บทที่ 3

วิธีการคำนวณและผลการคำนวณ

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

3.1 จะทำอะไรในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุดประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อคำนวณหา

3.1.1 k_∞ ที่เปอร์เซ็นต์เอนริชเม้นท์ต่าง ๆ

3.1.2 k_∞ เมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์ เปลี่ยนแปลงในเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ

3.1.3 รัศมีวิกฤต (critical radius) ของแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

3.1.4 เนื่องจากรัศมีวิกฤตที่คำนวณได้ในข้อ 3.1.3 นั้นเมื่อนำไปคำนวณหารีแอคติวิตี้ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จะได้ค่ารีแอคติวิตี้เท่ากับศูนย์ ซึ่งใช้ไม่ได้ จึงได้กำหนดใหม่ให้แกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯมีรัศมีใหญ่ขึ้นดังในหัวข้อ 3.2 และการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในหัวข้อต่าง ๆ ต่อไปนี้ ได้คำนวณจากค่ากำหนดใหม่ทั้งสิ้น

3.1.5 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่ในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน จากการเปลี่ยนของธอเรียม -232 และยูเรเนียม -238 ซึ่งจับนิวตรอนช้า ตามลำดับ

3.1.6 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เกิดฟิชชั่นไปภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน

3.1.7 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ที่หมดไปภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน

3.1.8 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ที่เกิดฟิชชั่นไปภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน

3.1.9 กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ (กำลังในที่นี้คือกำลังความร้อน)

3.1.10 จำนวนวันในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อให้ได้ค่าเบอร์นอัพ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน

3.1.11 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ภายในรีเฟลคเตอร์

3.1.12 จำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปภายในรีเฟลคเตอร์ เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนภายในแกน เปลี่ยนเป็นค่าต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้

3.2 ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดให้

3.2.1 สร้างแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เป็นรูปทรงกระบอก รัศมี 2 เมตร สูง 3 เมตร

3.2.2 เชื้อเพลิงใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์(UO_2) และธอเรียมไดออกไซด์ (ThO_2) ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ยูเรเนียมไดออกไซด์ มีเอนริช-เม้นท์ 5%

3.2.3 ใช้น้ำธรรมดาเป็นโมเดอเรเตอร์ ผสมเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

3.2.4 เพื่อความสดวกในการคำนวณ จะใช้น้ำหนักโมเลกุลของยูเรเนียม-ไดออกไซด์ และธอเรียมไดออกไซด์ คือ 270 และ 264 ตามลำดับ และให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทั้งสองคือ 10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเวลาคำนวณจะคำนวณโดยคิดว่าเครื่องปฏิกรณ์ฯนี้ เป็นแบบโฮโมจีเนียส

3.2.5 รีเฟลคเตอร์ หนา 50 เซนติเมตร ใช้ธอเรียมไดออกไซด์ผสมกับน้ำธรรมดาในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

3.2.6 ฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เปลี่ยนค่าดังนี้ 10^{12}, 5×10^{12}, 7.5×10^{12}, 10^{13} และ 2×10^{13} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$ ตามลำดับ

3.3 การคำนวณหาจำนวนอะตอมของธอเรียม -232, ยูเรเนียม -235 และยูเรเนียม -238 ในเชื้อเพลิง และจำนวนโมเลกุลของน้ำที่เป็นโมเดอเรเตอร์ เมื่อผสมเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์ในอัตราส่วน 1:1

<u>โดยปริมาตร และมีเอนริชเมนท์ 5%</u>

ก่อนอื่นต้องคำนวณหาปริมาตรของแกน น้ำหนักของ UO_2 และ ThO_2 ที่เป็นเชื้อเพลิงก่อน

ปริมาตรของแกน $= \pi R^2 H$

เมื่อ R = รัศมี, เมตร

H = ความสูง, เมตร

ปริมาตรแกน $= 37.7$ เมตร^3

ดังนั้น ปริมาตรของเชื้อเพลิง $= \frac{37.7}{2}$

$= 18.85$ เมตร^3

น้ำหนักของเชื้อเพลิง $= 18.85 \times 10^6$ ซม^3 $\times 10 \frac{\text{กรัม}}{\text{ซม}^3}$

$= 188.5 \times 10^6$ กรัม

$= 188.5$ ตัน

น้ำหนัก UO_2 หรือ ThO_2 $= \frac{188.5}{2}$

$= 94.25$ ตัน

จำนวนอะตอมของธอเรียม -232 = จำนวนโมเลกุลของ ThO_2

$$= \frac{94.25 \times 10^6 \times 6.02 \times 10^{23}}{264}$$

$$= 2.1491 \times 10^{29} \text{ อะตอม}$$

จำนวนอะตอมของยูเรเนียม -238 $= \frac{95}{100} \times \frac{94.25 \times 10^6 \times 6.02 \times 10^{23}}{270}$

$= 1.9963 \times 10^{29}$ อะตอม

จำนวนอะตอมของยูเรเนียม -235 $= \frac{5}{100} \times \frac{94.25 \times 10^6 \times 6.02 \times 10^{23}}{270}$

$= 1.0507 \times 10^{28}$ อะตอม

น.น.ของยูเรเนียมในเชื้อเพลิง $= \frac{1.0507 \times 10^{28} \times 235}{6.02 \times 10^{23}} + \frac{1.9963 \times 10^{29} \times 238}{6.02 \times 10^{23}}$

$= 4.102 \times 10^{6}$ กรัม $+ 78.923 \times 10^{6}$ กรัม

$= 83.025$ ตัน

จำนวนโมเลกุลของน้ำ $= \frac{18.85 \times 10^{6} \times 6.02 \times 10^{23}}{18}$

$= 6.3041 \times 10^{29}$ โมเลกุล

3.4 <u>คำนวณหาค่าบัคคลิ่ง (buckling) ของเครื่องปฏิกรณ์ฯที่แกนเป็นรูปทรงกระบอก รัศมี 2 เมตร สูง 3 เมตร</u>

ค่าบัคคลิ่งของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีแกนเป็นรูปทรงกระบอก คำนวณหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

