บทที่ 2

ยูเรเนียม

2.1 วัสดุนิวเคลียร์

วัสดุนิวเคลียร์ (Nuclear materials) หมายถึงวัสดุที่เป็นแหล่งต้นกำเนิดของพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. วัสดุฟิสไซล์ (Fissile Materials) คือวัสดุที่อะตอมของธาตุจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Fission) เมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอนช้า (Thermal neutron) แล้วให้พลังงานออกมาพร้อมทั้งมีจำนวนนิวตรอนเกิดเพิ่มขึ้นอีกด้วย ธาตุพวกนี้ได้แก่ ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu ซึ่งคุณสมบัติของธาตุพวกนี้มีแสดงไว้ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของธาตุฟิสไซล์[10]

Property	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U
Cross section, 2200 m/s			
Absorption, σ_a	680.8	1011.3	578.8
Fission, σ_f	582.2	742.5	531.1
Neutrons produced			
Per fission, ν	2.418	2.871	2.492
Per neutron absorbed, η			
2200 m/s	2.068	2.108	2.287
Typical light-water reactor†	1.96	1.86	2.2

†All entries except this row from BNL-325, 3d ed., vol. 1, June 1973.

ข. วัสดุเฟอร์ไทล์ (Fertile Materials) คือวัสดุที่อะตอมของธาตุจะดูดกลืน (Absorb) นิวตรอน เมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) แล้วสลายตัวกลายเป็นวัสดุฟิสไซล์ ธาตุพวกนี้ได้แก่ ^{234}U, ^{238}U, ^{232}Th, ^{240}Pu ดังสมการ

$$^{238}U(n_f, \gamma)\ ^{239}U \xrightarrow[23.5\ m]{\beta^-} {}^{239}Np \xrightarrow[2.35\ d]{\beta^-} {}^{239}Pu$$

วัสดุนิวเคลียร์ในธรรมชาติที่เป็นวัสดุฟิสไซล์นั้นมีเพียงธาตุเดียว คือ ^{235}U ส่วนที่เป็นวัสดุเฟอร์ไทล์ คือธาตุ ^{234}U, ^{238}U และ ^{232}Th

ดังนั้นแร่วัสดุนิวเคลียร์จึงหมายถึง

1. แร่ซึ่งมีธาตุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้
2. แร่ซึ่งมีธาตุกัมมันตรังสีอื่น ๆ เช่น ธาตุเรเดียม เป็นต้น
3. แร่ซึ่งมีธาตุที่จะนำไปใช้เป็นประโยชน์ในทางพลังงานนิวเคลียร์ได้ เช่น ธาตุเบอรีลเลียม (Beryllium) ซึ่งนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น

แร่วัสดุนิวเคลียร์ในธรรมชาตินั้น ได้แก่ แร่ยูเรเนียม และแร่ที่มีธาตุยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งในทางธรณีวิทยาได้แบ่งแร่วัสดุนิวเคลียร์เป็น 2 ตระกูลใหญ่ คือ ตระกูลยูเรเนียมและตระกูลทอเรียม โดยต่างก็เป็นวัสดุดิบนิวเคลียร์หรือวัสดุต้นกำลังในทางพลังงานนิวเคลียร์

สำหรับประเทศไทยของเรานั้น ในด้านความหวังที่จะพบแหล่งแร่วัสดุนิวเคลียร์นั้นมิใช่เป็นสิ่งเลื่อนลอย เราได้พบแร่วัสดุนิวเคลียร์แล้วไม่น้อยกว่า 5 ชนิด[3] และที่สำรวจพบว่ามีปริมาณมากที่สุดคือ แร่โมนาไซต์ ส่วนแร่ยูเรเนียมนั้นได้สำรวจพบแต่เพียงแหล่งแร่ขนาดเล็กเท่านั้น ยังไม่พบแหล่งที่มีปริมาณมากและมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

2.2 ประวัติ[3,11]

ธาตุยูเรเนียมถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักเคมีวิเคราะห์ชาวเยอรมันชื่อ Marten H. Klaproth เมื่อปี ค.ศ. 1789 โดยใช้แร่พิทช์เบลนด์ (Pitchblende) และ Joachimsthal และ Johanngeorgenstadt ในเช็คโกสโลวาเกีย มาทำการสกัดโดยใช้กรดไนตริกละลายออกมา แล้วตกตะกอนด้วยโปแตส (Potash) จะได้เป็นผงสีดำที่มีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างจากธาตุอื่น ๆ ที่รู้จัก จึงคิดว่าเป็นธาตุใหม่ และประกาศผลของการค้นพบต่อ Royal Prussian Academy of Science เมื่อ 24 กันยายน ค.ศ. 1789 โดยตั้งชื่อธาตุใหม่นี้ว่า Uranit ตามชื่อดาวนพเคราะห์ Uranus ที่เพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1781 ก่อนหน้านั้น และต่อมาเขาจึงเปลี่ยนชื่อเป็น Uranium ต่อมาในปี ค.ศ. 1842 นักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ E. Péligot จึงได้ค้นพบวิธีแยกเอาโลหะยูเรเนียมออกมาได้สำเร็จ เป็นโลหะสีขาวแกมเงิน โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับเตตราคลอไรด์ (Tetrachloride) แล้วเผากับโปแทสเซียม (Potassium) และในปี ค.ศ. 1896 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Henry Becquerel ได้พบว่า

ธาตุยูเรเนียมนั้นจะให้รังสีชนิดหนึ่งซึ่งมีคลื่นรังสีแม่เหล็กความถี่สั้นและมองไม่เห็นด้วยตาออกมาได้ ซึ่งในปัจจุบันเรียกว่า กัมมันตรังสี จนถึงปี ค.ศ. 1902 Ernest Rutherford กับ Frederick Soddy ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Theory of Radioactive Disintegration)

2.3 <u>ความสำคัญของยูเรเนียม</u> (1,3)

ยูเรเนียมเริ่มมีบทบาทสำคัญในทางพลังงานนิวเคลียร์อย่างแท้จริง เมื่อสหรัฐอเมริกาทดลองระเบิดนิวเคลียร์สำเร็จเป็นครั้งแรกในวันที่ 16 กรกฎาคม ค.ศ. 1945 ที่ Alamogordo รัฐนิวแมกซิโก ก่อนหน้านี้นักวิทยาศาสตร์สนใจยูเรเนียมเพียงแต่จะแยกเอาเรเดียมออกมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง หรือนำมาใช้ผสมแก้วเพื่อทำให้เกิดสีในอุตสาหกรรมแก้วและเครื่องเคลือบเป็นต้น จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1942 จึงได้มีการแสดงถึงวิธีการควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันของนิวเคลียส (Nuclear fission) วิวัฒนาการด้านพลังงานนิวเคลียร์ในช่วงแรกนั้น จะเห็นได้ว่ายูเรเนียมเท่านั้นที่มีความสำคัญที่สุดในด้านวัสดุต้นกำลัง จนกระทั่งมาถึงปี ค.ศ. 1946 ทอเรียมจึงเริ่มมีความสำคัญเมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบกระบวนการที่จะเปลี่ยน ^{233}U ซึ่งสามารถจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้เช่นกัน

จากผลสำเร็จในการวิวัฒนาการเกี่ยวกับระเบิดนิวเคลียร์ดังกล่าวมาแล้ว ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความคิดที่จะนำเอาพลังงานนิวเคลียร์ไปใช้ประโยชน์ในทางสร้างสรรค์ โดยได้เริ่มก่อตั้งองค์การพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) หรือ IAEA ขึ้น เพื่อการวิวัฒนาการเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) หลังจากนั้นกลุ่มประเทศทางภาคพื้นยุโรป อันประกอบด้วย เบลเยี่ยม ฝรั่งเศส เยอรมันตะวันตก เนเธอร์แลนด์ และลักเซมเบอร์ก ได้ก่อตั้ง The European Atomic Energy Community (Euratom) ขึ้นภายใต้คำว่า "ปรมาณูเพื่อสันติ" มีโครงการค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทั่วโลก รวมทั้งแผนงานในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์กำลัง (Power reactor) แบบต่าง ๆ การศึกษาค้นคว้าดังกล่าวได้ดำเนินมาตลอดและรุดหน้าเป็นลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อถึงปี ค.ศ. 1960 ประเทศต่าง ๆ ก็มีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์อยู่ถึง 442 เครื่อง โดยในจำนวนนี้สหรัฐอเมริกามี 286 เครื่อง อังกฤษมี 39 เครื่อง รัสเซียมี 39 เครื่อง ฝรั่งเศสมี 25 เครื่อง เยอรมันตะวันตกมี 18 เครื่อง อิตาลีมี 14 เครื่อง ญี่ปุ่นมี 11 เครื่อง และแคนาดามี 10 เครื่อง สำหรับในปัจจุบันนี้การศึกษาค้นคว้าก็ยังคงรุดหน้าต่อไป

ในด้านโรงไฟฟ้านิว เคลียร์ โดย เฉพาะอย่างยิ่งประ เทศสหรัฐอ เมริกาซึ่งถือว่า เป็นผู้นำทางด้านพลังงานนิว เคลียร์ประ เทศหนึ่ง ได้สร้างโรงไฟฟ้านิว เคลียร์ขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ยู เร เนียม เป็น เชื้อ เพลิงขึ้น เป็นแห่งแรกที่ Shippingport รัฐ เพนซิล เว เนีย และได้ เปิดดำ เนินการในปี ค.ศ. 1957 เมื่อถึงปี ค.ศ. 1964 ก็มีโรงไฟฟ้านิว เคลียร์ที่ใช้ยู เร เนียม เป็น เชื้อ เพลิงถึง 13 โรง สำหรับโรงไฟฟ้านิว เคลียร์ที่ติดตั้ง เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์แบบ Thorium-cycle Reactor ที่เรียกว่า High-temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) นั้น ได้ เปิดดำ เนินการครั้งแรกในปี ค.ศ. 1966 ตั้งอยู่ที่ Peach Bottom รัฐ เพนซิล เว เนีย

สำหรับประ เทศไทยได้ติดตั้ง เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์แบบวิจัย (Research reactor) เครื่องแรก ณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส.) ที่บาง เขน เมื่อปี พ.ศ. 2504 โดยมีชื่อว่า Thai Research Reactor-1 (TRR-1)

2.4 ต้นกำ เนิดของแร่ยู เร เนียม

โลหะยู เร เนียม เป็นธาตุที่ไวต่อปฏิกิริยา เคมีมาก จึงไม่พบในลักษณะ เป็นธาตุในธรรมชาติ แต่จะ เกิดรวมอยู่กับธาตุอื่น ๆ เป็นสารประกอบ มีการคาดคะ เนปริมาณของยู เร เนียมว่ามีบนเปลือกโลกประมาณร้อยละ 4×10^{-4} โดยมีในน้ำมหาสมุทร 0.3×10^{-6} ถึง 3.70×10^{-6} กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิ เมตร ในน้ำทะ เลสาป 3×10^{-8} ถึง $n \times 10^{-4}$ กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิ เมตร (n = เลขจำนวน เต็ม) และในน้ำแม่น้ำ 3×10^{-8} ถึง $nx10^{-5}$ กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิ เมตร หรือค่า เฉลี่ยในแหล่งน้ำต่าง ๆ เท่ากับ $(1.8\text{-}2)x10^{-6}$, 1×10^{-6} และ 1×10^{-6} กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิ เมตร ตามลำดับ[12] ซึ่งนับว่ามีปริมาณมากกว่าทองหรือ เงิน แต่จะมีปริมาณน้อยกว่าหรือพอ ๆ กับโคบอลต์ (Cobalt) โมลิบดีนัม (Molybdenum) และตะกั่ว

