

บทที่ 6

กระบวนการแบ่งแยกตัว (The Fission Process)

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบายการแบ่งแยกตัวทางนิวเคลียร์ได้
2. หาเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่เกิดขึ้นหลังจากการเกิดแบ่งแยกตัวได้
3. คำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการแบ่งแยกตัวได้
4. หาเวลาที่นิวตรอนมีชีวิตรอยู่ได้

6.1 การแบ่งแยกตัวทางนิวเคลียร์

นิวตรอนเป็นต้นกำเนิดให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวกับธาตุหนักๆ เช่น U^{235} , Pu^{239} และ U^{233} เมื่อนิวตรอนชนกับนิวคลีโอ ทำให้นิวเคลียสแตกออกเรียกว่าเกิด “ฟิชชัน” เป็นต้นกำเนิดที่สำคัญของพลังงานนิวเคลียร์

เนื่องจาก U^{235} , Pu^{239} และ U^{233} สามารถทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวได้ ไม่ว่านิวตรอนจะมีพลังงานเท่าใด เรียกไอโซโทปทั้งสามว่า “ฟิสไซล์ไอโซโทป” (fissile isotope) จึงได้นำไอโซโทปเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

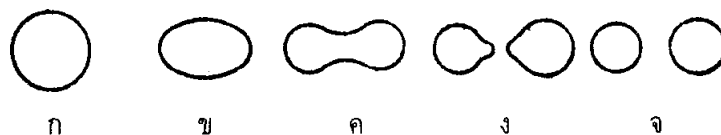
ยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย U^{238} ประมาณ 99.28 เปอร์เซ็นต์ และ U^{235} ประมาณ 0.72 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถจะใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานได้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มาล เพราะยูเรเนียม -238 ไม่มีค่าภาคตัดขวางสำหรับการแบ่งแยกตัว (σ_f) กับเทอร์มาลนิวตรอน

นอกจากนิวตรอนจะทำให้เกิดแบ่งแยกตัวได้แล้ว อนุภาคอื่นที่มีพลังงานสูง เช่น โปรตอน, ดิวเทรียม ก็จะทำให้นิวเคลียสเกิดแบ่งแยกตัวได้เช่นกัน ความจริงแล้ว ถ้าพลังงานของอนุภาคที่ใช้ยิ่งมากพอ เกือบทุกนิวเคลียสของธาตุหนัก จะทำให้เกิดแบ่งแยกตัวได้ เช่น แทนทาลัม เลขอะตอม 73 จะเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวเมื่อใช้อนุภาคแอลฟา พลังงาน 400 เมมอีวี

6.2 ผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว

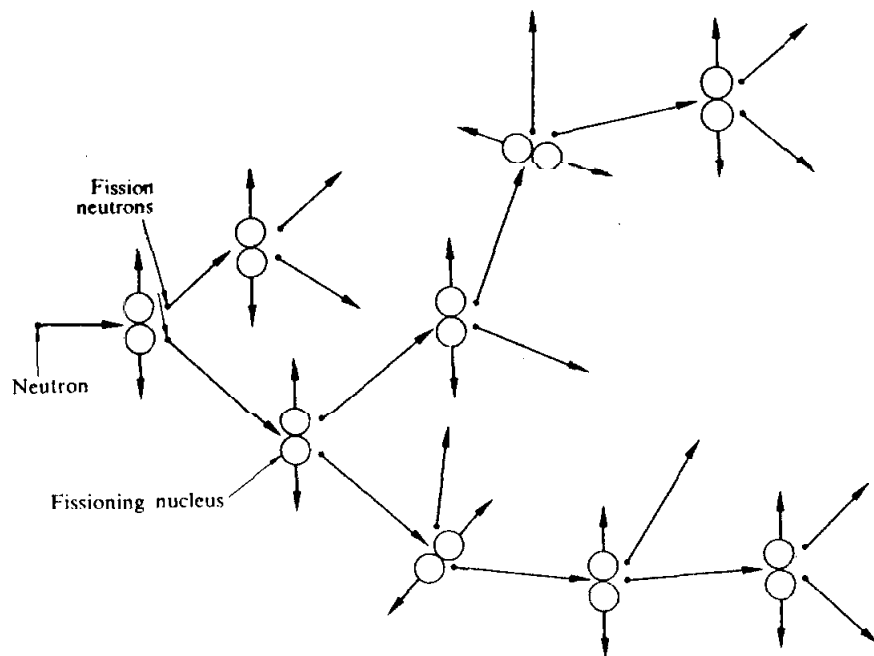
(Fission Product)