เมื่อ B = บัคคลิ่งของเครื่องปฏิกรณ์ฯ หน่วยเป็นต่อความยาว

R = รัศมีของแกน

H = ความสูงของแกน

ดังนั้น $B^2 = \left(\frac{2.405}{2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{3}\right)^2$

$= 2.5426$ เมตร$^{-2}$ $= 2.5426 \times 10^{-4}$ เซนติเมตร$^{-2}$

3.5 <u>การคำนวณหา k_∞ เมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ</u>

ตัวอย่างเช่น การคำนวณหา k_∞ เมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์ เป็น 50%ต่อ50% โดยปริมาตร หรือ 1:1 โดยปริมาตร

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบที่ใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง และน้ำเป็นโมเดเรเตอร์ นั้นคิดเป็นแบบโฮโมจีเนียส ค่าภาคตัดขวางต่ออะตอมในการดูดนิวตรอน และในการ-

เกิดฟิชชั่นของสารต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง และค่าต่าง ๆ ที่จะใช้ในการคำนวณ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าต่าง ๆ ที่จะใช้ในการคำนวณ

สารหรือธาตุต่าง ๆ	σ_a (บาร์น)	จำนวนอะตอม	Σ_a (ซม^2) = จำนวนอะตอม x σ_a	σ_f (บาร์น)	Σ_f (ซม^2) = จำนวนอะตอม x σ_f
ยูเรเนียม-235	683	1.0507×10^{28}	71.76×10^5	577	60.63×10^5
ยูเรเนียม-238	2.71	1.9963×10^{29}	5.41×10^5	-	-
ธอเรียม-232	7.56	2.1491×10^{29}	16.25×10^5	-	-
น้ำธรรมดา (โมเลกุล)	0.664	6.3041×10^{29}	4.186×10^5	-	-

สำหรับ Σ_a คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดโดยสารชนิดต่าง ๆ

$= \sigma_a \times 10^{-24} \times$ จำนวนอะตอม

Σ_f คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกจับแล้วเกิดฟิชชั่น

$= \sigma_f \times 10^{-24} \times$ จำนวนอะตอม

คำนวณค่า η คำนวณจากสมการ (2.3) ค่า ν จากตารางที่ 2.1 มีค่า 2.43

$$= 2.43 \times \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a \text{ ของเชื้อเพลิง}}$$

$$= 2.43 \times \frac{60.63 \times 10^5}{(71.76 + 5.41 + 16.25) \times 10^5}$$

$$= 1.57695$$

คำนวณหาค่า f คำนวณจากสมการ (2.5)

$$f = \frac{\Sigma_a \text{ ของเชื้อเพลิง}}{\Sigma_a \text{ ของแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ}}$$

$$= \frac{(71.76 + 5.41 + 16.25) \times 10^5}{(71.76 + 5.41 + 16.25 + 4.186) \times 10^5}$$

$$= 0.95711$$

ค่า ϵ ค่า ϵ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯแบบโฮโมจีเนียส มีค่าเท่ากับหนึ่ง

$$\therefore \quad \epsilon = 1$$

คำนวณค่า p ค่า p คำนวณจากสมการ

$$p = \exp\left[-\frac{N_u}{N_m} \cdot \frac{I}{\sigma_{sm}\xi}\right]$$

เมื่อ N_u คือจำนวนอะตอมทั้งหมดในเชื้อเพลิง ของยูเรเนียม -238 หรือธอเรียม -232

N_m คือจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของโมเดอเรเตอร์ ในที่นี้คือจำนวนโมเลกุลของน้ำธรรมดา

I คือเอฟเฟคทีฟ รีโซแนนซ์ อินติกรัล(effective resonance intigral)

σ_{sm} คือภาคตัดขวางต่ออะตอมในการชนแล้วช้าลงของนิวตรอน

ξ คือกำลังของน้ำในการทำให้นิวตรอนช้าลง

ในที่นี้ $N_u = 1.9963 \times 10^{29}$ อะตอมในกรณีของยูเรเนียม -238

และ $N_u = 2.1491 \times 10^{29}$ อะตอมในกรณีของธอเรียม -232

$N_m = 6.3041 \times 10^{29}$ โมเลกุล

$\sigma_{sm} = 103$ บาร์น

$\xi = 0.948$

สำหรับค่า I นั้นหาจากกราฟรูปที่ 3-3 หน้า 79*

โดยหาค่า $\frac{N_m \sigma_{sm}}{N_u} = \frac{6.3041 \times 10^{29} \times 103}{1.9963 \times 10^{29}}$ ในกรณีของยูเรเนียม -238

$= 325$ บาร์น/อะตอม

และ $\frac{N_m \sigma_{sm}}{N_u} = \frac{6.3041 \times 10^{29} \times 103}{2.1491 \times 10^{29}}$ ในกรณีของธอเรียม -232

$= 302$ บาร์น/อะตอม

<u>ในกรณีของยูเรเนียม -238</u> จะได้ค่าI = 43 บาร์น

$$P_1 = \exp\left[-\frac{1.9963 \times 10^{29} \times 43 \times 10^{-24}}{6.3041 \times 10^{29} \times 103 \times 10^{-24} \times 0.948}\right]$$

$= 0.86984$

<u>ในกรณีของธอเรียม -232</u> จะได้ค่า I = 36 บาร์น

$$P_2 = \exp\left[-\frac{2.149 \times 10^{29} \times 36 \times 10^{-24}}{6.304 \times 10^{29} \times 103 \times 10^{-24} \times 0.948}\right]$$

$= 0.8819$

ดังนั้น $P = P_1 \times P_2$

$= 0.86984 \times 0.88190$

$= 0.76711$

จาก $k_\infty = \eta \epsilon p f$

$= (1.5770)(1)(0.76711)(0.9571)$

$= 1.1578$

---

* หนังสือ Introduction to Nuclear Engineering ของ Richard Stephenson (พิมพ์ครั้งที่ 2)

สำหรับ k_∞ เมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและโมเดอเรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า k_∞ เมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและโมเดอเรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ โดยปริมาตร เมื่อยูเรเนียมมีเอนริชเม้นท์ 5%

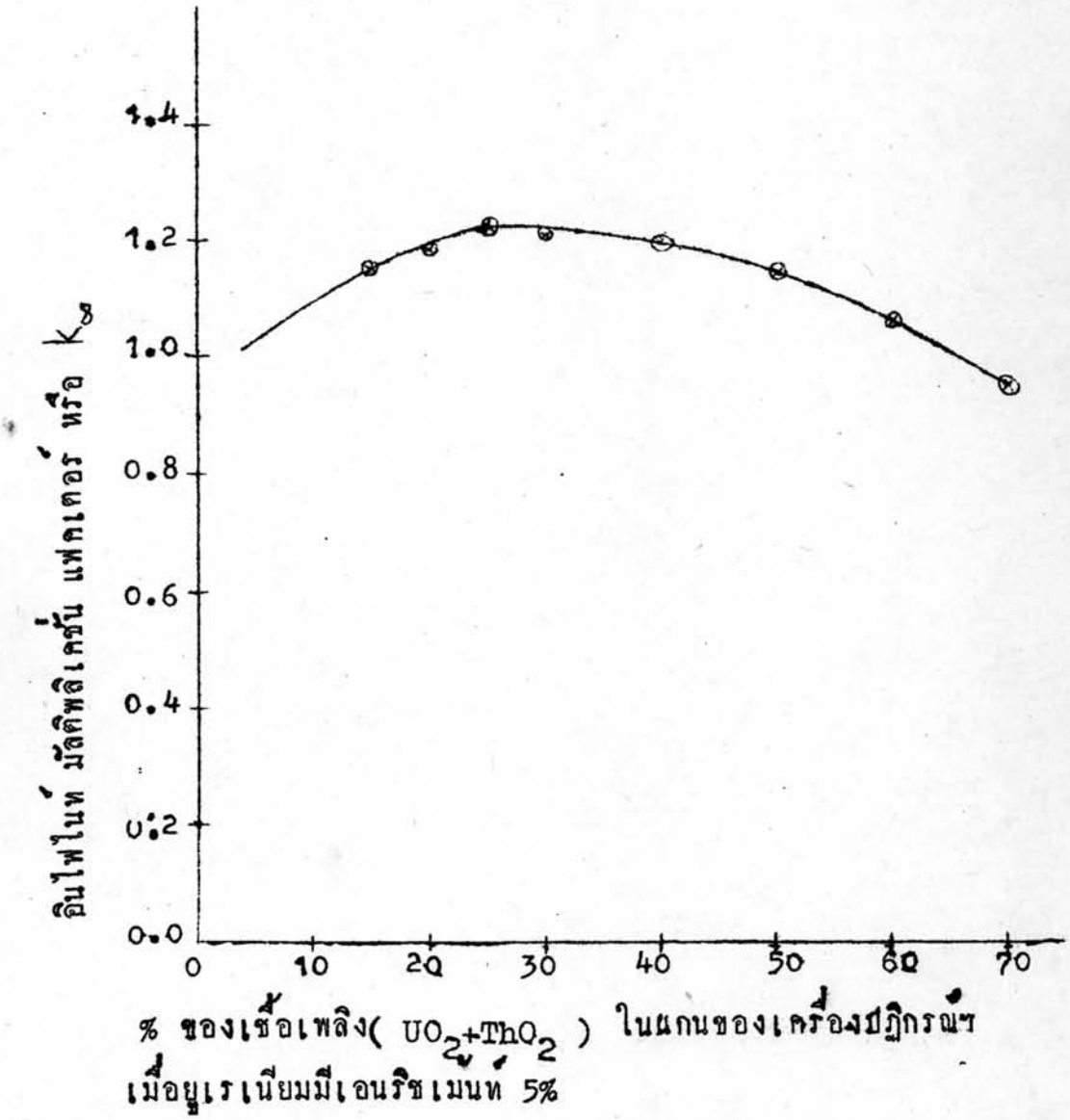
เปอร์เซ็นของเชื้อเพลิงในแกน	η	f	p	k_∞
15	1.57695	0.79750	0.91827	1.1548
20	1.57695	0.84801	0.89644	1.1988
25	1.57695	0.88150	0.87472	1.2159
30	1.57695	0.90534	0.84722	1.2096
40	1.57695	0.93700	0.81043	1.1979
50	1.57695	0.95711	0.76710	1.1578
60	1.57695	0.97099	0.69930	1.0708
70	1.57695	0.98115	0.61475	0.9511

3.6 การคำนวณหาค่า k_∞ ที่เปอร์เซ็นต์เอนริชเม้นท์ต่าง ๆ ของอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับโมเดอเรเตอร์ 50% ต่อ 50% หรือ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

สำหรับเปอร์เซ็นต์เอนริชเม้นท์ 5% นั้น คำนวณให้เห็นแล้วในหัวข้อ 3.5 ส่วนที่เอนริชเม้นท์ 4% และ 3% นั้น ก็คำนวณโดยวิธีเดียวกัน จะได้ค่า k_∞ สำหรับเอนริชเม้นท์ 5%, 4% และ 3% คือ 1.1578, 1.0547 และ 0.9587 ตามลำดับ และสำหรับการทดลองคำนวณต่อ ๆ ไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกเอาเอนริชเม้นท์ 5% ไปใช้

3.7 การคำนวณหารัศมีวิกฤตของแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เมื่อให้แกนเป็นทรงกลม

ก่อนอื่นที่จะคำนวณหาค่ารัศมีวิกฤตของแกนนั้น เราจะคำนวณหาค่า



รูปที่ 3-1 แสดงกราฟของ k_∞ ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เมื่อเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของเชื้อเพลิงในแกนเป็นค่าต่างๆ

กริติคัลบัคคลิ่ง (critical buckling) ของเครื่องปฏิกรณ์ฯก่อน โดยหาจากสมการ

$$1 = \frac{k_\infty}{1 + B_c^2(\tau + L^2)}$$

$$B_c^2 = \frac{1.1578 - 1}{0.32669 + 48.7496} = 3.2154 \times 10^{-3} \text{ ซม.}^{-2}$$

