บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และ การคำนวณเกี่ยวกับวัฏจักรเชื้อเพลิงและวิเคราะห์ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง

ราคาการก่อสร้างและดำเนินการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าปรมาณู เพื่อให้คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ และค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดกับสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าในราคาที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะสามารถแข่งขันได้กับโรงไฟฟ้าแบบอื่นนั้น มีองค์ประกอบหลายประการ ซึ่งได้แก่ เงินลงทุน (capital cost) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (operating cost) และราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังนั้นการที่จะศึกษาถึงวัฏจักรเชื้อเพลิง รวมทั้งการวิเคราะห์ราคาเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบราคาในการผลิตพลังงานของโรงไฟฟ้าปรมาณู เพื่อทราบถึงวัฏจักรเชื้อเพลิงและราคามีบทบาทอย่างไรในแง่การผลิตพลังงาน

2.1 ราคาในการผลิตพลังงานปรมาณู (Nuclear Power Costs)

การคิดคำนวณหาค่าราคาในการผลิตพลังงานปรมาณูนั้น ตั้งอยู่บนกฎพื้นฐาน 3 ข้อ คือ

1. ราคาจะเปลี่ยนตามกาลเวลา
2. ราคาจะแตกต่างกันระหว่างประเทศหนึ่งและกับอีกประเทศหนึ่ง
3. ราคาจะเปลี่ยนไปตามแบบ-ชนิดของปฏิกรณ์ปรมาณู

ดังนั้นหากเงื่อนไขการสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูเปลี่ยนไป ราคาในการผลิตพลังงานปรมาณูย่อมจะเปลี่ยนแปรไปด้วย เราสามารถแบ่งประเภทราคาค่าใช้จ่ายออกตามคุณสมบัติได้ 2 ประเภท คือ

2.1.1 เงินลงทุน (Capital Costs) อยู่ในรูปของจำนวนเงินต่อจำนวนกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งขึ้น ราคาต่อกิโลวัตต์ที่ติดตั้ง ($/kWe installed)

2.1.2 ราคาการผลิตพลังงาน (Power Production Costs) คือ ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผลิต ซึ่งมักนิยมใช้หน่วยเป็น mills/จำนวนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น (mills/kWhr produced) โดยที่ mill = US. $ $\frac{1}{1,000}$

ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของราคาใช้จ่ายทั้ง 2 ประเภทนี้ สามารถแสดงได้ดังตาราง 2.1-1

เงินลงทุน (capital costs) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามตาราง 2.1-1 คือ เงินลงทุนโดยตรง (direct capital costs) และเงินลงทุนทางอ้อม (indirect capital costs) ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ ของเงินลงทุนจะเห็นได้จากตารางที่ 2.1-2 ซึ่งยังสามารถแบ่งออกเป็น ทรัพย์สินที่มีการเสื่อมราคา (depreciation assets) และทรัพย์สินที่ไม่เสื่อมราคา

ทรัพย์สินที่เสื่อมราคา ได้แก่ ทรัพย์สินทั้งหมด ยกเว้นที่ดินและน้ำชนิดหนักที่มีอยู่ (D_2O inventory)

ทรัพย์สินที่ไม่เสื่อมราคา ได้แก่ ที่ดิน และกรรมสิทธิ์ที่ดินน้ำชนิดหนัก (หรือตัวระบายความร้อน และตัวหน่วงชนิดอื่น) นอกจากนี้ยังรวมไปถึง เงินทุนหมุนเวียนในการทำงาน (working capital) ซึ่งเป็นจำนวนเงินที่ต้องใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานในแต่ละวัน และสำหรับรักษาไว้ซึ่งฟลุค (stock) ต่าง ๆ

เงินลงทุนทางอ้อม เป็นเงินที่ต้องใช้จ่ายตลอดระยะในการสร้าง จนกระทั่งสามารถเดินเครื่องได้

ราคาการผลิตพลังงานแบ่งออกเป็น ต้นทุนคงที่ (fixed charges) ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง (fuel-cycle costs) และต้นทุนการดำเนินงานและการบำรุงรักษา (operation and maintenance cost, O&M cost)

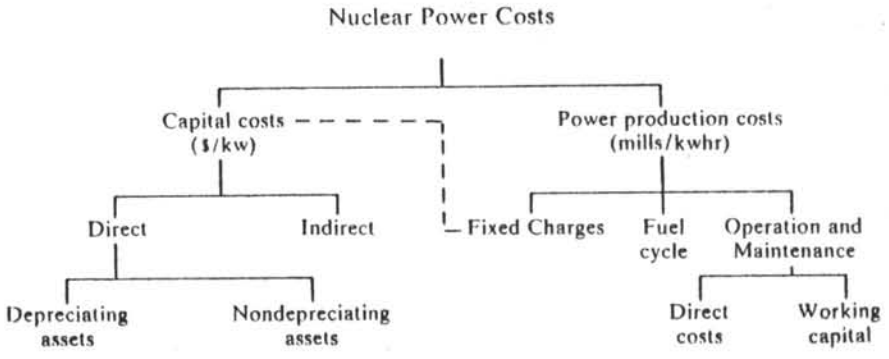
ตารางที่ 2.1-3 แสดงถึงรายละเอียดของราคาการผลิตพลังงาน

ต้นทุนคงที่จะขึ้นกับเงินลงทุนเป็นอย่างมาก และขึ้นกับ แพลนท์ออปเปเรติงแฟคเตอร์ (plant operating factor)

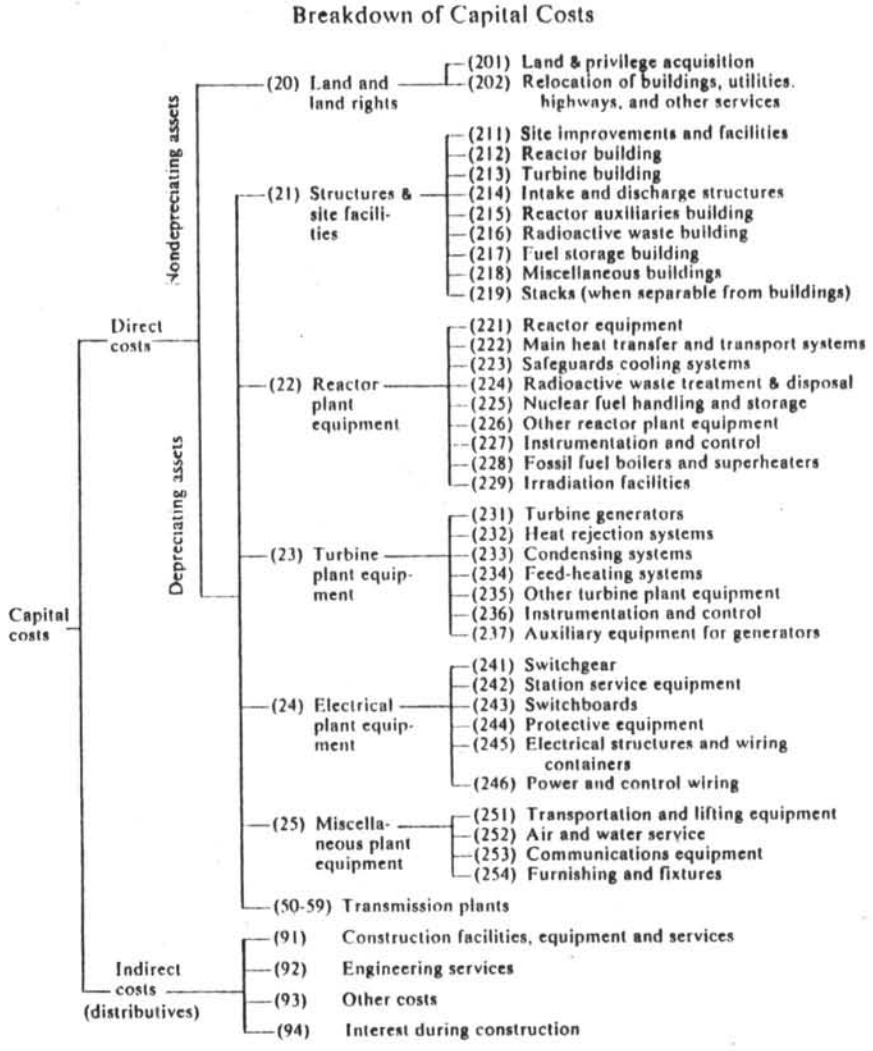
ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง เป็นราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงซึ่งจะทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

ต้นทุนการดำเนินงานและการบำรุงรักษา เป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และการบำรุงรักษาเครื่อง และ การประกันภัยในเทอมของ Nuclear liability insurance

สำหรับการประกันภัยอุบัติเหตุทั่วไป และการซ่อมบำรุงเครื่องจักรที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดหมายนั้นจัดอยู่ในค่าใช้จ่ายต้นทุนคงที่

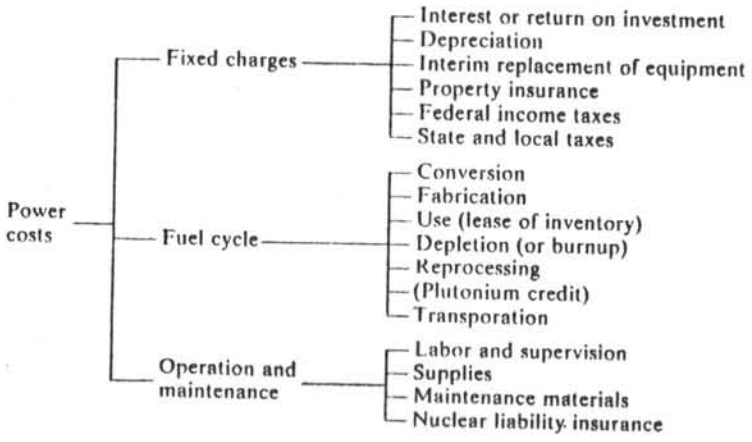


ตารางที่ 2.1-1 [8] องค์ประกอบของราคาในการผลิตพลังปรมาณู

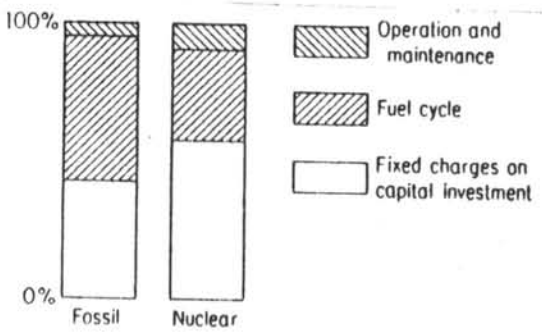


ตารางที่ 2.1-2 [8] รายละเอียดของเงินลงทุน

Breakdown of Power Production Costs



ตารางที่ 2.1-3 [8] รายละเอียดของราคาการผลิตพลังงาน



Approximate breakdown of production costs in fossil and nuclear power plants.

รูปที่ 2.1-1 [8] กราฟเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงและโรงพฟฟ้าปรมาณู

อนึ่ง กราฟเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิง และโรงไฟฟ้าปรมาณู ดังแสดงในรูปที่ 2.1-1

2.2 วัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณู

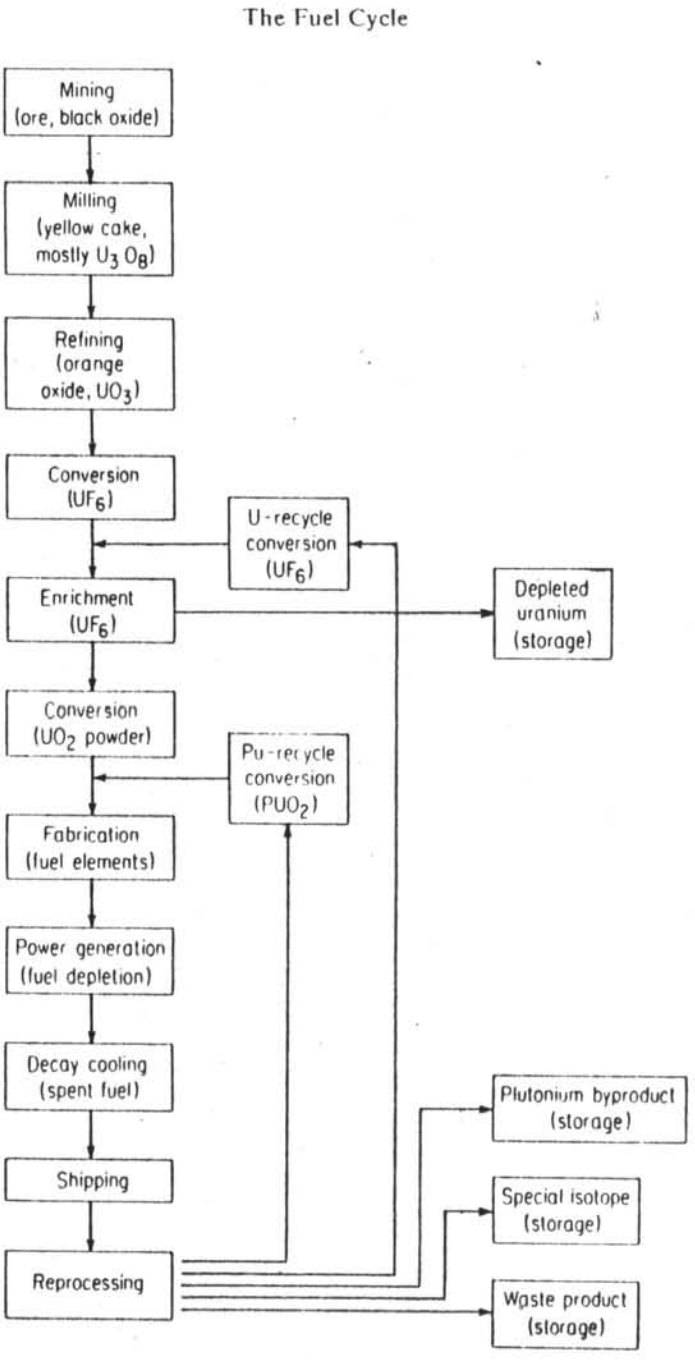
ก่อนที่จะศึกษาถึงวัฏจักรเชื้อเพลิงนั้น เราต้องทราบถึงความเป็นไปของวัฏจักรเชื้อเพลิงเสียก่อน ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ สามารถแสดงให้เห็นในตาราง 2.2-1

2.2.1 การทำเหมือง (Mining) เป็นการทำเหมืองแร่เพื่อให้ได้มาซึ่งแร่ยูเรเนียมออกไซด์ (black oxide = U_3O_8) ซึ่งในสินแร่จำนวน 1 ตัน จะมียูเรเนียมออกไซด์อยู่ประมาณ 2-20 ปอนด์ แต่โดยเฉลี่ยแล้วจะมีอยู่ระหว่าง 5 ปอนด์

2.2.2 การล้างแร่ (Milling) เป็นการล้างยูเรเนียมออกจากสินแร่โดยวิธี ลีชชิง (leaching) ซึ่งสินแร่จะถูกย่อยเป็นผงละเอียดแล้วทำปฏิกิริยากับน้ำยาล้างแร่ (leachant) เพื่อละลายยูเรเนียมออกจากสินแร่ โดยน้ำยากรดหรือน้ำยาด่าง จากนั้นยูเรเนียมออกไซด์จะถูกล้างจากน้ำยาล้างแร่ด้วยการล้างด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) หรือการแลกเปลี่ยนอิออน (ion exchanger) ทำให้ยูเรเนียมตกตะกอนในแอมโมเนีย จะได้ยูเรเนียมในรูปแอมโมเนียมไดยูเรเนต $(NH_4)_2\ U_2O_7$ กรองและเผาผลผลิตที่ได้ เพื่อขจัดน้ำที่ไม่ต้องการออก ผลที่ได้จะเป็นยูเรเนียมออกไซด์เข้มข้น ซึ่งเรียกว่า เยลโลเค้ก (yellow cake) มียูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) ประมาณ 70-90%

2.2.3 การทำให้บริสุทธิ์ (Refining) เป็นการเอาเยลโลเค้กที่ได้จากการล้างแร่มาทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการล้างด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) และเผาไล่สิ่งเจือปนที่จะดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นยูเรเนียมไตรออกไซด์ (UO_3) ที่บริสุทธิ์มาก UO_3 เป็นผงละเอียดสีส้ม ซึ่งรู้จักกันในนาม ออเร็นจ์ออกไซด์ (orange oxide)

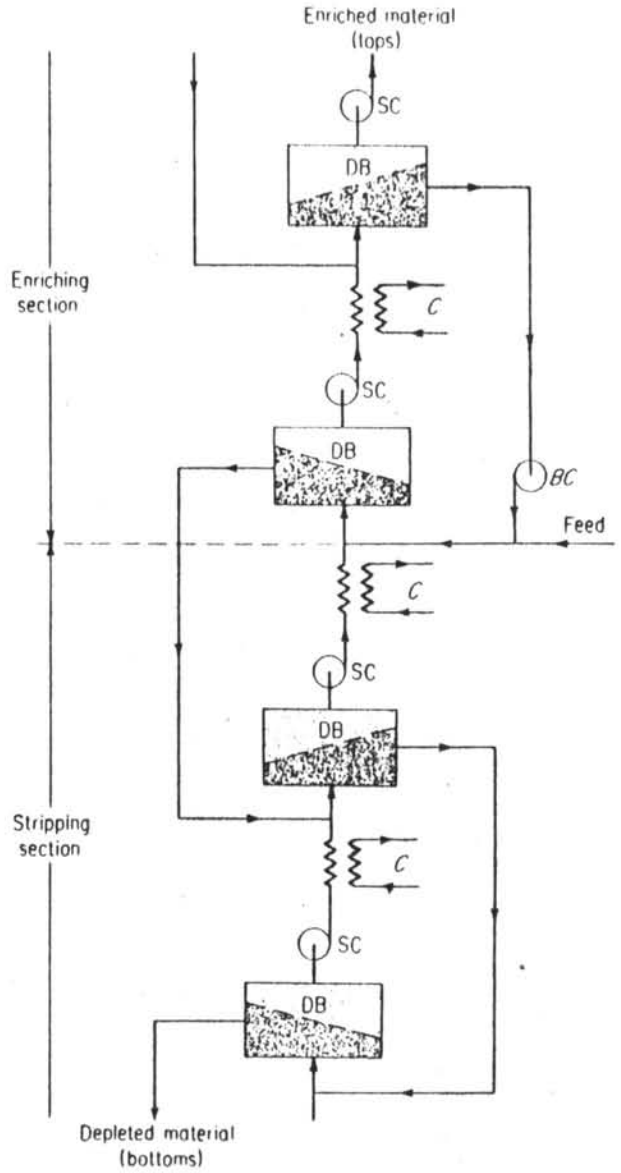
2.2.4 คอนเวอร์ชัน (Conversion) ครั้งแรกเป็นการเปลี่ยนออเร็นจ์ออกไซด์ (orange oxide) เป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) โดยวิธีไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) และเป็นยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ (UF_4) โดยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF)



ตารางที่ 2.2-1 ขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิง (8)

ซึ่ง UF_4 มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กรีนซอลท์ (green salt) จากนั้นนำ กรีนซอลท์ทำปฏิกิริยากับก๊าซฟลูออรีน เพื่อเปลี่ยนเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) ซึ่งจะเป็นก๊าซในระหว่างการผลิต แต่จะเป็นของแข็งเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง อนึ่ง ถ้าหากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลังจากเปลี่ยนเป็น UO_2 แล้วสามารถนำไปผลิตแท่งเชื้อเพลิง แฟบริเคชั่น (Fabrication) ได้เลย

2.2.5 <u>การทำให้เข้มข้นขึ้น</u> (Enrichment) เป็นขั้นตอนที่ยากที่สุดในวัฏจักรเชื้อเพลิง และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการหาราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง การทำให้เข้มข้นขึ้นเป็นการแยกไอโซโทปของยูเรเนียม ซึ่งจะให้ผลเป็นยูเรเนียมเข้มข้น (enriched uranium) และดีพลีทเต็ดยูเรเนียม (depleted uranium , tails) ซึ่งจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 มากกว่าหรือน้อยกว่า ความเข้มข้นธรรมชาติของยูเรเนียม -235 (0.71%) ตามลำดับ อนึ่งไอโซโทปของธาตุเดียวกันนั้นย่อมแยกด้วยวิธีทางเคมีไม่ได้ จึงต้องอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันทางฟิสิกส์ คือ ความแตกต่างระหว่างมวลของไอโซโทปทั้งสอง ซึ่งต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำให้ยุ่งยากซับซ้อนและต้องทำหลายขั้นตอน วิธีที่แพร่หลายที่สุดคือ การแพร่กระจายของก๊าซ (gaseous diffusion) โดยใช้หลักพลังงานจลน์ของอนุภาค ($\frac{1}{2}mv^2$) จะเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์เท่านั้น โดยพลังงานจลน์ของโมเลกุล ก๊าซที่อุณหภูมิหนึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน ณ ที่อุณหภูมิเดียวกัน อนุภาคเบาจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอนุภาคหนัก ฟลูออรีนเป็นธาตุที่มีไอโซโทปเพียงหนึ่ง (ฟลูออรีน-19) ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุล $U^{238}F_6$ กับ $U^{235}F_6$ จะขึ้นอยู่กับไอโซโทปของยูเรเนียมเท่านั้น และอัตราส่วนของความเร็วเฉลี่ยระหว่าง $U^{238}F_6$ กับ $U^{235}F_6$ จะเท่ากับ $\sqrt{352/349}$ หรือเท่ากับ 1.0043 เท่านั้น ซึ่งค่านี้เรียกว่าตัวประกอบเซพพาเรทีฟ (Separative factor) ก๊าซ UF_6 จะผ่านเข้าไปใน diffusion stage หลายร้อยตัวที่ต่ออนุกรมกัน ซึ่งรวมเรียกว่า cascade จนกว่าจะได้ความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 ตามต้องการ หลักการทำงานแสดงในรูป 2.2-1 ยูเรเนียมเข้มข้น ที่มีความเข้มข้นที่ต้องการจะบรรจุใน pressurized cylinders เพื่อนำสู่ขั้นตอนต่อไป ดีพลีทเต็ดยูเรเนียมจะเก็บไว้ใช้เป็นวัตถุเฟอร์ไทล์ (fertile material) หรือใช้ในงานอย่างอื่น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโรงงานแพร่กระจายก๊าซ จะต้องลงทุนสูงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยูเรเนียม ถ้าความเข้มข้นสูงก็จะต้องลงทุนมากและราคาในการทำให้เข้มข้นก็สูงตามด้วย



Schematic of a gaseous diffusion cascade. BC = booster compressor, C = cooler, DB = diffusion barrier, SC = stage compressor.

