บทที่ 2
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (The Nuclear Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู คือเครื่องมือที่ให้พลังงานปรมาณู ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากปฏิกริยาลูกโซ่ระหว่างนิวตรอนและสารที่แตกตัวได้ (fissionable) ปฏิกริยาปรมาณูนี้เป็นต้นกำเนิดของพลังงาน

ในเครื่องปฏิกรณ์ฯ นี้ นิวตรอนมีบทบาทสำคัญที่สุด เนื่องจากมันเป็นตัวการในการทำให้เกิดการแตกตัว (nuclear fission) นิวตรอนไม่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้นมันจะไม่มีปฏิกริยากับสารที่อยู่ใกล้ นอกจากว่ามันจะเข้าไปอยู่ภายในระยะประมาณ 10^{-12} ซม. ของนิวเคลียส ในทันทีที่มันเข้าไปอยู่ในช่วงนี้จะเกิดเหตุการณ์บางอย่างขึ้น กระจัดกระจายไปหรือถูกดูดกลืน (scattering or absorption) เราสามารถแบ่งการเกิดปฏิกริยาของนิวตรอนได้ดังนี้

2.1-1 การชนแบบอีลาสติค (Elastic Collision)

เมื่อใกล้ การชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสอาจเป็นแบบอีลาสติค คือโมเมนตัมและพลังงานจลน์ไม่เปลี่ยนแปลง ในการนี้ นิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนของมันให้กับนิวเคลียสที่เป็นเป้า(target) และตัวมันเองมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่

2.1-2 การชนแบบอินอีลาสติค (Inelastic Collision)

การชนกันแบบนี้เป็นการสูญเสียพลังงาน ในธาตุหนัก เช่น เหล็ก หรือยูเรเนียม นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 1 mev จะทำให้เกิดเอ็กซไซติ้เทเช่นของนิวเคลียส (Excitation of nucleus) ในการนี้นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่จากพลังงานเดิมของมันให้กับนิวเคลียส และนิวเคลียสนี้จะกลับสู่สถานะเดิมของมัน (ground energy state) โดยการปล่อยรังสีแกมม่าออกมา

<u>2.1-3 เรดิเอทีฟ แคปเชอร์</u> (Radiative capture)

ในการที่นิวเคลียสดูดกลืนนิวตรอน อาจทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนเป็น ไอโซโทป (isotope) ที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น การเกิด Co^{60} จาก Co^{59} พลังงานส่วนเกินที่เป็นผลเนื่องจากนิวเคลียสดูดกลืนนิวตรอน จะถูกปล่อยเกือบจะในทันทีทันใดนั้น เป็น แคปเชอร์แกมม่าเรย์ (capture gamma ray) และถ้าไอโซโทปที่เกิดขึ้นนั้นเป็นกัมมันตรังสีด้วย มันจะปล่อยอนุภาคเบต้า และรังสีแกมม่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับครึ่งชีวิต (half-life) ของมัน

<u>2.1-4 ดูดกลืนพร้อมทั้งปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา</u> (capture with charged particle emission)

ถ้านิวตรอนมีพลังงานสูงพอ นิวเคลียสจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อมทั้งปล่อย โปรตอน หรืออนุภาคแอลฟาออกมา ตัวอย่างเช่น การเกิด N^{16} จากปฏิกริยา O^{16} กับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเกิน 10 mev หรือ การเกิด C^{14} จากปฏิกริยาของ N^{14} กับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเกิน 10 mev

$$ {}_{8}O^{16} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{7}N^{16} + {}_{1}H^{1} $$

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

<u>2.1-5 การแตกตัว</u> (Fission)

นิวตรอนอาจจะเป็นตัวชักนำให้ธาตุเกิดการแตกตัว ในไอโซโทป U^{235}, Pu^{239} และ U^{233} การแตกตัวสามารถเกิดขึ้นได้ไม่ว่านิวตรอนจะมีพลังงานสูงหรือต่ำ โดยที่โอกาสของการแตกตัวจะมีมากขึ้นเมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำ U^{238} จะเกิดการแตกตัวเมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงเกิน 1 mev เท่านั้น การแตกตัวนี้ไอโซโทปจะปล่อยนิวตรอนวิ่งเร็วออกมาหลายตัว ทำให้เกิดปฏิกริยาลูกโซ่ (chain reaction)

ขบวนการแตกตัวประกอบด้วยการแบ่งนิวเคลียสออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่านั้น โดยที่มีมวลและอะตอมมิคนัมเบอร์ (atomic number) น้อยกว่าธาตุเดิม