ยู เร เนียมทุกชนิดมีต้นกำ เนิดมาจากหิน เหลว (Molten magmas) ซึ่งถูกดันออกมาให้อยู่ภายใน เปลือกโลก เรียกว่า หินไหล (Intrusive rock) หรือ เมื่อไผล่ขึ้นมาบนผิวโลกแล้วแข็งตัว เรียกว่า หินแลบ (Extrusive rock) ยู เร เนียมในหิน เหล่านี้จะตกผลึก เมื่อ เย็นตัวลง ในหินอัคนีอาจมียู เร เนียมปนอยู่ เป็นจำนวนน้อยในลักษณะแร่ประกอบหิน เช่น แร่ไมนาไซต์ เซอร์คอน (Zircon) และอะ เพไทต์ (Apatite) หรืออาจมียู เร เนียมอยู่ในรูปของฟิล์มบาง (Thin film) เคลือบบนผลึกแร่ ซึ่ง เป็นผล เนื่องมาจากการสะสมตัวของหิน เหลวในขั้นล่าสุด (Late stage) เช่น แร่ เพกมาไทต์ (Pegmatite)

2.5 ชนิดของยูเรเนียม

ยูเรเนียมมีปนอยู่ในแร่ต่าง ๆ ประมาณ 150 ชนิด[13] ซึ่งมีอยู่เพียงไม่กี่ชนิดที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ (มียูเรเนียมปนอยู่มากกว่าร้อยละ 0.1) ดังแสดงไว้ในตาราง 2.2

ตามลักษณะการกำเนิดทางธรณีวิทยาแบ่งแร่ยูเรเนียมออกเป็น 2 พวกใหญ่[3,14] คือ

1. แร่ยูเรเนียมปฐมภูมิ (Primary Uranium Minerals) คือแร่ยูเรเนียมที่มี U^{+4} โดยเกิดขึ้นมาจากภายในโลกพร้อมกับหินอัคนี ในสภาพที่หลอมเหลวโดยอิกเนียสแอคชัน (Igneous action) เมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัวมีลักษณะเป็นสายแร่ แร่พวกนี้จะมีสีค่อนข้างแก่ เช่น สีดำ น้ำตาลดำ น้ำตาล และน้ำตาลเหลือง เป็นต้น มีความถ่วงจำเพาะ 4 - 10 แล้วแต่มลทิน

ตาราง 2.2 แร่ยูเรเนียมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญพร้อมทั้งส่วนประกอบของแร่[13]

Ore	*Composition*	*Uranium content, %*	*Typical occurrence*
Uraninite	UO_{2+x}	45–85	Blind River (Canada)
Brannerite	$(U, Ca, Fe, Th, Y)_3 Ti_5 O_{16}$	40	Blind River (Canada)
Davidite	$(U, Fe, Ce)(Ti, Fe, V, Cr)_3 (O, OH)_7$	~10	Rum Jungle (Australia)
Autunite	$CaO \cdot 2\,UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8\text{–}12\,H_2O$	50	France
Carnotite	$K_2O \cdot 2\,UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 3\,H_2O$		Colorado, Utah (USA)
Uranophane	$Ca(UO_2)_2 Si_2O_7 \cdot 6\,H_2O$	57	Congo
Coffinite	$U(SiO_4)_{1-x}OH_{4x}$		Colorado

ที่ปนอยู่ในแร่ เช่น แร่ยูรานินไนต์ (Uraninite) มี U_3O_8 ประมาณ 65 - 85% แร่พิทช์เบลนด์ มี U_3O_8 ประมาณ 50 - 80% แร่คอฟฟินไนต์ (Coffinite) มี U_3O_8 ประมาณ 70% แร่ซามาร์-สไกต์มี U_3O_8 ประมาณ 27% และแร่เบตาไฟต์ (Betafite) มี U_3O_8 ประมาณ 27%

2. แร่ยูเรเนียมทุติยภูมิ (Secondary Uranium Minerals) คือแร่ที่มี U^{+6} โดยกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวของพวกแร่ปฐมภูมิ โดยวิธีการผุพังตามธรรมชาติและน้ำใต้ดิน รวมทั้งการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดเป็นแร่ยูเรเนียมชนิดใหม่ ซึ่งอาจจะเกิดอยู่ ณ ที่เดิมหรืออาจจะถูกพัดพาไปในลักษณะที่เป็นของเหลวรวมกับธาตุอื่น ๆ แล้วตกตะกอนเป็นแร่ยูเรเนียม ดังนั้นแร่พวกนี้จึงมีมากมาย มีสีสด เช่น สีเหลือง เขียวและส้ม มักจะพบ

เกิดอยู่ตื้น ๆ หรือบนผิวดินมีลักษณะ เป็นผงละ เอียด เคลือบผิวหน้าของหินหรือ เม็ดทราย หรือตามรอยแตกในหินต่าง ๆ บางครั้งจะ เกิดรวมกัน เป็นหย่อม ๆ หรือ เป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนกัน แร่พวกนี้ส่วนมากจะมีความ เข้มข้นของยู เร เนียมปนอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าแร่ยูรานิไนต์หรือแร่พิทช์ เบลนด์ อย่างไรก็ตามยังมีความสำคัญที่จะ เป็นตัวนำให้พบว่า เมื่อพบแร่พวกนี้แล้วควรจะคาดคะ เนว่า แหล่งแร่ยู เร เนียมปฐมภูมิควรจะอยู่ที่ระดับลึกลงไป ซึ่งตัวอย่างของแร่พวกนี้มีหลายกลุ่ม คือ

ก. แร่ยู เรนิลวานา เดต (Uranyl vanadate) คือแร่ที่มีวานา เดียมที่ถูกออกซิ-ไดซ์ (Oxidized vanadiferous ores) เป็นส่วนประกอบ จะมี U_3O_8 ประมาณ 50 - 55% เช่น แร่คาร์โนไทต์ (Carnotite) และทยูยามูไนต์ (Tyuyamunite)

ข. แร่ยู เรนิลฟอส เฟต (Uranyl phosphate) คือแร่ที่มีสันฐานแบบ เตรตา โกนัล (Tretagonal system) และมี เกิดในหินแม่ที่มีปริมาณฟอส เฟตสูง มี U_3O_8 ประมาณ 60 - 63% เช่น แร่ออทูไนต์ (Autunite) ทอร์ เบอร์ไนต์ (Torbernite) และซาลีไอต์ (Saleite)

ค. แร่ยู เรนิลซิลิ เกต (Uranyl silicate) คือแร่ที่มีซิลิ เกต เป็นองค์ประกอบสำคัญ มี U_3O_8 ประมาณ 65% เช่น แร่ยู เรโน เฟน (Uranophane)

ง. แร่ยู เรนิลคาร์บอ เนต (Uranyl carbonate) คือแร่ที่มีคาร์บอ เนต เป็นองค์ประกอบสำคัญ และมีสันฐานแบบออโธรอมบิก (Orthorhombic system) มี U_3O_8 ประมาณ 30% เช่น แร่สโคร เอกคิน เจอไรต์ (Schroeckingerite)

แร่ยู เร เนียมอาจแบ่งตามองค์ประกอบทาง เคมีได้ เป็น 5 ชนิด[15] คือ

1. ชนิดออกไซด์อย่างง่าย (Simple Oxide Type) คือแร่ชนิดที่มียู เร เนียมไดออก-ไซด์ (Uranium dioxide) (UO_2) และยู เร เนียมไตรออกไซด์ (Uranium trioxide) (UO_3) ผสมกันอยู่ เป็น U_3O_8 ซึ่งจะมีอยู่ประมาณ 60 - 90% เช่น แร่ยูรานิไนต์และแร่พิทช์ เบลนด์

2. ชนิดซิลิ เกตอย่างง่าย (Simple Silicate Type) คือแร่ชนิดที่มีซิลิ เกตอย่างง่าย (SiO_4) เป็นองค์ประกอบสำคัญ เช่น แร่คอฟฟิไนต์ $\left[U(SiO_4)_{(1-x)} (OH)_{4x} \right]$ (เมื่อ $x < 1$) ซึ่งมี U_3O_8 ประมาณ 72% และแร่ยู เรโนไทไรต์ (Uranothorite) $\left[Th_{(1-x)} U_x SiO_4 \right]$ ซึ่งมี U_3O_8 ประมาณ 10%

3. ชนิดออกไซด์ทวีคูณ (Multiple Oxide Type) คือแร่ที่มีองค์ประกอบ เป็น $A_mB_nO_x$ เมื่อ m:n เป็น 1:1 ถึง 1:2 และ A คือแรร์ เอิร์ท ยู เร เนียม ทอ เรียม แคล เซียม

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(Calcium) เหล็ก (Ferrous iron) แมงกานีส (Manganese) เซอร์คอน ส่วน B คือโคลัมเบียม (Columbium) แทนทาลัม (Tantalum) ไทเทเนียม (Titanium) เหล็ก (Ferric iron) ตีบุก ทังสะเตน (Tungsten) และเซอร์โคเนียม (Zirconium) แร่ชนิดนี้จะมี U_3O_8 ประมาณ < 1 ถึง 50% และมีอยู่ประมาณ 20 ชนิด

4. ชนิดออกไซด์ปนน้ำ (Hydrated Oxide Type) คือแร่ที่มีออกไซด์ของยูเรเนียมและน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ เป็นแร่ทุติยภูมิที่แปรเปลี่ยนมาจากพวกแร่ปฐมภูมิ เช่น แร่กัมไมต์ (Gummite) ($UO_3.nH_2O$) และคูไรต์ (Curite) ($2PbO.sUO_3.4H_2O$) เป็นต้น

5. ชนิดออกไซด์ปนเกลือยูเรเนียม (Hydrated Uranyl Salt Type) คือแร่ที่มีองค์ประกอบเป็นน้ำปนอยู่กับยูเรเนียมที่เป็น ยูเรเนท (Uranate) และยูเรนิล (Uranyl) เช่น แร่คาร์โนไทต์ ($K_2O.2UO_3.V_2O_5.3H_2O$) และออทูไนต์ ($CaO.2UO_3.P_2O_5.8H_2O$) เป็นต้น

แร่ยูเรเนียมในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มของออกไซด์ปนน้ำ ยูเรเนทและยูเรนิล นอกจากนี้อาจแบ่งแร่ยูเรเนียมตามกระบวนการทางโลหะวิทยาได้เป็น 5 กลุ่ม[15] คือ

1. กลุ่มที่มีเตตระวาเลนท์ยูเรเนียม (Tetravalent uranium) (U^{+4}) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งแร่ยูเรเนียมในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปนี้ เช่น แร่พิทช์เพลนด์

2. กลุ่มที่มีเฮกซะวาเลนท์ยูเรเนียม (Hexavalent uranium) (U^{+6}) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งแร่กลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแหล่งกำเนิดของธาตุยูเรเนียม เช่นแร่คาร์โนไทต์ ออทูไนต์ และยูเรไนเฟน

3. กลุ่มที่มีความทนทานต่อการละลายทางเคมีที่เรียกว่า "Refractory Uranium Minerals" ต้องอาศัยปฏิกิริยารุนแรง จึงจะสามารถย่อยสลายแร่ได้ ซึ่งเป็นพวกแร่ชนิดออกไซด์ทวิคูณ เช่น แร่ตระกูลโคลัมไบต์-แทนทาไลต์ แร่ไมนาไซต์ แร่ทอไรต์ และแร่ธอเรียนไนต์ (Thorianite)

4. กลุ่มที่มียูเรเนียมอยู่ปนกับคาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์

5. กลุ่มแร่ฟอสเฟตที่มียูเรเนียมปนอยู่เล็กน้อย เช่น แร่อะเพไทต์

6. กลุ่มที่มีวานาเดียมปนอยู่กับยูเรเนียม เช่น แร่คาร์โนไทต์

แร่ยูเรเนียมที่มี U^{+4} หรือ U^{+6} ปนอยู่ มีแสดงไว้ดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 แร่ยูเรเนียมตามคุณสมบัติทางโลหะวิทยา[10]

1. Ores containing tetravalent uranium	
Uraninite (pitchblende)	U_3O_8
Uranothorite	$Th_{1-x}U_xSiO_4$
Coffinite	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$
2. Hydrated ores containing hexavalent uranium	
Gummite	$UO_3 \cdot nH_2O$
Carnotite	$K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$
Tyuyamunite	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 8H_2O$
Autunite	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8H_2O$
Torbernite	$CuO \cdot 2UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8H_2O$
Uranophane	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 6H_2O$
3. Refractory minerals containing tetravalent uranium	
Davidite	$UFe_5Ti_8O_{24}$
Brannerite	$(U,Th,Ca_2,Fe_2)Ti_2O_6$
Pyrochlore	$(Na_4,Ca_2,U,Th)(Nb,Ta)_4O_{12}$

2.6 แหล่งแร่ยูเรเนียม[3,9,15,17]

บริเวณที่มียูเรเนียมสูงพอที่จะทำเหมืองได้นั้นควรจะมีปริมาณระหว่าง 400 - 2,500 เท่าของปริมาณยูเรเนียมโดยเฉลี่ยบนผิวโลก แหล่งแร่ยูเรเนียมแหล่งใหญ่ ๆ ที่พบส่วนมากจะมีปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียมโดยเฉลี่ยเพียง 0.1% ดังแสดงในตาราง 2.4 ด้วยเหตุนี้แหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจนั้นจะพบในหินเพียงไม่กี่ชนิด

ในทางธรณีวิทยาได้แบ่งแหล่งแร่ยูเรเนียมออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

2.6.1 แบบที่เกิดเป็นสายแร่ (Vein Deposits) คือแหล่งแร่ที่มีสายแร่ยูเรเนียมเกิดแทรกอยู่ตามรอยแตกในหินชนิดต่าง ๆ ซึ่งมักจะเป็นแผ่นกว้างและแบน (Tabular) หรือเป็นแผ่นบาง ๆ (Sheet-like) อาจจะมีความกว้างเป็นฟุตหรือเพียง 2 - 3 นิ้วเท่านั้น และอาจจะยาวเป็นร้อย ๆ ฟุต โดยมีความลึกลงไปจากผิวดินตามมุมเทของสายแร่ ซึ่งอาจลึกลงไปถึงระดับประมาณ 5,000 ฟุต และพบว่ามีปริมาณตั้งแต่ไม่กี่ตันจนถึงล้าน ๆ ตัน

แร่ยูเรเนียมที่เกิดแบบนี้ คือ แร่พิทช์เบลนด์ และยูรานิไนต์ แหล่งแร่แบบนี้แหล่งใหญ่มักจะเกิดร่วมกับพวกแร่ซัลไฟด์ (Sulphides) โดยเฉพาะแร่ไพไรต์ (Pyrite) ส่วนแหล่งแร่ขนาดปานกลางนั้น มักจะเกิดร่วมกับแร่ฟลูออไรต์ (Fluorites) เพื่อนแร่ที่สำคัญได้แก่ ทอง เงิน ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี

ตาราง 2.4 ปริมาณยูเรเนียมที่มีอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของโลก[16]

Material	Typical analyses, U_3O_8	
	%	ppm
High-grade veins	30-70	
Vein ores	0.2-1.0	
Sandstone ores	0.05-0.4	
Pegmatitic ores	0.05-0.1	
Dakota lignite ores (U.S.)	0.2-0.3	
Uraniferous hydrocarbons	0.001-0.1	
Uraniferous phosphates	0.005-0.03	
Alum shales (Sweden)	0.02-0.03	
Gold ores (South Africa)	0.015-0.06	
Chattanooga Shales (U.S.)	0.006	
Marine black shales	0.001-0.02	
Uraniferous granites		15-100
Normal granite		5
Earth's crust		3
Uranium mine waters		5-15
Copper dump leaching solutions		1-12
Sea water		0.002-0.003

แหล่งแร่ที่เกิดแบบนี้ที่สำคัญของโลก ได้แก่ เหมือง Shinkolobwe ในประเทศแซร์ เหมือง Port Radium ในแคนาดา ซึ่งทั้งสองแห่งนี้ได้เอาแร่ออกมาหมดแล้ว นอกจากนี้ยังมีเหมืองขนาดกลาง ได้แก่ เหมือง Joacvymov ในเช็คโกสโลวาเกีย และเหมือง Schwartzwalder ในรัฐโคโลราโด สหรัฐอเมริกา สำหรับเหมืองใหญ่ ๆ ที่ยังเปิดการทำเหมืองอยู่ในปัจจุบัน คือ เหมือง Deaverlodge Saskatchewan และเหมือง Dancroft ในแคนาดา

2.6.2 แบบที่เกิดอยู่ในชั้นหิน (Sedimentary Rocks) คือแหล่งแร่ที่เกิดอยู่ในหินทราย หินดินดาน ถ่านหินชนิดต่าง ๆ และหินฟอสเฟตซึ่งมีทั้งแร่ชนิดปฐมภูมิและชนิดทุติยภูมิ เช่น แร่ยูรานินไนต์ คอฟฟินไนต์ และคาร์โนไทต์

2.6.2.1 แบบที่เกิดในหินทราย (Sandstone) คือแร่ยูเรเนียมจะเกิดอยู่ในหินทรายที่มีลักษณะ เป็น เลนซ์สลับกับหินมัดสโตน (Mudstone) ซึ่งมีพวกเถ้าถ่านภูเขาไฟ เกิดปนอยู่ทั่วไป โดยในชั้นหินทรายนี้จะมีพวกซากพืช ซากกระดูกและไม้กลาย เป็นหินปนอยู่ถัดแร่ เป็นช่วง ๆ และรูปร่างไม่แน่นอน อาจจะหนาเพียง 2 - 3 นิ้ว จนถึงหลายสิบฟุตและยาว เป็นพันฟุต แหล่งแร่พวกนี้จะวางตัวขนานหรือเกือบขนานกับชั้นของหินทราย และวางตัวตัดชั้นหินทราย โดยจะมีความเข้มข้นของ U_3O_8 ประมาณ 0.1 - 0.5% แร่แบบนี้คือ แร่ยูรานินไนต์ คอฟฟินไนต์ และคาร์-

ไนไทต์ เพื่อนแร่ที่สำคัญคือ ทองแดง และแร่พวกวา เน เดียม

แหล่งแร่ยู เร เนียมแบบนี้ที่สำคัญของโลกอยู่ในบริ เวณที่ราบสูงโค-โลราโด สหรัฐอเมริกา ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 150,000 ตารางไมล์ คลุมบริเวณตะวันตกของรัฐโค-โลราโด ด้านตะวันออกของรัฐยูทาห์และรัฐอริโซนา กับด้านตะวันตก เฉียง เหนือของรัฐนิวแม็กซิโก

2.6.2.2 แบบที่ เกิดในชั้นหินกรวดมน (Quartz-pebble Conglomerates) คือแหล่งแร่ยู เร เนียมที่พบ เกิดในชั้นหินกรวดมน ซึ่งจะ เป็นแหล่งแร่ขนาดใหญ่ที่มีคุณค่าทาง เศรษฐกิจแบบหนึ่ง มักจะ เกิดร่วมกับทอง แหล่งแร่แบบนี้ได้แก่ ยูรานินไนต์ พิทช์เบลนด์ และแบรน-เนอไรต์ (Brannerite) โดยมี เพื่อนแร่ที่สำคัญคือ แร่ไพไรต์ คลอไรต์ (Chlorite) ทองและไบนาไซต์

แหล่งแร่ยู เร เนียมแบบนี้ที่สำคัญ ได้แก่ Blind River-Elliot Lake District ในแคนาดา เป็นชั้นหินกรวดมนหนา 5 - 25 ฟุต มีแร่ยูรานินไนต์และแบรน-เนอไรต์หนา 7 - 15 ฟุต และมีความยาวไปตามมุม เทของหินกรวดมนมากกว่า 600 ฟุต มีปริมาณสินแร่มากกว่า 5 ล้านตัน มีความ เข้มข้นของ U_3O_8 ประมาณ 0.12 - 0.16% และแหล่งที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง ซึ่งใหญ่กว่าแหล่งแรกแต่มีปริมาณยู เร เนียมต่ำกว่า คือ Witwatersrand ในอาฟ-ริกาใต้ มีความ เข้มข้นของ U_3O_8 ประมาณ 0.03 - 0.07%

2.6.2.3 แบบที่ เกิดในหินฟอส เฟต (Uraniferous Phosphatic Rocks) คือแร่ที่มียู เร เนียมปนอยู่ในหินฟอส เฟตในปริมาณ เพียง เล็กน้อย โดยปริมาณของยู เร เนียมจะ เพิ่มขึ้น เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณฟอส เฟต (P_2O_5) ต้นกำ เนิดสำคัญของฟอส เฟตคือ มารีนฟอสฟอ-ไรต์ (Marine phosphorite) และจะมีความหนา 5 - 10 ฟุต โดยจะมียู เร เนียมปนอยู่แผ่ เป็นบริ เวณกว้าง มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 0.007 - 0.07%

แหล่งแร่แบบนี้ที่สำคัญ คือ Florida land-pebble ในรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา ซึ่งมีชั้นของฟอสฟอไรต์หนา 6 - 7 ฟุต แผ่ เป็นบริ เวณกว้างหลายร้อยตารางไมล์ มีปริมาณของ U_3O_8 ประมาณ 0.012 - 0.024% นอกจากนี้ยังมีที่บราซิล และทางแถบทะ เล เมดิ เตอร์ เร เนียน

2.6.2.4 แบบที่เกิดในหินดินดาน (Shale) คือแหล่งแร่ยูเรเนียมที่พบเกิดอยู่ในหินดินดานสีดำ (Marine black shale) และในหินดินดานสีน้ำตาลแก่ (Lignitic shale) โดยทั่ว ๆ ไปหินดินดานจะมีปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียมต่ำกว่าในชั้นหินชนิดอื่น ๆ แต่ก็มีความสมบูรณ์เฉพาะแห่ง ซึ่งนับเป็นแหล่งแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

แหล่งแร่ยูเรเนียมแบบที่เกิดในหินดินดานสีดำนั้น มีกำเนิดในทะเลช่วงต้น ๆ บริเวณไหล่ทวีป มักจะแผ่ออกไปคลุมพื้นที่กว้างขวาง เช่น Chattanooga shale ในสหรัฐอเมริกา จะมีแผ่คลุมบริเวณรัฐเทนเนสซีตอนกลางไปจนถึงรัฐเคนตักกี้และอลาบามา มีความหนา 12 - 18 ฟุต มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 0.007% นอกจากนี้ยังมีพบในสวีเดน

แหล่งแร่ยูเรเนียมแบบที่เกิดในหินดินดานสีน้ำตาลแก่นั้น มักจะเกิดเป็นแหล่งไม่ใหญ่นัก แต่มีความสมบูรณ์มากกว่าแบบแรก จะพบเกิดเป็นช่วง ๆ มีความเกี่ยวพันกับลักษณะโครงสร้างและชั้นหิน มักจะพบแหล่งแร่ยูเรเนียมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เกิดอยู่ในบริเวณหินที่ผุ มีความชื้นประมาณ 50% และมักมีธาตุไมลิบดีนัมเกิดร่วมอยู่ด้วยเสมอ แหล่งแร่แบบนี้พบว่ามีปริมาณยูเรเนียมประมาณ 0.01% เช่นในบริเวณ Fort union lignite region ซึ่งมีบริเวณแผ่กว้างขวางในรัฐดาโกตา โคโลราโด และนิวแม็กซิโก ในสหรัฐอเมริกา

