



Small and Medium Nuclear Reactor for Development

Vutthi Bhanthumnavin

Professor, School of Technology, Shinawatra International University

Duchduen Bhanthumnavin

*Associate Professor, The Graduate School of Social and Environmental Development,
National Institute of Development Administration*

Abstract

The renewed interest towards nuclear energy is largely based on the escalation of fossil fuel price and rapid demand of for more energy in developing countries (e.g. China, India and Brazil). Furthermore, emission of Green House Gases (GHG) mainly carbon dioxide (CO₂) lead to an increasing of global warming. Nuclear renaissance or “Second Nuclear Era” served as basis of new nuclear technology evolution for nuclear power plant (NPP) development. In this paper small and medium nuclear reactor (SMR) are described together with their advantages in comparison to conventional or large nuclear reactor (LR). Furthermore, general application for development and suitability for developing countries are presented not only for electric generation but also for co-generation (e.g. desalination heat processing source for industries). Potentiality of SMR for Hydrogen production as fuel for transportation is briefly mentioned. Suggestion outline of SMR utilization for development are presented to developing countries.

Key words: Small and medium nuclear reactor (SMR), Second nuclear era, Economy of scale (EOS), Modularity, Comparison between SMR and LR, Advantages of SMR



เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง เพื่อการพัฒนา

วุฒติ พันธมนาวิน

ศาสตราจารย์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยชินวัตร

คจเดือน พันธมนาวิน

รองศาสตราจารย์ คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีหลายประเทศที่ให้ความสนใจที่จะนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้เป็นพลังงานทางเลือกอีก รูปแบบหนึ่ง เพราะมีสาเหตุใหญ่อันเนื่องจากการเพิ่มอย่างรวดเร็วของราคาเชื้อเพลิงแบบฟอสซิล (ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ) และนอกจากนี้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas: GHG) อันประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาในอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยังผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน ส่งผลกระทบแก่สิ่งแวดล้อม ตลอดจนการแปรปรวนของอากาศอย่างเห็นได้ชัดและถี่ขึ้น การกลับมาของ พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear renaissance) หรือ “ยุคที่สองของนิวเคลียร์” (Second nuclear era) จึงเริ่มขึ้น โดยมีการ พัฒนาด้านเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant, NPP) ที่ดีขึ้นในระดับวิวัฒนาการ (Evolution) ในบทความนี้ได้เขียนเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) ที่ได้รับการ พัฒนาขึ้นอย่างมีระบบและจุดมุ่งหมายที่แน่ชัด จนทำให้สามารถแข่งขันได้อย่างดีในเชิงเศรษฐกิจกับเครื่อง ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ได้บรรยายถึงข้อได้เปรียบและข้อที่เหมาะสม ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนาในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้พลังงานนิวเคลียร์ในด้านอื่น อาทิเช่น การผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล การผลิตพลังงานความร้อน เพื่อการใช้ในอุตสาหกรรม ตลอดจนถึงศักยภาพในการใช้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเพื่อการขนส่ง เครื่อง ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ดังกล่าวจึงเป็นความหวังของประเทศที่กำลังพัฒนาในการที่จะใช้พลังงานเพื่อการพัฒนา ประเทศอย่างยิ่ง

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง, ยุคที่สองของพลังงานนิวเคลียร์, โมดูลาริตี, เศรษฐศาสตร์จากขนาดของการผลิต, การเปรียบเทียบระหว่าง SMR กับ LR, ข้อได้เปรียบเทียบของ SMR

บทนำ

การเพิ่มประชากรโลกอย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่าในปี ค.ศ. 2050 จะมีประชากรประมาณเก้า พันล้าน (UNDP, 2009) ประกอบกับราคาของเชื้อเพลิงแบบฟอสซิล (Fossil fuel) ได้ปรับตัวสูงขึ้น ตลอดเวลาและมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลสูงมากในประเทศกำลังพัฒนา และในประเทศอุตสาหกรรมใหม่ (New industrial countries) อาทิเช่น ประเทศจีน อินเดีย และ

บราซิล จึงทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงมาก อันเนื่องมาจากการเผาเชื้อเพลิงดังกล่าวสู่บรรยากาศของโลก ซึ่งยังผลให้เกิดสภาวะโลกร้อนและการแปรปรวนของสภาพอากาศอย่างที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน และก่อให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติที่รุนแรงตามมา พลังงานนิวเคลียร์จึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่งที่จะสามารถจัดและตอบปัญหาสภาวะโลกร้อนได้เป็นอย่างดี (IAEA, 2009a)

อย่างไรก็ตาม ความต้องการอย่างเร่งด่วนในการใช้พลังงานที่สะอาด (Clean energy) และการลดสภาวะโลกร้อน ตลอดจนมีความต้องการที่จะสร้างความมั่นคงทางพลังงาน (Energy security) จึงมีความจำเป็นต้องอาศัยพลังงานนิวเคลียร์ผสมกับพลังงานหมุนเวียน(Renewable energy) ในรูปแบบของพลังงานผสม (Mixed energy) (Chu, 2009) เป็นที่ทราบกันดีว่า พลังงานนิวเคลียร์นั้นสามารถผลิตออกมาในรูปแบบที่มีปริมาณมากในระยะเวลาสั้น หรือที่เรียกว่าเป็นพลังงานที่มีความหนาแน่นของพลังสูง (High energy density) (Lee, Lee & Oh, 2007)

ดังนั้นพลังงานนิวเคลียร์จึงสามารถตอบสนองความต้องการใช้พลังงานในการผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อด้านอุตสาหกรรมโดยพลังงานนิวเคลียร์จะเปลี่ยนรูปแบบมาเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบ Base load generation (Horey- Lacy, 2006) ซึ่งพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบอื่น (อาทิ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังงานชีวมวล ฯลฯ เป็นต้น) ไม่สามารถจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สืบเนื่องจากข้อมูลดังกล่าว จึงทำให้เกิดมีการนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้อย่างจริงจังขึ้นในรอบที่สอง ดังเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “นิวเคลียร์ยุคที่สอง” (Second nuclear era) ในทศวรรษที่ 1980 (Ingersoll, 2009, p. 591)

ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว การพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant; NPP) ได้เพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้มีกำลังสูงขึ้นประมาณ 1,350 เมกะวัตต์อิเล็กทริก (MWe) ทั้งนี้เพื่อสนองกับการรักษาระดับ Base load generation และถูกกำกับโดย “หลักเศรษฐศาสตร์จากขนาดของการผลิต” (Economy of scale: EOS) ที่มีหลักการว่า ขนาดของโรงไฟฟ้ายิ่งผลิตกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนหลักและการดำเนินการ ก็ยิ่งลดลงด้วย (Bowers, Fuller & Mayers, 1983; 1987)

อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มาตรฐานขนาดใหญ่ (LR: 1000 MWe) ต้องการเงินลงทุนสูงมาก ระยะเวลาการก่อสร้างจนกระทั่งผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาจะใช้เวลาประมาณ 10-12 ปี เป็นระบบใหญ่ที่มีระบบการทำงานและระบบควบคุมการทำงานที่สลับซับซ้อน (เช่น มีระบบท่อส่งต่างๆ ระบบการควบคุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ระบบกำเนิดไอน้ำ ระบบระบายความร้อน ฯลฯ) ซึ่งทำให้มีการควบคุมมากขึ้น ทำให้โอกาสจะเกิดการทำงานที่ผิดพลาดซึ่งนำไปสู่อุบัติเหตุมากขึ้น

ตามมา ด้วยเหตุเหล่านี้จึงเป็นอุปสรรคต่อการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในประเทศที่กำลังพัฒนา เพราะมีผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์น้อย ตลอดจนต้องลงทุนมาก เป็นระยะยาว และมีความเสี่ยงต่อเงินลงทุนสูง จึงอาจจะไม่คุ้มและสิ้นเปลืองมากในการผลิตไฟฟ้าที่มีปริมาณการใช้ต่ำ โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรือในบางพื้นที่ที่ห่างไกล (Remote region)

ความต้องการพลังงานนิวเคลียร์มาเป็นพลังงานทดแทนนั้น จึงจำเป็นต้องใช้นวัตกรรมใหม่ของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ โดยเฉพาะในการผลิตระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลางที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของประเทศที่กำลังพัฒนา โดยจะได้กล่าวต่อไปในบทความนี้ถึงคุณสมบัติและข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและปานกลาง (Small and Medium Reactor; SMR) IAEA ได้ให้นิยามของ SMR ไว้ โดยแบ่งตามกำลังการผลิตไฟฟ้างดังนี้ (IAEA, 1997; 2005)

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก (Small nuclear reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในระดับที่ต่ำกว่า 300 MWe
2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดปานกลาง (Medium nuclear reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 300-700 MWe
3. สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีขนาดตั้งแต่ 1,000 MWe ขึ้นไป ถูกจัดเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (Large Reactor: LR) ซึ่งในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่ กำลังใช้งานอยู่ในระบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Generation III และ III+ (Advance nuclear reactors) (NEA, 2008, p. 373)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) อาจถูกจัดเป็นประเภทต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน Ingersoll (2009, p. 590) ดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับงานวิจัย (Research reactors) ซึ่งใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคนิวตรอนและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับการทดสอบ มีไว้ศึกษาและทดสอบเทคโนโลยีนิวเคลียร์ใหม่ ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่จะมาทำเป็นเครื่องปฏิกรณ์และส่วนต่างๆ ของการป้องกันการแผ่รังสี เป็นต้น
3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ต้นแบบ (Prototype or demonstration reactors) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีไว้แสดงและปฏิบัติการเก็บข้อมูลจากการออกแบบของเครื่องต้นแบบ
4. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับให้พลังงานเพื่อการขับเคลื่อน (Propulsion reactors) เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กที่ติดตั้งในเรือเดินสมุทร เรือดำน้ำ เรือบรรทุกเครื่องบิน เป็นต้น

5. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อการพาณิชย์ เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและกลาง ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการผลิตความร้อน (Processed heat) เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

จากบรรดาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั้ง 5 ประเภทนั้น ในบทความนี้จะเน้นกล่าวเพียงประเภทที่ 5 เท่านั้น เพราะมีความสำคัญที่จะใช้ในการพัฒนาในด้านต่างๆ ต่อไปในอนาคต

จากการริเริ่มของ IAEA เพื่อให้ประเทศที่กำลังพัฒนาสามารถหาพลังงานราคาถูกและเป็นพลังงานทดแทนจากการใช้พลังงานฟอสซิลในอนาคตอันใกล้ พลังงานนิวเคลียร์จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมในแง่มุมต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานให้ทันกับการเพิ่มของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วในประเทศกำลังพัฒนา โดยเป็นที่ทราบดีว่า กำลังพลังงานไฟฟ้าจาก SMR จะสามารถส่งผ่านเครือข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small electrical grid) ที่มีอยู่แล้วได้เป็นอย่างดี

2. ประเทศที่กำลังพัฒนามีขีดความสามารถในการลงทุนไม่มากพอ ดังนั้น SMR ซึ่งมีราคาถูกกว่า และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในภายหลัง ตลอดจนระยะเวลาการสร้างโรงไฟฟ้าที่สั้น จึงมีความเสี่ยงน้อยต่อการลงทุนสร้าง เมื่อเทียบกับการลงทุนสูงในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ซึ่งใช้ระยะเวลาก่อสร้างไม่ต่ำกว่า 10 ปี

3. ในประเทศที่มีการแข่งขันการผลิตกระแสไฟฟ้าขายในรูปแบบ “ตลาดเสรี” (Deregulated market) จำเป็นต้องลงทุนให้พอเหมาะกับการขยายตัวของความต้องการกระแสไฟฟ้า ดังนั้น SMR จึงเหมาะสมกว่า เพราะสามารถขยายกำลังการผลิตต่อไปได้เรื่อยๆ ทำให้ไม่ต้องกระจุยตัวในการลงทุนสูง โดยสามารถกระจายการลงทุนออกไปได้

4. SMR สามารถใช้ในงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ต้องการใช้พลังงานในรูปแบบการผลิตแบบ “การผลิตร่วม” (Co-generation) คือใช้ได้ทั้งกระแสไฟฟ้าและความร้อน โดยเฉพาะอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือนิคมอุตสาหกรรมที่อยู่ห่างไกลเครือข่ายกระแสไฟฟ้าหลัก นอกจากนี้ SMR ยังถูกนำไปใช้ในระบบทำน้ำจืด (Salt water desalination) อีกด้วย

5. การสร้าง SMR นั้น สามารถทำได้จากโรงงานที่ผลิตชิ้นส่วนของ SMR ซึ่งอยู่ที่ไหนก็ได้ แล้วนำมาประกอบเป็น SMR และใช้หลัก “Learning economy” มาผลิตรุ่นต่อไป (Nth-of-A-Kind: NOAK) ทำให้ผลิตได้มาตรฐานสูง ประหยัด รวดเร็ว และราคาถูกลงเรื่อยๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ การสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ ซึ่งต้องทำการสร้างที่สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าเท่านั้น จะทำให้เป็นการผลิตแบบ First – of –A-Kind (FOAK) ทำให้การควบคุมมาตรฐานการสร้างไม่รัดกุม

6. SMR มีขนาดเล็กกะทัดรัด (Integral unit) และมีน้ำหนักเบา ประมาณ 500 ตัน (Lawrence Livermore National Laboratory, 2004; NuScale Power, 2008) จึงสามารถขนส่งโดย

ทางเรือ รถไฟ และรถบรรทุกได้ จึงมีความสะดวกในการนำไปติดตั้ง และขนย้ายกลับเมื่อมีการรื้อถอนเมื่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หมดอายุ

