Article

การเตรียมความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้าน ตามกรอบของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ สำหรับโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR)

Infrastructure Readiness Across the IAEA 19-Issue Framework for Small Modular Reactor: SMR Programs

พรรณี แสงแก้ว[1,*] และ นทีกูล เกรียงชัยพร[2]

Phannee Saengkaew[1] and Nateekool Kriangchaiporn[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

[2]ฝ่ายวิศวกรรมโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

[1]Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University Patumwan, Bangkok 10330, Thailand

[2]Power Plant Engineering Division, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Bang Kruai, Nonthaburi 11130, Thailand

[*]Corresponding author E-mail: phannee.s@chula.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 มีนาคม 2569, วันแก้ไขบทความ: 3 กรกฎาคม 2569, วันตอบรับบทความ: 10 กรกฎาคม 2569

Received: 1st March 2026, Revised: 3rd July 2026, Accepted: 10th July 2026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกรอบการทำความเข้าใจเชิงวิชาการเกี่ยวกับระดับความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานที่ประเทศไทยจำเป็นต้องพิจารณา หากจะศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) โดยอ้างอิงกรอบ 19 ด้านของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ การวิเคราะห์บูรณาการมิติด้านกฎหมาย เศรษฐศาสตร์พลังงาน และความยอมรับของสังคม แสดงให้เห็นว่าความพร้อมด้านนิวเคลียร์เป็นโจทย์เชิงสถาบันมากกว่าประเด็นทางเทคโนโลยี และสะท้อนความสามารถของรัฐในการบริหารความเสี่ยงระยะยาวควบคู่กับความยั่งยืนทางเศรษฐกิจและความชอบธรรมทางสังคม แม้ว่าประเทศไทยจะมีองค์ประกอบพื้นฐานบางประการแล้ว เช่น ระบบการป้องกันอันตรายจากรังสี บุคลากรเฉพาะทาง และโครงข่ายพลังงานที่มีเสถียรภาพ แต่ยังขาดทิศทางนโยบายระดับชาติและกรอบกฎหมายเฉพาะสำหรับการพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การเตรียมความพร้อมจึงควรมุ่งรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ผ่านการพัฒนาสถาบัน การเสริมสร้างกำลังคน และการสร้างความเชื่อมั่นของสังคม เพื่อเพิ่มศักยภาพของรัฐในการตัดสินใจเชิงนโยบายในอนาคต

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล, โครงสร้างพื้นฐานโครงการนิวเคลียร์, กรอบโครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ, ความพร้อมเชิงสถาบันด้านนิวเคลียร์, นโยบายพลังงานนิวเคลียร์, การยอมรับของสังคมต่อพลังงานนิวเคลียร์

Abstract

This article presents an academic framework for understanding the infrastructure readiness Thailand would need to consider when studying the feasibility of a Small Modular Reactor (SMR) program, based on the International Atomic Energy Agency's 19-issue framework. By integrating legal, economic, and social dimensions, the analysis shows that nuclear readiness is primarily an institutional challenge rather than a purely technological one, reflecting the state's capacity to manage long-term risk alongside economic sustainability and social legitimacy. Although Thailand already possesses key foundational elements, including radiation protection systems, specialized human resources, and a stable energy network, it lacks a clearly articulated national policy direction and a dedicated legal framework for nuclear power deployment. Preparedness therefore centers on preserving strategic options through institutional development, workforce strengthening, and public confidence building, thereby enhancing the state's future policy decision-making capacity.

Keywords: Small Modular Reactors, Nuclear infrastructure development, IAEA infrastructure framework, Institutional readiness, Nuclear energy policy, Public acceptance of nuclear energy

บทนำ

การวางแผนพลังงานในศตวรรษที่ 21 เผชิญความท้าทายเชิงโครงสร้างหลายมิติพร้อมกัน ทั้งความมั่นคงทางพลังงาน เสถียรภาพทางเศรษฐกิจ และข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ระบบไฟฟ้าของหลายประเทศกำลังอยู่ในช่วงเปลี่ยนผ่านเพื่อรองรับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ควบคู่กับแรงกดดันด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเปลี่ยนผ่านดังกล่าวไม่ได้เป็นเพียงการเปลี่ยนเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า แต่เป็นการปรับโครงสร้างของระบบพลังงานทั้งระบบ ซึ่งต้องอาศัยการออกแบบเชิงนโยบายระยะยาวและโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถรองรับความไม่แน่นอนในอนาคต [1-4]

ในบริบทนี้ หลายประเทศพิจารณาแหล่งพลังงานที่สามารถให้กำลังผลิตที่มั่นคงและสนับสนุนเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศ พลังงานนิวเคลียร์ยังคงถูกจัดอยู่ในกลุ่มแหล่งพลังงานคาร์บอนต่ำที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และมีบทบาทในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในช่วงเปลี่ยนผ่านพลังงาน รายงานระหว่างประเทศชี้ว่า พลังงานนิวเคลียร์สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานฐานของระบบไฟฟ้า ช่วยรักษาเสถียรภาพของโครงข่าย ควบคู่กับการขยายตัวของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตามสภาพอากาศ [4,5]

ภายใต้แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบโมดูล (Small Modular Reactors: SMRs) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะรูปแบบโครงการที่ยืดหยุ่นกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ แนวคิดแบบโมดูลเปิดโอกาสให้เพิ่มกำลังผลิตแบบค่อยเป็นค่อยไป ลดความเสี่ยงของการลงทุนขนาดใหญ่ และปรับขนาดการพัฒนาให้สอดคล้องกับระบบไฟฟ้าของแต่ละประเทศ นอกจากนี้ SMR จำนวนมากออกแบบให้มีระบบความปลอดภัยแบบพาสซีฟ (Passive) ที่ทำงานได้เองเมื่อเกิดเหตุ ซึ่งช่วยเพิ่มความทนทานต่อเหตุขัดข้องบางประเภทได้ [6]

อย่างไรก็ตาม ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency: IAEA) เน้นย้ำอย่างต่อเนื่องว่า ความปลอดภัยของโครงการนิวเคลียร์ขึ้นอยู่กับความพร้อมของสถาบันรัฐมากกว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ กล่าวคือ โครงการ SMR ยังคงต้องอาศัยกรอบกฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร และวัฒนธรรมความปลอดภัยในระดับเดียวกับโครงการนิวเคลียร์แบบดั้งเดิม [1,2] คำถามสำคัญจึง

ไม่ใช่เพียงว่าเทคโนโลยีพร้อมหรือไม่ แต่คือประเทศมีความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานเพียงใดสำหรับการดำเนินโครงการนิวเคลียร์

โครงการนิวเคลียร์เป็นโครงสร้างพื้นฐานระยะยาวที่มีอายุการใช้งานหลายทศวรรษ ครอบคลุมมิติทางกฎหมาย ความปลอดภัย เศรษฐศาสตร์พลังงาน และความยอมรับของสังคมอย่างแยกไม่ออก เพื่อจัดการความซับซ้อนดังกล่าว ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศได้พัฒนากรอบ “19 ด้านโครงสร้างพื้นฐาน” (19 Infrastructure issues) เป็นมาตรฐานสากลสำหรับการประเมินความพร้อมของประเทศ โดยครอบคลุมตั้งแต่นโยบายระดับชาติ กฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล ความปลอดภัย การเงิน บุคลากร การจัดการกากกัมมันตรังสี ไปจนถึงการมีส่วนร่วมของสังคม [1,2]

สำหรับประเทศไทย ความท้าทายด้านพลังงานเกี่ยวข้องกับทั้งความมั่นคงและความยั่งยืน โครงสร้างเชื้อเพลิงที่พึ่งพาการนำเข้าในระดับสูงทำให้ระบบไฟฟ้าเผชิญความเสี่ยงต่อความผันผวนของตลาดพลังงานโลก ขณะเดียวกัน ประเทศได้ประกาศเป้าหมายเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ โดยรัฐบาลปรับเป้าหมาย Net zero จากเดิมปี ค.ศ. 2065 ให้เร็วขึ้นเป็นปี ค.ศ. 2050 ซึ่งทำให้ภาคไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว การวางแผนพลังงานในอนาคตจึงต้องสร้างสมดุลระหว่างความมั่นคง ต้นทุน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [4,5]

ในบริบทนี้ การศึกษา SMR สำหรับประเทศไทยจึงมีสถานะเป็นการรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์มากกว่าการตัดสินใจเชิงโครงการในทันที กล่าวคือ เป้าหมายของการศึกษาไม่ได้มุ่งไปที่การก่อสร้างทันที แต่เพื่อสร้างความเข้าใจเชิงโครงสร้างว่า หากประเทศต้องการรักษาทางเลือกด้านนิวเคลียร์ในอนาคต ระบบของรัฐจำเป็นต้องเตรียมองค์ประกอบใดบ้าง

บทความนี้เป็นบทความให้ความรู้เชิงวิชาการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนกรอบแนวคิดสำหรับการวิเคราะห์ความพร้อมเชิงโครงสร้างพื้นฐานของโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล ภายใต้กรอบการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ 19 ด้านของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ โดยใช้บริบทของประเทศไทยเป็นกรณีศึกษาเชิงวิเคราะห์ บทความมิได้มุ่งประกาศผลการประเมินความพร้อมของประเทศหรือเสนอข้อสรุปเชิงตัดสินใจแทนหน่วยงานนโยบาย หากแต่มุ่งสร้างความเข้าใจเชิงระบบเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมความพร้อมด้านนิวเคลียร์ตามมาตรฐานสากล ทั้งนี้ แม้บทความจะเน้น SMR เป็นหลัก แต่หลายประเด็นสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กมาก (Microreactor) และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขั้นสูง (Advanced reactor) ได้ในอนาคต

ในเชิงวิธีการ บทความนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณนาโดยมีโครงสร้างการค้นเอกสารอย่างเป็นระบบในระดับหนึ่ง มิใช่การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบเต็มรูปแบบหรือการวิเคราะห์อภิมาน เอกสารที่นำมาทบทวนครอบคลุมบทความวิชาการ หนังสือ รายงานทางเทคนิค และเอกสารเชิงสถาบันที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการ SMR ในมิตินโยบาย กฎหมาย การกำกับดูแล ความปลอดภัย ความมั่นคงปลอดภัย วัฏจักรเชื้อเพลิง การจัดการกากกัมมันตรังสี การเงิน บุคลากร สถานที่ตั้ง การสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และการจัดซื้อจัดจ้าง จากนั้นจึงสังเคราะห์เอกสารตามกรอบโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้าน เพื่อชี้ให้เห็นว่า ความพร้อมสำหรับโครงการ SMR เป็นประเด็นเชิงสถาบันและนโยบายที่ต้องพิจารณาควบคู่กับความพร้อมด้านเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์

หลักการพื้นฐานของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ตามกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ตั้งอยู่บน “หลักคิดเชิงสถาบัน” ที่มองโครงการนิวเคลียร์เป็นระบบของรัฐ มากกว่าเป็นเพียงโครงการก่อสร้างหรือโครงการจัดหาเทคโนโลยี กล่าวคือ ความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และความยั่งยืนของโครงการไม่ได้เกิดจากการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับความสามารถของรัฐในการออกแบบ กติกา สร้างองค์กร พัฒนาคน และทำให้ทุกส่วนทำงานร่วมกันได้จริงตลอดช่วงเวลายาวนาน [1,2]

ในการพิจารณารายละเอียดตามรายการโครงสร้างพื้นฐานทั้ง 19 ด้าน จำเป็นต้องทำความเข้าใจ “หลักการพื้นฐาน” ที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงทระบบทั้งหมดเข้าด้วยกัน ได้แก่ (1) พลังงานนิวเคลียร์ในฐานะพันธะระยะยาวของรัฐ (2) หลักการพัฒนาแบบเป็นขั้นตอน ครอบคลุม และบูรณาการ และ (3) กรอบการพัฒนาแบบสามระยะของกรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญ (Milestones approach) (4) โครงสร้างองค์กรหลักสามฝ่ายและหลักการถ่วงดุลความรับผิดชอบ (5) หลักการว่าด้วยความยั่งยืนและความต่อเนื่องของสถาบัน (6) ความร่วมมือระหว่างประเทศในการเสริมสร้างความน่าเชื่อถือ

1. พลังงานนิวเคลียร์ในฐานะพันธะระยะยาวของรัฐ

โครงการพลังงานนิวเคลียร์แตกต่างจากโครงการพลังงานรูปแบบอื่นตรงที่ “ภาระความรับผิดชอบ” ของรัฐไม่ได้สิ้นสุดเมื่อโรงไฟฟ้าสร้างเสร็จหรือเริ่มผลิตไฟฟ้า แต่ครอบคลุมตลอดวงจรชีวิต ตั้งแต่การออกแบบ การอนุญาต การเดินเครื่อง ไปจนถึงการจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี รวมทั้งการปลดระวางและการรื้อถอนในอนาคต [1,2] ภาระเหล่านี้มีระยะเวลายาวนานหลายทศวรรษ และในบางมิติอาจทอดยาวไปถึงระดับ “หลายรุ่นคน” ดังนั้น การเริ่มต้นโครงการจึงเท่ากับการเริ่มต้นพันธะผูกพันระยะยาวของรัฐต่อความปลอดภัยและต่อสังคม

เมื่อมองเช่นนี้ การตัดสินใจเข้าสู่พลังงานนิวเคลียร์จึงไม่ใช่การตัดสินใจเชิงเทคนิคเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการตัดสินใจเชิงโครงสร้างของรัฐที่ต้องอาศัย (1) ความต่อเนื่องของนโยบายและความเป็นเอกภาพของทิศทางระดับชาติ (2) ความสามารถของสถาบันรัฐในการกำกับดูแลอย่างมีประสิทธิภาพ และ (3) ความไว้วางใจของสังคมที่ต้องสร้างและดูแลต่อเนื่อง ไม่ใช่เฉพาะช่วงเริ่มโครงการ ด้วยเหตุนี้ เอกสารกรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญจึงเน้นแนวคิด “National commitment” หรือ “พันธสัญญาของชาติ” เพื่อชี้ว่าโครงการนิวเคลียร์เป็นเรื่องของความรับผิดชอบเชิงสถาบันมากกว่าความพร้อมของเครื่องจักร [1,2]

ในทางปฏิบัติ หากนโยบายขาดเสถียรภาพ โครงสร้างองค์กรไม่ชัดเจน หรือระบบกำกับดูแลยังไม่แข็งแรง การเริ่มโครงการอาจนำไปสู่ต้นทุนแฝงจำนวนมาก เช่น ความล่าช้า การแก้ไขแบบซ้ำซ้อน ความขัดแย้งเชิงบทบาท และความเสื่อมถอยของความเชื่อมั่นสาธารณะ ซึ่งท้ายที่สุดย้อนกลับมากระทบทั้งความปลอดภัยและความยั่งยืนของโครงการเอง นี่จึงเป็นเหตุผลว่าทำไม “ความพร้อมของรัฐ” จึงถูกยกเป็นเงื่อนไขตั้งต้นของการตัดสินใจเสมอ

2. หลักการพัฒนาแบบเป็นขั้นตอน ครอบคลุม และบูรณาการ

เพื่อจัดการความซับซ้อนและความเสี่ยงระยะยาว ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศออกแบบกรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญ ให้ยึดหลักการพัฒนา 3 ประการที่เชื่อมโยงกัน ได้แก่ เป็นขั้นตอน ครอบคลุม และบูรณาการ [1,2]

(1) เป็นขั้นตอน (Phased) หมายถึง การยอมรับว่า “ความพร้อมเชิงสถาบัน” ไม่สามารถสร้างได้ในระยะสั้น การออกกฎหมาย การจัดตั้งองค์กร การพัฒนาคน และการฝังวัฒนธรรมความปลอดภัยต้องใช้เวลาและต้องถูกทดสอบผ่านการทำงานจริง หากเร่งรัดเข้าสู่การดำเนินโครงการโดยฐานสถาบันยังไม่ผ่านการทดสอบความเสี่ยงจะสะสมเป็นต้นทุนและความเปราะบางของระบบในระยะยาว

(2) ครอบคลุม (Comprehensive) หมายถึง การมองโครงการนิวเคลียร์เป็น “ระบบของรัฐทั้งระบบ” ไม่ใช่เรื่องของหน่วยงานใดหน่วยงานหนึ่งหรือเรื่องของโรงไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เพราะองค์ประกอบสำคัญหลายด้านอยู่นอกภาควิศวกรรม เช่น กฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล กลไกการเงิน การสื่อสารสาธารณะ การเตรียมพร้อมเหตุฉุกเฉิน และการสร้างศักยภาพบุคลากร จุดสำคัญคือ ต่อให้เทคโนโลยีพร้อม แต่ถ้าระบบกฎหมายและกำกับดูแลยังไม่พร้อม โครงการก็ไม่สามารถก้าวหน้าได้อย่างปลอดภัยและน่าเชื่อถือ

(3) บูรณาการ (integrated) หมายถึง การพัฒนาองค์ประกอบต่าง ๆ ให้ “ไปด้วยกัน” และ “เชื่อมโยงกัน” ตั้งแต่เริ่มต้น ไม่ใช่การพัฒนาแยกส่วนแล้วค่อยมาเชื่อมต่อกันภายหลัง เพราะหลายระบบต้องทำงานประสานกันในสถานการณ์จริง เช่น ระบบกำกับดูแลต้องเชื่อมโยงกับกรอบกฎหมาย ระบบพัฒนาคนต้องเชื่อมกับ

มาตรฐานคุณวุฒิและความเชี่ยวชาญ ระบบฉุกเฉินต้องมีความประสานสอดคล้องกับหน่วยงานท้องถิ่นและหน่วยงานด้านความมั่นคง

หลักคิดทั้งสามข้อนี้ช่วยอธิบายประเด็นที่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศย้ำอยู่เสมอว่า ความล้มเหลวของโครงการนิวเคลียร์จำนวนมากไม่ได้เริ่มจาก “เทคโนโลยี” แต่เริ่มจาก “ความไม่สมดุลของสถาบัน” เช่น มีแผนและเงินทุน แต่หน่วยงานกำกับดูแลยังไม่เข้มแข็ง หรือมีเทคโนโลยี แต่บุคลากรยังไม่พร้อมและระบบบริหารคุณภาพยังไม่ฝังรากอย่างมั่นคงในระดับสถาบัน ดังนั้น กรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญ จึงทำหน้าที่คล้าย “แผนที่ของระบบรัฐ” มากกว่าจะเป็นคู่มือก่อสร้างเชิงวิศวกรรม

3. กรอบการพัฒนาแบบสามระยะของกรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญ และความหมายของ “หมุดหมาย”

เมื่อวางพื้นฐานเรื่องพันธะระยะยาวและหลักการพัฒนาแบบ Phased–Comprehensive–Integrated แล้ว ขั้นต่อไปคือการเข้าใจว่า กรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญใช้ “กรอบสามระยะ” เพื่อกำหนดจุดตรวจสอบความพร้อมอย่างไร โดยสาระสำคัญของการแบ่งระยะไม่ได้อยู่ที่การกำหนดตารางเวลา แต่คือการกำหนด จุดผ่าน (Readiness checkpoints) ที่ผูกกับหลักฐานเชิงสถาบัน คือ ประเทศต้องแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักของระบบรัฐ “ทำงานได้จริง” ก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป [1,2,7]

โดยทั่วไป กระบวนการตั้งแต่เริ่มพิจารณานโยบายจนถึงการเดินเครื่องเชิงพาณิชย์มักใช้เวลาประมาณ 10–15 ปี ทั้งนี้ระยะเวลาจริงขึ้นกับบริบทและความพร้อมของประเทศ และหลักการสำคัญของกรอบนี้คือการยึดระดับความพร้อมเชิงสถาบันเป็นตัวกำหนดจังหวะการพัฒนา มากกว่าการกำหนดเส้นเวลาแบบตายตัว [1,2,7]

ระยะที่ 1 การพิจารณา (Consider) (โดยประมาณ 3–5 ปี)

ระยะนี้เป็นช่วงของการพิจารณาเชิงยุทธศาสตร์และการสร้างความเข้าใจระดับชาติ ประเทศยังไม่ได้มุ่งสู่การดำเนินการก่อสร้าง แต่กำลังประเมินอย่างรอบด้านว่าโครงการ “ควร” และ “พร้อมจะรับผิดชอบ” หรือไม่ โดยเน้นการศึกษาความเป็นไปได้ การประเมินทางเลือก และการสร้างฐานข้อมูลสำหรับการตัดสินใจที่ตรวจสอบได้ [1,2] ประเด็นสำคัญในระยะนี้มักครอบคลุม เช่น

- การวิเคราะห์นโยบายพลังงานระยะยาวและบทบาทเชิงยุทธศาสตร์ของพลังงานของนิวเคลียร์ในระบบไฟฟ้าของประเทศ
- การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจและเทคนิคในภาพรวม
- การประเมินความเสี่ยงและผลกระทบต่อสังคม รวมถึงแนวทางการสื่อสารกับสาธารณชน
- การจัดวางโครงสร้างการบริหารระดับชาติสำหรับการประสานงาน (เชิงนโยบาย/เชิงสถาบัน)

<u>หมุดหมายสำคัญที่ 1</u> คือ ประเทศมีความพร้อมเพียงพอในการตัดสินใจเชิงนโยบายว่าจะ “เดินหน้า” สู่การเตรียมโครงการหรือไม่ โดยการตัดสินใจต้องตั้งอยู่บนฐานข้อมูลและกระบวนการที่มีความชอบธรรม

ระยะที่ 2 การเตรียมความพร้อม (Prepare) (โดยประมาณ 3–5 ปี)

ระยะนี้คือการแปลง “นโยบาย” ให้เป็น “สถาบันที่ใช้งานได้จริง” เป็นช่วงที่รัฐต้องทำให้กฎหมาย องค์กร ระบบกำกับดูแล และระบบสนับสนุนต่าง ๆ สามารถทำงานได้ในทางปฏิบัติ [1,2] ประเด็นสำคัญในระยะนี้มักครอบคลุม เช่น

- การออก/ปรับปรุง กฎหมายและกฎระเบียบเฉพาะด้านนิวเคลียร์
- การจัดตั้งหรือเสริมความเป็นอิสระและขีดความสามารถของหน่วยงานกำกับดูแล
- การพัฒนากำลังคนและการเสริมสร้างสมรรถนะของบุคลากร
- การเตรียมพร้อมระบบตอบสนองเหตุฉุกเฉินระดับชาติและการทดสอบแผน
- การวางโครงสร้างการเงินและการจัดซื้อจัดจ้างให้โปร่งใสและตรวจสอบได้

<u>หมุดหมายสำคัญที่ 2</u> คือ ประเทศมีความพร้อมที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการจัดหา/ทำสัญญา (เช่น เชิญประมูลหรือทำสัญญาสำหรับโรงไฟฟ้าแห่งแรก) บนฐานของระบบกฎหมายและกำกับดูแลที่ทำงานได้จริง

ระยะที่ 3 การก่อสร้างและเตรียมเดินเครื่อง (Construct and commission) (โดยประมาณ 4–6 ปี)

ระยะนี้คือช่วงของการดำเนินโครงการจริง ทั้งการก่อสร้าง การทดสอบ การกำกับดูแล และการเตรียมการเดินเครื่องเชิงพาณิชย์ จุดเน้นไม่ใช่แค่ “สร้างเสร็จตามแบบ” แต่เป็นการพิสูจน์ว่า ทั้งระบบ คือ ผู้ดำเนินการ หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร ระบบคุณภาพ และระบบฉุกเฉิน เหล่านี้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างปลอดภัยในเงื่อนไขจริง ประเด็นสำคัญในระยะนี้มักครอบคลุม เช่น

- การก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพงาน
- การทดสอบระบบความปลอดภัยและระบบสนับสนุน
- การตรวจสอบและออกใบอนุญาตตามขั้นตอนกำกับดูแล
- การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการและความพร้อมของบุคลากร
- การฝึกซ้อมและทดสอบระบบเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉินระดับชาติ รวมถึงการสื่อสารกับสาธารณชน

<u>หมุดหมายสำคัญที่ 3</u> คือ ประเทศมีความพร้อมสำหรับการเดินเครื่องและการดำเนินการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งแรกอย่างปลอดภัย [1,2,7,8]

โดยสรุปแล้ว ทั้งสามระยะจึงไม่ใช่เพียงลำดับขั้นของโครงการก่อสร้าง แต่เป็นกระบวนการสะสม “ขีดความสามารถของรัฐ” อย่างต่อเนื่อง โดยใช้หมุดหมายเป็นจุดยืนยันความพร้อมเชิงสถาบัน หากเร่งรัดหรือข้ามขั้นตอนโดยไม่มีหลักฐานรองรับ มักเพิ่มโอกาสเกิดความล่าช้า ต้นทุนสูง และความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในระยะยาว [1,2]

4. โครงสร้างองค์กรหลักสามฝ่ายและหลักการถ่วงดุลความรับผิดชอบ

หนึ่งในแกนสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์คือการกำหนดบทบาท “สามฝ่าย” ให้ชัดเจนและถ่วงดุลกันอย่างเหมาะสม ได้แก่ (1) รัฐบาล/องค์กรยุทธศาสตร์ระดับชาติ (เช่น NEPIO) (2) หน่วยงานกำกับดูแล และ (3) ผู้ดำเนินการ/เจ้าของโครงการ [1,2]

(1) รัฐบาลหรือองค์กรยุทธศาสตร์ระดับชาติ (เช่น NEPIO) ทำหน้าที่กำหนดทิศทาง วางยุทธศาสตร์ ประสานงานระหว่างหน่วยงาน และจัดสรรทรัพยากรในภาพรวม บทบาทสำคัญคือทำให้โครงการมี “เจ้าภาพเชิงนโยบาย” ที่ชัดเจน และรักษาความต่อเนื่องของแผนงานในระยะยาว

(2) หน่วยงานกำกับดูแล ต้องมีความเป็นอิสระและมีศักยภาพเพียงพอต่อการปฏิบัติหน้าที่ เนื่องจากเป็นกลไกหลักในการคุ้มครองมาตรฐานความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของทั้งระบบ การเป็นอิสระไม่ได้หมายถึงแค่มีชื่อในกฎหมาย แต่ต้องสะท้อนผ่านอำนาจตามกฎหมาย งบประมาณ บุคลากร และกระบวนการตัดสินใจที่ตรวจสอบได้

(3) ผู้ดำเนินการ/เจ้าของโครงการ เป็นผู้รับผิดชอบความปลอดภัยโดยตรงในภาคปฏิบัติ หลักการสากลระบุชัดว่า “ความรับผิดชอบด้านความปลอดภัยโอนไม่ได้” ผู้ดำเนินการจึงต้องมีระบบประกันคุณภาพ วัฒนธรรมความปลอดภัย และศักยภาพของบุคลากรที่มีความพร้อมอย่างเพียงพอ เพราะเป็นผู้ตัดสินใจในสถานการณ์ปฏิบัติการจริง

การแยกบทบาทให้ชัดเจน พร้อมกับการประสานงานอย่างต่อเนื่อง คือเงื่อนไขพื้นฐานเพื่อป้องกันความขัดแย้งทางผลประโยชน์ และเพื่อทำให้ “ความปลอดภัย” ไม่ถูกกลบด้วยแรงผลักด้านการเมืองหรือเศรษฐกิจ

5. หลักการว่าด้วยความยั่งยืนและความต่อเนื่องของสถาบัน

ในกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ “ความยั่งยืน” ไม่ใช่คำปลายทางที่ค่อยคิดทีหลัง แต่เป็นเงื่อนไขตั้งต้นของการตัดสินใจ เพราะโครงการนิวเคลียร์ต้องอาศัยศักยภาพของรัฐในการดูแลความปลอดภัยตลอดวงจรชีวิตของโรงไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงภาระหน้าที่หลังการหยุดเดินเครื่อง การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้ว และกากกัมมันตรังสีด้วย

ความยั่งยืนในมิติของโครงสร้างพื้นฐานจึงหมายถึงความสามารถในการรักษา 4 เรื่องหลักอย่างต่อเนื่อง ได้แก่

(1) เสถียรภาพของกรอบกฎหมายและการกำกับดูแล

(2) ความต่อเนื่องของบุคลากรและองค์ความรู้ (รวมถึงการถ่ายทอดความรู้ระหว่างรุ่น)

(3) ความมั่นคงทางการเงินเพื่อรองรับภาระระยะยาว (เช่น การจัดการกากกัมมันตรังสี และการปลดระวางโรงไฟฟ้า)

(4) ความเชื่อมั่นของสังคมที่ต้องได้รับการดูแลผ่านความโปร่งใสและความรับผิดชอบ

ประเด็นนี้ทำให้เห็นว่า “ความพร้อมของรัฐ” ไม่ใช่เพียงความพร้อมช่วงเริ่มต้น แต่รวมถึงความสามารถในการรักษามาตรฐานความปลอดภัยให้สม่ำเสมอในระยะยาว [7-11] หากสถาบันอ่อนแอ ความเสี่ยงย่อมถูกผลักไปยังคนรุ่นต่อไป ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมกรอบหมุดหมายสำคัญจึงย้ำเรื่องความต่อเนื่องของสถาบันอย่างมาก [1,2]

6. ความร่วมมือระหว่างประเทศในการเสริมสร้างความน่าเชื่อถือ

โครงการนิวเคลียร์ของประเทศผู้เริ่มต้นแทบทั้งหมดต้องพึ่งพาความร่วมมือระหว่างประเทศ เพราะมาตรฐานความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของนิวเคลียร์อยู่ภายใต้ระบบสากลทั้งในเชิงข้อผูกพัน มาตรฐาน และกลไกการทบทวน ดังนั้น ความร่วมมือจึงไม่ใช่ “กิจกรรมเสริม” แต่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพื้นฐานที่ทำให้ประเทศเชื่อมโยงเข้ากับระบบความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของโลก

ตัวอย่างสำคัญคือกลไกการทบทวนโครงสร้างพื้นฐานโดยผู้เชี่ยวชาญภายนอก เช่น *การทบทวนโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์แบบบูรณาการ (Integrated Nuclear Infrastructure Review: INIR)* ซึ่งช่วยสะท้อนจุดแข็งและช่องว่างของประเทศแบบเป็นระบบ [9-10,12] เพิ่มความโปร่งใส และเสริมความเชื่อมั่นต่อสาธารณะและประชาคมระหว่างประเทศ โดยเฉพาะในกรณี SMR ที่ประเด็นมาตรฐานและแนวปฏิบัติบางส่วนยังอยู่ในช่วงพัฒนา ความร่วมมือระหว่างประเทศยิ่งช่วยลดความไม่แน่นอนและต้นทุนการเรียนรู้ของประเทศผู้เริ่มต้น

กรอบแนวคิดโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้าน (19 Infrastructure issues)

การเตรียมความพร้อมโครงการนิวเคลียร์จำเป็นต้องใช้กรอบวิเคราะห์แบบองค์รวมที่ครอบคลุมโครงสร้างพื้นฐานทั้งระบบ ดังนั้นกรอบ “โครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้าน” จึงถูกพัฒนาขึ้นเป็นมาตรฐานสากลสำหรับประเมินความพร้อมของประเทศ เพื่อให้การวางแผนเป็นระบบ ลดความเสี่ยง และสนับสนุนความยั่งยืนระยะยาว ประเทศต่าง ๆ จำเป็นต้องวิเคราะห์ทั้ง 19 ด้านภายใต้บริบทของตนเอง เพื่อกำหนดแนวทางพัฒนาที่สอดคล้องกับเศรษฐกิจ สังคม และโครงสร้างสถาบันของประเทศนั้น ๆ การอภิปรายตามกรอบนี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือประเมินทิศทางเชิงยุทธศาสตร์ โดยสะท้อนองค์ประกอบที่ต้องพัฒนาอย่างสมดุลทั้งด้านนโยบาย โครงสร้างสถาบัน เทคโนโลยี และสังคม [7,9-10]

การวิเคราะห์รายประเด็นแต่ละด้านดังต่อไปนี้ เป็นการรวมรวมและสรุปเนื้อหาประเด็นสำคัญจากเอกสารแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ตลอดจนทบทวนบทความวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ในแต่ละด้าน โดยเฉพาะประเด็นที่เกี่ยวข้องกับ SMR ทั้งนี้ หากมีการศึกษาเพื่อนำไปสู่การดำเนินการจริง ควรศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากเอกสารแนวทางและเอกสารอ้างอิงฉบับเต็มทั้งหมดได้จากแหล่งเผยแพร่ข้อมูลอย่างเป็นทางการของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ [1,2]

ด้านที่ 1 จุดยืนระดับชาติ (National position)

จุดยืนระดับชาติเป็นรากฐานสำคัญที่สุดของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ เพราะโครงการพลังงานนิวเคลียร์ไม่ใช่เพียงโครงการผลิตไฟฟ้า แต่เป็นการตัดสินใจเชิงสถาบันระยะยาวที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงของรัฐ ความปลอดภัยสาธารณะ และความเชื่อมั่นของสังคมในช่วงเวลา 60–100 ปี [13-14] กรอบการพัฒนา

โครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุชัดว่า จุดยืนระดับชาติเป็นเงื่อนไขตั้งต้นที่กำหนดทิศทางของทุกประเด็นใน 19 ด้าน หากไม่มีจุดยืนที่ชัดเจน การพัฒนาด้านกฎหมาย การกำกับดูแล บุคลากร และการลงทุนจะไม่สามารถดำเนินไปอย่างเป็นระบบได้ [1,2,13-15]

กล่าวอีกนัยหนึ่ง จุดยืนระดับชาติทำหน้าที่วัด “ความจริงจังของรัฐ” ต่อโครงการ ประเทศที่ประสบความสำเร็จมักมีลักษณะร่วมกัน ได้แก่ การประกาศนโยบายระดับชาติที่ชัดเจน การมีแผนยุทธศาสตร์ระยะยาวที่เชื่อมโยงกับนโยบายพลังงานและความมั่นคง การมีฉันทามติทางการเมืองในระดับหนึ่ง และการสื่อสารกับสังคมอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างความไว้วางใจ [13-15] ประสบการณ์ระหว่างประเทศสะท้อนว่า*ความไม่ต่อเนื่องของนโยบายเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงการล่าช้าหรือหยุดชะงัก แม้จะมีความพร้อมทางเทคนิคก็ตาม* [8,15]

สำหรับเทคโนโลยี SMR ความสำคัญของจุดยืนระดับชาติยิ่งชัดเจนขึ้น แม้ SMR จะถูกนำเสนอว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยืดหยุ่นและปรับขนาดได้ แต่ความยืดหยุ่นทางเทคนิคไม่สามารถทดแทนความมั่นคงเชิงนโยบายได้ **หากขาดกรอบนโยบายที่ต่อเนื่อง โครงการมีความเสี่ยงหยุดกลางทาง เกิดต้นทุนจม และกระทบต่อความเชื่อมั่นของนักลงทุนและสาธารณะ**

จุดยืนระดับชาติจึงหมายถึงการประกาศเจตนารมณ์อย่างเป็นทางการของรัฐในการพัฒนาโครงการ โดยต้องได้รับการสนับสนุนทางการเมืองอย่างกว้างขวาง และมีการสื่อสารในทุกระดับ เหตุผลและยุทธศาสตร์ของโครงการต้องตั้งอยู่บนพื้นฐานของนโยบายพลังงานแห่งชาติ และต้องอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าพลังงานนิวเคลียร์มีบทบาทอย่างไรต่อโครงสร้างพลังงานของประเทศ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่าการสนับสนุนจากรัฐบาลต้องมีความต่อเนื่องตลอดอายุโครงการ และรัฐต้องมีบทบาทนำทั้งด้านนโยบายและการจัดสรรเงินทุนในระยะเริ่มต้น [13-15]

การกำหนดจุดยืนระดับชาติด้านพลังงานนิวเคลียร์ไม่ควรตั้งอยู่บนความสนใจต่อเทคโนโลยีเพียงประการเดียว หากแต่ต้องพิจารณาความสอดคล้องระหว่างแรงจูงใจด้านพลังงาน เศรษฐกิจ สถาบัน และสังคมอย่างเป็นระบบ โดย Durdovic et al. (2024) ให้ข้อสังเกตว่า ทัศนคติของสังคมต่อพลังงานนิวเคลียร์มิได้ขึ้นอยู่กับประเด็นด้านเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับบริบทด้านความมั่นคงทางพลังงาน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความไว้วางใจต่อสถาบัน และการรับรู้ความเสี่ยงของประชาชน ประเด็นนี้จึงบ่งชี้ว่า การกำหนดจุดยืนระดับชาติต่อ SMR จำเป็นต้องพิจารณาทั้งเหตุผลเชิงพลังงานและเงื่อนไขทางสังคมควบคู่กัน มิใช่เป็นเพียงการตัดสินใจเชิงเทคนิคหรือการกำหนดนโยบายจากส่วนกลางเท่านั้น [16] ต่อเนื่องจากมิติทางสังคม Anjum & Islam (2025) เสนอว่า ประเทศผู้เริ่มต้นโครงการนิวเคลียร์ที่พิจารณา SMR จำเป็นต้องปรับใช้กรอบกำหนดหมุดหมายสำคัญให้สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี โดยเฉพาะด้านกฎหมาย การกำกับดูแล การเงิน ห่วงโซ่อุปทาน การจัดซื้อจัดจ้าง และความพร้อมของหน่วยงานรัฐ และชี้ให้เห็นว่า การประกาศความสนใจต่อ SMR ยังไม่เพียงพอ หากประเทศยังไม่มีกรอบสถาบันและแผนดำเนินงานที่ชัดเจนรองรับ [17]

