บทที่ 1

บทนำ

ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกสั้น ๆ ว่า "ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง" เป็นค่าใช้จ่ายรวมจากการใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งรวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ การทำให้เข้มข้น การผลิตแท่งเชื้อเพลิงให้อยู่ในลักษณะที่ใช้ในการผลิตพลังงาน การหล่อเย็น การขนย้าย การทำรีโพรเซสซิง และรายรับจากราคายูเรเนียมและพลูโตเนียม (Uranium and Plutonium Credit) ที่ยังปรากฏอยู่ในเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบของราคาผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานปรมาณู โดยที่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูสูงกว่าโรงไฟฟ้าธรรมดามาก ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในราคาที่แข่งขันได้กับพลังงานชนิดอื่นหรือไม่

ดังนั้น การวิเคราะห์ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก ซึ่งผู้ที่สามารถทำการวิเคราะห์ราคาได้นั้น จะต้องเป็นผู้ที่มีความเข้าใจในขั้นตอนต่าง ๆ ของวัฏจักรเชื้อเพลิง การจัดการเชื้อเพลิงในแกนกลางเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และเนื่องจากค่าของเงินเปลี่ยนตามกาลเวลา ดังนั้นจึงต้องทราบถึงหลักเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องด้วย และเมื่อพิจารณาถึงการวิเคราะห์ความเหมาะสมโดยให้ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงต่อหน่วย พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้นั้น จะต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบออพติไมเซชัน (optimization) โดยใช้รูปแบบทางคณิต-ศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เหมาะสม

1.1 สาเหตุที่ศึกษาในปัญหานี้

เนื่องในปัจจุบันประเทศต่าง ๆ ในโลกมีการพัฒนาค้นหาพลังงานทดแทนพลังงานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม ทั้งนี้เพราะราคาน้ำมันปิโตรเลียมนี้มีราคาสูง และแปรเปลี่ยนในอัตราที่ไม่อาจทำนายได้ โดยขึ้นอยู่กับนโยบายการเมืองและการตลาดของประเทศผู้ผลิตและส่งออกน้ำมันปิโตรเลียมดิบเป็นสำคัญ ทำให้ประเทศต่าง ๆ ได้รับความกระทบกระเทือนในด้านการวางแผนและการใช้พลังงาน ดุลย์การชำระเงินระหว่างประเทศ และส่งผลถึงการพัฒนาประเทศด้วย อีกทั้งน้ำมันปิโตรเลียมดิบเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถใช้หมดไปได้ ดังนั้นประเทศต่าง ๆ จึงตื่นตัวที่จะแสวงหาพลังงานทดแทนอื่น ๆ เพื่อลดการพึ่งพาน้ำมันปิโตรเลียม โดยเฉพาะโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานทดแทนเหล่านี้ ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากวัสดุเหลือใช้การเกษตร พลังงานถ่านหิน พลังงานแก๊สธรรมชาติ และพลังงานปรมาณู เป็นต้น แต่พลังงานเหล่านี้ส่วนใหญ่มีขอบเขตจำกัดที่จะใช้ทดแทนพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งโดยมากใช้ในรูปของพลังงานไฟฟ้า จากเทคโนโลยีในปัจจุบัน พลังงานทดแทนที่สามารถผลิตไฟฟ้าปริมาณมากได้อย่างคุ้มค่าและสม่ำเสมอนั้นก็มีเพียงพลังงานจากถ่านหิน จากแก๊สธรรมชาติ และจากพลังงานปรมาณูเท่านั้น เนื่องจากพลังงานปรมาณูให้ค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าพลังงานอื่นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นพลังงานปรมาณูจึงเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ประเทศต่าง ๆ ให้ความสนใจกันเป็นอันมาก และเครื่องปฏิกรณ์กำเนิดพลังงานปรมาณูที่นิยมใช้กันแพร่หลายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์นั้น ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา (LWR) และแบบใช้น้ำชนิดหนัก (HWR)

การสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณู จะต้องใช้เวลานานในการเตรียมการฝึกคน และก่อสร้าง อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าสูงกว่าโรงไฟฟ้าธรรมดามาก แต่ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณูจะถูกกว่าราคาเชื้อเพลิงธรรมดามาก ทำให้ราคาการผลิตพลังงาน (power production costs) ของโรงไฟฟ้าปรมาณูได้เปรียบกว่าโรงไฟฟ้าธรรมดาที่ใช้น้ำมันปิโตรเลียมและมีราคาใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหิน ซึ่งถ้าเราสามารถใช้ประโยชน์วัฏจักรเชื้อเพลิงนี้ได้เต็มที่แล้ว ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานลดต่ำลงไปอีก ดังนั้นการวิเคราะห์ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและจำเป็นมากในการใช้พลังงานปรมาณู

1.2 ทำไมจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการศึกษาปัญหานี้

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ของราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงแล้วจะเห็นได้ว่า ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ หลายส่วน อาทิเช่น การคอนเวอร์ชัน ((conversion) การใช้ (use) การผลิตแท่งเชื้อเพลิง (fabrication) การดีพลีทชันหรือเบิร์นอัพ (depletion or burnup) การทำรีโพรเซสซิงเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว (reprocessing) การลดัดพลูโตเนียมและนำมาใช้ประโยชน์ (plutonium credit) และการขนส่ง (transportation) เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง และเงื่อนไขต่าง ๆ ในระหว่างการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เช่น การเปลี่ยนระดับพลังงาน การเปลี่ยนแพลนท์โหลดแฟคเตอร์ (plant load factor) ฯลฯ ดังนั้นการศึกษาวิเคราะห์ และการคำนวณราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง ในสภาวะใช้ประโยชน์เต็มที่จึงเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบหลายประการ และเป็นการตัดสินแบบมัลติสเต็จ (multi-stage decision process) แบบหนึ่ง ซึ่งการคำนวณสลับซับซ้อนมาก การคำนวณด้วยมือจะให้ผลเพียงหยาบ ๆ เท่านั้น ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการศึกษา

1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่นิยมกันแพร่หลายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา (LWR)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำธรรมดา (H_2O) เป็นทั้งตัวระบายความร้อน และตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอน โดยใช้ยูเรเนียม-235 เข้มข้นประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเชื้อเพลิง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา สามารถแบ่งชนิดตามจำนวนวงจรของไหลระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและเครื่องกังหันไอน้ำออกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดวงจรเดียว และชนิด 2 วงจร

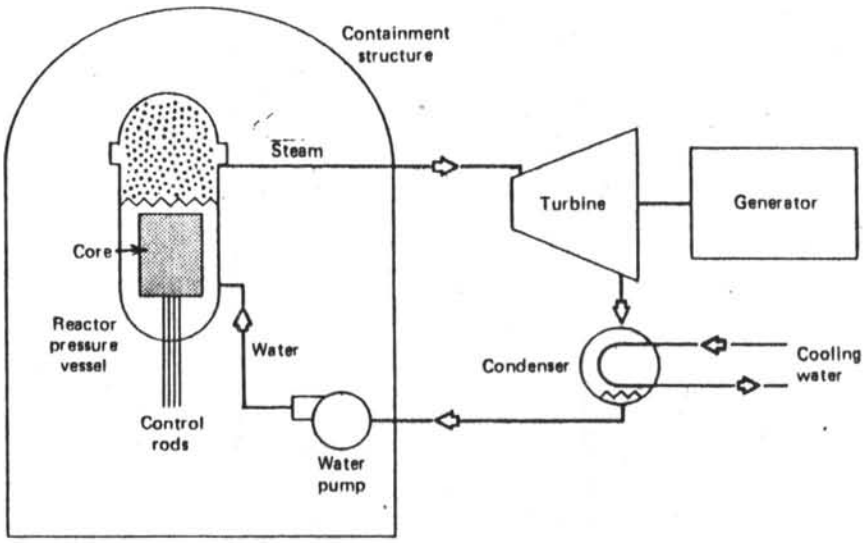
ก. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูระบบของไหลวงจรเดียวแบบใช้น้ำธรรมดา</u>

