



รายงาน

เรื่อง พลังงานนิวเคลียร์

จัดทำโดย

นายธนารัตน์ ปัญญา รหัส 65031620102

เสนอ

อาจารย์ คชรัตน์ ภูซัง

รายงานเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน (Energy Technology) หลักสูตร
ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ วิชาเอกฟิสิกส์ ชั้นปีที่ 4
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2568 มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

คำนำ

รายงานเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ รายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน (Energy Technology) เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับ พลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศในศตวรรษที่ 21 โดยเนื้อหาได้รวบรวมความหมายและความสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์ รวมถึงหลักการสำคัญที่ทำให้พลังงานชนิดนี้สามารถนำมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพ อาทิ กระบวนการฟิชชัน การควบคุมปฏิกิริยา และระบบความปลอดภัยภายในเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ รายงานยังอธิบายถึงประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ต่อภาคพลังงานและเศรษฐกิจ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ การยกตัวอย่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ใช้จริงในหลายประเทศ ตลอดจนวิเคราะห์มาตรการความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในมิติต่าง ๆ ทั้งต่อสังคม สิ่งแวดล้อม และด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นภาพรวมของพลังงานนิวเคลียร์ครบถ้วนทั้งด้านศักยภาพ ประโยชน์ ความท้าทาย และการจัดการความเสี่ยงอย่างเหมาะสม

ผู้จัดทำหวังว่ารายงานฉบับนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพลังงานนิวเคลียร์แก่ผู้อ่าน และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียน การสอน หรือการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับพลังงานที่มีบทบาทต่ออนาคตของโลกใบนี้ต่อไป.

ผู้จัดทำ

นายธนรัตน์ ปัญญา

สารบัญ

คำนำ	ก
สารบัญ	ข
พลังงานนิวเคลียร์	1
ความหมายพลังงานนิวเคลียร์	1
ความสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์	1
หลักการสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์	2
ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์	5
การเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้า	8
กระบวนการเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้า	8
ตัวอย่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์	9
ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์	13
มาตรฐานความปลอดภัย	13
ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อสังคม	14
ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อสิ่งแวดล้อม	15
ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อเศรษฐกิจ (กิจ)	16
บรรณานุกรม	18

พลังงานนิวเคลียร์

ความหมายพลังงานนิวเคลียร์ หมายถึง พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นการแตกตัวหรือรวมตัวของนิวเคลียสของอะตอม ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของ "พลังงานความร้อน" และ "รังสี (คลื่นความรู้ SciMath ,2560)

ความสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์มีความสำคัญในด้านการผลิตไฟฟ้าที่มั่นคงและสะอาด ซึ่งไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมีประโยชน์หลากหลายในอุตสาหกรรม การแพทย์ เกษตรกรรม และการสำรวจอวกาศ(คลังความรู้ SciMath ,2560)

- **ด้านการผลิตพลังงาน** เป็นพลังงานสะอาด โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือมลพิษทางอากาศอื่นๆ ในระหว่างการทำงาน จึงช่วยลดปัญหาสภาพภูมิอากาศและมลพิษทางอากาศ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ขึ้นกับสภาพอากาศเหมือนพลังงานแสงอาทิตย์หรือลม ทำให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ 1 กิโลกรัมสามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าถ่านหินถึง 20,000 เท่า ทำให้ลดปริมาณการขนส่งและจัดเก็บเชื้อเพลิง. (คลังความรู้ SciMath ,2560)



รูป 1 modern large thermal power plant in dezhou city ,shandong province,China

ด้านการแพทย์ ใช้สารกัมมันตรังสีเพื่อถ่ายภาพอวัยวะต่างๆ เพื่อตรวจความผิดปกติ เช่น การตรวจต่อมไทรอยด์ด้วยไอโอดีน-131 ใช้รังสีในการรักษาโรคมะเร็งและเนื้องอก เช่น การรักษาภาวะเม็ดเลือดแดงมากเกินไปด้วยฟอสฟอรัส-32. ใช้รังสีแกมมาเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ปลอดเชื้อ เช่น อุปกรณ์ที่ทนความร้อนไม่ได้. (คลังความรู้ SciMath ,2560)



รูป 2 ใช้รังสีในการรักษาโรคมะเร็งและเนื้องอก

ด้านอุตสาหกรรมและการเกษตร ใช้วิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและปรับปรุงพืชผล ใช้ประโยชน์จากรังสีในการตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิต. (คลังความรู้ SciMath ,2560)

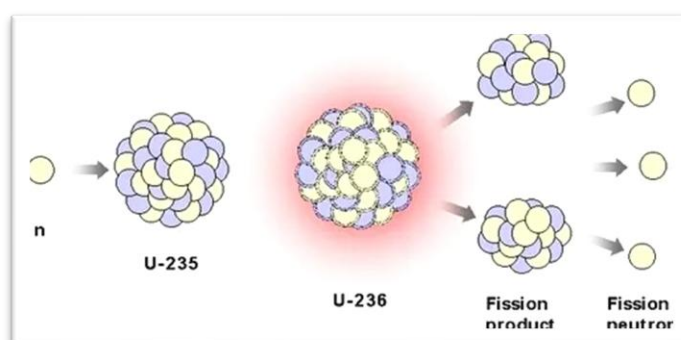


รูป 3 การใช้ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ในด้านอุตสาหกรรม

ด้านอื่นๆ เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในยานอวกาศ.ใช้ในกระบวนการแยกเกลือเพื่อผลิตน้ำจืด. (คลังความรู้ SciMath ,2560)

หลักการสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์ คือการปลดปล่อยพลังงานมหาศาล ที่เก็บไว้ใน นิวเคลียสของอะตอม โดยใช้ ปฏิกิริยาฟิชชัน (การแตกตัวของนิวเคลียสธาตุหนัก) เพื่อสร้างความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านการปั่นกังหันไอน้ำ และอีกวิธีคือ ปฏิกิริยาฟิวชัน (การรวมตัวของนิวเคลียสธาตุเบา) ซึ่งยังอยู่ในขั้นการวิจัย.

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน เกิดจากอนุภาคนิวตรอนวิ่งชนกับนิวเคลียสของธาตุยูเรเนียมหรือธาตุพลูโตเนียมที่เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ทำให้เกิดการแยกตัวหรือแตกตัวของนิวเคลียสของธาตุ โดยการแตกตัวแต่ละครั้งจะให้พลังงานความร้อนออกมามากมาย และมีอนุภาคนิวตรอนออกมาด้วย 2-3 ตัว ซึ่งจะวิ่งชนกับนิวเคลียสของอะตอมอื่นได้อีก ก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันอย่างต่อเนื่องเรียกว่า "ปฏิกิริยาลูกโซ่" (chain reaction) (ส่วนงานพลังงานนิวเคลียร์และรังสีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) , 2564)



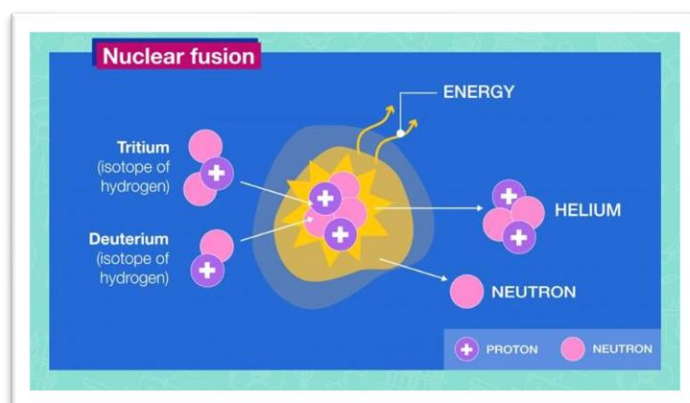
รูป 4 การเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน

การเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน โดยนิวตรอน (n) เข้าชนนิวเคลียสของยูเรเนียม ทำให้แตกออกเป็นสองส่วน (Fission Product) มีพลังงานปลดปล่อยออกมาในรูปของรังสีแกมมาและรังสีชนิดอื่นๆ และให้นิวตรอนออกมาจำนวนมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นอีก เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง ในทางฟิสิกส์ ฟิชชันเป็นกระบวนการทางนิวเคลียร์ หมายถึงมีการเกิดขึ้นที่นิวเคลียสของอะตอม ฟิชชันเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียส

แบ่งออกเป็นนิวเคลียสที่เล็กลง 2 หรือ 3 นิวเคลียส โดยทำให้เกิดผลพลอยได้ (by-product) ในรูปอนุภาคหรือรังสีออกมาด้วย ฟิชชันจะมีการปลดปล่อยพลังงานปริมาณมากออกมา โดยได้มาจากพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ซึ่งเป็นแรงนิวเคลียร์แบบแรง (strong nuclear force) ฟิชชันสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดได้หลายวิธี รวมทั้งการยิงนิวเคลียสของธาตุที่เป็นวัสดุ fissile ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานพอดี อนุภาคที่ใช้ยังส่วนใหญ่จะเป็นนิวตรอนอิสระที่มีพลังงานพอเหมาะ นิวตรอนอิสระจะถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียส ทำให้เกิดความไม่เสถียร และจะแตกออกเป็น 2 เศษหรือมากกว่า แต่ละเศษที่เกิดจากการแตกออกของนิวเคลียส เรียกว่า ผลผลิตฟิชชัน (fission product) โดยมีนิวตรอนอิสระ 2-3 นิวตรอนและโฟตอนให้ออกมาด้วย กระบวนการนี้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาสูงมาก เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเคมี โดยให้ออกมาในรูปของรังสีโฟตอน (photon radiation) เช่น รังสีแกมมา พลังงานจลน์ หรือพลังงานในการเคลื่อนที่ของนิวตรอนและนิวเคลียสของผลผลิตฟิชชัน โดยทั่วไปปฏิกิริยาฟิชชันแต่ละปฏิกิริยา จะให้พลังงานออกมาประมาณ 200 MeV

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ฟิชชันใช้ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน (การแตกตัวของนิวเคลียสอะตอม เช่น ยูเรเนียม) เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ จากนั้นไอน้ำแรงดันสูงจะถูกนำไปปั่นกังหันที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , 2567)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion Reaction) เกิดจากการรวมกันของนิวเคลียสของธาตุที่มีน้ำหนักเบา โดยปฏิกิริยารวมตัวกันของธาตุนี้จะปลดปล่อยพลังงานปริมาณมหาศาลออกมา เรียกว่า พลังงานนิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion energy) โดยจะมีความแตกต่างกับ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission) ที่ใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในปัจจุบัน ปฏิกิริยาฟิชชันนั้นจะเป็นการทำให้นิวเคลียสของธาตุหนักแตกตัว และมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าได้



รูป 5 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (fusion reaction)

ในการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน นิวเคลียสของธาตุจะต้องอยู่ในสถานะไอออน ซึ่งจะต้องเอาชนะแรงผลักไฟฟ้าระหว่างอะตอม และในการหลอมรวมนิวเคลียสจะต้องอยู่ในสภาวะที่มีพลังงาน แรงดัน และอุณหภูมิสูงมากพอ สำหรับที่สภาวะบนโลกต้องให้อุณหภูมิสูงกว่า 100 ล้านองศาเซลเซียส ซึ่งในสภาวะร้อนจัดเช่นนี้จะทำให้ไอโซโทปของธาตุเบาเช่น ดิวทีเรียม ($D, {}^2H$) และทริเทียม ($T, {}^3H$) อยู่ในสถานะ "พลาสมา" ทำให้สามารถบีบอัดหลอมรวมนิวเคลียสกันได้และปลดปล่อยพลังงานออกมา ทั้งนี้ ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดจากการรวมตัวกัน

ของนิวเคลียสธาตุได้หลายชนิด แต่ที่ได้รับความนิยม คือ ปฏิกิริยาฟิวชันดิวเทอเรียม-ทริเทียม (DT) ซึ่งผลิตพลังงานได้มาก และเกิดปฏิกิริยาฟิวชันได้ในสภาวะอุณหภูมิที่ต่ำกว่าปฏิกิริยาฟิวชันอื่น

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชัน ฟิวชันถือเป็นแหล่งพลังงานทางธรรมชาติของดวงอาทิตย์และดาวฤกษ์ ในใจกลางของดวงอาทิตย์มีความกดดันจากแรงโน้มถ่วงมหาศาล โดยแรงโน้มถ่วงจะบีบอัดก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันที่อุณหภูมิสูงในระดับ 10 ล้านองศาเซลเซียส ขณะที่บนโลกนั้นมีความดันต่ำกว่าดวงอาทิตย์มาก ดังนั้นการทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชันบนโลกจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 ล้านองศาเซลเซียส ความท้าทายของเทคโนโลยีฟิวชัน คือการสร้างเงื่อนไขของการเกิดดวงอาทิตย์บนโลก และควบคุมพลังงานพลาสมาร้อนที่นำมาใช้ผลิตพลังงาน วิธีการหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์นำมาใช้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชันบนโลกได้ คือ การกักเก็บก๊าซที่ร้อนจัด (super-heated gas) หรือ พลาสมา ให้รวมกลุ่มกันอย่างหนาแน่นด้วยสนามแม่เหล็กทรงวงแหวน ซึ่งมีลักษณะเหมือนโดนัท โดยมีการวิจัยพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบ สำหรับอุปกรณ์กักเก็บพลาสมาในสนามแม่เหล็กทรงแบบที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชันคือ “Tokamak” คำว่า Tokamak มาจากคำภาษารัสเซีย: “toroidalnaja kamera magnitnaja katushka” ซึ่งหมายถึง toroidal chamber magnetic coil ถูกคิดค้นในปี 1952 โดยนักฟิสิกส์ Igor Yevgenyevich Tamm และ Andrei Sakharov โดยเครื่องปฏิกรณ์ Tokamak ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชันได้โดยการกักเก็บและบีบอัด ดิวเทอเรียม และ ทริเทียม ด้วยความร้อนที่สูงมากในสนามแม่เหล็กทรงโดนัท จนก๊าซแตกตัวกลายเป็นพลาสมาและทำการควบคุมพลาสมาด้วยสนามแม่เหล็กแนว toroidal และ poloidal เพื่อทำให้เกิดพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชันไปใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าต่อไป (ส่วนงานพลังงานนิวเคลียร์และรังสีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) , 2564)

จุดเด่นของพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชัน

1. Abundant Energy ปฏิกิริยาฟิวชันปล่อยพลังงานมากกว่าปฏิกิริยาเคมีทั่วไปเกือบสี่ล้านเท่า และมากกว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันถึง 4 เท่า (ที่มวลเท่ากัน) โดยเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 ชนิด หรือ 2 ไอโซโทป คือ ดิวเทอเรียม (deuterium) กับ ทริเทียม (tritium) ดิวเทอเรียมสกัดออกมาจากน้ำทะเลที่มีอยู่ปริมาณมากและพบได้ทั่วไป และทริเทียมสามารถผลิตได้จากลิเทียม (lithium) ซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่ปริมาณมากบนเปลือกโลก
2. No CO₂ / Greenhouse Gas (GHG) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแตกต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อน ผลพลอยได้ของพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชันคือ ฮีเลียม (He) ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยและไม่เป็นพิษ
3. Accident free – No decay heat, No melt down ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันไม่สามารถทำให้เกิดอุบัติเหตุนิวเคลียร์ได้ เนื่องจากไม่ได้ใช้ปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นเดียวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันที่เกิดการสะสมความร้อน และต้องใช้เวลาในการสลาย