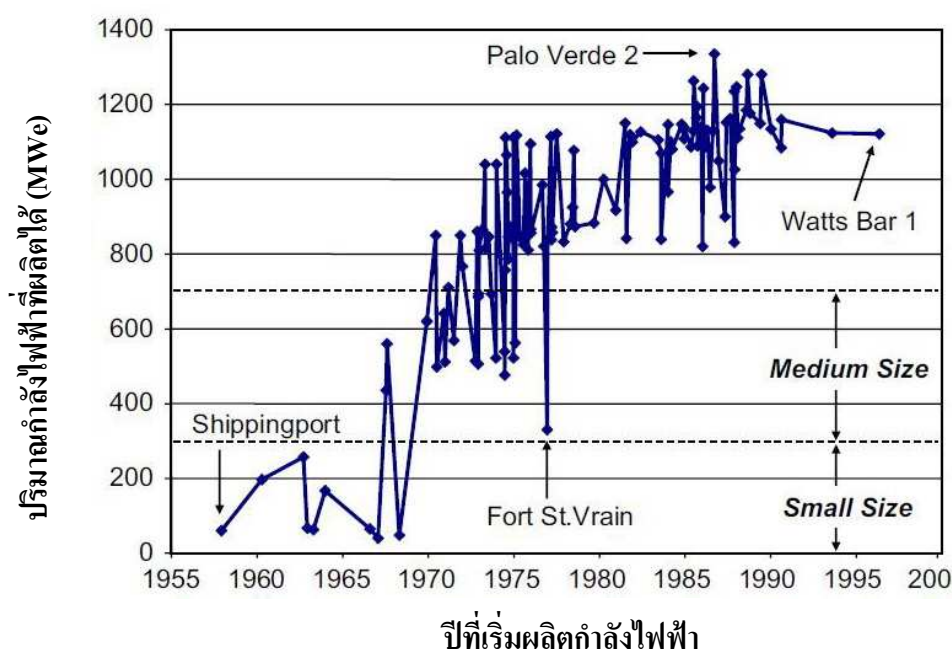
7. ไม่ต้องการเติมเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งานของ SMR โดยทั่วไปแล้วอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMR อยู่ระหว่าง 20-30 ปี ซึ่งเป็นข้อดีในการผลิตไฟฟ้าเพราะไม่ต้องหยุดโรงงานไฟฟ้าเพื่อทำการถ่ายหรือเติมเชื้อเพลิง และนอกจากนี้ กากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ก็จะไม่ถูกเก็บไว้ ณ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ หรือประเทศผู้ใช้ SMR แต่อย่างใด เพราะจะถูกนำไปถอดกากกากเชื้อเพลิงออก ณ ประเทศผู้ผลิต SMR ทำให้ลดการเกิดสภาวะการแพร่กระจายวัสดุนิวเคลียร์ (Proliferation) จากผู้ก่อการร้าย

ในปัจจุบัน (ค.ศ. 2010) มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ตามประเทศต่างๆ ทั่วโลก ใน 30 ประเทศ เป็นจำนวน 441 โรง ผลิตไฟฟ้าทั้งสิ้นประมาณ 375 กิกะวัตต์อิเล็กตริก (GWe) และมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อีก 60 โรงที่อยู่ในระยะก่อสร้างใน 16 ประเทศ ซึ่งจะให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มอีก 58.57 GWe (ENS, 2010) ในจำนวน 441 โรง โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่กำลังผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่นั้น เป็นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMR เป็นจำนวน 133 โรง ใน 28 ประเทศ และมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แบบ SMR ที่อยู่ในระยะก่อสร้างอีก 12 โรง (IAEA, 2009b)

ความเป็นมาของการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ได้เริ่มมานานแล้ว โดยมีการผลิตเพื่อใช้งานทางการค้าและใช้ในเรือดำน้ำ/เรือบรรทุกเครื่องบินนิวเคลียร์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1957 ยุคแรกของพลังงานนิวเคลียร์ (The first nuclear era) มีระยะเวลาดังแต่ปี ค.ศ. 1957 จนถึง การมีอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Three Mile Island (TMI) ในปี ค.ศ.1979 โดยเริ่มต้นจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาด 60 MWe ผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Shipping port ประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับเรือดำน้ำขนาดประมาณ 200 MWe ตลอดจนถึงโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ 1350 MWe (ภาพ 1) หลังจากเหตุการณ์อุบัติเหตุที่ Three Mile Island ในปี ค.ศ.1979 และการระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Chernobyl ในปี ค.ศ. 1986 การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้หยุดชะงักลง ตามนโยบายของรัฐบาลประเทศต่างๆ ที่ต้องโน้มเอียงไปตามความกลัวและการไม่ยอมรับพลังงานนิวเคลียร์ของประชาชน (Public acceptance) จนกระทั่งในปลายทศวรรษที่ 1980 และต่อมาในระยะ ค.ศ.2004 เป็นการเริ่มต้นของ Second nuclear era (Egan, 1984; Weinberg, Spicwak, Barkenbus, Livingstore & Phung, 1985)

จากภาพ 1 จะเห็นได้ว่า กำลังของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ ค.ศ.1970 จนเป็นระดับมากกว่า 1000 MWe จนมาถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตามประมาณกลางทศวรรษ 1980 IAEA (1985) และต่อมา NEA (1991) ได้มีความเห็นตรงกันอย่างชัดเจนว่า SMR จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา โดยได้วางแนวทางในการพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) ในด้านต่างๆ ดังนี้



ภาพ 1 ปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Ingesoll, 2009, p. 591)

1. การประกอบตัวเครื่องปฏิกรณ์ (Fabrication) ขนาดเล็กและขนาดกลาง SMR ให้สามารถทำได้ง่าย โดยตัดทอนปริมาตรของโดมเหล็กกล้าที่ครอบตัวปฏิกรณ์ (Containment dome) ลงถึง 68% (Greenspan & Brown, 2001) ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาหล่อ/เชื่อมได้มาก และสามารถทำได้อย่างรวดเร็วในหลายประเทศอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับโดมเหล็กกล้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ที่ต้องใช้เวลาหล่อโดมเหล็กกล้านาน และมีโรงงานที่สามารถสร้างโดมขนาดใหญ่นี้ได้เพียงสองแห่งในโลกเท่านั้น จึงทำให้การสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ใช้เวลาไปในการเข้าคิวรอการสร้างโดม ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดมาตรฐาน

กำลัง 1000 MWe จะต้องใช้เวลารสร้างเสร็จประมาณ 10-12 ปี ซึ่งส่วนใหญ่ของเวลาใช้ไปในการรอ
คิวการสร้างโดมเหล็กกล้า

2. การขนย้ายอุปกรณ์ชิ้นส่วน (Transportation) ในการสร้างโรงไฟฟ้า SMR จะมีข้อ
ได้เปรียบดีกว่า เพราะมีขนาดเล็ก ตัวเครื่องปฏิกรณ์ออกแบบกะชับ (Integral design) เป็นหน่วย
เดียวที่รวมหลายระบบการทำงานเข้าด้วยกัน กล่าวคือรวมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แกนของเครื่อง
ปฏิกรณ์ (Reactor core) ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchange unit) และตัวกำเนิดไอน้ำ
(Steam generator) ไว้เป็นส่วนเดียวกัน จึงไม่จำเป็นต้องมีท่อต่างๆ (Piping) ของระบบถ่ายความ
ร้อน และเครื่องควบคุม (Control device system) ดังเช่นที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดมาตรฐาน (LR)
จำเป็นต้องมี และ SMR ไม่จำเป็นต้องมีการสร้างอาคารโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ขนาดใหญ่โต และไม่
จำเป็นต้องสร้าง ณ สถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ทำให้ลดงบประมาณในการลงทุนก่อสร้างที่สูง
ลดลง ตลอดจนมีการควบคุมการก่อสร้างที่ได้มาตรฐานง่ายขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดความปลอดภัยสูงขึ้น

3. การก่อสร้าง SMR จะสร้างได้เสร็จเร็ว ซึ่งใช้เวลาสร้างเสร็จภายใน 3 ปี เพราะมีขนาด
เล็ก และมีข้อจำกัดน้อยเกี่ยวกับสถานที่ตั้ง (Site) และการเลือกแหล่งน้ำระบายความร้อน เมื่อเทียบ
กับ LR แล้ว SMR สามารถตั้งใกล้แม่น้ำขนาดเล็ก หรือแหล่งน้ำขนาดเล็ก หรือไม่จำเป็นต้องมีก็ได้
เพราะการออกแบบของ SMR บางรุ่นใช้ระบบระบายความร้อน โดยการหมุนเวียนของน้ำตามหลัก
ธรรมชาติในระบบความร้อนปฐมภูมิ (Primary coolant system) ในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องมีปั๊มน้ำ
เป็นจำนวนมากแต่อย่างใด จึงเป็นการเสี่ยงไม่ให้เกิดอุบัติเหตุที่เกิดจากการเสียน้ำหล่อเย็น (Lost of
coolant accident: LOCA) (NuScale Power, 2008)

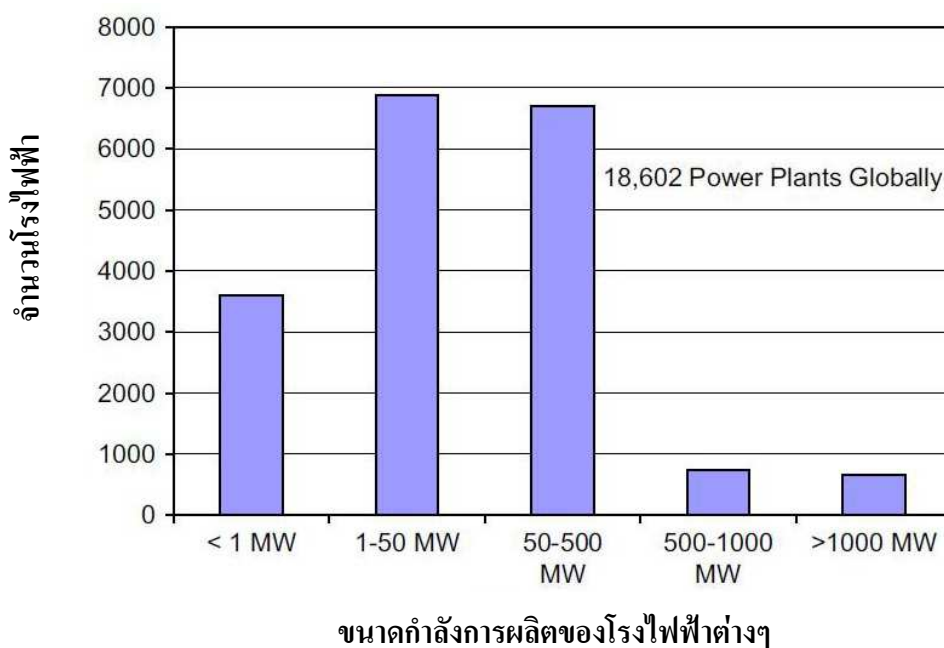
นอกจากนี้ IAEA และ NEA ได้ให้แนวทางการออกแบบ SMR เพื่อให้มีขีดความสามารถ
ในการแข่งขันทางเศรษฐกิจ (Economic competitiveness) โดยสามารถแข่งขันกับโรงไฟฟ้า
นิวเคลียร์ขนาดมาตรฐานหรือโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ ซึ่งในกรณีนี้จะได้กล่าวต่อไปในข้อดี
และการได้เปรียบของ SMR

4. ระบบความปลอดภัยของ SMR ได้รับการพัฒนาให้มีความปลอดภัย โดยอาศัย
ประสบการณ์จากการดำเนินการของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอดีต โดยใช้หลัก Passive safety (Bojan,
Carelli, Kling, Cavlina, & Grgic, 2006) กล่าวคือ หลีกเลี่ยงการใช้ระบบไฟฟ้าหรือการเกี่ยวข้องกับ
บุคคล โดยระบบนี้จะทำงานด้วยตัวมันเองตามหลักธรรมชาติ

จากการสำรวจในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศต่างๆ ทั่วโลกนั้น พบว่า โรงไฟฟ้า
ประเภทต่างๆ จะมีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่มีกำลังต่ำกว่า 500 MWe ถึง 93% จาก

จำนวนทั้งหมด 18,602 โรงไฟฟ้า (Global Database, 2006 cited in Ingersoll, 2009, p.593) ดังแสดงในภาพ 2

จากภาพ 2 จะพบว่าโดยทั่วไปโรงไฟฟ้าขนาด 1-50 MWe และ 50-500 MWe เป็นที่นิยมใช้งานมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของ SMR ทั้งนี้มีหลายเหตุผล อาทิเช่น ทางด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเงินลงทุน ระบบเครือข่ายการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Electrical grid) ของประเทศนั้น และอื่นๆ ดังนั้นในการออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย (Advanced technology) และประสบการณ์ในการดำเนินงานใช้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ผ่านมาในอดีต จะพบว่าโรงไฟฟ้างอกกล่าวจะมีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 10-500 MWe (โดยประมาณ) โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลางสำหรับโรงไฟฟ้างอกกล่าวสามารถสรุปได้ในตาราง 1



ภาพ 2 การกระจายขนาดของกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงต่างๆ ทั่วโลก (Global Database, 2006 cited in Ingersoll, 2009, p.593)

ตาราง 1 สรุปคุณลักษณะของการออกแบบ IRIS, NuScale และ 4S *

คุณลักษณะ	IRIS	NuScale	4S
บริษัทที่ออกแบบ	Westinghouse	NuScale	Toshiba
ตัวหล่อเย็นหลัก	น้ำ (Light water)	น้ำ (Light water)	โซเดียม
การหมุนเวียนของตัวหล่อเย็น	ปั๊ม	ธรรมชาติ	ปั๊ม
รูปร่างโดยรวม	รวมเป็นหนึ่งยูนิต (Integral)	รวมเป็นหนึ่งยูนิต (Integral)	รวมเป็นหนึ่งยูนิต (Integral)
กำลังผลิต (MWe)	335	45	10, 40
อุณหภูมิ (เซลเซียส)	330	300	480
วัฏจักรการแปลงกำลัง	Steam rankine	Steam rankine	Steam rankine
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวครอบ เครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)	6.2	2.7	3.5
ความสูงของตัวครอบ เครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)	22.5	14.0	24.0
ชนิดของเชื้อเพลิง U_2O_3	U_2O_3	U_2O_3	U-Zr
การเสริมสมรรถนะเชื้อเพลิง (%)	<5	<5	18
ระยะเวลาการเติมเชื้อเพลิงใหม่ (ปี)	3.5	2.5	30
กำหนดการใช้เชิงพาณิชย์ (ค.ศ.)	2015	2015	2013

* หมายเหตุ ปรับมาจาก Ingersoll (2009, p.593)

จากตาราง 1 จะพบว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่น่าสนใจคือ IRIS, NuScale, และ 4S (Super Safe, Small, and Simple) ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาและสร้างตัวต้นแบบไปมากแล้ว และคาดว่าจะนำมาใช้งานได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 เป็นต้นไป จึงเป็นที่น่าสนใจที่ทางประเทศไทยควรจะศึกษารายละเอียดของระบบเครื่องปฏิกรณ์เหล่านี้ รายละเอียดพอสังเขปของเครื่องปฏิกรณ์เหล่านี้จะได้นำสรุปเสนอตอนท้ายในบทความนี้ต่อไป

ในปัจจุบันเป็นที่ตระหนักโดยทั่วไปว่า การตั้งโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยพลังงานนิวเคลียร์ หรือที่เรียกว่า โรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้น ต้องใช้เวลานานมาก หลังจากตัดสินใจและลงนามสัญญาก่อสร้างโรงงานแล้ว จะต้องใช้เวลาจากนั้นต่อไปอีก 10-12 ปี จึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วในตอนต้นของบทความ เนื่องจากเพราะเป็นโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ (1000 MWe) จึงมีความจำเป็นต้องลงทุนสูง และค่าก่อสร้างก็สูงด้วย จึงมักจะพบกับความเสี่ยงในด้านต่างๆ อาทิเช่น งบลงทุนก่อสร้าง (Construction cost) ระบบความปลอดภัยที่ซับซ้อน (Redundant safe) ที่ต้องควบคุมระบบทำงานหลายภาคส่วนของตัวโรงงานไฟฟ้า แหล่งที่ตั้งของโรงงาน (Site) ที่มีศักยภาพในการถ่ายเทความร้อน เช่น ดิคริมทะเลหรือลำน้ำ

