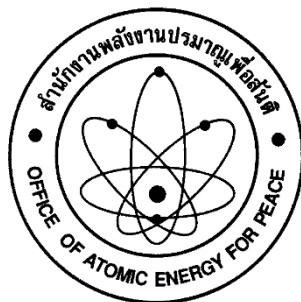




รายงานสรุปผลการดำเนินงานโครงการเสริมสร้างศักยภาพในการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์
ด้านการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
ประจำปีงบประมาณ 2563 - 2565

จัดทำโดย

กองอนุญาตทางนิวเคลียร์และรังสี
กลุ่มงานอนุญาตทางนิวเคลียร์

บทคัดย่อ

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติมีหน้าที่กำกับดูแลการใช้ประโยชน์จากนิวเคลียร์ในประเทศไทย ภารกิจภายใต้ พ.ร.บ. 2559 กำหนดให้สถานประกอบการทางนิวเคลียร์ต้องขออนุญาตในการดำเนินการต่างๆ ประกอบด้วย การเลือกสถานที่ตั้ง การก่อสร้าง การดำเนินการ และการเลิกดำเนินการ ในปัจจุบันมีสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ที่ดำเนินการอยู่ 1 แห่ง คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ปว.-1/1 ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) และมีโครงการจัดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยใหม่อีก 2 โครงการ คือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยขนาด 45 กิโลวัตต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) และโครงการจัดตั้งศูนย์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยแห่งใหม่ของ สทน. ดังนั้น กลุ่มอนุญาตทางนิวเคลียร์ กองอนุญาตทางนิวเคลียร์และรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) จึงต้องเตรียมความพร้อมในการออกใบอนุญาตสำหรับการดำเนินการต่าง ๆ ของสถานประกอบการและโครงการดังกล่าว

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ประกอบการพิจารณาให้อนุญาตก่อสร้าง เป็นโครงการต่อเนื่องที่มีระยะเวลา 3 ปี ในปีที่ 1 (ปีงบประมาณ 2563) ได้ทำการฝึกอบรมพื้นฐานการประเมินความปลอดภัย ซึ่งรวมถึงหลักการและการวิเคราะห์คำนวณเพื่อประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย และจัดซื้อเอกสารมาตรฐานสำหรับใช้อ้างอิง ปีที่ 2 (ปีงบประมาณ 2564) ได้จัดทำระบบประมวลผลสำหรับการประเมินความปลอดภัยสำเร็จจำนวน 5 ระบบ สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของ มทส. ในเบื้องต้น ในปีที่ 3 (ปีงบประมาณ 2565) ได้ทำพัฒนาแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยแบบ Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) ขนาด 45 kW ของ มทส. โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ MCNP SCALE และ SNAP-TRACE และทำการวิเคราะห์ความปลอดภัย อย่างไรก็ดี ยังขาดข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตโดยละเอียดและข้อมูลเชิงนิวเคลียร์บางส่วน จึงได้ขอข้อมูลจาก มทส. และผู้ผลิตจากสาธารณรัฐประชาชนจีน เพื่อทำการวิเคราะห์ความปลอดภัยในสถานะคงกำลัง และสถานะเกิดอุบัติเหตุให้เสร็จสมบูรณ์

โครงการได้จัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อเพิ่มศักยภาพในการประเมินความปลอดภัยประกอบการให้อนุญาตก่อสร้างสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยอย่างต่อเนื่องตลอด 3 ปี โดยร่วมมือกับคณะกรรมการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. NRC) การดำเนินการโครงการนี้ ทำให้สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติได้เพิ่มพูนศักยภาพในการประเมินความปลอดภัยสำหรับประกอบการพิจารณาให้อนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย และเป็นการเพิ่มศักยภาพในการกำกับดูแลสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น สามารถกำกับดูแลการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

The Office of Atoms for Peace (OAP) is responsible for the regulation of the use of nuclear energy in Thailand. Requirements under the Nuclear Energy for Peace Act B.E. 2559 (2016) obligate nuclear facilities to obtain licenses for Siting, Construction, Commissioning, Operation, and Decommission. At present, there is one operating nuclear facility, namely, Thai Research Reactor-1/ Modified 1 (TRR-1/M1) of Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT). There are two new research reactor projects include, a 45 kW research reactor of Suranaree University of Technology (SUT) and a project to establish a new nuclear research reactor center of TINT. Hence, the nuclear licensing group of the Nuclear and Radiation Licensing Division, Office of Atoms for Peace (OAP) has to prepare for the licensing of the established research reactor projects.

The purpose of this project is to prepare the readiness for nuclear research reactor safety assessment for decision making to issue the Construction license for the SUT research reactor. This is a three-year project. The first year (the fiscal year 2020) focused on training on the basics of safety assessment. This includes principles and computational analysis to assess the safety of research nuclear reactors and purchase standard documents for reference. The second year (the fiscal year 2021) established five computation systems for safety assessments, namely, the computational analysis center, neutronic analysis unit, reactor physics analysis unit, thermal-hydraulic analysis unit, and probabilistic safety analysis unit. In the third year (fiscal year 2022), we developed a model and conducted safety analysis of the 45 kW Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) of SUT using MCNP, SCALE and SNAP-TRACE computer codes. In the third year (the fiscal year 2022), we continued to develop a model of a 45 kW Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) using MCNP, SCALE, and SNAP-TRACE computer codes. However, details of geometry and some nuclear data are still missing. Therefore, the OAP requested more information from the SUT and the manufacturer from the People's Republic of China. After receiving the information, we will complete the safety analyses in steady-state and accident conditions.

In addition, numbers of training workshops were organized to enhance the capacity in safety assessment. These training workshops were conducted under collaboration of the United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC). This project enhanced the capacity of the OAP in safety assessments to support the Construction licensing process. The outcome of the project enhanced the regulation capacity of nuclear facilities in Thailand

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
1.4 กลุ่มเป้าหมาย	2
1.5 พื้นที่ดำเนินการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การกำกับดูแลความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย	3
2.2 การประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์	5
2.3 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
บทที่ 3 ระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์	12
3.1 ระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง	13
3.2 ระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวทรอนิกส์.....	14
3.3 ระบบประเมินความปลอดภัยทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์	15
3.4 ระบบประเมินความปลอดภัยทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	16
3.5 ระบบประเมินความปลอดภัยด้วยวิธีความน่าจะเป็นหรือวิธีการประเมินความเสี่ยง.....	17
บทที่ 4 การเสริมสร้างศักยภาพการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์	19
บทที่ 5 การประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	29
5.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์	29
5.2 การคำนวณเพื่อประเมินความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์	38
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินการ	44
เอกสารอ้างอิง	46
อ้างอิงรูปภาพ	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและเหตุผล

ภารกิจของ ปส. ภายใต้ พ.ร.บ. พลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ.2559 กำหนดให้สถานประกอบการทางนิวเคลียร์ต้องขออนุญาตในการดำเนินการต่าง ๆ ประกอบด้วย สถานที่ตั้ง การก่อสร้าง การดำเนินการ และการเลิกดำเนินการ ในการพิจารณาให้อนุญาตจะต้องมีการตรวจและทบทวนการประเมินความปลอดภัยที่ผู้ขอรับใบอนุญาตเสนอมา ปัจจุบันสถานประกอบการทำนิวเคลียร์ในประเทศไทยประกอบด้วย 3 โครงการ ดังนี้ 1) เครื่อง ปว. -1/1 ของ สทท. ที่มีอยู่ในปัจจุบัน 2) เครื่อง SUT – RR ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) ที่กำลังสร้างขึ้น และ 3) เครื่อง ONRC ดังนั้น ปส. ในฐานะหน่วยงานกำกับดูแลจึงต้องเตรียมความพร้อมในการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ที่ต้องใช้ความรู้ทักษะและประสบการณ์เป็นอย่างมาก

การประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ประกอบด้วย 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ 1) นิวทรอนิกส์ 2) การถ่ายเทความร้อน 3) วัสดุและสิ่งแวดล้อม และ 4) ระบบวิศวกรรมสนับสนุนความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ซึ่งทำโดยการคำนวณวิธีวิเคราะห์เชิงสถิติหรือแบบความน่าจะเป็น การคำนวณแต่ละแบบต้องใช้รหัสคอมพิวเตอร์เฉพาะตัว รวมทั้งระบบเครื่องมือข่ายการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพมาก จึงจะสามารถประเมินผลได้ถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็ว

ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 - พ.ศ.2565 ได้มุ่งเน้นในการเสริมสร้างศักยภาพในการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์ด้านการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย โดยประกอบด้วยการดำเนินการ 3 ด้านหลัก ได้แก่ 1) การจัดการระบบประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ประกอบด้วยระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง ระบบประมวลผลทางด้านนิวทรอนิกส์ ระบบประมวลผลทางด้านเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ ระบบประมวลผลทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และระบบประมวลผลแบบใช้ความน่าจะเป็น 2) การจัดการอบรมเพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์ด้านการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยให้แก่บุคลากรทั้งภายในและภายนอก ปส. จำนวน 6 ครั้ง และ 3) การฝึกปฏิบัติและการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของ มทส.

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และสร้างทักษะให้กับบุคลากรภายในและภายนอก
- เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการกำกับดูแลสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ในการพิจารณาอนุญาตเดินเครื่องปฏิกรณ์ SUT- RR ของ มทส. และการพิจารณาอนุญาตการเลิกดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว.-1/1

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถประเมินความปลอดภัยประกอบการพิจารณาให้อนุญาตดำเนินการต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะเป็นการเสริมสร้างศักยภาพในการกำกับดูแลสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ของ ปส.

1.4 กลุ่มเป้าหมาย

หน่วยงานกำกับดูแล (ปส.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)

1.5 พื้นที่ดำเนินการ

กรุงเทพมหานคร จ.นครราชสีมา และ จ.นครนายก

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกำกับดูแลความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย

2.1.1 การกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์

การกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ หมายถึง การกำกับดูแลโดยหน่วยงานของรัฐที่จะทำให้มั่นใจว่าการดำเนินการเกี่ยวกับสถานประกอบการทางนิวเคลียร์เป็นไปอย่างปลอดภัย โดยผ่านกระบวนการหรือฟังก์ชันการกำกับดูแล 4 ฟังก์ชัน ดังนี้ 1) การออกกฎหมายหรือระเบียบที่ระบุข้อกำหนดสำหรับความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ให้ปฏิบัติภายใต้ข้อกำหนดนี้ 2) การประเมินความปลอดภัยของสถานประกอบการตามเอกสารที่ผู้ขอรับใบอนุญาตยื่นพร้อมการขอรับใบอนุญาต 3) การตรวจสอบว่าสถานประกอบการดำเนินการถูกต้องตามที่กำหนดไว้หรือไม่ และ 4) การบังคับใช้ตามกฎหมาย โดยเฉพาะในกรณีที่ผู้รับใบอนุญาตไม่ปฏิบัติตามที่ระบุไว้ในกฎหมายหรือเงื่อนไขใบอนุญาต วัตถุประสงค์หลักของการกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์คือ เพื่อป้องกันมิให้ผู้ปฏิบัติงาน ประชาชน และสิ่งแวดล้อม ได้รับผลกระทบที่เป็นอันตรายจากรังสีจากการดำเนินการของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์

2.1.2 สถานประกอบการทางนิวเคลียร์

สถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ตาม พ.ร.บ. พลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ.2559 ได้กำหนดนิยามของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ไว้ 6 ข้อ ได้แก่ สถานที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการผลิตพลังงาน แต่ไม่รวมถึงยานพาหนะที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการผลิตพลังงานสำหรับการขับเคลื่อน สถานที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย สถานที่แต่งแร่เพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุนิวเคลียร์ สถานที่เปลี่ยนรูปหรือเสริมสมรรถนะวัสดุนิวเคลียร์ สถานที่ประกอบหรือจัดเก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และสถานที่จัดเก็บหรือแปรสภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว

การดำเนินงานตลอดอายุของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ต้องอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) โดยผู้ประกอบการจะต้องขอรับใบอนุญาตตามขั้นตอนต่าง ๆ ตลอดอายุการใช้งาน ประกอบด้วย ใบอนุญาตให้ใช้พื้นที่ตั้งสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ใบอนุญาตก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ การอนุญาตทดสอบเดินเครื่อง ใบอนุญาตดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ และใบอนุญาตเล็กดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ จากเลขานุการ ปส. โดยผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการตามลำดับ นอกจากนี้ หากมีการจะทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงใดๆ กับสถานประกอบการ (โดยจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงของรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัย (PSAR)) จะต้องได้รับอนุญาตจาก ปส. ก่อน

การขอรับใบอนุญาตข้างต้น ผู้ขอรับใบอนุญาตต้องจัดทำเอกสารประกอบการพิจารณา รายละเอียดดังนี้

1) ใบอนุญาตก่อตั้งสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ผู้ประกอบการจะต้องยื่นคำขอพร้อมกับเอกสารรายงานการวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่ตั้งสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ที่ประกอบด้วยรายละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบจากเหตุการณ์ภายนอกที่อาจเกิดขึ้น ลักษณะของพื้นที่ตั้ง รายงานด้านสิ่งแวดล้อม การกระจายตัวของประชากร เส้นทาง การอพยพในกรณีฉุกเฉิน รวมถึงการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ประชาชน

2) ใบอนุญาตก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ผู้ประกอบการจะต้องยื่นคำขอร้องพร้อมด้วยใบอนุญาตให้ใช้พื้นที่ตั้งสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ เอกสารหรือหลักฐานทางการเงิน และรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยเบื้องต้น พร้อมกับเอกสารประกอบอีก 9 ฉบับ คือ แผนการก่อสร้างและติดตั้งระบบอุปกรณ์ แผนการขนส่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ วัสดุนิวเคลียร์ และวัสดุกัมมันตรังสี แผนการเตรียมพื้นที่ก่อสร้าง รวมทั้งเส้นทาง การขนส่งวัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการก่อสร้าง ขั้นตอนวิธีการขนส่ง ขนย้าย และติดตั้งชิ้นส่วนเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ข้อมูลความเชี่ยวชาญและความน่าเชื่อถือขององค์กรและบุคลากรหลักที่รับผิดชอบงานก่อสร้าง เช่น ผู้จัดการโครงการก่อสร้าง และผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ข้อมูลระบบการบริหารจัดการโครงการก่อสร้าง และระบบประกันคุณภาพการก่อสร้าง แผนการจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี แผนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยในระหว่างการก่อสร้าง และแผนการจัดการความเสี่ยงของโครงการก่อสร้าง

3) การขออนุญาต การบรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ วัสดุนิวเคลียร์ หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว การทดสอบ การเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หรือการทดสอบการบรรจุวัสดุนิวเคลียร์ หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว และการ รายงานการทดสอบทดสอบ ผู้ประกอบการต้องยื่นคำขออนุญาตพร้อมเอกสารและหลักฐาน ดังนี้ แผนการทดสอบ การดำเนินการ รายงานการทดสอบระบบเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ได้รับความเห็นชอบจากเลขาธิการ เอกสารและหลักฐานอื่นตามที่ระบุไว้ในแบบคำขออนุญาต

4) การขอใบอนุญาตดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ผู้ประกอบการต้องยื่นคำขออนุญาต พร้อมเอกสารและหลักฐาน ดังนี้ เอกสารหลักฐานทางการเงิน ใบอนุญาตก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ที่ระบุชื่อผู้ขอรับใบอนุญาตและยังไม่สิ้นอายุ รายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ฉบับสมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วย รายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ฉบับเบื้องต้น รายงานการทดสอบระบบเครื่องจักรและอุปกรณ์ รายงานการทดสอบการบรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ วัสดุนิวเคลียร์ หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว หรือการทดสอบการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (ในกรณีที่มีการดำเนินงานในเรื่องดังกล่าว)

5) การขออนุญาตเลิกดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ผู้ประกอบการต้องยื่นคำขออนุญาต พร้อมเอกสารและหลักฐาน ดังนี้ แผนการเลิกดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ เอกสารทางการเงิน เกี่ยวกับการดำเนินการตามแผนการเลิกดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์