รูปที่ 2.2-1 หลักการทำให้เข้มข้น (8)

(ในการทำให้เข้มข้น นอกจากจะทำโดยวิธีแพร่กระจายก๊าซแล้ว ยังทำได้โดยวิธี ultracentrifuges ด้วย)

2.2.6 คอนเวอร์ชัน (Converston) ครั้งที่ 2 UF_6 จะถูกเปลี่ยนโดยทางเคมีให้เป็นสารประกอบยูเรเนียม ในรูปที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง (fabrication) เช่น โลหะ-ยูเรเนียม ยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) หรือ ยูเรเนียมคาร์ไบด์ (UC) เป็นต้น ทั้งนี้สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ความสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง รังสีสูง และต้องให้พลังงานออกมาสูง คุณสมบัติทางเคมีและทางนิวเคลียร์ของสารประกอบ และความสะดวกในการทำ เป็นต้น

2.2.7 การผลิตแท่งเชื้อเพลิง (Fabrication) เป็นขั้นตอนในการสร้างแท่งเชื้อเพลิง เพื่อนำไปใช้ในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า มักจะใช้อยู่ในรูปของยูเรเนียมไดออกไซด์ ด้วยการนำยูเรเนียมไดออกไซด์มาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ลักษณะแท่งรูปทรงกระบอกเล็ก ๆ (pellet) คัดอันที่ไม่ได้ขนาดหรืออันที่แตกออก จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงเรียงใส่ลงในท่อยาว ซึ่งจะเป็นพวก Zircaloy หรือ stainless steel cladding tube ภายในท่อจะบรรจุก๊าซฮีเลียม (He) เพื่อเป็นตัวช่วยพาความร้อน (thermal bonding) ที่เกิดขึ้นในขณะใช้งาน จากนั้นจะปิดหัวท้ายของท่อให้สนิทแน่น ท่อที่บรรจุเชื้อเพลิงจะถูกจัดเป็นชุด (bundle) ด้วย spacers ในตำแหน่งตรงหัวท้าย และตรงกลางของแท่งเชื้อเพลิง โดยมีช่องว่างระหว่างแท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ตัวระบายความร้อน (coolant) ไหลผ่านได้ ทั้งหมดนี้รวมเรียกว่า ชุดแท่งเชื้อเพลิง (Fuel Assembly) ซึ่งจะถูกนำไปใส่เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อใช้ต่อไป สิ่งที่ต้องคำนึงในการทำแท่งเชื้อเพลิงมีดังนี้

รูปร่างลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงจะต้องจัดให้อยู่ในลักษณะสภาพที่สามารถจะให้พลังงานได้มากที่สุด เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากแท่งเชื้อเพลิงสูงมาก จำเป็นต้องมีช่องว่างให้ตัวระบายความร้อนไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนได้ดี จะได้ไม่เกิด hot spot ขึ้นซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงหรือท่อ clad หลอมละลายหรือแตกร้าวได้ นอกจากนี้ยังต้องเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้หุ้มแท่งเชื้อเพลิง (clad) มักจะเป็นพวก Zirconium alloy เพราะเซอร์โคเนียม Zirconium เป็นโลหะที่แข็งแรงทนต่อสภาพความดันสูง อุณหภูมิสูง และรังสีสูง เป็นเวลานาน ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และจับนิวตรอนไม่ดี ทั้งนี้ตัวแท่งเชื้อเพลิงจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ

1. ช่วยป้องกันไม่ให้ตัวระบายความร้อนสัมผัสกับเชื้อเพลิงโดยตรง

2. ป้องกันไม่ให้สารที่เกิดจากการแตกตัว (Fission Products) รั่วไหลออกมา

2.2.8 <u>การผลิตพลังงาน</u> (Power generation) เป็นขั้นตอนที่นำ fuel assembly ใส่ประกอบเป็นแกนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งจะเกิดการเผา (เบิร์นอัพ = burn up) ในขณะเดินเครื่อง การเบิร์นอัพยิ่งสูงก็จะทำให้ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 ชั่วโมงน้อยลง คือ สามารถใช้เชื้อเพลิงได้อย่างคุ้มค่า เมื่อการเบิร์นอัพเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ไอโซโทปที่เป็นเชื้อเพลิงจะลดลงและเกิดสารที่เกิดจากการแตกตัว (fission product) ขึ้น สารที่เกิดจากการแตกตัวที่เกิดขึ้นบางตัวเป็นก๊าซ ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิงเสียไป เช่น เกิดการบวม แตกร้าว เป็นต้น การใช้เชื้อเพลิงได้อย่างคุ้มค่านั้น ขึ้นอยู่กับการจัดการและเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย อนึ่งในขณะที่ยูเรเนียม -235 เกิดปฏิกิริยาแตกตัวนั้น ยูเรเนียม -238 ซึ่งรวมอยู่ในเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมากจะจับนิวตรอนเปลี่ยนไปเป็นพลูโตเนียม -239 (Pu239) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ ยูเรเนียม -235 ดังนั้นในระหว่างเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมี Pu-239 แตกตัวให้พลังงานออกมาด้วย

2.2.9 <u>การหล่อเย็นของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว</u> (Decay cooling) เป็นขั้นตอนนำเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว (Spent or irradiated fuel) ออกจากแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดย remote control แท่งเชื้อเพลิงนี้จะมีรังสีสูง ดังนั้นก่อนที่จะทำการเคลื่อนย้ายจะต้องเก็บไว้ในน้ำเป็นเวลาหลายเดือน โดยน้ำจะเป็นตัวกำบังรังสี และตัวระบายความร้อนเพื่อให้สารรังสีบางตัวสลายตัวหมดก่อน แล้วจึงเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิงได้โดยปลอดภัย

2.2.10 <u>การขนย้าย</u> (Shipping) เป็นการขนย้ายเชื้อเพลิงใช้แล้วเพื่อนำไปทำรีโพรเซสซิง (Reprocessing) โดยบรรจุเชื้อเพลิงใช้แล้วในถังโลหะ (Cask) ที่กำบังรังสีได้ ราคาในการขนย้ายนี้จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของถัง และระยะเวลาระหว่างการขนย้ายเป็นใหญ่ การออกแบบตัวถังบรรจุเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับค่าการเบิร์นอัพ ขนาดและน้ำหนักของเชื้อเพลิง ขนาดและน้ำหนักของยานพาหนะ (Carreir) ค่าใช้จ่ายในการขนย้าย ประกอบด้วย ค่าเรือ (freight costs) ค่าตู้สินค้า (container costs) ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (handling costs) และค่าประกันภัย การเคลื่อนย้ายนี้จะต้องปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ความปลอดภัยที่วางไว้

2.2.11 <u>รีโพรเซสซิง</u> (Reprocessing) เป็นขบวนการสกัดเอาเชื้อเพลิงปรมาณูที่ใช้แล้ว ทั้งนี้เพราะว่าในเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วนั้น ยูเรเนียม -235 ยังถูกใช้ไม่หมดและมีเชื้อเพลิงพลูโตเนียม -239 เกิดขึ้น ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยเชื้อเพลิงจะถูกนำขึ้นจากบ่อน้ำที่พักไว้ผ่านขบวนการ Decladding ซึ่งจะตัดโครงยึด (structure support) ต่าง ๆ เท่าที่จะทำได้แล้วถอด cladding ออก ถ้า cladding ไม่อยู่ติดกับเชื้อเพลิง (โดยมากเชื้อเพลิงจะอยู่ในรูป UO_2) สามารถจะแยกเชื้อเพลิงออกโดยวิธีทางเครื่องกล และเก็บ cladding ไว้ในลักษณะ active waste ที่เป็นของแข็ง แต่ถ้าอยู่ติดกับเชื้อเพลิงแล้ว การแยกจะทำโดยทางเคมี คือ นำเชื้อเพลิงและ cladding ไปละลายในสารละลายกรด จากนั้นนำไปผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ตามขั้นตอนต่าง ๆ โดยสารที่ได้จากผลการแตกตัว (fission product) ส่วนใหญ่จะถูกแยกออกไปก่อน ต่อจากนั้นแยกยูเรเนียมออกจากพลูโตเนียมด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) จากนั้นจึงสกัดสารที่ได้จากการแตกตัวที่หลงเหลืออกจากยูเรเนียมและพลูโตเนียม ซึ่งจะได้สารละลายยูเรเนียมและพลูโตเนียมที่มีความเข้มข้นสูงพร้อมที่จะนำไปเปลี่ยนอยู่ในรูปที่ต้องการ เช่น ยูเรเนียมอาจเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) แล้วนำไปผ่านขบวนการทำให้เข้มข้นอีกครั้งหนึ่ง หรือเปลี่ยนเป็น UO_2 ซึ่งจะผสมกับ UO_2 ที่มีความเข้มข้นสูง (higher enrichment) เพื่อนำไปทำเป็นเม็ดเชื้อเพลิงต่อไป ส่วนพลูโตเนียมจะเปลี่ยนเป็น PuO_2 แล้วนำไปผสมกับ UO_2 ทำเม็ดเชื้อเพลิงหรือเก็บไว้ใช้ในวันข้างหน้า หรือนำไปสร้างเป็นระเบิดปรมาณู

อนึ่ง สารที่ได้จากการแตกตัว บางตัวที่มีประโยชน์จะถูกแยกออกและทำให้บริสุทธิ์ เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม หรือ ทางแพทย์ สำหรับสารที่ได้จากการแตกตัวที่ไม่มีประโยชน์จะถูกนำไปเก็บตามกรรมวิธีเก็บกากกัมมันตรังสี (waste product storage) ซึ่งอาจทำให้อยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้นสูง เพื่อลดปริมาตรลงหรือทำให้อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งจะสามารถเก็บไว้ใต้ดินโดยไม่เกิดปัญหาการรั่วไหลของสารรังสีสู่ผิวดิน

วัฏจักรเชื้อเพลิง สามารถแบ่งประเภทตามการจัดการเชื้อเพลิง (Fuel Management) ได้เป็น 3 ประการคือ

ก. Head - end fuel management ได้แก่ การจัดการเชื้อเพลิงก่อนที่จะนำเข้าไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งได้แก่ การทำเหมือง การล่กัดแร่ คอนเวอร์ชัน การทำให้เข้มข้นขึ้น และการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

ข. In - core fuel management เกี่ยวกับการออกแบบวัฏจักรเชื้อเพลิง และการเบิร์นอัพแตกตัวของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ได้แก่ รีแอคติวิตี (reactivity) และการควบคุมการจัดเรียงเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ การวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงาน (power distribution) และหา core capability

ค. Tail - end fuel management เป็นการจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วที่มีรังสีสูง หลังจากเอาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งได้แก่ การเก็บและการขนย้าย รีโพรเซสซิง และการขจัดกากเชื้อเพลิง (waste disposal)

2.3 การจัดการและเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิงในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

เมื่อเชื้อเพลิงปรมาณูได้ใช้ไประยะหนึ่ง รีแอคติวิตี (reactivity) จะลดลงและคุณสมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนไป ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้ในการผลิตพลังงานต่อไปได้ จึงต้องทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเสียใหม่ ซึ่งในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะต้องคำนึงถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่เบิร์นอัพ การให้พลังงานและระยะเวลาในการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งข้อคำนึงเหล่านี้จะมีผลต่อราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณูด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการเชื้อเพลิง เพื่อบรรลุถึงเป้าหมายต่อไปนี้

1. ทำให้เครื่องปฏิกรณ์สามารถรักษาภาวะวิกฤตเป็นช่วงเวลายาวในขณะที่ส่วนผสมและรีแอคติวิตี ได้เปลี่ยนแปลงไป

2. ปรับการกระจายของเพาเวอร์เดนซิตี (power density distribution) เพื่อผลิตพลังงานได้สูงสุด

3. ทำให้สามารถผลิตพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงได้มากที่สุด

4. ทำให้เชื้อเพลิงมีการ irradiation อย่างเอกรูป (uniform)

5. สามารถใช้นิวตรอนได้อย่างเต็มที่

วิธีการจัดการเชื้อเพลิงในแกนกลางเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