ขั้นแรกของการแตกตัวก็คือการดูดกลืนนิวตรอนและพร้อมกันนั้นก็จะปล่อยแกมมาเรย์ หลังจากนั้น U^{236} บางส่วน ราว 16 % จะยังคงอยู่ตัว (stable) มีครึ่งชีวิต 2.4×10^{7} ปี อีก 84 % จะเกิดการแตกตัว จะเขียนปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดังนี้

$$ {}_{0}n^{1} + {}_{92}U^{235} \longrightarrow {}_{92}U^{236} $$

$$ {}_{92}U^{236} \longrightarrow {}_{56}Ba^{139} + {}_{36}Kr^{94} + 3\,{}_{0}n^{1} + \text{energy} $$

ชิ้นส่วนที่แตกตัวออกมามีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือ มีพลังงานจลน์และมีกัมมันตรังสี (radioactivity) มันจะไม่อยู่ตัวเลย เนื่องจากมันมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าธาตุอยู่ตัวที่มีจำนวนอะตอมมิคนัมเบอร์เท่ากันอยู่มาก มันจะสลายตัวโดยปล่อยรังสีแกมมา และอนุภาคเบต้าออกมา พลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการแตกตัวนี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 190 mev และในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีนิวตรอนถูกปล่อยออกมาตั้งแต่ 1 – 6 ตัว

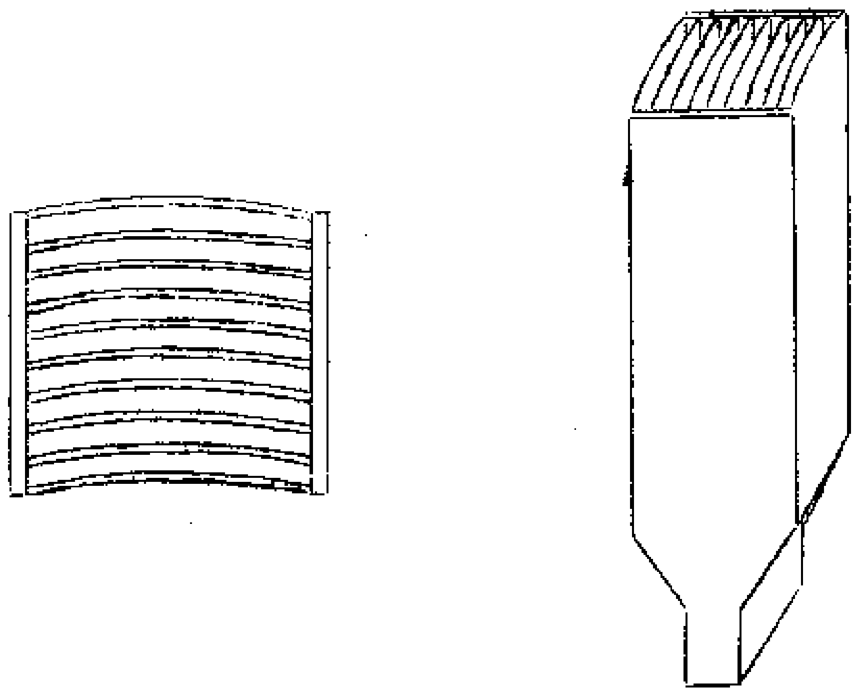
2.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบสระน้ำ (Swimming Pool Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบสระน้ำ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ แกน (core) และตัวสะท้อน (Reflector)

แกนของเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงหลายแท่ง แท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งมีขนาดกว้าง 3 นิ้ว ยาว 3 นิ้ว และสูง 2 ฟุต ภายในแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียม ภายในบรรจุยูเรเนียมผสมกับอลูมิเนียม แผ่นอลูมิเนียมนี้เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ อยู่ 10 แผ่นต่อ 1 แท่ง ระหว่างแผ่นเป็นที่ว่าง เนื่องจาก

แกนนี้แช่อยู่ในสระน้ำ จึงมีน้ำแทรกอยู่ตามที่ว่างนี้ เพื่อระบายความร้อน และช่วยทำหน้าที่เป็นโมเดอเรเตอร์(Moderator) ด้วย อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของโลหะกับปริมาตรของน้ำเท่ากับ 0.4 และแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งมียูเรเนียมอยู่ประมาณ 170 กรัม

น้ำที่ล้อมรอบแกนทำหน้าที่ป้องกันรังสี และเป็นตัวช่วยสะท้อนนิวตรอน ไม่ให้นิวตรอนหนีออกไปได้มากนัก ขณะเดียวกันก็ช่วยลดความเร็วของนิวตรอนด้วย การที่มีตัวสะท้อนนี้จะทำให้ขนาดวิกฤตของแกนลดลง เป็นการประหยัดเชื้อเพลิง นอกจากจะใช้น้ำเป็นตัวสะท้อนแล้ว ยังสามารถใช้กราไฟท์เป็นตัวสะท้อนได้ รูป 2-1 แสดงแกนของแท่งเชื้อเพลิง



