , ϕ , f มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของ W ที่วัดได้มีค่าละเอียด

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชันจะให้ผลดีเมื่อเครื่องวัดมีประสิทธิภาพสูง ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เป็นธาตุเบา ๆ และมีน้อยธาตุ ซึ่งจะทำให้ค่า σ และ f ถูกต้องยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ถ้าเครื่องกำเนิดนิวตรอนยังมีความสามารถในการให้นิวตรอนฟลักซ์มากขึ้น ย่อมจะทำให้ผลการวิเคราะห์ทำได้

ละเอียดยิ่งขึ้น

ถ้าเราใช้เครื่องวัด Geiger-Muller แบบธรรมดาซึ่งมีประสิทธิภาพ 10 % วัดได้ละเอียด 10 ครั้งต่อนาที และใช้นิวตรอนฟลักซ์ขนาด 10^{12} นิวตรอนต่อซม.² ต่อวินาที สำหรับธาตุที่มีองค์ประกอบ (abundance) 100 % ความละเอียดของน้ำหนักที่จะหาได้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (2-12)} \quad W &= \frac{M \times \frac{10}{60} \times \frac{100}{10}}{10^{12} \times 0 \times 10^{-24} \times \frac{100}{100} \times 6.02 \times 10^{23}} \\ &= \frac{M \times 10^{-12}}{.366} = \frac{3M}{0} \mu\text{g.} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าวิธีวิเคราะห์นี้สามารถหาปริมาณของธาตุในตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้เป็นไมโครกรัม และในกรณีที่เป็นการวิเคราะห์โดยไม่อาศัยวิธีทางเคมี (Non-Destructive Neutron Activation Analysis) ก็จะทำให้สารที่ต้องการหา นั้นมีความบริสุทธิ์และคงรูปลักษณะเดิมอยู่ได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีทางเคมี (Destructive Neutron Activation Analysis) ก็จะใช้สารรังสีทำหน้าที่เป็น tracer หาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไประหว่างกรรมวิธีทางเคมีได้

2.2.4 ข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

ข้อเสียของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชันนั้นนับว่าน้อยเหลือเกินเมื่อเทียบกับผลที่ได้กล่าวแล้ว ข้อเสียส่วนใหญ่ คือ การวิเคราะห์แบบนี้ต้องใช้แหล่งให้นิวตรอนที่มีค่านิวตรอนฟลักซ์สูงจึงจะใช้ได้ผลดี ข้อเสียอีกอย่างหนึ่ง คือ การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณทั้งหมดที่มีอยู่ของธาตุ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปใดก็ตาม จึงไม่สามารถบอกลักษณะการรวมตัวหรือลักษณะสารประกอบที่มันจับตัวกันอยู่ได้ ทำให้ไม่สามารถนำธาตุเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงจากการวิเคราะห์แบบนี้ ข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นได้จากการวิเคราะห์โดยนิวตรอนแอกติเวชันเกิดขึ้นได้จาก

1. นิวตรอนฟลักซ์ไม่สม่ำเสมอ ข้อผิดพลาดนี้จะเกิดขึ้นมาก ถ้าการอาบรังสีสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเป็นกนละเวลากัน ถึงแม้ว่าตำแหน่งที่อาบรังสีจะเหมือนกันทุกประการก็ตาม ปริมาณนิวตรอนที่ออกจากแหล่งให้นิวตรอนย่อมเปลี่ยนแปลงไปบางตามเวลา ถ้าสารตัวอย่างและสารมาตรฐานถูกอาบรังสีในเวลาเดียวกัน ก็ย่อมจะเกิดความผิดพลาด เนื่องจากตำแหน่งที่วางสารทั้งสองย่อมไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกัน ฟลักซ์ย่อมไม่เท่ากันทุกประการ วิธีแก้ อย่างหนึ่งก็คือ อาบรังสีโดยใช้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานอย่างละหลาย ๆ ชุดวางที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่าที่คำนวณได้จากการทดลองของสารหลาย ๆ ชุดนั้น