ในมุมของประเทศกำลังพัฒนา Friess et al. (2026) วิพากษ์ความคาดหวังต่อ SMR โดยชี้ว่า ข้อกล่าวอ้างเรื่องต้นทุนต่ำ ความยืดหยุ่น ความปลอดภัยสูง และความเหมาะสมกับประเทศที่มีระบบไฟฟ้าขนาดเล็กควรถูกประเมินจากหลักฐานเชิงประจักษ์ มากกว่าการรับตามคำกล่าวอ้างของผู้พัฒนาเทคโนโลยี ซึ่งได้เสนอว่าประเทศกำลังพัฒนาควรประเมิน SMR จากความสามารถจริงด้านการเงิน การกำกับดูแล บุคลากร โครงสร้างพื้นฐาน และความรับผิดชอบตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการ [18] ในทำนองเดียวกัน Thomas & Ramana (2022) วิเคราะห์ความพยายามของหลายประเทศในการผลักดัน SMR เพื่อฟื้นบทบาทของพลังงานนิวเคลียร์ และชี้ให้เห็นช่องว่างระหว่างความคาดหวังเชิงนโยบายกับข้อจำกัดด้านต้นทุน การก่อสร้าง ตลาด และการนำไปใช้จริง งานนี้จึงเป็นหลักฐานเสริมว่า การกำหนดจุดยืนระดับชาติไม่ควรตั้งอยู่บนการคาดการณ์เชิงบวกเพียงฝ่ายเดียว แต่ควรพิจารณาความไม่แน่นอนและบทเรียนจากประเทศที่เคยผลักดัน SMR มาก่อน [19] นอกจากนี้ Shobeiri et al. (2023) ยังสรุปอุปสรรคสำคัญต่อการนำ SMR ไปใช้จริง ทั้งด้านเงินลงทุน กฎระเบียบ การยอมรับของสังคม ห่วงโซ่อุปทาน และความพร้อมของตลาด ซึ่งช่วยเติมมุมมองเชิงปฏิบัติว่า จุดยืนระดับชาติที่ชัดเจนควรเชื่อมโยงกับแผนรับมือข้อจำกัดเหล่านี้ ไม่ใช่เพียงการระบุว่า SMR เป็นทางเลือก

พลังงานสะอาดหรือเทคโนโลยีแห่งอนาคต [20] โดยสรุป การกำหนดจุดยืนระดับชาติต่อ SMR ควรตั้งอยู่บนการประเมินอย่างรอบด้านระหว่างแรงจูงใจด้านพลังงาน ความพร้อมเชิงสถาบัน ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ การยอมรับของสังคม และขีดความสามารถของประเทศในการรับผิดชอบโครงการตลอดวัฏจักรชีวิต มากกว่าการตัดสินใจจากศักยภาพเชิงเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ประกาศจุดยืนระดับชาติอย่างเป็นทางการ
- จัดตั้งองค์กรดำเนินโครงการพลังงานนิวเคลียร์แห่งชาติ (Nuclear Energy Program Implementing Organization: NEPIO) หมายถึง องค์กรกลางระดับชาติ หรือ หน่วยงานของรัฐ ที่รับผิดชอบการขับเคลื่อนโครงการนิวเคลียร์ในระดับนโยบายและการประสานงาน ไม่ใช่หน่วยงานเดินเครื่องโรงไฟฟ้า แต่เป็นโครงสร้างเชิงยุทธศาสตร์ของรัฐ
- เชื่อมโยงนโยบายกับยุทธศาสตร์พลังงาน
- สื่อสารกับสังคมอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างความไว้วางใจ

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 สร้างฐานเชิงนโยบาย

- เข้าใจพันธะผูกพันระยะยาว
- ตระหนักถึงความสำคัญของ ความปลอดภัย (Safety) ความมั่นคงปลอดภัย (Security) การพิทักษ์ความปลอดภัย (Safeguard) และการไม่แพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์ (Non-proliferation)
- จัดตั้ง NEPIO แล้ว
- มียุทธศาสตร์ระดับชาติด้านนิวเคลียร์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐเริ่มมีโครงสร้างนโยบายตั้งต้นที่สามารถขับเคลื่อนการเตรียมความพร้อมได้”

ระยะที่ 2 แปลงนโยบายสู่โครงสร้างปฏิบัติการ

- บทบาทสนับสนุนของรัฐบาลถูกกำหนดอย่างเป็นระบบ
- มีกลยุทธ์สำหรับการทำสัญญาโรงไฟฟ้า
- กำหนดความรับผิดชอบขององค์กรหลักชัดเจน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ความตั้งใจเชิงนโยบายถูกแปลงเป็นระบบที่ทำงานได้จริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความมั่นคงของโครงการ

- บทบาทของรัฐบาลดำเนินการได้จริง
- ยุทธศาสตร์ระดับชาติถูกนำไปปฏิบัติ
- มีความร่วมมือระหว่างประเทศระยะยาว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “โครงการมีเสถียรภาพเชิงนโยบายและเชิงสถาบัน”

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีประกาศจุดยืนระดับชาติที่ชัดเจนต่อการพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ แม้จะมีการศึกษาทางเทคนิคและการหารือเชิงนโยบายเป็นระยะ ความไม่ชัดเจนเชิงนโยบายส่งผลให้การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านอื่นเดินหน้าได้จำกัด เนื่องจากหน่วยงานไม่สามารถวางแผนระยะยาวได้อย่างมั่นคง ในเชิงเปรียบเทียบ บังกลาเทศสามารถเดินหน้าโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์รูปปัว (Rooppur NPP) ได้จากการมีนโยบายระดับรัฐที่ชัดเจน ขณะที่สิงคโปร์เลือกกำหนดกรอบนโยบายเพื่อศึกษาอย่างเป็นระบบ แม้ยังไม่ตัดสินใจสร้างโรงไฟฟ้า ทั้งสองกรณีสะท้อนว่าจุดยืนระดับชาติหมายถึง “ความชัดเจนของทิศทาง” มากกว่าการตัดสินใจสร้างในทันที [8]

ในมุมนี้ การพิจารณาจัดทำกรอบนโยบายระดับชาติที่เปิดพื้นที่ให้การศึกษา การวิจัย และการเตรียมความพร้อมเชิงสถาบันดำเนินไปอย่างเป็นระบบ อาจช่วยสร้างความชัดเจนเชิงทิศทางให้หน่วยงานรัฐสามารถวางแผนด้านกฎหมาย บุคลากร และโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ ซึ่งถือเป็นเงื่อนไขตั้งต้น

ของความพร้อมเชิงสถาบันในภาพรวม และเป็นฐานรองรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านอื่นภายใต้กรอบ 19 ด้าน

ด้านที่ 2 ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear safety)

ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์เป็นแกนกลางของโครงการพลังงานนิวเคลียร์ทั้งหมด เพราะความชอบธรรมของโครงการในสายตาสังคมตั้งอยู่บนความสามารถของรัฐในการป้องกันอุบัติเหตุและควบคุมความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ [21,23-24] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุอย่างชัดเจนว่าความปลอดภัยไม่ใช่ “ส่วนเสริม” แต่เป็นหลักการตั้งต้นของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ ทุกการตัดสินใจเชิงเทคนิค การกำกับดูแล และการบริหารโครงการต้องอยู่ภายใต้กรอบความปลอดภัยที่ตรวจสอบได้ [1,2]

ประสบการณ์ระหว่างประเทศสะท้อนว่า ประเทศที่พัฒนาโครงการได้อย่างยั่งยืนไม่ได้โดดเด่นเพราะเทคโนโลยีล้ำหน้าเพียงอย่างเดียว แต่เพราะมี *วัฒนธรรมความปลอดภัย (Safety culture)* ที่ฝังอยู่ในสถาบันของรัฐและองค์กรผู้ดำเนินการ [21-24] ความปลอดภัยจึงไม่ใช่เพียงมาตรฐานทางวิศวกรรม แต่เป็นระบบความคิดที่กำหนดพฤติกรรมองค์กร การตัดสินใจ และความรับผิดชอบต่อสาธารณะ [8]

สำหรับ SMR แม้ผู้พัฒนาเทคโนโลยีมักเน้นข้อดีของระบบความปลอดภัยแบบพาสซีฟ [3] แต่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศย้ำว่า “คุณลักษณะความปลอดภัยที่ฝังอยู่ในแบบ (Inherent safety features)” ไม่สามารถแทนที่ “โครงสร้างพื้นฐานด้านความปลอดภัยของรัฐ” ได้ เพราะแม้เครื่องปฏิกรณ์จะออกแบบให้ปลอดภัยมากขึ้น การกำกับดูแล การออกใบอนุญาต และการตรวจสอบยังคงต้องเข้มงวดในระดับเดียวกับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ [1,2]

ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ในกรอบโครงสร้างพื้นฐานสื่อไปถึงความสามารถของรัฐในการสร้างระบบกฎหมาย มาตรฐาน และองค์กรที่สามารถป้องกันอุบัติเหตุ ตรวจจับความผิดปกติ และตอบสนองต่อความเสี่ยงได้อย่างเป็นระบบตลอดวงจรชีวิตของโรงไฟฟ้า ตั้งแต่การออกแบบ ก่อสร้าง เดินเครื่อง จนถึงการรื้อถอน [21-25]

อย่างไรก็ตาม การประเมินความปลอดภัย (Safety assessment) ของ SMR ไม่ควรยึดอยู่เพียงข้อกล่าวอ้างเรื่องขนาดกำลังผลิตที่ต่ำกว่า หรือการมีระบบความปลอดภัยเชิงพาสซีฟ (Passive safety system) เท่านั้น Basak & Lu (2025) แสดงให้เห็นว่า แม้ระบบความปลอดภัยเชิงพาสซีฟของ SMR จะถูกออกแบบเพื่อลดการพึ่งพาการทำงานของผู้ปฏิบัติงานหรือระบบไฟฟ้าภายนอก แต่สมรรถนะของระบบดังกล่าวยังต้องได้รับการประเมินด้วยวิธีวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงพลวัต (Dynamic probabilistic risk assessment) เพื่อให้สามารถพิจารณาลำดับเหตุการณ์ การเปลี่ยนแปลงของสถานะระบบ และความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างอุบัติเหตุได้อย่างเป็นระบบ [26] ประเด็นนี้มีความสำคัญเพราะระบบที่ถูกออกแบบให้ทำงานได้โดยอัตโนมัติหรืออาศัยหลักธรรมชาติ ยังอาจได้รับผลกระทบจากเงื่อนไขของเหตุการณ์จริง เช่น ระยะเวลาการเกิดอุบัติเหตุ สภาพของอุปกรณ์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบย่อยต่าง ๆ ในทำนองเดียวกัน Lee (2024) ให้ข้อสังเกตว่า คุณลักษณะด้านความปลอดภัยของ SMR เช่น ขนาดแกนปฏิกรณ์ที่เล็กลง การระบายความร้อนเชิงพาสซีฟ และการออกแบบแบบบูรณาการ อาจช่วยลดความเสี่ยงบางประเภทได้ แต่ยังไม่อาจใช้เป็นหลักฐานเพียงพอสำหรับสรุปว่า SMR มีความปลอดภัยสูงกว่าโดยอัตโนมัติ เนื่องจากยังมีข้อจำกัดด้านการพิสูจน์สมรรถนะของเทคโนโลยี การออกใบอนุญาต การกำกับดูแล และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจที่ต้องพิจารณาควบคู่กัน [27] ดังนั้น ความปลอดภัยของ SMR จึงควรถูกพิจารณาในฐานะผลลัพธ์ของการออกแบบ การทดสอบ การกำกับดูแล และการดำเนินงานจริง มิใช่เป็นคุณสมบัติที่เกิดขึ้นจากขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว

ในเชิงการวิเคราะห์อุบัติเหตุ (Accident analysis) Malicki & Lind (2024) ศึกษาอุบัติเหตุสูญเสียน้ำหล่อเย็น (Loss-of-coolant accident: LOCA) ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำอัดความดันแบบบูรณาการ (Integral pressurized water reactor: iPWR) ที่ชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมเทอร์มอลไฮดรอลิก การตอบสนองของระบบ และสมมติฐานที่ใช้ในการจำลอง ล้วนมีผลต่อพัฒนาการของอุบัติเหตุและผลการประเมินความปลอดภัย [28] กล่าวอีกนัยหนึ่ง การจำลองอุบัติเหตุไม่ได้เป็นเพียงการคำนวณเชิงวิศวกรรม แต่เป็นฐานสำคัญในการทำความเข้าใจว่าแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั้นจะตอบสนองต่อสถานการณ์ผิดปกติอย่างไร และมาตรการความ

ปลอดภัยที่ออกแบบไว้เพียงพอหรือไม่ ขณะที่ Šadek et al. (2025) แสดงให้เห็นว่า รายละเอียดของการจัดวางระบบความปลอดภัยเชิงพาสซีฟในแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ IRIS มีผลต่อการตอบสนองของเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุบัติเหตุสูญเสียน้ำหล่อเย็นขนาดเล็ก (Small-break LOCA) ที่สะท้อนว่าการประเมินความปลอดภัยของ SMR ต้องพิจารณาแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และรายละเอียดเชิงออกแบบอย่างเฉพาะเจาะจง มิใช่อ้างอิงจากคุณลักษณะทั่วไปของ SMR เท่านั้น [29] นอกจากนี้ Malicki & Lind (2024) ยังช่วยขยายการวิเคราะห์ไปสู่อุบัติเหตุเกินฐานการออกแบบ (Beyond-design-basis accident: BDBA) ซึ่งมีความสำคัญต่อการจัดทำกรณีความปลอดภัย (Safety case) และการวางแผนตอบสนองเหตุฉุกเฉิน [30] ส่วน Wang et al. (2024) เติมมิติด้านการจำลอง การควบคุม และระบบดิจิทัล (Simulation, control, and digital systems) ซึ่งมีบทบาทมากขึ้นใน SMR รุ่นใหม่ที่พึ่งพาระบบควบคุมขั้นสูง ทั้งในด้านการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบ การติดตามสถานการณ์เดินเครื่อง และการสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ผิดปกติ ประเด็นนี้จึงสะท้อนว่า ความปลอดภัยของ SMR ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบความปลอดภัยเชิงพาสซีฟเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของระบบดิจิทัลและการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ด้วย [31]

โดยสรุป ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่ให้ความสำคัญกับการจัดทำกรณีความปลอดภัย การประเมินเฉพาะแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และการกำกับดูแลที่ตั้งอยู่บนหลักฐานเชิงวิเคราะห์ ขณะเดียวกันยังเสริมให้เห็นว่า การพิจารณา SMR ควรให้ความสำคัญมากขึ้นต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลอง ระบบควบคุมดิจิทัล และการพิสูจน์สมรรถนะของระบบความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ภายใต้สถานการณ์อุบัติเหตุที่หลากหลาย

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- จัดตั้งกรอบกฎหมายและมาตรฐานความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตามหลักสากล
- พัฒนาระบบออกใบอนุญาตและการตรวจสอบด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์
- ส่งเสริมวัฒนธรรมความปลอดภัยในองค์กรผู้ดำเนินการ
- พัฒนาขีดความสามารถด้านการวิเคราะห์ความเสี่ยงและเหตุการณ์
- เชื่อมโยงระบบความปลอดภัยทางนิวเคลียร์กับการเตรียมพร้อมและการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางรากฐานความเข้าใจด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์

- เข้าใจหลักการ Safety fundamentals ของ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ
- ประเมินกรอบความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของประเทศ
- ระบุช่องว่างด้านกฎหมายและมาตรฐาน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐตระหนักถึงข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและรู้ว่าต้องสร้างอะไร”

ระยะที่ 2 สร้างระบบกำกับความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ที่ใช้งานได้

- ออกกฎหมายและข้อบังคับด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์
- จัดตั้งหน่วยงานกำกับดูแลที่มีศักยภาพ
- พัฒนาระบบออกใบอนุญาตและการตรวจสอบ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีโครงสร้างกำกับดูแลที่สามารถควบคุมความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ได้จริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความพร้อมด้านการปฏิบัติ

- ระบบความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ผ่านการทดสอบ
- การตรวจสอบดำเนินการได้ต่อเนื่อง
- วัฒนธรรมความปลอดภัยฝังในองค์กร

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ความปลอดภัยไม่ใช่เอกสาร แต่เป็นพฤติกรรมของระบบ”

ประเทศไทยมีประสบการณ์ด้านความปลอดภัยทางรังสีและการกำกับดูแลเครื่องกำเนิดรังสีในระดับหนึ่งผ่านโครงสร้างของสำนักงานกำกับดูแล แต่การยกระดับสู่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ต้องการการขยายขีดความสามารถอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งด้านบุคลากร มาตรฐาน และระบบตรวจสอบเฉพาะทาง

บทเรียนจากประเทศที่เริ่มโครงการใหม่ชี้ว่า การลงทุนด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นช่วยลดต้นทุนและความเสี่ยงในระยะยาว ความท้าทายของประเทศไทยจึงไม่ใช่การเริ่มจากศูนย์ แต่คือการยกระดับระบบที่มีอยู่ให้สอดคล้องกับมาตรฐานโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ระดับสากล

ด้านที่ 3 การบริหารจัดการ (Management)

การบริหารจัดการเป็นกลไกที่ทำให้โครงการพลังงานนิวเคลียร์สามารถแปลงนโยบายระดับชาติให้กลายเป็นการดำเนินงานจริงอย่างเป็นระบบ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าโครงการนิวเคลียร์ไม่ใช่เพียงโครงการก่อสร้าง แต่เป็นโครงการเชิงสถาบันที่ต้องการระบบบริหารจัดการในระดับเดียวกับโครงสร้างพื้นฐานของรัฐ การขาดระบบบริหารที่ชัดเจนจะนำไปสู่ความล่าช้า ความสับสนด้านความรับผิดชอบ และความเสี่ยงด้านความปลอดภัย [1,2,32-42]

หัวใจของด้านนี้คือ “ความสามารถขององค์กร” ไม่ว่าจะเป็นหน่วยงานรัฐ หน่วยงานกำกับดูแล หรือองค์กรผู้ดำเนินการ ต้องมีระบบบริหารคุณภาพ ระบบตัดสินใจ และการจัดการความรู้ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล [32-38] โครงการนิวเคลียร์มีความซับซ้อนสูงและเกี่ยวข้องกับหลายหน่วยงาน การประสานงานจึงต้องอยู่บนระบบบริหารที่ชัดเจน ไม่ขึ้นกับบุคคลใดบุคคลหนึ่ง [39-42]

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่า ระบบบริหารต้องรวมถึง ภาวะผู้นำด้านความปลอดภัย (Leadership for safety) กล่าวคือ ผู้บริหารต้องรับผิดชอบต่อความปลอดภัยโดยตรง ไม่สามารถผลักภาระไปยังฝ่ายเทคนิคเพียงอย่างเดียว [11,22] ประเทศที่ประสบความสำเร็จด้านนิวเคลียร์มักมีวัฒนธรรมองค์กรที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัยเทียบเท่าประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ [8]

สำหรับ SMR แม้ขนาดโครงการอาจเล็กลง แต่ความต้องการด้านระบบบริหารไม่ได้ลดลง โครงการยังต้องการระบบบริหารคุณภาพ การจัดการสัญญา และการควบคุมโครงการในระดับเดียวกับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพราะความซับซ้อนเชิงสถาบันยังคงอยู่

ในมุมของการบริหารจัดการโครงการ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ถือเป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนสูง ความเสี่ยงจึงมิได้เกิดจากปัญหาทางเทคนิคเฉพาะด้านเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับธรรมาภิบาล ความสมบูรณ์ของแบบออกแบบ การประสานงานระหว่างงานวิศวกรรม การจัดซื้อจัดจ้างและการก่อสร้าง ตลอดจนความพร้อมของห่วงโซ่อุปทาน ดังนั้น โครงการ SMR จึงไม่ควรถูกมองเป็นเพียงการบริหารเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เท่านั้น แต่เป็นการจัดการระบบสถาบันที่เชื่อมโยงผู้มีบทบาทหลายฝ่ายเข้าด้วยกัน โดยที่ Iakovleva & Rayner (2024) ระบุว่า การเร่งรัดการพัฒนา SMR จำเป็นต้องมีกลไกตัวกลางเพื่อประสานรัฐ ผู้พัฒนาเทคโนโลยี ภาคอุตสาหกรรม หน่วยงานกำกับดูแล ชุมชน และภาคการเงิน เพื่อให้การตัดสินใจ การจัดลำดับความสำคัญ และการจัดการความไม่แน่นอนของโครงการดำเนินไปในทิศทางเดียวกัน [43]

ในมิติความพร้อมของโครงการ Verma & Allen (2024) เสนอกรอบการประเมินความพร้อมเชิงสังคมและเทคนิคสำหรับเทคโนโลยีนิวเคลียร์ขั้นสูง โดยชี้ว่า ความก้าวหน้าทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการนำเทคโนโลยีไปใช้จริง หากยังขาดความพร้อมด้านกฎระเบียบ สถาบัน ตลาด สังคม และขีดความสามารถในการดำเนินโครงการ กรอบดังกล่าวจึงช่วยขยายการประเมิน SMR จากระดับความพร้อมของเทคโนโลยี ไปสู่การติดตามความพร้อมของระบบโดยรวมตั้งแต่ระยะพัฒนาเทคโนโลยีจนถึงการนำไปใช้เชิงพาณิชย์ [44]

ในด้านการอนุญาตและการกำกับดูแล Sam et al. (2023) แสดงให้เห็นว่า การออกใบอนุญาต SMR เผชิญความท้าทายจากความหลากหลายของแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ความไม่แน่นอนของข้อมูลการออกแบบ ความแตกต่างของกรอบกำกับดูแลระหว่างประเทศ และความจำเป็นในการประสานงานระหว่างผู้พัฒนาเทคโนโลยีกับหน่วยงานกำกับดูแลตั้งแต่ระยะต้น ประเด็นนี้สะท้อนว่า การบริหาร SMR ต้องครอบคลุมทั้งการ

จัดการข้อมูลเทคนิค เอกสารกรณีความปลอดภัย กระบวนการตัดสินใจ และการสื่อสารกับหน่วยงานกำกับดูแลอย่างต่อเนื่อง [45]

เมื่อพิจารณามิติธรรมาภิบาล Ramana & Blaise (2024) ให้ข้อสังเกตถึงความตึงเครียดระหว่างบทบาทของรัฐในฐานะผู้ส่งเสริมเทคโนโลยี SMR กับบทบาทของรัฐในฐานะผู้กำกับดูแลที่ต้องรักษาความเป็นอิสระและความน่าเชื่อถือ จึงเสนอให้การบริหารโครงการนิวเคลียร์ต้องมีการแยกบทบาท ความรับผิดชอบ และกลไกตรวจสอบถ่วงดุลอย่างชัดเจน เพื่อลดความเสี่ยงจากความขัดแย้งทางผลประโยชน์และรักษาความไว้วางใจของสาธารณชน [46] ขณะที่ Josephs et al. (2025) เสริมว่า การกำกับดูแล SMR ควรมีกลยุทธ์ที่ยืดหยุ่นและเหมาะสมกับลักษณะของเทคโนโลยีใหม่ ทั้งด้านการประเมินต้นทุน การบริหารความเสี่ยง การออกแบบกฎระเบียบ และการสร้างกรอบดำเนินงานที่รองรับความไม่แน่นอนของเทคโนโลยี ตลาด และสถาบัน [47]

นอกจากนี้ Cash-Gates et al. (2020) วิเคราะห์สาเหตุของต้นทุนเกินงบในการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และพบว่าปัญหามิได้เกิดจากเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับผลิตภาพแรงงาน ต้นทุนทางอ้อม การเปลี่ยนแปลงแบบ การกำกับดูแลโครงการ และความซับซ้อนของการส่งมอบงาน บทวิเคราะห์นี้มีนัยสำคัญต่อ SMR เนื่องจากแม้การผลิตแบบโมดูลอาจช่วยลดความซับซ้อนบางส่วน แต่การควบคุมต้นทุนและกำหนดการยังต้องอาศัยการบริหารโครงการ การจัดซื้อจัดจ้าง และการจัดการความเสี่ยงอย่างเป็นระบบตั้งแต่ระยะต้น [48]

โดยสรุป การบริหารจัดการ SMR ควรถูกออกแบบเป็นระบบบูรณาการที่ครอบคลุมการประสานงานระหว่างหน่วยงาน ความพร้อมเชิงสังคมและเทคนิค กระบวนการอนุญาต ธรรมาภิบาล ความเป็นอิสระของหน่วยงานกำกับดูแล และการรับมือกับความไม่แน่นอนตลอดวงจรโครงการ มุมมองนี้สอดรับกับกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่วางให้การบริหารจัดการเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ มิใช่เพียงงานสนับสนุนเชิงธุรการ แต่เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การตัดสินใจ การกำกับดูแล และการส่งมอบโครงการนิวเคลียร์สามารถดำเนินไปได้อย่างน่าเชื่อถือและรับผิดชอบ

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- จัดตั้งระบบบริหารคุณภาพตามมาตรฐานสากล
- กำหนดโครงสร้างการตัดสินใจและความรับผิดชอบองค์กร
- พัฒนาระบบบริหารความรู้และการถ่ายทอดองค์ความรู้
- ส่งเสริมภาวะผู้นำเพื่อความปลอดภัย ในทุกระดับองค์กร
- บูรณาการการบริหารจัดการโครงการกับระบบความปลอดภัย

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ออกแบบโครงสร้างการบริหาร

- ระบุองค์กรหลักและบทบาทชัดเจน
- เข้าใจข้อกำหนดระบบบริหารสากล
- ประเมินช่องว่างด้านการบริหารจัดการ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รู้ว่าโครงการต้องการระบบบริหารแบบใด”

ระยะที่ 2 สร้างระบบบริหารที่ใช้งานได้

- จัดตั้งระบบบริหารคุณภาพ
- กำหนดขั้นตอนตัดสินใจ
- พัฒนาระบบควบคุมการบริหารจัดการโครงการ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีระบบบริหารที่สามารถควบคุมโครงการได้จริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความสามารถองค์กร

- ระบบบริหารผ่านการใช้งานจริง
- การควบคุมโครงการมีเสถียรภาพ

- การถ่ายทอดองค์ความรู้ดำเนินได้ต่อเนื่อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “องค์กรสามารถบริหารโครงการระยะยาวได้อย่างยั่งยืน”

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย การเตรียมความพร้อมไม่ควรเริ่มจากการเลือกผู้ขายเทคโนโลยีเป็นลำดับแรก แต่ควรเริ่มจากการประเมินและพัฒนาขีดความสามารถของเจ้าของโครงการ รวมถึงการวางระบบธรรมาภิบาลโครงการที่สามารถกำกับดูแลสัญญา แบบออกแบบ ต้นทุน กำหนดเวลา คุณภาพ และความเสี่ยงได้อย่างเป็นเอกภาพ ก่อนนำไปสู่การตัดสินใจจัดซื้อเทคโนโลยี แม้ว่าประเทศไทยมีประสบการณ์บริหารโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ แต่โครงการนิวเคลียร์ต้องการมาตรฐานการบริหารที่เข้มงวดกว่า โดยเฉพาะระบบควบคุมคุณภาพและการบริหารความรู้ระยะยาว ความท้าทายคือการสร้างระบบองค์กรที่สามารถดำรงอยู่ได้ข้ามวัฏจักรการเมืองและการเปลี่ยนแปลงบุคลากร

การลงทุนด้านระบบบริหารตั้งแต่ระยะเริ่มต้นช่วยลดความเสี่ยงของโครงการในระยะยาว และเป็นเงื่อนไขสำคัญของความเชื่อมั่นทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ

ด้านที่ 4 การเงินและการลงทุน (Funding and financing)

การเงินและการลงทุนเป็นหนึ่งในปัจจัยชี้ขาดของโครงการนิวเคลียร์ เพราะโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นโครงสร้างพื้นฐานระยะยาวที่มีวงเงินลงทุนสูงและมีรอบเวลาคืนทุนหลายทศวรรษ [49-55] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าโครงการนิวเคลียร์ต้องอาศัยความมั่นคงเชิงนโยบาย กลไกบริหารความเสี่ยงทางการเงิน และความสามารถของรัฐในการสร้างความเชื่อมั่นแก่นักลงทุน เนื่องจากความไม่แน่นอนเชิงนโยบายจะสะท้อนโดยตรงในต้นทุนเงินทุน [1,2]

โครงการนิวเคลียร์แตกต่างจากโครงการพลังงานทั่วไปตรงที่ต้องบริหารความเสี่ยงระยะยาว ทั้งด้านกฎระเบียบ ราคาไฟฟ้า และความต่อเนื่องของรัฐ ประสบการณ์ระหว่างประเทศสะท้อนว่าประเทศที่มีความพร้อมทางเทคนิคแต่ไม่มีโครงสร้างการเงินที่มั่นคง มักเผชิญความล่าช้าและต้นทุนบานปลาย [51-55] นอกจากนี้ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Nuclear Energy Agency (NEA), Organization for Economic Co-operation and Development (OECD): OECD-NEA) ชี้ว่าต้นทุนทางการเงินอาจคิดเป็นสัดส่วนมากกว่าครึ่งหนึ่งของต้นทุนไฟฟ้านิวเคลียร์ทั้งหมด หากขาดโครงสร้างการเงินที่มีเสถียรภาพ [8]

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศแยกความหมายระหว่าง *เงินทุน (Funding)* และ *การจัดหาเงิน (Financing)* อย่างชัดเจน

เงินทุน หมายถึง ทรัพยากรของรัฐเพื่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน เช่น กฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร และการศึกษาความเป็นไปได้

การจัดหาเงิน หมายถึง กลไกทางการเงินของโรงไฟฟ้าเอง ซึ่งต้องออกแบบให้ลดความเสี่ยงนักลงทุนและสร้างความเชื่อมั่นระยะยาว [53]

สำหรับ SMR แม้ถูกเสนอว่าใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่า แต่ไม่ได้ลดความจำเป็นของกรอบการเงินเฉพาะทาง หากเปลี่ยนรูปแบบความเสี่ยงจาก “โครงการขนาดใหญ่ครั้งเดียว” เป็น “โครงการหลายช่วงต่อเนื่อง” ซึ่งยังต้องอาศัยกลไกสนับสนุนจากรัฐ เช่น รูปแบบการร่วมลงทุนระหว่างรัฐและเอกชน (Public–Private Partnership: PPP) การค้ำประกัน และการเงินระหว่างประเทศ [49-51]

ในเชิงเศรษฐศาสตร์ SMR อาจช่วยลดเงินลงทุนเริ่มต้นต่อหนึ่งโครงการเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ แต่ยังไม่อาจสรุปได้โดยอัตโนมัติว่าจะทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยลดลงเสมอไป Mignacca et al. (2020) ระบุว่า เศรษฐศาสตร์และการเงินของโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลยังมีช่องว่างความรู้หลายด้าน โดยเฉพาะอัตราการเรียนรู้จากการผลิตซ้ำ การผลิตในโรงงาน และรูปแบบการจัดหาเงินทุน [56] ขณะที่ Van Hee et al. (2024) ชี้ว่า ศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ของ SMR มิได้ขึ้นอยู่กับต้นทุนก่อสร้างเพียงอย่างเดียว แต่สัมพันธ์กับต้นทุนเงินลงทุน อัตราคิดลด ราคาขายไฟฟ้า ความสามารถในการผลิตซ้ำ และเงื่อนไขของตลาดพลังงาน กล่าวคือ SMR จะมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจได้ก็ต่อเมื่อมีเงื่อนไขทางการเงิน

และตลาดที่เอื้อต่อการลงทุน มิใช่อาศัยข้อได้เปรียบด้านขนาดหรือการผลิตแบบโมดูลเพียงอย่างเดียว [57] ในทำนองเดียวกัน Qu et al. (2025) วิเคราะห์เงื่อนไขด้านต้นทุนก่อสร้างและต้นทุนเดินเครื่องที่ทำให้ SMR สามารถแข่งขันได้ในตลาดยุโรป โดยพบว่า การลดต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้ามิได้เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติจากการลดขนาดเครื่องปฏิกรณ์ แต่ขึ้นอยู่กับระดับต้นทุนก่อสร้าง ระยะเวลาก่อสร้าง ต้นทุนการเดินเครื่อง ราคาไฟฟ้า และรูปแบบความต้องการพลังงาน [58] นอกจากนี้ Steigerwald et al. (2023) ยังเตือนว่า การประเมินต้นทุนของเทคโนโลยีนิวเคลียร์รุ่นใหม่มีความไม่แน่นอนสูง เนื่องจากข้อมูลการก่อสร้างจริงและประสบการณ์เชิงพาณิชย์ยังมีจำกัด จึงควรใช้การประเมินหลายสถานการณ์ วิเคราะห์ความอ่อนไหวของสมมติฐาน และพิจารณาความเสี่ยงจากการประเมินต้นทุนต่ำเกินไปตั้งแต่ระยะต้น [59] ส่วน Asuega et al. (2023) ใช้การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าของ SMR ขั้นสูง โดยพิจารณาทั้งสมรรถนะของเทคโนโลยี ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า และเงื่อนไขที่ทำให้เทคโนโลยีสามารถแข่งขันได้ งานดังกล่าวช่วยเสริมว่า การตัดสินใจด้านเงินทุนสำหรับ SMR ควรเปรียบเทียบหลายแบบเทคโนโลยีและหลายกรณีการใช้งาน มิใช่สรุปจากต้นทุนเฉลี่ยของ SMR เพียงค่าเดียว [60] ในอีกมุมหนึ่ง Wieser et al. (2025) ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้ง SMR ในพื้นที่โรงไฟฟ้าถ่านหินเดิม และชี้ว่า การใช้โครงสร้างพื้นฐานเดิม เช่น ระบบส่งไฟฟ้า พื้นที่อุตสาหกรรม และบุคลากรบางส่วน อาจช่วยลดภาระเงินลงทุนและความเสี่ยงด้านการพัฒนาโครงการได้ อย่างไรก็ตาม ความคุ้มค่าทางการเงินยังขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่เดิม ต้นทุนการปรับปรุง และเงื่อนไขตลาดพลังงานในแต่ละบริบท [61]

โดยสรุป การจัดหาเงินทุนและการวิเคราะห์ทางการเงินสำหรับ SMR ควรพิจารณาต้นทุนตลอดโครงการ ความไม่แน่นอนของต้นทุน เงื่อนไขตลาด รูปแบบการใช้งาน โอกาสในการใช้โครงสร้างพื้นฐานเดิม และกลไกแบ่งปันความเสี่ยงระหว่างรัฐ ผู้ลงทุน ผู้ประกอบการ และผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้น “ขนาดเล็ก” จึงมิได้หมายความว่า “การเงินง่าย” เสมอไป โดยเฉพาะในประเทศที่ยังไม่มีประสบการณ์ด้านโครงการนิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ หรือยังขาดกรอบการลงทุนที่น่าเชื่อถือและต่อเนื่องในระยะยาว ประเด็นนี้สอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่มองว่าความพร้อมด้านการเงินมิใช่เพียงการจัดหาแหล่งทุน แต่ต้องครอบคลุมความสามารถของประเทศในการประเมินต้นทุน ความเสี่ยง รูปแบบการลงทุน และความยั่งยืนทางเศรษฐกิจของโครงการตลอดวงจรชีวิต

กล่าวโดยสรุปสั้น ๆ ได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการสร้างเสถียรภาพทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- กำหนดยุทธศาสตร์เงินทุนระดับชาติ
- ออกแบบกลไกการจัดหาเงินที่ลดความเสี่ยงนักลงทุน
- พัฒนาระบบบริหารความเสี่ยงทางการเงิน
- จัดตั้งกองทุนสำหรับกากกัมมันตรังสี เชื้อเพลิงใช้แล้ว และการรื้อถอน
- กำหนดกลไกความรับผิดทางแพ่งด้านนิวเคลียร์

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางรากฐานเศรษฐศาสตร์โครงการ

- จัดทำยุทธศาสตร์เงินทุนของรัฐ
- ระบุแนวทางการจัดหาเงินที่เป็นไปได้

<u>หมุดหมายของระยะนี้</u> คือ “รัฐเข้าใจโครงสร้างเศรษฐศาสตร์ของโครงการ”

ระยะที่ 2 สร้างโครงสร้างการเงิน

- มีแผนเงินทุนอย่างเป็นทางการ
- กำหนดกลไกการจัดหาเงินแล้ว
- มียุทธศาสตร์บริหารความเสี่ยงทางการเงิน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "โครงการมีระบบการเงินที่ทำงานได้จริง"

ระยะที่ 3 ความมั่นคงทางการเงินระยะยาว

- มีรายได้รองรับการเดินเครื่อง
- มีกองทุนกากกัมมันตรังสี เชื้อเพลิงใช้แล้วและการรื้อถอน
- มีกลไกความรับผิดทางแพ่ง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "โครงการยืนอยู่ได้ทางเศรษฐศาสตร์ระยะยาว"

ประเทศไทยยังมิได้กำหนดกรอบงบประมาณสำหรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ รวมถึงยังไม่มีระบบการเงินเฉพาะสำหรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และการศึกษาเศรษฐศาสตร์ของโครงการ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะและแตกต่างจากโครงการโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ทั้งนี้ การออกแบบกลไกเศรษฐศาสตร์ตั้งแต่ระยะศึกษาความเป็นไปได้ถือเป็นขั้นตอนสำคัญ เพราะโครงสร้างทางการเงินไม่สามารถปรับแก้ไขได้โดยง่ายเมื่อโครงการเข้าสู่กระบวนการดำเนินงานแล้ว การเตรียมความพร้อมด้านระบบการเงินล่วงหน้าจะช่วยลดความเสี่ยงเชิงสถาบันและเพิ่มความเชื่อมั่นให้แก่ทั้งภาครัฐและเอกชน