กระบวนการแบ่งแยกตัว อธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปแบบหยดของเหลว (liquid drop model) โดยคิดว่านิวเคลียสมีรูปเป็นทรงกลมคล้ายหยดของเหลว เมื่อนิวตรอนถูกจับไป พลังงานรวมทั้งหมดจะถูกแบ่งปันให้กับนิวคลีโออนที่มีอยู่ ทำให้นิวเคลียสเกิดการสั่น อนุภาคโปรตอนจะไปรวมกันอยู่ทางด้านหนึ่ง ถ้าพลังงานมากพอ จะทำให้นิวเคลียสแยกออกเป็น 2 ส่วน วิ่งออกมาด้วยความเร็วสูง เนื่องจากแรงผลักรวม



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะการเกิดแบ่งแยกตัวตามรูปแบบหยดของเหลว

เมื่อนิวตรอนเข้าชนไอโซโทปที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวได้ จะเกิดการแบ่งแยกตัว มีส่วนที่แตกออกจากการเกิดแบ่งแยกตัว (fission fragment) 2 ธาตุ ธาตุหนึ่งเป็นธาตุหนัก อีกธาตุหนึ่งเป็นธาตุที่เบากว่า และมีนิวตรอนเร็วเกิดขึ้นทันที 2-3 อนุภาค ถ้าธาตุที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัวมีปริมาณมากพอ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) นิวตรอนเร็วจะเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ มีธาตุที่เป็นส่วนที่แตกออกจากการเกิดแบ่งแยกตัวเพิ่มขึ้น เป็นธาตุกัมมันตรังสี มีการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา และรังสีแกมมา เป็นผลให้มีทั้งรังสีและความร้อนเกิดขึ้นมากมาย จะต้องสามารถควบคุมปริมาณนิวตรอนที่เกิดขึ้นให้มีจำนวนคงที่ตลอดเวลา จึงจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้

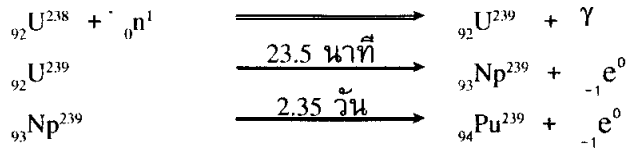


รูปที่ 6.2 แสดงปฏิกิริยาลูกโซ่จากการเกิดแบ่งแยกตัวของ U^{235}

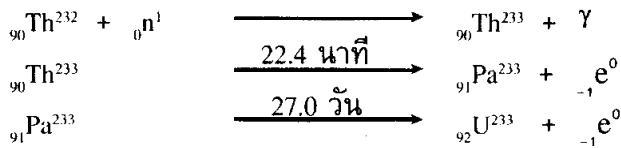
6.3 ธาตุเฟอร์ไทล์

(Fertile isotopes)

ในปี 1940, พบว่า เมื่อ ^{238}U ดูดกลืนนิวตรอนช้า จะเกิด ^{239}U นิวไคลด์ใหม่นี้สลายด้วยครึ่งชีวิต 23.5 นาที โดยการส่งอนุภาคเบตาเกิดเป็นธาตุ ^{239}Np สลายด้วยครึ่งชีวิต 2.35 วัน เกิดเป็น ^{239}Pu ดังสมการ



ส่วน ^{232}Th เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นธาตุ ^{233}U ได้ดังสมการ



