บทที่ 2

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง หมายถึง เครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานความร้อนในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ พลังงานที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานจากปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการแตกตัวของธาตุหนักเมื่อมีพลังงานกระตุ้นที่นิวเคลียส ธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้นั้นเรียกว่า ธาตุฟิสไซล์ ได้แก่ ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 และพลูโทเนียม-239 สำหรับปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังส่วนมากมักใช้ ยูเรเนียม-235 เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในการเกิดปฏิกริยาดังกล่าว โดยการนำอนุภาคนิวตรอนเข้าไปกระตุ้นนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$^{235}U + {}^{1}n \longrightarrow F_1 + F_2 + n + E \quad \text{.....(2.1)}^{[4]}$$

เมื่อ U = ยูเรเนียม

n = นิวตรอน

F_1 , F_2 = ผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชัน

E = พลังงาน

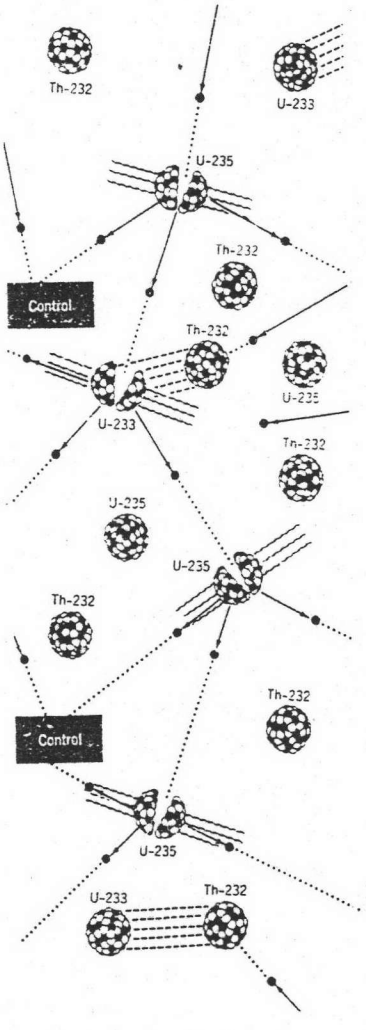
จากการแตกตัวของยูเรเนียม-235 ทำให้ได้ธาตุใหม่สองธาตุซึ่งเรียกว่า ผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชัน และมีการปลดปล่อยพลังงานพร้อมกับอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่อีกจำนวนหนึ่ง พลังที่ถูกปลดปล่อยดังกล่าวเนื่องมาจากมวลของ ยูเรเนียม-235 หายไปเป็นพลังงานตามสมการที่ 2.2

$$E = mc^2 \quad \text{.....(2.2)}^{[4]}$$

เมื่อ m = มวลที่หายไป

c = ความเร็วแสง (3×10^{10} m/s)

โดยเฉลี่ยแล้วในการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะปลดปล่อยพลังงานออกมา 200 MeV ต่อปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ธาตุคาร์บอนกับออกซิเจนให้พลังงานออกมา 2-3 eV ต่อปฏิกิริยา[5] ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน 100 ล้านเท่า สำหรับนิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่ประมาณ 2-3 อนุภาคต่อปฏิกิริยานั้นจะทำปฏิกิริยาฟิชชันกับยูเรเนียมอย่างต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่และได้พลังความร้อนออกมาอย่างมหาศาลพลังความร้อนที่ได้จะถูกถ่ายโอนไป



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาลูกโซ่

ระบบผลิตไอน้ำเพื่อนำไอน้ำไปหมุนกังหันผลิตไฟฟ้าโดยใช้สารระบายความร้อนเป็นตัวกลาง แต่อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และสารระบายความร้อนไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง เชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะบรรจุอยู่ในแท่งหุ้มเชื้อเพลิงอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันมีการปนเปื้อนกับสารระบายความร้อนได้ และเป็นการป้องกันไม่ให้สารระบายความร้อนกัดกร่อนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ภายในแกนปฏิกรณ์จะมีสารหน่วงนิวตรอน ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังบางชนิดจะเป็นสารเดียวกันกับสารระบายความร้อน สารหน่วงนิวตรอนเป็นตัวทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ กล่าวคือ นิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาฟิชชันจะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเรียกว่า นิวตรอนเร็ว ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยาฟิชชันกับยูเรเนียม-235 ดังนั้น สารหน่วงนิวตรอนจึงทำหน้าที่ในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็ว โดยการชนกันแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ทำให้ได้นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำลงเรียกว่า “นิวตรอนช้า” ซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยาฟิชชันกับยูเรเนียม-235ได้ เครื่องปฏิกรณ์ได้มีการใช้สารหน่วงนิวตอนที่แตกต่างกันไปตามการออกแบบ แต่ทั้งนี้สารที่จะทำหน้าที่หน่วงนิวตรอนจะต้องมีคุณสมบัติหลักคือมีค่าการดูดกลืนนิวตรอนต่ำ เพื่อให้ปริมาณความเข้มข้นของนิวตรอนในแกนปฏิกรณ์มีมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนที่เกิดมีพลังงานสูงมากทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ดังนั้น ภายในถังปฏิกรณ์จึงต้องมีการเคลือบตัวสะท้อนนิวตรอนไว้รอบๆ เพื่อป้องกันมิให้นิวตรอนทะลุทะลวงออกไปจากถังปฏิกรณ์ได้ ซึ่งนอกจากจะทำให้ปริมาณนิวตรอนเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ยังทำให้การเกิดปฏิกิริยาฟิชชันทั่วแกนปฏิกรณ์ เนื่องจาก นิวตรอนมีการกระจายทั่วกันทั้งแกนปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ เป็นถังขนาดใหญ่ที่ภายในบรรจุแกนปฏิกรณ์ สารระบายความร้อน และสารหน่วงนิวตรอนไว้ นอกจากนี้ ภายในถังปฏิกรณ์ยังบรรจุแท่งควบคุมและระบบเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม ซึ่งเป็นระบบในการควบคุมและหยุดการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ เครื่องตรวจวัดปริมาณรังสี เครื่องตรวจวัดความเข้มข้นของนิวตรอน ระบบการควบคุมอัตราการไหลของสารระบายความร้อนหรือสารหน่วงนิวตรอน ซึ่งระบบต่างๆเหล่านี้เป็นเครื่องมือที่เจ้าหน้าที่ใช้ปฏิบัติงานในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ การควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน และการหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งข้อมูลของแต่ละระบบจะถูกส่งไปยังห้องควบคุมที่อยู่ข้างๆ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว สิ่งที่สำคัญอีกระบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง คือ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นอาคารขนาดใหญ่สร้างคลุมส่วนปฏิกรณ์ทั้งหมดไว้ภายใน อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มักออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปโดม อาคารดังกล่าวจะต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทานต่อการเกิดอุบัติเหตุภายในซึ่งได้แก่ การระเบิดของแกนปฏิกรณ์ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงระเบิด และสามารถเก็บกักสารกัมมันตรังสีไว้ภายในอาคารโดยไม่ปล่อยให้ฟุ้งกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก และอุบัติเหตุภายนอกทั้งที่เกิดจากภัยธรรมชาติ ได้แก่ การเกิดแผ่นดินไหว น้ำท่วม พายุ และเหตุการณ์ที่เกิดจากมนุษย์กระทำ ได้แก่ อุบัติเหตุเครื่องบินตกชน การก่อวินาศกรรม เป็นต้น

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังชนิดต่าง ๆ

การแบ่งชนิดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง มักแบ่งตามลักษณะของสารระบายความร้อน สารหน่วงนิวตรอน หรือพลังงานของนิวตรอนที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแยกชนิดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังชนิดต่างๆ

ชนิด	ชื่อย่อ	พลังงานนิวตรอน	เชื้อเพลิงนิวเคลียร์	สารระบายความร้อน	สารหน่วงนิวตรอน
Pressurized light-water reactor	PWR	ต่ำ	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
Boiling light water reactor	BWR	ต่ำ	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
Pressurized heavy-water reactor	PHWR	ต่ำ	ยูเรเนียมธรรมชาติ	น้ำมวลหนัก	น้ำมวลหนัก
Light-water cooled, graphite moderator	LWGR	ต่ำ	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ	น้ำธรรมดา	กราไฟต์
Gas-cooled, graphite moderator	GCR	ต่ำ	ยูเรเนียมธรรมชาติ	คาร์บอนไดออกไซด์	กราไฟต์

ตารางที่ 2.1(ต่อ) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังชนิดต่างๆ

ชนิด	ชื่อย่อ	พลังงานนิวตรอน	เชื้อเพลิงนิวเคลียร์	สารระบายความร้อน	สารหน่วงนิวตรอน
Advanced gas-cooled, graphite moderator	AGR	ต่ำ	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ	คาร์บอนไดออกไซด์	กราไฟต์
Hight-temperature gas-cooled, graphite moderator	HTGR	ต่ำ	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะสูง	ฮีเลียม	กราไฟต์
Heavy-water moderated, gas-cooled	HWGCR	ต่ำ	ยูเรเนียมธรรมชาติ	คาร์บอนไดออกไซด์	น้ำมวลหนัก
Fast breeder	FBR	สูง	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะสูง	โซเดียมเหลว	ไม่มี

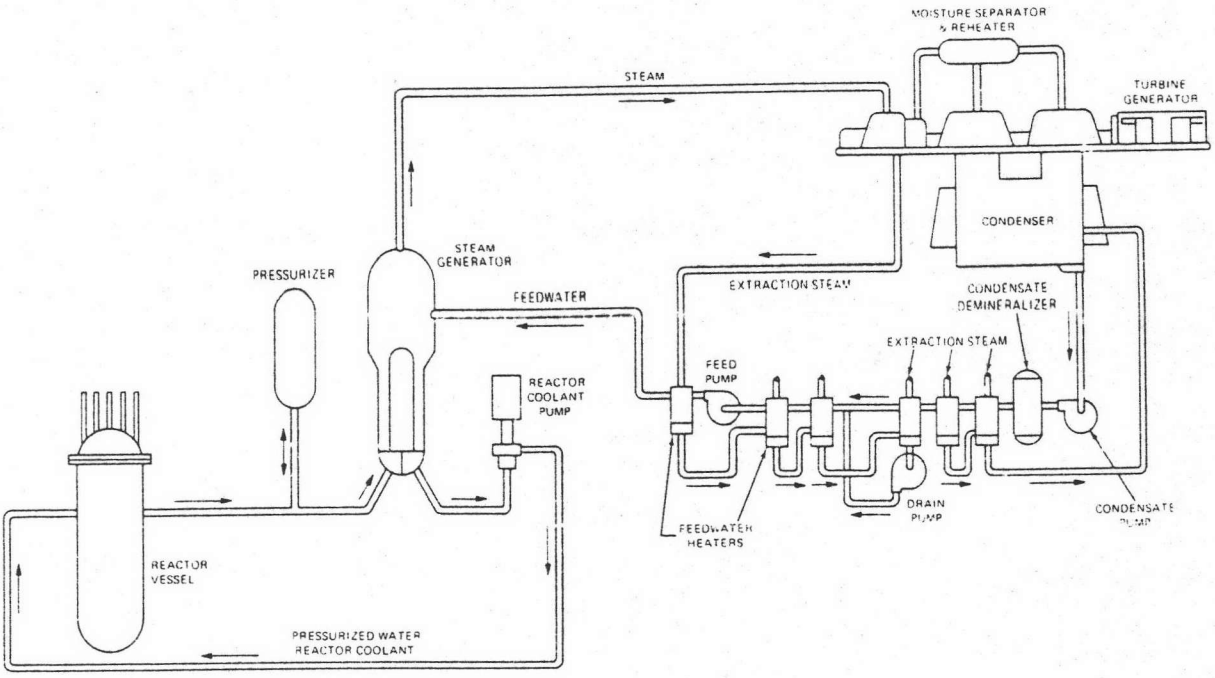
อย่างไรก็ตาม เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังที่ได้รับการพัฒนาเป็นเครื่องที่ใช้ในเชิงพานิชย์มีเพียง 3 แบบ คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR แบบ BWR และแบบ CANDU ดังนั้น ในการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในแง่ของความปลอดภัยจึงศึกษาเพียง 3 แบบ ที่กล่าวข้างต้น เนื่องจาก เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้ทั่วโลกและมีวิวัฒนาการในระดับสูงเพื่อให้เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ในอนาคต

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเชิงพานิชย์แบบต่าง ๆ

1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR

1.1 หลักการทำงาน

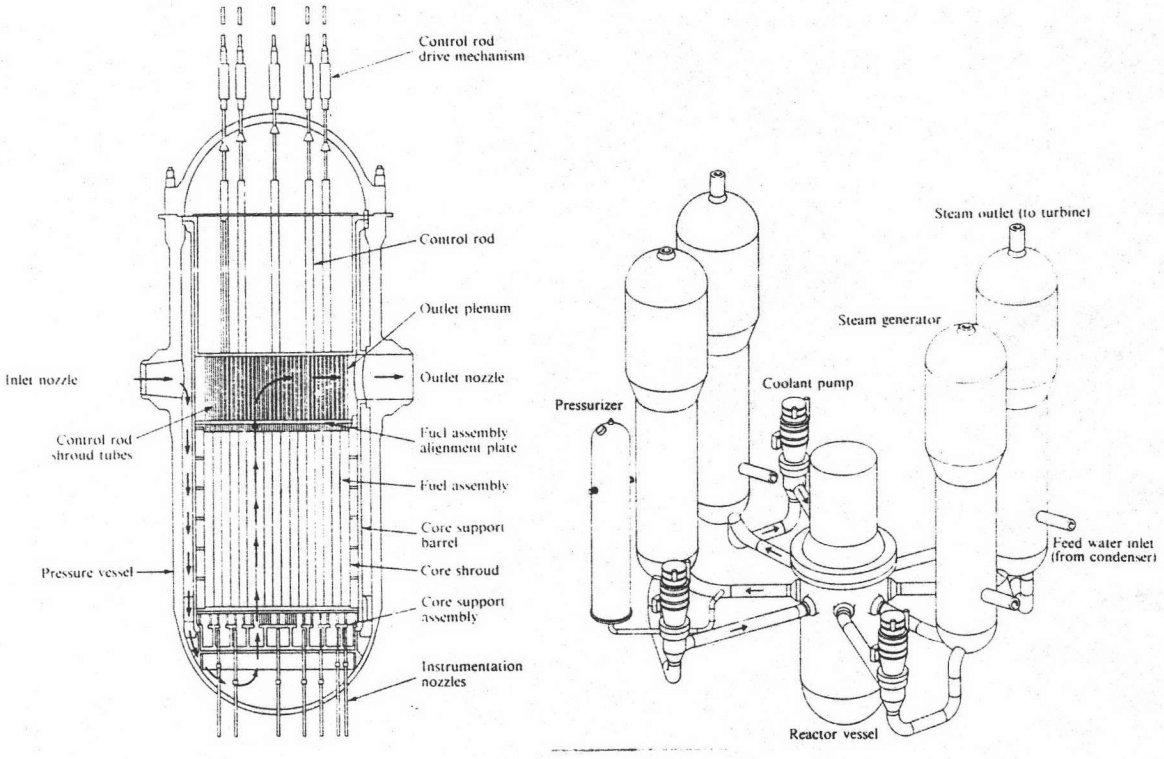
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR มีการทำงานของระบบระบายความร้อนแยกออกเป็น 2 วงจร โดยวงจรปฐมภูมิหรือระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ มีการควบคุมความดันประมาณ 150 เท่าของบรรยากาศ เพื่อไม่ให้น้ำในวงจรนี้เดือด ส่วนวงจรทุติยภูมิหรือระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ มีการควบคุมความดันที่ประมาณ 60 เท่าของบรรยากาศ [4] ดังนั้นน้ำส่วนนี้เมื่อได้รับความร้อนสามารถเดือดได้



รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบPWR

ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ ประกอบด้วยแกนเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ และใช้นิวตรอนย่านพลังงานต่ำในการทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันแบบลูกโซ่โดยมีน้ำในระบบระบายความร้อนปฐมภูมิเป็นทั้งสารระบายความร้อนและสารหน่วงนิวตรอน ซึ่งทั้งหมดนี้จะบรรจุอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ในการทำงานน้ำในวงจรปฐมภูมิที่มีอุณหภูมิประมาณ 295°ซ.[4] ถูกปั๊มเข้าทางด้านข้างของถังปฏิกรณ์ไหลลงด้านล่างแล้วไหลผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์จากด้านล่างสู่ด้านบนเพื่อถ่ายโอนความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากได้รับความร้อนแล้วน้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 30-35°ซ. ไหลออกอีกข้างหนึ่งของถังปฏิกรณ์ผ่านเข้าไปยังเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัวต่อ 1เครื่องปฏิกรณ์ เพื่อถ่ายโอนความร้อนให้กับน้ำในส่วนระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ เมื่อน้ำในวงจรปฐมภูมิวิ่งเข้าสู่ท่อภายในเครื่องผลิตไอน้ำแล้วจะถูกปั๊มกลับเข้าสู่แกนเครื่องปฏิกรณ์ต่อไปซึ่งเป็นลักษณะวงจรปิด ส่วนน้ำในวงจรทุติยภูมิเมื่อได้รับความร้อนจะเดือดกลายเป็นไอแล้วถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำ เพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าไอน้ำนี้หลังจากผ่านกังหันไอน้ำแล้วจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น ซึ่งมีท่อเล็ก ๆ รับน้ำที่ปั๊มมาจากภายนอกเข้ามารับความร้อนที่เหลือจากไอน้ำของวงจรทุติยภูมิ ไอน้ำจึงกลั่นตัวเป็น

น้ำและถูกปั๊มเข้าเครื่องผลิตไอน้ำอีกครั้งซึ่งวงจรทุติยภูมิเป็นวงจรปิดเช่นเดียวกับวงจรปฐมภูมิ

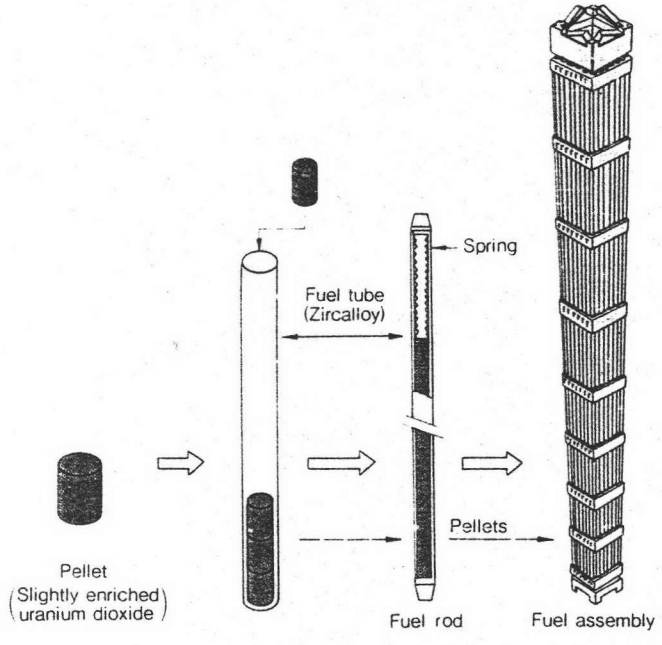


ก ข

รูปที่ 2.3[4] (ก) ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิภายในถังปฏิกรณ์
(ข) ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิระหว่างถังปฏิกรณ์กับเครื่องผลิตไอน้ำทั้ง 4 ตัว

1.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR

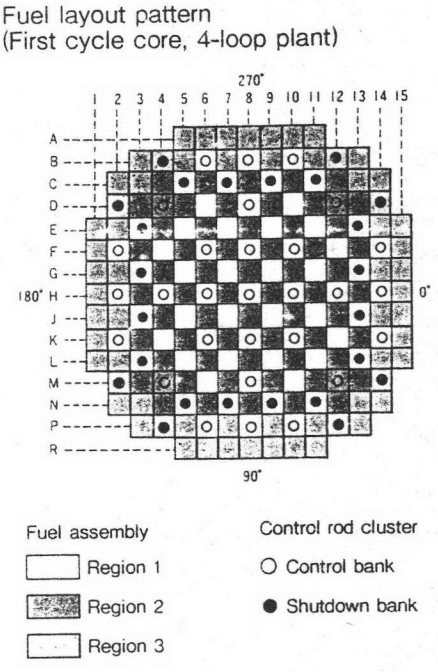
1. แท่งเชื้อเพลิง : ใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำอยู่ในรูปของยูเรเนียมไดออกไซด์ ถูกอัดเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร เรียกว่า เม็ดเชื้อเพลิง หลังจากนั้นนำมาบรรจุเรียงในกระบอกเหล็กกล้าปลอดสนิมหรือโลหะผสมเซอร์โคเนียม เรียกว่า แท่งหุ้มเชื้อเพลิงแล้วเชื่อมปิดสนิทหัวท้าย แท่งเชื้อเพลิงนี้มีความยาวประมาณ 4 เมตร เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงและแท่งควบคุมมามัดรวมกัน เรียกว่า มัดแท่งเชื้อเพลิง การมัดรวมแท่งเชื้อเพลิงของ PWR มี 2 แบบ คือ 16x16 หรือ 17x17 ตามการออกแบบ



รูปที่ 2.4 แท่งเชื้อเพลิง[6]

2. แท่งควบคุม : เป็นแท่งทรงกระบอกของเหล็กกล้าปลอดสนิมหรือโลหะผสมเซอร์โคเนียมที่มีขนาดเท่ากับแท่งเชื้อเพลิงภายในบรรจุสารดูดจับนิวตรอน ได้แก่ แคดเมียม โบรอน ฮาฟเนียม หรือโลหะผสมของเงิน-อินเดียม-แคดเมียม ซึ่งเป็นสารดูดนิวตรอน ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันโดยมีส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมอยู่ทางด้านบนของถังปฏิกรณ์

3. แกนปฏิกรณ์ : ส่วนที่เอามัดเชื้อเพลิงและแท่งควบคุมมาประกอบรวมกันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาด 1000 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า มีมัดแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 190-200 มัด

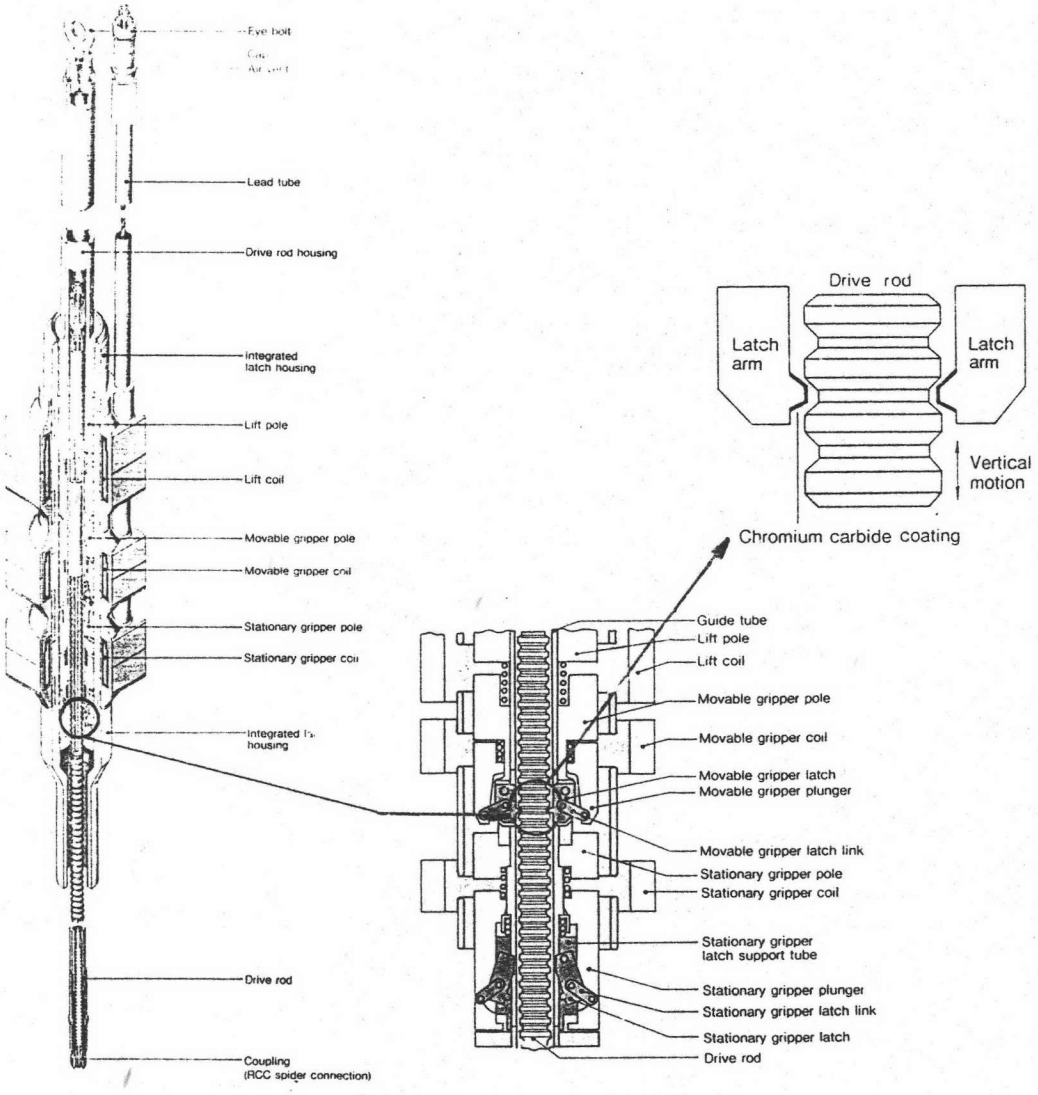


รูปที่ 2.5 การจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ [6]

4. ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม : อยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ แท่งควบคุมเคลื่อนที่ด้วยระบบ latch type megnetic jack drive ประกอบด้วย 4 ส่วน [6] [7] คือ pressure housing, latch assembly, driving rod และ coil stack ซึ่ง pressure housing เป็นส่วนที่บรรจุ driving rod และ latch assembly สำหรับ latch assembly ติดตั้งอยู่ด้านล่างของ pressure housing ประกอบด้วย stationary gripper และ movable gripper ซึ่งstationary gripper เป็นตัวยึดให้แท่งควบคุมอยู่ในระดับที่คงที่เมื่อได้ระดับตามที่ต้องการ ส่วน movable gripper เป็นตัวเกี่ยว driving rod ให้เคลื่อนที่ขึ้นลง อีกส่วนคือ driving rod เป็นส่วนที่ต่อกับแท่ง

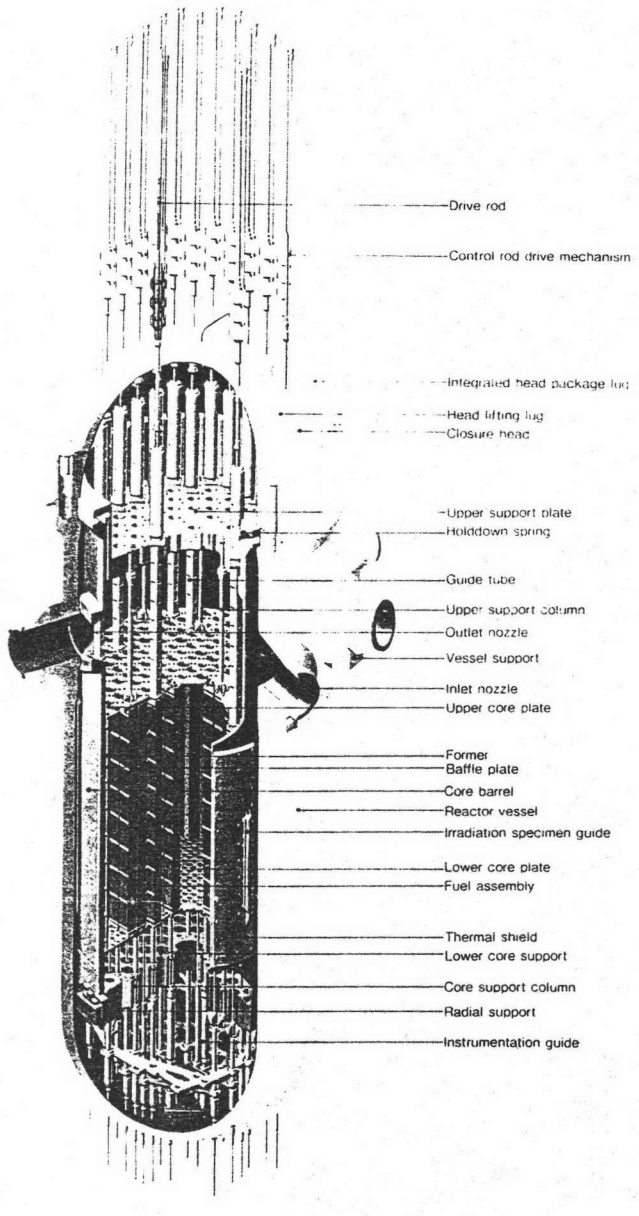
ควบคุมทำหน้าที่เป็นตัวเคลื่อนที่ขึ้นลงตามการเคลื่อนที่ของ latch assembly ส่วนสุดท้ายคือ coil stack เป็นส่วนที่อยู่ภายนอก pressure housing มีทั้งหมด 3 ชุด ซึ่งทำงานแยกอิสระกัน coil stack จะมีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะส่งไปยัง movable gripper เพื่อเกี่ยว driving rod ซึ่งจะเคลื่อนที่ตามแนวดิ่ง รายละเอียดของระบบควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6

ในขณะเดินเครื่องปกติแท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว114 เซนติเมตรต่อนาที แต่หากมีสัญญาณฉุกเฉินแท่งควบคุมสามารถตกลงสู่แกนปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกภายในเวลา 2 วินาที



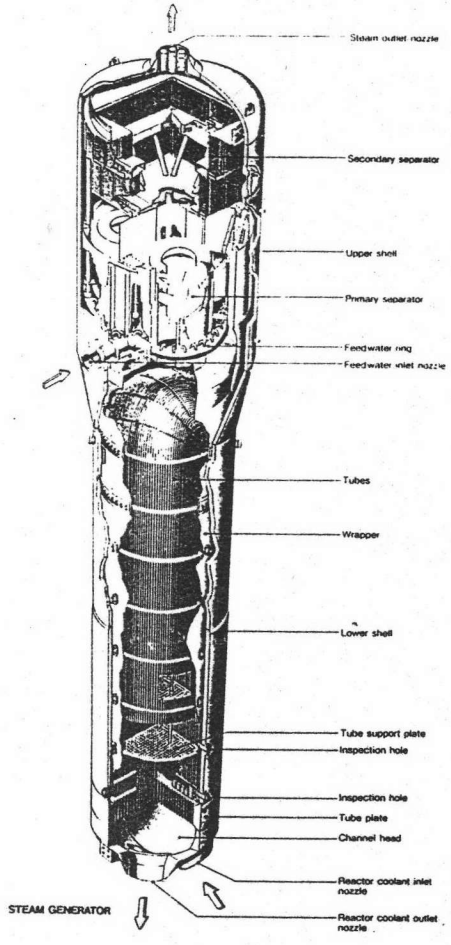
รูปที่ 2.6 ระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม

5. ถังปฏิกรณ์ : เป็นถังรูปทรงกระบอก วางในแนวตั้ง ทำด้วย Low-alloy Steel สามารถทนทานต่อแรงดันสูงได้ ภายในถังปฏิกรณ์บรรจุด้วยแกนเครื่องปฏิกรณ์และระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ โดยส่วนบนมีระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม ฝาด้านบนสามารถเปิดออกได้เพื่อทำการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงและตรวจสอบภายใน ส่วนด้านล่างเชื่อมปิดสนิทประกอบด้วยร่องนำการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม และระบบตรวจวัดปริมาณนิวตรอน นอกจากนี้ ทางเข้าและออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิจะอยู่เหนือแกนปฏิกรณ์ ทั้งนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้แกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน



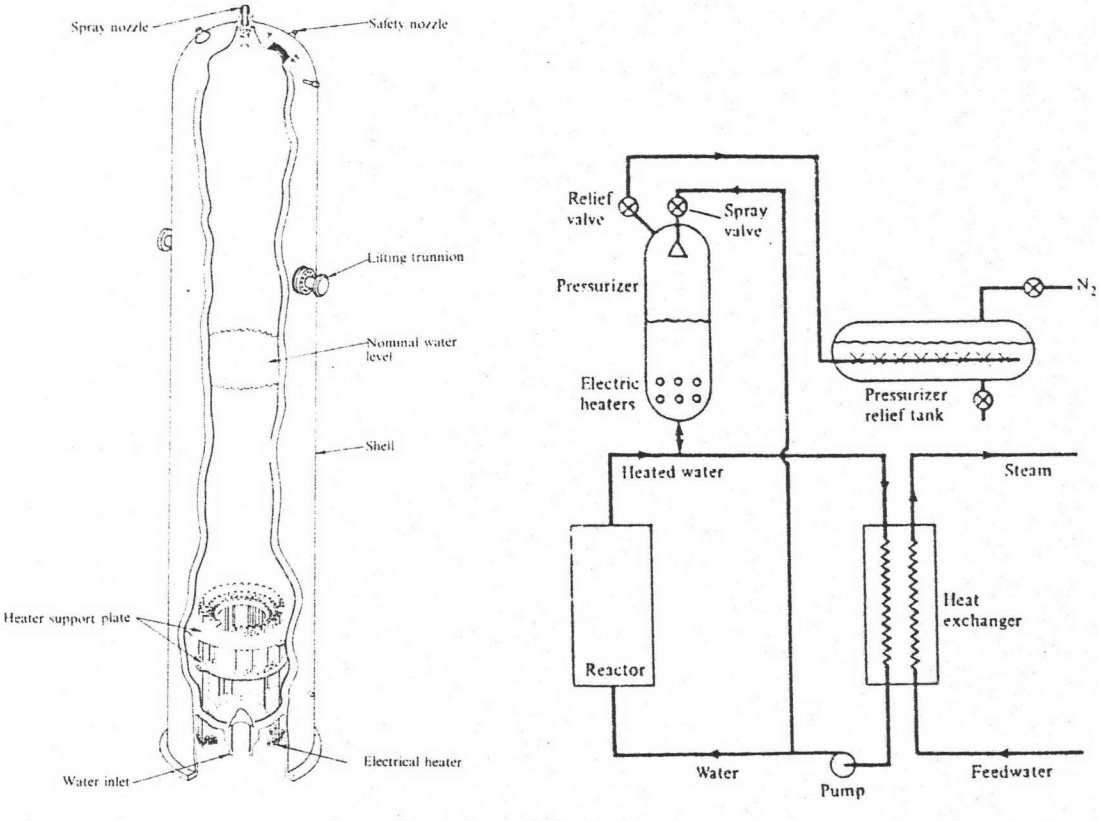
รูปที่ 2.7 ถังปฏิกรณ์และอุปกรณ์ภายใน [6]

6. เครื่องผลิตไอน้ำ : หรือกล่าวได้ว่าเป็นส่วนระบายความร้อนทุติยภูมิ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนในวงจรปฐมภูมิกับน้ำเย็นในวงจรทุติยภูมิ เครื่องผลิตไอน้ำมี 2 แบบ [8] ได้แก่ One Through และ U-Tube Bundle แต่ที่นิยมใช้กันเป็นแบบ U-Tube Bundle โดยวัสดุที่ทำท่อตัวยูใช้ Inconel หรือ สารประกอบของเงิน มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องผลิตไอน้ำแบบ U-Tube ทำได้โดยน้ำจากวงจรปฐมภูมิจะไหลเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำด้านล่างเข้าไปยังท่อเล็กๆ รูปตัวยูหลายพันแท่งเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อน เมื่อน้ำเย็นในวงจรทุติยภูมิที่อยู่ภายนอกท่อตัวยูได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอน้ำลอยสูงขึ้นผ่านเครื่องแยกไอน้ำออกจากน้ำ และเครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง เพื่อทำให้ไอน้ำมีความชื้นต่ำพุ่งออกจากส่วนหัวของเครื่องผลิตไอน้ำเข้าสู่กังหันไอน้ำ ส่วนน้ำร้อนจากวงจรปฐมภูมิเมื่อถ่ายโอนความร้อนแล้วจะวิ่งออกทางด้านล่างของเครื่องผลิตไอน้ำอีกด้านหนึ่งเพื่อกลับเข้าสู่ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิต่อไป



รูปที่ 2.8 เครื่องผลิตไอน้ำแบบ U-tube [6]

7. เครื่องควบคุมความดัน : เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการปรับความดันภายในระบบระบายความร้อนปฐมภูมิให้คงที่ตามต้องการ เครื่องควบคุมความดันมี 2 แบบ [8] คือ ควบคุมความดันด้วยไอน้ำ และแบบควบคุมความดันด้วยก๊าซ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง PWR ใช้แบบเครื่องควบคุมความดันด้วยไอน้ำ เนื่องจาก ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิใช้น้ำ เครื่องควบคุมความดันด้วยไอน้ำมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกปิดหัวท้าย ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เครื่องให้ความร้อนและมีท่อต่อกับน้ำที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ อยู่ด้านล่าง และสเปรย์หัวฉีดอยู่ด้านบนของเครื่องควบคุมความดัน โดยส่วนล่างของเครื่องควบคุมความดันบรรจุน้ำที่มีความดันเท่ากับน้ำร้อนที่ออกจากถังปฏิกรณ์ ส่วนบนบรรจุไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งไอน้ำจะขยายตัว



ก ข

รูปที่ 2.9 (ก) เครื่องควบคุมความดันด้วยไอน้ำ [4]
(ข) แผนผังแสดงการควบคุมความดันของเครื่องควบคุมความดัน [8]

และหดตัวแปรตามความดันภายในถังปฏิกรณ์ ในกรณีที่ความดันภายในถังปฏิกรณ์สูงขึ้นจะทำให้ไอน้ำในเครื่องควบคุมความดันถูกอัด น้ำเย็นจากวงจรปฐมภูมิส่วนหนึ่งจะถูกพ่นเข้าเครื่องควบคุมความดันทางหัวฉีดเพื่อควบแน่นไอน้ำทำให้ความดันลดลงเป็นปกติ นอกจากนี้ มีการออกแบบให้ด้านบนของเครื่องควบคุมความดันต่อกับวาล์วของ Pressurizer relief tank ภายในบรรจุน้ำ จะทำหน้าที่ในการนำไอน้ำของเครื่องควบคุมความดันไปควบแน่นในกรณีที่ความดันสูงขึ้นมาก เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ความดันภายในเครื่องควบคุมความดันสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยไอน้ำจะไหลผ่านทาง relief valve เข้าสู่ Pressurizer relief tank ในทางกลับกันถ้าความดันภายในถังปฏิกรณ์ลดลงจะทำให้ไอน้ำในเครื่องควบคุมความดันจะขยายตัวทำให้ความดันในเครื่องควบคุมความดันลดลงตาม เครื่องให้ความร้อนจะให้ความร้อนโดยอัตโนมัติทำให้น้ำส่วนล่างของเครื่องควบคุมความดันกลายเป็นไอน้ำเพื่อเพิ่มความดันในเครื่องควบคุมความดัน ซึ่งจะทำให้ความดันในแกนปฏิกรณ์เพิ่มตามด้วย การออกแบบความจุของเครื่องควบคุมความดันและ pressurizer relief tank ขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR โดยทั่วไปแล้วมีเครื่องควบคุมความดัน 1 เครื่อง

1.3. การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR

การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง คือ การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดภายในแกนปฏิกรณ์ให้เป็นไปอย่างปลอดภัย และสามารถเพิ่มและลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันให้เป็นไปตามต้องการได้ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและสารระบายความร้อน และปริมาณนิวตรอนที่สามารถทำปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR จึงมีการออกแบบให้การเดินเครื่องอยู่ในภาวะที่ปลอดภัย โดยมีระบบควบคุมความปลอดภัยทั้งจากการออกแบบให้เครื่องปฏิกิรณ์ปลอดภัยด้วยตัวเองและการควบคุมด้วยระบบความปลอดภัย

การออกแบบให้เครื่องปฏิกิรณ์ปลอดภัยด้วยตัวเองคือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR เป็นเครื่องแบบ Thermal Reactor ซึ่งอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันมาก ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับค่า สัมประสทธิ์ของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient) หากออกแบบให้มีค่าสัมประสทธิ์ของอุณหภูมิเป็นบวก คือ เมื่ออุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามแกนปฏิกรณ์อาจเกิดการหลอมละลายได้ซึ่งเป็นสภาวะการเดินเครื่องที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้น จึงออกแบบให้มีค่าสัมประสทธิ์ของอุณหภูมิเป็นลบกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นอัตราการเกิด

ปฏิกิริยาจะลดลง เรียกสภาวะการเดินเครื่องแบบนี้ว่า Negative Reactivity ซึ่งในการเดินเครื่องให้อยู่ในสภาวะดังกล่าวได้จะต้องควบคุมที่ค่าสัมประสทธิ์ของอุณหภูมิซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \text{Temperature Coefficient} \quad \text{.....(2.3)}^{[9]}$$

เมื่อ ρ = Fission Reactivity

T = Temperature

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอน การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของสารหน่วงนิวตรอน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแกนปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ 2.4

$$\text{Temperature Coefficient} = \frac{\partial \rho_n}{\partial T} + \frac{\partial \rho_d}{\partial T} + \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \quad \text{.....(2.4)}^{[9]}$$

เมื่อ $\frac{\partial \rho_n}{\partial T}$ = Nuclar Temperature Coefficient

$\frac{\partial \rho_d}{\partial T}$ = Density Temperature Coefficient

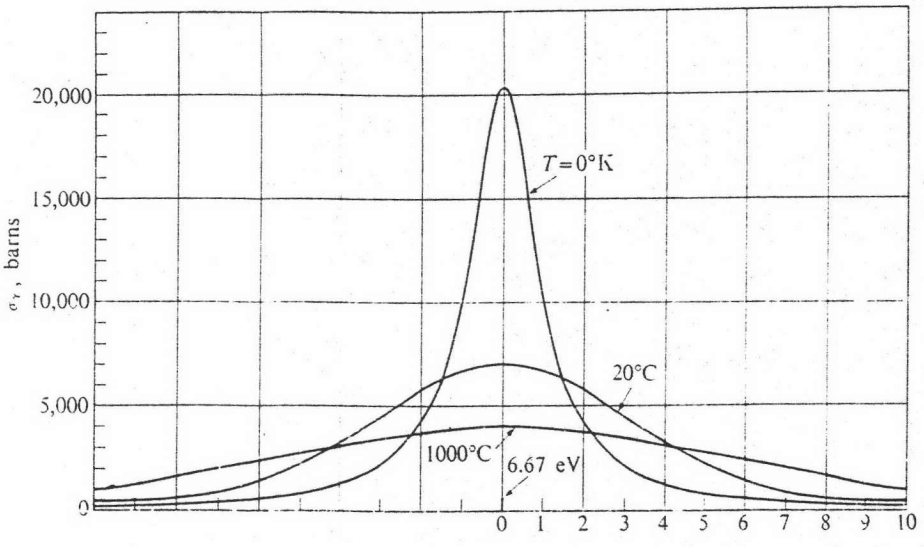
$\frac{\partial \rho_v}{\partial T}$ = Volume Temperature Coefficient

ดังนั้น $$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial \rho_n}{\partial T} + \frac{\partial \rho_d}{\partial T} + \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \quad \text{.....(2.5)}$$

สำหรับ Nuclear Temperature Coefficient ในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำธรรมดาเป็นสารระบายความร้อนจะมีค่าเป็น ลบ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันลดลง เนื่องจาก ยูเรเนียม-238 ทำปฏิกิริยาดูดจับนิวตรอนช่วงพลังงาน resonance ได้มากขึ้นปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า Doppler Effect สามารถอธิบายและแสดงความสัมพันธ์ตามกราฟรูปที่ 2.10 และสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$\frac{d\rho_n}{dT} = \frac{1}{p}\frac{dp}{dT} \quad \text{.....(2.6)}^{[10]}$$

เมื่อ p= Resonance Escape Probability



รูปที่ 2.10 กราฟการดูดจับ Resonance Neutron ของยูเรเนียม-238 [4]

$$F_a = \phi av \int \Sigma a(E)dE \quad \text{.....(2.7)} \quad [4]$$

เมื่อ F_a = Number of Neutrons Absorbed (/cm3-sec) in Resonance Energy

ϕav = Resonance Flux

Σa = Macroscopic absorbtion cross section

กล่าวคือ ขณะที่อุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์ปกติสเปคตรัมของ resonance neutron จะแคบและชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สเปคตรัมของ resonance neutron กว้างขึ้นและความชันลดลงแต่พื้นที่ใต้กราฟยังคงเท่าเดิมจึงทำให้ค่า $\int \Sigma a(E)dE$ มีค่าคงที่แม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนไป แต่เนื่องจากค่า ϕav ขึ้นกับอุณหภูมิกล่าวคือค่า ϕav จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในแกนปฏิกิรณ์สูงขึ้น ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดจับนิวตรอนของยูเรเนียม-238 (F_a)จะเพิ่มมากขึ้นทำให้เหลือจำนวนนิวตรอนที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับยูเรเนียม-235 น้อยลง

สำหรับค่า Density Temperature Coefficient ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการสูญหายของนิวตรอนเร็วและนิวตรอนช้ามากขึ้น กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนสูงขึ้นความหนาแน่นจะลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการหน่วงนิวตรอนลดลง สามารถอธิบายได้โดยอาศัยสมการที่ 2.8

$$P = \frac{1}{(1+B^2 L_T^2)(1+B^2 \tau_T)} \quad \text{.....(2.8)}^{[4]}$$

เนื่องจาก L_T^2 และ τ_T แปรตามค่า ρ_d^{-n} ดังนั้น

$$P = \frac{1}{(1+\frac{C_1}{\rho_d^n})(1+\frac{C_2}{\rho_d^n})} \quad \text{.....(2.9)}^{[4]}$$

โดยที่ C = Constant

P = Nonleakage Probability

B^2 = Physical Bulcking of Material

L_T^2 = Thermal Diffusion Area

τ_T = Age of Fission Neutron to Thermal

ρ_d = Density of Moderator

ถ้าอุณหภูมิของสารหน่วนิวตรอนสูงขึ้น ρ_d จะลดลงทำให้ค่า P ต่ำลงนั่นคือนิวตรอนเร็วมีการสูญหายมากขึ้นและจากการที่สารหน่วงนิวตรอนมีความหนาแน่นน้อยลงทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงนิวตรอนลดลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นจึงมีค่าเป็นลบ

ส่วนค่า Volume Temperature Coefficient นั้น มีค่าเป็นบวก กล่าวคือ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR มีเชื้อเพลิงเป็นของแข็งและของเหลวคือน้ำเป็นสารหน่วงนิวตรอนและสารระบายความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับปริมาตรที่เปลี่ยนไปได้ตามสมการที่ 2.10

$$\frac{d\rho_d}{dT} = \frac{1}{f}\frac{df}{dT} \quad \text{.....(2.10)}^{[9]}$$

เมื่อ f = Fuel Utilization

$$= \frac{\sum_{aF}}{\sum_{aF} + \sum_{aM}}$$

$\sum_{aF}$ = Macroscopic Absorbtion Cross Section in Fuel

$\sum_{aM}$ = Macroscopic Absorbtion Cross Section in Moderator

เนื่องจากการขยายตัวของของเหลวเมื่อได้รับความร้อนจะมากกว่าของแข็ง ดังนั้น จึงทำให้น้ำบางส่วนถูกดันออกจากแกนปฏิกรณ์ทำให้อัตราส่วนของการดูดกลืนของนิวตรอนช้าของน้ำน้อยกว่าในเชื้อเพลิงค่า $\sum_{aM}$ ลดลงเป็นผลให้ค่า f สูงขึ้นจึงทำให้ค่า $\frac{d\rho_v}{dT}$ มีค่าเป็นบวก ดังนั้นในการออกแบบจึงออกแบบให้ค่า Volume Temperature Coefficient มีค่าต่ำ เพื่อให้ค่ารวมของ Temperature Coefficient มีค่าเป็นลบ

สำหรับการควบคุมด้วยระบบความปลอดภัยสามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบ คือ การควบคุมโดยใช้แท่งควบคุมในแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่มีระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมอยู่ด้านบนของแกนปฏิกรณ์ ในการควบคุมปฏิกิริยานั้น แท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ลงมาจับนิวตรอนส่วนเกินเพื่อลดกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน) ในทางตรงกันข้ามแท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ขึ้นเมื่อต้องการเพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้แท่งควบคุมยังทำหน้าที่ควบคุมสภาวะในขณะเริ่มเดินเครื่อง หยุดเดินเครื่อง เปลี่ยนแปลงกำลังการเดินเครื่องการกระจายกำลังให้สม่ำเสมอ

อีกระบบหนึ่งคือ การควบคุมโดยใช้สารเคมี[11] โดยการฉีดสารละลายของสารดูดนิวตรอนเข้าไปกับน้ำระบายความร้อน สารดูดนิวตรอนที่ใช้ที่นิยมใช้คือ โบรอน เนื่องจากโบรอนจะไม่เกิดเป็นไอโซโทปของสารรังสี ซึ่งโบรอนที่ใช้จะอยู่ในรูปสารละลายกรดบอริค สำหรับการควบคุมปฏิกิริยาโดยใช้สารเคมีนี้มักใช้เพื่อควบคุมกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ได้เร็วกว่าระบบของแท่งควบคุมในการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้คงที่ได้โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโดยมี Chemical and Volume Control System (CVCS) เป็นระบบควบคุมความเข้มข้นด้วยการฉีดสารละลายกรดบอริคที่มีความเข้มข้นมากกว่าสารละลายในแกนปฏิกรณ์ ในกรณีต้องการความเข้มข้นของกรดบอริคมากขึ้น และถ้าต้องการลดความเข้มข้นของสารละลาย CVCS จะฉีดน้ำบริสุทธิหรือสารละลายกรดบอริคทีมีความเข้มข้นต่ำกว่าสารละลายในแกนปฏิกรณ์เข้าไป การควบคุมโดยใช้สารเคมีร่วมกับแท่งควบคุมมีข้อดีคือ ทำให้ลดจำนวนและขนาดของแท่งควบคุมลงได้ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายและทำให้การออกแบบง่ายขึ้น

นอกจากระบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีระบบการควบคุมความดันภายในแกนปฏิกรณ์โดยการใช้เครื่องควบคุมความดันในการควบคุมมิให้ความดันในแกนปฏิกรณ์เพิ่มสูงขึ้นจนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุรุนแรงได้

1.4. ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR มีระบบเตือนความผิดปกติทั้งที่เกิดจากภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ เช่น การวัดความสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว และที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น มีการวัดความดันภายในท่อระบายความร้อน หากความดันลดลงอาจเนื่องมาจากการรั่วของท่อ หรือมีการวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์หากอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากขาดน้ำระบายความร้อน ซึ่งเหตุผิดปกติเหล่านี้เป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการระเบิดภายในเครื่องปฏิกรณ์และทำให้กัมมันตภาพรังสีรั่วสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถทราบและยับยั้งเหตุผิดปกตินั้นๆก่อนที่จะนำไปสู่อุบัติเหตุร้ายแรง

ดังนั้น ระบบควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ในสภาวะฉุกเฉินจึงมีการทำงานเป็น 2 ระบบ คือ ระบบการตรวจวัด โดยมีการติดตั้งเครื่องตรวจวัด ตามบริเวณต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่จะทำให้หยุดเดินเครื่อง [11]

บริเวณที่ติดตั้งเครื่องวัด	สัญญาณที่ทำให้หยุดเดินเครื่อง
Neutron flux	high
Reactor pressure	low
Pressurizer water level	high
Primary coolant flow	low
Steam generator water level	low
Steam generator feed flow	low

ส่วนอีกระบบหนึ่งคือ ระบบการส่งข้อมูลประกอบด้วย วงจร analog วงจร logic และ สัญญาณหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเครื่องวัดต่างๆ ส่งข้อมูลมายังวงจร analog และผ่านไปยังวงจร logic และเข้าสู่สัญญาณหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อทำการหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการตกของแท่งควบคุมด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

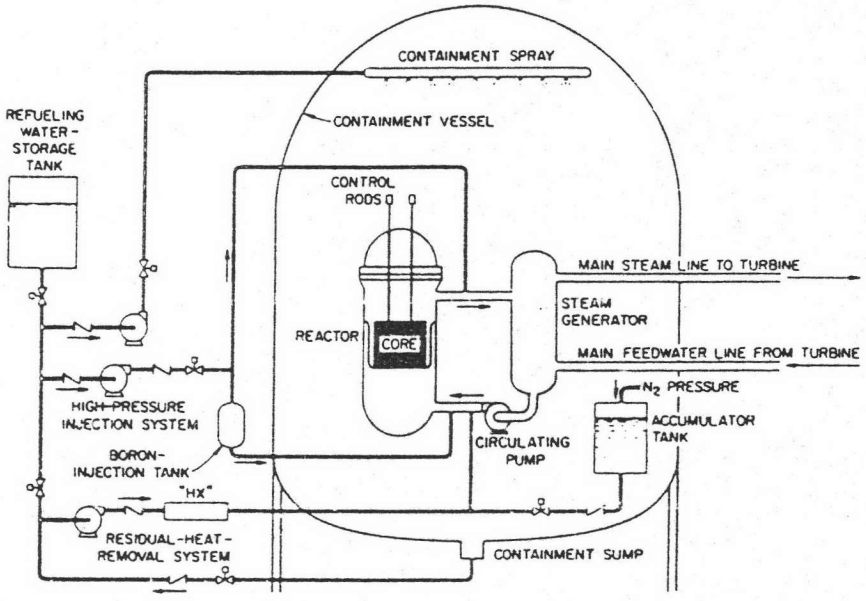
1.5. ระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม

เมื่อเกิดเหตุผิดปกติดังกล่าวข้างต้นแล้วหากไม่สามารถแก้ไขสถานการณ์ดังกล่าวได้ ซึ่งจะทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง คือ แกนเครื่องปฏิกรณ์สูญเสียน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิ แกนเครื่องปฏิกรณ์หลอมละลายและสารกัมมันตรังสีรั่วออกจากแท่งหุ้มเชื้อเพลิง ซึ่งอาจจะสามารถรั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR จึงได้ออกแบบระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันมิให้มีการสูญเสียน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิและหากมีการหลอมละลายของแกนเครื่องปฏิกรณ์แล้วสารกัมมันตรังสีจะต้องไม่สามารถรั่วสู่สิ่งแวดล้อมได้ ระบบดังกล่าวประกอบด้วย

1. ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน คือระบบการทดแทนน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิที่ขาดหายไปอาจจะเนื่องจากท่อส่งน้ำระบายความร้อนรั่วหรือแตก ปั๊มน้ำขัดข้อง เป็นต้น ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 3 ส่วนคือ Accumulator injection system, High pressure injection system และ Low pressure coolant injection system

Accumulator injection system เป็นระบบที่ทำงานโดยอัตโนมัติ โดยภายใน accumulator tank บรรจุสารละลายบอริคแอซิด และมีก๊าซไนโตรเจนที่อัดความดันไว้ที่ 125 เท่าของบรรยากาศ เมื่อความดันของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิลดต่ำกว่าความดันภายใน Accumulator tank จะมีสัญญาณไปยัง check-valve ของระบบ Accumulator เพื่อเปิดวาล์วฉีดสารละลายบอริคเข้าไปในระบบระบายความร้อนปฐมภูมิเพื่อหยุดปฏิกิริยาฟิชชัน ทั้งนี้ เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดแก่แกนปฏิกรณ์

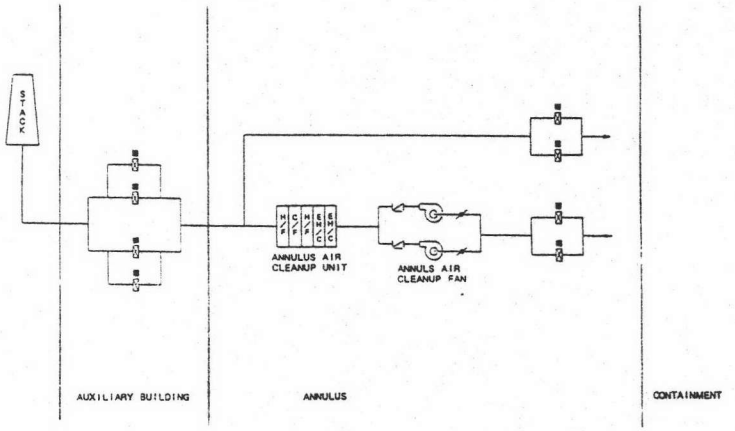
สำหรับ High pressure system และ Low pressure system เป็นระบบที่เดินเครื่องโดยเจ้าหน้าที่ ซึ่ง High pressure จะฉีดสารละลายบอริคแอซิดเข้าไปในระบบระบายความร้อนปฐมภูมิเพื่อช่วยหยุดปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งระบบหยุดปฏิกิริยานี้เป็นระบบเดียวกับการหยุดปฏิกิริยาฟิชชันในขณะเดินเครื่องปกติ หลังจากอุบัติเหตุความดันในแกนปฏิกรณ์จะลดต่ำลงแต่ยังคงมีความร้อนสะสมอยู่มาก ซึ่ง Low pressure system เป็นระบบที่ระบายความร้อนโดยนำน้ำจากถังน้ำบ่อเก็บเชื้อเพลิงเข้ามาหมุนเวียนระบายความร้อน



รูปที่ 2.11 ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน [5]

2. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะเป็นโดมคลุมเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับส่วนนิวเคลียร์ อาคารคอนกรีตนี้จะเสริมเหล็กทั้งในแนวตั้งและและแนวนอน เพื่อให้ทนทานต่อแรงดันที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น การระเบิดของถังปฏิกรณ์ และภายนอกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เช่น การเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว การก่อวินาศกรรม ภัยธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้น อาคารฯ จะเป็นตัวปิดกั้นไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งอุบัติเหตุที่เกิดจากภายนอกและในอาคารฯ

นอกจากนี้ ภายนอกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีวงแหวน (Annulus) หุ้มอยู่รอบ ๆ ภายในมีระบบ annular air clean up ภาวะปกติในวงแหวนจะควบคุมความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศ ดังนั้น ในสภาวะฉุกเฉินอากาศภายในอาคารฯ จะไหลเข้าสู่วงแหวนและผ่านระบบ air clean up ซึ่งมีตัวกรองอากาศเพื่อดูดจับสารกัมมันตรังสีก่อนปล่อยอากาศออกภายนอกทางปล่อง

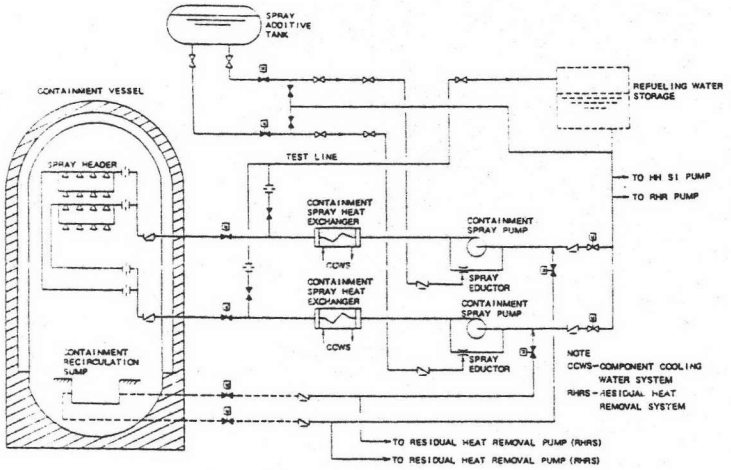


รูปที่ 2.12 วงแหวนรอบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และระบบ annulus air clean up [18]

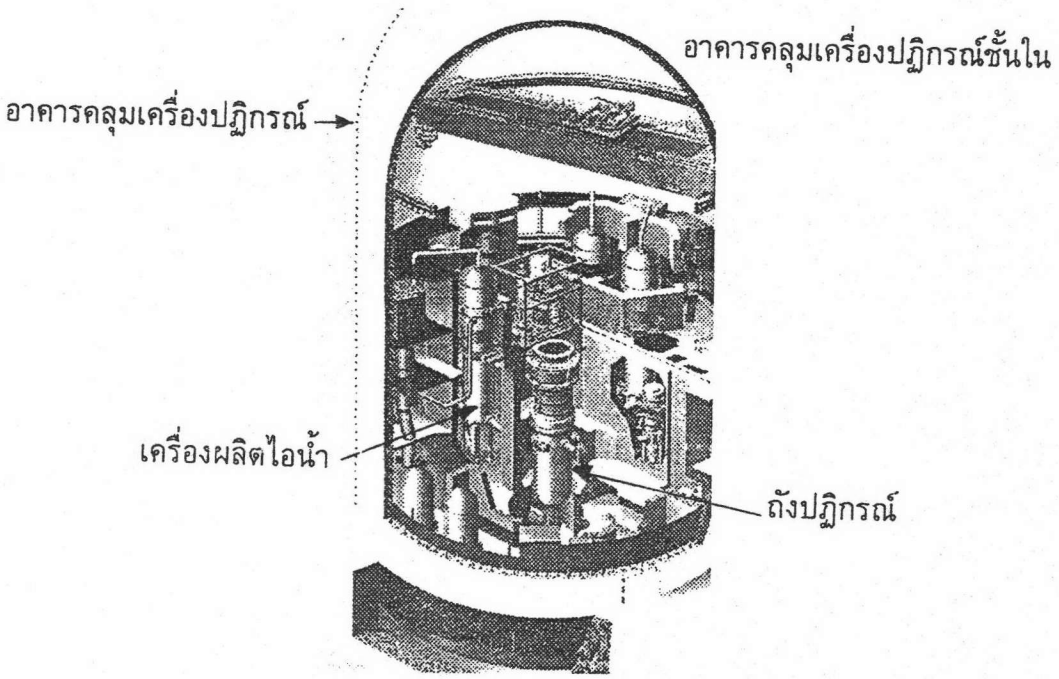
และมีระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเกิดอุบัติเหตุความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นมากเป็นผลให้อากาศและไอน้ำภายในอาคารฯ ขยายตัว ทำให้ความดันภายในอาคารฯ สูงขึ้นตามไปด้วย เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR จึงได้ออกแบบระบบระบายความร้อนในอาคารฯ โดยระบบระบายความร้อนฯ เป็นระบบที่สามารถทำงานโดยอัตโนมัติหรือทำงานโดยเจ้าหน้าที่ได้ จะทำงานเมื่อความดันภายในอาคารฯ สูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ การทำงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือระบบระบายความร้อนฯ แรกจะฉีดน้ำจากถังน้ำบ่อเก็บเชื้อเพลิงเข้าสู่ภายในอาคารฯ เพื่อทำการควบแน่นไอน้ำและลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เมื่อน้ำภายในถังน้ำบ่อเก็บเชื้อเพลิงมีปริมาณลดต่ำลง มีสัญญาณสั่งให้ระบบระบายความร้อนฯ ที่สองเปิดเซ็ควาล์ว เพื่อนำน้ำจากบ่อเก็บน้ำด้านล่างของอาคารฯ หมุนเวียนกลับเข้าไปใช้ใหม่

นอกจากนี้ ระบบระบายความร้อนฯ ดังกล่าว ยังมีการฉีดสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซจากผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชัน เพื่อลดการฟุ้งกระจายของสารกัมมันตรังสีอีกทางหนึ่ง

รายละเอียดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง PWR ดูเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข



รูปที่ 2.13 ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [7]



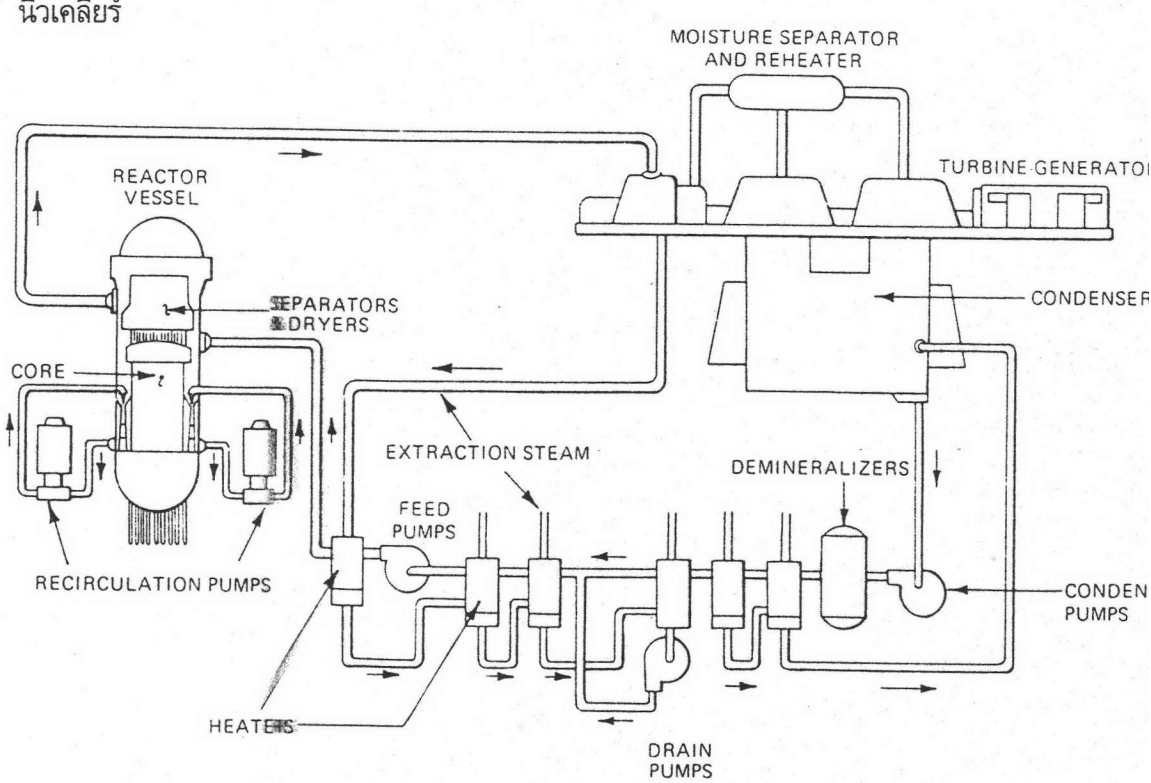
รูปที่ 2.14 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [6]

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR

ในสมัยเริ่มต้นของการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เชื่อว่าหากปล่อยให้น้ำภายในถังปฏิกรณ์เดือดจะทำให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียร ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR จึงได้รับการพัฒนาก่อนเป็นรุ่นแรก ต่อมาผลการทดลองปรากฏว่า ถ้าปล่อยให้น้ำในถังปฏิกรณ์เดือดที่ความดันภายในสูงกว่าปกติเครื่องปฏิกรณ์จะคงอยู่ในสภาวะที่เสถียรและสามารถควบคุมได้ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ซึ่งการควบคุมความดันภายในถังปฏิกรณ์ง่ายกว่าแบบ PWR

1. หลักการทำงาน

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ใช้นิวตรอนย่านพลังงานต่ำเพื่อทำปฏิกิริยาฟิชชันกับยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ โดยมีน้ำเป็นสารหน่วงนิวตรอนและระบายความร้อนเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR แต่มีความแตกต่างกันที่ความดันภายในถังปฏิกรณ์ไม่สูงเท่าแบบ PWR ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

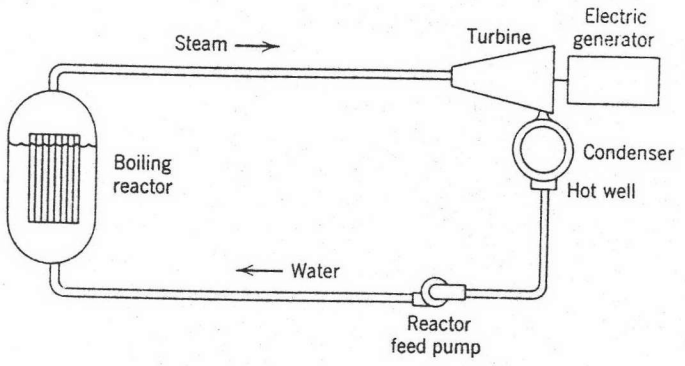


รูปที่ 2.15 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR [17]

กำลังแบบ BWR กล่าวคือ ภายในถังปฏิกรณ์จะเป็นส่วนผลิตไอน้ำโดยตรง ซึ่งควบคุมความดันประมาณ 70 เท่าของบรรยากาศ[4] หรือประมาณครึ่งหนึ่งของความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR น้ำระบายความร้อนไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทางเจทปั๊ม ที่อยู่ด้านข้างของถังปฏิกรณ์ หลังจากนั้น เจทปั๊มจะฉีดน้ำไปยังด้านล่างแล้วไหลผ่านแกนปฏิกรณ์จากด้านล่างสู่ด้านบนเพื่อถ่ายโอนความร้อนจากแกนปฏิกรณ์ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งพ้นแกนปฏิกรณ์น้ำจะเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 290°ซ.[4] ไอน้ำจะผ่านเครื่องแยกไอน้ำออกจากน้ำ และเครื่องทำให้ไอน้ำแห้งที่อยู่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์กลายเป็นไอน้ำที่มีความชื้นต่ำแล้วผ่านเข้ากังหันไอน้ำเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไอน้ำที่ไหลผ่านกังหันไอน้ำแล้วจะไหลผ่านมายังเครื่องควบแน่นซึ่งมีท่อเล็ก ๆ รับน้ำที่ปั๊มมาจากภายนอกเพื่อถ่ายโอนความร้อนที่เหลือจากไอน้ำ ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและถูกปั๊มกลับเข้าแกนปฏิกรณ์อีกครั้งหนึ่งซึ่งระบบนี้จะเป็นระบบปิด

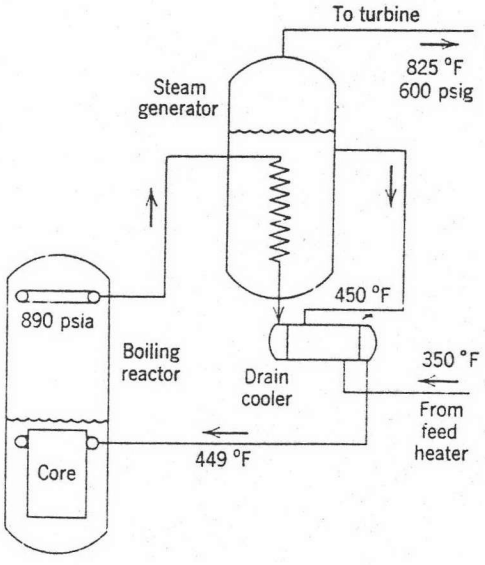
จากหลักการทำงานดังกล่าวข้างต้นนี้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ได้รับการออกแบบให้มีการทำงานของระบบระบายความร้อนเป็นหลายวงจร สามารถแบ่งออกได้[18]

1. ระบบผลิตไอน้ำโดยตรง เป็นระบบเดียวกับที่กล่าวข้างต้น คือไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์จะผ่านเข้าไปในส่วนผลิตไฟฟ้าโดยตรง



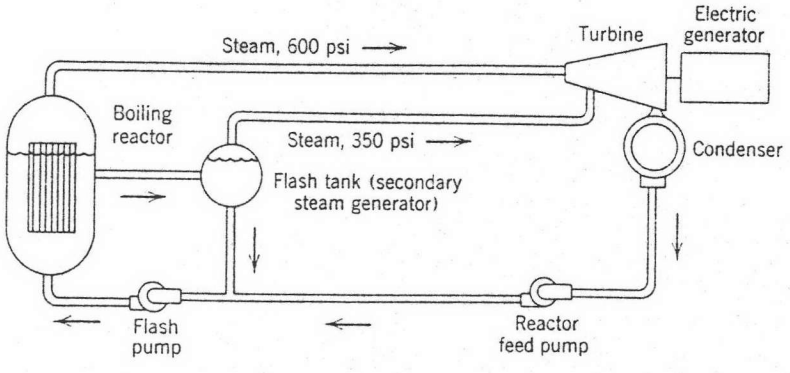
รูปที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำโดยตรง [18]

2. ระบบผลิตไอน้ำทางอ้อม ระบบนี้ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์จะผ่านไปยังเครื่องผลิตไอน้ำ ซึ่งเป็นน้ำอีกระบบหนึ่งที่มารับความร้อนจากไอน้ำที่ออกมาจากแกนปฏิกรณ์ น้ำในเครื่องผลิตไอน้ำจะเดือดกลายเป็นไอน้ำเข้าสู่กังหันผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำทางอ้อม [18]

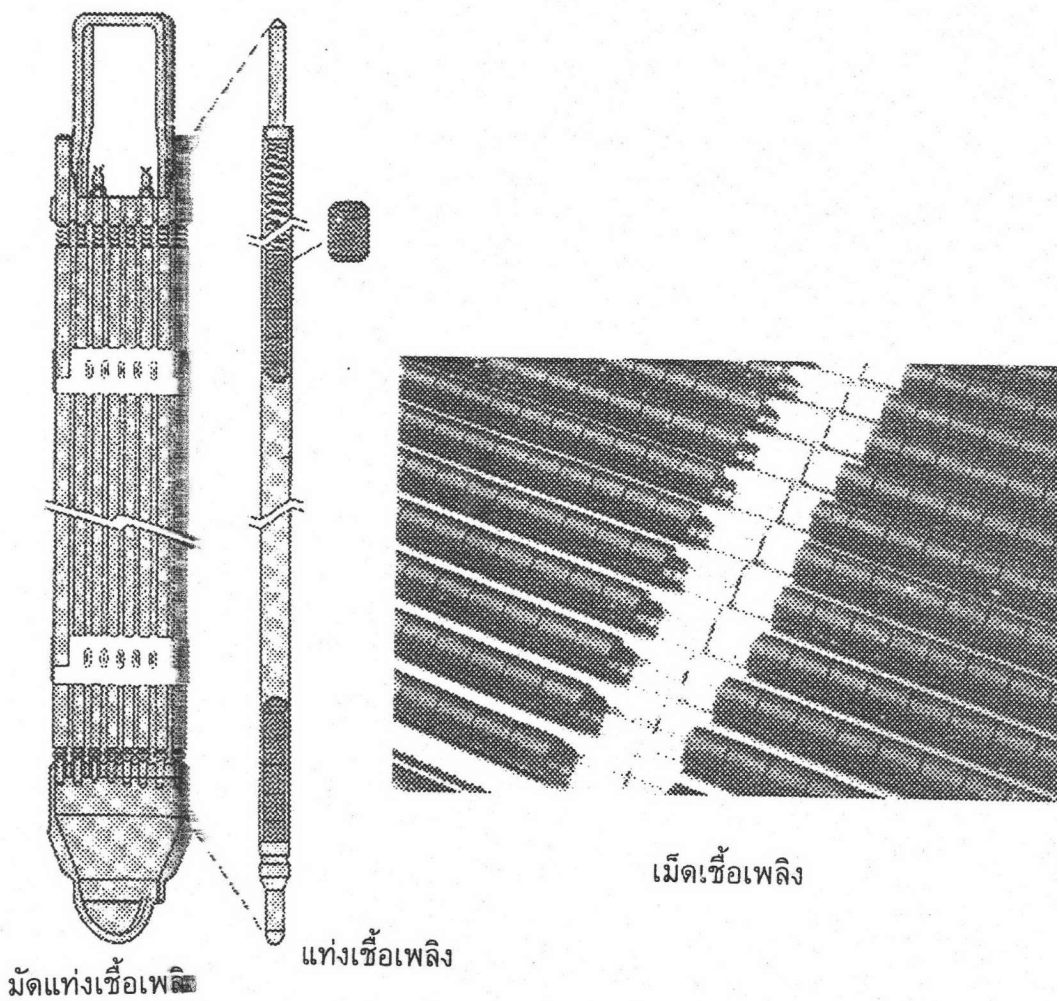
3. ระบบผลิตไอน้ำวงจรคู่ ระบบนี้มีเครื่องผลิตไอน้ำ 2 เครื่อง เครื่องแรกคือถังปฏิกรณ์ไอน้ำที่ออกจากแกนปฏิกรณ์จะวิ่งเข้าสู่กังหันความดันสูง อีกส่วนน้ำร้อนจากแกนปฏิกรณ์จะวิ่งเข้าเครื่องผลิตไอน้ำอีกตัวเพื่อผลิตไอน้ำ ซึ่งจะวิ่งเข้าสู่กังหันความดันต่ำ



รูปที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำวงจรคู่ [18]

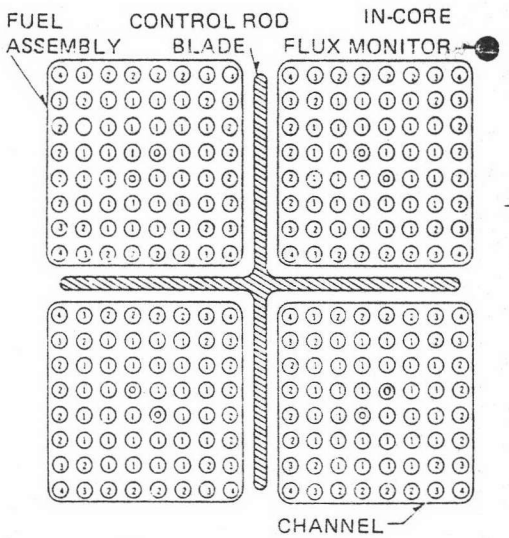
2.2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR

1. แท่งเชื้อเพลิง : มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วยโลหะผสมเซอร์โคเนียม บรรจุเชื้อเพลิงยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำอยู่ในรูปยูเรเนียมไดออกไซด์ ที่อัดเป็นรูปทรงกระบอกลักษณะเดียวกับเม็ดเชื้อเพลิงแบบ PWR มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและยาว 1 และ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงมัดรวมกัน เรียกว่า มัดเชื้อเพลิง ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR มัดเชื้อเพลิงหนึ่งจัดเรียงในลักษณะ 8x8

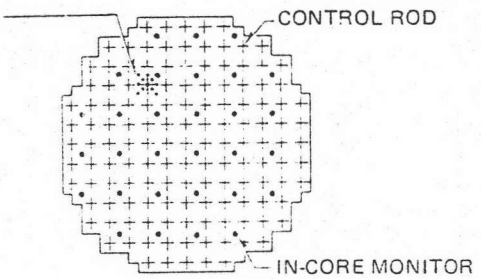


รูปที่ 2.19 เม็ดเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงและมัดเชื้อเพลิง [3]

2. แกนปฏิกรณ์ : ประกอบด้วยมัดแท่งเชื้อเพลิงประกอบรวมกับแท่งควบคุม โดยมัดแท่งเชื้อเพลิงทุก 4 มัด จะมีแท่งควบคุม 1 แท่ง จำนวนของมัดแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์



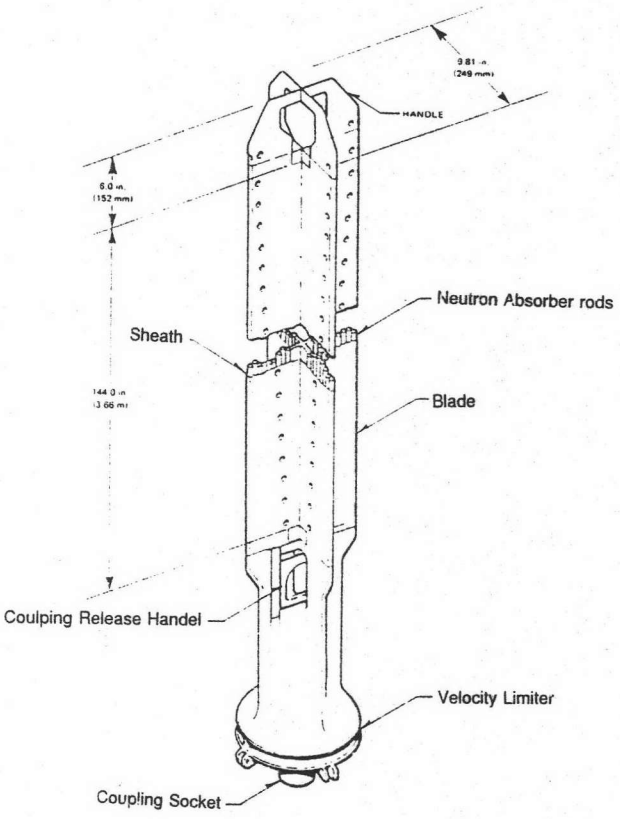
มัดแท่งเชื้อเพลิงกับแท่งควบคุม 1 กลุ่ม



แกนปฏิกรณ์

รูปที่ 2.20 การจัดเรียงมัดเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ [5]

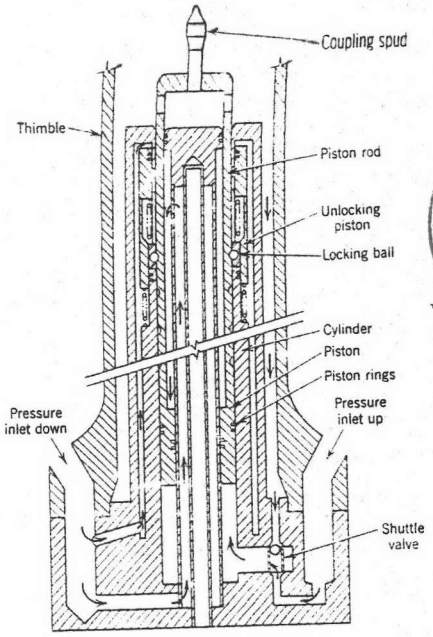
3. แท่งควบคุม : ทำด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 เซนติเมตร ความยาวประมาณ 4-6 เมตร ภายในบรรจุผงโบรอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารดูดนิวตรอน แท่งควบคุมอยู่รวมกันเป็นรูปกากบาท โดยแต่ละด้านจะมีแท่งควบคุมบรรจุ 18 แท่ง แท่งกากบาทนี้จัดเรียงตัวในมัดแท่งเชื้อเพลิงโดยมีระบบควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงอยู่ทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์



รูปที่ 2.21 แท่งควบคุม [19]

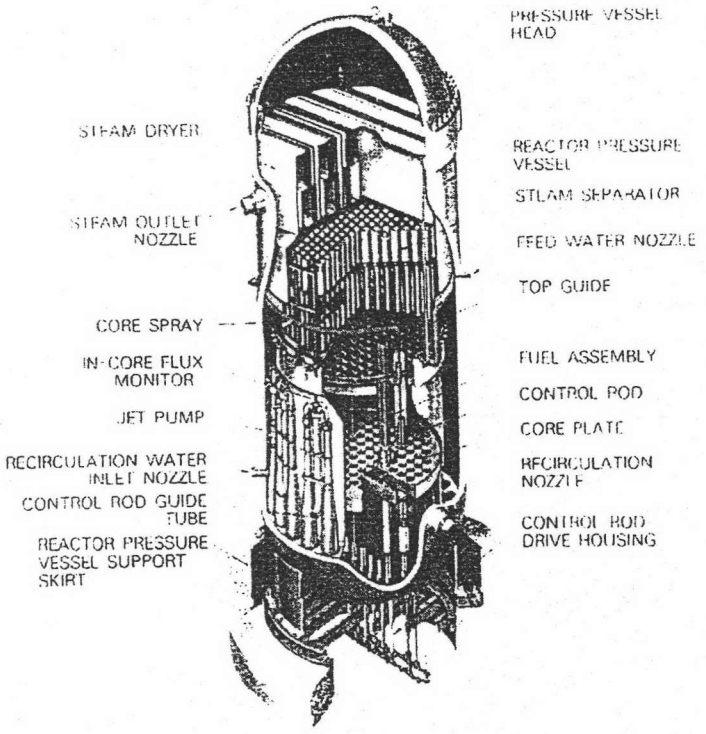
4. ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม : ติดตั้งอยู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ เนื่องจาก ภายในถังปฏิกรณ์ตอนบนประกอบด้วยเครื่องแยกไอน้ำออกจากน้ำ และเครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง จึงไม่สะดวกในการออกแบบให้แท่งควบคุมเคลื่อนที่ลงมา ระบบการเคลื่อนที่เป็นระบบไฮโดรลิค สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งเคลื่อนที่จากความไม่สมดุลของแรงดันของน้ำที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ เมื่อต้องการลดกำลังเครื่องปฏิกรณ์แท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ขึ้นโดยปล่อยน้ำจาก Insert Valve เข้าไปในกระบอกลูกสูบ น้ำที่เข้ามามีแรงดันมากกว่าน้ำภายในกระบอกสูบจะดันลูกสูบขึ้นทำให้แท่งควบคุมเคลื่อนที่ขึ้นตามในทางกลับกัน ถ้าต้องการเพิ่มกำลังเครื่องปฏิกรณ์น้ำจากกระบอกลูกสูบจะไหลเข้าทาง Withdraw Valve ทำให้แท่งควบคุมเคลื่อนที่ลงมา ในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินจะมีน้ำจาก accumulator tank ที่มีแรงดันสูงไหลเข้าสู่กระบอกสูบเพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นของแท่งควบคุม

I16796354



รูปที่ 2.22 ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม [18]

5. ถังปฏิกรณ์ : มีลักษณะรูปทรงกระบอก วางในแนวตั้งคล้ายคลึงกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR แต่ผนังของถังปฏิกรณ์ของ BWR จะบางกว่า เนื่องจากความดันภายในถังปฏิกรณ์ต่ำกว่าของ PWR

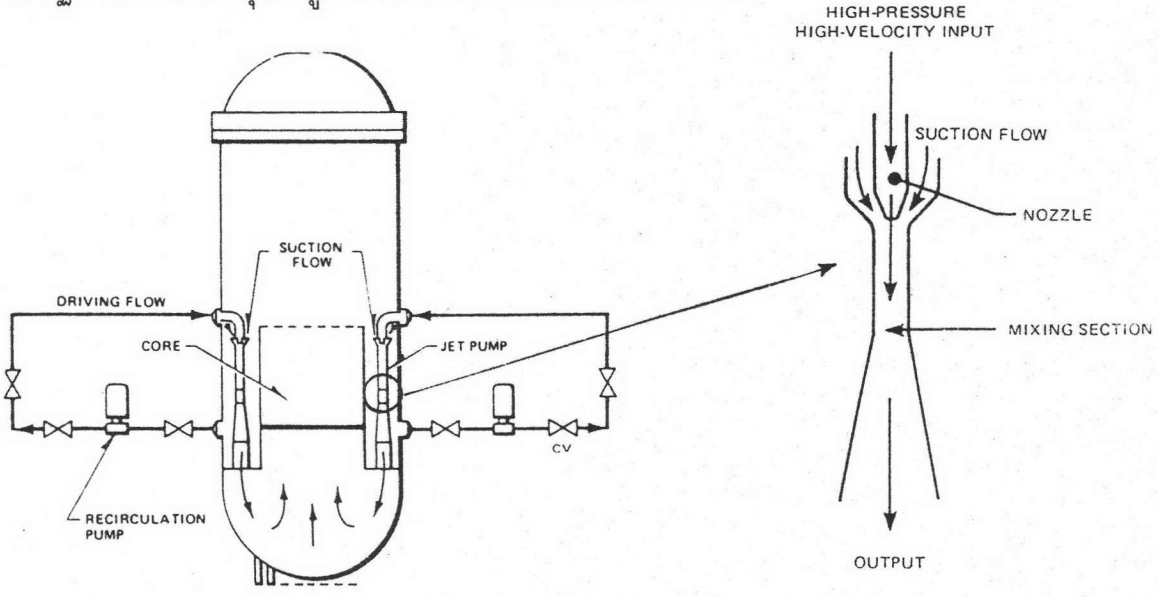


รูปที่ 2.23 ถังปฏิกรณ์และอุปกรณ์ภายใน [17]

6. เครื่องแยกไอน้ำออกจากน้ำ : อยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ ทำหน้าที่ในการแยกน้ำออกจากไอน้ำและนำเอาน้ำที่ถูกแยกออกกลับเข้าสู่แกนปฏิกรณ์อีกครั้งสำหรับกรณีเป็นระบบผลิตไอน้ำโดยตรง ส่วนระบบผลิตไอน้ำวงจรคู่น้ำจะถูกส่งออกไปสู่ระบบผลิตไอน้ำก่อนที่จะกลับเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ สำหรับในการแยกน้ำออกจากไอน้ำนั้นได้อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลาง

7. เครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง : เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของถังปฏิกรณ์ ทำหน้าที่อบแห้งไอน้ำความชื้นต่ำจากเครื่องแยกไอน้ำ ทั้งนี้ เพื่อให้ไอน้ำที่ผลิตได้มีความชื้นต่ำที่สุดก่อนจะเข้าสู่กังหันไอน้ำ

8. เจทปั๊ม (Jet Pump) : ไอน้ำหลังจากผ่านกังหันผลิตไฟฟ้าแล้วจะวิ่งไปยังเครื่องควบแน่น เพื่อถ่ายโอนความร้อนกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและถูกปั๊มมารวมกับน้ำที่มาจากเครื่องแยกไอน้ำโดยปั๊มหมุนเวียน (Circulation Pump) ก่อนปั๊มเข้าเจทปั๊มเพื่อฉีดน้ำลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ เจทปั๊มจะอยู่รอบ ๆ ถังปฏิกรณ์ซึ่งมีประมาณ 10-24 ตัว ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง ลักษณะของเจทปั๊มประกอบด้วยท่อขนาดเล็กมีหัวฉีดขนาดใหญ่ปลายบานสวมเข้าไปในท่อ การทำงานของเจทปั๊ม คือ น้ำระบายความร้อนจะถูกปั๊มเข้ามาโดยปั๊มหมุนเวียนด้วยความดันสูงเข้าไปในท่อเล็ก หัวฉีดจะฉีดน้ำที่ผ่านเข้ามาด้วยความเร็วสูงทำให้บริเวณโดยรอบหัวฉีดมีความดันลดลงเกิดเป็นแรงดูดเพื่อดูดน้ำจากบริเวณโดยรอบให้เข้าไปผสมกับน้ำที่ฉีดออกมา จะทำให้น้ำที่ฉีดเข้ามาใหม่รวมกับน้ำในแกนปฏิกรณ์ เพื่อให้มีอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนสม่ำเสมอกัน



รูปที่ 2.24 เจทปั๊มและการไหลเวียนของน้ำที่ฉีดออกจากเจทปั๊ม [5]

2.3. การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR

การควบคุมกำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR สามารถแยกพิจารณาได้ 2 ประเด็น คือ การควบคุมด้วยตัวเองและการควบคุมด้วยกลไกของระบบความปลอดภัย

การควบคุมด้วยตัวเองของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR นั้น เนื่องจากในการเดินเครื่องปกติน้ำภายในแกนปฏิกรณ์จะเดือดซึ่งจะเกิดฟองอากาศขึ้นภายในสารระบายความร้อน เรียกฟองอากาศนั้นว่า void หากปริมาณความร้อนในแกนปฏิกรณ์เพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้น้ำเดือดอย่างรุนแรง void จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและหาก void ไปเกาะที่ผิวของแท่งหุ้มเชื้อเพลิงจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างแท่งเชื้อเพลิงกับสารระบายความร้อนลดลงเป็นสาเหตุให้แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายได้ ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการเดินเครื่องจึงได้ออกแบบให้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง BWR มีการเดินเครื่องแบบ Negative Void Coefficient กล่าวคือ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ในขณะเดินเครื่องปกติจะมี void อยู่จำนวนหนึ่ง แต่เมื่ออุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิในสารระบายความร้อนสูงทำให้ความหนาแน่นของสารระบายความร้อนต่ำลงปริมาณของ void เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นคุณสมบัติในการหน่วงนิวตรอนต่ำลง ทำให้ปริมาณนิวตรอนช้าลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่ำลง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับค่าสัมประสิทธิ์ของ void แสดงได้ในสมการที่ 2.11

$$\frac{\alpha}{dx} = \frac{d\rho}{} \qquad \text{.....(2.11)}^{[9]}$$

เมื่อ α = Void Coeffcient

ρ = Fission Reactivity

x = Void Fraction = $\dfrac{\text{volum of vapor in mixture}}{\text{volum of liquid-vapor in mixture}}$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณปริมาตรของน้ำในส่วนผสมของน้ำและไอน้ำต่ำทำให้ค่า x มีค่าสูงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงและกำลังเครื่องปฏิกรณ์ลดลงตาม

สำหรับการควบคุมด้วยกลไกของระบบความปลอดภัย ได้แก่

1. การควบคุมกำลังด้วยระบบแท่งควบคุม แท่งควบคุมทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังในขณะเริ่มเดินเครื่อง ควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ขณะเดินเครื่องปกติ หยุดเดินเครื่องทั้งในสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉิน โดยแท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ขึ้นลงจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ระยะของแท่งควบคุมในแกนปฏิกรณ์จะเป็นตัวแปรหนึ่งในการกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

2. การควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์โดยระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเพิ่มตามด้วยจึงเป็นผลให้กำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้น ดังนั้นในการควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่อีกนัยคือการควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นให้คงที่โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณและมวลของน้ำระบายความร้อนที่เข้าสู่แกนปฏิกรณ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณความร้อนในแกนปฏิกรณ์ตามสมการที่ 2.11

$$Q_t = \bar{x}_e \dot{m}_i (h_g - h_d) \quad \text{.....(2.12)}^{[8]}$$

เมื่อ Q_t = Heat Generation

h_g = Saturated Steam Enthalpy

h_d = Feed Water Enthalpy

$\bar{x}_e$ = Average Exit Quality of entire Core = $\dfrac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_f}$

$\dot{m}_i = \dot{m}_g + \dot{m}_f$

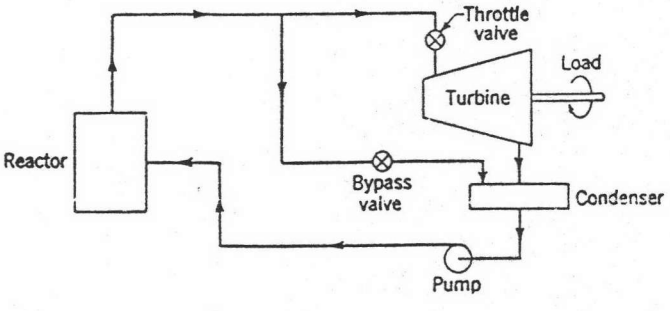
$\dot{m}_g$ = Mass Flow Rate of Vapor

$\dot{m}_f$ = Mass Flow Rate of Recirculation Liquid

เมื่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นค่า $\dot{m}_i$ เพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราไหลของไอน้ำมากขึ้น ดังนั้นจะลดกำลังเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยการลดค่า $\bar{x}_e$ โดยการเพิ่ม $\dot{m}_f$ คือการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่ปั๊มหมุนเวียนหรืออาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนหมุนเวียนเป็นการช่วยเร่งระบายความร้อนและทำให้ void ลดลง ดังนั้นค่า Q_t จึงคงที่

3. การควบคุมกำลังด้วยการควบคุมความดันของไอน้ำที่เข้าสู่กังหันโดยการใช้ Pressure Regulator เปรียบเทียบระหว่างแรงดันของไอน้ำที่ไปขับเคลื่อนกังหันกับค่า

แรงดันของกังหันที่ตั้งไว้ ถ้าน้ำภายในเตาปฏิกรณ์เดือดอย่างรุนแรง จะทำให้ค่าความดันของไอน้ำที่เข้าสู่กังหันสูงกว่าค่าความดันที่ตั้งไว้ จะมีสัญญาณจาก Pressure Deviation ส่งไปยังวงจร Bypass เพื่อเปิดวาล์วนำไอน้ำที่มากเกินพอผ่านเข้าสู่เครื่องควบแน่นโดยไม่ผ่านกังหันทำให้ปริมาณน้ำที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.25 การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการควบคุมความดันของไอน้ำ [8]

2.4. ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน

คือระบบของเครื่องตรวจวัดต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ ในระบบจะประกอบด้วยเครื่องวัดต่าง ๆ ระบบส่งผ่านสัญญาณ ระบบตรรก และสัญญาณเตือนภัย โดยเครื่องวัดเหล่านี้จะส่งสัญญาณที่ผิดปกติไปยังระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉินหรือระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม เพื่อให้ระบบทั้งสองแก้ไขสถานการณ์ต่าง ๆ ไม่ให้เกิดอุบัติเหตุรุนแรงตามมา

เมื่อระบบหยุดเดินเครื่องวัดสัญญาณเหตุผิดปกติใดๆ ที่อาจจะส่งผลเสียหายแก่แกนปฏิกรณ์ได้ ระบบความปลอดภัยจะทำการหยุดเดินเครื่องทันที เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดแก่แกนปฏิกรณ์อันจะเป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR นี้ ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉินประกอบด้วยเครื่องตรวจวัดความผิดปกติต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ เช่น เครื่องวัดความดันภายในถังปฏิกรณ์ เครื่องวัดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เป็นต้น หากมีความผิดปกติเครื่องวัดจะส่งสัญญาณไปยัง Scram Valve ของระบบขับเคลื่อนแท่งควบคุมเพื่อทำการหยุดเดินเครื่องโดยทันที จุดต่าง ๆ ที่ได้มีการติดตั้งเครื่องวัดความผิดปกติที่สามารถส่งสัญญาณให้หยุดเดินเครื่องได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่จะทำให้มีการหยุดเดินเครื่องได้[19]

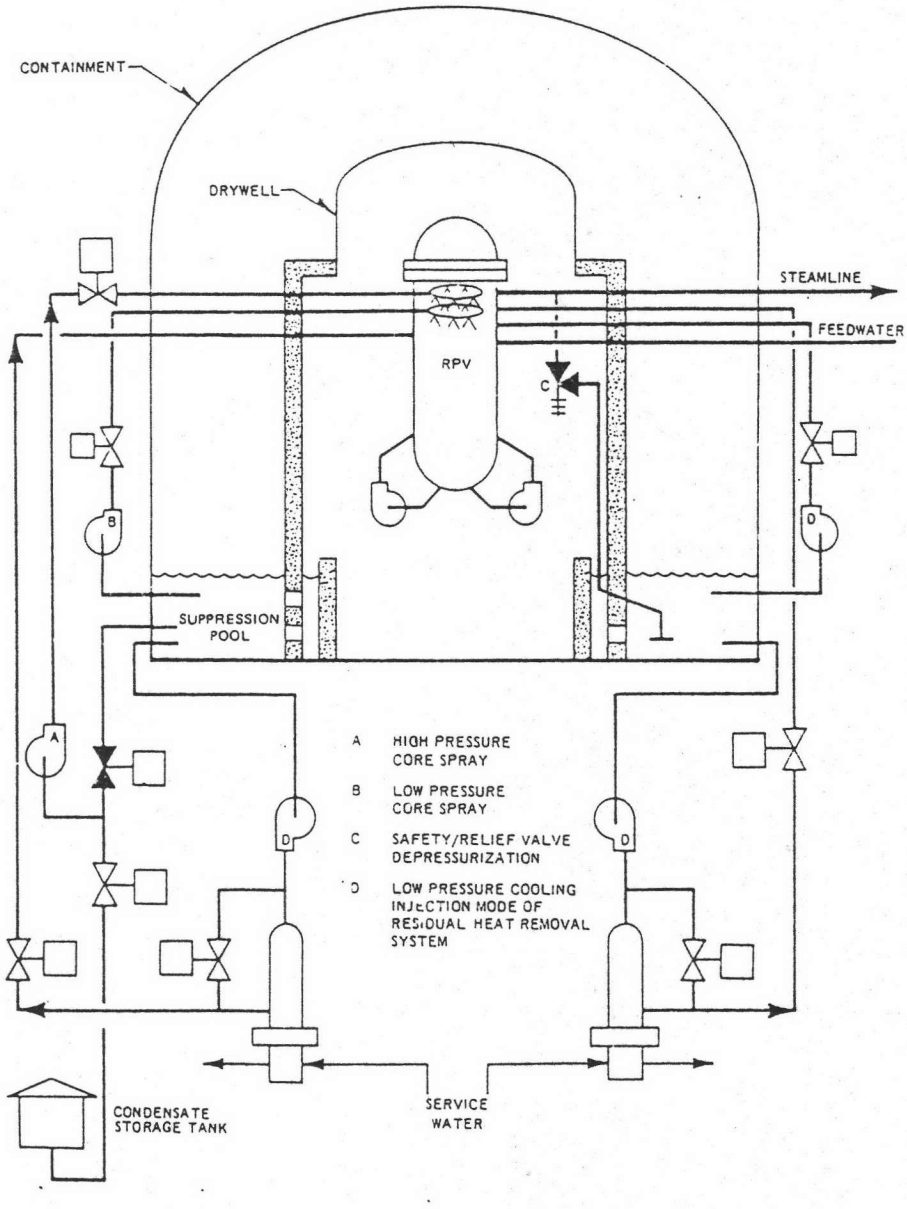
บริเวณที่ติดตั้งเครื่องวัด	สัญญาณที่ทำให้หยุดเดินเครื่อง
Reactor pressure	high
Reactor water level	low
Drywell pressure	high
Neutron flux	high
Scram discharge volume	water level high
Main steam line radiation	high
Earthquake acceleration	high

2.5 ระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม

ถึงแม้อุบัติเหตุที่เกิดจากแกนเครื่องปฏิกรณ์สูญเสียน้ำระบายความร้อน ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้แกนปฏิกรณ์แตกหักหรือหลอมละลาย และสารกัมมันตรังสีรั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยจึงได้มีการออกแบบระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรมไว้เพื่อป้องกันหรือลดความรุนแรงของอุบัติเหตุดังกล่าวข้างต้น โดยระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรมจะประกอบด้วย

1. ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน จะประกอบด้วย 4 ระบบย่อย คือ Low pressure core spray system (LPCS), Low pressure cooling injection system (LPCI), High pressure core spray system (HPCS), และ Automatic depressurization system (ADS) การทำงานของทั้ง 4 ระบบ จะเป็นการทำงานแบบอัตโนมัติ การเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้แกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนนั้นจะทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในแกนปฏิกรณ์ได้รับความร้อนสูงมากและเดือดอย่างรุนแรง ทำให้ปริมาณไอน้ำมากขึ้นและความดันสูง จะมีสัญญาณส่งไปยังระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน และจะเริ่มฉีดน้ำเข้ามาระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้แกนปฏิกรณ์หลอมละลาย โดย LPCS จะฉีดน้ำจาก suppression pool ส่วน LPCI จะฉีดน้ำจากระบบระบายความร้อนสำรองในขณะ

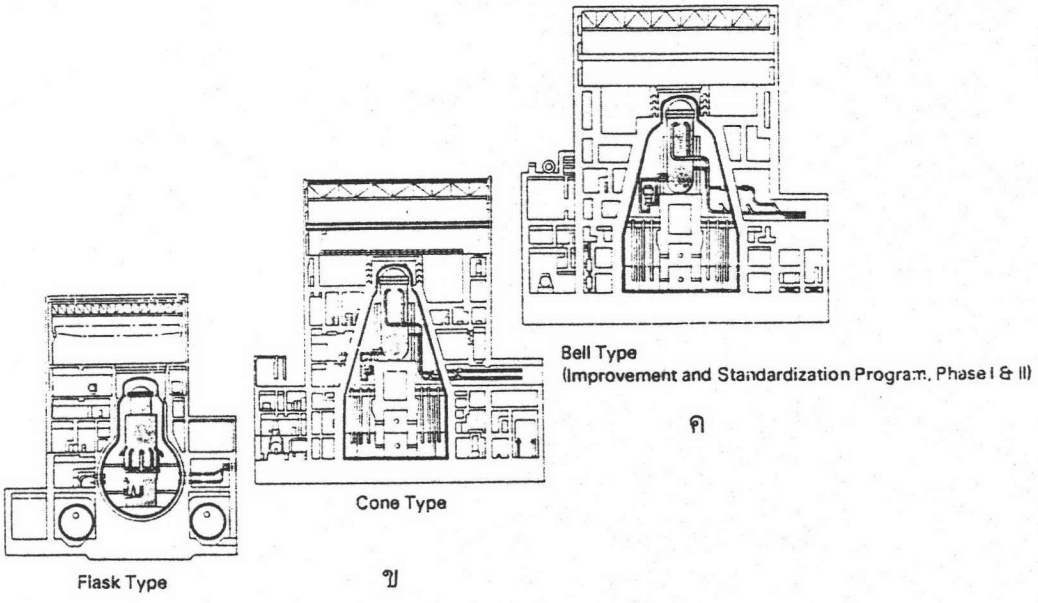
หยุดเดินเครื่องและ HPCS จะฉีดน้ำจาก Condensate storage tank ส่วน ADS จะมีวาล์วปิดเปิด เพื่อให้ไอน้ำภายในถังปฏิกรณ์มาควบแน่นที่ suppression pool เพื่อลดความดันภายในถังปฏิกรณ์ลง และ ADS มีวาล์วติดต่อกับระบบ LPCS และ LPCI เพื่อนำน้ำมาระบายความร้อนในถังปฏิกรณ์อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 2.25 ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน [60]

2. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ มีระบบต่าง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วสู่สิ่งแวดล้อมหลังจากที่เกิดอุบัติเหตุโดยให้สารกัมมันตรังสีและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาฟิชชันที่อาจจะรั่วออกมาจากแท่งหุ้มเชื้อเพลิงจะถูกกักเก็บไว้ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยภายในอาคารประกอบด้วย อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นใน ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ และ ระบบควบคุมความเข้มข้นของก๊าซภายในอาคาร

● อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์ BWR มีอยู่ 3 แบบ คือ Mark I มีลักษณะเป็นทรงกลม Mark II มีลักษณะคล้ายกรวย และ Mark III มีลักษณะคล้ายรูประฆัง อาคารทั้ง 3 แบบ เป็นอาคารที่ออกแบบให้ทนแรงดันที่เกิดจากการระเบิดของถังปฏิกรณ์ และแรงดันจากไอน้ำ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในออกแบบให้มีส่วน drywell เป็นส่วนที่วางถังปฏิกรณ์ และส่วน suppression pool เป็นส่วนที่มีน้ำบรรจุอยู่เพื่อใช้ระบายความร้อนในอาคาร



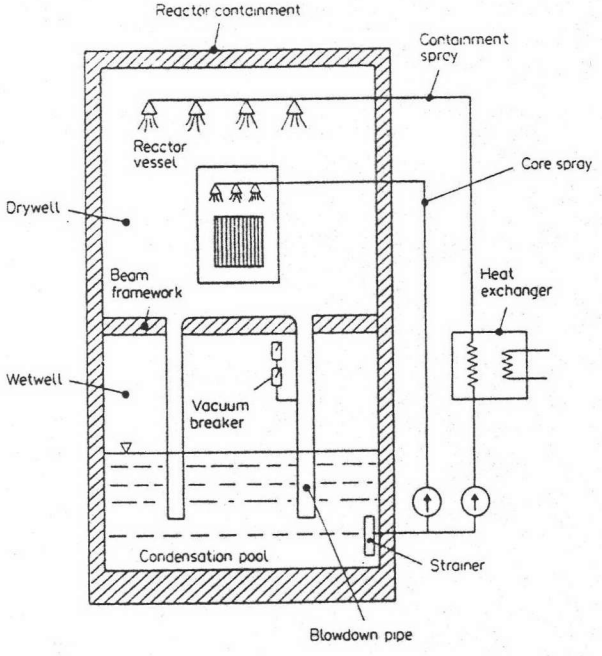
ก ข ค

รูปที่ 2.27 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในแบบต่างๆ [21]

(ก) Mark I (ข) Mark II (ค) Mark III

● ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเกิดอุบัติเหตุความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์สูงขึ้นมากไอน้ำและอากาศภายในอาคารฯ ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นตาม ดังนั้น เพื่อลดความดันมิให้สูงเกินกว่าที่อาคารคลุมฯ จะทนทานได้ ระบบระบายความร้อนในอาคารฯ จะฉีดน้ำจาก suppression pool เข้าสู่ภายในอาคารฯ และน้ำที่ฉีดจะกลับเข้าสู่ suppression pool และสามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ได้อีก

● ระบบควบคุมความเข้มข้นของก๊าซภายในอาคารฯ ในสภาวะปกติ ระบบนี้จะช่วยควบคุมให้ความดันภายในอาคารให้ต่ำกว่าบรรยากาศโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน เพื่อว่าหากเกิดอุบัติเหตุอากาศภายในอาคารจะไม่ฟุ้งกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม และควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนเพื่อมิให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ในสภาวะฉุกเฉินจะมีระบบควบคุมปริมาณก๊าซไวไฟ ซึ่งเป็นระบบที่ทำงานโดยเจ้าหน้าที่ ระบบควบคุมปริมาณก๊าซไวไฟ จะนำก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจากบริเวณ dry well ไปที่ suppression pool เพื่อป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดจากก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 2.28 ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [20]

3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบที่ใช้น้ำมวลหนักเป็นสารหน่วงนิวตรอนมีชื่อทั่วไปว่า Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) ได้รับการพัฒนาทั้งจากประเทศแคนาดา โดยบริษัท Atomic Energy of Canada Limited (AECL) ประเทศเยอรมันนี โดยบริษัท Kraftwerk Union และประเทศญี่ปุ่น จุดประสงค์หลักของการพัฒนาคือ ต้องการใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่การพัฒนาของทั้ง 3 ประเทศมีข้อแตกต่างกัน คือ ประเทศแคนาดาได้ออกแบบให้มัดเชื้อเพลิงบรรจุในท่อความดัน นำท่อความดันหลาย ๆ ท่อรวมกันเป็นแกนปฏิกรณ์บรรจุในถังคาแลนเดรีย (Calandria) ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังของประเทศแคนาดาจึงไม่จำเป็นต้องสร้างถังปฏิกรณ์ทนความดันขนาดใหญ่ สำหรับประเทศเยอรมันนี แกนปฏิกรณ์ยังคงบรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์เช่นเดิม ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบนี้มีชื่อว่า Atucha ในประเทศอาเยนตินาซึ่งเป็นประเทศเดียวที่ประเทศเยอรมันนีส่งออกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบนี้ ส่วนประเทศญี่ปุ่น ได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PHWR ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ชื่อว่า Fugen มีความแตกต่างจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ CANDU ที่ภายในท่อความดันจะบรรจุน้ำธรรมดา ซึ่งน้ำดังกล่าวจะเดือดภายในแกนปฏิกรณ์ และแท่งเชื้อเพลิงใช้ยูเรเนียมธรรมชาติและพลูโทเนียม ทำให้แกนปฏิกรณ์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Fugen เล็กกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ CANDU

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PHWR ที่นิยมมากคือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ CANDU ในปี พ.ศ. 2536[22] เดินเครื่องอยู่ทั่วโลก 32 โรง กำลังก่อสร้าง 13 โรง ดังนั้น ในการกล่าวรายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PHWR เป็นการออกแบบภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ CANDU

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ LWR จำเป็นต้องใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงดังกล่าวต้องใช้โรงงานผลิตยูเรเนียมเข้นขั้นที่ใช้เทคโนโลยีสูงและมีการลงทุนมหาศาล จึงได้เกิดแนวทางการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PHWR ที่ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยการใช้น้ำมวลหนักเป็นสารหน่วงนิวตรอนและสารระบายความร้อนแทนน้ำธรรมดา

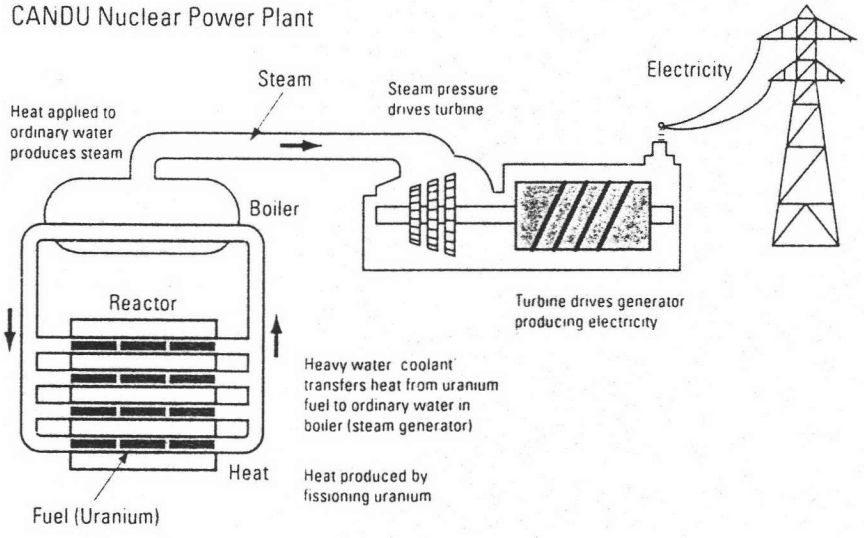
น้ำมวลหนัก เป็นน้ำซึ่งมีองค์ประกอบอะตอมของไฮโดรเจน เป็นไอโซโทปที่เรียกว่า “ดิวทีเรียม (deuterium , D หรือ $_1H^2$)” มีสูตรทางเคมีของน้ำมวลหนักคือ D_2O สาเหตุที่เรียกว่าน้ำมวลหนัก เนื่องจากนิวเคลียสของดิวทีเรียมจะประกอบด้วยนิวตรอน 1 ตัว โปรตอน 2 ตัว ขณะที่นิวเคลียสของไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตรอนเพียง 1 ตัว จึงทำให้น้ำ

มวลหนักมีมวลมากกว่าน้ำธรรมดา คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมวลหนักคือ สามารถลดความเร็วของนิวตรอนได้คล้ายคลึงกับน้ำธรรมดาแต่ดูดกลืนนิวตรอนได้น้อยกว่าทำให้จำนวนนิวตรอนย่านพลังงานต่ำในแกนปฏิกรณ์มากกว่าในระบบที่ใช้น้ำธรรมดา ดังนั้น เมื่อนำยูเรเนียมธรรมชาติมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวอย่างต่อเนื่องได้

ตามปกติน้ำมวลหนักจะอยู่ปะปนกับน้ำธรรมชาติ ในอัตราส่วนของน้ำที่มีอะตอมไฮโดรเจน 6500 โมเลกุลต่ออะตอมดิวทีเรียม 1 โมเลกุล สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้น้ำมวลหนักนี้ต้องการอัตราส่วนของอะตอมไฮโดรเจน 1 โมเลกุลต่ออะตอมดิวทีเรียม 400 โมเลกุล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีโรงงานผลิตน้ำมวลหนักซึ่งสกัดมาจากน้ำในธรรมชาติ ซึ่งโรงงานดังกล่าวต้องใช้การลงทุนสูง ถึงแม้จะไม่เท่ากับโรงงานผลิตยูเรเนียมเสริมสมรรถนะก็ตาม แต่ยังขึ้นอยู่กับความชำนาญในเทคโนโลยีของแต่ละประเทศอีกด้วย

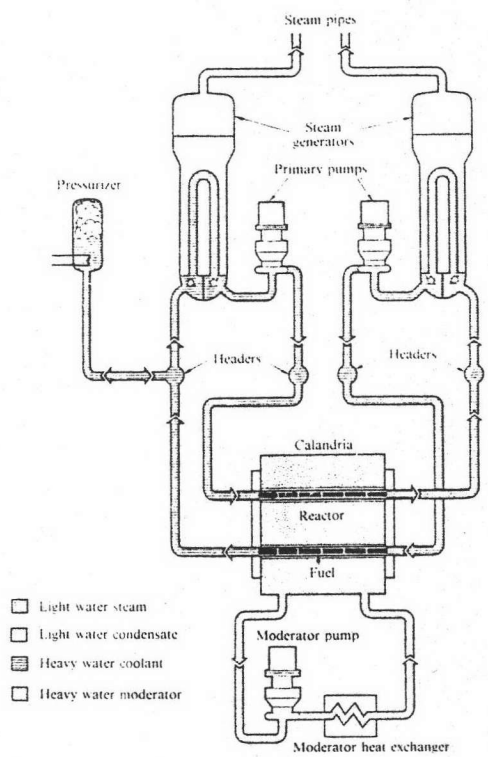
3.1 หลักการทำงาน

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU นอกจากจะหลีกเลี่ยงการใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะแล้ว ยังได้ออกแบบหลีกเลี่ยงการใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ทั้งนี้ โดยภายนอกใช้ถังที่เรียกว่า คาแลนเดรีย วางในแนวนอน ภายในบรรจุท่อขนาดเล็กที่ทนความดันสูง เรียกว่า ท่อความดันจำนวนมากแทนถังปฏิกรณ์ โดยที่ภายในท่อ



รูปที่ 2.29 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU [23]

ความดันแต่ละท่อจะบรรจุมัดแท่งเชื้อเพลิงและน้ำมวลหนักทำหน้าที่ระบายความร้อน ส่วนภายในคาแลนเดรียบรรจุน้ำมวลหนักที่ความดันปกติทำหน้าที่สารหน่วงนิวตรอน ดังนั้น ผนังของคาแลนเดรียจึงมีขนาดไม่หนา เพราะไม่ต้องทนต่อความดันสูง สำหรับการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU ก็คล้ายคลึงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR กล่าวคือ มีระบบระบายความร้อนเป็น 2 วงจร วงจรแรกหรือวงจรปฐมภูมิใช้น้ำมวลหนักเป็นสารระบายความร้อนอยู่ภายใต้ความกดดันสูงประมาณ 100 เท่าของบรรยากาศ เพื่อป้องกันมิให้น้ำมวลหนักเกิดการเดือด น้ำมวลหนักนี้จะวิ่งผ่านเข้าไปในท่อความดันสัมผัสกับแท่งเชื้อเพลิงรับความร้อน โดยมีอุณหภูมิก่อนเข้าท่อความดันประมาณ 260°ซ. [5] เมื่อรับความร้อนแล้วมีอุณหภูมิประมาณ 310° ซ.[5] โดยน้ำมวลหนักที่ไหลออกมาแต่ละท่อจะไหลมารวมกันแล้ววิ่งเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำแบบ U-tube และถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำระบายความร้อนระบบที่ 2 หรือวงจรทุติยภูมิ ซึ่งเป็นน้ำธรรมดาโดยการสัมผัสทางท่อเพื่อถ่ายโอนความร้อน น้ำวงจรทุติยภูมิควบคุมความดันที่ 47 เท่าของบรรยากาศ เพื่อให้น้ำสามารถเดือดได้ ไอน้ำที่ออกจากเครื่อง



รูปที่ 2.30 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU [4]

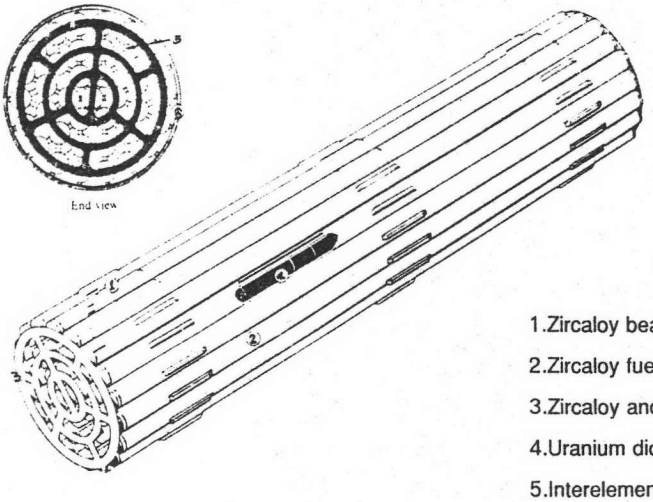
กำเนิดไอน้ำจะถูกส่งเข้าไปยังกังหันไอน้ำผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ส่วนน้ำมวลหนักในระบบปฐมภูมิ หลังจากถ่ายโอนความร้อนแล้ว จะถูกปั๊มกลับเข้าสู่แกนปฏิกรณ์เพื่อรับความร้อนใหม่อีกต่อไป การควบคุมความดันของระบบนั้นใช้เครื่องควบคุมความดันเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR

สำหรับสารหน่วงนิวตรอนซึ่งเป็นน้ำมวลหนักภายในคาแลนเดรีย จะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิประมาณ 70°ซ.[5] และความดันปกติ ทั้งนี้เพื่อมิให้มีการสูญเสียน้ำมวลหนัก ดังนั้น ความร้อนบางส่วนที่สะสมอยู่จึงต้องมีระบบระบายความร้อนให้แก่สารหน่วงนิวตรอนนี้แยกออกมาอีกวงจรหนึ่ง

3.2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU

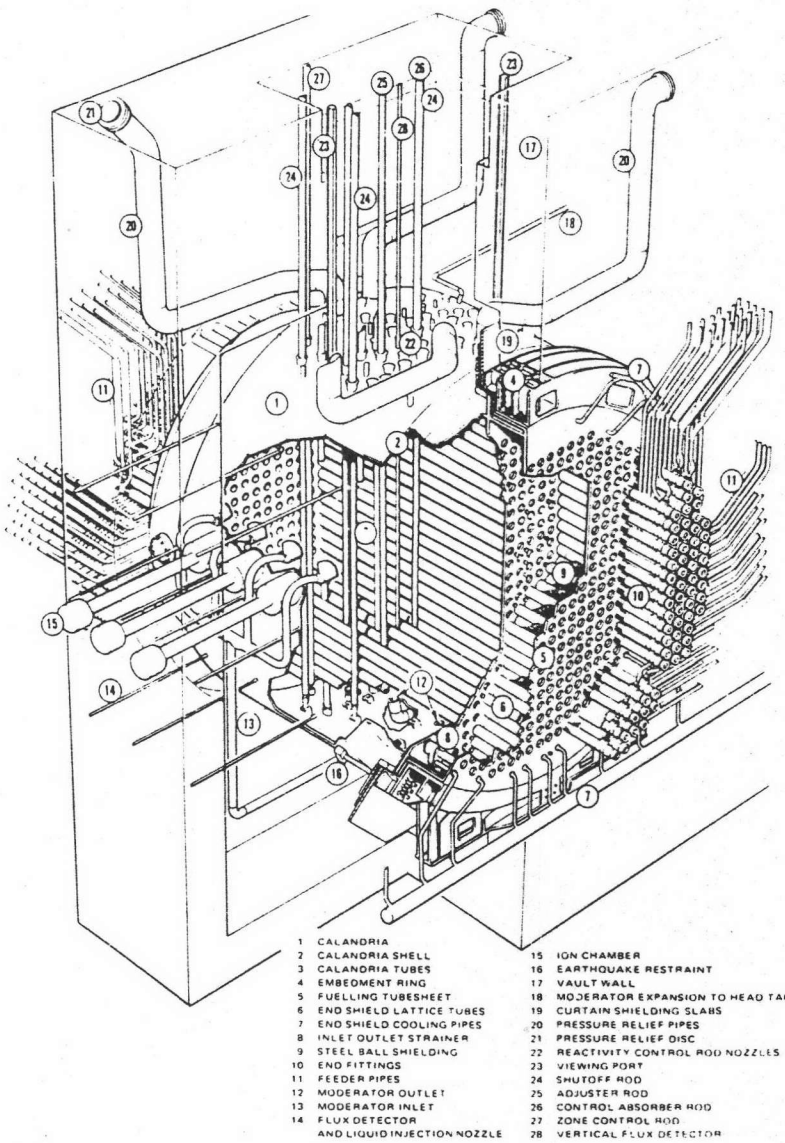
1. แท่งเชื้อเพลิง : ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติอยู่ในรูปของยูเรเนียมไดออกไซด์ อัดเป็นรูปทรงกระบอกลักษณะเดียวกับเม็ดเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ LWR คือมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร เรียกว่า เม็ดเชื้อเพลิง บรรจุอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกทำด้วยโลหะผสมเซอร์โคเนียม ปิดผนึกหัวท้าย

2. มัดแท่งเชื้อเพลิง: การนำแท่งเชื้อเพลิงมามัดรวมกัน โดยมัดแท่งเชื้อเพลิงเครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร ยาว 49.5 เซนติเมตร มัดแท่งเชื้อเพลิงหนึ่งมัดจะมีแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 37 แท่ง มัดแท่งเชื้อเพลิงแต่ละมัดจะถูกบรรจุภายในท่อความดันแต่ละท่อความดันมีมัดแท่งเชื้อเพลิงอยู่ 12 มัด



รูปที่ 2.31 เชื้อเพลิงและมัดแท่งเชื้อเพลิง[4]

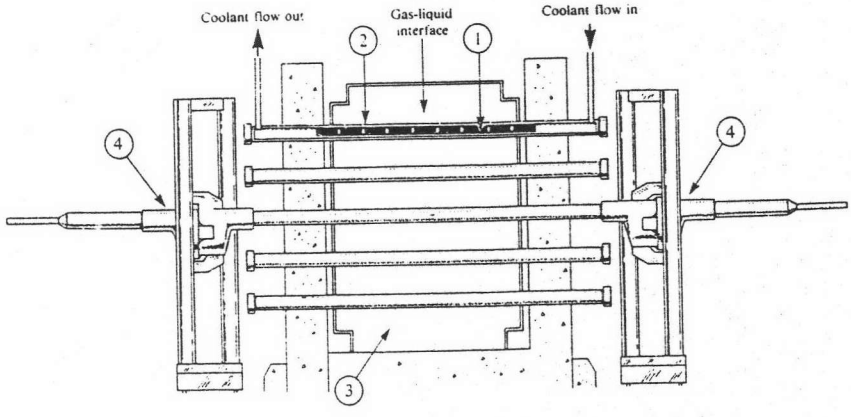
3. แกนปฏิกรณ์ : นำท่อความดันที่บรรจุมัดแท่งเชื้อเพลิงมารวมกันในถังคาแลนเดรีย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 เมตร ยาว 6 เมตร โดยวางในแนวนอน ภายในถังคาแลนเดรียจะบรรจุท่อความดัน 380 ท่อ



รูปที่ 2.31 ถังคาแลนเดรีย [32]

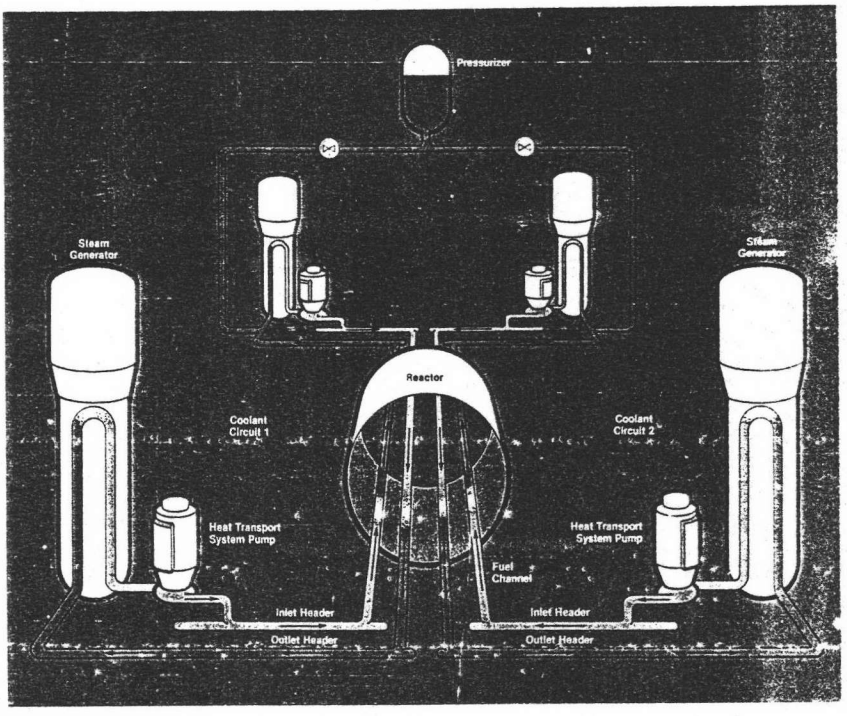
4. แท่งควบคุม : ทำด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมรูปทรงกระบอก อยู่ทางด้านบนของคาแลนเดรีย ภายในบรรจุแคดเมียม ทำหน้าที่ดูดจับนิวตรอน โดยการเคลื่อนที่ขึ้นลง

5. เครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิง : เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ได้มีการออกแบบพิเศษอีกประการหนึ่งคือ สามารถเปลี่ยนมัดแท่งเชื้อเพลิงได้ในขณะที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ การเปลี่ยนมัดแท่งเชื้อเพลิงทำได้โดยปิดระบบระบายความร้อนของท่อความดันที่ต้องการจะเปลี่ยนมัดแท่งเชื้อเพลิง ต่อเครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิง 2 เครื่อง เข้ากับปลายท่อความดันทั้งสองข้าง สอดมัดแท่งเชื้อเพลิงใหม่เข้าไปโดยมัดแท่งเชื้อเพลิงใหม่นี้จะไปดันให้มัดแท่งเชื้อเพลิงเก่าหลุดเข้าสู่เครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่รองรับที่ปลายของอีกข้างหนึ่ง หลังจากเปลี่ยนมัดแท่งเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้วจึงเปิดระบบระบายความร้อนของท่อความดันให้ทำงานตามปกติต่อไป



รูปที่ 2.33 เครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิง [4]
(1) มัดแท่งเชื้อเพลิง (2) ท่อความดัน (3) สารหน่วงนิวตรอน (4) เครื่องปลี่ยนเชื้อเพลิง

6. เครื่องผลิตไอน้ำ : เครื่องผลิตไอน้ำที่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังใช้เป็นแบบ U-tube เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ LWR โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง 1 เครื่อง ประกอบด้วยเครื่องผลิตไอน้ำ 4 ตัว เมื่อน้ำในระบบทุติยภูมิรับความร้อนจากน้ำมวลหนักในระบบปฐมภูมิโดยผ่านทางท่อแล้วน้ำระบบทุติยภูมิจะเดือดกลายเป็นไอน้ำ เนื่องจากว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ไม่สามารถผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงมากไอน้ำดังกล่าวจะวิ่งเข้าสู่กังหันไอน้ำโดยไม่ต้องผ่านเครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง ทำให้ไอน้ำที่เข้าสู่กังหันมีความชื้นสูง ดังนั้น กังหันไอน้ำจึงต้องออกแบบให้ทนต่อการกัดกร่อนสูง



รูปที่ 2.34 ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิ [23]

3.3. การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU

เพื่อให้กำลังการเดินเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่ต้องการ เครื่องปฏิกรณ์แบบ CANDU จึงได้ออกแบบระบบที่ใช้ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน 5 ระบบ คือ

● Light Water Zone Control Absorber : ประกอบด้วยแท่งควบคุมที่ภายในบรรจุน้ำธรรมดา เนื่องจากน้ำธรรมดามีคุณสมบัติดูดซับนิวตรอนช้าได้มากกว่าน้ำมวลหนัก ทำให้ปริมาณนิวตรอนที่จะทำปฏิกิริยาลดลง ตำแหน่งของแท่งควบคุมนี้วางแนวตั้ง ดังนั้น การเคลื่อนที่ขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันเร็วขึ้น และการเคลื่อนที่ลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันลดลง แท่งควบคุมที่บรรจุน้ำนี้แบ่งออกเป็น 14 เขต ภายในแกนปฏิกรณ์ โดยแต่ละเขตจะมีระดับบรรจุน้ำแตกต่างกัน ทั้งนี้ เพื่อทำให้การดูดซับนิวตรอนของแต่ละเขตแตกต่างกันจึงสามารถควบคุมความหนาแน่นของนิวตรอนช้าที่จะทำปฏิกริยาในแต่ละเขตได้

● Mechanical Control Absorbers : แท่งควบคุมที่ภายในบรรจุสารดูดซับนิวตรอน ได้แก่ แคดเมียม เป็นแท่งควบคุมที่ใช้สำหรับหยุดเดินเครื่องทั้งในสภาวะปกติ

ควบคุมมีหลักการเคลื่อนที่คลายกับในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR แต่สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ยังมีระบบสปริงเพื่อช่วยให้การเคลื่อนที่ในสภาวะฉุกเฉินได้เร็วยิ่งขึ้น

● Adjusters : เป็นแท่งควบคุมเปล่า มีจำนวน 21 แท่ง เคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนวตั้ง ทำหน้าที่ปรับปริมาณของสรระบายความร้อนเพื่อปรับอัตราการเกิดปฏิกิริยา และให้การกระจายความหนาแน่นของนิวตรอนสม่ำเสมอทั่วทั้งแกนปฏิกรณ์

● Poison Addition : คือระบบการเติมสารละลายของสารดูดซับนิวตรอนเข้าไปในสารหน่วงนิวตรอนเพื่อลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา สารดูดซับนิวตรอนที่ใช้ได้แก่ สารละลายโบรอน สารละลายกาโดลิเนียม โดยที่สารละลายของโบรอน มักใช้ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่ สำหรับสารละลายกาโดลิเนียมไนเตรต ใช้เมื่อปริมาณของซีนอน ในแกนปฏิกรณ์ลดน้อยลง

● Hardware Interlock : เป็นการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ หากการเดินเครื่องสามารถดำเนินไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ Hardware Interlock จะป้องกันไม่ให้มีการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยเจ้าหน้าที่ เช่น ไม่สามารถดึงแท่ง Adjusters หรือ Mechanical Control Absorbers ขึ้น และไม่สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณสารดูดซับนิวตรอน เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้

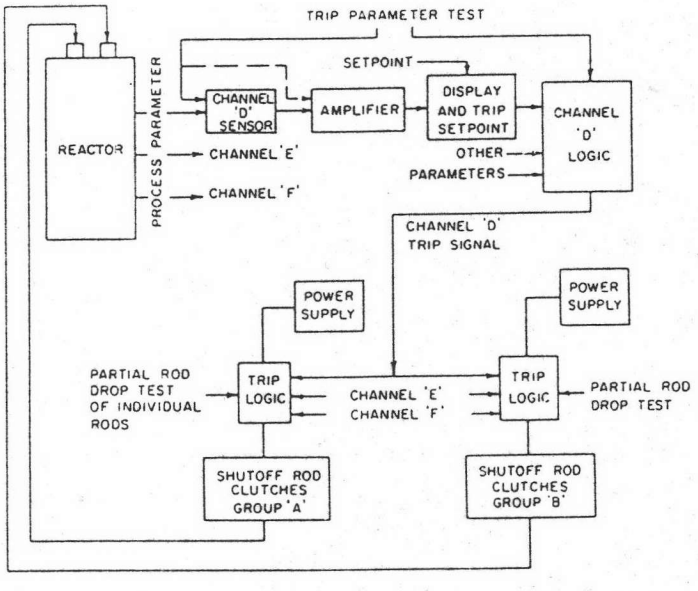
3.4 ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน มี 2 ระบบด้วยกันคือ SDS-1 และ SDS-2 (Shutdown system No.1 , Shutdown system No.2) ซึ่งระบบทั้งสองมีการทำงานที่แยกอิสระ โดยจะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณแสดงความผิดปกติในการเดินเครื่องหรือระบบทำงานอยู่ในช่วงที่เกินขอบเขตอาจเกิดอันตรายได้ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

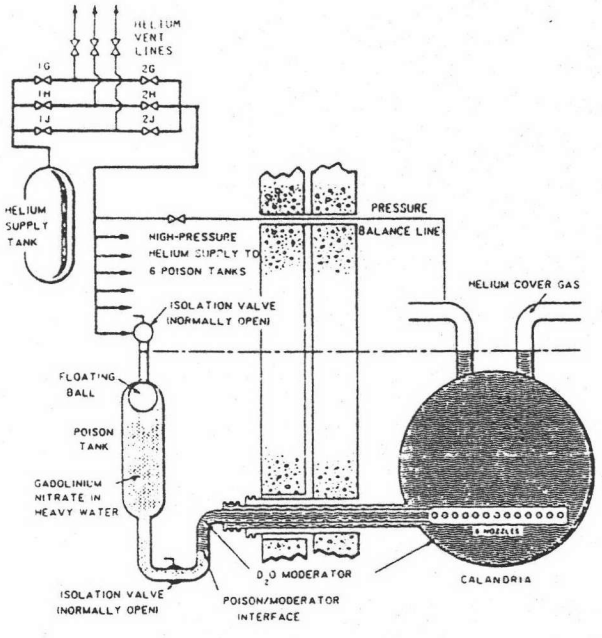
ตารางที่ 2.4 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่ทำให้มีการหยุดเดินเครื่อง[13]

บริเวณที่ติดตั้งเครื่องวัด	สัญญาณที่ทำให้หยุดเดินเครื่อง
Neutron power	high
Rate log neutron power	high
Heat transport pressure	high and low
Core differential pressure	low
Gross coolant flow	low
Reactor building pressure	high
Pressurizer level	low
Steam generator level	low
Boiler feedline pressure	low

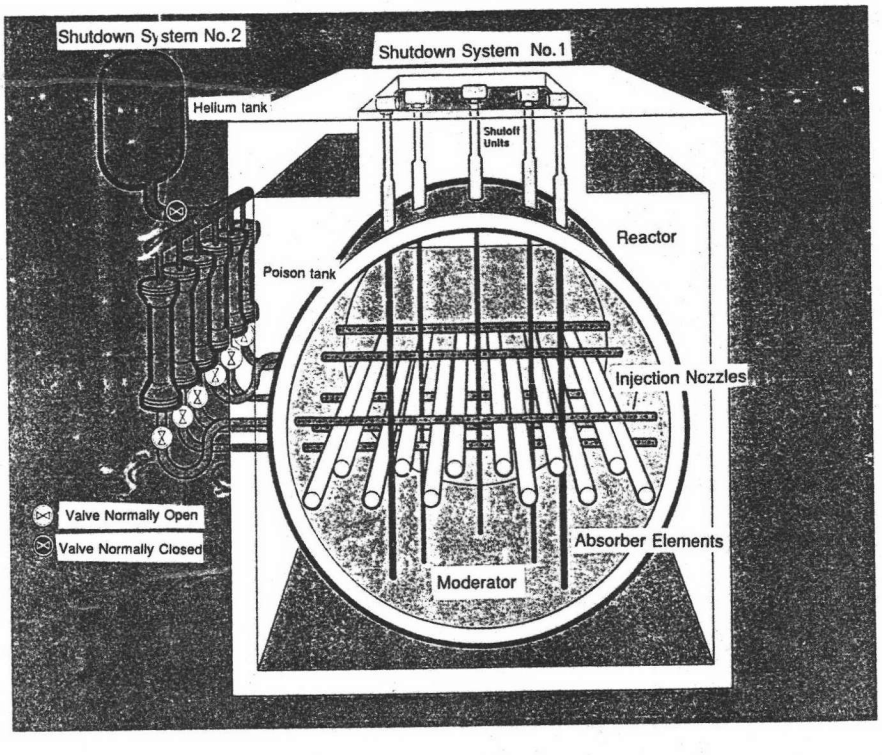
สำหรับระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉินนี้ ต้องมีระบบการตรวจสอบสัญญาณซ้ำเพื่อให้มั่นใจว่าเกิดเหตุการณ์ผิดปกติจริง ดังนั้น ทั้ง SDS-1 และ SDS-2 จึงมีช่องสัญญาณถึง 3 ช่อง และแต่ละช่องทำงานแยกอิสระจากกัน และต้องได้รับสัญญาณจำนวน 2 ใน 3 ของช่องสัญญาณ จึงจะทำการหยุดเดินเครื่อง สำหรับ SDS-1 ประกอบด้วยช่องสัญญาณ D Eและ F เมื่อได้รับสัญญาณ SDS-1 จะปลดแท่งควบคุมลงสู่แกนปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว ส่วน SDS-2 จะฉีดสารละลายกาโดลิเนียมไนเตรตเข้าไปในสารหน่วงนิวตรอน เพื่อลดปริมาณนิวตรอนที่จะทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.34 (ก) Shutdown system No. 1 [13]



รูปที่ 2.36 ระบบฉีดสารละลายกาโดลิเนียมไนเตรตของ Shutdown system No. 2 [13]



รูปที่ 2.37 ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน (SDS-1 และ SDS-2) [23]

3.5 ระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม

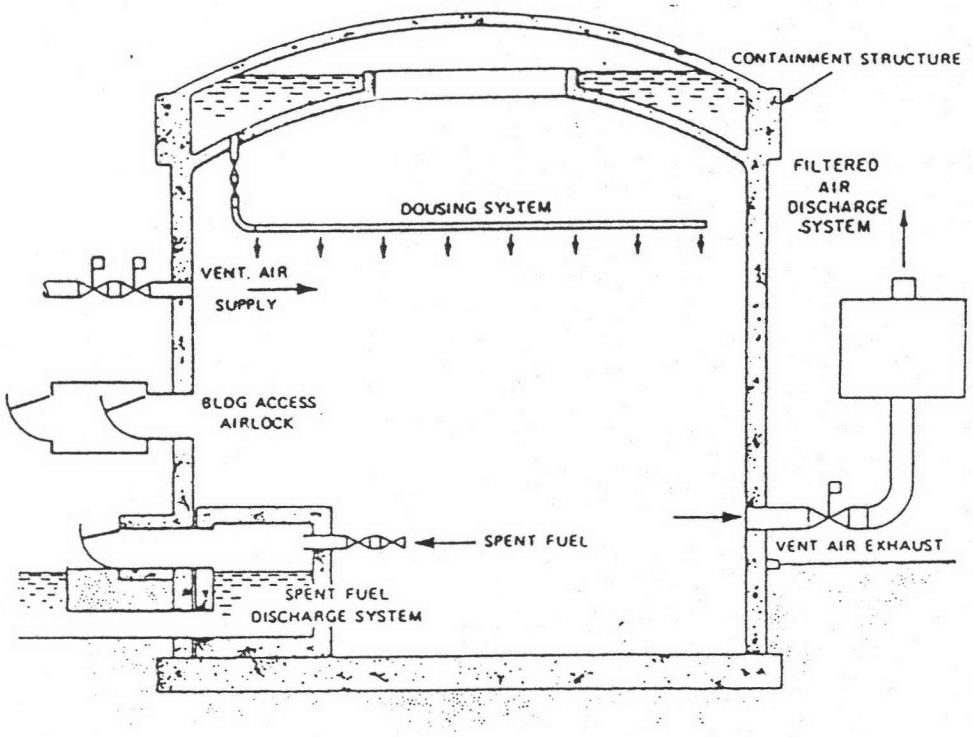
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU มีระบบความปลอดภัยวิศวกรรม 2 ระบบ คือ ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์สภาวะฉุกเฉิน และอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งสองระบบทำงานเพื่อลดความรุนแรงของอุบัติเหตุ และจำกัดอุบัติเหตุให้อยู่ในขอบเขต

1. ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน เมื่อเกิดเหตุผิดปกติ เช่น ปั๊มน้ำระบายความร้อนขัดข้อง ท่อส่งน้ำระบายความร้อนแตกหรือรั่ว กรณีเช่นนี้น้ำภายในแกนปฏิกรณ์เดือดและความร้อนที่แท่งเชื้อเพลิงสูงมากจะทำให้เปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายและสารกัมมันตรังสีหลุดลอดออกมาได้ ดังนั้น เมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติแล้วจะมีสัญญาณส่งไปยังระบบระบายความร้อนฯ ระบบดังกล่าวจะฉีดน้ำระบายความร้อนเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ เพื่อลดอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงและป้องกันมิให้เปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายได้ ระบบระบายความร้อนนี้ประกอบด้วย 3 ระบบย่อย High Pressure Injection (HP) ซึ่งประกอบด้วยถังเก็บน้ำที่มีปริมาณน้ำมากกว่าน้ำในระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ 3 เท่า อยู่ภายนอกอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ควบคุมความดันที่ 0.275 MPa อุณหภูมิ 21 °ซ และถังก๊าซไนโตรเจนควบคุมความดันที่ 4.1-5.5 MPa Medium Pressure Injection (MP) มีท่อลำเลียงน้ำจากถังเก็บน้ำดับเพลิง และ Low Pressure Injection (LP)

เมื่อได้รับสัญญาณในขั้นแรก HP นำน้ำในถังเก็บถูกฉีดเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ด้วยแรงดันของก๊าซไนโตรเจน เมื่อความดันลดลงถึงระดับหนึ่งวาล์วของ HP จะปิดลงโดยอัตโนมัติวาล์วของ MP จะเปิดเพื่อนำน้ำจากถังเก็บเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ สำหรับ HP และ MP จะสามารถระบายความร้อนในกรณีขาดน้ำระบายความร้อนรุนแรงที่สุดได้เพียง 2.5 นาที และ 13 นาที ตามลำดับ (อัตราไหล 1400 ลิตร/วินาที และ 645 ลิตร/นาที ตามลำดับ) น้ำที่สำรองจะหมด ดังนั้น เมื่อน้ำสำรองใน MP ใกล้หมดวาล์วของ LP จะเปิดเพื่อนำน้ำที่เก็บไว้ในฐานเครื่องปฏิกรณ์เข้าไประบายความร้อน และ LP จะเป็นระบบที่ระบายความร้อนในระยะยาวหลังจากเกิดอุบัติเหตุ ดังนั้น จึงมีระบบจ่ายน้ำในสภาวะฉุกเฉินให้แก่ LP

2. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเกิดเหตุขัดข้องแล้วระบบความปลอดภัยต่างๆ ไม่สามารถระงับเหตุการณ์ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุตามมา อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นเครื่องป้องกันมิให้สารกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จึงต้องมีความแข็งแรง ทนทานแรงกดดันสูง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU เป็นอาคารขนาดใหญ่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตอัดแรง ภายในมี

ระบบดับเพลิงอัตโนมัติซึ่งจะทำงานเมื่อแรงดันภายในอาคารสูงถึงขีดระดับ ระบบกรองอากาศเป็นเครื่องดักไม่ให้สารกัมมันตรังสีแพร่กระจายออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้



รูปที่ 2.38 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์[13]

ข้อมูลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ดูเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข