

บทที่ 3

ปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส (Nuclear Fission Reaction)

วัตถุประสงค์

เพื่อให้ นักศึกษามีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ

1. ความเป็นมาของการค้นพบการแบ่งแยกนิวเคลียส
2. การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่และผลที่ตามมา
3. พลังงานวิกฤตและภาคตัดขวางเพื่อการแบ่งแยกตัวของนิวไคลด์ต่าง ๆ

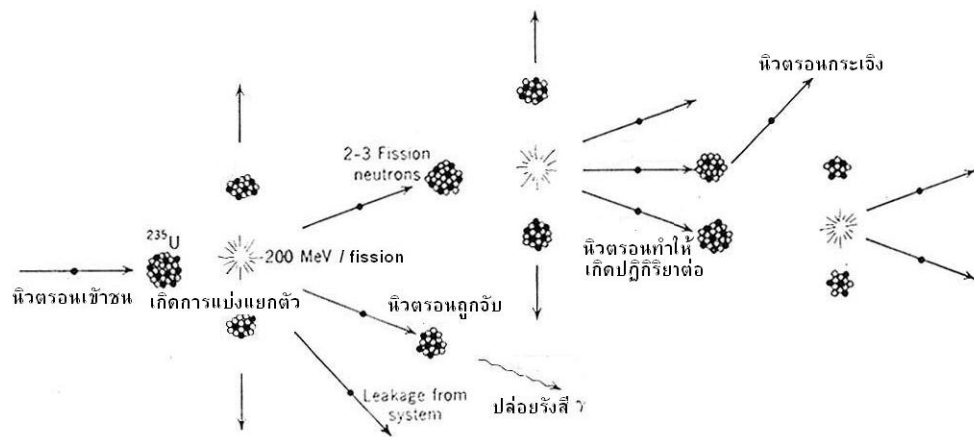
ในบทที่ 1 เรากล่าวถึงอันตรกิริยา หรือ ปฏิกิริยาในแบบต่างๆที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับ วัสดุ และ โอกาสเกิดปฏิกิริยาซึ่งบ่งบอกด้วยภาคตัดขวาง ในบทนี้จะเน้นปฏิกิริยาการแบ่งแยก นิวเคลียสเพราะว่าเป็นเรื่องสำคัญที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3.1 การค้นพบการแบ่งแยกนิวเคลียส (Discovery of Nuclear Fission)

หลังจากที่แซดวิกได้ค้นพบนิวตรอนในปี ค.ศ. 1932 และคูรี (Irene Curie กับ F. Joliot Curie)พบกัมมันตภาพรังสีที่สร้างขึ้นมา (artificial radioactivity) ในปี ค.ศ. 1934 เฟอร์มิ (Fermi) และ ผู้ร่วมงานของเขาได้เริ่มศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากนิวตรอน จากการทดลองสังเกตพบว่าเมื่อวัสดุหรือนิวเคลียสใดจับนิวตรอนที่ชนกัน นิวเคลียสนั้นมักจะปลดปล่อยอนุภาคบีตา (β decay) ออกมา และ นิวเคลียสลูก (daughter nucleus) นี้มีเลขมวลเพิ่มขึ้น หรือ เลื่อนเป็นธาตุ ที่สูงขึ้นในตารางพีริออดิก (periodic table) ทำให้เฟอร์มิ และ ผู้ร่วมงานทดลองยิงนิวตรอนเข้าชน ยูเรเนียมทำให้เกิดธาตุทรานส์ยูเรเนียม (Transuranic elements, $Z > 92$) และ เมื่อใช้นิวตรอนเข้า ยิง พวกเขาสังเกตพบว่ามี การปลดปล่อย β⁻ ออกมาหลายตัวจากธาตุหลายชนิดซึ่งมีครึ่งชีวิต (half lives) ต่างกัน และ ต่างไปจากธาตุข้างเคียงยูเรเนียมที่เคยรู้มาก่อน จึงสรุปกันว่าธาตุทรานส์ยูเรเนียมเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (n,γ) แล้วเกิดการปลดปล่อยบีตาตามมา วิธีการบ่งบอกว่า เกิดมีธาตุทรานส์ยูเรเนียมขึ้นมาจากการยิงนิวตรอนไปยังยูเรเนียม ทำได้โดยวิธีการวิเคราะห์ ทางเคมี (chemical analysis) โดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน เช่น ฮาห์น (Otto Hahn) และช ตราสส์แมน (Fritz Strassmann) ได้ทำการทดลองเพื่อแยกไอโซโทปที่ต้องสงสัยดังกล่าวแล้วเขียน เป็นรายงานสั้นๆใน Naturwissenschaften, Dec. 22, 1938 บอกว่าสิ่งที่ได้เป็นปฏิกิริยาแบบ ใหม่ที่ทำให้ นิวเคลียสที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วเกิดการแบ่งแยกตัวเป็น 2 นิวคลีไอ ซึ่งมีทเนอร์

ตอนนั้นนักฟิสิกส์หลายคนคาดว่าน่าจะมีนิวตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัว (fission fragments) แต่จากการทดลองการพบนิวตรอน 2-3 ตัวที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวโดยเฉลี่ยในเดือนมีนาคม ค.ศ.1939 โดย ฮอลบาน คูรี และโควารส์กี (Han von Halban, F. Joliot Curie และ Lew Kovarski) และยังคงพบต่อไปว่านิวตรอนที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถทำให้เกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสต่อไปอีกกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ได้ จึงเป็นการสังเกตพบที่น่าตื่นตะลึงมาก

ต่อมาได้มีการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาการแบ่งตัวใช้เวลาสั้นมาก $< 10^{-17}$ s และให้นิวตรอนหลุดออกมามากมายทันทีทันใดภายใน 10^{-14} s ของการเกิดเหตุการณ์นี้ เหตุการณ์



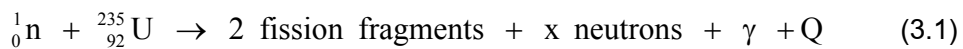
รูปที่ 3-1 รูปแบบอย่างง่ายของการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่

การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ให้ดูรูปที่ 3-1 นิวตรอนที่เกิดขึ้นทันทีนี้เรียก “prompt neutrons” อย่างไรก็ตามยังมีนิวตรอนจำนวนน้อย (< 1%) ของนิวตรอนทั้งหมดที่เกิดในปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวที่เกิดจากการสลายตัวของผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (fission products) ถือเป็นนิวตรอนที่เกิดช้า

จากการทดลองเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องในปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวทำให้ทราบว่ายังมีอนุภาคประจุพลังงานสูง (โปรตอน, ดิวเทรียม, แอลฟา) รังสีแกมมา และ ไอออนของธาตุเบา เช่น ^{12}C สามารถทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวของนิวไคลด์หนักมากๆ ($Z > 70$) ได้เช่นกัน

บอร์(N. Bohr) และวีเลอร์(J. A. Wheeler) ได้พัฒนาทฤษฎีการแบ่งแยกนิวเคลียส คล้ายคลึงกับแรงนิวเคลียส และ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลให้อยู่ด้วยกันในของเหลว โดยอาศัยรูปแบบนี้ทำให้สามารถอธิบายการเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสที่เกิดเองตามธรรมชาติ (spontaneous fission) แต่เกิดยากมาก และ ทำนายความน่าจะเป็นที่ ^{235}U ซึ่งเป็นไอโซโทปของยูเรเนียมที่มีอยู่ประมาณ 0.7% พร้อมทั้งจะเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้มากกว่า ^{238}U ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก (~99.3%) และ ยังแสดงต่อไปว่าถ้านิวตรอนมีพลังงานน้อยกว่าระดับที่เรียกเทอร์มอลนิวตรอนแล้วโอกาสเกิดกับ ^{235}U จะเพิ่มขึ้นเป็น 100 เท่า ส่วน ^{238}U โอกาสเกิดขึ้นได้ถ้า นิวตรอนมีพลังงานอย่างน้อย 1 MeV ความสำเร็จในการอธิบายการแบ่งแยกนิวเคลียสตามรูปแบบหยดของเหลวจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

