

บทที่ 5

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclea Reactors)

วัตถุประสงค์

เพื่อให้ศึกษามีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ

1. ตัวประกอบภาวะวิกฤต
2. สูตรของสี่ตัวประกอบ
3. การคำนวณกัมมันตภาพรังสี
4. การจำแนกเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

จากที่กล่าวมาตั้งแต่บทที่ 1 ถึง 4 ก็พอเป็นพื้นฐานที่จะนำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งถือเป็นบทที่มีชื่อเกี่ยวข้องโดยตรงกับตำราเล่มนี้ อย่างไรก็ตาม ยังมีเรื่องอื่นที่เกี่ยวข้องแต่จะกล่าวในรายละเอียดถึงในบทหลัง ในบทก่อนหน้าเราเน้นกระบวนการเกิดการแบ่งแยกตัว และเรารู้ว่าในแต่ละการแบ่งแยกตัวจะมีนิวตรอนเกิดขึ้นเฉลี่ยแล้วมากกว่า 2 ตัว นิวตรอนเหล่านี้เป็นตัวก่อให้เกิดการแบ่งแยกตัวของยูเรเนียมต่อไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น ถ้าอัตราการเกิดนิวตรอนเท่ากับอัตราการสูญเสียนิวตรอน ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเข้าสู่การพึ่งพาตัวเองได้ (self-supporting or self-sustained) และอุปกรณ์ที่ออกแบบให้มีสภาวะเช่นนี้และสามารถควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ จะถูกเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1 กล่าวถึงการค้นพบการแบ่งแยกนิวเคลียส ขอเพิ่มเติมว่า เฟอร์มิ และ ผู้ร่วมงานของเขา ประสบความสำเร็จในการทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่นิวเคลียร์ แบบพึ่งพาตัวเองได้ (self-sustained nuclear chain reaction) เป็นครั้งแรกในวันที่ 2 ธันวาคม ค.ศ. 1942 ที่มหาวิทยาลัยแห่งชิคาโก (University of Chicago) สหรัฐอเมริกา โดยอาศัยการหน่วงนิวตรอนโดยมอดอเรเตอร์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวจากแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งมีการจัดแท่งเชื้อเพลิง และ มอดอเรเตอร์ ให้เหมาะสมทั้งนี้อาศัยแนวคิดและความร่วมมือทางนวัตกรรมของนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ ที่มีการศึกษา และ ทดลองในเรื่องนี้ มาช่วย

5.1 ตัวประกอบภาวะวิกฤต (Criticality Factor)

ดังกล่าวมาแล้วว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่จะเข้าสู่สภาวะพึ่งพาตนเองได้ อัตราการเกิดนิวตรอนต้องเท่ากับ อัตราการสูญเสียนิวตรอน ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดของระบบ ในเครื่องปฏิกรณ์จะสูญเสียนิวตรอนไปใน 2 กระบวนการ คือ จากการดูดกลืนของนิวคลีไอน์ตัวกลาง หรือ จากการ

ตัวประกอบที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาลูกโซ่ คือ ตัวประกอบการคูณ (the multiplication factor) k ซึ่งนิยามว่า คือ อัตราส่วนของจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นหนึ่ง (a generation) ต่อ จำนวนที่คลั่งจองในชั่วรุ่นก่อนหน้านี้ นั่นคือ

$$k = \text{จำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นที่ } (n+1) / \text{จำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นที่ } n \quad (5.1)$$

ถ้า $k > 1$ จะมีจำนวนนิวตรอนเพิ่มขึ้นอย่างไม่แน่นอนไปกับเวลา ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ควบคุมไม่ได้ แต่ถ้า $k < 1$ จำนวนนิวตรอนจะลดลงไปกับเวลา และ ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่หยุดลงเอง ในกรณีพิเศษที่ $k = 1$ หมายถึงจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นตามกันมา จะมีค่าคงที่ ทำให้ปฏิกิริยา ลูกโซ่ดำเนินไปด้วยอัตราคงที่ ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นกรณี k ต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

$k > 1$ อยู่ในภาวะเหนือวิกฤต (supercritical)

$k = 1$ อยู่ในภาวะวิกฤต (critical)

$k < 1$ อยู่ในภาวะต่ำกว่าวิกฤต (subcritical)

ด้วยเหตุนี้ k จึงมักถูกเรียกว่า เป็นตัวประกอบภาวะวิกฤต (criticality factor) ของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์ และ วิศวกรที่ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ต้องพยายามปรับให้ได้ ค่าตัวประกอบภาวะวิกฤตที่มีค่า $k = 1$ ให้ได้

ในทางปฏิบัติค่า k นี้อาจนิยามในพจน์ของความสัมพันธ์สมดุลของนิวตรอน โดย $k = \text{อัตราการผลิตนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์} / \text{อัตราการสูญเสียจากการดูดกลืนและถูกจับ ในเครื่องปฏิกรณ์}$

$$k = P(t) / L(t) \quad (5.2)$$

โดยอัตราทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา หรือ การใช้เชื้อเพลิง ในการคำนวณหาค่า k จะพิจารณา จากประวัติชีวิตของนิวตรอน ในส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor assembly) จากช่วง เกิดในการแบ่งแยกตัว ถึง ช่วงรั่วไหล หรือ ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง หรือ วัสดุอื่น ๆ ดังนั้นเราสามารถนิยามอายุใช้งาน (lifetime) l ของนิวตรอน ว่าคือ

$$l = n(t) / L(t) \quad (5.3)$$

เมื่อ $n(t)$ คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ ณ เวลา t ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลง $n(t)$ มีค่า $dn(t)/dt =$ อัตราการผลิต - อัตราการสูญเสีย

$$= P(t) - L(t) \quad (5.4)$$

เมื่อจะให้สัมพันธ์กับตัวประกอบการคูณ k ตามสมการ (5.2) จะได้

$$\frac{dn(t)}{dt} = \left[\frac{P(t)}{L(t)} - 1 \right] L(t) = (k-1)L(t) \quad (5.5)$$

หรือเมื่อให้สัมพันธ์กับอายุใช้งาน ℓ ตามสมการ (5.3) จะได้

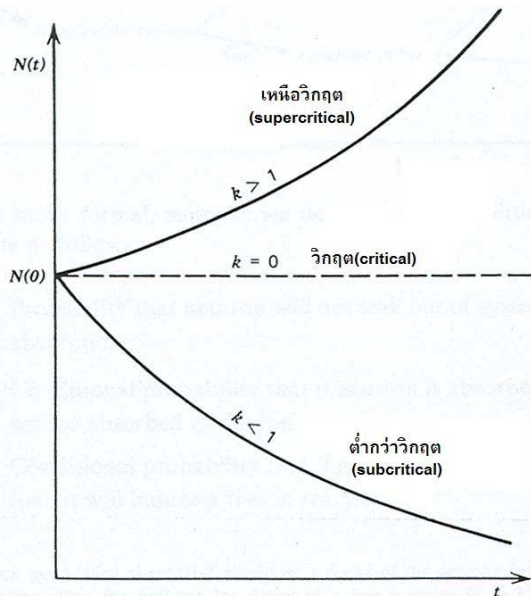
$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(k-1)}{\lambda} n(t) \quad (5.6)$$

ถ้าเราสมมุติว่าทั้ง k และ ℓ ไม่ขึ้นกับเวลา โดยให้เป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่การเกิดนิวตรอน และการรั่วไหลหรือดูดกลืนไปในช่วงสุดท้าย เราจะสามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ปกติ เพื่อหาจำนวนนิวตรอน ณ เวลาผ่านไป t ใดๆ ได้ โดยสมมุติว่าเริ่มต้นมีจำนวนนิวตรอน n_0 ในเครื่องปฏิกรณ์ ณ เวลา $t = 0$ จะได้

$$n(t) = n_0 e^{(k-1)t/\ell} \quad (5.7)$$

สมการ (5.7) นี้จะสอดคล้องกับค่า k ที่กล่าวถึงในตอนต้น ให้ดูค่า k ที่ได้ตามรูปที่ 5-1

จำแสดงจำนวนนิวตรอน $n(t)$ ที่ขึ้นกับเวลา t ในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อตัวประกอบการคูณ k แตกต่างกัน 3 กรณี



รูปที่ 5-1 จำนวนนิวตรอนที่ขึ้นกับเวลาในเครื่องปฏิกรณ์

ตัวอย่างที่ 5-1

ถ้านิวตรอนที่เกิดทันที (prompt neutrons) จากการแบ่งแยกตัวมีอายุใช้งานประมาณ 10^{-3} วินาที และ ถ้าเครื่องปฏิกรณ์นี้มีตัวประกอบภาวะวิกฤต หรือ ตัวประกอบการคูณ เท่ากับ 1.01 จงหาจำนวนนิวตรอนที่เพิ่มขึ้นต่อวินาที

วิธีทำ

จากสมการ (5.7) โจทย์กำหนด $k = 1.01$ และ $\ell = 0.001$ s ดังนั้น เมื่อเราพิจารณาเวลาที่ผ่านไป $t = 1$ วินาที จะได้

$$n(t) / n_0 = e^{((1.01-1) \times 1s) / (0.001s)} = e^{10} \approx 22,000$$

นั่นคือ จะมีนิวตรอนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที จำนวน 22,000 ตัว

จากตัวอย่างที่ 5-1 จะเห็นว่าจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นมากมายต่อวินาที เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยเครื่องมือใดๆ จึงเป็นเครื่องที่นักวิทยาศาสตร์ไม่ปรารถนาให้เกิดขึ้นและโชคดีที่นิวตรอนที่เกิดตามมา (delayed neutrons) ช่วยยืดอายุการใช้งานของนิวตรอนให้มีค่าประมาณ 0.1 วินาที จึงทำให้สามารถออกแบบให้มีอุปกรณ์ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ได้

5.2 สูตรของสี่ตัวประกอบ (The Four-Factor Formula)

ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบการคูณ k เราต้องพิจารณาแท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่เอามารวมกันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งต้องมีตัวระบายความร้อน (coolant) จากการแบ่งแยกตัว นอกจากนี้ยังมีวัสดุอื่นๆอีก อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวก เราจะสมมุติว่าทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเอกรูปหรือสม่ำเสมอ (uniform) เราจะพิจารณาวัฏจักรชีวิตของนิวตรอน (neutron life cycle) ในเครื่องปฏิกรณ์ ตั้งแต่เกิดจากการแบ่งแยก จนถึงที่รั่วไหลออกไป หรือ จากการถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง หรือ วัสดุอื่นๆดังกล่าว และที่เหลือทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวใหม่ครบวัฏจักร พอประมาณได้ดังรูปที่ 5-2 เพื่อความสะดวกในการพิจารณา เราจะแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น 2 ระบบ โดยที่ระบบแรกมีขนาดอนันต์จึงไม่มีการสูญเสียนิวตรอนจากการรั่วไหล อีกระบบมีขนาดจำกัด

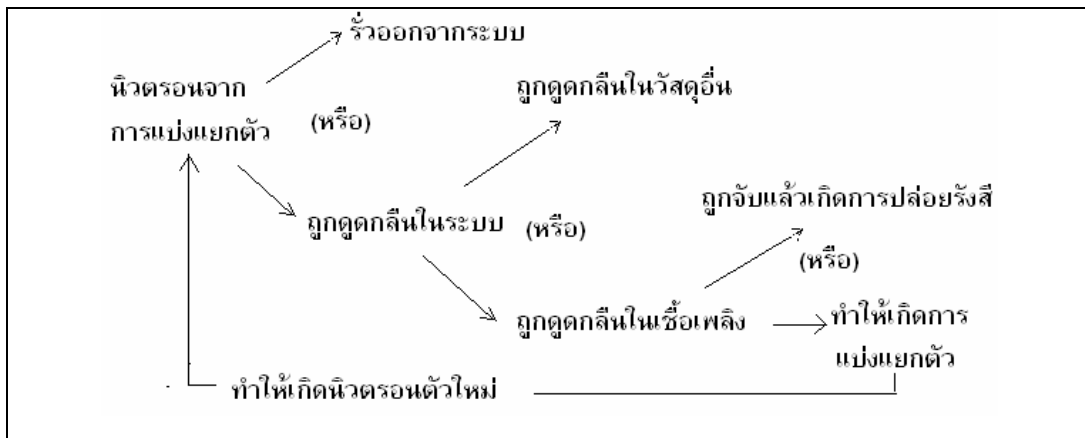
5.2.1 ระบบขนาดอนันต์ (Infinite Systems)

เริ่มจากพิจารณาเทอร์มอลนิวตรอน ซึ่งถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของยูเรเนียม (อาจเป็น ^{235}U หรือ ^{238}U) แล้วเกิดนิวตรอนเร็ว เฉลี่ย η ตัว ซึ่งแต่ละตัวมีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 MeV เป็นพลังงานเหนือขั้นต่ำของการแบ่งแยกตัว (fission threshold energy) ของ ^{238}U นิวตรอนเร็ว

ϵ = จำนวนนิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวทั้งหมด (fast and thermal fission) /

จำนวนนิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวด้วยเทอร์มอลนิวตรอน (thermal fission) (5.8)

ค่า ϵ ตามสมการ(5.8)นี้มีค่าใกล้เคียง 1 ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนโดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $\epsilon = 1.03 - 1.15$



รูปที่ 5-2 วัฏจักรชีวิตของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เมื่อพลังงานของนิวตรอนมีค่าต่ำกว่าพลังงานขั้นต่ำของการแบ่งแยกตัวของ ^{238}U จึงไม่เกิดการแบ่งแยกตัวต่อไปของไอโซโทปนี้ นิวตรอนทั้งหลายก็จะถูกลดความเร็วต่อไป แต่ก่อนที่จะมีพลังงานระดับเทอร์มอลนิวตรอน ^{238}U สามารถดูดกลืนนิวตรอนโดยไม่เกิดการแบ่งแยกตัวไปอีกจำนวนมาก เนื่องจากเกิดการดูดกลืนแบบเรโซแนนซ์ (resonance absorption) ทำให้นิวตรอนจำนวนหนึ่งหายไปจากระบบโดยไม่เกิดตัวใหม่ขึ้นมา ถ้าให้ p คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนจะรอดพ้นจากการถูกจับใน ^{238}U แบบเรโซแนนซ์ โดยเรียก p เป็นความน่าจะเป็นที่รอดพ้นจากเรโซแนนซ์ (resonance escape probability) หรือ

$$p = \frac{\text{จำนวนเทอร์มอลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนในระบบ}}{\text{จำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืน}}$$

ในช่วงพลังงานต่ำกว่าพลังงานขั้นต่ำของการแบ่งแยกตัวจากนิวตรอนเร็ว (5.9)

ดังนั้น

จำนวนนิวตรอนที่เหลือเพื่อถูกทำให้เป็นเทอร์มอลนิวตรอน(thermalization)

$$= n \in p \quad (5.10)$$

และในจำนวนตามสมการ(5.10)นี้มีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดกับมอดเรเตอร์และวัสดุอื่นๆ โดยมีสัดส่วน f ที่ถูกดูดกลืนอีกครั้งในเชื้อเพลิง และ เหนียวนำทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวต่อไปอีก เรียก f ว่าเป็นตัวประกอบการใช้งานของเทอร์มอลนิวตรอน (thermal utilization factor) โดย

$$f = \frac{\text{จำนวนเทอร์มอลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสเชื้อเพลิงยูเรเนียม}}{\text{จำนวนเทอร์มอลนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนในระบบ}}$$

ดังนั้นเราจะพบว่าถ้าเราเริ่มจากการจับเทอร์มอลนิวตรอนตัวหนึ่งในยูเรเนียม จนกระทั่งถึงจำนวนนิวตรอนที่ถูกจับในชั่วรุ่นถัดไป จะมีค่าเท่ากับ $n \in pf$ เราใช้สัญลักษณ์แทนด้วย k_{∞} เป็นค่าคงที่การคูณของตัวกลางแบบอนันต์ (infinite-medium multiplication constant) หรืออาจเรียกสั้นๆว่า k -อนันต์ (k -infinity) ของระบบ โดย

$$k_{\infty} = \eta \in pf \quad (5.11)$$

สูตรตามสมการ (5.11) เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นสูตรของสี่ตัวประกอบ (four factor formula) ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน ที่มีเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ หรือ มีการเสริม สมรรถนะให้มียูเรเนียมมากขึ้น

กรณีเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน (thermal reactor) ที่ใช้เชื้อเพลิง ^{235}U จะมีค่า \in และ p เข้าใกล้ 1 ทั้งคู่ จะได้สมการ (5.11) มีค่าลดรูปเป็น $k_{\infty} = \eta f$ และ กรณีระบบขนาดอนันต์ จะได้ $k_{\infty} = 1$ เป็นเงื่อนไขเป็นเงื่อนไขภาวะวิกฤต (criticality condition)

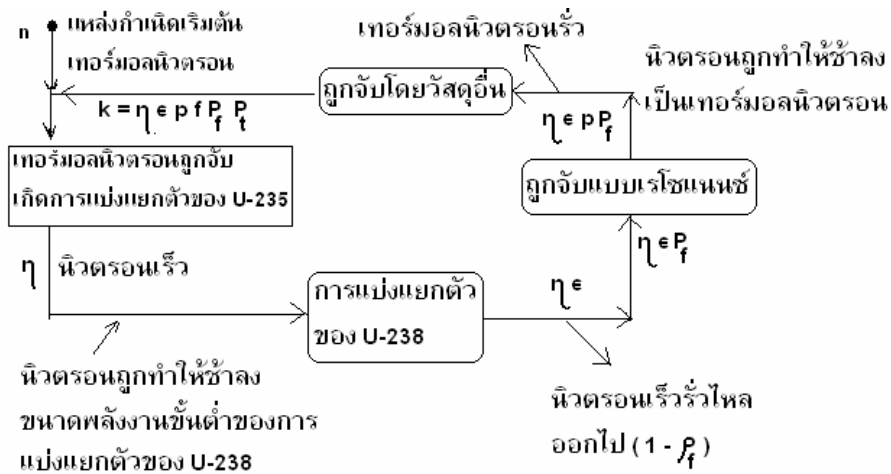
5.2.2 ระบบขนาดจำกัด (A Finite System)

สำหรับระบบที่เป็นจริงจะมีขนาดจำกัด จึงจำเป็นต้องปรับสมการ (5.11) ใหม่ โดยพิจารณาการรั่วไหลของนิวตรอนออกจากระบบตอนที่ลดความเร็วด้วย โดยเฉพาะนิวตรอนที่ยังมีความเร็ว นอกจากนี้นิวตรอนยังสามารถหลุดรอดจากระบบขณะกำลังแพร่เป็นเทอร์มอลนิวตรอนให้ดูรูปที่ 5-3 ประกอบซึ่งแสดงวัฏจักรนิวตรอน และ การรั่วไหลออกจากระบบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจำกัด ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงยูเรเนียม ถ้าให้

$$P_f = \text{ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนเร็วรั่วไหล ขณะถูกทำให้ช้า}$$

$$P_r = \text{ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนช้ารั่วไหล ขณะเกิดการแพร่}$$

ดังนั้น สำหรับระบบที่มีขนาดจำกัด จะได้ตัวประกอบคูณ มีค่า



รูปที่ 5-3 วงจรนิวตรอน และการรั่วไหลออกจากระบบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจำกัด

$$k = n \epsilon p f P_f P_t = k_{\infty} P_f P_t \quad (5.12)$$

เงื่อนไขสภาพวิกฤตจะต้องมีค่า $k = 1$ โดยที่ผลคูณ $P_f P_t$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1 อยู่แล้ว จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดจำกัด ต้องมี $k_{\infty} > 1$

งานหลักของนักฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์ (reactor physicist) คือการคำนวณหาค่า k ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ คือ $\eta, \epsilon, p, f, P_f$ และ P_t โดยที่ η ขึ้นอยู่เฉพาะกับสมบัติทางนิวเคลียสของเชื้อเพลิง ส่วน ϵ, p และ f ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของธาตุเชื้อเพลิง และการแจกแจงของค่าเหล่านี้ภายในมอดเดอเรเตอร์ ในทางตรงกันข้าม ค่า P_f และ P_t คำนวณจากรูปร่างและขนาดของระบบ

5.3 การคำนวณกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity Calculation)