2.3.1 Batch Irradiation เป็นการจัดการเชื้อเพลิงแบบง่ายที่สุด โดยแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะถูกบรรจุด้วย fuel assembly ที่มีความเข้มข้นและส่วนผสมเท่ากันจนเต็มโดยมี boron control ที่กระจายตัวสม่ำเสมอเป็นตัวควบคุม และเมื่อมีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงทั้งหมดแล้วเอาเชื้อเพลิงใส่ลงไปในแกนกลางจนเต็มอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งวิธีการนี้ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง และตัวควบคุมจะอยู่ในลักษณะเอกรูปตลอดทั่วทั้งแกนกลางแต่การกระจายตัวของฟลักซ์ (flux) และเพาเวอร์เดนซิตี (power density) จะไม่เป็นเอกรูปอย่างมาก

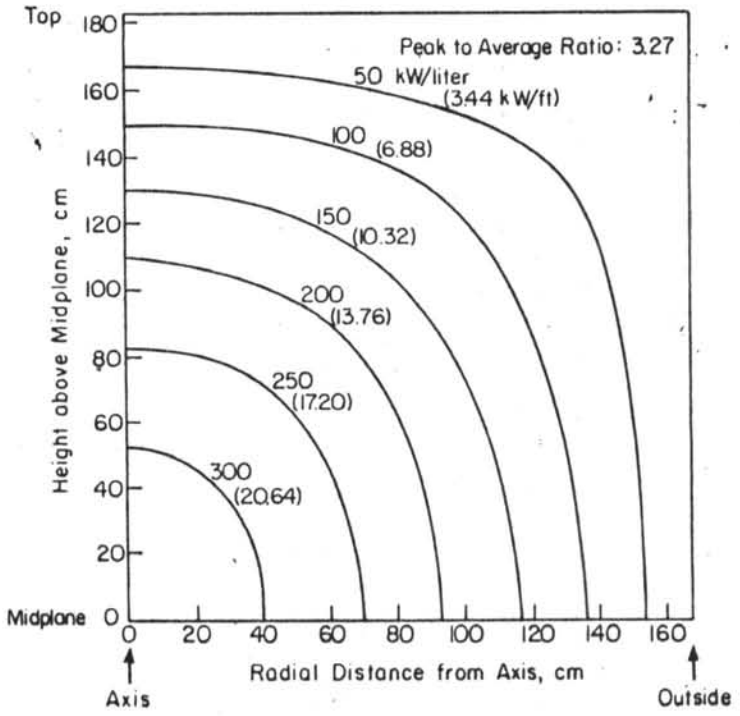
ข้อเสียของการจัดการเชื้อเพลิงแบบนี้มี ดังนี้

ก. Power density ซึ่งเป็นสัดส่วนกับผลคูณของนิวตรอนฟลักซ์ และความเข้มข้นของการเชื้อเพลิงจะไม่เป็นเอกรูป เพราะเกิดจากนิวตรอนฟลักซ์ไม่คงที่

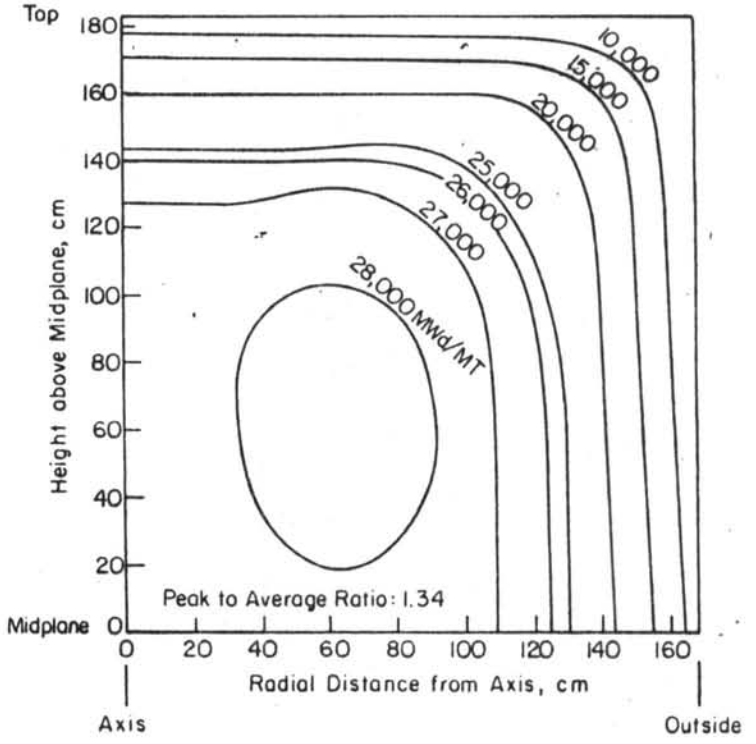
ดังนั้น power density ที่ตรงกลางของแกนจะสูงกว่าจุดอื่น ซึ่งทำให้พลังงานความร้อนที่ได้รับน้อยกว่าในขณะที่ power density เป็นเอกรูป ดังรูปที่ 2.3-1

ข. เนื่องจากความไม่เป็นเอกรูปของนิวตรอนฟลักซ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและส่วนผสมของเชื้อเพลิงไม่เท่ากัน โดยที่เชื้อเพลิงที่อยู่ตรงกลางถูกเบิร์นอัพ มากกว่าเชื้อเพลิงที่รอบนอก ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเมื่อครบอายุการใช้งาน เชื้อเพลิงที่อยู่รอบนอกจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตความร้อนสูงกว่า ปัญหาเรื่องการขจัดความร้อนที่มีมากกว่าเช่นกัน ดังรูป 2.3-2

ค. รีแอคติวิตี ระหว่างจุดเริ่มต้นและเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน มีการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงต้องใช้พอยซันคอนโทรล (poison control) มากในระหว่างการเริ่มต้นและเอาออกหมดเมื่อจะสิ้นสุดการใช้งาน ถ้าพอยซันที่ใช้เป็นกรดบอริคจะมีปัญหาการกัดกร่อนและค่าใช้จ่ายหน่วยขจัดบอรอนออกจากตัวระบายความร้อน ถ้าใช้แท่งควบคุม (control rod) ก็ต้องใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายแล้วยังเป็นการจำกัดการเบิร์นอัพของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.3-1 (7) การกระจายของ power density ของแกนกลาง



Burnup distribution in 1060-MWe PWR at end of period after batch irradiation of initially uniform fuel containing 3.2 w/o ^{235}U.

รูปที่ 2.3-2 (7) การเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงในแกนกลาง

ง. จะสูญเสียนิวตรอนโดยใช่เหตุในขณะเริ่มต้นเดินเครื่องโดยถูกพอยซันดูดกลืน

Batch Irradiation จะเหมาะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูขนาดเล็ก

2.3.2 Zoned Loading โดยการใส่เชื้อเพลิงที่เข้มข้นต่างกันลงในตำแหน่งที่แตกต่างกันในแกนกลาง หรือโดยการใส่พอยซันที่มีความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของ power density เป็นเอกรูปขึ้นและสามารถเดินเครื่องได้ที่ power density สูงสุดที่เป็นไปได้ ทั้งนี้โดยให้เชื้อเพลิงที่อยู่ตรงกลางมีความเข้มข้นน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่รอบนอก (buckled zones) หรือโดยการให้พอยซันมากที่ตรงกลางของแกนกลาง

ข้อดีสำหรับการจัดแกนกลางแบบนี้ คือ

ก. จำนวนครั้งในการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะน้อยครั้งกว่าการจัดการเชื้อเพลิงที่มีการย้ายตำแหน่ง fuel assembly

ข. ให้ power density ที่เป็นเอกรูปกว่า

ค. จะให้เบิร์นอัพเป็นเอกรูปมากกว่า ในช่วงที่นิวตรอนฟลักซ์เป็นเอกรูป

ข้อเสียสำหรับการจัดการแบบนี้ คือ

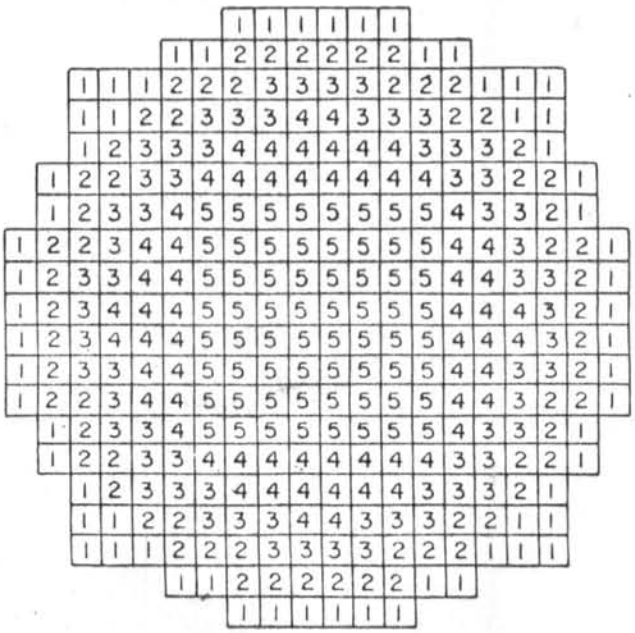
ก. ต้องใช้เชื้อเพลิงที่เข้มข้นขึ้นใน buckled zone ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น

ข. การเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงใน buckled zone ก็ยังคงไม่เป็นเอกรูปอย่างมาก

2.3.3 Partial Batch Replacement การจัดการแบบนี้เป็นการแก้ปัญหาการเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นเอกรูป โดยการเปลี่ยนเชื้อเพลิงบางส่วนในขณะที่สิ้นสุดอายุการใช้งาน แทนที่จะเปลี่ยนเชื้อเพลิงทั้งหมด โดยในตอนแรกเชื้อเพลิงในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมีความเข้มข้นเท่ากัน และจัดแบ่งเป็นกลุ่มให้อยู่ในลักษณะคล้ายวงแหวนเป็นชั้น ๆ การเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนเฉพาะกลุ่มที่เบิร์นอัพมากที่สุด ด้วยเชื้อเพลิงใหม่ที่มีส่วนผสมและความเข้มข้นเป็นไปตามกำหนดขึ้น โดยการเปลี่ยนครั้งละกลุ่ม ดังรูปที่ 2.3-3

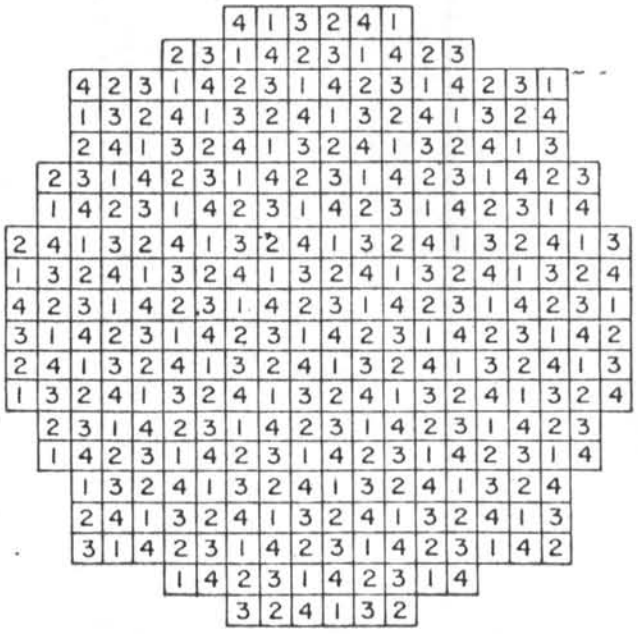
ข้อดีสำหรับการจัดการแบบนี้ ดังนี้

ก. เชื้อเพลิงที่เอาออกมาจากแกนกลางในแต่ละครั้งจะมีความเข้มข้นและส่วนผสมที่ค่อนข้างเป็นเอกรูป



Fuel zones for partial batch replacement or out-in fueling.

รูปที่ 2.3-3 (7) partial batch replacement or out-in fueling



Fuel pattern in scatter refueling.

รูปที่ 2.3-4 (7) scattering refueling

ข้อเสียสำหรับจัดการแบบนี้

ก. การหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะมีจำนวนครั้งมากกว่า การเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบเปลี่ยนทั้งหมด

ข. จะเกิดภาวะพีคกิง (peaking) ของฟลักซ์ และ power density เมื่อเชื้อเพลิงใหม่ใส่เข้าไปในตรงกลางของแกนกลางในขณะที่เชื้อเพลิง ณ ตำแหน่งอื่นได้มีการเบิร์นอัพไปบ้างแล้ว

2.3.4 Seed - Blanket Loading เป็นการจัดการเชื้อเพลิงที่แตกต่างออกไปจากวิธี zoned loading โดยใช้หลักการเดียวกัน คือ โซนวงแหวนที่ประกอบด้วย เชื้อเพลิงเข้มข้นกว่า (Seed) จะอยู่ระหว่างโซนที่ประกอบด้วยเชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ (ทำหน้าที่เป็น blanket) ซึ่งการจัดการแบบนี้จะจัดอยู่ในรูปแบบลักษณะต่าง ๆ ได้

ข้อดีของการจัดการแบบนี้ คือ สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดพีคกิง (peaking) ของนิวตรอนฟลักซ์ที่ตรงกลางแกน

2.3.5 Scatter Refueling เป็นการจัดการเชื้อเพลิงเพื่อลดพีคกิงของฟลักซ์ ซึ่งมีหลักการคล้ายกับ partial batch replacement โดยการแบ่งเชื้อเพลิงออกเป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มจะมีจำนวน ชุดเชื้อเพลิง (assemblies) เท่ากัน แต่ที่นิยมใช้กันนั้น ในเชื้อเพลิงแต่ละกลุ่มจะมี 4-6 ชุดเชื้อเพลิง การเปลี่ยนเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งทำได้โดยการเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงเพียง 1 ชุดเชื้อเพลิงของแต่ละกลุ่มเชื้อเพลิงตลอดทั่วทั้งแกนกลาง และการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในครั้งต่อไป ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงในตำแหน่งอื่นของกลุ่มเชื้อเพลิงต่าง ๆ ในแกนกลาง ดังเช่นรูปที่ 2.3-4 ซึ่งในแต่ละกลุ่มเชื้อเพลิงจะมีอยู่ 4 ชุดเชื้อเพลิง ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงครั้งที่ 1 จะเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงในตำแหน่งที่ 1 เมื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงครั้งที่ 2 จะเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงในตำแหน่งที่ 2 ทำเช่นนี้เรื่อย ๆ ไปจนถึงการเปลี่ยนเชื้อเพลิงครั้งที่ 5 ก็จะเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงตำแหน่งที่ 1 อีกครั้ง เป็นต้น ลักษณะเช่นนี้แต่ละ assembly จะอยู่ในแกนเป็นเวลา 4 ไซเคิล (cycle) มีค่าการเบิร์นอัพไม่เหมือนกัน และเนื่องจากแต่ละชุดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก นิวตรอนฟลักซ์ในแต่ละชุดเชื้อเพลิงของกลุ่มจะเกือบเท่ากัน ซึ่งจะทำให้การลดการพีคกิงของฟลักซ์ที่เชื้อเพลิงใหม่ได้มาก แต่ power density ยังคงปรากฏพีคกิงอยู่ เพราะแม้ว่าฟลักซ์จะค่อนข้างเอกรูปในแต่ละกลุ่มเชื้อเพลิง แต่

I 18056143

เชื้อเพลิงใหม่จะมีปริมาณสารฟิสไซล์มากกว่าจึงทำให้เกิด power density peaking

ข้อดีสำหรับ scatter refueling เมื่อเทียบกับ batch irradiation มีดังนี้

ก. เชื้อเพลิงสามารถให้การเบิร์นอัพได้มากกว่าภายใต้ความเข้มข้นเท่ากัน

ข. ใช้พอยซันในการควบคุมน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะความเปลี่ยนแปลงของรีแอคติวิตีน้อยกว่า และมีเชื้อเพลิงเก่าเป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนที่มีมากเกินความต้องการเพื่อผลิตเป็นพลูโตเนียม

ข้อเสียสำหรับ scatter refueling เมื่อเทียบกับ batch irradiation

ก. ถ้าจำนวนชุดเชื้อเพลิงในกลุ่มเชื้อเพลิงมากเกินไป (มากกว่า 6 ชุด) จะทำให้มีการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนชุดเชื้อเพลิงที่เกินไปในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา

ข. ฟลักซ์ที่ตรงกลางของแกนกลางจะสูงกว่ารอบนอก แต่ความไม่เป็นเอกรูปน้อยกว่า batch irradiation

อนึ่ง ข้อดีและข้อเสียเหล่านี้สามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอคติวิตีเมื่อเกิดการเบิร์นอัพ ซึ่งรีแอคติวิตีจะลดลงเป็นลักษณะกราฟเส้นตรง เมื่อเทียบกับการเบิร์นอัพ

$$\rho = \rho_o - aI \qquad (2.3\text{-}1)$$

ρ = รีแอคติวิตี (reactivity)

ρ_o = รีแอคติวิตี ของเชื้อเพลิงใหม่

I = จำนวนการเบิร์นอัพ

Batch Irradiation

ค่าเบิร์นอัพสุดท้ายที่สิ้นสุดอายุการใช้งาน (I_1) จะมีรีแอคติวิตี (ρ) = o จะได้

$$I_1 = \frac{\rho_o}{a} \qquad (2.3\text{-}2)$$

จำนวนรีแอคติวิตีที่ต้องควบคุมตอนเริ่มต้นการเดินเครื่อง (ρ_1) ซึ่งในขณะนั้น ค่าเบิร์นอัพ =o จะได้

$$\rho_1 = \rho_o \qquad (2.3\text{-}3)$$

Scatter Refueling

n = จำนวนโซน

I_n = ขอบเขตค่า burn up ที่สิ้นสุดอายุใช้งาน

i = จำนวนไซเคิลของเชื้อเพลิงที่ได้ทำการเบิร์นอัพ

= 1, 2, 3,.....n

$\frac{iI_n}{n}$ = ค่าเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงหลังจาก burn up ไป i ไซเคิล

ค่ารีแอคติวิตีของเชื้อเพลิงจะเป็น

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\rho_0 - \frac{aiI_n}{n} \right)$$

$$\rho = \rho_0 - \frac{a(n+1) I_n}{2n} \qquad (2.3\text{-}4)$$

เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานรีแอคติวิตี = o จะได้

$$I_n = \frac{2n \rho_0}{a(n+1)} \qquad (2.3\text{-}5)$$

เมื่อเริ่มต้นไซเคิลของการใช้งานรีแอคติวิตีจะเป็นดังนี้

$$\rho_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[\rho_0 - \frac{a(i-1) I_n}{n} \right]$$

$$\rho_n = \rho_0 - \frac{a(n-1) I_n}{2n} \qquad (2.3\text{-}6)$$

จากสมการ (5) $\rho_n = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n+1}\right)$

$$\rho_n = \frac{2\rho_0}{n+1} \qquad (2.3\text{-}7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง satter refueling กับ batch irradiation

1. ในด้านเบิร์นอัพ

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{2n}{n+1} \qquad (2.3\text{-}8)$$

2. ในด้านการเปลี่ยนแปลงรีแอคติวิตี้

$$\frac{\rho_n}{\rho_1} = \frac{2}{n+1} \qquad (2.3\text{-}9)$$

ผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้จากตารางที่ 2.3-1

2.3.6 Graded Refueling เป็นการจัดการเชื้อเพลิงแบบ scatter refueling โดยมีค่า n ต่อ 1 กลุ่มเชื้อเพลิงใหญ่มาก และในขณะเปลี่ยนเชื้อเพลิงไม่ต้องหยุดเครื่อง ทั้งนี้เพราะมีจำนวนชุดเชื้อเพลิงนับเป็นพัน ๆ ชุดอยู่ในแกนกลาง และมีเครื่องจักรเปลี่ยนเชื้อเพลิง (fueling machine) สำหรับใช้ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในขณะเดินเครื่อง เมื่อเชื้อเพลิงนั้นได้เบิร์นอัพถึงค่า ๆ หนึ่งที่กำหนดไว้ให้เท่ากันตลอดทั้งแกนกลางก็จะมีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจำนวนหนึ่ง เชื้อเพลิงที่เอาออกจากแกนกลางของแกนจะเบิร์นอัพมากกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่รอบนอก เนื่องจากเชื้อเพลิงของ graded refueling มีส่วนผสมเฉลี่ยและรีแอคติวิตี้ที่คงที่และเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วมีส่วนผสมที่เหมือนกัน ดังนั้นการจัดเชื้อเพลิงแบบนี้จะทำการวิเคราะห์ได้ง่ายกว่า scatter refueling

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่จัดการเชื้อเพลิงด้วยวิธีนี้ได้แก่ Graphite - moderated gas - cooled reactor

สำหรับการเปรียบเทียบค่าเบิร์นอัพรีแอคติวิตีและระยะเวลาของไซเคิล (cycle time) กับ batch irradiation จะเห็นได้จากตาราง 2.3-1 เมื่อ n เข้าใกล้ ∞

2.3.7 Out - In Refueling เนื่องจาก graded และ scatter refueling มีข้อเสียตรงที่ฟลักซ์ที่ตรงกลางแกนมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่น ดังนั้นจึงทำการจัดการเชื้อเพลิงด้วยวิธีนี้เพื่อลดฟลักซ์ และ power density ที่แกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งเชื้อเพลิงจะถูกแบ่งเป็นโซนรูปร่างคล้ายวงแหวน (annular) โดยแต่ละโซนจะมีปริมาตรเท่ากัน ดังแสดงในรูป 2.3-3 ซึ่งในการเปลี่ยนเชื้อเพลิง จะทำได้โดยเอาเชื้อเพลิงในโซนตรงกลางของแกนกลางออก และเลื่อนเชื้อเพลิงที่อยู่ในโซนถัดไปเข้ามาทดแทน สำหรับโซนอื่น ๆ ทดแทนโดยการเลื่อนเชื้อเพลิงจากขอบนอกเข้าสู่แกนกลางตามลำดับ สำหรับโซนนอกสุดที่ว่างลงจะถูกทดแทนด้วยเชื้อเพลิงใหม่ ซึ่งการจัดการเชื้อเพลิงแบบนี้นอกจากไซเคิลแรกแล้ว ไซเคิลอื่น ๆ จะคล้ายกัน ซึ่งมีระยะเวลาของไซเคิล (cycle time) ค่าเบิร์นอัพเฉลี่ยของเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วและการเปลี่ยนแปลงรีแอคติวิตี

ที่เหมือนกัน เชื้อเพลิงที่อยู่ในตรงกลางของแกนจะถูกใช้ไปมาก และค่ารีแอคติวิตีน้อย ดังนั้นฟลักซ์และ power density จะถูกลดลง ทำให้มีค่าค่อนข้างจะเป็นเอกรูป

ข้อดีสำหรับการจัดการแบบนี้

ก. ให้ power density distribution ค่อนข้างจะเอกรูปในทิศทางของรัศมีแกนกลาง

ข. ให้การเบิร์นอัพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ batch irradiation

ข้อเสียสำหรับการจัดการแบบนี้

ก. ประสิทธิภาพในการใช้นิวตรอนไม่ค่อยดี โดยที่เชื้อเพลิงใหม่ที่จะให้ค่ารีแอคติวิตีสูงสุด ถูกจัดอยู่ในตำแหน่งนิวตรอนฟลักซ์ต่ำสุดและเชื้อเพลิงที่ให้รีแอคติวิตีต่ำสุดอยู่ในตำแหน่งนิวตรอนฟลักซ์สูงสุด

ข. ในแกนกลางที่ใหญ่ขึ้นและมีค่าเบิร์นอัพสูง การจัดการแบบนี้จะลดฟลักซ์และ power density ที่ตรงกลางของแกนเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในระยะเริ่มเดินเครื่อง ทำให้เสียความเป็นเอกรูป

2.3.8 <u>Center to Outside Loading</u> การจัดการแบบนี้จะกลับกัน Out-in refueling โดยเชื้อเพลิงใหม่จะใส่ที่ตรงกลางแกนและเลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งไปโซนนอกตามลำดับ จากนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วจะถูกเอาออกจากแกนกลาง

ข้อดีสำหรับการจัดการแบบนี้

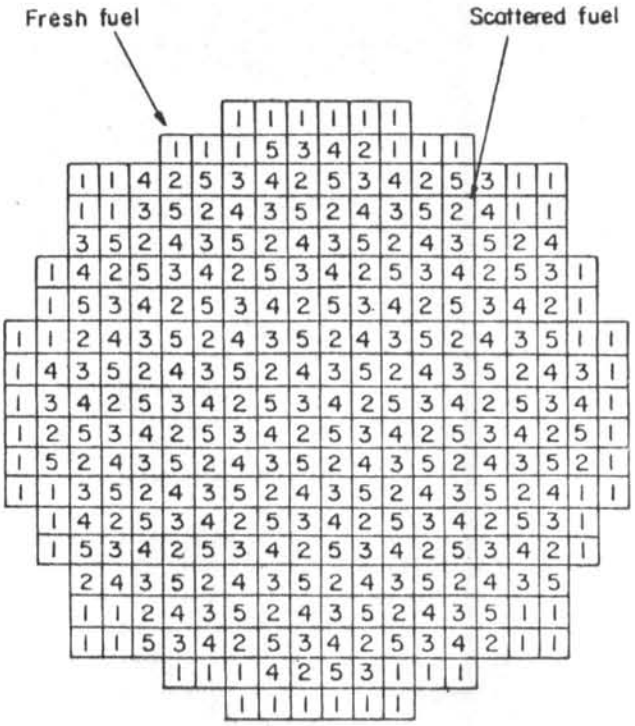
ก. สามารถใช้นิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ข. ให้ค่าเบิร์นอัพที่สูงสุดเมื่อเทียบกับการจัดการด้วยวิธีอื่น

ข้อเสียสำหรับการจัดการแบบนี้ ดังนี้

ก. เนื่องจากนิวตรอนฟลักซ์และสาร เชื้อเพลิงที่แตกตัวได้มีมากที่สุดที่ตรงกลางของแกนกลาง แล้วลดลงตามแนวรัศมีของแกนกลาง ดังนั้นการแตกต่างของ power density จะมากกว่าเมื่อเทียบกับ batch irradiation

ข. การออกแบบสำหรับระบบพาความร้อนออกจากเชื้อเพลิงจะเป็นไปด้วยความลำบาก



รูปที่ 2.3-5 Modified scattering refueling [7]

Number of zones of assemblies, *n*	1	2	3	4	5	∞
Burnup ratio, scatter refueling/batch	1.00	1.33	1.50	1.60	1.67	2.00
Reactivity change, scatter/batch	1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.00
Cycle time, scatter/batch	1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.00

ตารางที่ 2.3-1 ผลการเปรียบเทียบการจัดการเชื้อเพลิงแบบ batch irradiation กับ scattering fueling [7]

2.3.9 Modified Scatter Refueling การจัดการแบบนี้ใช้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใหญ่มาก เป็นการจัดการที่รวมเอาแบบ out-in และ scatter เข้าด้วยกัน ซึ่งจะให้ผลดียิ่งขึ้น ตัวอย่างการจัดการเชื้อเพลิงแบบนี้ดังแสดงในรูป 2.3-5 โดยโซนนอก (โซน 1) จะมีชุดเชื้อเพลิงเป็น 1/5 ของทั้งหมด เชื้อเพลิงที่เหลือจะอยู่ในโซนใน ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็นกลุ่มเชื้อเพลิงต่าง ๆ กลุ่มละ 4 โซน ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะดึงเอาเชื้อเพลิงที่เบิร์นอัพมากที่สุดในแต่ละกลุ่มเชื้อเพลิงของโซนในออกแล้วทดแทนด้วยเชื้อเพลิงที่มาจากโซนนอก และเชื้อเพลิงใหม่จะใส่เข้าไปในโซนนอก ดังนั้นโซนในจะมีลักษณะคล้ายกับ flattened zone และโซนนอกเป็น buckled zone ของ zoned loading

ข้อดีสำหรับการจัดการแบบนี้

ก. สามารถลด power density peaking ที่ตรงกลางของแกนกลางซึ่งเกิดจาก scatter refueling ธรรมดาได้

ข. ไม่เกิดการลด power density มากเกินไป เหมือนที่เกิดจาก out-in fueling ธรรมดา

ค. จะให้การเปลี่ยนแปลงของรีแอคติวิตี้น้อยและค่าเบิร์นอัพสูง

2.3.10 Axial Distribution เป็นการจัดการเชื้อเพลิงในทิศทางของแกน (axis) ทั้งนี้เพราะว่าถ้าจัดการเฉพาะในทิศทางของรัศมีหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเชื้อเพลิงจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ส่วนหัวและส่วนล่างของแกนกลางได้เต็มที่ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเชื้อเพลิงตลอดความยาวของแท่งเชื้อเพลิง หรือ แบ่งแกนกลางออกเป็นส่วนบนและส่วนล่าง ทำการเปลี่ยนที่เชื้อเพลิงระหว่างกันในขณะทำการเบิร์นอัพเชื้อเพลิง

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้า เบิร์นอัพของเชื้อเพลิงช่วงระยะเวลาการเดินเครื่องครบวงจรของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสามารถคิดจากเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ดังนี้

$E = 24 \eta I \left(\frac{U}{n}\right)$ (2.4-1)

E = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ , $M W_e h$

η = ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของโรงไฟฟ้าปรมาณู (เป็นอัตราส่วนไฟฟ้า และความร้อนที่ผลิตได้)

U = น้ำหนักของยูเรเนียมทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเมตริกตัน , MT

n = จำนวนโซ่นของเชื้อเพลิง

$\frac{U}{n}$ = น้ำหนักของยูเรเนียมใน 1 โซ่นของเชื้อเพลิง , MT

I = ค่าเบิร์นอัพของเชื้อเพลิง MWd/MT

นอกจากนี้ยังสามารถหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในการเดินเชื้อเพลิงครบวงจรได้ดังนี้

$E = 8766\ L' K \tau'$ (2.4-2)

8766 = จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี

K = กำลังผลิตไฟฟ้าที่กำหนด, MW_e

τ' = จำนวนปีระหว่างการเริ่มใช้งานและหยุดเครื่องเพื่อนำออกจากแกนกลางเครื่องของเชื้อเพลิง 1 ไซเคิล

L' = ตัวประกอบความสามารถในการเดินเครื่องผลิตกำลังไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง เมื่อยะเดินเครื่องอยู่ต่อจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตามกำลังผลิตที่กำหนดไว้ในช่วงเวลาเดียวกัน หรือเรียกว่า ยูทิไลเซชันแฟตเตอร์ (utilization factor)

เมื่อเชื้อเพลิงเดินเครื่องในภาวะสม่ำเสมอภายใต้เงื่อนไขของแต่ละไซเคิลที่เหมือนกัน สมการ (2.4-1) จะเท่ากับ (2.4-2)

$8766\ KL'\tau' = 24\ \eta I \left(\frac{U}{n}\right)$ (2.4-3)

ถ้าระยะเวลาในการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงในช่วงที่ต่อเนื่องกันเป็น τ_K แล้วระยะเวลาของวัฏจักรเชื้อเพลิงระหว่างการเริ่มเดินเครื่อง 2 ครั้งที่ต่อเนื่องกัน (σ_K) จะเป็นดังนี้

$\sigma_K = \tau' + \tau_K$ (2.4-4)

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็นธัลพี และช่วงระยะเวลาของไซเคิลภายใต้ภาวะสม่ำเสมอ จะได้ว่า

$$\delta_K = \tau_K + \frac{I_n\ (U/n)}{365\ 25KL} \qquad (2.4\text{-}5)$$

2.5 <u>ทฤษฎีและวิธีการทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวกับการคำนวณ และวิเคราะห์ราคาเชื้อเพลิงปรมาณู</u>

วัฏจักรเชื้อเพลิงและราคานั้น นอกจากจะมีส่วนสัมพันธ์กับราคาในการผลิตพลังงานไฟฟ้าแล้วยังสัมพันธ์กับกาลเวลาที่ล่วงเลยไปด้วย ซึ่งจะทำให้มูลค่าเปลี่ยนแปลงไปตามหลักการทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ค่าของเงินเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา การวิเคราะห์การลงทุน และการเสื่อมราคา

2.5.1 <u>ค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา (Time Value of Money)</u>

เนื่องจากการคิดราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณูจะต้องคิดระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจากการทำเหมืองจนถึงการสกัดยูเรเนียม และพลูโตเนียมออกจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นเวลาหลายปี ดังนั้นค่าของเงินในช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาเสมอ ดังนั้นเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบราคาจึงต้องคิดเทียบราคาค่าใช้จ่ายต่าง ๆ กับเวลาที่ตั้งไว้เป็นมาตรฐาน โดยใช้ความรู้ทางเศรษฐศาสตร์ช่วย ซึ่งจะเกี่ยวพันกับการคิดค่าของเงินที่เปลี่ยนตามกาลเวลาในเชิงของดอกเบี้ย

2.5.1.1 <u>อัตราดอกเบี้ยเชิงเดี่ยว</u> (Simple Interest)

$S = P + Pni$

$S = P\ (i+ni)$ (2.5-1)

i = อัตราดอกเบี้ยต่อระยะเวลา (วัน, เดือน, ปี)

n = จำนวนระยะเวลาที่ผิดไปจากเวลาที่ตั้งไว้เป็นมาตรฐาน (วัน, เดือน, ปี)

P = จำนวนเงินเริ่มต้น (Present sum หรือ Present worth)

S = เงินรวม (Future Sum)

2.5.1.2 อัตราดอกเบี้ยเชิงซ้อน (Compound Interest)

ก. ระบบจ่ายที่เดียว (Single payment system)

$$S = P\,(1+i)^n \qquad (2.5\text{-}2)$$

$$= P\,(CAF, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}3)$$

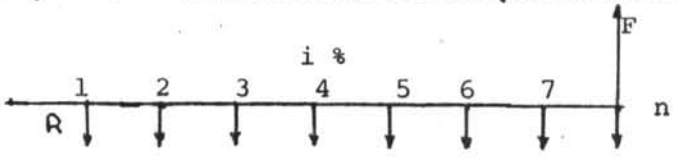
$(CAF, i\%, n) = (1+i)^n$ = Single payment compound amount factor

$$P = S\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right] \qquad (2.5\text{-}4)$$

$$= S\,(PWF, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}5)$$

$(PWF, i\%, n) = \frac{1}{(1+i)^n}$ = Single payment present-worth factor

ข. ระบบจ่ายเป็นอนุกรม และมีค่าเท่ากันตลอด (Uniform Annual Series System) รูปที่ 2.5-1 ผังแสดงการจ่ายเงินเป็นอนุกรมและมีค่าเท่ากันตลอด



$$S = R\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right] \qquad (2.5\text{-}6)$$

$$= R\,(SCAF, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}7)$$

R = Annual payment, Annuity หรือ Regular payment

$$(SCAF, i\%, n) = \frac{(1+i)^n-1}{i}$$

= unifrom series compound amount factor

$$R = S\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right] \qquad (2.5\text{-}8)$$

$$= S\,(SFF, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}9)$$

$$(SFF, i\%, n) = \frac{i}{(1+i)^n-1}$$

= Sinking fund factor

จากสมการ (2.5-6) แทนค่า $S = P(1+i)^n$

$$P = R\left[\frac{(1+i)^n-1}{i\,(1+i)^n}\right] \qquad (2.5\text{-}10)$$

$$= R\ (SPWF, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}11)$$

$$(SPWF, i\%, n) = \frac{(1+i)^n-1}{i\,(1+i)^n}$$

= uniform series present worth factor

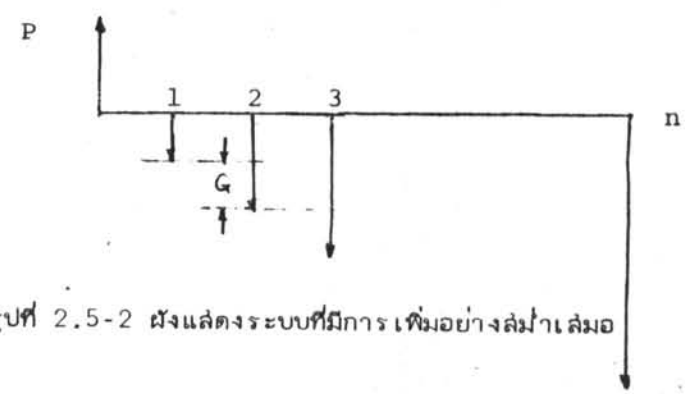
$$R = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right] \qquad (2.5\text{-}12)$$

$$= P\ (CRE, i\%, n) \qquad (2.5\text{-}13)$$

$$(CRE, i\%, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}$$

= capital recovery factor

ค. <u>ระบบที่มีการเพิ่มหรือลดหย่อนอย่างสม่ำเสมอ</u> (Uniform Gradient System)



รูปที่ 2.5-2 ผังแสดงระบบที่มีการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ

$$P = \frac{G}{i}\left[\frac{(1+i)^n-i}{i(1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n}\right] \qquad (2.5\text{-}14)$$

$= G\ (GPWF, i\%, n)$ = ค่าเงินต้นเทียบเท่าของส่วนที่เพิ่ม

$$(GPWF, i\%, n) = \frac{1}{i}\left[\frac{(1+i)^n-1}{i\,(1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n}\right]$$

= uniform gradient present - worth factor

G = เงินเฉพาะส่วนที่จ่ายเพิ่มขึ้น

$$R = G\left[\frac{1}{i} - \frac{n}{i}\left\{\frac{i}{(1+i)^{n}-1}\right\}\right]$$

$$= G\ (GUSF,\ i\%,\ n)$$

$$(GUSF,\ i\%,\ n) = \left[\frac{1}{i} - \frac{n}{i}\left\{\frac{i}{(1+i)^{n}-1}\right\}\right]$$

= Gradient to uniform series conversion factor

ตารางที่ 2.5-1 แสดงความสัมพันธ์สัญญลักษณ์ที่ใช้และสูตรสำเร็จ ดังนี้

2.5.2 การวิเคราะห์การลงทุน (Investment Analysis)

วิธีวิเคราะห์การลงทุนที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่ 4 วิธี ดังนี้

ก. ค่าเงินต้นเทียบเท่าที่ปัจจุบัน (Present Worth Method)

เป็นการเทียบเท่าเงินลงทุนค่าใช้จ่ายและรายได้ต่าง ๆ ที่ได้ประเมินเป็นค่าเงินต้นปัจจุบัน (present worth) ซึ่งจากวิธีนี้สามารถนำค่าเงินต้นที่เทียบเท่าแล้วของแต่ละโครงการมาเปรียบเทียบกัน ค่าเงินต้นเทียบเท่าที่น้อยที่สุด จะเป็นโครงการที่เหมาะสมที่สุดที่ควรจะตัดสินใจเลือก

การคำนวณค่าเงินต้นเทียบเท่านี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า discounting และอัตราดอกเบี้ยที่ใช้เรียกว่า discounting rate ซึ่งในแง่ของการลงทุนอัตราดอกเบี้ยก็คือ อัตราผลตอบแทน (rate of retwon) นั่นเอง

ข. การเปรียบเทียบโดยเปลี่ยนเป็นค่าเทียบเท่าเงินจ่ายเท่ากันรายปี (Equivalent Uniform Annual Cash Flow Method) วิธีนี้ตรงข้ามกับวิธีค่าเงินต้นเทียบเท่าที่ปัจจุบัน โดยวิธีนี้จะเทียบค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เป็นเงินเท่ากันรายปี (annual cost) ซึ่งสามารถนำค่าเงินจ่ายเท่ากันรายปีของแต่ละโครงการมาเปรียบเทียบกัน โครงการที่มีค่าเทียบเท่าน้อยกว่าจะถือว่าเป็นโครงการที่มีความเหมาะสมมากกว่า

แฟกเตอร์	สัญญลักษณ์	ความสัมพันธ์ *	สูตรสำเร็จ
Single payment compound amount factor	(CAF, i%, n)	$CAF = \frac{1}{PWF}$	$(1+i)^n$
Single payment present worth factor	(PWF, i%, n)	$PWF = \frac{1}{CAF}$	$\frac{1}{(1+i)^n}$
Uniform series compound amount factor	(SCAF, i%, n)	$SCAF = \frac{1}{SFF}$	$\frac{(1+i)^n-1}{i}$
Sinking fund factor	(SFF, i%, n)	$SFF = \frac{1}{SCAF}$	$\frac{i}{(1+i)^n-1}$
Uniform series present worth factor	(SPWF, i%, n)	$SPWF = \frac{1}{CRF}$	$\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}$
Capital recovery factor	(CRF, i%, n)	$CRF = \frac{1}{SPWF}$ $CRF = SFF + i$	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}$
Uniform gradient present worth factor	(GPWF, i%, n)	-	$\frac{1}{i}\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n}\right]$
Gradient to uniform series conversion factor	(GUSF, i%, n)	-	$\frac{1}{i} - \frac{n}{i}\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]$

* ความสัมพันธ์นี้จะเป็นจริงเมื่อเทียบเท่าที่อัตราดอกเบี้ยและระยะเวลาเดียวกันเท่านั้น

(10)
ตารางที่ 2.5-1 แสดงความสัมพันธ์สัญญลักษณ์ที่ใช้และสูตรสำเร็จในเรื่องค่าของเงินเปลี่ยนตามกาลเวลา

เงื่อนไขที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับการเปรียบเทียบโดยวิธีนี้ ก็คือ ค่าอัตราดอกเบี้ยที่ใช้เปรียบเทียบ (i*) ถือว่าคงที่ตลอดเวลาของการเปรียบเทียบ และสามารถคิดค่าเทียบเท่าเงินจ่ายเท่ากันรายปีจากอายุการใช้งานของแต่ละโครงการได้เลย ไม่ว่าอายุการใช้งานจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่าการเปรียบเทียบจะกระทำภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ราคาและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ มีค่าคงที่ (price constant) ทำให้ค่าเทียบเท่าเงินจ่ายเท่ากันรายปีของแต่ละโครงการมีค่าคงที่ไปด้วย

ค. <u>การหาอัตราผลตอบแทน</u> (Rate of Reteurn Method)

อัตราผลตอบแทน คือ ผลที่ได้จากการลงทุนเป็นอัตราร้อยละเมื่อเทียบกับเวลาหนึ่งปีที่ลงทุนไป ซึ่งอัตราผลตอบแทนในกิจการต่าง ๆ จะไม่เท่ากันแล้วแต่ชนิดของกิจการและลักษณะของผลได้ในกิจการนี้ การหาอัตราผลตอบแทนของโครงการต่าง ๆ จึงเป็นวิธีซึ่งนอกจากจะสามารถช่วยให้กำหนดความพึงพอใจในการลงทุนแล้วยังสามารถใช้เป็นส่วนเปรียบเทียบโครงการได้ คือ โครงการใดก็ตามมีอัตราผลตอบแทนสูงกว่าภายใต้เงื่อนไขอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน โครงการนั้นย่อมดีกว่า

ง. <u>การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน</u> (Break-even Point Method)

วิธีนี้เป็นวิธีที่สมมุติเงินลงทุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ได้กู้มาโดยอัตราดอกเบี้ยที่กำหนดไว้ จากนั้นจะส่งคืนเงินกู้โดยเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยยังไม่หาผลประโยชน์จากโครงการ และระยะเวลาที่จุดคุ้มทุนปรากฏ จะเป็นเวลาที่ได้ชำระเงินกู้เรียบร้อยและเริ่มจะได้รับผลประโยชน์จากโครงการ ซึ่งวิธีนี้จะต่างกับการหาอัตราผลตอบแทนตรงที่วิธีนี้เป็นการหาเวลาที่จะคุ้มทุน แต่วิธีการหาอัตราผลตอบแทนเป็นการหาอัตราผลตอบแทน (อัตราดอกเบี้ย) ที่เหมาะสมหรือพอใจ

2.5.3 <u>การเสื่อมราคา</u> (Depreciation)

เนื่องจากในการคิดราคาพลังงานปรมาณู (Nuclear Power Cost) ซึ่งมีราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงเป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งนั้น ทรัพย์สิน เครื่องจักร และเครื่องใช้อื่น ๆ ของโรงไฟฟ้าปรมาณูย่อมมีการเสื่อมราคา ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงเรื่องการเสื่อมราคาด้วย

การเสื่อมราคาแบ่งวิธีการคิดตามองค์ประกอบได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.5.3.1 <u>วิธีคิดค่าเสื่อมราคาแบ่งตามองค์ประกอบของเวลาหรืออายุการใช้งาน</u> มีดังนี้

ก. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง (Straight line Depreciation)

ข. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบลดส่วน (Declining balance Depreciation)

ค. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบผลบวกตัวเลข (Sum of the Year's Digits Depreciation)

ง. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรงมีอัตราเปลี่ยน (Straight line with rate change)

จ. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบทุนจม (Sinking - Fund Depreciation)

2.5.3.2 <u>วิธีคิดค่าเสื่อมราคาแบ่งตามองค์ประกอบของลักษณะการใช้งาน</u> มีดังนี้

ก. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบคิดจำนวนหน่วยผลิตคงที่ (Constant unit use charges)

ข. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรงมีสัมประสิทธิ์การใช้งาน (Straight line modified by use-factor)

ค. การคิดค่าเสื่อมราคาแบบลดส่วนจำนวนหน่วยผลิต (Declining unit use charge)

2.6 <u>การคำนวณหาราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง</u>

2.6.1 <u>ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง</u>

จากหัวข้อ 2.2 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบวัฏจักรเชื้อเพลิงนั้น ได้แก่ การทำเหมือง การล้างแร่ การทำให้บริสุทธิและคอนเวอร์ชัน การทำให้เข้มข้นขึ้น การผลิตแท่งเชื้อเพลิง การหล่อเย็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว การขนย้ายและการทำรีโพรเซสซิง เป็นต้น ดังนั้นในการคำนวณราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงจะต้องนำราคาขององค์ประกอบเหล่านี้มาคิดรวมกัน รวมทั้งราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทน (replacement energy cost) ในขณะที่ทำการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิง

ราคาองค์ประกอบวัฏจักรเชื้อเพลิงที่ควรนำมาพิจารณาให้ละเอียด คือ

ก. <u>ราคายูเรเนียมบริสุทธิความเข้มข้นธรรมชาติ</u>, C_1

ราคานี้จะรวมถึงการทำเหมือง การล้างแร่ การทำให้บริสุทธิและคอนเวอร์ชั่นจาก U_3O_8 เป็น UF_6 ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$C_1 = 2.5998\ A(1)\ C_1 + A(2) \qquad (2.6\text{-}1)$$

C_1 = ราคาของ UF_6 ยูเรเนียมความเข้มข้นธรรมชาติ, \$/kgU

2.5998 = จำนวนน้ำหนักเป็นปอนด์ของ U_3O_8 ต่อ 1 kgU

A (1) = ราคาของยูเรเนียมธรรมชาติ , \$/lb U_3O_8

C_1 = conversion lossfactor โดยมากจะใช้ค่า 1.005

A (2) = ราคาในการเปลี่ยน U_3O_8 เป็น UF_6 , \$/kgU

ข. <u>ราคายูเรเนียมเข้มข้น</u> , C_2

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักยูเรเนียมที่ป้อนเข้าไปในหน่วย ทำให้เข้มข้น (F) กับน้ำหนักยูเรเนียมเข้มข้น (P) และน้ำหนักดีพลีทเต็ดยูเรเนียม (W) ดังนี้

$$F = P+W \qquad (2.6\text{-}2)$$

ให้ X_f , X_p และ X_t เป็นจำนวนสัดส่วนยูเรเนียม -235 โดยน้ำหนักที่อยู่ในยูเรเนียมที่ป้อนเข้าไปในหน่วยทำให้เข้มข้น ยูเรเนียมเข้มข้นและดีพลีทเต็ดยูเรเนียมตามลำดับจะได้ความสัมพันธ์ของน้ำหนักยูเรเนียม -235 ในทั้ง 3 ส่วนดังนี้

$$FX_f = PX_p - WX_t \qquad (2.6\text{-}3)$$

$$\frac{F}{P} = \frac{X_p - X_t}{X_f - X_t} \qquad (2.6\text{-}4)$$

ให้ X = ความเข้มข้นใด ๆ , X_f = ความเข้มข้นธรรมชาติ = 0.711% โดยน้ำหนัก

$$\frac{F}{P} = \frac{X - X_t}{0.711 - X_t} \qquad (2.6\text{-}5)$$

สำหรับ Separative work ของการทำให้เข้มข้น แสดงได้ดังนี้

$$\text{Separative work} = WV(X_t) + PV(X_p) - FV(X_f) \qquad (2.6\text{-}6)$$

โดยที่

$$V(X_i) = (2X_i - 1) \ln \frac{X_i}{1-X_i} \qquad (2.6\text{-}7)$$

ซึ่งการคิดราคาการทำให้เข้มข้นคิดในหน่วย $/SWU

SWU = Separative work mass unit

$$C_2 = C_e \left[\frac{(X-X_t)(1-2X_t)}{X_t(1-X_t)} \right] - (1-2X) \ln \left\{ \frac{X(1-X_t)}{X_t(1-X)} \right\} \Bigg]$$

$$- (C_{n,\,opt} - C_1) \left[\frac{X-X_t}{0.00711-X_t} \right] \qquad (2.6\text{-}8)$$

C_2 = ราคายูเรเนียมเข้มข้น X , $/kgU

C_e = ราคาของ separative work , $/kgU

0.00711 = จำนวนอัตราส่วนความเข้มข้น โดยน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ในยูเรเนียมธรรมชาติ

X = จำนวนอัตราส่วนความเข้มข้น โดยน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ในยูเรเนียมเข้มข้น

X_t = จำนวนอัตราส่วนความเข้มข้น โดยน้ำหนักของยูเรเนียม -235 ในฟีดสตรีทเต็ดยูเรเนียม

C_1 = ราคาของยูเรเนียมธรรมชาติ , $/kgU

$C_{n,\,opt}$ = ราคาของยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่ง X_t เป็น optimum tails, $/kgU

$$C_{n,\,opt} = C_e \left[\frac{(0.00711-X_t)(1-2X_t)}{X_t(1-X_t)} \right.$$

$$- 0.98578 \ln \left\{ \frac{0.00711(1-X_t)}{X_t(0.99289)} \right\} \Bigg] \qquad (2.6\text{-}9)$$

Equivalent Cost of 1 kg of Uranium Loaded
(15 Percent Annual Rate of Return with Monthly Compounding)

Event	Value at time of expenditure $	Time from initial operation month	Value at initial operation $
1. Purchase 7.029 kg U_3O_8[a] at $104/kg contained U	619.83	−15	746.79
2. $U_3O_8 \rightarrow UF_6$ conversion for 5.930 kg contained U @ $4/kg	23.72	−13	27.88
3. Enriching service—4.7943[b] SWU at $75/SWU	359.58	−6	387.41
4. Fabrication of 1 kg @ $90	90.00	−3	93.42
	Fuel value at initial operation		1255.50

[a] Includes 0.0891 kg U_3O_8 for conversion and fabrication losses.
[b] Includes 0.0479 SWU for fabrication losses.

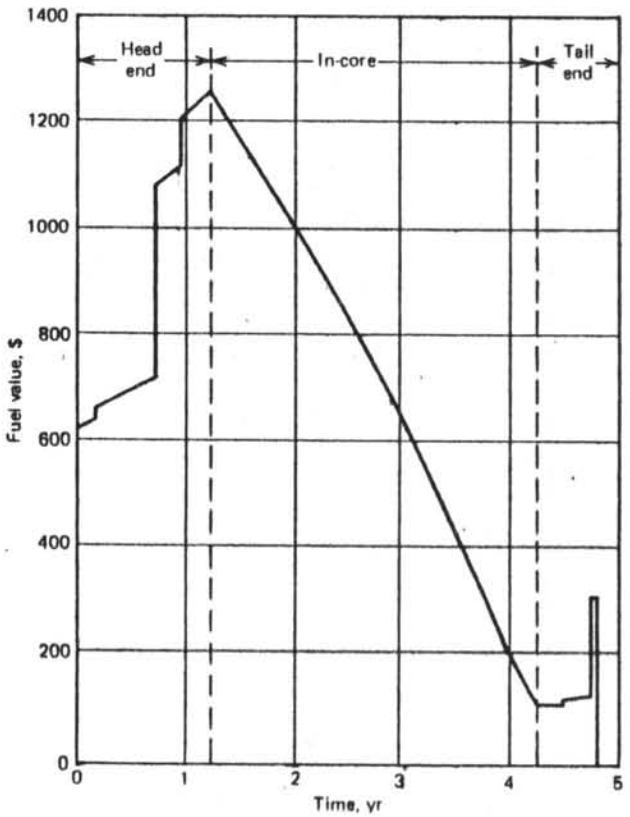
(1)
ตารางที่ 2.6-1 แสดงความสัมพันธ์ราคากับเวลาการใช้เชื้อเพลิง

Final Value of Uranium Discharged from Reactor
(15 Percent Annual Rate of Return with Monthly Compounding)

Event	Value at time of event $	Time from discharge month	Value at discharge $
Shipping cost	10.00	−3	−9.63
Reprocessing charge	180.00	−6	−167.07
Credit for 0.959 kg of 0.9 w/o[a] uranium @ $104/kg U			
$75/SWU	153.59	−6	142.56
Credit for 6.04 g fissile Pu[b] @ $25/g	151.00	−6	140.15
	Value at time of discharge		106.01
	Spent fuel value referenced to time of initial operation (36 mo)		67.78

[a] Reprocessing loss of 0.05 kg U not included.
[b] Reprocessing loss of 0.06 kg fissile Pu not included.

(1)
ตารางที่ 2.6-1 (ต่อ)



Fuel cycle investment time diagram.

รูปที่ 26.-1 (1) แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลงทุนในวัฏจักรเชื้อเพลิงกับเวลา

จากสมการ (2.6-8) เทอมหลังเป็นการแก้ไขค่าในกรณี off-optimum tails แต่ถ้าเป็น optimum tail แล้ว เทอมนี้จะเท่ากับ 0

ค. <u>พลูโตเนียมเครดิต</u> (Plutonium Credit) เป็นผลพลอยได้จากการทำรีโพรเซสซิง ซึ่งจะสามารถสกัดพลูโตเนียมออกจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว โดยถือว่าเป็นรายรับของวัฏจักรเชื้อเพลิง ค่านี้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 ในเชื้อเพลิง

ง. <u>ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทน</u> (Replacement Energy) เป็นราคาเชื้อเพลิงของพลังงานที่ใช้ทดแทนเมื่อหยุดเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิง

2.6.2 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงกับเวลา</u>

เนื่องจากการซื้อและจัดหาเชื้อเพลิงยูเรเนียมจนกระทั่งใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ และนำออกไปทำรีโพรเซสซิงนั้น ไม่ได้กระทำในระยะเวลาเดียวกัน (time span) ดังแสดงในตารางที่ 2.6-1 การคิดค่าราคาและรายรับในช่วงเวลาเหล่านั้น จึงมีอิทธิพลเกี่ยวกับเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงต้องเทียบกับเวลาที่ใช้อ้างอิงเดียวกันที่ได้กำหนดขึ้น ซึ่งโดยมากจะถือเวลาที่เริ่มเดินเครื่องใช้งานเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลาอ้างอิง ฉะนั้นการคิดราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงจึงต้องใช้ความรู้ทางเศรษฐศาสตร์ (หัวข้อ 2.5) ในเรื่องค่าของเงินเปลี่ยนตามกาลเวลาเข้ามาช่วยในการคำนวณ

สำหรับแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลงทุนในวัฏจักรเชื้อเพลิงกับเวลา (fuel cycle investment time diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.6-1

2.6.3 <u>การคำนวณราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง</u>

จากหัวข้อ 2.1 ทราบว่า ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงคิดเป็น mill/kWhr และจากหัวข้อ 2.6.1 และ 2.6.2 ทราบว่าราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับเวลา และในทำนองเดียวกันพลังงานก็สัมพันธ์กับเวลาด้วย ดังนั้น

$$C_T = \sum_{K=1}^{N} \frac{\sum_{h=1}^{9} C_{hk} \psi_{hk}}{E_k \psi_k} \qquad (2.6\text{-}10)$$

C_T = ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงตลอดวัฏจักร N

N = จำนวนวัฏจักร

E_k = พลังงานไฟฟ้าในวัฏจักรที่ k

ψ_k = present worth factor คิดเทียบระหว่างเวลาตรงกึ่งกลางของวัฏจักรที่ k กับเมื่อเริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

C_{hk} = รายจ่ายและรายรับตลอดวัฏจักรที่ k

ψ_{hk} = present worth factor คิดเทียบระหว่างเวลาที่การใช้จ่ายได้ปรากฏขึ้นกับ เมื่อเริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

g = จำนวนรายการราคาค่าใช้จ่ายและรายรับ

2.7 <u>การยืดเวลาเดินเครื่องของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู</u>

ในแต่ละวงจรการเดินเครื่องเพื่อผลิตพลังงาน เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าในระดับที่กำหนดไว้ได้อีก ทั้งที่สืบเนื่องจากเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาลูกโซ่หรืออุณหภูมิของตัวระบายความร้อน เครื่องจะต้องหยุดเดินและเปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่ แต่ในบางกรณีหากการหยุดเครื่องอยู่ในช่วงจังหวะไม่เหมาะสม เช่น การหยุดเครื่องในขณะที่มีความต้องการพลังงานมาก และมีพลังงานทดแทนไม่เพียงพอ เป็นต้น จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการหยุดเดินเครื่อง (replacement energy) สูงขึ้นกว่าปกติมาก มีผลทำให้ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงสูงขึ้น และทำให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้สามารถเดินเครื่องต่อไปได้อีกโดยการลดระดับกำลังไฟฟ้าที่ผลิต หรือลดอุณหภูมิของตัวระบายความร้อน ซึ่งวิธีนี้จะเรียกว่า cycle stretchout ซึ่งอาจจะมีผลต่อราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงมาก แต่วิธีนี้จะใช้ต่อเมื่อมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและมีผู้ควบคุมเครื่องเป็นผู้ตัดสินใจใช้