วารสาร
Atoms for Peace Journal

ปรมาณูเพื่อสันติ

ปีที่ 36 ฉบับที่ 2 ประจำปี 2566

บก. เปิดเล่ม

วารสารปรมาณูเพื่อสันติ ปีที่ 36 ฉบับที่ 2 ประจำปี 2566 คณะผู้จัดทำขอนำเสนอบทความที่น่าสนใจเกี่ยวกับวัสดุกัมมันตรังสี ซึ่งเมื่อช่วงต้นปีที่ผ่านมาเกิดเหตุการณ์วัสดุกัมมันตรังสีซีเซียม-137 หล่นหายที่จังหวัดปราจีนบุรี ทำให้หลายฝ่ายเกิดความวิตกกังวล ปส. ในนามของหน่วยงานกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์และรังสี จึงได้เผยแพร่บทความเกี่ยวกับ “มาตรการเสริมความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึก” สำหรับสถานประกอบการเพื่อนำไปปรับใช้ตามความเหมาะสม อีกทั้งยังมีบทความที่เกี่ยวกับการนำวัสดุกัมมันตรังสีไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อาทิ การศึกษาวิจัย ใช้ในทางการแพทย์รักษาผู้ป่วยมะเร็ง นอกจากนี้ยังมีบทความที่น่าสนใจเรื่องอื่น ๆ อีกมากมาย

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณผู้ที่สนใจติดตามวารสารฉบับนี้อย่างต่อเนื่อง และในวารสารเล่มถัดไปนั้นจะเป็นเนื้อหาอะไร ติดตามพบกันใหม่ในฉบับหน้า

บรรณาธิการ

จัดทำโดย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ที่ปรึกษา

1. นายเพิ่มสุข สัจจาภิวัฒน์ เลขาธิการสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
2. นางเพ็ญนภา กัญชนะ รองเลขาธิการสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

คณะทำงานพิจารณาเอกสารวิชาการและสื่อเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (กองบรรณาธิการ)

1. นางสาวอัมพิกา อภิชัยบุคคล ผู้อำนวยการกองยุทธศาสตร์และแผนงาน
2. นางวราภรณ์ วัชรสุรกุล ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์
3. นายรุ่งธรรม ทาคำ ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านความปลอดภัยทางรังสี
4. นางสาวธนวรรณ แจ่มสุวรรณ ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านการพัฒนาระบบบริหารจัดการด้านพลังงานปรมาณู
5. นายยุทธนา ตุ้มน้อย รักษาการในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านพลังงานปรมาณู
6. นายวิทิต ผึ่งกัน รักษาการในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านการประเมินค่ากัมมันตภาพรังสี
7. นางสาวอุษา กัลลประวิทย์ นักนิวเคลียร์เคมีชำนาญการพิเศษ
8. นางอภิสรา เจริญศรี นักนิวเคลียร์เคมีชำนาญการพิเศษ
9. นางสุนันทา สาวิกันย์ นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการพิเศษ
10. นายไชยยศ สุนทราภา วิศวกรนิวเคลียร์ชำนาญการพิเศษ
11. นายณรงค์เวทย์ บุญเต็ม นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการพิเศษ
12. นางสาวชลาทิพย์ เกื้อกอบ นักวิเคราะห์นโยบายและแผนชำนาญการพิเศษ (เลขานุการฯ)
13. นางสาวนุชจรีย์ สัจจา นักวิชาการเผยแพร่ชำนาญการ (ผู้ช่วยเลขานุการฯ)

ออกแบบ : กลุ่มเผยแพร่และประชาสัมพันธ์

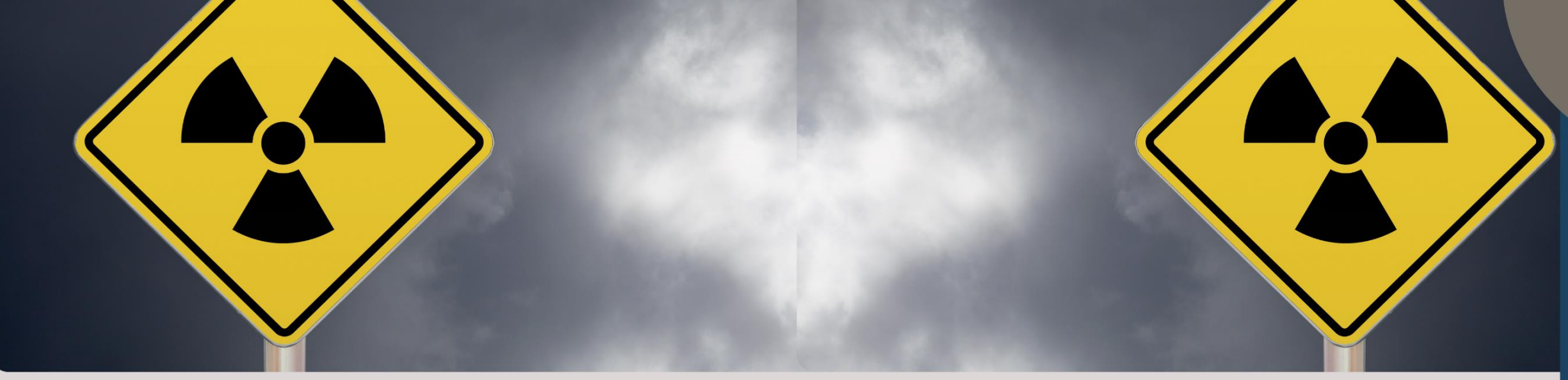


Table of Contents

4 มาตรการเสริมความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึก

9 การตรวจวัดปริมาณซีเซียม-137 (Cs-137) จากภายในร่างกาย โดยใช้เทคนิคการวัดปริมาณรังสีแกมมาในปัสสาวะ

13 วัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

19 สารเภสัชรังสีลูทีเชียม-177 (Lutetium, Lu-177)

23 การวัดปริมาณรังสีด้วยวัสดุประเภทแก้ว

30 การวิเคราะห์ผลของรังสีต่อการทำลายดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ท ตอนที่ 2

35 มลภาวะพลาสติก : การนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้รังสีเพื่อปกป้องสิ่งแวดล้อม

วารสารปรมาณูเพื่อสันติจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ภารกิจและการดำเนินงานของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ รวมทั้งข่าวสาร บทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ตลอดจนเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการส่งเสริมความรู้ความเข้าใจในทางเทคโนโลยีนิวเคลียร์ให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

บรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการคัดเลือกและแก้ไขต้นฉบับทั้งเรื่องและภาพตามแต่จะเห็นสมควร โดยไม่ต้องขอความเห็นชอบจากเจ้าของเรื่องและไม่ส่งต้นฉบับคืน

ข้อคิดเห็นหรือบทความในเอกสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ซึ่งไม่มีข้อมูลผูกพันกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติแต่อย่างใด

ผู้สนใจส่งข้อเขียน หรือข้อเสนอแนะ
สามารถติดต่อได้ที่กลุ่มเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
เลขที่ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ 0 2596 7600 ต่อ 1110,1120 โทรสาร 0 2561 3013

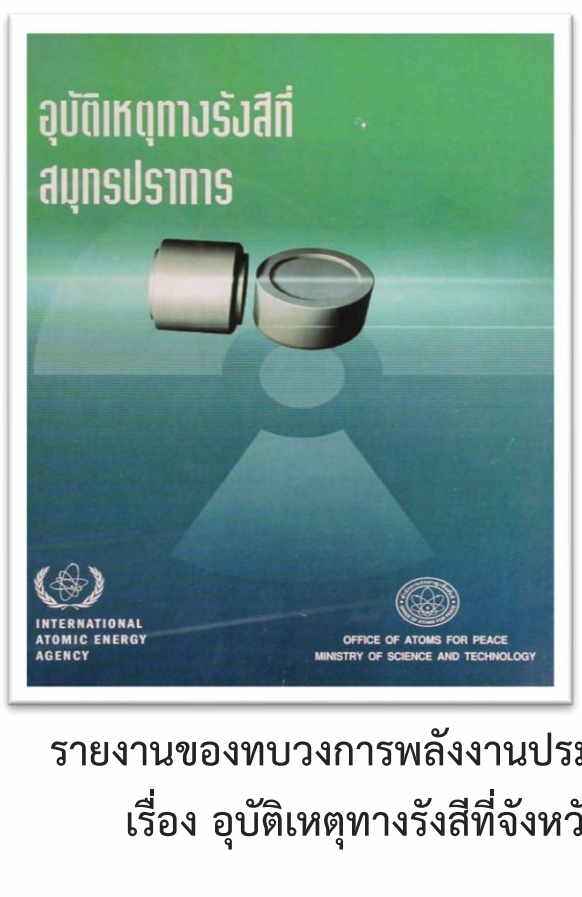
: www.oap.go.th : pr@oap.go.th : Atoms4Peace สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

: officeofatomsforpeace : @atomsnet

มาตรการเสริมความมั่นคงปลอดภัย ของวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึก

ดร.รุ่งธรรม ทาคำ
ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านความปลอดภัยทางรังสี

เป็นอีกครั้งหนึ่งในประเทศไทยที่มีเหตุไม่ปกติเกิดขึ้นกับวัสดุกัมมันตรังสีซึ่งอยู่ในความครอบครองหรือใช้ประโยชน์ในสถานประกอบการ หากจำกันได้เมื่อเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 วัสดุกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว (disused radioactive source) ซึ่งเก็บไว้ในสถานที่แห่งหนึ่งได้ถูกลักลอบนำออกไปจากสถานที่จัดเก็บจังหวัดสมุทรปราการ และนำไปขายที่ร้านรับซื้อของเก่า เมื่อเครื่องกำบังรังสีได้ถูกตัดแยกออกจากกันก็ทำให้แท่งวัสดุกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 หลุดออกมาสู่ภายนอก และแผ่รังสีระดับสูงให้แก่คนงานที่ทำงานอยู่ใกล้ชิดกับวัสดุกัมมันตรังสี รวมทั้งบุคคลอื่น ๆ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงก็ได้รับปริมาณรังสีในระดับที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระยะทางจากวัสดุกัมมันตรังสี และระยะเวลาที่ได้รับปริมาณรังสี เหตุการณ์ในครั้งนั้นส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 3 ราย และมีผู้ได้รับบาดเจ็บหลายราย โดยมีอาการแสดงมากน้อยแตกต่างกันไปตามปริมาณรังสีที่ได้รับ ผู้เขียนเองซึ่งได้ไปปฏิบัติหน้าที่ในการค้นหาและเก็บกู้วัสดุกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 ร่วมกับเจ้าหน้าที่คนอื่น ๆ ในเหตุการณ์ครั้งนั้นก็ได้รับปริมาณรังสีจำนวนหนึ่ง แต่ก็มิได้รับอันตรายที่ก่อให้เกิดผลชัดเจน (deterministic effects) ใด ๆ ผลกระทบนอกเหนือไปจากการเสียชีวิตของคนงาน การบาดเจ็บและการได้รับปริมาณรังสีที่สูงกว่าปกติของบุคคลที่อยู่ในเหตุการณ์ครั้งนั้น คือการที่ประชาคมของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากวัสดุกัมมันตรังสี และผู้ที่มีหน้าที่ในการกำกับดูแล หันมาให้ความสนใจและความสำคัญในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสี (security of radioactive sources) อย่างจริงจังทั้งในระดับนานาชาติที่นำโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency หรือ IAEA) ซึ่งได้จัดทำ The Code of Conduct on Safety and Security of Radioactive Sources และ Additional Guidance on Import and Export of Radioactive Materials รวมทั้ง Nuclear Security Series ฉบับต่าง ๆ ทั้งฉบับที่จัดเป็นข้อกำหนดพื้นฐาน (fundamental) และที่เป็นข้อแนะนำในทางปฏิบัติ (implementing guides)



SCAN ME

รายงานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ
เรื่อง อุบัติเหตุทางรังสีที่จังหวัดสมุทรปราการ

ในส่วนของประเทศไทยที่มีสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) ทำหน้าที่เป็นหน่วยงานหลักในการกำกับดูแลการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์และรังสี ได้มีการพัฒนาและจัดทำข้อกำหนดและหลักเกณฑ์ในด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสี โดยในขณะนั้นได้อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. 2504 จัดทำระเบียบคณะกรรมการพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ว่าด้วยวิธีการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุพลอยได้ พ.ศ. 2554 และบัญชี 1 แนบท้ายระเบียบฯ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อกำหนดและหลักเกณฑ์หลักในด้านความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี (radiological security) ต่อมาเมื่อได้มีการบัญญัติพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 ก็ได้มีการกำหนดกฎกระทรวงความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561 เพื่อนำมาใช้เป็นข้อกำหนดและหลักเกณฑ์ในด้านความมั่นคงปลอดภัยทางรังสีแทนที่ระเบียบฯ ดังกล่าวข้างต้น

เล่ม ๑๓๕ ตอนที่ ๗๙ ก หน้า ๑๗ ราชกิจจานุเบกษา ๕ ตุลาคม ๒๕๖๑

กฎกระทรวง
ความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี
พ.ศ. ๒๕๖๑

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕ วรรคหนึ่ง มาตรา ๘ (๑๘) และมาตรา ๙๑ แห่งพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. ๒๕๕๙ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติออกกฎกระทรวงไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ในกฎกระทรวงนี้

"การรักษาความมั่นคงปลอดภัย" หมายความว่า การป้องกัน การตรวจจับ การหน่วงเวลา และการเผชิญเหตุความมั่นคงปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุกัมมันตรังสี สถานที่ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

"การตรวจจับ" หมายความว่า มาตรการ กลไก หรือวิธีการใด ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถตรวจพบการเข้าถึงหรือความพยายามเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต การเคลื่อนย้ายโดยผิดกฎหมาย หรือการจงใจกระทำผิดกฎหมายอื่น ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับวัสดุกัมมันตรังสี สถานที่ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

"การหน่วงเวลา" หมายความว่า มาตรการ กลไก หรือวิธีการใด ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถหน่วง ถ่วง หรือยืดระยะเวลา ที่จำต้องใช้เพื่อลดความพยายามในการก่อหรือการกระทำที่เป็นอันตรายต่อความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี

"การเผชิญเหตุ" หมายความว่า การดำเนินการเมื่อปรากฏสัญญาณการตรวจจับ โดยบุคลากรผู้มีหน้าที่ในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสีในสถานประกอบการทางรังสี หรือโดยเจ้าหน้าที่ของรัฐ เพื่อป้องกันมิให้ผู้ใดสามารถเข้าถึงหรือเคลื่อนย้ายวัสดุกัมมันตรังสีโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือก่อวินาศกรรมต่อวัสดุกัมมันตรังสี สถานที่ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

"แผนรักษาความมั่นคงปลอดภัย" หมายความว่า แผนที่จัดทำโดยผู้ขอรับใบอนุญาตหรือผู้แจ้งซึ่งระบุรายละเอียดเกี่ยวกับมาตรการ กลไก และวิธีการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสี สถานที่ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

SCAN ME

กฎกระทรวงความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561

ในกฎกระทรวงฯ ฉบับนี้ ได้กำหนดมาตรการ วัตถุประสงค์ และกลไกการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของวัสดุกัมมันตรังสีแต่ละประเภทไว้อย่างครบถ้วน ทั้งในด้านการตรวจจับ (detection) การหน่วงเวลา (delay) การเผชิญเหตุ (response) และการบริหารจัดการความมั่นคงปลอดภัย (security management) รวมทั้งการจัดทำบัญชีรายการต้นกำเนิดรังสี (source inventory) ที่ถือว่าเป็นวิธีการหนึ่งในกลไกการตรวจจับที่มีประสิทธิภาพสูงและมีประโยชน์อย่างยิ่งในการตรวจตราและตรวจจับเหตุความมั่นคงปลอดภัย (security incident) ที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานประกอบการ ซึ่งในเหตุความมั่นคงปลอดภัยครั้งล่าสุดที่เกิดกับวัสดุกัมมันตรังสีซีเซียม-137 ในสถานประกอบการที่จังหวัดปราจีนบุรีนั้น หากมิใช่เพราะการตรวจสอบและทบทวนบัญชีรายการต้นกำเนิดรังสีตามวงรอบของสถานประกอบการ อาจจะไม่พบว่าวัสดุกัมมันตรังสีที่สถานประกอบการได้มีไว้ในครอบครองหรือใช้อยู่นั้นได้สูญหายไป

ด้วยเหตุนี้ ผู้เขียนจึงขอเสนอมาตรการเสริมความมั่นคงปลอดภัยสำหรับวัสดุกัมมันตรังสีชนิดปิดผนึก (radioactive sealed sources) สำหรับสถานประกอบการต่าง ๆ นำไปปรับใช้ตามความเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุกัมมันตรังสีในอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร รวมทั้งอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนที่สูงที่มีโอกาสตกหล่นและสูญหายได้ หรือติดตั้งอยู่ในจุดลับสายตาและมีโอกาสถูกโจรกรรม มาตรการดังกล่าวนี้ประกอบด้วย

1. จัดทำ ตรวจสอบ ทบทวน ปรับปรุงและแก้ไขบัญชีรายการวัสดุกัมมันตรังสีเป็นประจำ ตามกรอบระยะเวลาที่สอดคล้องกับประเภทของวัสดุกัมมันตรังสี ได้แก่

- ทุก ๆ 60 วัน สำหรับวัสดุกัมมันตรังสีประเภทที่ 1
- ทุก ๆ 90 วัน สำหรับวัสดุกัมมันตรังสีประเภทที่ 2
- ทุก ๆ 120 วัน สำหรับวัสดุกัมมันตรังสีประเภทที่ 3
- ทุก ๆ 180 วัน สำหรับวัสดุกัมมันตรังสีประเภทอื่น ๆ

โดยรูปแบบของบัญชีรายการวัสดุกัมมันตรังสีอาจนำตารางท้ายแบบรายงานแสดงปริมาณของวัสดุพลอยได้ที่มีไว้ในครอบครองตามกฎกระทรวงกำหนดเงื่อนไขวิธีการขอรับใบอนุญาต และการดำเนินการเกี่ยวกับวัสดุนิวเคลียร์พิเศษ วัสดุต้นกำลัง วัสดุพลอยได้หรือพลังงานปรมาณู พ.ศ. 2550 มาปรับใช้ตามตัวอย่างในตารางที่ 1 ข้างท้ายบทความนี้

2. จัดให้มีหรือเพิ่มประสิทธิภาพของกลไกการตรวจจับและการหน่วงเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัสดุกัมมันตรังสีในอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร รวมทั้งอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนที่สูงที่มีโอกาสตกหล่นลงมาและอาจเกิดการสูญหายได้ หรือติดตั้งอยู่ในจุดลับสายตาและมีโอกาสถูกโจรกรรม เช่น สำหรับกลไกการตรวจจับอาจพิจารณาติดตั้งระบบตรวจตราจากทางไกลด้วยกล้องวงจรปิด (CCTV) ที่สามารถทำงานได้ตลอดเวลา มีความคมชัดโดยสามารถจับภาพของอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุกัมมันตรังสีเป็นต้นกำเนิดรังสีได้อย่างชัดเจน พร้อมระบบบันทึกภาพแบบดิจิตัลที่สามารถเก็บบันทึกสัญญาณภาพไว้ได้นานเป็นเวลาอย่างน้อย 15 - 30 วัน หรืออาจติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถให้สัญญาณแจ้งเตือนเมื่ออุปกรณ์ทางรังสีถูกถอดหรือหลุดออกจากจุดติดตั้งโดยไม่ได้รับอนุญาต หรืออาจเพิ่มความถี่ของวงรอบในการเดินตรวจตราโดยเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย (รปภ.) หรือเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย (จป.) หรือเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสี (RSO) เพื่อตรวจสอบการคงอยู่ของต้นกำเนิดรังสี สำหรับกลไกการหน่วงเวลานั้นอาจเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นด้วยการติดตั้งกรงขังที่ทำด้วยโลหะที่มั่นคงทนทานพร้อมระบบกุญแจล็อคครอบทับอุปกรณ์ทางรังสีไว้ ในกรณีที่อุปกรณ์ทางรังสีเกิดหลุดออกจากจุดติดตั้งก็จะไม่หล่นลงมาด้านล่างและถูกผู้ไม่หวังดีที่พบเห็นนำออกไปโดยไม่ได้รับอนุญาต

3. หมั่นดูแลและบำรุงรักษาอุปกรณ์ทางรังสีให้อยู่ในสภาพดีและพร้อมใช้ประโยชน์เป็นประจำ ตามวงรอบที่ผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายแนะนำ

นอกจากมาตราการเสริมในด้านความมั่นคงปลอดภัยสำหรับวัสดุกัมมันตรังสีที่กล่าวถึงในข้างต้นแล้ว ผู้ครอบครองหรือใช้วัสดุกัมมันตรังสีควรจะต้องเตรียมการในเรื่องการจัดการกากกัมมันตรังสีเมื่อวัสดุกัมมันตรังสีนั้นสิ้นอายุการใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่มีวัสดุกัมมันตรังสีประเภทที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพรังสีสูง ๆ เป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยงานผู้ให้บริการจัดการกากกัมมันตรังสีนั้น ได้กำหนดนโยบายที่จะไม่รับดำเนินการจัดการกากกัมมันตรังสีที่เป็นวัสดุกัมมันตรังสีประเภทดังกล่าว ผู้ก่อให้เกิดกากกัมมันตรังสีนี้จะต้องดำเนินการส่งกากกัมมันตรังสีหรือกัมมันตรังสีที่ไม่ใช้ประโยชน์แล้วนี้กลับคืนไปยังผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายในต่างประเทศหรือไปยังหน่วยงานในต่างประเทศที่มีความเชี่ยวชาญในการจัดการกากกัมมันตรังสีต่อไป

ตารางที่ 1 (ตัวอย่าง) บัญชีรายการวัสดุกัมมันตรังสีที่สถานประกอบการมีไว้ในครอบครองหรือใช้

ลำดับ	รายละเอียดวัสดุกัมมันตรังสี								รายละเอียดภาชนะบรรจุ/เครื่องมือ/เครื่องจักร				ชื่อหรือรหัสของสถานที่ติดตั้ง/ใช้/จัดเก็บ	สถานภาพของวัสดุกัมมันตรังสี				
	ชนิดของไอโซโทปรังสี	ผู้ผลิต	รุ่น	หมายเลขกำกับ	กัมมันตภาพหรือน้ำหนัก (Bq, Ci, kg, Lb)			ประเภท (Category)	ผู้ผลิต	รุ่น	หมายเลขกำกับ	ความจุกัมมันตภาพหรือน้ำหนักสูงสุด (Bq, Ci, kg, Lb)		พบ	ไม่พบ	ใช้ปกติ	เก็บสำรอง	อื่น ๆ (ระบุ)
					ปริมาณ	ณ วันที่	จำนวน											
1	Co-60	Amersham	xx-x	1234	30 mCi	1-Jan-2022	1	4	xxx	RD-1	xx-xxx	30 mCi	SILO-Chem1	√	-	√	-	-
2	Am-241	SourceTech	AAA	7890	15 mCi	1-Jan-2015	1	4	Gauge4U	GG-111	45-356x	15 mCi	SILO-Ash10	-	√	-	-	ชำรุด ถอดเก็บรอกำจัด

ทั้งนี้ ขอเน้นย้ำว่าความปลอดภัยและความมั่นคงปลอดภัยเป็นหน้าที่และความรับผิดชอบของผู้ครอบครองหรือใช้วัสดุกัมมันตรังสี ที่ต้องจัดให้มีและบำรุงรักษาให้คงอยู่ตลอดอายุการใช้งานของวัสดุกัมมันตรังสี การดำเนินงานเพื่อความปลอดภัยและความมั่นคงปลอดภัยทางรังสีอันสอดคล้องกับชนิดและประเภทของวัสดุกัมมันตรังสี ต้องเป็นไปตามกฎหมาย เงื่อนไข และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ที่ ปส. ได้กำหนดและประกาศใช้ โดยมีวัฒนธรรมความปลอดภัยและวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยเป็นส่วนเสริมสำคัญที่จะช่วยให้การครอบครองหรือใช้วัสดุกัมมันตรังสีนั้น มีประสิทธิผลตามที่ผู้ครอบครองหรือใช้วัสดุกัมมันตรังสีต้องการ และเกิดความปลอดภัยและความมั่นคงปลอดภัยที่ดียิ่งขึ้น

การตรวจวัดปริมาณซีเซียม-137 (Cs-137) จากภายในร่างกาย โดยใช้เทคนิคการวัดปริมาณรังสีแกมมาในปัสสาวะ

นางสาวชติภรณ์ โตศรี
นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ปฏิบัติการ

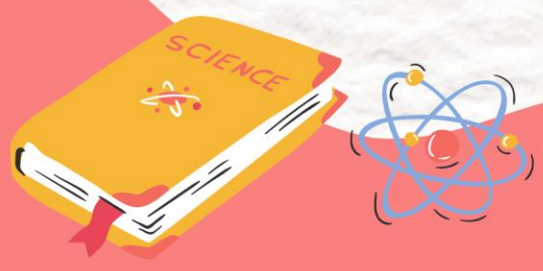
การตรวจวัดปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการตรวจวัดจากร่างกายโดยตรงด้วยเครื่องวัดรังสีทั่วร่างกาย (Whole Body Counter) การตรวจวัดจากสิ่งขับถ่าย เช่น ปัสสาวะ และ การตรวจวัดจากตัวอย่างอื่น ๆ เช่น ตัวอย่างอากาศ เป็นต้น โดยกลุ่มประเมินค่าปริมาณรังสี (กปร.) มีหน้าที่รับผิดชอบในการตรวจวัดและประเมินค่าปริมาณรังสีจากภายในร่างกาย ของผู้ปฏิบัติงานทางรังสีในสถานปฏิบัติการที่ขออนุญาตมีไว้ในครอบครองซึ่งวัสดุกัมมันตรังสี สถานปฏิบัติการทางนิวเคลียร์ และผู้เกี่ยวข้อง ตลอดจนประชาชนที่มีโอกาสได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย ทั้งจากสภาวะปกติและอุบัติเหตุฉุกเฉินทางรังสี ได้แก่ การตรวจสอบการได้รับรังสีจากภายในร่างกายผู้ปฏิบัติงานหน่วยงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ของโรงพยาบาล และ การตรวจสอบปริมาณการฟุ้งกระจายของไอโอดีน -131 ของห้องปฏิบัติการทางรังสี เป็นต้น

จากกรณีวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 สูญหายจากโรงไฟฟ้า จ.ปราจีนบุรี มีการตั้งข้อสังเกตว่าพบปริมาณ Cs-137 ในฝุ่นเหล็ก บริเวณโรงงานหลอมเหล็กแห่งหนึ่ง สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) จึงได้ทำการตรวจวัดปริมาณรังสีโดยรอบพื้นที่โรงงาน ตรวจวัดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ตรวจวัดการเปรอะเปื้อนของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานหลอมเหล็ก และเก็บตัวอย่างปัสสาวะมาตรวจวัดปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย โดย กปร. ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างปัสสาวะของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานหลอมเหล็กมาตรวจวัดปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย เพื่อตรวจสอบยืนยันให้เกิดความมั่นใจในด้านความปลอดภัย

ซีเซียม-137 (Cs-137)

Cs-137 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ใช้ในเครื่องวัดการไหลของของเหลวและเครื่องวัดความหนาของวัสดุในทางอุตสาหกรรม ตรวจหาความชื้นของดิน เป็นต้น

Cs-137 สามารถเข้าสู่ร่างกายได้จากการกินอาหารหรือดื่มน้ำที่ปนเปื้อน การซึมผ่านทางผิวหนังหรือบาดแผล และการหายใจเอาอากาศที่ปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้ว ซีเซียมซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับโปแตสเซียมจะกระจายไปทั่วร่างกาย โดยจะสะสมมากที่กล้ามเนื้อและกระดูก Cs-137 มีค่าครึ่งชีวิตทางกายภาพ (Physical half-life) 30.17 ปี และค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ (biological half-life) ประมาณ 70-100 วัน และจะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะและอุจจาระ



การตรวจวัดปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย

เก็บตัวอย่างปัสสาวะที่ขับถ่ายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง (IAEA, 2004) จากผู้ปฏิบัติงานในตำแหน่งต่าง ๆ ในโรงงานหลอมเหล็ก จำนวน 26 ตัวอย่าง นำมาตรวจวัดเป็นเวลา 3,600 วินาที ด้วยหัววัดรังสีแกมมา NaI (Tl) แบบถ้ำตะกั่ว บันทึกข้อมูลค่านับวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV เพื่อนำมาประเมินค่าปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย และวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้ (Minimum Detectable Activity; MDA)

ขั้นตอนการตรวจวัดปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย

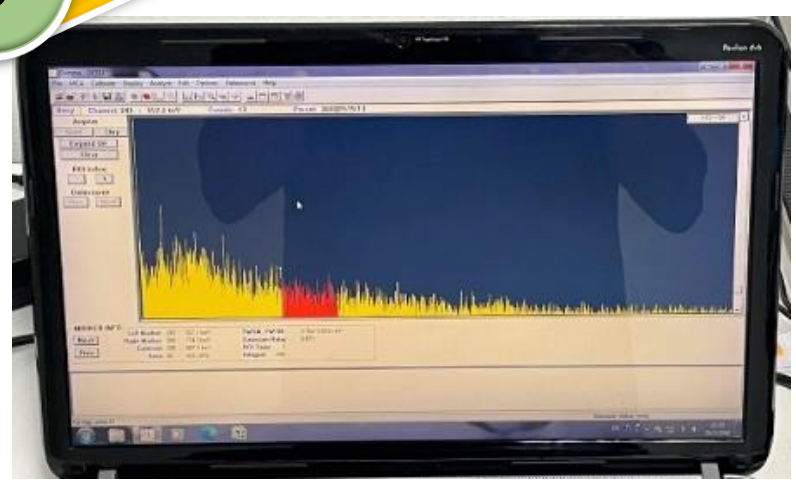
1

เก็บตัวอย่าง

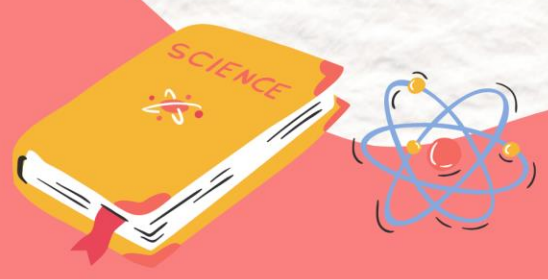
2

การตรวจวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมา
ชนิดซินทิลเลชันแบบถ้ำตะกั่ว

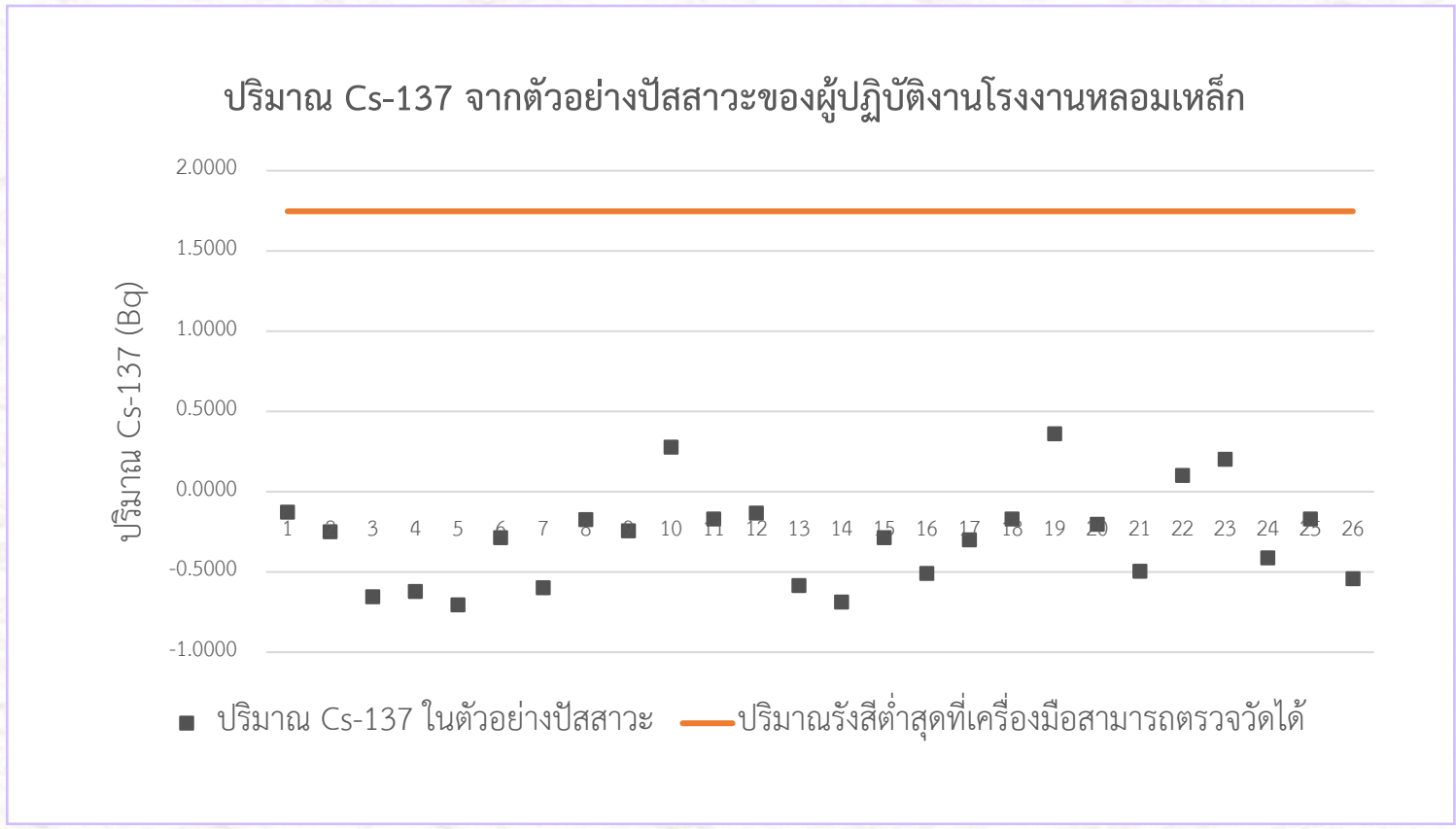
3



ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง



ผลการตรวจวัดปริมาณ Cs-137 จากภายในร่างกาย



กราฟที่ 1 แสดงปริมาณ Cs-137 จากตัวอย่างปัสสาวะของผู้ปฏิบัติงานโรงงานหลอมเหล็ก

การตรวจวัดตัวอย่างปัสสาวะจากผู้ปฏิบัติงานในตำแหน่งต่างๆ ในโรงงานหลอมเหล็ก จำนวน 26 ตัวอย่าง พบว่า ปริมาณ Cs-137 จากตัวอย่างปัสสาวะของผู้ปฏิบัติงานโรงงานหลอมเหล็กทั้ง 26 ตัวอย่าง มีค่าต่ำกว่าค่าปริมาณรังสีต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้ (Minimum Detectable Activity; MDA) คือมีค่าต่ำกว่า 0.2755 CPS หรือ 1.74 Bq หรือ 0.14 mSv

ตารางที่ 1 ขีดจำกัดของการได้รับรังสี/ปี (Dose Limit) (กฎกระทรวงความปลอดภัยทางรังสี, 2561)

	ผู้ปฏิบัติงานทางรังสี	ประชาชนทั่วไป
Dose Limit	100 mSV/5 ปี หรือเฉลี่ย 20 mSV/ปี แต่ต้องไม่เกิน 50 mSv/ปี	1 mSv/ปี

นอกจากการตรวจวัดปริมาณรังสีจากภายในร่างกายจากปัสสาวะแล้ว ในอนาคต กปร.จะสามารถตรวจวัดปริมาณรังสีจากภายในร่างกายได้โดยตรง ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีทั่วร่างกาย ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดน้อยกว่าการตรวจวัดจากสิ่งขับถ่าย เพื่อให้ผู้รับบริการได้รับความสะดวก รวดเร็วในการประเมินค่าปริมาณรังสีมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย .ม.ป.ป .**ซีเซียม-137 (Caesium-137)**) .online(. https://www.nst.or.th/article/article54/article54-004.html., 1 มิถุนายน.2566
2. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ25 .54 .**การตรวจวัดปริมาณไอโอดีน-131จากภายในร่างกาย.**
3. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ .2566 .**รายงานการปฏิบัติงานกรณีวัสดุกัมมันตรังสีซีเซียม 137-สูญหาย และการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีซีเซียม 137-ในผงโลหะ จังหวัดปราจีนบุรี พ.ศ.2566 .**
4. ราชกิจจานุเบกษา .2561 .**กฎกระทรวงความปลอดภัยทางรังสี**.ก79 ี่ทนอต135 ม่ลเ **.**
5. International Atomic Energy Agency. 1998 .**DOSIMETRIC AND MEDICAL ASPECTS OF THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN Goiânia.** SSN 1011-4289.
6. International Atomic Energy Agency. 2004. **METHODS FOR ASSESSING OCCUPATIONAL RADIATION DOSES DUE TO INTAKES OF RADIONUCLIDES.** SAFETY REPORTS SERIES No. 37. ISSN 1020–6450.
7. International Commission on Radiological Protection. 2017. **Occupational intakes of radionuclides: Part 3**. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

วัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

ดร. หฤทัย กสิวัฒนาวุฒิ
นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการ

เทคโนโลยีนิวเคลียร์ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การแพทย์ การศึกษาวิจัย และเกษตรกรรม ซึ่งตามมาตรฐานสากลการใช้งานวัสดุนิวเคลียร์หรือวัสดุกัมมันตรังสี ในสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ หรือสถานที่ที่กำหนด ต้องคำนึงถึงมาตรการด้านความปลอดภัย ความมั่นคงปลอดภัย และการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างกลุ่มหรือระหว่างประเทศในหลาย ๆ ด้าน ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้หลายประเทศต้องให้ความสำคัญกับการรักษาความมั่นคงปลอดภัย ทั้งนี้ในบริบทของความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุนิวเคลียร์หรือวัสดุกัมมันตรังสีถูกนำไปใช้ในการกระทำมุ่งร้าย ก่อให้เกิดอันตรายทางรังสี และส่งผลกระทบต่อประชาชน สังคม และสิ่งแวดล้อม และทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) ในฐานะองค์กรระหว่างประเทศที่ส่งเสริมการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในทางสันติ ได้ให้นิยามของการรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ หมายความว่า การป้องกัน การตรวจจับ และการตอบสนองต่อการโจรกรรม การก่อวินาศกรรม การเข้าถึงโดยมิชอบ การเคลื่อนย้ายโดยมิชอบ หรือ การกระทำอื่นใดอันมีเจตนากระทำผิดกฎหมายต่อวัสดุนิวเคลียร์ วัสดุกัมมันตรังสี รวมถึงสถานประกอบการทางนิวเคลียร์

เมื่อมองย้อนกลับไปที่เหตุการณ์ด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์หรือวัสดุกัมมันตรังสีที่ผ่านมาในหลายประเทศ อาทิ การสูญหาย การถูกโจรกรรม ความพยายามในการก่อวินาศกรรม ทั้งที่รู้เท่าไม่ถึงการณ์ หรือด้วยความตั้งใจเพื่อหวังก่อการร้าย และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ตั้งแต่เหตุการณ์อุบัติเหตุทางรังสีโคบอลต์-60 จังหวัดสมุทรปราการ ในปี พ.ศ. 2543 เหตุการณ์ประชาชนพบเครื่องถ่ายภาพด้วยรังสี ที่ใช้วัสดุกัมมันตรังสีอิริเดียม-192 ในอาคารร้าง กรุงเทพฯ ในปี พ.ศ. 2559 และล่าสุดเหตุการณ์กรณีวัสดุกัมมันตรังสีซีเซียม-137 สูญหาย จังหวัดปราจีนบุรี ในปี พ.ศ. 2566 เหตุการณ์เหล่านี้ล้วนเป็นบทเรียนที่ช่วยให้เราอนุมานได้ว่า ปัจจัยหลักส่วนหนึ่งที่นำไปสู่เหตุการณ์ดังกล่าว อาจเกิดจากการละเลย หรือไม่ให้ความสำคัญกับการรักษาความมั่นคงปลอดภัย

ปัจจุบันหลายประเทศพยายามออกมาตรการต่าง ๆ เพื่อยับยั้ง และรับมือกับภัยคุกคามด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ทั้งในระดับประเทศ และระหว่างประเทศ โดยมุ่งเน้นเพื่อป้องกันการเคลื่อนย้ายโดยมิชอบหรือการก่อวินาศกรรม ในสถานประกอบการ หรือในระหว่างการขนส่ง ซึ่งมาตรการต่าง ๆ สะท้อนออกมาในรูปแบบของสนธิสัญญา อนุสัญญา หรือความตกลงระหว่างประเทศ ตลอดจนแนวทางกำกับดูแลภายในประเทศ มาตรการหลัก ๆ ได้แก่ การจัดเก็บวัสดุนิวเคลียร์หรือวัสดุกัมมันตรังสีในสถานที่ที่กำหนด การควบคุมการเข้าออก การจดบันทึกการใช้งาน การจัดทำบัญชีวัสดุ การตรวจตรา การเตรียมการรองรับเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน การฝึกอบรมให้ความรู้แก่บุคลากรที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เพิ่มเติมจากมาตรการที่กล่าวมา IAEA แนะนำให้ประเทศสมาชิกตระหนักถึงความสำคัญของวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear Security Culture) ซึ่งเป็นมาตรการในเชิงป้องกัน และช่วยเสริมสร้างความยั่งยืนของระบอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์อีกด้วย

เมื่อกล่าวถึงคำว่า “วัฒนธรรม”

สามารถนิยามความหมายอย่างสั้นได้ว่า หมายถึง สิ่งที่ทำความเจริญงอกงามให้แก่หมู่คณะ เช่น วิถีชีวิต สิ่งที่แสดงออก ความคิด ความเชื่อ ค่านิยม เป็นต้น วัฒนธรรมสามารถส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่และความเจริญก้าวหน้าของสังคมในส่วนที่กว้างขึ้น สำหรับมุมมองทางด้านนิวเคลียร์ วัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ หมายถึง ลักษณะของทัศนคติและพฤติกรรมของบุคคล องค์กร และสถาบันที่ทำหน้าที่สนับสนุน ส่งเสริม และรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ให้ยั่งยืน โดยกลุ่มคนที่เกี่ยวข้องกับวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์นั้นครอบคลุมตั้งแต่ระดับประเทศ หน่วยงานกำกับดูแล และผู้รับใบอนุญาต เช่น ผู้ใช้งาน ผู้นำเข้าส่งออก หรือเกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์หรือวัสดุกัมมันตรังสี และลงไปถึงระดับบุคลากร ประชาชนทั่วไป และชุมชนระหว่างประเทศด้วย

ถ้าเราพิจารณาลักษณะการทำงานโดยทั่วไปแล้ว คงหลีกเลี่ยงไม่ได้ว่า ปัจจัยด้านบุคคล ส่งผลกระทบหลักต่อการดำเนินงานค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับการดำเนินการด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ซึ่งปัจจัยด้านบุคคลนั้น หมายรวมถึง การตัดสินใจ การออกนโยบาย พฤติกรรม การเฝ้าระวัง การออกแบบหรือสร้างระบบต่าง ๆ ซึ่งทางด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ สามารถสะท้อนออกมาในรูปแบบการออกกฎหมาย ระเบียบ มาตรการ แนวทางกำกับดูแล ตลอดจนการพัฒนาศักยภาพในด้านต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ พฤติกรรมของบุคคล เช่น ความไม่คุ้นเคย ขาดความเข้าใจ สิ่งกระตุ้นทั้งจากภายนอกหรือภายในจิตใจ เทคโนโลยีสมัยใหม่ สิ่งเหล่านี้เป็นความเสี่ยงจากบุคคล ดังนั้น เพื่อลดความเสี่ยงและปัจจัยของบุคคลดังกล่าว การส่งเสริมด้านวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยมุ่งเน้นสร้างความเข้าใจและสร้างความตระหนักถึงความสำคัญในการปกป้องวัสดุนิวเคลียร์และวัสดุกัมมันตรังสี เป็นมาตรการหลักเพื่อให้เกิดความยั่งยืนต่อไป

IAEA ได้จัดทำเอกสาร แนวทางการดำเนินงานด้านวัฒนธรรมความมั่งคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยสาระสำคัญของเอกสารฉบับนี้ กล่าวถึงคุณลักษณะสากลของวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ซึ่งระบุถึงบทบาทของผู้ที่เกี่ยวข้องที่ใช้วัสดุนิวเคลียร์ วัสดุกัมมันตรังสี หรือปฏิบัติงานในสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ทางรังสี และแนวทางต้นแบบคุณลักษณะเฉพาะด้านวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่า บทบาทของการดำเนินงานด้านวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์เกี่ยวข้องตั้งแต่ระดับนโยบายของประเทศ นโยบายและการบริหารจัดการของหน่วยงาน การควบคุมดูแลของผู้จัดการหรือหัวหน้างาน ตลอดจนระดับผู้ปฏิบัติงาน

รูปที่ 1 คุณลักษณะสากลของวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

เป้าหมาย: การรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์อย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาระบบการจัดการและจัดลำดับความสำคัญ

(1) นโยบายความมั่นคงปลอดภัยที่มองเห็นได้
(2) บทบาทและความรับผิดชอบที่ชัดเจน
(3) การวัดผลประสิทธิภาพการทำงาน
(4) สภาพแวดล้อมในการทำงาน
(5) การฝึกอบรมและคุณสมบัติ
(6) การบริหารงาน
(7) ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล
(8) การดำเนินงานและการบำรุงรักษา
(9) การกำหนดความน่าเชื่อถือของบุคลากร
(10) การประกันคุณภาพ
(11) การจัดการการเปลี่ยนแปลง
(12) กระบวนการเกี่ยวกับข้อเสนอแนะ
(13) แผนเผชิญเหตุและการฝึกซ้อม
(14) การประเมินตนเอง
(15) การประสานกับหน่วยงานกำกับดูแล
(16) การประสานงานกับหน่วยงานนอกสถานที่
(17) การเก็บบันทึก

พฤติกรรมส่งเสริมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ที่มีประสิทธิภาพ

พฤติกรรมความเป็นผู้นำ

(1) ความคาดหวัง
(2) การใช้อำนาจหน้าที่
(3) การตัดสินใจ
(4) การกำกับดูแลการจัดการ
(5) การมีส่วนร่วมของบุคลากร
(6) การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ
(7) การปรับปรุงผลการปฏิบัติงาน
(8) แรงจูงใจ

พฤติกรรมบุคลากร

(1) แนวทางปฏิบัติในวิชาชีพ
(2) ความรับผิดชอบส่วนบุคคล
(3) การปฏิบัติตามขั้นตอน
(4) การทำงานเป็นทีมและความร่วมมือ
(5) การเฝ้าระวัง

หลักคำแนะนำในการตัดสินใจและพฤติกรรม

(๑) แรงจูงใจ
(๒) ความเป็นผู้นำ
(๓) ความมุ่งมั่นและความรับผิดชอบ
(๔) ความเป็นมืออาชีพและความสามารถ
(๕) การเรียนรู้และการปรับปรุง

รูปที่ 2 แนวทางต้นแบบคุณลักษณะเฉพาะด้านวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์

เมื่อพิจารณาแนวทางต้นแบบคุณลักษณะเฉพาะของวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ตามแนวทฤษฎีฐานสู่ยอด ตามรูปที่ 2 เป้าหมายเพื่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยอย่างมีประสิทธิภาพ พบว่า รากฐานของการส่งเสริมวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ เริ่มต้นมาจาก ความเชื่อและทัศนคติ โดยทุกคนที่เกี่ยวข้องต้องเชื่อว่าภัยคุกคามทางนิวเคลียร์มีอยู่จริง สามารถเกิดขึ้นได้จริง และทุกคนจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ ลำดับถัดไปคือ หลักคำแนะนำในการตัดสินใจและพฤติกรรมของทุกคนที่เกี่ยวข้อง และเมื่อพิจารณาบทบาทของหน่วยงาน ในการพัฒนาระบบการจัดการและจัดลำดับความสำคัญ โดยเฉพาะนโยบายที่ชัดเจนด้านวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ในหน่วยงานและองค์กร ตลอดจนพฤติกรรมความเป็นผู้นำของผู้บังคับบัญชา ผู้จัดการ หัวหน้างาน และพฤติกรรมบุคลากรทุกคน สิ่งเหล่านี้ที่ส่งเสริมมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์อย่างมีประสิทธิภาพได้

แนวทางการดำเนินการเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ สามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ โดยหน่วยงานควรประเมินประสิทธิภาพด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของหน่วยงาน และบุคลากรอย่างเป็นระบบ โดยได้รับการส่งเสริมจากผู้จัดทำนโยบาย เพื่อให้ทุกคนตระหนักถึงความสำคัญของมาตรการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ โดยจัดทำกิจกรรมที่ส่งเสริมการมีส่วนร่วมของทุกคนในหน่วยงานหรือองค์กร เช่น การจัดแผนการให้ความรู้ สร้างความตระหนักให้ผู้บริหารและบุคลากร การเตรียมการจัดทำแผนการประเมินตนเอง การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การจัดลำดับความสำคัญ และนำไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างกิจกรรมดังกล่าว ได้แก่ การรณรงค์ การจัดกิจกรรมสันทนาการที่สอดแทรกความรู้ด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ การสำรวจข้อมูล การสัมภาษณ์ การสังเกต การพิจารณาเอกสาร หรือแนวปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างความยั่งยืนของมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

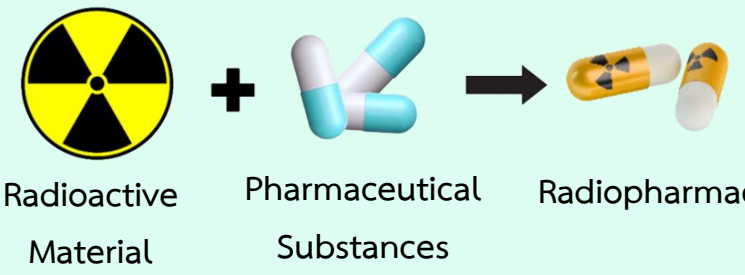
1. IAEA Nuclear Security Series (NSS) Nuclear Security Fundamentals “Objective and Essential Elements of a State’s Nuclear Security Regime” (IAEA Nuclear Security Series No. 20)
2. IAEA Nuclear Security Series (NSS) Nuclear Security Recommendations “Nuclear Security Recommendations on Radioactive Material and Associated Facilities” (IAEA Nuclear Security Series No. 14)
3. IAEA Nuclear Security Series (NSS) Implementing Guide “Nuclear Security Culture” (IAEA Nuclear Security Series No. 07)
4. วารสารปรมาณูเพื่อสันติ ปีที่ 33 ฉบับที่ 1 ประจำ ปี 2563
5. แผนแม่บทในการเฝ้าระวัง เตรียมความพร้อม ระงับ และฟื้นฟูเหตุฉุกเฉินทางนิวเคลียร์และรังสี พ.ศ. 2561 - 2565

สารเภสัชรังสีลูทีเชียม-177 (Lutetium, Lu-177)

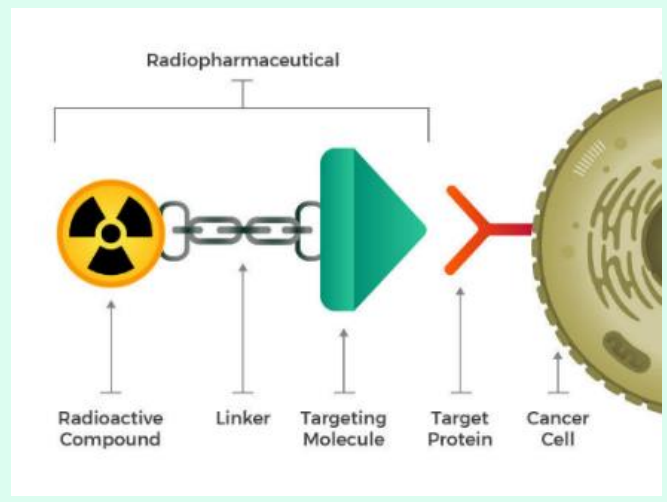
นายภรินท์ ไชยวงศ์
นักฟิสิกส์รังสีปฏิบัติการ
นางสาววาสนา ไม้มะตาม
นักฟิสิกส์รังสีปฏิบัติการ

สารเภสัชรังสี (Radiopharmaceutical)

คือ วัสดุกัมมันตรังสี (Radioactive Material) ที่นำมาติดฉลากกับสารเภสัชภัณฑ์ (Pharmaceutical Substances) โดยวัสดุกัมมันตรังสีจะทำหน้าที่รักษาโรคหรือติดตามสภาวะของโรค และสารเภสัชภัณฑ์ทำหน้าที่นำวัสดุกัมมันตรังสีไปยังเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเป้าหมายที่ต้องการวินิจฉัยหรือรักษาโรค ปัจจุบันสารเภสัชรังสีถูกนำมาใช้ในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์อย่างแพร่หลาย เช่น การฉีดเทคนีเชียม-99เอ็ม (Tc-99m) เข้าสู่ร่างกายเพื่อไปสะสมตามอวัยวะเป้าหมาย เช่น กระดูก สมอง ปอด ตับ ม้าม ไต และหัวใจ และใช้เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา (SPECT Gamma Camera) ถ่ายภาพอวัยวะดังกล่าวเพื่อวินิจฉัยโรค เป็นต้น



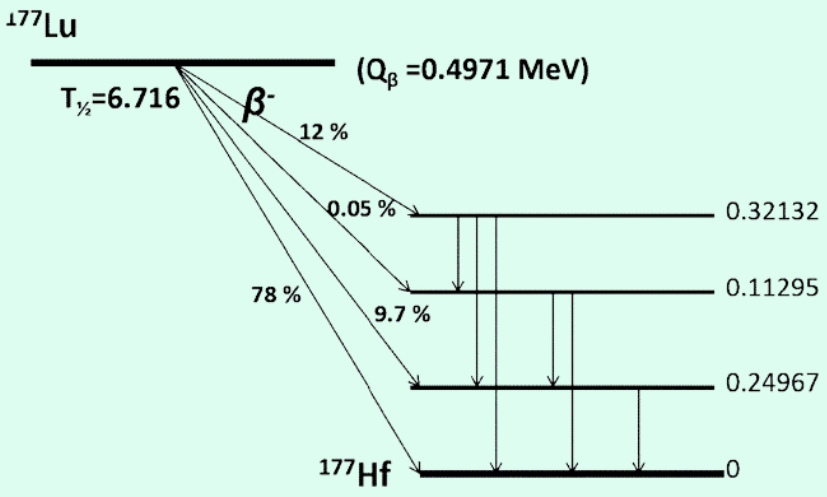
รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของสารเภสัชรังสี



รูปที่ 2 แสดงการทำงานของสารเภสัชรังสี

ที่มา : https://www.cancer.gov/news-events/cancer-currents-blog/2020/radiopharmaceuticals-cancer-radiation-therapy

ลูทีเชียม-177 (Lu-177) เป็นไอโซโทปรังสีที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีค่าครึ่งชีวิตทางกายภาพประมาณ 6.7 วัน สลายตัวให้แฮฟเนียม-177 (Hf-177) ปลดปล่อยอนุภาคบีตาพลังงานเฉลี่ย 490 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) มีอำนาจทะลุทะลวงในเนื้อเยื่อน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 208 keV (ร้อยละ 10) และ 113 keV (ร้อยละ 6) ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการสลายตัวของ Lu-177

ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/Simplified-decay-scheme-of-177-Lu_fig1_303910508

รูปที่ 4 แสดงภาชนะบรรจุสารเภสัชรังสี Lu-177

ที่มา : https://www.carcinoid.org/2016/05/03/one-step-closer-us-peptide-receptor-radionuclide-therapy-prrt-neuroendocrine-cancers/

Lu-177 ถูกนำมาใช้ในการรักษาแบบพุ่งเป้า (targeted therapy) และการวินิจฉัยในคราวเดียวกัน เรียกว่า Theragnostic โดยนำ Lu-177 มาติดฉลากกับสารเภสัชภัณฑ์ ที่ชื่อว่า PSMA-617 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Lu-177 PSMA-617 ซึ่งจะนำมาใช้รักษาผู้ป่วยมะเร็งต่อมลูกหมากระยะแพร่กระจาย และสารเภสัชภัณฑ์ DOTATATE ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Lu-177 DOTATATE นำมาใช้รักษาผู้ป่วยกลุ่มโรคมะเร็ง Neuroendocrine Tumor (NETs) สารเภสัชรังสีลูทีเชียม-177 เหมาะสำหรับการนำมารักษาร่วมกับการถ่ายภาพรังสีโดยใช้เครื่อง SPECT/CT เรียกว่า การรักษาด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Image-guided radionuclide therapy) และปัจจุบัน Lu-177 และนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่น ๆ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการรักษาแบบพุ่งเป้า (ตามตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการรักษาแบบพุ่งเป้า

ไอโซโทปรังสี	ค่าครึ่งชีวิตทางกายภาพ (วัน)	การปลดปล่อยรังสีและพลังงานโฟตอนเฉลี่ย (MeV)	ระยะการทะลุทะลวงในเนื้อเยื่อ (mm) สำหรับรังสีบีตา
I-131	8	β (0.6 MeV) และ γ (0.364 MeV)	2
Y-90	2.67	β (2.28 MeV)	12
Cu-67	2.58	β (0.54 MeV) และ γ (0.185 MeV)	1.8
Re-186	3.77	β (1.08 MeV) และ γ (0.131 MeV)	5
Lu-177	6.7	β (0.497 MeV) และ γ (0.208 MeV)	1.5

** **หมายเหตุ :** β = รังสีบีต้า , γ = รังสีแกมมา

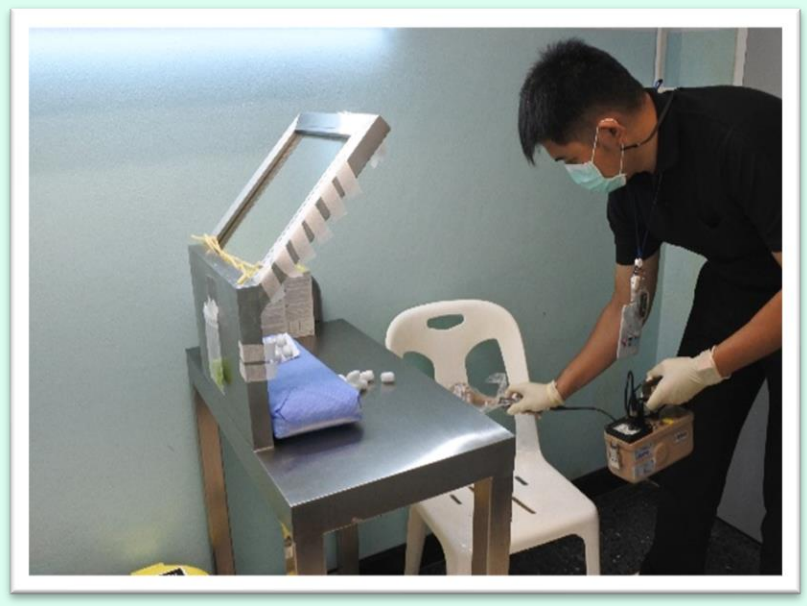
รูปที่ 5 แสดงการถ่ายภาพรังสีด้วยเครื่อง SPECT/CT

ที่มา : https://www.cognitivefxusa.com/blog/fmri-vs-spect-scan-for-brain

การบริหารสารเภสัชรังสีที่มีองค์ประกอบของ Lu-177 จะดำเนินการโดยการฉีดให้ผู้ป่วยทางหลอดเลือดดำ (Intravenous injection) ซึ่งปริมาณกัมมันตภาพที่บริหารให้ผู้ป่วยโดยเฉลี่ยประมาณ 200 มิลลิคูรี หรือ 7.4 จิกะเบ็กเคอเรล ต่อครั้งต่อราย เพื่อรักษามะเร็งต่อมลูกหมาก และผู้ป่วยต้องพักรักษาตัวภายในโรงพยาบาลเป็นเวลา 3 วัน โดย Lu-177 จะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ ประมาณร้อยละ 70 ภายใน 12 ชั่วโมง ดังนั้น หากมีการรักษาด้วยสารเภสัชรังสีลูทีเชียม-177 ปริมาณมากกว่า 30 มิลลิคูรี หรือ 1.11 จิกะเบ็กเคอเรล โรงพยาบาลต้องจัดให้มีห้องพักสำหรับผู้ป่วยเช่นเดียวกับการรักษามะเร็งต่อมไทรอยด์ด้วยไอโอดีน-131 และก่อนอนุญาตให้ผู้ป่วยกลับบ้านต้องตรวจวัดระดับรังสีที่ระยะ 1 เมตร จากตัวผู้ป่วยเพื่อประเมินความปลอดภัยทางรังสี ทั้งนี้ ระดับรังสีจากผู้ป่วยที่ระยะ 1 เมตร ต้องมีค่าไม่เกิน 50 ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง

การนำวัสดุกัมมันตรังสี Lu-177 มาใช้ จะต้องคำนึงถึงการปนเปื้อนทางรังสีเป็นหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุกัมมันตรังสีชนิดไม่ปิดผนึก (Unsealed Sources) มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลว จะต้องบรรจุอยู่ในภาชนะที่เหมาะสม ต้องจัดให้มีมาตรการด้านความปลอดภัยทางรังสีสำหรับสถานประกอบการที่ใช้สารเภสัชรังสี การบริหารสารเภสัชรังสี การป้องกันการปนเปื้อนที่จะเกิดขึ้นจากการฉีดสารเภสัชรังสี การจัดการกากกัมมันตรังสี ปริมาณกัมมันตภาพรวมก่อนปล่อยทิ้งเป็นกากกัมมันตรังสี กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาโดยใช้สารเภสัชรังสีลูทีเชียม-177 นี้ จัดเป็นกากกัมมันตรังสีที่ต้องมีการควบคุมก่อนปล่อยสู่สาธารณะ จะต้องมีบ่อพักน้ำเสียหรือมาตรการอื่นใดที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีที่ปนเปื้อนจากห้องพักผู้ป่วยลดระดับรังสีให้อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยทางรังสีและลดปริมาณกัมมันตภาพให้ไม่เกินเกณฑ์ปริมาณกัมมันตภาพรวมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมตามที่กฎหมายกำหนด สำหรับ Lu-177 จะต้องมีปริมาณกัมมันตภาพรวมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต้องไม่เกิน $1x10^{11}$ เบ็กเคอเรลต่อปี ตามกฎกระทรวงการปล่อยทิ้งกากกัมมันตรังสี พ.ศ. 2561 การป้องกันการได้รับอันตรายจากรังสีสำหรับเจ้าหน้าที่โรงพยาบาลและญาติผู้ดูแล ตามกฎกระทรวงความปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561 มีมาตรการที่เกี่ยวข้อง เช่น การจัดเก็บสารเภสัชรังสี การเข้าถึงสารเภสัชรังสี การรับ-ส่งสารเภสัชรังสี การบริหารสารเภสัชรังสีแก่ผู้ป่วย การวัดระดับรังสีจากตัวผู้ป่วยก่อนกลับบ้าน และการได้รับรังสีสำหรับญาติผู้ดูแล

รูปที่ 6 แสดงเครื่องสำรวจการปนเปื้อนทางรังสี



รูปที่ 7 แสดงการวัดการปนเปื้อนทางรังสี

เอกสารอ้างอิง

1. กฎกระทรวงความปลอดภัยทางรังสี พ.ศ.2561. (2561, 5 ตุลาคม). **ราชกิจจานุเบกษา.** เล่มที่ 135 ตอนที่ 79 ก.
2. กฎกระทรวงความมั่นคงปลอดภัยทางรังสี พ.ศ.2561. (2561, 5 ตุลาคม). **ราชกิจจานุเบกษา.** เล่มที่ 135 ตอนที่ 79 ก.
3. กฎกระทรวงการปล่อยทิ้งกากกัมมันตรังสี พ.ศ.2561. (2561, 5 พฤศจิกายน). **ราชกิจจานุเบกษา.** เล่มที่ 135 ตอนที่ 89 ก.
4. สมาคมเวชศาสตร์นิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, สมาคมนักฟิสิกส์การแพทย์ไทย, สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2549). **Radiation Safety Management in Nuclear Medicine**. ในเอกสารการสัมมนาเชิงปฏิบัติการ ณ สำนักงานปรมาณูเพื่อวันติม, กรุงเพทพมหานคร.
5. อาจารย์ ดร. ผกาทิพย์ รื่นระเริงศักดิ์. (2561). **มะเร็ง...นวัตกรรมใหม่ในการรักษาและวินิจฉัยที่ได้ผลเฉียบกว่าเดิม**. สืบค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2565, จาก https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge /article/423/รักษามะเร็งแนวใหม่.
6. Emmett L, Willowson K, Violet J, Shin J, Blanksby A, Lee J. **Lutetium 177 PSMA radionuclide therapy for men with prostate cancer: a review of the current literature and discussion of practical aspects of therapy**. J Med Radiat Sci. 2017 Mar;64(1):52-60. doi: 10.1002/jmrs.227. PMID: 28303694; PMCID: PMC5355374.
7. Chatachot, K., Shiratori, S., Chaiwatanarat, T. et al. **Patient dosimetry of 177Lu-PSMA I&T in metastatic prostate cancer treatment: the experience in Thailand**. Ann Nucl Med 35, 1193–1202 (2021). https://doi.org/10.1007/s12149-021-01659-8.
8. Dash A, Pillai MR, Knapp FF Jr. **Production of (177)Lu for Targeted Radionuclide Therapy: Available Options**. Nucl Med Mol Imaging. 2015 Jun;49(2): 85-107. doi: 10.1007/s131 39-014-0315-z. Epub 2015 Feb 17. PMID: 26085854; PMCID: PMC4463871.

การวัดปริมาณรังสี ด้วยวัสดุประเภทแก้ว

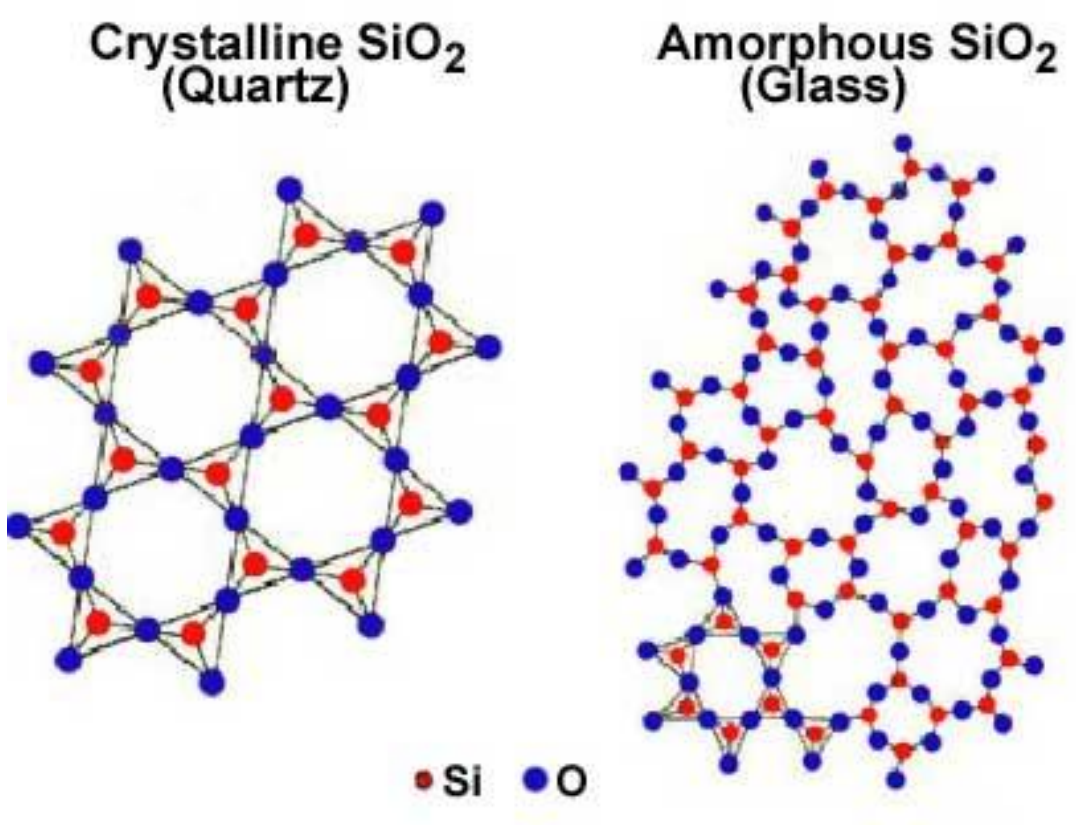
ดร.ชุติมา เติมสุข
นักฟิสิกส์รังสีปฏิบัติการ

แก้ว เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ยาวนานกว่า 5,000 ปี สามารถพบเห็นทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น บรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม อาหาร ยา สิ่งก่อสร้าง ประตู หน้าต่าง ผนัง เฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากกระจก เป็นต้น แก้วสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามองค์ประกอบทางเคมี แต่จะมีส่วนประกอบหลักเหมือนกันคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) [1]

นอกจากการใช้ประโยชน์จากแก้วในเชิงอุปโภคแล้ว ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาวัสดุที่ผลิตจากแก้วได้รับความสนใจจากนักวิจัยในการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการวัดปริมาณรังสีด้วยเทคนิคการแปลงค่าสัญญาณที่เรืองแสงจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermoluminescence) และการถูกกระตุ้นด้วยแสง (Optical Stimulated Luminescence)

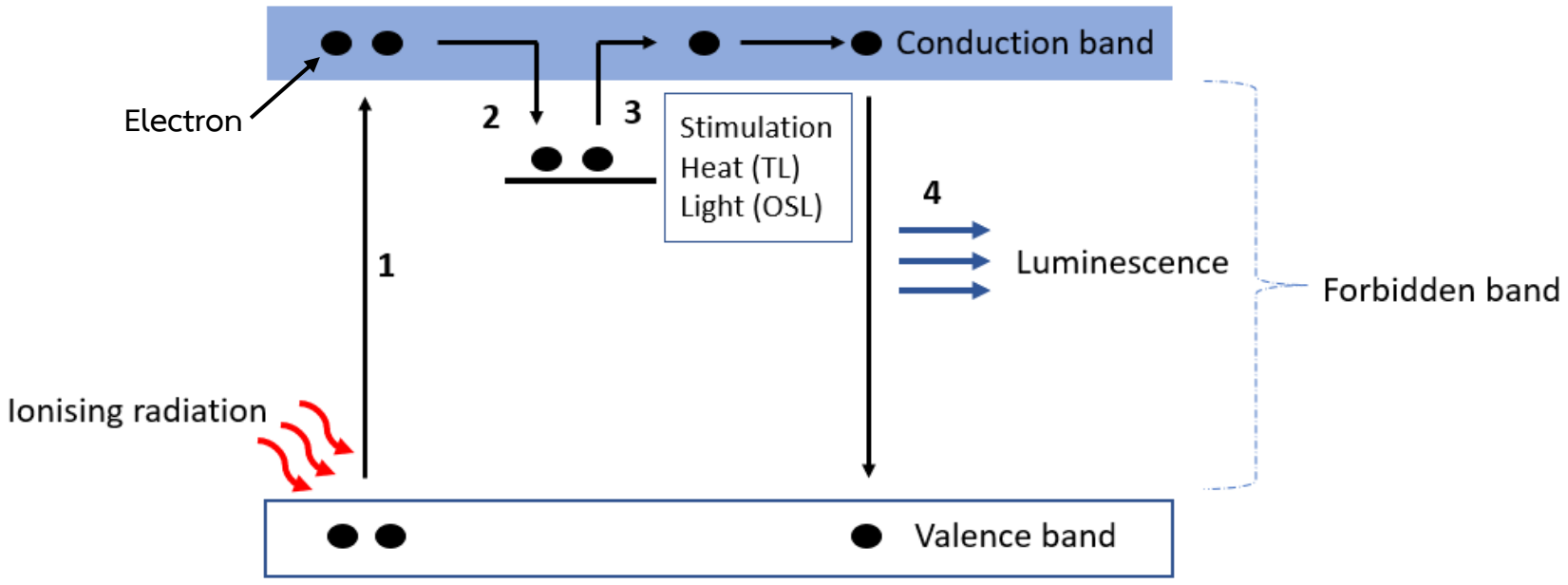
แก้วสามารถวัดปริมาณรังสีได้อย่างไร

แก้วมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่รวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบกับคริสตัล ซึ่งแม้จะประกอบด้วย SiO_2 เช่นกัน แต่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ ตามรูปที่ 1



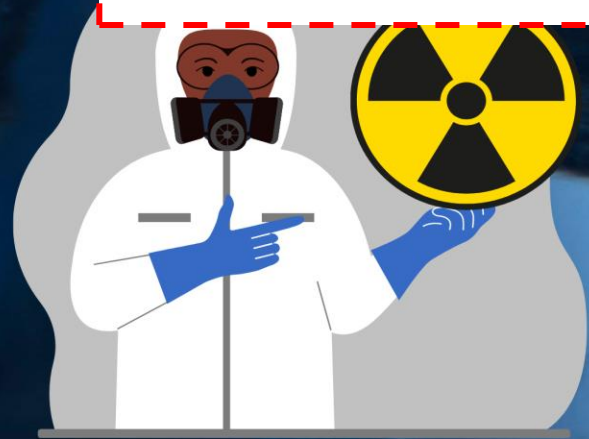
รูปที่ 1 แสดงการจัดเรียงตัวของ SiO_2 ในคริสตัล (ซ้าย) และแก้ว(ขวา) [2]

ชั้นพลังงานของผลึกอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย Valence Band ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของคู่ไอออน (คู่อิเล็กตรอน (-) และโฮล (+)) และชั้นบนสุดคือ Conduction Band ทั้งสองแถบพลังงานถูกคั้นด้วย Band Gap หรือ Forbidden Band ซึ่งประกอบไปด้วยกับดัก (Traps) ขั้นตอนของ Thermoluminescence และ Optically Stimulated Luminescence อธิบายอย่างง่ายตามรูปที่ 2 โดยในสภาวะปกติคู่อิเล็กตรอนและโฮลจะอยู่ในชั้น Valence Band เมื่อได้รับการฉายรังสี พลังงานจากรังสีถ่ายเทให้คู่อิเล็กตรอนและโฮลเกิดการแตกตัว (Ionizing) อิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ขึ้นไปยังชั้น Conduction Band (ขั้นที่ 1) และถูกกักไว้ใน Traps (ขั้นที่ 2) โดยระยะเวลาที่ถูกกักขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของ Traps อาจในระดับวินาทีจนถึงหลักร้อยปี โดยจำนวนอิเล็กตรอนที่ติดอยู่ในกับดักจะแปรผันตามปริมาณรังสีที่ได้รับ หลังจากนั้นเมื่อให้ความร้อนหรือแสงแก่ผลึกเพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนในหลุมกับดักให้ได้รับพลังงานจากความร้อนหรือแสงจนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกจากกับดัก (ขั้นที่ 3) กลับไปสู่ชั้น Valence Band (ขั้นที่ 4) และปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงในช่วงที่ตามองเห็น สัญญาณแสงที่ปลดปล่อยจากการตกลงสู่ชั้น Valence Band ของอิเล็กตรอนถูกนำไปแปลงค่าเป็นปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับ โดยปริมาณรังสีแปรผันตามปริมาณแสงที่นับวัดได้ ปัจจุบันผลึกสังเคราะห์ที่ใช้ทั่วไปสำหรับงานวัดปริมาณรังสี เช่น LiF, CaS ใช้ร่วมกับเทคนิคกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermoluminescence) และ Al_2O_3 ใช้ร่วมกับเทคนิคการถูกกระตุ้นด้วยแสง (Optically Stimulated Luminescence)



รูปที่ 2 แสดงชั้นพลังงานของวัสดุและลำดับการเกิด Thermoluminescence และ Optically stimulated luminescence

สำหรับแก้วซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของ SiO_2 แบบอสัณฐาน การเติมสารเจือปน (Doping) เพื่อให้แก้วมีคุณสมบัติทางกายภาพตามต้องการ รวมถึงกระบวนการในการผลิตแก้ว (อุณหภูมิ เทคนิคการขึ้นรูป ฯลฯ) สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดความไม่สมบูรณ์ (Defect) ในเนื้อแก้วเพิ่มขึ้น ซึ่ง Defect เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นกับดักอิเล็กตรอน (Traps) อยู่ในชั้น Forbidden Band ช่วยให้แก้วสามารถเก็บข้อมูลปริมาณรังสีที่ได้รับในรูปแบบของจำนวนอิเล็กตรอนในกับดัก สิ่งนี้จึงทำให้แก้วมีคุณสมบัติที่สามารถถูกวิเคราะห์ปริมาณแสงจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermoluminescence) และการถูกกระตุ้นด้วยแสง (Optically Stimulated Luminescence) [3]



จุดเด่นของแก้วในการวัดปริมาณรังสี

วัสดุประเภทแก้วที่พบในชีวิตประจำวันถูกนำมาวิจัยหาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุวัดปริมาณรังสี ได้แก่ เส้นใยแก้วนำแสง (Glass optical fibres) ลูกปัดแก้ว (Glass beads) และกระจกเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์ (Microscope glass slides) ข้อดีของวัสดุประเภทแก้ว ได้แก่

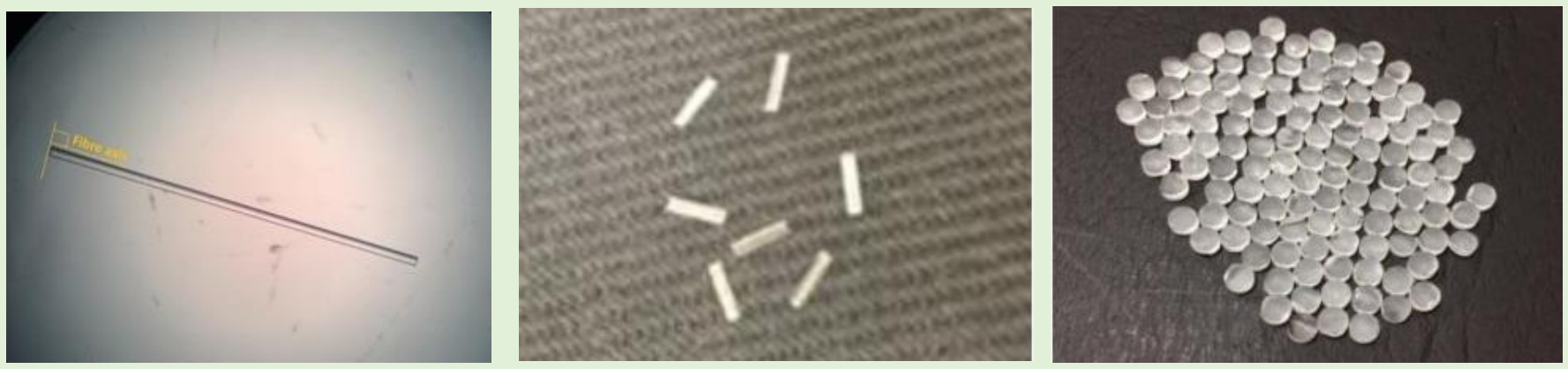
1. เป็นของแข็ง สามารถใช้งานกับของเหลวได้ ซึ่งเป็นจุดเด่นในการพัฒนาเพื่อวัดรังสีในงานวิจัยประเภท in viva และในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง โดยไม่ต้องมีวัสดุกันน้ำห่อหุ้มอีกชั้นเหมือนในกรณีของผลึกสังเคราะห์
2. จุดหลอมเหลวสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้วัดปริมาณรังสีในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
3. มีขนาดเล็ก กล่าวคือ เส้นใยแก้วนำแสง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร และความยาวสามารถตัดได้ตามต้องการ ลูกปัดแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 2 มิลลิเมตร ความสูง 1-2 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดที่เลือกใช้ ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวัดปริมาณรังสี small field หรือการวัดปริมาณรังสีในงานถ่ายภาพรังสีซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กไม่บดบัง ผลกระทบต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้
4. มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า จึงมีผลกระทบน้อยเมื่อต้องทำงานร่วมกับเครื่องมือที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น Magnetic Resonance Imaging Guided Linear Accelerator (MRI-LINAC)

อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทแก้วที่นำมาวิจัยมีข้อเสียที่สำคัญต่อการวัดปริมาณรังสี คือ เลขอะตอมรวม (Effective Atomic Number, Z_{eff}) ของแก้วแต่ละชนิด อยู่ระหว่าง 10-18 ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเลขอะตอมของกระดูกมนุษย์ (11.6 - 13.8) ซึ่งยังไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุวัดปริมาณรังสีคือควรมีค่า Z_{eff} ใกล้เคียงกับเลขอะตอมของเนื้อเยื่อมนุษย์ (7.14) โดยปัจจุบันสารประกอบที่ใช้งานสำหรับการวัดปริมาณรังสีด้วยเทคนิค TL และ OSL เช่น BeO, LiF:Mg,Ti, Al_2O_3:C, M และ CaF_2:Mn มีค่า Z_{eff} อยู่ที่ 7.2, 8.3, 11.3 และ 16.9 ตามลำดับ เนื่องจากเลขอะตอมที่แตกต่างกันของวัตถุส่งผลต่ออัตราการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีและวัตถุ โดยเฉพาะรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ที่อัตราการเกิดอันตรกิริยาแปรผันกับเลขอะตอมของวัตถุ ดังนั้นการใช้แก้วเพื่อวัดปริมาณรังสีจึงต้องมีค่าแก้เพื่อคำนวณค่าวัดปริมาณรังสีให้ใกล้เคียงมากที่สุด

ชนิดของแก้วที่ถูกวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุวัดปริมาณรังสี

Silica doped optical fibres, glass fibres

เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้สำหรับงานโทรคมนาคมหลากหลายชนิดถูกนำมาศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้สำหรับการวัดปริมาณรังสี เช่น SiO_2, SiO_2:Al SiO_2:GeB, SiO_2:Er เป็นต้น แต่เส้นใยแก้วนำแสงที่ตอบสนองต่อรังสีมากที่สุดและถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง คือ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดเจือด้วยสารเจอร์มาเนียม (SiO_2:Ge) โดยถูกทดสอบกับรังสีเอกซ์ ซินโครตรอน โฟตอนและอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ (Linac) โปรตอน นิวตรอน และแอลฟา ซึ่งครอบคลุมย่านพลังงานในช่วง eV – MeV โดยมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นต่อรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอนในช่วง 1Gy – 2kGy เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จึงถูกนำไปศึกษาเพื่อวัดปริมาณรังสีในงานรังสีรักษา ด้วยรูปทรงกระบอกขนาดเล็กของเส้นใยแก้วนำแสง (รูปที่ 3(a)) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวัดปริมาณรังสีแบบ 1 มิติ แต่ยากต่อการใช้งาน ติดตั้ง และมีโอกาสสูญหายขณะดำเนินการวัดปริมาณรังสี กลุ่มนักวิจัยในมาเลเซียจึงมีการออกแบบให้วัสดุ SiO_2:Ge มีรูปทรงแบบ Flat และ Disk (รูปที่ 3 (b) และ (c) ตามลำดับ) ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับมิลลิเมตรเพื่อง่ายต่อการใช้งาน และยังทำให้วัสดุมีมวลมากขึ้นส่งผลให้การตอบสนองต่อรังสีเพิ่มขึ้น พื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราการนับวัดสัญญาณแสงในเครื่องอ่าน TL/OSL มากขึ้นด้วย [4], [5]

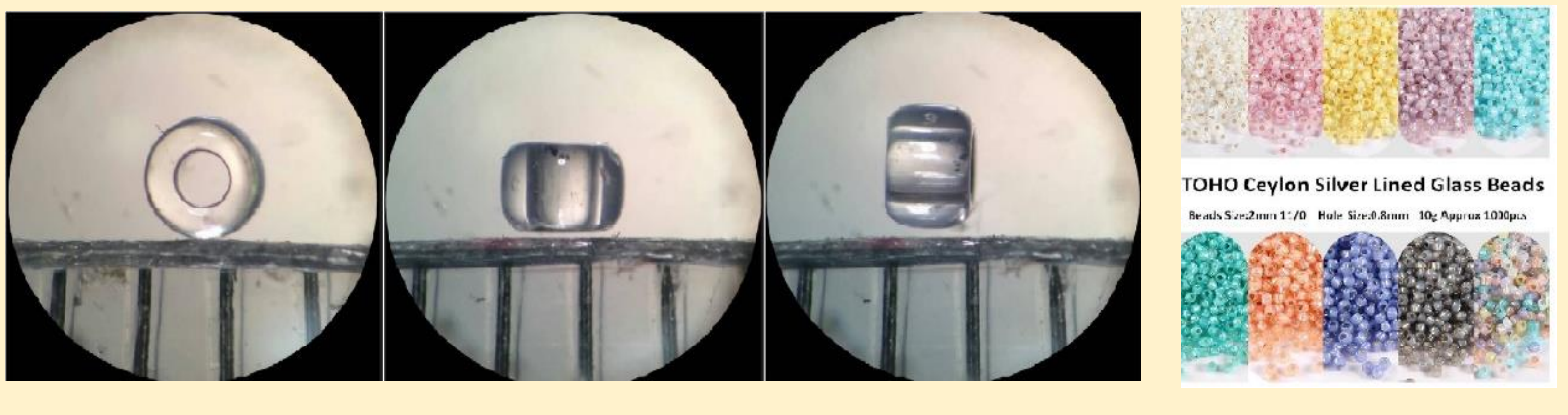


(a) (b) (c)

รูปที่ 3 (a) เส้นใยแก้วนำแสงความยาว 5 มิลลิเมตร ขยายด้วยกล้องจุลทรรน์ กำลังขยาย 15 เท่า [4]
(b) flat fibres ขนาด 3.5 × 1.9 มิลลิเมตร
(c) disk fibres เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.65 มิลลิเมตร หนา 1.92 มิลลิเมตร [5]

Silica beads, glass beads

ลูกปัดแก้วที่ใช้สำหรับทำเครื่องประดับ งานประดิษฐ์ ขนาดตั้งแต่ 1-3 มิลลิเมตร (รูปที่ 4) ถูกนำมาวิจัยความสามารถในการวัดปริมาณรังสี โดยมุ่งเน้นงานในด้านรังสีรักษาในระดับ kV – MV ของโฟตอน อิเล็กตรอน โปรตอน และคาร์บอนไอออนของลูกปัดแก้วมีค่าการตอบสนองต่อรังสี (Sensitivity) สูงกว่า LiF TLD และมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นต่อปริมาณรังสีตั้งแต่ 1 cGy ถึง 100 Gy ค่าการตอบสนองไม่ขึ้นอยู่กับอัตราปริมาณรังสี (Dose rate) และมุมการฉายรังสี การจางหายของสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ [6] ลูกปัดแก้วสามารถนำมาร้อยต่อกันเป็นเส้นยาวเพื่อจัดเป็นรูปร่างตาม 3D-phantom ของอวัยวะที่สนใจวัดปริมาณรังสีในรูปแบบ 3 มิติได้ง่าย [7] เนื่องจากลูกปัดในท้องตลาดมีหลากหลายสี ชนิด หลายแหล่งผลิตจึงทำให้เกิดข้อแตกต่างของส่วนประกอบเคมีภายใน การศึกษาพบว่าลูกปัดแก้วชนิดใสมีค่าการตอบสนองดีที่สุดหากเปรียบเทียบในบรรดาลูกปัดหลากสี ก่อนนำลูกปัดแต่ละแบบมาทดสอบจึงต้องมีการยืนยันส่วนประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ;EDS และการล้างสารเคลือบ เช่น กากเพชร สีเคลือบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัด [8]

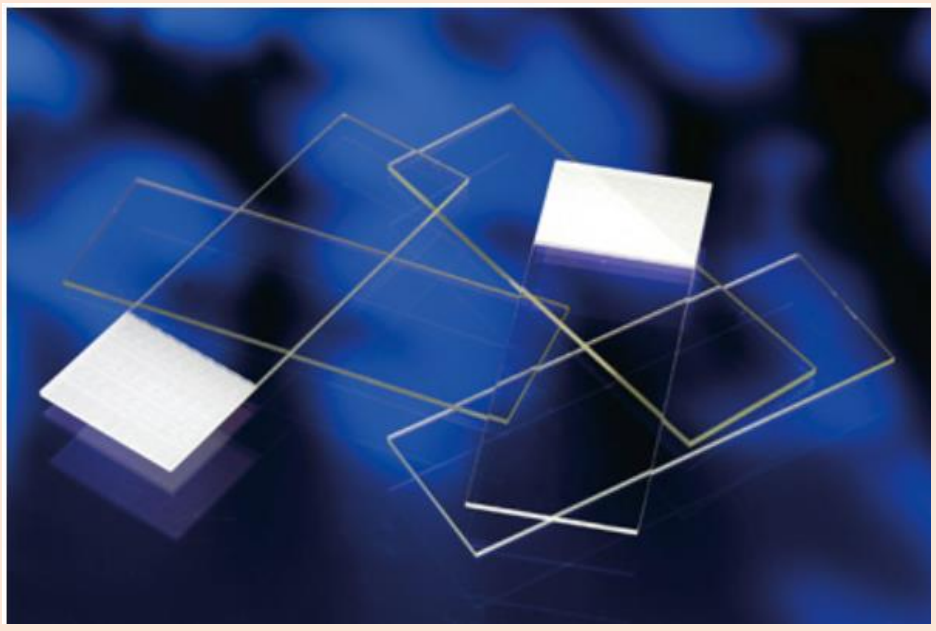


(a) (b)

รูปที่ 4 (a) แสดงรูปทรงของลูกปัดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า (b) ลูกปัดแก้วหลากหลายสีในท้องตลาดที่สามารถนำมาวิจัย (ที่มา https://www.aliexpress.com/item/1005002886649493.html)

Borosilicate glass

แก้วชนิดบอโรซิลิเกต (SiO_2–B_2O_3) ที่ใช้ในการศึกษาการวัดปริมาณรังสี เป็นกระจกเตรียมตัวอย่าง (Microscope slides) สำหรับใช้กับกล้องจุลทรรศน์ มีความหนาอยู่ที่ 1.0-1.2 มิลลิเมตร ขนาดเริ่มต้น 76.2 x 25.4 mm^2 ซึ่งสามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ตามการใช้งานโดยการตัด ในงานวิจัยใช้ขนาด 5 x 5 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถเข้าเครื่องอ่านสัญญาณได้ ตัวอย่างกระจกบอโรซิลิเกตถูกทดสอบการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ในช่วงปริมาณรังสีสำหรับรักษา 2-10 Gy จากเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ และ 0.2–1 kGy จากเครื่องฉายรังสีอิเล็กตรอนในงานฉายรังสีปริมาณสูง พบว่าความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองต่อรังสีทั้งสองดี มีค่า Regression Coefficient (R2) > 0.98 การตอบสนองเป็นเชิงเส้นนี้เป็นข้อดีในการประยุกต์ใช้วัดปริมาณรังสีในงานรังสีรักษาและงานอุตสาหกรรมฉายรังสีปริมาณสูง เช่น โรงงานฉายรังสีสำหรับฆ่าเชื้อเครื่องมือแพทย์และอาหาร เป็นต้น แต่การจางหายของสัญญาณก่อนเข้าเครื่องอ่าน (Fading) เป็นสิ่งที่ควรระวังเนื่องจากการศึกษาการฉายรังสีที่พลังงาน 120 kVp พบว่า ค่าสัญญาณลดลงประมาณ 50% เมื่ออ่านสัญญาณในวันที่ 35 เทียบกับ วันแรก จุดเด่นที่น่าสนใจของกระจกบอโรซิลิเกต คือ มีส่วนประกอบของโบรอน ซึ่งเป็นหนึ่งในสารหน่วงนิวตรอน ทำให้กระจกบอโรซิลิเกตมีความเป็นไปได้เพื่อใช้วัดรังสีนิวตรอน [9], [10]



รูปที่ 5 แก้วชนิดบอโรซิลิเกต(SiO_2-B_2O_3) หรือกระจกเตรียมตัวอย่าง (Microscope Slides) สำหรับใช้กับกล้องจุลทรรศน์ (ที่มา https://www.fishersci.pt/)

การศึกษาวิจัยการอ่านค่าสัญญาณแสงจากแก้วชนิดต่างๆ ด้วยวิธีกระตุ้นด้วยความร้อนและแสง แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ที่จะใช้แก้วและกระจกเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับวัดปริมาณรังสี ช่วงค่าพลังงาน kV-MV และช่วงปริมาณรังสีระดับ cGy - kGy การใช้วัสดุเหล่านี้ซึ่งมีพร้อมให้เลือกซื้อในท้องตลาด ทำให้แก้วเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อวัดรังสีโดยตรง อย่างไรก็ตามการศึกษาให้ครอบคลุมทุกคุณสมบัติของแก้วที่จะนำมาใช้วัดปริมาณรังสีนั้นจำเป็น เพื่อให้ผลการวัดนั้นถูกต้อง แม่นยำมากที่สุด ข้อมูลวิจัยที่ผ่านมานำไปสู่การพัฒนาผลิตวัสดุประเภทแก้วหรือกระจกที่มีการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพให้เหมาะสมเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีที่ถูกต้อง และเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านที่ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีต้องการ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ, "ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP," [Online]. Available: http://otop.dss.go.th/index.php/home/26-interesting-articles/136-2017-05-31-06-33-45.

[2] "physicsopenlab," 13 February 2018. [Online]. Available: https://physicsopenlab.org/2018/02/13/crystalline-and-amorphous-solids/. [Accessed 2 June 2023].

[3] S. W. S. McKeever, Thermoluminescence of Solids, Cambridge University Press, Thermoluminescence of Solids.

[4] C. Termsuk, S. J. Sweeney and C. S. Taylor, "Thermoluminescence glow curve study of beta irradiated germanium doped core fibre with different dopant concentrations," Radiation Physics and Chemistry, vol. 193, no. 22 January 2022, 2022.

[5] A. Alyahyawi, "Silica-based Passive Dosimeters for sub-Gy Patient-focused Dose Evaluations," Universeity of Surrey, UK, 2019.

[6] S. Jafari, "Characterisation and novel applications of glass beads as dosimeters in radiotherapy," University of Surrey, UK, 2015.

[7] S. Babaloui, S. Jafari, W. Polak, M. Ghorbani, M. W. Hubbard, A. Lohstroh and A. Shirazi, "Development of a novel and low-cost," Physics Contributions, vol. 12, no. 30.10.2020, pp. 470-479, Journal of Contemporary Brachytherapy.

[8] K. Ley, S. Jafari and D. Bradley, "Thermoluminescence of silica beads for dosimetry up to 250 kGy Declaration of Originality," Radiation Physics and Chemistry, vol. 155, no. February 2019, pp. 178-183, 2019.

[9] A. Alqahtani, "Versatile Passive Dosimetry at Radiotherapy and Greater Levels using Borosilicate Glass," University of Surrey, UK, 2020.

[10] S. F. A. Sani, M. H. U. Othman, A. Alqahtani, K. S. Almugren, F. H. Alkallas and D. A. Bradley, "Low-cost commercial borosilicate glass slides for passive radiation dosimetry," PLOS ONE, vol. 15, no. December 30, 2020, 2020.

การวิเคราะห์ผลของรังสีต่อการทำลายดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ท ตอนที่ 2

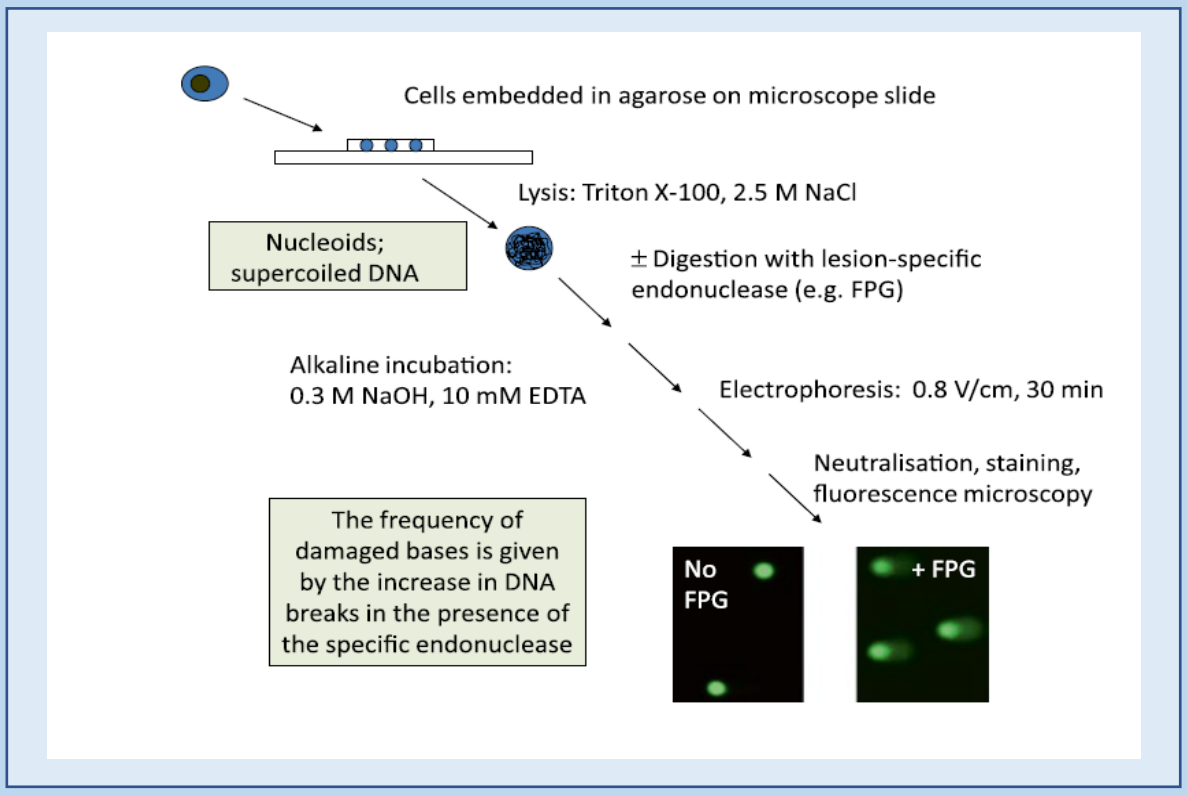
เฉลิมสิน เพิ่มเติมสิน
นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการ

จากที่ได้กล่าวในตอนที่ 1 แล้วว่าโคเม็ทเป็นวิธีที่สามารถใช้วิเคราะห์ดีเอ็นเอที่เสียหาย (DNA damage) จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ยาเคมีบำบัด ยาฆ่าแมลง และรังสี เป็นต้น นอกจากนี้วิธีนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ความสามารถของเซลล์ในการซ่อมแซมดีเอ็นเอที่เสียหาย (DNA repair) ได้อีกด้วย

ปัจจุบันโคเม็ทมีหลายเทคนิค เช่น Alkaline Comet Assay, Neutral Comet Assay และ Modified Comet Assay อย่างไรก็ตามการศึกษาผลของดีเอ็นเอที่ถูกทำลายด้วยรังสีจะนิยมใช้เพียง 2 เทคนิคแรกเท่านั้น ซึ่งเทคนิค Modified Comet Assay มีการพัฒนาก็เพื่อให้เกิดความจำเพาะและสะดวกต่อการวิเคราะห์ตัวอย่างบางชนิดเท่านั้น เช่น Tear duct epithelial cells [Rojas et al., 2000], Enzyme-modified neutral comet assay [Fabbrizi et al., 2021] และ Lens epithelial cells [Osnes-Ringen et al. 2012] เป็นต้น ดังนั้นบทความนี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะ 2 เทคนิคแรก ดังนี้

1. การวิเคราะห์ดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ทภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง (Alkaline Comet Assay)

วิธีนี้จะทำการแยกเซลล์เพาะเลี้ยงให้เป็นเซลล์เดี่ยว ๆ หรือใช้ตัวอย่างจากเลือด (โดยจะแยกเอาเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดขาวหรือไม่แยกก็ได้) หลังจากนั้นจะทำการตรึงเซลล์ให้อยู่กับที่โดยผสมกับอะกาโรสชนิดจุดหลอมเหลวต่ำ (low melting agarose) แล้วทำให้เป็นแผ่นเจลบาง ๆ บนแผ่นสไลด์ที่ใสและสะอาด เพื่อให้ดีเอ็นเอสามารถเคลื่อนที่ออกจากเยื่อหุ้มเซลล์และเยื่อหุ้มนิวเคลียสจึงจำเป็นต้องทำลายเยื่อหุ้มทั้งสองโดยการเติมสารละลาย Triton x-100 และในสารละลายนี้จะมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ ลงไปเพื่อแยกโปรตีนฮีสโตนออกจากสายดีเอ็นเอ ซึ่งโปรตีนตัวนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางให้ดีเอ็นเอพันเป็นเกลียวรอบ ๆ โปรตีนฮีสโตน เมื่อแยกดีเอ็นเอออกจากโปรตีนจะทำให้ดีเอ็นเอเกิดการคลายเกลียวเป็นเส้นตรงในที่นี้จะยกตัวอย่างการใช้เอนไซม์ตัดจำเพาะต่อดีเอ็นเอ เช่น Formamidopyrimidine DNA Glycosylase (FPG) แทนรังสีในการตัดสายดีเอ็นเอให้สั้นลง หลังจากนั้นจะทำการบ่มกับสารละลายด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) ก่อนทำการแยกดีเอ็นเอขนาดต่าง ๆ ด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Phosphate Buffered Saline (PBS) ที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ pH13 0.03 โมลาร์ [Cortés-Gutiérrez et al., 2012] หลังจากแยกเสร็จให้ล้างด้วย PBS และทำการตรึง (Fixation) ดีเอ็นเอด้วยเมทธานอลก่อนจะย้อมด้วยสีฟลูออเรสเซนต์ เช่น propidium iodide, 4′,6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) และ Hoechst 33342 ซึ่งสีย้อมนี้จะไปจับกับเบสบนสายดีเอ็นเอ หลังจากนั้นจะทำการถ่ายภาพเซลล์ด้วยกล้องที่มีแหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ การวิเคราะห์ผลควรวิเคราะห์ไม่น้อยกว่า 50 เซลล์ (หรือ 50โคเม็ท) ต่อตัวอย่าง และต้องใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์หาโคเม็ทโดยเฉพาะ ขั้นตอนการทำอย่างย่อแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีโคเม็ท โดยใช้เอ็นไซม์ FPG ตัดสายดีเอ็นเอซึ่งจะทำให้เกิดส่วนหัวและส่วนหางของดีเอ็นเอภายใต้กระแสไฟฟ้า [Azqueta and Collins, 2013].

2. การวิเคราะห์ดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ทในสภาวะที่เป็นกลาง (Neutral Comet Assay)

การรักษาความสมบูรณ์ของดีเอ็นเอ (DNA Integrity) มีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับเซลล์ ซึ่งการทำลายดีเอ็นเอสามารถนำไปสู่การพัฒนาเป็นโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะในสภาวะปัจจุบันที่เซลล์ต้องเผชิญกับมลภาวะที่เป็นพิษจากแหล่งกำเนิดทั้งจากภายนอกและภายในร่างกายจำนวนมากที่สามารถทำลายดีเอ็นเอได้ อย่างไรก็ตามเซลล์ได้มีการพัฒนากลไกการซ่อมแซมดีเอ็นเอที่หลากหลายเพื่อปกป้องดีเอ็นเอซึ่งเป็นสารพันธุกรรม เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเสียหายของดีเอ็นเอและการซ่อมแซมสำหรับการเกิดโรค การวัดค่าเหล่านี้จึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [Clementi et al., 2021] และการหาปริมาณดีเอ็นเอที่เสียหายจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้สำหรับประเมินความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานทางรังสีเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนป้องกันอันตรายจากรังสีในการปฏิบัติงานได้

ข้อจำกัดในการวิเคราะห์ด้วยวิธีโคเม็ท

1. วิธีโคเม็ทไม่เหมาะสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างเซลล์หรือเนื้อที่ทำการแช่แข็งเนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดจะทำลายดีเอ็นเอได้ ยกเว้นกรณีที่เซลล์เก็บใน freezing medium (10% Fetal bovine serum + 10 % DMSO) และค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงจนถึง -80 ^{0}C [Collins and Azqueta, 2013].

2. แนะนำให้เตรียมในที่มืดหรือภายใต้แสงสีแดงชนิดที่ไม่ใช่แอกทินิก (Non-actinic red light) เพื่อป้องกันแสงกระตุ้นให้เกิดการเสียหายต่อดีเอ็นเอ [Pourrut et al., 2011]

3. ดีเอ็นเอในไมโทคอนเดรีย (Mitochondrial DNA) นั้นเล็กเกินกว่าจะตรวจจับได้ เนื่องจากดีเอ็นเอจะหายไปจากเจลอย่างรวดเร็วเมื่อทำการย่อยเซลล์ ดังนั้นวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ดีเอ็นเอในไมโทคอนเดรีย

4. วิธีนี้ใช้แรงงานและเวลาในการวิเคราะห์นานเนื่องจากข้อจำกัดของตัวอย่างต่อการทำแต่ละครั้ง จำนวนของสไลด์ที่วางใน Electrophoresis Tank อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาโดยทำโคเม็ทในไมโครเพลทชนิด 96 หลุม ทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างพร้อมกันได้เป็นจำนวนมาก

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำโคเม็ท

1

ความเข้มข้นของเจล พบว่าเจลที่ความเข้มข้น 0.4% จะทำให้เกิดดีเอ็นเอส่วนหางมากกว่าและจะเริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นเจลสูงขึ้นและจะเริ่มคงที่เมื่อเจลมีความเข้มข้นที่ 1.3%

2

ระยะเวลาในการทำให้เยื่อหุ้มเซลล์และเยื่อหุ้มนิวเคลียสแตกด้วย Triton และสารละลายเกลือ ความเข้มข้นสูงไม่ส่งผลต่อการเกิดโคเม็ท โดยทั่วไปการทำให้เซลล์แตกแค่ 1 ชั่วโมงก็เพียงพอแล้ว หรือบางกรณีอาจทิ้งไว้ค้างคืนก็ได้

3

การวิเคราะห์ดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ทภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง เวลาในการบ่มนั้นสำคัญมาก พบว่าเปอร์เซ็นต์ดีเอ็นเอส่วนหางแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการบ่ม

4

สิ่งที่มีผลมากที่สุดคือ โวลต์และระยะเวลา โดนส่วนหางจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่าทั้งสองที่เพิ่มขึ้น

5

การทำโคเม็ท ปกติจะตั้งค่ากระแสที่ 300 มิลลิแอมป์ อย่างไรก็ตามกระแสที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการเกิดโคเม็ทไม่มาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสจะทำให้เกิดความร้อน จึงแนะนำให้อุณหภูมิของการทำ Electrophoresis ไม่เกิน 15 °C หรือทำในห้องเย็น

6

การนับโคเม็ทก็มีส่วนที่จะทำให้เกิดความผิดพลาด เช่น การใช้สีฟลูออเรสเซนต์ที่แตกต่างกันก่อให้เกิดความเข้มของแสงแตกต่างกัน แหล่งกำเนิดแสงเสื่อมสภาพ รวมถึงคุณภาพของเลนส์และการปรับความคมชัดของภาพ เป็นต้น

ข้อแนะนำการทำโคเม็ท

1. จำนวนเซลล์ต่อสไลด์หรือต่อหลุมควรเหมาะสม เซลล์มากไปจะเกิดการทับซ้อนของโคเม็ท ส่วนเซลล์น้อยไปก็ไม่เหมาะสมต่อการคำนวณทางสถิติ แนะนำ 10^4 เซลล์/สไลด์ หรือ 250 เซลล์/หลุม อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงเซลล์ที่จะหลุดในขั้นตอนการล้างการปั่นเหวี่ยงร่วมด้วย

2. เจือจางเซลล์ในเจลความเข้มข้น 0.6-0.8% ไม่แนะนำให้ใช้เจลที่เตรียมแล้วใช้ 3-4 ครั้ง เนื่องจากการระเหยของสารละลายจะทำให้ความเข้มข้นเปลี่ยน

3. การทำให้เซลล์แตกควรทำที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือค้างคืนหรือนานกว่านั้น อย่างไรก็ตามการใช้เวลานานอาจทำให้เจลหลุดได้

4. การวิเคราะห์ดีเอ็นเอด้วยวิธีโคเม็ทภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ขั้นตอน Alkaline incubation (0.3 M NaOH+10 mM EDTA) แนะนำให้ทำที่ 4 °C เป็นเวลา 40 นาที

5. การทำ Electrophoresis แนะนำทำในห้องเย็น (Cold room) ปรับค่าที่ 1.15 V/cm นาน 20 นาที หรือ 0.8 V/cm นาน 30 นาที

6. หลังจากขั้นตอนการทำให้เป็นกลาง (Neutralization) และการล้าง (Washing) ปล่อยให้เจลแห้งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเจลแห้งแผ่นจะบางกว่าเดิมและการโฟกัสโคเม็ทจะเห็นง่ายขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Azqueta A., and Collins AR. The essential comet assay: a comprehensive guide to measuring DNA damage and repair. *Arch Toxicol* 2013, 87:949–968. DOI: 10.1007/s00204 -013-1070-0.
2. Clementi E., Garajove Z., and Markkanen E. Measurement of DNA damage using the neutral comet assay in culture cells. *Bio-protocol* 2021, 11(22):e4226. DOI:10.21769/ BioProtoc.4226.
3. Cortés-Gutiérrez EI., Hernández-Garza F., García-Pérez JO., and et al. Evaluation of DNA single and double strand breaks in women with cervical neoplasia based on alkaline and neutral comet assay techniques. *J. Biomed. Biotechnol*. 2012, Article ID 385245. DOI:10.1155/2012/385245.
4. Fabbriz MR., Hughes JR., and Parsons JL. The enzyme-modified neutral comet (EMNC) assay for complex DNA damage detection. *Methods Protoc.* 2021, 4, 14. DOI:10.3390/ mps4010014.
5. Osnes-Ringen Ø., Azqueta AO., Moe MC., Zetterström C., Röger M., and et al. DNA damage in lens epithelium of cataract patients in vivo and ex vivo. *Acta Ophthalmol*. 2013, 91:652–656. DOI:10.1111/j.1755-3768.2012.02500.x .
6. Pourrut B., Séverine J., Silvestre J., Pinelli E. Lead-induced DNA damage in Vicia faba root cells: potential involvement of oxidative stress. Mut Res Genet *Toxicol Environ Mutagen.* 2011, 726:123–128.
7. Rojas E., Valverde M., Lopez MC., Naufal I., Sanchez I., and et al. Evaluation of DNA damage in exfoliated tear duct epithelial cells from individuals exposed to air pollution assessed by single cell gel electrophoresis assay. *Mutat Res*. 2000, 468:11–17.

มลภาวะพลาสติก :

การนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้รังสีเพื่อปกป้องสิ่งแวดล้อม

นางสาวหทัยกาญจน์ กุหลาบเสาวคนธ์
นักฟิสิกส์รังสีปฏิบัติการ
นางสาวกาหลง อุ่ยยะเสถียร
นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการ

รูปที่ 1 ขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งในมหาสมุทรหรือบนชายหาดที่ไม่ได้ถูกนำมารีไซเคิล
(ที่มา : M. Gaspar/IAEA)

เกาะเฮนเดอร์สัน (Henderson Island) อาจเป็นสถานที่ที่แยกออกอย่างโดดเดี่ยวมากที่สุดบนโลกเนื่องจากอยู่ห่างจากแผ่นดินใหญ่กว่า 5,000 กิโลเมตร แม้ว่าจะไม่มีผู้คนอยู่เลย เกาะสวรรค์แห่งแปซิฟิกตอนใต้แห่งนี้ก็ยังเต็มไปด้วยชิ้นส่วนและอนุภาคพลาสติกกว่า 4,000 ล้านชิ้น ขยะที่เรียงรายอยู่ตามชายหาดของเกาะเฮนเดอร์สันไม่เพียงแต่ทำให้เกาะสกปรกเท่านั้น แต่ยังทำให้สัตว์ทะเลเสียชีวิตจากการกินเศษพลาสติกเข้าไปและเกิดการอุดตันในร่างกาย ขยะพลาสติกเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของพลาสติกกว่า 8 พันล้านตัน ที่ถูกผลิตขึ้นมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2493 (ค.ศ.1950)

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency,IAEA) กำลังทำงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญจากทั่วโลกเพื่อแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกและปกป้องสิ่งมีชีวิตในทะเลรวมถึงสิ่งแวดล้อมจากมลพิษจากพลาสติก โดย IAEA ได้ร่วมมือกับพันธมิตรในการวิจัยและพัฒนาเทคนิคทางรังสี[1] เพื่อแปรรูปและรีไซเคิลพลาสติกในราคาย่อมเยา เทคนิคเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องเร่งลำอิเล็กตรอน (electron beam accelerators) เพื่อฉายรังสีพลาสติกหลังการใช้งานเพื่อนำพลาสติกเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่และสามารถแปรรูปพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ง่ายขึ้น โดยเทคนิคนี้มีแนวโน้มที่ดีเพราะมันไม่ใช่เรื่องใหม่ทั้งหมดและมีการนำมาใช้งานจนประสบความสำเร็จมาอย่างยาวนาน เช่น การฉายรังสีวัสดุพอลิเมอร์ตั้งแต่ยางรถยนต์ไปจนถึงท่อน้ำร้อนและบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่ง Celina Horak หัวหน้าแผนกผลิตภัณฑ์ไอโซโทปรังสีและเทคโนโลยีทางรังสีของ IAEA ได้กล่าวว่า ถ้าสามารถใช้เทคโนโลยีนี้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้คุณลักษณะใหม่ในพลาสติก จะสามารถใช้การฉายรังสี[1]เพื่อปรับโครงสร้างพลาสติกเพื่อปรับปรุงความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่และลดปริมาณพลาสติกที่ถูกทิ้ง

พลาสติกผลิตขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์ประเภทต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยกลุ่มอะตอมมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวหรือเป็นโครงข่ายซ้ำกันของวัสดุมอนอเมอร์ (Monomer) โดยการฉายรังสีของวัสดุพอลิเมอร์ทำให้เกิดผลที่แตกต่างของวัสดุพอลิเมอร์เหล่านั้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำขยะพลาสติกมาใช้ใหม่

โครงการวิจัยใหม่โดยความร่วมมือของ IAEA เพื่อพัฒนาการใช้รังสี[1] ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะพอลิเมอร์นำไปสู่การวิจัยในเรื่องนี้ โดย Bin Jeremiah Barba ผู้เชี่ยวชาญด้านการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ของสถาบันวิจัยนิวเคลียร์แห่งฟิลิปปินส์ (Philippine Nuclear Research Institute, PNRI) กล่าวว่า การฉายรังสีวัสดุไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือในการผลิต แต่ยังเป็นเครื่องมือสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้น เทคนิคการฉายรังสี[1] ที่นำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุพอลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติก โดย PNRI เป็น 1 ใน 18 ประเทศ ที่กำลังมีความร่วมมือในการพิจารณากระบวนการทางรังสีเพื่อช่วยประเทศต่าง ๆ ในการพัฒนาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลาสติกโดยใช้งบประมาณที่ไม่มาก โดยกระบวนการทางรังสีที่นำมาใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ เช่น กระบวนการ Cross-linking กระบวนการ Chain Scission กระบวนการ Grafting และการดัดแปลงพื้นผิวอื่น ๆ เป็นต้น

กระบวนการ Cross-linked Polymers

กระบวนการ Cross-linking คือ การใช้การฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอนเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสายพอลิเมอร์ โดยการเชื่อมโยงสายพอลิเมอร์เข้าหากันจะเกิดขึ้นจากการเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ทนทานขึ้น และมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งวิธีการนี้นำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตสามารถลดขนาดและความหนาของยางซึ่งทำให้ลดวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการผลิต และทำให้ผลิตภัณฑ์มีการใช้งานได้ยาวนานขึ้น

กระบวนการ Degrading Polymers

กระบวนการนี้ เป็นการใช้การฉายรังสีผ่านกระบวนการ Chain Scission (กระบวนการหนึ่งที่ทำให้เกิดการขาดกันของโมเลกุลของพอลิเมอร์) โดย Olgun Guven ผู้เชี่ยวชาญด้านพอลิเมอร์รังสีจากมหาวิทยาลัย Hacettepe ประเทศตุรกี กล่าวว่า กระบวนการนี้ทำให้วัสดุเปราะและง่ายต่อการบดให้เป็นพอลิเมอร์ที่ละเอียด ยกตัวอย่างเช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) ซึ่งเป็นสารเคลือบทางเคมีที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อแบรนด์เทฟลอน (Teflon) ถูกย่อยสลายและนำไปใช้ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์และสารเติมแต่งสำหรับหมึกพิมพ์ นอกจากนี้ ผู้เชี่ยวชาญกำลังพิจารณาถึงการใช้กระบวนการ Chain Scission ในการนำกลับมาใช้ใหม่ทางเคมีไปสู่รูปแบบทางเคมีพื้นฐานทำให้เกิดวัตถุดิบใหม่หรือน้ำมัน นอกจากนี้ กระบวนการ Chain Scission สำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของผลิตภัณฑ์ใหม่จากพอลิเมอร์แบบใช้ครั้งเดียวได้อีกด้วย

กระบวนการ Grafting polymers

กระบวนการ Grafting เป็นกระบวนการของการต่อมอนอเมอร์เข้ากับสายพอลิเมอร์ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุพอลิเมอร์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งเทคนิคเดียวกันนี้สามารถนำมาใช้ในการรวมพอลิเมอร์เพื่อการขึ้นรูปและการปรับโครงสร้างของของเสียที่ง่ายขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเข้ากันไม่ได้ โดยเทคนิคเหล่านี้เป็นเพียงไม่กี่วิธีที่ IAEA กำลังสำรวจการใช้รังสี[1] เพื่อการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ ซึ่ง Horak กล่าวว่า เครื่องมือหลายชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นการแก้ปัญหาที่ใช้งบประมาณน้อยและเข้าถึงได้เพื่อเป็นการลดขยะพลาสติกที่ทำลายสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้โครงการวิจัยที่ดำเนินการร่วมกันอย่างต่อเนื่องจะปรับปรุงและตรวจสอบเทคโนโลยีการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลาสติก และช่วยกำหนดความเป็นไปได้ในการใช้งานในประเทศต่างๆ รวมถึงสามารถพัฒนาแผนการถ่ายทอดความรู้และนำไปปฏิบัติได้

ในปี พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) IAEA ได้ริเริ่มโครงการเทคโนโลยีนิวเคลียร์เพื่อควบคุมมลพิษพลาสติก (The Nuclear Technology for Controlling Plastic Pollution, NUTEC Plastics) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการประยุกต์ใช้เทคนิคการฉายรังสีที่เป็นนวัตกรรมเพื่อลดขยะพลาสติกโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ทั่วโลก โดยโครงการนี้ช่วยให้ประเทศต่างๆ ใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์และใช้หลักฐานทางวิทยาศาสตร์ในการจำแนกลักษณะและประเมินมลพิษไมโครพลาสติกในทะเล พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงการใช้รังสีในการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลาสติก โดยเปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นทรัพยากรที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้

NUTEC Plastics เป็นโครงการวิจัยที่ดำเนินการร่วมกัน เพื่อช่วยให้เกิดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่แม่นยำ รวมทั้งนำไปสู่นโยบายมลพิษจากพลาสติก เสริมสร้างวิธีการในการติดตามพลาสติกและปรับปรุงขอบเขตของเทคโนโลยีการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยโครงการความร่วมมือทางเทคนิค (Technical Cooperation Project, TC Project) ได้สนับสนุนเครื่องมือและการฝึกอบรมแก่นักวิจัยในการถ่ายทอดความรู้และสนับสนุนในเรื่องอื่น ๆ ภายใต้โครงการการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลาสติก ซึ่งการพัฒนาแนวทางดังกล่าวจะช่วยประเทศต่าง ๆ จัดตั้งสถานที่ในการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ในการจัดการกับมลพิษจากพลาสติกอย่างยั่งยืน

ประเทศไทย โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติได้มีการจัดประชุมความร่วมมือทางเทคนิค (TC Project) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างศักยภาพของประเทศสมาชิกในภูมิภาค มีการประยุกต์ใช้เทคนิคทางรังสีเพื่อการพัฒนาเพิ่มมูลค่าของวัสดุใหม่ที่เกิดจากขยะโพลีเมอร์สำหรับการใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

เอกสารฉบับนี้ รังสี หมายถึง รังสีชนิดก่อไอออน (Ionizing radiation)

เอกสารอ้างอิง

1. https://www.iaea.org/bulletin/plastic-pollution-recycling-with-radiation-to-protect-the-environment

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

เลขที่ 16 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0 2596 7600 ต่อ 1110,1120 โทรสาร 0 2561 3013

: pr@oap.go.th : Atoms4Peace สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

: www.oap.go.th : officeofatomsforpeace : @atomsnet

สายด่วนฉุกเฉิน
ทางนิวเคลียร์และรังสี
1296
ตลอด 24 ชั่วโมง