ขนาดใหญ่ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าจะมีเพียง 30-35% หากใช้ระบบ LWR (Light Water Reactor) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันทั่วไปและมีความปลอดภัยสูง นอกจากนี้ก็ต้องเตรียมกำลังคนในระดับต่างๆ เป็นจำนวนมาก เพื่อปฏิบัติงานในระบบดำเนินการและครอบคลุมโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) นั้นจะเป็นคำตอบที่ดีและเหมาะสมกับโจทย์ปัญหาดังกล่าวข้างต้น และจะเป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนาหรือประเทศที่คิดจะติดตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขึ้นเป็นครั้งแรก ความได้เปรียบของ SMR ได้ถูกสรุปไว้ในบทความต่างๆ (Carelli, et al, 2004; EMWG, 2007; Ingersoll, 2009) ดังนี้

1. ขนาดของ SMR เป็นระบบที่มีขนาดเล็กและกะทัดรัด (Small and compactness) SMR ที่มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10 -335 MWe จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.75 ถึง 6.20 เมตร สูง ประมาณ 14 ถึง 24 เมตร (ดูตาราง 1) และมีน้ำหนักประมาณ 500 ตัน ซึ่งเป็นขนาดและน้ำหนักที่สามารถขนย้ายโดยทางรถไฟ รถบรรทุกขนาดใหญ่หรือทางเรือได้อย่างง่ายดาย

2. เป็นระบบที่เบ็ดเสร็จในตัว (Modular) คือ ระบบของ SMR จะถูกออกแบบให้รวมการถ่ายเทความร้อน ระบบการหมุนเวียนของน้ำ (ระบบ LWR) ท่อส่ง, ลิ้น ควบคุมการไหลเวียน (Control valves) ตัวเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Reactor core) และเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) เป็นต้น ไว้ใน Reactor vessel ซึ่งอยู่ภายใต้โดมคลุม (Containment) ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด ระบบนี้เรียกว่า Integral unit ซึ่งแตกต่างกับระบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (Large Reactor; LR) ซึ่งจะต้องมีบริเวณของตัวเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และระบบถ่ายเทความร้อนของน้ำ และระบบท่อไอน้ำแยกบริเวณกัน และต้องมีระบบท่อนำส่ง (Piping) ที่ทนแรงดันสูง ระบบปั๊ม (Pump) และลิ้นควบคุม (Control valve) ขนาดใหญ่ เช่น ท่อนำส่งในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 90 เซนติเมตรสำหรับ LR เมื่อเทียบกับแล้ว ระบบ SMR ใช้ท่อนำส่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5.0 เซนติเมตรเท่านั้น และมีความสั้นกว่ามาก (Ingersoll, 2009, p. 592)

3. ที่ตั้งของโรงไฟฟ้า (Site) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) มีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่กว้างมาก ประมาณ 500 ถึง 1000 เอเคอร์ (Acres) (Gonyeau, 2005) หรือเทียบเท่ากับพื้นที่ ระหว่าง 2.0 ถึง 4.0 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้เพราะขนาดและระบบการทำงานซึ่งต่างกับพื้นที่ที่จะใช้ติดตั้ง SMR ถึงแม้จะต้องสร้าง SMR ต่อเนื่องเป็นระบบอนุกรม (Series) เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าก็ตาม การใช้พื้นที่ที่ก็ยังน้อยกว่ามาก ทั้งนี้เพราะเป็นระบบแบบ Combined integral units ซึ่งมีระบบต่างๆ ใช้

ร่วมกันได้ นอกจากนี้ข้อได้เปรียบของที่ตั้งสำหรับ SMR ในด้านระบบความร้อนไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำขนาดใหญ่ แม่น้ำ หรือริมทะเล SMR ของระบบสามารถใช้ระบบระบายความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection process) ผ่านเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่กล่าวมาแล้ว

4. ด้านความปลอดภัย (Safety) ระบบ SMR นั้นถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีและประสิทธิภาพของระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิด Light Water Reactor (LWR) ซึ่งมีประวัติของความปลอดภัยสูง และในปัจจุบันมีใช้อยู่แพร่หลาย ประกอบกับตัวระบบ SMR ซึ่งถูกออกแบบมาให้อยู่ในรูป Integral Unit ตามที่อธิบายไว้แล้ว นอกจากนั้นยังเป็น Modular ซึ่งสามารถสร้างและประกอบได้ภายในโรงงาน (Factory assembly) สามารถควบคุมคุณภาพและมีเครื่องมือตรวจสอบที่ละเอียด ดีกว่าไปสร้างโรงไฟฟ้า ณ สถานที่ตั้ง (On site construction) ทำให้การควบคุมคุณภาพอย่างละเอียดแม่นยำทำได้ลำบาก เมื่อเทียบกับการทำในห้องปฏิบัติการทดสอบในโรงงานที่ผลิต ดังนั้นความปลอดภัยของตัวโรงงานแบบ SMR จะดีกว่ามาก นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของระบบ SMR จะถูกฝังใต้ดินเพื่อป้องกันการแพร่กระจายรังสีอีกด้วย

5. ด้านเศรษฐกิจ สืบเนื่องจากทศวรรษที่ 1950 และ 1960 ซึ่งเป็นระยะเวลาของ The first nuclear era ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น และสภาพของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในด้านความปลอดภัยดี ประกอบการการยึดหลักเศรษฐศาสตร์แบบ Economy of scale (EOS) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จึงถูกขยายขนาดกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น จนถึงขนาดใหญ่ 1350 MWe ทั้งนี้โดยมิได้อาศัยพื้นฐานของการพัฒนาและประสิทธิภาพที่ดีของ SMR ที่เคยเริ่มต้นไว้ในอดีต ดังนั้นจะพบว่า เพื่อต้องการกระแสไฟฟ้าให้มาก จึงจำเป็นต้องขยายขนาดของโรงงานและเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ตามหลักเศรษฐศาสตร์แบบ EOS ทำให้ต้องลงทุนในค่าก่อสร้างและการดำเนินการของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (1000 MWe) เพิ่มอย่างมาก ได้มีการประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่เอาไว้ 4-6 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ (4-6 billion US\$, Ingersoll, 2009) ซึ่งกว่าจะสร้างเสร็จต้องใช้เวลา 10-12 ปี นับว่าเป็นการลงทุนสูงมากและมีความเสี่ยงสูงในหลายๆ ด้าน ทั้งนี้เพราะระยะเวลาก่อสร้างนานไป

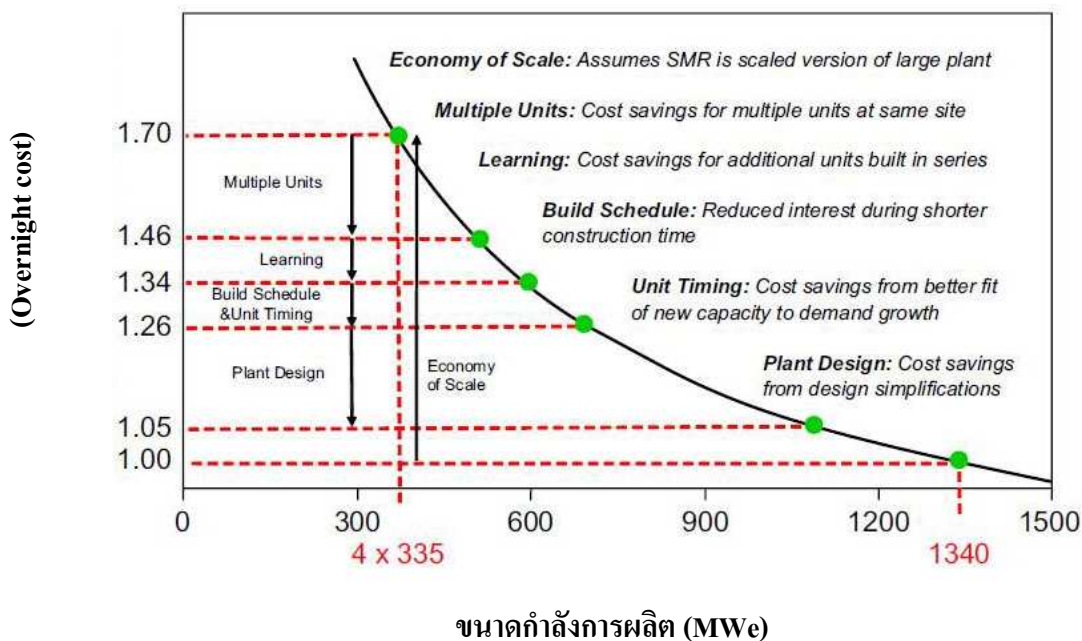
ถ้าเรานำหลักการแบบ EOS มาใช้กับ SMR แล้วจะพบว่า SMR อาจไม่เหมาะสมและคุ้มค่าในด้านเศรษฐกิจแบบนี้ เพราะ SMR จะมีผลทางลบ (Negative) ถึง 1.7 เท่าเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (Carelli, et al, 2007; Ingersoll, 2009) อย่างไรก็ตาม EOS จะใช้ได้ผลต่อเมื่อมีการเปรียบเทียบกับงาน/ระบบที่มีสภาพและหลักการออกแบบที่เหมือนกัน ดังนั้น EOS จึงไม่สามารถนำมาใช้กับ SMR ได้ (Carelli, et al, 2010, p. 413) เพราะ SMR มีการออกแบบและระบบ

การทำงานของโรงงานไฟฟ้าแตกต่างกับ LR ที่มีระบบสลับซับซ้อนมาก SMRสามารถแก้ไขข้อเสียเปรียบอันนี้

งมาจากการใช้หลัก EOS ในรูปแบบของการมีขนาดเล็ก (Smallness) กะทัดรัด (Compact) และ ใช้หลักการ “เศรษฐศาสตร์ของการผลิตจำนวนมาก” (Economy of mass production, หรือ ที่เรียกว่า Economy of replication) ในการทำชิ้นส่วนที่ได้มาตรฐานแล้วนำมาประกอบกัน คล้ายๆ กับอุตสาหกรรมยานยนต์ และ “หลักการผลิตที่อาศัยการเรียนรู้จากการผลิตครั้งแรกๆ” (Learning economy) (IAEA, 2006a)

จากภาพ 3 Ingersoll (2009) ซึ่งนำข้อมูลมาจาก Carelli, et al. (2007) ที่แสดง Overnight cost ของ SMR จำนวน 4 เครื่อง (1340 MWe)ที่ใช้หลักการข้างต้น เมื่อเทียบกับ LR จำนวน 1 โรง (1340 MWe) แล้ว จะมีค่าการลงทุนสูงกว่าเพียง 5.0% ซึ่งรายละเอียดได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SMR กับ LR อยู่ในตาราง 2

ต้นทุนการผลิตแบบไม่คิดดอกเบี้ย



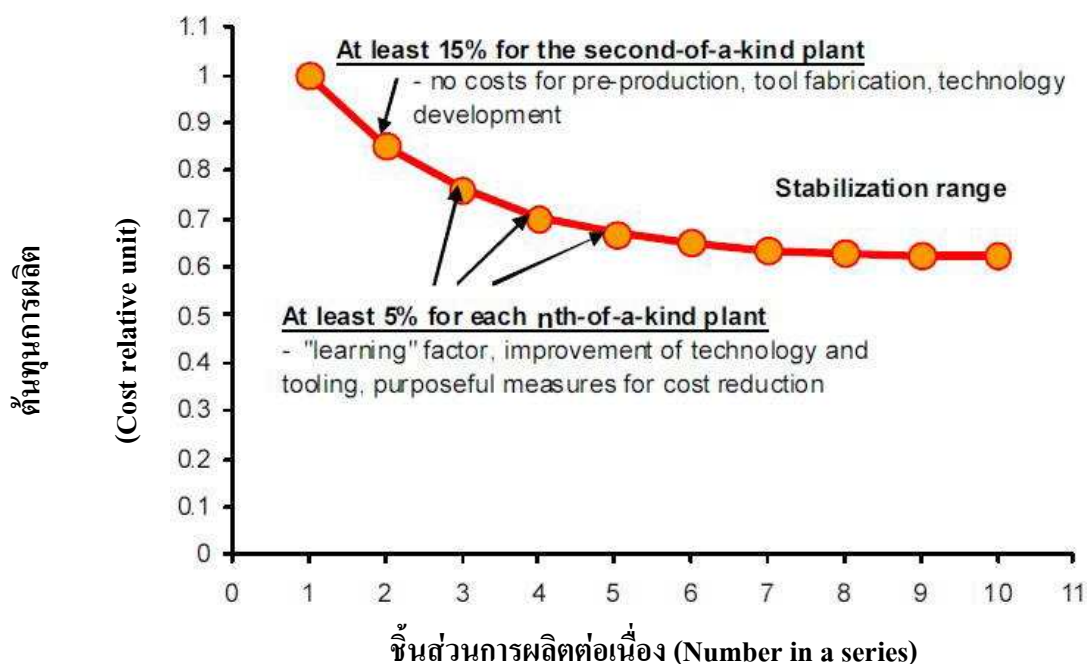
ภาพ 3 ตัวประกอบทางด้านเศรษฐศาสตร์แบบ Economy of scale ของ 4 หน่วย SMR เมื่อเทียบกับ 1 หน่วยโรงงานแบบ LR (Ingersoll, 2007, p. 594)

ตาราง 2 การเปรียบเทียบระหว่าง SMR กับ LR (Carelli, et al., 2007, p.661)

องค์ประกอบ	SMR 1 หน่วย ต่อ LR	SMR หลายหน่วยรวมกัน ต่อ LR
เศรษฐศาสตร์จากขนาดของการผลิต (EOS)	1.7	1.7
เครื่อง SMR หลายเครื่อง (Multiple units)	0.86	1.46
การเรียนรู้ (Learning)	0.92	1.34
ระยะและกำหนดการก่อสร้าง	0.94	1.26
การออกแบบเฉพาะ (Design specific)	0.83	1.05