การวางแผนการเงินจึงไม่ใช่เพียงเรื่องเงินลงทุน แต่เป็นการออกแบบระบบเศรษฐศาสตร์ที่ทำให้โครงการยั่งยืนในระยะยาว

ด้านที่ 5 กรอบกฎหมายด้านนิวเคลียร์ (Nuclear legal framework)

กรอบกฎหมายด้านนิวเคลียร์เป็นรากฐานเชิงสถาบันของความปลอดภัย ความรับผิด และความโปร่งใสของรัฐ เนื่องจากเทคโนโลยีนิวเคลียร์ไม่สามารถพึ่งพาเพียงมาตรฐานทางวิศวกรรม แต่ต้องตั้งอยู่บนโครงสร้างกฎหมายที่กำหนดอำนาจหน้าที่ ความรับผิด และกลไกตรวจสอบอย่างชัดเจน ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าประเทศที่เริ่มโครงการพลังงานนิวเคลียร์จำเป็นต้องมีกฎหมายนิวเคลียร์แบบครอบคลุม (Comprehensive nuclear law) ซึ่งครอบคลุมอย่างน้อยความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ การป้องกันอันตรายจากรังสี การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ และความรับผิดทางแพ่งต่อความเสียหายจากอุบัติเหตุ พร้อมทั้งต้องสอดคล้องกับตราสารระหว่างประเทศ [62,63]

กรอบกฎหมายไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือควบคุมกิจกรรม แต่เป็น "สัญญาทางสังคม" ที่สะท้อนความรับผิดของรัฐต่อความเสี่ยงระยะยาว คู่มือว่าด้วยกฎหมายนิวเคลียร์ (Handbook on Nuclear Law) ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศชี้ว่าประเทศที่มีกฎหมายชัดเจนตั้งแต่ระยะเริ่มต้นสามารถลดความไม่แน่นอนเชิงนโยบาย ลดความเสี่ยงทางการเงิน และเพิ่มความเชื่อมั่นของสาธารณะได้อย่างมีนัยสำคัญ [62,63]

โดยทั่วไป กรอบกฎหมายต้องครอบคลุมสามองค์ประกอบหลัก

(1) การเข้าร่วมตราสารทางกฎหมายระหว่างประเทศ

(2) การตรากฎหมายนิวเคลียร์แบบครอบคลุม

(3) การทบทวนกฎหมายอื่นที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่าทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศจะให้กรอบพื้นฐานด้านกฎหมายสำหรับโครงการนิวเคลียร์ แต่การพัฒนาโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) อาจทำให้กฎหมายเดิมไม่ครอบคลุมประเด็นใหม่หลายด้าน ซึ่ง Betkowski (2023) ชี้ให้เห็นว่า การนำ SMR ไปใช้จำเป็นต้องทบทวนว่ากฎหมายภายในประเทศสามารถรองรับลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยีใหม่ได้เพียงใด โดยเฉพาะเมื่อกรอบกฎหมายเดิมถูกออกแบบจากประสบการณ์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม ประเด็นนี้มีนัยว่า ประเทศที่พิจารณา SMR ต้องประเมินความพร้อมของกฎหมายในด้านการออกใบอนุญาต การกำกับดูแล การติดตั้งหลายหน่วย และบทบาทของผู้ดำเนินโครงการอย่างรอบด้าน [64] ขณะที่ Nriezedi-Anejionu (2024) เสนอว่า การพัฒนา SMR เพื่อสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนอาจจำเป็นต้องมีกรอบกฎหมายระหว่างประเทศที่ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจาก SMR เกี่ยวข้องกับการถ่ายทอดเทคโนโลยี ความร่วมมือข้ามพรมแดน การกำกับดูแลความปลอดภัย และความรับผิดชอบของรัฐผู้ใช้เทคโนโลยี มุมมองนี้ช่วยขยายให้เห็นว่า กฎหมายนิวเคลียร์สำหรับ SMR ไม่ควรถูกจำกัดอยู่เฉพาะกฎหมายภายในประเทศ แต่ต้องพิจารณาความเชื่อมโยงกับพันธกรณีระหว่าง

ประเทศด้วย [65] ต่อเนื่องจากประเด็นนี้ Nriezedi-Anejionu (2025) วิเคราะห์ความท้าทายทางกฎหมายของการทำให้ SMR เป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ในระดับโลกจากมุมมองกฎหมายการลงทุนระหว่างประเทศ โดยชี้ว่าการลงทุนใน SMR อาจเกี่ยวข้องกับสิทธิและความคุ้มครองของผู้ลงทุน ความรับผิดของรัฐ การถ่ายทอดเทคโนโลยี และข้อพิพาทระหว่างรัฐกับเอกชน จึงสะท้อนว่า ประเทศผู้รับเทคโนโลยีควรเตรียมกรอบกฎหมายและสัญญาการลงทุนอย่างรอบคอบตั้งแต่ระยะต้น [66] ในระดับการปฏิบัติตามข้อกำหนด Pal et al. (2025) เน้นว่า การนำ SMR ไปใช้จริงต้องเผชิญความแตกต่างของกรอบกฎหมายและข้อกำกับระหว่างประเทศ ทั้งในด้านการอนุญาต ความรับผิด การกำกับดูแล และการยอมรับตามข้อกำหนดทางเทคนิค จึงไม่ควรมองการเตรียมกฎหมายสำหรับ SMR เป็นเพียงการเพิ่มบทบัญญัติใหม่ แต่ควรประเมินความสอดคล้องของระบบกฎหมายทั้งชุดกับรูปแบบการออกแบบ การผลิต การติดตั้ง และการเดินเครื่องของ SMR [67] นอกจากนี้ McCauley (2026) ยังเติมมุมมองด้านความยุติธรรมด้านพลังงานและกระบวนการอนุญาตพื้นที่ โดยชี้ว่า การปรับกฎหมายเพื่อเร่งรัดโครงการพลังงานไม่ควรลดทอนสิทธิการมีส่วนร่วมของชุมชนหรือความชอบธรรมของกระบวนการตัดสินใจ ส่วน Roland (2023) ขยายประเด็นไปสู่ความรับผิดทางนิวเคลียร์ โดยพิจารณาว่าอนุสัญญาความรับผิดที่มีอยู่สามารถใช้กับ SMR รูปแบบต่าง ๆ ได้เพียงใด โดยเฉพาะกรณีการติดตั้งแบบโมดูล การขนส่ง และรูปแบบเจ้าของหรือผู้ดำเนินการที่ซับซ้อนขึ้น [68,69] โดยสรุป กฎหมายนิวเคลียร์สำหรับ SMR ควรถูกพิจารณาในฐานะระบบรองรับการกำกับดูแลตลอดวงจรโครงการ ครอบคลุมทั้งการออกใบอนุญาต การกำกับดูแล ความรับผิด การลงทุนระหว่างประเทศ สิทธิของชุมชน และพันธกรณีข้ามพรมแดน มุมมองนี้สอดคล้องกับกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่เน้นว่าความพร้อมด้านกฎหมายต้องสามารถสนับสนุนการใช้พลังงานนิวเคลียร์อย่างปลอดภัย มั่นคง โปร่งใส และมีความรับผิดชอบ มิใช่เพียงการปรับบทบัญญัติบางส่วนเพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่เท่านั้น

ดังนั้น กล่าวโดยสรุปสั้น ๆ ได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความพร้อมเชิงกฎหมายของรัฐในการรับผิดชอบความเสี่ยงระยะยาว”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- เข้าร่วมตราสารกฎหมายระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้อง
- ตรากฎหมายนิวเคลียร์แบบครอบคลุม
- ทบทวนกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับพลังงานและสิ่งแวดล้อม
- กำหนดกรอบความรับผิดทางแพ่ง
- สร้างกลไกบังคับใช้กฎหมายอย่างเป็นระบบ

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางรากฐานทางกฎหมาย

- วางแผนเข้าร่วมตราสารระหว่างประเทศ
- มีแผนพัฒนากฎหมายนิวเคลียร์
- มีแผนทบทวนกฎหมายอื่นที่เกี่ยวข้อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐเริ่มสร้างฐานกฎหมายของโครงการ”

ระยะที่ 2 ตรากฎหมายและบังคับใช้

- ปฏิบัติตามตราสารระหว่างประเทศ
- ตรากฎหมายนิวเคลียร์แล้ว
- ทบทวนกฎหมายที่เกี่ยวข้องแล้ว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “กรอบกฎหมายเริ่มทำงานได้จริง”

ระยะที่ 3 การบังคับใช้และการทบทวนอย่างต่อเนื่อง

- บังคับใช้กฎหมายได้จริงอย่างมีประสิทธิผล
- มีระบบติดตาม ทบทวน และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “กฎหมายมีเสถียรภาพและปรับตัวได้”

ประเทศไทยมีฐานกฎหมายสำคัญผ่านพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 และฉบับแก้ไข พ.ศ. 2562 และการเข้าร่วมกรอบความร่วมมือระหว่างประเทศหลายฉบับ อย่างไรก็ตาม กฎหมายปัจจุบันยังไม่ได้พัฒนาเพื่อรองรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือ SMR โดยเฉพาะ เนื่องจากยังมุ่งกำกับกิจกรรมนิวเคลียร์และรังสีในลักษณะทั่วไป และมีประสบการณ์เชิงปฏิบัติในบริบทของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยเป็นหลัก ดังนั้นการประเมินความพร้อมด้านกฎหมายของไทยจึงควรครอบคลุมมากกว่าประเด็นความปลอดภัย โดยรวมถึงความรับผิดทางนิวเคลียร์ ความเป็นเจ้าของโครงการ การขนส่ง การคัดเลือกสถานที่ตั้ง และภาระผูกพันด้านการรื้อถอนตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการด้วย

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเตือนว่าประเทศที่รอให้มีโครงการจริงก่อนจึงปรับกฎหมาย มักเผชิญความล่าช้าและต้นทุนเชิงสถาบันที่สูงขึ้น *การทบทวนกฎหมายล่วงหน้าจึงเป็นการลงทุนเชิงสถาบันที่ความเสี่ยงต่ำแต่ผลตอบแทนสูง แม้ยังไม่ตัดสินใจสร้างโรงไฟฟ้า*

ด้านที่ 6 การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear safeguards)

การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์เป็นกลไกระดับสากลที่มีเป้าหมายป้องกันการนำวัสดุนิวเคลียร์ไปสู่การใช้งานทางทหาร และสร้างความเชื่อมั่นระหว่างประเทศว่ากิจกรรมนิวเคลียร์ของรัฐมีวัตถุประสงค์เพื่อสันติเท่านั้น [41] ระบบการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตั้งอยู่บนกระบวนการรายงาน การตรวจสอบ และการตรวจยืนยัน โดยประเทศสมาชิกต้องพัฒนาระบบบัญชีและควบคุมวัสดุนิวเคลียร์ระดับชาติ (State System of Accounting for and Control of Nuclear Material: SSAC) ให้สอดคล้องกับข้อตกลงระหว่างประเทศ [70-72]

การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ไม่ใช่ข้อจำกัดของการพัฒนาเทคโนโลยี แต่เป็นเงื่อนไขของความร่วมมือระหว่างประเทศ ประเทศที่มีระบบการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ที่น่าเชื่อถือสามารถเข้าถึงเทคโนโลยี การลงทุน และความร่วมมือได้ง่ายขึ้น [71,72] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่าประเทศที่เริ่มต้นพัฒนาโครงการนิวเคลียร์ควรวางระบบการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ไม่ใช่ดำเนินการภายหลัง เพราะเมื่อกิจกรรมนิวเคลียร์ขยายตัว ปริมาณวัสดุนิวเคลียร์และความซับซ้อนของการควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก [1,2]

แม้ว่า SMR บางแบบอาจลดความถี่ในการเติมเชื้อเพลิง แต่ไม่ได้ทำให้การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ง่ายขึ้นโดยอัตโนมัติ โดยที่ Kim & Chirayath (2024) ชี้ว่า การใช้ SMR ในประเทศผู้เริ่มต้นโครงการนิวเคลียร์ยังต้องประเมินความเสี่ยงด้านการแพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์อย่างรอบด้าน โดยพิจารณาทั้งชนิดเชื้อเพลิง ระดับการเสริมสมรรถนะ รูปแบบการเดินเครื่อง การเข้าถึงวัสดุนิวเคลียร์ และขีดความสามารถของรัฐในการกำกับดูแล ประเด็นนี้สะท้อนว่า SMR มิได้ลดภาระด้านการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์โดยอัตโนมัติ หากแต่ต้องออกแบบระบบตรวจพิสูจน์ การทำบัญชีวัสดุนิวเคลียร์ และมาตรการกำกับดูแลให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยีและบริบทของประเทศผู้ใช้ [73] การกำกับดูแลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รุ่นใหม่อาจต้องอาศัยทั้งระบบบัญชีวัสดุนิวเคลียร์ เครื่องมือตรวจวัดรังสีขั้นสูง และการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เชื่อถือได้มากขึ้น Ryan et al. (2024) ยังเน้นว่า SMR และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กมาก (Microreactor) อาจสร้างความท้าทายใหม่ต่อระบบการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ เนื่องจากอาจมีรูปแบบการติดตั้งแบบกระจายตัว การขนส่งเป็นหน่วยสำเร็จรูป การเติมเชื้อเพลิงเฉพาะแบบ หรือระยะเวลาการเดินเครื่องที่ยาวขึ้น จึงควรพัฒนามาตรการพิทักษ์ความปลอดภัยไปพร้อมกับการออกแบบเทคโนโลยี โดยเฉพาะการตรวจติดตามระยะไกล การทำบัญชีวัสดุนิวเคลียร์ และการออกแบบโดยคำนึงถึงการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตั้งแต่ต้น [74,75]

โดยสรุป การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์สำหรับ SMR ไม่ควรถูกมองเป็นภารกิจตรวจสอบภายหลังการออกแบบ แต่ควรถูกบูรณาการตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของโครงการ ครอบคลุมการประเมินความเสี่ยงด้านการแพร่ขยาย การทำบัญชีวัสดุนิวเคลียร์ การตรวจติดตามอย่างต่อเนื่อง และเทคโนโลยีตรวจพิสูจน์ที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของ SMR และเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กมาก มุมมองนี้ช่วยขยายความหมายของ

“ความพร้อมด้านการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์” จากการมีระบบตรวจสอบตามข้อกำหนด ไปสู่ความสามารถของรัฐในการออกแบบ กำกับ และตรวจพิสูจน์การใช้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ได้อย่างน่าเชื่อถือตลอดวงจรโครงการ

ดังนั้น ประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการควบคุมวัสดุนิวเคลียร์ตามมาตรฐานสากล”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ยืนยันพันธกรณีการไม่แพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์
- จัดตั้งและยกระดับระบบบัญชี SSAC
- พัฒนาระบบรายงานและการตรวจสอบ
- สร้างบุคลากรเฉพาะทางด้านการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์
- ประสานงานกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศอย่างต่อเนื่อง

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ยืนยันพันธกรณีระหว่างประเทศ

- มีข้อตกลงการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์
- วางแผนเสริมความเข้มแข็งของระบบ SSAC
- ดำเนินการตามข้อเสนอแนะจากการประเมิน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐยืนยันความโปร่งใสและเข้าใจพันธกรณีระหว่างประเทศ”

ระยะที่ 2 สร้างระบบใช้งานจริง

- การยกระดับระบบ SSAC ที่กำลังดำเนินอยู่
- ระบบรองรับข้อกำหนดโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- รับรู้ข้อกำหนดข้อมูลการออกแบบ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ระบบการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ เริ่มทำงานในระดับโครงการจริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์การควบคุมวัสดุนิวเคลียร์

- ระบบ SSAC ทำงานได้เต็มรูปแบบสำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐสามารถควบคุมวัสดุนิวเคลียร์ได้ตามมาตรฐานสากล”

ดังนั้น หากประเทศไทยสนใจพัฒนาโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล ควรเตรียมความพร้อมด้านกฎหมาย บุคลากร ระบบบัญชีวัสดุนิวเคลียร์ เครื่องมือเฝ้าระวัง และความร่วมมือกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศและประเทศคู่ภาคีตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ซึ่งประเทศไทยเป็นภาคีสนธิสัญญาไม่แพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์ (Non-Proliferation of Nuclear Weapons Treaty: NPT) และดำเนินงานการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งนี้สะท้อนความน่าเชื่อถือในระดับนานาชาติ แต่อย่างไรก็ตาม หากมีการพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์หรือ SMR ระบบ NMAC/SSAC ต้องยกระดับสู่มาตรฐานโรงไฟฟ้าเต็มรูปแบบ ซึ่งต้องอาศัยบุคลากรเฉพาะทาง ระบบข้อมูล และกลไกประสานงานกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่เข้มแข็งยิ่งขึ้น

การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์จึงควรถูกมองเป็นโครงสร้างพื้นฐานเชิงสถาบันระยะยาว เพราะความโปร่งใสด้านนิวเคลียร์เป็นเงื่อนไขของความร่วมมือระหว่างประเทศ และเป็นฐานความเชื่อมั่นของโครงการในเวทีโลก

ด้านที่ 7 ระบบกำกับดูแล (Regulatory framework)

กรอบกฎหมายคือโครงสร้างพื้นฐานเชิงหลักการ ระบบกำกับดูแลคือกลไกที่ทำให้กฎหมายเกิดผลในทางปฏิบัติ [76-80] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่าหน่วยงานกำกับดูแลต้องมี ความเป็นอิสระเชิงหน้าที่ (functional independence) จากองค์กรผู้ส่งเสริมหรือผู้ดำเนินโครงการ [81] เพื่อหลีกเลี่ยงความขัดแย้งทางผลประโยชน์ และรักษาความน่าเชื่อถือของการตัดสินใจด้านความปลอดภัย

ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA ชี้ว่าประเทศที่มีบันทึกความปลอดภัยแข็งแรงล้วนแยกบทบาท “ผู้ส่งเสริม” และ “ผู้กำกับดูแล” ออกจากกันอย่างชัดเจน การกำกับดูแลที่มีประสิทธิภาพจึงไม่ใช่เพียงประเด็นด้านเทคนิค แต่เป็นเรื่องธรรมาภิบาล ความโปร่งใส และความรับผิดชอบต่อสาธารณะ [8]

ภายใต้กรอบหมุดหมายสำคัญ หน่วยงานกำกับดูแลต้องมีขีดความสามารถหลัก ได้แก่ การออกใบอนุญาต การตรวจสอบ การบังคับใช้กฎหมาย การประเมินความปลอดภัย และการสื่อสารกับสาธารณะ [82,83] ประเทศที่ไม่เคยมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มักเผชิญความท้าทายด้านบุคลากรและความเชี่ยวชาญ ซึ่งต้องอาศัยการสนับสนุนระยะยาวจากรัฐ [1,2]

สำหรับโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล แม้ว่าต้องการ “การปรับกรอบกำกับดูแลให้เหมาะสม” แต่ต้องมิใช่ “การผ่อนคลายมาตรฐานกำกับดูแล” โดยที่ Josephs et al. (2025) เสนอว่า การกำกับดูแล SMR ควรพัฒนาไปสู่แนวทางที่ยืดหยุ่นและอิงความเสี่ยงมากขึ้น เพื่อรองรับความหลากหลายของแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การผลิตแบบโมดูล การติดตั้งหลายหน่วย และการใช้งานในบริบทที่แตกต่างกัน โดยไม่ลดทอนมาตรฐานด้านความปลอดภัยและความมั่นคง ประเด็นนี้สะท้อนว่า การปรับกรอบกำกับดูแลไม่ควรถูกตีความว่าเป็นการผ่อนปรนข้อกำหนด หากแต่เป็นการออกแบบระบบกำกับที่สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงและลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี [47]

ในมิติด้านกฎหมายและการปฏิบัติตามข้อกำหนด Pal et al. (2025) ชี้ว่า การนำ SMR ไปใช้จริงต้องเผชิญความท้าทายจากความแตกต่างของกรอบกำกับดูแลระหว่างประเทศ โดยเฉพาะเมื่อ SMR มีรูปแบบการออกแบบ การผลิต การติดตั้ง และการเดินเครื่องที่ต่างจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม นัยสำคัญคือประเทศที่พิจารณา SMR ต้องทบทวนว่ากฎหมายและข้อกำหนดเดิมสามารถรองรับเทคโนโลยีใหม่นี้ได้เพียงใด และควรปรับปรุงส่วนใดเพื่อให้การกำกับดูแลมีความชัดเจน สอดคล้องกัน และบังคับใช้ได้จริง [67] ขณะที่ Sam et al. (2023) ทบทวนอุปสรรคด้านการออกใบอนุญาต SMR อย่างเป็นระบบ และพบว่า ความท้าทายสำคัญอยู่ที่ความไม่แน่นอนของแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ข้อมูลเทคนิคที่ยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ ความแตกต่างของข้อกำหนดระหว่างประเทศ และความจำเป็นในการประสานงานระหว่างผู้พัฒนาเทคโนโลยีกับหน่วยงานกำกับดูแลตั้งแต่ระยะต้น ข้อค้นพบนี้แสดงให้เห็นว่า การออกใบอนุญาต SMR ต้องอาศัยการบริหารข้อมูล การพิจารณากรณีความปลอดภัย และกระบวนการตัดสินใจที่โปร่งใส ต่อเนื่อง และตรวจสอบได้ [45] เมื่อพิจารณาร่วมกับ Ramana & Blaise (2024) กรอบกำกับดูแลสำหรับ SMR ยังต้องระมัดระวังความตึงเครียดระหว่างบทบาทของรัฐในฐานะผู้ส่งเสริมเทคโนโลยีกับบทบาทของรัฐในฐานะผู้กำกับดูแลที่ต้องรักษาความเป็นอิสระ งานดังกล่าวช่วยเติมมุมมองด้านธรรมาภิบาลว่า การเร่งรัดการออกใบอนุญาตหรือการสนับสนุน SMR ไม่ควรทำให้มาตรฐานการกำกับดูแล ความโปร่งใส และความน่าเชื่อถือของสถาบันลดลง [46] โดยสรุป กรอบกำกับดูแลสำหรับ SMR ควรถูกพัฒนาให้มีความยืดหยุ่นเพียงพอต่อเทคโนโลยีใหม่ แต่หนักแน่นพอที่จะรักษาหลักการพื้นฐานด้านความปลอดภัย ความมั่นคง ความเป็นอิสระของหน่วยงานกำกับดูแล และความน่าเชื่อถือของกระบวนการออกใบอนุญาต กล่าวอีกนัยหนึ่ง ความพร้อมด้านกฎระเบียบสำหรับ SMR มิได้อยู่ที่การลดขั้นตอนให้เร็วขึ้นเท่านั้น แต่อยู่ที่ความสามารถของรัฐในการกำกับเทคโนโลยีที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงเร็วได้อย่างรอบคอบ โปร่งใส และรับผิดชอบ ซึ่งเป็นสาระสำคัญที่สอดรับกับแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ

กล่าวโดยสรุปได้ว่า ประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการกำกับดูแลโครงการอย่างอิสระ มีมาตรฐาน และน่าเชื่อถือ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- จัดตั้งหน่วยงานกำกับดูแลที่เป็นอิสระ
- พัฒนากฎระเบียบสอดคล้องมาตรฐานทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ
- สร้างขีดความสามารถด้านเทคนิค 3S (Safety, Security, Safeguards)
- จัดสรรงบประมาณและทรัพยากรอย่างเพียงพอ

- สร้างความร่วมมือกับหน่วยงานกำกับดูแลของต่างประเทศ

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางฐานระบบกำกับดูแล

- มีแผนพัฒนากรอบกำกับดูแล
- ระบุโครงสร้างหน่วยงานกำกับ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "รัฐยอมรับความจำเป็นของการกำกับดูแลอิสระ"

ระยะที่ 2 ทำให้หน่วยงานกำกับทำงานได้จริง

- จัดตั้งหน่วยงานกำกับอิสระแล้ว
- มีกฎระเบียบสำหรับสถานที่ตั้งและการก่อสร้าง
- มีบุคลากรและทรัพยากรใช้งานได้จริง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "ระบบกำกับดูแลเริ่มทำงานในเชิงปฏิบัติ"

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความเข้มแข็งของระบบกำกับ

- มีกฎระเบียบสำหรับการเดินเครื่อง
- หน่วยงานกำกับมีงบประมาณเพียงพอ
- มีความร่วมมือระหว่างประเทศด้านการกำกับดูแล

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "ระบบกำกับดูแลสามารถควบคุมโครงการระยะยาวได้"

ดังนั้น ประเทศไทยไม่ควรลดมาตรฐานความปลอดภัยเพื่อเร่งรัดโครงการ แต่ควรพัฒนากรอบกำกับดูแลที่จำแนกระดับตามความเสี่ยง อิงหลักฐานด้านความเสี่ยง และสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี โดยยังคงความเป็นอิสระ ความเข้มแข็ง และความน่าเชื่อถือของหน่วยงานกำกับดูแลไว้เป็นหลัก ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีโครงสร้างกำกับดูแลที่แยกจากผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นจุดแข็งเชิงสถาบัน อย่างไรก็ตาม การขยายบทบาทสู่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์หรือ SMR จำเป็นต้องยกระดับบุคลากร งบประมาณ และความสามารถเชิงเทคนิค ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเตือนว่าความล่าช้าในการพัฒนาหน่วยงานกำกับดูแลเป็นหนึ่งในความเสี่ยงหลักของประเทศใหม่ที่เพิ่งเริ่มโครงการ

การลงทุนล่วงหน้าในศักยภาพของหน่วยงานกำกับดูแลจึงเป็น **การรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ของรัฐ** ไม่ใช่การผูกมัดเชิงนโยบาย

ด้านที่ 8 ระบบการป้องกันอันตรายจากรังสี (Radiation protection)

ระบบการป้องกันอันตรายจากรังสีเป็นกลไกหลักในการคุ้มครองผู้ปฏิบัติงาน ประชาชน และสิ่งแวดล้อม [84-86] หลักการสากลกำหนดให้ควบคุมการได้รับรังสีต่ำกว่าขีดจำกัด และยึดหลัก ALARA (As low as reasonably achievable) ให้ได้รับขั้นต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้อย่างสมเหตุสมผล ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบกำกับดูแลด้านรังสีทั่วโลก [54] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าระบบป้องกันอันตรายจากรังสีต้องเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพื้นฐานตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อมของโครงการ ไม่ใช่จัดทำเพิ่มเติมเมื่อโรงไฟฟ้าเริ่มเดินเครื่องแล้ว [1,2]

โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นไม่ได้หมายถึงเครื่องมือวัดปริมาณรังสีเพียงอย่างเดียว แต่เป็น "ระบบระดับชาติ" ที่ประกอบด้วยห้องปฏิบัติการมาตรวิทยา เครือข่ายตรวจวัดรังสี ระบบเฝ้าตรวจตราปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม การอบรมเจ้าหน้าที่ และระบบรายงานเหตุการณ์ ทั้งหมดต้องทำงานเชื่อมโยงกัน ไม่ใช่หน่วยงานแยกส่วน [84-86] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA เน้นว่าความต่อเนื่องของข้อมูลและความโปร่งใสเป็นหัวใจของความเชื่อมั่นสาธารณะ เพราะข้อมูลการได้รับปริมาณรังสีคือฐานความเชื่อถือของรัฐในระยะยาว [8]

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องการระบบเฝ้าตรวจตราทางรังสีระดับประเทศที่ทำงานตลอดอายุโครงการ ไม่ใช่เฉพาะช่วงก่อสร้าง การลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานการป้องกันทางรังสีจึงเป็นการสร้าง "ระบบสุขภาพและสิ่งแวดล้อมระยะยาว" ที่รองรับทั้งงานนิวเคลียร์และงานรังสีทั่วไป [84]

การป้องกันอันตรายจากรังสีสำหรับ SMR ไม่ควรจำกัดอยู่เฉพาะช่วงการเดินเครื่อง แต่ต้องครอบคลุมตั้งแต่ปริมาณสารกัมมันตรังสีต้นกำเนิด การกำบังรังสี เชื้อเพลิงใช้แล้ว การประเมินปริมาณรังสีในภาวะฉุกเฉิน และการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ งานด้านการออกแบบกำบังรังสียังสะท้อนว่า มาตรการป้องกันรังสีต้องสอดคล้องกับชนิด แหล่งกำเนิดรังสี และลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละแบบ (Bagheri et al., 2025) [87] โดยสรุป ผลการศึกษาข้างต้นชี้ว่า การป้องกันอันตรายจากรังสีสำหรับ SMR ต้องเป็นการประเมินตลอดวัฏจักรโครงการ ตั้งแต่การออกแบบ การเดินเครื่อง การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้ว ไปจนถึงการเตรียมพร้อมฉุกเฉิน มุมมองนี้สอดรับกับหลักการของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่ให้ความสำคัญกับการป้องกันรังสีในฐานะระบบความปลอดภัยแบบต่อเนื่อง มิใช่มาตรการเฉพาะช่วงเดินเครื่องหรือเฉพาะสถานการณ์ใดสถานการณ์หนึ่งเท่านั้น

กล่าวโดยสรุปได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการคุ้มครองประชาชนจากการได้รับรังสีอย่างเป็นระบบ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- พัฒนาระบบตรวจวัดและติดตามปริมาณการได้รับรังสีระดับประเทศ
- พัฒนาศักยภาพห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาทางรังสี
- จัดตั้งเครือข่ายเฝ้าตรวจตราปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม
- พัฒนาโปรแกรมฝึกอบรมเจ้าหน้าที่
- สร้างระบบรายงานเหตุการณ์และฐานข้อมูลระยะยาว

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ระบุช่องว่างและวางแผนยกระดับ

- ระบุและวางแผนยกระดับระบบการป้องกันอันตรายจากรังสี
- ประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานปัจจุบัน

<u>หมุดหมายของระยะนี้</u> คือ “รัฐรู้ว่าระบบการป้องกันอันตรายจากรังสีต้องยกระดับตรงไหน”

ระยะที่ 2 สร้างโครงสร้างพื้นฐานใช้งานจริง

- มีแผนขยายโครงสร้างพื้นฐาน
- มีโครงการฝึกอบรมบุคลากร
- เริ่มติดตั้งเครือข่ายตรวจวัดปริมาณรังสี

<u>หมุดหมายของระยะนี้</u> คือ “ระบบเฝ้าตรวจตราทางรังสีเริ่มทำงานได้จริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์การควบคุมปริมาณการได้รับรังสีระยะยาว

- มีอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีพร้อมใช้
- มีระบบควบคุมการได้รับปริมาณรังสีระหว่างเดินเครื่อง
- มีฐานข้อมูลเฝ้าระวังระยะยาว

<u>หมุดหมายของระยะนี้</u> คือ “รัฐควบคุมความเสี่ยงทางรังสีได้จริงตลอดอายุโครงการ”

ดังนั้น ประเทศไทยควรพัฒนาสมรรถนะด้านการประเมินปริมาณรังสี การวิเคราะห์การกำบังรังสี และการเฝ้าระวังรังสีในสิ่งแวดล้อม ก่อนเข้าสู่การพัฒนาโครงการจริง แม้ว่าประเทศไทยมีโครงสร้างพื้นฐานรังสีที่เข้มแข็งจากการใช้งานทางการแพทย์ ภาคอุตสาหกรรม และการวิจัย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญ อย่างไรก็ตาม การรองรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องขยายศักยภาพทั้งด้านเครื่องมือ บุคลากร และเครือข่ายเฝ้าระวังระดับประเทศให้เชื่อมโยงเป็นระบบเดียวกัน

ระบบป้องกันอันตรายจากรังสีจึงควรถูกมองเป็น *โครงสร้างพื้นฐานด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของชาติ* ไม่ใช่เพียงมาตรการทางเทคนิค

ด้านที่ 9 โครงข่ายไฟฟ้า (Electrical grid)

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพสูง เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานฐาน (Base load) ที่ออกแบบให้เดินเครื่องต่อเนื่องระยะยาว [88] กรอบโครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าความมั่นคงของโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเงื่อนไขพื้นฐานของการดำเนินโครงการนิวเคลียร์ เพราะความไม่เสถียรของระบบไฟฟ้าอาจส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินเครื่องและความพร้อมของระบบสนับสนุนโดยตรง [1,2]

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์โดยทั่วไป จะมีกำลังการผลิตที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบไฟฟ้าของประเทศ จึงต้องประเมินขนาดโครงข่าย ความเชื่อถือได้ (Reliability) และความสามารถในการรองรับเหตุขัดข้อง รวมถึงการวางแผนกำลังสำรองและการควบคุมโหลดตั้งแต่ระยะเริ่มต้น เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงด้านเสถียรภาพระบบ

ในบริบทของ SMR เทคโนโลยีที่มีกำลังผลิตต่อหน่วยต่ำกว่านี้มักถูกเสนอว่าเหมาะกับโครงข่ายไฟฟ้าขนาดกลาง การเพิ่มกำลังผลิตแบบค่อยเป็นค่อยไป ระบบนอกโครงข่ายหลัก และระบบที่มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนสูง อย่างไรก็ตาม ความยืดหยุ่นเชิงเทคนิคดังกล่าวจะเกิดประโยชน์ได้จริงก็ต่อเมื่อมีการวางแผนระบบพลังงานระดับชาติอย่างเป็นระบบ มิฉะนั้น SMR อาจกลายเป็นภาระต่อโครงข่ายไฟฟ้ามากกว่าจะเป็นเครื่องมือเสริมเสถียรภาพของระบบ ซึ่งทาง Gao et al. (2022) แสดงให้เห็นว่า SMR อาจมีบทบาทแตกต่างกันในระบบไฟฟ้าคาร์บอนต่ำของแคนาดา ทั้งในพื้นที่ที่ยังพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล พื้นที่ที่มีพลังงานหมุนเวียนผันแปรสูง และพื้นที่ห่างไกล [89] ขณะที่ Michaelson & Jiang (2021) ชี้ว่า การบูรณาการ SMR กับไมโครกริดพลังงานหมุนเวียนอาจช่วยเพิ่มความมั่นคงของระบบ แต่ยังต้องพิจารณาความไม่แน่นอนของพลังงานหมุนเวียน การกักเก็บพลังงาน และการควบคุมระบบไฟฟ้าอย่างรอบด้าน [90] นอกจากนี้ Nian & Zhong (2020) ยังเน้นว่าการผลิตพลังงานแบบยืดหยุ่นจาก SMR ต้องประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ควบคู่กับการวางแผนระบบพลังงานแบบบูรณาการ [91] โดยสรุป ศักยภาพของ SMR ในระบบไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดหรือความยืดหยุ่นของเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความสามารถของประเทศในการวางแผนระบบไฟฟ้า โครงข่ายพลังงาน การกักเก็บพลังงาน และกลไกตลาดให้รองรับการเดินเครื่องจริงได้อย่างสอดคล้องกัน ประเด็นนี้ช่วยขยายกรอบการพิจารณาของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศจากความพร้อมด้านเทคโนโลยีไปสู่ความพร้อมของระบบพลังงานโดยรวมที่ SMR จะเข้าไปเป็นส่วนหนึ่ง

กล่าวโดยรวมได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความพร้อมของโครงสร้างพลังงานระดับประเทศ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ประเมินเสถียรภาพและขนาดโครงข่ายไฟฟ้า
- วางแผนยกระดับโครงข่ายรองรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
- จัดเตรียมระบบสำรองและควบคุมโหลด
- ประสานแผนพลังงานนิวเคลียร์กับพลังงานหมุนเวียน
- สร้างกลไกประสานงานระหว่างผู้เดินเครื่องกับบริษัทโครงข่ายไฟฟ้า

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ประเมินข้อจำกัดของโครงข่าย

- พิจารณาข้อกำหนดของโครงข่ายไฟฟ้าแล้ว
- ระบุข้อจำกัดเชิงระบบ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐเข้าใจขีดความสามารถของโครงข่ายปัจจุบัน”

ระยะที่ 2 แปลงผลการศึกษาเป็นแผนลงทุน

- มีการศึกษารายละเอียดการยกระดับโครงข่าย
- มีแผน เงินทุน และกำหนดการรองรับแล้ว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีแผนยกระดับโครงข่ายที่ตรวจสอบได้”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความเชื่อถือได้ของระบบ

- ประสานงานองค์กรเดินเครื่องและโครงข่าย
- ดำเนินการตามแผนยกระดับแล้ว
- แสดงความเชื่อถือได้ของโครงข่าย

หมุดหมายของระยะนี้ คือ "โครงข่ายรองรับโรงไฟฟ้าได้ในสภาพปฏิบัติการจริง"

ดังนั้นสำหรับประเทศไทย การประเมินความเหมาะสมของ SMR ไม่ควรพิจารณาเฉพาะกำลังผลิตติดตั้งของเครื่องปฏิกรณ์เท่านั้น แต่ควรครอบคลุมข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า กำลังสำรองของระบบ ความสามารถในการปรับกำลังผลิตตามภาระไฟฟ้า ข้อจำกัดของระบบส่งไฟฟ้า และการทำงานร่วมกับพลังงานหมุนเวียนอย่างเป็นระบบ แม้ว่าประเทศไทยมีโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมโยงทั่วประเทศและมีเสถียรภาพในระดับสูง ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบเชิงเทคนิค แต่การบูรณาการพลังงานนิวเคลียร์กับพลังงานหมุนเวียนยังจำเป็นต้องอาศัยการวางแผนระยะยาว ทั้งด้านโครงข่ายไฟฟ้า โครงสร้างกำลังผลิต กลไกบริหารความผันผวน และบทบาทของ SMR ในระบบพลังงานโดยรวม

