หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

4.1 หลักการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

โดยทั่วไปการผลิตไฟฟ้านั้นจะต้องประกอบด้วยต้นกำเนิดของพลังงาน (Source) ซึ่งมักจะได้มาในรูปของพลังงานความร้อน (ยกเว้นพลังงานที่ได้รับจากน้ำตก) พลังงานเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงาน (Convertor) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับพลังงานความร้อนนี้อาจจะได้มาจากปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction) โดยการสันดาประหว่างออกซิเจนกับน้ำมันเชื้อเพลิง ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และอาจจะได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear Reaction) โดยการแตกตัว (Fission) ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ กรณีหลังนี้จะได้พลังงานที่สูงกว่ากรณีแรก ซึ่งเป็นข้อแสดงความแตกต่างระหว่างการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงน้ำมัน และการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

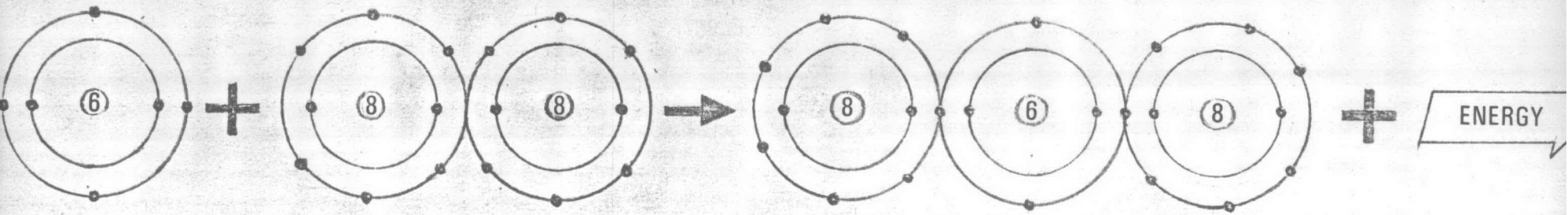
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า สารต่าง ๆ ในโลกหากนำมาแยกในห้องทดลองจะพบอนุภาคของธาตุต่าง ๆ ซึ่งครั้งหนึ่งเคยเชื่อกันว่าอนุภาคเหล่านี้เป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดไม่สามารถจะแยกต่อไปอีกได้ เราเรียกอนุภาคเหล่านี้ว่า อะตอม (Atom) หรือปรมาณู แต่ในปัจจุบันเชื่อว่าอนุภาคนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเรียกว่านิวเคลียส (Nucleus) หรือใจกลาง อีกส่วนหนึ่งเรียกว่าอีเล็คตรอน (Electron) ซึ่งวิ่งวนอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสตลอดเวลา ในทำนองเดียวกันกับดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์ในระบบสุริยะจักรวาล อนุภาคอีเล็คตรอนเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุด มีน้ำหนัก 0.0009×10^{-24} กรัม มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนที่เรียกว่านิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาคสองชนิดคือ นิวตรอนและโปรตรอน อนุภาคโปรตรอนมีน้ำหนัก 1.674×10^{-24} กรัม หรือหนักประมาณ

1,840 เท่าของอนุภาคอีเล็คตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก อนุภาคนิวตรอนมีน้ำหนัก 1.674×10^{-24} กรัม ไม่มีประจุไฟฟ้า คุณสมบัติธรรมดา ๆ ของธาตุต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอื่น ความสามารถในการละลายน้ำ ความมีสี สักษณะอ่อนแข็ง เหล่านี้เป็นคุณสมบัติซึ่งตัวอีเล็คตรอนของปรมาณูของธาตุนั้นเป็นผู้กำหนดโดยสิ้นเชิง นิวเคลียสไม่มีส่วนเข้ามาเกี่ยวข้องในการกำหนดคุณสมบัติเหล่านั้นเลย การสันดาปหรือปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนและคาร์บอนจึงเป็นเพียงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยอีเล็คตรอนที่วิ่งรอบ ๆ นิวเคลียสรวมตัวกันระหว่างธาตุสองธาตุขึ้นไป อีเล็คตรอนที่วิ่งอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสนั้นจะมีการหมุนหรือโคจรในระดับต่าง ๆ กันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นก็มีอีเล็คตรอนจำนวนจำกัด เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอีเล็คตรอนที่วิ่งอยู่ในวงจรรอบนอกของธาตุทั้งสองจะรวมตัวกัน เช่น คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้และให้ความร้อนออกมาจำนวน 14,150 บีทียูต่อปอนด์ของถ่าน หรือ 4.15 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อถ่านน้ำหนักหนึ่งปอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 14

อย่างไรก็ตาม ได้มีการค้นพบว่ามีธาตุที่มีน้ำหนักมาก เช่น ยูเรเนียม ธอเรียม และเรเดียม เป็นธาตุที่หนักที่สุดตามลำดับที่มีอยู่ในธรรมชาติ นิวเคลียสของธาตุเหล่านี้อยู่ในสภาพไม่คงตัว (unstable) มีการเปลี่ยนแปลงภายในอยู่ตลอดเวลา คือนิวเคลียสจะสลายตัว (disintegrate) และอนุภาคส่วนหนึ่งของนิวเคลียสจะหลุดพุ่งออกมาอยู่ตลอดเวลาและตัวเองก็จะกลายเป็นธาตุใหม่ไป นิวเคลียสของธาตุใหม่นี้จะเริ่มสลายตัวอีกและอนุภาคส่วนหนึ่งก็จะหลุดออกมา ในทำนองเดียวกันตัวเองก็จะกลายเป็นธาตุใหม่ไปอีก พฤติการณ์นี้จะอุบัติซ้ำ ๆ กันอยู่เรื่อย ๆ จนวาระสุดท้ายธาตุใหม่ที่เกิดขึ้นจะเป็นตะกั่ว เมื่อถึงวาระนี้การสลายตัวของนิวเคลียสจะยุติลงอย่างสิ้นเชิง ธาตุตะกั่วจะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นธาตุอื่นได้อีกต่อไปเพราะนิวเคลียสของธาตุตะกั่วเป็นนิวเคลียสที่คงตัว (stable) อนึ่ง การสลายตัวของนิวเคลียสหรือการแปรสภาพของธาตุหนึ่งเป็นอีกธาตุหนึ่งดังกล่าวนี้ แต่ละช่วงใช้เวลาต่าง ๆ กันตั้งแต่เสี้ยววินาทีไปจนถึงเป็นพัน ๆ ล้านปี การเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวของนิวเคลียสซึ่งปล่อยอนุภาคหลุดพุ่งออกมานั้นพูดได้อีกนัย

รูปที่ 14

ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่าน



C + O_2 = CO_2

+ 14,150 Btu per lb C

(4.15 kwhr per lb C)

หนึ่งว่า นิวเคลียสนั้นเปล่งหรือแผ่รังสี (ray) ออกมา ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การแผ่รังสี (radioactivity) การแผ่รังสีนี้เกิดขึ้นตามธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอ ไม่สามารถยับยั้งหรือชะลอหรือเร่งได้และไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความกดดันหรือสิ่งแวดล้อม ใด ๆ ทั้งสิ้น การแผ่รังสีเป็นปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ซึ่งแตกต่างออกไปจากปฏิกิริยาทางเคมี เป็นรังสีที่แผ่ออกจากนิวเคลียสของปรมาณู รังสีที่แผ่ออกมานี้แบ่งออกเป็นสามชนิดคือ รังสีแอลฟ่า (Alpha ray) รังสีเบต้า (Beta ray) และรังสีแกมม่า (Gamma ray) รังสีเหล่านี้ได้นำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรม เกษตรกรรม และธรณีวิทยา ตลอดจนการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ นับว่าเป็นประโยชน์แก่มวลมนุษย์อย่างยิ่ง ขณะเดียวกันรังสีอาจจะเป็นโทษได้ถ้านำไปใช้ไม่ถูกวิธี คืออาจจะทำให้เกิดโรคมะเร็ง โรคเม็ดเลือด ต้อหิน อายุสั้น เกิดความผิดปกติทางกรรมพันธุ์ เป็นต้น หรือถ้าถูกรังสีมาก ๆ อาจเป็นอันตรายแก่ชีวิตได้

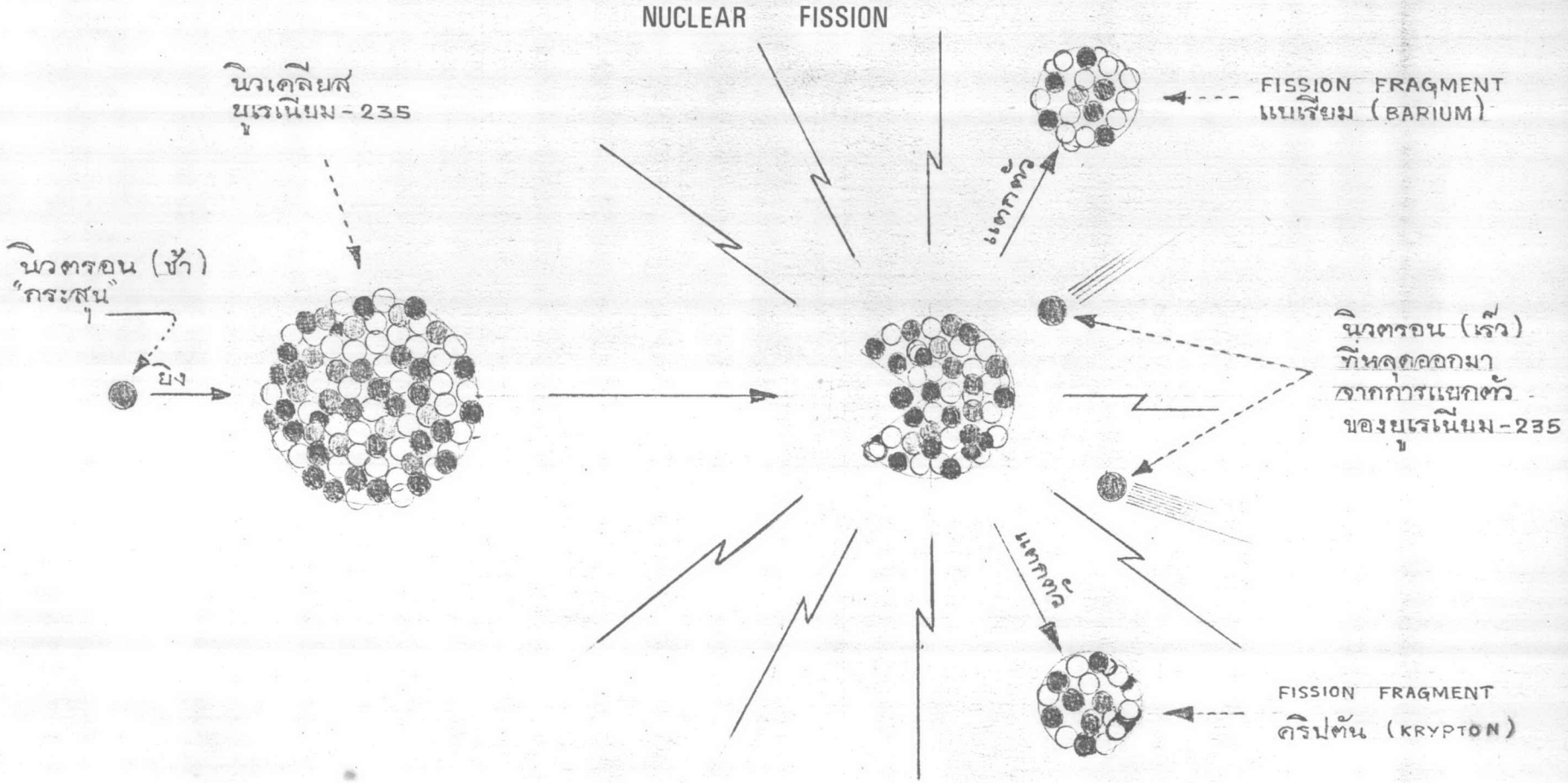
จากความรู้เรื่องการสลายตัวตามธรรมชาติของนิวเคลียสของธาตุซึ่งทำให้เกิดการแปรเปลี่ยนไปเป็นธาตุอื่นโดยธรรมชาติเช่นนี้ นักวิทยาศาสตร์จึงได้เพียรพยายามค้นคว้าหาวิธีแยกหรือแบ่งภาคนิวเคลียสของธาตุในลักษณะเดียวกันโดยมนุษย์บ้าง ในที่สุดการค้นคว้าก็ประสบความสำเร็จ และได้ค้นพบความจริงอันยิ่งใหญ่ประการหนึ่ง ซึ่งเป็นการเปิดยุคนิวเคลียร์ขึ้น กล่าวคือ ทุกครั้งที่นิวเคลียสถูกแบ่งภาคออกไปจะมีน้ำหนักหายไปจำนวนหนึ่งและจะมีพลังงานจำนวนมหาศาลถูกปล่อยออกมาด้วย กระบวนการแบ่งภาคของนิวเคลียสและปล่อยพลังงานออกมานี้เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์อย่างหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยาแตกตัว (Nuclear Fission) นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์ยังประสบความสำเร็จในการรวมนิวเคลียสสองนิวเคลียสเข้าด้วยกัน และปรากฏว่ามีน้ำหนักจำนวนหนึ่งหายไปเช่นเดียวกัน แต่ได้พลังงานมหาศาลยิ่งกว่าในกรณีการแบ่งภาคของนิวเคลียสอีก กระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์อีกแบบหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยารวมตัว (Nuclear Fusion) พลังงานที่เกิดขึ้นในกรณีเกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับปฏิกิริยารวมตัวนั้นพบว่าเป็นพลังงานที่แปรสภาพจากน้ำหนักของสารที่หายไปนั่นเอง บรรดาปฏิกิริยานิวเคลียร์ทั้งสามแบบคือ การแผ่รังสี (radioactivity) ปฏิกิริยาแตกตัว (Fission)

และปฏิกิริยารวมตัว (Fusion) นี้มีข้อแตกต่างกันคือ การแผ่รังสีเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติไม่สามารถจะบังคับควบคุมโดยวิธีใด ๆ ได้ ขึ้นอยู่กับเวลาอย่างเดียว ส่วนปฏิกิริยาแตกตัวและรวมตัวนั้นมนุษย์อาจทำให้เกิดขึ้นและควบคุมได้

ปฏิกิริยาแตกตัวตามปกติจะเกิดกับธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม ซึ่งเป็นธาตุหนักที่สุดที่มีอยู่ในธรรมชาติและสามารถควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามความต้องการได้ สามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้อุณหภูมิปกติ ส่วนปฏิกิริยารวมตัวโดยปกติจะเกิดขึ้นกับธาตุเบา เช่น ไฮโดรเจน ปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถจะหาวิธีควบคุมได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วต้องปล่อยให้เป็นไปจนสุดฤทธิ์ และจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมินับล้าน ๆ องศา ทั้งปฏิกิริยาแตกตัวและรวมตัวต่างให้พลังงานในรูปของความร้อนและส่งกัมมันตภาพรังสีจำนวนมหาศาลออกมาด้วย แต่เนื่องจากปฏิกิริยาแตกตัวสามารถควบคุมได้จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ เช่น ผลิตพลังงานไฟฟ้าและขับเคลื่อนยานพาหนะ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อเนื่องกันไปเป็นลูกโซ่ (Chain reaction) นี้เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor) ธาตุที่ใช้ทำปฏิกิริยาแตกตัวในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เรียกว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear fuel) ปัจจุบันนี้สำหรับงานทางด้านพลังงาน จะใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงเพราะมีความเหมาะสมและสามารถจะแข่งขันกับราคาการผลิตพลังงานจากถ่านหินและน้ำมันได้

<u>ปฏิกิริยาแตกตัว</u> (Nuclear Fission) ธาตุที่มีน้ำหนักมาก ๆ เช่น ยูเรเนียม 235 ยูเรเนียม 233 และพลูโตเนียม 239 เมื่อถูกนิวตรอนอิสระจาก Neutron Source ชน และนิวตรอนนั้นถูกจับไว้ทำให้นิวเคลียสของธาตุยูเรเนียมอยู่ในสภาวะตื่นตัว (Excited stage) และแตกตัวออกเป็นธาตุใหม่สองชนิด พร้อมทั้งให้นิวตรอนอิสระอีก 2-3 ตัว รวมทั้งให้รังสีแกมม่าและพลังงานประมาณ 200 เมกกะอีเล็คตรอนโวลท์ (Mega Electron Volt - MEV.) ต่อปฏิกิริยาแตกตัวหนึ่งครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 15 ในการนี้พบว่า ผลบวกของน้ำหนักของสิ่งต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวจะน้อยกว่าผลบวกของน้ำหนักของสิ่งที่ทำปฏิกิริยากัน กล่าวคือ น้ำหนักของปรมาณู

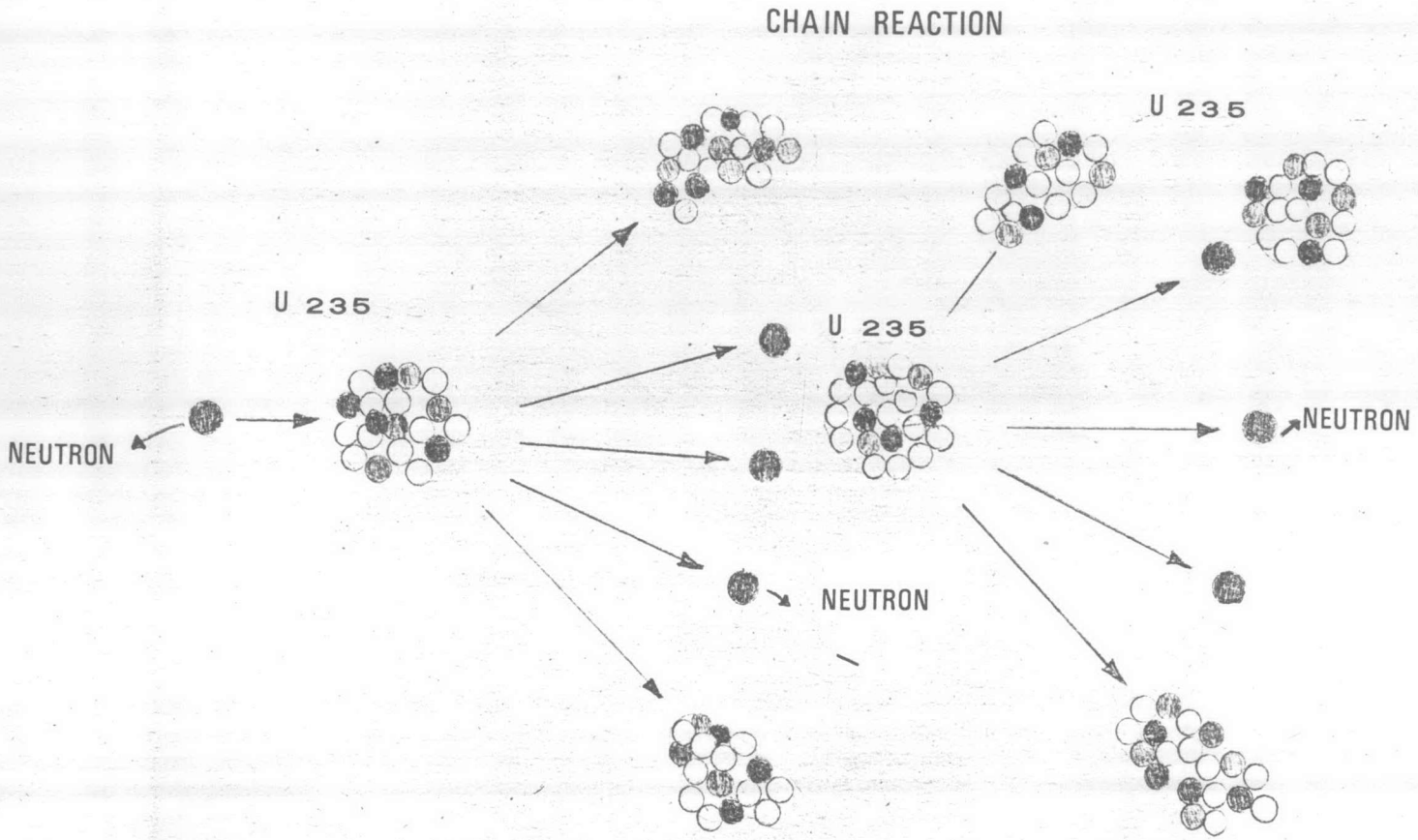
รูปที่ 15


NUCLEAR FISSION
นิวเคลียส
ยูเรเนียม-235
นิวตรอน (ช้า)
"กระสุน"
ยิง
แตกตัว
FISSION FRAGMENT
แบเรียม (BARIUM)
นิวตรอน (เร็ว)
ที่หลุดออกมา
จากการแยกตัว
ของยูเรเนียม-235
แตกตัว
FISSION FRAGMENT
คริปตัน (KRYPTON)

ของธาตุเดิมบวกกับน้ำหนักของนิวตรอนที่ถูกดูดเข้าไปจะมากกว่าน้ำหนักของธาตุทั้งสองธาตุที่เกิดขึ้นใหม่บวกกับน้ำหนักของนิวตรอนที่หลุดออกมา ปฏิกิริยาในลักษณะนี้สำคัญมาก และเป็นปฏิกิริยาฐานรากต้นกำเนิดของพลังงานนิวเคลียร์ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแตกตัว สำหรับธาตุยูเรเนียม 235 ยูเรเนียม 233 หรือพลูโตเนียม 239 ซึ่งใช้เป็นเป้าให้นิวตรอนวิ่งชนเรียกว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ส่วนนิวเคลียสของธาตุที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาเรียกว่า Fission Fragment สำหรับนิวตรอนอิสระซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นจะพุ่งเข้าชนนิวเคลียสอื่น ๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวขึ้นอีก ทำให้ได้นิวตรอนมากขึ้น เมื่อมีนิวตรอนมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็จะมากขึ้น กรรมวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ ปฏิกิริยาลูกโซ่นี้จะทำให้เกิดพลังงานต่อเนื่องกันไป ซึ่งทำให้สามารถนำพลังงานไปใช้ประโยชน์ได้ จะเห็นได้ว่านิวตรอนมีบทบาทสำคัญยิ่งในการที่จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ดำรงอยู่ได้ แต่ถ้าหากไม่มีปฏิกิริยาลูกโซ่ กล่าวคือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเพียงครั้งเดียวแล้วหยุดไป คุณค่าของปฏิกิริยาแตกตัวในด้านพลังงานก็จะหมดลง การที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดขึ้นและปล่อยให้ดำเนินไปเรื่อย ๆ โดยไม่มีการควบคุมและมีสารที่เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์มากเพียงพอ พลังงานจะถูกสะสมมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งก็จะทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ซึ่งหลักการนี้เองได้นำมาใช้สร้างลูกระเบิดนิวเคลียร์ในปลายสงครามโลกครั้งที่สอง การจะนำปฏิกิริยาลูกโซ่มาใช้ให้เป็นประโยชน์จึงต้องมีมาตรการควบคุมโดยพยายามจำกัดจำนวนของนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแตกตัวให้มีปริมาณพอดีมิให้มีมากเกินควร อุปกรณ์ควบคุมดังกล่าวนี้ได้แก่ Control Rod ซึ่งจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป ปฏิกิริยาลูกโซ่ดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 16

พลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวเกิดจากพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของ Fission Fragment ซึ่งถูกทำให้หยุดด้วยแรงเสียดทาน (Friction) ของเชื้อเพลิงอันทำให้พลังงานจลน์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด ดังนั้นประมาณร้อยละ 90 ของพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวจึงเกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง

รูปที่ 16



ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 เกิดจากนิวตรอน รังสีเบต้า และรังสีแกมม่า ซึ่งอาจทะลุแท่งเชื้อเพลิงออกมา และทำให้เกิดความร้อนนอกแท่งเชื้อเพลิง พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถจะคิดเป็นตัวเลขเปรียบเทียบได้ กล่าวคือ ในจำนวนยูเรเนียม 235 หนัก 1 กรัม จะได้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 220,500 กิโลวัตต์-ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัติสามารถจะนำมาใช้ได้เพียงร้อยละ 30 เท่านั้น อีกร้อยละ 70 จะสูญเสียไปในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพลังงานนิวเคลียร์กับพลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้ทางปฏิกิริยาเคมีแล้วจะเห็นว่าระหว่างถ่านที่มีน้ำหนักเท่า ๆ กับเชื้อเพลิงยูเรเนียมปฏิกิริยานิวเคลียร์จะให้พลังงานมากกว่าการเผาไหม้ธรรมดาของถ่านประมาณ 2.5 ล้านเท่า

ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จะมีเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียม 235 และยูเรเนียม 238 อยู่ที่แกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เมื่อได้รับนิวตรอนก็จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวซึ่งให้พลังงานความร้อนจำนวนมหาศาลออกมา และเมื่อตัวระบายความร้อน (Coolant) ไหลผ่านแท่งเชื้อเพลิง ตัวระบายความร้อนจะรับความร้อนเอาไว้และส่งมายังเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator) ตัวระบายความร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งอยู่อีกวงจรหนึ่ง จนกระทั่งน้ำเดือดและกลายเป็นไอในที่สุด ไอน้ำนี้เมื่อมีแรงดันและอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการแล้วก็จะถูกส่งไปตามท่อไปยังกังหันไอน้ำและไปขับดันให้กังหันไอน้ำหมุนเพื่อจะได้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าที่ใช้น้ำมัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถทำงานและผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 17

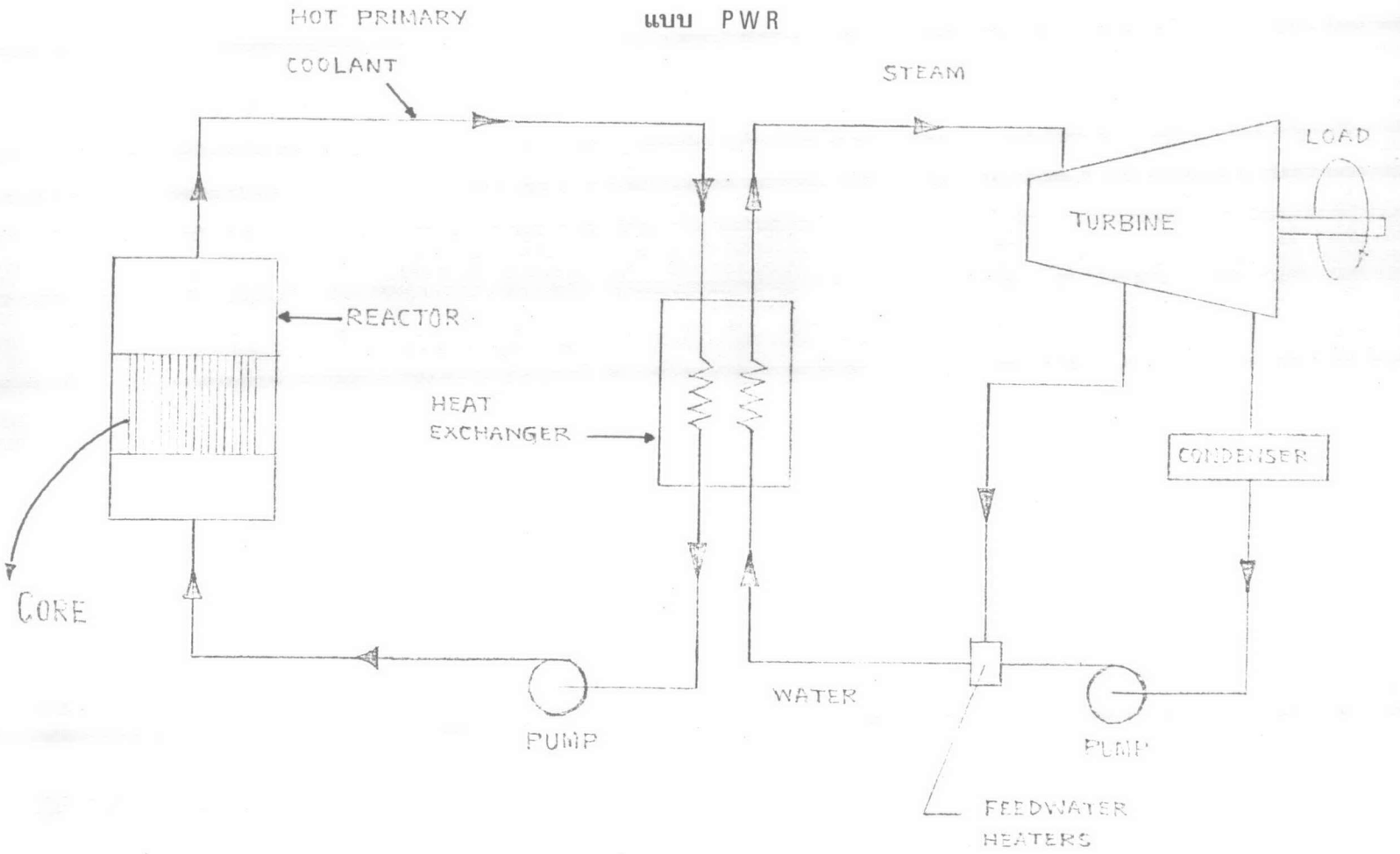
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า

