บทที่ 2

ยูเรเนียมและธอเรียม

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

2.1 ยูเรเนียม

ในปี ค.ศ. 1789 มาร์ติน ไฮน์ริช คลาพรอธ นักเคมีชาวเยอรมัน ได้ค้นพบธาตุยูเรเนียมในแร่พิทช์เบลนด์ (pitchblende) ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสี มีอยู่บนผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 4 ส่วนในล้านส่วน ในธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป มีปริมาณและครึ่งชีวิตดังนี้คือ

ยูเรเนียม-234	มีอยู่ร้อยละ 0.056	ครึ่งชีวิต 2.48×10^5 ปี
ยูเรเนียม-235	มีอยู่ร้อยละ 0.7205	ครึ่งชีวิต 7.13×10^8 ปี
ยูเรเนียม-238	มีอยู่ร้อยละ 99.274	ครึ่งชีวิต 4.51×10^9 ปี

ยูเรเนียมมีความสำคัญมากในด้านเป็นเชื้อเพลิงปรมาณู ในระยะแรกนักวิทยาศาสตร์สนใจแร่ยูเรเนียมเพียงแต่จะแยกเอาเรเดียมออกมาเพื่อใช้รักษาโรคมะเร็งเท่านั้น ส่วนยูเรเนียมถือว่าไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนำไปใช้ให้สีแก่เครื่องเคลือบ และเครื่องแก้ว

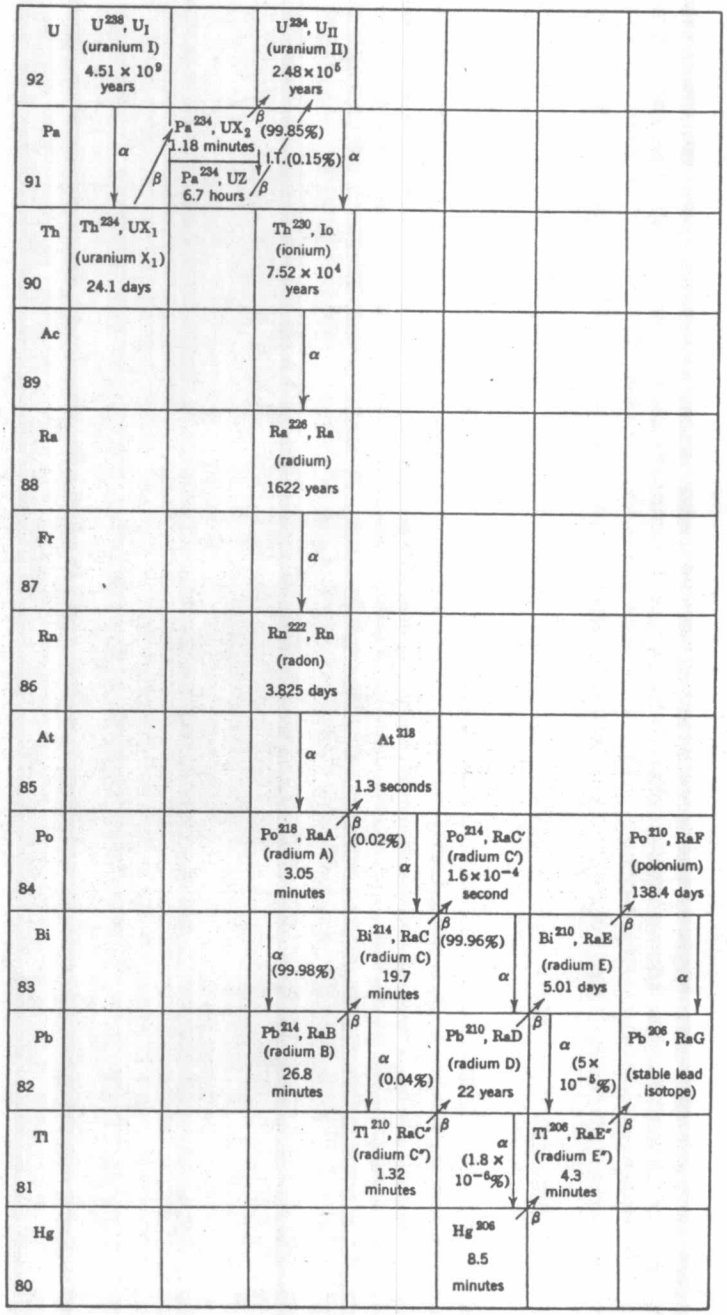
ยูเรเนียม-235 เมื่อจับนิวตรอนพลังงานต่ำ สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) ให้พลังงานออกมาประมาณ 200 MeV(million electron volt) ต่อครั้ง ส่วนยูเรเนียม-238 เมื่อจับนิวตรอนพลังงานต่ำ จะเปลี่ยนไปเป็นพลูโตเนียม -239 ดังสมการต่อไปนี้

$$^{238}_{92}U\,(n,\gamma)\,^{239}_{92}U \xrightarrow[23.5\ \text{นาที}]{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow[2.35\ \text{วัน}]{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu$$

พลูโตเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิงปรมาณูชนิดที่มนุษย์ผลิตขึ้น (man - made nuclear fuel) เมื่อจับนิวตรอนพลังงานต่ำสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกับยูเรเนียม-235

2.2 อนุกรมยูเรเนียม

อนุกรมยูเรเนียมตั้งต้นจากยูเรเนียม-238 สลายตัวให้อนุภาคอัลฟาเกิดเป็นธอเรียม-234 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสีสลายตัวต่อเนื่องกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียร(stable isotope)



รูปที่ 2.1[13] อนุกรมยูเรเนียม

ตารางที่ 2.1[33]

กัมมันตภาพรังสีจากอนุกรมยูเรเนียม

Radioactive species	Nuclide	Half-life	Major radiations, approximate energies (MeV) and intensities (%)	
Uranium I (UI)	$^{238}_{92}U$	4.51×10^9 y	alpha	4.20 (75 %), 4.15 (25 %)
Uranium X_1 (UX_1)	$^{234}_{90}Th$	24.10 d	beta	0.191 max
Uranium X_2 (UX_2)	$^{234}_{91}Pa$	1.175 m	beta	2.29 max
Uranium Z (UZ)	$^{234}_{91}Pa$	6.75 h	beta	1.13 max
			gamma	0.100 (50 %), 0.126 (26 %), 0.22 (14 %), 0.36 (13 %), 0.56 (15 %) 0.70 (24 %), 0.90 (70 %), 1.08(12 %)
Uranium II (U II)	$^{234}_{92}U$	2.47×10^5 y	alpha	4.77 (72 %), 4.72 (28 %)
Ionium (Io)	$^{230}_{90}Th$	7.5×10^4 y	alpha	4.68 (76 %), 4.62 (24 %)
Radium (Ra)	$^{226}_{88}Ra$	1622 y	alpha	4.78 (95 %), 4.60 (6 %)
			gamma	0.186 (4 %)
Ra Emanation (Rn)	$^{222}_{86}Em$	3.825 d	alpha	5.49 (100 %)
Radium A (RaA)	$^{218}_{84}Po$	3.05 m	alpha	6.00 (100 %)
Radium B (RaB)	$^{214}_{82}Pb$	26.8 m	beta	1.03 max (6 %), 0.67 max
			gamma	0.242 (4 %), 0.295 (19 %) 0.352 (36 %)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Radioactive species	Nuclide	Half-life	Major radiations, approximate energies (MeV) and intensities (%)	
Astatine-218 (^{218}At)	$^{218}_{85}$At	1.5-2.1 s	alpha	6.70 (94 %), 6.65 (6 %)
Radium C (RaC)	$^{214}_{83}$Bi	19.7 m	beta	3.26 max
			gamma	0.609 (47 %), 0.769 (5 %), 0.935 (3 %) 1.120 (17 %), 1.238 (6 %), 1.378 (5 %) 1.40 (4 %), 1.509 (2 %), 1.728 (3 %) 1.746 (17 %), 1.848 (2 %), 2.117 (1 %) 2.204 (5 %), 2.442 (2 %)
Radium C' (RaC')	$^{214}_{84}$Po	1.64x10^{-4} s	alpha	7.69 (100 %)
Radium C" (RaC")	$^{210}_{81}$Tl	1.32 m	beta	2.3 max
			gamma	0.296 (80 %), 0.795 (100 %), 1.08 (19 %), 1.21 (17 %), 1.31 (21 %), 2.01 (7 %), 2.09 (5 %), 2.36 (8 %), 2.43 (9 %)
Radium D (RaD)	$^{210}_{82}$Pb	22.0 y	alpha	3.27
			beta	0.061 max
Radium E (RaE)	$^{210}_{83}$Bi	5.013 d	beta	1.160 max
Radium F (RaF)	$^{210}_{84}$Po	138.40 d	alpha	5.305 (100 %)
Thallium-206 (^{206}Tl)	$^{206}_{81}$Tl^{2}	4.23 m	beta	1.52 max
Radium G (RaG)	$^{206}_{82}$Pb	stable		

2.3 ธอเรียม

ในปี ค.ศ. 1828 เบอร์ซีเลียส นักเคมีชาวสวีเดน ได้ค้นพบธาตุธอเรียมในแร่ธอไรท์ (thorite) ธอเรียมเป็นธาตุกัมมันตรังสี มีอยู่บนผิวโลกเฉลี่ยประมาณ 12 ส่วนในล้านส่วน มักเกิดร่วมกับยูเรเนียม และแรร์เอิร์ธ (rare-earths) ธอเรียมในธรรมชาติ มีไอโซโทปเดียวคือ ธอเรียม-232 มีครึ่งชีวิต 1.39 x 10^{10} ปี

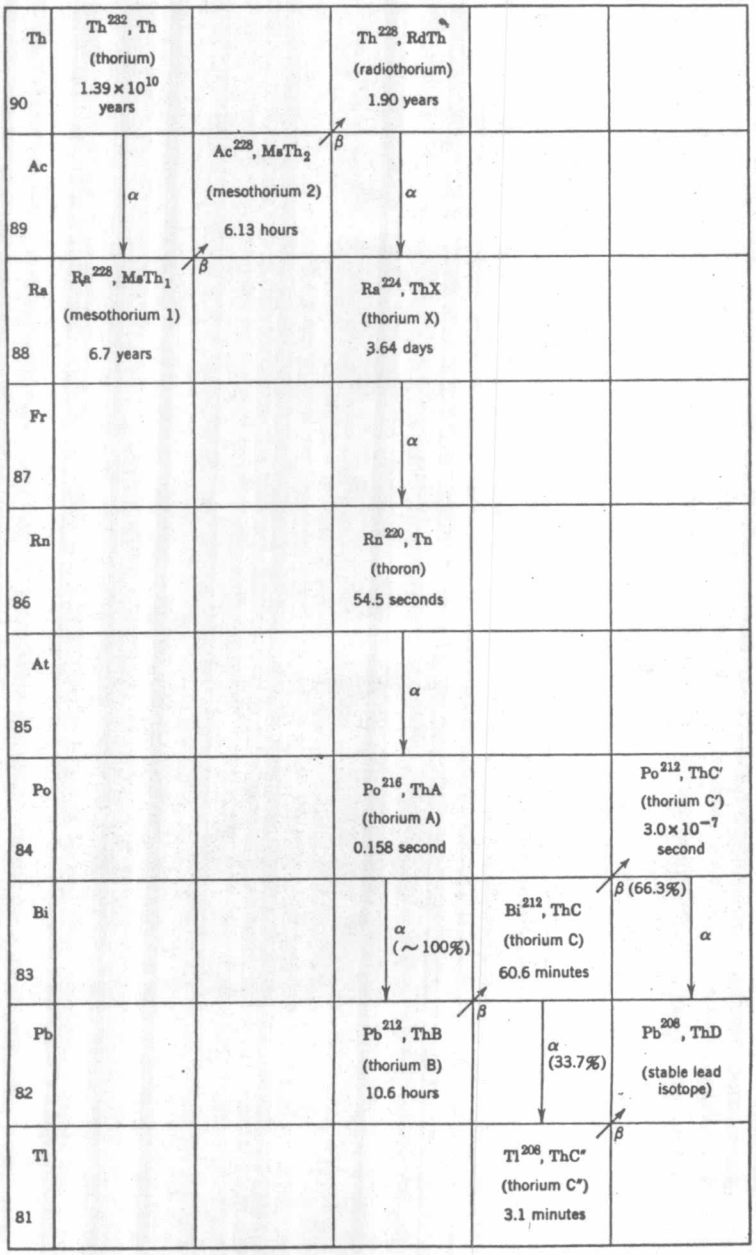
ในระยะแรกธอเรียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมทำไส้ตะเกียงเจ้าพายุ อุตสาหกรรมโลหะผสม และอุตสาหกรรมทำไส้หลอดไฟฟ้า เป็นต้น ต่อมาในระยะหลังจึงทราบว่าธอเรียมมีความสำคัญทางด้านเชื้อเพลิง – ปรมาณู เมื่อพบว่าธอเรียม-232 จับนิวตรอนพลังงานต่ำจะเปลี่ยนไปเป็น ยูเรเนียม -233 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$^{232}_{90}\mathrm{Th}\,(n,\gamma)\,^{233}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[22.2\text{นาที}]{\beta^-} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[27.4\ \text{วัน}]{\beta^-} {}^{233}_{92}\mathrm{U}$$

