การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์สำหรับประเทศไทย

โดย

ประเสริฐ ภวสันต์ Ph.D. (Imperial College, London)

โครงการวิจัยเลขที่ 106G-CHEM-2552

ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มกราคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๒ และงานวิจัยนี้คงไม่สามารถดำเนินการได้หากปราศจากความสนับสนุนและช่วยเหลือจากบุคคลจำนวนมาก ดังนี้

- วทัตตา ฤทธิ์เจริญ ผู้วิจัยหลัก ที่ทำและช่วยเหลืองานทุกด้าน
- จักราช คุณาเขมากร ผู้ช่วยผู้วิจัยหลัก ที่ช่วยสนับสนุนงาน LCA ของ EPR
- ฟาติมา ปรียากร ผู้ช่วยผู้วิจัยหลัก ที่ช่วยสนับสนุนงาน LCA ของ ABWR
- ดร. พรทิพย์ วงศ์สุโชโต ที่ช่วยดูแลเรื่องการประเมิน LCA ของทุกเทคโนโลยี
- รศ.ดร. นวดล เหล่าศิริพจน์ ที่ช่วยหากำลังคนมาสนับสนุนงานในครั้งนี้ และช่วยให้ input ที่สำคัญสำหรับการคำนวณเปรียบเทียบ
- ผศ. ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์ /ดร. ขนิษฐา มีวาสนา (มารุ่งเรือง)/ดร. วรพจน์ กนกกัณฑพงษ์/ผศ. ดร. บุณยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล ผู้ให้กำลังใจแรงงาน และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องที่ร้องขอ
- ภุชงค์ ศรีอ่วม และ กีรติ อิสระพายัพ ผู้ช่วยงานทั่วไป (สารพัดประโยชน์)
- อาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทั้ง 4 ท่าน (รศ.นเรศ จันทร์ขาว รศ.สมยศ ศรีสถิตย์ รศ.ดร.สุพิชชา จันทรโยธา อ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง) ที่คอยแนะนำในเรื่องต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคโนโลยีนิวเคลียร์สำหรับโรงไฟฟ้า

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือที่ตีมูลค่าไม่ได้เหล่านี้ และหวังว่างานวิจัยนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้ใช้งาน โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการตัดสินใจการคัดเลือกเทคโนโลยีสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ และขอให้โครงการในระยะที่ 2 (ปีงบประมาณ 2553) สามารถดำเนินการได้ลุล่วงเพื่อให้รายงานมีความสมบูรณ์ขึ้นต่อไป

ผู้วิจัย

ธันวาคม 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อภาษาไทย

โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตพลังงานสะอาดภายในประเทศเพื่อตอบสนองต่อความต้องการไฟฟ้าในอนาคต อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานนิวเคลียร์จำเป็นต้องมีการศึกษาทบทวนผลกระทบทางด้านต่าง ๆ อย่างถี่ถ้วน ทั้งทางด้านความปลอดภัยและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการให้รายละเอียดเกี่ยวกับเทคโนโลยีนิวเคลียร์ เริ่มตั้งแต่ชนิดของเทคโนโลยีที่มีใช้อยู่ตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน และแนวโน้มเทคโนโลยีที่จะมีใช้ในอนาคต แนวทางการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ โดยให้รายละเอียดเกี่ยวกับเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคัดเลือกพื้นที่ รวมถึงประเมินพื้นที่จริงในประเทศไทยที่มีศักยภาพในการตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ และยังได้เสนอบทวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการขุดเจาะยูเรเนียม การเปลี่ยนรูปและการเสริมสมรรถนะของเชื้อเพลิงยูเรเนียม การประกอบแท่งเชื้อเพลิง การผลิตไฟฟ้า รวมทั้งพิจารณาทางเลือกในการกำจัดซากเชื้อเพลิง 2 รูปแบบ คือ การนำกลับมาปรับสภาพเพื่อใช้ใหม่ และการทิ้งซากอย่างปลอดภัย นอกจากนี้ ยังได้เสนอบทวิเคราะห์ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ภายใต้การคำนวณวัฏจักรชีวิตของพลังงานนิวเคลียร์ด้วย โดยแสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

Nuclear power plant is one potential alternative for the production of clean power to be responsible for the increasing power requirement of the country. Nevertheless, the installment of nuclear technology necessitates a thorough investigation of the impacts that might occur to both safety and environment. This research sets the objectives to provide detailed information on nuclear technology. This starts from giving details of the technologies used in the past, current situation, and future directions. Not to disregard is the evaluation of suitable areas for nuclear power plants. The criteria for the selection of the suitable places for nuclear power plant are given together with actual examples of the investigation for the areas in Thailand with high potential for such technology. The environmental impact assessment for nuclear technology is provided using the concept of life cycle assessment starting from the extraction stage of uranium, conversion and enrichment of the natural uranium, fabrication of the fuel, the power plant, and also the options for the treatment of uranium wastes either the reuse of such uranium waste, or the safe disposal. At the end of this report, the evaluation of all the greenhouse gases generated from each stage of the life cycle of the nuclear technology will be proposed for the assessment of global warming potential of such technology.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

สารบัญเรื่อง จ

สารบัญตาราง ช

สารบัญรูป ช

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย 4

1.4 ทฤษฎี และ/หรือแนวทางความคิดที่วิจัย มาใช้ในการวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 8

บทที่ 2 แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ 9

2.1 แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ 9

2.2 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 1 9

2.3 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 2 10

2.4 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 3 11

2.5 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 3+ 11

2.6 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 4 12

บทที่ 3 แนวทางการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 15

3.1 หลักเกณฑ์เบื้องต้นในการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 15

3.2 รายละเอียดเกณฑ์การพิจารณาสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 15

บทที่ 4 สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย 19

4.1 ทบทวนข้อมูลการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย 19

4.2 ข้อเสนอการคัดเลือกสถานที่ตั้ง 27

4.3 บทวิเคราะห์การเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย 29

บทที่ 5 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ 33

5.1 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 วัฏจักรนิวเคลียร์ส่วนหน้า (Front end of nuclear fuel cycle) 35
5.3 การผลิตกระแสไฟฟ้า (Power generation) 41
5.4 วัฏจักรนิวเคลียร์ส่วนหลัง (Back end of nuclear fuel cycle) 41
5.5 บทวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อประเทศไทย43
บทที่ 6 การคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 45
6.1 แนวทางการศึกษา 45
6.2 ขั้นตอนการประเมิน 45
6.3 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล 57
6.4 บทสรุป 60
บทที่ 7 บทสรุป: ผลการดำเนินการในปีแรกและแผนงานในปีที่ 2 63
บรรณานุกรม 65
ประวัตินักวิจัยและคณะ 67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในยุคที่ 2 10
ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในแต่ละเทคโนโลยี 14
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การจัดแบ่งพื้นที่โซนบริเวณรอบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 17
ตารางที่ 4.1 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละพื้นที่ 20
ตารางที่ 4.2 คะแนนประเมินด้านความปลอดภัย 23
ตารางที่ 4.3 คะแนนประเมินด้านสิ่งแวดล้อม 23
ตารางที่ 4.4 ราคาประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ 24
ตารางที่ 4.5 พื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 25
ตารางที่ 4.6 รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย 27
ตารางที่ 4.7 จังหวัดที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณรอยเลื่อน 32
ตารางที่ 5.1 เปอร์เซนต์โดยเฉลี่ยของเกรดแร่ยูเรเนียมออกไซด์ในแต่ละประเทศ 36
ตารางที่ 5.2 ผลกระทบจากขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อประเทศไทย 44
ตารางที่ 6.1 exposure time แต่ละเทคโนโลยีที่ศึกษา 47
ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญ 48
ตารางที่ 6.3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากเทคโนโลยีอ้างอิง BWRและ PWR
ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด (Close fuel cycle) 49
ตารางที่ 6.4 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียมอ้างอิง 53
ตารางที่ 6.5 ปริมาณยูเรเนียมทั้งหมดและปริมาณยูเรเนียมป้อนเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ 54
ตารางที่ 6.6 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม
ภายใต้ทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด 54
ตารางที่ 6.7 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม
ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด 55
ตารางที่ 6.8 สัดส่วนโดยมวลของปริมาณยูเรเนียมขาเข้าแต่ละขั้นตอน (Mi) 57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ 7
รูปที่ 2.1 การพัฒนาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน 10
รูปที่ 2.2 จำนวนรูปแบบโรงไฟฟ้าในโลกทั้งหมด 436 โรง 12
รูปที่ 2.3 จำนวนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้งานอยู่ในแต่ละประเทศ 13
รูปที่ 4.1 อัตราการไหลของน้ำ ในแม่น้ำเจ้าพระยา จ.นครสวรรค์ 29
รูปที่ 4.2 แผนที่รอยเลื่อนและลุ่มน้ำในประเทศไทย 31
รูปที่ 5.1 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 34
รูปที่ 5.2 สัดส่วนการส่งผลิตแร่ยูเรเนียมในแต่ละประเทศ ปี 2551 35
รูปที่ 5.3 เค้กเหลือง (Yellow cake) 36
รูปที่ 5.4 กระบวนการแพร่ของก๊าซ (Gaseous Diffusion) 38
รูปที่ 5.5 กระบวนการหมุนเหวี่ยงของก๊าซ (Gas centrifuge) 38
รูปที่ 5.6 มัดเชื้อเพลิง (Fuel assemblies) 39
รูปที่ 5.7 มัดเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา แบบ PWR และ BWR 40
รูปที่ 5.8 บ่อน้ำสำหรับแช่เชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว 42
รูปที่ 5.9 สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิง 43
รูปที่ 6.1 ขอบเขตการศึกษา 46
รูปที่ 6.2 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กรณีศึกษา 51
รูปที่ 6.3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีดั้งเดิม (BWR และ PWR) และ เทคโนโลยีที่พัฒนาแล้ว (ABWR และ EPR) 58
รูปที่ 6.4 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด และแบบเปิด ของเทคโนโลยี ABWR และ EPR 59
รูปที่ 6.5 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี ABWR เมื่อเทคโนโลยีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต่างกัน 59
รูปที่ 6.6 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

GHG	ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas)
BWR	เครื่องปฏิกรณ์แบบ Boiling Water Reactor
PWR	เครื่องปฏิกรณ์แบบ Pressurized Water Reactor
ABWR	เครื่องปฏิกรณ์แบบ Advanced Boiling Water Reactor
EPR	เครื่องปฏิกรณ์แบบ European Pressurized Water Reactor
Thermal energy	พลังงานความร้อน ($MW_{th}d$)
electricity output	กระแสไฟฟ้า (MW_e)
thermal efficiency	ประสิทธิภาพทางความร้อน (%)
exposure time	เวลาที่เชื้อเพลิงยูเรเนียมอยู่ในถังปฏิกรณ์ (d)
capacity factor	สัดส่วนของเวลาในหนึ่งปีที่มีการผลิตกระแสไฟฟ้า 100% (%)
burn up rate	อัตราการให้พลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิงยูเรเนียม ($MW_{th}d/kg\ U$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สืบเนื่องจากปัญหาด้านพลังงานที่ประเทศทั่วโลกกำลังประสบอยู่ในปัจจุบันรุนแรงกว่าครั้งวิกฤตการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตที่ผ่านมามาก โดยในปัจจุบันนั้นราคาน้ำมันมีการปรับตัวสูงขึ้นและมีความผันผวนมาก โดยมีราคาระหว่าง 70-80 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล และอาจมีราคาสูงถึง 100 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรลในอนาคตอันใกล้ สำหรับประเทศไทยนั้นมีอัตราการนำเข้าพลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีการนำเข้าน้ำมันดิบรวมทั้งสิ้น 40,419 พันตัน เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2550 ร้อยละ 1.4 และคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 68.1 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด โดยเป็นมูลค่านำเข้าทั้งสิ้น 1,044,987 ล้านบาท นอกจากนั้นประเทศไทยยังนำเข้าก๊าซธรรมชาติทั้งสิ้น 8,261 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 13.9 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด และเป็นมูลค่านำเข้าทั้งสิ้น 70,389 ล้านบาท โดยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2550 ร้อยละ 0.7 นำเข้าน้ำมันสำเร็จรูป 391 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 0.7 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด และเป็นมูลค่านำเข้ารวมทั้งสิ้น 9,299 ล้านบาท นำเข้าถ่านหิน 10,034 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2550 ร้อยละ 12.1 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 16.9 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด และเป็นมูลค่า 34,512 ล้านบาท นอกจากนั้นประเทศไทยยังต้องนำเข้าไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้านรวม 240 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เป็นสัดส่วนร้อยละ 0.4 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด และเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 4,475 ล้านบาท

ซึ่งด้วยอัตราการนำเข้าพลังงานที่สูงอย่างต่อเนื่องในระดับดังกล่าว ประเทศไทยจะประสบกับปัญหาภาวะคุกคามด้านพลังงานในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอนดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.1.1 ปัญหาความมั่งคงด้านการจัดหาพลังงาน

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการการใช้พลังงานสูงขึ้นกว่าในอดีตอย่างมาก โดยจากข้อมูลของ APEC Energy Demand and Supply Outlook พบว่า ความต้องการพลังงานขั้นต้น (Primary energy demand) อันได้แก่ แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน และพลังงานน้ำจากเขื่อนใหญ่ของประเทศไทยมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.6 ต่อปี ในช่วงที่ผ่านมา และมีการคาดการณ์ต่อว่าความต้องการพลังงานขั้นต้นของประเทศไทยจะเพิ่มเป็น 258 Mtoe ในปี พ.ศ. 2573 นอกจากนั้น APEC Energy Demand and Supply Outlook ได้รายงานว่าความต้องการพลังงานในแต่ละภาคส่วนของประเทศ (final energy demand) อันประกอบด้วยภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง ภาคอาคารพาณิชย์ และภาคบ้านเรือนที่อยู่อาศัยทั่วไป ว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4.5 ต่อปี และคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2573 ความต้องการพลังงานในแต่ละภาคส่วนของประเทศจะสูงถึง 190 Mtoe ด้วยอัตรา

การความต้องการใช้พลังงานของประเทศที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีการเตรียมความพร้อมในการจัดหาแหล่งพลังงานที่เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของประเทศ ประเทศไทยจะต้องเผชิญกับปัญหาความมั่งคงด้านการจัดหาพลังงานในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอน

1.1.2 ปัญหาความมั่นคงและเสถียรภาพของการผลิตไฟฟ้า

จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2546 พบว่าประเทศไทยมีกำลังการผลิต และติดตั้งระบบไฟฟ้ารวม 24,805 MW คิดเป็น Reserve Margin ร้อยละ 25 และในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตและติดตั้งระบบไฟฟ้ารวมเพิ่มขึ้นเป็น 33,348 MW แต่ค่า Reserve Margin ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 18 เท่านั้น สำหรับ ปี พ.ศ. 2550 ประเทศไทยมีกำลังผลิตไฟฟ้ารวม 28,522 MW และมีค่า Reserve margin อยู่ราว 26.3% ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากปัญหาวิกฤตเศรษฐกิจที่ประเทศไทยประสบ และทำให้ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ดีคณะอนุกรรมการการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าคาดการณ์ว่า ในปี พ.ศ. 2559 หากเศรษฐกิจมีการฟื้นตัวและขยายตัวในระดับปานกลาง ประเทศไทยจะมีอัตราความต้องการไฟฟ้าสูงถึง 43,558 MW ซึ่งหากการสร้างโรงไฟฟ้าไม่เป็นไปตามแผนการพัฒนากำลังไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณสำรองต่ำกว่าร้อยละ 15 (เกณฑ์มาตรฐานสากล) ดังนั้นอนาคตการจัดหาพลังงานไฟฟ้าของไทยจึงเสี่ยงต่อความไม่เพียงพอของเชื้อเพลิง

1.1.3 ปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม รวมถึงปัญหาภาวะโลกร้อนอันสืบเนื่องมาจากการใช้พลังงานในอัตราที่สูงเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุด และจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดแนวทางการใช้แหล่งและเทคโนโลยีพลังงานสำหรับประเทศไทยในอนาคตอย่างมาก โดยในปี พ.ศ. 2551 ร้อยละ 81.5 ของพลังงานขั้นต้นที่จัดหามาได้ของประเทศเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ทางน้ำและดินในระดับท้องถิ่นรวมทั้งในระดับภูมิภาค เช่น ฝนกรด โดยเฉพาะมลภาวะทางอากาศนั้น พบว่ามีปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจกที่เป็นต้นเหตุของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศของโลก ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเกษตรกรรม และความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตอย่างรุนแรง

อนึ่งประเทศไทยเป็นภาคีของพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ที่มุ่งแสวงหามาตรการที่เป็นรูปธรรมสำหรับป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าว และได้ให้สัตยาบรรณต่อพิธีสารดังกล่าวเมื่อปี พ.ศ. 2545 ที่จะต้องลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกลง แต่จากการที่ประเทศไทยยังใช้พลังงานหมุนเวียนน้อย และปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้การปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่อประชากรของไทยสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกในปีฐาน (พ.ศ. 2533) คือ 3.9 ตันคาร์บอนไดออกไซด์

เทียบเท่าต่อคน ภายในปี พ.ศ. 2553 และประเทศไทยจะมีความเสี่ยงต่อการถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มประเทศที่มีพันธกรณี ต้องลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ดังเช่นประเทศที่พัฒนาแล้วซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังต้องเผชิญกับมาตรการกีดกันทางการค้า ด้วยเหตุผลของการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (Non – tariff trade barrier) ของประเทศผู้นำเข้าสินค้า อนึ่งจากการคาดการณ์ของ APEC Energy Demand and Supply Outlook 2006 พบว่าในปี พ.ศ. 2573 ประเทศไทยจะมีอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกภาคส่วนสูงถึง 734 ล้านตัน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในระยะเวลา 5-10 ปีข้างหน้า หากประเทศไทยมีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้อย่างเต็มศักยภาพโดยอาศัยมาตรการที่เข้มข้นและต่อเนื่อง อาจช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานและทดแทนพลังงานรูปแบบปกติได้ถึงร้อยละ 15-20 อย่างไรก็ตามในระยะยาวประเทศไทยก็จะยังคงประสบกับปัญหาการขาดแคลนพลังงานอยู่ดีอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากการใช้พลังงานหมุนเวียนจะไม่สามารถลดปริมาณความต้องการพลังงานฟอสซิลได้อย่างมีนัยสำคัญมาก ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยต้องเผชิญกับภาวะความเสี่ยงด้านความมั่นคงทางพลังงาน และด้านการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อประชากรเกินค่าเฉลี่ยของโลก ดังนั้นนอกเหนือจากการใช้พลังงานหมุนเวียนแล้ว ประเทศไทยจำเป็นต้องคำนึงถึงแนวทางอื่นประกอบด้วย เช่น การพึ่งพาแหล่งพลังงานของมิตรประเทศเพื่อนบ้าน (ซึ่งอาจเสี่ยงต่อปัญหาภูมิศาสตร์การเมืองถ้าจัดการความสัมพันธ์ระหว่างประเทศได้ไม่ราบรื่น) รวมถึงการใช้ชีวมวลเป็นปริมาณมาก (Large scale bioenergy systems) (ซึ่งต้องมีการปฏิรูปภาคการเกษตรและการปฏิรูปที่ดิน เพื่อนำไปสู่ "Bioeconomy") นอกจากนั้นประเทศไทยควรให้ความสนใจในการติดตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีผลิตพลังงานใหม่ๆ ที่สำคัญซึ่งในปัจจุบันยังมีราคาแพงและยังไม่คุ้มค่าในการลงทุน เช่น เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ๆ (เช่น Biological solar cell และ Polymer solar cell) เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง และที่สำคัญที่สุดคือ "เทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์" โดยเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการบรรจุเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์เข้าไปในแผน Power Development Plan (PDP) 2007 ว่าในอีก 14 ปีข้างหน้า (พ.ศ. 2564) ประเทศไทยจะมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ทั้งสิ้น 4,000 MW

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์หลักเพื่อได้เทคโนโลยีในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและมีวัตถุประสงค์เฉพาะคือ

1.2.1 เพื่อทบทวนสถานภาพของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก

1.2.2 เพื่อประเมินผลดี และผลเสียอันเกิดจากการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้เทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์แต่ละประเภทโดยใช้หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment)

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย

1.2.5 เพื่อเผยแพร่ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสู่สาธารณะ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์เฉพาะที่มีการใช้งานเชิงพาณิชย์และเป็นที่นิยมในปัจจุบัน จำนวนไม่เกิน 3 เทคโนโลยี

1.3.2 พิจารณาผลกระทบของการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่มีต่อสภาพแวดล้อม สังคม และเศรษฐกิจโดยรวม

1.3.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตมีขอบเขตครอบคลุมตั้งแต่การก่อสร้างโรงไฟฟ้า การจัดหาวัตถุดิบ การขนส่ง การผลิตไฟฟ้า และการกำจัดกากนิวเคลียร์

1.3.4 วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในรูปของต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อหน่วยการผลิต

1.3.5 เผยแพร่ข้อมูลที่ศึกษาสู่สาธารณะโดยการจัดสัมมนา

1.4 ทฤษฎี และ/หรือแนวทางความคิดที่วิจัย มาใช้ในการวิจัย

1.4.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการใช้งานเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์