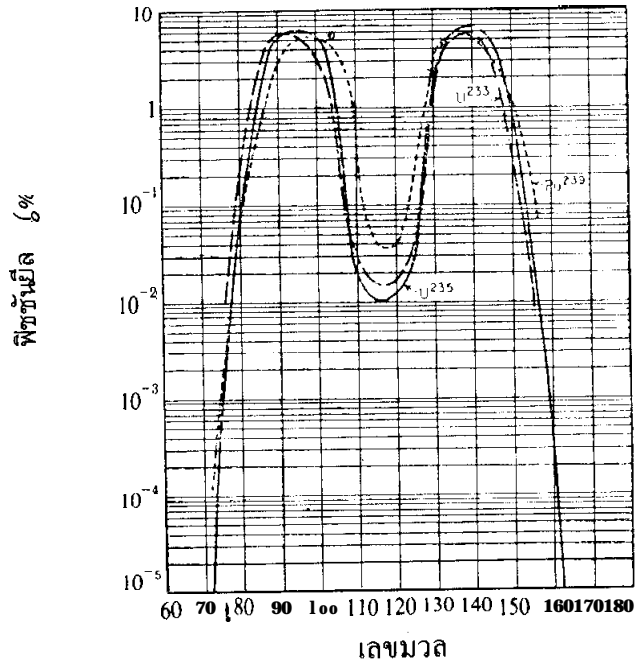
เรียกธาตุ ^{238}U และ ^{232}Th ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นธาตุที่เกิดแบ่งแยกตัวได้ว่าเป็น “ธาตุเฟอร์ไทล์” (fertile isotopes)

^{239}Pu และ ^{233}U ไม่เกิดในธรรมชาติ แต่จะเกิดในปฏิกิริยาที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเชื้อเพลิง บรีดเดอร์ รีแอกเตอร์ (Breeder reactor)

6.4 ฟิชชันยิลด์

(Fission Yield)

นิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่หลังจากการแบ่งแยกตัวมีปริมาณต่างๆ กัน มักเรียกเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ความหมายของฟิชชันยิลด์ว่า เป็นเปอร์เซ็นต์ที่จะทำให้เกิดนิวเคลียสนั้น ตามรูปที่ 6.3 ได้แสดงผลที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกตัว (%) ของ ^{235}U , ^{239}Pu และ ^{233}U สังเกตว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 6.3 แสดงฟิชชันโปรดักทียิลด์ สำหรับ U^{235} , Pu^{239} และ U^{233}

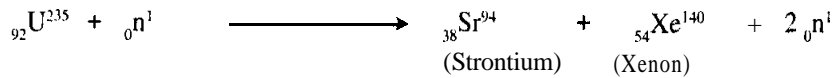
(K. Way and N. Dismuke, Fission Product Yields, ORNL-280 and AECD-2817, 1949)

นิวเคลียสที่แตกออกมา (fission fragment) ส่วนมากเป็นพวกกัมมันตรังสี มีการสลาย (decay) โดยการส่งอนุภาคเบตา อธิบายลักษณะการไม่เสถียรภาพได้ดังนี้

เป็นที่ทราบกันแล้วว่า นิวไคลด์ใดที่มีลักษณะเสถียรภาพ จำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสก็มีจำนวนเท่ากัน นั่นคือ $N = Z$, เมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอน นิวตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงจากนิวตรอนไปเป็นโปรตอนในนิวเคลียส การเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งอนุภาคเบตาออกมา ดังสมการ



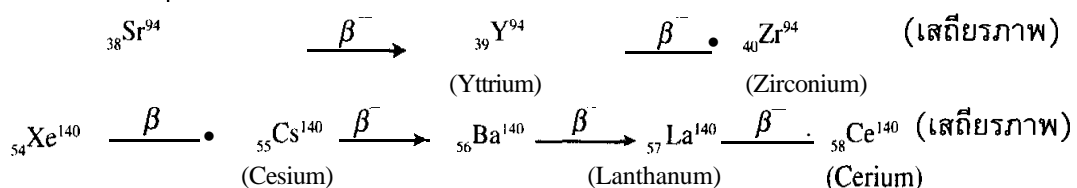
จากปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวของนิวคลีไอ U^{235} เขียนสมการได้ดังนี้



ตารางที่ 6.1 แสดงพิสัยของส่วนที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัว

ตัวกลาง	พิสัย x , 10^{-3} เซนติเมตร
อะลูมิเนียม	1.4
ทองแดง	0.59
เงิน	0.53
ยูเรเนียม	0.66
ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8)	1.4

นิวไคลด์ที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัว เป็นธาตุกัมมันตรังสี มีการสลายต่อไป โดยการส่งอนุภาคเบตา ดังสมการ



นิวไคลด์ที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว นอกจากจะส่งอนุภาคเบตาออกมาแล้ว บางนิวไคลด์อาจส่งรังสีแกมมาออกมาด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องป้องกันรังสีแกมมา

6.5 นิวตรอนที่ถูกส่งออกมาทันทีหลังจากการเกิดแบ่งแยกตัว

(Prompt neutrons)

นิวตรอนที่ถูกส่งออกมาจากส่วนที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัวภายในเวลา 10^{-12} วินาที หลังจากการเกิดแบ่งแยกตัว เรียก พรอมท์นิวตรอน (Prompt neutrons)

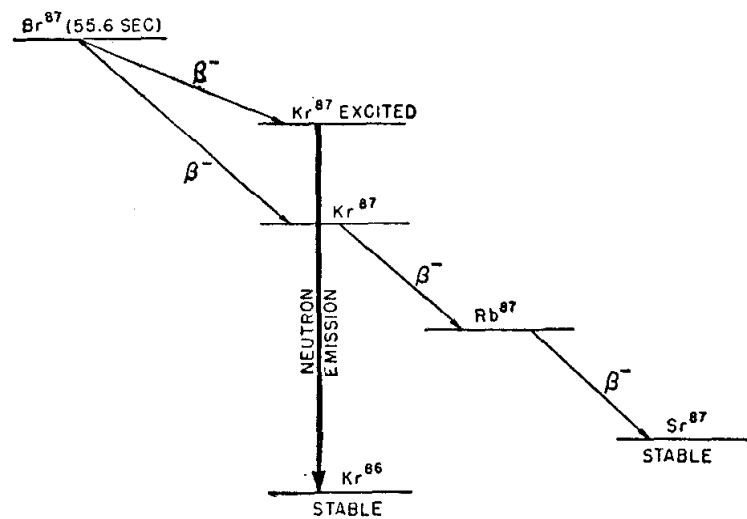
ยังมีนิวตรอนอีกพวกหนึ่งที่ถูกส่งออกมาภายหลังการเกิดแบ่งแยกตัว เรียก ดีเลย์นิวตรอน (delay neutron) แบ่งตามพลังงานออกเป็น 5 กลุ่ม มีครึ่งชีวิตต่างกันไป และจำนวนเปอร์เซ็นต์ก็ต่างกันไปด้วย เชื่อว่า นิวตรอนที่ส่งออกมาทีหลังนี้ เกิดจากปฏิกิริยา (γ, n) ของนิวคลีไอที่เกิดขึ้นหลังการเกิดแบ่งแยกตัว

ตารางที่ 6.2 แสดงกลุ่มต่างๆ ของดีเลย์นิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว

ครึ่งชีวิต (วินาที)	พลังงาน (เคอีวี)	ผลจากการส่งนิวตรอนออกมา 100 ตัว		
		U ²³⁵	Pu ²³⁹	"2"
55.6	250	0.025	0.014	0.018
22.0	570	0.166	0.105	0.058
4.50	412	0.213	0.126	0.086
1.52	670	0.241		0.062
0.43	400	0.085	0.119	0.018
		ดีเลย์ 0.730%	0.364%	0.242%

จากตารางแสดงว่า U^{235} ส่งดีเลย์นิวตรอนออกมามากที่สุด ทำให้สะดวกในการควบคุมปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ โดยส่งออกมาถึง 0.73% แสดงว่า การควบคุมปฏิกิริยาจะง่ายกว่าการใช้ Pu^{239} , U^{233} เป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีดีเลย์นิวตรอนเพียง $\frac{1}{3}$ และ $\frac{1}{2}$ ของดีเลย์นิวตรอนที่ส่งออกมาหลังการแบ่งแยกตัวของ U^{235}

โดยการแยกธาตุที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว ปรากฏว่า ดีเลย์นิวตรอน ที่มีครึ่งชีวิต 55.6 วินาที มีต้นกำเนิดจากไอโซโทปโบรมีน (Br^{87}) ส่วนดีเลย์นิวตรอน ที่มีครึ่งชีวิต 22.0 วินาที มาจากไอโซโทปของไอโอดีน (I)



รูปที่ 6.4 แสดงแผนผังการสลายของโบรมีน-87

อนุภาคเบตาที่ส่งออกมา มีพลังงานน้อยเหลือคริปตอน -87 (excited state) ซึ่งมีพลังงานมากพอที่จะส่งนิวตรอนออกมาเพื่อกลายเป็นคริปตอน -86 ที่มีเสถียรภาพ

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากคริปตอน -87 (excited state) ไปเป็นคริปตอน -86 เกือบจะเกิดขึ้นทันที ดีเลย์นิวตรอน ที่มีครึ่งชีวิตค่าเดียวกับโบรมีน -87 เรียก **พรีเคอร์เซอร์ (precursor)**

6.6 พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการแบ่งแยกตัว

ในการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว ปรากฏว่า มีการปล่อยพลังงานออกมามากมาย พบว่ามีค่าประมาณ 200 เอมอีวี หรือ 3.2×10^{-11} จูล/ฟิชชัน ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานของส่วนที่แตกออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว มีบางส่วนที่เป็นพลังงานของนิวตรอน, รังสีแกมมา (prompt gamma) และจากการสลายของสารกัมมันตรังสีที่เป็นส่วนของนิวไคลด์ที่แตกออกมา อาจแยกพลังงานแต่ละส่วนได้ดังนี้

พลังงานที่เกิดขึ้น (เอมอีวี.) เมื่อเกิดการแบ่งแยกตัวจากยูเรเนียม -235	
ส่วนที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัว	168
รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันที (prompt gamma rays)	7
พลังงานจลน์ของนิวตรอน	5
การสลายของฟิชชันโปรดักต์	
พลังงานจากการสลายโดยให้รังสีแกมมา	7
พลังงานจากการสลายโดยให้รังสีเบตา	8
นิวตริโน	12
พลังงานทั้งหมดประมาณ	207

พลังงานที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวสำหรับ พลูโตเนียม -239, ยูเรเนียม -233 จะมีค่าเช่นเดียวกับการเกิดแบ่งแยกตัวของยูเรเนียม -235 ในการคำนวณจะประมาณได้ว่าพลังงานที่ส่งออกมาจากการแบ่งแยกตัวมีค่า 200 เอมอีวี ต่อ 1 ฟิชชัน

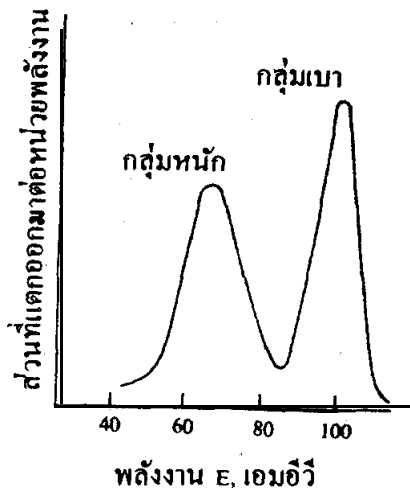
6.7 คุณสมบัติของส่วนที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัว

(Properties of Fission Fragments)

ทันทีที่นิวเคลียสจับนิวตรอนแล้วเกิดแบ่งแยกตัว โมเมนตัมของนิวเคลียสเชิงประกอบจะเป็นศูนย์ หลังจากเกิดแบ่งแยกตัว นิวเคลียสจะแตกออกเป็น 2 ส่วน มวล m_1 และ m_2 ความเร็ว v_1 และ v_2 ถ้าให้ E_1 และ E_2 เป็นพลังงานจลน์ของมวล m_1 และ m_2 โมเมนตัมรวมทั้งมดยังคงเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \vec{m}_1 \vec{v}_1 + \vec{m}_2 \vec{v}_2 &= \mathbf{0} \\ v_1 &= \frac{m_2 v_2}{m_1} \\ \frac{E_1}{E_2} &= \frac{1/2 m_1 v_1^2}{1/2 m_2 v_2^2} = \frac{m_2}{m_1} \quad \dots(6.1) \end{aligned}$$