โครงข่ายไฟฟ้าจึงควรถูกมองเป็น *แกนกลางของระบบพลังงานอนาคต* ไม่ใช่เพียงโครงสร้างรองรับ

ด้านที่ 10 การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ (Human resource development)

การพัฒนาโครงการนิวเคลียร์ไม่สามารถพึ่งพาเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว เพราะหัวใจของระบบทั้งหมดคือ **"มนุษย์"** กรอบโครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุชัดว่า *ทรัพยากรมนุษย์เป็นเงื่อนไขตั้งต้นของโครงการนิวเคลียร์ เนื่องจากทุกมิติของความปลอดภัย การกำกับดูแล และการดำเนินงานล้วนขึ้นกับความสามารถของบุคลากร และต้องรักษาความต่อเนื่องของความรู้ข้ามรุ่นในระยะยาว* [92,93]

กำลังคนที่เกี่ยวข้องไม่ได้จำกัดเฉพาะวิศวกรนิวเคลียร์ แต่ครอบคลุมผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา ตั้งแต่วิศวกรรม เครื่องกล ไฟฟ้า ระบบควบคุม ฟิสิกส์รังสี แพทย์ เจ้าหน้าที่กำกับดูแล ผู้เชี่ยวชาญกฎหมาย การเงิน ไปจนถึงผู้บริหารโครงการ *โครงสร้างบุคลากรของโครงการนิวเคลียร์จึงเป็น "ระบบนิเวศวิชาชีพ" ที่ต้องทำงานประสานกันอย่างต่อเนื่อง* [94,95]

การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ด้านนิวเคลียร์ไม่ควรถูกจำกัดอยู่เพียงการส่งบุคลากรไปอบรมระยะสั้น แต่ควรมองเป็นระบบสร้างสมรรถนะระยะยาวที่ครอบคลุมหน่วยงานกำกับดูแล ผู้ดำเนินโครงการ หน่วยสนับสนุนทางเทคนิค มหาวิทยาลัย เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย หน่วยรับมือเหตุฉุกเฉิน และภาคอุตสาหกรรม งานศึกษาด้านการสร้างขีดความสามารถบุคลากรนิวเคลียร์ในยุโรปชี้ว่า การรักษาบุคลากร เครือข่ายความรู้ และความต่อเนื่องของความเชี่ยวชาญมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าการผลิตบัณฑิตใหม่ (Dieguez Porras et al., 2024) [96] ขณะที่ Egieya et al. (2022) แสดงให้เห็นว่า ประเทศผู้เริ่มต้นโครงการนิวเคลียร์จำเป็นต้องวิเคราะห์ความต้องการบุคลากรล่วงหน้าอย่างเป็นระบบ ทั้งในด้านจำนวน สาขาความเชี่ยวชาญ ระยะเวลาการพัฒนา และบทบาทของสถาบันการศึกษาและหน่วยงานรัฐ [97] ต่อมา Egieya et al. (2023) ยังชี้ว่า แม้ SMR จะมีขนาดเล็กกว่าและอาจใช้ระบบอัตโนมัติมากขึ้น แต่ยังต้องการบุคลากรด้านการเดินเครื่อง การซ่อมบำรุง ความปลอดภัย การกำกับดูแล และการสนับสนุนทางเทคนิคอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การวางแผนการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์สำหรับ SMR จึงควรอิงรูปแบบการเดินเครื่องจริง จำนวนหน่วยเครื่องปฏิกรณ์ และภารกิจตลอดวงจรโครงการ มิใช่พิจารณาจากขนาดกำลังผลิตเพียงอย่างเดียว [98] นอกจากนี้ Orikpete et al. (2023) ยังสะท้อนว่า สำหรับประเทศกำลังพัฒนา การนำเข้าเทคโนโลยีนิวเคลียร์ต้องดำเนินควบคู่กับการสร้างขีดความสามารถภายในประเทศ ทั้งด้านการศึกษา การฝึกอบรม สถาบัน โครงสร้างพื้นฐาน การเงิน และกรอบกำกับดูแล [99] ซึ่งสอดคล้องกับ OECD/NEA (2012) ที่เน้นว่า การศึกษา การฝึกอบรม และการถ่ายทอดความรู้เป็นเงื่อนไขสำคัญต่อความปลอดภัยและความยั่งยืนของกิจการนิวเคลียร์ [100] โดยสรุป ความเสี่ยงสำคัญของประเทศผู้เริ่มต้นโครงการอาจไม่ใช่เพียงการขาดเทคโนโลยี แต่คือการขาดความต่อเนื่องของกำลังคนและความรู้เชิงสถาบัน ซึ่งอาจนำไปสู่คอขวดในช่วงก่อสร้าง การออกใบอนุญาต การเดินเครื่อง และการกำกับ

ดูแลในระยะยาว มุมมองนี้ช่วยให้การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ตามกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่ควรเข้าใจในฐานะ “ระบบความสามารถของประเทศ” มากกว่ากิจกรรมฝึกอบรมเป็นรายครั้ง

สำหรับ SMR แม้โรงไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กลง แต่ความต้องการบุคลากรทักษะสูงกลับเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะด้านระบบดิจิทัล ความปลอดภัยเชิงวิเคราะห์ การควบคุมขั้นสูง และความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cybersecurity) ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่า *SMR เปลี่ยนลักษณะความต้องการจาก “แรงงานจำนวนมาก” ไปสู่ “ผู้เชี่ยวชาญทักษะสูง” ที่ต้องฝึกอบรมลึกและต่อเนื่อง*

กล่าวโดยรวมได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการสร้างและรักษาระบบความรู้ระยะยาว”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ระบุทักษะและสมรรถนะที่โครงการต้องใช้
- เชื่อมระบบการศึกษากับความต้องการจริงของโครงการ
- พัฒนาเส้นทางอาชีพเฉพาะทาง
- สร้างระบบรับรองสมรรถนะ
- รักษาบุคลากรในระยะยาว
- พัฒนาการฝึกอบรม และการฝึกฝนกับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)
- สร้างความร่วมมือระหว่างประเทศ

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ระบุช่องว่างและวางแผนพัฒนา

- ระบุความรู้และทักษะที่จำเป็นแล้ว
- ประเมินช่องว่างระบบการศึกษา
- วางแผนพัฒนาทรัพยากรมนุษย์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐรู้ว่าต้องสร้างคนแบบไหน”

ระยะที่ 2 แปลงเป็นยุทธศาสตร์ระดับชาติ

- ระบุทักษะสำหรับระยะก่อสร้างและเดินเครื่อง
- มีแผนพัฒนาและรักษาบุคลากร
- มียุทธศาสตร์กำลังคนระดับชาติ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ระบบผลิตคนเชื่อมกับความต้องการจริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์การทำงานของระบบกำลังคน

- โครงการพัฒนาบุคลากรของหน่วยงานเดินเครื่องที่ทำงานได้จริง
- ระบบพัฒนาบุคลากรของหน่วยงานกำกับดูแลที่ทำงานได้จริง
- มีโครงการการศึกษา และการวิจัยและพัฒนา (R&D) ระดับชาติ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ระบบผลิต–พัฒนา–รักษาคน ทำงานได้จริง”

หากประเทศไทยพิจารณาพัฒนาโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล ควรจัดทำแผนพัฒนากำลังคนระยะยาวในลักษณะแผนดำเนินงานเป็นระยะ ที่เชื่อมโยงมหาวิทยาลัย หน่วยงานกำกับดูแล ศูนย์วิจัย ผู้ดำเนินโครงการ และภาคอุตสาหกรรมเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ แผนดังกล่าวควรครอบคลุมการเรียนการสอน การวิจัยระดับสูง การฝึกปฏิบัติจริง การฝึกจำลองสถานการณ์ ความร่วมมือระหว่างประเทศ และเส้นทางอาชีพในหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การพัฒนาบุคลากรสอดคล้องกับช่วงเวลาของโครงการนิวเคลียร์ระดับชาติ

ประเทศไทยมีฐานบุคลากรด้านรังสี วิศวกรรมนิวเคลียร์ วิศวกรรมพลังงาน และสาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ที่เกี่ยวข้องอยู่แล้ว ซึ่งถือเป็นทุนทรัพยากรมนุษย์ตั้งต้นที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม ระบบการพัฒนากำลังคนยังไม่ได้ถูกออกแบบเป็นแผนเชิงบูรณาการระยะยาว 20–30 ปี ซึ่งสอดคล้องกับวงจรการพัฒนาโครงการ

นิวเคลียร์ การเตรียมกำลังคนจึงควรเริ่มตั้งแต่ระดับมหาวิทยาลัยและดำเนินต่อเนื่องไปจนถึงหน่วยงานกำกับดูแล ผู้ดำเนินโครงการ ศูนย์วิจัย และภาคอุตสาหกรรม เพื่อหลีกเลี่ยงคอขวดด้านบุคลากรในอนาคต [101] *ในเชิงยุทธศาสตร์ กำลังคนไม่ควรถูกมองเป็นเพียงทรัพยากรสนับสนุนโครงการ แต่ควรถูกพิจารณาเป็นการลงทุนระดับชาติที่กำหนดศักยภาพของระบบนิวเคลียร์ไทยในระยะยาว*

ด้านที่ 11 การสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder engagement)

การยอมรับของสังคมเป็นปัจจัยกำหนดความสำเร็จของโครงการนิวเคลียร์ในหลายประเทศ และเป็นประเด็นที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว กรอบโครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่า *การสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต้องเริ่มตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อม ไม่ใช่รอจนถึงช่วงตัดสินใจก่อสร้าง เพราะความเชื่อมั่นของสังคมต้องใช้เวลาในการสร้าง และไม่สามารถเร่งให้เกิดขึ้นในช่วงท้ายของโครงการได้* [1,2,102-105]

ประสบการณ์ระหว่างประเทศสะท้อนว่า หากการสื่อสารเริ่มหลังการตัดสินใจแล้ว มักถูกตีความว่าเป็นการยืนยันสิ่งที่กำหนดไว้ มากกว่าการเปิดพื้นที่ให้สังคมมีส่วนร่วมจริง [105] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA เน้นว่าการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพไม่ใช่การโน้มน้าว แต่คือการสร้างความเข้าใจร่วมบนฐานข้อมูลที่ตรวจสอบได้ [8]

ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียไม่ได้หมายถึงประชาชนทั่วไปเท่านั้น แต่รวมถึงชุมชนท้องถิ่น หน่วยงานรัฐ อุตสาหกรรม นักวิชาการ สื่อ และองค์กรระหว่างประเทศ ซึ่งล้วนมีบทบาทต่อความไว้วางใจและความชอบธรรมของโครงการ [61]

สำหรับ SMR แม้เทคโนโลยีนี้มักถูกนำเสนอว่ามีความปลอดภัยสูงกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม แต่การสื่อสารต่อสาธารณชนต้องตั้งอยู่บนข้อมูลที่ตรวจสอบได้ มิใช่ถ้อยคำเชิงการตลาดหรือการกล่าวอ้างเกินหลักฐานรองรับ เพราะอาจบั่นทอนความเชื่อมั่นของสังคมในระยะยาว [1,2] ดังนั้น การสร้างการยอมรับต่อ SMR จึงไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการเผยแพร่ข้อมูล แต่ควรพัฒนาไปสู่กระบวนการมีส่วนร่วมที่เปิดให้ประชาชนรับรู้ ซักถาม ตรวจสอบ และสะท้อนข้อกังวลตั้งแต่ระยะเริ่มต้น โดยที่ Durdovic et al. (2024) แสดงให้เห็นว่าทัศนคติของสังคมต่อพลังงานนิวเคลียร์มิได้ถูกกำหนดจากประเด็นด้านเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่สัมพันธ์กับบริบทด้านความมั่นคงทางพลังงาน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความไว้วางใจต่อสถาบัน และการรับรู้ความเสี่ยงของประชาชน [16] ประเด็นนี้สะท้อนว่า การยอมรับพลังงานนิวเคลียร์เป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเหตุผลเชิงพลังงานกับความเชื่อมั่นทางสังคม ไม่ใช่ผลจากการนำเสนอข้อดีของเทคโนโลยีเพียงด้านเดียว ในขณะที่ Hlavacek et al. (2023) ศึกษาการยอมรับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็กในระดับชุมชน และพบว่าปัจจัยสำคัญเกี่ยวข้องกับความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยี ความกลัวต่อพลังงานนิวเคลียร์ ความไว้วางใจต่อรัฐบาล การรับข้อมูลผ่านสื่อ และระยะห่างของที่ตั้งโครงการจากที่อยู่อาศัย [106] ผลดังกล่าวชี้ว่า ขนาดที่เล็กลงของเครื่องปฏิกรณ์มิได้ทำให้การยอมรับจากชุมชนเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ หากประชาชนยังมีข้อกังวลต่อความเสี่ยง ความโปร่งใส หรือผลกระทบต่อพื้นที่ของตนเอง ในทำนองเดียวกัน Tuler & Webler (2024) เน้นว่า การยอมรับของชุมชนต่อโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็กยังเป็นความท้าทายเฉพาะ เนื่องจากชุมชนไม่ได้ประเมินเทคโนโลยีจากคุณลักษณะทางวิศวกรรมเท่านั้น แต่พิจารณาควบคู่กับความเป็นธรรมของกระบวนการตัดสินใจ ความโปร่งใสของข้อมูล ความน่าเชื่อถือของผู้ดำเนินโครงการ และผลกระทบต่อพื้นที่ตั้ง [107] ดังนั้น การสื่อสารเกี่ยวกับ SMR จึงควรมุ่งสร้างความเข้าใจ ความไว้วางใจ และพื้นที่สนทนาที่มีคุณภาพ มากกว่าการโน้มน้าวให้สังคมยอมรับเทคโนโลยีโดยเร็ว ดังนั้นโดยสรุป ประเด็นการยอมรับของสังคมต่อ SMR ชี้ให้เห็นว่า ด้านการสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียตามแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ควรได้รับการออกแบบให้เป็นกระบวนการต่อเนื่องของการสร้างความไว้วางใจ ความโปร่งใส และความชอบธรรมในการตัดสินใจ มิใช่เพียงการเผยแพร่ข้อมูลหรือการประชาสัมพันธ์โครงการ โดยเฉพาะในประเทศที่ยังไม่มีประสบการณ์โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ กระบวนการดังกล่าวจึงเป็นเงื่อนไขสำคัญของความพร้อมเชิงสถาบันและความยั่งยืนของโครงการในระยะยาว

กล่าวโดยรวมได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการสร้างความไว้วางใจผ่านกระบวนการที่โปร่งใส”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- สื่อสารข้อมูลอย่างโปร่งใสและต่อเนื่อง
- เปิดเวทีรับฟังความคิดเห็น
- สร้างระบบสื่อสารความเสี่ยง
- ทำการสำรวจการรับรู้ของสังคม
- ประสานการสื่อสารระหว่างองค์กรหลัก
- พัฒนาการศึกษาสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 เริ่มบทสนทนากับสังคม

- เริ่มโครงการการสร้างการมีส่วนร่วมของสังคมแบบเปิด
- สำรวจความรู้และการยอมรับของประชาชน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐเริ่มฟังสังคมอย่างเป็นระบบ”

ระยะที่ 2 สร้างระบบสื่อสารระดับชาติ

- ดำเนินตามแผนการสร้างการมีส่วนร่วมของสังคมระดับชาติ
- ประสานการสื่อสารระหว่างองค์กรหลัก

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ข้อมูลสอดคล้องและลดความสับสน”

ระยะที่ 3 รักษาความเชื่อมั่นระยะยาว

- การสื่อสารอย่างโปร่งใสและดำเนินอย่างต่อเนื่อง
- เตรียมพร้อมรองรับในช่วงเดินเครื่อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ความเชื่อมั่นยังต่อเนื่องแม้โครงการเริ่มเดินเครื่องแล้ว”

ความรู้เรื่องนิวเคลียร์ในสังคมไทยยังจำกัด และการรับรู้มักเชื่อมโยงกับเหตุการณ์ต่างประเทศมากกว่าความเข้าใจเชิงวิทยาศาสตร์ การสร้างความเข้าใจจึงต้องเป็นงานระยะยาวที่ผสานการศึกษา การสื่อสารข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ และการมีส่วนร่วมของชุมชนอย่างเคารพต่อความกังวลของสาธารณะ

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศชี้ว่าประเทศที่ประสบความสำเร็จด้านการยอมรับมักลงทุนด้านการศึกษาและการสื่อสารตั้งแต่ก่อนเริ่มโครงการ

ดังนั้น ประเทศไทยควรจัดทำแผนที่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เปิดเวทีสนทนาเชิงไตร่ตรอง และมีกลไกความโปร่งใสตั้งแต่ก่อนการเลือกเทคโนโลยี เพื่อให้การตัดสินใจด้านนิวเคลียร์ตั้งอยู่บนข้อมูล ความไว้วางใจ และความรับผิดชอบร่วมกัน

การสร้างการมีส่วนร่วมของสังคมจึงเป็น **โครงสร้างพื้นฐานเชิงสถาบัน ไม่ใช่งานประชาสัมพันธ์**

ด้านที่ 12 สถานที่ตั้งและสิ่งอำนวยความสะดวกสนับสนุน (Siting and supporting facilities)

การเลือกสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่อ่อนไหวที่สุดของโครงการ เพราะเกี่ยวข้องพร้อมกันทั้งความปลอดภัย วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และความเชื่อมั่นของสังคม กรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าการคัดเลือกพื้นที่ต้องอาศัยกระบวนการประเมินเชิงวิทยาศาสตร์และกฎหมายที่โปร่งใส เนื่องจากการตัดสินใจด้านที่ตั้งส่งผลระยะยาวตลอดอายุโครงการ และสร้างข้อผูกพันเชิงพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงได้ยากในภายหลัง [1,2]

การเลือกพื้นที่จึงไม่ใช่เพียงการหาพื้นที่ว่าง แต่เป็นการประเมินความเหมาะสมเชิงระบบที่ต้องอธิบายได้ ตรวจสอบได้ และยอมรับได้ในเชิงสาธารณะ [108-110]

ในเชิงเทคนิค การประเมินพื้นที่ต้องครอบคลุมลักษณะธรณีวิทยา ความเสี่ยงแผ่นดินไหว ความเพียงพอของแหล่งน้ำ ระบบโครงสร้างพื้นฐานไฟฟ้าและคมนาคม ลักษณะการใช้ที่ดิน ระยะห่างจากชุมชน ความ

เปราะบางของสิ่งแวดล้อม และประเด็นด้านความมั่นคงปลอดภัย การวิเคราะห์ทั้งหมดต้องตั้งอยู่บนฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ที่ตรวจสอบได้ [108,110] และทางทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA ชี้ว่าการเปิดเผยข้อมูลการประเมินพื้นที่อย่างโปร่งใสช่วยลดความไม่ไว้วางใจและเพิ่มความยอมรับของชุมชนได้อย่างมีนัยสำคัญ [8]

แม้ SMR จะใช้พื้นที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม แต่การคัดเลือกสถานที่ตั้งยังต้องผ่านเกณฑ์การประเมินที่เข้มงวดเช่นเดียวกัน เนื่องจากความปลอดภัยของโครงการมิได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว หากยังสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับบริบทของพื้นที่ตั้ง ทั้งด้านธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และการยอมรับของชุมชน ดังนั้น การคัดเลือกสถานที่ตั้งสำหรับ SMR จึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะปัจจัยด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมเท่านั้น แต่ต้องครอบคลุมการเข้าถึงพื้นที่ในภาวะฉุกเฉิน การเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า แหล่งน้ำ ความขัดแย้งด้านการใช้ที่ดิน และความเป็นไปได้ของการตั้งร่วมกับพื้นที่อุตสาหกรรม โดยที่ Osiolo & Mukundan (2026) แสดงให้เห็นว่า การเลือกพื้นที่ตั้ง SMR มิใช่เพียงการประเมินความเหมาะสมทางเทคนิคของพื้นที่ แต่ยังเกี่ยวข้องกับความไว้วางใจต่อสถาบันกำกับดูแล การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การรับรู้ด้านความปลอดภัย ระยะห่างจากพื้นที่อยู่อาศัย และความกังวลต่อกากกัมมันตรังสีในระยะยาว และงานนี้ยังสะท้อนว่า การพัฒนา SMR ในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งต้องให้ความสำคัญกับการสื่อสารและการมีส่วนร่วมของชุมชนตั้งแต่ระยะเริ่มต้น [111] ขณะที่ Susiati et al. (2025) ทบทวนแนวโน้มการเลือกพื้นที่ตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ด้วยวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision-making: MCDM) โดยครอบคลุมปัจจัยด้านเทคนิค สิ่งแวดล้อม ภูมิศาสตร์ ความปลอดภัย สังคม และเศรษฐกิจ ซึ่งชี้ว่าการคัดเลือกพื้นที่ตั้งควรอาศัยกรอบวิเคราะห์ที่บูรณาการข้อมูลหลายมิติอย่างเป็นระบบ มากกว่าการพิจารณาจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง [112] นอกจากนี้ Ikonen et al. (2025) ศึกษาความเป็นไปได้ของการบูรณาการ SMR เข้ากับระบบผลิตความร้อนของเขตเมืองเฮลซิงกิ และชี้ว่า การพิจารณาสถานที่ตั้งและสิ่งอำนวยความสะดวกสนับสนุนสำหรับ SMR ต้องครอบคลุมความเชื่อมโยงกับโครงข่ายความร้อนและความเย็น ความต้องการพลังงานของพื้นที่ ความต่อเนื่องของการจ่ายพลังงาน ต้นทุนการลงทุน และความเข้ากันได้กับโครงสร้างพื้นฐานพลังงานเดิม งานนี้จึงช่วยย้ำว่า การเลือกพื้นที่ตั้ง SMR ควรถูกประเมินในฐานะส่วนหนึ่งของระบบพลังงานท้องถิ่น มิใช่เพียงการจัดหาพื้นที่สำหรับติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ [113] โดยสรุป การคัดเลือกสถานที่ตั้งสำหรับ SMR ควรถูกพิจารณาในฐานะกระบวนการตัดสินใจเชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงมิติทางเทคนิค สังคม สิ่งแวดล้อม และโครงสร้างพื้นฐานเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ มุมมองเหล่านี้สอดรับกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่ให้ความสำคัญกับการประเมินพื้นที่ตั้งในฐานะส่วนหนึ่งของความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์โดยรวม มิใช่เพียงการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ทางกายภาพเท่านั้น

กล่าวโดยรวมสั้น ๆ ได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการตัดสินใจเชิงพื้นที่บนฐานข้อมูลวิทยาศาสตร์”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- สำรวจพื้นที่ที่เป็นไปได้ในระดับประเทศ
- ประเมินความเสี่ยงเชิงธรณีวิทยาและสิ่งแวดล้อม
- วิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานสนับสนุน
- เปิดกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน
- จัดทำฐานข้อมูลพื้นที่ที่ตรวจสอบได้
- วางแผนเตรียมพื้นที่ระยะยาว

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 สำรวจพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้

- สำรวจพื้นที่ศักยภาพ
- มีเกณฑ์คัดกรองพื้นที่เชิงวิทยาศาสตร์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐรู้ว่าพื้นที่ใดเป็นไปได้ และเพราะเหตุใด”

ระยะที่ 2 ยืนยันพื้นที่ด้วยข้อมูลเชิงลึก

- การศึกษาพื้นที่อย่างละเอียด
- มีแผนเตรียมพื้นที่สำหรับก่อสร้าง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “การเลือกพื้นที่อธิบายได้และปฏิบัติได้จริง”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความเหมาะสมระยะยาว

- ยืนยันข้อมูลพื้นที่
- มีระบบติดตามพื้นที่ต่อเนื่อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “พื้นที่ได้รับการตรวจยืนยันตลอดอายุโครงการ”

การเริ่มศึกษาสถานที่ตั้งตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อมไม่จำเป็นต้องหมายถึงการตัดสินใจสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในทันที หากแต่เป็นการจัดทำฐานข้อมูลเชิงนโยบายเพื่อช่วยลดความไม่แน่นอน ลดโอกาสเกิดความขัดแย้ง และยกระดับความพร้อมของรัฐในการอธิบายเหตุผลเชิงวิทยาศาสตร์ต่อสาธารณชน ทั้งนี้ ประเทศไทยเคยมีประสบการณ์จากกระบวนการประเมินอย่างเป็นทางการสำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ในอดีต ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นฐานในการทบทวนและปรับให้เหมาะสมกับบริบทของ SMR ได้ ซึ่งทั้งนี้การประเมินสถานที่ตั้งควรเริ่มตั้งแต่ระยะต้นของการเตรียมความพร้อม โดยพิจารณาควบคู่กันทั้งความเหมาะสมเชิงเทคนิค ความปลอดภัยเชิงพื้นที่ และความชอบธรรมทางสังคมในการดำเนินโครงการ

การเลือกสถานที่ตั้งจึงควรถูกมองเป็น *การวางแผนเชิงยุทธศาสตร์ระยะยาว ไม่ใช่การตัดสินใจเฉพาะหน้า*

ด้านที่ 13 การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (Environmental protection)

โครงการพลังงานนิวเคลียร์จำเป็นต้องผ่านการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมอย่างเข้มงวด เพราะเป็นโครงสร้างพื้นฐานระยะยาวที่เชื่อมโยงโดยตรงกับทรัพยากรธรรมชาติ สุขภาพประชาชน และความยั่งยืนของระบบนิเวศในพื้นที่ตั้งโรงไฟฟ้า [114] แนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศวางหลักว่า “สิ่งแวดล้อม” ต้องถูกบูรณาการตั้งแต่ช่วงออกแบบและวางแผนโครงการ ไม่ใช่ข้อกำหนดที่จัดทำภายหลัง เพื่อให้การตัดสินใจตั้งอยู่บนฐานข้อมูลที่ตรวจสอบได้ [1,2]

การคุ้มครองสิ่งแวดล้อมครอบคลุมการกำหนด Baseline ของพื้นที่ การประเมินผลกระทบจากการใช้น้ำหล่อเย็นและการปล่อยความร้อนทิ้ง การควบคุมการปล่อยสารกัมมันตรังสี การป้องกันการปนเปื้อนทางรังสี และการติดตามระยะยาว [115] ประเด็นสำคัญคือความน่าเชื่อถือทางวิทยาศาสตร์และความโปร่งใสของกระบวนการ เพราะความเชื่อมั่นของสังคมเกิดจากความเชื่อถือในระบบประเมิน ไม่ใช่จากเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว [116]

ถึงแม้ว่า SMR บางประเภทอาจได้รับการออกแบบให้ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมบางด้านตั้งแต่ต้น แต่ข้อได้เปรียบเชิงการออกแบบไม่สามารถใช้แทนการประเมินเฉพาะพื้นที่ได้ เนื่องจากบริบทด้านสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรน้ำ ระบบนิเวศ โครงสร้างพื้นฐานพลังงาน และการใช้ประโยชน์ที่ดินของแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของ SMR จึงไม่ควรจำกัดอยู่เพียงข้อสรุปว่าเป็นแหล่งพลังงานคาร์บอนต่ำ แต่ควรพิจารณาทั้งตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการและในระดับระบบพลังงานโดยรวม ซึ่งในประเด็นนี้ Carless et al. (2016) ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment: LCA) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของ SMR ผลการศึกษาชี้ว่า แม้ SMR จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าพลังงานฟอสซิลอย่างชัดเจน แต่ไม่ได้มีข้อได้เปรียบเหนือโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่เสมอไป เนื่องจากกำลังผลิตที่เล็กลงอาจทำให้การใช้วัสดุและทรัพยากรต่อหน่วยไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้น การประเมิน SMR ในมิติสิ่งแวดล้อมจึงควรครอบคลุมตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การจัดหาเชื้อเพลิง การก่อสร้าง การเดินเครื่อง ไปจนถึงการรื้อถอน [117] ขณะที่ El-Emam and Subki (2021) แสดงให้เห็นว่า การบูรณาการ SMR กับพลังงานหมุนเวียนต้องพิจารณาทั้งความยืดหยุ่นของระบบ การผลิตพลังงานหลายรูปแบบ และข้อจำกัดในการดำเนินงานร่วมกัน [118] ประเด็นนี้ช่วยขยายมิติสิ่งแวดล้อมจากการประเมินตัวเครื่องปฏิกรณ์ ไปสู่การพิจารณาว่า SMR จะทำงานร่วมกับระบบพลังงานคาร์บอนต่ำโดยรวมได้อย่างไร ส่วน Krall et al. (2022) ตั้งข้อสังเกตว่า SMR บางแบบอาจ

ก่อให้เกิดกากกัมมันตรังสีต่อหน่วยพลังงานมากกว่าที่คาดไว้ ซึ่งทำให้การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมต้องเชื่อมโยงกับประเด็นการจัดการกากกัมมันตรังสีและเชื้อเพลิงใช้แล้วอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [119] โดยสรุป การประเมินสิ่งแวดล้อมสำหรับ SMR ควรถูกพิจารณาในฐานะการประเมินเชิงระบบ ครอบคลุมทั้งผลกระทบเฉพาะพื้นที่ วัฏจักรชีวิตของโครงการ การเชื่อมต่อกับระบบพลังงานคาร์บอนต่ำ และภาระด้านกากกัมมันตรังสีในระยะยาว มุมมองนี้สอดรับกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่ให้ความสำคัญกับการประเมินสิ่งแวดล้อมในฐานะองค์ประกอบหนึ่งของความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ มิใช่เพียงการยืนยันว่าเทคโนโลยีมีการปล่อยคาร์บอนต่ำเท่านั้น

กล่าวโดยรวมสั้น ๆ ได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการปกป้องสิ่งแวดล้อมบนฐานข้อมูลวิทยาศาสตร์”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ทบทวนและยกระดับกรอบคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของประเทศ
- บูรณาการ EHIA เข้ากับกระบวนการอนุญาต
- จัดทำฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมของพื้นที่
- สร้างระบบติดตามตรวจวัดระยะยาว
- พัฒนาความเชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อมเชิงรังสี

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางฐานและกำหนดสิ่งที่ต้องสร้าง

- พิจารณาข้อกำหนดสิ่งแวดล้อมสำหรับโรงไฟฟ้า
- ทบทวนกรอบคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแล้ว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รู้ว่าต้องยกระดับอะไร และต้องเก็บข้อมูลฐานแบบใด”

ระยะที่ 2 ทำให้การกำกับดูแลเป็นรูปธรรม

- ดำเนินการ EHIA แล้ว
- จัดทำ Baseline ของพื้นที่
- มีหน่วยงานกำกับดูแลที่ชัดเจน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีกรอบการกำกับและข้อมูลพื้นที่จริงรองรับการอนุญาต”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ระบบติดตามระยะยาว

- กำหนดเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมแล้ว
- มีระบบการเฝ้าตรวจติดตาม (Monitoring programme) พร้อมใช้

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีทั้งเงื่อนไขการกำกับและระบบติดตามที่ทำงานได้จริง”

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย การพิจารณา SMR ควรนำเสนออย่างสมดุลว่า เทคโนโลยีนี้อาจมีบทบาทในการลดการปล่อยคาร์บอน แต่ยังต้องประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตอย่างรอบด้าน ทั้งการใช้น้ำ ความร้อนทิ้ง กากกัมมันตรังสี การรื้อถอน และผลกระทบเฉพาะพื้นที่ก่อนตัดสินใจเชิงนโยบาย แม้ว่าประเทศไทยมีระบบการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและสุขภาพสำหรับโครงการขนาดใหญ่ (EHIA) ซึ่งเป็นทุนเชิงกระบวนการที่สำคัญอยู่แล้ว แต่หากจะพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์หรือ SMR จำเป็นต้องเสริมความเชี่ยวชาญเฉพาะทางเพิ่มเติม เช่น การติดตามระดับรังสีในสิ่งแวดล้อมระยะยาว การประเมินความร้อนทิ้ง และการจัดทำฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่โปร่งใส ตรวจสอบได้ และใช้ประกอบการกำกับดูแลได้อย่างต่อเนื่อง

มาตรการสิ่งแวดล้อมจึงต้องทำหน้าที่เป็น *ฐานความเชื่อมั่นทางวิทยาศาสตร์ ไม่ใช่เพียงเอกสารอนุญาต*

ด้านที่ 14 การเตรียมความพร้อมและการตอบสนองกรณีฉุกเฉิน (Emergency preparedness and response: EPR)

แม้ความน่าจะเป็นของอุบัติเหตุนิวเคลียร์จะต่ำ กรอบสากลกำหนดให้การเตรียมพร้อมและการตอบสนองเหตุฉุกเฉินอยู่ในระดับสูงสุด เพราะเป็นความเสี่ยงแบบ **โอกาสต่ำ–ผลกระทบสูง** ซึ่งกระทบทั้งความปลอดภัยและ

ความเชื่อมั่นของสังคมโดยตรง ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าระบบฉุกเฉินต้องพัฒนาไปพร้อมกับโครงการตั้งแต่ระยะเริ่มต้น และต้องครอบคลุมทั้งผู้ดำเนินการ หน่วยงานกำกับดูแล และกลไกรัฐ ไม่ใช่ดำเนินการภายหลังเมื่อใกล้เดินเครื่อง [1,2,120]

สาระสำคัญของระบบฉุกเฉินไม่ใช่การมี “แผนบนกระดาษ” แต่คือความสามารถในการปฏิบัติจริง ได้แก่ โครงสร้างบัญชาการ ระบบสื่อสาร การแจ้งเตือน การตัดสินใจเชิงเวลาจริง การซ้อมแผน และการทบทวนบทเรียน เพราะประสบการณ์สากลสะท้อนว่าความเสียหายจำนวนมากเกิดจากช่องว่างการประสานงานและการสื่อสาร มากกว่าความล้มเหลวทางเทคนิคเพียงอย่างเดียว [121,122]

แม้ SMR บางเทคโนโลยีอาจช่วยจำกัดผลกระทบเชิงเทคนิคจากอุบัติเหตุได้ แต่ระบบเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉินไม่ควรถูกลดทอนลงจากข้อสันนิษฐานดังกล่าว เนื่องจากเป้าหมายสำคัญของระบบฉุกเฉินคือการทำให้รัฐมีขีดความสามารถในการรับผิดชอบและจัดการความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ ที่สอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่เน้นว่า ความพร้อมของรัฐยังคงเป็นเงื่อนไขจำเป็น แม้เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์จะมีคุณลักษณะด้านความปลอดภัยเพิ่มขึ้นก็ตาม

ในกรณีของ SMR แม้บางแบบอาจมีปริมาณสารกัมมันตรังสีที่อาจถูกปลดปล่อยหรือแหล่งกำเนิดการปล่อยสารกัมมันตรังสีจากอุบัติเหตุ (Source term) ต่ำกว่า และมีระบบความปลอดภัยแบบพาสซีฟมากกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่บางแบบ แต่การลดขนาดเขตวางแผนรับมือเหตุฉุกเฉิน (Emergency planning zone: EPZ) ต้องตั้งอยู่บนหลักฐานเชิงวิเคราะห์ มิใช่ข้อสันนิษฐานจากขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีงานวิจัยโดย Hummel et al. (2020) แสดงให้เห็นว่า การกำหนดขนาดเขตวางแผนฉุกเฉินควรอาศัยการประเมินผลกระทบด้านปริมาณรังสีจากอุบัติเหตุสมมุติ [123] ขณะที่ Vechgama et al. (2024) ศึกษากรณี iPWR-SMR ในประเทศไทย และชี้ว่า การวางแผนตอบสนองเหตุฉุกเฉินควรพิจารณาข้อมูลเฉพาะของแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ สถานที่ตั้ง และเวลาเริ่มต้นของการปล่อยสารกัมมันตรังสี แทนการอ้างอิงสมมติฐานทั่วไปจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ [124] นอกจากนี้ Liu et al. (2025) ยังเน้นว่า การคัดเลือกสถานการณ์อุบัติเหตุเป็นขั้นตอนสำคัญของการพัฒนาเขตวางแผนฉุกเฉินสำหรับ SMR เนื่องจากชนิดของอุบัติเหตุ ลำดับเหตุการณ์ ความรุนแรงของแหล่งกำเนิดการปล่อยสารกัมมันตรังสี และเกณฑ์การคัดเลือกกรณีจำกัดผลกระทบล้วนส่งผลต่อขนาดและขอบเขตของเขตฉุกเฉินโดยตรง [125] ส่วน Mitrakos (2022) แสดงให้เห็นว่า ผลการประเมินเขตฉุกเฉินของ iPWR อาจแตกต่างกันตามวิธีคำนวณแหล่งกำเนิดการปล่อยสารกัมมันตรังสี จึงควรใช้การวิเคราะห์เฉพาะแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มากกว่าการเทียบเคียงจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่โดยตรง [126] โดยสรุป การเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉินสำหรับ SMR จำเป็นต้องอาศัยการประเมินเชิงเทคนิคที่จำเพาะต่อเทคโนโลยี พื้นที่ตั้ง และสถานการณ์อุบัติเหตุ มากกว่าการลดขนาดเขตฉุกเฉินจากสมมติฐานด้านขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว ประเด็นนี้ช่วยตอกย้ำว่า ในกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ความพร้อมด้านเหตุฉุกเฉินนี้มิใช่มาตรการปลายทางหลังการออกแบบ แต่เป็นขีดความสามารถเชิงสถาบันที่ต้องพัฒนาให้สอดคล้องกับความเสี่ยงจริงของโครงการตั้งแต่ระยะวางแผน

