

บทความพิเศษ

การป้องกันอันตรายจากรังสีในงานรังสีวินิจฉัย

(Radiation Protection in Diagnostic X-ray Imaging)

ศุภชาติ แสงเรืองอ่อน

ภาควิชารังสีวิทยา วิทยาลัยแพทยศาสตร์พระมงกุฎเกล้า

บทนำ

เครื่องมือทางรังสีวินิจฉัยมีความสำคัญและมีบทบาทเป็นอย่างมาก ในการถ่ายภาพและแสดงภาพรังสีทางการแพทย์เพื่อประกอบการแปลผลและวินิจฉัยโรคของผู้ป่วย ประกอบด้วย เครื่องมือตรวจทางรังสีวินิจฉัย ที่ใช้รังสีก่อไอออน (Ionizing radiation) ได้แก่ รังสีเอกซ์ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการตรวจเอกซเรย์ทั่วไป (General X-ray Machine) การตรวจด้วยเครื่องส่องตรวจทางรังสี (Fluoroscopy X-ray Machine) การตรวจด้วยเครื่องเอกซเรย์ระบบหลอดเลือด (Digital Subtraction Angiography) รวมทั้งตรวจด้วยเครื่องมือพิเศษ ได้แก่ เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography Machine) และเครื่องเอกซเรย์เต้านม (X-ray Mammography) เป็นต้น ขณะที่รังสีไม่ก่อไอออน (Non-ionizing radiation) ถูกนำมาใช้ในการตรวจด้วยเครื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นวิทยุ (Magnetic Resonance Imaging) เป็นต้น เครื่องมือเหล่านี้เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างมากในงานรังสีวินิจฉัย ใช้ในการถ่ายภาพผู้ป่วยเพื่อหาพยาธิสภาพ เพื่อให้การตรวจวินิจฉัยและรักษาผู้ป่วยเป็นไปด้วยความรวดเร็ว ใช้ปริมาณรังสีให้น้อยที่สุดและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อย่างไรก็ตาม รังสีก่อไอออน เมื่อผ่านเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Living cells) อาจทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing) เรียกขบวนการที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนว่า ไอออไนเซชัน (Ionization) หรืออะตอมอาจถูกทำให้มีพลังงานสูงขึ้น แต่ไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนร่อนหลุดออกจากอะตอมได้ ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปสู่สถานะถูกกระตุ้นได้ เรียกขบวนการนี้ว่า เอกซไซเซชัน (Excitation) โดยทั้ง Ionization และ Excitation ถือว่าเป็นขั้นแรกของการนำไปสู่การทำลายเซลล์ของสิ่งมีชีวิต¹

ดังนั้นบุคลากรทางรังสีและผู้ที่เกี่ยวข้อง ควรมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิตและการป้องกันอันตรายจากรังสีในงานรังสีวินิจฉัย เพื่อนำรังสีมาใช้ประโยชน์ในการตรวจให้กับผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยสูงสุด

รังสีคืออะไร

รังสี คือ พลังงานรูปหนึ่งที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดที่มาจากธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ แสงสว่าง และ รังสีเอกซ์ หรืออนุภาคที่มีความเร็วสูง เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีคอสมิก เป็นต้น รังสีสามารถถ่ายทอดพลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดให้กับตัวกลางที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านได้ ในสิ่งแวดล้อมมีรังสีอยู่ทั่วไป โดยแหล่งกำเนิดรังสีมาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดรังสีจากตามธรรมชาติ (Natural Sources of Radiation) และแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made Sources of Radiation) ทั้งนี้ ส่วนใหญ่รังสีมาจากแหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติถึงร้อยละ 82²

ประเภทของรังสี

เมื่อแบ่งตามคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการแตกตัวของอะตอมตัวกลาง รังสีจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) Non-ionizing radiation (รังสีไม่ก่อไอออน) คือ รังสีที่ไม่สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในอะตอมของตัวกลางที่รังสีนั้นวิ่งผ่าน เพียงแต่จะทำให้อิเล็กตรอนขยับตัวสูงขึ้นจากวงโคจรนั้น แล้วตกลงสู่วงโคจรเดิมอีก เช่น รังสีความร้อน ไมโครเวฟ เลเซอร์ รังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นวิทยุ เป็นต้น

2) Ionizing radiation (รังสีก่อไอออน) คือ รังสีที่มีพลังงานสูงที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางที่รังสีนั้นวิ่งผ่านเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งโดยทางตรงหรือทางอ้อม เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น³

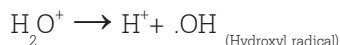
ปฏิกิริยาของรังสีกับโมเลกุลของน้ำ

เนื่องจากในร่างกายมีน้ำเป็นองค์ประกอบใหญ่ ดังนั้นจะพิจารณาถึงผลของรังสี เมื่อ ionization ในน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีผลต่อการสร้างและการทำงานของเซลล์ โดยขั้นตอนการทำลายของรังสีแยกได้เป็น 4 ขั้นตอน⁴ ดังนี้

1. เมื่อเซลล์ได้รับพลังงานจากรังสี ทำให้เกิดมี ionization ในน้ำ กระบวนการที่เกิดขึ้นคือ



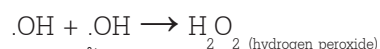
2. อนุภาคบวก H_2O^+ จะแตกตัว (dissociates)



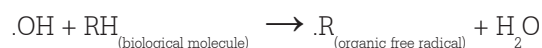
อนุภาค หรือ e^-_{aq} จะใช้ร่วมกับโมเลกุลของน้ำที่เป็นกลาง และจะแตกตัวไป