เริ่มต้นจากค่านี้ ($B_c^2 = 3.2154 \times 10^{-3}$ ซม.$^{-2}$) แล้วลองแทนค่า B_c^2 ในสมการเอจดิฟฟิวชั่น (age-diffusion) จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม ในที่นี้ค่า B_c^2 ที่เหมาะสมคือ 2.9856×10^{-3} ซม.$^{-2}$

สมการ เอจ-ดิฟฟิวชั่นคือ $$B_c^2 = \frac{k_\infty e^{-B_c^2\tau} - 1}{L^2}$$

เมื่อได้ค่า B_c^2 ที่เหมาะสมแล้ว ก็นำค่านี้ไปหารัศมีวิกฤตของแก่นได้ โดยถือว่าแกนเป็นทรงกลม นั่นคือ

$$R_c^2 = \frac{\pi}{B_c^2}$$

เมื่อ R_c คือรัศมีวิกฤต และ B_c คือกริติคัลบัคคลิ่ง

ดังนั้น $$R_c^2 = \frac{\pi}{2.9856 \times 10^{-3}}$$

$$R_c = 57.5 \text{ ซม.}$$

$$= 0.575 \text{ เมตร}$$

ซึ่งค่ารัศมีวิกฤตนี้ ถ้านำไปหารีแอคติวิตี้ แล้วจะได้ค่ารีแอคติวิตี้เท่ากับ ศูนย์ ซึ่งใช้ไม่ได้ เพราะเครื่องปฏิกรณ์ฯไม่ทำงาน จึงได้มีการกำหนดรัศมีของแกนให้ใหญ่ขึ้น ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.1.4

3.8 การคำนวณหาค่า k_{eff} ของเครื่องปฏิกรณ์ฯเมื่อผสมเชื้อเพลิงและโมเดอเรเตอร์ในอัตรา 50% ต่อ 50% หรือ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร และมีเอนริชเม้นท์ 5%

ในการคำนวณหาค่า k_{eff} นั้นหาจากสมการ $k_{eff} = \frac{k_\infty}{1 + B_c^2(\tau + L^2)}$

เมื่อ $B^2 = 2.5426 \times 10^{-4}$ ซม$^{-2}$ จากหัวข้อ 3.4

$L^2 = L_m^2 (1 - f)$

L_m คือระยะการกระจายของนิวตรอนในโมเดอเรเตอร์ ในที่นี้มีค่า 2.76* ซม

f คือเธอมอลยูติไลเซชั่น มีค่า 0.95711 จากหัวข้อ 3.5

ดังนั้น $L^2 = (2.76)^2(1 - 0.95711)$

$= 0.32669$ ซม$^{-2}$

และ $\tau = \frac{1}{3\Sigma_{tr}\Sigma_{sl}}$

เมื่อ τ คือเฟอร์มิเอจ (Fermi age) ของนิวตรอน

Σ_{tr} คือภาคตัดขวางต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในการถ่ายเทพลังงานของนิวตรอนเร็ว

Σ_{sl} คือภาคตัดขวางต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในการช้าลงของกลุ่มนิวตรอนเร็ว

การคำนวณหาค่า Σ_{tr} และ Σ_{sl} แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

<u>ตารางที่ 3.3 ข้อมูลต่าง ๆ ที่จะใช้ในการคำนวณหา Σ_{tr} และ Σ_{sl}</u>

	จำนวนอะตอม	σ_{tr} (บาร์น)	σ_{sl} (บาร์น)
ยูเรเนียม	2.10137×10^{29}	9.00	0.80
ซอเรียม	2.1491×10^{29}	9.00	0.80
ไฮโดรเจน	6.3041×10^{29}	1.85	0.655
ออกซิเจน	21.10913×10^{29}	3.31	0.027

* จากหนังสือ Nuclear Reactor Engineering ของ Samuel Glasstone และ Alexander Sesonske พิมพ์ครั้งที่ 1 หน้า 147 ตารางที่ 3.5

หมายเหตุ ค่า σ_{tr} และ σ_{sl} ของธอเรียม -232 นั้นใช้ค่าเดียวกับของยูเรเนียม เพราะน้ำหนักอะตอมของธอเรียมและยูเรเนียมใกล้เคียงกัน สำหรับค่า ε_{tr} และ ε_{sl} ที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.3 จะต้องมีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร ค่า ε_{tr} ที่คำนวณได้มีค่า 0.3180 ซม$^{-1}$ และ ε_{sl} มีค่า 0.0215 ซม$^{-1}$

ดังนั้นจะได้ค่า $\tau = \dfrac{1}{3 \times 0.3180 \times 0.0215}$

$= 48.7496$ ซม$^{-2}$

และเมื่อแทนค่า k_∞, L^2 และ τ แล้วจะได้ k_{eff} ดังนี้

$$k_{eff} = \frac{1.1578}{1 + 2.5426 \times 10^{-4}(0.3267 + 48.7496)}$$

$= 1.1433$

3.9 คำนวณหารีแอคติวิตี้ของเครื่องปฏิกรณ์ฯที่แกนมีรัศมี 2 เมตร สูง 3 เมตร

สำหรับแอคติวิตี้ของเครื่องปฏิกรณ์ฯคำนวณหาจากสมการ (2.7)

$$= \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} = \frac{1.1433 - 1}{1.1322}$$

$= 0.125$

$= 12.5\%$

3.10 การคำนวณหากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

กำลังของเครื่องที่จะคำนวณหาต่อไปนี้ เป็นกำลังเมื่อเริ่มต้นเดินเครื่อง ดังนั้นค่าฟลักซ์ถือค่าเมื่อเริ่มต้นมาคิด และจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -235 ก็ถือเอาค่าเมื่อเริ่มต้นมาคิด กำลังของเครื่องหาจากสมการ (2.10)

$$P = \frac{N_f \sigma_f \phi}{3.1 \times 10^{16}} \text{ เมกาวัตต์}$$

เช่นในกรณีที่ฟลักซ์เฉลี่ยมีค่า 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$ หรือ 4.32×10^{17} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วัน}}$

จะได้กำลังของเครื่องดังนี้

$$P = \frac{1.0507 \times 10^{28} \times 577 \times 10^{-24} \times 5 \times 10^{12}}{3.1 \times 10^{16}} \text{ เมกาวัตต์}$$

$$= 977.8 \text{ เมกาวัตต์}$$

สำหรับฟลักซ์ค่าอื่น ๆ ก็คำนวนแบบเดียวกัน ผลการคำนวณหากำลังของเครื่อง-ปฏิกรณ์ฯ แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