มองจากด้านบน มองจากด้านข้าง

รูปที่ 2-1 แท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์

2.3 ขนาดวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Critical Size of Reactor)

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีขนาดจำกัด จำนวนนิวตรอนที่หนีหายไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนน้อย การรั่วจะยาก ขนาดวิกฤตของเครื่องก็คือขนาดของเครื่องที่นิวตรอนมีโอกาสที่จะไม่รั่ว ฯ โดยที่ kP = 1

k คือมัลติพลิเคชั่นแฟคเตอร์[1] (multiplication factor)

kP คือเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชั่นแฟคเตอร์ (effective multiplication factor) ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

ถ้าค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชั่นแฟคเตอร์ มากกว่า 1 เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ฯ เหนือวิกฤต (supercritical reactor) ในสถานะนี้อัตราการแตกตัวและความหนาแน่นของนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ถ้าค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชั่นแฟคเตอร์ น้อยกว่า 1 เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ฯ ใต้วิกฤต (subcritical reactor) ในสถานะนี้อัตราการแตกตัวและความหนาแน่นของนิวตรอนจะลดลงเรื่อย ๆ

การหาขนาดวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบ่งได้เป็น 2 กรณี

2.3-1 เครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบไม่มีตัวช่วยสะท้อน (bare reactor)

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น พิจารณากรณีที่เครื่องปฏิกรณ์ฯ มีเนื้อสารชนิดเดียวกัน และอยู่ในสถานะคงที่ ดังนั้นฟลักซ์ของนิวตรอนคงที่เทียบกับเวลาที่ทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์ฯ และในที่นี้จะพิจารณานิวตรอนที่มีพลังงานขนาดเดียวกันเท่านั้น (one-group energy)

---

[1] *Ibid.*, p. 79

ในขณะที่เครื่องวิกฤต (ไม่มีการลดการเพิ่มฟลักซ์ของนิวตรอน) จะตั้งสมการได้ว่า

อัตราการเกิด = อัตราการดูดกลืน + อัตราการรั่วไหลออกไป

$$S = \phi \Sigma_a + (-D\nabla^2\phi)$$

$$S = \nu \Sigma_f \phi$$

ϕ คือฟลักซ์ของนิวตรอน (neutron flux)

Σ_f คือครอสเซคชั่นของการแตกตัว (fission cross section) ของสาร

ν คือจำนวนนิวตรอนที่เกิดจากการแตกตัวแต่ละครั้ง

$\Sigma_f \phi$ คืออัตราการแตกตัวของสารต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\nu \Sigma_f \phi$ คืออัตราการเกิดของนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

Σ_a คือครอสเซคชั่นของการดูดกลืน (absorption cross section) ของสาร

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของนิวตรอน (diffusion coefficient of neutron

$$\nu \Sigma_f \phi + D\nabla^2\phi - \phi\Sigma_a = 0$$

$$\nabla^2\phi + \frac{\Sigma_a}{D}\left(\frac{\nu\Sigma_f}{\Sigma_a} - 1\right)\phi = 0$$

หรือเขียนสมการได้เป็น

$$\nabla^2\phi + B^2\phi = 0 \qquad (2.1)$$

ในเมื่อ

$$B^2 = \frac{(k-1)\Sigma_a}{D} = \frac{k-1}{L^2} \qquad (2.2)$$

ในที่นี้ $k = \frac{\nu\Sigma_f}{\Sigma_a}$, $L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$

L คือความยาวของการแพร่กระจาย[2] (diffusion length)

B^2 คือบัคคลิ้ง[3] (Buckling)

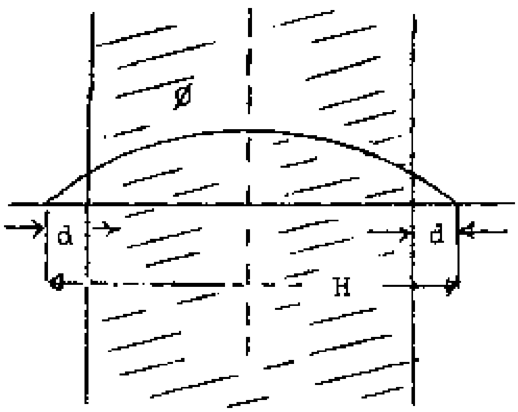
จากสมการ (2.2) เราอาจจะเขียนได้เป็น

$$\frac{k}{1 + L^2B^2} = 1$$

เป็นเงื่อนไขวิกฤต (critical condition) ทั่ว ๆ ไป

การแก้สมการ (2.1) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

พิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีรูปเป็นแผ่นขนาดอนันต์ (infinite slab) เป็นเครื่องที่มีความหนาจำกัด แต่ความยาวและความกว้างมีขนาดอนันต์



