



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมความปลอดภัย

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินและปรับปรุงความเสี่ยงโดยวิธีความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุแห่ง
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์หลอมละลายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1

Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Research Reactor (TRR-1/M1)
of Nuclear Fuel Meltdown Accident

นามผู้วิจัย นายสมเจตน์ สดประเสริฐ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ทิรยุทธ์ ชาณเศรษฐกุล, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประกอบ สุวัฒน์วรรณ, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์รัชฎะ เกียรติวัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์อนนต์ วงษ์เกษม, M.S.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 3 เดือน เมษายน พ.ศ. ๒549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินและปรับปรุงความเสี่ยงโดยวิธีความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิง
นิวเคลียร์หลอมละลายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1

Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Research Reactor (TRR-1/M1)
of Nuclear Fuel Meltdown Accident

โดย

นายสมเจตน์ สูดประเสริฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)
พ.ศ. 2549

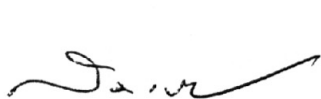
ISBN 974-16-1471-3

สมเจตน์ สดประเสริฐ 2549: การประเมินและปรับปรุงความเสี่ยงโดยวิธีความน่าจะเป็น
ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์หลอมละลายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย
ปว.1/1 ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย) สาขาวิชา
วิศวกรรมความปลอดภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา ภาชานกรรมการที่
ปริกษา: รองศาสตราจารย์พิรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D. 100 หน้า

ISBN 974-16-1471-3

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาค่าความเชื่อมั่นที่ระบบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย
ปว.1/1 จะทำงานตามหน้าที่ ซึ่งนับเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของการเดินเครื่อง
ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เช่น ระบบควบคุมปฏิกริยานิวเคลียร์ ระบบดับเครื่องปฏิกรณ์อัตโนมัติเมื่อมี
เหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น และระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ สามารถป้องกันการหลอม
ละลายของแท่งเชื้อเพลิงที่อยู่ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯได้เป็นอย่างดี ซึ่งทั้งหมดนี้จะช่วยให้
สามารถควบคุมเหตุผิดพลาดหรืออุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัยตลอดเวลาที่มีการเดิน
เครื่องใช้งาน ในการที่จะพิจารณาได้ว่าระบบต่างๆมีการออกแบบทางวิศวกรรมที่ดีเพียงใดนั้น
จำเป็นที่ต้องมีการประเมินความเสี่ยงอย่างเป็นระบบทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งวิธีการ
ประเมินความเสี่ยงด้วยการหาค่าความน่าจะเป็นนี้ สามารถแสดงระดับความเสี่ยงของเครื่อง
ปฏิกรณ์ฯและระบบอุปกรณ์ต่างๆที่มีความซับซ้อนนี้ด้วยค่าความน่าจะเป็นที่ชัดเจนและง่ายต่อ
การพิจารณาเปรียบเทียบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์ที่เป็น
จุดบกพร่องของเครื่องปฏิกรณ์ฯ และคงไว้ซึ่งระดับความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ต่อไป

ผลจากการวิจัยนี้พบว่า ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (Secondary Cooling System)
และระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องฉุกเฉิน (Emergency Core Cooling System) เป็นระบบ
ที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการทำงานสูงกว่าระบบอื่นๆ ทั้งนี้สาเหตุมาจากการออกแบบ
ระบบและอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม โดยมีค่าความเสี่ยงของระบบโดยรวมเท่ากับ 0.077 ซึ่งภายหลัง
จากการปรับปรุงระบบต่างๆ ที่เป็นปัญหาดังกล่าวแล้ว สามารถลดค่าความเสี่ยงของการเกิด
อุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายลงเหลือ 0.0225 โดยลดลงคิดเป็นร้อยละ 70.77



ลายมือชื่อนิติ



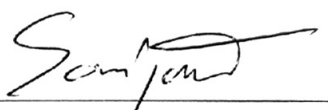
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

29 / 3 / 49

Somjait Sudprasert 2006: Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Research Reactor (TRR-1/M1) of Nuclear Fuel Meltdown Accident. Master of Engineering (Safety Engineering), Major Field: Safety Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Associate Professor Peerayuth Charnsethikul, Ph.D. 100 pages. ISBN 974-16-1471-3

The most importance for the safety of nuclear research reactor is to ensure that the safety system is reliable such as the control of nuclear reaction in the reactor, shutdown system when abnormal operation occurred and cooling system preventing the fuel melt in the reactor core. These effective and reliable safety systems can be utilized to control the incident and accident of the reactor. The engineering design for emergency and the risk analysis should be considered as the first priority for improvement at the reactor system. The objective of using the probabilistic risk assessment method is to calculate the risk of the reactor for the complex equipment and instrument system in the reactor. The result from the risk assessment can be used for improving the safety system and for the correction of the malfunction system. This method is beneficial for effective improvement and can maintain the safety system of the reactor.

The result of this research indicated that the Secondary Cooling System and the Emergency Core Cooling System (ECCS) are the weak point of the overall system needed to be improved. After the improvement, the failure probability of the reactor of the fuel meltdown accident has been decreased from 0.077 to 0.0225 which is approximately 70.77 percent.


Student's signature

 - 29 / 3 / 2006
Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิรุณ ชาญเศรษฐิกุล ประธานกรรมการ ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและคอยช่วยเหลือให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธัญญะ เกียรติวัฒน์ กรรมการวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกอบ สุรวฒนาวรรณ กรรมการวิชาเอก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณี พักกง ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ ดร. ปานจิต ฐานิพานิชกุลและเจ้าหน้าที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในทุกๆด้านอย่างดียิ่ง รวมทั้งภรรยาและลูกที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีหรือประโยชน์ทั้งหลายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณ บิดา มารดา คุณครูอาจารย์ และญาติมิตรทุกท่าน

สมเจตน์ สุดประเสริฐ

มีนาคม 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	6
อุปกรณ์	6
วิธีการ	6
ผลและวิจารณ์	10
ผล	10
วิจารณ์ผลการรวบรวมค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์	42
วิจารณ์ผลการคำนวณค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุฯ	55
วิจารณ์ผลการปรับปรุงค่าความเสี่ยง	70
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	74
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ	8
2	รายละเอียดการออกแบบค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ฯ	12
3	ค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบที่เกี่ยวข้อง	38
4	เหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆในระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน	44
5	ค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน	46
6	เหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ	48
7	ค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ	49
8	เหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	52
9	ค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	53
10	สรุปรายการอุปกรณ์ที่ต้องพิจารณาปรับปรุงจากผลการคำนวณค่าความสำคัญ	57
11	รายการระบบอุปกรณ์ที่ต้องดำเนินการปรับปรุง	59
12	แสดงวิธีการปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ	62
13	แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวหลังจากที่มีการปรับปรุงแล้ว	64
14	วิธีการปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	65
15	แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ในระบบ ECCS หลังการปรับปรุง	68

ตารางผนวกที่

ก1	คำที่ใช้ถามชี้แนะในการประเมินความเสี่ยงแบบ HAZOP	76
ข1	สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิต้นไม้ (Fault Tree Symbols)	81
ค1	แสดงความแตกต่างระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์	89
ง1	รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 4	95
ง2	รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 5	96
ง3	รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 6	98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1	11
2	แผนภาพระบบน้ำระบายความร้อนจากบ่อปฏิกรณ์ฯ	15
3	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	17
4	แผนภาพต้นไม้มุ่งความพิศพร่องของเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย	20
5	แผนภาพต้นไม้มุ่งความพิศพร่องของระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ	21
6	แผนภาพต้นไม้มุ่งความพิศพร่องของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	22
7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเหตุการณ์ P3	45
8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเหตุการณ์ P4	47
9	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการล้มเหลวระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	51
10	ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P4) หลังการปรับปรุง	63
11	ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (P2) หลังการปรับปรุง	67
ภาพผนวกที่		
ค1	ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ของ U-235	89
ค2	บ่อปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1	90
ค3	แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1	91

การประเมินและปรับปรุงความเสี่ยงโดยวิธีความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุแห่ง เชื้อเพลิงนิวเคลียร์หลอมละลายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1

Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Research Reactor (TRR-1/M1) of Nuclear Fuel Meltdown Accident

คำนำ

เทคโนโลยีนิวเคลียร์ เป็นเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งได้มีการพัฒนาและนำมาใช้ประโยชน์เป็น เวลาหลายสิบปีแล้ว นับเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศเข้าสู่ยุค อุตสาหกรรม อาทิเช่น เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น แต่ปัญหาของการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้า มาใช้ประโยชน์ของประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลายรวมทั้งประเทศไทย ที่สำคัญประการหนึ่งก็คือ การขาดความรู้ความเข้าใจอย่างถ่องแท้ ในเรื่องของความเสี่ยงที่แฝงมากับเทคโนโลยีนิวเคลียร์ จึงทำให้ไม่สามารถออกแบบมาตรการป้องกันได้อย่างเหมาะสม นำไปสู่โอกาสที่จะเกิดอันตราย ร้ายแรงขึ้นได้ ดังเช่น การเกิดอุบัติเหตุของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิล ประเทศรัสเซีย ในปี พ.ศ. 2526 ซึ่งนำไปสู่การฟุ้งกระจายของสารรังสีในหลายๆประเทศในยุโรป สร้างความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินอย่างรุนแรง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 เป็นเครื่องมือหนึ่ง ที่ช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยี นิวเคลียร์ของไทย ซึ่งประกอบไปด้วยระบบต่างๆที่เชื่อมโยงกันเป็นจำนวนมาก ทำให้การค้นหา เพื่อระบุว่าอุปกรณ์ใดบ้างที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยรวมของเครื่องปฏิกรณ์ฯมาน้อยกว่ากัน เป็นไปได้ด้วยความยุ่งยาก ดังนั้น จึงต้องมีการประเมินความเสี่ยงเพื่อทบทวนว่าการซ่อมบำรุง ระบบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ตามคู่มือการซ่อมบำรุงที่มีนั้น เพียงพอหรือไม่ที่จะรักษาระดับความ น่าเชื่อถือของระบบอุปกรณ์ว่าจะทำงานตามหน้าที่ตลอดเวลาที่มีการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฯ

เพื่อให้การเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีความปลอดภัยตามมาตรฐาน วิธีการประเมินความเสี่ยง ด้วยการหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุรุนแรงสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้กับเครื่อง ปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย จึงน่าจะเป็นทางออกที่ดีในการชี้บ่งถึงสถานะหรือสภาพของเครื่องปฏิกรณ์ฯ และระบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ให้อยู่ในรูปเชิงปริมาณ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการ

และระยะเวลาซ่อมบำรุงที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ทำให้การเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ มีความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน

ปัญหาของงานวิจัย

การออกแบบป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น ไม่ว่าจะจากการออกแบบระบบตัวเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือจากการเสื่อมสภาพของระบบอุปกรณ์ต่างๆ หลังจากที่ได้มีการใช้งานมาแล้วระยะหนึ่งก็ตาม จำเป็นต้องมีการประเมินความเสี่ยงของระบบอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อหาจุดบกพร่องในตัวระบบที่อาจนำไปสู่อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ ซึ่งหากอยู่ในช่วงของการประเมินก่อนการก่อสร้าง การประเมินความเสี่ยงก็จะช่วยให้สามารถระบุได้ว่ามีอุปกรณ์หรือระบบใดบ้างที่ต้องปรับปรุงแก้ไขให้สมบูรณ์ ก่อนที่จะมีการลงมือก่อสร้าง หรือเพื่อแก้ไขปรับปรุงเพื่อคงไว้ซึ่งมาตรฐานด้านความปลอดภัย สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ได้มีการก่อสร้างไปแล้วและกำลังเดินเครื่องใช้งาน รวมทั้งเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีอายุการใช้งานมากๆ ก็จำเป็นต้องได้รับการประเมินความเสี่ยงเป็นระยะๆ ด้วยเช่นกัน เพื่อให้สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสมกับอายุการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์ฯ นั้นๆ

ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการประเมินความเสี่ยงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติต่อการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 นี้ เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดกำลัง 2 MW (Thermal) ที่มีหลักการทำงานเดียวกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยการประยุกต์ใช้วิธีการของความน่าจะเป็น (Probabilistic Methodology) เข้ามาใช้ในการประเมิน ซึ่งวิธีนี้ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่า สามารถนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ สามารถแสดงถึงภาพรวมขององค์ประกอบต่างๆ ที่ส่งผลต่อระบบความปลอดภัยของโรงงานนิวเคลียร์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และเป็นเครื่องมือประกอบการพิจารณาวางแผนการซ่อมบำรุงและปรับปรุงระบบอุปกรณ์ ให้มีความน่าเชื่อถือสูงขึ้นและลดโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ซึ่งเป็นสมมติฐานการเกิดอุบัติเหตุที่รุนแรงที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Worst Case Scenario) โดยพิจารณาเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ที่นำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุนี้

ซึ่งผลจากการประเมิน ทำให้สามารถระบุจุดวิกฤตในระบบที่เกี่ยวข้องต่อการเกิดเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจปรับปรุงหรือเพิ่มเติมระบบอุปกรณ์ เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวลง ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ต่อไป

การตรวจเอกสาร

Park *et al.* (2003) ได้นำเทคนิคการประเมินด้วยวิธีความน่าจะเป็น (Probabilistic Risk Assessment) นี้ มาประยุกต์ใช้ในการประเมินอันตรายจากการก่อการร้ายในบริเวณพื้นที่ต่างๆ ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของประเทศสาธารณรัฐเกาหลีใต้ โดยทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบรักษาความปลอดภัยของระบบป้องกันอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ซึ่งผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถกำหนดบริเวณพื้นที่ที่มีความสำคัญต่อระบบรักษาความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถวางมาตรการป้องกันการก่อการร้ายต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวางระเบิดในบริเวณที่สำคัญๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด (A PSA-based vital area identification methodology, Journal of Reliability Engineering & System Safety)

Neto *et al.* (2001) ได้เข้าร่วมกันจัดทำฐานข้อมูลความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ต่างๆ ที่สำคัญต่อความปลอดภัย (Failure Data) สำหรับโรงงานทั่วไปและโรงงานนิวเคลียร์ รวมทั้งได้ประยุกต์ใช้วิธีการ PSA ในการวิเคราะห์อันตรายจากการเกิดเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นในโรงงานนิวเคลียร์ (Fire Hazard Analysis) อีกทั้งยังทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกรองอากาศ (Filtration System) และประสิทธิภาพของระบบป้องกันการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีของอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Containment) ออกสู่ภายนอก (Nuclear Engineering Center Report)

Kvam and Miller (2002) ได้วิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือในอนาคตของตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Predictive Analysis) เพื่อนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี PSA ให้มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวนมาก วิธีการที่นำมาใช้ในการพยากรณ์ก็คือ การสร้างแบบจำลองทางสถิติที่มีการกระจายของตัวแปรสุ่มแบบ Poisson และ Binomial เข้ามาใช้ในการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีแนวโน้มการกระจายของค่าความน่าเชื่อถือในรูปแบบเดียวกันได้เป็นอย่างดี (Discrete Predictive Analysis in Probabilistic Safety Assessment, Journal of Quality Technology)

Babar *et al.* (1985) ได้นำวิธีการของ PSA เข้ามาใช้ในการประเมินความเสี่ยงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Pressurized Heavy Water Reactor ในกรณีของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ร่วมกับการจัดทำแบบจำลองการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีจาก

อุบัติเหตุที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้ Event Tree และ Fault Tree อีกทั้งวิเคราะห์ค่า Failure Data โดยใช้เทคนิคของ Bayesian เพื่อให้ค่าที่ได้ มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น
(Probabilistic Risk Assessment Methodology Application to Indian Pressurized Heavy Water Reactors, IAEA-SR-111/5)

Cassidy *et al.* (1985) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงในกรณีการเกิดเพลิงไหม้ในพื้นที่ต่างๆ ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยใช้วิธีการทาง PRA (Probabilistic Risk Assessment) ในการประเมินโอกาสที่อาจเกิดขึ้น ความรุนแรงของเพลิงไหม้ และผลกระทบที่มีต่อระบบรักษาความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งการประเมินประกอบไปด้วยทั้งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ จะเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในส่วนของการพิจารณาระบบตัวระบบและอุปกรณ์ที่สำคัญต่อความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ฯ และพิจารณาถึงสาเหตุของการเกิดเพลิงไหม้ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งหมด ส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณนั้นจะใช้ในการประมาณค่าโอกาสการเกิดเพลิงไหม้และโอกาสที่อุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ไม่ทำงานออกมาเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงรวมต่อไป (Fire Analysis Probabilistic Risk Assessment Methodology, IAEA-SR-111/15)

Berger (1985) ได้ทำการศึกษาค่าความน่าจะเป็น (Probabilistic Study) ระบบอุปกรณ์ต่างๆ ในช่วงการออกแบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ของประเทศฝรั่งเศส โดยเน้นป้องกันการขัดข้องของระบบจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่อาจส่งผลกระทบต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ โดยพิจารณากรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมด ด้วยแผนภูมิเหตุการณ์ (Event Tree) จากนั้นจึงหาค่าโอกาสที่ระบบต่างๆ ในอยู่ในแผนภูมิจะไม่ทำงาน โดยตั้งเป้าหมายให้อโอกาสของการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องอยู่ที่ 10^{-7} ครั้งต่อปี ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในระดับสากล
(Contribution of Probabilistic Studies to the French Nuclear Power Plant' s Design, IAEA-SR-111/29)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์

ชนิด Intel Pentium Mobile CPU 1.3 GHz 128 MB of RAM

2. เครื่องพิมพ์

ชนิด Laser Jet

3. เครื่องสแกนเนอร์

4. โปรแกรมสำเร็จรูป

4.1 Microsoft Office 2003

4.2 SAPHIRE

วิธีการ

1. รวบรวมข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอุปกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1

ดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องอุปกรณ์ฯ จากเอกสารต่างๆ ที่ได้จาก โครงการพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์และอุปกรณ์ปฏิบัติ (คท.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการเดินเครื่องใช้งานเครื่องอุปกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 และเอกสารจากสำนักกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (สน.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการกำกับดูแลความปลอดภัย

โรงงานนิวเคลียร์ โดยหน่วยงานทั้งสองอยู่ในสังกัดของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

2. สร้างแผนภาพต้นไม้แห่งความผิดพลาดของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย

จากข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
สามารถนำมาพัฒนาแผนภาพต้นไม้ของการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวได้ โดยอาศัยหลักการสร้าง
แผนภาพต้นไม้ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

3. รวบรวมค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ในแผนภาพต้นไม้ฯ จากฐานข้อมูลต่างๆ

ทำการเก็บรวบรวมค่าโอกาสการล้มเหลว (Failure probability) ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ
ทุกระบบที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ตามลักษณะของการใช้งานของอุปกรณ์
นั้นๆ ซึ่งลักษณะของการล้มเหลว (Failure mode) ก็จะแตกต่างกันไป โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลมี
ทั้งหมด 3 วิธี เรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย ดังนี้คือ

3.1 ประวัติการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว.1/1

3.2 ข้อมูลจากเครื่องปฏิกรณ์วิจัยอื่นๆ (PSA Project, IAEA)

3.3 ข้อมูลจากการศึกษา PRA ของสหรัฐอเมริกา (Reactor Safety Study, WASH-1400)

ขั้นตอนนี้เน้นว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อความถูกต้องของการประเมินความเสี่ยง ซึ่ง
จะมีผลต่อความน่าเชื่อถือของการประเมินโดยรวมอีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ค่าโอกาสการล้มเหลว
ของอุปกรณ์จากฐานข้อมูลใดนั้น ต้องมีการพิจารณาให้มีความเหมาะสมสูงสุด โดยจะต้องพิจารณา
ถึงองค์ประกอบต่างๆ คือ ประเภทหรือชนิดของอุปกรณ์ ขนาดหรืออัตรากำลังของอุปกรณ์นั้นๆ
และลักษณะการล้มเหลว (Failure mode) ซึ่งจากการศึกษา PSA ของทบวงการพลังงานปรมาณู
ระหว่างประเทศ (IAEA) ได้จำแนกลักษณะการล้มเหลวและรหัสย่อทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ (Component failure mode)

Failure mode code	Failure mode
B	Degrade
C	Failure to change position
D	Failure to remain position
E	Failure to close
O	Failure to open
F	Failure to function
G	Short to ground
H	Short circuit
I	Open circuit
Q	Plugged
K	Spurious function
R	Failure to run
S	Failure to start
X	Other critical faults
Y	Leakage
J	Rupture
M	Control rod fail

ที่มา: IAEA (TechDoc.930, 1997)

4. คำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุ

โดยการสร้างสมการ Boolean เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุแห่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ตามรูปแบบความสัมพันธ์ของระบบและอุปกรณ์ในแผนภาพต้นไม้ฯ จากนั้นจึงแทนค่าความน่าจะเป็นของอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะเกิดการล้มเหลว (Failure Probability) ในการทำงานตามหน้าที่ลงในสมการ เพื่อคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดอุบัติเหตุแห่งเชื้อเพลิงหลอมละลายต่อไป

5. ศึกษาวิธีปรับปรุงระบบและคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่ระบบจะล้มเหลว หลังการปรับปรุง

ทำการศึกษาจากเอกสารและข้อมูลที่ได้รับจากการฝึกอบรมหลักสูตร Basic Probabilistic Risk Assessment for Regulatory body (US-NRC, 2005) สามารถนำหลักการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ด้วยวิธีการหาค่าความสำคัญ (Importance Measure) มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาระบบหรืออุปกรณ์ที่มีผลต่อการล้มเหลวของระบบโดยรวมมากที่สุด จากนั้นจึงหาวิธีที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (Reliability Engineering) และความเป็นไปได้ในเชิงปฏิบัติ เพื่อออกแบบวิธีการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์ย่อยๆ ที่มีค่าโอกาสการล้มเหลวสูงทั้งหมด จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดอุบัติเหตุอีกครั้งหนึ่ง เพื่อตรวจสอบว่าสามารถลดค่าความเสี่ยงลงจากเดิมได้อย่างคุ้มค่าเพียงไร หากจะดำเนินการปรับปรุงระบบอย่างเป็นรูปธรรมในอนาคต