พลังงานนิวเคลียร์มีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่สะอาด ไม่มีเขม่าควัน หรือแก๊สมลพิษ ไม่ทำให้เกิดฝนกรดหรือปรากฏการณ์เรือนกระจก น้ำระบายความร้อนที่ปล่อยออกมามีลักษณะเหมือนกับน้ำที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนทั่วไป โดยในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่ 436 โรงใน 30 ประเทศ ให้กำลังผลิตไฟฟ้ารวมกันมากกว่า 400,000 MW หรือไม่น้อยกว่าร้อยละ 16 ของการใช้ไฟฟ้าทั่วโลก โดยประเทศฝรั่งเศสมีสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์สูงที่สุดถึงร้อยละ 78 ส่วนประเทศสหรัฐอเมริกา มีจำนวนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มากที่สุดถึง 104 โรง และยังมีโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่อยู่ระหว่างการก่อสร้างอีก 53 แห่ง นอกจากนั้นในปัจจุบันประเทศจีนก็เป็นประเทศหนึ่งที่มีการขยายการผลิตไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์อย่างมาก โดยประเทศจีนมีโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ใช้อยู่ในขณะนี้ 9 แห่ง อยู่ระหว่างการก่อสร้าง 2 แห่ง และวางแผนที่จะก่อสร้างเพิ่มเติมอีกถึง 30 แห่ง อนึ่งเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ที่ใช้กันอยู่มี 3 ประเภทหลักคือ แบบน้ำอัดความดัน (Pressurized water reactor; PWR) แบบน้ำเดือด (Boiling water reactor; BWR)

และแบบ CANDU (ย่อมาจาก *Canada deuterium uranium*) โดยเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ 2 ประเภทแรกจะใช้ยูเรเนียมที่ทำให้เข้มข้นเป็นเชื้อเพลิง และใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวระบายความร้อนและตัวหน่วงนิวตรอน ส่วนเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ประเภท CANDU จะใช้ยูเรเนียมธรรมดาที่ไม่ต้องทำให้เข้มข้นเป็นเชื้อเพลิง และใช้น้ำมวลหนักเป็นตัวระบายความร้อนและตัวหน่วงนิวตรอน

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ก็มีข้อเสียที่พึงต้องระวัง ทั้งในแง่ของความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ รวมถึงการจัดการกากเชื้อเพลิงกัมมันตภาพสูงจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยปัญหาดังกล่าวกำลังได้รับการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางจากหลายประเทศทั่วโลกเพื่อให้สามารถนำเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยที่สุดในอนาคตอันใกล้ ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์จะมุ่งเน้นไปในส่วนของเตาปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งเตาปฏิกรณ์ที่กำลังอยู่ระหว่างการพัฒนา และคาดว่าจะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ภายใน 10 ปีข้างหน้ามี 2 ประเภท คือ แบบ Fast-breeder reactor ซึ่งกำลังพัฒนาในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส และญี่ปุ่น ส่วนเตาปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ 2 คือ Pebble-bed reactor ที่กำลังดำเนินการพัฒนาในประเทศจีน และคาดว่าจะมีความปลอดภัยสูงมากเนื่องจากใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปเมล็ดขนาดเล็ก และถูกหุ้มด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ และวัสดุเซรามิก ซึ่งยากที่จะหลอมละลาย โดยในปัจจุบันประเทศจีนได้ให้ความสนใจในตัวเทคโนโลยีนี้อย่างมากเพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเทคโนโลยีนิวเคลียร์

ในส่วนของประเทศไทยนั้น การใช้พลังงานนิวเคลียร์จำเป็นต้องมีการเตรียมการอย่างจริงจัง ทั้งในเชิงเทคนิค การเลือกเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ความปลอดภัย รวมถึงการโน้มน้าวทัศนคติของสาธารณชน และการศึกษาด้านการลงทุน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4.2 แนวคิดด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment: LCA) ของผลิตภัณฑ์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นกระบวนการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมโดยพิจารณาครอบคลุมทั้งกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันในรูปของวัตถุดิบและพลังงานตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียดเพื่อที่จะหาวิธีการในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้ LCA แตกต่างไปจากเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ นอกจากนี้ LCA ยังเน้นผลเชิงปริมาณ เริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมจากแหล่งกำเนิดของทรัพยากรที่นำมาใช้ไปจนถึงขั้นตอนการทำลายซากผลิตภัณฑ์ และประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในทุกประเด็นที่เกิดขึ้น และให้

ความสำคัญทั้งในเรื่องของทรัพยากรที่สิ้นเปลืองไปและสารอันตรายที่ถูกปลดปล่อยออกจากวัฏจักรชีวิต ซึ่งตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะแสดงถึงผลกระทบขั้นกลาง เช่น การทำให้โลกร้อนขึ้น หรือ การลดลงของปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศ มากกว่าที่จะมองเฉพาะปัญหาเฉพาะสารที่ปล่อยออกมา และยังสามารถประเมินผลกระทบถึงขั้นปลายทาง ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย ผลกระทบต่อระบบนิเวศ และผลกระทบต่อการคงเหลือของทรัพยากร

อนึ่งการจำแนกผลกระทบในการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับการใช้พลังงานนิวเคลียร์ต่อสิ่งแวดล้อมมีความแตกต่างจากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการประเมินวัฏจักรชีวิตทั่วไป ซึ่งผลกระทบของการใช้พลังงานนิวเคลียร์ต่อสิ่งแวดล้อมสามารถสามารถแบ่งได้ออกเป็น 9 กลุ่มใหญ่คือ Abiotic Resources Depletion Potential (ADP), Global Warming Potential (GWP), Ozone Depletion Potential (ODP), Acidification Potential (ACP), Ecotoxicity through Aquatic and Terrestrial (ECA, ECT), Nutrification Potential (NP), radiological impact potential (RP) และ Critical Volume (CV) [Heijungs R. (1992); Guinee J.B. (1995); UNEP (1998)] ในการศึกษาครั้งนี้ดัชนีชี้วัดที่ถูกเลือกนำมาประเมินคือ ดัชนีชีวัด GWP โดยวัดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อนซึ่งปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

1.4.3 หลักการและความสำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิต

หลักการสำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ คือ การประเมินผลกระทบโดยมีขอบเขตการพิจารณาที่กว้างขึ้น นั่นคือ รวมถึงผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ ผลกระทบจากการขนส่ง/จำหน่าย และผลกระทบจากการใช้งานและการจัดการเมื่อผลิตภัณฑ์หมดสภาพการใช้งานแล้ว โดยสำหรับประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์สามารถแสดงขอบเขตการพิจารณาได้ดังรูปที่ 1.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.1 ขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ประโยชน์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 หัวข้อหลัก คือ ประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมของหน่วยงานรัฐ ประโยชน์เชิงธุรกิจต่อผู้ประกอบการ และประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมโดยส่วนรวม ดังนี้

- ประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศ

รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นด้วยว่าการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้นจำเป็นจะต้องมีการวางแผนที่ดีเพื่อให้มีการใช้ทรัพยากรในการจัดการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด นั่นคือหากมีการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้ไม่สามารถใช้ศักยภาพของทรัพยากรที่ใช้ไปอย่างเต็มที่ เช่น กรณีที่ผลกระทบส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่จากการสร้างโรงไฟฟ้า (ตัวอย่างในรูปที่ 1.1) การทุ่มงบประมาณเพื่อให้การผลิตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงย่อมไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม จึงเป็นการวางแผนใช้ทรัพยากรที่ไม่เหมาะสม

- ประโยชน์เชิงธุรกิจต่อผู้ประกอบการ

การดำเนินงานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ทวีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินงานทางธุรกิจมากขึ้นในปัจจุบัน ดังจะเห็นได้ว่ามีข้อกำหนดทางด้านสิ่งแวดล้อมที่นำมาใช้เป็นเกณฑ์การค้าระหว่างประเทศมากมาย โดยประเด็นสำคัญได้แก่ การซื้อขายคาร์บอน (Carbon credit) ที่ใช้หลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อช่วยคำนวณปริมาณคาร์บอนสำหรับการซื้อขายดังกล่าว

- ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมโดยส่วนรวม

เป็นที่ทราบดีในปัจจุบันแล้วว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นไม่ได้จำกัดอยู่ในขอบเขตจำกัด หากแต่มีผลกระทบในวงกว้าง และบางครั้งเป็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อสภาวะของโลกโดยรวมผล

สำเร็จจากการประเมินวัฏจักรชีวิตเกี่ยวกับการเพิ่มคุณภาพการดำเนินงานทางด้านสิ่งแวดล้อม ย่อมทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีต่อสังคมโดยรวมมีน้อยลง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสถานภาพความก้าวหน้าของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ในปัจจุบัน

1.5.2 ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

1.5.3 เป็นแนวทางในการเลือกชนิดของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย รวมถึงเป็นการเตรียมความพร้อมเพื่อก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์

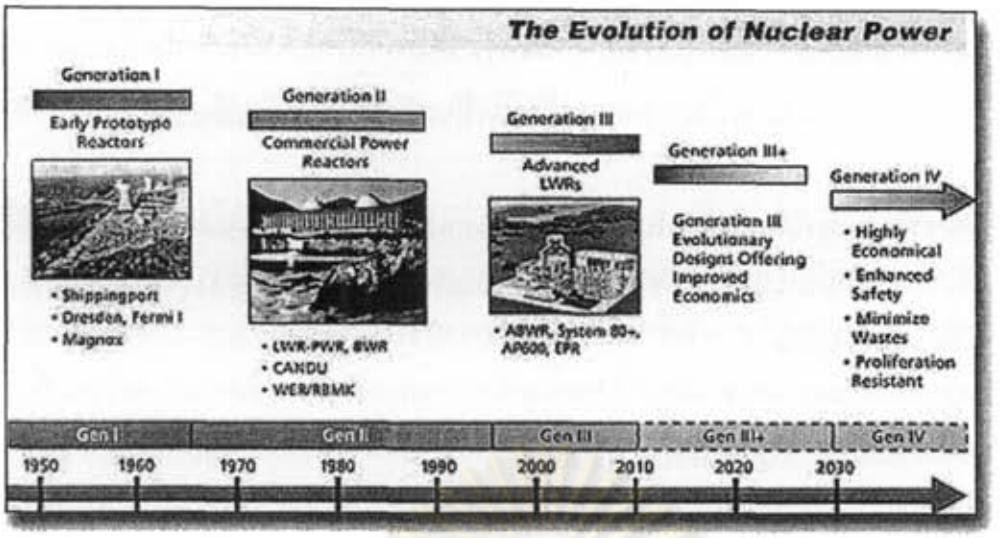
บทนี้นำเสนอข้อมูลแนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ในแต่ละประเทศ และวิวัฒนาการของเทคโนโลยีเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้า รวมทั้งจำนวนโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

2.1 แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มีหลายรูปแบบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ผลิตพลังงานนิวเคลียร์ จากอดีตจนถึงปัจจุบันเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในหลาย ๆ ประเทศ ซึ่งเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์สามารถแบ่งประเภทได้หลายรูปแบบขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้ ซึ่งหากแบ่งตามยุคสมัยเทคโนโลยีนิวเคลียร์อาจแบ่งได้เป็น 4 ยุค ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.2 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 1

ยุคที่ 1 เป็นยุคแรกในช่วงปี ค.ศ. 1950 – ค.ศ. 1960 ที่มีการใช้พลังงานนิวเคลียร์มาผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องปฏิกรณ์ส่วนใหญ่ยังเป็นเครื่องต้นแบบซึ่งมีขนาดเล็ก เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา (Light water reactor: LWR) ชื่อ Mark-1 ขนาด 90 MW_e และเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำเดือด (Boiling water reactor: BWR) ชื่อ Dresden-1 ขนาด 250 MW_e ที่คิดค้นโดยประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องปฏิกรณ์แบบ Magnox ซึ่งใช้แก๊สเป็นตัวหล่อเย็น และใช้แกรไฟต์เป็นตัวหน่วงนิวตรอน ขนาด 50 MW_e ซึ่งพัฒนาขึ้นในประเทศอังกฤษ เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบ EBR-1 ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น และใช้แกรไฟต์เป็นตัวหน่วงนิวตรอน ขนาด 100 MW_e ซึ่งพัฒนาขึ้นในประเทศรัสเซีย ในประเทศแคนาดามีการพัฒนาที่ต่างออกไปจากประเทศอื่นๆ คือการใช้ยูเรเนียมธรรมชาติกับน้ำมวลหนักเป็นตัวหล่อเย็นและตัวหน่วง โดยเครื่องต้นแบบเริ่มดำเนินการประมาณปี 1962 อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์ในยุคแรกก็มีการพัฒนาใช้เชิงพาณิชย์บ้าง เช่น เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1,000 MW_e ชื่อ RMBK ซึ่งพัฒนาขึ้นในประเทศรัสเซียและมีการพัฒนาในยุคที่ 2 ต่อไปอีกด้วย ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ในยุคนี้ปิดตัวลงเกือบทั้งหมดแล้ว



รูปที่ 2.1 การพัฒนาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

(ที่มา: http://www.anl.gov/Media_Center/Frontiers/2003/d4ee2.html)

2.3 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 2

เทคโนโลยีในยุคนี้ที่ถูกออกแบบและพัฒนาในช่วงปี ค.ศ. 1960 – 1980 มาจากเครื่องต้น แบบเพื่อใช้ในเชิงการค้า โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งาน ความปลอดภัย และการลงทุนมากขึ้น แต่ละเทคโนโลยีในยุคนี้แตกต่างกันตามชนิดเชื้อเพลิง สารหล่อเย็น และตัวหน่วง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ในยุคนี้แบบใช้น้ำอัดความดันสูง (Pressurized water reactor: PWR) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำเดือด (Boiling water reactor: BWR) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำมวลหนัก (Pressurized heavy water reactor: PHWR หรือ CANDU) มีใช้กันมากที่สุดตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในยุคที่ 2

ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	เชื้อเพลิง	สารหล่อเย็น	ตัวหน่วง
Pressurized Water Reactor (PWR)	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
Boiling Water Reactor (BWR)	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ	น้ำธรรมดา	น้ำธรรมดา
Pressurized Heavy Water Reactor "CANDU" (PHWR)	ยูเรเนียมธรรมชาติ	น้ำหนัก	น้ำหนัก
Gas-cooled Reactor (AGR & Magnox)	ยูเรเนียมธรรมชาติ (โลหะ)	คาร์บอนไดออกไซด์	กราไฟต์

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในยุคที่ 2 (ต่อ)

ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	เชื้อเพลิง	สารหล่อเย็น	ตัวหน่วง
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ	น้ำธรรมดา	กราไฟต์
Fast Neutron Reactor (FBR)	พลูโตเนียมและยูเรเนียม	โซเดียมเหลว	-
Other	ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ	น้ำธรรมดา	กราไฟต์

2.4 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 3

ในปี 1990 เป็นยุคที่มีการพัฒนาสูงขึ้นจากยุคที่ 2 ด้านความปลอดภัยและเศรษฐศาสตร์ โดยออกแบบใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะแรก เป็นการออกแบบที่เน้นด้านความปลอดภัยเชิงแพสซิฟ เรียกว่า การออกแบบเชิงแพสซิฟ (passive-design) ซึ่งหากเกิดความผิดปกติระหว่างเดินเครื่อง ไม่จำเป็นต้องมีการแก้ไขด้วยอุปกรณ์สั่งการ แต่จะใช้หลักธรรมชาติ เช่น ความโน้มถ่วง การพาแบบธรรมชาติ หรือการลดอุณหภูมิของวัสดุเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาได้เอง ตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดนี้เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รุ่น AP-600 (AP คือ Advanced passive) ที่เวสติงเฮาส์พัฒนาขึ้น และได้รับอนุญาตให้ใช้งานได้แล้วในสหรัฐอเมริกา ลักษณะที่ 2 เป็นการออกแบบเชิงก้าวหน้าหรือขั้นสูง (Advanced design) เน้นการพัฒนาศักยภาพ และความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้อยู่ให้สูงขึ้นมากที่สุด เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขั้นสูงแบบน้ำเดือด (Advanced boiling water reactor หรือ ABWR) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขั้นสูงแบบน้ำอัดความดัน (Advanced pressurized water reactor หรือ APWR) มีการพัฒนาใช้ในประเทศญี่ปุ่นและเกาหลี แบบ European pressurized water reactor (EPR) ด้วยการพัฒนาของประเทศฝรั่งเศส นอกจากนี้ยังสามารถผนวกกับการออกแบบแพสซิฟเข้าด้วยกัน เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ SWR 1000 และ ESBWR เป็นต้น ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ในยุคที่ 3 มีใช้งานแล้วในประเทศญี่ปุ่น คือ ABWR จำนวน 4 โรงไฟฟ้า และอยู่ระหว่างการก่อสร้างคือ APWR, ABWR (ญี่ปุ่น) และ EPR (ฟินแลนด์ เริ่มสร้างปี 2005 และฝรั่งเศส เริ่มสร้างปี 2007)

2.5 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 3+

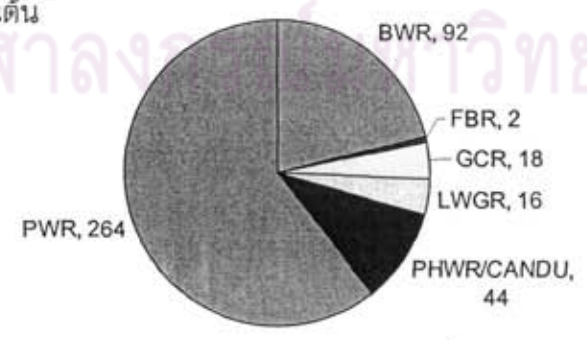
ยุคที่ 3+ คือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่จะมีใช้ในอนาคตตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ.2010 มีคุณลักษณะคล้ายเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ยุคนี้คือ มีการออกแบบให้เป็นมอดูล ที่ทำให้ต้นทุนต่ำลงและใช้เวลาก่อสร้างสั้นลง ตัวอย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มอดุลาร์แบบถังกรวด (Pebble-bed modular reactor หรือ PBMR) และ Advance Passive 1000 (AP-1000) ซึ่ง AP-1000 พัฒนามาจาก

AP-600 ได้รับการยืนยันถึงสมรรถนะจากองค์กรของอเมริกา the US nuclear Regulatory Commission (USNRC) แล้วและอยู่ในขั้นตอนการเตรียมการก่อสร้างต่อไป

2.6 เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ยุคที่ 4

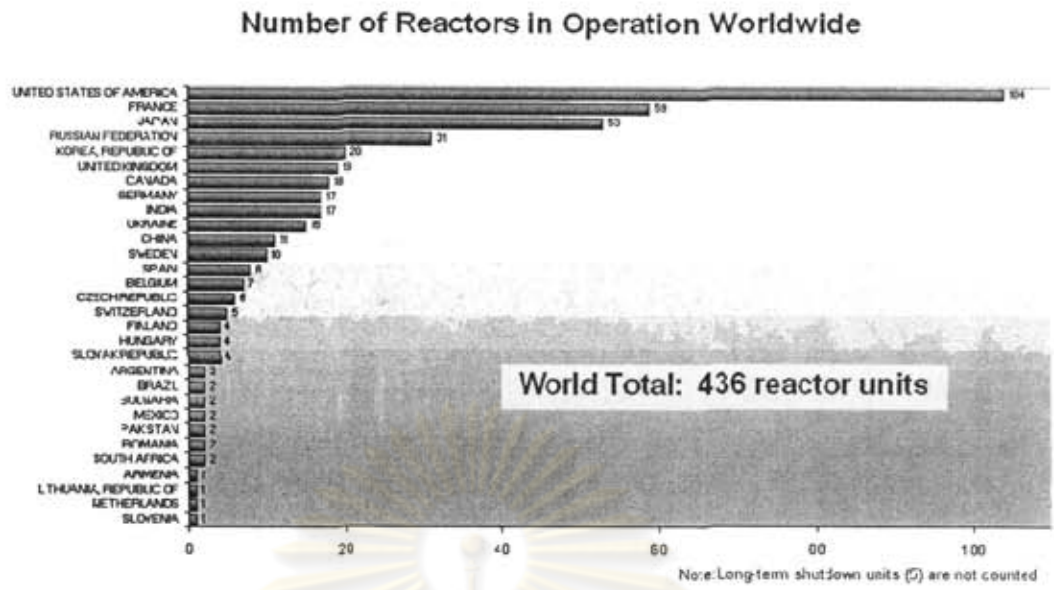
เทคโนโลยียุคที่ 4 เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ออกแบบขึ้น โดยคาดหวังว่าจะมีต้นทุนที่ต่ำมาก รวมถึงสมรรถนะด้านความปลอดภัยสูง มีกากเชื้อเพลิงน้อยที่สุด และปลอดจากการนำไปใช้ในการแพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์ ซึ่งในอนาคตน่าจะใช้กันได้ตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 2030 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในยุคนี้ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฮีเลียมมอดุลาร์แบบกังหันแก๊ส (Gas turbine modular helium reactor หรือ GT-MHR) ซึ่งมีคุณลักษณะด้านความปลอดภัยเชิงแพสซิฟและหล่อเย็นด้วยแก๊ส โดยเป็นการร่วมมือกันระหว่างอเมริกากับรัสเซีย เครื่องปฏิกรณ์ในยุคนี้ยังอยู่ในขั้นตอนวิจัยและพัฒนาต่อไป

