บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง

ทิศทางการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง

จากระยะเวลาการดำเนินการโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์มากกว่า 30 ปี ได้เกิดอุบัติเหตุครั้งสำคัญขึ้น 2 ครั้ง คือ ในปีพ.ศ. 2522 อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์* ประเทศสหรัฐอเมริกา และในปีพ.ศ. 2529 อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เชอร์โนบิล* ประเทศสหภาพโซเวียตรัสเซีย(ในขณะนั้น) จากอุบัติเหตุทั้งสองเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการตื่นตัวในการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง โดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ได้จัดให้มีการประชุมเมื่อวันที่ 25-29 สิงหาคม พ.ศ. 2529 ที่กรุงเวียนนา ภายหลังการเกิดอุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เชอร์โนบิล และได้แต่งตั้ง International Safety Advisory Group (INSAG) เพื่อทำหน้าที่สรุปสาเหตุและจัดทำรายงานการเกิดอุบัติเหตุ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไขสถานการณ์ และนอกจากนี้ INSAG ได้กำหนดหลักการด้านความปลอดภัยพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ในอนาคต ซึ่งแนวทางดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. มุ่งเน้นการใช้ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ โดยการออกแบบให้ในสภาวะฉุกเฉินระบบความปลอดภัยต่างๆทำงานอัตโนมัติด้วยแรงทางธรรมชาติโดยไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานจักรกลจากระบบภายนอก ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มเวลาในการแก้ไขสถานการณ์แก่เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน
2. มุ่งเน้นให้ การออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เพื่อให้ง่ายต่อการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง
3. พัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์และการจัดการกากกัมมันตรังสี
4. การออกแบบมุ่งเน้นลดอัตราการเสี่ยงภัยของการเกิดอุบัติเหตุ

---

* ดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ค

5. มุ่งเน้นให้มีการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการก่อสร้างและการออกกฎระเบียบข้อบังคับมาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งจะเป็นการลดระยะเวลาและต้นทุนในการก่อสร้างทั้งยังทำให้ความน่าเชื่อถือด้านความปลอดภัยสูงขึ้น

6. สามารถควบคุมหรือจำกัดขอบเขตของการเกิดอุบัติเหตุขั้นรุนแรงได้

7. การออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ต้องมีความทนทานต่ออุบัติเหตุที่เกิดจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง อุบัติเหตุจากธรรมชาติและการก่อวินาศกรรม

จากแนวทางการพัฒนาดังกล่าวข้างต้น บริษัทและสถาบันต่างๆ ได้ทำการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังซึ่งสามารถจำแนกการพัฒนาได้ 2 กลุ่ม คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดกำลังต่ำ

<u>เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่</u>

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ เป็นการพัฒนาในขนาดกำลังสูงคือประมาณ 900-1500 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า ซึ่งการพัฒนาแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR มีการพัฒนา 2 รุ่น คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ Advanced Pressurized Water Reactor (APWR) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SYSTEM-80^{+}

1. <u>เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR</u>

ในปี พ.ศ. 2521 บริษัท Westinghouse ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR โดยใช้ชื่อว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR มีขนาดกำลัง 1300 เมกกะวัตต์ ต่อมาในปี พ.ศ. 2524 บริษัท Mitsubishi ประเทศญี่ปุ่น ได้ร่วมโครงการพัฒนาดังกล่าวด้วย ในปัจจุบัน เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR-1300 ได้ออกแบบสำหรับเชิงพานิชย์เสร็จสมบูรณ์แล้ว และได้ผ่านการรับรองรายงานการตรวจสอบการออกแบบเบื้องต้นจาก U.S. Nuclear Regulatory Commission [35] ซึ่งวัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนาสามารถสรุปได้ดังนี้

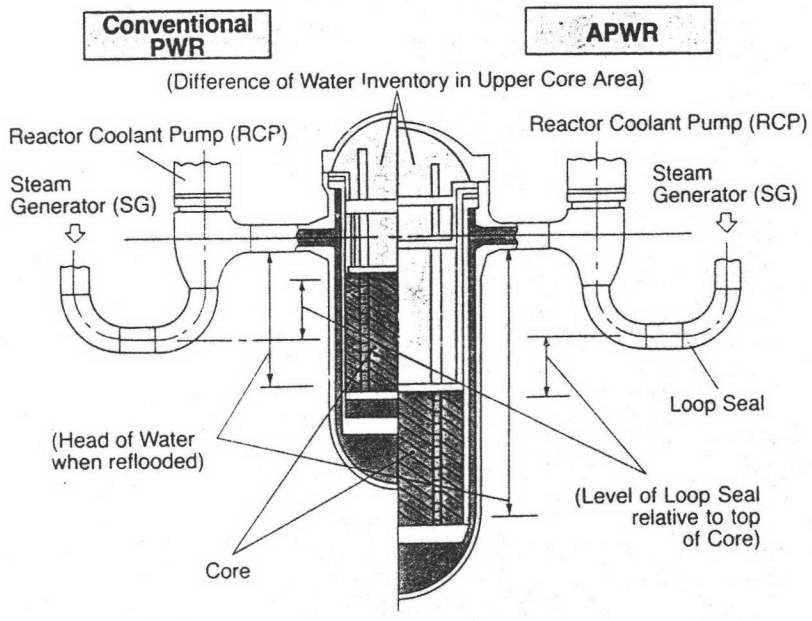
1.1 วัตถุประสงค์

1. เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง
2. เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเจ้าหน้าที่
3. ลดปริมาณการรับรังสีของเจ้าหน้าที่
4. ลดต้นทุนการผลิต

1.2 แนวทางการพัฒนา

1.2.1 เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง มีการพัฒนาดังนี้

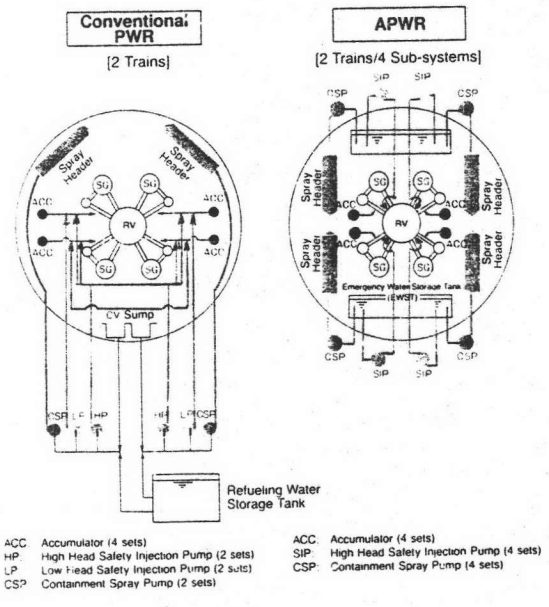
1.2.1.1 ออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR ได้ออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ด้านส่วนบนของแกนปฏิกรณ์มีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำระบายความร้อนที่อยู่เหนือแกนปฏิกรณ์มากขึ้นตามมาด้วย ซึ่งจะช่วยให้โอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลายลดลง



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบขนาดถังปฏิกรณ์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR กับ APWR[36]

1.2.1.2 ปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน มีการปรับปรุงให้การทำงานของระบบระบายความร้อนฉุกเฉินมีความเชื่อถือสูง โดยทำการพัฒนาให้ระบบฯ มีการทำงานจากเดิมมี 2 ระบบหลัก เป็น 2 ระบบหลัก 4 ระบบย่อยที่แยกอิสระจากกัน เพื่อให้เป็นการทำงานซ้ำซ้อนและตรวจสอบกันเอง

นอกจากนี้ ยังมีการเพิ่มปริมาณน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิสำรอง และปรับปรุงระบบระบายอากาศภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.2 วงจรระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน[36]

1.2.1.3 ปรับปรุงระบบภายในแกนปฏิกรณ์ (Core Internal) พื้นที่ภายในแกนปฏิกรณ์สามารถแยกพิจารณาได้ 3 ส่วน คือ ด้านบนและด้านล่างของแกนปฏิกรณ์ อีกส่วนคือระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม โดยแต่ละส่วนได้มีการปรับปรุงดังนี้

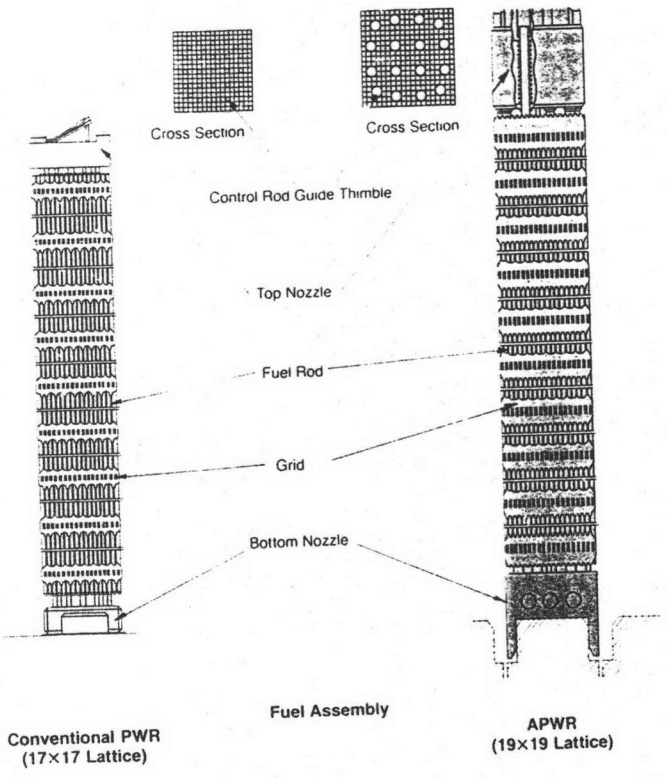
1. ด้านส่วนบนของแกนปฏิกรณ์ โดยออกแบบให้ด้านบนของถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มที่ว่างสำหรับ Water Displacer Rods (WDR) และปรับปรุงอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่บริเวณแนวนำแท่งควบคุม

2. ด้านส่วนล่างของแกนปฏิกรณ์ ปรับปรุงผนังสะท้อนนิวตรอนจากเดิมเป็น thermal shield เป็น radial reflector

3. ปรับปรุงระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม โดยการเพิ่มระบบ Water Displacer Rod Drive Mechanism (DRDM) ซึ่งจะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของ WDR โดยการใช้กลไกของปริมาณน้ำระบายความร้อนที่เคลื่อนที่เข้าออก ซึ่งเป็นการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน และปรับปรุงระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม (Control Rod Drive Mechanism (CRDM)) โดยการเปลี่ยนมาใช้ doutble tooth latch arm แทน lacth assemblies

1.2.1.4 ปรับปรุงการจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำกว่าของ PWR ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากว่า มีปริมาณนิวตรอนที่มากขึ้นและนอกจากนี้ได้ปรับปรุง

1. การจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิงจาก 17x17 เป็น 19x19



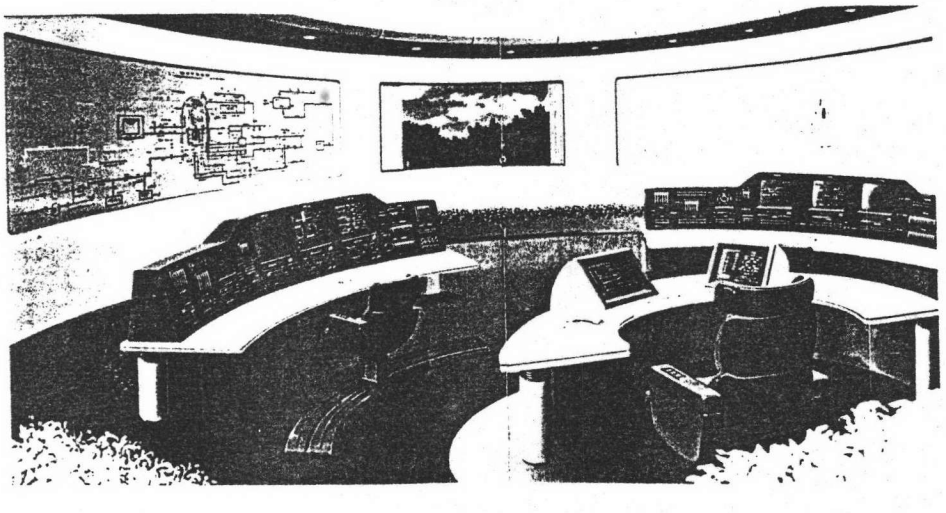
รูปที่ 3.3 มัดแท่งเชื้อเพลิงที่ปรับปรุง[36]

2. ใช้ gray control rod ร่วมกับ black control rod แท่งควบคุมแบบ gray rod เป็นแท่งควบคุมที่ภายในบรรจุสารที่ดูดกลืนนิวตรอนต่ำกว่าของ black rod ซึ่งคือแท่งควบคุมที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน สำหรับ gray rod ใช้ในการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาแทนการใช้สารซีนอนและการควบคุมโดยสารเคมี ทำให้สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

3. การเพิ่ม WDR เพื่อทำให้อัตราส่วนของยูเรเนียมกับน้ำเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ซึ่ง PWR ที่ใช้อยู่ปัจจุบันอัตราส่วนของยูเรเนียมกับน้ำคงที่ตลอดเวลา การที่อัตราส่วนฯ เปลี่ยนแปลงทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง กล่าวคือ เมื่อใส่แท่งเชื้อเพลิงใหม่จะทำให้อัตราส่วนของน้ำต่ำกว่าอัตราส่วนของยูเรเนียม ทำปริมาณนิวตรอนเร็วมากกว่านิวตรอนช้า ภายในแท่งเชื้อเพลิงจะเกิดการดูดกลืนนิวตรอนเร็วของยูเรเนียม-238 ซึ่งจะได้ พลูโทเนียม-239 และเมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้ไปเรื่อยๆ WDR จะเคลื่อนที่ขึ้น เพื่อให้อัตราส่วนของน้ำสูงกว่ายูเรเนียม เป็นการเพิ่มจำนวนนิวตรอนช้าที่จะมาทำปฏิกิริยากับยูเรเนียม-235 และพลูโทเนียม-239

1.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเจ้าหน้าที่

พัฒนาระบบการควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการนำระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์และจากการปรับปรุงแท่งควบคุมให้เป็น gray rod และระบบการเคลื่อนที่ ทำให้การควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถทำงานง่ายขึ้น นอกจากนี้ ใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่ และปรับปรุงห้องควบคุมให้มีการแสดงผลจากจอคอมพิวเตอร์เป็นแบบตัวเลขเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มขนาดหน้าจอมีขนาดใหญ่เพื่อสามารถมองเห็นสภาวะในแกนปฏิกรณ์ได้พร้อมทั้งระบบ ซึ่งจะลดความผิดพลาดจากการอ่านข้อมูลของเจ้าหน้าที่ได้



รูปที่ 3.4 ห้องควบคุม[41]

1.2.3 ลดปริมาณการรับรังสีของเจ้าหน้าที่

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR ได้มีการพัฒนาระบบอุปกรณ์ให้ทำงานโดยอัตโนมัติและใช้หุ่นยนต์ในงานซ่อมบำรุง เพื่อลดการทำงานของเจ้าหน้าที่ในบริเวณที่มีสารกัมมันตรังสี และมีการควบคุมการใช้วัสดุในส่วนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การปรับปรุงระบบทำน้ำให้บริสุทธิ์ เพื่อมิให้สารที่เจือปนเข้าไปก่อเกิดเป็นสารกัมมันตรังสีได้ และเป็นการลดการเกิดสารกัมมันตรังสี

1.2.4 ลดต้นทุนการผลิต

การลดต้นทุนการผลิตทางหนึ่งคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง จากการเพิ่มระบบ WDR ทำให้มีพลูโทเนียม-239 ภายในแท่งเชื้อเพลิงเกิดขึ้นมากกว่าในเชื้อเพลิงแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้น จึงทำให้อายุการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

1.3. <u>สรุป</u>

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR สามารถสรุปและแสดงผลได้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปผลจากการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
1.เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์	1.ออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้น	●ลดโอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย เนื่องจากปริมาณน้ำเหนือแกนปฏิกรณ์มีปริมาณมาก
	2.ออกแบบให้ระบบระบายความร้อนมี 2 ระบบหลัก 4 ระบบย่อย	●การทำงานของระบบระบายความร้อนมีความเชื่อถือสูง

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สรุปผลจากการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
	3.ปรับปรุงระบบภายในแกนปฏิกรณ์ ได้แก่	
	●ด้านส่วนบนแกนปฏิกรณ์	●ทำให้มีพื้นที่ว่างในการเพิ่มระบบ WDR ●ลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตามแนวท่อนำของแท่งควบคุม เนื่องจากออกแบบให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนต่ำ
	●ด้านส่วนล่างแกนปฏิกรณ์	●การใช้นิวตรอนเป็นไปอย่างคุ้มค่า ใช้ตัวสะท้อนนิวตรอนใหม่
	●ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม	●การใช้ tooth lacth มีความทนทานกว่า arm latch
	4.ปรับปรุงการจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่	
	●จัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิงแบบ 19x 19	●แกนปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเหมาะสมกับการปรับปรุงระบบในแกนปฏิกรณ์
	●การเพิ่มระบบ WDR	●การใช้เชื้อเพลิงและนิวตรอนเป็นไปอย่างคุ้มค่า ●การกระจายกำลังเป็นไปอย่างสมมาตร (symmetry) ●อายุการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิงมากขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 20
	●มีการใช้แท่งควบคุมแบบ gray rod ร่วมกับ black rod	●การเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็ว
2.เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่	5.ใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์	●สามารถทราบสถานภาพของทั้งระบบเนื่องจากมีการแสดงข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน ●การวิเคราะห์ข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยลง และลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากเจ้าหน้าที่ ●ลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่ ●ลดระยะเวลาในการตรวจสอบทดสอบเครื่องจาก 45 วัน เป็น 40 วันต่อปี

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สรุปผลจากการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
3.ลดปริมาณการรับรังสีของเจ้าหน้าที่	6.ควบคุมวัสดุที่ใช้ในส่วนปฏิกรณ์ 7.พัฒนาหุ่นยนต์ให้ทำงานในบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง	●ลดปริมาณสารรังสี

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+ เป็นการพัฒนาของบริษัท ABB Combustion Engineering Nuclear Power (ABB-CE) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบขนาด 1,300 เมกกะวัตต์อิเลคทริค มีการพัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80 โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+ ได้ยึดหลักการออกแบบตามแนวพัฒนาของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR เพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐาน 10 CFR 52 ของ US-NRC Regulation Commission

ในปี พ.ศ. 2536 ABB-CE ส่งรายงานการออกแบบขั้นสุดท้ายและแบบร่างของรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยให้แก่ US Nuclear Regulatory Commission ซึ่งคาดว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+ ได้ใบรับรองด้านความปลอดภัยในปี พ.ศ. 2538 แต่อย่างไรก็ตาม ขณะนี้ได้มีการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่มีส่วนนิวเคลียร์เป็นของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+ จำนวน 4 โรง ที่ Yonggwang และ Ulchin ในประเทศเกาหลีใต้ แห่งละ 2 โรง ซึ่งคาดว่าจะสามารถเดินเครื่องได้ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2538 และเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2542 ตามลำดับ[35]

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80+ มีวัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนาดังนี้

2.1 วัตถุประสงค์

1. เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์
2. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้า
3. ลดปริมาณการได้รับรังสีของเจ้าหน้าที่
4. ลดต้นทุน

2.2 แนวทางการพัฒนา

2.2.1 เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์

2.2.1.1 การออกแบบให้ระบบความปลอดภัยในแต่ละระบบมีการทำงานซ้ำกัน เพื่อการทำงานของระบบความปลอดภัยเป็นไปอย่างถูกต้องตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้น และแต่ละระบบนั้นยังได้ออกแบบให้มีการทำงานเป็นอิสระต่อกันเพื่อป้องกันการขัดข้องในระบบใดระบบหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดโอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย โดยระบบความปลอดภัยที่ได้ออกแบบเพิ่มมี 3 ระบบ คือ

1. Safety Injection System (SIS) เป็นการออกแบบใหม่ให้มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและมีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากมี 4 ระบบย่อย ที่ทำงานซ้ำและเป็นอิสระต่อกัน การทำงานของ SIS คือเมื่อได้รับข้อมูลความดันที่แกนปฏิกรณ์สูงขึ้นหรือระดับน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิลดลง SIS จะนำน้ำหล่อเย็นจาก Safety Injection Tank เข้าสู่แกนปฏิกรณ์โดยตรง

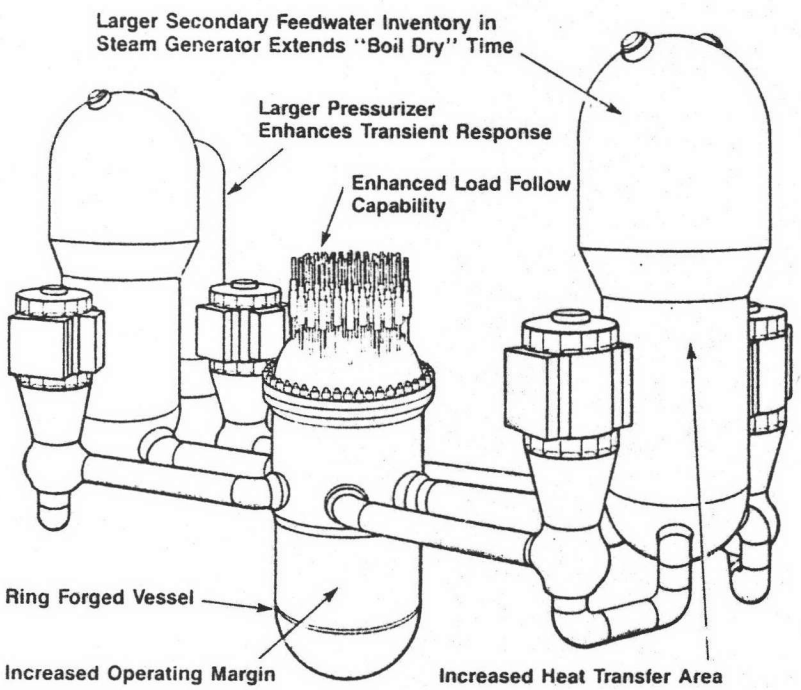
2. Emergency Feed Water System (EFWS) ประกอบด้วยระบบย่อย 2 ระบบ โดยแต่ละระบบย่อยมี ถังเก็บน้ำ เพื่อถ่ายน้ำให่แก่แกนปฏิกรณ์กรณีเกิดอุบัติเหตุ และ ปั๊มน้ำที่จะนำน้ำจากถังเก็บเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ ซึ่งการทำงานของปั๊มมี 2 ระบบคือ ระบบขับเคลื่อนปั๊มด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และปั๊มน้ำที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำโดยการผ่าน (bypass) ไอน้ำที่ยังไม่ควบแน่นจากกังหันผลิตกระแสไฟฟ้าเข้าไปหมุนกังหันของปั๊มน้ำ กรณีเกิดอุบัติเหตุแล้วไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้แก่มอเตอร์ปั๊มน้ำ

กลไกการทำงานของ EFWS คือ มีเครื่องตรวจวัดความดัน 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่หนึ่งที่ท่อที่นำน้ำเย็นเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ หากท่อนี้เกิดรั่วความดันภายในท่อจะลดลงซึ่งทำให้ขาดน้ำที่จะเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นระบบย่อยทั้งสองจะทำงานโดยอัตโนมัติ โดยการตัดน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิที่จะเข้าสู่เครื่องผลิต

ไอน้ำโดยทันที เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำในแกนปฏิกรณ์ และปล่อยน้ำจากถังเก็บเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ ตำแหน่งที่สองท่อของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิภายในเครื่องผลิตไอน้ำ กรณีที่ท่อนี้รั่วระบบ EFWS จะปิดวาล์วที่นำน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์สู่เครื่องผลิตไอน้ำโดยอัตโนมัติ เพื่อป้องกันไม่ให้มีการปนเปื้อนระหว่างน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิกับน้ำระบายความร้อนทุติยภูมิ

3. Safety Depressurization System (SDS) กรณีที่ความดันของท่อส่งน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิลดต่ำลงแสดงว่าท่อส่งน้ำรั่ว จะมีสัญญาณส่งไปยังระบบ SDS เพื่อทำการเปิดวาล์วนำน้ำจาก in-containment refueling water storage (IRWST) ไหลเข้าสู่แกนปฏิกรณ์

นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80^{+} ได้ออกแบบเครื่องควบคุมความดัน ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้การควบคุมความดันภายในถังปฏิกรณ์มีช่วงการควบคุมได้มากขึ้นกว่าเดิมถึงร้อยละ 33



รูปที่ 3.5 ถังปฏิกรณ์ เครื่องควบคุมความดันและเครื่องผลิตไอน้ำ[37]

2.2.1.2 การออกแบบอาคารคลุมปฏิกรณ์ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มี 2 ชั้น โดยชั้นในได้รับการออกแบบเป็นรูปทรงกลม ทำด้วยเหล็กหนา 4.5 เซนติเมตร ภายในมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 66 เมตร อาคารชั้นในใช้เหล็กที่มีการเชื่อมแบบแน่สนิท เพื่อให้สามารถเก็บสารกัมมันตรังสีไว้ภายในอาคารในกรณีเกิดอุบัติเหตุ ส่วนชั้นนอกเป็นอาคารคอนกรีตทรงกระบอก หนา 90 เซนติเมตร ระหว่างอาคารชั้นนอกและในมีช่องว่างเพื่อให้กักเก็บสารรังสีที่อาจจะรั่วออกจากอาคารชั้นในได้ในกรณีอุบัติเหตุรุนแรง ภายในระหว่างช่องว่างนั้นจะมีเครื่องกรองอากาศและสารเคมีที่ไว้ดูดจับสารรังสีไม่ให้มีการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่

การควบคุมการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ Nuplex 80^{+} โดยมีจอภาพแสดงการดำเนินงาน และแสดงข้อมูลต่าง ๆ เป็นระบบตัวเลข เพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านค่า และนอกจากนี้มีการออกแบบให้จอภาพสามารถมองเห็นได้อย่างทั่วถึง เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงาน

2.2.3 การลดปริมาณการได้รับรังสีของเจ้าหน้าที่

โดยยึดหลักการทำงานให้เจ้าหน้าที่รับรังสีน้อยที่สุดในขณะปฏิบัติงาน (As Low As Resonably Achievable, ALARA) เป็นแนวทางในการออกแบบให้มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกขึ้น ดังนี้

- แยกระบบที่ไม่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี ออกจากระบบที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี
- ลดความยาวของท่อต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี
- มีเครื่องกำบังในบริเวณที่มีสารกัมมันตรังสี
- แยกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับส่วนสารกัมมันตรังสี ออกจากอุปกรณ์อื่นๆ
- วัสดุในส่วนนิวเคลียร์ให้ใช้วัสดุที่มีการปนเปื้อนของสารโคบอล-59 ต่ำ
- ปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิให้อยู่ในช่วง 6.9-7.4 เพื่อให้น้ำมีสภาพเป็นกลาง แสดงว่าไม่มีการปนเปื้อนของแคทไอออนหรือแอนไอออนของสารอื่น ๆ ที่อาจจะเป็นสารรังสีได้เมื่อดูดจับนิวตรอน

นอกจากนี้ การออกแบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในรูปทรงกลม ทำให้มีพื้นที่ในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงอุปกรณ์เพิ่มขึ้นจากแบบทรงกระบอก ถึงร้อยละ 18 ทำให้ปริมาณรังสีที่เจ้าหน้าที่ได้รับลดลงจากเดิม 170 คน-เรม/ปี เป็น 70 คน-เรม/ปี และการทำงานภายในอาคารคลุมปฏิกรณ์ชั้นในเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2.2.4 ลดต้นทุนการผลิต

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80^{+} มีการพัฒนาเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง โดยการจัดเรียงแท่งเชื้อเพลิงแบบ 16x16 ใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำในรูปยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2)เป็นเชื้อเพลิง และได้มีการออกแบบให้สามารถใช้พลูโทเนียมที่ได้จากการสกัดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงใหม่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80^{+} มีวัฏจักรเชื้อเพลิง 18-24 เดือน และการพัฒนาเครื่องผลิตไอน้ำ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System-80^{+} ใช้เครื่องผลิตไอน้ำแบบ U-tube จำนวน 2 วงจร (เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ขนาดประมาณ 1000 เมกกะวัตต์ ส่วนมากเป็นแบบ 4 วงจร) มีหลักการออกแบบที่นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพแล้วยังให้มีความคงทนและง่ายต่อการบำรุงรักษา การออกแบบเครื่องผลิตไอน้ำใหม่สามารถเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนได้มากกว่าเดิมร้อยละ 17 และปริมาณน้ำระบายความร้อนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 25

2.3. <u>สรุป</u>

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System 80+ สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 สรุปผลจากการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System 80+

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
1.เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์	1.ออกแบบให้ระบบความปลอดภัยมีการทำงานที่ซ้ำกัน 2.อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ •ออกแบบให้มี 2 ชั้น และมีระบบจัดกรองก๊าซกัมมันตรังสี •ออกแบบให้มีรูปทรงกลม	•การแก้ไขสถานการณ์ของระบบความปลอดภัยเป็นไปอย่างถูกต้อง •สามารถทนทานต่อแรงดันในขณะเกิดอุบัติเหตุและสามารถเก็บกักสารกัมมันตรังสีไว้ในอาคารได้ •เพิ่มพื้นที่ในการทำงานของเจ้าหน้าที่ทำให้ลดระยะเวลาในการทำงานลงร้อยละ 18
2.เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเจ้าหน้าที่	3.ใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมเครื่อง	•ลดความผิดพลาดในการอ่านข้อมูล เนื่องจากมีการออกแบบให้แสดงผลเป็นตัวเลขและปรับปรุงหน้าจอให้สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน
3.ลดปริมาณการรับรังสีของเจ้าหน้าที่	4.ให้หลักการ ALARA ในการทำงาน	•ลดปริมาณรังสีที่ได้รับจากเดิม 170 คน-เรม/ปี เป็น 70 คน-เรม/ปี
4.ลดต้นทุนการผลิต	5.ออกแบบการจัดเรียงแท่งเชื้อเพลิงใหม่ 6.ออกแบบเครื่องผลิตไอน้ำใหม่	•เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง •เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนได้มากกว่าเดิมร้อยละ 17 •ปริมาณน้ำในระบบระบายความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 25

3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR เป็นการพัฒนาร่วมของบริษัท General Electric Company (GE) ประเทศสหรัฐอเมริกา กับบริษัท Hitachi และบริษัท Toshiba ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ชื่อว่า Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) มีขนาดกำลังการผลิต 1350 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า

ปัจจุบัน เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR อยู่ในขั้นตอนการตรวจสอบการออกแบบของ U.S. Nuclear Regulatory Commission ในประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับในประเทศญี่ปุ่นกระทรวงอุตสาหกรรม (Japan's Ministry of International Trade and Industry ,MITI) ได้ออกใบรับรองการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR เมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 จึงได้มีโครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR จำนวน 2 โรง ที่ Kashiwazaki Kariwa Unit 6 และ 7 ซึ่งคาดว่าจะสามารถเดินเครื่องได้ในปีพ.ศ. 2540 และ 2541 ตามลำดับ[35]

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR มีวัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนาดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์

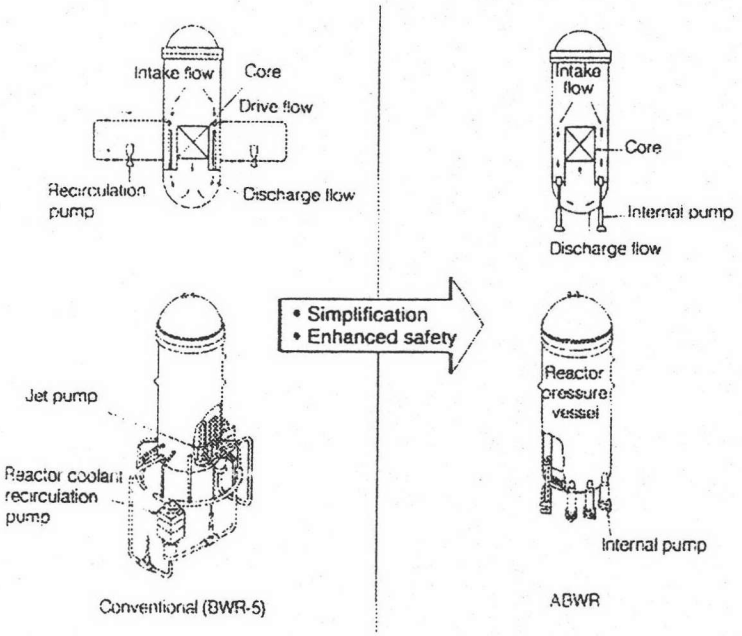
1. เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์
2. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่
3. ลดปริมาณการได้รับรังสีของเจ้าหน้าที่
4. ลดต้นทุนการผลิต

3.2 แนวทางการพัฒนา

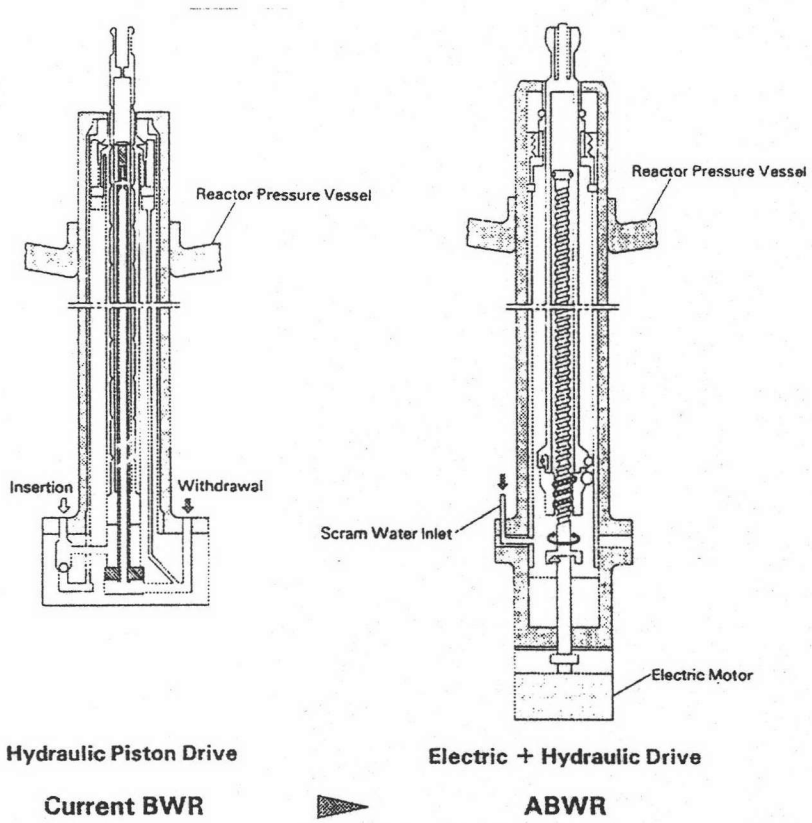
3.2.1 เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์

3.2.1.1 ปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ให้มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เดิมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR มีการใช้ปั๊มหมุนเวียน ปั๊มน้ำผ่านท่อต่างๆ เข้าสู่แกนปฏิกรณ์โดยการฉีดของเจทปั๊ม สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ได้ออกแบบปั๊มใหม่ เป็นปั๊มหมุนเวียนภายในทำให้ไม่ต้องใช้เจทปั๊มและเปลี่ยนตำแหน่งโดยวางติดกับถังปฏิกรณ์ ทำให้ไม่มีท่อจากปั๊มไปยังถังปฏิกรณ์

3.2.1.2 การปรับปรุงการขับเคลื่อนแท่งควบคุม เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ใช้ระบบ Fine Motion Control Rod Drive (FMCRD) ในการขับเคลื่อนแท่งควบคุม โดย FMCRD มี 2 ระบบ คือ ระบบที่ใช้ไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งจะใช้ในขณะเดินเครื่องปกติ และระบบไฮโดรลิค ในขณะเกิดเหตุขัดข้องหรืออุบัติเหตุ

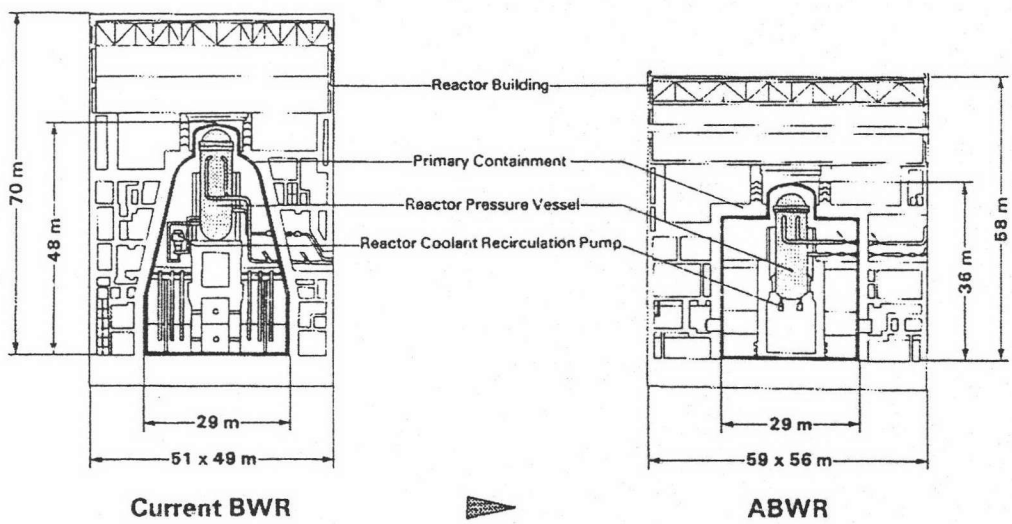


รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการหมุนเวียนของน้ำระบายความร้อนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR กับ ABWR



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบระบบการทำงานของระบบขับเคลื่อนแท่งควบคุม [49]