3.11 <u>การคำนวณหาจำนวนวันในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน</u>

การคำนวณหาเวลาเป็นวันในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ คำนวณโดยใช้สมการ (2.13) ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ฟลักซ์เฉลี่ยในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ คือ 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$ หรือ 4.32×10^{17} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วัน}}$ จะคำนวณได้ดังนี้

$$10{,}000 \frac{\text{เมกาวัตต์-วัน}}{\text{ตัน}} = \frac{977.8 \times \text{จำนวนวันในการเดินเครื่อง}}{\text{น.น.ยูเรเนียม(83.025 ตัน)}}$$

$$\text{จำนวนวันในการเดินเครื่อง} = \frac{10{,}000 \times 83.025}{977.8} \text{ วัน}$$

$$= 849 \text{ วัน}$$

สำหรับฟลักซ์เฉลี่ยค่าอื่น ๆ ก็คำนวณแบบเดียวกัน ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

3.12 <u>การคำนวณหาจำนวนอะตอมและน้ำหนักของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่ภายในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 MWD/T</u>

การคำนวณหาจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่ในแกน คำนวณโดยใช้สมการ (2.22) ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

	ธอเรียม -232			ยูเรเนียม -238		
λ_2	65.1584	วัน$^{-1}$		61.2745	วัน$^{-1}$	
λ_3	0.03704	วัน$^{-1}$		0.4348	วัน$^{-1}$	
σ_{a1}	7.56	บาร์น		2.8	บาร์น	
σ_{a2}	1400	บาร์น		22	บาร์น	
σ_{a3}	66	บาร์น		80	บาร์น	
σ_{a4}	56	บาร์น	σ = 583 บาร์น	315	บาร์น	σ = 1061 บาร์น
σ_{f4}	527	บาร์น		746	บาร์น	

สำหรับ t คือเวลาเป็นวันในการเดินเครื่องที่ฟลักซ์ค่าต่าง ๆ หน่วยเป็นวัน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.5 และ ϕ คือฟลักซ์ของนิวตรอนค่าต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2

เมื่อคำนวณจำนวนอะตอมที่เหลืออยู่ของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ได้แล้ว ก็คำนวณหาน้ำหนักได้ สำหรับน้ำหนักของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

3.13 <u>การคำนวณหายูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เกิดพิชชั่นไปในแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน</u>

การคำนวณหาจำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เกิดพิชชั่นไปในแกนคำนวณจากสมการ (2.23)

จำนวนอะตอมของพลูโตเนียม -239 หรือยูเรเนียม -233 ที่เกิดชิชชั่นไป

$$= \phi\sigma_{f_4}\left[- \frac{E}{\phi\sigma_{a1}}(e^{-\phi\sigma_{a1}t} - 1) + \frac{F}{\lambda_2}(e^{-\lambda_2 t} - 1)\right.$$

$$\left. + \frac{G}{\lambda_3}(e^{-\lambda_3 t} - 1) + \frac{H}{\phi\sigma}(e^{-\phi\sigma t} - 1)\right]$$

เมื่อ $E = \dfrac{B\lambda_3}{\phi(\sigma - \sigma_{a1})}$

$$= \frac{\lambda_2\phi\sigma_{a1}Q_1^o\lambda_3}{\phi(\sigma - \sigma_{a1})(\lambda_3 - \phi\sigma_{a1})(\lambda_2 - \phi\sigma_{a1})}$$

$$= \frac{\sigma_{a1}Q_1^o}{\sigma - \sigma_{a1}}$$

โดยถือว่า $\phi\sigma_{a1}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ λ_2 และ λ_3 จึงตัดค่า $\phi\sigma_{a1}$ทิ้งไป

$$F = \frac{C\lambda_3}{\phi\sigma - \lambda_2}$$

$$= \frac{\phi\sigma_{a1}Q_1^o\lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\phi\sigma - \lambda_2)\lambda_2}$$

ซึ่ง F นี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ E และ G แล้ว จึงตัด F ทิ้งไป

$$G = \frac{(B - C)\lambda_3}{\phi\sigma - \lambda_3} = - \frac{\lambda_2\sigma_{a1}Q_1^o}{\lambda_3 - \lambda_2}\left(\frac{\phi}{\phi\sigma - \lambda_3}\right)$$

$$H = E - F - G = E + G$$

สำหรับยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เกิดฟิชชั่นไปที่ฟลักซ์เฉลี่ยในแกนค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในตาราง 3.9

3.14 <u>การคำนวณหาน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ที่ใช้หมดเปลืองไปภายในแกนที่ 10,000 เมกาวัตต์-วันต่อตัน</u>

การคำนวณหาจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -235 ที่หมดไปเนื่องจากดูดนิวตรอน เมื่อเดินเครื่องไปเป็นเวลา t ใด ๆ คำนวณโดยใช้สมการ (2.25) ตัวอย่างการคำนวณเช่น เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$ หรือ 4.32×10^{17} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วัน}}$ ดูจากตารางที่ 3.5 เวลาในการเดินเครื่อง หรือ t คือ 846 วัน a_5 คือ 687 บาร์น N_5^o คือ 1.0507×10^{28} อะตอม แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.25) จะได้ว่า

จำนวนอะตอมของยูเรเนียม -235 ที่หมดไป ที่ 10,000 MWD/T

$= 1.0507 \times 10^{28}(1 - e^{-4.32 \times 10^{17} \times 687 \times 10^{-24} \times 846})$

$= 1.0507 \times 10^{28} \left(\frac{0.2854}{1.2854}\right)$

$= 0.2328 \times 10^{28}$ อะตอม

น.น.ของยูเรเนียม -235 ที่หมดไป ที่ 10,000 MWD/T เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนคือ 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$