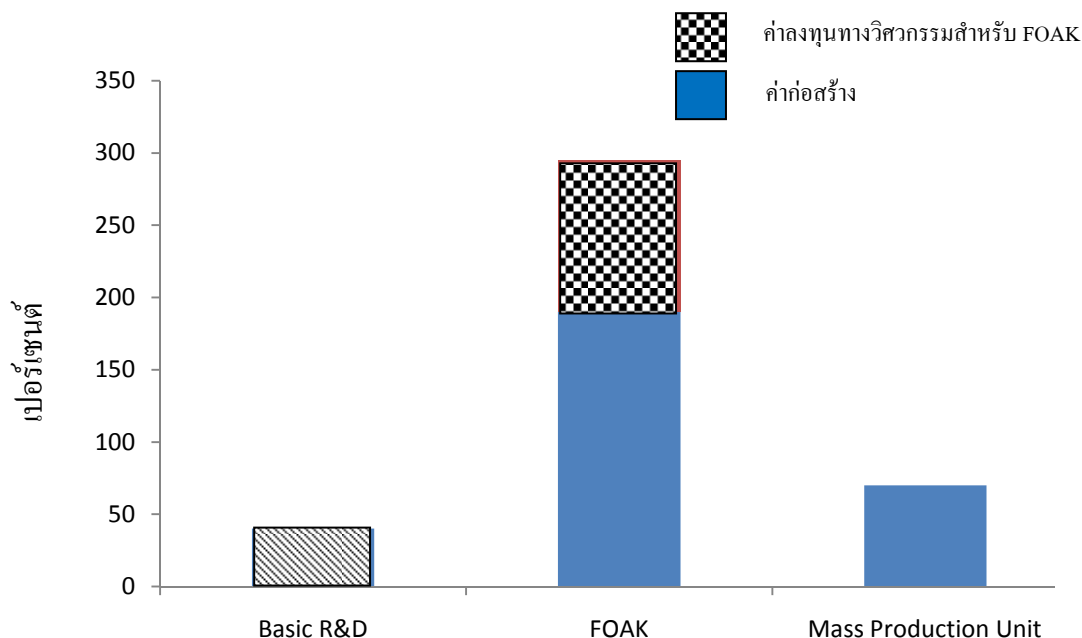
หมายเหตุ SMR : 1 โรง กำลัง 335 MWe (4 หน่วย = 1,340 MWe); LR : 1 โรง กำลัง 1340 MWe

ในด้านการผลิตการเรียนรู้ที่ได้รับการจากผลิตของรุ่นแรกๆ (First of A Kind; FOAK) (ภาพ 4) สามารถนำมาใช้ปรับปรุงแก้ไขเพื่อผลิตกันทำให้ดียิ่งๆขึ้น จนอยู่ตัวได้มาตรฐาน และมีประสิทธิภาพสูง ดังที่เรียกว่าเป็นรุ่นที่ N หรือที่เรียก N^{th} of A Kind; (NOAK) โดย N มีค่าประมาณ



ภาพ 4 “Learning Curve” การลดค่าใช้จ่ายค่าการประกอบและติดตั้งในการผลิตซ้ำๆ และต่อเนื่องที่เกี่ยวข้องกับโรงงานนิวเคลียร์ (IAEA, 2010a)

เท่ากับ 5 หรือ 6 (รุ่นที่ 5 หรือรุ่นที่ 6) การผลิตโดยใช้หลักของผลิตจำนวนมากๆ (Mass production) นั้นจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมาก ดังแสดงในภาพ 4 และหลักการนี้ได้รับการสนับสนุนสอดคล้องเป็นอย่างดีดังในภาพที่ 5



ภาพ 5 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแรก (FOAK) และการผลิตแบบ Mass production ของ SMR ชนิด 4S (Greenspan & Brown , 2001)

ภาพ 5 แสดงค่าประมาณการใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแรก (FOAK) และการผลิตแบบ Mass production ของ SMR ชนิด 4s (Greenspan & Brown, 2001) จากภาพจะพบว่าต้นทุนการผลิตแบบ Mass production สามารถลดค่าผลิตได้ประมาณ $300\% / 70\% = 4.5$ เท่าหรือประมาณ 450% ในการผลิต SMR แบบ 4S นอกจากนี้ จากภาพ 4 จะพบว่า ในการผลิตซ้ำครั้งที่ 2 จะมีราคาถูกลง 15% และเมื่อผลิตไปถึงรุ่นที่ 5 หรือ ที่ 6 ต้นทุนจะลดลงไปรวมแล้วได้ถึง 35% ดังนั้นจะเห็นว่า ราคาของ SMR จะถูกกว่าแบบ LR (เมื่อเทียบกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เท่ากัน)

ถ้าพิจารณาเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์ของความเสี่ยงในการลงทุน (Economy of investment risk) แล้วจะพบว่า SMR มีความเสี่ยงน้อยกว่า LR มาก (เมื่อเปรียบเทียบกำลังของการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆ กัน) ได้มีการวิเคราะห์เปรียบเทียบอย่างละเอียดในเรื่องนี้ โดยเปรียบเทียบระหว่าง SMR แบบ IRIS (International Reactor Innovative and Secure) ที่มีขนาดการผลิต 335 MWe/เครื่อง จำนวน 4 เครื่อง กำลังการผลิต = $335 \times 4 = 1340$ MWe กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ขนาด 1340 MWe ทั้งนี้กำหนดให้การก่อสร้าง IRIS หน่วยที่สองทันทีที่หน่วยแรกสร้างเสร็จ และทำต่อไปกับหน่วยที่ 3 และหน่วยที่ 4 ในทำนองเดียวกัน จะพบว่า จะต้องใช้เงินทุนหมุนเวียนเพียง 50% เมื่อเทียบกับระบบ LR จึงทำให้ SMR ไม่ต้องใช้เงินมาก และไม่เสี่ยงกับการลงทุนระยะยาว (Ingersoll, 2009, p. 594) และหากคิดให้ละเอียดถึงการเว้นห่างของระยะเวลาการก่อสร้าง SMR หน่วยที่ 2 และ 3 ห่างออกไป โดยไม่ต้องสร้างทันทีที่เครื่องก่อนเสร็จลง จะพบว่า เงินทุนหมุนเวียนจะประหยัดได้ถึง 35% เมื่อระยะเว้นห่าง 36 เดือน (ตาราง 3) เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) การวิเคราะห์นี้ได้แสดงไว้ในตาราง 3

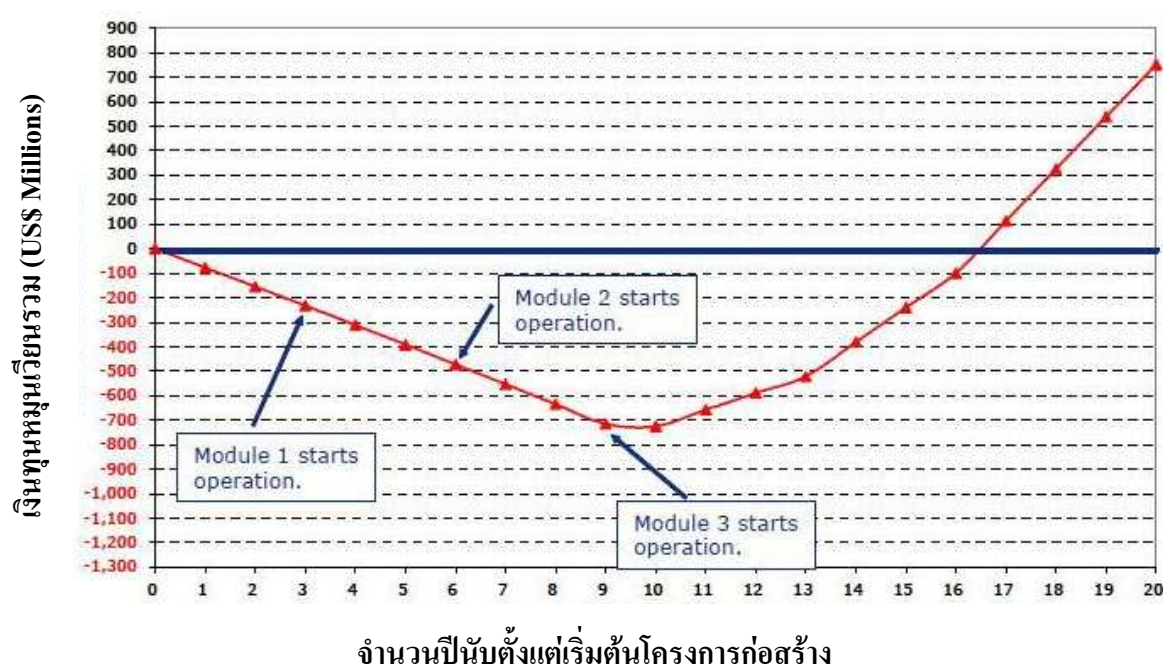
ตาราง 3 เงินทุนหมุนเวียนของการสร้าง SMR กับระยะห่างของช่วงเวลาที่เสร็จของ SMR หน่วยต่อไป (Carelli, et al.,2007, p. 659)

ระยะเวลาระหว่าง การสร้าง SMR (เดือน)	เปอร์เซ็นต์ของทุนหมุนเวียนสูงสุด
9	82%
12	70%
24	41%
36	35%

นอกจากนี้ ได้มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับเงินทุนหมุนเวียน (Cash flow) ที่ใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาด 1000 MWe โดยใช้เป็นแบบโรงงานใหญ่ (LR) หรือใช้ SMR แบบ IRIS 3 หน่วยๆ ละ 350 MWe ($350 \text{ MWe} \times 3 = 1050 \text{ MWe}$) จะพบว่า ต้องมีเงินทุนหมุนเวียนประมาณ U.S.\$ 750 million ซึ่งเป็นงบประมาณที่เหมาะสมการลงทุน (สำหรับประเทศกำลังพัฒนา) ซึ่งเมื่อเทียบกับเงินทุนหมุนเวียนที่ต้องใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) แล้วจะต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากไม่ต่ำกว่า U.S.\$ 2000 million (Bojan, et al., 2006) ดังแสดงในภาพ 6

นอกจากมุมมองทางด้านประหยัดทางเศรษฐกิจดังกล่าวมาแล้ว ในแง่มุมของการดำเนินการและการบำรุงรักษา (Operation and Maintenance; OM) จะพบว่า SMR ซึ่งเป็นระบบเล็กกะทัดรัด (Smallness and compact) และได้ออกแบบมาให้หลายๆระบบอยู่ในส่วนเดียวกับที่เรียกว่า Integral Unit Design ดังนั้น ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาและลดลงมาก ดังนั้น จำนวนพนักงาน วิศวกร ฯลฯ จะลดลงตามลงมาด้วย ประกอบกับระยะเวลาการหยุดเติมเชื้อเพลิงยาวนานระหว่าง 3-30 ปี แล้วแต่ชนิดของ SMR บางระบบไม่มีการเติมเชื้อเพลิงเลย (No refueling) ตลอดอายุการใช้งาน และ

ไม่มีระบบซ้ำซ้อนและซ้ำซ้อน (Redundant) อย่างในโรงงานขนาดใหญ่ (LR) (Kuznetsov, 2008, p. 244)



ภาพ 6 เงินลงทุนรวมสำหรับ IRIS Modules 3 เครื่อง ระยะการสร้างห่างทุก ๆ 3 ปีที่ดอกเบี้ย 10% (Bojan, et al., 2006, p. 408.9)

6. ด้านเครือข่ายสายส่งกำลังไฟฟ้า (Electric grid) ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องมีสายส่ง (Transmission line) และเครือข่ายของการส่งกำลังไฟฟ้า (Grid) สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา โดยการเริ่มต้นสร้างเครือข่ายของการส่งกำลังไฟฟ้าที่มีความสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าระดับปานกลาง อาทิเช่น 4 GWe (4000 MWe) หลักการเครือข่ายของการส่งกำลังไฟฟ้ามีขีดความสามารถรับการแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่ม/ลด ได้ไม่เกิน 10% ของค่า Grid ในที่นี้คือ 4GWe จะมีค่าประมาณ 400 MWe ดังนั้นเราจะพบว่า SMR ที่มีกำลังประมาณ 335 MWe (ระบบ IRIS) จะสามารถเพิ่มเข้าไปในเครือข่าย Grid ปัจจุบันได้เลย แต่เมื่อจะใช้พลังไฟฟ้าจากโรงงานนิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ซึ่งให้กำลังตั้งแต่ 1000 MWe ขึ้นไป ก็จะทำให้ Grid เสียหายและไม่สามารถนำมาต่อเชื่อมกับ Grid เดิมที่มีอยู่ได้ ยกเว้นต้องสร้าง Grid ใหม่มาเสริม (คือเดินสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงขึ้นมาใหม่ ทำให้สิ้นเปลืองมากไม่เหมาะกับอัตราการขยายตัวของการใช้กระแสไฟฟ้า)

ดังนั้นจะพบว่า SMR มีความเหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนา หรือประเทศที่มี Grid ไฟฟ้าในระดับปานกลาง (หรือสำหรับการใช้กำลังไฟฟ้าในภูมิภาคห่างไกล) (Carelli, et al, 2010; CAES, 2010)

7. การเติมเชื้อเพลิงใหม่ (Refueling) SMR ไม่จำเป็นต้องเติมบ่อยๆ เมื่อเทียบกับ LR ซึ่งต้องเติมเชื้อเพลิงทุกๆ 2 ปี แต่ SMR บางชนิด จะมีระยะการเติมเชื้อเพลิงตั้งแต่ 5 ปีขึ้นไปหรือไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งานเลย (ตั้งแต่ 30 ปี ขึ้นไป) (WNA, 2010a) (การเติมเชื้อเพลิงนั้นต้องหยุดการปฏิบัติการของโรงงานไฟฟ้า ทำให้เสียรายได้หากมีการเติมเชื้อเพลิงบ่อยๆ อย่างเช่นโรงงานขนาดใหญ่ LR จะทำให้ไม่มีผลดีทางเศรษฐกิจ

8. ด้านการจัดการเกี่ยวกับกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เนื่องจาก SMR ได้รับการออกแบบให้เป็นขนาดเล็กกะทัดรัด และอยู่ในรูปแบบ Integral unit ดังนั้น การประกอบตัวเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ตลอดจนการเผาเชื้อเพลิงจะมีมากพอที่จะใช้งานตลอดอายุของการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยไม่ต้องมีการเติมเชื้อเพลิงเป็นระยะๆ จึงทำให้สะดวกและเมื่อหมดเชื้อเพลิงแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ทั้งชุด จะถูกนำไปถ่ายเชื้อเพลิงที่โรงงานของผู้ผลิต สามารถทำได้เพราะมีขนาดเล็กกะทัดรัด จึงขนส่งกลับไปยังโรงงานผลิต โดยทางเรือ รถไฟและรถบรรทุกได้ ดังกล่าวมาในตอนต้นของบทความนี้แล้ว ด้วยคุณสมบัติของ SMR ดังกล่าวนี้นี้ จึงทำให้มีการแพร่กระจายของกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพื่อไปทำระเบิดนิวเคลียร์ได้ยาก (Proliferation) และประเทศผู้ใช้ SMR ก็หมดภาระในเรื่องการจัดการกากนิวเคลียร์ (Nuclear waste management) เพราะผู้ผลิตจะเป็นผู้ดำเนินการให้เอง

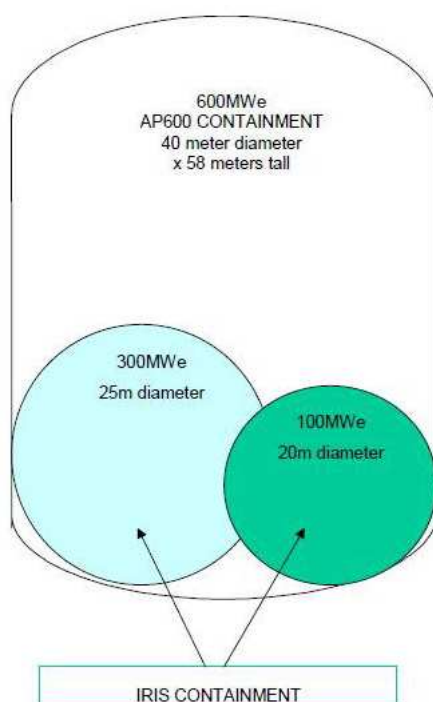
9. ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMR นั้นจะมีราคาพอๆกับราคาของกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ LR ทั้งนี้ได้มีการประเมินได้ว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่มาจาก SMR จะมีราคาประมาณ US cents 4-6 /kWh. (Cavlina, 2010) เมื่อเปรียบเทียบกับโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน ค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่ในราคา U.S. cents 8.65/kWh. (Bhanthumnavin, 2010a; Kaznetsov, 2008; World Nuclear Association, 2010a)

10. ด้านการลงทุน (Capital cost) จากการวิเคราะห์เราพบว่า เมื่อคิดต้นทุนต่อ kWh ของการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ระหว่างระบบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) โรงไฟฟ้าถ่านหินที่รวมทั้งค่าใช้จ่ายของการกักเก็บ CO₂ ด้วย (Carbon Capture and Storage; CCS) และก๊าซธรรมชาติแล้ว จะพบว่า ค่าลงทุน (Capital cost) ของ SMR จะถูกที่สุดคือประมาณ 1030-1240 US\$ /KWe (Kuznetsov, 2008, p. 246) เมื่อเทียบกับการลงทุนของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ (World Nuclear Association,

2010a) ดังนั้น เมื่อเทียบค่าการลงทุนระหว่าง LR และ SMR พบว่า SMR ถูกกว่า $4038/1240 = 3.25$ เท่า ซึ่งจะเป็นการประหยัดการลงทุนอย่างมากสำหรับกำลังไฟฟ้าที่เท่าๆ กัน ประเทศที่กำลังพัฒนาหรือประเทศที่มีเงินลงทุนน้อย ควรจะตระหนักในการประหยัดการลงทุนโดยใช้ SMR แทน LR อย่างยิ่ง ต้องคำนึงว่าเมื่อลงทุน SMR แล้วจะสามารถขยายกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มได้อีก เพราะ SMR สามารถต่อเสริมเชื่อมได้เป็นแบบอนุกรม (Series) ในภายหลัง อาทิเช่น เพิ่ม SMR ในภายหลังอีก 2 เครื่อง เราก็จะได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มจากของเดิมที่มีอยู่แล้ว 335 MWe (เครื่องแรก) เป็น $(335 + 335 \times 3) = 1050$ MWe เท่ากับขนาดของโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ (LR) แต่เราค่อยเพิ่มขยายกำลังการผลิตขึ้นตามการเพิ่มของการใช้ไฟฟ้าและสามารถเก็บค่าไฟฟ้าจ่ายเครื่องแรกมาลงทุนสำหรับการสร้างเครื่องที่ 2 และที่ 3 ตามลำดับ และนอกจากนั้นเราสามารถมีกระแสไฟฟ้าใช้ได้หลังจากการก่อสร้างเครื่องแรกในปีที่ 3 ดีกว่ารอคอยกระแสไฟฟ้าที่จะได้จากการผลิตของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) ซึ่งต้องใช้เวลาก่อสร้างกว่าจะเสร็จถึง 12 ปี และต้องการเงินลงทุนอย่างมหาศาล

11. ระยะเวลาการก่อสร้าง (Construction time) ในการก่อสร้าง SMR นั้นระยะเวลาของการก่อสร้างประมาณ 3 ปี ทั้งนี้ เพราะ SMR มีเอกลักษณ์ของตัวมันเองอยู่แล้วที่ว่า เล็ก กะทัดรัด และรวมระบบต่างๆ ให้อยู่ในระบบเดียวกัน (Integral unit) ดังนั้นจึงสามารถสร้างและประกอบได้ภายในโรงงานการผลิต และการผลิต SMR นั้น ชิ้นส่วนสามารถทำเป็นจำนวนมาก (Mass production) ซึ่งจะประหยัดต้นทุนและควบคุมคุณภาพได้เป็นอย่างดี ระบบป้องกันการรั่วไหลของกัมมันตรังสีที่มีขนาดเล็ก สามารถทำได้จากแหล่งผลิตทั่วไป ใช้เวลาน้อย เมื่อเทียบกับการทำระบบป้องกันการรั่วรั่วไหล เพื่อใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่แล้วต้องใช้เวลาอย่างมาก เพราะต้องรอการก่อสร้างหล่อ/เชื่อม ซึ่งมีเพียงแห่งเดียวในโลกที่สามารถทำอย่างขนาดใหญ่ได้คือที่ประเทศญี่ปุ่น ดังนั้น เราจะพบว่ามีการรอการรอกว้างนานมาก กว่าที่จะสร้าง LR เสร็จก็ใช้เวลา 10-12 ปี (เสียเวลาส่วนใหญ่ไปในการรอการก่อสร้าง (Containment dome) ภาพ 7 แสดงการเปรียบเทียบ ปริมาตรและขนาดของ Containment dome ระหว่าง LR และ SMR แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ระบบ Generation III+ แบบ AP-600 (600 MWe) จะถูกจัดเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดกลาง (Medium reactor) ตามนิยามที่ IAEA ให้ไว้ข้างต้นก็ตาม แต่การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และระบบการทำงานนั้น เป็นการย่อบางส่วนจากระบบ AP-1000 (1000 MWe) ซึ่งเป็นระบบ LR มาให้เล็กลง จึงถือว่า AP-600 เป็นขนาดย่อของ LR และไม่ถือว่าเป็น SMR รวมทั้งระบบการออกก็ไม่เป็น Integral unite ด้วย ดังนั้นในภาพ 7 จึงเห็นอย่างเด่นชัดว่า ระบบ SMR แบบต่อรวมกัน (Cumulative system) จึงสามารถมาเปรียบเทียบกับ AP-600

จากภาพ 7 จะพบว่าปริมาตรของ Containment สำหรับ SMR จะมีเพียง 22% ของ LR (AP-600) ซึ่งเมื่อเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก SMR – IRIS 2 เครื่อง = $335 \times 2 = 670$ MWe ซึ่งพอๆ กับผลิตจากเครื่อง AP-600 (600 MWe) แล้ว ปริมาตรของ Containment สำหรับ LR (AP-600) จะใหญ่ SMR 2 เครื่องถึง 4.45 เท่า จะเห็นว่าการสร้าง SMR ในขนาดที่มีกำลังเท่าๆ กันกับเครื่อง LR แล้ว จะประหยัดเงิน วัสดุก่อสร้าง (เหล็ก) และระยะเวลาได้เป็นอย่างมาก

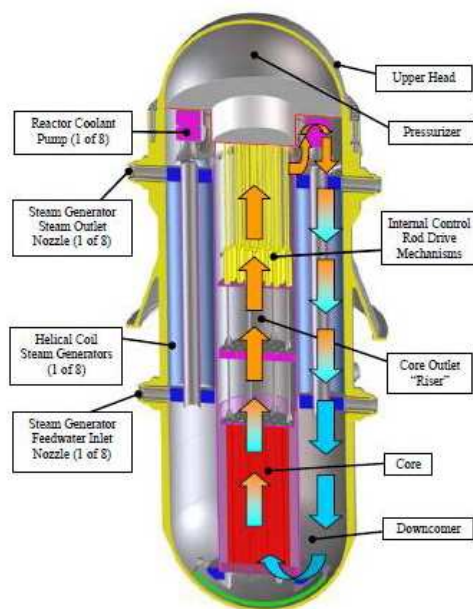


ภาพ 7 การเปรียบเทียบปริมาตรของ IRIS กับ AP-600 (Greenspan & Brown, 2001, p. 6)

ตามคุณสมบัติที่ดีดังกล่าวของ SMR ข้างต้น จะมีระบบ SMR ที่กำลังผลิตออกมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในระยะเวลา 3-5 ปี เป็นจำนวน 3 ระบบ คือ 1) ระบบ IRIS (International Reactor Innovative and Secure) 2) ระบบ Super Safe Small and Simple – 4S และ 3) ระบบ NuScale (รายละเอียดโปรดดู Carelli, et al., 2004; , Ingersoll, 2009; WNA, 2010b) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ระบบ International Reactor Innovative and Secure (IRIS) (ภาพ 8) เป็นระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ความร่วมมือระหว่าง 20 องค์กรนานาชาติ จาก 10 ประเทศ โดยมีบริษัท Westinghouse, USA เป็นแกนนำ การพัฒนาระบบนี้เป็นไปตามความร่วมมือ ระหว่างประเทศที่เรียกว่า GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) ภายใต้การริเริ่มของประเทศสหรัฐอเมริกาใน

ปี ค.ศ. 2006 (Bush, 2006) ในปัจจุบันระบบนี้ถูกพัฒนาถึงขั้นการรออนุมัติใบอนุญาตจาก US NRC (US Nuclear Regulatory Committee) แล้ว ระบบนี้มีขนาดกำลัง 100 MWe และ 335 MWe คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ในปี ค.ศ. 2015

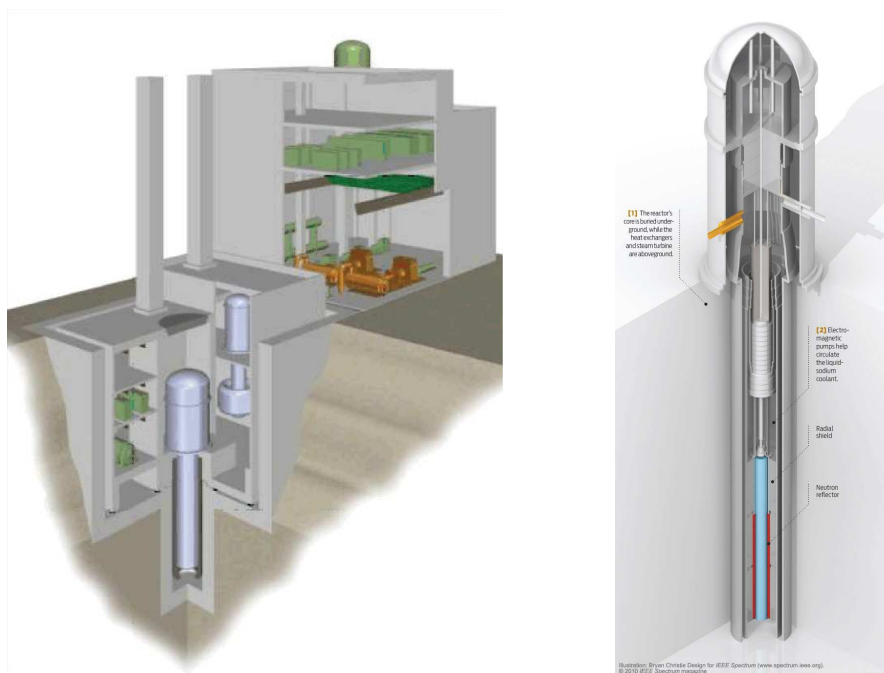


ภาพ 8 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก ระบบ IRIS (IAEA, 2006, p. 183)

2. ระบบ Super Safe Small and Simple (4S) (ภาพ 9) เป็นระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก บางทีอาจเรียกว่าเป็น “Nuclear battery” ระบบนี้พัฒนาโดยบริษัท Toshiba ประเทศญี่ปุ่น อยู่ในช่วงการรออนุมัติใบอนุญาตจาก US NCR เช่นเดียวกัน และคาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ในปี ค.ศ. 2013 ระบบ 4S นี้ได้รับการสั่งซื้อจากเมือง Galena มลรัฐ Alaska ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อนำไปใช้งานในลักษณะ Co-generation คือ ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้แก่เมือง Galena ที่มีประชากร 700 คน และใช้เป็นเครื่องกำเนิดความร้อนแก่เครื่องสาธารณูปโภคของเมือง (District heating) (The City of Galena, 2007) รายละเอียดของระบบ 4S สามารถดูได้จาก IAEA (2010b)

นอกจากระบบ 4S แล้ว บริษัท Toshiba กำลังพัฒนาระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก (100 times smaller Micro Nuclear Power Reactor) สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 200 KWe ซึ่งเท่ากับ 0.2 MWe มีขนาดของเครื่องยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เมตร เป็นระบบอัตโนมัติไม่

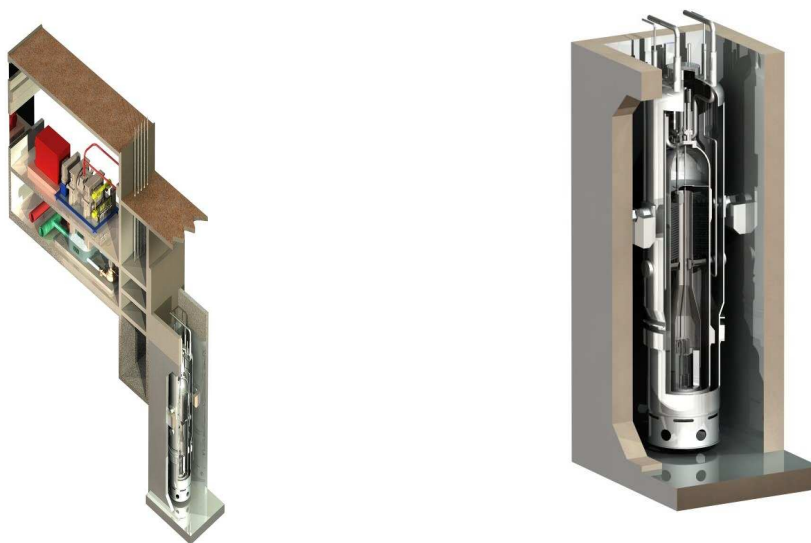
ต้องเติมเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งาน 40 ปี ระบบนี้จะถูกฝังอยู่ใต้ดิน โดยคาดว่าจะมีค่าไฟฟ้าประมาณ US cents 5/kWh ซึ่งถูกกว่าของราคาไฟฟ้าในปัจจุบัน ถึง 50% (Next energy news, 2007)



ภาพ 9 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก ระบบ 4S (ซ้าย: US NRC, 2009; ขวา: Christie, 2010)

3. ระบบ NuScale (ภาพ 10) พัฒนาโดยบริษัท NuScale Power ประเทศสหรัฐอเมริกา (NuScale Power, 2010) เป็นระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กที่ให้กำลังไฟฟ้า 45 MWe อยู่ในรูปแบบ Modular และ Integral unit สามารถต่อรวมกันเป็นระบบใหญ่ รวม 24 เครื่อง จะได้กำลังไฟฟ้า 1080 MWe ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์นี้ กว้าง 12 เมตร ยาว 18 เมตร ตัวหุ้มเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Reactor vessel) อยู่ในบ่อน้ำที่ฝังใต้ดิน มีการป้องกันการแผ่รังสี เมื่อเกิดอุบัติเหตุ และ ขาดต่อการใช้เครื่องbinในการก่อวินาศกรรม มีระบบความปลอดภัยแบบ Passive safety ระบบเครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถสร้างเสร็จภายใน 3 ปี มีน้ำหนัก 500 ตัน สามารถทำการประกอบเสร็จภายในโรงงานแล้วนำส่งทางเรือ ทางรถไฟ หรือรถบรรทุกขนาดใหญ่ได้ ขณะนี้อยู่ในขั้นการรออนุมัติจาก US NRC และคาดว่าจะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2013

นอกจากการใช้ SMR ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้ในรูปแบบผสมกับการผลิตความร้อนแล้ว SMR ยังมีศักยภาพเหมือนกับ LR สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน เพื่อเป็นพลังงานในอุตสาหกรรมขนส่ง ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ในเวลาอีก 30 ปีข้างหน้า ในปัจจุบันนี้ได้มีการทดลองใช้ก๊าซไฮโดรเจนในรถบรรทุก รถโดยสารขนาดใหญ่ และรถยนต์ส่วนบุคคลแล้ว ทั้งนี้เพื่อที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลให้มากที่สุด



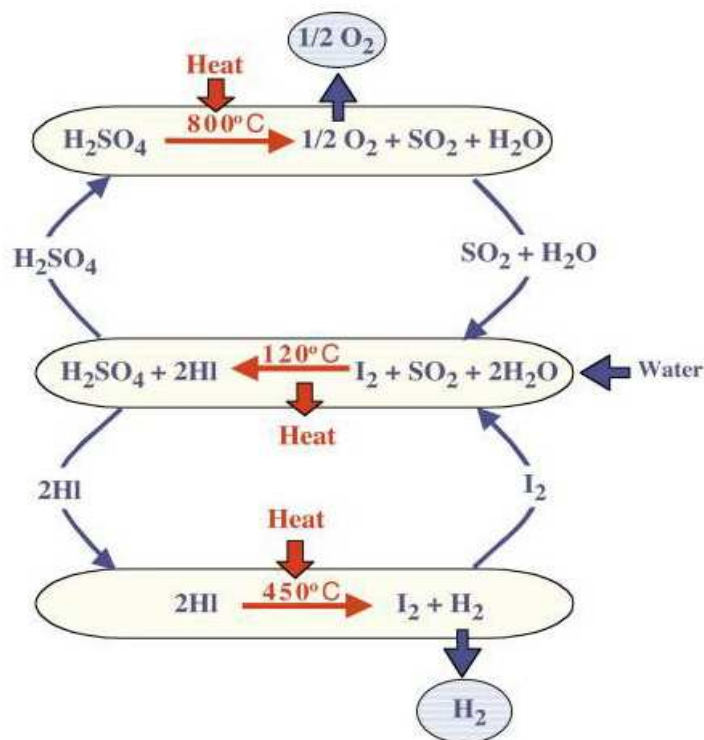
ภาพ 10 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก ระบบ NuScale (NuScale Power, 2008)

ขบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้น จะใช้กระแสไฟฟ้าแยกน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ออกเป็น ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซออกซิเจน ที่เรียกว่า Electrolysis การใช้พลังงานนิวเคลียร์ในรูปแบบพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะสามารถแยกน้ำเพื่อให้ได้ก๊าซทั้งสองได้หลายวิธี คือ

1. ใช้ขบวนการแยกน้ำโดยไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขณะที่มีกำลังไฟฟ้าเหลือเกินพอ (Off peak load) ขบวนการนี้เรียกว่า Electrolysis แบบธรรมดาที่อุณหภูมิต่ำ
2. ใช้ขบวนการแบบ Co-generation โดยนำความร้อนจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มาทำการแยกไอน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง ขบวนการนี้เรียกว่า High-temperature steam electrolysis ซึ่งเป็นขบวนการผสม (Herring, et al, 2007)
3. ใช้พลังงานความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มาทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบ “เคมีความร้อน” (Thermo-chemical reaction) (Yildiz & Kazimi, 2006)

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยพลังงานนิวเคลียร์ โดยมากนิยมใช้ขบวนการ Thermo-

chemical process ที่ใช้วงจรกำมะถัน-ไอโอดีน (Sulphur-Iodine cycle) โดยใช้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ปฏิกริยาเกิดที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส (Schultz, et al, 2003) ดังในภาพ 11



ภาพ 11 วงจร Sulphur-Iodine สำหรับการผลิตไฮโดรเจน โดยพลังงานนิวเคลียร์ (Schultz, et al, 2003, p. 4)

การเปรียบเทียบคุณลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง กับ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่

จากคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะพบว่ามีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากประเทศไทยกำลังอยู่ในขั้นของการตัดสินใจเลือกระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อใช้ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีกำลังผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ นักวิชาการในต่างประเทศได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะของ SMR และ LR ในเอกสารวิชาการต่างๆ (เช่น Carelli, et al., 2007, 2010; Greenspan & Brown, 2001; Kuznetsov, 2008).) ซึ่งถูกรวบรวมและนำเสนอในตาราง 4 พอสังเขป

ตาราง ๔ การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)

รายการ	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)
ขนาด และน้ำหนัก	เครื่องปฏิกรณ์ฯ รวมทั้งตัวคลุม (Containment dome) มีน้ำหนักประมาณ 500 ตัน	เฉพาะฝาปิด Reactor vessel อย่างเดียว มีน้ำหนัก 4,000 ตันต่อด้าน ซึ่งมี 2 ด้าน (ระบบ AP-1000) (IHI, 2010)
ขนาดกำลังการผลิต	ขนาดเล็ก มีกำลังผลิต น้อยกว่า 300 เมกกะวัตต์ ขนาดกลาง มีกำลังผลิต 300 ถึง 700 เมกกะวัตต์ สามารถต่อพ่วงกันเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตเป็น x2, x3, x4, x5, ...	ตั้งแต่ 1,000 เมกกะวัตต์ขึ้นไป สามารถเพิ่มหน่วยต่อๆ ไปได้ แต่จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากในด้านต่างๆ อาทิเช่น สถานที่ตั้ง การควบคุม เป็นต้น
เทคโนโลยี	ใช้เทคโนโลยีแบบ General III+ ร่วมกับ General IV บางส่วน และรวบรวมระบบต่างๆ เป็นหน่วยเดียวกัน (Integral unit) จึงเป็นระบบที่สมบูรณ์ในตัวมันเอง (Modularity)	เป็นระบบ General II+ ที่ซับซ้อน มีการแยกส่วนระบบต่างๆ ออกจากกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ และสิ้นเปลืองในการก่อสร้าง และมีความซับซ้อนในการควบคุมดำเนินการ
สถานที่ตั้ง	ใช้บริเวณพื้นน้อย มีข้อจำกัดไม่มาก ยืดหยุ่น เพราะการถ่ายเทความร้อนไม่มาก ไม่เสี่ยงภัยมากในกรณีแผ่นดินไหว เพราะมีระบบท่อ (Piping) น้อยมาก เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถูกฝังอยู่ใต้ดิน ลดความเสี่ยงต่อการถูกโจมตี	ใช้บริเวณกว้างมาก ขนาดประมาณ 2x2 ตารางกิโลเมตร มีข้อจำกัดต่างๆ อาทิ เรื่องการระบายความร้อน จึงต้องอยู่ใกล้แหล่งน้ำขนาดใหญ่ เช่น ทะเล ทะเลสาบ หรือแม่น้ำสายใหญ่ เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์ตั้งอยู่เหนือพื้นดิน เสี่ยงต่อการถูกโจมตี และเสี่ยงภัยมากขึ้นเพราะมีระบบท่อ (Piping) มีความซับซ้อน มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ และมีความยาวมาก

ตาราง 4 การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) (ต่อ)

รายการ	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)
เงินลงทุนก่อสร้าง	ประมาณ US\$ 1,030-1,240 ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Kuznetsov, 2008)	ประมาณ ไม่ต่ำกว่า US\$ 4-6 พันล้านเหรียญต่อ LR 1 โรง (Ingersoll, 2009, p. 594) ดังนั้น โรงไฟฟ้า LR ขนาด 1000 MWe จะเสียค่าก่อสร้างไม่น้อยกว่า US\$ 4,000 ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง
ระยะเวลาก่อสร้าง	ประมาณ 3 ปีต่อโรงไฟฟ้า ในกรณีที่ต้องการกำลังการผลิตประมาณ 1,000 เมกกะวัตต์ จะใช้ SMR 3 โรงที่มีกำลังการผลิตโรงละ 335 เมกกะวัตต์ (ระบบ IRIS) ใช้เวลาก่อสร้างต่อเนื่องรวม 9 ปี (หรืออาจจะสร้าง 3 โรงพร้อมกันภายในระยะเวลา 3 ปี ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ โรงใหญ่ 1 โรง) แต่ระหว่างนั้น หลังปีที่ 3 ไปแล้ว จะเริ่มผลิตกระแสไฟฟ้าใช้และขายเอาเงินมาสร้างโรงต่อไปได้	ประมาณ 10 ถึง 12 ปี ต่อโรงไฟฟ้า (ขนาด 1,000 เมกกะวัตต์) ทำให้มีความเสี่ยงในด้านต่างๆ เช่น ความแปรปรวนของอัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงิน ราคาวัสดุก่อสร้างที่แปรผัน และตลอดระยะเวลา 10-12 ปีนี้ จะไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าให้ใช้หรือขายได้เลย
เงินทุนหมุนเวียน	ใช้น้อยกว่า เพราะระยะเวลาก่อสร้างสั้น จึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกจำหน่ายได้เร็ว ลดเงินทุนหมุนเวียนลงได้มาก จะใช้เงินทุนหมุนเวียนเพียง 35% เมื่อเทียบกับ LR ที่มีขนาดกำลังการผลิตเดียวกัน	เงินทุนหมุนเวียนสูงมาก เพราะใช้ระยะเวลาก่อสร้างนาน จึงทำให้มีความเสี่ยงที่งบประมาณจะบานปลายมาก

ตาราง 4 การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) (ต่อ)

รายการ	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)
การควบคุมคุณภาพ	มีการสร้างและประกอบโดยตรงจากโรงงาน สามารถควบคุมคุณภาพได้เต็มที่ และชิ้นส่วนสามารถทำงานโรงงานอื่น แล้วมาประกอบภายในการควบคุมคุณภาพ ลักษณะคล้ายกับโรงงานผลิต/ประกอบรถยนต์	สร้าง ณ สถานที่ก่อสร้าง ต้องลำเลียงวัสดุก่อสร้างจำนวนมากมาประกอบเพื่อสร้างโรงไฟฟ้า ณ ที่นั่นแห่งเดียว ทำให้การควบคุมคุณภาพได้ไม่เต็มที่ และอาจทำให้เกิดอุปสรรคการก่อสร้าง อาทิ การประทุ้ง
เศรษฐศาสตร์	ไม่ขึ้นกับ “เศรษฐศาสตร์จากขนาดของการผลิต” (Economy of scale) แต่ขึ้นกับ “เศรษฐศาสตร์ของการผลิตจำนวนมาก” (Economy of mass production; Economy of repetition) ซึ่งเป็น “N th -of A-Kind” (NOAK) ทำให้ได้มาตรฐานและคุณภาพดี และราคาถูกลง	ใช้หลัก “เศรษฐศาสตร์จากขนาดของการผลิต” (Economy of scale) เท่านั้น จึงลดต้นทุนการสร้างได้น้อย เพราะเป็นการผลิตแบบ “First- of – A- Kind” (FOAK)
ระบบเครือข่ายไฟฟ้า	สามารถใช้ได้อย่างดีกับระบบ Grid ขนาดเล็ก ในประเทศที่กำลังพัฒนา หรือในท้องถิ่นห่างไกลทุรกันดาร ทำให้ไม่ต้องลงทุนสูงในการสร้างระบบ Grid ใหม่เพิ่มขึ้น รวมทั้งสามารถสร้าง Grid ใหม่ใหม่ตามจำนวนการเพิ่มของ SMR	ใช้ได้กับระบบ Grid ขนาดใหญ่ที่ประเทศพัฒนาแล้วมี ดังนั้นถ้าใช้ LR กับประเทศที่มี Grid ขนาดเล็ก จะต้องเสียค่าลงทุนเพื่อสร้าง Grid ใหม่เพิ่มขึ้นในการรองรับการผลิตกำลังไฟฟ้าของ LR ที่มีกำลังมาก จึงไม่สอดคล้องกับการใช้กระแสไฟฟ้าที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นไม่สูงมากสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา

ตาราง 4 การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) (ต่อ)

รายการ	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)
การประยุกต์ใช้งาน	- เหมาะที่จะใช้ในประเทศที่กำลังพัฒนาที่มีเงินลงทุนน้อย ใช้กับบริเวณที่อยู่ห่างไกลทุรกันดารที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าไม่มากและคุ้มค่าต่อการสร้างสายส่งไฟฟ้าต่อเชื่อมกับระบบ Grid หลัก - เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้า และหรือแหล่งผลิตความร้อน (Co-Generation) กับอุตสาหกรรมขนาดย่อม นิคมอุตสาหกรรม เมืองขนาดเล็ก - ใช้เป็นเครื่องทำน้ำจืด (Desalination) เพื่อการบริโภค อุตสาหกรรม	เหมาะใช้กับเมืองขนาดใหญ่ หรืออุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่ที่ใช้กระแสไฟฟ้ามาก
การเตรียมกำลังคนและการดำเนินการ	เนื่องจากเป็นระบบเล็ก กะทัดรัด และรวมระบบต่างๆ ไว้ในทีเดียวกัน (Integral unit) จึงใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวนน้อยในการดำเนินการควบคุม จึงไม่ต้องเตรียมบุคลากรจำนวนมาก ซึ่งเหมาะสมกับสถานการณ์ของประเทศกำลังพัฒนา	เป็นระบบใหญ่ที่มีความซับซ้อน ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเป็นจำนวนมากในการควบคุมดูแลดำเนินการทำงานของโรงไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมบุคลากรจำนวนมากสำหรับแต่ละโรงไฟฟ้า ซึ่งไม่เหมาะสมกับประเทศกำลังพัฒนาที่ขาดกำลังคน
ระยะเวลาเวลาการหยุดทำงานเพื่อเติมเชื้อเพลิง	SMR รุ่นแรกๆ ต้องหยุดเติมเชื้อเพลิงทุกๆ 3 ถึง 5 ปี ต่อครั้งแล้วแต่ละระบบ แต่รุ่นใหม่ส่วนใหญ่จะออกแบบให้ไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งาน (30 ปี)	LR ส่วนใหญ่ต้องหยุดโรงไฟฟ้าเพิ่มเติมเชื้อเพลิงทุกๆ 2 ปี อาจทำให้ต้องหยุดผลิตกระแสไฟฟ้าโดยประมาณ 10% ของกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งปี