คือ บอยลิ่งวอเตอร์รีแอคเตอร์ (Boiling Water Reactor, BWR) ซึ่งในระบบนี้ของไหล (น้ำ) ที่ใช้พาความร้อนออกจากเชื้อเพลิงปรมาณูจะเป็นของไหลเดียวกันกับของไหลที่ขับดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยไอน้ำจะผ่านเข้าไปในเครื่องแยกไอน้ำ (steam separator) และเครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง (dryers) ก่อนเข้าเครื่องกังหันไอน้ำ จากนั้นจะผ่านเข้าเครื่องควบแน่น (condenser) เพื่อกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์อีกครั้งหนึ่ง

รูปที่ 1.3-1 , 1.3-2 , 1.3-3 , 1.3-4 , 1.3-5 และ 1.3-6 เป็นรูปแสดงการทำงานของระบบการผลิตพลังงาน (power system) ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor assembly) ชุดแท่งเชื้อเพลิง (fuel assembly) แลคทิซของแกนกลาง (core lattice) การจัดการเชื้อเพลิงภายในแกนกลาง (typical core arrangement) และแท่งควบคุมของ BWR ตามลำดับ

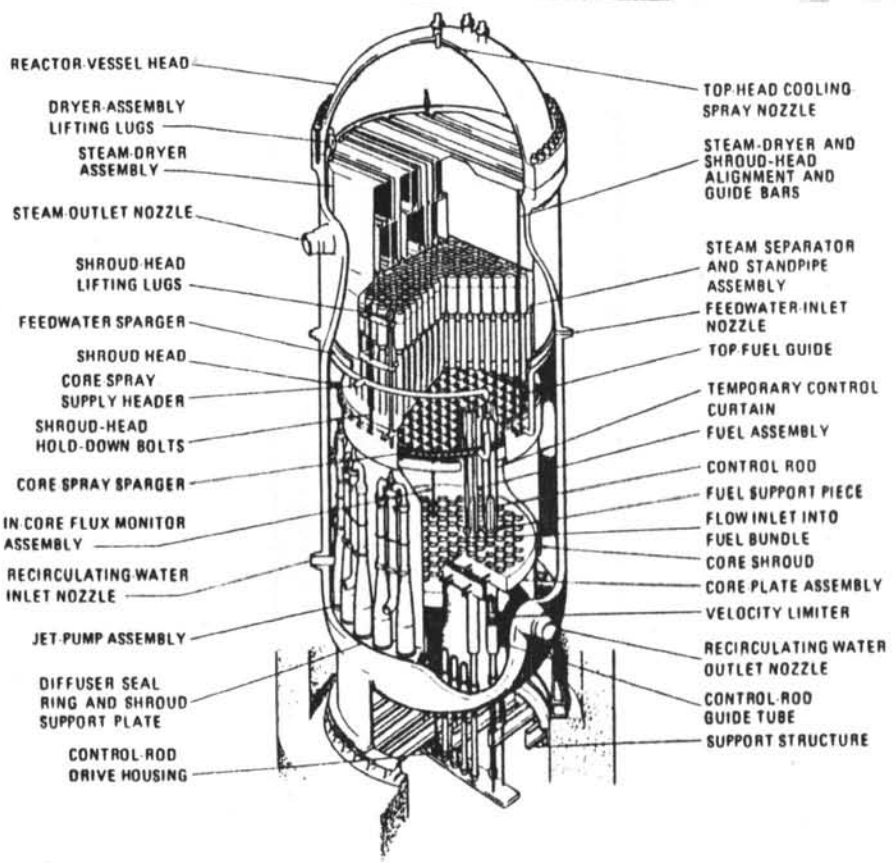
ข. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูระบบของไหล 2 วงจรแบบใช้น้ำธรรมดา</u> คือ เพรสเซอไรซ์ดวอเตอร์รีแอคเตอร์ (Pressurized Water Reactor , PWR) ซึ่งของไหล (น้ำ) ในวงจรแรกจะพาความร้อนออกจากเชื้อเพลิงปรมาณูไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือ เครื่องกำเนิดไอน้ำ แล้วกลับเข้าไปในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อพาความร้อนต่อไป ทั้งนี้น้ำจะอยู่ภายใต้ความดันสูง จึงอยู่ในสภาพของเหลวตลอดเวลาในการเดินเครื่อง ส่วนวงจรของไหล (น้ำ) ในวงจรที่ 2 จะถูกทำให้กลายเป็นไอน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ไอน้ำจะผ่านเครื่องแยกไอน้ำ และเครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง แล้วไปขับดันเครื่องกังหันไอน้ำ เพื่อไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นไอน้ำจะผ่านเข้าเครื่องควบแน่นกลั่นตัวเป็นน้ำแล้วกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำใหม่

รูปที่ 1.3-7 , 1.3-8 , 1.3-9 , 1.3-10 , 1.3-11 , 1.3-12 , 1.3-13 เป็นรูปแสดงการทำงานของระบบการผลิตพลังงาน (power system) ระบบการระบายความร้อน (coolant system) ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor pressure vessel with internal) แท่งเชื้อเพลิงโครงสร้างของชุดแท่งเชื้อเพลิง (fuel assembly structure) การจัดการเชื้อเพลิงภายในแกนกลาง (core arrangement) และชุดเชื้อเพลิง



(1)

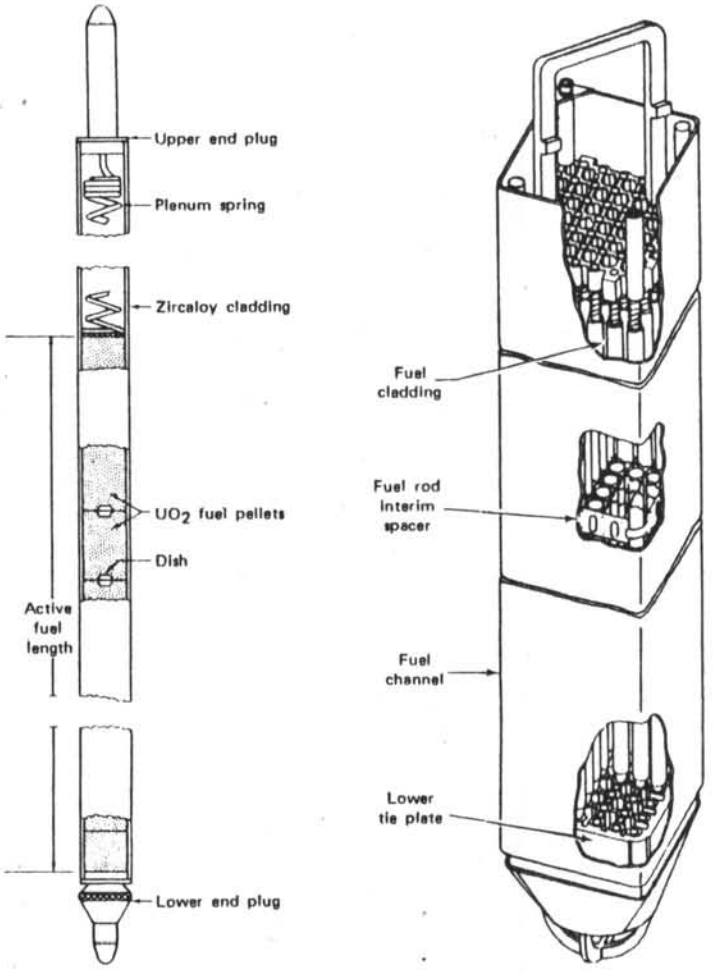
รูปที่ 1.3-1 ระบบการผลิตพลังงานของ BWR



Vessel arrangement of a boiling-water reactor.