จากหัวข้อ 5.1 จะเห็นว่านิวตรอนบางส่วนที่ถูกจับด้วยวัสดุอื่นๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ ในวัสดุจะประกอบด้วยธาตุเสถียรต่างๆ ซึ่งเมื่อจับนิวตรอนแล้วจะเกิดสถานะไม่เสถียรหรือกลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) ตามสมการ (1.10) ที่เคยได้ในบทที่ 1 เราจะพิจารณากรณีไม่เกิดการแบ่งแยกตัว



เราเรียกผลที่เกิดตามสมการ (5.13) นี้ว่าการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน (neutron activation) ในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัย (research reactors) ก็มีการศึกษาในเรื่องนี้ โดยเฉพาะการนำวัสดุที่เสถียรมาอบเทอร์มอลนิวตรอน เพื่อศึกษาธาตุกัมมันตรังสีต่างๆ ที่เกิดขึ้น

การคำนวณหาความแรงหรือ กัมมันตภาพ (activity) ของธาตุกัมมันตรังสี ที่เกิดขึ้นหลังการอบเทอร์มอลนิวตรอนเป็นเวลา T อาศัยหลักการที่ว่า ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมากก็ต้องมีการสลายตัวด้วย ดังนั้นเมื่อเอาวัสดุที่เสถียรไปอบเทอร์มอลนิวตรอนที่มีฟลักซ์นิวตรอน ϕ {หน่วย neutrons/(cm².s)} เมื่อวัสดุที่เสถียรดังกล่าวประกอบด้วยธาตุ A_ZX ที่มีภาคตัดขวางมหภาค Σ (cm⁻¹) จะได้

$$\text{อัตราการเกิดธาตุกัมมันตรังสี} = \Sigma \phi \{ \text{neutrons}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}) \}$$

เนื่องจาก 1 นิวตรอนทำปฏิกิริยา (ถูกจับ) กับ 1 นิวเคลียส ดังนั้น กรณีหลายๆนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียส (nuclei) เราจึงให้ความหมายของหน่วยได้ว่า

$$\text{อัตราการเกิดธาตุกัมมันตรังสี} = \Sigma \phi \{ \text{nuclei}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}) \} \quad (5.14)$$

ส่วนการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสีก็เป็นไปตามกฎของกระบวนการสลายตัวที่ว่า ความน่าจะเป็นของการสลายตัวของนิวเคลียส(ของแต่ละธาตุ)ต่อเวลา จะมีค่าคงที่เฉพาะตัวตามธรรมชาติของธาตุนั้นๆ ค่าคงที่ดังกล่าวคือ

$$\lambda = \text{ค่าคงที่การสลาย (decay constant, s}^{-1}\text{)}$$

ดังนั้นถ้าให้

$$N = \text{จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี (nuclei}/\text{cm}^3\text{)}$$

จะได้

$$\text{อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี} = -\lambda N \{ \text{nuclei}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}) \}$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาพร้อมกันขณะอบเทอร์มอลนิวตรอนจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของธาตุกัมมันตรังสี เท่ากับอัตราการเกิด และ อัตราการสลาย ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา T ที่อบนิวตรอน หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี

$$= dN / dT = \Sigma \phi - \lambda N \quad (5.15)$$

เนื่องจาก 1 นิวเคลียสเป็นส่วนประกอบของ 1 อะตอม หลายอะตอมก็คือหลายนิวเคลียส หรือนิวเคลียส (nuclei) ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของธาตุกัมมันตรังสี จึงอาจแทนหน่วยเป็น {nuclei/(cm³.s)}

ในการคำนวณหา จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีใด ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อนำธาตุไปอบนิวตรอนนาน T จะได้ $N = N(T)$ ซึ่งเรานำสมการ (5.15) มาพิจารณาจะได้

$$dN / dT = -(\lambda N - \Sigma \phi) = -\lambda \{ N - (\Sigma \phi / \lambda) \}$$

$$\int_0^N \frac{d(N - \Sigma \phi / \lambda)}{(N - \Sigma \phi / \lambda)} = -\lambda \int_0^T dT$$

เมื่อพิจารณาว่าที่เวลาเริ่มต้น T = 0 ยังไม่มีการอบเทอร์มอลนิวตรอน จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจึงยังไม่มี ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตออกมาจะได้

$$\ln\left(\frac{N - \Sigma\phi/\lambda}{0 - \Sigma\phi/\lambda}\right) = -\lambda T$$

หรือ

$$\frac{N - \Sigma\phi/\lambda}{-\Sigma\phi/\lambda} = e^{-\lambda T}$$

ดังนั้น เมื่อนำวัสดุที่เสถียร ไปอาบเทอร์มอลนิวตรอน เป็นเวลา T จะเกิดธาตุกัมมันตรังสี $N = N(T)$ หรือ

$$N(T) = \frac{\Sigma\phi}{\lambda}(1 - e^{-\lambda T}) \quad (5.16)$$

หรือคิดเป็นความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเมื่ออาบเทอร์มอลนิวตรอนเป็นเวลานาน T มีค่า A(T) โดย

$$A(T) = \lambda N(T) = \Sigma\phi(1 - e^{-\lambda T}) \quad (5.17)$$

มีหน่วยความแรงเป็นอัตราการสลาย (disintegrations / s) ตามระบบ SI ความแรงมีหน่วยดังกล่าวนี้เป็น เบกเคอเรล (becquerel, B_q) แต่ที่นิยมกันมาก่อนคือ คูรี (curies, C_i) โดย

$$1 C_i = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegrations / s} = 3.7 \times 10^{10} \text{ nuclei / s}$$

ดังนั้น

$$1 B_q = 2.703 \times 10^{-11} C_i \\ \approx 27 \text{ pC}_i$$

วัสดุที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะอาบรังสีในช่วงเวลาที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นช่วงเวลาที่นานมาก ($T \rightarrow \infty$) ดังนั้นสมการ (5.15) หรือ สมการ (5.16) จะได้ $\Sigma\phi = \lambda N$ จะได้จำนวนนิวคลีไอของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นมากที่สุดมีค่า N₀ โดย

$$N_0 = \Sigma\phi/\lambda \quad (5.18)$$

เราเรียกสมการ (5.18) ว่าสถานะคงตัว (steady state) กล่าวคืออัตราการเกิดธาตุกัมมันตรังสีเท่ากับอัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสี ถือเป็นความแรงของธาตุกัมมันตรังสีมีค่าสูงสุดเรียกความแรงอิ่มตัว (saturation activity)

เมื่อนำธาตุที่อาบเทอร์มอลนิวตรอนเป็นเวลา T จะมีความแรงตามสมการ (5.17) ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ หรือ ออกจากแหล่งกำเนิดที่ใช้อาบ แล้วมาปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา t เราจะหาความแรงที่วัดได้ เมื่อเวลาผ่านไป t มีค่า A(t) โดยอาศัยหลักการสลายตัวเมื่อเวลาผ่านไป dt จะเหลือความแรง A(t) อยู่ตามสมการ

$$-dA(t) = \lambda A(t) dt$$

อินทิเกรตออกมาจะได้

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5.19)$$

เมื่อ A_0 คือ ความแรงของธาตุกัมมันตรังสี ตอนนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ หรือ ออกจากแหล่งกำเนิดที่ใช้واب นั่นคือ $A_0 = A(T)$ ดังนั้นสมการ (5.19) จึงอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} A(t) &= A(T) e^{-\lambda T} \\ &= \Sigma\phi(1 - e^{-\lambda T})e^{-\lambda T} \end{aligned} \quad (5.20)$$

จากสมการ (5.19) ถ้าเราจะหาความแรงของธาตุกัมมันตรังสีที่เหลือครึ่งหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไป $t_{1/2}$ (ครึ่งชีวิต) หรือเหลือ $A(t_{1/2}) = A_0/2$ จากเวลาที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยให้เวลาเริ่มต้นที่เอาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ $t = 0$ จะมี $A_{(t=0)} = A_0$ ดังนั้น จะได้สมการ (5.19) มีค่า

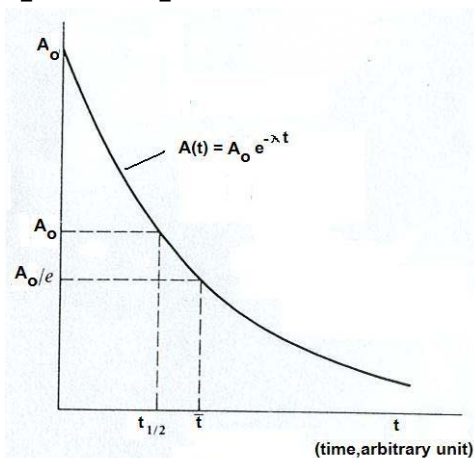
$$A(t_{1/2}) = A_0 / 2 = A_0 \exp(-\lambda t_{1/2}) \quad (5.21)$$

ในที่สุดจะได้

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad (5.22)$$

ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆตามสมการ (5.19), (5.21) และ (5.22) ให้ดูในรูปที่ 5.4 และ จากสมการ (5.22) เราอาจเขียนสมการ (5.17) ในรูป

$$A(T) = \Sigma\phi \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{T}{t_{1/2}}} \right] \quad (5.23)$$



รูปที่ 5-4 ความแรง (activity) ของธาตุกัมมันตรังสี เมื่อเวลาผ่านไป t

หลังจากออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ในทำนองเดียวกัน สมการ (5.20) เขียนได้เป็น

$$A(t) = A(T) \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \quad (5.24)$$

ตัวอย่างที่ 5-2

ทอง-198 (gold-198) ครึ่งชีวิต 64.8 ชั่วโมง สามารถผลิตขึ้นจากการนำ ^{197}Au (เสถียร) ไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ โดยสมมุติว่านำแผ่น ^{197}Au ซึ่งมีมวล 0.1 กรัมไปวาง

ในตำแหน่งที่มีเทอร์มอลนิวตรอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำออกมาจะพบว่ามีความแรง 0.90 C_i

ก.) ความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจาก ¹⁹⁸Au ในแผ่นทอง ตามทฤษฎีมีค่าเท่าไร

ข.) ต้องใช้เวลาในการอบเทอร์มอลนิวตรอน นานเท่าไร จึงจะมีความแรง 80% ของค่าสูงสุด

ค.) หลังจากอบนาน 12 ชั่วโมง แล้วนำออกมาปล่อยให้ทิ้งไว้ 1 วัน แล้ววัดจะมีความแรงเท่าไร