รูปที่ 2-6 เครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีรูปเป็นแผ่นขนาดอนันต์

จากรูป สมการ (2.1) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + B^2\phi = 0$$

---

[2] Ibid., p. 115

[3] Ibid., pp. 198 -199

จะได้คำตอบทั่วไป (solution) ของสมการเป็น

$$\phi = A_1 \cos Bx + A_2 \sin Bx \qquad (2.3)$$

และจะได้ว่า

$$\frac{d\phi}{dx} = -A_1 B\sin Bx + A_2 B\cos Bx \qquad (2.4)$$

เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

1. จากสมภาพ ϕ มีค่าสูงสุดเมื่อ $x = 0$ ดังนั้นจากสมการ (2.3)

$$\frac{d\phi}{dx} = 0$$

นั่นคือ

$$A_2 = 0$$

$$\phi = A_1 \cos Bx \qquad (2.5)$$

2. $\phi = 0$ เมื่อ $x = \pm \frac{H}{2}$

$\frac{H}{2}$ คือครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่น บวกกับเอ็กซตราโพเลชั่น ดิสแทนซ์ (extrapolation distance) $2d$ ดังนั้น สมการ (2.5) จะเป็น

$$A_1 \cos \frac{BH}{2} = 0$$

เนื่องจาก A_1 ไม่เป็นศูนย์ ดังนั้น ϕ จะเป็นศูนย์ เมื่อ

$$\cos \frac{BH}{2} = 0$$

ดังนั้น

$$\frac{BH}{2} = \frac{n\pi}{2}$$

ค่าของ B เหล่านี้ สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต เรียกว่าค่าไอเก้น (eigen-value) ของสมการ ค่าที่ต่ำสุดเรียกฟันดาเมนทัลไอเก้นแวลลิว (fundamental eigenvalue) และค่าอื่น ๆ ที่มีค่าสูงกว่าเรียกฮามอนิคของฟันดาเมนทัล (harmonics of fundamental) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่อยู่ในสภาพวิกฤต ค่ามักคลิ้ง คือค่าไอเก้นที่ต่ำสุดของสมการคลื่น

นั่นคือ $n = 1$ ดังนั้น

$$B = \frac{\pi}{H} \qquad\qquad B^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

ค่าของ B ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์ ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2-1

ตารางแสดงฟลักซ์และบักคลิ้งสำหรับรูปทางเรขาคณิตต่าง ๆ

Geometry	Flux	Buckling
Infinite Slab	$A\cos Bx$	$\left(\frac{\pi}{H}\right)^2$
Rectangular Parallelepiped	$A\cos\frac{\pi x}{a}\cos\frac{\pi y}{b}\cos\frac{z}{c}$	$\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2$
Sphere	$\frac{A}{r}\sin\frac{\pi r}{R}$	$\left(\frac{\pi}{R}\right)^2$
Finite cylinder	$AJ_0\left(\frac{2.405r}{R}\right)\cos\frac{\pi z}{H}$	$\left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$

เมื่อ H คือความหนาของแผ่นปฏิกรณ์ และความสูงของรูปทรงกระบอก

a, b, c คือความกว้าง ยาว และสูงของเครื่องปฏิกรณ์ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

R คือรัศมีของรูปทรงกลม และรัศมีของรูปทรงกระบอก

J_0 คือฟังก์ชันของเบสเซล(Bessel's Function)

<u>2.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ประกอบด้วยเครื่องช่วยสะท้อน</u> (Reflected Reactor)

มวลวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ฯ สามารถลดลงได้โดยใช้สารที่เป็นตัวสะท้อน (scattering material) เช่น กราไฟท์ หรือเบอริเลียม ล้อมรอบแกน มันทำหน้าที่ช่วยสะท้อนนิวตรอนที่จะหนีออกไปจากแกนให้กลับเข้ามา เป็นการลดการสูญหายของนิวตรอน ทำให้แกนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต เมื่อเป็นเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ไม่มีตัวสะท้อน สามารถกลายเป็นสภาพวิกฤตได้ ดังนั้นจึงเป็นการช่วยประหยัดปริมาณของสารเชื้อเพลิง

กรณีง่ายที่สุดในการจะหาขนาดของแกนเมื่อมีตัวสะท้อน คือใช้ทฤษฎี วันกรุ๊ป โดยสมมติว่า การเกิด การแพร่กระจาย และการดูดกลืนของนิวตรอนเกิดที่พลังงานเดียวกัน คือพลังงานเทอร์มอล (Thermal energy)

