หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในบรรยากาศรอบ ๆ ตัวเรานั้น มีรังสีแผ่อยู่ตลอดเวลา ย่อมเป็นที่ทราบกันแล้วว่า มันคือรังสีคอสมิก และกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และจากการทดลองของระเบิดนิวเคลียร์ แต่ปริมาณของรังสีดังกล่าวนี้มีน้อยมากจนไม่ทำให้เกิดอันตราย ซึ่งสามารถตรวจได้ด้วยเครื่องมือสำหรับวัดรังสี เช่น ไกเกอร์มุลเลอร์เคาน์เตอร์ (Geiger Müller Counter) หรือ ซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ (Scintillation Counter) และพบว่าปริมาณรังสีที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามวันเวลาและสถานที่ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากกัมมันตรังสีที่มาจากแร่ที่อยู่ใต้ดินแต่ละแห่ง สภาพดินฟ้าอากาศ ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีวิทยา ตลอดจนความไวของเครื่องมือที่ใช้วัด

ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ นักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Marten Heinrich Klaproth เป็นผู้พบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ.1789 โดยพบจากแร่พิทช์เบล็นด์ (Pitchblende) ความจริงแร่ดังกล่าวนี้มีคนรู้จักกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1727 แต่ขณะนั้นยังไม่มีใครทราบว่ามีธาตุยูเรเนียมอยู่ในแร่ชนิดนี้ ต่อมาในปี ค.ศ.1841 E.Péligot ซึ่งเป็นนักเคมีชาวฝรั่งเศส ได้คนพบวิธีแยกเอาธาตุยูเรเนียมออกมาได้สำเร็จ ธาตุยูเรเนียมที่เป็นโลหะมีสีขาวคล้ายเงิน แต่ยังไม่เคยพบเป็นโลหะแท้ ๆ เหมือนทองคำ หรือทองแดงเลย ปกติจะเกิดร่วมอยู่กับธาตุอื่น ๆ เป็นสารประกอบเสมอ (1,2)

แหล่งแร่ยูเรเนียมแหล่งแรกที่เปิดทำเหมืองเพื่อจุดประสงค์เฉพาะจะผลิตธาตุเรเดียมเท่านั้น คือเหมือง Joachymov ในเชคโกสโลวาเกีย ซึ่งเป็นแหล่งที่มาดามคูรี (Madame Curie) ได้นำเอาแร่พิทช์เบล็นด์ (Pitchblende) มาสกัดเพื่อแยกเอาธาตุเรเดียมได้เป็นผลสำเร็จเมื่อปี ค.ศ.1898 นอกจากนี้ยังพบแร่ออทูไนท์ (Autunite) ในโปรตุเกส แร่ยูรานินไนท์ (Uraninite) ในอังกฤษ แร่คาร์โนไทท์ (Carnotite) ทางด้านตะวันตกของรัฐโคโลราโด และทางตะวันออกของรัฐยูทาห์ในสหรัฐอเมริกา (1)

ในปี ค.ศ.1913 ได้ค้นพบแหล่งแร่ยูเรเนียมที่ใหญ่และมีความสมบูรณ์มากที่ Shinkolobwe ใน Belgian Congo (Zaire) และในปี ค.ศ.1923 คองโกได้ครอบครองตลาดโลกของยูเรเนียมแทนสหรัฐอเมริกา ต่อมาในปี ค.ศ.1930 คานาดาก็ได้ค้นพบแหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีความสมบูรณ์มากที่ Great Bear Lake และในปี ค.ศ.1942 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มผลิตยูเรเนียมจากแร่ยูเรเนียม แต่ผลผลิตที่ได้ไม่เพียงพอกับความต้องการ จึงต้องสั่งซื้อจากคานาดาและเบลเยียนคองโก เนื่องจากสหรัฐอเมริกาต้องการยูเรเนียมเป็นจำนวนมากในการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ รวมทั้งพบวิธีการควบคุมขบวนการการเกิดพลังงานนิวเคลียร์ได้เป็นผลสำเร็จเป็นครั้งแรก ในปี ค.ศ.1942 การพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ในระยะแรก ๆ นั้น มีจุดประสงค์เพื่อประโยชน์ทางการทหารโดยตรง และเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมียูเรเนียมไว้อย่างเพียงพอ ด้วยเหตุนี้ในปี ค.ศ.1948 คณะกรรมาธิการพลังงานปรมาณูแห่งสหรัฐอเมริกาจึงได้หาวิธีการกระตุ้น (1,3) เพื่อให้มีการสำรวจหาแหล่งแร่ยูเรเนียมกันอย่างกว้างขวาง โดยให้รางวัลตอบแทนแก่ผู้สำรวจพบแหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีคุณภาพสูง ทั้งยังได้กำหนดราคามาตรฐานของแร่ยูเรเนียมไว้ด้วย โดยวิธีการดังกล่าวนี้เป็นผลให้สหรัฐอเมริกาสำรวจพบแหล่งแร่ยูเรเนียมใหญ่ ๆ เพิ่มขึ้นอีกมากมาย ทั้งในบริเวณที่ราบสูงโคโลราโด และบริเวณอื่น ๆ อีกด้วย จึงทำให้สหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำในการผลิตสินแร่ยูเรเนียมของโลกมาจนถึงปัจจุบันนี้ (1,3)