วิธีทำ

ก.) ความแรงสูงสุดตามทฤษฎี หาค่าออกมาได้ตามสมการ (5.17) หรือ สมการ (5.23) เมื่อ $T \rightarrow \infty$ นั่นคือจะได้

$$A(T \rightarrow \infty) = \Sigma \phi$$

ดังนั้นหาค่า $\Sigma \phi$ จากที่โจทย์กำหนด โดยมี

$$\lambda = 0.693 / (64.8 \text{ hr}) = 1.07 \times 10^{-2} / \text{hr}$$

แทนค่าในสมการ (5.17) จะได้

$$0.90 \text{ C}_i = \Sigma \phi [1 - \exp(-1.07 \times 10^{-2} \times 12)]$$

เมื่อแก้สมการทั้งสองออกมาจะได้ความแรงสูงสุด

$$\begin{aligned} A(T \rightarrow \infty) &= \Sigma \phi = 7.5 \text{ C}_i \\ &= 7.5 \times 3.7 \times 10^{10} \text{ atoms / s} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติอาจใช้ $T > 10t_{1/2}$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $1 - e^{-\lambda T} \approx 1$ นั่นคือจะได้ความแรง

สูงสุด $A(T > 10t_{1/2}) \approx \Sigma \phi$

ข.) หาเวลาที่อบแล้วให้ความแรงคิดเป็น 80% ของค่าสูงสุด นั่นคืออาศัยสมการ (5.17) จะได้

$$0.8 \Sigma \phi = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda t})$$

จะได้ $t = 150$ ชั่วโมง

ค.) หาความแรงหลังจากนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ 24 ชั่วโมงโดยใช้สมการ (5.20) หรือ (5.24) จะได้

$$A(t) = 0.90 \text{ C}_i \left(\frac{1}{2}\right)^{24/64.8} \approx 0.696 \text{ C}_i$$

5.4 การจำแนกเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

(Classification of Nuclear Reactors)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถูกสร้างขึ้นมามากมายหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นเพื่อการวิจัย การผลิตกระแสไฟฟ้าและผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์อาจแบ่งตาม

1.) พลังงานของนิวตรอนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว (neutron energy)

- 2.) วัสดุที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ ในรูปของเชื้อเพลิง มอดอเรเตอร์ หรือ ตัวระบายความร้อน และ สถานะทางกายภาพ (materials)
- 3.) ลักษณะโครงสร้าง (structure)
- 4.) วัตถุประสงค์ในการใช้งาน (purpose)

5.4.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่จำแนกตามพลังงานของนิวตรอนที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัว

เมื่อพิจารณาตามพลังงานของนิวตรอน ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเชื้อเพลิง ให้เกิดการแบ่งแยกตัว จะแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

- 1.) เครื่องปฏิกรณ์แบบใช้นิวตรอนเร็ว (fast reactors) พลังงานของนิวตรอนมีค่าขนาด 100–200 keV หรือ อาจจะต่ำกว่านี้ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้กำลังมีการวิจัยและพัฒนา
- 2.) เครื่องปฏิกรณ์แบบใช้นิวตรอนที่มีพลังงานระดับปานกลาง (intermediate reactors) พลังงานของนิวตรอนขนาด 10 – 100 eV บางครั้งเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์เรโซแนนซ์ (resonance reactors) ซึ่งเครื่องแบบนี้ยังไม่ได้มีการพัฒนา
- 3.) เครื่องปฏิกรณ์แบบใช้เทอร์มอลนิวตรอน (thermal reactors) พลังงานของนิวตรอนที่ใช้มีค่าประมาณ 0.0253 eV ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

5.4.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่จำแนกตามวัสดุที่ใช้งาน

การจำแนกเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ เน้นวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง มอดอเรเตอร์ หรือ ตัวระบายความร้อน ซึ่ง แสดงสมบัติ และ สถานะ แตกต่างกัน เช่น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน ที่ระบุเพิ่มเติมว่าใช้แกรไฟต์เป็นมอดอเรเตอร์ ใช้ CO₂ เป็นตัวระบายความร้อน และ ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหรือ บางเครื่องใช้น้ำ (H₂O) เป็นมอดอเรเตอร์ และ ตัวระบายความร้อน โดยมีเชื้อเพลิงที่มียูเรเนียม ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะให้มี ²³⁵U มากกว่าที่มีอยู่ในยูเรเนียมธรรมชาติ (ซึ่งมี 0.71%) เครื่องปฏิกรณ์แบบหลังนี้ เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้ยูเรเนียมที่เสริมสมรรถนะ มีน้ำเป็นตัวหน่วง และ ระบายความร้อน ชื่อเรียกย่อๆว่า เครื่องปฏิกรณ์น้ำเบา (light water reactors) ถ้าใช้น้ำมวลหนักก็จะเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์น้ำมวลหนัก (heavy water reactors) เป็นต้น

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้เทอร์มอลนิวตรอน จะใช้ตัวระบายความร้อนเป็นพวกแก๊ส หรือ โซเดียมละลาย (molten sodium) ดังนั้นจึงอาจเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็วระบายความร้อนด้วยแก๊ส (gas cooled fast reactors) เป็นต้น

5.4.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่จำแนกตามโครงสร้าง

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะเน้นวัตถุประสงค์การใช้งานว่าสร้างขึ้นมาเพื่ออะไร ซึ่งจะแบ่ง

ได้เป็น 3 ประเภท คือ

1.) เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัย (research reactors) ซึ่งถือเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่สร้างขึ้นมาก่อนแบบอื่น อันเป็นพื้นฐานความรู้นำไปพัฒนาในเรื่องอื่นๆตามมา เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัยในยุคแรกๆ ให้ดูจากตารางที่ 5-1

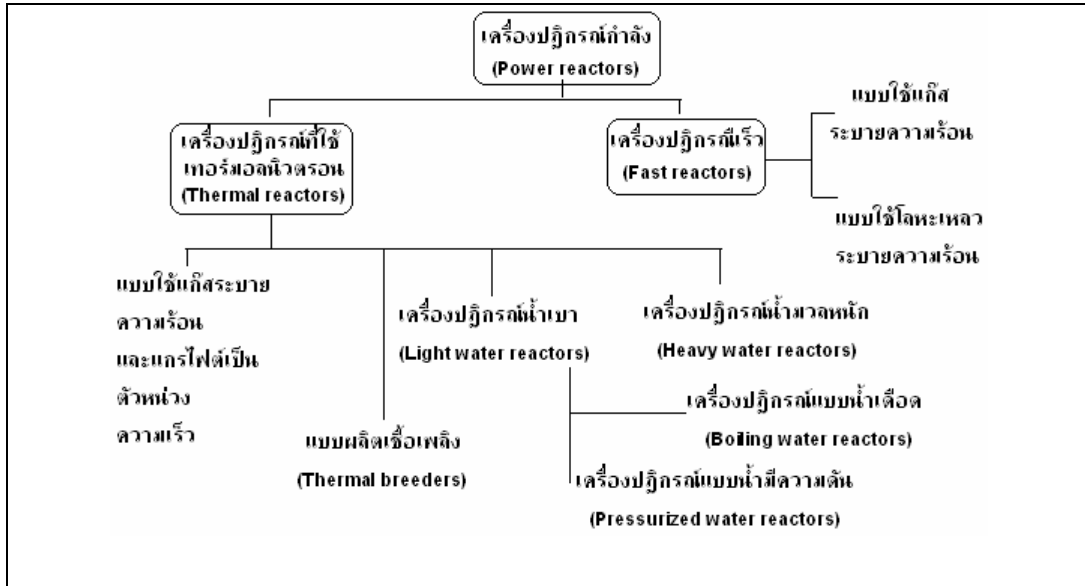
ตารางที่ 5-1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการวิจัยในยุคแรกบางเครื่อง

ชื่อ	สถานที่	ปฏิบัติการเดินเครื่อง	เชื้อเพลิง	มอดเตอเรเตอร์	ตัวทำความเย็น	ตัวสะท้อน	กำลัง	Remarks
CP-1	Chicago, Illinois, USA	December 1942	natural uranium	graphite	air	graphite	200 W	World's first nuclear reactor
LOPO	Los Alamos, N. Mexico, USA	May 1944	enriched (~15%) U, UO ₂ SO ₄ dissolved in water	H ₂ O	H ₂ O	beryllium oxide	1 W	First enriched uranium reactor (Homogeneous type)
CP-3	Argonne, Illinois, USA	May 1944	natural uranium rods	D ₂ O	D ₂ O	graphite	300 kW	First heavy water reactor
Clementine	Los Alamos, N. Mexico, USA	November 1946	²³⁹ Pu rods	—	Hg	natural uranium	25 kW	First fast reactor
BSR	Oak Ridge, Tennessee, USA	November 1950	enriched uranium	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	100 kW	First swimming pool reactor
EBR-1	NRTS, Arco Idaho, USA	December 1951	90% enriched uranium rods	—	NaK	natural U	100 kW	First breeder reactor and power prototype
EBWR	Argonne, Illinois, USA	December 1956	1.5% ²³⁵ U plates	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	5 MW	First boiling water reactor
GLEEP	Harwell, U.K.	August 1947	natural uranium bars	graphite	air	graphite	100 kW	First English reactor
BEPO	Harwell, U.K.	July 1948	natural uranium rods	graphite	air	graphite	6 MW	—
DIMPLE	Harwell, U.K.	—	natural uranium	D ₂ O	D ₂ O	—	30 W	—
ZEPHYR	Harwell, U.K.	—	²³⁹ Pu	—	—	natural U	low	—
ZEEP	Chalk River, Canada	April 1945	natural uranium	D ₂ O	D ₂ O	—	—	First Canadian reactor
NRX	Chalk River, Canada	August 1947	natural uranium cylindrical rods	D ₂ O	D ₂ O	graphite	40 MW	High flux reactor
G-1	Marcoule, France	—	natural uranium	graphite	air	—	—	—
P-2	Saclay, France	—	natural uranium	D ₂ O	CO ₂	—	1500 kW	—

เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัยจะเน้นการวิจัยพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในสาขาต่างๆ การออกแบบและทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ การผลิตไอโซโทปรังสี (radioisotopes) และ วัตถุประสงค์ทางการแพทย์ ในสาขาเวชศาสตร์นิวเคลียร์ (nuclear medicine) เป็นต้น

