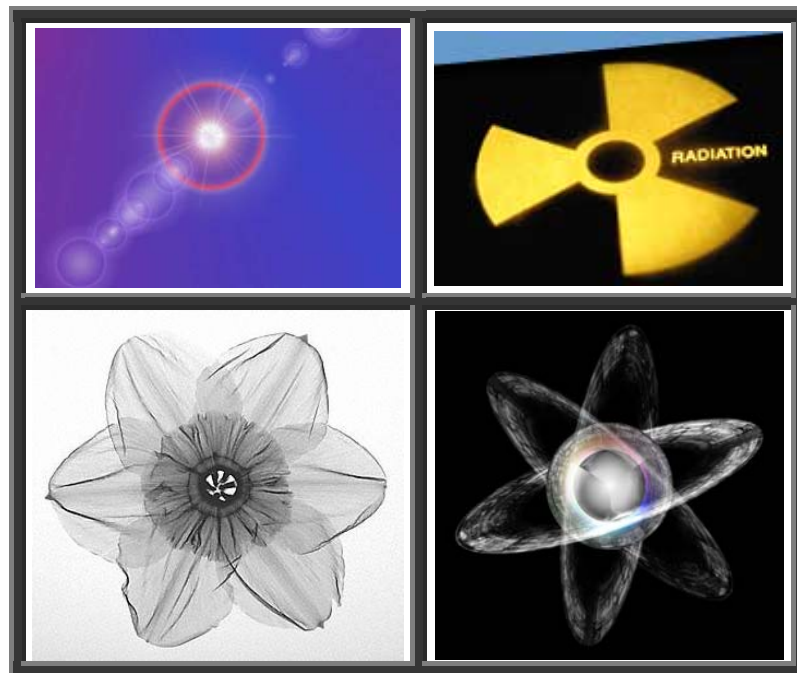


# อันตรายจากรังสีและการควบคุม

เรียบเรียงโดย

**อัมพร ฝิ่นเขียน**

ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



รังสีเป็นสิ่งที่มองไม่เห็นและไม่รู้สึกได้ด้วยประสาทสัมผัส รังสีมีประโยชน์ต่อการใช้งานอย่างถูกต้อง และจัดเป็นเทคโนโลยีทันสมัยของเครื่องมือต่างๆ รังสีเอกซ์ในเครื่องเอกซเรย์เป็นที่รู้จักถึงประโยชน์สำหรับมนุษย์มานานถึงหนึ่งศตวรรษแล้ว การเข้าใจรังสีจะเอื้อประโยชน์ต่อชีวิตได้มากมายหลายประการ

เอกสารนี้ใช้ประกอบคำบรรยายเรื่อง “อันตรายจากรังสีและการควบคุม” สำหรับบุคลากรทางรังสี, พยาบาล และบุคคลทั่วไป ให้เข้าใจคุณสมบัติของรังสี, ผลกระทบของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต, และหลักการควบคุมป้องกันและใช้รังสีให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด และไม่ก่ออันตรายต่อผู้ป่วย ผู้ร่วมงานและสาธารณชน ผู้เขียนรวบรวมรวบรัดประเด็นสำคัญในการใช้รังสี ซึ่งได้ทำงานด้านรังสีมานาน เพื่อช่วยให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจรังสีในเบื้องต้น และนำไปปฏิบัติใช้รังสีได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

ขอขอบพระคุณหัวหน้าภาควิชารังสีวิทยา และหัวหน้าหน่วยรังสีรักษา ที่ได้มอบหมายภารกิจทางฟิสิกส์และรังสีอันทรงคุณค่าให้ได้ศึกษาและปรับปรุงพัฒนามาด้วยดีตลอดกาลสมัย

อัมพร ฝืนเขียน

นักวิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์การแพทย์)  
กรกฎาคม 2547

หัวเรื่อง	หน้า
<b>สารบัญ</b>	
<b>บทที่ 1 ชนิดและแหล่งกำเนิดรังสี</b>	5
1.1 ชนิดของรังสี	5
1.2 แหล่งกำเนิดรังสี	5
1.3 กัมมันตภาพรังสี (radioactivity)	7
1.4 แผนภูมิการสลายตัว	8
1.5 เอกซเรย์	10
<b>บทที่ 2 คุณสมบัติของรังสี หน่วยวัดรังสี และการวัดรังสี</b>	12
2.1 คุณสมบัติของรังสี	12
2.2 หน่วยวัดรังสี	14
2.3 การวัดรังสี	16
2.4 เครื่องวัดรังสีในงานฟิสิกส์สุขภาพ	16
2.5 เครื่องวัดรังสีประจำบุคคลชนิด Film Badge	18
2.6 เครื่องวัดรังสีประจำบุคคลชนิด TLD Badge	19
2.7 การใช้เครื่องวัดรังสีประจำบุคคล	19
<b>บทที่ 3 อันตรกิริยาของรังสีต่อสสาร</b>	20
3.1 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และแกมมาต่อสสาร	20
3.2 อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนต่อสสาร	23
<b>บทที่ 4 ผลกระทบจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต</b>	25
4.1 ข้อมูลผู้ได้รับรังสี	25
4.2 ปฏิกิริยาของรังสีต่อโมเลกุลและเซลล์	25
4.3 ความไวรังสีของเซลล์	26
4.4 การเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมื่อได้รับรังสี	26
4.5 ผลกระทบจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต	27
4.6 อาการจากการได้รับรังสีแบบเฉียบพลันทั่วร่างกายในคน	28
4.7 ผลกระทบจากรังสีต่อทารกในครรภ์	28
<b>บทที่ 5 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี</b>	29
5.1 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี	29
5.2 หลักควบคุมการใช้รังสี	29
5.3 แนวปฏิบัติในการป้องกันอันตรายจากรังสี	30
5.3 การป้องกันอันตรายรังสีจากแหล่งกำเนิดนอกและภายในร่างกาย	31
5.4 ปริมาณรังสีขีดจำกัด	33
5.5 ปริมาณรังสีต่อบุคลากรทางรังสีที่ตั้งครรภ์	34
5.6 สัญลัษณ์รังสี	34
5.7 บริเวณรังสี	35
5.8 ประเภทของสารกัมมันตรังสีและห้องปฏิบัติการสารกัมมันตรังสี	37
5.9 การขนย้ายและขนส่งสารกัมมันตรังสี	37
5.10 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมรังสี	38
5.11 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมรังสี	38
5.12 การจัดการกากรังสี	39

	หน้า
<b>บทที่ 6 การระวังป้องกันรังสีในงานเอกซเรย์</b>	39
6.1 อันตรายจากรังสีในงานเอกซเรย์	41
6.2 ความปลอดภัยในการใช้เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่	42
<b>บทที่ 7 อุบัติเหตุทางรังสี</b>	42
7.1 อุบัติเหตุทางรังสี	42
7.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุรังสีมากที่สุด	43
7.3 ความปลอดภัยจากรังสีกรณีเกิดอัตรภัย	43
7.3 ปริมาณรังสีขีดจำกัดตามมาตรฐานต่างๆ	44
<b>บรรณานุกรม</b>	45
<b>ภาคผนวก การจัดการกากกัมมันตรังสี</b>	46

# บทที่ 1 ชนิดและแหล่งกำเนิดรังสี

ความร้อนและแสงสว่างเป็นรังสีในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งที่มนุษย์สัมผัสได้ แต่ยังมีรังสีชนิดอื่นๆที่มนุษย์สัมผัสไม่ได้ ซึ่งอาจมาจากท้องฟ้า, อากาศ, พื้นดิน หรือแม้แต่ในอาหารที่ดื่มกิน รังสีสามารถใช้ประโยชน์ได้มากมายเช่น ใช้ตรวจวินิจฉัยโรคในการแพทย์ ใช้ตรวจรอยเชื่อมโลหะในงานอุตสาหกรรมเช่น ถังเก็บน้ำมัน, ถูต่อเรือ รังสีแกมมาใช้ฉายผลิตภัณฑ์ให้ปลอดเชื้อ หรือชักนำเหนียวนำให้ได้เมล็ดพืชพันธุ์ใหม่ในทางเกษตรกรรม และในปัจจุบันนี้ 17% ของพลังงานไฟฟ้าในโลกได้จากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

การใช้ประโยชน์จากรังสีนี้หมายถึงว่าประชาชนต้องได้รับปริมาณรังสีจากที่มนุษย์สร้างขึ้นพอกๆกับที่ได้รับจากธรรมชาติอยู่แล้ว สังคมจึงต้องรู้จักชนิดและแหล่งกำเนิดรังสีและผลกระทบจากรังสี เพื่อให้ใช้รังสีในโลกนี้กันอย่างปลอดภัย

## 1.1 ชนิดของรังสี

เมื่อรังสีชนิดทำให้ประจุแตกตัว (ionizing radiation) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะทำให้อะตอมถูกประจุไฟฟ้าหรือแตกตัวเป็นไอออน ไอออนที่เกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาในสิ่งมีชีวิต ionizing radiation มีหลายชนิดเช่น รังสีแอลฟา, เบตา, แกมมา, นิวตรอน

1. รังสีแอลฟา เป็นอนุภาคที่ประจุบวก ถูกหยุดยั้งได้ด้วยกระดาษหรือผิวหนังของร่างกาย จะเป็นอันตรายเมื่อรังสีแอลฟาสามารถทะลุสูกันรังสีเข้าสู่ร่างกายโดยการกลืนหรือหายใจเข้าไป
2. รังสีเบตาเป็นอิเล็กตรอน สามารถทะลุผ่านตัวกลางได้ดีกว่ารังสีแอลฟา รังสีเบตาถูกหยุดยั้งได้ด้วยน้ำ แก้วหรือโลหะ แต่รังสีเบตายังคงมีอันตรายเมื่อเข้าสู่ร่างกาย
3. รังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสงหรือคลื่นวิทยุ แต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า รังสีชนิดนี้มีความสามารถในการทะลุผ่านวัสดุต่างๆ จำเป็นต้องใช้วัสดุกันรังสีอย่างดีที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ตะกั่วหรือคอนกรีต
4. นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงสามารถทะลุผ่านตัวกลางไปได้ไกลกว่าอนุภาคอื่น และไม่สามารถทำให้เกิดการแตกประจุ(ionization) ได้โดยตรง แต่อันตรกิริยาจากการชนของนิวตรอนกับอะตอมในตัวกลางทำให้เกิดอนุภาคแอลฟา, เบตา แกมมาและรังสีเอกซ์ซึ่งทำให้เกิดการแตกประจุตามมา นิวตรอนสามารถกันได้ด้วยวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำเช่น คอนกรีต, น้ำ, ซีเมนต์ หรือพาราฟิน

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของรังสีแอลฟา, เบตา, แกมมา, เอกซ์เรย์ และนิวตรอน แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

## 1.2 แหล่งกำเนิดรังสี

มนุษย์ทุกคนย่อมได้รับรังสีจากแหล่งรังสีธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ และรับเพิ่มจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์ได้สร้างขึ้น ประมาณว่าประชากรโลกได้รับรังสีโดยเฉลี่ย 1 mSv ต่อปีจากแหล่งรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ และประชากร 5 ล้านได้รับรังสี 1.7 mSv ต่อปีจากธรรมชาติ

**1.2.1 แหล่งรังสีธรรมชาติ** มีแหล่งกำเนิดหลายแหล่งทั้งในชั้นดิน, บรรยากาศและตัวเราเอง ประชากรอาจได้รับรังสีเหล่านี้ เช่น

- รังสีคอสมิกในชั้นบรรยากาศ ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคไอออนบวก และรังสีแกมมาเป็นส่วนใหญ่ ประมาณ 0.39 mSv ต่อปี

- รังสีจากแหล่งแร่ใต้ดิน เช่น รังสีในวัสดุก่อสร้าง, แหล่งน้ำดื่ม ซึ่งมีธาตุในอนุกรมของยูเรเนียม และอนุกรมของทอเรียมปะปนอยู่ ประมาณ 0.46 mSv ต่อปี
- รังสีจากก๊าซเรดอน ซึ่งสลายจากธาตุในอนุกรมยูเรเนียม เฉลี่ย 1.3 mSv ต่อปี
- รังสีจากอาหารการกิน ซึ่งปะปนมากับธาตุในธรรมชาติ เช่น ใน Shell fish และ Brazil nuts โดยเฉพาะ  $K^{40}$  เฉลี่ย 0.23 mSv ต่อปี
- รังสีจากธาตุกัมมันตรังสีที่ปะปนในร่างกาย เช่น  $Na^{24}$ ,  $C^{14}$ ,  $Ar^{41}$ ,  $K^{40}$  ประมาณ 0.39 mSv ต่อปี

**1.2.2 แหล่งรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น** ทำให้มนุษย์ได้รับรังสีเพิ่มขึ้น แต่ยังมีปริมาณรังสีน้อยกว่าที่ได้นับจากแหล่งรังสีธรรมชาติ ปริมาณรังสีจากแหล่งที่มนุษย์สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ควบคุมได้ เช่น

- รังสีในการแพทย์ เช่น เครื่องเอกซเรย์ หรือรังสีที่ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง เป็นแหล่งรังสีที่ทำให้ประชากรได้รับรังสีสูงสุดในแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น ประชาชนทั่วไปจะได้รับรังสีจากการแพทย์เฉลี่ย 0.3 mSv ต่อปี การถ่ายเอกซเรย์ปอด 1 ครั้งทำให้คนได้รับรังสีเพิ่ม 0.1 mSv เท่านั้น
- การทดลองระเบิดปรมาณู ซึ่งถูกต่อต้านในยุคนี้ จึงทำให้เราได้รับรังสีนี้้น้อยกว่า 0.006 mSv ต่อปี
- เครื่องมือ เครื่องใช้ เช่น โทรศัพท์, เครื่องจับควัน, เครื่องเอกซเรย์สัมภาระ, ประมาณน้อยกว่า 0.0005 mSv ต่อปี
- เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ปัจจุบันมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มากกว่า 438 โรงในปี ค.ศ.2000 และกำลังสร้างอยู่กว่า 31 แห่ง ประมาณปริมาณรังสีที่ประชากรได้รับน้อยกว่า 0.008 mSv ต่อปี ซึ่งมักปล่อย  $C^{14}$ ,  $S^{35}$  ออกมาในบรรยากาศ แต่บริเวณใกล้โรงไฟฟ้าอาจมีรังสีสูงเฉลี่ย 0.4 mSv ต่อปี

ประมาณว่าทั่วโลกมีคนทำงานด้านรังสี 4 ล้านคน ได้รับรังสีจากแหล่งรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยเฉลี่ย 1 mSv ต่อปี และประชากรอีก 5 ล้าน ซึ่งส่วนใหญ่อาศัยในเมืองใหญ่ และเดินทางโดยเครื่องบินบ่อยๆ ได้รับรังสีจากธรรมชาติเฉลี่ยถึง 1.7 mSv ต่อปี

ตารางที่ 1.1: แสดงคุณสมบัติของรังสีแอลฟา, เบตา, แกมมา, รังสีเอกซ์, นิวตรอน

รังสี	สัญลักษณ์	ลักษณะ	แหล่งกำเนิด	อนุภาคพื้นฐาน	น้ำหนักมวล (amu)	ประจุ	พลังงานในสเปกตรัม	ข้อมูลอื่นที่สำคัญ
แอลฟา	$\alpha$	อนุภาคมีประจุ	นิวเคลียส	2p, 2n	4	+2	MeV	เป็น monoenergetic, เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่
เบตา	$\beta$	อนุภาคมีประจุ	นิวเคลียส	$1e^-$	$\ll 1$	-1	0 ถึงสูงสุด	
แกมมา	$\gamma$	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	นิวเคลียส	Photon	None	None	MeV	มักเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของอนุภาค
รังสีเอกซ์	X	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	อิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียส	Photon	None	None	keV	
นิวตรอน	n	อนุภาคไม่มีประจุ	นิวเคลียส	1n	1	0	eV ถึง MeV	

### 1.3 กัมมันตภาพรังสี (radioactivity)

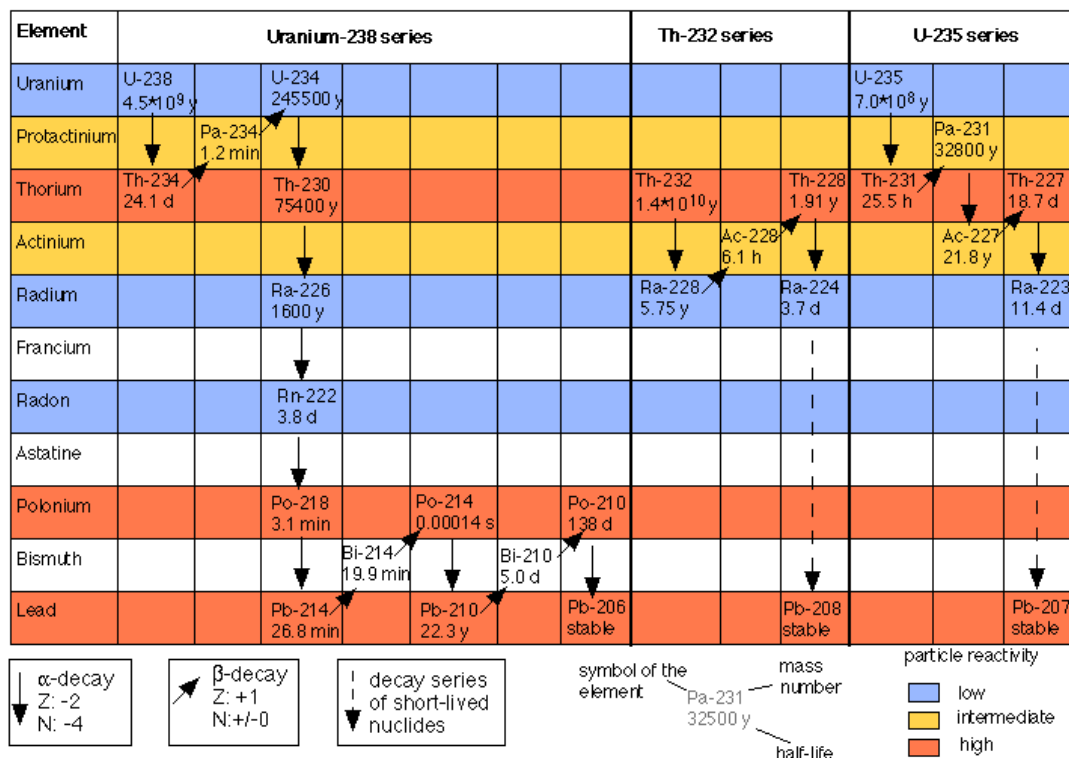
ธาตุต่างๆสามารถปล่อยพลังงานรังสีออกมาได้เมื่อสัดส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนในนิวเคลียสไม่สมดุลย์ อนุภาคนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสยึดอยู่ร่วมกันด้วยแรงนิวเคลียร์ เมื่อสัดส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนในนิวเคลียสไม่สมดุลย์ นิวเคลียสต้องปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีแอลฟา, เบตา, หรือนิวตรอน พร้อมพลังงานรังสีแกมมา ภายหลังการสลายตัวนิวเคลียสจะยังคงคายพลังงานต่อไปเรื่อยๆ จนกว่านิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสจะจัดระเบียบได้เหมาะสม มีเสถียรภาพทางพลังงาน ซึ่งธาตุสุดท้ายของการสลายตัวในอนุกรมธรรมชาติ คือ ตะกั่ว

ธาตุกัมมันตรังสีเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมาพร้อมกับโลก และมนุษย์สามารถสร้างสารกัมมันตรังสีได้เช่นกัน แหล่งสารกัมมันตรังสีจึงแบ่งเป็น

#### 1.3.1 ธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

อนุกรมของธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาสมบูรณ์แล้วตั้งแต่ ค.ศ. 1935 คือ อนุกรมยูเรเนียม (เริ่มต้นด้วย  $U^{238}$ ), อนุกรมทอเรียม (เริ่มต้นด้วย  $Th^{232}$ ), อนุกรมแอกติเนียม (เริ่มต้นด้วย  $U^{235}$ ) ยังอนุกรมเนปจูนีียม (เริ่มต้นด้วย  $Np^{237}$ ) ซึ่งพบในปฏิกริยานิวเคลียร์เท่านั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อประชากร

อนุกรมของธาตุทุกอนุกรมจะสลายตัวจากนิวไคลด์ตั้งต้น (parent nuclides) ให้รังสีแอลฟาและเบตา เป็นลูกโซ่จนสุดท้ายเป็นนิวไคลด์ที่เสถียร (stable nuclide) คือตะกั่ว ดังแสดงในภาพที่ 1.1

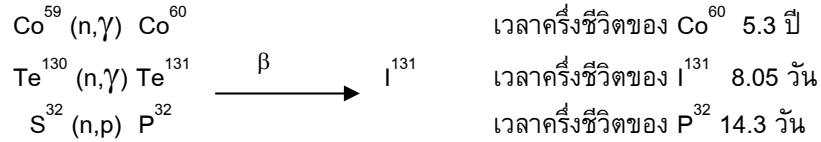


ภาพที่ 1.1 แสดงอนุกรมยูเรเนียม (เริ่มต้นด้วย  $U^{238}$ ), อนุกรมทอเรียม (เริ่มต้นด้วย  $Th^{232}$ ), อนุกรมแอกติเนียม (เริ่มต้นด้วย  $U^{235}$ )

### 1.3.2 การผลิตธาตุกัมมันตรังสี

วัสดุกัมมันตรังสีที่เราใช้อยู่ นั้นผลิตจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งมักเป็น neutron bombardment ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือเป็น proton bombardment จากเครื่องเร่งอนุภาค synclotron

ตัวอย่างปฏิกิริยา neutron bombardment เช่น



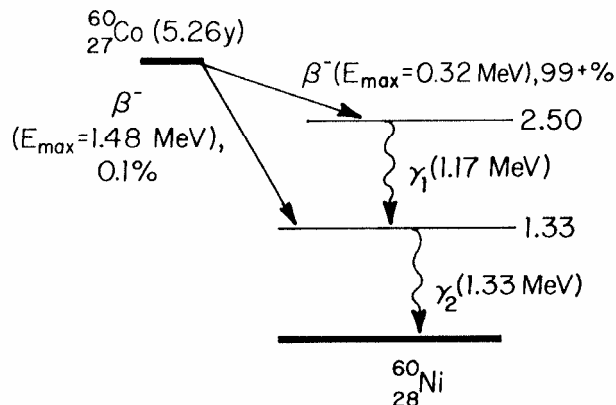
ตัวอย่างปฏิกิริยา proton bombardment เช่น



### 1.4 แผนภูมิการสลายตัว (nuclear decay scheme) และเวลาครึ่งชีวิต (half-life)

ธาตุกัมมันตรังสีแต่ละตัวจะมีรูปแบบการปลดปล่อยรังสีที่ชัดเจนมาก และเป็นคุณสมบัติจำเพาะสำหรับธาตุแต่ละตัว เรียกว่าแผนภูมิการสลายตัวทางนิวเคลียร์ (nuclear decay scheme) นักวิทยาศาสตร์สามารถใช้คุณสมบัตินี้ในการวิเคราะห์ได้มากมาย ยกตัวอย่างแผนภูมิการสลายตัวของธาตุโคบอลต์-60 จะมีลำดับการสลายตัวที่ไม่ซับซ้อนดังภาพที่ 1.2 โคบอลต์-60 จะปล่อยรังสีเบตาพลังงาน 0.32 และ 1.48 MeV ในสัดส่วน 99.9% และ 0.1% โดยที่พลังงานในนิวเคลียสยังไม่สมดุลย์ นิวเคลียสของโคบอลต์-60 จึงปล่อยพลังงานเป็นรังสีแกมมาพลังงาน 1.17 MeV และยังคงคายพลังงาน 1.33 MeV อีกทุกครั้งที่เกิดรังสีแกมมา 1.17 MeV จึงได้สัดส่วนจำนวนรังสีแกมมาทั้งสองเป็น 1:1 เพราะรังสีแกมมา 1.33 MeV ที่เกิดจากรังสีเบตา 1.48 MeV นั้นต่ำมาก ดังนั้นการใช้งานโคบอลต์-60 จึงมักกำหนดพลังงานรังสีแกมมาซึ่งมีพลังงานใกล้เคียงกันเป็นค่าพลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV

อะตอมกัมมันตรังสีในวัสดุกัมมันตรังสีจะลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านมา ทำให้จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง เรียกช่วงเวลานั้นว่า เวลาครึ่งชีวิต(Half-life) ของธาตุกัมมันตรังสีนั้น radioisotope หนึ่งๆ มีค่า half-life จำเพาะ และมีอัตรารังสีคงที่จำเพาะ (specific gamma ray constant) เช่น โคบอลต์-60 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดรังสีในเครื่องฉายรังสีโคบอลต์ มีเวลาครึ่งชีวิต 5.26 ปี มีความแรงกัมมันตรังสีเมื่อเริ่มต้น 10,000 Ci เมื่อเวลาผ่านไป 10.52 ปี ยังคงมีความแรงรังสี 2,500 Ci แต่ยังคงแผ่รังสีเป็นอันตรายถึงเสียชีวิตได้ (อัตราการแผ่รังสีจากธาตุโคบอลต์-60 ความแรง 2,500 Ci เท่ากับ 3,300 Roentgen ต่อชั่วโมงที่ระยะห่าง 1 เมตร ในอากาศ)



รูปที่ 1.2 แสดงแผนภูมิการสลายตัวทางนิวเคลียร์ของธาตุโคบอลต์-60 ซึ่งสลายตัวให้รังสีเบตา และแกมมาพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV โดยมีเวลาครึ่งชีวิตของการสลายตัว 5.26 ปี

ค่า half-life และมีอัตราการสลายที่จำเพาะ (specific gamma ray constant) สำหรับธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ แสดงไว้ตามตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงตัวอย่างธาตุกัมมันตรังสี, อายุครึ่งชีวิต และค่า specific gamma ray constant

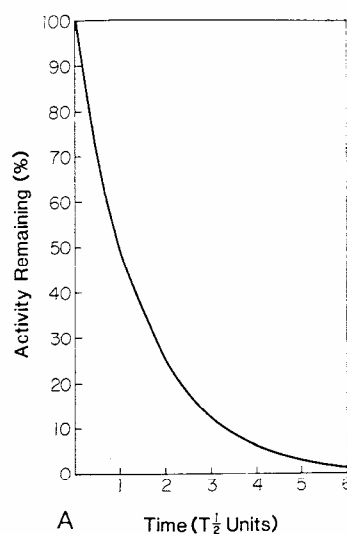
ธาตุกัมมันตรังสี	อายุครึ่งชีวิต(half-life)	Specific Gamma Ray Constant (R.cm <sup>2</sup> /h.mCi)
H <sup>3</sup>	12.35 ปี	5.91
K <sup>42</sup>	12.4 ชั่วโมง	1.35
Co <sup>57</sup>	267 วัน	0.93
Co <sup>60</sup>	5.6 ปี	13.2
I <sup>125</sup>	60 วัน	0.70
I <sup>129</sup>	1.7 x 10 <sup>9</sup> ปี	
I <sup>131</sup>	8.05 วัน	2.23
Hg <sup>203</sup>	46.6 วัน	1.33

ถ้าเขียนกราฟจำนวนอะตอมหรือความแรงรังสีกับเวลา จะได้ความสัมพันธ์ของความแรงรังสีกับเวลาเป็น exponential ดังรูปที่ 1.3 เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$$

เมื่อ:

- A<sub>0</sub> = ความแรงรังสีของสารกัมมันตรังสีเมื่อเริ่มต้น
- A<sub>t</sub> = ความแรงรังสีของสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลาผ่านไป t
- λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว = 0.693/T<sub>1/2</sub>
- T<sub>1/2</sub> = เวลาครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี
- t = ช่วงเวลาที่ผ่านไปตามเวลาแห่งการสลายตัว



รูปที่ 1.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบ exponential ของความแรงรังสีกับเวลาที่ผ่านไป

## 1.5 เอกซเรย์

วิลเฮ็ล์ม คอนราด เรินเกนต์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม ค.ศ.1845 ที่ประเทศเยอรมันนี้ เขาศึกษาวิชาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัย Utrecht ใน ค.ศ. 1865 และสำเร็จปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัย Zurich ใน ค.ศ. 1869

วันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1895 เรินเกนต์ได้ค้นพบแสงที่มองไม่เห็น ทำให้จอฟลูออเรสเซนต์เรืองแสงได้ ในขณะที่เขากำลังทดลองเกี่ยวกับรังสีแคโทดในห้องทดลองมหาวิทยาลัย Wurzburg เขาประหลาดใจที่ลำแสงมองไม่เห็นนี้สามารถทะลุกระดาษดำที่หุ้มหลอดอยู่ จึงเรียกว่ารังสี "X" เขาศึกษารังสีเอกซ์เพิ่มเติมจนได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ใน ค.ศ.1901

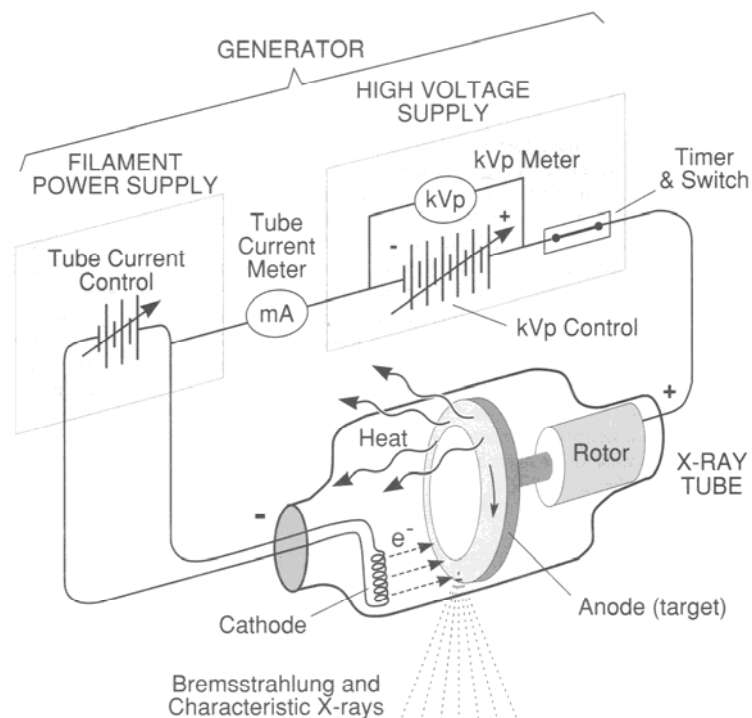
### 1.5.1 หลอดเอกซเรย์

หลอดเอกซเรย์ในปัจจุบันพัฒนาไปมากในเรื่องความปลอดภัยและประสิทธิภาพการใช้งาน เพื่อใช้งานในการแพทย์, อุตสาหกรรมหรืออื่นๆ

หลอดเอกซเรย์ทั่วไปมีส่วนประกอบเบื้องต้นที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 คือ

1. ไส้หลอด (cathode หรือ filament) เพื่อให้กำเนิดอิเล็กตรอน
2. เป้าโลหะ (anode หรือ target) ส่วนใหญ่เป็นทังสเตน หรืออาจเป็นโมลิบดีนัมสำหรับหลอดเอกซเรย์เต้านม
3. วงจรความต่างศักย์สูง (generator) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างไส้หลอดกับเป้าโลหะ

ประสิทธิภาพในการเกิดเอกซเรย์นั้นน้อยกว่า 1% พลังงานส่วนใหญ่เกิดเป็นความร้อนซึ่งระบายด้วยน้ำมันภายในส่วนหุ้มหลอดเอกซเรย์



รูปที่ 1.4 แสดงส่วนประกอบเบื้องต้นและการทำงานของหลอดเอกซเรย์ ประกอบด้วยไส้หลอด (cathode หรือ filament) และเป้าโลหะ (anode หรือ target) ซึ่งอยู่ในหลอดสุญญากาศ การควบคุมพลังงานเอกซเรย์ทำโดยวงจรความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด (kVp) การควบคุมความเข้มหรือปริมาณเอกซเรย์ทำโดยวงจรควบคุมกระแสไส้หลอดและเครื่องตั้งเวลา (mA.s)

### 1.5.2 การเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดเอกซเรย์ประกอบด้วยรังสีเอกซ์แบบเส้น (line spectrum or characteristic x-rays) และรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Bremmstrahlung radiation) พร้อมๆกัน

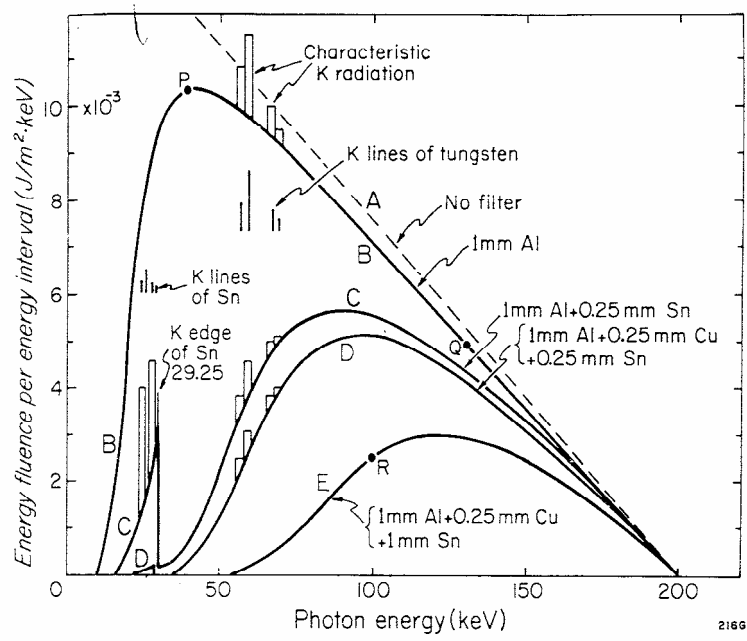
#### การเกิดเอกซเรย์แบบเส้น

เมื่ออิเล็กตรอนบางส่วนจากไส้หลอด ตกกระทบอะตอมของเป้าโลหะด้วยสนามไฟฟ้าอันเกิดจากความต่างศักย์ระหว่างขั้ว ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมเป้าถูกชนหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นถัดไปจะเข้าแทนที่ตำแหน่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนั้น พร้อมกับคายพลังงานออกมาเท่ากับ ความแตกต่างของระดับชั้นพลังงาน จะตรวจวัดเอกซเรย์ชนิดนี้ได้เป็นเส้นๆ ซึ่งใช้ในงานวิเคราะห์

#### การเกิดเอกซเรย์แบบต่อเนื่อง

เอกซเรย์แบบต่อเนื่องเกิดจากบางส่วนของอิเล็กตรอนจากไส้หลอดอาจเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของเป้าโลหะ ประจวบกันในนิวเคลียสทำให้อิเล็กตรอน(ซึ่งมีประจุลบ) เปลี่ยนทิศทางและความเร็ว ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นคายพลังงานออกมาได้ พลังงานที่คายออกจากอิเล็กตรอนมีได้ตั้งแต่มากที่สุดจนถึงต่ำสุด รังสีเอกซ์แบบนี้เรียกว่า Bremmstrahlung radiation ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้งานต่างๆ เช่น การตรวจวินิจฉัย, รักษาโรค หรืออุตสาหกรรม

รังสีเอกซ์แบบเส้น (line spectrum or characteristic x-rays) และรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Bremmstrahlung radiation) แสดงเป็น spectrum ไว้ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงแถบพลังงานของเอกซเรย์แบบเส้น (characteristic x-rays) และแบบต่อเนื่อง (Bremmstrahlung x-rays) เมื่อตั้งความต่างศักย์ของหลอดเอกซเรย์ 200 keV

## บทที่ 2 คุณสมบัติของรังสี หน่วยวัดรังสี และการวัดรังสี

### 2.1 คุณสมบัติของรังสี

รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความเร็วเท่าแสง สามารถเลี้ยวเบน, แทรกสอดได้ และสามารถแสดงพฤติกรรมเป็นอนุภาคได้ จึงเรียกว่าเป็น โฟตอน

พลังงานของรังสีเอกซ์ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น หรือความยาวคลื่นที่สั้นลง โดย  $E = hc/\lambda$

$$h = \text{ค่าคงที่ของ Planck} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c = \text{ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า} = 3.8 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า}$$

เมื่อรังสีเอกซ์หรือแกมมาแสดงพฤติกรรมเป็นอนุภาค จะมีโมเมนตัม  $= h/\lambda$

ความเข้มของรังสีเอกซ์และแกมมา แม้จะมีอำนาจทะลุทะลวงได้สูง แต่ความเข้มรังสีจะลดลงตามระยะทางในอากาศ เป็นสัดส่วนผกผันกำลังสอง (inverse square law) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเป็นสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

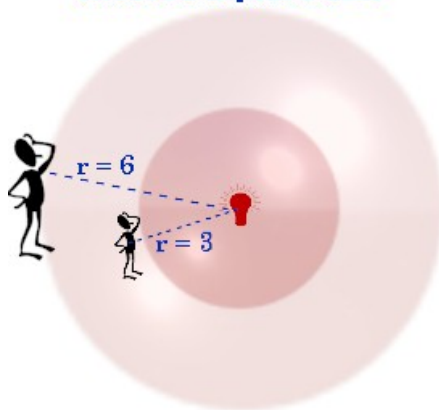
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(r_2)^2}{(r_1)^2}$$

$$I_1, I_2 = \text{ความเข้มรังสีที่ระยะ } r_1, \text{ และ } r_2 \text{ ตามลำดับ}$$

$$r_1, r_2 = \text{ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี}$$

ดังนั้นความเข้มรังสีเอกซ์และแกมมาจะลดลง 4 เท่า เมื่อเพิ่มระยะห่างไป 2 เท่าจากต้นกำเนิดรังสี

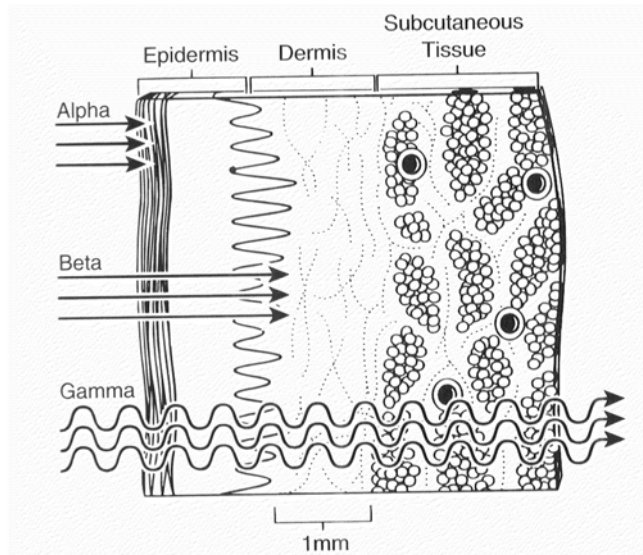
### Inverse Square Law



รูปที่ 2.1 แสดงการลดลงของความเข้มรังสีตามกฎสัดส่วนผกผันกำลังสอง (inverse square law) หรือลดลงตามพื้นที่ผิวทรงกลมเมื่อระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีเพิ่มขึ้น

รังสีแอลฟาและเบตา ซึ่งมีมวลและประจุ จะมีพิสัยในอากาศในพิสัยไม่กี่ฟุตเท่านั้น ตามแต่พลังงานของรังสีนั้น ซึ่งนิวตรอนจะเคลื่อนที่ได้ไกลกว่ารังสีแอลฟาและเบตา การกั้นนิวตรอนนั้นต้องใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ เช่น น้ำ พาราฟิน ซีผึ้ง เป็นต้น สำหรับรังสีเอกซ์และแกมมา มีอัตราการทะลุในตัวกลางที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของตัวกลาง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนขึ้นกับเลขอะตอมและความหนาแน่นของตัวกลาง และพลังงานรังสีที่ผ่านเข้ามา พิสัยของรังสีแอลฟา, เบตา และแกมมา เมื่อเดินทางผ่านชั้นผิวหนึ่งแสดงไว้รูปที่ 2.2

ความหนาของวัสดุที่ใช้กั้นรังสีเอกซ์หรือแกมมา จึงกำหนดอยู่ในรูปของ HVL (Half Value Layer) หรือ TVL (Tenth Value Layer) ความหนาของวัสดุ 1 HVL คือ ความหนาของวัสดุที่สามารถกั้นรังสี ณ พลังงานนั้นให้ลดปริมาณรังสี เหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณรังสีที่ผ่านเข้ามา ส่วน TVL คือ ความหนาของวัสดุที่จะลดปริมาณรังสีเหลือ 1/10 ของปริมาณรังสีที่เข้ามา ตัวอย่าง ค่า HVL ของตะกั่วและคอนกรีตเมื่อกั้นรังสีเอกซ์และแกมมาพลังงานต่างๆแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แสดงพิสัยของรังสีแอลฟา, เบตาและแกมมาเมื่อเดินทางผ่านชั้นผิวหนัง รังสีแอลฟาและเบตา จะผ่านชั้นผิวหนังได้ 2-3 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ซึ่งทะลุผ่านร่างกายได้มากกว่าหลายเท่า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Half Value Layer (HVL) ของตะกั่วและคอนกรีตเมื่อกั้นรังสีเอกซ์และแกมมาพลังงานต่างๆ

พลังงานรังสีเอกซ์	ตะกั่ว (ซ.ม.)	คอนกรีต(ซ.ม.)
50 kV	0.005	0.4
75 kV	0.015	-
100 kV	0.025	1.6
150 kV	0.029	2.2
200 kV	0.042	2.6
250 kV	0.086	2.8
500 kV	0.31	3.6
1 MV	0.76	4.6
2 MV	1.15	6.1
4 MV	1.48	8.4
6 MV	1.54	10.2
10 MV	1.69	11.7
<b>สารกัมมันตรังสี</b>		
Co <sup>60</sup>	1.2	6.1
Cs <sup>137</sup>	0.7	4.9
Ir <sup>192</sup>	0.6	4.1
Au <sup>198</sup>	1.1	4.1
Ra <sup>226</sup>	1.3	7.0

## 2.2 หน่วยวัดรังสี

หน่วยวัดรังสีแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ หน่วยวัดความแรงกัมมันตรังสี (radioactivity) และหน่วยวัดปริมาณรังสี (exposure) หน่วยวัดความแรงกัมมันตรังสีเป็นการกำหนดจำนวนรังสีที่ปล่อยมาจากต้นกำเนิดรังสี ส่วนหน่วยวัดปริมาณรังสีนั้นกำหนดจำนวนรังสีจากต้นกำเนิดรังสีที่ถูกดูดกลืนในตัวกลาง ปัจจุบันนี้มีหน่วยวัดใช้กันอยู่ 2 แบบคือหน่วยวัดแบบเดิม CGS (Centimeter-Gram-Second) ได้แก่ Curie, Roentgen, Rad และ Rem และหน่วยมาตรฐานสากล SI units (Standard Interational Units) ได้แก่ Becquerel, Gray และ Sievert เป็นต้น

รายละเอียดและความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดรังสีต่างๆมีนิยามดังนี้

### 2.2.1 Ci (Curie)

เป็นหน่วยวัดปริมาณสารกัมมันตรังสี (radioactivity หรือ source strength) ปริมาณสารรังสี 1 Ci เป็นจำนวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานในนิวเคลียสหรือการสลายตัว (nuclear transformation)  $3.7 \times 10^{10}$  disintegration per second (dps) ใน SI unit กำหนดให้  $1 \text{ dps} = 1 \text{ Bq}$  (Becquerel)

### 2.2.2 Roentgen (R)

เป็นหน่วยวัดปริมาณ exposure ปริมาณรังสี 1 R ทำให้อากาศอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ( $0^{\circ}\text{C}$  ความดัน 1 บรรยากาศ) แดกตัวมีประจุเกิดขึ้น  $2.58 \times 10^{-4}$  Coulomb/Kg ของอากาศ หรือว่าต้องใช้พลังงานไปทั้งสิ้น 89.6 erg ต่อกรัมของอากาศ Roentgen เป็นหน่วยวัดรังสีที่มีนิยามใช้เฉพาะรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในอากาศที่มีพลังงานไม่เกิน 3 MeV

### 2.2.3 Gray (Gy)

เป็นหน่วยวัดรังสีที่ดูดกลืนในตัวกลางใดๆ (Absorbed Dose) ตามแต่ชนิดและพลังงานของรังสี ปริมาณรังสี 1 Gy เป็นพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืน 1 Joule/Kg ของตัวกลาง หรือตามระบบวัดเดิม 1 Rad (Radiation Absorbed Dose) เป็นพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 erg/gram ของตัวกลาง ดังนั้น  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$ .

### 2.2.4 Sievert (Sv)

เป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับ เป็นหน่วยวัดประเภท Dose Equivalent ซึ่งรวมผลกระทบทางชีววิทยาตามแต่ชนิดของรังสีด้วย

เนื่องจากรังสีแต่ละชนิดมีอำนาจทำให้เกิดการแตกตัวไม่เท่ากัน ดังนั้นปริมาณ

$$\text{Dose Equivalent} = \text{Absorbed Dose} \times \text{Radiation Weighting Factors} (W_R)$$

$$\text{Sv} = \text{Gy} \times W_R$$

$$\text{หรือ Rem} = \text{Rad} \times W_R$$

$$\text{ดังนั้น } 1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$$

ค่า  $W_R$  ของรังสีชนิดต่างๆ ซึ่งเดิมเรียกว่า Radiation Quality Factor แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

อวัยวะต่างๆในร่างกายมีความไวต่อรังสีไม่เท่ากัน ปริมาณรังสีที่อวัยวะเหล่านั้นได้รับเรียกว่าเป็น Effective Dose โดย  $\text{Effective Dose} = \text{Equivalent Dose} \times \text{Tissue Weighting Factors} (W_T)$

ค่า  $W_T$  ของรังสีชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

Effective dose เป็นผลรวม equivalent dose ของอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกาย โดยผลรวม Effective dose ของทุกอวัยวะในร่างกาย = 1 หรือการได้รับรังสีตลอดทั่วร่างกายนั้นเป็น Effective dose สูงสุด ปริมาณ Effective dose ใช้ในด้านความปลอดภัยจากรังสี และมีหน่วยเป็น Sievert

สรุปหน่วยวัดรังสีและความสัมพันธ์ระหว่างความแรงกัมมันตรังสีกับหน่วยวัดปริมาณการดูดกลืนรังสี ทั้งแบบ CGS และ SI Units ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ค่าของ Radiation Weighting Factors ( $W_R$ ) หรือ Radiation Quality Factors

ชนิดและพลังงานรังสี	Radiation Weighting Factor ( $W_R$ )
โพตรอน, เอกซเรย์, แกมมา	1
เบตา, อิเล็กตรอน	1
นิวตรอน พลังงาน < 10 keV	5
10 – 100 keV	10
> 100 keV – 2 MeV	20
> 2 MeV – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
โปรตอน	5
แอลฟา และ Fission Fragments	20

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ Tissue Weighting Factors ( $W_T$ ) ของอวัยวะต่างๆ

อวัยวะ	Tissue Weighting Factor ( $W_T$ )
Gonads (testes or ovaries)	0.20
Red bone marrow	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.05
Breast	0.05
Liver	0.05
Esophagus	0.05
Thyroid gland	0.05
Skin	0.01
Bone surfaces	0.01
Remainder**	0.05
<b>Whole body</b>	<b>1.00</b>

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดรังสีและความแรงกัมมันตรังสีและหน่วยวัดปริมาณการดูดกลืนรังสี ทั้งแบบ CGS และ SI Units

เทอม	หน่วยวัด	สัญลักษณ์	ค่าของหน่วยวัด
<b>Exposure</b> Ionization per unit mass of air due to x or gamma radiation	Roentgen	R	1 esu/cc 87 erg/g
	none	X	1 R = $2.58 \times 10^{-4}$ C/kg
<b>Absorbed Dose (D)</b> Energy deposited in a unit mass by any radiation	<b>CGS</b> Radiation Absorbed Dose	Rad	100 erg/s 0.01 Gy
	<b>SI</b> Gray	Gy	1 J/kg 1 Gy = 100 rad
<b>Dose Equivalent (H)</b> Measure of radiation damage in living tissue	<b>SI</b> Roentgen Equivalent Man	Rem	Equivalent biological damage as 1 R = 0.01 Sv
	<b>SI</b> Sievert	Sv	100 Rem
<b>Activity (A)</b> The amount of radioactive material yielding a specific rate of decay	<b>Historical</b> Curie	Ci	$3.7 \times 10^{10}$ dps (disintegration per second)
	<b>SI</b> Becquerel	Bq	1 dps

## 2.3 การวัดรังสี

การวัดปริมาณรังสี สามารถวัดได้ด้วยคุณสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์และเคมีของรังสี แต่มีขีดจำกัดเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากรังสีต่อหัวตรวจจذبรังสี (detector) เกิดขึ้นในระดับต่ำมาก รายละเอียดเกี่ยวกับการวัดรังสีสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือ “การตรวจและการวัดรังสี” (วัช ชิตตระกูล, พ.ศ. 2541) หลักการวัดรังสีวิธีต่างๆ เช่น

**2.3.1 ionization method** วัดโดยการตรวจจذبจำนวนประจุจากการแตกตัวของอากาศภายในหัววัดรังสี เช่น หัววัดรังสีแบบ Farmer หรือ Parallel-plate chamber และ Ionization Chamber แบบต่างๆ รวมถึง Geiger-Muller detectors (GM detector)

**2.3.2 Calorimetry** วัดโดยการตรวจจذبการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวกลาง

**2.3.3 Chemical dosimetry หรือ Fricke dosimeter** วัดโดยการตรวจจذبการเกิด oxidation จาก ferrous ions ( $Fe^{2+}$ ) เป็น ferric ions ( $Fe^{3+}$ ) ในสารละลาย Ferrous Sulfate ซึ่งเป็นสารวัดรังสี ที่เตรียมจาก (1 mmol/l ferrous sulfate or ferrous ammonium sulfate + 1 mmol/l NaCl + 0.4 mol/l sulfuric acid)

**2.3.4 Photographic Film dosimetry** วัดโดยตรวจจذبการเปลี่ยนแปลงความดำของฟิล์มเกลือเงินที่ฉาบบนแผ่นฟิล์ม

**2.3.5 Thermoluminescent dosimeter (TLD)** ใช้หลักวัดแสงที่ปล่อยออกจากอิเล็กตรอนในโครงสร้างผลึก TLD ที่สะสมพลังงานไว้ในระหว่างการได้รับรังสี ปริมาณแสงจะสัมพันธ์กับปริมาณรังสี ซึ่งแปรค่าโดยเครื่องอ่านค่า TLD (TLD reader) ผลึกที่นิยมใช้ เช่น LiF,  $CaSO_4$ ,  $Li_2B_4O_7$

**2.3.6 Scintillation dosimeter** วัดแสงที่ปล่อยจากผลึก scintillator เมื่อได้รับการกระตุ้นจากรังสี แผ่น scintillator ที่ใช้ เช่น NaI(Tl), Ge(Li)

**2.3.7 Semiconductor dosimeter** วัดรังสีจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าของ p-n junction ของสารกึ่งตัวนำ เช่น หัววัดแบบ silicon diode หัววัดแบบ Si detector เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากมีราคาถูกลงและไม่แตกหักง่ายเมื่อเทียบกับหัววัดแบบ ionization chamber

## 2.4 เครื่องวัดรังสีในงานฟิสิกส์สุขภาพ

### 2.4.1 เครื่องวัดรังสีประจำบุคคล

เป็นเครื่องวัดบันทึกปริมาณรังสีประจำบุคคลในช่วงเวลาการทำงานกับรังสี เช่น Film badge, TLD badge, pocket dosimeter ดูรูปที่ 2.3, 2.4 และ 2.5

### 2.4.2 เครื่องวัดรังสีแบบสำรวจ เช่น

- radiation surveymeter เป็นเครื่องวัดรังสีน้ำหนักเบา ความไวสูง ใช้วัดรังสีทั่วไป มักมีหัวจذبรังสีเป็น GM detector ดูรูปที่ 2.6
- contamination surveymeter เป็นเครื่องวัดรังสีความไวสูงมาก ใช้ ionization chamber ขนาดใหญ่เป็น detector ใช้วัดความเปื้อนรังสี ดูรูปที่ 2.7

### 2.4.3 เครื่องวัดรังสีประจำพื้นที่

Area Alarm Monitor หรือ Wall Alarm Monitor ใช้ GM detector เป็นเครื่องวัดรังสีติดตั้งไว้ที่ผนังห้อง เพื่อตรวจระดับรังสีในอากาศเมื่อมีระดับสูงกว่าปกติ หรือสูงเกินระดับที่ตั้งไว้ เช่น ตั้งเตือนเมื่อระดับรังสีเกิน 2.5 mR ต่อชั่วโมง ดูรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ Film Badge ซึ่งใช้ฟิล์มและ  
ตลับกรอกรังสี



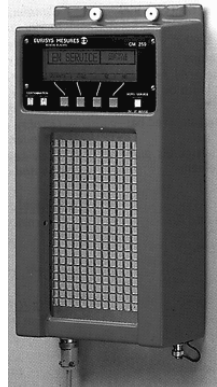
รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ TLD Badge ซึ่งใช้ผลึก  
Lithium Fluoride (LiF) เป็นตัวจับรังสี



รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ pocket dosimeter ซึ่งใช้  
หัววัดรังสี Geiger Muller detector เป็นตัวจับรังสี สามารถบอก  
ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับได้ทันที



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ Survey meter ซึ่งมีน้ำหนัก  
เบา ความไวสูง ใช้วัดรังสีทั่วไป



รูปที่ 2.7 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ Contamination Surveymeter  
ซึ่งมีความไวสูง ใช้วัดการเปื้อนรังสีแอลฟา, เบตา หรือแกมมา  
ตามเสื้อผ้า มือ หรือพื้นผิวอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องวัดรังสีแบบ Area Alarm Monitor ซึ่งติดตั้ง  
ไว้ที่ผนังห้อง เพื่อตรวจระดับรังสีในอากาศ และส่งสัญญาณ  
เตือนเมื่อมีระดับสูงกว่าปกติ (>2.5 mR ต่อชั่วโมง)

## 2.5 เครื่องวัดรังสีประจำบุคคลชนิดฟิล์มแบดจ์ (Film Badges)

ฟิล์มแบดจ์เป็นเครื่องวัดรังสีประจำบุคคลที่ใช้งานมานานตั้งแต่ยุค ค.ศ. 1940 ฟิล์มแบดจ์ประกอบด้วยฟิล์มและตลับฟิล์ม (badge) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตลับฟิล์มเป็นพลาสติก ภายในตลับในมีแผ่นกรองแยกชนิดรังสีและพลังงานรังสีต่างๆ รวมทั้งมีช่องเปิดที่ฝาตลับเพื่อวัดปริมาณรังสีรวม ฟิล์มแบดจ์เหมาะกับรังสีที่ทะลุทะลวงสูงเช่นรังสีเอกซ์, รังสีเบตาพลังงานสูงหรือรังสีแกมมา ฟิล์มแบดจ์มีความไวรังสีได้ต่ำถึง 10 mRem (0.1 mSv) และรับรังสีได้สูงถึง 700 ถึง 2,000 Rem ฟิล์มแบดจ์มีความไวต่อรังสีสูงสุดที่พลังงานรังสี 50 keV ซึ่งไม่เป็นปัญหาต่อการใช้งาน เนื่องจากฟิล์มแบดจ์มุ่งหมายใช้วัดรังสีกระเจิง ความแม่นยำของฟิล์มแบดจ์อยู่ในช่วง  $\pm 25\%$  ถึง  $\pm 50\%$  ซึ่งไม่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานที่ระดับรังสีต่ำ เช่นค่าที่อ่านจากฟิล์มแบดจ์ 20 mRem ที่  $\pm 50\%$  อาจเป็นปริมาณรังสี 10 ถึง 30 mRem ยังคงเป็นช่วงการใช้งานที่ยอมรับได้

ฟิล์มแบดจ์ใช้งานได้ดี เนื่องจาก

- ได้ใช้งานมานาน เป็นระบบวัดรังสีประจำบุคคลที่มีเสถียรภาพ
- ค่าใช้จ่ายทั้งตัวฟิล์มแบดจ์และกระบวนการไม่แพง
- ใช้สะดวกไม่เสียง่าย
- กระบวนการวัดปริมาณรังสีบุคคลและอ่านผลฟิล์มแบดจ์ง่ายไม่ซับซ้อน
- เก็บบันทึกผลรังสีได้ถาวร
- มีพิสัยความไวรังสีกว้าง ใช้กับรังสีได้หลายชนิด หลายพลังงาน

ฟิล์มแบดจ์ก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น

- ต้องสะสมปริมาณรังสี และคอยเวลาอ่านค่า (1 เดือน หรือนานกว่า)
- วัดรังสีได้แม่นยำเมื่อปริมาณรังสีมากกว่า 10 mRem ขึ้นไป
- ไม่มีความแม่นยำ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับ TLD badge)
- ฟิล์มอาจขุ่นมัวได้ เนื่องจากอุณหภูมิ, ความชื้นและแสงสว่างเล็ดลอดเข้าฟิล์ม
- ใช้ได้ครั้งเดียว ไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้

## 2.6 เครื่องวัดรังสีประจำบุคคลชนิด Thermoluminescent Dosimeter Badge (TLD badges)

การใช้แผ่น TLD แทนฟิล์มเพื่อบันทึกปริมาณรังสีบุคคล ดังรูปที่ 2.4 ผลึก TLD เช่น LiF สามารถเก็บสะสมพลังงานรังสีไว้ในโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถอ่านค่ากลับออกมาได้เมื่อกระตุ้น TLD ด้วยความร้อนประมาณ 200-400 °C ให้ TLD คายพลังงานที่สะสมไว้ออกมาเป็นแสง เครื่องอ่านค่า TLD จะแปรค่าปริมาณแสงตามปริมาณรังสีที่ TLD ได้รับ TLD มีความไวรังสีวัดได้ต่ำถึง 5 mRem (0.05 mSv) และมีความแม่นยำ  $\pm 7\%$  ซึ่งสูงกว่าฟิล์มแบดจ์ และสามารถสะสมปริมาณรังสีได้นานถึง 3 เดือน

ข้อดีของ TLD badge มีหลายประการ เช่น

- เลขอะตอมเฉลี่ยของ LiF ใกล้เคียงกับ soft tissue จัดเป็นตัววัดรังสีที่มีคุณสมบัติเป็น tissue equivalent material
- สามารถใช้งานวัดปริมาณรังสีสะสมได้นานถึง 3 เดือน
- นำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง
- มีความแม่นยำและมีความไวรังสีสูง
- ไม่มีความขุ่นมัว

ข้อเสียของ TLD badge คือ

- TLD มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายสูง
- ไม่สามารถเก็บเป็นหลักฐานถาวร

## 2.7 การใช้เครื่องวัดรังสีประจำบุคคล

ผู้ที่ทำงานสัมผัสรังสีทุกคนต้องติดเครื่องวัดรังสีประจำบุคคล (ฟิล์มแบดจ์ หรือ ทีแอลดีแบดจ์) เป็นประจำเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีตลอดตัว (**whole body dose**) ห้ามนำฟิล์มแบดจ์หรือทีแอลดีแบดจ์ออกจากที่ทำงานเพราะอาจได้รับรังสีจากแหล่งอื่นที่ไม่ได้เกิดจากการทำงาน ฟิล์มแบดจ์หรือทีแอลดีแบดจ์ ไวต่อแสงและความร้อน การทิ้งเครื่องวัดรังสีเหล่านี้ไว้ในรถหรือที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ผลการประเมินผิดพลาดได้ ต้องเปลี่ยนเป็นประจำทุกเดือน หรืออาจทุก 3 เดือน

การวัดรังสีตลอดตัวควรติดฟิล์มแบดจ์หรือทีแอลดีแบดจ์ไว้ที่ลำตัว การทำงานกับรังสีเบตา 32P ที่มีความแรงรังสีเกิน 1 mCi จำเป็นต้องใช้ **extremity badge** เพิ่มที่มือหรือนิ้วมือ

ผู้ใช้เครื่องวัดรังสีประจำบุคคล (ฟิล์มแบดจ์หรือทีแอลดีแบดจ์) ต้องไม่ทำให้เครื่องเปื้อนรังสี หากทำหายต้องแจ้งเจ้าหน้าที่กำกับดูแลความปลอดภัย และไม่อาจหยิบยืมฟิล์มแบดจ์หรือทีแอลดีแบดจ์ของผู้อื่นมาใช้แทน

## บทที่ 3 อันตรกิริยาของรังสีต่อสสาร

### 3.1 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และแกมมาต่อสสาร

เมื่อรังสีเอกซ์หรือแกมมาเคลื่อนที่ผ่านสสารซึ่งประกอบด้วยอะตอมต่างๆ อะตอมแต่ละตัวล้วนมีค่าพื้นที่ตัดขวาง (cross section) ให้เกิดอันตรกิริยากับรังสีเอกซ์หรือแกมมา ซึ่งจะลดทอนความเข้มรังสีลง โดยแสดงในทอมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) มักใช้สัญลักษณ์  $\mu$  หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ใช้สัญลักษณ์  $\mu/\rho$

ความเข้มรังสีที่ลดลง

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-(\mu/\rho) \rho x}$$

เมื่อ  $I$  และ  $I_0$  เป็นความเข้มรังสีที่มากกระทบและทะลุผ่านตัวกลางความหนา  $X$  ที่มีความหนาแน่น  $\rho$  ตามลำดับ

กลไกของรังสีเอกซ์หรือแกมมาพลังงานต่างๆอาจเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางหรือสสารได้หลายรูปแบบ ที่สำคัญเช่น Rayleigh หรือ Coherent scattering, photoelectric effects, Compton scattering, pair production และ photonuclear interaction อันตรกิริยาแต่ละแบบเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานต่างๆกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเชิงเส้น ( $\mu$ ) จึงประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนย่อยๆของแต่ละอันตรกิริยา เช่น  $\sigma_{coh}$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_c$ ,  $K$ ,  $\tau_{nucl}$  ตามลำดับ

รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ช่วงพลังงานของรังสีแกมมาตามสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากว้างกว่ารังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรอบๆอะตอม ส่วนรังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียส ทั้งรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาต่อไปจะเรียกรวมว่า "โฟตอน"

#### 3.1.1 Rayleigh หรือ coherent scattering

เกิดเมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนชั้นในใกล้ๆนิวเคลียส โฟตอนจะถูกเปลี่ยนแปลงทิศทางแต่เกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง อันตรกิริยานี้จะเกิดมากเมื่อตัวกลางมีเลขอะตอมสูงขึ้นไป แต่จะเกิดเฉพาะในโฟตอนช่วงพลังงานต่ำๆ  $< 10$  keV เท่านั้น

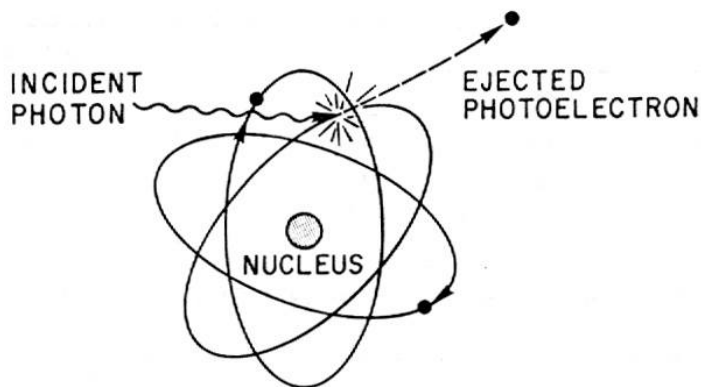
$$\sigma_{coh} \propto Z^2/E^2 ; E < 10 \text{ keV}$$

#### 3.1.2 Photoelectric effects

อันตรกิริยานี้จะเกิดมากที่โฟตอนพลังงานต่ำ พลังงานเกือบทั้งหมดของโฟตอนถูกดูดกลืนและถ่ายเทไปยังอิเล็กตรอนชั้นในให้หลุดออกมา อิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้าแทนที่พร้อมคายพลังงานออกมาเป็น characteristic x-rays ดังแสดงในรูปที่ 3.1 อันตรกิริยาจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่าพลังงานของ orbital electron ระดับนั้นเพียงเล็กน้อย โอกาสการเกิดอันตรกิริยานี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น

$$\tau \propto 1/E^3$$

การดูดกลืนรังสีแบบ photoelectric effects ในช่วงระดับพลังงานใกล้ K-shell ของวัสดุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 30 ขึ้นไป ซึ่งตรงกับพลังงานเอกซเรย์ในรังสีวินิจฉัย (10-100 keV) ปรากฏการณ์นี้จะเอื้อประโยชน์ต่อการเลือกใช้วัสดุทำฉากเรืองแสงเอกซเรย์ หรือการเลือกสารเคมีทำสารทึบรังสี



รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดอันตรกิริยาแบบ photoelectric effects เมื่อโฟตอนชนและเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นในให้หลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนชั้นนอกซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้าแทนที่ช่องว่างอิเล็กตรอน พร้อมคายพลังงานออกมาเป็น characteristic x-rays ที่พลังงานเท่ากับความแตกต่างระดับชั้นพลังงานของอะตอมชนิดนั้น

### 3.1.3 Compton scattering

เมื่อพลังงานบางส่วนของโฟตอนถูกถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนรอบนอกของอะตอมหรืออิเล็กตรอนอิสระ (ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานที่มาตกกระทบหลายเท่า) โฟตอนถูกเปลี่ยนทิศทางเป็นรังสีกระเจิง และอิเล็กตรอนถูกชนกระเด็นไปทิศทางอื่น โดยทั้งหมดยังคงเป็นไปตามกฎการทรงพลังงานและโมเมนตัม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 อันตรกิริยาแบบ Compton scattering เกิดขึ้นได้กับพลังงานโฟตอนในช่วงกว้างตั้งแต่ 30 keV ถึง 10 MeV อันตรกิริยานี้ไม่ขึ้นกับเลขอะตอมโดยตรง แต่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของตัวกลาง ปรากฏการณ์นี้จึงเอื้อประโยชน์ในเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เพราะเป็นการสร้างภาพจากรังสีที่ทะลุคนไข้ โดยสัมพันธ์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของเนื้อเยื่อ การใช้เอกซเรย์พลังงานสูง (120-140 keV) เพื่อเป็นการลด photoelectric effects จากเอกซเรย์ช่วงพลังงานต่ำ Compton scattering เกิดที่พลังงานโฟตอน >100 keV โดย

$$\sigma_c \propto 1/E$$

ปริมาณรังสีกระเจิงใน Compton scattering ที่โฟตอนพลังงานต่ำ (10-40 keV) จะเท่ากันทั้ง forward และ backward scatter รังสีกระเจิงจากโฟตอนพลังงานสูงส่วนใหญ่จะไปข้างหน้า

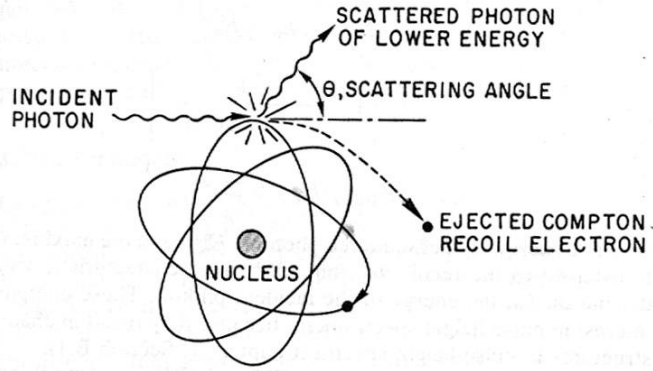
พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงไปจะลดลงเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน พิจารณาจากความยาวคลื่นของรังสีกระเจิงที่เปลี่ยนไปดังนี้

$$\Delta\lambda = (h/m_e c) (1 - \cos\theta)$$

เมื่อ  $h$  = Planck's constant,  $m_e$  = มวลอิเล็กตรอน และ  $C$  = ความเร็วของแสง ดังนั้น

$$\Delta\lambda = 0.024 (1 - \cos\theta) \text{ \AA} \text{ เมื่อใช้ความยาวคลื่นเป็น Angstrom (10}^{-10} \text{ เมตร)}$$

สัดส่วนพลังงานของโฟตอนที่สูญเสียไปจากรังสีที่ตกกระทบจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของรังสี เช่น ที่มุม  $60^\circ$  สัดส่วนพลังงานที่อิเล็กตรอนพาออกไป 5% ที่ 60 keV, 9% ที่ 100 keV และ 50% ที่ 1 MV



รูปที่ 3.2 แสดงอันตรกิริยาแบบ Compton scattering พลังงานบางส่วนของโฟตอนที่ตกกระทบสูญเสียให้กับ Compton recoil electron ที่หลุดออกไป พลังงานที่เหลือติดไปกับ Compton scatter ที่กระเจิงไปเป็นมุม  $\theta$  กับแนวเดิม

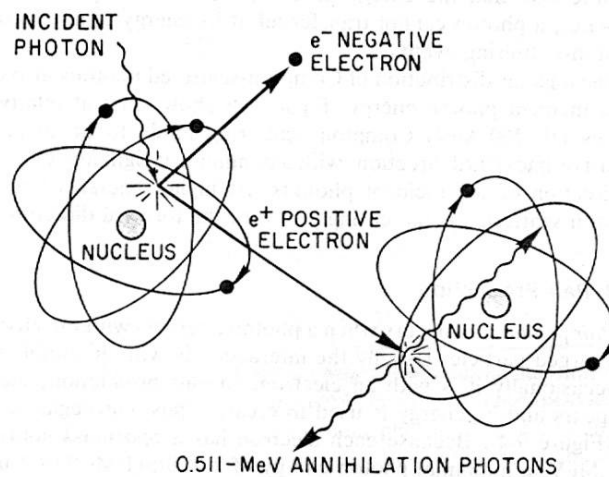
### 3.1.4 Pair production

เป็นอันตรกิริยาแปรรูปพลังงานโฟตอนเป็นอนุภาคคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน โดยโฟตอนที่ตกกระทบต้องมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV ซึ่งเป็นสมมูลย์พลังงานของคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน (โดย  $E = m_e c^2$ , เมื่อ  $m_e$  เป็นมวลอิเล็กตรอน  $E = 0.511$  Mev) อิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะไม่มีเสถียรภาพทางพลังงานจะรวมตัวกันกลับพร้อมคายพลังงานจลน์ออกมา 0.511 Mev สองตัวในทิศทางตรงข้ามกันเสมอ เรียกว่า annihilation x-rays ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ปรากฏการณ์นี้เอื้อประโยชน์ต่อการตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่อง Positron Emission Tomography (PET scan)

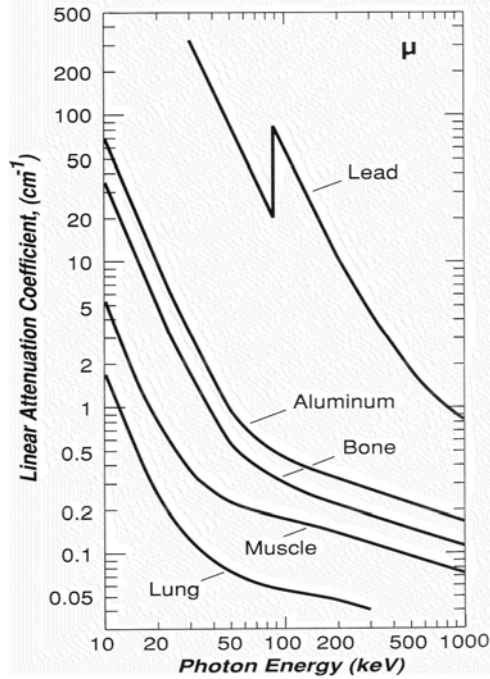
อันตรกิริยาแบบ pair production จะเกิดมากในช่วงพลังงานโฟตอน >5-50 MeV โอกาสการเกิด pair production จะเพิ่มตามพลังงานโฟตอนและเลขอะตอมของตัวกลาง

$$K \propto (E - 1.02 \text{ MeV}) \cdot Z$$

เมื่อโฟตอนมีพลังงาน >3 MeV การเกิด pair production จะชัดเจนขึ้นในตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง



รูปที่ 3.3 แสดงอันตรกิริยาแบบ pair production ซึ่งโฟตอนตกกระทบต้องมีพลังงาน >1.02 MeV แปรรูปเป็นคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน เมื่ออนุภาคไม่เสถียรนี้รวมตัวกลับจะคายพลังงาน 0.511 MeV พร้อมกันในทิศทางตรงกันข้ามเสมอ



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเชิงเส้น ( $\mu$ ) ที่พลังงานโฟตอนต่างๆ ในตัวกลางชนิดต่างๆ คือ ตะกั่ว, อะลูมิเนียม, กระดูก, กล้ามเนื้อ และเนื้อเยื่อปอด ในตะกั่วจะแสดงปรากฏการณ์ K-edge absorption เนื่องจาก photoelectric effects ได้ชัดเจน

โอกาสการเกิดอันตรกิริยาแต่ละอย่างนั้นขึ้นกับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบและเลขอะตอมของตัวกลางเป็นสำคัญ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีจึงเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมของทุกอันตรกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3.4

$$\mu = \sigma_{\text{coh}} + \tau + \sigma_c + K + \tau_{\text{nucl}}$$

สมการการดูดกลืนรังสีเชิงเส้น จึงอาจเขียนได้เป็น

$$I = I_0 e^{-\sigma_{\text{coh}} X} e^{-\tau X} e^{-\sigma_c X} e^{-KX} e^{-\tau_{\text{nucl}} X} = I_0 e^{-\mu X}$$

### 3.2 อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนต่อสสาร

นิวตรอนไม่สามารถเกิดได้จากธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ นิวตรอนเกิดได้จากผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ฟิชชันบางตัวที่มีเวลาครึ่งชีวิตสั้นๆ และสามารถสลายตัวให้รังสีนิวตรอน เช่น Californium-252 นิวตรอนส่วนใหญ่จะได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูหรือเครื่องเร่งอนุภาค

นิวตรอนแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ fast neutron มีพลังงาน  $>0.1$  MeV และ thermal neutron ซึ่งมีพลังงานต่ำพอๆกับโมเลกุลของก๊าซในอากาศ นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์มักเป็น fast neutron พลังงานของนิวตรอนจะสูญเสียไปกับการชนกับนิวเคลียส และลดพลังงานลงจนเป็น thermal neutron อันตรกิริยาที่สำคัญ คือการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ซึ่งทำให้นิวตรอนเสียพลังงานจนให้กับนิวเคลียส และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานดังนี้ คือ

$$\langle E = E_0 - E_f = E_0 \cdot 4Mm / (M+m)^2 \cos^2 \theta$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นพลังงานนิวตรอนที่มาตกกระทบก่อนการชน และ  $E_f$  เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังการชน

$m$  เป็นมวลของนิวตรอนที่มาชน และ  $M$  เป็นมวลของนิวเคลียสที่ถูกชน,  $\theta$  เป็นมุมระหว่างนิวเคลียสและนิวตรอนที่กระเด็นเปลี่ยนทิศทางไป

สัดส่วนการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนจะมากเมื่อเกิดอันตรกิริยากับนิวไคลด์เล็กๆ โดยเฉพาะไฮโดรเจนซึ่งมีมวลพอกๆกับนิวตรอน นิวตรอนจึงมีผลทำลายต่อสิ่งมีชีวิตได้มากเนื่องจากมีไฮโดรเจนประกอบอยู่มาก ดังนั้นสารประกอบที่มีไฮโดรเจนมากๆ เช่น น้ำ, ไขมันหรือพาราฟิน จึงหยุดยั้งหรือกั้นรังสีนิวตรอนได้ดี

Fast neutron จะเกิดอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) ในตัวกลาง และทำให้ระดับพลังงานในนิวเคลียสของตัวกลางนั้นอยู่ใน excited state ซึ่งจะต้องปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีแกมมา แต่ถ้านิวตรอนที่มาตกกระทบมีพลังงาน  $>10$  MeV จะทำให้เกิดนิวตรอนตัวที่สองได้อีก

การดูดกลืนรังสีนิวตรอนจะแปรผกผันกับพลังงานนิวตรอนยกกำลังสองเมื่อนิวตรอนมีพลังงาน  $>0.025$  eV วัสดุที่กั้นรังสีนิวตรอนจึงอาจใช้ Boron-10 เป็นส่วนประกอบ เนื่องจาก Boron-10 มี neutron absorption cross-section สูง การดูดจับรังสีนิวตรอนในตัวกลางอาจมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาตามมา หรือทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนเป็นสารกัมมันตรังสีได้ การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในบริเวณรังสีนิวตรอน จึงต้องระมัดระวังการเกิดธาตุกัมมันตรังสีที่มีเวลาครึ่งชีวิตยาวจากปฏิกิริยานิวตรอนได้ง่ายๆ เช่น  $\text{Co}^{59}(n,\gamma)\text{Co}^{60}$  เป็นต้น

อันตรกิริยาของโฟตอนและนิวตรอนต่างๆเหล่านี้ เป็นจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ในตัวกลาง มีผลกระทบต่อการใช้รังสีในเครื่องมือ และมีผลกระทบมากขึ้นเมื่อเกิดขึ้นในตัวกลางที่เป็นสิ่งมีชีวิต อันตรกิริยาพื้นฐานเหล่านี้ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในตัวกลาง และเป็นตัวก่ออนุมูลอิสระหรือ free radical ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเซลล์มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่มากกว่า 70% รายละเอียดการเกิดปฏิกิริยาเหนี่ยวนำอนุมูลอิสระ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก “ตำรารังสีรักษา – ฟิสิกส์ ชีวรังสี การรักษาพยาบาลผู้ป่วย บทที่ 2: กระบวนการถ่ายเทพลังงานและการตอบโต้ของเซลล์ต่อรังสี, พวงทอง ไกรพิบูลย์ และคณะ, 2534.

การเกิดอนุมูลอิสระปริมาณมากจากอันตรกิริยาของรังสี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวเคมีที่องค์ประกอบของเซลล์ หรืออาจเป็นในนิวเคลียสที่มี DNA ประกอบอยู่

## บทที่ 4 ผลกระทบจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

### 4.1 ข้อมูลผู้ได้รับรังสี

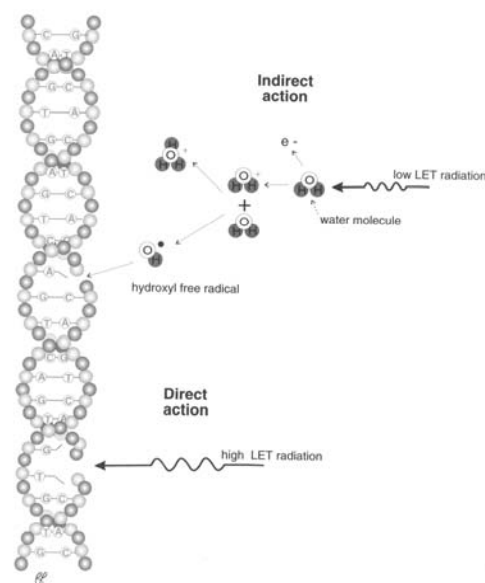
การทดลองผลกระทบจากรังสีทำได้ยาก การใช้ข้อมูลจากแหล่งประชากรที่ได้รับรังสีระดับสูงช่วยในการศึกษาผลกระทบจากรังสีได้มาก ข้อมูลจากแหล่งสำคัญ เช่น

- คนทำงานกับรังสีในยุคเริ่มต้นใช้รังสี เช่น รังสีแพทย์ ซึ่งได้รับปริมาณรังสีสูงก่อนที่จะรู้จักผลกระทบจากรังสี ซึ่งขณะนั้นยังไม่มีมาตรฐานสำหรับคนทำงานกับรังสี
- ผู้ที่มีชีวิตรอดจากระเบิดปรมาณูที่เมืองฮิโรชิมา และนางาซากิ มากกว่า 100,000 คน ประมาณว่าผู้คนเหล่านั้นได้รับปริมาณรังสีมากกว่า 50,000 mRem
- ผู้ที่ได้รับผลกระทบจากโรงงานไฟฟ้าระเบิดที่เมือง Chernobyl.
- คนกลุ่มใหญ่ซึ่งเป็นคนไข้มะเร็งที่ได้รับรังสีบำบัด

### 4.2 ปฏิกริยาของรังสีต่อโมเลกุลและเซลล์

อาการบาดเจ็บทางรังสีมีสาเหตุหลักมาจากการแตกตัวของเนื้อเยื่อในร่างกาย เมื่อรังสีชนกับเซลล์จะเกิดการแตกตัวและตื่นตัว (ionization and excitation) ที่โมเลกุลของเซลล์หรือองค์ประกอบของเซลล์ซึ่งส่วนใหญ่มีน้ำประกอบอยู่ ผลกระทบจากรังสีตามลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของรังสีต่อเซลล์ จึงเรียกว่าเป็นปฏิกริยาจากรังสีโดยตรงหรือโดยอ้อม (direct หรือ indirect action) ดังรูปที่ 4.1

- ปฏิกริยาจากรังสีโดยตรง คือ ผลกระทบจากรังสีที่เกิดเมื่อรังสีทำให้เกิด ionization และถูกดูดกลืนใน macromolecule ภายในเซลล์ (เช่น DNA, RNA, โปรตีน, เอนไซม์ เป็นต้น) ทำให้โครงสร้างของ macromolecules เกิดความผิดปกติ ชักนำและเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา
- ปฏิกริยาจากรังสีโดยอ้อม คือ ผลกระทบเมื่อรังสีทำให้โมเลกุลโปรตีนในเซลล์เกิด ionization โมเลกุลที่เกิดปฏิกริยาทางอ้อมนี้มากที่สุดคือน้ำ ทำให้เกิดปฏิกริยาเคมีเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals) และเกิดสารประกอบ peroxide เมื่อมีปฏิกริยาจำนวนมากจะเกิดการทำลายต่อเซลล์หรืออวัยวะเมื่อปริมาณสารประกอบ peroxide มีมากเกินไป



รูปที่ 4.1 แสดงการเกิดปฏิกริยารังสีโดยตรงและโดยอ้อมต่อโมเลกุลของ DNA

#### 4.3 ความไวรังสีของเซลล์

เซลล์บางชนิดมีความไวต่อปัจจัยต่างๆในสภาวะแวดล้อม เช่น ไวรัส, ท็อกซินและรังสี อัตราการทำลายของเซลล์เนื่องจากรังสีขึ้นอยู่กับความไวต่อรังสีของเซลล์ชนิดนั้น ในค.ศ.1906 ได้มีการทดลองหาระดับความไวรังสีของเซลล์ชนิดต่างๆในระดับเซลล์โดย Bergonie และ Tribondeau ทั้งสองได้เสนอเป็นหลักการว่า “ความไวรังสีของเซลล์ขึ้นตรงกับความสามารถในการแบ่งเซลล์และแปรผกผันกับ degree of differentiation ของเซลล์ชนิดนั้น” หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เซลล์ที่แบ่งตัวได้เร็วที่สุดและไม่เป็น fully mother cell จะถูกรังสีทำลายได้มากที่สุด ตัวอย่างเซลล์ที่แบ่งตัวได้เร็วเช่น เซลล์สร้างเม็ดเลือด, เซลล์เยื่อบุลำไส้เล็ก, เซลล์ขุมขน, เซลล์สร้างสเปิร์ม ส่วนเซลล์ที่แบ่งตัวช้าเช่นเซลล์สมอง หรือเซลล์กล้ามเนื้อไม่ไวต่อการทำลายจากรังสี ความไวรังสีของเซลล์ชนิดต่างๆเรียงลำดับไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับความไวของรังสีตามชนิดของเนื้อเยื่อต่างๆเมื่อได้รับรังสี แสดงในตารางข้างล่างนี้

เซลล์ไวรังสี:
Mature red blood corpuscles
Liver cells
Nerve cells
Pituitary cells
Thyroid cells
Muscle cells
Bone and cartilage cells
Skin epithelium
Cornea
Squamous mucous epithelium
Renal tubules
Lung-tissue cells
Lens
Gonadal germ cells
Bone marrow cells
Lymphocytes

↓

เซลล์ไวรังสี:

#### 4.4 การเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมื่อได้รับรังสี

เมื่อเซลล์ได้รับรังสีอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นลำดับคือ

##### 1. ไม่มีผลกระทบต่อเซลล์หากปริมาณรังสีต่ำมาก

##### 2. เซลล์สามารถซ่อมแซมส่วนที่ถูกทำลายและคืนกลับเป็นปกติได้

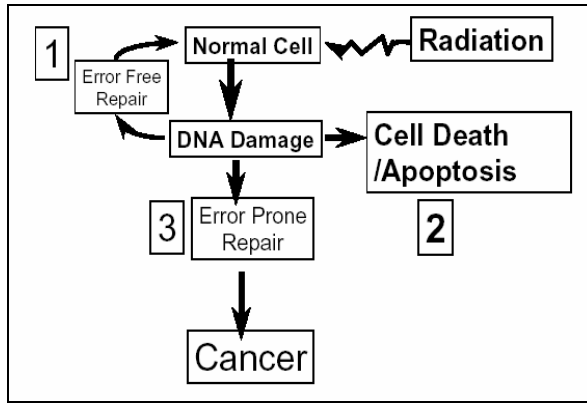
องค์ประกอบส่วนใหญ่ของเซลล์เป็นน้ำ เมื่อเซลล์ได้รับรังสีก็มักเกิดอันตรกิริยากับน้ำในเซลล์ ซึ่งเซลล์มักซ่อมแซมการโดนทำลายแบบนี้ได้ รังสีอาจทะลุไปโดนนิวเคลียสของเซลล์ได้ โดยที่นิวเคลียสเป็นที่เก็บส่วนสำคัญเกี่ยวกับการทำงานของเซลล์ เช่นโครโมโซม เมื่อโครโมโซมทำสำเนาตัวเองและถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมไปยังเซลล์ใหม่ การที่โครโมโซมถูกทำลายนั้นค่อนข้างยาก แต่ก็ยังซ่อมแซมได้เพราะในแต่ละวันคนเรามีการซ่อมแซมโครโมโซมถึง 100,000 ครั้ง

##### 3. เซลล์ถูกทำลายและแบ่งตัวผิดปกติ

บางครั้งเซลล์ที่ถูกทำลายไม่อาจซ่อมแซมได้หรือซ่อมแซมได้ไม่สมบูรณ์ เซลล์นั้นจึงไม่อาจทำงานได้สมบูรณ์หรือเซลล์อาจตาย อาจเป็นเพราะว่าโครโมโซมในนิวเคลียสถูกทำลายและซ่อมแซมได้ไม่ถูกต้อง จึงเกิดเป็นการกลายพันธุ์ (mutation) หรือเกิดผลกระทบทางพันธุกรรม

##### 4. เซลล์ตาย

เมื่อเซลล์ได้รับปริมาณรังสีสูงหรือได้รับรังสีในเวลาอันรวดเร็ว เซลล์จะตายเนื่องจากไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ทัน



รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมื่อเซลล์ปกติได้รับรังสี เซลล์อาจซ่อมแซมตัวเองได้หรือตาย การเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์ที่ซ่อมแซมไม่ได้อาจกลายเป็นเซลล์ผิดปกติหรือเป็นเซลล์มะเร็ง

#### 4.5 ผลกระทบจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

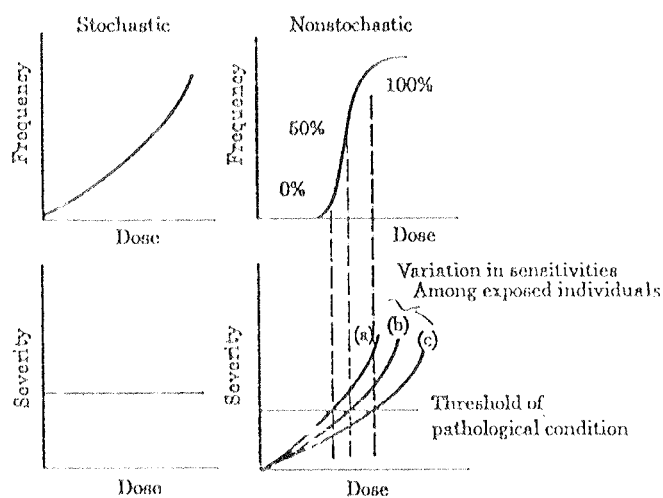
สิ่งที่เป็นผลกระทบสำคัญที่สุดจากการทำลายของรังสีในเซลล์คือ DNA ในนิวเคลียสถูกทำลาย ผลกระทบทางชีววิทยาเมื่อ DNA ที่ถูกทำลายไม่สามารถซ่อมแซมได้หรือซ่อมกลับมาได้ไม่เหมือนเดิม DNA ที่ถูกทำลายมากจะตาย จำนวนเซลล์ที่ตายมากเข้าจะทำให้การทำงานของอวัยวะล้มเหลวและเสียชีวิตในที่สุด DNA ที่ซ่อมแซมไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดมะเร็งต่อมน้ำเหลือง (lymphoma) หรือมะเร็งที่อวัยวะต่างๆ ผลกระทบจากรังสียังสามารถแยกได้เป็นผลกระทบรังสีแบบเฉียบพลันและแบบระยะยาว

##### ผลกระทบรังสีแบบเฉียบพลัน (Acute หรือ non-stochastic effects)

เป็นผลจากรังสีแบบมีระดับความรุนแรง (ได้รับปริมาณรังสีสูงกว่า 10 rad ในครั้งเดียว) ที่มีปริมาณรังสีขีดเริ่ม ตัวอย่างเช่น การเกิดต่อกระดูกจากรังสี บางครั้งอาจเรียกว่า deterministic effects

##### ผลกระทบรังสีระยะยาว (Delayed หรือ stochastic effects)

เป็นผลกระทบจากการได้รับปริมาณรังสีต่ำต่อเนื่อง (กว่า 10 rad หรือไม่เกิน 150 rad ในเวลา 30 ปี) ผลกระทบแบบนี้เกิดขึ้นตามโอกาสหรือความเสี่ยงต่อรังสีมากกว่าระดับปริมาณรังสีที่ได้รับ เรามักตั้งสมมติฐานว่าโอกาสเกิดผลกระทบนี้เป็นเชิงเส้นตรงโดยไม่มีที่มีปริมาณรังสีขีดเริ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลกระทบแบบ stochastic เช่น ผลกระทบด้านพันธุกรรม และการเกิดมะเร็ง เป็นต้น



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของโอกาส (frequency) และความรุนแรง (severity) ของผลกระทบจากรังสีแบบ non-stochastic effects และ stochastic effects กับปริมาณรังสี

#### 4.6 อาการจากการได้รับรังสีแบบเฉียบพลันทั่วร่างกายในคน

เป็นความจำเป็นที่จะต้องทราบผลกระทบรังสีระยะสั้น (acute effects) จากการได้รับรังสีปริมาณสูง หากไม่มีข้อมูลเหล่านี้เราจะไม่มีการทราบระดับอันตรายของงานที่ทำ เนื่องจากรังสีเป็นมองไม่เห็น, ไม่ได้กลิ่น หรือรู้สัมผัส ทำให้รู้สึกยิ่งกลัวรังสี ตารางที่ 4.2 ข้างล่างนี้จะบอกผลกระทบจากระดับรังสีสูงปริมาณต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบจากระดับรังสีสูงปริมาณต่าง ๆ กัน เมื่อได้รับรังสีตลอดตัวในครั้งเดียว

ปริมาณรังสี (mSv)	อาการ
0-250	ไม่ปรากฏอาการใดๆ
250-500	เม็ดเลือดขาวลดลงเล็กน้อย ผลระยะยาวมีโอกาสน้อย
500-1,000	เม็ดเลือดขาวลดลงชัดเจน แต่จะค่อยๆ กลับเป็นปกติ มีอาการคลื่นเหียนและอ่อนเพลีย ผลระยะยาวอาจจะมีผลที่จะทำให้อายุสั้น
1,000-2,000	มีอาการคลื่นเหียน อ่อนเพลีย มีอาการอาเจียน ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง เม็ดเลือดขาวลดลง ผลติดตามภายใน 1-2 สัปดาห์ คือ ตัวซีด ผม่วง อ่อนเพลีย ส่วนใหญ่จะค่อยๆ กลับเป็นปกติ 2-3% เสียชีวิต 1% หายเป็นปกติ แต่อายุสั้น
2,000-3,000	อ่อนเพลีย อาเจียน อาจมีอาการท้องเสียภายใน 2-3 ชั่วโมง เม็ดเลือดลดลง ผลระยะยาว ผม่วง เบื่ออาหาร ตัวซีด คอแห้ง มีไข้ในสัปดาห์แรก โดยทั่วไป กลับเป็นปกติใน 3 เดือน บางคนอาจจะเสียชีวิตภายใน 2-6 สัปดาห์ รอดชีวิต 2-3 % มีอายุสั้นลง เป็นมะเร็ง
3,000-6,000	อ่อนเพลีย อาเจียน และท้องร่วงภายใน 1-2 ชั่วโมง เม็ดเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว ติดตามด้วยอาการผม่วง มีไข้ อ่อนเพลีย มีอาการอักเสบบริเวณปาก และในลำคออย่างรุนแรง มีเลือดออก ถ้าได้รับรังสี 4,500 mSv มีโอกาสเสียชีวิต 50% ถ้าได้รับรังสี 6,000 mSv จะเสียชีวิตใน 2 สัปดาห์ ส่วนคนที่รอดชีวิตก็จะเสียชีวิตจากมะเร็งในเวลาต่อมา
6,000-12,000	ผิวหนังมีสีแดง ผม่วงภายใน 2-3 วัน เสียชีวิตภายใน 2-3 สัปดาห์
เกิน 12,000	ผิวหนังลอก เสียชีวิตภายใน 2-3 วัน
ประมาณ 100,000	เสียชีวิตภายในไม่กี่ชั่วโมง

#### 4.7 ผลกระทบจากรังสีต่อทารกในครรภ์

ในขณะที่คนทำงานรังสีมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งหรือเกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมนั้น ทารกในครรภ์มีความเสี่ยงสูงกว่ามาก สตรีมีครรภ์หรือสตรีที่คาดว่าตั้งครรภ์ควรมีความระมัดระวังต่อรังสีอย่างสูง ตัวอ่อนในครรภ์ (embryo) จะไวต่อรังสีมากในระหว่าง 3 เดือนแรกภายหลังการปฏิสนธิ ในขณะที่ผู้เป็นแม่อาจยังไม่ทราบว่าตนเองตั้งครรภ์ โอกาสและผลกระทบจากรังสีต่อทารกในครรภ์แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบจากรังสีต่อทารกในครรภ์ที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาหลังปฏิสนธิ	ผลกระทบ
0-1 สัปดาห์ (pre-implantation)	ทารกตายในท้อง
2-7 สัปดาห์ (organogenesis)	พัฒนาเป็นความผิดปกติหรือโตไม่ขึ้น หรือเป็นมะเร็ง
8-40 สัปดาห์ (fetal stage)	เหมือนข้างบน และอาจทำให้อวัยวะทำงานผิดปกติ

## บทที่ 5 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี

### 5.1 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี

หลักการป้องกันอันตรายจากรังสีตาม Basic Safety Standard (BSS) ใช้หลักการ "practices" และ "interventions" ซึ่งมีความหมายดังนี้

**Practices** เป็นกิจกรรมเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณรังสีแก่ประชากรนอกเหนือจากการได้รับรังสีจากธรรมชาติ รวมถึงการใช้รังสีหรือสารรังสีที่เพิ่มขึ้นในวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตร การศึกษา, อบรมวิจัย แม้กระทั่งการเพิ่มพลังงานจากพลังงานนิวเคลียร์ อีกทั้งกิจการที่เกี่ยวข้องเช่น อุตสาหกรรมอวกาศ, เหมืองแร่และการถลุงสินแร่กัมมันตรังสีและกระบวนการจัดการกากรังสี

**Intervention** เป็นกิจกรรมหาแนวทางลดปริมาณรังสีที่ใช้อยู่ ทั้งกรณีที่เป็นการได้รับรังสีต่อเนื่อง (chronic exposure เช่น ก๊าซเรดอน) และฉุกเฉิน (เช่นการปนเปื้อนสารรังสีภายหลังอุบัติเหตุรังสี)

การป้องกันอันตรายจากรังสีภายใต้ Basic Safety Standard ตามหลักการของ ICRP (International Commission on Radiological Protection) สรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

- **การวิเคราะห์คุณโทษในการใช้รังสี (Justification of the practice)** ไม่ควรสร้างงานที่ใช้รังสีจนกว่าจะได้รับประโยชน์จากงานนั้นมากกว่าโทษ
- **ใช้การป้องกันรังสีอย่างเหมาะสมพอเพียง (Optimization of protection)** ปริมาณรังสีที่ได้รับ ความเสี่ยงต่อการได้รับรังสีต้องให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ตามความเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจและสังคมแวดล้อม (**as low as reasonably achievable (ALARA) economic and social factors**)
- **จำกัดปริมาณรังสีรายบุคคล (Limitation of individual risk)** ปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับต้องไม่เกินปริมาณรังสีที่จำกัดที่กำหนดไว้

หลักการทั้งสามประการนี้ใช้ในการป้องกันอันตรายจากรังสีแก่ผู้ทำงานรังสีและประชาชนทั่วไป อย่างไรก็ตามการป้องกันรังสีแก่ผู้ป่วยในระหว่างการรักษาโรคด้วย ionization radiation นั้นจะใช้เฉพาะหลักการแรกคือ justification และ optimization ปริมาณรังสีที่จำกัด หรือ Dose Limits นั้นไม่ได้ใช้กับการตรวจรักษาทางการแพทย์ และเป็นแนวทางให้แพทย์ได้สร้างแผนปฏิบัติงานที่ดี Dose Limits ยังใช้ในหลักการลดปริมาณรังสีที่ใช้อยู่ได้ด้วย

วัตถุประสงค์ของ Basic Safety Standard คือการป้องกันผลกระทบจากปริมาณรังสีสูงในช่วงระยะเวลาสั้น และเข้มงวดกับการเกิดผลกระทบในระยะยาว สมมุติว่าการพิจารณาใช้รังสีว่าดีแล้ว แต่ต้องป้องกันการแผ่รังสีแก่บุคคลได้อย่างเหมาะสมและรับประกันความปลอดภัยของแหล่งกำเนิดรังสี

### 5.2 หลักควบคุมการใช้รังสี (Radiation Control Methodology)

- **ใช้ The ALARA Concept** การกำหนด ALARA concept อย่างง่าย ๆ คือการรักษาระดับปริมาณรังสีให้ต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ ปรชญานี้ยังเป็นหลักการป้องกันรังสีสมัยใหม่
- **จำกัดการได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอก** ใช้หลักการง่าย ๆ 3 ประการในการป้องกันการได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอกคือ การใช้ระยะทาง, เวลาและเครื่องกำบังรังสี (time, distance, and shielding.) การวัดรังสีมักทำในรูปอัตรารังสี เช่น mRem/hr ดังนั้นเวลาในการทำงานบริเวณนั้นจึงต้องสั้นที่สุด

### 5.3 แนวปฏิบัติในการป้องกันอันตรายจากรังสี

การป้องกันอันตรายจากรังสีแบ่งตามประเภทของต้นกำเนิดรังสี คือ แหล่งกำเนิดรังสีนอกร่างกาย (External exposure) และแหล่งกำเนิดรังสีภายในร่างกาย (Internal exposure)

#### 5.3.1 การป้องกันอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีนอกร่างกาย (External exposure)

เป็นการป้องกันการแผ่รังสีมาโดนร่างกาย ใช้หลัก 3 ประการ คือ

- เวลาที่น้อยที่สุดในการสัมผัสรังสี
- ระยะทางที่ห่างแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุด
- เครื่องกำบังรังสีตามความจำเป็น

ประการสำคัญที่สุดคือต้องสำรวจควบคุมอย่างสม่ำเสมอ

#### 5.3.2 การป้องกันอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีในร่างกาย (internal exposure)

การปนเปื้อนรังสีเข้าสู่ร่างกายอาจเกิดขึ้นได้ 4 ทางหลัก เช่น ทางกรดื่มน้ำ, ทางการหายใจ, ซึมเข้าทางผิวหนัง และเข้าทางบาดแผล การป้องกันความเปราะเปื้อนรังสีขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น

1. การออกแบบสถานที่ปฏิบัติงานรังสี
2. การวางกฎระเบียบการทำงาน
3. บุคลากรมีความรู้ ความเข้าใจงานเป็นอย่างดี
4. สำรวจความเปราะเปื้อนสม่ำเสมอ
5. วางแผนงานอย่างรัดกุม

#### 5.3.3 การสำรวจการปนเปื้อนรังสี

การสำรวจรอยเปื้อนรังสีเป็นสิ่งจำเป็นต้องทำเมื่อมีการใช้สารกัมมันตรังสี การวัดที่ไม่ถูกต้องทำให้เกิดการปนเปื้อนรังสีโดยไม่รู้ตัว การสำรวจรอยเปื้อนรังสีทำได้โดย

1. ตรวจวัดรอยเปื้อนพื้นผิว (Surface contamination survey หรือ wipe test)
2. ตรวจจับรังสีปนเปื้อนในอากาศ
3. การวัดการปนเปื้อนรังสีของของเหลวในร่างกาย เช่น ฉေးเลือดเพื่อวัดการได้รับสารรังสีในร่างกาย (bioassay)

การขจัดรอยเปื้อนรังสี (decontamination) การใช้น้ำและน้ำสบู่ขจัดรอยเปื้อนสารรังสีในขั้นต้นนั้น เป็นวิธีขจัดรอยเปื้อนรังสีที่มีประสิทธิภาพ

#### 5.3.4 การควบคุมการเปราะเปื้อนรังสี

การควบคุมการวัดรอยเปื้อนสารรังสีชนิดไม่ปิดผนึก (unsealed radioactive materials) ใช้ได้กับสารรังสีทุกชนิด เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารรังสีเข้าสู่ร่างกาย มีรายละเอียดปฏิบัติ เช่น

- อุปกรณ์ป้องกันรังสีรายบุคคล ใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารรังสีเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังหรือเสื้อผ้า
- เสื้อกาวน์ ที่มีแขนยาวคลุมข้อมือและยาวคลุมเข่า ใช้สวมเพื่อป้องกันรังสีเข้าสู่แขนขา
- แว่นตา ใช้สวมป้องกันสารรังสีหรือสารอันตรายอื่นๆ กระเด็นเข้าตา
- รองเท้าปิดนิ้ว สวมป้องกันสารรังสีกระเด็นสู่เท้าและนิ้วเท้า
- ถุงมือใช้ครั้งเดียว สวมเพื่อป้องกันรังสีเข้าสู่มือและข้อมือ ควรสวมสองชั้นและเปลี่ยนชั้นนอกทิ้งบ่อยๆ
- วัสดุปูพื้นโต๊ะ ใช้ปูเพื่อป้องกันสารรังสีเปื้อนสู่โต๊ะปฏิบัติการและผนังของตู้ดูดไอระเหย

- แผ่นกระดาษเคลือบพลาสติกใช้แล้วทิ้ง ต้องปูให้ด้านเคลือบพลาสติกอยู่ด้านล่างเสมอ และเปลี่ยนทันทีเมื่อฉีกขาดหรือเปื้อนรังสี
- ถาดรองเปื้อน ป้องกันสารรังสีกระเด็น โดยใช้แผ่นกระดาษซับรองไว้ในถาดให้สะดวกต่อการกำจัดรอยเปื้อนรังสี
- ภาชนะสองชั้น ใช้บรรจุสารรังสีทั้งหมดที่อาจกระเด็นได้
- ภาชนะเก็บสารรังสีชนิดของเหลว
- ภาชนะสำหรับการขนย้ายสารรังสี ใช้ถังพลาสติกทรงสูงที่มีฝาปิดเพื่อขนย้ายสารรังสีระหว่างห้องปฏิบัติการ
- วัสดุอุปกรณ์ชนิดใช้ครั้งเดียว ใช้แทนภาชนะที่ต้องล้าง เพื่อป้องกันสารรังสีตกค้างบนภาชนะ วัสดุอุปกรณ์ที่ควรเป็นชนิดใช้ครั้งเดียว เช่น plastic pipette tips, หลอดสำหรับเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge tubes) เป็นต้น ทั้งนี้ต้องพิจารณาเรื่องการกำจัดขยะการรังสีของวัสดุเหล่านี้ด้วย
- ใช้เครื่องมือที่เหมาะสม อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ควรสามารถลดการเปื้อนรังสีและลดปริมาณรังสีที่แผ่สู่ผู้ปฏิบัติงานได้ในเวลาเดียวกัน เช่น ปากคีบ, คีมปากยาว, คีมด้ามยาว และภาชนะกันรังสี เป็นต้น
- สุขอนามัยในห้องปฏิบัติการ
  - ควรเข้มงวดเรื่องการดื่มกิน การใช้เครื่องสำอาง ต้องให้อยู่นอกพิสัยอย่างน้อย 1 เมตรจากตู้เก็บสารรังสี
  - ห้ามเก็บอาหารในตู้เดียวกับสารรังสีโดยเด็ดขาด วิธีที่ดีที่สุดต้องเก็บแยกกันคนละห้อง
- การซ่อมปฏิบัติการ โดยใช้น้ำสีแทนสารรังสี สามารถแสดงรอยเปื้อนสารรังสีได้ชัดเจนเมื่อมีการเปื้อนรังสี
- ติดสติกเกอร์และเครื่องหมายสารรังสี เป็นวิธีสำคัญที่สุดของการควบคุมการเปื้อนรังสี ต้องติดสติกเกอร์และเครื่องหมายสัญลักษณ์รังสี (trifol symbol) ทุกเครื่องมือ, ทุกบริเวณที่ใช้รังสีและทุกภาชนะเก็บสารรังสี สาเหตุของการเปื้อนรังสีที่มากที่สุดเกิดจากการไม่ได้ติดฉลากว่าเป็น “สารกัมมันตรังสี”

#### 5.4 ปริมาณรังสีขีดจำกัด (Dose Limits)

ICRP ได้ปรับปรุง dose limits ในปี 1990 โดยลด dose limits ลงจากเดิม Sinclair ได้เปรียบเทียบวิวัฒนาการและข้อแตกต่างปริมาณรังสีขีดจำกัดตาม ICRP (International Commission on Radiological Protection) และ NCRP แห่งอเมริกา (National Commission on Radiological Protection) ไว้ตามตารางที่ 5.1 รายละเอียดของ Dose limit ซึ่งนับทั้ง external และ internal exposure แต่ไม่รวมปริมาณรังสีจากการตรวจรักษาทางการแพทย์ Dose Limits ของ NCRP และ ICRP แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ดูรายละเอียดการศึกษาเปรียบเทียบเรื่องปริมาณรังสีขีดจำกัดนี้โดยการศึกษาของ Warren K. Sinclair ตามบรรณานุกรมหมายเลข 13

ตารางที่ 5.1 แสดงการพัฒนาปริมาณรังสีขีดจำกัดของ ICRP และ NCRP ซึ่งมีแนวโน้มลดขีดจำกัดปริมาณรังสีลง เพื่อให้เจ้าหน้าที่รังสีและประชากรปลอดภัยจากรังสีมากขึ้น

Protection recommendations, 1928-1993					
Year	Exposed population	ICRP		NCRP	
		Limit	Annual equivalent	Limit	Annual equivalent
1931-1934	Occupational	0.2 rad/day	~ 60 rad	0.1 rad/day	~ 30 rad
1949-1954	Occupational	0.3 rem/week*	15 rem	0.3 rem/week	15 rem
1957-1958	Occupational	5 (N-18) rem	5 rem (15 rem maximum)	5 (N-18) rem	5 rem (15 rem maximum)
1971	Public	5 rem/30 year	170 mrem average	10 rem/30 year	1/3 rem average
	Occupational Public			5 (N-18) rem 500 mrem/year (individual) 170 mrem/year (average)	5 rem (15 rem maximum) 500 mrem (individual) 170 mrem (average)
1977	Occupational	50 mSv/year	50 mSv		
	Public	5 mSv/year maximum	5 mSv maximum 0.5 mSv average		
1987	Occupational			50 mSv/year Age × 10 mSv as cumulative guidance	50 mSv
	Public			1 mSv/year (continuous) 5 mSv/year (occasional) 10 μ Sv/source/year	1 mSv (continuous) 5 mSv (occasional) 10 μ Sv/source
1990	NIRL <sup>†</sup>				
	Occupational	20 mSv/year over 5 years	20 mSv		
	Public	1 mSv/year over 5 years	1 mSv		
1993	Occupational			50 mSv/year Age × 10 mSv	10-20 mSv average
	Public			1 mSv/y (continuous) 5 mSv/y (occasional) 10 μ Sv/source/year	1 mSv (continuous) 5 mSv (occasional) 10 μ Sv/source
	NID <sup>†</sup>				

\* 1 rem = 10 mSv.

<sup>†</sup> NIRL = Negligible individual risk level; NID = Negligible individual dose.

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณ dose limits ตาม NCRP (National Commission on Radiological Protection) และ ICRP (International Commission on Radiological Protection) สำหรับผู้ปฏิบัติงานรังสี, สตรีมีครรภ์, ประชาชนทั่วไป และผู้ฝึกงานรังสี

	NCRP	ICRP where different
Stochastic effects		
Effective dose limits (cumulative)	10 mSv × age	20 mSv y <sup>-1</sup> averaged over 5 years
Effective dose limited (annual)	50 mSv y <sup>-1</sup>	
Deterministic effects		
Dose equivalent limits for tissues and organs (annual)		
Lens of eye	150 mSv y <sup>-1</sup>	
Skin, hands, and feet	500 mSv y <sup>-1</sup>	
Embryo or fetus exposure		
Effective dose limit	0.5 mSv month <sup>-1</sup>	Total of 2 mSv to abdomen surface
Public exposures (annual)		
Effective dose limit, continuous or frequent exposure	1 mSv y <sup>-1</sup>	
Effective dose limit, infrequent exposure	5 mSv y <sup>-1</sup>	Averaged over 5 years Must be 1 mSv y <sup>-1</sup>
Dose equivalent limits for lens of eye, skin, and extremities	50 mSv y <sup>-1</sup>	
Education and training exposures (annual)		
Effective dose limit	1 mSv y <sup>-1</sup>	No statement
Dose equivalent limit for lens of eye, skin, and extremities	50 mSv y <sup>-1</sup>	No statement

ในประเทศไทยได้กำหนดปริมาณรังสีขีดจำกัดไว้ในพระราชกฤษฎีกาว่าด้วย กำหนดเงื่อนไข และวิธีการขอรับใบอนุญาตและการออกใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. ๒๕๐๔ พ.ศ. ๒๕๔๖ เล่ม ๑๒๐ ตอนที่ ๒๗ ก หน้า ๑๘ โดยเทียบเท่ากับ ICRP dose limits (1990) มีรายละเอียด ดังนี้

ข้อ ๑๒ ผู้รับใบอนุญาตต้องระมัดระวังมิให้บุคคลที่ทำงานในบริเวณรังสีได้รับรังสีเกินปริมาณที่กำหนด ดังต่อไปนี้

- (๑) ๒๐ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี โดยเฉลี่ยในช่วง ๕ ปีติดต่อกัน ตลอดทั่วร่างกาย ทั้งนี้ในแต่ละปี จะรับรังสีได้ไม่เกิน ๕๐ มิลลิซีเวิร์ต และตลอดช่วง ๕ ปีติดต่อกันนั้นจะต้องได้รับรังสีไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิซีเวิร์ต
- (๒) ๑๕๐ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี สำหรับเลนส์ของดวงตา
- (๓) ๕๐๐ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี สำหรับส่วนที่เป็นผิวหนัง มือ และเท้า

ข้อ ๑๓ ผู้รับใบอนุญาตต้องระมัดระวังมิให้หญิงมีครรภ์ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีได้รับรังสีตลอดระยะเวลาที่ตั้งครรภ์เกิน ๒ มิลลิซีเวิร์ต และทั้งนี้ ต้องได้รับรังสีเฉลี่ยไม่เกิน ๐.๒ มิลลิซีเวิร์ตต่อเดือน

ข้อ ๑๔ ผู้รับใบอนุญาตต้องระมัดระวังมิให้ประชาชนทั่วไปที่ไม่ใช่ผู้มารับบริการทางการแพทย์ได้รับรังสีเกินปริมาณที่กำหนด ดังต่อไปนี้

- (๑) ๑ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี สำหรับตลอดทั่วร่างกาย
- (๒) ๑๕ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี สำหรับเลนส์ของดวงตา
- (๓) ๕๐ มิลลิซีเวิร์ตต่อปี สำหรับส่วนที่เป็นผิวหนัง

ข้อ ๑๕ ผู้รับใบอนุญาตต้องไม่จัดให้บุคคลที่มีอายุต่ำกว่าสิบหกปีเข้าไปในบริเวณรังสีหรือปฏิบัติงานใดๆที่เกี่ยวกับรังสี

## 5.5 ปริมาณรังสีต่อบุคลากรทางรังสีที่ตั้งครรภ์

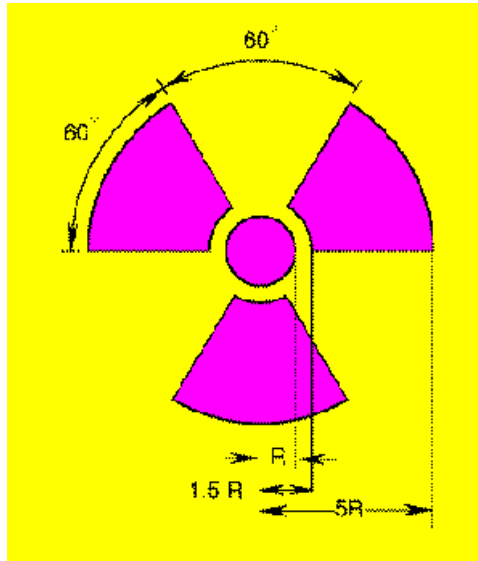
บุคลากรทางรังสีที่ตั้งครรภ์อาจทำให้ตัวอ่อนหรือทารกในครรภ์ได้รับรังสีด้วย จากการศึกษาพบว่าตัวอ่อนในครรภ์ไวต่อรังสีมากกว่าผู้ใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 4 เดือนแรกของการตั้งครรภ์ ซึ่งคนทั่วไปมักจะไม่ได้รู้ตัวว่าตั้งครรภ์ในช่วงเดือน-สองเดือนแรก

ปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้ตลอดการตั้งครรภ์ ไม่เกิน 500 mRem บุคลากรที่ตั้งครรภ์ควรใช้ฟิล์มแบดจ์หรือที่แอลดีแบดจ์สองอัน วัด whole body dose อันหนึ่ง และวัด fetus dose อีกอันหนึ่งโดยติดไว้บริเวณหน้าท้อง เปลี่ยนฟิล์มแบดจ์หรือที่แอลดีแบดจ์ทุกเดือน ติดตามปริมาณรังสีต้องไม่เกิน 50 mRem ต่อเดือน เพื่อระวังป้องกันรังสีที่บังเอิญเล็ดลอดมาสัมผัสได้

## 5.6 สัญลักษณ์รังสี

สัญลักษณ์รังสีรูปใบพัดสามแฉกที่ใช้ในขณะนี้ เริ่มต้นใช้โดยกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ที่ห้องปฏิบัติการรังสีของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย, Berkley ในปี ค.ศ.1946 ตามบันทึกของ Nels Garden ในปี 1952 แรกเริ่มเป็นใบพัดสีม่วงบนพื้นสีน้ำเงินเพราะเป็นสีที่ลอกเลียนได้ยากในสมัยนั้น ต่อมา Bill Ray และ George Warlick ได้นำไปใช้ที่ห้องปฏิบัติการ Oak Ridge ในปี 1948 ได้เปลี่ยนเป็นรูปใบพัดสีม่วงบนพื้นสีเหลือง เพื่อให้เห็นได้ชัดในระยะไกล (โดย Paul Frame จาก Oak Ridge Associated Universities: [www.orau.org/ptp/articlesstories/radwarnsymbstory.htm](http://www.orau.org/ptp/articlesstories/radwarnsymbstory.htm) )

สัญลักษณ์รังสีมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน หรือเรียกว่า trifold พร้อมมาตราส่วนที่ถูกต้อง แสดงไว้ตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงสัญลักษณ์รังสีพร้อมมาตราส่วน

## 5.7 บริเวณรังสี

### 5.7.1 บริเวณรังสีตามพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

พระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กำหนดบริเวณรังสีเป็นบริเวณที่บุคคลสามารถเข้าถึงได้ โดยการตรวจวัดที่ระยะ 30 เซนติเมตรจากวัสดุกัมมันตรังสี หรือเครื่องกำเนิดรังสี หรือพื้นผิวใดที่มีรังสีแผ่ออกมาซึ่งมีระดับรังสีที่ทำให้บุคคลได้รับปริมาณรังสีมากกว่า 25 ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง

### 5.7.2 การกำหนดบริเวณรังสีตามเกณฑ์ 10 CFR 20.1003 (Code of Federal Regulations, USA) ดังนี้

#### Unrestricted Area (บริเวณไม่ควบคุมรังสี)

เป็นบริเวณไม่หวงห้ามหรือไม่ควบคุมตามใบอนุญาตให้ใช้และครอบครองสารกัมมันตรังสี

#### Restricted Area (บริเวณหวงห้ามทางรังสี)

เป็นบริเวณที่จำกัดตามใบอนุญาตให้ใช้และครอบครองสารกัมมันตรังสี เพื่อป้องกันบุคคลต่อการเสี่ยงรับรังสีหรือสารกัมมันตรังสี พื้นที่ restricted area ไม่รวมพื้นที่สำนักงาน แต่ห้องแยกเก็บรังสีในอาคารสำนักงานใช้เป็น restricted area ได้

#### Controlled Area (บริเวณควบคุมทางรังสี)

เป็นบริเวณนอกเหนือ restricted area แต่อยู่ในขอบเขตกำกับดูแลตามใบอนุญาตให้ใช้และครอบครองสารกัมมันตรังสี เป็นบริเวณที่มีอัตรารังสีไม่เกิน 0.02 mSv/hr

#### Radiation Area (บริเวณรังสี)

เป็นบริเวณที่มีรังสีที่อาจทำให้บุคคลได้รับรังสีเกิน 0.05 – 1 mSv/hr ต่อชั่วโมงที่ระยะ 30 ซม. ห่างจากผิวของต้นกำเนิดรังสีที่แผ่ทะลุออกมา

#### High Radiation Area (บริเวณรังสีสูง)

เป็นบริเวณที่มีรังสีที่อาจทำให้บุคคลได้รับรังสีเกิน 1- 50 mSv/hr ต่อชั่วโมงที่ระยะ 30 ซม. ห่างจากผิวของต้นกำเนิดรังสีที่แผ่ทะลุออกมา

### Very High Radiation Area (บริเวณรังสีสูงมาก)

เป็นบริเวณที่มีรังสีที่อาจทำให้บุคคลได้รับรังสีเกิน 5 Sv/hr ต่อชั่วโมงที่ระยะ 1 เมตรจากผิวของต้นกำเนิดรังสีที่แผ่ทะลุออกมา

#### 5.7.3 การควบคุมบริเวณที่มีรังสี (Area Restrictions)

ทุกห้องหรือบริเวณที่ได้รับอนุญาตให้มีใช้และครอบครองสารรังสี ต้องแสดงป้ายสัญลักษณ์ "ระวังอันตรายจากรังสี" "Caution Radioactive Material"

บริเวณ Radiation Area จำเป็นต้องมีป้ายเตือนรังสี และโดยเฉพาะใน Restricted Area นั้น ผู้ปฏิบัติทุกคนต้องระวังป้องกันวัสดุกัมมันตรังสีสูญหายอีกด้วย

### 5.8 ประเภทของสารกัมมันตรังสีและห้องปฏิบัติการสารกัมมันตรังสี

#### 5.8.1 สารกัมมันตรังสี

อันตรายของสารกัมมันตรังสีขึ้นกับทั้งปัจจัยทางเคมี และปัจจัยทางฟิสิกส์ที่ข้องกับ radiotoxicity ดังนี้

- อายุครึ่งชีวิต
- ชนิดของรังสีที่ปลดปล่อยจากนิวไคลด์นั้น
- พลังงานของรังสีที่ปล่อยออกมา
- ชนิดของนิวไคลด์ลูกที่เกิด
- คุณสมบัติของสารนั้น

การแบ่งกลุ่มสารกัมมันตรังสีตามระดับ radiotoxicity และแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 5.2 ดังนี้

- Very high radiotoxicity,
- High radiotoxicity,
- Moderate radiotoxicity,
- Low radiotoxicity

#### 5.8.2 ห้องปฏิบัติการรังสี

ห้องปฏิบัติการรังสีแบ่งตามขีดความสามารถในการรองรับความแรงสารกัมมันตรังสีและ radiotoxicity ดังนี้

Radiotoxicity	Minimum significant quantity (microCurie)	Type C	Type B	Type A
1. Very high	0.1	10 uCi or less	10 uCi - 10 mCi	10 mCi or more
2. High	1.0	100 uCi or less	100 uCi - 100 mCi	100 mCi or more
3. Moderate	10.0	1 mCi or less	1 mCi - 1 Ci	1 Ci or more
4. Low	100.0	10 mCi or less	10 mCi - 10 Ci	10 Ci or more

ห้องปฏิบัติการรังสี **Type C** คือห้องปฏิบัติการเคมีมาตรฐาน

ห้องปฏิบัติการรังสี **Type B** คือห้องปฏิบัติเคมีมาตรฐานที่ออกแบบไว้สำหรับการใช้สารกัมมันตรังสี

ห้องปฏิบัติการรังสี **Type A** คือห้องปฏิบัติเคมีมาตรฐานที่ออกแบบไว้สำหรับการใช้สารกัมมันตรังสีปริมาณมาก ซึ่งต้องมีตู้ดูดสารระเหย (fume hood) และเครื่องระบายอากาศที่เพียงพอ มีพื้นผิวใช้งานที่ไม่ดูดจับสารเคมี และมีเครื่องมืออุปกรณ์ที่ทันสมัย

ตารางที่ 5.2: ธาตุกัมมันตรังสีแบ่งตาม radiotoxicity ต่อหน่วยความแรงรังสี \*

Group I: Very high radiotoxicity

210Pb	226Ra	227Th	231Pa	233U	238Pu	241Pu	243Am	244Cm	249Cf
210Po	228Ra	228Th	230U	234U	239Pu	242Pu	242Cm	245Cm	250Cf
223Ra	227Ac	230Th	232U	237Np	240Pu	241Am	243Cm	246Cm	252Cf

Group II: High radiotoxicity

22Na	56Co	95Zr	124Sb	126I	140Ba	170Tm	207Bi	228Ac
36Cl	60Co	106Ru	125Sb	131I	144Ce	181Hf	210Bi	230Pa
45Ca	89Sr	110Ag <sub>m</sub>	127Te <sub>m</sub>	133I	152Eu	182Ta	211At	234Th
46Sc	90Sr	115Cd <sub>m</sub>	129Te <sub>m</sub>	134Cs	154Eu	192Ir	212Pb	236U
54Mn	91Y	114In <sub>m</sub>	124I	137Cs	160Tb	204Tl	224Ra	249Bk

Group III: Moderate radiotoxicity

7Be	48Sc	65Zn	91Sr	103Ru	125Te <sub>m</sub>	140La	153Gd	183Re	199Au	233Pa
14C	48V	69Zn <sub>m</sub>	90Y	105Ru	127Te	141Ce	159Gd	186Re	197Hg	239Np
18F	51Cr	72Ga	92Y	106Rh	129Te	143Ce	165Dy	188Re	197Hg <sub>m</sub>	
24Na	52Mn	73As	93Y	103Pd	131Te <sub>m</sub>	142Pr	166Dy	185Os	203Hg	
38Cl	56Mn	74As	97Zr	109Pd	132Te	143Pr	166Ho	191Os	200Tl	
31Si	52Fe	76As	93Nb <sub>m</sub>	105Ag	130I	147Nd	169Er	193Os	201Tl	
32P	55Fe	77As	95Nb	111Ag	132I	149Nd	171Er	190Ir	202Tl	
35S	59Fe	75Se	99Mo	109Cd	134I	147Pm	171Tm	194Ir	203Pb	
41A	57Co	82Br	96Tc	115Cd	135I	149Pm	175Yb	191Pt	206Bi	
42K	58Co	85Kr <sub>m</sub>	97Tc <sub>m</sub>	115In <sub>m</sub>	135Xe	151Sm	177Lu	193Pt	212Bi	
43K	63Ni	87Kr	97Tc	113Sn	131Cs	153Sm	181W	197Pt	220Rn	
47Ca	65Ni	86Rb	99Tc	125Sn	136Cs	152Eu	185W	196Au	222Rn	
47Sc	64Cu	85Sr	97Ru	122Sb	131Ba	155Eu	187W	198Au	231Th	

Group IV: Low radiotoxicity

3H	58Co <sub>m</sub>	71Ge	87Rb	97Nb	103Rh <sub>m</sub>	129I	134Cs <sub>m</sub>	187Re	197Pt <sub>m</sub>	235U
15O	59Ni	85Kr	91Y <sub>m</sub>	96Tc <sub>m</sub>	113In <sub>m</sub>	131Xe <sub>m</sub>	135Cs	191Os <sub>m</sub>	232Th	238U
37A	69Zn	85Sr <sub>m</sub>	93Zr	99Tc <sub>m</sub>	125I	135Xe	147S <sub>m</sub>	193Pt <sub>m</sub>	NatTh	NatU

\* From Safe Handling of Radionuclides, IAEA Safety Standards, 1973

### 5.8.3 การติดตามการปล่อยรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสี

ฉลากสัญลักษณ์รังสีสามารถติดได้ทุกจุดที่อัตรารังสีสูงกว่า **background radiation** เช่น พื้นที่รังสี, ถาดวางสารรังสี, ชุดวางหลอดทดลองสารรังสี, ห้องเก็บสารรังสี, ภาชนะหรือห้องเก็บแยกกากรังสี, อุปกรณ์เครื่องมือทุกชิ้นทุกชนิดที่มีสารรังสีประกอบอยู่ต้องติดฉลากแสดง “สารกัมมันตรังสี” ป้ายฉลากต้องระบุชื่อหรือชนิดสารรังสี, วันที่และความแรงรังสีรวม หากมีหลายอันหรือหลายหลอดทดลอง อาจแสดงฉลากรวมทั้งชุดได้

ควรติดตามการปนเปื้อนเครื่องมือหรือพื้นโต๊ะ และผนังที่เปื้อนสารรังสี โดยระบุชื่อสารรังสีที่เปื้อนอยู่ วันที่และความแรงรังสีสูงสุดที่ได้วัดสำรวจไว้

นอกเหนือจากนี้ควรแสดงชื่อบุคคลผู้เชี่ยวชาญสารรังสีชนิดนั้นๆ หรือผู้รับผิดชอบทางเทคนิค หรือ Radiation Protection Officer พร้อมเบอร์โทรศัพท์ สำหรับติดต่อกรณีฉุกเฉิน

### 5.9 การขนย้ายและขนส่งสารกัมมันตรังสี

ต้องไม่ขนย้ายสารกัมมันตรังสีหรือเครื่องมือกำเนิดรังสี ให้ผู้ที่ยังไม่ได้รับอนุญาตหรือไม่มีใบอนุญาตผลิต มีไว้ในครอบครอง หรือใช้ซึ่งวัสดุพลอยได้ ตามพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ทั้งผู้ทำการขนย้ายและผู้รับสารกัมมันตรังสี ต้องขออนุญาตหน่วยงานควบคุมสารกัมมันตรังสีก่อนการขนย้ายเช่น รอรับอนุญาตจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ควรทำตามแนวปฏิบัติขนย้ายและขนส่งสารกัมมันตรังสีของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ IAEA Safety Standards Series No.TS-R-1 “REGULATIONS FOR THE SAFE TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIAL REQUIREMENTS”, 1996 Edition (Revised)

### 5.10 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมรังสี

หน่วยงานควบคุมการใช้รังสีระหว่างประเทศ

- ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ หรือ IAEA (International Atomic Energy Agency), สำนักงานอยู่ที่ถนน Wagramer Strasse 5, P.O. Box 100, A-1400 กรุง Vienna, ประเทศ Austria
- ICRP (International Commission on Radiological Protection)

หน่วยงานควบคุมการใช้รังสีระหว่างประเทศ

- สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานเลขที่ 16 ถนนวิภาวดี-รังสิต เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
- กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข สำนักงานเลขที่ 88/7 ถนนติวานนท์ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

หน่วยงานควบคุมการใช้รังสีในองค์กร

- คณะกรรมการควบคุมป้องกันรังสี (Radiation Protection Committees)
- เจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสี (Radiation Protection Officers)

### 5.11 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมรังสี

ประเทศไทยได้ใช้พระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. 2504 โดยได้ปรับปรุงตาม “คณะกรรมการกำหนดตามกฎกระทรวงกำหนดเงื่อนไขและวิธีการขอรับใบอนุญาตและการออกใบอนุญาต ตามพระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. 2504, เมื่อ พ.ศ. 2546” มีรายละเอียดสองส่วนคือว่า “ด้วยการ ”กำหนดเงื่อนไขและวิธีการขอรับใบอนุญาตและการออกใบอนุญาต” และว่า “ด้วยกากกัมมันตรังสี” ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://center.oaep.go.th>

### 5.12 การจัดการกากรังสี

กากรังสีมีลักษณะเป็น sealed หรือ unsealed source การจัดการกากรังสีมีหลักเบื้องต้น 3 ประการ ซึ่งมักใช้ทั้ง 3 หลักร่วมกัน คือ

1. ทำให้เข้มข้นแล้วรวบรวม (concentration and contain)
2. ทำให้เจือจางแล้วระบายทิ้ง (dilute and disperse)
3. ปล่อยให้สลายตัวไปเอง (delay and decay)

การจัดการรังสีให้ถือตามเกณฑ์ของกองขจัดกาก สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ตามแต่ลักษณะของ สารกัมมันตรังสีที่ใช้ รายละเอียดการจัดการขจัดกากรังสีตามมาตรฐาน แสดงไว้ในภาคผนวก ก ตัวอย่างกากกัมมันตรังสีบรรจุที่บรรจุภาชนะแล้ว แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงกากกัมมันตรังสีที่รวบรวมแล้วทำให้เข้มข้น (concentration and contain) บรรจุภาชนะแล้ว ภาพจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

## บทที่ 6 การระวังป้องกันรังสีในงานเอกซเรย์

### 6.1 อันตรายจากรังสีในงานเอกซเรย์

การใช้รังสีเอกซ์จำเป็นต้องระวังป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับผู้ป่วย และอันตรายที่จะเกิดกับเจ้าหน้าที่

#### 6.1.1 อันตรายที่จะเกิดกับผู้ป่วย

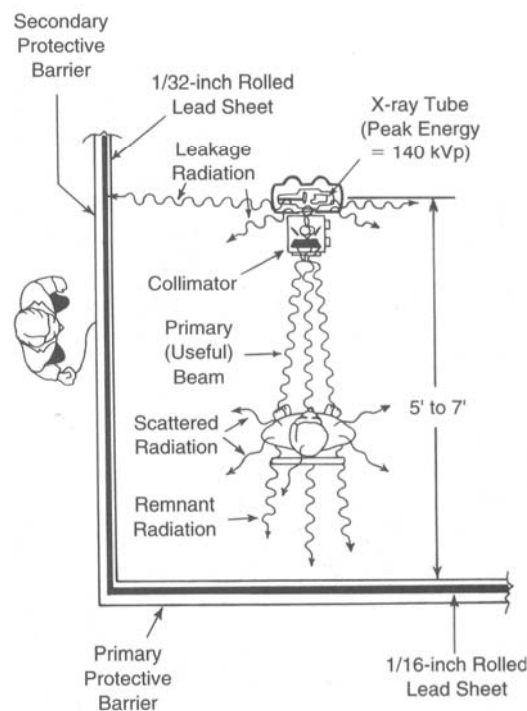
พยายามให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีต่ำสุดจากการถ่ายภาพซ้ำ, การจัดทำผู้ป่วยไม่ให้ critical organ, ระวังผู้ป่วยสตรีที่อยู่ในวัยเจริญพันธุ์ และสตรีตั้งครรภ์ ปริมาณรังสีที่ผิวหนังผู้ป่วยได้รับจากการถ่ายภาพเอกซเรย์อวัยวะต่างๆ และ exposure techniques ต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 6.1

#### 6.1.2 อันตรายที่จะเกิดกับเจ้าหน้าที่

เจ้าหน้าที่อาจได้รับปริมาณรังสีจาก Scatter และ Leakage Radiation จากเครื่องเอกซเรย์ ดังรูปที่ 6.1

เจ้าหน้าที่รังสีจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเครื่องมือรังสีและอุปกรณ์ที่ใช้ และการตรวจสอบคุณภาพ

- **Scatter radiation** เป็นปริมาณรังสีที่เกิดจากเอกซเรย์กระทบ collimator หรือกระทบผู้ป่วยและวัสดุต่างๆ ปริมาณ scatter ในทิศ 90 องศา (ด้านข้างของผู้ป่วย) ยังคงมีปริมาณสูงพอที่จะทำให้เกิดอันตรายได้
- **Leakage radiation** เป็นรังสีที่เล็ดลอดออกจากหลอดที่เกิดรอยร้าวเมื่อหลอดเสื่อม Leakage radiation มีปริมาณน้อยแต่มีพลังงานสูงกว่าค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีเอกซ์



รูปที่ 6.1 แสดงรังสีกระเจิงที่เกิดจากรังสีเอกซ์กระทบผู้ป่วยและวัสดุอื่นๆภายในห้องเอกซเรย์และรังสีรั่วไหลรอบเครื่องเอกซเรย์

ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณรังสีที่ผิวหนังผู้ป่วยได้รับจากการถ่ายภาพเอกซเรย์ที่อวัยวะต่างๆ

<b>Ranges of Expected Patient Entrance Exposures*</b>	
<b>AP supine abdomen</b>	
Upper quartile	4 mGy (400 mrad)
Median	3 mGy (300 mrad)
Lower quartile	2.5 mGy (250 mrad)
<b>PA upright chest @ 115 kVp and grid</b>	
Upper quartile	0.20 mGy (20 mrad)
Median	0.16 mGy (16 mrad)
Lower quartile	0.12 mGy (12 mrad)
<b>PA upright chest @ 80 kVp, nongrid</b>	
Upper quartile	0.12 mGy (12 mrad)
Median	0.08 mGy (8 mrad)
Lower quartile	0.05 mGy (5 mrad)
<b>AP supine lumbar spine</b>	
Upper quartile	4.5 mGy (450 mrad)
Median	3.5 mGy (350 mrad)
Lower quartile	2.7 mGy (270 mrad)
<b>AP cervical spine</b>	
Upper quartile	1.1 mGy (110 mrad)
Median	0.8 mGy (80 mrad)
Lower quartile	0.5 mGy (50 mrad)
<b>PA and lateral knees, with 8:1 grid</b>	
Upper quartile	0.30 mGy (30 mrad)
Median	0.20 mGy (20 mrad)
Lower quartile	0.10 mGy (10 mrad)
<b>AP and lateral forearm, with 100-speed detail screens</b>	
Upper quartile	0.25 mGy (25 mrad)
Median	0.18 mGy (18 mrad)
Lower quartile	0.10 mGy (10 mrad)

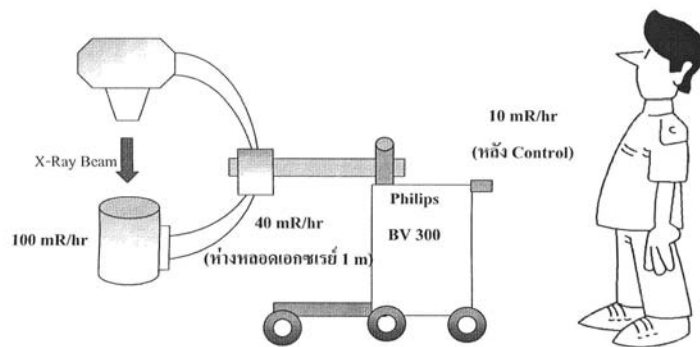
\*Based on data collected in Washington state.

From Warner R: Using Technique Factors to Predict Patient ESE. Radiol Technol. 65(1):25, 1993. Used by permission.

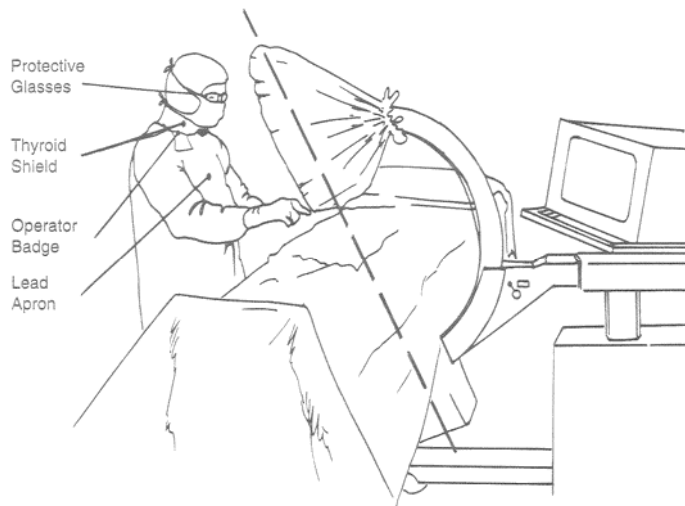
## 6.2 ความปลอดภัยในการใช้เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่

เจ้าหน้าที่รังสีควรอยู่ห่างจากผู้ป่วยอย่างน้อย 2 เมตร เพื่อให้ห่างจาก scatter radiation และอยู่ด้านหลังหลอดมากกว่า 1 เมตรเพื่อหลีกเลี่ยง leakage radiation ขณะทำการปล่อยรังสีเอกซ์ต้องแน่ใจว่าไม่ผู้ใดอยู่ในทิศทางของ primary beam ดังแสดงในรูปที่ 6.2

ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งในการใช้เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ชนิด C-arm ที่มักหันหลอดเอกซเรย์ไว้ด้านหลังผู้ป่วย ดูรูปที่ 6.3 แพทย์, พยาบาลหรือเจ้าหน้าที่ผู้ใช้ต้องระมัดระวังไม่ให้อวัยวะของตนเองอยู่ในลำรังสีขณะทำการวินิจฉัย ควรสวมเสื้อตะกั่วและอุปกรณ์ป้องกันรังสีเอกซ์ที่อวัยวะสำคัญเช่น ตา และขั้วรอยด์ให้ปลอดภัยจากรังสี



รูปที่ 6.2 แสดงปริมาณรังสีรั่วรอบๆเครื่องเอกซเรย์แบบเคลื่อนที่ และตำแหน่งที่ปลอดภัยต่อการควบคุมเครื่องเอกซเรย์



รูปที่ 6.3 แสดงการใช้เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่แบบ C-arm ซึ่งหลอดเอกซเรย์มักอยู่ด้านหลังผู้ป่วย แพทย์, พยาบาลผู้ใช้ต้องระมัดระวังไม่ให้อวัยวะของตนเองเข้าไปอยู่ในลำรังสีขณะปล่อยรังสี ควรสวมอุปกรณ์ป้องกันให้รังสีให้ถูกต้องปลอดภัย

## บทที่ 7 อุบัติเหตุทางรังสี

### 7.1 อุบัติเหตุทางรังสี

อุบัติเหตุทางรังสีคืออุบัติการณ์ที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดการแผ่รังสีหรือทำให้เกิดการเปราะเปื้อนสารรังสีแก่ผู้คน นับแต่มีการคิดค้นและใช้รังสีและสารกัมมันตรังสีในโลกนี้ มีเหตุการณ์รุนแรงทางรังสีครั้งสำคัญ เช่น

1. ระเบิดปรมาณูที่ Hiroshima และ Nagasaki, ญี่ปุ่น ค.ศ.1945
2. อุบัติเหตุเครื่องปฏิกรณ์ที่เกาะ Three Mile, สหรัฐอเมริกา ค.ศ.1979
3. อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ Chernobyl, รัสเซีย ค.ศ.1986
4. อุบัติเหตุซากโคบอลต์ที่สมุทรปราการ, ไทย ค.ศ.2000

ยังมีอุบัติเหตุทางรังสีอีกมากมายที่เกิดขึ้นบนโลกนี้ ที่รวบรวมแบ่งแยกประเภทไว้ตามตารางที่ 7.1 ซึ่งได้เสนอโดย Robert C., Ricks, ใน "Scope of the Problem, Kiev, Ukraine", 9-13 October, 2000.

ตารางที่ 7.1 แสดงอุบัติเหตุทางรังสีครั้งสำคัญที่เกิดขึ้นในโลก ตั้งแต่ ค.ศ. 1944 – สิงหาคม ค.ศ. 2000 แบ่งตามประเภทเครื่องมือหรืออุปกรณ์

ประเภทเครื่องมือหรืออุปกรณ์	ครั้ง
<b>เหตุการณ์วิกฤต "Criticalities"</b>	<b>22</b>
Critical assemblies	9
Reactors	7
Chemical operations	6
<b>เครื่องมือรังสี (Radiation devices)</b>	<b>309</b>
Sealed sources	204
X-ray devices	80
Accelerators	24
Radar generators	1
<b>สารกัมมันตรังสี (Radioisotopes )</b>	<b>86</b>
Transuranics	27
Tritium	2
Fission products	11
Radium spills	1
Diagnosis and therapy	37
Other	8
<b>รวม</b>	<b>417</b>

ที่มา: Radiation Emergency Assistance Center/Training Site, Radiation Accident Registries.

## 7.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุรังสีมากที่สุด

- สารกัมมันตรังสีสูญหายหรือหลุดจากการเก็บรักษา (Lost or mishandled sources)
- การลัดวงจรนิรภัย (Interlock bypass)
- ไม่ได้ใช้วัดสำรวจรังสีหรือเครื่องวัดสำรวจรังสีทำงานไม่ถูกต้อง (Failure to use survey instruments)
- การฝึกอบรมหรือการเขียนแผนการใช้รังสีไม่รัดกุมเพียงพอ (Inadequate training/written procedures)
- เกณฑ์สำคัญที่ควบคุมการใช้รังสีที่ผิดพลาด (Failure to use criticality control)
- แผนป้องกันอันตรายจากรังสีไม่รัดกุมเพียงพอ (Inadequate radiation protection programs)
- การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีผิดพลาด (Calibration/programming errors)
- การตรวจสอบคุณภาพไม่ดีพอ (Inadequate supervision/quality control)
- การให้รังสีผิด (Medical misadministration)
- ผิดพลาดจากคน (Human factors)

## 7.3 ความปลอดภัยของเม็ตรังสีเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติหรือโครงสร้างของเม็ตรังสีสำหรับผู้ใช้นั้นมีน้อยมาก และมักไม่แสดงไว้ในตำราหรือคู่มือสำหรับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามความปลอดภัยเกี่ยวกับสารรังสีหรือเม็ตรังสีเมื่อเกิดอุบัติเหตุตามมาตรฐานโรงพยาบาลนั้น มีข้อมูลเป็นแนวทางดังนี้

### 7.3.1 ความปลอดภัยของเม็ตรังสี Ir-192 เมื่อเกิดอุบัติเหตุ

Eise Jan Kromhout van der Meer แห่งบริษัทนิวเคลียตรอน (Nucletron B.V., Netherland) ผู้ผลิตเครื่องใส่แร่ให้ข้อมูลของเม็ตรังสี Ir-192 ไว้ว่า เม็ตรังสีที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานเม็ตรังสีชนิดปิดผนึก ISO-2919 ซึ่งที่ใช้งานใส่แร่นั้นต้องใช้ผ่านมาตรฐานอุณหภูมิระดับ 5 หมายความว่าแคปซูลหุ้มเม็ตรังสีนั้นต้องทนอุณหภูมิได้ถึง 600 °C และอุณหภูมิที่อาจพุ่งพรวดสูงกว่านี้ ตัวอย่างเช่น เม็ตรังสี Ir-192 ที่ใช้งานกับเครื่องใส่แร่ Nucletron จะถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 800 °C นาน 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นลงเหลือ 20 °C (จำลองสถานการณ์ดับเพลิงด้วยน้ำ) กล้องนิรภัยเก็บเม็ตรังสีของเครื่องใส่แร่ซึ่งทำด้วยโลหะผสมของทังสเตน (densimat-18) ซึ่งสามารถงอรูปตัวเองได้ถึงอุณหภูมิ 1,500 °C ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้มันจะค่อยๆ ยุบตัวเองโดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 3,400 °C

สำหรับแคปซูลสแตนเลสหุ้ม Ir-192 นั้นมีจุดหลอมเหลว 1,500 °C ส่วนอิริเดียมมันมีจุดหลอมเหลว 2,246 °C ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ อิริเดียมจะกลายเป็นไอปนเปื้อนไปในอากาศโดยอิริเดียมจะมีจุดเดือดที่ 4,428 °C

### 7.3.2 ความปลอดภัยของเม็ตรังสี โคบอลต์-60 เมื่อเกิดอุบัติเหตุ

อารีรัตน์ คอนดองแก้ว แห่งสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้กล่าวถึงข้อมูลของโคบอลต์-60 เอาไว้ว่าการขนส่งโคบอลต์-60 จากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังโรงงานตกแต่ง จากโรงงานตกแต่งไปยังผู้ใช้ และจากผู้ใช้กลับไปยังผู้ผลิตเมื่อต้นกำเนิดโดยสมรรถนะในการใช้งาน การขนส่งในทุกกรณีโคบอลต์-60 จะถูกบรรจุลงในภาชนะที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ มีเปลือกนอกทำด้วยเหล็กกล้าผนังหนา ด้านในทำด้วยตะกั่ว และในการขนส่งนี้ต้องทำตามมาตรฐาน หรือข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ดังนี้

- ต้องมีการทดสอบการปล่อยตกโดยอิสระจากความสูง 1 เมตรลงพื้นแข็ง

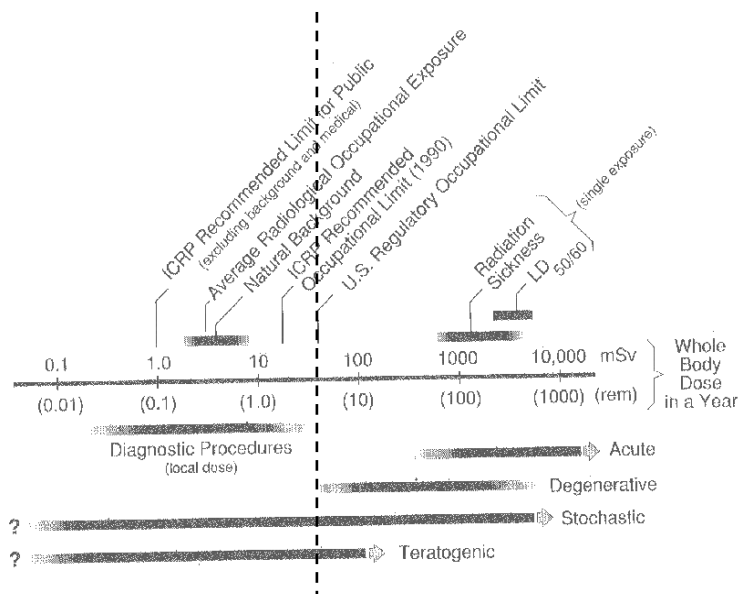
- ต้องมีการทดสอบการปล่อยตกโดยอิสระจากความสูง 9 เมตรลงพื้นผิวคอนกรีต/เหล็กกล้าที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษ
- ทดสอบการทนความร้อน โดยการจุ่มลงไปในที่ที่มีอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ดังนั้นในสถานการณ์ไฟไหม้แม้จะมีอุณหภูมิสูงมาก เม็ดแร่อิริเดียม-192 และแท่งแร่โคบอลต์-60 ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวตามมาตรฐานนี้ จะสามารถคงตัวอยู่ได้โดยไม่เกิดการฟุ้งกระจายของสารรังสี

#### 7.4 ปริมาณรังสีขีดจำกัดตามมาตรฐานต่าง ๆ กับผลกระทบให้เกิดอาการทางรังสี

การได้รับรังสีปริมาณสูงเป็นอันตรายแก่ชีวิต รังสีไม่สามารถทำให้ร่างกายเสียชีวิตทันที แต่อาจทำให้เกิดพองไหม้และบาดแผลได้ทันที และการได้รับรังสีเพียงอย่างเดียวไม่เป็นกรณีฉุกเฉินทางการแพทย์

ปริมาณรังสีขีดจำกัดที่ตั้งไว้เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายจากรังสีเนื่องจากการทำงานและการใช้รังสี ตั้งไว้ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการรังสีที่ได้รับจากธรรมชาติ (Natural Background) และผลกระทบจากรังสีที่เกิดขึ้นต่อชีวิต ดูรูปที่ 7.1 ดังนั้นการทำตามกฎระเบียบและแนวปฏิบัติต่างๆที่กำหนดไว้ การควบคุมภาพและบำรุงรักษาเครื่องมือที่ถูกต้อง การตรวจสอบรังสีอย่างสม่ำเสมอ ย่อมแน่ใจได้ว่าปลอดภัยจากรังสี



รูปที่ 7.1: เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีขีดจำกัดสำหรับสาธารณะหรือประชาชนทั่วไป, สำหรับผู้ทำงานทางรังสีตาม ICRP (20 mSv ต่อปีโดยนับค่าเฉลี่ยจากช่วง 5 ปีต่อเนื่อง), ระดับปริมาณรังสีในธรรมชาติ ปริมาณรังสีขีดจำกัดสำหรับเจ้าหน้าที่รังสีตามกฎข้อบังคับของอเมริกา และปริมาณรังสีในการตรวจวินิจฉัยโรค ปริมาณรังสีขีดจำกัดสำหรับผู้ปฏิบัติงานรังสี กำหนดไว้ 50 mSv ต่อปี(แสดงด้วยเส้นประ) ยังคงต่ำกว่าระดับปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดอาการทางรังสีอยู่เป็นหลายเท่า

## บรรณานุกรม

1. คู่มือฝึกอบรมหลักสูตรการป้องกันอันตรายจากรังสีระดับ 2. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, พ.ศ. 2542.
2. พวงทอง ไกรพิบูลย์, วิชา บุญกิตติเจริญ และจีระภา ตันนันทน์ ,ตำรารังสีรักษา – ฟิสิกส์ชีวรังสี การรักษาพยาบาลผู้ป่วย, ไทยวัฒนาพานิช กรุงเทพฯ, 2534.
3. ธวัช ชิตตระการ, การตรวจและการวัดรังสี, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2541.
4. Training Manual for "3rd Follow up joint training course on radiation protection for radiation safety supervisor", 19-30 May 2003, Office of Atoms for Peace. Bangkok, THAILAND.
5. Radiation and Safety, Division of Radiation and Waste Safety, IAEA Vienna, Austria, 1999. <http://www.worldatom.org>
6. Radiation Safety Manual, Michigan State University, Office of Radiation, Chemical, and Biological Safety, 1996. <http://www.orcbs.msu.edu> See Radiation Safety.
7. Radiation Safety Fundamentals Workbook. Environmental Health & Safety, University of California, Santa Cruz, 3rd ed. 1999.
8. Wolbarst, Anthony Brinton., Physics of Radiology, Appleton & Lange, 1993.
9. Martin, Colin J, Sutton, David G. Practical Radiation Protection in Health Care, Oxford University Press, UK, 2002.
10. Down, Steven B., Tilson Elwin R., Practical radiation protection and applied radiobiology. 2nd ed, W.B. Saunders, 1999.
11. Hall, Eric J. Radiology for the Radiologist, 5th ed, Lippincott, 2000.
12. IAEA Safety series No. 115, International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources, IAEA, 1996.
13. Sinclair, Warren K., Radiation Protection Recommendations on Dose Limits: The Role of The NCRP and The ICRP and Future Developments, Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 31, No.2, pp. 387-392, 1995.
14. ICRP publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection , Pergamon press, 1991.
15. Mary Alice Statkiewicz-Sherer, Paul J. Visconti, E. Russell Ritenour. Radiation protection in Medical Radiography, 2nd ed, 1993.
16. Paul Frame, Radiation Warning Symbol, Oak Ridge Associated Universities: [www.ornl.gov/ptp/articlesstories/radwarnsymbstory.htm](http://www.ornl.gov/ptp/articlesstories/radwarnsymbstory.htm)
17. IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1 (ST-1, Revised), Regulations for the safe transport of radioactive material, 1996 Edition (Revised).
18. Seeram, Euclid., Radiation Protection. Lippincott, 1997. Robert C. Ricks, "Scope of the Problem, Kiev, Ukraine", 9-13 October, 2000.
19. Eise Jan Kromhout van der Meer, (Personal contact), Machine safety information for micro high dose rate afterloader, Nucletron BV, The Netherland
20. อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว, ข้าหละธาตุมี่-โคบอลท์-60, รายงานพิเศษหนังสือพิมพ์มติชนรายวัน, 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2543.
21. ปฐม แหยมเกต, การจัดการกากกัมมันตรังสี (Radioactive Waste Management), กองจัดกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, พ.ศ. 2547 <http://center.oaep.go.th>

## ภาคผนวก

### การจัดการกากกัมมันตรังสี (Radioactive Waste Management)

ปฐุม แหยมเกตุ, กองขจัดกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

กากกัมมันตรังสี หมายถึง ของเสียทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ที่ประกอบหรือปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีที่ไม่ใช้แล้ว ในระดับกัมมันตภาพรังสีสูงกว่า เกณฑ์ปกติในธรรมชาติ

นับตั้งแต่ Henri Becquerel ได้พบกัมมันตภาพรังสี ในปี พ.ศ. 2439 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาพัฒนาความรู้และการใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ต่าง ๆ มากมาย เช่น การใช้ในรูปของพลังงาน และ การใช้สารกัมมันตรังสีในการศึกษาวิจัยและในการปฏิบัติงานอื่น การใช้งานของสารกัมมันตรังสีเพื่อประโยชน์ต่าง ๆ ดังกล่าว ยังผลให้เกิดกากกัมมันตรังสีขึ้น ผู้ใช้สารกัมมันตรังสีควรต้องทราบถึงกรรมวิธีจัดการกากที่ถูกต้องเพื่อมิให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อ

1. ต้นกำเนิดและลักษณะชนิดของกากกัมมันตรังสี

2. กากกัมมันตรังสีจากแหล่งกำเนิดกาก

กากกัมมันตรังสีจากการทำเหมืองแร่ ยูเรเนียม

กากกัมมันตรังสีจากการแต่งแร่ ยูเรเนียม

กากกัมมันตรังสีจากขบวนการยูเรเนียมบริสุทธิ์

กากกัมมันตรังสีจากการประดิษฐ์แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

กากกัมมันตรังสีจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

กากกัมมันตรังสีจากขบวนการฟอกกากนิวเคลียร์

กากกัมมันตรังสีจากศูนย์วิจัยและสถาบันการศึกษา

กากกัมมันตรังสีที่มาจากการใช้งานทางการแพทย์

กากกัมมันตรังสีจากโรงงานอุตสาหกรรม

กากกัมมันตรังสีจากการใช้งานทางการแพทย์

3. หลักการจัดการกากกัมมันตรังสี

4. การขจัดกากของเหลวกัมมันตรังสี

5. การขจัดกากของแข็งกัมมันตรังสี

6. การขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นไอหรือก๊าซ

7. การแปรสภาพของแข็ง ให้เหมาะต่อการเก็บทิ้งโดยถาวร (Conditioning)

8. การเก็บรักษาและทิ้งกากโดยถาวร

#### ต้นกำเนิดและลักษณะชนิดของกากกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสีในกากนั้นอาจจะเป็นสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ(Natural radioactivity) หรือสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากการประดิษฐ์ของมนุษย์ (Artificial radioactivity)

การจัดจำพวกของกากกัมมันตรังสีนั้น อาจแยกได้หลายวิธี เช่น

- คุณสมบัติทางเคมี(อินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร ฯลฯ)
- ชนิดของสารกัมมันตรังสีที่ปล่อยออกมา(แอลฟา เบตา และ แกมมา)
- ระดับของการเปื้อนเป็นสารรังสี(รังสีระดับสูง รังสีระดับต่ำและปานกลาง)
- แหล่งกำเนิดกากฯ หมายถึงสถานที่ปฏิบัติการทางรังสี

## กากกัมมันตรังสีจากแหล่งกำเนิดกาก

กากกัมมันตรังสีจากขบวนการวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

### - กากกัมมันตรังสีจากการทำเหมืองแร่ ยูเรเนียม

ปริมาณและคุณภาพของกากกัมมันตรังสีจากเหมืองแร่ยูเรเนียม ขึ้นอยู่กับแหล่งแร่และกรรมวิธีการผลิต โดยปกติกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นคือหางแร่ที่มีระดับรังสีต่ำและสะสมตัวในบ่อน้ำในบริเวณกว้าง ซึ่งไม่เป็นปัญหาสำคัญนัก เพราะแหล่งแร่ยูเรเนียม มักจะอยู่ห่างไกลแหล่งชุมชน สำหรับชนิดของสารกัมมันตรังสีที่พบคือ ยูเรเนียม เรเดียมหรือทอเรียม ที่เจือปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย

### - กากกัมมันตรังสีจากการแต่งแร่ ยูเรเนียม

สินแร่ยูเรเนียม จะมี ยูเรเนียมออกไซด์  $U^{3O8}$  ประมาณ 0.25% เมื่อส่งออกจากเหมืองแร่ สินแร่ดังกล่าวจะถูกส่งเข้าโรงงานแต่งแร่ ซึ่งจะแยกสารประกอบยูเรเนียม ออกจากสิ่งเจือปนทั้งหมด โดยการนำสินแร่มาบดให้แตกละเอียด แล้วสกัดสารประกอบยูเรเนียมออกมาโดยขบวนการทางเคมี ซึ่งมี 2 วิธี คือการสกัดโดยกรดและการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารประกอบยูเรเนียมจะละลายในสารละลาย และจะถูกนำไปแยกออกจากสารละลาย โดยวิธี Ion Exchange หรือโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ต่อไป

กากกัมมันตรังสีจากการแต่งแร่ ส่วนใหญ่คือหางแร่ ซึ่งจะเปื้อนปนด้วยสารรังสีที่มาจาก การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม เช่นเดียวกับกากขี้ จากเหมืองแร่ กากขี้เหล่านี้จะถูกระบายออกสู่อบوابกและจะตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อ โดยจะมีโลหะธาตุอื่นๆปนอยู่ด้วย เช่น Mn, Cu, Pb, As ฯลฯ กากกัมมันตรังสีชนิดเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นในการแต่งแร่ โมนาไซต์ ซึ่งเป็นแร่ที่มี ธาตุทอเรียมผสมอยู่ด้วย โดยสรุปแล้วกากกัมมันตรังสีในกลุ่มนี้ไม่ก่อปัญหาสำคัญแต่อย่างใด

### - กากกัมมันตรังสีจากขบวนการยูเรเนียมบริสุทธิ์

ผลิตผลจากการแต่งแร่ยูเรเนียม จะได้เป็นสารประกอบยูเรเนียมที่มีเนื้อยูเรเนียมประมาณ 70% ซึ่งจะต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปทำเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป ทั้งนี้โดยการทำละลายสารประกอบนั้นด้วยกรดดินประสิว แล้วทำการสกัดด้วยสารประกอบ (Tributyl phosphate) ซึ่งจะช่วยให้สามารถแยกยูเรเนียมเป็นสารประกอบบริสุทธิ์ได้

สำหรับกากกัมมันตรังสีในกรณีนี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารละลาย ในปริมาณ 5000 ลิตรต่อ ยูเรเนียม 1 ตัน กัมมันตภาพรังสีในกากนั้นจะมาจาก เรเดียม ยูเรเนียม และผลิตผลจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม เช่น ทอเรียมและโปรแทกทีเนียม เป็นต้น

หลังจากการสกัดด้วย TBP แล้วจะได้สารประกอบบริสุทธิ์ของ Uranyl Nitrate ซึ่งต่อมาจะถูก Oxidized กลายเป็นก๊าซ Uranium Tetrafluoride ซึ่งจะถูก Reduced ด้วย Mg กลายเป็นโลหะ ยูเรเนียมบริสุทธิ์ในที่สุด

### - กากกัมมันตรังสีจากการประดิษฐ์แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

การสร้าง หรือ ประกอบแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์นั้น จะเกี่ยวกับการนำโลหะยูเรเนียม ไปทำเป็น โลหะผสมที่ความคงทนต่อสภาพต่างๆ อาทิ เช่น ความร้อน ความดัน ความเครียด ในแท่งเชื้อเพลิง เป็นต้น การสร้างแท่งเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยขบวนการเชิงกล เช่นการหลอมโลหะ การกลึงให้เข้ารูป การเจาะ และการขัดทำความสะอาด เป็นต้น

กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น จะประกอบด้วยเศษโลหะ สารละลายที่ใช้ทำความสะอาด กระดาษ ฝุ่นละออง ต่างๆ ซึ่งเศษโลหะจากขบวนการนี้จะถูกเรียกเก็บกลับไปใช้งานใหม่ และกากส่วนอื่นๆ นั้นมีระดับรังสีต่ำมาก

- กากกัมมันตรังสีจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู  
การเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีสองจำพวก คือ ผลผลิตของการฟิชชัน (fission product) และผลผลิตจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับวัสดุอื่น ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (ผลผลิตแอกติเวชัน activation products) ปกติในส่วนของผลผลิตฟิชชัน นั้นจะติดค้างอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงปรมาณู ไม่เล็ดลอดออกมา แต่สำหรับผลผลิตแอกติเวชันนั้น จะปะปนอยู่ในตัวทำความเย็น และวัสดุโครงสร้างอื่น ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูซึ่งอาจจะถูกชะล้างออกมาในตัวทำความเย็นได้

สารกัมมันตรังสีที่อยู่ในกลุ่มนี้ประกอบด้วย ไอโซโทปต่าง ๆ มากมาย แต่อาจสรุปที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้  $H^3, C^{14}, Fe^{55}, Co^{60}, Ni^{63}, Kr^{85}, Sr^{89}, Sr^{90}, Y^{91}, Zr^{93}, Zr^{95}, Nb^{95}, Tc^{99}, Ru^{106}, I^{129}, I^{131}, Xe^{133}, Cs^{134}, Cs^{137}, Ce^{141}, Ce^{144}, Pm^{147}, SM^{151}, Eu^{154}, PB^{210}, Rn^{222}, Ra^{226}, Th^{229}, Th^{230}, U^{234}, U^{235}, U^{238}, Np^{237}, Pu^{239}, Pu^{240}, PU^{241}, Pu^{242}, Am^{241}, Am^{243}$  และ  $Cm^{242}$  เป็นต้น

- กากกัมมันตรังสีจากขบวนการฟอกกากนิวเคลียร์  
แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่นำไปใช้งานจนเสื่อมสมรรถนะภาพแล้ว อาจจะไปปรุงแต่งให้คืนสภาพใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง โดยขบวนการแยกทางเคมี โดยมีวิธีการประกอบด้วย การทำลายแท่งเชื้อเพลิงฯ ด้วยกรดดินปะสิว ซึ่งจะช่วยให้ได้กากกัมมันตรังสีในรูปของสารละลายที่มีสารกัมมันตรังสีชนิดผลผลิตฟิชชันที่มีความแรงรังสีสูงมากโดยปกติผลผลิตฟิชชันนั้นประกอบด้วยธาตุประมาณ 35 ธาตุและเป็นไอโซโทปรังสีประมาณ 120 ชนิด แต่ส่วนใหญ่เป็นไอโซโทปรังสีที่มีอายุสั้น ๆ สำหรับผลผลิตฟิชชันที่มีครึ่งชีวิตยาวมีไม่มากนัก ที่สำคัญคือ  $Cs^{137}$  มีครึ่งชีวิต 30 ปี  $Sr^{90}$  มีครึ่งชีวิต 29 ปี และ  $Ru^{106}$  มีครึ่งชีวิต 1 ปี เป็นต้น

นอกจากผลผลิตฟิชชันแล้ว กากกัมมันตรังสีชุดนี้ ยังประกอบด้วยสารรังสีชนิดทรานสยูเรนิค (Transurenic) ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่า ยูเรเนียมและเป็นไอโซโทปที่ให้แอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และมีครึ่งอายุค่อนข้างยาวนานด้วย

- กากกัมมันตรังสีจากศูนย์วิจัยและสถาบันการศึกษา  
กัมมันตภาพรังสีของกากกัม ในกลุ่มนี้ มีระดับรังสีต่ำมาก แต่ปรากฏว่าปริมาณของกากรังสีเพิ่มมากขึ้นทุกทีเนื่องจาก ปัจจุบันมีการใช้สารรังสีในการศึกษาวิจัยในโครงการต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น กากกัมมันตรังสีในกลุ่มนี้มีสภาพทางกายภาพคล้ายคลึงกันแต่องค์ประกอบของกากแตกต่างกัน ขึ้นกับโครงการที่ปฏิบัติ อาทิเช่น กากของเหลวอาจเป็นพวกสารอินทรีย์ที่มีการเจือปนด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน หรืออาจเป็นสารละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับกากของแข็งนั้น ส่วนมากประกอบด้วย วัสดุ อุปกรณ์ที่ชำรุด หรือ เศษกระดาษ ผ้า เฟอร์นิเจอร์ ขวดแก้ว พลาสติก และอื่น ๆ

- กากกัมมันตรังสีที่มาจากการใช้งานทางการแพทย์  
การใช้ประโยชน์ทางรังสีในกิจการแพทย์ประกอบด้วย การใช้ในการตรวจวินิจฉัย และการบำบัดรักษา อากาศโรค เช่น การใช้สารรังสีฉีดเข้าไปในร่างกาย และตรวจสอบการทำงานของระบบอวัยวะต่างๆ โดยการติดตามวัดปริมาณรังสี การใช้รังสีจากต้นกำเนิดรังสีฉายไปยังบริเวณอวัยวะที่เป็นเนื้องอก เพื่อระงับการแพร่ขยายของเนื้องอก ณ อวัยวะส่วนนั้น และการใช้รังสี X ฉายผ่านอวัยวะของร่างกาย เพื่อตรวจหาความผิดปกติ เป็นต้น ทั้งนี้สารรังสีที่ใช้มีทั้งในลักษณะของต้นกำเนิดรังสีผนึกสนิท(sealed source) และสารเคมีรังสีชนิดไม่ผนึก(unsealed sources)

กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น อาจจะอยู่ในรูปของเสียที่ขับถ่ายจากผู้ป่วยที่ได้รับสารรังสีเข้าสู่ร่างกาย น้ำเสียจากการทำความสะอาดภาชนะหรือเครื่องแต่งกายของผู้ป่วยและภาชนะบรรจุสาร

กัมมันตรังสี เซมิซีดยาและอื่นๆ สารรังสีที่ใช้ในกิจการนี้มักเป็นพวกที่มีครึ่งอายุสั้นๆ เช่น  $Au^{198}$ ,  $I^{125}$ ,  $Cr^{51}$  และ  $Tc^{99m}$  เป็นต้น

- กากกัมมันตรังสีจากโรงงานอุตสาหกรรม

ปกติสารกัมมันตรังสีที่ใช้ในกิจการอุตสาหกรรมต่างๆนั้น มักอยู่ในสภาพของสารรังสีชนิดผนึกสนิทในภาชนะ(seal source) โดยส่วนมากจะมีการใช้งานในการถ่ายภาพทางรังสี(radiography) ของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ หรือ เครื่องยนต์กลไก การใช้เป็นเครื่องตรวจสอบ ความหนาของวัสดุ ตรวจสอบความหนาแน่น ตรวจสอบระดับของเหลวในถังทึบ เป็นต้น ต้นกำเนิดรังสีเหล่านั้นจะถูกเรียกว่ากากกัมมันตรังสีก็ต่อเมื่อเลิกใช้งานแล้ว ซึ่งในเวลานั้นสารรังสีจะมีความเข้มข้นของรังสีลดลงอย่างมากแล้ว และเป็นกากที่แยกจากองค์ประกอบอื่นๆ ได้ง่าย ตัวอย่างไอโซโทปรังสี ในกรณีนี้มี เช่น โคบอลต์-60 เอริเดียม-192 ซีเซียม-137 เป็นต้น

- กากกัมมันตรังสีจากการใช้งานทางการเกษตร

การศึกษาวิจัยทางการเกษตรหลายอย่างเป็นต้นกำเนิดกากกัมมันตรังสี ประเภทนี้ อาทิ เช่น การตรวจสอบสภาพดิน หรือการศึกษาความสามารถในการดูดซึมปุ๋ยของพืชชนิดต่างๆ การตรวจหาความชื้นในดิน ฯลฯ กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมักจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ กากที่เกิดจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ทั่วไป

### หลักการจัดการกากกัมมันตรังสี

การจัดการกากกัมมันตรังสี มิได้หมายถึงการทำลายสารกัมมันตรังสี ให้หมดสิ้นไป ทั้งนี้เพราะวิธีการทางเคมี-ฟิสิกส์สามัญ ไม่สามารถทำลายสภาพกัมมันตรังสีได้ จะมีเพียงวิธีทางนิวเคลียร์ ซึ่งยุ่งยากและสิ้นเปลือง และขบวนการสลายตัวตามธรรมชาติของสารกัมมันตรังสีนั้นเท่านั้น ที่จะแปรสภาพความเป็นกัมมันตรังสีของสารได้ การจัดการกากกัมมันตรังสีจึงเป็นการดำเนินการใดๆ เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของกากกัมมันตรังสีในสภาวะแวดล้อมเกิดการเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสี ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนโดยทั่วไป

วิธีการที่ใช้ปฏิบัติต่อกาก เหล่านี้มีมากมายหลายวิธีตามลักษณะคุณภาพและปริมาณของกาก เหล่านั้น แต่โดยส่วนรวมแล้ว การจัดการกากๆ ใดๆวิธีจะมีหลักการร่วมกัน 3 ประการ

1. การทำให้เข้มข้น แล้วเก็บรวบรวม ( concentrate and contain )
2. การทำให้เจือจาง แล้วระบายทิ้ง ( dilute and disperse )
3. การเก็บทอดระยะเวลา และปล่อยให้สารกัมมันตรังสีสลายตัวไปเอง ( Delay and Decay )

### การขจัดกากของเหลวกัมมันตรังสี

กากของเหลวระดับรังสีสูง( $10^4 - 10^6$  Ci/m<sup>3</sup>)

กากกัมมันตรังสีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ fission – product จากโรงงานคินสภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และมีระดับรังสีสูง การบำบัดกากนี้มักใช้วิธีการต้มระเหย(evaporation) แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่คงทน รอกจนสารรังสีบางส่วนสลายตัวลงบ้าง แล้วจึงนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง เช่นโดยวิธีผนึกให้เป็นแก้ว ( Vitrification ) ต่อไป

กากของเหลวระดับรังสีต่ำและปานกลาง( $10^{-6} - 1$  Ci/m<sup>3</sup>)

ตามปกติกากของเหลวกัมมันตรังสีมักจะอยู่ในรูปสารละลายของน้ำ เพราะน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญในการปฏิบัติงานทุกประเภท เช่นใช้น้ำทำความสะอาดอุปกรณ์ ใช้ทำละลายสารเคมีต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ การดำเนินการขจัดกากของเหลวกัมมันตรังสีนั้น จะเริ่มด้วยการรวบรวมกากของเหลวไว้

จนกระทั่งมีปริมาณมากพอ ซึ่งจะได้ประโยชน์สองประการคือ เป็นการทอดระยะเวลาให้สารกัมมันตรังสีที่มีอายุสั้นๆ สลายตัวหมดไป(ตามหลักการข้อที่3) และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะสามารถดำเนินการต่อ

กากขจัดกากของแข็งที่เหมาะสม ในการเดินเครื่องครั้งหนึ่งๆ วิธีการดำเนินการขจัดกากของเหลวมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนเคมี เป็นวิธีที่ใช้สารเคมีผสมลงในของเหลว ทำให้สารกัมมันตรังสีเกิดการตกตะกอนร่วมกับสารเคมีนั้น (หลักการข้อที่1) และสารละลายในส่วนที่เหลือหลังจากเกิดการตกตะกอน จะถูกระบายทิ้งต่อไป (หลักการข้อที่2)

ผลจากวิธีทางเคมี คือการเกิดสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำซึ่งมักเป็นเกลือ hydroxide carbonate หรือ phosphate ขึ้นกับ วิธีการ และสารเคมีที่ใช้ งานการต้มระเหย (Evaporation) เป็นวิธีที่ใช้ความร้อนในการต้มระเหยน้ำทั้งกัมมันตรังสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่มีระดับรังสีปานกลาง กรรมวิธีนี้จะทำให้ค่า DF สูงมาก การต้มระเหยนี้ จะได้ผลเป็นกากกัมมันตรังสีที่เข้มข้นในรูปตะกอน หรือของเหลวข้นๆ (concentrated residue) ตามหลักการข้อที่ 1 และส่วนที่เป็นไอน้ำ (Distillate) จะถูกระบายออกไป ตามหลักการข้อที่ 2

การดูดซับด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เนื่องจากสารกัมมันตรังสีในกากของเหลว จะอยู่ในรูปอนุผลของธาตุด้วย ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออนในการขจัดกากของเหลว ได้โดยให้กากของเหลวไหลผ่านคอลัมน์ของสารแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งอาจเป็นสารสังเคราะห์ เช่น Ion Exchange resin หรือสารที่มีกำเนิดแต่ธรรมชาติ เช่น ถ่าน เกลือ ซีโอไลต์ เบนโตไนท์ และ ดินเคลย์ ต่างๆ สารกัมมันตรังสีจะถูกดูดซับไว้ในสารแลกเปลี่ยนไอออน (หลักข้อที่ 1) และสารละลายที่ผ่านออกไปสามารถละลายทิ้งได้ (หลักข้อที่ 2)

สำหรับการปฏิบัติงานขจัดกากของเหลวกัมมันตรังสีของสำนักงาน พปส. นั้น กระทำโดยใช้วิธีตกตะกอนเคมี

### การขจัดกากของแข็งกัมมันตรังสี

กากกัมมันตรังสีระดับรังสีสูง กากของแข็งชนิดนี้ได้จาก โรงงานคืนสภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel reprocessing plant) ลักษณะของกากคือ อ็อกไซด์ของธาตุต่างๆ การบำบัดกากข จะกระทำโดยแปรสภาพของกากให้เป็นวัสดุที่คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี อาทิเช่น แก้ว หรือ เซรามิค กากของแข็งที่แปรสภาพแล้ว เรียกว่า ผลิตภัณฑ์กากข (Waste product) จะถูกบรรจุลงในภาชนะที่เหมาะสม และเก็บไว้รอการทิ้งกากขโดยถาวรต่อไป

กากกัมมันตรังสีระดับรังสีต่ำและปานกลาง กากของแข็งในกลุ่มนี้ ประกอบด้วย

กากตะกอนเข้มข้น( Residue) จากการต้มระเหยกากขของเหลว จากขบวนการตกตะกอนเคมีของกากขของเหลว และ หรือ จากสารแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้แล้ว เป็นต้น กากตะกอนเหล่านี้นี้มักมีความชื้นปะปนอยู่ด้วยและยังไม่คงทนต่อสภาวะแวดล้อมดังนั้นจะต้องมีการแปรสภาพ เป็นผลิตภัณฑ์กากขที่เหมาะสมเช่นกัน การแปรสภาพกากขดังกล่าวนี้ อาจกระทำได้ด้วยวิธี Cementation หรือวิธี Bituminization

กากขของแข็งจากการใช้งานทั่วไป กากขของแข็งกัมมันตรังสีส่วนใหญ่ มาจากอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิบัติงานทางรังสี เช่น ภาชนะต่างๆ เศษกระดาษ และ ซากสัตว์ทดลอง เป็นต้น วิธีการ

ปฏิบัติต่อกากกลุ่มนี้ก็คือ ลดปริมาตรของกาก และเก็บรวบรวมไว้ การลดปริมาตรของกาก สามารถกระทำได้เช่น

การเผาทำลายกากที่เผาไหม้ได้ (Incineration)

การกด / อัดกาก ด้วยเครื่องมืออัดกำลัง (Compaction)

การบด / ตัดกาก ที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กกลง ( Fragmentation)

การหลอมละลายโลหะเป็อนรังสี (Melting)

การทำละลายด้วยกรด (Acid reduction)

กากของแข็งที่ทำการลดปริมาตรลงแล้ว จะเก็บรวบรวมไว้และนำไปแปรสภาพให้เหมาะสม เพื่อนำไปเก็บหรือทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ โดยไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางรังสีต่อสภาวะแวดล้อม

### การขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นไอหรือก๊าซ

กากกัมมันตรังสีที่อยู่ในสถานะของก๊าซนั้นมีอยู่ 2 ลักษณะได้แก่ ก๊าซกัมมันตภาพรังสี (radioactive gas) เช่น I<sub>2</sub>, Kr, Ar, Rn และ Xe เป็นต้น หรือ ไอสาร หรือ ฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสี (Aerosols) การบำบัดกาก ชนิด Aerosols นั้นกระทำได้โดยวิธีการกรองกาก ในอากาศด้วยระบบกรองพิเศษ ซึ่งมักจะประกอบด้วย Activated Charcoal เป็นตัวดูดจับสารกัมมันตรังสี และมีอุปกรณ์กรองมลสารแขวนลอย ที่มีขนาดเล็กๆได้ดี HEPA filter จากการขจัดกาก โดยการกรองแล้ว เครื่องกรองจะถูกทิ้งเป็นกากของแข็งต่อไป

การบำบัดกากชนิดที่เป็นก๊าซกัมมันตรังสีนั้นจำเป็นต้องอาศัยกรรมวิธีเฉพาะ เช่น

**เทคนิคการดูดจับ (Adsorption technique)** ได้แก่การดูดจับก๊าซกัมมันตรังสีด้วยสารตัวกลางที่เหมาะสม เช่น Activated Carbon หรือ Porous matter ที่เคลือบหรือจุ่มให้โชกด้วยเกลือของเงิน (Silver Nitrate Impregnated) ในกรณีของ I<sub>2</sub>

**การสกัดแยก (Extraction)** เช่นการสกัดแยกด้วยวิธีกลั่นเย็น (Cryogenic distillation) ซึ่งกระทำได้โดยการลดอุณหภูมิของก๊าซให้เย็นจัดจนกลายเป็นของเหลว แล้วปล่อยให้อุณหภูมิสูงขึ้นทีละน้อย ก๊าซแต่ละชนิดที่มีจุดเดือดแตกต่างกันก็จะระเหยออกมา ณ ที่อุณหภูมิต่างกัน ตัวอย่างเช่น Ne มีจุดเดือด = -111.9 °C เป็นต้น

**การแพร่ (Diffusion)** เป็นการสกัดแยกก๊าซอีกแบบหนึ่งโดยอาศัยหลักการที่ว่าก๊าซแต่ละชนิดมีอัตราการแพร่ (rate of diffusion) ในตัวกลางต่างๆไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถแยกจากกันได้

หลังจากการกรองหรือสกัดแยกก๊าซ ด้วยวิธีต่างๆดังกล่าวแล้ว ชุดเครื่องกรอง ก็จะเป็นที่สะสมของสารกัมมันตรังสี และจะต้องนำไปบำบัดเป็นกากของแข็งต่อไป ส่วนก๊าซที่สกัดแยกเอาไว้ ก็บรรจุใส่ท่อ หรือถังก๊าซเพื่อนำไปทิ้งโดยถาวรต่อไป

### การแปรสภาพของแข็ง ให้เหมาะต่อการเก็บทิ้งโดยถาวร(Conditioning)

เพื่อให้สภาพของกาก คงทนต่อสภาพแวดล้อม ในเมื่อจะมีการเก็บทิ้งโดยถาวรจะต้องมีการแปรสภาพกาก เช่น การฉีกกาก ในเนื้อซีเมนต์ (cementation) โดยใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึด/เชื่อมกากกัมมันตรังสี และป้องกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีในกาก กระจายออกสู่สภาวะสิ่งแวดล้อม หรืออาจจะฉีกกาก ในสารบิฟู

เมน หรือ ยางมะตอย (bituminization) หรืออาจจะแปรสภาพของกากฯ ให้อยู่ในรูปของสารที่เสถียรมากๆ เช่น แก้วและเซรามิก (Vitrification) เป็นต้น การเลือกวิธีแปรสภาพนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของกากฯ นั้นๆ และเหตุผลทางเศรษฐกิจของการจัดการกากนั้นๆ

### **การเก็บรักษาและทิ้งกากโดยถาวร**

กากฯที่แปรสภาพแล้ว สามารถนำไปทิ้งโดยถาวรได้ ซึ่งมีวิธีทิ้งหลายวิธี เช่น การเก็บฝังลงใต้ดิน ตื้นๆ การเก็บฝังในเหมืองแร่ร้างใต้ดินและการเก็บทิ้งลงในมหาสมุทร เป็นต้น

#### **การทิ้งกากแบบฝังดิน** สามารถกระทำได้ 2 วิธี

การทิ้งกากแบบฝังดิน(Shallow land burial) เป็นวิธีการที่ใช้กับ กากกัมมันตรังสีของแข็ง ที่มีความแรงรังสีต่ำ และมีครึ่งชีวิตของ สารกัมมันตรังสีสั้น (ไม่เกิน 30 ปี) ที่ฝังกากแบบนี้อาจเป็นหลุมดินหรือเป็นบ่อ ที่มีโครงสร้างแข็งแรง (engineered structure)

การทิ้งกากแบบฝังดินลึก (Deep underground disposal) เป็นการทิ้งกากที่เหมาะสมสำหรับกากกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาว และมีระดับความแรงรังสีสูง และต้องการแยกกากจากมนุษย์และสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับประชาชนให้มากที่สุด

#### **การทิ้งกากแบบทิ้งทะเล**

การทิ้งกากแบบนี้อาจกระทำได้โดยการทิ้งผลิตภัณฑ์กากที่ผืนกสนิทแล้วลงสู่ท้องทะเลโดยตรง หรือโดยวิธีฝังกากใต้ดินใต้ท้องทะเลลึกแต่จะต้องปฏิบัติตามกฎเกณฑ์ข้อตกลงนานาชาติว่าด้วย การทิ้งกากสารอันตรายลงสู่ท้องทะเล(The London Dumping Convention) ปัจจุบันนี้ประเทศต่างๆทั่วโลกพยายามละเว้นการทิ้งกากวิธีนี้

#### **การทิ้ง/ทำลายกากโดยถาวรวิธีอื่นๆ**

ยังมีวิธีทำลายกากอีกหลายวิธีที่มีการพิจารณาว่าอาจจะนำมาใช้ปฏิบัติได้ ตัวอย่างเช่นการฝังกากลงในน้ำแข็ง (disposal into ice sheet) การทำลายกากโดยวิธีนิวเคลียร์(Nuclear transmutation) และการทิ้งกากออกไปสู่อวกาศ(disposal into space) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคการทิ้งกากด้วยวิธีดังกล่าวยังมิได้นำมาใช้ปฏิบัติในปัจจุบัน