ใช้ตัวล่อท้าย c และ r เพื่อแสดงว่าเป็นแกนหรือตัวสะท้อนตามลำดับ ในสถานะคงที่ สมการการแพร่กระจาย (diffusion equation) สำหรับนิวตรอนที่แกนเป็น

$$D_c \nabla^2 \phi_c - \Sigma_{ac} \phi_c + \nu \Sigma_{fc} \phi_c = 0 \quad (2.6)$$

D_c คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของนิวตรอนที่แกน

Σ_{fc} คือครอสเซคชั่นของการแตกตัวของนิวตรอนที่แกน

Σ_{ac} คือครอสเซคชั่นของการดูดกลืนของนิวตรอนที่แกน

เขียนในรูปสมการของคลื่น (wave equation) เป็น

$$\nabla^2 \phi_c + B_c^2 \phi_c = 0 \quad (2.7)$$

B_c^2 คือบักคลิ้งที่แกน

$$B_c^2 = (k-1)\frac{\Sigma_{ac}}{D_c} = \frac{k-1}{L_c^2}$$

L_c คือความยาวของการแพร่กระจายของนิวตรอนที่แกน

สำหรับตัวสะท้อน ถือว่าไม่มีการเพิ่มนิวตรอน เพราะไม่มีตัวทำให้เกิดนิวตรอน สมการการแพร่กระจายของนิวตรอนในตัวสะท้อนเป็น

$$D_r \nabla^2 \phi_r - \Sigma_{ar} \phi_r = 0 \qquad (2.8)$$

D_r คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของนิวตรอนในตัวสะท้อน

Σ_{ar} คือครอสเซคชั่นของการดูดกลืนสำหรับนิวตรอนในตัวสะท้อน

สมการ (2.6) เขียนได้เป็น

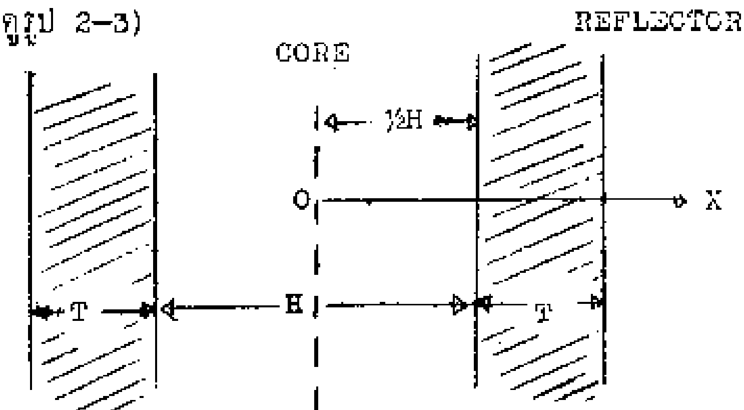
$$\nabla^2 \phi_r - K_r^2 \phi_r = 0 \qquad (2.9)$$

เมื่อ

$$K_r^2 = \frac{\Sigma_{ar}}{D_r}$$

การแก้สมการ (2.7) และ (2.9) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์ฯ

พิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ที่มีรูปเป็นแผ่นขนาดอนันต์ (infinite slab reactor) แกนมีความหนา H มีตัวสะท้อนอยู่แต่ละข้างความหนา T (รวมเอ็กทราโพเลชั่นดิสแทนส์ แล้ว) (ดูรูป 2–3)



รูปที่ 2–3 เครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีรูปเป็นแผ่นขนาดอนันต์กับตัวสะท้อน

จากสมการ (2.7) จะได้คำตอบที่แกนเป็น

$$\phi_c = A\cos B_c x \qquad (2.10)$$

เมื่อ A เป็นค่าคงที่ใด ๆ

จากสมการ (2.9) เนื่องจาก K_r^2 มีค่าเป็นบวก จะได้คำตอบทั่วไปของสมการตัวสะท้อนเป็น

$$\phi_r = A' \cosh K_r x + C' \sinh K_r x \qquad (2.11)$$

เงื่อนไขขอบเขตมี 2 ประการคือ

1. ฟลักซ์เป็นศูนย์ที่ขอบเขตของตัวสะท้อน

2. ฟลักซ์ของนิวตรอน และความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าต่อเนื่องกันที่ผิวระหว่างแกนกับตัวสะท้อน