กล่าวได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการรับมือวิกฤตอย่างเป็นระบบ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- กำหนดโครงสร้างบัญชาการเหตุฉุกเฉินระดับชาติ
- ระบุบทบาท–ความรับผิดชอบขององค์กรทั้งหมด
- พัฒนาแผนการเตรียมพร้อมและการตอบสนองเหตุฉุกเฉินที่ปฏิบัติได้จริง
- สร้างระบบสื่อสารต่อสาธารณะ
- จัดการฝึกอบรมและซ้อมแผนสม่ำเสมอ
- ทบทวนและปรับปรุงระบบต่อเนื่อง

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 ระบุช่องว่างและวางแผนยกระดับ

- ระบุความต้องการยกระดับระบบฉุกเฉินแล้ว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐรู้ว่าต้องสร้างอะไร และต้องประสานใคร”

ระยะที่ 2 สร้างโครงสร้างปฏิบัติการ

- กำหนดความรับผิดชอบแต่ละองค์กร
- มีแผนการเตรียมพร้อมและการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน อย่างเป็นทางการ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “มีแผนที่ปฏิบัติได้และมีเจ้าภาพชัดเจน”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ด้วยการซ้อมจริง

- ระบบฉุกเฉินของผู้ดำเนินการพร้อมใช้
- ระบบของรัฐผ่านการทดสอบ
- มีการซ้อมและฝึกปฏิบัติเป็นประจำ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ซ้อมแล้ว ทำงานได้จริง และปรับปรุงจากบทเรียน”

ดังนั้น ประเทศไทยควรเตรียมระบบรับมือเหตุฉุกเฉินแบบแบ่งระดับตามความเสี่ยง โดยอาศัยข้อมูลที่ตรวจสอบได้เกี่ยวกับสารต้นกำเนิดการปลดปล่อยรังสี สถานการณ์อุบัติเหตุ ความเป็นไปได้ของการอพยพ และแนวทางการสื่อสารกับประชาชนอย่างเป็นระบบ แม้ว่าประเทศไทยมีประสบการณ์ด้านการจัดการภัยพิบัติและเหตุฉุกเฉินทางรังสีอยู่ในระดับหนึ่ง แต่หากจะพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จำเป็นต้องยกระดับไปสู่ระบบเฉพาะด้านที่เชื่อมโยงบทบาทของรัฐ หน่วยงานกำกับดูแล และผู้ดำเนินโครงการอย่างชัดเจน ตั้งแต่โครงสร้างบัญชาการ การประสานงานระหว่างหน่วยงาน แผนตอบสนองเหตุฉุกเฉิน ไปจนถึงการฝึกซ้อมร่วมกับชุมชนในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบ

การออกแบบ EPR ตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อมจึงเป็น **การสร้างความน่าเชื่อถือของรัฐ ไม่ใช่เพียงมาตรการเทคนิค**

ด้านที่ 15 ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear security)

ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์มุ่งป้องกันการกระทำโดยเจตนา เช่น การก่อวินาศกรรม การโจรกรรมวัสดุนิวเคลียร์ หรือการเข้าถึงระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต ซึ่งแตกต่างจาก “ความปลอดภัย (Safety)” ที่เน้นการลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศวางหลักชัดว่า ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์เป็นความรับผิดชอบของรัฐ และต้องสร้างโครงสร้างพื้นฐานตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของโครงการ ไม่ใช่รอจนจนโครงการใกล้เข้าสู่ขั้นเดินเครื่อง [1,2,127-131]

โครงสร้างพื้นฐานด้านความมั่นคงประกอบด้วยกรอบกฎหมาย มาตรการองค์กร มาตรการป้องกันทางกายภาพ การควบคุมข้อมูลอ่อนไหว โปรแกรมความน่าเชื่อถือของบุคลากร [128,129] และการประเมินภัยคุกคามระดับชาติ [132] พร้อมทั้งการสร้าง “วัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์” ที่ฝังอยู่ในพฤติกรรมขององค์กร [133]

แม้ว่า SMR บางเทคโนโลยีจะมีลักษณะทางกายภาพที่อาจช่วยลดความเสี่ยงบางประเภท แต่ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ไม่ได้ทำให้ความจำเป็นด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ลดลงโดยอัตโนมัติ เนื่องจากภัยคุกคามจำนวนมากขึ้นอยู่กับพฤติกรรมมนุษย์ สภาพแวดล้อมของพื้นที่ตั้ง และรูปแบบการกำกับดูแล มากกว่าคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว ในทางกลับกัน การพัฒนา SMR อาจทำให้รูปแบบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากโครงการอาจประกอบด้วยหลายโมดูล กระจายอยู่หลายพื้นที่ หรืออยู่ใกล้ผู้ใช้พลังงานภาคอุตสาหกรรมมากกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม

ในประเด็นนี้ Trajano (2025) ชี้ว่า การนำ SMR มาใช้ในเอเชียตะวันออกอาจทำให้กรอบธรรมาภิบาลนิวเคลียร์ซับซ้อนขึ้น เนื่องจาก SMR มีรูปแบบการติดตั้ง การใช้งาน และห่วงโซ่อุปทานที่หลากหลายกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม จึงต้องพิจารณาทั้งความปลอดภัย ความมั่นคงปลอดภัย การกำกับดูแล ความร่วมมือระหว่างประเทศ และขีดความสามารถของสถาบันกำกับดูแลไปพร้อมกัน [134] ขณะที่ Duguay (2020) ชี้ว่า ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของ SMR ควรถูกบูรณาการตั้งแต่ระยะออกแบบผ่านแนวคิด

การออกแบบโดยคำนึงถึงความมั่นคงปลอดภัย (Security by design) โดยครอบคลุมทั้งการป้องกันทางกายภาพ ภัยคุกคามโดยเจตนา ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ และการกำกับดูแลที่อิงความเสี่ยงตามลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยี [135] ส่วน Ayodeji et al. (2024) ขยายประเด็นดังกล่าวไปสู่มิติความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ของ SMR โดยเสนอแนวทางตรวจจับการโจมตีทางไซเบอร์ต่อระบบควบคุมดิจิทัลของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำอัดความดันขนาดเล็ก ซึ่งงานนี้สะท้อนว่า การพึ่งพาระบบดิจิทัลและระบบอัตโนมัติของ SMR ทำให้การตรวจจับ ป้องกัน และตอบสนองต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญของความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ [136] โดยสรุป ความพร้อมด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์สำหรับ SMR ควรถูกประเมินจากความเสี่ยงเฉพาะของเทคโนโลยี พื้นที่ตั้ง รูปแบบการติดตั้ง และภัยคุกคามทั้งทางกายภาพและไซเบอร์ มากกว่าการพิจารณาจากขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว ประเด็นนี้ช่วยขยายความหมายของความมั่นคงปลอดภัยตามกรอบของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ จากการป้องกันสถานที่ตั้ง ไปสู่การออกแบบระบบกำกับดูแลที่สามารถรับมือกับภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามรูปแบบเทคโนโลยีและบริบทการใช้งานจริง

กล่าวโดยรวมได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการป้องกันภัยโดยเจตนาอย่างเป็นระบบ”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- วางแผนยกระดับระบบความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear security)
- ระบุองค์กรและความรับผิดชอบทั้งหมด
- พัฒนาการประเมินภัยคุกคามตามฐานการออกแบบ (Design-basis threat: DBT) ระดับชาติ
- สร้างระบบป้องกันทางกายภาพ
- จัดการข้อมูลอ่อนไหว
- พัฒนาโปรแกรมความน่าเชื่อถือของบุคลากร
- ส่งเสริมวัฒนธรรมความมั่นคง

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 จัดระบบผู้รับผิดชอบ

- ระบุองค์กรและบทบาทหน้าที่
- มีแผนยกระดับความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐรู้ว่าใครรับผิดชอบอะไร”

ระยะที่ 2 สร้างข้อกำหนดเชิงระบบ

- มี DBT อย่างเป็นทางการ
- มีระบบจัดการข้อมูลอ่อนไหว
- มีโปรแกรมความน่าเชื่อถือของบุคลากร
- มีแผนวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ข้อกำหนดพร้อม และองค์กรเริ่มทำให้ระบบทำงาน”

ระยะที่ 3 พิสูจน์ความพร้อมปฏิบัติการ

- ระบบป้องกันได้รับอนุมัติ
- แผนเผชิญเหตุผ่านการทดสอบ
- มีวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์อย่างชัดเจน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ระบบได้รับอนุมัติและใช้งานได้จริง”

ดังนั้น ประเทศไทยไม่ควรประเมินความพร้อมด้านความมั่นคงปลอดภัยของ SMR จากคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ควรครอบคลุมการกำหนดภัยคุกคามตามฐานการออกแบบ (DBT) การบูรณาการมาตรการป้องกันทางกายภาพกับความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ การคุ้มครองระหว่างการขนส่ง และการสร้างวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยตั้งแต่ระยะเตรียมโครงการ ทั้งนี้ ความร่วมมืออย่างต่อเนื่องระหว่าง

ประเทศไทยกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศสามารถใช้เป็นฐานสำคัญในการยกระดับกรอบกฎหมาย มาตรการป้องกัน และขีดความสามารถเชิงปฏิบัติการ เพื่อรองรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอนาคต

ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์จึงเป็น **เงื่อนไขตั้งต้นของความยั่งยืนและความเชื่อมั่นระหว่างประเทศ**

ด้านที่ 16 วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และเชื้อเพลิงใช้แล้ว (Nuclear fuel cycle and spent fuel)

วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นประเด็นโครงสร้างพื้นฐานที่ครอบคลุมทั้งระบบ ตั้งแต่ส่วนต้นน้ำของการสำรวจทรัพยากรยูเรเนียมและทอเรียม การทำเหมือง การแต่งแร่ การแปรสภาพ การเสริมสมรรถนะ และการผลิตเชื้อเพลิง ไปจนถึงการจัดหาเชื้อเพลิง การขนส่ง การใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์ และการจัดการเชื้อเพลิงหลังการใช้งาน ในบริบทของประเทศที่กำลังพิจารณาโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ประเด็นนี้จึงมิได้หมายถึงการมีทรัพยากรเชื้อเพลิงภายในประเทศเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงการกำหนดยุทธศาสตร์เชื้อเพลิงที่สอดคล้องกับนโยบายพลังงาน ความมั่นคงในการจัดหาเชื้อเพลิง กฎหมายและมาตรฐานการกำกับดูแล การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ การขนส่งวัสดุนิวเคลียร์ และความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

ในเชิงนโยบาย วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ควรถูกมองเป็นระบบต่อเนื่องตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ มิใช่แยกส่วนระหว่าง “การจัดหาเชื้อเพลิง” กับ “การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้ว” เพราะการตัดสินใจในแต่ละช่วงของวัฏจักรย่อมส่งผลต่อภาระด้านเทคนิค กฎหมาย การเงิน ความปลอดภัย ความมั่นคงปลอดภัย และการยอมรับของสังคมในระยะยาว โดยเฉพาะเมื่อเชื้อเพลิงถูกนำออกจากแกนปฏิกรณ์แล้ว ยังต้องมีแผนรองรับทั้งการจัดเก็บชั่วคราว การจัดเก็บระยะยาว การพิจารณาทางเลือกของวัฏจักรเชื้อเพลิงแบบเปิดหรือแบบปิด การแปรรูปซ้ำในกรณีที่เกี่ยวข้อง และการกำจัดขั้นสุดท้ายอย่างปลอดภัย

ในเชิงสถาบัน “เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว” ไม่ใช่ประเด็นปลายทางที่ค่อยไปจัดการหลังเดินเครื่อง แต่เป็นเงื่อนไขตั้งต้นของความยั่งยืน เพราะเป็นภาระผูกพันระยะยาวที่ต้องมีทั้งกรอบนโยบาย หน่วยงานรับผิดชอบ กลไกกำกับดูแล และแผนการเงินรองรับอย่างต่อเนื่องตลอดวงจรชีวิตโครงการ [137,138] ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศชี้ชัดว่าประเทศต้องระบุตัวเลือก กำหนดยุทธศาสตร์ และทำให้เกิดการปฏิบัติได้จริงทั้งในส่วนต้นน้ำคือการจัดหาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และปลายน้ำคือการจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว ตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อม [1,2]

ประเด็นนี้มักเป็นจุดโฟกัสของสังคม เพราะเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วมีทั้งความร้อนและกัมมันตภาพสูง จึงต้องอาศัยแนวคิดการกักเก็บหลายชั้น (Multi-barrier) และระบบจัดการที่พิสูจน์ได้ว่าปลอดภัยในระยะยาว [137,138] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA สะท้อนว่าความต่อเนื่องของนโยบายและความโปร่งใสเป็นตัวแปรสำคัญต่อความเชื่อมั่นของสาธารณะ

สำหรับ SMR แม้บางเทคโนโลยีจะเสนอทางเลือกการจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ยืดหยุ่นกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม แต่หลักการพื้นฐานยังคงไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ประเทศเจ้าของโครงการต้องมีแผนจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วตั้งแต่ระยะเริ่มต้น และต้องมีการจัดเตรียมเชิงสถาบันเพื่อรองรับความรับผิดชอบดังกล่าวอย่างชัดเจน

ทั้งนี้เทคโนโลยี SMR มิได้ใช้วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์รูปแบบเดียวกันทั้งหมด แต่แตกต่างกันตามชนิดเครื่องปฏิกรณ์ การออกแบบแกนปฏิกรณ์ และยุทธศาสตร์การจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ บางแบบใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำ (low-enriched uranium: LEU) ขณะที่บางแบบอาจต้องใช้ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำระดับสูง (High-assay low-enriched uranium: HALEU) เชื้อเพลิงแบบทริโซ (TRISO) ทอเรียม หรือเชื้อเพลิงออกไซด์ผสม (Mixed oxide fuel: MOX) ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของ SMR จำนวนมาก ดังเช่น Amatullah et al. (2024) เปรียบเทียบวัฏจักรเชื้อเพลิงยูเรเนียมและทอเรียมในบริบทของ SMR และชี้ให้เห็นว่าการเลือกชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อสมรรถนะนิวทรอนิกส์และแนวทางการจัดการเชื้อเพลิงโดยรวม [139] ขณะที่ Akbari et al. (2024) แสดงให้เห็นศักยภาพของการใช้เชื้อเพลิงทอเรียมร่วมกับธาตุทรานส์ยูเรเนียมในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำมวลเบาขนาดเล็กแบบโมดูล เพื่อเพิ่มความยั่งยืนของการจัดหาเชื้อเพลิงและลดข้อจำกัด

ของวัฏจักรเชื้อเพลิงในระยะยาว [140] ส่วน Rosales et al. (2022) ศึกษากลยุทธ์เชื้อเพลิง MOX ร่วมกับอนุภาคเชื้อเพลิง TRISO ในแกนปฏิกรณ์แบบน้ำอัดความดันขนาดเล็ก [141] ดังนั้น ประเด็นวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จึงควรถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขเชิงยุทธศาสตร์ในการคัดเลือกเทคโนโลยี SMR และการวางแผนโครงสร้างพื้นฐานด้านนิวเคลียร์ของประเทศ มิใช่เพียงประเด็นด้านเทคนิคหรือการจัดหาเชื้อเพลิงเท่านั้น [142] มุมมองนี้สอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่เน้นให้ประเทศผู้เริ่มต้นโครงการประเมินความพร้อมด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อย่างครอบคลุม ตั้งแต่ความมั่นคงของการจัดหาเชื้อเพลิง การกำกับดูแลวัสดุนิวเคลียร์ การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้ว ไปจนถึงความรับผิดชอบตลอดวงจรชีวิตของโครงการ

กล่าวโดยรวมสั้น ๆ ได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการรับผิดชอบภาระข้ามรุ่น”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- กำหนดยุทธศาสตร์วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ระดับชาติ
- ระบุความรับผิดชอบของรัฐและผู้ดำเนินการ
- วางแผนการจัดหาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- วางแผนการเก็บและจัดการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว
- จัดเตรียมโครงสร้างกำกับดูแลระยะยาว
- เตรียมกลไกเงินทุนรองรับภาระในอนาคต

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 กำหนดตัวเลือกและกรอบนโยบาย

- พิจารณาทางเลือกวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- เริ่มกำหนดความรับผิดชอบเชิงหลักการ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศมีกรอบคิดชัดว่าใครรับผิดชอบอะไร”

ระยะที่ 2 ประกาศยุทธศาสตร์และจัดวางโครงสร้าง

- มียุทธศาสตร์ต้นน้ำและปลายน้ำอย่างเป็นทางการ
- มอบหมายบทบาทองค์กรชัดเจน

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ยุทธศาสตร์เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ถูกแปลงเป็นนโยบายใช้งานได้จริง”

ระยะที่ 3 การจัดเตรียมพร้อมใช้งาน

- มีข้อตกลงจัดหาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- มีระบบรองรับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศมีโครงสร้างรองรับภาระเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ระยะยาว”

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย การวางแผนด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการระบุว่าจะจัดซื้อเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ แต่ควรพิจารณาอย่างเป็นระบบทั้งห่วงโซ่อุปทานเชื้อเพลิง ความมั่นคงของตลาดยูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำระดับสูง (HALEU) การขนส่งเชื้อเพลิง การจัดเก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว และภาระด้านการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ควบคู่กัน แม้ประเทศไทยมีข้อมูลการสำรวจทางธรณีวิทยาและธรณีฟิสิกส์ที่ระบุแหล่งปรากฏหรือศักยภาพเบื้องต้นของยูเรเนียมและทอเรียมในบางพื้นที่ แต่ข้อมูลดังกล่าวยังไม่ควรถูกตีความว่าเป็นหลักฐานของทรัพยากรเชิงพาณิชย์ที่เพียงพอต่อการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การวางแผนวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของไทยจึงควรผสานการประเมินฐานข้อมูลทรัพยากรภายในประเทศเข้ากับยุทธศาสตร์การจัดหาเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีการสกัดในอนาคต และพันธกรณีระหว่างประเทศ [1,2] ขณะเดียวกัน แม้ประเทศไทยมีประสบการณ์ในการจัดการกากกัมมันตรังสีจากการใช้ประโยชน์ด้านรังสีอยู่ในระดับหนึ่ง แต่การรองรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จำเป็นต้องพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเฉพาะเพิ่มเติม ทั้งระบบจัดเก็บเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว การขนส่ง การกำกับดูแล และแผนระยะยาวระดับชาติอย่างชัดเจน

การเริ่มวางกรอบเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ตั้งแต่ช่วงเตรียมความพร้อมจึงเป็น **การลดความเสี่ยงเชิงสถาบันที่ย้อนกลับแก้ยากในอนาคต**

ด้านที่ 17 การจัดการกากกัมมันตรังสี (Radioactive waste management)

การจัดการกากกัมมันตรังสีไม่ใช่เพียงงานวิศวกรรม แต่เป็นประเด็นเชิงจริยธรรมและความรับผิดชอบ เพราะหลักการสากลกำหนดชัดว่าโครงการนิวเคลียร์ต้องไม่ส่งต่อภาระที่ไม่เหมาะสมไปยังคนรุ่นถัดไป ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่า ประเทศต้องมีนโยบายและแผนการจัดการกากกัมมันตรังสีตั้งแต่ระยะเตรียมโครงการ ไม่ใช่รอจนโรงไฟฟ้าเดินเครื่องแล้วค่อยออกแบบระบบรองรับ [1,2]

ในเชิงระบบ โครงสร้างการจัดการกากกัมมันตรังสีต้องครอบคลุมวงจรชีวิตทั้งหมด ตั้งแต่การจำแนกประเภท การเก็บชั่วคราว การปรับสภาพ การขนส่ง ไปจนถึงการกำจัดขั้นสุดท้าย พร้อมทั้งเชื่อมโยงกับแผนการปลดระวางโรงไฟฟ้า (Decommissioning) ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น [143-146] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA ชี้ว่า ประเทศที่มีนโยบายกากกัมมันตรังสีชัดเจนและโปร่งใสมักได้รับความเชื่อมั่นจากสาธารณะมากกว่า เพราะสังคมมองเห็นว่ารัฐมีแผนรับผิดชอบระยะยาว ไม่ใช่เพียงแก้ปัญหาเฉพาะหน้า [8]

สำหรับ SMR แม้บางเทคโนโลยีจะเสนอแนวทางการจัดการแบบรวมศูนย์ หรืออ้างว่าสามารถลดปริมาณกากกัมมันตรังสีบางประเภทได้ แต่หลักการพื้นฐานยังคงไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ประเทศเจ้าของโครงการต้องมีขีดความสามารถขั้นต่ำในการจัดการกากกัมมันตรังสีภายในประเทศ และต้องเริ่มศึกษา รวมถึงวางแผนระยะยาวสำหรับกากกัมมันตรังสีระดับสูงตั้งแต่ช่วงเตรียมความพร้อม

ทั้งนี้ SMR ไม่ได้ทำให้ปัญหากากกัมมันตรังสีหมดไปโดยอัตโนมัติ และบางแบบอาจก่อให้เกิดกากต่อหน่วยพลังงานมากกว่าที่ผู้สนับสนุนเทคโนโลยีคาดไว้ ซึ่งในประเด็นนี้ Krall et al. (2022) ตั้งข้อสังเกตว่า SMR บางแนวคิดอาจเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วและวัสดุที่ถูกกระตุ้นให้เกิดกัมมันตภาพรังสีเมื่อเทียบต่อหน่วยพลังงาน [119] ในขณะที่ Halimi & Shirvan (2024) วิเคราะห์ผลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์ต่อการออกแบบแกนปฏิกรณ์ ต้นทุนเชื้อเพลิง และปริมาณเชื้อเพลิงใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำอัดความดัน และได้ชี้ให้เห็นว่า การลดขนาดกำลังผลิตของเครื่องปฏิกรณ์อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณเชื้อเพลิงใช้แล้วต่อหน่วยไฟฟ้า ดังนั้น การประเมิน SMR นั้นควรต้องรวมผลกระทบต่อวัฏจักรเชื้อเพลิงและภาระการจัดการกากกัมมันตรังสีในระยะยาวด้วย [147] ส่วน Kamarudin et al. (2024) ศึกษาการปรับแต่งเชื้อเพลิงฐานทอเรียมสำหรับ SMR โดยมุ่งลดปริมาณเชื้อเพลิงใช้แล้วและความเป็นพิษทางรังสีของกากนิวเคลียร์ ผลการศึกษาสะท้อนว่า การเลือกชนิดและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่อปริมาณและลักษณะของกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ซึ่งนี้สนับสนุนข้อเสนอว่า การจัดการกากกัมมันตรังสีควรถูกพิจารณาตั้งแต่ระยะออกแบบเชื้อเพลิงและแกนปฏิกรณ์ ไม่ใช่เฉพาะหลังการเดินเครื่อง [148] โดยที่ Clayton et al. (2025) ทบทวนการแปรรูปและการกำจัดกากกัมมันตรังสีจากมุมมองด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต ซึ่งงานนี้เน้นว่า การประเมินผลกระทบของกากกัมมันตรังสีไม่ควรจำกัดอยู่ที่ปริมาณกากที่เกิดขึ้นเท่านั้น แต่ควรครอบคลุมกระบวนการปรับสภาพกาก การจัดเก็บ การขนส่ง การกำจัดขั้นสุดท้าย และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องตลอดห่วงโซ่การจัดการกาก งานนี้จึงเหมาะสำหรับใช้สนับสนุนประเด็นว่า SMR ต้องมีแผนจัดการกากกัมมันตรังสีที่ครอบคลุมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ [149] โดยสรุป การจัดการกากกัมมันตรังสีสำหรับ SMR ควรถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขเชิงยุทธศาสตร์ตั้งแต่ระยะคัดเลือกเทคโนโลยีและออกแบบโครงการ ครอบคลุมทั้งชนิดเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง ปริมาณและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงใช้แล้ว ตลอดจนความพร้อมด้านการปรับสภาพ จัดเก็บ ขนส่ง และกำจัดขั้นสุดท้าย มุมมองนี้สอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่เน้นว่าประเทศผู้เริ่มต้นโครงการต้องวางระบบความรับผิดชอบต่อกากกัมมันตรังสีและเชื้อเพลิงใช้แล้วตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการ มิใช่มองกากเป็นภาระที่จะจัดการภายหลังการเดินเครื่องเท่านั้น

กล่าวได้ว่าประเด็นนี้เป็นตัวชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการรับผิดชอบกากกัมมันตรังสีระยะยาวอย่างเป็นธรรม”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- กำหนดนโยบายระดับชาติด้านกากกัมมันตรังสี
- วางแผนการปลดระวางโรงไฟฟ้าตั้งแต่ระยะเริ่มต้น
- ประเมินภาระกากกัมมันตรังสีที่จะเกิดขึ้น
- พัฒนาโครงสร้างการเก็บและกำจัดกากกัมมันตรังสี
- จัดเตรียมระบบกำกับดูแล
- สื่อสารแผนการจัดการกากกัมมันตรังสีต่อสาธารณะอย่างโปร่งใส

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 เข้าใจภาระกากกัมมันตรังสีและตัวเลือก

- ระบุข้อกำหนดการจัดการกากกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้า
- เข้าใจตัวเลือกการกำจัดทุกประเภท

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศรู้ขอบเขตภาระการจัดการกากกัมมันตรังสีของตน”

ระยะที่ 2 แปลงเป็นข้อกำหนดโครงการ

- ประเมินภาระการจัดการกากกัมมันตรังสีอย่างเป็นระบบ
- ผนวกการวางแผนปลดระวางเบื้องต้นไว้ในเอกสารโครงการ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “การจัดการกากกัมมันตรังสีถูกบูรณาการเข้ากับโครงการ”

ระยะที่ 3 มีแผนและระบบพร้อมใช้

- มีระบบกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ/ปานกลางพร้อมใช้งาน
- เริ่มพัฒนาระบบกากกัมมันตรังสีระดับสูง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศมีโครงสร้างการจัดการกากกัมมันตรังสีที่ทำงานได้จริง”

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย การพิจารณา SMR ควรกำหนดนโยบายเกี่ยวกับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว กากกัมมันตรังสีระดับต่ำและระดับกลาง กากกัมมันตรังสีระดับสูง เงินกองทุนสำหรับการจัดการระยะยาว และความรับผิดชอบหลังสิ้นสุดโครงการให้ชัดเจนก่อนตัดสินใจดำเนินโครงการ แม้ว่าประเทศไทยจะมีระบบจัดการกากกัมมันตรังสีจากการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์และอุตสาหกรรมอยู่ในระดับหนึ่ง แต่การรองรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องอาศัยขีดความสามารถที่สูงขึ้น ทั้งในด้านปริมาณกากกัมมันตรังสี ระยะเวลาความรับผิดชอบ มาตรฐานกำกับดูแล และกลไกทางการเงินระยะยาว การวางแผนระดับชาติตั้งแต่ช่วงเตรียมความพร้อมจึงเป็นเงื่อนไขสำคัญในการลดความไม่แน่นอน และสร้างความเชื่อมั่นต่อสังคมบนฐานข้อมูลที่โปร่งใสและตรวจสอบได้

การจัดการกากกัมมันตรังสีจึงไม่ใช่ภารกิจปลายทาง แต่เป็นเงื่อนไขตั้งต้นของความยั่งยืน

ด้านที่ 18 การมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรมภายในประเทศ (Industrial involvement)

การพัฒนาโครงการพลังงานนิวเคลียร์ไม่ใช่เพียงการนำเข้าเทคโนโลยี แต่เป็นกระบวนการสร้างศักยภาพทางอุตสาหกรรมของประเทศในระยะยาว ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเน้นว่าการมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรมภายในประเทศเป็นองค์ประกอบสำคัญของความยั่งยืน เพราะช่วยสร้างห่วงโซ่อุปทาน บุคลากรเชิงเทคนิค และความสามารถในการบำรุงรักษาในระยะยาว หากประเทศพึ่งพาต่างประเทศทั้งหมด โครงการจะมีความเสี่ยงด้านต้นทุน ความมั่นคง และการถ่ายทอดความรู้ [150]

ในเชิงโครงสร้าง การมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรมไม่ได้หมายถึงการผลิตเครื่องปฏิกรณ์เอง แต่หมายถึงการพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน เช่น งานก่อสร้าง วิศวกรรม ระบบไฟฟ้า โลจิสติกส์ การบำรุงรักษา และการควบคุมคุณภาพ [150] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA ชี้ว่าประเทศที่สร้างอุตสาหกรรมสนับสนุนได้สำเร็จมักได้รับผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจระยะยาว ทั้งในรูปของการจ้างงาน การถ่ายทอดเทคโนโลยี และความสามารถแข่งขันในตลาดสากล [8]

สำหรับเทคโนโลยี SMR แนวคิดการผลิตแบบโมดูล (Modular manufacturing) อาจเปิดโอกาสให้ประเทศไทยพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุนบางส่วนได้มากกว่าโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม

เนื่องจากรูปแบบการมีส่วนร่วมของภาคอุตสาหกรรมอาจเปลี่ยนจากการก่อสร้างขนาดใหญ่ในพื้นที่โครงการ ไปสู่การผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปนอกพื้นที่ การผลิตในโรงงาน การประกันคุณภาพ และการจัดมาตรฐานห่วงโซ่อุปทาน อย่างไรก็ตาม โอกาสดังกล่าวต้องอาศัยมาตรฐานคุณภาพระดับนิวเคลียร์ ระบบรับรองมาตรฐาน และกรอบกำกับดูแลที่ชัดเจน งานวิจัยล่าสุดสนับสนุนประเด็นนี้ โดย Vanatta et al. (2025) ชี้ว่า การลดต้นทุนของ SMR ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่สัมพันธ์กับการผลิตซ้ำในระดับอุตสาหกรรม ประสบการณ์ของผู้ผลิต นโยบายสนับสนุน และการสร้างตลาดเริ่มต้นที่เพียงพอ [151] ขณะที่ Ahmad & Usman (2025) เน้นว่า ห่วงโซ่อุปทานของเครื่องปฏิกรณ์ขั้นสูงและ SMR ยังต้องอาศัยผู้ผลิตชิ้นส่วนเฉพาะทาง มาตรฐานอุตสาหกรรม การรับรองคุณภาพ และความร่วมมือระหว่างประเทศ [152] ส่วน Wrigley et al. (2024) แสดงให้เห็นว่า การก่อสร้างแบบโมดูลและการผลิตนอกพื้นที่อาจช่วยลดความซับซ้อนของงานก่อสร้าง เพิ่มการควบคุมคุณภาพ และลดความไม่แน่นอนของกำหนดการได้ หากมีการออกแบบที่เหมาะสม ระบบขนส่ง และติดตั้งที่พร้อม และความร่วมมือระหว่างผู้ออกแบบ ผู้ผลิต ผู้รับเหมา และหน่วยงานกำกับดูแล [153] ดังนั้น สำหรับ SMR ขีดความสามารถของภาคอุตสาหกรรมควรถูกประเมินจากมาตรฐานการผลิต การประกันคุณภาพ ความน่าเชื่อถือของห่วงโซ่อุปทาน และกลไกประสานงานกับหน่วยงานกำกับดูแล แนวคิดนี้สอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่ถือว่าภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์โดยตรง มิใช่เพียงผู้จัดหาอุปกรณ์หรือบริการให้แก่โครงการเท่านั้น

ประเด็นนี้จึงชี้วัด “ความสามารถของประเทศในการสร้างฐานอุตสาหกรรมรองรับโครงการระยะยาว”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- ประเมินศักยภาพอุตสาหกรรมภายในประเทศ
- กำหนดยุทธศาสตร์การมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรม
- พัฒนามาตรฐานคุณภาพระดับนิวเคลียร์
- สร้างระบบรับรองและควบคุมคุณภาพ
- วางแผนถ่ายทอดเทคโนโลยี
- เชื่อมโยงอุตสาหกรรมกับการพัฒนาบุคลากร

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 สำรวจศักยภาพและกำหนดยุทธศาสตร์

- ประเมินอุตสาหกรรมที่มีอยู่
- ระบุช่องว่างด้านมาตรฐาน
- วางยุทธศาสตร์การพัฒนา

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศรู้ว่าศักยภาพอุตสาหกรรมอยู่ตรงไหน”

ระยะที่ 2 ยกระดับและเชื่อมระบบ

- พัฒนามาตรฐานคุณภาพ
- จัดตั้งระบบรับรอง
- เริ่มถ่ายทอดเทคโนโลยี

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “อุตสาหกรรมเริ่มเข้าสู่มาตรฐานนิวเคลียร์”

ระยะที่ 3 ทำงานได้จริงในโครงการ

- อุตสาหกรรมภายในประเทศดำเนินการร่วมก่อสร้าง
- ระบบคุณภาพใช้งานได้จริง
- มีห่วงโซ่อุปทานที่มั่นคงและเชื่อถือได้

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ประเทศมีฐานอุตสาหกรรมรองรับโครงการ”

ดังนั้น ประเทศไทยควรประเมินอย่างชัดเจนว่าอุตสาหกรรมภายในประเทศจะสามารถมีบทบาทในส่วนใดของโครงการ SMR ได้บ้าง เช่น งานโยธา ระบบไฟฟ้า ระบบประกอบโรงไฟฟ้า การประกันและควบคุมคุณภาพ

การซ่อมบำรุง หรือการผลิตชิ้นส่วนตามมาตรฐานนิวเคลียร์ และถึงแม้ว่าประเทศไทยมีฐานอุตสาหกรรมก่อสร้าง วิศวกรรม และโลจิสติกส์ที่เข้มแข็ง ซึ่งสามารถใช้เป็นจุดตั้งต้นของการมีส่วนร่วมได้ แต่การเข้าสู่ห่วงโซ่อุปทานระดับนิวเคลียร์ยังต้องอาศัยการยกระดับระบบควบคุมคุณภาพ การรับรองมาตรฐาน และวัฒนธรรมความปลอดภัยในภาคอุตสาหกรรมอย่างเป็นระบบ การวางยุทธศาสตร์ตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อมจึงจะช่วยให้การลงทุนด้านอุตสาหกรรมก่อให้เกิดประโยชน์ระยะยาวต่อประเทศ แทนที่จะเป็นเพียงการรองรับโครงการเฉพาะครั้งหรือชั่วคราวเท่านั้น

การมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรมจึงไม่ใช่เรื่องเศรษฐกิจอย่างเดียวแต่เป็นเรื่องความมั่นคงของระบบด้วย

ด้านที่ 19 การจัดซื้อจัดจ้าง (Procurement)

การจัดซื้อจัดจ้างในโครงการพลังงานนิวเคลียร์เป็นหนึ่งในประเด็นที่มีความเสี่ยงสูงที่สุด เพราะเกี่ยวข้องกับเงินลงทุนจำนวนมาก สัญญาระยะยาว เทคโนโลยีที่ซับซ้อน และความรับผิดชอบด้านความปลอดภัยในระดับสูง ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศระบุว่าความล้มเหลวของหลายโครงการทั่วโลกไม่ได้เกิดจากเทคโนโลยี แต่เกิดจากโครงสร้างสัญญา การบริหารความเสี่ยง และกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างที่ไม่รัดกุม [1,2]

การจัดซื้อในโครงการนิวเคลียร์จึงไม่ใช่เพียงการเลือกผู้ขาย แต่เป็นการออกแบบความสัมพันธ์เชิงสถาบันระหว่างรัฐ ผู้ดำเนินการ ผู้รับเหมา และผู้ควบคุมคุณภาพ สัญญาต้องสะท้อนการแบ่งความรับผิดชอบอย่างชัดเจน โดยเฉพาะด้านความปลอดภัย เวลา ต้นทุน และการถ่ายทอดความรู้ [154,155] ทบวงการพลังงานนิวเคลียร์ OECD-NEA ชี้ว่าประเทศที่ประสบความสำเร็จมักมีระบบการจัดซื้อจัดจ้างที่โปร่งใส ตรวจสอบได้ และอิงมาตรฐานสากล เพราะความเชื่อมั่นของนักลงทุนและสาธารณะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของกระบวนการจัดซื้อ [8]

สำหรับโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) ซึ่งหลายแบบยังอยู่ระหว่างการพัฒนา การจัดซื้อจัดจ้างยิ่งมีความซับซ้อน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีใหม่ รูปแบบสัญญาใหม่ และความไม่แน่นอนของตลาด ดังนั้น กรอบการจัดซื้อจัดจ้างจึงต้องมีความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลง ขณะเดียวกันยังต้องรักษามาตรฐานความปลอดภัยในระดับสูง

การจัดซื้อจัดจ้างสำหรับ SMR ไม่ควรถูกตีความอย่างแคบว่าเป็นเพียงการจัดซื้อเครื่องปฏิกรณ์ หากแต่เป็นการจัดทำสัญญาเชิงระบบที่ครอบคลุมการออกแบบ การสนับสนุนด้านการขออนุญาต การจัดหาเชื้อเพลิง การให้บริการระยะยาว ความรับผิดชอบต่อกากกัมมันตรังสี การฝึกอบรมบุคลากร ระบบดิจิทัล ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ และพันธกรณีด้านการรื้อถอนเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน งานของ Wrigley et al. (2021) สนับสนุนประเด็นนี้โดยชี้ว่า การก่อสร้างและการออกแบบแบบโมดูลนอกพื้นที่อาจช่วยลดความซับซ้อนของงานก่อสร้าง เพิ่มการควบคุมคุณภาพ และลดความเสี่ยงด้านกำหนดการได้ แต่การใช้ประโยชน์จากแนวทางดังกล่าวต้องอาศัยการออกแบบที่สอดคล้องกับการผลิต การจัดซื้อ การขนส่ง การประกอบติดตั้ง และการประกันคุณภาพตั้งแต่ระยะต้นของโครงการ จึงมีนัยสำคัญต่อการกำหนดกลยุทธ์การจัดซื้อจัดจ้างสำหรับ SMR [156]