4.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor) เป็นต้นกำเนิดของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวติดต่อกันไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ และสามารถบังคับควบคุมปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ได้ตามความต้องการ ในแง่การพลังงานเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูอาจเรียกได้ว่าเป็นอุปกรณ์สำหรับ

รูปที่ 17

SCHEMATIC โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

แบบ PWR



แปรพลังงานจากการแตกตัวของนิวเคลียสในปรมาณูของสารให้เป็นไปในรูปที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งให้เป็นพลังงานในรูปของความร้อนเพื่อนำเอามาต้มน้ำให้เป็นไอเพื่อใช้ขับดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิจารณาในแง่นี้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูก็คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายเตาของหม้อน้ำในเครื่องจักรไอน้ำนั่นเอง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยทั่ว ๆ ไปมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้คือ

4.2.1.1 <u>แกนปฏิกรณ์</u> (Core) เป็นส่วนที่เป็นหัวใจของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นแหล่งที่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวและปฏิกิริยาลูกโซ่ เป็นที่ ๆ พลังงานจากปฏิกิริยาแตกตัวจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อน ส่วนแกนเครื่องปฏิกรณ์นี้ประกอบด้วยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear fuel) และ Moderator

ก. <u>เชื้อเพลิงนิวเคลียร์</u> (Nuclear fuel) ได้แก่สารที่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวเมื่อถูกชนด้วยอนุภาคนิวตรอน โดยทั่วไปได้แก่ยูเรเนียม 235 ซึ่งมีอยู่ในยูเรเนียมธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0.7 หรือประมาณ 1/140 ที่เหลืออีกร้อยละ 99.3 เป็นยูเรเนียม 238 สารเชื้อเพลิงที่ใช้รองลงมาได้แก่ยูเรเนียม 233 และพลูโตเนียม 239 ซึ่งไม่มีอยู่ในธรรมชาติ จะต้องผลิตขึ้นมาจากกรรมวิธีทางนิวเคลียร์และทางเคมี จึงมีราคาแพงกว่ายูเรเนียม 235 เชื้อเพลิงอาจจะอยู่ในภาวะของแข็ง ของเหลว หรือแกส สำหรับเชื้อเพลิงที่อยู่ในภาวะของแกสขณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการทดลอง ยังไม่ได้นำมาใช้งานจริงจัง

เชื้อเพลิงที่อยู่ในภาวะของแข็งอาจจะอยู่ในรูปของสารใดสารหนึ่งคือ ยูเรเนียมธรรมชาติ ยูเรเนียมไดออกไซด์ หรือยูเรเนียมคาร์ไบด์ ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง อาจจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในสภาพของยูเรเนียมธรรมชาติ และอาจจะนำมาผ่านกรรมวิธีเพื่อเพิ่มสัดส่วนของยูเรเนียม 235 ให้มากขึ้น เรียกว่า ยูเรเนียมเข้มข้น (Enriched Uranium) ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปใช้ยูเรเนียมเข้มข้นซึ่งมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 2-3 และเพื่อให้มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดีขึ้น ได้มีการนำโลหะมาผสมกับยูเรเนียมเป็น Uranium

alloy โลหะดังกล่าวได้แก่ Zirconium, Molybdenum และ Chromium เป็นต้น เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถรักษารูปและขนาดได้ดี ไม่คดงอหรือพองตัวจากความร้อน หรือสึกกร่อนจากรังสีที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เชื้อเพลิงประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในอุณหภูมิสูง ๆ

สำหรับยูเรเนียมไดออกไซด์นั้น ข้อดีสำหรับเชื้อเพลิงชนิดนี้คือ ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ ไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีการพองตัวเมื่อถูกความร้อน มีจุดหลอมตัวสูงประมาณ 5,000 °F ในขณะที่ยูเรเนียมธรรมดามีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ 2,250 °F นอกจากนี้ยูเรเนียมไดออกไซด์มีการสึกกร่อนต่อรังสีน้อย แต่มีข้อเสียคือ เปราะ ถ้าถูกความร้อนถึงจุดหนึ่งอาจจะร้าวหรือแตก ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ มีน้ำหนักเบากว่ายูเรเนียมธรรมชาติ ทำให้ต้องใช้ขนาดของแกนปฏิกรณ์ใหญ่ ยูเรเนียมไดออกไซด์มีเนื้อยูเรเนียมน้อยในปริมาตรที่เท่า ๆ กัน ฉะนั้นในบางกรณีจึงจำเป็นต้องทำให้เข้มข้นขึ้น

ส่วนยูเรเนียมคาร์ไบด์นั้นเป็นสารเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมาะสมหลายประการ เช่น มีการนำความร้อนสูงกว่ายูเรเนียมไดออกไซด์ประมาณ 6-8 เท่า มีเนื้อยูเรเนียมมากกว่ายูเรเนียมไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 30 มีจุดหลอมตัวสูงพอสมควร คือประมาณ 4,200 °F มีการสึกกร่อนต่อรังสีน้อยเท่า ๆ กับยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น ข้อเสียที่สำคัญคือ ยูเรเนียมคาร์ไบด์เป็นสารที่มีปฏิกิริยาอย่างแรงกับน้ำและโลหะบางอย่าง มีความเปราะเช่นเดียวกับยูเรเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้กรรมวิธีที่จะผลิตยูเรเนียมคาร์ไบด์ก็เป็นกรรมวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน

เชื้อเพลิงที่อยู่ในภาวะของเหลวนั้นอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น สารละลายในน้ำ (Aqueous Solution) ของ Uranyl Sulphate (UO_2SO_4), Uranyl Phosphate (UO_2PO_4) และ Uranyl Nytrate $\left[UO_2(NO_3)^2\right]$ หรือเป็นสารกึ่งละลาย (Suspension) ของยูเรเนียมไดออกไซด์ในน้ำ เป็นโลหะเหลว (Liquid metal) ของยูเรเนียม 235 หรือยูเรเนียม 233 ละลายในบิสมัทเหลว

(Bismuth) หรือเป็นสารเกลือของยูเรเนียม เช่น Uranium Tetrafluoride - UF_4 หลอมเหลว เชื้อเพลิงชนิดสารละลายในน้ำอาจใช้น้ำนั้นเป็นตัวระบายความร้อนถ่ายเทความร้อนออกไปใช้งานได้ในตัว เชื้อเพลิงนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ตัดงานการประกอบเชื้อเพลิงเป็นแท่งออกไปได้ ไม่มีการสึกกร่อนของเชื้อเพลิงจากผลของรังสีเหมือนเชื้อเพลิงแข็ง สามารถบรรจุเชื้อเพลิงได้ต่อเนื่องกันไปตลอดเวลาที่เดินเครื่อง รวมทั้งการแยกเอา Fission product ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูก็ทำได้ต่อเนื่องกันไปเช่นเดียวกัน สำหรับข้อเสียของเชื้อเพลิงเหลวก็คือ เชื้อเพลิงที่ผสมอยู่ในตัวระบายความร้อนจะมีสภาพเป็นกัมมันตภาพรังสีอย่างแรง จึงจำเป็นต้องใช้ระบบถ่ายเทความร้อนแบบวงจรปิด (Closed circuit หรือ Indirect cooling system) คือต้องระวังไม่ให้ตัวระบายความร้อนรั่วซึมออกมาได้ เป็นการเพิ่มภาระในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ สารละลายนี้จะให้มีอุณหภูมิสูงมากนักไม่ได้ เพราะถูกจำกัดโดยจุดเดือดของน้ำ และการที่อุณหภูมิสูงจะมีผลทำให้ภาวะการละลายของสารเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ส่วนการใช้โลหะเหลวหรือสารเกลือของยูเรเนียมหลอมเหลวเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่มีปัญหาทางด้านอื่น ๆ ติดตามมา เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการหาโลหะที่ทนความร้อนได้สูงมาทำเป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูอาจจะมีราคาสูงมาก เป็นต้น จากข้อเสียดังกล่าว ทำให้การใช้เชื้อเพลิงเหลวไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายเท่ากับเชื้อเพลิงแข็ง

ข. <u>Moderator</u> ได้แก่สารที่ใช้หน่วงความเร็วของนิวตรอน ใช้เฉพาะในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้นิวตรอนช้า (Thermal Power Reactor) เท่านั้น ไม่มีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้นิวตรอนเร็ว (Fast Breeder Reactor) หน้าที่ของ Moderator คือลดความเร็วของนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวให้ช้าลงอยู่ในระดับของ Thermal neutron ซึ่งในทางนิวเคลียร์ถือว่ามีความเร็วในเกณฑ์ 2,200 เมตรต่อวินาที และนิวตรอนในภาวะนี้จะมีพลังงานจลน์ 0.025 อีเล็คตรอนโวลท์ สารที่จะใช้เป็น Moderator จะต้องมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติ

ด้านอื่น ๆ ดีด้วย เช่นมีภาวะคงตัวไม่สลายตัวหรือสึกกร่อนง่ายเมื่อถูกรังสี ไม่เป็นปฏิกิริยากับสารข้างเคียงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และตัวระบายความร้อน มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน และมีราคาไม่แพงจนเกินไป สารที่มีคุณสมบัติเป็น Moderator ที่สมบูรณ์ที่สุดได้แก่ แกสฮีเลียม เพราะเป็นธาตุที่เบาที่สุดและไม่ดูดนิวตรอนไม่ว่าจะอยู่ในภาวะใด แต่ฮีเลียมมีข้อเสียคือ จะต้องใช้ปริมาณมากมายในการนำมาใช้งาน จึงทำให้ต้องมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขนาดใหญ่โตมาก ซึ่งเป็นการไม่ประหยัดในด้านการลงทุน ถ้าจะใช้ฮีเลียมในภาวะของเหลวเพื่อให้ปริมาตรเล็กลงก็จะต้องลดอุณหภูมิลงต่ำมากซึ่งก็ไม่อาจเป็นไปได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถใช้ฮีเลียมเป็น Moderator ได้ สารที่ใช้เป็น Moderator ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยทั่ว ๆ ไปมีอยู่ 5 ชนิดคือ น้ำธรรมดา น้ำหนัก (Heavy Water - D_2O) แกรไฟท์ (Graphite - C) เบอริลเลียม (Beryllium - B_e) และเบอริลเลียมออกไซด์ (Berylliumoxide - B_eO)

1. <u>น้ำธรรมดา</u> เป็นสารที่หาง่าย ราคาถูก สะดวกในการใช้เป็น Moderator มากที่สุด สามารถใช้หน่วงความเร็วของนิวตรอนได้ดีมาก ข้อเสียของน้ำก็คือ มีความสามารถในการดูดจับนิวตรอนค่อนข้างสูง ทำให้ต้องทำเชื้อเพลิงให้เข้มข้นมากขึ้น น้ำที่ใช้เป็น Moderator ก็จะต้องเป็นน้ำที่บริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปน เนื่องจากสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำอาจจะดูดจับนิวตรอนแล้วกลายเป็นกัมมันตภาพรังสี ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพและชีวิต

2. <u>น้ำหนัก</u> (Heavy Water - D_2O) มีความสามารถในการหน่วงความเร็วของนิวตรอนได้ดีเป็นเลิศ และไม่ต้องทำเชื้อเพลิงให้เข้มข้นสามารถใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติได้ แต่น้ำหนักนี้มีราคาแพงมากจึงไม่ค่อยใช้กันแพร่หลายเหมือนน้ำธรรมดา

3. <u>แกรไฟท์</u> เป็น Moderator ที่นับว่าอยู่ในชั้นดีมาก ใช้เป็นทั้ง Moderator และตัวสะท้อนนิวตรอน (Reflector) กันอย่างกว้างขวาง สามารถคงรูปได้ดีไม่ค่อยจะสึกกร่อนเมื่อถูกรังสีหรือถูกความร้อนขนาดปานกลาง ราคา

ถูกกว่าน้ำหนัก (D_2O) และเบอริลเลียม ข้อเสียของแกรไฟท์ก็คือ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไอน้ำในที่ ๆ มีอุณหภูมิสูง ๆ และยังรวมตัวกับโลหะและออกไซด์ของโลหะอีกด้วย

4. เบอริลเลียม เป็นได้ทั้ง Moderator และตัวสะท้อนนิวตรอนที่ดี เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เบอริลเลียมเป็น Moderator จะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้แกรไฟท์เป็น Moderator แต่เบอริลเลียมเป็นสารที่มีพิษต่อการหายใจ การประกอบจึงยากและมีราคาแพง

5. เบอริลเลียมออกไซด์ มีคุณสมบัติในทางเป็น Moderator ได้ดีเท่า ๆ กับเบอริลเลียม แต่เป็นสารที่เปราะมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ และความคงทนต่อรังสีและการปะทะของนิวตรอนก็ไม่สู้จะดี

4.2.1.2 ตัวสะท้อนนิวตรอน (Reflector) ทำหน้าที่สกัดกั้นนิวตรอนที่วิ่งกระจายออกไปให้สะท้อนกลับมาเข้าที่แกนปฏิกรณ์ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับเชื้อเพลิงมากขึ้น เป็นการลดการสูญเสียนิวตรอน สารที่ใช้เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนควรจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ Moderator ในทางปฏิบัติมักจะใช้สารชนิดเดียวกันคือ น้ำธรรมดา น้ำหนัก (D_2O) แกรไฟท์ เบอริลเลียม และเบอริลเลียมออกไซด์

4.2.1.3 แท่งควบคุมปฏิกิริยา (Control Rod) มีหน้าที่ควบคุมการเพิ่มและการลดปฏิกิริยาแตกตัวให้เป็นไปตามความต้องการ รวมทั้งควบคุมการเดินเครื่องและหยุดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย เนื่องจากการผลิตพลังงานความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมีมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัว และอัตราการแตกตัวนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนนิวตรอน กล่าวคือ ถ้าขณะใดมีจำนวนนิวตรอนวิ่งไปมาสูงก็จะผลิตพลังงานได้มาก และในทางตรงกันข้ามถ้ามีจำนวนนิวตรอนวิ่งไปมาต่ำก็จะผลิตพลังงานได้น้อย ดังนั้นในขณะที่กำลังเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูหากประสงค์จะเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตหรือแม้ในกรณีที่ต้องการเดินเครื่องและหยุดเครื่องก็ตาม สามารถจะกระทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนนิวตรอนในแกนปฏิกรณ์ด้วยการใช้สารซึ่งมีความสามารถในการดูดจับ

นิวตรอนได้สูง ซึ่งเรียกว่า Neutron poison ดังนั้นถ้าต้องการหยุดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูก็จะต้องดูดเอานิวตรอนไว้ไม่ให้เหลือเพื่อไปทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงนิวตรอนในแกนปฏิกรณ์นี้เรียกว่า แท่งควบคุมปฏิกิริยา (Control Rod) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งยาวใช้สอดเข้าไปในแกนปฏิกรณ์ หรือในตัวสะท้อนนิวตรอนใกล้ ๆ กับแกนปฏิกรณ์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีนิวตรอนวิ่งผ่านไปมาจำนวนมาก แท่งควบคุมปฏิกิริยานี้สามารถเลื่อนเข้าออกได้จากภายนอก เมื่อต้องการเดินเครื่องหรือต้องการเพิ่มกำลังผลิต ก็จะดึงแท่งควบคุมปฏิกิริยาออกไปจากบริเวณแกนปฏิกรณ์เพื่อให้มีนิวตรอนอยู่ในบริเวณเชื้อเพลิงได้อย่างเต็มที่ เมื่อต้องการลดการผลิตหรือหยุดเดินเครื่องจะต้องสอดแท่งควบคุมปฏิกิริยานี้เข้ามาในบริเวณแกนปฏิกรณ์หรือบริเวณใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงเพื่อดูดจับนิวตรอนไว้ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ หรือเท่าที่ต้องการเพื่อลดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ในกรณีที่ต้องการหยุดเดินเครื่องจำเป็นจะต้องหยุดปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยสิ้นเชิง จะต้องสอดแท่งควบคุมปฏิกิริยาเข้ามาให้มากที่สุด จึงจะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่หยุดลง สารที่ใช้ทำแท่งควบคุมปฏิกิริยาส่วนมากเป็นสารจำพวก Boron Cadmium Hafnium และจำพวก Rare earth ซึ่งได้แก่ Samarium Europium และ Gadolinium เป็นต้น

4.2.1.4 <u>ตัวระบายความร้อน</u> (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากบริเวณแกนปฏิกรณ์ เนื่องจากพลังงานส่วนมากที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของความร้อน ฉะนั้นปฏิกรณ์ปรมาณูจึงต้องมีระบบระบายความร้อนอย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้อุณหภูมิในแกนปฏิกรณ์สูงเกินไป อันอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุภายในได้ สารที่ใช้ระบายความร้อนอาจจะเป็นของเหลวหรือแกสก็ได้ ซึ่งจะเป็นสารชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตพลังงานความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแกนปฏิกรณ์ (Power density) และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขนาดเล็กที่ใช้ในการค้นคว้าวิจัยซึ่งไม่ต้องการนำความร้อนมาใช้ ระบบระบายความร้อนก็ง่ายไม่ซับซ้อน แต่ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขนาดใหญ่ที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องเลือกชนิดของตัวระบายความร้อนรวมทั้งการวางระบบระบายความร้อน

ไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด คุณสมบัติพื้นฐานของตัวระบายความร้อนควรจะมีดังนี้ เช่น มีจุดเดือดสูง มีจุดหลอมตัวต่ำ มีความคงตัวต่อความร้อนและกัมมันตภาพรังสีดี ไม่สลายตัวทางเคมีเมื่อถูกความร้อนสูง ๆ เป็นตัวนำความร้อนที่ดี สามารถเก็บความร้อนได้มาก และมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี นอกจากนี้ควรจะมีความหนืด (Viscosity) น้อย สามารถไหลไปได้อย่างรวดเร็ว หาได้ง่ายและราคาต่ำ ไม่มีปฏิกิริยากับสารข้างเคียงทั้งภายในและภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ตัวระบายความร้อนที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมักจะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็น Moderator ที่ดีด้วย เช่น น้ำธรรมดา น้ำหนัก (D_2O) และแกส แกสที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปได้แก่แกสคาร์บอนไดออกไซด์ และฮีเลียม ในบางกรณีมีผู้ใช้สารอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อน คือ Diphenyl และ Terphenyl บางกรณีก็จำเป็นต้องใช้โลหะเหลว เช่น โซเดียม หรือโลหะผสมโซเดียมโปแตสเซียม (Sodium - Potassium) เป็นตัวระบายความร้อน เช่นในกรณีของการใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็ว (Fast Breeder Reactor)

4.2.1.5 <u>Shield</u> ทำหน้าที่ป้องกันกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากหรือเนื่องมาจากปฏิกิริยาแตกตัวในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมิให้แผ่ออกมาภายนอก ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพและชีวิต ตามธรรมดารังสีต่าง ๆ นั้น รังสีแกมม่าและอนุภาคนิวตรอนมีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีอื่น ๆ หรืออาจพูดได้ว่ามีอานุภาพร้ายแรงกว่ารังสีอื่น ๆ การป้องกันอันตรายจากรังสีจึงถือเอารังสีสองชนิดนี้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ทั้งนี้เพราะมาตรการใด ๆ หากสามารถป้องกันอันตรายจากรังสีสองชนิดนี้อย่างได้ผลแล้ว ก็จะป้องกันอันตรายจากรังสีอื่นได้โดยอัตโนมัติ หลักการทำงานของ Shield ก็คือ ดูดนิวตรอนและยับยั้งรังสีแกมม่าที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูไม่ให้เหลือเกินปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อบุคคลและอุปกรณ์ที่อยู่ภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูได้ ตามหลักแล้วสารทุกอย่างจะยับยั้งการแผ่ของรังสีแกมม่าได้ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแรงของรังสีและความเข้มข้นของสารนั้น สารที่ใช้จึงเป็นสารที่สามารถดูดจับนิวตรอนได้สูง เช่น Boron เป็นต้น การใช้ Shield จะให้มีความหนาเท่าใดจึงขึ้นอยู่กับความแรงของรังสีแกมม่าและความเข้มข้นของสารที่ใช้ สำหรับ Shield ชั้นในซึ่งใช้กำบังรังสีจากแกนปฏิกรณ์

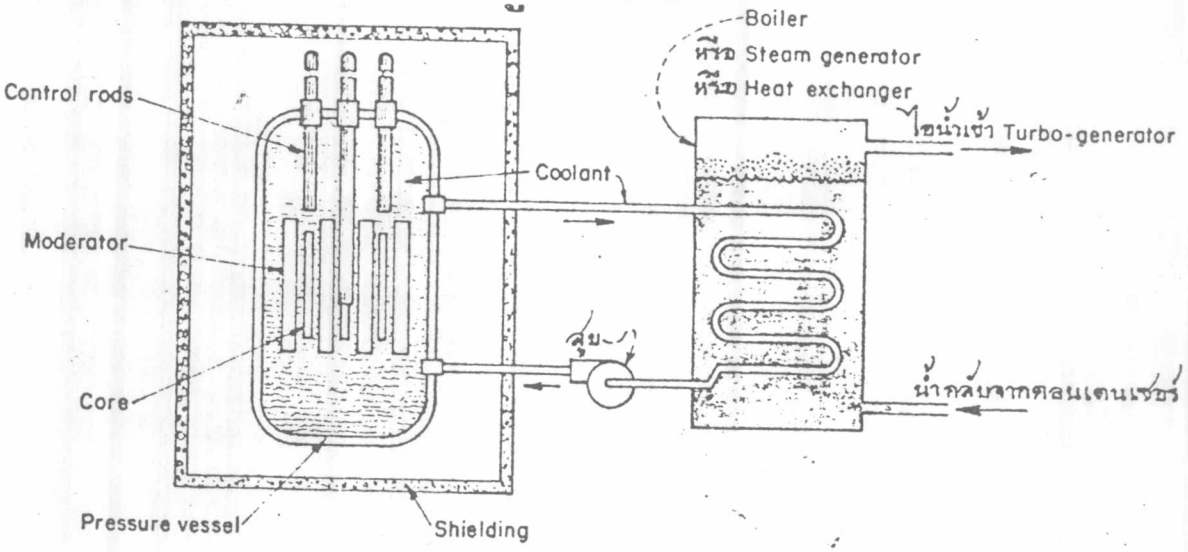
ปรมาณูนั้นส่วนใหญ่จะใช้คอนกรีต และมักจะใช้โบรอนหรือ Colemanite ผสมลงไปในคอนกรีตด้วย เพื่อให้ดูดจับนิวตรอนได้ดียิ่งขึ้น หินในคอนกรีตซึ่งมีน้ำหนักมากจะเป็นตัวยับยั้งรังสีแกมม่า ส่วน Shield ชั้นนอกซึ่งทำหน้าที่กำบังเฉพาะรังสีแกมม่านั้นอาจใช้สารหนัก ๆ ได้ทุกชนิด เช่น เหล็กหรือตะกั่ว เป็นต้น แต่โดยมากจะใช้คอนกรีตเพราะมีราคาต่ำกว่าสารอื่น ๆ หากสถานที่จำกัดจำเป็นต้องลดความหนาของคอนกรีตลงบ้างก็จะเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีตโดยผสมสินแร่เหล็ก (magnetic iron ore) หรือ Baryte เข้ากับคอนกรีต เรียกว่า คอนกรีตหนัก (heavy concrete) ทั้งนี้จะทำให้ราคาค่าก่อสร้างแพงขึ้น

สารที่ทำหน้าที่ Shield นั้นจะต้องเป็นสารที่ทนต่อความร้อนและปฏิกิริยาจากรังสีได้ดี มีความชำรุดสึกกร่อนจากรังสีน้อย เนื่องจากการดูดรังสีเข้าไว้ในตัวนั้นทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นสูงมาก ทำให้เสียไฮโดรเจนจากน้ำธรรมดาในคอนกรีตและทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเสื่อมไป ฉะนั้นจึงต้องรักษาระดับอุณหภูมิของคอนกรีตให้ต่ำพอสมควร เช่นประมาณ 82°C หรือ 180°F ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูบางแบบอาจจะต้องใช้ท่อน้ำทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนฝังไว้ในคอนกรีตเพื่อรักษาอุณหภูมินี้ไว้ รูปที่ 18 แสดงถึงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

4.2.2 <u>แบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู</u> เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองแบบใหญ่ ๆ คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็ว และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้า

ก. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็ว</u> (Fast Breeder Reactor) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ยังอยู่ในระหว่างการทดลองใช้งาน นิวตรอนดังกล่าวมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ตั้งแต่ 10^5 อีเล็คตรอนโวลท์ขึ้นไป มีความเร็วสูงกว่า 4.4 ล้านเมตรต่อวินาที เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูประเภทนี้ใช้ยูเรเนียมเข้มข้นประมาณร้อยละ 20 เป็นเชื้อเพลิง วัตถุประสงค์ที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้คือ การผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในขณะเดียวกันกับที่ให้พลังงานความร้อน เนื่องจากธาตุ

รูปที่ 18



ส่วนประกอบที่สำคัญของปฏิกรณ์ปรมาณู

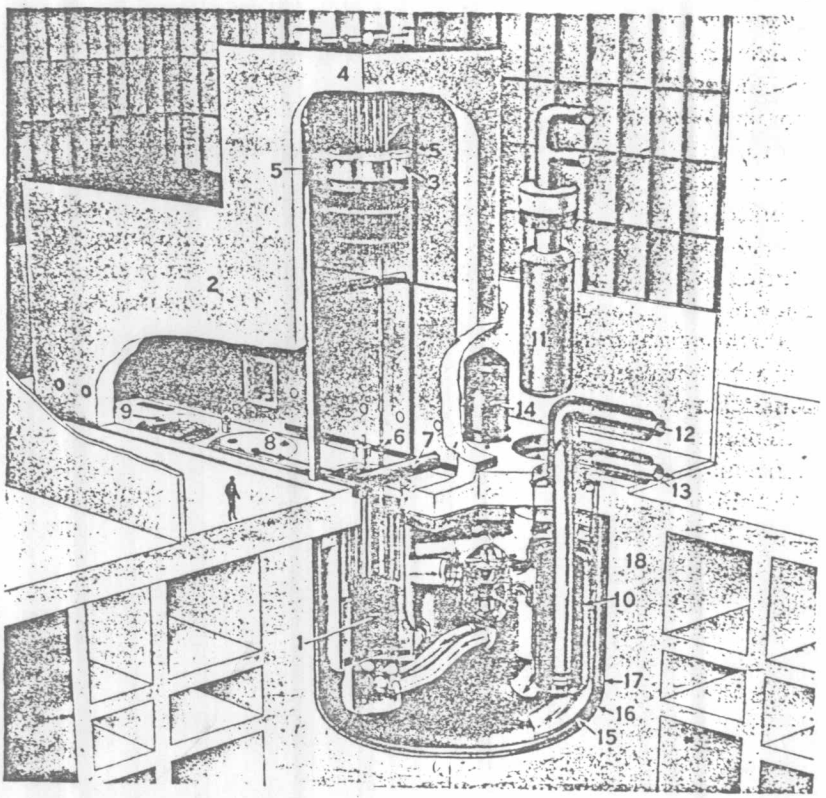
หนักบางชนิด เช่นธอเรียม 232 และยูเรเนียม 238 ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติไม่ใช่สารที่เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ แต่เมื่อนำสารดังกล่าวมาวางไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูรอบ ๆ แท่งเชื้อเพลิง เมื่อเกิดมีนิวตรอนหลุดออกมาแต่ละครั้ง นิวตรอนที่หลุดออกมาจะถูกดูดโดยธาตุธอเรียม 232 และยูเรเนียม 238 เรียกว่า เกิดปฏิกิริยา radiative capture เป็นผลให้ยูเรเนียม 238 เปลี่ยนสภาพเป็นยูเรเนียม 239 จากยูเรเนียม 239 เป็น Neptunium (NP 239) และจาก NP 239 เป็นพลูโตเนียม 239 (PU 239) ในที่สุด จะเห็นได้ว่าพร้อม ๆ กันกับที่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูผลิตพลังงานจากปฏิกิริยาแตกตัวและเผาผลาญเชื้อเพลิงอยู่ตลอดเวลานั้น ในขณะเดียวกันก็สามารถจะผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์พลูโตเนียม 239 หรือยูเรเนียม 233 จากธอเรียม 232 ออกมาเรื่อย ๆ และปรากฏว่าปริมาณของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นจะมากกว่าปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในช่วงเวลาเดียวกัน จึงเรียกเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ว่า Breeder การที่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็วสามารถจะผลิตเชื้อเพลิงขึ้นมาได้เองนั้นเป็นข้อดีอย่างหนึ่งในการช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็วก็มีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น วัสดุที่ใช้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้นต้องเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมาก เพราะถ้าเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักน้อยแล้วจะไปชะลอความเร็วของนิวตรอนให้ช้าลง เป็นการสูญเสียพลังงาน ประการที่สอง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็วมีขนาดของแกนเชื้อเพลิงเล็ก มีอัตราการผลิตพลังงานความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแกนปฏิกรณ์ (Power density) สูง ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็จะสูง วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงต้องเป็นวัสดุพิเศษที่ทนความร้อนได้สูง ประการที่สาม ระบบถ่ายเทความร้อนออกมาจากแกนเชื้อเพลิงจะทำได้ด้วยความลำบาก เพราะแกนเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก สารที่ใช้ถ่ายเทความร้อนจึงจะใช้สารธรรมดาไม่ได้ ต้องใช้ลิควิดโซเดียม (Liquid sodium) หรือโซเดียมโปแตสเซียมแอลลอย (Sodium potassium alloy) ซึ่งจะต้องระมัดระวังมิให้เกิดรั่วไหลขึ้นได้ หากเกิดการรั่วไหลและสารดังกล่าวสัมผัสกับน้ำก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดระเบิดขึ้นอย่างรุนแรง อนึ่ง โซเดียมและโซเดียมโปแตสเซียมแอลลอยยังมีปฏิกิริยากับสารแปลกปลอม (Impurity)

