หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

โรงไฟฟ้าปรมาณูแบบ พีดับเบิลยูอาร์

2.1 ประวัติของการพัฒนา

สหรัฐได้ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ขึ้นครั้งแรก เพื่อติดตั้งให้แก่เรือดำน้ำ Nautilus แห่งราชนาวีสหรัฐ เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับเรือดำน้ำ Nautilus ได้ถูกสร้างขึ้นบนบก เพื่อทดลองการทำงาน เรียกว่า STR Mark 1 ซึ่งเดินเครื่องสำเร็จครั้งแรกในเดือนมีนาคม 1953 หลังจากนั้นอีก 2 ปี คือ ในเดือนมกราคม 1955 สหรัฐก็ประสบความสำเร็จในการทดลองขับเคลื่อนเรือดำน้ำ Nautilus ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ในทะเล หลังจากนั้นเป็นต้นมาเรือดำน้ำปรมาณู เรือบรรทุกเครื่องบิน และเรือพิฆาตของราชนาวีสหรัฐได้ถูกสร้างขึ้นอย่างมากมาย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR นี้เป็นพลังขับเคลื่อน

เครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าครั้งแรกที่โรงไฟฟ้าปรมาณู Shippingport ในรัฐแพนซิลวาเนีย สามารถเดินเครื่องสำเร็จในเดือนธันวาคม 1957 และผลิตไฟฟ้าได้เต็มกำลังผลิต 60 เมกกะวัตต์ ในเวลาอีก 3 อาทิตย์ต่อมา หลังจากนั้นโรงไฟฟ้าปรมาณูแห่งอื่น เช่น Yankee - Rowe, Indian Point, San Onofre, Haddam Neck, Point Beach, Surry, Turkey Point, Zion, Donald C. Cook ฯลฯ ก็ถูกสร้างขึ้นในสหรัฐ โดยมีกำลังผลิตมากขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 60 เมกกะวัตต์ที่โรงไฟฟ้าปรมาณู Shippingport จนถึง 1,060 เมกกะวัตต์ ที่โรงไฟฟ้าปรมาณู Donald C. Cook นอกจากนี้โรงไฟฟ้าปรมาณูแบบ PWR ก็ถูกสร้างขึ้นในประเทศอื่น ๆ เช่นกัน ได้แก่ โรงไฟฟ้า Voronezh ในรัสเซีย, Atomkraftwerk - 1 (AKW - 1) ในเยอรมันตะวันออก, Stade ในเยอรมันตะวันตก, SELNI ในอิตาลี, SENA ในฝรั่งเศส, Jose de Cabrera ในสเปญ, Beznau ในสวิตเซอร์แลนด์, Mihama และ Takahama ในญี่ปุ่น, Ringhal ในสวีเดน

2.2 ระบบผลิตไอน้ำ (NSSS)

ระบบผลิตไอน้ำของ PWR ประกอบด้วย Reactor และวงจรหลาย ๆ วงจร ของน้ำระบายความร้อน ซึ่งเชื่อมโยงกับถังปฏิกรณ์ในลักษณะขนาน แต่ละวงจรของน้ำระบายประกอบด้วย ปั๊มป์ (Reactor Coolant Pump) และเครื่องผลิตไอน้ำ (Steam Generator) นอกจากนี้ระบบผลิตไอน้ำ จะต้องมีเครื่องควบคุมความดัน และระบบช่วยอื่น ๆ อีกด้วย (ภาพตัดขวางของอาคารเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR แสดงไว้ในรูปที่ 2-1)

น้ำที่มีความดันสูงจะหมุนเวียนผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยาลูกโซ่ในแท่งเชื้อเพลิง น้ำเมื่อได้รับความร้อนแล้วก็ออกจากถังปฏิกรณ์ผ่านไปทางท่อสู่เครื่องผลิตไอน้ำ ซึ่ง ณ ที่นี้ความร้อนก็จะถูกถ่ายเทจากน้ำระบายความร้อนในระบบแรกสู่น้ำอีกระบบที่ 2 ซึ่งมีความดันต่ำกว่า ดังนั้นจึงกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งเมื่อผ่านเครื่องขจัดความชื้น และทำให้เป็นไอแห้งแล้วก็จะถูกส่งไปหมุนกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป น้ำระบายความร้อนในระบบที่หนึ่งหลังจากที่ได้ถ่ายเทความร้อนแล้ว ก็จะถูกปั๊มป์กลับไปรับความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์อีก เป็นอันครบวงจร ส่วนไอน้ำในระบบที่ 2 ที่หมุนกังหันแล้วก็จะผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งมีน้ำจากแหล่งน้ำภายนอก เช่น แม่น้ำ หรือทะเลมาระบายความร้อนส่วนที่เหลือใช้ไป ไอน้ำนั้นก็จะกลับกลายเป็นน้ำเพื่อที่จะถูกปั๊มป์ไปรับความร้อนจากน้ำในระบบที่ 1 ที่เครื่องผลิตไอน้ำเป็นอันครบวงจรที่ 2 (แสดงไว้ในรูปที่ 2-2) การถ่ายเทพลังงานความร้อนของน้ำในระบบที่ 1 และ 2 ที่เครื่องผลิตไอน้ำและไอน้ำในระบบที่ 2 กับน้ำจากแหล่งภายนอกนั้นไม่มีส่วนใดสัมผัสกันโดยตรง เพราะในระบบระบายความร้อนทั้งระบบจะใช้อุปกรณ์เฉพาะที่ไม่มีการรั่วไหลทั้งสิ้น เพื่อให้แน่ใจได้ว่าของเหลวจะอยู่แต่เฉพาะภายในระบบเท่านั้น

แกนเครื่องปฏิกรณ์แบ่งออกเป็นหลายส่วนตามความเข้มข้นของยูเรเนียม 235 ในแท่งเชื้อเพลิง โดยที่แท่งเชื้อเพลิงในส่วนต่าง ๆ เหล่านั้นมีลักษณะและคุณสมบัติทางกลศาสตร์เหมือนกันทุกประการ โดยทั่วไปในการบรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ครั้งแรก เชื้อเพลิงจะมีความเข้มข้น 3 ระดับ เชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นสูงสุดจะถูกบรรจุไว้รอบนอกของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีความเข้มข้นรองลงมาทั้ง 2 ระดับ จะถูกจัดให้อยู่ในส่วนกลางตามตำแหน่งที่เตรียมไว้

แล้ว ภายหลังจากการใช้งานเชื้อเพลิงส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำสุดประมาณ $\frac{1}{3}$ ของทั้งหมด ซึ่งอยู่ในส่วนกลางจะถูกนำออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ เชื้อเพลิงใหม่ที่จะถูกนำมาบรรจุในบริเวณรอบนอกของแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยที่เชื้อเพลิงที่เหลืออยู่อีก $\frac{2}{3}$ จะถูกสับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ให้อยู่ในลักษณะที่จะได้การกระจายของกำลังดีที่สุด (ตัวอย่างการจัดตำแหน่งของเชื้อเพลิงแสดงไว้ในรูปที่ 2-3)

แท่งควบคุมที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ประกอบด้วยแท่งดูดจับนิวตรอนรูปทรงกระบอกหลาย ๆแท่ง สามารถเคลื่อนขึ้นลงภายในท่อนำทางซึ่งอยู่ในมัดเชื้อเพลิงบางมัด แท่งควบคุมเหล่านี้จะไปเชื่อมโยงที่ตอนบนเหนือแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นชุด ๆ แต่ละชุดก็มีแกนกลางติดอยู่กับเครื่องกลไก ซึ่งตั้งอยู่ตอนบนของถังเครื่องปฏิกรณ์สำหรับขับเคลื่อนแท่งควบคุมขึ้นลงตามที่ต้องการ ในกรณีที่ต้องดับเครื่องอย่างฉุกเฉิน แท่งควบคุมจะตกลงไปในแกนเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแรงดึงดูดของโลก (แสดงไว้ในรูปที่ 2-4)

ปั๊มน้ำที่ใช้ขับดันน้ำระบายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นแบบ (Single - Stage, Centrifugal Pumps of The Shaft - Seal Type) อาศัยแรงเหวี่ยงขั้นเดียว ชนิดป้องกันการรั่ว ต้นกำลังที่จะจ่ายให้ปั๊มน้ำนี้ ได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานอยู่ได้ในทุกสถานการณ์ เพื่อเป็นหลักประกันว่า ยังคงมีน้ำไหลเวียนเพียงพอที่จะระบายความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องผลิตไอน้ำเป็นแบบตั้ง ประกอบด้วยท่อทำด้วยโลหะผสม Inconel รูปตัว U นับพันท่อ เพื่อให้มีพื้นผิวสำหรับถ่ายเทความร้อนมาก ๆ น้ำระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์จะไหลเวียนเข้าไปในท่อเหล่านี้ หลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในระบบที่ 2 แล้ว จึงกลับไปรับความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ น้ำในระบบที่ 2 เมื่อได้รับความร้อนแล้ว เนื่องจากมีความดันต่ำกว่า จึงมีบางส่วนกลายเป็นไอน้ำ ผ่านเข้าไปในเครื่องสกัดความชื้น ซึ่งอยู่ตอนบนของเครื่องผลิตไอน้ำ เครื่องสกัดความชื้น (The Moisture Separator) มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะลดความชื้นของไอจนเหลือไม่เกิน 0.25 %

ท่อในระบบระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ตลอดจนส่วนประกอบอื่น ๆ ที่สัมผัสกับน้ำระบายความร้อนทำด้วย Stainless Steel นอกจากท่อในเครื่องผลิตไอน้ำ และท่อเชื้อเพลิงที่ทำด้วย Inconel และ Zircaloy ตามลำดับ ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (แสดงไว้ในรูปที่ 2-5) รวมทั้งเพลาที่ใช้ขับเคลื่อนแท่งควบคุม ทำด้วย Stainless Steel เป็นส่วนใหญ่

เครื่องปรับความดันจะติดตั้งอยู่ที่วงจรใดวงจรหนึ่งของระบบระบายความร้อนทำหน้าที่รักษาระดับความดันในระบบระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมด ในเครื่องผลิตความดัน (แสดงไว้ในรูปที่ 2-6) ประกอบด้วยน้ำและไอน้ำอยู่ประมาณอย่างละ 50 % ของปริมาตร ในขณะที่ความดันลดลง เครื่องทำความร้อนจะต้มน้ำ ให้เป็นไอเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบ และเมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้น ระบบอัตโนมัติจะฉีดน้ำเย็นเข้าทางตอนบน ทำให้ไอบางส่วนกลายเป็นน้ำลดความดันของระบบลง

นอกจากนี้ยังมีระบบช่วยอื่น ๆ เช่น ระบบเติมน้ำเข้าไปในระบบระบายความร้อน, ระบบขจัดกากในน้ำระบายความร้อน, ระบบเติมสารเคมี เพื่อป้องกันการสึกกร่อน และควบคุม Reactivity, ระบบหล่อเย็นสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ, ระบบระบายความร้อนที่เหลือภายหลังการดับเครื่องและระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน เป็นต้น

2.3 การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์อาศัยอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เอง เรียกว่า Temperature Coefficients of Reactivity กล่าวคือ ในกรณีที่มีโหลดสูงขึ้นในระบบไฟฟ้าจะทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ซึ่งเป็นเหตุให้เครื่องปฏิกรณ์เพิ่มกำลังผลิตขึ้นโดยอัตโนมัติและหากโหลดหายไปจากระบบไฟฟ้าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เครื่องปฏิกรณ์ลดกำลังผลิตลงเอง นอกจากนี้ยังมีแท่งควบคุมซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดจับนิวตรอนอย่างแรง การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ทำได้โดยการเคลื่อนที่แท่งควบคุมเหล่านี้ หากแท่งควบคุมเคลื่อนเข้าไปอยู่ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ก็จะไปดูดจับนิวตรอนมาก ปฏิกริยานิวเคลียร์ก็ลดลง และหากเคลื่อนแท่งควบคุมออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้จำนวนนิวตรอนเพิ่มทวีขึ้น ปฏิกริยานิวเคลียร์ก็เกิดขึ้นมาก และให้พลังงานออกมามาก แท่งควบคุมใช้ทำหน้าที่สตาร์ท

เครื่อง ดับเครื่อง และติดตามการเปลี่ยนโหลดอย่างกระทันหัน การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ระยะยาวอาศัย Boron ซึ่งมีคุณสมบัติดูดจับนิวตรอนอย่างแรง เติมลงไปในน้ำระบายความร้อนในรูปของ Boric Acid ในขณะดับเครื่อง ดึงออกบางส่วนในขณะสตาร์ทเครื่อง และปรับให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมระหว่างเดินเครื่องตลอดเวลา ทั้งนี้ เพื่อให้สมดุลย์กับอัตราการใช้ไปของเชื้อเพลิง รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของกากเชื้อเพลิงใช้แล้ว (Fission Products) ซึ่งมีคุณสมบัติหน่วงให้ปฏิกริยาลูกโซ่เกิดขึ้นน้อยลง

ระบบควบคุมนี้สามารถรับต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดในทันที (Step Change) 10 % หรือค่อย ๆ เปลี่ยนในอัตรา 5 % ต่อนาที ในช่วงที่เครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องอยู่ระหว่าง 15 % - 10 % ของกำลังผลิตเต็มที่

การควบคุมทั้งเครื่องปฏิกรณ์และกังหันไอน้ำ กระทำได้จากห้องควบคุมกลาง

2.4 ระบบเปลี่ยนเชื้อเพลิง

การเปลี่ยนเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นั้น อาศัยเครื่องมือที่สามารถเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วใต้น้ำ ตั้งแต่ออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ จนกระทั่งบรรจุลงในถังเพื่อส่งไปยังโรงงานสะกัดเชื้อเพลิงใช้แล้วต่อไป การเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิงใช้แล้วใต้น้ำเป็นวิธีที่ลงทุนน้อยที่สุด เพราะน้ำมีคุณสมบัติป้องกันรังสีได้ดี และมีความโปร่งใสทำให้สามารถเห็นการทำงานของเครื่องมือได้ชัดเจน นอกจากนี้น้ำยังทำหน้าที่ระบายความร้อนส่วนที่ยังเหลืออยู่ในเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบเปลี่ยนเชื้อเพลิงอาจแบ่งได้เป็น 2 บริเวณ คือ ในส่วนที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจะต้องปล่อยให้น้ำท่วมจนถึงส่วนบนในขณะทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิง และส่วนที่เป็นสระเก็บเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นบริเวณที่เจ้าหน้าที่สามารถเข้าออก เพื่อปฏิบัติการได้ตลอดเวลาแม้ขณะเดินเครื่อง ทั้ง 2 บริเวณ สามารถติดต่อถึงกันได้ในขณะขนย้ายเชื้อเพลิง โดยผ่านทางช่องเปิดที่อาคารคุมเครื่องปฏิกรณ์

เชื้อเพลิงใช้แล้วจะถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิงแล้ว

นำไปบรรจุลงในระบบขนย้ายเชื้อเพลิง ซึ่งจะจัดการขนย้ายเชื้อเพลิงผ่านช่องเปิดออกไปยังสระสำหรับเก็บเชื้อเพลิง ณ ที่นั้นเชื้อเพลิงจะถูกนำไปพักวางไว้ในรางใต้น้ำเป็นเวลาประมาณ 4 - 5 เดือน เพื่อให้สารกัมมันตรังสีส่วนใหญ่สลายตัวไปเสียก่อน จึงนำเชื้อเพลิงบรรจุลงในถังเหล็ก (Spent Fuel Casks) เพื่อจัดส่งไปยังโรงงานสะกัดเชื้อเพลิงใช้แล้วต่อไป

2.5 ระบบขจัดกาก

ระบบขจัดกากมีอุปกรณ์หลายชนิดที่ทำหน้าที่ควบคุม และตระเตรียมสำหรับการเก็บกักหรือการระบายออกของกากที่เป็นของเหลวหรือแกส ที่ได้จากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

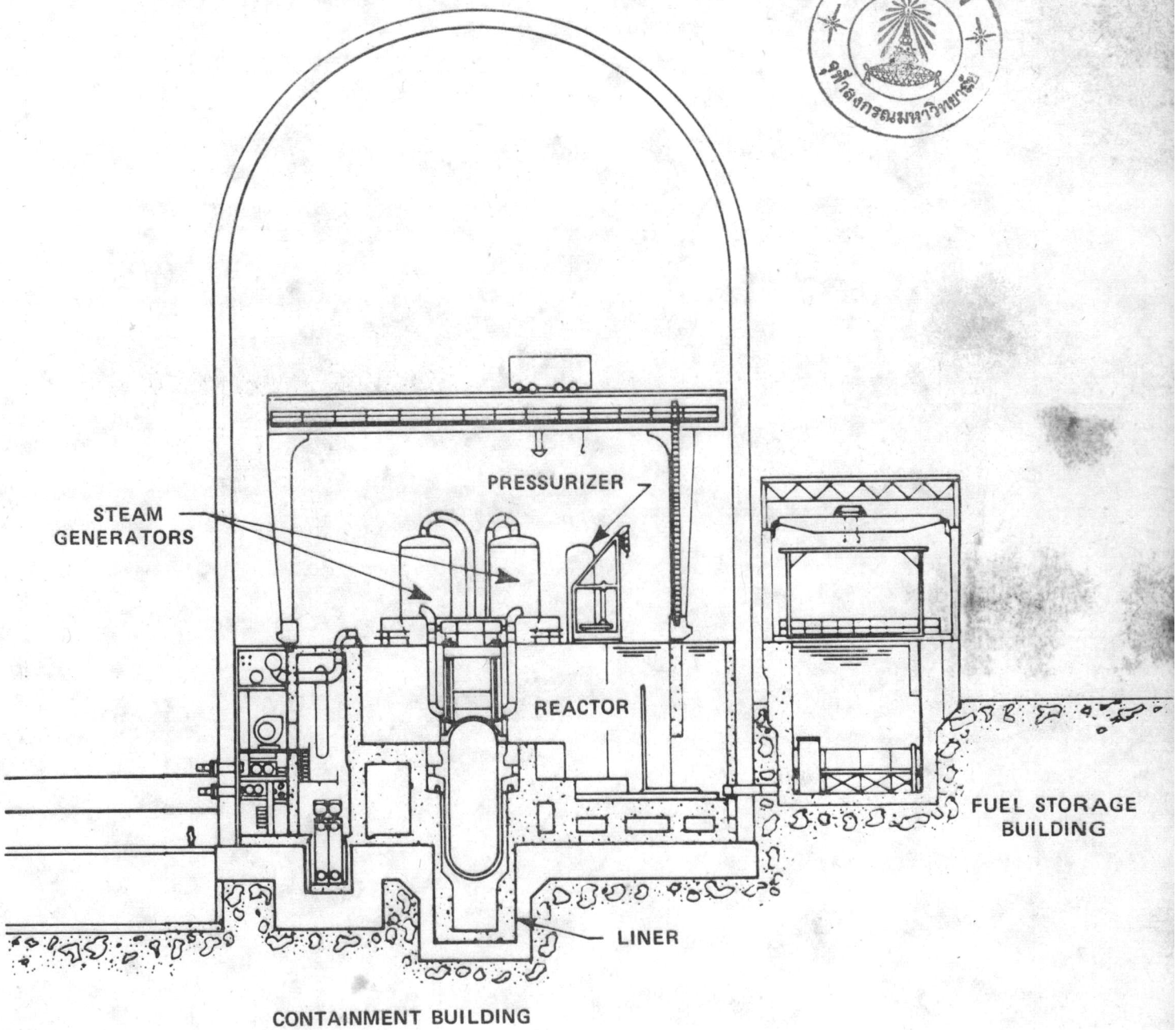
ระบบขจัดกากที่เป็นของเหลว จะเก็บรวบรวม, จัดการและหมุนเวียนน้ำที่ยังมีคุณภาพดีไปใช้ใหม่ ขจัดสารกัมมันตรังสีที่เจือปนอยู่ในของเหลว ทำให้เข้มข้นและจัดการให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมที่จะปล่อยออกมา หรือจัดส่งไปฝังในสถานที่อื่น ๆ

ส่วนระบบขจัดกากที่เป็นแกส ทำหน้าที่สะกัดแกสกัมมันตรังสีที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ออกจากน้ำระบายความร้อน แล้วนำไปเก็บไว้ในขณะเดินเครื่องปกติ ระบบนี้จะเก็บรวบรวมแกสที่เกิดจากการระเหยในระบบหมุนเวียนของโบรอนด้วย

รายละเอียดของระบบขจัดกากแสดงไว้ในบทที่ 4

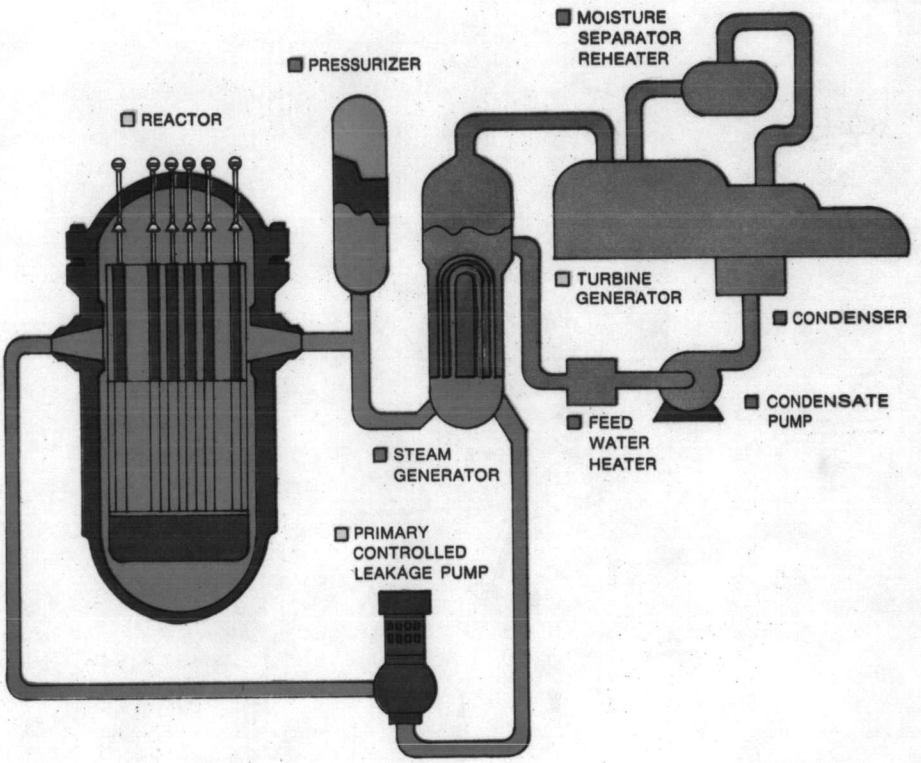
รูปที่ 2-1 อาคารเครื่องปฏิกรณ์

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

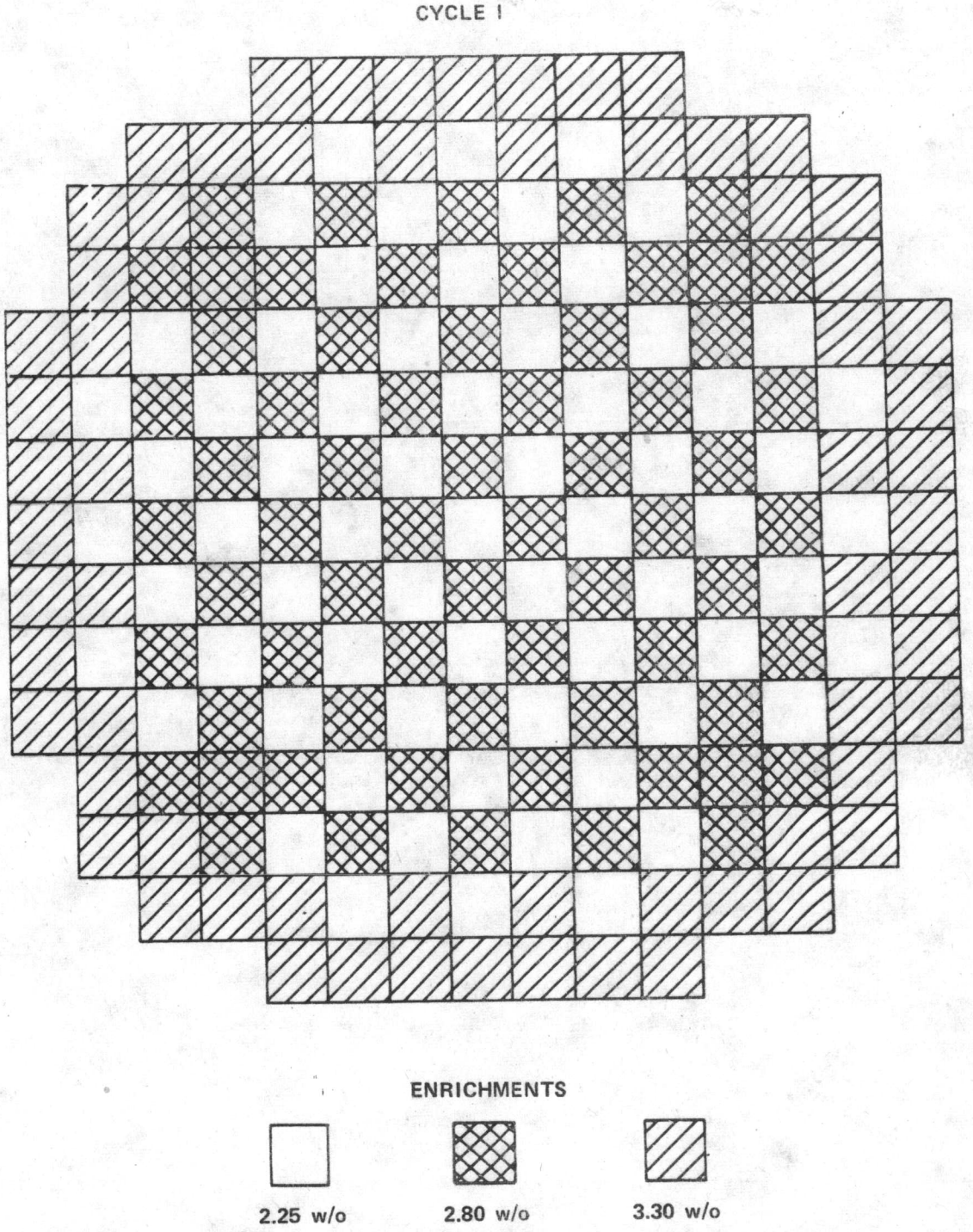


รูปที่ 2-2 ระบบผลิตไอน้ำ

PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)

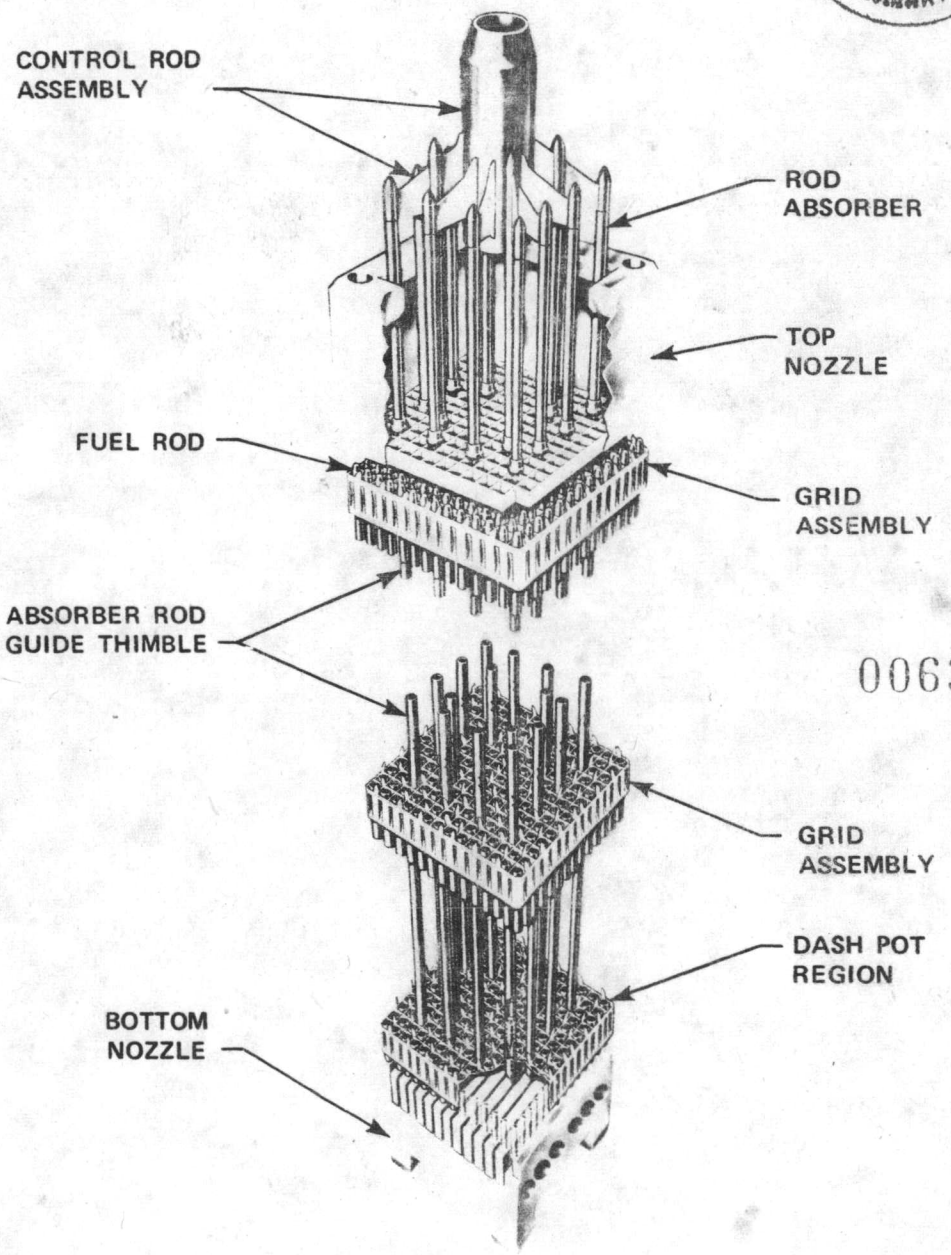


รูปที่ 2-3 การจัดตำแหน่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 2-4 แท่งควบคุม

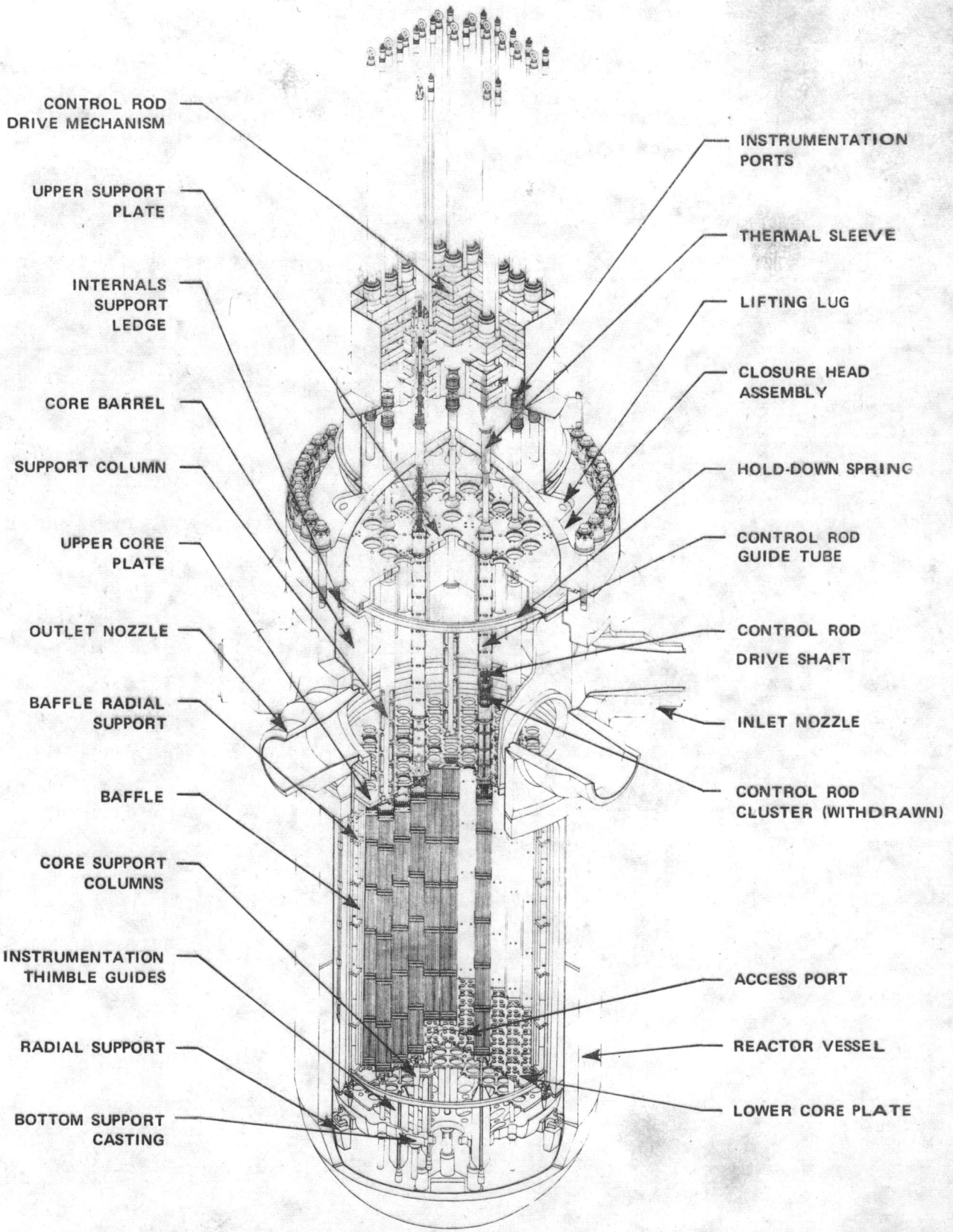
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย



006343

i 181994 58

รูปที่ 2·5 แกนเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2-6 เครื่องปรับความดัน