

การคำนวณหาความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

จารุเดช วาดวิไล
ศูนย์ไอโซโทปรังสี

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

การผลิตไอโซโทปรังสีเพื่อใช้ในกิจการแพทย์ในประเทศไทย ส่วนใหญ่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ได้แก่ ^{131}I หรือ ^{153}Sm เป็นต้น โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์(n, γ) เป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวของนิวคลีอิดของธาตุที่ใช้เป็นเป้ากับเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะได้ไอโซโทปรังสีที่ต้องการ ทั้งนี้ ไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น อาจเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุชนิดเดียวกันกับธาตุที่ใช้เป็นเป้าหรือเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุอื่นก็ได้ จากนั้นจึงแยกเอาสารไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นแล้วนำไปใช้ประโยชน์จากสารไอโซโทปรังสีนั้นโดยตรงเช่น ^{131}I สำหรับรักษาและวินิจฉัยโรคที่ต่อมไทรอยด์ หรือนำสารไอโซโทปรังสีที่ได้ไปผลิตเป็นสารประกอบติดฉลากก่อนแล้วจึงนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปเช่น ^{131}I -MIBG หรือ ^{153}Sm -EDTMP

สำหรับ ^{177}Lu เป็นไอโซโทปรังสีของธาตุ lutetium มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ทำให้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายโดยนำไปผลิตเป็นสารประกอบติดฉลากหลากหลายชนิด เพื่อใช้ในการรักษาโรคมะเร็งชนิดต่าง ๆ ^{177}Lu มีครึ่งชีวิตยาวถึง 6.17 วัน สามารถนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อนได้ และสามารถที่จะขนส่งในระยะทางไกลได้ และให้รังสีบีตาพลังงานสูงสุดเท่ากับ 498 keV ซึ่งสามารถทำลายเซลล์มะเร็งขนาดเล็กได้ และยังมีรังสีแกมมาพลังงานต่ำ 113 และ 208 keV ตามลำดับ (gamma abundance 6% และ 10% ตามลำดับ) ทำให้สามารถตรวจสอบการกระจายตัวของสารเภสัชรังสีของ ^{177}Lu ในร่างกายของคนไข้โดยใช้ gamma camera ได้ กระบวนการผลิต ^{177}Lu มี 2 กระบวนการ คือ ใช้ ^{176}Lu ชนิดเสริมสรณณะเป็นสารตั้งต้น (^{176}Lu enriched target) ที่มีขายในขณะนี้จะมี ^{176}Lu อยู่ 60-80% ^{176}Lu มีภาคตัดขวาง (cross section) สูงถึง 2090 barn (b) แต่ผลผลิตที่ได้จะมี lutetium ที่เป็นพาหะ (carrier) ปนอยู่มาก ทำให้ความแรงรังสีจำเพาะหรือกัมมันตภาพจำเพาะ (specific activity) ที่ได้ไม่สูงมากนัก และมีโอกาสที่จะเกิด $^{177\text{m}}\text{Lu}$ ขึ้นมาเจือปน ส่วนอีกกระบวนการหนึ่งใช้ธาตุ ytterbium คือ ^{176}Yb ชนิดเสริมสรณณะเป็นสารตั้งต้น (^{176}Yb enriched target) ที่มีขายในขณะนี้จะมี $^{176}\text{Yb} > 99\%$ แต่มี cross section เพียง 2.4b เท่านั้น ผลผลิตที่ได้คือ ^{177}Lu ซึ่งมีครึ่งชีวิตเพียง

1.91 ชั่วโมงและจะสลายกลายเป็น ^{177}Lu และไม่ก่อให้เกิด $^{177\text{m}}\text{Lu}$ ขึ้นมาเจือปน ทำให้ได้ผลผลิต ^{177}Lu มีความแรงรังสีจำเพาะสูงเรียกว่าแบบไม่เติมพาหะ (non carrier added, n.c.a) แต่การแยก lutetium ออกจาก ytterbium ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุที่อยู่ในอนุกรมแลนทาไนด์ (lanthanide series) ซึ่งมีสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันมาก และปริมาณของ lutetium ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ ytterbium ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

โดยทั่วไป การคำนวณหาความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ สามารถหาได้จากสมการ

$$A = \sigma_0 \cdot \phi_n \cdot \theta \cdot N \cdot (1 - \exp(-\lambda t_i)) \quad (1)$$