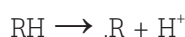
ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ H^+ , OH^- , $\cdot\text{H}$ และ เราเรียก $\cdot\text{H}$ และ OH^- ซึ่งมีอิเล็กตรอนที่ขาดคู่ (unpaired electron) ว่า อนุพันธ์อิสระ (free radicals) มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีมาก



ในปฏิกิริยานี้ hydrogen peroxide จะเป็นตัว oxidizing agent ที่แรง โดย $\cdot\text{OH}$ เป็น free radical ที่มีสภาวะเป็นพิษมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลได้ทุกชนิดในเซลล์ ปฏิกิริยาที่ $\cdot\text{OH}$ ทำปฏิกิริยากับชีวโมเลกุล (RH) แสดงดังสมการ



โดย $\cdot\text{R}$ เป็นผลผลิตที่อาจเกิดจากรังสีทำปฏิกิริยากับ RH โดยตรงจะเรียกว่า direct action Radiation



อนุพันธ์อิสระ (free radicals) และ oxidizing agent จะไป attack กับ complex molecules ติดเข้ากับสายโมเลกุล ในโมเลกุลยาวทำให้แตกออก การเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังกล่าวทำให้เกิดผลต่อเซลล์หลายอย่าง เช่น

1. ทำให้เซลล์ตายตั้งแต่เนิ่น ๆ
2. ขัดขวางการแบ่งเซลล์ หรือทำให้มีการแบ่งเซลล์ช้าลง
3. เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (Radiation weighting factor, W_R)^(5,6)

ชนิดของรังสี	ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี
รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน โปรซิตรอน และมิวออน	1
นิวตรอน พลังงาน < 10 keV	5
10 keV ถึง 100 keV	10
> 100 keV ถึง 2 MeV	20
> 2 MeV ถึง 20 MeV	10
> 20 MeV	5
โปรตรอน	5
รังสีแอลฟา	20

หน่วยของการวัดปริมาณรังสีต่างๆ มีดังนี้

1. Exposure คือ หน่วยวัดปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว เป็น ไอออนเกิดเป็นประจุไฟฟ้า หน่วยเดิมคือ เรนท์เกน (Roentgen, R) หน่วยใหม่คือ Coulomb per kilogram: C.kg^{-1} การแปลงหน่วยโดย $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$

2. Absorbed dose คือ ปริมาณรังสีที่อะตอมตัวกลางของวัตถุดูดกลืนไว้ ทั้งนี้รังสีจะถ่ายโอนพลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดให้อะตอมเหล่านั้น หน่วยเดิมคือ แรด (rad) หน่วยใหม่คือ เกรย์ (Gray) การแปลงหน่วยโดย $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

3. Equivalent Dose คือ ปริมาณรังสีสมมูล หน่วยเดิมคือ เรม (rem) หน่วยใหม่คือ ซีเวิร์ต (Sv) การแปลงหน่วย โดย $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ คำนวณจากการนำปริมาณรังสีดูดกลืนของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อ คูณด้วยค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (Radiation weighting factor, W_R) ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี แสดงดังตารางที่ 1

4. Effective Dose คือ ปริมาณรังสียังผล หน่วยเดิมคือ เรม (rem) หน่วยใหม่คือ ซีเวิร์ต (Sv) การแปลงหน่วยโดย $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ค่า Effective dose เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับเพื่อวางแผนการป้องกันรังสีที่เหมาะสมให้กับผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไป คำนวณได้จากการนำปริมาณรังสีสมมูล คูณด้วยค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของรังสีต่ออวัยวะหรือเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ (Tissue weighting factor, W_T) โดยค่า W_T เป็นค่าที่แสดงถึงความไวของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อ ซึ่งจะเกิดความเสียหายได้ไม่เท่ากัน แม้จะดูดกลืนปริมาณรังสีไว้เท่ากัน จากตารางที่ 2 แสดงค่า W_T ที่คณะกรรมการการระหวางประเทศด้านป้องกันรังสี (International Commission on Radiological Protection, ICRP) ได้มีการประชุมร่วมกันเพื่อกำหนดค่า W_T โดย ICRP ฉบับ

ตารางที่ 2 แสดงค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของรังสีต่ออวัยวะหรือเนื้อเยื่อชนิดต่าง ๆ (Tissue weighting factors, W_T) อ้างอิงข้อมูลจาก ICRP* No. 26, 60 and 103⁶⁻⁹

อวัยวะ	ICRP No. 26	ICRP No. 60	ICRP No. 103
อวัยวะสืบพันธุ์	0.25	0.20	0.08
ไขกระดูก	0.12	0.12	0.12
ทรวงอก	0.12	0.12	0.12
เต้านม	0.15	0.05	0.12
ต่อมไทรอยด์	0.03	0.05	0.04
ผิวหนัง	0.03	0.01	0.01
ลำไส้ใหญ่		0.12	0.12
กระเพาะอาหาร		0.12	0.12
กระเพาะปัสสาวะ		0.05	0.04
ตับ		0.05	0.04
หลอดอาหาร		0.05	0.04
ผิวหนัง		0.01	0.01
ต่อมน้ำลาย			0.01
สมอง			0.01
อวัยวะอื่นๆ	0.30	0.05	0.12

*ICRP, International Commission on Radiological Protection

ที่ 26 , ICRP ฉบับที่ 60 และ ICRP ฉบับที่ 103 แสดงค่า W_T แตกต่างกันไปเล็กน้อยในอวัยวะแต่ละชนิด เนื่องจาก ICRP ได้มีการปรับค่า W_T ตามอุบัติการณ์ของผลของรังสีที่มีต่ออวัยวะหรือเนื้อเยื่อแต่ละชนิด

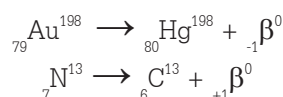
5. Radioactivity คือ กัมมันตภาพรังสี หน่วยเดิม คือ คูรี (Ci) หน่วยใหม่ คือ เบคเคอเรล (Bq) การแปลงหน่วยโดย $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ กัมมันตภาพรังสี หมายถึง ธาตุที่สามารถปล่อยพลังงานรังสีออกมาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อสัดส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนในนิวเคลียสไม่สมดุลย์ และธาตุนั้นจะกลายเป็นธาตุใหม่ จนในที่สุดได้อะตอมที่เสถียร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 83 เช่น U-238, Th-232, Rn-222 รังสีที่แผ่ออกมา มี 3 ชนิด คือ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา

รังสีแอลฟา (α) คือ อนุภาคที่มีคุณสมบัติเหมือนนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม (${}^4_2\text{He}$) มีประจุ +2 เกิดขึ้นในขณะที่มีการสลายของธาตุกัมมันตรังสีบางชนิด เช่น ยูเรเนียม เรเดียม เรดอน และทอเรียม รังสีแอลฟาเป็นรังสีที่มีพลังงานสูงสุด แต่มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำที่สุด โดยสามารถเดินทางผ่านอากาศได้เพียง 3 - 5 ซม. หรือ กระดาษเพียง 1-2 แผ่นก็สามารถกั้นได้ เนื่องจากรังสีแอลฟาสามารถทำให้สารที่ผ่านแตกตัวเป็นไอออนได้ดี จึงเสียพลังงาน

อย่างรวดเร็ว โดยธาตุที่แผ่รังสีแอลฟาได้นั้นจะมีจำนวนโปรตอนมาก หรือนิวเคลียสมีขนาดใหญ่มากเกินไป ทำให้แรงผลักระหว่างโปรตอนมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียส ตัวอย่างการสลายตัวให้รังสีแอลฟา

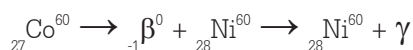


รังสีบีตา (β) คือ รังสีชนิดหนึ่งซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็น -1 เรียกว่า เนกาตรอน (Negatron: β^-) หรือมีประจุไฟฟ้า +1 เรียกว่า โพสิตรอน (Positron: β^+) รังสีบีตามีอำนาจทะลุทะลวงปานกลาง สามารถทะลุทะลวงตัวกลางได้ดีกว่ารังสีแอลฟา ในขณะที่มีพลังงานต่ำกว่า เคลื่อนที่ในอากาศได้ประมาณ 1-3 เมตร สามารถทะลุผ่านน้ำที่ลึกได้ประมาณ 1 นิ้วหรือประมาณความหนาของผิวหนังที่ฝ่ามือได้ และถูกกั้นได้โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมชนิดบาง หรือแผ่นพลาสติก ธาตุที่สลายตัวให้รังสีบีตาได้นั้นจะมีจำนวนนิวตรอนมากเกินไปจะสลายตัวให้ ${}_{-1}^0\beta$ หรือ มีจำนวนนิวตรอนน้อยเกินไป สลายตัวให้ ${}_{+1}^0\beta$ ตัวอย่างการสลายตัวให้รังสีบีตาแสดงได้ดังนี้



รังสีแกมมา (γ) รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้น ที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียส เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียส

ที่ไม่เสถียรหรือจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ มักเกิดร่วมกับรังสีแอลฟาและรังสีบีตา รังสีแกมมามีพลังงานสูงและมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงด้วย ดังนั้นในการป้องกันอันตรายจากรังสีชนิดนี้ต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว คอนกรีตหนาเป็นเครื่องกำบัง ตัวอย่างการสลายตัวให้รังสีแกมมา แสดงได้ดังนี้



ผลทางชีววิทยาของรังสี เราแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม¹⁰ ดังนี้

1. Somatic effects เกิดจากการทำลายเซลล์ธรรมดาของร่างกายและจะเกิดผลต่อผู้ได้รับรังสีเท่านั้น อาจเกิดและแสดงผลเร็วหลังจากได้รับรังสีเรียกว่า “Early somatic effect” ถ้าผลนั้นปรากฏในเวลานานหลังได้รับรังสี เรียกว่า “Late somatic effects” ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น

- ชนิดของรังสี: รังสีแต่ละชนิดมีอำนาจการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อรวมทั้งอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายไม่เท่ากัน เช่น ผู้ที่ได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนในปริมาณที่เท่ากัน การได้รับรังสีแอลฟาจะได้รับอันตรายมากกว่ารังสีเอกซ์ ถึง 20 เท่า เนื่องจากรังสีแกมมามีอำนาจในการทำลายเนื้อเยื่อมากกว่ารังสีเอกซ์ถึง 20 เท่า เป็นต้น
- ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose): ผู้ได้รับรังสียิ่งมาก อันตรายยิ่งเกิดขึ้นมาก
- พลังงานของรังสี: พลังงานของรังสียิ่งมาก อันตรายก็ยิ่งมาก

