บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 แหล่งกำเนิดของนิวตรอน (Neutron Sources)

แหล่งที่จะใช้นิวตรอนมี 3 แหล่งใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactors)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูสามารถผลิตนิวตรอนได้เป็นจำนวนมาก นิวตรอนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมี 4 ชนิด แบ่งตามขนาดของพลังงานคือ

ก. นิวตรอนวิ่งช้า (Thermal Neutron)มีพลังงานระหว่าง0–1eV

ข. นิวตรอนวิ่งปานกลาง แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

Epithermal Neutron มีพลังงานระหว่าง 1 eV - 1 KeV

Intermediate Neutron มีพลังงานระหว่าง 1 KeV - 0.1 MeV

ค. นิวตรอนวิ่งเร็ว (Fast Neutron)มีพลังงานระหว่าง 0.1 Mev-10 MeV

ง. นิวตรอนวิ่งเร็วมาก(Very Fast Neutron)มีพลังงานสูงกว่า 10 MeV ขึ้นไป

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมีนิวตรอนวิ่งช้า ที่มีพลังงาน0.025 eV มากที่สุด และธาตุส่วนมากสามารถจะมีปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ(n, γ) กับ นิวตรอนวิ่งช้าได้ดี และมีค่าพื้นที่ภาคตัดขวาง(Cross Section) ที่เหมาะมากในช่วงนี้ ฉะนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ทำการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่น

2.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerators)

เครื่องเร่งอนุภาคใช้เร่งอนุภาคโปรตอน ดิวทีเรียม ทริเตียม หรืออนุภาคอัลฟ่าให้มีพลังงานสูง แล้วใช้ยิงเป้า (Target) จะเกิดปฏิกริยา

นิวเคลียร์ได้นิวตรอนออกมาใช้ เช่น ปฏิกริยา

$H^2(d,n)\ He^3$

$H^3(d,n)\ He^4$

$Li^7(p,n)\ Be^7$

$Be^9(d,n)\ B^{10}$

2.1.3 <u>แหล่งกำเนิดไอโซโทปิค</u> (Isotopic Sources)

มีธาตุกัมมันตภาพรังสีอยู่หลายชนิด ซึ่งสามารถทำปฏิกริยานิวเคลียร์ (α,n) หรือ (γ,n) ให้นิวตรอนพลังงานต่าง ๆ ออกมา และสามารถนำไปใช้ทำการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่นได้เช่นเดียวกับ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเหมือนกัน แต่ต้องมี Be เป็นเป้า เช่น

Cm^{242} - Be $\qquad$ Cm^{244} - Be

Po^{210} - Be $\qquad$ Pu^{238} - Be

Sb^{124} - Be $\qquad$ Am^{241} - Be

แหล่งกำเนิดเหล่านี้สามารถผลิตนิวตรอนอยู่ในช่วง 10^4–10^8 ตัวต่อวินาที

เมื่อปีค.ศ. 1969 ได้มีการพบธาตุ Cf – 252 ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใหม่สำหรับยุคนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้ธาตุอื่นเป็นเป้า Cf – 252 มีครึ่งชีวิต (Half life) 2.55 ปี มีอัตราการสลายตัวโดยการปลอยอนุภาคอัลฟา 97% เกิดสปอนเทเนียส ฟิชชั่น (Spontaneous Fission) 3.4% และให้นิวตรอนออกมาประมาณ 3.5 ตัวต่อการเกิดฟิชชั่น 1 ครั้ง คือ Cf – 252 ปลอยนิวตรอนออกมาประมาณ 2.4×10^6 ตัว/ไมโครกรัม–วินาที

2.2 <u>ปฏิกริยาของนิวตรอนต่อสาร</u> (Interaction of Neutrons with Matter)

สำหรับนิวตรอนวิ่งช้า ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ(n, γ)เช่น

ปฏิกริยา $Cu^{65}(n,\gamma)\ Cu^{66}$ และ $Co^{59}(n,\gamma)\ Co^{60}$ ซึ่งปฏิกริยานิวเคลียร์นี้ ใช้เป็นประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่น