ตาราง 4 การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) (ต่อ)

รายการ	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR)
กากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์	ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับการจัดการกับกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพราะเมื่อใช้เชื้อเพลิงหมดแล้ว ตัวเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกากเชื้อเพลิงข้างในซึ่งถูกห่อหุ้มไว้อย่างดี (Sealed) ก็จะถูกส่งกลับไปยังประเทศผู้ผลิต เพื่อดำเนินการกำจัดต่อไป จึงไม่เป็นการระคายต่อผู้ใช้ SMR และยังเป็นกำบังกั้นมิให้เกิดการแพร่กระจายของวัสดุนิวเคลียร์ (Proliferation) จากผู้ก่อการร้าย	กากเชื้อเพลิงจะต้องนำออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์และแช่ลงในน้ำในบ่อบริเวณข้างๆ โรงงานเป็นเวลานานหลายสิบปี ก่อนที่จะนำไปดำเนินการฝังใต้ดินต่อไป หรือทำการ fuel reprocessing
ความปลอดภัย	มีความปลอดภัยสูงเหมือน LR รวมทั้งเครื่องปฏิกรณ์ฝังใต้ดินจึงป้องกันการแพร่กระจายของกัมมันตภาพรังสีได้ดีกว่า และปลอดภัยจากการก่อการร้ายและวินาศกรรม	มีความปลอดภัยสูง เครื่องปฏิกรณ์ถูกรอบด้วยโดมเหล็กกล้าซึ่งหนา 35 เซนติเมตร และติดตั้งในอาคารคอนกรีตที่มีกำแพงและเพดานหนา 2 เมตร ซึ่งป้องกันการแพร่กระจายของกัมมันตภาพรังสีได้ดีกว่า และปลอดภัยจากการพุ่งชนของอากาศยาน

ข้อสรุปและเสนอแนะ

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) ตามที่ได้เสนอมาในข้างต้นนั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการมีขนาดเล็ก กะทัดรัด และใช้เทคโนโลยีในการออกแบบ ที่ก้าวหน้า เพื่อเป็นระบบ modular และ integral unit ทำให้สะดวกในการควบคุมการทำงานและในการดำเนินการ ตลอดจนมีความปลอดภัยสูง รวมทั้งไม่ต้องกังวลเรื่องกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพราะไม่จำเป็นต้องเติมเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งาน เมื่อใช้งานจนหมดเชื้อเพลิง (ประมาณ 30 ปี) ก็ส่งกลับไปยังโรงงานผู้ผลิตทั้งตัวเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกากเชื้อเพลิงที่อยู่ภายใน ผู้ผลิตจะเป็นผู้บริหารจัดการเกี่ยวกับกากเชื้อเพลิงเองตามข้อตกลงของการซื้อเครื่อง SMR เพราะเครื่องปฏิกรณ์ ถูกปิด (Sealed) จะแกะออกมาได้ก็ต่อเมื่อบริษัทผู้ผลิตเป็นผู้ดำเนินการเอง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของวัสดุนิวเคลียร์ (Proliferation) โดยประเทศผู้ซื้อจะไม่มีกากกัมมันตภาพรังสีปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม และไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับการแพร่กระจายวัสดุนิวเคลียร์ นอกจากนี้ ในเรื่องของ การลงทุนสร้าง มีการใช้เงินลงทุนที่น้อยกว่าการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ ดังนั้น SMR จึงมีความคุ้มค่าทั้งทางด้านเทคโนโลยี เศรษฐกิจ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น SMR จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับประเทศที่กำลังพัฒนาที่กำลังจะตัดสินใจใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือเพื่ออุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องมีการเตรียมความพร้อมไว้รองรับในการใช้พลังงานนิวเคลียร์ ข้อเสนอแนะในการเตรียมความพร้อม สรุปได้ดังนี้

ประการแรก การติดตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ในทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านกฎหมาย ข้อบังคับ (Thirawat, et al., in progress) ด้านการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และการเศรษฐศาสตร์นิวเคลียร์ที่เกี่ยวกับการลงทุนก่อสร้าง การดำเนินการของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และผลกระทบ เป็นต้น โดยเฉพาะการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รุ่น Generation III+ ซึ่งเริ่มมีใช้ในเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2010 อย่างไรก็ตาม SMR อย่างเช่นระบบ IRIS, Toshiba 4S และ NuScale ได้ถูกพัฒนาโดยมีการออกแบบโดยอาศัยหลักการของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ Generation III+ เป็นส่วนใหญ่ และรวมบางคุณลักษณะของ Generation IV และจะนำออกใช้ในเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2013 เป็นต้นไป ดังนั้น ประเทศที่คิดจะใช้พลังงานนิวเคลียร์เป็นครั้งแรกควรติดตามดูในรายละเอียดต่างๆ ของ SMR

การติดตามศึกษาอย่างใกล้ชิดเรื่อง SMR มีความจำเป็นอย่างยิ่งและเร่งด่วน เพราะในภายภาคหน้าจะมีโรงไฟฟ้า SMR ที่มีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ากว่านี้อีก เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ระบบ

High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) (WNA, 2010b) ในขณะนี้เทคโนโลยีที่ใช้กับ SMR นั้นยังเป็นแบบ Pressurized Water Reactor (PWR) ซึ่งมีสถิติการใช้งานที่ปลอดภัยสูงและมีการใช้อย่างแพร่หลาย

ประการที่สอง การเตรียมบุคลากร ข้อเสนอแนะนี้สำคัญมาก และเป็นการเตรียมการขั้นพื้นฐานไม่ว่าจะมีการดำเนินการในเรื่องโครงการใดก็ตาม การเตรียมองค์บุคคลนั้น ไม่ใช่ว่าจะเตรียมการเพื่อจะสร้างหรือดำเนินเครื่องในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เท่านั้น หากจะต้องเตรียมการในด้านอื่นๆ ในหลายระดับอีกด้วย เป็นต้นว่า การเตรียมการศึกษาเพื่อให้องค์ความรู้ทางพลังงานนิวเคลียร์ ตั้งแต่ระดับประถมจนถึงระดับอุดมศึกษา อาจจะต้องเกี่ยวข้องเป็นรายวิชา กลุ่มวิชาทางพลังงานนิวเคลียร์ หรือหลักสูตร เพื่อนำไปสู่การให้ปริญญาในระดับต่างๆ ทางด้านพลังงานนิวเคลียร์

นอกจากจะเป็นการเตรียมองค์บุคคลในการเรียนในชั้นเรียน (Formal education) การดำเนินการแบบนอกระบบ (Informal education) ในรูปแบบต่างๆ ก็ต้องดำเนินการไปพร้อมๆ กัน เช่น การเปิดอบรมทั่วไปเกี่ยวกับกิจการต่างๆ ด้านนิวเคลียร์ โดยองค์กรของรัฐที่เกี่ยวข้อง ไม่ใช่จะต้องเป็นหน้าที่ของกระทรวงศึกษาธิการเท่านั้น แต่ต้องมีกระทรวงอื่นๆ เข้ามาร่วมเป็นเจ้าภาพ เช่น กระทรวงพลังงาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงสาธารณสุข ตลอดจนกระทรวงมหาดไทย โดยเฉพาะกรมการปกครองส่วนท้องถิ่น กรมพัฒนาชุมชน องค์การบริหารส่วนจังหวัด และองค์การบริหารส่วนท้องถิ่น ดังนั้นการเตรียมบุคลากรทางด้านนี้ จึงควรเป็น “วาระแห่งชาติ” ในการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ เพื่อการพัฒนาประเทศ ให้มีความมั่นคงทางด้านพลังงาน (Energy security) จึงควรจัดทำแผนแม่บทของพลังงานนิวเคลียร์ให้ชัดเจนและประสานงานกันอย่างแท้จริง

นอกจากนี้ ทางด้านการต่างประเทศนั้น มีความสำคัญมากในแง่กฎหมายระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับพลังงานนิวเคลียร์ การทำอนุสัญญาต่างๆ การประสานงานกับทบวงการปรมาณูของสหประชาชาติ (International Atomic Energy Agency: IAEA) ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย เพราะในการจัดทำโครงการนิวเคลียร์ต่างๆ ทาง IAEA จะส่งผู้แทนมาให้การคำแนะนำ และตรวจสอบในด้านต่างๆ ตั้งแต่การเตรียมการ จนถึงดำเนินการตลอดไป

ตัวอย่าง การเตรียมองค์บุคคลในระดับต่างๆ ด้านนิวเคลียร์ในต่างประเทศนั้น ตัวอย่างที่ดีคือ โครงการในประเทศญี่ปุ่น ประเทศฝรั่งเศส และประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น สำหรับประเทศญี่ปุ่นนั้น มีโครงการ Center of Excellence – Innovative Nuclear Energy System : Co-INES (Sekimoto, 2008 คุรายะเอียคใน Bhanthumnavin & Bhanthumnavin, 2009)

ประการที่สาม การยอมรับทางสังคม (Public acceptance) เมื่อติดตามศึกษาการพัฒนาพัฒนางานนิวเคลียร์ในประเทศต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโครงการใดก็ตาม เนื่องจากในระยะแรกจะพบถึงปัญหาในเรื่องการยอมรับทางสังคม ในมิติต่างๆ เช่น เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ความปลอดภัยของการใช้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ความปลอดภัยของชุมชนและบุคคล ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การจัดการกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประเภทต่างๆ โดยเฉพาะประเภทที่มีการแผ่รังสีสูง และมีอายุครึ่งชีวิตยาว (High level waste) ปัญหาเหล่านี้ทางรัฐบาล โดยการดำเนินการของหน่วยงานรัฐและการร่วมมือกับภาคเอกชน ต้องตระหนักว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก และต้องทำการชี้แจงกับภาคประชาชนให้เข้าใจในทุกระดับที่เกี่ยวข้อง โดยให้ประชาชนมีส่วนร่วมในโครงการนิวเคลียร์ทุกระดับ เริ่มตั้งแต่ระดับการมีสิทธิ์ที่จะรับรู้ในเรื่องของโครงการ ไปจนถึงการมีบทบาทร่วมและตัดสินใจในขั้นสุดท้ายด้วย (Shiraga, 2002 ดูรายละเอียดใน Bhanthumnavin, 2010a)

การทำให้เกิดการยอมรับการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการพัฒนานั้น ควรจะเริ่มต้นจากการหาสาเหตุของการยอมรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในกลุ่มประชากรประเภทต่างๆ ทั้งนี้จะดำเนินการได้โดยการส่งเสริมสนับสนุนให้มีการวิจัยขั้นสูงที่ไม่ใช่การดำเนินการเพียงแต่การสำรวจความเห็น (Opinion survey) ควรเป็นการทำวิจัยในรูปแบบของการหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบ (Correlation comparative study) และการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental study) จะนำไปสู่การบริหารจัดการองค์ความรู้ (Knowledge management) โดยเฉพาะมิติขององค์ความรู้ (Knowledge dimensions) ที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มประชากรต่างๆ ทั้งนี้การเผยแพร่องค์ความรู้กับประชาชนนั้น จะต้องการทำด้วยความรอบคอบและอยู่บนพื้นฐานขององค์ความรู้ทางวิชาการ มิใช่ให้ความรู้ในลักษณะของการเหวี่ยงแห เพราะความรู้ในบางแง่มุมอาจสูงเกินไปกว่าที่ประชากรบางกลุ่มจะเข้าใจอย่างถูกต้อง และอาจทำให้เกิดความเข้าใจผิดจนก่อให้เกิดความตระหนกตกใจและต่อต้านมากขึ้น

การวิจัยแบบสำรวจอย่างเดียว ก็จะพบแต่ผลของการสำรวจเช่นเดียวกับที่พบในต่างประเทศว่า ประชากรส่วนใหญ่ยอมรับให้มีการตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ในประเทศ แต่จะต้องไม่ตั้งในอำเภอหรือหมู่บ้านของพวกเขา (Not In My Back Yard: NIMBY) แต่ผลการวิจัยขั้นสูงที่ได้กระทำไปแล้วในการวิจัยหาความสัมพันธ์ (Correlational study) ระหว่างการบริหารจัดการและมิติของความรู้ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์กับการยอมรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในนิสิตระดับมหาวิทยาลัย (Bhanthumnavin, D. & Bhanthumnavin, V., in progress; Bhanthumnavin, V. & Bhanthumnavin, D., 2009b) รวมทั้งการศึกษาปัจจัยเชิงเหตุของการยอมรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Correlational study) โดยพบปัจจัยเชิงเหตุทางด้านจิตใจและสถานการณ์หลายตัวแปร เช่น ความไว้วางใจรัฐ การเปิดรับข่าวสารด้านนิวเคลียร์ ตลอดจนความกลัวพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear phobia) เป็นต้น

(Bhanthumnavin, D. & Bhanthumnavin, V. 2009; Bhanthumnavin, V., 2010b; Bhanthumnavin, V. & Bhanthumnavin, D., in progress) งานวิจัยเชิงทดลองล่าสุดได้พบว่า การยอมรับโรงไฟฟ้า นิวเคลียร์ในระดับอำเภอและหมู่บ้าน (Not In My Back Yard: NIMBY) สามารถทำให้เพิ่มการยอมรับได้ในนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายโดยการชักจูงหรือปรับเปลี่ยนทัศนคติ (Termkunanon, 2010) ที่ถูกต้องตามหลักการทางจิตวิทยาสังคม (Pol, Di Masso, Castrechni, Bonet, & Vidal, 2006; Thornton & Tizard, 2010; Vites, Pollock, & Lilie, 1992)