ข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ดำเนินการอยู่ทั้งหมด 436 โรงงาน ใน 30 ประเทศทั่วโลก มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งหมด 370,260 MW_e ประเทศที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มากที่สุดคือ สหรัฐอเมริกา รองลงมาคือ ฝรั่งเศส และญี่ปุ่น ตามลำดับ ซึ่งในจำนวนนี้กว่าร้อยละ 90 เป็นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในยุคที่ 2 ได้แก่ โรงไฟฟ้าแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำอัดความดันสูง (Pressurized water reactor: PWR) ซึ่งมีจำนวนมากที่สุด 264 โรง ผลิตไฟฟ้าได้ 243,160 MW_e รองลงมาคือ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำเดือด (Boiling water reactor: BWR) มีจำนวน 92 โรง ผลิตไฟฟ้าได้ 83,656 MW_e และ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำมวลหนัก (Pressurized heavy water reactor: PHWR หรือ CANDU) มีจำนวน 44 โรง ผลิตไฟฟ้าได้ 22,441 MW_e ตามลำดับ และอยู่ในขั้นตอนการก่อสร้างอีก 53 โรงไฟฟ้า การก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่วนมากจะสร้างด้วยเทคโนโลยีในยุคที่ 3 เพราะมีได้ปรับปรุงและพัฒนาให้มีศักยภาพที่ดีขึ้น ทั้งทางด้านความปลอดภัยจากภัยธรรมชาติหรือการก่อการร้าย ประสิทธภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า และราคาต่อหน่วยกระแสไฟฟ้าที่ลดลง เป็นต้น



รูปที่ 2.2 จำนวนรูปแบบโรงไฟฟ้าในโลกทั้งหมด 436 โรง

(ที่มา: http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.reaopucty.htm, last update on 2009/09/07)



รูปที่ 2.3 จำนวนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้งานอยู่ในแต่ละประเทศ

(ที่มา: http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.oprconst.htm)

การก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่วนมากจะสร้างด้วยเทคโนโลยีในยุคที่ 3 เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้เทคโนโลยี ABWR พัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR มีใช้จริงแล้วในประเทศญี่ปุ่น และเทคโนโลยี EPR พัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ขณะนี้อยู่ในระหว่างการก่อสร้างในประเทศเนเธอร์แลนด์ และฝรั่งเศส เนื่องจากเทคโนโลยีในยุคที่ 3 มีการปรับปรุงและพัฒนาให้มีศักยภาพที่ดีขึ้น ทั้งทางด้านความปลอดภัยจากภัยธรรมชาติหรือการก่อการร้าย และประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ตารางที่ 2.2 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญในเทคโนโลยียุคที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าเทคโนโลยีในยุคที่ 3 มีอัตราการ burn up ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal energy) capacity factor และ กระแสไฟฟ้า (Electricity output) ที่สูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในแต่ละเทคโนโลยี

Parameters	Unit	BWR [Lenzen, 2008]	ABWR [Hitachi; Dones, 1996]	PWR [Lenzen, 2008]	EPR [Done, 1996; Leverenz, 2004]
Burn up rate	MWd/kg U	30-40	45	30-45	55-60
Thermal Efficiency	%	32-33	34.5	32-33	35-37
Capacity Factor	%	70-85	87	70-85	up to 92
Electricity output	MWe	1,000-1,100	1,356	1,000-1,100	1,100-1,600
%Enrichment	%	3-4	3.7	3-4	Up to 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
แนวทางการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

บทนี้ได้รวบรวมหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในแต่ละประเทศ เพื่อเป็นพื้นฐานในการเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทยต่อไป

3.1 หลักเกณฑ์เบื้องต้นในการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

การคัดเลือกหาสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกทั้งทางด้านความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในแต่ละประเทศมีหลักเกณฑ์เบื้องต้นที่คล้ายคลึงกัน เพื่อลดความเสี่ยงต่อประชาชนให้น้อยที่สุด ดังนี้

1. สถานที่ก่อสร้างอยู่ใกล้กับโรงไฟฟ้าอื่นที่มีอยู่ เพื่อเป็นการเชื่อมโยงกับโครงสร้างพื้นฐานของระบบจ่ายไฟ
2. โรงไฟฟ้าควรตั้งอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางโหลดจ่ายไฟ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่ง
3. สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าต้องอยู่ห่างจากแหล่งชุมชนมากที่สุด เพื่อเป็นการป้องกันหากเกิดการแพร่กระจายของรังสี
4. โรงไฟฟ้าควรอยู่ใกล้กับระบบขนส่ง เช่นทางเรือ ถนน และรถไฟ เพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิง กากของเสีย และวัสดุต่างๆ
5. โรงไฟฟ้าควรตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำมากที่สุด เช่น ทะเล หรือแม่น้ำ เพื่อสะดวกในการนำน้ำมาใช้สำหรับหล่อเย็น มิฉะนั้นจะต้องมีการสร้างอ่างเก็บน้ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย

3.2 รายละเอียดเกณฑ์การพิจารณาสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เมื่อทราบถึงหลักเกณฑ์เบื้องต้นดังกล่าวแล้ว รายละเอียดในการพิจารณาหลักเกณฑ์ต่างๆ ควรต้องพิจารณาร่วมด้วย เพื่อประกอบการคัดเลือกสถานที่ที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้

3.2.1 ด้านธรณีวิทยาและการเกิดแผ่นดินไหว

ข้อมูลด้านธรณีวิทยาและการเกิดแผ่นดินไหวเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาความเสี่ยงต่อการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนของเปลือกโลก เช่น พิจารณาจากบันทึกจำนวนครั้งการเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากเหตุการณ์ธรรมชาติเหล่านี้อาจกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีได้ หากมีความจำเป็นจะต้องสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในพื้นที่ที่ไม่เสถียรและเกิดแผ่นดินไหวได้เหล่านี้ จำเป็นจะต้องมีการลงทุนการป้องกันภัยธรรมชาติมากขึ้น ซึ่งราคาการ

ก่อสร้างและการดำเนินการจะสูงขึ้นด้วย เช่นในกรณีของประเทศญี่ปุ่นที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นจำนวนมาก

3.2.2 สภาพอากาศและการกระจายตัว

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะต้องได้รับความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่รุนแรงน้อยที่สุด เช่น น้ำท่วม หรือพายุไซโคลน เพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการดำเนินการของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการแพร่กระจายของวัสดุกัมมันตรังสี หรือไอน้ำจากการดำเนินการปกติ สู่บรรยากาศโดยรอบ

3.2.3 แผนด้านความปลอดภัย

สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะต้องมีความเสี่ยงต่อการทำลาย เช่นการก่อวินาศกรรม หรือการใช้เครื่องบินจู่โจมน้อยที่สุด นอกจากนี้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไม่ควรตั้งอยู่ใกล้บริเวณที่มีกิจกรรมหรือสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ที่อาจได้รับผลกระทบจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ เช่น ไม่ควรมีโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีในรัศมี 8 กม. และสนามบินควรอยู่ห่างออกไปอย่างน้อย 16 กม. เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดจากอุบัติเหตุ

3.2.4 อุทกศาสตร์

- *อุทกภัย* ต้องหาพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดอุทกภัย น้ำท่วม หรือสึนามิ
- *แหล่งน้ำที่ใช้* มีน้ำเพียงพอสำหรับดำเนินการ และไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้อื่นๆ เช่น ประชาชน และอุตสาหกรรมอื่นๆ เมื่อเกิดภาวะขาดแคลนน้ำ
- *คุณภาพของน้ำ* มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ทั้งทางเคมี และกายภาพที่ใช้ดำเนินการและตรวจวัดความเข้มข้นของรังสีปนเปื้อนก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5 ประชากรศาสตร์

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ควรตั้งอยู่ในบริเวณที่มีประชากรเบาบาง เพื่อให้มีความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยน้อยที่สุด จึงต้องมีการกำหนดเขตควบคุมรอบ ๆ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งในแต่ละประเทศจะมีการแบ่งโซนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น ในประเทศฟินแลนด์ ซึ่งอยู่ในความดูแลของหน่วยงาน The Radiation and Nuclear Safety Authority [STUK] และในสหรัฐอเมริกา ภายใต้องค์กร the US nuclear Regulatory Commission [USNRC, 1998] ได้มีการกำหนดเขตรอบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การจัดแบ่งพื้นที่โซนบริเวณรอบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ฟินแลนด์	สหรัฐอเมริกา
- **โซนที่** 1 เป็นส่วนของบริเวณโรงไฟฟ้าและห่างออกไปประมาณ 1 กม. จาก facility ในบริเวณนี้ห้ามมีการตั้งถิ่นฐานอย่างถาวร ในบริเวณนี้สามารถรวมถึงถนนสาธารณะได้ แต่การจราจรต้องไม่คับคั่งและสามารถเปลี่ยนเส้นทางได้เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน - **โซนที่** 2 เรียกว่า Protective zone ห่างออกไปจาก facility ประมาณ 5 กม. บริเวณนี้จำกัดการตั้งถิ่นฐานอยู่อาศัย และ ห้ามมีโรงพยาบาล หรือสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ที่ทำให้มีประชากรหนาแน่น - **โซนที่** 3 เรียกว่า Emergency planning Zone ห่างออกไปจาก facility ประมาณ 20 กม. เป็นพื้นที่ที่สามารถมีการอพยพผู้คนได้อย่างแน่นอนเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน แต่ไม่ใช่ศูนย์กลางที่มีประชากรหนาแน่น เพราะจะไม่สามารถช่วยเหลือทั้งหมดได้เมื่อเกิดเหตุ	- **เขตกักกัน หรือ** Exclusion Area คือ พื้นที่รอบๆ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในรัศมีไม่เกิน 1 กม. ซึ่งไม่ให้มีการอยู่อาศัยอย่างถาวร แต่อนุญาตให้มีมีระบบการขนส่ง เช่น ทางหลวง ทางรถไฟ ทางน้ำ ได้ ซึ่งจะไม่อยู่ใกล้เกินไปจนขัดขวางการดำเนินการและสามารถควบคุมการจราจรได้เมื่อเกิดเหตุภาวะฉุกเฉิน และมีการควบคุมตรวจวัดปริมาณรังสี ตลอดเวลารอบๆโรงไฟฟ้า - Low Population Zone (LPZ) เป็นเขตที่ถัดจากเขตกักกัน ประชากรที่อยู่ในบริเวณนี้จะต้องได้รับรังสีไม่เกิน 25 rem ของทั้งหมด - Emergency planning Zone (EPZ) แบ่งเป็น 2 โซนคือ (1) the plume exposure pathway EPZ ในรัศมี 16 กม. (2) the ingestion exposure pathway EPZ ในรัศมี 80กม.เป็นเขตพื้นที่หลีกเลี่ยงการปลดปล่อยและการย่อยของสารกัมมันตรังสี

3.2.6 ระบบนิเวศวิทยา

สถานที่ตั้งควรตั้งห่างจากบริเวณที่มีระบบนิเวศวิทยาสมบูรณ์ เช่น บริเวณหนอง บึง และแหล่งทำกินของประชาชน เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการทำลายหรือปิดกลั้นพื้นที่ทางน้ำ ที่เป็นแหล่งผสมพันธุ์หรือวางไข่ของสิ่งมีชีวิต

3.2.7 การใช้ที่ดินและสุนทรียภาพ

พิจารณาถึงผลกระทบของการใช้ที่ดินและสุนทรียภาพของภูมิประเทศ

3.2.8 เสียง

มีการควบคุมเสียงขณะดำเนินการให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

บทที่ 4
สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย

4.1 ทบทวนข้อมูลการคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทย

ในปี 2538 กฟผ.ร่วมกับบริษัท NEWJEC ของประเทศญี่ปุ่น ได้ศึกษาสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทยโดยการคัดสรรพื้นที่ที่เหมาะสมจากพื้นที่ร่วมคัดเลือก 59 พื้นที่ จนได้ 4 พื้นที่ติดชายฝั่งทะเลที่ผ่านการคัดเลือกโดยแต่ละพื้นที่มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 เพื่อนำมาประเมินในรายละเอียด ทั้งทางด้านความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาคือ twin-type of Pressurized Water Reactors (PWR) และขนาดโรงไฟฟ้ามี 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ยูนิตละ 1,000 $MW_{e\ (electricity)}$ จำนวน 2 ยูนิต

กรณีที่ 2 ยูนิตละ 600 MW_{e} จำนวน 4 ยูนิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละพื้นที่

สถานที่ตั้ง	ข้อดี	ข้อเสีย
พื้นที่ 1	1. ใกล้กับแหล่งการปลดปล่อยสารอันตรายจากเหตุการณ์ที่มนุษย์เป็นผู้กระทำน้อยกว่าที่ตั้งอื่น 2. มีย่านธุรกิจ ที่พักอาศัย และแหล่งสันทนาการ ในรัศมี 1-20 กม. เล็กกว่าที่ตั้งอื่น 3. ปริมาณปลา ในรัศมี 1-20 กม. น้อยกว่าที่ตั้งอื่น 4. ราคาสายส่งน้อยกว่าที่ตั้งอื่น 5. ราคาในการสรรหาที่ดินน้อยกว่าที่ตั้งอื่น 6. ราคาสำหรับ การเตรียมพื้นที่มากกว่าที่ตั้งอื่น	1. ชั้นหิน มีความแข็งแรงน้อยที่สุดอาจมีผลต่อการรับน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ได้
พื้นที่ 2	1. ราคาในการสรรหาที่ดิน น้อยกว่าที่ตั้งอื่น 2. ราคาสำหรับระบบน้ำหล่อเย็นน้อยกว่าที่ตั้งอื่น 3. ราคาในการติดตั้ง/ถอดออกของอุปกรณ์ น้อยกว่าที่ตั้งอื่น	1. มีสนามบิน ในระยะ 2 กม. ภายใต้บริเวณการก่อสร้าง 3.5 กม.
พื้นที่ 3	1. มีวัตถุโบราณ ในรัศมี 1-20 กม. น้อยกว่าที่ตั้งอื่น	1. มีประชากรอาศัยอยู่ในรัศมี 1-5 กม. มากที่สุด 2. มีประชากรอาศัยอยู่มากที่สุด และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาอยู่มากที่สุดในระยะ 5-20 กม. 3. ปริมาณผลผลิตเกษตรกรรมในรัศมี 1-20 กม. มากกว่าที่ตั้งอื่น 4. มีการผลิตนมในรัศมี 1-20 กม. มากกว่าที่ตั้งอื่น

ตารางที่ 4.1 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละพื้นที่ (ต่อ)

สถานที่ตั้ง	ข้อดี	ข้อเสีย
		5. มีย่านธุรกิจ ที่พักอาศัย และแหล่งสันทนาการ ในรัศมี 1-20 กม. ใหญ่กว่าที่ตั้งอื่น 6. ราคาสำหรับระบบน้ำหล่อเย็นมากกว่าที่ตั้งอื่น 7. ราคาในการติดตั้ง/ถอดออกของอุปกรณ์ มากกว่าที่ตั้งอื่น
พื้นที่ 4	1. มีการสั่นของเปลือกโลกน้อยกว่าที่ตั้งอื่น 2. มีชั้นหินที่แข็งแรงซึ่งดีที่สุดในที่ตั้งทั้งหมด 3. มีประชากรอาศัยอยู่ต่ำสุด ในรัศมี 1-5 กม. 4. ทิศทางลมดีกว่าที่ตั้งอื่น 5. ราคาสำหรับการเตรียมพื้นที่มากกว่าที่ตั้งอื่น	1. มีการวางแผนที่จะสร้างโรงกลั่นน้ำมันในระยะ 2 กม. จากศูนย์กลางของโรงไฟฟ้า 2. มีวัตถุโบราณ ในรัศมี 1-20 กม. มากกว่าที่ตั้งอื่น 3. เป็นพื้นที่เดียวเท่านั้นที่มีพื้นที่สวนสาธารณะในรัศมี 1 กม. 4. มีสิ่งมีชีวิตที่อาจเป็นอันตรายในบริเวณนี้มากกว่าที่ตั้งอื่น 5. ราคาในการติดตั้ง/ถอดออกของอุปกรณ์มากกว่าที่ตั้งอื่น 6. ราคาสายส่ง มากกว่าที่ตั้งอื่น

สำหรับประเทศไทยได้มีเกณฑ์การเลือกสถานที่ตั้งตามหลักของ The International Atomic Energy Agency (IAEA) ดังนี้

4.1.1 การประเมินด้านความปลอดภัย พิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของผิวโลก เกี่ยวกับปริมาณการเกิดแผ่นดินไหว และความยาวรอยเลื่อน
2) การเกิดแผ่นดินไหว ทำการบันทึกจำนวนการเกิดแผ่นดินไหวภายในรัศมี 500 กม.
3) ความเหมาะสมของวัสดุใต้ผิวดิน
   - ความแข็งแรงของหินฐานราก (Strength of Foundation Rock)
   - สภาพการซึมผ่านได้ของหินฐานราก (Permeability of Foundation Rock)
4) ภูเขาไฟระเบิด พิจารณาที่ระยะทาง 5, 10, 50, 150 และ 200 กม. จากโรงไฟฟ้าถึงภูเขาไฟ
5) น้ำท่วมชายฝั่ง เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เพราะเป็นพื้นที่ติดชายฝั่ง
   - สึนามิ
   - Wind –waves (ไซโคลน และไต้ฝุ่น)
6) น้ำล้นตลิ่ง มีความสำคัญสำหรับโรงไฟฟ้าที่ตั้งใกล้แม่น้ำ ซึ่งต้องเพียงพอสำหรับหล่อเย็น
7) ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่รุนแรง

4.1.2 การประเมินด้านความสิ่งแวดล้อม พิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1) เหตุการณ์ที่เกิดจากมนุษย์ เช่น การชนด้วยเครื่องบิน การระเบิด ไฟไหม้ และการปลดปล่อยของไหลที่เป็นอันตราย เป็นต้น
2) จำนวนประชากรที่อาศัยอยู่ และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาอาศัยในบริเวณ 1-5 กม. และ 5-20 กม.
3) การใช้ที่ดินและแหล่งน้ำ โดยศึกษาพื้นที่รอบๆ บริเวณสถานที่ตั้งในระยะทาง 1-20 กม. ว่ามีพื้นที่การเกษตร ฟาร์มโคนม แหล่งเพาะพันธ์ปลา และสัตว์ป่าหรือไม่
4) สิ่งมีชีวิตที่อาจได้รับอันตราย ระบบนิเวศวิทยา โบราณคดีและพื้นที่ที่เปราะบางในระยะทาง 1-20 กม.

