บทที่ 7
การคำนวณโดสรังสี

เป็นที่ทราบดีว่ากัมมันตรังสีมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเทคนิคเวชศาสตร์นิวเคลียร์ต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ที่เกิดต่อผู้ป่วยโดยให้มีการเสี่ยงน้อยที่สุด ความแรงของโดสรังสีที่ให้ผู้ป่วยนั้นนับว่ามีผลอย่างยิ่งต่อความเข้ม หรือโอกาสของการเกิดผลกระทบอันเนื่องจากรังสี ดังนั้น ถ้าทราบโดสรังสีที่ปล่อยให้ผู้ป่วยจะสามารถคำนวณผลที่อาจเกิดกับผู้ป่วยได้ ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการต่าง ๆ ของการหาโดสรังสีที่ผู้ป่วยได้รับทั้งจากการดื่มหรือฉีดนิวไคลด์รังสีและเภสัชรังสี

สำหรับเทคนิคทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ยากที่จะวัดโดสรังสีได้โดยตรงจากการใช้เครื่องนับวัด (detector) วิธีการที่ใช้คือคำนวณโดยอาศัยข้อมูลด้านฟิสิกส์และชีวภาพ จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่จัดสร้างเพื่อการนี้โดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามข้อยุ่งยากเกิดจากหลายองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลด้านชีวภาพที่ได้นั้นไม่ถูกต้อง ทั้งยังเป็นการยากที่จะได้ค่าถูกต้อง ในทางปฏิบัติทำโดยการประเมิน (extrapolate) ข้อมูลจากสัตว์ทดลอง บางกรณีได้ข้อมูลจากมนุษย์แต่ก็มีขีดจำกัดมาก

ตาราง 7-1 ขนาดมวล (น้ำหนัก) อวัยวะของคนมาตรฐาน

อวัยวะ	มวล (กรัม)
ตลอดร่างกาย	70,000
กระเพาะปัสสาวะ	509
ไต (2 ข้าง)	288
ตับ	1,833
ปอด	999
รังไข่ (2 ข้าง)	8.8
ตับอ่อน	61
กระดูกและไขกระดูก	10,091
ม้าม	176
กระเพาะอาหาร	402
อัณฑะ	38
ธัยรอยด์	20

2. ในทางปฏิบัติ ถ้าเป็นงานประจำอาจมีการเพิ่มตัวแปรในการคำนวณ เพื่อให้ได้ข้อมูลใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ตัวอย่างเช่นการกระจายของรังสีอย่างทั่วถึง การที่อวัยวะบางส่วนมีการจับเภสัชรังสีหรือการกำจัดรังสีโดยกลไกทางชีวภาพ (ซึ่งเป็นเส้นกราฟเอกซ์โพเนนเชียลในกรณีปกติ)

3. การคำนวณโดสรังสี มักกระทำโดยตั้งสมมุติฐานจากมนุษย์ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็น "มนุษย์มาตรฐาน" (standard man) ในตาราง 7.1 แสดงน้ำหนักของอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งในบางกรณีอาจแตกต่างไปจากข้อมูลดังกล่าวบ้าง

เห็นได้ว่า ถ้ารวมปัจจัยต่าง ๆ ทั้งสามดังกล่าวข้างต้น ย่อมก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการคำนวณโดสรังสี ดังนั้นข้อมูลที่ปรากฏทั่วไป ทั้งในหนังสือนี้และจากแหล่งข้อมูลทั่วไปอื่น ๆ จึงถูกเสนอในรูปของโดสค่าเฉลี่ย ปัญหาคือจะนำไปใช้กับกรณีพิเศษได้อย่างไร? คำตอบที่แน่นอนคือจะต้องสร้างสัมประสิทธิ์หรือองค์ประกอบอื่นขึ้นมา อาจเป็นหนึ่งหรือสอง หรือมากกว่าขึ้นไปก็ได้แล้วแต่กรณี

นิยาม :

ก่อนจะทำการคำนวณโดสรังสี จะต้องทราบความหมายของ "โดสรังสี" (radiation dose) และ "อัตราโดสรังสี" (radiation dose-rate)

โดสรังสี :

โดสรังสี (radiation dose) แทนด้วยอักษร D คำเต็มคือโดสรังสีที่ถูกดูดกลืน (absorbed dose) เป็นการวัดปริมาณพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืนทั้งหมด หน่วยที่ใช้วัดคือ "แรด" (rad) ถูกนิยามเป็นพลังงานที่ถูกดูดกลืน 100 เอิร์ก (ergs) ต่อ 1 กรัมของเนื้อเยื่อหรือสารใด ๆ ถ้าทราบพลังงานที่ถูกดูดกลืนในหน่วยเอิร์ก/กรัม สามารถหาค่าโดสรังสีได้โดยหารปริมาณดังกล่าวด้วย 100 กล่าวคือ

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gm}$$

หน่วย SI คือเกรย์ (Gray) แทนด้วยอักษร Gy โดย

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ gray}$$

$$\text{หรือ} \quad 1 \text{ gray} = 100 \text{ rad}$$

อัตราโดสรังสี :

อัตราโดสรังสี (radiation dose-rate) มักแทนด้วย $\frac{dD}{dt}$

ถูกนิยามเป็นปริมาณพลังงานถูกดูดกลืนทั้งหมดต่อหน่วยเวลาต่อกรัมเนื้อเยื่อ หน่วยที่ใช้ได้แก่ แรด/นาที (rads per minute) แรด/ชม. (rads per hour) และ แรด/วัน (rads per day) เป็นต้น

พารามีเตอร์หรือข้อมูลที่จำเป็น

เป็นที่รู้จักแพร่หลายว่า เทคนิคของเวชศาสตร์นิวเคลียร์คือการให้กัมมันตภาพรังสีซึ่งทราบปริมาณแน่นอน (เรียกทั่วไปว่า เภสัชรังสี) ให้กับผู้ป่วย ดังนั้น ย่อมมีการกระจายของกัมมันตรังสีส่วนหนึ่งไปอยู่ภายในอวัยวะที่สนใจ สมมุติให้มีปริมาณเป็น f สิ่งที่สนใจคือ โดสรังสีที่ถูกปล่อยให้กับอวัยวะดังกล่าว และในบางกรณีอาจโยงไปถึงอวัยวะอื่น ๆ อีกด้วย ดังนั้นข้อมูลอาจแยกได้ 2 ลักษณะ คือ

(1) เป็นข้อมูลที่สัมพันธ์กับลักษณะสมบัติการสลายตัวของนิวไคลด์รังสี

(2) เป็นข้อมูลที่สัมพันธ์กับการกระจายและการกำจัดเภสัชรังสีแบบชีวภาพ

ตาราง 7-2 พารามีเตอร์ต่าง ๆ และสัญลักษณ์ที่ใช้คำนวณโดสรังสี

พารามีเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย
รังสีใด ๆ	i	
พลังงานของรังสี	E_{i_1}	MeV
ความถี่ในการเปล่งรังสี	n_i	Per decay
ค่าคงที่โดสสมบูรณ์ของรังสี i	Δ_i	g . rad/μCi . h
ปริมาณรังสีทั้งหมด	n	
ส่วนที่ถูกดูดกลืน	$\Phi_i(T \rightarrow S)$	
อวัยวะเป้า	T	
อวัยวะต้นกำเนิด	S	
อัตราโดส ณ เวลา t	$\frac{dD}{dt}$	rad/hr
โดส (ที่ถูกดูดกลืน)	D	rad
กัมมันตภาพรังสี ณ เวลา t	A(t)	μCi
กัมมันตภาพรังสี ณ เวลา o	Ao	μCi
น้ำหนักของอวัยวะเป้า	M	gm
ค่าครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์	$T_{1/2}$	hr.
ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ	$T_{1/2}$(Bio)	hr.
ค่าครึ่งชีวิตยังผล	$T_{1/2}$(eff)	hr.
ส่วนของกัมมันตภาพรังสีที่จับอยู่ในอวัยวะ	f	

ตาราง 7.2 ได้นำเสนอพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดังกล่าว มีบางพารามิเตอร์ที่ถูกนิยามไว้แล้วในบทที่ 2 และ 3

การคำนวณโดสรังสี :

ในการคำนวณโดสรังสีซึ่งบุคคลหนึ่ง ๆ ได้รับนั้น จะต้องหาปริมาณเฉลี่ยของพลังงานถูกดูดกลืน โดยเนื้อเยื่อ 1 กรัม (เป็นเนื้อเยื่อของเป้าหมาย หรืออวัยวะที่เราสนใจ) เปรียบเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ถูกปล่อย โดยการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีที่ทราบปริมาณหรือความแรง การกระจายของกัมมันตภาพรังสีอาจเป็นไปได้หลายกรณี เช่น

1. อาจกระจายอยู่ภายในปริมาตรของเป้า ϒ(T) หรือ
2. ปริมาตรของแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี (S) โดย S อยู่นอก T เสมอ

ขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

(1) หาอัตราการเปล่งพลังงาน (ergs/hr) ของนิวไคลด์รังสีที่กระจายอยู่ในรูปต่าง ๆ ของรังสี

(2) หาอัตราพลังงานที่ปริมาตรของเป้าได้ดูดกลืนไว้

(3) หาค่าเฉลี่ยของอัตราโดส คือ $\frac{dD}{dt}$

(4) หาค่าโดสเฉลี่ย D

เรียกวิธีการคำนวณโดสดังกล่าวเป็น "absorbed fraction method" 3 ขั้นตอนแรกต้องอาศัยข้อมูลทางฟิสิกส์เป็นสำคัญ เช่น ลักษณะสมบัติของการสลายตัว รูปร่างและขนาดของอวัยวะเป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายต้องอาศัยข้อมูลของการกระจายแบบชีวภาพ

อัตราการเปล่งพลังงาน :

เพื่อสะดวกในการศึกษาขั้นต้น สมมุตินิวไคลด์รังสีเปล่งรังสีเพียงชนิดเดียวจึงมีความถี่ของส่วนการเปล่ง = 1 (fractional emission frequency = 1) โดยพลังงานจากการเปล่ง 1 ครั้ง มีค่า E (MeV) จากคำจำกัดความ

$$1\ \mu Ci = 3.7 \times 10^{4}\ dps$$

(หมายเหตุ μCi = ไมโครคิวรี และ dps = decay per sec)

ดังนั้น นิวไคลด์รังสีดังกล่าวจะมีอัตราการเปล่งพลังงานเป็น $3.7 \times 10^{4} \times E$ MeV/sec/μCi ถ้าต้องการแปลงหน่วยพลังงานจาก MeV เป็น ergs ให้อาศัยความสัมพันธ์

$$1\ MeV = 1.6 \times 10^{-6}\ erg$$

และแปลงหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นชั่วโมง (1 ชม. = 3,600 วินาที) อัตราการเปล่งพลังงานนิวไคลด์รังสี 1 ไม

โครคิวรี มีค่าเป็น $3.7 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-6} \times 3{,}600 \times E$ ergs/hr/μCi ซึ่งมีค่าเท่ากับ $213 \times E$ ergs/hr/μCi-

สำหรับกรณีนิวไคลด์รังสีที่เปล่งรังสีมากกว่า 1 พลังงาน สมมุติเป็น 1,2,3,.....,n ซึ่งมีค่าความถี่ของการเปล่งเป็น $n_1,n_2,n_3,.....,n_n$ และมีพลังงานเป็น $E_1,E_2,E_3,.....,E_n$ ตามลำดับ อัตราการเปล่งพลังงานของรังสีแต่ละชนิดจากกัมมันตภาพรังสี 1 μCi มีค่าเป็น $213n_1E_1$ ergs/hr/μCi สำหรับรังสีชนิดที่ 1 และถ้าเป็นรังสีชนิดที่ 2 จะมีค่าเป็น $213n_2E_2$ ergs/hr/μCi

อัตราการดูดกลืนพลังงาน :

จุดประสงค์ในการหาอัตราการดูดกลืนพลังงานในที่นี้เป็นการคำนวณอัตราการดูดกลืนพลังงานของเป้า (target) ซึ่งมีปริมาตร T โดยแหล่งกำเนิดพลังงาน (source) ของนิวไคลด์รังสีมีปริมาตร S เพื่อความสะดวกนิยามให้ส่วนที่ถูกดูดกลืนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\Phi_i(T \leftarrow S)$ หมายถึงอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกเป้าดูดกลืนไว้ (เป้ามีปริมาตร T) โดยรังสี i กระจายอยู่อย่างทั่วถึงในแหล่งกำเนิดซึ่งมีปริมาตร S เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Phi_i(T \leftarrow S) = \frac{\text{ปริมาณพลังงานถูกดูดกลืนในปริมาตร T}}{\text{ปริมาณพลังงานถูกเปล่งออกจากปริมาตร S}}$$

โดยพลังงานทั้งสิ้นหมายถึงพลังงานจากรังสี i

ปัญหาหลักของงานทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์คือ กัมมันตภาพรังสีจะกระจายอยู่ภายในปริมาตรของเป้านั่นเอง กล่าวคือ T มีค่าเช่นเดียวกับ S ดังนั้น Φ_i จึงหมายถึงกรณีที่มีปริมาตรของเป้าเป็นเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิด ถ้ายังคงใช้ค่าอัตราการเปล่งพลังงานรังสี i เป็น $213n_iE_i$ ergs/hr/μCi ดังนั้น อัตราการดูดกลืนพลังงานจากเป้าซึ่งมีปริมาตร T มีค่าเป็น $213n_iE_i\Phi_i(T \rightarrow S)$ ergs/hr/μCi

ถ้ามีรังสีจำนวน n อัตราการดูดกลืนพลังงานทั้งหมดจะเป็นผลรวมของการดูดกลืนแต่ละพลังงาน กล่าวคือ มีค่าเป็น

$$213n_1E_1\Phi_1(T \leftarrow S) + 213n_2E_2\Phi_2(T \leftarrow S) + ...213n_nE_n\Phi_n(T \leftarrow S) \text{ ergs/hr/}\mu\text{Ci}$$

ซึ่งเขียนรวมได้เป็น

$$213 \sum_{i=1}^{n} n_iE_i\Phi_i(T \rightarrow S) \text{ ergs/hr/}\mu\text{Ci}$$

โดย $\sum_{i=1}^{n}$ เป็นผลรวมของนิพจน์ทั้งหมด และ i มีค่าจาก 1 ถึง n

ปัญหาคือจะหาค่าของ $\Phi_i(T \leftarrow S)$ ได้อย่างไร? การหาค่าของส่วนที่ถูกดูดกลืน จะต้องทราบลักษณะการชนกันของรังสีกับวัสดุ (ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่แล้ว) ในกรณีของรังสี เช่น รังสีเบตา conversion electron หรือ อนุภาคอัลฟา เป็นต้น พลังงานที่ปล่อยมาเกือบทั้งหมดจะถูกดูดกลืนอยู่ในปริมาตรที่มันกระจายค่าพลังงานนั่นเอง โดยต้องเป็นกรณีที่แหล่งกำเนิดมีปริมาตรใหญ่กว่า 1 ซม.^{3} ดังนั้น $\Phi_i(T \leftarrow S) = 0$ ถ้า T ไม่เท่า

กับ S ในทางตรงข้าม ถ้า T = S จะได้ค่า $\Phi_i = 1$ ความสัมพันธ์นี้ยังคงใช้ได้กับรังสีเอ็กซ์และแกมมา ที่มีพลังงานน้อยกว่า 10 KeV

สำหรับรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า 10 KeV ค่าของ $\Phi_i(T \leftarrow S)$ จะขึ้นกับองค์ประกอบต่อไปนี้

1. พลังงานของรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา
2. รูปร่างและขนาดของปริมาตรแหล่งกำเนิด
3. รูปร่าง ขนาด และระยะห่างของปริมาตรเป้า

โดยทั่วไป $\Phi_i(T \leftarrow S)$ มักมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง จะเริ่มลดค่าลงเมื่อพลังงานของรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาเพิ่มขึ้น จากนั้นจะมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ

การคำนวณค่าแน่นอนของ $\Phi_i(T \leftarrow S)$ จากกลไกพื้นฐานของการชนกันระหว่างรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมากับวัสดุนั้น จำต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูง วารสาร Journal of Nuclear Medicine ได้ลงพิมพ์ตารางต่าง ๆ ซึ่งแจงค่า $\Phi_i(T \leftarrow S)$ เมื่อรังสีเอ็กซ์หรือแกมมามีพลังงานแปรค่าไป ตาราง 7–3 แสดงส่วนพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยอวัยวะต่าง ๆ ของคนมาตรฐานเมื่อแปรค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ หรือแกมมา (ในอวัยวะเดียวกัน) ทั้งนี้ถือว่า T เป็นค่าเดียวกับ S

ตาราง 7-3 ส่วนของกัมมันตภาพรังสีที่ถูกดูดกลืน Φ_i กรณีพลังงานแกมมามีค่าแตกต่างกันและเป็นค่าในอวัยวะต่าง ๆ

	Energy (keV)						
Organ	15	30	50	100	200	500	1000
Bladder	0.885	0.464	0.201	0.117	0.116	0.116	0.107
Stomach	0.860	0.414	0.176	0.101	0.101	0.101	0.093
Kidneys	0.787	0.298	0.112	0.066	0.068	0.073	0.067
Liver	0.898	0.543	0.278	0.165	0.158	0.157	0.144
Lungs	0.665	0.231	0.089	0.049	0.050	0.051	0.045
Pancreas	0.666	0.195	0.068	0.038	0.042	0.044	0.040
Skeleton	0.893	0.681	0.400	0.173	0.123	0.118	0.110
Spleen	0.817	0.331	0.128	0.071	0.073	0.077	0.070
Thyroid	0.592	0.149	0.048	0.028	0.031	0.032	0.029
Total Body	0.933	0.774	0.548	0.370	0.338	0.340	0.321

อัตราโดส :

อัตราโดส (dose rate) คือ $\frac{dD}{dt}$ อาจคำนวณได้โดยอาศัยค่าอัตราพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยเป้าหารด้วยมวล M ของเป้า ซึ่งค่านี้คือ อัตราพลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อหนึ่งกรัมของเนื้อเยื่อซึ่งถ้าหารด้วย 100 (จุดประสงค์เพื่อแปลงหน่วย erg/gm เป็น rad) จะได้เป็นค่าอัตราโดสของแต่ละไมโครคิวรี นั่นคือ อัตราโดสต่อ μCi ของกัมมันตภาพรังสีซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{213 \sum_{i=1}^{n} n_i E_i \Phi_i (T \leftarrow S)}{100 \times M} \quad \text{rad/hr/}\mu\text{Ci}$$

หรือ $$= \frac{2.13}{M} \sum_{i=1}^{n} n_i E_i \Phi_i (T \leftarrow S) \quad \text{rad/hr/}\mu\text{Ci}$$

ถ้าปริมาตรแหล่งกำเนิดประกอบด้วย A(t) μCi ณ เวลา t ดังนั้น อัตราโดส $\frac{dD}{dt}$ จากปริมาณกัมมันตภาพรังสี A(t) กลายเป็น

$$\frac{dD}{dt} = \frac{2.13}{M} \cdot A(t) \cdot \sum_{i=1}^{n} n_i E_i \Phi_i (T \leftarrow S) \quad \text{rad/hr} \quad (1)$$

โดสเฉลี่ย D :

โดสเฉลี่ย (average dose) ในระบบชีวภาพ กัมมันตภาพรังสี A(t) จะถูกกำจัดออกอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าครึ่งอายุยังผล (effective half-life) เป็น $T_{1/2}(eff)$ กล่าวคือ

$$A(t) = A_o \exp \frac{(-0.693\ t)}{T_{1/2}(eff)} \quad (2)$$

เห็นได้ว่า $\frac{dD}{dt}$ จะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา ท้ายสุดจะสู่ค่าศูนย์ สิ่งที่ต้องการทราบคือโดสทั้งหมดที่คนไข้ได้รับนับจากเวลาเริ่มต้น (t=0) จนถึงเวลาที่อัตราโดสถูกลดค่าเป็นศูนย์ หาคำตอบโดยการรวมอัตราโดสจากเวลาศูนย์ถึงอนันต์ หรือ

$$D = \int_0^{\infty} \frac{dD}{dt} \cdot dt$$

ดังนั้น โดสรังสีมีค่าเป็น

$$D(T \leftarrow S) = 2.13 \frac{A_0}{M} \cdot (1.44 T_{1/2}(eff)) \cdot \sum_{i=1}^{n} n_i E_i \Phi_i (T \leftarrow S) \quad (3)$$

กำหนดให้ $$\Delta_i = 2.13 n_i E_i \quad (4)$$

สมการ (3) สามารถเขียนได้

$$(1)\ (T \rightarrow S) = \frac{A_o}{M} \cdot (1.44 \cdot T_{\frac{1}{2}}(eff)) \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta_i \Phi_i\ (T \rightarrow S) \quad (5)$$

ในกรณีที่ T = S สามารถเขียนได้เป็น

$$(1) = \frac{A_o}{M} \cdot (1.44 \cdot T_{\frac{1}{2}}(eff)) \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta_i \Phi_i \quad (6)$$

จากสมการ (6) เห็นได้ว่าถ้าต้องการลดโดสให้กับคนไข้ อาจปฏิบัติโดย

(1) ใช้กัมมันตภาพรังสีปริมาณน้อย ๆ (คือ A_0) หรือ

(2) ใช้เภสัชรังสีที่มีครึ่งชีวิตยังผลสั้น (คือ $T_{1/2}$eff นั่นเอง และ $T_{1/2}$eff จะมีค่าน้อยเนื่องจาก

$T_{1/2}$ หรือ $T_{1/2}(bio)$ มีค่าน้อย)

โดยทั่วไป หลักการคำนวณโดสรังสีที่อวัยวะได้รับนั้น จะต้องคำนึงถึงโดสที่อวัยวะนั้น ๆ ได้รับเองโดยตรงและจากอวัยวะอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งกรณีหลังจะเป็นไปได้เฉพาะรังสีเอกซ์หรือแกมมาที่จะไปรบกวนโดสรังสี

นอกจากนี้ สมการ (5) และ (6) เป็นการคาดว่าอัพเทค (uptake) ในอวัยวะเป็นลักษณะชั่วขณะและการที่กัมมันตภาพรังสีลดไปจากต้นกำเนิดนั้นแทนได้ด้วยพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียลเดี่ยว (single exponential) ตามความเป็นจริงแล้วจะต้องคำนึงถึงโดสสะสม $\tilde{A} = \int_o^\infty A(t)dt$ อีกด้วย ซึ่งจะมีผลให้การคำนวณโดสซับซ้อนยุ่งยาก จึงจะละเว้นการกล่าวถึงรายละเอียด ณ ที่นี้

การคำนวณโดสรังสีอย่างง่ายโดยใช้ "S" แฟคเตอร์

Snyder และคณะได้นิยาม "S" แฟคเตอร์ เพื่อช่วยในการคำนวณโดสสำหรับงานประจำด้านคลีนิค กล่าวคือ เป็นการรวบรวมข้อมูลด้านฟิสิกส์ที่อาจเกิดขึ้นในคนมาตรฐานให้เป็นนิพจน์เดี่ยว ตัวอย่างของข้อมูลด้านฟิสิกส์ ได้แก่ โดสรังสีที่เปล่งจากนิวไคลด์รังสีและถูกดูดกลืนโดยแหล่งกำเนิดหรือเป้าต่างชนิดกัน เขียนในรูปทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$S(T \leftarrow S) = \frac{2.13}{M} \sum_{i=1}^{n} n_i E_i \Phi_i \quad rad/\mu Ci \cdot hr$$

$$\frac{dD}{dt} = A(t) \cdot S(T \leftarrow S) \quad rad/hr \qquad (7)$$

และ

$$D(T \leftarrow S) = \tilde{A} \cdot S(T \leftarrow S) \qquad (8)$$

หรือ

$$= 1.44\ A_o \cdot T_{1/2}(eff) \cdot S(T \leftarrow S)$$

S แฟคเตอร์ ขึ้นกับข้อมูลทางฟิสิกส์เท่านั้น และมีค่าเพียงค่าเดียวสำหรับรังสีหนึ่ง ๆ กับอวัยวะที่กำหนดเฉพาะของคนมาตรฐาน ดังนั้น ในการคำนวณคู่นิวไคลด์รังสีและอวัยวะดังกล่าวจึงต้องกระทำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น Synder และคณะได้ทำการคำนวณค่าดังกล่าวซึ่งส่วนเป็นนิวไคลด์รังสีที่ใช้ในด้านการแพทย์ ตาราง 7 –4 แสดงตัวอย่างค่าของ S แฟคเตอร์ สำหรับ ^{99m}Tc คู่กับแต่ละอวัยวะของคนมาตรฐาน วิธีการคำนวณค่าโดส จากสมการ (8) ทำโดยอ่านค่า S แฟคเตอร์ จากตาราง 7 –4 ทราบค่าบ่งถึงการกระจายของกัมมันตภาพรังสีในอวัยวะที่เป็นแหล่งกำเนิด และค่าครึ่งชีวิตยังผล จากนั้นแทนค่าในสมการ

ตัวอย่างที่ 1 ในการตรวจตับผู้ป่วยตามวิธีการสแกน โดยใช้ ^{99m}Tc ติดฉลากกับ Sulphur colloid ปริมาณ 2 mCi สมมุติว่า 90% ของโดสที่ฉีดเข้าไปนั้นกระจายอยู่ในตับชั่วขณะ ซึ่งค่าครึ่งชีวิตยังผลคือ 6 ชั่วโมง จงคำนวณโดสที่ตับของผู้ป่วยที่จะได้รับ

วิธีคำนวณ

(1) สำหรับกรณีนี้โจทย์ไม่กำหนดค่ามวลของตับ ดังนั้นถือว่ามีค่าเท่ากับของคนมาตรฐาน คือ M = 1,800 กรัม

(2) จากสมการ (6) หาค่าของแต่ละพารามิเตอร์ดังนี้

(3) ปริมาณกัมมันตรังสีเริ่มต้นที่มีในตับมีค่าเป็น

$$A_o = 0.90 \times 2000 \ \mu Ci$$

$$= 1800 \ \mu Ci$$

(4) ค่าครึ่งชีวิตยังผล $T_{1/2}(eff) = 6$ ชม.

(5) อ่านค่า n_i, E_i, Δ_i ของ ^{99m}Tc และ Φ_i ของตับสำหรับ ^{99m}Tc และ $\sum \Delta_i \ \phi_i$ หาค่าจากตาราง 7–5

7 –5

(6) แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (6)

$$Dose\ (liver) = \frac{1800}{1800} \times 1.44 \times 6 \times 0.078$$

$$= 0.67 \ rad$$

ข้อสังเกต : โดสส่วนที่เหลืออีก 10% จะไปอยู่ที่ไหน และมีบทบาทต่อการนับวัดกัมมันตภาพรังสีหรือไม่? คำตอบที่เป็นไปได้คือ

(1) โดสดังกล่าวอาจถูกกำจัดออกจากร่างกายในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือ

(2) เป็นโดสรบกวนอยู่บริเวณตับนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม การรบกวนเช่นที่กล่าวยังเป็นค่าน้อย ๆ จนสามารถละทิ้งได้

ตาราง 7-4 แฟคเตอร์ S กรณี ^{99m}TC ใช้กับคู่อวัยวะที่เป็นเป้าและแหล่งกำเนิดในคน มาตรฐาน

Target \ Source	Bladder Content	Stomach Content	Kidneys	Liver	Lung	Marrow Red	Bone (Av)	Spleen	Thyroid	Total Body
Bladder Wall	1.6×10^{-4}	2.7×10^{-7}	2.8×10^{-7}	1.6×10^{-7}	3.6×10^{-8}	9.9×10^{-7}	5.1×10^{-7}	1.2×10^{-7}	2.1×10^{-9}	2.3×10^{-6}
Bone (Total)	9.2×10^{-7}	9.0×10^{-7}	1.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.5×10^{-6}	4.0×10^{-6}	1.1×10^{-5}	1.1×10^{-6}	1.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}
Stomach Wall	2.7×10^{-7}	1.3×10^{-4}	3.6×10^{-6}	1.9×10^{-7}	1.8×10^{-8}	9.5×10^{-7}	5.5×10^{-7}	1.0×10^{-5}	4.5×10^{-8}	2.2×10^{-6}
Kidneys	2.6×10^{-7}	3.5×10^{-6}	1.9×10^{-4}	3.9×10^{-6}	8.4×10^{-7}	2.2×10^{-7}	0.2×10^{-7}	9.1×10^{-6}	3.4×10^{-8}	2.2×10^{-6}
Liver	1.7×10^{-7}	2.0×10^{-6}	3.9×10^{-6}	4.6×10^{-5}	2.5×10^{-6}	9.2×10^{-7}	6.6×10^{-7}	9.8×10^{-7}	9.3×10^{-8}	2.2×10^{-6}
Lungs	2.4×10^{-8}	1.7×10^{-6}	0.5×10^{-7}	2.5×10^{-6}	5.2×10^{-5}	1.2×10^{-6}	9.4×10^{-7}	2.3×10^{-6}	9.4×10^{-7}	2.0×10^{-6}
Marrows	2.2×10^{-6}	1.6×10^{-6}	3.8×10^{-6}	1.6×10^{-6}	1.9×10^{-6}	3.1×10^{-5}	6.6×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.1×10^{-6}	1.1×10^{-6}
Ovaries	7.3×10^{-6}	5.0×10^{-7}	1.1×10^{-6}	4.5×10^{-7}	9.4×10^{-8}	3.2×10^{-6}	8.5×10^{-7}	4.0×10^{-7}	4.9×10^{-9}	2.4×10^{-6}
Spleen	6.6×10^{-7}	1.8×10^{-5}	8.6×10^{-6}	9.2×10^{-7}	2.3×10^{-6}	9.2×10^{-7}	5.8×10^{-7}	3.3×10^{-4}	1.1×10^{-7}	2.2×10^{-6}
Testes	4.7×10^{-6}	5.1×10^{-8}	8.8×10^{-6}	6.2×10^{-6}	7.9×10^{-9}	4.5×10^{-7}	6.4×10^{-7}	4.8×10^{-8}	5.0×10^{-6}	1.7×10^{-6}
Thyroid	2.1×10^{-9}	0.7×10^{-8}	4.8×10^{-8}	1.5×10^{-7}	9.2×10^{-7}	6.8×10^{-7}	7.9×10^{-7}	8.7×10^{-8}	2.3×10^{-3}	1.5×10^{-6}
Total Body	1.9×10^{-6}	1.9×10^{-6}	2.2×10^{-6}	2.2×10^{-6}	2.0×10^{-6}	2.2×10^{-6}	6.6×10^{-7}	2.2×10^{-6}	1.8×10^{-6}	2.0×10^{-6}

ตัวอย่างที่ 2 จงคำนวณโดสรังสีที่ตับ ไขกระดูก (bone marrow) รังไข่ และ อัณฑะ (testes) โดยใช้ S แฟคเตอร์ และข้อมูลต่าง ๆ เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

วิธีการคำนวณ

(1) ข้อมูลจากตัวอย่างที่ 1 คือ

$T_{1/2}(\text{eff}) = 6$ ชม.

A_o (ในตับ) $= 1800\ \mu Ci$

(2) สมการที่ใช้คือ (8) แต่ต้องหาค่าต่าง ๆ จากตาราง 7 - 4 ดังนี้

$S(\text{liver} \leftarrow \text{liver}) = 4.6 \times 10^{-5}$

$S(\text{marrow} \leftarrow \text{liver}) = 1.6 \times 10^{-6}$

$S(\text{ovaries} \leftarrow \text{liver}) = 4.5 \times 10^{-7}$

$S(\text{testes} \leftarrow \text{liver}) = 6.2 \times 10^{-8}$

ตาราง 7-5 การคำนวณค่า $\Sigma \Delta_i \Phi_i$: ปัญหาที่ 1 (^{99m}Tc)

Radiation i	n_i	E_i	Δ_i*	ϕ_i	$\Delta_i \phi_i$
Gamma 1					
(Conversion electrons only)	0.986	0.002	0.004	1	0.004
Gamma 2	0.883	0.140	0.264	0.16	0.042
K Conversion Electron	0.088	0.119	0.022	1	0.022
L Conversion Electron	0.011	0.138	0.003	1	0.003
M Conversion Electron	0.004	0.140	0.001	1	0.001
Gamma 3					
(Conversion electrons only)	0.01	0.122	0.003	1	0.003
K (α) X-Ray	0.064	0.018	0.003	0.88	0.0026
K (β) X-Ray	0.012	0.021	—	0.87	—
KLL Auger Electron	0.015	0.015	—	1	—
LMM Auger Electron	0.106	0.002	—	1	—
MXY Auger Electron	1.23	0.0004	—	1	—
					$\sum_i A_i \phi_i = 0.078$†

*Δ_i calculated using eq. 4.
†Sum of all $\Delta_i \phi_i$.

(3) แทนค่าต่าง ๆ จากขั้นตอนที่ (2) ลงในสมการที่ (8)

D (liver ← liver) $= 1.44 \times 1800 \times 6 \times 4.6 \times 10^{-5}$

$= 0.72$ rad

D (marrow ← liver) $= 1.44 \times 1800 \times 6 \times 1.6 \times 10^{-6}$

$= 0.025$ rad

D (ovaries ← liver) $= 1.44 \times 1800 \times 6 \times 4.5 \times 10^{-7}$

$= 0.007$ rad

$$D\ (testes \longleftarrow liver) = 1.44 \times 1800 \times 6 \times 6.2 \times 10^{-8}$$

$$= 0.001 \text{ rad}$$

จากตัวอย่างที่ 2 เห็นได้ว่าการใช้ S แฟคเตอร์ เพิ่มความสะดวกและให้ความถูกต้องพอสมควร อย่างไรก็ตาม ได้ละเว้นการรบกวนของโดสรังสี 10% ในเภสัชรังสีที่มิได้แพร่กระจายอยู่ในตับ ถ้าเปรียบเทียบโดสที่ตับได้รับจากตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 จะมีค่าต่างกันเล็กน้อย สาเหตุเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากคนมาตรฐาน (ที่ใช้คำนวณ S แฟคเตอร์) มีค่าต่างจากค่าจริง ที่ใช้คำนวณส่วนรังสีที่ถูกดูดกลืน (Φ_i)

คำเตือน ในการใช้วิธีคำนวณโดย S แฟคเตอร์ กรณีที่บุคคลมีส่วนประกอบต่างจากคนมาตรฐาน เช่น เด็ก เป็นต้น ไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้

ตาราง 7-6 การคำนวณค่า $\Sigma \Delta_i \Phi_i$: ปัญหาที่ 3 (^{131}I)

Radiation i	n_i	E_i	4	Φ_i	$\Delta_i\Phi_i$
Beta 1	0.016	0.070	0.002	1	0.002
Beta 2	0.069	0.095	0.014	1	0.014
Beta 3	0.005	0.143	0.001	1	0.001
Beta4	0.905	0.192	0.369	1	0.369
Beta5	0.006	0.286	0.004	1	0.004
Gamma 1	0.017	0.080	0.003	0.035	—
K Conversion Electron	0.029	0.046	0.003	1	0.003
Gamma2					
(Conversion Electron)	0.004	0.129	0.001	1	0.001
Gamma3	0.047	0.284	0.029	0.03	0.001
K Conversion Electron	0.002	0.250	0.001	1	0.001
Gamma4	0.002	0.326	0.001	0.03	—
Gamma 5	0.833	0.364	0.646	0.03	0.019
K Conversion Electron	0.017	0.330	0.012	1	0.012
L Conversion Electron	0.003	0.359	0.002	1	0.002
Gamma6	0.003	0.503	0.003	0.03	—
Gamma 7	0.069	0.637	0.093	0.03	0.003
Gamma 8	0.016	0.723	0.025	0.03	0.001
K (α) X-Rays	0.038	0.030	0.002	0.15	—
					$\sum_i \Delta_i \phi_i = 0.433$*

*Sum of all $\Delta_i\phi_i$.

ตัวอย่างที่ 3 คนไข้ฮัยเปอร์ธัยรอยด์ (hyperthyroidism) ได้รับการรักษาด้วย ^{131}I จงคำนวณโดสรังสีที่ต่อมธัยรอยด์ของคนไข้ดังกล่าวได้รับ สมมุติต่อมธัยรอยด์มีน้ำหนัก 30 กรัม ค่าครึ่งชีวิตยังผล 4 วัน และค่าธัยรอยด์อัพเทคเป็น 45%

วิธีการคำนวณ ข้อมูลต่าง ๆ มีดังนี้

(1) มวลของธัยรอยด์ M = 30 กรัม

(2) ปริมาณกัมมันตภาพรังสีเมื่อเริ่มต้นที่ต่อมธัยรอยด์ คือ

$$A_0 = 0.45 \times 5000 \ \mu Ci$$

$= 2250 \quad \mu Ci$

(3) ครึ่งอายุยังผล $T_{1/2}(eff) = 4$ วัน $= 4 \times 24 = 96$ ชม.

(4) จากตาราง (7 –6) อ่านค่า n_i, E_i, และ Δ_i ของ ^{131}I และ $\Sigma \Delta_i \Phi_i$

(5) แทนค่าต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ลงในสมการ (6)

$$D(thyroid) = \frac{2250}{30} \times 1.44 \times 96 \times 0.433 \quad rad$$

$$= 4489 \quad rad$$

ตาราง 7-7 โดสรังสีในสแกนทั่วไป

Procedure	*Amount of* Radiopharmaceutical *(mCi)*	*Radiation Dose (Rad)* Total *Body*	Radiation Dose *(Rad)* *Critical* Organ
BRAIN SCAN			
$^{99m}Tc\ O_4^-$	10	0.1-0.2	2-3 Stomach
^{99m}Tc Glucoheptonate	20	0.1-0.2	3-6 Bladder
BONE SCAN			
^{99m}Tc-Sn (Phosphates)	10	-0.1	I-2 Bladder
LIVER SCAN			
^{99m}Tc Sulphur Colloid	3	0.03-0.06	0.6-I .2 Liver
LUNG SCAN			
^{99m}Tc MAA	3	0.03-0.06	- 1 Lungs
^{133}Xe	10	0.001	0.3 Lung
THYROID SCAN			
^{131}I	0.05	-0.2	60-90 Thyroid
^{123}I	0.1	-0.004	1.5-3 Thyroid
$^{99m}Tc\ O_4^-$	1	0.01-0.02	0.2-0.5 Thyroid
SPLEEN			
^{51}Cr Damaged RBC's	0.25	0.05-O. 1	5-I 2 Spleen
KIDNEY			
^{99m}Tc Iron ascorbate	2	-0.008	- 1 Kidneys
^{99m}Tc DMSA	6	0.09	3.8 Kidneys
^{99m}Tc DTPA	20	0.12	2-5 Bladder
^{131}I iodohippurate	0.2	-0.006	-0.2 Kidneys
HEART			
Thallous (^{201}Tl) Chloride	1.5	0.36	2.2 Kidneys
^{99m}Tc Red Cells	20	0.4	0.4 Total body
LIVER-GALLBLADDER			
^{99m}Tc HIDA and related compounds	5	0.05	1.6 (small intestines)
CISTERNOGRAPHY			
^{111}In DPTA	0.5	0.04	1.9 Spinal Cord
TUMOR OR ABSCESS			
^{67}Ga citrate	5	***1.3***	4.5 Lower Large Intestine

หมายเหตุ ถ้าเป็นการคำนวณเฉพาะค่าโดสที่เกิดจาก ^{131}I ควรจะได้ผลเป็น 4043 rad กล่าวคือ เป็นค่า 90% ของโดสกัมมันตภาพรังสีที่ ^{131}I ส่งไปยังธัยรอยด์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นรังสีเบตา (β)

โดสรังสีที่ได้รับจากการตรวจสแกน

ในตาราง 7 –7 ได้แสดงค่าเฉลี่ยโดสที่คนไข้ (ผู้ใหญ่) ได้รับจากเภสัชรังสีที่มักใช้ในงานเวช–ศาสตร์นิวเคลียร์ โดยแจงตามอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นกรณีงานประจำเท่านั้นและในตารางได้แสดงค่าโดสทั่วร่างกายและอวัยวะจำเพาะที่ดูดกลืนเภสัชรังสีไว้มากที่สุด ส่วนในแง่ของการเสี่ยงจะมีความสำคัญอย่างไรนั้นจะได้กล่าวในบทที่ 15