ความร้อนเมื่อดับเครื่องปฏิกรณ์ ปฏิกริยานิวเคลียร์ฟิวชันจะเป็นระบบกักเก็บพลาสมา โดยมีระบบทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและระบบควบคุมสนามแม่เหล็กทำให้พลาสมา ร้อนอยู่ในสภาวะที่ทำให้เกิดพลังงานนิวเคลียร์ฟิวชัน ดังนั้น การปรับเปลี่ยนค่าการ ทำงานในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้เงื่อนไขของภาวะพลาสมาเปลี่ยนแปลง และระบบจะ สูญเสียการกักเก็บความร้อนทำให้พลาสมาเกิดการเย็นตัว กรณีเช่นนี้เครื่องปฏิกรณ์จะ หยุดทำงานโดยอัตโนมัติภายในไม่กี่วินาที ด้วยเหตุนี้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันจึงถือ ว่าเป็นระบบที่ปลอดภัยโดยธรรมชาติ คือ การทำงานที่ผิดปกติจะส่งผลให้ระบบปิด ตัวเองลงทันทีและมีการสลายความร้อนอย่างรวดเร็ว

4. No long-lived radioactive waste กากกัมมันตรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชัน เป็นธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ต่ำ สำหรับองค์ประกอบของพลาสมาถูกจำแนกเป็น เพียงกากกัมมันตรังสีระดับต่ำและปานกลาง (Low & Medium level waste, L&MLW)
5. Limited risk of proliferation ภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันไม่มีวัสดุเสริม สมรรถนะที่สามารถใช้สร้างอาวุธนิวเคลียร์ได้ (ส่วนงานพลังงานนิวเคลียร์และรังสีการ ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) , 2564)

ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ พลังงานนิวเคลียร์มีประโยชน์หลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าที่สะอาด และเชื่อถือได้ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ด้านอื่น ๆ เช่น การแพทย์ (วินิจฉัยและ รักษา มะเร็ง) อุตสาหกรรม (ฆ่าเชื้ออุปกรณ์, ควบคุมกระบวนการผลิต) เกษตรกรรม และการสำรวจ อวกาศ (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

การใช้ประโยชน์เทคโนโลยีนิวเคลียร์ด้านอาหาร และการเกษตร

เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ และกำจัดจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เป็นการนำอาหารไปรับรังสีเพื่อ ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ซึ่งปนเปื้อนในอาหาร เช่น แหนม เนื้อไก่แช่แข็ง ปลาป่น

เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา โดยรังสีจะไปทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย ซึ่งเป็นผลให้ สามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้นานขึ้นกว่าเดิม สามารถใช้ได้กับอาหารประเภทเนื้อสัตว์ รวมทั้งสัตว์ปีกและอาหารทะเล

เพื่อชะลอการสุกของผลไม้ โดยอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามลักษณะการสุก คือ ผลไม้สุก ที่กินได้เลยเมื่อเก็บจากต้น ได้แก่ ส้ม พุทรา กับพวกผลไม้ที่ต้องนำมาบ่ม หรือปล่อยให้สุกก่อนถึง จะกินได้ เช่นกล้วย มะละกอ มะม่วง ผลไม้ที่นำมาฉายรังสี

เพื่อชะลอการสุกต้องเป็นผลไม้กลุ่มที่ต้องบ่ม หรือปล่อยให้สุกก่อนเท่านั้นจึงจะได้ผล เช่นมะม่วงอกร่อง มะม่วงทองดำ กล้วยหอม เพื่อยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา เป็นการฉาย รังสีอาหารที่นำไปใช้กับพืชประเภทหัวสะสมอาหาร ช่วยลดการสูญเสียของอาหารระหว่างการเก็บ รักษา ได้แก่ หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง ชะลอการบาน ของดอกเห็ดหลังการเก็บเกี่ยว

การปรับปรุงพันธุ์พืชด้วยรังสี คือการชักนำให้เปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของพืชโดยใช้รังสี โดยธรรมชาติพืชจะมีการเปลี่ยนแปลงของสารพันธุกรรม (Gene) การนำรังสีมาใช้ก็เพียงช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น และเร็วกว่าที่จะปล่อยให้เกิดเองตามธรรมชาติ ไม่มีการนำยีน จากภายนอกเข้าไป รังสีที่นิยมใช้คือ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ และรังสี นิวตรอน เพราะสามารถฉายผ่านทะลุเข้าไปถึงเนื้อเยื่อภายในได้ดี (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

การใช้ประโยชน์เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทย

เก็บรักษาและถนอมอาหาร ตรวจสอบควบคุมคุณภาพในการผลิต ฉายรังสีฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ และเชื้อโรคที่ปนเปื้อน เพื่อยืดอายุอาหารและผลิตผลการเกษตร ช่วยยืดอายุอาหารเวลาส่งข้ามประเทศทำให้อาหารเสียช้าลง

ผักผลไม้ปลอดโรคและแมลงเพื่อการส่งออก ในการค้าอาหารฉายรังสีระหว่างประเทศ มีข้อกำหนดและวิธีการปฏิบัติ โดยประเทศผู้ขายต้องปฏิบัติ ตามอย่างเคร่งครัด เพื่อให้เกิดความมั่นใจ ประเทศผู้ซื้อจำเป็นต้องตรวจสอบระบบต่างๆ ในกระบวนการส่งออกผลไม้ฉายรังสี เริ่มจาก ตรวจสอบการดูแลสวนผลไม้ การเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา การบรรจุ หีบห่อ การขนส่งก่อนฉายรังสี กระบวนการฉายรังสีทุกขั้นตอน จนถึงการวางตลาด

การตรวจสอบอาหารปนเปื้อนโดยเทคนิคเชิงนิวเคลียร์ Neutron Activation Analysis, NAA เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยถึงหนึ่งในล้านส่วนได้อย่างแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนทางเคมี ส่งผลให้วิเคราะห์ปริมาณ ธาตุพิษในอาหารได้อย่างง่ายดาย อาหารที่มักพบว่ามีเชื้อโรคคือ อาหารจำพวกเนื้อสัตว์ ซึ่งจะมีเชื้อโรคเช่น ซาลโมเนลลา ปะปนอยู่ โดยเฉพาะเนื้อไก่ นั้น พบมากกว่าร้อยละ 20 ของตัวอย่างที่ส่งตรวจ

การเพิ่มคุณค่าอัญมณีโดยวิธีนิวเคลียร์ การฉายรังสีให้อัญมณีมีสีเปลี่ยนไปจากเดิม และมีสีสวยงดงามขึ้นโดยรังสี ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ชนิดก็คือ รังสีแกมมา, อิเล็กตรอน และนิวตรอน(สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

การใช้ประโยชน์เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ด้านการแพทย์

ด้านการตรวจและวินิจฉัยโรค (Diagnosis) การถ่ายภาพเอกซเรย์ เพื่อตรวจความผิดปกติของอวัยวะในร่างกาย เช่น ฟัน ปอด กระดูก การตรวจการทำงานของระบบอวัยวะ โดยให้ผู้ป่วยรับประทานหรือฉีดสารกัมมันตรังสีเข้าไปในร่างกาย แล้วทำการถ่ายภาพอวัยวะ

ด้านการบำบัดรักษาโรค (Radiotherapy) การรักษาด้วยรังสีแบบระยะใกล้ด้วยเครื่องฉายรังสี (การฉายแสง) และการใส่แร่หรือการรักษาด้วยรังสีแบบระยะใกล้