ในมิติของต้นทุนและกำหนดการ Stewart & Shirvan (2023) ชี้ว่า ความเสี่ยงด้านต้นทุนและการส่งมอบยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องสะท้อนอยู่ในรูปแบบสัญญา การแบ่งความรับผิดชอบ และการบริหารความเสี่ยงของโครงการ แม้ SMR จะถูกคาดหวังว่าจะช่วยลดความซับซ้อนของการก่อสร้าง แต่ความเสี่ยงด้านการส่งมอบยังต้องประเมินอย่างเป็นระบบตั้งแต่ระยะจัดซื้อจัดจ้าง [157] ขณะที่ Forsyth et al. (2026) เน้นว่า ต้นทุนเกินงบของโครงการนิวเคลียร์ไม่ได้เกิดจากปัจจัยทางเทคนิคเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับบทบาท แรงจูงใจ และการประสานงานของเจ้าของโครงการ ผู้รับเหมา ผู้ออกแบบ ผู้จัดหาอุปกรณ์ และหน่วยงานกำกับดูแล ดังนั้นโครงสร้างสัญญาสำหรับ SMR ควรจัดสรรความเสี่ยง ความรับผิดชอบ และแรงจูงใจอย่างเหมาะสม เพื่อลดโอกาสเกิดต้นทุนบานปลาย [158]

ในด้านห่วงโซ่อุปทาน Ahmad & Usman (2025) แสดงให้เห็นว่า การจัดซื้อจัดจ้างสำหรับ SMR ต้องพึ่งพาห่วงโซ่อุปทานที่มีมาตรฐาน ผู้ผลิตชิ้นส่วนเฉพาะทาง และระบบรับรองคุณภาพที่เข้มงวด เนื่องจากชิ้นส่วนและระบบจำนวนมากต้องเป็นไปตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยระดับนิวเคลียร์ งานนี้สะท้อนว่า การจัดซื้อจัด

จ้างสำหรับ SMR ไม่ใช่เพียงการคัดเลือกผู้ขายเทคโนโลยี แต่ต้องประเมินความพร้อมของฐานอุตสาหกรรม ความน่าเชื่อถือของผู้จัดหา และความสามารถในการผลิตซ้ำในระยะยาว [152] นอกจากนี้ Emblemsvåg (2025) ยังชี้ว่า การขยายการใช้ SMR ในเชิงพาณิชย์ต้องอาศัยรูปแบบธุรกิจและกลไกการจัดซื้อที่เอื้อต่อการผลิตซ้ำ การลดต้นทุน และการสร้างตลาดที่ต่อเนื่อง มิฉะนั้น SMR อาจไม่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของการผลิตแบบโมดูลได้เต็มที่ แม้เทคโนโลยีจะมีศักยภาพในเชิงวิศวกรรมก็ตาม [159] ดังนั้นข้อค้นพบจากงานวิจัยข้างต้นสะท้อนว่า การจัดซื้อจัดจ้างสำหรับ SMR ควรถูกออกแบบเป็นกลไกบริหารความเสี่ยงทั้งระบบครอบคลุมต้นทุน กำหนดการส่งมอบ โครงสร้างสัญญา ห่วงโซ่อุปทาน และรูปแบบธุรกิจระยะยาว ทั้งนี้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่ให้ความสำคัญกับการจัดซื้อจัดจ้างในฐานะส่วนหนึ่งของธรรมาภิบาลโครงการนิวเคลียร์ ซึ่งต้องคำนึงถึงคุณภาพ ความปลอดภัย ความโปร่งใส และความรับผิดชอบตลอดกระบวนการส่งมอบโครงการ

ประเด็นนี้จึงชี้วัด “ความสามารถของรัฐในการบริหารความเสี่ยงผ่านโครงสร้างสัญญา”

กิจกรรมสำคัญของด้านนี้

- พัฒนานโยบายและกรอบการจัดซื้อจัดจ้างระดับชาติ
- ออกแบบโครงสร้างสัญญาให้สอดคล้องกับความเสี่ยง
- สร้างระบบประเมินและคัดเลือกผู้ขาย
- กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในห่วงโซ่อุปทาน
- จัดตั้งระบบควบคุมคุณภาพและตรวจสอบ
- วางแผนการถ่ายทอดความรู้จากผู้ขาย

ตัวชี้วัดและหมุดหมายตามระยะการพัฒนา

ระยะที่ 1 วางกรอบและเข้าใจความเสี่ยง

- ศึกษารูปแบบสัญญานิวเคลียร์
- ประเมินความเสี่ยงของการจัดซื้อจัดจ้าง
- พัฒนานโยบายระดับชาติ

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐเข้าใจความเสี่ยงและกรอบสัญญา”

ระยะที่ 2 สร้างระบบจัดซื้อที่ใช้งานได้

- จัดตั้งโครงสร้างระบบการจัดซื้อจัดจ้าง
- พัฒนากระบวนการประเมินผู้ขาย
- เชื่อมระบบกับหน่วยงานกำกับดูแล

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “ระบบจัดซื้อทำงานได้จริง”

ระยะที่ 3 ดำเนินสัญญาและควบคุมคุณภาพ

- ลงนามและบริหารสัญญา
- ควบคุมคุณภาพห่วงโซ่อุปทาน
- ตรวจสอบความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง

หมุดหมายของระยะนี้ คือ “รัฐควบคุมความเสี่ยงเชิงสัญญาได้”

ดังนั้น ประเทศไทยจึงควรกำหนดยุทธศาสตร์การจัดซื้อจัดจ้างด้านนิวเคลียร์ที่ให้ความสำคัญกับการจัดสรรความเสี่ยง การถ่ายทอดเทคโนโลยี ความรับผิดชอบตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการ และการทบทวนทางเทคนิคโดยหน่วยงานอิสระ มากกว่าการพิจารณาจากราคาซื้อเริ่มต้นเพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีประสบการณ์จัดซื้อโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ แต่โครงการนิวเคลียร์ต้องการมาตรฐานการบริหารสัญญาที่เข้มงวดกว่าปกติ การพัฒนากรอบการจัดซื้อจัดจ้างเฉพาะด้านนิวเคลียร์ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจะช่วยลดความเสี่ยงด้านต้นทุน ความล่าช้า และความขัดแย้งเชิงสัญญาในอนาคต

การจัดซื้อที่โปร่งใสและตรวจสอบได้จึงไม่ใช่เพียงเครื่องมือทางเศรษฐกิจ แต่เป็นเงื่อนไขของความเชื่อมั่นสาธารณะ

สรุปโดยรวมได้ว่า กรอบหมุดหมายสำคัญของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศมิได้เป็นเพียงแผนสำหรับการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่เป็นเครื่องมือประเมินความพร้อมเชิงสถาบันของรัฐใน 19 มิติที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 ภาพรวมตัวชี้วัดความพร้อมโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ตามกรอบหมุดหมายสำคัญ การผ่านแต่ละระยะจึงหมายถึงการที่รัฐสามารถแสดงหลักฐานเชิงประจักษ์ว่ากลไกด้านนโยบาย กฎหมาย กำกับดูแล เทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม พร้อมทำงานได้จริงในระดับปฏิบัติการ ไม่ใช่เพียงอยู่ในระดับแผนหรือเจตนารมณ์

ในมุมนี้ ความสำเร็จของโครงการนิวเคลียร์ไม่ได้วัดจากการสร้างเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก หากแต่วัดจากความสามารถของรัฐในการบริหารความเสี่ยงระยะยาวอย่างต่อเนื่อง และในการรักษาความเชื่อมั่นของสังคมผ่านโครงสร้างพื้นฐานเชิงสถาบันที่เข้มแข็ง โปร่งใส และตรวจสอบได้

ตารางที่ 1 ภาพรวมตัวชี้วัดความพร้อมโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ตามกรอบหมุดหมายสำคัญของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA Milestones)

ประเด็นที่	โครงสร้างพื้นฐาน (IAEA issue)	ระยะที่ 1 การวางรากฐานเชิงนโยบาย	ระยะที่ 2 การพัฒนาโครงสร้างสถาบัน	ระยะที่ 3 ความพร้อมเชิงปฏิบัติการ
1	จุดยืนระดับชาติ	มีนโยบายระดับรัฐและองค์กร NEPIO	แผนปฏิบัติการระดับชาติได้รับอนุมัติ	การสนับสนุนเชิงนโยบายอย่างต่อเนื่อง
2	ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์	ยอมรับกรอบความปลอดภัยตามมาตรฐานสากล	มีระบบบริหารความปลอดภัยและกรณีความปลอดภัยที่ได้รับการประเมิน	วัฒนธรรมความปลอดภัยฝังอยู่ในองค์กร
3	การบริหารจัดการโครงการ	จัดตั้งโครงสร้างการบริหารโครงการ	องค์กรดำเนินโครงการมีความพร้อม	ระบบบริหารโครงการใช้งานได้จริง
4	การเงินและการลงทุน	วิเคราะห์รูปแบบการลงทุน	แผนการเงินได้รับอนุมัติ	กลไกเงินทุนระยะยาวได้รับการจัดตั้ง
5	กรอบกฎหมายนิวเคลียร์	จัดทำแผนพัฒนากฎหมายนิวเคลียร์	กฎหมายนิวเคลียร์ได้รับการตราใช้	กฎหมายได้รับการบังคับใช้และทบทวนอย่างต่อเนื่อง
6	การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์	มีพันธกรณีระหว่างประเทศด้านการพิทักษ์ความปลอดภัย	ระบบบัญชีและควบคุมวัสดุนิวเคลียร์ของรัฐ (SSAC) ได้รับการพัฒนา	ระบบ SSAC ดำเนินงานได้เต็มรูปแบบ
7	ระบบการกำกับดูแล	จัดทำแผนพัฒนาระบบการกำกับดูแล	หน่วยงานกำกับดูแลมีความเป็นอิสระ	หน่วยงานกำกับดูแลมีขีดความสามารถเต็มรูปแบบ
8	การป้องกันอันตรายจากรังสี	ประเมินช่องว่างของระบบป้องกันอันตรายจากรังสี	ขยายระบบตรวจวัด ควบคุม และเฝ้าติดตามการได้รับปริมาณรังสี	ระบบควบคุมปริมาณการได้รับรังสีใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

ประเด็นที่	โครงสร้างพื้นฐาน (IAEA issue)	ระยะที่ 1 การวางรากฐานเชิงนโยบาย	ระยะที่ 2 การพัฒนาโครงสร้างสถาบัน	ระยะที่ 3 ความพร้อมเชิงปฏิบัติการ
9	โครงข่ายไฟฟ้า	วิเคราะห์ขีดความสามารถของโครงข่ายไฟฟ้า	แผนยกระดับโครงข่ายได้รับอนุมัติ	ความเชื่อถือได้ของโครงข่ายได้รับการพิสูจน์
10	การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์	วิเคราะห์ความต้องการบุคลากรด้านนิวเคลียร์	ยุทธศาสตร์การพัฒนากำลังคนด้านนิวเคลียร์ระดับชาติ	โปรแกรมพัฒนาบุคลากรดำเนินการอย่างต่อเนื่อง
11	การสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	เริ่มกระบวนการ/โครงการสร้างการมีส่วนร่วมของสังคม	แผนสื่อสารและการสร้างการมีส่วนร่วมระดับชาติ	ความไว้วางใจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในระยะยาว
12	สถานที่ตั้งและสิ่งอำนวยความสะดวกสนับสนุน	ระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพ	ศึกษาพื้นที่ตั้งแล้วเสร็จ	ระบบติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่อย่างต่อเนื่อง
13	การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม	กรอบการประเมิน EHIA พร้อม	การประเมิน EHIA ดำเนินการแล้วเสร็จ	ระบบติดตามสิ่งแวดล้อมระยะยาว
14	การเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉิน	จัดทำแผนการเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉิน	จัดตั้งระบบ EPR แล้ว	ระบบผ่านการฝึกซ้อมจริง
15	ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์และการป้องกันทางกายภาพ	แผนความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์	กำหนด DBT และระบบป้องกันแล้ว	ระบบได้รับการอนุมัติและผ่านการทดสอบแล้ว
16	วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์	ศึกษาทางเลือกด้านเชื้อเพลิง	กำหนดยุทธศาสตร์วัฏจักรเชื้อเพลิง	มีระบบจัดหาและจัดการเชื้อเพลิงพร้อมใช้งาน
17	การจัดการกากกัมมันตรังสี	ออกแบบแผนการจัดการกากกัมมันตรังสี	พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการจัดการกากกัมมันตรังสี	ระบบการจัดการกากกัมมันตรังสีใช้งานได้จริง
18	การมีส่วนร่วมของภาคอุตสาหกรรม	กำหนดนโยบายอุตสาหกรรม	แผนยกระดับขีดความสามารถของอุตสาหกรรมภายในประเทศ	อุตสาหกรรมภายในประเทศร่วมโครงการ
19	การจัดซื้อจัดจ้าง	กำหนดมาตรฐานคุณภาพ	จัดตั้งระบบตรวจสอบและคัดเลือกผู้จัดหา	ระบบจัดซื้อจัดจ้างพร้อมใช้งานได้จริง

หมายเหตุ: ตารางนี้สังเคราะห์จากกรอบการกำหนดหมุดหมายสำคัญของทบวงการฯ ซึ่งกำหนดตัวชี้วัดความพร้อมของประเทศที่เริ่มพัฒนาโครงการพลังงานนิวเคลียร์ โดยแบ่งเป็นสามระยะ: การวางรากฐานเชิงนโยบาย การพัฒนาโครงสร้างสถาบัน และความพร้อมเชิงปฏิบัติการ [1,2]

หลังจากการวิเคราะห์ตามกรอบ 19 ด้านโครงสร้างพื้นฐาน จะเห็นได้ว่าประเด็นต่าง ๆ เชื่อมโยงกันเป็นระบบเดียว การประเมินความพร้อมของประเทศจึงควรเป็นการสังเคราะห์เชิงองค์รวม เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างนโยบาย เทคโนโลยี เศรษฐกิจ และสังคมอย่างเป็นระบบ บทความนี้จึงจัดกลุ่มทั้ง 19 ประเด็นเป็น 4 มิติ เพื่ออธิบายโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ในฐานะระบบของรัฐ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับ

งานศึกษาทางวิชาการที่มองระบบพลังงานเป็นระบบที่ผสานเทคโนโลยีกับโครงสร้างสถาบันและสังคม และเน้นการกำกับดูแลเชิงระบบ มากกว่าการพิจารณาองค์ประกอบแบบแยกส่วน [160-162] ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2 การจัดกลุ่ม 19 ด้านโครงสร้างพื้นฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศตาม 4 มิติหลัก

ลำดับ	โครงสร้างพื้นฐาน (IAEA issue)	การเมืองและนโยบาย	เทคนิคและความปลอดภัย	เศรษฐกิจและอุตสาหกรรม	ทรัพยากรมนุษย์และสังคม
1	จุดยืนระดับชาติ	✓			
2	ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์		✓		
3	การบริหารจัดการโครงการ				✓
4	การเงินและการลงทุน			✓	
5	กรอบกฎหมายนิวเคลียร์	✓			
6	การพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์	✓			
7	ระบบการกำกับดูแล	✓			
8	การป้องกันอันตรายจากรังสี		✓		
9	โครงข่ายไฟฟ้า		✓		
10	การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์				✓
11	การสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย				✓
12	สถานที่ตั้งและสิ่งอำนวยความสะดวกสนับสนุน		✓		
13	การคุ้มครองสิ่งแวดล้อม		✓		
14	การเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉิน		✓		
15	ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์และการป้องกันทางกายภาพ		✓		
16	วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์			✓	
17	การจัดการกากกัมมันตรังสี			✓	
18	การมีส่วนร่วมของภาคอุตสาหกรรม			✓	
19	การจัดซื้อจัดจ้าง			✓	

หมายเหตุ: การจัดกลุ่มในตารางนี้เป็นการจำแนกตามมิติหลักของแต่ละประเด็น โดยบางประเด็นอาจเกี่ยวข้องกับมากกว่าหนึ่งมิติ เช่น กรอบกฎหมาย ระบบการกำกับดูแล ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ วัฏจักรเชื้อเพลิง และการจัดการกากกัมมันตรังสี

1. มิติการเมืองและนโยบาย

มิตินี้เป็นฐานของระบบทั้งหมด เพราะกำหนดทิศทาง ความชอบธรรม และความต่อเนื่องของนโยบายระยะยาว สิ่งสำคัญไม่ใช่เพียงการตัดสินใจสร้างโรงไฟฟ้า แต่คือความสามารถของรัฐในการรักษาจุดยืนระดับชาติอย่างต่อเนื่องข้ามรัฐบาล การมีกฎหมายที่ชัดเจน หน่วยงานกำกับดูแลที่เป็นอิสระ และการปฏิบัติตามพันธกรณีระหว่างประเทศ เป็นเงื่อนไขของความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพเชิงสถาบัน ซึ่งเป็นพื้นฐานของทุกมิติอื่น

2. มิติเทคนิคและความปลอดภัย

ความปลอดภัยเป็นปัจจัยสำคัญของโครงการนิวเคลียร์ และต้องถูกออกแบบเป็นระบบครบวงจร ตั้งแต่ความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม ความมั่นคง การเตรียมพร้อมภาวะฉุกเฉิน การป้องกันอันตรายจากรังสี ไปจนถึง

การจัดการกากกัมมันตรังสี มิตินี้ไม่ใช่เพียงเรื่องเทคโนโลยี แต่คือการสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยระดับชาติ ความเข้มแข็งของระบบความปลอดภัยเป็นตัวชี้วัดความไว้วางใจของสังคมและประชาคมระหว่างประเทศ

3. มิติเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม

ความยั่งยืนของโครงการขึ้นอยู่กับความสามารถทางเศรษฐกิจและฐานอุตสาหกรรมในประเทศ โครงการนิวเคลียร์มีต้นทุนเริ่มต้นสูงและรอบเวลาคืนทุนยาว จึงต้องมีกลไกการเงินที่ลดความเสี่ยง พร้อมทั้งสร้างการมีส่วนร่วมของอุตสาหกรรมภายในประเทศ ไม่เช่นนั้น โครงการจะเป็นเพียงการนำเข้าเทคโนโลยีโดยไม่สร้างศักยภาพภายใน ยุทธศาสตร์เชื้อเพลิงและกากกัมมันตรังสีเป็นส่วนหนึ่งของมิตินี้ เพราะเกี่ยวข้องกับต้นทุนระยะยาวและความมั่นคงพลังงาน

4. มิติสังคม

ทรัพยากรมนุษย์และความไว้วางใจของสังคมเป็นเงื่อนไขของการดำรงอยู่ระยะยาว โครงการนิวเคลียร์ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความรู้และวัฒนธรรมความปลอดภัย ควบคู่กับการมีส่วนร่วมของสาธารณะอย่างโปร่งใส การสื่อสารต้องตั้งอยู่บนฐานวิทยาศาสตร์ ไม่ใช่การประชาสัมพันธ์ มิตินี้จึงเป็นคำถามเชิงโครงสร้างว่า รัฐสามารถสร้างความเชื่อมั่นระยะยาวกับประชาชนได้หรือไม่

โดยสรุป การตัดสินใจด้านนิวเคลียร์คือพันธะระยะยาวระหว่างรัฐและสังคม ไม่ใช่เพียงการเลือกเทคโนโลยี แต่เป็นการสร้างระบบที่ต้องดำเนินต่อเนื่องข้ามหลายชั่วอายุคน

ข้อจำกัดและข้อควรระวังในการประยุกต์ใช้กรอบการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์

แม้กรอบการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ 19 ด้าน และแนวทางการกำหนดหมุดหมายสำคัญของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ จะเป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบความพร้อมของประเทศที่กำลังพิจารณาเริ่มโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่การนำกรอบดังกล่าวมาใช้จำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ กรอบนี้ควรถูกทำความเข้าใจในฐานะ “เงื่อนไขจำเป็น” สำหรับการเตรียมความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐาน มากกว่าจะเป็น “เงื่อนไขเพียงพอ” สำหรับการตัดสินใจว่าประเทศควรเดินหน้าโครงการนิวเคลียร์หรือไม่ เนื่องจากการตัดสินใจดังกล่าวยังต้องอาศัยการประเมินบริบทเฉพาะของแต่ละประเทศนั้นอย่างรอบด้าน ทั้งในด้านโครงสร้างระบบโครงข่ายไฟฟ้า ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ความสามารถทางการเงิน เสถียรภาพของนโยบายระยะยาว ศักยภาพของหน่วยงานกำกับดูแล รวมถึงระดับความไว้วางใจและการยอมรับของสังคม [1,163]

นอกจากนี้ แม้กรอบโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้านจะสามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลได้ แต่คุณลักษณะเฉพาะของ SMR ทำให้จำเป็นต้องตีความและปรับใช้กรอบดังกล่าวให้เหมาะสมกับบริบทของเทคโนโลยีมากขึ้น ประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม ได้แก่ การอนุญาตแบบหลายโมดูล การผลิตและประกอบจากโรงงาน การขนส่งโมดูล การพึ่งพาผู้ขายเทคโนโลยี ห่วงโซ่อุปทานเชื้อเพลิงและชิ้นส่วนสำคัญ รูปแบบธุรกิจ ตลอดจนการจัดสรรบทบาทและความรับผิดชอบระหว่างรัฐ หน่วยงานกำกับดูแล ผู้ดำเนินโครงการและผู้ขายเทคโนโลยี [163,164]

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย กรอบแนวทางตามทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ควรถูกใช้เป็นฐานในการประเมินความพร้อมเชิงโครงสร้างพื้นฐาน ควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงวิพากษ์จากแหล่งข้อมูลอื่น การพิจารณา SMR จึงไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการตรวจสอบว่าประเทศมีความพร้อมครบตามรายการประเมินหรือไม่ แต่ควรพิจารณาว่าประเทศมีความสามารถเพียงพอในการกำกับดูแล บริหารความเสี่ยง จัดการภาระระยะยาว และรับผิดชอบต่อเทคโนโลยีนิวเคลียร์ตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการได้อย่างแท้จริงหรือไม่

กรณีศึกษาเปรียบเทียบการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลในต่างประเทศและบทเรียนเชิงนโยบายสำหรับประเทศไทย

การพิจารณาความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานสำหรับโครงการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล ไม่ควรอาศัยเพียงกรอบโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้านของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศเท่านั้น

แต่ควรพิจารณาประสบการณ์ของประเทศอื่นที่มีสถานะการพัฒนาแตกต่างกัน เพื่อให้เห็นทั้งเงื่อนไขความสำเร็จ ข้อจำกัด และความเสี่ยงในมิตินโยบาย กฎหมาย การกำกับดูแล การเงิน เทคโนโลยี พื้นที่ตั้ง ห่วงโซ่อุปทาน และการยอมรับของสังคม

หัวข้อนี้จึงนำเสนอกรณีศึกษาเปรียบเทียบจากประเทศที่มีบทบาทแตกต่างกัน ทั้งประเทศที่มีโครงการ SMR ก้าวหน้า ประเทศที่เชื่อมโยง SMR กับยุทธศาสตร์พลังงานและอุตสาหกรรม ประเทศขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างเตรียมความพร้อม ประเทศที่ยังรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ และประเทศกำลังเริ่มต้นโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ กรณีเหล่านี้ช่วยสะท้อนว่า SMR มิใช่เพียงทางเลือกทางเทคโนโลยี แต่เป็นโจทย์เชิงระบบที่ต้องอาศัยความพร้อมของประเทศโดยรวม

1. กรณีศึกษาเปรียบเทียบประเทศที่มีสถานะการพัฒนาแตกต่างกัน

หัวข้อนี้นำเสนอกรณีศึกษาเปรียบเทียบจากประเทศที่มีสถานะการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลแตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความก้าวหน้า ข้อจำกัด ความเสี่ยง และบทเรียนเชิงนโยบายที่เกี่ยวข้องกับประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กรณีศึกษาเปรียบเทียบการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลในต่างประเทศและบทเรียนสำหรับประเทศไทย

ประเทศ	สถานะ/บทบาท	ข้อจำกัด/ความเสี่ยงที่ควรพิจารณา	บทเรียนสำหรับประเทศไทย
แคนาดา	เป็นกรณีของประเทศที่มีระบบกำกับดูแลด้านนิวเคลียร์เข้มแข็งและมีประสบการณ์สูง โดยคณะกรรมการความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของแคนาดา(Canadian Nuclear Safety Commission: CNSC) ได้ออกใบอนุญาตให้ Ontario Power Generation ก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์ BWRX-300 จำนวน 1 เครื่อง ณ โครงการ Darlington New Nuclear Project [165,166]	แม้จะมีหน่วยงานกำกับดูแลที่เข้มแข็ง แต่การพัฒนา SMR ยังต้องเผชิญความเสี่ยงจากการเป็นโครงการรุ่นแรกของการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ ความไม่แน่นอนด้านต้นทุนและระยะ เวลาก่อสร้าง ความพร้อมของห่วงโซ่อุปทาน การจัดหาเชื้อเพลิง และการยอมรับของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งเป็นมิติที่ OECD-NEA ใช้ประเมินความก้าวหน้าของ SMR นอกเหนือจากความเป็นไปได้ทางเทคนิคเพียงอย่างเดียว [167]	ประเทศไทยควรให้ความสำคัญกับการเตรียมความพร้อมของหน่วยงานกำกับดูแลก่อนตัดสินใจพัฒนาโครงการจริง โดยเฉพาะการกำหนดแนวทางการออกใบอนุญาตที่ชัดเจน การพัฒนาบุคลากรและสมรรถนะของผู้กำกับดูแล การจัดกระบวนการรับฟังความคิดเห็นของสาธารณะ การกำกับดูแลห่วงโซ่อุปทาน และการประเมินความเสี่ยงจากการติดตั้งหลายโมดูลในพื้นที่เดียวกัน
โปแลนด์	เป็นกรณีของประเทศที่เชื่อมโยงการพัฒนา SMR เข้ากับยุทธศาสตร์พลังงาน ความมั่นคงทางพลังงาน และการยกระดับขีดความสามารถของภาค อุตสาหกรรม โดย ORLEN และ Synthos Green Energy ได้บรรลุข้อตกลงเพื่อเดินหน้าโครงการ BWRX-300 ณ เมือง Włocławek ซึ่งถูก	ความท้าทายสำคัญอยู่ที่การประสานนโยบายพลังงานกับรูปแบบการเงิน สิทธิการใช้เทคโนโลยี การคัดเลือกพื้นที่ตั้ง การพัฒนาห่วงโซ่อุปทาน และความต่อเนื่องทางการเมือง รวมถึงความเสี่ยงจากการพึ่งพาผู้ขายเทคโนโลยีหรือพันธมิตรต่างประเทศมากเกินไป [167] นอกจากนี้ กรณีโปแลนด์ยังสะท้อนว่าการพัฒนาโครงการนิวเคลียร์	SMR ควรถูกวางอยู่ในยุทธศาสตร์พลังงานและยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมของประเทศ ไม่ใช่เป็นเพียงการเลือกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ประเทศไทยจึงควรพิจารณาควบคู่กันทั้งนโยบายพลังงาน รูปแบบการเงิน การมีส่วนร่วมของภาคอุตสาหกรรม ห่วงโซ่

ประเทศ	สถานะ/บทบาท	ข้อจำกัด/ความเสี่ยงที่ควรพิจารณา	บทเรียนสำหรับประเทศไทย
	กำหนดเป็นพื้นที่ตั้งลำดับแรกของโครงการ SMR ในโปแลนด์ ขณะเดียวกัน ORLEN ยังตั้งเป้าพัฒนา SMR รวมอย่างน้อย 0.6 GW ภายในปี 2035 [168,169]	จำเป็นต้องมาพร้อมกับการเสริมสมรรถนะของหน่วยงานกำกับดูแลทั้งด้านบุคลากร เครื่องมือวิเคราะห์ การตรวจสอบ และระบบสนับสนุนทางเทคนิค [170]	อุปทาน และขีดความสามารถภายในประเทศ
เอสโตเนีย	เป็นกรณีของประเทศขนาดเล็กและประเทศเริ่มต้นโครงการนิวเคลียร์ที่ศึกษาความเป็นไปได้ของ SMR อย่างเป็นขั้นตอนผ่านคณะทำงานระดับชาติ การประเมินโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ตามแนวทางของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ และการจัดทำรายงานเพื่อประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบาย [171,172] ต่อมารัฐสภาเอสโตเนียได้มีมติสนับสนุนการรับพลังงานนิวเคลียร์และเดินหน้าจัดทำกรอบกฎหมายและหน่วยงานกำกับดูแลที่เกี่ยวข้อง [173] และในปี 2026 ได้ผ่านกฎหมาย Nuclear Energy and Safety Act เพื่อวางกรอบทางกฎหมายสำหรับการผลิตและการใช้พลังงานนิวเคลียร์ [174]	ในฐานะประเทศที่ยังไม่มีประสบการณ์เดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์ ความเสี่ยงสำคัญอยู่ที่ความพร้อมของกฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร การคัดเลือกพื้นที่ตั้ง การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม การยอมรับของสังคม และความสามารถของรัฐในการกำกับดูแลผู้พัฒนาโครงการและผู้ขายเทคโนโลยี [171,172]	ประเทศเริ่มต้นโครงการควรเริ่มจากการประเมินความพร้อมของประเทศอย่างเป็นระบบก่อนตัดสินใจลงทุน โดยให้ความสำคัญกับกรอบกฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร การวางแผนพื้นที่ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการสื่อสารกับชุมชนอย่างต่อเนื่อง
สิงคโปร์	เป็นกรณีของประเทศที่ยังไม่ตัดสินใจใช้พลังงานนิวเคลียร์ แต่ให้ความสำคัญกับการสร้างขีดความสามารถในการประเมินเทคโนโลยี ความปลอดภัย ความมั่นคง ความคุ้มค่า และความเหมาะสมของ SMR และเครื่องปฏิกรณ์ขั้นก้าวหน้าในบริบทของประเทศ [175,176]	แนวทางดังกล่าวช่วยลดความเสี่ยงจากการตัดสินใจเร็วเกินไป แต่ยังมีข้อจำกัดจากขนาดพื้นที่ ความหนาแน่นของประชากร ความอ่อนไหวด้านความปลอดภัย การจัดการกากกัมมันตรังสี และข้อจำกัดด้านพื้นที่ตั้งในระยะยาว [177]	สิงคโปร์สะท้อนแนวคิดการรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ กล่าวคือ การสร้างความรู้ ขีดความสามารถ และเครือข่ายความร่วมมือก่อน โดยยังไม่สร้างพันธะเชิงนโยบายทันที แนวทางนี้มีความเหมาะสมต่อประเทศไทยในระยะเตรียมความพร้อม
บังกลาเทศ	ไม่ใช่กรณี SMR โดยตรง แต่เป็นกรณีของประเทศเริ่มต้นโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ผ่านโครงการ	ความเสี่ยงสำคัญอยู่ที่การพึ่งพาผู้ขายเทคโนโลยีและเงินกู้ต่างประเทศ การถ่ายทอดความรู้ ความพร้อมของบุคลากร การกำกับดูแลระหว่าง	กรณีนี้ชี้ว่า แม้ประเทศเริ่มต้นจะเข้าสู่โครงการจริงแล้ว ก็ยังต้องลงทุนอย่างต่อเนื่องในด้านบุคลากร วัฒนธรรมความ

ประเทศ	สถานะ/บทบาท	ข้อจำกัด/ความเสี่ยงที่ควรพิจารณา	บทเรียนสำหรับประเทศไทย
	Rooppur ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์ VVER-1200 จำนวน 2 หน่วย โดยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ตามแนวทางของ IAEA และมีการทบทวนความพร้อมด้านความปลอดภัยก่อนเข้าสู่การเดินเครื่อง [178,179]	ก่อสร้างและก่อนเดินเครื่อง การเตรียมพร้อมกรณีฉุกเฉิน ตลอดจนภาระระยะยาวด้านเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี [179,180]	ปลอดภัย การกำกับดูแล การเตรียมพร้อมกรณีฉุกเฉิน และการลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาต่างประเทศ
โรมาเนีย	เป็นกรณี SMR ที่เชื่อมโยงกับการเปลี่ยนผ่านจากพื้นที่โรงไฟฟ้าถ่านหินเดิม โดยโครงการ DoiceŞti ใช้เทคโนโลยี NuScale จำนวน 6 โมดูล รวมกำลังผลิต 462 เมกะวัตต์ไฟฟ้า และได้รับการตัดสินใจลงทุนขั้นสุดท้ายจาก Nuclearelectrica ในปี ค.ศ. 2026 [181,182]	แม้โครงการมีความก้าวหน้าและผ่านการประเมินกระบวนการคัดเลือกพื้นที่ตั้งตามมาตรฐานความปลอดภัยของ IAEA แต่ยังมีความเสี่ยงจากเทคโนโลยีที่อยู่ในระยะเริ่มต้นของการใช้งานเชิงพาณิชย์ ความไม่แน่นอนด้านต้นทุนและการจัดหาเงินทุน การพึ่งพาผู้ขายเทคโนโลยีต่างประเทศ การจัดการโครงการหลายโมดูล และการพิสูจน์ความสามารถในการใช้โครงสร้างพื้นฐานเดิมอย่างปลอดภัย [183,184]	ประเทศไทยสามารถใช้กรณีโรมาเนียเป็นบทเรียนเรื่องการประเมินพื้นที่ตั้ง การใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานพลังงานเดิม การจัดการความร่วมมือระหว่างประเทศ และการประเมินความเสี่ยงด้านการเงินเทคโนโลยี และห่วงโซ่อุปทานก่อนตัดสินใจลงทุน

ตารางที่ 3 ชี้ว่า แต่ละประเทศให้บทเรียนแตกต่างกัน แคนาดาเน้นความพร้อมของหน่วยงานกำกับดูแล โปแลนด์เน้นการเชื่อมโยงนิวเคลียร์กับยุทธศาสตร์พลังงานและอุตสาหกรรม เอสโตเนียเน้นกระบวนการเตรียมความพร้อมของประเทศขนาดเล็ก สิงคโปร์เน้นการรักษาทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ บังกลาเทศให้บทเรียนจากประเทศเริ่มต้นโครงการจริง และโรมาเนียสะท้อนการใช้ SMR เพื่อเปลี่ยนผ่านจากโครงสร้างพื้นฐานพลังงานเดิม กรณีเหล่านี้ชี้ร่วมกันว่า SMR มิใช่ทางลัดที่ทำให้ประเทศสามารถข้ามขั้นตอนการเตรียมความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ได้ หากแต่เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้บางประเด็น เช่น การออกใบอนุญาต ห่วงโซ่อุปทาน การเงิน การกำกับดูแลผู้ขายเทคโนโลยี และการยอมรับของสังคม มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างเพิ่มเติมจากประเทศผู้พัฒนาเทคโนโลยีและประเทศที่มีประสบการณ์ใช้งาน

นอกจากกรณีศึกษาหลักข้างต้น ยังมีตัวอย่างจากประเทศอื่นที่ช่วยสะท้อนทิศทางและข้อจำกัดของการพัฒนา SMR ในระดับโลก ดังต่อไปนี้

จีน เป็นกรณีของประเทศที่ผลักดันเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (Small Modular Reactor: SMR) ในเชิงอุตสาหกรรมและการสาธิตเทคโนโลยีอย่างเป็นรูปธรรม โดยโครงการ Linglong One หรือ ACP100 ที่มณฑลไห่หนานได้รับการบันทึกในฐานข้อมูลระบบสารสนเทศเครื่องปฏิกรณ์กำลังของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ขนาด 125 เมกะวัตต์ไฟฟ้า และอยู่ระหว่างการก่อสร้าง [185] ขณะเดียวกัน CNNC นำเสนอโครงการนี้ว่าเป็นโครงการ SMR เชิงพาณิชย์บนบกที่มีความก้าวหน้า โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์สำคัญและผ่านขั้นตอนทดสอบระบบก่อนการบรรจุเชื้อเพลิงในช่วงปี ค.ศ. 2025–2026 [186,187] กรณีนี้สะท้อนว่า ประเทศที่มีอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ ห่วงโซ่อุปทานภายในประเทศ และขีดความสามารถด้านวิศวกรรมการผลิตที่เข้มแข็ง อาจผลักดัน SMR ได้รวดเร็วกว่าประเทศเริ่มต้น อย่างไร

ก็ตาม โครงการยังต้องพิสูจน์ความสามารถด้านการเดินเครื่องจริง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนตลอดวัฏจักรโครงการ และศักยภาพในการผลิตซ้ำในระดับอุตสาหกรรม

รัสเซีย เป็นกรณีที่แตกต่างจากประเทศอื่น เนื่องจากมีประสบการณ์เดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ลอยน้ำ Akademik Lomonosov ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์ KLT-40S จำนวน 2 หน่วย โดยแต่ละหน่วยมีกำลังผลิตไฟฟ้า 35 เมกะวัตต์ และเริ่มเดินเครื่องเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2020 [188] โรงไฟฟ้าดังกล่าวสามารถผลิตทั้งไฟฟ้าและความร้อนให้แก่เมือง Pevek และระบบไฟฟ้าในภูมิภาคห่างไกลของรัสเซีย จึงสะท้อนศักยภาพของ SMR สำหรับระบบพลังงานเฉพาะพื้นที่ พื้นที่ห่างไกล หรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านโครงข่ายไฟฟ้า [189] อย่างไรก็ตาม กรณีนี้ยังชี้ให้เห็นประเด็นที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม ได้แก่ ความมั่นคงปลอดภัยทางกายภาพ การขนส่งและจัดเก็บเชื้อเพลิง การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี การตอบสนองกรณีฉุกเฉินในพื้นที่เฉพาะ และการกำกับดูแลเทคโนโลยีที่มีรูปแบบแตกต่างจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์บนบกทั่วไป [190]

สหรัฐอเมริกา เป็นกรณีศึกษาสำคัญด้านการออกใบอนุญาตและการรับรองแบบเครื่องปฏิกรณ์ โดย NuScale เป็นแบบ SMR รายแรกที่ได้รับการรับรองแบบจากคณะกรรมการกำกับดูแลนิวเคลียร์ของสหรัฐอเมริกา (U.S. Nuclear Regulatory Commission: U.S. NRC) ในปี ค.ศ. 2023 และต่อมาแบบ NuScale US460 ขนาด 77 เมกะวัตต์ไฟฟ้าต่อโมดูล ได้รับการอนุมัติแบบมาตรฐานในปี ค.ศ. 2025 [191,192] อย่างไรก็ตาม กรณีนี้สะท้อนว่า ความก้าวหน้าด้านการกำกับดูแลและความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมไม่ได้รับประกันความสำเร็จเชิงพาณิชย์โดยอัตโนมัติ เนื่องจากโครงการ SMR ยังขึ้นอยู่กับต้นทุน ผู้รับซื้อไฟฟ้า รูปแบบธุรกิจ การจัดหาเงินทุน และความสามารถในการแข่งขันกับแหล่งพลังงานอื่น ดังเห็นได้จากการยุติโครงการ Carbon Free Power Project ในปี ค.ศ. 2023 [193,194] อย่างไรก็ดี NuScale ยังคงเดินหน้าโครงการอื่นในระยะต่อมา กรณีดังกล่าวยังคงเป็นบทเรียนสำคัญว่า การพัฒนา SMR ต้องพิจารณาทั้งมิติด้านเทคโนโลยี กฎระเบียบ เศรษฐศาสตร์ และความเสี่ยงของโครงการแรกอย่างรอบด้าน สำหรับประเทศไทย บทเรียนสำคัญคือ การพิจารณา SMR ไม่ควรอาศัยเพียงการรับรองแบบจากต่างประเทศ แต่ต้องประเมินควบคู่กันทั้งความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าไทย ความพร้อมด้านกฎหมายและการกำกับดูแล ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ การจัดหาเงินทุน ผู้รับซื้อไฟฟ้า และความเสี่ยงของโครงการแรก การรับรองแบบจากประเทศต้นทางจึงควรถูกมองเป็นจุดเริ่มต้นของการลดความไม่แน่นอนด้านเทคนิค มิใช่หลักประกันความสำเร็จของโครงการ

สหราชอาณาจักร เป็นกรณีที่สะท้อนการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) เป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์พลังงานและยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมนิวเคลียร์ภายในประเทศ โดยรัฐบาลสหราชอาณาจักรได้เลือก Rolls-Royce SMR เป็นผู้เสนอเทคโนโลยีหลักในการพัฒนาโครงการ SMR ภายใต้ Great British Energy-Nuclear ในปี ค.ศ. 2025 และต่อมาได้ลงนามสัญญาเพื่อเริ่มกิจกรรมด้านการออกแบบ การมีส่วนร่วมกับหน่วยงานกำกับดูแล และการเตรียมโครงการในปี ค.ศ. 2026 [195,196] กรณีนี้ชี้ให้เห็นว่า SMR มิใช่เพียงทางเลือกด้านพลังงาน แต่ยังเกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุตสาหกรรมขั้นสูง การสร้างงานทักษะสูง มาตรฐานการผลิต การรับรองคุณภาพ และขีดความสามารถของห่วงโซ่อุปทานภายในประเทศ ซึ่งเป็นประเด็นที่ประเทศไทยควรพิจารณาควบคู่กับการประเมินด้านเทคโนโลยีและความปลอดภัย

ฝรั่งเศส เป็นกรณีที่ให้บทเรียนเชิงระมัดระวังเกี่ยวกับการพัฒนาแบบเครื่องปฏิกรณ์และความท้าทายในการทำให้เทคโนโลยีพร้อมใช้งานเชิงพาณิชย์ แม้ว่าบริษัท Électricité de France (EDF) เป็นบริษัทไฟฟ้ารายใหญ่ (รัฐวิสาหกิจ) ของฝรั่งเศส ได้จัดตั้งบริษัท NUWARD ในปี ค.ศ. 2023 เพื่อพัฒนา SMR และนำโครงการเข้าสู่ขั้นการออกแบบพื้นฐาน [197] แต่ต่อมา EDF ได้ปรับทิศทางการออกแบบ โดยเน้นการใช้เทคโนโลยีที่พิสูจน์แล้วมากขึ้น เพื่อลดความเสี่ยงด้านต้นทุน ระยะเวลา และเพิ่มความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ [198,199] ขณะเดียวกัน กรณี NUWARD ยังถูกใช้เป็นพื้นที่เรียนรู้เชิงกำกับดูแลผ่านกระบวนการทบทวนร่วมระยะต้นของหน่วยงานกำกับดูแลนิวเคลียร์ยุโรป ซึ่งสะท้อนความสำคัญของการหารือด้านความปลอดภัยและข้อกำหนดกำกับดูแลตั้งแต่ก่อนการยื่นขออนุญาตจริง [200]

กล่าวโดยสรุป บทเรียนจากประเทศเหล่านี้สะท้อนย้ำว่า ความสำเร็จของ SMR ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าของแบบเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความพร้อมของระบบสถาบัน อุตสาหกรรม การกำกับดูแล การเงิน และความสามารถในการจัดการความเสี่ยงตลอดอายุโครงการอย่างรอบด้าน

2. บทเรียนเชิงเปรียบเทียบสำหรับประเทศไทย

เมื่อพิจารณากรณีศึกษาหลักร่วมกับตัวอย่างเพิ่มเติมจากประเทศผู้พัฒนาเทคโนโลยี จะสะท้อนให้เห็นถึงบทเรียนสำคัญต่อประเทศไทยอย่างน้อย 4 ประการ

ประการที่ 1 ความพร้อมด้านนิวเคลียร์ต้องเริ่มจากความชัดเจนเชิงนโยบายและความต่อเนื่องของรัฐ ไม่ใช่เริ่มจากการเลือกแบบเครื่องปฏิกรณ์

ประการที่ 2 หน่วยงานกำกับดูแลต้องมีสมรรถนะเพียงพอก่อนการตัดสินใจดำเนินโครงการจริง โดยเฉพาะด้านการออกใบอนุญาต การประเมินความปลอดภัย การกำกับห่วงโซ่อุปทาน การกำกับระบบดิจิทัล และระบบควบคุม ตลอดจนการประเมินความเสี่ยงจากการติดตั้งหลายโมดูล

ประการที่ 3 การพึ่งพาผู้ขายเทคโนโลยีและเงินทุนต่างประเทศอาจช่วยเร่งโครงการได้ แต่ต้องมีมาตรการรองรับด้านการถ่ายทอดความรู้ อำนาจต่อรองของรัฐ และความรับผิดชอบระยะยาว

ประการที่ 4 การยอมรับของสาธารณชนต้องสร้างผ่านความโปร่งใส การสื่อสารสองทาง และการมีส่วนร่วมตั้งแต่ระยะก่อนการตัดสินใจเชิงนโยบาย

ดังนั้น สำหรับประเทศไทย โครงการ SMR ควรถูกพิจารณาในฐานะ “ทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์” ที่ต้องอาศัยการเตรียมความพร้อมเป็นลำดับขั้น มากกว่าการประกาศพันธะเชิงนโยบายทันที การวิเคราะห์กรณีศึกษาต่างประเทศจึงสนับสนุนข้อเสนอว่า ประเทศไทยควรเริ่มจากการกำหนดจุดยืนระดับชาติ การจัดทำแผนที่นำทางด้านกฎหมายและการกำกับดูแล การพัฒนาบุคลากรและองค์กรสนับสนุนทางเทคนิค การศึกษารูปแบบการเงินและการเป็นเจ้าของโครงการ การวางแผนวัฏจักรเชื้อเพลิงและกากกัมมันตรังสี การประเมินพื้นที่ตั้ง และการสร้างกระบวนการสื่อสารกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอย่างต่อเนื่อง ก่อนพิจารณาการตัดสินใจลงทุนหรือดำเนินโครงการในอนาคต

การอภิปรายเชิงสังเคราะห์: สถานการณ์ประเทศไทยในกรอบโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานด้านนิวเคลียร์ของประเทศไทยตามกรอบ 19 ด้านของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ จะเห็นว่าไทยมีฐานความพร้อมบางส่วนจากกฎหมายหลัก หน่วยงานกำกับดูแล ระบบการอนุญาตและตรวจสอบ การป้องกันอันตรายจากรังสี ตลอดจนประสบการณ์การใช้รังสีในภาคการแพทย์ อุตสาหกรรม การวิจัย และการศึกษา อย่างไรก็ตาม ความพร้อมดังกล่าวยังมีขอบเขตจำกัด และยังไม่อาจถือเป็นความพร้อมเต็มรูปแบบสำหรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์หรือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (Small Modular Reactor: SMR)

ดังนั้น การประเมินสถานการณ์ของประเทศไทยจึงควรมองในเชิงระบบ โดยจัดกลุ่มประเด็นโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้านออกเป็น 4 มิติหลัก ได้แก่ มิติการเมืองและนโยบาย มิติเทคนิคและความปลอดภัย มิติเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม และมิติทรัพยากรมนุษย์และสังคม ทั้งนี้ การจัดกลุ่มดังกล่าวเป็นการจำแนกตามมิติเด่นของแต่ละประเด็น มิได้หมายความว่าแต่ละด้านแยกขาดจากกันอย่างสมบูรณ์

1. ช่องว่างสำคัญและลำดับความสำคัญในการพัฒนา

เมื่อวิเคราะห์ตาม 4 มิติหลัก ช่องว่างสำคัญของประเทศไทยสามารถสังเคราะห์ได้ดังนี้

- **มิติการเมืองและนโยบาย** เป็นช่องว่างที่มีความสำคัญสูงที่สุด เนื่องจากไทยยังไม่มีจุดยืนระดับชาติที่ชัดเจนต่อบทบาทของพลังงานนิวเคลียร์ในระบบพลังงานระยะยาว แม้มีกฎหมายและหน่วยงานกำกับดูแลอยู่แล้ว

แต่ยังต้องประเมินความเพียงพอของกรอบกฎหมาย ระบบกำกับดูแล และพันธกรณีระหว่างประเทศให้รองรับโครงการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือ SMR โดยเฉพาะ

- **มิติเทคนิคและความปลอดภัย** ไทยมีฐานจากระบบความปลอดภัยทางรังสีและการกำกับดูแลกิจกรรมทางรังสี แต่ยังขาดประสบการณ์ตรงในการประเมินความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การกำกับการก่อสร้างและเดินเครื่อง การเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉิน การประเมินพื้นที่ตั้ง และการบูรณาการ SMR เข้ากับระบบไฟฟ้าของไทย

- **มิติเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม** ยังเป็นช่องว่างสำคัญ เนื่องจากไทยยังไม่มีแบบจำลองการเงินเฉพาะสำหรับโครงการนิวเคลียร์ ไม่มีกรอบการจัดสรรความเสี่ยงระหว่างรัฐ ผู้ลงทุน ผู้ขายเทคโนโลยี และผู้ใช้ไฟฟ้า อีกทั้งห่วงโซ่อุปทานภายในประเทศยังต้องยกระดับให้สอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพนิวเคลียร์ รวมถึงต้องวางยุทธศาสตร์วัฏจักรเชื้อเพลิง การจัดซื้อจัดจ้าง และการจัดการกากกัมมันตรังสีระยะยาว

- **มิติทรัพยากรมนุษย์และสังคม** เป็นเงื่อนไขสำคัญต่อความยั่งยืนของโครงการ ไทยยังต้องพัฒนาบุคลากรเฉพาะทางด้านการกำกับดูแล วิศวกรรมเครื่องปฏิกรณ์ การวิเคราะห์ความปลอดภัย การเดินเครื่อง และการจัดการเหตุฉุกเฉิน ขณะเดียวกันต้องสร้างกระบวนการสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอย่างโปร่งใสและต่อเนื่อง เพราะความยอมรับของสังคมไม่อาจเกิดจากการให้ข้อมูลฝ่ายเดียว แต่ต้องอาศัยความไว้วางใจต่อกระบวนการตัดสินใจและการกำกับดูแลของรัฐ

2. SMR กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบดั้งเดิม: นัยต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน

สำหรับประเทศผู้เริ่มต้นพัฒนาโครงการพลังงานนิวเคลียร์ การเปรียบเทียบระหว่าง SMR กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบดั้งเดิมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากไม่ควรพิจารณาเพียงขนาดและกำลังผลิตเท่านั้น แต่ต้องครอบคลุมถึงต้นทุน การก่อสร้าง การออกใบอนุญาต ห่วงโซ่อุปทาน และภาระด้านโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ ดังสรุปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบ SMR กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบดั้งเดิมในมิติด้านเทคโนโลยี เศรษฐศาสตร์ และโครงสร้างพื้นฐาน

ประเด็นเปรียบเทียบ	เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม	นัยเชิงวิพากษ์ต่อประเทศที่เพิ่งเริ่มพิจารณาโครงการนิวเคลียร์
ขนาดกำลังผลิต	โดยทั่วไปมีกำลังผลิตต่อหน่วยไม่เกินประมาณ 300 เมกะวัตต์ไฟฟ้า และสามารถออกแบบเป็นหน่วยเดี่ยวหรือหลายโมดูลตามความต้องการของระบบไฟฟ้า [201]	มีกำลังผลิตต่อหน่วยสูง มักอยู่ในระดับหลายร้อยถึงมากกว่า 1,000 เมกะวัตต์ไฟฟ้า เหมาะกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่และโครงข่ายที่มั่นคง	SMR อาจเหมาะกับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กหรือการเพิ่มกำลังผลิตเป็นระยะ แต่ต้องประเมินความสามารถของระบบส่งไฟฟ้าความต้องการไฟฟ้าจริง และการเดินเครื่องหลายโมดูลอย่างรอบด้าน [1,202]
เงินลงทุนเริ่มต้น	เงินลงทุนรวมต่อโครงการอาจต่ำกว่าเพราะขนาดหน่วยผลิตเล็กกว่า และอาจทยอยลงทุนได้	ต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นสูงมาก และมีความเสี่ยงจากต้นทุนบานปลายหรือความล่าช้าของโครงการขนาดใหญ่	ข้อได้เปรียบด้านการเงินของ SMR ยังไม่แน่นอน เพราะต้นทุนต่อกิโลวัตต์อาจสูงกว่าหากยังไม่เกิดการผลิตซ้ำในระดับอุตสาหกรรมและคำสั่งซื้อจำนวนมาก [52,163,167]
รูปแบบการก่อสร้าง	เน้นการผลิตชิ้นส่วนจากโรงงานการประกอบแบบโมดูล และ	พึ่งพาการก่อสร้างขนาดใหญ่ ณ สถานที่ตั้ง มีความซับซ้อนด้าน	SMR อาจลดความเสี่ยงบางส่วนของงานก่อสร้างในพื้นที่ แต่จะ

ประเด็นเปรียบเทียบ	เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม	นัยเชิงวิพากษ์ต่อประเทศที่เพิ่งเริ่มพิจารณาโครงการนิวเคลียร์
	การลดงานก่อสร้างบางส่วนณ สถานที่ตั้ง	วิศวกรรมโยธา การจัดการผู้รับเหมา และระยะเวลาก่อสร้าง	เพิ่มความสำคัญของการประกันคุณภาพโรงงาน มาตรฐานชิ้นส่วน และห่วงโซ่อุปทานข้ามประเทศ [163,167]
การอนุญาตและการกำกับดูแล	ต้องประเมินลักษณะเฉพาะของแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นิวเคลียร์รุ่นใหม่ ระบบความปลอดภัยแบบพาสซีฟ การเดินเครื่องหลายโมดูล ห้องควบคุมร่วม และแนวคิดการเดินเครื่องที่แตกต่างจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ [202]	หน่วยงานกำกับดูแลในหลายประเทศมีประสบการณ์กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดน้ำมวลเบาขนาดใหญ่เชิงพาณิชย์มากกว่า	SMR ไม่ได้ลดภาระกำกับดูแลโดยอัตโนมัติ ประเทศผู้เริ่มต้นยังต้องมีหน่วยงานกำกับดูแลที่เป็นอิสระ มีบุคลากรเพียงพอและสามารถประเมินเทคโนโลยีเฉพาะแบบได้ [1,202]
ห่วงโซ่อุปทาน	อาศัยแนวคิดการผลิตซ้ำ การผลิตจากโรงงาน และมาตรฐานชิ้นส่วนที่ทำซ้ำได้ บางแบบอาจต้องใช้เชื้อเพลิงเฉพาะ เช่น เชื้อเพลิงยูเรเนียมเสริมสมรรถนะระดับสูงกว่ายูเรเนียมเสริมสมรรถนะต่ำทั่วไป [201,203]	อาศัยห่วงโซ่อุปทานขนาดใหญ่สำหรับอุปกรณ์หลัก งานก่อสร้าง ระบบความปลอดภัย และบริการตลอดอายุโครงการ	ข้อได้เปรียบของ SMR จะเกิดขึ้นจริงเมื่อมีตลาดและคำสั่งซื้อเพียงพอ หากติดตั้งเพียงไม่กี่หน่วย ประเทศผู้ใช้เทคโนโลยีอาจยังพึ่งพาผู้ขายต่างประเทศสูง [163,167]
ระบบไฟฟ้าและการบูรณาการกับพลังงานอื่น	มีความยืดหยุ่นด้านขนาดกำลังผลิต และอาจใช้ร่วมกับอุตสาหกรรม ความร้อนกระบวนการผลิต พื้นที่ห่างไกล หรือระบบพลังงานคาร์บอนต่ำในอนาคต [201]	เหมาะกับการผลิตไฟฟ้าฐานขนาดใหญ่ในระบบที่มีความต้องการพลังงานสูงและมีโครงข่ายไฟฟ้ารองรับ	SMR อาจเพิ่มทางเลือกเชิงระบบ แต่ต้องประเมินบทบาทร่วมกับพลังงานหมุนเวียน ความต้องการไฟฟ้าจริง กำลังสำรอง และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ไม่ควรมองเป็นคำตอบเชิงเทคโนโลยีอย่างโดดเดี่ยว [1]
กากกัมมันตรังสีและเชื้อเพลิงใช้แล้ว	ยังคงต้องมีระบบจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้ว กากกัมมันตรังสี การขนส่ง การเก็บรักษา และการรื้อถอน โดยปริมาณและลักษณะกากขึ้นกับแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และเชื้อเพลิง [119]	มีประสบการณ์สากลมากกว่าในการจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์ที่ใช้มานาน	SMR ไม่ได้ทำให้ปัญหากากกัมมันตรังสีหมดไป ประเทศผู้เริ่มต้นต้องมีนโยบายเชื้อเพลิงใช้แล้ว กองทุนรื้อถอน และกรอบความรับผิดชอบระยะยาวตั้งแต่ระยะแรก [1,119]
ความเสี่ยงเชิงสถาบัน	อาจลดความเสี่ยงด้านขนาดโครงการ แต่เพิ่มความท้าทายจากเทคโนโลยีใหม่ แบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลาย	มีความเสี่ยงจากเงินลงทุนสูง ความล่าช้า การเมืองพลังงาน และภาระโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่	ไม่ว่าเลือก SMR หรือโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ ปัจจัยชี้ขาดยังอยู่ที่ความต่อเนื่องของนโยบาย ความเป็นอิสระของ

ประเด็นเปรียบเทียบ	เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR)	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม	นัยเชิงวิพากษ์ต่อประเทศที่เพิ่งเริ่มพิจารณาโครงการนิวเคลียร์
	ประเภท ผู้ขายหลายราย การออกแบบหลายโมดูล และความไม่แน่นอนของตลาด		หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร การเงิน และความไว้วางใจของสาธารณะ [1,163,167]

การเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นว่า SMR มีศักยภาพในการลดข้อจำกัดบางประการของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ เช่น ขนาดเงินลงทุนเริ่มต้น ความยืดหยุ่นของการติดตั้ง และความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์นอกเหนือภาคไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม SMR ไม่ได้ลดภารกิจหลักของประเทศผู้เริ่มต้นด้านความปลอดภัย การกำกับดูแล การจัดการกากกัมมันตรังสี การพัฒนาบุคลากร และความรับผิดชอบระยะยาวโดยอัตโนมัติ ดังนั้น การประเมิน SMR สำหรับประเทศไทยจึงควรหลีกเลี่ยงการมองเทคโนโลยีในฐานะ “ทางลัด” ของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ แต่ควรพิจารณาในฐานะ “ทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์” ที่ยังต้องอาศัยความพร้อมครบถ้วนในระดับนโยบาย สถาบัน กฎหมาย การเงิน เทคนิค และสังคมไม่แตกต่างจากโครงการนิวเคลียร์รูปแบบอื่น

3. ข้อแนะนำเพิ่มเติมต่อประเด็นร่วมสมัยของการกำกับดูแล SMR

- การกำกับดูแลระบบดิจิทัล ปัญญาประดิษฐ์ และความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์สำหรับ SMR

การพัฒนา SMR มีแนวโน้มเชื่อมโยงกับระบบเครื่องมือวัดและควบคุมดิจิทัล การจำลองสถานการณ์ แบบจำลองดิจิทัลเสมือนจริง (Digital twin) การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ การตรวจจับความผิดปกติ และระบบสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงานผ่านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning: ML) มากขึ้น [204–206] ขณะเดียวกัน งานประยุกต์ด้านแบบจำลองดิจิทัลเสมือนจริงในบริบทโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังสะท้อนศักยภาพของเทคโนโลยีดังกล่าวในการสนับสนุนการปฏิบัติงาน การเฝ้าติดตาม และการทดสอบระบบเสมือนจริง [207,208] อย่างไรก็ตาม การใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ในบริบทนิวเคลียร์ต้องอาศัยข้อมูลที่มีคุณภาพ การเชื่อมโยงระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริงอย่างตรวจสอบได้ การทวนสอบและยืนยันผลตลอดวงจรชีวิตของระบบ ความปลอดภัยของซอฟต์แวร์ และมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ระบบดิจิทัลหรือแบบจำลองเสมือนจริงกลายเป็นแหล่งความคลาดเคลื่อนในการตัดสินใจด้านความปลอดภัย [204,205,209-211]

ดังนั้น การกำกับดูแล SMR จึงไม่อาจจำกัดอยู่เฉพาะการประเมินแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และระบบความปลอดภัยทางกายภาพเท่านั้น แต่ต้องครอบคลุมธรรมาภิบาลข้อมูล ความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ของ AI ความรับผิดชอบของมนุษย์ในการตัดสินใจ และการป้องกันความเสี่ยงจากการพึ่งพาระบบอัตโนมัติมากเกินไป [204,209] ในบริบทของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ระบบดิจิทัลและ AI อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเดินเครื่อง การเฝ้าระวังสภาวะผิดปกติ และการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก แต่ในขณะเดียวกันก็เพิ่มความท้าทายด้านการกำกับดูแล โดยเฉพาะเมื่อระบบดังกล่าวมีผลต่อการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย [204,206,209]

ขณะเดียวกัน ความมั่นคงปลอดภัยของระบบเครื่องมือวัดและควบคุมต้องพิจารณาตั้งแต่ขั้นออกแบบ การพัฒนา การทดสอบ การติดตั้ง การเดินเครื่อง การบำรุงรักษา และการปรับปรุงระบบ เพื่อป้องกันทั้งการโจมตีทางไซเบอร์ การเปลี่ยนแปลงซอฟต์แวร์โดยไม่ได้รับอนุญาต และความล้มเหลวร่วมของระบบดิจิทัล [210,211] สำหรับประเทศไทย ประเด็นนี้ควรถูกบรรจุไว้ในการพัฒนาขีดความสามารถของหน่วยงานกำกับดูแลและองค์กรสนับสนุนทางเทคนิคตั้งแต่ระยะเตรียมความพร้อม เนื่องจากประเทศผู้ใช้เทคโนโลยีต้องสามารถประเมินระบบดิจิทัล ข้อมูล แบบจำลอง และหลักฐานด้านความปลอดภัยที่ได้รับจากผู้ขายเทคโนโลยีได้อย่างเป็นอิสระ ไม่ควรพึ่งพาการรับรองจากผู้ขายเพียงฝ่ายเดียว ดังนั้น การเตรียมความพร้อมด้าน SMR จึงควรรวมถึงการพัฒนา

บุคลากรด้านระบบควบคุมดิจิทัล AI ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ การทวนสอบและยืนยันผลซอฟต์แวร์ การจัดการข้อมูล และการกำกับดูแลเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดอายุโครงการ [204,206,209,210]

- ความร่วมมือระดับภูมิภาคและความพร้อมของอาเซียนต่อการกำกับดูแล SMR แม้อาเซียนยังไม่มีกรอบกำกับดูแลร่วมเฉพาะสำหรับโครงการ SMR แต่ภูมิภาคมีฐานความร่วมมือด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ และการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ผ่านเครือข่ายหน่วยงานกำกับดูแลด้านพลังงานปรมาณูของอาเซียน (ASEAN Network of Regulatory Bodies on Atomic Energy: ASEANTOM) ซึ่งจัดตั้งขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 [212,213] นอกจากนี้ แผนปฏิบัติการความร่วมมือด้านพลังงานของอาเซียน ค.ศ. 2026–2030 ยังคงระบุพลังงานนิวเคลียร์พลเรือน (Civilian Nuclear Energy: CNE) เป็นหนึ่งในพื้นที่ความร่วมมือด้านพลังงานของภูมิภาค สะท้อนว่า ประเด็นนิวเคลียร์ยังคงถูกพิจารณาในบริบทของความมั่นคงทางพลังงาน การลดคาร์บอน และการเปลี่ยนผ่านพลังงานของอาเซียน [214]

ความร่วมมือดังกล่าวสามารถต่อยอดไปสู่การเตรียมความพร้อมด้าน SMR ได้หลายมิติ ได้แก่ การฝึกอบรมบุคลากรกำกับดูแล การแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านมาตรฐานความปลอดภัยและแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การฝึกซ้อมการเตรียมพร้อมและตอบสนองเหตุฉุกเฉินทางนิวเคลียร์และรังสี การเฝ้าระวังรังสีข้ามพรมแดน การพัฒนาช่องทางสื่อสารฉุกเฉินระดับภูมิภาค การแลกเปลี่ยนประสบการณ์ด้านการกำกับดูแลผู้ขายเทคโนโลยี ตลอดจนการสร้างเครือข่ายผู้เชี่ยวชาญและองค์กรสนับสนุนทางเทคนิค [212,213,215] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประชุม ASEANTOM ครั้งที่ 12 ในปี ค.ศ. 2025 ได้รับรองแผนงาน ASEANTOM ค.ศ. 2025–2029 และแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารฉุกเฉินและการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ในภูมิภาค ซึ่งเป็นฐานสำคัญที่สามารถขยายไปสู่ประเด็น SMR ได้ในอนาคต [215]

อย่างไรก็ตาม ความร่วมมือระดับภูมิภาคไม่สามารถทดแทนความรับผิดชอบระดับชาติได้ เนื่องจากการตัดสินใจพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ การออกใบอนุญาต การกำกับความปลอดภัย การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี ตลอดจนการคุ้มครองประชาชนและสิ่งแวดล้อม ยังคงเป็นหน้าที่ของรัฐเจ้าของโครงการโดยตรง [1] ดังนั้น สำหรับประเทศไทย ความร่วมมืออาเซียนควรถูกใช้เป็นกลไกเสริมในการยกระดับขีดความสามารถ แลกเปลี่ยนประสบการณ์ และสร้างความโปร่งใสในภูมิภาค แต่ประเทศไทยยังจำเป็นต้องพัฒนาจุดยืนระดับชาติ กฎหมาย หน่วยงานกำกับดูแล บุคลากร ระบบฉุกเฉิน กลไกสื่อสารกับสังคม และความสามารถในการประเมินเทคโนโลยีอย่างเป็นอิสระ หากต้องการรักษาทางเลือกด้าน SMR อย่างรับผิดชอบ

บทสรุปและข้อเสนอเชิงนโยบาย

บทความนี้ชี้ให้เห็นว่า การพิจารณาโครงการพลังงานนิวเคลียร์สำหรับประเทศไทย ไม่ควรถูกตัดสินจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีหรือขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ต้องพิจารณาจากความพร้อมของประเทศในเชิงนโยบาย กฎหมาย การกำกับดูแล บุคลากร การเงิน ความปลอดภัย และความไว้วางใจของสังคม กรอบโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ 19 ด้านของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศจึงมีคุณค่าในฐานะเครื่องมือประเมินความพร้อมเชิงระบบ โดยความพร้อมที่แท้จริงต้องสะท้อนถึงความสามารถของประเทศในการกำกับดูแลการใช้ประโยชน์ และความรับผิดชอบต่อเทคโนโลยีนิวเคลียร์ได้ตลอดวัฏจักรชีวิตของโครงการ แม้ว่า SMR จะช่วยเพิ่มทางเลือกให้กับระบบพลังงานในอนาคต แต่ไม่ได้ลดภาระพื้นฐานของการพัฒนาโครงการนิวเคลียร์ลงอย่างมีนัยสำคัญ ความเล็กของขนาดและความเป็นโมดูลอาจช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นด้านการออกแบบและการติดตั้ง แต่ไม่สามารถทดแทนนโยบายที่ชัดเจน กฎหมายที่เข้มแข็ง หน่วยงานกำกับดูแลที่มีขีดความสามารถ การจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี กลไกการเงินที่รับผิดชอบได้ และการยอมรับของสังคมได้ ดังนั้น SMR จึงไม่ควรถูกมองว่าเป็นทางลัดของการเข้าสู่พลังงานนิวเคลียร์ แต่เป็นทางเลือกเชิงยุทธศาสตร์ที่ต้องอาศัยความพร้อมรอบด้านเช่นเดียวกับโครงการนิวเคลียร์รูปแบบอื่น

สำหรับประเทศไทย ข้อเสนอเชิงนโยบายที่ควรให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกคือ การกำหนดจุดยืนระดับชาติให้ชัดเจนว่า โครงการนิวเคลียร์จะมีบทบาทใดในระบบพลังงานไทย และ SMR จะตอบโจทย์เชิง

ยุทธศาสตร์ใดของประเทศ ก่อนนำไปสู่การเลือกเทคโนโลยี รูปแบบการลงทุน หรือพื้นที่ตั้งโครงการ การพัฒนาความพร้อมจึงควรเริ่มจากฐานสำคัญ ได้แก่ นโยบาย กฎหมาย ความปลอดภัย การกำกับดูแล การป้องกันอันตรายจากรังสี ความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ และการมีส่วนร่วมของสังคม จากนั้นจึงขยายไปสู่ประเด็นด้านเศรษฐศาสตร์ การเงิน ระบบไฟฟ้า บุคลากร อุตสาหกรรม ห่วงโซ่อุปทาน การจัดซื้อจัดจ้าง และความรับผิดชอบระยะยาวของโครงการ ในเชิงวิชาการ การศึกษาต่อไปควรต่อยอดจากพื้นฐานความเข้าใจในกรอบแนวทางของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ ไปสู่การศึกษาเชิงเปรียบเทียบและเชิงประจักษ์มากขึ้น โดยเฉพาะความเหมาะสมของ SMR ต่อระบบไฟฟ้าของไทย ต้นทุนตลอดอายุโครงการ กลไกการจัดสรรความเสี่ยง ความพร้อมของกฎหมายและหน่วยงานกำกับดูแล การยอมรับของสังคม และความร่วมมือระดับภูมิภาคด้านการจัดการเชื้อเพลิงใช้แล้วและกากกัมมันตรังสี ประเด็นเหล่านี้จะช่วยให้การพิจารณา SMR ของไทยตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักฐานมากขึ้น และลดความเสี่ยงของการตัดสินใจที่ขับเคลื่อนด้วยความคาดหวังต่อเทคโนโลยีเพียงด้านเดียว

ท้ายที่สุด คุณค่าหลักของกรอบโครงสร้างพื้นฐานนิวเคลียร์ 19 ด้าน คือการช่วยให้ประเทศตัดสินใจด้านนิวเคลียร์อย่างเป็นขั้นเป็นตอน รอบคอบ และรับผิดชอบต่อสาธารณะ หากประเทศไทยจะพิจารณา SMR อย่างจริงจัง ความพร้อมที่แท้จริงจึงควรวัดจากความสามารถของประเทศในการกำหนดทิศทาง กำกับดูแล ใช้ประโยชน์ และรับผิดชอบต่อเทคโนโลยีนี้ได้อย่างปลอดภัย โปร่งใส และยั่งยืน

References

[1] International Atomic Energy Agency, “Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power”, Nuclear Energy Series, NG-G-3.1 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2024). https://doi.org/10.61092/iaea.zjau-e8cs.

[2] International Atomic Energy Agency, “Nuclear infrastructure bibliography”, from https://www.iaea.org/topics/infrastructure-development/bibliography. Access on June 25th, 2026.

[3] International Energy Agency, “World energy outlook 2022”, from https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022. Access on February 15th, 2026.

[4] International Energy Agency, “Nuclear power and secure energy transitions: From today’s challenges to tomorrow’s clean energy systems”, from https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions. Access on February 15th, 2026.

[5] International Atomic Energy Agency, “Climate change and nuclear power 2020”, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2020).

[6] International Atomic Energy Agency, “Advances in small modular reactor technology developments. A Supplement to: AEA Advanced Reactors Information System (ARIS) (2020 Edition)”, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2020).

[7] International Atomic Energy Agency, “Milestones approach”, from https://www.iaea.org/topics/infrastructure-development/milestones-approach. Access on June 25th, 2026.

[8] New Unit Assistance Industry Working Group, “Roadmap to operational readiness: A new entrant’s guide to preparing for the challenge of safe and efficient nuclear power plant operation (Rev. 1)”, World Association of Nuclear Operators (2022).

[9] International Atomic Energy Agency, “Guidelines for Preparing and Conducting an Integrated Nuclear Infrastructure Review (INIR)”, Services Series, 34, IAEA, Vienna (2017).

[10] International Atomic Energy Agency, “Evaluation of the status of national nuclear infrastructure development”, Nuclear Energy Series, NG-T-3.2 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2022).

[11] International Atomic Energy Agency, “Introducing nuclear power: The role of national leadership”, from https://www.iaea.org/sites/default/files/role-nuclear-power.pdf. Access on February 15th, 2026.

[12] International Atomic Energy Agency, "Integrated nuclear infrastructure review (INIR): Ten years of lessons learned", TECDOC Series, 1947, IAEA, Vienna (2021).
[13] International Atomic Energy Agency, "Building a national position for a new nuclear power programme", Nuclear Energy Series, NG-T-3.14, IAEA, Vienna (2016).
[14] International Atomic Energy Agency, "Responsibilities and functions of a nuclear energy programme implementing organization", Nuclear Energy Series, NG-T-3.6 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2019).
[15] International Atomic Energy Agency, "Case studies on the development of a comprehensive report to support the decision making process for a nuclear power programme", TECDOC Series, 1993, IAEA, Vienna (2022).
[16] M. Durdovic, C. Turcanu, R. Sala, R. Geysmans, S. López-Asensio and L. Gonçalves, "The outlooks of nuclear energy in society: Unraveling public attitudes in the context of climate and energy security challenges", Progress in Nuclear Energy, 174, 105286 (2024). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105286.
[17] Z. T. Anjum and M. S. Islam, "Deploying small modular reactors in newcomer countries: Adapting the IAEA Milestones Approach", Energy Strategy Reviews, 61, 101841 (2025). https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101841.
[18] F. Friess, M. Siddiqui and M. V. Ramana, "Small modular nuclear reactors for developing countries: Expectations and evidence", PNAS Nexus, 5, pgag006 (2026). https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgag006.
[19] S. Thomas and M. V. Ramana, "A hopeless pursuit? National efforts to promote small modular nuclear reactors and revive nuclear power", WIREs Energy and Environment, 11, e429 (2022). https://doi.org/10.1002/wene.429.
[20] E. Shobeiri, F. Genco, D. Hoornweg and A. Tokuhiro, "Small modular reactor deployment and obstacles to be overcome", Energies, 16, 3468 (2023). https://doi.org/10.3390/en16083468.
[21] International Atomic Energy Agency, "Establishing the safety infrastructure for a nuclear power programme", Safety Standards Series, SSG-16 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).
[22] International Atomic Energy Agency, "Leadership and management for safety", Safety Standards Series, GSR Part 2, IAEA, Vienna (2016). https://doi.org/10.61092/iaea.cq1k-j5z3.
[23] International Atomic Energy Agency, "Fundamental safety principles", Safety Standards Series, SF-1, IAEA, Vienna (2006). https://doi.org/10.61092/iaea.hmxn-vw0a.
[24] International Atomic Energy Agency, "Strengthening the global nuclear safety regime", INSAG Series, 21, IAEA, Vienna (2006).
[25] International Atomic Energy Agency, "Format and content of the safety analysis report for nuclear power plants", Safety Standards Series, SSG-61, IAEA, Vienna (2021).
[26] S. Basak and L. Lu, "Dynamic probabilistic risk assessment of passive safety systems for LOCA analysis using EMRALD", Journal of Nuclear Engineering, 6, 18 (2025). https://doi.org/10.3390/jne6020018.
[27] J. I. Lee, "Review of small modular reactors: Challenges in safety and economy to success", Korean Journal of Chemical Engineering, 41, 2761–2780 (2024). https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0.
[28] M. Malicki and T. Lind, "MELCOR 2.2 iPWR LOCA type accident analysis, Part I: Thermal-hydraulics", Nuclear Engineering and Design, 428, 113433 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113433.
[29] S. Šadek, D. Grgić and P. Druzijanić, "Small break LOCA studies for different layouts of passive safety systems in the IRIS reactor", Nuclear Engineering and Design, 431, 113745 (2025). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113745.
[30] M. Malicki and T. Lind, "MELCOR 2.2 iPWR LOCA type accident analysis, Part II: BDBA", Nuclear Engineering and Design, 430, 113667 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113667.