เมื่อ A = ความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น (Bq)

σ_0 = cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ ($1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \text{ barn}$)

ϕ_n = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$)

θ = % abundance ของไอโซโทปที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

N = จำนวนนิวเคลียสของธาตุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

λ = ค่าคงตัวการสลายของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น

t_i = ระยะเวลาที่ใช้อบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ฯ

สมการนี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เกือบทุกปฏิกิริยา โดยขึ้นกับ cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นำมาคำนวณ ซึ่งในกรณีของการผลิตไอโซโทปรังสีปฏิกิริยานิวเคลียร์ส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยา (n, γ) ที่เกิดจากเทอร์มัลนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แต่ความแรงรังสีที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (1) นั้นยังมีความแตกต่างกับค่าที่วัดได้จริงอยู่ เพราะในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีนิวตรอนหลายระดับพลังงาน และ cross section ของปฏิกิริยา (n, γ) นั้นแปรผกผันกับพลังงานของนิวตรอน (กฎ $1/v_n$) และเนื่องจากอุณหภูมิในแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ขณะเดินเครื่องจะสูงกว่าอุณหภูมิของเทอร์มัลนิวตรอน (อุณหภูมิ 20°C) และในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นในการผลิตปริมาณน้อย ๆ และใช้เวลาอบนิวตรอนนาน ๆ ก็ควรพิจารณาถึงการสูญเสียสารตั้งต้น (target burn-up) ด้วย

ในปี 2003 Z. Dvorakova และคณะ ได้ทดลองหาความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ผลิตจาก ^{176}Lu โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และนำมาเปรียบเทียบกับความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่

คำนวณจาก Westcott convention อย่างง่ายตามสมการ (2) และ Høgdahl convention โดยการแทนค่า k-factor ในสมการ (2) ด้วย 1 ผลการทดลองแสดงว่าความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ได้จากการคำนวณตาม Westcott convention มีค่าใกล้เคียงกับความแรงรังสีที่ได้จากการทดลองมากกว่า Høgdahl convention

$$A = \{(\sigma_0 \cdot \phi_{th} \cdot N_t \cdot k \cdot \lambda) / (\lambda - \sigma_0 \cdot \phi_{th} \cdot k)\} \cdot \{\exp(-\sigma_0 \cdot \phi_{th} \cdot k \cdot t_i) - \exp(-\lambda \cdot t_i)\} \quad (2)$$

เมื่อ k คือ k-factor หาได้จาก

$$k = [G_{th} \cdot g(T_n) + G_r \cdot r(\alpha) \{T_n/T_0\}^{1/2} \cdot s_0(\alpha)] \quad (3)$$

โดย $s_0(\alpha)$ หาได้จาก

$$s_0(\alpha) = s_0 \cdot (\bar{E}_r)^{-\alpha} \quad (4)$$

เมื่อ

A = ความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น (Bq)

σ_0 = cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ (1 barn = $1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$)

ϕ_{th} = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$)

N_t = จำนวนนิวไคลด์ของไอโซโทปของธาตุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