4.1.3 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ พิจารณาด้านราคาโดยใช้ตัวแปรต่อไปนี้

1) สรรหาที่ดินเพื่อการลงทุน
2) ถนนเข้า-ออก
3) การเตรียมพื้นที่
4) ระบบน้ำหล่อเย็น
5) การติดตั้ง/ถอดออกของอุปกรณ์
6) สายส่ง

ทั้ง 4 พื้นที่ที่ได้รับคัดเลือกเบื้องต้นจะถูกประเมินผลทางด้านความปลอดภัย สิ่งแวดล้อมและเศรษฐ-ศาสตร์ โดยการให้คะแนนตามความเหมาะสมในแต่ละตัวแปร ถ้าพื้นที่ใดหลีกเลี่ยงบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดลักษณะดังตารางที่ 4.2-4.3 ก็จะมีคะแนนประเมินที่สูง แสดงว่าพื้นที่นั้นมีโอกาสที่จะเป็นสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ อย่างไรก็ตามปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่นราคาที่ดิน และวัสดุก่อสร้างยังมีส่วนสำคัญ ถ้าพื้นที่ใดมีการประเมินราคาตามลักษณะดังตารางที่ 4.4 น้อยก็จะเป็นพื้นที่หนึ่งที่มีสิทธิ์ได้รับคัดเลือกต่อไป

ตารางที่ 4.2 คะแนนประเมินด้านความปลอดภัย

ลักษณะ	คะแนนประเมิน
การเคลื่อนที่ของผิวโลก	25
การเกิดแผ่นดินไหว	15
ความเหมาะสมของวัสดุใต้ผิวดิน	30
ภูเขาไฟระเบิด	10
น้ำท่วมชายฝั่ง	10
น้ำล้นตลิ่ง	5
ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่รุนแรง	5
รวม	100

ตารางที่ 4.3 คะแนนประเมินด้านสิ่งแวดล้อม

ลักษณะ	คะแนนประเมิน
เหตุการณ์ที่เกิดจากมนุษย์	20
จำนวนประชากร	30
การใช้ที่ดินและแหล่งน้ำ	30
ระบบนิเวศ สิ่งมีชีวิตอื่นๆ และโบราณคดี	20
รวม	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ราคาประเมินด้านเศรษฐศาสตร์

ลักษณะ	ราคาประเมิน
สรรหาที่ดินเพื่อการลงทุน	ณ ช่วงเวลานั้น
ถนนเข้า-ออก	ณ ช่วงเวลานั้น
การเตรียมพื้นที่	ณ ช่วงเวลานั้น
ระบบน้ำหล่อเย็น	ณ ช่วงเวลานั้น
การติดตั้ง/ถอดออกของอุปกรณ์	ณ ช่วงเวลานั้น
สายส่ง	ณ ช่วงเวลานั้น
รวม	

จากรายงานการประเมินค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านความปลอดภัย สิ่งแวดล้อมและเศรษฐ-ศาสตร์เบื้องต้นของทั้ง 4 พื้นที่เพื่อคัดเลือกเป็นสถานที่ตั้งของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์พบว่า ค่าการประเมินทางด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมทุกพื้นที่มีค่าค่อนข้างเท่ากัน จะแตกต่างกันเฉพาะค่าการประเมินด้านราคาทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการคิดพื้นที่ที่เหมาะสมพิจารณาได้จากผลคูณกันของค่าการประเมินทั้ง 3 ด้าน ถ้าพื้นที่ใดมีค่าผลคูณมากก็จะเป็นพื้นที่ที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพื้นที่ 2 และพื้นที่ 1 มีความเหมาะสมมากที่สุดจากทั้งหมด 4 พื้นที่ จึงได้รับคัดเลือกเพื่อศึกษาเชิงลึกต่อไป แต่เนื่องจากผลการสำรวจนี้ได้พิจารณามาเป็นเวลา 13 ปีแล้ว ส่งผลให้ค่าการประเมินดังกล่าวอาจไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ และสภาพแวดล้อมย่อมมีการเปลี่ยนแปลง เช่น สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความหนาแน่นของประชากร ระบบนิเวศต่างๆ ราคาที่ดินและวัสดุก่อสร้าง ดังนั้นจึงควรมีการสำรวจพื้นที่ใหม่อีกครั้งเพื่อให้ได้พื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 พื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

กรณีที่ 1 ยูนิตละ 1,000 MW_e จำนวน 2 ยูนิต

พื้นที่	คะแนนการประเมินรวม			ค่าการประเมิน			ผลคูณรวมค่าการประเมิน	ลำดับพื้นที่เหมาะสม
	ความปลอดภัย	สิ่งแวดล้อม	เศรษฐศาสตร์ ($\times 10^3$)	ความปลอดภัย	สิ่งแวดล้อม	เศรษฐศาสตร์		
1	55	64.0	8,683,168	0.55 [1)]	0.640 [2)]	0.945 [3)]	0.333 [4)]	2
2	69	61.0	8,203,105	0.69	0.610	1.000	0.421	1
3	68	49.6	10,712,658	0.68	0.496	0.766	0.258	3
4	85	57.0	17,356,231	0.85	0.570	0.473	0.229	4

[1)] ค่าการประเมินความปลอดภัย คำนวณจาก คะแนนประเมินความปลอดภัยหารด้วยคะแนนที่เป็นไปได้สูงสุด (100) เช่น 0.55 = 55/100

[2)] ค่าการประเมินสิ่งแวดล้อม คำนวณจาก คะแนนประเมินสิ่งแวดล้อมหารด้วยคะแนนที่เป็นไปได้สูงสุด (100) เช่น 0.64 = 64/100

[3)] ค่าการประเมินราคาทางเศรษฐศาสตร์ คำนวณจาก คะแนนประเมินเศรษฐศาสตร์น้อยที่สุดใน 4 พื้นที่หารด้วยคะแนนประเมินเศรษศาสตร์ของพื้นที่นั้น เช่น 0.945 = 8,203,105/8,683,168

[4)] ผลคูณรวมค่าการประเมิน คำนวณจาก ผลคูณของค่าการประเมินความปลอดภัย ค่าการประเมินสิ่งแวดล้อมและค่าการประเมินเศรษฐศาสตร์ เช่น 0.333 = 0.55 x 0.640 x 0.945

ตารางที่ 4.5 พื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (ต่อ)

กรณีที่ 2 ยูนิตละ 600 MW_e จำนวน 4 ยูนิต

พื้นที่	คะแนนการประเมินรวม			ค่าการประเมิน			ผลคูณรวมค่าการประเมิน	ลำดับพื้นที่เหมาะสม
	ความปลอดภัย	สิ่งแวดล้อม	เศรษฐศาสตร์ ($\times 10^3$)	ความปลอดภัย	สิ่งแวดล้อม	เศรษศาสตร์		
1	55	64.0	11,881,732	0.55	0.640	0.946	0.333	2
2	69	61.0	11,241,634	0.69	0.610	1.000	0.421	1
3	68	49.6	15,872,796	0.68	0.496	0.708	0.239	4
4	85	57.0	22,431,315	0.85	0.570	0.501	0.243	3

4.2 ข้อเสนอการคัดเลือกสถานที่ตั้ง

ในที่นี้ขอพิจารณาเกณฑ์การเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในเรื่องของธรณีวิทยาและแหล่งน้ำสำหรับประเทศไทย

4.2.1 ธรณีวิทยา

กรมทรัพยากรธรณีได้รวบรวมศึกษาข้อมูลด้านการสำรวจรอยเลื่อนในประเทศไทย พบว่ามีรอยเลื่อนใหญ่ ๆ ที่มีพลังอยู่หลายแนวด้วยกันที่สำคัญสามารถจัดกลุ่มได้ 3 แนวคือ กลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ กลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และกลุ่มรอยเลื่อนที่วางตัวในแนวทิศเหนือ-ใต้ ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 22 จังหวัด แสดงดังตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ในประเทศไทยเคยเกิดแผ่นดินไหวอยู่หลายครั้ง โดยสำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยาได้รายงานเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ส่วนใหญ่เกิดบริเวณทางภาคเหนือ เช่น เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน และตาก เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

รอยเลื่อน	จังหวัด
ภาคเหนือ	
แม่จันและแม่อิง	เชียงใหม่ และเชียงราย
แม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน และตาก
เมย	ตาก และกำแพงเพชร
แม่ทา	เชียงใหม่ เชียงราย และลำพูน
เถิน	ลำปาง และแพร่
พะเยา	ลำปาง เชียงราย และพะเยา
บัว	น่าน
อุตรดิตถ์	อุตรดิตถ์
ภาคตะวันตก	
เจดีย์สามองค์	กาญจนบุรี และราชบุรี
ศรีสวัสดิ์	กาญจนบุรี และอุทัยธานี
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	
ท่าแขก	หนองคาย และนครพนม
ภาคใต้	
ระนอง	ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร ระนอง และพังงา
คลองมะรุ่ย	สุราษฎ์ธานี กระบี่ และพังงา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 แหล่งน้ำ

สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ควรตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำขนาดใหญ่ที่เพียงพอสำหรับการระบายความร้อนของระบบ สำหรับระบบระบายความร้อนมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบหล่อเย็นแบบผ่านรวดเดียว (Once-through) เป็นการดึงน้ำจากแหล่งน้ำเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วผ่านการควบแน่นปล่อยออกสู่แหล่งน้ำนั้นโดยตรงทำให้ต้องใช้น้ำในปริมาณค่อนข้างมาก และระบบวนปิด (Closed-loop system) คือระบบการไหลหมุนเวียนน้ำเป็นระบบปิดโดยใช้หอหล่อเย็น (Cooling tower) เช่น หอหล่อเย็นแบบ mechanical-draft หรือ natural draft ช่วยระบายความร้อน ซึ่งมีการดึงน้ำจะแหล่งน้ำน้อยกว่าระบบแรก เนื่องจากน้ำที่ดึงเพิ่มเข้ามานั้นเป็นส่วนของน้ำที่ระเหยออกไป

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วไป ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 33% ส่วนอีก 66% เป็นส่วนความร้อนสูญเสีย (GOT WATER?, 2007; Water Consumption and Water Use of Heat-Engine Electricity Generating Plants, 2008) ถ้าต้องการผลิตกระแสไฟฟ้า 1,000 MW_e ความร้อนสูญเสียประมาณ 2,000 $MW_{th\ (thermal)}$ และเมื่อพิจารณาระบบหล่อเย็นแบบผ่านรวดเดียว จะต้องการน้ำในอัตราการไหลเชิงปริมาตรประมาณ 160 m^3/s (คิด ΔT ไม่เกิน 3°C ตามมาตรฐานประเทศไทย) โดยปริมาณความต้องการน้ำหล่อเย็นสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \qquad (4.1)$$

เมื่อ Q เท่ากับ อัตราการไหลของความร้อน (kJ/s)

$\dot{m}$ เท่ากับ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

C_p เท่ากับ ค่าความจุความร้อนของน้ำ 4.187 (kJ/kg-K)

ΔT เท่ากับ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออก (K)

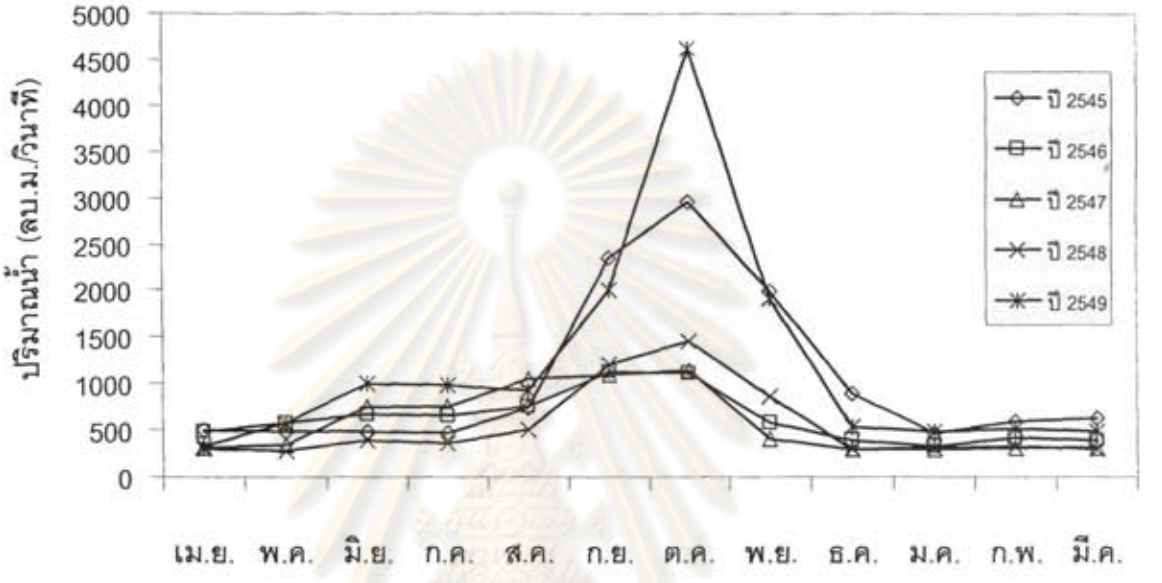
สำหรับประเทศไทยมีแหล่งน้ำจำนวนมาก จากข้อมูลของกรมชลประทาน โดยพิจารณาในช่วงปี พ.ศ. 2545-2549 พบว่าแม่น้ำที่มีปริมาณน้ำที่คาดว่าเพียงพอต่อความต้องการในระดับค่าการคำนวณ (160 m^3/s) คือแม่น้ำเจ้าพระยา ตรวจวัด ณ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ ที่อัตราการไหลต่ำสุดประมาณ 278 m^3/s ในช่วงฤดูร้อน ดังรูปที่ 4.1 แต่ถ้าดึงน้ำมาใช้โดยตรงจากแม่น้ำ อาจทำให้เกิดภาวะขาดแคลนน้ำได้ จึงควรต้องใช้ระบบหอหล่อเย็นแทนการดึงน้ำมาใช้ทั้งหมดโดยตรง เนื่องจากดึงน้ำเติมในส่วนของน้ำที่ระเหยไป คำนวณได้จากสมการที่ (4.2) เมื่อความร้อนสูญเสียประมาณ 2,000 MW_{th} เช่นเดิม และกำหนดในความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่ 60 °C จะได้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ระเหยไปประมาณ 0.84 m^3/s แต่ค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง และในความเป็นจริงระบบอาจต้องมีการดึงน้ำมากกว่าที่คำนวณประมาณ 2 เท่า (Ovais Shuja, Service factors) เพื่อป้องกันภาวะขาดน้ำ ดังนั้นจึงมีอีกแนวทางหนึ่งคือ การหาสถานที่ตั้งบริเวณชายฝั่งทะเล เพื่อให้มีน้ำที่พอเพียงในการหล่อเย็นแบบผ่านรวดเดียว

$$\dot{Q} = \dot{m}_{evap} L_v \quad (4.2)$$

เมื่อ Q เท่ากับ อัตราการไหลของความร้อน (kJ/s)

$\dot{m}$ เท่ากับ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ระเหยไป (kg/s)

L_v เท่ากับ ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ 2,362 (J/g) ที่ 60 °C



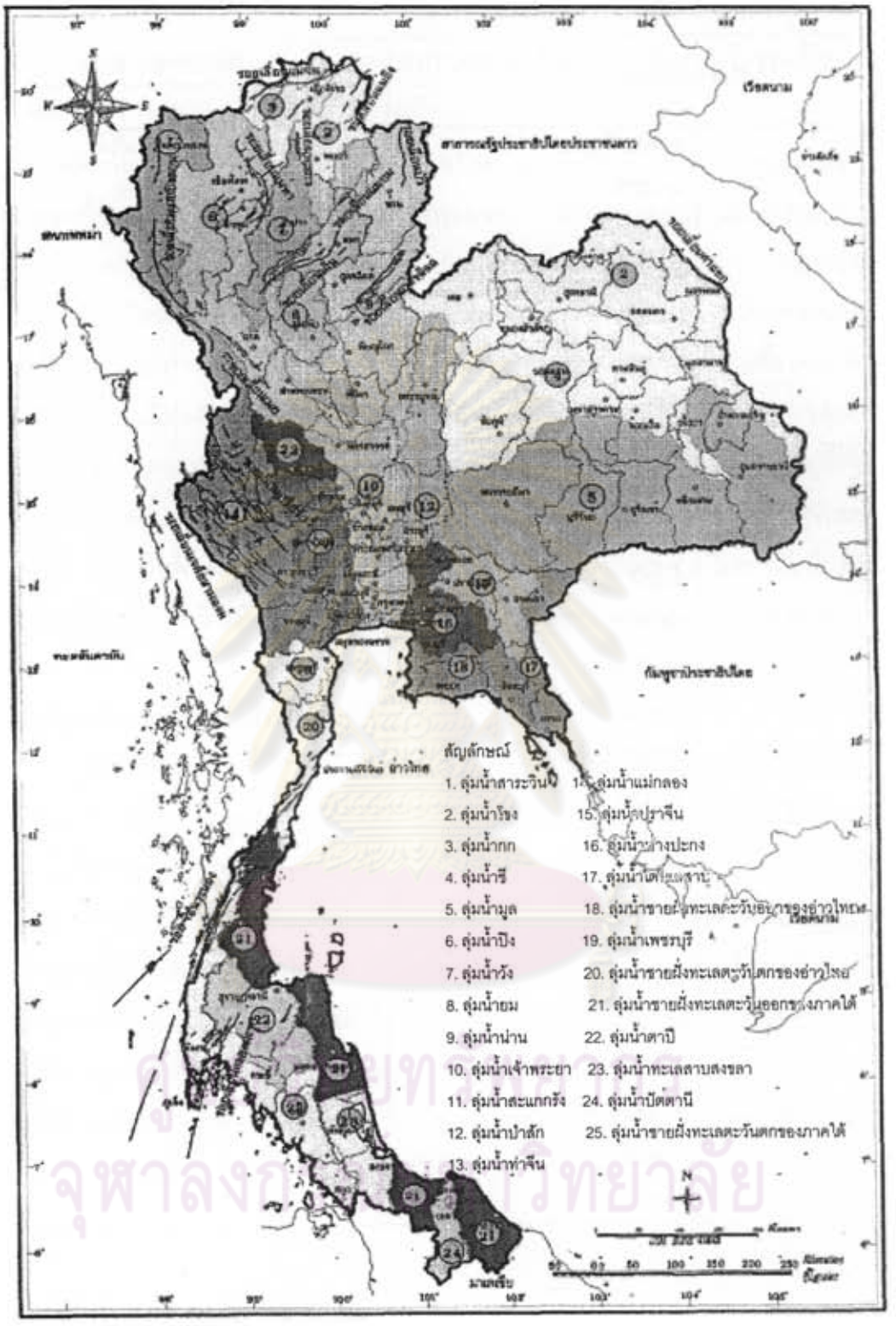
รูปที่ 4.1 อัตราการไหลของน้ำ ในแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณสถานีตรวจวัด อ.เมือง จ.นครสวรรค์

4.3 บทวิเคราะห์การเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย

การสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในปัจจุบันอยู่ในยุคที่ 3 เนื่องจากมีการพัฒนาด้านความปลอดภัย เช่น เครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบเชิงแพสซิฟ เมื่อเกิดอุบัติเหตุเครื่องปฏิกรณ์สามารถหยุดปฏิกิริยาได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องใช้ระบบควบคุม หรือ เครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบขั้นสูงที่ทนต่อการเกิดแผ่นดินไหวและอุบัติเหตุจากการชนด้วยเครื่องบิน นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้า มีการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลง และลดเวลาในการก่อสร้าง ในต่างประเทศที่มีการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ใหม่จะใช้เทคโนโลยีในยุคที่ 3 เป็นส่วนใหญ่ เช่น ในประเทศญี่ปุ่นเป็น ABWR และในประเทศฟินแลนด์และฝรั่งเศสเป็น EPR เป็นต้น สำหรับประเทศไทยนั้นเมื่อพิจารณาเกณฑ์ในการคัดเลือกสถานที่ตั้งในผลของรอยเลื่อนพบว่ามี 22 จังหวัดที่อยู่ในบริเวณรอยเลื่อน (รูปที่ 4.2) ส่วนมากอยู่ทางภาคเหนือของประเทศ ส่วนพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากรอยเลื่อนมี 54 จังหวัด แบ่งเป็นจังหวัดที่ติดทะเลและไม่ติดทะเล ดังตารางที่ 4.7 ส่วนผลของแหล่งน้ำ ถ้าต้องการสร้างบริเวณแม่น้ำควรเลือกบริเวณที่มีน้ำเพียงพอทั้งการใช้ในโรงไฟฟ้า แหล่งทำมาหากินของประชาชน และอุตสาหกรรมอื่นๆ จากรายงานการตรวจวัดปริมาณน้ำของกรมชลประทาน พบว่าบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาบริเวณ

ภาคกลางมีปริมาณน้ำมากที่สุดแต่อาจเกิดภาวะขาดแคลนน้ำได้ในฤดูร้อน ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้น้ำเป็นจำนวนมาก และความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำปล่อยออกน้อย (ไม่เกินกว่า 3°C) ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประชาชนได้ ถ้าต้ องการตั้งโรงไฟฟ้าริมแม่น้ำจึงควรใช้ระบบระบายความร้อนด้วยหอหล่อเย็น เพื่อช่วยลดปริมาณน้ำ และช่วยลดอุณหภูมิให้กับน้ำได้อย่างดี แต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยได้คือ ตั้งบริเวณชายฝั่งทะเล ที่สามารถดึงน้ำมาใช้และปล่อยออกได้โดยตรง ในประเทศไทยมีพื้นที่ติดทะเลอยู่สองด้าน คือ บริเวณอ่าวไทย และอันดามัน เนื่องจากจังหวัดทางฝั่งอันดามันเคยประสบภัยพิบัติสึนามิ จากการได้รับผลกระทบแผ่นดินไหวบริเวณเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย ในปีพ.ศ. 2547 ทำให้พื้นที่ตรงส่วนนี้อาจไม่เหมาะสม ดังนั้นพื้นที่จังหวัดติดอ่าวไทยจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการพิจารณาต่อไป อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีในยุคที่ 3 ซึ่งออกแบบมาให้ทนต่อการเกิดแผ่นดินไหว ถ้าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากรอยเลื่อนและปริมาณน้ำมีความเหมาะสมในด้านอื่นๆ เช่น มีประชากรอาศัยอยู่น้อย และไม่ทำลายระบบนิเวศ เป็นต้น ก็เป็นไปได้ที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์บริเวณนั้น แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นเช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แผนที่รอยเลื่อนและลุ่มน้ำในประเทศไทย

ตารางที่ 4.7 จังหวัดที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณรอยเลื่อน

จังหวัดไม่ติดทะเล		จังหวัดติดทะเล	
		อ่าวไทย	อันดามัน
ภาคเหนือ	**ภาคตะวันออก**	**ภาคตะวันออก**	**ภาคใต้**
สุโขทัย	นครนายก	ชลบุรี	ภูเก็ต
พิษณุโลก	ปราจีนบุรี	ระยอง	ตรัง
พิจิตร	ฉะเชิงเทรา	จันทบุรี	สตูล
เพชรบูรณ์	สระแก้ว	ตราด	
นครสวรรค์	**ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**	สมุทรปราการ	
ชัยนาท	เลย	**ภาคตะวันตก**	
ภาคตะวันตก	อุดรธานี	สมุทรสงคราม	
สุพรรณบุรี	หนองบัวลำภู	สมุทรสาคร	
นครปฐม	สกลนคร	เพชรบุรี	
ภาคกลาง	ชัยภูมิ	**ภาคใต้**	
สิงห์บุรี	ขอนแก่น	นครศรีธรรมราช	
อ่างทอง	กาฬสินธุ์	พัทลุง	
อยุธยา	มุกดาหาร	สงขลา	
ปทุมธานี	มหาสารคาม	ปัตตานี	
นนทบุรี	ร้อยเอ็ด	นราธิวาส	
ลพบุรี	ยโสธร		
สระบุรี	อำนาจเจริญ		
กรุงเทพมหานคร	นครราชสีมา		
	บุรีรัมย์		
	สุรินทร์		
	ศรีสะเกษ		
	อุบลราชธานี		
	ภาคใต้		
	ยะลา		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