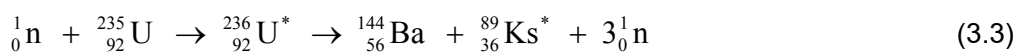
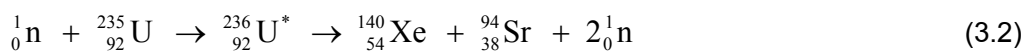
ตามรูปที่ 3-1 นั้นสรุปออกมาเป็นสมการของปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส กรณี ^{235}U ถูกเหนี่ยวนำด้วยเทอร์มอลนิวตรอน (^1_0n) กลายเป็น $^{236}\text{U}^*$ ตื่นตัวแล้วเกิดขึ้นส่วนการแบ่งแยกตัวเป็น 2 นิวไคลด์ นิวตรอน รังสีแกมมา และ พลังงาน (Q) ออกมาตามสมการ



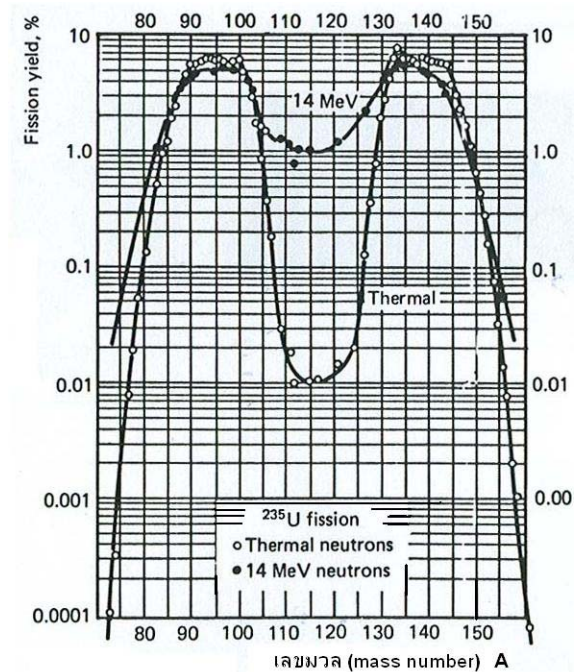
ตามสมการ (3.1) นี้ 2 ชิ้นส่วนที่แบ่งแยกออกมานี้ต่างเป็นนิวไคลด์ (nuclides) ที่มีมวลในระดับกลาง ส่วนค่า $x = 2 - 3$ นิวไคลด์ทั้งสองที่เกิดขึ้นจะไม่เสถียรจึงมีการปลดปล่อยอนุภาคบีตา นิวตริโน (neutrinos) รังสีแกมมา (γ) และ อาจมีนิวตรอนตามมาด้วย พลังงานรวมของปฏิกิริยาที่ปลดปล่อยออกมามีค่าประมาณ 200 MeV ตามสมการ (3.1) นี้ จะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์นิวคลีออน ประจุ พลังงาน และ โมเมนตัม เหมือนในปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นๆ

3.2 ผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (Fission Products)

เพื่อเป็นตัวอย่างให้เห็นภาพง่ายๆ กรณีการอนุรักษ์นิวคลีออน และ ประจุ ให้ดูปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียสที่เป็นไปตามสมการ



ผลของการแบ่งแยกนิวเคลียสของ $^{236}\text{U}^*$ เป็น 2 นิวไคลด์ตามแบบสมการ (3.2) และ (3.3) พบว่ามีมากกว่า 100 นิวไคลด์ ที่แตกต่างกันของธาตุต่างๆ มากกว่า 20 ธาตุ ให้ดูรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงการแจกแจงเลขมวลของชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัวที่เกิดจาก $^{236}\text{U}^*$ (แต่ทั่วไป



รูปที่ 3.2 การแจกแจงมวลของชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัวของ ^{235}U สเกลในแกนตั้งอยู่ในรูปลอการิทึม(logarithmic)

มักจะเรียกว่าเกิดจาก ^{235}U) จะเห็นว่าส่วนใหญ่เป็น 2 นิวไคลด์ที่มีเลขมวลจาก 90-100 และจาก 135-145 ส่วน 2 นิวไคลด์ที่เกิดในปฏิกิริยามีมวลใกล้เคียงกันเกิดขึ้นได้ยาก ดูจาก % ของผลที่ได้จากการแบ่งแยกตัว (fission yield,%)

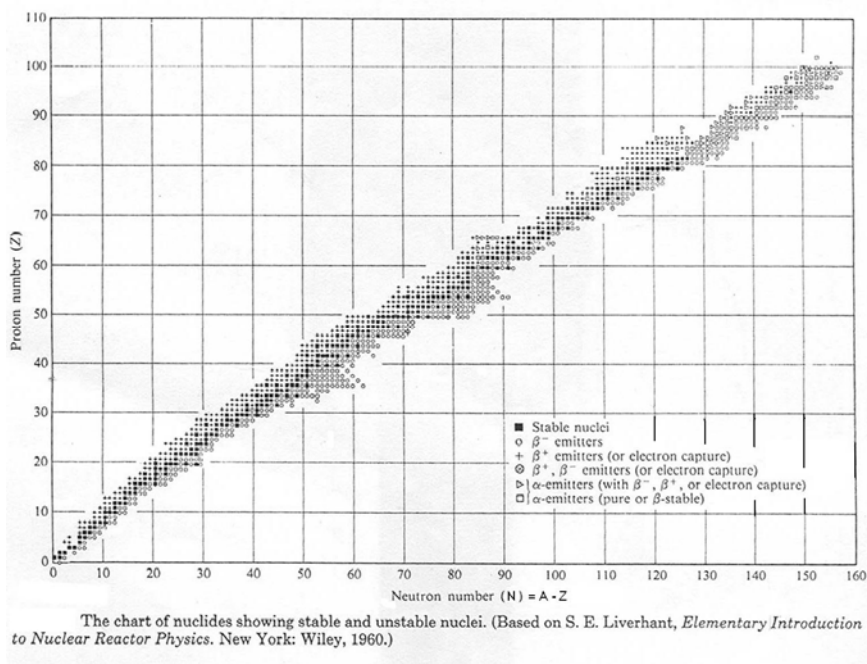
ในการคำนวณหาพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาอาจประมาณได้จากรูปที่ 1-2 จะเห็นว่านิวไคลด์ที่มีเลขมวลอยู่ตอนปลายของเลขมวล (ใกล้ $A = 240$) จะมีการยึดเหนี่ยวที่เบาบางลงหรือมีค่าน้อยกว่าเลขมวลขนาดกลาง ($A = 90$ ถึง 145) เฉลี่ยแล้วจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ($E_b / \text{nucleon}$) มีค่าประมาณ 7.6 MeV ที่ $A = 240$ แต่จะมีค่า 8.5 MeV ที่ $A = 120$ ดังนั้นประมาณอย่างหยาบพลังงานยึดเหนี่ยวจะมีความแตกต่างระหว่างการแบ่งแยกตัวมีค่า $(8.5 - 7.6) \text{ MeV} / \text{nucleon} = 0.9 \text{ MeV} / \text{nucleon}$ หรือคิดเป็นพลังงานทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาจากการแบ่งแยกตัวของนิวเคลียส ^{235}U กล้วยไปเป็นพลังงานที่แบ่งกันของผลที่เกิดจาก

ปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว (MeV / fission) หรือ พลังงานที่ปลดปล่อยจากการแบ่งแยกนิวเคลียส

$$= 235 \times 0.9 \text{ MeV/fission} = 211.5 \text{ MeV/fission} \approx 200 \text{ MeV/fission} \quad (3.4)$$