ด้านการปลอดเชื้อผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ (Radiosterilization) การใช้รังสีแกมมาจากไอโซโทป โคบอลต์ ๖๐ หรือรังสี อิเล็กตรอน เป็นตัวกลางในกระบวนการปลอดเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการใช้ก๊าซหรือการอบด้วยความร้อนเมื่อก้าวเข้าสู่โรงพยาบาลผู้ป่วยจะได้รับการตรวจรักษาทั่วไปเป็นลำดับแรก เครื่องมืออุปกรณ์ทางการแพทย์เช่น ถุงมือ หลอดฉีดยา ล้วนแล้วแต่ผ่านการฉายรังสีเพื่อปรับปรุงคุณภาพหรือเพื่อปลอดเชื้อมาแล้ว (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

การใช้ประโยชน์เทคโนโลยีนิวเคลียร์ ด้านพลังงาน ปัจจุบันประเทศมหาอำนาจในโลกส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โรงไฟฟ้า นิวเคลียร์จัดเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนชนิดหนึ่ง ใช้เชื้อเพลิงจากธาตุยูเรเนียม โดยโรงไฟฟ้า นิวเคลียร์นั้นสามารถแบ่งส่วนการทำงานได้ 2 ส่วน คือ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ จะใส่แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ไว้ในน้ำภายในโครงสร้างที่ปิดสนิท เพื่อให้ความร้อนที่ได้จาก ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันไปต้มน้ำ ผลิตไอน้ำ และส่วนผลิตไฟฟ้า เป็นส่วนที่รับไอน้ำจากเครื่อง ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แล้วส่งไปหมุนกังหันผลิตไฟฟ้า(สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

ปฏิกิริยาฟิชชัน จากยูเรเนียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 35 % ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันในเชื้อเพลิงโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้น ควบคุมได้โดยใช้แท่งควบคุม ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษในการ ดูดจับอนุภาคนิวตรอน เช่น โบรอนคาร์ไบด์ ทำหน้าที่ควบคุม ให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เพิ่มขึ้น หรือลดลงตามที่ต้องการ โดยการเลื่อนแท่งควบคุมเข้าออก ภายในแกนปฏิกรณ์ตามแนวขึ้นลง เพื่อดูดจับอนุภาคนิวตรอนส่วนเกิน

ประโยชน์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ให้ใช้หลักการ 3 E คือ

E Environment เป็นโรงไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

E Economic เป็นโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในขณะนี้

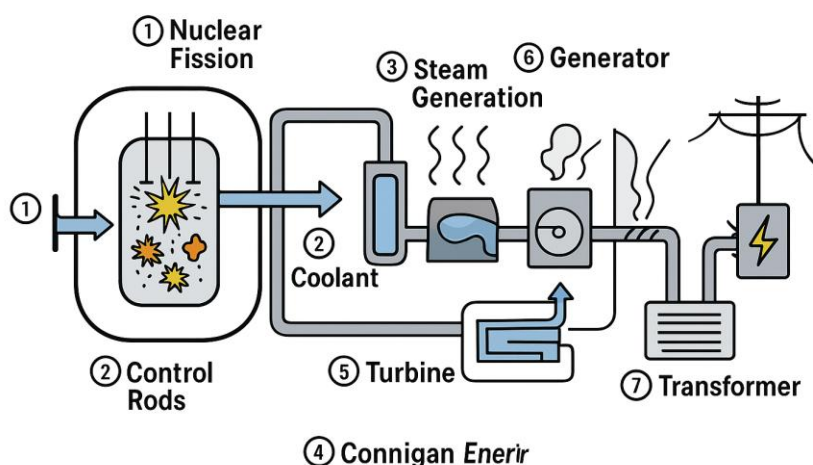
E Energy เป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานได้ดีที่สุด (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ,2564)

การเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้า

กระบวนการเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้า

พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอม โดยเฉพาะจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Nuclear Fission) หรือ “การแตกตัวของนิวเคลียสหนัก” เช่น ยูเรเนียม-235 หรือพลูโทเนียม-239 กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้สร้างพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพดังขั้นตอนต่อไปนี้

NUCLEAR ENERGY TO ELECTRICITY



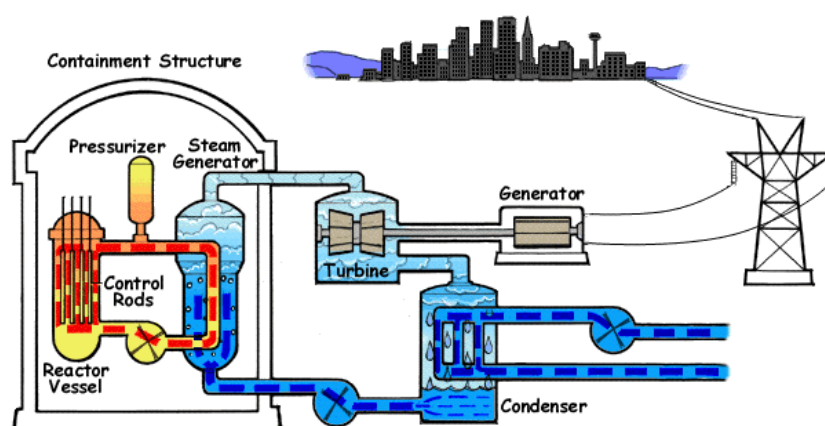
รูป 6 การเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้า

1. การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันภายในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Reactor Core) จะบรรจเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในรูปเม็ดยูเรเนียม เมื่อยูเรเนียม-235 ดูดซับนิวตรอนหนึ่งตัว นิวเคลียสจะไม่เสถียรและแตกตัวออกเป็นธาตุที่มีมวลเบากว่า พร้อมทั้งปล่อยนิวตรอนเพิ่มและพลังงานความร้อนจำนวนมาก พลังงานความร้อนนี้เป็นแหล่งพลังงานหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์
2. นิวตรอนใหม่ที่ถูกปล่อยออกมาสามารถไปชนยูเรเนียมเม็ดอื่น ๆ ทำให้เกิด “ปฏิกิริยาลูกโซ่” เพื่อควบคุมไม่ให้ปฏิกิริยาเร็วเกินไป โรงไฟฟ้าใช้แท่งควบคุม (Control Rods) ทำจากแคดเมียมหรือโบรอนเพื่อลดหรือเพิ่มจำนวนของนิวตรอน จึงควบคุมอัตราการเกิดความร้อนได้อย่างปลอดภัย
3. ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแกนปฏิกรณ์จะถูกถ่ายไปยังสารหล่อเย็น (Coolant) เช่น น้ำบริสุทธิ์หรือน้ำในสภาวะความดันสูง หากเป็นโรงไฟฟ้าแบบ PWR (Pressurized Water Reactor) น้ำในวงจรแรกจะถูกอัดความดันไม่ให้เดือด แม้จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 300°C
4. น้ำร้อนจากวงจรแรกจะถูกส่งผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนไปสู่ไอน้ำในวงจรที่สอง จนกลายเป็นไอน้ำความดันสูง ไอน้ำนี้ไม่ปนเปื้อนกับมันตรังสีเพราะไม่สัมผัสกับปฏิกรณ์โดยตรง
5. ไอน้ำแรงดันสูงจะถูกส่งไปหมุนกังหันขนาดใหญ่ การหมุนของใบกังหันทำให้เพลลาของกังหันเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หมุนตามไปด้วย

6. เมื่อเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน แม่เหล็กภายในจะหมุนตัดกับขดลวดทองแดง เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) และสร้างกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าทั่วไป
7. หลังจากให้พลังงานกับกังหันแล้ว ไอน้ำที่แรงดันลดลงจะถูกส่งเข้าสู่คอนเดนเซอร์ (Condenser) เพื่อทำให้เย็นลงและควบแน่นกลับเป็นน้ำ โดยใช้ระบบน้ำหล่อเย็น เช่น น้ำจากแม่น้ำหรือหอหล่อเย็น (Cooling Tower) น้ำที่ควบแน่นนี้จะถูกปั๊มกลับไปใช้ใหม่ในระบบวงจรที่สอง
8. ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกส่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสำหรับการส่งผ่านสายส่งระยะไกล ก่อนเข้าสู่เครือข่ายไฟฟ้าและกระจายไปยังบ้านเรือนและอุตสาหกรรมต่าง ๆ

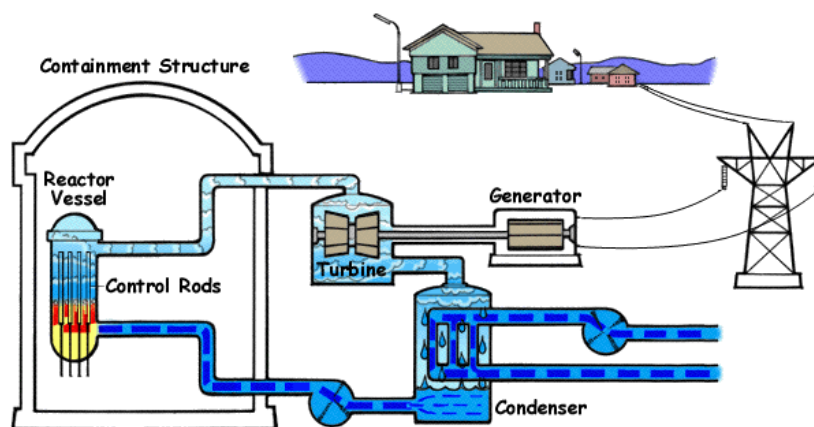
สรุปกระบวนการเปลี่ยนพลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นการนำความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชันมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลในการหมุนกังหัน และสุดท้ายเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระบวนการทั้งหมดนี้อาศัยการควบคุมที่แม่นยำ ปลอดภัย และเป็นระบบปิด ทำให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าปริมาณมากได้อย่างต่อเนื่องและเสถียร

ตัวอย่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์



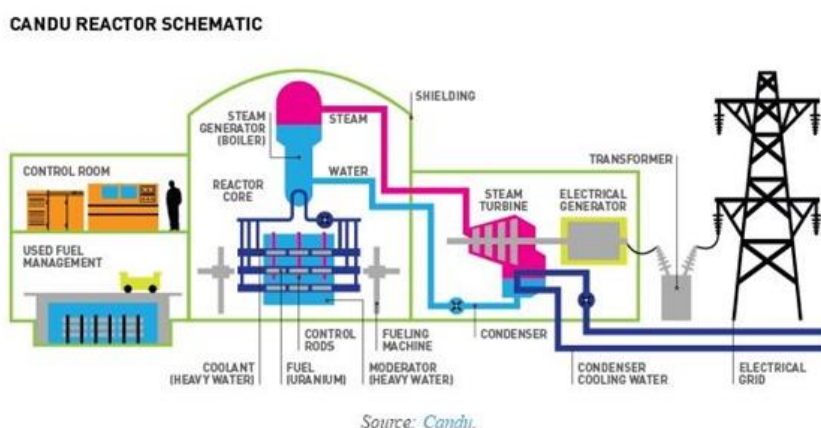
รูป 7 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำอัดความดัน (Pressurized Water Reactor: PWR)

โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำอัดความดัน (Pressurized Water Reactor: PWR) เป็นโรงไฟฟ้าที่นิยมใช้มากที่สุด โรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น (coolant) และสารหน่วงนิวตรอน (moderator) ให้กับเครื่องปฏิกรณ์ และมีระบบการทำงานเป็นสองวงจร โดยวงจรแรกเป็นระบบระบายความร้อนจากแกนปฏิกรณ์ ซึ่งระบบน้ำในวงจรนี้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 325 องศาเซลเซียส จำเป็นต้องทำงานภายใต้ความดันที่สูงมากเพื่อป้องกันการเดือดของน้ำ และมีเครื่องควบคุมความดัน (Pressurizer) ทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในระบบ ในส่วนของวงจรที่สองจะทำงานภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าวงจรแรก ซึ่งน้ำในวงจรนี้จะถูกผลิตเป็นไอน้ำที่เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator) เพื่อไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และไอน้ำที่ผ่านกังหันไอน้ำจะผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) กลับเป็นน้ำแล้วจะกลับไปรับความร้อนที่เครื่องผลิตไอน้ำอีกครั้ง



รูป 8 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor: BWR)

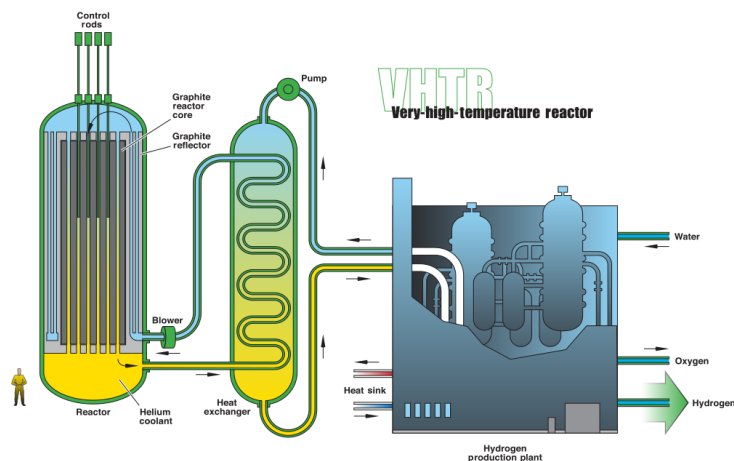
โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (Boiling Water Reactor: BWR) โรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นและสารหน่วงนิวตรอน และมีระบบการผลิตไอน้ำหมุนเวียนเป็นวงจรเดียว โดยความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชันจะทำให้น้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์เดือดกลายเป็นไอน้ำ โดยมีอุณหภูมิสูงประมาณ 285 องศาเซลเซียส ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปที่กังหันไอน้ำเพื่อไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นไอน้ำจะผ่านเครื่องควบแน่นกลับเป็นน้ำเพื่อไปรับความร้อนจากแกนปฏิกรณ์อีกครั้ง ระบบของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำเดือดถูกออกแบบให้ทำงานที่ความดันต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำอัดความดัน และเนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านแกนปฏิกรณ์มีการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี ทำให้อุปกรณ์ในส่วนของกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีด้วย ทำให้ระบบการป้องกันอันตรายและการควบคุมสารกัมมันตรังสีและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ค่อนข้างยุ่งยากกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบอื่น



รูป 9 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก (PHWR/CANDU)

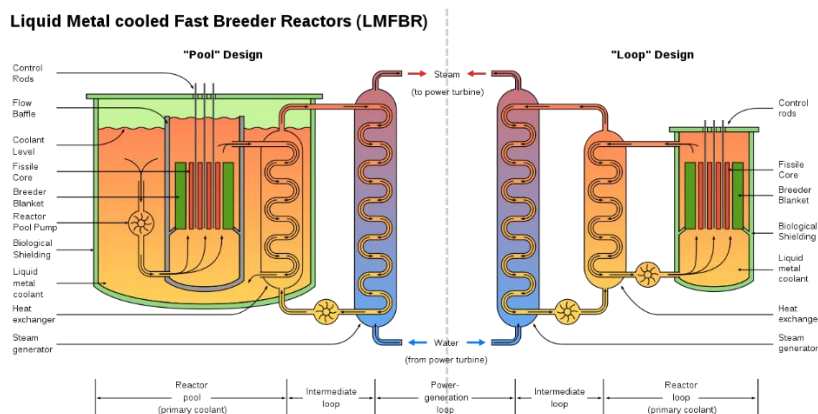
โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก (PHWR/CANDU) โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำมวลหนัก (Pressurized Heavy Water Reactor: PHWR / CANada Deuterium Uranium: CANDU) พัฒนาโดยประเทศแคนาดา โรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติที่ไม่มีการเสริมสมรรถนะเป็นเชื้อเพลิง และใช้น้ำมวลหนัก (D_2O) เป็นสารหล่อเย็นและสารหน่วงนิวตรอน สำหรับระบบการผลิตไอน้ำเป็นแบบสองวงจรเหมือนโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำอัดความดัน โดยน้ำมวลหนักในวงจรแรกจะถ่ายเทความร้อนออก