ส่วนที่แตกออกมาหลังจากการเกิดแบ่งแยกตัว จะถูกส่งออกมาโดยมีทิศทางตรงกันข้าม จะเห็นว่าพลังงานจลน์เป็นส่วนกลับกับมวล ความเร็วของแต่ละส่วนอาจมีค่าประมาณ 10^9 เซนติเมตร/วินาที เนื่องจากความเร็วที่มีค่าสูงนี้ อาจผลักให้อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสหลุดออกไปนอกวงโคจรทำให้เกิดการแตกตัวอย่างแรง



รูปที่ 8.5 แสดงการแจกแจงพลังงานของส่วนที่แตกออกมาจากการแบ่งแยกตัว เป็นฟังก์ชันของพลังงานในหน่วยเอมอีวี

6.8 เวลาที่นิวตรอนมีชีวิตอยู่

เวลาที่นิวตรอนมีชีวิตอยู่ (t) เป็นผลรวมของเวลาที่นิวตรอนใช้ในการลดความเร็ว (t) และเวลาที่นิวตรอนใช้ในการแพร่ไปในตัวกลาง (t_{th}) โดยที่เทอมหลังมีค่ามากกว่าเทอมแรก ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นจึงประมาณได้ว่า ช่วงชีวิตของนิวตรอนเท่ากับเวลาที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลาง

สำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่มาก (ขนาดอนันต์)

$$t_{\infty} = \frac{1}{v \Sigma_a} \quad \text{.....(6.2)}$$

เมื่อ t_{∞} คือเวลาที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลางขนาดอนันต์

v คือความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน และ

Σ_a คือภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืน

สำหรับระบบที่มีขนาดจำกัด, จะหาค่าเวลา (t) ได้ดังนี้

$$t = t_{\infty} \epsilon_{th} \quad \text{.....(6.3)}$$

เมื่อ ϵ_{th} คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนไม่รั่วออกไป (non-leakage probability) มีค่า

$$= \frac{1}{1 + B^2 L_{th}^2}$$

และ

$$t = \frac{t_{\infty}}{1 + B^2 L_{th}^2} \quad \text{.....(6.4)}$$

B^2 เรียก บัคคลิง (Buckling)

L_{th}^2 คือพื้นที่การแพร่ของเทอร์มอลนิวตรอน (Thermal diffusion area)

ตัวอย่างที่ 6.1

จงหาจำนวนฟิชชัน ต่อวินาที เพื่อจะให้ได้กำลังงาน 1 วัตต์

จากที่เคยทราบแล้วว่า เมื่อเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง จะให้พลังงาน 200 เอมอีวี

ดังนั้น พลังงาน 200 เอมอีวี เกิดจากการแบ่งแยกตัว 1 ฟิชชัน

หรือ $200 \text{ เอมอีวี} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ จูล} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ จูล}$ เกิดจากการแบ่งแยกตัว 1 ฟิชชัน
 $\frac{1 \text{ เอมอีวี}}{1.6 \times 10^{-13} \text{ จูล}}$

การทำงาน 1 จูล ในเวลา 1 วินาที ได้กำลังงาน 1 วัตต์

หรือ $\frac{1 \text{ จูล}}{\text{วินาที}}$ ได้กำลังงาน 1 วัตต์

ดังนั้น	กำลังงาน	3.2×10^{-11}	จูล	เกิดจากการแบ่งแยกตัว	1	ฟิชชัน
			วินาที			วินาที
		1	วัตต์	เกิดจากการแบ่งแยกตัว	$1 = \frac{3.1 \times 10^{10}}{3.2 \times 10^{-11}}$	ฟิชชัน
						วินาที
นั่นคือ	กำลังงาน	1	วัตต์	เกิดจากการแบ่งแยกตัว	3.1×10^{10}	ฟิชชัน
						วินาที