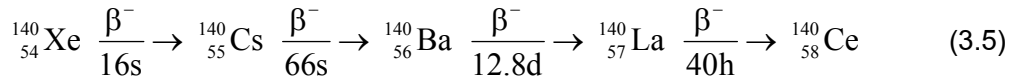
รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อพลังงานที่ปลดปล่อย ค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาตามสมการ (3.4) นี้ ไม่ได้ทำให้การอนุรักษ์พลังงานเสียไป แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่อยู่นิ่ง (rest energy) ไปเป็นพลังงานจลน์ (kinetic energy) หรือ พลังงานที่คิดจากมวลที่หายไปของปฏิกิริยานั้นเอง

ชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัวมักจะมีนิวตรอนอยู่มากจนไม่อยู่ในสภาพธาตุเสถียรได้ จากการศึกษาอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอน (N/Z) ของนิวไคลด์ต่างๆ จากรูปที่ 3-3 แสดงให้เห็นนิวไคลด์ที่เสถียร และไม่เสถียร (stable and unstable nuclei) โดยนิวคลีไอเสถียรหรือนิวไคลด์เสถียร (stable nuclides) แทนด้วยสี่เหลี่ยมสีดำ นอกนั้นเป็นนิวไคลด์ไม่เสถียร จากรูปจะเห็นว่านิวคลีไอเสถียรที่เป็นนิวไคลด์เบาจะมีค่าประมาณ 1 (จำนวนนิวตรอนกับจำนวนโปรตอนมีค่าเกือบเท่ากัน) ซึ่งในกลุ่ม $Z \leq 20$ จะมีนิวไคลด์ที่เสถียรเป็นจำนวนมาก บริเวณที่ $Z > 20$



รูปที่ 3-3 แผนภูมิของนิวไคลด์ต่างๆ (nuclides) ที่มีอัตราส่วนของ (N/Z) ต่างกัน

แนวของนิวไคลด์เสถียรจะโค้งไปทาง $N > Z$ โดยนิวไคลด์เสถียรที่เลขมวล $A=100$ จะมี N / Z ประมาณ 1.3 และที่ $A = 150$ จะมี N / Z ประมาณ 1.4 เมื่อพิจารณานิวไคลด์ที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวของ ^{235}U เช่น $^{140}_{54}\text{Xe}$ จะมี $N / Z = (140-54) / 54 = 1.59$ เนื่องจากมีนิวตรอนอยู่มากเกินไป ทำให้ไม่เสถียร จึงมีการสลายตัวให้ β^- ออกมาเพื่อลดจำนวนนิวตรอน เป็นการเพิ่ม



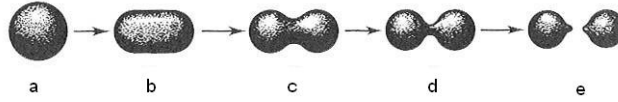
ซึ่ง ${}^{140}\text{Ce}$ เป็นนิวไคลด์ที่เสถียร อนุกรมการสลายตัว β^- ให้พลังงานออกมาเฉลี่ยประมาณ 15 MeV สมการ (3.5) เราอาจจะเรียกว่าเกิด ลูกโซ่การสลายบีตา (β^- - decay chain)

3.3 รูปแบบหยดของเหลวของการแบ่งแยกนิวเคลียส

(Liquid Drop Model of Nuclear Fission)

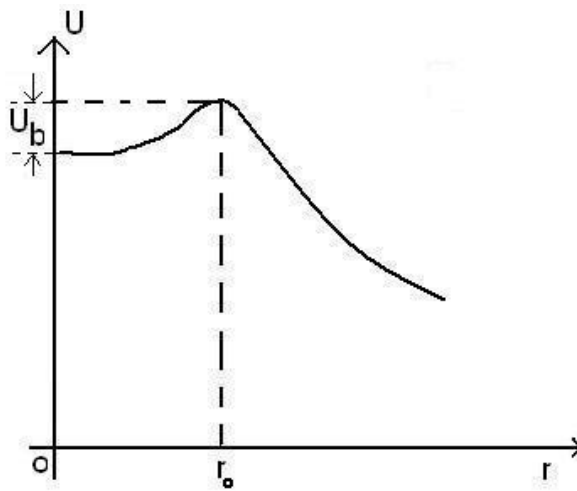
ในนิวเคลียสหนักจะมีนิวคลีออนอยู่เป็นจำนวนมาก มีแรงหลัก 2 อย่างที่เกิดคือ แรงผลักลูมบ์ ระหว่างโปรตอน และ แรงนิวเคลียร์ระหว่างนิวคลีออน แรงนิวเคลียร์เป็นแรงในระยะสั้น ไม่ขึ้นกับประจุ ดังนั้นนิวคลีออนตัวใดที่อยู่ลึกลงไปนิวเคลียสแล้วถูกล้อมรอบด้วยนิวคลีออนตัวอื่น แรงลัพท์โดยเฉลี่ยที่เกิดกับนิวคลีออนนั้นมีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามนิวคลีออนตัวใดที่อยู่ผิวจะถูกดึงดูดไว้จากนิวคลีออนที่อยู่ภายในนิวเคลียสในระยะของแรงนิวเคลียร์และทำให้เกิดแรงที่ไม่เกิดดุลภาพ (unbalance force) เข้าสู่ศูนย์กลางนิวเคลียสซึ่งคล้ายกับแรงตึงผิว (surface tension) ในของเหลว ดังนั้นเราจึงพิจารณานิวเคลียสเป็นเหมือนหยดของเหลวที่มีประจุ (charged liquid drop) ซึ่งในสถานะต่ำสุดจะมีลักษณะสมมาตรแบบทรงกลม (spherically symmetric)

เพื่อพิจารณาให้ตรงกับการเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ให้ดูรูปที่ 3-4 เมื่อนิวเคลียส ${}^{235}\text{U}$ ถูกกลืนนิวตรอน ทำให้เกิดเป็นนิวเคลียส ${}^{236}\text{U}^*$ ในสถานะตื่นตัว (excited state) เนื่องจากมีพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เข้าชนเพิ่มเข้ามาทำให้เกิดการจذبวงตัวนิวคลีออนในนิวเคลียสขึ้นมาใหม่ จากรูปทรงกลมในตอนเริ่มต้น (รูป 3.4a) ก็จะเปลี่ยนเป็นรูปที่ 3.4 b โดยมีการกวัดแกว่งที่ผิวทำให้รูปทรงกลมเสียไป แรงตึงผิวก็พยายามรักษารูปเดิมไว้ ถ้าพลังงานของการตื่นตัวมีค่าน้อยรูปที่เพี้ยนไปก็จะกลับเข้าสู่รูปเดิมได้โดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา นิวเคลียสก็จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) แต่ถ้านิวเคลียสได้รับพลังงานเพิ่มเข้ามามาก จะทำให้เกิดการกวัดแกว่งที่ผิวอย่างรุนแรง (strong surface oscillations) เป็นผลทำให้รูปทรงของนิวเคลียสผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแรงผลักลูมบ์เพิ่มขึ้น รูปที่ 3.4c เป็นรูปแบบดัมเบลล์ (dumbbells) และ เมื่อแรงผลักไฟฟ้าทำให้ระยะห่างระหว่างประจุที่แยกจากกันทั้งสองส่วนเกินค่าวิกฤตของนิวเคลียสทำให้เริ่มเกิดการแบ่งแยกตัวเป็นสองส่วนตามรูปที่ 3.4d ในที่สุดจะเป็นรูปที่ 3.4e ซึ่งทั้งสองส่วนจะแยกออกจากกันอย่างรวดเร็วพร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอน 2 - 3 ตัวหลุดออกมาด้วย โดยพลังงานส่วนต่างกลายเป็นพลังงานจลน์ของผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการแบ่งแยกนิวเคลียสของ ^{235}U ตามรูปแบบหยดของเหลว

การแบ่งแยกนิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เมื่อการดูดกลืนนิวตรอนทำให้เกิดพลังงานการตื่นตัวมากกว่าความสูงของกำแพงพลังงาน (energy barrier) U_B ตามรูปที่ 3.5 การแบ่งแยก (fission fragments) จะทำได้ก็ต่อเมื่อพลังงานการตื่นตัวมากกว่า U_B เป็นคำอธิบายว่าทำไมบางนิวเคลียสเกิดการแบ่งแยกได้หรือไม่ได้ ถ้านิวเคลียสใดดูดกลืนนิวตรอนแล้วทำให้เกิดมีพลังงานการตื่นตัวมากกว่าความสูงของกำแพงพลังงาน (energy barrier) U_B หรือ พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสไว้ด้วยกัน ก็จะทำให้เกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้ ถึงแม้ว่าพลังงานไม่เพียงพอให้เกิดแต่ก็มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการทะลุทะลวงทางกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanical tunneling) ทำให้นิวคลีไอของธาตุหนักที่เสถียรเกิดการแบ่งแยกตัวได้แต่จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความสูง และ ความกว้างของกำแพงศักย์ของแต่ละนิวเคลียส ตามรูปที่ 3-5 ที่ระยะ r เกินกว่าช่วง r_0 ของการเกิดแรงนิวเคลียร์ พลังงานศักย์จะแปรผกผันกับ $1/r$ การแบ่งแยกนิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานการตื่นตัวเกินกว่า U_B หรือมีความน่าจะเป็นพอที่จะทะลุทะลวงผ่านกำแพงศักย์นี้



รูปที่ 3.5 พลังงานของพลังงานศักย์(U)แบบสมมุติฐานจะแปรผกผันกับ $1/r$ นอกกระยะนิวเคลียส(r_0)ทำให้นิวเคลียสเกิดการแบ่งแยกเป็น 2 ชิ้นส่วน

3.4 พลังงานวิกฤตเพื่อการแบ่งแยกนิวเคลียส

(Critical Energies for Nuclear Fission)

ในหัวข้อ 3.3 กล่าวถึงหลักการทั่วไปของการเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียส ถึงแม้มีบางนิวคลีไอหนักที่ไม่เสถียรอาจเกิดการแบ่งแยกได้เองแต่โอกาสเกิดได้น้อย เพื่อเร่งให้เกิดได้อย่างรวดเร็วในเครื่องปฏิกรณ์จำเป็นต้องเพิ่มพลังงานเข้าไปให้กับนิวเคลียสเพื่อเอาชนะแรงนิวเคลียร์แล้วทำให้เกิดแบ่งแยกเป็นสองส่วนได้ เราจะเรียกพลังงานส่วนนี้ว่าพลังงานวิกฤตเพื่อการแบ่งแยกนิวเคลียสแทนด้วยสัญลักษณ์ E_{cri} ให้ดูค่านี้ได้ในตารางที่ 3-1 สำหรับหลายนิวคลีไอ

พลังงานวิกฤต E_{cri} จะเข้าไปเหนี่ยวนำการแบ่งแยกนิวเคลียสโดยให้นิวเคลียสดูดกลืนนิวตรอน ทำให้เกิดนิวเคลียสสารประกอบที่อยู่ในสถานะตื่นเต้นตัวที่เกิดจากพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เข้าชน เมื่อรวมกับพลังงานเพื่อการแบ่งแยก (separation energy) ของนิวตรอนในนิวเคลียสสารประกอบให้มีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวก็จะเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้ หรือแม้แต่ไม่มีพลังงานจลน์แต่นิวตรอนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปเพิ่มในนิวเคลียสแต่เป็นตัวสุดท้ายในนิวคลีไอใหม่ที่มีพลังงานเพียงพอต่อการแบ่งแยกนิวเคลียส ดูตัวอย่างในตาราง 3-1 พลังงานเพื่อการแบ่งแยกของนิวตรอนตัวสุดท้ายใน ^{236}U มีค่า 6.4 MeV ขณะที่พลังงานวิกฤตที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกมีค่าเพียง 5.3 MeV ดังนั้นแม้นิวตรอนไม่มีพลังงานจลน์ถูก ^{235}U ดูดกลืนไว้เกิด

ตารางที่ 3-1

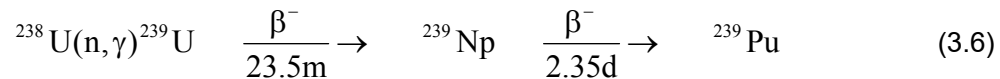
พลังงานวิกฤตเพื่อการแบ่งแยกนิวเคลียส (MeV)

นิวเคลียส ^AX ที่จะเกิดแบ่งแยก	พลังงาน วิกฤต	พลังงานเพื่อการแบ่งแยก ของนิวตรอนตัวสุดท้ายใน ^AX
^{232}Th	5.9	*
^{233}Th	6.5	5.1
^{233}U	5.5	*
^{234}U	4.6	6.6
^{235}U	5.73	*
^{236}U	5.3	6.4
^{238}U	5.85	*
^{239}U	5.5	4.9
^{240}U	4.0	6.4

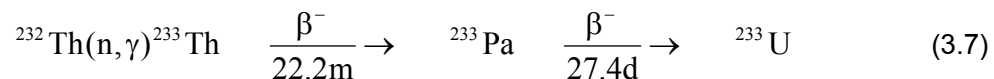
* พลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนไม่เกี่ยวข้องกับนิวคลีไอพวกนี้เนื่องจากไม่มีการดูดกลืนนิวตรอนของนิวคลีไอ ^{A-1}X

เป็นนิวเคลียสสารประกอบ ^{236}U ก็ยังมีพลังงานเกินกว่าพลังงานวิกฤต 1.1 MeV จึงพอเพียงให้เกิดการแบ่งแยกได้ทันทีทันใด จึงเรียก ^{235}U ว่าเป็นฟิชไซล์นิวไคลด์ (fissile nuclide) ซึ่งจริงๆ แล้วนิวไคลด์ที่แบ่งแยกตัวคือ ^{236}U จากตารางที่ 3-1 ฟิชไซล์นิวไคลด์มี ^{233}U , ^{235}U และ ^{239}Pu (plutonium-239) รวมทั้ง ^{241}Pu ซึ่งไม่อยู่ในตารางนี้

ยังมีนิวคลีไอหนักอื่นๆ ที่พลังงานแบ่งแยกตัว (หรือพลังงานยึดเหนี่ยว) ไม่เพียงพอต้องให้พลังเพิ่มเข้าไปเป็นพลังงานวิกฤตเพื่อเป็นพลังงานที่เพียงพอในการแบ่งแยกตัว นั่นคือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์บางค่าเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการแบ่งแยกตัว โดยเฉพาะกรณีนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนเป็นเลขคู่ (even-A nucleus) จะมีพลังงานสุดท้ายมักต่ำกว่านิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนเป็นเลขคี่ (odd-A nucleus) ดูจากตารางที่ 3-1 เช่น พลังงานเพื่อการแบ่งแยกของนิวตรอนตัวสุดท้ายใน ^{239}U มีค่าเพียง 4.9 MeV ซึ่งเกิดจาก ^{238}U ดูกกลืนนิวตรอนพลังงานจลน์ศูนย์เข้าไปทำให้ไม่สามารถเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้ยกเว้นต้องดูดกลืนนิวตรอนพลังงานสูง (energetic neutron) เข้าไป เราจึงเรียก ^{238}U เฟอร์ไทล์นิวไคลด์ (fertile nuclide) ตัวอย่างของนิวไคลด์พวกนี้มี ^{232}Th , ^{238}U , ^{240}Pu และ ^{242}Pu ในการทำเฟอร์ไทล์ไอโซโทป (fertile isotopes) ให้เป็นฟิชไซล์ไอโซโทป (fissile isotopes) ทำได้โดยปฏิกิริยาการแปรธาตุหลังดูดกลืนนิวตรอน (neutron transmutation reactions) ที่สำคัญคือ