2. การกำบังตนเอง (Self Shielding) เนื่องจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ใช้ไม่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เช่น สถานะ, ความหนาแน่น, ลักษณะของปริมาตร ฯลฯ ทำให้การกำบังและการดูดกลืนนิวตรอนไม่เหมือนกัน ทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่จะทำให้เกิดผลทางนิวตรอนแอคติเวชันผิดไปด้วย

3. การเตรียมและความเข้มข้นของสารมาตรฐาน สารมาตรฐานนอกจากจะให้ผลตามข้อ 1. และ ข้อ 2. แล้ว ลักษณะของสารมาตรฐาน, ปริมาณของสารมาตรฐานเมื่อเทียบกับสารตัวอย่าง ถ้าต่างกันมาก ก็จะทำให้ผลการวัดรังสีผิดไปด้วย วิธีการวิเคราะห์หาค่านิวตรอนแอคติเวชันนี้ ส่วนใหญ่มักจะใช้หาธาตุที่มีปริมาณน้อยในสารต่าง ๆ สารมาตรฐานที่ใช้มักมีปริมาณมากกว่าในสารตัวอย่าง ทำให้รังสีที่วัดแรงมากเมื่อเทียบกับสารตัวอย่างเครื่องวัดอาจวัดไม่ทัน ในการเตรียมสารตัวอย่างจึงควรเตรียมให้มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่มีอยู่ในสารตัวอย่างมากที่สุด เพื่อให้ผลการวัดพอ ๆ กัน ก็จะทำให้ผลการวัดดี

4. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดแทรกซ้อนขึ้น (Interfering Nuclear Reaction) ปฏิกิริยานิวเคลียร์หลายอย่างอาจจะทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีชนิดเดียวกันได้ ปฏิกิริยา (n, p) , (n, α) เนื่องจากนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอนอาจจะทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีเช่นเดียวกับที่เกิดจากปฏิกิริยา (n, γ) ได้ เช่น ในการหาปริมาณธาตุโซเดียมจาก Na^{24} ตามสมการ

$\text{Na}^{23} (n, \gamma) \text{Na}^{24}$ ผลของการวัด Na^{24} อาจจะไม่ใช้ Na^{24} จากธาตุโซเดียม
 เพียงอย่างเดียว อาจจะเป็น Na^{24} ที่เกิดจากธาตุอูมิเนียมได้ตั้งสมการ Al^{27}
 $(n, \alpha) \text{Na}^{24}$ แต่อย่างไรก็ตามนี้ว่ายังมีข้อคือยู่ที่ว่าค่า cross section
 ของปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, p) และ (n, α) ค่ามากเมื่อเทียบกับค่า cross
 section ของปฏิกิริยาแบบ (n, γ) ปฏิกิริยาการแทรกซอนนี้ จะมีผลมาก ในกรณี
 ที่สารตัวอย่างมีปริมาณมาก ถ้าสารตัวอย่างมีธาตุที่ต้องการหาปริมาณน้อย ผลเนื่องจาก
 ปฏิกิริยาแทรกซอนนี้จะมีน้อยจนไม่ต้องคำนึงถึงเลย วิธีแก้อย่างหนึ่งก็คือ พยายามใช้
 เฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนในการอาบรังสี เช่น นิวตรอนในเทอร์มัลคอลัม (Thermal
 Column) เป็นต้น

5. ข้อผิดพลาดอื่น ๆ อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง
 ความผิดพลาดเนื่องจากการเปื้อนสารต่าง ๆ (Contamination) ซึ่งจะทำให้
 ผลที่ได้ผิดพลาดมากเพราะธาตุที่ต้องการหาปริมาณเพียงปริมาณน้อย ๆ ข้อผิดพลาดเนื่อง
 จากการวัดก็นับว่ามีผลมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำแหน่งที่วางของสารตัวอย่างและ
 สารมาตรฐานจะต้องเหมือนกันทุกประการ

006302