[31] Y. Wang, W. Chen, L. Zhang, X. Zhao, Y. Gao and V. Dinavahi, "Small modular reactors: An overview of modeling, control, simulation, and applications", IEEE Access, 12, 39628–39650 (2024). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351220.
[32] International Atomic Energy Agency, "Initiating nuclear power programmes: Responsibilities and capabilities of owners and operators", Nuclear Energy Series, NG-T-3.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).
[33] International Atomic Energy Agency, "Contracting and ownership approaches for new nuclear power plants", TECDOC Series, 1750 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2024).
[34] International Atomic Energy Agency, "Commissioning guidelines for nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NP-T-2.10, IAEA, Vienna (2018).
[35] International Atomic Energy Agency, "Preparation of a feasibility study for new nuclear power projects", Nuclear Energy Series, NG-T-3.3, IAEA, Vienna (2014).
[36] International Atomic Energy Agency, "Project management in nuclear power plant construction: Guidelines and experience", Nuclear Energy Series, NP-T-2.7, IAEA, Vienna (2012).
[37] International Atomic Energy Agency, "The operating organization for nuclear power plants", Safety Standards Series, SSG-72, IAEA, Vienna (2022).
[38] International Atomic Energy Agency, "Nuclear contracting toolkit", from https://nucleus.iaea.org/sites/connect/MSNpublic/Pages/nct/site/index.html. Access on February 15th, 2026.
[39] International Atomic Energy Agency, "The management system for nuclear installations", Safety Standards Series, GS-G-3.5, IAEA, Vienna (2009).
[40] International Atomic Energy Agency, "Experiences of regulatory bodies and owner/operator organizations in developing management systems for new nuclear power programmes", TECDOC Series, 2013, IAEA, Vienna (2022).
[41] International Atomic Energy Agency, "Use of a graded approach in the application of the management system requirements for facilities and activities", TECDOC Series, 1740, IAEA, Vienna (2014).
[42] International Atomic Energy Agency, "Application of the management system for facilities and activities", Safety Standards Series, GS-G-3.1, IAEA, Vienna (2006).
[43] M. Iakovleva and J. Rayner, "Accelerating the deployment of SMRs in Canada: The importance of intermediaries", Environmental Innovation and Societal Transitions, 53, 100918 (2024). https://doi.org/10.1016/j.eist.2024.100918.
[44] A. Verma and T. Allen, "A sociotechnical readiness level framework for the development of advanced nuclear technologies", Nuclear Technology, 210, 1722–1739 (2024). https://doi.org/10.1080/00295450.2024.2336355.
[45] R. Sam, T. Sainati, B. Hanson and R. Kay, "Licensing small modular reactors: A state-of-the-art review of the challenges and barriers", Progress in Nuclear Energy, 164, 104859 (2023). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104859.
[46] M. V. Ramana and K. Blaise, "Regulation vs promotion: Small modular nuclear reactors in Canada", Energy Policy, 192, 114228 (2024). https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114228.
[47] R. E. Josephs, T. Yap, M. Alamooti, T. Omojiba, A. Benarbia, O. Tomomewo and H. Ouadi, "Regulation of small modular reactors (SMRs): Innovative strategies and economic insights", Eng, 6, 61 (2025). https://doi.org/10.3390/eng6040061.
[48] P. Cash-Gates, M. M. Klemun, G. Kavlak, J. McNerney, J. Buongiorno and J. E. Trancik, "Sources of cost overrun in nuclear power plant construction call for a new approach to engineering design", Joule, 4, 2348–2373 (2020). https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.10.001.

[49] International Atomic Energy Agency, "Financing of new nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NG-T-4.2, IAEA, Vienna (2008).
[50] International Atomic Energy Agency, "Resource requirements for nuclear power infrastructure development", Nuclear Energy Series, NG-T-3.21, IAEA, Vienna (2022).
[51] Nuclear Energy Agency, "Nuclear new build: Insights into financing and project management", OECD Publishing, Paris (2015).
[52] World Nuclear Association, "Nuclear power economics and structuring (2024 Edition)", from https://world-nuclear.org/images/articles/economics-report-2024-April.pdf. Access on February 15th, 2026.
[53] International Atomic Energy Agency, "Managing the financial risk associated with the financing of new nuclear power plant projects", Nuclear Energy Series, NG-T-4.6, IAEA, Vienna (2017).
[54] International Atomic Energy Agency, "Cost considerations and financing mechanisms for the disposal of low and intermediate level radioactive waste", TECDOC Series, 1552, IAEA, Vienna (2007).
[55] International Atomic Energy Agency, "Costing methods and funding schemes for radioactive waste disposal programmes", Nuclear Energy Series, NW-T-1.25, IAEA, Vienna (2020).
[56] B. Mignacca and G. Locatelli, "Economics and finance of small modular reactors: A systematic review and research agenda", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 118, 109519 (2020). https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519.
[57] N. V. Hee, H. Peremans and P. Nimmegeers, "Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 203, 114743 (2024). https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743.
[58] C. Qu, R. N. Bang and L. K. Sandal, "Construction and operational cost requirements for competitive small modular reactors in Europe", Applied Energy, 401, 126621 (2025). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126621.
[59] B. Steigerwald, J. Weibezahn, M. Slowik and C. von Hirschhausen, "Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors", Energy, 281, 128204 (2023). https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204.
[60] A. Asuega, B. J. Limb and J. C. Quinn, "Techno-economic analysis of advanced small modular nuclear reactors", Applied Energy, 334, 120669 (2023). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120669.
[61] E. Wieser, K. Clarno, D. Haas and M. E. Webber, "The economics of small modular reactors at coal sites: A program-level analysis within the state of Texas", Energy Policy, 202, 114572 (2025). https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114572.
[62] C. Stoiber, A. Baer, N. Pelzer and W. Tonhauser, "Handbook on nuclear law", IAEA, Vienna (2003).
[63] C. Stoiber, A. Cherf, W. Tonhauser and M. de L. Vez Carmona, "Handbook on nuclear law: Implementing legislation", IAEA, Vienna (2010).
[64] P. Betkowski, "Legal aspects of small modular reactors in Polish nuclear law", Student Journal of Law, Administration and Economics, 43, 93-104 (2023). https://doi.org/10.19195/1733-5779.43.8.
[65] C. Nriezedi-Anejionu, "Carbon reduction and nuclear energy policy U-turn: The necessity for an international treaty on small modular reactors (SMR) new nuclear technology", Carbon Management, 15, 2396585 (2024). https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2396585.
[66] C. Nriezedi-Anejionu, "The legal challenges of global commercialisation of SMR new nuclear technologies: From an international investment law perspective", Journal of Energy & Natural Resources Law, 1-28 (2025). https://doi.org/10.1080/02646811.2025.2583937.

[67] U. K. Pal, C. Zhang, S. Timalsina, U. Quapp and H. Li, "Comparative analysis of regulatory compliance and legal issues in small modular nuclear reactor deployment", Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 17, (2025). https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-1270.
[68] D. McCauley, "The energy justice implications of reduced consent in planning reforms: Assessing UK nuclear planning reforms for small modular reactors", Journal of Energy & Natural Resources Law, 1-22 (2026). https://doi.org/10.1080/02646811.2026.2635979.
[69] V. J. H. Roland, "Applicability of the existing nuclear liability conventions to different types of small modular reactors currently under development", Nuclear Law Bulletin, 110, 7–36 (2023).
[70] International Atomic Energy Agency, "Enhancing national safeguards infrastructure to support the introduction of nuclear power", Nuclear Energy Series, NG-T-3.25, IAEA, Vienna (2023).
[71] International Atomic Energy Agency, "Guidance for states implementing comprehensive safeguards agreements and additional protocols", Services Series, 21, IAEA, Vienna (2016).
[72] International Atomic Energy Agenc, "Safeguards implementation practices guide on establishing and maintaining state safeguards infrastructure", Services Series, 31, IAEA, Vienna (2018).
[73] P. Kim and S. S. Chirayath, "Assessing the nuclear weapons proliferation risks in nuclear energy newcomer countries: The case of small modular reactors", Nuclear Engineering and Technology, 56, 3155–3166 (2024). https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.016.
[74] C. Stewart, A. Abou-Jaoude and A. Erickson, "Employing antineutrino detectors to safeguard future nuclear reactors from diversions", Nature Communications, 10, 3527 (2019). https://doi.org/10.1038/s41467-019-11434-z.
[75] E. D. Ryan, I. Trivedi, S. Terlizzi, A. Shields, M. Schanfein, G. Reyes and R. Stewart, "Challenges and technology-driven opportunities for safeguarding microreactors", Nuclear Science and Engineering, 1-19 (2024). https://doi.org/10.1080/00295639.2024.2372223.
[76] International Atomic Energy Agency, "Governmental, legal and regulatory framework for safety", Safety Standards Series, GSR Part 1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2016).
[77] International Atomic Energy Agency, "Organization, management and staffing of the regulatory body for safety", Safety Standards Series, GSG-12, IAEA, Vienna (2018).
[78] International Atomic Energy Agency, "Functions and processes of the regulatory body for safety", Safety Standards Series, GSG-13, IAEA, Vienna (2018).
[79] International Atomic Energy Agency, "Managing regulatory body competence", Safety Report Series, 79, IAEA, Vienna (2014).
[80] International Atomic Energy Agency, "Technical and scientific support organizations providing support to regulatory functions", TECDOC Series, 1835, IAEA, Vienna (2018).
[81] International Atomic Energy Agency, "Independence in regulatory decision making", INSAG Series, 17, IAEA, Vienna (2003).
[82] International Atomic Energy Agency, "Licensing process for nuclear installations", Safety Standards Series, SSG-12, IAEA, Vienna (2010).
[83] International Atomic Energy Agency, "Licensing the first nuclear power plant", INSAG Series, 26, IAEA, Vienna (2012).
[84] International Atomic Energy Agency, "Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards, Safety Standards Series, GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014). https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm.
[85] International Atomic Energy Agency, "Radiation protection aspects of design for nuclear power plants", Safety Standards Series, SSG-90, IAEA, Vienna (2024). https://doi.org/10.61092/iaea.jc6f-diaa.

[86] International Atomic Energy Agency, "Occupational radiation protection", Safety Standards Series, GSG-7, IAEA, Vienna (2018).
[87] S. Bagheri, H. Khalafi and A. A. Bahrami, "An optimal radiation shield design of a small modular nuclear power reactor by genetic algorithm", Nuclear Technology, 211, 940–952 (2025). https://doi.org/10.1080/00295450.2024.2362524.
[88] International Atomic Energy Agency, "Electric grid reliability and interface with nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NG-T-3.8, IAEA, Vienna (2012).
[89] S. Gao, G. Huang, X. Zhang and D. Han, "Small modular reactors enable the transition to a low-carbon power system across Canada", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 112905 (2022). https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112905.
[90] D. Michaelson and J. Jiang, "Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152, 111638 (2021). https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638.
[91] V. Nian and S. Zhong, "Economic feasibility of flexible energy productions by small modular reactors from the perspective of integrated planning", Progress in Nuclear Energy, 118, 103106 (2020). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103106.
[92] International Atomic Energy Agency, "Human resource management for new nuclear power programmes", Nuclear Energy Series, NG-T-3.10 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2022).
[93] International Atomic Energy Agency, "Guide to knowledge management strategies and approaches in nuclear energy organizations and facilities", Nuclear Energy Series, NG-G-6.1, IAEA, Vienna (2022).
[94] International Atomic Energy Agency, "Managing human resources in the field of nuclear energy", Nuclear Energy Series, NG-G-2.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2023).
[95] International Atomic Energy Agency, "Recruitment, qualification and training of personnel for nuclear power plants", Safety Standards Series, SSG-76, IAEA, Vienna (2022).
[96] P. D. Porras, J. S. Gozalo, L. Cizelj, W. Ambrosini and G. L. Pavel, "Sustaining regional nuclear human capacity building in Europe", Nuclear Engineering and Design, 419, 112916 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112916.
[97] J. M. Egieya, R. M. Ayo-Imoru, D. R. E. Ewim and E. C. Agedah, "Human resource development and needs analysis for nuclear power plant deployment in Nigeria", Nuclear Engineering and Technology, 54, 749–763 (2022). https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.019.
[98] J. M. Egieya, M. A. Amidu and M. Hachaichi, "Small modular reactors: An assessment of workforce requirements and operating costs", Progress in Nuclear Energy, 159, 104632 (2023). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104632.
[99] O. F. Orikpete, D. R. E. Ewim and J. M. Egieya, "Nuclear fission technology in Africa: Assessing challenges and opportunities for future development", Nuclear Engineering and Design, 413, 112568 (2023). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112568.
[100] OECD/NEA, "Nuclear education and training: From concern to capability", Nuclear Development, OECD Publishing, Paris (2012). https://doi.org/10.1787/9789264177604-en.
[101] International Atomic Energy Agency, "Nuclear power human resources modelling tool", Training Course Series, 73, IAEA, Vienna (2021).
[102] International Atomic Energy Agency, "Stakeholder engagement in nuclear programmes", Nuclear Energy Series, NG-G-5.1, IAEA, Vienna (2021).
[103] International Atomic Energy Agency, "Stakeholder engagement in new nuclear power programmes", Nuclear Energy Series, NG-T-5.1, IAEA, Vienna (2025).

[104] International Atomic Energy Agency, "Stakeholder involvement throughout the life cycle of nuclear facilities", Nuclear Energy Series, NG-T-1.4, IAEA, Vienna (2011).
[105] International Atomic Energy Agency, "Communication and consultation with interested parties by the regulatory body", Safety Standards Series, GSG-6, IAEA, Vienna (2017).
[106] M. Hlavacek, I. Cabelkova, K. Pawlak and L. Smutka, "Nuclear reactor at home? Public acceptance of small nuclear reactors in the neighborhood", Frontiers in Energy Research, 11, 1211434 (2023). https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1211434.
[107] S. P. Tuler and T. Webler, "The challenge of community acceptance of small nuclear reactors", Energy Research & Social Science, 118, 103831 (2024). https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103831.
[108] International Atomic Energy Agency, "Site survey and site selection for nuclear installations", Safety Standards Series, SSG-35, IAEA, Vienna (2015).
[109] International Atomic Energy Agency, "Managing siting activities for nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NG-T-3.7 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2022).
[110] International Atomic Energy Agency, "Site evaluation for nuclear installations", Safety Standards Series, SSR-1, IAEA, Vienna (2019).
[111] H. H. Osiolo and S. Mukundan, "From promise to legitimacy: A survey-based study of stakeholder engagement and public acceptance of small modular reactors in the UK", Energy Conversion and Management: X, 30, 101860 (2026). https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101860.
[112] H. Susiati, N. Noeraida, M. A. Widiawaty, J. S. Pane, M. Dede, K. Handono and S. Sunardi, "Trends and insights in nuclear power plant siting: A multi-criteria decision-making approach", Discover Applied Sciences, 7, 395 (2025). https://doi.org/10.1007/s42452-025-06897-3.
[113] J.-P. Ikonen, T. J. Lindroos and P. Hiltunen, "Feasibility of small modular reactors for decarbonizing district heating systems: A case study of the Helsinki metropolitan area", Nuclear Engineering and Design, 442, 114262 (2025). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114262.
[114] International Atomic Energy Agency, "Environmental protection in new nuclear power programmes", Nuclear Energy Series, NG-T-3.11 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2024).
[115] International Atomic Energy Agency, "Prospective radiological environmental impact assessment for facilities and activities", Safety Standards Series, GSG-10, IAEA, Vienna (2018).
[116] International Atomic Energy Agency, "Strategic environmental assessment for nuclear power programmes: Guidelines", Nuclear Energy Series, NG-T-3.17, IAEA, Vienna (2018).
[117] T. S. Carless, W. M. Griffin and P. S. Fischbeck, "The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study", Energy, 114, 84–99 (2016). https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.111.
[118] R. S. El-Emam and M. H. Subki, "Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: Prospects and impediments", International Journal of Energy Research, 45, 16995–17004 (2021). https://doi.org/10.1002/er.6838.
[119] L. M. Krall, A. M. Macfarlane and R. C. Ewing, "Nuclear waste from small modular reactors", Proceedings of the National Academy of Sciences, 119, e2111833119 (2022). https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119.
[120] International Atomic Energy Agency, "Considerations in emergency preparedness and response for a state embarking on a nuclear power programme", Emergency Preparedness and Response, IAEA, Vienna (2012).
[121] International Atomic Energy Agency, "Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency", Safety Standards Series, GSR (Part 7), IAEA, Vienna (2015). https://doi.org/10.61092/iaea.3dbe-055p.

[122] International Atomic Energy Agency, "Arrangements for preparedness for a nuclear or radiological emergency, Safety Standards Series, GS-G-2.1, IAEA, Vienna (2007).
[123] D. W. Hummel, S. Chouhan, L. Lebel, and A. C. Morreale, "Radiation dose consequences of postulated limiting accidents in small modular reactors to inform emergency planning zone size requirements", Annals of Nuclear Energy, 137, 107062 (2020). https://doi.org.j.anucene.2019.107062.
[124] W. Vechgama, P. Krisanangkura and K. Silva, "Application of release starting time classification for planning emergency preparedness and response to the hypothetical accident scenario of iPWR-SMR in Thailand", Nuclear Engineering and Design, 429, 113629 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113629.
[125] Z. Liu, T. Liu and G. Peng, "Study on key technical issues of accident selection in emergency planning zone development for small modular reactors", Journal of Nuclear Science and Technology, 62, 949-955 (2025). https://doi.org/10.1080/00223131.2025.2515995.
[126] D. Mitrakos, "Radiological impact and emergency zones for small iPWR with different approaches for source term calculation", Progress in Nuclear Energy, 145, 104123 (2022). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104123.
[127] International Atomic Energy Agency, "Establishing the nuclear security infrastructure for a nuclear power programme", Nuclear Security Series, 19, IAEA, Vienna (2013).
[128] International Atomic Energy Agency, "Building capacity for nuclear security", Nuclear Security Series, 31-G, IAEA, Vienna (2018).
[129] International Atomic Energy Agency, "Objective and essential elements of a state's nuclear security regime", Nuclear Security Series, 20, IAEA, Vienna (2013). https://doi.org/10.61092/iaea.ajrj-ymul.
[130] International Atomic Energy Agency, "Physical protection of nuclear material and nuclear facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5)", Nuclear Security Series, 27-G, IAEA, Vienna (2018).
[131] International Atomic Energy Agency, "Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities (INFCIRC/225/Revision 5)", Nuclear Security Series, 13, IAEA, Vienna (2011). https://doi.org/10.61092/iaea.ko2c-dc4q.
[132] International Atomic Energy Agency, "National nuclear security threat assessment, design basis threats and representative threat statements, Nuclear Security Series, 10-G (Rev. 1), IAEA, Vienna (2021).
[133] International Atomic Energy Agency, "Nuclear security culture", Nuclear Security Series, No.7, IAEA, Vienna (2008).
[134] J. C. Trajano, "Deploying small modular reactors in East Asia: Implications on nuclear governance", International Journal of Nuclear Security, 9, 9 (2025). https://doi.org/10.7290/ijns09125181.
[135] R. Duguay, "Small modular reactors and advanced reactor security: Regulatory perspectives on integrating physical and cyber security by design to protect against malicious acts and evolving threats", International Journal of Nuclear Security, 7, 2 (2020). https://doi.org/10.7290/ijns070102.
[136] A. Ayodeji, A. D. Buono, I. Pierce and H. Ahmed, 'Wavy-attention network for real-time cyber-attack detection in a small modular pressurized water reactor digital control system", Nuclear Engineering and Design, 424, 113277 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113277.
[137] International Atomic Energy Agency, "Options for management of spent fuel and radioactive waste for countries developing new nuclear power programmes", Nuclear Energy Series, NW-T-1.24 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2018).
[138] International Atomic Energy Agency, "Storage of spent nuclear fuel", Safety Standards Series, SSG-15 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).

[139] A. Amatullah, S. Permana, D. Irwanto and A. H. Aimon, "Comparative analysis on small modular reactor (SMR) with uranium and thorium fuel cycle", Nuclear Engineering and Design, 418, 112934 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112934.
[140] R. Akbari, M. A. Nasr, F. D'Auria, A. Cammi, J. R. Maiorino and G. L. de Stefani, "Analysis of thorium-transuranic fuel deployment in a LW-SMR: A solution toward sustainable fuel supply for future plants", Nuclear Engineering and Design, 421, 113090 (2024). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113090.
[141] J. Rosales, J.-L. François and C. García, "Neutronic assessment of a PWR-type SMR core with TRISO particles using mixed-oxide fuel strategies", Progress in Nuclear Energy, 154, 104470. (2022). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104470.
[142] B. Gao, K. Kuznetsova, Z. Ma and K. Miller, "Nuclear small modular reactors (SMRs): Key considerations for deployment", International Energy Forum (2024).
[143] International Atomic Energy Agency, "Classification of radioactive waste", Safety Standards Series, GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
[144] International Atomic Energy Agency, "Policies and strategies for radioactive waste management", Nuclear Energy Series, NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).
[145] International Atomic Energy Agency, "Policies and strategies for the decommissioning of nuclear and radiological facilities", Nuclear Energy Series, NW-G-2.1, IAEA, Vienna (2011).
[146] International Atomic Energy Agency, "Disposal approaches for long lived low and intermediate level radioactive waste", Nuclear Energy Series, NW-T-1.20, IAEA, Vienna (2010).
[147] A. Halimi and K. Shirvan, "Scale effects on core design, fuel costs, and spent fuel volume of pressurized water reactors", Annals of Nuclear Energy, 209, 110847 (2024). https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110847.
[148] N. A. Z. Kamarudin, A. F. Ismail, M. H. Rabir and K. K. Siong, "Neutronic optimization of thorium-based fuel configurations for minimizing slightly used nuclear fuel and radiotoxicity in small modular reactors", Nuclear Engineering and Technology, 56, 2641–2649 (2024). https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.023.
[149] R. Clayton, J. Kirk, A. Banford and L. Stamford, "A review of radioactive waste processing and disposal from a life cycle environmental perspective", Clean Technologies and Environmental Policy, 27, 665–682 (2025). https://doi.org/10.1007/s10098-024-02998-6.
[150] International Atomic Energy Agency, "Industrial involvement to support a national nuclear power programme", Nuclear Energy Series, NG-T-3.4, IAEA, Vienna (2016).
[151] M. Vanatta, W. R. Stewart and M. T. Craig, "The role of policy and module manufacturing learning in industrial decarbonization by small modular reactors", Nature Energy, 10, 77-89 (2025). https://doi.org/10.1038/s41560-024-01665-w.
[152] F. Ahmad and S. Usman, "Advanced and small modular reactors' supply chain: Current status and potential for global cooperation", Progress in Nuclear Energy, 184, 105661 (2025). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105661.
[153] P. Wrigley, P. Wood, D. Robertson, J. Joannou, S. O'Neill and R. Hall, "Modular reactors: What can we learn from modular industrial plants and off site construction research", Nuclear Engineering and Technology, 56, 222-232 (2024). https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.029.
[154] International Atomic Energy Agency, "Procurement engineering and supply chain guidelines in support of operation and maintenance of nuclear facilities", Nuclear Energy Series, NP-T-3.21, IAEA, Vienna (2016).
[155] International Atomic Energy Agency, "Invitation and evaluation of bids for nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NG-T-3.9, IAEA, Vienna (2011).

[156] P. A. Wrigley, P. Wood, S. O'Neill, R. Hall and D. Robertson, "Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review", Progress in Nuclear Energy, 134, 103664 (2021). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103664.
[157] W. R. Stewart and K. Shirvan, "Construction schedule and cost risk for large and small light water reactors", Nuclear Engineering and Design, 407, 112305 (2023). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112305.
[158] C. Forsyth, L. M. Larsen, R. Spangler, C. Bolisetti, J. Hansen, B. Hanna, A. Abou-Jaoude, J. Zhou and K. Shirvan, "Analysis of stakeholder involvement in nuclear power plant cost overruns and implications for contract structuring", arXiv:2601.14558 [econ.GN] (2026). https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.14558.
[159] J. Emblemsvåg, "Successful scaling of small modular reactors requires the right business model", Nuclear Technology, 1-20 (2025). https://doi.org/10.1080/00295450.2025.2525706.
[160] S. Jasanoff and S.-H. Kim, "Sociotechnical imaginaries and national energy policies", Science as Culture, 22, 189–196 (2013). https://doi.org/10.1080/09505431.2013.786990.
[161] B. K. Sovacool and M. V. Ramana, "Back to the future: Small modular reactors, nuclear fantasies, and symbolic convergence", Science, Technology, & Human Values, 40, 96–125 (2015). https://doi.org/10.1177/0162243914542350.
[162] A. Stirling, "Transforming power: Social science and the politics of energy choices", Energy Research & Social Science, 1, 83–95 (2014). https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.001.
[163] Nuclear Energy Agency, "Small modular reactors: Challenges and opportunities", OECD Publishing, Paris (2021).
[164] International Atomic Energy Agency, "Considerations to facilitate the accelerated deployment of small modular reactors", TECDOC Series, 2104, IAEA, Vienna (2025). https://doi.org/10.61092/iaea.4qu6-ec8q.
[165] Canadian Nuclear Safety Commission, "Commission authorizes Ontario Power Generation Inc. to construct 1 BWRX-300 reactor at the Darlington New Nuclear Project site", from https://www.canada.ca/en/nuclear-safety-commission/news/2025/04/commission-authorizes-ontario-power-generation-inc-to-construct-1-bwrx-300-reactor-at-the-darlington-new-nuclear-project-site.html. Access on June 21st, 2026.
[166] Canadian Nuclear Safety Commission, "Darlington New Nuclear Project", https://www.cnsc-ccsn.gc.ca/eng/reactors/new-reactor-power-plant-projects/new-reactor-power-plant-facilities/darlington-new-nuclear-project/. Access on June 21st, 2026.
[167] Nuclear Energy Agency, "The NEA small modular reactor dashboard: Third edition", OECD Publishing, Paris (2025). https://doi.org/10.82155/nqz2-hp44.
[168] ORLEN, "ORLEN and Synthos reach agreement paving the way for Poland's first SMR nuclear power plant in Włocławek", from https://www.orlen.pl/en/about-the-company/media/press-releases/current/2025/August-2025/orlen-and-synthos-reach-agreement-paving-the-way-for-polands-first-smr-nuclear-power-plant-in-wloclawek. Access on June 21st, 2026.
[169] ORLEN, "Strategy 2035: The energy of tomorrow starts today", from https://www.orlen.pl/en/about-the-company/strategy. Access on June 21st, 2026.
[170] National Atomic Energy Agency, "PAA in the Polish Nuclear Power Programme", from https://www.gov.pl/web/paa-en/Polish-Nuclear-Power-Program. Access on June 21st, 2026.
[171] International Atomic Energy Agency, "IAEA delivers report to Estonia on its nuclear power infrastructure development", from https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-delivers-report-to-estonia-on-its-nuclear-power-infrastructure-development. Access on June 21st, 2026.
[172] Ministry of Climate of Estonia "Final report 2023: Possibilities for the implementation of nuclear energy in Estonia", from https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-02/Final%20Report%20-

%20Possibilities%20for%20the%20Implementation%20of%20Nuclear%20Energy%20in%20Estonia.pdf. Access on June 21st, 2026.
[173] Riigikogu, "The Riigikogu passed a resolution on supporting the adoption of nuclear energy in Estonia", from https://www.riigikogu.ee/en/press-releases/plenary-assembly/the-riigikogu-passed-a-resolution-on-supporting-the-adoption-of-nuclear-energy-in-estonia/. Access on June 21st, 2026.
[174] Riigikogu, "The Riigikogu passed the Nuclear Energy and Safety Act", from https://www.riigikogu.ee/en/press-releases/plenary-assembly/the-riigikogu-passed-the-nuclear-energy-and-safety-act/. Access on June 21st, 2026.
[175] Energy Market Authority, "Singapore and nuclear energy: A conversation in progress", from https://ema.gov.sg/news-events/news/feature-stories/2025/singapore-and-nuclear-energy-a-conversation-in-progress. Access on June 21st, 2026.
[176] Energy Market Authority, "EMA to conduct study on the safety and technical feasibility of advanced nuclear energy technologies", from https://ema.gov.sg/news-events/news/media-releases/2025/ema-to-conduct-study-on-safety-technical-feasibility-of-advanced-nuclear-energy-technologies. Access on June 21st, 2026.
[177] Ministry of Trade and Industry Singapore, "Nuclear energy", from https://www.mti.gov.sg/energy-and-carbon/energy-supply/low-carbon-alternatives/nuclear-energy/. Access on June 21st, 2026.
[178] International Atomic Energy Agency, "IAEA reviews progress of Bangladesh's nuclear infrastructure development", from https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-reviews-progress-of-bangladeshs-nuclear-infrastructure-development. Access on June 21st, 2026.
[179] International Atomic Energy Agency, "IAEA observes commitment to operational safety at Bangladesh's first nuclear power plant", from https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-observes-commitment-to-operational-safety-at-bangladeshs-first-nuclear-power-plant. Access on June 21st, 2026.
[180] World Nuclear Association, "Nuclear power in Bangladesh", from https://world-nuclear.org/Information-Library/Country-Profiles/countries-A-F/Bangladesh. Access on June 21st, 2026.
[181] Nuclearelectrica, "Proiectul SMR (Small Modular Reactor – Reactoare Modulare Mici)", from https://nuclearelectrica.ro/snn/proiecte-de-investitii/proiect-smr/. Access on June 21st, 2026.
[182] Nuclearelectrica, "The DoiceŞti small modular reactors (SMR) project obtains the final investment decision and enters the third stage of development", from https://nuclearelectrica.ro/snn/en/2026/02/12/the-doicesti-small-modular-reactors-smr-project-obtains-the-final-investment-decision-and-enters-the-third-stage-of-development/. Access on June 21st, 2026.
[183] International Atomic Energy Agency, "IAEA SEED follow up mission highlights good progress in SMR site selection in Romania", from https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-seed-follow-up-mission-highlights-good-progress-in-smr-site-selection-in-romania. Access on June 21st, 2026.
[184] World Nuclear News, "Final investment decision taken for Romanian SMR project", from https://www.world-nuclear-news.org/articles/final-investment-decision-taken-for-romanias-smrs. Access on June 21st, 2026.
[185] International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, "LINGLONG-1 (Hainan Changjiang SMR)", from https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=1111. Access on June 21st, 2026.
[186] China National Nuclear Corporation, "Main pump installed on Linglong One unit of Changjiang Nuclear Power Plant", from https://en.cnnc.com.cn/2025-04/27/c_1089207.htm. Access on June 21st, 2026.
[187] World Nuclear News, "Chinese SMR completes non-nuclear steam start up test", from https://www.world-nuclear-news.org/articles/chinese-smr-completes-non-nuclear-steam-start-up-test. Access on June 21st, 2026.
[188] International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, "Akademik Lomonosov-1", from https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=895. Access on June 21st, 2026.

[189] World Nuclear News, "Russia's floating nuclear power plant passes one billion kWh", from https://www.world-nuclear-news.org/articles/russias-floating-nuclear-power-plant-passes-one-billion-kwh. Access on June 21st, 2026.
[190] Nuclear Threat Initiative, "Akademik Lomonosov floating nuclear power plant – Russia", from https://www.nti.org/education-center/facilities/akademik-lomonosov/. Access on June 21st, 2026.
[191] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NuScale small modular reactor design certification", from https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/19/2023-00729/nuscale-small-modular-reactor-design-certification. Access on June 21st, 2026.
[192] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NuScale Power, LLC; NuScale US460 small modular reactor; standard design approval", from https://www.federalregister.gov/documents/2025/06/04/2025-10123/nuscale-power-llc-nuscale-us460-small-modular-reactor-standard-design-approval. Access on June 25th, 2026.
[193] Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS), "Carbon Free Power Project", from https://www.uamps.com/Carbon-Free. Access on June 25th, 2026.
[194] T. Gardner and M. Mishra, "NuScale ends Utah project, in blow to U.S. nuclear power ambitions", from https://www.reuters.com/business/energy/nuscale-power-uamps-agree-terminate-nuclear-project-2023-11-08/. Access on June 25th, 2026.
[195] Department for Energy Security and Net Zero, Great British Energy – Nuclear, The Rt Hon Ed Miliband MP and The Rt Hon Rachel Reeves MP, "Rolls-Royce SMR selected to build small modular nuclear reactors", from https://www.gov.uk/government/news/rolls-royce-smr-selected-to-build-small-modular-nuclear-reactors. Access on June 25th, 2026.
[196] Great British Energy – Nuclear, "Great British Energy - Nuclear and Rolls-Royce SMR sign contract", from https://www.gov.uk/government/news/great-british-energy-nuclear-and-rolls-royce-smr-sign-contract. Access on June 25th, 2026.
[197] E. Nucléaire, "EDF announces the creation of its subsidiary NUWARD to boost the development of its SMR now entering the basic design phase", from https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/edf-announces-the-creation-of-its-subsidiary-nuward-to-boost-the-development-of-its-smr-now-entering-the-basic-design-phase. Access on June 25th, 2026.
[198] A. Hernandez, "France's EDF to redraft small modular reactor design amid cost, technology concerns", from https://www.reuters.com/business/energy/frances-edf-drops-plans-develop-its-own-small-nuclear-reactor-technology-2024-07-01/. Access on June 25th, 2026.
[199] World Nuclear News, "EDF simplifies Nuward SMR design", from https://world-nuclear-news.org/articles/edf-simplifies-nuward-smr-design. Access on June 25th, 2026.
[200] Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), "Launch of the third phase of the joint review of safety options of the NUWARD reactor", from https://en.asnr.fr/news/launch-third-phase-joint-review-safety-options-nuward-reactor. Access on June 25th, 2026.
[201] International Atomic Energy Agency, "Small modular reactors: Advances in SMR developments 2024", Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2024). https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum.
[202] SMR Regulators' Forum, "Small Modular Reactors' Forum Working Group on Licensing Issues: Phase 2 Report", from https://www.iaea.org/sites/default/files/21/06/working_group_on_licensing_issues_phase_2_report.pdf. Access on June 25th, 2026.
[203] L. Ashton, "Fuelling the future: Building fuel supply chains for SMRs and advanced reactors", IAEA Bulletin – Nuclear Innovations for Net Zero, 64, (2023).

[204] International Atomic Energy Agency, "Considerations for deploying artificial intelligence applications in the nuclear power industry", Nuclear Energy Series, NR-T-1.26, IAEA, Vienna (2025). https://doi.org/10.61092/iaea.s6uy-wjt8.
[205] K. Mondal, O. Martinez and P. Jain, "Advanced manufacturing and digital twin technology for nuclear energy", Frontiers in Energy Research – Nuclear Energy, 12, 1339836 (2024). https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1339836.
[206] International Atomic Energy Agency, "Digital instrumentation and control systems and other advanced digital technologies for enhancing nuclear power plant performance", Nuclear Energy Series, NR-T-1.22, IAEA, Vienna (2026). https://doi.org/10.61092/iaea.f6b5-jepd.
[207] H. Vairagade, S. Kim, H. Son and F. Zhang, A nuclear power plant digital twin for developing robot navigation and interaction", Frontiers in Energy Research – Nuclear Energy, 12, 1356624 (2024). https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1356624.
[208] R. Stewart, E. Treviño, A. Shields, K. Heaps, J. Darrington, Q. Williams, C. Pope, J. Scott, B. Baker, J. Palmer, B. Vainqueur, T. S. Palmer, C. Palmer, S. Bays, M. Schanfein, G. Reyes and C. Ritter, "The AGN-201 digital twin: A test bed for remotely monitoring nuclear reactors", Annals of Nuclear Energy, 213, 111041 (2025). https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.111041.
[209] Nuclear Energy Agency, "Task force on artificial intelligence and machine learning for scientific computing in nuclear engineering", from https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77779/task-force-on-artificial-intelligence-and-machine-learning-for-scientific-computing-in-nuclear-engineering. Access on June 25th, 2026.
[210] International Atomic Energy Agency, "Computer security aspects of design for instrumentation and control systems at nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NR-T-3.30, IAEA, Vienna (2020).
[211] International Atomic Energy Agency, "Protecting against common cause failures in digital I&C systems of nuclear power plants", Nuclear Energy Series, NP-T-1.5, IAEA, Vienna (2009).
[212] ASEAN Secretariat, "Nuclear safety, security, and safeguards", from https://asean.org/our-communities/asean-political-security-community/peaceful-secure-and-stable-region/nuclear-safety-security-and-safeguards/. Access on June 25th, 2026.
[213] Office of Atoms for Peace, "ASEANTOM TOR", from https://www.oap.go.th/en/2023/01/18/aseantom-tor/. Access on June 25th, 2026.
[214] APAEC Drafting Committee, "ASEAN Plan of Action for Energy Cooperation (APAEC) 2026–2030", from https://aseanenergy.org/publications/asean-plan-of-action-for-energy-cooperation-apaec-2026-2030. Access on June 25th, 2026.
[215] Safety, Health and Environment National Authority (SHENA), "12th ASEAN network of regulatory bodies on atomic energy (ASEANTOM) annual meeting", from https://shena.gov.bn/media-center/news/12th-asean-network-of-regulatory-bodies-on-atomic-energy-aseantom-annual-meeting. Access on June 25th, 2026.