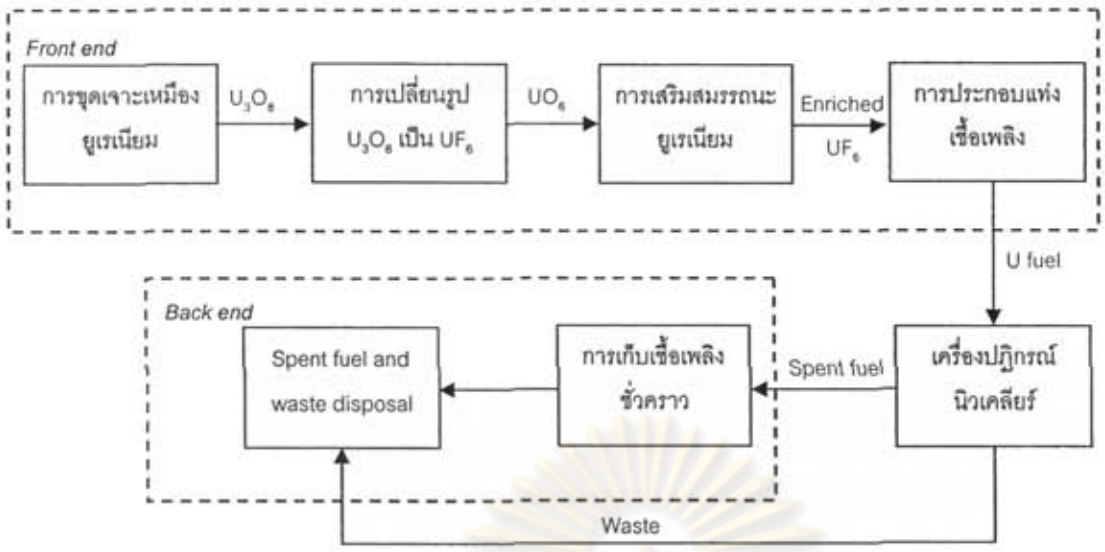
บทที่ 5
ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์

พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อมาทดแทนการใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานที่สะอาด อย่างไรก็ตามผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ควรคำนึงอย่างมากคือ ผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน แม้ว่าในขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเหมือนดังเช่นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่นๆ แต่การใช้พลังงานนิวเคลียร์ก็มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยทางอ้อมเกิดขึ้น เช่นการก่อสร้างโรงไฟฟ้า และขั้นตอนต่างๆ ในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นอกจากนี้ผลกระทบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือการปลดปล่อยสารกัมมันตรังสี เนื่องจากพลังงานนิวเคลียร์เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชั่นของเชื้อเพลิงยูเรเนียม เกิดเป็นพลังงานความร้อนและผลิตภัณฑ์ฟิชชั่นอีกมากมายซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี จากผลกระทบทั้งสองอย่างนี้จะมีความรุนแรงมากน้อยเพียงใดก็ต้องมาลองประเมินกันดูต่อไป

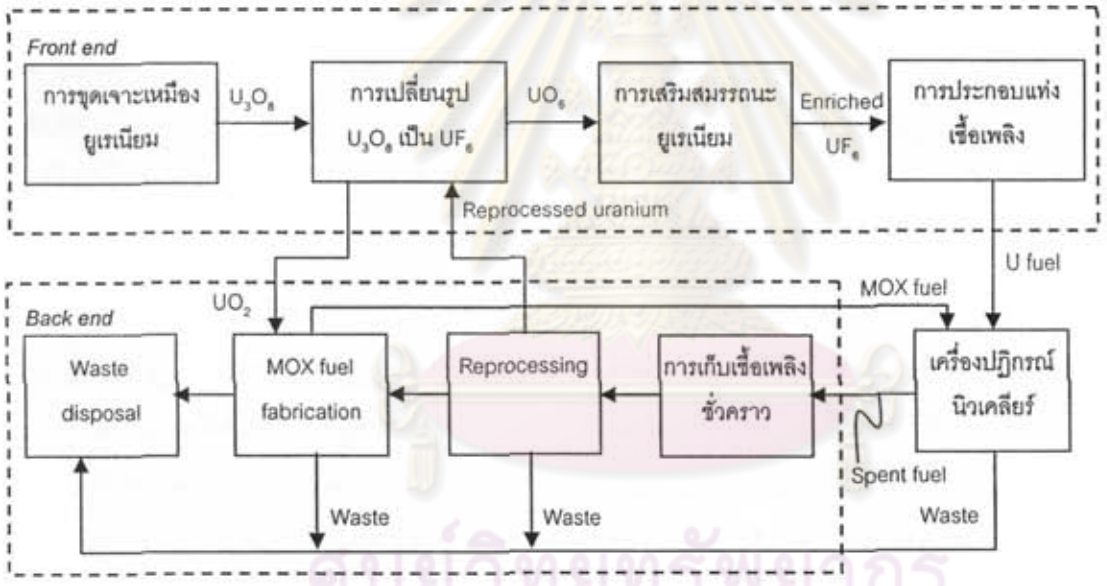
5.1 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์คือ กระบวนการต่างๆ ที่ทำให้เกิดไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ตั้งแต่การเตรียมเชื้อเพลิง การผลิตกระแสไฟฟ้า และรวมถึงการกำจัดเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว ซึ่งมี 2 รูปแบบคือ วัฏจักรที่เชื้อเพลิงยูเรเนียมถูกใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (Once through nuclear fuel cycle) หรือวัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด (Open fuel cycle) และ วัฏจักรที่มีการนำเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยจะมีกระบวนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ (Reprocessing) หรือเรียกว่า วัฏจักรเชื้อเพลิงแบบปิด (Close fuel cycle) ดังรูปที่ 5.1 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้า (Front end of nuclear fuel cycle) การผลิตกระแสไฟฟ้า (Power generation) และวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหลัง (back end of nuclear fuel cycle) แต่ละส่วนมีกระบวนแยกย่อยที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

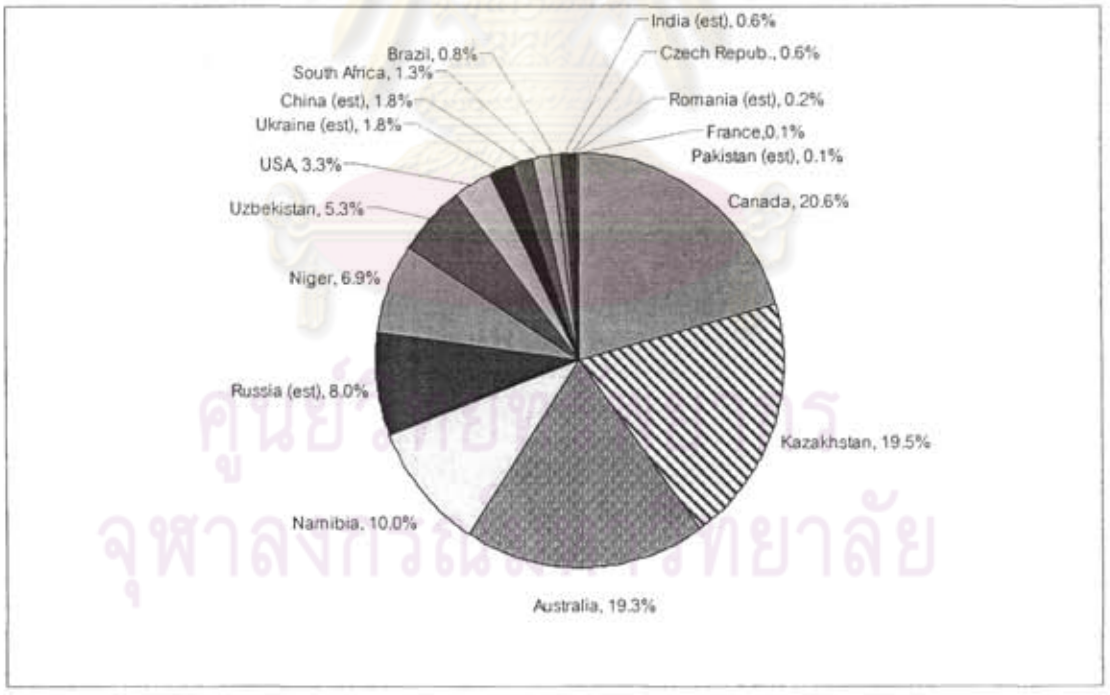
รูปที่ 5.1 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (ก) Once through nuclear fuel cycle และ (ข) Close fuel cycle

5.2 **วัฏจักรนิวเคลียร์ส่วนหน้า** (Front end of nuclear fuel cycle)

คือ กระบวนการทั้งหมดในการเตรียมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ

5.2.1 การทำเหมืองและการบดยูเรเนียม (Uranium mining and milling)

ยูเรเนียมในธรรมชาติจะอยู่ปะปนกับชั้นหิน และถูกขุดเจาะขึ้นมาโดยใช้เทคนิค 2 แบบคือ การทำเหมืองแบบเปิด (Open pit) เป็นการทำเหมืองใกล้พื้นผิวใช้ในกรณีที่มีแร่สะสมอยู่มากบริเวณผิวดิน และการทำเหมืองใต้ดิน (under ground) ใช้เมื่อมีการสะสมของแร่ที่ความลึกมากกว่า 200 เมตร ทั้งสองวิธีนี้ใช้กันมากถึง 62% นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการย่อยสลายแบบ in situ (in situ leaching) โดยการใช้กรดหรือเบสในการละลายแร่ยูเรเนียมออกมา ในปี 2551 ประเทศที่มีการผลิตแร่ยูเรเนียมส่งออกในโลกมากที่สุด 3 อันดับแรกคือ แคนาดา (20.5%) รองลงมาคือ คาซัคสถาน (19.4%) และออสเตรเลีย (19.2%) ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งแร่ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (ตารางที่ 5.1) โดยประเทศแคนาดามีเปอร์เซนต์เกรดแร่ยูเรเนียมออกไซด์มากที่สุด สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทำเหมืองยูเรเนียมคือ การเกิดสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัว (decay) ของยูเรเนียม โดยเฉพาะก๊าซเรดอน (Rn) ที่อาจทำให้เกิดโรงมะเร็งในปอด



รูปที่ 5.2 สัดส่วนการส่งผลิตแร่ยูเรเนียมในแต่ละประเทศ ปี 2551

(ที่มา: http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html)

ตารางที่ 5.1 เปอร์เซนต์โดยเฉลี่ยของเกรดแร่ยูเรเนียมออกไซด์ในแต่ละประเทศ

ประเทศ	Average of % ore grade	ที่มา
แคนาดา	8	Lenzen 2008
คาซัคสถาน	0.12	http://www.wise-uranium.org/upkz.html
ออสเตรเลีย	0.045	Lenzen 2008

เมื่อได้แร่มาแล้วจะถูกนำมาบดให้ละเอียดและทำให้บริสุทธิ์ กระบวนการบดแร่โดยปกติแล้วจะอยู่ใกล้กับบริเวณการทำเหมืองเพื่อหลีกเลี่ยงการขนส่งแร่ดิบ แร่ยูเรเนียมจะถูกแยกออกจากสิ่งเจือปนโดยนำแร่มาละลายในกรดเช่น กรดซัลฟิวริก จากนั้นสกัดด้วยตัวทำละลายและตกตะกอนเป็นขั้นตอนสุดท้ายจะได้แร่ยูเรเนียมในรูปของยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 75% มีลักษณะเป็นเค้กสีเหลือง (Yellow cake) ดังรูปที่ 5.3 ในขั้นตอนนี้จะมีกากของเสียเกิดขึ้นที่เรียกว่า mill tailing ส่วนมากเป็นสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากการทำเหมืองและมียูเรเนียมบางส่วนที่ไม่สามารถถูกสกัดไปได้ทั้งหมด รวมทั้งโลหะหนักและสารเคมีที่ใช้ในการสกัด ซึ่งจะต้องมีการจัดการกากของเสียนี้ให้เป็นอย่างดี

รูปที่ 5.3 เค้กเหลือง (Yellow cake)
(ที่มา: http://tonto.eia.doe.gov/kids/energy.cfm?page=energy_slang)

สำหรับประเทศไทยนั้นมีการขุดพบแหล่งแร่ยูเรเนียม บริเวณอำเภอ ดอยเต่า และอำเภออมก๋อยจังหวัดเชียงใหม่ และอำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่นแต่มีปริมาณยูเรเนียมออกไซด์ค่อนข้างน้อยประมาณ 2-6 ตัน ที่เกรดแร่ยูเรเนียมออกไซด์ 0.01-0.05% เท่านั้น [แผนที่และข้อมูลแหล่งแร่ของไทย, 2543] จึงไม่เพียงพอที่จะผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้ ดังนั้นประเทศไทยจึงไม่ได้รับกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากขั้นตอนการทำเหมืองแร่และการบดแร่

5.2.2 การเปลี่ยนรูป (Conversion)

เชื้อเพลิงยูเรเนียมจะต้องมีความบริสุทธิ์มากและสามารถถูกเสริมสมรรถนะได้ ซึ่งยูเรเนียมที่จะนำไปผ่านกระบวนการเสริมสมรรถนะต้องอยู่ในรูปของก๊าซจึงต้องมีการเปลี่ยนรูปโดยยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) ถูกเปลี่ยนเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) โดยนำ U_3O_8 ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะได้ยูเรเนียมเตทตระฟลูออไรด์ (UF_4) และเมื่อให้ทำปฏิกิริยาต่อกับก๊าซฟลูออรีน (F_2) จะได้ยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ (UF_6) ตามปฏิกิริยารวมดังสมการที่ 5.1

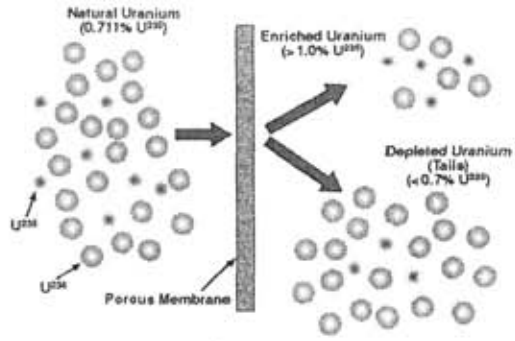
$$U_3O_8 + 16HF + F_2 \rightarrow 3UF_6 + 8H_2O \qquad (5.1)$$

UF_6 นี้สามารถอยู่ในสถานะของของแข็ง ของเหลว และก๊าซก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป UF_6 จะอยู่ในสถานะก๊าซซึ่งสามารถนำไปผ่านกระบวนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต่อไปได้ โรงงานการเปลี่ยนรูปยูเรเนียมส่วนมากตั้งอยู่ในประเทศที่มีการทำเหมืองยูเรเนียม เช่น รัสเซีย สหรัฐอเมริกา และแคนาดา อย่างไรก็ตามประเทศที่ไม่มีแหล่งยูเรเนียมก็มีการก่อตั้งโรงงานเปลี่ยนรูปยูเรเนียมเช่น ประเทศอังกฤษ และญี่ปุ่น เป็นต้น

5.2.3 การเสริมสมรรถนะ (Enrichment)

แร่ยูเรเนียมในธรรมชาติมีไอโซโทปของยูเรเนียมที่สามารถแตกตัวให้พลังงานได้คือ U-235 ซึ่งมีอยู่เพียงประมาณ 0.7% ที่เหลือเป็น U-238 และไอโซโทปอื่นๆ ที่ไม่สามารถแตกตัวได้ ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะกับเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลหนัก (Heavy water reactor, HWR) หรือ CANDU แต่ไม่สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำเบา (Light water reactor, LWR) เนื่องจากความเข้มข้นของ U-235 น้อยเกินไปจึงต้องเพิ่มความเข้มข้นโดยแยก U-235 ออกจาก U-238 และทำให้ความเข้มข้นของ U-235 เพิ่มขึ้นเป็น 3-5 % ซึ่งเรียกว่าการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม เทคนิคที่นิยมใช้ในทางการค้าคือ

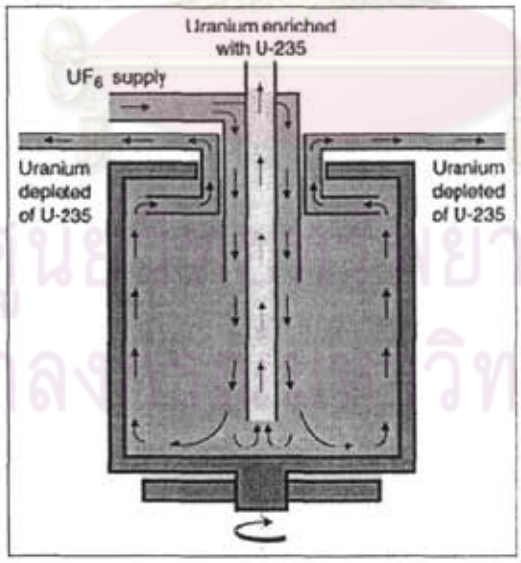
- **การแพร่ของก๊าซ** (Gaseous Diffusion) เป็นเทคนิคแรกที่ใช้ในทางการค้า ซึ่งเป็นกระบวนการเสริมสมรรถนะ U-235 ด้วยการอัดแรงดันให้ UF_6 สถานะก๊าซแพร่ผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุนเล็กๆ ดังรูปที่ 5.4 ซึ่ง U-235 มีน้ำหนักโมเลกุลที่เบากว่า U-238 จะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้เร็วกว่าทำให้ U-235 ถูกเสริมสมรรถนะขึ้นเรื่อยๆ แต่เนื่องจาก U-235 และ U-238 มีน้ำหนักโมเลกุลไม่ต่างกันมากนักจึงต้องมีกระบวนการแยกซ้ำอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น เมื่อได้ความเข้มข้นของ U-235 ตามต้องการจะมีสองส่วนคือ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ (Enriched Uranium) และยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ (Depleted Uranium) หรือหาง (Tail) ที่มีสัดส่วนของ U-235 ที่ลดลงและสัดส่วนของ U-238 ที่สูงขึ้น สามารถนำไปทำเป็นลูกกระสุนที่มีอนุภาพสูง สำหรับโรงงานเสริมสมรรถนะยูเรเนียมที่ใช้เทคนิคนี้ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศ ฝรั่งเศสและสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 5.4 กระบวนการแพร่ของก๊าซ (Gaseous Diffusion)

(ที่มา: http://www.nrc.gov/images/materials/fuel-cycle-fac/enrichment-process.gif)

- **การหมุนเหวี่ยงของก๊าซ** (Gas centrifuge) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาขึ้นมาโดยก๊าซ UF_6 จะถูกปั่นด้วยความเร็วสูงในท่อทรงกระบอก เพื่อให้ U-238 ที่หนักกว่า U-235 เล็กน้อย แยกออกจากกัน โดย U-238 ในกระบอก จะถูกเหวี่ยงไปที่ผนังและถูกแยกออกไป ขณะที่ U-235 จะจับกลุ่มสะสมอยู่ใกล้กับแกนกลางของกระบอก ดังรูปที่ 5.5 ยูเรเนียมที่เสริมสมรรถนะจากเครื่องหมุนเหวี่ยงก๊าซในกระบอกแรกจะถูกส่งไปที่เครื่องถัดไปเพื่อผ่านกระบวนการซ้ำ โดยมีชุดของเครื่องหมุนเหวี่ยงต่อกันเป็นทอดๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเช่นเดียวกันกับแบบการแพร่ผ่านของก๊าซ โรงงานเสริมสมรรถนะยูเรเนียมที่ใช้เทคนิคนี้ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศ รัสเซีย เยอรมันนี อังกฤษ เนเธอร์แลนด์ จีนและญี่ปุ่น



รูปที่ 5.5 กระบวนการหมุนเหวี่ยงของก๊าซ (Gas centrifuge)

(ที่มา: http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/g/gascentrifuge.htm)