3.2.1.3 การปรับปรุงระบบป้องกันภัยจากแผ่นดินไหว เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR มีการออกแบบอาคารคลุมปฏิกรณ์ชั้นในได้มีการออกแบบด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีความทนทานต่อแรงกดดันสูงแทนอาคารเหล็กเดิมในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR และปรับปรุงให้มีรูปทรงกระบอก เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ การวางตำแหน่งของปั๊มหมุนเวียนใหม่ซึ่งทำให้ฐานของถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจุดศูนย์กลางมวลมีเสถียรมากขึ้น ถังปฏิกรณ์จะมีความมั่นคงมากขึ้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว



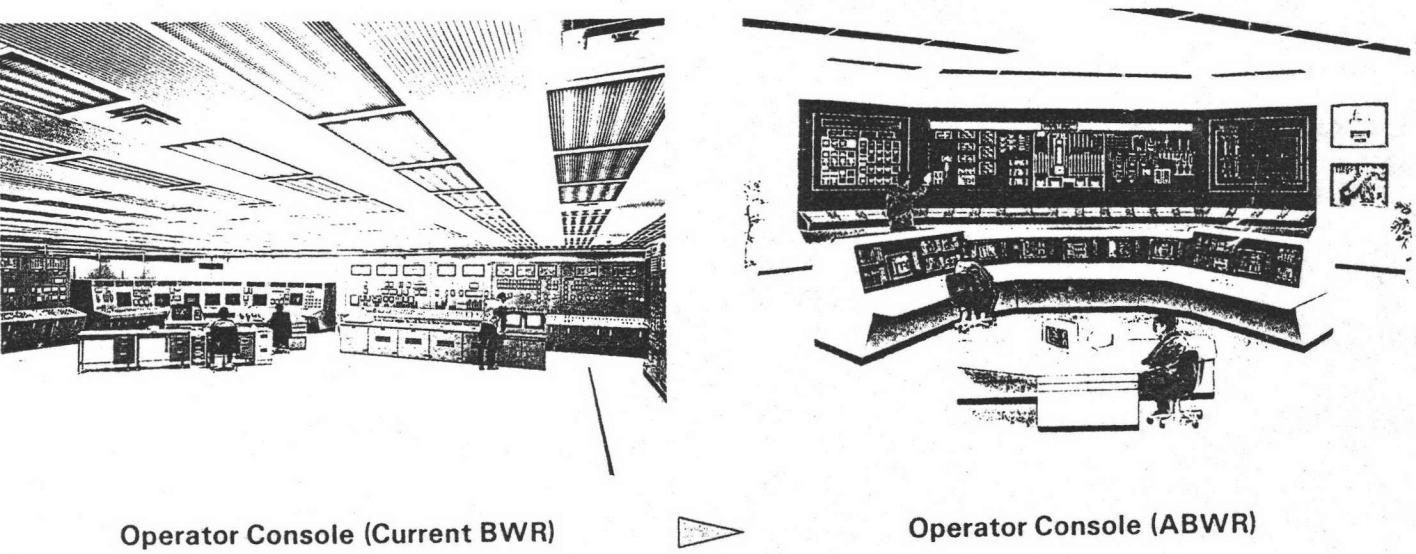
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ [49]

3.2.1.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ได้ออกแบบให้ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน มี 3 ระบบ ซึ่งแต่ละระบบทำงานเป็นอิสระจากกัน ในระบบcid ประกอบด้วย Reactor Core Isolation Cooling (RCIC) ซึ่งเป็นระบบที่แยกการระบายความร้อนในสภาวะฉุกเฉินออกจากการระบายความร้อนปกติ ระบบ RCIC สามารถทำงานโดยนำไอน้ำจากแกนปฏิกรณ์ที่ยังคงมีแรงเฉื่อยไปขับกังหัน เพื่อผลิตกระแสไฟนำมาหมุนเวียนน้ำในกรณีฉุกเฉินที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าส่งให้แก่ปั๊ม และมีระบบ Low Pressure Flooder (LPFL) ทำหน้าที่ระบายความร้อนแก่แกนปฏิกรณ์เมื่อความดันภายใน

แกนปฏิกรณ์ลดต่ำลง โดยทำงานร่วมกับ Reactor Heat Removral (RHR) ซึ่งระบายความร้อนหลังจากเกิดอุบัติเหตุ ส่วนระบบที่ 2 และ 3 ประกอบด้วย LPFL, RHR และ High Pressure Core Spray (HPCS) ทำหน้าที่ระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในขณะที่ความดันสูง

3.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ได้นำระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม เพื่อให้เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ โดยมีศูนย์กลางการควบคุมที่ห้องควบคุม ซึ่งมีจอภาพแสดงผลการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ เจ้าหน้าที่จะควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบภายในห้องควบคุมตั้งแต่การเริ่มเดินเครื่อง เดินเครื่องปกติ การหยุดเดินเครื่องทั้งในสภาวะปกติและฉุกเฉิน ดังนั้น เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำจึงต้องออกแบบให้ระบบการควบคุมและแสดงผลมีการตรวจสอบตัวเองของระบบสัญญาณ และแสดงข้อมูลที่ง่ายต่อการประมวลผล โดย ABWR มีการแสดงผลเป็นตัวเลข แทนการแสดงผลแบบ analog ใน BWR ทั้งนี้ เพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านข้อมูลของเจ้าหน้าที่



Operator Console (Current BWR) ▷ Operator Console (ABWR)

รูปที่ 3.9 ห้องควบคุม [21]

3.2.3 ลดปริมาณการได้รับรังสีของเจ้าหน้าที่

การออกแบบใช้ปั๊มหมุนเวียนติดถังปฏิกรณ์ และอาคารคลุมปฏิกรณ์ชั้นในให้มีพื้นที่ในการปฏิบัติงานมากขึ้น ผลทำให้ลดขั้นตอนการตรวจสอบอุปกรณ์ และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ใช้เวลาในการปฏิบัติงานลดลง ทำให้ปริมาณรังสีที่เจ้าหน้าที่ได้รับรังสีลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ยังมีการควบคุมการใช้วัสดุอุปกรณ์ในส่วนปฏิกรณ์ และน้ำบริสุทธิ์ที่จะเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ ให้มีปริมาณธาตุโคบอล-59 (Co-59) ต่ำ เพื่อลดบัญหาการแผ่รังสีแกมมาจากธาตุโคบอล-60 (Co-60) ซึ่งเกิดจากการจับนิวตรอนของ Co-59

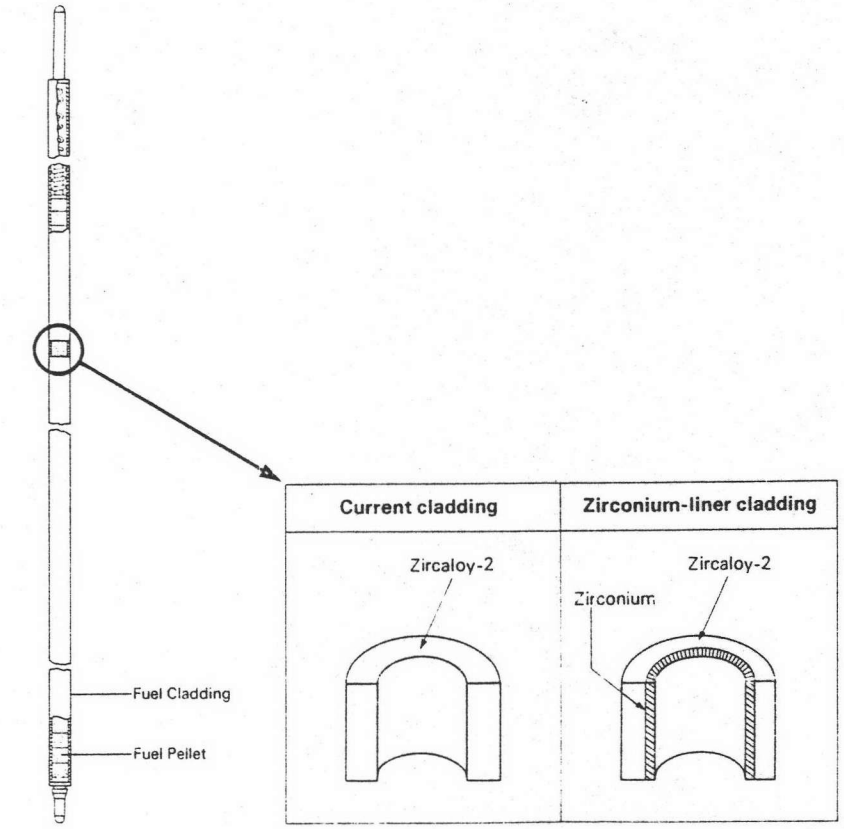
3.2.4 ลดต้นทุนการผลิต

3.2.4.1 การลดระยะเวลาในการก่อสร้าง สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR เนื่องมาจากโครงสร้างมีขนาดที่เล็กลงและมีการออกแบบให้อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนประกอบเดียวกันกับโครงสร้างของส่วนปฏิกรณ์

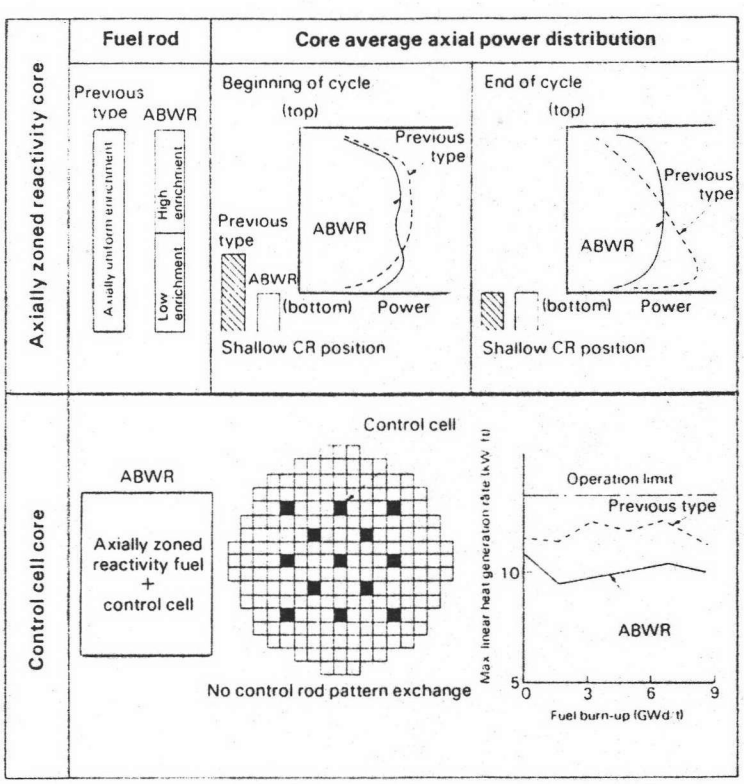
3.2.4.2 การลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ สามารถลดระยะเวลาในการบำรุงรักษาน้อยลง เนื่องจาก ระบบการดำเนินงานลดความซับซ้อน เช่น การออกแบบปั๊มหมุนเวียนให้ง่ายต่อการตรวจสอบและบำรุงรักษา การควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมใช้ระบบ FMCRD ซึ่งง่ายต่อการบำรุงรักษา และการลดจำนวนท่อของระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์

3.2.4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ได้ปรับปรุงการจัดแกนปฏิกรณ์และแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง โดย

1. แท่งเชื้อเพลิง เคลือบเซอร์โคเนียมภายในแท่งหุ้มเชื้อเพลิง ทำให้เพิ่มความแข็งแรงซึ่งจะลดโอกาสการเกิดแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย และมีการใช้เชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะต่ำและสูงรวมกันในแท่งเชื้อเพลิงเดียว ทำให้การกระจายกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิง และทำให้ลดการควบคุมการกระจายกำลังโดยแท่งควบคุมอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 3.10 แท่งหุ้มเชื้อเพลิงที่ปรับปรุง



รูปที่ 3.11 แกนปฏิกรณ์ที่ปรับปรุง

2. แกนปฏิกรณ์ มีการนำ control cell จัดเรียงภายในแกนปฏิกรณ์ เนื่องจาก control cell ประกอบด้วยมัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วจำนวน 4 มัด ซึ่งมีอัตรากำลังต่ำวางรอบๆ แท่งควบคุม จึงจัดเรียงให้ control cell วางในตำแหน่งที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงซึ่งจะทำให้มีการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในตำแหน่งดังกล่าว จะทำให้การกระจายกำลังจึงสม่ำเสมอทั่วแกนปฏิกรณ์ ซึ่งจะเป็นลดการควบคุมกำลังโดยใช้แท่งควบคุม

3.3. สรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณีนิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง	1.ปรับปรุงระบบท่อส่งน้ำระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์	• ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขากน้ำระบายความร้อน เนื่องจากท่อรั่วหรือแตก • ถังปฏิกรณ์มีความทนทานต่อแผ่นดินไหว เนื่องจากจุดศูนย์กลางมวลมีความเสถียรมากขึ้น • ลดเวลาในการก่อสร้าง เนื่องจากอาคารเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลง • สามารถลดงานเชื่อมท่อลงได้ร้อยละ 50 • ลดระยะเวลาในการตรวจสอบทำให้เจ้าหน้าที่รับรังสีลดน้อยลง
	2.ปรับปรุงการขับเคลื่อนของแท่งควบคุม	• การควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแท่งควบคุมไม่มีความซับซ้อน • แท่งควบคุมเคลื่อนที่เร็วขึ้น • ลดปริมาณรังสีที่เจ้าหน้าที่ได้รับ เนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยทำให้การบำรุงรักษาและตรวจสอบใช้เวลาน้อย

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
	3.ออกแบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ให้มีรูปทรงกระบอก 4.การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน	• เพิ่มพื้นที่ในการทำงาน • อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลงเนื่องจากการใช้ปั๊มหมุนเวียนภายในทำให้ทนทานต่อแผ่นดินไหว • ระบบฯมีความเชื่อถือได้สูง
เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่	5.นำระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการเดินเครื่อง	• ลดข้อผิดพลาดในการประมวลผลเพื่อการตัดสินใจของเจ้าหน้าที่) • การอ่านค่ามีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากการแสดงค่าเป็นตัวเลขและการออกแบบจอภาพให้มองเห็นได้ทุกตำแหน่ง • ลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่
ลดปริมาณการรับรังสีของเจ้าหน้าที่	6.มีการควบคุมวัสดุที่ใช้ในส่วนปฏิกรณ์และสารเจือปนในน้ำระบายความร้อนและมีพื้นที่ในการทำงานมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปั๊มหมุนเวียนภายใน และออกแบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก	• ลดระยะเวลาในการตรวจสอบอุปกรณ์จากเดิม 70-85 วัน/ปี เป็น 55 วัน/ปี • ลดปริมาณรังสีที่เจ้าหน้าที่ได้รับจาก 1000 มิลลิซีเวิร์ท/คน/ปีเป็น 490 มิลลิซีเวิร์ท/คน/ปี
ลดต้นทุนการผลิต	7.เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต • เคลือบเซอร์โคเนียมด้านในแท่งหุ้มเชื้อเพลิง • ใช้เชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะต่ำและสูงในแท่งเชื้อเพลิงเดียวกัน • ใช้ control cell	 • เพิ่มความทนทาน • ลดการรั่วของสารรังสี • การกระจายกำลังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ • การกระจายกำลังสม่ำเสมอทั่วทั้งแกนปฏิกรณ์ • ลดการใช้แท่งควบคุมในการควบคุมการกระจายกำลังแกนปฏิกรณ์

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดกำลังต่ำ

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง นอกจากมีการพัฒนาในรุ่นที่มีขนาดกำลังสูงแล้วยังได้พัฒนาในรุ่นที่มีขนาดกำลังต่ำคือประมาณ 300-600 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า ซึ่งจะเรียกเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบนี้ว่า Simplified ซึ่งมีการพัฒนาที่แตกต่างกับขนาดกำลังสูง คือ มีการออกแบบใช้ระบบความปลอดภัยธรรมชาติในระบบป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ

ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ คือ ระบบที่ทำงานโดยอาศัยแรงธรรมชาติ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก แรงจากพลังงานศักย์ของวัตถุ การหมุนเวียนของของไหลด้วยแรงธรรมชาติ ดังนั้น ระบบดังกล่าวจึงไม่ต้องอาศัยปั๊ม หรือระบบจ่ายไฟจากภายนอกซึ่งเป็นการทำงานแบบอัตโนมัติโดยในสภาวะฉุกเฉินความดันและอุณหภูมิที่ผิดปกติจะทำให้มีการเปิดวาล์วของระบบฯ ให้ทำงานหรือปิดวาล์วให้หยุดการทำงาน นอกจากนี้ ไม่สามารถตัดระบบความปลอดภัยดังกล่าวออกจากระบบการเดินเครื่องได้ ซึ่งจะทำให้เจ้าหน้าที่เดินเครื่องไม่สามารถเดินเครื่องผิดจากข้อกำหนดด้านความปลอดภัยได้ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบความปลอดภัยธรรมชาตินี้จะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดกำลังต่ำ ข้อดีของการใช้ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ คือ [43][44]

1. เป็นระบบที่มีการทำงานแบบไม่ซับซ้อน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ การติดตั้ง และการใช้งาน
2. เนื่องจากมีการลดการใช้ปั๊มและระบบการจ่ายไฟฟ้า ทำให้ลดอัตราการเสี่ยงต่อการเกิดความขัดข้องของอุปกรณ์ และลดเวลาในการซ่อมบำรุงและตรวจสอบ
3. เป็นการทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งจะลดความผิดพลาดที่เกิดจากเจ้าหน้าที่
4. ระบบความปลอดภัยธรรมชาติมีค่าความเชื่อถือสูง

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดกำลังต่ำที่มีการพัฒนาแบบ simplified ได้แก่

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR
2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600
3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR
4. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ Simplified Pressurized Water Reactor (SPWR) ได้รับการพัฒนาจากบริษัท Mitsubishi ประเทศญี่ปุ่น มีการพัฒนา 2 รุ่นคือรุ่นที่มีขนาดกำลัง 300 และ 600 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า[45] การพัฒนาของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR ใช้หลักการออกแบบระบบความปลอดภัยผสมผสานทั้งระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่และระบบการทำงานแบบธรรมชาติ ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์ ความเชื่อถือด้านความปลอดภัย และมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR
2. ระบบความปลอดภัยสามารถควบคุมสถานการณ์ในสภาวะฉุกเฉินได้ระยะหนึ่ง เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการแก้ไขสถานการณ์ของเจ้าหน้าที่

1.2 แนวทางการพัฒนา

1.2.1 เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR โดยการออกแบบระบบความปลอดภัยร่วมของระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่กับระบบการทำงานแบบธรรมชาติ ระบบความปลอดภัยทั้งสองมีจุดเด่นและด้อยด้วยกัน คือ ระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่ จะมีการทำงานอย่างรวดเร็วในการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ และการปฏิบัติงานมีความยืดหยุ่นได้สูง หากแต่จุดด้อยคือ อาจมีการดำเนินการแก้ไขสถานการณ์ผิดพลาดได้ เนื่องจาก การวิเคราะห์ข้อมูลผิดหรือการไม่เข้าใจสถานการณ์ขัดข้องที่เกิดขึ้น หรือเจ้าหน้าที่ไม่มีความพร้อมในการทำงาน สำหรับระบบการทำงานแบบธรรมชาติ เป็นระบบที่มีการทำงานไม่ซับซ้อน มีความเชื่อถือได้สูงและไม่เกิดความผิดพลาดจากเจ้าหน้าที่ เนื่องจาก ระบบทำงานโดยอัตโนมัติด้วยแรงธรรมชาติ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก ความดันที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขยายตัวของก๊าซ การหมุนเวียนของของไหลโดยความแตกต่างของความหนาแน่น เป็นต้น แต่จุดด้อยคือ วิธีการแก้ไขสถานการณ์เป็นวิธีการที่คงที่แน่นอนจึงทำให้ไม่มีความยืดหยุ่นหากสถานการณ์มีเงื่อนไขที่แตกต่างออกไป

ดังนั้น การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR ได้นำทั้งสองระบบมารวมกันโดย

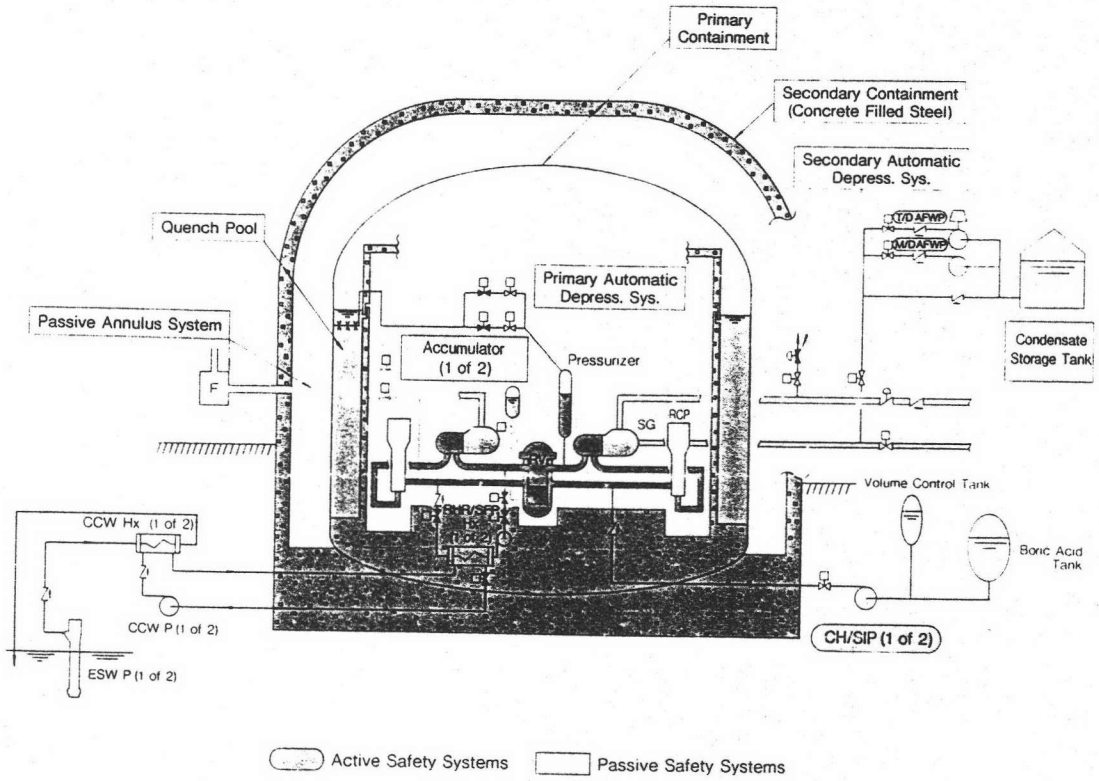
1. ระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่ ทำงานในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องจากท่อน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิรั่ว ระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่ ซึ่งประกอบด้วย safety injection pump และ feedwater pump จะปั๊มส่งน้ำไปยังแกนปฏิกรณ์ ซึ่งลักษณะการทำงานดังกล่าวเหมือนกับในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

2. ระบบการทำงานแบบธรรมชาติ เมื่อมีสัญญาณแจ้งการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนระบบการทำงานแบบธรรมชาติจะเริ่มทำงาน เช่น กรณีเกิดอุบัติเหตุท่อน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิรั่วทำให้ปริมาณความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์สูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ primary depressurization valve ของเครื่องควบคุมความดัน และ secondary depressurization valve จะเปิดโดยอัตโนมัติ เพื่อทำการลดความดันภายในแกนปฏิกรณ์โดยการนำน้ำจาก gravity injection, condensation storage tank และ accumulator เข้าสู่แกนปฏิกรณ์โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

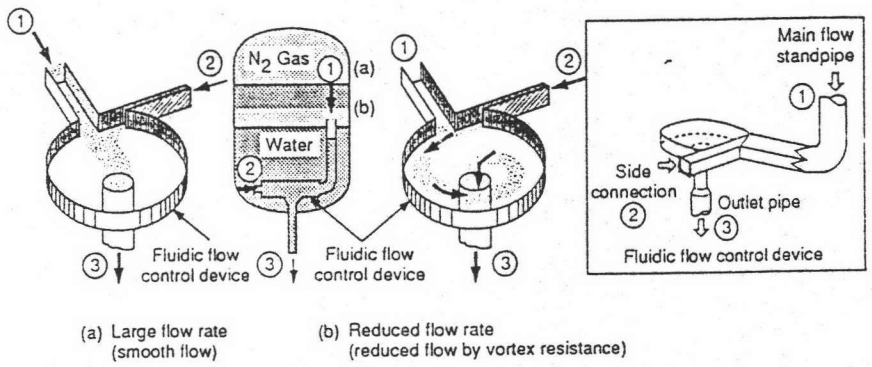
นอกจากนี้ ได้มีการออกแบบ accumulator และ เครื่องผลิตไอน้ำเพื่อเพิ่มความปลอดภัยดังนี้

•Accumulator เนื่องจากในระยะต้นของการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนต้องอาศัยน้ำจำนวนมากเข้าท่วมแกนปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะมีน้ำจำนวนหนึ่งฉีดเข้าไปเพื่อชดเชยน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการรั่วและเป็นการช่วยในการระบายความร้อน ดังนั้น accumulator ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง SPWR จึงถูกออกแบบให้ใช้งานได้ทั้ง 2 ระยะพร้อมกันโดยมีอุปกรณ์ควบคุมการไหลบรรจุอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 3.13 ด้านบนของ accumulator จะบรรจุก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 5 MPa ด้านล่างบรรจุน้ำจำนวนหนึ่ง

ในระยะต้นของอุบัติเหตุน้ำจะถูกดันให้ไหลผ่านปลายท่อทั้งสองพร้อมกัน ซึ่งจากการออกแบบของการวางแนวท่อและระดับของปลายท่อทำให้น้ำจำนวนมากไหลออกสู่แกนปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ จนกระทั่งระดับน้ำลดต่ำลงกว่าปลายท่อที่ 1 น้ำจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมการไหลทางปลายท่อที่ 2 ซึ่งออกแบบให้มีการไหลวนที่มีความต้านทานการไหลสูงทำให้อัตราการไหลต่ำลง น้ำจึงไหลเข้าสู่แกนปฏิกรณ์อย่างช้าและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง



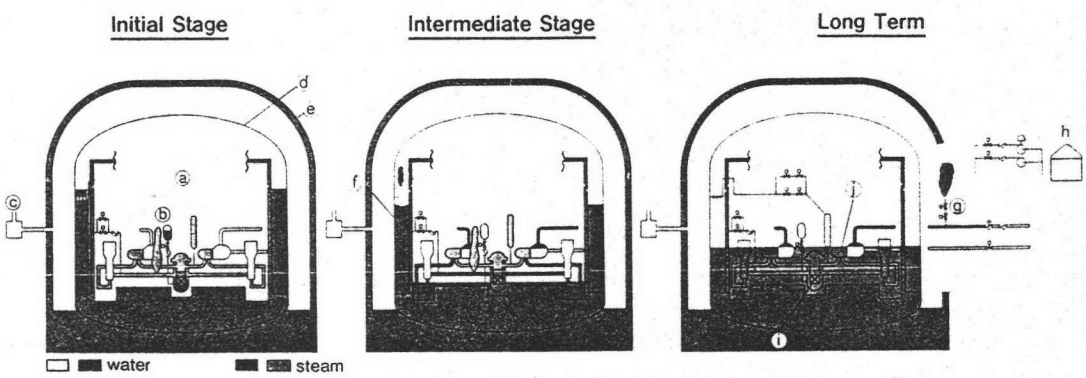
รูปที่ 3.12 ระบบความปลอดภัย [45]



รูปที่ 3.13 การไหลของน้ำภายใน Accumulator [46]

•เครื่องผลิตไอน้ำ ออกแบบให้วางในแนวนอน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR ได้ออกแบบให้ในสภาวะฉุกเฉินสามารถนำไอน้ำจากแกนปฏิกรณ์เข้าไปควบแน่นที่ Condensate storage tank โดยผ่านเข้าทางเครื่องผลิตไอน้ำ ดังนั้นเครื่องผลิตไอน้ำจึงต้องออกแบบให้วางแนวนอน ซึ่งหากวางในแนวตั้งอาจทำให้ไอน้ำหยุดไหลเวียนเนื่องจาก Syphon break คือการเกิดอากาศอัดอยู่ภายในท่อตัวยูของเครื่องผลิตไอน้ำทำให้ไอน้ำไม่สามารถวิ่งผ่านไปยัง Condensate storage tank ได้

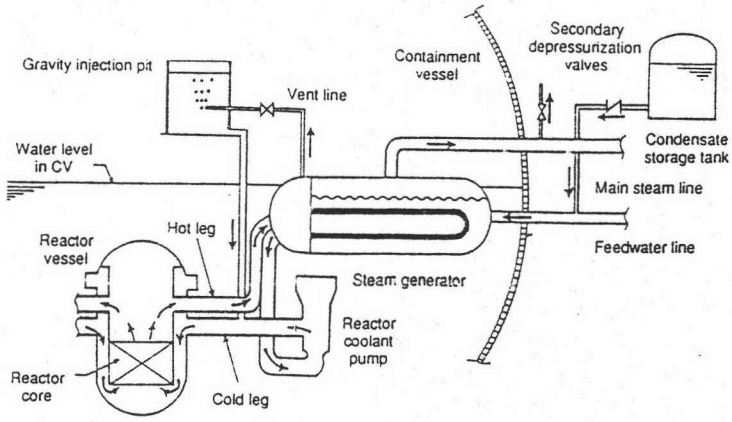
1.2.2 ระบบความปลอดภัยสามารถควบคุมสถานการณ์ในสภาวะฉุกเฉินได้ระยะหนึ่ง เพื่อเพิ่มเวลาในการแก้ไขสถานการณ์แก่เจ้าหน้าที่ หลังจากเกิดอุบัติเหตุแม้ว่าเครื่องปฏิกรณ์หยุดเดินเครื่องแต่ยังคงมีความร้อนจากปฏิกิริยาและจากสารกัมมันตรังสีภายในแกนปฏิกรณ์ ดังนั้น จึงต้องมีการออกแบบระบบระบายความร้อนหลังจากเกิดอุบัติเหตุ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการระเบิดของไอน้ำหรือการหลอมละลายของแท่งเชื้อเพลิงได้ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR ได้ออกแบบระบบระบายความร้อนหลังอุบัติเหตุแบบธรรมชาติ คือ ภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์จะมี Quench Pool บรรจุน้ำไว้ที่ปริมาณน้ำสูงกว่าในแกนปฏิกรณ์ เมื่อเกิดอุบัติเหตุความดันภายในระบบแกนปฏิกรณ์ (Reactor Core System) ลดลงน้ำจาก Quench Pool จะไหลเข้าสู่ระบบแกนปฏิกรณ์ นอกจากเป็นการลดความร้อนในระบบแกนปฏิกรณ์แล้วยังเป็นการปรับให้ความดันของระบบแกนปฏิกรณ์เท่ากับความดันภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.14 การระบายความร้อนภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ภายหลังอุบัติเหตุ [43]

a) Primary automatic depress b) Accumulator c) Charcoal filter d) Primary containment
e) Secondary containment f) Quench poolg) Secondary automatic depress
h) Condensate storage tanki) Core j) Steam generator

นอกจากนี้ ความร้อนที่สะสมอยู่สามารถทำให้น้ำภายในแกนปฏิกรณ์หรือเครื่องกำเนิดไอน้ำเดือดได้ ไอน้ำดังกล่าวจะควบแน่นและสะสมอยู่ที่ Condensate Storage Tank และน้ำภายใน Condensate Storage Tank จะสามารถไหลเวียนเข้ามาระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ได้ ซึ่งระบบนี้สามารถควบคุมสถานการณ์หลังจากเกิดอุบัติเหตุไว้ได้ 3 วัน



รูปที่ 3.15 การไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนภายในเครื่องผลิตไอน้ำกับ Condensate storage tank [46]

1.3 สรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์	ใช้ระบบความปลอดภัยร่วมของระบบการทำงานโดยเจ้าหน้าที่และระบบการทำงานแบบธรรมชาติ (Hybrid Safety System)	1.ในขณะเกิดเหตุขัดข้องเล็กน้อยสามารถใช้ระบบความปลอดภัยที่ทำงานโดยเจ้าหน้าที่ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง 2.ในสภาวะฉุกเฉินสามารถใช้ระบบความปลอดภัยแบบธรรมชาติซึ่งมีความเชื่อถือสูงและทำงานโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก
ระบบความปลอดภัยสามารถควบคุมสถานการณ์ในสภาวะฉุกเฉิน	ออกแบบให้มี Quench Pool และ Condensate Storage Tank ซึ่งเป็นระบบที่ทำงานโดยธรรมชาติ	1.ภายหลังการเกิดอุบัติเหตุมีระบบระบายความร้อนสะสมภายในแกนลดโอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลายและการเกิดการระเบิดจากการขยายตัวของไอน้ำหรือก๊าซที่ได้ความร้อนสูง 2.เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานมีเวลาในการตัดสินใจแก้ไขสถานการณ์หลังการเกิดอุบัติเหตุ

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง AP-600

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง AP-600 เป็นการพัฒนาของบริษัท Westinghouse ประเทศสหรัฐอเมริกา มีขนาด 600 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในเชิงพานิชย์แต่จากแนวความคิดด้านความปลอดภัยที่ว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดเล็กทำให้การออกแบบอุปกรณ์และระบบต่างๆ ไม่ให้มีความซับซ้อนทำได้ง่ายกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดใหญ่ และการก่อสร้างในขนาดเล็กมักเป็นไปตามแผนการที่วางไว้ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนได้อีกทางหนึ่ง

ปัจจุบัน บริษัท Westinghouse ได้ส่งรายงานการประเมินโอกาสความเสี่ยงภัย และรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง AP-600 ต่อ US-NRC เมื่อปี พ.ศ. 2534 และ 2535 ตามลำดับ ซึ่งทางบริษัท Westinghouse คาดว่าจะได้ใบอนุญาตการดำเนินการภายในต้นปี พ.ศ. 2538 [35]

2.1 วัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนา

1. เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์
2. เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเจ้าหน้าที่
3. ลดต้นทุนการผลิต

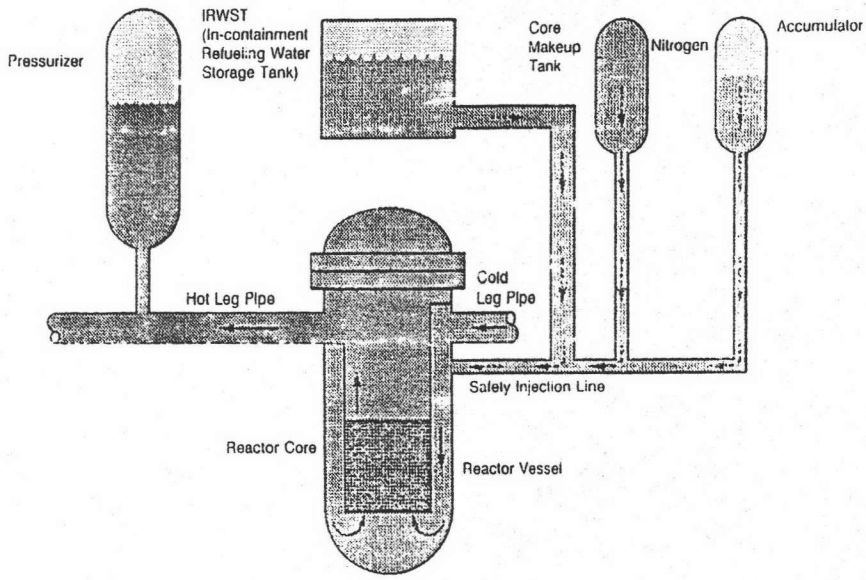
2.2 แนวทางการพัฒนา

2.2.1 เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์

2.2.1.1 ออกแบบระบบระบายความร้อนฉุกเฉินมีการทำงานแบบธรรมชาติซึ่งประกอบด้วย 2 ระบบ คือ

1. Safety Injection ประกอบด้วยถัง accumulator 2 ถัง ภายในบรรจุสารละลายของโบรอนและไนโตรเจนเหลว ในอัตราส่วน 5.6 ต่อ 1 ที่ความดัน 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ Core Makeup Tank (CMT) 2 ถัง ภายใน CMT บรรจุสารละลายโบรอนวางอยู่เหนือถังปฏิกรณ์ เพื่อให้สามารถถ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์โดยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ในกรณีเกิดอุบัติเหตุเล็กน้อยน้ำจาก CMT จะไหลช้าๆ เข้าสู่แกนปฏิกรณ์

แต่ในกรณีเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนน้ำจาก accumulator จะไหลด้วยความเร็วสูงสู่แกนปฏิกรณ์ทันที

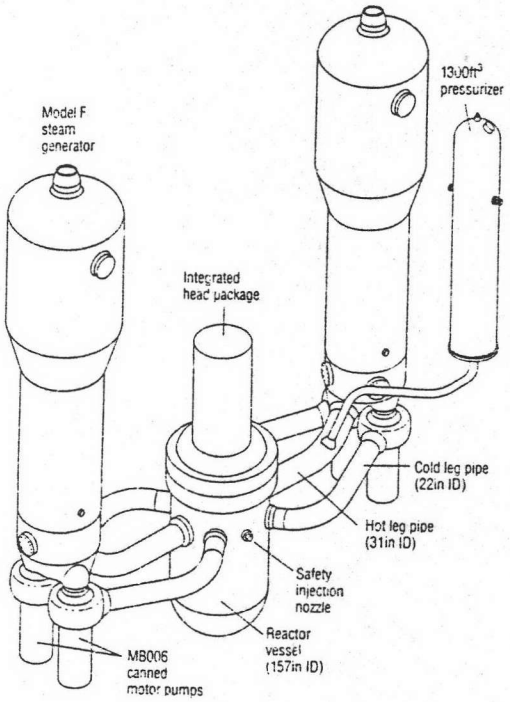


รูปที่ 3.16 ระบบ Safety injection [47]

2. Passive Residual Heat Remove Heat Exchange (PRHR HX) เป็นระบบควบแน่นไอน้ำที่อยู่ภายในถัง IRWST ที่วางอยู่เหนือถังปฏิกรณ์ ภายในบรรจุน้ำที่ความดันเดียวกับน้ำในแกนปฏิกรณ์ ในการเดินเครื่องปกติระบบ PRHR HX จะปิด เมื่อเกิดเหตุขัดข้องหรืออุบัติเหตุที่ทำให้น้ำระบายความร้อนปฐมภูมิภายในเครื่องผลิตไอน้ำลดลงในระดับต่ำ จะส่งสัญญาณเปิดไปยังวาล์วลมเพื่อนำไอน้ำจากแกนปฏิกรณ์ไปควบแน่นแล้วส่งไประบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์โดยสามารถไหลเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งระบบนี้ออกแบบให้สามารถระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ภายหลังจากเกิดอุบัติเหตุได้เป็นเวลา 3 วัน เพื่อเพิ่มเวลาแก่เจ้าหน้าที่ในการแก้ไขสถานการณ์

นอกจากทั้ง 2 ระบบนี้แล้วยังมี automatic depressurizer system อยู่ภายในเครื่องควบคุมความดัน ทำหน้าที่ตรวจสอบระดับน้ำภายใน CMT ถ้าน้ำลดลงในระดับต่ำเมื่อใด depressurizer จะส่งสัญญาณนำน้ำจาก IRWST เข้าสู่ CMT

2.2.1.2 ออกแบบปั๊มน้ำของระบบระบายความร้อนปฐมภูมิใหม่ โดยเปลี่ยนชนิดของปั๊มน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิให้เป็นปั๊ม canned motor ซึ่งเป็นปั๊มชนิดที่บัดกรีแน่นพิเศษไม่ให้อากาศเข้าได้ และสามารถวางติดกับเครื่องผลิตไอน้ำ

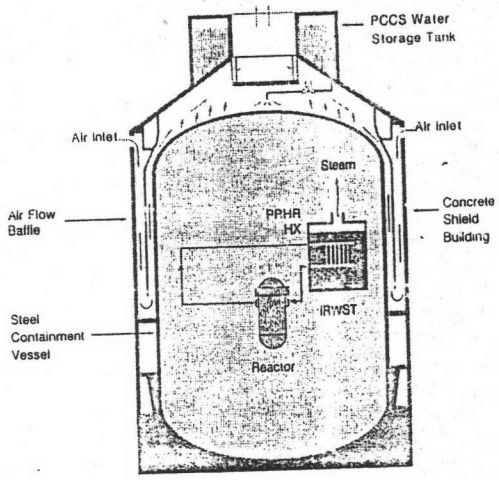


รูปที่ 3.17 ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ [47]

2.2.1.3 ออกแบบระบบป้องกันการรั่วของสารกัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อเกิดอุบัติเหตุแม้โอกาสที่ก๊าซไอโอดีนหรือก๊าซซีเซียมจะรั่วออกมาจากแท่งเชื้อเพลิงออกสู่บรรยากาศนั้นมีน้อยมาก แต่เพื่อป้องกันเหตุดังกล่าว เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 ได้ออกแบบระบบ Containment Spray ซึ่งประกอบด้วยโบเรตเหลว หรือไนโตรเจนเหลว อยู่ภายนอกรอบ ๆ อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเกิดอุบัติเหตุจะมีการฉีดสารดังกล่าวเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตโนมัติ เพื่อลดการฟุ้งกระจายของสารกัมมันตรังสีจากแท่งเชื้อเพลิง

2.2.1.4 มีการระบายความร้อนภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์โดยการออกแบบให้มีอากาศเย็นไหลเข้าในช่องว่างระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในซึ่งทำด้วยเหล็กและอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นนอกที่ทำด้วยคอนกรีต ซึ่งการไหลเวียนของอากาศใช้ระบบธรรมชาติคือ อากาศในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในจะร้อนเนื่องจากความร้อนจากถังปฏิกรณ์ดังนั้นอากาศนี้จะลอยตัวขึ้นสู่ข้างบน ส่วนอากาศภายนอกที่ไหล

เข้าทางอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นนอกซึ่งเย็นกว่าจะไหลสู่ด้านล่างของอาคาร นอกจากนี้ ด้านบนของอาคารฯ มีถังเก็บน้ำเพื่อฉีดน้ำระบายความร้อนอาคารฯชั้นใน ในกรณีอุณหภูมิภายในอาคารฯ สูงขึ้นมาก ปริมาณน้ำในถังเก็บออกแบบให้มีปริมาณเพียงพอระบายความร้อนได้ 3 วัน หลังจากเกิดอุบัติเหตุรุนแรง



รูปที่ 3.18 การระบายความร้อนระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในและชั้นนอก[47]

2.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่

มีการพัฒนาห้องระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการเดินเครื่องสำหรับ AP-600 ข้อมูลที่รวบรวม ได้แก่ ข้อมูลการเดินเครื่อง อุปกรณ์วัดค่าและตรวจสอบเหตุขัดข้อง การส่งสัญญาณเตือนภัย การควบคุมระบบความปลอดภัยในกรณีฉุกเฉินมาแสดงผลและสถานภาพที่จอภาพในห้องควบคุม การแสดงค่าต่างๆ จะแสดงเป็นตัวเลขเพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านค่า

2.2.3 ลดต้นทุนการผลิต

โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งได้ออกแบบการจัดเชื้อเพลิงให้มีการกระจายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์มากที่สุด (Low power density core) สามารถเพิ่มระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง (fuel cycle) จาก 12 เดือน เป็น 18 เดือน และมีการใช้ gray control rod ในการปรับอัตราการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ ระหว่างแกนปฏิกรณ์กับผนังถังปฏิกรณ์มีแผ่นเหล็กกล้าปลอดสนิมและน้ำเป็นตัวกั้นและสะท้อนอนุภาคนิวตรอนกลับเข้าแกนปฏิกรณ์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มจำนวนนิวตรอนที่จะทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมภายในเชื้อเพลิงทำให้เพิ่มปริมาณการใช้เชื้อเพลิงได้

2.3. สรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.5 สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
1.เพิ่มความปลอดภัยแก่เครื่องปฏิกรณ์	1.ระบบระบายความร้อนฉุกเฉินมีการทำงานแบบธรรมชาติ	•ลดจำนวนปั๊ม •ลดการบำรุงรักษาปั๊มน้ำ •ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย เนื่องจากปั๊มน้ำฉุกเฉินไม่ทำงาน •ลดความผิดพลาดที่เกิดจากเจ้าหน้าที่ เนื่องจากระบบสามารถทำงานโดยอัตโนมัติ
	2.ใช้ปั๊มน้ำของระบบระบายความร้อนปฐมภูมิแบบ canned motor	•ลดการสั่นสะเทือนของปั๊ม •ลดข้อต่อและข้องอ •ลดโอกาสการแตกหักของท่อได้ เนื่องจากมีระยะของท่อสั้นลงและการสั่นของปั๊มลดลง •ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุที่แกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน เนื่องจากระยะของท่อสั้นลง •ลดเวลาก่อสร้าง เนื่องจากปั๊ม canned motor กับเครื่องผลิตไอน้ำมีขนาดเล็กลง
	3.ออกแบบระบบป้องกันการรั่วของสารกัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม	•ลดปริมาณการฟุ้งกระจายของสารกัมมันตรังสี
	4.มีการระบายความร้อนภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	•ลดความร้อนและความดันภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์
2.เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเจ้าหน้าที่	5.นำระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการเดินเครื่อง	•ลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากเจ้าหน้าที่ •ลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่
3.ลดต้นทุนการผลิต	6.จัดแกนปฏิกรณ์ใหม่และปรับปรุงวัสดุสะท้อนนิวตรอน	•การใช้เชื้อเพลิงเป็นไปอย่างคุ้มค่า •ปริมาณนิวตรอนในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR

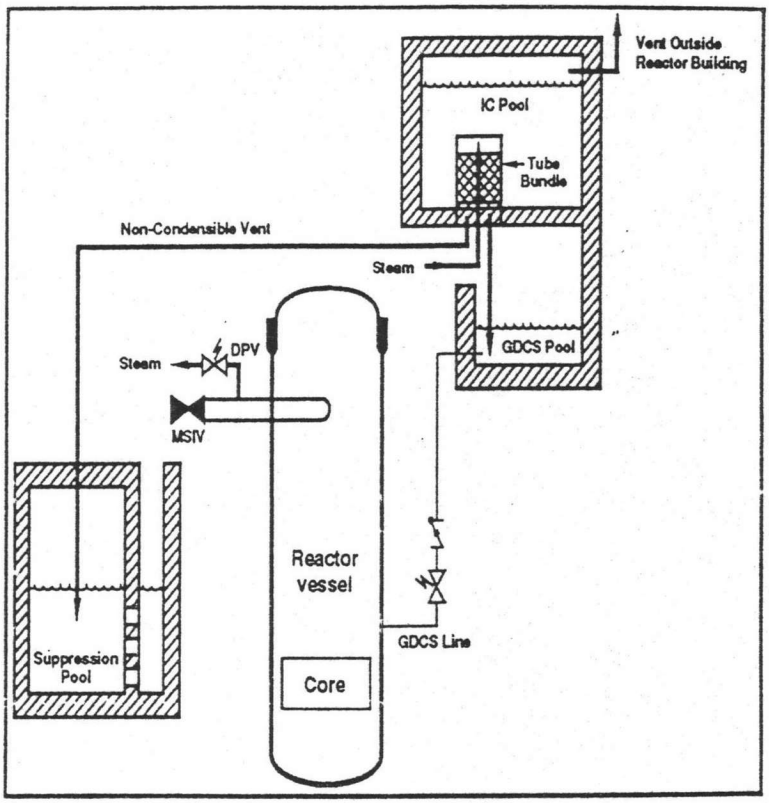
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ Simplified Boiling Water Reactor(SBWR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในเชิงพานิชย์ของบริษัท General Electric (GE) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รับการพัฒนาหลังจากกาพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR 4-5 ปี สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR มีขนาดกำลัง 600 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการออกแบบระบบความปลอดภัยธรรมชาติ เมื่อปีพ.ศ. 2536 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR ได้เสนอรายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัยต่อ US-NRC และคาดว่าจะได้รับใบอนุญาตให้ก่อสร้างได้ภายในปี พ.ศ. 2538[35]

3.1 วัตถุประสงค์

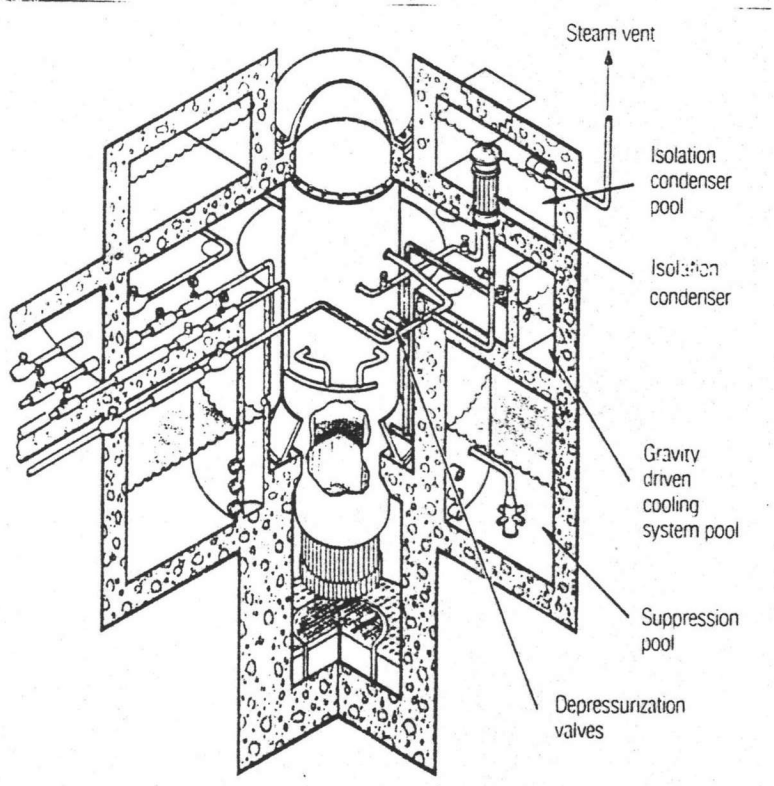
1. ออกแบบระบบความปลอดภัยธรรมชาติ
2. ปรับปรุงและพัฒนาจากเทคโนโลยีปัจจุบัน

3.2 แนวทางการพัฒนา

3.2.1 ออกแบบระบบความปลอดภัยธรรมชาติ ในการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR นั้น มีการชดเชยน้ำระบายความร้อนจากระบบต่าง ๆ 2 ระบบ ได้แก่ Gravity driving cooling และ Isolation condense ซึ่งทั้งสองระบบจะมีการไหลเวียนของน้ำโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก คือ เมื่อเกิดเหตุขัดข้องหรืออุบัติเหตุที่แกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนซึ่งทำให้แรงดันภายในถังปฏิกรณ์สูงขึ้นเนื่องจากน้ำเดือดอย่างรุนแรง แรงดันนั้นจะไปดันให้วาล์วของ depressurization เปิดออกเพื่อนำน้ำจาก gravity driven cooling system pool ไหลเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนี้ Safety Relief Valve (SRV) เปิดนำไอน้ำจากแกนปฏิกรณ์มาควบแน่นที่ Isolation condenser แล้วไหลเวียนกลับไประบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งการระบายความร้อนด้วยวิธีนี้ระบบความปลอดภัยสามารถควบคุมสถานการณ์ภายหลังการเกิดอุบัติเหตุได้นาน 3 วัน



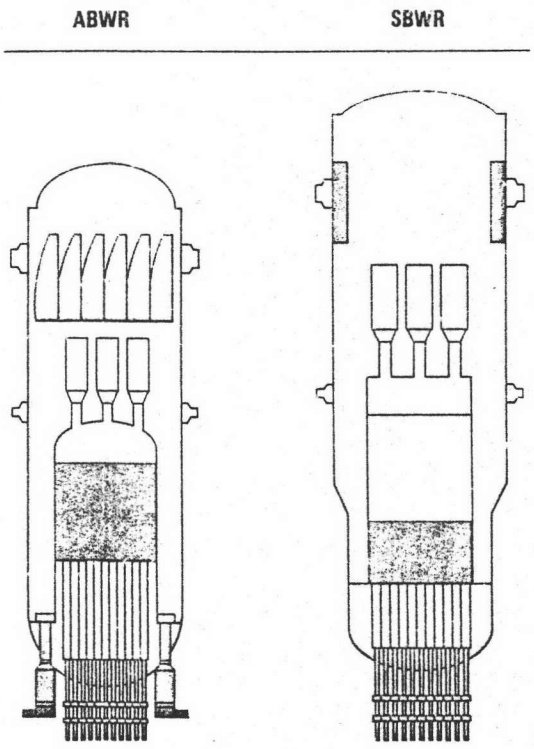
ก



ข

รูปที่ 3.19 (ก) การทำงานของระบบความปลอดภัยธรรมชาติ[49]
(ข) ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ[49]

3.2.2. ออกแบบถังปฏิกรณ์ใหม่ โดยให้มีขนาดใหญ่กว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR โดยมีความสูง 24 เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของช่วงล่างที่แกนปฏิกรณ์และช่วงบนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 6 และ 7 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR และ ABWR มีความสูง 22 และ21 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 และ7 เมตร ตามลำดับ และได้ออกแบบให้เครื่องทำให้ไอน้ำแห้งเป็นวงแหวนอยู่รอบๆ ผนังถังปฏิกรณ์ด้านบน ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.20 ขนาดถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR และ SBWR [49]

3.3 สรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตาราง 3.6 ดังนี้

ตารางที่ 3.6 สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
ใช้ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ	•ใช้ Gravity driving cooling และ Isolation condense	•ลดจำนวนปั๊ม •ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุเนื่องจากปั๊มไม่ทำงานในสภาวะฉุกเฉิน •ลดการตรวจสอบและซ่อมบำรุง •ระบบมีความเชื่อถือได้สูงเนื่องจากใช้แรงจากธรรมชาติ •ระบบความปลอดภัยทำงานโดยอัตโนมัติในสภาวะฉุกเฉิน และไม่สามารถปิดระบบฯออกจากการปฏิบัติงานได้
	•ออกแบบถังปฏิกรณ์ใหม่	•ทำให้น้ำที่อยู่เหนือแกนปฏิกรณ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณน้ำสำรองในสภาวะฉุกเฉิน ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน และช่วยเพิ่มความปลอดภัยในระหว่างการรอการทำงานของระบบความปลอดภัยธรรมชาติในขณะเกิดอุบัติเหตุ •เพิ่มพื้นที่ด้านบนแกนปฏิกรณ์ ทำให้การเปลี่ยนถ่ายแท่งเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสะดวกขึ้น

4. การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ได้รับการพัฒนาจากบริษัท Atomic Energy Canadian Limited (AECL) ประเทศแคนาดา โดยให้ชื่อเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังว่า CANDU-3 มีขนาดกำลัง 450 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า โดยพัฒนาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

4.1 วัตถุประสงค์

หลักในการพัฒนา CANDU-3 คือ การเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง โดยการนำหลักการป้องกันหลายชั้น (defense in depth) ในการออกแบบ การพัฒนาระบบความปลอดภัย เพื่อป้องกันหรือลดความรุนแรงของอุบัติเหตุ และการพัฒนาด้านการออกแบบ การก่อสร้าง การเพิ่มอายุการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อลดราคาต้นทุน

4.2 แนวทางการพัฒนา

4.2.1 การเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

1 การพัฒนาเครื่องวัดและอุปกรณ์การส่งข้อมูล : ในการควบคุมการเดินเครื่องปฏิกรณ์นั้น มีระบบเครื่องวัดเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆ ภายในแกนปฏิกรณ์ และส่งข้อมูลไปยังห้องควบคุมด้วยระบบส่งข้อมูล เจ้าหน้าที่เดินเครื่องจะนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์และทำการควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันให้ดำเนินไปอย่างปลอดภัย ดังนั้น ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความถูกต้องสูง เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจได้ CANDU-3 จึงได้พัฒนาระบบเครื่องวัดและการส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความถูกต้อง ซึ่งจะสามารถลดความผิดพลาดในการเดินเครื่องได้

2. พัฒนาการทำงานระหว่างเจ้าหน้าที่กับเครื่องจักร : CANDU-3 ออกแบบให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ เพื่อลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงาน ปรับปรุงสภาพแวดล้อมในสถานที่ที่ทำงานให้ทำงานได้สะดวก และภายในห้องควบคุมสามารถมองเห็นข้อมูลในแกนปฏิกรณ์จากจอคอมพิวเตอร์ได้ทุกด้าน มีการออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เพื่อง่ายต่อการ

ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ในการออกแบบยังได้คำนึงถึงการลดปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับซึ่งยึดหลัก ให้เจ้าหน้าที่ได้รับรังสีน้อยที่สุดในขณะปฏิบัติงาน (As Low As Resonably Achievable, ALARA) โดยมีการเพิ่มเครื่องกำบังรังสี เพิ่มพื้นที่การใช้งานและมีการแยกบริเวณการทำงานตามปริมาณรังสี เพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศ เพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของตริเตียม เป็นต้น

4.2.2. การป้องกันการเกิดอุบัติเหตุแกนเชื้อเพลิงหลอมละลาย

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 มีการออกแบบป้องกันการเกิดอุบัติเหตุเพิ่มจากระบบความปลอดภัยที่มีอยู่เดิม โดยการป้องกันสามารถแยกพิจารณาได้ 2 ประเด็น คือ ระบบการป้องกันไม่ให้แกนปฏิกรณ์หลอมละลาย โดยการออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพแก่ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ และหากเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมละลายจะสามารถควบคุมสถานการณ์ให้อยู่ภายในขอบเขตที่จำกัดได้โดยการออกแบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ให้มีความทนทานต่ออุณหภูมิและความดันในขณะเกิดอุบัติเหตุ

1. การพัฒนาระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ที่ใช้ในปัจจุบันได้ออกแบบให้ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิและระบบสารหน่วงนิวตรอนแยกจากกันโดยอิสระ ดังนั้น แม้ว่าหากเกิดอุบัติเหตุรุนแรงที่สุดคือ แกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน และระบบน้ำระบายความร้อนฉุกเฉินขัดข้อง แกนปฏิกรณ์จะยังคงมีสารหน่วงนิวตรอนซึ่งจะสามารถทำหน้าที่ระบายความความร้อนได้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 ยังคงใช้หลักการเดิมและได้เพิ่มระบบให้สารหน่วงนิวตรอนสามารถระบายความร้อนได้ในสภาวะฉุกเฉิน โดยความดันที่เพิ่มขึ้นในแกนปฏิกรณ์จะไปดันลูกบอลลูนของท่อความดันที่ติดอยู่กับถังคาแลนเดรียให้เปิดออกเพื่อนำระบบสารหน่วงนิวตรอนเข้าสู่ระบบระบายความร้อน นอกจากนี้ ได้มีการปรับปรุงระบบทำงานสารหน่วงนิวตรอนใหม่ เพื่อลดโอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย โดยการ

- การปรับปรุงการไหลเวียนของสารหน่วงนิวตรอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงนิวตรอน และลดโอกาสการเกิดอุณหภูมิสูงในสารหน่วงนิวตรอนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สารหน่วงนิวตรอนเดือดและระเหยไปได้
- เพิ่มความแข็งแรงให้ท่อคาแลนเดรีย เพื่อป้องกันมิให้ท่อความดันเกิดความเสียหาย และภายหลังอุบัติเหตุจะสามารถเก็บกักสารกัมมันตรังสีไว้ในท่อคาแลนเดรีย

2. การพัฒนาอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ แม้ว่า อัตราการเกิดอุบัติเหตุขั้นรุนแรงของเครื่องปฏิกรณ์จะน้อยมาก เนื่องจากมีระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉินทำงานอยู่ 2 ระบบ และมีการแยกระบบระบายความร้อนปฐมภูมิและระบบสารหน่วงนิวตรอนออกจากกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นหลักประกันในความปลอดภัย เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังจึงได้ออกแบบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อลดความรุนแรงหรือจำกัดขอบเขตของอุบัติเหตุไว้ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 ได้พัฒนาอาคารฯ ให้มีความทนทานต่อแรงดันสูง โดยการเพิ่ม carbon steel line ไว้ภายในโครงสร้างของคอนกรีต และมีระบบระบายความร้อนภายในอาคารฯ ซึ่งจะช่วยควบแน่นไอน้ำภายในอาคารและสามารถนำกลับไประบายความร้อนได้ในสภาวะฉุกเฉิน และทำให้ความดันในอาคารฯ ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวสามารถใช้ควบคุมสถานะการณ์หลังอุบัติเหตุได้

4.2.3 การลดต้นทุน

4.3.1 เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU 3 ได้นำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบ โดยการใช้โปรแกรม CANDID (Candu Integrated Design) ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรม 2 โปรแกรมคือ CADDS (Computer Aided Design and Drafting System) ซึ่งเป็นโปรแกรมสร้างภาพจำลอง 3 มิติ เพื่อให้สามารถออกแบบอุปกรณ์และวางแผนติดตั้งอุปกรณ์บนจอภาพคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงในความล่าช้าในขณะก่อสร้าง และโปรแกรม GPCR (General Purpose Computer Risk) เป็นฐานข้อมูลที่ใช้ประเมินผลและวิเคราะห์ความแข็งแรงทนทาน และความน่าเชื่อถือในด้านความปลอดภัยของอุปกรณ์และระบบ สำหรับโปรแกรม CANDID ใช้ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองในงานก่อสร้าง ทำให้สามารถแก้ปัญหาการก่อสร้างและวางแผนงานบนจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำให้ลดระยะเวลาในการก่อสร้างได้

4.3.2 การเพิ่มอายุการใช้งานโรงไฟฟ้า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 ออกแบบอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ โครงสร้าง ถังคาแลนเดรีย ระบบท่อส่งเครื่องกำเนิดไอน้ำ ใช้มีอายุการใช้งานได้ถึง 60 ปี ซึ่งแต่เดิมออกแบบใช้งานได้อย่างน้อย 30 ปี (ที่ปริมาณการใช้งานร้อยละ 90)

4.3.3 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน โดยการออกแบบให้มีพื้นที่การทำงานที่สะดวกทำให้ลดระยะเวลาในการซ่อมบำรุง ลดระยะเวลาในการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง

4.3. สรุป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 สามารถสรุปและแสดงผลการพัฒนาได้ในตารางที่ 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.7 สรุปผลการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3

วัตถุประสงค์	แนวทางการพัฒนา	ผล
1.เพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน	1.พัฒนาเครื่องวัดและอุปกรณ์การส่งข้อมูล 2.พัฒนาการทำงานระหว่างเจ้าหน้าที่กับเครื่องจักร	•ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสูง •ลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากเจ้าหน้าที่ •ลดความเมื่อยล้าของเจ้าหน้าที่
2.ป้องกันการเกิดอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย	3.พัฒนาระบบระบายความร้อนปฐมภูมิและอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์	•ลดโอกาสการเกิดแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน •สามารถกักเก็บสารกัมมันตรังสีไว้ภายในอาคารในกรณีเกิดอุบัติเหตุ
3.ลดต้นทุนการผลิต	4.เพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	•ลดระยะเวลาในการออกแบบ •สามารถแก้ปัญหาการก่อสร้างบนจอภาพคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้ลดความผิดพลาดและระยะเวลาในการก่อสร้าง •การวางแผนติดตั้งในภาพจำลอง 3 มิติ จะทำให้เกิดความสะดวกในการติดตั้ง การซ่อมบำรุงในระหว่างการทำงานจริง •สามารถสร้างภาพจำลองในการเกิดอุบัติเหตุ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ความแข็งแรงทนทานของเครื่องมืออุปกรณ์