

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### การค้นพบและคุณสมบัติ

##### 1. ประวัติการค้นพบธาตุทอเรียม<sup>(6)</sup>

ในปี ค.ศ. 1815 นักเคมีชาวสวีตชื่อ Baron Jons Jakob Berzelius ได้ค้นพบธาตุชนิดหนึ่งจากแร่กาโคลิไนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเซอร์โคเนีย และได้ให้ชื่อว่า ทอเรียม แต่แท้จริงแล้วคือ อิทเทรียมฟอสเฟต ต่อมาในปี ค.ศ. 1828 Berzelius ได้ค้นพบธาตุใหม่จริงๆ จากแร่ชนิดหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันเรียกชื่อว่าแร่ทอไรต์ (Thorite) ในประเทศนอร์เวย์ และให้ชื่อธาตุใหม่นั้นว่า ทอรินา (Thorina) หรือ ทอเรียม (Thoria) ในปี ค.ศ. 1851 ได้มีรายงานของ Bergemann ได้ค้นพบธาตุใหม่เรียกว่า ดอนาเซียม (Donasium) ซึ่งพบในแร่อรานไกต์ (Orangite) และจากรายงานของ J.F.Bahr ได้รายงานการค้นพบธาตุใหม่ในแร่โอไทด์ ชื่อว่า วาสเมียม (Wasmium) ธาตุทั้งสองชนิดนี้และธาตุที่ค้นพบโดย Berzelius ได้มีการพิสูจน์แล้วว่า เป็นธาตุชนิดเดียวกัน และปัจจุบันให้ชื่อว่า ทอเรียม

##### 2. แหล่งที่พบทอเรียม

ได้มีการประมาณค่าปริมาณทอเรียมมีอยู่ในเปลือกโลกอยู่หลายค่า และค่าที่เป็นที่ยอมรับมีค่าอยู่ระหว่าง 0.001 - 0.002 เปอร์เซ็นต์ และมีอยู่ในแร่หลายชนิด ในแร่บางชนิดจะมีทอเรียมเป็นองค์ประกอบหลัก ทอเรียมมักจะปะปนอยู่กับยูเรเนียม และธาตุหายาก

ทอเรียมเป็นองค์ประกอบหลักของแร่ 2 ชนิดคือ ทอไรต์ (Thorite) และทอเรียมไนต์ (Thorianite) ทอไรต์จะอยู่ในรูปของทอเรียมซิลิเกต มีโครงสร้างและพฤติกรรมคล้ายๆกับ

เซอร์คอน ทอไรต์จะมีทอเรียมอยู่มากถึง 62 % ประปนอยู่กับเกลือซลิเกตของยูเรเนียม เหล็ก แมงกานีส ทองแดง แมกนีเซียม ตะกั่ว สังกะสี อะลูมิเนียม โซเดียม และโปแตสเซียม เป็นที่รู้กันทั่วไปว่าทอไรต์เป็นแร่ที่มีมากในประเทศนิวซีแลนด์ และตอนกลางของรัฐแคลิฟอร์เนีย และที่อื่นๆทางตะวันตกของอเมริกา สถานที่ที่มีทอเรียมสะสมอยู่มากนั้นหาได้ยากมาก ดังนั้นทอเรียมทางการค้าจากแร่ชนิดนี้จึงมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

แร่อีกตัวหนึ่งที่มีทอเรียมอยู่ปริมาณมากที่สุดคือ ทอเรียไนต์ มีปริมาณ ThO<sub>2</sub> มากถึง 90 % เป็นแร่ที่มีความหนาแน่นมากตัวหนึ่ง ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 8.0 - 9.7 g/cm<sup>3</sup> แร่ชนิดนี้มีอยู่ในมาดากัสกา และแหล่งอื่นๆ

ปัจจุบันแหล่งทอเรียมที่สำคัญคือ โมนาไซต์(Monazite) พบมากในตอนกลางของ 5 พื้นที่คือ บราซิล อินเดียและศรีลังกา อินโดนีเซีย มาเลเซียและออสเตรเลีย อเมริกาและทางตอนใต้ของประเทศแอฟริกา แหล่งแร่โมนาไซต์ต่างๆเหล่านี้ เมื่อผ่านกระบวนการแยกต่างๆแล้วจะให้ปริมาณทอเรียมเพียง 5 - 8 % เท่านั้น แร่โมนาไซต์เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่จัดอยู่ในแร่ธาตุหายาก (วิชาญ อมตาริยกุล) โดยมีธาตุทอเรียมและยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบสำคัญ ในประเทศไทยพบแร่โมนาไซต์อยู่ในแหล่งแร่ดีบุกเกือบทุกแห่ง ทั้งแหล่งลานแร่ บนบก ในทะเล และแหล่งสายคลาบนภูเขา โดยแหล่งลานแร่มักพบปริมาณของแร่โมนาไซต์ค่อนข้างสูงกว่าแหล่งสายคลา อย่างไรก็ตามความสมบูรณ์ของแร่โมนาไซต์เมื่อเทียบกับแร่ดีบุกแล้วต่ำมาก จากตัวอย่างหลุมสำรวจอาจเจอแร่โมนาไซต์ในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.001 % ในขณะที่แร่ดีบุกมีความสมบูรณ์พอที่จะทำเหมืองแร่ได้ตั้งแต่ 0.12 % ขึ้นไป

หัวแร่ดีบุกชั้นต้นจะมีแร่โมนาไซต์ตั้งแต่ 0.01% จนถึงสูงกว่า 1.0% ผลผลิตแร่โมนาไซต์ที่สำคัญได้จากการนำมูลแร่หรือแร่คละมาผ่านกระบวนการแต่งแร่อีกต่อหนึ่ง ซึ่งโรงงานที่ผลิตแร่โมนาไซต์ก็คือโรงแต่งแร่ต่างๆในท้องที่จังหวัด ภูเก็ต พังงา และระนอง แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งก็คือแหล่งแร่ชายหาด (Beach Sand Deposit) ที่จังหวัดชุมพร ซึ่งมีการแต่งแร่เซอร์คอน และแร่โมนาไซต์เป็นแร่สำคัญ

จากการสำรวจของสำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 2 (ภูเก็ต) เมื่อปี 2530 ถ้าจำนวนเหมืองแร่ดีบุกในเขตจังหวัด ภูเก็ต พังงา ตะกั่วป่า ระนอง และชุมพร อยู่ระหว่าง 60 - 70 เหมือง จะได้ปริมาณแร่โมนาไซต์จากการทำเหมืองแร่ดีบุกขณะนั้นประมาณ 179 - 202 ตัน/ปี และปริมาณสำรองของแร่โมนาไซต์จากกองมูลแร่หรือแร่คละมีมากกว่า 1,180 เมตริกตัน แร่

โมนาไซต์เคยมีผลผลิตและส่งออกเป็นปริมาณมาก ระหว่างปี พ.ศ. 2515 - 2517 แต่เมื่อพ.ศ. 2523 รัฐบาลได้มีนโยบายห้ามส่งออกแร่โมนาไซต์จนกระทั่งกลางปี พ.ศ. 2527 จึงได้ยกเลิกข้อห้ามนี้และทำให้มีการผลิต ส่งออกแร่โมนาไซต์อีกครั้งหนึ่ง

ปัจจุบันจำนวนเหมืองแร่ดีบุกได้ลดลงมาก เนื่องจากสภาวะราคาแร่ดีบุกตกต่ำ ให้ปริมาณแร่โมนาไซต์ที่เป็นผลพลอยได้ไม่ถึงปีละ 100 ตัน อย่างไรก็ตาม ยังมีแร่โมนาไซต์ที่ตกค้างอยู่ในแร่ละหรือมูลแร่ตามเหมืองแร่ดีบุกและโรงแต่งแร่ต่างๆ อยู่มากพอสมควร รวมทั้งหัวแร่โมนาไซต์สะอาดที่ยังไม่ได้จำหน่าย คิดเป็นปริมาณไม่น้อยกว่า 1,500 ตัน ส่วนการผลิตแร่โมนาไซต์จากมูลแร่ในอนาคตขึ้นอยู่กับราคาและความต้องการของตลาดไม่ว่าจะเป็นตลาดภายในหรือต่างประเทศ