จากมัดเชื้อเพลิงให้กับน้ำในวงจรที่สองเพื่อนำไปผลิตไอน้ำที่เครื่องกำเนิดไอน้ำ ก่อนส่งไอน้ำไปหมุนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า และเนื่องจากโรงไฟฟ้าประเภทนี้ใช้ยูเรเนียมธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทำให้ต้องเปลี่ยนเชื้อเพลิงทุกวัน ดังนั้นจึงมีการออกแบบให้โรงไฟฟ้าประเภทนี้สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์



รูป 10 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)

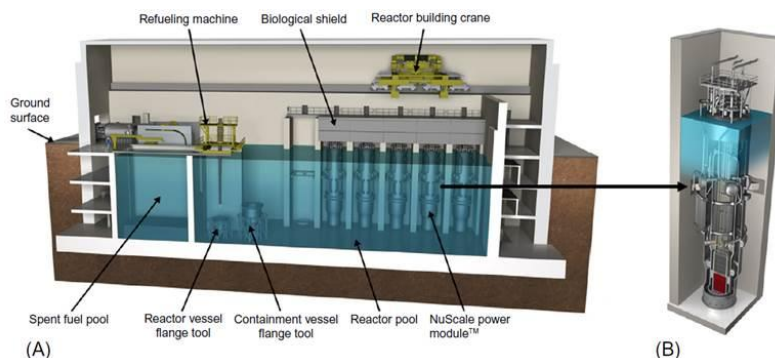
โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ประเภทนี้ใช้ก๊าซเป็นตัวระบายความร้อน มีความปลอดภัยในตัวเองสูง (inherent safety) กล่าวคือมีแนวโน้มการเกิดอุบัติเหตุต่ำแม้ไม่มีการควบคุม เป้าหมายของเครื่องปฏิกรณ์ลักษณะนี้ไม่ได้มุ่งเน้นการผลิตไฟฟ้า แต่เน้นการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ โดยหลักการเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภทนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้นิวตรอนพลังงานต่ำและนิวตรอนพลังงานสูง โดยใช้ U-235, Pu-239 และ U-233 เป็นเชื้อเพลิง



รูป 11 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ Fast Neutron Reactor (FNR)

โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ Fast Neutron Reactor (FNR) เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่เน้นปฏิกิริยาการแตกตัวที่เกิดจากนิวตรอนพลังงานสูง เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภทนี้สามารถใช้ U-238 ซึ่งมีอยู่มากมายในธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งช่วยลดปัญหาเรื่องการจัดหาเชื้อเพลิงและการเสริมสมรรถนะ โดย FNR บางแบบสามารถถูกออกแบบให้แปลง U-238 เป็น Pu-239 ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่อง

ปฏิกิริยาทั่วไปได้อีกส่วนหนึ่ง เรียกเครื่องปฏิกิริยาลักษณะนี้เรียกว่า Fast Breeder Reactor (FBR) เครื่องปฏิกิริยาแบบ FBR จะใช้นิวตรอนเร็วเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาฟิชชัน เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารประกอบของ PuO_2 และมี U-238 ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์ไทล์ห่อหุ้มรอบแกนปฏิกิริยา นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชันจะเข้าทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ U-238 ได้พลูโตเนียมเป็นผลผลิต ซึ่งสามารถสกัดเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไปได้อีก โรงไฟฟ้าประเภทนี้มีระบบระบายความร้อนเป็นแบบ 2 วงจรโดยมีโซเดียมเหลวเป็นสารหล่อเย็น



รูป 12 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบโมดูลขนาดเล็ก (Small Modular Reactor: SMR)

โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบโมดูลขนาดเล็ก (Small Modular Reactor: SMR) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMR เป็นเครื่องปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีกำลังการผลิตน้อยกว่า 300 เมกะวัตต์ มีลักษณะเป็นโมดูลที่ผลิตและประกอบเบ็ดเสร็จจากโรงงานผู้ผลิต สามารถขนย้ายโดยรถบรรทุกหรือรถไฟ เพื่อนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่ต้องการได้อย่างสะดวก ในบางรุ่นสามารถติดตั้ง SMR หลายโมดูลประกอบกันเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ โรงไฟฟ้าประเภทนี้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ใช้เงินลงทุนต่ำกว่า ใช้เวลาก่อสร้างน้อยกว่า และเรื่องความปลอดภัยที่มีกำลังการผลิตต่ำกว่า รวมถึงความซับซ้อนของระบบน้อยกว่า และสามารถนำไปประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การผลิตน้ำจืด การผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (ส่วนงานพลังงานนิวเคลียร์และรังสีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) , 2564)

ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

มาตรฐานความปลอดภัย

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีมาตรฐานความปลอดภัยสูงมาก ทั้งนี้เพราะมีมาตรการ และกระบวนการ ตรวจสอบต่างๆ ที่เข้มงวด และรัดกุมหลายขั้นตอน ทั้งด้านนามธรรม และรูปธรรม

1. ด้านนามธรรม ได้แก่ แนวคิดในการออกแบบให้ปฏิกรณ์มีความปลอดภัยในตัวเอง คือ

ก. ใช้เม็ดเชื้อเพลิงทนความร้อนได้สูงมาก โดยมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 2800 องศาเซลเซียส

ข. ใช้ยูเรเนียม-235 ในเชื้อเพลิงมีสัดส่วนต่ำประมาณร้อยละ 0.7-3 เท่านั้น

ค. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สามารถ หยุดยังปฏิกิริยาแตกตัวได้ด้วยตัวเอง เมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบ

ง. ระบบถ่ายเทความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นระบบปิด ไม่มีส่วนใดสัมผัสกับ เครื่องมืออุปกรณ์ภายนอก

จ. เครื่องมืออุปกรณ์ที่สัมผัสและปนเปื้อนรังสี จะติดตั้งรวมไว้ในอาคารคลุมปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ เพื่อความสะดวกในการควบคุม ตลอดจนปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ประชาชน และสิ่งแวดล้อม

2. ด้านรูปธรรม ได้แก่ กฎระเบียบ อุปกรณ์ และระบบความปลอดภัยต่างๆ หลากหลายชนิด และซ้อนกันหลายระบบประกอบด้วย

ก. รายงานการวิเคราะห์ความปลอดภัย รายงานนี้ต้องจัดทำขึ้น ก่อนการลงมือก่อสร้าง โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ประกอบด้วยการศึกษาวิเคราะห์ในด้านต่างๆ

ข. การประกันคุณภาพ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของมาตรฐานความปลอดภัยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ คือ มาตรการประกันคุณภาพ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 5 ขั้นตอน การเลือกสถานที่ตั้ง โรงไฟฟ้า การออกแบบโรงไฟฟ้า การผลิตเครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า การเดินเครื่องและบำรุงรักษา โรงไฟฟ้า การกำกับดูแลความปลอดภัยโรงไฟฟ้า

ค. เกราะป้องกันรังสีหลายชั้น คือ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ หลายชั้น ที่ใช้กักกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วไหล หรือแพร่กระจายจากเนื้อเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกโรงไฟฟ้า เกราะป้องกันรังสีหลายชั้น เป็น ๑ ในหัวข้อสำคัญของมาตรการความปลอดภัย ที่เป็นรูปธรรม ประกอบด้วย

เกราะชั้นที่ 1 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (fuel pellet)