จากเงื่อนไขขอบเขตข้อ 1. เมื่อ $x = ½H + T$ จะได้

$$\phi_r(½H + T) = A' \cosh K_r(½H+T) + C' \sinh K_r(½H+T)$$
$$= 0$$

ดังนั้น

$$A' = - C' \tanh K_r (½H+T)$$

แทนค่า A' ใน (2.11)

$$\phi_r = C \sinh K_r (½H+T-x) \qquad (2.12)$$

C เป็นค่าคงที่ใด ๆ ตัวใหม่

จากเงื่อนไขขอบเขตข้อ 2. เมื่อ $x = ½H$ จะได้

$$\phi_c(½H) = \phi_r(½H) \qquad (2.13)$$

และ

$$D_c \frac{d\phi_c}{dx}(½H) = D_r \frac{d\phi_r}{dx}(½H) \qquad (2.14)$$

เราจะได้

$$A \cos B_c \frac{H}{2} = C \sinh K_r T \qquad (2.15)$$

และ

$$A D_c B_c \sin B_c \frac{H}{2} = C D_r K_r \cosh K_r T \qquad (2.16)$$

จากการหารสมการ (2.16) ด้วยสมการ (2.15) จะได้

$$D_c B_c \tan B_c \frac{H}{2} = D_c K_r \coth K_r T \qquad (2.17)$$

ซึ่งเป็นสมการวิกฤตสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบแผ่นขนาดอนันต์และมีตัวสะท้อน

เนื่องจากค่า D_c, B_c, D_r และ K_r เป็นค่าที่หาได้จากคุณสมบัติของสารเชื้อเพลิง, โมเดอเรเตอร์ และตัวสะท้อน ถ้ารู้ค่าความหนาของแกน จะหาความหนาของตัวสะท้อนได้ หรือถ้ารู้ความหนาของตัวสะท้อน จะหาความหนาของแกนได้

พิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีรูปทรงกลมและมีตัวสะท้อนล้อมรอบ (Symmetrical Reflected Reactor with Spherical core) จะสามารถหาสมการวิกฤตได้ในทำนองเดียวกันเป็น [4]

$$\cot B_c R = \frac{1}{B_c R}\left(1 - \frac{D_c}{D_r}\right) - \frac{D_r}{D_c B_c L_r} \coth \frac{T}{L_r} \qquad (2.18)$$

R คือรัศมีของแกน $\qquad L_r = \frac{1}{K_r}$

T คือความหนาของตัวสะท้อนที่ล้อมรอบทรงกลม (ต้องมีสมภาพรอบทรงกลม)

2.4 รีเฟลกเตอร์เซฟวิ่ง (Reflector Savings)

การลดของขนาดวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เนื่องจากตัวสะท้อน เรียกว่า รีเฟลกเตอร์เซฟวิ่ง แทนด้วย (δ) โดยให้ค่าจำกัดความว่า

$$\delta = \tfrac{1}{2} H_0 - \tfrac{1}{2} H \qquad (2.19)$$

H_0 คือความหนาวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีลักษณะเป็นแผ่นและไม่มีตัวสะท้อนล้อมรอบ

H คือความหนาวิกฤตของเครื่องนี้เมื่อมีตัวสะท้อนล้อมรอบ

จากตาราง (2-1) $\qquad B^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$

---

[4] Ward C. Sangren. Digital Computers and Nuclear Reactor Calculations. (New York: John-Wiley & Sons, Inc., 1960), p.144