2.) เครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตเชื้อเพลิง (breeder reactors) เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้สร้างขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนเฟอร์ไรล์ไอโซโทป ให้เป็นฟิชไซล์ไอโซโทป เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปฏิกิริยาการแปรธาตุหลังดักกลืนนิวตรอน ตามสมการ (3.6) และ (3.7) โดยมี ²³²Th และ ²³⁸U เป็นเฟอร์ไรล์ไอโซโทป เมื่อดักกลืนเทอร์มอลนิวตรอน จะสลายเป็นฟิชไซล์ไอโซโทป คือ ²³³U และ ²³⁹Pu ตามลำดับ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้คือตัวเปลี่ยน (converters)

3.) เครื่องปฏิกรณ์กำลัง (power reactor) หรือ เครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (nuclear power plants) เพื่อทดแทนโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากแก๊ส น้ำมันและถ่านหิน



รูปที่ 5-5 การจำแนกเครื่องปฏิกรณ์กำลัง

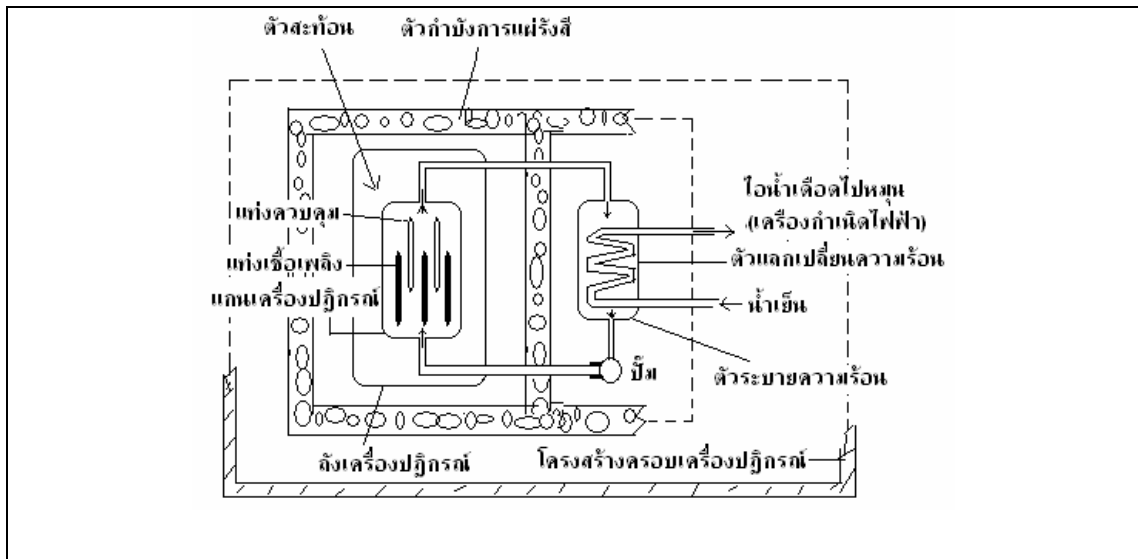
5.5 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

(Basic Components of Nuclear Reactors)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทุกแบบ จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน ที่คล้ายคลึงกัน คือมี

- แกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core)
- ตัวสะท้อน (reflector)
- ถังเครื่องปฏิกรณ์ (reactor vessel)
- ตัวกำบังรังสี (radiation shield)
- ตัวระบายความร้อน (coolant)
- โครงสร้างครอบเครื่องปฏิกรณ์ (containment)
- ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger)
- ส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วแต่ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

ส่วนประกอบพื้นฐานบางส่วนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้ดูจากรูปที่ 5-6 ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้นิวตรอนเร็วจะมีตัวปกปิด (blanket) เพิ่มเข้ามาระหว่างแกนและตัวสะท้อน



รูปที่ 5-6 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ที่นี้มาดูรายละเอียดบางประการของแต่ละส่วนบางชิ้นดังนี้

1.) แกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core)

บริเวณศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการแบ่งแยกนิวเคลียส ซึ่งส่งผลให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา เรียกบริเวณนี้ว่าแกนเครื่องปฏิกรณ์ ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็ว จะประกอบด้วยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel) ตัวระบายความร้อน (coolant) แกนควบคุม (control rods) และ วัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างของส่วนนี้ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้เทอร์มอลนิวตรอนจะมีตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน หรือ โมเดอเรเตอร์อยู่ด้วย เชื้อเพลิงในอุดมคติ (ideal fuel) จะมีสภาพนำความร้อนสูง มีจุดหลอมเหลวสูง มีความต้านทานต่อการถูกทำลายด้วยการแผ่รังสีสูง และ มีความเฉื่อยเชิงเคมี นอกจากนี้ควรง่ายต่อการขึ้นรูป และ ทนทานต่อการสึกกร่อน

ในการป้องกันชิ้นส่วนการแบ่งแยก (fission fragments) เข้าสู่ตัวระบายความร้อน หรือ โมเดอเรเตอร์ และ ป้องกันวัสดุที่แบ่งแยกตัวได้ไม่ให้ขึ้นสนิม ต้องครอบแท่งเชื้อเพลิง หรือ แผ่นเชื้อเพลิง ด้วยวัสดุป้องกันที่เรียกแคลดดิ้ง (cladding) หรือ แคนนิง (canning) ซึ่งแคลดดิ้งในอุดมคติจะมีสภาพต้านทานต่อการเป็นสนิมสูง และ ดูดกลืนนิวตรอนต่ำ ราคาถูก หาได้ง่าย นอกจากนี้ยังต้องมีสภาพทนทานเชิงกล มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น เซอร์โคเนียม (zirconium) เหล็กกันสนิม อลูมิเนียม แมกเนเซียม นิกเกิล และ วัสดุคล้ายคลึงอย่างอื่น แต่ที่นิยมมากคือ โลหะเจือ เซอร์โคเนียม (zirconium alloy) ซึ่งมักจะใช้ในเครื่องปฏิกรณ์กำลัง แบบใช้เทอร์มอลนิวตรอน

ความร้อนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว สามารถระบายออกไปได้ด้วยตัวระบายความร้อน โดยทำเป็นวงรอบของการไหลของ ของเหลว หรือ แก๊สที่เป็นตัวระบาย สมบัติของตัวระบาย ความร้อนคือมีความจุความร้อนสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ ดูดกลืนนิวตรอนต่ำ ถ่ายเทความร้อนได้ดี ใน เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็ว ตัวระบายความร้อนจะหน่วงความเร็วนิวตรอนได้น้อย มักใช้ โซเดียมเหลว หรือ ฮีเลียม ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน มักจะใช้น้ำ (H₂O) หรือน้ำมวลหนัก (D₂O) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือ ฮีเลียม

ในการลดความเร็วนิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว จะใช้มอดเรเตอร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน วัสดุที่ใช้จะมีเลขมวลต่ำ ภาคตัดขวางการกระเจิงสูงแต่ ภาคตัดขวางการดูดกลืนต่ำ สมบัติคล้ายตัวระบายความร้อน ซึ่งมักใช้น้ำมวลหนัก และ แกรไฟต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบผลิตเชื้อเพลิงมักใช้ลิเทียม-7(Lithium-7, ⁷Li)และเบอริลเลียม(beryllium) ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็วไม่มีมอดเรเตอร์ ดังนั้นต้องออกแบบวัสดุเหล่านี้ให้เหมาะสม

ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ยังมีต้นกำเนิดนิวตรอน(neutron source)ซึ่งต้องใช้เป็นตัวจุดชนวน ปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในแท่งเชื้อเพลิง และเพื่อให้การปฏิบัติงานเดินเครื่องปฏิกรณ์ปลอดภัยในการควบคุมระดับกำลัง เดินเครื่องหรือดับเครื่องได้ตามต้องการลด การผลิตสารพิษ(poisons) ดูแลการเผาไหม้เชื้อเพลิงรวมทั้งอุณหภูมิของแกนเชื้อเพลิงก็คือการ ควบคุมตัวประกอบควบคุม(k)จึงต้องมีแท่งควบคุม(control rods)ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ แท่ง ควบคุมจะเป็นวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้สูง เช่น โบรอน(boron) แคดเมียม(cadmium) ฮาฟเนียม (hafnium) หรืออยู่ในรูปโลหะเจือ(alloys)ของสารดังกล่าว เช่น ในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด (BWRs)จะใช้โบรอนในรูปผงโบรอนคาร์ไบด์(boron carbide, B₄C)บรรจุอัดอยู่ในเหล็กกันสนิม เป็นแท่งควบคุม เมื่อต้องการเพิ่มปฏิกิริยาลูกโซ่ก็ดึงแท่งควบคุมขึ้นจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ถ้า ต้องการลดก็ปล่อยแท่งควบคุมลง หรือต้องการดับเครื่องปฏิกรณ์ก็ปล่อยแท่งควบคุมลงจนสุด เพื่อดูดกลืนนิวตรอนไม่ให้เหลือไปทำปฏิกิริยากับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่น ๆ อีกที่ มีการนำมาใช้ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

2.) ตัวครอบคลุมหรือแบลนเกต(Blanket)

ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็วซึ่งมักมีขนาดกะทัดรัดจะมีนิวตรอนส่วนหนึ่งในแกน รั่วไหลออกมาจากระบบ เพื่อลดการรั่วไหลและใช้นิวตรอนที่รั่วไหลได้ต้องใช้วิธีล้อมรอบแกน เครื่องปฏิกรณ์เหล่านี้ด้วยเฟอร์ไรต์ไอโซโทป(²³²Th หรือ ²³⁸U) บริเวณที่ล้อมรอบแกนนี้เรียกตัว

3.) ตัวสะท้อน(Reflector)