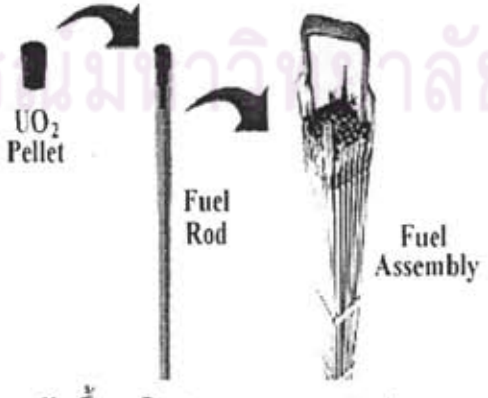
การหมุนเหวี่ยงของก๊าซมีข้อดีกว่าการใช้เทคนิคการแพร่ของก๊าซกล่าวคือ การหมุนเหวี่ยงของก๊าซใช้พลังงานในการเสริมสมรรถนะไม่เกินประมาณ 75 kWh/SWU น้อยกว่าการแพร่ของก๊าซด้วยการอัดผ่านเมมเบรนที่ใช้พลังงานมากถึงประมาณ 3,000 kWh/SWU นอกจากนี้การหมุนเหวี่ยงของก๊าซยังมีจำนวนลำดับการแยกเพียง 10-20 ครั้ง ซึ่งน้อยกว่า กระบวนการแพร่ของก๊าซที่ใช้ถึงเกือบ 1000 ครั้ง จึงทำให้มีแนวโน้มว่าการสร้างโรงงานเสริมสมรรถนะยูเรเนียมทั้งในปัจจุบันและอนาคตจะใช้เทคนิคการหมุนเหวี่ยงของก๊าซ และโรงงานเสริมสมรรถนะแต่เดิมที่ใช้เทคนิคการแพร่ของก๊าซเมื่อเริ่มหมดอายุการใช้งานก็จะถูกแทนที่ด้วยเทคนิคดังกล่าว

5.2.4 การประกอบเชื้อเพลิง (Fuel fabrication)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปยูเรเนียมเฮกซะ-ฟลูออไรด์ที่เสริมสมรรถนะแล้วเป็นผงยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) เพื่อสามารถนำไปอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

$$UO_6 + 2H_2O + H_2 \rightarrow UO_2 + 6HF \qquad (5.2)$$

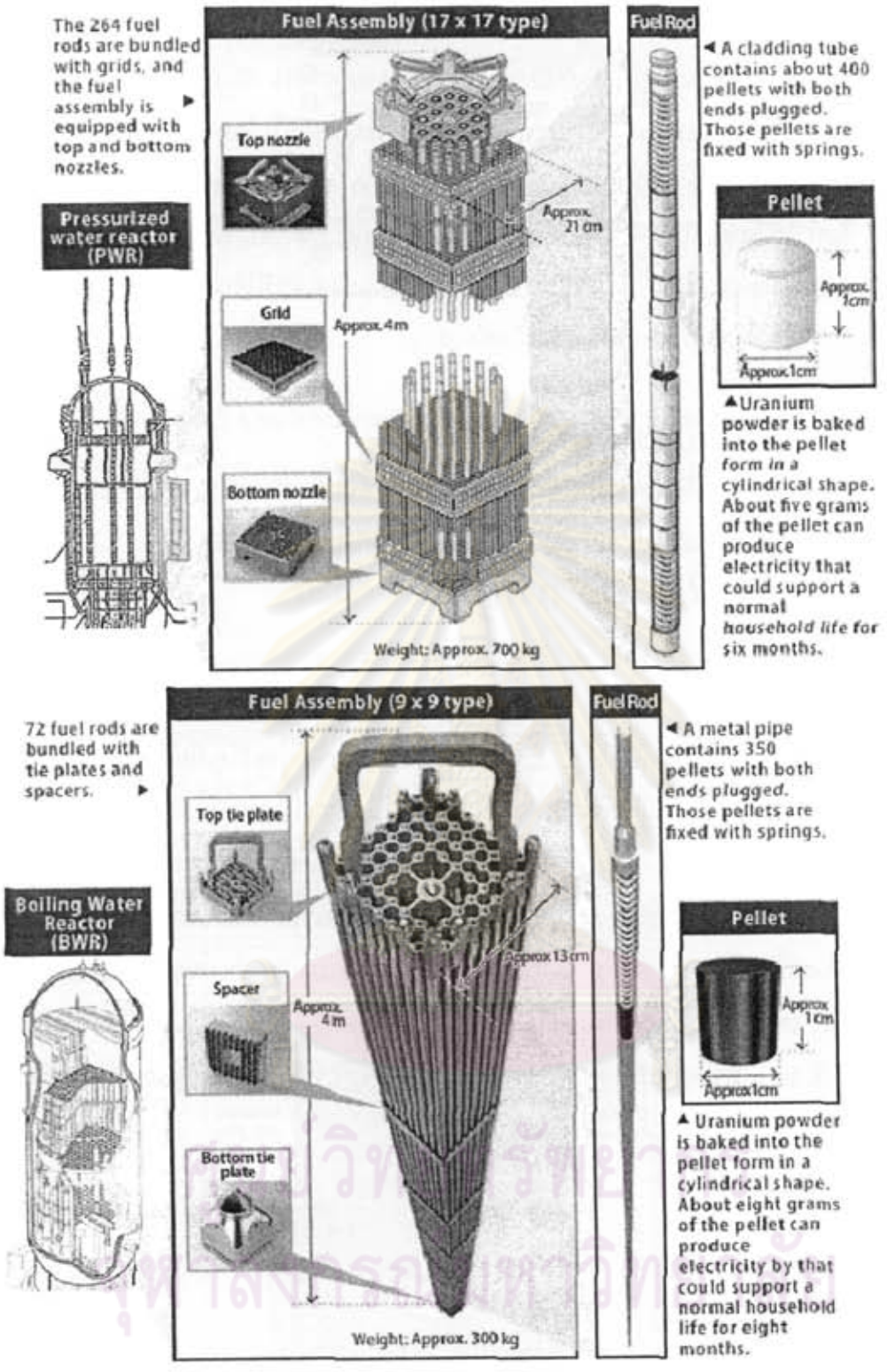
ผง UO_2 ถูกนำมาผ่านกระบวนการกดอัด (Pressing) และการทำ sintering เผาที่อุณหภูมิสูง จะได้เม็ดเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และยาวประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิง UO_2 บรรจุในท่อโลหะผสมของเซอร์โคเนียม (zirconium alloy) เนื่องจากเซอร์โคเนียมมีคุณสมบัติดูดซับนิวตรอนได้น้อย เมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะได้แท่งเชื้อเพลิง (Fuel rod) ที่มีความยาวประมาณ 4 เมตร แล้วนำแท่งเชื้อเพลิงหลายๆ อันมาประกอบรวมกันเป็นมัดเชื้อเพลิง (fuel assemblies) (รูปที่ 5.6) ในแต่ละเทคโนโลยีมัดเชื้อเพลิงมีขนาดแตกต่างกันไปขึ้นกับคุณลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา (Light Water Reactor) ทั้งแบบ PWR และBWR โดยทั่วไป จะมีขนาดมัดเชื้อเพลิงไม่เท่ากันคือ 264 และ 72 แท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัดตามลำดับ (รูปที่ 5.7) ตัวอย่างประเทศที่มีโรงงานประกอบเชื้องเพลิงเช่น สหรัฐอเมริกา รัสเซีย คาซัคสถาน ญี่ปุ่น และฝรั่งเศส เป็นต้น



รูปที่ 5.6 มัดเชื้อเพลิง (Fuel assemblies)

(ที่มา: http://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/images/fuel-pellet-assembly.jpg)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 มัดเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบา แบบ *PWR* และ *BWR*

(ที่มา: http://www.nfi.co.jp/e/product/prod02.html)

5.3 การผลิตกระแสไฟฟ้า (Power generation)

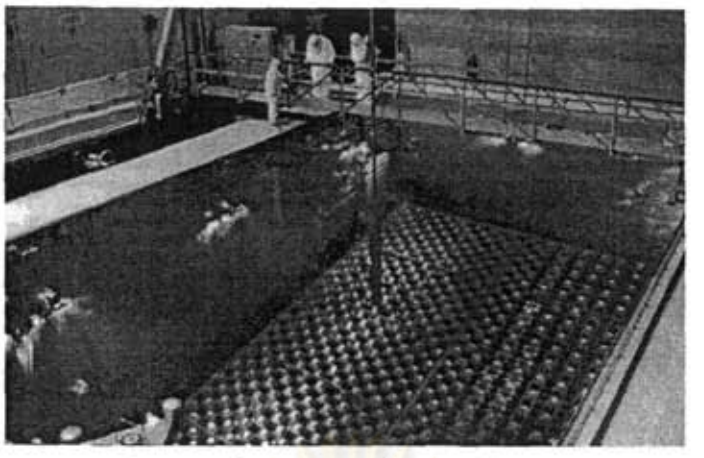
ในส่วนนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การก่อสร้าง (Construction) การก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสำคัญเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี วัสดุที่ใช้ก่อสร้างต้องมีความแข็งแรง และทนทาน เช่น คอนกรีตเสริมแรง และเหล็กกล้า เมื่อการก่อสร้างโรงไฟฟ้าเสร็จสมบูรณ์ จะเข้าสู่ขั้นตอนการดำเนินงาน (Operation) เป็นขั้นตอนในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ รวมทั้งการดูแลรักษา โดยปกติช่วงชีวิต (Life time) ของโรงไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 30-40 ปี แต่เทคโนโลยีใหม่ๆ จะอยู่ที่ประมาณ 60 ปี พลังงานนิวเคลียร์เกิดจากพลังงานความร้อนที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชั่น (Nuclear fission) ของ U-235 กล่าวคือ ยูเรเนียมถูกชนด้วยนิวตรอนแล้วแตกตัวให้พลังงานสูงและสารกัมมันตรังสีต่างๆ ซึ่งพลังงานนี้จะให้ความร้อนกับน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำเพื่อไปขับกังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา สำหรับ U-238นั้น เมื่อถูกชนด้วยนิวตรอนจะเปลี่ยนเป็นพลูโตเนียม-239 ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชั่นได้ซึ่งจะถูกสกัดออกมาในขั้นตอนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ต่อไป และสุดท้ายการปลดระวางโรงไฟฟ้า (Decommissioning) และการรื้อถอนเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสิ้นอายุของโรงไฟฟ้าแล้วย่อมที่จะถูกรื้นถอน ซึ่งต้องทิ้งไว้อย่างน้อยหลังจากเลิกใช้งานเป็นเวลาประมาณ 50-100 ปี

5.4 วัฏจักรนิวเคลียร์ส่วนหลัง (Back end of nuclear fuel cycle)

คือ กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากเชื้อเพลิงถูกใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อบำบัดกากกัมมันตรังสี ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

5.4.1 การเก็บเชื้อเพลิงชั่วคราว (Interim storage)

เมื่อเดินเครื่องไปประมาณ12-24 เดือน เชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว (Spent fuel) จะถูกเปลี่ยนออกมา ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วนี้จะมีความแรงรังสีและความร้อนสูงมากจึงต้องนำไปแช่ไว้ในบ่อน้ำที่มีเครื่องกำบังรังสีในบริเวณใกล้ ๆ กับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อลดความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงลง ประมาณ 1-5 ปี ก่อนนำเชื้อเพลิงใช้แล้วไปกำจัด (รูปที่ 5.8) หรือในกรณีการนำเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วจะถูกแช่น้ำอีกประมาณ 150 วัน ก่อนส่งเชื้อเพลิงใช้แล้วนั้นไปยังโรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิงใช้แล้ว (Reprocessing plant)

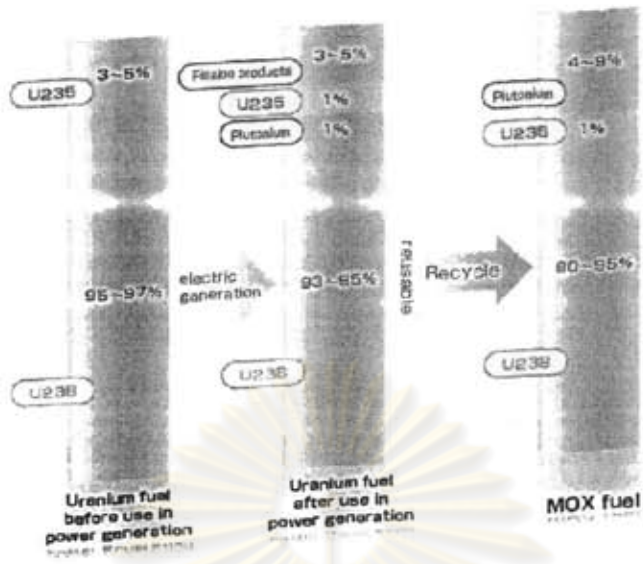


รูปที่ 5.8 บ่อน้ำสำหรับแช่เชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว

5.4.2 กระบวนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ (Reprocessing)

เป็นขั้นตอนที่มีการสกัดแยก U-235 ที่เหลืออยู่ และ พลูโตเนียม-239 ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของ U-238 ออกมาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งช่วยลดปริมาณกากกัมมันตรังสีได้อีกด้วย โดยทั่วไปจะมียูเรเนียม -235 เหลืออยู่ 1% พลูโตเนียม-239 เกิดขึ้น 1% ผลิตภัณฑ์ฟิชชั่น 3% และ U-238 อีก 95% (รูปที่5.9) เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหลังจากแช่ไว้ในบ่อน้ำจะถูกนำมาละลายในกรดเพื่อแยกองค์ประกอบต่างๆแล้วนำสารละลายไปสกัดด้วยตัวทำละลายจะสามารถแยกยูเรเนียมและพลูโตเนียมออกจากกันได้ ในรูปของสารละลายยูเรนิลไนเทรตและพลูโตเนียมไนเทรต ตามลำดับ สารละลายทั้งสองจะถูกนำไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) จะได้ยูเรเนียมออกไซด์และพลูโตเนียมออกไซด์ เมื่อนำมาผสมกันจะสามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงประเภทออกไซด์ผสม (Mix oxide) หรือเรียกว่า MOX ส่วนกากจะถูกนำไปกำจัดต่อไป ซึ่งทั่วโลกมีโรงงานการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ไม่กี่ประเทศ เช่น ฝรั่งเศส อังกฤษ ญี่ปุ่น อินเดีย สหรัฐอเมริกา และรัสเซีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิง

(ที่มา: http://www.gnfjapan.com/english/business/mox.html)

5.4.3 การกำจัดเชื้อเพลิงใช้แล้ว (Waste disposal)

กากของเสียที่เกิดขึ้นมีระดับความแรงของกัมมันตรังสีแตกต่างกันไปทั้งระดับต่ำ ปานกลาง และสูง จึงต้องมีการจัดการกากที่เหมาะสม โดยที่เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วจะถูกฝังลงสู่ใต้ดินที่มีคุณภาพของชั้นหินที่เหมาะสม เช่น หินบะซอลล์ หินดินเคล์ หรือหินแกรไฟต์ เป็นต้น ลึกประมาณ 500 เมตร ตัวอย่างพื้นที่ฝังเก็บที่ประเทศสหรัฐอเมริกาอยู่ที่ภูเขา Yucca เมืองเนวาดา

5.5 บทวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อประเทศไทย

การที่ประเทศไทยจะมีการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมย่อมเกิดขึ้นอย่างแน่นอน ดังตารางที่ 5.2 เมื่อพิจารณาวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบว่า ประเทศไทยจะไม่ได้รับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในส่วนของวัฏจักรนิวเคลียร์ส่วนหน้าจากการผลิตเชื้อเพลิงยูเรเนียม เช่น การปลดปล่อยสารกัมมันตรังสีสู่แหล่งน้ำ หรืออากาศ และการปลดปล่อยเรือนกระจก เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งแร่ยูเรเนียมไม่เพียงพอต่อการผลิตเชื้อเพลิง นอกจากนี้หากต้องการสร้างโรงงานการเปลี่ยนรูป เสริมสมรรถนะ และประกอบแท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม จะต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก ดังนั้นมัดเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ใช้ทั้งหมดจะถูกนำเข้าจากต่างประเทศ แต่จะเกิดผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเกิดจากการขนส่ง

ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าที่ประกอบด้วย การก่อสร้าง การดำเนินงาน และการปลดระวางโรงไฟฟ้า ประเทศไทยได้รับผลกระทบทางด้านการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการปลดปล่อยสาร

กัมมันตรังสีอย่างแน่นอน ถ้าสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าติดทะเลจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมากกว่าการตั้งบริเวณพื้นที่ไม่ติดทะเล เนื่องจากวัสดุการก่อสร้าง รวมทั้งเชื้อเพลิงจะขนส่งมาทางเรือเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการดำเนินงาน และการปลดระวางโรงไฟฟ้าจะส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในระยะยาวตลอดช่วงอายุของโรงไฟฟ้านั่นเอง

สำหรับผลกระทบจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหลัง เป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นกากของเสียที่มีองค์ประกอบของสารกัมมันตรังสี ประเทศไทยจะได้รับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการเก็บเชื้อเพลิงชั่วคราวและการกำจัดเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว ส่วนผลจากกระบวนการนำเชื้อเพลิงมาใช้ใหม่ ประเทศไทยจะได้รับผลกระทบจากการขนส่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วไปสู่ประเทศที่มีโรงงานการนำเชื้อเพลิงมาใช้ใหม่ ดังนั้นจึงควรหาพื้นที่เหมาะสมเพื่อเป็นที่เก็บกากของเสียโดยไม่เป็นอันตรายต่อประชาชน เช่น ห่างไกลชุมชน และระบบนิเวศต่างๆ

ตารางที่ 5.2 ผลกระทบจากขั้นตอนของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อประเทศไทย

ขั้นตอน	ได้รับผลกระทบ	ไม่ได้รับผลกระทบ
วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้า		
การทำเหมืองและการบดยูเรเนียม		✓
การเปลี่ยนรูป		✓
การเสริมสมรรถนะ		✓
การประกอบเชื้อเพลิง		✓
การผลิตกระแสไฟฟ้า		
การก่อสร้าง	✓	
การดำเนินงาน	✓	
การปลดระวางโรงไฟฟ้า	✓	
วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหลัง		
การเก็บเชื้อเพลิงชั่วคราว	✓	
กระบวนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่		✓
การกำจัดเชื้อเพลิงใช้แล้ว	✓	
การขนส่ง	✓	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
การคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
(Greenhouse Gas, GHG, emission)

ในกรณีศึกษานี้ขอเสนอการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงยูเรเนียม การผลิตกระแสไฟฟ้า และการกำจัดกากของเสีย ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์เทคโนโลยี Advanced Boiling Water reactor (ABWR) และ European Pressurized Water Reactor (EPR) โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ของวัฏจักรนิวเคลียร์ ซึ่งข้อมูลสำหรับการประเมินได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 แนวทางการศึกษา

รวบรวมข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์โดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas, GHG, emission) ของเทคโนโลยี BWR และ PWR

↓

คำนวณสมดุลยูเรเนียมขาเข้าและขาออกในแต่ละขั้นตอน ประกอบด้วย 8 ขั้นตอนคือ mining & milling, conversion, enrichment, fuel fabrication, generation, waste storage, reprocessing และ waste disposal

↓

เทียบบัญญัติไตรยางค์หาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี ABWR และ EPR ด้วยปริมาณยูเรเนียมขาเข้าในแต่ละขั้นตอน จากเทคโนโลยี BWR และPWR ตามลำดับ

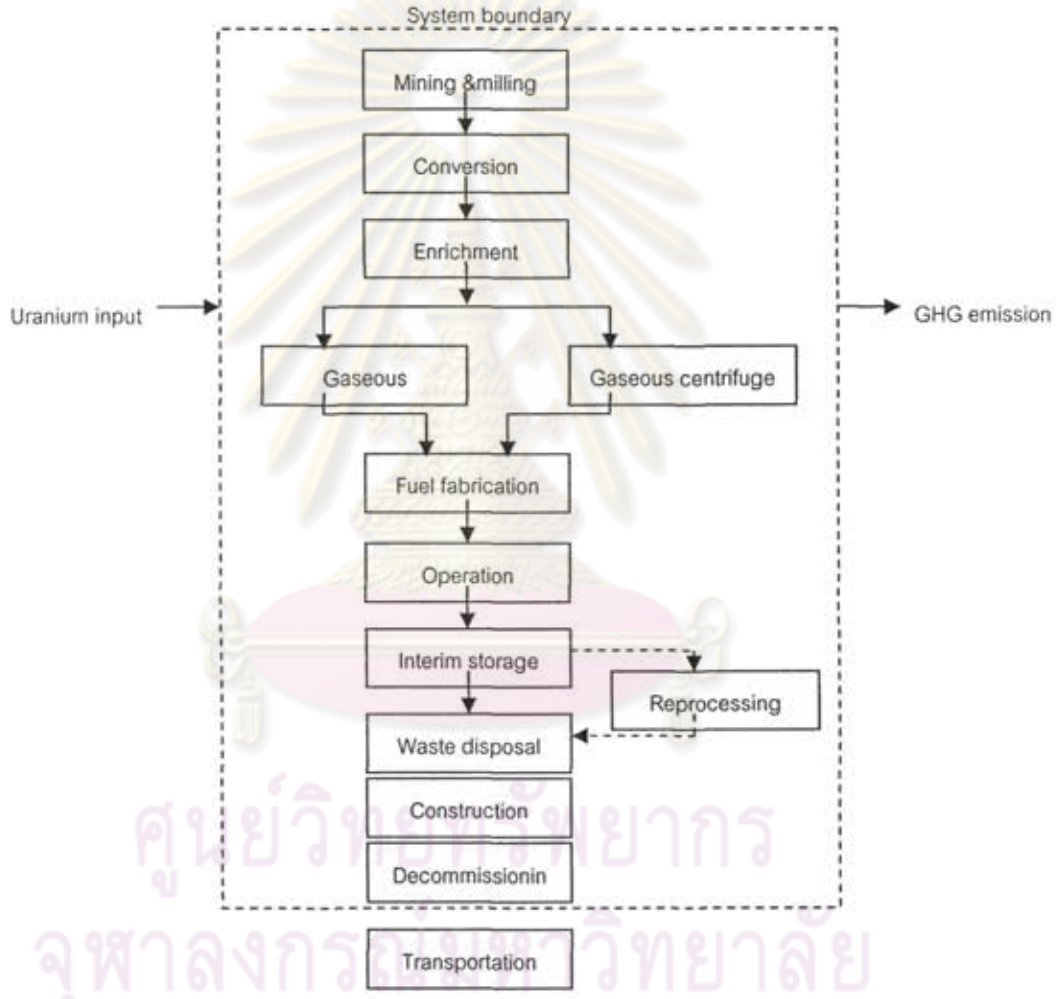
6.2 ขั้นตอนการประเมิน

6.2.1 กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมิน (Goal and Scope Definition)