แร่ยูเรเนียมที่พบในประเทศไทย (1) มีหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณเหมืองดีบุก และวุลแฟรมนั้น ได้พบแหล่งแร่ยูเรเนียมเปอร์เซนต์ปานกลาง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดอยู่เป็นออกไซด์ร่วมกับแร่อื่น ๆ ได้แก่ ออกไซด์ของธาตุโคลัมเบียม (Cb) และธาตุแทนทาลัม (Ta) เช่น แร่ซามาสไกท์ (Samarskite) ซึ่งพบที่เหมืองตืนเป็ก จังหวัดพังงา ผลของการวิเคราะห์ พบว่า มี 1.3% ThO_2 และ 13.2% U_3O_8 และในเขตอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี ก็ได้พบแร่พริโอไรท์ (Priorite) ซึ่งเป็นแร่ยูเรเนียมเปอร์เซนต์ต่ำ (1–5% UO_2) และมีส่วนประกอบเหมือนแร่ยูเซนไนท์ (Euxenite) และโพลีเครส (Polycrase) สำหรับแร่ยูเรเนียมทุติยภูมิ ซึ่งเป็นแร่เปอร์เซนต์สูง คือ

แร่ทอร์เบอร์ไนท์ (Hydrous copper uranium phosphate) ซึ่งมีปริมาณยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8) สูงประมาณ 60% ได้สำรวจพบที่เหมืองยิบอินซอย ที่บ้านทุ่งโพธิ์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และที่บ้านขุนทองหลาง อำเภอนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี นอกจากนี้ก็ได้พบแร่ยูเรเนียมในหินทรายอายุเมโซโซอิค (Mesozoic) ที่บ้านหนองขาม อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น อย่างไรก็ตามแร่ยูเรเนียมชนิดต่าง ๆ ที่พบนั้น ยังมีปริมาณไม่มากพอที่จะเปิดการทำเหมืองได้ ความหวังที่เราจะพบแหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจนั้นก็มีอยู่บ้างในหินทรายเมโซโซอิค ซึ่งแม้ว่าแหล่งที่พบนั้นจะมีปริมาณน้อยก็ตาม แต่ก็อาจเป็นแนวทางที่จะพบแหล่งใหญ่ ๆ ได้ในบริเวณที่ราบสูงโคราชอีกต่อไป