ที่มีอยู่ในระบบท่อ เช่นออกซิเจน ซึ่งเมื่อเป็นออกไซด์แล้วจะทำให้ท่อเป็นสนิมและตีบตัน อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในระบบตัวระบายความร้อน (Coolant) เช่น เครื่องสูบ ท่อ ตัวถ่ายเทความร้อน (Heat exchanger) จะต้องทำด้วยวัสดุพิเศษ ซึ่งนอกจากจะทนต่อความร้อนแล้ว ยังจะต้องเป็นวัสดุที่ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีต่อโซเดียมหรือโซเดียมโปแตส-เซียมแอลลอยอีกด้วย เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็วได้แสดงไว้ในรูปที่ 19

ข. <u>ปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้า</u> (Thermal Power Reactor) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ใช้นิวตรอนช้าเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงโดยใช้นิวตรอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 1 อีเล็คตรอนโวลท์ หรือมีความเร็วน้อยกว่า 13,800 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้จะเกิดจากการที่นิวตรอนเร็วไปชนกับอนุภาคหรือปรมาณูหรือนิวเคลียสของสารบางชนิดที่ขวางหน้าอยู่ (Moderator) ในการนี้นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งและลดความเร็วลง นิวตรอนที่ลดความเร็วลงมาเป็นนิวตรอนช้าก็จะวิ่งไปชนอนุภาคอื่น ๆ อีก และจะเกิดปฏิกิริยาซ้ำซ้อนเป็นทอด ๆ ขึ้น แต่ละครั้งนิวตรอนก็จะอ่อนกำลังลงทุกทีและความเร็วก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงขีดหนึ่งที่พลังงานจลน์ของนิวตรอนจะลดลงเหลือเท่ากับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอณูหรือปรมาณูของ Moderator ณ จุดนี้การถ่ายเทพลังงานจลน์จากนิวตรอนให้อนุภาคของ Moderator ก็จะยุติลง นิวตรอนในภาวะนี้เรียกว่าอยู่ในสภาพสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากจุดนี้เป็นต้นไปพลังงานของนิวตรอนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ Moderator แต่เพียงอย่างเดียว กล่าวคือ Moderator มีอุณหภูมิสูงต่ำอย่างไร นิวตรอนก็จะมีพลังงานมากน้อยไปตามส่วนด้วย นิวตรอนชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า Thermal neutron เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้านี้เป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับและเชื่อถือกันว่ามีความปลอดภัย ไม่มีปัญหาในการใช้งาน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูประเภทนี้จำเป็นต้องมี Moderator เป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้ามีข้อได้เปรียบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนิวตรอนเร็วอยู่หลายประการ เช่น มีทางเลือกใช้สารเป็น Moderator และตัวระบายความร้อน รวมทั้งสารเชื้อเพลิงได้มากกว่า โดยเฉพาะสารเชื้อเพลิงอาจจะใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่งมียูเรเนียม 235 เพียงร้อยละ 0.7 หรือจะนำมาทำให้เข้มข้นจนกระทั่งมียูเรเนียม 235

รูปที่ 19

Fast-Breeder Reactors and Power Plants



1 Reactor core
2 Refueling cell wall
3 Shield plug (in raised position)
4 Control rod drives
5 Shield plug lifting screw and guide
6 Fuel transfer machine
7 Fuel shuffling machine
8 Fuel decay tank
9 New fuel storage
10 Intermediate heat exchanger (3 units)
11 Intermediate heat exchanger (shown in raised position)
12 Secondary sodium inlet
13 Secondary sodium outlet
14 Primary sodium pump and drive motor (3 units)
15 Primary sodium vessel
16 Insulation and outer tank
17 Steel liner on concrete
18 Concrete shielding

1000 Mw(e) follow-on Design of LMFBR. (Courtesy General Electric Co.)

ถึงร้อยละ 90 หรือมากกว่านั้นก็ได้ ทั้งนี้นับว่าเป็นข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัด เพราะธรรมดาสารเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ยูเรเนียมมีปริมาณมากที่สุดและราคาต่ำกว่าสารเชื้อเพลิงอื่น ๆ ซึ่งบางชนิดจำเป็นต้องผลิตขึ้นมาด้วยกรรมวิธีทางเคมีหรือนิวเคลียร์ การที่มีโอกาสเลือกสารเชื้อเพลิง Moderator และตัวระบายความร้อนได้หลายทางหลายวิธีเช่นนี้ ทำให้สามารถออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้าได้หลายแบบ โดยจะให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ ต่างกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนเร็วซึ่งมีทางเลือกสารดังกล่าวได้อย่างจำกัด เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทุกเครื่องมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ เหมือนกัน เช่น เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ Moderator ตัวสะท้อนนิวตรอน แท่งควบคุมปฏิกิริยา ตัวระบายความร้อนและ Shield เป็นต้น ในชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ Moderator และตัวระบายความร้อน เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดลักษณะแตกต่างของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขึ้น การจำแนกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูส่วนใหญ่อาศัยคุณสมบัติของส่วนประกอบเหล่านี้เป็นพื้นฐาน ทั้งการเรียกชื่อของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูบางแบบก็เรียกตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นสำคัญ แล้วแต่จะใช้อะไรเป็นหลัก เช่น แบ่งตามลักษณะของนิวตรอน แบ่งตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แบ่งตามลักษณะการจัดเชื้อเพลิง Moderator และตัวระบายความร้อน แบ่งตามชนิดของสารที่ใช้เป็น Moderator และตัวระบายความร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะแบ่งแยกประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเหล่านี้ออกจากกันโดยเด็ดขาด ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจึงมีการเหลื่อมล้ำกันอยู่บ้าง การแบ่งประเภทตามที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นเพียงการแสดงให้เห็นเป็นแนวทางเท่านั้น

<u>แบ่งตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน</u>

1. Research Reactor ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในการค้นคว้าวิจัย และการทดลองทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง Radioisotope ด้วย

2. Production Reactor ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในการผลิตสารเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ คือพลูโตเนียม 239 และยูเรเนียม 233

3. Power Reactor ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เพื่อการกำลัง (Power) เช่นผลิตพลังงานไฟฟ้า ขับเคลื่อนเรือดำน้ำ เรือเดินสมุทร อาจรวมทั้งเครื่องบิน และยานอวกาศด้วย

<u>แบ่งตามชนิดของสารที่ใช้เป็น Moderator และตัวระบายความร้อน</u>

1. Light Water Moderated Reactor (LWR) ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำธรรมดาเป็น Moderator และตัวระบายความร้อน

2. Heavy Water Moderated Reactor (HWR) ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator และอาจใช้ Pressurized Heavy Water (PHW) หรือ Boiling Light Water (BLW) หรือแกสคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารอินทรีย์เป็นตัวระบายความร้อน

3. Gas - Cooled Reactor (GCR) ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้แกสคาร์บอนไดออกไซด์หรือแกสฮีเลียมเป็นตัวระบายความร้อน ใช้แกรไฟท์เป็น Moderator

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนิวตรอนช้าเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ ตามลักษณะของเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ และความยืดหยุ่นในด้านการจัดหาเชื้อเพลิงซึ่งขึ้นอยู่กับนโยบายการเมืองด้านต่างประเทศดังนี้คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ และแบบที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น

1. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ</u> (Natural Uranium) เนื่องจากยูเรเนียมธรรมชาติมีเชื้อเพลิงยูเรเนียม 235 ร้อยละ 0.7 และยูเรเนียม 238 ร้อยละ 99.3 การทำเชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น (Enriched Uranium) เป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้องใช้ความรู้ความชำนาญทางด้านวิชาการสูงมาก และประเทศที่ให้บริการในการทำยูเรเนียมเข้มข้นก็มีเพียง 5 ประเทศเท่านั้น คือ สหรัฐ-อเมริกา สหภาพโซเวียต ฝรั่งเศส เยอรมัน และอังกฤษ ดังนั้นจึงมีหลายประเทศพยายาม

ที่จะใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่สามารถจะใช้เชื้อเพลิงได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีทำยูเรเนียมให้เข้มข้น ประเทศดังกล่าวได้แก่ แคนาดา อินเดีย ปากีสถาน เกาหลี เป็นต้น หลักการในการใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติก็คือต้องใช้ Moderator ที่มีประสิทธิภาพซึ่งได้แก่ น้ำหนัก (D_2O) หรือแกรไฟท์ ในประเทศแคนาดาได้มีการใช้น้ำหนัก (D_2O)เป็น Moderator และเป็นตัวระบายความร้อนด้วย ส่วนในประเทศฝรั่งเศสและประเทศอังกฤษใช้น้ำหนัก (D_2O) หรือแกรไฟท์เป็น Moderator และใช้แกสคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวระบายความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบของประเทศแคนาดานั้นมีชื่อย่อ ๆ เรียกว่า Candu (Canadian Deutorium Uranium) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำหนัก (D_2O)ภายใต้ความกดดันสูง (Pressurized Heavy Water Reactor) โดยปกติน้ำหนัก (D_2O) มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีเกือบจะเหมือนกับน้ำธรรมดา เช่น มีจุดเดือด 214.6°F ในขณะที่น้ำธรรมดามีจุดเดือด 212°F มีจุดแข็ง 38.9°F เปรียบเทียบกับ 32.0°F ของน้ำธรรมดา มีความหนาแน่น 1.1 เทียบกับ 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตรของน้ำธรรมดาในอุณหภูมิปกติ เป็นต้น ถ้าจะใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็นตัวระบายความร้อนที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องอยู่ภายใต้ความกดดัน ซึ่งโดยปกติความกดดันที่ใช้ในตัวระบายความร้อนจะมีประมาณ 900 - 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

น้ำหนัก (D_2O) สามารถจะทำหน้าที่เป็น Moderator ได้ดีกว่าน้ำธรรมดาถึง 90 เท่า นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนที่ดีด้วย ข้อเสียมีอยู่ประการเดียวคือ มีราคาสูงมากประมาณ 615 บาทต่อ 1 ปอนด์ (ราคาปี 2513)[1] ข้อดีในการใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator ได้แก่ความสูญเสียนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีน้อยมาก จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดอื่น ๆ ซึ่งผลที่ได้ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์จำเป็นต้อง

---

[1] M.M. El - Wakil, Nuclear Energy Conversion, Copyright 1971, International Textbook Co., p. 162.

นำไปเก็บเป็นกากแล้ว จะเห็นว่าอัตราการเผาผลาญสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator มีอัตราต่ำกว่า กล่าวคือ สามารถจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 10,000 เมกกะวัตต์เดย์ (Megawatt-day) ต่อน้ำหนัก 1 ตัน ของเชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบอื่น ๆ อาจจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในอัตราที่สูงกว่านี้ แต่จะต้องใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติที่ใช้แกรไฟท์เป็น Moderator อาจจะมีอัตรากำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อ 1 ตัน เชื้อเพลิงต่ำกว่าเนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทางวัตถุ และทางโลหะวิทยา ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองจึงเป็นสิ่งจูงใจให้ประเทศกำลังพัฒนาและมีความสามารถจำกัดในการทำเชื้อเพลิงให้เข้มข้นมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator มากขึ้น

เนื่องจาก Moderator จะมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หลักเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้จึงพยายามลดอุณหภูมิของ Moderator ไม่ให้มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับตัวระบายความร้อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้ท่อแรงดัน (Pressure tube) ซึ่งประกอบขึ้นด้วยท่อทนความดันสูงหลาย ๆ ท่อประกอบเข้าด้วยกัน รวมอยู่ในภาชนะหรือถังใบใหญ่ที่เรียกว่า Calandria โดยตัวระบายความร้อนและ Moderator แยกออกจากกัน กล่าวคือ Moderator จะอยู่ภายนอกท่อแรงดันและอยู่ภายในถัง Calandria ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูอีกทางหนึ่ง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบท่อแรงดันนี้เหมาะสำหรับประเทศกำลังพัฒนาซึ่งไม่มีความสามารถทางด้านอุตสาหกรรม เพราะสามารถจะสร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ได้โดยไม่ยากนัก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการผลิตใหญ่โตแต่อย่างใด ต่างกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ถังแรงดัน (Pressure vessel) ซึ่งใช้ภาชนะที่ทนแรงดันสูงและผนังโลหะมีความหนามาก

การประกอบเชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติมีราคาการประกอบต่ำกว่าการประกอบเชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น เนื่องจากการประกอบเป็นไปอย่างธรรมดาไม่สลับ

ซับซ้อน การควบคุมทำได้ง่าย ส่วนการประกอบเชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้นจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพและขั้นตอนอย่างเข้มงวดและละเอียดถี่ถ้วน จึงทำให้ราคาต้นทุนเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้จึงสามารถจะพิจารณาได้แตกต่างออกไปตามความเหมาะสมของแต่ละประเทศ ในประเทศแคนาดาได้แสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติและใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น ดังนั้นประเทศแคนาดาจึงพยายามพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้อยู่ตลอดมา นอกจากนี้ประเทศที่กำลังพัฒนา เช่น อินเดีย ปากีสถาน อาร์เจนตินา ก็ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ปัจจุบันประเทศเกาหลีใต้กำลังสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ ในปี 2503 ได้มีการประมาณราคาเชื้อเพลิงสำหรับต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยหบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency - IAEA) ปรากฏว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator และใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงมีต้นทุนการผลิต 1 - 1.5 มิลล์ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำธรรมดาเป็น Moderator จะมีราคาประมาณ 1.5 - 2.5 มิลล์ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการซื้อแร่ยูเรเนียมและราคาการประกอบเชื้อเพลิงรวมทั้งราคาขายพลูโตเนียมซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้ของเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว แต่การที่ราคาเชื้อเพลิงถูกลงนี้จะต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการซื้อน้ำหนัก (D_2O) มาทำเป็น Moderator ซึ่งเป็นราคาที่สูงตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำหนัก (D_2O) นี้สามารถจะใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติในรูปของโลหะหรือออกไซด์ได้ทั้งสองแบบ ส่วนวัสดุที่นำมาใช้เป็นภาชนะห่อหุ้มเชื้อเพลิงอาจจะใช้วัสดุที่มีความสามารถในการดูดจับนิวตรอนต่ำมาก เช่น Zircaloy, Beryllium และ Beryllium Magnesium Alloy ข้อเสียประการหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบท่อแรงดัน (Pressure tube) นั้นมีการรั่วไหลของ Moderator หรือของตัวระบายความร้อนซึ่งใช้น้ำหนัก (D_2O) ในอัตรา

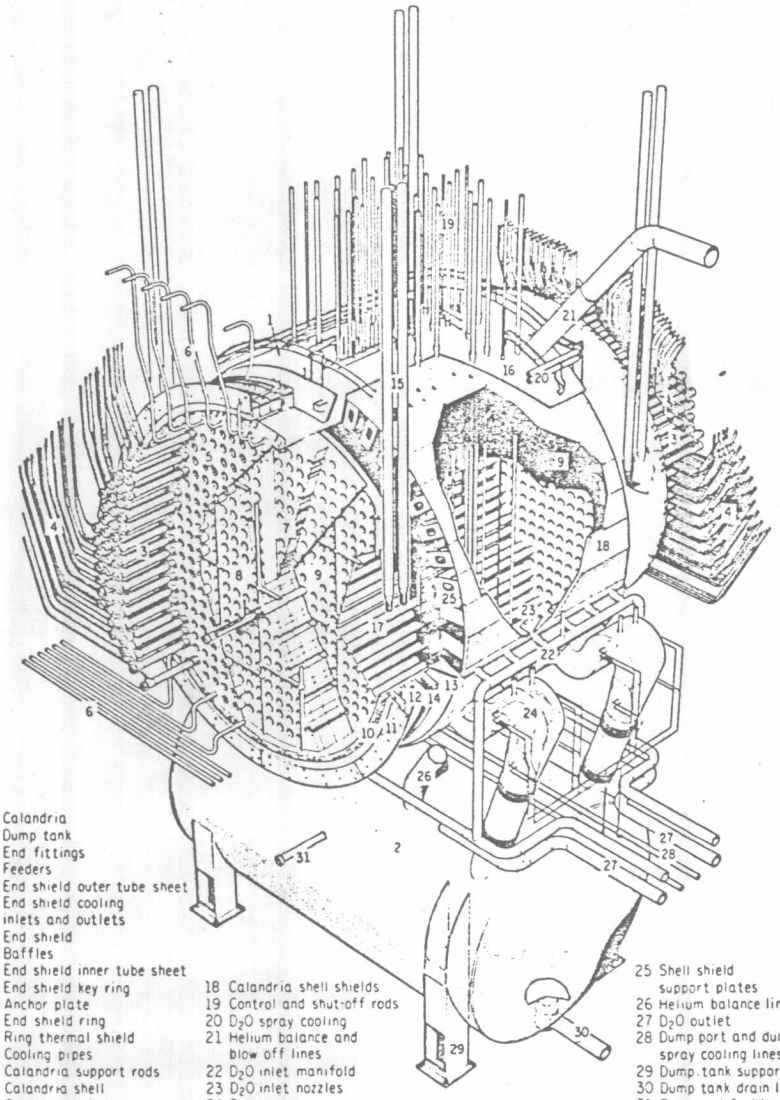
ที่สูง ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองในการเดินเครื่อง เพราะน้ำหนัก (D_2O) มีราคาแพง นอกจากนี้ยังต้องมีการป้องกันอันตรายที่จะเกิดจากกัมมันตภาพรังสี (radioactivity) อันเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากไอโซโทปของไฮโดรเจนรวมตัวกับออกซิเจน

นอกจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูซึ่งใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator และตัวระบายความร้อนแล้ว ยังมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบต่าง ๆ ซึ่งไม่ได้นำมากล่าวไว้ในที่นี้โดยละเอียด เช่นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำหนัก (D_2O) เป็น Moderator และใช้แกสคาร์บอนไดออกไซด์หรือฮีเลียมเป็นตัวระบายความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวระบายความร้อน เป็นต้น แต่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเหล่านี้ไม่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

ในที่นี้จะได้กล่าวถึงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเป็นตัวอย่างเพียงแบบเดียวคือ แบบ Heavy Water Candu Type ที่ Pickering Station ในประเทศแคนาดา

<u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ Heavy Water Candu Type</u> ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ประกอบด้วยถังรูปทรงกระบอกติดตั้งในแนวนอน เรียกว่า Calandria ซึ่งแผ่นปิดหัวท้ายของถังจะมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 20 ภายใต้ถัง Calandria ประกอบด้วยถัง 2 ถังเรียกว่า Dump tank ตั้งอยู่ภายในผนังคอนกรีตอย่างแน่นหนาเพื่อป้องกันการแผ่รังสี ผนังคอนกรีตจะมีระบบระบายความร้อนด้วย ภายใน Dump tank นี้จะบรรจุแกสฮีเลียมไว้บางส่วน ส่วนบนของถัง Calandria จะติดตั้งแท่งควบคุมในแนวตั้ง ทำหน้าที่ควบคุมพลังงานและปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้เป็นไปตามความต้องการ นอกจากนี้ยังมีแท่งควบคุมเพื่อใช้ในระบบความปลอดภัยอีกจำนวนหนึ่งสำหรับใช้ในขณะที่ต้องหยุดเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูอย่างกระทันหัน ภายในถัง Calandria ประกอบด้วยท่อแรงดันสูงติดตั้งในแนวนอนเช่นเดียวกับตัวถัง และมีท่อระบายความร้อนต่อออกมาจากท่อแรงดันนี้ ภายในท่อแต่ละท่อจะบรรจุด้วยแท่งเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ถูกอัดเป็นแท่งเล็ก ๆ

รูปที่ 20



1 Calandria
2 Dump tank
3 End fittings
4 Feeders
5 End shield outer tube sheet
6 End shield cooling inlets and outlets
7 End shield
8 Baffles
9 End shield inner tube sheet
10 End shield key ring
11 Anchor plate
12 End shield ring
13 Ring thermal shield
14 Cooling pipes
15 Calandria support rods
16 Calandria shell
17 Calandria tubes
18 Calandria shell shields
19 Control and shut-off rods
20 D_2O spray cooling
21 Helium balance and blow off lines
22 D_2O inlet manifold
23 D_2O inlet nozzles
24 Dump ports
25 Shell shield support plates
26 Helium balance line
27 D_2O outlet
28 Dump port and dump tank spray cooling lines
29 Dump tank supports
30 Dump tank drain line
31 Rehearsal facility

Pickering reactor assembly. (Courtesy Atomic Energy of Canada Limited.)

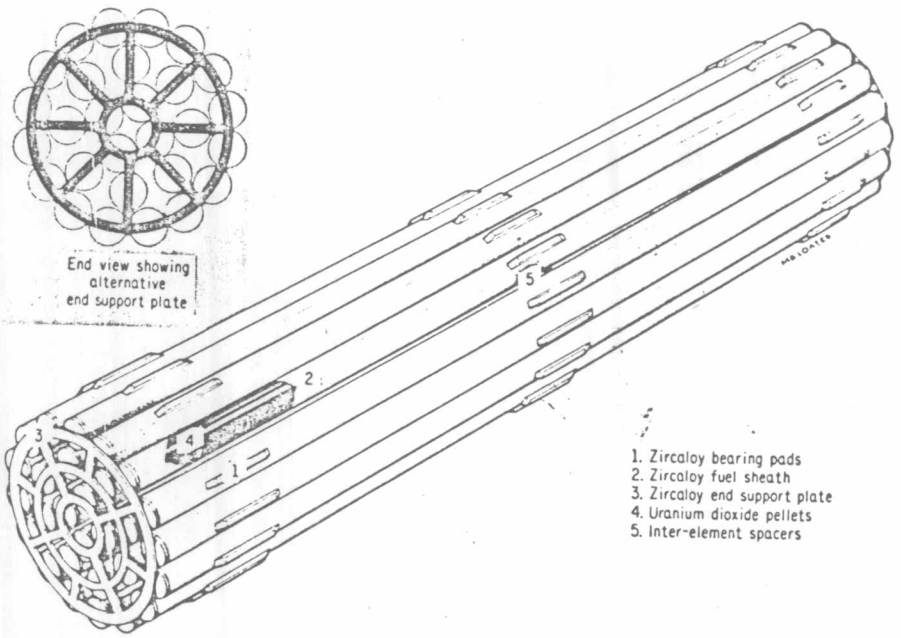
และทำเป็นชุด ๆ แต่ละชุดจะมีแท่งเชื้อเพลิงที่ประกอบมัดเข้าด้วยกันแล้วบรรจุใน Zircaloy กลม ดังแสดงในรูปที่ 21 เชื้อเพลิงแต่ละชุดจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.03 นิ้ว และมีความยาว 19.5 นิ้ว ส่วนน้ำหนัก (D_2O) ที่บรรจุอยู่ในถัง Calandria ภายนอกท่อแรงดันจะทำหน้าที่เป็น Moderator และตัวสะท้อนนิวตรอน ซึ่งจะต้องใช้น้ำหนัก (D_2O) ประมาณ 270 ตัน นอกจากนี้น้ำหนัก (D_2O) ยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนด้วย โดยไหลผ่านเข้าไปในท่อแรงดันผ่านเชื้อเพลิง อุณหภูมิครั้งแรกที่ผ่านเข้ามาประมาณ 480°F และจะไหลออกจากท่อแรงดันโดยรับความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงไปด้วยอุณหภูมิประมาณ 560°F มีความดัน 1,300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยผ่านไปตามท่อระบายความร้อนไปรวมกันที่ Feeder pipe เพื่อเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งประกอบด้วยถังรูปทรงกระบอกตั้งอยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อน (Heat - exchanger) โดยถ่ายเทความร้อนจากตัวระบายความร้อนให้แก่น้ำซึ่งทำให้เกิดเป็นไอในอัตรา 6.4 ล้านปอนด์ต่อชั่วโมง ที่แรงดัน 585 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และที่อุณหภูมิ 483.5°F [1] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 22 ไอน้ำที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับกังหันไอน้ำให้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อไป สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะบรรจุอยู่ในอาคารซึ่งทำหน้าที่เป็นแนวป้องกันการแผ่กัมมันตภาพรังสีหรือการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีมิให้ออกไปสู่ภายนอก ตัวอาคารจะต้องสร้างให้ทนต่อแรงดันได้ประมาณ 6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้สามารถจะทำการบรรจุและถ่ายเชื้อเพลิงออกในขณะที่เดินเครื่องอยู่ได้ ซึ่งกระทำโดยอุปกรณ์บรรจุเชื้อเพลิงที่มีการควบคุมโดยอัตโนมัติ อุปกรณ์บรรจุเชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วยเครื่องบรรจุเชื้อเพลิง 2 ชุด อยู่คนละด้านของถัง Calandria เมื่อเครื่องบรรจุเชื้อเพลิงเลื่อนไปยังตำแหน่งที่กำหนดให้แล้ว ก็จะถอดฝาท่อแรงดันออกและบรรจุเชื้อเพลิงใหม่เข้าไป ในขณะที่เครื่องบรรจุเชื้อเพลิงอีกด้านหนึ่งของถังทำหน้าที่รับเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วออกมาและนำไปเก็บไว้ในที่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วซึ่งอยู่ใต้น้ำ

---

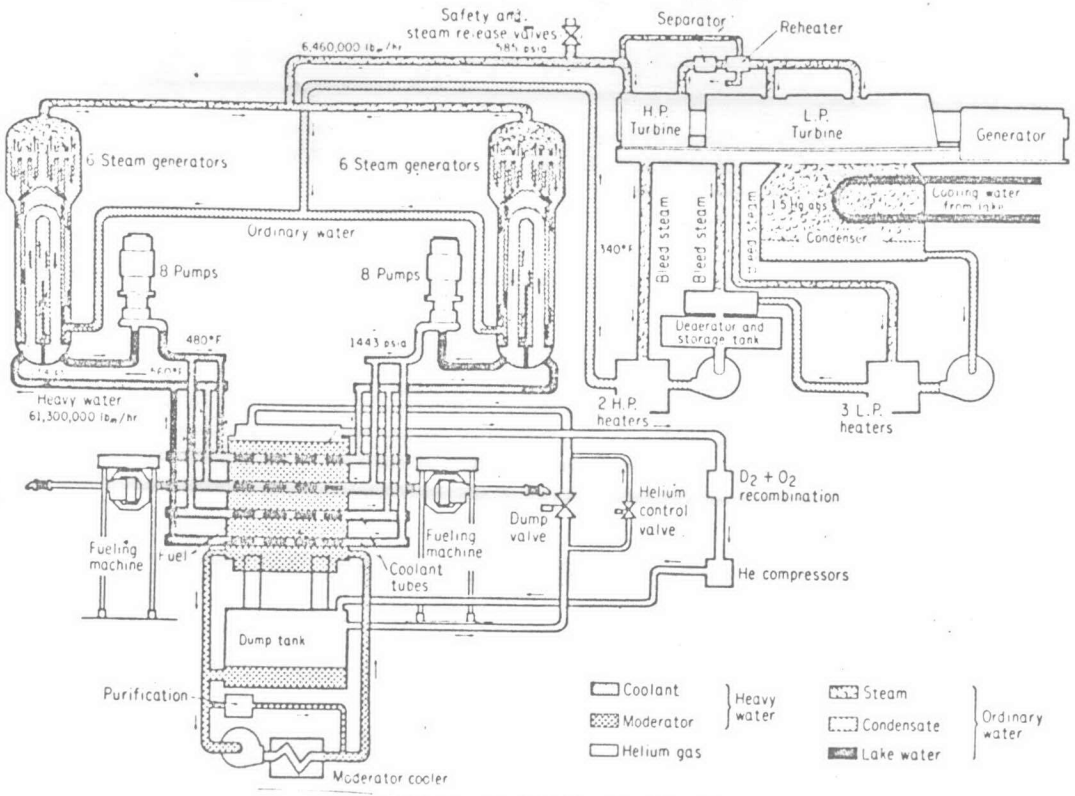
[1] Ibid., p. 185.

รูปที่ 21



Pickering 28 element fuel bundle. (Courtesy Atomic Energy of Canada Limited.)

รูปที่ 22



Pickering simplified station flow diagram.

2. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น</u> (Enriched Uranium) ในทางปฏิบัติยูเรเนียมที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมักจะทำยูเรเนียม 235 ให้เข้มข้นขึ้นประมาณร้อยละ 2-3 จึงเหลือยูเรเนียม 238 ประมาณร้อยละ 97-98 ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมและเป็นการประหยัดมากที่สุด เมื่อใช้เชื้อเพลิงไปจนเหลือยูเรเนียม 235 ประมาณร้อยละ 1 ยูเรเนียม 238 ประมาณร้อยละ 95 มีพลูโตเนียมประมาณร้อยละ 1 และจะได้ผลผลิตจากปฏิกิริยาแตกตัว (Fission Product) อื่น ๆ อีกประมาณร้อยละ 3 จึงนำยูเรเนียม 235 กลับไปทำความเข้มข้นใหม่ ข้อดีของการใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้นคือ สามารถจะเลือกใช้ Moderator และตัวระบายความร้อนได้อย่างกว้างขวาง มีการสูญเสียนิวตรอนใน Moderator และตัวระบายความร้อนบ้างเล็กน้อย ปัญหาในการเดินเครื่องเช่นเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำหนัก (D_2O) ไม่มี ข้อเสียคือ บริการในการทำยูเรเนียมเข้มข้นมีบริการจำกัด คือมีในประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพโซเวียต ฝรั่งเศส เยอรมัน และอังกฤษเท่านั้น ฉะนั้นการจะตัดสินใจใช้ยูเรเนียมเข้มข้นจะต้องมีความแน่นอนในการหาบริการทำยูเรเนียมเข้มข้น ซึ่งจำเป็นต้องพึ่งพาประเทศทั้งห้าดังกล่าว เพราะการทำยูเรเนียมเข้มข้นมีกระบวนการที่ซับซ้อนและต้องการโรงงานขนาดใหญ่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก ไม่สามารถที่จะทำขึ้นได้เองในประเทศที่กำลังพัฒนา ประเทศที่ต้องการความเป็นอิสระในการพัฒนาพลังงานของตนเอง เช่น แคนาดา อินเดีย จึงไม่นิยมใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้น

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมเข้มข้นแบ่งออกเป็นหลายชนิด แต่จะกล่าวถึงเพียงชนิดเดียวคือ แบบ Light Water Reactor (LWR) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้ใช้น้ำธรรมดาเป็น Moderator และตัวระบายความร้อน ซึ่งมีข้อดีคือ น้ำธรรมดาหาได้ง่าย ราคาถูก และเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวนำความร้อนที่ดี (Heat transfer) สามารถอุ้มความร้อนได้มากและมีปฏิกิริยาทางเคมีกับเนื้อวัสดุของอุปกรณ์ต่าง ๆ น้อย ปัญหาในเรื่องการเกิดสนิมผุกร่อนจึงมีไม่มากเหมือนสารอื่น โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดใหญ่จำเป็นจะต้องใช้ Moderator และตัวระบายความร้อนเป็น

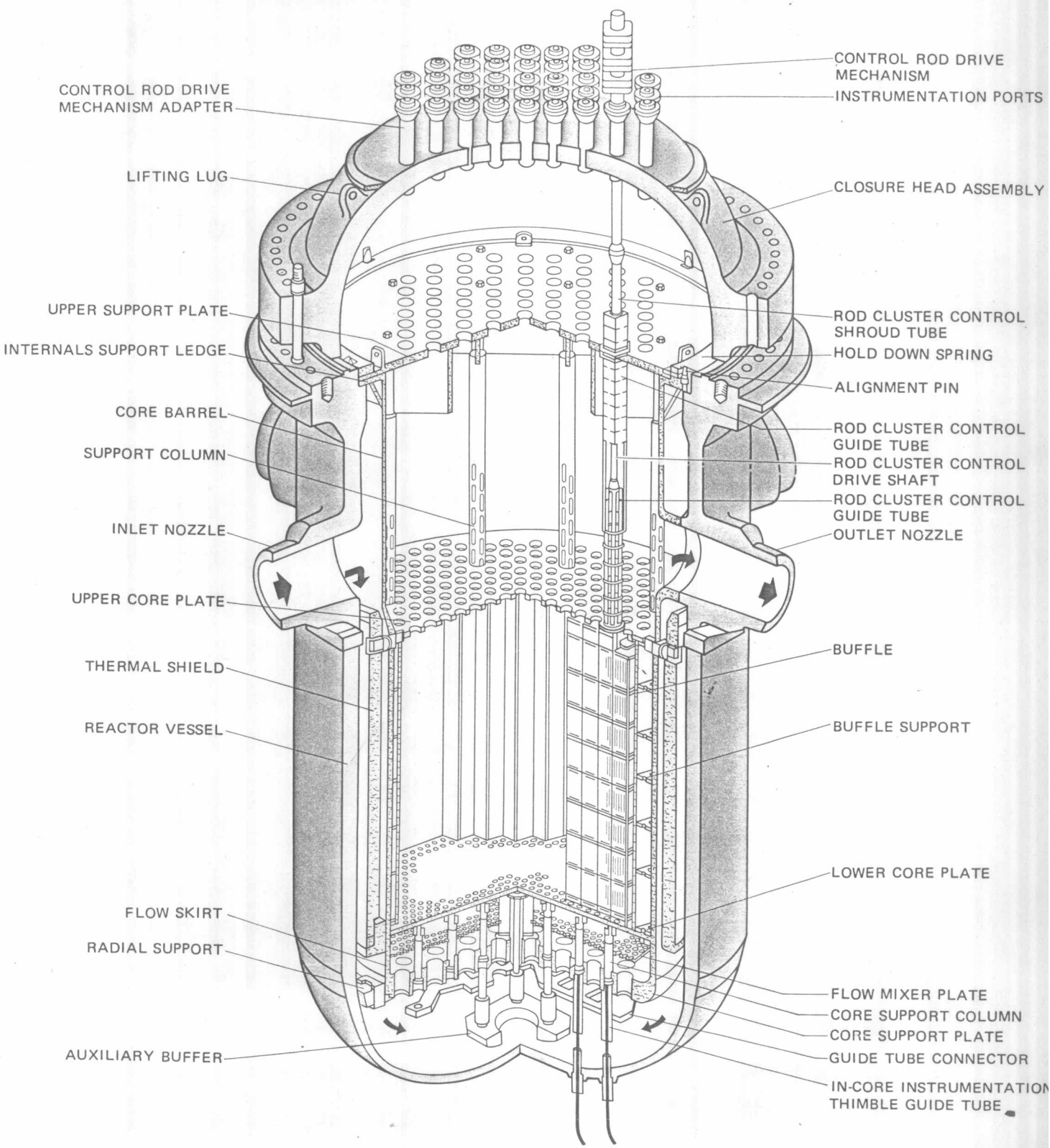
จำนวนมาก ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ LWR จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด อย่างไรก็ดี น้ำธรรมดามีข้อเสียบางประการคือ ไฮโดรเจนที่ประกอบเป็นน้ำนั้นมีความสามารถในการดูดจับนิวตรอนสูง ฉะนั้นจึงทำให้สูญเสียนิวตรอนมาก จำเป็นต้องทำให้เชื้อเพลิงมีความเข้มข้นสูงขึ้นเพื่อชดเชยนิวตรอนที่ถูกน้ำดูดไป เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเชื้อเพลิง นอกจากนี้น้ำธรรมดามีจุดเดือดต่ำคือ 100°C เมื่อนำมาใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ผลิตไอน้ำใช้กับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงต้องเพิ่มความดันเพื่อให้มีจุดเดือดสูงขึ้นด้วย เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ LWR ยังแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

ก. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำภายใต้ความกดดันสูง</u> (Pressurized Water Reactor - PWR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบสองวงจร อุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้

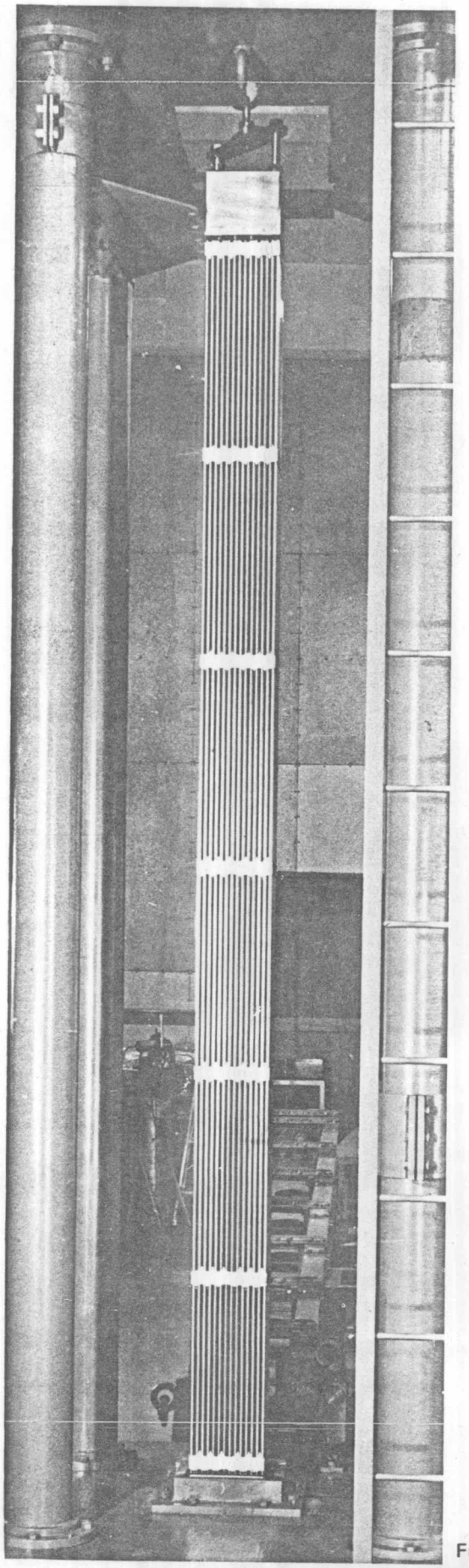
1) <u>แกนปฏิกรณ์</u> ซึ่งเป็นที่บรรจุเชื้อเพลิงประมาณ 200 ชุดอยู่ในช่วงประมาณส่วนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ดังแสดงในรูปที่ 23 แท่งเชื้อเพลิงมีขนาดความยาวประมาณ 12 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1/2 นิ้ว แท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งจะประกอบด้วยยูเรเนียมไดออกไซด์เข้มข้นซึ่งเป็นแท่งรูปทรงกระบอกเล็ก ๆ ยาวประมาณ 3/4 นิ้ว ถูกบรรจุอยู่ในหลอดบรรจุเชื้อเพลิง (Fuel assembly) และประกอบหลอดเข้าด้วยกันเป็นชุด ๆ ชุดหนึ่งมีประมาณ 200 หลอด มีขนาดความกว้าง 8 นิ้ว ความยาว 8 นิ้ว และสูง 12 ฟุต ดังแสดงในรูปที่ 24 ภายหลังที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ในแท่งเชื้อเพลิงแล้วจะมีสารและแกสบางอย่างเกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงและจะถูกเก็บไว้ในแท่งเชื้อเพลิง แต่จะมีแกสบางส่วนประมาณร้อยละ 25 ที่สามารถจะออกมาจากแท่งเชื้อเพลิงได้ แต่ก็จะถูกกักเก็บไว้ในหลอดบรรจุเชื้อเพลิงส่วนช่วงบน หลอดบรรจุเชื้อเพลิงนี้ได้ถูกสร้างขึ้นให้สามารถกักเก็บแกสซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีไว้ได้ตลอดอายุของเชื้อเพลิง พร้อมทั้งยังมีที่ว่างเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่มีความร้อนได้ขยายตัวไปตามความยาวของหลอดเชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตั้งอยู่ในแนวตั้ง มีน้ำหนักประมาณ 650,000 - 1,000,000 ปอนด์ ความร้อนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์จะถูกถ่ายเทออกไปโดยตัวระบายความร้อนซึ่งเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

รูปที่ 23

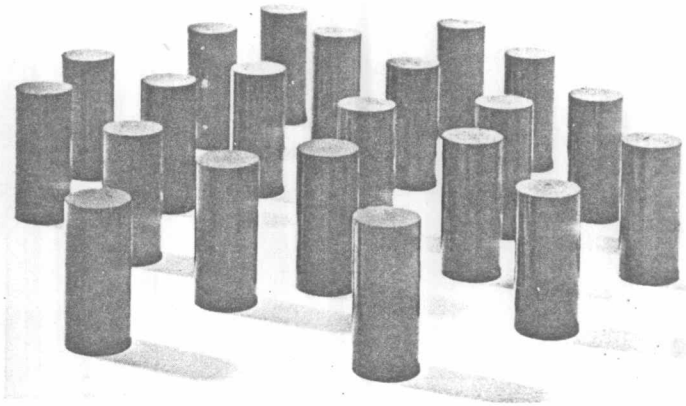
Reactor Vessel and Internal Structure



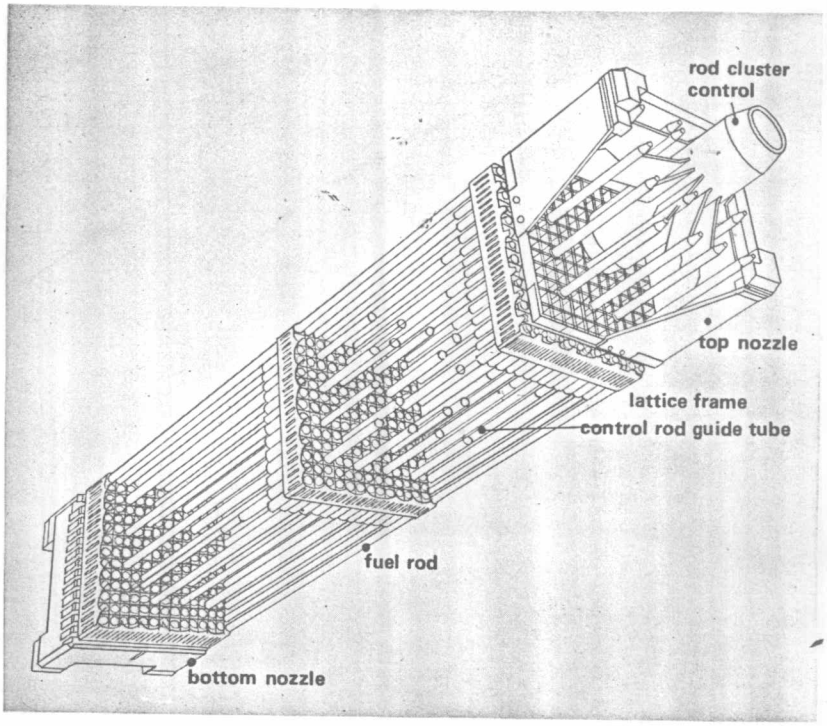
รูปที่ 24



Fuel assembly



Uranium dioxide pellets



Fuel assembly with rod cluster control

มีแรงดันสูงประมาณ 2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวระบายความร้อนจะไหลผ่านแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยมีอัตราไหล 300,000 แกลลอนต่อนาที เพื่อรับความร้อนไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยมีอุณหภูมิประมาณ 600°F

2) <u>เครื่องกำเนิดไอน้ำ</u> (Steam Generator) ทำหน้าที่คล้ายกับหม้อน้ำ (Boiler) ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันทั่ว ๆ ไป ภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำจะมีน้ำไหลวนเวียนเพื่อรับความร้อนจากตัวระบายความร้อน พร้อมกันนั้นก็เปลี่ยนสภาพของน้ำในส่วนนี้ให้กลายเป็นไอน้ำ (Steam) เพื่อไปขับดันกังหันไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกวางอยู่ในแนวตั้ง ภายในประกอบด้วยท่อเล็ก ๆ มากมายทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อน (Heat - exchanger) ตัวระบายความร้อนที่ถูกสูบนำมาโดยเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่จะไหลอยู่ภายในท่อระบายความร้อนนี้ และถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำซึ่งอยู่ในอีกวงจรหนึ่ง จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวระบายความร้อนลดลงประมาณ 50°F ตัวระบายความร้อนจะไหลออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำในอุณหภูมิประมาณ 550°F และถูกสูบกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยเครื่องสูบน้ำที่เรียกว่า Circulating pump เมื่อตัวระบายความร้อนผ่านแกนปฏิกรณ์ซึ่งมีเชื้อเพลิงให้ความร้อนอยู่ อุณหภูมิของตัวระบายความร้อนก็จะกลับสูงขึ้นเป็น 600°F ตามเดิม แล้วถูกสูบกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอน้ำอีก วนเวียนอยู่เช่นนี้ เครื่องกำเนิดไอน้ำนี้อาจจะใช้ 2-4 ชุดขึ้นอยู่กับแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและขนาดของกำลังผลิต ท่อระบายความร้อนภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำอาจจะติดตั้งในรูปตัวยู ขนาดของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยทั่วไปจะมีความสูงประมาณ 60 ฟุต มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 ฟุต มีน้ำหนักประมาณ 1,000,000 ปอนด์ เครื่องกำเนิดไอน้ำแต่ละชุดจะมีเครื่องแยกไอน้ำ และเครื่องทำไอน้ำให้แห้งเพื่อขจัดความชื้นออกจากไอน้ำที่จะนำไปใช้กับกังหันไอน้ำ

3) <u>ถังควบคุมแรงดัน</u> (Pressurizer) เป็นภาชนะรูปทรงกระบอกติดตั้งในแนวตั้ง มีความสูง 30 ฟุต มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ฟุต มีหน้าที่ควบคุมแรงดันในเครื่อง

ปฏิกรณ์ปรมาณูและเครื่องกำเนิดไอน้ำ เนื่องจากในขณะที่มีผู้ใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความต้องการไอน้ำของกังหันไอน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปทำให้การถ่ายเทความร้อนจากตัวระบายความร้อนไปยังระบบไอน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง แรงดันในวงจรระบายความร้อนก็จะเปลี่ยนแปลงไป (เพิ่มขึ้นหรือลดลง) ถังควบคุมแรงดันจึงมีหน้าที่คอยควบคุมแรงดันภายในวงจรระบายความร้อนโดยมีหัวฉีดน้ำทำการฉีดน้ำเพื่อทำให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเป็นการลดแรงดันลง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าเพื่อใช้เพิ่มแรงดันโดยต้มน้ำในถังควบคุมแรงดันให้กลายเป็นไอน้ำ

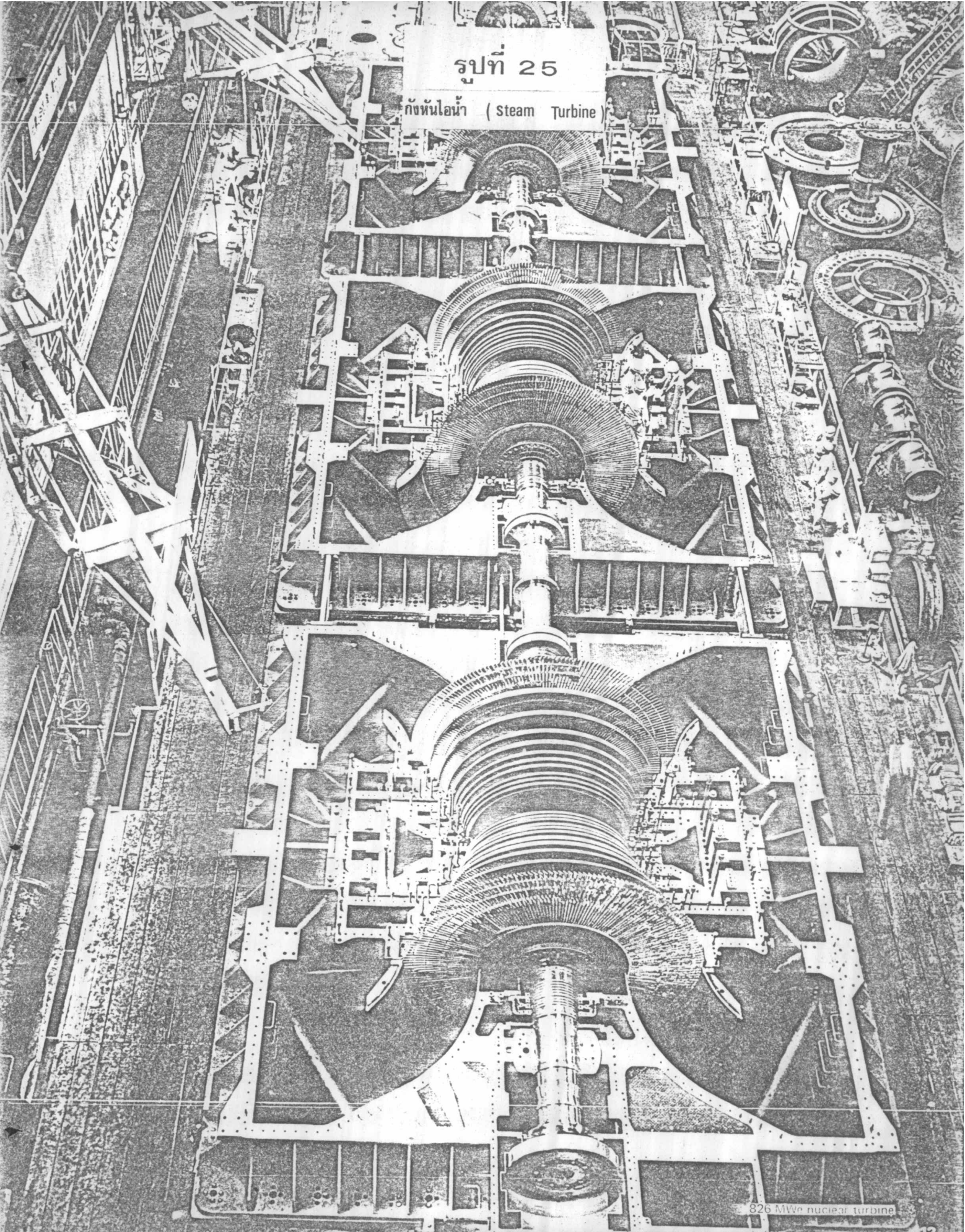
4) <u>เครื่องควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์</u> (Reactivity Control) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำภายใต้ความกดดันสูงนี้ควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยแปรจำนวนของนิวตรอนด้วยแท่งดูดนิวตรอน (Control Rod Absorber) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในแท่งเชื้อเพลิง เพื่อใช้เพิ่มจำนวนสารดูดนิวตรอนเข้าไปในบริเวณแท่งเชื้อเพลิง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ลดลง สารดูดนิวตรอนนี้อาจจะแบ่งเป็นสองแบบคือ ในลักษณะของเหลวโดยละลายกับน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนและเปลี่ยนแปรความเข้มข้นของสารละลายนั้นเพื่อเพิ่มหรือลดความสามารถในการดูดนิวตรอน เช่นสารละลายจำพวก Boric acid ส่วนมากมักจะใช้ในระยะต้น ๆ ของอายุเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นระยะที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์มากเกินไป จึงใช้สารละลายดังกล่าวดูดนิวตรอนเพื่อลดปฏิกิริยานิวเคลียร์ลง เมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งแล้วจะอ่อนกำลังลง จึงจำเป็นต้องลดความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวในตัวระบายความร้อน ทั้งนี้เพื่อให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นไปในระดับที่สม่ำเสมอ สารดูดนิวตรอนอีกแบบหนึ่งจะอยู่ในลักษณะของของแข็ง ใช้เมื่อเริ่มเดินเครื่องหรือเมื่อต้องการหยุดเดินเครื่องโดยกระทันหัน สารดูดนิวตรอนชนิดนี้จะตั้งอยู่ส่วนบนของเชื้อเพลิง มีลักษณะเป็นแท่ง มักจะใช้สอดลงมาในระหว่างช่องว่างของเชื้อเพลิงในอัตราความเร็วตามที่ต้องการ ในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินอาจจะสอดเข้ามาเพื่อดูดจับนิวตรอนทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่นั้นหยุดลงทันที

อุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบนี้จะถูกจัดให้อยู่ภายในอาคารปฏิกรณ์ (Reactor Containment) ซึ่งมีขนาดความสูงประมาณ 160 ฟุต มีเส้น

ผ่าศูนย์กลางประมาณ 130 ฟุต ประกอบขึ้นด้วยผนังคอนกรีตหนาประมาณ 3 $\frac{1}{2}$ ฟุต ทำหน้าที่ป้องกันสารกัมมันตภาพรังสีต่าง ๆ ที่อาจจะหลุดออกมาจากอุปกรณ์มิให้ผ่านออกไปยังบรรยากาศรอบนอก อาคารปฏิกรณ์นี้จะต้องสามารถทนต่อแรงดันภายในและอุณหภูมิได้โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ เช่น ท่อน้ำตัวระบายความร้อนแตก โดยทั่วไปอาคารปฏิกรณ์นี้จะทนต่อแรงดันได้ประมาณ 40-45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และทนต่ออุณหภูมิได้ประมาณ 276°F อุปกรณ์ที่สำคัญเช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องกำเนิดไอน้ำ ถังควบคุมแรงดัน และเครื่องสูบน้ำ (Circulating pump) จะถูกจัดให้อยู่ในอาคารปฏิกรณ์หลังนี้

5) <u>กังหันไอน้ำ</u> (Steam Turbine) เป็นอุปกรณ์รับพลังงานความร้อนและแรงดันจากไอน้ำแล้วเปลี่ยนสภาพให้เป็นพลังงานกล (หมุน) แกนกลางของกังหันไอน้ำจะต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยหลักการเดียวกันกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมัน จากการที่เครื่องกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์สามารถจะทำไอน้ำซึ่งมีแรงดันต่ำประมาณ 50-80 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร หรือประมาณ 550-750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กังหันไอน้ำที่ใช้จึงต้องมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวกังหันไอน้ำแรงดันต่ำ (Low Pressure Turbine) จะมีตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และมีกังหันใบสุดท้ายยาว 40-50 นิ้ว ดังนั้นกังหันไอน้ำที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จึงมีความเร็วต่ำกว่าประมาณครึ่งหนึ่ง (1,500 รอบต่อนาที) ของกังหันไอน้ำที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมัน (3,000 รอบต่อนาที) นอกจากนี้โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จะต้องมีกำลังผลิตอย่างต่ำ 600 เมกกะวัตต์ และต้องมีอุปกรณ์แยกความชื้นในไอน้ำ (Moisture Separator) เพื่อป้องกันไม่ให้ใบพัดของกังหันไอน้ำถูกกัดกร่อน รวมทั้งมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Reheater อยู่ในระบบของกังหันไอน้ำด้วย ทำให้กังหันไอน้ำมีขนาดใหญ่และมีความยาวมาก ดังแสดงในรูปที่ 25

6) <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> (Generator)เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า มีหน้าที่สำคัญเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.3 ส่วนที่แตกต่างกันคือ เนื่องจากความเร็วของกังหันไอน้ำในโรง



รูปที่ 25

กังหันไอน้ำ (Steam Turbine)

ไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ต่ำกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตสูงจึงมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก

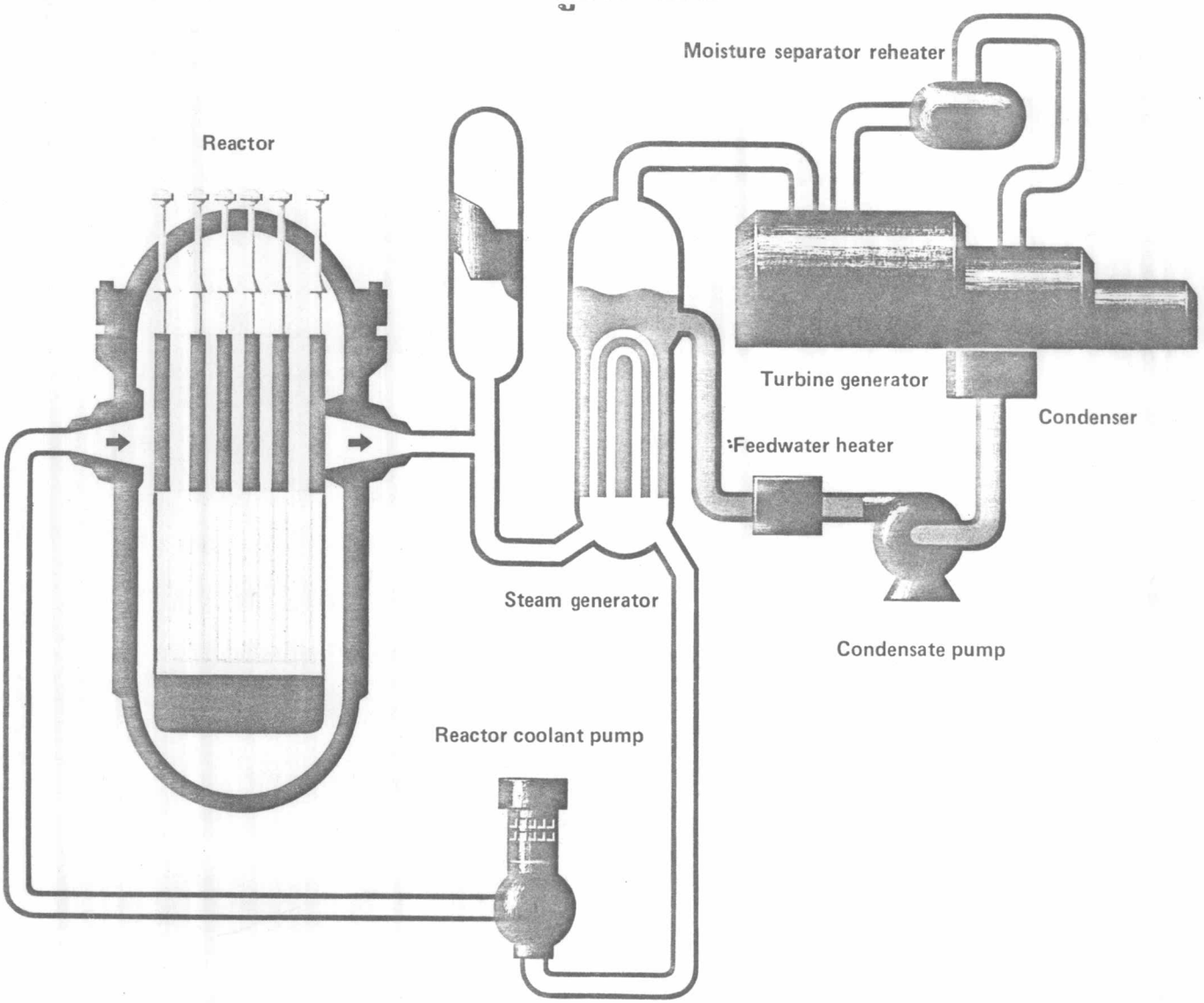
โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำภายใต้ความกดดันสูง (PWR) ซึ่งมีสองวงจร (Indirect cycle) นี้ โอกาสที่จะมีกัมมันตภาพรังสีรั่วไหลเข้าไปในระบบวงจรของไอน้ำและกังหันไอน้ำเป็นไปได้ยาก จึงนับว่าเป็นโรงไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยสูง สามารถเข้าไปทำการบำรุงรักษาได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องมีระบบและมาตรการป้องกันอย่างเข้มงวด โรงไฟฟ้าแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไป รวมทั้งเป็นแบบหนึ่งที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ นำมาพิจารณาด้วย ได้แสดงระบบการทำงานของโรงไฟฟ้าแบบนี้ไว้ในรูปที่ 26

ข. <u>เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบน้ำเดือด</u> (Boiling Water Reactor - BWR) เป็นแบบวงจรเดียว น้ำที่หมุนเวียนในวงจรมีความดันประมาณ 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อระบายความร้อนจากเชื้อเพลิงแล้วจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำอยู่ภายในแกนปฏิกรณ์และถูกส่งไปตามท่อเพื่อขับกังหันไอน้ำ ตัวระบายความร้อนของปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR มีอุณหภูมิประมาณ 500° F ไอน้ำจะมีปริมาตรประมาณ 1,000,000 ปอนด์ต่อชั่วโมง สำหรับขนาดกำลังผลิต 800 เมกกะวัตต์ ไอน้ำซึ่งไหลผ่านกังหันไอน้ำแล้วจะไหลลงสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและสูบกลับมายังเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยผ่านอุปกรณ์กรองน้ำ อุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้คือ

1) <u>แกนปฏิกรณ์</u> ซึ่งเป็นที่บรรจุเชื้อเพลิงประมาณ 500-800 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 27 ชุดเชื้อเพลิงแต่ละชุดจะประกอบด้วยแท่งบรรจุเชื้อเพลิงประมาณ 40-60 แท่ง รูปสี่เหลี่ยม เชื้อเพลิงแต่ละแท่งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว มีความยาว 12 ฟุต ทำด้วยโลหะ Zircaloy ทรงกระบอกบรรจุยูเรเนียมไดออกไซด์แท่งเล็ก ๆ หลอดบรรจุเชื้อเพลิงจะมีที่ว่างสำหรับกักเก็บแกสที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ และช่องว่างสำหรับให้เชื้อเพลิงขยายตัวเมื่อมีความร้อนสูงขึ้น เชื้อเพลิงทุก ๆ 4 ชุดจะถูกจัดให้อยู่เป็นกลุ่มเดียวกันและมีแท่งควบคุม (Control Blade) 1 ชุดสอดอยู่ระหว่างแท่งเชื้อเพลิง

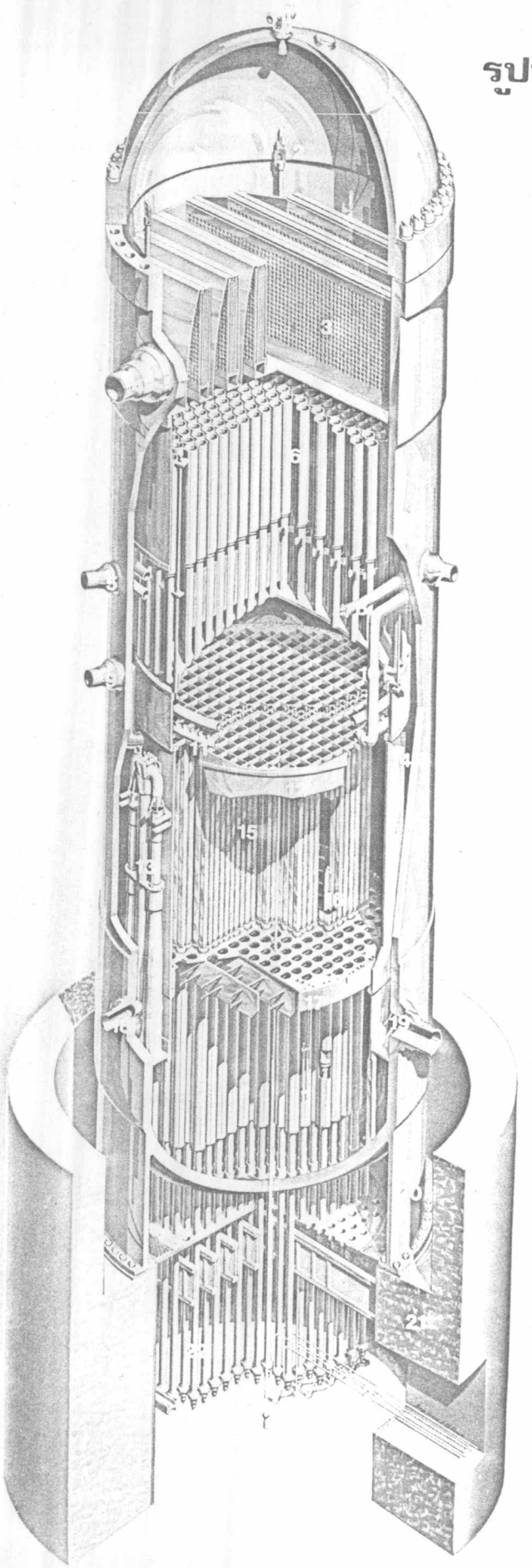
STRUCTURE OF PWR NUCLEAR POWER PLANT

รูปที่ 26



The primary system (brown, including reactor) and the secondary system (green, including turbine generator) are completely separated by the steam generator heat transfer tubes. Accordingly, each system is independent and selects optimum conditions; and radioactivity in the primary system does not transfer to the secondary system.

รูปที่ 27



BWR/6

REACTOR ASSEMBLY

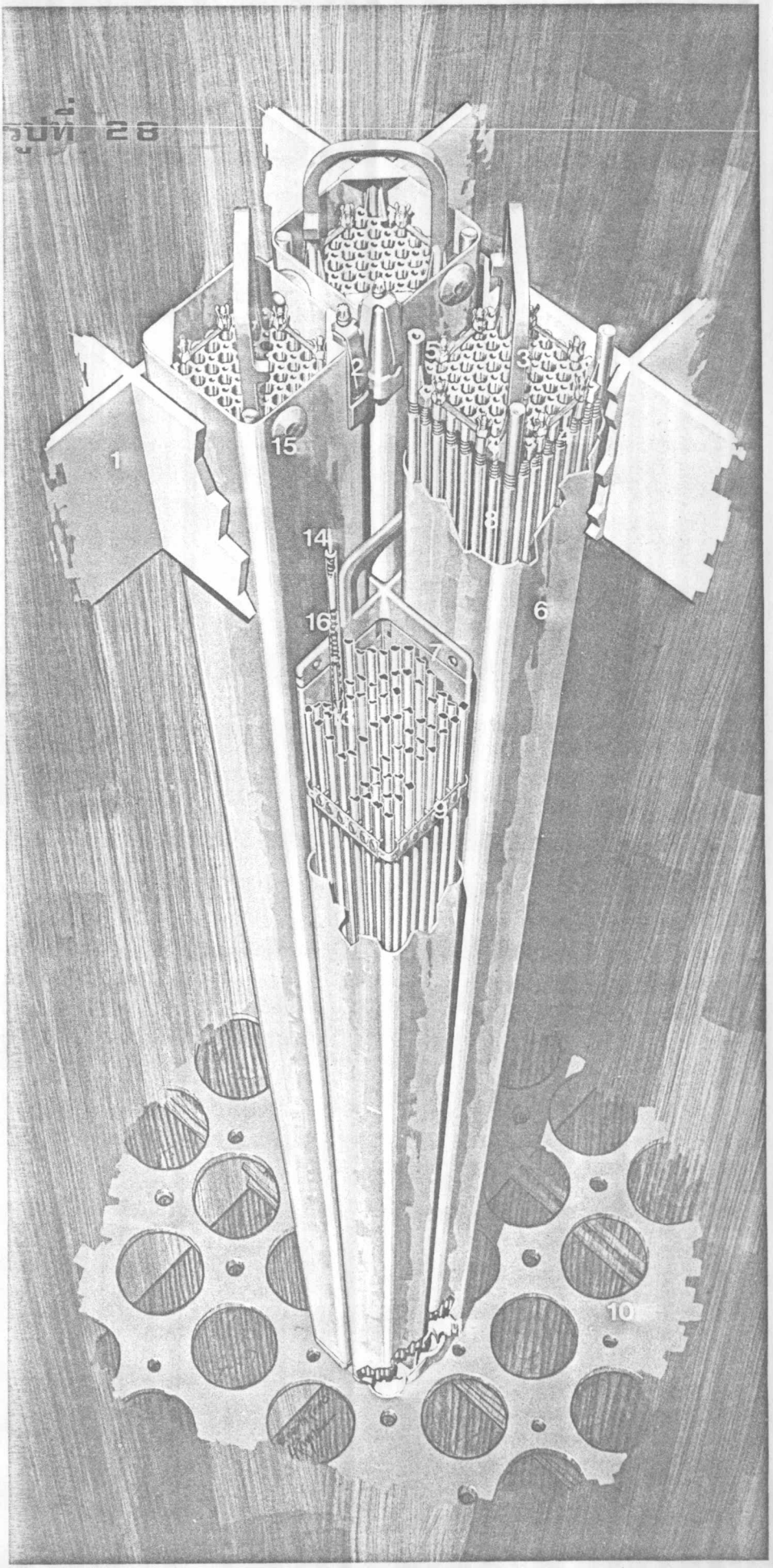
1. VENT AND HEAD SPRAY
2. STEAM DRYER LIFTING LUG
3. STEAM DRYER ASSEMBLY
4. STEAM OUTLET
5. CORE SPRAY INLET
6. STEAM SEPARATOR ASSEMBLY
7. FEEDWATER INLET
8. FEEDWATER SPARGER
9. LOW PRESSURE COOLANT INJECTION INLET
10. CORE SPRAY LINE
11. CORE SPRAY SPARGER
12. TOP GUIDE
13. JET PUMP ASSEMBLY
14. CORE SHROUD
15. FUEL ASSEMBLIES
16. CONTROL BLADE
17. CORE PLATE
18. JET PUMP / RECIRCULATION WATER INLET
19. RECIRCULATION WATER OUTLET
20. VESSEL SUPPORT SKIRT
21. SHIELD WALL
22. CONTROL ROD DRIVES
23. CONTROL ROD DRIVE HYDRAULIC LINES
24. IN-CORE FLUX MONITOR

เป็นรูปกากบาท ดังรูปที่ 28 แท่งควบคุมนี้จะทำหน้าที่ควบคุมปฏิกิริยาและมีหน้าที่หยุดปฏิกิริยานิวเคลียร์ทันทีที่เกิดเหตุฉุกเฉิน แท่งควบคุมจะเคลื่อนที่โดยกำลังแรงดันของระบบไฮโดรลิคซึ่งติดอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR นี้เป็นรูปในแนวตั้ง มีฝาเป็นรูปครึ่งทรงกลม มีความสูง 61 ฟุต มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 ฟุต ความหนาประมาณ 5.5 นิ้ว และมีน้ำหนักประมาณ 1,300,000 ปอนด์ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR และแบบ PWR คือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR สามารถจะผลิตไอน้ำได้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โดยไม่ต้องมีเครื่องกำเนิดไอน้ำอีกชุดหนึ่งต่างหาก ในตัวเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนี้จะติดตั้งเครื่องแยกไอน้ำ เครื่องทำให้ไอน้ำแห้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไอน้ำที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์นี้มีคุณภาพเหมาะสมที่จะใช้ในกังหันไอน้ำ และเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นไปโดยรวดเร็วและทั่วถึง นอกจากนี้ยังต้องติดระบบ Jet pump เพื่อให้ตัวระบายความร้อนสามารถจะเคลื่อนที่เข้าไปถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งเชื้อเพลิงได้โดยรวดเร็วและทั่วถึง และสามารถจะควบคุมให้เป็นไปตามความต้องการของระบบไฟฟ้า คือสามารถเพิ่มและลดการผลิตไอน้ำให้เป็นไปตามความต้องการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะถูกจัดให้อยู่ในอาคารปฏิกรณ์ปรมาณู รวมทั้งอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ถือว่าเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น Recirculation pump, Fuel pool, Spent fuel, Residual Heat Remover System เป็นต้น ภายในอาคารปฏิกรณ์ปรมาณูจะจัดให้มีระบบความปลอดภัย เช่น บ่อน้ำขนาดใหญ่สำหรับกักเก็บความร้อนที่เกิดจากไอน้ำในกรณีที่ท่อแตก น้ำที่ไหลออกมาจะถูกระบายความร้อนลงสู่บ่อน้ำนี้ ทำให้อุณหภูมิและแรงดันลดลง เป็นการลดอันตรายลงโดยรวดเร็ว

2) <u>กังหันไอน้ำ</u> กังหันไอน้ำที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับกังหันไอน้ำที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ PWR กล่าวคือ มีขนาดใหญ่ มีความเร็วต่อรอบต่ำ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR เป็นแบบวงจรเดียว จึงมีโอกาสในบางครั้งที่ไอน้ำนำเอาสารกัมมันตภาพรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูตกอยู่ในเครื่องกังหันไอน้ำ ในระหว่างการเดินเครื่องและการบำรุงรักษาจึงจำเป็นต้องมีมาตรการ

BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

1.TOP FUEL GUIDE
2.CHANNEL FASTENER
3.UPPER TIE PLATE
4.EXPANSION SPRING
5.LOCKING TAB
6.CHANNEL
7.CONTROL ROD
8.FUEL ROD
9.SPACER
10.CORE PLATE ASSEMBLY
11.LOWER TIE PLATE
12.FUEL SUPPORT PIECE
13.FUEL PELLETS
14.END PLUG
15.CHANNEL SPACER
16.PLENUM SPRING



GEZ-4383

ป้องกันสำหรับผู้เข้าไปปฏิบัติงานอย่างเข้มงวดเพื่อป้องกันอันตรายอันเกิดจากการถูกสารกัมมันตภาพรังสี

3) <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> มีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ PWR ดังกล่าวมาแล้ว ได้แสดงระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ BWR ไว้ในรูปที่ 29

การที่กล่าวถึงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู 3 แบบ คือแบบ CANDU แบบ PWR และแบบ BWR โดยละเอียดนั้น เพราะทั้ง 3 แบบดังกล่าวอยู่ในข่ายการพิจารณาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ หากได้รับอนุมัติให้สร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ได้ จากการสัมภาษณ์[1] เจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ทราบว่า แนวโน้มการพิจารณาจะมุ่งไปที่แบบ PWR, BWR และ CANDU เพราะสองแบบแรกเป็นที่นิยมใช้กันในประเทศต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ส่วนแบบ CANDU ก็มีประวัติการใช้งานได้ดีพอสมควร แม้จะมีจำนวนใช้งานน้อยในปัจจุบันนี้ ข้อดีของแบบ CANDU อีกประการหนึ่งก็คือขั้นตอนในการจัดทำเชื้อเพลิงง่ายและเป็นอิสระพอสมควร

4.3 <u>การก่อสร้างโรงไฟฟ้า</u>

โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงมักจะใช้เวลาในการก่อสร้าง 3-4 ปี แต่สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นอกจากจะเป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั้งสิ้นแล้ว ยังมีคุณสมบัติพิเศษอีกหลายประการที่แตกต่างจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมัน ทำให้ต้องใช้เวลาในการก่อสร้างนาน 6-8 ปี ลักษณะพิเศษดังกล่าวอาจจำแนกได้ดังต่อไปนี้

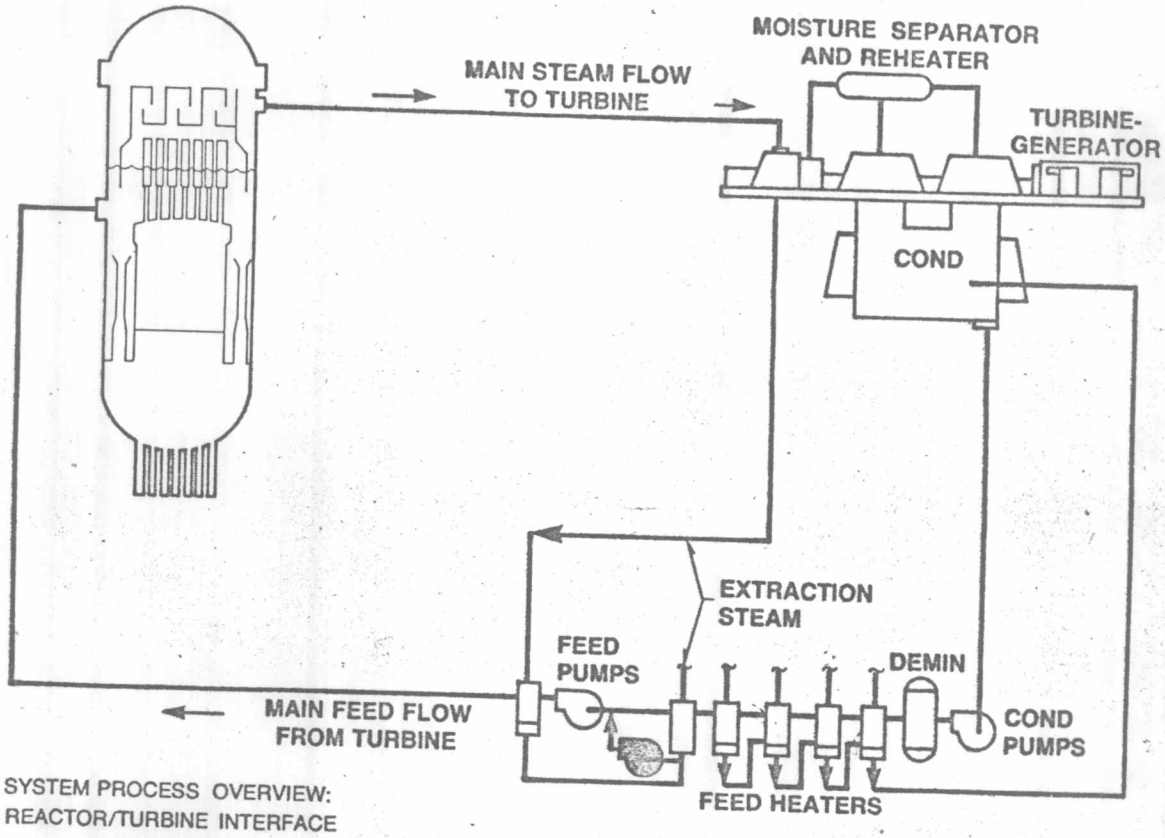
ก. <u>ต้องการเงินลงทุนจำนวนมาก</u> โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มีราคาค่าก่อสร้างสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 1.8 เท่าในขนาดเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์โรงแรกของประเทศแล้ว ราคาค่าก่อสร้าง

---

[1]สัมภาษณ์ อุดร ชุนวิไชย, หัวหน้าแผนกวิศวกรรมโครงการ กองวิศวกรรมโรงไฟฟ้า, 26 ตุลาคม 2521.

รูปที่ 29

Reactor/Turbine Interface Considerations:
FEEDWATER QUALITY



SYSTEM PROCESS OVERVIEW:
REACTOR/TURBINE INTERFACE

ก็จะสูงขึ้นไปอีกเนื่องจากค่าใช้จ่ายก่อนเริ่มงาน เช่น ค่าเตรียมงาน ค่าฝึกอบรม ค่าประชาสัมพันธ์ เป็นต้น สำหรับค่าดอกเบี้ยเงินกู้ระหว่างก่อสร้างจะมีจำนวนประมาณร้อยละ 22 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่สร้างเสร็จแล้วจะต้องมีประสิทธิภาพในการเดินเครื่องสูง ถ้าจำเป็นจะต้องหยุดการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพียงวันเดียวก็จะทำให้ขาดรายได้อย่างน้อยที่สุด 3 ล้านบาท[1] ดังนั้นการพิจารณาแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ผู้ผลิตอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าที่จะเลือกมาใช้ในระบบ และรายละเอียดอื่น ๆ จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วน และใช้เวลาในการพิจารณามากกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังงานอื่น ๆ

ข. <u>ข้อกำหนดเกี่ยวกับความปลอดภัย</u> จากการที่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีผลิตผลพลอยได้คือกัมมันตภาพรังสี ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสาธารณชนทั้งในระหว่างการผลิตพลังงานไฟฟ้าตามปกติและในกรณีที่มีอุบัติเหตุเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จึงจำเป็นต้องมีข้อกำหนดและวิธีการที่จะใช้ในการควบคุมการดำเนินการก่อสร้าง การเดินเครื่อง การบำรุงรักษา และการใช้เชื้อเพลิงให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อยและปลอดภัย ซึ่งการควบคุมดังกล่าวนั้นกระทำโดยองค์การของรัฐในการพิจารณาทุกขั้นตอนในการดำเนินการตั้งแต่การขออนุญาตในการเลือกสถานที่ก่อสร้าง การก่อสร้าง การเดินเครื่อง มาตรการในการคัดเลือกอบรมบุคคลที่มีคุณวุฒิและความสามารถเหมาะสมในการควบคุมการเดินเครื่องและบำรุงรักษา ซึ่งการควบคุมดังกล่าวนี้แตกต่างไปจากการควบคุมโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงอื่น ๆ

ค. <u>การเลือกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่จะใช้กับโรงไฟฟ้า</u> เป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับความผูกพันในระยะยาวในการจัดหาและบริการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้นอาจจะใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติหรือยูเรเนียมเข้มข้นก็ได้ และเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีการจำหน่ายและให้บริการแตกต่างกันออกไปทั้งกลุ่มประเทศ

---

[1] International Atomic Energy Agency, Vienna, 1975, <u>Steps to Nuclear Power</u>, Technical Reports Series No. 164 (IAEA in Austria, April 1975), p. 19.

ความรู้ทางเทคนิค รวมทั้งการให้บริการในระยะยาว นอกจากนี้ยังมีการควบคุมป้องกันมิให้การใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้านี้ก่อให้เกิดการแพร่ขยายของสารที่สามารถนำไปผลิตเป็นอาวุธนิวเคลียร์ซึ่งเป็นอันตรายต่อประเทศต่าง ๆ ในโลก ข้อจำกัดดังกล่าวจึงจำเป็นต้องนำมาพิจารณาในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งความผูกพันเกี่ยวกับแนวทางทางการเมืองและทางเศรษฐกิจในอนาคต

ง. <u>ความต้องการเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติการและผู้เชี่ยวชาญ</u> การดำเนินการทุกขั้นตอนของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นี้จำเป็นต้องมีการควบคุมอย่างเข้มงวดและใกล้ชิด ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องมีความรอบรู้ในด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิทยาการที่ยังไม่แพร่หลายอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนา การจัดเตรียมบุคลากรดังกล่าวทั้งฝ่ายผู้ก่อสร้างและฝ่ายองค์การของรัฐบาลที่มีหน้าที่ควบคุมจึงจำเป็นต้องใช้เวลาและเงินทุนที่จะดำเนินการจัดอบรม แตกต่างจากประเทศที่พัฒนาแล้วและเป็นประเทศอุตสาหกรรมซึ่งสามารถจะย้ายถ่ายเทบุคลากรดังกล่าวมาจากหน่วยงานหรือจากวงการอุตสาหกรรมที่มีความรู้ความชำนาญใกล้เคียงกัน

สำหรับการดำเนินการก่อสร้างซึ่งเป็นไปโดยสลับซับซ้อน อาจจะกล่าวได้โดยสรุปดังต่อไปนี้

4.3.1 <u>การเลือกสถานที่ก่อสร้าง</u> (Site Selection) สถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้นจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ วิศวกรรม และความปลอดภัยของประชาชนเป็นสำคัญ การพิจารณาถึงความเหมาะสมดังกล่าวจะต้องอาศัยหลักเกณฑ์ดังนี้[1]

ก. <u>คุณลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทางด้านวิศวกรรม</u> จะต้องมีการพิจารณาว่าในสถานที่ ๆ จะก่อสร้างนั้นจะก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มีขนาดกำลังผลิตเท่าใดโดยคำนึงถึงมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมโดยทั่ว ๆ ไปที่จะใช้ในการออกแบบและก่อสร้าง การดำเนินการเกี่ยวกับความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมเพื่อที่จะลด

---

[1] Ibid., pp. 35-39.

หรือขจัดผลสืบเนื่องอันเกิดจากอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้น โดยทั่วไปในระหว่างการเลือกสถานที่ก่อสร้างนั้นยังไม่ทราบข้อมูลที่แน่นอนเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่จะใช้ แต่อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปอาจจะสามารถกำหนดรายละเอียดบางประการได้ เช่น ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า แบบหรือชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่เลือก ซึ่งต้องเป็นแบบที่ได้รับอนุญาตให้ก่อสร้างและใช้ในประเทศของผู้ขาย

ข. <u>ความหนาแน่นของประชากร</u> เป็นการยากที่จะกำหนดจำนวนความหนาแน่นของประชากรในบริเวณสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในนานาประเทศ แต่สามารถจะนำเอาตัวอย่างบางแห่งมาใช้ประกอบการพิจารณาได้ ทั้งนี้จำเป็นจะต้องทราบถึงขนาดของพื้นที่ที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้า ระยะทางและสถานที่ที่สำคัญในบริเวณใกล้เคียงรวมทั้งจำนวนประชากรที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงระหว่างสถานที่ก่อสร้างและศูนย์กลางที่ประชากรอยู่หนาแน่น ในรูปที่ 30 แสดงถึงตัวอย่างสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์และจำนวนประชากรที่มีอยู่โดยรอบ โดยปกติเจ้าหน้าที่ของหน่วงการปรมาณูระหว่างประเทศจะใช้ Curve เหล่านี้เป็นแนวทางอ้างอิง หากจำนวนประชากรที่มีอยู่ใกล้เคียงกับจำนวนที่แสดงใน Curve การดำเนินการทางด้านความปลอดภัยทางวิศวกรรมก็ใช้มาตรการปกติ แต่ถ้าจำนวนประชากรมีอยู่น้อยกว่าที่แสดงใน Curve ปัญหาเกี่ยวกับประชากรก็ถือว่ามีน้อยมาก ในทำนองเดียวกันถ้าประชากรมีหนาแน่นกว่าที่แสดงใน Curve การพิจารณาเกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้างก็จำเป็นจะต้องนำเอาการป้องกันทางด้านความปลอดภัยมาพิจารณาอย่างรอบคอบ

ค. <u>ลักษณะทั่วไปของสถานที่ก่อสร้าง</u> สิ่งที่ควรนำมาพิจารณาคือ

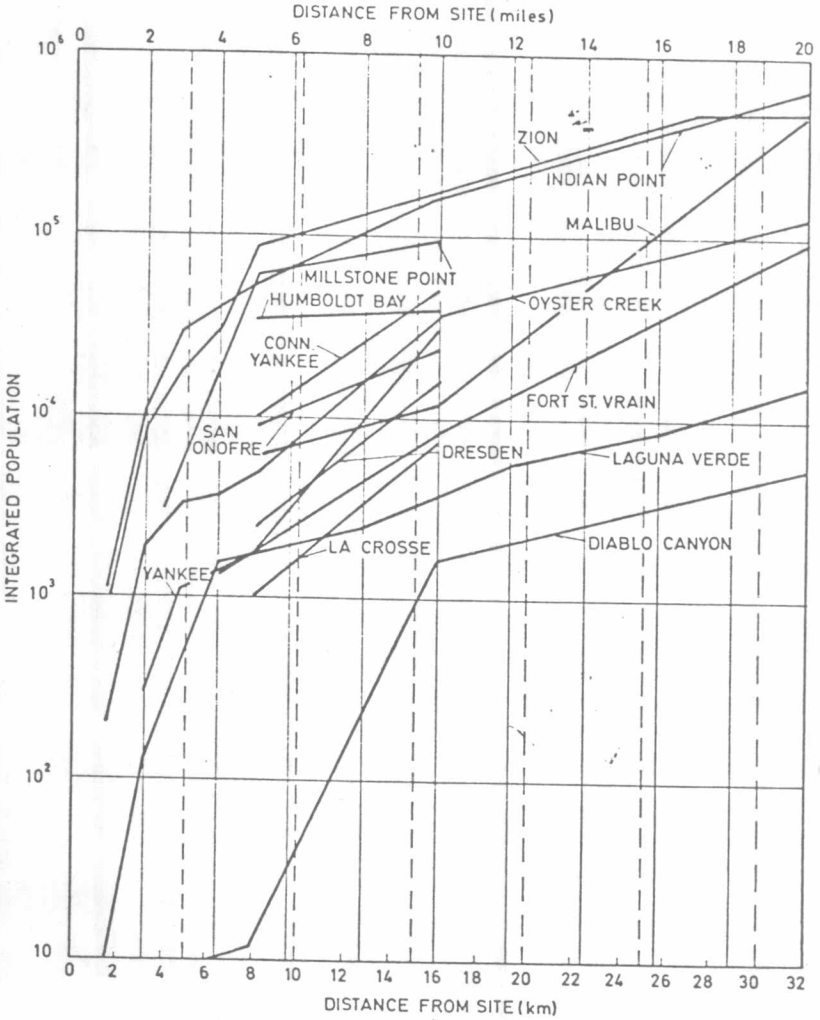
1. <u>สถานที่ก่อสร้างและเตรียมงาน</u> สถานที่ที่จะใช้ในการก่อสร้างและเตรียมงานจำเป็นต้องมีขนาดเท่ากับ 150 - 300 ไร่ และสถานที่ที่จะสร้างตัวอาคารจะมีเนื้อที่ประมาณ 9.37 ไร่[1]

2. <u>น้ำสำหรับระบายความร้อน</u> ต้องมีน้ำเพียงพอสำหรับระบาย

---

[1] Ibid., p. 37.

รูปที่ 30



Examples of integrated population as a function of distance from some power plant sites in the US.

ความร้อน จำนวนน้ำขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตและแบบของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โดยปกติโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาด 600 เมกกะวัตต์ แบบ Light Water Reactor นั้นจะต้องการน้ำสำหรับระบายความร้อนประมาณ 18 - 25 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยไม่ต้องคำนึงถึงน้ำขึ้นน้ำลง แต่ความลึกในบริเวณอาคารสูบน้ำจะต้องมีความลึกมากพอ โรงไฟฟ้าจำเป็นต้องอยู่ใกล้กับอาคารสูบน้ำ เพราะท่อน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดดังกล่าวมีราคาสูงมาก

ในกรณีที่จำเป็นต้องมี Wet Cooling Tower สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 600 เมกกะวัตต์จะมีปริมาณน้ำที่ระเหยไปประมาณ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การระบายความร้อนแบบนี้จะมีเงินลงทุนสูง ทั้ง Cooling Tower ท่อน้ำที่จำเป็นต้องต่อลึกเข้ามาในฝั่ง เครื่องสูบน้ำ และพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ รวมทั้งมาตรการเกี่ยวกับความปลอดภัย ซึ่งค่าใช้จ่ายเหล่านี้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

3. <u>ฐานราก</u> โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จำเป็นต้องมีฐานรากที่มั่นคง สามารถรับน้ำหนักได้โดยเฉลี่ย 40 ตันต่อตารางเมตร สำหรับพื้นที่ ๆ ใช้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และเฉลี่ยประมาณ 15 ตันต่อตารางเมตรต่อพื้นที่ที่จะใช้สร้างกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับบริเวณที่ใช้ก่อสร้างอุปกรณ์อื่น ๆ จำเป็นต้องมีฐานรากเท่ากับมาตรฐานการก่อสร้างโดยปกติทั่วไป

4. <u>ความสะดวกในการคมนาคมและการส่งพลังงานไฟฟ้า</u> จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงการคมนาคมและการขนส่งเกี่ยวกับผู้ปฏิบัติงาน อุปกรณ์ต่าง ๆ วัสดุในการก่อสร้าง เชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว เพราะการที่สถานที่ก่อสร้างอยู่ใกล้หรือไกลจากทางหลวงแผ่นดินหรือการขนส่งทางน้ำจะมีผลต่อต่อทุนค่าก่อสร้างทั้งสิ้น นอกจากนี้การส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปสู่ศูนย์กลางของการใช้พลังงานก็จะมีผลต่อต้นทุนการผลิตเช่นเดียวกัน จึงต้องทำการวิเคราะห์อย่างรอบคอบ

5. <u>ลักษณะภูมิประเทศ</u> ลักษณะภูมิประเทศของสถานที่ก่อสร้าง เช่น เป็นหุบเขา ที่ราบ หรือเนินสูง ย่อมเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาถึงผลกระทบกระเทือนที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

6. ลักษณะทางด้านภูมิศาสตร์ จะต้องพิจารณาถึงโครงสร้างของพื้นผิวโลกในบริเวณก่อสร้าง เช่น ลักษณะของชั้นหิน ชั้นดิน ชั้นทราย เป็นต้น เพื่อใช้พิจารณาถึงความมั่นคงของฐานราก หากมีลักษณะของพื้นผิวใต้ดิน หรือชั้นหินที่แสดงให้เห็นว่าอาจจะมีการเคลื่อนไหว ถล่มทลาย หรืออาจจะเกิดแผ่นดินไหวได้ ซึ่งกระทบกระเทือนถึงความมั่นคงแข็งแรงของโรงไฟฟ้าแล้ว ก็จะต้องเลือกสถานที่ก่อสร้างใหม่ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาเกี่ยวกับความลึก ทิศทาง และความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบฐานราก ความรู้ดังกล่าวยังสามารถนำมาคาดคะเนเกี่ยวกับอุบัติเหตุ และการรั่วไหลของสารกัมมันตภาพรังสีลงสู่ใต้ดิน ทำให้รู้ทิศทางสามารถกำหนดมาตรการป้องกันได้

7. อุทกภัย จะต้องพิจารณาถึงโอกาสที่จะเกิดอุทกภัยจากแม่น้ำ ทะเล พายุใต้ฝุ่น และคลื่นยักษ์อันเกิดจากแผ่นดินไหว การออกแบบโครงสร้างจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทนทานต่ออุทกภัยที่อาจจะเกิดขึ้นในบริเวณนั้นที่ร้ายแรงที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบโครงสร้างเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โรงเก็บสารกัมมันตภาพรังสี โรงไฟฟ้าดีเซลซึ่งใช้ในกรณีฉุกเฉิน เป็นต้น อาคารสำหรับปฏิกรณ์ปรมาณูและอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็จะต้องไม่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำในกรณีเกิดอุทกภัย

8. ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา เป็นการพิจารณาถึงทิศทาง ขนาดของกัมมันตภาพรังสีที่ถูกปล่อยออกมาทั้งในระหว่างการเดินเครื่องปกติ และกรณีเกิดอุบัติเหตุ ทั้งนี้จำต้องอาศัยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา

9. คลื่นยักษ์ที่เกิดจากแผ่นดินไหว (Tsunamis) ในกรณีที่โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่จำเป็นต้องสร้างริมฝั่งทะเลในเขตที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง ต้องมีการวางมาตรการป้องกันเกี่ยวกับความสูงของคลื่นยักษ์ จุดศูนย์กลางและขนาดของแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้นในทะเล หรือรูปร่างลักษณะของฝั่งทะเลที่จะเป็นผลทำให้เกิดหรือเพิ่มขนาดของคลื่นยักษ์ ซึ่งอาจจะต้องทำสิ่งก่อสร้างที่จะป้องกันคลื่นดังกล่าว หากโรงไฟฟ้าไม่อยู่ในเขตที่มีแผ่นดินไหวก็ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อนี้

10. แผ่นดินไหว ในกรณีที่สถานที่ก่อสร้างอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับสถานที่ ๆ อาจจะเกิดแผ่นดินไหว ก็จำเป็นต้องออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่ทำให้โครงสร้าง

มีความทนทานต่อความรุนแรงของแผ่นดินไหวทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งมาตรการในการออกแบบดังกล่าวจะทำให้ราคาต้นทุนของการก่อสร้างสูงขึ้นมาก

กล่าวโดยสรุป สถานที่ก่อสร้างจะต้องไม่นำความเสียหายและอันตรายมาสู่ประชาชน โดยยึดถือกฎเกณฑ์ของการเลือกสถานที่ของหน่วยงานของรัฐซึ่งมีความรับผิดชอบเกี่ยวกับความปลอดภัย เช่น คณะกรรมการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ รวมทั้งนำกฎเกณฑ์ซึ่งกำหนดขึ้นโดยคณะกรรมาธิการพลังงานปรมาณูแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Atomic Energy Commission หรือ USAEC) และของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency - IAEA) มาเป็นหลักในการเลือกสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ กฎเกณฑ์ของ USAEC และ IAEA นี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกว่าได้มีการวิเคราะห์และพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบที่สุด ทั้งนี้โดยได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

สำหรับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ได้เลือกไว้คือที่ ตำบลอ่าวไผ่ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี นั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ก็ได้ดำเนินการสำรวจและวิเคราะห์ทั้งทางด้านอุทกศาสตร์ สมุทรศาสตร์ ธรณีวิทยา อุตุนิยมวิทยา นิเวศน์วิทยาทางทะเล ปริมาณรังสีในธรรมชาติ สิ่งมีชีวิตในทะเลและความหนาแน่นของประชากร โดยทำการสำรวจหาข้อมูลมาตั้งแต่ปี 2510 และผลการสำรวจก็เป็นหลักฐานยืนยันว่าสถานที่ดังกล่าวเหมาะสมที่สุด

4.3.2 <u>การเสนอรายละเอียด</u> (Specification) รูปแบบของสัญญาโดยทั่ว ๆ ไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

ก. <u>Turn Key Contract</u> สัญญาแบบนี้ผู้ขายจะต้องรับผิดชอบต่อทุกสิ่งทุกอย่างในโครงการก่อสร้าง กล่าวคือ เป็นผู้จัดหาและสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ภายในเวลาที่กำหนด

Turn Key Contract อาจจะแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท เช่น ผู้ขายเป็นผู้รับผิดชอบต่องานทั้งหมด โดยจ้างวิศวกรที่ปรึกษาเป็นผู้ออกแบบและดำเนินการก่อสร้าง หรือบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาเป็นทั้งผู้ออกแบบและดำเนินการก่อสร้าง รวมทั้งเป็นผู้รับผิดชอบต่อโครงการทั้งหมด

ข. Nuclear Island Contract ผู้ขายจะต้องรับผิดชอบต่ออุปกรณ์ทั้งหมดที่ตนเองเป็นผู้ผลิตรวมทั้งอุปกรณ์ช่วย (Auxiliary equipment) อื่น ๆ โดยสร้างอาคารและที่เก็บเชื้อเพลิงใช้แล้ว รวมทั้งจะต้องช่วยเหลือในการติดตั้งด้วย

ค. Nuclear Steam Supply System ผู้ขายจะรับผิดชอบเฉพาะเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องกำเนิดไอน้ำ รวมทั้งการติดตั้ง

ในกรณีของสัญญาประเภทที่ 2 และ 3 ผู้ซื้ออาจจะเป็นผู้รับผิดชอบต่อโครงการทั้งหมด หรืออาจจะจ้างบริษัทวิศวกรที่ปรึกษามาดำเนินการออกแบบทางด้านวิศวกรรมก่อสร้างก็ได้ แต่โดยปกติการตระเตรียมเอกสารรายละเอียดต่าง ๆ จะต้องจัดทำโดยบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญ รายละเอียดดังกล่าวจำเป็นจะต้องมีข้อมูลมากพอสมควรเพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ประมูลมีความสะดวกในการคำนวณและคาดคะเนราคา

ในการเสนอรายละเอียดนั้น ผู้ซื้อจำเป็นต้องให้รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลขั้นพื้นฐาน (Background information) ในรายละเอียดควรจะกล่าวถึงการศึกษาและการคาดคะเนต่าง ๆ ที่จะนำไปสู่การวางแผนงานที่จะก่อสร้าง ผู้ซื้อควรให้ข้อมูลต่าง ๆ อย่างเปิดเผยและกว้างขวางเพื่อให้ผู้เข้าประมูลสามารถเข้าใจสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ดี

2. ข้อมูลทั่ว ๆ ไปเกี่ยวกับโครงการ (General project description) เช่น ชื่อโครงการ เจ้าของโครงการ ผู้ที่จะดำเนินการเดินเครื่อง สถานที่ก่อสร้าง ขนาดกำลังผลิต ระบบกำลังผลิตไฟฟ้า และการส่งพลังงานไฟฟ้า กำหนดเวลาแล้วเสร็จ หมายกำหนดการที่จะเปิดประกวดราคาและเซ็นสัญญา เป็นต้น

3. ลักษณะและที่ตั้งของสถานที่ก่อสร้าง (Site characteristic)

จะต้องเสนอรายละเอียดของสถานที่ก่อสร้างเพื่อให้ผู้ขายสามารถออกแบบอุปกรณ์และอาคารต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

4. ขอบเขตของสัญญา (Scope of supply) ต้องระบุโดยแน่ชัดว่าเป็นสัญญาแบบใด เช่น แบบ Turn Key หรือ Nuclear Island หรือ Nuclear Steam Supply System และต้องสำนึกว่า แม้ว่าจะเป็นสัญญาประเภทใดก็ตามก็อาจจะมีบางสิ่งบางอย่างที่ไม่ได้ระบุในขอบเขตของสัญญาโดยทั่วไป เช่น การปรับปรุงสถานที่ก่อสร้าง การทำถนนทางเข้า อาคาร โครงสร้างประกอบต่าง ๆ เป็นต้น

5. วิธีการพิจารณาการประกวดราคา (Evaluation method) จะต้องระบุไว้โดยแน่ชัด และควรจะให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับราคาที่จำเป็น เช่น อัตราแลกเปลี่ยน อัตราค่าจ้างคนงานในท้องถิ่น ราคาวัสดุที่สามารถจะหาได้ในท้องถิ่น ซึ่งจะทำให้ผู้เข้าประกวดราคาสามารถคิดคำนวณราคาได้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ทำให้สามารถจะประมูลได้ในราคาต่ำที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

6. เงื่อนไขต่าง ๆ (General conditions) เป็นการสมควรอย่างยิ่งที่ผู้ซื้อควรจะให้ผู้เข้าประกวดราคาได้ศึกษาถึงร่างของสัญญาและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะกำหนดในสัญญา เพื่อให้ผู้เข้าประกวดราคาสามารถจะทำความเข้าใจหรือโต้แย้งในข้อขัดแย้งต่าง ๆ ที่มีความคิดเห็นต่างกัน

7. เงินทุน (Financing) ควรจะระบุถึงแหล่งที่มาของเงินทุนที่จะใช้ในโครงการ เช่น อาจจะเป็นเงินกู้จากแหล่งต่าง ๆ หรือจากประเทศของผู้ขายหรือเงินกู้จากบริษัทผู้ขายเอง เพราะแหล่งที่มาของเงินทุนจะก่อให้เกิดความแตกต่างในการเสนอราคา

การเสนอรายละเอียดโดยทั่ว ๆ ไปมักจะระบุไว้อย่างกว้าง ๆ สามารถยืดหยุ่นได้พอควร เพื่อที่จะนำเอาเทคนิคก้าวหน้าใหม่ ๆ มาประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างได้ แต่ก็ต้องไม่กว้างเกินไปจนเป็นเหตุให้ยุ่งยากลำบากในการพิจารณาในภายหลัง

4.3.3 การเปิดประมูลและการเซ็นสัญญา (Bidding and Negotiation)

หลังจากที่ระบุรายละเอียดที่ต้องการแล้วก็จะเปิดโอกาสให้บริษัททั่วโลกได้ทำการประมูลราคาของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้น พร้อมทั้งให้ข้อเสนอต่าง ๆ ที่คิดว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ซื้อโรงไฟฟ้ามากที่สุด การเปิดซองและพิจารณาข้อเสนอจากผู้ผลิตนี้เป็นงานที่ค่อนข้างยากและสำคัญต้องใช้ความเชี่ยวชาญเป็นพิเศษ อาจจำเป็นต้องให้บริษัทวิศวกรที่ปรึกษาช่วยเป็นผู้พิจารณาแทน การพิจารณานั้นทำไปทั้งทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์พร้อม ๆ กันไป ข้อแตกต่างทางด้านวิศวกรรมและด้านต่าง ๆ จะต้องนำเอามาพิจารณาเปรียบเทียบโดยละเอียดรอบคอบ การพิจารณาเปรียบเทียบข้อแตกต่างมักจะปรับและจัดแต่งให้เป็นค่าของเงิน เพื่อให้สามารถคำนวณหาราคาของผู้เข้าประมูลทุก ๆ รายโดยใช้มาตรฐานอย่างเดียวกัน

งานขั้นแรกในการพิจารณาการประกวดราคาก็คือ การตรวจสอบเอกสารในการเสนอราคาเพื่อให้แน่ใจว่ารายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้จัดเตรียมเพื่อให้ผู้ประกวดราคากรอกมาในฟอร์มนั้นได้รับความเอาใจใส่และได้มีการให้รายละเอียดข้อเสนออย่างครบถ้วนถูกต้องตรงกับความต้องการของผู้ซื้อ

งานขั้นต่อมาคือ การพิจารณาข้อมูลที่ได้รับอย่างละเอียดถี่ถ้วน หากมีข้อความใดคลุมเครือไม่ชัดแจ้ง คณะกรรมการก็จำเป็นจะต้องติดต่อให้ผู้เสนอราคาชี้แจงให้กระจ่างชัดปราศจากข้อเคลือบแคลงสงสัย

ส่วนใหญ่มักจะมีการเข้าใจผิดในเรื่องของขอบเขตของการเสนอราคาและปริมาณงานซึ่งทำให้เกิดปัญหาขัดแย้งหลังจากเซ็นสัญญาไปแล้ว ดังนั้นทุก ๆ ฝ่ายจะต้องเข้าใจในเงื่อนไขของสัญญาอย่างแจ้งชัดว่าสิ่งใดรวมและสิ่งใดไม่รวมอยู่ในขอบเขตของงาน อย่างไรก็ตาม ผู้เสนอราคาหลายรายมักจะไม่สนใจในข้อกำหนดที่ระบุไว้ในรายละเอียดการเสนอราคา และมักจะเสนอขอบเขตของงาน เงื่อนไขของสัญญาซึ่งตนเองมีความคุ้นเคยหรือกล่าวได้ว่ามีความประสงค์ที่จะเสนอราคาตามเงื่อนไขของตนเอง แทนที่จะเสนอตามเงื่อนไขของผู้ซื้อ ซึ่งปกติแล้วข้อเสนอของผู้ผลิตมักจะแตกต่างไปจากความต้องการของผู้ซื้อเสมอ จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณากันอย่างรอบคอบอีกครั้งหนึ่ง

หลังจากพิจารณาโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว จะมีการพิจารณาทางด้านวิศวกรรมดังต่อไปนี้

ก. <u>พิจารณาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงไฟฟ้า และการใช้งานจากข้อมูลที่ได้รับ</u> ในกรณีนี้จำเป็นจะต้องใช้ความชำนาญในการพิจารณาชิ้นส่วนอุปกรณ์ วัสดุต่าง ๆ กระบวนการ และวิธีการเดินเครื่องจากบริษัทผู้ผลิต เพื่อให้แน่ใจว่าโรงไฟฟ้าดังกล่าวมีคุณภาพดีและเป็นที่เชื่อถือได้ในการเดินเครื่อง หากรายการใดมีข้อเสนอที่สามารถเลือกได้ (Alternative) ก็จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงข้อเสนอที่ให้เลือกนั้นว่ามีความเหมาะสมเพียงไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรพิจารณาถึงมาตรฐานและการควบคุมคุณภาพที่ผู้ผลิตใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่าง ๆ

ข. <u>พิจารณาการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้า</u> การพิจารณาแผนแบบในการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าเพื่อพิจารณาความเหมาะสมและความคล่องตัวในการปฏิบัติงาน ความสะดวกในการขนส่งและบำรุงรักษา การจัดวางและการก่อสร้างตัวอาคารอย่างเหมาะสมเพื่อความปลอดภัยและทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีสุขภาพดี และจะต้องพิจารณาถึงความสะดวกและรวดเร็ว รวมทั้งความคล่องตัวในการซ่อมแซมบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าด้วย

ค. <u>พิจารณาในด้านความปลอดภัยของโรงไฟฟ้า</u> โดยพิจารณาว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ และโรงไฟฟ้าได้ถูกออกแบบและก่อสร้างตามกฎเกณฑ์และมาตรฐานทางด้านวิศวกรรม รวมทั้งกฎเกณฑ์เกี่ยวกับความปลอดภัย ผู้ผลิตได้นำเอาข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้างมาพิจารณาในการออกแบบหรือไม่ วิเคราะห์ถึงผลที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุและวิธีการป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดอุบัติเหตุว่ามีการป้องกันมากน้อยเพียงใด

ง. <u>พิจารณาถึงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า</u> การรับประกันคุณภาพในสภาพต่าง ๆ กัน เช่น สภาพปกติ สภาพไม่ปกติ พิจารณาถึงการบำรุงรักษา การเปลี่ยนเชื้อเพลิง การตรวจสอบและทดสอบในระหว่างการเดินเครื่อง ระยะเวลาในการเติมเชื้อเพลิง และการผลิตพลังงานไฟฟ้าในขนาดกำลังผลิตต่าง ๆ กัน

นอกจากการพิจารณาทางด้านวิศวกรรมแล้ว จะต้องพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์อย่างละเอียดถี่ถ้วน โดยมีขั้นตอนในการพิจารณาดังนี้[1]

ก. กำหนดอัตราค่าปัจจุบัน (Present Worth) หนึ่งหรือสองอัตรา เพื่อแสดงค่าของทรัพยากรทั้งที่เป็นตัวเงินและอื่น ๆ ทั้งโครงการหรือเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับการก่อสร้าง

ข. รายได้และรายจ่ายทุก ๆ รายการ ยกเว้นค่าขายพลังงานไฟฟ้า จะแสดงเป็นค่าปัจจุบันของวันที่กำหนดไว้ โดยถือว่ารายได้และรายจ่ายเหล่านั้นจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอน

ค. แก้ไขปรับปรุงความแตกต่างในเรื่องขนาด การให้บริการ ของทางเลือกต่าง ๆ ให้อยู่ในพื้นฐานเดียวกัน

ง. ภายหลังเมื่อปรับปรุงแก้ไขแล้ว ให้เลือกทางเลือกที่มีค่าปัจจุบันต่ำที่สุด

ภายหลังที่ได้พิจารณาเลือกบริษัทแล้วจะต้องเจรจาต่อรองเกี่ยวกับรายละเอียดต่าง ๆ กันอีก เมื่อเป็นที่ตกลงจึงจะทำการเซ็นสัญญากับบริษัทที่ได้รับเลือก โดยในสัญญาจะระบุข้อตกลงที่จะทำขึ้นระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

4.3.4 <u>การออกแบบผลิตอุปกรณ์ การเขียนแบบ และการขนส่ง</u> (Design, Drawing and Transportation) บริษัทที่ได้รับการคัดเลือกและเซ็นสัญญาจะจัดเตรียมอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อประกอบเป็นตัวโรงไฟฟ้า อุปกรณ์เหล่านี้จะมีบางส่วนที่ตรงกับความต้องการของผู้ซื้ออยู่แล้วและทำการผลิตได้ทันที และจะมีบางส่วนที่ต้องออกแบบและจัดทำขึ้นใหม่ หลังจากที่ทำการผลิตเสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้างโดยทางเรือหรือทางเครื่องบิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์และความต้องการของผู้ซื้อ

---

[1] Ibid., pp. 75-76.

สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มีข้อแตกต่างในการดำเนินการจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมัน คือจะต้องมีมาตรการในการควบคุมคุณภาพ (Quality control) และมาตรการในการประกันคุณภาพ (Quality assurance) โดยผู้ผลิตจะต้องเสนอแผนงานของมาตรการควบคุมและการประกันคุณภาพให้แก่ผู้ซื้อและบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาทำการตรวจสอบขั้นตอนโดยละเอียดในการควบคุมคุณภาพของอุปกรณ์ชิ้นส่วน ระบบ โครงสร้างที่จำเป็นในการควบคุมคุณภาพ แผนงานดังกล่าวควรจะระบุการควบคุมแต่ละขั้นตอน เช่น การออกแบบ การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต และการขนส่ง เป็นต้น มาตรการควบคุมในการออกแบบและการเขียนแบบได้แก่การทำรายงานเก็บสถิติข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับการวิเคราะห์ การคำนวณ ข้อกำหนดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดในการออกแบบ รายการกำหนดรายละเอียดในการตรวจสอบและการทดสอบการคัดเลือกวัสดุ อุปกรณ์ วัตถุดิบ และการแก้ไขแบบ ส่วนมาตรการควบคุมในการผลิตได้แก่การควบคุมวัตถุดิบ การควบคุมขั้นตอนในการผลิต ขั้นตอนในการทดสอบ การตรวจสอบมาตรวัด (Calibration) การควบคุมมาตรฐานในการผลิต (Code and Standard) รวมทั้งการควบคุมและการประกันคุณภาพซึ่งรวมไปถึงการบรรจุหีบห่อและการขนส่ง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ทุกชิ้นได้ถูกออกแบบ ผลิต บรรจุหีบห่อ และขนส่งมายังสถานที่ก่อสร้างถูกต้องตามข้อกำหนดและมาตรฐาน

การดำเนินงานดังกล่าวทุกขั้นตอนจะต้องบันทึกไว้เป็นหลักฐานและเก็บไว้ในที่ ๆ สามารถจะเอามาตรวจสอบและยืนยันได้โดยองค์กรที่มีหน้าที่ควบคุมเกี่ยวกับความปลอดภัยโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เช่น คณะกรรมการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นต้น

การจัดระบบเก็บข้อมูล บันทึกเกี่ยวกับงานขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้จะต้องถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าและทำความตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้ผลิต รวมทั้งเป็นข้อกำหนดที่ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ด้วย

4.3.5 <u>การดำเนินการก่อสร้าง</u> (Construction) เมื่อได้ทำการคัดเลือก

ผู้ผลิตที่เหมาะสมแล้ว งานขั้นต่อไปก็ได้แก่การเตรียมรายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัยขั้นต้น (Preliminary Safety Analysis Report - PSAR) เพื่อเสนอต่อองค์กรที่มีหน้าที่ควบคุมการใช้พลังงานนิวเคลียร์เพื่อขออนุญาตที่จะดำเนินการก่อสร้างและการเดินเครื่อง โดยปกติตามระเบียบข้อบังคับจะไม่ยอมอนุญาตให้ทำการก่อสร้างจนกว่าจะได้มีการทบทวน PSAR เสียก่อน ซึ่งในบางประเทศอาจจะใช้เวลาประมาณ 1-2 ปี ในระหว่างเซ็นสัญญาจนถึงงานก่อสร้างได้เริ่มต้น ทั้งนี้เพื่อควบคุมการใช้พลังงานนิวเคลียร์ให้มีความปลอดภัยแก่ประชาชนเป็นส่วนรวม ดังนั้นสำหรับการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์โรงแรกในประเทศที่กำลังพัฒนาก็ควรจะเป็นโรงไฟฟ้าที่เคยสร้างและมีประวัติการใช้ผลิตพลังงานมานานแล้ว แม้จะเป็นแบบที่ไม่ทันสมัยมากนัก แต่ก็ควรเป็นแบบที่มีประวัติการเดินเครื่องดีเด่น มีปัญหาน้อย หรือมีปัญหาแต่ได้รับการแก้ไขแล้ว ผู้ผลิตควรจะให้เอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าประเภทนี้ ซึ่งได้รับอนุญาตให้เดินเครื่องได้ในประเทศของผู้ผลิต เพื่อให้องค์กรผู้ควบคุมการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในประเทศของผู้ซื้อสามารถทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น การเตรียม PSAR นี้ส่วนใหญ่จะเป็นหน้าที่ของผู้ผลิต ยกเว้นส่วนที่เกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้าง สภาพดินฟ้าอากาศบริเวณสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งเป็นหน้าที่ของผู้ซื้อที่จะต้องจัดทำรายงาน ในระหว่างการก่อสร้างผู้ผลิตจะต้องติดตามแก้ไข PSAR ให้เป็นไปตามข้อเท็จจริงตาม วิวัฒนาการของการออกแบบซึ่งมีการแก้ไขปรับปรุงให้เหมาะสมดียิ่งขึ้นตลอดระยะเวลาก่อสร้าง ซึ่งใช้เวลานานถึง 6 ปี เพื่อให้มั่นใจได้ว่ารายงานครั้งสุดท้าย (Final Report) ซึ่งขออนุมัติเดินเครื่องนั้นจะมีพื้นฐานอยู่ใกล้เคียงกับข้อเท็จจริง

เมื่อได้รับอนุมัติให้ดำเนินการก่อสร้างแล้ว ก็ควรจะเริ่มเตรียมสถานที่ก่อสร้าง ถนน ระบบน้ำ ระบบไฟฟ้า อาคารสถานที่ ๆ จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า ซึ่งจะต้องเตรียมไว้ให้เรียบร้อยก่อนที่บริษัทผู้ผลิตจะส่งอุปกรณ์มาถึง และเช่นเดียวกับการดำเนินการในขั้นตอนอื่น ๆ การดำเนินงานก่อสร้างโรงไฟฟ้าก็จำเป็นจะต้องมีการควบคุมคุณภาพ การประกันคุณภาพ เพื่อให้การก่อสร้างดำเนินไปอย่างถูกต้องและไม่มีอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและประชาชนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง มาตรการในการ

ควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง ได้แก่การตรวจสอบโครงสร้าง ระบบ ชิ้นส่วน การควบคุมผู้รับเหมารายย่อย การควบคุมการวัดและทดสอบอุปกรณ์ การตรวจสอบมาตรวัด (Calibration) ระบบการทำงาน การเก็บวัสดุ การขนส่ง และการติดตั้ง ขั้นตอนในการดำเนินงานดังกล่าวจะต้องทำด้วยความละเอียดรอบคอบ ต้องกำหนดและวางแผนไว้ล่วงหน้า และควบคุมโดยผู้ที่ผ่านการอบรมมาแล้ว

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โดยปกติจะต้องใช้เวลาในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ไม่น้อยกว่า 6 ปี แต่ในขณะก่อสร้างนั้นบางครั้งอาจจะเกิดปัญหาซึ่งมิได้คาดหมายมาก่อน ทำให้ต้องใช้เวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอีกระยะหนึ่ง เช่น 6 เดือน เป็นต้น จำนวนแรงงานที่ใช้ในการก่อสร้างและติดตั้งรวมทั้งหมดประมาณ 12 ล้านชั่วโมงแรงงานคน (Man - hour) หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเท่ากับคนงาน 1,000 คนทำงานตลอดระยะเวลา 6 ปี แต่ในทางปฏิบัติจำนวนแรงงานจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มทำการก่อสร้างจนกระทั่งถึงช่วงเวลาที่ต้องใช้แรงงานจำนวนสูงสุด คือประมาณ 1,000 - 2,000 คน ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาระหว่างปีที่ 2 และปีที่ 3 ของระยะเวลาในการก่อสร้าง หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ จำนวนแรงงานดังกล่าวไม่รวมถึงแรงงานที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในประเทศของผู้ผลิต และแรงงานที่ต้องใช้ในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมซึ่งต้องใช้แรงงานประมาณ 2 ล้านชั่วโมงแรงงานคน จำนวนแรงงานนั้นมิได้เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของสัญญา Turn Key หรือ Nonturn - Key Contract แต่เปลี่ยนแปลงไปตามคุณลักษณะของประเทศที่ทำการก่อสร้าง ในบางประเทศแรงงานมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้ต้องใช้แรงงานเพิ่มขึ้น งานหลักที่สำคัญของผู้เป็นเจ้าของโรงไฟฟ้ามีอยู่ 2 ประการคือ

ก. ควบคุมการดำเนินการก่อสร้าง รวมทั้งการตรวจสอบและทดสอบให้เป็นไปตามรายละเอียดและข้อกำหนด ซึ่งจะต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานประมาณ 30 - 40 คน ควบคุมงานที่ทำโดยผู้รับเหมาภายนอก โดยจะเริ่มควบคุมตั้งแต่เริ่มงานก่อสร้าง

ข. อบรมผู้ปฏิบัติงานซึ่งจะต้องมีหน้าที่รับผิดชอบในการเดินเครื่องซึ่งจะมีจำนวนประมาณ 200 - 250 คน โดยจะเริ่มอบรมภายหลังที่งานก่อสร้างได้เริ่ม

ไปแล้วชั่วระยะเวลาหนึ่ง และจะกระทำการอบรมอยู่ตลอดเวลาที่ทำการเดินเครื่อง

นอกเหนือจากงานหลักดังกล่าวแล้ว เจ้าของโรงไฟฟ้าอาจจะต้องมีความรับผิดชอบในบางส่วนของโรงไฟฟ้า เช่น ถนน ตึกที่ทำการ ระบบน้ำ ระบบไฟฟ้า บ้านพัก ที่ทำการหน่วยรักษาความปลอดภัย หน่วยบริการ หน่วยแพทย์และพยาบาล เป็นต้น หรือบางครั้งอาจจะต้องรับผิดชอบเกี่ยวกับการก่อสร้างที่เกี่ยวกับโรงไฟฟ้าโดยตรง เช่น สร้างตัวอาคารโรงไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งรับผิดชอบต่อการบริหารงานโครงการทั้งหมดในกรณีที่การก่อสร้างเป็นแบบ Nonturn - Key องค์การในบางประเทศต้องการได้ประโยชน์จากการก่อสร้างในการพัฒนาทางด้าน Technology และทางด้านความรู้ความชำนาญ รวมทั้งเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมภายในประเทศ ความรับผิดชอบที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องเพิ่มบุคลากรมากขึ้น อันมีผลกระทบกระเทือนต้นทุนการผลิตด้วย จึงต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบหากจะดำเนินนโยบายดังกล่าว

4.3.6 <u>การทดสอบและเดินเครื่อง</u> (Start up, Test and Operation) เนื่องจากการออกแบบทางด้านวิศวกรรมและการก่อสร้างของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในการดำเนินการทดสอบและเดินเครื่องจึงต้องมีระเบียบแบบแผน การประสานงาน และการวางแผนงานที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถดำเนินการไปได้ตามระยะเวลาที่ได้กำหนดไว้ และสามารถนำเอาโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เข้าสู่ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ภายในกำหนดเวลา แผนงานเกี่ยวกับการทดสอบและเดินเครื่องสามารถจะแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้

ก. <u>การทดสอบงานก่อสร้างและติดตั้ง</u> (Construction prove and testing) ซึ่งจะแบ่งงานทดสอบเป็น 3 อย่างดังนี้

1. <u>System Flushing</u> เป็นงานทดสอบที่ใช้ของเหลว เช่น น้ำ ทำความสะอาดท่อต่าง ๆ ในแต่ละระบบของโรงไฟฟ้า

2. <u>Strength testing</u> เป็นการทดสอบความแข็งแรงของการก่อสร้าง ซึ่งโดยปกติจะใช้วิธี Hydrostatic test คืออัดของเหลว เช่น น้ำเข้า

ไปในอุปกรณ์ด้วยความดันที่กำหนดให้ เป็นการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้าง รอยต่อ รอยเชื่อม เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์ทุกชิ้นสามารถจะทนต่อแรงดันได้ทั้งในการทำงานปกติและการทำงานที่มีเหตุขัดข้อง

3. Electrical and instrument check เป็นการทดสอบระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์เครื่องวัด เครื่องควบคุม เพื่อแสดงว่าระบบแต่ละระบบนั้นได้ติดตั้งและมีการทำงานอย่างถูกต้อง

ข. การทดสอบก่อนการเดินเครื่อง (Pre - operational testing) คือการทดสอบการทำงานของระบบโดยเฉพาะแต่ละระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบการทำงานของระบบย่อยทุก ๆ ระบบเพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานของแต่ละระบบนั้นเป็นไปอย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบและกำหนดไว้

ค. การทดสอบการเดินเครื่อง (Plant start - up testing) คือการทดสอบอย่างละเอียดของทุก ๆ ระบบพร้อมกัน เพื่อดูว่าโรงไฟฟ้าทั้งโรงสามารถจะทำงานได้ด้วยความถูกต้องเพียงไร และมีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่

งานทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวจะต้องดำเนินไปตามระยะเวลาและแผนงานที่ได้กำหนดไว้ หมายกำหนดการเกี่ยวกับการทดสอบและเดินเครื่องได้แสดงไว้ในรูปที่ 31 โดยปกติเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะเริ่มติดตั้งในปีที่ 2 ของโครงการ และการเติมเชื้อเพลิงจะกระทำในปีที่ 5 ของโครงการ โดยทั่วไประยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มักจะใช้เวลาประมาณ 5.5 ปี นับจากงานก่อสร้างได้เริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้จากหมายกำหนดการในรูปที่ 31 ว่าการทดสอบงานก่อสร้างและติดตั้งจะเริ่มต้นประมาณเดือนที่ 42 นับจากงานก่อสร้างได้เริ่มต้น และจะใช้เวลาประมาณ 5 เดือน สำหรับการทดสอบก่อนการเดินเครื่องจะเริ่มทดสอบประมาณเดือนที่ 47 นับจากการเริ่มก่อสร้าง และจะใช้เวลาประมาณ 12 เดือนเพื่อให้มีเวลาเพียงพอสำหรับการทดสอบแต่ละระบบ หลังจากทำการทดสอบแล้วจะต้องรายงานผลการทดสอบนี้ไปยังคณะกรรมการควบคุมการใช้พลังงานปรมาณูเพื่อสันติเพื่อพิจารณา ถ้าคณะกรรมการพิจารณาแล้วและพอใจในผลการทดสอบก็จะออกใบอนุญาตให้บรรจุเชื้อเพลิงได้ในเดือน

รูปที่ 31

NUCLEAR PLANT TESTING SCHEDULE

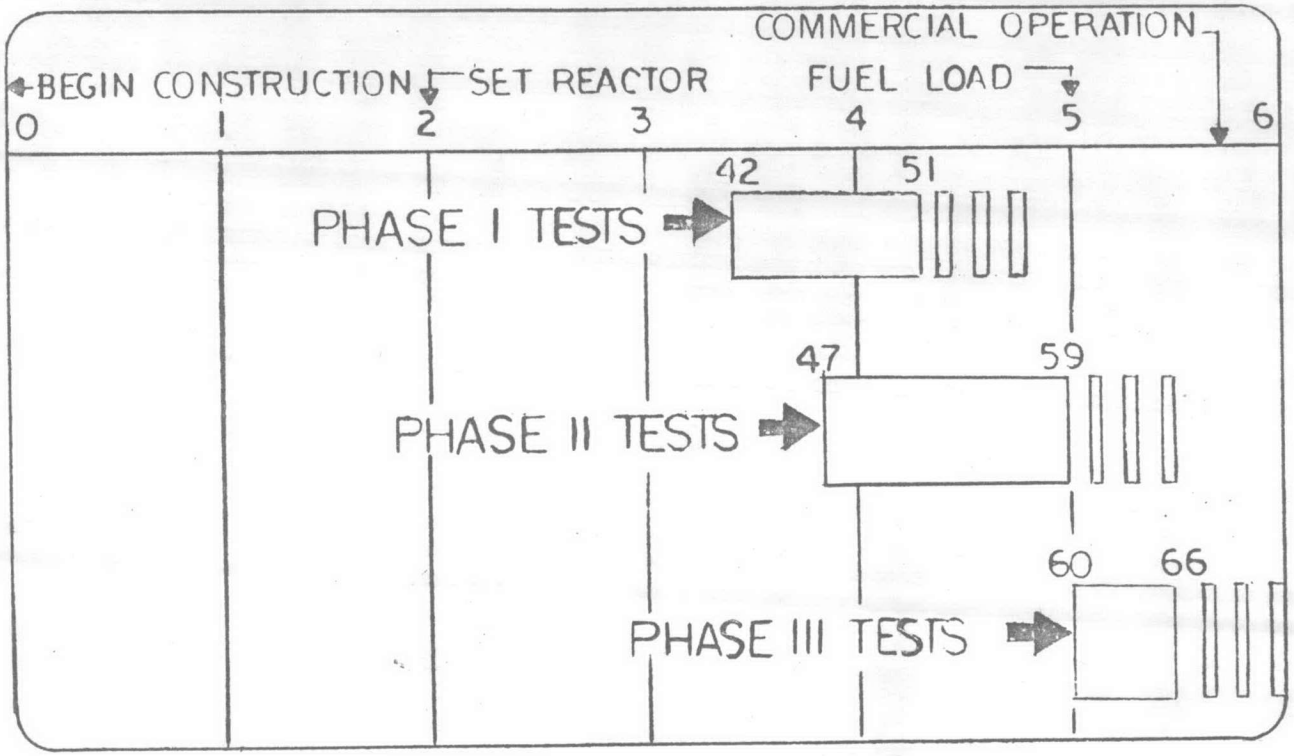


EXHIBIT "E"

SARGENT & LUNDY ENGINEERS CHICAGO

NUCLEAR FIELD SERVICES DIVISION

FORM NFSD - 1001.3 (7/21/76)

ที่ 60 การทดสอบการเดินเครื่องจะกระทำไปพร้อม ๆ กับการบรรจุเชื้อเพลิง และใช้ระยะเวลาการทดสอบประมาณ 6 เดือน ซึ่งถ้าสำเร็จเรียบร้อยตามแผนงานแล้วก็จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ภายใน 5.5 ปี หลังจากเริ่มงานก่อสร้าง

หลักการสำคัญในการทำงานด้านการทดสอบและเดินเครื่องก็คือ การควบคุมหมายกำหนดการและการดำเนินการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และระบบของอุปกรณ์นั้น ๆ ให้เป็นไปตามลำดับที่ได้วางแผนงานไว้ เมื่อเรียงลำดับขั้นตอนในการทดสอบขั้นที่ 1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงจะดำเนินการทดสอบเรียงตามลำดับของงานขั้นที่ 2 เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าในระยะงานก่อสร้างขั้นแรกผู้ก่อสร้างจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงงานที่จะเข้าไปเริ่มดำเนินการได้ก่อน หลักการสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคือ ความง่ายในการก่อสร้างและติดตั้ง ประสิทธิภาพและความประหยัด แต่เมื่องานก่อสร้างได้ดำเนินไปประมาณครึ่งหนึ่งแล้ว ผู้ก่อสร้างจำเป็นจะต้องพยายามบริหารงานเพื่อให้หมายกำหนดการแล้วเสร็จของอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปตามหมายกำหนดการของการทดสอบทั้ง 3 ขั้นตอน หากการดำเนินการดังกล่าวล้มเหลว ระบบอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นในการทดสอบไม่แล้วเสร็จหรือเสร็จภายหลังกำหนดการทดสอบ งานและขั้นตอนในการทดสอบก็จะยุ่งเหยิงซับซ้อนและเสียเวลามากโดยไม่จำเป็น การจัดทำหมายกำหนดการเกี่ยวกับอุปกรณ์และการทดสอบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ควรจะกำหนดส่วนของงานที่สำคัญ ๆ ลงไปด้วย เช่น วิธีการเกี่ยวกับการทำความสะอาดระบบท่อต่าง ๆ (System Flushing procedure) วิธีการในการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้าง (Hydro leak test procedure) วิธีการทดสอบทางด้านไฟฟ้าและอุปกรณ์เครื่องวัด (Electrical and instrumentation test procedure) เป็นต้น หลังจากกำหนดประเภทงานต่าง ๆ ที่จำเป็นจะต้องทำแล้ว งานขั้นต่อไปคือมอบหมายผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องทำหน้าที่ดังกล่าว ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยผู้ปฏิบัติงานจากบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา ผู้เชี่ยวชาญจากบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้า และผู้ปฏิบัติงานจากเจ้าของโรงไฟฟ้านั้น ๆ เจ้าหน้าที่เหล่านี้จะมีหน้าที่ตั้งแต่วางแผน จัดเตรียมร่างข้อกำหนดวิธีการทดสอบ การบันทึกการทดสอบ การเลือกผู้ปฏิบัติงานในการทดสอบ จำนวนชั่วโมงทำงานของผู้ปฏิบัติงาน

เหล่านี้ (manhour) ในการดำเนินการทดสอบและเดินเครื่องจะมีประมาณ 400,000 manhours

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะทำให้การก่อสร้างโรงไฟฟ้า การทดสอบและการเดินเครื่องดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและเป็นไปตามหมายกำหนดการที่ได้วางไว้ คือการเตรียมการทางด้านบุคลากร พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้เป็นวิธีการที่ต้องใช้ความรู้ทางด้านเทคนิคสูงสุด ผู้ซื้อโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จะต้องสำนึกถึงความรับผิดชอบและความสำคัญของการเดินเครื่อง ต้องเข้าใจถึงความซับซ้อนยุ่งยากของการออกแบบก่อสร้างและการเดินเครื่อง จำเป็นจะต้องมีการพัฒนาด้านบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถเหมาะสมที่จะเดินเครื่องได้ด้วยความเรียบร้อยและปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่องค์การพลังงานปรมาณูของประเทศนั้น ๆ กำหนดขึ้น จำนวนผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ไม่แตกต่างไปจากผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันมากนัก แต่คุณวุฒิและคุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นั้นจำเป็นต้องมีประสบการณ์ในด้านโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันมาแล้วพอสมควร และได้รับการอบรมเกี่ยวกับพื้นความรู้ทางด้านนิวเคลียร์อีกประมาณ 6-8 เดือน รวมทั้งผ่านการฝึกงานในระหว่างการทดลองการเดินเครื่องอีกประมาณ 1 ปี จึงจะนับว่าเป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถได้รับความไว้วางใจให้เดินเครื่องในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ได้ ในประเทศที่พัฒนาแล้วบางประเทศ เช่นสหรัฐอเมริกา เจ้าหน้าที่บางระดับอย่างน้อยกว่าร้อยละ 50 จำเป็นจะต้องผ่านการสอบเพื่อรับใบอนุญาตซึ่งจัดให้มีการสอบโดยองค์การควบคุมการใช้พลังงานนิวเคลียร์ จำนวนผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เฉพาะด้านการเดินเครื่องจะมีประมาณ 200-250 คน ในจำนวนนี้มีประมาณร้อยละ 40 จะต้องได้รับการฝึกอบรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ อีกร้อยละ 60 จะต้องได้รับการฝึกอบรมอย่างน้อยที่สุดจากในประเทศ ผู้ที่จะสามารถช่วยเหลือเกี่ยวกับการฝึกอบรมนี้มักจะได้แก่บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ซึ่งขายอุปกรณ์ให้แก่ผู้ซื้อโรงไฟฟ้า และบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา เป็นต้น

อุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่สามารถช่วยเหลือผู้ปฏิบัติงานให้ได้รับความชำนิชำนาญในการเดินเครื่องได้เป็นอย่างดีคือ Simulator ซึ่งเป็นแผงจำลองห้องควบคุมที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถเลียนแบบลักษณะอาการที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด โดยจำลองสภาพการทำงานตามปกติและเมื่อมีเหตุขัดข้องรวมทั้งปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อให้ผู้เข้ารับการอบรมได้ฝึกหัดแก้ไขให้เกิดความชำนาญ ในประเทศที่กำลังพัฒนา เช่นประเทศไทย ปัญหาการเตรียมเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่ง ควรที่ฝ่ายบริหารจะต้องเอาใจใส่และมีนโยบายที่แน่นอน ไม่เฉพาะแต่เจ้าหน้าที่ฝ่ายเดินเครื่องเท่านั้น แต่เจ้าหน้าที่ฝ่ายอื่น ๆ ก็ควรจะผ่านการฝึกอบรมด้วย เนื่องจากยังไม่มีโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มาก่อน เช่น เจ้าหน้าที่ฝ่ายบำรุงรักษา เจ้าหน้าที่ที่มีหน้าที่ดูแลตรวจตราให้เป็นไปตามระเบียบข้อบังคับ เจ้าหน้าที่ที่ต้องรับผิดชอบในการดูแลขนถ่ายและเก็บรักษาสารวัสดุกัมมันตภาพรังสี นายแพทย์ นักวิทยาศาสตร์ทางด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ และทางด้าน health physic เป็นต้น

การที่กล่าวถึงหัวข้อนี้ค่อนข้างละเอียดก็เพื่อจะเน้นให้เห็นถึงความแตกต่างทางด้านการทดสอบและเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าทั้งสองชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมาก

ลำดับขั้นการดำเนินงานของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 15

4.4 ต้นทุนค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้า

4.4.1 สมมุติฐาน ในการคำนวณหาต้นทุนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าจำเป็นต้องมีข้อมูลหรือข้อสมมุติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ดังนี้

1. ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	636
2. ระยะเวลาคิดค่าเสื่อมราคา (ปี)	25
3. ระยะเวลาในการก่อสร้าง (ปี)	6

ตารางที่ 15 ลำดับขั้นการดำเนินงานของโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

FILE NO	DESCRIPTION	2521	2522	2523	2524	2525	2526	2527	2528	2529
	การสำรวจ และจัดเตรียมสถานที่ Site Investigation and Feasibility Study									
	การเสนอรายละเอียด Specification									
	การเปิดประมูล และเซ็นสัญญา Bidding & Negotiation									
	การออกแบบผลิตอุปกรณ์ การเขียนแบบ และการขนส่ง Design , Manufacture , Drawing and Transportation									
	การดำเนินการก่อสร้าง Construction									
	การทดสอบ และการเดินเครื่อง Test & Operation									

4. อัตราดอกเบี้ย (ร้อยละต่อปี) 10

5. อัตราเพิ่มของค่าใช้จ่ายต่อปี (ร้อยละ)

อุปกรณ์ต่างประเทศ 6

อุปกรณ์ในประเทศ 6

ค่าแรงงานภายในประเทศ 10

ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา 6

ค่าเชื้อเพลิง 5.8

6. ค่าภาษีเครื่องจักรและอุปกรณ์ (ร้อยละของราคาเครื่องจักรและอุปกรณ์) 10

7. อัตราแลกเปลี่ยน 1 เหรียญสหรัฐเท่ากับ 20.50 บาท

4.4.2 <u>การประเมินค่าลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้า</u>

ก. <u>เงินลงทุน</u> ประกอบด้วย ค่าที่ดิน ค่าอาคารต่าง ๆ และการปรับปรุงพื้นที่ ค่าอุปกรณ์สำหรับตัวโรงไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู กังหันไอน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น Switchboard, Switchgear, เครื่องสูบลม เครื่องสูบน้ำ ค่าอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดสำหรับตัวโรงไฟฟ้า เช่น เครื่องมือสื่อสาร ไฟฟ้าแสงสว่างในตัวอาคาร เครื่องปรับอากาศ รวมทั้งค่าหม้อแปลงไฟฟ้าและ Circuit breaker

ในการคำนวณต้นทุนของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เนื่องจากยังไม่มีโรงไฟฟ้าชนิดนี้ในประเทศไทยมาก่อน จึงจะใช้ประสบการณ์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ เหมือนกับการคำนวณต้นทุนบางชนิดของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันไม่ได้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้ใช้ตัวเลขมาตรฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดกำลังผลิต 1,000 เมกกะ-วัตต์ ของหมวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ทั้งหมด โดยปรับตัวเลขเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมัน กล่าวคือ ปรับเกี่ยวกับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า (Size Adjustment) เวลาเริ่มทำการก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Time Adjustment)

และปรับเกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Location Adjustment) เพื่อให้เข้ากับสภาพการณ์ของประเทศไทย เงินลงทุนทั้งหมดที่ประเมินได้มีจำนวน 5,301.40 ล้านบาท ซึ่งในจำนวนนี้รวมค่าที่ดินที่ใช้ในการก่อสร้างจำนวน 55.35 ล้านบาท เงินลงทุนทั้งหมดจะมีจำนวนประมาณร้อยละ 34.57 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด

ตัวเลขมาตรฐานของโรงไฟฟ้าขนาด 1,000 เมกกะวัตต์ ของ IAEA ได้แสดงไว้ในตารางที่ 16 ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับเงินลงทุนได้แสดงไว้ในตารางที่ 17 พร้อมทั้งตัวอย่างการปรับตัวเลขต้นทุนมาตรฐานให้เข้ากับสภาพการณ์ในประเทศไทยดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 16

ต้นทุนมาตรฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดกำลังผลิต 1,000 เมกกะวัตต์

	ต้นทุนรวม (ล้านเหรียญ)	ตัวยกกำลัง	อัตราส่วนของค่าใช้จ่าย		
			ค่าอุปกรณ์	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
ACCT.21 อาคารต่าง ๆ และการปรับปรุงพื้นที่	C(1)= 41.40	N(1) = .40	EF(1) = .04	MF(1) = .38	LF(1) = .58
ACCT.22 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	C(2)= 69.54	N(2) = .60	EF(2) = .63	MF(2) = .13	LF(2) = .24
ACCT.23 กังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	C(3)= 67.50	N(3) = .80	EF(3) = .62	MF(3) = .12	LF(3) = .26
ACCT.24 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ	C(4)= 24.88	N(4) = .60	EF(4) = .28	MF(4) = .20	LF(4) = .52
ACCT.25 อุปกรณ์เบ็ดเตล็ดสำหรับตัวโรงไฟฟ้า	C(5)= 4.60	N(5) = .30	EF(5) = .38	MF(5) = .17	LF(5) = .45

F 91 ค่าบริการและสิ่งอำนวยความสะดวกในการก่อสร้าง = .80

F 92 ค่าบริหารงานในการก่อสราง ค่าวิศวกรรมและค่าประกันคุณภาพ = 1.17

F 93 ค่าภาษีขาเข้า = .76

ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้ามาตรฐาน (Base Size) SS = 1,000 เมกกะวัตต์

ปีฐาน (Base Year) YB = พ.ศ. 2514

สถานที่ก่อสร้าง (Base Location) ใจกลางเมือง

ต้นทุนค่าที่ดิน (Cost of Land) CL = .000 ล้านเหรียญ

ที่มา : หน่วงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency)

หมายเหตุ

ACCT = Account = รหัสบัญชี

C = Cost = ต้นทุน

N = Exponent = ตัวยกกำลัง

EF = Equipment Factor = อัตราส่วนค่าอุปกรณ์

MF = Material Factor = อัตราส่วนค่าวัสดุ

LF = Labor Factor = อัตราส่วนค่าแรง

ตารางที่ 17

การประมาณต้นทุนค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

(ล้านบาท)

	ค่าอุปกรณ์และค่าวัสดุ		ค่าแรงในประเทศ	รวม
	เงินตราต่างประเทศ	เงินตราในประเทศ		
เงินลงทุน				
1. ที่ดิน	-	55.35	-	55.35
2. อาคารต่าง ๆ และการปรับปรุงพื้นที่	335.29	263.45	293.92	892.66
3. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	1,718.28	35.07	186.60	1,939.95
4. กังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1,438.96	75.73	179.25	1,693.94
5. อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ	381.60	7.79	144.68	534.07
6. อุปกรณ์เบ็ดเตล็ดสำหรับตัวโรงไฟฟ้า	88.44	6.66	26.48	121.58
7. หม้อแปลงไฟฟ้า และ Circuit breaker	50.26	4.37	9.22	63.85
รวมเงินลงทุน (ยกเว้นที่ดิน)	4,012.83	393.07	840.15	5,246.05
รวมเงินลงทุนทั้งหมด (รวมค่าที่ดิน)	4,012.83	448.42	840.15	5,301.40
ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง				
8. ค่าบริการและสิ่งอำนวยความสะดวกในการก่อสร้าง	280.90	27.51	58.81	367.22

ตารางที่ 17

การประมาณต้นทุนค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ (ต่อ)

(ล้านบาท)

	ค่าอุปกรณ์และค่าวัสดุ		ค่าแรงในประเทศ	รวม
	เงินตราต่างประเทศ	เงินตราในประเทศ		
9. ค่าบริหารงานในการก่อสร้าง ค่าวิศวกรรม และค่าประกันคุณภาพ	1,347.19	112.27	112.27	1,571.73
10. ค่าเริ่มเดินเครื่อง	-	30.75	-	30.75
11. ค่าฝึกอบรม	102.50	-	20.50	123.00
12. ค่าเครื่องอะไหล่	120.38	-	-	120.38
13. ค่าระวาง ค่าประกันภัย และค่าขนส่ง	413.32	3.93	-	417.25
14. ค่าภาษีขาเข้า	-	454.65	-	454.65
15. ค่าเบ็ดเตล็ด	802.57	78.61	168.03	1,049.21
รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	3,066.86	707.72	359.61	4,134.19
16. ค่าเพิ่มราคาระหว่างการก่อสร้าง	1,898.80	258.35	266.42	2,423.57
รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและค่าเพิ่มราคา	4,965.66	966.07	626.03	6,557.76
17. ค่าดอกเบี้ยระหว่างการก่อสร้าง	-	3,476.54	-	3,476.54
รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทั้งหมด	4,965.66	4,442.61	626.03	10,034.30
รวมต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด	8,978.49	4,891.03	1,466.18	15,335.70

ที่มา : ฝ่ายวิทยาการพลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

การคำนวณต้นทุนค่าอาคารต่าง ๆ และการปรับปรุงพื้นที่ (892.66 ล้านบาท)

ก. สมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

1. ต้นทุนจะประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ (Equipment) ร้อยละ 4 ค่าวัสดุ (Material) ร้อยละ 38 และค่าแรง (Labor) ร้อยละ 58 ของต้นทุนรวม (ตารางที่ 16)

2. ค่าเพิ่มราคาตั้งแต่ 1 มกราคม 2514 - 30 มิถุนายน 2519 เป็นดังนี้

ค่าอุปกรณ์ร้อยละ	(ต่อปี)	6.5
ค่าวัสดุร้อยละ	(ต่อปี)	6.5
ค่าแรงร้อยละ	(ต่อปี)	10

3. ค่าเพิ่มราคาตั้งแต่ 1 กรกฎาคม 2519 - 31 ธันวาคม 2521 เป็นดังนี้

ค่าอุปกรณ์ร้อยละ	(ต่อปี)	6
ค่าวัสดุร้อยละ	(ต่อปี)	6
ค่าแรงร้อยละ	(ต่อปี)	10

4. การปรับเกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้าง (Location adjustment) ใช้เลขดัชนีดังนี้

ค่าอุปกรณ์	1.05
ค่าวัสดุ	1.00
ค่าแรง	0.30

ข. วิธีการคำนวณ

1. การปรับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า (Size adjustment)

ใช้สูตร $CC = C \times (\frac{S}{SS})^N$

CC = ราคาโรงไฟฟ้าที่ต้องการคำนวณ

C = ราคาโรงไฟฟ้ามาตรฐาน

S = ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าที่ต้องการคำนวณ

SS = ขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้ามาตรฐาน

N = ตัวยกกำลังซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S และ SS

2. <u>การปรับเกี่ยวกับเวลาเริ่มทำการก่อสร้างโรงไฟฟ้า</u> (Time adjustment)

ใช้สูตร $CC_1 = CC\ (1 +$ อัตราค่าเพิ่มราคา$)^{ปี}$

3. <u>การปรับเกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า</u> (Location adjustment)

ใช้สูตร $CC_2 = CC_1 \times$ ดัชนีราคา

ค. <u>การคำนวณ</u> (ล้านเหรียญสหรัฐ)

1. <u>การคำนวณค่าอุปกรณ์</u>

ต้นทุนค่าอุปกรณ์ = ต้นทุนรวม x อัตราส่วนของค่าอุปกรณ์

= 41.4 x .04

= 1.656

ปรับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า (Size adjustment) $= 1.656 \times \left(\frac{636}{1,000}\right)^{0.4}$

$= 1.3817$

ปรับเวลาเริ่มทำการก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Time adjustment) $= 1.3817 \times (1+0.065)^{5.5} \times (1 + 0.06)^{2.5}$

$= 2.2599$

ปรับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Location adjustment) $= 2.2599 \times 1.05$

$= 2.373$

2. การคำนวณค่าวัสดุ

ต้นทุนค่าวัสดุ = ต้นทุนรวม x อัตราส่วนของค่าวัสดุ

= 41.4 x .38

= 15.732

ปรับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า = $15.732 \times \left[\frac{636}{1,000}\right]^{0.4}$

(Size adjustment) = 13.1270

ปรับเวลาเริ่มทำการก่อสร้าง - = $13.1270 \times (1+0.065)^{5.5}$

โรงไฟฟ้า $\times (1+0.06)^{2.5}$

(Time adjustment) = 21.4710

ปรับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า = 21.4710 x 1.00

(Location adjustment) = 21.471

3. การคำนวณค่าแรง

ต้นทุนค่าแรง = ต้นทุนรวม x อัตราส่วนของค่าวัสดุ

= 41.4 x .58

= 24.012

ปรับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า = $24.012 \times \left[\frac{636}{1,000}\right]^{0.4}$

(Size adjustment) = 20.0360

ปรับเวลาเริ่มทำการก่อสร้าง - = $20.0360 \times (1+0.10)^{5.5}$

โรงไฟฟ้า $\times (1+0.10)^{2.5}$

(Time adjustment) = 42.948944

ปรับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า = 42.948944 x .30

(Location adjustment) = 12.885

รวมต้นทุนค่าอาคารต่าง ๆ และ = ต้นทุนค่าอุปกรณ์ + ต้นทุนค่าวัสดุ

การปรับปรุงพื้นที่ + ต้นทุนค่าแรง

= 2.373 + 21.471 + 12.885

= 36.729

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ปรับปรุงราคาเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 18.5

= 36.729 x 1.185

= 43.524 ล้านเหรียญสหรัฐ

ราคาต้นทุนเป็นเงินบาท = 43.524 x 20.5

= 892.24 ล้านบาท

ข. <u>ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง</u> ได้แก่ค่าบริการและสิ่งอำนวยความสะดวกในการก่อสร้าง ค่าบริหารงานในการก่อสร้าง ค่าวิศวกรรม และค่าประกันคุณภาพ ค่าใช้จ่ายในการเริ่มเดินเครื่อง ค่าฝึกอบรมพนักงานที่จะต้องทำงานในโครงการนี้ ค่าเครื่องอะไหล่ ค่าระวาง ค่าประกันภัย ค่าขนส่ง ค่าภาษีขาเข้า และค่าเบ็ดเตล็ด รวมทั้งค่าดอกเบี้ยและค่าเพิ่มราคาระหว่างการก่อสร้าง ข้อที่ควรสังเกตคือ โครงการที่ใช้เวลาในการก่อสร้างนาน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเงินลงทุน ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 17 ว่าค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทั้งหมดมีจำนวนประมาณ 10,034.30 ล้านบาท หรือร้อยละ 65.43 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด ในขณะที่เงินลงทุนทั้งหมดมีจำนวนประมาณ 5,301.40 ล้านบาท หรือร้อยละ 34.57 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากค่าดอกเบี้ยเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการก่อสร้างตามสมมุติฐานซึ่งใช้อัตราดอกเบี้ยระหว่างการก่อสร้างร้อยละ 10 ต่อปี และใช้เวลาในการก่อสร้าง 6 ปีนั้น ค่าดอกเบี้ยระหว่างการก่อสร้าง (3,476.54 ล้านบาท) จะสูงถึงร้อยละ 29.31 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมดเมื่อยังไม่รวมค่าดอกเบี้ย (11,859.16 ล้านบาท)

ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ประเมินได้มีจำนวน 4,134.19 ล้านบาท หรือประมาณร้อยละ 26.96 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด ถ้ารวมค่าดอกเบี้ยระหว่างการก่อสร้างจำนวน 3,476.54 ล้านบาท จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 49.63 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด และเมื่อรวมค่าเพิ่มราคาจำนวน 2,423.57 ล้านบาท จะเป็นค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทั้งหมด 10,034.30 ล้านบาท หรือประมาณร้อยละ 65.43 ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด

ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างนั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ได้ใช้ตัวเลขมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ทั้งหมด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก และนำมาปรับตัวเลขใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการณ์ในประเทศไทย เช่น การปรับเกี่ยวกับขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า (Size adjustment) เวลาเริ่มทำการก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Time adjustment) และปรับเกี่ยวกับสถานที่ก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Location adjustment) ซึ่งเป็นการปรับตัวเลขในทำนองเดียวกันกับการคำนวณเงินลงทุน

ในการแยกต้นทุนเป็นเงินตราต่างประเทศและเงินตราในประเทศก็ใช้วิธีการเดียวกัน กล่าวคือ ใช้ตัวเลขมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ทั้งหมด และปรับตัวเลขใหม่ให้เหมาะสมกับสภาพการณ์ในประเทศไทย ซึ่งภายหลังการปรับปรุงแล้วการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ สามารถประมาณได้ว่าอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เป็นเงินตราต่างประเทศและเงินตราในประเทศจะเป็นดังนี้

	เงินตราต่างประเทศ (%)	เงินตราในประเทศ (%)
ค่าอาคารต่าง ๆ และการปรับปรุงพื้นที่	56	44
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	98	2
กังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	95	5
อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ	98	2
อุปกรณ์เบ็ดเตล็ดสำหรับตัวโรงไฟฟ้า	93	7
หม้อแปลงไฟฟ้าและ Circuit breaker	92	8
ค่าบริการและสิ่งอำนวยความสะดวกในการก่อสร้าง	91	9
ค่าบริหารงานในการก่อสร้าง ค่าวิศวกรรมและค่าประกันคุณภาพ	92	8

	เงินตราต่างประเทศ (%)	เงินตราในประเทศ (%)
ค่าเครื่องอะไหล่	100	-
ค่าระวาง ค่าประกันภัย และค่าขนส่ง	99	1
ค่าเบ็ดเตล็ด	91	9

เมื่อรวมเงินลงทุนทั้งหมดจำนวน 5,301.40 ล้านบาท กับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทั้งหมด 10,034.30 ล้านบาท จะเป็นต้นทุนค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าทั้งหมด 15,335.70 ล้านบาท ซึ่งเป็นต้นทุนส่วนที่คงที่

4.5 ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance)

การเดินเครื่องจะเริ่มภายหลังจากการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในตำแหน่งสำคัญ ๆ ของโรงไฟฟ้าและห้องควบคุมเครื่อง (Control room) จะต้องมีผู้ควบคุมประจำการผลัดเปลี่ยนกันตลอดเวลา 24 ชั่วโมงที่มีการเดินเครื่อง เพื่อควบคุมการทำงานและป้องกันมิให้เกิดอุบัติเหตุ ส่วนการส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั้น ผู้ควบคุมจะทำตามที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้ากลางสั่งมา เช่นในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าน้อยก็อาจจะมีการลดกำลังผลิตลง และในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มก็จะทำการเพิ่มกำลังผลิตให้เพียงพอกับความต้องการ โดยคำนึงถึงสภาพและกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า ในขณะที่โรงไฟฟ้าส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั้น เชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะถูกใช้ไปอย่างช้า ๆ ชั่วระยะเวลาหนึ่ง (อาจเป็นปีหรือหลายปี) หลังจากนั้นจำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องเพื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันถ้าตรวจพบว่ามีส่วนใดส่วนหนึ่งของโรงไฟฟ้าชำรุดเสียหาย หรือเริ่มจะเสื่อมคุณภาพก็จะต้องทำการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมไปพร้อม ๆ กันกับการเปลี่ยนเชื้อเพลิง เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลักสำคัญ ฉะนั้นในแต่ละปีจึงต้องมีการหยุดเดินเครื่องเพื่อตรวจซ่อมครั้งใหญ่เสมอ จึงมักจะทำการซ่อมแซมครั้งใหญ่ในขณะที่เปลี่ยนเชื้อเพลิง ซึ่งจะใช้เวลาในการตรวจสอบและซ่อมแซมประมาณปีละ 2 เดือน

หมวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ได้ทำรายงานวิเคราะห์การขยายระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศกำลังพัฒนาซึ่งรวมทั้งประเทศไทยด้วยเมื่อ พ.ศ. 2516 และได้ประมาณค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ไว้ประมาณ 6.56 บาทต่อกิโลวัตต์-เดือน หรือประมาณปีละ 47.23 ล้านบาท ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาในปีปัจจุบัน (2521) ประมาณ 8.78 บาทต่อกิโลวัตต์-เดือน หรือประมาณปีละ 63.19 ล้านบาท และในปีที่เดินเครื่องโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งจะสร้างที่อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี (ต.ค. 2528) จะเป็น 13.79 บาทต่อกิโลวัตต์-เดือน หรือประมาณปีละ 99.28 ล้านบาท ทั้งนี้โดยสมมุติว่าอัตราเพิ่มเป็นร้อยละ 6 ต่อปี

4.6 ค่าเชื้อเพลิง (Nuclear Fuel Cost)

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้

ก. ค่าแร่ยูเรเนียม แร่ยูเรเนียมมีอยู่ในธรรมชาติ วัสดุพื้นฐานเหล่านี้จะถูกแยกด้วยวิธีการทางเคมีจนกระทั่งได้ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) หรือที่รู้จักกันในนามของ Yellow Cake สารประกอบยูเรเนียมนี้จะมียูเรเนียมที่สำคัญอยู่ 2 ไอโซโทป คือยูเรเนียม 235 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง และยูเรเนียม 238 ในอัตราส่วนร้อยละ 0.7 และ 99.3 ตามลำดับ ยูเรเนียมมีราคาประมาณกิโลกรัมละ 1,807.80 บาท

ข. ค่าเปลี่ยนแร่ยูเรเนียมออกไซด์(U_3O_8) ยูเรเนียมออกไซด์มีลักษณะเป็นผงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแกส (Uranium hexa fluoride - UF_6) เพื่อจะนำเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความเข้มข้น ค่าเปลี่ยนสถานะของผงแร่ยูเรเนียมให้เป็นแกสประมาณ 74.60 บาทต่อ 1 กิโลกรัมของแร่ยูเรเนียม

ค. ค่าบริการทำยูเรเนียมให้เข้มข้น (Enrichment) เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทั้งสองไอโซโทปเปลี่ยนไปตามความต้องการ

เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เช่นในกรณีของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ชนิดใช้น้ำธรรมดาเป็น Moderator และตัวระบายความร้อน (Light Water Moderated Reactor - LWR) มักจะใช้ความเข้มข้นของยูเรเนียม 235 ประมาณร้อยละ 3 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 97 เป็นยูเรเนียม 238 ค่าบริการทำยูเรเนียมเข้มข้นจากสำนักงานบริหารการวิจัยและพัฒนาพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (Energy Research and Development Administration - ERDA) ประมาณ 1,705.60 บาทต่อหน่วยบริการ (Separative Work Unit - SWU) ราคานี้จะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 ต่อปี และอาจปรับปรุงเป็นครั้งคราวตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน

ง. <u>ค่าประกอบเชื้อเพลิง</u> (Fabrication) เป็นการนำยูเรเนียมเข้มข้นไปอัดเป็นแท่งเล็ก ๆ (Pellet) แล้วใส่ในหลอด Zirconium Alloy เพื่อประกอบเป็นมัดเชื้อเพลิงให้อยู่ในสถานะและรูปร่างที่เหมาะสมในการนำไปใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในโรงไฟฟ้าต่อไป โดยปกติบริษัทที่ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมักจะเป็นผู้ประกอบเชื้อเพลิงด้วย ค่าประกอบเชื้อเพลิงรวมทั้งค่าขนส่งประมาณ 1,921.50 บาทต่อกิโลกรัมยูเรเนียม

จ. <u>ค่าขนส่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว</u> เชื้อเพลิงที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมักจะมีอายุใช้งานประมาณ 3 ปี แต่เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงและเหตุผลทางด้านเทคนิคอื่น ๆ จึงกำหนดให้เปลี่ยนเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูปีละครั้ง ครั้งละ 1/4 - 1/3 ของเชื้อเพลิงทั้งหมดในแกนปฏิกรณ์ เชื้อเพลิงใช้แล้วจะนำไปเก็บไว้ในบ่อเชื้อเพลิงชั่วระยะเวลาหนึ่งประมาณ 4 เดือนเพื่อลดระดับรังสีและความร้อน จากนั้นจึงขนส่งไปสกัดแร่ยูเรเนียมที่ยังตกค้างอยู่ซึ่งมีประมาณถึงร้อยละ 95 และสกัดแร่พลูโตเนียมที่เกิดขึ้นใหม่ในระหว่างการใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้หรือจำหน่าย เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วมีรังสี ดังนั้นการขนส่งจึงต้องทำด้วยความระมัดระวังทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วประมาณกิโลกรัมละ 1,025 บาท

ฉ. <u>ค่าสกัดแร่จากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว</u> เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วจะมียูเรเนียมเหลือจากการใช้ดังกล่าวข้างต้นประมาณร้อยละ 95 จึงมีค่าใช้จ่ายในการสกัดแร่ยูเรเนียม

เพื่อนำกลับมาใช้อีกกิโลกรัมละ 2,648.60 บาท และค่าเปลี่ยนสารเหลือใช้ให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมกิโลกรัมละ 164 บาท ทั้งนี้ได้รวมค่าใช้จ่ายในการขจัดกากรังสีด้วย

ขั้นตอนในการดำเนินงาน รวมทั้งค่าใช้จ่ายทั้งหมดเกี่ยวกับเชื้อเพลิงได้สรุปไว้ในตารางที่ 18

ตารางที่ 18
สรุปค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ชนิดของงาน	ราคาปี 2519 (บาทต่อกิโลกรัม)	อัตราเพิ่มของราคา (ร้อยละต่อปี)
ค่าแร่ยูเรเนียม	1,807.80	7
ค่าเปลี่ยนแร่ยูเรเนียมให้เป็นแกส UF_6	74.60	4
ค่าทำยูเรเนียมให้เข้มข้น	1,705.60	4
ค่าประกอบเชื้อเพลิงและค่าขนส่ง	1,921.50	3
ค่าขนส่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว	1,025.00	3
ค่าแยกเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว	2,648.60	4
ค่าเปลี่ยนสารเหลือใช้ให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสม	164.00	4

ที่มา : EGAT 600 MW. Nuclear Power Plant, Reference Proposal, Volume V - Nuclear Fuel, Westinghouse Electric Corporation, Power Systems Project Division, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., 1975.

4.7 ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้า

จากข้อสมมุติที่ใช้เป็นกรณีพื้นฐาน (Base Case) ในข้อ 4.4.1 ทำให้สามารถประมาณต้นทุนการผลิตต่อหน่วยได้ 78.81 สตางค์ ซึ่งต้นทุนการผลิตนี้ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายประจำ[1] ค่าเชื้อเพลิง ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา รายละเอียดของต้นทุนจะเป็นดังนี้

ก. ขนาดกำลังผลิต (เมกกะวัตต์)	636
ข. กำลังผลิตที่ต้องใช้ภายในโรงไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	36
ค. พลังงานสุทธิเฉลี่ย (ล้านหน่วยต่อปี)	4,084.7
ง. ค่าก่อสร้าง (ล้านบาท)	15,336
จ. ค่าใช้จ่ายประจำปี (Annual cost - ล้านบาทต่อปี)	
ค่าใช้จ่ายประจำ (Fixed cost)	1,861
ค่าเชื้อเพลิง	1,185
ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา	173
รวมค่าใช้จ่ายประจำปี	3,219
ฉ. ต้นทุนการผลิต (สตางค์ต่อหน่วย)	
ค่าใช้จ่ายประจำ (Fixed cost)	45.564
ค่าเชื้อเพลิง	29.013
ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา	4.237
รวมต้นทุนค่าก่อสร้างและต้นทุนการผลิต	78.814

จากตารางที่ 19 ซึ่งแสดงรายละเอียดของค่าปัจจุบันของต้นทุนต่าง ๆ แยกเป็นค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าและค่าประกันภัย ค่าเชื้อเพลิง ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา ตั้งแต่ปี 2522 - 2554 รวมทั้งจำนวนหน่วยพลังงานและค่าปัจจุบันของพลังงาน จาก

---

[1] ค่าใช้จ่ายประจำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ หมายถึง ค่าเสื่อมราคา ค่าดอกเบี้ย และค่าประกันภัย

ตัวเลขต้นทุนในแต่ละปีดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาค่าใช้จ่ายประจำปี โดยแยกแสดงให้เห็นเป็นค่าใช้จ่ายประจำ ค่าเชื้อเพลิง ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังนำมาคำนวณหาต้นทุนการผลิตเป็นสตางค์ต่อหน่วยได้ โดยให้ 1 มิลล์ เท่ากับ 2.05 สตางค์ (mill = 1×10^{-3})

ในการหาค่าใช้จ่ายประจำปี จะมีตัวคงที่ซึ่งมีค่า .110168 เป็นตัวคูณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งได้มาจากการคิดอัตราส่วนลด 10% ในระยะเวลา 25 ปี

ก. <u>การคำนวณหาค่าใช้จ่ายประจำปี</u>

1. <u>ค่าใช้จ่ายประจำ</u>

ค่าปัจจุบันรวมทั้งสิ้นของค่าก่อสร้างและประกันภัย = 824.09 x 20.50 ล้านบาท

= 16,893.845 ล้านบาท

ค่าใช้จ่ายประจำปี = 16,893.845 x .110168 ล้านบาท

= 1,861.161 ล้านบาท

2. <u>ค่าเชื้อเพลิง</u>

ค่าปัจจุบันรวมทั้งสิ้น = 524.74 x 20.50 ล้านบาท

= 10,757.170 ล้านบาท

ค่าใช้จ่ายประจำปี = 10,757.170 x .110168 ล้านบาท

= 1,185.095 ล้านบาท

3. <u>ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา</u>

ค่าปัจจุบันรวมทั้งสิ้น = 76.64 x 20.50 ล้านบาท

= 1,571.120 ล้านบาท

ค่าใช้จ่ายประจำปี = 1,571.120 x .110168 ล้านบาท

= 173.087 ล้านบาท

ข. <u>การคำนวณหาต้นทุนการผลิตต่อหน่วย</u>

1. ค่าใช้จ่ายประจำ = 22.226447 x 2.05 สตางค์
= 45.564216 สตางค์
2. ค่าเชื้อเพลิง = 14.152709 x 2.05 สตางค์
= 29.013053 สตางค์
3. ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา
= 2.067049 x 2.05 สตางค์
= 4.237450 สตางค์

<u>หรือคำนวณจากค่าใช้จ่ายประจำปี</u>

1. ค่าใช้จ่ายประจำ = 1,861.161 ÷ 4,084.7 สตางค์
= 45.5642 สตางค์
2. ค่าเชื้อเพลิง = 1,185.095 ÷ 4,084.7 สตางค์
= 29.01302 สตางค์
3. ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา
= 173.087 ÷ 4,084.7 สตางค์
= 4.23744 สตางค์

เมื่อคำนวณต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันและโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์โดยประมาณได้แล้ว ก็สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมประกอบการตัดสินใจ รวมทั้งการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ดังจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

ตารางที่ 19

ค่าปัจจุบันของต้นทุนค่าก่อสร้างและต้นทุนการผลิต ตุลาคม 2528

ปี	ต้นทุนค่าก่อสร้างและต้นทุนการผลิต (ล้านเหรียญสหรัฐ)			พลังงาน (ล้านหน่วย)	
	ต้นทุนคงที่	ต้นทุนแปรได้			
	ค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าและค่าประกันภัย	ค่าเชื้อเพลิง	ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา	พลังงานที่ผลิตได้	ค่าปัจจุบัน
2522	21.54	-	-	-	-
2523	37.70	-	-	-	-
2524	113.10	-	-	-	-
2525	199.28	-	-	-	-
2526	134.65	13.66	-	-	-
2527	32.32	55.47	-	-	-
2528	7.66	6.12	4.51	2,691	2,756
2529	7.66	37.75	4.78	2,691	2,506
2530	7.66	43.70	5.06	3,915	3,313
2531	7.66	38.62	5.37	3,915	3,012
2532	7.66	31.13	5.69	3,915	2,738
2533	7.66	42.08	6.03	3,915	2,489
2534	7.66	42.65	6.39	3,915	2,263
2535	7.66	45.50	6.78	3,915	2,057
2536	7.66	48.37	7.18	3,915	1,870
2537	7.66	49.34	7.61	3,915	1,700
2538	7.66	54.05	8.07	3,915	1,546
2539	7.66	57.54	8.55	3,915	1,405
2540	7.66	60.98	9.07	3,915	1,277
2541	7.66	64.47	9.61	3,915	1,161
2542	7.66	67.46	10.19	3,915	1,056
2543	7.66	72.79	10.80	3,670	900
2544	7.66	77.46	11.45	3,670	818

ตารางที่ 19 ค่าปัจจุบันของต้นทุนค่าก่อสร้างและต้นทุนการผลิต ตุลาคม 2528 (ต่อ)

ปี	ต้นทุนค่าก่อสร้างและต้นทุนการผลิต (ล้านเหรียญสหรัฐ)			พลังงาน (ล้านหน่วย)	
	ต้นทุนคงที่	ต้นทุนแปรได้			
	ค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้าและค่าประกันภัย	ค่าเชื้อเพลิง	ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา	พลังงานที่ผลิตได้	ค่าปัจจุบัน
2545	7.66	-2.29	12.13	3,670	744
2546	7.66	82.18	12.86	3,670	676
2547	7.66	86.77	13.63	3,670	615
2548	7.66	92.62	14.45	3,425	521
2549	7.66	95.99	15.32	3,425	474
2550	7.66	152.22	16.24	3,425	431
2551	7.66	87.46	17.21	3,425	392
2552	7.66	-15.32	18.24	3,425	356
2553	-	-41.94	-	-	-
2554	-	-220.45	-	-	-
รวม	730.12	1,226.39	247.22	91,751	37,077
รวมค่าปัจจุบัน	824.09	524.74	76.64		
ต้นทุนต่อหน่วย มิลล์/หน่วย	22.23	14.15	2.07		

ที่มา : ฝ่ายวิทยาการพลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

หมายเหตุ การคำนวณต้นทุนต่อหน่วย (มิลล์/หน่วย)

ค่าใช้จ่ายประจำ = $\frac{824.09}{37,077} \times 1,000 = 22.226447$

ค่าเชื้อเพลิง = $\frac{524.74}{37,077} \times 1,000 = 14.152709$

ค่าเดินเครื่องและบำรุงรักษา = $\frac{76.64}{37,077} \times 1,000 = 2.067049$