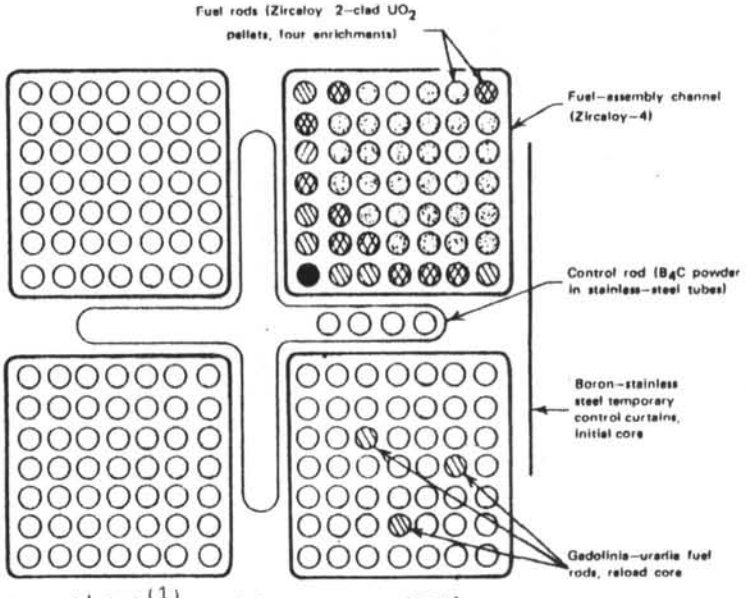
(2)

รูปที่ 1.3-2 ส่วนประกอบของ BWR

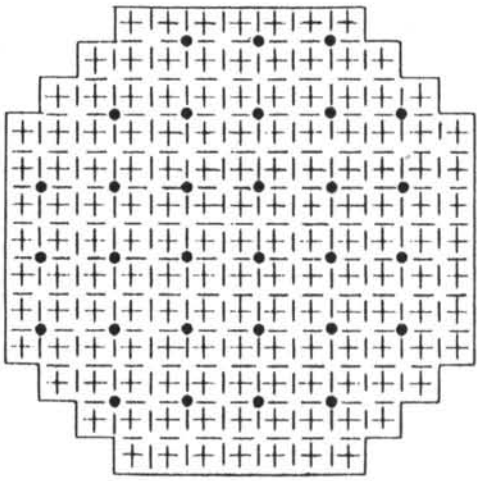


(1)

รูปที่ 1.3-3 ชุดแท่งเชื้อเพลิง (BWR)

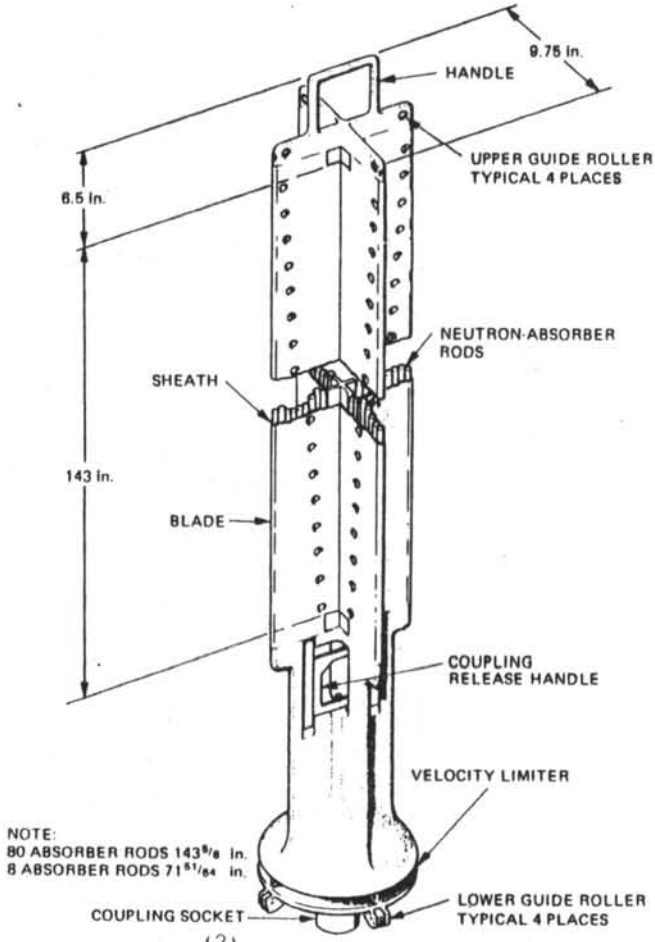


รูปที่ 1.3-4 (1) แสดงที่ของแกนกลาง (BWR)



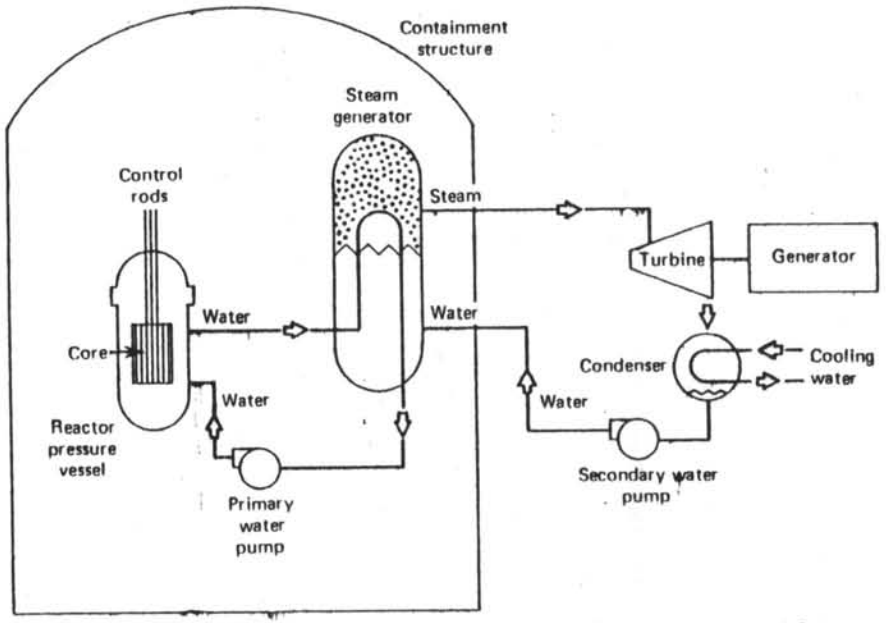
Typical core arrangement: +, control blades; –, curtains; ●, in-core monitor location.

รูปที่ 1.3-5[11] การจัดการเชื้อเพลิงภายในแกนกลาง BWR



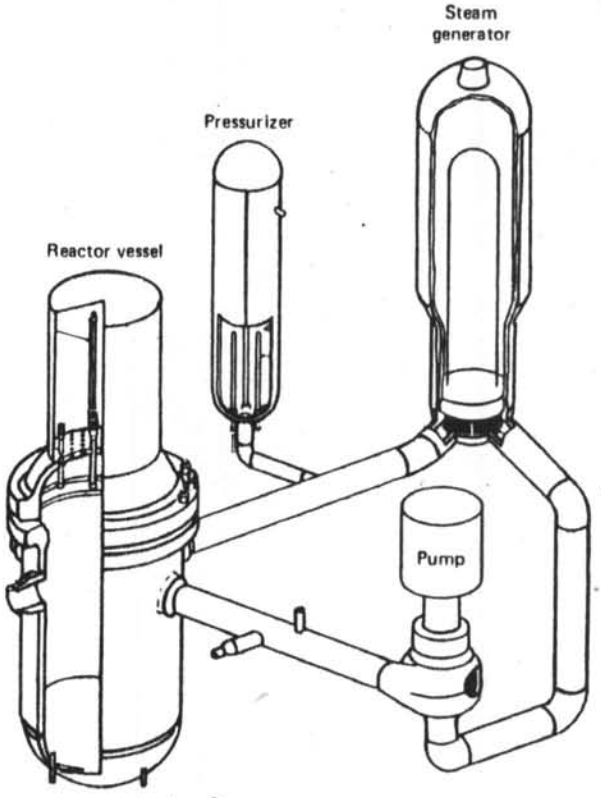
รูปที่ 1.3-6[12] แท่งควบคุม BWR

Boiling-water-reactor control rod with cruciform-shaped blade.



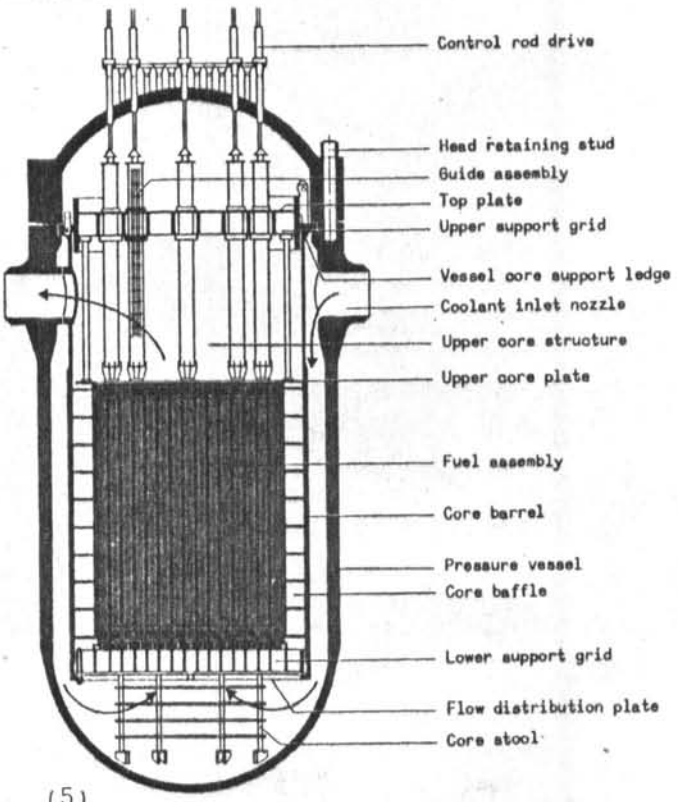
(1)

รูปที่ 1.3-7 ระบบการผลิตพลังงานของ PWR

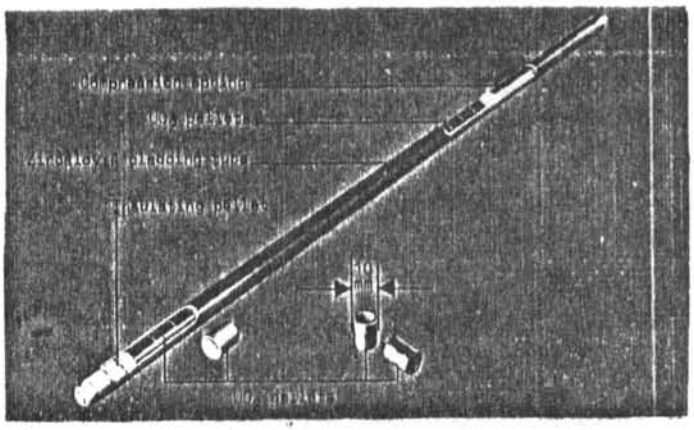


(1)

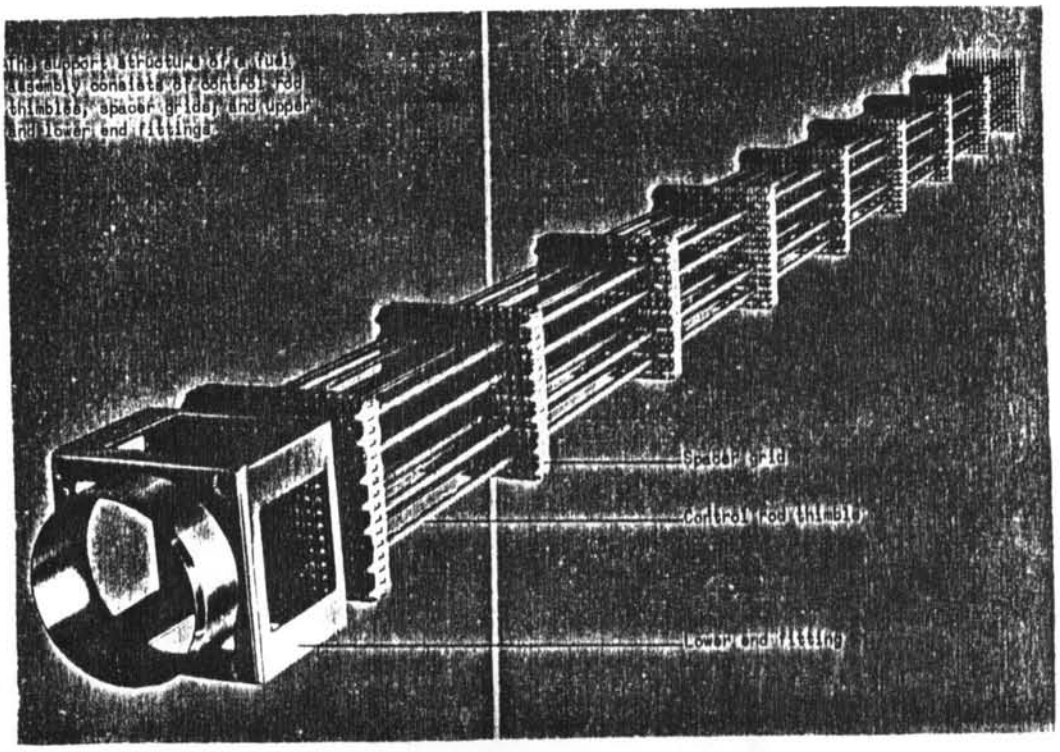
รูปที่ 1.3-8 ระบบการระบายความร้อนของ PWR



