แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ต้นกำเนิดกากกัมมันตรังสี ระบบการขจัดกากกัมมันตรังสี ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถ

1. อธิบายองค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
2. อธิบายและเขียนแผนภาพการเกิดวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
3. อธิบายต้นกำเนิดกากกัมมันตรังสี
4. อธิบายระบบการขจัดกากกัมมันตรังสี
5. อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์
6. จำแนกประเภทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. บรรยายและตอบปัญหาซักถามประเด็นข้อสงสัย
2. ศึกษาจากเอกสารประกอบการสอน
3. สรุปและทบทวนเนื้อหาเพิ่มเติมเมื่อจบบทที่ 5
4. ศึกษาแหล่งเรียนรู้เพิ่มเติมด้วยตนเอง

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน
2. วีดีทัศน์
3. สไลด์ประกอบการสอน
4. คำถามท้ายบท

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากพฤติกรรมการมีส่วนร่วมในห้องเรียน
2. ประเมินผลจากแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน
3. ประเมินจากการนำเสนอรายงาน

บทที่ 5

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นเครื่องที่นำผลของพลังงานนิวเคลียร์จากการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่สามารถควบคุมได้มาใช้ ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สร้างขึ้นหลายรูปแบบเพื่อนำพลังงานใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดไม่มีมลพิษ และเป็นเพลังงานหนึ่งที่สามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องด้วยการขยายตัวประชากรและการขยายตัวของเศรษฐกิจได้ดำเนินอยู่ตลอดเวลา จึงมีอัตราการเพิ่มของปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นทุกปี แหล่งผลิตพลังงานต่าง ๆ ย่อมส่งมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น เช่น การใช้น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดฝนกรด และปรากฏการณ์เรือนกระจก การเกิดก๊าซมีเทนรั่วสู่บรรยากาศ จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาพลังงานรูปแบบอื่นในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในบทนี้จะศึกษาการผลิตพลังงานนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หมายถึง เครื่องมือที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแบ่งแยกตัวหรือแบบฟิชชันแบบลูกโซ่และคอยควบคุมพลังงานมหาศาลที่เกิดขึ้นมาโดยการควบคุมจำนวนนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมาพร้อมกับกระบวนการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแบ่งแยกตัวหรือแบบฟิชชันให้มีปริมาณพอดีที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปเรื่อยๆ ตามต้องการ

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องแรกของโลกเริ่มเปิดให้ปฏิบัติงานได้ในปี ค.ศ. 1942 โดยที่นักฟิสิกส์ชาวอิตาลีชื่อ เอ็นริโก เฟอร์มิ (Enrico Fermi) เริ่มใช้นิวตรอนยิงธาตุหนักแทนที่จะใช้อนุภาคแอลฟา ซึ่งแต่เดิมใช้ยิงเพื่อทำให้เกิดสารกัมมันตรังสี ด้วยเหตุ เพราะอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อวิ่งผ่านวัตถุจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ 2 ทาง อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบและหมุนรอบนิวเคลียสซึ่งจะฉุดอนุภาคแอลฟาที่มีประจุไฟฟ้าบวก ทำให้วิ่งช้าลงอย่างรวดเร็วและหยุดกับที่ กับการที่อนุภาคแอลฟาวิ่งไปถึงนิวเคลียสได้ ประจุไฟฟ้าบวกของโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียสจะทำการต้านหรือผลักให้อนุภาคแอลฟาเสียพลังงานไป ทำให้การชนนิวเคลียสของอนุภาคแอลฟาก็ไม่แรงพอที่จะทำให้นิวเคลียสแตกตัวได้ ผลการยิงธาตุต่าง ๆ ด้วยนิวตรอนปรากฏว่าผลิตไอโซโทป (isotope) หลายชนิดที่ไม่

เคยปรากฏในธรรมชาติ และสามารถผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่แตกต่างจากธาตุที่เป็นเป้า มีผลทำให้นิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้าจำนวนมากสามารถจับนิวตรอนได้ และแตกตัวเป็นสารกัมมันตรังสี

สำหรับส่วนประกอบหลัก ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Si-Hwan KIM et al, 2012) มีดังต่อไปนี้

1. เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel)

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ หมายถึง สารที่มีนิวเคลียสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแบ่งแยกตัวหรือแบบฟิชชันได้ เมื่อนิวตรอนที่ระดมยิงเข้าไปในนิวเคลียสต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นมาได้และมีพลังงานของปฏิกิริยาออกมาอย่างมากมาย เชื้อเพลิงนิวเคลียร์มักทำให้อยู่ในรูปออกไซด์ (oxide) เช่น UO_2 ซึ่งจะมีข้อดีที่มีสภาพนำความร้อนต่ำ สำหรับเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในรูปคาร์ไบด์ (carbide) เช่น UC หรือในรูปไนไทร์ด(nitride) เช่น UN จะมีสภาพนำความร้อน ความหนาแน่น และอัตราการผลิตเชื้อเพลิงสูงกว่าในรูปออกไซด์หรืออาจจะหลุดออกจากวัสดุห่อหุ้มมาทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำที่ใช้เป็นสารระเหยความร้อน

เชื้อเพลิงไม่ได้บรรจุในแกนปฏิกรณ์โดยตรง แต่จะมีวัสดุห่อหุ้ม (cladding) เพื่อทำหน้าที่แยกเชื้อเพลิงออกจากสิ่งแวดล้อม ป้องกันไม่ให้ผลผลิตฟิชชันกระจายออกไปป้องกันโครงสร้างของเชื้อเพลิงและช่วยถ่ายเทความร้อน วัสดุห่อหุ้มมักทำจากวัตถุที่คงทนต่อความร้อนและคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและวัสดุแวดล้อม มีภาคตัดขวางการจับนิวตรอนต่ำและทนต่อรังสี โดยทั่วไปปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะทำงานที่อุณหภูมิสูง จึงต้องทำเชื้อเพลิงเป็นเม็ด (pellet) รูปทรงกระบอกท่อนสั้นๆ เพื่อป้องกันการร้าวหรือแตกที่อุณหภูมิสูงแล้วบรรจุที่วัสดุห่อหุ้มที่ทำเป็นแท่งยาว เรียกว่า แท่งเชื้อเพลิง (fuel rod*)* เช่น แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม (fuel elements) มีเนื้อเชื้อเพลิงเป็น $U-ZrH_{16}$ (*Uranium-Zirconium Hydride*) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ *1.50* นิ้ว ยาวประมาณ *30* นิ้ว ส่วนบนและล่างเป็นแกรไฟต์ เชื้อเพลิงชนิดนี้มีสมบัติพิเศษในการยับยั้งปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ เมื่ออุณหภูมิของเนื้อเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของเชื้อเพลิงชนิดนี้ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดนี้ทำงานแบบทวีกำลังได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อเชื้อเพลิง เนื้อเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ปรมาณู คิดเป็นปริมาณยูเรเนียม -235 ประมาณ 5888.25 กรัม

2. สารหน่วง (moderator)

สารหน่วง หมายถึง สารที่ใช้ลดความเร็วของนิวตรอนที่มีความเร็วและพลังงานสูงที่ได้ออกมาปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่ จะเป็นของเหลวบรรจุอยู่รอบ ๆ แกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งการหน่วงนิวตรอนที่มีพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) สูงหรือจากนิวตรอนเร็ว (Fast Neutron) ให้ลดลงเป็นนิวตรอนช้า (Thermal Neutron) โดยใช้ปฏิกิริยาสะท้อน การหน่วงนิวตรอนให้ช้าลงเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัว เนื่องจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนใหญ่ จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนที่มีพลังงานสูง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหน่วงนิวตรอนเร็วที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวให้เป็นนิวตรอนช้าโดยเร็วที่สุด เพื่อลดการสูญเสียนิวตรอนจากการถูกจับ (Capturing) ของธาตุอื่นและเพิมโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับธาตุอื่นที่เป็นเชื้อเพลิง สารที่ใช้เป็นตัวหน่วงนิวตรอนจะต้องมีสมบัติ คือ ต้องหน่วงนิวตรอนได้ดี ซึ่งเป็นธาตุเบา เป็นสารที่ไม่จับ (Capture) นิวตรอนมากเกินไป ต้องไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และไม่เป็นพิษและต้องเป็นสารที่หาได้ไม่ยาก และราคาไม่แพงเกินไป และสารที่มีสมบัติเหล่านี้ที่เป็นที่ได้รับความนิยมใช้เป็นตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอน ในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านแกรไฟต์ (Graphite) น้ำบริสุทธิ์ (Light Water) และน้ำมวลหนัก (Heavy Water)

3. ระบบการควบคุม (control)