### 3. ประโยชน์ของทอเรียม<sup>(6)</sup>

#### 3.1. การใช้ประโยชน์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับทางด้านนิวเคลียร์ (nonnuclear uses)

โลหะทอเรียมและสารประกอบของทอเรียมมีคุณสมบัติพิเศษ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ ในด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมมีคุณสมบัติพิเศษ เพราะมีค่าต้านแรงดึงต่ำ (low tensile strength) low elastic modulus ความหนาแน่นมาก และสุกง่ายขึ้นเป็นสนิมได้ง่าย แต่เมื่อนำมาใช้ทางด้านโลหะผสม (Alloy) ทอเรียมจึงมีการฟื้นฟูการใช้เพิ่มมากขึ้น เช่น เมื่อเติมทอเรียมลงไปโลหะผสมแมกนีเซียม ทำให้คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์โดดเด่นขึ้น โลหะผสมที่มีปริมาณทอเรียม 2 - 3 % จะทำให้มีคุณสมบัติความอ่อนตัวดี และมีความคงตัวหลังจากให้ความร้อน ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์ของทอเรียมที่ไม่เกี่ยวข้องกับทางด้านนิวเคลียร์มีดังต่อไปนี้

- ไส้ตะเกียงเจ้าพายุ (Gas mantles) ก่อนที่จะมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์นั้น ทอเรียมนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมทำไส้ตะเกียงเจ้าพายุมากที่สุด ในปี ค.ศ. 1885 Baron Carl Auer von Welsbach ชาวออสเตรีย ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของธาตุหายากต่างๆ ที่สามารถนำมาทำไส้ตะเกียง และพบคุณสมบัติการปลดปล่อยปริมาณแสงสว่างของออกไซด์ของธาตุต่างๆ ทำให้เกิดความคิดในการนำไปทำไส้ตะเกียงให้แสงสว่าง จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปริมาณการให้แสงสว่าง เมื่อทำให้ไส้ตะเกียงซึมซับด้วยทอเรียม และ 1-2 % ของออกไซด์ธาตุอื่นๆ (ส่วนมากใช้ซีเรียมออกไซด์) จะให้ความสว่างจากการเผาไหม้แก่ขามากที่สุด

- หลอดอิเล็กตรอน (electron tube) ทอเรียมใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในหลอดปล่อยประจุ (discharge tube) แบบแก๊ซ ต้องการพลังงานเพียงเล็กน้อยในการทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้มากเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆ

- ลวดภายในโคมไฟ โลหะผสมของทังสเตนและทอเรียม จะเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างของลวดภายในโคมไฟ ทังสเตนโลหะผสมที่มีทอเรียมเป็นส่วนผสม (0.8 - 1.2 %) และออกไซด์ของธาตุหายากเพื่อควบคุมขนาดผลึกโลหะที่เกิดขึ้นเมื่อใช้หลอดไฟไปนานๆ โลหะผสมดังกล่าวนี้จะไม่เปราะแม้เมื่อเวลาเย็น และป้องกันการตกผลึกเมื่อใช้เป็นเวลานาน

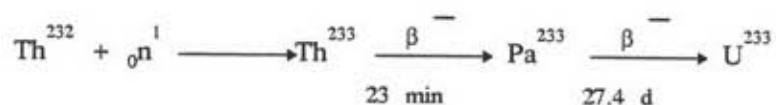
- การเชื่อมและการหลอม โลหะทอเรียมที่เติมลงไปในทังสเตนทำให้การเชื่อมมีคุณภาพดีขึ้น เมื่อเติม 10% Th-Mo ลงไป การเชื่อมนั้นจะไม่เปราะแม้เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้อง

- การใช้ประโยชน์ทางด้านเคมี ใช้เป็นตัวเร่งในการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และแอมโมเนียไปเป็นกรดไนตริกในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัว deoxidant ได้เช่นเดียวกับโลหะ คือ โมลิบดีนัม และเหล็ก

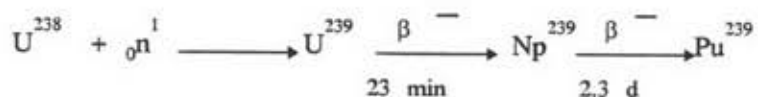
- การใช้รังสีที่ปลดปล่อยจากทอเรียม Th-228 (เมโซทอเรียม) สามารถนำมารักษาโรคบางอย่าง และโรคผิวหนัง ส่วนผสมของทอเรียม และ Th-228 สามารถใช้แทนเรเดียมในอุตสาหกรรมสารเรืองแสง

### 3.2. การใช้ประโยชน์ทางด้านนิวเคลียร์

การใช้ทอเรียมลดลง เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าแทนตะเกียงเจ้าพายุกันมากขึ้น แต่ทอเรียมกลับมีความสำคัญทางด้านพลังงานนิวเคลียร์มาก เพราะ Th-232 จับกับนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีเบตา ให้ไอโซโทปของ U-233 ซึ่งเป็น fissionable isotope ดังสมการนี้



สมการนี้จะคล้ายคลึงกับ สมการของการเกิดพลูโทเนียม จากการที่อะตอมของ U-238 จับนิวตรอน และเกิดการสลายตัวตามลำดับดังนี้



ทั้ง Pu-239 และ U-233 เป็นไอโซโทปที่สามารถแตกตัวได้ (fissionable isotope) เมื่อนิวเคลียสของ U-233 เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว นิวตรอน 2 - 3 ตัวจะถูกปลดปล่อยออกมา เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ โดยนิวตรอนที่เกิดวิ่งเข้าไปชนกับนิวเคลียสของ fissionable isotope นอกจากนี้นิวตรอนที่มากเกินไปยังสามารถใช้ในการผลิต U-233 จาก Th-232 ได้

ห้องปฏิบัติการหลายแห่งได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับทอเรียมที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ เช่น ที่ Argonne National Laboratory ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโลหะทอเรียม และทอเรียม ออกไซด์ใน Boiling Water Reactor สถาบัน Atomic International Canoga Park California ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการใช้โลหะทอเรียมใน Sodium Reactor Experiment. ที่ Oak Ridge National laboratory ศึกษาเกี่ยวกับทอเรียมออกไซด์เหลวสำหรับ Homogeneous Reactor. และที่ Brookhaven National Laboratory ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ของการใช้ ทอเรียม - บิสมัท ใน Liquid Metal Fuel Reactor Experiment.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4. คุณสมบัติของทอเรียม<sup>(1)</sup>

ทอเรียมมีอยู่ในธรรมชาติ 6 ไอโซโทป คือ Th-232 (ไอโซโทปหลัก) Th-234 Th-231 Th-230 Th-228 และ Th-227 ส่วนไอโซโทปที่สังเคราะห์ขึ้นมี Th-235 Th-233 Th-229 Th-226 Th-225 Th-224 และ Th-223 คุณสมบัติของไอโซโทปเหล่านี้อยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไอโซโทปทอเรียม<sup>(1)</sup>

Mass no.	Half life	Mode of disintegration and energy, M.e.V.	Gamma radiation, M.e.V.	Mode of formation
235	<10 min	$\beta$		$^{234}\text{Th}(n,\gamma)$
234	24.10 days	$\beta(0.193,0.103),\gamma$	0.092,0.063,0.029	Natural
233	23.5 min	$\beta(1.23)$		$^{232}\text{Th}(n,\gamma),(d,p)$
232	$1.39 \times 10^{10}$ yr.	$\alpha(3.98),\gamma$	0.055	Natural
231	25.64 hrs.	$\beta(0.302,0.216,0.094),\gamma$	0.022,0.085,other	Natural, $^{230}\text{Th}(n,\gamma)$ , $^{232}\text{Th}(n,2n)$
230	$8.0 \times 10^4$ yr.	$\alpha(4.68,4.62,other),\gamma$	0.068,other	Natural
229	$7.34 \times 10^3$ yr.	$\alpha(5.02,10\%;4.94,20\%;4.85,70\%)$		$^{233}\text{U}$ decay
228	1.91 yr.	$\alpha(5.421,71\%;5.338,28\%),\gamma$	0.0845,0.137,other	Natural
227	18.4 days	$\alpha(6.03,5.97,other),\gamma$	0.05,0.113,other	Natural
226	30.9 min	$\alpha(6.34),\gamma$	0.109,0.13,other	$^{230}\text{U}$ decay
225	$8 \pm 0.5$ min	K capture,10%, $\alpha(6.57),90\%$		$^{229}\text{U}$ decay
224	About 1 sec	$\alpha(7.13)$		$^{228}\text{U}$ decay
223	About 0.1sec	$\alpha(7.55)$		$^{227}\text{U}$ decay