2.6.2.5 แบบที่เกิดในชั้นถ่านหิน คือแหล่งแร่ที่มียูเรเนียมปนอยู่ในชั้นถ่านหินชนิดต่าง ๆ โดยทั่ว ๆ ไปจะมีปริมาณต่ำเช่นเดียวกับหินดินดาน ซึ่งจากการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมในถ่านหินจากประเทศต่าง ๆ ในยุโรปตอนกลาง[17] พบว่าพีท (Peat) มีปริมาณต่ำสุด คือประมาณ 0.0001% ลิกไนต์มีประมาณ 0.0003% และแอนทราไซต์ (Anthracite) มีสูงสุดคือ ประมาณ 0.0007% แต่ในถ่านหินบางชนิดที่ไม่บริสุทธิ์ (Impure lignite) ในบางบริเวณจะมีปริมาณสูงมากกว่า 0.1% ซึ่งเป็นแหล่งแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจได้ เช่น ในบริเวณ Fort union lignite region สหรัฐอเมริกา จะมีปริมาณยูเรเนียมอยู่ประมาณ 0.01 - 0.2%

2.6.3 แบบที่เกิดในลานแร่ (Placer Deposit) คือแหล่งแร่ที่มีการสะสมตัวอยู่ตามลานแร่หรือในแอ่ง ด้วยผลของการกัดกร่อนและพัดพามาของน้ำ แร่ยูเรเนียมที่เกิดแบบนี้จะมีน้ำหนักมากและคงทนต่อวิธีการผุพังต่าง ๆ ต้นกำเนิดของแร่แบบนี้คือ เพกมาไทต์ และหินแกรนิตชนิดต่าง ๆ และมักจะพบอยู่ในแร่ตระกูลโคลัมไบต์-แทนทาไลต์ (Columbite-tantalite) แร่โมนาไซต์หรือแร่ทอไรต์ (Thorite) และทอเรียนไนต์ แร่อื่น ๆ ที่พบในแหล่งลานแร่ ได้แก่

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดีบุก เซอร์คอน และอิลเมไนต์ (Ilmenite) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแหล่งแร่ยูเรเนียมแบบนี้มักจะไม่มีความสมบูรณ์พอที่จะเปิดการทำเหมืองได้ ส่วนใหญ่จึงเป็นแร่พลอยได้ของแร่ชนิดอื่น ๆ เช่น ดีบุก หรืออิลเมไนต์

2.6.4 แบบที่เกิดในหินอัคนี คือแหล่งแร่ยูเรเนียมที่เกิดเป็นแบบสายแร่ และแบบประกระจาย (Dissemination) มีบริเวณกว้างขวาง แต่มักจะไม่มีความสมบูรณ์พอที่จะเปิดการทำเหมืองได้ โดยทั่วไปหินอัคนีทุกชนิดจะมีธาตุยูเรเนียมและทอเรียม เกิดอยู่ด้วยกันเสมอ แต่ชนิดที่มีปริมาณยูเรเนียมมากที่สุด คือ หินอัคนีพวกอัลคาลิก (Alkalic rock) และกรานิติกอิคเนียส (Granitic igneous rock) เช่น Conway granite ในรัฐนิวแฮมเชียร์ สหรัฐอเมริกา จะไพล่ให้เห็นเป็นพื้นที่มากกว่า 300 ตารางไมล์ มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 0.0015% และ ThO_2 ประมาณ 0.0064%

จะเห็นได้ว่าในสหรัฐอเมริกานั้น แหล่งแร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่ประมาณ 99% จะอยู่ในแหล่งแร่ยูเรเนียมในหินทราย นอกจากนั้นจะมีอยู่ในแหล่งแร่แบบสายแร่และแหล่งชนิดอื่น ๆ ปริมาณ U_3O_8 โดยเฉลี่ยทั่วไปประมาณ 0.22%

สำหรับในประเทศอื่น ๆ นั้น แหล่งแร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่เป็นแหล่งแร่แบบในชั้นหินกรวดมน แบบสายแร่ และแบบชนิดอื่น ๆ ปริมาณ U_3O_8 โดยเฉลี่ยจะมากกว่า 0.1% ซึ่งสามารถเปิดการทำเหมืองยูเรเนียมเป็นการเฉพาะได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงแร่พลอยได้อื่น ๆ ดังแสดงในตาราง 2.5

จะเห็นว่าแหล่งแร่ยูเรเนียมที่สำคัญของโลก ซึ่งให้ผลผลิตสูงได้แก่ แหล่งแร่แบบที่เกิดเป็นสายแร่ แบบที่เกิดในหินทราย และแบบที่เกิดในหินกรวดมน ที่สำคัญที่สุดคือแบบที่เกิดในหินทราย

เราอาจแบ่งเขตพื้นที่บนพื้นผิวโลกที่เป็นแหล่งแร่ยูเรเนียม (Uranium Province) ได้กว้าง ๆ (ยกเว้นประเทศในค่ายคอมมิวนิสต์) เป็น 5 เขต[15] คือ

ก. อาณาบริเวณที่เป็นหินแกรนิตชนิดหินไหล (Granitic intrusive) ในยุคแอพพาลาเชียน (Appalachian) ของยุโรปตะวันตกและอัฟริกาตอนเหนือ

ข. อาณาบริเวณในอาณาเขตของอัฟริกันชีลด์ (African shield)

ตาราง 2.5 แหล่งแร่ยูเรเนียมในส่วนต่าง ๆ ของโลก[1]

Locality	U_3O_8 Grade,%	U_3O_8(Short tons)
United States:western States	0.22	273,000
Canada:		
Blind River-Elliot Lake, Wollaston Lake, Bancroft, Beaverlodge.	> 0.10	230,000
Elliot Lake	< 0.10	130,000
Mexico:Chihuahua (Aldama) and other States	< 0.10	2,380
Argentina:Salta, Mendoza	> 0.10	9,000
France:Vendee, Limousin, Forez, Morven	> 0.10	66,400
Portugal:Viseu (Urgeirica), Nisa, Guarda	> 0.10	9,500
Spain:Ciudad Rodrigo (Salamanca), Andujar	> 0.10	11,000
Sweden:Vastergotland (Billingen), Narke	0.03	350,000
Other Europe:West Germany, Italy, Turkey, Yugoslavia	> 0.10	6,500
Central Africa Republic:Bakouma...	~ 0.10	19,500
Gabon:Mounana (Franceville), Mikouloungou	> 0.10	19,500
Niger:Arlit	0.29	26,000
Azelick, Madaouela	> 0.10	13,100

Locality	U_3O_8 Grade,%	U_3O_8 (Short tons)
South Africa, South West Africa:Witwatersrand, Rodding Australia:Mary Kathleen, Alligator Rivers area (Nabarlek, Jim, Ranger), Frome Lake	0.10 0.01	300,000 100,000
India:Jaduguda, Bihar	0.06-0.07	36,000
Japan:Ningyo-toge	0.06	4,000
Total		1,605,880

ค. อาณาบริเวณในอาณาเขตภาคใต้และภาคตะวันตกของแคนาเดียนชีลด์ (Canadian shield)

ง. ส่วนที่เป็นสันเขาของอเมริกาเหนือและใต้ จากเมืองมอนตานาและวอชิงตัน หรือจากอลาสกาพุ่งตรงไปทางใต้จนถึงตอนกลางของชิลีและอาร์เจนตินา

จ. อาณาบริเวณที่เป็นหินแกรนิตชนิดหินไหลในออสเตรเลีย

สำหรับแร่ยูเรเนียมที่พบในประเทศไทยนั้นมีหลายชนิด ซึ่งจากการสำรวจแหล่งแร่ยูเรเนียมในประเทศไทยพบว่า มีลักษณะการกำเนิดแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด[3] คือ

1. แบบที่เกิดในหินอัคนี เป็นแร่ยูเรเนียมชนิดทุติยภูมิที่มีปริมาณยูเรเนียมสูง พบที่บริเวณบ้านทุ่งโพธิ์และบ้านทุ่งขมิ้น อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา กับที่บ้านขุนทองหลาง อำเภอนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี แต่บริเวณที่พบแร่เด่นชัดคือเหมืองแร่ดีบุก บริษัท ยิบอินซอย บ้านทุ่งโพธิ์ โดยตั้งอยู่ประมาณเส้นรุ้ง 6° 55′ เหนือและเส้นแวง 100° 30′ตะวันออก ซึ่งเป็นแร่ทอร์เบอร์ไนท์ มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 60% เกิดแบบประกระจายอยู่ในหินแกรนิต เนื้อหยาบปานกลาง ที่เรียกว่า นิวมาโตไลติก (Pneumatolytic granite) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับหินแกรนิตในบริเวณแหล่งแร่ดีบุกที่หาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง อย่างไรก็ตามแร่ที่พบในบริ-

เวณดังกล่าวมีปริมาณน้อย จึงไม่อยู่ในข่ายที่น่าสนใจ

2. แบบที่เกิดในลานแร่ มักจะพบในแหล่งลานแร่ดีบุก-วุลแฟรม เท่าที่สำรวจพบคือ แร่ซามาร์สไกต์ (Rare-earth columbate) พบที่ตำบลคีกคัก อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา และพบมากที่สุดที่เหมืองตีน เป็ด บ้านทุ่งขมิ้น ตำบลคีกคัก โดยอยู่ประมาณเส้นรุ้ง 8° 43′ เหนือ และเส้นแวง 98° 17′ ตะวันตก มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 13.2% นอกจากนี้ยังพบแร่ไพรโอไรด์ (เป็น Multiple oxide ของธาตุ Y , Th, U, Nb และธาตุอื่น ๆ) ซึ่งเกิดในลานแร่ปนอยู่กับแร่ดีบุก ตามลำห้วยหมากดิบ ซึ่งไหลผ่านบ้านนุ้งในอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี มีปริมาณ U_3O_8 ประมาณ 1 - 5% และยังมีแร่ไบนาไซต์ อันได้มาจากหางแร่ดีบุกและจากทรายตามชายหาดบางแห่งของภาคใต้ด้านตะวันตกของประเทศไทยด้วย ซึ่งพบว่าจะมีปริมาณยูเรเนียมแปรผันอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8%[9] หรือเฉลี่ย 0.5% เนื่องจากแร่ชนิดดังกล่าวมีปริมาณน้อย และไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ แต่ก็อาจจะเป็นผลผลิตพลอยได้ของการทำเหมืองดีบุกหรือแร่หนักที่มีค่าอื่น ๆ

3. แบบที่เกิดในหินทราย พบเป็นแหล่งแร่ในชั้นหินทรายยุคเขาพระวิหาร ณ บริเวณเขาประตูตีหมา ในแอ่งภูเวียงด้านทิศตะวันตกใกล้ ๆ กับขอบด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของที่ราบสูงโคราช อยู่ประมาณเส้นรุ้ง 16° 40′ เหนือ และเส้นแวง 102° 13′ ตะวันออก และในเขตบ้านหนองขาม ตำบลเขาน้อย อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 155,000 ตารางกิโลเมตร โดยได้ทำการสำรวจมาตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2519 แร่ยูเรเนียมที่พบคือพิทช์เบลนด์และยูเรนิไนต์ มีสีน้ำตาลและเนื้อละเอียดมาก เกิดแบบประกระจายร่วมกับแร่ทองแดงและแร่อะซูไรต์ (Azurite) โดยเกิดอยู่ตามช่องว่างและรอยแตกในหิน ตลอดจนเกิดแบบแทนที่เม็ดหินทรายและพวกซากพืชซากสัตว์ (Carbonaceous materials) เคลือบเม็ดทรายในหินทราย นอกจากนี้ยังพบแร่คาร์โนไทต์ ซึ่งมีขนาดเท่าเมล็ดถั่วเขียว เคลือบอยู่บนผิวซากพืชซากสัตว์ แหล่งแร่มีลักษณะเป็นรูปเลนซ์เล็ก ๆ มีแร่เกิดอยู่ตอนล่างเป็นหย่อม ๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าในแหล่งแร่แบบนี้มีปริมาณยูเรเนียมประมาณ 0.002 - 0.08%

แหล่งแร่ประตูตีหมานี้จะเป็นแนวทางในการสำรวจหาแหล่งแร่ยูเรเนียมอื่น ๆ ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจของประเทศต่อไป ทั้งนี้เพราะลักษณะโครงสร้างของหิน ตลอดจนอายุของหินในบริเวณที่ราบสูงโคราชนั้น คล้ายคลึงกับบริเวณที่ราบสูงโคโลราโดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแหล่งแร่ยูเรเนียมมากและมีชื่อเสียงอยู่ในปัจจุบัน

2.7 คุณสมบัติของยู เร เนียม

ก่อนการค้นพบธาตุทรานสยู เร เนียม (Transuranium elements) เชื่อว่ายู เร เนียม จัดอยู่ในพวกธาตุทรานสิชัน (Transition elements) เพราะมีอิ เล็คตรอนอยู่ใน 5d orbital แต่ต่อมาพบว่ามีอยู่ใน 5f orbital ซึ่งคล้ายกับพวกธาตุแลนทาไนด์ (Lanthanide elements) ใน subgroup IIIB ซึ่งมีอิ เล็คตรอนอยู่ใน 4f orbital ฉะนั้นจึงจัดยู เร เนียม เป็นธาตุกลุ่มใหม่ว่า ธาตุแอกติไนด์ (Actinide elements) อย่างไรก็ตามแม้ยู เร เนียมจะมีคุณสมบัติคล้ายพวกธาตุแลนทาไนด์ก็จริง แต่ก็มีคุณสมบัติหลายอย่างคล้ายพวกธาตุทรานสิชันของ subgroup IVA, VA, และ VIA ด้วย ดังนั้นยู เร เนียมจึงควร เป็นธาตุที่จัดอยู่ในพวก 5f - 6d สำหรับอะตอมยู เร เนียมที่สะ เทินในสถานะกาซจะมีโครงสร้างของอิ เล็คตรอน (Electronic configuration) เป็น $5f - 6d - 7s^2$ ฉะนั้นพวกแอกติไนด์จึงมีคุณสมบัติก้ำกึ่งกันกับพวกสองกลุ่มดังกล่าว เนื่องจากระดับพลังงานของอิ เล็คตรอนใน 5f และ 6d orbital นั้นแตกต่างกัน เล็กน้อยมาก

2.7.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) [11,12,13]

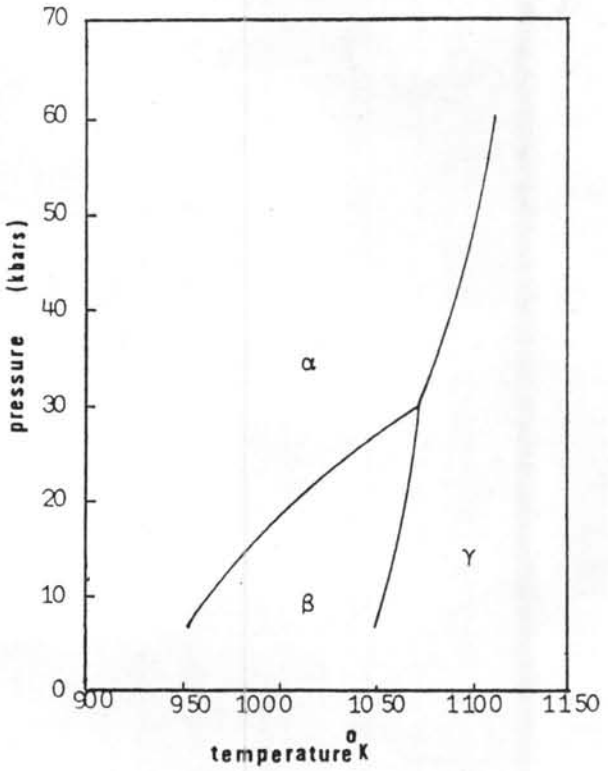
ยู เร เนียม เป็นธาตุที่ เป็นโลหะ มีสีขาว เงิน ผิวมันแวววาว เหมือน เหล็ก เมื่อถูกตัด และยิ่งจะมีความแวววาวมากขึ้น เมื่อนำมาขัดที่ผิว แต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศประมาณ 2 - 3 ชั่วโมงจะมีความมัว เกิดขึ้น ยู เร เนียม เป็นโลหะที่หนักกว่าตะกั่ว 80% อ่อนตัวได้ง่ายและมีความ เหนียว ซึ่งสามารถรีด เป็น เส้นได้ ถ้าผสมกับโลหะอื่น เป็นโลหะผสมจะมีความแข็งคงทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อรังสี เพิ่มขึ้น ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ แสดงไว้ในตาราง 2.6

ตาราง 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะยู เร เนียม [13]

Atomic weight	238.03
Density (25°C)	
X-ray	19.214
exp.	19.05 ± 0.02
Phase transformations	
$\alpha \rightarrow \beta$	667.7°C
$\beta \rightarrow \gamma$	774.8°C
Melting point	1132.3°C
Heat of fusion	2500 cal/g atom
	2900 cal/g atom
Heat of sublimation (0°K)	129.0 kcal/mole
Specific heat	6.594 cal/°mole
Thermal conductivity (25°C)	0.060 cal/cm. sec. deg

ส่วนจุด เดือดนั้นยังไม่มีการทดลองหากัน แต่จากการประมาณการจาก เส้นกราฟของความดันไอ จะพบว่าโลหะยู เร เนียมมีจุด เดือดประมาณ 3813°ซ[12]

โลหะยู เร เนียม เป็นโลหะที่สามารถ เปลี่ยนโครงสร้างในสภาพของแข็งได้ไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Allotropic metal) ซึ่งโลหะยู เร เนียมจะมีการ เปลี่ยนสถานะ (Phase transformation) เช่นนี้อยู่ 3 แบบ (Allotropic forms) คือแอลฟา (Alpha) (α - form) เบตา (Beta) (β - form) และแกมมา (Gamma) (γ - form) โดยแอลฟายู เร-เนียมจะมีโครงสร้างแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) มีความหนาแน่น 19.214 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติ เมตร เบตายู เร เนียมจะมีโครงสร้างแบบ เตตระโกนัล (Tetragonal) มีความหนาแน่น 18.13 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติ เมตร มีขนาดผลึกใหญ่กว่าแบบแอลฟา ส่วนแกมมายู เร เนียมจะมีโครงสร้างแบบบอดี เซน เตอร์คิวบิก (Body-Centered cubic) มีความหนาแน่น 18.06 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติ เมตร ซึ่งผลของอุณหภูมิที่ เกี่ยวข้องกับสถานะ (Phase) แสดงไว้ในรูป 2.1 จุดที่สถานะ α, β และ γ อยู่ในภาวะสมดุลย์ คือที่อุณหภูมิ 798°ซ ภายใต้ความดัน 29.8 กิโลบาร์ (K bars)



รูป 2.1 การ เปลี่ยนสถานะของยู เร เนียม[13]

การเปลี่ยนสถานะของโลหะยูเรเนียมที่อุณหภูมิและความดันได้เช่นนี้ ทำให้โลหะยูเรเนียมขาดคุณสมบัติที่จะเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ดี แต่ก็อาจทำเป็นโลหะผสม เช่น ทำเป็นโลหะผสมกับเซอร์โคเนียม แล้วพบว่าเมื่อทำให้เย็นลงจะมีเบตา-แกมมา ($\beta - \gamma$ form) น้อยมาก แกมมาจะเปลี่ยนสถานะไปเป็นแอลฟาเลย ทำให้ได้สถานะที่มีเสถียรภาพ (Dimension stability) ดี

โลหะยูเรเนียมเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างเลว เมื่อเทียบกับเหล็ก นอกจากนี้ยูเรเนียม (α - form) ยังมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Paramagnetic) อ่อน ๆ วัดได้ 1.720×10^{-6} อี.เอม.ยู ต่อกรัมที่ 15°ซ. และเพิ่มเป็น 1.891×10^{-6} อี.เอม.ยู ต่อกรัมที่ 654°ซ.

โลหะยูเรเนียมเมื่อถูกรังสีนิวตรอนจะเกิดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด (Distortion) ได้ 2 แบบ[12] คือ

ก. ไดเมนชัน (Dimension) เกิดเปลี่ยนแปลงในขณะที่ความหนาแน่นคงเดิม เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 450°ซ.

ข. เกิดการบวมขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 450°ซ.

การที่โลหะยูเรเนียมบิดเบี้ยว (Distort) และบวม (Swell) ขึ้น[13] โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°ซ. นั้น เป็นเพราะกาซคริปตรอน (Kr) และซีนอน (Xe) จากผลที่ได้จากฟิสชัน (Fission products) จะรวมเป็นฟองกาซเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.01-1.0 ไมครอน (Micron) ฝังอยู่ในเนื้อโลหะยูเรเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาตรโตขึ้นอาจถึงหลายเปอร์เซนต์ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นและเบิร์นอัพ (Burn-up) มากขึ้น ปริมาตรจะยิ่งโตขึ้น อีกสาเหตุที่ทำให้ปริมาตรของโลหะยูเรเนียมเปลี่ยนไป คือ อะตอมของยูเรเนียมหลังเกิดปฏิกิริยาฟิสชันแล้ว จะใช้เนื้อที่น้อยลงกว่าเดิม ดังนั้น ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นบางครั้งก็ไม่มีการบวมมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิสูงถึง 370 - 500°ซ. จะเกิดการบวมอันเนื่องมาจากแรงเค้นภายใน (Internal stress) ซึ่งเป็นการขยายตัวแบบแอนิโสโทรปิก (Anisotropic) ของแต่ละเกรน (Grain)

การเกิดการบวมและหย่อนตัวของโลหะยูเรเนียมนั้น สามารถแก้ไขได้โดยการทำเป็นโลหะผสมและการใช้สิ่งห่อหุ้ม (Cladding) ที่แข็งแรงไว้รอบนอกของเชื้อเพลิงที่เป็นโลหะยูเรเนียม

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.2 คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ (Nuclear Properties)[10,13,18]

ยูเรเนียมที่เกิดตามธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป คือ ^{238}U, ^{235}U และ ^{234}U ซึ่งมีเป็นสัดส่วน (Atomic percent) และมีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ดังแสดงในตาราง 2.7 นอกจากนี้ยังมีไอโซโทปอื่น ๆ อีก 11 ไอโซโทป ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ผลิตขึ้นได้โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ และมีค่าครึ่งชีวิตสั้นกว่า ดังแสดงในตาราง 2.8

ตาราง 2.7 ไอโซโทปของยูเรเนียมในธรรมชาติ[13]

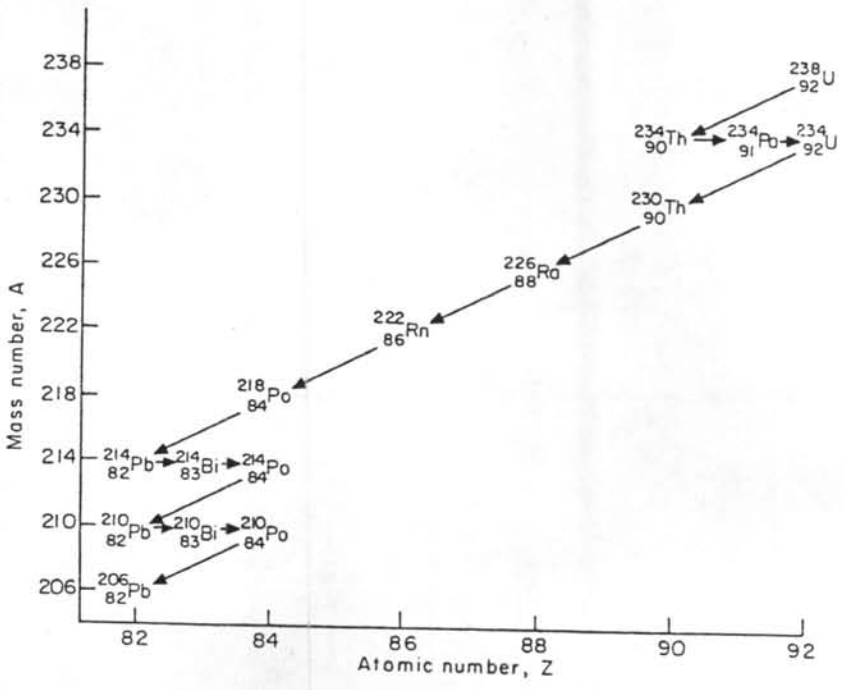
Isotope, mass	*Atomic percentage*[7]	*Half-life, years*
238	99.276 ± 0.0005	$4.51 \cdot 10^9$
235	0.718 ± 0.0005	$7.09 \cdot 10^8$
234	0.0056 ± 0.0001	$2.35 \cdot 10^5$

ตาราง 2.8 ไอโซโทปต่าง ๆ ของยูเรเนียม[18]

Mass number	Type of transformation	Energy, MeV	Half-life
	Natural isotopes		
234	α	4.763 (74%) 4.716 (26%)	$2.48 \cdot 10^5$ years
235	α	4.58 (10%) 4.47 (~3%) 4.40 (83%) 4.20 (4%)	$7.13 \cdot 10^8$ years
238	α	4.18	$4.49 \cdot 10^9$ years
	Artificial isotopes		
227	α	6.8	1.3 min
228	α (80%); electron capture (20%)	6.67	9.3 min
229	α (20%) electron capture (80%)	6.42	58 min
230	α	5.85	20.8 days
231	α (0.0055%); electron capture (>99%)	5.45	4.2 days
232	α	5.31 (69%) 5.27 (31%)	70 years
233	α	4.823	$1.62 \cdot 10^5$ years
236	α	4.499	$2.39 \cdot 10^7$ years
237	β^-, γ	0.245	6.75 days
239	β^-	1.21	23.54 min
240	β^-	0.36	14 ± 1 hours

ไอโซโทป ^{238}U และ ^{234}U จัดอยู่ในอนุกรมการสลายตัวแบบ 4n + 2 โดยมี ^{238}U เป็นธาตุแม่ (Parent element) สลายตัวต่อให้รังสี α และ β กลายเป็น ^{234}U ดังแสดงในรูป 2.2 และตาราง 2.9 สัดส่วนของไอโซโทป ^{238}U และ ^{234}U จึงอยู่ในสภาวะคงที่ (Secular equilibrium) และเท่ากับสัดส่วนของค่าครึ่งชีวิตของ 2 ไอโซโทปนี้

รังสีที่ตรวจพบในแร่ยูเรเนียมมาจากการสลายตัวอย่างต่อเนื่องของ ^{238}U นี้เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะกาซเรดอน (^{222}Rn) และธาตุลูก (Daughter) ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นของ ^{222}Rn ถ้าสามารถขจัดกาซเรดอนออกจากแร่ยูเรเนียมได้ ความแรงรังสีจะลดลงอย่างมาก แต่เพียงชั่วระยะหนึ่ง ^{222}Rn จะมีขึ้นมาใหม่และมีความแรงรังสีเท่า ๆ เดิมในเวลา 10 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของ ^{222}Rn ซึ่งอยู่ในสภาวะคงที่ (Secular equilibrium) ถ้าต้องการขจัดรังสีออกจากแร่ยูเรเนียมให้ได้มากและไม่ให้เกิดขึ้นเร็วอีก จะต้องแยกเอา ^{226}Ra ซึ่งเป็นธาตุแม่ของ ^{222}Rn ออก ปกติแล้ว ^{226}Ra จะแยกออกมาในกระบวนการละลายแร่ในกรด ซึ่งน้ำชะล้างที่ได้จะให้รังสี α และ γ แรง ส่วนรังสี β จากแร่ยูเรเนียมนั้นส่วนใหญ่มาจากการสลายตัวของ ^{234}Pa และธาตุแม่ของมันคือ ^{234}Th ซึ่งในกระบวนการทำให้ยูเรเนียมบริสุทธิ์นั้น ทั้ง 2 ไอโซโทปนี้จะถูกขจัดออกไปได้ แต่จะเกิดขึ้นมาใหม่ได้ และจะให้รังสีประมาณเท่าเดิมได้ภายใน 1 ปี สำหรับยูเรเนียมบริสุทธิ์ที่เตรียมขึ้นใหม่ ๆ จะสลายตัวให้เฉพาะรังสี α เท่านั้น

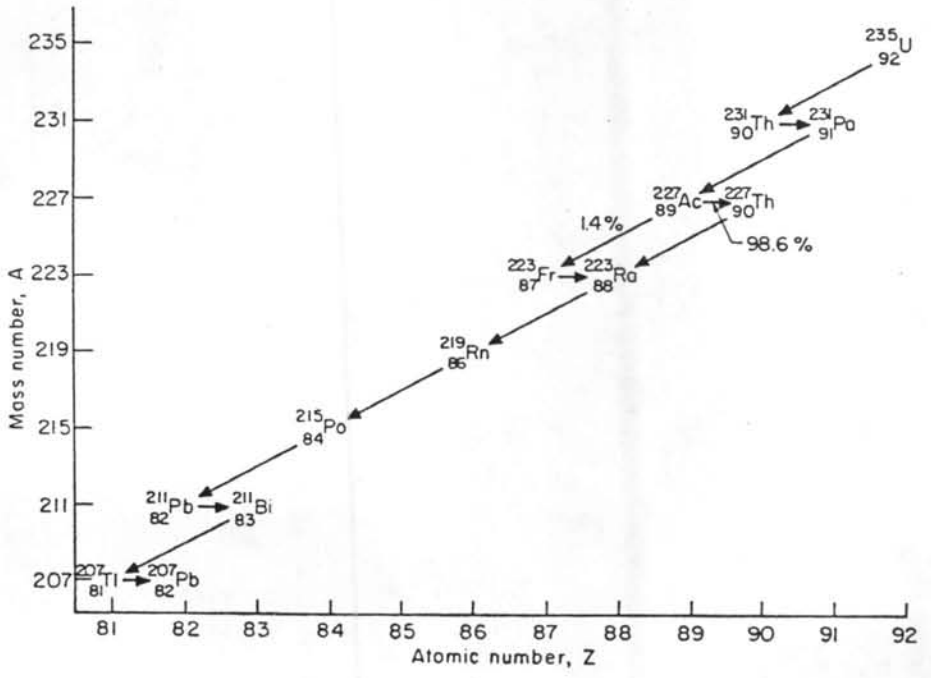


รูป 2.2 การสลายตัวของ ^{238}U (10)

ตาราง 2.9 การสลายตัวของผลิตผลของ $^{238}_{U}$(10)

Nuclide	Historical name	Half-life	Radiation	Atom ratio, ppb in natural uranium
$^{238}_{92}$U	Uranium I	4.51E9 yr	$\alpha(\gamma)$	9.927E8
$^{234}_{90}$Th	UX_1	24.1 days	$\beta(\gamma)$	0.0145
$^{234}_{91}$Pa	UX_2	1.17 min	β, γ	4.9E-7
$^{234}_{92}$U	Uranium II	2.47E5 yr	$\alpha(\gamma)$	5.44E4
$^{230}_{90}$Th	Ionium	8.0E4 yr	$\alpha(\gamma)$	1.76E4
$^{226}_{88}$Ra	Radium	1602 yr	$\alpha(\gamma)$	353
$^{222}_{86}$Rn	Radon	3.821 days	α	2.30E-3
$^{218}_{84}$Po	Radium A	3.05 min	α	1.28E-6
$^{214}_{82}$Pb	Radium B	26.8 min	β, γ	1.12E-5
$^{214}_{83}$Bi	Radium C	19.7 min	β, γ	8.25E-6
$^{214}_{84}$Po	Radium C′	164 μs	α	1.14E-12
$^{210}_{82}$Pb	Radium D	21 yr	$\beta(\gamma)$	4.62
$^{210}_{83}$Bi	Radium E	5.01 days	β	3.02E-3
$^{210}_{84}$Po	Polonium	138.4 days	α	0.0835
$^{206}_{82}$Pb	Radium G	Stable		

ส่วนไอโซโทป $^{235}_{U}$ จัดอยู่ในอนุกรมการสลายตัวแบบ 4n + 3 ดังแสดงในรูป 2.3 และตาราง 2.10



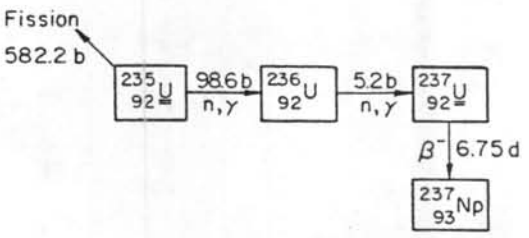
รูป 2.3 การสลายตัวของ $^{235}_{U}$(10)

ตาราง 2.10 การสลายตัวของผลิตผลของ $^{235}_{92}U$(10)

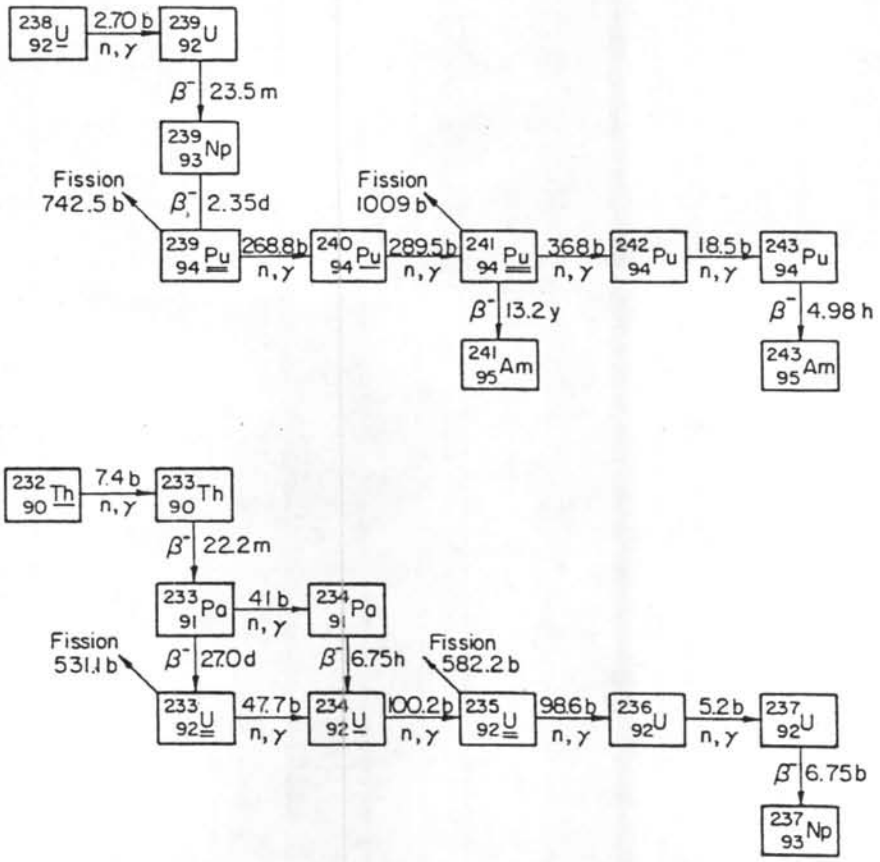
Nuclide	Historical name	Half-life	Radiation	Atom ratio, ppb in natural uranium
$^{235}_{92}U$	Actinouranium	7.1E8 yr	α, γ	7.205E6
$^{231}_{90}Th$	Uranium Y	25.5 h	$\beta(\gamma)$	2.95E-5
$^{231}_{91}Pa$	Protactinium	3.25E4 yr	α, γ	330
$^{227}_{89}Ac$	Actinium†	21.6 yr	$\alpha, \beta(\gamma)$	0.219
$^{227}_{90}Th$	Radioactinium	18.2 days	α, γ	4.99E-4
$^{223}_{87}Fr$	Actinium K	22 min	α, γ	5.9E-9
$^{223}_{88}Ra$	Actinium X	11.43 days	α, γ	3.18E-4
$^{219}_{86}Rn$	Actinon	4.0 s	α, γ	1.29E-9
$^{215}_{84}Po$	Actinium A	1.78 ms	α	5.73E-13
$^{211}_{82}Pb$	Actinium B	36.1 min	β, γ	6.97E-7
$^{211}_{83}Bi$	Actinium C	2.15 min	$\alpha, (\beta), \gamma$	4.15E-8
$^{207}_{81}Tl$	Actinium C″	4.79 min	β, γ	9.25E-8
$^{207}_{82}Pb$	Actinium D	Stable		

†1.4% of decays of ^{227}Ac go to ^{223}Fr, 98.6% to ^{227}Th.

เนื่องจาก ^{235}U เป็นยูเรเนียมไอโซโทปเดียวที่มีในธรรมชาติและเป็นวัสดุฟิสไซล์ด้วย ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้กับนิวตรอนช้า ดังปฏิกิริยาในรูป 2.4 ส่วน ^{239}Pu, ^{241}Pu และ ^{233}U ซึ่งเป็นวัสดุฟิสไซล์ที่ไม่มีในธรรมชาติ แต่จะได้จากวัสดุเฟอร์ไทล์ คือ ^{238}U และ ^{232}Th ซึ่งมีในธรรมชาติ มาทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเร็ว ดังปฏิกิริยาในรูป 2.5



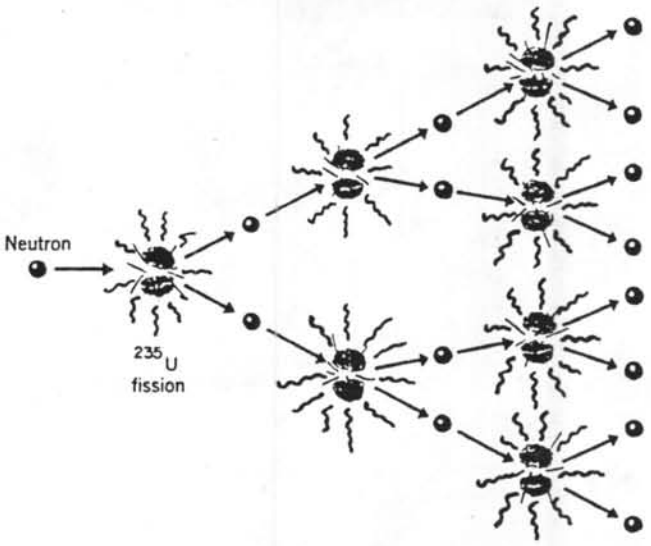
รูป 2.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของวัสดุฟิสไซล์ ^{235}U(10)



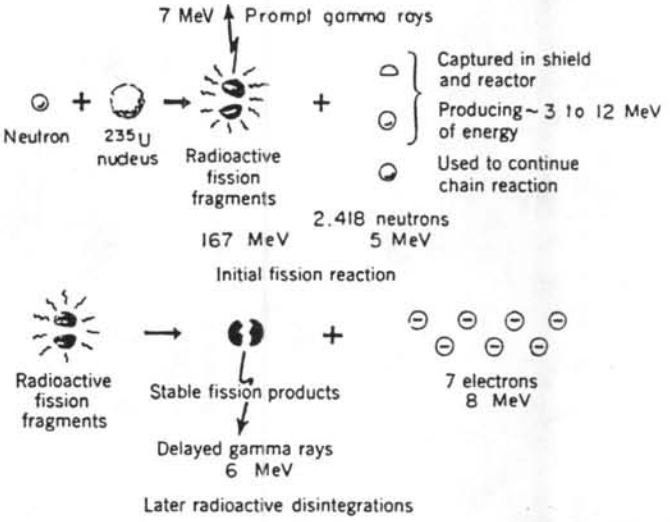
รูป 2.5 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของวัสดุเฟอร์ไทล์ ^{238}U และ ^{232}Th (10)

เมื่อนิวเคลียสของ ^{235}U, ^{233}U และ ^{239}Pu เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิสชันลูกโซ่ (Nuclear fission chain) กับนิวตรอนช้า จะให้พลังงานปล่อยออกมาอย่างมากมาย ดังแสดงในรูป 2.6 และรูป 2.7

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2.6 ปฏิกิริยาลูกโซ่[10]



รูป 2.7 ผลผลิตจากการแตกตัวของ ^{235}U[10]

2.7.3 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)[10,12,13]

2.7.3.1 สารประกอบต่าง ๆ ของยูเรเนียม[13]

โดยทั่วไปโลหะยูเรเนียมจะทำปฏิกิริยากับพวกอโลหะ (Non-metal) ส่วนมากได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดของโลหะยูเรเนียมที่จะทำปฏิกิริยาด้วย ถ้าเป็นก้อนโต (Massive metal) จะเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า เมื่อเป็นผงละเอียด (Finely divided metal) โดยเฉพาะผงละเอียดของโลหะยูเรเนียมนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นไพโรโฟริก (Pyrophoric) คือติดไฟได้เองในอากาศที่อุณหภูมิห้อง หรือแม้แต่ในน้ำ แม้กระนั้นของผสมที่เป็นผงของโลหะอื่นที่ผสมกับผงของยูเรเนียมก็มีคุณสมบัติเช่นนี้ และสามารถจะระเบิดได้ในอากาศ

ยูเรเนียมเป็นธาตุที่สามารถรวมตัวได้ง่ายกับออกซิเจนและทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับอากาศ เมื่อมีความชื้นได้เป็นออกไซด์เกิดขึ้น โลหะยูเรเนียมที่เป็นก้อนโต ถ้าทิ้งไว้ในอากาศผิวจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidise) เกิดเป็นชั้นสีดำปนเหลืองขึ้น ซึ่งชั้นนี้สามารถป้องกันมิให้เกิดการออกซิไดซ์ต่อไปได้ แต่ถ้าถูกกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง ก็จะถูกออกซิไดซ์ได้เช่นกัน และจะถูกยับยั้ง (Inhibit) การเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยออกซิเจน ดังสมการ

$$U + 2H_2O_{(g)} \longrightarrow UO_2 + 2H_2$$

ปฏิกิริยาของโลหะยูเรเนียมต่อธาตุและสารประกอบต่าง ๆ มีแสดงไว้ในตาราง 2.11

2.7.3.2 การละลายของยูเรเนียม[13]

โลหะยูเรเนียมละลายได้ในกรดแร่ (Mineral acids) ที่เจือจาง เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เจือจาง หรือกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) (H_3PO_4) เจือจาง ถ้าเป็นกรดซัลฟูริกจะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) (H_2O_2) เป็นตัวช่วย จึงจะละลายได้ แต่จะละลายได้ช้าในกรดซัลฟูริกที่ร้อนและเข้มข้น (มากกว่า 6N) เช่นเดียวกับเมื่อละลายในสารละลายด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ก็จะต้องใช้ Na_2O_2 ช่วยจึงจะละลายได้ ซึ่งปกติแล้วโลหะยูเรเนียมจะไม่ละลายในด่าง

ตาราง 2.11 ปฏิกิริยาทางเคมีของโลหะยูเรเนียม[13]

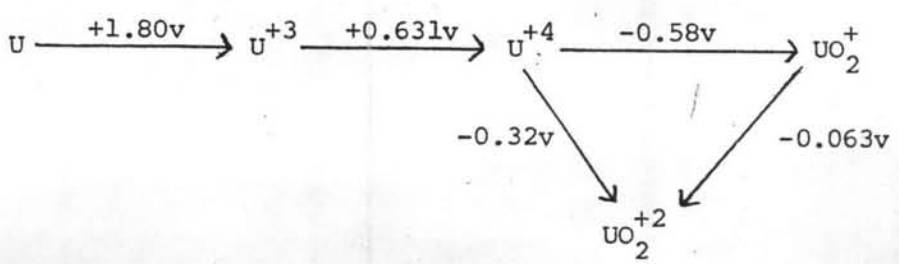
Reactant	Temperature of reaction, °C		
	massive metal	powder	Products
hydrogen	250	25	UH_3
carbon	1800-2400	100-1200	UC, U_2C_3, UC_3
nitrogen	700	500	UN, $UN_{1.75}$, UN_2
phosphorus		1000	U_3P_4
oxygen	150-350	pyrophoric	UO_2, U_3O_8
sulfur	500		US_2
fluorine	25		UF_6
chlorine	500-600	150-180	UCl_4, UCl_5, UCl_6
bromine	650	210	UBr_4
iodine	350	260	UI_3, UI_4
water	100	25	UO_2
hydrogenfluoride (g)		200-400	UF_4
hydrogen chloride (g)		250-300	UCl_3
ammonia	700	400	$UN_{1.75}$
hydrogen sulfide		500	US, U_2S_3, US_2
nitric oxide	400-500		U_3O_8
dinitrogen tetroxide	25		$UO_2(NO_3)_2.2NO_2$
methane		900	UC
carbon monoxide	750		UO_2 + UC
carbondioxide	750		UO_2 + UC

การละลายของยูเรเนียมในกรดนั้นค่อนข้างแปลกไม่เหมือนกับโลหะชนิดอื่น คืออัตราการละลายจะลดลง เมื่อสภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (Acidity) ของสารละลายเพิ่มขึ้น เพราะไฮโดรเจนอิออน (Hydrogen ion) (H^+) จะเป็นตัวยับยั้งการละลายได้ แต่การละลายจะเกิดได้ดีเมื่อละลายในกรดไนตริกหรือซัลฟุริกที่เจือจางและร้อน โดยมีสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือกรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) ($HClO_4$) อยู่ด้วย ส่วนในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) (HCl) นั้น ยูเรเนียมที่เป็นผงละเอียดจะละลายได้อย่างรุนแรงในกรดเจือจาง แต่ถ้าเป็นก้อนโตจะละลายได้ช้ากว่า แต่จะละลายได้รวดเร็วกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (มากกว่า 1N) นอกจากนี้ยังพบว่าออกไซด์ของยูเรเนียมทุกตัวจะละลายได้ในกรดไนตริก

2.7.3.3 ยูเรเนียมอิออน (Uranium Ions)[13]

ธาตุยูเรเนียมมีวาเลนซ์อิเลคตรอน (Valence electrons) 6 ตัว และมีโครงสร้าง (Configuration) เป็น $5f^3$, $6d^1$, $7s^2$ มีออกซิเดชันสเตท (Oxidation state) 4 แบบ คือ +3, +4, +5 และ +6 ซึ่งคุณสมบัติของยูเรเนียมอิออนในสารละลายนั้นมีความสำคัญในเรื่องเคมีของยูเรเนียม สามารถอธิบายปฏิกิริยาของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complex forming reaction) และภาวะสมดุลย์ในออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction) ได้

สารละลายของยูเรเนียมอิออนในน้ำมีสีต่าง ๆ กัน คือ U^{+3} จะให้สีม่วงแดง (Rose-purple), U^{+4} จะให้สีเขียวเข้ม (Deep-green), U^{+5} หรือ UO_2^+ ให้สีไม่แน่นอน และ U^{+6} หรือ UO_2^{+2} จะให้สีเหลืองสด (Bright-yellow) ซึ่งความสัมพันธ์ของสเตท (State) ต่าง ๆ ระหว่างออกซิเดชันและรีเดกชันของยูเรเนียมอิออน แสดงได้ดังรูป 2.8



รูป 2.8 โพเทนเชียลไดอะแกรมของยูเรเนียมใน 1.0N $HClO_4$ ที่ 25°ซ.[13]

U^{+3} จะไม่เสถียร เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีน้ำ จะมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซิง (Reducing agent) ทำการออกซิไดซ์น้ำได้เป็น U^{+4} ดังสมการ

$$2U^{+3} + 2H_2O \longrightarrow 2U^{+4} + H_2 + 2OH^-$$

อัตราส่วนของ U^{+3} และ U^{+4} ในสารละลายนั้นจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ละลาย

U^{+5} หรือ UO_2^+ ก็ไม่เสถียรจะสลายตัวเป็น U^{+4} และ U^{+6} หรือ UO_2^{+2} ได้ง่าย ดังสมการ

$$2UO_2^+ + 4H^+ \longrightarrow UO_2^{+2} + U^{+4} + 2H_2O$$

จะเห็นว่าถ้า U^{+5} อยู่ในกรดที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่นที่ pH 2-2.5 การสลายตัวก็จะมีไม่มากนัก

U^{+4} หรือยูเรนัสอิออน (Uranous ion) เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดออกซิเดชันอย่างช้า ๆ ได้เป็น UO_2^{+2} แต่ถ้าเติม Cu^{+2} หรือ Fe^{+3} เป็นตัวออกซิไดซ์ลงไปด้วย จะเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นมาก ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 - 80 °ซ. ก็จะมีผลเช่นเดียวกับการเติมตัวออกซิไดซ์

$$2U^{+4} + 2H_2O + O_2 \longrightarrow 2UO_2^{+2} + 4H$$

$$U^{+4} + H_2O \rightleftharpoons U(OH)^{+3} + H^+$$

สารละลาย U^{+4} เจือจางมาก ๆ ถ้าทิ้งไว้ในอากาศ จะเปลี่ยนสีจากเขียวเข้มเป็นใส (ไม่มีสี) และมีตะกอนสีเข้มของ UO_2 เกิดขึ้น เนื่องจากถูกออกซิไดซ์

U^{+6} หรือยูเรนิลอิออน (Uranyl ion) เมื่ออยู่ในน้ำจะไม่เสถียร แต่สามารถเกิดเสถียรภาพ (Stabilize) ตัวเองได้เป็น UO_2^{+2} แม้แต่ในรูปของแข็งพวกยูเรนิลไนเตรท (Uranyl nitrate) ยูราเนต (Uranate) และเฮกซะวาเลนท์ออกไซด์ (Hexavalent oxide) ก็จะอยู่ในรูปของ UO_2^{+2} เช่นกัน ซึ่งส่วนมากแล้วสารประกอบของยูเรนิล (Uranyl compound) มักจะมีสีเหลือง

จะเห็นว่ายูเรเนียมอิออนที่เสถียรนั้นมีเพียง 2 แบบ คือ U^{+4} และ U^{+6}

ปฏิกิริยาที่สำคัญของยูเรเนียมอิออน คือ

$$2UO_2^{+2} + 6NH_4OH \longrightarrow (NH_4)_2 U_2O_7 + 4NH_4^{+} + 3N_2O$$

$$UO_2^{+2} + 2H_2O_2 + 4H_2O \longrightarrow UO_4 \cdot 4H_2O + 4H^{+}$$

$$UO_2^{+2} + 2OH^{-} \rightleftharpoons UO_2(OH)_2 \rightleftharpoons UO_4^{-2} + 2H^{+}$$

2.7.3.4 ออกไซด์ของยูเรเนียม[10,12,13]

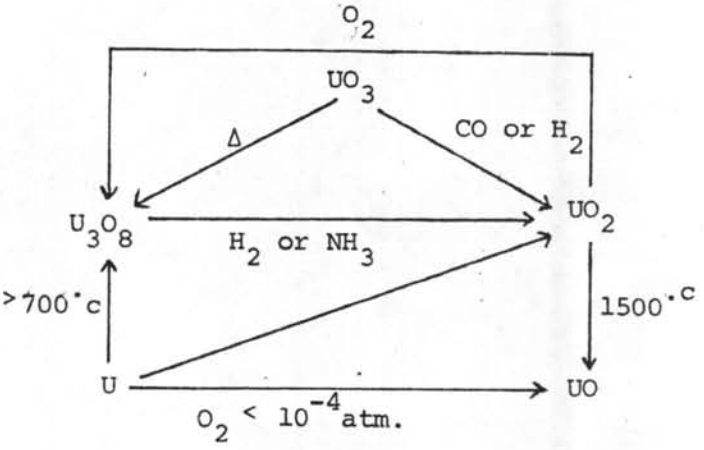
ออกไซด์ของยูเรเนียมมีหลายชนิด บางชนิดมีสัดส่วนกับออกซิเจนผันแปรได้ไม่เป็นไปตามสทอยชิโอมิทรี (Stoichiometry) โดยเฉพาะยูเรเนียมไดออกไซด์ ซึ่งออกไซด์ของยูเรเนียมที่เสถียรเท่าที่พบมี UO_2, U_4O_9, U_3O_8 และ UO_3 แต่ที่ยังไม่แน่นอนคือ U_3O_7, U_2O_5 และ UO

ยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) มีสีน้ำตาลเข้ม เกือบสีดำ มีจุดหลอมตัวที่ 2760°ซ. มีความหนาแน่น 10.952 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีโครงสร้างเป็นผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (Face-centered cubic) ผงของ UO_2 จะไม่เสถียร เมื่อถูกกับออกซิเจนจะมีคุณสมบัติเป็นไพโรโฟริก ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น U_3O_8

ไตรยูเรเนียมออกโตไซด์ (Triuranium-octoxide) (U_3O_8) จะมีสีดำ ถ้าเป็นแผ่นบางจะมีสีเขียวมะกอก (Olive green) เป็นออกไซด์ที่เสถียรในอากาศแม้ที่อุณหภูมิ 650 - 800°ซ. U_3O_8 มีอยู่ 3 รูปผลึก คือ ออร์โธรอมบิก (α -U_3O_8) ออร์โธ-รอมบิก (β -U_3O_8) และเฮกซะโกนัล (Hexagonal) (γ -U_3O_8)

ยูเรเนียมไตรออกไซด์ (UO_3) จะมีสีต่าง ๆ กันตั้งแต่สีน้ำตาลส้ม เหลือง แดง และแดงอิฐ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของรูปผลึกที่อาจเป็นออร์โธรอมบิก โมโนคลีนิค (Monoclinic) สูโดเตตระโกนัล (Pseudotetragonal) คิวบิก (Cubic) และไตรคลีนิค (Triclinic)

ออกไซด์ทั้งสามของยูเรเนียมจะมีปฏิกิริยาสัมพันธ์กัน ดังรูป 2.9



รูป 2.9 การเปลี่ยนแปลงจากโลหะยูเรเนียม เป็นออกไซด์ของยูเรเนียม [10,12]

ออกไซด์ของยูเรเนียมทุกตัว เมื่อนำมาเผาที่ 700°ซ.จะได้เป็น U_3O_8 [10]

2.7.3.5 เกลือของยูเรเนียม (Uranium Salt) [13]

ยูเรเนียมสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเกล็ดเกลือได้ทั้งจาก U^{+6} และ U^{+4} ได้เป็นเกลือยูเรนิล (Uranyl salt) และเกลือยูเรนัส (Uranous salt) ของเกลือไนเตรท (Nitrate salts) เกลือซัลเฟต (Sulphate salts) เกลือฟลูออไรด์ (Fluoride salts) เกลือคลอไรด์ (Chloride slats) เกลือฟอสเฟต (Phosphate salts) เกลือคาร์บอเนต (Carbonate salts) และเกลือเฮไลด์ (Halide salts)

เกลือไนเตรทมีอยู่ในรูปของเกลือไฮเดรท (Hydrate salts) คือ $UO_2(NO_3)_2.6H_2O$, $UO_2(NO_3)_2.3H_2O$, $UO_2(NO_3)_2.2H_2O$ และ $UO_2(NO_3)_2.H_2O$ ส่วน $UO_2(NO_3)_2$ ซึ่งเป็นแอนไฮดรัส (Anhydrous uranyl nitrate) นั้น เป็นผงสีเหลืองอ่อน มีปฏิกิริยาไวมากกับพวกน้ำ หรือแม้แต่สารอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ (Ether)

เกลือซัลเฟตมีอยู่ในรูปของ $UO_2SO_4.2\frac{1}{2}H_2O$, $U(SO_4)_2.4H_2O$ และ UO_2SO_4 ส่วน $UO_2SO_4.H_2O$ จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง

เกลือฟลูออไรด์มีอยู่ในรูปผลึกของ $UO_2F_2.2H_2O$ และ $UO_2F_2.2HF.4H_2O$ ส่วน UO_2F_2 ซึ่งเป็นแอนไฮดรัสยูเรนิลฟลูออไรด์ (Anhydrous uranyl fluoride)

นั้นจะมีสี เหลืองและ เสถียร เมื่ออุณหภูมิไม่ เกิน 300°c

เกลือคลอไรด์ที่ เป็นแอนไฮดรัส (UO_2Cl_2) นั้น จะมีสี เหลืองสด มีคุณสมบัติดูดความชื้นได้ดีกลาย เป็น $UO_2Cl_2.H_2O$ และ $UO_2Cl_2.3H_2O$ ซึ่งจะ เยิ้ม เหนียวและมีสี เขียว เรืองแสง

เกลือฟอส เฟตจะมีอยู่ในรูปของ $(UO_2)_3(PO_4)_2.6H_2O$, $(UO_2)_2P_2O_7$, $U(PO_3)_4$ และ $(UO_2)_3(PO_4)_2$ ซึ่ง เป็นแอนไฮดรัส

เกลือคาร์บอ เนตจะมีอยู่ในรูปของ $UO_2CO_3.2\frac{1}{2}H_2O$ (มีสี เหลือง), $UOCO_3.xH_2O$ (ตะกอนสี เขียว) และ UO_2CO_3 ซึ่ง เป็นแอนไฮดรัส

เกลือ เฮไลด์ของยู เร เนียมทุกตัวมีคุณสมบัติ เป็นไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) ดูดความชื้นในอากาศได้ดี ทำให้ เกิดการออกซิ เดชัน นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการระ เหย เร็ว (Volatility) เกลือ เฮไลด์ที่สำคัญคือ ยู เร เนียมฟลูออไรด์ (Uranium fluoride) และยู เร เนียมคลอไรด์ (Uranium chloride) ซึ่งที่พบจะมีอยู่ในรูปของ UF_3, UF_4, U_4F_{17}, U_2F_9, UF_5, UF_6; UCl_3, UCl_4, UCl_5, UCl_6; UI_3 และ UI_4 ตามลำดับ

สารละลายของ เกลือยู เร เนียมมีฤทธิ์ เป็นกรด เนื่องจาก เกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังสมการ

$$U^{+4} + H_2O \rightleftharpoons U(OH)^{+3} + H^+$$

2.8 ประโยชน์ของยู เร เนียม[1]

ทั้งโลหะยู เร เนียมและสารประกอบบางชนิดของยู เร เนียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ที่สำคัญ คือ

ก. ใช้ในการพัฒนาพลังงานนิว เคลียร์ตาม เป้าหมายทางการทหาร เช่น การวิจัยและพัฒนาอาวุธนิว เคลียร์ต่าง ๆ และในด้านอวกาศ (Space nuclear) เป็นต้น

ข. ในทางการค้าที่สำคัญที่สุดคือใช้ เป็น เชื้อ เพลิงใน เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์ เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าในโรงไฟฟ้านิว เคลียร์

ค. นำพลังงานความร้อนจาก เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

เคมีต่าง ๆ เช่น โรงงานกระดาษ น้ำตาล ปุ๋ย และอื่น ๆ โดยใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์

ง. ใช้เป็นสารเคมี เพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และใช้กำบังรังสีในเครื่องมือวิทยาศาสตร์

จ. ใช้ในอุตสาหกรรมการสร้างปีกเครื่องบิน โดยใช้ไลทะยูเรเนียม

ฉ. ใช้ในอุตสาหกรรมวัตถุระเบิด เพื่อเจาะอุโมงค์และการทำเหมืองแร่

ช. นำพลังงานนิวเคลียร์ไปพัฒนาใช้เป็นตัวดีซัลเตอร์ (Desalter)

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย