

บทที่ 15

ผลของรังสีต่อระบบชีวภาพ

ปฏิกิริยาของกัมมันตภาพรังสีและระบบชีวภาพส่งผลในรูปของการเปลี่ยนแปลงด้านชีวะ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งร้ายแรง หรือ ไม่ร้ายแรง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ยังแยกเป็นประเภทที่สามารถแสดงผลทันทีทันใด หรือ ใช้เวลานานเป็นปีจึงแสดงอาการ (บางกรณีอาจนานเป็นชั่วอายุคนจึงปรากฏอาการ) โดยทั่วไปโอกาสของการเกิด ชนิดและความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นกับหลายองค์ประกอบ ซึ่งอาจขึ้นกับกัมมันตภาพรังสี และลักษณะสมบัติของมันเองหรือขึ้นกับลักษณะสมบัติด้านชีวภาพของระบบ รายละเอียดที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตลอดจนองค์ประกอบทั้งหมดที่ส่งอิทธิพลนั้นรวมอยู่ในสาขาชีวรังสี (radiation biology) สาขาในบทนี้จะจำกัดเฉพาะแง่ของชีวรังสีที่จำเป็น ในการป้องกันอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีอันอาจเกิดขึ้นได้ในงานทางด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์

กลไกการทำลายชีวภาพ

อาการปรากฏของระบบชีวภาพ เมื่อถูกกัมมันตภาพรังสีนั้นเป็นไปตามขั้นตอนทาง physio-chemical ที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม แยกลำดับขั้นตอน ดังแสดงในรูป 15 -1 ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

(1) เป็นการปลดปล่อยพลังงานกัมมันตภาพรังสี ผลลัพธ์คือก่อให้เกิดอะตอมหรือโมเลกุลของระบบชีวภาพเกิดการแตกตัว หรืออยู่ในสถานะกระตุ้น ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 10^{-12} วินาทีหรือน้อยกว่า

(2) คือขั้นตอนการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งเป็นไปได้ 2 แบบ คือ

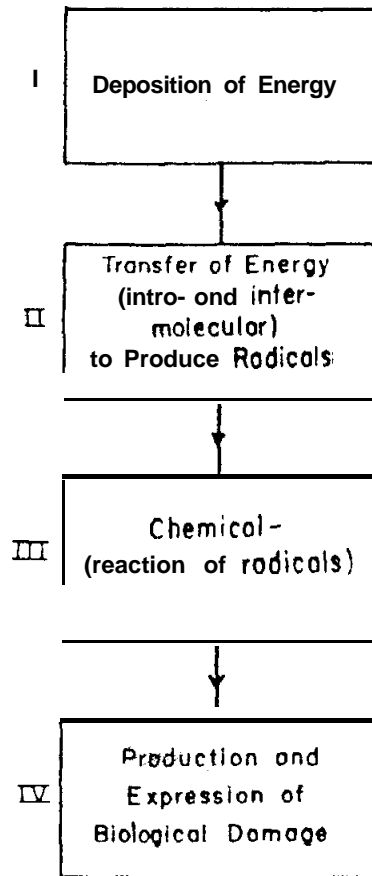
2.1 การส่งผ่านพลังงานให้กับโมเลกุลใกล้เคียง เรียกเป็นการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุล (inter-molecular) หรือ

2.2 ส่งผ่านภายในโมเลกุลเดียวกันนั่นเอง เรียกเป็นการส่งผ่านพลังงานภายในโมเลกุล (intra-molecular) สุดท้ายคือเกิดเรดิคอลลิสระ (free radical) หลหลายรูป คุณสมบัติประจำของสารเหล่านี้คือมีอายุสั้น และไวต่อปฏิกิริยาเคมี ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ $10^{-12} - 10^{-13}$ วินาที

(3) เรดิคอลลิสระจากขั้นตอนที่ (2) จะเกิดปฏิกิริยากับเรดิคอลลิสระด้วยกันเอง หรืออาจเกิดกับสารโมเลกุลชีวภาพ (เช่น DNA, RNA) ซึ่งมักจะเกิดกรณีหลังมากกว่า ผลคือเกิดการเปลี่ยนแปลง การผิดปกติขึ้นในโมเลกุลดังกล่าว ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 10^{-3} วินาที จนถึงหลายวินาที

(4) เป็นการแสดงอาการผิดปกติด้านชีวภาพ ซึ่งก็คือผลเสียหายทางชีวภาพ ทั้งนี้ขึ้นกับสารประเภทโมเลกุลชีวภาพดังกล่าวจะเปลี่ยนไป เวลาในขั้นตอนที่ไม่แน่นอน อาจเกิดได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือยาวนานเป็น

หลายชั่วอายุคนก็ได้ ขึ้นกับชนิดและหน้าที่ของโมเลกุลที่แปรไปดังกล่าว



รูป 15-1 แสดงขั้นตอนต่าง ๆ เมื่อระบบชีวภาพถูกทำลายเนื่องจากรังสีพลังงานสูง

ปัจจัยซึ่งมีอิทธิพลต่อความเสียหายต่อชีวภาพ

การที่รังสีจะส่งผลเสียหายต่อระบบชีวภาพนั้น ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

1. โดสรังสี : (Radiation Dose) อิทธิพลการทำลายด้านชีวะเนื่องจากรังสี ไม่ว่าจะเป็นแบบร้ายแรง หรือไม่ร้ายแรงก็ตาม ขึ้นกับโดสรังสีเป็นสำคัญ โดยทั่วไป ผลเสียหาย หรือผลเสียหายอย่างรุนแรง มักเกิดจากโดสสูงมากกว่าโดสต่ำ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างโดสกับผลที่เกิดขึ้นนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของผลนั้นด้วย ตัวอย่างเช่น โดสที่ก่อให้เกิดมะเร็งย่อมแตกต่างจากโดสที่ก่อให้เกิดการผิดพันธุ์ (genetic mutation) เป็นต้น

ข้อสงสัยที่อาจเกิดขึ้นในใจคือ มีระดับปริมาณโดสรังสีเท่าใดจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้าต่ำกว่าปริมาณนี้จะไม่ส่งผลแบบร้ายแรง แจงได้หรือไม่? คำตอบที่แน่นอนยังไม่ปรากฏ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกรณีก่อให้เกิดมะเร็งและการผิดพันธุ์ โดยทั่วไปถือว่าโดสและผลที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น สำหรับกรณีโดสต่ำ ส่วนขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงซึ่งหมายถึงกรณีได้รับโดสต่ำกว่านี้จะไม่เกิดผลใด ๆ นั้นยังไม่มีผลการทดลอง

2. อัตราโดส : (Dose Rate) ถ้าโดสรังสีปริมาณเท่ากันฉายถูกระบบชีวภาพ 2 ระบบ โดยที่ระบบหนึ่งในช่วงเวลาสั้น (คืออัตราโดสสูง) อีกระบบหนึ่งในช่วงเวลานาน (อัตราโดสต่ำ) การตอบสนองแบบชีวภาพของระบบทั้งสองจะแตกต่างกันอัตราโดสสูงย่อมมีอำนาจทำลายสูงกว่าอัตราโดสต่ำ

3. ชนิดของรังสี : (LET หรือ Type of Radiation) รังสีที่มีค่า LET (linear energy transfer) สูง (เช่น อนุภาคอัลฟา โปรตอน และนิวตรอน เป็นต้น) ย่อมส่งผลเสียหายให้กับระบบชีวภาพได้มากกว่าพวกมีค่า LET ต่ำ (เช่น อิเล็กตรอน รังสีเอ็กซ์และแกมมา ซึ่งเกิดจากการชนกันแบบคอมป์ตันและโฟโตอิเล็กทริก) ค่ายังผลสัมพัทธ์ด้านชีวภาพ (relative biological effectiveness) หรือที่เรียกทับศัพท์เป็น RBE ของกัมมันตภาพรังสี ซึ่งจะส่งผลต่อชีวภาพถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของโดสเอ็กซ์เรย์มาตรฐานซึ่งส่งผลต่อชีวภาพกับโดสของรังสีอื่นที่จะก่อให้เกิดผลเช่นเดียวกับเอ็กซ์เรย์ต่อระบบชีวภาพเดียวกัน ตัวอย่างเช่น นิวตรอน 10 MeV มีค่า RBE ในการทำลายเซลล์ประมาณ 10 กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ นิวตรอน 10 MeV มีผลในการทำลายเซลล์ได้สูงกว่าเอ็กซ์เรย์ 10 เท่า (โดยทั่วไปใช้เอ็กซ์เรย์มาตรฐาน ประมาณ 250 kVp)

4. ชนิดของเนื้อเยื่อ : (Type of Tissues) ระบบชีวภาพใด ๆ ย่อมมีลักษณะการตอบสนองแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของเนื้อเยื่อ (เช่น ตับ ไชกระดูก เนื้อเยื่อประสาท) การฉายรังสีด้วยโดสเท่ากันในอัตราโดสเดียวกันต่อไชกระดูกและเนื้อเยื่อประสาท ไชกระดูกมีความไวต่อรังสีสูงกว่าเนื้อเยื่อประสาท

5. ปริมาณเนื้อเยื่อ : (amount of tissues) การบอบช้ำหรือบาดเจ็บของระบบชีวภาพยังขึ้นกับปริมาณของเนื้อเยื่อที่ถูกฉายรังสี ตัวอย่างเช่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จะมีความทนทานต่อการฉายรังสีเพียงบางส่วนของร่างกายมากกว่าการฉายรังสีทั้งร่างกาย

6. การแปรเปลี่ยนทางชีวภาพ : (Biological Variation) แม้ว่าปัจจัยต่าง ๆ ทั้ง 5 จะคงค่าเช่นเดิม การตอบสนองของระบบชีวภาพยังแปรเปลี่ยนได้ในแต่ละบุคคล เช่น บุคคลหนึ่งอาจมีความทนทานรังสีได้ถึง 1,000 แรด แต่อีกบุคคลหนึ่งอาจทนได้เพียง 200 แรด

7. การแปรทางเคมี : (Chemical Modifiers) กรณีที่ระบบชีวภาพปรากฏสารเคมีบางชนิดเป็นองค์ประกอบอยู่ การตอบสนองต่อรังสีของระบบชีวภาพดังกล่าวจะถูกแปรเปลี่ยนไป เรียกสารเคมีเหล่านี้ว่า chemical modifiers แยกเป็นสารประเภทที่ก่อให้เกิดระบบชีวภาพมีความทนทานต่อรังสี ซึ่งเรียกชื่อเป็น “สารป้องกันรังสี” (radio-protectors) ได้แก่ โปรตีน (protein) ซิสทีน (cystein) เป็นต้น อีกประเภทหนึ่งคือ สารที่มีคุณสมบัติให้ระบบชีวภาพมีความไวต่อรังสี เรียกชื่อเป็น “สารทำให้ไวต่อรังสี” (radio-sensitizers) เช่น โมเลกุลของออกซิเจน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สารเคมีทั้งสองชนิดจะทำหน้าที่ดังกล่าว ต่อเมื่อมันปรากฏอยู่ในระบบชีวภาพขณะที่มีการฉายรังสีเท่านั้น

ผลอันตรายต่อมนุษย์

อันตรายที่เกิดในมนุษย์แยกเป็นประเภทเฉียบพลัน (acute) และระยะยาว (chronic) ผลแบบเฉียบพลัน

จะแสดงอาการภายในช่วงเวลาสั้น ๆ ภายหลังจากได้รับรังสี และลำดับอาการเริ่มจาก มีนวิงเวียนศีรษะ อาเจียน จนถึงสุดท้ายคือเสียชีวิต ส่วนผลแบบระยะยาวอาจใช้เวลานานเป็นช่วงอายุคนจึงจะแสดงอาการ ซึ่งรวมทั้งการกระตุ้นให้เกิดมะเร็งและมะเร็งเม็ดเลือด (leukemia) การพิการแต่กำเนิดและลักษณะผิดปกติต่าง ๆ ในบุคคลที่ถูกรังสี (การทำลายพันธุกรรม) ต้อกระจก อายุสั้นหรือการเป็นหมันชั่วคราวและถาวร เป็นต้น

ผลแบบเฉียบพลัน :

ลักษณะอาการจะเกิดเมื่อได้รับโดสรังสีสูง ซึ่งจะปล่อยพลังงานเข้าสู่ทั่วร่างกายในช่วงเวลาสั้น ๆ อาการทางคลินิกอาจแยกได้เป็น 5 ประเภท โดยโดสรังสีมีลักษณะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนี้

- (1) ไม่มีผลใด ๆ เกิดขึ้น
- (2) ไขกระดูกถูกทำลายปานกลาง
- (3) ไขกระดูกถูกทำลายอย่างรุนแรงและทางเดินอาหารถูกทำลายปานกลาง
- (4) ทางเดินอาหารถูกทำลายอย่างรุนแรง
- (5) เนื้อเยื่อประสาทถูกทำลาย

ตาราง 15-1 แสดงช่วงโดสรังสีซึ่งอาจก่อให้เกิดอาการต่าง ๆ ทั้ง 5 ประเภทดังกล่าว

ตาราง 15-1 โดสกับมัมตภาพรังสีและผลเฉียบพลัน

ระยะ	ช่วงโดส (แรด)	อาการ
I	0 - 200	อาการไม่สามารถสังเกตได้
II	150 - 400	วิงเวียนศีรษะและอาเจียนระบบเลือดถูกทำลายอย่างเด่นชัด ฟื้นตัวในเวลา 1-2 เดือน
III	350 - 600	ระบบเลือดถูกทำลายอย่างรุนแรงมีโอกาสรอดชีวิตปานกลาง
IV	550 - 1,000	ผนังลำไส้ถูกทำลาย วิงเวียนศีรษะอย่างรุนแรง อาเจียนและท้องเสีย โอกาสฟื้นตัวมีน้อย ตายใน 10 - 24 วัน
V	> 1,000	สับสน ช็อคหมดสติ ตายภายในไม่กี่ชั่วโมง

ผลแบบระยะยาว :

กรณีได้รับโดสจนเกิดอาการเฉียบพลันแบบปานกลาง (กล่าวคือ เป็นการถูกโดสรังสีต่ำแบบทั่วหรือเพียงบางส่วนของร่างกาย) สำหรับงานรังสีวินิจฉัย (หมายถึงทั้งงานรังสีวิทยาและเวชศาสตร์นิวเคลียร์) โดสรังสีที่คนไข้ได้รับมักจัดอยู่ในประเภทนี้ ดังนั้น สิ่งที่น่าสนใจคือความสัมพันธ์ของโดสรังสีและอาการระยะยาว

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับการเสี่ยงต่อโดสรังสีต่ำ ๆ หาได้ยาก เนื่องจาก

(1) ผลระยะยาวเนื่องจากโดสต่ำมีโอกาสเกิดได้น้อย ดังนั้นต้องใช้ประชากรจำนวนมากจึงจะถูกต้องตามวิธีทางสถิติ ซึ่งยากในทางปฏิบัติ

(2) ระยะแฝงในผลแบบระยะยาว ต้องติดตามผลในช่วงระยะเวลานาน ๆ เช่น 10 ปีหรือนานกว่า

(3) ผลระยะยาวอาจเกิดได้เองตามธรรมชาติ แต่ข้อมูลจากกรณีดังกล่าวนี้ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นยากที่จะทำนายอิทธิพลของโดสต่ำ ๆ นอกจากนี้ ความถี่ของการเกิดอาการตามธรรมชาติ ยังขึ้นกับองค์ประกอบซับซ้อนอีกมาก เช่น อายุ เพศ ประวัติทางพันธุกรรม ภูมิประเทศ และสภาพแวดล้อมด้านจิตใจ รวมทั้งองค์ประกอบทางเศรษฐกิจสังคม (socioeconomic factors)

ผู้อ่านหลายท่านคงสงสัยว่า ถ้ารายละเอียดดังกล่าวเป็นจริง ข้อมูลเกี่ยวกับการเสี่ยงเป็นมะเร็งชนิดต่าง ๆ (ดังปรากฏในตาราง 15-2) ได้จากแหล่งไหน? อธิบายที่มาของข้อมูลได้ 2 เหตุผลดังนี้

(1) การ extrapolate ทำนายโดยอาศัยผลการทดลองจากสัตว์ทดลอง เช่น หนู

(2) การศึกษาย้อนหลัง (retrospective) จากกรณีระเบิดปรมาณูที่เมืองนางาซากิและเมืองฮิโรชิมา

การศึกษาจากชาวหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก รวมทั้งพวกใส่ชุดอาบน้ำแบบบิกินี (bikini) ซึ่งบุคคลดังกล่าว จะได้รับรังสี อาจเนื่องจากฝุ่นกัมมันตรังสี บุคคลได้รับรังสีจากงานด้านการแพทย์ และผู้มีอาชีพเกี่ยวข้องกับกัมมันตรังสี เช่น คนงานเหมืองยูเรเนียมและพนักงานรังสี เช่น นักรังสีวิทยา กล่าวได้ว่าบุคคลประเภทเหล่านี้ ได้รับรังสีเนื่องจากอาชีพ

เมื่อพิจารณาผลระยะยาวทั้งหมดที่อาจเกิดนั้น ประการสำคัญที่สุดได้แก่การก่อให้เกิดมะเร็งและการทำลายพันธุกรรม จากตาราง 15-2 การเสี่ยงเป็นทั้งค่าสัมบูรณ์และค่าสัมพัทธ์ ค่าสัมบูรณ์ได้จากประมาณจำนวน

ตาราง 15-2 ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งซึ่งเกิดจากรังสี

Type	Relative Risk (% Increased/rad)	Absolute Risk (cases/10 ³ /yt/rad)
Leukemia	2-3	1-2
Thyroid	- +	1.6-9.3*
Bone	0.7-1.4	0.1-0.5
Skin	0.3 or Less	-
Breast	0.8	3-10
Lung	0.3-0.5	1-2
All Others		0.5-1

* In children; in adults it is probably a lower value
+ No figures available

รายที่เป็นมะเร็งซึ่งเป็นค่าต่อปี เนื่องจากได้รับโดส exposure 1 แรด ในบุคคล 1 ล้านคน ส่วนค่าสัมพัทธ์เป็นเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มอัตราเสี่ยงเมื่อเทียบกับรายที่ปรากฏอาการตามธรรมชาติ จากตาราง 15-2 สรุปได้ว่า ในปัจจุบัน ลักษณะอาการก่อให้เกิดมะเร็งทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 ราย/ปี/แรด/ 10^6 คน

ส่วนข้อมูลเกี่ยวกับการทำลายพันธุกรรม ได้จากผลการทดลองในแมลงวันผลไม้แถบเมดิเตอร์เรเนียน เรียกชื่อเป็น “ดรอโซฟิลา” (drosophila) และจากหนู (mice) โอกาสการทำลายพันธุกรรมอาจทำนายได้โดยใช้วิธีการเดียวกับการก่อให้เกิดมะเร็ง ถ้าจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นในการเสี่ยงของผู้ป่วยในช่วงอายุคน ค่าคาดคะเนประมาณ 0.1-1% สำหรับเอ็กซ์โพเชอร์ 1 แรด ต่อชั่วอายุคน

ผลของรังสีต่อตัวอ่อน :

embryo และ fetus ถูกรังสีทำลายได้ง่ายกว่าผู้ใหญ่ ซึ่งในช่วงอายุของการเป็นทารก รังสีอาจทำให้ทารกตายและก่อให้เกิดมะเร็ง ทำให้อ้วนและมีพฤติกรรมผิดปกติ และมีโครงสร้างผิดปกติ (malformation) ระยะที่ไวที่สุดต่อการเกิดอาการผิดปกติดังกล่าว ได้แก่ ช่วงตั้งครรภ์ อาทิตย์ที่ 2 ถึง 10 (คือในช่วงเวลา 3 เดือนแรก) แม้การเอ็กซ์โพเชอร์ในช่วงอายุดังกล่าว ถ้าโดสต่ำกว่า 5 แรด อาจก่อให้เกิด gross congenital malformations ถ้าต่ำกว่า 5 แรด ทารกอาจมีโอกาสมะเร็งมากขึ้น ในปัจจุบันคาดว่าปีประมาณ 500 รายที่ตายก่อนอายุ 10 ปี สำหรับเด็ก 1 ล้านคน ถูกฉายแสงในช่วงเวลาสั้นก่อนเกิดด้วยโดส 1 แรด