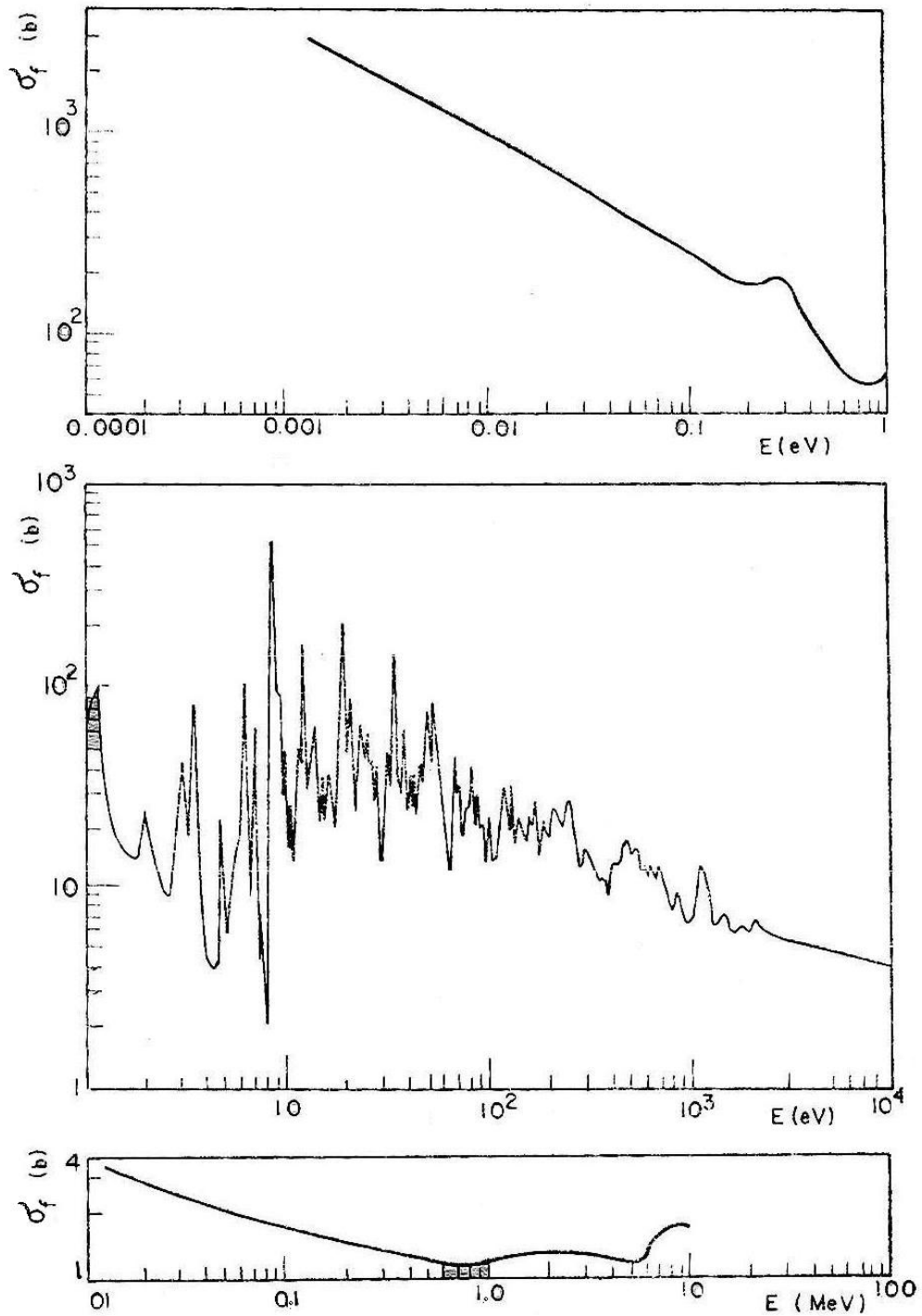
และ



โดยทั้ง ^{238}U และ ^{232}Th มีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ^{239}Pu และ ^{233}U ดังกล่าว เพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3.5 ภาคตัดขวางของการแบ่งแยกตัว (Fission Cross Section)

เรื่องภาคตัดขวางของปฏิกิริยาต่างๆ ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 2 แต่ในหัวข้อนี้จะเน้นภาคตัดขวางของการแบ่งแยกนิวเคลียส σ_f ดูรูปที่ 3-6 แสดงภาคตัดขวางของ ^{235}U ในแกนตั้งกับพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เข้าชน E (MeV) ในแกนนอน เราจะเห็นว่าในย่านเทอร์มอลนิวตรอน σ_f จะแปรผกผันกับ $1/v$ (เมื่อ v คืออัตราเร็วของนิวตรอน) และมีค่ามากที่ E = 0.025 eV ค่า σ_f ของ ^{235}U มีค่าประมาณ 582b ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าที่นิวตรอนพลังงานต่ำจะมีผลทำให้นิวคลีไอ ^{235}U แบ่งแยกตัวได้ดี ตารางที่ 3-2 แสดงภาคตัดขวางการแบ่งแยกของนิวไคลด์ที่สำคัญที่จะนำไปพิจารณานำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน (พลังงานจลน์



รูปที่ 3-6 ภาคตัดขวางของการแบ่งแยกตัว σ_f ของ ^{235}U
แปรผันไปกับพลังงานของนิวตรอน E

โดยที่เรโซแนนซ์เหล่านี้จะมีค่ากว้างขึ้นและต่ำลงเมื่อนิวตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น และเมื่อพลังงานสูงมากขึ้น ($E > 10 \text{ keV}$) ค่า σ_f จะมีค่าโน้มต่ำลงเหลือไม่กี่บาร์น

ตารางที่ 3-2

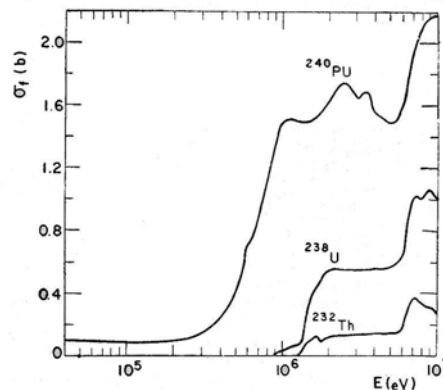
ภาคตัดขวางต่างๆของยูเรเนียมธรรมชาติ (^{233}U , ^{235}U) และพลูโตเนียม (^{239}Pu) ที่เกิดจากเทอร์มอลนิวตรอน (0.0253 eV)

	σ_f (b)	σ_a^\dagger (b)	σ_s (b)	σ_c (b)	α	ν	η
^{233}U	531	579	—	—	0.0899	2.492	2.287
^{235}U	582	681	8	689	0.169	2.418	2.068
Natural Uranium	4.2	7.6	8.3	15.9	0.811	2.418	1.335
^{239}Pu	743	1011	10	1021	0.362	2.871	2.108

*Ref. 33.

† $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$.

ถ้าเราพิจารณาภาคตัดขวางของเฟอร์ไทล์ไอโซโทป ^{232}Th , ^{238}U และ ^{240}Pu ที่เกิดจากนิวตรอนพลังงานต่างๆตามรูปที่ 3-7 จะพบความแตกต่างจากภาคตัดขวางของฟิชไซล์ไอโซโทป เช่นเดียวกับ ^{235}U เมื่อดูรูปเราจะเห็นของ ^{232}Th และ เฟอร์ไทล์ไอโซโทป อื่นๆ จะเกิดการแบ่งแยกได้เมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูง(หรือนิวตรอนเร็ว $E \approx 1 - 2 \text{ MeV}$) ซึ่งจะเกิดได้เมื่ออยู่เหนือบริเวณเรโซแนนซ์ การแบ่งแยกได้บริเวณนี้จะมี σ_f ใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงไม่เกิดขึ้น และ σ_f จะมีค่าสูงสุดใกล้บริเวณพลังงาน 10 MeV แต่ก็มีค่าไม่กี่บาร์น ซึ่งขึ้นกับชนิดของนิวไคลด์



รูปที่ 3-7 ภาคตัดขวางของเฟอร์ไทล์ไอโซโทปที่นิวตรอนพลังงานต่างๆ

เมื่อเฟอร์ไทล์ไอโซโทปดูดกลืนนิวตรอนไม่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวเสมอไป บางครั้งทำให้นิวเคลียสสารประกอบเกิดการตื่นตัวแล้วปล่อยรังสีแกมมาออกมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น

$$\alpha = \sigma_{\gamma} / \sigma_f \quad (3.8)$$

ค่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของนิวไคลด์ และ ขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนด้วย กรณีเทอร์มอลนิวตรอนจะมีค่าตามตารางที่ 3-2 แนวตั้งที่หกของตารางแสดงค่า V คือจำนวนเฉลี่ยของนิวตรอนที่เกิดขึ้นต่อการแบ่งแยกตัว ซึ่งจะเห็นว่าของ ^{239}Pu จะมีค่าสูงสุด ส่วนของ ^{235}U จะมีค่าต่ำสุด

อีกค่าที่สำคัญคือ จำนวนเฉลี่ยของนิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นต่อนิวตรอนช้า ที่ถูกดูดกลืนโดยนิวไคลด์ใช้สัญลักษณ์ η ของวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุชนิดหนึ่งโดย

$$\eta = v \sigma_f / \sigma_a = v \sigma_f / (\sigma_f + \sigma_{\gamma}) = v / (1 + \alpha) \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาวัสดุ เช่น ยูเรเนียมธรรมชาติ (natural uranium) ซึ่งมีหลายไอโซโทป เราอาจนิยาม η ในพจน์ของภาคตัดขวางมหภาคที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว และ การดูดกลืนที่ได้จากการรวมของแต่ละไอโซโทป มีค่า

$$\eta = (\sum_i v_i \Sigma_{f_i}) / (\sum_i \Sigma_{a_i}) \quad (3.10)$$

เมื่อ

v_i = จำนวนเฉลี่ยของนิวตรอนที่เกิดต่อการแบ่งแยกตัว (neutrons / fission)

Σ_{f_i} = ภาคตัดขวางมหภาคของการแบ่งแยกตัว

Σ_{a_i} = ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน

ทั้งหมดห้อย i หมายถึงของไอโซโทปที่ 1, 2, ... ที่อยู่ในวัสดุนั้นตามที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ ค่าที่ได้ตามสมการ (3.10) นั้นคำนวณที่พลังงานของนิวตรอนที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดการแบ่งแยกตัว

ตัวอย่างที่ 3.1

ยูเรเนียมธรรมชาติประกอบด้วย ^{234}U , ^{235}U และ ^{238}U มีความอุดมสมบูรณ์คิดเป็น % (abundance, %) และ น้ำหนักอะตอม ดังตาราง

ไอโซโทป	ความอุดมสมบูรณ์, %	น้ำหนักอะตอม
^{234}U	0.0057	234.0409
^{235}U	0.72	235.0439
^{238}U	99.27	238.0508

เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติจะมีค่า η ที่เกิดจากเทอร์มอลนิวตรอนนั้นมีค่าเท่าใด (ถ้า ^{234}U) และความหนาแน่นมีค่า 18.9 g/cm^3

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{สมการ (3.10)} \quad \eta &= \frac{v(^{235}\text{U})\sum_f(^{235}\text{U})}{\sum_a(^{235}\text{U}) + \sum_a(^{238}\text{U})} \\ \eta &= \frac{v(^{235}\text{U})N(^{235}\text{U})\sigma_t(^{235}\text{U})}{N(^{235}\text{U})\sigma_a(^{235}\text{U}) + N(^{238}\text{U})\sigma_a(^{238}\text{U})} \end{aligned}$$

เมื่ออาศัยสมการ (2.23)

$$N_i = \frac{\omega_i \rho N_{AV}}{100A_i}$$

เมื่อกรณีนี้ ω_i คือความอุดมสมบูรณ์คิดเป็น % ของไอโซโทป i ดังนั้นแทนค่าต่าง ๆ จากโจทย์ จากตารางที่ 3-2 และจากตารางแนบท้ายลงในสมการข้างบนจะได้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(2.418 \times 0.72 \times 582) / 235.0439}{\{(0.72 \times 681) / 235.0439\} + \{(99.27 \times 2.7) / 238.0508\}} \\ &= \frac{4.3108}{2.086078 + 1.125939} = \frac{4.3108}{3.212017} = 1.3421 \end{aligned}$$

หรืออาจจะประมาณจากสมการ (2.23) ว่าความหนาแน่นอะตอม N_i ขึ้นอยู่กับ % ความอุดมสมบูรณ์ในธรรมชาติ ดังนั้นจะได้

$$\eta = \frac{v(^{235}\text{U}) \times 0.72 \sigma_f(^{235}\text{U})}{\{0.72 \times \sigma_a(^{235}\text{U})\} + \{99.27 \times \sigma_a(^{238}\text{U})\}}$$

แทนค่าลงไปจะได้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2.418 \times 0.72 \times 582}{(0.72 \times 681) + (99.27 \times 2.7)} \\ &= \frac{1013.238}{490.32 + 268.029} = \frac{1013.238}{758.349} = 1.336 \end{aligned}$$

ซึ่งค่าที่คำนวณออกมาใกล้เคียงกับค่าในตารางที่ 3-2

3.6 พลังงานที่ปลดปล่อยในการแบ่งแยกนิวเคลียส

(Energy Released in Nuclear Fission)

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการแบ่งแยกนิวเคลียสจะอยู่ในรูปพลังงานจลน์ของผล การแบ่งแยกตัวต่างๆ และ รังสีแกมมา โดยมีพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 190-210 MeV/fission หรือ อาจประมาณว่ามีค่า 200 MeV/fission ตามสมการ (3.4) ในหัวข้อ 3.2 สำหรับในหัวข้อนี้จะ

ตารางที่ 3-3 พลังงานที่ปลดปล่อยในการแบ่งแยกนิวเคลียสของ ^{235}U และ ^{239}Pu ที่เกิดจากเทอร์มอลนิวตรอน

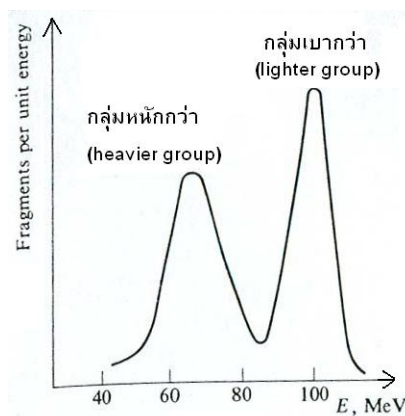
ผลการแบ่งแยก	พลังงานที่ปลดปล่อย (MeV)		ระยะ (m)
	^{235}U	^{239}Pu	
ชิ้นส่วนเบา	99.8 ± 1.0	101.8 ± 1.0	$< 1 \times 10^{-4}$
ชิ้นส่วนหนัก	68.4 ± 0.7	73.2 ± 0.7	"
นิวตรอนที่เกิดขึ้นทันที (prompt neutrons)	4.8	5.8	*
โฟตอนที่เกิดขึ้นทันที ($t < 1 \mu\text{s}$)	7.5	7.0	1
ผลการสลาย			
ก. อนุภาค β^-	7.8	8.0	$< 1 \times 10^{-2}$
ข. รังสีแกมมา ($t > 1 \mu\text{s}$)	6.8	6.2	< 1
ค. นิวตริโน (neutrinos)	12.0	12.0	โตมาก

พลังงานที่เกิดขึ้นดังกล่าวก็จะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปความร้อน โดยชิ้นส่วนการแบ่งแยกทั้งสองเกิดอันตรกิริยากับนิวคลีไอของตัวกลางผ่านแรงคูลอมบ์ และจะมีความเร็วที่ช้าลงในระยะทางไม่กี่ไมครอน(microns) นิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกจะมีความเร็วลดลงเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวคลีไอของตัวกลาง รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นที่มีพลังงานน้อยกว่าหรือใกล้เคียง 3 MeV จะสูญเสียพลังงานผ่านปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) นอกจากนี้ก็อาจมีการสูญเสียผ่านการกระเจิงแบบคอมพตัน (Compton scattering) และการผลิตคู่(pair production) ซึ่งถ้าคิดเป็น % แล้วประมาณได้ดังนี้

ผลการแบ่งแยก	พลังงานที่แบ่งไป(%)
พลังงานจลน์ของชิ้นส่วนการแบ่งแยกทั้งสอง	80
นิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นทันที	3
รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันที	4

ผลการแบ่งแยก(ต่อ)	พลังงานที่แบ่งไป(%)
ผลจากการสลาย	
- อนุภาค β	4
- รังสีแกมมา	4
- นิวตริโน	5

การแจกแจงพลังงานของชิ้นส่วนการแบ่งแยกทั้งสอง ดูจากรูปที่ 3-8 ซึ่งจะมี 2 ยอดแยกกลุ่มตามเลขอะตอม โดยกลุ่มเบากว่าคือ $A \approx 95$ และ กลุ่มหนักกว่าคือ $A \approx 140$



รูปที่ 3-8 การแจกแจงพลังงานของชิ้นส่วนการแบ่งแยก

จากตารางที่ 3-3 กรณี ^{235}U โดยเฉลี่ยแล้วชิ้นส่วนการแบ่งแยกทั้งสอง เมื่อพลังงานรวมกันจะมีค่าประมาณ 168 MeV หรือคิดเป็นประมาณ 80% ของพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการแบ่งแยก โดยมีค่าความไม่แน่นอนประมาณ 2 MeV พลังงานที่ไปกับนิวตรอน และ รังสีแกมมา ที่เกิดขึ้นที่มีค่าประมาณ 4.8 MeV และ 7.5 MeV ตามลำดับ และ พลังงานที่ไปกับอนุภาค β รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นภายหลัง(delayed γ -rays)และนิวตริโน ซึ่งทั้ง 3 แบบมาจากการสลายตัวของชิ้นส่วนการแบ่งแยกทั้งสอง ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ 27 ± 3 MeV โดยเป็นของนิวตริโนประมาณ 12 MeV (ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์พลังงานส่วนนี้จะหายไปจากระบบ แต่อย่างไรก็ตามนิวตรอนบางส่วนที่เกิดจากการแบ่งแยกถูกดูดกลืนโดยวัสดุในเครื่องปฏิกรณ์ และ ทำให้เกิดรังสีแกมมาคิดเป็นประมาณ 3 – 12 MeV ที่ปลดปล่อยออกมาต่อการแบ่งแยกตัว จึงเป็นพลังงานชดเชย (recoverable energy) บางส่วนที่หายไปกับนิวตริโน) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงประมาณว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาต่อการแบ่งแยกตัวมีค่าประมาณ 200 MeV/fission โดยมีความไม่แน่นอน 5 – 10 MeV

ตัวอย่างที่ 3.2

เครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่งใช้พลังงานจากการแบ่งแยกนิวเคลียสของ ^{235}U ให้พลังงานออกมาต่อวินาที หรือ กำลังงาน P megawatts (หรือ MW) หรือ กล่าวอีกอย่างว่าเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่กำลังความร้อน (thermal power) P MW

- จงหาอัตราการแบ่งแยกตัว (fission rate)
- ให้อัตราการเผาไหม้ (burning rate) = (อัตราการแบ่งแยก \times น้ำหนักอะตอม / เลขอาโวกาโดร์) จากผลที่ได้ในข้อ ก. จะมีค่านี้เท่าใดเมื่อคิดเป็นวัน
- ถ้าเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่กำลังความร้อน 1 MW จากข้อ ข. ต้องใช้ ^{235}U กี่กรัมต่อวัน
- ถ้าฟิชชันไอโซโทปดุกกลืนนิวตรอนแล้วมีโอกาสเกิดปฏิกิริยา 2 อย่างคือการแบ่งแยก (มี σ_f) และ การดุกกลืนแล้วปล่อยรังสี (มี σ_γ) จงหาอัตราการใช้ (consumption rate) ^{235}U ในข้อ ค.

วิธีทำ

ก. จากที่เราทราบจากสมการ (3.4) และ ในหัวข้อนี้ว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาต่อการแบ่งแยกตัว = 200 MeV/fission เราจะหาอัตราการแบ่งแยก (fission/s) ดังนั้น พิจารณาขนาดประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C จะได้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา 200 MeV = $200 \times 1.6 \times 10^{-19}$ MJ นั่นคือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา 3.2×10^{-17} MJ ที่เกิดจาก 1 fission หรือ คิดเป็นกำลังงาน ($W = J/s$) เราจะได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่ 3.2×10^{-17} MW เกิดจาก 1 fission/s ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่ P MW เกิดจาก $\frac{P}{3.2 \times 10^{-17}} \frac{\text{fission}}{\text{s}}$ หรือ

$$P \times 3.125 \times 10^{16} \text{ fission/s}$$

ข. เมื่อเราพิจารณาน้ำหนักอะตอมของ ^{235}U มีค่า $A = 235$ g/mol และ เลขอาโวกาโดร์ = $N_{AV} = 0.602 \times 10^{24}$ atoms/mol โดยต้องระลึกว่า 1 อะตอมมี 1 นิวเคลียส และ 1 fission ก็คือเกิดจาก 1 นิวเคลียส ดุกกลืน 1 นิวตรอน ดังนั้นจากคำตอบในข้อ ก. จะได้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเผาไหม้} &= \frac{P \times 3.125 \times 10^{16} (\text{fissions/s}) \times 235 (\text{g/mol})}{0.602 \times 10^{24} (\text{fission/mol})} \\ &= P \times 1219.89 \times 10^{-8} \text{ g/s} \end{aligned}$$

เมื่อ 1 วัน = 1 d = 24 \times 60 \times 60 s = 86400 s ดังนั้นจะได้ อัตราการเผาไหม้ = $P \times 1.05$ g/d

ค. ดังนั้นจากข้อ ข. ถ้าเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่กำลังความร้อน 1 MW หมายถึง $P = 1$ จะต้องใช้ ^{235}U ในอัตราประมาณ 1.05 g/d หรืออาจกล่าวได้ว่าปลดปล่อยกำลัง 1 MW-d จะต้องใช้ ^{235}U จำนวน 1 g

ง. เพื่อให้ได้จำนวนการแบ่งแยกเท่าเดิม จะต้องใช้ ^{235}U มากกว่าเดิม เนื่องจากมีบางส่วนเกิดปฏิกิริยาการดูดกลืนแล้วปล่อยรังสี ดังนั้นเมื่อ $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$ และจากสมการ (3.8)

$$\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f \quad \text{เราจะได้} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_f} = 1 + \frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f} = 1 + \alpha$$

นั่นคือ เราต้องการแบ่งแยกเท่าเดิม เราต้องเอาค่าที่ได้เข้าไปคูณอัตราการแบ่งแยก (ข้อ ก.)

ดังนั้นจากคำตอบในข้อ ค. เมื่อต้องการเดินเครื่องที่พลังความร้อน 1 MW

ต้องมีอัตราการใช้ $^{235}\text{U} = 1.05 (1 + \alpha) \text{ g/d}$ หรือต้องใช้ α ของ ^{235}U เดินเครื่องปฏิกรณ์ที่

กำลังความร้อน 1 MW ประมาณ 1.23 กรัมต่อวัน ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนเป็นตัวเหนี่ยวนำ

สรุปเนื้อหาในบทที่ 3

1. สมการของปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส กรณี ^{235}U จะถูกเหนี่ยวนำด้วยเทอร์มอลนิวตรอน (^1_0n) กลายเป็น $^{236}\text{U}^*$ ตื่นตัวแล้วเกิดชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัวเป็น 2 นิวไคลด์ นิวตรอน รังสีแกมมา และ พลังงาน (Q) ออกมาตามสมการ

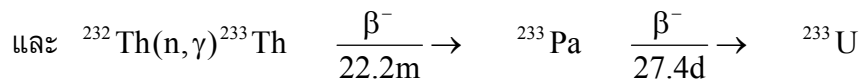
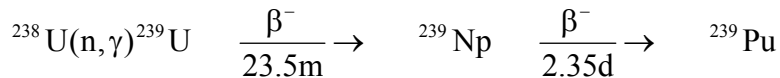