ยูเรเนียม -233 เมื่อจับนิวตรอนพลังงานต่ำ สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกับยูเรเนียม-235 และ พลูโตเนียม -239 ในปัจจุบันมนุษย์มุ่งที่จะใช้ธอเรียมเป็นเชื้อเพลิงปรมาณูสำหรับเตาปฏิกรณ์แบบบรีดเดอร์ (breeder reactor)

2.4 อนุกรมธอเรียม

อนุกรมธอเรียมตั้งต้นจากธอเรียม-232 สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เกิดเป็นเรเดียม-228 ซึ่งเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวต่อเนื่องกันไปดังรูปที่ 2.2 ไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-208 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร



รูปที่ 2.2.[13] อนุกรมธอเรียม

ตารางที่ 2.2[33]

กัมมันตภาพรังสีจากอนุกรมธอเรียม

Radioactive species	Nuclide	Half-life	Major radiations, approximate energies (MeV) and intensities (%)	
Thorium (Th)	$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10} y	alpha	4.01 (76 %), 3.95 (24 %)
Mesothorium 1(MsTh 1)	$^{228}_{88}Ra$	6.7 y	beta	0.05 max
Mesothorium 2(MsTh 2)	$^{228}_{89}Ac$	6.13 h	beta	2.11 max
			gamma	0.32 (15 %), 0.908 (25 %), 0.96 (20 %)
Radiothorium (RdTh)	$^{228}_{90}Th$	1.910 y	alpha	5.43 (71 %), 5.34 (28 %)
Thorium X (ThX)	$^{224}_{88}Ra$	3.64 d	alpha	5.68 (94 %), 5.45 (6 %)
			gamma	0.241 (3.7 %)
Th Emanation (Tn)	$^{220}_{86}Em$	54.5	alpha	6.29 (100 %)
Thorium A (ThA)	$^{216}_{84}Po$	0.145 s	alpha	6.78 (100 %)
Thorium B (ThB)	$^{212}_{82}Pb$	10.64 h	beta	0.58 max
			gamma	0.239 (47 %), 0.300 (3.2 %)
Thorium C (ThC)	$^{212}_{83}Bi$	60.60 m	alpha	6.09 (10 %), 6.05 (25 %)
			beta	2.25 max
			gamma	0.727 (7 %), 0.785 (1.1 %), 1.620 (1.8 %)
Thorium C'(ThC')	$^{212}_{84}Po$	3.04×10^{-7} s	alpha	8.78 (100 %)
Thorium C''(ThC'')	$^{208}_{81}Tl$	3.10 m	beta	1.80 max
			gamma	0.511 (23 %), 0.583 (86 %), 0.860 (12 %), 2.614 (100 %)
Thorium D (ThD)	$^{208}_{82}Pb$	stable		

2.5 แร่ยูเรเนียมและแร่ธอเรียม

แร่ยูเรเนียมและแร่ธอเรียมมีมากกว่าร้อยชนิด แต่ชนิดที่สำคัญมีน้อย แยกตามประเภทได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 ประเภทออกไซด์(Oxides) มีแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ ยูเรนิไนท์ (uraninite) พิทช์เบลนด์ (pitchblende) และ ธอเรียไนท์ (thorianite)

ก. ยูเรนิไนท์ แร่ชนิดนี้เป็นแร่ที่มีปริมาณยูเรเนียมสูงสุด ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ยูเรเนียมในรูปยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) แต่ที่พบโดยทั่วไปมีสูตรระหว่าง UO_2 กับ U_3O_8 ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 62.5 ถึง 76.5 เปอร์เซนต์ มีธอเรียม และ แรร์เอิร์ธปนอยู่ด้วย และอาจจะมีปริมาณสูง แร่มีลักษณะเป็นก้อนสีดำปนเทา วาวคล้ายโลหะ หรือเป็นมันแบบยางสน มีความถ่วงจำเพาะ 7.7 - 10.8มีระบบผลึกแบบไอโซเมตริก(isometric system)

ข. พิทช์เบลนด์ พิทช์เบลนด์เป็นแร่ชนิดเดียวกันกับยูเรนิไนท์ แต่ไม่มีทรงผลึก (amorphous) ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 52.3 ถึง 76.5 เปอร์เซนต์ มีธอเรียม และแรร์เอิร์ธปนอยู่ในปริมาณต่ำ แร่มีลักษณะเป็นก้อนหรือเป็นชิ้นบาง ๆ ในสายแร่ มีสีดำ หรือดำปนเทา ผิวมันหรือด้านมัว มีความถ่วงจำเพาะ 4.8 - 7.7

ค. ธอเรียไนท์ เป็นแร่ที่มีปริมาณธอเรียมสูงสุด เนื้อแร่ประกอบด้วยธอเรียมไดออกไซด์ (ThO_2) และยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) ปริมาณธอเรียมอยู่ระหว่าง 45.3 ถึง 87.9 เปอร์เซนต์ ปริมาณยูเรเนียมอาจสูงถึง 46.5 เปอร์เซนต์ แร่มีลักษณะเป็นก้อน หรือเป็นเม็ดสีเทา ดำ หรือน้ำตาล วาวคล้ายโลหะ หรือ เป็นมันแบบยางสน มีความถ่วงจำเพาะ 9.2 - 9.7

2.5.2 ประเภทออกไซด์เชิงซ้อน (Complex Oxides) แร่ประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

2.5.2.1 พวกที่มีนิโอเบียม (Nb) และ แทนทาลัม (Ta) เป็นองค์ประกอบ แร่พวกนี้ได้แก่ แร่ซามาร์สไกท์ (samarskite)

ก. ซามาร์สไกท์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ นิโอเบียม แทนทาลัม ยูเรเนียม และธอเรียม มักพบไททาเนียม ดีบุก และ ทังสะเตน ปนอยู่ในปริมาณต่ำ สูตรของซามาร์สไกท์คือ AB_2O_6 เมื่อ A = Y, Ce, U, Ca, Fe^{2+}, Pb, Th, La และ B = Nb, Ta, Fe^{3+}, Ti, Sn, W ปริมาณนิโอเบียมมีประมาณ 32-48 เปอร์เซนต์นิโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) แทนทาลัม 5-12 เปอร์เซนต์แทนทาลัมออกไซด์ (Ta_2O_5) มียูเรเนียมและธอเรียมสูงประมาณ 20 เปอร์เซนต์ และ 4 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ แร่ชนิดนี้มีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ คล้ายกรวด หรือเป็นเม็ด มีสีดำ หรือ ดำปนน้ำตาล รอยแตกมีความมันวาวคล้ายโลหะหรือยางสน มีความถ่วงจำเพาะ 5.25 - 5.69 ในประเทศไทยพบแร่ชนิดนี้ในแหล่งแร่ดีบุก ที่อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา

2.5.2.2 พวกที่ไม่มีนิโอเบียม และแทนทาลัมเป็นองค์ประกอบ มีแร่ที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ ดาวิไดท์ (davidite) และ แบรนเนไรท์ (brannerite)

ก. ดาวิไดท์ มีสูตรเป็น $AB_3(O, OH)_7$ เมื่อ A = Fe^{2+}, rare earths, U, Ca, Na, Zr, Th; B = Ti^{4+}, Fe^{3+}, U, V^{3+}, Cr^{3+} ปริมาณไททาเนียมสูงประมาณ 52-54 เปอร์เซนต์ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ยูเรเนียมประมาณ 2.0 - 8.4 เปอร์เซนต์ อาจมีธอเรียมอยู่ในปริมาณต่ำ ลักษณะแร่เป็นก้อน หรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีดำ แววมาวคล้ายโลหะหรือคล้ายแก้ว มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4.5

ข. แบรนเนไรท์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ยูเรเนียม ธอเรียม ไททาเนียม แคลเซียม เหล็ก และ อิตเตรียม สูตรของแร่ชนิดนี้ คือ $(U, Ca, Fe, Y, Th)_3 Ti_5O_{16}$ ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 27.9 ถึง 43.6 เปอร์เซนต์ มีธอเรียม 0.26 ถึง 4.4 เปอร์เซนต์ ลักษณะแร่เป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือเป็นก้อนสีดำ น้ำตาล น้ำตาลปนเหลือง หรือน้ำตาลปนแดง มีความวาวคล้ายยางสนหรือคล้ายโลหะ มีความถ่วงจำเพาะ 4.5 - 5.4

2.5.3 ประเภทคาร์บอเนต (Carbonates) มีแร่ที่สำคัญอยู่ชนิดเดียว คือ เชรีกกิงเกอไรท์ (schroeckingerite)

ก. เซริกกิงเกอไรท์ เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปเกลือเชิงซ้อน มีสูตร คือ $NaCa_3(UO_2)(CO_3)_3(SO_4)F \cdot 10\,H_2O$ มีปริมาณยูเรเนียมประมาณ 26.1 - 27.0 เปอร์เซนต์ เนื้อแร่มีสีเหลืองหรือเหลืองปนเขียว ลักษณะเป็นเกล็ดหรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ มีความวาวคล้ายแก้วหรือมุก ความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.5

2.5.4 ประเภทฟอสเฟต (Phosphates) แร่ประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

2.5.4.1 พวกที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (hydrated phosphates) แร่ที่สำคัญได้แก่ ออทูไนท์ (autunite) และ ทอร์เบอร์ไนท์ (torbernite)

ก. ออทูไนท์ เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปแคลเซียม ยูเรนิล ฟอสเฟต (calcium uranyl phosphate) มีสูตร คือ $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10\text{-}12\,H_2O$ มียูเรเนียม 43.0 - 52.5 เปอร์เซนต์ แร่มีลักษณะเป็นแผ่น หรือเป็นชิ้นบาง ๆ สีเหลือง เหลืองปนเขียว หรือเขียวอ่อน วาวแบบมุกหรือแก้ว มีความถ่วงจำเพาะ 3.0 - 3.2

ข. ทอร์เบอร์ไนท์ เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปทองแดง ยูเรนิล ฟอสเฟต (copper uranyl phosphate) มีสูตร คือ $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12\,H_2O$ ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 57 - 61 เปอร์เซนต์ยูเรเนียมไตรออกไซด์ (UO_3) แร่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ สีเขียวอ่อน หรือเขียวแก่ วาวคล้ายมุก แก้ว หรือไมกา (mica) เกลือบอยู่ตามหิน มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.2 ในประเทศไทยพบแร่ประเภทนี้ที่จังหวัดสงขลา และสุราษฎร์ธานี

2.5.4.2 พวกที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (nonhydrated phosphates) แร่ที่สำคัญได้แก่ โมนาไซท์ (monazite)

ก. โมนาไซท์ เป็นแร่ในรูปเกลือฟอสเฟตของซอเรียมและแรร์เอิร์ธ ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ซีเรียม แทนทาลัม ซอเรียม อิตเตรียม และยูเรเนียม ปริมาณซีเรียมออกไซด์ และแลนทานัมออกไซด์ รวมกันสูงสุดถึง 60.6 เปอร์เซนต์ ปริมาณซอเรียมสูงสุดที่พบโดยทั่วไปประมาณ 10 เปอร์เซนต์ แต่ที่พบในประเทศศรีลังกามีปริมาณซอเรียมสูงถึง 28.20 เปอร์เซนต์ซอเรียมไดออกไซด์ ยูเรเนียมปนอยู่ในปริมาณ

ต่ำ ก็อระหว่าง 0.1 ถึง 1 เปอร์เซนต์ สูตรทางเคมีของโมนาไซท์ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันคือ (Ce,La,Y,Th) PO_4 ธาตุอื่นที่อาจพบปนอยู่ด้วยได้แก่ เหล็ก อลูมิเนียม แมงกานีส แคลเซียม แมกเนเซียม ตะกั่ว ดีบุก ซิลิกอน ไทเทเนียม และ เซอร์โคเนียม ลักษณะแร่เป็นเม็ดมน หรือเกล็ดเล็ก ๆ ปนอยู่ในดิน หิน หรือทราย มีสีน้ำตาล น้ำตาลปนแดง น้ำตาลปนเหลือง เหลือง หรือเขียว ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 4.9 ถึง 5.5

แหล่งแร่โมนาไซท์ที่สำคัญของโลกได้แก่ บริเวณชายฝั่งทะเล ของประเทศอินเดีย และ บราซิล สำหรับประเทศไทยพบแหล่งแร่โมนาไซท์หลายแห่ง เช่น พบอยู่ร่วมกับแหล่งแร่ดีบุกตามชายฝั่งทะเล และในทะเลภาคใต้บริเวณจังหวัดพังงา ภูเก็ต และระนอง นอกจากนี้ยังพบตามชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก เช่น ที่ตำบลมาบตาพุด จังหวัดระยอง เป็นต้น

2.5.5 ประเภทวานาเดท (Vanadates) มีแร่ชนิดที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ การ์โนไทท์ (carnotite) และ ทยูยามูไนท์ (tyuyamunite)

ก. การ์โนไทท์ เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปโปแตสเซียม ยูเรนิล วานาเดท (potassium uranyl vanadate) มีสูตร คือ $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 51.7 - 54.5 เปอร์เซนต์ เนื้อแร่เป็นผงละเอียดคล้ายดิน มีสีเหลืองสด เคลือบอยู่ตามหินหรือดิน มีความถ่วงจำเพาะ 4.7

ข. ทยูยามูไนท์ เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปแคลเซียม ยูเรนิล วานาเดท (calcium uranyl vanadate) มีสูตร คือ $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5\text{-}8H_2O$ มียูเรเนียม 44.5 - 52.5 เปอร์เซนต์ เนื้อแร่เป็นผงละเอียดคล้ายดินหรือเป็นเกล็ดเล็ก ๆ สีเหลือง หรือเหลืองปนเขียว มีความถ่วงจำเพาะ 3.3 - 3.6

2.5.6 ประเภทซิลิเกต (Silicates) แร่ประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

2.5.6.1 พวกที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (hydrated silicates) มีแร่ที่สำคัญ คือ ยูเรโนเฟน (uranophane)

001142

ตารางที่ 2.3[17),(30)]

แร่ยูเรเนียมและแร่ธอเรียมบางชนิด

No	Mineral and Formula	Crystal System and Aggregation	Color	Streak	Luster	Content of Valuable Components	Specific Gravity
1	Autunite; $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2.10\text{-}12\ H_2O$	Tetragonal; Scaly aggregates, powdery masses	Yellow, slightly greenish	Yellow	Pearly, vitreous	43.0 to 52.5 % U	3.0-3.2
2	Brannerite; $(U,Ca,Fe,Y,Th)_3Ti_5O_{16}$	Monoclinic; Prismatic, curved disseminated crystals and very fine crystals in cement of metamorphosed conglomerates	Brownish yellow, on fracture black	Greenish brown	Submetallic to resinous	27.9 to 43.6 % U 0.26 to 4.4 % Th	4.5-5.4
3	Carnotite; $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3\ H_2O$	Monoclinic; Micaceous, more often powdery, masses	Yellow with various tints	Yellow	Pearly, Vitreous	51.7 to 54.5 % U	4.7

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

o	Mineral and Formula	Crystal System and Aggregation	Color	Streak	Luster	Content of Valuable Components	Specific Gravity
4	Coffinite; $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	Tetragonal; Fine crystalline aggregates usually associated with pitchblende in earthy masses	Black	Gray	Vitreous to resinous, in aggregates dull	40.8 to 60.1 % U	up to 5.1
5	Davidite; $AB_3(O,OH)_7$ A=Fe^{2+}, rare earths, U, Ca Na, Zr, Th B=Ti^{4+}, Fe^{3+}, U, V^{3+}, Cr^{3+}	Hexagonal; Crystalline aggregates, cubic, octahedral and like crystals and disseminated irregular grains	Black with brownish tint	Black with brownish tint	Vitreous to metallic	2.0 to 8.4 % U 52 to 54 % TiO_2	4.5
6	Monazite; $(Ce,La,Th)(PO_4)(SiO_4)$ or $(Ce,La,Y,Th)PO_4$	Monoclinic; Minute flattened crystals	Brown, Yellow, sometimes nealy white to greenish	Colorless	Resinous	60.6 % $(Ce,La)_2O_3$ to 10 % Th 0.1 to 1.0 % U	4.9-5.5
7	Pitchblende; $mUO_2 \cdot nUO_3 \cdot lPbO$ or $UO_{2.16-2.70}$	Amorphous; Streaks and pockets of incrustations and colloform masses	Black	Black	Strong resinous to dull	52.3 to 76.5 % U	4.8-7.7

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

No	Mineral and Formula	Crystal System and Aggregation	Color	Streak	Luster	Content of Valuable Components	Specific Gravity
8	Samarskite; AB_2O_6 A = Y, Ce, U, Ca, Fe^{2+}, Pb, Th, La B = Nb, Ta, Fe^{3+}, minor Ti, Sn, W	Orthorhombic; Prismatic and platy crystals	Velvet black to brown, frequently brown crusts	Dark brown	Greasy dull, resinous on	32-48 % Nb_2O_5 5-12 % Ta_2O_5 to 23 % UO_2 up to 4 % Th	5.25-5.69
9	Schroeckingerite; $NaCa_3[UO_2(CO_3)_3SO_4F] \cdot 10\ H_2O$	Orthorhombic; Micaceous, globular, flocculent aggregates and powdery coatings	Yellow, greenish yellow	Yellow	Vitreous to pearly	26.1 to 27.0 % U	2.51
10	Thorianite; ThO_2 (Contains UO_2 and PbO)	Isometric; Cubic and orbicular crystals, twins	Dark gray to black	Gray, black	Resinous, submetallic	45.3 to 87.9 % Th up to 46.5%U	9.2-9.7
11	Thorite; $ThSiO_4$	Tetragonal; Tetragonal crystals and amorphous hydrated masses (orangite)	Orange yellow to black	Yellow, brown	Resinous	49-75 % Th up to 10 % U	4-6

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

No	Mineral and Formula	Crytal System and Aggregation	Color	Streak	Luster	Content of Valuable Components	Specific Gravity
12	Torbernite; $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12\ H_2O$	Tetragonal; Fine micaceous aggregates	Green	Green	Vitreous	57 - 61 % UO_3	3.2
13	Tyuyamunite; $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5\text{-}8\ H_2O$	Orthorhombic; Small scales and powdery masses	Yellow of various tints	Yellow	Pearly, vitreous	44.5 to 52.5 % U	3.3-3.6
14	Uraninite; $(U^{4+},Th)_{1-x}\ U^{6+x}\ O_{2+x}$	Isometric; Crystals, aggregates, imbedded crystals, fine crystalline masses	Black	Black	Resinous, submetallic on faces	62.8 to 76.5 % U	7.7-10.8
15	Uranophane and beta-uranotil $Ca(UO_2)_2(Si_2O_7) \cdot n\ H_2O$ or $Ca(H_3O)_2(UO_2)_2 \cdot (SiO_4)_2 \cdot 3\ H_2O$	Monoclinic; Powder, thin crusts and radiating aggregates (the latter in beta-urarotil)	Straw yellow, beta-urarotil orange yellow	Yellow	Vitreous	49.8 to 55.9 % U	3.81-3.96

ก. ยูเรโนเฟน เป็นแร่ยูเรเนียมในรูปแคลเซียม ยูเรนิล ซิลิเกต (calcium uranyl silicate) มียูเรเนียม 49.8 - 55.9 เปอร์เซนต์ ลักษณะของแร่เป็นผงละเอียดหรือเป็นผลึกรูปเข็ม แผ่เป็นวงกลมหรือตัดกันไปมา มีสีเหลืองอ่อน เหลือง-ส้ม หรือเหลืองเขียว มีความวาวคล้ายมุกหรือขี้ผึ้ง มีความถ่วงจำเพาะ 3.81 - 3.96

2.5.6.2 พวกที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (nonhydrated silicates) มีแร่ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ ธอไรท์ (thorite) และ คอฟฟีไนท์ (coffinite)

ก. ธอไรท์ เป็นแร่ที่มีธอเรียมปริมาณสูงรองจากธอเรียไนท์ ธอเรียมอยู่ในรูปของธอเรียมซิลิเกต (thorium silicate) มีสูตร คือ $ThSiO_4$ ปริมาณธอเรียมอยู่ระหว่าง 49-75 เปอร์เซนต์ธอเรียมไดออกไซด์ มีปริมาณยูเรเนียมสูงสุดประมาณ 10 เปอร์เซนต์ แร่มีลักษณะเป็นก้อนหรือเป็นเม็ด สีดำ ดำปนเขียว น้ำตาล ส้ม เหลือง หรือ เขียว มีความถ่วงจำเพาะ 4-6

ข. คอฟฟีไนท์ มีสูตรทั่วไปคือ $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$ (เมื่อ x มีค่าน้อยกว่า 1) ปริมาณยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 40.8-60.1 เปอร์เซนต์ ลักษณะแร่เป็นเม็ดละเอียด สีดำแววววาว มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5

2.6 แหล่งแร่ยูเรเนียม

แหล่งแร่ยูเรเนียมที่สำคัญ ๆ จำแนกออกเป็นประเภทได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 ประเภทที่เกิดเป็นสายแร่ (Vein-type Deposits)

สายแร่ยูเรเนียมเกิดแทรกอยู่ตามรอยแตกของหินชนิดต่าง ๆ สายแร่มีลักษณะเป็นแผ่นกว้างและแบน หรือเป็นแผ่นบาง ๆ มีความกว้างตั้งแต่สองสามนิ้วจนกระทั่งเป็นฟุต บางแห่งมีความยาวเป็นร้อย ๆ ฟุต แร่ที่เกิดเป็นสายแร่ได้แก่ แร่พิทช์เบลนด์ และ แร่ยูเรนิไนท์

2.6.2 ประเภทที่เกิดในหินชั้น (Deposit in Sedimentary Rocks)

2.6.2.1 ประเภทที่เกิดในหินทราย (Sandstone - type Deposits) แหล่งแร่ยูเรเนียมประเภทนี้นับว่ามีความสำคัญมาก ที่พบโดยทั่วไปเป็นแหล่งแร่ขนาดใหญ่ แร่ยูเรเนียมจะเกิดแทรกอยู่ตามช่องว่างในหินทราย เคลือบตามเม็ดทราย หรือเป็นตัว-

ประสานระหว่างเม็ดทราย และตามรอยแตก แร่ยูเรเนียมที่เกิดแบบนี้ได้แก่แร่ยูเรนิไนท์ แร่คอฟฟิไนท์ และแร่คาร์โนไทท์ เป็นต้น ธาตุที่พบร่วมด้วยเสมอคือ วานาเดียม และทองแดง แหล่งแร่ที่สำคัญได้แก่บริเวณที่ราบสูงโคโลราโด ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับในประเทศไทยพบแหล่งแร่ประเภทนี้ บริเวณ "แหล่งแร่ยูเรเนียม ประตูหมา" อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น

2.6.2.2 ประเภทที่เกิดในหินกรวดมน (Quartz - Pebble Conglomerates) เป็นแหล่งแร่ที่มีขนาดใหญ่ และมีคุณค่าทางเศรษฐกิจแบบหนึ่ง มักจะพบยูเรเนียมเกิดรวมอยู่กับทอง แร่ยูเรเนียมที่สำคัญที่เกิดแบบนี้ได้แก่ แร่ยูเรนิไนท์ แร่พิทช์เบลนด์ และ แร่แบรนเนไรท์

สำหรับแร่ยูเรเนียมประเภทที่เกิดในหินฟอสเฟต หินดินดาน และถ่านหิน พบว่ามีความสำคัญน้อยกว่าประเภทที่เกิดในหินทราย และหินกรวดมน

2.6.3 ประเภทที่เกิดในลานแร่ (Placer Deposits)

แหล่งแร่ยูเรเนียมประเภทนี้ จะพบแร่ยูเรเนียมรวมปะปนกับแร่ชนิดอื่นอยู่ในลานแร่ หรือในแองแร่ แร่ที่เกิดแบบนี้ เช่น แร่กระกูลโคลัมไบท์–แทนทาไลท์ (columbite - tantalite) แร่โมนาไซท์ แร่ซีโนไรท์ แร่ซีเรียไนท์ และ แร่ซามาร์สไกท์ เป็นต้น ทางภาคใต้ของประเทศไทยพบแร่ซามาร์สไกท์ในลานแร่คีบุก–วุลแฟรม ที่ตำบลบ้านคึกคัก อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา

2.6.4 ประเภทที่เกิดในหินอัคนี (Deposit in Igneous Rocks)

แร่ยูเรเนียมที่เกิดในหินอัคนี มักเกิดเป็นสายแร่ หรือ เกิดแบบกระจาย (dissemination) แหล่งแร่ยูเรเนียมประเภทนี้แม้จะมีบริเวณกว้าง แต่โดยทั่วไปไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอที่จะเปิดทำเหมืองได้ ในประเทศไทยก็พบแร่ยูเรเนียม ที่เกิดในหินอัคนีเช่นกันคือ ที่บ้านทุ่งโพธิ์ และบ้านทุ่งขมิ้น อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และที่บ้านขุนทองหลาง อำเภอบ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี แต่ว่ามีปริมาณน้อย