เป้าหมายของงานนี้คือการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ด้วยเทคโนโลยี ABWR และ EPR ด้วยการใช้ข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของเทคโนโลยีพื้นฐานที่มีอยู่คือ BWR และ PWR

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบเขตของการศึกษาคือ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยมีสายป้อนเข้าเป็นปริมาณเชื้อเพลิงยูเรเนียม และสายออกเป็นค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก สามารถแบ่งทางเลือกเป็น 2 แบบหลักๆ ดังนี้ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบเปิด (once-through fuel cycle) เชื้อเพลิงยูเรเนียมถูกใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง และ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด (close fuel cycle) เชื้อเพลิงยูเรเนียมมีการนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้ใหม่ (Reprocessing) และในแต่ละแบบมีการใช้เทคโนโลยีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมอีก 2 วิธีคือ การแพร่ของก๊าซ (Gaseous Diffusion) และ การหมุนเหวี่ยงของก๊าซ (Gas centrifuge) ดังรูปที่ 6.1 ส่วนการขนส่งยังไม่ได้ถูกนำมาคิดในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 6.1 ขอบเขตการศึกษา

พลังงานความร้อน (Thermal Energy) จากสมดุลมวลอ้างอิง (Faghihi F และคณะ 2008) ถูกกำหนดให้เป็นหน่วยของผลิตภัณฑ์ (Functional Unit) มีค่าเท่ากับ 2,707,692 $MW_{th}d$ คำนวณได้จากสมการ

Thermal energy = (electricity output/thermal eff.) x exposure time x capacity factor (6.1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการเห็นได้ว่า ตัวแปร electricity output, thermal efficiency และ capacity factor เป็นค่าที่ได้จากคุณสมบัติของเทคโนโลยี ยกเว้นตัวแปร exposure time ที่จะผันแปร (ตารางที่ 6.1) เพื่อที่จะให้ทุกเทคโนโลยีเหล่านั้นมีค่าพลังงานความร้อนเท่ากัน

ตารางที่ 6.1 exposure time แต่ละเทคโนโลยีที่ศึกษา

technology	exposure time (d)	reference
PWR (MB)	1,100	Faghihi F, et al., 2008
BWR1	1,173	Van de vate JF, 2002
BWR 2	1,246	Hondo H., 2005
PWR	1,081	Lenzen M, 2008
ABWR	792	Hitachi-GE; Dones R and Gantner U, 1996
EPR	700	Dones R and Gantner U, 1996; Leverenz R, Gerhard L., 2004

6.2.2 การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Life cycle inventory analysis)

การเก็บข้อมูลนี้เป็นข้อมูลประเภททุติยภูมิ คือ ข้อมูลที่ไม่ได้เกิดจากการทำการทดลอง แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

(ก) ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการคำนวณนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการคำนวณแสดงดังตารางที่ 6.2 ประกอบด้วย % of enriched U-235, burn up rate, thermal efficiency, capacity factor, และ electricity output ทุกพารามิเตอร์ของเทคโนโลยี ABWR และ EPR มีค่ามากกว่าเทคโนโลยี BWR และ PWR เช่น ประสิทธิภาพทางความร้อนของเทคโนโลยี ABWR และ EPR สูงกว่า BWR และ PWR จากเดิมประมาณ 32.5 % เป็น 34-37% ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นจาก 1,000 MW_e เป็น 1,356 และ 1,600 MW_e ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า burn up ที่สูงขึ้นทำให้ใช้เชื้อเพลิงลดลงเมื่อพลังงานความร้อนเท่ากัน และอายุของโรงไฟฟ้ายังมากกว่าถึง 60 ปี

ส่วนข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากเทคโนโลยี BWR และ PWR ที่ใช้ในการอ้างอิง แสดงในรูปของปริมาณกรัมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อพลังงานไฟฟ้า (gCO_{2eq}/kW_eh) ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งเป็นวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด (close fuel cycle) ประกอบด้วย 10 ขั้นตอน จากตารางจะเห็นว่าขั้นตอนที่มีอิทธิพลมากต่อการ

ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกคือ ขั้นตอนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซ (Gaseous diffusion) จะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าวิธีการหมุนเหวี่ยงของก๊าซ (Gas diffusion) มากถึงประมาณ 50% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด แต่จากข้อมูล PWR ซึ่งเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซเหมือนกันแต่มีค่าปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าอย่างมาก อาจเกิดจากใช้วิธีคำนวณที่แตกต่างกันของผู้วิจัย

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญ

	PWR (MB)	BWR1	BWR2	PWR	ABWR	EPR
%of enriched U-235	3.3	3.3[a]	3.4	3.7	3.8	4.3
Burn up rate (MWd/kgU)	33	30	40	42.8	45	60
Thermal Efficiency (%)	32.5	32.5[a]	32.2	32.5[a]	34.5	37.0
Capacity Factor (%)	80	75	70	81.4	87	90
Electricity output (MW_e)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,356	1,600
Life time (y)	-	30	30	40	60	60

[a] ค่าสมมติ

(ข) ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

- สมมติฐาน

1) ปริมาณยูเรเนียมที่ใช้สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
2) % loss and % recycle คงที่
3) % composition of spent fuel คงที่
4) % composition of radioactive waste คงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากเทคโนโลยีอ้างอิง BWRและ PWR ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด (Close fuel cycle)

Stages	BWR1 ($gCO_{2\,eq}/kW_eh$)		BWR2 ($gCO_{2\,eq}/kW_eh$)	PWR ($gCO_{2\,eq}/kW_eh$)
Mining & milling	0.18	0.18	0.90	1.73
conversion	0.92	0.92	0.20	1.37
enrichment	1.52 (Centrifuge)	10.75 (Diffusion)	12.40 (Diffusion)	0.54 (Diffusion)
fuel fabrication	0.13	0.13	0.60	0.12
construction	2.25	2.25	3.20	0.69
generation	2.25	2.25	3.20	0.69
waste storage	-	-	0.20	0.30
reprocessing	1.61	1.61	0.70	0.30
waste disposal	1.33	1.33	0.30	0.24
decommissioning	-	-	0.50	-
Total	10.19	19.42	22.2	5.98

- สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาณเชื้อยูเรเนียมทั้งหมดที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์หาได้จากพลังงานความร้อน (2,707,692 $MW_{th}d$) หารด้วย burn up rate ของแต่ละเทคโนโลยี ดังสมการที่ 6.2

$$\text{total mass of uranium} = \frac{\text{thermal energy}}{\text{burn up rate}} \qquad (6.2)$$

ในหนึ่งวัฏจักรเชื้อเพลิงยูเรเนียม โดยปกติเชื้อเพลิงยูเรเนียมในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกนำออกประมาณประมาณหนึ่งส่วนสามของปริมาณยูเรเนียมทั้งหมด ดังนั้นจึงป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปหนึ่งส่วนของปริมาณทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{mass of uranium refueling input to reactor} = \frac{1}{3} \text{ x total mass of uranium} \qquad (6.3)$$

เมื่อเทียบสัดส่วนโดยมวลของปริมาณยูเรเนียมขาเข้าในแต่ละขั้นตอน (M_i) (ตารางที่ 6.8) กับปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากตารางที่ 6.3 ก็จะได้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เทคโนโลยี ABWR และ EPR ดังสมการ

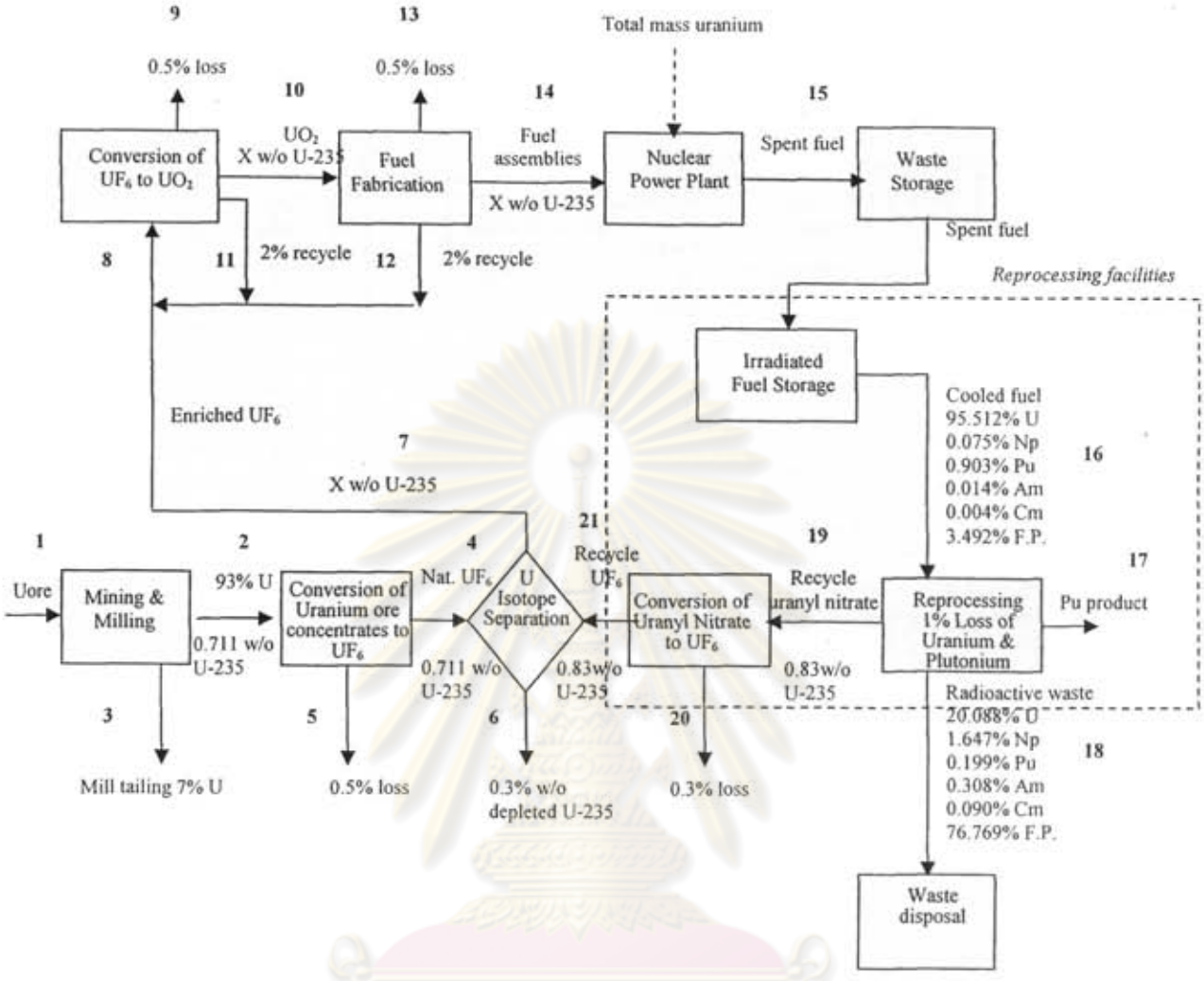
$$M_i \text{ x } GHG_i(\text{original}) = GHG_i(\text{advance}) \qquad (6.4)$$

- **สมดุลมวลยูเรเนียม** (mass balance of uranium)

สมดุลมวลยูเรเนียมแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษาคือ วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด และวัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด ดังรูปที่ 6.2 ประกอบด้วย 8ขั้นตอนหลักๆ คือ

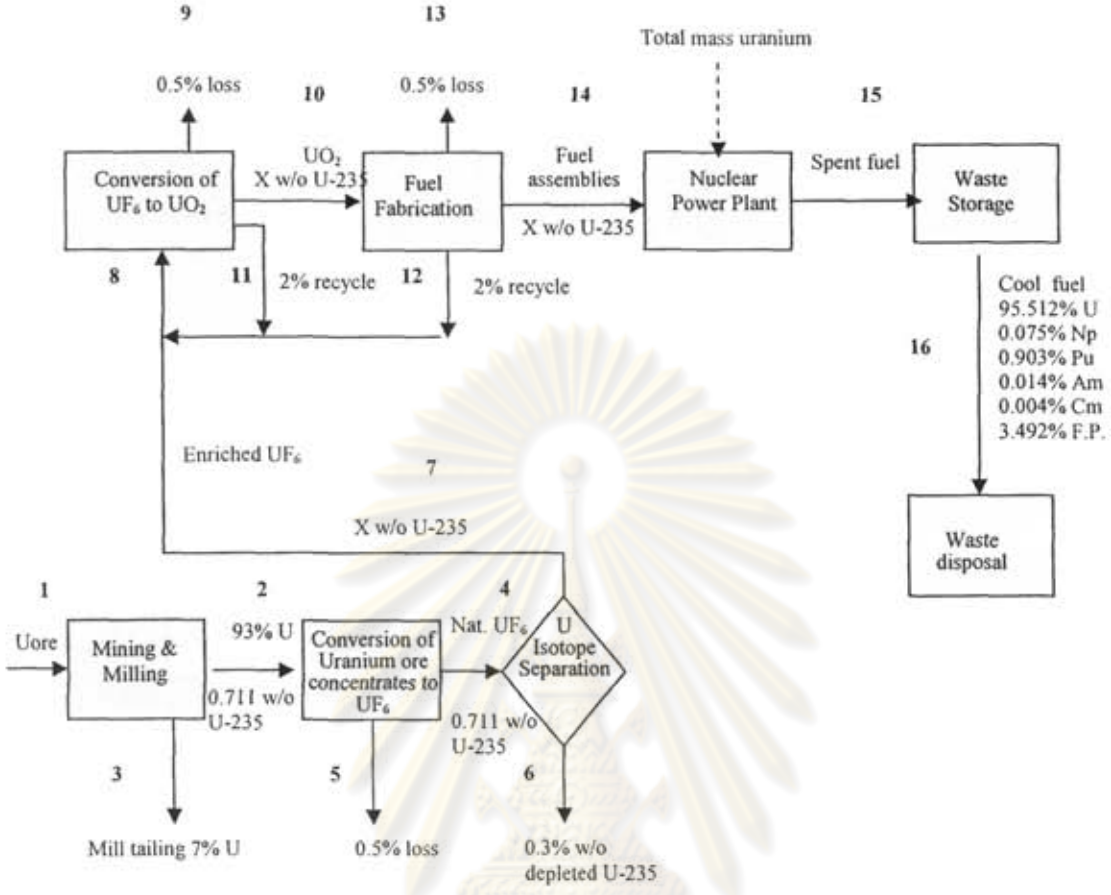
1) mining & milling นำแร่ยูเรเนียมที่ได้จากการขุดมาทำความสะอาด และบด จะได้ยูเรเนียม 93% ซึ่งมี U-235 อยู่ 0.711%
2) conversion เปลี่ยนรูปแร่ยูเรเนียมธรรมชาติให้อยู่ในรูป UF_6
3) enrichment แยกไอโซโทปยูเรเนียมเพื่อให้มีความเข้มข้นของ U-235 มากขึ้น และ UF_6 จะถูกเปลี่ยนรูปกลับเป็น UF_2
4) fuel fabrication เตรียมมัดเชื้อเพลิง
5) generation ผลิตไฟฟ้าโดยใช้มัดเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้
6) waste storage เก็บเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วชั่วคราวเพื่อลดความแรงของสารกัมมันตรังสี
7) reprocessing กระบวนการนำเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ จะมียูเรเนียมและพลูโตเนียมหายไป 1% และสกัด U-235 กลับมาใช้ใหม่ที่ความเข้มข้น 0.83%
8) waste disposal กำจัดกากของเสีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข)

รูปที่ 6.2 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กรณีศึกษา (ก) Once through nuclear fuel cycle และ (ข) Close fuel cycle

สมดุลมวลยูเรเนียมของเทคโนโลยี ABWR และ EPR จะถูกเทียบกับเทคโนโลยี BWR และ PWR ตามลำดับ ซึ่งในที่นี้ข้อมูล BWR ที่เพียงพอต่อการคำนวณได้จากงานวิจัยของ Van de vate JF (2002) และ Hondo H. (2005) ส่วน PWR เป็นข้อมูลจาก Lenzen M (2008) การคำนวณสมดุลมวลยูเรเนียมเริ่มต้นจากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Faghihi F และคณะ (2008) โดยใช้เทคโนโลยี PWR ภายใต้วัฏจักรเชื้อพลิงแบบปิด (รูปที่ 6.2 (ก)) แต่ละขั้นตอนแสดงปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกในหนึ่งวัฏจักร ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียมอ้างอิง

สายที่	ปริมาณยูเรเนียม (kgU)	หมายเหตุ
1	181,605	สายเข้าขั้นตอน mining & milling
2	168,935	สายเข้าขั้นตอน conversion stage
3	12,670.13	
4	168,090	สายเข้าขั้นตอนenrichment
5	845	
6	166,200	
7	27,564	
8	29,599	
9	148	
10	28,859	สายเข้าขั้นตอน fuel fabrication
11	592	
12	1,443	
13	144	
14	27,271	สายเข้าขั้นตอน generation
15	27,233.32	สายเข้าขั้นตอน waste storage
16	27,233.32	สายเข้าขั้นตอน reprocessing
17	243.5	
18	1,238.78	สายเข้าขั้นตอน waste disposal
19	25,751	
20	77.3	
21	25,674	สายเข้าขั้นตอนenrichment

จากนั้นคำนวณปริมาณยูเรเนียมขาเข้าโรงไฟฟ้าแต่ละเทคโนโลยีจากสมการที่ 6.2 และ 6.3 จะได้ปริมาณยูเรเนียมดังตารางที่ 6.5 โดยทั่วไปปริมาณยูเรเนียมที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ในหนึ่งวัฏจักรจะเป็นหนึ่งส่วนสามของปริมาณยูเรเนียมทั้งหมด เมื่อทราบปริมาณยูเรเนียมขาเข้าสำหรับผลิตไฟฟ้าแล้วทำการเทียบสัดส่วนปริมาณยูเรเนียมจากเทคโนโลยี BWR และ PWR นี้กับของสมดุลมวลอ้างอิง (สายที่ 14 ตารางที่ 6.4) จะได้ค่าแฟคเตอร์เพื่อคูณเทียบหาปริมาณยูเรเนียมในสายอื่นๆ สุดท้ายเทียบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัดส่วนปริมาณยูเรเนียมจากเทคโนโลยี BWR และPWR กับ APWR และ EPR ด้วยวิธีเดียวกันก็จะได้สมดุลยูเรเนียมในแต่ละเทคโนโลยีตามต้องการ

ตารางที่ 6.5 ปริมาณยูเรเนียมทั้งหมดและปริมาณยูเรเนียมป้อนเข้าของเครื่องปฏิกรณ์

	BWR1	BWR2	ABWR	PWR	EPR
ปริมาณยูเรเนียมทั้งหมดที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ (total mass of uranium)	90,256	67,692	60,171	63,264	45,372
ปริมาณยูเรเนียมที่เติมในวัฏจักร (mass of uranium refueling input to reactor)	30,085	22,564	20,057	21,088	15,124

ตารางที่ 6.6-6.7 แสดงปริมาณยูเรเนียมจากเทคโนโลยีต่างๆ ทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิดและวัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด จะเห็นว่าทั้งสองรูปแบบจะใช้ปริมาณยูเรเนียมต่างกันตรงขั้นตอน mining & milling, conversion และenrichment (สายที่ 1-7) ซึ่งวัฏจักรแบบเปิดจะใช้ปริมาณยูเรเนียมมากกว่า เนื่องจากไม่มีการนำเชื้อเพลิงใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จึงต้องใช้ปริมาณยูเรเนียมธรรมชาติมากขึ้น

ตารางที่ 6.6 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม
ภายใต้ทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด

สายที่	ปริมาณยูเรเนียม (kgU)				
	BWR1	BWR2	PWR	ABWR	EPR
1	200,347	156,255	168,445	154,881	140,899
2	186,370	145,354	156,693	144,075	131,069
3	13,978	10,902	11,752	10,806	9,830
4	185,438	144,627	155,909	143,355	130,413
5	932	727	784	721	656
6	183,352	143,063	154,448	141,964	129,365
7	30,409	22,807	21,315	20,272	15,287

ตารางที่ 6.6 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม ภายใต้ทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด (ต่อ)

สายที่	ปริมาณยูเรเนียม (kgU)				
	BWR1	BWR2	PWR	ABWR	EPR
8	32,654	24,491	22,889	21,769	16,415
9	163	122	114	109	82
10	31,837	23,878	22,316	21,225	16,005
11	653	490	458	435	328
12	1,592	119	1,116	1,061	800
13	159	119	111	106	80
14	30,086	22,564	21,088	20,057	15,124
15	30,044	22,533	21,059	20,029	15,103
16	30,044	22,533	21,059	20,029	15,103
17	269	201	188	179	135
18	1,367	1,025	958	911	687
19	28,409	21,307	19,913	18,939	14,281
20	85	64	60	57	43
21	28,324	21,243	19,853	18,883	14,238

ตารางที่ 6.7 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด

สายที่	ปริมาณยูเรเนียม (kgU)	
	ABWR	EPR
1	181,188	160,736
2	168,547	149,522
3	12,641	11,214
4	167,704	148,774

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.7 ปริมาณยูเรเนียมขาเข้าและขาออกของสมดุลยูเรเนียม
ภายใต้วัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิด (ต่อ)

สายที่	ปริมาณยูเรเนียม (kgU)	
	ABWR	EPR
5	843	748
6	147,431	133,488
7	20,272	15,287
8	21,768	16,415
9	109	82
10	21,225	16,005
11	435	328
12	1,061	800
13	106	80
14	20,057	15,124
15	20,029	15,103
16	20,029	15,103

- ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emission)

เมื่อทราบสมดุลมวลยูเรเนียมแล้ว เทียบสัดส่วนปริมาณยูเรเนียมขาเข้าในแต่ละขั้นตอน ของเทคโนโลยี ABWR กับ BWR และ EPR เทียบกับPWR (ตารางที่ 6.8) โดยกำหนดให้เป็นตัวแปร M_i จากนั้นนำค่า M_i นี้คูณกับค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี BWR และPWR (ตารางที่ 6.3) ตามสมการที่ 6.3 ก็จะได้ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี ABWR และ EPR

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.8 สัดส่วนโดยมวลของปริมาณยูเรเนียมขาเข้าแต่ละขั้นตอน (M,)

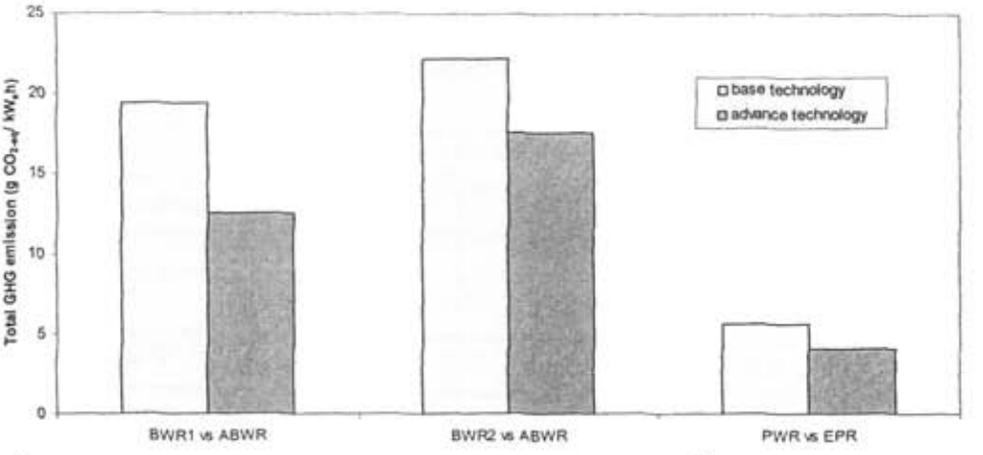
stages	Close fuel cycle			once-through fuel cycle		
	ABWR/BWR1	ABWR/BWR2	EPR/PWR	ABWR/BWR1	ABWR/BWR2	EPR/PWR
Mining & milling	0.77	0.99	0.84	0.90	1.16	0.95
conversion	0.77	0.99	0.84	0.90	1.16	0.95
enrichment	0.76	0.98	0.82	0.78	1.01	0.85
fuel fabrication	0.67	0.89	0.72	0.67	0.89	0.72
generation	0.67	0.89	0.72	0.67	0.89	0.72
waste storage	0.67	0.89	0.72	0.67	0.89	0.72
reprocessing	0.67	0.89	0.72	-	-	-
waste disposal	0.67	0.89	0.72	0.67	0.89	0.72

สำหรับขั้นตอน construction และ decommissioning ไม่สามารถคำนวณค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ตามวิธีข้างต้น เนื่องจากไม่ขึ้นกับปริมาณยูเรเนียม จากงานวิจัยที่ผ่านมาหลายฉบับปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอน construction และ generation มีสัดส่วนกัน 1:1 [Lenzen M, 2008] จึงคิดเทียบจากขนาดและอายุของโรงไฟฟ้าต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลแทน

6.3 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

6.3.1 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างเทคโนโลยีพื้นฐาน (BWR และ PWR) กับ เทคโนโลยีที่พัฒนาแล้ว (ABWR และ EPR)

รูปที่ 6.3 แสดงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิดและเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusion) ของเทคโนโลยีดั้งเดิม (BWR และ PWR) และ เทคโนโลยีที่พัฒนาแล้ว (ABWR และ EPR) พบว่า เทคโนโลยี ABWR และ EPR ช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 20-35 % เนื่องจากเทคโนโลยีเหล่านี้ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพ เช่น ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

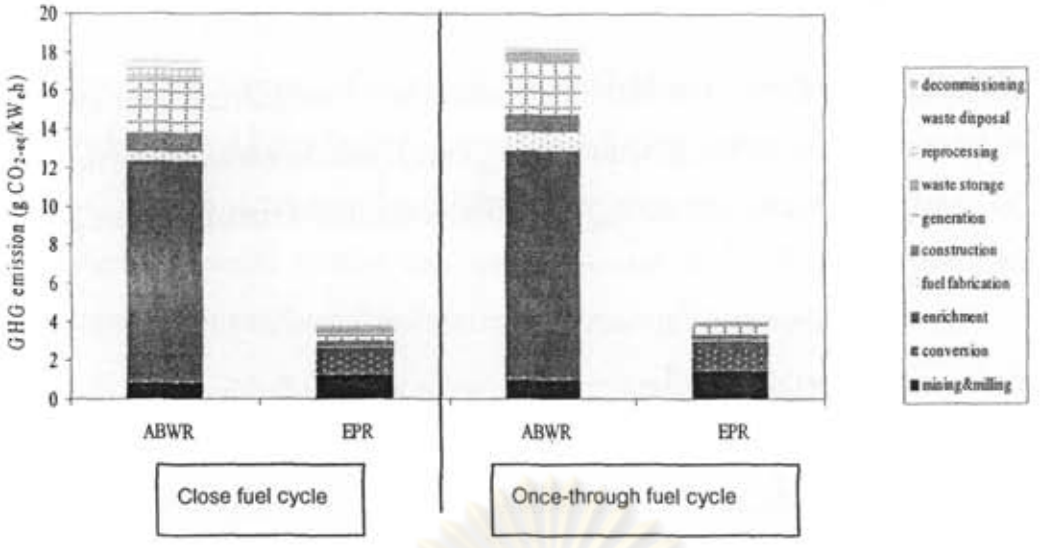


รูปที่ 6.3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีดั้งเดิม (BWR และ PWR) และเทคโนโลยีที่พัฒนาแล้ว (ABWR และ EPR)

6.3.2 รูปแบบของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

สำหรับในกรณีศึกษานี้พบว่า การนำเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ หรือ วัฏจักรเชื้อเพลิงแบบปิดตามสมดุลมวลยูเรเนียม ช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ส่วนหน้าคือ ขั้นตอน mining & milling, conversion, enrichment และ fuel fabrication แต่จากรูปที่ 6.4 เห็นได้ว่าการนำเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งจากเทคโนโลยี ABWR (เทียบจาก BWR2) และ EPR (เทียบจาก PWR) มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกลดลงเพียงเล็กน้อย เช่น ขั้นตอน mining & milling ของเทคโนโลยี ABWR ลดลงจาก 0.97 gCO_{2eq}/ kW_eh เป็น 0.83 gCO_{2eq}/ kW_eh นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเทคโนโลยี ABWR และ EPR พบว่า แม้ใช้เทคโนโลยีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมที่เหมือนกัน คือ การแพร่ของก๊าซ (Gaseous diffusion) แต่ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยออกมาแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากข้อมูลงานวิจัยที่ใช้เทียบอ้างอิงอาจคำนวณด้วยวิธีที่ต่างกันจึงทำให้ค่าที่ออกมาแตกต่างกันมาก

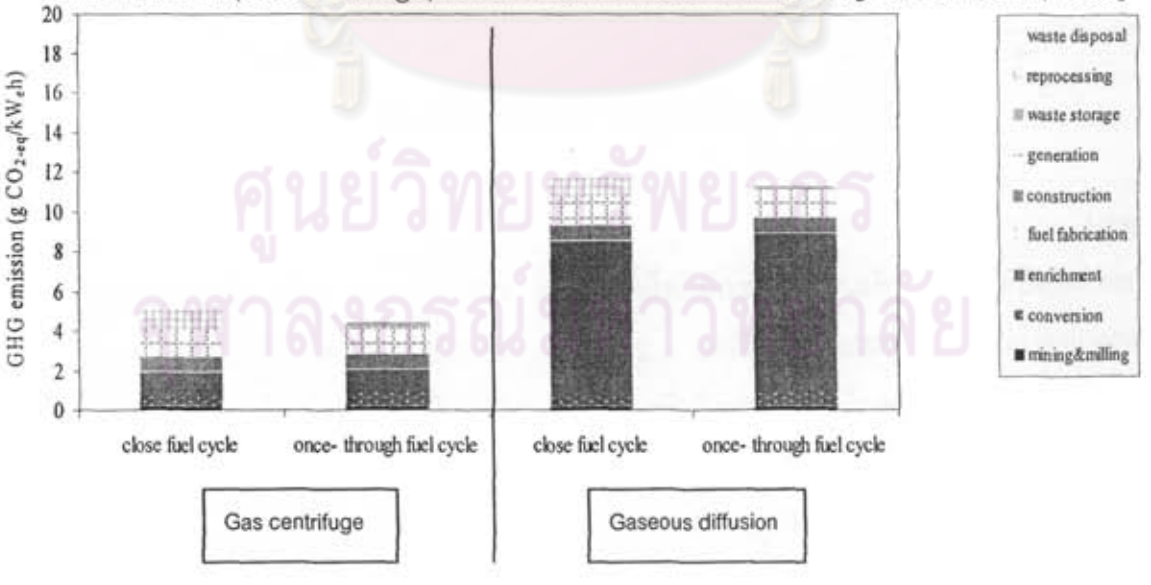
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิด และแบบเปิด ของเทคโนโลยี ABWR และ EPR

6.3.3 วิธีการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม

รูปที่ 6.5 แสดงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทั้งแบบเปิดและแบบปิดของเทคโนโลยี ABWR (เทียบจาก BWR1) จะเห็นว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมามากเมื่อเสริมสมรรถนะยูเรเนียมด้วยวิธีการแพร่ของก๊าซ (Gaseous diffusion) ประมาณ 70% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดวัฏจักร เนื่องจากกระบวนการแพร่ของก๊าซต้องการพลังงานมากถึง 2,400 kWh /SWU เพื่อให้เกิดการแยกไอโซโทปยูเรเนียม ในขณะที่กระบวนการหมุนเหวี่ยงของก๊าซ (Gas centrifuge) ใช้พลังงานเพียง 40-50 kWh /SWU [Dones R et al., 1996]



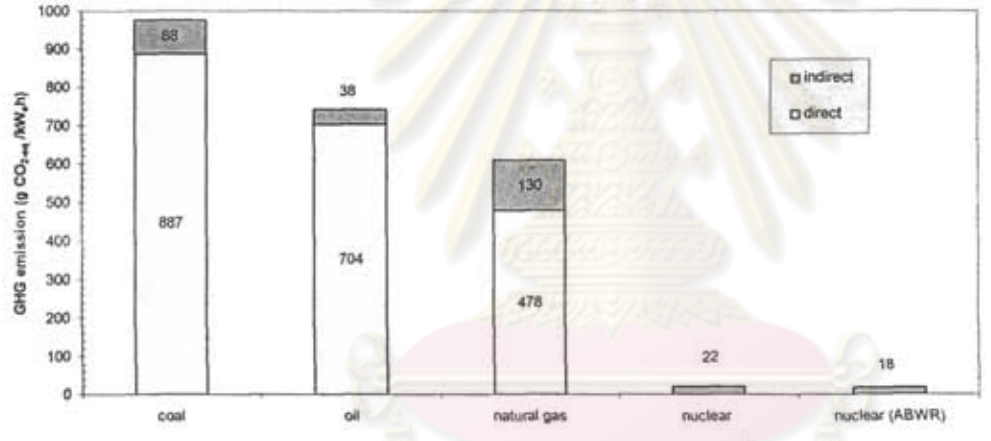
รูปที่ 6.5 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยี ABWR เมื่อเทคโนโลยีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องบ้างฉบับรายงานผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของเทคโนโลยี ABWR [Dones R et al., 1996] ประมาณ 6 gCO_{2eq}/ kW_eh ซึ่งใกล้เคียงกับผลการคำนวณ ABWR (เทียบจาก BWR1) ประมาณ 4.5-5.9 gCO_{2eq}/ kW_eh เมื่อใช้เทคโนโลยีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมแบบด้วยวิธีการเหวี่ยงของก๊าซ

6.3.4 เปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กับเชื้อเพลิงอื่นๆ

รูปที่ 6.6 แสดงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงต่างๆ [Hondo, 2005] จะเห็นว่า เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าไม่ถึง 30 gCO_{2eq}/kW_eh ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงจำพวกฟอสซิลและถ่านหินมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมากเกือบ 1,000 $gCO_{2\ eq}/kW_eh$ เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้จึงไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง แต่จะมีก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นจากการเตรียมเชื้อเพลิงและการกำจัดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นการปลดปล่อยโดยอ้อมมากกว่า



รูปที่ 6.6 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ

6.4 บทสรุป

เทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาจากเทคโนโลยีดั้งเดิมคือ ABWR และ EPR สามารถช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้เกือบ 20-35% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในหนึ่งวัฏจักร สำหรับรูปแบบของวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ เนื่องจากทั้งวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบปิดและแบบเปิด มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยขั้นตอนที่สำคัญต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกคือ กระบวนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม ซึ่งการใช้วิธีการเหวี่ยงของก๊าซช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมากประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือน

กระจกที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าพบว่า การใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลและถ่านหิน

สำหรับประเทศไทยนั้นจะได้รับผลกระทบจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอน generation, waste storage และ waste disposal เท่านั้น เนื่องจากขั้นตอนอื่นๆ เกิดขึ้นภายนอกประเทศ จึงช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกโดยรวมภายในประเทศได้เป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7
บทสรุป: ผลการดำเนินการในปีแรกและแผนงานในปีที่ 2
(Conclusion: Summary of the 1st year work and 2nd year plan)

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่มีระยะเวลาต่อเนื่อง 2 ปี และในปีที่ 1 ผลงานได้ครอบคลุมขอบเขตตามที่วางเป้าหมายไว้เกือบทั้งหมด รวมทั้งครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนของงานในปีที่ 2 ไปด้วย นั่นคือ

- ได้สรุปแนวโน้มของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ รวมทั้งรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในประเทศที่พัฒนาแล้ว โดยได้เสนอให้เห็นถึงประโยชน์และปัญหาของการใช้พลังงานนิวเคลียร์ (บทที่ 1 และ 2)
- ได้เสนอแนวทางในการกำหนดที่ตั้งของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (บทที่ 3 และ 4)
- ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของการใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีทางเลือกของการใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน และการกำจัดซากเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ (บทที่ 5) นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบในแง่ของภาวะโลกร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์อย่างละเอียด (บทที่ 6)
- ในส่วนของงบประมาณในการก่อสร้าง ทางคณะวิจัยได้ปรับให้เป็นมูลค่าผลกระทบด้านต่าง ๆ ดังได้เสนอในบทที่ 4 ซึ่งคิดว่าน่าจะเป็นประโยชน์ในเชิงการบริหารจัดการโครงการการจัดสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ต่อไป

โดยในการดำเนินการนั้น ได้มีการจัดประชุมผู้เชี่ยวชาญทุก ๆ 3 เดือน เป็นจำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อนำเสนอความก้าวหน้า และขอคำแนะนำเพื่อปรับให้งานที่ได้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้มากที่สุด โดยผู้เชี่ยวชาญที่มาให้คำแนะนำเป็นอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นผู้ชำนาญการในสาขานี้โดยเฉพาะ

สิ่งที่จักได้ดำเนินการต่อในปีที่ 2 คือ การจัดทำการประเมินผลกระทบโดยใช้หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพิ่มเติม และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการประเมินนี้ ซึ่งจะยึดแนวทางการทำงานในลักษณะเดิม คือ จัดให้มีการขอคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิทุก ๆ 3 เดือน เพื่อให้คำแนะนำกับผลการดำเนินงานที่ได้ และจะได้จัดทำเอกสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนงานในปีที่ 2

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา/ เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. จัดทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของเทคโนโลยีใหม่ๆโดยใช้หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต	←	—	→									
2. จัดประชุมขอคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิ ครั้งที่ 1			←	→								
3. รวบรวมผลกระทบจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้า และการกำจัดกากของเสีย				←	—	→						
4. จัดประชุมขอคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิ ครั้งที่ 2						←	→					
5. จัดทำรายงายความหน้า 6 เดือน							←	→				
6.จัดทำการประเมินผลกระทบจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้า โดยใช้หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต							←	—	→			
7. จัดประชุมขอคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิ ครั้งที่ 3										←	→	
8. การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดกากของเสีย										←	—	→
9. จัดประชุมขอคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิ ครั้งที่ 4												← →
10. จัดทำรายงายฉบับสมบูรณ์											←	— →

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

แผนที่และข้อมูลแหล่งแร่ของไทย ชุดแร่โลหะของประเทศไทย ฉบับที่ 4 แหล่งแร่ยูเรเนียมในประเทศไทย, เอกสารเผยแพร่เศรษฐธรณีวิทยา ฉบับที่ กศ/2543 ISBN 974-7733-05-6, กรมทรัพยากรธรณี กองเศรษฐธรณีวิทยา 2543

Andrew Macintosh, "Siting Nuclear Power Plants in Australia", January, 2007

Dones R, Gantner U, Hirschberg S. *Environmental inventories for future electricity supply* systems for Switzerland. PSI Bericht Nr. 96-07, Paul Scherrer Institut, Villigen 1996.

Faghihi F, Havasi H, Mozafari AM. Plutonium-239 production rate study using a typical fusion reactor. Annals of nuclear energy 2008;35:759-766.

Guinee, J.B. Development of a Methodology for the Environmental Life Cycle Assessment of Products, Ph. D Thesis, Leiden University, Netherlands; 1995: 108-112.

GOT WATER?, Union of Concerned Scientists, December, 2007

Heijungs, R. (1992), Environmental Life Cycle Assessment of Product - Guide and Background, Center for Environmental Science, Leiden University, Netherlands.

http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/main.php?filename=Active_FAULTS_THAI

http://www.absoluteastronomy.com/topics/Passive_nuclear_safety

http://hydro-5.com/

http://www.tmdseismology.com/tmd/files/downloads/statEQ.doc

Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy 2005;30:2042-2056.

IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3, "Site Evalution for Nuclear Installations", the International Atomic Energy Agency 2003.

Leverenz R, Gerhard L. The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs. International Conference Nuclear Energy for New Europe 2004.

Lenzen, M. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. Energy Conversion and Management 2008;49: 2178-2199.

Nuclear power plant system Advanced Boiling Water Reactor (ABWR). Hitachi-GE

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Nuclear Energy, Ltd.

Ovais Shuja, Service factors, Jalal Engineering, Karachi.

Regulatory Guide 4.7 - General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations, United States Regulatory Commission, April, 1998.

R.W. Nordquist, Consideration for Siting a Nuclear Powered Generating Station in Saskatchewan, March, 1975.

Safety Criteria for Siting a Nuclear Power Plant, STUK, July, 2000.

Site Evalution for New Nuclear power plants, Canadian Nuclear Safety Commission, October, 2007.

Site Identification Study and Initial Environmental Examination for the Nuclear Power Project in Thailand,EGAT, December, 1995.

UNEP Ozone Secretariat, Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer (1997 upgrade), Division of Technology Industry and Engineering, United Nation Environment and Programme,1998.

Van de vate JF. Full-energy-chain greenhouse-gas emissions: a comparison between nuclear power, hydropower, solar power and wind power. Int. J. Risk Assessment and Management 2002; 3(1): 59-74.

Water Consumption and Water Use of Heat-Engine Electricity Generating Plants, September, 2008.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัตินักวิจัยและคณะ

หัวหน้าโครงการวิจัย	หน่วยงาน
รศ. ดร. ประเสริฐ ภวสันต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทีมงานร่วม

รศ. ดร. นวดล เหล่าศิริพจน์	บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ. ดร. บุณยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล	ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร. วรพจน์ กนกกันฑพงษ์	คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
ดร. พรทิพย์ วงศ์สุโชโต	ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย
นางสาว วทัตตา ฤทธิ์เจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นางสาว ฟาติมา ปรียากร	บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
นายจักราช คุณาเขมากร	บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย