บทที่ 7
พลังงานจากรังสี

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการคำนวณพลังงานจากรังสีเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย
2. ศึกษาการคำนวณพลังงานจากรังสีเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในร่างกาย
3. ศึกษาผลของรังสีชนิดต่าง ๆ
4. ศึกษาครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์และครึ่งชีวิตทางชีววิทยา
5. ศึกษาสารที่ให้รังสีแอลฟา รังสีเบตา และรังสีแกมมา

7.1 บทนำ

การทราบพลังงานของรังสีที่ถ่ายเทให้แก่ร่างกาย เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการนำรังสีมาใช้ประโยชน์ เมื่อทราบพลังงานจะทำให้ทราบว่า จะต้องใช้ปริมาณรังสีจำนวนเท่าไร การนำรังสีมาใช้งานกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย แล้วฉายรังสีตรงไปยังตำแหน่งที่ต้องการ
2. โดยการทำให้แหล่งกำเนิดรังสีเข้าไปในร่างกาย ไปสะสมอยู่ตรงอวัยวะที่ต้องการ

การคำนวณพลังงานที่ร่ างกายได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีที่อยู่ภายในร่างกายกระทำได้ยากกว่า เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกายมาก มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้การคำนวณผิดพลาด จึงต้องคำนวณเป็นพลังงานสูงสุดที่ร่างกายควรจะได้รับ

7.2 การคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย

ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็กโพเชอร์และแอ็ปสอบโดส

พลังงานที่ถูกดูดกลืนในอากาศตรงตำแหน่งที่เอ็กโพเชอร์ เท่ากับ 1 เรินเกนท์ มีค่าเท่ากับ 87.7 เอิกร์/กรัม แอ็ปสอบโดสที่จุดใดๆ ในอากาศ ซึ่งเอ็กโพเชอร์ เท่ากับ R เรินเกนท์ มีค่าเท่ากับ

$$D_{air} = 0.877\ R$$

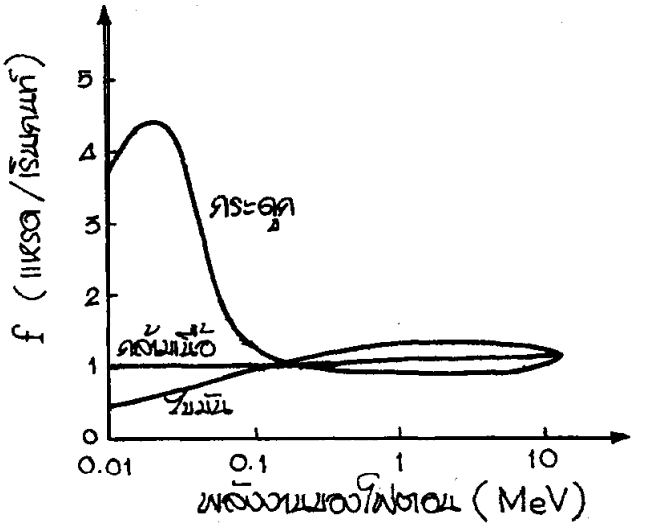
จำนวนแหรดต่อเรินเกนท์ในอากาศเท่ากับ 0.877 ในทางปฏิบัติสามารถวัดเอ็กโพเชอร์ได้ แล้วจึงคำนวณหาแอ็ปสอบโดส โดยใช้สมการข้างบน

ถ้าหากว่าตัวกลางไม่ใช่อากาศและถ้าเกิดภาวะสมดุลย์ สมการข้างบนจะต้องคูณด้วยอัตราระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนมวลของตัวกลางกับของอากาศ

ดังนั้น
$$D_m = 0.877 \frac{(\mu_m/\rho)_m}{(\mu_m/\rho)_{air}} = f\ R$$

จำนวนแหรดต่อเรินเกนท์ในตัวกลาง ใช้สัญญลักษณ์ f รูปที่ 7.1 แสดง f เป็นฟังก์ชันของพลังงานของรังสีแกมมาสำหรับตัวกลาง เช่น กระดูก, กล้ามเนื้อ และไขมัน

ถ้าไม่เกิดภาวะสมดุลย์ ก็ยังคงคำนวณแอ็ปสอบโดสได้ โดยใช้ทฤษฎีแบรก-เกรย์ (Bragg - Gray principle) โดยทั่วไปในการหาแอ็ปสอบโดสจะแบ่งพลังงานของรังสีของรังสีแกมมาเป็น 3 ส่วน คือ พลังงานต่ำ, พลังงานปานกลาง และพลังงานสูง ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการคำนวณยิ่งขึ้น



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง f และพลังงานของโฟตอน

พลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.1 เอ็มอีวี)

ถ้าโฟตอนมีพลังงานต่ำ จะเกิดขบวนการโฟโตอีเล็คทริค ดังนั้น $\mu_m \cong \tau$ เราทราบว่า $\tau \propto Z^2$ เมื่อ Z เป็นเลขอะตอมของตัวดูดกลืน ดังนั้น

$$D_m \propto (Z_m / Z_{air})^2$$

แอ็ปสอบโดสเป็นแหรดแปรตามกำลังสี่ของอัตราส่วนของเลขอะตอมของตัวดูดกลืนและอากาศ ดังนั้นแอ็ปสอบโดสจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ

พลังงานปานกลาง (ระหว่าง 0.1 เอ็มอีวี และ 1 เอ็มอีวี)

เมื่อโฟตอนมีพลังงานปานกลาง จะเกิดขบวนการคอมป์ตันมาก ดังนั้น $\mu_m \cong \sigma_a$ เนื่องจาก $\sigma_a \propto Z/A$ จะได้ว่า

$$D_m \propto \frac{(Z/A)_m}{(Z/A)_{air}}$$

รูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้มีค่าน้อยมาก

พลังงานสูง (มากกว่า 1 เอ็มอีวี)

เกิดขบวนการแพร์โปรดักชัน ดังนั้น $\mu_m \cong K$ เนื่องจากขบวนการแพร์โปรดักชันเปลี่ยนแปลงตามกำลังสองของเลขมวลของตัวดูดกลืน จะได้ว่า

$$D_m \propto \left(\frac{Z_m}{Z_{air}} \right)^2$$

การเปลี่ยนแปลงของแอ็ปสอบโคสกับพลังงานในช่วงนี้ จะมีค่ามากกว่าบริเวณที่เกิดขบวนการคอมป์ตัน แต่มีค่าน้อยกว่าบริเวณที่เกิดขบวนการโฟโตอีเล็คทริค

สำหรับลำรังสีที่มีพลังงานหลายค่า เช่น ลำรังสีเอ็กซ์ จะต้องแก้ไขสูตรบ้างเล็กน้อย กำหนดให้

$f(E)$ = แหรดต่อเรินเกนท์ที่พลังงาน E

และ $R(E)$ = เรินเกนท์ต่อช่วงพลังงาน

= การกระจายของโฟตอนในเทอมของเรินเกนท์

ดังนั้น $D = \int_0^{E_{max}} R(E) \cdot f(E) \cdot dE$

และ $R = \int_0^{E_{max}} R(E) dE$

ดังนั้น $\bar{f} = D/R$ = ค่าเฉลี่ยของแหรดต่อเรินเกนท์เมื่อลำโฟตอนมีพลังงานหลายค่า

7.3 การประยุกต์นิยามเบื้องต้น

การนำนิยามของคำว่าเอ็กโพเชอร์ และแอ็ปสอบโคสไปใช้งาน จะต้องเพิ่มเติมเทอมขึ้นอีกเล็กน้อยดังนี้

R_a = เอ็กโพเชอร์เป็นเรินเกนท์ที่จุด P ในอากาศ

= โคสของอากาศที่จุด P

R_S = เอ็กโพเชอร์เป็นเรินเกนท์ที่จุด P ถ้าผิวของร่างกายหรือแฟนทอมอยู่ที่จุดนี้

= โคสที่ผิวที่จุด P

R_d = เอ็กโพเชอร์เป็นเรินเกนท์ที่จุดใดๆ ในร่างกายหรือภายในแฟนทอม, วัดโดย

ใช้เครื่องวัดเรินเกนท์

R_S / R_a = แบคสแกทเทอแฟคเตอร์ (backscatter factor)

(R_d / R_S) = เปอร์เซ็นต์เดพโดส (percent depth dose)

ตัวอย่างที่ 7.1 กำหนดให้ ลำรังสีเอ็กซ์ขนาด 250 เควีพี (KVP) ขนาดของลำรังสีเท่ากับ 100 ตารางเซ็นติเมตร และความหนาครึ่งหนึ่ง (HVL) เท่ากับ 1 มม. ทองแดง สมมติว่า $\bar{f}$ = 0.95 (เนื้อเยื่ออ่อน) $\bar{f}$ = 1.76 (กระดูก) และแบคสแกท-เทอแฟคเตอร์เท่ากับ 1.36 กำหนดให้ R_a = 1000 R, ดังนั้น D_a = 0.877 R = 877 rad. ที่รอยต่อระหว่างอากาศและเนื้อเยื่อ จะได้ว่า

R_S = 1000 x 1.36 = 1360 R

Ds = 0.877 x 1360 = 1193 rad ในอากาศ

D_S = 0.95 x 1360 = 1290 rad ในเนื้อเยื่อ

ที 80 ไอโซโดส (isodose)

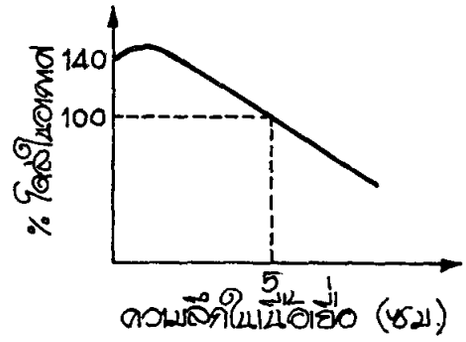
D_t = 0.80 x 0.95 x 1360 = 1030 rad ในเนื้อเยื่อ

D_b = 0.80 x 1.76 x 1360 = 1920 rad ในกระดูก

ตัวอย่างข้างบนนี้ แสดงถึงวิธีการหาโดสจากเอ็กโพเชอร์ ซึ่งอาจจะสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. วัดเอ็กโพเชอร์ในอากาศที่ผิวของเนื้อเยื่อ
2. คำนวณหาเอ็กโพเชอร์ที่ความลึกตามที่ต้องการโดยใช้กราฟไอโซโดส
3. คำนวณแอ็ปสอบโดส

ตัวอย่างที่ 7.2 กำหนดให้ กราฟแสดงโดสที่ความลึกต่างๆ ของลำรังสีเอ็กซ์ 500 เควีพี (KVP) ที่ความลึก 5 ซม. ซึ่งเป็นความลึกที่พบระบบสร้างเม็ดโลหิต, เอ็กโพเชอร์ จะมีค่าเท่ากับในฟรีแอร์ที่จุดบนพื้นผิวของร่างกาย ดังนั้น, เนื่องจากพลังงลดลงในช่วงที่เกิดคอมป์ตัน, $f \cong 1$ ดังนั้น, จาก $D_t = fR$ จะได้ว่า $|D_t| = |R|$



เอ็กโพเซอร์เป็นเรินเกนท์ในอากาศเท่ากับขนาดของแอ็ปสอบโดส เป็นแหรดในระบบสร้างเม็ดโลหิต เมื่อผิวของร่างกายวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

7.4 การคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในร่างกาย

การควบคุมพลังงานจากรังสีที่ร่างกายได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอกร่างกาย กระทำได้ง่ายกว่า เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายในร่างกาย พลังงานของรังสีที่ร่างกายได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีภายในร่างกายขึ้นอยู่กับ

1. ครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี
2. พลังงานและชนิดของรังสีที่ได้จากการสลายตัว
3. ปริมาตรของเนื้อเยื่อที่สารกัมมันตรังสีกระจายอยู่
4. ลักษณะการกระจายของสารกัมมันตรังสี
5. การขับถ่ายออกจากร่างกาย

สำหรับค่าทางฟิสิกส์ เช่น ครึ่งชีวิต พลังงาน สามารถวัดได้โดยมีความแม่นยำมาก แต่ค่าทางชีววิทยา เช่น การขับถ่าย ไม่สามารถทราบค่าถูกต้องได้ การคำนวณพลังงานจากรังสีจากกัมมันตรังสีที่มีอยู่ภายในร่างกาย จึงให้ผลถูกต้องน้อยกว่า เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกายมาก

7.5 ผลเนื่องจากชนิดของรังสี

รังสีที่ส่งออกมาจากสารกัมมันตรังสีอาจจะเป็นรังสีที่มีอนุภาค เช่น รังสีแอลฟา, อีเล็คตรอน, โพซิตรอน หรือ เป็นรังสีที่ไม่มีอนุภาค เช่น รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา สำหรับรังสีเบตาเคลื่อนที่ในเนื้อเยื่อเนระยะทางน้อยอยู่ในช่วงมิลลิเมตรเท่านั้น จึงสามารถถ่ายเทพลังงานทั้งหมดแก่เนื้อเยื่อตรงบริเวณที่แหล่งกำเนิดรังสีเบตากระจายอยู่ แต่

สำหรับรังสีแกมมาซึ่งมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมาก จะสูญเสียพลังงานภายนอกบนิเวณที่สารกัมมันตรังสีกระจายอยู่ การคำนวณปริมาณรังสีภายในร่างกายจากรังสีแกมมา จึงยุ่งยากมากกว่าการคำนวณจากรังสีเบตา ถ้าหากว่าการกระจายของสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเบตาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (uniform) การคำนวณพลังงานจากรังสีจะยิ่งทำได้ง่ายขึ้น

7.6 ครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์และครึ่งชีวิตทางชีววิทยา ถ้าให้สารกัมมันตรังสีแก่อวัยวะใด พลังงานรังสีที่อวัยวะนั้นได้รับจะขึ้นอยู่กับ 1. การสลายตัวทางฟิสิกส์ของสารกัมมันตรังสี (R_p) และ 2. การขจัดทางชีววิทยา (R_b) การลดลงของสารกัมมันตรังสี (R_{eff}) จะเท่ากับผลรวมอัตราการลดลงทั้งสองข้อ

$$R_{eff} = R_p + R_b$$

เรากล่าวถึงอัตราการลดลงด้วยครึ่งชีวิต ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ถ้าครึ่งชีวิตสั้น หมายความว่าการลดลงเร็ว แต่ถ้าครึ่งชีวิตยาว หมายความว่า การลดลงเป็นไปอย่างช้าๆ

$$\text{อัตราการลดลง } (R) \propto \frac{1}{T_{1/2}}$$

ถ้า T_{eff} เป็นครึ่งชีวิตเฉลี่ย, T_p เป็นครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์ และ T_b เป็นครึ่งชีวิตทางชีววิทยา จะได้ว่า

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

หรือ

ดังนั้น ถ้าทราบอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี และอัตราการขจัดทางชีววิทยา จะสามารถหาอัตราการลดลงของสารกัมมันตรังสีได้

7.7 สารที่ให้รังสีแอลฟา

เนื่องจากรังสีแอลฟาเป็นอนุภาคที่มีประจุมาก จึงเคลื่อนที่ในเนื้อเยื่อเป็นระยะทางน้อยมาก อยู่ในช่วงไม่เกิน 70 ไมครอน ในทางปฏิบัติ พลังงานทั้งหมดของรังสีแอลฟาจะถูกดูดกลืนตรงตำแหน่ง ที่สารกัมมันตรังสีแกมมาออกมา ถ้าหากว่าการกระจายของสารกัมมันตรังสีเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ พลังงานจากรังสีก็จะสม่ำเสมอด้วย

กัมมันตภาพ 1 ไมโครคูรี แสดงว่าสารกัมมันตรังสี 3.7×10^4 อะตอม สลายตัวใน 1 วินาที ถ้าการสลายตัว 1 ครั้งให้รังสีแอลฟา 1 ตัว สารกัมมันตรังสี 1 ไมโครคูรี จะสลายตัวให้รังสีแอลฟา 3.7×10^4 ตัว นอกจากนี้รังสีแอลฟาที่ได้จากการสลายตัวยังมีพลังงานที่จำเพาะ ถ้าการกระจายของสารกัมมันตรังสีเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและมีกัมมันตภาพ C ไมโครคูรีต่อกรัม และรังสีแอลฟามีพลังงาน E เอ็มอีวี จะได้ว่า

จำนวนการสลายตัวต่อวินาทีต่อกรัมของเนื้อเยื่อ เท่ากับ $3.7 \times 10^4 \times C$

เนื่องจากการสลายตัว 1 ครั้งให้รังสีแอลฟาที่มีพลังงาน E เอ็มอีวี ดังนั้น

พลังงานที่ถูกดูดกลืน $= 3.7 \times \times 10^4 \times C \times E$	MeV/sec/gm

แต่ 1 แหรดเป็นพลังงาน 100 เอิกร์ต่อกรัม และ 1 เอ็มอีวี เท่ากับ 1.6×10^{-6} เอิกร์ ดังนั้น 1 แหรด เท่ากับ 6.24×10^7 เอ็มอีวีต่อกรัม ดังนั้น โดสต่อวินาที

$$\frac{D_{\alpha}}{\text{วินาที}} = \frac{5.92 \times 10^4 \times C \times E}{6.24 \times 10^7} \quad \text{แหรด}$$

$\frac{D_{\alpha}}{\text{วินาที}} = 5.92 \times 10^{-4} \times E \times C$	แหรด

$\frac{D_{\alpha}}{\text{วัน}} = 51.2 \times E \times C$	แหรด

สมการข้างต้นนี้ใช้ได้ดีเมื่อครึ่งชีวิตมากกว่า 1 วัน ส่วนมากสารที่ให้รังสีแอลฟา จะมีครึ่งชีวิตยาว ดังนั้นการสลาบตัวทางฟิสิกส์ จึงไม่มีผลต่อการคำนวณมากนัก นอกจากนี้ สารที่ให้รังสีแอลฟา (เรเดียม, พลูโตเนียม) มักจะฝังตัวอยู่ในกระดูกซึ่งร่างกายขจัดได้ช้ามาก ทำให้ครึ่งชีวิตเฉลี่ย (T_{eff}) ในอวัยวะยาวนานมาก ในการคำนวณจึงอาจจะไม่คิดถึงการสลายตัวได้

ตัวอย่างที่ 7.3 สมมติว่า ชายคนหนึ่งได้รับเรเดียม-226 จำนวน 10 ไมโครคูรี ซึ่งจะไปฝังอยู่ที่กระดูก ครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์ของเรเดียม-266 เท่ากับ 1622 ปี เมื่อเรเดียมฝังอยู่ในกระดูกแล้ว ร่างกายจะขจัดออกน้อยมาก จึงทำให้เนื้อเยื่อบริเวณข้างเคียงได้รับรังสีค่อนข้างมาก พลังงานของรังสีแอลฟาที่ได้จากเรเดียมท่ากับ 4.79 เอ็ม-อีวี และกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในกระดูกมวล 7,000 กรัม

จาก

$$\frac{D_{\infty}}{\text{วัน}} = 51.2 \times E \times C \qquad \text{แหรด}$$

แทนค่า

$$\frac{D_{\infty}}{\text{วัน}} = 51.2 \times 4.79 \times \frac{10}{7{,}000} = 0.348 \text{ แหรด}$$

เนื่องจากเรเดียมมีครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์ยาว และถูกขจัดออกจากกระดูกน้อย ดังนั้น โดสใน 1 ปี คือ

$$\frac{D_{\infty}}{\text{ปี}} = 0.348 \times 365 = 127 \text{ แหรด}$$

การคำนวณ คิดเฉพาะปริมาณรังสีจากรังสีแอลฟาพลังงาน 4.79 เอ็มอีวีเท่านั้น ที่จริงแล้วยังมีรังสีแอลฟาพลังงานอื่น และรังสีแกมมาอีกด้วย นอกจากนี้ตามปกติ เรเดียมไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอภายในกระดูก แต่จะมีบริเวณที่มีความเข้มข้นของเรเดียมมาก (hot spot)

7.8 สารที่ให้รังสีเบตา เมื่อสารที่ให้รังสีเบตาเข้าไปสะสมอยู่ในอวัยวะใด จะให้รังสีเบตาออกมา โดยที่รังสีเบตาจะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมดภายในอวัยวะนั้น เพราะว่า รังสีเบตาสามารถเคลื่อนที่ไปในเนื้อเยื่อ เป็นระยะทางน้อยมากประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เท่านั้น นอกจากว่า รังสีเบตามีพลังงานสูงมาก จนอาจจะหลุดออกจากอวัยวะนั้นได้

รังสีเบตาเมื่อหลุดออกจากสารกัมมันตรังสีจะมีพลังงานหลายค่า จากศูนย์จนกระทั่งถึง

พลังงานสูงสุด ในการคำนวณจะต้องใช้พลังงานเฉลี่ย ($\bar{E}_\beta$) ของรังสีเบตาที่ได้จากสารกัมมันตรังสีนั้น

ในการคำนวณพลังงานรังสีให้ใช้สูตรเดียวกับสารที่ให้รังสีแอลฟา กำหนดให้ความเข้มของสารกัมมันตรังสีในเนื้อเยื่อเท่ากับ C ไมโครคูรีต่อกรัม และพลังงานเฉลี่ยของรังสีเบตาเท่ากับ E เอ็มอีวี

$$\frac{D_\beta}{\text{วัน}} = 51.2 \times C \times \bar{E}_\beta \quad \text{แหรด}$$

สมการนี้ใช้ได้ดีเมื่อครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเบตามากกว่า 1 วัน ในการคำนวณจะต้องใช้ค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ยด้วย

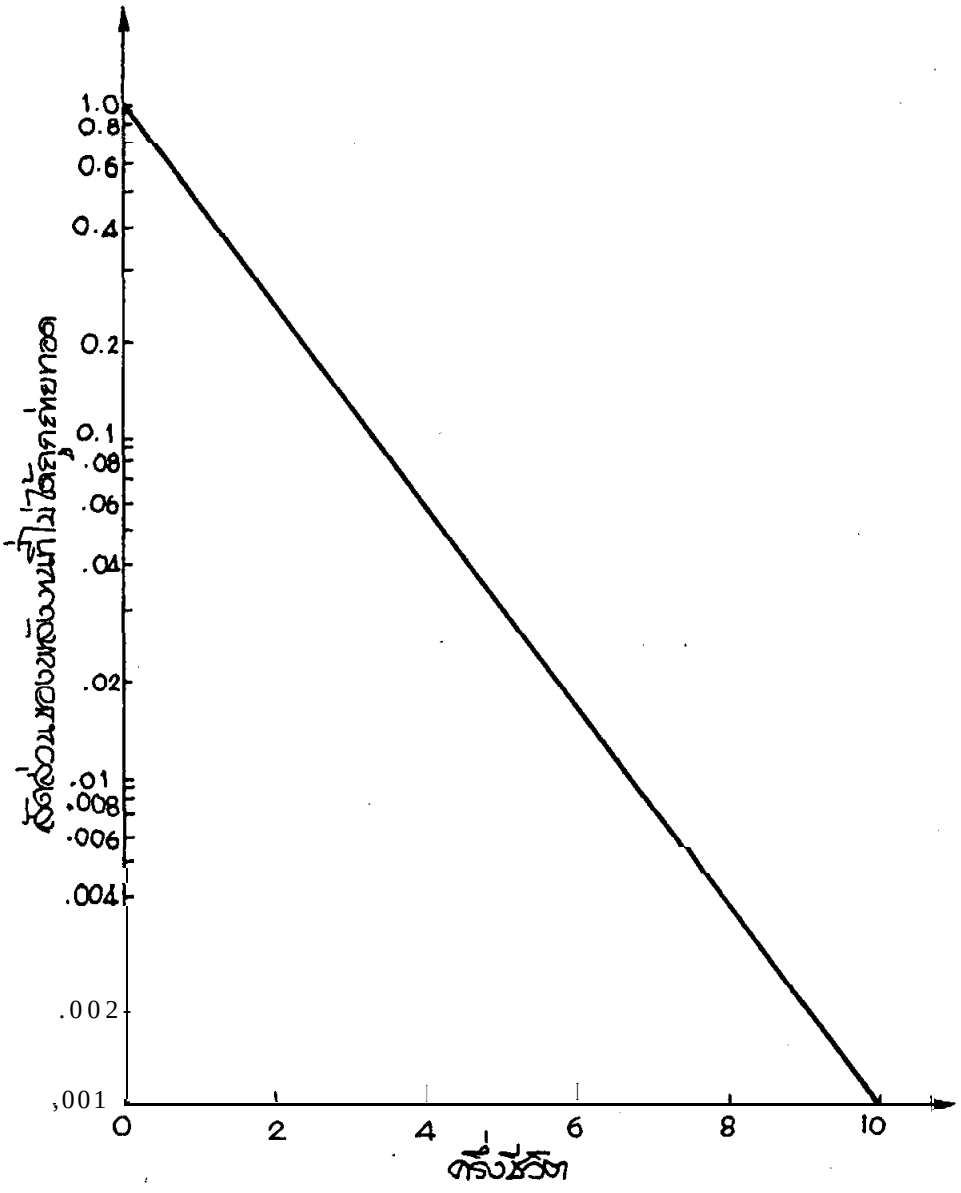
พลังงานจากรังสีรวมที่ได้จากการสลายตัวหมดของสารกัมมันตรังสี จะมีค่าเท่ากับผลคูณของพลังงานจากรังสีในหนึ่งวันกับอายุเฉลี่ย (τ) เป็นวันของสารกัมมันตรังสีนั้น ดังนั้น

$$D_\beta = 51.2 \times C \times \bar{E}_\beta \times \tau \quad \text{แหรด}$$

$$D_\beta = 51.2 \times C \times \bar{E}_\beta \times 1.44 \times T_{1/2} \quad \text{แหรด}$$

$$D_\beta = 73.8 \times C \times \bar{E}_\beta \times T_{1/2} \quad \text{แหรด}$$

ในการคำนวณ ครึ่งชีวิตที่ใช้จะต้องเป็นครึ่งชีวิตเฉลี่ย (T_{eff}) แต่เนื่องจากการหาค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ยทำได้ยาก จึงอาจจะใช้เฉพาะครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์ โดยยกเว้นไม่คิดครึ่งชีวิตทางชีววิทยา พลังงานจากรังสีที่คำนวณได้จะเป็นปริมาณรังสีสูงสุด พลังงานจากรังสีอาจจะคำนวณในช่วงเวลาที่น้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการสลายตัวจนหมดได้ โดยใช้สมการเดียวกัน พลังงานจากรังสีมีค่าครึ่งหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับเวลาครึ่งชีวิต พลังงานจากรังสีมีค่าเท่ากับสามในสี่เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ 2 เท่าของเวลาครึ่งชีวิต (ครึ่งชีวิตที่สอง, second half life) โดยอาศัยการคำนวณสามารถหาพลังงานรังสีภายในช่วงเวลาต่างๆ ได้ หรือจะหาจากกราฟรูปที่ 7.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากรังสีที่ไม่ได้ถ่ายทอด เมื่อเวลาต่างๆ กราฟเป็นรูปเส้นตรงเพราะว่าเขียนลงบนกระดาษกึ่งล็อก



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ไม่ได้ถ่ายทอดกับเวลา

7.9 สารที่ให้รังสีแกมมา โดยทั่วไปรังสีแกมมาจากสารกัมมันตรังสีที่ฝังอยู่ในอวัยวะภายในร่างกาย จะไม่ถ่ายเทพลังงานให้อวัยวะนั้นจนหมด ในเนื้อเยื่อที่สารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมาฝังอยู่อย่างสม่ำเสมอ พลังงานของรังสีจะไม่สม่ำเสมอด้วย พลังงานของรังสีตรงกลางจะมีค่า

มากที่สุดแล้วจะมีค่าลดลงโดยรอบพลังงานของรังสีจะมีค่าขึ้นกับ

1. พลังงานของรังสีแกมมาและจำนวนของรังสีแกมมา พารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าทั้งสองนี้คือ Γ ซึ่งจะมีค่าเป็นเรินเกนท์ต่อชั่วโมงที่ระยะห่าง 1 เซ็นติเมตรจากสารกัมมันตรังสี 1 มิลลิคูรี โดยทั่วไปจะกล่าวถึงสารกัมมันตรังสีเป็นไมโครคูรี ($10^{-3}\Gamma$) เป็นเรินเกนท์ต่อชั่วโมงที่ระยะห่าง 1 เซ็นติเมตรจากสารกัมมันตรังสี 1 ไมโครคูรี ค่า Γ แสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์ของสารกัมมันตรังสี

Symbol	Halh-Life	Radiation	Average Bet a Energy E (MeV)	R/mc-hr at 1 cm
^{14}C	5570 yr	B^-	0.050	
^{137}CS	30 yr	B^-,	0.242	3.0
^{51}Cr	27.8 d	EC,	0.005	0.18
“co	5.2 yr	B^-,	0.093	12.9
^{198}AU	2.7 d	B^-,	0.328	2.27
^{3}H	12.26 yr	B^-	0.006	
^{131}I	8.1 d	B^-,	0.188	2.20
^{59}Fe	45 d	B^-,	0.118	6.8
^{32}P	14.3 d	B^-,	0.70	
^{42}K	12.5 hr	B^-,	1.45	1.4
^{24}Na	15 hr	B^-,	0.56	18.7

2. ความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสี (ไมโครคูรีต่อกรัม) ภายในเนื้อเยื่อ

3. ขนาดและรูปร่างของเนื้อเยื่อ ปริมาณที่ใช้ในการพิจารณาขนาดและรูปร่างของเนื้อเยื่อคือ จีออเมตริกแฟคเตอร์ (geometric factor) ใช้สัญญลักษณ์ g ค่า g จะเปลี่ยนไปตลอดเนื้อเยื่อ ในเนื้อเยื่อหนึ่งก้อนจะมีค่า g ไม่เท่ากันทั้งก้อน จึงต้องใช้ค่าเฉลี่ย ($\bar{g}$) สำหรับร่างกายคนและสำหรับทรงรูปกระบอกรูปต่างๆ (ตารางที่ 7.2 และ 7.3) สำหรับเนื้อเยื่อรูปกลมที่มีรัศมีน้อยกว่า 10 เซ็นติเมตร อาจจะคำนวณหาค่า g ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{g} = 3R$$

เมื่อ R เป็นรัศมีหน่วยเซ็นติเมตร เมื่อใช้ค่าเฉลี่ย $\bar{g}$ ปริมาณรังสีที่คำนวณได้ จะเป็นปริมาณรังสีเฉลี่ยภายในเนื้อเยื่อในทรงกลมนั้น ปริมาณรังสีสูงสุดอยู่ตรงกลางทรงกลมและมีค่ามากกว่าปริมาณรังสีเฉลี่ยประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่า g ของทรงกลมแสดงในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.2 ของสารกัมมันตรังสีที่มห้รังสีแกมมาซึ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในร่างกาย

Weight of Individual (Kg)	Height of Individual (Cm)						
	200	190	180	170	160	150	140
	Values of $\bar{g}$						
100	138	139	142	145	147	150	154
90	134	136	138	140	143	146	148
80	129	130	131	134	136	139	141
70	123	124	125	126	129	131	135
60	117	118	119	120	122	125	128

ตารางที่ 7.3 g สำหรับทรงกระบอกที่บรรจุสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมา

Length of Cylinder (cm)	Radius of Cylinder (cm)						
	1	2	3	5	7	10	15
1	3.8	7.5	10.2	13.0	13.5	13.8	15.1
2	6.5	11.7	15.7	21.6	23.2	25.2	28.1
3	8.4	14.7	19.8	27.7	31.0	34.5	39.2
5	10.6	18.8	25.6	36.0	42.4	48.5	56.1
7	11.6	21.4	29.3	41.4	50.0	59.0	68.7
10	12.7	23.6	33.0	47.1	57.8	70.2	83.2
15	13.7	25.6	36.4	53.2	66.1	81.4	99.7

ดังนั้น พลังงานของรังสีภายในเนื้อเยื่อจากสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมาและกระจายอย่างสม่ำเสมอจะขึ้นอยู่กับ $10^{-3}\Gamma$, ความเข้มข้น (C) เป็นไมโครคูรีต่อกรัม และจีออเมตริก-แฟคเตอร์ ($\bar{g}$) ของเนื้อเยื่อ

$$\frac{D_\gamma}{\text{ชั่วโมง}} = 10^{-3}\Gamma \times C \times \bar{g}$$ เรินเกนท์

จำนวนแทรคต่อเริเกนท์แปรตามพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของตัวกลาง เนื่องจาก รังสีแกมมามีพลังงานอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3 เอ็มอีวี ซึ่งค่า f ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแทรดเป็นเรินเกนท์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.96 ถึง 0.98 มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากจนอาจจะคิดว่า ในช่วงนี้จำนวนแทรดเท่ากับจำนวนเรินเกนท์ จึงสามารถใช้สมการข้างบนเป็นแทรดได้ แต่ถ้าหากพลังงานของรังสีแกมมาอยู่ในช่วงอื่น จะต้องคูณด้วย f

$$\frac{D_\gamma}{\text{ชั่วโมง}} = 10^{-3} \times C \times \bar{g}$$ แทรด

พลังงานของรังสีในหนึ่งวันหาได้โดยคูณด้วย 24 ชั่วโมงต่อวัน พลังงานของรังสีทั้งหมด เมื่อการสลายตัวสิ้นสุดมีค่าเท่ากับผลคูณของพลังงานของรังสีในหนึ่งวันกับอายุเฉลี่ยเป็นวัน

$$D_\gamma = 0.0346\ \Gamma \times C \times \bar{g} \times T_{1/2}$$ แทรด

ตารางที่ 7.4 ค่า $\bar{g}$ เพื่อใช้ในการคำนวณพลังงานของรังสีจากรังสีแกมมา ถ้าอวัยวะเป็นรูปทรงกลมรัศมี

R(cm)	V(cm^3)	g(max)	g
1	4.2	12.6	9.5
2	33.5	25.2	18.9
3	103	37.8	28.4
4	278	50.4	37.8
6	905	75.6	56.7
8	2140	101	75.8
10	4180	126	94.5

สูตรนี้ใช้ได้ กับรังสีแกมมาพลังงานระหว่าง 0.1 ถึง 3.0 เอ็มอีวี ซึ่งการดูดกลืนรังสีค่อนข้างคงที่ สำหรับรังสีแกมมาพลังงานระหว่าง 15 ถึง 100 เคอีวี จะต้องใช้เทคนิคอื่นในการคำนวณ ส่วนรังสีที่มีพลังงานต่ำมาก เช่น รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.015 เอ็มอีวี) เคลื่อนเข้าไปในเนื้อเยื่อในช่วงน้อยกว่า 1 เซ็นติเมตร มีลักษณะเหมือนกับรังสีเบตา ในการคำนวณปริมาณรังสีเหล่านี้ จึงอาจจะใช้สูตรที่ใช้กับรังสีเบตาได้

7.10 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานจากรังสีภายในร่างกายจากสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเบตาและรังสีแกมมา

พลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนจากรังสีเบตาและรังสีแกมมาขึ้นอยู่กับ พลังงานของรังสีและรูปร่างของเนื้อเยื่อ เมื่อสารกัมมันตรังสีให้รังสีทั้งสองชนิดนี้ พลังงานที่ถูกดูดกลืนจากรังสีเบตาจะมากกว่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากรังสีแกมมา เพราะว่า พลังงานของรังสีเบตาถูกดูดกลืนทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดภายในอวัยวะนั้น แต่รังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านออกจากอวัยวะนั้นได้ พลังงานที่ถูกดูดกลืนจึงมีค่าน้อย ทำให้พลังงานที่ถูกดูดกลืนจากรังสีแกมมาขึ้นกับการกระจายของสารกัมมันตรังสีน้อยกว่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยรังสีเบตา

ตัวอย่างที่ 7.4 เมื่อให้สารกัมมันตรังสีไอโอดีน-131 แก่คนไข้ซึ่งต่อมไทรอยด์ทำงานมากเกินไป ไอโอดีน-131 จะไปสะสมอยู่ที่ต่อมไทรอยด์ ให้รังสีออกมา ทำให้บางส่วนของต่อมไทรอยด์ถูกทำลายลง ไอโอดีนไม่ได้สะสมอยู่ในต่อมไทรอยด์ตลอดเวลาแต่จะถูกขับออกมา ถ้าคิดว่า

การขจัดไอโอดีนจากต่อมไทรอยด์ใช้เวลานานกว่าครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์ไอโอดีน ดังนั้น T_{eff} = T = 8.1 วัน

จากตารางที่ 7.1 $\bar{E}$ = 0.188 เอ็มอีวี

Γ = 2.2 เรินเกนท์ต่อชั่วโมง

สมมติว่า ต่อมไทรอยด์มีมวล 33 กรัม และได้รับไอโอดีนจำนวน 3 มิลลิคูรี

ความเข้มข้นของไอโอดีน (C) = 3000 ไมโครคูรี/33 กรัม

สำหรับทรงกลมมวล 33 กรัมค่า $\bar{g}$ = 18.9

$D_\beta = 73.8 \times C \times \bar{E}_\beta \times T_{1/2}$ แหรด

แทนค่า $D_\beta = \frac{73.8 \times 0.188 \times 3000 \times 8.1}{3.3}$ แหรด

= 10,217 แหรด

จาก $D_\gamma = 0.0346 \Gamma \times C \times \bar{g} \times T_{1/2}$ แหรด

$= \frac{0.0346 \times 2.2 \times 3000 \times 18.9 \times 8.1}{33}$ แหรด

= 1,059 แหรด

ดังนั้น $D_\beta + D_\gamma$ = 11,276 แหรด ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ได้จากรังสีเบตา พลังงานจำนวนนี้เป็นพลังงานที่ต่อมไทรอยด์ได้รับเมื่อไอโอดีนสลายตัวจนหมด ต่อมไทรอยด์ได้รับพลังงานครึ่งหนึ่ง (5,638 แหรด) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ครึ่งชีวิต (8.1 วัน) และต่อมไทรอยด์ได้รับพลังงาน 3 ใน4 คือ 8,457 แหรด เมื่อเวลาผ่านไป 16.2 วัน การคำนวณพลังงานที่อวัยวะได้รับเมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง ให้ใช้กราฟรูปที่ 7.1 ช่วยในการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการคำนวณพลังงานเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ซึ่งคิดเป็น 30/8.1 = 3.7 ครึ่งชีวิตจากกราฟ เมื่อเวลา 3.7 ครึ่งชีวิตพลังงานที่ยังไม่ได้รับ = 8 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่อวัยวะได้รับ = 92 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น พลังงานที่อวัยวะได้รับ = 0.92 x 11,276 = 10,374 แหรด

ตัวอย่างที่ 7.5 ฉีดทอง-198 เข้าเส้นเลือดของหนูหนัก 200 กรัม ทอง-198 จำนวน 85 เปอร์-เซ็นต์จะถูกจับโดยตับ ที่เหลืออีก 15 เปอร์เซ็นต์ ถูกจับโดยม้ามและไขกระดูก เนื่องจากทอง-198 ในรูปของ colloid ถูกขจัดออกจากร่างกายน้อยมาก ดังนั้น $T_{eff} = T_p$ = 2.7 วัน สมมติว่าตับหนัก 6.7 กรัม จงหาพลังงานที่ตับได้รับ

จากตารางที่ 7.1 $\overline{E_\beta}$ = 0.328 เอ็มอีวี

Γ = 2.27 เรินเกนท์ต่อชั่วโมง

จากตารางที่ 7.1 $\overline{g}$ สำหรับทรงกลมมวล 6.7 กรัม = 11

C = 0.85 (200 ไมโครคูรี/6.7 กรัม)

= 25.4

ถ้าการสลายตัวสิ้นสุดลง

D_β = 73.8 x $\overline{E_\beta}$ x C x $T_{,,}$ แหรด

= 73.8 x 0.328 x 25.4 x 2.7

= 1660 แหรด

D_γ = 0.0346Γ x C x g-x $T_{1/2}$ แหรด

= 0.0346 x 2.27 x 25.4 x 11 x 2.1

= 59.3 แหรด

จะเห็นได้ว่า พลังงานส่วนใหญ่ที่ตับได้รับ ได้มาจากรังสีเบตา

ตัวอย่างที่ 7.6 คนไข้เป็นฮีโมไลติคเอนีเมีย (hemolytic anemia) ทำการตรวจหาอายุเม็ดเลือดแดงโดยใช้โครเมียม-51 (^{51}Cr) ซึ่งมีครึ่งชีวิตทางฟิสิกส์เท่ากับ 26.6 วัน วิธีการตรวจมีขั้นตอนดังนี้ ผสมโครเมียม-51 ลงไปในเลือดที่ดูดมาจากคนไข้ โครเมียมจะไปจับกับเม็ดเลือดแดง ฉีดเลือดจำนวนนี้เข้าไปในตัวคนไข้รอจนกระทั่งเลือดที่ฉีดเข้าไปผสมกับเลือดที่มีอยู่ในตัวคนไข้จนทั่วดูดเลือดจากคนไข้อีกครั้งหนึ่งในช่วงเวลาต่างๆ กัน ในช่วง 2-3 อาทิตย์ วัดจำนวนกัมมันตภาพ นำไปเขียนกราฟระหว่างเวลากับกัมมันตภาพ จะหาอัตราการกำจัดเม็ดเลือดแดงออกจากร่างกายได้ โดยทั่วไปเม็ดเลือดแดงจะถูกกำจัดออกจากร่างกายครึ่งหนึ่งในเวลา 30 วัน สมมติว่าคนไข้คนนี้เม็ดเลือดแดงถูกขับออกจากร่างกายในเวลา 12 วัน นั่นคือ T_b = 12 วัน

$$T_{eff} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b}$$

แทนค่า $T_{eff} = \frac{26.6 \times 12}{12.6 + 12}$ = 8.3 วัน

โครเมียม-51 สลายตัวโดยขบวนการอีเล็คตรอนแคพเจอร์ ให้รังสีเอ็กซ์พลังงาน 0.005 เอ็มอีวี และรังสีแกมมาพลังงาน 0.323 เอ็มอีวีจำนวน 9 เปอร์เซ็นต์ โดยมี $\Gamma = 0.18$ เรินเกนท์ต่อชั่วโมง ที่ระยะทาง 1 เซ็นติเมตร จาก 1 มิลลิคูรี

จากตารางที่สอง ชายหนัก 70 กิโลกรัม สูง 180 เซ็นติเมตร มีค่า $\bar{g} = 125$

จาก $D_\gamma = 0.0346\ \Gamma \times C \times \bar{g} \times T_{1/2}$

แทนค่า $D_\gamma = 0.0346 \times 0.18 \times \frac{50}{27{,}000} \times 125 \times 8.3 = 0.0046$ แหรด

เนื่องจากรังสีเอ็กซ์มีพลังงานน้อยกว่า 15 เคอีวี ซึ่งมีพลังงานต่ำ จึงอาจจะหาพลังงานที่ถูกดูดกลืน โดยใช้สูตรของรังสีเบตา เมื่อ $\bar{E_\beta} = 0.005$ เอ็มอีวี

จาก $D_\beta = 73.8 \times E_\beta \times C \times T_{1/2}$ แหรด

แทนค่า $D_\beta = 73.8 \times 0.005 \times \frac{50}{70{,}000} \times 8.3 = 0.0022$ แหรด

พลังงานที่ถูกดูดกลืนทั้งหมด = 0.0046 + 0.0022 = 0.0068 แหรด

แบบฝึกหัดที่ 7

1. จงอธิบายวิธีวัดโดสของรังสีเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย
2. หน่วยเรินเกนท์ใช้กับรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 3 เอ็มอีวีไม่ได้ จงหาขอบเขตจำกัดของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ยังคงสามารถใช้หน่วยเรินเกนท์เป็นหน่วยวัดได้
3. เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์จำนวนหนึ่งผ่านอากาศ วัดโดสได้ 1 เรินเกนท์ จงหาจำนวนไอออนคู่ที่เกิดขึ้นในอากาศ 1 ลูกบาศก์เซ็นติเมตร

.....