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1

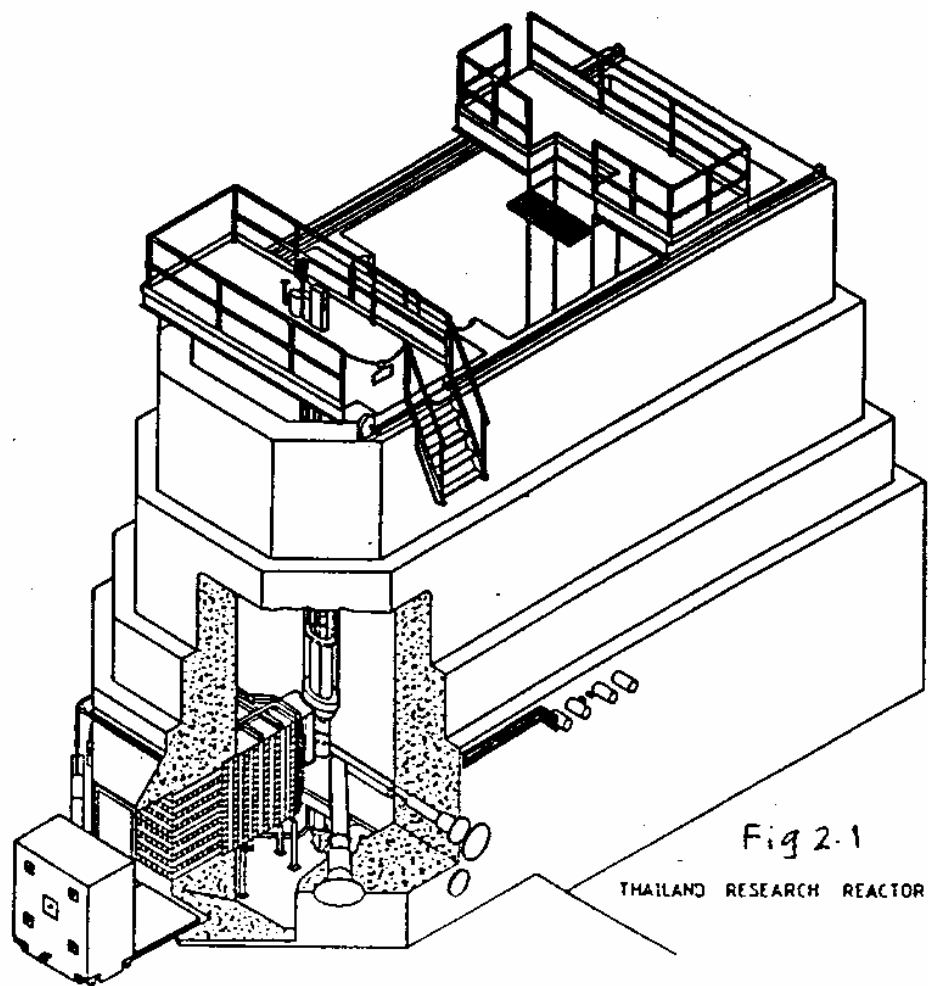
ได้ทำการรวบรวมเอกสารทางเทคนิคเครื่องปฏิกรณ์ฯ ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- บันทึกการเดินเครื่อง (Operation Log Book)
- บันทึกการซ่อมบำรุง (Maintenance Log Book)
- Technical Specification of TRR-1/M1
- TRR-1/M1 System Description
- เอกสารประกอบการฝึกอบรมเจ้าหน้าที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ
- รายงานการตรวจสอบความปลอดภัยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย TRR-1/M1

(พ.ศ. 2537-2548)

ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลต่างๆ ทั้งจากเอกสารต่างๆ ดังกล่าวและการสอบถามข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ของหน่วยงานเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ (คท.) จึงสามารถสรุปข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ได้ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบสระน้ำ (Pool type reactor) รุ่น TRIGA Mark-III ออกแบบและผลิตโดยบริษัท General Atomic (GA) แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Reactor Core) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมความเข้มข้นต่ำ (Low Enrich Uranium, 20% U-235) แบบแท่ง (Rod type) สามารถเดินเครื่องที่ระดับกำลังสูงสุด 2 เมกกะวัตต์ ซึ่งแต่เดิมแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ใช้เชื้อเพลิงแบบแผ่น (Plate type) ของบริษัท Curtiss-Wright ที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมความเข้มข้นสูง (High enrich uranium, 90% U-235) ต่อมาได้มีการดัดแปลงแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นชนิด TRIGA ในภายหลัง ดังมีรายละเอียดทางเทคนิคต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ในตารางที่ 1 โดยยังคงใช้ระบบสนับสนุนอื่นๆ ตามเดิม อาทิเช่น ระบบระบายความร้อน (Cooling system) และระบบถ่ายเทอากาศ (Ventilation System) เป็นต้น ซึ่งระบบต่างๆ ติดตั้งอยู่ภายในอาคารเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Building) ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีโครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ฯ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของบ่อและเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1
ที่มา: ยุทธพงษ์ (2532)

ลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์ฯ	ค่าตัวแปร
Reactor Type	TRIGA Mark III
Maximum Steady-State Power Level	2,000 kW (thermal)
Maximum Pulse	2.1% $\delta k/k$ (\$3.00)
Fuel Element Design	
Fuel-moderator material	U-ZrH _{1.6}
Uranium content	8.5 wt-%
Uranium enrichment	20%U-235
Shape	
Length of fuel	Cylindrical
Diameter of fuel	38 cm (15 in.) overall
Cladding material	3.63 cm (1.43 in.) OD
Cladding thickness	Type 304 SS 0.051 cm (0.020 in.)
Number of fuel elements	100 (Nominal)
Excess Reactivity, max	6.3% $\delta k/k$ (cold, clean)
Number of control rods	
Safety-transient	1
Regulating	1
Shim	1
Safety	2
Total Reactivity Worth of Rods	10.12 % $\delta k/k$
Reactor Cooling	Natural convection of pool water

ซึ่งระบบต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้ ดังต่อไปนี้

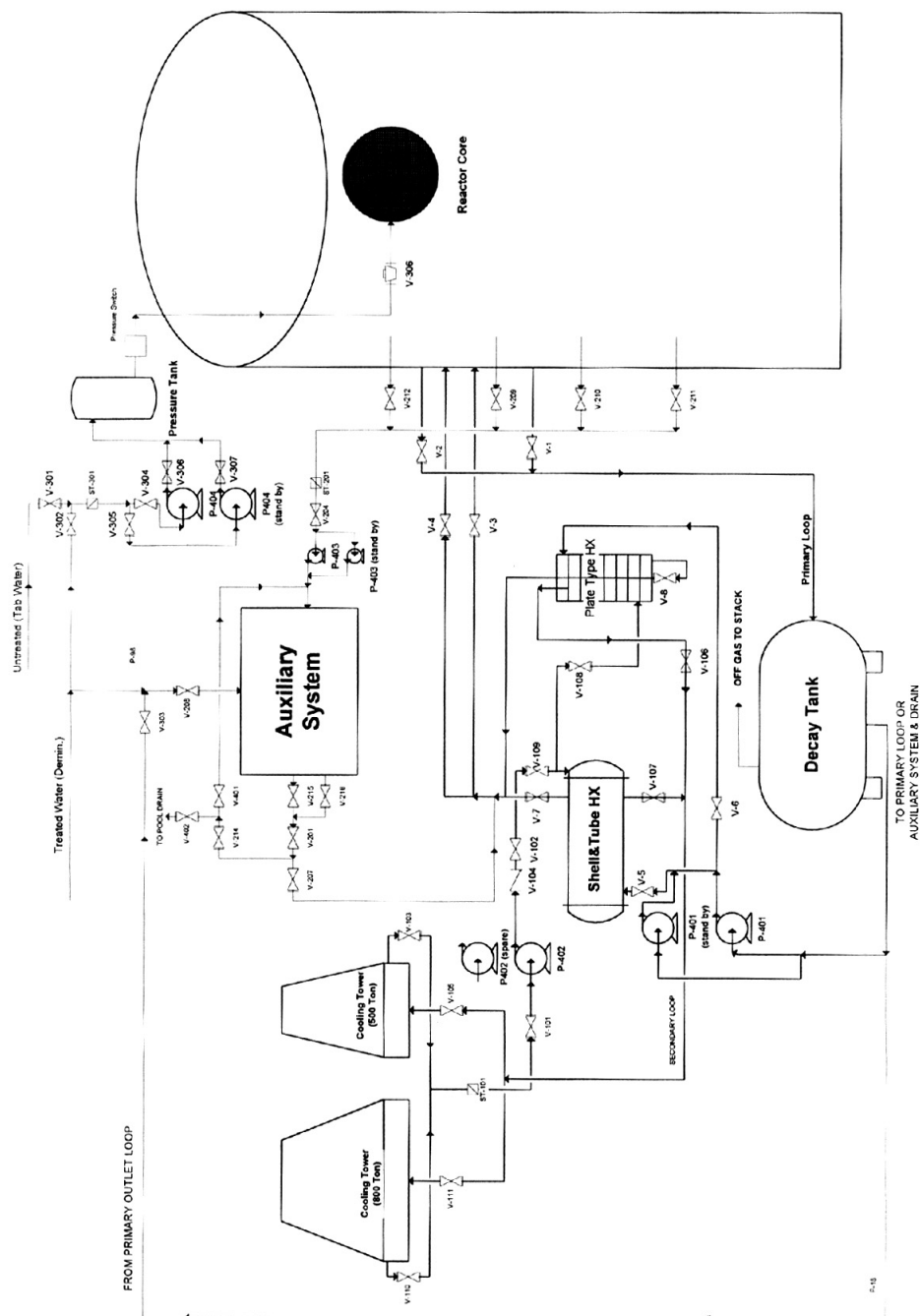
1.1 ระบบควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Reactor Control System)

ใช้แผงวงจรควบคุมแบบ Logic ที่ติดตั้งอยู่ใน Console ควบคุมการเดินเครื่อง ซึ่งวงจรนี้จะได้รับสัญญาณต่างๆ อาทิเช่น ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง ตำแหน่งของแท่งควบคุม ฯลฯ จากนั้นจึงประมวลผลจากข้อมูลต่างๆ อีกครั้งหนึ่ง ในการควบคุม ปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ นั้น จะใช้แท่งควบคุม (Control Rod) แบบ Fuel Follower จำนวน 5 แท่ง ที่ทำจากสารซึ่งมีคุณสมบัติดูดจับนิวตรอนที่ดี ก็คือ โบรอนคาร์ไบด์ โดยแท่งควบคุมจะเคลื่อนที่ขึ้นลงภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ด้วยกลไกมอเตอร์ไฟฟ้า (Control Rod Drive Mechanism) ที่ติดตั้งบนสะพานโครงสร้างแกนปฏิกรณ์ฯ เพื่อควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ฯ ให้มีระดับกำลังที่ต้องการ รวมทั้งดับเครื่องปฏิกรณ์ฯลงในสภาวะการเดินเครื่องปกติและในสภาวะฉุกเฉิน ด้วยวงจร SCRAM Logic ที่จะปล่อยแท่งควบคุมทั้งหมดลงสู่แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯในทันทีเมื่อได้รับสัญญาณตามเงื่อนไขที่วงจร Logic ได้วางไว้

1.2 ระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Cooling System)

การระบายความร้อนจากแกนปฏิกรณ์ฯ จะใช้น้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านการปรับสภาพ (Demineralized water) เพื่อแยกแร่ธาตุที่อาจทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วกลายเป็นสารกัมมันตรังสีปะปนในระบบน้ำหล่อเย็น รวมทั้งปรับสภาวะกรดด่างที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนต่อโลหะที่เป็นโครงสร้างของแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯและแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งน้ำบริสุทธิ์นี้จะบรรจุอยู่ในบ่อน้ำที่ติดตั้งแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯไว้กั้นบ่อ นอกจากหน้าที่ในการระบายความร้อนจากแกนเครื่องแล้ว ยังช่วยในการป้องกันอันตรายจากรังสีแก่ผู้ที่ปฏิบัติงานโดยรอบบ่อปฏิกรณ์ฯอีกด้วย การหมุนเวียนของน้ำระบายความร้อนในบ่อปฏิกรณ์ฯ จะเป็นรูปแบบตามธรรมชาติ (Natural convection) คือ เมื่อน้ำในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะลอยขึ้นด้านบน น้ำเย็นที่อยู่ใต้แกนเครื่องก็จะเข้ามาแทนที่หมุนเวียนกันเช่นนี้ตลอดเวลาที่มีการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ การหมุนเวียนของน้ำในลักษณะเช่นนี้มีข้อดีก็คือ แม้ว่ากระแสไฟฟ้าดับ น้ำภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯก็ยังคงหมุนเวียนระบายความร้อนได้ตลอดเวลา แต่ระบบนี้ก็เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่มีระดับกำลังต่ำๆ เช่นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเท่านั้น ส่วนน้ำภายในบ่อที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะถูกออกไปยังระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (Secondary Cooling System) เพื่อส่งผ่านไปยังอุปกรณ์

แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ส่วนน้ำในระบบทุติยภูมิก็จะระบายออกสู่บรรยากาศที่บริเวณหอระบายความร้อน (Cooling tower) ดังมีแผนภาพแสดงการทำงานของระบบดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพระบบน้ำระบายความร้อนจากปฏิกิริยา

1.3 ระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ฉุกเฉิน (Emergency Core Cooling System)

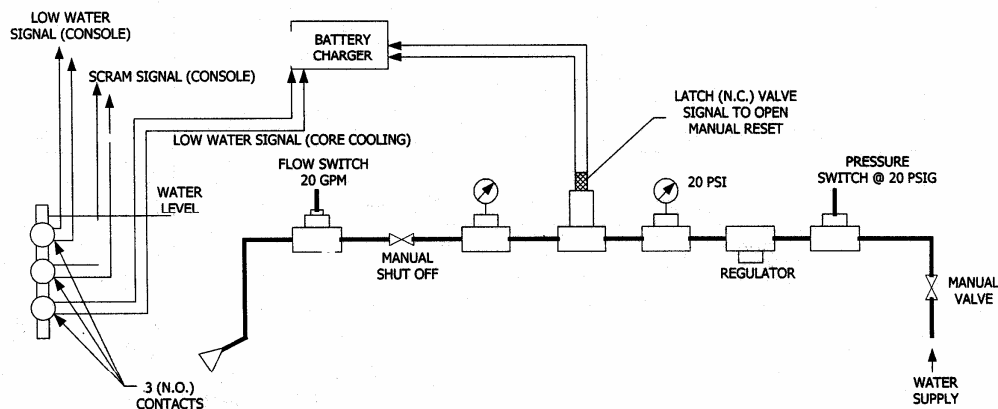
เป็นระบบที่ทำหน้าที่ระบายพลังงานความร้อนสะสม (Residual heat) ออกจากแกนปฏิกรณ์ในกรณีน้ำในบ่อปฏิกรณ์มีระดับลดลงกะทันหัน ซึ่งเป็นการป้องกันแท่งเชื้อเพลิงเสียหาย โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อระดับน้ำในบ่อปฏิกรณ์ลดลงต่ำกว่า 16 ฟุตจากระดับปกติ สวิทช์ลูกลอย (Floating Valve) จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปเปิด Solenoid Valve ที่ติดตั้งบริเวณข้างบ่อปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้น้ำที่อัดอยู่ในถังแรงดันสูงไหลไปยังหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่เหนือแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อฉีดน้ำระบายความร้อนเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ ด้วยอัตราการไหล 20 แกลลอนต่อนาที เป็นเวลาอย่างน้อย 4.2 ชั่วโมง ดังแผนภาพการทำงานของระบบในภาพที่ 3

1.4 ระบบระบายอากาศ (Ventilation System)

เครื่องปฏิกรณ์ฯ ติดตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เรียกว่าบริเวณกักอากาศ (Gas Tight Area, GTA) ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะต้องมีการจัดระบบระบายอากาศอย่างเหมาะสม มีหลักการทำงานคือ อากาศภายนอกจะถูกป้อนเข้าสู่บริเวณภายในบริเวณกักอากาศทาง Damper ในขณะที่เดียวกันอากาศที่อยู่ภายในบริเวณกักอากาศจะถูกดูดระบายออกทาง Automatic shutoff damper ผ่าน HEPA filter ก่อนออกสู่บรรยากาศภายนอกอาคารปฏิกรณ์โดยผ่านปล่อง โดยอากาศที่ถูกดูดระบายออกมีปริมาณมากกว่าอากาศที่ดูดเข้าจึงทำให้ความดันบรรยากาศภายในบริเวณกักอากาศมีค่าเป็นลบ (Negative Pressure)

1.5 ระบบฟอลดออบรังสี (Irradiate Pneumatic System)

เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งสารตัวอย่างเข้าไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่ออบรังสีนิวตรอนด้วยระบบลม มีหลักการทำงานคือ ใช้แรงดันลมส่งสารตัวอย่างเข้าไปในแกนปฏิกรณ์เพื่อทำการอบรังสีแล้วปล่อยลมดังกล่าวออกสู่บรรยากาศภายนอกอาคารปฏิกรณ์โดยผ่านทางปล่องของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งจะผ่าน HEPA filter เมื่ออบรังสีเพียงพอแล้วจะใช้ลมดูดสารตัวอย่างดังกล่าวออกมาโดยปล่อยลมที่ใช้ดูดส่วนหนึ่งออกทางปล่องและ HEPA filter เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (ECCS)

ที่มา: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (2548)

2. แผนภาพต้นไม้ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย

งานวิจัยนี้ ได้กำหนดขอบเขตของอุบัติเหตุจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่รุนแรงที่สุด (Worst case scenario) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ ก็คือ การเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย (Fuel Meltdown) จากสาเหตุการล้มเหลวของระบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง โดยทั้งนี้จะไม่รวมถึงสาเหตุจากความผิดพลาดของคน (Human Error) และสาเหตุจากภายนอก (External Event) อาทิเช่น ภัยธรรมชาติ การก่อการร้าย เป็นต้น ดังนั้น ในการพัฒนาแผนภาพต้นไม้ จึงกำหนดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายนี้ เป็นเหตุการณ์บนสุด (Top event) ของแผนภาพต้นไม้ และพิจารณาการล้มเหลวของระบบอุปกรณ์ต่างๆที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุต่อไป

ดังนั้น ในการประเมินความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายนี้ จึงจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและนำไปสู่การเกิดเหตุการณ์บนสุดนี้ และจากผลของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระบบต่างๆนี้ สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างระบบอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องโดยแสดงอยู่ในรูปของแผนภาพต้นไม้แห่งความผิดพลาด (Fault tree) ดังภาพที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในแผนภาพ ตามตารางผนวกที่ 1

2.1 ระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย

ซึ่งจากการพิจารณาแผนภาพต้นไม้มันของเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายนี้ จะเห็นได้ว่ามีระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหากเกิดการล้มเหลวก็อาจนำไปสู่เหตุการณ์ดังกล่าว ดังต่อไปนี้

2.1.1 ระบบระบายความร้อนจากบ่อปฏิกรณ์ฯ (Main Cooling System)

ก. ระบบหมุนเวียนน้ำจากบ่อปฏิกรณ์ฯ (Water Circulating System)

1) ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ (Primary Cooling System)

ทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำจากบ่อปฏิกรณ์ฯ ที่มีความร้อนประมาณ 38 องศาเซลเซียส ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อถ่ายเทความร้อนจากน้ำภายในบ่อปฏิกรณ์ฯ กับน้ำจากระบบทุติยภูมิ (Secondary loop) ทำให้น้ำในระบบปฐมภูมิที่ออกมาจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อน มีอุณหภูมิลดลงประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูบกลับเข้าไปในบ่อปฏิกรณ์ฯ ส่วนน้ำจากระบบทุติยภูมิที่ออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและสูบกลับไปยังหอระบายความร้อน (Cooling tower) ที่อยู่ภายนอกอาคารเครื่องปฏิกรณ์ฯ เพื่อระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศต่อไป

2) ระบบสนับสนุนการระบายความร้อน (Auxiliary System)

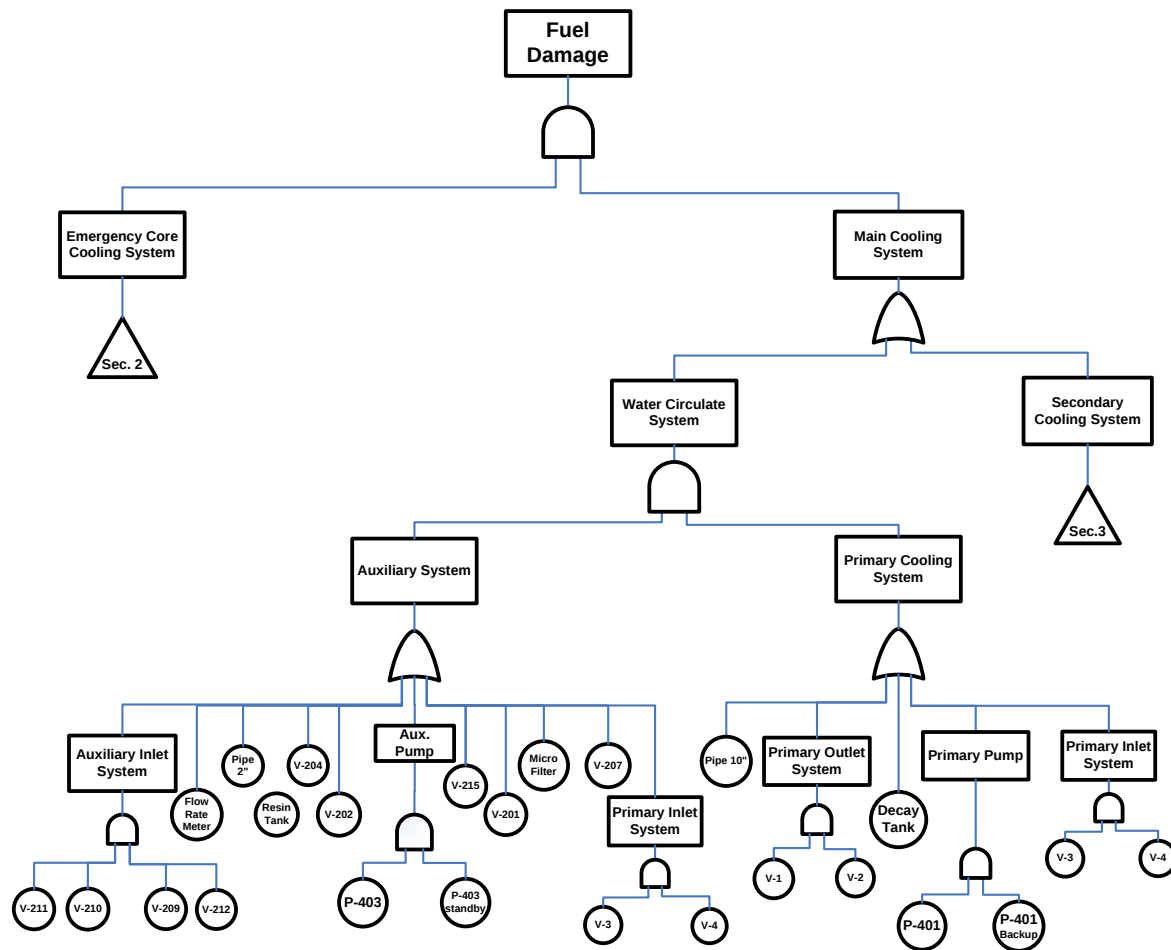
เป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการสนับสนุนการทำงานของระบบระบายความร้อนจากบ่อปฏิกรณ์ฯ ไปยังระบบแลกเปลี่ยนความร้อน โดยระบบนี้จะทำปรับสภาพทางเคมีและทำความสะอาดน้ำภายในบ่อให้มีความบริสุทธิ์ ด้วยการดักจับฝุ่นละอองด้วย Filter และดักจับสารรังสีต่างๆ ที่อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของนิวตรอนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์กับแร่ธาตุต่างๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำ ด้วยสารเรซินที่บรรจุในถังเรซิน (Resin Tank)

ข. ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (Secondary Cooling System)

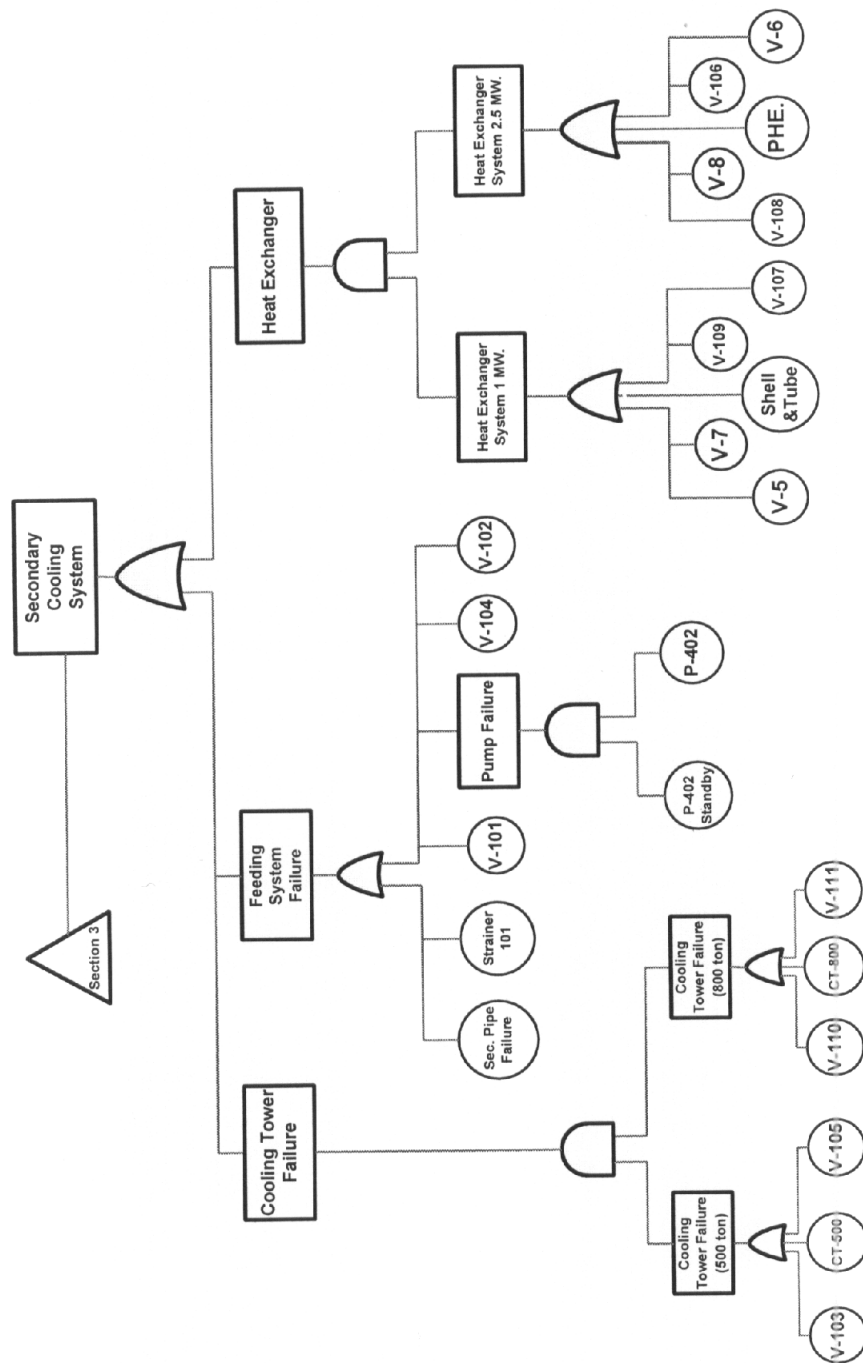
ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ ออกสู่บรรยากาศภายนอก ดังมีอุปกรณ์ประกอบภายในระบบนี้ ดังแสดงในแผนภาพที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆ ที่แสดงในภาพที่ 5 ตามตารางผนวก ง2

2.1.2 ระบบระบายความร้อนแกนเครื่องปฏิกรณ์ฉุกเฉิน (Emergency Core Cooling System)

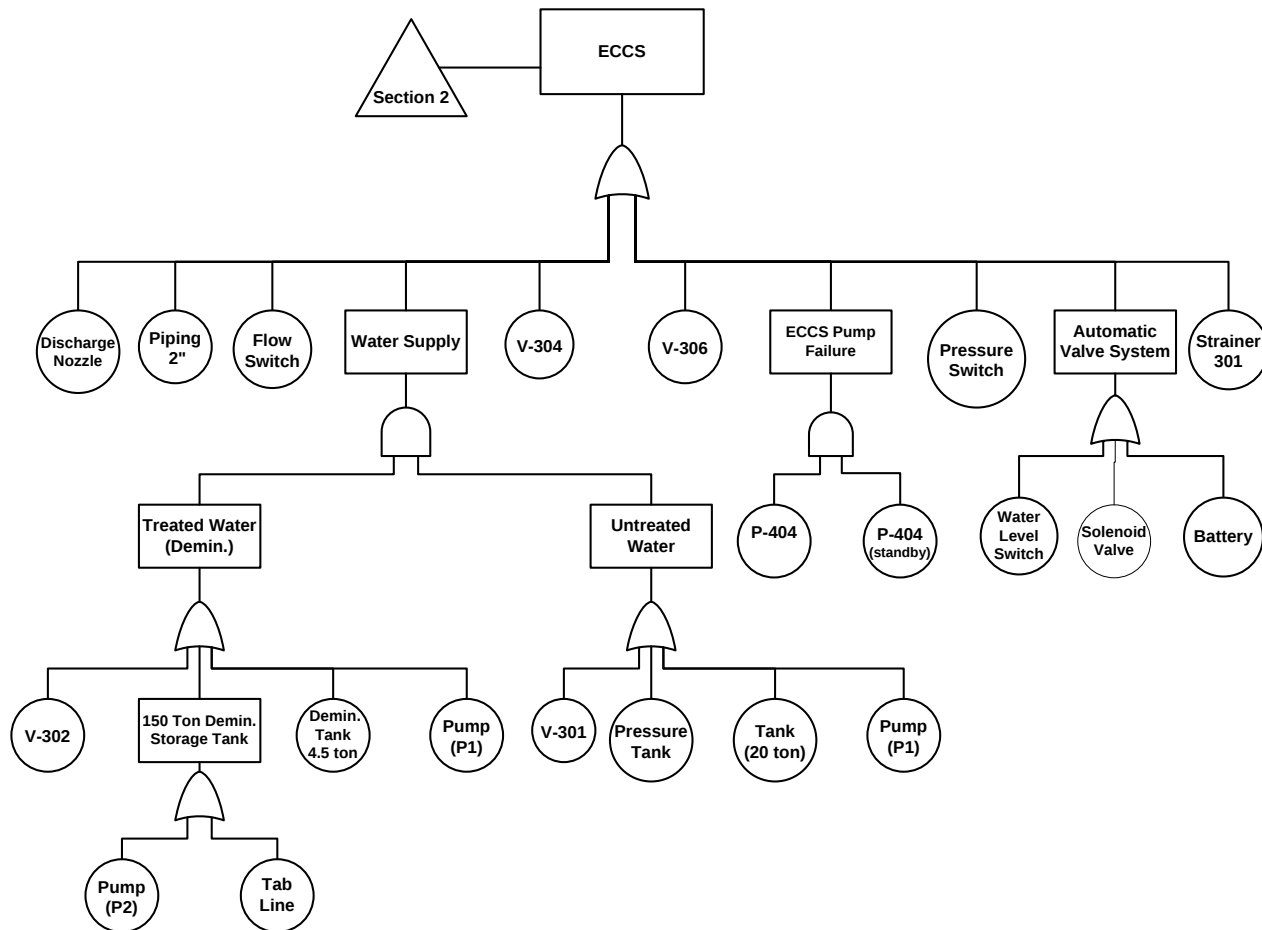
ระบบ ECCS นี้จะทำงานเมื่อระดับน้ำภายในบ่อปฏิกรณ์ลดลงต่ำกว่าระดับปกติ 16 ฟุต เมื่อระดับน้ำลดลงถึงระดับที่กำหนดสวิทช์ระดับน้ำ (Water level switch) จะส่งสัญญาณไปที่วาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า (Solenoid valve) เพื่อเปิดให้น้ำที่อัดอยู่ในถังความดัน (Pressure Tank) ไหลมายังหัวฉีด ทำการฉีดน้ำโดยตรงไปที่แกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อระบายความร้อนที่สะสมในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Residual heat) ด้วยอัตราการฉีด 20 แกลลอนต่ออนาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 4.2 ชั่วโมง เพื่อป้องกันแท่งเชื้อเพลิงและแกนเครื่องปฏิกรณ์เกิดความเสียหาย ซึ่งการเชื่อมโยงของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการล้มเหลวระบบ ECCS นี้ เป็นไปดังภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 6 ตามตารางผนวก 3



ภาพที่ 4 แผนภาพต้นไม้แห่งความผิดพลาดของการเกิดเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย



ภาพที่ 5 แผนภาพต้นไม้แห่งความคิดของระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ



ภาพที่ 6 แผนภาพต้นไม้แห่งความผิดพลาดของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

3. ค่าโอกาสการล้มเหลว (Failure probability) ของอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้ การคัดเลือกค่าโอกาสการล้มเหลวที่จะนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงจะพิจารณาเลือกจากฐานข้อมูล ที่มีความใกล้เคียงกับอุปกรณ์ในระบบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 มากที่สุด ตามองค์ประกอบข้างต้น ซึ่งสามารถหาค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในแต่ละระบบที่ปรากฏอยู่ในภาพที่ 4 ดังต่อไปนี้

3.1. ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ (Primary Cooling System)

3.1.1 วาล์วมือหมุน (Manual Valve)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	13.5E-6/h	5% , 2.4E-6/h	-
			95%, 32E-6/h	-
WASH-1400	D	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d	3
	J	1.0E-8/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	D:วาล์วน้ำไม่คงอยู่ที่ตำแหน่งเปิด	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d 95%,3.0E-4/d	3
เหตุผล เนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณากรณีกรณีแกนเครื่องปฏิกรณ์ขาดน้ำระบายความร้อนเป็นหลัก ดังนั้นลักษณะการล้มเหลวที่นำไปสู่การเกิดเหตุการณ์นี้ก็คือการที่วาล์วน้ำไม่อยู่ในตำแหน่งเปิด (D) ทำให้น้ำระบายความร้อนไม่สามารถไหลไปที่แกนเครื่องปฏิกรณ์ได้				

3.1.2 ถังพักสารรังสี (Decay Tank)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	
<u>เหตุผล</u> เนื่องจากพิจารณากรณีที่ถึงเกิดการแตกจนทำให้น้ำภายในถังไหลออกเป็นจำนวนมาก พบว่ามีเพียงฐานข้อมูลของ IAEA เท่านั้นที่มีค่าการล้มเหลวนี้อยู่ จึงพิจารณาเลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลนี้				

3.1.3 ปั๊มน้ำรวมมอเตอร์ขับเคลื่อน (Water Pump with Motor Driven)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	- -
WASH-1400	R;Failure to Run	3.0E-5/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	
<u>เหตุผล</u> จากลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การไม่สามารถสูบน้ำได้ ซึ่งจากฐานข้อมูลที่มีอยู่พบว่าค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลของ IAEA เนื่องจากมีความทันสมัยและเก็บค่าสถิติจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเหมือนกัน				

3.1.4 ท่อน้ำขนาด 10 นิ้ว

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Y	15.3E-6/h	5%=7.3/95%=36.3	-
WASH-1400	Q, J	1.0E-10/h	-	30
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q, J	1.0E-10/h	-	30
เหตุผล เนื่องจากกรณีที่น่าจะระบายความร้อนไม่สามารถไหลเวียนในระบบจนกระทั่งไม่สามารถระบายความร้อนได้ ท่อน้ำต้องเกิดการอุดตันหรือแตก ดังนั้นฐานข้อมูลที่มีลักษณะการล้มเหลวที่พิจารณา (Q or J) ก็คือจาก WASH-1400 จึงเลือกใช้ค่าอัตราการล้มเหลวจากฐานข้อมูลนี้				

3.2 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำระบายความร้อน (Auxiliary cooling system)

3.2.1 ถังกรองสารรังสี (Resin Tank)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	
WASH-1400				
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	
เหตุผล เนื่องจากพิจารณากรณีที่ถังเกิดการแตกจนทำให้น้ำภายในถังไหลออกจากระบบเป็นจำนวนมาก พบว่ามีเพียงฐานข้อมูลของ IAEA เท่านั้นที่มีค่าการล้มเหลวนี้อยู่ จึงพิจารณาเลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลนี้				

3.2.2 ปั๊มน้ำรวมมอเตอร์ขับเคลื่อน (Water Pump with Motor Driven)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	- -
WASH-1400	R;Failure to Run	3.0E-5/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	
เหตุผล จากลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การไม่สามารถสูบน้ำได้อย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ พบว่าค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลของ IAEA เนื่องจากมีความทันสมัยและเก็บค่าสถิติจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเหมือนกัน				

3.2.3 เครื่องกรองแบบละเอียด (Micro Filter)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Q	7.1E-6/h	5% = 4.0E-6/h 95%= 1.1E-5/h	
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q	7.1E-6/h	5% = 4.0E-6/h 95%= 1.1E-5/h	
เหตุผล เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลที่ทันสมัยและเก็บจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเช่นเดียวกัน โดยลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การอุดตัน				

3.2.4 วาล์วมือหมุน (Manual Valve)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	13.5E-6/h	5% , 2.4E-6/h	-
			95%, 32E-6/h	-
WASH-1400	D	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d	3
	J	1.0E-8/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	D	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d 95%,3.0E-4/d	3
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูล WASH มีข้อมูลของลักษณะการล้มเหลวที่นำไปสู่การขาดน้ำระบายความร้อน คือการที่วาล์วน้ำอยู่ในตำแหน่งไม่คงที่ตำแหน่งเปิด (D) ทำให้น้ำระบายความร้อนไม่สามารถไหลไปที่แกนเครื่องปฏิกรณ์ได้				

3.2.5 ท่อน้ำขนาด 2 ½ นิ้ว

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA				
WASH-1400	Q , J	1.0E-9/h	-	30
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q , J	1.0E-9/h	-	30
เหตุผล เนื่องจากกรณีที่น้ำระบายความร้อนไม่สามารถไหลเวียนในระบบจนกระทั่งไม่สามารถระบายความร้อนได้ ท่อน้ำต้องเกิดการอุดตันหรือแตก ดังนั้นฐานข้อมูลที่มีลักษณะการล้มเหลวที่พิจารณา (Q or J) ก็คือ WASH-1400 จึงพิจารณาเลือกใช้ค่าอัตราการล้มเหลวจากฐานข้อมูลนี้				

3.2.6 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Rate Meter)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	-	-	-	-
WASH-1400	Q	3E-4/day	-	3
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q	3E-4/day	-	3
เหตุผล เป็นฐานข้อมูลที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์นี้ในลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือการอุดตัน				

3.3 ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (Secondary Cooling System)

3.3.1 วาล์วมือหมุน (Manual Valve)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	13.5E-6/h	5% , 2.4E-6/h 95%, 32E-6/h	- -
WASH-1400	D	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d 95%,3.0E-4/d	3
	J	1.0E-8/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	D	1.0E-4/d	5%,3.0E-5/d 95%,3.0E-4/d	3
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูล WASH-1400 มีข้อมูลของลักษณะการล้มเหลวที่นำไปสู่การขาดน้ำระบายความร้อน คือการที่วาล์วน้ำไม่ค้างอยู่ที่ตำแหน่งเปิด (D) ทำให้น้ำระบายความร้อนไม่สามารถไหลไปที่แกนเครื่องปฏิกรณ์ได้				

3.3.2 ปั๊มน้ำรวมมอเตอร์ขับเคลื่อน (Water Pump with Motor Driven)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Failure to Run, R	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	- -
WASH-1400	Failure to Run, R	3.0E-5/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Failure to Run, R	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	-
เหตุผล จากลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การไม่สามารถสูบน้ำได้ ซึ่งจากฐานข้อมูลที่มีอยู่พบว่าค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลของ IAEA เนื่องจากมีความทันสมัยและเก็บค่าสถิติจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเหมือนกัน				

3.3.3 หอระบายความร้อน (Cooling Tower)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	O	2.84E-5/h	5% = 9.7E-6/h 95%= 5.5E-5/h	-
WASH-1400	-	-	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	O	2.84E-5/h	5% = 9.7E-6/h 95%= 5.5E-5/h	-
เหตุผล เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลเดียวที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ชนิดนี้				

3.3.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell และ Tube (Shell and Tube Heat Exchanger)

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีลักษณะท่อแนวนอน มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 1 เมกกะวัตต์

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	1.44E-4/h	5% = 9.69E-5 95% = 2.0E-4	-
WASH-1400	-	-	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	1.44E-4/h	5% = 9.69E-5 95% = 2.0E-4	
เหตุผล เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลเดียวที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ชนิดนี้				

3.3.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate type Heat Exchanger)

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 3.5 เมกกะวัตต์

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	1.07E-5/h	5% = 4.2E-6/h 95% = 1.95E-5/h	-
WASH-1400	F	3.0E-6/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	1.07E-5/h	5% = 4.2E-6/h 95% = 1.95E-5/h	-
เหตุผล จากลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การไม่สามารถทำงานตามหน้าที่ได้ ซึ่งจากฐานข้อมูลที่มีอยู่พบว่าค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เลือกใช้ค่าจากฐานข้อมูลของ IAEA เนื่องจากมีค่าอัตราการล้มเหลวสูงกว่า (Conservative) และเก็บค่าสถิติจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเหมือนกัน				

3.3.6 อุปกรณ์การกรอง (Strainer)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Q	7.1E-6/h	5% = 4.0E-6/h 95% = 1.1E-5/h	-
WASH-1400	Q	3.0E-5/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณ	Q	3.0E-5/h	-	10
<u>เหตุผล</u> เลือกใช้ค่าอัตราการล้มเหลวจากฐานข้อมูล WASH-1400 เนื่องจากมาจากการเก็บข้อมูลจากหลายแหล่งกว่า ทั้งจากโรงงานนิวเคลียร์และโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ				

3.3.7 ท่อน้ำขนาด 10 นิ้ว

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Y	15.3E-6/h	5%=7.3/95%=36.3	-
WASH-1400	Q, J	1.0E-10/h	-	30
ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณ	Q, J	1.0E-10/h	-	30
<u>เหตุผล</u> เนื่องจากสนใจกรณีที่ก่อให้เกิดการอุดตันหรือแตก จนน้ำในระบบไม่สามารถหมุนเวียนได้				

3.4 ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (Emergency Core Cooling System)

3.4.1 ปั๊มน้ำรวมมอเตอร์ขับเคลื่อน (Water Pump with Motor Driven)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	S: Failure to start	2.75E-5/h	5% = 16.2 95%= 45.2	- -
WASH-1400	S: Failure to start	8.0E-6/h	-	1.4
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	S: Failure to start	2.75E-5/h	5% = 16.2 95%= 45.2	-
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูลของ IAEA มีค่าอัตราการล้มเหลวที่ทันสมัยกว่าและเป็นข้อมูลจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเช่นเดียวกัน ซึ่งปั๊มน้ำของระบบนี้ จะสนใจกรณีการไม่ทำงานในเวลาที่ต้องการ				

3.4.2 ถังน้ำ (Water Tank)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	-
WASH-1400	-	-	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	J	1.0E-6/h	5% = 0 95%=4.4E-6/h	-
เหตุผล เนื่องจาก IAEA เป็นฐานข้อมูลเดียวที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ชนิดนี้				

3.4.3 ถังน้ำแบบอัดแรงดัน (Pressure Tank)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการ ล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาด เคลื่อน (Error Factor)
IAEA	Y	1.5E-6/h	5% = 1.0E-7/h 95% = 4.4E-6/h	-
WASH-1400	J	2.7E-8/h	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	J	2.7E-8/h	-	-
<u>เหตุผล</u> เนื่องจากลักษณะการล้มเหลวที่สนใจคือ การแตกของถังความดัน (J) เพราะจะมีผลทำให้น้ำในระบบไม่สามารถไหลไปยังแกนเครื่องปฏิกรณ์ได้				

3.4.4 สวิตช์ระดับน้ำ (Water Level Switch)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาด เคลื่อน (Error Factor)
IAEA	E	4.5E-6/h	5% = 8.0E-5/h 95% = 1.07E-5/h	-
IEEE-500	K	1.6E-6/h	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	E	4.5E-6/h	5% = 8.0E-5/h 95% = 1.07E-5/h	-
<u>เหตุผล</u> เนื่องจากลักษณะการล้มเหลว E (Failure to close) ส่งผลให้ระบบ ECCS ทั้งระบบไม่ทำงาน เพราะไม่ได้รับสัญญาณ				

3.4.5 แบตเตอรี่ (Battery)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	10.1E-6/h	5%=8.6/95%=11.7	-
WASH-1400	F	3E-6/h	-	3
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	10.1E-6/h	5%=8.6/95%=11.7	
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูลของ IAEA มีค่าอัตราการล้มเหลวสูงกว่า (Conservative)				

3.4.6 หัวฉีดน้ำสู่แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Discharge Nozzle)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	-	-	-	-
WASH-1400	Q	1.8E-5/h	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q	1.8E-5/h	-	-
เหตุผล เนื่องจาก WASH-1400 เป็นฐานข้อมูลเดียวที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ชนิดนี้				

3.4.7 สวิตช์วัดการไหล (Flow switch)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	-	-	-	-
WASH-1400	F	9.8E-7/h	-	-
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	9.8E-7/h	-	-
เหตุผล เนื่องจาก WASH-1400 เป็นฐานข้อมูลเดียวที่มีค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ชนิดนี้				

3.4.8 ท่อน้ำขนาด 2 ½ นิ้ว

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	-	-	-	-
WASH-1400	Q , J	1.0E-9/h	-	30
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	Q , J	1.0E-9/h	-	30
เหตุผล เนื่องจากกรณีที่น้ำระบายความร้อนไม่สามารถไหลเวียนในระบบจนกระทั่งไม่สามารถระบายความร้อนได้ ท่อน้ำต้องเกิดการอุดตันหรือแตก ดังนั้นฐานข้อมูลที่มีลักษณะการล้มเหลวที่พิจารณา (Q or J) ก็คือ WASH-1400 จึงเลือกใช้ค่าอัตราการล้มเหลวจากฐานข้อมูลนี้				

3.4.9 วาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า (Solenoid Valve)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	4.5E-6/h	5%=1.8/95%=4.2	-
WASH-1400	F	1.0E-3/d	-	3
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	1.0E-3/d	-	3
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูลของ WASH-1400 มีค่าอัตราการล้มเหลวสูงกว่า (Conservative)				

3.4.10 สวิตช์แรงดัน (Pressure Switch)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	F	9.0E-6/h	5%=1.6/95%=21.4	-
WASH-1400	F	1.0E-4/h	-	3
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	F	1.0E-4/h	-	3
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูลของ WASH-1400 มีค่าอัตราการล้มเหลวสูงกว่า (Conservative)				

3.4.11 ปั๊มน้ำรวมมอเตอร์ขับเคลื่อน (Water Pump with Motor Driven)

แหล่งข้อมูล (Data Source)	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	ค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate)	ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)	ค่าความคลาดเคลื่อน (Error Factor)
IAEA	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	- -
WASH-1400	R;Failure to Run	3.0E-5/h	-	10
ค่าที่นำมาใช้ ในการคำนวณ	R;Failure to Run	3.18E-5/h	5% = 1.93E-4/h 95%= 4.24E-4/h	
เหตุผล เนื่องจากฐานข้อมูลของ IAEA มีค่าอัตราการล้มเหลวสูงกว่า (Conservative)				

ซึ่งจากการเก็บประวัติการเดินเครื่องในปี พ.ศ. 2548 พบว่า มีการเดินเครื่องอุปกรณ์ที่ใช้
งานทั้งสิ้น 221 วัน โดยเดินเครื่องเฉลี่ยวันละ 10 ชั่วโมง คิดเป็นการเดินเครื่องตลอดทั้งปีคิดเป็น
จำนวนชั่วโมงทั้งสิ้น 2210 ชั่วโมง

จากสูตรคำนวณค่าโอกาสการล้มเหลว

$$P(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

โดย t = ช่วงเวลาที่พิจารณา
 μ = ค่าอัตราการล้มเหลว

และในกรณีที่ $\mu t \leq 0.1$
จะได้ $P(t) \cong \mu t$

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะพิจารณาในช่วงระยะเวลา 1 ปี ดังนั้น หากค่าอัตราการล้มเหลว
ของอุปกรณ์ใดมีหน่วยเป็นครั้งต่อวัน ก็จะแทนค่า t เท่ากับ 221 แต่หากมีหน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง ก็
จะแทนค่า t เท่ากับ 2210 ในสมการเพื่อหาค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นๆต่อไป

จากการรวบรวมค่าอัตราการล้มเหลว (Failure Rate) ของอุปกรณ์ทั้งหมดของระบบต่างๆที่
เกี่ยวข้อง สามารถคำนวณและสรุปค่าโอกาสการล้มเหลว (Failure Probability) ของอุปกรณ์แต่ละ
ตัวที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงเสียหาย (Top Event)
ต่อไป ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบที่เกี่ยวข้อง

Component	Failure Mode	Failure rate	Failure Probability ($P(t) = \mu t$)	Error Factor	Source of Data
Water Circulation System					
1. Manual Operated Valve (V209)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
2. Manual Operated Valve (V210)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
3. Manual Operated Valve (V211)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
4. Manual Operated Valve (V212)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
5. Flow Meter	Q	3E-4/d	6.63E-2	3	
6. Piping Auxiliary	Q,J	1.0E-9/h	2.21E-6	30	WASH-1400
7. Resin Tank	J	1.0E-6/h	2.21E-3		IAEA
8. Manual Operated Valve (V204)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
9. Manual Operated Valve (V202)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
10. Auxiliary Pump (P403)	R	3.18E-5/h	7.02E-2	-	IAEA
11. Auxiliary Pump (P403S)	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
12. Manual Operated Valve (V215)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
13. Manual Operated Valve (V201)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
14. Micro Filter	Q	7.1E-6/h	1.56E-2	-	IAEA
15. Manual Operated Valve (V207)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Component	Failure Mode	Failure rate	Failure Probability ($P(t) = \mu t$)	Error Factor	Source of Data
16. Manual Operated Valve (V3)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
17. Manual Operated Valve (V4)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
18. Piping Primary	Q,J	1.0E-10/h	2.21E-7	30	WASH-1400
19. Manual Operated Valve (V1)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
20. Manual Operated Valve (V2)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
21. Decay Tank	J	1.0E-6/h	2.21E-3	-	IAEA
22. Primary Pump (P401)	R	3.18E-5/h	7.02E-2	-	IAEA
23. Primary Pump (P401S)	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
24. Manual Operated Valve (V3)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
25. Manual Operated Valve (V4)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
Secondary Cooling System					
26. Manual Operated Valve (V103)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
27. Cooling Tower 500 ton	O	2.84E-5/h	6.27E-2	-	IAEA
28. Manual Operated Valve (V105)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
29. Manual Operated Valve (V110)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Component	Failure Mode	Failure rate	Failure Probability ($P(t) = \mu t$)	Error Factor	Source of Data
30. Cooling Tower 800 ton	O	2.84E-5/h	6.27E-2	-	IAEA
31. Manual Operated Valve (V111)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
32. Piping Secondary	Q, J	1.0E-10/h	2.21E-7	30	WASH-1400
33. Strainer 101	Q	3.0E-5/h	6.63E-2	10	WASH-1400
34. Manual Operated Valve (V101)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
35. Secondary Pump (P402)	R	3.18E-5/h	7.02E-2	-	IAEA
36. Secondary Pump (P402S)	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
37. Manual Operated Valve (V104)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
38. Manual Operated Valve (V102)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
39. Manual Operated Valve (V5)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
40. Manual Operated Valve (V7)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
41. Shell & Tube	F	1.44E-4/h	0.318	-	IAEA
42. Manual Operated Valve (V109)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
43. Manual Operated Valve (V107)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
44. Manual Operated Valve (V108)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
45. Manual Operated Valve (V8)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
46. Plate Heat	F	1.07E-5/h	2.36E-2	-	IAEA

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Component	Failure Mode	Failure rate	Failure Probability ($P(t) = \mu t$)	Error Factor	Source of Data
47. Manual Operated Valve (V106)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
48. Manual Operated Valve (V6)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
Emergency Core Cooling System					
49. Discharge Nozzle	Q	1.8E-5/h	3.97E-2	-	WASH-1400
50. ECCS Piping	Q, J	1.0E-9/h	2.21E-6	30	WASH-1400
51. Flow Switch	F	9.8E-7/h	2.16E-3	-	WASH-1400
52. Manual Operated Valve (V302)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
53. Pump (P2)	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
54. Water tank (Demin.)	J	1.0E-6/h	2.21E-3	-	IAEA
55. Pump (P1)	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
56. Manual Operated Valve (V301)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
57. Pressure Tank	Y	1.56E-6/h	3.44E-3	-	IAEA
58. Water Tank (20 ton)	J	1.0E-6/h	2.21E-3	-	IAEA
59. Manual Operated Valve (V304)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
60. Manual Operated Valve (V306)	D	1.0E-4/d	2.21E-2	3	WASH-1400
61. Pump - 404	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
62. Pump - 404	S	2.75E-5/h	6.07E-2	-	IAEA
63. Pressure Switch	F	1.0E-4/h	2.21E-2	3	WASH-1400
64. Water Level Switch	E	4.5E-6/h	9.94E-3	-	IAEA
65. Battery 12 v.	F	1.01E-5/h	2.23E-2	-	IAEA
66. Solenoid Valve	F	1.0E-3/d	0.221	3	WASH-1400
67. Strainer - 301	Q	3.0E-5/h	6.63E-2	10	WASH-1400

วิจารณ์ผลการรวบรวมค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์

จากผลการคำนวณหาโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งหมดพบว่ามีค่า μt ของ อุปกรณ์ Shell and Tube Heat Exchanger และวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า (Solenoid Valve) มีค่า ≥ 0.1 ซึ่งจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งสองชนิด จึงต้องทำการคำนวณจากสูตร

$$P(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

ดังนั้น ค่าโอกาสการล้มเหลว ของ Shell and Tube Heat Exchanger

$$\begin{aligned} &= 1 - e^{-0.318} \\ &= 0.272 \end{aligned}$$

และ ค่าโอกาสการล้มเหลวของวาล์วโซเลนอยด์ (Solenoid Valve)

$$\begin{aligned} &= 1 - e^{-0.221} \\ &= 0.198 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงได้ค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าโอกาสการล้มเหลวของระบบโดยรวม คือ

$$P(\text{Shell\&Tube Heat exchanger}) = 0.272$$

$$\text{และ } P(\text{Solenoid Valve}) = 0.198$$

ซึ่งการปรับปรุงค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งสองนี้ จะทำให้การคำนวณหาโอกาสการล้มเหลวของระบบระบายความร้อนทั้งหมดของเครื่องปฏิกรณ์ในขั้นตอนต่อไป มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

4. การคำนวณค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย

จากแผนภาพที่ 1 (แผนภาพต้นไม้ของเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย) จะเห็นได้ว่าการล้มเหลวของระบบที่นำไปสู่เหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย (P0) นั้น เกิดจากการล้มเหลวของระบบที่เกี่ยวข้อง 2 ระบบด้วยกัน คือ 1) ระบบระบายความร้อนหลัก (P1) และ 2) ระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ นกเงิน (P2)

ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ ดังสมการที่ 1

$$P0_{\text{Fuel damage}} = P1_{\text{Main cooling system failure}} \times P2_{\text{ECCS failure}} \quad (1)$$

และการล้มเหลวของระบบระบายความร้อนหลัก ก็มีสาเหตุมาจากการล้มเหลวของระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน(P3) และระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P4) ดังสมการที่ 2

$$P1_{\text{Main cooling system failure}} = 1 - (1 - P3_{\text{Water circulation system failure}}) \times (1 - P4_{\text{Secondary cooling system failure}}) \quad (2)$$

โดยระบบไหลเวียนน้ำภายในบ่อปฏิกรณ์เกิดการล้มเหลวจะมีสาเหตุจากการล้มเหลวของสองระบบพร้อมๆกันคือ ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิและระบบสนับสนุนน้ำระบายความร้อน ดังสมการที่ 3

$$P3_{\text{Water circulation failure}} = P5_{\text{Primary cooling system failure}} \times P6_{\text{Auxiliary system failure}} \quad (3)$$

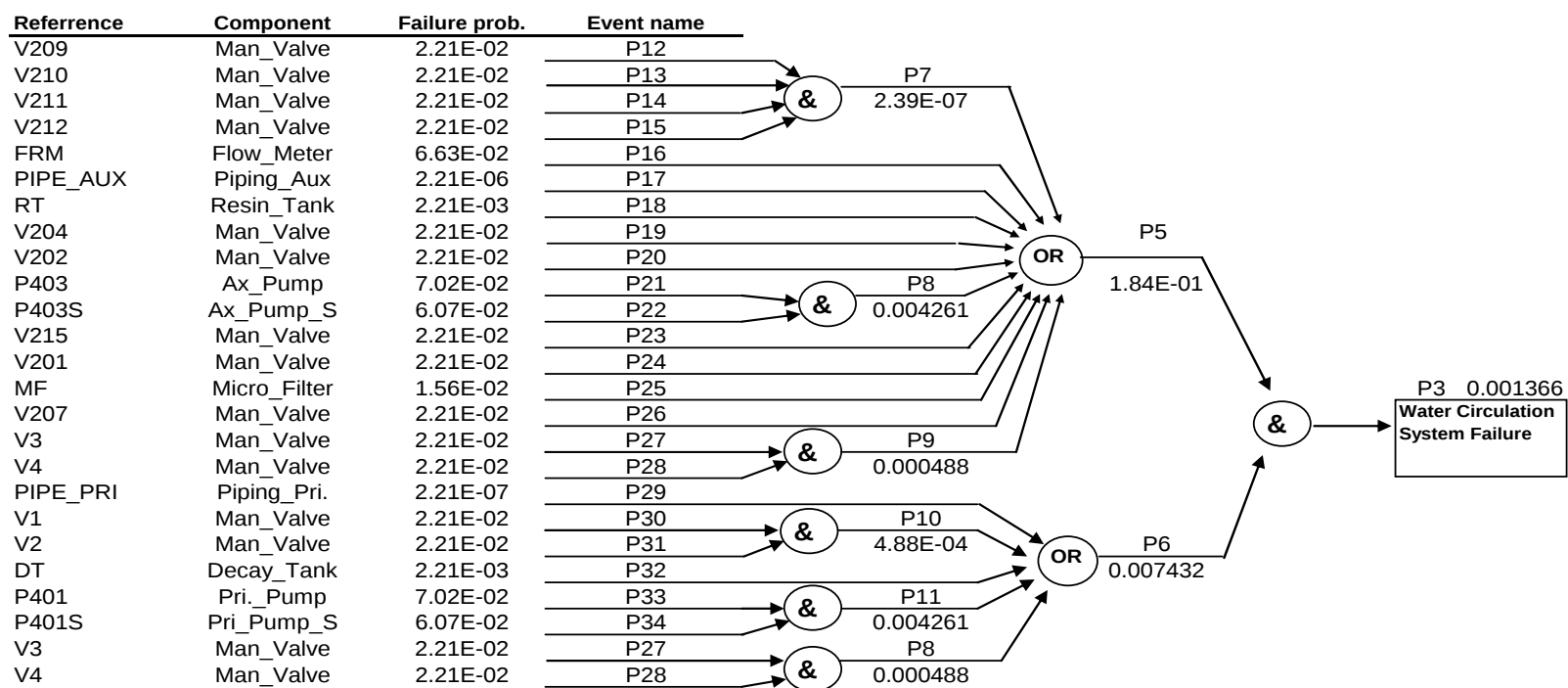
โดยที่การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน มีรายการเหตุการณ์และลักษณะการล้มเหลว ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆในระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน

เหตุการณ์	คำอธิบายลักษณะของเหตุการณ์
P12	วาล์วน้ำ V209 ล้มเหลวในการเปิด
P13	วาล์วน้ำ V210 ล้มเหลวในการเปิด
P14	วาล์วน้ำ V211 ล้มเหลวในการเปิด
P15	วาล์วน้ำ V212 ล้มเหลวในการเปิด
P16	เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ไม่ทำงาน
P17	ท่อน้ำของระบบสนับสนุนฯ แตกหรืออุดตัน
P18	ถังเครื่องกรองน้ำของระบบสนับสนุนฯ เกิดการอุดตัน
P19	วาล์วน้ำ V204 ล้มเหลวในการเปิด
P20	วาล์วน้ำ V202 ล้มเหลวในการเปิด
P21	ปั๊มน้ำหลักของระบบสนับสนุนฯ ไม่ทำงาน
P22	ปั๊มน้ำสำรองของระบบสนับสนุนฯ ไม่ทำงาน
P23	วาล์วน้ำ V215 ล้มเหลวในการเปิด
P24	วาล์วน้ำ V201 ล้มเหลวในการเปิด
P25	แผ่นกรองน้ำ (Micro filter) เกิดการอุดตัน
P26	วาล์วน้ำ V207 ล้มเหลวในการเปิด
P27	วาล์วน้ำ V3 ล้มเหลวในการเปิด
P28	วาล์วน้ำ V4 ล้มเหลวในการเปิด
P29	ท่อน้ำของระบบปฐมภูมิ แตกหรืออุดตัน
P30	วาล์วน้ำ V1 ล้มเหลวในการเปิด
P31	วาล์วน้ำ V2 ล้มเหลวในการเปิด
P32	ถังหน่วงให้สารรังสีสลายตัว (Decay Tank)
P33	ปั๊มน้ำหลักของระบบปฐมภูมิ ไม่ทำงาน
P34	ปั๊มน้ำสำรองของระบบปฐมภูมิ ไม่ทำงาน

จากภาพที่ 1 สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) แสดงเหตุการณ์ล้มเหลวของระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน (P3) ได้ ดังภาพที่ 7

WATER CIRCULATION SYSTEM FAILURE



ภาพที่ 7 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเหตุการณ์ P3

จากการคำนวณโดยการแทนค่าโอกาสการล้มเหลวของ P12 ถึง P28 ตามรูปแบบความสัมพันธ์ในภาพที่ 7 สามารถสรุปค่าโอกาสการล้มเหลวของระบบย่อยต่าง (P5-P11) ของระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5 แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน(P3)

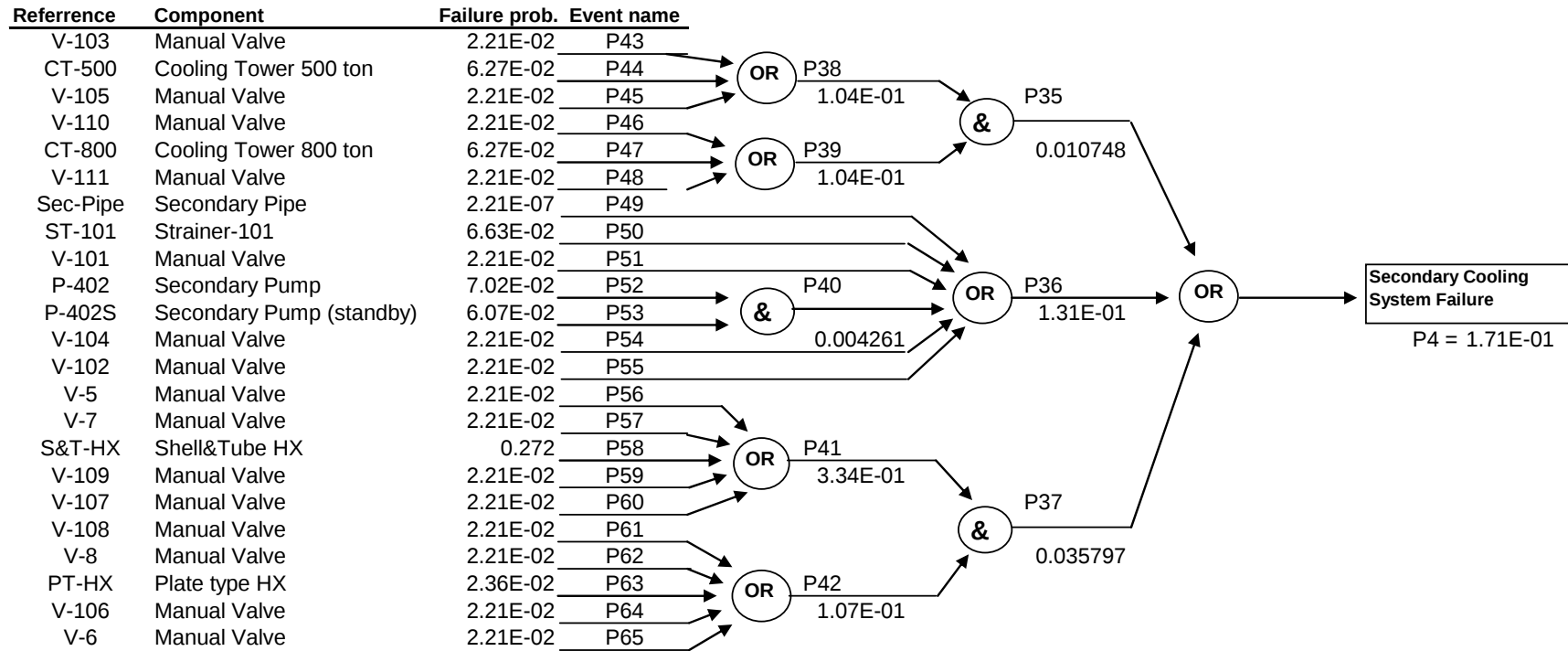
ระบบย่อย	สมการความสัมพันธ์กับระบบ/อุปกรณ์อื่นๆ	ค่าโอกาสการล้มเหลว
P5	$= 1-(1-P7)(1-P16)(1-P17)(1-P18) \times (1-P19)(1-P20)$	0.184
P6	$= 1-(1-P29)(1-P10)(1-P32)(1-P11)(1-P8)$	7.43×10^{-3}
P7	$= P12 \times P13 \times P14 \times P15$	2.39×10^{-7}
P8	$= P21 \times P22$	4.26×10^{-3}
P9	$= P27 \times P28$	4.88×10^{-4}
P10	$= P30 \times P31$	4.88×10^{-4}
P11	$= P33 \times P34$	4.26×10^{-3}

สามารถคำนวณค่าโอกาสการล้มเหลวของระบบหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน (P3) คือ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 3} \quad P3 &= P5 \times P6 \\
 &= 0.184 \times 0.007 \\
 &= 0.0013
 \end{aligned}$$

และจากภาพที่ 5 (แผนภาพต้นไม้ของระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ) สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเหตุการณ์ล้มเหลวของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน(P4) ได้ดังภาพที่ 8 ซึ่งโอกาสการล้มเหลวของระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P4) จะประกอบไปด้วยการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ดังตารางที่ 6

SECONDARY COOLING SYSTEM FAILURE



ภาพที่ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเหตุการณ์ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิล้มเหลว (P4)

ตารางที่ 6 เหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ

เหตุการณ์	คำอธิบายลักษณะการล้มเหลว
P35	ระบบหอระบายความร้อนทั้งหมดล้มเหลว
P36	ระบบส่งน้ำระบายความร้อนล้มเหลว
P37	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดล้มเหลว
P38	ระบบหอระบายความร้อนขนาด 500 ตัน ล้มเหลว
P39	ระบบหอระบายความร้อนขนาด 800 ตัน ล้มเหลว
P40	ระบบปั๊มส่งน้ำทั้งหมดล้มเหลว
P41	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 1 เมกกะวัตต์ล้มเหลว
P42	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 2.5 เมกกะวัตต์ล้มเหลว
P43	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P44	หอระบายความร้อนขนาด 500 ตัน ล้มเหลว
P45	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P46	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P47	หอระบายความร้อนขนาด 800 ตัน ล้มเหลว
P48	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P49	ท่อส่งน้ำในระบบทุติยภูมิล้มเหลว
P51	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P52	ปั๊มน้ำหลัก (P-402) ล้มเหลว
P53	ปั๊มน้ำสำรอง (P-402-Standby) ล้มเหลว
P54	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P55	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P56	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P57	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P58	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell & Tube ล้มเหลว
P59	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P60	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด

ตารางที่ 6 (ต่อ)

เหตุการณ์	คำอธิบาย
P61	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P62	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P63	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate type ล้มเหลว
P64	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P65	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด

จากแบบจำลองฯของเหตุการณ์ P4 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบด้วยสมการ Boolean ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7 แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P4)

ระบบย่อย	สมการความสัมพันธ์กับระบบ/อุปกรณ์อื่นๆ	ค่าโอกาสการล้มเหลว
P35	$= P38 \times P39$	0.0107
P36	$= 1 - (1 - P40)(1 - P49)(1 - P50)(1 - P51) \times (1 - P54)(1 - P55)$	0.131
P37	$= P41 \times P42$	0.0357
P38	$= 1 - (1 - P43)(1 - P44)(1 - P45)$	0.104
P39	$= 1 - (1 - P46)(1 - P47)(1 - P48)$	0.104
P40	$= P52 \times P53$	4.26×10^{-3}
P41	$= 1 - (1 - P56)(1 - P57)(1 - P58)(1 - P59)(1 - P60)$	0.334
P42	$= 1 - (1 - P61)(1 - P62)(1 - P63)(1 - P64)(1 - P65)$	0.107

จากความสัมพันธ์ดังภาพที่ 8 สามารถแทนค่า P35 P36 และ P37 ลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าโอกาสที่ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ(P4) จะล้มเหลว ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P4 &= 1-(1-P35)x(1-P36)x(1-P37) \\ &= 1-(1-0.0107)x(1-0.131)x(1-0.0357) \end{aligned} \quad (4)$$

ดังนั้นได้ค่าโอกาสที่ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิล้มเหลว คือ

$$P4 = 0.171$$

และจากสมการที่ 2

$$P1 = 1-(1-P3)x(1-P4)$$

แทนค่า P3 และ P4 ลงในสมการที่ 2 เพื่อคำนวณค่าโอกาสที่ระบบระบายความร้อนหลัก (P1) ไม่ทำงาน

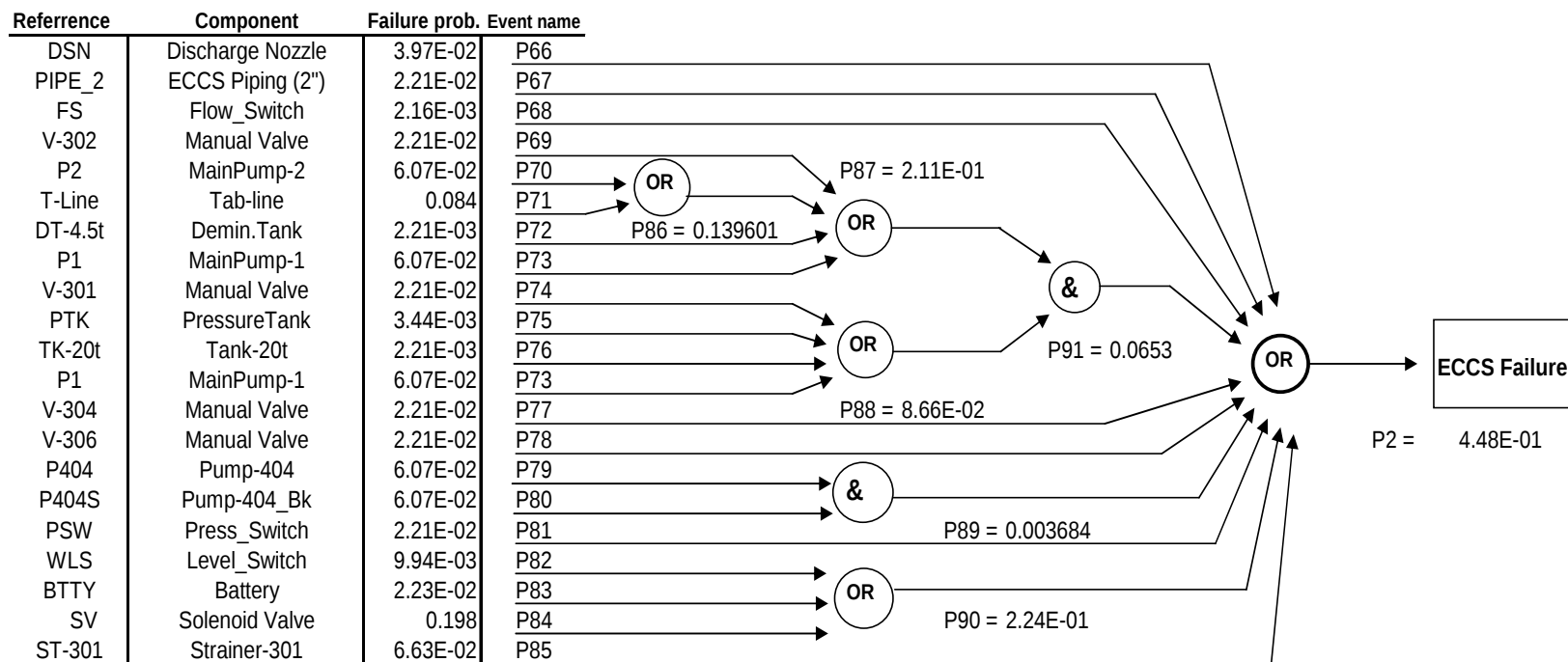
$$P1 = 1-(1-1.36 \times 10^{-3})x(1-0.171)$$

ดังนั้น

$$P1 = 0.172$$

และจากภาพที่ 6 (แผนภาพต้นไม้ของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน, ECCS) สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการล้มเหลวของระบบ ECCS ได้ดังภาพที่ 9

EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM FAILURE



ภาพที่ 9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการล้มเหลวระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (ECCS)

โดยการลืมหวนของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน มีเหตุการณ์และลักษณะของการลืมหวน ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เหตุการณ์การลืมหวนของอุปกรณ์ต่างๆในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

เหตุการณ์	คำอธิบายลักษณะเหตุการณ์
P66	หัวฉีดน้ำระบายความร้อนฉุกเฉินลืมหวน
P67	ท่อส่งน้ำในระบบลืมหวน
P68	สวิทช์การไหลของน้ำ (Flow switch) ลืมหวน
P69	วาล์วน้ำ V302 ลืมหวน
P70	ปั้มน้ำหมายเลข 2 ลืมหวน
P71	ท่อน้ำจากการประปาลืมหวนหรือไม่มีน้ำ
P72	ถังน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้วลืมหวน
P73	ปั้มน้ำหมายเลข 1 ลืมหวน
P74	วาล์วน้ำ V301 ลืมหวน
P75	ถังน้ำอัดความดัน (Pressure Tank) ลืมหวน
P76	ถังน้ำขนาด 20 ตันลืมหวน
P77	วาล์วน้ำ V304 ลืมหวน
P78	วาล์วน้ำ V306 ลืมหวน
P79	ปั้มน้ำหลักหมายเลข 404 ลืมหวน
P80	ปั้มน้ำสำรองหมายเลข 404 ลืมหวน
P81	สวิทช์ความดัน (Pressure switch) ลืมหวน
P82	สวิทช์ระดับน้ำ (Level switch) ลืมหวน
P83	แบตเตอรี่ลืมหวนในการจ่ายไฟ
P84	วาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า (Solenoid Valve) ลืมหวน
P85	ตัวคัดตะกอน (Strainer) หมายเลข 301 อุดตัน
P86	ถังน้ำขนาด 150 ตันไม่มีน้ำ
P87	ไม่มีน้ำที่ผ่านการปรับสภาพจ่ายให้ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน
P88	ไม่มีน้ำประปาจ่ายให้ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน
P89	ปั้มน้ำของระบบ ECCS ทั้งหมดลืมหวน

ตารางที่ 8 (ต่อ)

เหตุการณ์	คำอธิบาย
P90	ระบบวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า ล้มเหลว
P91	ไม่มีน้ำจ่ายให้ระบบ ECCS

ซึ่งจากแบบจำลองของเหตุการณ์ P4 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบด้วยสมการ Boolean ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9 แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (P2)

ระบบย่อย	สมการความสัมพันธ์กับระบบ/อุปกรณ์อื่นๆ	ค่าโอกาสการล้มเหลว
P86	= P70xP71	0.139
P87	= 1- (1-P69)(1-P86)(1-P72)(1-P73)	0.211
P88	= 1- (1-P74)(1-P75)(1-P76)(1-P73)	0.0866
P89	= P79 x P80	0.0368
P90	= 1-(1-P82)(1-P83)(1-P84)	0.244
P91	= P87 x P88	0.0183

ซึ่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (ECCS) ตามภาพที่ 9 สามารถเขียนเป็นสมการ Boolean ของการที่ระบบระบายความร้อนฉุกเฉินจะเกิดการล้มเหลว ได้ดังต่อไปนี้

$$P2 = 1 - (1-P66)(1-P67)(1-P68)(1-P91)(1-P77)(1-P78)(1-P89)(1-P90)(1-P85) \quad (5)$$

แทนค่า P66 ถึง P85 ลงในสมการที่ 8 เพื่อคำนวณหาค่า P2

$$\text{ได้ค่า} \quad P2 = 0.42$$

จากนั้น จึงแทนค่า P1 และ P2 ลงในสมการที่ 1 เพื่อคำนวณค่า P0 (Top Event) ดังนี้

$$\begin{aligned} P0 &= P1 \times P2 \\ &= 0.172 \times 0.42 \\ &= 0.0722 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่ระบบระบายความร้อนทั้งหมดจะเกิดการล้มเหลว และอาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ณ สภาพของระบบเครื่องปฏิกรณ์ฯ ณ ปัจจุบัน (P0) จะมีค่าเท่ากับ 0.0722

ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย (Accident Frequency) จากการที่แกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ขาดน้ำระบายความร้อน (Loss of Coolant Accident, LOCA) จากสาเหตุที่ท่อหลักของระบบระบายความร้อนปฐมภูมิแตกโดยสิ้นเชิง สามารถคำนวณได้จาก

$$F0 (\text{แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย}) = F(\text{ท่อหลักของระบบปฐมภูมิแตก}) \times P0 \quad (6)$$

โดยที่ $F0$ (แท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย) คือ ความถี่ของการที่แท่งเชื้อเพลิงจะเกิดการหลอมละลาย (ครั้ง/ปี)

และ $F1$ (ท่อหลักของระบบปฐมภูมิแตก) คือ ความถี่ที่ท่อน้ำหลักจะเกิดการแตก (ครั้ง/ปี)

ซึ่งจากข้อมูลการศึกษา IAEA-SR-111/3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 9.4×10^{-4} ครั้งต่อปี

ดังนั้นจึงแทนค่า $F1 = 9.4 \times 10^{-4}$ และ $P0 = 0.0722$ ลงในสมการที่ 6

$$F0 = 9.4 \times 10^{-4} \times 0.0722$$

ดังนั้น ค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1
 $= 6.78 \times 10^{-5}$ ครั้งต่อปี

วิจารณ์ผลการคำนวณค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย

เมื่อนำค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว. 1/1 มาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ตามเอกสาร Acceptance of Annual Fatality Risk Level (Otway and Erdman, 1970) และค่าที่ US-NRC กำหนดไว้ในกฎหมาย (10CFR50) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-4} - 10^{-5} ครั้งต่อปี จึงสามารถพิจารณาได้ว่าค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว.1/1 ณ สภาพปัจจุบันนั้น มีความปลอดภัยอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณาจากแผนภาพต้นไม้และผลการคำนวณตามแผนภาพทางคณิตศาสตร์ พบว่ายังคงมีบางระบบและอุปกรณ์ มีการออกแบบที่ไม่เหมาะสม ซึ่งสามารถปรับปรุงเพื่อลดค่าความเสี่ยงลงได้อีก จึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ระบบโดยละเอียด เพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบวิธีการปรับปรุงให้เครื่องปฏิกรณ์ฯ มีค่าความเสี่ยงลดลงให้มากที่สุดต่อไป

5. การปรับปรุงค่าความเสี่ยง

จากผลการคำนวณค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.1/1 จะมีค่าเท่ากับ 6.78×10^{-5} ครั้งต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ของการเกิดเหตุการณ์แกนปฏิกรณ์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เสียหาย (Core Damage Frequency) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-5} - 10^{-6} ครั้งต่อปี นับว่ามีระดับความปลอดภัยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่จากความแตกต่างกันของเทคโนโลยีระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และจากวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ ที่มุ่งเน้นปรับปรุงระบบของเครื่องปฏิกรณ์วิจัยให้มีระดับความเสี่ยงลดลงให้มากที่สุด

ที่สุด จึงต้องพิจารณาระบบต่างๆ โดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อระบุจุดที่เป็นปัญหาหรือจุดอ่อนของระบบนั้นๆ โดยในการประเมินความเสี่ยงด้วยการหาค่าความน่าจะเป็น จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) โดยการหาค่าความสำคัญ (Importance measure) ของอุปกรณ์แต่ละตัวของระบบ จากนั้นจึงทำการจัดลำดับค่าความสำคัญที่ได้ สำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์ใดๆ อีกครั้งหนึ่ง ดังนี้

5.1 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

จะทำการวิเคราะห์โดยการวัดความสำคัญของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ (Importance Measure) ว่าการล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นๆ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโอกาสการล้มเหลวของระบบทั้งหมดเพียงใด ซึ่งในการวัดความสำคัญนี้ จะใช้วิธีการของ Fussell-Vesely ทำการวัดความสำคัญของเหตุการณ์ทั้งหมดที่มีผลต่อความเสี่ยงที่กำลังพิจารณา ซึ่งทำการคำนวณโดยการรวมความถี่ของ cut sets ที่ประกอบด้วยเหตุการณ์ที่สนใจทั้งหมดแล้วหารออกจากทั้งหมดด้วยค่าโอกาสที่เหตุการณ์ x จะมีส่วนในการล้มเหลวของระบบ ดังสมการ

$$FV_x = \sum \text{Cut sets with event } x / F(x)$$

หรือ
$$FV_x = [F(x) - F(o)] / F(x)$$

โดยที่ $F(x)$ คือความเสี่ยงหรือโอกาสที่เหตุการณ์ x จะมีส่วนในการล้มเหลวของระบบ และ $F(o)$ ก็คือความเสี่ยงหรือโอกาสที่เหตุการณ์ x จะไม่มีการล้มเหลว

$$(\text{Failure probability} = 0)$$

โดยค่าความสำคัญของ Fussell-Vesely นี้จะแสดงค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

ซึ่งจากการคำนวณค่าความสำคัญของแผนภาพต้นไม้ของการเกิดแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย โดยใช้โปรแกรม SAPHIRE ได้ผลของอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบโดยรวมดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 10 สรุปรายการอุปกรณ์ที่ต้องพิจารณาปรับปรุงจากผลการการคำนวณค่าความสำคัญ

Event Name	Num. of Occ.	Probability of Failure	Fussell- Vesely Importance	Risk Reduction Ratio
P-84	100	1.980E-001	4.368E-001	1.776E+000
P-50	27	6.630E-002	3.398E-001	1.515E+000
P-58	135	2.720E-001	1.544E-001	1.183E+000
P-85	100	6.630E-002	1.441E-001	1.168E+000
P-51	27	2.210E-002	1.119E-001	1.126E+000
P-54	27	2.210E-002	1.119E-001	1.126E+000
P-55	27	2.210E-002	1.119E-001	1.126E+000
P-66	100	3.970E-002	8.604E-002	1.094E+000
P-83	100	2.230E-002	4.824E-002	1.051E+000
P-81	100	2.210E-002	4.780E-002	1.050E+000
P-78	100	2.210E-002	4.780E-002	1.050E+000
P-77	100	2.210E-002	4.780E-002	1.050E+000
P-67	100	2.210E-002	4.780E-002	1.050E+000
P-63	135	2.360E-002	4.289E-002	1.045E+000
P-64	135	2.210E-002	4.016E-002	1.042E+000
P-61	135	2.210E-002	4.016E-002	1.042E+000
P-62	135	2.210E-002	4.016E-002	1.042E+000
P-65	135	2.210E-002	4.016E-002	1.042E+000
P-47	81	6.270E-002	3.378E-002	1.035E+000
P-44	81	6.270E-002	3.378E-002	1.035E+000
P-82	100	9.940E-003	2.147E-002	1.022E+000
P-53	27	6.070E-002	2.147E-002	1.022E+000
P-52	27	7.020E-002	2.147E-002	1.022E+000

ตารางที่10 (ต่อ)

Event Name	Num. of Occ.	Probability of Failure	Fussell- Vesely Importance	Risk Reduction Ratio
P-73b	400	6.070E-002	1.910E-002	1.019E+000
P-57	135	2.210E-002	1.246E-002	1.013E+000
P-56	135	2.210E-002	1.246E-002	1.013E+000
P-60	135	2.210E-002	1.246E-002	1.013E+000
P-59	135	2.210E-002	1.246E-002	1.013E+000
P-46	81	2.210E-002	1.189E-002	1.012E+000
P-45	81	2.210E-002	1.189E-002	1.012E+000
P-48	81	2.210E-002	1.189E-002	1.012E+000
P-43	81	2.210E-002	1.189E-002	1.012E+000
P-70	400	6.070E-002	1.159E-002	1.012E+000
P-73a	400	6.070E-002	1.159E-002	1.012E+000

จากการพิจารณาลำดับของค่าโอกาสการล้มเหลวแต่ละทางออก (Gate) และลำดับความสำคัญ (Importance Measure) เพื่อระบุรายการระบบและอุปกรณ์ย่อยที่สามารถทำการปรับปรุงเพื่อลดค่าความเสี่ยงของระบบโดยรวมลงอย่างชัดเจน ดังรายการในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 11 สรุปรายการอุปกรณ์ของแต่ละระบบที่จะนำมาพิจารณาปรับปรุง

ระบบหลัก	อุปกรณ์ในระบบ	ระบบรอง	ลำดับค่าความสำคัญของอุปกรณ์
P-2 (ECCS)	P84 (Solenoid Valve)	P-90	1
	P85 (Strainer301)	-	4
	P66 (Discharge nozzle)	-	8
	P83 (Battery)	P-90	9
	P81 (Pressure Switch)	-	10
	P78 (V306)	-	11
	P77 (V304)	-	12
	P67 (ECCS pipe)	-	13
	P82 (Level Switch)	-	21
	P73 (Pump P1)	P-87, P-88 (CCF*)	24
	P70 (Pump P2)	P-86	33

* CCF = Common Cause Failure

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ระบบหลัก	อุปกรณ์ในระบบ	ระบบรอง	ลำดับค่าความสำคัญของอุปกรณ์
			-
P-4 (Sec. sys.)	P50 (Strainer101)	P-36	2
	P58 (S&T HX)	P-41	3
	P51 (V101)	P-36	5
	P54 (V104)	„	6
	P55 (V102)	„	7
	P63 (Plate HX)	P-42	14
	P64 (V106)	„	15
	P61 (V108)	„	16
	P62 (V6)	„	17
	P65 (V8)	„	18
	P47 (CT800)	P-39	19
	P44 (CT500)	P-38	20
	P53 (Pump standby)	P-36	22
	P52 (Pump)	„	23
	P57 (V7)	P-41	25
	P56 (V5)	„	26
	P60 (V107)	„	27
	P59 (V109)	„	28
	P46 (V110)	P39	29
	P45 (V105)	P38	30
	P48 (V111)	P39	31
	P43 (V103)	P38	32

5.2 การปรับปรุงระบบเพื่อลดค่าความเสี่ยง

จะดำเนินการปรับปรุงระบบและอุปกรณ์ต่างๆในระบบ โดยการพิจารณาจากค่าความสำคัญเป็นหลัก จากนั้นจึงหาวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสมทางเทคนิคที่สามารถดำเนินการได้จริง โดยยึดหลักการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบด้วยวิธีการเพิ่ม Redundancy, diversity และลด common cause failure ต่างๆที่มีในการออกแบบระบบเดิม ซึ่งทั้งนี้ จะไม่นำผลจากการดำเนินการตามแผนการซ่อมบำรุงของหน่วยงานเดินเครื่องปฏิกรณ์ในปัจจุบัน มาร่วมในการพิจารณาปรับปรุง

5.2.1 การปรับปรุงระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (Secondary Cooling System, P-4)

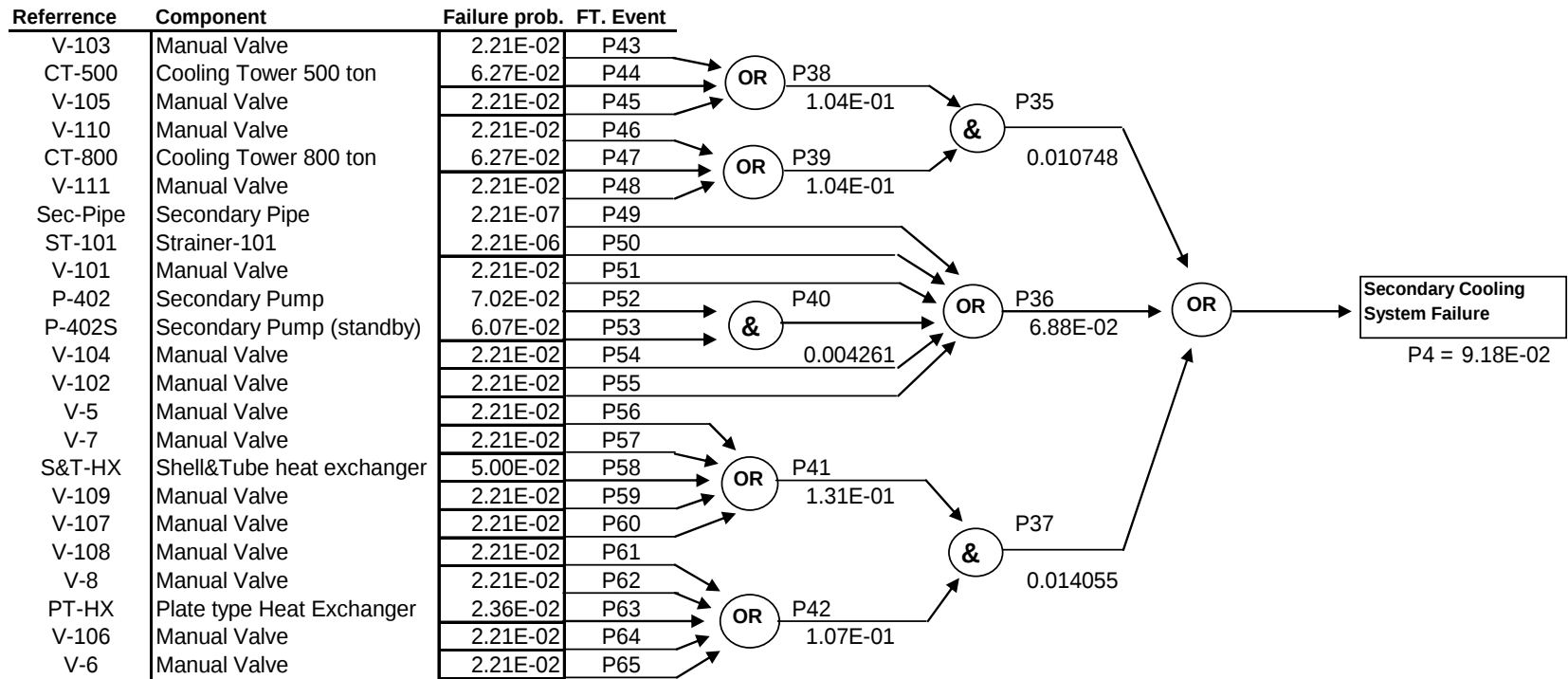
จากตารางรายการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิที่เป็นจุดอ่อนของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย ได้แก่ อุปกรณ์ดักจับตะกอนและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell & Tube นอกนั้นเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบท่อและวาล์วที่มีค่าความสำคัญไม่สูงมากและไม่คุ้มค่าในการปรับปรุง จึงดำเนินการปรับปรุงเฉพาะอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองมีแนวทางการปรับปรุงที่แตกต่างกันไป ตามลักษณะการใช้งานและการล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นๆ ดังสรุปได้ต่อไปนี้

ตารางที่ 12 แสดงวิธีการปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ

อุปกรณ์	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	วิธีการปรับปรุงเพื่อลดค่า โอกาสการล้มเหลว
อุปกรณ์ดักจับตะกรัน (P50)	ตัน	1. ทำระบบท่อ Bypass เมื่อเกิดการอุดตันขึ้น 2. ทำแผนการซ่อมบำรุงโดยเปลี่ยนตามอายุการใช้งาน เพื่อลดค่าโอกาสการล้มเหลว
สรุปผลการปรับปรุง ด้วยการทำระบบท่อ Bypass และการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดการอุดตันของตัวดักตะกรันมีค่าเท่ากับการเกิดอุดตันของท่อ (ขนาดเล็กกว่า 7.5 cm.) ซึ่งเท่ากับ 2.21×10^{-6} ($1.0 \times 10^{-9}/\text{Hr}$)		
Shell and Tube Heat Exchanger (P-58)	ไม่ทำงาน	- ทำแผนการซ่อมบำรุงโดยตรวจสอบและขัดผิวภายในท่อ เพื่อป้องกันการอุดตันและติดตั้งอุปกรณ์ดักจับตะกรัน
*ซึ่งจากการทำแผนการซ่อมบำรุงประจำปี ด้วยการตรวจสอบและขัดผิวด้านในเพื่อลดโอกาสการอุดตันของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้สามารถลดค่าความเสี่ยงลงได้ จากประวัติการเดินเครื่องพบว่าเคยเกิดการอุดตันจำนวน 1 ครั้ง ในรอบ 20 ปี คิดเป็นค่าโอกาสการล้มเหลวเท่ากับ 0.050		

หลังจากปรับปรุงค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบระบายความร้อนแล้ว จะได้ค่าโอกาสการล้มเหลวของแต่ละระบบย่อย ดังแสดงในภาพที่ 10 ดังต่อไปนี้

SECONDARY COOLING SYSTEM FAILURE



ภาพที่ 10 ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P4) หลังการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงระบบระบายความร้อนทุติยภูมิแล้ว ค่าโอกาสที่ระบบนี้จะเกิดการล้มเหลวจะมีค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 13 แสดงค่าโอกาสการล้มเหลวของอุปกรณ์ในระบบหลังจากที่มีการปรับปรุงแล้ว

รหัสระบบ/อุปกรณ์	ชื่อระบบ/อุปกรณ์	ค่าโอกาสการล้มเหลวเดิม	ค่าโอกาสการล้มเหลวใหม่
P-4	ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ	0.171	0.091
P-36	ระบบปั๊มส่งน้ำระบายความร้อน	0.131	0.0688
P-50	เครื่องคัดตะกอน	6.63×10^{-2}	2.21×10^{-6}
P-37	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด	0.035	0.0140
P-41	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน 1 MW	0.334	0.131
P-58	Shell&Tube HX	0.272	0.050

ผลการปรับปรุงระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P-4)

จากการปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆในระบบด้วยวิธีการดังตารางที่ 12 พบว่าสามารถลดโอกาสการล้มเหลวของระบบลงจาก 0.171 เป็น 0.091 คิดเป็นร้อยละของค่าความเสี่ยงที่ลดลงเท่ากับ 46.31

5.2.2 การปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

(Emergency Core Cooling System, P2)

จากการพิจารณาค่าความไวและความสำคัญของอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (P2) สามารถระบุระบบและอุปกรณ์ที่เป็นจุดอ่อน ดังรายการต่อไปนี้

ก. ระบบน้ำสำหรับจ่ายให้ระบบ ECCS (P91)

ข. วาล์ว Solenoid (P84)

ค. เครื่องคักจับตะกอน (P85)

ซึ่งจากการพิจารณาการปรับปรุงค่าโอกาสการล้มเหลวของแต่ละทางออก สามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 14 วิธีการปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

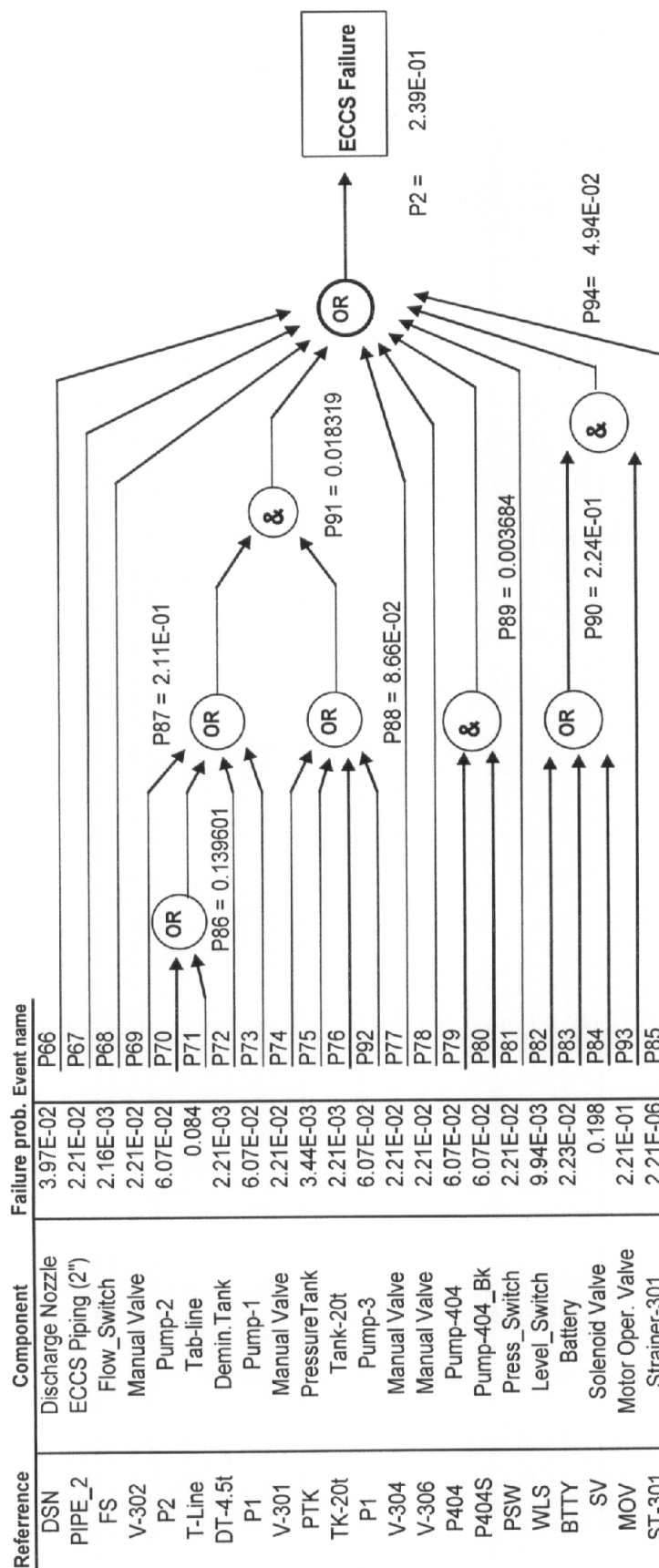
ระบบ/อุปกรณ์	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	วิธีการปรับปรุง
1. ไม่มีน้ำจ่ายระบบ ECCS (P91)	F	เพิ่มปั้มน้ำ (P3) ในระบบถึงน้ำขนาด 20 ตัน
การติดตั้งปั้มน้ำเพิ่มในระบบนี้แทนที่จะใช้ปั้มหมายเลข 1 ร่วมกับระบบถึงน้ำขนาด 4.5 ตัน เพื่อลดโอกาสการเกิดล้มเหลวของทั้งสองระบบหากปั้มน้ำหมายเลข 1 ไม่ทำงานหรือที่เรียกว่า Common Cause Failure ซึ่งการเพิ่มปั้ม P-3 เข้าไปในระบบน้ำสำรองของระบบ ECCS นี้ จะลดค่าโอกาสที่ระบบ ECCS ขาดน้ำระบายความร้อนเหลือ 0.0183 จากเดิม 0.0653		
2. ระบบวาล์ว Solenoid	F	ติดตั้งระบบท่อที่ใช้วาล์วควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (Motor operated valve) เพิ่มโดยติดตั้งแบบขนานกับท่อระบบวาล์วโซเลนอยด์ ซึ่งเป็นการเพิ่ม redundancy ให้กับระบบ
ค่าโอกาสการล้มเหลว(Failure Probability) ของ Motor Operated Valve เท่ากับ 0.221 ($1.0 \times 10^{-3}/d$, Error Factor = 3)		

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ระบบ/อุปกรณ์	ลักษณะการล้มเหลว (Failure Mode)	วิธีการปรับปรุง
3. ตัวตัดตะกรัน	Q	ติดตั้งระบบท่อ Bypass ที่น้ำในระบบ ECCS จะยังสามารถไหลไปยังระบบอื่นๆได้ เมื่อเกิดการอุดตันขึ้นที่ท่ออุปกรณ์ดักจับตะกรัน
การปรับปรุง ด้วยการติดตั้งระบบท่อ Bypass และการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดการอุดตันของตัวตัดตะกรันมีค่าเท่ากับการเกิดอุดตันของท่อ (ขนาดเล็กกว่า 7.5 cm.) ซึ่งเท่ากับ 2.21×10^{-6} ($1 \times 10^{-9}/\text{Hr}$)		

เมื่อดำเนินการปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉินแล้ว จะได้ค่าโอกาสการล้มเหลวใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 11

EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM FAILURE



ภาพที่ 11 ระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ (P2) หลังการปรับปรุง

จากผลการคำนวณตามแผนภาพ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับก่อนการปรับปรุงได้ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบค่าโอกาสการล้มเหลวของในระบบ ECCS ก่อนและหลังการปรับปรุง

รหัสระบบ/อุปกรณ์	ชื่อระบบ/อุปกรณ์	ค่าโอกาสการล้มเหลวเดิม	ค่าโอกาสการล้มเหลวใหม่
1. P-2 (ECCS)	ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน	0.448	0.239
2. P-91	ไม่มีน้ำจ่ายให้ระบบ ECCS	0.065	0.018
3. P-90	ระบบวาล์วโซเลนอยด์	0.224	0.049
4. P-85	อุปกรณ์ดักตะกอน	0.066	2.21E-6

ผลการปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

จากการปรับปรุงระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องฉุกเฉิน (ECCS) ด้วยวิธีการดังตารางที่ 14 พบว่าสามารถปรับปรุงลดค่าความเสี่ยงของการที่ระบบ ECCS จะล้มเหลวในการทำงานจาก 0.448 ลงเหลือ 0.242 คิดเป็นร้อยละของความเสี่ยงที่ลดลงได้เท่ากับ 47.3

5.3 การคำนวณค่าความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุฯ หลังการปรับปรุง

เมื่อพิจารณาทั้งระบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย การปรับปรุงระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ (P-4) และระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (P-2) จะมีผลในการปรับปรุงค่าความเสี่ยงของการเกิดเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงเสียหาย (P-0) ดังการคำนวณในสมการต่อไปนี้

$$\text{จากสมการ} \quad P_0 = P_1 \times P_2$$

$$\text{โดย} \quad P_1 = 1 - (1 - P_3)(1 - P_4)$$

$$\text{แทนค่า} \quad P_3 = 0.00136$$

$$\text{และจากการปรับปรุงได้ค่า } P_4 \text{ ใหม่} = 0.0918$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นได้ค่า } P_1 \text{ ใหม่} &= 1 - (1 - 1.36 \times 10^{-3})(1 - 0.0918) \\ &= 0.0930 \end{aligned}$$

$$\text{จากการปรับปรุงระบบ ECCS ได้ค่า } P_2 \text{ ใหม่} = 0.242$$

$$\text{แทนค่า} \quad P_1 = 0.093 \text{ และ } P_2 = 0.242 \text{ ลงในสมการคำนวณค่า } P_0$$

$$\begin{aligned} P_0 &= 0.093 \times 0.242 \\ &= 0.0225 \end{aligned}$$

จากผลการปรับปรุงค่าความเสี่ยงพบว่า สามารถลดค่าความเสี่ยงที่ระบบระบายความร้อนทั้งหมดล้มเหลว (P0) ลงจาก 0.0770 เหลือ 0.0225

จากนั้นจึงแทนค่า $F1 = 9.4 \times 10^{-4}$ และ $P0 = 0.0225$ ลงในสมการที่ 6

$$F0 = 9.4 \times 10^{-4} \times 0.0225$$

ดังนั้น จึงได้ค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์
ปว.-1/1 หลังการปรับปรุง $= 2.11 \times 10^{-5}$ ครั้งต่อปี

วิจารณ์ผลการปรับปรุงค่าความเสี่ยง

จากการปรับปรุงระบบต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการล้มเหลวของระบบโดยรวม คือ ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิและระบบระบายความร้อนฉุกเฉินพบว่า สามารถลดค่าความเสี่ยงของระบบระบายความร้อนทั้งหมดที่จะล้มเหลวลงได้ เหลือ 0.0225 คิดเป็นร้อยละของค่าความเสี่ยงที่ลดลงได้เท่ากับ 70.77 และเมื่อคำนวณค่าความถี่ของการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายของเครื่องปฏิกรณ์ฯลงเหลือ 2.11×10^{-5} ครั้งต่อปี จากเดิม 6.37×10^{-5} ครั้งต่อปี ซึ่งลดลงจากเดิมในระดับที่น่าพอใจ เนื่องจากการทดลองปรับปรุงเฉพาะในระบบย่อยๆ ที่สามารถกระทำได้ง่ายและใช้งบประมาณไม่มากนัก ทั้งนี้ หากมีการเก็บข้อมูลการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ฯอย่างเป็นระบบและนำข้อมูลการซ่อมบำรุงในปัจจุบันมารวมคำนวณด้วย ก็จะทำให้ผลการคำนวณมีความเที่ยงตรงกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น และในการปรับปรุงค่าความเสี่ยงหากมีการนำระบบการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมาดำเนินการร่วมกับการปรับปรุงระบบด้วยวิธีการดังกล่าวอย่างครบถ้วน ก็คาดว่าจะสามารถลดค่าความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลายลงได้เป็นอย่างดี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการประเมินความเสี่ยงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 ในการเกิดอุบัติเหตุแท่งเชื้อเพลิงหลอมละลาย จากสาเหตุการขาดน้ำระบายความร้อนในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยวิธีการหาค่าความน่าจะเป็นจากแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree) เพราะเนื่องจากระบบระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ประกอบเชื่อมโยงกันเป็นจำนวนมาก จึงยากที่จะระบุจุดบกพร่องในระบบได้อย่างชัดเจนด้วยวิธีการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพอื่นๆ เพียงแบบเดียว และด้วยเหตุที่วิธีการหาค่าความน่าจะเป็นนี้ เป็นการผสมผสานวิธีการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเข้าด้วยกัน จึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือและครอบคลุมในทุกสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งแสดงผลค่าความน่าจะเป็นหรือค่าความเสี่ยงของการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวออกมาด้วยค่าตัวเลข จึงง่ายต่อการพิจารณาตัดสินใจในการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์ที่เป็นจุดอ่อนต่อความปลอดภัยของระบบโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งผลจากการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีหาค่าความน่าจะเป็น (Probabilistic Risk Assessment) นี้พบว่า ก่อนการปรับปรุงมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 0.077 โดยในการคำนวณค่าความเสี่ยงนี้ยังไม่ได้นำผลจากการซ่อมบำรุงประจำปีมาใช้ในการคำนวณด้วย ซึ่งจากการปรับปรุงระบบด้วยการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของระบบย่อยด้วยการหาค่าความสำคัญ (Importance Measure) ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทั้งหมด ทำให้สามารถระบุระบบที่เป็นจุดอ่อนของเครื่องปฏิกรณ์ ต่อการเกิดเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงเสียหายได้ คือ อุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนทุติยภูมิและระบบระบายความร้อนจากแกนเครื่องถูกเจลิน

ทั้งนี้ หากระบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 ได้มีการปรับปรุงตามแนวทางในการวิจัยนี้ครบถ้วน ก็จะสามารถลดค่าความเสี่ยงต่อการเกิดเหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงเสียหายหรือหลอมละลายเนื่องจากสาเหตุการขาดน้ำระบายความร้อนลงเหลือ 0.0225 หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 70.77 ซึ่งทั้งนี้ หากมีการเก็บข้อมูลการล้มเหลวอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่น่าเชื่อถือและนำมาใช้ในการคำนวณค่าความเสี่ยงด้วย ก็จะสามารถลดค่าความเสี่ยงของเครื่องปฏิกรณ์ ลงได้อีกมาก

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการดำเนินการจัดเก็บข้อมูลการล้มเหลวของอุปกรณ์ให้ครบถ้วนยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถใช้ข้อมูลจริงในการคำนวณค่าความเสี่ยงของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จึงจะได้ผลการประเมินที่เที่ยงตรงที่สุด รวมทั้งปรับปรุงระบบต่างๆ เพื่อลดค่าความเสี่ยงของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ดังนี้

1. การปรับปรุงระบบระบายความร้อนทุติยภูมิ

1.1. อุปกรณ์ดักจับตะกอน (Strainer)

ควรทำการปรับปรุงด้วยการเพิ่มท่อ Bypass ของน้ำในระบบทุติยภูมิก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ดักจับตะกอน ซึ่งเมื่อเกิดการอุดตันขึ้นกับอุปกรณ์ดักจับตะกอน น้ำในระบบก็ยังคงสามารถไหลเวียนและทำหน้าที่ระบายความร้อนได้ตามปกติ

1.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell & Tube

ในแผนการซ่อมบำรุงประจำปีของเครื่องปฏิกรณ์ฯ ควรกำหนดให้มีการตรวจสอบการอุดตันและขัดผิวด้านท่อภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทุกครั้ง เพื่อลดการเกิดขึ้นของตะกอนและการติดตั้งอุปกรณ์ดักจับตะกอน

2. การปรับปรุงระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน

2.1. ปริมาณน้ำสำรองสำหรับจ่ายให้ระบบ ECCS

ควรมีมาตรการเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีการสำรองน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนฉุกเฉินอย่างเพียงพอตลอดเวลาที่มีการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ รวมทั้งมีเครื่องวัดระดับน้ำที่สามารถแจ้งเตือนเจ้าหน้าที่เดินเครื่องหากระดับน้ำในถังลดลงโดยไม่ทราบสาเหตุ ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขได้ทัน่วงที และลดโอกาสการขาดน้ำสำหรับจ่ายให้แก่ระบบ ECCS

2.2 วาล์วโซเลนอยด์ (Solenoid Valve)

ควรมีการตรวจสอบการทำงานของวาล์ว Solenoid เป็นระยะๆ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม และทำการเปลี่ยนวาล์วตัวใหม่ เมื่อพบว่าเริ่มทำงานขัดข้องจนไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และเพิ่มระบบท่อสำรองที่ใช้วาล์วแบบมือหมุน (Manual Valve) ต่อขนานกับท่อที่ใช้วาล์ว Solenoid เนื่องจากระบบ ECCS ยังคงทำงานได้โดยให้เจ้าหน้าที่เดินเครื่องเป็นผู้หมุนเปิดวาล์ว ถึงแม้ว่าวาล์ว Solenoid จะเกิดการล้มเหลวขึ้นก็ตาม

2.3 อุปกรณ์ดักจับตะกอน

ควรดำเนินการปรับปรุงเช่นเดียวกับข้อ 1.1

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2543. การประเมินความเสี่ยง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- David, B.B. 1976. **Systems Analysis and Design for Safety**. Prentice Hall, New Jersey.
- Farmer, F.R. 1977. **Nuclear Reactor Safety**. Academic Press, London.
- IAEA. 1997. **Generic Component Reliability Data for Research Reactor PSA (IAEA-Tecdoc.-930)**. IAEA, Austria.
- IAEA. 1992. **Manual on Reliability Data Collection for Research Reactor PSAs (IAEA-Tecdoc.- 636)**. IAEA, Austria.
- Bentley, J.P. 1999. **Introduction to Reliability & Quality Engineering (2nd edition)**. Addison-Wesley, Harlow, England.
- Hignett, K.C. 1996. **Practical Safety and Reliability Assessment**. E&FN SPON, London.
- Louvar, J.F. and Louvar, B.D. 1998. **Health and Environmental Risk Analysis**. Prentice Hall, New Jersey.
- McCormick, N. J. 1981. **Reliability and Risk Analysis**. Academic Press, New York.
- Tanipanichskul, P. 1988. **Application of PSA to reduce frequency of unplanned shutdown**. Office of Atomic Energy for Peace, Thailand.
- Busamongkol, Y. 1989. **TRR-1/M1 System Descriptions**. Office of Atomic Energy for Peace, Thailand.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีการประเมินความเสี่ยง

วิธีการประเมินความเสี่ยง

ในการประเมินความเสี่ยงอันตรายของโรงงานแต่ละประเภท จะมีขั้นตอนการดำเนินการประเมินความเสี่ยง 4 ขั้นตอนด้วยกัน (กรมโรงงาน, คู่มือการประเมินความเสี่ยง)
คือ 1. การชี้บ่งอันตราย 2. การพิจารณาโอกาสของการเกิดอันตราย 3. การพิจารณาความรุนแรงของอันตราย 4. การประมาณระดับความเสี่ยง

ทั้งนี้ การเลือกใช้วิธีการชี้บ่งอันตรายจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะของโรงงานและความรุนแรงของอันตรายที่อาจเกิดขึ้น หากเกิดอุบัติเหตุในโรงงานนั้นๆ โดยวิธีการชี้บ่งอันตรายเพื่อประเมินความเสี่ยงต่างๆ ที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังต่อไปนี้

1. Checklist

เป็นวิธีที่ใช้ในการชี้บ่งอันตรายโดยการนำแบบตรวจไปใช้ในการตรวจสอบการดำเนินงานต่างๆ ในโรงงานเพื่อค้นหาอันตราย แบบตรวจประเมินจะประกอบไปด้วยหัวข้อคำถามที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานต่างๆ เพื่อตรวจสอบว่าได้ปฏิบัติตามมาตรฐานการออกแบบ มาตรฐานการปฏิบัติงานหรือกฎหมายเพื่อนำผลจากการตรวจสอบมาทำการชี้บ่งอันตราย

2. What if Analysis

เป็นวิธีการชี้บ่งอันตรายที่ใช้งานได้ง่ายอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ทุกชนิดและกิจกรรมทุกประเภท โดยใช้วิธีการทดลองตั้งคำถาม หากเกิดเหตุการณ์ในลักษณะต่างๆ ขึ้น จะเกิดอะไรขึ้นกับความปลอดภัยของโรงงานที่กำลังพิจารณา ซึ่งต้องมีการประชุมหารือถึงสาเหตุและผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยต้องมีผู้เชี่ยวชาญในหลายๆ ด้าน ที่มีความเข้าใจในระบบต่างๆ ของโรงงานนั้นๆ เป็นอย่างดี เข้าร่วมร่วมให้ความคิดเห็นในแต่ละกรณีที่น่าจะเป็นปัญหาของโรงงาน

3. Hazard and Operability Study (HAZOP)

เป็นเทคนิคการศึกษา วิเคราะห์ และทบทวนเพื่อชี้บ่งอันตรายและปัญหาของระบบต่างๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในการออกแบบที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจ โดยการตั้งคำถามที่

สมมติสถานการณ์ในภาวะต่างๆ โดยการใช้ HAZOP Guide Words ในตารางผนวกที่ ก1 มาประกอบกับปัจจัยการผลิตที่ได้ออกแบบไว้ หรือความบกพร่องและความผิดปกติในการทำงาน เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น เพื่อนำมาชี้บ่งอันตรายหรือค้นหาปัญหาในกระบวนการผลิตซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้

ตารางผนวกที่ ก1 คำที่ใช้ถามขึ้นในการประเมินความเสี่ยงแบบ HAZOP

HAZOP Guide Words	ความบกพร่องหรือผิดปกติในการทำงาน (Operating Deviation)
ไม่ (None)	- ไม่มีการไหล (No Flow) - ไหลย้อนกลับ (Reverse Flow) - ไม่เกิดปฏิกิริยา (No Reaction)
มากกว่า (More)	- อัตราการไหลเพิ่มขึ้น (Increased Flow) - ความดันเพิ่มขึ้น (Increased Pressure) - อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Increased Temperature) - อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Increased Reaction Rate)
น้อยกว่า (Less)	- อัตราการไหลลดลง (Reduced Flow) - ความดันลดลง (Reduced Pressure) - อุณหภูมิลดลง (Reduced Temperature) - อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง (Reduced Reaction Rate)
ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (Part of, as well as Other)	- การเปลี่ยนแปลงวัสดุดิบ (Different Material Present) - สภาวะโรงงานที่แตกต่างจากการปฏิบัติอย่างปกติ (Different Plant Condition from Normal Operation) - การเดินเครื่องจักร (Start up) - การหยุดเครื่องจักร (Shutdown) - การปล่อยสารเคมี ความดัน ฯลฯ (Relief) - ความบกพร่องของระบบน้ำ ระบบไฟ เป็นต้น (Utility Failure) - การกัดกร่อน (Corrosion) - การซ่อมบำรุง (Maintenance)

4. Fault-Tree Analysis (FTA)

เป็นเทคนิคการชี้บ่งอันตรายที่เน้นถึงอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุร้ายแรงที่เกิดขึ้นหรือคาดว่าจะเกิดขึ้น เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดเหตุ ซึ่งเป็นเทคนิคในการคิดย้อนกลับที่อาศัยหลักการทางตรรกวิทยา ในการใช้หลักการและเหตุผล เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุร้ายแรง โดยเริ่มวิเคราะห์จากอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุร้ายแรง ที่เกิดขึ้นหรือคาดว่าจะเกิดขึ้น เพื่อพิจารณาหาเหตุการณ์แรกที่จะเกิดขึ้นก่อนแล้วนำมาแจกแจงขั้นตอนการเกิดเหตุการณ์แรกว่ามาจากเหตุการณ์ย่อยอะไรได้บ้าง และเหตุการณ์ย่อยเหล่านั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร การสิ้นสุดการวิเคราะห์เมื่อพบว่าสาเหตุการเกิดเหตุการณ์ย่อยเป็นผลเนื่องมาจากความบกพร่องของเครื่องจักร อุปกรณ์ หรือความผิดพลาดจากการปฏิบัติงาน

5. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

เป็นเทคนิคการชี้บ่งอันตรายที่ใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบความล้มเหลวและผลที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบชิ้นส่วนเครื่องจักรอุปกรณ์ในแต่ละส่วนของระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์หาผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความล้มเหลวของเครื่องจักรอุปกรณ์

6. Event-Tree Analysis (ETA)

เป็นวิธีการชี้บ่งอันตรายที่มีแนวทางการทำงานสวนทางกับ Fault-Tree Analysis จะใช้จุดตั้งต้นของเหตุการณ์ เช่น MAKE UP VALUE ไม่เปิด มาเป็นจุดเริ่มต้นในการวิเคราะห์ว่าเหตุการณ์จะพัฒนาต่อไปอย่างไร มีมาตรการป้องกันและควบคุมอะไรบ้าง เมื่อมาตรการป้องกันและควบคุมไม่ทำงานตามที่ได้ออกแบบหรือตามที่ได้กำหนดไว้ ผลจะเป็นอย่างไร และหากมาตรการป้องกันและควบคุมไม่ทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ผลจะเป็นอย่างไรจากนั้นหากพบว่ามาตรการที่มีอยู่ไม่เพียงพอก็จะเสนอแนะให้มีการกำหนดมาตรการป้องกัน ควบคุมเพิ่มเติมได้ Event-Tree Analysis มีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ทุกชนิดและกิจกรรมทุกประเภท

7. Probabilistic Risk Assessment (PRA)

นอกจากการชี้ป่งอันตรายออกมาในรูปแบบเชิงคุณภาพ (Qualitative) แล้ว การประเมินเชิงปริมาณ (Quantitative) ก็สามารถบ่งชี้ระดับความเสี่ยงได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเป็นค่าตัวเลข ซึ่งจะช่วยให้การพิจารณาเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงหรือความปลอดภัยทำได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบระหว่างค่าความเสี่ยงในระบบที่พิจารณากับค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (Acceptance Criteria) ดังนั้นจึงมีการนำทฤษฎีความน่าจะเป็นทางสถิติเข้ามาใช้ในการประเมินค่าความเสี่ยงควบคู่กับการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิต้นไม้ แผนภูมิเหตุการณ์ และ FMEA โดยการเก็บข้อมูลค่าโอกาสการเกิดความล้มเหลวของการทำงานตามหน้าที่ของอุปกรณ์แต่ละชนิดในระบบต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ จากนั้นจึงนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ด้วยแผนภาพต้นไม้และคำนวณหาค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุรุนแรงที่สนใจ (Top event) ด้วยสมการความสัมพันธ์แบบ Boolean ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า Probabilistic Risk Assessment หรือการประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีหาค่าความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ประกอบไปด้วยระบบต่างๆ จำนวนมากและทำงานเชื่อมโยงกันอย่างซับซ้อน ยกที่จะพิจารณาหาค่าความเสี่ยงด้วยวิธีการเชิงคุณภาพเพียงอย่างเดียว เช่น อุตสาหกรรมเคมี โรงงานนิวเคลียร์และอากาศยาน เป็นต้น

ภาคผนวก ข การสร้างแผนภูมิต้นไม้ (Construction of Fault Tree)

การสร้างแผนภูมิต้นไม้ (Construction of Fault Tree)

1. คำจำกัดความทั่วไปในแผนภาพต้นไม้

Event (เหตุการณ์) หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบ อาจเป็นที่เกิดขึ้นในระดับชั้นของอุปกรณ์หรือระบบ ซึ่งเหตุการณ์นี้อาจจะไม่ใช่สาเหตุของการขัดข้อง (Failure) ของระบบก็ได้ เพราะเหตุการณ์สามารถเกิดขึ้นได้ในการทำหน้าที่ตามปกติของอุปกรณ์หรือระบบนั้นๆ

Fault event (เหตุการณ์ผิดปกติ) หมายถึง เหตุการณ์ที่บ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดปกติหรือความขัดข้องขึ้น

Normal event (เหตุการณ์ปกติ) หมายถึง เหตุการณ์ที่อาจมีความหมายได้ทั้งสองสถานะ คือ อาจเป็นเหตุการณ์ผิดปกติหรือเป็นเหตุการณ์ปกติก็ได้ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์นั้นๆ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดช่วงเวลาให้ชัดเจน

Basic event (เหตุการณ์มูลฐาน) หมายถึง เหตุการณ์ (ผิดปกติหรือปกติ) ที่เกิดขึ้นในระดับของส่วนประกอบที่เล็กที่สุดของระบบ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึง ส่วนประกอบ (component) ที่มีค่าอัตราการขัดข้อง (failure rate) ที่แน่นอนสำหรับส่วนประกอบนั้นๆ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องดำเนินการแบ่งแยกอีกต่อไป ดังนั้นเหตุการณ์มูลฐานก็คือ การขัดข้องที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่มีค่าอัตราความขัดข้องแล้วนั่นเอง

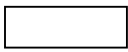
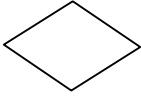
Primary event (เหตุการณ์ปฐมภูมิ) หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดจากลักษณะที่อยู่ภายในของอุปกรณ์นั้นๆ เช่น หลอดไฟไม่ติด เนื่องจากไส้หลอดขาดเอง เป็นต้น

Secondary event (เหตุการณ์ทุติยภูมิ) หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น ไส้หลอดไฟขาด เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าสูงผิดปกติ เป็นต้น

Head event (เหตุการณ์ส่วนนำ) หมายถึง เหตุการณ์ที่อยู่ยอดบนสุดของแผนภาพต้นไม้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ส่วนอื่นๆ ของแผนภาพต้นไม้ โดยทั่วไปจะเป็นเหตุการณ์ที่ทำให้ระบบทำงานเบี่ยงเบนไปจากสภาพการทำงานตามปกติ

Mutually Exclusive Events (เหตุการณ์ที่เป็นอิสระต่อกัน) หมายถึง เหตุการณ์ที่ไม่เกิดขึ้นร่วมกับเหตุการณ์อื่นๆ

ตารางผนวกที่ ข1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิต้นไม้ (Fault Tree Symbols)

สัญลักษณ์	ชื่อ	ความหมาย
	And gate	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุหลายสาเหตุของเหตุการณ์ย่อยเกิดขึ้นพร้อมๆกัน
สาเหตุหลายสาเหตุ		
	Or gate	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องมาจากสาเหตุใด สาเหตุหนึ่งของเหตุการณ์ย่อย
สาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง		
	Basic event เหตุการณ์เริ่มต้นที่เกิดขึ้นใน	เหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นได้ตามปกติ ซึ่งทราบถึงสาเหตุที่เห็นได้ชัดเจนโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป ถือเป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิดอุบัติเหตุ
	Fault tree event เหตุการณ์ย่อย	เหตุการณ์ย่อยที่ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ต่อเนื่องจนกระทั่งนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ
	Undeveloped event เหตุการณ์ที่วิเคราะห์ต่อไม่ได้	เหตุการณ์ย่อยที่ไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป เนื่องจากไม่มีข้อมูลสนับสนุน
	External event เหตุการณ์ภายนอก	เหตุการณ์ภายนอกหรือปัจจัยภายนอกที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์เริ่มต้นในลักษณะต่าง ๆ

ที่มา: Louvar (1998)

2. การสร้างแผนภูมิต้นไม้

ในการสร้างแผนภูมิต้นไม้ มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ระบุเหตุการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับระบบ หรืออุบัติเหตุร้ายแรง

ขั้นตอนที่ 2 ให้คำจำกัดความที่ชัดเจนว่าจะอะไรคือความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 ระบุว่าเมื่ออุปกรณ์ใดบ้างที่เมื่อเกิดความล้มเหลว ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดความล้มเหลวของระบบหรือไม่

(I) หากมีก็จะระบุว่าเป็นสถานะของอุปกรณ์ล้มเหลว (state of component) และเพิ่ม OR gate ต่อเข้ากับเหตุการณ์นั้น และค้นหาสิ่งที่เกิดขึ้นในระดับปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และ รูปแบบของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดพลาด (Command mode failure fault)

(II) ถ้าพิจารณาแล้วว่าไม่มีอุปกรณ์ใดล้มเหลว ก็จะระบุว่าเป็นความผิดพลาดจากระบบ (state of system fault) จากนั้นจะทำการพิจารณาต่อเพื่อหาสิ่งที่เป็นสาเหตุจำนวนน้อยที่สุดซึ่งเพียงพอที่จะทำให้ระบบเกิดความผิดพลาด ในขั้นตอนนี้อาจต่อ AND gate หรือ OR หรือ Inhibit gate เข้าภายใต้เหตุการณ์ที่ไม่ต้องการ หรืออาจไม่ต่อ gate ใดๆ เลยก็ได้

3. สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการสร้างแผนภูมิต้นไม้

1. หากอุปกรณ์ในสภาพการทำงานปกติ มีความเกี่ยวข้องกับลำดับการเกิดเหตุผิดพลาดในระบบ ให้ถือว่า อุปกรณ์นั้นทำงานตามปกติ

2. ตัวแปรเข้าทั้งหมด (Input) ในแต่ละ gate ควรมีการระบุที่ชัดเจนก่อนที่จะมีการดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

3. ผลลัพธ์ของแต่ละทางออก (Gate output) ต้องสามารถระบุว่าเป็นสาเหตุของเหตุการณ์ผิดพลาดที่อยู่เหนือขึ้นไปได้อย่างชัดเจน และต้องไม่มีเส้นเชื่อมต่อระหว่างทางออกโดยตรง

4. กฎพื้นฐานของการสร้างแผนภูมิต้นไม้

นอกจากนี้ยังมีกฎพื้นฐานที่ต้องคำนึง ในระหว่างการสร้างแผนภูมิต้นไม้ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 ระบุลักษณะของเหตุการณ์ที่ถือเป็นเหตุผิดพลาด โดยระบุรายละเอียดและช่วงระยะเวลาของความผิดพลาดในแต่ละเงื่อนไข รวมถึงระบุว่า

- ก. สถานะของความผิดพลาดของระบบและอุปกรณ์คืออะไร
 - ข. เมื่อใดระบบหรืออุปกรณ์จะอยู่ในสถานะที่ผิดพลาด
- และทดสอบเหตุการณ์ที่ผิดพลาดด้วยการตั้งคำถามว่า
- ค. สิ่งที่เกิดขึ้น คือความผิดพลาดหรือไม่
 - ง. มีความเกี่ยวข้องระหว่างสิ่งที่เกิดขึ้นกับเวลาที่เกิดขึ้น ในแง่ของลักษณะของความผิดพลาดหรือไม่

กฎข้อที่ 2 มีคำชี้แจงความผิดพลาด (Fault statement) พื้นฐานอยู่ 2 ชนิด คือ สถานะของระบบกับสถานะของอุปกรณ์ ในการสร้างแผนภูมิต้นไม้ต่อ

- ก. หากเป็นชนิดสถานะของระบบ ให้ใช้กฎข้อ 3
- ข. หากเป็นชนิดสถานะของอุปกรณ์ ให้ใช้กฎข้อ 4

กฎข้อที่ 3 สถานะความผิดพลาดของระบบอาจใช้ AND, OR, INHIBIT Gate หรือ no gate ทั้งหมดก็ได้ โดยในการคำนวณว่าจะใช้ทางออกไหนนั้น ความผิดพลาดจะต้อง

- ก. น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น และเป็นเหตุการณ์ที่ผิดพลาดเพียงพอ
- ข. เป็นเหตุผิดพลาดที่เกิดขึ้นทันทีทันใด

ในการดำเนินการต่อไป ให้ระบุตัวแปรเข้าของเหตุผิดพลาดเข้ากับทางออกที่เหมาะสม

กฎข้อ 4 สถานะความผิดพลาดของอุปกรณ์มักจะใช้ OR gate

ในการดำเนินการต่อไป ให้มองหาเหตุผิดพลาดปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และจากการไม่ทำตามคำสั่ง หลังจากนั้นจึงกำหนดให้เหล่านั้นเป็นเหตุผิดพลาด

- ก. ความขัดข้องปฐมภูมิ คือความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายใต้สภาพการทำงานปกติที่ได้ออกแบบไว้
- ข. ความล้มเหลวทุติยภูมิ คือความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ทำงานนอกเหนือจากสภาพแวดล้อมที่ได้ออกแบบไว้
- ค. ความผิดพลาดต่อคำสั่งคือการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดจากความผิดพลาดของระบบควบคุม

กฎข้อ 5 ไม่มีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างทางเข้าออก (Gate-to-gate relationship) เช่น การสร้างเหตุการณ์ใดๆขึ้นระหว่างทางเข้าออก

กฎข้อ 6 ไม่มีเรื่องอรรถรย์ ทุกสิ่งทีคาดว่าจะเกิดขึ้นตามปกติเมื่อเกิดเหตุผิดพลาดขึ้นคงจะต้องเกิดขึ้นและเป็นสิ่งต่างๆที่ควรจะเกิดขึ้นเท่านั้น เช่นเดียวกันกับระบบป้องกันทีคาดว่าจะต้องทำงานเมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้น

กฎข้อ 7 ใน OR gate ตัวแปรเข้าไม่ใช่สาเหตุของตัวแปรออกเสมอไปทุกตัว หากเกิดมีตัวแปรเข้าเกิดขึ้น และมีตัวแปรออกเกิดขึ้น เหตุผิดพลาดภายใต้ทางเข้าออกก็คือการให้คำจำกัดความกับเหตุการณ์ของตัวแปรออกที่เกิดขึ้น

กฎข้อ 8 ใน AND gate กำหนดให้เป็นความสัมพันธ์แบบเป็นเหตุเป็นผลกัน หากตัวแปรเข้าเกิดขึ้นพร้อมๆกัน จึงจะมีผลลัพธ์ก็คือ ตัวแปรออกเกิดขึ้น

กฎข้อ 9 ทางเข้าออกแบบไตร่ตรง (Inhibit gate) จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุผิดพลาดหนึ่งกับความผิดพลาดอื่นๆ แต่เงื่อนไขบอกเหตุ (Indicated condition) จะต้องมีการนำเสนอและความผิดพลาดนั้นจะต้องมีเพียงประการเดียวทีทำให้เกิดตัวแปรออกหากเป็นไปตามเงื่อนไขทีได้นำเสนอไว้ เงื่อนไขทีต้องไตร่ตรงอาจจะเป็นความผิดพลาดหรือสถานการณ์ ซึ่งนี่ก็คือสิ่งทีทำให้ AND gate และ INHIBIT gate มีความแตกต่างกัน

5. วิธีการตั้งชื่อเหตุการณ์พื้นฐานหรือประตูทางออก

- ต้องมีความง่าย ไม่ซับซ้อน
- เป็นชื่อเฉพาะตัว
- ไม่ใช่ภาษาคอมพิวเตอร์
- จำง่าย
- สามารถระบุความเชื่อมโยงได้

ภาคผนวก ค เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย TRR-1/M1

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Research Reactor)

1. ความหมาย หรือนิยามของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

“เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ อุปกรณ์สำหรับให้ปฏิกิริยาฟิชชันแบ่งแยกนิวเคลียสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสามารถควบคุมได้ ใช้สำหรับผลิตนิวตรอน หรือพลังงานความร้อน มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ แกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งบรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน ตัวสะท้อนนิวตรอน ตัวทำให้เย็น วัสดุกำบังรังสี และระบบควบคุม”

ที่มา: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (2547)

ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานวิจัยในสาขาต่างๆ เช่น

- ฟิสิกส์มูลฐานและฟิสิกส์ประยุกต์
- ชีววิทยา
- เคมี
- ช่วยในการตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นจากรังสีต่อวัสดุต่างๆ

คุณลักษณะที่เด่นของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยก็คือ มีท่อส่งนิวตรอนหลายท่อที่ถูกติดตั้งไว้ใกล้แกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะนำนิวตรอนและรังสีแกมมาออกมาจากแกน เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตไอโซโทปบางชนิดอีกด้วย”

จากคำจำกัดความดังกล่าวจะเห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย มีลักษณะแตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์กำลัง (Power Reactor) อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เครื่องปฏิกรณ์กำลังจะนำเอาพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันมาใช้ประโยชน์และทิ้งกัมมันตภาพรังสีออกไป ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจะใช้ประโยชน์จากผลผลิตของปฏิกิริยาฟิชชันเป็นหลัก ซึ่งก็คือกัมมันตภาพรังสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากอนุภาคนิวตรอนและระบายความร้อนทิ้งออกไป

2. ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะถูกจำแนกประเภทได้โดยคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์นั้นๆ ตามปกติขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะแสดงได้ในรูปของระดับกำลังและปริมาณนิวตรอน

ฟลักซ์ ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยกำลัง มีค่าอยู่ระหว่าง 10 กิโลวัตต์ความร้อนไปจนถึงมากกว่า 50 เมกกะวัตต์

- เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่มีกำลังน้อยกว่า 1 เมกกะวัตต์ จะถูกจัดอยู่ในประเภท “กำลังต่ำ”
- เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่มีกำลังระหว่าง 1 เมกกะวัตต์ ถึง 5 เมกกะวัตต์ จะถูกจัดอยู่ในประเภท “กำลังปานกลาง”
- เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่มีกำลัง 10 เมกกะวัตต์ หรือมากกว่า จะถูกจัดอยู่ในประเภท “กำลังสูง”

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยก็คือ ค่า “ฟลักซ์” (Flux) ฟลักซ์ คือ การวัดความเข้มของนิวตรอน สามารถให้คำจำกัดความได้ว่า คือ จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านลงบนพื้นที่ซึ่งมีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ในเวลา 1 วินาที (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที) นิวตรอนฟลักซ์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเฉพาะจำนวนนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วของนิวตรอนเหล่านั้นด้วย ดังนั้นจึงหาได้โดยการคูณค่าจำนวนนิวตรอนใน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน ของสารที่ทำให้เกิดฟิชชัน กับความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนเหล่านั้นเขียนย่อได้เป็น “nv” หรือใช้สัญลักษณ์ “ ϕ ”

$$\phi = nv$$

เมื่อ n = ความหนาแน่นของนิวตรอนใน 1 ตารางเซนติเมตร
 V = ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน cm/sec

ตัวอย่างเช่น ณ ตำแหน่งหนึ่งในแกนปฏิกรณ์ มีนิวตรอนจำนวน 1 ล้านล้านตัววิ่งผ่าน พื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรในแต่ละวินาที จะเรียกว่าบริเวณนั้นมีค่าความเข้มของนิวตรอนหรือค่านิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 10^{12} nv หรือ 10^{12} n/cm²-sec

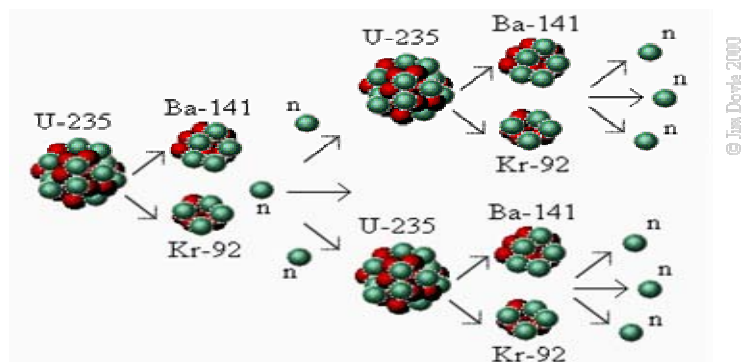
ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเกือบทั้งหมดที่มีการเดินเครื่องใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จะมีค่านิวตรอนฟลักซ์ ประมาณ 10^{12} n/cm²-sec หรือบางเครื่องอาจมีค่าฟลักซ์สูงมากกว่า 5×10^{14} n/cm²-sec

โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ส่วนใหญ่จะมีกำลังประมาณ 2 เมกะวัตต์ความร้อน ถ้าพลังงานทั้งหมดถูกแปลงเป็นไฟฟ้าจะสามารถให้บริการตามความต้องการของเมืองหนึ่งที่มีประชากรประมาณ 4,000 คน แต่ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์วิจัยนี้จะถูกระบายทิ้ง

3. หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติในปัจจุบัน มีชื่อเป็นทางการว่า ปปว.1/1 หรือ TRR-1/M1 ซึ่งย่อมาจาก เครื่องปรมาณูวิจัยไทยเครื่องที่ 1 /ปรับปรุงครั้งที่ 1 (Thai Research Reactor -1/ Modification) เริ่มเดินเครื่องใช้งานตั้งแต่ พ.ศ. 2520 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบบ่อน้ำ (Pool type reactor) มีแกนปฏิกรณ์ (Reactor Core) ทรงกระบอกที่ทำจาก aluminum ซึ่งโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์แขวนติดอยู่กับสะพานเหล็กที่อยู่เหนือบ่อปฏิกรณ์ ใช้แท่งเชื้อเพลิงที่มีลักษณะแท่งทรงกลม (Rod type) โดยเนื้อเชื้อเพลิงเป็นชนิด Uranium Zirconium Hydride (UZrH) ชนิดความเข้มข้นยูเรเนียมต่ำ (Low enrich uranium, 20% U235) บรรจุอยู่ในเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง (Fuel cladding) ที่ทำจากโลหะ stainless steel เบอร์ 304 (SS304) มีแท่งควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Control rods) จำนวน 5 แท่ง ซึ่งบรรจุสาร Boron carbide (B_4C) ที่มีคุณสมบัติดูดจับนิวตรอนที่ดี

หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู คือ เมื่อยูเรเนียม 235 ที่อยู่ในเนื้อเชื้อเพลิง ได้ถูกทำให้แตกตัวด้วยนิวตรอนที่มาจากแหล่งต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source) ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของ U-235 ที่จะให้พลังงานความร้อนและนิวตรอนอีกจำนวนหนึ่งออกมา ดังรูปที่ ส่วน U-235 หลังจากการเกิดปฏิกิริยาสิ้นสุดลงก็จะกลายสภาพเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการแตกตัว ที่เรียกว่า Fission product และนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ในครั้งแรกก็จะวิ่งไปกระทบกับ U-235 ที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ต่อไปเรื่อยๆ และในการเดินเครื่องปฏิกรณ์จะควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้ โดยใช้แท่งควบคุมในการดูดจับนิวตรอนที่เกิดขึ้นให้มีจำนวนเท่าที่เราต้องการ เนื่องจากระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์จะแปรผันตามจำนวนความเข้มข้นของนิวตรอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Neutron flux)



ภาพผนวกที่ ค1 ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ของ U-235

ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จากนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ในการทดลองทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ นิวเคลียร์เคมี อีกทั้งยังใช้ในการผลิตสารกัมมันตภาพรังสีที่ใช้ในทางการแพทย์และทางอุตสาหกรรม อาทิเช่น สารรังสีที่ใช้ในงานตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive testing) ที่นำไปใช้ในการตรวจสอบหอกลับ เป็นต้น โดยการใช้ประโยชน์จะมีความแตกต่างจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ดังสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่

ตารางผนวกที่ ค1 แสดงความแตกต่างระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์
เพื่องานวิจัยทางนิวเคลียร์	เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า
ใช้ประโยชน์จากนิวตรอน	ใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อน
20%, U-235	3-4%, U-235

4. ระบบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

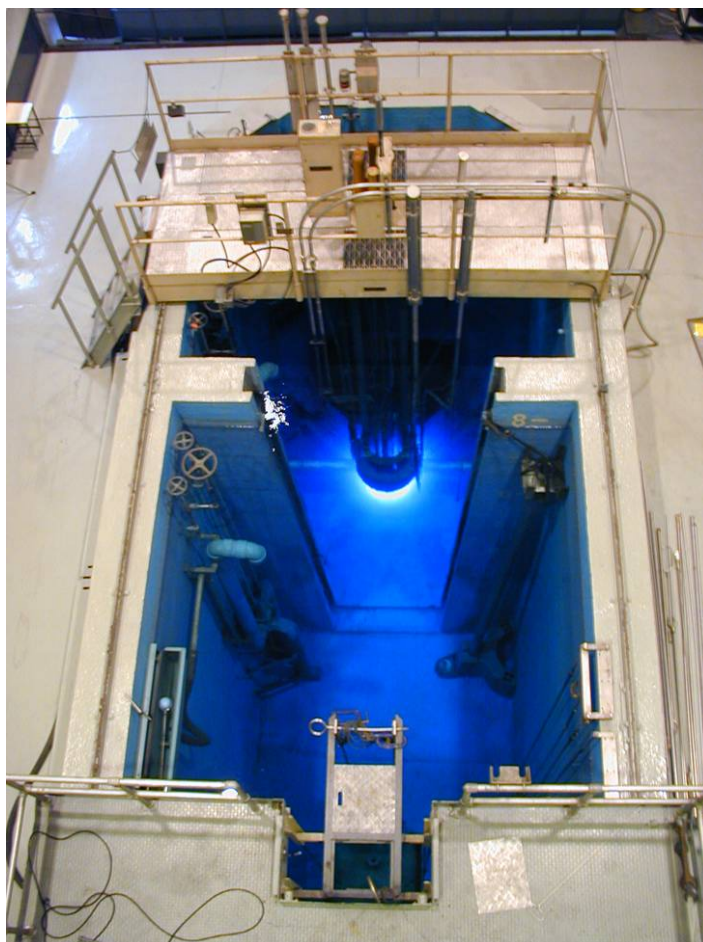
เครื่องปฏิกรณ์ TRR-1/M1 ประกอบไปด้วยระบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 อาคารเครื่องปฏิกรณ์และระบบหมุนเวียนอากาศ

4.2 บ่อปฏิกรณ์และการกำบังรังสี ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ผนังด้านข้างของบ่อจะมีท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ซึ่งเป็นท่อของระบบระบายความร้อนฝังทะลุผาด้านข้าง

ของบ่อ ส่วนผนังบ่อเป็นผนังคอนกรีตชนิดความหนาแน่นสูง (High density concrete) ที่มีความหนาแน่น 3.5 gm/cm^3 ส่วนบนสุดของบ่อหนา 1.5 ฟุต และจะเพิ่มความหนาเป็นชั้นๆ ชั้นละ 1 ฟุตตามระดับความสูง ชั้นล่างสุดจะมีความหนามากที่สุดคือ 4.5 ฟุต

ขนาดของบ่อปฏิกรณ์โดยประมาณ กว้าง 3.5 เมตร ยาว 12 เมตร ลึก 8.5 เมตร สามารถบรรจุน้ำได้ประมาณ 64,800 แกลลอน (หรือประมาณ 245 ลูกบาศก์เมตร)



ภาพผนวกที่ ค2 บ่อปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1
ที่มา: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (2548)

4.3 แกนปฏิกรณ์และส่วนประกอบ การจัดเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์จะมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal array) แกนเครื่องปฏิกรณ์จะบรรจุอยู่ในถังอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 55 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร ภายในแท่งเชื้อเพลิงจะบรรจุอยู่ในลักษณะตั้งตรง ส่วนบนและส่วนล่างของแท่งเชื้อเพลิงเป็น Graphite reflector ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนให้กลับเข้ามาทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงภายในแกน โดยแกนปฏิกรณ์และอุปกรณ์ทั้งหมดจะอยู่ใต้น้ำที่มีคุณสมบัติกำบังรังสีที่ดี



ภาพผนวกที่ ค3 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1

ที่มา: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (2548)

4. ระบบน้ำหล่อเย็น เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู คือการใช้ประโยชน์จากนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จึงต้องมีการ

ระบายออกจากแกนปฏิกรณ์ โดยใช้ระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) มีหลักการทำงานคือ น้ำที่อยู่ในแกนปฏิกรณ์เมื่อได้รับความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็จะลอยสูงขึ้น และน้ำเย็นที่อยู่เบื้องล่างก็จะลอยขึ้นมาแทนที่ เมื่อน้ำร้อนลอยตัวขึ้นมาก็จะถูกดูดออกไปด้วยเครื่องปั๊มน้ำ (ระบบปฐมภูมิ) ด้วยอัตราการไหลประมาณ 1,060 แกลลอนต่อนาที ส่งผ่านไปที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ส่วนความร้อนที่เพิ่มขึ้นของน้ำในระบบทุติยภูมิ (Secondary) ก็จะถูกระบายออกสู่บรรยากาศ ที่บริเวณหอระบายความร้อน (Cooling tower)

5. ระบบควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ฯ (Control System) มีหน้าที่ ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ โดยมีแท่งควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Control Rod) ของเครื่องปฏิกรณ์ทำหน้าที่ดังกล่าว

สำหรับแท่งควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Control Rod) ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 นั้น มีด้วยกันทั้งหมด 5 แท่ง ดังนี้

- Safety Rod 1 แท่ง
- Regulating Rod 1 แท่ง
- Shim Rod 2 แท่ง
- Transient Rod 1 แท่ง

Regulating, Safety และ Shim Rod ประกอบด้วย สาร Boron carbide (B_4C) เป็นตัวดูดจับนิวตรอน โดยด้านบนของสารดูดจับนิวตรอนเป็นอากาศ ส่วนด้านล่างเป็นเนื้อเชื้อเพลิง (Fuel follower control rod) ซึ่งทั้งหมดบรรจุอยู่ในเปลือกหุ้ม (Cladding) ที่ทำจากโลหะ stainless steel เบอร์ 304 ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแท่งควบคุมขึ้นลงในแกนปฏิกรณ์

Transient Rod ประกอบด้วย สาร Boron carbide (B_4C) เป็นตัวดูดจับนิวตรอนเหมือนกับแท่งอื่นๆ แต่ทั้งด้านบนและด้านล่างของสารดูดจับนิวตรอนเป็นอากาศ บรรจุอยู่ในเปลือกหุ้ม (Cladding) ที่ทำจาก อลูมิเนียม ใช้แรงลม (Pneumatic Drive) ในการขับเคลื่อนแท่งควบคุมขึ้นลงในแกนปฏิกรณ์

6. ระบบหล่อเย็นแกนปฏิกรณ์ฉุกเฉิน (Emergency Core Cooling System, ECCS)

ระบบหล่อเย็นแกนปฏิกรณ์ฉุกเฉิน ทำหน้าที่ ระบายความร้อนออกจากเชื้อเพลิง ในกรณีที่สูญเสีย น้ำในบ่อปฏิกรณ์ซึ่งเป็นระบบหล่อเย็นปกติ ซึ่งจะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อน้ำภายในบ่อปฏิกรณ์ลดลง 16 ฟุต จากระดับปกติ ระบบจะดับเครื่องปฏิกรณ์ลงและจะเริ่มฉีดน้ำเข้าไปในบ่อปฏิกรณ์ทางด้านบนของแกนปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 20 แกลลอนต่อนาที จนกว่าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงจะลดลงเหลือต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส

7. เชื้อเพลิงและเปลือกหุ้มเชื้อเพลิง (Fuel and cladding characteristic)

แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 มี 2 ชนิด คือ

- แท่งเชื้อเพลิงแบบธรรมดา
- แท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีหัววัดอุณหภูมิภายใน (Instrumented fuel element)

เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารของแข็งที่มีส่วนผสมเนื้อเดียว (homogenous mixture) ของ zirconium – hydride moderator ผสมกับ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ยูเรเนียม เป็น UZrH โดยมียูเรเนียม 8.5% โดยน้ำหนัก และเสริมสมรรถนะ (Enrichment) U-235 20% ซึ่งบริเวณกึ่งกลางของแท่งเชื้อเพลิง (active fuel) ถูกเจาะเป็นรูเล็ก เพื่อเสียบแท่ง hydrogen-zirconium ส่วนด้านบนและล่างของแท่งเชื้อเพลิงจะบรรจุแท่งกราไฟท์บรรจุอยู่ในเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง (Fuel cladding) ที่ทำจากโลหะ stainless steel เบอร์ 304

ส่วนแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีหัววัดอุณหภูมิภายใน (Instrumented fuel element) มีลักษณะและส่วนประกอบเหมือนเชื้อเพลิงแบบธรรมดา แต่ภายในเนื้อเชื้อเพลิงจะมีหัววัดอุณหภูมิฝังอยู่

โดยแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมดภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเรียงเป็นรูปหกเหลี่ยม ตามแนว horizontal ของ core frame structure

ภาคผนวก ง

รายละเอียดสัญลักษณ์ของระบบและอุปกรณ์ต่างๆในแผนภาพต้นไม้

ตารางผนวกที่ 1 รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 4

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้	คำอธิบายเหตุการณ์
P0	Fuel Damage	เหตุการณ์แท่งเชื้อเพลิงเกิดการหลอมละลาย
P1	Main Cooling System	ระบบระบายความร้อนหลักล้มเหลว
P2	Emergency Core Cooling System	ระบบระบายความร้อนฉุกเฉินล้มเหลว
P3	Water Circulate System	ระบบหมุนเวียนน้ำจากบ่อปฏิกรณ์ล้มเหลว
P4	Secondary Cooling System	ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิล้มเหลว
P5	Auxiliary System	ระบบสนับสนุนน้ำระบายความร้อนล้มเหลว
P6	Primary Cooling System	ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิล้มเหลว
P7	Auxiliary Inlet System	ระบบน้ำเข้าของระบบสนับสนุนล้มเหลว
P8	Aux.Pump Sys.	ระบบปั๊มน้ำของระบบสนับสนุนล้มเหลว
P9	Primary Inlet System	ระบบน้ำเข้าของระบบปฐมภูมิล้มเหลว
P10	Primary Outlet System	ระบบน้ำออกของระบบปฐมภูมิล้มเหลว
P11	Primary Pump	ระบบปั๊มน้ำของระบบปฐมภูมิล้มเหลว
P12	V-209	วาล์วน้ำ V209 ล้มเหลวในการเปิด
P13	V-210	วาล์วน้ำ V210 ล้มเหลวในการเปิด
P14	V-211	วาล์วน้ำ V211 ล้มเหลวในการเปิด
P15	V-212	วาล์วน้ำ V212 ล้มเหลวในการเปิด
P16	Flow Rate Meter	เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ไม่ทำงาน
P17	Pipe2"	ท่อน้ำของระบบสนับสนุนฯ แตกหรืออุดตัน
P18	Rasin Tank	ถังเรซินของระบบสนับสนุนฯ เกิดการอุดตัน
P19	V-204	วาล์วน้ำ V204 ล้มเหลวในการเปิด
P20	V-202	วาล์วน้ำ V202 ล้มเหลวในการเปิด
P21	P-403	ปั๊มน้ำหลักของระบบสนับสนุนฯ ไม่ทำงาน
P22	P-403-Standby	ปั๊มน้ำสำรองของระบบสนับสนุนฯ ไม่ทำงาน

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้ม	คำอธิบายเหตุการณ์
P23	V-215	วาล์วน้ำ V215 ล้มเหลวในการเปิด
P24	V-201	วาล์วน้ำ V201 ล้มเหลวในการเปิด
P25	Micro Filter	แผ่นกรองน้ำ (Micro filter) เกิดการอุดตัน
P26	V-207	วาล์วน้ำ V207 ล้มเหลวในการเปิด
P27	V-3	วาล์วน้ำ V3 ล้มเหลวในการเปิด
P28	V-4	วาล์วน้ำ V4 ล้มเหลวในการเปิด
P29	Pipe 10"	ท่อน้ำของระบบปฐุมภูมิ แตกหรืออุดตัน
P30	V-1	วาล์วน้ำ V1 ล้มเหลวในการเปิด
P31	V-2	วาล์วน้ำ V2 ล้มเหลวในการเปิด
P32	Decay Tank	ถังหน่วงให้สารรังสีสลายตัวเกิดการอุดตัน
P33	P-401	ปั้มน้ำหมายเลข401 ของระบบปฐุมภูมิไม่ทำงาน
P34	P-401 Backup	ปั้มน้ำสำรองของระบบปฐุมภูมิไม่ทำงาน

ตารางผนวกที่ 2 รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 5

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้ม	คำอธิบายเหตุการณ์
P4	Secondary Cooling System	ระบบระบายความร้อนทุติยภูมิล้มเหลว
P35	Cooling Tower Failure	ระบบหอระบายความร้อนทั้งหมดล้มเหลว
P36	Feeding System Failure	ระบบส่งน้ำระบายความร้อนล้มเหลว
P37	Heat Exchanger	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดล้มเหลว

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้	คำอธิบายเหตุการณ์
P38	Cooling Tower Failure (500 ton)	ระบบหอระบายความร้อนขนาด 500 ตัน ล้มเหลว
P39	Cooling Tower Failure (800 ton)	ระบบหอระบายความร้อนขนาด 800 ตัน ล้มเหลว
P40	Pump Failure	ระบบปั๊มส่งน้ำทั้งหมดล้มเหลว
P41	Heat Exchanger System 1 MW	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 1 MW. ล้มเหลว
P42	Heat Exchanger System 2.5 MW	ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 2.5 MW. ล้มเหลว
P43	V-103	วาล์วน้ำ V103 ล้มเหลวในการเปิด
P44	CT-500	หอระบายความร้อนขนาด 500 ตัน ล้มเหลว
P45	V-105	วาล์วน้ำ V105 ล้มเหลวในการเปิด
P46	V-110	วาล์วน้ำ V110 ล้มเหลวในการเปิด
P47	CT-800	หอระบายความร้อนขนาด 800 ตัน ล้มเหลว
P48	V-111	วาล์วน้ำ V111 ล้มเหลวในการเปิด
P49	Sec. Pipe Failure	ท่อส่งน้ำในระบบทุติยภูมิล้มเหลว
P50	Strainer 101	อุปกรณ์ดักตะกอนหมายเลข 101 ตัน
P51	V-101	วาล์วน้ำ V101 ล้มเหลวในการเปิด
P52	P-402	ปั๊มน้ำหลัก (P-402) ล้มเหลว
P53	P-402 Standby	ปั๊มน้ำสำรอง (P-402-Standby) ล้มเหลว
P54	V-104	วาล์วน้ำ V104 ล้มเหลวในการเปิด
P55	V-102	วาล์วน้ำ V102 ล้มเหลวในการเปิด
P56	V-5	วาล์วน้ำ V5 ล้มเหลวในการเปิด
P57	V-7	วาล์วน้ำ V7 ล้มเหลวในการเปิด

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้	คำอธิบายเหตุการณ์
P58	Shell&Tube	Shell & Tube Heat Exchanger ล้มเหลว
P59	V-109	วาล์วน้ำ V109 ล้มเหลวในการเปิด
P60	V-107	วาล์วน้ำ V107 ล้มเหลวในการเปิด
P61	V-108	วาล์วน้ำ V108 ล้มเหลวในการเปิด
P62	V-8	วาล์วน้ำ V8 ล้มเหลวในการเปิด
P63	PHE.	Plate Type Heat Exchanger ล้มเหลว
P64	V-106	วาล์วน้ำ V106 ล้มเหลวในการเปิด
P65	V-6	วาล์วน้ำ V6 ล้มเหลวในการเปิด

ตารางผนวกที่ ง3 รายละเอียดของอุปกรณ์และเหตุการณ์ต่างๆที่แสดงในภาพที่ 6

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้	คำอธิบายเหตุการณ์
P2	ECCS	ระบบระบายความร้อนฉุกเฉินล้มเหลว
P66	Discharge Nozzle	หัวฉีดน้ำระบายความร้อนฉุกเฉินล้มเหลว
P67	Piping 2"	ท่อส่งน้ำในระบบล้มเหลว
P68	Flow Switch	สวิทช์การไหลของน้ำ (Flow switch) ล้มเหลว
P69	V-302	วาล์วน้ำ V302 ล้มเหลว
P70	Pump(P2)	ปั๊มน้ำหมายเลข 2 ล้มเหลว
P71	Tab Line	ท่อน้ำจากการประปาล้มเหลวหรือไม่มีน้ำ
P72	Demin. Tank 4.5 ton	ถังน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้วล้มเหลว
P73	Pump (P1)	ปั๊มน้ำหมายเลข 1 ล้มเหลว
P74	V-301	วาล์วน้ำ V301 ล้มเหลว
P75	Pressure Tank	ถังน้ำอัดความดัน (Pressure Tank) ล้มเหลว
P76	Tank (20 ton)	ถังน้ำขนาด 20 ตันล้มเหลว

ตารางผนวกที่ ง3 (ต่อ)

ชื่อเหตุการณ์	สัญลักษณ์ในแผนภาพต้นไม้ม	คำอธิบายเหตุการณ์
P77	V-304	วาล์วน้ำ V304 ล้มเหลว
P78	V-306	วาล์วน้ำ V306 ล้มเหลว
P79	P-404	ปั๊มน้ำหลักหมายเลข 404 ล้มเหลว
P80	P-404 (Standby)	ปั๊มน้ำสำรองหมายเลข 404 ล้มเหลว
P81	Pressure Switch	สวิตช์ความดัน (Pressure switch) ล้มเหลว
P82	Water Level Switch	สวิตช์ระดับน้ำ (Level switch) ล้มเหลว
P83	Battery	แบตเตอรี่ลื้ลลลลลในการจ่ายไฟ
P84	Solenoid Valve	วาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า (Solenoid Valve) ล้มเหลว
P85	Strainer 301	ตัวคักตะกอน (Strainer) หมายเลข 301 อุดตัน
P86	150 Ton Demin. Storage Tank	ถังน้ำขนาด 150 ตันไม่มีน้ำ
P87	Treated Water (Demin.)	ไม่มีน้ำที่ผ่านการปรับสภาพจ่ายให้ระบบ ระบายความร้อนฉุกเฉิน
P88	Untreated Water	ไม่มีน้ำประปาจ่ายให้ระบบระบายความร้อน ฉุกเฉิน
P89	ECCS Pump Failure	ปั๊มน้ำของระบบ ECCS ทั้งหมดลื้ลลลล
P90	Automatic Valve System	ระบบวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า ล้มเหลว
P91	Water Supply	ไม่มีน้ำจ่ายให้ระบบ ECCS

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสมเจตน์ สุดประเสริฐ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 กันยายน 2514
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (อุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยรังสิต (2536)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรนิเวศลิษฐ์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