ประการที่สี่ การเสริมสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยด้านนิวเคลียร์ (Nuclear safety culture) วัฒนธรรมความปลอดภัยเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งไม่ว่าจะเป็นการดำเนินการในด้านใดก็ตาม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปลูกฝังวัฒนธรรมนี้แก่เยาวชนและประชาชนทุกระดับให้ตระหนักและปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด โดยสามารถผนวกเข้ากับวัฒนธรรมด้านอื่นๆ ให้เป็นวัฒนธรรมองค์การ (Organizational culture) เช่น ในมหาวิทยาลัยจะต้องมีวัฒนธรรมหลัก (University culture) ที่สำคัญต้องปฏิบัติ อันประกอบด้วย การตรงต่อเวลา (Punctuality) ความซื่อสัตย์ (Honesty) และความปลอดภัย (Safety) เป็นต้น วัฒนธรรมความปลอดภัยนี้จะเป็เครื่องชี้วัดคุณภาพของประชาชนในประเทศ (Bhanthumnavin & Bhanthumnavin, 2009a) ดังนั้นจึงต้องกระทำอย่างต่อเนื่องในทุก ระดับ ซึ่งจิตลักษณะที่พบจากผลการวิจัยมากกว่า 5 ปีที่ผ่านมาว่า มีความเกี่ยวข้องกับพฤติกรรม ปลอดภัยในด้านต่างๆ คือ ลักษณะมุ่งอนาคตควบคุมตน (Bhanthumnavin, 2007; Sriporngam, 2004; Pibaljan, 2008)

ประการสุดท้าย การเริ่มต้นของการใช้พลังงานนิวเคลียร์เพื่อการพัฒนา ควรเริ่มจาก การศึกษาและทำความเข้าใจกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทุกขนาด โดยเฉพาะขนาดเล็กและขนาด กลาง การใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กในประเทศไทย มีมานานกว่า 50 ปีแล้ว ซึ่งตั้งอยู่ที่ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร เป็นเครื่องขนาด 1 MWe เพื่อการวิจัย ทางนิวตรอนและผลิตไอโซโทปต่างๆ ที่ใช้ในวงการแพทย์วงการอุตสาหกรรม และวงการ การเกษตร แต่ไม่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนแต่อย่างใด การเริ่มต้นผลิต กระแสไฟฟ้าในตอนเริ่มต้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและขนาดกลางมีความเหมาะสมกับ ประเทศไทย เพราะคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ถึงแม้ว่าเครื่องปฏิกรณ์เหล่านี้อยู่ในระยะของ การรอพิจารณาอนุมัติใบอนุญาต (Licensing) และคาดว่าภายใน 2-3 ปี ก็คงจะนำมาใช้ได้เชิง พาณิชย์ ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนที่เกี่ยวข้อง จะต้องเริ่มศึกษาคุณสมบัติและ รายละเอียดล่วงหน้า เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติและสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก และขนาดกลางประเภทต่างๆ เพื่อการตัดสินใจในการลงทุนในอนาคตอันใกล้ ถ้าหากตัดสินใจ

เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์เหล่านี้แล้ว โอกาสที่จะได้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMR) จะเร็วกว่าที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ (LR) และจะทำให้เกิดควมมีเสถียรภาพในเรื่องความมั่นคงทางพลังงานของประเทศโดยเร็ว

เอกสารอ้างอิง

- Bhanthumnavin, D. (2007). *Synthesis of research results on morality and values in Thailand and abroad*. Moral Center. Office of Prime Minister, Bangkok, Thailand.
- Bhanthumnavin, D. & Bhanthumnavin, V. (in progress). *Multi-dimensional test construction of nuclear power plant acceptance*. Research report. National Institute of Development Administration collaboration with Shinawatra International University. Thailand.
- Bhanthumnavin, D., & Bhanthumnavin, V. (2009). *Norms and technical knowledge contributing to acceptance of nuclear power innovation in young Thai adults*. Full manuscript in Proceedings of the 1st International Conference on Technical Education (ICTE2009), January 21-22, 2010 Bangkok, Thailand.
- Bhanthumnavin, V. (2010a). Nuclear energy in sustainable development. *Journal of Social Development*, 12(1), 93-120.
- Bhanthumnavin, V. (2010b). *Antecedents of the acceptance of nuclear power plant: Psychosocial characteristics of Thai university students*. Proceedings in the Society's 2010 Annual Conference, 17-21 July, 2010, Rotorua, New Zealand.
- Bhanthumnavin, V., & Bhanthumnavin, D. (in progress). *Psychological and situational antecedents of nuclear power plant acceptance in Thai undergraduate students*. Research report. Shinawatra International University collaboration with National Institute of Development Administration. Thailand.
- Bhanthumnavin, V., & Bhanthumnavin, D. (2009a). Nuclear power plant : Knowledge, safety culture, and acceptance. *Journal of Social Development*, 11(2), 114-141.
- Bhanthumnavin, V., & Bhanthumnavin, D. (2009b). *Knowledge dimensions and NPP sites acceptance in Thai university students: Implications for knowledge management*. Full manuscript in Proceedings of the 1st International Conference on Technical Education (ICTE2009), January 21-22, 2010 Bangkok, Thailand.

- Bojan, P., Carelli, M.D., Kling, C.L., Cavlina, N., & Grgic, D. (2006). *IRIS-Progress in licensing and toward deployment*. Full manuscript in Proceedings of International Conference Nuclear Energy for New Europe 2006 on September 18-21, 2006 at Portoroz, Slovenia.
- Bowers, H.I., Fuller, L.C., & Mayers, M.L. (1983). *Trends in nuclear power plant capital investment cost estimates 1976 to 1982 A.2*. ONRL/TM-8898. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA.
- Bowers, H.I., Fuller, L.C., & Mayers, M.L. (1987). *Cost estimating relationships for nuclear power plant operation and maintenance*. ONRL/TM-10563. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA.
- Bush, G.W. (2006). *State of union: The advance energy initiative*. Washington, D.C.
- Carelli, M.D., Conway, L.E., Oriani, L., Petrovic, B., Lombardi, C.V., Ricotti, M.E., Barroso, A.C.O., Collado, J.M., Cinotti, L., Todreas, N.E., Grgi, D., Moraes, M.M. Borrough, R.D., Ninokata, H., Ingersoll, D.T., & Oriolo, F. (2004). The design and safety features of the IRIS reactor. *Nuclear Engineering and Design* 230, 157-167.
- Carelli, M.D., Garrone, P., Locatelli, G., Mancini, M., Mycoff, C., Trucco, P., & Ricotti, M.E. (2010). Economic features of integral, modular, small-to medium size reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 52, 403-414.
- Carelli, M.D., Petrovic, B., Mycoff, C.W. , Trucco, P., Ricotti, M.E., & Locatelli, G. (2007). *Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors*. Proceeding IJM Camcoon, Mexico.
- Cavlina, N. (2010). The role of small and medium reactors in the energy security of a country, IRIS example. *Nuclear Power and Energy Security*. Spring Science and Business Media B.V. 2010
- Center for Advanced Energy Study (CAES). (2010). Economic and employment impacts of small modular nuclear reactors. The Energy Policy Institute, U.S.A. June, 2010. Retrieve from <http://epi.boisestate.edu>.
- Christie, B. (2010). Super safe small and simple- 4S. *IEEE Spectrum Magazine*. Retrieve from www.spectrum.ieee.org.

- Chu, S. (2009). *Nuclear must be part of energy mix*. Nuclear Energy Institute. NEI Nuclear Notes. Retrieved from <http://neinuclearnotes.blogspot.com/2009/03/chu-nuclear-must-be-part-of-energy-mix.html>.
- Egan, J.R. (1984). Small reactors and the “second nuclear era”. *Energy*, 9(9/10), 865-874.
- EMWG. (2007). *Cost estimating guideline for generation IV nuclear energy system*. Retrieved from www.gen-4.org/Technology/horizontal/EMWG_Guidelines.pdf.
- ENS. (2010). *Nuclear power plants world wide*. European Nuclear Society News. Retrieved from <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>.
- Galena , The City of. (2007). *Overview of Galena’s proposed approach to licensing a 4S nuclear reactor based power generation facility*. The City of Galena, Alaska, USA. Retrieved from <http://www.roe.com/pdfs/technical/Galena/Overview%20Whitepaper%20Rev02.pdf>.
- Gonyeau, J. (2005). *Key areas and buildings at nuclear power plant site*. The virtue nuclear tourist. Retrieved from <http://www.nucleartourist.com/areas/areas.htm>.
- Greenspan, E. & Brown, N. (2001). *Small innovative reactor design- useful attribute and status technology*. The James A. Baker III Institute for public Policy, Rice University, USA. Retrieved from <http://www.bakerinstitute.org/publications/small-innovative-reactor-designs-useful-attributes-and-status-of-technology>.
- Herring, J.S., O’Brien, J.E., Stools, C.M., Hartvigsen, J.J., Petri, M.C., Carter, J.D. ,& Bischoff, B.L.. (2007). *Overview of high temperature electrolysis for hydrogen production*. Idaho Laboratory. INL/CON-07-12192, USA. Retrieved from <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/3772050.pdf>.
- Hore-Lacy, I. (2006). *Nuclear energy in the 21st century* (pp. 73). Canada: World Nuclear University Press.
- IAEA. (1985). *Small and Medium Power Reactors: Project Initiation study phase I*. IAEA-TEDOC 374. Vienna, Austria.
- IAEA. (1997). *Introduction to small and medium reactors in developing countries*. IAEA-TECDOC-999. Vienna, Austria.
- IAEA. (2005). *Innovative small and medium sized reactors: Design, features, safety approaches and R&D trends*. IAEA-TECDOC-1451. Vienna, Austria.

- IAEA. (2006a). *Status of innovative small and medium sized reactor designs*. Vienna, Austria.
- IAEA. (2006b). *Advanced nuclear plant design options to cope with external events*. IAEA-TECDOC-1487. Vienna, Austria.
- IAEA. (2009a). *Climate change and nuclear power*. IAEA. Vienna, Austria.
- IAEA. (2009b). *Common technologies and issues for small and medium sized reactors*. Nuclear power technology development. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/>.
- IAEA. (2010a). *IAEA nuclear energy series report: Approaches to access to competitiveness of SMRs*. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/SMR/docs/Approaches-to-assess-competitiveness-of-SMRDraft.pdf>.
- IAEA. (2010b). *Status report for advance nuclear reactor design*. Report 76-Super Safe, Small and Simple Reactor (4S). Vienna, Austria.
- IHI. (2010). *IHI is shipping first AP 1000 □ product to CB&I*. Press release. August 3, 2010. Retrieved from <http://www.ihico.jp/en/press/2010/2010-8-08/index.html>.
- Ingersoll, D.T. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy* 51, 589-603
- Kuznetsov, V. (2008). Option for small and medium sized reactors (SMRs) to overcome loss of economic of scale and incorporate increased proliferation resistance and energy security. *Progress in Nuclear energy*, 5, 242-250.
- Lawrence Livermore National Laboratory. (2004). *Nuclear energy to go: A self contained, portable reactor*. UCRL-52000-04-6. Retrieved from <https://www.llnl.gov/str/JulAug04/Smith.html>.
- Lee, T.J., Lee, K.H., & Oh, K. (2007). Strategic environments for nuclear energy innovation in the next half century. *Progress in Nuclear Energy*, 49, 397-408.
- Next energy news. (2007). *Toshiba builds 100x smaller micro reactor*. Retrieved from <http://www.nextenergynews.com/news1/next-energy-news-toshiba-micro-nuclear-12.17b.html>.
- Nuclear Energy Agency. (1991). *Small and Medium Reactors; Status and Prospects*. Paris, France.

- Nuclear Energy Agency. (2008). Chapter 13 Advanced reactor. In *Nuclear energy outlook*. (pp. 373). Nuclear Energy Agency. OECD, Paris, France.
- Nuclear Energy Institute. (2010). *The cost of new generating capacity in perspective*. Nuclear Energy Institute. Retrieved from <http://www.nei.org/resourcesandstats/documentlibrary/newplants/graphicsandcharts/the-cost-of-new-generating-capacity-in-perspective>.
- Nuclear Regulatory Commission. (2009). *Advanced Reactors*. Retrieved from <http://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>.
- NuScale Power. (2008). *Facts about the NuScale system and technology*. NuScale power. Retrieved on October 2010. Retrieved from <http://www.nuscalepower.com/ot-Facts-NuScale-System-Technology.php>.
- NuScale Power. (2010). *Overview of NuScale's technology*. Retrieved from <http://www.nuscalepower.com/ot-Scalable-Nuclear-Power-Technology.php>.
- Pibaljan, J. (2008). *Psychological characteristics and working situations as correlates of preventive behavior from work injury of operational workers in plastic industry with ISO 9001: 2000 Certificate* (Unpublished Master's thesis). Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand.
- Pol, E., Di Masso, A., Castrechi, A., Bonet, M.R., & Vidal, T. (2006). Psychology parameters to understand and manage the NIMBY effect. *Revue Europeenne de Psychologie Appliquee*, 56, 43-51.
- Schultz, K.R., Brown, L.C., Besenbruch, G.E., & Hamilton, C.J. (2003). *Large scale production of hydrogen by nuclear energy for hydrogen economy*. General Atomic Project 49009, US Department of Energy, USA.
- Sekimoto, H. (2008). Progress in COE-INES. *Progress in Nuclear Energy*, 50, 71-74.
- Shiraga, K. (2002). *Understanding society and nuclear energy*. NEA News, 20.2, 4-6.
- Sripornngam, T. (2004). Psychosocial as correlates of work-safety behavioral of employees in textile and spinning industry. *Journal of Psycho-Behavioral Science: The Thai Behavioral System*, 4(1), 13-48.

- Termkunanon, S. (2010). *Effects of persuasive message and information on nuclear power plant acceptance of secondary school students* (Unpublished master's thesis). National Institute of Development Administration, Bangkok, Thailand.
- Thirawat, J., et al. (in progress). *Feasibility study of Thai legal system for operating nuclear power plant*. Thailand Research Fund. Bangkok, Thailand.
- Thornton, B., & Tizard, H.J. (2010). "Not in My Back Yard": Evidence for arousal moderating vested interest and oppositional behavior to proposed change. *Social Psychology*, 41(4), 255-262.
- UNDP. (2009). World population prospect: The 2008 revision. *Population News Letter*, 87, 1-20. University Press.
- Weinberg, A.M. (1994). *The first nuclear era; The life and time of a technological*. Fixer. American Institute of Physics Press.
- Weinberg, A.M., Spicwak, I., Barkenbus, J.N., Livingstone, R.S., Phung, D.L. (1985). *The second nuclear era*. Praeger Publishers.
- World Nuclear Association. (2010a). *The economics of nuclear power*. Retrieved from www.world-nuclear.org/info/info2.html.
- World Nuclear Association. (2010b). *Small nuclear reactors (SMR)*. World Nuclear Association. Retrieved from <http://www.world-nuclear.org/info/inf33.html>.
- Vittes, M.E., Pollock, P.H., & Lilie, S.A. (1992). Factors contributing to NIMBY attitudes. *Waste Management*, 13, 125-129.
- Yildiz, B., & Kazimi, M.S. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 77-92.