λ = ค่าคงตัวการสลายของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น

t_i = ระยะเวลาที่ใช้อาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ฯ

G_{th} และ G_r = self-shielding factor ของเทอร์มัล และ เอพิเทอร์มัล

นิวตรอน ตามลำดับ

$g(T_n)$ = Westcott factor

$r(\alpha) \{T_n/T_0\}^{1/2}$ = Spectrum index

s_0 และ \bar{E}_r = ค่าคงตัวของแต่ละนิวไคลด์

α = ค่าเบี่ยงเบนของเอพิเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

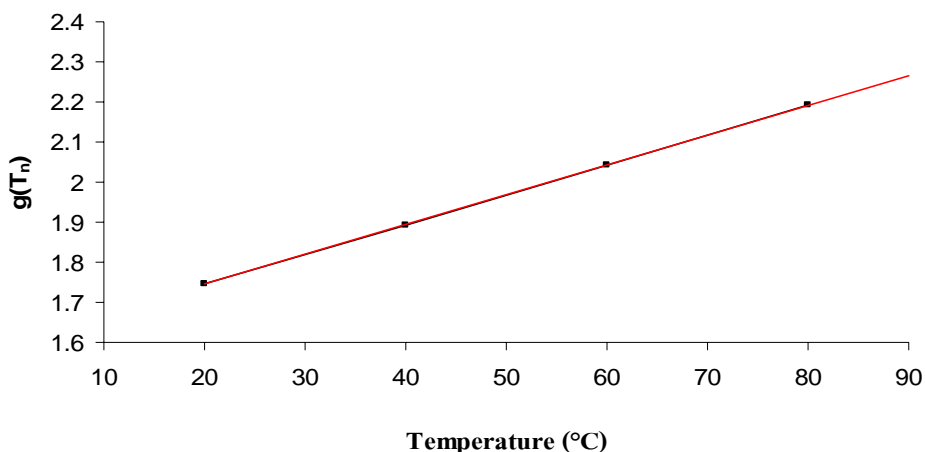
G_{th} และ G_r สามารถแทนค่าด้วย 1 ถ้านิวไคลด์ที่เป็นเป้าหมายมีปริมาณเจือจางมาก และค่าในเทอมของ spectrum index และ α เป็นค่าที่ได้จากการวัดนิวตรอนฟลักซ์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

นอกจากนี้ความแรงรังสีที่คำนวณได้จากทั้งสมการที่ (1) และ (2) เป็นความแรงรังสีที่เวลาสิ้นสุดการอบรังสี (end of bombard, EOB) ซึ่งจะแตกต่างจากความแรงรังสีที่วัดได้จริงเพราะ ในทางปฏิบัติจะต้องปล่อยให้สารไอโซโทปรังสีที่ผลิตได้สลายไประยะหนึ่ง

ก่อนเพื่อให้ปริมาณรังสีอยู่ในระดับปลอดภัยสำหรับการปฏิบัติงานทางรังสี และเป็นการลดการรบกวนการวัดรังสีจากไอโซโทปรังสีชนิดอื่นที่อาจเกิดขึ้น และในกรณีที่ต้องนำสารไอโซโทปรังสีที่ผลิตได้ไปผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อแยกไอโซโทปรังสีที่ผลิตได้ออกจากสารตั้งต้น ปริมาณความเข้มรังสีที่ได้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการแยกให้บริสุทธิ์ ดังนั้นในกรณีของการผลิต ^{177}Lu จาก ^{176}Lu โดยตรง สามารถใช้ค่าจากการคำนวณมาใช้ประมาณการความเข้มรังสีที่ผลิตขึ้นมาได้ แต่ปฏิกิริยาที่ใช้ ^{176}Yb ในการผลิตไม่สามารถใช้วิธีนี้มาประมาณการได้

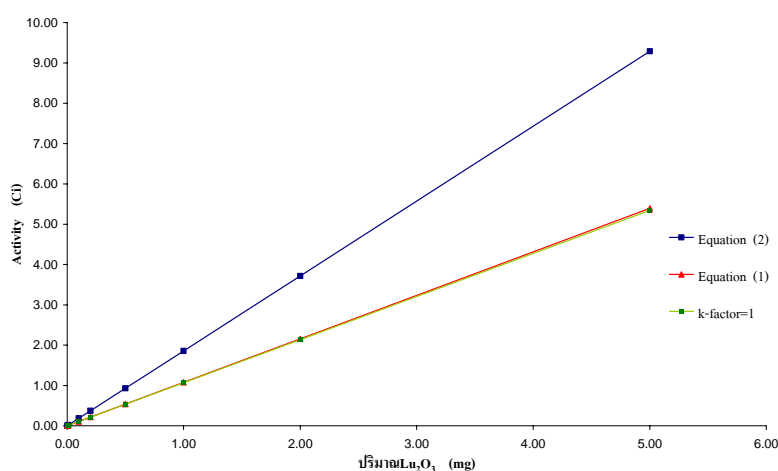
ดังนั้นการประเมินค่าความเข้มรังสีของ ^{177}Lu ที่จะผลิตโดยศูนย์ไอโซโทปรังสีสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติในอนาคต จะใช้สมการ (1) และ (2) โดยจะคำนวณทั้ง Westcott และ Høgdahl ในสมการ (2) การคำนวณหาความเข้มรังสีของ ^{177}Lu ที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์โดยจะใช้ ^{176}Lu ทั้งจากธรรมชาติและเสริมสมรรถนะ ซึ่งมี isotopic abundance เท่ากับ 2.6 และ 64.3% ตามลำดับ และใช้ lutetiumoxide (Lu_2O_3) เป็นสารตั้งต้น มีน้ำหนักสารตั้งต้นในช่วง 0.0001–5 มิลลิกรัม และใช้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ฯ นาน 1–30 วัน ใช้นิวตรอนฟลักซ์จากเครื่องปฏิกรณ์ประมาณวิจัย ปปว.1/1 ที่ตำแหน่งท่อ CT และตามข้อกำหนดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องใหม่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.0×10^{13} และ 1.0×10^{14} n/cm²·s ตามลำดับ cross section ของ ^{176}Lu เท่ากับ 2090 b อุณหภูมิของนิวตรอนที่ใช้คำนวณคือ 20°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของเทอร์มัลนิวตรอน และ 80°C ซึ่งวัดจากอุณหภูมิของน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณวิจัย ปปว.1/1 และถือเป็นอุณหภูมิของนิวตรอน

ผลการคำนวณ k-factor ตามแนวทางของ Z. Dvorakova และคณะ พบว่า k-factor ที่คำนวณจาก (3) มีค่าแปรตาม Westcott factor ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 20–80°C ซึ่ง k-factor ของ ^{177}Lu มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังรูปที่ 1

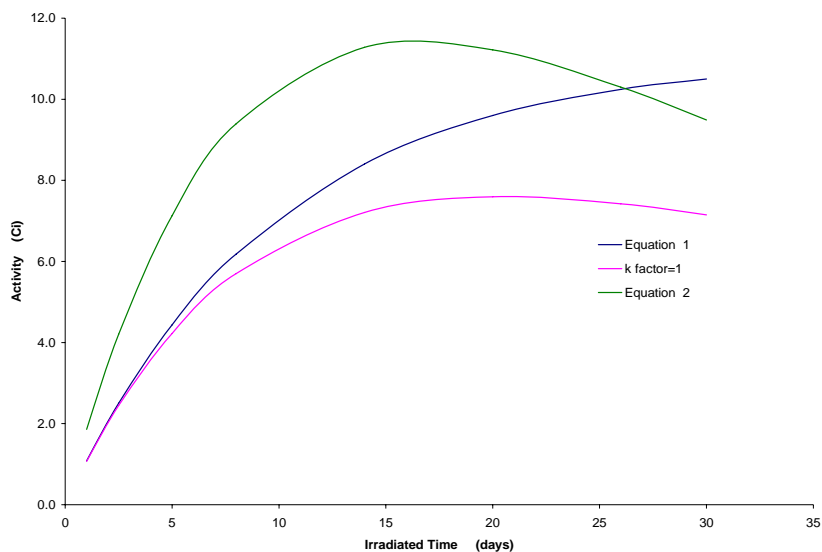


รูปที่ 1.ความสัมพันธ์ระหว่างWestcott factor กับอุณหภูมิ

จากการคำนวณหาความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ปริมาณต่าง ๆ โดยให้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนคงที่ จากสมการที่ (1) และ (2) ด้วย k-factor ที่อุณหภูมิ 20°C (Westcott convention) และแทนค่า k-factor เท่ากับ 1 ในสมการ (2) (Høgdahl convention) พบว่าความแรงรังสีที่คำนวณจากสมการ (1) และ Høgdahl ให้ผลใกล้เคียงกันมากตามรูปที่ 2. และเมื่อเพิ่มระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนโดยให้ปริมาณสารตั้งต้นคงที่ พบว่าผลการคำนวณแบบ Westcott และ Høgdahl เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ ความแรงรังสีสูงสุดเมื่อใช้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนนานประมาณ 15 วัน และ 20 วัน ตามลำดับ และ ความแรงรังสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาอบรังสีนานขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารตั้งต้น (target burn-up) ส่วนการคำนวณตามสมการ (1) ความแรงรังสีที่ได้จะมีค่าคงที่เมื่อให้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนตั้งแต่ 30 วันขึ้นไป ตามรูปที่ 3

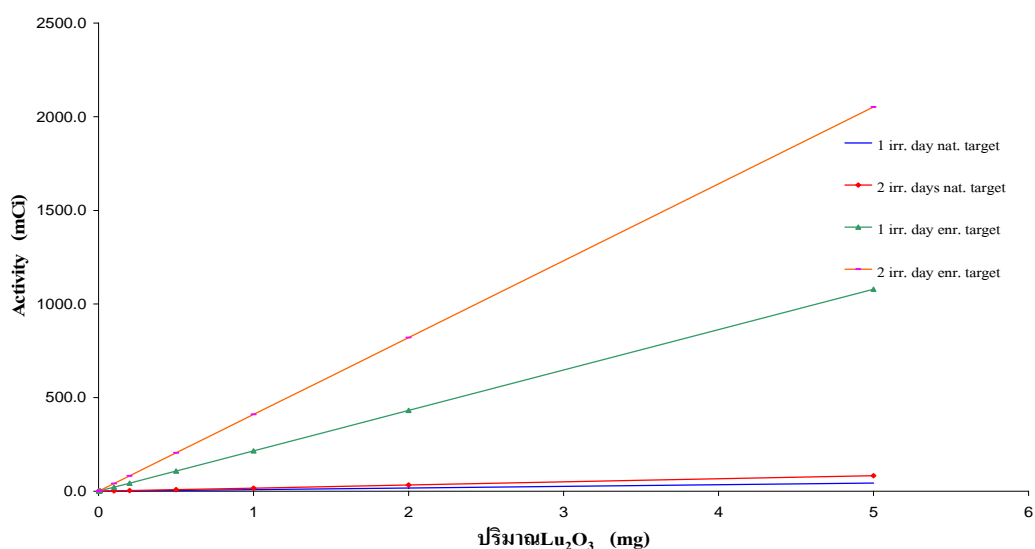


รูปที่ 2.เปรียบเทียบความแรงรังสีของ ^{177}Lu กับสารตั้งต้นปริมาณต่าง ๆ

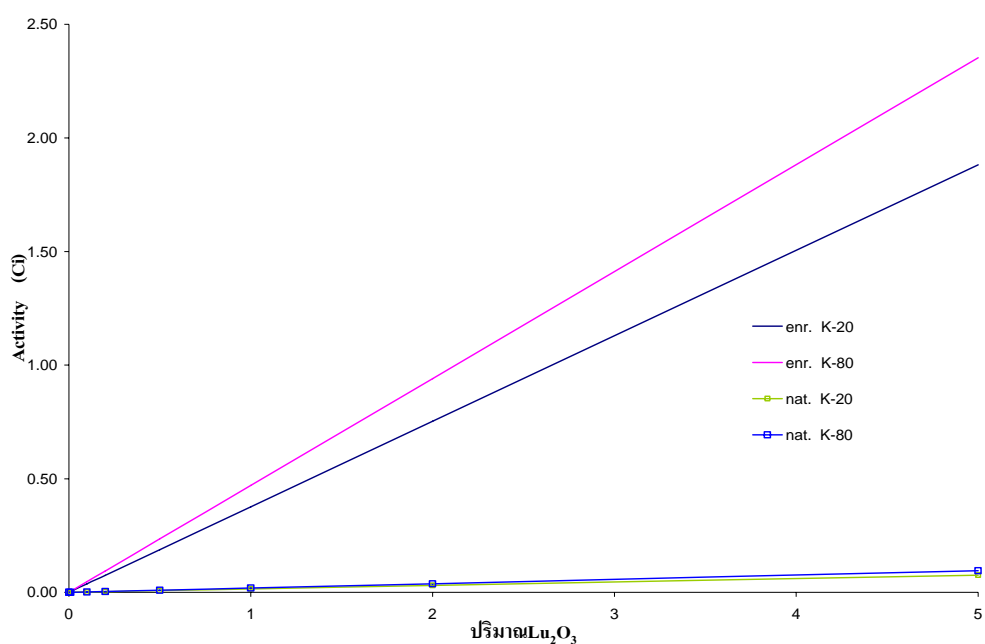


รูปที่ 3.เปรียบเทียบความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ระยะเวลาอบรังสีต่าง ๆ

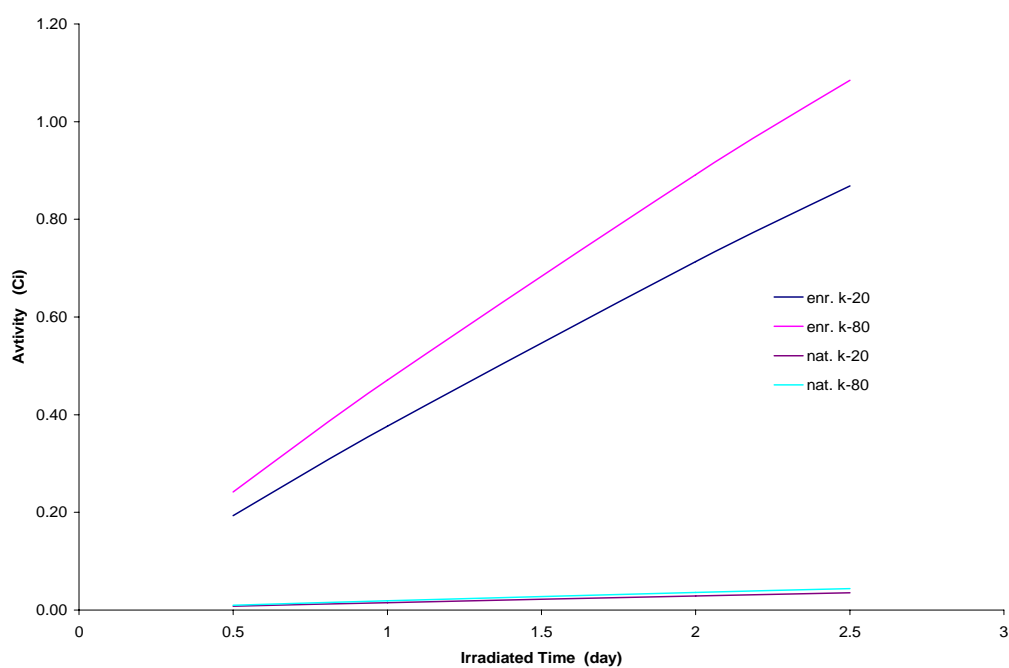
รูปที่ 4.- 6. แสดงผลการคำนวณความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากสมการที่ (1) และ (2) ที่ใช้ ^{176}Lu เป็นตัวตั้งต้น ทั้งแบบธรรมชาติและเสริมสมรรถนะ (enriched target) โดยนำไปอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว. 1/1 ที่ระยะเวลาอบรังสีและปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน พบว่าการใช้ตัวตั้งต้น ^{176}Lu แบบธรรมชาติจะให้ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ต่ำกว่าการใช้ตัวตั้งต้นแบบเสริมสมรรถนะอย่างมาก และผลจากการคำนวณตามสมการที่ (2) ที่ k-factor ที่อุณหภูมิ 80°C ให้ความแรงรังสีของ ^{177}Lu สูงที่สุดในปริมาณตัวตั้งต้นและระยะเวลาอบรังสีที่เท่ากัน เปรียบเทียบค่าความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปปว.1/1 ที่คำนวณได้จากตารางที่ 1



รูปที่ 4.ความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว. 1/1 คำนวณตามสมการ (1) โดยใช้ระยะเวลาอบรังสี 1-2 วัน



รูปที่ 5. ความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว. 1/1 คำนวณตามสมการ (2) ที่ k-factor อุณหภูมิต่าง ๆ ตามปริมาณสารตั้งต้น

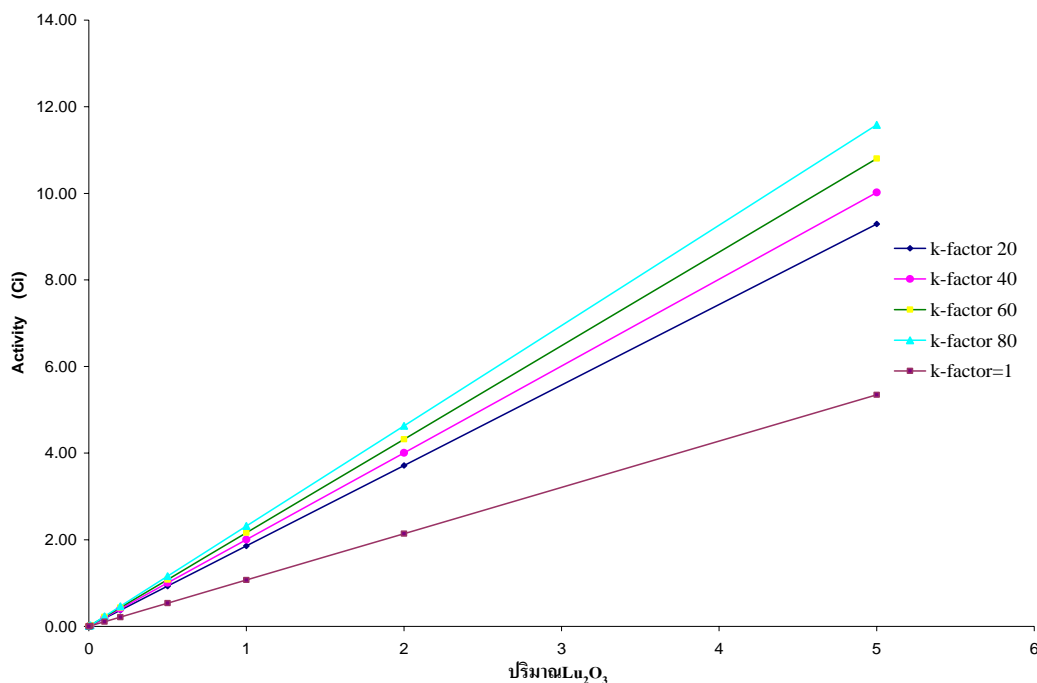


รูปที่ 6. ความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากเครื่องปฏิกรณ์ฯ ปปว. 1/1 คำนวณตามสมการ (2) ที่ k-factor อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ระยะเวลาอบรังสีต่าง ๆ

ตารางที่ 1. ความแรงรังสีที่ได้จากการคำนวณแบบต่าง ๆ โดยใช้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ปว. 1/1 นาน 1 วัน

	ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่ EOB (Ci)					
	^{176}Lu ธรรมชาติ			^{176}Lu เสริมสมรรถนะ		
ปริมาณ Lu_2O_3	1mg	2mg	5mg	1mg	2mg	5mg
สมการ (1)	0.01	0.02	0.04	0.22	0.43	1.08
k-Factor =1	-	-	-	0.22	0.43	1.08
k-Factor 20°C	0.02	0.03	0.08	0.38	0.75	1.88
k-Factor 80°C	0.02	0.04	0.10	0.47	0.94	2.35

การคำนวณความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่จะผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเครื่องใหม่ ที่มีนิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ 1×10^{14} n/cm²·sec และกำหนดให้ใช้ k-factor แปรตามอุณหภูมิบริเวณแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ ขณะเดินเครื่องต่าง ๆ กัน และเปรียบเทียบกับ การคำนวณแบบ Høgdahl (k-factor=1) โดยใช้ตัวตั้งต้นเป็น ^{176}Lu ชนิดเสริมสมรรถนะที่ ปริมาณต่าง ๆ และใช้เวลาอบรังสีนิวตรอนนาน 1 วัน ได้ผลตามรูปที่ 7. ซึ่งความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 2. และใช้ระยะเวลาอบรังสีต่าง ๆ กันในตารางที่ 3



รูปที่ 7. ความแรงรังสีของ ^{177}Lu จากการคำนวณแบบ Westcott ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ กันแบบ Høgdahl ของปฏิกรณ์ปรมาณูเครื่องใหม่ นาน 1 วัน

ตารางที่ 2. ความแรงรังสีที่ได้จากการคำนวณแบบต่าง ๆ โดยใช้ระยะเวลาอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องใหม่ นาน 1 วัน โดยใช้ ^{176}Lu แบบเสริมสมรรถนะเป็นตัวตั้งต้น

	ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่EOB (Ci)				
ปริมาณ Lu_2O_3 (mg)	0.1	0.5	1	2	5
สมการ(1)	0.11	0.54	1.08	2.16	5.39
k-Factor =1	0.11	0.54	1.07	2.14	5.35
k-Factor 20°C	0.19	0.93	1.86	3.72	9.29
k-Factor 40°C	0.20	1.00	2.00	4.01	10.02
k-Factor 60°C	0.22	1.08	2.16	4.32	10.80
k-Factor 80°C	0.23	1.16	2.32	4.63	11.58

ตารางที่ 3. ความแรงรังสีที่ได้จากการคำนวณแบบต่าง ๆ และมีมีระยะเวลาอบรังสีต่าง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องใหม่ โดยใช้ ^{176}Lu แบบเสริมสมรรถนะปริมาณ 1mg

	ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่EOB (Ci)		
ระยะเวลาอบรังสี	7วัน	15วัน	21วัน
สมการ(1)	5.66	8.65	9.77
k-Factor =1	5.28	7.33	7.60
k-Factor 20°C	8.77	11.37	11.11
k-Factor 40°C	9.38	12.00	11.61
k-Factor 60°C	10.02	12.66	12.10
k-Factor 80°C	10.65	13.27	12.54

สรุป วิจัย และข้อเสนอแนะ

การผลิตไอโซโทปรังสี ^{177}Lu เพื่อใช้ในกิจการแพทย์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 และที่วางแผนจะผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ เครื่องใหม่นั้น ควรใช้ ^{176}Lu แบบเสริมสมรรถนะในรูป lutetiumoxide (Lu_2O_3) เป็นตัวตั้งต้น เพราะจะได้ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ในปริมาณมากพอสำหรับนำไปผลิตเป็นสารประกอบติดฉลากกับ EDTMP HEDP หรือ HA เป็นต้น เพื่อทดแทนไอโซโทปรังสี ^{153}Sm หรือ ^{186}Re ที่มีครึ่งชีวิตสั้นกว่า และยังจะใช้ปริมาณสารตั้งต้นน้อยกว่า โดยใช้ Lu_2O_3 ไม่เกิน 2.5 mg ได้ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ประมาณ 700-900 mCi และมีความแรงรังสีจำเพาะประมาณ 400 Ci/g ของ Lu_2O_3 ซึ่งก็เพียงพอสำหรับการผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปว.1/1 และใช้ปริมาณ Lu_2O_3 เพียง 0.05-0.1mg สำหรับการผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ เครื่องใหม่ได้ความแรงรังสีของ ^{177}Lu ประมาณ 0.5-1 Ci และมีค่าความแรงรังสีจำเพาะ

ประมาณ 1900 Ci/g ของ Lu_2O_3 เนื่องจากสามารถใช้เวลาอบรังสีได้นานกว่า (ประมาณ 15-20 วันต่อ 1 คาบการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ) และมีนิวตรอนฟลักซ์สูงกว่า โดย

ในกรณีที่ต้องการนำ ^{177}Lu ไปติดฉลากกับสารพวกโพลิโกเพปไทด์หรือแอนติบอดีชนิดต่าง ๆ จะต้องใช้ ^{177}Lu ที่มีค่าความแรงรังสีจำเพาะสูง ๆ หรือที่เรียกว่าแบบ n.c.a. ^{177}Lu ซึ่งจะใช้ธาตุ ytterbium แบบเสริมสมรรถนะ ^{176}Yb เป็นตัวตั้งต้น และต้องนำไปผ่านกระบวนการแยกเอา lutetium ออกจากสารตั้งต้น ซึ่งความแรงรังสีของ ^{177}Lu ที่จะได้ นั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการแยกมากกว่า การอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ฯ

การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบความแรงรังสีที่ EOB ของการผลิตไอโซโทปรังสีอย่างที่ทำในครั้งนี ของธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ธาตุอื่น ๆ ยังทำได้ยาก เนื่องจากในขณะนี้ยังขาดข้อมูลทางนิวเคลียร์ที่จำเป็นในการคำนวณของไอโซโทปอื่น ๆ เช่น ^{152}Sm โดยเฉพาะค่า Westcott g-factor ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของไอโซโทปแต่ละชนิด เช่นไอโซโทป ^{176}Lu ค่า Westcott g-factor จะแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่ของไอโซโทป ^{175}Lu จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิในที่นี้คืออุณหภูมิของแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั่นเอง

บรรณานุกรม

วารสาร

1. Z. Dvorakova, R. Henkelmann, X. Lin, A. Tuerler, H. Gerstenberg. Production of ^{177}Lu at the new research reactor FRM-II: Irradiation yield of $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$. Applied Radiation and Isotopes, 2008, vol. 66, pp.147-151
2. N. E. Holden. Temperature Dependence of the Westcott g-Factor for Neutron Reaction in Activation Analysis. Pure App. Chem., 1999, vol. 71(12), pp. 2309-2315
3. R.B. Firestone and V.S. Shirley editors. Table of Isotopes edition 8th. 1996, John Wiley & Son. New York
4. D. Saengchantr, N. Onishi.: Temperature Measurement at the exit of Flow Channel in TRR-1/M1 Core. Report in Office of Atoms for Peace, 2006

เว็บไซต์

1. www.nndc.bnl.org/endl