รูปที่ 1.3-9 ส่วนประกอบของ PWR (5)

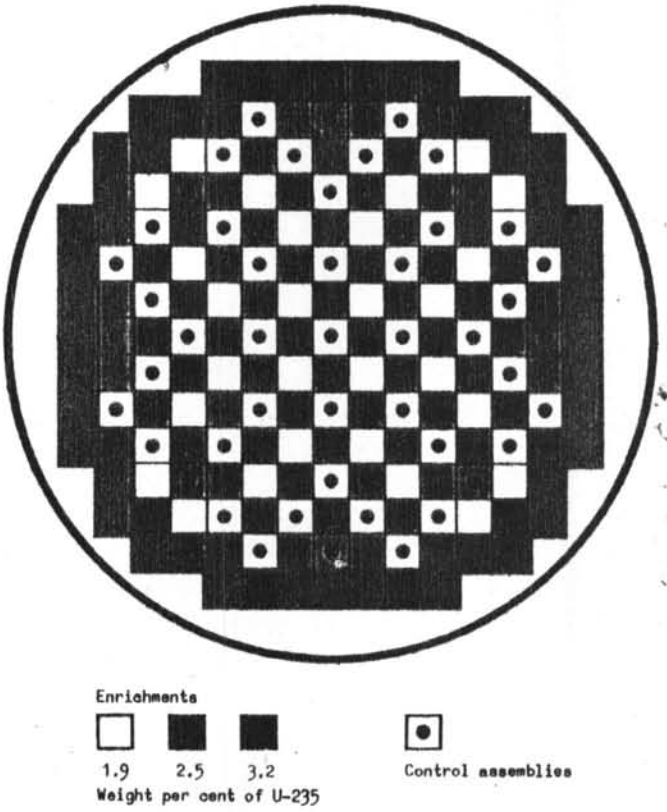


รูปที่ 1.3-10 แท่งเชื้อเพลิง PWR (5)



(5)

รูปที่ 1.3-11 โครงสร้างของชุดเชื้อเพลิง PWR



(5)

รูปที่ 1.3-12 การจัดการเชื้อเพลิงภายในแกนหลาง PWR

แล่ดงการมีและการไม่มีแท่งควบคุม (fuel assemblies with and without rod cluster control) ของ PWR ตามลำดับ

1.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำย่นิดหนัก (HWR)

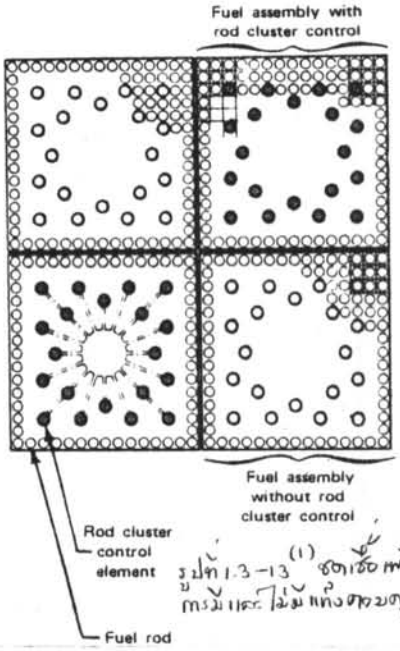
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำย่นิดหนัก คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำย่นิดหนัก (D_2O) เป็นตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอน โดยใช้ยูเรเนียมความเข้มข้นตามธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพราะค่าภาคตัดขวางการดูดกลืน (absorption cross section) ของ D_2O น้อยมาก เนื่องจากคุณสมบัติการหน่วงความเร็วนิวตรอนของน้ำย่นิดหนักสู้ของน้ำธรรมดาไม่ได้อัตราตัวหน่วง : เชื้อเพลิงจะเป็น 5 ถึง 8 เท่าของ LWR ดังนั้นปริมาตรของน้ำย่นิดหนักที่ใช้ใน HWR จึงมากกว่าน้ำธรรมดาที่ใช้ใน LWR การออกแบบจึงล่ร้างถังความดันต่ำ (low pressure tank) เพื่อบรรจุน้ำย่นิดหนัก (ตัวหน่วง) และตัวระบายความร้อนจะระบายความร้อนออกจากเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ใน fuel channels ต่าง ๆ

อนึ่ง HWR ที่ใช้กันแพร่หลายเป็นระบบคานาเดียนดิวทีเรียม ยูเรเนียม (Canadian Deuterium Uranium reactor system, CANDU) ซึ่งยังสามารถแบ่งตามประเภทของตัวระบายความร้อนได้ออกเป็น 2 ย่นิดคือ

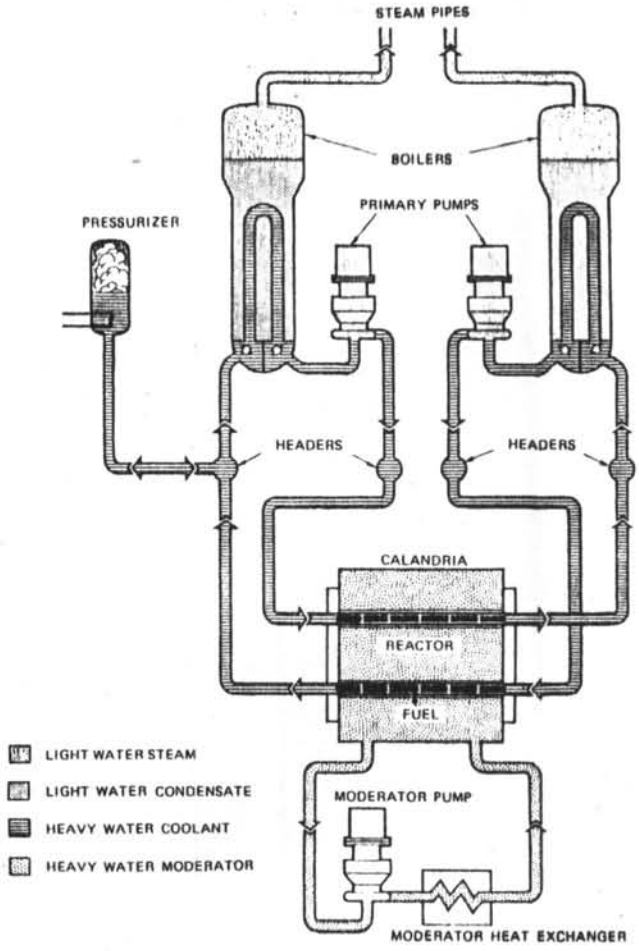
ก. CANDU - PHW (Pressurized Heavy Water) ใช้น้ำย่นิดหนักที่ความดันสูงเป็นตัวระบายความร้อน โดย fuel channel จะจัดเรียงอยู่ในแนวนอน หลักการทำงานคล้ายคลึงกับ PWR รูป 1.3-14 , 1.3-15 , 1.3-16 , 1.3-17 แล่ดงหลักการทำงานของระบบการผลิตพลังงาน (power system) ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor arrangement) การควบคุมรีแอคติวิตีและความปลอดภัย (reactivity control and safety devices) และ fuel channel ของ CANDU - PHW ตามลำดับ

CANDU - PHW เป็น HWR ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว

ข. CANDU - BLW (Boiling Light Water) ใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวระบายความร้อน โดย fuel channel จะจัดเรียงอยู่ในแนวตั้ง หลักการทำงานคล้ายคลึงกับ BWR รูปที่ 1.3-18 และ 1.3-19 แล่ดงหลักการทำงานของระบบการผลิตพลังงาน

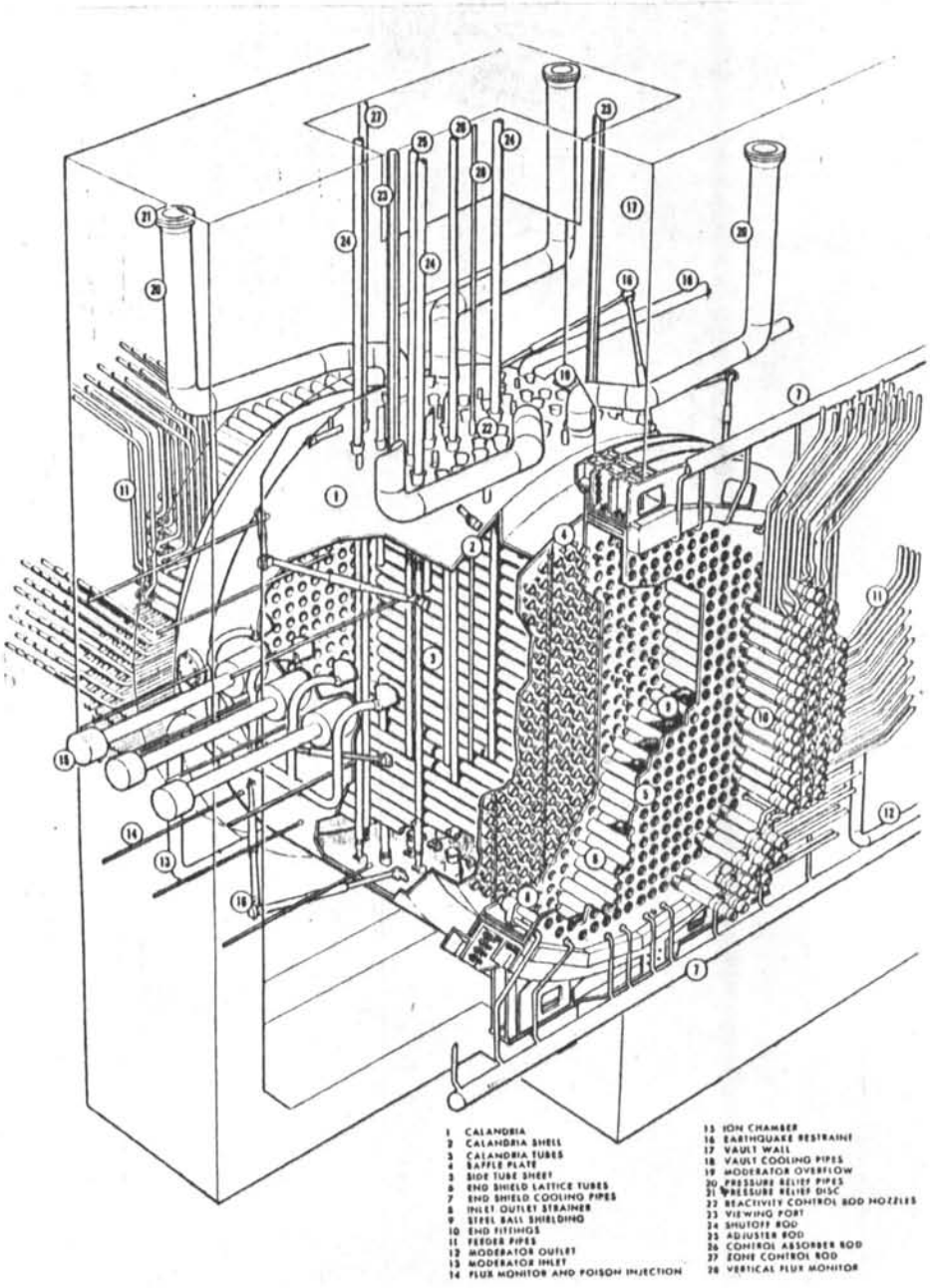


รูปที่ 1.3-13 (1) ชุดเชื้อเพลิงแสดง
การมีและไม่มีแท่งควบคุม PWR

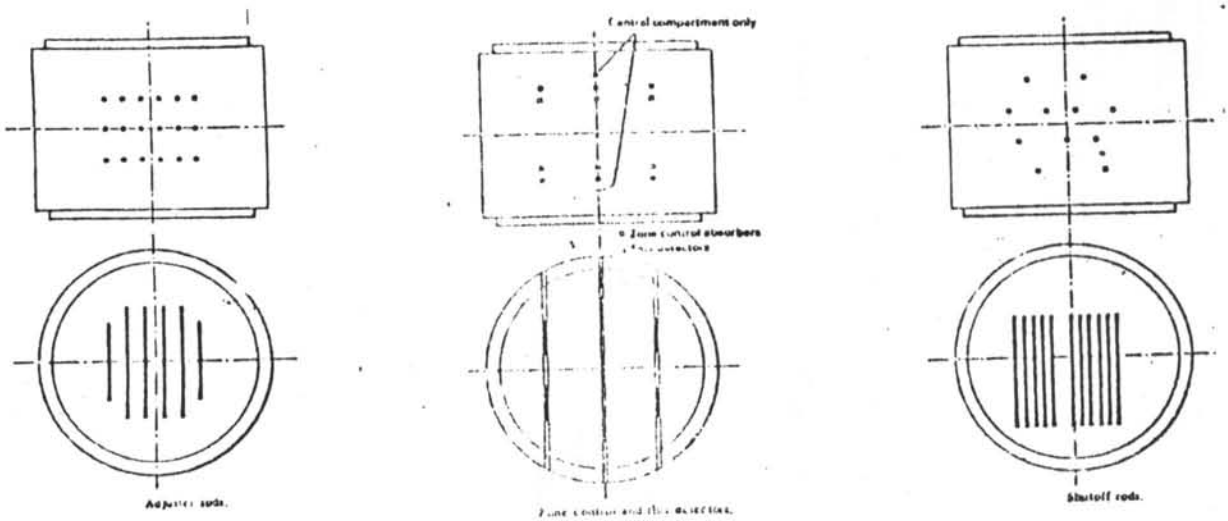


(b) CANDU REACTOR SIMPLIFIED FLOW DIAGRAM

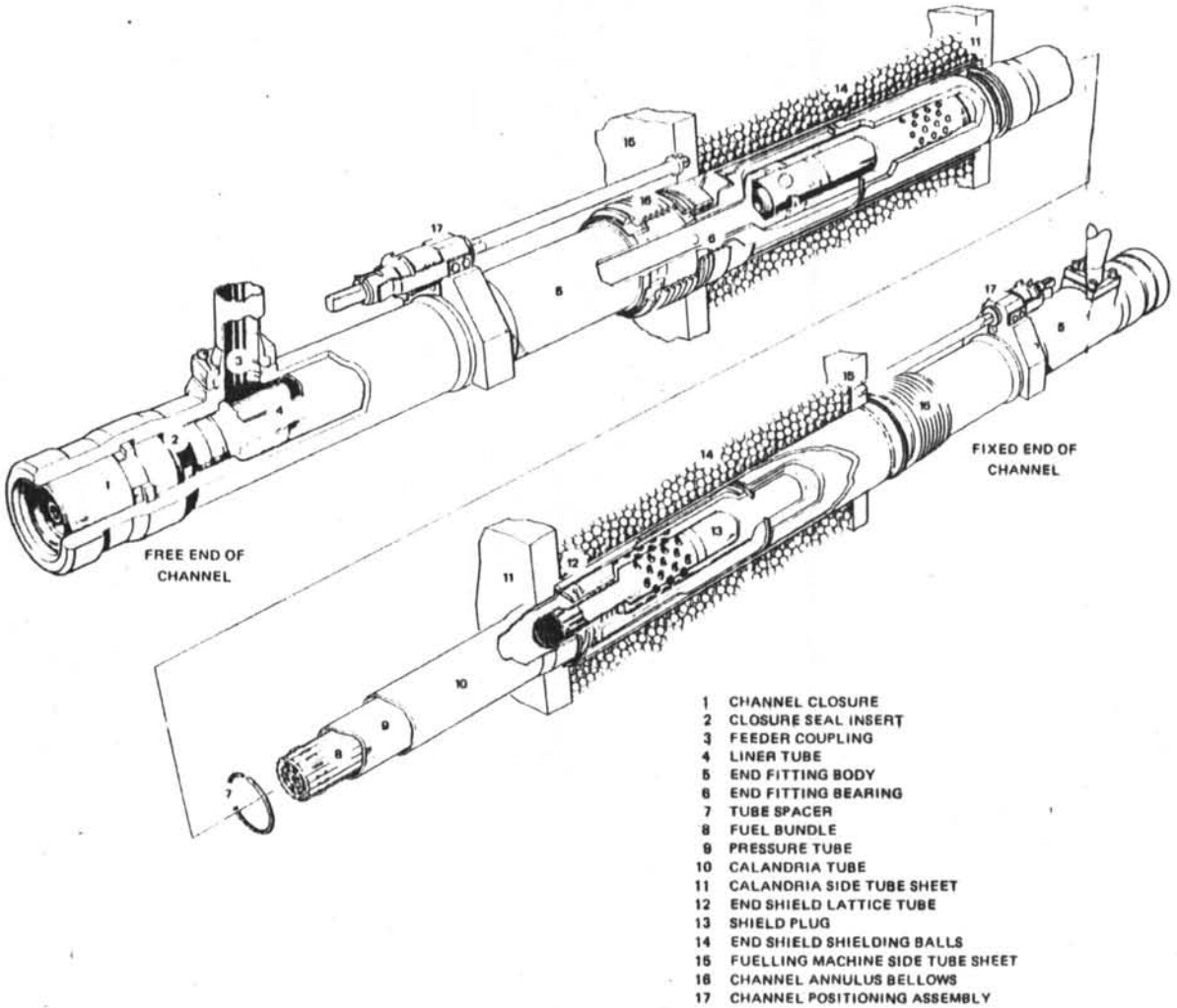
รูปที่ 1.3-14 ระบบการผลิตพลังงาน CANDU-PHW



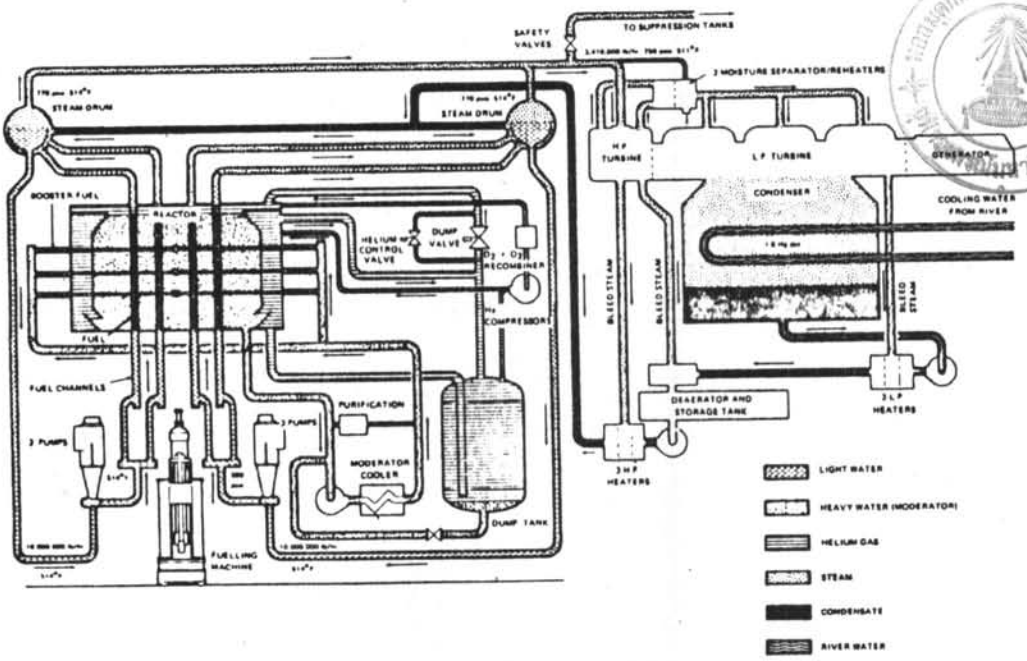
รูปที่ 1.3-15 (6) ส่วนประกอบของ CANDU-PHW



รูปที่ 1.3-16 การควบคุมรีแอ็คติวิตี้และความปลอดภัย CANDU-PHW (6)



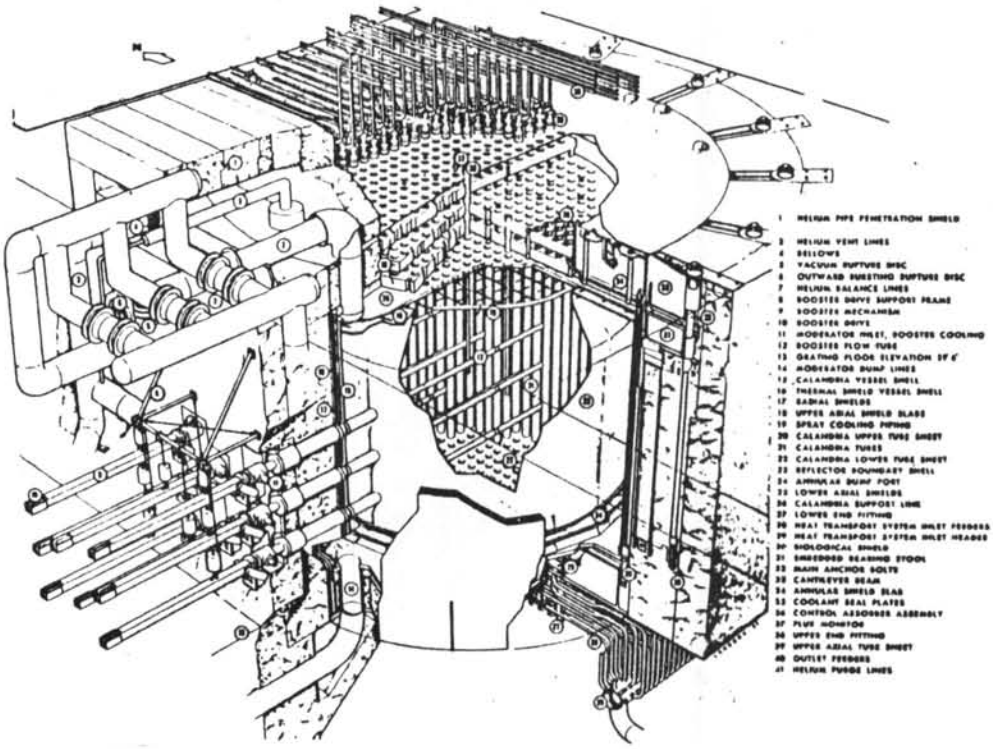
รูปที่ 1.3-17 fuel channel (CANDU-PHW) (4)



(16)

รูปที่ 1.3-18 ระบบการผลิตพลังงาน CANDU-BLW

SIMPLLPIED STATION FLOW DIAGRAM CONDU BLW



(16)

รูปที่ 1.3-19 ส่วนประกอบของ CANDU-BLW

007596

Gentlyy Reactor Assembly

(power system) และส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor assembly) ของ CANDU-BLW ตามลำดับ

CANDU - BLW เป็น HWR ที่เริ่มทดลองใช้ผลิตพลังงานในเชิงพาณิชย์

1.4 เชื้อเพลิงปรมาณู (Nuclear Fuels)

เชื้อเพลิงปรมาณูแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

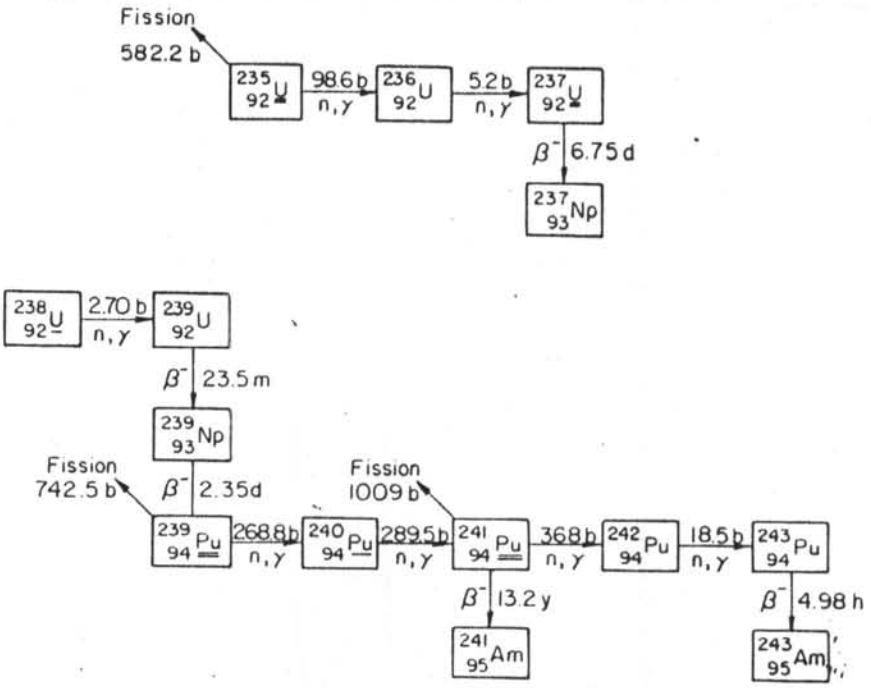
1.4.1 วัตถุฟิสไซล์ (fissile material) เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูที่ดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนแล้วจะแตกตัวให้ธาตุใหม่ และให้จำนวนอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ U-235 , Pu-239 และ U-233 เป็นต้น ซึ่งในจำนวนนี้จะมีเพียง U-235 ที่ปรากฏอยู่ในธรรมชาติด้วยปริมาณ 0.711% โดยน้ำหนักของธาตุยูเรเนียมธรรมชาติ

1.4.2 วัตถุเฟอร์ไทล์ (fertile material) เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูที่ดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนแล้วจะไม่แตกตัว แต่ให้ธาตุใหม่ที่เป็นวัตถุฟิสไซล์ ซึ่งได้แก่ U-238 และ Th-232 รวมทั้ง Pu-240 และ U-234 เป็นต้น ในธาตุยูเรเนียมธรรมชาติมี U-238, U-234 อยู่ประมาณ 99.283 และ 0.0058% โดยน้ำหนัก

ระบบเชื้อเพลิงปรมาณูที่นิยมใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ระบบ U-235, U-238 กับ Pu และระบบ U-235 กับ Th-232 ซึ่งปฏิกิริยาปรมาณูทั้ง 2 ระบบนั้นแสดงในรูปที่ 1.4-1, 1.4-2 ตามลำดับ แต่ระบบเชื้อเพลิงที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันคือ ระบบ U-235, U-238 กับ Pu

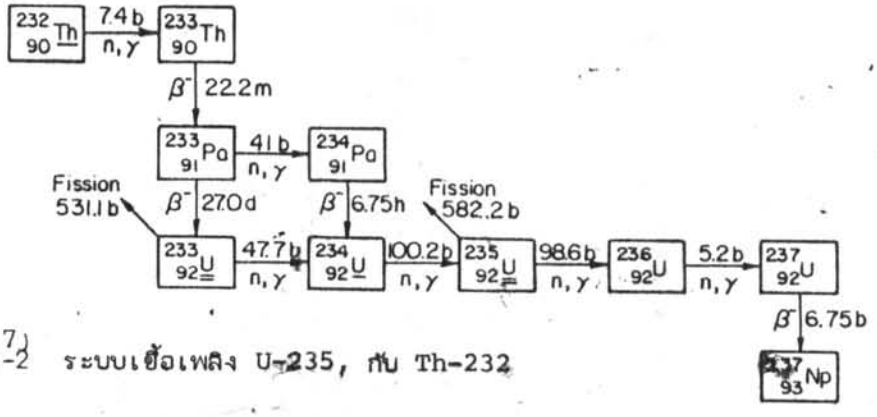
1.5 การจัดการเชื้อเพลิงปรมาณู (Nuclear Fuel Mangement)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงปรมาณูเป็นต้นกำเนิดพลังงาน (ความร้อน) ในโรงไฟฟ้าปรมาณู และเป็นตัวชี้ถึงราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานนั้น ๆ ว่ามารถแข่งขันกับโรงไฟฟ้าธรรมดาหรือไม่ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงการจัดการเชื้อเพลิงปรมาณูอย่างรอบคอบ



Principal nuclear reactions in uranium-fueled reactors.

รูปที่ 1.4-1 (7) ระบบเชื้อเพลิง U-235, U-238 กับ Pu



รูปที่ 1.4-2 (7) ระบบเชื้อเพลิง U-235, กับ Th-232

Principal nuclear reactions in thorium-fueled reactors.

การจัดการแท่งเชื้อเพลิงปรมาณูประกอบด้วย การจัดหาเพื่อให้ได้มาซึ่งเชื้อเพลิง การออกแบบ ลักษณะของเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิง และชุดของเชื้อเพลิง โดยสัมพันธ์กับแกนกลาง และแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูการใช้งาน (เผา หรือ burning) และการควบคุมในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การนำเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วออกจากแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การขนส่ง และการสกัดสารเชื้อเพลิงที่มีค่าในแท่งเชื้อเพลิง และการทิ้งกากเชื้อเพลิงปรมาณู เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เกี่ยวพันถึงการวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การวิเคราะห์ทางด้าน thermal และ hydraulic คุณสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์โครงสร้างเชื้อเพลิง และทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เป็นต้น จึงสามารถได้มาซึ่งการออกแบบเชื้อเพลิง และการวางแผนจัดหาและใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในที่นี้จะศึกษาเฉพาะด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำธรรมดา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการจัดการเชื้อเพลิง-ปรมาณู