สำหรับนิวตรอนวิ่งเร็ว ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ (n,p) หรือ (n, α) เช่น ปฏิกริยา $N^{14}(n,p)\ C^{14}$ และ $B^{10}(n,\alpha)\ Li^{7}$ แต่ถ้านิวตรอนมีพลังงานสูงมาก ๆ จะเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ขึ้นได้หลายแบบ ตัวอย่างเช่น ปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ (n,2n) ต้องการพลังงานของนิวตรอนประมาณ 10 MeV ตัวอย่างคือ $Sb^{121}(n,2n)\ Sb^{120}$ และปฏิกริยาแบบ (n,3n) ต้องการพลังงานของนิวตรอนประมาณ 30 MeV ตัวอย่างคือ $La^{139}(n,3n)\ La^{137}$

พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสแตกออกเป็นโปรตอนและนิวตรอน เรียกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียส(Binding Energy)คำนวณได้จากสูตร

$$E_B = ZM_H + NM_N - M \quad \text{.....(2-1)}$$

โดย E_B = พลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียส (MeV)

Z = จำนวนโปรตอนในนิวเคลียส

N = จำนวนนิวตรอนในนิวเคลียส

M_H = มวลของไฮโดรเจนอะตอม(938.77 MeV)

M_N = มวลของนิวตรอนอะตอม(939.55 MeV)

M = ค่ามวลไอโซโทปิค(Isotopic Mass)ของอะตอม (MeV)

2.3 นิวตรอนแอคติเวชั่น (Neutron Activation)

เมื่อธาตุถูกยิงด้วยนิวตรอน บางส่วนของอะตอมของธาตุนั้นจะกลายเป็นธาตุกัมมันตภาพรังสี อัตราการเกิดธาตุกัมมันตภาพรังสีนี้ขึ้นอยู่กับสิ่งสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

ก. จำนวนอะตอมของธาตุที่นำไปอาบรังสี รวมทั้งปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Natural Isotopic Abundance) ของธาตุนั้นด้วย

ข. คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุนั้น เช่น ความสามารถในการจับนิวตรอน

ค. ระยะเวลาของการอาบรังสี

ง. ปริมาณนิวตรอนที่ใช้อาบธาตุนั้น

สมการที่แสดงถึงกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้น ภายหลังอาบรังสีนิวตรอน ชั่วระยะเวลาหนึ่ง คือ

$$A = N\sigma\phi\,(1-e^{-\lambda T}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2\text{-}2)$$

โดย A = อัตราการสลายตัวหรือความแรงของธาตุกัมมันตภาพรังสี ที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น disintegration per sec (dps)

N = จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่วัดอัตราการสลายตัว (ก่อนอาบรังสี)

$= \frac{m\,No}{M} \cdot f$

m = น้ำหนักทั้งหมดของธาตุที่นำไปอาบรังสี (กรัม)

No = ตัวเลขอาโวกาโดร (Avogadro Number)

$= 6.025 \times 10^{23}$ อะตอม/กรัม–อะตอม

M = น้ำหนักกรัมอะตอมของธาตุที่วัดอัตราการสลายตัว (ก่อนอาบรังสี)

f = จำนวนของไอโซโทปของธาตุที่วัดอัตราการสลายตัวที่มีอยู่ในธรรมชาติ

σ = ค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของนิวตรอนในการแอคติเวชั่น (Activation Cross Section) มีหน่วยเป็น ซม.^{2} โดยปรกติ ค่าพื้นที่ภาคตัดขวางมีหน่วยอยู่ในรูปของบาร์น (Barn), 1 บาร์น = 10^{-24} ซม.^{2}

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron Flux) มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ซม.^{2}–วินาที

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay Constant)

$= \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$ ($t_{\frac{1}{2}}$ = ครึ่งชีวิต)

T = เวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน

สมการ (2 – 2) สามารถเขียนได้เป็น

$$A = \frac{m\,No}{M} \cdot f\sigma\phi(1-e^{-\lambda T}) \quad \text{.....(2-3)}$$

อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากถูกยิงด้วยนิวตรอนแล้วที่เวลา t_w ใด ๆ จะลดลงด้วยแฟคเตอร์ $e^{-\lambda t_w}$ เหลืออัตราการสลายตัวเป็น

$$A = \frac{m\,No}{M} \cdot f\sigma\phi(1-e^{-\lambda T})e^{-\lambda t_w} \quad \text{.....(2-4)}$$

หรือ $$m = \frac{AMe^{\lambda t_w}}{f\sigma\phi\,No(1-e^{-\lambda T})} \quad \text{.....(2-5)}$$

ค่าที่อยู่ทางขวามือของสมการ (2 – 5) เป็นค่าที่สามารถวัดได้จึงสามารถคำนวณหาค่า m ได้ แต่ค่า f, σ และ ϕ ไม่สามารถที่จะรู้ค่าได้ถูกต้องมากนัก เพราะฉะนั้น การคำนวณหาค่า m จึงไม่เป็นการหาที่ง่ายนัก ในการหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง วิธีที่ดีที่สุดคือ ใช้วิธีเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่จะหาปริมาณภายใต้สภาวะอย่างเดียวกันทุกอย่าง

จากสมการ (2 – 4) ให้

A_s = อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน

A_x = อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่ต้องการหาปริมาณ ในสารตัวอย่าง

m_s = น้ำหนักของธาตุที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน

m_x = น้ำหนักของธาตุที่ต้องการหาปริมาณในสารตัวอย่าง

จะได้

$$A_s = \frac{m_s No}{M} \cdot f\sigma\phi\,(1-e^{-\lambda T})e^{-\lambda t_w}$$

$$A_x = \frac{m_x No}{M} \cdot f\sigma\phi\,(1-e^{-\lambda T})e^{-\lambda t_w}$$

เมื่อใช้เวลาในการนับรังสีนิวตรอน และเวลาก่อนนับรังสีเท่ากัน ในที่สุดจะได้

$$\frac{As}{Ax} = \frac{m_s}{m_x}$$

หรือ $$\frac{Cx}{Cs} = \frac{m_s}{m_x} \quad \text{.....(2 - 6)}$$

ในเมื่อ Cs, Cx คือ อัตราการนับรังสีของธาตุซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐานและธาตุที่ต้องการหาปริมาณ ตามลำดับ

จากสมการ(2 - 6) จะเห็นว่า อัตราการสลายตัวของธาตุไม่ขึ้นกับค่าพื้นที่ภาคตัดขวาง(σ) นิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) และประสิทธิภาพของเครื่องวัด แต่จะขึ้นกับน้ำหนักของธาตุซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐานและน้ำหนักของธาตุที่ต้องการหาปริมาณ

หลักการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่น มีอยู่ 2 แบบ คือ

ก. <u>การวิเคราะห์โดยไม่อาศัยวิธีทางเคมี</u>(Non-Destructive Neutron Activation Analysis)

คือนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน แล้วนำมาวัดรังสีเปรียบเทียบกัน ในสภาวะเหมือนกันทุกอย่าง แล้วคำนวณน้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่างโดยใช้สมการ(2 - 6) ซึ่งการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้ใช้วิธีการแบบนี้

ข. <u>การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีทางเคมี</u>(Destructive Neutron Activation Analysis)

สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้น บางทีเป็นส่วนผสมของธาตุหลายอย่าง มิได้มีแต่ธาตุเดียวโดด ๆ อาจมีการรบกวนซึ่งกันและกันได้ ส่วนใหญ่มี peak onergy ใกล้เคียงกันไม่สามารถแยกได้ง่าย ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีทางเคมี เช่น การตกตะกอน การสกัดและการกลั่น เป็นต้น เมื่อแยกธาตุที่ต้องการได้บริสุทธิ์แล้ว จึงค่อยทำการวัดรังสี

2.4 ความไวของการวิเคราะห์หาธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่น

ในการอาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลานาน ๆ หลาย ๆ เท่าของค่าครึ่งชีวิตของธาตุ เทอมอิ่มตัว(Saturation Factor) คือ $1-e^{-\lambda T}$ ในสมการ(2 – 5) จะมีค่าใกล้ 1 และหลังจากอาบรังสีนิวตรอนแล้ว ทำการวัดอัตราการสลายตัวในช่วงระยะเวลาอันสั้น เมื่อเทียบกับครึ่งชีวิตของธาตุแล้ว น้ำหนักของธาตุ ในสารตัวอย่างเขียนได้เป็น

$$m = \frac{AM}{f\sigma\phi N_o} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2\text{-}7)$$

