บทที่ 4

วิเคราะห์เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ได้รับการพัฒนาทั้งหมด 3 รุ่น ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR แบบ SPWR และแบบ AP-600 ซึ่งรายละเอียดการพัฒนาสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ชนิดต่างๆ

	PWR	APWR	SYSTEM80+	SPWR	AP-600
Name	Tsuruga-2	None	None	None	None
MWe(net)	1150	1300	1300	600	600
MWt	3411	3839	3817	1825	1940
Fuel material	UO_2	UO_2	UO_2 or PuO_2	UO_2	UO_2
Cladding material	Zircaloy-4	Zircaloy-4	Zircaloy-4	-*	Zircaloy-4
Fuel geometry	17x17	19x19	16x16	15x15	17x17
Number of fuel assembies	193	193	241	157	145
Fuel pin outer diameter(mm)	8.19	10.3	9.7	-	9.5
Number of control rod cluster	53 black rods	69 black rods 28 gray rods 88 displacer rods	93 black rods	-	45 black rods 16 gray rods
Control material	Ag-In-Cd	black-B_4C/Ag-In-Cd, gray-stainless steel, displacer-zirconium	48 B_4C 20 Ag-In-Cd 25 Inconel625	Ag-In-Cd	black-Ag-In-Cd gray-stainless steel 304

* ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ชนิดต่างๆ

	PWR	APWR	SYSTEM80+	SPWR	AP-600
Control rod drive mechanism	Magnetic jack	black-magnetic jack gray-hydraulic	Magnetic jack	Magnetic jack	Magnetic jack
Reactor pressure vessel height/diameter (m)	12.9/4.39	16.4/5.1	15.3/4.6	-	11.59/4.39
Coolant inlet temp (°C)	289	292	292	290	276
Coolant outlet temp (°C)	325	327	324	325	312
Main coolant system pressure (MPa)	15.7	15.51	15.41	15.7	15.41
Containment	Prestressed concrete	Cylindrical steel	Spherical steel+concrete building	Concrete filled steel	Steel
Number of steam generator	4	4	2	2	2
Emergency core cooling system	2 train	2 train/4 subsystem	4 train	Passive+active	Passive

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้นคือ

1. การแยกระบบควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกจากระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน ดังเห็นได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR ได้ใช้แท่งควบคุมแบบ black rod ที่มีระบบการเคลื่อนที่แบบ magnetic jack เป็นระบบควบคุมการหยุดเดินเครื่อง และใช้ gray rod ที่มีระบบการเคลื่อนที่แบบ hydraulic เป็นระบบควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์ในสภาวะเดินเครื่องปกติ สำหรับในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP- 600 ก็ได้ใช้แท่งควบคุมแบบ gray rod ในการควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์เช่นเดียวกัน ซึ่งการแยกระบบควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์และระบบหยุดเดินเครื่องของแท่งควบคุมออกจากกันทำให้เพิ่มอายุการใช้งานและลดความสึกหรอของระบบเคลื่อนที่แท่งควบคุมจึงเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือแก่ระบบดังกล่าวมากขึ้น

2. ลดอัตราการเสี่ยงภัยในการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังเห็นได้ว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR และ System80+ มีขนาดถังปฏิกรณ์ใหญ่กว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ในขนาดกำลังที่ใกล้เคียงกันที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 ซึ่งมีขนาดกำลัง 600 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า แต่ได้ออกแบบให้มีขนาดถังปฏิกรณ์ใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR ที่มีขนาดกำลัง 1000 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ ทำให้ปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นและทำให้มีปริมาณน้ำระบายความร้อนมากขึ้น ดังนั้น จึงเป็นการลดอัตราการเสี่ยงภัยการเกิดแกนปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อน

3. ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินมีความเชื่อถือได้สูง เนื่องจากออกแบบให้มีการทำงานหลายระบบซ้ำกันและเป็นอิสระต่อกัน ดังเห็นได้จาก เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR ได้ออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน 2 ระบบหลัก และในแต่ละระบบหลักมีอีก 2 ระบบย่อยทำงานซ้ำกัน ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความมั่นใจในการทำงานของระบบดังกล่าว และสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System 80+ ได้ออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินมีถึง 4 ระบบด้วยกัน ส่วนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบขนาดกำลังต่ำ ได้ออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินแบบธรรมชาติ ซึ่งมีการทำงานแบบอัตโนมัติและใช้หลักธรรมชาติในการนำน้ำไประบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ทั้งในสภาวะฉุกเฉินและภายหลังการเกิดอุบัติเหตุ การทำงานในระบบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้สูงเนื่องจากไม่ต้องอาศัยปั๊ม ระบบจ่ายไฟภายนอกและนอกจากนี้การเปิดหรือปิดระบบฯ จะเป็นไปตามสภาวะของเครื่องในขณะนั้น ดังนั้นเจ้าหน้าที่จึงไม่สามารถตัดระบบความปลอดภัยออกไปจากการเดินเครื่องได้ทำให้การเดินเครื่องเป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR ได้ออกแบบให้ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินมีการทำงานทั้งแบบธรรมชาติและโดยเจ้าหน้าที่ โดยการนำจุดเด่นของแต่ละระบบมาใช้รวมกัน จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในอนาคตมีความเชื่อถือได้สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

4. อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากมีการเสริมเหล็กแข็งพิเศษในโครงสร้างอาคารคอนกรีตทำให้เพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความทนทานต่อความดันสูงที่เกิดในสภาวะฉุกเฉิน สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 ได้ใช้ผนังด้านในเป็นเหล็ก เพื่อสนับสนุนการหมุนเวียนแบบธรรมชาติของอากาศภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากผนังเหล็กเป็นตัวถ่ายเทความร้อนได้ดีทำให้อากาศร้อนภายในอาคารสามารถถ่ายเทความร้อนกับอากาศเย็นภายนอกอาคารที่ถูกเป่าเข้ามาได้ดีกว่ากว่าผนังคอนกรีต

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ได้รับการพัฒนาทั้งหมด 2 รุ่น ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR และแบบSBWR ซึ่งรายละเอียดการพัฒนาสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ชนิดต่างๆ

	BWR	ABWR	SBWR
Name	Tsuruga-1	None	None
MWe(net)	1100	1300	640
MWt	3293	3926	2000
Fuel material	UO_2	UO_2	UO_2
Cladding material	-	Zircaloy-2	Zircaloy-2
Fuel design	Low enriched	Low+high enriched	Low enriched
Fuel geometry	8x8	8x8 or 9x9	8x8 or 9x9
Number of fuel assembies	764	872	732
Fuel pin outer diameter(mm)	12.3	12.3	12.3
Number of control rod cluster	185	205	177

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ชนิดต่างๆ

	BWR	ABWR	SBWR
Control material	B_4C	B_4C	B_4C
Control rod drive machanism	Normal-hydraulic Scram-hydraulic	Normal-fine motion electric motor drive Scram-hydraulic	Normal-electric motor drive Scram-hydraulic
Primary containment	Free standing steel vessel	Reinforced concrete with line	Reinforced concrete
Emergency core cooling system	Div.I-LPCI+LPCS Div.II-LPCI+LPCI Div.III-HPCS ADS	Div.I-RCIC+LPFL(RHR) Div.II-HPCF+LPFL(RHR) Div.III-HPCF+LPFL(RHR) ADS	Passive
Residaul heat removal system	2 system	3 system	None
Coolant recirculation (number of pump)	External recirculating pump(2)+jet pump (24)	internal pump (10)	Natural circulation

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น คือ

1. ลดความซับซ้อนในระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง โดยการปรับปรุงระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR และ SBWR ให้มี 2 ระบบรวมกัน คือ ระบบการเคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง ซึ่งเป็นระบบที่มีการทำงานง่ายและไม่มีความซับซ้อน และระบบการเคลื่อนที่ด้วยไฮโดรลิกใช้ในการหยุดเดินเครื่อง นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ได้ออกแบบให้มีการใช้ internal pump แทน jet pump ซึ่งการทำงาน การตรวจสอบและการบำรุงรักษามีความซับซ้อนน้อย สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR ได้มีการออกแบบให้น้ำภายในแกนปฏิกรณ์มีการหมุนเวียนแบบธรรมชาติซึ่งเป็นการลดการใช้อุปกรณ์ต่างๆ จากการมุ่งเน้นออกแบบให้ระบบมีการทำงานซับซ้อนน้อยลงนี้ เพื่อให้เจ้าหน้าที่มีความสะดวกและสามารถเข้าใจระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์รวดเร็วและดียิ่งขึ้น

2. ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมมีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังเห็นได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR และ SBWR มีการออกแบบเพิ่มระบบการเคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ให้แก่แท่งควบคุม ซึ่งมีการทำงานง่ายและสามารถปรับอัตราเร็วต่างๆ ได้มากขึ้นจึงทำให้การเพิ่มหรือลดกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว

3. ลดอัตราการเสี่ยงภัยในการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลาย เนื่องจากลดความยาวท่อและลดจุดเชื่อมต่อของท่อน้ำ ดังจะเห็นได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR ใช้ปั๊มหมุนเวียนแบบ internal pump ซึ่งสามารถวางติดกับถังปฏิกรณ์จึงทำให้ลดท่อน้ำจากถังปฏิกรณ์สู่ปั๊มหมุนเวียน ซึ่งเป็นการลดโอกาสการเกิดท่อรั่วหรือแตกหัก สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR ออกแบบให้น้ำระบายความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์มีการหมุนเวียนแบบธรรมชาติจึงทำให้ไม่ใช้ท่อน้ำหรือปั๊มน้ำ ซึ่งทำให้โอกาสเกิดการรั่วของท่อน้ำหรือการขัดข้องของปั๊มไม่มี จากการออกแบบดังกล่าวทำให้อัตราการเสี่ยงภัยในการเกิดแกนปฏิกรณ์ไม่มีน้ำระบายความร้อนจึงมีค่าต่ำมาก

4. ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินมีความเชื่อถือได้สูง เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR มีการออกแบบให้มีระบบ HPCF และ LPFL ฉีดน้ำระบายความร้อนเข้าแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินขณะความดันสูงถึง 2 วงจร นอกจากนี้ภายหลังการเกิดอุบัติเหตุมีระบบ RCIC และ LPFL อีก 1 วงจร ที่จะนำน้ำหมุนเวียนระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์ ทั้งสามวงจรออกแบบให้ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบ residual heat removal ซึ่งมี 3 วงจรเช่นเดียวกัน น้ำระบายความร้อนในแกนปฏิกรณ์เมื่อผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วอุณหภูมิจะลดต่ำลงซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้เมื่อนำน้ำกลับเข้าไปหมุนเวียนใช้อีกครั้ง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR ใช้ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินแบบธรรมชาติ ซึ่งเป็นระบบที่ทำงานโดยอัตโนมัติและไม่ได้อาศัยปั๊มหรือระบบจ่ายไฟภายนอก จากการออกแบบดังกล่าวจึงทำให้ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินมีความน่าเชื่อถือสูง

5. เครื่องปฏิกรณ์มีความทนทานต่อแผ่นดินไหว เนื่องจากจุดศูนย์กลางมวลของถังปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR มีความเสถียรมากขึ้นจากการออกแบบใช้ internal pump ซึ่งเป็นปั๊มที่วางติดกับถังปฏิกรณ์ดังนั้นจึงลดขนาดฐานของถังปฏิกรณ์ นอกจากนี้ ทำให้สามารถออกแบบให้อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลงได้ซึ่งช่วยเสริมให้ทนทานต่อแผ่นดินไหวอีกทางหนึ่ง

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU ได้รับการพัฒนาทั้งหมด 1 รุ่น ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 ซึ่งรายละเอียดการพัฒนาสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU

	CANDU	CANDU-3
Name	CANDU-6	None
MWe(net)	900	450
MWt	3064	1440
Fuel material	Nat. UO_2	Nat. UO_2
Cladding material	Zircaloy	Zircaloy-4
Fuel geometry	37 pin	37 pin
Fuel bundel per channel	12	12
Number of fuel assembies	380	232
Control material	Cadmium	Cadmium
Number of control rods	28	24
Control rod mechnism	Mechanical(gravity and spring)	Mechanical(gravity and spring)
Coolant inlet temp. (°C)	279	268
Coolant outlet temp (°C)	310	310
Main coolant system pressure (MPa)	12.9	9.90
Number of steam generator	4	2
Containment	Prestressed concrete	Concrete with carbon steel line

เนื่องจาก เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU มีระบบการหน่วงนิวตรอนและระบบระบายความร้อนปฐมภูมิแยกจากกัน ซึ่งทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากหากขาดน้ำระบายความร้อนยังคงมีน้ำในระบบหน่วงนิวตรอนระบายความร้อนอีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU จึงมุ่งเน้นที่การคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการก่อสร้างและการลดระยะเวลาในการก่อสร้างโดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ทั้งการออกแบบและการแก้ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ด้านความปลอดภัยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 มีสูงขึ้นกว่าเดิมเนื่องจากการลดขนาดของกำลังทำให้ลดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้น ปริมาณน้ำและการควบคุมต่างๆ ที่คงเดิมจึงเพียงพอในการลดอัตราการเสี่ยงภัยในการเกิดแกนปฏิกรณ์หลอมละลายได้