บทที่ 7
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
(NUCLEAR REACTOR)

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. อธิบาย ประเภทและแบบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อนำมาใช้ได้อย่างถูกต้อง
2. ทราบถึงส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการทำงานได้
3. นำสูตรโฟร์แฟกเตอร์มาใช้ในการคำนวณได้
4. คำนวณหาค่าแฟกเตอร์ตัวคูณได้
5. เขียนวัฏจักรของเทอร์มาลนิวตรอนได้

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทำงานได้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว เมื่อนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของธาตุที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวแล้วเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวต่อไปได้เรื่อยๆ เรียกปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นในระบบต้องมีปริมาณมากพอกับจำนวนนิวตรอนที่หายไปจากระบบ เครื่องปฏิกรณ์จึงทำงานต่อไปได้เรื่อยๆ ถ้ามีการควบคุมให้จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่หายไป เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นโดยการแบ่งแยกตัว เป็นผลจากการชนระหว่างนิวตรอนกับเชื้อเพลิง ส่วนจำนวนนิวตรอนที่หายไปจากระบบเป็นผลจากการดูดกลืนนิวตรอนและการรั่วออกไปจากระบบ ปัญหาหนึ่งในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ คือการคำนวณขนาด และส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับตัวลดความเร็วเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต การคำนวณเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะใช้การคำนวณกลุ่มเดียว (one group calculation) โดยพิจารณานิวตรอนเพียงพลังงานเดียว เช่นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็ว ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัว จะคิดว่า นิวตรอนที่เกิด, ถูกดูดกลืน และการรั่ว เกิดขึ้นกับนิวตรอนเร็วเพียงพลังงานเดียว

7.1 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ได้ถูกดัดแปลงตามจุดประสงค์ของการใช้งาน ได้แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

7.1.1 เครื่องปฏิกรณ์เพื่อการวิจัย (Research reactor)

ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ที่มุ่งใช้ประโยชน์จากนิวตรอนฟลักซ์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงถูกระบายให้กับอากาศ

7.1.2 เครื่องปฏิกรณ์กำลัง (Power reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ มุ่งใช้ประโยชน์จากความร้อนที่เกิดขึ้น โดยการนำพลังงานความร้อนเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้จึงมีกำลังมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

7.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง (Breeder reactor)

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนธาตุเฟอร์ไทล์ให้เป็นธาตุฟิซไซล์

แบบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

(1) เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มาล (Thermal reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะใช้เทอร์มาลนิวตรอนจับเชื้อเพลิง แล้วเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว จึงเรียก เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มาล

(2) เครื่องปฏิกรณ์แบบอินเทอร์มีเดียท (Intermediate reactor)

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนจนถึงประมาณ 1000 อิเล็กตรอนโวลต์ เข้าทำปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการแบ่งแยกตัว

(3) เครื่องปฏิกรณ์แบบที่ใช้นิวตรอนเร็วเข้าทำปฏิกิริยา (Fast reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะใช้นิวตรอนเร็วเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง เพื่อใช้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว แต่ละแบบยังได้เรียกชื่อต่างกันไป เช่น

(1) เครื่องปฏิกรณ์เอกพันธ์ (Homogeneous reactor)

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมเชื้อเพลิงกับตัวลดความเร็วจนเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) เครื่องปฏิกรณ์วิวิธพันธ์ (Heterogeneous reactor)

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่แยกธาตุที่เป็นเชื้อเพลิงและตัวลดความเร็วออกจากกัน

ลักษณะทางเรขาคณิตของเครื่องปฏิกรณ์ก็มีส่วนในการพิจารณาจำนวนนิวตรอนในระบบจึงได้แบ่งลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ไว้ดังนี้

(1) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดจำกัด

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่มีรูปทรงเรขาคณิต นิวตรอนจำนวนหนึ่งจะหายไปจากระบบโดยการรั่ว หลังจากการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวแล้ว นิวตรอนเข้าชนกับตัวลดความเร็ว และกระเจิง นิวตรอนบางตัวในเครื่องปฏิกรณ์จึงอาจหายไปจากระบบ เรียกว่านิวตรอนหายไปโดยการรั่ว (leakage) เป็นผลให้นิวตรอนที่เหลืออยู่ในระบบเพื่อทำปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวมีจำนวนลดน้อยลงไป

(2) เครื่องปฏิกรณ์ขนาดอนันต์ (Infinite reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้น นิวตรอนจึงไม่สามารถหนีหรือเล็ดลอดออกไปจากระบบได้ขณะที่เข้าชนกับตัวลดความเร็วแล้วกระเจิง ในการคำนวณ จึงกำหนดให้การรั่วเป็นศูนย์

นอกจากนี้ ฟลักซ์นิวตรอนบริเวณแกนของเครื่องปฏิกรณ์ ยังมีผลมาจากการกำหนดส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย จึงได้เรียกชื่อเครื่องปฏิกรณ์ต่างกันดังนี้

(1) เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่มีตัวสะท้อนนิวตรอน (Bare reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ประกอบด้วย เชื้อเพลิง ตัวลดความเร็ว เป็นเนื้อเดียวกัน มีขอบเขตเพียงแห่งเดียว ไม่มีตัวสะท้อนนิวตรอน เรียก แบร์รีแอคเตอร์

(2) เครื่องปฏิกรณ์แบบที่มีตัวสะท้อนนิวตรอน (Reflected reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ นอกจากจะมีเชื้อเพลิงแล้ว รอบนอกแกนของเครื่องปฏิกรณ์ยังล้อมรอบด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน เป็นผลให้นิวตรอนบางตัวสะท้อนกลับมายังแกนของเครื่องปฏิกรณ์ได้อีก

7.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

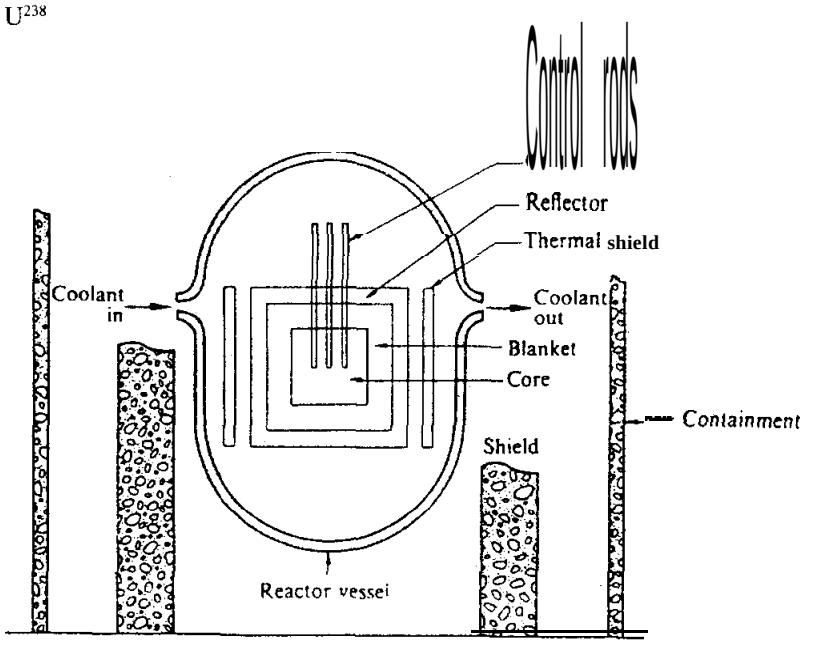
(Components of nuclear reactors)

ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์อาจอธิบายได้ตามรูป

(1) แกน

(Core)

เป็นส่วนที่อยู่กึ่งกลางของเครื่องปฏิกรณ์ ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มาล ประกอบด้วย เชื้อเพลิง (fuel) ตัวลดความเร็ว (moderator) และตัวระบายความร้อน (coolant) เชื้อเพลิงประกอบด้วยไอโซโทปที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัว (fissile isotope) เครื่องปฏิกรณ์รุ่นใหม่ที่เป็นเทอร์มาลใช้เชื้อเพลิงที่มียูเรเนียมเพิ่มปริมาณเพียง 2-3 เปอร์เซ็นต์ ของ U^{235} เท่านั้น เชื้อเพลิงส่วนมากจึงเป็น U^{238}



รูปที่ 7.1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ รวมทั้งเครื่องกำบังรังสี และสิ่งที่ใช้บรรจุ

(2) ตัวลดความเร็ว

(Moderator)

เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการลดความเร็วของนิวตรอน เพื่อให้ความเร็วลดลงจากนิวตรอนพลังงานสูง จนเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานเทอร์มาล นิวคลีไอที่มีเลขมวลต่ำ จะเป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอนได้ดี เช่น น้ำ, น้ำหนัก กราฟไฟท์ หรือคาร์บอนธรรมดา, เบอร์ริลเลี่ยม และ เบอร์ริลเลี่ยมออกไซด์ (BeO = White ceramic material) ก็มักใช้เป็นตัวลดความเร็ว

เช่นกัน แต่ราคาแพงมาก

(3) ตัวระบายความร้อน

(Coolant)

ใช้ในการนำความร้อนจากแกน และส่วนอื่นของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความร้อนเกิดขึ้นออกมาภายนอก ในเทอร์มาลรีแอคเตอร์ใช้น้ำ, น้ำหนัก และแก๊สต่างๆ เป็นตัวระบายความร้อน ตัวระบายความร้อนที่ใช้น้ำและน้ำหนัก จะใช้เป็นตัวลดความเร็วได้ด้วย สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็ว (fast reactor) จะไม่ใช้น้ำหรือน้ำหนัก เพราะนิวคลีไอของไฮโดรเจน และดิวทีเรียม มักเป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอนจากการแบ่งแยกตัวได้ดี และในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ ไม่ต้องการใช้นิวตรอนพลังงานเทอร์มาล จึงจำเป็นต้องเก็บพลังงานเหล่านี้ไว้ ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ จึงถูกระบายความร้อนโดยใช้ธาตุที่เป็นของเหลว เช่น โซเดียมเหลว, โซเดียมมีคุณสมบัติในการส่งผ่านความร้อนได้เป็นอย่างดี, มีน้ำหนักอะตอม 23, นับว่าเป็นธาตุที่จะไม่ทำให้นิวตรอนมีความเร็วลดลงได้ดีนัก นอกจากนี้ ก็ยังใช้แก๊สเป็นตัวระบายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็วอีกด้วย

รอบๆ แกนในเครื่องปฏิกรณ์บางเครื่อง โดยเฉพาะบรีดเดอร์ รีแอคเตอร์ ซึ่งเป็นเขตที่มีธาตุเฟอร์ไทล์ เรียก **แบลงเค็ท** (blanket) เขตนี้ออกแบบเพื่อเปลี่ยนแปลงธาตุเฟอร์ไทล์ ให้เป็นธาตุฟิซไซล์ โดยเฉพาะนิวตรอนที่หนีจากแกนจะถูกสกัดกั้นไว้ในแบลงเค็ท นิวตรอนตัวนี้จะเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม อาจทำให้เกิดกำลังในแบลงเค็ทจากผลของการเกิดแบ่งแยกตัวโดยนิวตรอนเร็ว ดังนั้นจึงต้องระบายความร้อนออกไปเช่นเดียวกับที่แกนกลางด้วย

(4) ตัวสะท้อนนิวตรอน

(Reflector)

คือเขตที่อยู่ชิดกับแกน บริเวณแบลงเค็ท มักประกอบด้วยธาตุที่ใช้เป็นตัวลดความเร็ว กรณีที่รอบแกนเป็นบริเวณว่างเปล่า นิวตรอนทุกตัวที่หนีออกมาจากแกน จะหายไปจากเครื่องปฏิกรณ์ ไม่มีตัวใดกลับเข้ามายังแกนอีก แต่เมื่อใส่วัสดุลดความเร็วในบริเวณรอบแกนของเครื่องปฏิกรณ์ จะมีนิวตรอนบางตัวกลับเข้ามายังแกนหรือแบลงเค็ท หลังจากเกิดการชนครั้งหนึ่งหรือหลายครั้ง ดังนั้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวสะท้อนนิวตรอน จะทำให้นิวตรอนเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีตัวสะท้อนนิวตรอน เป็นการช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่จะต้องใช้เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต

(5) แท่งบังคับปฏิกิริยา

(Control rod)

เป็นสารที่ดูดกลืนนิวตรอนได้ดี ทำเป็นแท่ง เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตามความต้องการ เพื่อใช้บังคับปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นแท่งที่ใช้ดูดกลืนนิวตรอน การเคลื่อนย้ายแท่ง จะมีผลทำให้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณของระบบ (k) เปลี่ยนแปลง ถ้าเอาแท่งออกจะทำให้ค่า k เพิ่มขึ้น ถ้าใส่เข้าไป ค่า k ก็จะลดลง ดังนั้น จะเห็นได้ว่าแท่งนี้จะเป็นตัวบังคับให้เครื่องปฏิกรณ์เริ่มทำงาน (started up) หรือดับลง (shut down) หรือทำให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังที่เกิดขึ้น โดยการเคลื่อนแท่งนี้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ แท่งบังคับจะถูกปรับเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต หรือทำงานที่ระดับกำลังคงที่เฉพาะค่าหนึ่ง ธาตุที่ใช้เป็นแท่งบังคับก็มี คาร์บอน, โบริน (โบรอนเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนสูง), ฮาล์ฟเนียม หรือแคดเมียม ซึ่งเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนอย่างแรง และยังมี เงิน และพวกโลหะผสม (alloy) หลายอย่างของโลหะเหล่านี้ แท่งบังคับปฏิกิริยาอาจมีรูปร่างทรงกระบอก, เป็นแผ่น, แบบใบมีด หรืออาจเป็นรูปดาบและอื่นๆ

(6) เทอร์มาลชีล

(Thermal shield)

เป็นแผ่นหนา ประกอบด้วยวัตถุที่ใช้ดูดกลืนรังสีแกมมาที่แพร่กระจายออกมาจากแกน เทอร์มาลชีลจึงอยู่ระหว่างตัวสะท้อนและผนังภายในภาชนะที่ใส่เครื่องปฏิกรณ์ (reactor vessel) มักใช้โลหะพวกเหล็ก เนื่องจากเทอร์มาลชีลเป็นตัวดูดกลืนพลังงาน จึงต้องทำให้เย็นตามทางระหว่างแกนกับแบลงเค็ท

(7) ภาชนะสำหรับใส่เครื่องปฏิกรณ์

(Reactor vessel)

ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแล้ว ตั้งอยู่ในภาชนะ เรียก ภาชนะสำหรับใส่เครื่องปฏิกรณ์

(8) โครงสร้างที่เก็บเครื่องปฏิกรณ์

(Containment structure)

เพื่อเป็นการป้องกันผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์รวมทั้งการเกิดอุบัติเหตุ, การปล่อยผลิตผลที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (fission products) และรังสีที่ผ่านออกมา จึงต้องออกแบบโครงสร้างและการใช้วัสดุของอาคารที่ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ ให้เหมาะสมอีกด้วย

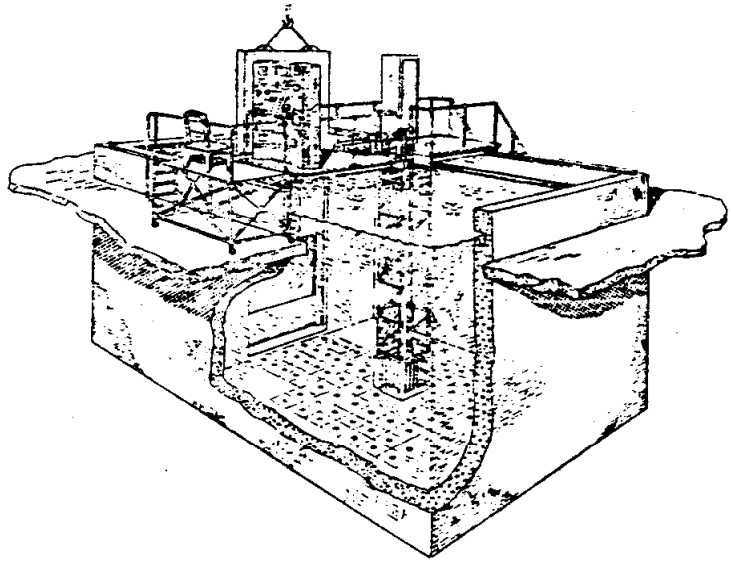
(9) ระบบกำจัดกากกัมมันตรังสีที่ถูกใช้แล้ว

จำเป็นต้องคำนึงถึงระบบการนำกากกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงได้ถูกนำไปใช้แล้วออกไปไว้ภายนอกโครงสร้างที่เก็บเครื่องปฏิกรณ์อย่างปลอดภัย รวมทั้งการขจัดปัญหาการรั่วของกัมมันตรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อมิให้มีรังสีเล็ดลอดออกมา เป็นอันตรายต่อผู้คนที่อยู่ใกล้เคียง

นอกจากนี้ก็มีระบบที่จะให้ความปลอดภัย, สัญญาณเตือนภัยในกรณีฉุกเฉิน เพื่อเตรียมการในกรณีที่จะมีเชื้อเพลิงมากเกินไป

7.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของไทย

เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวิจัย (Thai Research Reactor) มีลักษณะเป็นแบบสระน้ำ (swimming pool) มีน้ำเป็นตัวลดความเร็ว และเป็นตัวสะท้อนอนุภาคนิวตรอน



รูปที่ 7.2 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสระว่ายน้ำ

(W.M. Breazeale, A low cost Neutron Chain Reactor, ORNL 1105, 1952)

นิวตรอนเกิดขึ้นจากการแบ่งแยกตัวของ U^{235}, เป็นนิวตรอนเร็ว, ความเร็ว 1.8 x 10^7 เมตร/วินาที ทำให้ช้าลง โดยการแช่ไว้ในน้ำบริสุทธิ์ จนกระทั่งความเร็วของนิวตรอนลดลงเหลือ 2,200 เมตร ต่อวินาที นิวตรอนพลังงานนี้ จะสามารถทำให้เกิดแบ่งแยกตัวกับนิวคลีไอของ U^{235} ได้อีก

น้ำที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่ดังนี้

(1) ลดความเร็วของนิวตรอน

(2) ระบายความร้อน

(3) ป้องกันอันตรายจากรังสี

7.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

สามารถผลิตสารกัมมันตรังสี เช่น I^{131}, Na^{24}, K^{42}, Au^{198} เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์, การเกษตร, การอุตสาหกรรม I^{131} ใช้ในการวินิจฉัย และรักษาโรคคอพอก

สารทุกชนิด เมื่อนำเข้าไปไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะกลายเป็นสารกัมมันตรังสี เป็นวิธีที่ใช้ตรวจวิเคราะห์สารต่างๆ เพื่อใช้ในการศึกษาค้นคว้า เมื่อนำสารกัมมันตรังสีออกมาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ตามกระบวนการป้องกันรังสี

7.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มาล

(Thermal reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ประกอบด้วย เชื้อเพลิง, ตัวระบายความร้อน, ตัวลดความเร็ว, วัสดุที่เป็นโครงสร้าง วัสดุทุกชนิดในเครื่องปฏิกรณ์นอกจากเชื้อเพลิง จะเรียกว่าตัวลดความเร็ว ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วย เชื้อเพลิง (fuel) และตัวลดความเร็ว (moderator)

7.6 สูตรโฟร์แฟกเตอร์

(The Four-Factor Formula)

ในการพิจารณาเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในระบบวิกฤต จะต้องพิจารณาแฟกเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ คือ

7.6.1 การหาค่า η

η หมายถึงค่าเฉลี่ยของนิวตรอนเร็วที่ส่งออกมาต่อการจับเทอร์มาลนิวตรอน 1 ตัว แล้วทำให้เกิดแบ่งแยกตัว

เมื่อเชื้อเพลิงจับเทอร์มาลนิวตรอน แล้วมีปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว เป็นผลให้นิวตรอนเร็วจำนวนหนึ่งถูกส่งออกมา พร้อมกับส่วนของนิวเคลียสเดิมที่แตกออก (fission fragment)

นิวตรอนเร็วที่มีพลังงานสูงจะวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของธาตุที่ใช้ลดความเร็วแล้วกระเจิง (scattered) ไปชนกับนิวเคลียสอื่นๆ ครั้งแล้วครั้งเล่า จนพลังงานลดลง ในระหว่างที่นิวตรอนเร็วชนกับนิวเคลียสจนกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนนี้ ไม่ใช่ว่าทุกตัวของนิวตรอนเร็ว จะกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนได้ทั้งหมด ระหว่างกระบวนการลดความเร็ว นิวตรอนบางตัวอาจถูกดูดกลืนโดยธาตุที่เป็นส่วนผสมในเครื่องปฏิกรณ์ บางตัวอาจหนีหรือรั่วออกไปจากระบบ

ในการเกิดแบ่งแยกตัวครั้งหนึ่ง จำนวนนิวตรอนเร็วที่ถูกส่งออกมาสำหรับแต่ละธาตุที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัวจะแตกต่างกันไป โดยเฉลี่ยแล้ว จะส่งนิวตรอนเร็วออกมาประมาณ 2.5 ± 1 ตัว ต่อ 1 ตัว ของนิวตรอนช้า ที่ถูกจับเข้าไปแล้วทำให้เกิดแบ่งแยกตัว ถ้าจะแทนด้วยสัญลักษณ์ ν

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r} \qquad \ldots..(7.1)$$

เมื่อ σ_f เป็น ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการเกิดแบ่งแยกตัวสำหรับนิวตรอนช้า

$\sigma_f + \sigma_r$ เป็นภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมดของธาตุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ทั้งที่ดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนแล้วทำให้เกิดแบ่งแยกตัว และไม่เกิดแบ่งแยกตัว

ตัวอย่างที่ 7.1

จงหา η สำหรับ U^{235} และ Pu^{239} กำหนดค่าต่างๆ สำหรับ

U^{235}, $\nu^{235} = 2.5 \pm 0.1$, $\sigma_f^{235} = 549$ บาร์น, $\sigma_r^{235} = 101$ บาร์น

Pu^{239}, $\nu^{239} = 3.0 \pm 0.1$, $\sigma_f^{239} = 664$ บาร์น, $\sigma_r^{239} = 361$ บาร์น

จากสูตร

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r}$$

$$\eta^{235} = 2.5 \left(\frac{549}{549+101}\right)$$

$$= 2.11$$

$$\eta_{239} = 3.0 \frac{664}{664 + 361}$$

$$= 1.94$$

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าภาคตัดขวางจุลภาค ของเทอร์มาลนิวตรอนสำหรับธาตุยูเรเนียม

ธาตุ	σ_f (บาร์น)	σ_r (บาร์น)	σ_s (บาร์น)
U^{235}	**549**	**101**	**8.2**
U^{238}	**0**	**2.75**	**8.2**
$U_{\text{ธรรมชาติ}}$	**3.92**	**3.5**	**8.2**

ตัวอย่างที่ 7.2

จงหาค่า η สำหรับยูเรเนียมธรรมชาติ กับเทอร์มาลนิวตรอน

$$\eta = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_f + \Sigma_r}$$

ค่า η จะเปลี่ยนแปลงเมื่อ U^{235} มีปริมาณมากขึ้น
อาจเขียนได้ว่า

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f^{235} + \sigma_r^{235} + \frac{N^{238}}{N^{235}} \sigma_a^{238}}$$

เมื่อ σ_r^{235} เป็นภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับปฏิกิริยา (n,γ) โดย U^{235}
ถ้าหารด้วย σ_f^{235}, จะได้

$$\eta = \frac{\nu}{1 + \frac{\sigma_r^{235}}{\sigma_f^{235}} + \frac{N^{238}}{N^{235}} \frac{\sigma_a^{238}}{\sigma_f^{235}}}$$

$$= \frac{\nu}{1 + \frac{101}{549} + \frac{\mathbf{99.28}}{\mathbf{0.72}} \times \frac{\mathbf{2.75}}{\mathbf{549}}}$$

$$= \frac{\mathbf{2.44}}{1.18 + 0.005 \times \mathbf{137.8}}$$

$$= \frac{2.44}{\mathbf{1.86}}$$

$$= \mathbf{1.31}$$

7.6.2 แฟกเตอร์ฟาสต์ฟิชชัน (ϵ)

(Fast fission factor)

หมายถึง อัตราส่วนของนิวตรอนเร็วทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยการแบ่งแยกตัวที่มาจากนิวตรอนทุกพลังงาน ต่อจำนวนนิวตรอนเร็วที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวโดยเทอร์มาลนิวตรอน

ได้กล่าวแล้วว่า ในการจับเทอร์มาลนิวตรอนเข้าไปในเชื้อเพลิง จะทำให้เกิดนิวตรอนเร็ว นิวตรอนเหล่านี้จะชนกับนิวคลีไอเพื่อให้พลังงานลดลง แต่บางทีก็ถูกจับไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวได้อีก ส่วนมากจะเกิดกับนิวคลีไอของ U^{238} ในการเกิดแบ่งแยกตัวแต่ละครั้งจะทำให้เกิดนิวตรอนเร็วมากกว่า 1 ตัวโดยเฉลี่ย จึงทำให้จำนวนนิวตรอนเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราส่วน ϵ (เรียก fast fission factor)

7.6.3 ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนหนีออกมาได้เมื่อผ่านพลังงานเรโซแนนซ์ (p)

(Resonance escape probability)

หมายถึงโอกาสที่นิวตรอนเร็วที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวบางตัวหนี หรือเล็ดลอดจากการถูกจับขณะที่กำลังลดพลังงานตามกระบวนการลดความเร็ว เพื่อกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน ค่านี้มีวิธีหาที่ยุ่งยาก จึงไม่ได้นำมากล่าวในที่นี้

นิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวทุกตัวเป็นนิวตรอนเร็ว ขณะที่ผ่านตัวลดความเร็วจะเกิดการชนแบบยืดหยุ่นแล้วกระเจิง ทำให้พลังงานลดลงทุกครั้งที่เกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งมีพลังงานซึ่งอยู่ในเขตเรโซแนนซ์ของยูเรเนียม -238 (มีค่าภาคตัดขวางสูงสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนที่พลังงานนี้) นิวตรอนที่พลังงานนี้จึงถูกจับไป ทำให้ไม่มีโอกาสจะผ่านกระบวนการลดความเร็วเพื่อกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน นิวตรอนที่หนีออกมาได้จากการถูกจับ จึงจะผ่านกระบวนการลดความเร็ว เพื่อกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนต่อไป

7.6.4 แฟกเตอร์เทอร์มาลยูทิลไลเซชั่น (f)

(Thermal utilization factor)

เมื่อนิวตรอนมีพลังงานลดลง จนเป็นเทอร์มาลนิวตรอน นิวตรอนเหล่านี้จะแพร่ (difuse) ไปในตัวกลาง โดยที่พลังงานรวมทั้งหมดมีค่าคงที่ ในที่สุด นิวตรอนเหล่านี้ จะถูกดูดกลืนไปในเชื้อเพลิง หรือตัวลดความเร็ว หรืออาจจะเป็นสารพวกที่เรียกสารพิษ (poison) ที่มีปะปนอยู่ ถ้าเทอร์มาลนิวตรอนถูกดูดกลืนไปในเชื้อเพลิงด้วยสัดส่วน f เขียนคำจำกัดความได้ว่า

$$f = \frac{\text{เทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนไปในเชื้อเพลิง}}{\text{เทอร์มาลนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืน}}$$

จะสังเกตว่า ตัวหาร คือ จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนไปในเชื้อเพลิง, ตัวลดความเร็ว และสารอื่นๆ ในเครื่องปฏิกรณ์

$$f = \frac{N_F \sigma_{aF}}{N_F \sigma_{aF} + N_M \sigma_{aM}} = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aP} + \Sigma_{aM}} \qquad (7.2)$$

เมื่อ Σ_{aF} เป็นภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนสำหรับเชื้อเพลิง และ
Σ_{aM} เป็นภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืนสำหรับวัสดุทุกชนิดนอกจากเชื้อเพลิง

ถ้ากำหนดให้ $z = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aM}}$

$$= \frac{N_F \sigma_{aF}}{N_M \sigma_{aM}} \qquad (7.3)$$

และเทอร์มาลยูทิลไลเซชัน $f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}}$

จะได้ว่า $f = \frac{Z}{Z+1}$ ..... (7.4)

พิจารณา พื้นที่การแพร่ของเทอร์มาลนิวตรอน

$$L_T^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \qquad \text{.....} \quad (7.5)$$

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ทั้งหมด (คือ วัสดุที่เป็นส่วนผสมและเชื้อเพลิง) ซึ่งผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีน้อยในส่วนผสมนั้น
จึงเขียนได้ว่า

$$L_T^2 = \frac{D_M}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}} \qquad (7.6)$$

สมการ (7.6) หารตลอดด้วย Σ_{aM} จะได้

$$L_T^2 = \frac{L_{TM}^2}{Z+1}$$

เมื่อ L_{TM}^2 เป็น พื้นที่การแพร่ของตัวลดความเร็ว จะได้

$$L_T^2 = (1-f)\, L_{TM}^2 \qquad (7.7)$$

7.7 แฟกเตอร์ตัวคูณ (k)

(The multiplication factor)

การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ดำเนินต่อไปได้นั้นต้องพิจารณาจำนวนนิวตรอนที่เกิดใหม่ กับจำนวนนิวตรอนที่มีอยู่เดิม ถ้าจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่น

(generation) ใหม่น้อยกว่าจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นเดิมแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ก็จะไม่สามารถดำเนินงานต่อไปได้อัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นใหม่ต่อจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นเดิม เรียก แฟกเตอร์ตัวคูณ "k" อาจพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

(1) k มากกว่า 1 แสดงว่า เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว จำนวนปฏิกิริยาจะเกิดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียก "สูงกว่าวิกฤต" (Supercritical)

(2) k เท่ากับ 1 แสดงว่า เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว จำนวนปฏิกิริยาจะมีจำนวนเท่าเดิมตลอดเวลา เรียก "วิกฤต" (Critical)

(3) k น้อยกว่า 1 แสดงว่า เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว จำนวนปฏิกิริยาจะเกิดน้อยลงๆ เรียก "ต่ำกว่าวิกฤต" (Subcritical)

การหาค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาด อาจทำได้ง่ายๆ จากการหาอัตราการเกิดนิวตรอน และอัตราที่นิวตรอนหายไปจากระบบ ใช้ k_{eff}

$$k_{eff} = \frac{\text{อัตราการเกิดนิวตรอน}}{\text{อัตราที่นิวตรอนถูกจับไป + อัตราการรั่วของนิวตรอน}} \qquad (7.8)$$

k_{eff} เรียกแฟกเตอร์ตัวคูณยังผล (effective multiplication factor)
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มาก (อนันต์) ใช้ κ_∞

$$k_\infty = \frac{\text{อัตราการเกิดนิวตรอน}}{\text{อัตราที่นิวตรอนถูกจับไป}} \qquad \text{..... (7.9)}$$

เมื่อ k_∞ เรียก แฟกเตอร์ตัวคูณอนันต์ (Infinite multiplication factor)

การพิจารณาว่าเครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤตหรือไม่นั้นบางทีจะใช้คำว่า**รีแอคทิวิตี้** (Reactivity) แทนคำว่า แฟกเตอร์ตัวคูณ โดยให้ความหมายว่า

$$\text{รีแอคทิวิตี้ (R)} = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \qquad \text{..... (7.10)}$$

รีแอคทิวิตี้ เป็นตัวเลขที่แสดงว่า เครื่องปฏิกรณ์ทำงานอย่างไร มีกรณีต่างๆ กัน ดังนี้

(1) $R = 0$, $k_{eff} = 1$, เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในระบบวิกฤต หมายความว่า จำนวนนิวตรอนเมื่อเริ่มต้นมีจำนวนเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่จะเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนในชั่วรุ่น (generation) ต่อไป แสดงว่า จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

(2) $R > 0$, $k_{eff} > 1$, เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะ สูงกว่าวิกฤต หมายความว่า จำนวนนิวตรอนที่จะเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนในชั่วรุ่นใหม่ มีจำนวนมากขึ้นกว่าเมื่อเริ่มต้น จำนวนปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว จะเกิดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

(3) $R < 0$, $k_{eff} < 1$, เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะ ต่ำกว่าวิกฤต หมายความว่า จำนวนปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เพราะจำนวนนิวตรอนที่จะเป็นต้นกำเนิดในชั่วรุ่นต่อไป มีจำนวนลดลง

7.8 วัฏจักรของเทอร์มาลนิวตรอน

การสมดุลของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเทอร์มาล อธิบายได้โดยใช้วัฏจักรของนิวตรอน (neutron cycle) เพื่อแสดงว่าเกิดอะไรขึ้นกับนิวตรอนเหล่านั้น

เริ่มต้นด้วยการเกิดแบ่งแยกตัว เมื่อเทอร์มาลนิวตรอน n ตัว วิ่งเข้าชนนิวเคลียสของ U^{235} ทำให้เกิดนิวตรอนเร็ว ν ตัว แต่ไม่ใช่ว่าทุกนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนโดยยูเรเนียมจะเกิดแบ่งแยกตัวกับนิวเคลียสของ U^{235} ได้หมด เพราะบางนิวตรอนก็ถูกดูดกลืนไปใน U^{235} แล้วเกิดปฏิกิริยา (n, γ) สัดส่วนของเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนโดยยูเรเนียมที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัวกับ U^{235} คือ $\frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r}$ ดังนั้น นิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นจึงเป็น $n\eta$ ตัว เมื่อ $\eta = \frac{\nu \sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r}$ นิวตรอนเร็วเหล่านี้มีพลังงานเฉลี่ยสูงกว่าค่าพลังงานต่ำสุดที่จะทำให้เกิดแบ่งแยกตัวกับ U^{238} บางตัวจึงมีพลังงานพอที่จะเกิดแบ่งแยกตัวกับ U^{238} ได้ โอกาสที่จะทำให้เกิดนิวตรอนเพิ่มขึ้นคือ นิวตรอนเหล่านี้ จะต้องเกิดแบ่งแยกตัวโดยชนกับนิวเคลียสของ U^{238} ก่อนที่จะชนกับนิวเคลียสของธาตุที่เป็นตัวลดความเร็ว จำนวนนิวตรอนที่จะเกิดแบ่งแยกตัวกับ U^{235} จึงเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดฟาสต์ฟิชชัน กับนิวเคลียสของ U^{238} จำนวนนิวตรอนเร็วทั้งหมดจากการแบ่งแยกตัวจึงเพิ่มขึ้นจาก $n\eta$ เป็น $n\eta\epsilon$, ϵ เป็นปริมาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 หรือมากกว่า 1 เพียงเล็กน้อย เรียกปริมาณ ϵ ว่า แฟกเตอร์ฟาสต์ฟิชชัน, ϵ มีค่าเกือบเท่ากับ 1 ใน เครื่องปฏิกรณ์เอกพันธ์ และพบบ่อยว่า ในเครื่องปฏิกรณ์วิวิธพันธ์ มีค่าประมาณ 1.1 กรณีที่ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ และกราฟไฟท์เป็นตัวลดความเร็ว ϵ มีค่า 1.03

นิวตรอน $n\ \eta\ \epsilon$ ที่เกิดขึ้น จะแพร่เข้าไปในกอง (pile) ของธาตุเชื้อเพลิง และตัวลดความเร็ว นิวตรอนเหล่านี้ส่วนใหญ่มีความเร็วลดลง แต่ก็มีบางตัวที่หนีไปก่อนที่จะมีความเร็วลดลงจนเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานเทอร์มาล ถ้ามีนิวตรอนเป็นสัดส่วน $(1 - £_f)$ หนีออกไปจากระบบก่อนที่จะมีความเร็วลดลง จะเหลือนิวตรอนที่กำลังลดความเร็วด้วยสัดส่วน $£_f$ ตัว เพื่อวิ่งเข้าชนอะตอมของธาตุที่ใช้ลดความเร็ว แต่ระหว่างกระบวนการลดความเร็วนี้ บางตัวก็จะถูกจับโดยนิวเคลียสของ U^{238} เพื่อเป็น U^{239} แล้วสลายให้ธาตุ Np^{239} แล้วเป็น Pu^{239} ต่อไป จะเห็นได้ว่า เมื่อนิวตรอนมีพลังงานระหว่าง 1 อิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงหลายๆ พันอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนสูง พร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมาออกมา (radiative capture) ดังนั้นนิวตรอนที่พลังงานเรโซแนนซ์จึงถูกจับไปโดยไม่เกิดแบ่งแยกตัว ถ้ามีนิวตรอน $n\ \eta\ \epsilon\ £_f$ เริ่มลดความเร็วเมื่อผ่านพลังงานนี้จะถูกจับไปด้วยสัดส่วน

$(1 - p)$ จึงเหลือนิวตรอนที่หนีออกมาจากขณะที่เกิดเรโซแนนซ์เพื่อลดความเร็ว $n\,\eta\,\epsilon\,£_f\,p$ เรียก p ว่า "ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนหนีออกมาได้เมื่อผ่านพลังงานเรโซแนนซ์ การดูดกลืนนิวตรอนของ U^{238} เป็นการจับนิวตรอนโดยไม่เกิดแบ่งแยกตัว แต่ได้สูญเสียนิวตรอนไป

นิวตรอนที่หนีออกมาได้จากการถูกดูดกลืนที่พลังงานเรโซแนนซ์ จะลดความเร็วลงจนมีพลังงานเทอร์มาล ซึ่งจะเกิด 2 กระบวนการขึ้นพร้อมๆ กัน บางนิวตรอนก็แพร่โดยไม่ถูกจับ และบางทีก็หนีออกไปจากระบบ ถ้าหนีออกไปด้วยสัดส่วน $(1 - £_{th})$ จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดจาก n ฟิชชัน ของเทอร์มาลนิวตรอนกับ U^{235} ที่ยังคงอยู่เพื่อเป็นเทอร์มาลนิวตรอนคือ $n\eta\epsilon£_f p£_{th}$

ถ้าสัดส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยยูเรเนียมเท่ากับ f และ $1 - f$ เป็นจำนวนที่ถูกดูดกลืนในธาตุอื่น เช่น ตัวลดความเร็วหรือวัสดุที่เป็นโครงสร้าง นั่นคือ นิวตรอนเหล่านี้จะหายไป จำนวนนิวตรอนที่เหลืออยู่เพื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปก็คือ $n\eta\,\epsilon£_f\,p£_{th}\,f$, f เรียกแฟก**เตอร์**เทอร์มาลยูทิลไลเซชัน

อัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่น ที่ 2 ที่จะทำให้เกิดแบ่งแยกตัวต่อจำนวนนิวตรอนในชั่วรุ่นเดิม เรียกแฟกเตอร์ตัวคูณ หรือ k_{eff} ได้ว่า

$$k_{eff} = \frac{n\eta\epsilon\,£_f\,p£_{th}\,f}{n} = \eta\epsilon\,£_f\,p£_{th}\,f$$

เมื่อ k_{eff} คือ แฟกเตอร์ตัวคูณยังผล ขึ้นกับขนาดจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์
เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ และดำเนินต่อไปได้โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่ จำเป็นต้องให้ค่า $k_{eff} = 1$, แต่ถ้า k น้อยกว่า 1, จะไม่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ เรียก ต่ำกว่าวิกฤต และถ้า k_{eff} มากกว่า 1, จำนวนนิวตรอนจากการเกิดแบ่งแยกตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียก สูงกว่าวิกฤต

ถ้าเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่มาก มีการชนหลายครั้ง นิวตรอนก็ยังคงแพร่อยู่ในระบบ จึงถือว่าไม่มีการรั่วของนิวตรอนออกไปจากระบบ ปริมาณ $(1 - £_f)$ และ $(1 - £_{th})$ จึงเป็นศูนย์ กรณีนี้ $k_\infty = n\,\eta\,\epsilon\,f$, สูตรนี้เรียก "สูตรโฟร์แฟกเตอร์" และ

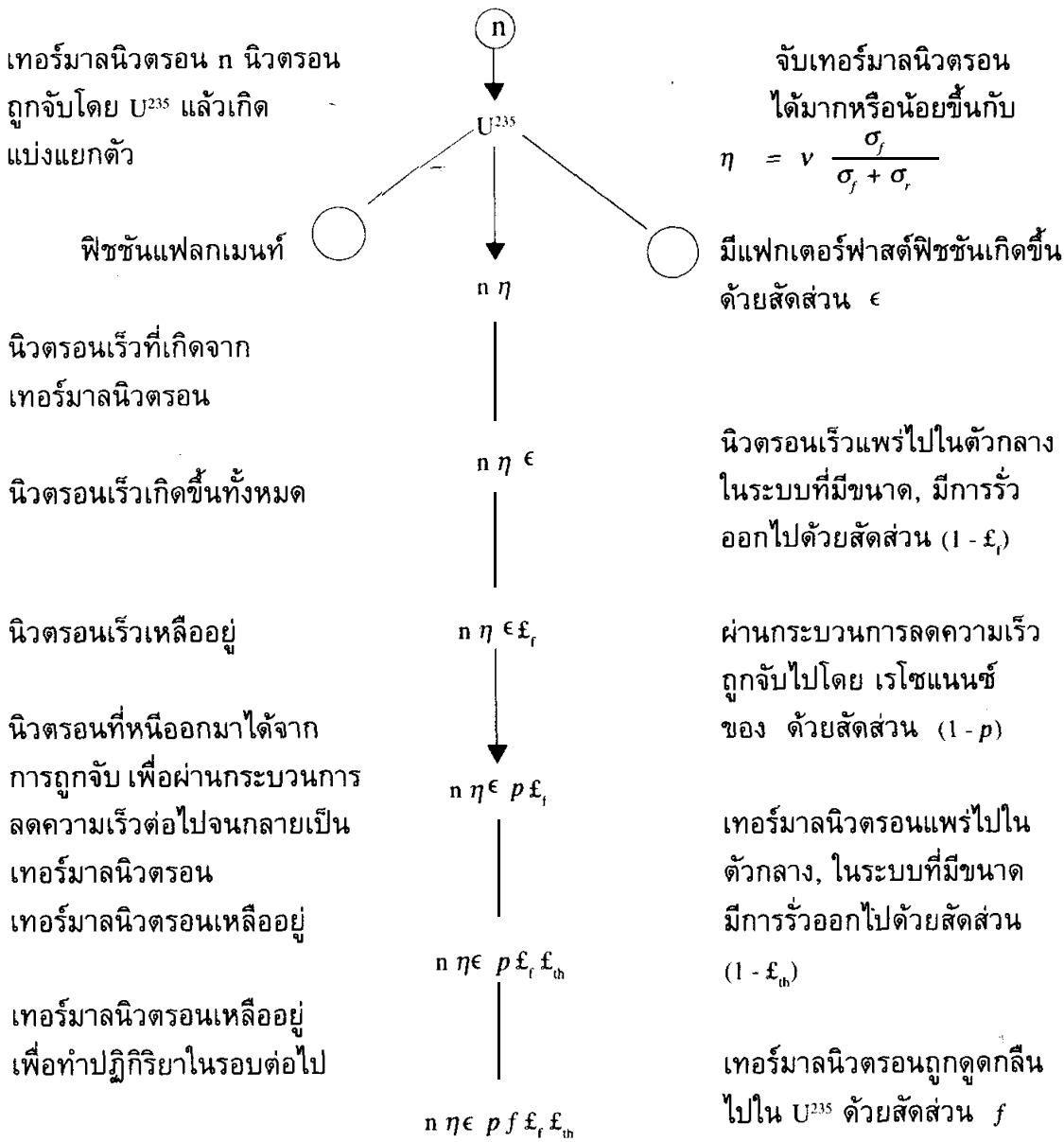
$$k_{eff} = k_\infty\,£_{th}\,.\,£_f \qquad \text{..... (7.11)}$$

เครื่องปฏิกรณ์ในระบบเอกพันธ์ เชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นไมครอน เป็นที่แน่นอนว่า นิวตรอนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวจะหนีออกไปจากเชื้อเพลิงก่อนที่จะชนกับ U^{238} นิวตรอนจะเข้าไปชนตัวลดความเร็ว ความเร็วจึงลดลงก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวกับ U^{238}, ดังนั้น ϵ จึงเป็น 1 การสูญเสียนิวตรอนโดยวิธีนี้ นับว่าเป็นข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์เอกพันธ์

กรณีที่ $\epsilon = 1, p = 1, k_\infty = \eta f$

$$k_\infty = \eta f \quad \text{.....} \quad (7.12)$$

f คือ แฟกเตอร์เทอร์มาลยูทิลไลเซชัน ได้แสดงวัฏจักรของเทอร์มาลนิวตรอนไว้ในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 *แผนผังแสดงวัฏจักรของเทอร์มาลนิวตรอน* *(Thermal neutron cycle)*

ดังนั้น ถ้ามีจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนอยู่ n นิวตรอน เมื่อเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว นิวตรอนที่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการลดความเร็วจนเป็นเทอร์มาลนิวตรอนเพื่อจะเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวต่อไป คือ $n\,\eta\,\epsilon\,p\,f\,£_f£_{th}$ นิวตรอน

$$k_{eff} = \frac{n\,\eta\,\epsilon\,p\,f\,£_f£_{th}}{n}$$

$$= \eta\,\epsilon\,p\,f\,£_f£_{th} \qquad (7.13)$$

ในระบบที่มีขนาดอนันต์

$$k_\infty = \eta\,\epsilon\,Pf \qquad (7.14)$$

ตัวอย่างที่ 7.3

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มากมีส่วนผสมของยูเรเนียมธรรมชาติกับน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้เรื่อยๆ หรือไม่ ถ้าอัตราส่วนของยูเรเนียมธรรมชาติกับน้ำคือ $\frac{1}{100}$ (โมเลกุล : โมเลกุล), กำหนดค่า

$\nu^{235} = 2.41$ $\quad \sigma_a^{235} = 683$ บาร์น, $\quad \sigma_f^{235} = 577$ บาร์น

$\sigma_a^{238} = 2.73$ บาร์น, $\quad \sigma_a(H) = 0.33$ บาร์น

จากสูตร

$$k_\infty = \frac{\text{อัตราการเกิด}}{\text{อัตราที่นิวตรอนถูกจับไป}}$$

$$k_\infty = \frac{\nu_{nat.U}\Sigma_{f(nat.U)} + \nu_H\,\Sigma_f(H) + \nu_0\,\Sigma_f(0)}{\Sigma_{a(nat.U)} + \Sigma_a(H) + \Sigma_a(0)}$$

$\Sigma_f(H), \Sigma_f(0) = 0$, เพราะทั้ง H และ O ไม่เกิดแบ่งแยกตัว

U^{238} ไม่เกิดแบ่งแยกตัวกับเทอร์มาลนิวตรอน, $\sigma_f^{238} = 0$

$\sigma_a(0)$ มีค่าน้อย, $\Sigma_a(0)$ ไม่ต้องนำมาพิจารณา

$$k_\infty = \frac{\nu_{235}\ \Sigma_f^{235}}{\Sigma_a^{235} + \Sigma_a^{238} + \Sigma_a(H)}$$

$$k_\infty = \frac{\nu^{235}}{\frac{\sigma_a^{235}}{\sigma_f^{235}} + \frac{N^{238}}{N^{235}}\frac{\sigma_a^{238}}{\sigma_f^{235}} + \frac{N(H)}{N^{235}}\frac{\sigma_a(H)}{\sigma_f^{235}}}$$

แทนค่า

$$k_\infty = \frac{2.41}{\frac{683}{577} + \frac{99.28}{0.72} \times \frac{2.73}{577} + \frac{100}{1} \times \frac{100}{0.72} \times \frac{0.33}{577}}$$

$$= \frac{2.41}{1.1837 + 0.6524 + 7.9433}$$

$$= \frac{2.41}{9.7794} = 0.246 = 0.25$$

k_∞ น้อยกว่า 1, เครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้เรื่อยๆ

ตัวอย่างที่ 7.4

จงคำนวณเพื่อหาค่า f และ สำหรับส่วนผสมของยูเรเนียม -235 และโซเดียม -23 ซึ่งมีส่วนผสมของยูเรเนียม -235 เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%)

กำหนดค่า

$\sigma_{aS}(Na) = 0.0008$ บาร์น

$\sigma_{aF}(U^{235}) = 1.65$ บาร์น

$\eta = 2.2$

$$f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_a} = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aS}}$$

เมื่อ Σ_{aF} และ Σ_{aS} เป็น ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืนของยูเรเนียม -235 และโซเดียม -23

โดยการหารตลอดด้วย Σ_{aF} จะได้

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{aS}}{\Sigma_{aF}}} = \frac{1}{1 + \frac{N_S.\sigma_{aS}}{N_F.\sigma_{aF}}}$$

เมื่อ N_F และ N_S เป็นความหนาแน่นอะตอมของยูเรเนียม และโซเดียม

กำหนด ρ_F และ ρ_S เป็นจำนวนกรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ของยูเรเนียมและโซเดียม ตามลำดับ

สิ่งที่ต้องการหา คือ $\frac{N_S}{N_F}$, ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{N_S}{N_F} = \frac{\rho_S}{\rho_F} \cdot \frac{M_F}{M_S}$$

(โดยใช้ $N = \rho \frac{N_A}{M}$, เมื่อ N_A เป็นเลขอาร์โวกาโดร)

M_F และ M_F เป็นน้ำหนักกรัมอะตอม ของยูเรเนียม และโซเดียม

$$\frac{1\ w/o}{\frac{\rho_F + \rho_S}{\rho_F}} = \frac{1}{100} = \frac{\rho_F}{\rho_F + \rho_S}$$

$$1 + \frac{\rho_S}{\rho_F} = 100, \qquad \frac{\rho_S}{\rho_F} = 99$$

โดยการใช้ค่า σ_a ที่กำหนดให้, ค่าของ f คือ

$$f = \frac{1}{1 + 99 \times \frac{235}{23} \times \frac{0.0008}{1.65}} = \frac{1}{1.49}$$

$$= 0.671$$

$$k_\infty = \eta f = 2.2 \times 0.671 = 1.48$$

แฟกเตอร์ตัวคูณ มีค่ามากกว่า 1, ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดอนันต์ ที่ประกอบด้วยส่วนประกอบนี้ จะเกิด สูงกว่าวิกฤต (supercritical)

สรุป

1. เครื่องปฏิกรณ์ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น
   1.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายในการศึกษา และวิจัย โดยนำความรู้ที่ได้มาใช้เป็นประโยชน์ทางสันติ เช่น ทางด้านการแพทย์, การเกษตร และอื่นๆ
   1.2 เครื่องปฏิกรณ์กำลัง สร้างขึ้นเพื่อมุ่งประโยชน์ในการนำพลังงานมาใช้
   1.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง เพื่อเปลี่ยนแปลงธาตุเฟอร์ไทล์ ให้เป็นธาตุที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัวได้
2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ประกอบด้วย เชื้อเพลิง และตัวลดความเร็ว นอกจากนี้ก็มีตัวระบายความร้อน แท่งบังคับปฏิกิริยา ดังมีรายละเอียดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว
3. สูตรโฟร์แฟกเตอร์ ประกอบด้วย η, ϵ, p, f
4. ค่าตัวคูณ k คือตัวเลขที่แสดงว่า จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นเป็นกี่เท่าของจำนวนนิวตรอนที่ถูกจับไป
5. เครื่องปฏิกรณ์ ที่มีขนาด $k_{eff} = \eta \epsilon p f £_{th} £_{f}$
   เครื่องปฏิกรณ์ขนาดอนันต์ $k_{\infty} = \eta \epsilon p f$
6. วัฏจักรของเทอร์มาลนิวตรอน จะเริ่มจากเทอร์มาลนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของธาตุที่ทำให้เกิดแบ่งแยกตัวได้ ทำให้นิวเกิดตรอนเร็ว และส่วนที่แตกออกมาจากการเกิดแบ่งแยกตัว นิวตรอนเร็วจะผ่านกระบวนการลดความเร็ว, การรั่ว, การดูดกลืน จนเป็นเทอร์มาลนิวตรอนอีกครั้งหนึ่ง

แบบฝึกหัด

7.1 จงอธิบายความหมายของสัญลักษณ์ต่อไปนี้

1 η

2 ϵ

3 p

4 f

5 k

7.2 จงหาจำนวนอะตอม/ซม.^{3} ของอะลูมิเนียม-27 และไฮโดรเจน ในส่วนผสมของอะลูมิเนียมและน้ำ ด้วยอัตราส่วนของอะลูมิเนียม ต่อน้ำ เท่ากับ 0.5 โดยปริมาตร กำหนดความหนาแน่นของอะลูมิเนียม เท่ากับ 0.0602×10^{24} อะตอม/ซม.^{3}

กำหนด U^{238}, $\nu = 2.5$

$\sigma_f = 549$ บาร์น, $\sigma_r = 101$ บาร์น,

$\sigma_a = 683$ บาร์น, $\sigma_a(H_2O) = 0.66$ บาร์น

7.3 จงหาค่าเทอร์มาลยูทิไลเซชั่นแฟกเตอร์ สำหรับส่วนผสมของ ยูเรเนียม-235 และน้ำ ความหนาแน่นของยูเรเนียม-235 เท่ากับ 3.47×10^{-4} อะตอม/ซม.^{3}

สำหรับ U^{238}, $\sigma_a = 683$ บาร์น, $\sigma_a(H_2O) = 0.66$ บาร์น

7.4 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดอนันต์ ประกอบด้วยยูเรเนียม-235 และเบอร์ริลเลียมออกไซด์ ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 30,000 โมเลกุล เครื่องปฏิกรณ์จะทำงานในระบบวิกฤตได้หรือไม่ กำหนด $\nu^{235} = 2.5$

$\sigma_a^{235} = 683$ บาร์น, $\sigma_f^{235} = 577$ บาร์น

7.5 ในระบบที่มี D_2O และยูเรเนียมธรรมชาติผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยอัตราส่วน 1000 โมเลกุล ของ D_2O ต่อ 1 อะตอม ของ ยูเรเนียม จะเกิดวิกฤตได้หรือไม่

กำหนด $\sigma_a^{235} = 678$ บาร์น, $\sigma_f^{235} = 580$ บาร์น

$\sigma_a^{238} = 2.73$ บาร์น, $\sigma_a^{D_2O} = 0.001$ บาร์น

$\nu^{235} = 2.41$

7.6 เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มาก มีส่วนผสมของยูเรเนียมธรรมชาติกับน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้เรื่อยๆ หรือไม่ ถ้าอัตราส่วนของยูเรเนียมต่อน้ำคือ 1 ต่อ 10 (โมเลกุล ต่อ โมเลกุล) กำหนดค่า

$\nu^{235} = 2.5$ $\sigma_a^{235} = 683$ บาร์น, $\sigma_f^{235} = 577$ บาร์น

$\sigma_a^{238} = 2.73$ บาร์น, $\sigma_a(H) = 0.33$ บาร์น