$= \frac{0.2328 \times 10^{28} \times 235}{6.02 \times 10^{23}}$

$= 9.089 \times 10^5$ กรัม

$= 908.9$ กิโลกรัม

$= 909$ กิโลกรัม

สำหรับที่ฟลักซ์เฉลี่ยค่าอื่น ๆ ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2 นั้น ก็คำนวณวิธีเดียวกัน น.น.ของยูเรเนียมที่หมดไปที่ 10,000 MWD/T เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยค่าต่าง ๆ ได้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

สำหรับการคำนวณหาจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -235 ที่เกิดฟิชชั่นไปนั้น คำนวณหาจากสมการ (2.26) หรืออาจจะคำนวณหา น.น.โดยตรงเลย โดยเอาค่า $\frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}}$ หรือ $\frac{580}{687}$ หรือ 0.844 คูณกับน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ที่หมดไป เนื่องจากยูเรเนียม -235 ถูกนิวตรอน ตัวอย่างเช่นเมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนเป็น 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{-วินาที}}$ น้ำหนักของยูเรเนียม -235 ที่หมดไปเนื่องจากถูกนิวตรอนคือ 909 กิโลกรัม ดังนั้นน้ำหนักของยูเรเนียมที่หมดไปเพราะเกิดฟิชชั่นคือ 909 x 0.844 ซึ่งคือ 768 กิโลกรัม สำหรับที่ฟลักซ์เฉลี่ยค่าอื่น ๆ ก็คำนวณแบบเดียวกัน ยูเรเนียม -235 ที่เกิดฟิชชั่นไปที่ฟลักซ์ค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.7

3.15 การคำนวณหาจำนวนอะตอมหรือน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ที่รีเฟลกเตอร์

ก่อนอื่นจะต้องคำนวณว่าจะต้องใช้ยูเรียมไดออกไซด์เท่าไหร่ในรีเฟลกเตอร์ เมื่อกำหนดให้ รีเฟลกเตอร์หนา 50 ซม. มียูเรียมไดออกไซด์ผสมกับน้ำ 50% ต่อ 50% โดยปริมาตร ความหนาแน่นของยูเรียมไดออกไซด์คือ 10 กรัมต่อลูกบาศก์ซม. รีเฟลกเตอร์สูง 3 เมตร ซึ่งปริมาตรที่แท้จริงคือ $\pi(2.5^2-2^2)\times0.5\times3$ หรือ 21.21 ม^3

เพื่อความสะดวกในการหาปริมาตรของรีเฟลกเตอร์ เราจะคิดว่ารีเฟลกเตอร์เมื่อตัดแล้วแผ่ออกเป็นผืน พื้นที่ภาคตัดขวางจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งยาวเท่ากับ $2\pi R$ (เมื่อ R คือรัศมีของแกนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ในที่นี้มีค่า 2 เมตร) และกว้าง 50 ซม. ดังนั้น

ปริมาตรของรีเฟลกเตอร์ = พื้นที่ภาคตัดขวาง x สูง

= $2\pi R$ x 50 ซม. x 3 เมตร

= 2π x 2 x 0.5 x 3

= 18.84 เมตร^3

ปริมาตรของยูเรียมไดออกไซด์ หรือปริมาตรของน้ำ

= $\frac{18.84}{2}$ = 9.425 เมตร^3

น.น.ของธอเรียมไดออกไซด์ = 9.425×10^6 ซม^3 $\times$ 10 $\frac{\text{กรัม}}{\text{ซม}^3}$

= 94.25×10^6 กรัม

= 94.25 ตัน

จำนวนอะตอมของธอเรียม -232 ในธอเรียมไดออกไซด์ 94.25 ตัน

= 2.4456×10^{29} อะตอม

สำหรับการหาจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 นั้น ยังคงหาจากสมการ (2.22) แต่เนื่องจากค่าฟลักซ์ของนิวตรอนภายในรีเฟลคเตอร์ไม่คงที่ จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อห่างออกมาจากแกน ดังนั้นในขั้นแรกต้องหาฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ก่อน โดยหาจากสมการ (2.9) แล้วนำค่าฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ห่างจากแกนแทนค่าลงในสมการ (2.22) ก็จะได้จำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 ที่ระยะนั้น ๆ ออกมา นำค่าจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ระยะต่าง ๆ ภายในรีเฟลคเตอร์ และระยะต่าง ๆ ในรีเฟลคเตอร์ห่างจากแกน มาเขียนกราฟโดยให้แกนยืนเป็นจำนวนอะตอม แกนนอนเป็นระยะ กระดาษกราฟใช้กราฟธรรมดา เมื่อได้กราฟของจำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 กับระยะทางแล้ว นับจำนวนช่องใต้เส้นกราฟทั้งหมด แล้วหารด้วยระยะตั้งแต่ศูนย์ (ติดกับแกน) ถึงระยะที่เส้นกราฟตัดแกนนอน (ระยะที่จำนวนอะตอมของยูเรเนียม -233 เป็นศูนย์) จะได้จำนวนอะตอมเฉลี่ยของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์ แล้วก็จะหาน้ำหนักเฉลี่ยของยูเรเนียม -233 ในรีเฟลคเตอร์ได้ ตัวอย่างการคำนวณ เช่นในกรณีของฟลักซ์ 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$ หรือ 4.32×10^{17} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วัน}}$ ในกรณีนี้ ϕ_0 คือ 4.32×10^{17} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วัน}}$ และเป็นฟลักซ์ที่ระยะ 0ซม.จากผิว แกน สำหรับที่ระยะอื่น ๆ ใช้สมการ $\phi = \phi_0 e^{-X/L}$ ในที่นี้ L มีค่า 10 ซม. หาค่า ϕ ที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 ซม. ตามลำดับ

ตารางข้างล่างนี้แสดงจำนวนอะตอมของ U-233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์ที่ระยะต่าง ๆ ห่างจากผิวของแกน เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยในแกนเป็น 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$

ระยะห่างจากผิวแกน (ซม)	0	5	10	15	20	25	30	40	50
จำนวนอะตอม U-233 ที่เหลือ $\times 10^{26}$	5.3	3.4	2.1	1.3	0.79	0.5	0.3	0.11	0.03

นำค่าทั้งสองจากตารางไปเขียนกราฟ จะได้กราฟรูปที่ 3-2 นับตารางภายใต้เส้นกราฟ ซึ่งคือจำนวนอะตอมคูณกับระยะทาง เอาระยะ 50 เซนติเมตร หารพื้นที่ใต้เส้นกราฟทั้งหมด จะได้เป็นจำนวนอะตอมเฉลี่ยของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ภายในรีเฟลคเตอร์ ซึ่งคือ 1.122×10^{26} อะตอม หรือ 43.4 กิโลกรัม

สำหรับฟลักซ์ค่าอื่น ๆ ก็คำนวณเหมือนกัน นำน้ำหนักเฉลี่ยของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.10

3.16 การคำนวณหาน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปในรีเฟลคเตอร์

สำหรับการคำนวณหายูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปภายในรีเฟลคเตอร์ เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนภายในแกนมีค่าต่าง ๆ คำนวณหาดังนี้ จากตารางที่ 3.8 และตารางที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปในแกนจะประมาณเท่ากับ $\frac{1}{10}$ ของน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ภายในแกน ในทำนองเดียวกัน เราก็สามารถที่จะหาน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปในรีเฟลคเตอร์ได้ดังนี้

น้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปในรีเฟลคเตอร์

$= \frac{1}{10}$ ของน้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์

น้ำหนักของยูเรเนียม -233 ที่เกิดฟิชชั่นไปในรีเฟลคเตอร์ เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนภายในแกน มีค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.11

ผลการคำนวณของหัวข้อต่าง ๆ ในบทที่ 3 แสดงไว้ในตารางข้างล่างดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
กำลัง(ความร้อน) ของเครื่อง(เมกาวัตต์)	195.56	977.8	1456.7	1955.66	3911.3

ตารางที่ 3.5 จำนวนวันในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 MWD /T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
จำนวนวัน	4246	849	566	424.5	212.2

ตารางที่ 3.6 ยูเรเนียม -235 ที่หมดไปเพราะดูดนิวตรอนภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ 10,000 MWD / T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -235 ที่หมดไป(กิโลกรัม)	908.8	908.8	908.8	908.8	908.8

ตารางที่ 3.7 ยูเรเนียม -235 ที่ฟิชชั่นไปภายในแกน ที่ 10,000 MWD / T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -235 ที่ฟิชชั่นไป(กิโลกรัม)	768	768	768	768	768

ตารางที่ 3.8 ยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่ภายในแกน ที่ 10,000 MWD / T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่(กิโลกรัม)	206.2	201.4	198.4	195.34	182.95
พลูโตเนียม -239 ที่เหลืออยู่(กิโลกรัม)	67.4	67.2	67.16	67.08	66.78

ตารางที่ 3.9 ยูเรเนียม -233 และพลูโตเนียม -239 ที่พิชชั่นไปภายในแกน ที่ 10,000 MWD / T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -233 ที่พิชชั่นไป(กิโลกรัม)	21.3	20.24	19.74	19.2	17.1
พลูโตเนียม -239 ที่พิชชั่นไป(กิโลกรัม)	9.8	9.8	9.8	9.7	9.6

ตารางที่ 3.10 ยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์ ที่ 10,000 MWD / T

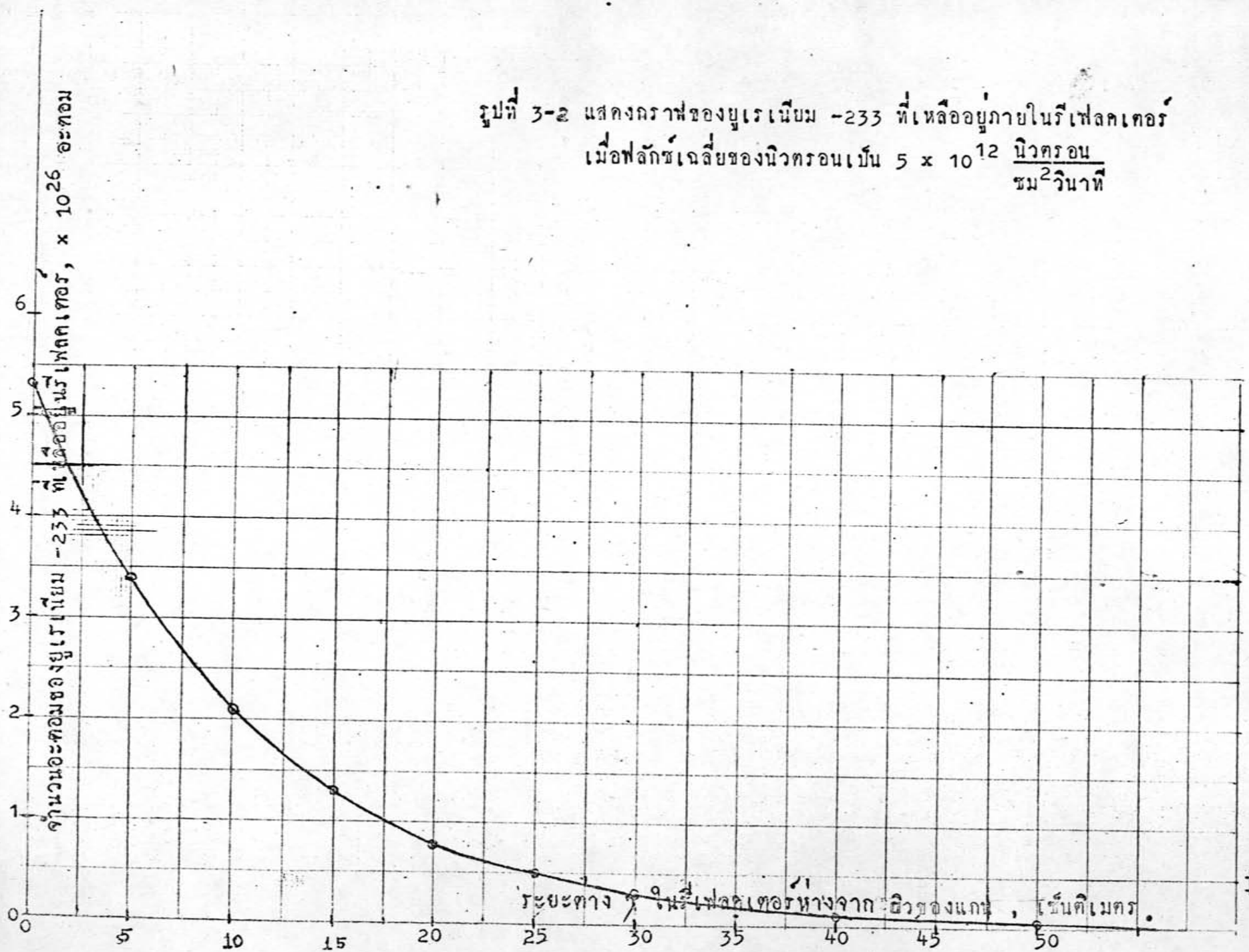
ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ในรีเฟลคเตอร์(กิโลกรัม)	44	43.4	42.5	42	37