ระบบการควบคุม หมายถึง ระบบการควบคุมจำนวนนิวตรอนในแกนกลางของปฏิกรณ์นิวตรอน ให้มีจำนวนมากหรือน้อยตามความเหมาะสมเพื่อรักษาค่า K ให้สูง ต่ำ หรือเทียบกับ 1 โดยใช้สารที่มีสมบัติเฉพาะ เช่น โบรอนหรือแคดเมียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนนิวตรอนได้ดี สารเหล่านี้มักจะสอดใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในรูปแท่งควบคุมที่เคลื่อนที่ได้มีว่า แท่งควบคุม (control rod) ซึ่งปกติจะมีแท่งควบคุมอยู่สองชุด ชุดหนึ่งใช้ในยามปกติอีกชุดหนึ่งใช้ในยามฉุกเฉินเมื่อต้องการปิดเครื่อง แท่งควบคุม (contor rods) มีลักษณะและขนาดคล้องแท่งคล้ายแท่งเชื้อเพลิงมีส่วนบนเป็นโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) เป็นตัวดูดจับนิวตรอนส่วนล่างเป็นเนื้อเชื้อเพลิง แท่งควบคุมชนิดนี้มี 4 แท่งและแท่งควบคุมชั่วคราว (transient) ไม่มีเนื้อเชื้อเพลิงอีก 1 แท่ง

4. ระบบระบายความร้อน (cooling system)

พลังงานที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแยกตัวหรือแบบฟิชชันจะเป็นพลังงานจลน์ของนิวไคลด์ที่แตกตัวใหม่ออกมา เมื่อนิวไคลด์ของสารเหล่านี้ชนกับสารที่อยู่ล้อมรอบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แล้วจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่แกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยที่ระบบถ่ายเทความร้อนจะคอยทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนดังกล่าวนี้ออกไปจากแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และปัญหาสำคัญที่คอยลดทอนกำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบการถ่ายเทความร้อนจากแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ดังนั้น ตัวระบายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีหน้าที่หลัก ๆ คือ ป้องกันไม่ให้แท่งเชื้อเพลิงร้อนเกินอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และเป็นตัวพาความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวไปผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้ามีหลักการเช่นเดียวกับการผลิตไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง

เครื่องปฏิกรณ์บางแบบใช้ตัวระบายความร้อนเป็นตัวหน่วงความเร็วนิวตรอนด้วย เช่น น้ำธรรมดาและน้ำมวลหนัก อาจใช้วิธีเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำ หรือเปลี่ยนช่องว่างเล็กน้อย (Void Fraction) ของตัวระบายความร้อนในการควบคุมระดับนิวตรอนของแกนปฏิกรณ์ได้ ซึ่งสารที่นิยมใช้เป็นตัวระบายความร้อนควรมีความสามารถในการพาความร้อน และนำความร้อนได้ดี เป็นสารที่ไม่จับนิวตรอนมากไป เป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันที่ใช้กันมาก ได้แก่ น้ำ น้ำมวลหนัก คาร์บอนไดออกไซด์ และฮีเลียม

5. สารสะท้อน *(reflector)*

นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากฟิชชัน อาจกระเจิงออกไปจากแกนปฏิกรณ์ ทำให้สูญเสียนิวตรอนไปโดยไม่เกิดประโยชน์ สารสะท้อนที่อยู่รอบๆแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทำหน้าที่สกัดกั้นและสะท้อนนิวตรอนให้กลับมาที่แกนปฏิกรณ์ เพื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงต่อไป เป็นการลดการสูญเสียนิวตรอนและทำให้มวลวิกฤตของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ลดลง วัสดุนิยมใช้เป็นสารสะท้อนนิวตรอน คือ เบรลเลียมและคาร์บอน ซึ่งสามารถใช้เป็นทั้งสารหน่วงนิวตรอนและสารสะท้อน

6. เครื่องกำบังรังสี *(shielding)*

เครื่องกำบังรังสี หรือ อาจจะเป็นตัวอาคาร หรือ สิ่งก่อสร้างชั้นนอก ทำหน้าที่กำบังรังสีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกรณ์ฟิชชันวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อป้องกันมิให้รังสีกระจายสู่สิ่งแวดล้อมในกรณีเกิดอุบัติเหตุ มักนิยมใช้เป็นเครื่องกำบังรังสี เช่น คอนกรีต เหล็ก ตะกั่ว

วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงจนถึงการฟื้นฟูสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งเริ่มจากการทำเหมือง (Mining) เพื่อสกัดยูเรเนียมจากนั้นจึงเปลี่ยนรูป (Conversion) ยูเรเนียมให้อยู่ในรูปของก๊าซ ก่อนจะเสริมสมรรถนะ (Enrichment) ให้ยูเรเนียม-235 มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 2-3% สำหรับผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือเสริมสมรรถนะ ให้ยูเรเนียม-235 มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นมากกว่า 90% สำหรับใช้ในอาวุธนิวเคลียร์ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว อาจสกัดซ้ำ (Reprocessing) เพื่อแยกกากนิวเคลียร์ออกและสกัดเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่หรือสกัดพลูโตเนียม สำหรับผลิตอาวุธนิวเคลียร์หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ซึ่งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน (สุวพันธ์ นิลายน, 2554) ดังนี้

1. การทำเหมือง (Mining) และการแยกแร่ (Milling)

ปัจจุบันการสำรวจแหล่งแร่ยูเรเนียม สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม การใช้ภาพถ่ายจากเครื่องบินสำรวจ การสำรวจทางภาคพื้นดินและทางทะเล การขุดเจาะสำรวจ และการ วิเคราะห์ตัวอย่างหินและดิน ซึ่งแต่ละวิธีสามารถให้รายละเอียดข้อมูลในระดับต่าง ๆ ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายแตกต่างกันออกไป สำหรับการทำเหมืองแบบใต้ดินและแบบขุดเจาะจะขึ้นอยู่กับความลึก ขนาด วิธีการถลุงแร่ และลักษณะภูมิประเทศของแหล่งที่พบแร่ยูเรเนียม สินแร่จากเหมืองในแต่ละแห่งจะแตกต่างกันที่ขนาด วิธีการถลุงแร่ และลักษณะภูมิประเทศของแหล่งที่พบ เช่น ในสหรัฐอเมริกาสามารถนำไปถลุงจะได้แร่ยูเรเนียมประมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสินแร่ยูเรเนียม 1 ตัน ประกอบด้วยยูเรเนียม 5 ปอนด์ หรือประมาณ 2-3 กิโลกรัม ในน้ำทะเล 1,000 ตัน มียูเรเนียมประมาณ 1 กรัม ในการสำรวจแหล่งแร่ยูเรเนียม เป็นต้น

เหมืองแร่ยูเรเนียมสามารถแบ่งได้ 2 แบบใหญ่ ๆ คือ เหมืองเปิด (open pit mining) และเหมืองใต้ดิน (underground mining) นอกจากนี้ยังมีเหมืองแร่ที่มีลักษณะพิเศษ ซึ่งสามารถใช้วิธีการเฉพาะเรียกว่า in situ leaching (ISL) โดยการใช้ สารละลายอัดฉีดเข้าไปชะยูเรเนียมออกมาจากแร่ยูเรเนียมที่อยู่ใต้ดินออกมา ยูเรเนียมบางส่วนก็มีการผลิต ได้มาจากผลพลอยได้ (by-product) จากการทำเหมืองแร่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยูเรเนียมโดยตรง

การแยกแร่ยูแรเนียมเพื่อให้ยูเรเนียมในรูปของเค้กเหลือง (Yellow-cake) โดยโรงบดแร่ยูเรเนียมทำการบดให้ขนาดของแร่ยูเรเนียมเล็กลงจนมีขนาด และลักษณะคล้ายน้ำตาลทรายการบดแร่ขั้นตอนสุดท้ายจะเติมน้ำมันลงไปละลายแร่ยูเรเนียมเพื่อทำการแยกสิ่งเจือปนบางอย่างออก แล้วใช้เครื่องสูบสารละลายแร่ยูเรียมนี้ไปเก็บไว้ในถังขนาดใหญ่ และเติมกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ลงไป การละลายแร่ในกรดกำมะถันเพื่อแยกสารอื่นๆ หรือเศษโลหะอื่นออกก่อนที่จะนำไปใช้เครื่องแยกแร่ชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifugal Type) หรือเครื่องแยกแร่แยกเหวี่ยงเหลว (Rate type Classsifiers) ทรายส่วนที่ตกตะกอนจะแยกออกจากสารละลาย ส่วนหางแร่จะดูดไปเก็บไว้เพื่อให้ตกตะกอน สารละลายจะนำเอาไปผ่านกระบวนการแยกยูเรเนียมต่อไป วิธีการแยกอาจใช้แบบต่าง ๆ กัน โรงบดแร่ยูเรเนียมส่วนมากใช้กระบวนการ ที่เรียกว่า การสกัดสารละลายด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ในกระบวนการนี้จะแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายของกรด และทำให้เข้มข้นขึ้น 2-3 เท่าด้วยกรด และนำไปตกตะกอน โดยการนำสารละลายไปทิ้งไว้ในถังหนา ๆ แล้วนำตะกอนจากถังนี้ไปกรองและทำให้แห้งเมื่อนำมาบดเรียกว่า เค้กเหลือง (yellow-cake) ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) ประมาณ 70-80% ตามปกติเค้กเหลืองนี้จะนำไปซื้อขายกันเป็นรูปเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ดิบ

2. การเปลี่ยนยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8)ให้เป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6)

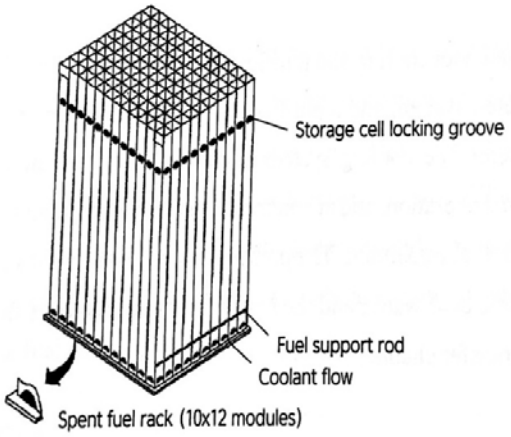
การเปลี่ยนรูปสารประกอบทางเคมีของยูเรเนียม เป็นกระบวนการที่ทำให้ยูเรเนียมอยู่ในรูปที่จะเข้ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป โดยทั่วไปแล้ว จะเปลี่ยนรูปให้เป็นก๊าซออกไซด์เป็นเฮกซะฟลูออไรด์เพื่อเข้าสู่กระบวนการเสริมสมรรถนะต่อไป สำหรับวิธีการเพิ่มความเข้มข้นโดยการนำเค้กเหลืองไปทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น และเปลี่ยนจากยูเรเนียมออกไซด์เป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ ขั้นตอนนี้เรียกว่ากระบวนการทำให้เป็น ด้วยวิธีการละลายยูเรเนียมออกไซด์ในกรดดินประสิวจะได้ยูเรนิลไนเทรต (Uranyl Nitrate) นำมากรองทำให้บริสุทธิ์และเข้มข้นขึ้นแล้วนำไปพ่นลงใน Flidized Bed เพื่อให้ยูเรนิลไนเทรตเปลี่ยนไปเป็นยูเรเนียมไทรออกไซด์ และพ่นอากาศร้อนลงที่ผงยูเรเนียมไทรออกไซด์ จะเปลี่ยนเป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ นำเอายูเรเนียมไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาเคมีกับไนโตรเจน ไฮโดรเจน และกรดไฮโดรฟลูออริกที่ร้อน ยูเรเนียมออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นยูเรเนียมไทรฟลูออไรด์และทำปฏิกิริยาต่อไปเปลี่ยนเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์พร้อมที่จะผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นต่อไป

3. การเสริมสมรรถนะยูเรเนียม -235 (Enrichment)

กระบวนการเสริมสมรรถนะที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือ กระบวนการแพร่แก๊สและวิธีการหมุนเหวี่ยงก๊าซ ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะใช้ยูเรเนียมเฮคซาฟลูออไรด์ (UF_6) ในรูปก๊าซเป็นวัตถุดิบในการเสริมสมรรถนะ กระบวนการเสริมสมรรถนะทั้งสองกระบวนการจะทำงานโดยอาศัยความแตกต่างของมวลระหว่างยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ที่แตกต่างกันเพียง 1% ในการแยกไอโซโทปทั้งสองออกจากกัน โดยหลังจากกระบวนการนี้ เราจะได้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 ประมาณ 3.5% ถึง 5% อยู่ในรูปของยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) ยูเรเนียมที่ได้จากการทำเหมือง ยังต้องผ่านกระบวนการบางอย่าง ที่จะทำให้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าได้ เนื่องจากยูเรเนียมที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชั่น ซึ่งทำให้เกิดพลังงานความร้อนในเตาปฏิกรณ์ได้ คือ ไอโซโทปยูเรเนียม-235 แต่เนื่องจากในธรรมชาติมียูเรเนียม-235 เพียง 0.7% และส่วนที่เหลือคือไอโซโทปยูเรเนียม-238 แต่โรงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 ระหว่าง 3.5% ถึง 5% ทำให้เราต้องนำยูเรเนียมมาผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 ที่เรียกว่า กระบวนการเสริมสมรรถนะ

4. การประกอบเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (fuel fabrication)

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยทั่วไปประกอบด้วยเม็ดเชื้อเพลิง (pellet) ซึ่งนำยูเรเนียมเฮซะฟลูออไรด์ทำให้เป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นผงเพื่ออัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ใส่ไว้ในท่อโลหะผสมเซอร์โคเนียม โดยเชื่อมปิดผนึกกันเรียกว่าแท่งเชื้อเพลิง (fuel rod) ซึ่งมีสมบัติทนทานต่อแรงกดดันสูง โดยอัดเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เซนติเมตร และนำไปเผาในบรรยากาศของไฮโดรเจน เพื่อให้เกิดความหนาแน่นสูงอยู่ในรูปของเซรามิกไม่แตกกระจายง่ายแต่ผิวเรียบ แล้วทำการคัดเลือกเพื่อบรรจุในท่อเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ แท่งเชื้อเพลิงหลายแท่งประกอบเข้าด้วยกันเรียก “มัดเชื้อเพลิง” (fuel assembly)

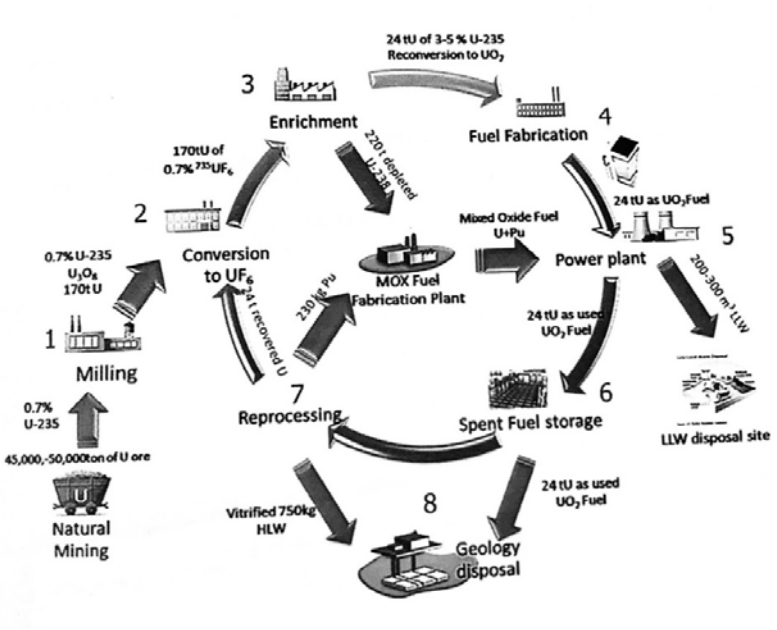


ภาพที่ 5.1 แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ที่มา: (Kim Jae-keun, 2015, p. 129)

5. เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว (Reprocessing)

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วไปได้เฉลี่ย 4 ปี จะมีการสะสมของผลผลิตจากฟิสชันมากขึ้นจนถึงขีดที่ใช้งานต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพไม่ได้ จึงต้องมีการนำออกจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์และใส่แท่งเชื้อเพลิงใหม่แทนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วเมื่อนำออกจากเตาปฏิกรณ์จะมีรังสีสูงมากและร้อนจัด จึงต้องเก็บรักษาไว้ในบ่อเป็นเวลานานหลายสิบปี ซึ่งทำให้รังสีมีปริมาณลดลง หลังจากนั้นอาจมีทางเลือกในการนำแท่งเชื้อเพลิงมาใช้ใหม่ หรือขจัดอย่างถาวรด้วยการเก็บไว้ในสถานที่เหมาะสมแยกจากสิ่งแวดล้อมของมนุษย์ สำหรับแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วต้องการนำกลับมาใช้ได้อีก ต้องเข้าสู่กระบวนการเสริมสมรรถนะเพื่อผลิตเชื้อเพลิงใหม่ โดยนำยูเรเนียมจากการสกัดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วไปเพิ่มความเข้มข้นก่อน ส่วนพลูโทเนียม-239 ซึ่งเป็นโลหะหนักเหมือนยูเรเนียม แต่มีพิษสูงและเป็นอันตรายต่อการจับต้อง การจับต้องและการแต่งแร่พลูโทเนียมสามารถทำให้ปลอดภัยโดยเทคนิคการควบคุมระยะไกล (เช่น การใช้หุ่นยนต์บังคับ ผู้ปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องสัมผัสเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เลย) สารประกอบพลูโทเนียมออกไซด์สามารถนำมาผสมกับยูเรเนียมธรรมชาติ หรือส่วนที่เหลือจากการถลุงแล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยการออกแบบให้มีสารที่ใช้ในการแตกตัวในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 3 เปอร์เซ็นต์ การทำส่วนผสมของยูเรเนียมและพลูโทเนียมจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว มาสร้างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่ได้ เป็นการเริ่มต้นวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์



ภาพที่ 5.2 วัฏจักรนิวเคลียร์

ที่มา: (สุพิชชา จันทรโยธา, 2559, น. 127)

ต้นกำเนิดกากกัมมันตรังสี

กากกัมมันตรังสี หมายถึง ของเสียทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ที่ประกอบหรือปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีที่ไม่ใช้แล้ว ในระดับกัมมันตภาพรังสีสูงกว่าเกณฑ์ปกติในธรรมชาติ สำหรับการผลิตพลังงานนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์มีกากกัมมันตรังสี ดังรายละเอียดดังนี้

กากกัมมันตรังสีในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบ่งตามลักษณะการเกิดได้ 2 ประเภท คือ

1. กากกัมมันตรังสีที่เกิดโดยปฏิกิริยาแตกตัวของเชื้อเพลิงยูเรเนียม ทำให้เกิดธาตุกัมมันตรังสีใหม่มากชนิด สทรอนเซียม (Strontium) และซีเซียม (Cesium) เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดประมาณ 5 เปอร์เซ็นของปฏิกิริยาแตกตัวทั้งหมด นอกจากนี้ไอโซโทปของธาตุพลูโทเนียม (Plutonium) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากการดูดจับนิวตรอนของยูเรเนียม-238

จากหลักเกณฑ์การใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่จำนวน 1,000 กิโลกรัม ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียม-235 ปริมาณ 3.3 เปอร์เซ็น เมื่อใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไป 3 ปี ความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 จะลดลงเหลือเพียง 0.8 เปอร์เซ็น และยูเรเนียม-235 ถูกใช้ไปประมาณ 25 กิโลกรัม และ

เปลี่ยนไปเป็นกากกัมมันตรังสีทั้งหมด ส่วนยูเรเนียม-238 ถูกใช้ประมาณ 24 กิโลกรัม โดยเปลี่ยนไปเป็นพลูโทเนียม และธาตุอื่น ๆ พลูโทเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อีกชนิดหนึ่ง ในขณะที่อยู่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว และให้พลังงานบางส่วนออกมาด้วย เมื่อครบอายุการใช้งานในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วจะมีพลูโทเรียมเหลืออยู่ประมาณ 9 กิโลกรัม กากกัมมันตรังสีประมาณ 35 กิโลกรัม และมีธาตุอื่นหนักประมาณ 5 กิโลกรัม กากกัมมันตรังสีเหล่านี้ ถ้าหากปล่อยให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอกเกินกว่าเกณฑ์กำหนดไว้ อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนที่ต้องป้องกันที่เป็นก๊าซ มีคริปทอน ซีนอน และไอโอดีน ส่วนที่เป็นของแข็งมีเทลลูเรียม ซีเซียม สทรอนเซียม และรูทีเนียม โดยเฉพาะไอโซโทปของไอโอดีน-131 ซีเซียม-137 และสทรอนเซียม-90

ผลที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เมื่อเริ่มต้น 1,000 กิโลกรัม มียูเรเนียม-238 จำนวน 967 กิโลกรัม และยูเรเนียม-235 จำนวน 33 กิโลกรัม เมื่อใช้ไปในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ระยะเวลา 3 ปี ยูเรเนียม-238 จะถูกใช้ไปจำนวน 24 กิโลกรัม คงเหลือยูเรเนียม-238 อีก 943 กิโลกรัม ส่วนยูเรเนียม-235 ใช้ไปจำนวน 25 กิโลกรัม คงเหลือยูเรเนียม-235 อีก 8 กิโลกรัม กลายเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาแตกตัว จำนวน 35 กิโลกรัม และไอโซโทปต่าง ๆ ของพลูโทเนียม 8.9 กิโลกรัม ยูเรเนียม-236 จำนวน 4.6 กิโลกรัม เนปจูเนียน-237 จำนวน 0.5 กิโลกรัม อะเมริเซียม-243 จำนวน 0.12 กิโลกรัม และคูเรียม-244 จำนวน 0.04 กิโลกรัม

2. สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากการสึกกร่อนที่แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งระบายความร้อนโดยน้ำเป็นตัวกลางที่นำความร้อนจากผิวของท่อเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มาถ่ายเทให้น้ำเย็นอีกระบบหนึ่งที่ชุดเครื่องผลิตไอน้ำ เมื่อใช้ไปนาน ๆ จะมีเศษผงชิ้นเล็ก ๆ จากการสึกกร่อนของท่อและชิ้นส่วนอุปกรณ์จำนวนเล็กน้อย พวกเหล็ก โคบอลต์ แมงกานีส เป็นต้น ปะปนอยู่ในน้ำไหลเวียนอยู่ในระบบระบายความร้อน และผ่านเข้าไปในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เศษผงเหล่านี้จึงถูกอาบด้วยอนุภาคนิวตรอน กลายเป็นสารกัมมันตรังสีอย่างต่ำ ซึ่งส่วนมากมีครึ่งชีวิตสั้น ในระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จะมีระบบกำจัดเศษผงเล็ก ๆ เหล่านี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดผลเสียหายต่ออุปกรณ์และป้องกันไม่ให้ไหลออกไปภายนอกด้วย

นอกจากนี้ ไอโซโทปของไนโตรเจนและตริเตียมที่เกิดจากน้ำ เมื่อถูกอนุภาคนิวตรอนในช่วงเวลานาน ๆ บางส่วนแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจน เมื่อถูกรังสีนิวตรอนอีกต่อไปอีก ก๊าซไฮโดรเจนส่วนน้อยจะกลายเป็นตริเตียม ส่วนก๊าซออกซิเจนจะกลายเป็นไอโซโทปของไนโตรเจน-16 ซึ่งเกิดขึ้นโดยมีครึ่งชีวิตเพียง 17 วินาทีเท่านั้น ก๊าซกัมมันตรังสีเหล่านี้จะสลายตัวหมดในระบบจัดการกากกัมมันตรังสีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก่อนปล่อยออกภายนอก

ระบบการขจัดกากกัมมันตรังสี

กากกัมมันตรังสีแบ่งตามสถานะของกากเป็น 3 ประเภท คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง โดยกากกัมมันตรังสีที่เป็นก๊าซ ได้แก่ ก๊าซที่เล็ดลอดจากแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นำมาทำการแยกเอาสารกัมมันตรังสีออก หรือเก็บสารกัมมันตรังสีไว้เพื่อให้สารกัมมันตรังสีนั้นสลายไป สำหรับสารกัมมันตรังสีที่ไม่สามารถขจัดได้ในระยะนี้ก็จะแยกออกมาทำให้เป็นของแข็งเพื่อเก็บส่วนอากาศหรือของเหลวที่ได้แยกเอาสารกัมมันตรังสีออกแล้วผ่านการตรวจสอบเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือปล่อยออกสู่ภายนอก การปล่อยน้ำ หรืออากาศออกจากโรงไฟฟ้าจะต้องทำการตรวจวัดเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสารกัมมันตรังสีเจือปนอยู่ หรือถ้ามีก็ต้องให้มีปริมาณน้อยที่สุดและจะต้องมีปริมาณที่ต่ำกว่าเกณฑ์การอนุญาตให้ปล่อยสารกัมมันตรังสีออกสู่ภายนอก (International Commission on Radiological Protection : ICRP) ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ยอมรับในนานาชาติทั่วโลก

ระบบการขจัดกากกัมมันตรังสีในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แบ่งเป็น 3 ระบบตามลักษณะของกากกัมมันตรังสี (สุวพันธ์ นิลายน, 2554) คือ

1. ก๊าซกัมมันตรังสีจากปฏิกิริยาแตกตัว และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ส่วนใหญ่จะนำออกจากน้ำระบายความร้อนที่ระบบถังควบคุมปริมาณน้ำ (Volume Control Tank) และบางส่วนนำออกทางถังส่งออกน้ำระบายความร้อนของปฏิกรณ์ (Reactor Coolant Drain Tank) ถังเพื่อการระเหยกลับของโบรอน (Boron Recycle Evaporator) และถังน้ำที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนโดยวิธีการรวบรวมก๊าซเหล่านั้นไว้ภายในถังเก็บก๊าซที่ทำการอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไปผสมกับก๊าซไฮโดรเจนให้มีความเข้มข้นขึ้นเพื่อเป็นการควบคุมไม่ให้ถึงจุดระเบิดได้ ก๊าซจากถังเหล่านี้จะส่งเข้าไปในระบบขจัดกากโดยการให้ผ่านท่อน้ำ และเครื่องอัดความดัน (Compressure) เข้าสู่ระบบการรวมตัว เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เติมเข้าไปทำปฏิกิริยากลายเป็นน้ำ ส่วนก๊าซที่เหลือจะส่งผ่านไปยังถังเก็บสลายก๊าซที่มีปริมาตรสามารถเก็บก๊าซไว้ได้นานถึง 60 วัน ก๊าซกัมมันตรังสีส่วนใหญ่สลายตัวไป เมื่อทำการตรวจสอบ ปรากฏว่าระดับกัมมันตรังสีต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดแล้ว จึงปล่อยผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซที่ประกอบด้วยเครื่องกรองก๊าซ ที่มีประสิทธิภาพในการกรองถึง 99.95 เปอร์เซ็น (บางประเทศใช้วิธีทำให้ตกตะกอน) แล้วจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศในสภาวะที่การกระจายของบรรยากาศดี

2. กากที่เป็นของเหลวในระบบการขจัดกากกัมมันตรังสี แบ่งกากที่เป็นของเหลวออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ต้องนำกลับไปใช้ใหม่ ได้แก่ น้ำที่รั่วหรือถ่ายเทออกจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้า วาล์วน้ำ และน้ำจากระบบควบคุมปริมาณน้ำในถังเก็บ น้ำเหล่านี้มาจากน้ำในระบบระบายความร้อนจากแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นน้ำที่บริสุทธิ์ที่มีกรดยอริกผสมอยู่ และอาจมีสารกัมมันตรังสีเจือปนด้วย น้ำเหล่านี้จะไหลมารวมกันที่ถังเก็บกากของเหลว การแยกสารเจือปนออกโดยวิธีการกลั่นและให้ผ่านเครื่องแยกสิ่งปลอมปน (Demineralizer) อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้น้ำที่สะอาด สามารถนำกลับไปใช้ได้อีก

ส่วนที่ต้องทิ้งเป็นน้ำที่ได้จากระบบน้ำทิ้งจากหม้อน้ำ (Steam Generator Blowdown) น้ำจากห้องทดลอง น้ำจากการถ่ายออกจากอุปกรณ์ในระบบการผลิตไอน้ำ น้ำจากการล้างพื้นอาบน้ำและซักเสื้อผ้า ต้องทำการตรวจสอบจำแนกประเภทเพื่อการขจัดกากด้วยวิธีการที่เหมาะสม ความแรงของรังสีต่ำมากคือไม่เกิน 10^3 เบกเคอเรล/ลิตร เช่น กรองตกตะกอนโดยวิธีทางเคมี ผ่านเครื่องแยกสิ่งปลอมปนหรือการกลั่น อาจใช้วิธีเดียวหรือหลายวิธีประกอบกันตามลักษณะของชนิดและสารกัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ เมื่อผ่านการตรวจสอบจนสะอาดแล้วจึงปล่อยออกโดยผสมกับน้ำทิ้งจากระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้า

3. การที่เป็นของแข็งชนิดที่มีกัมมันตรังสีระดับต่ำและระดับกลาง

กากกัมมันตรังสีระดับต่ำ ประเภทเครื่องมือเครื่องใช้ที่เปรอะเปื้อนสารรังสี หรือฝุ่นกัมมันตรังสี เศษยาง ไส้กรองที่ใช้แล้ว ตะกอนจากระบบขจัดกากี่เป็นก๊าซ และของเหลวนำมาเก็บไว้อย่างมิดชิดในที่เก็บ เพื่อรอให้กัมมันตรังสีสลายตัวไปด้วยวิธีการแยกประเภท และทำให้มีขนาดเล็กที่สุด ห่อหุ้มด้วยของที่แข็งแรง และทนทานตามลักษณะของกากนั้น เชาน กระดาษ หรือเศษผี่เปรอะเปื้อนสารกัมมันตรังสี ยางหรือสารจากระบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) นำมาเผาให้เป็นขี้เถ้าในเตาขจัดกากที่มีระบบทำความสะอาดควัน ส่วนขี้เถ้านำมาผสมกับซีเมนต์ในถังขนาด 200 ลิตร ส่วนเครื่องมือเครื่องใช้บางชนิดนำบรรจุถุงพลาสติกบรรจุถังและอัดผสมซีเมนต์ หรือยางมะตอยบรรจุถัง 200 ลิตร นำไปวัดปริมาณกัมมันตรังสีเพื่อแยกประเภทความแรงของกัมมันตรังสีเพื่อการเก็บรักษาต่อไป สำหรับกากกัมมันตรังสีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาด 1,000 เมกะวัตต์ 1 โรงจะมีกากปริมาณราว ๆ 400-500 ถัง/ปี สถานที่เก็บกากกัมมันตรังสีซึ่งเมื่อทำเป็นของแข็งแล้วจะบรรจุไว้ในถังเหล็กขนาดมาตรฐาน 200 ลิตร ผสมกับซีเมนต์หรือน้ำมันดิน (Bitumen) ตามความเหมาะสม และจัดจำแนกออกตามระดับความแรงของกัมมันตรังสี สถานที่เก็บกากกัมมันตรังสีซึ่งทำเป็นของแข็งนี้ในต่างประเทศมีหลายวิธี คือ

3.1 เก็บในบ่อใต้ดินบริเวณโรงไฟฟ้า ลักษณะเดียวกับกากประเภทแรก แต่ปิดบ่อด้วยฝาคอนกรีตอย่างหนา

3.2 เก็บในเหมืองถ่านหิน เหมืองเกลือ หรือเหมืองทองที่เลิกใช้แล้ว แต่จะต้องศึกษาสภาพธรณีวิทยา น้ำใต้ดิน รวมทั้งผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเสียก่อ แล้วทำสถานที่เก็บกากของแข็งประเทศเยอรมนี ตะวันตก และสหรัฐอเมริกาเคยนำมาใช้แล้ว

3.3 เก็บที่เกาะห่างไกล เช่น ไต้หวัน กำลังใช้วิธีการนี้อยู่ เพราะมีเกาะที่อยู่ห่างไกลชุมชนง่ายต่อการดูแลรักษาความปลอดภัย การเก็บจะทำเป็นอุโมงค์ซึ่งจัดแบ่งเป็นสัดส่วนตามระดับความแรงของรังสี การเคลื่อนย้ายถังบรรจุกากกระทำด้วยระบบควบคุมทางไกล (Remote Control)

กากกัมมันตรังสีปานกลางนี้ มีความแรงของรังสีประมาณ 100 ถึง 1,000 เท่าของกากกัมมันตรังสีต่ำ แต่จะไม่เกิน 10^6 เบ็กเคอเรล/ลิตร ความแรงของรังสีที่ผิวถังจะไม่เกิน 1 ใน 100,000 เท่าของความแรงรังสีภายใน ปัญหาการจัดการกับกากประเภทนี้ในอนาคตขึ้นอยู่กับปริมาณของกากมากกว่าระดับรังสี กากกัมมันตรังสี 2 ประเภทที่กล่าวไปแล้วนั้น สร้างปัญหาหรือความวิตกไม่มากนัก เพราะการกำจัดค่อนข้างง่าย การจัดการกับกากกัมมันตรังสีคือผลิตผลของปฏิกิริยาแตกตัวในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เท่านั้นที่มีความยุ่งยาก แต่ก็มีหนทางกำจัดอย่างปลอดภัยได้

สำหรับการเก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วในขั้นสุดท้าย มีวิธีที่นับว่าดีเป็นวิธีที่ประเทศสวีเดนใช้อยู่ คือการหล่อเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วเพื่อเก็บอย่างถาวรในแท่งทองแดง แล้วฝังในที่เก็บซึ่งเป็นชั้นดินเหนียว (Clay) หรือชั้นหินเบื้องล่างที่คงที่ (Bed Rock) ซึ่งชั้นดินเหนียวสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของหินส่วนน้อยด้วย

แหล่งที่มาของกากกัมมันตรังสีระดับสูงทั้งหมดจะอยู่ภายในแท่งเชื้อเพลิง แต่แท่งเชื้อเพลิงตลอดทั้งแท่งนั้นไม่ใช่กากกัมมันตรังสีระดับสูง เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ยังเป็นประโยชน์อีกมากมายต่อเมื่อมีการสกัดเชื้อเพลิงออกไปใช้แล้ว สารต่าง ๆ ที่เหลือใช้จากกระบวนการจึงนับเป็นกากกัมมันตรังสี และสารที่จะนับว่าเป็นกากกัมมันตรังสีระดับสูงนั้นก็คือ สารจากปฏิกิริยาแตกตัวเท่านั้น

แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วเมื่อนำออกมาใหม่ ๆ จะมีอุณหภูมิสูงมาก ต้องเก็บไว้ในบ่อน้ำภายในโรงไฟฟ้าเป็นเวลาหลายเดือนจึงนำส่งไปโรงงานสกัดกาก เพื่อทำการแยกส่วนแท่งเชื้อเพลิงออกในที่ปกปิดมิดชิด กากกัมมันตรังสีสูงซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายกรดไนทริกจะถูกแยกออกเพื่อขจัดด้วยวิธีเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังต่อไปนี้

1. ทำให้เข้มข้น และเก็บไว้ในถังคอนกรีตหุ้มด้วยเหล็กกล้า มีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน วิธีการนี้ให้ความปลอดภัยดี แต่ไม่สะดวกแก่การเก็บนาน ๆ หลายสิบปี จึงเป็นการเก็บรักษาชั่วระยะหนึ่ง

2. ทำให้แห้งเป็นผง โดยนำสารละลายกรดไนทริกผ่านความร้อนสูงขนาด 900 องศาเซลเซียส บรรจุในถังเหล็กกล้า 2 ชั้น ระหว่างชั้นกั้นด้วยตะกั่ว

3. ผสมกับสารพวกแก้ว โดยทำให้เป็นผงเช่นเดียวกับวิธีแรก แต่นำไปผสมกับสารพวกแก้วหลอมละลายภายใต้อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส บรรจุในกระบอกเหล็กกล้าหนา 3-4 มิลลิเมตร หุ้มด้วยโลหะอีก 2 ชั้น ชั้นในเป็นตะกั่วหนา 100 มิลลิเมตร ชั้นนอกเป็นไททาเนียมหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร

จากนั้นกากกัมมันตรังสีจะถูกเก็บไว้ในที่เก็บชั่วคราวรอเวลาจะนำไปขจัดอย่างถาวรต่อไป ในการขจัดอย่างถาวรนั้น ได้มีการศึกษาและทดลองปฏิบัติมากมายหลายวิธี ตัวอย่างเช่น กำจัดออกไปจากโลก โดยบรรจุใส่ภาชนะความทนทานสูง แล้วยิงด้วยจรวดออกไปในอวกาศ ฝังถังเก็บในชั้นหินลึกในระดับที่ไม่ต่ำกว่า 1,000 เมตร โครงสร้างเป็นหินแกรนิต ซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันน้ำได้ดี เก็บไว้ในเหมืองเกลือ เก็บใต้แผ่นน้ำแข็ง หรือเก็บในชั้นดินเหนียว เป็นต้น

กากกัมมันตรังสีจากปฏิกิริยาแตกตัว ประกอบด้วยไอโซโทปต่าง ๆ เกือบ 200 ไอโซโทป แต่ส่วนใหญ่มีครึ่งชีวิตสั้น ซึ่งจะสลายตัวไปหมดในเวลาไม่นานนัก คงเหลือธาตุกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตเป็นเดือน และมีไม่กี่ชนิดที่เป็นปี สำหรับการเก็บในทางปฏิบัติ ซีเซียม-144 มีครึ่งชีวิต 28 วัน มีอัตราการแผ่รังสีสูงสุดในระยะหนึ่งมีแรก ส่วนในระยะเวลา 10 ถึง 500 ปีต่อไป คือ สทรอนเซียม-90 และซีเซียม-137 ซึ่งมีครึ่งชีวิตประมาณ 30 ปี (ที่เป็นไอโซโทปที่มีอัตราการแผ่รังสีสูงสุดในกากกัมมันตรังสีทั้งหมด) ที่ต้องคำนึงถึงในการเก็บ ดังนั้น ต้องจัดหาวถานที่และภาชนะเก็บไว้ให้นานถึง 500 ปี ส่วนธาตุกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวมาก ๆ มีเกิดขึ้นน้อย และมีอัตราการแผ่รังสีต่ำมาก ซึ่งต่ำกว่าอัตราการแผ่รังสีของแร่ยูเรเนียมที่ขุดขึ้นมาจากธรรมชาติ

ตารางที่ 5.1 ครึ่งชีวิตของกากกัมมันตรังสีที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวและการสลายตัว

ไอโซโทป	ครึ่งชีวิต	อัตราการแผ่รังสี		
		1 ปี	10 ปี	100 ปี
ไอโอดีน-131	8 วัน	-	-	-
รูทีเนียม-103	40 วัน	20	-	-
ซีเรียม-144	284 วัน	2.5×10^4	9	-
รูทีเนียม-106	1 ปี	1.9×10^3	2	-
คริปทอน-85	11 ปี	3×10^2	2×10^2	0.6
สทรอนเซียม-90	29 ปี	3×10^3	2.5×10^3	2.9×10^2
ซีเซียม-137	30 ปี	3.2×10^3	2.6×10^3	3.2×10^2
ทามาเรียม-151	90 ปี	4	4	2
เทคนีเซียม-99	200,000 ปี	0.5	0.5	0.5
ไอโอดีน-129	17,000,000 ปี	0.001	0.001	0.001

ที่มา: (สุวพันธ์ นิลายน, 2554, น. 202)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์

ในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์ที่จะทำการเกิดธาตุใหม่นั้น (พัฒนสุข ชำนินอก, 2555) พิจารณาจากสมการที่ 5.1

$$ {}_0n^1 + {}_{92}U^{238} \rightarrow {}_{92}U^{236} $$

$$ {}_{92}U^{236} \rightarrow {}_AX^B + {}_CY^D + {}_0n^1 + E \qquad (5.1) $$

เมื่อ $A+C=92$ และ $B+D=236$

สำหรับ X และ Y

$$ {}_0n^1 \quad + \quad {}_{92}U^{235} \quad \rightarrow \quad {}_{54}Xe^{140} \; + \; {}_{38}Sr^{94} \; + \; 2\,{}_0n^1 \; + \text{ พลังงาน 200 MeV} $$

↑ ↑ ↑ ↑

นิวตรอนเข้า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ธาตุที่เกิดใหม่ นิวตรอนเร็ว

นิวตรอนอิสระที่ทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอะตอมของธาตุยูเรเนียม-235 ได้ง่าย ๆ ควรมีความเร็วน้อยกว่า หรือประมาณ 2,200 เมตร/วินาที และอะตอมของธาตุที่เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เท่านั้น จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับนิวตรอนอิสระ แต่ไม่จำเป็นเสมอไป เพราะบางครั้งนิวตรอนอิสระอาจถูกจับไว้เฉย ๆ ไม่เกิดปฏิกิริยาแตกตัว แต่จะเปลี่ยนอะตอมของธาตุยูเรเนียม-235 เป็นไอโซโทปของธาตุยูเรเนียม

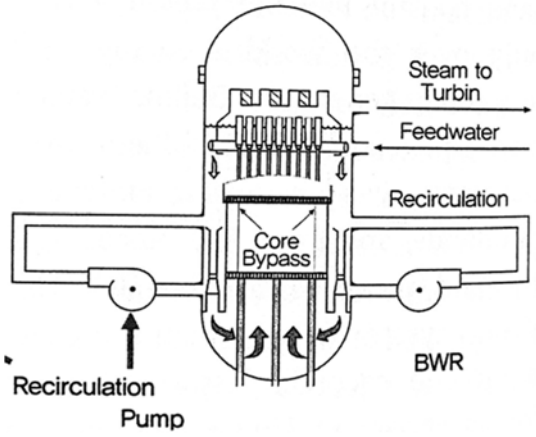
ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

การแบ่งประเภทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีวิธีแบ่งได้หลายแบบ คือ (สุวพันธ์ นิลายน, 2554).

1. การแบ่งประเภทตามประสบการณ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

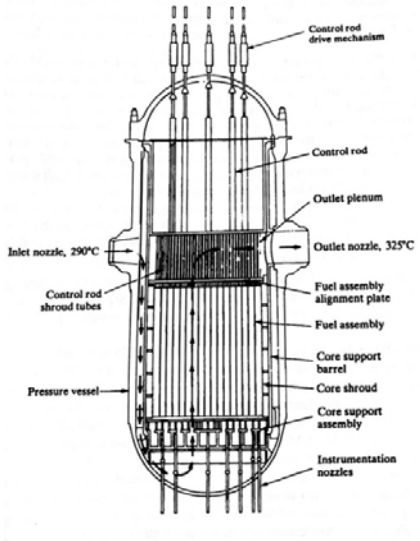
ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าของประเทศต่างๆ ทั่วโลกมีวิธีการออกแบบต่างกัน แต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสีย และมีประสบการณ์ในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต่างกัน

1.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบที่มีประสบการณ์ในการเดินเครื่องในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ออกแบบเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะ มิใช่เพื่อการวิจัยหรือการทดสอบ มีขนาดกำลังผลิตของเครื่องมากกว่า 100 เมกะวัตต์ และมีสถิติในการเดินเครื่องเป็นเวลานานพอสมควร (ไม่ควรน้อยกว่า 1 ปี) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนี้ ได้แก่ แบบปฏิกรณ์น้ำธรรมดา (Light Water Reactor: LWR) มีอยู่ 2 ชนิด คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor: BWR) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบความดันสูง (Pressurized Water Reactor: PWR) กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก (Heavy Water Reactor: HWR หรือ CANDU) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบก๊าซ (Gas cooled Reactor: GCR)



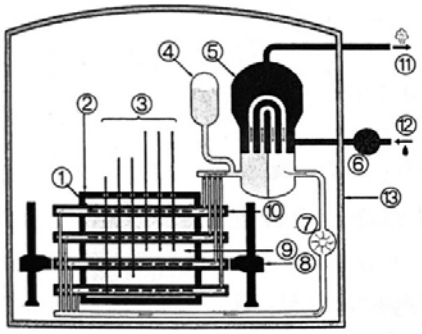
ภาพที่ 5.3 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor: BWR)

ที่มา: (Si-Hwan KIM et al, 2012, p. 264)



ภาพที่ 5.4 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบความดันสูง (Pressurized Water Reactor: PWR)

ที่มา: (John R. and Anthony J, 2001, p. 138)



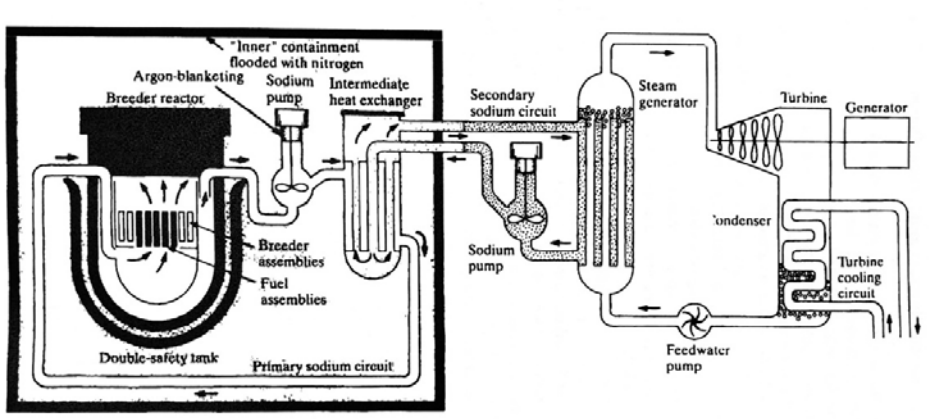
① Nuclear fuel assembly	⑧ Refueling machine
② Caladria	⑨ Heavy water moderator
③ Control rod	⑩ Pressure tube
④ Pressurizer	⑪ Steam
⑤ Steam generator	⑫ Feed water
⑥ Feed water pump	⑬ Containment
⑦ reactor coolant pump	

ภาพที่ 5.5 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก (Heavy Water Reactor: HWR หรือ CANDU)

ที่มา: (Si-Hwan KIM et al, 2012, p. 270)

1.2 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบที่กำลังทดลองเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และยังไม่นิยมใช้ เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบก๊าซพัฒนา (Advanced Gas Cooled Reactor: AGR) เคื่อง ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบก๊าซอุณหภูมิสูง (High Temperature Gas Cooled Reactor: HTGR) และ เป็นต้น

เนื่องจากจุดประสงค์ที่สำคัญของกิจการไฟฟ้า คือ การจัดให้มีกระแสไฟฟ้าใช้ตลอดเวลาด้วย ราคาพอเหมาะพอควร ดังนั้น เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าที่แน่ใจว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ ต้องการจะเป็นเครื่องที่เหมาะสม และต้องมีความปลอดภัยในการเดินเครื่องด้วยจากการพิจารณาด้าน ต่างๆ พบว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำธรรมดา (LWR) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำ มวลหนัก (CANDU) เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 5.6 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบรีดเดอร์โลหะเหลว (Liquid Metal Fast Breeder Reactor: LMFBR)

ที่มา: (John and Antrony, 2001, p. 171)

2. การแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2.1 ประเภทปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มุ่งผลิตนิวตรอนเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัย ผลิตสารกัมมันตรังสีเพื่อใช้ในกิจการวิทยาศาสตร์สาขาต่างๆ พลังงานความร้อนที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณีนิวเคลียร์ชนิดนี้ มักจะอยู่ในระดับต่ำมินำไปใช้ประโยชน์

2.2 ประเภทปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่สร้างขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อผลิตพลังงานความร้อน สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในรูปพลังงานอื่น ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับสูงมาก วิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้แก่น้ำจนกลายเป็นไอ แล้วนำไอน้ำนั้นไปหมุนกังหันไอน้ำที่มีเพลาต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าที่เราเรียกว่า โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่ถ้าต่อเพลากับกังหันไอน้ำกับใบพัด ก็จะเป็นพลังงานขับเคลื่อนในเรือผิวน้ำให้เป็นเรือเดินสมุทรพลังงานนิวเคลียร์ ใช้ในเรือใต้น้ำก็เป็นเรือดำน้ำพลังงานนิวเคลียร์

3. การแบ่งตามชนิดสารระบายความร้อนและสารหน่วงนิวตรอน

3.1 ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำธรรมดา ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนี้ใช้น้ำธรรมดาเป็นทั้งสารระบายความร้อนและสารหน่วงอิเล็กตรอน โดยใช้ยูเรเนียม -235 ที่มีความเข้มข้นประมาณ 3 เปอร์เซ็นเป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ผลิตกระแสไฟฟ้ากันในประเทศต่างๆ มี 2 แบบ คือ ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด และปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำไม่เดือด เนื่องจากอยู่ภายใต้ความกดดันสูง

3.2 ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนี้ใช้น้ำมวลหนักเป็นสารหน่วงนิวตรอน ส่วนสารระบายความร้อนอาจจะใช้น้ำธรรมดา น้ำมวลหนัก หรือสารอื่นๆ สำหรับเชื้อเพลิงใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ

3.3 ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบก๊าซ ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนี้ใช้ก๊าซเป็นสารระบายความร้อน มีแกรไฟต์เป็นสารหน่วงนิวตรอน ใช้ยูเรเนียม -235 เข้มข้นเป็นเชื้อเพลิง

3.4ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบสระน้ำ ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบนี้เป็นปฏิกรณ์นิวเคลียร์น้ำธรรมดาเพียงแต่ความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 สูงกว่าปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำธรรมดาที่ใช้ทั่วไป

และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วางอยู่ในสระน้ำ ใช้น้ำในสระทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอน ระบายความร้อน และป้องกันรังสี ปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบสระน้ำนี้มักใช้ในกิจการวิจัยเป็นส่วนใหญ่

อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ สามารถควบคุมปฏิกิริยาการแตกตัว และควบคุมพลังงานที่เกิดขึ้นได้ตามต้องการ เรียกว่า “เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์” ในส่วนของปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะต้องมีอุปกรณ์ควบคุมปฏิกิริยาแตกตัว มีเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และมีสารระบายความร้อนตามหลักวิชาการโดยทั่วไปในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์นั้น เชื้อเพลิงที่ใส่ในเตาปฏิกรณ์คือวัสดุที่ใช้นิวตรอนยิงให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัว เป็นวัสดุที่แตกตัวได้ง่าย แม้นิวตรอนจะมีพลังงานต่ำมากเกือบใกล้ศูนย์ เราเรียกว่า วัสดุฟิสไซล์ (Fissile Meterial) ได้แก่ ยูเรเนียม -233 ยูเรเนียม -235 และพลูโทเนียม -239 วัสดุฟิสไซล์ที่พบในธรรมชาติมีเพียงชนิดเดียวเท่านั้นคือยูเรเนียม -235 ปนอยู่กับยูเรเนียม -238 ด้วย นิวตรอน ทอเรียม -232 และยูเรเนียม -238 มีอยู่มากในธรรมชาติเราเรียกว่าเป็นวัสดุเฟอร์ไทล์ (Fertile Material)

เมื่อยิงนิวตรอนไปยังนิวเคลียสของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นิวเคลียสหนึ่งจะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน พร้อมทั้งเกิดนิวตรอนใหม่อีก 2-3 ตัว นิวตรอนที่เกิดใหม่นี้จะชนกับนิวเคลียสของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ทำให้เกิดการแตกตัวของนิวเคลียสตัวอื่นๆ ต่อไปจนเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่การแตกตัวของนิวเคลียส แต่เชื้อเพลิงต้องการนิวตรอนไปทำปฏิกิริยาเพียง 1 ตัวเท่านั้น

อัตราการเกิดและการสูญหายของนิวตรอนจะต้องสมดุลกัน จึงต้องทำให้เกิดการสูญหายของนิวตรอนไปจากระบบปฏิกิริยาลูกโซ่คือถูกดูดจับไว้ภายใน ในทางปฏิบัติจึงต้องมีทางจัดการส่วนผสมและปริมาตรของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้เกิดความสมดุลของนิวตรอนในปฏิกิริยาโดยใช้เชื้อเพลิงของนิวเคลียร์และส่วนประกอบอื่นๆ มีความสอดคล้องกันในภาวะมวลวิกฤต และปริมาตรวิกฤต

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวมีเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหนึ่งที่แตกตัวได้ยาก คือ ยูเรเนียม-238 และทอเรียม -232 ในบางส่วนจะดูดจับนิวตรอนไว้กลายเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่แตกตัวได้คือพลูโทเนียม -239 และยูเรเนียม -233 การที่เกิดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ขึ้นใหม่นี้คิดจากอัตราส่วนการแปรเปลี่ยน (Conversation Ratio) คือ จำนวนอะตอมของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เกิดใหม่ต่อจำนวนอะตอมของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เดิมที่ถูกใช้ไป ตามปกติในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยทั่วไปมักจะมีค่าน้อยกว่า 1 แต่ถ้าปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีอัตราส่วนการแปรเปลี่ยนที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิงที่สิ้นเปลืองไปเป็นปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เรียกว่า บรีดเดอร์ (Breeder) ฉะนั้น ขณะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นลูกโซ่ ส่วนผสมของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลง เช่น มีปริมาณเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ลดลง มีธาตุใหม่เกิดขึ้น บางธาตุดูดนิวตรอน เช่น ซีนอน -135 และซีแมเรียม -149 บางธาตุเกิดเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่ เช่น พลูโทเนียม -239 และยูเรเนียม -233 ทำให้เพิ่มนิวตรอนการควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จึงมีการปรับส่วนผสมของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้อยู่ในสภาวะมวลวิกฤตตลอดเวลาในค่า

ของรีแอกทิวิตี้ (Reactivity) กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นค่ารีแอกทิวิตี้ทางบวก และปฏิกิริยาลดน้อยลงเมื่อค่ารีแอกทิวิตี้ทางลบ โดยการเลื่อนแท่งควบคุมปฏิกิริยาแตกตัวอย่างช้าๆ (ตามปกติทำโดยอัตโนมัติ) นอกจากนี้การสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ขึ้นอยู่กับการจัดวางมัดเชื้อเพลิงด้วย ถ้าเชื้อเพลิงทุกมัดมีความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 เท่ากันตลอด เชื้อเพลิงส่วนที่อยู่ใจกลางปฏิกรณ์จะทำปฏิกิริยาสูงสุด เนื่องจากนิวตรอนหนาแน่นมากกว่ารอบนอก และจะค่อยๆ ลดปฏิกิริยาแตกตัวต่ำสุด เพื่อความสมดุลในการใช้เชื้อเพลิงจึงจัดวางมัดเชื้อเพลิง หรือบรรจุแท่งเชื้อเพลิงตามชนิดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งให้มีความเข้มข้นด้านในต่ำกว่าด้านนอก เพื่อบังคับปฏิกิริยาแตกตัวสม่ำเสมอตลอดทั้งแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีประสิทธิภาพ มีความปลอดภัย ลดค่าใช้จ่ายในการทำยูเรเนียมเข้มข้นและไม่จำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์พร้อมกันทั้งหมด จะเปลี่ยนแปลงเพียงบางส่วนเฉพาะบริเวณที่อยู่ด้านในเท่านั้น โดยใช้วิธีการขยับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่อยู่ด้านนอกเข้าไปแทนที่พร้อมกับเติมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ชุดใหม่ไว้ด้านนอกรอบๆ

ตารางที่ 5.2 ความแตกต่างของระบบในปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบต่างๆ

ปฏิกรณ์นิวเคลียร์	เชื้อเพลิง	ความเร็วนิวตรอน	สารหน่วงนิวตรอน	สารระบายความร้อน
แบบความดันสูง	ยูเรเนียมเข้มข้น 2-3 %	ช้า	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
แบบปฏิกรณ์น้ำเดือด	ยูเรเนียมเข้มข้น 2-3 %	ช้า	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
แบบปฏิกรณ์น้ำมวลหนัก	ยูเรเนียมธรรมชาติ	ช้า	น้ำมวลหนัก	น้ำมวลหนัก
แบบก๊าซอุณหภูมิสูง	ยูเรเนียมเข้มข้น 90%	ช้า	แกรไฟต์	ก๊าซฮีเลียม
แบบบรีดเดอร์โลหะเหลว	พลูโทเนียมและยูเรเนียม -238	เร็ว	-	โซเดียมเหลว

ที่มา (สุวพันธ์ นิลายน, 2554, น. 117)

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบปฏิกรณ์น้ำธรรมดา (PWR และ MBWR) และแบบน้ำมวลหนัก (CANDU หรือ HWR)

PWR และ BWR	CANDU (หรือ HWR)
มีสองแบบคือ PWR และ BWR ใช้น้ำบริสุทธิ์ธรรมดาเป็นสารหน่วงความเร็วนิวตรอน และตัวระบายความร้อน โดยทำหนน้าที่สองอย่างพร้อมกันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	มีแบบเดียวใช้น้ำมวลหนักเป็นสารหน่วงความเร็วนิวตรอน และตัวระบายความร้อน สารหน่วงความเร็วนิวตรอนบรรจุอยู่ในหม้อปฏิกรณ์นิวเคลียร์พิเศษแบบแคนดู เรียกว่า คาแลนเดรีย (Calandria) มีความกดดันต่ำ ตัวระบายความร้อนบรรจุในท่อมีความกดดันสูง แยกต่างหากสารหน่วงความเร็วนิวตรอน
ลักษณะเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ทำเป็นเม็ดยูเรเนียมออกไซด์ บรรจุอยู่ในท่อเซอร์คัลลอยเพื่อป้องกันสารจากปฏิกิริยาแตกตัวนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น	ลักษณะเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นเม็ดยูเรเนียมออกไซด์บบรจุในท่อเซอร์คัลลอยเช่นกัน
เปลี่ยนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ปีละครั้ง ครั้งละ 1/3 ครั้งในแบบ PWR และครั้งละ 1/4 ในแบบ BWR ต้องทำการหยุดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในขณะเปลี่ยนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Off-load Refueling)	เปลี่ยนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทุกวัน รวมสัปดาห์ละประมาณ 1% กว่าเล็กน้อยของเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงขณะเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (On-load Refueling)
ในการผลิตไอน้ำให้ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ให้กับวงจรของกังหัน (Turbine Cycle) ในแบบ BWR เป็นแบบวงจรเดียว (Direct Cycle)	ในการผลิตไอน้ำให้ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ให้กับวงจรของกังหัน (Turbine Cycle) เหมือนกับปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำธรรมดา และเป็นแบบ 2 วงจร (Indirect Cycle)
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว บางครั้งอาจนำมาสกัดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เอายูเรเนียมที่เหลือ และพลูโทเนียมที่เกิดขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วไม่จำเป็นต้องมาสกัดใหม่ เพราะไม่คุ้มค่า

ที่มา: (สุวพันธ์ นิลายน, 2554, น. 120)

ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบปฏิกรณ์น้ำธรรมดาและปฏิกรณ์แบบน้ำมวลหนัก โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบปฏิกรณ์น้ำธรรมดา คือ PWR และ BWR น่าจะเป็นแบบที่เหมาะสมโดยเฉพาะในปัจจุบัน บริษัทผู้ผลิตโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ชั้นนำของโลกต่างก็ร่วมมือเป็นกลุ่มในหลายประเทศ และมีการผลิตแบบปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั้งแบบ PWR, BWR, CANDU-HWR ที่พัฒนาการรุ่นใหม่เป็นแบบ “ Advanced ” ที่ปรับปรุงระบบต่างๆ ในโรงไฟฟ้าใหม่ให้มีเทคโนโลยีที่ทันสมัย ระบบที่เรียบง่าย ลดความซับซ้อนลง เพิ่มความปลอดภัยมากขึ้น และมีการออกแบบที่ลดระยะเวลาในการก่อสร้างลง เพิ่มความปลอดภัยมากขึ้น และมีการออกแบบที่ลดระยะเวลาในการก่อสร้างลง ซึ่งมีผลต่อการลดต้นทุนของโครงการ

บทสรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นเครื่องมือที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันแบบลูกโซ่และเกิดพลังงานมหาศาลจากการเกิดจำนวนนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมาพร้อมกับกระบวนการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยส่วนประกอบหลัก ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ได้แก่ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ สารหน่วง ระบบการควบคุม ระบบระบายความร้อน สารสะท้อนและเครื่องกำบังรังสี ซึ่งมีวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยเริ่มต้นจากการทำเหมืองและการแยกแร่ หลังจากนั้นเป็นกระบวนการเสริมสมรรถนะการเปลี่ยนยูเรเนียมออกไซด์ ให้เป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์แล้วนำยูเรเนียมมาผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 และนำยูเรเนียมไดออกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นผงเพื่ออัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ใส่ไว้ในท่อโลหะผสมเซอร์โคเนียม โดยเชื่อมปิดผนึกเป็นแท่งเชื้อเพลิง และสุดท้ายนำส่วนผสมของยูเรเนียมและพลูโทเนียมจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว สามารถนำมาสร้างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใหม่ หรือนำไปขจัดกากเชื้อเพลิง โดยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เก็บในบ่อใต้ดินบริเวณโรงไฟฟ้า ลักษณะเดียวกับกากประเภทแรก แต่ปิดบ่อด้วยฝาคอนกรีตอย่างหนา เก็บในเหมืองถ่านหิน เหมืองเกลือ หรือเหมืองทองที่เลิกใช้แล้ว หรือเก็บที่เกาะห่างไกล สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ออกแบบเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ออกแบบเพื่อการวิจัยหรือการทดสอบ เป็นต้น

คำถามท้ายบทที่ 5

1. จงอธิบายองค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
2. จงเขียนแผนภาพวัฏจักรนิวเคลียร์พร้อมอธิบาย
3. จงอธิบายวิธีการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อย่างละเอียด
4. นักศึกษามีวิธีการกำจัดกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อย่างไรบ้าง
5. จงจำแนกชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า
6. จงอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
7. จงเปรียบเทียบหลักการทำงาน การใช้ประโยชน์จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภทต่าง ๆ
8. จงยกตัวอย่างธาตุที่มีครึ่งชีวิตของกากกัมมันตรังสีที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวและการสลายตัว
9. จงวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยด้วยพลังงานนิวเคลียร์
10. นักศึกษามีความคิดเห็นอย่างไรในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์

เอกสารอ้างอิง

พัฒนสุข ชำนินอก. (2555). **ฟิสิกส์นิวเคลียร์ 1**. มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

สุพิชชา จันทรโยธา. (2559). **การจัดการกากกัมมันตรังสี.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุวพันธ์ นิลายน. (2554). **โรงไฟฟ้านิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Si, H. K., Hee, C. N, Deck, J. L., Doo, J. L., Dong, S. S., Won, Z. O., & Soo, D. S. (2012). **Introduction to Nuclear Engineering**. Korea: Korea nuclear association.

Kim, J-K. (2015). **System engineering of nuclear power plant**. Korea: Korea nuclear association.

John, R. L. and Anthony, J. B. (2001). **Introduction to nuclear engineering**. New Jersey: Prentice Hall.

.