- การกระจายของปริมาณรังสีที่ได้รับทั้งตัวหรือเฉพาะที่ โดย ICRP ได้แบ่ง Somatic effect เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 Stochastic effects หมายถึง ผลของรังสีที่มีโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติ (โรค) ไม่ใช่ความรุนแรงของความผิดปกติ Stochastic ที่สำคัญ คือ ทำให้เกิดมะเร็งบางชนิด โดยอัตราเสี่ยงของการเกิดขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยไม่กำหนด threshold dose

1.2 Non-stochastic effects หรือ deterministic หมายถึงความรุนแรงของความผิดปกติ (โรค) จะขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยมี threshold dose หมายถึง ปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า threshold dose จะไม่ก่อให้เกิดผลชนิดนี้ขึ้น เช่น ถ้าทารกในครรภ์ได้รับรังสีในปริมาณสูงกว่า 100 มิลลิซีเวิร์ต ในช่วงที่มีอายุ 8-15 สัปดาห์ จะเกิดผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เด็กที่เกิดมามีอาการทางจิตปัญญา (Mental retardation) และอาจเป็นสาเหตุของมะเร็งในวัยเด็ก เมื่อตาได้รับปริมาณรังสี 2,000-5,000

มิลลิซีเวิร์ต เพียงครั้งเดียวจะทำให้เกิดต้อกระจกขึ้นได้ เป็นต้น

2. Genetic effects หรือ Heredity effects ผลทาง Genetic หรือ heredity จะเกิดเมื่อรังสีทำอันตรายต่อเซลล์สืบพันธุ์ (reproductive cells) การทำลายอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (genetic mutation) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากรังสี มักเป็นลักษณะด้อย (recessive) ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมจะปรากฏต่อเมื่อ บิดา มารดา มียีนส์ลักษณะด้อย (recessive genes) ทั้งคู่ เนื่องจากรังสีทำให้เพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ซึ่งจะปรากฏในคนรุ่นถัดไป ฉะนั้นจำต้องให้ความสนใจและมีการควบคุมอย่างเข้มงวดต่อการใช้รังสี ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้

จุดประสงค์ของการป้องกันอันตรายจากรังสีตามที่ ICRP ได้กำหนดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้อันตราย ด้าน Non stochastic effects เกิดขึ้นและจำกัดโอกาสที่จะเกิดผลด้าน stochastic ให้น้อยลง จุดหมายที่จะทำให้บรรลุได้ดังนี้

- กำหนด dose equivalent limits ที่ระดับต่ำที่จะใช้ ไม่ให้ถึงค่า threshold dose แม้ว่าจะได้รับ exposure ในช่วงชีวิตหนึ่ง นั่นคือ ป้องกันไม่ให้เกิด Non - stochastic
- พยายามลด exposure ให้น้อยลงให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ ไม่ให้ dose equivalent limits เกินค่าจำกัดของ stochastic effect

Dose limit

Dose limit หมายถึง ปริมาณรังสีที่บุคคลต่างๆ สามารถรับได้โดยไม่พบสิ่งผิดปกติหรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ ค่าของ dose limit ที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันเป็นค่าที่กำหนดโดย ICRP มุ่งเน้นหลัก การป้องกันรังสีว่า จะต้องให้ได้รับรังสีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (As low As Reasonably Achievable: ALARA) โดยคำนึงถึงสภาพเศรษฐกิจและสังคม ในประเทศไทยได้กำหนดปริมาณรังสีขีดจำกัดไว้ในพระราชกฤษฎีกาว่าด้วย กำหนดเงื่อนไขและวิธีการขอรับใบอนุญาตและการออกใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. 2504 พ.ศ. 2546 เล่ม 120 ตอนที่ 27 ก หน้า 18 โดยเทียบเท่ากับ ICRP Publication 60⁹ และ ICRP Publication 103⁹ แสดงดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตามค่าปริมาณรังสีกำหนดที่บุคคลจะรับได้ (Dose limit) ใช้สำหรับบุคลากรทางรังสีและประชาชนทั่วไป โดยไม่ได้กำหนด Dose limit สำหรับผู้ป่วยที่จะได้รับการตรวจหรือรักษา

ตารางที่ 3 แสดงค่าปริมาณรังสีที่กำหนดที่บุคคลจะรับได้ (Dose limit)⁽⁸⁾

การวัดปริมาณรังสี	ปริมาณกำหนดรังสีที่บุคคลจะรับได้	
	สำหรับผู้ปฏิบัติงานทางรังสี	สำหรับประชาชนทั่วไป
ปริมาณรังสียังผล (Effective dose) ต่อปี	20 mSv/ปี เฉลี่ยใน ช่วง 5 ปีตลอดทั่วร่างกาย ทั้งนี้ในแต่ละปีจะรับรังสีได้ไม่เกิน 50 mSv และตลอดช่วง 5 ปีติดต่อกันจะต้องได้รับรังสีไม่เกิน 100 mSv ^(a)	1 mSv/ปี ^(b)
ปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent dose) ต่อปี		
เลนส์ตา	20 mSv/ปี เฉลี่ยใน ช่วง 5 ปี ทั้งนี้ในแต่ละปีจะรับรังสีได้ไม่เกิน 50 mSv	15 mSv
ผิวหนัง	500 mSv	50 mSv
มือและเท้า	500 mSv	-

(a) นอกจากนี้ยังกำหนดว่า “หญิงมีครรภ์ที่ปฏิบัติงานทางรังสีต้องได้รับปริมาณรังสี ไม่เกิน 1 mSv ตลอดระยะเวลาการตั้งครรภ์ และโดยเฉลี่ยไม่เกิน 0.1 mSv ต่อเดือน”

(b) กรณีพิเศษ Effective dose ยอมให้มีค่าสูงกว่าได้ใน 1 ปีแต่เฉลี่ยแล้วต้องไม่เกิน 1 mSv ในเวลา 5 ปี

เนื่องจากแพทย์เป็นผู้พิจารณาแล้วว่าผู้ป่วยจะได้ประโยชน์ต่อการรักษามากกว่าโทษ โดยแพทย์จะใช้หลักให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุดและก่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุดแก่ผู้ป่วย ทั้งนี้ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยจะได้รับจากการตรวจด้วยเครื่องมือทางรังสีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือและอวัยวะส่วนที่จะตรวจ แสดงดังตารางที่ 4

อันตรายจากรังสี (Radiation Hazard)

อันตรายจากรังสีที่เกิดจากต้นกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย เรียกว่า external radiation hazard แต่ถ้าสารกัมมันตรังสีเข้าไปในร่างกายจะเกิดเป็น internal radiation hazard โดยในงานรังสีวินิจฉัยนั้น ต้นกำเนิดรังสีอยู่ภายนอก¹² ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการควบคุมอันตรายที่เกิดจากต้นกำเนิดที่อยู่ภายนอกเท่านั้น ดังนี้

1. เวลา (Time)

ปริมาณรังสีในบริเวณปฏิบัติงานจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณรังสี (Dose) = อัตรารังสี (Dose rate) × เวลา (Time)

ดังนั้นเมื่อวางแผนการปฏิบัติงานให้สั้น ก็จะทำให้ปริมาณรังสีที่ได้รับน้อยลง

2. ระยะทาง (Distance)

เมื่อพิจารณากรณีต้นกำเนิดรังสีเป็นจุด (point source) อัตราของปริมาณรังสีจะเปลี่ยนแปลงลดลงไปตามระยะทางจากต้นกำเนิดรังสี โดยอัตราของปริมาณรังสีจะลดลงเป็นสัดส่วนกลับ กับระยะทางยกกำลังสอง แสดงดังสมการ

$$D_1 / D_2 = (X_2 / X_1)^2$$

โดย D_1, D_2 คือ Dose rate ที่ระยะ X_1, X_2 ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณ: อัตราปริมาณรังสีที่ระยะทางห่างจากจุดกำเนิดแสง 1 เมตร คือ 400 mSv/hr อยากทราบว่าอัตราปริมาณรังสีที่ระยะ 2 เมตรห่างจากต้นกำเนิดรังสีเป็นเท่าไร

$$D_1 / D_2 = (X_2 / X_1)^2$$

แทนค่าในสมการ $400/D_2 = (2/1)^2$

ดังนั้นอัตราปริมาณรังสีที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี

$$2 \text{ เมตร} = 100 \text{ mSv/hr}$$

3. เครื่องป้องกัน (Shielding)

ในส่วนของผู้เจ้าหน้าที่ กรณีที่ไม่สามารถอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีในระยะปลอดภัย จะต้องใช้เครื่องป้องกันรังสี โดยต้องเลือกใช้วัสดุป้องกันให้เหมาะสมกับชนิดของพลังงานของรังสี เช่น สวมเสื้อตะกั่ว และอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่บริเวณไทรอยด์ ขณะทำการตรวจด้วยเครื่องส่องทางรังสี

ตารางที่ 4 แสดงค่าปริมาณรังสียังผล (Effective Radiation Dose) ในผู้ป่วย¹¹

กระบวนการตรวจทางรังสี	ปริมาณรังสียังผลเฉลี่ย (mSv)	ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากกระบวนการตรวจทางรังสี คิดเทียบเป็นปริมาณรังสีที่ได้รับจากสิ่งแวดล้อม
เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography, CT)		
- ช่องท้องและอุ้งเชิงกราน	10 mSv	3 ปี
- ทรวงอก	7 mSv	2 ปี
- สมอง	2 mSv	8 เดือน
- กระดูกสันหลัง	6 mSv	2 ปี
การตรวจพิเศษทางรังสีของระบบทางเดินปัสสาวะ (Intravenous Pyelogram)	3 mSv	2 ปี
การตรวจเอกซเรย์เต้านม (Mammogram)	0.4 mSv	7 สัปดาห์
การตรวจเอกซเรย์ทั่วไป (General X-ray)		
- ทรวงอก	0.1 mSv	10 วัน
- กระดูกกระยางค์ เช่น มือ เท้า เป็นต้น	0.001 mSv	3 ชั่วโมง

ปรัชญาของการป้องกันอันตรายจากรังสี ของ ICRP¹³ คือ

1. Justification of Practice: จะพิจารณาใช้รังสีต่อเมื่อได้ประโยชน์ (benefit) มากกว่าความเสี่ยง (Risk)

2. Optimization of Protection: การใช้รังสีจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากรังสีให้เกิดประโยชน์มากกว่าที่จะกระทำได้ โดยยึดหลักความปลอดภัยแก่ผู้ป่วยและบุคลากรทางรังสีเป็นสำคัญ โดยยึดหลัก ALARA (As Low As Reasonably Achievable) เป็นสำคัญ ได้แก่

ระยะเวลา (Time): ปริมาณรังสี แปรผันตาม ระยะเวลา ดังนั้นควรใช้ระยะเวลาให้น้อยที่สุด

ระยะทาง (Distance): ปริมาณรังสี แปรผันผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง เมื่อระยะทางเพิ่มเป็น 2 เท่า ปริมาณรังสีลดลง 4 เท่า

อุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding): การใช้อุปกรณ์กำบังรังสีที่เหมาะสมกับประเภทของรังสี สามารถช่วยลดปริมาณรังสีให้กับผู้ป่วยได้

3. Individual dose Limits: การให้ปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วยควรที่จะมีการวางแผนการให้ปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วยแต่ละรายอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีเกินขีดจำกัด ที่คณะกรรมการป้องกันอันตรายจากรังสีแนะนำไว้

มาตรการการป้องกันอันตรายจากรังสีและความปลอดภัย ขณะปฏิบัติงานรังสีวินิจฉัยสำหรับผู้ป่วย¹⁴ มีดังนี้

● ใช้ปริมาณรังสีน้อยที่สุดเท่าที่ควรจะได้รับ โดยใช้หลักของ ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

● ทวนสอบคำสั่งเอกซเรย์กับพยาธิสภาพและการทวนชื่อนามสกุล ของผู้ป่วยก่อนการได้รับการเอกซเรย์ทุกครั้ง

● ป้องกันรังสีให้กับอวัยวะของผู้ป่วย ในส่วนที่ไม่ได้รับการตรวจด้วยอุปกรณ์ป้องกันรังสี เช่น อุปกรณ์ป้องกันรังสีที่บริเวณอวัยวะสืบพันธุ์ (Gonad shield) อุปกรณ์ป้องกันรังสีที่บริเวณไทรอยด์ (Thyroid shield) เป็นต้น

● ในกรณีผู้ป่วยเด็กที่ไม่ได้ทำการตรวจบริเวณช่องท้องส่วนล่าง ควรใช้อุปกรณ์ป้องกันรังสีบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์

● มีการใช้อุปกรณ์จำกัดลำรังสี (Collimator) เฉพาะส่วนที่ต้องการตรวจ การจำกัดขอบเขตเพื่อป้องกันการได้รับรังสีมากเกินไปตามขนาดความจำเป็น โดยการเปิดขนาดของขอบเขตของลำรังสีตามขนาดของอวัยวะที่ต้องการตรวจ เพื่อให้ได้รับรังสีน้อยที่สุดและได้ภาพเอกซเรย์ที่มีคุณภาพชัดเจนที่สุด

● มีป้ายคำเตือน “รังสีมีผลต่อทารกในครรภ์ หากสงสัยมีครรภ์กรุณาแจ้งเจ้าหน้าที่” หน้าห้องเอกซเรย์

● สอบถามประวัติการมีประจำเดือนครั้งสุดท้าย สำหรับผู้ป่วยหญิง วัยเจริญพันธุ์และยึดหลัก “10 days rule” ในการปฏิบัติงาน โดยนับจากวันแรกของการมีประจำเดือน ไป 10 วัน จะเป็นช่วงที่ปลอดภัยจากการตกไข่ จึงแน่ใจว่าไม่สามารถตั้งครรภ์ได้ ซึ่งเป็นช่วงเวลาปลอดภัยสำหรับการตรวจทางรังสีวินิจฉัย

- กรณีผู้ป่วยตั้งครุฑและมีความจำเป็นต้องทำการตรวจเอกซเรย์และไม่ได้ทำการตรวจบริเวณช่องท้อง ต้องทำการป้องกันรังสีด้วยแผ่นตะกั่วป้องกันรังสีบริเวณครุฑด้วยทุกครั้ง
- มีการป้องกันรังสีให้ญาติ หรือผู้ติดตาม ในกรณีที่ต้องให้จับผู้ป่วยที่ได้รับการเอกซเรย์ด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันรังสี เช่น เสื้อตะกั่ว ถุงมือตะกั่ว และแว่นตากันรังสี
- มีข้อมูลปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจากการถ่ายภาพรังสี (Patient dose)
- มีตารางเทคนิคการให้ปริมาณรังสี (Technical chart) หรือโปรโตคอล (Protocol) ติดตั้งอยู่ในพื้นที่ห้องควบคุมเครื่องกำเนิดรังสี เพื่อผู้ปฏิบัติงานใช้เป็นแนวทางปฏิบัติงานได้
- เจ้าหน้าที่ได้รับการฝึกอบรมช่วยฟื้นคืนชีพขั้นพื้นฐาน (Cardio-Pulmonary Resuscitation: CPR) เพื่อให้การช่วยเหลือผู้ป่วยกรณีเกิดภาวะฉุกเฉิน
- มีแนวทางการปฏิบัติงานหรือคู่มือการปฏิบัติงาน เกี่ยวกับความปลอดภัยในกรณีที่มีการตรวจพิเศษด้วยสารทึบแสงหรือสารเปรียบต่าง (Contrast media) และมีการจัดเตรียม Emergency set ที่พร้อมใช้งานไว้ในห้องตรวจทางรังสีก่อนการให้บริการ
- มีระบบการเฝ้าระวังดูแลผู้ป่วยขณะรอรับบริการอยู่ในพื้นที่ขณะให้บริการถ่ายภาพรังสี และขณะเคลื่อนย้ายส่งต่อผู้ป่วย เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุหรือได้รับบาดเจ็บขณะมารับบริการ เช่น การป้องกันผู้ป่วยตกเตียง มีอุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนย้ายผู้ป่วย เช่น Patient Pat Slide
- เครื่องมือและห้องทางรังสีวิทยาที่ติดตั้งใช้งานต้องมีคุณภาพ ได้รับการตรวจตามมาตรฐานจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข และได้รับการตรวจสอบเครื่องมือเป็นประจำเพื่อตรวจสอบสภาพความพร้อมใช้งาน
- เครื่องมือทางรังสีวิทยาและอุปกรณ์ ได้รับการบำรุงรักษาตามห้วงเวลาที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอ
- มีคู่มือการใช้งานรวมทั้งมีการจัดเก็บข้อมูลต่างๆ ของแต่ละเครื่องให้เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีสามารถเข้าถึงได้
- มีแผนอัปเดต โดยมีการซ่อมตามแผนอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง มีการแสดงป้ายสัญลักษณ์ที่จำเป็น เช่น ทางหนีไฟ ติดตั้งอุปกรณ์ที่จำเป็น และพร้อมใช้งานมีการติดตั้งถังดับเพลิงที่เหมาะสม เป็นต้น

มาตรการป้องกันอันตรายจากรังสีและความปลอดภัย ขณะปฏิบัติงาน สำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานรังสีวินิจฉัย¹⁴ มีดังนี้

- ปฏิบัติงานตามหลัก ALARA คือ เวลา ระยะทาง และเครื่องกำบังรังสี
- ในระหว่างการปฏิบัติงานทางรังสีต้องติดอุปกรณ์วัดรังสีประจำบุคคลทุกครั้ง เพื่อเป็นการเฝ้าระวังและประเมินค่าความเสี่ยง ไม่ให้เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี ได้รับปริมาณรังสีเกินกว่าค่าที่กำหนด (Dose limit) หากเจ้าหน้าที่ท่านใดได้รับปริมาณรังสีสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด คณะกรรมการความปลอดภัยทางรังสีจะเข้าดำเนินการสอบสวนหาสาเหตุที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งให้คำแนะนำแก่ผู้ปฏิบัติงาน ในการป้องกันอันตรายจากรังสี และติดตามผลปริมาณรังสีบุคคลที่ผู้ปฏิบัติงานคนดังกล่าวอย่างใกล้ชิด
- มีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสี เช่น เสื้อตะกั่ว ฉากตะกั่ว แผ่นตะกั่ว แว่นตากันรังสี เป็นต้น โดยอุปกรณ์กำบังรังสีควรเลือกใช้เสื้อตะกั่วที่มี 2 ชั้นเพื่อกระจายน้ำหนัก ความหนาของตะกั่ว 0.25 มม. เมื่อซ้อนทับเป็น 0.5 มม. ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง สามารถลดปริมาณรังสีได้มากกว่าร้อยละ 90 ส่วนแว่นตาทำด้วยกระจกตะกั่วที่มีการป้องกันรังสีที่มาจากด้านหน้าและด้านข้างหรือการป้องกันรังสีที่ต่อมไทรอยด์
- หากปฏิบัติงานภายในห้องที่มีรังสีทุกครั้ง ควรสวมเสื้อตะกั่วและ อุปกรณ์ป้องกันรังสีที่บริเวณไทรอยด์ เป็นต้น
- ขณะถ่ายภาพรังสี เจ้าหน้าที่จะต้องมีฉากกันรังสีทุกครั้งและไม่ยื่นส่วนใดออกมาจากนอกฉาก โดยไม่จำเป็น
- ถ้ามีความจำเป็นต้องจับตัวผู้ป่วยขณะถ่ายภาพรังสี ควรให้ญาติหรือผู้อื่นที่ไม่ได้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีเป็นผู้จับ และต้องสวมเสื้อและใส่ถุงมือกันรังสีทุกครั้ง
- เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบต่างๆเกี่ยวกับรังสี ต้องได้รับการดูแลอย่างสม่ำเสมอให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยและใช้งานได้ตลอดเวลา
- มีวัสดุ เวชภัณฑ์ และสิ่งที่เป็นด้านความปลอดภัย พร้อมใช้ในแผนก เช่น หน้ากากอนามัย ถุงมือ แอลกอฮอล์เช็ดมือ อ่างล้างมือ เป็นต้น
- มีแนวทางในการทำงานเมื่อต้องสัมผัสสารเคมี อย่างถูกต้อง ปลอดภัย

มาตรฐานความปลอดภัยด้านสถานที่และสิ่งแวดล้อมในงานรังสีวินิจฉัย¹⁴ ดังนี้

- จัดเตรียมพื้นที่รองรับบริการให้เพียงพอและมีความปลอดภัยจากรังสี
- มีพื้นที่ลงทะเบียน รับ-ส่ง เอกสารรวมทั้งผู้ป่วย และมีความปลอดภัยจากรังสี
- กำแพงทุกด้านของห้องตรวจทางรังสี สามารถป้องกันรังสีได้ในระดับที่ปลอดภัย และมีการแสดงปริมาณรังสี เพื่อเตือนให้บุคลากรทั่วไปได้รับทราบ
- มีพื้นที่เก็บเครื่องมือและอุปกรณ์เป็นสัดส่วน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสี เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับควบคุมคุณภาพวัสดุอุปกรณ์การป้องกันรังสี เป็นต้น
- พนักงานจุดควบคุมการเอกซเรย์ อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และสามารถป้องกันรังสีได้ในระดับที่ปลอดภัย มีช่องมองผู้ป่วยที่สามารถมองเห็นผู้ป่วยได้อย่างชัดเจนและสามารถกันรังสีได้
- ประตูเข้าออกห้องตรวจทางรังสีมีขนาดกว้างเพียงพอ เพื่อให้ผู้ป่วยพร้อมอุปกรณ์ช่วยเหลือ เช่น รถนั่ง เพล สามารถผ่านเข้าออกได้สะดวก ประตูสามารถกันรังสีได้ในระดับที่ปลอดภัย สามารถเปิดและปิดได้อย่างสะดวก
- มีการคัดแยกขยะขยะติดเชื้อก่อนส่งไปกำจัด
- มีป้ายและสัญลักษณ์ต่างๆ ได้แก่
 1. ป้ายแสดงบริเวณรังสี
 2. มีสัญญาณไฟแสดงการใช้งานเครื่องกำเนิดรังสี ติดไว้ด้านนอกบริเวณ ทางเข้าห้องตรวจทางรังสี
 3. ป้ายคำเตือนผู้ป่วยที่มีครรภ์ หรือสงสัยว่าจะมีครรภ์ ให้แจ้งแก่ผู้ปฏิบัติงาน

มาตรการด้านการประกันคุณภาพ¹⁴ (Quality Assurance)

- มีการดำเนินการประกันคุณภาพที่ครอบคลุมทั้งการควบคุมคุณภาพและการบริหารจัดการ ได้แก่
- มีการวิเคราะห์ฟิล์มเสียและแผนการแก้ไขปรับปรุง
 - การควบคุมคุณภาพเครื่องมือทางรังสีวิทยา
 - 1) การซ่อมบำรุงตามระยะเวลา
 - 2) การควบคุมคุณภาพโดยนักรังสีเทคนิค
 - การตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ป้องกันรังสี อย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง
 - 1) รอยแตก (Crack)

- 2) การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual check)
- 3) บันทึกการบำรุงรักษา

● มีเอกสารบันทึกประวัติบำรุงรักษา และซ่อมบำรุงอย่างต่อเนื่อง

● มีการบริหารจัดการห้องเก็บพัสดุ และการเบิกจ่ายวัสดุและอุปกรณ์ เช่น

- 1) การควบคุมสถานะแวดล้อมห้องเก็บพัสดุที่เหมาะสม
 - 2) มีระบบการเบิกจ่ายแบบเข้าก่อน-ออกก่อน
 - 3) มีการป้องกันเข้าถึงพัสดุของบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้อง
 - 4) มีการบันทึกการเก็บและการเบิกจ่ายพัสดุ
- มีการตรวจสอบคุณภาพถ้ายรังสีก่อนส่งมอบให้แพทย์
- 1) ข้อมูลผู้ป่วยบนภาพถ่ายรังสี ชัดเจน ครบถ้วน ถูกต้อง
 - 2) คุณภาพของภาพถ่ายรังสีต้องถูกต้องตามหลักวิชาการ

สรุป

รังสีมีประโยชน์อย่างมากในวงการแพทย์ การใช้รังสีอย่างเหมาะสมในการตรวจและรักษาผู้ป่วยเป็นสิ่งสำคัญ ที่ผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีจะต้องตระหนัก โดยใช้หลักการป้องกันอันตรายจากรังสีที่สำคัญคือ จะพิจารณาใช้รังสีต่อเมื่อได้ประโยชน์มากกว่าความเสี่ยง การใช้รังสีจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากรังสีให้เกิดประโยชน์มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ โดยยึดหลักความปลอดภัยแก่ผู้ป่วยและบุคลากรทางรังสีเป็นสำคัญ นอกจากนี้ การให้ปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วย ควรที่จะมีการวางแผนการให้มีปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วยแต่ละรายอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีเกินขีดจำกัดที่คณะกรรมการป้องกันอันตรายจากรังสีแนะนำไว้

เอกสารอ้างอิง

1. Reisz JA, Bansal N, Qian J, Zhao W, Furdul CM. Effects of ionizing radiation on biological molecules mechanisms of damage and emerging methods of detection. *Antioxid Redox Signal*. 2014;21(2):260-92.
2. World Health Organization. Ionizing radiation, health effects and protective measures [Internet]. 2016 [cited 2019 Sep 28]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.
3. Gordon E. 5.4: Ionizing radiation and non-ionizing radiation [Internet]. 2019 [cited 2019 Sep 30]. Available from: <http://chem.libretexts.org/link?85161>

4. Caer SL. Water radiolysis: influence of oxide surfaces on H₂ production under ionizing radiation. *Water*. 2011;3(1);235-53.
5. The National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) reports 116. Limitation of exposure to ionizing Radiation. Bethesda, MD: NCRP Publications; 1993.
6. The International Commission on Radiological Protection Publication 119. Compendium of dose coefficients base on ICRP publication 60. Essen: Elsevier; 2012.
7. The International Commission on Radiological Protection Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon; 1977.
8. The International Commission on Radiological Protection Publication 60. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon; 1990.
9. The International Commission on Radiological Protection. Radiation Protection ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Essen: Elsevier; 2007.
10. Ministry of the Environment of Japan. Health Effects of Radiation. Booklet to provide Basic Information Regarding Health Effects of Radiation. Tokyo: Ministry of the Environment of Japan; 2015. p. 77-92.
11. RadiologyInfo Organization. Effective Radiation Dose in Adults [Internet]. 2019 [Cited 2019 Sep 30]. Available from: <https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=safety-xray>.
12. United States Nuclear Regulatory Commission. Radiation protection and the NRC. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2010. p.7-8.
13. International atomic Energy Agency. Radiation protection of the public and the environmental, general safety guide. Series: IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no.GSG-8. Vienna, Austria: IAEA;2018. p. 6-8.
14. International atomic Energy Agency. Radiation protection and safety in Medical uses of ionizing radiation. Series: IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X; no.SSG-46. Vienna, Austria: IAEA; 2018. p. 36-9, 89-121.

