หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน[4, 5, 6]

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน เป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยมีหลักการพอสรุปย่อ ๆ ได้ดังนี้คือ เมื่ออนุภาคนิวตรอนถูกยิง (bombard) เข้าใส่อะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส (nuclear transformation) ของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นสารกัมมันตรังสีหรือเรดิโอไอโซโทป ซึ่งอาจเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิมหรือธาตุใหม่ก็ได้ จากคุณสมบัติเฉพาะตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นนี้อันได้แก่ ครึ่งชีวิต, ชนิดของรังสีและระดับของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ก็สามารถจะทำให้ทราบได้ว่าเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด และจากปริมาณรังสีที่วัดได้จากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานของธาตุนั้น ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณปริมาณของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ

2.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron source) ได้มีการตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับอนุภาคนิวตรอน มานานหลายปีแล้ว ก่อนที่ Chadwick จะค้นพบว่ามีอยู่จริงในปี ค.ศ. 1932 อนุภาคนิวตรอนมีมวลเป็น 1.68×10^{-24} กรัม (1.00898 amu) ซึ่งมีมวลมากกว่ามวลของอนุภาคโปรตอนเพียงเล็กน้อย นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร ไม่มีประจุ มีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที และสลายตัวให้โปรตอน (p) 1 ตัว อิเลคตรอน ($\bar{e}$) 1 ตัว และนิวตริโน (ν) 1 ตัว เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงทำให้มันมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ด้วยขบวนการทั่วไป 2 ขบวนการคือ

1. เกิดจากการระดมยิงนิวเคลียสของสารที่ใช้เป็นเป้าด้วยอนุภาคพลังงานสูงต่าง ๆ

2. เกิดจากการเกิดการแตกสลายในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (fission in reactor)

จากหลักการทั้ง 2 หลักการ ทำให้สามารถแบ่งแหล่งกำเนิดนิวตรอนออกได้ เป็นสามแหล่งใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

2.1.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้มาจากสารกัมมันตรังสี (radioactive sources) แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้ทำขึ้นได้โดยการผสมสารที่ใช้เป็นเป้า เข้ากับสารกัมมันตรังสีที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวยิง (bombard) รังสีเข้าไปในเป้าแล้วปลดปล่อยนิวตรอนออกมา แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้มักจะมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถนำพาไปได้และยังดัดแปลงให้เข้ากับการทดลองต่าง ๆ ได้ง่าย จึงมีชื่ออีกชื่อหนึ่งว่า "Portable Sources of Neutrons

แหล่งกำเนิดนิวตรอนโดยวิธีนี้ที่นิยมทำกันมาก โดยอาศัยพื้นฐานการใช้สารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคแอลฟา (α) หรือรังสีแกมมา (γ) ออกมาเป็นส่วนใหญ่ กระทำได้โดยการยิงอนุภาค α หรือรังสีแกมมานี้เข้าไปในเป้า ที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวตรอนต่ำ เช่น เบอรีลเลียม (beryllium), โบรอน (boron) หรือดิวทีเรียม (deuterium) เป็นต้น แล้วทำให้เกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ ผลจากปฏิกริยาทำให้ได้นิวตรอนออกมา จำนวนของนิวตรอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^3 ถึง 10^7 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี (n/sec-curies) และเป็นนิวตรอนเร็ว ด้วยวิธีการนี้จะเห็นว่าจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) มีค่าน้อย ไม่สามารถจะนำไปศึกษาหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันได้ ยกเว้นแต่เราจะทำการหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณมาก ๆ และธาตุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติเอื้ออำนวยต่อปฏิกริยาที่จะเกิดขึ้นแก่รังสีนิวตรอน เช่นมี Effective Cross-section สูง ครึ่งชีวิตสั้น และไอโซโทปิคอะบันแดนซ์สูง เป็นต้น

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกริยา (α, n) ได้แก่ $^{9}Be(\alpha, n)^{12}C$ และ $^{11}B(\alpha, n)^{14}N$ โดยอนุภาคแอลฟาที่ใช้ยิงเป้า (bombard) นั้นได้จาก ^{210}Po, ^{226}Pa, ^{239}Pu และ ^{241}Am สำหรับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกริยา (γ, n) ได้แก่

$^{9}Be(\gamma, n)^{8}Be$ และ $^{2}_{1}D(\gamma, n)^{1}_{1}H$ รังสีแกมมาได้จากไอโซโทปกัมมันตรังสี เช่น ^{124}Sb, ^{24}Na

2.1.1.2 เครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron generator) เครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน สามารถผลิตนิวตรอนออกมาได้โดยอาศัยปฏิกริยา (d, n) และ (p, n) เนื่องจากดิวทีรอน (deuteron) และโปรตอน (proton) เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ถ้าอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานต่ำ โอกาสที่จะทำให้เกิดปฏิกริยาต่อเป้านั้นจะมีน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้ดิวทีรอนหรือโปรตอนมีพลังงานสูงขึ้น โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) ซึ่งอาจจะเป็น High voltage supply, Linear accelerator หรือไซโคลตรอน (cyclotron) เป็นต้น ส่วนนิวคลีไอ (nuclei) ที่ใช้เป็นเป้าจะเป็นพวกนิวคลีไอเบา (light nuclei) ซึ่งให้แรงผลักแบบคูลอมบ์ (coulomb repulsion) น้อย เมื่อยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไปยังเป้า จะเกิดปฏิกริยานิวเคลียร์ได้นิวตรอนออกมา เช่น ปฏิกริยาดังต่อไปนี้

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n + 3.28\ MeV$$

$$^{3}_{1}T + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17.6\ MeV$$

$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n + 4.35\ MeV$$

ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{9} - 10^{11} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.1.1.3 นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor neutron) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่สามารถควบคุมการเกิดของนิวตรอน กับยังให้นิวตรอนที่มีค่าพลังงานต่าง ๆ โดยมีสเปคตรัมของพลังงานอยู่ในช่วงกว้างระหว่าง 0.001 eV จนถึง 15 MeV[6] หรือบางทีอาจจะถึง 25 MeV[7] และมีค่านิวตรอนฟลักซ์อยู่ในระดับ 10^{8} - 10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในการทดลองนี้อนุภาคนิวตรอนที่ใช้ในการอาบรังสีสารตัวอย่าง ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งอนุภาคนิวตรอนนี้เกิดจากปฏิกริยา

การแตกตัว (fission reaction) ของเชื้อเพลิงปรมาณู ยูเรเนียม-235 (^{235}U) ในการแตกตัวแต่ละครั้ง จะมีการปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค ขณะเดียวกันจะเกิดพลังงานจำนวนมากประมาณ 200 MeV ถูกปลดปล่อยออกมาด้วย

2.1.2 พลังงานของนิวตรอน

Kruger[8] ได้จำแนกอนุภาคนิวตรอนตามขนาดของพลังงานออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. นิวตรอนช้า (Slow neutron) เป็นนิวตรอนที่มีช่วงพลังงานตั้งแต่ 0 - 1 keV ซึ่งยังแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ๆ ดังนี้

ก. เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) ซึ่งจะมีการกระจายของพลังงานส่วนใหญ่ที่ 0.025 eV

ข. อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) จะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.025 eV - 0.2 eV

ค. รีโซแนนท์นิวตรอน จะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1 - 1000 eV

2. อินเทอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1 - 500 keV

3. นิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.5 MeV ซึ่งนิวตรอนที่มีพลังงานมากเท่านี้ สามารถทำให้เกิดปฏิกริยาทางนิวเคลียร์ได้หลายแบบ ซึ่งไม่ปรากฏให้เห็นในช่วงของนิวตรอนพลังงานต่ำ มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ที่ใช้ไม่ได้ผลโดยเทอร์มัลนิวตรอน

2.1.3 ปฏิกริยาของนิวตรอน (Neutron reaction)[8]

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ดังนั้นมันจึงสามารถวิ่งเข้าสู่นิวเคลียสของเป้าได้โดยไม่ถูกแรงคูลอมบ์ (coulomb force) กระทำต่อมัน ดังนั้นนิวตรอนจึงสามารถ

วิ่งเข้ากระทบกับนิวเคลียสต่าง ๆ ของเป้าได้ เทอร์มัลนิวตรอนซึ่งมีพลังงาน 0.025 eV ที่อุณหภูมิ 20 °C นับว่าเป็นนิวตรอนที่มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอน อย่างไรก็ตาม "ปฏิกริยาของนิวตรอน" ก็จะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกับเทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนชนิดอื่น ๆ ที่มีพลังงานสูงขึ้นไปอีก ปฏิกริยาที่สำคัญ ๆ ที่มักเกิดขึ้นเสมอ ๆ มีอยู่ 4 แบบด้วยกัน(8)

1. นิวตรอนแคปเจอร์ (neutron capture) หรือปฏิกริยานิวตรอน-แกมมา (n, γ) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมากที่สุด กล่าวคือนิวตรอนพลังงานต่ำจะถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของสารที่ใช้เป็นเป้า แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนไปเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุเดิมพร้อมกับปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ตัวอย่างปฏิกริยาได้แก่

$$^{23}_{11}Na + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{24}_{11}Na + \gamma$$

เขียนแบบย่อได้ว่า $^{23}Na(n,\gamma)^{24}Na$

2. ทรานมิวส์เตชัน (transmutation) คือปฏิกริยาที่เกิดจากการที่อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้เป็นเป้า แล้วอะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไปเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมาตัวหนึ่ง อนุภาคที่มีประจุที่มักจะถูกปลดปล่อยออกมาเสมอ ๆ คือ อนุภาคโปรตอน ซึ่งปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกริยานิวตรอน-โปรตอน (n, p) ส่วนปฏิกริยาอื่น ๆ ที่อาจมีโอกาสเกิดขึ้นได้บ้างก็คือปฏิกริยานิวตรอน-แอลฟา (n, α) เป็นต้น ตัวอย่างของปฏิกริยานิวตรอน-โปรตอน คือ

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

เขียนย่อได้ $^{14}N(n, p)^{14}C$

ตัวอย่างของปฏิกริยานิวตรอน-แอลฟา คือ

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$$

เขียนย่อได้ $^{7}Li(n,\alpha)^{3}H$

3. การแตกตัว (fission) ขบวนการในการเกิดการแตกตัวจะประกอบด้วยการดูดกลืนเอาอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ ที่มีค่าอะตอมมิค-นัมเบอร์สูงมาก ๆ ($Z \geqslant 90$) และผลที่เกิดขึ้นก็คือนิวเคลียสของธาตุหนักนั้นก็จะแตกตัวเป็นสองเสี่ยงใหญ่ ๆ พร้อมกันนั้นก็จะปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค ปฏิกริยานี้ได้แก่การแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 เมื่อดูดกลืนเอาอนุภาคนิวตรอนเข้าไปแสดงได้ดังสมการ

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{236}U^{*} \longrightarrow ^{A_1}Z_1 + ^{A_2}Z_2 + \nu\, ^{1}_{0}n + Q$$

เมื่อ Z_1, Z_2 คือฟิชชันแฟรคเมนท์ (fission fragment)

Q คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากขบวนการนี้มีหน่วยเป็น MeV กรณีของยูเรเนียม-235 Q จะมีค่าประมาณ 200 MeV

ν จำนวนนิวตรอนที่เกิด

4. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (inelastic scattering of neutron) ปฏิกริยานี้แตกต่างไปจากขบวนการทั้ง 3 ขบวนการที่กล่าวแล้วข้างต้น นิวตรอนจะวิ่งเข้าสู่นิวเคลียสของอะตอมของเป้า โดยการถ่ายเทพลังงานจลน์บางส่วนของมันให้แก่นิวเคลียสนั้น ปฏิกริยาที่เกิดแบบนี้ที่น่าสนใจมีอยู่ 2 ปฏิกริยาคือ

1) ปฏิกริยา (n, n') จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนิวตรอนที่กระเจิง (scattered neutron) ได้ถ่ายเทพลังงานให้แก่นิวเคลียสของอะตอมของสารที่ใช้เป็นเป้ามากพอสมควรที่จะยกพลังงานของมันไปอยู่ในสถานะ "Meta stable" ตัวอย่างเช่น

$$^{103}_{45}Rh + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{103m}_{45}Rh + ^{1}_{0}n'$$

เขียนย่อ $^{103}Rh(n, n')^{103m}Rh$

2) ปฏิกริยา (n, 2n) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนิวตรอนที่กระเจิง ให้พลังงานอย่างพอเพียง แก่นิวเคลียสของอะตอมที่ใช้เป็นเป้าจนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนที่ยึดเหนี่ยวตัวสุดท้าย ในที่สุดผลที่ได้ก็คือนิวตรอนตัวหนึ่งหลุดออกไปจากนิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้า ดังตัวอย่างข้างล่างนี้

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{13}_{7}N + 2^{1}_{0}n$$

เขียนย่อเป็น $^{14}N(n, 2n)^{13}N$

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพราะว่าพลังงานยึดเหนี่ยว เฉลี่ยสำหรับนิวตรอนตัวหนึ่งหนึ่งนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 6 MeV - 8 MeV ดังนั้นนิวตรอนที่จะใช้ทำให้เกิดปฏิกริยานี้จึงต้องมีพลังงานสูงมากพอสมควร โดยมีค่าอย่างหยาบ ๆ จาก 10 MeV ขึ้นไป เช่นเดียวกับปฏิกริยา (n, γ) นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าอะตอมมิคนัมเบอร์ (Z) คงเดิม แต่จะมีค่าแมสนัมเบอร์ (A) ลดลงไปจากนิวเคลียสใหม่ที่เกิดจากปฏิกริยานี้มักจะเป็นสารกัมมันตรังสี ประโยชน์ของปฏิกริยา (n, 2n) ที่เห็นได้ชัดก็คือใช้ในการวัดหาพลังงานและความเข้มของนิวตรอนพลังงานสูงในเครื่องเร่งอนุภาคนิวตรอนและในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู สำหรับค่าพลังงานต่ำสุด (E_T, threshold energy) ที่จะทำให้เกิดปฏิกริยานี้ได้ อาจจะหามาได้จากการสังเกตุจากปฏิกริยา (γ, n) ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคเบตาตรอน (betatrons) เราสามารถผลิตรังสีแกมมาให้มีพลังงานตามที่ต้องการได้ เมื่อเราทราบพลังงานต่ำสุด ($E_{T(\gamma, n)}$) ของรังสีแกมมาในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (γ, n) ก็สามารถที่จะแปลงไปเป็นพลังงานต่ำสุด ($E_{T(n, 2n)}$) ของอนุภาคนิวตรอนที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n) ได้โดยความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ ดังสมการข้างล่างนี้

$$E_{T(n, 2n)} = \frac{A + 1}{A} E_{T(\gamma, n)} \quad (10) \qquad (ก)$$

เมื่อ A = แมสนัมเบอร์ของนิวไคลด์ ที่ต้องการทราบพลังงานต่ำสุดของนิวตรอน ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n)

$E_{T(n, 2n)}$ = พลังงานจลน์ต่ำสุดของอนุภาคนิวตรอนในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n)

$E_{T(\gamma, n)}$ = พลังงานจลน์ต่ำสุดของรังสีแกมมา ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (γ, n)

ค่าพลังงานต่ำสุดของอนุภาคนิวตรอน ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n) ของนิวไคลด์บางนิวไคลด์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 เพื่อที่จะแสดงขนาดและแนวโน้มทั่วไปของปฏิกริยานี้ที่เกิดกับนิวไคลด์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานต่ำสุดของอนุภาคนิวตรอน ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n) ของนิวไคลด์บางนิวไคลด์

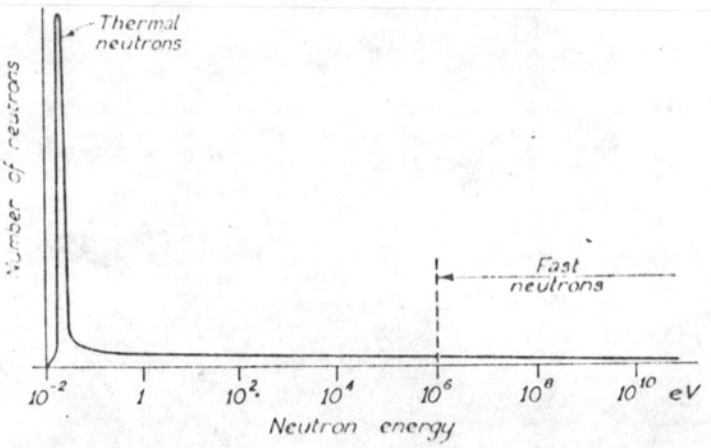
Target	E_T (MeV) (n, 2n)	Target	E_T (MeV) (n, 2n)
$_1H^2$	3.34	$_{14}Si^{29}$	8.7
$_3Li^6$	6.20	$_{15}P^{31}$	12.6
$_3Li^7$	8.20	$_{16}S^{32}$	15.3
$_4Be^9$	1.85	$_{16}S^{34}$	11.2
$_5B^{10}$	9.4	$_{23}V^{51}$	11.4
$_5B^{11}$	12.6	$_{25}Mn^{55}$	10.3
$_6C^{12}$	20.3	$_{27}Co^{59}$	10.5
$_7N^{14}$	11.3	$_{33}As^{75}$	10.4
$_8O^{16}$	17.3	$_{48}Cd^{113}$	6.6
$_9F^{19}$	10.9	$_{57}La^{139}$	8.9
$_{11}Na^{23}$	12.6	$_{73}Ta^{181}$	7.6

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Target	E_T (MeV) (n, 2n)	Target	E_T (MeV) (n, 2n)
$_{12}Mg^{24}$	17.1	$_{77}Ir^{193}$	7.8
$_{12}Mg^{25}$	7.5	$_{79}Au^{197}$	8.1
$_{12}Mg^{26}$	11.6	$_{83}Bi^{209}$	7.4
$_{13}Al^{27}$	13.2	$_{90}Th^{232}$	6.4
$_{14}Si^{28}$	17.4	$_{92}U^{238}$	6.0

2.1.4 การแอคติเวทโดยใช้นิวตรอนพลังงานสูง จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

จากหัวข้อที่ 2.1.3 ข้อย่อยที่ 4 จะเห็นว่าในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, 2n) นั้น ต้องใช้นิวตรอนที่มีพลังงานสูงถึง 10 MeV ขึ้นไปเข้าบอมบ์บาด (bombard) นิวเคลียสของสารที่ใช้เป็นเป้า ต้นกำเนิดของนิวตรอนพลังงานสูงขนาดนี้ โดยทั่วไปจะใช้ 14 MeV Neutron generators ซึ่งได้จากปฏิกริยา $_1^3H(d, n)_2^4He$ ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2 แต่ในการทดลองนี้ ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นตัวให้รังสีนิวตรอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การกระจายพลังงานของอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะเป็นดังรูปที่ 2.1[4]



รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายพลังงานของนิวตรอน ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

การกระจายพลังงานของอนุภาคนิวตรอน ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทั่ว ๆ ไป จะเห็นว่านิวตรอนส่วนใหญ่ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นเทอร์มัลนิวตรอน ส่วนนิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) จะมีเพียงส่วนน้อย แต่ในบางโอกาสการแอคติเวทโดยใช้นิวตรอนพลังงานสูง ก็อาจนำมาใช้ประโยชน์ได้[7] เมื่อขาคุบางขาคุให้ค่าความแรง (activity) ต่อหน่วยน้ำหนักน้อย เมื่อนำไปแอคติเวทด้วยเทอร์มัลนิวตรอน โดยปฏิกริยา (n, γ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ขาคุนั้นมีค่าภาคตัดขวาง (cross section) σ ต่ำมาก ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกริยา (n, γ) หรือมิฉะนั้นก็เพราะว่ามีค่าไอโซโทปิค อะบันแดนซ์ (isotopic abundance) ต่ำ ซึ่งบางครั้งก็เกิดได้ทั้ง 2 กรณี เช่นในกรณีของไนโตรเจนซึ่งมีไอโซโทปที่เสถียร (stable isotope) อยู่ 2 ไอโซโทปคือ ไนโตรเจน-14 และไนโตรเจน-15 ($^{14}_{7}N$, $^{15}_{7}N$) โดยที่ไนโตรเจน-14 มีอยู่ในธรรมชาติ 99.63 % ไนโตรเจน-15 มีอยู่ในธรรมชาติ 0.37 % ดังนั้นปฏิกริยาที่เกิดจาก $^{14}N(n, 2n)^{13}N$ จากปฏิกริยานี้จะทำให้เกิด ^{13}N ที่มีค่าความแรงจำเพาะ (specific activity) สูงกว่า ค่าความแรง-

007627

i 18306433

จำเพาะของ ^{16}N ซึ่งเกิดจากปฏิกริยา $^{15}N(n,\gamma)^{16}N$ ถึง 5000 เท่า เมื่อหามาจากที่เทอร์มัลนิวตรอนและฟิชชันสเปคตรัม (fission spectrum) ของความเข้มของนิวตรอนเดียวกัน

เหตุผลสำคัญในกรณีของไนโตรเจนนี้ก็คือ การเกิดปฏิกริยา (n,γ) มีค่าครอสเซคชันต่ำมากสำหรับ ^{15}N คือประมาณ 0.00002 บาร์น (barn) และยังมีค่าไอโซโทปิคอะบันแดนซ์ต่ำมากอีกด้วย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ใช้ การแอคติเวทตัวอย่างด้วยนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งถึงแม้จะมีค่าของความเข้มของนิวตรอนเร็ว (fast neutron flux) ต่ำกว่าความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron flux) ก็ตาม แต่จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของไนโตรเจน ทำให้การแอคติเวทด้วยนิวตรอนพลังงานสูง มีข้อได้เปรียบกว่ามาก

2.1.5 อัตราการเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี[4]

เมื่อนำสาร (ตัวอย่าง) ที่จะวิเคราะห์ไปอาบนิวตรอน ก็จะมีบางส่วนของอะตอมของสารนั้นเกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะเดียวกันไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ก็จะสลายตัวเพื่อเข้าสู่สถานะเสถียร โดยที่อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอน (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron crossection) ของธาตุที่นำเข้าอาบรังสี จำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน และรวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในธรรมชาติ (isotopic abundance) ดังนั้นอัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N^{*} \qquad (2.1)$$

เมื่อให้ P = อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี

$\frac{dN^{*}}{dt}$ = อัตราการสะสมของไอโซโทปกัมมันตรังสี

λ = ค่าคงตัวในการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (decay constant) มีค่าเป็น $0.693/T_{\frac{1}{2}}$ (เมื่อ $T_{\frac{1}{2}}$ คือค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

N^* = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

ถ้าสารตัวอย่างถูกอาบรังสีเป็นระยะเวลา t_1 โดยที่ค่า P ไม่เปลี่ยนแปลง เราอาจหาค่า $N^*_{t_1}$ ได้ด้วยการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) จากสมการ (2.1) แบบง่าย ๆ ดังนี้

$$\frac{dN^*_{t_1}}{dt_1} = P - \lambda N^*_{t_1} \qquad (2.2)$$

จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล ได้ว่า

$$N^*_{t_1} = \frac{P}{\lambda} - \frac{P}{\lambda} e^{-\lambda t_1} \qquad (2.3)$$

ในทางปฏิบัติเราต้องการหราบปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ $N^*_{t_1}$ ปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเราให้มีค่าเป็น A_{t_1} จาก 2.3 จัดใหม่ได้

$$A_{t_1} = \lambda N^*_{t_1} = P(1-e^{-\lambda t_1}) \qquad (2.4)$$

สิ่งที่ต้องการหราบต่อไปคือ P ซึ่ง เป็นอัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีซึ่งมีวิธีหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอน โอกาสที่นิวตรอนหนึ่งอนุภาคจะชนและเกิดปฏิกริยากับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่าง สามารถเขียนได้ว่า

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดปฏิกริยาต่อ 1 อนุภาคนิวตรอน

$$= \frac{\text{พ.ท หน้าตัดของนิวเคลียสในเป้า}}{\text{พ.ท ทั้งหมดของเป้า}}$$

$$= \frac{\text{Nuclear target area}}{\text{total target area}}$$

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดปฏิกริยาต่อ 1 อนุภาคนิวตรอน $= \frac{N\sigma}{a}$

เมื่อ N = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดในเป้า

σ = ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn)

a = พื้นที่ทั้งหมดของเป้า

ถ้า ϕ = เป็นจำนวนนิวตรอนที่เข้าชนเป้าในแนวตั้งฉาก ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา (ตามปกติจะแสดงหน่วยเป็นความเข้มของนิวตรอน ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

จะได้ว่า

จำนวนปฏิกริยาที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที = $\frac{N\sigma\phi a}{a}$

อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี $P = N\sigma\phi$ (2.5)

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียส (N) ทั้งหมดที่ถูกนำไปอาบรังสีหาได้จาก[9]

$$N = \frac{N_0 WK}{M} \quad (2.6)$$

เมื่อ N_0 = ค่าคงที่ของอโวกาโดร (Avogadro's number) ซึ่งมีค่า 6.023×10^{23} อะตอมต่อโมล

W = น้ำหนักของธาตุทั้งหมด หน่วยเป็นกรัม

K = สัดส่วนจำนวนของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ (isotopic abundance) หน่วยเป็นร้อยละ

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (2.5), (2.6) ลงใน (2.4) จะได้เป็นสมการของนิวตรอน-แอคติเวชัน

$$A_{t_1} = \frac{N_0 WK\sigma\phi(1-e^{-\lambda t})}{M} \quad (2.7)$$

หรือ $$W = \frac{MA}{N_0 K \sigma \phi (1-e^{-\lambda t})} \quad (2.8)$$

ความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น หลังจากถูกยิงด้วยนิวตรอนแล้วที่เวลา T ใด ๆ ไอโซโทปกัมมันตรังสีจะสลายตัวด้วย $e^{-\lambda t}$ ดังนั้น

$$A = \frac{N_0 WK \sigma \phi (1-e^{-\lambda t}) e^{-\lambda T}}{M} \quad (2.9)$$

หรือ $$W = \frac{MA\, e^{\lambda T}}{N_0 K \sigma \phi (1-e^{-\lambda t})} \quad (2.10)$$

จากความแรงที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากความเข้มของนิวตรอน ในระหว่างการอาบรังสีอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ และความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้องแน่นอน ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันจึงนิยมใช้วิธีเปรียบเทียบระหว่างธาตุในสารตัวอย่างกับธาตุนั้นในสารมาตรฐาน โดยการนำสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีในตำแหน่งและระยะเวลาเดียวกันกับสารตัวอย่าง แล้ววัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน}} \quad (2.11)$$

2.2 เทคนิคของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

เทคนิคของการวิเคราะห์มี 2 แบบคือ

2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน โดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี เป็นการวิเคราะห์โดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน เข้าอาบรังสีพร้อมกัน แล้ววัดความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่ต้องการหาปริมาณ เทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง การวัดปริมาณจำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจจับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาตามขนาดพลังงานต่าง ๆ ได้ วิธีนี้ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญในการใช้เครื่องมือตรวจจับรังสีเป็นอย่างมาก

2.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน โดยผ่านกรรมวิธีการแยกทางเคมี เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานมาผ่านกรรมวิธีทางเคมี เพื่อแยกชนิดของธาตุที่ต้องการก่อนหรือหลังการอาบรังสี ทั้งนี้เพื่อให้ปราศจากการรบกวนจากไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุตัวอื่นในสารตัวอย่างนั้น แล้วจึงวัดความแรงรังสีเทียบกับสารมาตรฐาน กรรมวิธีทางเคมีที่อาจนำมาใช้ เช่น การกลั่น, การสกัด, การตกตะกอน, การทำละลาย, การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

2.3 ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

2.3.1 ความไวของการวิเคราะห์สูง ความไวของการวิเคราะห์ในที่นี้หมายถึงความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งได้ต่ำที่สุดเท่าใดภายใต้สภาวะที่กำหนด ความไวของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความเข้มของอนุภาคนิวตรอน ความสามารถในการจับนิวตรอนสัดส่วนการมีอยู่ตามธรรมชาติของไอโซโทปเสถียรของธาตุ และน้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น นอกจากนั้นความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ (efficiency) ของเครื่องมือนับรังสีอีกด้วย เพราะปกติเครื่องมือนับรังสีมีขีดความสามารถที่จะวัดรังสีได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ถ้าประสิทธิภาพของเครื่องมือนับรังสีสูง ย่อมสามารถนับความแรงรังสีได้ใกล้เคียงกับความแรงรังสีจริง ซึ่งจะทำให้ความไวของการวิเคราะห์สูงด้วย ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\text{ความแรงรังสีจริง} = \frac{\text{จำนวนที่นับได้}}{\text{ประสิทธิภาพของเครื่องมือนับรังสี}} \times 100$$

ถ้าพิจารณาจากสมการ (2.8) คือ

$$W = \frac{MA}{N_0 K \sigma \phi (1-e^{-\lambda t})}$$

จะเห็นว่า เมื่อนำธาตุเข้าอาบรังสีเป็นเวลานานหลายเท่าของค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุนั้นที่เกิดขึ้นแล้ว เทอม $(1-e^{-\lambda t})$ ในสมการซึ่งถูกเรียกว่าเป็นเทอมอิ่มตัว (saturation term) จะมีค่าใกล้ 1

ดังนั้น $$W = \frac{MA}{N_0 K \sigma \phi} \qquad (2.12)$$

จะเห็นได้ว่า ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (detection limit) ลดลงซึ่งก็เท่ากับเป็นการเพิ่มความไวของการวิเคราะห์นั่นเอง ในปี ค.ศ. 1964 Lukens[7] ได้ทำตารางรายงานขีดต่ำสุดของการตรวจวิเคราะห์ธาตุบางชนิด โดยเทคนิคของนิวตรอนแอคติเวชันด้วยนิวตรอนเร็ว ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขีดต่ำสุดของการตรวจวิเคราะห์ของธาตุบางธาตุจำนวน 73 ธาตุ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันด้วยฟาสต์นิวตรอนจาก Fission spectrum ซึ่งมีค่าความเข้มของนิวตรอนเป็น 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เวลาอาบรังสี 1 ชั่วโมง[7]

ขีดจำกัดต่ำสุด (ไมโครกรัม)	ธาตุ
$1\text{-}3 \times 10^{-2}$	Al, Ni, Se, In
$4\text{-}9 \times 10^{-2}$	Si, Rb, Xe, Pr, Ir
$1\text{-}3 \times 10^{-1}$	F, Mg, Ti, V, Fe, Zn, Ga, As, Br, Kr, Sr, Y, Sb, Gd, Ho, Hf, Ta, W, Os, Au, Hg, Pb
$4\text{-}9 \times 10^{-1}$	P, K, Sc, Cr, Co, Te, Ba, Ce
1-3	N, Na, Ar, Ge, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Nd, Sm, Lu, Pt
4-9	Cs, Re
10-30	Ne, Cl, Cu, I, Eu, Tb, Er
40-90	Mn, Tm, Yb
100-300	O, Ca, La, Tl
400-900	S

2.3.2 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องกังวลต่อข้อผิดพลาดที่จะเกิดจากสิ่งเจือปน (impurity) ในระหว่างการปฏิบัติงานภายหลังจากการอาบรังสีแล้ว เนื่องจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้กลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี โดยมีคุณสมบัติเฉพาะตัวไม่เหมือนกับไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดจากสิ่งเจือปน

2.3.3 สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีทางเคมีธรรมดา (conventional chemical analysis) ทั้งนี้เพราะเทคนิคนี้คำนึงเฉพาะปริมาณรังสีที่จะเกิดขึ้น

2.3.4 ในการวิเคราะห์โดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) ได้สะดวกและรวดเร็ว โดยไม่สูญเสียสารตัวอย่าง รวมทั้งรูปและลักษณะด้วย

2.4 ข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

2.4.1 เป็นกรรมวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง เนื่องจากจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดนิวตรอน และเครื่องมือนับรังสีที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งทั้งสองสิ่งนี้มีราคาแพงมาก

2.4.2 จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกัน และตรวจสอบรังสีชนิดต่าง ๆ อย่างพร้อมมูล

2.4.3 เป็นกรรมวิธีวิเคราะห์ ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์นั้นอยู่ในรูปลักษณะใด และผลของการวิเคราะห์เป็นไปในรูปของปริมาณทั้งหมดของธาตุนั้น

2.4.4 ผู้ที่ปฏิบัติการ จำเป็นต้องได้รับการฝึกอบรม และมีความรู้เกี่ยวกับกัมมันตรังสีเป็นอย่างดี

2.4.5 เป็นกรรมวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ธาตุได้ทุกธาตุในตารางธาตุ

2.5 ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

2.5.1 การสุ่มตัวอย่าง (sampling) เนื่องจากการวิเคราะห์แบบนิวตรอน-

แอคติเวชัน มีความไวของการวิเคราะห์สูง จึงใช้สารตัวอย่างด้วยปริมาณน้อย ฉะนั้นกรณีที่สารตัวอย่างมีเนื้อสารแตกต่างกัน การคลุกเคล้าไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการสุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้เป็นตัวแทนทั้งหมด ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดได้

2.5.2 การเตรียมสารตัวอย่าง (sample preparation) กรณีสารตัวอย่างทางชีววิทยาที่ต้องการมีการเผาหรือทำให้แห้งก่อนอาบรังสี อาจมีการสูญเสียธาตุที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ไป บางครั้งต้องผ่านการบดให้ละเอียด คลุกเคล้ากันให้ดี อาจมีการเปรอะเปื้อนจากภาชนะที่ใช้ และการเปรอะเปื้อนจากฝุ่นละออง นอกจากนี้ถ้าภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่าง มีการเปรอะเปื้อน ย่อมทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้เช่นกัน

2.5.3 ความเข้มของนิวตรอนไม่คงที่ (flux inhomogeneity) เนื่องจากความเข้มของนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้านำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีในตำแหน่งที่ต่างกันหรือใช้เวลาอาบต่างกัน ปริมาณไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากสารมาตรฐาน และสารตัวอย่าง จึงนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้ การแก้ไขกระทำได้โดยการนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน และใกล้กันมากที่สุด

2.5.4 การกำบังตนเองขณะอาบนิวตรอน (self-shielding) ข้อผิดพลาดนี้เกิดจากธาตุบางชนิดมีความสามารถในการดูดจับอนุภาคนิวตรอนได้ดี ถ้าสารตัวอย่างมีธาตุเหล่านี้มาก อนุภาคนิวตรอนจะไม่สามารถเข้าถึงบริเวณใจกลางของสารตัวอย่างนั้น ทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ ทำให้มีข้อผิดพลาดทางการวิเคราะห์ได้ ฉะนั้นการแก้ไขอาจกระทำได้โดยการเตรียมสารมาตรฐานให้มีการกระจายของธาตุ และอยู่ในลักษณะเนื้อสาร (matrix) และความเข้มข้นของธาตุใกล้เคียงกับสารตัวอย่างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.5.5 ปฏิกริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน (interference nuclear reaction) เป็นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ ประการแรกในสารตัวอย่างที่นำเข้าวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่พึงประสงค์ อาจจะมีธาตุอื่นที่มีเลขอะตอม (atomic number) ใกล้เคียงกับธาตุนั้น 1 หรือ 2 ตัวปะปนอยู่ด้วย และประการหลังคือตำแหน่งที่นำสารเข้าอาบ

รังสีนิวตรอนนั้น ไม่ได้มีนิวตรอนชนิดที่ต้องการเพียงอย่างเดียว ฉะนั้นนอกจากปฏิกริยาที่ต้องการคือ (n, 2n) จากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ อาจจะมีปฏิกริยาอื่น ๆ เช่น นิวตรอน-แกมมา (n,γ) นิวตรอน-โปรตอน (n, p) และ/หรือ นิวตรอน-แอลฟา (n,α) จากธาตุอื่นร่วมด้วย ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดไปได้ การแก้ไขอาจจะกระทำได้โดยใช้สารพิเศษบางอย่าง เช่น แคดเมียม ทำเป็นปลอกหุ้มสารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน ก่อนนำเข้าอาบนิวตรอนในตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันนิวตรอนช้าเข้าไปรบกวนนั่นเอง

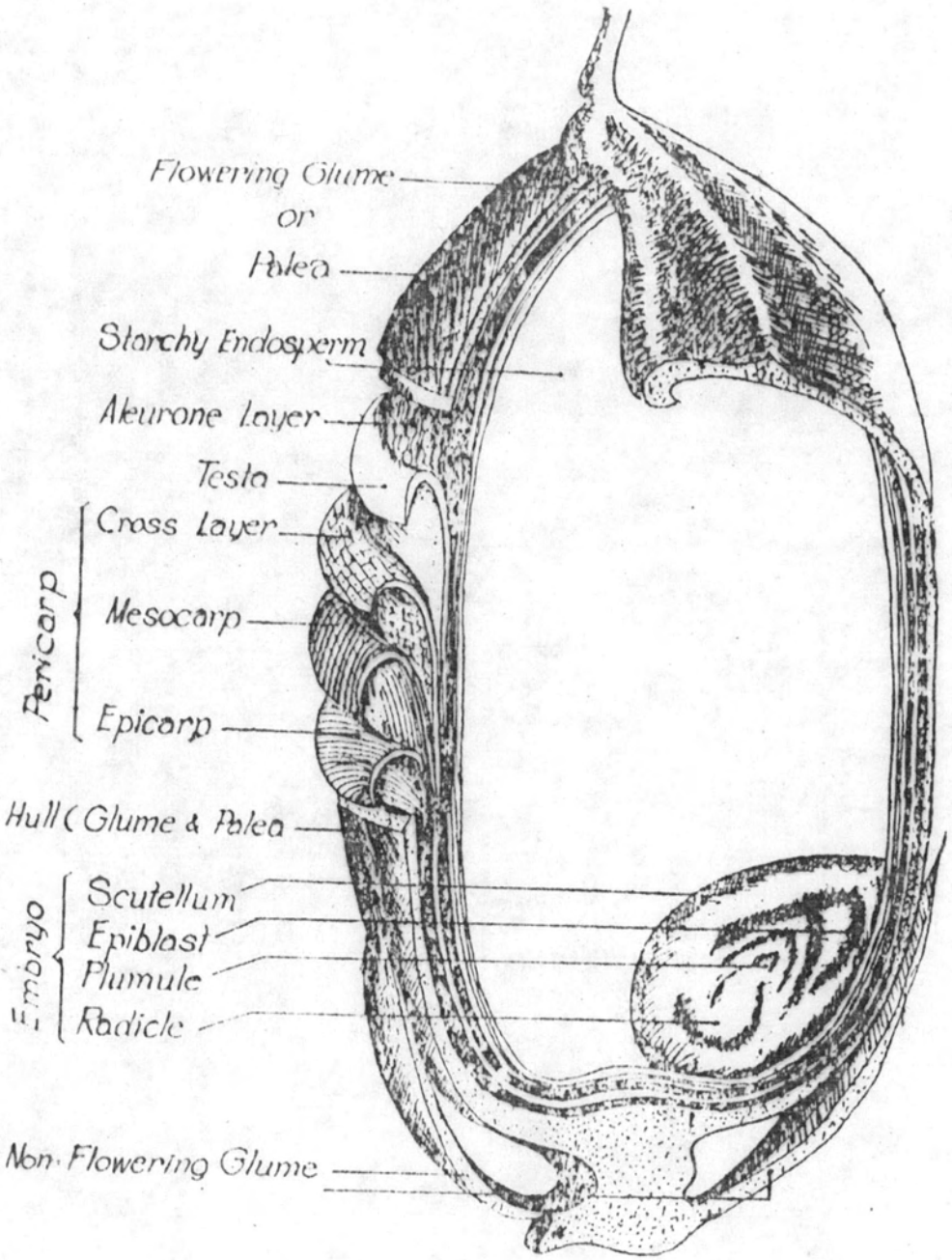
2.5.6 ความผิดพลาดอื่น ๆ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู มีทั้งนิวตรอนเร็วและนิวตรอนช้า ในกรณีที่นำสารตัวอย่างที่มีน้ำปะปนอยู่ด้วยเข้าอาบรังสีนิวตรอน จะทำให้มีปริมาณเทอร์มัลนิวตรอนเพิ่มขึ้นมากกว่าในสารตัวอย่างที่ปราศจากน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดได้

2.6 ข้าวจ้าว (Rice)[1, 2]

ข้าวจ้าว (rice, <u>oryza sativa L</u>) เป็นธัญญพืชชนิดหนึ่งซึ่งเป็นพืชตระกูลหญ้าที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหารมาก ให้พลังงานสูงมีราคาถูก และเก็บได้นาน ธัญญพืชเหล่านี้นอกจากข้าวจ้าวแล้ว ก็ยังมี ข้าวสาลี, ข้าวโพด, ข้าวฟ่าง, ข้าวโอ๊ต, ข้าวบาเลย์, ข้าวไรย์ และข้าวมิลเล็ต (millet) นอกจากจะใช้เมล็ดเป็นอาหารโดยตรงแล้ว ยังนำเมล็ดข้าวจ้าวมาบดเป็นแป้งหรือสกัดน้ำมัน เช่น น้ำมันรำ เพื่อใช้ประกอบอาหาร

ในแต่ละภูมิภาคของโลก จะปลูกธัญญพืชได้ต่างชนิดกันออกไปตามลักษณะดินฟ้าอากาศของภูมิประเทศในส่วนนั้น ๆ และประชากรก็จะนิยมบริโภคธัญญพืชที่ตนปลูกได้ผลดี เป็นอาหารหลัก เช่น ข้าวจ้าวปลูกได้ดีในเขตร้อน แถบทวีปเอเชีย ประชากรแถบนี้จึงนิยมบริโภคข้าวจ้าว ในทางพฤษศาสตร์ระบุว่า เมล็ดข้าวจ้าวมีลักษณะเป็นแคริออพซิส (caryopsis) คือผลที่มีเมล็ดเดียว มีเปลือก และเยื่อหุ้มผนึกติดกัน จนไม่อาจแยกออกจากกันได้ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพืชตระกูลหญ้า โดยทั่วไปนิยมเรียกว่าเมล็ด (grain) โครงสร้างของเมล็ดข้าว ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าวจ้าว[1]



Structure of the rice grain

1. เพอริคาร์ป (pericarp) เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเปลือกนอก (husk หรือ hull) ส่วนนี้ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างต่าง ๆ เรียงกันเป็นชั้น ๆ โดยทั่วไปมีอยู่สามชั้น คือชั้นนอกหรืออิพิคาร์ป (epicarp) ชั้นกลาง หรือมีโซคาร์ป (mesocarp) และชั้นใน หรือเอนโดคาร์ป (endocarp) ชั้นเหล่านี้จะทำหน้าที่หอหุ้มเมล็ดไว้ประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) แร่ธาตุและโปรตีน

2. ชั้นอัลลูโรน (aleurone layer) เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นของเพอริคาร์ป เข้าไปเป็นเซลล์ที่มีผนังหนา ประกอบด้วยโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ นอกนั้นเป็นฟอสฟอรัส และแร่ธาตุต่าง ๆ

3. เอนโดสเปอร์ม (endosperm) อยู่ถัดจากชั้นของอัลลูโรน หรือมีชั้นของอัลลูโรนล้อมรอบ มีสีขาวประกอบด้วยเซลล์ที่มีผนังบาง รูปร่างต่าง ๆ กัน ภายในเซลล์มีเม็ดแป้งอยู่มากมาย เป็นแหล่งสะสมอาหารไว้เลี้ยงต้นอ่อน

4. เอมบริโอ (embryo หรือ germ) เป็นส่วนที่อยู่ตอนล่างด้านฐานของเมล็ด มีขนาดเล็ก ส่วนนี้จะเจริญเป็นต้นอ่อนต่อไป ในเอมบริโออุดมไปด้วยสารอาหารต่าง ๆ ได้แก่ แร่ธาตุ ไขมัน โปรตีน น้ำตาล และไวตามินที่สำคัญ ๆ

โดยทั่วไปแล้วเมล็ดข้าวจ้าวและเมล็ดธัญญพืชอื่น ๆ ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรท เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นเป็นไขมัน โปรตีน เกลือแร่ กากอาหาร และไวตามิน ซึ่งส่วนมากเป็นไวตามินบี ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและพลังงานโดยเฉลี่ยของข้าวจ้าวและเมล็ดธัญญพืชอื่น ๆ[1]

ชนิดของเมล็ดธัญญพืช	ความชื้น ร้อยละ	คาร์โบไฮเดรท ร้อยละ	โปรตีน ร้อยละ	ไขมัน ร้อยละ	กากอาหาร ร้อยละ	แคลอรี่ ต่อ 100 กรัม
ข้าวโพด	11	72	10	4	2	352
ข้าวสาลี	11	69	13	2	3	340
ข้าวโอ๊ต	13	58	10	5	10	317
ข้าวฟ่าง	11	70	12	4	2	348
ข้าวบาเลย์	14	63	12	2	6	320
ข้าวไรย์	11	71	12	2	2	321
ข้าวจ้าว	11	65	8	2	9	310

ระบบสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดของเมล็ดข้าว

ข้าวที่เพาะปลูกอยู่โดยทั่วไป มีหลายชนิด แตกต่างกันไปตามภูมิภาคของโลก สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ

ก. ข้าวเมล็ดแข็ง (hard-grain rice) เป็นข้าวเมล็ดยาวเรียว มีเนื้อแข็ง เป็นมัน จัดอยู่ในพวกอินดิคา (indica group) ได้แก่ข้าวจ้าว มีปลูกมากในเขตร้อน เช่นอินเดีย ไทย อินโดนิเซีย และฟิลิปปินส์

ข. ข้าวเมล็ดอ่อน (soft-grain rice) เป็นข้าวที่มีเมล็ดสั้นป้อม เนื้อข้าวนุ่น ไม่แข็งเหมือนพวกแรก จัดอยู่ในพวกจาปอนนิคา (japonica group) ได้แก่ ข้าวเหนียว มีปลูกมากในประเทศ ญี่ปุ่น เกาหลี และตอนเหนือของจีน

การสีข้าว

เมื่อเมล็ดข้าวสุกหรือแก่เต็มที่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยวได้นั้น จะมีความชื้นประมาณ ร้อยละ 20-22 หลังจากเก็บเกี่ยวแล้ว ควรนำเมล็ดข้าวมาทำให้แห้งทันทีโดยการตากแดด หรือใช้เครื่องอบแห้ง จนความชื้นภายในเมล็ดลดลงเหลือร้อยละ 13-14 จึงนำมาสีได้

การสีข้าวทำได้ 3 แบบคือ การสีข้าวภายในครัวเรือน การสีแบบอุตสาหกรรม และการทำข้าวนึ่ง

1. การสีข้าวภายในครัวเรือน (small-scale milling) โดยการใช้แรงงานคน วิธีที่ใช้เรียก "ตำข้าว" เป็นการนำเมล็ดข้าวเปลือกมาใส่ในครกขนาดใหญ่ แล้วใช้สากตำ เพื่อให้เปลือกข้าวหลุด แล้วร่อนเอาเปลือกและรำออก ข้าวที่ตำได้เรียกว่า "ข้าวซ้อมมือ" ซึ่งยังคงมีส่วนของเพอริคาร์ปเทสต้า เยื่ออัลลูโรน และไวตามิน อยู่มากกว่าข้าวที่ได้จากโรงสีใหญ่ ๆ

2. การสีแบบอุตสาหกรรม (large-scall milling) เป็นการสีข้าวที่ใช้เครื่องจักรกล ซึ่งกรรมวิธีและขั้นตอนในการสีข้าวได้กล่าวไว้อย่างละเอียดใน (1)

3. การทำข้าวนึ่ง (parboiled rice) เริ่มมาจากประเทศอินเดียนานมาแล้ว โดยมีจุดประสงค์เดิมที่จะให้เปลือกหลุดออกจากข้าวได้ง่ายขึ้น และมีข้าวหักน้อยลง วิธีการทำ

ตลอดจนขั้นตอนต่าง ๆ พอจะกล่าวได้คร่าว ๆ ดังนี้คือ นำข้าวเปลือกมาแช่น้ำเย็นหรือร้อน เมื่อได้ตามความต้องการแล้ว จึงนำข้าวเปลือกไปต้ม ต่อไปนำข้าวเปลือกที่ผ่านการต้มแล้วมาทำให้แห้ง แล้วจึงนำไปขัดสี การขัดสีข้าวนึ่งใช้วิธีการเดียวกับการขัดสีข้าวเปลือกธรรมดา แต่จะได้ข้าวสารเต็มเมล็ดมากขึ้น เพราะข้าวที่ผ่านการนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งกลายสภาพเป็นเจล (gel) ช่วยให้รอยร้าวที่แตกหักต่อเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อนำไปตากแห้งเมล็ดข้าวจะใสและแข็งแน่นร่อนจากเปลือก ทำให้การกระเทาะเปลือกง่ายและคุณภาพของการขัดสีดีขึ้น นอกจากนั้นขณะที่แช่ข้าวเปลือกในน้ำก่อนต้ม น้ำที่แช่จะซึมเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าว ทำให้สารอาหารบางอย่างโดยเฉพาะโปรตีนและไวตามินบี 1[1, 22] ซึ่งมีอยู่มากที่ชั้นนอกของเมล็ดข้าวซึมเข้าไปด้วย ทำให้ข้าวนึ่งมีคุณค่าทางอาหารดีกว่าข้าวธรรมดา

ในการขัดสีข้าว ซึ่งก็คือการแปลงข้าวกล้อง (brown rice) ให้เป็นข้าวขาวหรือข้าวสาร (white or polished rice) พบว่าประมาณร้อยละ 10 ของโปรตีน, ร้อยละ 85 ของไขมัน (fat) และร้อยละ 70 ของแร่ธาตุ ที่มีอยู่บริเวณเปลือกและผิวส่วนนอกของเมล็ดข้าว ถูกสีหลุดออกไป ซึ่งสามารถแสดงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่เพาะปลูกกันทั่วไป และผลพลอยได้จากการขัดสีข้าว ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่เพาะปลูกกันทั่วไป และผลพลอยได้จากการขัดสี

ผลิตภัณฑ์	ค่าร้อยละโดยประมาณขององค์ประกอบทางเคมีของข้าว				
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน (fat)	เส้นใย (fiber)	เถ้า (ash)
ข้าว :					
Rough rice	11.7	8.1	1.8	8.9	5.0
Brown rice	12.2	9.1	2.0	1.1	1.1
Head rice	12.6	9.0	0.5	0.4	0.5
Seconhead rice	12.4	8.7	0.4	0.4	0.6
Screening rice	11.4	8.4	0.5	0.4	0.6
Brewers' rice	11.8	8.9	1.0	0.6	0.7
ผลพลอยได้จากการสีข้าว :					
รำ Stone bran	9.7	9.8	7.7	20.9	15.2
รำ Huller bran	9.8	15.0	16.9	7.9	7.4
รำ Cone bran	9.8	15.4	16.0	5.7	7.1
รำละเอียด	9.9	12.9	9.1	2.1	4.2
แกลบ	8.5	3.6	0.9	39.0	18.6

ผลพลอยได้จากการสีข้าว มีดังนี้คือ(1)

1. แกลบ (hull) ประมาณร้อยละ 20
2. รำ (bran) ประมาณร้อยละ 8.5
3. รำละเอียด (rice polish) ประมาณร้อยละ 20