เกราะชั้นที่ 2 ท่อหุ้มเม็ดเชื้อเพลิง นิวเคลียร์ (fuel clad)

เกราะชั้นที่ 3 น้ำระบายความร้อน (coolant)

เกราะชั้นที่ 4 ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor vessel)

เกราะชั้นที่ 5 กำแพงคอนกรีตกำบังรังสี (biological concrete shield)

เกราะชั้นที่ 6 แผ่นเหล็กกรุผนังด้านในอาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (steel liner)

เกราะชั้นที่ 7 อาคารคลุมปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ (reactor containment)

ง. ระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม คือ ชุดเครื่องมืออุปกรณ์หลายระบบ ระบบหลายชุด ที่ติดตั้ง เพื่อตรวจวัด และตรวจสอบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตโนมัติ ซึ่งแยกต่างหากจากระบบควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ชุดปกติ แต่จะทำงานควบคู่กันไป ในกรณีที่มีเหตุผิดปกติเกิดขึ้น ระบบความปลอดภัยทางวิศวกรรม จะเข้ามาแก้ไขเหตุการณ์ทันที ก่อนที่เหตุการณ์รุนแรงจะเกิดขึ้น ประกอบด้วยชุดเครื่องมือ/อุปกรณ์หลายระบบ

จ. ระบบเสริมความปลอดภัยอื่นๆ คือ ชุดเครื่องมืออุปกรณ์ ที่ทำหน้าที่เสริมการทำงานให้แก่ระบบความปลอดภัยต่างๆ เพื่อให้การทำงานของระบบต่างๆ มีประสิทธิภาพ และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

ฉ. มาตรการหลังเกิดเหตุฉุกเฉิน ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การแจ้งข่าวสารโดยเร็ว การจัดหาสถานที่ที่ปลอดภัย และเตรียมการอพยพ การจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันรังสี การตรวจวัดระดับรังสี การควบคุมเส้นทางเข้าออกโรงไฟฟ้า การชำระล้างสิ่งเปื้อนกัมมันตรังสี การจัดเตรียมบริการทางการแพทย์ การจัดเตรียมอาหารและเครื่องดื่ม การควบคุมผลิตผลทางการเกษตร และการเผยแพร่ข่าวสารต่อสาธารณชน

จากมาตรฐาน และมาตรการต่างๆ ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่า โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลกส่วนมากมีมาตรฐานความปลอดภัยสูงมาก โดยเฉพาะโรงไฟฟ้านิวเคลียร์รุ่นใหม่ๆ ที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลากว่า 40 ปี ก็จะมีประสิทธิภาพ และความปลอดภัยสูงมากขึ้น ยกเว้นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์บางแห่งของบางประเทศ ที่ไม่ได้มาตรฐานสากล เนื่องจากในอดีตไม่ได้มีการควบคุม และตรวจสอบ จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ แต่โรงไฟฟ้าดังกล่าว ซึ่งมีอยู่ไม่กี่แห่งในโลก กำลังจะหมดไปในไม่ช้า (มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน,2558)

ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อสังคม

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นแหล่งพลังงานที่หลายประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญ เนื่องจากสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง มีเสถียรภาพสูง และไม่ปล่อยมลพิษที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน อย่างไรก็ตาม ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นประเด็นที่สังคมให้ความสนใจอย่างยิ่ง เพราะความกังวลเกี่ยวกับรังสีและอุบัติเหตุในอดีตยังคงอยู่ในความทรงจำของผู้คนจำนวนมาก ดังนั้นการทำความเข้าใจระบบความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้สังคมสามารถประเมินความเสี่ยงได้อย่างถูกต้องและมีเหตุผล

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สมัยใหม่ถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยสูงมาก โดยใช้ระบบป้องกันหลายชั้นหรือที่เรียกว่า “Defense-in-Depth” เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้หลายครั้งซ้อนกัน ชั้นแรกคือการห่อหุ้มเชื้อเพลิงด้วยโลหะทนความร้อน ชั้นต่อมาคือถังปฏิกรณ์ที่มีความแข็งแรงสูง และชั้นสุดท้ายคืออาคารป้องกันที่สร้างด้วยคอนกรีตหนาหลายเมตร ระบบป้องกันที่ซ้อนกันหลายชั้นนี้ช่วยให้แม้เกิดเหตุขัดข้องภายในระบบก็ยังสามารถควบคุมรังสีให้อยู่ภายในขอบเขตที่ปลอดภัยได้ นอกจากนี้ เทคโนโลยีรุ่นใหม่ เช่น ปฏิกรณ์ Generation III และ III+ ยังติดตั้งระบบความปลอดภัยเชิงรับ ที่สามารถทำงานได้เองแม้ไม่มีไฟฟ้าหรือไม่มีผู้ควบคุม ช่วยลดโอกาสที่อุบัติเหตุรุนแรงจะเกิดขึ้น

ในด้านผลกระทบต่อสังคม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ถือว่ามีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานฟอสซิล โดยไม่มีการปล่อยก๊าซพิษอย่างซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ หรือฝุ่น PM2.5 ที่เป็นสาเหตุของโรคทางเดินหายใจ ปัจจุบันข้อมูลจากหลายประเทศยืนยันว่าอัตราการเกิดอุบัติเหตุและการสูญเสียชีวิตจากพลังงานนิวเคลียร์ต่ำกว่าพลังงานถ่านหินและน้ำมันหลายเท่า และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของโลกในปัจจุบันอีกด้วย นอกจากนี้ ประเทศที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์ยังมีระบบตรวจวัดและรายงานรังสีอย่างเข้มงวด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ชุมชนรอบโรงไฟฟ้า

แม้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะมีความปลอดภัยสูง แต่สังคมก็ยังคงมีความกังวลบางประการ เช่น ความเสี่ยงจากอุบัติเหตุขนาดใหญ่ที่อาจเกิดขึ้นแม้จะมีโอกาสน้อยมาก หรือการจัดการของเสียกัมมันตรังสีในระยะยาวที่ต้องใช้ความรอบคอบและการวางแผนอย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม ประสบการณ์จากอุบัติเหตุใหญ่ในอดีต เช่น เซอร์โบวิลและฟูกูชิมะ ได้กลายเป็นบทเรียนสำคัญที่ทำให้ประเทศต่าง ๆ พัฒนาเทคโนโลยีและมาตรการความปลอดภัยให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กล่าวโดยสรุป โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นแหล่งพลังงานที่มีความปลอดภัยสูงเมื่อมีการออกแบบที่ได้มาตรฐาน การดำเนินงานที่รัดกุม และการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ หากสังคมได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง โปร่งใส และเข้าใจความเสี่ยงอย่างสมเหตุสมผล ก็จะสามารถยอมรับพลังงานนิวเคลียร์ในฐานะแหล่งพลังงานสะอาดที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้มากยิ่งขึ้น (มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2558)

ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อสิ่งแวดล้อม

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความนิยมอย่างมากในยุคปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณมากอย่างต่อเนื่องโดยไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้เป็นพลังงานที่มีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน อย่างไรก็ตาม เรื่องความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่สังคมส่วนใหญ่กังวล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีระบบป้องกันและควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร

ในด้านการปล่อยมลพิษ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ถือว่ามีความปลอดภัยอย่างมาก เนื่องจากไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหมือนโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือน้ำมัน จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ หรือฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศ นอกจากนี้ ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ยังต่ำมาก ส่งผลดีต่อการลดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว

ในส่วนของระบบความปลอดภัย โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สมัยใหม่ได้รับการออกแบบให้มีการป้องกันหลายชั้น ตั้งแต่การห่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิงด้วยโลหะทนความร้อน การใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีความแข็งแรงสูง ไปจนถึงอาคารป้องกันที่สร้างด้วยคอนกรีตหนาหลายเมตร ซึ่งเป็นเกราะสำคัญในการป้องกันไม่ให้อกัมมันตภาพรังสีรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม แม้ในกรณีเกิดเหตุผิดปกติภายในโรงไฟฟ้า ระบบป้องกันเหล่านี้ยังคงสามารถควบคุมการแพร่กระจายของกัมมันตรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การจัดการของเสียกัมมันตรังสีเป็นอีกหนึ่งประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ผลิตของเสียปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดอื่น ของเสียระดับต่ำและปานกลางจะถูกบำบัดอัดแน่น และบรรจุในถังที่ปลอดภัย ก่อนนำไปเก็บในสถานที่จัดเก็บเฉพาะ ส่วนของเสียระดับสูงจากแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วจะถูกเก็บในสระเก็บความร้อนและย้ายไปยังถังเก็บแบบแห้ง ซึ่งออกแบบมาให้ทนทานต่อธรรมชาติและปลอดภัยเป็นเวลานาน กระบวนการทั้งหมดทำขึ้นตามมาตรฐานสากลและอยู่ภายใต้การตรวจสอบอย่างใกล้ชิด

แม้เทคโนโลยีสมัยใหม่จะช่วยให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีความปลอดภัยสูง แต่การตระหนักถึงปัญหาและบทเรียนจากเหตุการณ์ในอดีต เช่น ฟูกูชิมะ หรือเชอร์โนบีล ก็มีส่วนสำคัญทำให้แต่ละประเทศพัฒนาระบบความปลอดภัยให้ดียิ่งขึ้น ทั้งด้านการออกแบบ การป้องกันภัยธรรมชาติ และการเตรียมแผนรองรับสถานการณ์ฉุกเฉิน การเรียนรู้จากเหตุการณ์เหล่านี้ช่วยลดความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยเพิ่มความมั่นใจให้แก่สังคมและชุมชนรอบโรงไฟฟ้า

โดยสรุป โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นพลังงานที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ทั้งในด้านการปล่อยมลพิษ การจัดการของเสีย และระบบความปลอดภัยที่ออกแบบมาอย่างรัดกุม หากประเทศใดมีการดำเนินงานอย่างโปร่งใส ปฏิบัติตามมาตรฐานสากล และมีระบบตรวจสอบที่เข้มงวด โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก็จะเป็นแหล่งพลังงานที่ปลอดภัยและยั่งยืน สามารถอยู่ร่วมกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุลและเป็นประโยชน์ต่อสังคมในระยะยาว (มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2558)

ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่อเศรษฐกิจ (กิจ)

ในยุคที่ความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเลือกใช้แหล่งพลังงานที่มีความมั่นคงปลอดภัย และคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ กลายเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นหนึ่งในทางเลือกที่หลายประเทศให้ความสำคัญ ไม่เพียงเพราะเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอและมีต้นทุนระยะยาวต่ำ แต่ยังมีความปลอดภัยต่อระบบเศรษฐกิจในภาพรวม เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงจากต้นทุนพลังงานที่ไม่แน่นอนและส่งเสริมเสถียรภาพด้านพลังงานของประเทศ

ในด้านต้นทุนการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำมากเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าที่ต้องเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน หรือน้ำมัน แม้ต้นทุนเริ่มต้นในการก่อสร้างจะสูง แต่การที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สามารถเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าได้ต่อเนื่องยาวนานถึง 40-60 ปี ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยลดลงและมีความคุ้มค่าในระยะยาว สิ่งนี้ทำให้ระบบเศรษฐกิจมีความปลอดภัยมากขึ้น เพราะประเทศไม่ต้องเผชิญความผันผวนของราคาพลังงานในตลาดโลก และสามารถวางแผนด้านพลังงานได้อย่างมั่นคง

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังส่งผลดีต่อเศรษฐกิจในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและการสร้างงาน ช่วงการก่อสร้างต้องใช้แรงงานจำนวนมากและหลากหลายสาขา ทั้งวิศวกรรม นิวเคลียร์ เทคโนโลยีสารสนเทศ และงานช่างเฉพาะทาง ส่งผลให้เกิดการจ้างงานและการพัฒนาทักษะแรงงานในประเทศ เมื่อเดินเครื่องแล้ว โรงไฟฟ้าต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้สูง ซึ่งช่วยยกระดับคุณภาพแรงงานและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของ

ประเทศในระยะยาว อีกทั้งยังช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจในพื้นที่โดยรอบผ่านกิจกรรมทางธุรกิจและการท่องเที่ยวเชิงวิชาการ

ด้านความปลอดภัย โรงไฟฟ้านิวเคลียร์สมัยใหม่ได้รับการออกแบบให้มีระบบป้องกันหลายชั้น ทำให้โอกาสเกิดอุบัติเหตุรุนแรงต่ำมาก การมีระบบความปลอดภัยที่เข้มงวดช่วยลดความเสี่ยงทางเศรษฐกิจ ทั้งต่อรัฐและต่อประชาชน เพราะหากเกิดอุบัติเหตุใหญ่ย่อมส่งผลกระทบทางเศรษฐกิจอย่างรุนแรง เช่น สูญเสียพื้นที่การเกษตร การย้ายประชาชน หรือการฟื้นฟูพื้นที่ แต่ด้วยมาตรฐานความปลอดภัยที่สูงขึ้นมากในปัจจุบัน ความเสี่ยงเหล่านี้จึงลดลงอย่างชัดเจน

เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานฟอสซิล โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ยังช่วยลดต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จากผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยไม่มีการปล่อยมลพิษที่ทำให้ประชาชนเจ็บป่วยหรือก่อให้เกิดปัญหาฝุ่น PM2.5 ซึ่งมักทำให้รัฐต้องแบกรับค่าใช้จ่ายด้านสาธารณสุขจำนวนมาก การใช้พลังงานนิวเคลียร์จึงเป็นการลดภาระทางเศรษฐกิจของประเทศในระยะยาวและสร้างความปลอดภัยต่อประชาชนในเชิงเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิต

กล่าวโดยสรุป โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีความปลอดภัยต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศทั้งในด้านเสถียรภาพทางพลังงาน ต้นทุนระยะยาวที่คุ้มค่า การจ้างงาน และการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม แม้จะมีต้นทุนเริ่มต้นสูงและต้องการมาตรการความปลอดภัยที่เข้มงวด แต่หากมีการออกแบบที่ดี การบริหารจัดการที่โปร่งใส และการตรวจสอบตามมาตรฐานสากล โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก็สามารถเป็นพื้นฐานสำคัญของระบบเศรษฐกิจที่มั่นคงและยั่งยืนได้ในอนาคต

บรรณานุกรม

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ,(2560) “คลังความรู้ SciMath” สืบค้นเมื่อวันที่ 29/11/68 จาก <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7264-2017-06-13-13-47-06>

ส่วนงานพลังงานนิวเคลียร์และรังสีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) , (2564) “พลังงานนิวเคลียร์ฟิชชัน” สืบค้นเมื่อวันที่ 29/11/68 จาก <https://ned.egat.co.th/index.php/component/sppagebuilder/?view=page&id=53>

สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย ,(2567) “การขับเคลื่อนด้วยพลังงานนิวเคลียร์” สืบค้นเมื่อวันที่ 29/11/68 จาก <https://nst.or.th/academics/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%82%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87/>

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน),(2564) “นิวเคลียร์และการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนิวเคลียร์” สืบค้นเมื่อวันที่ 29/11/68 จาก <https://elibrary.tint.or.th/wp-content/uploads/2021/10/%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A3%E0%B9%8C-%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%82%E0%B8%A2%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B9%8C%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A3%E0%B9%8C.pdf>

มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน(2558) “ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์” สืบค้นเมื่อวันที่ 29/11/68 จาก <https://saranukromthai.or.th/oldchild/3124>