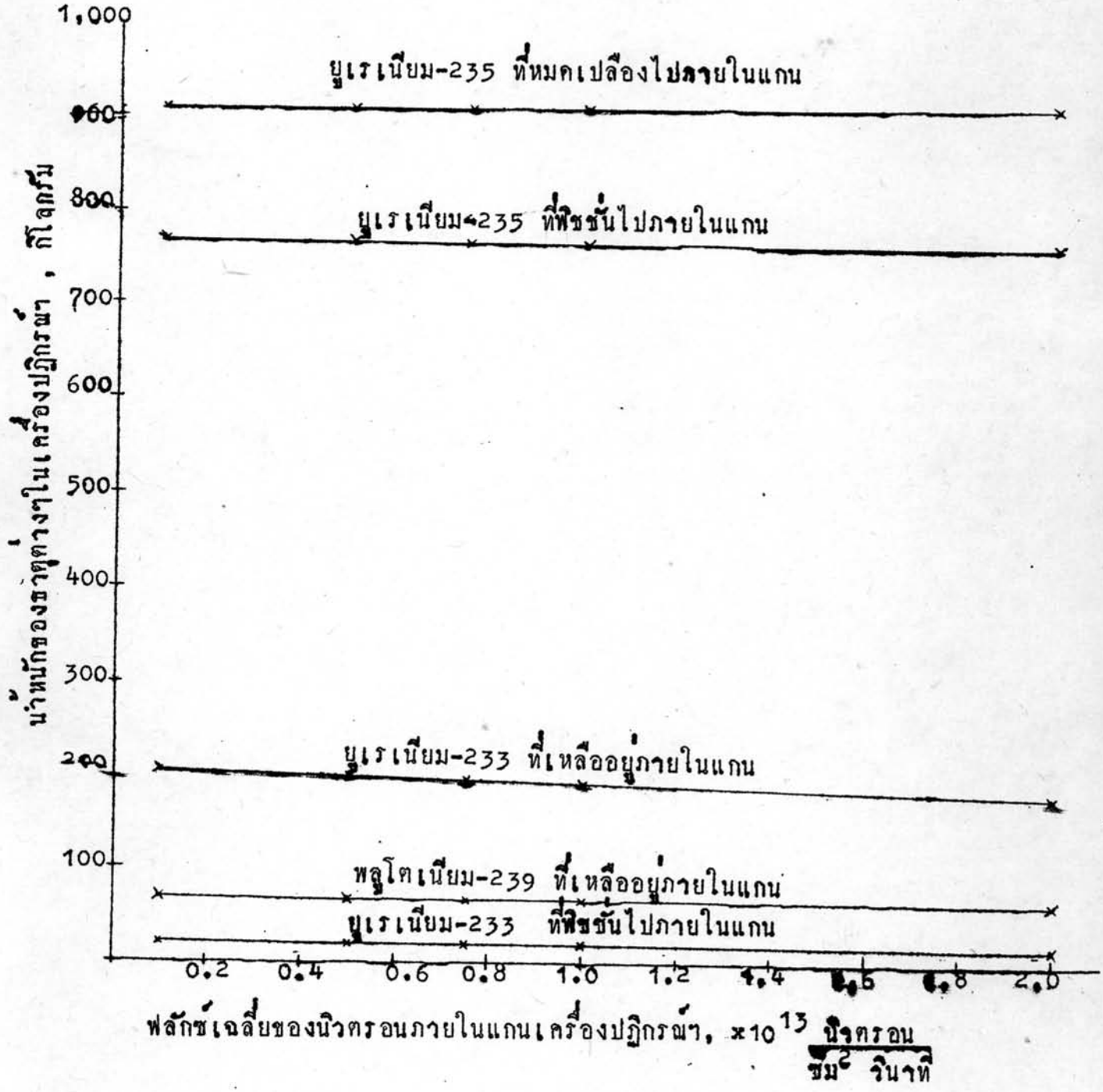
ตารางที่ 3.11 ยูเรเนียม -233 ที่เกิดพิชชั่นไปภายในรีเฟลคเตอร์ ที่ 10,000 MWD / T

ฟลักซ์ (นิวตรอนต่อซม^{2}วินาที)	10^{12}	5×10^{12}	7.5×10^{12}	10^{13}	2×10^{13}
ยูเรเนียม -233 ที่พิชชั่นไปในรีเฟลคเตอร์(กิโลกรัม)	4.4	4.34	4.25	4.2	3.7

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางที่ 3.11 เป็นตัวเลขที่มิได้มาจากการคำนวณโดยตรง แต่ประมาณจากผลในตารางที่ 3.8, 3.9 และ 3.10

รูปที่ 3-2 แสดงกราฟของยูเรเนียม -233 ที่เหลืออยู่ภายในรีเฟลคเตอร์ เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนเป็น 5×10^{12} $\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ซม}^2\text{วินาที}}$





รูปที่ 3-3 แสดงกราฟของน้ำหนักของธาตุต่างๆภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เมื่อฟลักซ์เฉลี่ยของนิวตรอนภายในแกนเปลี่ยนแปลงเป็นค่าต่างๆและหลังจากเบอร์นอัพไป 10000 MWD/T

หมายเหตุ สำหรับกราฟของธาตุต่างๆในรีเฟลคเตอร์ ก็จะได้ในทำนองเดียวกัน