พลังงานรวมของปฏิกิริยาที่ปลดปล่อยออกมามีค่าประมาณ 200 MeV

2. การแบ่งแยกนิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานการตื่นตัวเกินกว่า U_B หรือมีความน่าจะเป็นพอที่จะทะลุทะลวงผ่านกำแพงศักย์

3. พลังงานวิกฤต E_{crit} จะเข้าไปเหนี่ยวนำการแบ่งแยกนิวเคลียสโดยให้นิวเคลียสดูดกลืนนิวตรอนทำให้เกิดนิวเคลียสสารประกอบที่อยู่ในสถานะตื่นตัวที่เกิดจากพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เข้าชนเมื่อรวมกับพลังงานเพื่อการแบ่งแยก (separation energy) ของนิวตรอนในนิวเคลียสของสารประกอบให้มีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวก็จะเกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้

4. เฟอริล์นิวไคลด์ (fertile nuclide) ตัวอย่างของนิวไคลด์พวกนี้มี ^{232}Th , ^{238}U , ^{240}Pu และ ^{242}Pu ในการทำเฟอริล์ไอโซโทปให้เป็นฟิสไซล์ไอโซโทปทำได้โดยปฏิกิริยาการแปรธาตุหลังดูดกลืนนิวตรอน (neutron transmutation reactions) ที่สำคัญคือ



โดยทั้ง ^{238}U และ ^{232}Th มีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ^{239}Pu และ ^{233}U ดังกล่าว เพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

5. ภาคตัดขวางของการแบ่งแยกนิวเคลียส σ_f จะแปรผกผันกับ $1/v$ (เมื่อ v คืออัตราเร็วของนิวตรอน) และมีค่ามากที่ $E = 0.025 \text{ eV}$ ค่า σ_f ของ ^{235}U มีค่าประมาณ 582 b ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าที่นิวตรอนพลังงานต่ำจะมีผลทำให้นิวคลีไอ ^{235}U แบ่งแยกตัวได้ดี

6. อัตราส่วนของภาคตัดขวางการดูดกลืนแล้วปล่อยรังสี (σ_γ) ต่อภาคตัดขวางของการแบ่งแยกตัว (σ_f) มีค่า $\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f$ ค่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของนิวไคลด์และขึ้นกับพลังงานของนิวตรอน

7. จำนวนเฉลี่ยของนิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นต่อนิวตรอนช้าที่ถูกดูดกลืนโดยนิวไคลด์ของวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุชนิดหนึ่ง $\eta = v \sigma_f / \sigma_a = v \sigma_f / (\sigma_f + \sigma_\gamma) = v / (1 + \alpha)$

ยูเรเนียมธรรมชาติ (natural uranium) ซึ่งมีหลายไอโซโทป เราอาจนิยาม η ในพจน์ของ ภาคตัดขวางมหภาคที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวและการดูดกลืนที่ได้จากการรวมของแต่ละ ไอโซโทป มีค่า $\eta = (\sum_i v_i \Sigma_{fi}) / (\sum_i \Sigma_{ai})$ เมื่อ

v_i = จำนวนเฉลี่ยของนิวตรอนที่เกิดต่อการแบ่งแยกตัว (neutrons / fission)

Σ_{fi} = ภาคตัดขวางมหภาคของการแบ่งแยกตัว

Σ_{ai} = ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน

ทั้งหมดห้อย i หมายถึงของไอโซโทปที่ 1, 2, ... ที่อยู่ในวัสดุนั้น

แบบฝึกหัดบทที่ 3

- 3.1 พลังงานที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวของ ^{235}U จำนวน 1 g มีค่าประมาณ 1 MWd (megawatt.day) ให้หาปริมาณที่สมมูลกับค่านี้ในการเผาไหม้
- ก. ถ่านหินที่ให้ความร้อน $3 \times 10^7 \text{ J/kg}$ ข. น้ำมันที่ให้ความร้อน $4.3 \times 10^7 \text{ J/kg}$
- 3.2 ให้อธิบายว่าทำไมชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัว(fission fragment) ส่วนใหญ่จะมีการสลายอนุภาค β^-
- 3.3 การเผาไหม้ถ่านหิน 1 ตัน เมื่อคิดเป็นพลังงานความร้อนจะได้ประมาณ 0.36 MWd ถ้าไม่คิดประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน ให้เปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่ได้จาก 1 g ของ ^{235}U ที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวหมดกับที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน 1 g
- 3.4 จงอธิบายการแบ่งแยกนิวเคลียสตามรูปแบบหยดของเหลว
- 3.5 จงคำนวณหามวลของ ^{235}U ที่ต้องใช้แต่ละวันเพื่อให้เกิดการแบ่งแยกตัวเพื่อให้เกิดกำลังความร้อน 3,000 MW
- 3.6 ให้คำนวณหาพลังงาน Q ที่ปลดปล่อยออกมาจากการแบ่งแยกตัวของ ^{235}U จากปฏิกิริยาต่อไปนี้
- $$^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{140}\text{Ce} + ^{94}\text{Zr} + 2n + Q$$
- $$^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe} + ^{98}\text{Mo} + 2n + Q$$
- กำหนดให้ $M(^{235}\text{U}) = 235.043933 \text{ u}$ $m_n = 1.008665 \text{ u}$
 $M(^{140}\text{Ce}) = 139.905392 \text{ u}$ $M(^{94}\text{Zr}) = 93.906314 \text{ u}$
 $M(^{136}\text{Xe}) = 135.907221 \text{ u}$ และ $M(^{98}\text{Mo}) = 97.905409 \text{ u}$
- 3.7 ให้หาเศษส่วนของตัวอย่าง(sample) ^{235}U ที่จะเกิดการแบ่งแยกตัวในเวลา 1 ปี เมื่ออาบด้วยฟลักซ์เทอร์มอลนิวตรอน $2 \times 10^{13} \text{ neutrons/(cm}^2 \text{ s)}$ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
- 3.8 การแบ่งแยกตัวด้วยเทอร์มอลนิวตรอน(thermal fission)ของ ^{239}Pu และปล่อยนิวตรอนออกมา 4 ตัว เมื่อชิ้นส่วนการแบ่งแยกตัว(fission fragments)คือ ^{155}Gd และ ^{81}Br ถ้า 1 g ของ ^{239}Pu เกิดการแบ่งแยกตัวหมด ให้คำนวณหามวลของแต่ละชิ้นส่วน การแบ่งแยกตัวที่เกิดขึ้นมารวมทั้งมวลของนิวตรอนที่ได้ กำหนดให้
- $$M(^{239}\text{Pu}) = 239.052146 \text{ u} , \quad m_n = 1.008665 \text{ u} , \quad M(^{155}\text{Gd}) = 154.922664 \text{ u} \quad \text{และ}$$
- $$M(^{81}\text{Br}) = 80.916292 \text{ u}$$
- 3.9 ให้คำนวณหาพลังงานจลน์ทั้งหมดของ ^{98}Zr และ ^{138}Xe ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวด้วยเทอร์มอลนิวตรอนของ ^{239}Pu
- 3.10 ในการแบ่งแยกตัวของหนึ่งนิวเคลียสของ ^{238}U จะปลดปล่อยพลังงานออกมา 200 MeV ให้

หาออกมาในรูปพลังงานต่อโมล(J/mol) และให้เปรียบเทียบกับความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่มีค่าประมาณ 1.0×10^5 J/mol

- 3.11 ให้คำนวณหาอัตราการใช้ ^{235}U และ ^{238}U ที่เกิดจากฟลักซ์นิวตรอน $\phi = 2.5 \times 10^{13}$ neutrons/(cm² s) ถ้าความหนาแน่นอะตอมยูเรเนียม $N = 0.0223 \times 10^{24}$ atoms/cm³ โดยเศษส่วนอะตอมของไอโซโทปทั้งสองมีค่า 0.0072 และ 0.9928 และมีภาคตัดขวาง 678 barns และ 2.70 barns ตามลำดับ