เป็นวัสดุที่ไม่แบ่งแยกตัววางถัดออกมาจากตัวครอบคลุม (ถ้ามี) ล้อมรอบเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่สะท้อนนิวตรอนหลุดออกมาจากแกน (และตัวครอบคลุม) เครื่องปฏิกรณ์ เรียกว่าตัวสะท้อน ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็วจะใช้วัสดุที่มีเลขมวลสูง และมีภาคตัดขวางการดูดกลืนต่ำ ดังนั้นพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่ถูกสะท้อนกลับจากตัวสะท้อนจะไม่มี ความแตกต่างกันมากนัก ด้วยเหตุนี้จึงใช้ Ni , Cu และ Mo เป็นตัวสะท้อนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน วัสดุที่ใช้เป็นตัวหน่วงนิวตรอนได้ดีสามารถนำมาใช้เป็นตัวสะท้อนได้ เช่น ในเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำเบา(Light Water Reactors, LWRs)จะใช้น้ำ(H₂O)และเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำหนักที่มีความดัน (Pressured Heavy Waters, PHWRs)จะใช้น้ำมวลหนัก(D₂O)เป็นตัวสะท้อนไปในตัว ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ที่ระบายความร้อนด้วยแก๊สมักใช้แกรไฟต์ Be หรือ BeO

4.) ถังเครื่องปฏิกรณ์(Reactor Vessel)

อุปกรณ์ที่ประกอบกันเป็นเครื่องปฏิกรณ์จะอยู่ภายในถังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งอาจเรียกถัง ความดัน(pressure vessel) ถังเครื่องปฏิกรณ์มักทำด้วยเหล็กกันสนิม กรณีเครื่องปฏิกรณ์แบบ น้ำมีความดัน(PWRs)ถังนี้จะถูกออกแบบให้ใช้งานกับความดันประมาณ 15.5 MPa (Pa = N/m²) ผันของถังที่จะทนความดันดังกล่าวนี้ได้ต้องหนาหลายนิ้ว ส่วนความดันในเครื่องปฏิกรณ์แบบ น้ำเดือด(BWRs)มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมีความดัน ดังนั้นความหนาของ ถังเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำเดือดจึงบางกว่า

5.) ตัวกำบังการแผ่รังสี(Radiation Shield)

เพื่อให้ให้นักวิทยาศาสตร์และบุคคลที่ทำงานรอบ ๆ เครื่องปฏิกรณ์มีความปลอดภัยรวมทั้ง เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ให้เกิดความเสียหายจากการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ โดยเฉพาะที่เกิดจากนิวตรอนและรังสีแกมมา ดังนั้นจึงมีการสร้างกำแพงคอนกรีตที่หนา เพียงพอครอบถังเครื่องปฏิกรณ์ บางกรณีอาจมีการสร้างให้มีผนังหลายชั้นเพื่อให้มีชั้นของธาตุ หนักและธาตุเบา เช่นมีคอนกรีตและโพลีเอทิลีน(polyethylene)หรือคอนกรีตและน้ำ ตัวกำบัง การแผ่รังสีนี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าตัวกำบังชีวภาพ(biological shield)

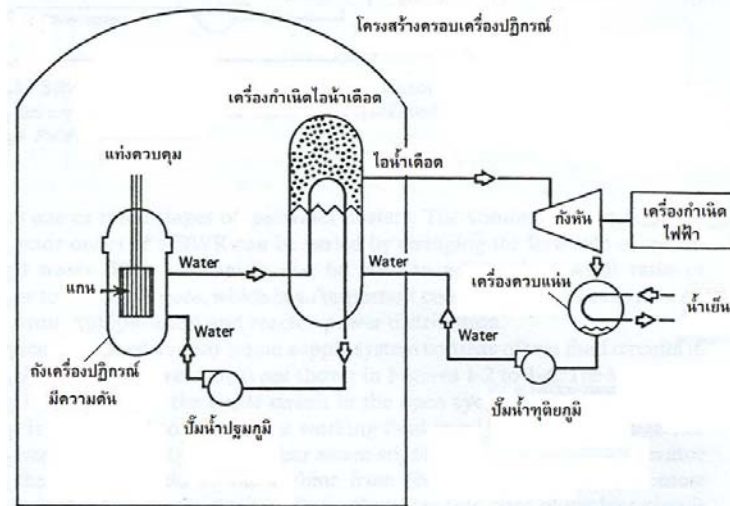
6.) โครงสร้างครอบเครื่องปฏิกรณ์(Containment)

ชิ้นส่วนทุกอย่างที่ประกอบกันเป็นเครื่องปฏิกรณ์รวมทั้งส่วนอื่นที่เกี่ยวข้องจะอยู่ภายใน โครงสร้างครอบเครื่องปฏิกรณ์ กรณีใหญ่ขึ้นมาคือเครื่องปฏิกรณ์กำลังเพื่อผลิตไฟฟ้าจะถูกสร้าง ไว้ภายในอาคารเครื่องปฏิกรณ์(reactor building)ซึ่งไม่ให้มีอากาศรั่วไหลเข้าออก มีความกด อากาศต่ำกว่าภายนอกเล็กน้อย ดังนั้นจึงไม่มีอากาศรั่วไหลออกไปจากอาคารยกเว้นช่องระบาย

7.) วงรอบของตัวทำความเย็นและตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

(Coolant Loops and Heat Exchangers)

ความร้อนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์จะถูกระบายออกไปด้วยตัวทำความเย็น โดยอาศัยหลักการนำและการพาความร้อนไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วตัวทำความเย็นนี้จะหมุนวนกลับเข้ามายังแกนเครื่องปฏิกรณ์เรียกว่าวงรอบปฐมภูมิ(primary loop) โดยตัวทำความเย็นนี้จะมีกัมมันตรังสีสูงจะสูญเสียความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านให้กับของเหลวซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำในวงรอบทุติยภูมิ(secondary loop)โดยของเหลวทั้งสองไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงหรือผสมกัน ดังนั้นจึงไม่มีกัมมันตรังสีที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปะปนไปกับน้ำในวงรอบทุติยภูมิเนื่องจากไม่ได้มีการผสมกันดังกล่าว ในเครื่องปฏิกรณ์กำลังอุณหภูมิของน้ำในวงรอบทุติยภูมิจะสูงถึงขนาดเป็นไอน้ำเดือดซึ่งนำไปหมุนกังหันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(generator)ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบวงรอบเพื่อการใช้งานไปใช้ ให้ดูตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมีความดัน(PWR)ในรูปที่ 5-7 ซึ่งแสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5-7 โครงแบบพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมีความดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ส่วนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์(ปรมาณู)เพื่อการวิจัย วงรอบทุติยภูมิของการระบายความร้อนมักจะเปิดสู่ภายนอก ดังนั้นความร้อนที่เกิดภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์จะถูกถ่ายเทความร้อนโดยผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสู่วงรอบทุติยภูมิซึ่งเปิดสู่ภายนอก โดยอาจให้ความร้อน

5.6 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย(Thai Research Reactor)

ประเทศไทยเริ่มมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยอยู่ในสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ(พ.ป.ส.) ตั้งอยู่ถนนวิภาวดีรังสิต ติดกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร โดยเริ่มเดินเครื่องเข้าสู่ภาวะวิกฤตเป็นครั้งแรกเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2505 โดยมีชื่อเป็นทางการว่า “เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1” ต่อมาเมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ได้มีการปรับปรุงโดยมีการเปลี่ยนแปลงแกนเครื่องปฏิกรณ์ใหม่มีการตั้งชื่อใหม่เป็น “เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1” (Thai Research Reactor-1/ Modification 1)ชื่อย่อว่า ปปว-1/1 ถือเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ปัจจุบันมีการเปลี่ยนชื่อสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติเป็นสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

เครื่องปฏิกรณ์ ฯ ปปว-1/1 ตั้งขึ้นมาเพื่อใช้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้กับหน่วยงานต่าง ๆ หลักการทำงานเป็นระบบที่ประกอบขึ้นเพื่อผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชันและมีการควบคุมปฏิกิริยานี้ จึงเป็นที่มาของชื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ส่วนประกอบหลักของ ปปว-1/1 เหมือนที่กล่าวมาในหัวข้อ 5.5 แต่มีลักษณะเฉพาะที่จะกล่าวพอเป็นสังเขปดังต่อไปนี้(รายละเอียดต้องไปดูที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ)

ลักษณะของ ปปว-1/1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์วิจัยมีกำลังสม่ำเสมอ(steady state)ขนาด 2 MW(ความร้อน) สามารถทำงานแบบทวิกำลัง(pulsing)ได้ถึงประมาณ 2,000 MW ในระยะสั้น ๆ ประมาณ 10.5 ms ผู้สร้างคือบริษัท General Atomics ประเทศสหรัฐอเมริกา(ใช้ชื่อทางการค้าว่า TRIGA Mark III) มีบ่อเครื่องปฏิกรณ์(reactor pool)อยู่ในอาคารปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย มีท่อของระบบระบายความร้อนผิงทะลุผ่านด้านข้างของบ่อ โดยผนังบ่อเป็นคอนกรีตความหนาแน่นสูง ส่วนบนสุดของบ่อหนา 1.5 ฟุต ชั้นล่างสุดจะหนามากที่สุดคือหนา 4.5 ฟุต ขนาดของบ่อกว้าง 3.5 เมตร x ยาว 12 เมตร x ลึก 8.5 เมตร จุน้ำได้ประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร บนปากบ่อมีสะพาน(reactor bridge)ที่ขับเคลื่อนได้

มีห้องทดลองวิทยาศาสตร์เพื่อทดลองโดยอาศัยนิวตรอน มีอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลองของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร

ลักษณะแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นรูปหกเหลี่ยม(hexagonal array) มีการจัดเชื้อเพลิงบรรจุในถังอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกในลักษณะตั้งตรง ส่วนบนและส่วนล่างของแท่งเชื้อเพลิงเป็นตัวสะท้อนแกรไฟต์(graphite reflector) แกนเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบทั้งหมดจะอยู่ในน้ำ

แท่งเชื้อเพลิง(fuel element)ยูเรเนียมมีเนื้อเชื้อเพลิงเป็น U-ZrH (Uranium-Zirconium hydride) คิดเป็นยูเรเนียม-235 ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะไม่เกินร้อยละ 20 มีมวลประมาณ 5695.2 กรัม

แท่งควบคุม(control rods)มีลักษณะและขนาดคล้ายแท่งเชื้อเพลิงแต่ส่วนบนเป็น B₄C (boron carbide) ซึ่งใช้เป็นตัวดูดจับนิวตรอนและส่วนล่างจะเป็นเนื้อเชื้อเพลิง แท่งควบคุมจะมีจำนวน 4 แท่ง และมีแท่งควบคุมแบบพิเศษ(transient)ซึ่งไม่มีเนื้อเชื้อเพลิงอีก 1 แท่ง

มีการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์โดยมีแท่งเชื้อเพลิงและแท่งควบคุมปะปนกันเป็นรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ตามต้องการโดยมีสารหน่วงความเร็วนิวตรอน(moderator) เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้เป็น U-ZrH ดังนั้นนิวตรอนความเร็วสูงที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวในเนื้อเชื้อเพลิงจะถูกหน่วงความเร็วตั้งแต่เริ่มเกิด บางครั้งจึงเรียกแท่งเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่าแท่งเชื้อเพลิงมอดเรเตอร์(fuel – moderator element) ส่วนสารหน่วงความเร็วถัดออกมาคือน้ำ(H₂O) โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นทั้งมอดเรเตอร์และตัวระบายความร้อน(coolant)

ระบบระบายความร้อนของ ปปว-1/1 เป็นแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยใช้หอระบายความร้อน(cooling tower)

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น หัววัดนิวตรอน(neutron detectors)มีลักษณะเป็นถังการแบ่งแยกตัว(fission chambers)ติดตั้งในแกนเครื่องปฏิกรณ์ และยังมีท่ออาบรังสี(irradiation tubes)ในแกนเครื่องปฏิกรณ์และบริเวณรอบแกนเครื่องปฏิกรณ์อีกจำนวนมาก

ต้นกำเนิดนิวตรอน(neutron source)ซึ่งจะเป็นตัวจุดชนวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ต้นกำเนิดนิวตรอนของ ปปว-1/1 เป็นอเมอริเซียม เบอริลเลียม(Americium Beryllium, Am – Be) มีความแรงรังสี 3 Ci มีครึ่งชีวิต 458 ปี ต้นกำเนิดนิวตรอนนี้เป็นตัวจุดชนวนปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวในเนื้อเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป ต้นกำเนิดนิวตรอนนี้ติดตั้งอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ หลังเกิดปฏิกิริยาในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ปปว-1/1 ปริมาณความหนาแน่นของนิวตรอนจะมีค่ามากที่สุดตรงใจกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Central Thimble, CT) มีค่าประมาณ 3×10^3 neutrons/(cm² s) ที่กำลัง 1.2 MW

ระบบควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ปปว-1/1 ในการเดินเครื่องนั้นถ้าเกิดกรณีฉุกเฉินที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อแกนเครื่องปฏิกรณ์ มีระบบอัตโนมัติให้แท่งควบคุมตกลงในแกนเครื่องปฏิกรณ์เพื่อดูดกลืนนิวตรอนทำให้ลดปฏิกิริยาและในที่สุดหยุดการเดินเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจะเกิดขึ้นกรณีฉุกเฉินแท่งเชื้อเพลิงและกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เกินกว่าที่กำหนดรวมทั้งเมื่อกระแสไฟฟ้าของระบบควบคุมขัดข้อง

สำหรับประโยชน์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ปปว-1/1 พอสรุปได้ดังนี้

1.) การวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์หรือการกักมันต์ด้วยนิวตรอน(Neutron

Activation Analysis, NAA) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่เกิด
ภายหลังการอาบนิวตรอน

- 2.) การผลิตไอโซโทปรังสี(radioisotope)เพื่อใช้ในการแพทย์ การวินิจฉัยและบำบัดโรค
- 3.) การศึกษาด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์(nuclear physics) วิศวกรรมเครื่องปฏิกรณ์(reactor engineering) และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน(neutron radiography)
- 4.) การฝึกอบรมและเป็นแหล่งศึกษาของนิสิต นักศึกษาและผู้สนใจในงานที่เกี่ยวข้อง

5.7 ประสิทธิภาพ(Efficiency)

การคำนวณหาประสิทธิภาพโดยทั่วไปพิจารณาจากอัตราส่วนของสิ่งที่ได้ออกมาต่อสิ่งที่ใส่เข้าไป กรณีของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเราเน้นลงไปว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์กำลังเพื่อผลิตไฟฟ้า วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพก็เหมือนโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์หรือฟอสซิล(fossil fuel plant)คือพิจารณาจากอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ได้ออกมาต่อพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นหรือเมื่อเราเปลี่ยนเป็นกำลังทั้งคู่จะได้

ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าหรือประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$= \text{กำลังไฟฟ้าที่ได้} / \text{กำลังความร้อนที่เกิดขึ้น} = W_E / W_{Th} \quad (5.25)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดอาจพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ในอุดมคติ(ideal thermodynamic efficiency)ซึ่งหาจากอุณหภูมิของไอน้ำเดือดในกังหัน(T_1) และอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์(condensar)หรืออุณหภูมิที่สูญเสียไป(T_2) ดังนั้นประสิทธิภาพแบบเทอร์โมไดนามิกส์ในอุดมคติ = $(T_1 - T_2) / T_1 = 1 - (T_2 - T_1)$ (5.26)

นั่นคือประสิทธิภาพแบบนี้จะสูงเมื่อ T_1 มีค่ามาก T_2 มีค่าน้อย โดยทั่วไปประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มักจะต่ำกว่าของโรงไฟฟ้าที่ใช้ฟอสซิลเนื่องจากการป้องกันไม่ให้แกนเครื่องปฏิกรณ์หลอมตัวเนื่องจากความร้อนสูง

ตัวอย่างที่ 5.3

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องหนึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ 300 MW จะต้องเผาไหม้หรือใช้ ^{235}U เท่าไรต่อวัน เครื่องปฏิกรณ์นี้มีประสิทธิภาพ 30 % ถ้าพลังงานที่เกิดขึ้นต่อการแบ่งแยกตัวมีค่า 200 MW / fission

วิธีทำ

จากสมการ(5.25)ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ หรือ

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = W_E / W_{Th}$$

$W_E = 300 \text{ MW}$ และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน = 30 % ดังนั้น

$$W_{Th} = (300 \times 100 / 30) \text{ MW} = 10^3 \text{ MW}$$

นั่นคือกำลังความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ต้องผลิตขึ้นมาจากการแบ่งแยกตัวมีค่า = 10^3 MW และตัวอย่างที่ 3.2 เราได้มาแล้วว่าเมื่อพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา 200 MeV / fission จะได้ว่า เครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่ P MW จะมีอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (^{235}U) = $P \times 1.05 \text{ g / d}$ กรณีตัวอย่างนี้ $P = 10^3$ ดังนั้นจะได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องที่ 10^3 MW มีอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (^{235}U) = $10^3 \times 1.05 \text{ g / d} = 1.05 \text{ kg / d}$ นั่นคือเครื่องปฏิกรณ์กำลังที่ผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 30 % เครื่องนี้ จะผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาให้ได้ 300 MW จะต้องใช้ ^{235}U จำนวน 1.05 กิโลกรัมต่อวัน

ค่าเผาไหม้จำเพาะและเศษส่วนการเผาไหม้

(Specific burnup and fractional burnup)

พลังงานที่ปลดปล่อยจากการแบ่งแยกตัวต่อมวลเชื้อเพลิงเรียกการเผาไหม้จำเพาะของเชื้อเพลิงจึงมักเขียนเป็นเมกะวัตต์ต่อเมตริกตัน หรือ เมกะวัตต์ต่อกิโลกรัม (MWd/t or MWd/kg) ดังนั้นจากตัวอย่างที่ 5.3 การแบ่งแยกตัวของเชื้อเพลิง 1.05 g ของ ^{235}U จะให้ 1 MWd ดังนั้นคิดเป็นการเผาไหม้สูงสุดตามทฤษฎีมีค่า

$$(1 \text{ MWd} / 1.05 \text{ g}) \times (10^6 \text{ g} / \text{t}) = 950 \text{ MWd} / \text{t} = 950 \text{ MWd} / \text{kg}$$

ส่วนการทำงานของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์(nuclear fuel performance) มักอธิบายในพจน์ขอเศษส่วนการเผาไหม้ซึ่งมักคิดเป็น(%)และใช้สัญลักษณ์ ซึ่งนิยามว่า β คือ อัตราส่วนของจำนวนการแบ่งแยกตัวในมวลที่กำหนดให้ของเชื้อเพลิงต่อจำนวนอะตอมหนักทั้งหมดตอนเริ่มต้นในเชื้อเพลิง ดังนั้น

$$\beta = \text{จำนวนอะตอมของการแบ่งแยกตัว} / \text{จำนวนอะตอมเริ่มต้นของธาตุหนัก} \quad (5.27)$$

ดังนั้นจากตัวอย่างที่กล่าวมาการแบ่งแยกตัวของอะตอมเชื้อเพลิงทั้งหมด($\beta = 1$)ให้ 950,000 MWd / t และการเผาไหม้จำเพาะ ณ เวลาใด ๆ จะเป็นสัดส่วนกับ β ที่จะเกิดกับ ^{235}U นั่นคือจะได้ค่า การเผาไหม้จำเพาะ = 950,000 β MWd / t

ค่าสูงสุดของการเผาไหม้จำเพาะที่จะหาได้จากเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ใด ๆ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างซึ่งไม่ขอกล่าวในที่นี้

สรุปเนื้อหาในบทที่ 5

1. ตัวประกอบที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาลูกโซ่คือตัวประกอบการคูณ k ซึ่งนิยามว่า

$$k = \text{จำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นที่ } (n+1) / \text{จำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นที่ } n$$

$$k > 1 \quad \text{อยู่ในภาวะเหนือวิกฤต} \quad (\text{supercritical})$$

$$k = 1 \quad \text{อยู่ในภาวะวิกฤต} \quad (\text{critical})$$

$$k < 1 \quad \text{อยู่ในภาวะต่ำกว่าวิกฤต} \quad (\text{subcritical})$$
2. ในทางปฏิบัติค่า k นี้อาจนิยามในพจน์ของความสัมพันธ์สมดุลของนิวตรอน โดย

$$k = \text{อัตราการผลิตนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์} / \text{อัตราการสูญเสียจากการดูดกลืนและถูกจับในเครื่องปฏิกรณ์}$$

$$k = P(t) / L(t)$$
3. อายุใช้งาน (lifetime) ℓ ของนิวตรอนคือ $\ell = n(t) / L(t)$ เมื่อ $n(t)$ คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ ณ เวลา t
4. จำนวนนิวตรอน ณ เวลาผ่านไป t ใดๆได้ โดยสมมติว่าเริ่มต้นมีจำนวนนิวตรอน n_0 ในเครื่องปฏิกรณ์ ณ เวลา $t = 0$ จะได้ $n(t) = n_0 e^{(k-1)t/\ell}$
5. ϵ คือตัวประกอบการแบ่งแยกตัวที่เกิดจากนิวตรอนเร็ว หรือ

$$\epsilon = \text{จำนวนนิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวทั้งหมด} / \text{จำนวนนิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวด้วยเทอร์มอลนิวตรอน}$$
6. ระบบขนาดอนันต์เทอร์มอลนิวตรอนซึ่งถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของยูเรเนียมแล้วเกิดนิวตรอนเร็วเฉลี่ย η ตัว จำนวนนิวตรอนที่ถูกทำให้ช้าลงต่อเทอร์มอลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนในยูเรเนียม จึงมักจะมีค่ามากกว่า η ให้ค่าออกมาเป็น $\eta \epsilon$
7. p เป็นความน่าจะเป็นที่รอดพ้นจากเรโซแนนซ์ (resonance escape probability) หรือจำนวนนิวตรอนที่เหลือเพื่อถูกทำให้เป็นเทอร์มอลนิวตรอน(thermalization) $= n \epsilon p$
8. f คือตัวประกอบการใช้งานของเทอร์มอลนิวตรอน (thermal utilization factor) โดยที่

$$f = \frac{\text{จำนวนเทอร์มอลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนโดยนิวคลีไอเชื้อเพลิงยูเรเนียม}}{\text{จำนวนเทอร์มอลนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนในระบบ}}$$
9. เริ่มจากการจับเทอร์มอลนิวตรอนตัวหนึ่งในยูเรเนียม จนกระทั่งถึงจำนวนนิวตรอนที่ถูกจับในชั่วรุ่นถัดไปจะมีค่าเท่ากับ $n \epsilon p f$ เราใช้สัญญลักษณ์แทนด้วย k_∞ เป็นค่าคงที่การคูณของตัวกลางแบบอนันต์ โดย $k_\infty = \eta \epsilon p f$ คือสูตรของสี่ตัวประกอบ (four factor formula) ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนที่มีเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ

10. ให้ P_f = ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนเร็วเร็วไหล ขณะถูกทำให้ช้า
 P_t = ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนช้าเร็วไหล ขณะเกิดการแพร่
 สำหรับระบบที่มีขนาดจำกัด จะได้ตัวประกอบการคูณ $k = n \in pf P_f P_t = k_{\infty} P_f P_t$
11. ธาตุเสถียรต่าง ๆ ซึ่งเมื่อจับนิวตรอนแล้วจะเกิดสถานะไม่เสถียรหรือกลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี
 กรณีไม่เกิดการแบ่งแยกตัวตามสมการ ${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow {}_Z^{A+1}X^*$ เรียกว่าการก่อกัมมันต์
 ด้วยนิวตรอน (neutron activation)
12. เมื่อนำธาตุที่อาบเทอร์มอลนิวตรอนเป็นเวลา T จะมีความแรง $A(T) = \sum \phi(1 - e^{-\lambda T})$ แล้ว
 เอาออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์หรือออกจากแหล่งกำเนิดที่ใช้อาบแล้วมาปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา t
 จะได้ความแรง $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ เมื่อ $A_0 = A(T)$
13. เครื่องปฏิกรณ์ที่จำแนกตามโครงสร้างแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ
1. เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัย
 2. เครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตเชื้อเพลิง (breeder reactors)
 3. เครื่องปฏิกรณ์กำลัง
14. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทุกแบบ จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน ที่คล้ายคลึงกัน คือมี
- แกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core)
 - ตัวสะท้อน (reflector)
 - ถังเครื่องปฏิกรณ์ (reactor vessel)
 - ตัวกำบังรังสี (radiation shield)
 - ตัวระบายความร้อน (coolant)
 - โครงสร้างครอบเครื่องปฏิกรณ์ (containment)
 - ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger)
 - ส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วแต่ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

แบบฝึกหัดบทที่ 5

- 5.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนเครื่องหนึ่งใช้เชื้อเพลิงที่เป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ (uranium dioxide, UO_2) 98 เมตริกตัน(metric tons, t) ที่ได้รับการเสริมสมรรถนะให้ ^{235}U 3 % เครื่องปฏิกรณ์เครื่องนี้เดินเครื่องที่ระดับกำลัง 3,300 MW เป็นเวลา 750 วันก่อนที่จะหยุดเดินเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิง ระยะเวลาหยุดนั้นจงหาค่าการเผาไหม้จำเพาะ(specific burnup)เมื่อน้ำหนักเชิงอะตอมของ 3 % ยูเรเนียมมีค่าประมาณ 238
- 5.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนเครื่องหนึ่งมีเชื้อเพลิง ^{235}U จากสมการ(5.11)
- $$k_\infty = \eta \epsilon p f$$
- เมื่อทั้ง ϵ และ p มีค่าใกล้ 1 จะได้ $k_\infty = \eta f$ ให้คำนวณหา k_∞ กรณี ยูเรเนียมได้รับการเสริมสมรรถนะให้ ^{235}U 1 % 2.5 % 5 % และ 100 %
- 5.3 จากโจทย์ในข้อ 5.1 จงหาเศษส่วนการเผาไหม้ (β)
- 5.4 ไอโซโทปกัมมันตรังสี(radioactive isotope) Y เกิดขึ้นด้วยอัตรา R atoms/s ซึ่งเกิดจากการยิงนิวตรอน n ไปยังไอโซโทป X ตามปฏิกิริยา $X(n, \gamma)$ ถ้าเวลาที่ใช้ยิงนิวตรอนมีค่าเท่ากับครึ่งชีวิตของ Y ให้หาเศษส่วนของความแรงอิ่มตัว(saturation activity)ของ Y ที่จะเกิดขึ้น สมมุติว่าตอนเริ่มต้นไม่มี Y
- 5.5 โคบอลต์ธรรมชาติ(natural cobalt) ^{59}Co มีความอุดม(percent abundance) 100 % จะเกิดปฏิกิริยากับเทอร์มอลนิวตรอน(n, γ) โดยมีภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยานี้ $\sigma_{\text{act}} = 20 \text{ b}$ และมีครึ่งชีวิตของผลที่เกิด (product half-life) ^{60}Co 5.3 ปี จะมีความแรงสูงสุดเท่าไรเมื่ออาบฟลักซ์เทอร์มอลนิวตรอน $\phi = 4 \times 10^{12} \text{ neutrons}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
- 5.6 ให้หาความแรงของยูเรเนียมธรรมชาติ 1 g ถ้ายูเรเนียมถูกเสริมสมรรถนะให้ ^{235}U ให้หาความหนาแน่นอะตอมของ ^{235}U เมื่อกำหนดให้ยูเรเนียมมีความหนาแน่น $19.0 \text{ g}/\text{cm}^3$
- 5.7 จากโจทย์ในข้อ 5.5 จะต้องอาบฟลักซ์เทอร์มอลนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ดังกล่าว นานเท่าใดเพื่อให้มีความแรงเป็น 25% ของความแรงสูงสุด
- 5.8 ให้แสดงว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในชั่วรุ่นที่ n ของปฏิกิริยาลูกโซ่การแบ่งแยกตัว โดยเริ่มต้นจากการแบ่งแยกตัวครั้งเดียว (a fission chain reaction) มีค่าเป็น $E_n = k^n E_R$ เมื่อ k คือตัวประกอบการคูณ และ E_R คือ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาต่อการแบ่งแยกตัว และจงแสดงว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาทั้งหมดจนถึงชั่วรุ่นที่ n (รวมถึงชั่วรุ่นที่ n ด้วย) มีค่า $E_n = (k^{n+1} - 1) E_R / (k - 1)$
- 5.9 เรเดียม-226 (^{226}Ra) มีครึ่งชีวิต 1620 ปี ($t_{1/2} = 1620 \text{ y}$) จงหาความแรงของ เรเดียม-226 ปริมาณ 1 g ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$
- 5.10 พลูโตเนียม-239 สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา(α -decay) โดยมีครึ่งชีวิต 2400 ปี ให้คำนวณ

- หาความแรงของพลูโตเนียมไดออกไซด์(plutonium dioxide , $^{239}\text{PuO}_2$) จำนวน 1 g
- 5.11 ไม้ชิ้นหนึ่งมีมวล 50 g เมื่อนำมาวัดความแรงของคาร์บอน-14 ที่มีอยู่ได้ค่า 320 dpm (disintegrations/minute) เมื่อต้นไม้ที่มีชีวิตมี 12 dp(mg) จงหาอายุของไม้ชิ้นนี้ เมื่อกำหนดให้ ครึ่งชีวิตของคาร์บอน -14 มีค่า $t_{1/2} = 5730$ ปี และมีค่าคงที่การสลาย $\lambda = 0.693 / t_{1/2}$
- 5.12 ทริเทียม(tritium, ^3_1H) จะสลายตัวโดยปล่อยอนุภาค β^- ออกมา โดยมีครึ่งชีวิต 12.26 ปี น้ำหนักอะตอมของ ^3_1H มีค่า 3.016 u
- ก. H^3 สลายตัวเป็นนิวเคลียสอะไร
- ข. มวลเป็นกรัมของ 1 mCi ของทริเทียมมีค่าเท่าไร
- 5.13 ในช่วงหนึ่งปีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์โรงหนึ่งมีกำลังการผลิต 1075 MWe/d ในช่วงหนึ่งปีนั้นผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาทั้งหมด 255,000 MWd โดยมีช่วงหยุดทำการเดินเครื่องนาน 28 วัน เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิง อีก 45 วันเพื่อซ่อมแซมเครื่องปฏิกรณ์และ 18 วันเพื่อซ่อมส่วนอื่น ๆ ของโรงไฟฟ้า จงหา
- ก. ตัวประกอบความจุการผลิตของโรงไฟฟ้า(plant capacity factor)
- ข. สัดส่วนการใช้งานของโรงไฟฟ้า(plant availability)ในปีนั้น
- 5.14 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอนเครื่องหนึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 30 % ให้กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า 200 MWe จะต้องใช้ ^{235}U ไปเท่าใด เมื่อใช้เดินเครื่องเป็นเวลา 30 วัน