ความสำคัญของยูเรเนียม ธาตุยูเรเนียมเริ่มมีบทบาทสำคัญในทางพลังงานปรมาณูอย่างแท้จริง เมื่อสหรัฐอเมริกาทดลองระเบิดปรมาณูได้สำเร็จเป็นครั้งแรก เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม ค.ศ.1945 ที่ Alamogordo รัฐนิวเม็กซิโก จะเห็นได้ว่าในสมัยก่อน ค.ศ.1942 นั้น นักวิทยาศาสตร์สนใจยูเรเนียมเพียงแต่จะแยกเอาเรเดียมออกมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง หรือนำมาใช้ผสมแก้วเพื่อทำให้เกิดสีในอุตสาหกรรมแก้วและเครื่องเคลือบเป็นต้น จนกระทั่งถึงปี ค.ศ.1942 จึงได้มีการแสดงถึงวิธีการควบคุมนิวเคลียร์ฟิสชัน (Nuclear Fission) วิวัฒนาการทางด้านพลังงานปรมาณูในช่วงแรกนั้น จะเห็นได้ว่ายูเรเนียมเท่านั้นที่มีความสำคัญที่สุดในด้านวัสดุเชื้อเพลิงปรมาณู ธาตุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูมีเพียง 3 ธาตุ คือ ยูเรเนียม-235 (U-235) พลูโตเนียม-239 (Pu-239) และยูเรเนียม-233 (U-233) ธาตุแรกคือยูเรเนียม-235 นั้นเป็นไอโซโทป (Isotope) ชนิดหนึ่งของธาตุยูเรเนียม ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนธาตุพลูโตเนียม-239 นั้น เป็นผลที่ได้มาจากการทำให้ยูเรเนียม-238 (U-238) ซึ่งเป็นไอโซโทปอีกชนิดหนึ่งของยูเรเนียม และเป็นเชื้อเพลิงปรมาณูให้กลายเป็นพลูโตเนียม-239 ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงปรมาณูโดยใช้วิธีอาบรังสีนิวตรอน (Neutron bombardment) และโดยวิธีเดียวกันนี้ ก็อาจทำให้ธอเรียม-232 (Th-232) ซึ่งไม่เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูให้กลายเป็นยูเรเนียม-233 ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงปรมาณู ผลผลิตไอโซโทปต่าง ๆ ที่เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูได้มาจากไอโซโทป ซึ่งไม่เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูด้วยกระบวนการดังกล่าวแล้ว เรียกว่า Breeding (2)

จากผลสำเร็จในการวิวัฒนาการเกี่ยวกับระเบิดปรมาณูดังกล่าวแล้ว ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความคิดที่จะนำเอาพลังงานปรมาณูไปใช้ประโยชน์ในทางสร้างสรรค์ จึงได้เริ่มตั้ง International Atomic Energy Agency (IAEA) ขึ้น เพื่อการวิวัฒนาการเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู หลังจากนั้นกลุ่มประเทศทางภาคพื้นยุโรป อันประกอบด้วย เบลเยี่ยม, ฝรั่งเศส, เยอรมันตะวันตก, ลักเซมเบอร์ก และเนเธอร์แลนด์ ได้ก่อตั้ง The European Atomic Energy Community (Euratom) ขึ้นภายใต้คำว่า "ปรมาณูเพื่อสันติ" มีโครงการเพื่อการศึกษาค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทั่วไป รวมทั้งแผนงานในการสร้าง Power Reactors แบบต่าง ๆ การศึกษาค้นคว้าดังกล่าวได้ดำเนินมาตลอดและรุดหน้าเป็นลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อถึงปี ค.ศ.1960 ประเทศต่าง ๆ ก็มีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactors) ถึง 442 เครื่อง (1) ในจำนวนนี้สหรัฐอเมริกามี 286 เครื่อง อังกฤษมี 39 เครื่อง รัสเซียมี 39 เครื่อง ฝรั่งเศสมี 25 เครื่อง เยอรมันตะวันตกมี 18 เครื่อง อิตาลีมี 14 เครื่อง ญี่ปุ่นมี 11 เครื่อง และคานาดามี 10 เครื่อง (1) ปัจจุบันนี้การศึกษาค้นคว้ายังรุดหน้าต่อไปเรื่อย ๆ

ในด้านโรงไฟฟ้าปรมาณู โดยเฉพาะอย่างยิ่งสหรัฐอเมริกาซึ่งถือว่าเป็นผู้นำทางด้านพลังงานปรมาณูประเทศหนึ่ง ได้สร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงเป็นโรงแรกที่เมือง Shippingport รัฐเพนซิลเวเนีย และได้เปิดดำเนินการในปี ค.ศ.1957 ต่อมาในปี ค.ศ.1964 ก็มีโรงไฟฟ้าปรมาณูที่ใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงถึง 13 โรง สำหรับโรงไฟฟ้าปรมาณูที่ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ Thorium Cycle Reactor ที่เรียกว่า High temperature gas cooled reactor (HTGR) นั้น ได้เปิดดำเนินการครั้งแรกในปี ค.ศ.1966 ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Peach Bottom รัฐเพนซิลเวเนีย และอีกโรงหนึ่งอยู่ใกล้ ๆ เมือง Platteville รัฐโคโลราโด ซึ่งเปิดดำเนินการเมื่อปี ค.ศ.1973 ส่วนอีก 4 โรงกำลังก่อสร้างอยู่ สำหรับประเทศไทยได้ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบวิจัย (Research Reactor) เครื่องแรก ณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติที่บางเขน เมื่อ พ.ศ.2504 โดยมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Thai Research Reactor-1

(TRR-1) นอกจากนี้ก็ยังมีโครงการที่จะสร้างโรงไฟฟ้าปรมาณูอีกด้วย (1)

ความต้องการในด้านพลังงานของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกนับวันยิ่งสูงขึ้น ในขณะเดียวกัน แหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติเช่น ถ่านหินและน้ำมัน มีปริมาณลดลงตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ยูเรเนียมและธอเรียมมีบทบาทสำคัญยิ่งในด้านวัสดุเชื้อเพลิงปรมาณู ที่จะนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงธรรมชาติดังกล่าวแล้ว ดังนั้นจึงนับได้ว่าแร่ดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อประเทศที่กำลังพัฒนา โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทย

<u>คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางนิวเคลียร์ ของธาตุยูเรเนียม</u> (2)

<u>คุณสมบัติทางกายภาพ</u> (Physical properties)

ยูเรเนียมเป็นธาตุที่เป็นโลหะมีแวววาวเหมือนเหล็กเมื่อถูกตัด และยิ่งจะมีความแวววาวมากขึ้นเมื่อนำมาขัดที่ผิว แต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง ความแวววาวจะลดลง ยูเรเนียมเป็นโลหะที่หนักกว่าตะกั่ว 80 เปอร์เซนต์ มีความหนาแน่น 19.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเหนียวซึ่งสามารถรีดเป็นเส้นได้ ยูเรเนียมเป็นโลหะที่สามารถเกิดได้ 3 รูป คือ รูปแอลฟา (ต้องเผาที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส) รูปเบตา (ต้องเผาที่อุณหภูมิ 660 – 770 องศาเซลเซียส) และรูปแกมมา (ต้องเผาที่อุณหภูมิ 770 – 1130 องศาเซลเซียส) ยูเรเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1130 องศาเซลเซียส

<u>คุณสมบัติทางเคมี</u> (Chemical properties)

ธาตุยูเรเนียมเป็นโลหะคล้ายเหล็ก คือสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายมาก และทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับอากาศเมื่อมีความชื้นจะเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น ยูเรเนียมมีออกซิเดชันสเตท (Oxidation state) ได้ 4 ค่า คือ +3, +4, +5, และ +6 ยูเรเนียมอิออนที่อยู่ในสารละลายสามารถเขียนได้เป็น U^{3+}, U^{4+}, UO_2^{1+} และ UO_2^{2+} ที่เป็น U^{5+} ได้แก่ UF_5, UCl_5 ซึ่งเป็นของแข็ง UO เมื่อดูลักษณะทั่ว ๆ ไปจะเหมือนโลหะยูเรเนียม U^{4+} และ U^{6+} เป็นตัวที่มีความสำคัญที่สุด ดังนั้นความสำคัญทางเคมีของยูเรเนียมอยู่ที่ออกไซด์ 2 ชนิด คือ UO_2 และ UO_3 ในเมื่อ UO_2 เป็นออกไซด์สีน้ำตาล แต่ UO_3 เป็นออกไซด์สีส้ม ซึ่งเตรียมได้จากการเผาให้สลายตัวของยูเรนีลไนเตรตที่

อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แต่ UO_2 ได้จากการรีดิวส์ UO_3 ด้วยกาซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ออกไซด์ที่ใช้ในพลังงานปรมาณู คือ U_3O_8 ซึ่งเป็นออกไซด์สีดำ เกิดจากการนำออกไซด์ของยูเรเนียมตัวใดตัวหนึ่งมาเผา (ignite) ในอากาศที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ออกไซด์ทุกตัวที่กล่าวมานี้ละลายได้ง่ายในกรดไนตริก แล้วจะได้สารละลายยูเรนิลไนเตรต

เฮไลด์ของยูเรเนียมที่นับว่าสำคัญได้แก่ UF_6 ซึ่งภายใต้สภาวะปกติจะเป็นของแข็งสีขาว และมีความหนาแน่นสูง อาจจะถูกทำให้ระเหิดหรือกลั่นได้ UF_6 ที่มีสถานะเป็นกาซถือว่าเป็นกาซสมบูรณ์แบบ เป็นสารที่สามารถเติมฟลูออรีนอย่างแรงให้กับธาตุอื่น โดยที่ตัวมันเองนั้นเป็นพิษและมีฤทธิ์กัดสูง เพราะมันไวต่อความชื้น ซึ่งจะต้องคิดหาเทคนิคพิเศษมาใช้ป้องกัน

โลหะยูเรเนียมทำปฏิกิริยากับกาซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้เกิดเป็น UH_3 ซึ่งจะสลายตัวต่อไป ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเป็น 436 องศาเซลเซียสที่ 1 บรรยากาศ สารดังกล่าวเมื่อสลายตัวแล้วจะได้ผงยูเรเนียมและกาซไฮโดรเจน สารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์ของยูเรเนียมที่ควรรู้จัก ได้แก่ UC, UC_2, UN, U_2N_3และ UN_2

<u>คุณสมบัติทางนิวเคลียร์</u> (Nuclear properties)

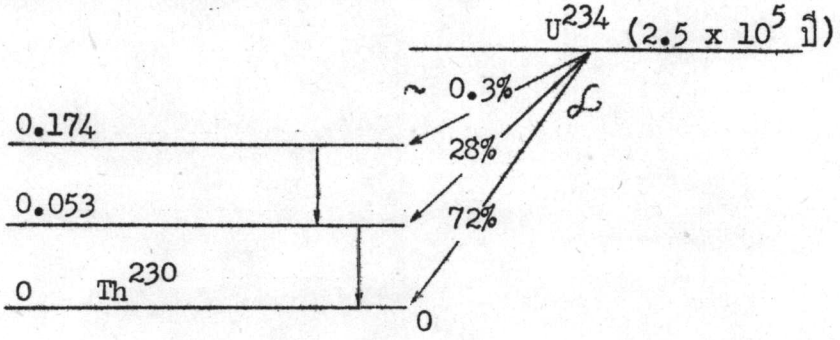
ในปัจจุบันนี้ความสนใจยูเรเนียมมิได้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีธรรมดาของมันเลย แต่จะอยู่ที่คุณสมบัติแปลก ๆ ของนิวเคลียสของมัน เนื่องจากยูเรเนียมเป็นธาตุที่นำไปสู่การค้นพบกัมมันตภาพรังสี ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของนิวเคลียสของอะตอมเอง เมื่อได้ศึกษาเรื่องกัมมันตภาพรังสีต่อไปก็สามารถตั้งสมมุติฐานของนิวเคลียสของอะตอมขึ้นมา และนำไปสู่ความรู้ทางด้านโครงสร้างของนิวเคลียส

เบเคอเรลเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบปรากฏการณ์ของกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากธาตุยูเรเนียมและสารประกอบของมัน เขาได้เฝ้าสังเกตการเรืองแสงหรือการส่งแสงเรืองออกมาจากสาร ภายหลังจากที่เอาไปรับแสงที่มีความเข้มสูง และเขาได้พบว่าเกลือของยูเรเนียมบางตัวก็จะมีคุณสมบัติของการเรืองแสงได้เช่นเดียวกัน เบเคอเรลยังพบว่ารังสี

ที่ออกจากเกลือของยูเรเนียมสามารถผ่านกระดาษสีดำที่หอฟิล์มถ่ายรูปไว้ ทำให้ฟิล์มถ่ายรูปมีลักษณะคล้ายถูกแสงสว่าง ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นได้เสมอ แม้ว่าเกลือของยูเรเนียมนั้นจะถูกทิ้งไว้เป็นเวลานาน ในที่สุดเขาได้แสดงให้เห็นว่า รังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาเหล่านี้คือคุณสมบัติของยูเรเนียมเอง ไม่เกี่ยวกับสารประกอบที่นำมาทดลองหรือไม่จำเป็นต้องให้ถูกแสงสว่าง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "การเกิดกัมมันตภาพรังสี"

แผนภูมิแสดงการสลายตัวของธาตุยูเรเนียม (4)

U^{234} มีอยู่ในธรรมชาติ 0.0057% มีครึ่งชีวิต ($t_{\frac{1}{2}}$) 2.48×10^5 ปี การสลายตัวของ U^{234} เป็นดังนี้

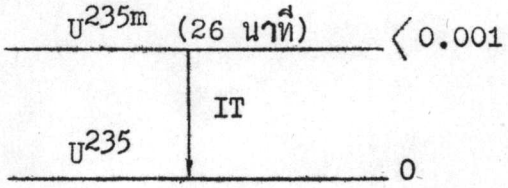


U^{234} มีค่า absorption cross section 97 ± 5 barns และมีค่า neutron activation cross section 90 ± 30 barns

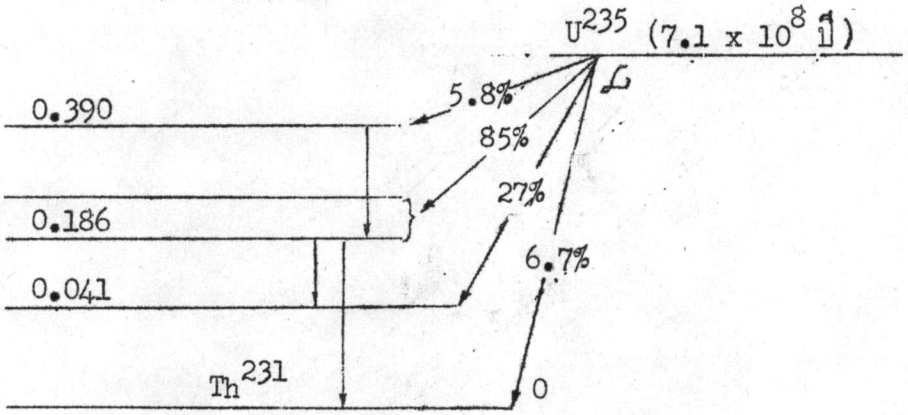
คือ $U^{234}(n, \gamma)\ U^{235m}$ $t_{\frac{1}{2}}$ 26.5 นาที

$U^{234}(n, \gamma)\ U^{235}$ $t_{\frac{1}{2}}$ 7.1×10^8 ปี

U^{235m} มีการสลายตัวดังนี้



U^{235} มีอยู่ในธรรมชาติ 0.714% มีครึ่งชีวิต ($t_{\frac{1}{2}}$) 7.1×10^8 ปี และการสลายตัวของ U^{235} เป็นดังนี้



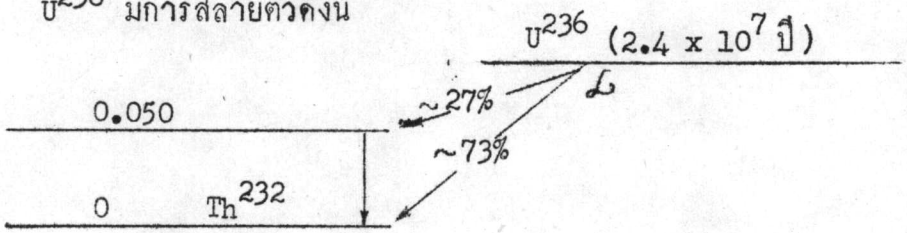
U^{235} มีค่า absorption cross section 694 ± 8 barns

มีค่า neutron activation cross section 107 ± 5 barns

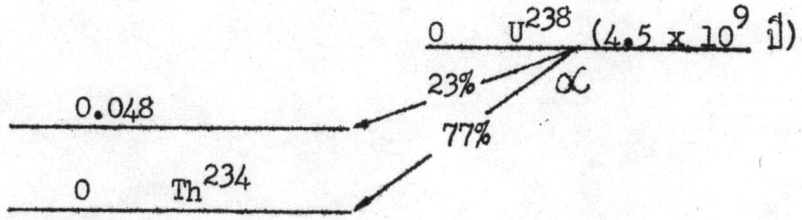
มีค่า fission cross section 582 ± 6 barns

$U^{235}(n, \gamma)\ U^{236}$ $t_{\frac{1}{2}}$ 2.39×10^7 ปี

U^{236} มีการสลายตัวดังนี้



U^{238} มีอยู่ในธรรมชาติ 99.3% มีครึ่งชีวิต ($t_{\frac{1}{2}}$) 4.51×10^9 ปี การสลายตัวของ U^{238} เป็นดังนี้



U^{238} มีค่า absorption cross section 2.71 ± 0.02 barns

มีค่า neutron activation cross section 2.74 ± 0.06 barns

มีค่า fission cross section 0.5 millibarn

$$U^{238}(n,\gamma)\ U^{239} \xrightarrow[23.54\ m]{\beta^-} Np^{239}$$

U^{239} จะสลายตัวให้ Np^{239} โดยมีครึ่งชีวิต ($t_{\frac{1}{2}}$) 23.54 นาที และ Np^{239} สลายตัวต่อไปด้วยครึ่งชีวิต ($t_{\frac{1}{2}}$) 2.3 วัน ซึ่งสามารถนำไปใช้หาปริมาณของ U^{239} ได้ การสลายตัวของ Np^{239} ผลที่ได้คือ Pu^{239}