และโดยที่

$$\text{อัตราการสลายตัวของรังสี } A(\text{dps}) = \frac{\text{ค่าที่นับได้ต่อวินาที}}{\text{ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสี(\%)}} \times 100$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ความไวของการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่นนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสี ถ้าเครื่องวัดมีความไวสูง จะทำให้วิธีการนี้วัดได้ไวมาก

นอกจากนี้ถ้าปริมาณของนิวตรอน พื้นที่ภาคตัดขวางและปริมาณของธาตุนั้นที่มีในธรรมชาติมีค่ามาก จะทำให้การวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างมีความไวมาก คือสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างที่เป็นปริมาณน้อย ๆ เป็นไมโครกรัมได้ดี

2.5 ข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชั่น

ก. เกิดขึ้นเนื่องจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานต่าง ๆ ได้รับปริมาณนิวตรอนไม่เท่ากัน สำหรับการวิเคราะห์ครั้งนี้ อาบรังสีนิวตรอนในทออาบรังสี Trough Tube ในบริเวณกลางท่อจะมีนิวตรอนฟลักซ์สูงสุด แล้วค่อย ๆ ลดลงมาตามระยะทางจากใจกลางท่อทั้งสองข้าง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการสร้างกราฟ

คอนทัวร์(Contour Graph) ไว้แก้นิวตรอนฟลักซ์ เพื่อคิดเทียบให้สารตัวอย่าง และสารมาตรฐานรับนิวตรอนฟลักซ์ปริมาณเท่ากันทุกตัวอย่าง รายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 4.2.2 บทที่ 4

ข. เกิดขึ้นเนื่องจากความแรงของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานมีความแรงของรังสีแตกต่างกันมาก เมื่อวัดความแรงของสารมาตรฐานจะทำให้จำนวนนับของรังสีหายไปเป็นบางส่วน เนื่องจากเครื่องวัดรังสีนับไม่ทันซึ่งแก้ไขได้โดยพยายามทำให้ความแรงของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานมีความแรงของรังสีขนาดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามถ้าสามารถทราบช่วงระยะเวลาที่เครื่องวัดรังสีไม่นับก็สามารถคำนวณหาจำนวนนับที่แท้จริงได้

ค. เกิดขึ้นเนื่องจากการรบกวนจากปฏิกริยานิวเคลียร์อื่น ๆ เช่น ปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ (n,p) กับธาตุ Z+1 หรือปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ (n, α) กับธาตุ Z+2ตัวอย่างเช่น ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ต้องการหาปริมาณโคบอลต์ในสารตัวอย่างโดยอาศัยปฏิกริยานิวเคลียร์ของ $Co^{59}(n, \gamma)\ Co^{60}$ ปฏิกริยานิวเคลียร์อื่น ๆ นี้ สามารถรบกวนได้ คือ $Ni^{60}(n,p)\ Co^{60}$ และ $Cu^{63}\ (n,\alpha)\ Co^{60}$ จะเห็นได้ว่า ถ้าในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มีธาตุพวก Z + 1 หรือ Z + 2 ปะปนอยู่ มันสามารถที่จะไปรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างนี้ได้ การรบกวนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุพวก Z +1 และZ + 2 ที่ปะปนอยู่ในสารตัวอย่างนั้น และปริมาณสัดส่วนของนิวตรอนวิ่งเร็วต่อนิวตรอนวิ่งช้า ตลอดจนสัดส่วนของพื้นที่ภาคตัดขวางว่า จะเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ได้ดีเพียงใด แต่มีข้อดีที่ว่าพื้นที่ภาคตัดขวางของปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ (n,p)และ(n, α)ต่ำมาก เมื่อเทียบกับแบบ (n, γ)

การรบกวนอีกแบบหนึ่งคือ เกิดจากปฏิกริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) กับธาตุที่ปะปนอยู่ในสารตัวอย่างซึ่งให้ peak energy ใกล้เคียงกับ peak energy ของตัวธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ การรบกวนเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้เครื่องวัดรังสีที่มีความสามารถในการแยกพลังงาน(Energy Resolution)

สูง หรือโดยการจัดระบบการวัดที่เหมาะสมเช่น ในการวัดรังสีแกมม่าจาก Co-60 ในสารตัวอย่างซึ่งอาบรังสีนิวตรอนแล้ว Co-60 ให้รังสีแกมม่า 2 ตัว คือ 1.17 และ 1.33 MeV ถ้าจะวัดที่ peak energy 2 อันนี้อาจเกิดการรบกวนได้เพราะธาตุอื่น ๆ สามารถให้รังสีแกมม่าที่มีพลังงานอยู่ในระดับนี้มีมาก ซึ่งแก้ไขได้โดยจัดการวัดให้เป็นระบบโคอินซิเดนซ์(Coincidence)วัดที่ sum peak 2.50 MeV ซึ่งจะตัดการรบกวนจากธาตุอื่น ๆ ได้โดยสิ้นเชิง เพราะมีรังสีของ Co-60 อยู่โดดเดี่ยวในย่าน 2.50 MeV นี้เท่านั้น

2.6 นิวตรอนแอคติเวชั่นของโคบอลต์

โคบอลต์ในธรรมชาติมีอยู่ไอโซโทปเดียว คือ มี Co-59 อยู่ 100% เมื่อโคบอลต์ถูกยิงด้วยนิวตรอนวิ่งช้า จะเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ได้ 2 แบบ คือ

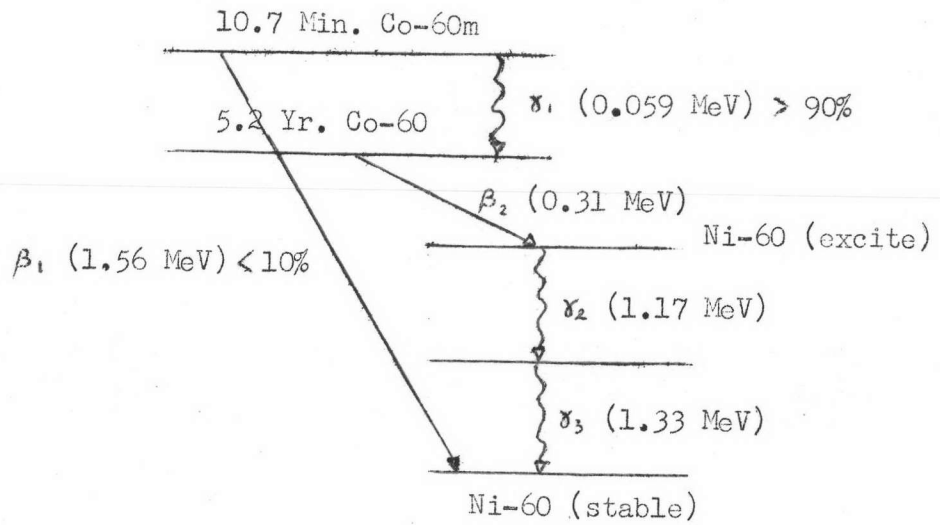
ก. เกิดขึ้นด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง 20 ± 2[1] บาร์น เป็นสารกัมมันตภาพรังสีของ Co-60 m ในสภาวะคงตัวพิเศษ(Metastable)มีครึ่งชีวิต 10.7 นาที มีการสลายตัวดังผังการสลายตัว(Decay Scheme)รูปที่ 2-1

ข. เกิดขึ้นด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง 17 ± 2[2] บาร์น เป็นสารกัมมันตภาพรังสีของ Co-60 มีครึ่งชีวิต 5.2 ปี มีการสลายตัวดังผังการสลายตัวรูปที่2-1

---

[1]S.F. Mughab and D.I. Garber, Neutron Cross Sections. (New York : National Neutron Cross Section Center, Brookhaven National Laboratory, 1973), Vol. 1, p. 27-1.

[2]S.F. Mughab and D.I. Garber, op.cit., p. 27-1.



รูปที่ 2–1[3] แสดงผังการสลายตัวของ Co-60m และ Co-60

เมื่ออาบรังสีโคบอลต์แล้วทิ้งไว้สักครู่ Co-60m จะสลายตัวไปหมด จะมีการสลายตัวของ 5.2 Yr. Co-60 ปรากฏอยู่อย่างเดียว ซึ่งให้รังสีเบต้ามีพลังงานสูงสุด (Emax.) 0.31 MeV 100% และให้รังสีแกมมา 2 ตัวมีพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV 100% ทั้ง 2 ตัว

---

[3] Nuclear Data. , National Bureau of Standards Circular 499, 1950.