ดังนั้น

$$H_O = \frac{\pi}{B_c}$$

จะได้

$$\delta = \frac{\pi}{2B_c} - ½ H$$

หรือ

$$½ H = \frac{\pi}{2B_c} - \delta$$

แทนค่า ½H ในสมการ (2.17) จะได้

$$D_cB_c\tan\left(\frac{\pi}{2} - B_c\delta\right) = D_rK_r\coth K_rT$$

หรือ

$$D_cB_c\cot B_c\delta = D_rK_r\coth K_rT$$

จากการคูณไขว้และจัดเสียใหม่ จะได้

$$\tan B_c\delta = \frac{D_cL_c}{D_rK_r}\tanh K_rT \qquad (2.20)$$

หรือ

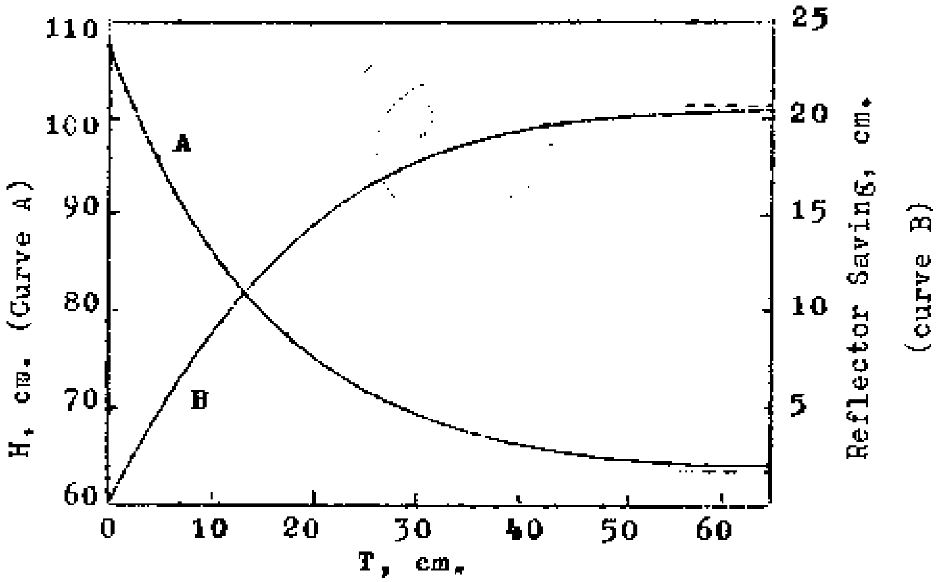
$$\delta = \frac{1}{B_c}\left\{\tan^{-1}\left(\frac{D_cB_c}{D_rK_r}\tanh K_rT\right)\right\} \qquad (2.21)$$

จากสมการที่ได้ จะสามารถคำนวณค่า รีเฟลกเตอร์เซฟวิ่ง เมื่อค่าความหนาของตัวสะท้อนต่าง ๆ กัน (ดูรูป 2-4)

เส้นโค้ง A แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา T กับความหนาของแกนรูปแผ่นขนาดอนันต์ โดยอาศัยการคำนวณจากสมการ (2.17)

เส้นโค้ง B แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา T กับค่ารีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งของแกนรูปแผ่นขนาดอนันต์ โดยอาศัยการคำนวณจากสมการ (2.21)

จากกราฟ จะเห็นว่า ขณะที่ความหนาของตัวสะท้อนเพิ่มขึ้น ความหนาวิกฤตของแกนจะค่อย ๆ ลดลง แต่เมื่อตัวสะท้อนมีความหนาถึงค่าหนึ่ง ขนาดของแกนจะไม่ลดลง ทั้งนี้เพราะตัวสะท้อนที่มีความหนาประมาณ 2 เท่าของระยะทางแพร่กระจาย จะแสดงตัวคล้ายตัวสะท้อนที่มีความหนาอนันต์



รูปที่ (2-4) รีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯแบบแผ่นขนาดอนันต์

ถ้าเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีรูปทรงกลม รีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งเขียนได้เป็น

$$\delta = R_0 - R$$

จากตาราง (2-1)

$$R_0 = \frac{\pi}{B_c}$$

R_0 คือรัศมีวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ไม่มีตัวสะท้อน (**bare reactor**)

ในกรณีเครื่องปฏิกรณ์ฯ ใหญ่ R จะมีค่ามาก ดังนั้น B_c จะมีค่าน้อย หรือความหนาของตัวสะท้อนน้อยเมื่อ δ น้อย ค่าของ $B_c\delta$ จะน้อย

แทนค่า R โดย $R_0 - \delta$ และ R_0 โดย $\frac{\pi}{B_c}$ ใน $\cot B_cR$ จะได้

$$\cot B_cR = \cot (B_cR_0 - B_c\delta)$$

$$= \cot (\pi - B_c\delta) = -\cot B_c\delta$$

เนื่องจาก $B_c\delta$ มีค่าน้อย $\cot B_c\delta$ มีค่าประมาณ $\frac{1}{B_c\delta}$ ดังนั้น

$$\cot B_cR \approx -\frac{1}{B_c\delta}$$

แทนค่านี้ในสมการ (2.18) จะได้สมการควอดคราติค (Quadratic) δ^2 ซึ่งจะได้คำตอบเป็น

$$\delta \approx \frac{1}{2}\left[\frac{D_r}{D_c}\delta_0 + R_0 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{D_c}\delta_0 + R_0\right)^2 - 4 R_0 \delta_0}\right] \qquad (2.22)$$

เมื่อ $\delta_0 \approx \frac{D_c}{D_r} L_r \tanh \frac{T}{L_r}$

คำตอบที่มีเครื่องหมายบวกหน้าเทอมที่มีรากที่สองไม่ใช้ เพราะให้ค่า δ มากเกินไป

จากสมการนี้ จะสามารถคำนวณค่า δ เมื่อทราบความหนาของเครื่องปฏิกรณ์หรือความหนาของตัวสะท้อน

2.5 การหาค่ารีเฟลกเตอร์เซฟวิ่ง (Determination of Reflector Saving)

ในการหาค่ารีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งโดยทฤษฎี วันกรุ๊ป ใช้สมการ (2.21) สำหรับรูปแผ่นขนาดอนันต์ และสมการ (2.22) สำหรับรูปทรงกลม ในสมการเหล่านี้ต้องการค่าคงตัว D_c, D_r, L_c, L_r และ B_c

B_c^2 คำนวณจาก $B_c^2 = \frac{k-1}{L_c^2}$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องใดเครื่องหนึ่ง L_c มีค่าคงตัว สำหรับในกรณีนี้ใช้ค่า $L_c^2 = 50$ ซม.^{2} ตลอด ซึ่งเป็นค่าที่เจ้าหน้าที่เครื่องปฏิกรณ์ ของสำนักงานพลังงานปรมาณูใช้อยู่สำหรับการปฏิบัติทั่ว ๆ ไป (ในบทต่อไปได้แสดงการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี ทูกรุ๊ป และได้ค่าซึ่งมีความหมายใกล้เคียงกัน L_c^2 เป็น 51.8 ซม.^{2})

สำหรับ k เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ ตลอดอายุการใช้งาน จะมีค่า k อยู่ประมาณ 1.4 – 1.6 ดังนั้นจึงใช้ค่า 1.4 และ 1.6 ทดลองคำนวณ เพื่อดูว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของ δ หรือไม่

ค่า D_c, D_r และ L_r ได้อาศัยค่าจากหนังสืออ้างอิง[5] D_r และ L_r เป็น

---

[5] Raymond L. Murray, Nuclear Reactor Physics (Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, Inc., 1957) pp. 121–125

ค่าคงตัวของตัวสะท้อนไม่ขึ้นกับเครื่องปฏิกรณ์ฯ D_c เป็นค่าที่เกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ฯ แต่ในที่นี้ใช้ค่า D_c จากหนังสืออ้างอิง เพราะค่า D_c ไม่เปลี่ยนแปลงมากสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบเดียวกัน แม้จะเป็นคนละเครื่องก็ตาม ปัญหาที่สำคัญคือ ในการคำนวณแบบอาศัยทฤษฎีวับกรุ๊ปไม่สามารถตัดสินได้ว่า ควรใช้ D_c, D_r และ L_r สำหรับนิวตรอนวิ่งช้าหรือนิวตรอนวิ่งเร็วมาคำนวณ จึงได้ทดลองคำนวณทั้งสองกรณี เพื่อเปรียบเทียบว่าจะเกิดผลแตกต่างกันอย่างไร ค่าคงตัวต่าง ๆ ที่ใช้มีดังตาราง

ตารางที่ 2-2

ตารางแสดงค่าคงตัวที่ใช้ในการคำนวณหาค่า δ

	Reflector	D_c	D_r	L_r
constant for slow neutron	Water	0.261	0.16	2.85
	graphite	0.261	0,90	52
constant for fast neutron	water	1.241	1.143	5.74
	graphite	1.241	1.11	55.4

ทุกกรณีใช้ $L_c^2 = 50$ ซม.^{2} และหาค่า B_c ได้ 0.089 และ 0.11 เมื่อ k มีค่าเป็น 1.4 และ 1.6 ตามลำดับ

จากค่าคงตัวที่กำหนดให้ แทนลงในสมการ (2.21) และสมการ (2.22) จะสามารถหาค่ารีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ เมื่อมีน้ำและกราไฟท์เป็นตัวสะท้อน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3

ตารางแสดงค่ารีเฟลกเตอร์เซฟวิ่งเมื่อใช้น้ำและกราไฟท์เป็นตัวสะท้อน
(ใช้ทฤษฎีวันกรุ๊ป)

Geometry	k	Constant for slow neutron		Constant for fast neutron	
		(water)	(graphite)	(water)	(graphite)
slab	1.6	4.3	9.4	5.5	13
	1.4	4.4	10.5	5.7	15.6
sphere	1.6	5.0	5.3	6.3	36.8
	1.4	4.8	6.7	6.3	-

ผลจากในตาราง แสดงว่า

ก. การเปลี่ยนแปลงของ k ไม่กระทบกระเทือนค่า δ มากนัก

ข. การเปลี่ยนการคำนวณจากรูปแผ่นมาเป็นรูปทรงกลม ทำให้ค่า δ เปลี่ยนแปลงไปมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกราไฟท์

ค. การใช้ค่าคงตัวของนิวตรอนวิ่งช้า ผลแตกต่างจากการใช้ค่าคงตัวของนิวตรอนวิ่งเร็ว

ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะตัดสินว่าค่าใดถูกต้องกว่า ในการคำนวณต่อ ๆ ไป ในวิทยานิพนธ์นี้จึงไม่ได้นำผลเหล่านี้ไปใช้