2.7 วิธีสำรวจยูเรเนียม

วิธีสำรวจยูเรเนียมมีอยู่หลายวิธี วิธีที่สำคัญ ๆ ได้แก่ วิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสี (radiometric surveys) วิธีตรวจวัดกาซเรดอน (radon measurement surveys) วิธีสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (geophysical surveys) วิธีสำรวจทางธรณีเคมี geochemical surveys) และ วิธีเจาะสำรวจ (exploration drilling)

2.7.1 วิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสี

วิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสี เป็นวิธีที่สำคัญที่สุดในการสำรวจยูเรเนียม แร่ยูเรเนียมเป็นแร่กัมมันตรังสีให้ทั้งรังสีอัลฟา เบตา และ แกมมา โดยทั่วไปจะมุ่งวัดรังสี-แกมมา เนื่องจากมีอำนาจทะลุทะลวงสูง ทำให้สามารถตรวจวัดได้ในระยะห่าง รังสีแกมมาที่สำคัญจากแร่ยูเรเนียมคือ รังสีแกมมาพลังงานสูงจากบิสมัธ-214 สิ่งที่ต้องคำนึงในการสำรวจกัมมันตภาพรังสีก็คือ นอกจากแร่ยูเรเนียมแล้ว กัมมันตภาพรังสีที่ตรวจวัดได้อาจมาจากแร่ธอเรียม และ โปแตสเซียม-40 ในกรณีที่ใช้เครื่องมือสำรวจชนิดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ (gamma spectrometer) วัดแบบแยกพลังงาน สามารถบอกได้ว่ารังสีแกมมาที่วัด ได้มาจากแร่ยูเรเนียม แร่ธอเรียม หรือโปแตสเซียม-40 เนื่องจากมีพลังงานต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4

การสำรวจวิธีนี้จะใช้ได้ผลในกรณีที่แร่อยู่บริเวณผิวดิน หรือ ใต้ดินเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน หรือ หิน ที่ปกคลุมอยู่ ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสีจะนำไปเขียนเป็นแผนที่ แสดงความเข้มของกัมมันตภาพรังสี เพื่อดูบริเวณที่มีกัมมันตภาพรังสีสูงผิดปกติ (anomalous radioactivity) ก่อนจะทำการสำรวจละเอียดต่อไป

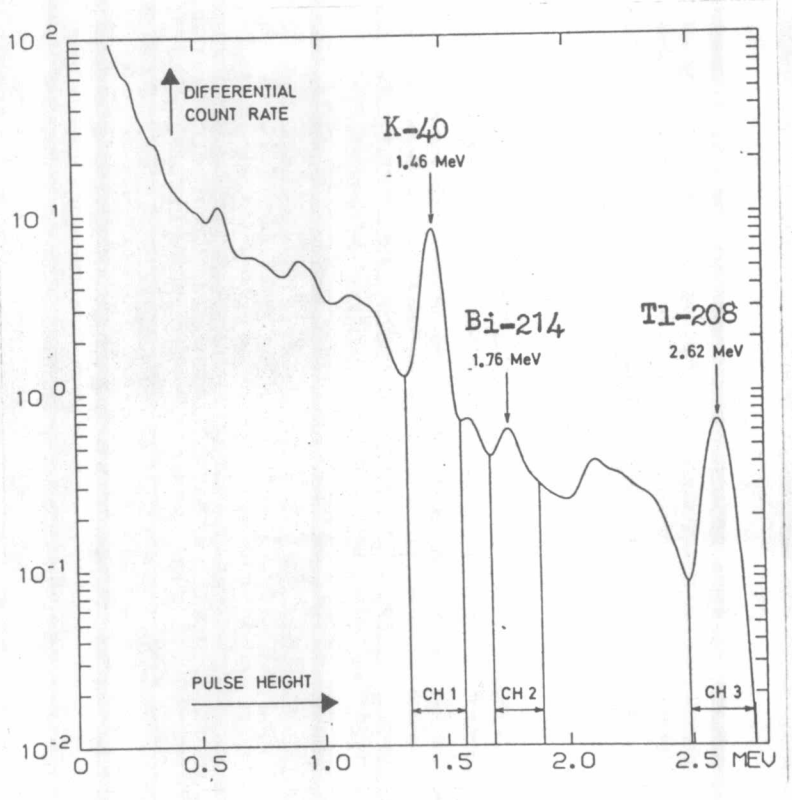
วิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสีแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การสำรวจทางอากาศ (air-borne surveys) และ การสำรวจภาคพื้นดิน (ground surveys)

2.7.1.1 การสำรวจทางอากาศ เป็นวิธีที่ใช้กันมากสำหรับการสำรวจขั้นต้น โดยการนำเครื่องวัดรังสีติดกับเครื่องบิน หรือ เฮลิคอปเตอร์ บินสำรวจ พร้อมด้วยเครื่องมือสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ติดไปด้วย เช่น แมกนิโตมิเตอร์ (magnetometer) วิธีนี้สามารถทำได้รวดเร็ว คลุมพื้นที่ได้กว้าง เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในการสำรวจวิธีนี้ได้แก่ เครื่องนับรังสี

ตารางที่ 2.4

พลังงานของรังสีแกมมาที่สำคัญจากโปแตสเซียม–40 แร่ยูเรเนียมและแร่ธอเรียม

ต้นกำเนิด	พลังงาน (MeV)
โปแตสเซียม–40	1.46
บิสมัธ–214 ในแร่ยูเรเนียม	1.76
ธัลเลียม–208 ในแร่ธอเรียม	2.62



รูป 2.3 แสดงสเปคตรัมรังสีแกมมาจากโปแตสเซียม–40 แร่ยูเรเนียมและธอเรียม โดยแกมมาสเปคโตรมิเตอร์หัววัด NaI(Tl)

แกมมาแบบซินทิลเลชัน (gamma scintillation counter) และ แกมมาสเปกโตร-มิเตอร์ (gamma spectrometer)

2.7.1.2 การสำรวจภาคพื้นดิน แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การสำรวจด้วยรถยนต์ (car-borne surveys) และ การเดินสำรวจ (foot surveys)

ก. การสำรวจด้วยรถยนต์ ใช้รถยนต์เป็นพาหนะติดเครื่องวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลชัน หรือ แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ทำการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ

ข. การเดินสำรวจ จะทำในบริเวณพื้นที่ที่สนใจที่รถยนต์ไม่สามารถแล่นเข้าไปได้ เช่น ตามภูเขา หรือ ในป่า ผู้สำรวจจะนำเครื่องวัดรังสีชนิดกระเป๋าหิ้ว (portable radiation counter) ติดตัวไป เครื่องวัดรังสีที่ใช้ได้แก่ เครื่องนับแบบไกเกอร์ (geiger counter) เครื่องนับรังสีแกมมาแบบซินทิลเลชัน และ แกมมาสเปกโตรมิเตอร์

เนื่องจากวิธีสำรวจกัมมันตภาพรังสีไม่สามารถตรวจวัดได้ถ้าแร่อยู่ลึก บางแห่งแร่อยู่ลึกเพียงกึ่งฟุตก็ไม่สามารถตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีได้ ในการสำรวจบางครั้งจำเป็นต้องใช้วิธีขุดหลุมแล้วหย่อนหัววัดรังสีลงไป หรือหย่อนลงไปในหลุมที่ทำการเจาะสำรวจ

2.7.2 วิธีตรวจวัดกาซเรดอน

วิธีตรวจวัดกาซเรดอน เป็นวิธีสำรวจหาแหล่งแร่ยูเรเนียมทางอ้อมโดยอาศัยกาซเรดอน (เรดอน-222) เป็นตัวชี้บอก กาซเรดอนเป็นกาซกัมมันตรังสีชนิดเดียว ที่เกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียม-238 ในบริเวณที่มีแร่ยูเรเนียมมีกาซชนิดนี้ฟุ้งอยู่ในดิน และในกรณีที่แร่อยู่ลึกจากผิวดินลงไป กาซเรดอนก็สามารถฟุ้งผ่านขึ้นมาสู่ผิวดินเบื้องบนได้ การตรวจวัดกาซเรดอนที่บริเวณผิวดินจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสำรวจยูเรเนียมมากวิธีหนึ่ง วิธีนี้ใช้ได้ผลดีแม้แร่จะอยู่ลึก ในบางกรณีแร่อยู่ลึกกว่าร้อยเมตร[15],[26] ก็สามารถบอกได้ว่าบริเวณนั้นมีแร่ยูเรเนียมหรือไม่

ในการสำรวจจะทำการตรวจวัดกาซเรดอนบริเวณผิวดินตามจุดต่าง ๆ เป็น

ระยะ ๆ แล้วนำผลการตรวจวัดไปทำแผนที่แสดงความเข้มข้นของกาซเรดอน (radon concentration map) ทำนองเดียวกับแผนที่แสดงความเข้ม ของกัมมันตภาพรังสี ในการสำรวจโดยวิธีวัดกัมมันตภาพรังสี การตรวจวัดกาซเรดอนในแหล่งน้ำ หรือในน้ำบาดาลก็เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการสำรวจยูเรเนียม ที่ได้ผลเช่นกัน

เครื่องตรวจวัดกาซเรดอนที่สำคัญได้แก่ เครื่องนับรังสีอัลฟาแบบซินทิลเลชันชนิกสังกะสีซัลไฟด์ (zinc sulfide scintillation counter) อัลฟามิเตอร์ (alpha meter) และ ถ้วยสำรวจแบบแทรก-เอทช์ (track-etch cup)เป็นต้น เครื่องตรวจวัดกาซเรดอนเหล่านี้ได้ออกแบบสำหรับวัดรังสีอัลฟา ที่เกิดจากการสลายตัว ของกาซเรดอนโดยเฉพาะ

วิธีตรวจวัดกาซเรดอน สามารถใช้สำรวจธอเรียมได้เช่นเดียวกันทั้งนี้เพราะแร่ธอเรียมจะมีกาซเรดอน-220 ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า กาซโธรอน (thoron) เป็นกาซกัมมันตรังสีสลายตัว ให้อนุภาคอัลฟาเช่นเดียวกับกาซเรดอน (เรดอน-222) แต่มีครึ่งชีวิตสั้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ2.2 การที่มีครึ่งชีวิตสั้นทำให้โธรอนฟุ้งผ่านชั้นดินที่ปกคลุมขึ้นมาได้น้อย จึงทำให้ใช้วิธีนี้ไม่ได้ผลถ้าแร่อยู่ลึก อย่างไรก็ตามธอเรียมที่พบในธรรมชาติ โดยทั่วไปก็พบเกิดรวมอยู่กับยูเรเนียม เช่นในแร่โมนาไซท์และซามาร์สไกท์ เป็นต้น

2.7.3 วิธีสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysical Surveys)

โดยทั่วไปการสำรวจยูเรเนียมโดยวิธีทางธรณีฟิสิกส์จะทำร่วมกับวิธีสำรวจวัดกัมมันตภาพรังสี วิธีที่สำคัญได้แก่ วิธี seismic refraction วิธีวัด resistivity และ spontaneous potential ในกรณีที่ยูเรเนียมเกิดร่วมกับ แมกเนไตต์ (magnetite) ก็สามารถสำรวจโดยใช้แมกเนโตมิเตอร์ (magnetometer) วัดสนามแม่เหล็ก

2.7.4 วิธีสำรวจทางธรณีเคมี (Geochemical Surveys)

การสำรวจยูเรเนียมโดยวิธีทางธรณีเคมี เป็นการวิเคราะห์ยูเรเนียม หรือ

ธาตุชนิดอื่นที่เป็นตัวชี้บอก ในแหล่งน้ำ น้ำบาดาล ดิน หิน ตลอดจนในพืชโดยวิธีทางเคมี วิธีนี้ต้องการความละเอียด แต่ไม่ค่อยได้ผลนัก การสำรวจวิธีนี้จึงไม่ใช้แพร่หลาย เท่าวิธีอื่น

2.7.5 วิธีเจาะสำรวจ (Exploration Drilling)

การเจาะสำรวจเป็นวิธีสำรวจขั้นสุดท้ายเพื่อหาขนาด ความลึก ความหนาของแหล่งแร่ ตลอดจนคุณภาพ และความเข้มข้นของแร่ เพื่อประเมินผล ประกอบการพิจารณาทำเหมือง แม้ว่าวิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง แต่ก็สามารถทำให้ทราบรายละเอียดได้มากและถูกต้อง รวมทั้งสามารถเก็บตัวอย่างที่อยู่ลึกได้

เครื่องเจาะสำรวจที่ใช้กันมากก็อ เครื่องเจาะหัวเพชร (diamond drill) ส่วนเครื่องเจาะชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการสำรวจได้แก่ หัวเจาะแบบปั่น (churn drill) หัวเจาะแบบกระแทก (percussion drill) และหัวเจาะแบบหมุน (rotary drill) เป็นต้น