2.2 การประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์

การขอรับใบอนุญาตในการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.1.2 เมื่อผู้ประกอบการได้ ยื่นคำขอรับใบอนุญาตพร้อมทั้งเอกสารประกอบ หน่วยงานกำกับดูแลจะต้อง ในการประเมินความปลอดภัยทาง นิวเคลียร์จะประกอบด้วย 4 ด้านหลัก ได้แก่ การประเมินด้านนิวทรอนิกส์ การถ่ายเทความร้อน การประเมินด้าน ความปลอดภัยทางรังสี และด้านโครงสร้างและวัสดุ

2.2.1 การประเมินด้านนิวทรอนิกส์ (neutronic) หรือฟิสิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นการคำนวณเกี่ยวกับการ เกิดปฏิกิริยาฟิชชันและการควบคุมจำนวนนิวตรอน โดยใช้หลักการแพร่ (Diffusion) ของนิวตรอนในการ คำนวณ การคำนวณด้านนิวทรอนิกส์ใช้รหัสคอมพิวเตอร์ MCNP หรือ SCALE หรือ PARCS ในการคำนวณ ตัวอย่างของการประเมินด้านนี้ได้แก่ cross-section processing, neutron transport and diffusion และ core analysis

2.2.2 การประเมินด้านการถ่ายเทความร้อน หรือเทอร์มัลไฮดรอลิก (thermal-hydraulic) เป็นการ คำนวณเกี่ยวกับการหล่อเย็นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้หลักเทอร์มัลไฮดรอลิก ประเมินการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงสู่สารหล่อเย็นโดยผ่านทางเปลือกห่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง (clad) และคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการไหลเวียนของสารหล่อเย็นออกไปจากบริเวณแกน เพื่อวิเคราะห์ว่า การถ่ายเทความร้อนเพียงพอหรือไม่ที่จะไม่ทำให้เกิดการเดือดหรือเกินขีดจำกัดความปลอดภัยสำหรับอุณหภูมิของ แท่งเชื้อเพลิง การประเมินด้านเทอร์มัลไฮดรอลิกใช้รหัสคอมพิวเตอร์ RELAP หรือ TRACE

2.2.3 การประเมินด้านความปลอดภัยทางรังสี ครอบคลุมถึงการประเมินหลายด้านเพื่อวิเคราะห์ความ ปลอดภัยด้านรังสี ประกอบด้วยการกำบังรังสี การแผ่รังสี และการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีออกสู่ สิ่งแวดล้อมภายนอก การคำนวณใช้รหัสคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับหัวข้อที่ต้องการประเมิน เช่น MCNP ใช้ สำหรับประเมินการกำบังรังสีและการแผ่รังสี รหัส HotSpot, ARGOS, RODOS ใช้สำหรับการวิเคราะห์การ แพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม

2.2.4 การประเมินด้านโครงสร้างและวัสดุ ประกอบด้วยการประเมินโครงสร้างอาคารเพื่อรองรับภัยจากภายนอก เช่น ภัยธรรมชาติ แผ่นดินไหว หรือดินถล่ม และการประเมินวัสดุว่าสามารถทนต่อการใช้งานภายใต้สภาวะที่มีรังสีและความร้อน รวมถึงแรงเชิงกลได้หรือไม่ การประเมินใช้รหัสคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับที่ใช้ในด้านวิศวกรรมโยธาหรือวิศวกรรมด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น Finite element รหัสสำหรับวิเคราะห์วัสดุ Molecular dynamic, ArXiv เป็นต้น

2.3 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

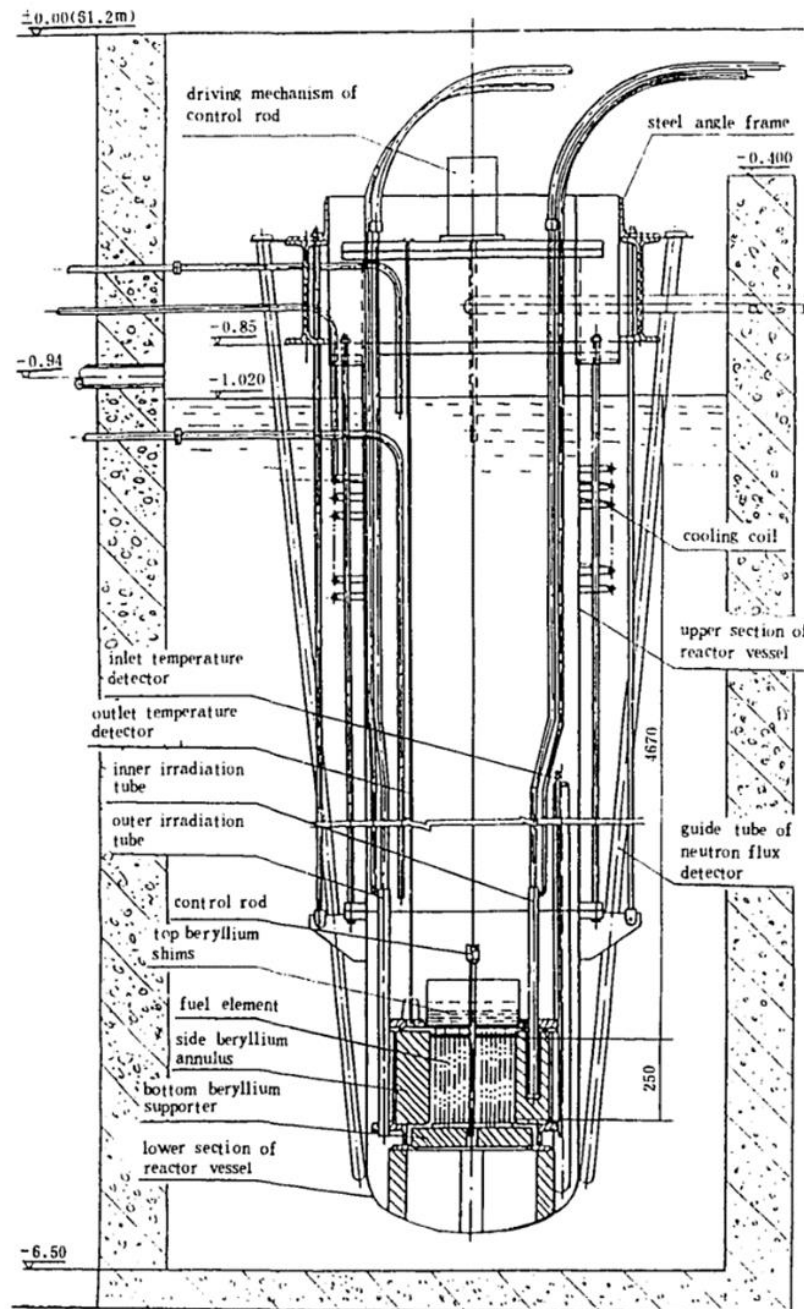
2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนขนาดเล็ก

เครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนขนาดเล็ก (Miniature Neutron Source Reactor ; MNSR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์พลังงานต่ำ ซึ่งในปี ค.ศ.1980 สถาบันพลังงานปรมาณูแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน (China Institute Atomic Energy ; CIAE) ได้เริ่มการพัฒนาเครื่องต้นแบบขึ้น โดยได้ทำการศึกษาแนวคิดและวิธีการออกแบบจากเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการดำเนินการในหลายประเทศ อาทิ เครื่องปฏิกรณ์ TRIGA ของสหรัฐอเมริกา และเครื่องปฏิกรณ์ SLOWPOKE ของแคนาดา จนสามารถสร้างเครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนต้นแบบได้แล้วเสร็จและเริ่มดำเนินการในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ.1984 โดยในช่วงเริ่มต้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีวัตถุประสงค์สำหรับการใช้ในด้านการศึกษาวิเคราะห์นิวตรอน การผลิตไอโซโทปอายุสั้น - กลาง รวมถึงในการฝึกอบรมด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ [1]

2.3.2 โครงสร้างและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนขนาดเล็ก

เครื่องปฏิกรณ์ MNSR เครื่องต้นแบบซึ่งออกแบบโดย CIAE มีกำลังปฏิกิริยาที่ประมาณ 30 kW มีค่าฟลักซ์ของนิวตรอนอยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ (วัดจากตำแหน่งข้างแกนปฏิกรณ์ที่กำลังสูงสุด) ลักษณะโครงสร้างจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบถังในสระน้ำ หรือ Tank – in – pool ซึ่งตัวถังปฏิกรณ์จะถูกติดตั้งภายในบ่อปฏิกรณ์ที่ทำจากคอนกรีต โดยภายในถังปฏิกรณ์และบ่อปฏิกรณ์จะทำการบรรจุน้ำซึ่งจะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของนิวตรอนและกำบังรังสี ในส่วนของแกนปฏิกรณ์ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง 350 แท่ง ทำจากวัสดุอูเรเนียมซึ่งบรรจุยูเรเนียมเสริมสมรรถนะสูง (High Enrich Uranium) ที่มีความเข้มข้นของ U-235 เฉลี่ยประมาณ 90 % เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในการดำเนินเครื่องโดยปกติจะใช้แท่งเชื้อเพลิงที่มียูเรเนียมบรรจุอยู่จำนวน 347 แท่ง และแท่งเชื้อเพลิงเปล่า (Dummy) จำนวน 3 แท่ง ที่กึ่งกลางของแกนปฏิกรณ์จะมีแท่งควบคุมจำนวน 1 แท่ง ทำจากแคดเมียมที่หุ้มด้วยสแตนเลสสตีล ที่บริเวณด้านบน ด้านล่างและล้อมรอบของแกนปฏิกรณ์จะมีการติดตั้งตัวสะท้อนนิวตรอนทำด้วยวัสดุเบริลเลียมสำหรับทำหน้าที่ในการสะท้อนนิวตรอนกลับเข้าสู่แกนปฏิกรณ์เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์สามารถรักษาสภาวะวิกฤตได้ บริเวณด้านข้างของแกนปฏิกรณ์จะมีการติดตั้งช่องสำหรับการใส่ท่ออาบ

รังสีจำนวนทั้งสิ้น 10 ท่อ โดยแบ่งออกเป็น 5 ท่อ ที่บริเวณภายในของตัวสะท้อนเบริลเลียมรอบแกนปฏิกรณ์ และด้านนอกของตัวสะท้อนเบริลเลียมอีกจำนวน 5 ท่อ นอกจากนี้ที่บริเวณรอบแกนปฏิกรณ์ ยังมีการติดตั้งเครื่องมือสำหรับตรวจวัดปริมาณรังสี อุณหภูมิ สำหรับโครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์แบบ MNSR จะแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบ MNSR

ที่มา : Yongmao, Z. (1988) [i]

ด้านความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ MNSR เนื่องจากเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะแบบ Tank – in – pool ที่ทั้งภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบบหล่อเย็นปฐมภูมิและภายนอกถังปฏิกรณ์ (บ่อปฏิกรณ์) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบบหล่อเย็นทุติยภูมิ ทั้งสองส่วนจะบรรจุน้ำซึ่งทำหน้าที่ในการระบายความร้อน โดยใช้วิธีการระบายความร้อนแบบพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าซึ่งมีการลอยตัวขึ้นกับน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำบริเวณผิวน้ำด้านบนที่เคลื่อนที่ลงมาแทน ทำให้เกิดการหมุนเวียนระบายความร้อนให้แก่ปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ทั้งยังมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังปฏิกรณ์และบ่อปฏิกรณ์ทำให้สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิในระดับที่ปลอดภัยและยังมีระบบวัดระดับน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียสารหล่อเย็น นอกจากนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์เพื่อทดสอบความปลอดภัยของแกนปฏิกรณ์ (อ้างอิงจากเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบของจีน) โดยจะมีค่าของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรีแอคติวิตีเป็นลบ (Negative reactivity temperature coefficient) อยู่ที่ $-0.1 \text{ mk/}^{\circ}\text{C}$ เมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิปกติ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย $15^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$ ในส่วนของการวัดค่ารีแอคติวิตี (Reactivity) เมื่อทำการถอนแท่งควบคุมออกจากแกนปฏิกรณ์จะทำให้ค่ารีแอคติวิตีอยู่ที่ $+3.6$ และเครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุดที่ 76 kW ในขณะที่เราผ่านไป (~ 6 นาทีหลังจากพลังงานมีค่าสูงสุด) กำลังของเครื่องปฏิกรณ์จะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรีแอคติวิตีเป็นลบ นอกจากนี้ยังได้มีการคำนวณที่แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของแท่งเชื้อเพลิงที่กำลังสูงสุด 76 kW นั้นยังคงต่ำกว่าอุณหภูมิอิมิตัวกว่า 10 องศา เป็นการแสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ MNSR นั้นมีความปลอดภัย [2]

เครื่องปฏิกรณ์ MNSR กลายเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้มีราคาต้นทุนในการผลิตไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นในขณะนั้นรวมทั้งการออกแบบที่มีความปลอดภัยในตัว (Inherent safety) [3] ส่งผลให้จีนมีการส่งออกเครื่องปฏิกรณ์ MNSR ไปในหลายประเทศ ได้แก่ ซีเรีย กาน่า อิหร่าน ปากีสถาน และไนจีเรีย ต่อมาในปี 2006 ภายใต้โปรแกรม The Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) โดยกระทรวงพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. DoE) และความร่วมจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ซึ่งเป็นโปรแกรมความร่วมมือในการวิจัยเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงที่มีการลดสมรรถนะของเชื้อเพลิงยูเรเนียมจากที่ความเข้มข้นเฉลี่ย $\geq 20\%$ (ระดับ HEU) ให้ลดลงอยู่ที่ความเข้มข้นเฉลี่ย $< 20\%$ (ระดับ LEU) [4] รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลจากโปรแกรมหากล่าวปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยบางส่วนได้ดำเนินการเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิงจาก HEU เป็น LEU ได้สำเร็จ โดยในส่วนของ

เครื่องปฏิกรณ์แบบ MNSR ที่ได้ทำการเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิงแล้ว ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบของ CIAE ประเทศจีน เครื่องปฏิกรณ์ GHARR-1 ประเทศกานา และเครื่องปฏิกรณ์ NIRR-1 ประเทศไนจีเรีย [5]

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเชื้อเพลิงจาก HEU เป็น LEU นั้น เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบางเพื่อให้มีความเหมาะสม โดยโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงไปสามารถสรุปได้ ดังนี้ (อ้างอิงจากเครื่องปฏิกรณ์ GHARR – 1) [6]

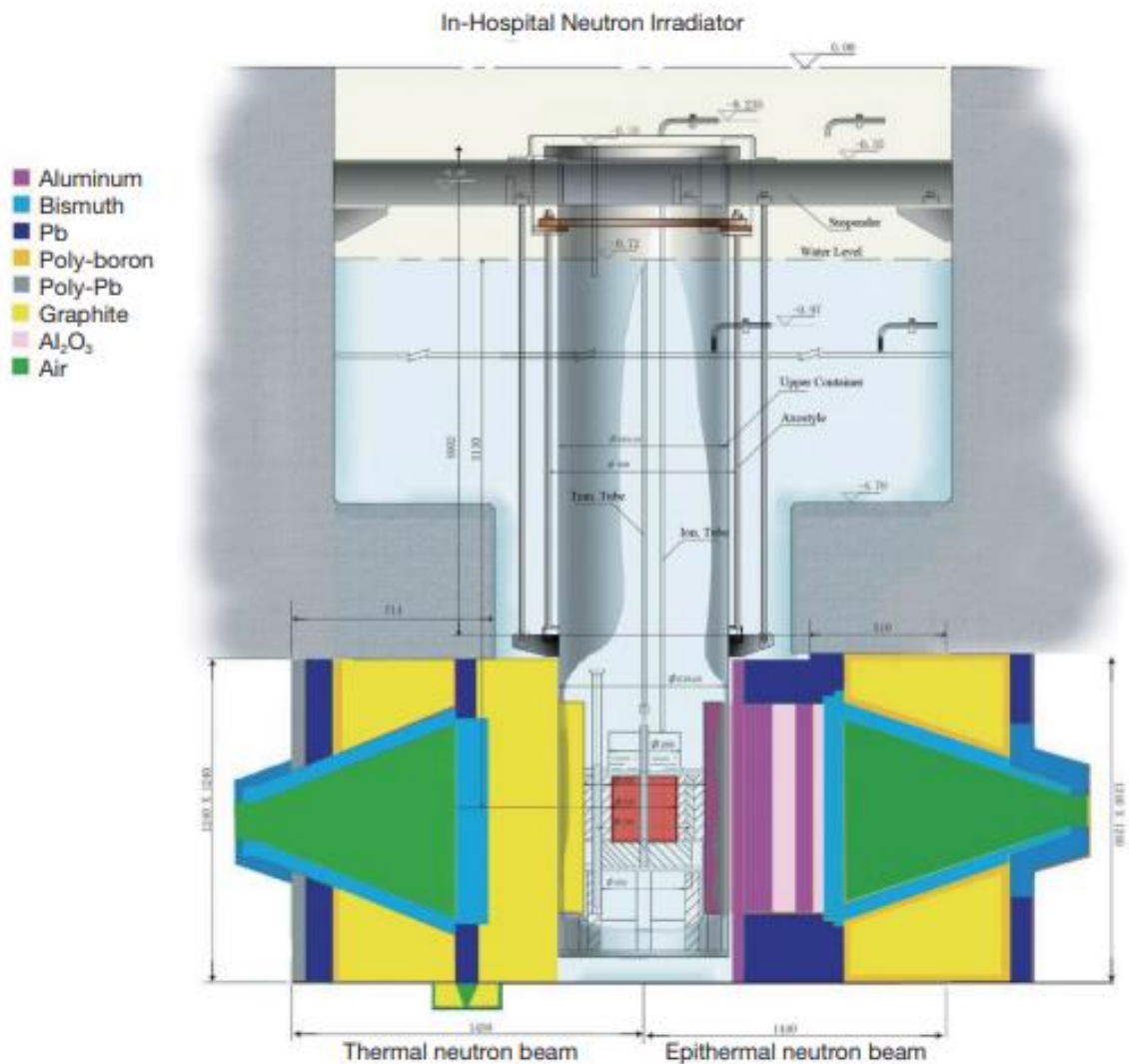
- เชื้อเพลิงจาก UAl_4 เป็น UO_2
- ปริมาณเชื้อเพลิง U – 235 จาก ~ 998 g เป็น ~ 1358 g
- เปรอ์เซ็นเนียมเสริมสมรรถนะจาก 90.2 % เป็น 13.0 %
- ความหนาแน่นของเนื้อเชื้อเพลิงจาก 3.456 g/cm³ เป็น 10.6 g/cm³
- จำนวนแท่งเชื้อเพลิงจาก 344 แท่ง เป็น 335 แท่ง
- กำลังของเครื่องปฏิกรณ์จาก 30 kW เป็น 34 kW
- วัสดุโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์จาก Al เป็น Zirc – 4
- แท่งควบคุมจากวัสดุ Cd และ SS เป็น Cd SS และ Al

เมื่อทำการคำนวณเพื่อทดสอบความปลอดภัยและประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ LEU พบว่าค่าฟลักซ์ของนิวตรอนที่บริเวณด้านในของตัวสะท้อนเบรลเลียมจะมีค่าฟลักซ์ของเทอร์มอลนิวตรอนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2×10^{12} n/cm² และที่บริเวณภายนอกตัวสะท้อนเบรลเลียมจะมีค่าอยู่ที่ สำหรับคาร์แอคทีวิตีของเครื่องปฏิกรณ์จะอยู่ที่ประมาณ 4.03 mk ในขณะที่แท่งควบคุมมีค่าการควบคุมอยู่ที่ - 7.03 mk [7] ซึ่งเมื่อมีการใส่แท่งควบคุมลงไปทั้งหมดจะทำให้คาร์แอคทีวิตีอยู่ที่ประมาณ - 3 mk ทำให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาพต่ำกว่าภาวะวิกฤต (Subcritical state) ซึ่งทำให้สามารถควบคุมปฏิกิริยาได้อย่างปลอดภัย

2.3.3 การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนขนาดเล็กสำหรับการใช้งานทางการแพทย์

ในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์กำเนิดนิวตรอนขนาดเล็กเพื่อการนำไปใช้ในทางการแพทย์ ได้เริ่มดำเนินการโดย CIAE และได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ที่มีชื่อว่า IHNI – 1 ซึ่งเป็นการต่อยอดจากเครื่องปฏิกรณ์ MNSR ให้มีความเหมาะสมสำหรับการรักษาทางการแพทย์โดยใช้เทคนิคการจับยึดนิวตรอนด้วยโบรอน (Boron Neutron Capture Therapy ; BNCT) โดยเครื่องปฏิกรณ์ IHNI – 1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดกำลังอยู่ที่ 30 kW และมีเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) ที่มียูเรเนียมแบบเสริมสมรรถนะต่ำ (LEU) ความเข้มข้น 12.5 % ตามคำแนะนำของ U.S. DoE ภายใต้โปรแกรม RERTR [8] ลักษณะโครงสร้างของเครื่อง IHNI – 1 เนื่องจากการต่อยอดจาก

เครื่องปฏิกรณ์ MNSR จึงมีลักษณะโครงสร้างทั่วไปคงเดิม แต่จะมีการเพิ่มเติมส่วนของระบบลำเลียงนิวตรอนจำนวน 2 ระบบ สำหรับใช้ในเทคนิค BNCT โดยจะประกอบด้วย ระบบลำเลียงนิวตรอนสำหรับนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) และระบบลำเลียงนิวตรอนเอพิเทอร์มอล (Epithermal neutron) ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ IHNI – 1

ที่มา : Zhang, Zizhu, and Tong Liu [ii]

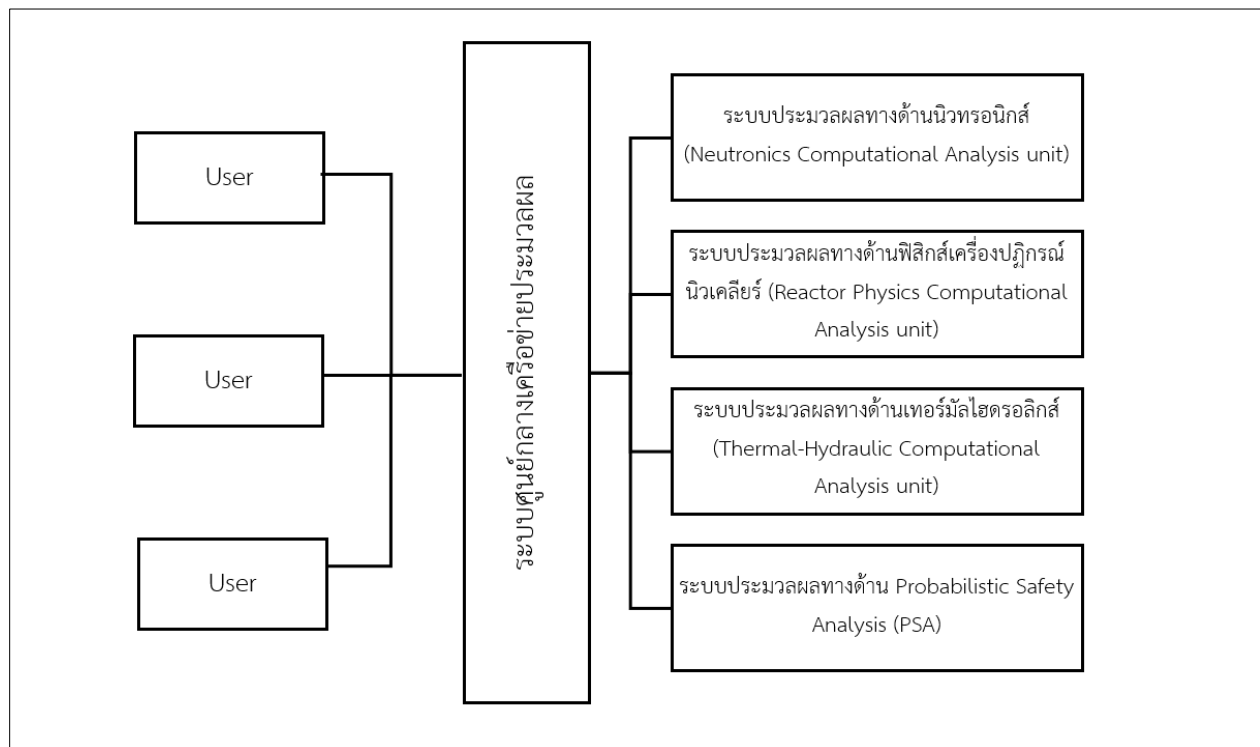
โดยเครื่องปฏิกรณ์ IHNI – 1 ได้ถูกนำมาใช้ในการรักษาผู้ป่วยคนแรกด้วยวิธี BNCT ในปี 2014 โดยผู้ป่วยมีการอาการผิดปกติที่บริเวณฝ่าเท้า ซึ่งผลการวินิจฉัยพบว่าเป็นมะเร็งผิวหนังชนิด Malignant Melanoma พบว่าผู้ป่วยมีการตอบสนองต่อการรักษาแบบ BNCT อย่างสมบูรณ์และภายหลังรักษาเป็นเวลา 24 เดือน ไม่มีการตรวจพบอาการบาดเจ็บซึ่งเป็นผลข้างเคียงจากรังสี [9]

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยขนาดเล็ก นับตั้งแต่ได้เริ่มการพัฒนาในปี 1980 กระทั่งปัจจุบันนั้นได้มีการดำเนินการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เริ่มต้นจากการใช้งานเพื่อการศึกษาและวิจัย พัฒนาต่อมาเพื่อใช้ในด้านวัสดุ เช่น การวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน การถ่ายภาพวัสดุโดยใช้นิวตรอน จนกระทั่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์ในการรักษาผู้ป่วยด้วยรังสีนิวตรอนซึ่งเป็นงานต้องการความปลอดภัยสูง โดยในทุกขั้นตอนการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์การประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องดำเนินการควบคู่กันเสมอ เพื่อในเครื่องปฏิกรณ์สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานรวมถึงประชาชนทั่วไปได้

บทที่ 3

ระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์

ในการประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการขออนุญาตตั้งสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ จะต้องมีการจัดทำระบบสำหรับการประเมินโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ จึงได้มีการออกแบบระบบเพื่อให้ครอบคลุมการจำลองในทุก ๆ ด้านของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยภายในระบบจะประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง ระบบประมวลผลทางด้านนิวทรอนิกส์ ระบบประมวลผลทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์ ระบบประมวลผลทางด้านเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ และระบบประเมินความปลอดภัยทางด้าน Probabilistic Safety Analysis โดยรายละเอียดของแต่ละระบบจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

3.1 ระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง

เป็นศูนย์กลางระบบเครือข่ายประมวลผลสูงสำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก มีระบบแสดงผลการวิเคราะห์คำนวณจากชุดประมวลผลสูง มีระบบเชื่อมต่อเครือข่าย (Network interface) สามารถแสดงผลการคำนวณ กราฟ แบบจำลองที่ได้จากระบบประมวลผลอื่น ๆ โดยระบบคอมพิวเตอร์สำหรับเครือข่ายประมวลผลสูงที่ใช้ มีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นระบบประมวลผลแบบพกพา (Laptop) ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ชนิด Intel Core i9
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.6 GHz มีเทคโนโลยีเพิ่มความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Turbo Boost Technology) เพื่อประมวลผลสูงได้ถึง 5.0 GHz
- หน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 ขนาด 8 GB
- หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดความจุ 512 GB
- หน่วยความจำแบบ Cache memory ขนาด 24 MB
- หน่วยแสดงผลเพื่อแสดงภาพแยกจากแผงวงจรหลักที่มีขนาด 4 GB ชนิด GDDR6
- จอแสดงผลแสดงผลขนาด 15.6 นิ้ว ความละเอียด 3840 X 2400 p



รูปที่ 3.2 ระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง

3.2 ระบบประเมินความปลอดภัยทางนิวทริกส์

สำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาฟิชชัน การควบคุมนิวตรอน การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ การกำบังรังสี โดยระบบจะประกอบด้วยโปรแกรมและระบบคอมพิวเตอร์ ดังนี้

3.2.1 โปรแกรมสำหรับการคำนวณทางนิวทริกส์

โปรแกรมสำหรับการคำนวณทางนิวทริกส์จะใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP-X (MCNP 5) และ MCNP 6 โดยโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP เป็นโปรแกรมสำหรับการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์โดยใช้พื้นฐานการจำลองแบบมอนติคาร์โล เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคหลายชนิด เช่น นิวตรอน โปรตรอน อิเล็กตรอน และอนุภาคอื่น ๆ ที่มีพลังงานสูงสุดได้ถึง 1 TeV โดยตัวโปรแกรมสามารถกำหนดพื้นที่จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในขอบเขตแบบ 3 มิติ รวมถึงกำหนดสสารเพื่อจำลองเป็นวัตถุสำหรับการเกิดอันตรกิริยากับอนุภาค จึงเหมาะสำหรับใช้ในการประเมินทางด้านนิวทริกส์ในส่วนของประเมินค่าฟลักซ์นิวตรอน ค่าการกระจายพลังงานสำหรับแกนปฏิกรณ์ การกำบังรังสี และอื่น ๆ

3.2.2 ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางนิวทริกส์

ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางนิวทริกส์ เป็นระบบคอมพิวเตอร์สำหรับงานประมวลผลสูง ที่รองรับการใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP (Version 6) โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ระบบประมวลผลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ชนิด Intel Core i7
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 3.6 GHz มีเทคโนโลยีเพิ่มความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Turbo Boost Technology) เพื่อประมวลผลสูงได้ถึง 5.0 GHz
- หน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 ขนาด 16 GB (2X8 GB)
- หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดความจุ 512 GB
- หน่วยความจำแบบ Cache memory ขนาด 16 MB
- หน่วยแสดงผลเพื่อแสดงภาพแยกจากแผงวงจรหลักที่มีขนาด 4 GB ชนิด GDDR5
- จอแสดงผลขนาด 21.5 นิ้ว ความละเอียด 1920 X 1080 p

3.3 ระบบประเมินความปลอดภัยทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์

สำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ระบบหล่อ เย็น การป้องกันการหลอมละลายของแท่งเชื้อเพลิงและอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยระบบจะประกอบด้วยโปรแกรมและระบบคอมพิวเตอร์ ดังนี้

3.3.1 โปรแกรมสำหรับการคำนวณทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์

โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SNAP/TRACE เป็นโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ สำหรับการประเมินระบบวิศวกรรมของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถูกพัฒนาโดยคณะกรรมการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์แห่งสหรัฐอเมริกาหรือ U.S. Nuclear Regulatory Commission โดยโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SNAP/TRACE จะประกอบด้วยส่วนโปรแกรม SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package) ซึ่งเป็นโปรแกรมชุดคำสั่งแบบเบ็ดเสร็จ (Integrated application) โดยสามารถเพิ่มโปรแกรมส่วนขยาย (Plug – ins) เพื่อการวิเคราะห์แบบเจาะจง โดยในการประเมินความปลอดภัยทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ จะใช้ส่วนขยาย TRACE ซึ่งถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการทางนิวทรอนิกส์ – เทอร์มัลไฮดรอลิกส์ ของเครื่องปฏิกรณ์โดยครอบคลุมทั้งในสถานะคงที่ (Steady state) และสถานะเปลี่ยนแปลง (Transient state)

3.3.2 ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณความทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์

ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณความทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ เป็นระบบคอมพิวเตอร์สำหรับงานประมวลผลสูง ที่รองรับการใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SNAP/TRACE โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ระบบประมวลผลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ชนิด Intel Core i7
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 3.6 GHz มีเทคโนโลยีเพิ่มความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Turbo Boost Technology) เพื่อประมวลผลสูงได้ถึง 5.0 GHz
- หน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 ขนาด 16 GB (2X8 GB)
- หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดความจุ 512 GB
- หน่วยความจำแบบ Cache memory ขนาด 16 MB
- หน่วยแสดงผลเพื่อแสดงภาพแยกจากแผงวงจรหลักที่มีขนาด 4 GB ชนิด GDDR5
- จอแสดงผลขนาด 21.5 นิ้ว ความละเอียด 1920 X 1080 p

3.4 ระบบประเมินความปลอดภัยทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

สำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกี่ยวกับอะตอม พื้นฐานทางนิวเคลียร์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ รังสี และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยระบบจะประกอบด้วยโปรแกรมและระบบคอมพิวเตอร์ ดังนี้

3.4.1 โปรแกรมสำหรับการคำนวณทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SNAP/PARCS และ SCALE version 6.2.3 โดยใช้โปรแกรม SNAP ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3.1 โปรแกรมจะสามารถใช้ส่วนขยายในการสำหรับการวิเคราะห์แบบเจาะจง โดยในการคำนวณด้านฟิสิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ จะใช้โปรแกรมส่วนขยาย PARCS ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการวิเคราะห์สมการการกระจายตัวของนิวตรอนบนพื้นที่ 3 มิติ เพื่อให้ได้ผลของปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ และโปรแกรมส่วนขยาย SCALE สำหรับการวิเคราะห์

3.4.2 ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นระบบคอมพิวเตอร์สำหรับงานประมวลผลสูง ที่รองรับการใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SNAP/PARCS และ SCALE version 6.2.3 โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ระบบประมวลผลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ชนิด Intel Core i7
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 3.6 GHz มีเทคโนโลยีเพิ่มความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Turbo Boost Technology) เพื่อประมวลผลสูงได้ถึง 5.0 GHz
- หน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 ขนาด 16 GB (2X8 GB)
- หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดความจุ 512 GB
- หน่วยความจำแบบ Cache memory ขนาด 16 MB
- หน่วยแสดงผลเพื่อแสดงภาพแยกจากแผงวงจรหลักที่มีขนาด 4 GB ชนิด GDDR5
- จอแสดงผลขนาด 21.5 นิ้ว ความละเอียด 1920 X 1080 p

3.5 ระบบประเมินความปลอดภัยด้วยวิธีความน่าจะเป็นหรือวิธีการประเมินความเสี่ยง

สำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้ความน่าจะเป็น (Probabilistic Safety Analysis ; PSA) หรือวิธีการประเมินความเสี่ยง (Probabilistic Risk Assessments; PRA) โดยระบบจะประกอบด้วยโปรแกรมและระบบคอมพิวเตอร์ ดังนี้

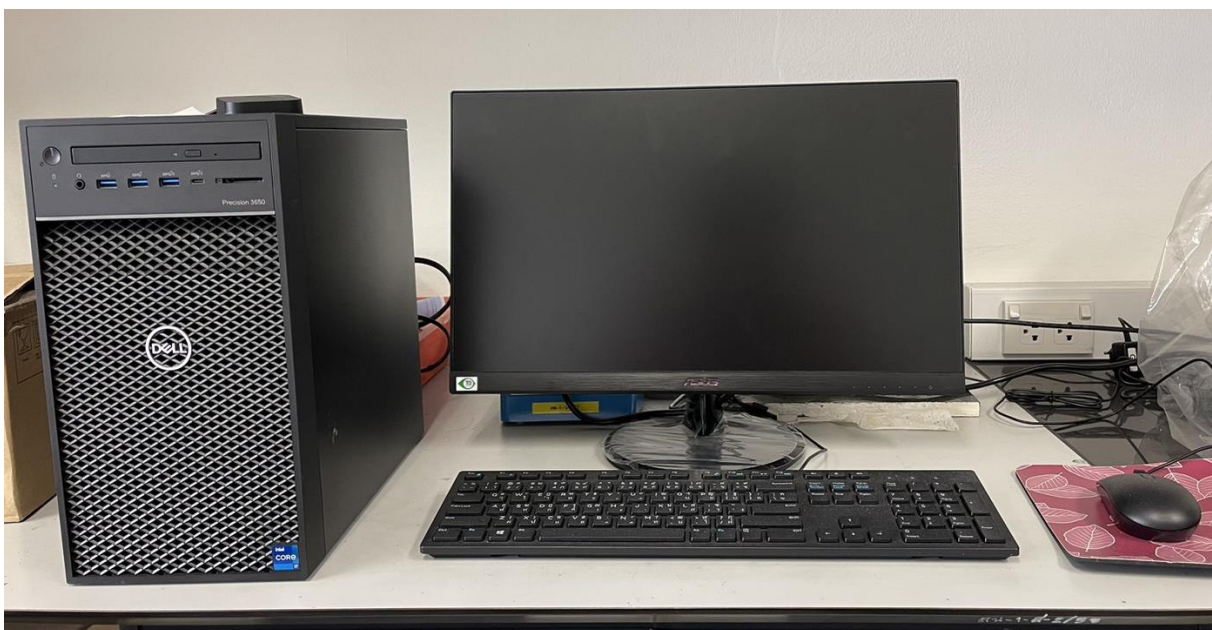
3.5.1 โปรแกรมสำหรับการประเมินความปลอดภัยด้วยวิธีความน่าจะเป็น

โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SAPHIRE 8 เป็นโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยคณะกรรมการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์แห่งสหรัฐอเมริกา U.S. Nuclear Regulatory Commission ซึ่งโปรแกรม SAPHIRE 8 สามารถจำลองเหตุการณ์เพื่อการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์โดยวิธีการประเมินความเสี่ยง ทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 การประเมินความถี่ที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Core Damage Frequency ; CDF) ระดับที่ 2 การประเมินความถี่ที่จะอุบัติเหตุที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยของกัมมันตภาพรังสี และระดับที่ 3 การประเมินผลกระทบหรือความเสียหายที่จะเกิดกับประชาชนและสิ่งแวดล้อม

3.5.2 ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการประเมินความปลอดภัยด้วยวิธีความน่าจะเป็น

เป็นระบบคอมพิวเตอร์สำหรับงานประมวลผลสูง ที่รองรับการใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SAPHIRE 8 โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ระบบประมวลผลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ชนิด Intel Core i7
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 3.6 GHz มีเทคโนโลยีเพิ่มความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Turbo Boost Technology) เพื่อประมวลผลสูงได้ถึง 5.0 GHz
- หน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 ขนาด 16 GB (2X8 GB)
- หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดความจุ 512 GB
- หน่วยความจำแบบ Cache memory ขนาด 16 MB
- หน่วยแสดงผลเพื่อแสดงภาพแยกจากแผงวงจรหลักที่มีขนาด 4 GB ชนิด GDDR5
- จอแสดงผลขนาด 21.5 นิ้ว ความละเอียด 1920 X 1080 p



รูปที่ 3.3 ระบบประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์

บทที่ 4

การเสริมสร้างศักยภาพการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์

ในปีงบประมาณ พ.ศ.2563 ถึง พ.ศ.2565 เพื่อเป็นการเสริมสร้างศักยภาพเพื่อในการดำเนินการในการกับดูแลทางนิวเคลียร์ จึงจัดให้มีการอบรมแก่บุคลากรของ ปส. และผู้ที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการทางนิวเคลียร์ อันประกอบไปด้วยหัวข้อการอบรมที่ครอบคลุมเนื้อหาที่เกี่ยวกับการประเมินความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ทั้งหมด 6 หัวข้อ ได้แก่ การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “Overview of Computer Codes Used in The Regulatory Process” การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP6 เบื้องต้น (Introduction to MCNP6)” การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “การอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (Construction Licensing for Research Reactors)” การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “การตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (Research and Test Reactors Construction Inspection)” การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว (Geology and seismology considerations for research and test reactor siting and design)” และการอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “การออกแบบอาคารและระบบสนับสนุนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ กำลัง (Nuclear Power Plant – Building and Supporting Systems Design)” โดยรายละเอียดการอบรมในแต่ละหัวข้อจะขอกล่าวถึงในลำดับถัดไป

4.1 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง Overview of computer codes used in the regulatory process

การอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง Overview of computer codes used in the regulatory process จัดขึ้นในวันที่ 11 – 14 และ 18 – 20 พฤษภาคม 2564 เป็นการอบรมในรูปแบบออนไลน์ โดยการอบรมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจถึงการวิธีการกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์และโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการนำโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ซึ่งการอบรมประกอบไปด้วยหัวข้อ

วันที่ 11 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- การแนะนำโปรแกรมเบื้องต้น
- บทบาทของโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ในกระบวนการกำกับดูแล
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์และการตัดสินใจในกระบวนการกำกับดูแล
- การพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์

วันที่ 12 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ TRACE (TRAC/RELAP) สำหรับการประเมินด้านเทอร์โมลไฮดรอลิกส์
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ FRAPCON สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง

วันที่ 13 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ FRAPCON (ต่อ)
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ FRAPTRAN สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแท่งเชื้อเพลิง

วันที่ 14 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- ตัวอย่างการจัดทำรายงานแบบเฉพาะหัวข้อ
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ PARCS สำหรับการจำลองแบบ 3 มิติ ของแกนปฏิกรณ์

วันที่ 18 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ RASCAL (NRC/RES) สำหรับการประเมินเหตุฉุกเฉินทางรังสี
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SAPHIRE สำหรับการประเมินความเสี่ยงแบบใช้ความน่าจะเป็น

วันที่ 19 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ SAPHIRE (ต่อ)
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MELCOR สำหรับการคำนวณลำดับการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำมวลเบา (Light water reactor; LWR) ในส่วนของแหล่งกำเนิด

วันที่ 20 พฤษภาคม 2564 เวลา 8.00 – 11.00 น.

- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MELCOR (ต่อ)
- โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MACCS สำหรับการประเมินผลกระทบจากอุบัติเหตุรุนแรง

4.2 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP6 เบื้องต้น

การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP6 เบื้องต้น จัดขึ้นเมื่อวันที่ 28 – 30 มิถุนายน 2564 ในรูปแบบออนไลน์ มีผู้เข้าร่วมการอบรมทั้งสิ้น 28 คน โดยการอบรมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจถึงส่วนประกอบของโปรแกรม หลักการทำงาน รวมถึงการนำโปรแกรม MCNP6 มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย โดยในการอบรมเชิงปฏิบัติการในครั้งนี้ได้กำหนดหัวข้อในการอบรมไว้ ดังนี้

วันที่ 28 มิถุนายน 2564 เวลา 19.00 – 21.00 น.

- การแนะนำโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP6 เบื้องต้น
- หลักการพื้นฐานในการสร้างแบบจำลอง
- การกำหนดภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันใน MCNP6

วันที่ 29 มิถุนายน 2564 เวลา 19.00 – 21.00 น.

- การกำหนดภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันใน MCNP6 (ต่อ)
- การกำหนดอัตราการใช้เชื้อเพลิงใน MCNP6
- ค่าวิกฤตของปฏิกิริยานิวเคลียร์ใน MCNP6
- การกำหนดการวัดผล เช่น ฟลักซ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา ใน MCNP6

วันที่ 30 มิถุนายน 2564 เวลา 19.00 – 21.00 น.

- การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตบน MCNP6
- การประยุกต์ใช้โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์กับเครื่องปฏิกรณ์วิจัย

4.3 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย

จัดที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) วันที่ 13 - 24 มิถุนายน 2565 มีผู้เข้าร่วม 25 คน และผู้เชี่ยวชาญจากสหรัฐอเมริกา 3 คน ได้แก่ Al Adams, Steve Reese, และ Rich Holm ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินความปลอดภัยและการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย มาเป็นผู้บรรยาย ณ ห้องประชุมใหญ่ ปส. และผ่านทางระบบออนไลน์ การอบรมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้เข้ารับการอบรมมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย และสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการพิจารณาความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย เพื่อประกอบการขออนุญาตก่อสร้าง

วันที่ 13 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- การแนะนำเบื้องต้นสำหรับการ
- การอนุญาตก่อสร้างและการอนุญาตให้ดำเนินการ
- เครื่องปฏิกรณ์ อ้างอิงจาก บทที่ 4 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537

วันที่ 14 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- การเตรียมการก่อสร้างสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- เครื่องปฏิกรณ์ อ้างอิงจาก บทที่ 4 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)
- ระบบสนับสนุนอื่น ๆ อ้างอิงจากบางส่วนของ บทที่ 9 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537

วันที่ 15 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- เครื่องปฏิกรณ์ อ้างอิงจาก บทที่ 4 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)

วันที่ 16 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- เครื่องปฏิกรณ์ อ้างอิงจาก บทที่ 4 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)

วันที่ 17 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- เครื่องปฏิกรณ์ อ้างอิงจาก บทที่ 4 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)
- ระบบหล่อเย็น อ้างอิงจาก บทที่ 5 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537
- การขนส่งและการใช้เชื้อเพลิงใหม่

วันที่ 20 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- ระบบไฟฟ้า อ้างอิงจาก บทที่ 8 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537
- การฟุ้งกระจายทางอากาศ : การกักเก็บ/การจำกัด

วันที่ 21 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- การป้องกันอันตรายจากอัคคีภัย
- การฟุ้งกระจายทางอากาศ : การกักเก็บ/การจำกัด (ต่อ)
- การจัดเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้ว อ้างอิงจากบางส่วนของ บทที่ 9 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537

วันที่ 22 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

- การทดลองและการใช้งาน อ้างอิงจาก บทที่ 10 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537
- การวิเคราะห์อุบัติเหตุ อ้างอิงจาก บทที่ 13 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537

วันที่ 23 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 16.45 น.

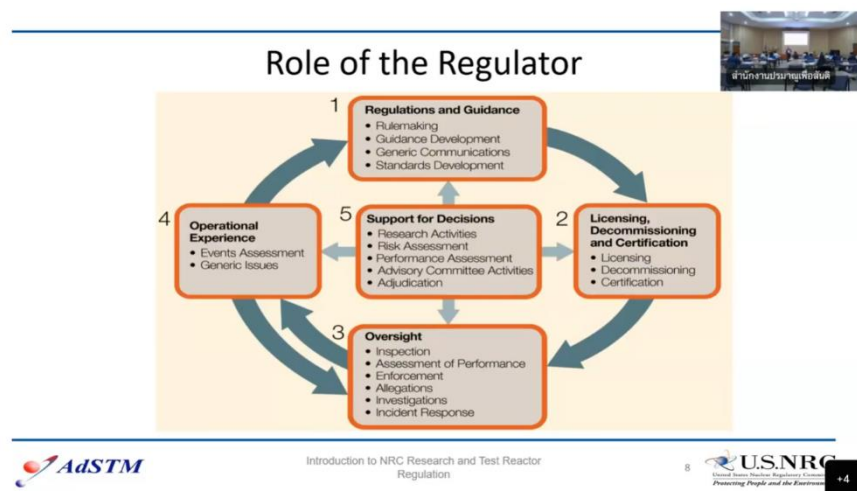
- การวิเคราะห์อุบัติเหตุ อ้างอิงจาก บทที่ 13 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)
- ระบบประกันคุณภาพ อ้างอิงจากบางส่วนของ บทที่ 12 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537

วันที่ 24 มิถุนายน 2565 เวลา 9.30 – 15.30 น.

ระบบประกันคุณภาพ อ้างอิงจากบางส่วนของ บทที่ 12 เอกสารมาตรฐาน NUREG-1537 (ต่อ)



รูปที่ 4.1 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ณ ห้องประชุมใหญ่ ปส.



รูปที่ 4.2 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ผ่านระบบออนไลน์

4.4 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย

วันที่ 1- 5 สิงหาคม 2565 แบบออนไลน์ มีผู้เข้าร่วม 24 คน การอบรมมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างศักยภาพในกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยมุ่งเน้นที่การตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย การอบรมครอบคลุมถึงพื้นฐานสำคัญของการตรวจสอบ องค์ประกอบของการตรวจสอบการก่อสร้าง ขั้นตอนการตรวจสอบส่วนประกอบที่สำคัญต่อความปลอดภัย และตัวอย่างการรีวิวและตรวจสอบในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในการอบรมจะประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

- องค์ประกอบสำคัญสำหรับระบบการตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
- วัตถุประสงค์หลักและการดำเนินการของแผนการตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
- การฝึกอบรมเฉพาะสำหรับผู้ตรวจสอบการก่อสร้าง
- การทบทวนขั้นตอนการตรวจสอบวัสดุและบริการที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
- การทบทวนตัวอย่างรายงานการตรวจสอบ
- การทบทวนขั้นตอนการตรวจสอบสำหรับการดำเนินโครงการประกันคุณภาพของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
- การทบทวนตัวอย่างรายงานการตรวจสอบของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย
- การทบทวนขั้นตอนการตรวจความพร้อมในการปฏิบัติงาน

4.5 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว (Geology and seismology considerations for research and test reactor siting and design)

วันที่ 20 - 23 กันยายน 2565 แบบออนไลน์ มีผู้เข้าร่วม 26 คน การอบรมมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจในการออกแบบและประเมินความปลอดภัยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว พร้อมกับครอบคลุมไปถึงการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง (ในที่นี่ได้ยกตัวอย่างกรณีของการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มาเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย) โดยการอบรมในแต่ละวันจะประกอบไปด้วยหัวข้อ ดังนี้

วันที่ 20 กันยายน 2565 เวลา 8:30 - 11:00 น.

ข้อควรพิจารณาด้านธรณีวิทยาและแผ่นดินไหววิทยาสำหรับการวิจัยและทดสอบที่ตั้งเครื่องปฏิกรณ์

- ข้อกำหนดและคำแนะนำเกี่ยวกับธรณีวิทยาและแผ่นดินไหววิทยาสำหรับพื้นที่ก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยและเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง
- การออกใบอนุญาตสำหรับการวิจัยและการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์

วันที่ 21 กันยายน 2565 เวลา 8:30 - 11:00 น.

การทบทวนข้อกำหนดเกี่ยวกับระบบ โครงสร้าง และส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ใช้กำลัง

- ขอบเขตข้อกำหนดทั่วไปที่พิจารณา ได้แก่ ความเพียงพอของการออกแบบ ความเสียหายจากสภาพอากาศ ความเสียหายจากอุทกภัย ความเสียหายจากแผ่นดินไหว ความเสียหายจากรังสี และอื่น ๆ

วันที่ 22 และ 23 กันยายน 2565 เวลา 8:30 - 11:00 น.

ระบบประกันคุณภาพโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยเน้นในส่วนของการก่อสร้าง

- ภาพรวมของการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์
- ความสำคัญของการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์ระหว่างการก่อสร้าง
- ระเบียบและคำแนะนำสำหรับการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์ โดย NRC
- มาตรฐานการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์ของสหรัฐอเมริกา
- แผนทบทวนมาตรฐาน (SRP) สำหรับการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์
- นิยามของการประกันคุณภาพทางนิวเคลียร์ สำหรับการก่อสร้าง
- ระบบบริหารจัดการทางนิวเคลียร์ โดย IAEA
- ข้อมูลการก่อสร้างนิวเคลียร์

PowerPoint Slide Show - [RTR Structural Review clean final9.19-20]

Structural Review - Sufficiency of SSC Designs

CHAPTER 3 of NUREG-1537	(APPLICANT'S DESIGN OF NPR'S) SYSTEMS STRUCTURES AND COMPONENTS
3.1 Design Criteria	Addresses and describes the design criteria considered for facility preliminary/final design and its SSCs
3.2 Meteorological Damage	Addresses and describes the facility and its SSCs design bases for protection against meteorological events
3.3 Water Damage	Addresses and describes the facility and its SSCs design bases against water damage
3.4 Seismic Damage	Addresses and describes the facility and its SSCs design bases required to maintain safety function(s) when a seismic event occurs for seismic damage
3.5 Systems and Components	Addresses and describes design bases of specialized systems and components required for safe NPR operation and shutdown
Possible Section on SSCs for Research and Development (R&D)	Identifies and describes SSCs that require R&D to confirm the adequacy of their design (per 10CFR50.34(a)(8))


 Regulatory Review of NPR SSCs
 15


Bryce Lehman - NRC

รูปที่ 4.3 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว

4.6 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “การออกแบบอาคารและระบบสนับสนุนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบกำลัง

วันที่ 7 - 11 พฤศจิกายน 2565 วันที่ 14 - 15 พฤศจิกายน 2565 และวันที่ 29 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2565 แบบออนไลน์ มีผู้เข้าร่วม คน การอบรมนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจในการออกแบบอาคาร รวมทั้งระบบสนับสนุนต่างๆ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง พร้อมกับครอบคลุมถึงการขนส่งเชื้อเพลิงใหม่ โดยการอบรมในแต่ละวันจะประกอบไปด้วยข้อหัว ดังนี้

วันที่ 7 พฤศจิกายน เวลา 8:00 - 11:30 น.

- ภาพรวมของกฎระเบียบที่บังคับใช้
- แผนทบทวนมาตรฐาน อ้างอิงจาก บทที่ 2 เอกสารมาตรฐาน NUREG - 0800

วันที่ 8 พฤศจิกายน เวลา 8:00 - 11:00 น.

- ประสิทธิภาพการทำงานในการกักกันของโครงสร้างอาคารและระบบสนับสนุน

วันที่ 9 พฤศจิกายน เวลา 8:00 - 11:00 น.

- ประสิทธิภาพการทำงานในการกักกันของโครงสร้างอาคารและระบบสนับสนุน (ต่อ)

วันที่ 10 พฤศจิกายน เวลา 8:00 - 11:00 น.

- ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

วันที่ 11 พฤศจิกายน เวลา 8:00 - 11:00 น.

- ระบบไฟฟ้ากระแสตรง
- การขนส่งเชื้อเพลิงใหม่สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกำลัง

วันที่ 14 พฤศจิกายน เวลา 8:30 - 12:00 น.

- การขนส่งเชื้อเพลิงใหม่สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกำลัง (ต่อ)
- ระบบระบายและระบบกรองอากาศ

วันที่ 15 พฤศจิกายน เวลา 8:30 - 12:00 น.

- การจัดเก็บเชื้อใหม่และเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว

วันที่ 29 พฤศจิกายน เวลา 8:30 - 12:00 น.

- ระบบระบายและระบบกรองอากาศ (ต่อ)
- การจัดเก็บเชื้อใหม่และเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว (ต่อ)

วันที่ 30 พฤศจิกายน เวลา 8:30 - 12:00 น.

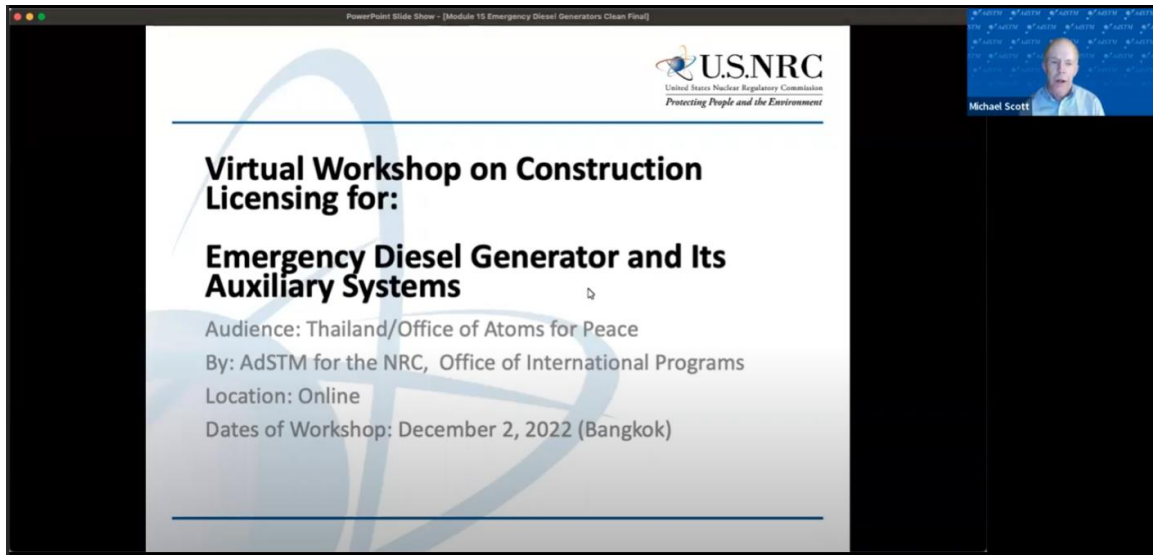
- ระบบระบายน้ำ
- แนวทางปฏิบัติในการก่อสร้าง

วันที่ 1 ธันวาคม เวลา 8:30 - 12:00 น.

- การป้องกันอันตรายจากอัคคีภัย

วันที่ 2 ธันวาคม เวลา 8:30 - 12:00 น.

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลสำหรับกรณีฉุกเฉินและระบบสนับสนุน



รูปที่ 4.4 การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การออกแบบอาคารและระบบสนับสนุนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

บทที่ 5

การประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

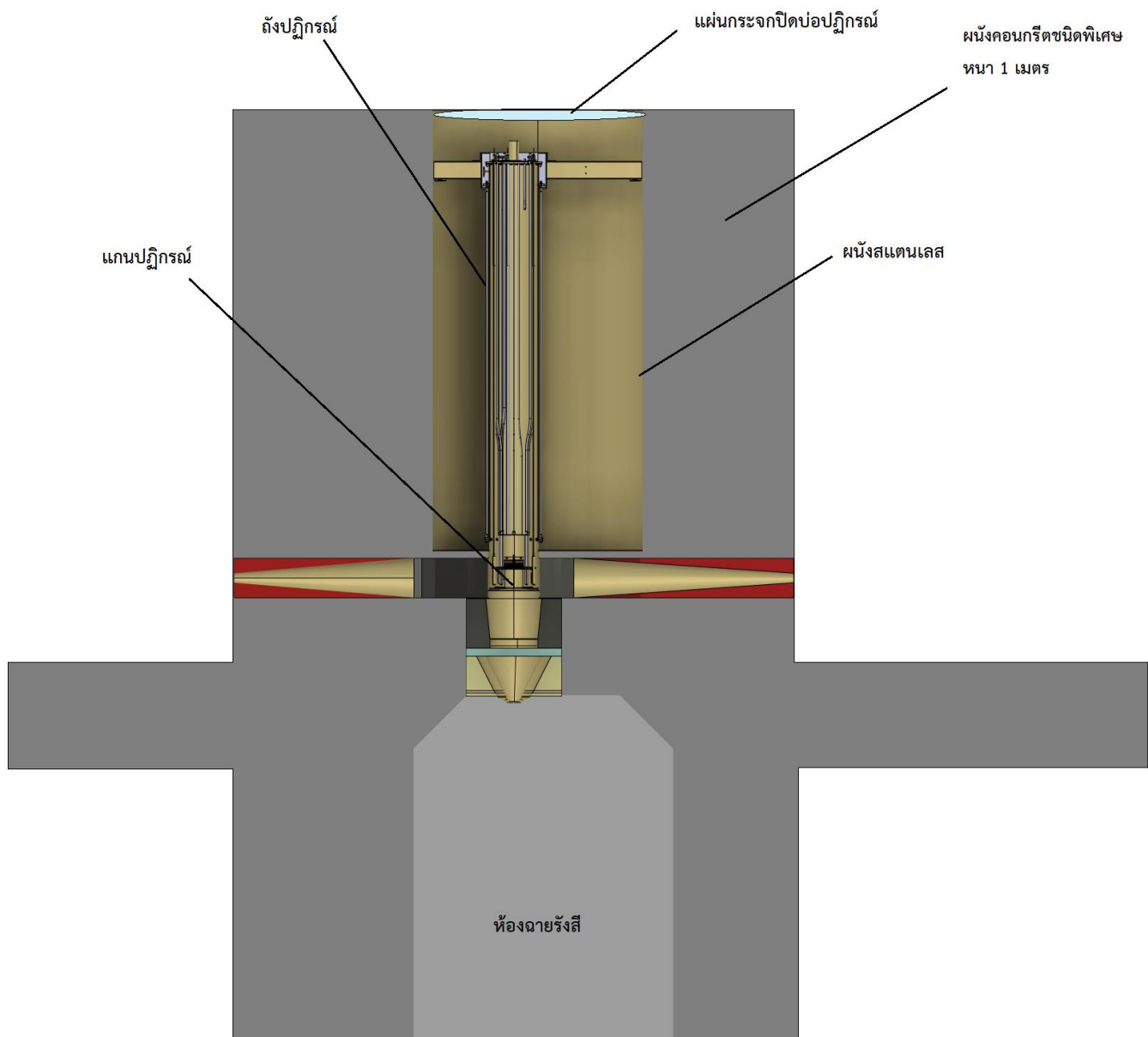
โครงการจัดตั้งศูนย์ปฏิบัติการวิจัยรังสีรักษาจากโบรอนจับยึดนิวตรอนภายใต้การดำเนินการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งในปัจจุบันได้รับใบอนุญาตใช้พื้นที่เพื่อก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์แล้ว และอยู่ในระหว่างการดำเนินการเพื่อขอรับใบอนุญาตก่อสร้างสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ โดยได้ดำเนินการจัดทำรายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ฉบับเบื้องต้น ซึ่ง ปส. มีหน้าที่รับผิดชอบในการพิจารณาการอนุญาตก่อสร้าง จะต้องพิจารณาเอกสารทั้งหมด รวมถึงการวิเคราะห์ความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ฉบับเบื้องต้น ประกอบด้วยเนื้อหา 20 บท โดยในการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ถือเป็นส่วนหนึ่งของรายงาน ทาง ปส. ได้เริ่มดำเนินการในการวิเคราะห์เครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วย การวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ การวิเคราะห์ความปลอดภัยทางด้านนิวทริกส์ และการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางเทอร์มอลไฮดรอลิกส์ (ในการวิเคราะห์ดังกล่าวจะอ้างอิงข้อมูลและรูปภาพจากรายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ และไฟล์แบบวิศวกรรมซึ่งจัดทำโดย มทส.และ CIAE) โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

5.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี Suranaree University of Technology Research Reactor (SUT-RR) หรือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ปว. มทส. มีลักษณะเป็นเครื่องปฏิกรณ์วิจัยขนาดเล็ก (Miniature Neutron Source Reactor; MNSR) มีวัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อใช้ในการวิจัยโดยเน้นไปที่การรักษามะเร็งด้วยเทคนิคโบรอนจับยึดนิวตรอน รวมถึงการประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ เช่น การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีนิวตรอน เป็นต้น โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นี้จะมีกำลังอยู่ที่ 45 kW แบบ Tank – in – Pool โดยถังปฏิกรณ์จะถูกติดตั้งอยู่ภายในบ่อปฏิกรณ์ มีน้ำบรรจุอยู่ภายในทำหน้าที่เป็นสารระบายความร้อน(ด้วยวิธีการพาความร้อน หรือ Natural Convection) และห่อหุ้มนิวตรอน เชื้อเพลิงที่ใช้ ได้แก่ ยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO₂) ที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม 19.75% เป็นยูเรเนียมสมรรถนะต่ำ เครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก ได้แก่ บ่อปฏิกรณ์ (Reactor pool) ถังปฏิกรณ์ (Reactor vessel) แกนปฏิกรณ์ (Reactor core) ตัวสะท้อนนิวตรอนชนิดเบริลเลียม (Beryllium reflector) แท่งควบคุม (Control rod) และระบบลำเลียงนิวตรอน

5.1.1 บ่อปฏิกรณ์

บ่อปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีลักษณะเป็นบ่อกลมตัวผนัง ทำจากคอนกรีตมวลหนักที่มีความหนา 1 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 เมตร ความสูง 5.5 เมตร และพื้นบ่อ หนา 1.6 เมตร ภายในบ่อบรรจุน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นให้กับถังปฏิกรณ์ตัวห่นวงนิวตรอน และเป็นตัว ป้องกันรังสีแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ผนังด้านในผนังและพื้นด้านในบ่อจะใช้วัสดุสแตนเลสสตีลและเคลือบสาร ป้องกันการรั่วซึมของน้ำ โดยส่วนประกอบของบ่อปฏิกรณ์จะแสดงดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์

5.1.2 ถังปฏิกรณ์

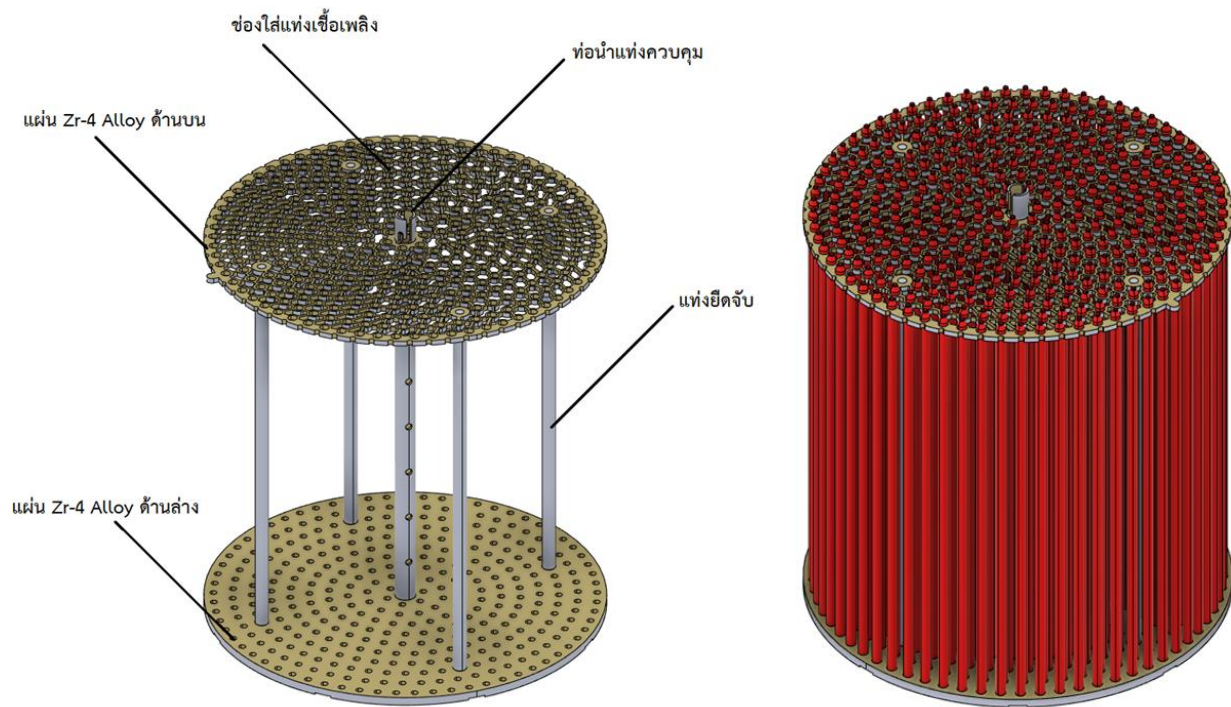
ถังปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีลักษณะเป็นถังอะลูมิเนียม ความหนา 10 มม. ความยาวทั้งหมดประมาณ 5.3 เมตร เมตร โดยตัวถังปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- ฝาปิดถังปฏิกรณ์ ทำจากอะลูมิเนียม ความหนา 22 มม. มีช่องสำหรับท่อของระบบต่าง ๆ อาทิ ท่อสำหรับทางเข้าและทางออกของน้ำและก๊าซ ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบน้ำให้บริสุทธิ์และระบบกำจัดก๊าซผ่านทางท่อของระบบตรวจวัดอุณหภูมิ และท่อสำหรับแท่งควบคุม (Control rod) เป็นต้น
- ถังปฏิกรณ์ส่วนบน ความยาว 4.7 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.62 เมตร ความหนา 10 มม. ตัวถังจะมีช่องสำหรับเชื่อมต่อกับท่อของระบบทำน้ำบริสุทธิ์โดยเป็นท่อสำหรับน้ำขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม. อยู่ต่ำกว่าส่วนบนสุดของถังปฏิกรณ์ 50 มม. และท่อสำหรับน้ำขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม. อยู่ต่ำกว่าส่วนบนสุดของถังปฏิกรณ์ 500 มม.
- ถังปฏิกรณ์ส่วนล่าง ความยาว 0.637 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.62 เมตร ความหนา 10 มม. ภายในบริเวณถังปฏิกรณ์ส่วนล่างจะเป็นตำแหน่งที่บรรจุแกนปฏิกรณ์

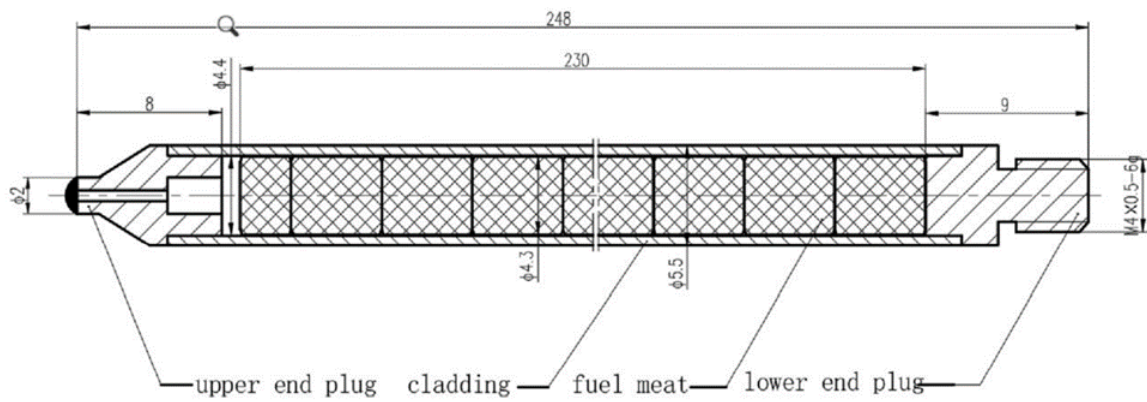
5.1.3 แกนปฏิกรณ์

แกนปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะถูกติดตั้งอยู่ที่บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ โดยตัวแกนปฏิกรณ์จะมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่

- กรงบรรจุเชื้อเพลิง (Bird cage) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม ประกอบด้วยแผ่น Zr - 4 alloy ความสูง 258 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 230 มม. มีช่องสำหรับบรรจุแท่งเชื้อเพลิง จำนวน 350 ช่อง แต่ละช่องนั้นจะจัดเรียงเป็นวงล้อมรอบจุดศูนย์กลางของแกนปฏิกรณ์ จำนวนทั้งหมด 10 วง มีแท่งยึดจับ (Tie rods) สำหรับการยึดระหว่าง จำนวน 4 จุด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มม. และที่บริเวณตรงกลางจะมีท่อสำหรับนำแท่งควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.4 มม. (รูปที่ 5.2)
- แท่งเชื้อเพลิง (Fuel rod) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ทำจาก Zr - 4 alloy ความยาว 248 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.3 มม. ภายในมีบริเวณสำหรับบรรจุเม็ดเชื้อเพลิงเป็นระยะ 230 มม. และมีการเติมแก๊ส Helium เข้าไปในบริเวณช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงและแท่งเชื้อเพลิงระยะ 1 มม. (รูปที่ 5.3)
- เม็ดเชื้อเพลิง (Fuel Pellet) เป็นเชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์ UO_2 ลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 มม. ยาว 5.0 มม. บรรจุเรียงกันอยู่ภายในแท่งบรรจุเชื้อเพลิง



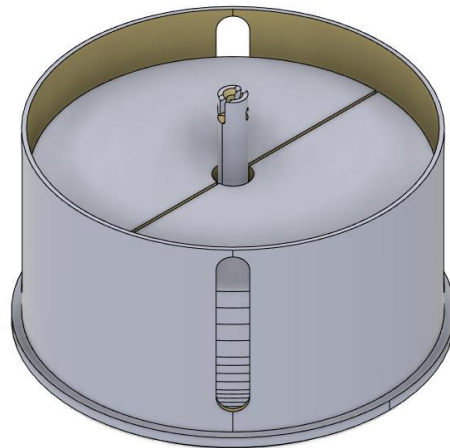
รูปที่ 5.2 กรงบรรจุเชื้อเพลิง (ซ้าย) กรงบรรจุเชื้อเพลิงที่มีการบรรจุเชื้อเพลิง (ขวา)



รูปที่ 5.3 บรรจุเชื้อเพลิง

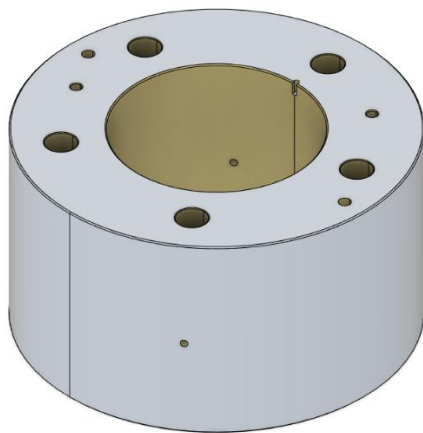
5.1.4 ตัวสะท้อนนิวตรอน

ตัวสะท้อนนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะใช้เป็นวัสดุเบริลเลียม (Beryllium) ทำการติดตั้งที่บริเวณด้านบนเหนือแกนปฏิกรณ์และด้านข้างล้อมรอบแกนปฏิกรณ์ โดยตัวสะท้อนนิวตรอนที่อยู่เหนือแกนปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นแผ่นครึ่งวงกลมสองชิ้นประกบกันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 243 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มม. หนา 1.5 มม. (สามารถเลือกใช้แผ่น ที่มีความหนา 3 มม. 6 มม. และ 12 มม. โดยแผ่นเบริลเลียมดังกล่าวจะถูกบรรจุอยู่ในกล่องที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกคล้ายกล่องใส่แผ่นซีดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 264.0 มม. สูง 170 มม.



รูปที่ 5.4 ตัวสะท้อนนิวตรอนเหนือแกนปฏิกรณ์

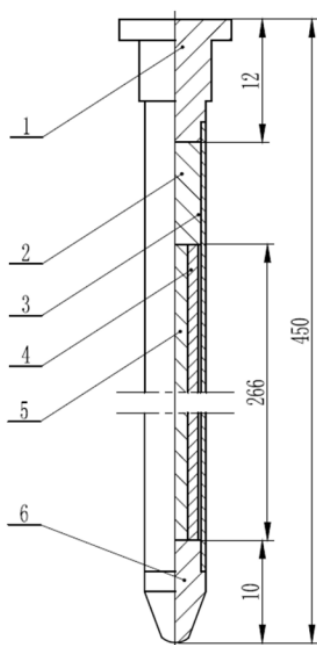
ในส่วนของตัวสะท้อนนิวตรอนที่ถูกติดตั้งบริเวณด้านข้างของแกนปฏิกรณ์จะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบแกนปฏิกรณ์ด้านข้างซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 231 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 435 มม. สูง 238.5 มม. โดยภายในวงแหวนของตัวสะท้อนนิวตรอนจะมีช่องสำหรับติดตั้งท่อขนส่งชิ้นงานเข้าฉายรังสีทั้งหมด 5 ท่อ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มม. (รูปที่ 5.5)



รูปที่ 5.5 ตัวสะท้อนนิวตรอนรอบแกนปฏิกรณ์

5.1.5 แท่งควบคุม

แท่งควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังรูปที่ 5.6 ความยาวทั้งหมด 450 มม. รัศมี 5 มม. มีส่วนของวัสดุดูดซับนิวตรอนเป็นแคดเมียมเคลือบอยู่บนแท่งควบคุมที่ทำจากอลูมิเนียม (หมายเลข 2) หนาประมาณ 1 มม. ส่วนของแคดเมียม (หมายเลข 4) ยาว 266 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.0 มม. และทั้งหมดจะถูกห่อหุ้มด้วยสแตนเลสสตีล (หมายเลข 1)

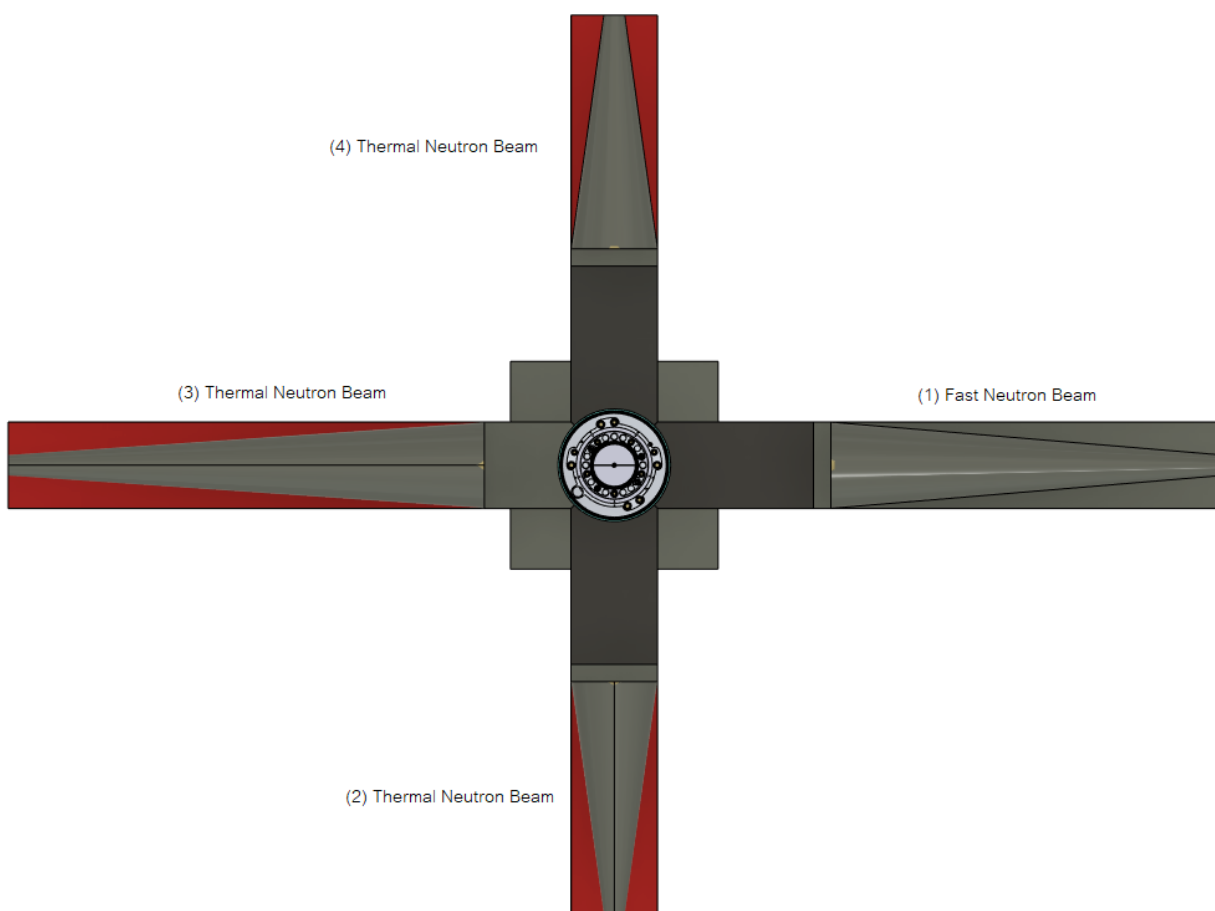


รูปที่ 5.5 ลักษณะของแท่งควบคุม

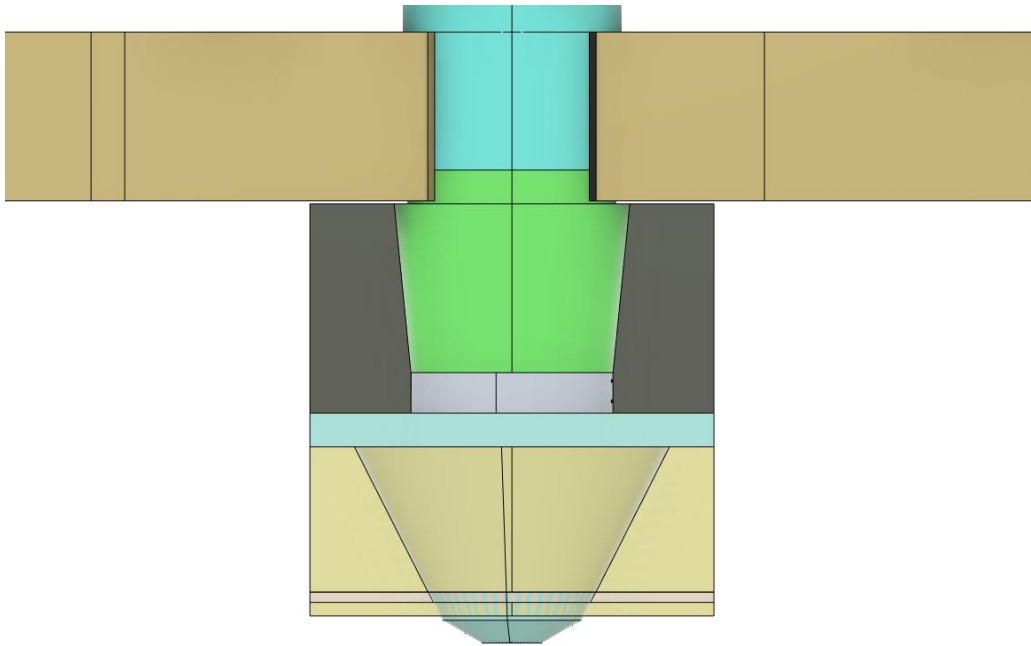
5.1.6 ระบบลำเลียงนิวตรอน

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประกอบด้วยระบบลำเลียงนิวตรอนทั้งหมด 5 ระบบ โดยแต่ละระบบจะถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่ต่างกัน ระบบลำเลียงนิวตรอนทั้ง 5 ระบบจะทำการลำเลียงนิวตรอนไปยังห้องสำหรับการฉายรังสีในอาคารวิจัย โดยแบ่งเป็นระบบลำเลียงนิวตรอนในแนวนอน 4 ระบบ (รูปที่ 5.6) และระบบลำเลียงนิวตรอนในแนวตั้งจำนวน 1 ระบบ (รูปที่ 5.7)

ระบบลำเลียงนิวตรอนในแนวนอน แบ่งออกเป็นระบบลำเลียงสำหรับลำเลียงเทอร์มอลนิวตรอน (Thermal neutron) 3 ระบบ ประกอบด้วยตัวหน่วงนิวตรอน ตัวดูดซับแกมมาและตัวควบคุมลำนิวตรอนและระบบลำเลียงฟาสต์นิวตรอน (Fast neutron) 1 ระบบ ประกอบด้วยตัวดูดซับรังสีแกมมา และตัวควบคุมลำนิวตรอน โดยระบบลำเลียงนิวตรอนในแนวนอนจะถูกติดตั้งที่บริเวณรอบแกนปฏิกรณ์ สำหรับระบบลำเลียงนิวตรอนในแนวตั้ง จะประกอบด้วยวัสดุสำหรับหน่วงนิวตรอน, วัสดุกันรังสีแกมมา (γ (Pb/Bi) ตัวเปลี่ยนย่านสเปกตรัมของนิวตรอน (Neutron spectrum shifter) และตัวควบคุมลำนิวตรอน (Neutron collimator)



รูปที่ 5.6 ระบบลำเลียงนิวตรอนแนวนอน

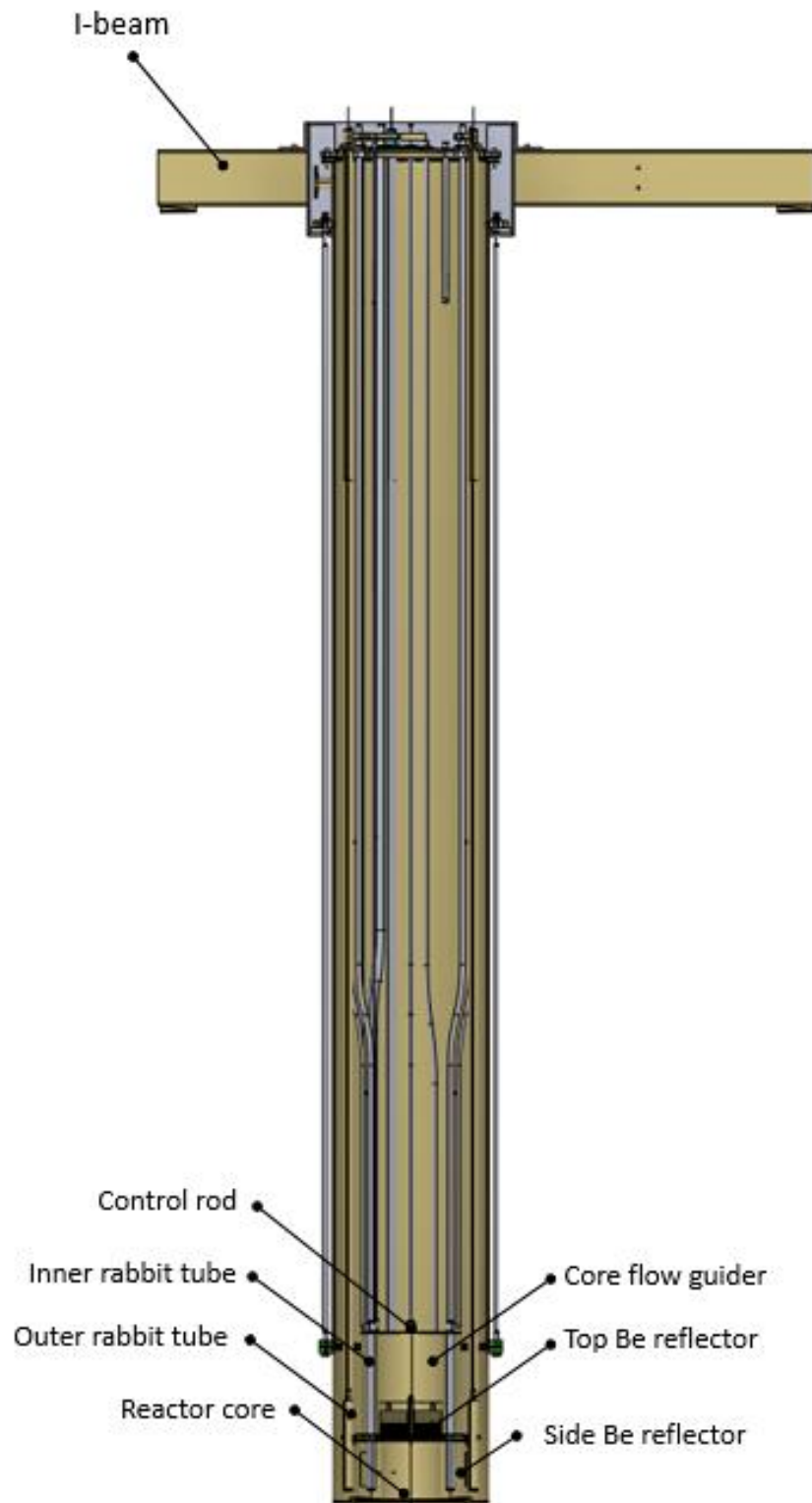


รูปที่ 5.7 ระบบลำเลียงนิวตรอนแนวตั้ง

5.1.7 ระบบสนับสนุนอื่น ๆ

นอกเหนือจากส่วนโครงสร้างหลักที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 5.1.1 - 5.1.6 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารียังประกอบด้วยโครงสร้างสนับสนุนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่

- ท่ออาบรังสี (Irradiation tubes หรือ Rabbit tubes) สำหรับการอาบตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน
- ระบบวัด (Measuring system) สำหรับวัดฟลักซ์ อุณหภูมิ ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ ฯลฯ
- ท่อนำการไหลของน้ำ (Core flow guider)
- แท่นยึดถังปฏิกรณ์ I-beam (I-beam for suspending the reactor vessel) เป็น
- แผ่นกระจกปิดบ่อปฏิกรณ์ (Organic glass cover plate)



รูปที่ 5.8 โครงสร้างภายในถังปฏิกรณ์

5.2 การคำนวณเพื่อประเมินความปลอดภัยของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์

5.2.1 การประเมินด้านนิวทรอนิกส์

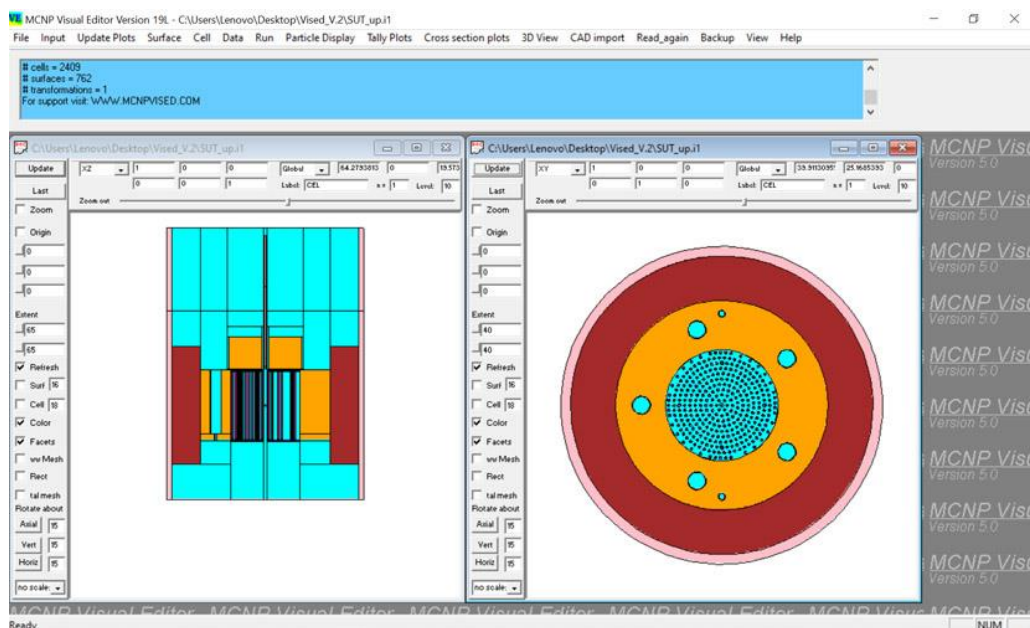
ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองการจัดแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย SUT-RR ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) และทำการวิเคราะห์คำนวณทางนิวทรอนิกส์โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) โดยกำหนดสมมติฐานการวิเคราะห์คำนวณอ้างอิงตามเอกสารร่างรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยฉบับเบื้องต้น (Preliminary Safety Analysis Report, PSAR) ของสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ดังกล่าว ดังนี้

- 1) คุณลักษณะโครงสร้าง ชนิดคุณสมบัติและค่า atomic densities ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฯ อ้างอิงตามเอกสาร PSAR และ Input File ที่ใช้ในการวิเคราะห์คำนวณของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) เครื่องปฏิกรณ์ฯ เดินเครื่องที่กำลังเครื่องปฏิกรณ์สูงสุดที่ 45 กิโลวัตต์
- 3) มีแท่งเชื้อเพลิงอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์จำนวนทั้งหมด 325 แท่ง และเป็นแท่งเชื้อเพลิงใหม่ทั้งหมด (ไม่ผ่านการใช้งาน)
- 4) สารหน่วงนิวตรอน (Moderator) แท่งเชื้อเพลิง และวัสดุส่วนประกอบทั้งหมดอยู่ในสภาวะ Cold โดยมีอุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ 300 องศาเซลเซียส และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีสภาวะ Clean ปราศจากผลกระทบจาก Xenon effects หรือ neutron poison ใดๆ เป็นไปตามหลักการคำนวณแบบเชิงอนุรักษ์ความปลอดภัย (Safety conservative analysis) ซึ่งจะให้ได้ผลการวิเคราะห์คำนวณเป็นค่ามากที่สุด
- 5) สารสะท้อนนิวตรอนอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์มากที่สุดส่งผลให้เกิด reaction rate สูงสุด
- 6) แท่งควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งสูงสุดในเครื่องปฏิกรณ์กรณีหนึ่ง และอยู่ตำแหน่งต่ำสุดอีกกรณีหนึ่ง
- 7) วิเคราะห์คำนวณที่สภาวะเดินเครื่องปฏิกรณ์แบบคงที่ (Steady State operation)

ทั้งนี้ ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองและดำเนินการวิเคราะห์คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางนิวทรอนิกส์ ดังนี้

- 1) วิเคราะห์คำนวณค่า Core Excess reactivity
- 2) วิเคราะห์คำนวณค่า Control rod worth
- 3) วิเคราะห์คำนวณค่า Power Distribution เพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์คำนวณทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ด้วยโปรแกรม TRACE ต่อไป

4) วิเคราะห์คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ (reactor kinetic parameter) เพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์คำนวณทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ด้วยโปรแกรม TRACE ต่อไป



รูปที่ 5.9 แสดงแบบจำลองการวิเคราะห์คำนวณเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ SUT-RR ด้วยโปรแกรม MCNP

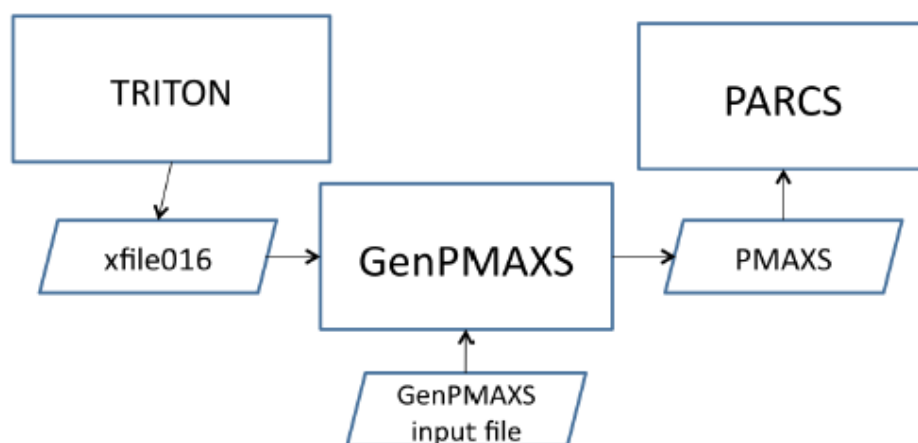
ผลการวิเคราะห์คำนวณทางนิวทรอนิกส์ด้วยชุดรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าและแตกต่างจากผลการวิเคราะห์คำนวณตามที่ปรากฏในรายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยฉบับเบื้องต้น (PSAR) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งควรจะได้มีการพิจารณาขอข้อมูลรายละเอียดเพิ่มเติม ตลอดจนทบทวนวิธีการวิเคราะห์ของสถานประกอบทางนิวเคลียร์ดังกล่าว และนำมาปรับปรุงแก้ไขการวิเคราะห์คำนวณเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางนิวทรอนิกส์และค่าพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฯ สำหรับการวิเคราะห์ทางเทอร์มัลไฮดรอลิกส์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดยลำดับถัดไป

5.2.2 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ความปลอดภัยโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ SCALE

ในการฝึกอบรมการใช้ SCALE computer code นั้นได้มีการทดลองสร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับ Miniature Neutron Source Reactor ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อคำนวณหา Criticality ที่กำลังสูงสุด โดยการสร้างแบบจำลองใช้ User interface ผ่านทั้งโปรแกรม GeeWiz และ โปรแกรม SNAP4.0 ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน

หลังจากการคำนวณหา Criticality การฝึกอบรมได้เริ่มต้นการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลอง Lattice Physics ผ่าน โปรแกรม SNAP4.0 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่า Cross-section ของแท่งปฏิกรณ์ด้วย

SCALE/TRITON computer code เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันเพื่อคำนวณค่า Macroscopic Cross-section ผ่านโปรแกรม GenPMAXS และนำไปสู่การคำนวณ Full Core Simulation ของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านโปรแกรม PARCS ดังรูป เพื่อสร้างผลลัพธ์ในรูปแบบของโปรไฟล์กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณทางเทอร์โมไฮดรอลิกส์แบบมีฟีดแบคหรือแบบ Coupling ด้วยโปรแกรม TRACE ต่อไป



รูปที่ 5.10 แผนผังขั้นตอนการใช้ชุดโปรแกรมคำนวณทางนิวทรอนิกส์

5.2.3 การคำนวณเทอร์มัลไฮดรอลิกส์

ได้สร้างแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) ซึ่งเป็นแบบ Miniature neutron source reactor (MNSR) ขนาด 45 kW โดยรหัสคอมพิวเตอร์ TRACE การสร้างแบบจำลองนี้ทำเพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยด้านเทอร์มัลไฮดรอลิก ซึ่งเน้นที่การวิเคราะห์ระบบหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ว่ามีระบบหล่อเย็นที่เพียงพอจะทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปลอดภัยหรือไม่ โดยใช้เกณฑ์กำหนดเป็นค่าที่บ่งบอกว่าปลอดภัย ได้แก่ ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เปลือกห่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิง และค่าความห่างจากจุดที่ทำให้เกิดการเดือดที่ผิว (Departure from nucleate boiling; DNBR) เพื่อป้องกันการเกิด film boiling

ผลของการฝึกอบรมที่ Brookhaven National Laboratory ทำให้ได้สร้างแบบจำลองในเบื้องต้นสำเร็จ โดยสร้างแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ของ มทส. ซึ่งประกอบด้วยระบบหล่อเย็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

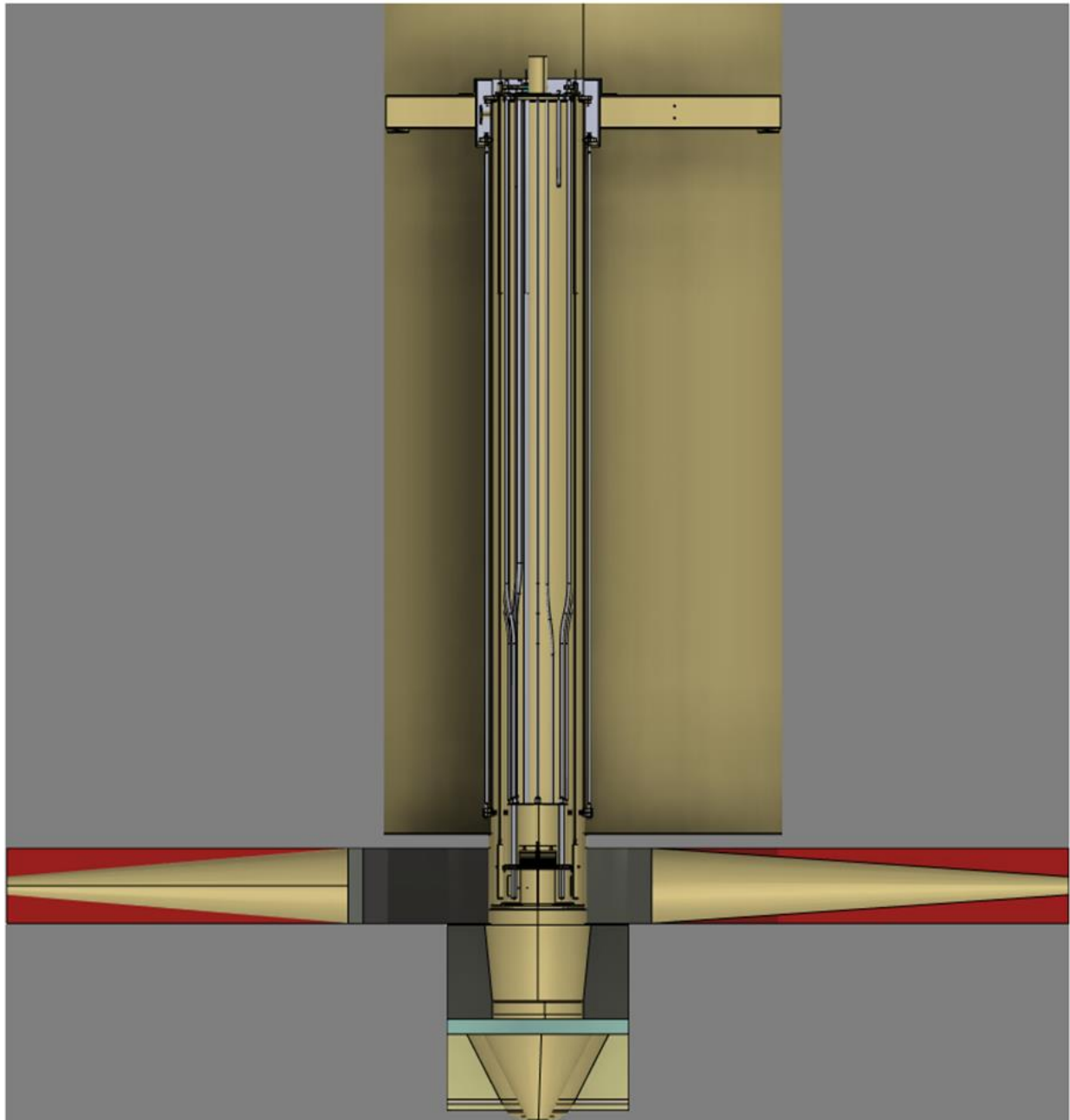
- 1) ระบบหล่อเย็นในถังปฏิกรณ์ (reactor vessel) ที่สร้างจากอลูมิเนียมอัลลอย (Al6061) เป็นถังที่บรรจุแกนปฏิกรณ์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร สูง 25.8 เซนติเมตร (โดยประมาณ) ถังปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.62 เมตร แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนด้านล่าง อยู่ด้านล่างสุดของถังซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนปฏิกรณ์ ถือเป็นส่วนสำคัญของระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีทางน้ำหล่อเย็นเข้าแกนและทางน้ำออกจากแกนอยู่ในบริเวณนี้ มทส. ได้ออกแบบให้มีช่องทางน้ำออกจากแกนบังคับให้น้ำไหลขึ้นสู่ด้านบน (Flow guider) เพื่อป้องกันน้ำร้อนไหลกลับเข้าสู่แกนปฏิกรณ์ ความสูงของถังส่วนล่าง คือ 0.637 เมตร การไหลเวียนของน้ำเป็นแบบธรรมชาติ (Natural convection)
- ส่วนด้านบน เป็นส่วนที่มีน้ำหล่อเย็นไหลเวียนอยู่ในปริมาณมาก ความสูงประมาณ 4.5 เมตร ในแบบจำลองได้แบ่งส่วนนี้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่น้ำไหลออกจากแกนขึ้นสู่ด้านบน และส่วนที่น้ำที่ไหลลงเข้าสู่แกน ความสูงของถังส่วนบน 4.7 เมตร การไหลเวียนแบบธรรมชาติ

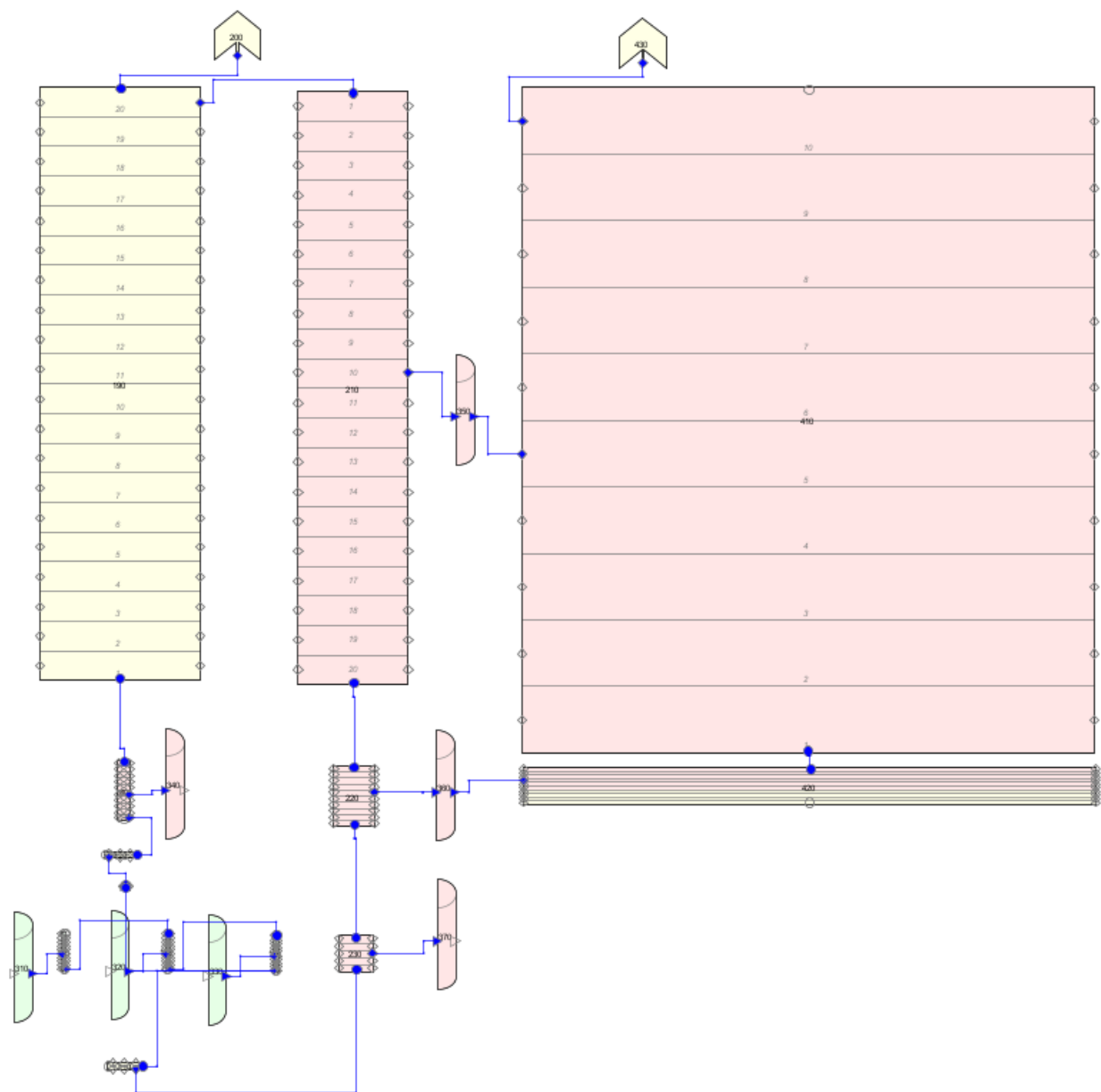
2) ระบบหล่อเย็นในบ่อคอนกรีต (Concrete pool) บ่อปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 เมตร สูง 5.5 เมตร บ่อคอนกรีตบรรจุถังปฏิกรณ์อยู่ด้านใน ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนออกจากถังปฏิกรณ์อีกชั้นหนึ่ง โดยผ่านผนังของถังปฏิกรณ์อลูมิเนียม นอกจากนี้ยังเป็นบ่อที่บรรจุน้ำหล่อเย็นสำรองเพื่อให้น้ำไหลเข้าไปในถังปฏิกรณ์หากมีการแตกรั่วของถังปฏิกรณ์เกิดขึ้น การไหลเวียนของน้ำในบ่อปฏิกรณ์เป็นการไหลเวียนแบบธรรมชาติเช่นเดียวกับในถังปฏิกรณ์

แบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ใช้ข้อมูลจริงที่ มทส. รายงานในรายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัยฉบับเบื้องต้น (PSAR) โดยใช้วัสดุ ขนาด ตำแหน่ง และอุณหภูมิเบื้องต้นที่มีในรายงาน นอกจากนี้ได้คำนวณ Hydraulic diameter ความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ได้นำในทั้งถังและบ่อปฏิกรณ์ หากบางข้อมูลไม่ชัดเจน ได้ทำสมมติฐานและบันทึกไว้ในการทำแบบจำลอง รูป 5.11 แสดงแผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของ มทส. และรูป 5.12 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ TRACE

แผนการดำเนินการต่อไป คือ ทบทวนขนาด ตำแหน่งต่าง ๆ ให้แม่นยำ และนำค่าการกระจายของกำลังในแกนปฏิกรณ์ทั้งแนวระนาบและแนวตั้งจากการคำนวณด้านนิวทرونิกส์มาใส่ในแบบจำลอง แล้วทำการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ขณะกำลังคงที่ (Steady state) และในขณะมีเหตุการณ์ผิดปกติหรือเกิดอุบัติเหตุ (Transient state)



รูป 5.11 แสดงแผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของ มทส.



รูป 5.12 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ TRACE

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบการพิจารณาให้อนุญาตก่อสร้าง ซึ่งเป็นโครงการต่อเนื่องที่มีระยะเวลา 3 ปี สรุปผลการดำเนินงานที่ผ่านมา ดังนี้

ปีที่ 1 (ปีงบประมาณ 2563) ได้ทำการฝึกอบรมพื้นฐานการประเมินความปลอดภัย ซึ่งรวมถึงหลักการและการวิเคราะห์คำนวณเพื่อประเมินความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย และจัดซื้อเอกสารมาตรฐานสำหรับใช้อ้างอิง การอบรมประกอบด้วย

- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง Overview of computer codes used in the regulatory process
- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง โปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ MCNP6 เบื้องต้น (Introduction to MCNP6)

ปีที่ 2 (ปีงบประมาณ 2564) ได้จัดทำระบบประมวลผลสำหรับการประเมินความปลอดภัยสำเร็จจำนวน 5 ระบบและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย

- ระบบศูนย์กลางเครือข่ายประมวลผลสูง
- ระบบประมวลผลทางด้านนิวทรอนิกส์
- ระบบประมวลผลทางด้านฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์
- ระบบประมวลผลทางด้านเทอร์มัลไฮดรอลิกส์
- ระบบประเมินความปลอดภัยทางด้าน Probabilistic Safety Analysis

ในปีที่ 3 (ปีงบประมาณ 2565) ได้พัฒนาแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยแบบ Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) ขนาด 45 kW ของ มทส. โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ MCNP SCALE และ SNAP-TRACE และทำการวิเคราะห์ความปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ยังขาดข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตโดยละเอียดและข้อมูลเชิงนิวเคลียร์บางส่วน จึงได้ขอข้อมูลจาก มทส. และผู้ผลิตจากสาธารณรัฐประชาชนจีน เพื่อทำการวิเคราะห์ความปลอดภัยในสภาวะคงกำลัง และสภาวะเกิดอุบัติเหตุให้เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ ได้จัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อเพิ่มศักยภาพในการประเมินความปลอดภัยประกอบการให้อนุญาตก่อสร้างสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยโดยร่วมมือกับคณะกรรมการกำกับดูแลทางนิวเคลียร์แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. NRC) ได้แก่

- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การอนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (Construction Licensing for Research Reactors)
- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การตรวจสอบการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย (Research and Test Reactors Construction Inspection)
- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว (Geology and seismology considerations for research and test reactor siting and design)
- การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การออกแบบอาคารและระบบสนับสนุนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบกำลัง (Nuclear Power Plant – Building and Supporting Systems Design)

การดำเนินการโครงการนี้ ทำให้สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติได้เพิ่มพูนศักยภาพในการประเมินความปลอดภัยสำหรับประกอบการพิจารณาให้อนุญาตก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย และเป็นการเพิ่มศักยภาพในการกำกับดูแลสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น สามารถกำกับดูแลการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhou, Yongmao, et al. “The Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) a Private Nuclear Tool.” *NDT International*, vol. 22, no. 4, 1989, p. 244., [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(89\)91057-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(89)91057-2).
- [2] Yongmao, Z. (1988). Safe private nuclear tool the miniature neutron source reactor. *Transactions of the American Nuclear Society*, 56(1), 253-259.
- [3] Ahmed, Y.A., Ewa, I.O.B., Umar, M., Bezboruah, T., Johri, M., & Akaho, E.H.K. (2006). The low power miniature neutron source reactors: Design, safety and applications (IC--2006/020). International Atomic Energy Agency (IAEA)
- [4] RERTR Available from: <https://www.rertr.anl.gov/> [accessed 11 April 2023].
- [5] Conversion of Miniature Neutron Source Reactors from High Enriched Uranium to Low Enriched Uranium Available from: <https://conferences.iaea.org/event/181/contributions/15780> [accessed 15 April 2023].
- [6] Osei, B., et al. “The Low Enriched Uranium Miniature Neutron Source Reactor (Leu-MNSR) Neutron Spectrum Characterization for K0-INAA.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1005, 2021, p. 165397.,
- [7] Manowogbor, Victor & Odoi, Henry Cecil & Abrefah, Rex. (2018). Neutronic Calculations of Ghana Research Reactor-1 LEU Core. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165397>.
- [8] Lim, In Cheol, Wu, Sang Ik, Lee, Byung Chul, & Ha, Jae Joo (2012). Review of the status of low power research reactors and considerations for its development. *Proceedings of the KNS autumn meeting*, (pp. 1CD-ROM). Korea, Republic of: KNS.
- [9] Zhang, Zizhu, and Tong Liu. “A Review of the Development of in-Hospital Neutron Irradiator-1 and Boron Neutron Capture Therapy Clinical Research on Malignant Melanoma.” *Therapeutic Radiology and Oncology*, vol. 2, 2018, pp. 49–49., <https://doi.org/10.21037/tro.2018.10.03>.
- [10] รายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ฉบับเบื้องต้น โครงการจัดตั้งศูนย์ปฏิบัติการวิจัยรังสีรักษาจากโบรอนจับยัตินิวตรอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ้างอิงรูปภาพ

- i. Yongmao, Z. (1988). Safe private nuclear tool the miniature neutron source reactor. Transactions of the American Nuclear Society, 56(1), 253-259
- ii. Zhang, Zizhu, and Tong Liu. "A Review of the Development of in-Hospital Neutron Irradiator-1 and Boron Neutron Capture Therapy Clinical Research on Malignant Melanoma." Therapeutic Radiology and Oncology, vol. 2, 2018, pp. 49-49.,