ตัวอย่างที่ 6.2

ถ้ายูเรเนียม -235 จำนวน 1 กรัม เกิดแบ่งแยกตัวหมดใน 1 วัน จะได้กำลังงานเท่าไร
เมื่อเกิดแบ่งแยกตัว 3.1×10^{10} ฟิชชัน ให้กำลัง 1 วัตต์

หรือจะต้องเกิดการแบ่งแยกตัว 3.1×10^{10} ฟิชชัน $\times 8.64 \times 10^4$ วินาที ให้กำลัง 1 วัตต์

ได้ว่า เกิดการแบ่งแยกตัว 2.68×10^{15} ฟิชชัน ให้กำลัง 1 วัตต์(1)

$$\begin{aligned} \text{ยูเรเนียม-235} \quad \text{จำนวน} \quad 1 \quad \text{กรัม} \quad \text{มีจำนวนอะตอม} &= \frac{1 \times 0.602 \times 10^{24}}{235} \\ &= 2.57 \times 10^{21} \quad \text{อะตอม} \end{aligned}$$

จากสมการ (1)

เกิดการแบ่งแยกตัว 2.68×10^{15} อะตอม ให้กำลัง 1 วัตต์

เกิดการแบ่งแยกตัว 2.57×10^{21} อะตอม ให้กำลัง $\frac{2.57 \times 10^{21}}{2.68 \times 10^{15}} = 10^6$ วัตต์

นั่นคือ U^{235} 1 กรัม เกิดการแบ่งแยกตัวหมดในเวลา 1 วัน ให้กำลัง 1 เมกะวัตต์

ตัวอย่างที่ 6.3

จงหาจำนวนการแบ่งแยกตัวที่เกิดขึ้นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่เกิดจากเชื้อเพลิง ยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2), ความหนาแน่น 10.2 กรัม/ซม.³ หนัก 1 ตัน (เมตริกตัน) ในเวลา 1 วัน เพื่อให้ได้กำลัง 1 เมกะวัตต์

กำลังงาน 1

กำลังงาน 1

กำลังงาน 1

กำลังงาน 1 เมกะวัตต์ ในเวลา 1 วัน เกิดจากการแบ่งแยกตัว 2.68×10^{15} ฟิชชัน.....(1)
 1 ตันยูเรเนียม กรัมยูเรเนียม

โดยการประมาณ UO_2 ประกอบด้วย ยูเรเนียม -238 จำนวน 1 อะตอม และ ออกซิเจน 2 อะตอม
 มวลของ UO_2 โดยประมาณ = $238 + 32 = 270$ กรัม
 ความหนาแน่น ของ UO_2 = $10.2 \frac{\text{กรัม}}{\text{ซม.}^3}$
 จำนวนยูเรเนียม -238 = $\frac{10.2 \times 238}{270} = 8.99 \frac{\text{กรัม}}{\text{ซม.}^3}$

จากสมการ (1)

กำลังงาน 1 เมกะวัตต์ ที่เกิดจากยูเรเนียม 1 ตัน ในเวลา 1 วัน เกิดจากการแบ่งแยกตัว
 2.68×10^{15} ฟิชชัน
กรัมยูเรเนียม

ความหนาแน่น ของ ยูเรเนียม = $8.99 \frac{\text{กรัม}}{\text{ซม.}^3}$

ดังนั้น ยูเรเนียมไดออกไซด์ 1 ตัน ในเวลา 1 วัน จะต้องเกิดการแบ่งแยกตัว $2.68 \times 10^{15} \times 8.99$
 $\frac{\text{ฟิชชัน} \times \text{กรัมยูเรเนียม}}{\text{กรัมยูเรเนียม} \quad \text{ซม.}^3}$
 = $2.41 \times 10^{16} \frac{\text{ฟิชชัน}}{\text{ซม.}^3}$

จึงจะได้กำลัง 1 เมกะวัตต์