#### 4.1. คุณสมบัติทางเคมี <sup>(1)</sup>

ผงทอเรียมที่ละเอียดสามารถติดไฟในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบทอเรียมไดออกไซด์ โลหะทอเรียมทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และ ซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิสูงถึง 450 องศาเซลเซียส และกับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ได้เป็นสารประกอบ เฮไลด์ ซัลไฟด์ ( $\text{ThS}_2$ ) และ ไนไตรด์ ( $\text{Th}_3\text{N}_4$ ) ทอเรียมที่เป็นผงละเอียดสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องได้ แต่ถ้ามีขนาดใหญ่จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 - 400 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสารประกอบของ  $\text{ThH}_2$  และถ้ามี  $\text{H}_2$  มากจะเกิดเป็นในรูปที่มีจำนวนไฮโดรเจนมากกว่า ( $\text{Th}_{3.75}$ ) เมื่อโลหะทอเรียมได้รับความร้อนสามารถทำปฏิกิริยาได้กับ คาร์บอน ฟอสฟอรัส หรือโบรอน ได้สารประกอบของทอเรียมคาร์ไบด์ ( $\text{ThC}$  และ  $\text{ThC}_2$ ) ฟอสไฟด์ ( $\text{Th}_3\text{P}_4$ ) และ โบไรด์ ( $\text{ThB}_2$ ) ตามลำดับ

สารละลายกรดกัดทอง (กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นและกรดไนตริกเข้มข้น) สามารถละลายทอเรียมได้อย่างรวดเร็ว ส่วนกรดไฮโดรคลอริก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ที่เจือจาง จะมีความสามารถในการละลายทอเรียม ได้เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับ กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ส่วนด่างแก่จะไม่ทำปฏิกิริยากับทอเรียม

ทอเรียมจะรวมตัวเป็นสารประกอบที่มีออกซิเดชันค่าเดียวเท่านั้นคือ +4 ทอเรียมที่อยู่ในรูปไอออนลบจะมีสี่ และเกลือของทอเรียมทั้งหมดจะเป็นสารละลายที่ไม่มีสี ทอเรียมไอออนจะรวมตัวกับไอออนลบต่างๆที่มากเกินพอ เช่น  $\text{CO}_3^{2-}$   $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$   $\text{SO}_4^{2-}$  (อาจเป็น  $\text{HSO}_4^-$ ) และ  $\text{PO}_4^{3-}$  ในสารละลายกรดหรือสารละลายที่เป็นกลาง ซิเตรต และ ทาร์เตรต เป็นต้น เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นไอออนลบ นอกจากนี้ทอเรียมที่มีประจุบวกยังสามารถรวมตัวกับ  $\text{F}^-$  เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้มากกว่า 1 ตัว เมื่ออัตราส่วนจำนวนโมลของ  $\text{F}^-$  ต่อทอเรียมมีค่าน้อยกว่า 2 ทอเรียมยังสามารถเกิด double salt เช่น  $\text{K}_2\text{ThF}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $\text{NaTh}_2(\text{PO}_4)_3$   $\text{MnTh}(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{ThSO}_4\text{HPO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ basic salt เช่น  $\text{ThOCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เนื่องจากสารประกอบทอเรียมบางตัวไม่สามารถละลายในสารละลายกรด จึงสามารถแยกทอเรียมออกจากธาตุอื่นๆได้ สารประกอบเหล่านั้นได้แก่ ไอโอเดต เปอร์ออกไซด์ ออกซาเลต ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต สารประกอบเชิงซ้อนซัลเฟต ฟอสเฟต เพอร์โรโซยานด์ และ double salt ของโพตัสเซียมทอเรียมซัลเฟต

#### 4.2. คุณสมบัติทางกายภาพ<sup>(6)</sup>

โลหะทอเรียจะมีโครงสร้างแบบ face - centered cubic ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อให้ความร้อนถึง  $1400 \pm 25$  องศาเซลเซียส โครงสร้างจะเปลี่ยนจาก face - centered cubic ไปเป็นโครงสร้างแบบ body - centered cubic

การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของทอเรียมนั้นทำได้ยาก เนื่องจากว่าหาโลหะทอเรียที่มีความบริสุทธิ์จริงๆ ได้ยาก แต่ก็ได้นักวิทยาศาสตร์หลายคนวิเคราะห์หาความหนาแน่นของทอเรียมนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งที่ Ames Laboratory ได้คำนวณค่าความหนาแน่นในทางทฤษฎี มีค่า  $11.72 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งได้มีการคำนวณก่อนหน้านี้ที่ Ohio State University ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $11.83 \text{ g/cm}^3$  ทั้งนี้ได้ใช้สมมุติฐานในการคำนวณโดยใช้ขนาดของโครงสร้างผลึกต่างกัน

Marden และ Rentschler ได้วัดความหนาแน่นโดยตรงมีค่าอยู่ระหว่าง  $11.3 - 11.7 \text{ g/cm}^3$  ส่วนความหนาแน่นที่หาจากโลหะหลอมจะให้ค่าอยู่ระหว่าง  $11.5$  และ  $11.6 \text{ g/cm}^3$  ส่วนทอเรียมที่ได้จากการหลอมเหลวด้วยไฟฟ้าจะให้ค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี คือ  $11.66 \text{ g/cm}^3$  หลังจากโลหะชิ้นนี้ทำการม้วนแล้วค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ  $11.75 \text{ g/cm}^3$

จุดหลอมเหลวของทอเรียมมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้าง เพราะทอเรียมไวต่อชนิดและปริมาณของมลทินที่ปะปนอยู่ จุดหลอมเหลวที่ได้มีการศึกษาค้นคว้ามีค่าต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2 ค่าจุดหลอมเหลวของทอเรียมจากรายงานต่างๆ

Year	Melting point, C	Author
1908	1450	von Bolton
1909	1745	von Wartenberg
1918	1450	Mott
1927	1842 ± 30	Marden and Rentschler
1933	1827	deBoer
1933	1672 - 1695*	Thompson
	1712 - 1739 <sup>+</sup>	
1949	1850 ± 50	Alberman and Anderson
1949	1140 ± 26	D'Eye
1950	1695	Chiotti

หมายเหตุ \* ทอเรียมผลิตโดยวิธี electrolytic

+ ทอเรียมผลิตโดยการรีดิวซ์ด้วยแคลเซียม

### ทอเรียมในเนื้อเยื่อมนุษย์ของประชากรโลก<sup>(7)</sup>

ปริมาณทอเรียมโดยเฉลี่ยในดินของประเทศอเมริกามีความเข้มข้นประมาณ 1 pCi Th-232/g soil ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.2 ppm ขณะที่ความเข้มข้นของทอเรียมโดยเฉลี่ยในดินของทั่วโลกมีค่าประมาณ 0.7 pCi/g หรือ 6.4 ppm ไอโซโทปทอเรียมที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพคือ Th-228 Th-230 และ Th-232 เพราะมีค่าครึ่งชีวิตยาวนานมาก

การศึกษาความเข้มข้นของทอเรียมในเนื้อเยื่อมนุษย์นั้นได้มีการศึกษากันอยู่หลายคน และได้ค่าความเข้มข้นของทอเรียมอยู่หลายค่าตัวอย่างเช่น Hill พบว่าความเข้มข้นของ Th-232 ในตัวอย่างปอด 9 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 0.2 pCi(1.8 µg/kg) - 1 pCi(9.2 µg/kg) Petrow Strehlow วัดความเข้มข้นของทอเรียมที่สะสมอยู่ในกระดูกคนหลายตัวอย่างพบว่ามีความเข้มข้น 10 ng/g ash Picer และ Strohl รายงานความเข้มข้นของทอเรียมในเด็กกระดูกคนที่ไม่ทราบอายุพบว่ามีความเข้มข้น 23 ng/g ash Lucas และผู้ร่วมงานได้ศึกษาความเข้มข้นของทอเรียมในตัวอย่างกระดูกมนุษย์ในตัวอย่างกระดูกซี่โครง 38 ตัวอย่าง ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1 - 72 ng/g ash พวกเขาพบว่าความเข้มข้นของทอเรียมในกระดูกจะเพิ่มขึ้นตามอายุในอัตรา

0.16 ng/g ash ต่อปี และ Clifton และผู้ร่วมงานวัดความเข้มข้นของ Th-232 ในกระดูกคนที่ไม่ได้รับรังสีใน United Kingdom พบว่าความเข้มข้นในกระดูกซี่โครงอยู่ในช่วง 0.8 - 164 ng/g และมีค่าเฉลี่ย  $28.6 \pm 13.1$  ng/g

ความเข้มข้นของทอเรียมที่พบในเนื้อเยื่อมนุษย์ รวมทั้งกระดูก และเนื้อเยื่ออ่อนจากประชาชนที่อาศัยอยู่ใน Washington ,D.C. และ Grand Junction, Colorado ความเข้มข้นของทอเรียม 3 ไอโซโทป ที่อวัยวะต่างๆของประชาชนทั้งสองเมืองดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การลดลงของทอเรียม 3 ไอโซโทป ที่อวัยวะต่างๆ

Isotope	Location	Order of Decreasing Concentration
Th-228	Grand Junction	Lymphnodes>bone>lung>kidney>liver
	Washington ,D.C.	Lymphnodes>bone>lung>kidney>liver
Th-230	Grand Junction	Lymphnodes>bone>lung>kidney>liver
	Washington ,D.C.	Lymphnodes>lung>bone>liver>kidney
Th-232	Grand Junction	Lymphnodes>lung>bone>kidney>liver
	Washington ,D.C.	Lymphnodes>lung>bone>liver>kidney

ปริมาณรังสีที่ได้รับจากทอเรียมไอโซโทปทั้งหมดจะมีผลต่อ tracheobronchial lymph nodes มากที่สุด คือ จะได้รับปริมาณรังสีอยู่ในช่วง 1 - 5 mrads/yr (0.01 - 0.05 mGy/yr)

การหาปริมาณ Actinides โดยวิธี Alpha spectrometry<sup>(8)</sup>

การหาปริมาณแอกติไนด์โดยวิธีอัลฟาสเปกโตรเมตรี มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องติดตามปริมาณตะกอนที่ได้หลังกระบวนการวิเคราะห์(Recovery yield, %RY) เนื่องจากการวิเคราะห์จะมีการสูญหายของแอกติไนด์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยการเติมสารละลายตัวติดตาม สารละลายตัวติดตามที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณทอเรียมคือ Th-229 Th-234 และ Th-227

การวิเคราะห์ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมตัวอย่าง(sample preparation)
2. การตกตะกอนร่วม(co-precipitation)
3. การสกัดด้วยตัวทำละลาย(solvent extraction)หรือการแลกเปลี่ยนไอออน(ion exchange separation)
4. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด(source preparation)
5. การวัดด้วยเครื่องอัลฟาสเปกโตรเมตรี (alpha-spectrometry)

#### 1. การเตรียมตัวอย่าง (sample preparation )

1.1. Dry ashing เหมาะสำหรับตัวอย่างทางชีววิทยา เช่น เนื้อเยื่ออ่อน กระจก และ ตัวอย่างอุจจาระ โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง 500 - 550 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิช้าๆเป็นเวลานานถึง 8-12 ชั่วโมง

1.2. Wet ashing เหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นเนื้อเยื่ออ่อน รวมทั้งเลือด โดยการย่อยสลายด้วยกรดไนตริกหรือกรดซัลฟูริกซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญ ในการย่อยสลายจะเติมกรดไนตริกลงไปในส่วนตัวอย่างปริมาณเล็กน้อย แล้วระเหยสารตัวอย่างให้มีปริมาณน้อยๆ ซึ่งโดยมากจะเกิดการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ได้โดยไม่ต้องเติมตัวออกซิไดซ์อีก การออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์จะไม่ปรากฏควันสีน้ำตาล หากปรากฏควันสีน้ำตาล ควรเติมกรดไนตริกซ้ำอีก หรือเติมกรดไนตริกพร้อมกับของกรดเปอร์คลอริกปริมาณเล็กน้อย และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะช่วยให้เกิดการออกซิไดซ์ได้สมบูรณ์ และได้กากตะกอนของตัวอย่างมีสีขาว<sup>(2)</sup>

1.3. การชะล้าง (Leaching) Joshi พบว่าการชะล้างทอเร็มให้ได้ปริมาณมาก จะทำได้โดยการ Reflux ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 8 นอร์มอล เขาแสดงให้เห็นว่า การชะล้างจากตัวอย่างที่ได้จาก National Bureau of Standards ( USA ) ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 8 นอร์มอล 2 ครั้งนั้นเพียงพอต่อการละลายทอเร็มได้อย่างดี

1.4. การหลอมด้วยความร้อน (Fusion) เป็นการละลายตัวอย่างดิน ตะกอน และ ตัวอย่างผัก ด้วยการเติม  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaOH}$  และ ส่วนผสมของ  $\text{KF} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$  แล้วนำไปหลอม Gascoyne และ Larocque ได้ทำการละลายตัวอย่างหินแกรนิตด้วยวิธีนี้ โดยหลอมร่วมกับ lithium metaborate เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม และทอเร็ม

## 2. การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)<sup>(8)</sup>

วัตถุประสงค์ของการทำ Co-precipitation คือ

- เพื่อต้องการแยก Actinide ออกจากสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในตัวอย่าง
- เพื่อเตรียมทำให้ Actinide มีความเข้มข้นมากขึ้น จากตัวอย่างที่ละลายในกระบวนการ wet ashing ที่มีปริมาณมาก
- เพื่อหาปริมาณ Actinide แต่ละตัวที่มี Valence state แตกต่างกัน

การทำ co-precipitation นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและชนิดของ Actinide เช่น จะใช้ Fe hydroxide ตกตะกอนร่วมกับ U Th และ Pu ในเนื้อเยื่ออ่อน และตัวอย่างอุจจาระ ปัสสาวะ Tetravalent Actinide จะตกตะกอนร่วมกับ แคลเซียมออกซาลेट ในตัวอย่างกระดูก แต่ไม่สามารถใช้เหล็กไฮดรอกไซด์เป็นตัวพาได้ อาจเป็นเพราะมีแคลเซียม และ ฟอสเฟต ในกระดูกเป็นปริมาณมาก

การตกตะกอนทอเริ่มด้วยออกซาลेट ทอเริ่มออกซาลेट ( $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) คือ ตะกอนที่ได้จากการเติมกรดออกซาลิกลงไปในสารละลายเกลือของทอเริ่ม ทอเริ่มออกซาลेट ละลายได้ในกรดซัลฟูริกที่ร้อน หรือต้มให้เดือดด้วยกรดไนตริก ทอเริ่มออกซาลेटสามารถตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ในสภาวะที่ตัวกลางเป็นกรด

การตกตะกอนด้วยกรดออกซาลิกเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถแยกทอเริ่มออกจากธาตุอื่นๆได้ยกเว้น rare earth และ quadrivalent uranium Ca Pb Cu และ Sr จะตกตะกอนร่วมด้วยเมื่อมีปริมาณมากถึง 10 มิลลิกรัม เกลือฟอสเฟต ซัลเฟต Co Ni Cu Zn Ag Cd Sn และ Bi อาจจะปนเปื้อนมากับตะกอนของทอเริ่มออกซาลेटเมื่อมีปริมาณมาก แต่สามารถขจัดออกด้วยการตกตะกอนซ้ำหลายๆครั้ง<sup>(1)</sup>

ทอเริ่มในปัสสาวะสามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกซาลेट (calcium oxalate) ได้ และสามารถแยกทอเริ่มออกจากแคลเซียมได้ โดยการตกตะกอนร่วมกับเหล็กไฮดรอกไซด์ และทำให้บริสุทธิ์โดยการผ่าน anion exchange ในสารละลายตัวกลางกรดไนตริก 8 นอร์มอล และเตรียมตัวอย่างให้เหมาะสมกับการวัดด้วยวิธีอัลฟาสเปกโตรเมตรี โดยการตกตะกอนร่วมกับนีโอดีเมียมฟลูออไรด์ด้วยวิธี microprecipitation

### 3. การแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange )<sup>(9)</sup>

Ion exchange เป็นการแยก Actinide ออกจากสารอนินทรีย์ในตัวอย่างทางชีววิทยา และสิ่งแวดล้อม และแยกออกจากธาตุอื่นๆ โดยอาศัยคุณสมบัติการดูดซับที่แตกต่างกันของธาตุนบน anion หรือ cation resin

ion exchange resins เป็น polyacid หรือ polybase ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่ละลายในของเหลวทั้งหมดและตัวกลางที่ไม่ใช่ของเหลว มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่ที่มีขั้วแลกเปลี่ยนที่ใหญ่เป็นโครงสร้าง 3 มิติของไฮโดรคาร์บอน ถ้าเป็น Cation exchangers จะประกอบด้วยหมู่ซัลโฟนิก ฟอสฟอรัส ฟอสฟอนิก คาร์บอกซิลิก หรือ ฟีนอลิก Anion exchangers จะประกอบด้วยหมู่ของ primary secondary tertiary amine และหมู่ของ quaternary ammonium

ปฏิกิริยาของการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่คล้ายๆกับสารละลายทั่วไปดังนี้



ซิลเวอร์ไอออนแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออน ซึ่งเปรียบได้กับโซเดียมเป็น cation exchange resin จะแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนจากเรซินกับซิลเวอร์ไอออนจากสารละลาย ดังสมการข้างล่างนี้



การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการแลกเปลี่ยนของไอออนระหว่างของแข็งและของเหลวซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างของของแข็ง

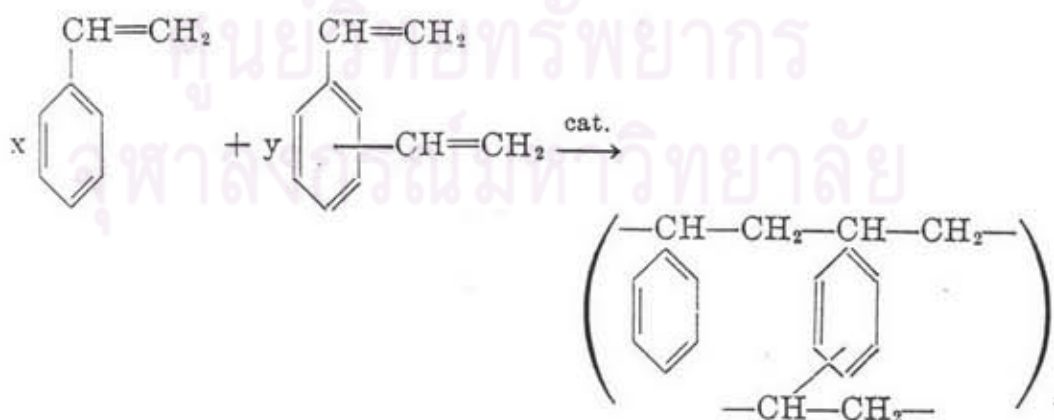
เมื่อ ion exchangers ใช้หมดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการล้างด้วยสารละลายที่เหมาะสม ในกรณีของ cation exchange resin ในรูปของไฮโดรเจน และโซเดียมไอออนอื่นสามารถขจัดออกได้ โดยการล้างเรซินด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก หรือสารละลายกรด

ไฮโดรคลอริก ถ้าเป็น anion exchange resin ก็สามารถแปลงกลับไปเป็นรูปไฮดรอกไซด์ได้ โดยการล้างด้วยสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในปี 1935 Adams และ Holmes สังเคราะห์ Cation Exchangers ตัวแรกจากฟีนอล และฟอร์มัลดีไฮด์ ถึงแม้ว่าโพลีเมอร์ดังกล่าวจะเป็นเรซินได้ดีมากก็ตาม แต่ภายหลังแบบ สไตรีน เป็นที่แพร่หลายและครองตลาดมากกว่า สไตรีนสามารถทำได้หลายรูปแบบมากกว่า เช่น สามารถผลิตเป็นรูปทรงกลมได้ มีความเสถียรต่อความร้อนและตัวออกซิไดซ์ มีความจุสูง ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

ในสมัยแรกนั้น Anion Exchangers เตรียมได้จาก อะโรมาติกเอมีนและ ฟอร์มัลดีไฮด์ และเป็นเบสอย่างอ่อน ต่อมาได้พัฒนาเป็น อะลิฟาติกเอมีนของเบสแก่ซึ่งมีประโยชน์มากกว่า แต่ยังคงสามารถขจัดเพียงกรดแก่ออกจากสารละลายเท่านั้น ได้มีการพัฒนาเอาผลิตภัณฑ์ของ quaternary amine ซึ่งเป็นไอออนที่สามารถขจัดกรดอ่อน เช่น กรดคาบอนิก และกรดซิลิซิก ออกจากน้ำได้ ตลอดช่วงค่า pH ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ชนิดนี้สามารถทำให้น้ำปราศจาก ไอออนได้

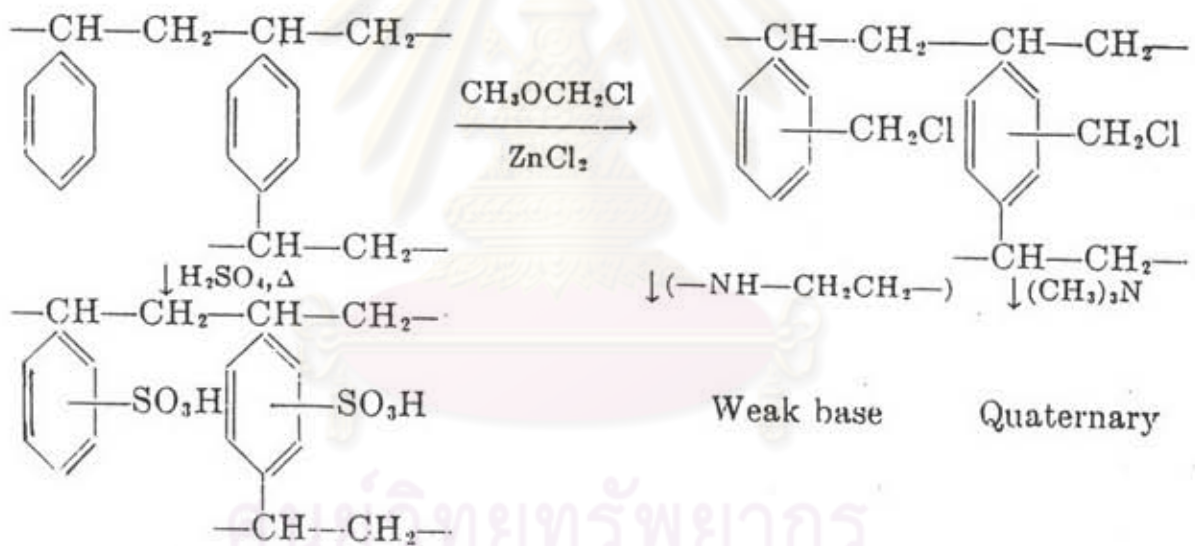
ตัวแลกเปลี่ยนไอออนที่สำคัญส่วนใหญ่สามารถเตรียมได้จาก การโพลีเมอร์ไรเซชันร่วม ของ สไตรีน และไดไวนิลเบนซีนในปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งใช้เป็นตัว crosslink ดังปฏิกิริยาข้างล่าง อนุภาคที่ได้เป็นทรงกลม มีขนาด 20-50 mesh หากมีความละเอียดมากกว่านี้ราคาก็สูงขึ้น



### ชนิดของ Ion Exchange Resin แบ่งออกเป็น

- Cation Exchangers เตรียมจากผลิตภัณฑ์ของโคโพลีเมอร์โดยเติมกรดซัลฟูริกที่ร้อนเพื่อทำให้เกิดกลุ่มซัลโฟนิก และร่วมตัวเป็น Cation Exchange resin ทำให้เป็นกลางได้โดยการเติม soda ash และการล้างเป็นการสิ้นสุดขั้นตอน

- Anion Exchangers ได้จากการใช้โคโพลีเมอร์เหมือนกันกับ Cation Exchangers แต่จำเป็นต้องทำเป็น chloromethylate ด้วย methyl chloromethyl ether ก่อน และใช้ Friedel Crafts เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามด้วยการ amination ด้วย amine ชนิดต่างๆ ถ้าใช้ Tertiary amine ผลที่ได้คือ quaternary ammonium resins ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเบสแก่ และถ้าเป็น โพลีเอมีน ผลที่ได้คือเบสอ่อน ดังสมการข้างล่าง



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Anion Exchangers มีอยู่หลายชนิด เช่น ถ้าใช้ trimethyl amine ทำให้เกิดผลผลิตสุดท้ายอยู่ในชนิดที่ 1 คือ anion exchanger ซึ่งเป็นเบสแก่ ถ้าใช้ dimethylethanolamine ผลผลิตที่ได้จะเป็นชนิดที่ 2 ถ้าใช้ polyamine เช่น diethylenetriamine จะได้ anion exchange resin ซึ่งเป็นเบสอ่อน เรซินชนิดที่ 1 จะมีค่า thermal stability และ oxidative stability และรักษาสภาพความคงทนของ quaternary ดีกว่า ชนิดที่ 2 มีข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิ คือใช้กับอุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 105 องศาฟาเรนไฮต์ เมื่อใช้กับรูปไฮดรอกไซด์ และไม่ควรใช้ภายใต้สภาวะที่มีการออกซิไดซ์ เรซินชนิดนี้ จะสูญเสีย quaternary amine ไปเรื่อยๆ และมีอายุการใช้งานประมาณ 3 - 5 ปี เรซินชนิดที่ 2 นี้มักจะใช้มากกว่าชนิดที่ 1 เพราะมีราคาถูก และ regenerate ง่ายกว่า คุณสมบัติและเรซินทั้งหมดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 2.4



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเรซินที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

Industrial Trade Names	Structure and Active Groups	Form Supplied	Bulk Density (lbs./cu. ft. as supplied)	Moisture (%) as supplied	Total Exchange Capacity			Maximum Operating Temperature	pH Range for Operation	
					Kgr. as CaCO <sub>3</sub> /cu. ft.	Meq./ml. Wet Resin	Meq./g. Dry Resin			
Amberlite IR-120 (1) Chempro C-20 (2) Dowex 50 (3) Nalcite HCR (4) Permutit Q (5)	Cation exchanger; strongly acidic, cross-linked polystyrene	Spherical Na <sup>+</sup> (H <sup>+</sup> special order)	50-51	45	43	1.9	4.9-5.0	250°F	0-14	
Nalcite HGR (4)			52	40	48	2.0	4.9-5.0	250°F	0-14	
Nalcite HDR (4)			54	37	49	2.1	4.9-5.0	250°F	0-14	
Duolite C-25 (2)			45-50	50-60	33	1.5	4.7	250°F	0-14	
							Na <sup>+</sup> Form	H <sup>+</sup> Form	H <sup>+</sup> Form	Na <sup>+</sup> Form
Amberlite IRC-50 (1) Duolite CS-101 (2) Permutit H-70 (3)	Cation exchanger; weakly acidic carboxylic	Spherical H <sup>+</sup>	43	45-55	71	3.5	10.0	250°F	7-14	
							H <sup>+</sup> Form	H <sup>+</sup> Form	H <sup>+</sup> Form	Na <sup>+</sup> Form
Amberlite IRA-400 (1) Dowex-1 (3) Duolite A-42 (2) Nalcite SBR (4) Permutit S-1 (5)	Type I strongly basic anion exchanger; quaternary, ammonium polystyrene	Spherical Cl <sup>-</sup> (OH <sup>-</sup> special order)	40	40	26	1.2	3.0	150°F	0-14	
							Cl <sup>-</sup> Form	Cl <sup>-</sup> Form	Cl <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form
Amberlite IRA-401 (1)	Type I, porous									
Duolite A-42LC (2)	strongly basic anion exchanger	Spherical Cl <sup>-</sup>	40	55	18	0.80	3.5	150°F	0-14	
Amberlite IRA-410 (1) Dowex-2 (3) Duolite A-40 (2) Nalcite SAR (4) Permutit S-2 (5)	Type II strongly basic anion exchanger; quaternary ammonium, polystyrene	Spherical Cl <sup>-</sup>	42	40	26	1.2	3.0	100°F	0-14	
							Cl <sup>-</sup> Form	Cl <sup>-</sup> Form	Cl <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form
Amberlite IRA-411 (1) Duolite A-40LC (2)	Type II, porous Strongly basic anion exchanger	Spherical Cl <sup>-</sup>	42	55	15.0	0.7	3.0	100°F	0-14	
Amberlite IR-4B (1) Deacidite (5) Duolite A-7 (2)	Weakly basic anion exchanger (structure varies with manufacturer)	Granular OH <sup>-</sup>	35	40-45	44-56	2.0-2.5	5.2-9.1	100°F	0-7	
							OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form
Amberlite IR-45 (1) Dowex-3 (3) Duolite A-14 (2) Nalcite WBR (4)	Weakly basic anion exchanger; polyamine, cross-linked polystyrene	Spherical OH <sup>-</sup>	40	35-45	44	2	5.5	200°F	0-7	
							OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form	OH <sup>-</sup> Form

\* This table includes only those ion exchangers which are in general commercial usage. Variations in properties such as particle size and cross-linkage are often available. Figures are approximate and vary somewhat with the manufacturer. Additional detailed data should be gotten directly. Data on other resins for specialized uses can be obtained directly from the manufacturers.

- (1) Rohm and Haas Co., Washington Square, Philadelphia, Penn.
- (2) Chemical Process Co., 901 Spring St., Redwood City, Cal.
- (3) Dow Chemical Co., Midland, Michigan (Resins sold and serviced by (4)).
- (4) National Aluminate Corp., 6216 W. 66th Place, Chicago, Ill.
- (5) Permutit Co., 330 W. 42nd St., New York, N.Y.

#### 4. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด<sup>(8)</sup> (Source preparation)

มี 2 วิธีใหญ่ๆคือ

4.1. การทำ electrodeposition ของ Actinide บน platinum หรือ polished stainless steel disk

4.2. การทำ co-precipitation ของ Actinide โดยการตกตะกอนร่วมกับ lanthanum cerium หรือ neodemium

ส่วนใหญ่มักจะเลือกการทำ co-precipitation ของ Actinide มากกว่า electrodeposition เนื่องจาก การทำ co-precipitation เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกผลการวิเคราะห์สเปกตรัมดี ฉะนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี co-precipitation

#### 5. Alpha-spectrometry

ธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Actinide ทั้งหมด ที่ปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาจะอยู่ในช่วงพลังงาน ระหว่าง 3.95 MeV (Th-232) ถึง 8.8 MeV (Po-212) ดังตารางที่ 2.5

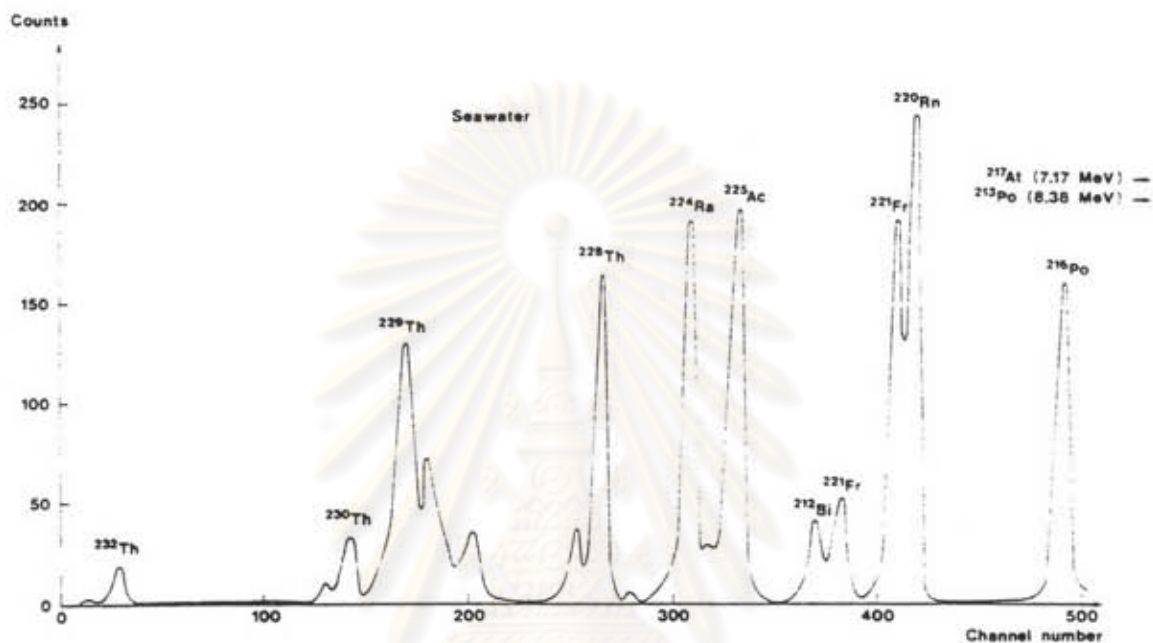
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสีที่ให้อัลฟาและสารกัมมันตรังสีที่ใช้หาค่าเปอร์เซ็นต์การวิเคราะห์

ไอโซโทป	$E_\alpha$ (MeV)	$T_{1/2}$	ตัวติดตาม	$E_\alpha$ (MeV)	$T_{1/2}$
$^{210}\text{Po}$	5.30	138 d	$\left\{ \begin{array}{l} ^{208}\text{Po} \\ ^{209}\text{Po} \end{array} \right.$	5.11	$2.9 \times 10^5$ yr
				4.88	103 yr
$^{239}\text{Pu}$	5.16	$2.41 \times 10^4$ yr	$\left\{ \begin{array}{l} ^{236}\text{Pu} \\ ^{242}\text{Pu} \end{array} \right.$	5.77	2.85 yr
$^{240}\text{Pu}$	5.16	6570 yr		4.90	$3.8 \times 10^5$ yr
$^{238}\text{Pu}$	5.50	87.7 yr			
$^{241}\text{Am}$	5.48	433 yr	$\left\{ \begin{array}{l} ^{243}\text{Am} \\ ^{244}\text{Cm} \end{array} \right.$	5.27	7370 yr
				5.80	18.1 yr
$^{242}\text{Cm}$	6.11	163 d	$\left\{ \begin{array}{l} ^{243}\text{Am} \\ ^{241}\text{Am} \end{array} \right.$	5.27	7370 yr
$^{244}\text{Cm}$	5.80	18.1 yr		5.48	433 yr
$^{234}\text{U}$	4.76	$2.5 \times 10^5$ yr	$\left\{ \begin{array}{l} ^{232}\text{U} \end{array} \right.$		
$^{235}\text{U}$	4.40	$7.0 \times 10^8$ yr		5.32	72 yr
$^{238}\text{U}$	4.20	$4.5 \times 10^9$ yr			
$^{228}\text{Th}$	5.42	1.91 yr	$\left\{ \begin{array}{l} ^{229}\text{Th} \end{array} \right.$		
$^{230}\text{Th}$	4.69	$8.0 \times 10^4$ yr		4.8-5.05	7300 yr
$^{232}\text{Th}$	4.0	$1.4 \times 10^{10}$ yr			
$^{231}\text{Pa}$	5.0	$3.3 \times 10^4$ yr	$^{233}\text{Pa} (\beta, \gamma)$		27 d
$^{237}\text{Np}$	4.78	$2.1 \times 10^6$ yr	$^{239}\text{Np} (\beta, \gamma)$		2.35 d
$^{226}\text{Ra}$	4.78	1600 yr	$^{224}\text{Ra}$	5.69	3.7 d
			$^{225}\text{Ra} (\beta, \gamma)$		14.8 d
			$^{223}\text{Ra}$	5.72	11.4 d

การหาพื้นที่ของสเปกตรัมเป็นสิ่งสำคัญมาก ในบางการทดลองจะทำการหาพื้นที่ในด้านพลังงานสูงในช่วง 1.5 FWHM และด้านพลังงานต่ำในช่วง 2.5 FWHM ความหนาของตะกอนที่ใช้ในการวัดด้วยวิธีอัลฟาสเปกโตรเมตรีจะต้องเป็นตะกอนที่มีความหนาน้อยมาก ถ้ามีความหนามากกว่า 3 ไมครอน ค่าการแยกของสเปกตรัมจะไม่สามารถเชื่อถือได้ สเปกตรัมของ

ทอเรียมแสดงใน รูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสเปกตรัมของทอเรียม-229 มีหลายพลังงานมากมีอยู่ระหว่าง 4.8-5.05 MeV



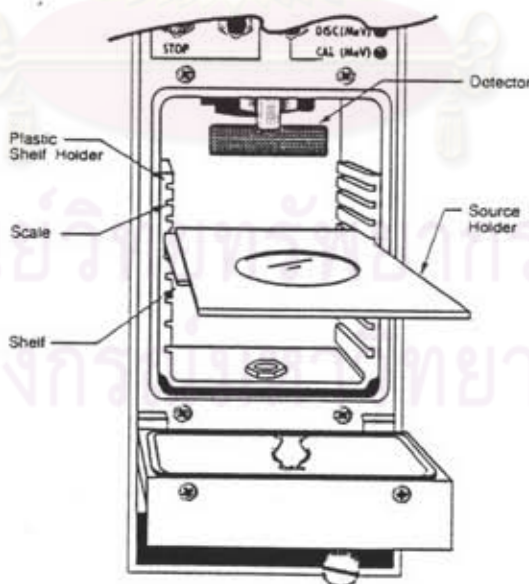
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของตัวอย่างทอเรียมตามธรรมชาติที่แยกมาจากน้ำทะเล ซึ่งใช้ Th-229 เป็นตัวติดตาม วัดด้วยหัววัดชนิด silicon surface barrier

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดลองนี้ใช้หัววัดชนิด PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon Detector) ซึ่งพัฒนามาจากเทคนิคของ semi conductor จะมีความสามารถในการแยกพลังงาน (Energy Resolution) สูง ความไวสูง และ ค่า background ต่ำ

- ความสามารถในการแยกพลังงานสูง เพราะมีหน้าตางของหัววัดที่บางมาก
- ความไวสูง เนื่องจากมีหน้าตางที่บาง และมีค่าความลึกของ depletion ต่ำสุด 140 ไมครอน ซึ่งจะดูดกลืนอนุภาคอัลฟาได้มากถึง 15 MeV ครอบคลุมช่วงพลังงานของกัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยรังสีอัลฟาทั้งหมด
- ค่า background ต่ำ เพราะมีการเลือกใช้วัสดุที่บริสุทธิ์ กระบวนการผลิตที่สะอาด และ ผ่านการทดสอบแล้ว

พื้นที่ของหัววัด มีพื้นที่มากถึง 1200 ตารางมิลลิเมตร มีห้องสำหรับวางตัวอย่างทำด้วยเหล็กไร้สนิม ระยะห่างระหว่าง source และ หัววัด สามารถเลือกปรับได้ตั้งแต่ 1 - 49 มิลลิเมตร ห้องแต่ละชั้นห่างกัน 4 มิลลิเมตร หัววัดบรรจุอยู่ใน chamber ที่มีขนาด 8.16 x 6.03 x 6.25 เซนติเมตร ซึ่งทำด้วยเหล็กไร้สนิม ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 chamber ของ PIPS detector

PIPS detector มีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้

- Buried Ion Implanted Junctions
- SiO<sub>2</sub> Passivation
- กระแสรั่วไหลน้อย
- สัญญาณรบกวนต่ำ
- หน้าต่างบาง ( $\leq 500 \text{ \AA}$  eq. Si.)
- สามารถทำความสะอาดผิวหน้าได้
- อบที่อุณหภูมิสูงได้

หลักการทั่วไป

อนุภาคจะหยุดอยู่ในย่าน depletion region และเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล พลังงานที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลหนึ่งคู่นั้นขึ้นอยู่กับ สารที่นำมาทำหัววัด แต่ที่สำคัญคือพลังงานอิสระของอนุภาคที่เข้ามาสู่หัววัด จำนวนคู่อิเล็กตรอนโฮลที่รวมตัวนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของอนุภาค สนามไฟฟ้าที่เกิดใน depletion region จะกวาดเอาอิเล็กตรอนไปที่จุดเริ่มต้นจุดหนึ่งทำให้เกิด hole ขึ้น สัญญาณของประจจะถูกรวบรวมไว้ใน preamplifier เพื่อผลิตสัญญาณไฟฟ้า (Voltage Pulse)

ความกว้างของ depletion region ขึ้นอยู่กับปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ให้ ถ้าให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูง depletion region ก็กว้างด้วย

PIPS detector สามารถประยุกต์ใช้กับงานต่างๆได้ เช่น

- การวิเคราะห์ทางเคมีรังสี
- ศึกษาและสำรวจสิ่งแวดล้อม
- ฟิสิกส์สุขภาพ
- การสำรวจสถานที่ตั้งทางนิวเคลียร์
- ด้านธรณีวิทยา และ geomorphological เช่น U-Th dating เป็นต้น

อย่างไรก็ตามความสามารถในการแยกพลังงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับหัววัดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น การเตรียมตัวอย่าง การปรับลดความดันภายในห้องสุญญากาศ ระยะห่างระหว่าง source และ หัววัด และที่สำคัญที่สุด คือ คุณภาพของ preamplifier และ หรือ spectrometer

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกพลังงานและประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

1. ระยะห่างระหว่าง source และ detector เพราะค่าประสิทธิภาพของรังสีอัลฟาขึ้นอยู่กับ solid angle เมื่อใช้ขนาดหัววัดที่แตกต่างกัน อยู่ห่างจาก source เพียงเล็กน้อย ค่าประสิทธิภาพอาจมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ประสิทธิภาพของหัววัดชนิดนี้มีค่ามากถึง 40 % และมีการกระเจิงของพลังงานต่ำมาก เนื่องจากหน้าต่างของหัววัดบางเพียง 500 Å
2. ความหนาของตัวอย่างที่วัดต้องบางมากๆ และเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเจิงพลังงานเนื่องจาก self-absorption ค่า self-absorption เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวอย่าง และเป็นสัดส่วนผกผันกับความแรงรังสีจำเพาะ

ความเข้มข้นสูงสุดของทอเรียมที่ยอมรับได้<sup>(10)</sup>

คณะกรรมการนานาชาติเกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiation Protection) ที่ย่อว่า ICRP ซึ่งประกอบด้วยนักวิทยาศาสตร์ นักชีววิทยารังสี และผู้เชี่ยวชาญด้านต่างๆ ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรังสี ได้กำหนดค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ สำหรับทอเรียมในน้ำ และในอากาศ ของบุคคลที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นสูงสุดของทอริยมที่ขอมให้รับได้<sup>(10)</sup>

ไอโซโทป ทอริยมและ ชนิดของ การสลายตัว	อวัยวะเป้าหมาย	ค่าสูงสุด ที่ยอมให้ รับได้ทั่ว ร่างกาย ( $\mu\text{Ci}$ )	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้รับได้ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )			
			40 ชั่วโมง/สัปดาห์		168 ชั่วโมง/สัปดาห์	
			น้ำ	อากาศ	น้ำ	อากาศ
${}_{90}\text{Th}^{227}$ ละลาย $\alpha, \beta, \gamma$	ทางเดินอาหาร		$5 \times 10^{-4}$	$10^{-7}$	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-8}$
	กระดูก	0.02	$8 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-3}$	$10^{-10}$
	ไต	0.08	0.04	$2 \times 10^{-9}$	0.01	$6 \times 10^{-10}$
	ทั่วร่างกาย	0.1	0.05	$2 \times 10^{-9}$	0.02	$7 \times 10^{-10}$
	ตับ	0.5	0.2	$10^{-8}$	0.08	$4 \times 10^{-9}$
ไม่ละลาย	ปอด			$2 \times 10^{-10}$		$6 \times 10^{-11}$
	ทางเดินอาหาร		$5 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-8}$
${}_{90}\text{Th}^{228}$ ละลาย $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	กระดูก	0.02	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-12}$	$7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-8}$	$10^{-4}$	$3 \times 10^{-8}$
	ไต	0.09	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-11}$
	ทั่วร่างกาย	0.09	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-11}$
	ตับ	0.5	$7 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-3}$	$10^{-10}$
ไม่ละลาย	ปอด			$6 \times 10^{-12}$		$2 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$4 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-8}$	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$
${}_{90}\text{Th}^{230}$ ละลาย $\alpha, \gamma$	กระดูก	0.05	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-13}$
	ไต	0.3	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-12}$	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$
	ทั่วร่างกาย	0.4	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-11}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-12}$
	ตับ	0.6	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$9 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-8}$
ไม่ละลาย	ปอด			$10^{-11}$		$3 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$9 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-8}$

หมายเหตุ ตัวอักษรหนาเป็นอวัยวะวิกฤติ



ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นสูงสุดของทอเรียมที่ยอมให้รับได้ (ต่อ)

ไอโซโทป ทอเรียมและ ชนิดของ การสลายตัว	อวัยวะเป้าหมาย	ค่าสูงสุด ที่ยอมให้ รับได้ทั่ว ร่างกาย ( $\mu\text{Ci}$ )	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้รับได้ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )			
			40 ชั่วโมง/สัปดาห์		168 ชั่วโมง/สัปดาห์	
			น้ำ	อากาศ	น้ำ	อากาศ
$^{231}\text{Th}$ ละลาย $\alpha, \beta, \gamma$	ทางเดินอาหาร		$7 \times 10^{-3}$	$10^{-6}$	$2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-7}$
	กระดูก	30	200	$10^{-5}$	80	$4 \times 10^{-6}$
	ไต	40	300	$10^{-5}$	100	$5 \times 10^{-6}$
	ทั่วร่างกาย	100	900	$4 \times 10^{-5}$	300	$10^{-5}$
	ตับ	300	$2 \times 10^3$	$10^{-4}$	800	$3 \times 10^{-5}$
ไม่ละลาย	ทางเดินอาหาร ปอด		$7 \times 10^{-3}$	$10^{-6}$ $6 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-6}$
$^{232}\text{Th}$ ละลาย $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	กระดูก	0.04	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$ *	$2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-13}$ *
	ไต	0.3	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-12}$	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$
	ทั่วร่างกาย	0.3	$3 \times 10^{-4}$	$10^{-11}$	$9 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-12}$
	ตับ	0.7	$6 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$10^{-3}$	$2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-8}$
ไม่ละลาย	ปอด ทางเดินอาหาร		$10^{-3}$	$10^{-11}$ $2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-12}$ $7 \times 10^{-8}$
$^{234}\text{Th}$ ละลาย $\beta, \gamma$	ทางเดินอาหาร		$5 \times 10^{-4}$	$10^{-7}$	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-8}$
	กระดูก	4	1	$6 \times 10^{-8}$	0.5	$2 \times 10^{-8}$
	ไต	6	2	$9 \times 10^{-8}$	0.7	$3 \times 10^{-8}$
	ทั่วร่างกาย	20	8	$4 \times 10^{-7}$	3	$10^{-7}$
	ตับ	30	10	$5 \times 10^{-7}$	4	$2 \times 10^{-7}$
ไม่ละลาย	ทางเดินอาหาร ปอด		$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-8}$ $9 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-8}$ $3 \times 10^{-8}$

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นสูงสุดของทอเรียมที่ยอมให้รับได้ (ต่อ)

ไอโซโทป ทอเรียมและชนิด ของ การสลายตัว	อวัยวะเป้าหมาย	ค่าสูงสุด ที่ยอมให้ รับได้ทั่ว ร่างกาย ( $\mu\text{Ci}$ )	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้รับได้ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )			
			40 ชั่วโมง/สัปดาห์		168 ชั่วโมง/สัปดาห์	
			น้ำ	อากาศ	น้ำ	อากาศ
$^{90}\text{Th-Nat}$ ละลาย $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	กระดูก	0.01	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$ *	$10^{-5}$	$6 \times 10^{-13}$ *
	ไต	0.07	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-12}$	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$
	ทั่วร่างกาย	0.07	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-12}$	$7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$3 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-8}$	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$
	ตับ	0.3	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-12}$
ไม่ละลาย	ปอด			$4 \times 10^{-12}$		$10^{-12}$
	ทางเดินอาหาร		$3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-8}$	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$

\* ค่า  $\text{Th-232}$  และ  $\text{Th-nat}$  ถึงแม้จะได้จากการคำนวณและจากการทดลองในสัตว์ บางทีอาจจะมียังอันตรายเทียบเท่ากับพลูโทเนียม จากประสบการณ์ที่ผ่านมาทำให้เกิดข้อเสนอนี้ว่า อันตรายของทอเรียมที่แวดล้อมไปด้วยอุตสาหกรรมนั้น ไม่มากไปกว่าอันตรายของยูเรเนียมตามธรรมชาติ ดังนั้นควรจะต้องใช้ค่า MPC ที่กำหนดและยอมรับได้ในการหายใจเอา  $\text{Th-nat}$  และ  $\text{Th-232}$  มาพิจารณา คือ ค่า  $(\text{MPC})_a = 3 \times 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  สำหรับคนทำงาน 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ และ  $(\text{MPC})_a = 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  สำหรับคนทำงาน 168 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย