

เรื่องทั่วไปเกี่ยวกับยูเรเนียม

2.1 การค้นพบและคุณสมบัติ

2.1.1 ประวัติ

ธาตุยูเรเนียมถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Marten H. Klaproth ในปี ค.ศ. 1789 โดยใช้กรดไนตริกละลายยูเรเนียมออกจากแร่พิทช์เบลนด์ (Pitchblende) และตกตะกอนด้วยโพแทช (Potash) ซึ่งเมื่อรีดิวซ์ (reduce) ตะกอนด้วยคาร์บอน จะได้ผงสีดำที่มีคุณสมบัติแตกต่างจากธาตุอื่น ๆ ที่รู้จัก จึงคิดว่าเป็นธาตุใหม่ และประกาศผลการค้นพบต่อ Royal Prussian Academy of Science เมื่อ 24 กันยายน ค.ศ. 1789 โดยตั้งชื่อธาตุใหม่นี้ว่า Uranit ตามชื่อดาวพฤหัสบดียูเรนัส (Uranus) ที่เพิ่งค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1781 และต่อมาเปลี่ยนเป็นยูเรเนียม (Uranium) ต่อมาในปี ค.ศ. 1842 นักเคมีชาวฝรั่งเศส ชื่อ E. Peligot ได้ค้นพบวิธีแยกเอาโลหะยูเรเนียมออกมาได้สำเร็จ ซึ่งเป็นโลหะสีขาวแกมเงิน โดยการไฮโดรไลส์ (Hydrolyse) ยูเรเนียมด้วย เตตราคลอไรด์ (tetrachloride) แล้วเผากับโพแทสเซียม (Potassium)

2.1.2 ชนิดของยูเรเนียม

2.1.2.1 ยูเรเนียมธรรมชาติ (Natural Uranium)

ยูเรเนียมที่มีในธรรมชาติมี 3 ไอโซโทป คือ  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  และ  $^{234}\text{U}$  ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์อะตอม (Atomic percent) และมีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ไอโซโทปของยูเรเนียมในธรรมชาติ<sup>(๓)</sup>

ไอโซโทป(เลขมวล)	เปอร์เซ็นต์อะตอม	ค่าครึ่งชีวิต(ปี)
238	99.284	$4.51 \times 10^9$
235	0.711	$7.13 \times 10^8$
234	0.005	$2.35 \times 10^5$

### 2.1.2.2 ยูเรเนียมเพิ่มสมรรถนะ ( Enriched Uranium )

ยูเรเนียมที่เพิ่มสมรรถนะ คือ ยูเรเนียมที่มีสัดส่วนของ  $^{235}\text{U}$  /  $^{238}\text{U}$  มากกว่าในธรรมชาติปกติ โดยทั่วไปมักจะเพิ่มให้มีปริมาณของ  $^{235}\text{U}$  เป็น 1.5 ถึง 4 % เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่ใช้ตัวหน่วงนิวตรอน ( Moderator ) เป็นน้ำหรือกราไฟต์ กระบวนการเพิ่มสมรรถนะยูเรเนียม มีหลายกระบวนการ ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 กระบวนการเพิ่มสมรรถนะของ  $^{235}\text{U}$  (4)

กระบวนการ	ประเทศที่ใช้
Gaseous diffusion of $\text{UF}_6$	โรงงานขนาดใหญ่อยู่ที่สหรัฐอเมริกา 3 แห่ง สหภาพโซเวียต และประเทศจีน
Centrifugation of $\text{UF}_6$	โรงงานขนาดเล็กอยู่ที่ อังกฤษและฝรั่งเศส
Thermal diffusion of $\text{UF}_6$	อังกฤษ , เนเธอร์แลนด์ , สหรัฐอเมริกา
Electromagnetic Separation of $\text{UCl}_4$	สหรัฐอเมริกา
Separation nozzle process	เยอรมัน และบราซิล
UCOR process	อัฟริกาใต้

### 2.1.2.3 ดีพลีท ยูเรเนียม ( Depleted Uranium ) (3)

ดีพลีทยูเรเนียม เป็นผลิตผลพลอยได้ จากกระบวนการเพิ่มสมรรถนะของยูเรเนียม ( Uranium Enrichment process ) ในดีพลีท ยูเรเนียม จะมีปริมาณ  $^{235}\text{U}$  ต่ำกว่า 0.2% มีความหนาแน่น 18.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรมีจุดหลอมเหลว  $1132^\circ\text{C}$  ( $2070^\circ\text{F}$ )

### 2.1.3 คุณสมบัติของยูเรเนียม (5)

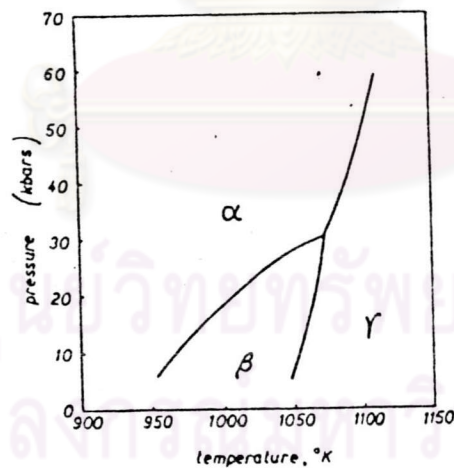
ธาตุยูเรเนียม มีโครงสร้างอิเล็กตรอน ( Electron configuration ) เป็น  $5f^3$  ,  $6d^1$  ,  $7s^2$  มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ U มีน้ำหนักอะตอม ( Atomic Weight ) 238.03 เลขอะตอม ( Atomic Number ) 92 มีออกซิเดชันสเตต ( Oxidation state ) คือ +3 , +4 , +5 และ +6

#### 2.1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ ( Physical Properties ) (2.6)

ยูเรเนียม เป็นธาตุโลหะ มีสีขาวเงิน คิวมันแวววาวเหมือนเหล็ก

ถ้าทิ้งไว้ในอากาศประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมงจะเกิดความมืด มีความเหนียว สามารถ รีด เป็นเส้นได้ อ่อนตัวได้ง่าย ถ้าผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม จะมีความแข็งคงทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ (ที่  $25^{\circ}\text{C}$ ) 19.214 (โดยการ X-Ray) หรือเท่ากับ  $19.05 \pm 0.02$  (จากการทดลองวัด) จุดหลอมเหลว  $1132.3^{\circ}\text{C}$  จุดเดือดประมาณ  $3927^{\circ}\text{C}$  <sup>(1)</sup> ค่าความร้อนจำเพาะ ( Specific heat ) 6.594 Cal/mol. deg. ค่าการนำความร้อน (ที่  $25^{\circ}\text{C}$ ) 0.060 Cal/cm. sec. deg.

โลหะยูเรเนียม สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามอุณหภูมิ ซึ่งมี 3 สถานะ ( phase ) คือ แอลฟา ( Alpha ) เบตา ( Beta ) และแกมมา ( Gamma ) โดยแอลฟายูเรเนียม มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก ( Orthorhombic ) มีความหนาแน่น 19.214 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เบตายูเรเนียม มีโครงสร้างแบบเตตระโกนัล ( Tetragonal ) มีความหนาแน่น 18.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีขนาดผลึกโตกว่าแบบแอลฟา ส่วนแกมมายูเรเนียม มีโครงสร้างแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก ( Body-Centered Cubic ) มีความหนาแน่น 18.06 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สถานะที่เป็นแอลฟา จะเปลี่ยนเป็นเบตาที่อุณหภูมิ  $774.8^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูป 2.1 ซึ่งอุณหภูมิตั้งเดิม ของ 3 สถานะอยู่ที่  $798^{\circ}\text{C}$  ความดัน 29.8 กิโลบาร์



รูป 2.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของยูเรเนียม (6)

### 2.1.3.2 คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ ( Nuclear Properties ) <sup>(4,5,6)</sup>

นอกจากยูเรเนียมที่มีอยู่ในธรรมชาติ 3 ไอโซโทปแล้ว ยังมีไอโซโทปอื่น ๆ อีก 11 ไอโซโทป ซึ่งผลิตขึ้นได้โดยใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ไอโซโทปที่ผลิตขึ้นมาจะมีค่าครึ่งชีวิตสั้น ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ไอโซโทปต่าง ๆ ของยูเรเนียม<sup>(7)</sup>

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

ไอโซโทป  $^{238}\text{U}$  และ  $^{234}\text{U}$  จัดอยู่ในอนุกรมการสลายตัวแบบ  $4n + 2$  โดยมี

$^{238}\text{U}$  เป็นธาตุแม่ (parent element) สลายตัวให้รังสีแอลฟาและเบตา กลายเป็น

$^{234}\text{U}$  ดังในตาราง 2.4

ตาราง 2.4 การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ของ  $^{238}\text{U}$  (4)

Nuclide	Historical name	Half-life	Radiation	Atom ratio, ppb in natural uranium
$^{238}_{92}\text{U}$	Uranium I	4.51 E9 yr	$\alpha(\gamma)$	9.927 E8
$^{234}_{90}\text{Th}$	UX <sub>1</sub>	24.1 days	$\beta(\gamma)$	0.0145
$^{234}_{91}\text{Pa}$	UX <sub>2</sub>	1.17 min	$\beta, \gamma$	4.9 E-7
$^{234}_{92}\text{U}$	Uranium II	2.47 E5 yr	$\alpha(\gamma)$	5.44 E4
$^{230}_{90}\text{Th}$	Ionium	8.0 E4 yr	$\alpha(\gamma)$	1.76 E4
$^{226}_{88}\text{Ra}$	Radium	1602 yr	$\alpha(\gamma)$	353
$^{222}_{86}\text{Rn}$	Radon	3.821 days	$\alpha$	2.30 E-3
$^{218}_{84}\text{Po}$	Radium A	3.05 min	$\alpha$	1.28 E-6
$^{214}_{82}\text{Pb}$	Radium B	26.8 min	$\beta, \gamma$	1.12 E-5
$^{214}_{83}\text{Bi}$	Radium C	19.7 min	$\beta, \gamma$	8.25 E-6
$^{214}_{84}\text{Po}$	Radium C	164 $\mu\text{s}$	$\alpha$	1.14 E-12
$^{210}_{82}\text{Pb}$	Radium D	21 yr	$\beta(\gamma)$	4.62
$^{210}_{83}\text{Bi}$	Radium E	5.01 days	$\beta$	3.02 E-3
$^{210}_{84}\text{Po}$	Polonium	138.4 days	$\alpha$	0.0835
$^{206}_{82}\text{Pb}$	Radium G	Stable		

ส่วนไอโซโทป  $^{235}\text{U}$ จัดอยู่ในอนุกรมการสลายตัวแบบ  $4n + 3$ 

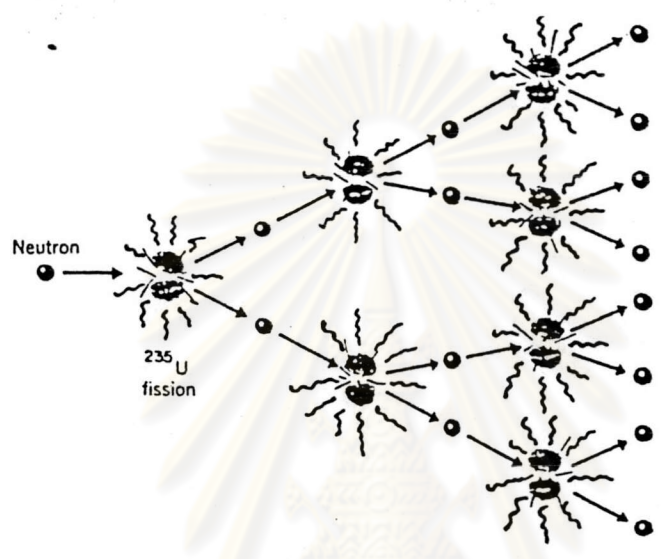
ดังในตาราง 2.5

ตาราง 2.5 การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ของ  $^{235}\text{U}$  (4)

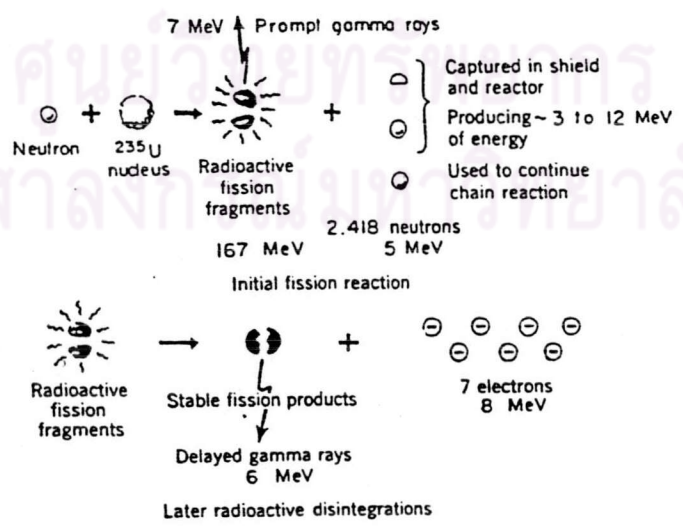
Nuclide	Historical name	Half-life	Radiation	Atom ratio, ppb in natural uranium
$^{235}_{92}\text{U}$	Actinouranium	7.1 E8 yr	$\alpha$ , $\gamma$	7.205 E6
$^{231}_{90}\text{Th}$	Uranium Y	25.5 h	$\beta(\gamma)$	2.95 E-5
$^{231}_{91}\text{Pa}$	Protactinium	3.25 E4 yr	$\alpha$ , $\gamma$	330
$^{227}_{89}\text{Ac}$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

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

ไอโซโทป  $^{235}\text{U}$  เป็นวัสดุฟิสไซล์ ( fissile materials ) คือวัสดุที่จะยอมของธาตุเกิดปฏิกิริยาแตกตัว ( Fission ) เมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอนช้า ( Thermal - neutron ) แล้วให้พลังงานออกมา พร้อมทั้งมีจำนวนนิวตรอนเกิดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ดังในรูป 2.2 และ รูป 2.3 ซึ่งให้พลังงานออกมาจำนวนมากมาย



รูป 2.2 ปฏิกิริยาแตกตัวแบบลูกโซ่ (4)



รูป 2.3 ผลผลิตจากการแตกตัวของ  $^{235}\text{U}$  (4)

### 2.1.3.3 คุณสมบัติทางเคมี ( Chemical Properties ) (5.6.8)

โลหะยูเรเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับพวกอโลหะ ( Non-Metal )

ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของโลหะยูเรเนียม ถ้าเป็นผงละเอียดจะมีคุณสมบัติเป็นไพโรฟริก ( Pyrophoric ) คือติดไฟได้เองในอากาศที่อุณหภูมิห้องหรือในน้ำ ยูเรเนียมรวมตัวกับออกซิเจน โดยเกิดเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 ° C โลหะยูเรเนียมถูกออกซิไดซ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 650 ° C และสามารถออกซิไดซ์ ในน้ำหรือไอน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 - 100 ° C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ



โลหะยูเรเนียมละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) ถ้าเป็นกรดซัลฟูริก ( H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ) เป็นตัวช่วย จึงจะละลายได้ เช่นเดียวกับในสารละลายต่าง เช่น โซดาไฟ ( NaOH ) ต้องใช้โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ( Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ) ช่วยจึงจะละลายได้ ซึ่งปกติโลหะยูเรเนียมจะไม่ละลายในต่าง

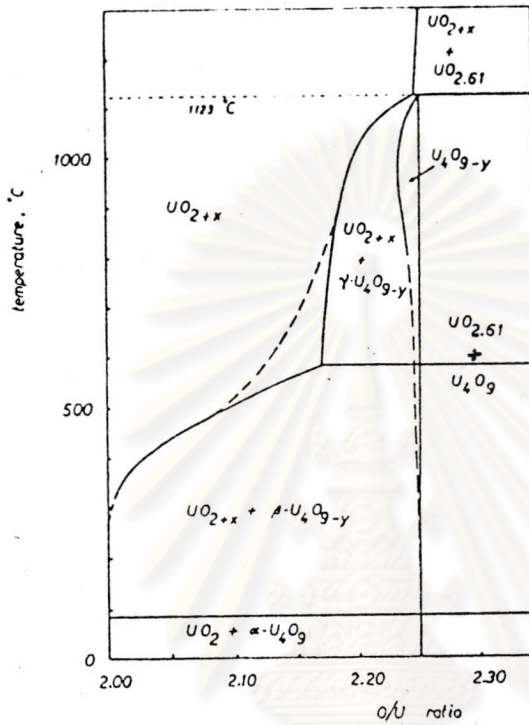
### 2.2 ออกไซด์ของยูเรเนียม (5.6)

ออกไซด์ของยูเรเนียมมีหลายชนิด แต่ที่เสถียรมี 4 สถานะ คือ UO<sub>2</sub> , U<sub>4</sub>O<sub>9</sub> , U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> และ UO<sub>3</sub> และสถานะที่ไม่เสถียรคือ U<sub>3</sub>O<sub>7</sub> , U<sub>2</sub>O<sub>5</sub> และ UO เป็นต้น

2.2.1 เฟส ไดอะแกรม ( Phase diagram ) ของออกไซด์ของยูเรเนียม ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1500 ° C

การละลายของออกซิเจนในโลหะยูเรเนียมมีค่าต่ำ ที่จุดหลอมเหลว ( 1132 ° C ) อัตราการละลาย 0.05 เปอร์เซ็นต์อะตอม และเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 เปอร์เซ็นต์อะตอมที่ 2000 ° C ออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล กับยูเรเนียม คือ UO<sub>2</sub> ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 300 ° C จะมีองค์ประกอบเป็น UO<sub>2.00</sub> ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีองค์ประกอบเป็น UO<sub>2</sub> + X ซึ่งค่า X ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ( surface area ) ของยูเรเนียมและความดันย่อย ( Partial Pressure ) ของออกซิเจน X จะมีค่าสูงจนทำให้ออกไซด์มีองค์ประกอบเป็น U<sub>4</sub>O<sub>9</sub> หรือ UO<sub>2.25</sub> ที่อุณหภูมิ 950 ° C X มีค่าเท่ากับ 0.17 และที่อุณหภูมิ 1123 ° C X มีค่าเท่ากับ 0.244



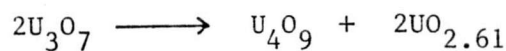


รูป 2.4 เฟส โคอะแกรมของออกไซด์ยูเรเนียมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1500 ° C (6)

สถานะที่เป็น  $U_4O_9$  มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนัล อัตราส่วนของ O/U สูงสุดที่อุณหภูมิ 1123 ° C เท่ากับ 2.25 ซึ่งที่อุณหภูมินี้เป็นจุดที่สมดุลของ  $UO_{2+x} \cdot U_4O_{9-y}$ ,  $U_3O_{8-x}$  และ  $O_2$

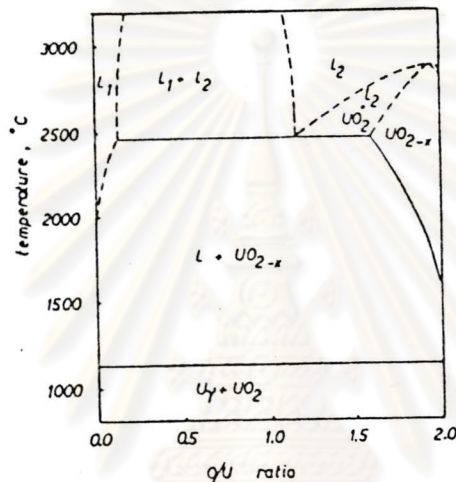
สถานะที่มีองค์ประกอบเป็น  $U_3O_8$  มีอัตราส่วนตั้งแต่ 2.667 ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 2.61 ที่อุณหภูมิ 1123 ° C ส่วนออกไซด์ที่มีองค์ประกอบเป็น  $UO_3$  เป็นสถานะที่เสถียรที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่ำกว่า 500 ° C

สำหรับ  $U_3O_7$  ได้จากการออกซิไดซ์  $UO_2$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 ° C และเมื่อ Anneal ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 ° C จะได้  $U_4O_9$  ดังสมการ (6)



### 2.2.2 เฟส โดอะแกรม ของออกไซด์ยูเรเนียม ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C

ในการใช้  $UO_2$  ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะใช้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงต้องศึกษาคุณสมบัติของออกไซด์ยูเรเนียมที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1500 ถึงจุดเดือดคือประมาณ 2800 °C องค์ประกอบของ  $UO_2$  จะเปลี่ยนแปลงโดยอัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียม ( O/U ratio ) ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1600 °C ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ดังรูป 2.5 อัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียม จะลดลงจาก 1.92 ที่อุณหภูมิ 1800 °C เป็น 1.6 ที่อุณหภูมิ 2470 °C



รูป 2.5 เฟส โดอะแกรมของออกไซด์ยูเรเนียมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C<sup>(6)</sup>

คุณสมบัติของไตรยูเรเนียม-ออกไซด์ ( triuranium octoxide ,  $U_3O_8$  )<sup>(6)</sup> มีสีเขียวมะกอก ( Olive-green ) จนถึงดำ มีความหนาแน่น<sup>(9)</sup> 8.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นออกไซด์ที่เตรียมได้ง่ายกว่าตัวอื่น เนื่องจากเสถียรในอากาศ มีรูปผลึกเป็นออร์โทโรมบิก เมื่อเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 ถึง 400 °C จะค่อย ๆ เปลี่ยนรูปผลึกเป็นเฮกซะโกนัล ( Hexagonal )  $U_3O_8$  มีรูปผลึก 3 แบบคือ แบบแอลฟา (  $\alpha$ - $U_3O_8$  ) มีรูปผลึกเป็นออร์โทโรมบิก แบบเบตา (  $\beta$ - $U_3O_8$  ) มีรูปผลึกเป็นออร์โทโรมบิก และแบบแกมมา (  $\gamma$ - $U_3O_8$  ) มีรูปผลึกเป็นเฮกซะโกนัล

คุณสมบัติของยูเรเนียม ไตรออกไซด์ ( Uranium trioxide ,  $UO_3$  )<sup>(6)</sup> เตรียมได้จากการเผาเกลือของยูเรเนียมหรือเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 500 °C ในอากาศซึ่ง  $UO_3$  ที่เตรียมได้จะมีรูปร่างผลึกและสีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข ( Condition ) ในการเผา

เมื่อเผา  $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่มีไนเตรดอออน ( nitrate ion ) ปนที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  จะได้  $\alpha - \text{UO}_3$  สีน้ำตาล ถ้าไม่มีไนเตรดอออนอยู่จะได้  $\alpha - \text{UO}_3$  ที่อุณหภูมิใกล้  $450^\circ\text{C}$  แต่ที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  หรือมากกว่าจะสลายตัวให้  $\text{UO}_{2.9}$  ซึ่งมีรูปผลึกเป็นออร์โธโรมบิก

เมื่อเผายูเรเนียม ไดยูเรเนต (  $(\text{NH}_4)_2 \text{U}_2\text{O}_7 \cdot \text{ADU}$  ) หรือยูเรนิลไนเตรต  $\text{UO}_2 (\text{NO}_3)_2$  เร็ว ๆ ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  จะได้  $\beta - \text{UO}_3$  ซึ่งมีรูปผลึกไม่ชัดเจน ถ้าเผาต่อถึงอุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  แล้วทิ้งไว้หลาย ๆ สัปดาห์ จะได้ผลึกโตขึ้น มีรูปผลึกเป็นโมนอคลิติก ( Monoclinic )  $\beta - \text{UO}_3$  มีสีส้ม ความหนาแน่น 8.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\gamma - \text{UO}_3$  มีสีเหลืองสด ( Bright-yellow ) เตรียมโดยการเผา  $\text{UO}_2 (\text{NO}_3)_2$  อย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  แล้วเผาต่อจนถึงอุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  มีรูปผลึกแบบโมนอคลิติก และซูดเตตระโกนัล ( Pseudotetragonal ) มีความหนาแน่น 8.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\delta - \text{UO}_3$  เตรียมได้จากการเผา  $\text{UO}_2 (\text{OH})_2$  (  $\beta - \text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ) ในอากาศที่อุณหภูมิ  $375^\circ\text{C}$  เป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง  $\delta - \text{UO}_3$  มีสีแดงรูปผลึกเป็นแบบคิวบิก ( Cubic ) มีความหนาแน่น 8.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\epsilon - \text{UO}_3$  มีสีแดงอิฐ เตรียมได้จากการผ่านก๊าซ  $\text{NO}_2$  เข้าไปใน  $\text{U}_3\text{O}_8$  ที่อุณหภูมิ  $225^\circ$  ถึง  $300^\circ\text{C}$  มีรูปผลึกเป็นไตรคลินิก ( triclinic )

$\eta - \text{UO}_3$  เตรียมได้จากการเผา  $\text{UO}_3$  ที่ความดันสูงประมาณ 30 กิโลบาร์ ( Kilobars ) อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  รูปผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก มีความหนาแน่น 8.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

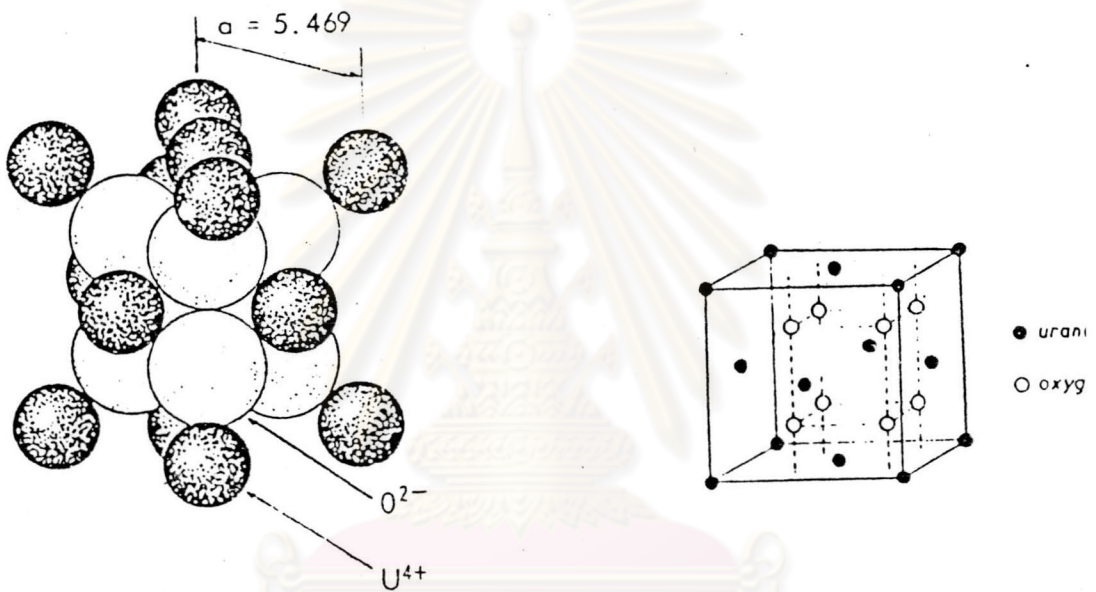
ตาราง 2.6 คุณสมบัติของ  $UO_3$  (๑)

	Colour	Structure	Z	Density	- $H_{298}$ (kcal/mole)	$S^\circ_{298}$ (cal/deg. mole)
$\alpha - UO_3$	brown	orthorhombic , a = 3.913 , b = 6.936 A, c = 4.167 A	-	8.4 (X-ray) 7.2 (exp.)	291.8	23.76
$\beta - UO_3$	orange	monoclinic , a = 10.34 A , b = 14.33 A , c = 3.91 A , $\beta = 99.03^\circ$	10	8.25	292.6	23.02
$\gamma - UO_3$	yellow	monoclinic , pseudotetragonal , a = b = 6.89 A , c = 19.94 A , $\gamma = 90.34^\circ$	-	8.01	293.5	22.97
$\delta - UO_3$	red	cubic , a = 4.15 A	-	-	290	-
$\epsilon - UO_3$	brick-red	triclinic , a = 4.002 A , b = 3.841 A , c = 4.165 A , $\alpha = 98^\circ 17'$ $\beta = 90^\circ 33'$ , $\gamma = 120^\circ 28'$	-	8.73	291.8	-
$\eta - UO_3$	?	orthorhombic , a = 7.511 A , b = 5.466 A , c = 5.224 A	4	8.85	-	-

## 2.3 ยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) (6,10,11)

### 2.3.1 คุณสมบัติของผงยูเรเนียม ไดออกไซด์

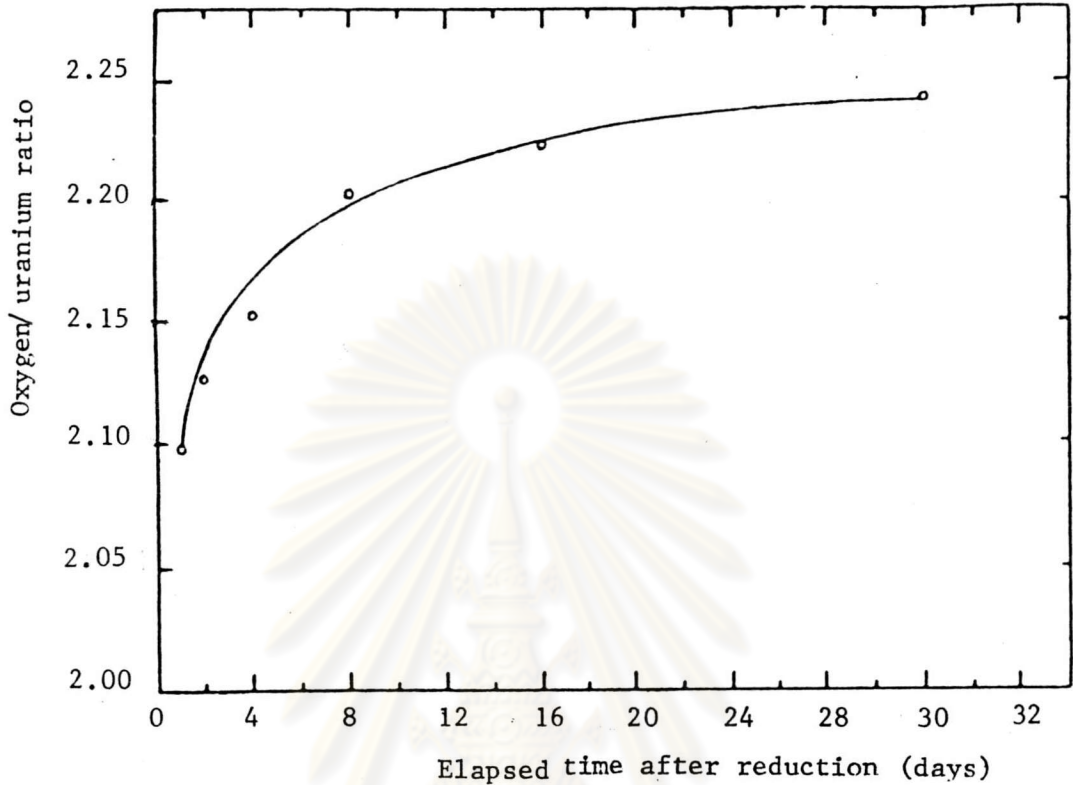
ยูเรเนียม ไดออกไซด์ มีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ มีความหนาแน่นตามทฤษฎี ( Theoretical density . TD ) 10.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร <sup>(9)</sup> ผลึกของ  $UO_2$  มีรูปร่างเป็น เฟส-เซนเตอร์ คิวบิก ( Face-centered cubic ) ดังแสดงในรูป 2.6 หน่วยเซลล์ ( unit Cell ) ของผลึกประกอบด้วย 4 โมเลกุลของ  $UO_2$



รูป 2.6 รูปร่างผลึกของ  $UO_2$  (6)

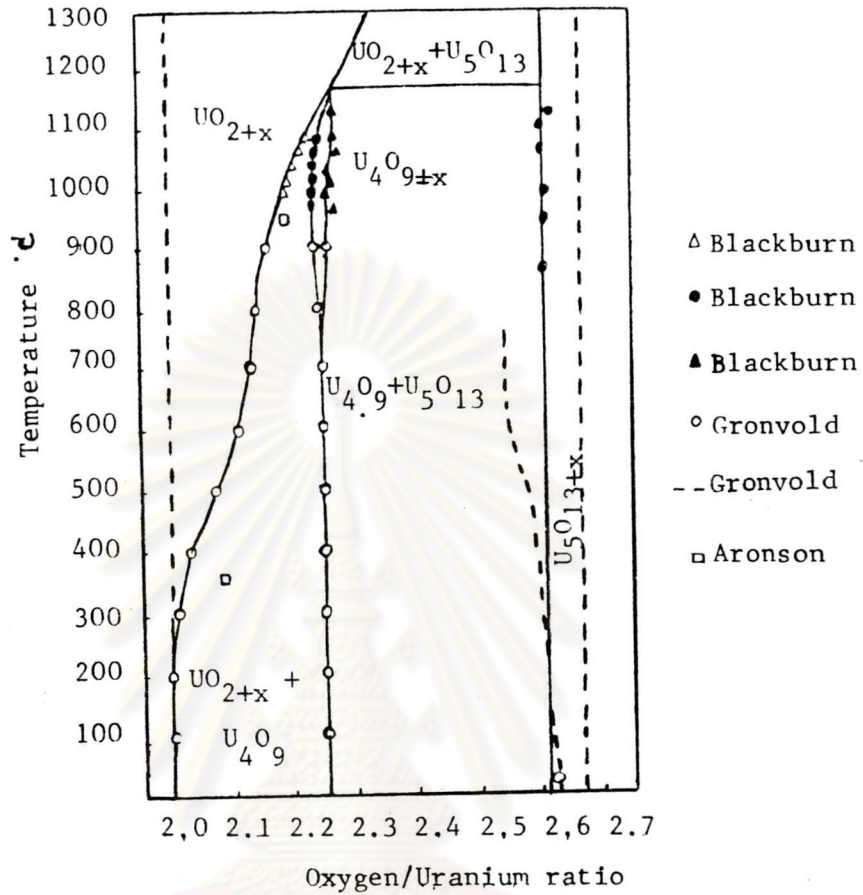
ผง  $UO_2$  สามารถถูกออกซิไดซ์ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ได้เป็น  $UO_{2+x}$  และ หน่วยเซลล์ของออกไซด์จะเล็กลงเรื่อย ๆ ตามค่าของ  $x$  ที่มากขึ้น การเกิดออกซิเดชันขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ผิวของผง  $UO_2$

ออกซิเจนสามารถถูกดูดกลืน ( Absorbed ) ได้ปริมาณ 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร คิวบิกของสารที่อุณหภูมิและความดันปกติ รูป 2.7 แสดงการเกิดออกซิเดชัน ขึ้นเองที่อุณหภูมิห้องของ  $UO_2$  ขนาด 0.1 ไมครอน ซึ่งได้จากการรีดิวซ์ ( reduced ) ADU ที่อุณหภูมิ  $900^\circ C$   $UO_2$  จะถูกออกซิไดซ์จนมีองค์ประกอบเป็น  $UO_{2.25}$  หลังจากทิ้งไว้เป็นเวลา 1 เดือนในอากาศที่อุณหภูมิห้อง สำหรับผง  $UO_2$  ที่มีขนาดใหญ่จะถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่าขนาดเล็ก



รูป 2.7 การเกิดออกซิเดชันขึ้นเองของ  $\text{UO}_2$  ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (10)

รูป 2.8 เป็นเฟสไดอะแกรมของ  $\text{UO}_2 - \text{U}_3\text{O}_8$  ซึ่งช่วงที่สนใจคือตั้งแต่  $\text{UO}_2$  ถึง  $\text{U}_4\text{O}_9$   $\text{UO}_2$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{UO}_{2.28}$  ที่อุณหภูมิ 1077 องศาเซลเซียส  $\text{UO}_{2.33}$  หรือ  $\text{U}_3\text{O}_7$  ซึ่งมีรูปผลึกเป็นเตตระโกนัล เกิดจากการออกซิไดซ์ ผง  $\text{UO}_2$  หรือเม็ด  $\text{UO}_2$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่ปรากฏโครงสร้างสมดุล (Equilibrium structure) จึงไม่ได้แสดงไว้ในรูป สำหรับองค์ประกอบที่เป็น  $\text{UO}_{2.00}$  จนถึง  $\text{UO}_{2.25}$  ( $\text{U}_4\text{O}_9$ ) จะมีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างคิวบิกกับเตตระโกนัล และถูกเปลี่ยนเป็นคิวบิกหลังจากทิ้งไว้ 4 เดือน ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส



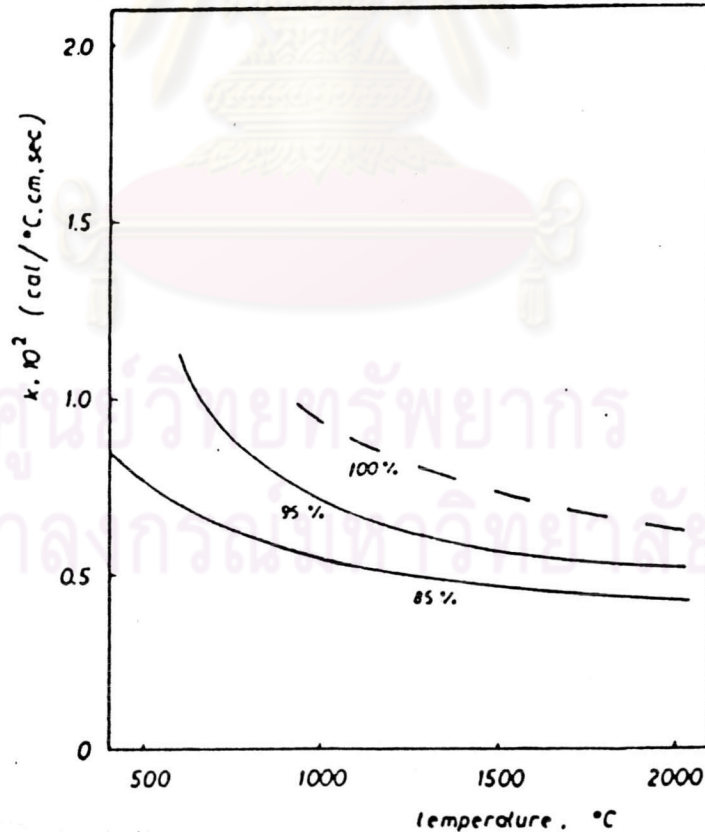
รูป 2.8 เฟส ไดอะแกรมของ  $UO_2 - U_3O_8$  (10)

ความหนาแน่นของ  $UO_{2.00}$  เท่ากับ 10.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับ  $U_4O_9$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็นคิวบิก จะมีความหนาแน่นสูงคือเท่ากับ 11.30 กรัมต่อลูกบาศก์-เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณอะตอมของออกซิเจนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้โครงสร้าง เปลี่ยนไป  $UO_2$  มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 2800 °C และจุดหลอมเหลวจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับบรรยากาศ ซึ่งได้มีการทดลองและสรุปผลดังในตาราง 2.7

ตาราง 2.7 แสดงจุดหลอมเหลวของ  $UO_2$  ในบรรยากาศต่าง ๆ (10)

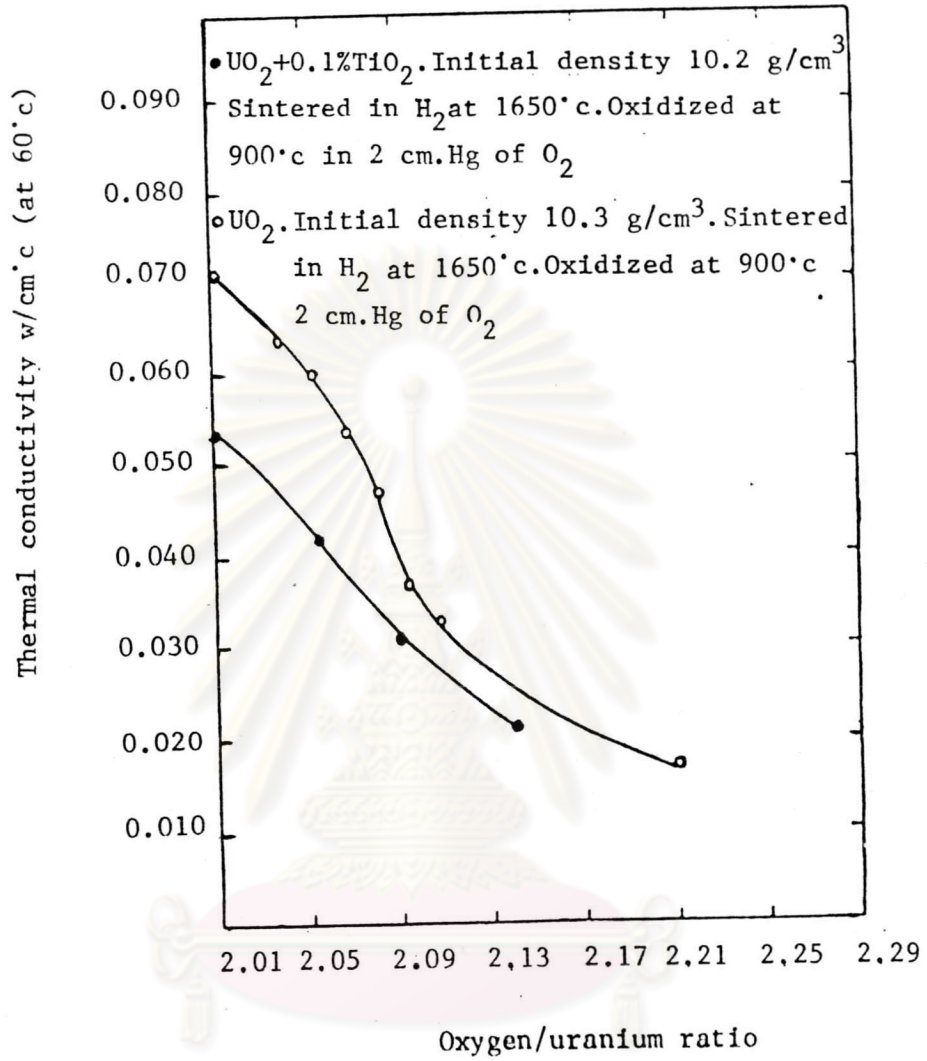
Reference	Date	Atmosphere	Melting point °C
Ruff and Goecke	1911	$H_2$ , $N_2$	2176
Friederich and Sitting	1925	$N_2$	2500 - 2600
Lambertson and Mueller	1953	Vacuum, He	$2878 \pm 22$
Ackermann	1955	Vacuum	$2405 \pm 22$
Wisnyi and Pijanowski	1956	Vacuum, $H_2$ , He, Ar	$2760 \pm 30$
Ehlert and Margrave	1958	Vacuum	$2860 \pm 45$

ค่าการนำความร้อน ( Thermal Conductivity ) ของ  $UO_2$  จะลดลงเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นและความหนาแน่นลดลง ดังในรูป 2.9 และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ ออกซิเจนต่อยูเรเนียมเพิ่มขึ้น ดังในรูป 2.10 ซึ่งแสดงค่าการนำความร้อนเมื่อเป็น  $UO_2$  และเป็นออกไซด์ผสมระหว่าง  $UO_2$  และ  $TiO_2$  0.1%



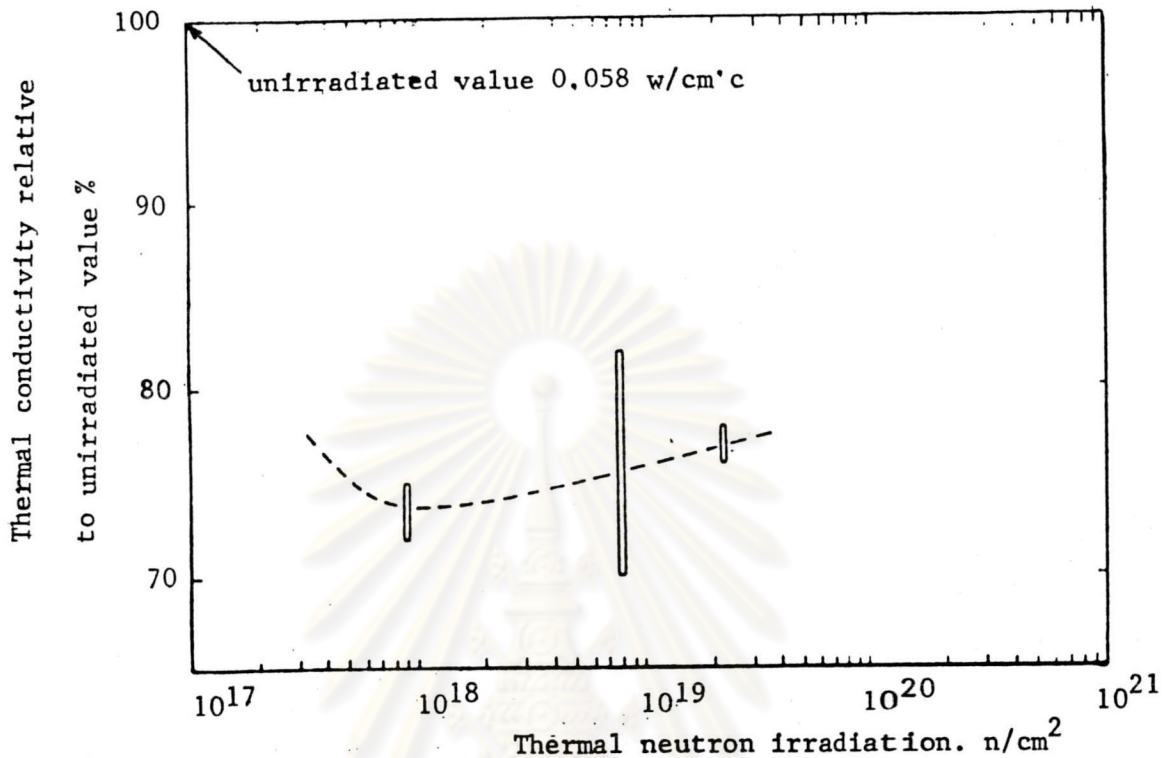
รูป 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของ  $UO_2$  กับอุณหภูมิ และความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลง (6)





รูป 2.10 ผลของอัตราส่วนของออกซิเจนและยูเรเนียมที่มีต่อค่าการนำความร้อน  
ของยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (10)

เมื่อยูเรเนียม ไดออกไซด์ ถูกรังสีนิวตรอนปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าการนำความร้อน  
เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูป 2.11



รูป 2.11 ผลของการถูกรังสีนิวตรอนปริมาณต่าง ๆ ต่อค่าการนำความร้อนของ  $UO_2$  ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (10)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ( Linear thermal-expansion coefficient ) ของ  $UO_2$  จะเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิ ดังในตาราง 2.8 ส่วนความหนาแน่นและอัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียม มีผลต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวนี้เพียงเล็กน้อย

ตาราง 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของยูเรเนียม ไดออกไซด์ (10)

Temp. Range ( ° C )	Mean Coefficient of Linear Expansion ( $10^{-6} / ^\circ C$ )
20 - 720	11.5
20 - 946	10.8
27 - 400	9.0
400 - 800	11.0
800 - 1260	13.0
400 - 900	10

### 2.3.2 คุณสมบัติของยูเรเนียม ไดออกไซด์ หลังเผาประสาน ( Sintered $UO_2$ )<sup>(10)</sup>

ยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาประสานแล้ว จะลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลง ดังนั้นยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่เผาประสานแล้ว สามารถทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานได้โดยไม่ถูกออกซิไดซ์ ยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาประสานจะมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง และนอกจากนี้ยังเสถียรในโซเดียมเหลว (Liquid Sodium)

การเผาประสานถ้าเลือกใช้วิธีการต่างกัน จะมีผลต่อค่าการนำความร้อน ค่าอัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียมและความหนาแน่น ดังในตาราง 2.9 และนอกจากนี้กระบวนการผลิตยูเรเนียม ไดออกไซด์ก็มีผลต่อความหนาแน่นของยูเรเนียม ไดออกไซด์ที่เผาประสานแล้ว ดังในตาราง 2.10

ตาราง 2.9 ผลของวิธีการเผาประสานต่อค่าการนำความร้อน ค่าอัตราส่วนของออกซิเจนต่อยูเรเนียม และความหนาแน่น (10)

O:U Ratio	Density (g/cm <sup>2</sup> )	Method of Fabrication	Thermal Conductivity at 60 °C, corrected to theoretical density (w/cm °C)
2.01 ± 0.01	10.3	Sintered in hydrogen at 1650 °C for 2 hr, cooled in hydrogen	0.070 ± 0.005
2.03 ± 0.0±	10.45	Sintered in steam at 1400 °C for 3 hr, cooled in hydrogen	0.051 ± 0.003
2.01 ± 0.01	10.45	Sintered in steam at 1400 °C for 3 hr, annealed in hydrogen at 1400 °C for 2 hr, cooled in hydrogen	0.067 ± 0.002
2.21 ± 0.01	10.6	Sintered in steam at 1400 °C for 2 hr, cooled in steam	0.017 ± 0.001

ตาราง 2.10 กระบวนการผลิต ยูเรเนียม ไดออกไซด์ วิธีต่าง ๆ และ

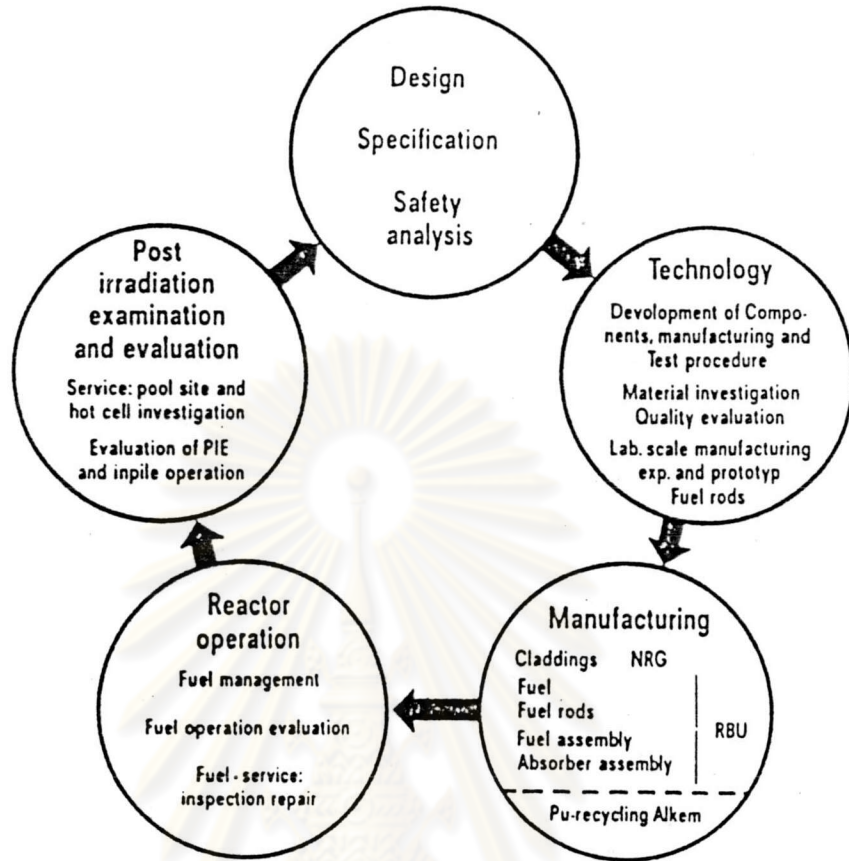
ค่าความหนาแน่นของยูเรเนียม ไดออกไซด์หลังเผาประสาน (10)

Source of UO <sub>2</sub>	Preparation Route	Sintered Density (g/cm <sup>2</sup> )
Mallinckrodt Chem. Co.	Pyrolysis of uranyl nitrate hexahydrate (U.N.H.) to UO <sub>3</sub> , reduction with H <sub>2</sub>	7.8
Shattuck Chem. Co.	Believed similar to Mallinckrodt	8.6
National Lead Co.	Believed similar to Mallinckrodt	9.1
Eldorado Mining and Refining Co.	Pyrolysis of U.N.H. to UO <sub>3</sub> reduction with H <sub>2</sub>	9.2
Eldorado Mining and Refining Co.	Pyrolysis of U.N.H. to UO <sub>3</sub> , UO <sub>3</sub> hydrated by wet ball-milling, then reduced with H <sub>2</sub>	10.3
U.K.A.E.A., Springfields	Precipitation of A.D.U. from U.N.H., reduction with H <sub>2</sub>	10.6
Mines Branch, Ottawa	Precipitation of A.D.U. from U.N.H., reduction with H <sub>2</sub>	10.1-10.7
A.E.C.L., Chalk River	Precipitation of A.D.U. from U.N.H., reduction with H <sub>2</sub>	10.4-10.6

\* All Pellets cold-pressed at 2800 kg/cm<sup>2</sup> (40,000 psi) and sintered for 30 min, at 1700 °C in hydrogen.

### 2.3.3 พฤติกรรม ( Behaviour ) ของเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ได้มีการศึกษาและค้นคว้าถึงวิธีการผลิตเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ กันเป็น เวลาหลายปี และประสบผลสำเร็จในการผลิตขั้นอุตสาหกรรม ระบบควบคุมคุณภาพของการผลิต มีผลอย่างมากต่อผลสำเร็จระบบควบคุมคุณภาพที่ Kraftwerk Union (KWU )<sup>(12)</sup> สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน มีพื้นฐานจากวิจัยกร ดังแสดงในรูป 2.12 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ การออกแบบ การศึกษาเทคโนโลยี การผลิตและทดลองเดินเครื่องปฏิกรณ์



รูป 2.12 ระบบควบคุมคุณภาพวัสดุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของ KWU (12)

คุณลักษณะ ( characteristic ) ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่เผาประสานแล้ว คือมีความแข็งและมีความหนาแน่นสูง โครงสร้างไมโคร ( Microstructure ) ของเชื้อเพลิง จะเป็นตัวควบคุมความเหมาะสมของการใช้ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ตาราง 2.11 แสดงปรากฏการณ์ ( phenomena ) ที่เกิดขึ้นอันมีผลต่อคุณลักษณะของเม็ดเชื้อเพลิง

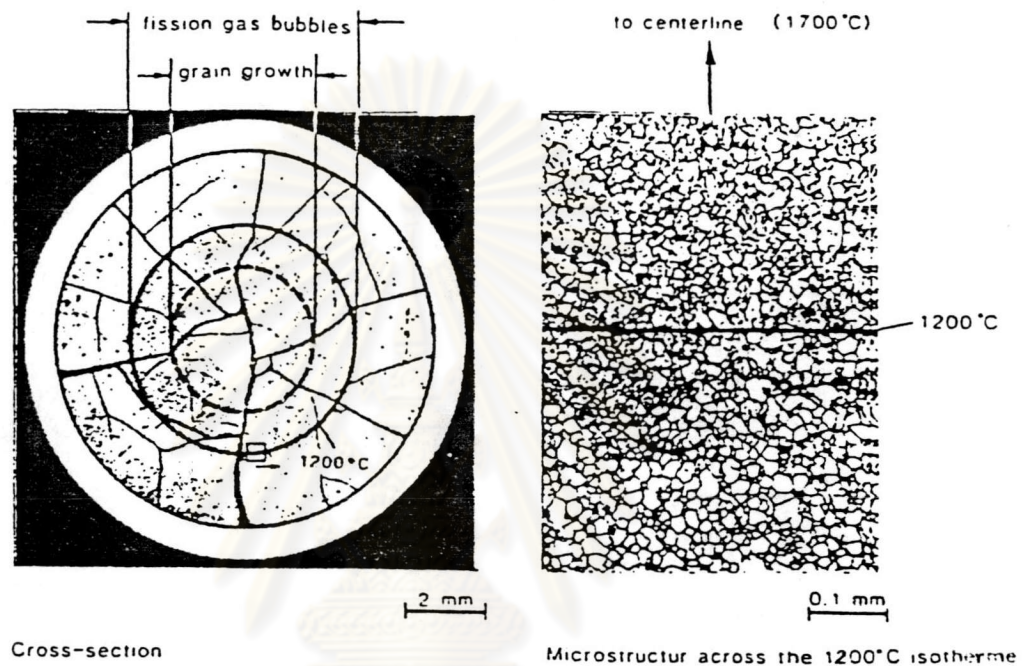
2.3.3.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไมโคร ( Microstructure - changes ) (13,14) การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งไม่เกิดจากการบวม ( swelling ) หรือการแน่นตัว ( Densification ) แต่เป็นผลจากความเค้น เมื่อได้รับความร้อน ( thermal stress ) ของเม็ดเชื้อเพลิงทำให้เกิดรอยร้าว ( crack pattern ) ขึ้น การเกิดรอยร้าวขึ้นนี้ ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ( temperature gradient ) ลักษณะของรอยร้าว

ตาราง 2.11 ปรางุการณ์ที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีผลต่อ  
คุณลักษณะของเม็ดเชื้อเพลิง (14)

Characteristics of Fuel Pellets As - Fabricated  In - Reactor Phenomena	Fissile Material and Gd Content (Variations)	Chemical Properties		Density and Microstructure				Surface and Geometry
		Impurities	Stoichiometry	Density	Pore Structure	Grain Structure	Oxide Phase Structure	
<u>Restructuring and Microstructural Changes</u> - Crack Pattern and Relocation - Grain Growth - Pore Migration, Columnar Grain Growth, (Central Void)			(X)	(X)	(X)	X X		X
<u>Densification and Swelling</u> - Thermal Activated Densifi- cation - Fission-Induced Densification - Fission-Induced Swelling	X (X)		X	X	(X)	(X)	X X (X)	
<u>Fission Product Behaviour</u> - Solid and Volatile Fission Products - Release of Fission Cases (steady state, transient) - Short-lived Fission Products	X		X	X	X	X	X (X) (X) (X)	(X)
<u>Interaction with the Cladding</u> - Internal Corrosion of the Cladding - Pellet/Clad-Interaction (PCI)	X		X	(X)			X	(X)

X = strong relation , (X) weak relation

ที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูป 2.13 ซึ่งเป็นภาพตัดขวาง แสดงเม็ดเชื้อเพลิง หลังจากใช้ไป 48.5 ชั่วโมง มีการเบิร์นอัพ ( Burn-up ) 21.5 กิกะวัตต์-วันต่อตันของ ยูเรเนียม โดยให้กำลังความร้อน 460 วัตต์ต่อเซนติเมตร



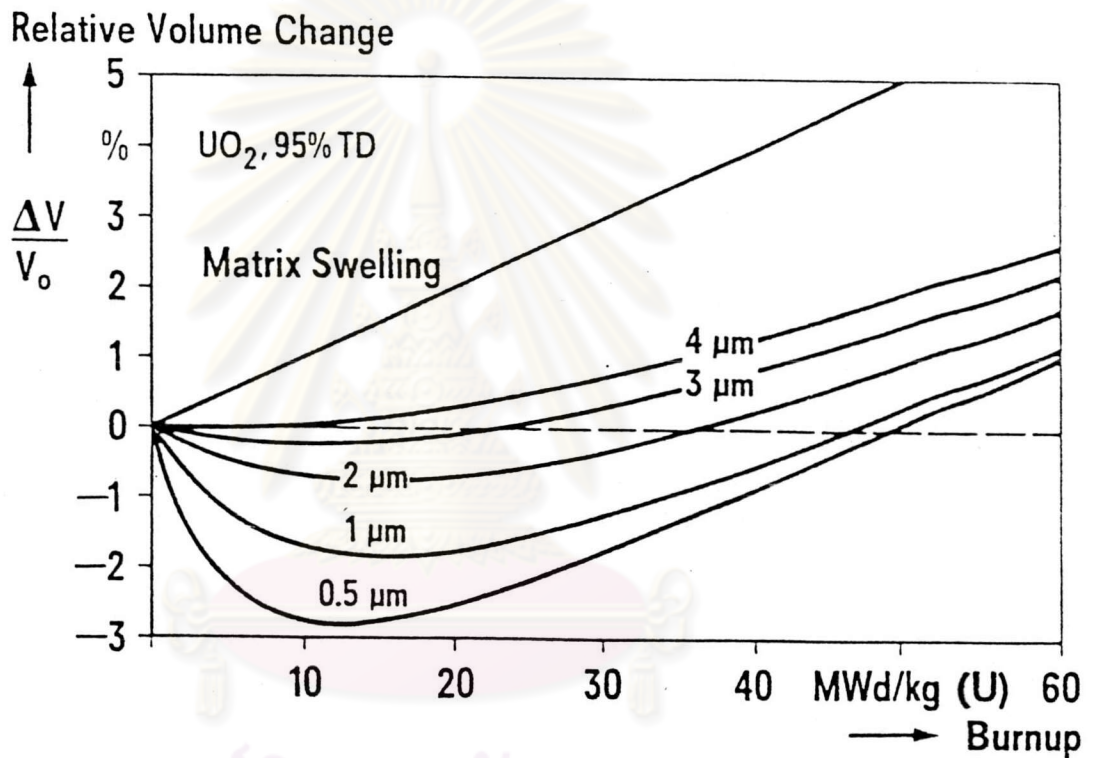
รูป 2.13 แสดงลักษณะรอยร้าวของเม็ดเชื้อเพลิง (14)

2.3.3.2 การขวมและการแน่นตัว (13,14) การแน่นตัวเกิดจากการเกิดอันตกิริยาต่อกัน ( interaction ) ของส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัว ( fission - fragments ) กับรูพรุน ( pore ) เกิดการหดตัวของรูพรุน ซึ่งลดความเป็นรูพรุน ( porosity ) ส่วนการขวมเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว ทำให้สัดส่วนของปริมาตร (  $\Delta V/V_0$  ) เกิดความเปลี่ยนแปลงโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ (13)

$$\Delta V/V_0 = (\Delta V/V_0)^P + (\Delta V/V_0)^S$$

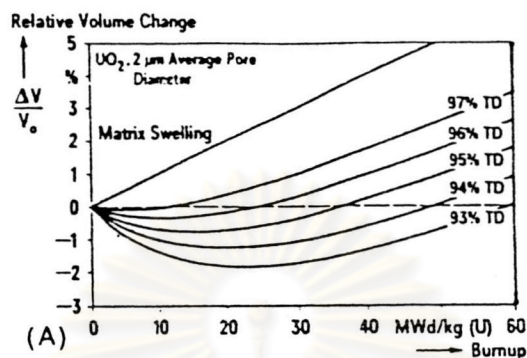
ซึ่ง P หมายถึงการหดตัวของรูพรุนมีค่าเป็นลบ และ S หมายถึงการขวมที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะได้ว่าอัตราการเกิดเบิร์นอัพ ของยูเรเนียมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร ดังในรูป 2.14 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื่องจาก

การแน่นตัวหรือการบวมของยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่มีความหนาแน่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของค่าตามทฤษฎี ( Theoretical density = TD ) โดยมีขนาดของรูพรุนต่าง ๆ กัน และรูป 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรสัมพันธ์กับอัตราการเกิดเบิร์นอัพของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ โดยมีรูพรุนขนาดเฉลี่ย 2 ไมครอน ที่ความหนาแน่นต่าง ๆ



รูป 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอัตราการเกิดเบิร์นอัพ ของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่มีความหนาแน่น 95% TD (14)





รูป 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอัตราการเกิดเบิร์นอัพ ของเม็ดเชื้อเพลิงยูเรเนียม ไดออกไซด์ ที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน (13)

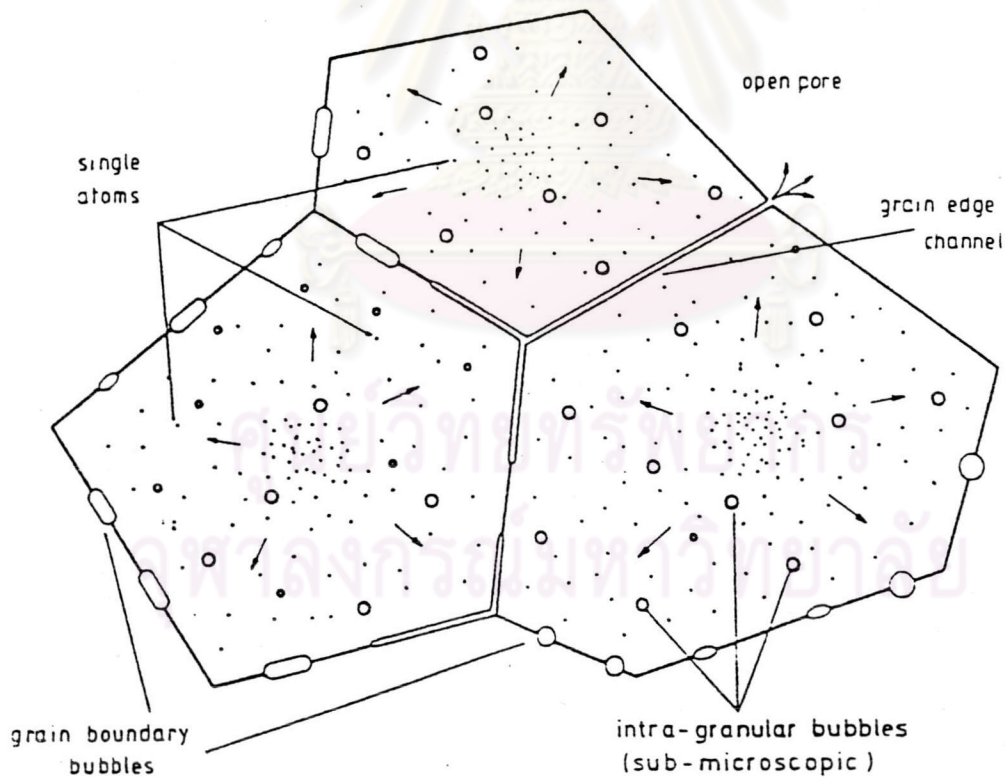
### 2.3.3.3 พฤติกรรมจากผลผลิตของปฏิกิริยาการแตกตัว ( Fission product behaviour ) (13,14)

ผลผลิตฟิชชันในเชื้อเพลิงออกไซด์สามารถแบ่งตามพฤติกรรมทางเคมีและฟิสิกส์ ได้ 5 ประเภทคือ (14)

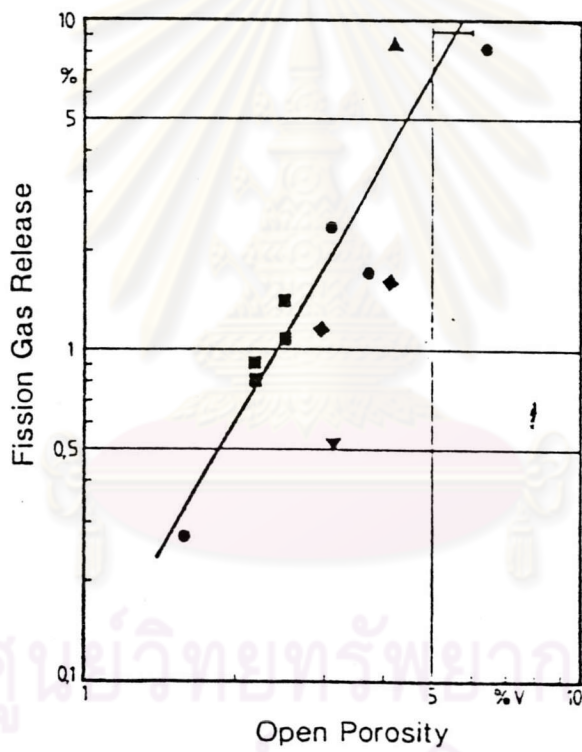
- 1) เกิดเป็นออกไซด์ที่ละลายได้ ( Soluble oxides ) ได้แก่ เซอร์โคเนียม ( Zr ) , สตรอนเชียม ( Sr ) และธาตุพวกแรเอิร์ท ( rare earth elements )
- 2) เกิดตะกอนออกไซด์ ได้แก่ แบเรียม ( Ba ) , โมลิบดีนัม ( Mo )
- 3) เกิดตะกอนเป็นโลหะ ( metallic ) ได้แก่ รูทีเนียม ( Ru ) และโมลิบดีนัม
- 4) สารระเหยง่าย ได้แก่ ซีเซียม ( Cs ) , ไอโอดีน ( I ) และเทลลูเรียม ( Te )
- 5) ก๊าซเฉื่อย ได้แก่ ซีซอน ( Xe ) และคริปทอน ( Kr )

การที่โมลิบดีนัม จะเกิดเป็นออกไซด์หรืออยู่ในรูปโลหะ ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของออกซิเจน ( oxygen partial pressure ) สำหรับการปลดปล่อย ( Release ) ของก๊าซเฉื่อยจะเกิดขึ้นในประมาณ 15% ของผลผลิตฟิชชันทั้งหมด ในรูป 2.16 แสดงกลไกการ

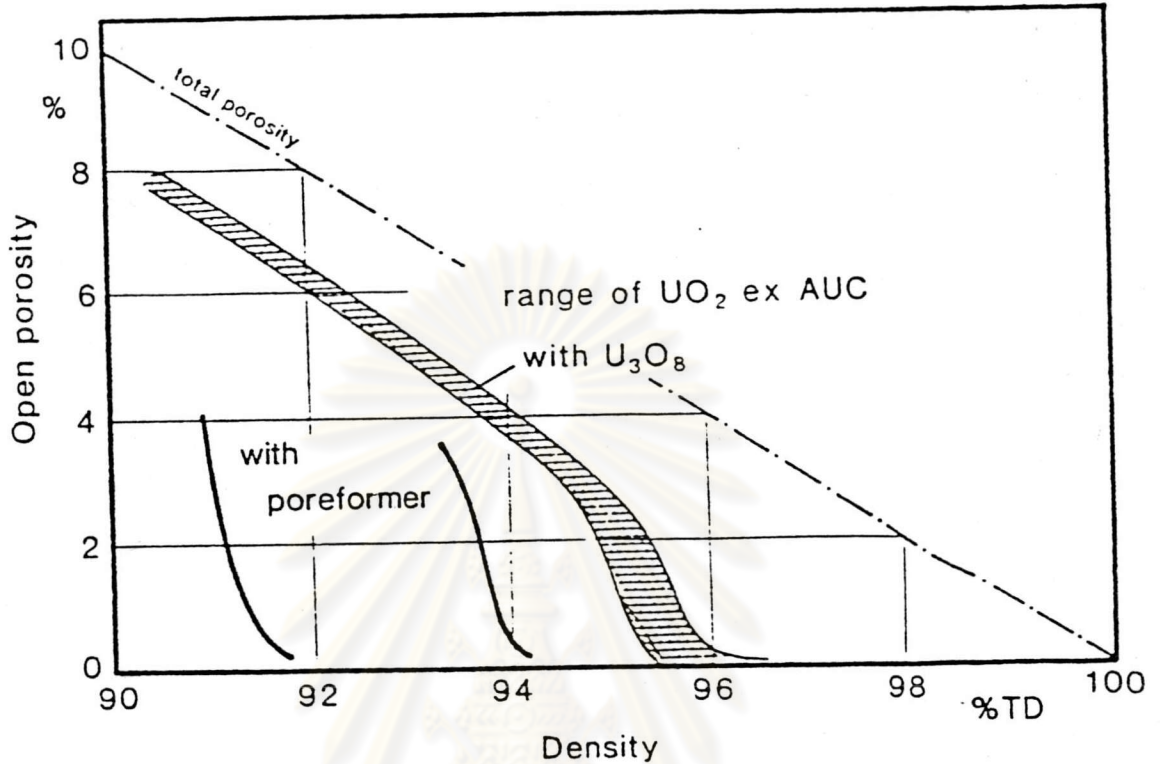
ปลดปล่อยฟิซชันก๊าซ โดยที่อะตอมของฟิซชันก๊าซ จะถูกจับไว้ในสารละลายของแข็ง ( Solid - Solution ) ในก้อนยูเรเนียม ไดออกไซด์ อะตอมนี้เกิดการเคลื่อนย้าย ( migrate ) ไป โดยการแพร่กระจาย ( diffusion ) และเกิดเป็นฟอง ( bubbles ) ขนาดใหญ่ขึ้นที่ผิวเกรน ทำให้เกิดรูพรุนที่ผิวเกรนขึ้น ผลจากการปลดปล่อยฟิซชันก๊าซ จะทำให้เพิ่มจำนวนรูพรุนเปิด ( open porosity ) มากขึ้น ดังแสดงในรูป 2.17 และรูพรุนเปิดของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นด้วย ดังในรูป 2.18, ค่าของรูพรุนเปิด จะมีค่าเข้าใกล้ ศูนย์ที่ประมาณ 96% ของค่าตามทฤษฎี โดยไม่มีการเติมสารที่ทำให้เกิดรูพรุน ( pore formers ) สำหรับกรณีที่มีการเติมสารที่ทำให้เกิดรูพรุน จะทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ความหนาแน่นของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ลดลง และค่าของรูพรุนเปิดมีค่าต่ำ



รูป 2.16 กลไกการปลดปล่อยฟิซชันก๊าซ (14)



รูป 2.17 ความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยฟิชชันก๊าซกับรูพรุนเปิดหลังจาก  
การเบิร์นอัฟไป 1 วัฏจักร (14)

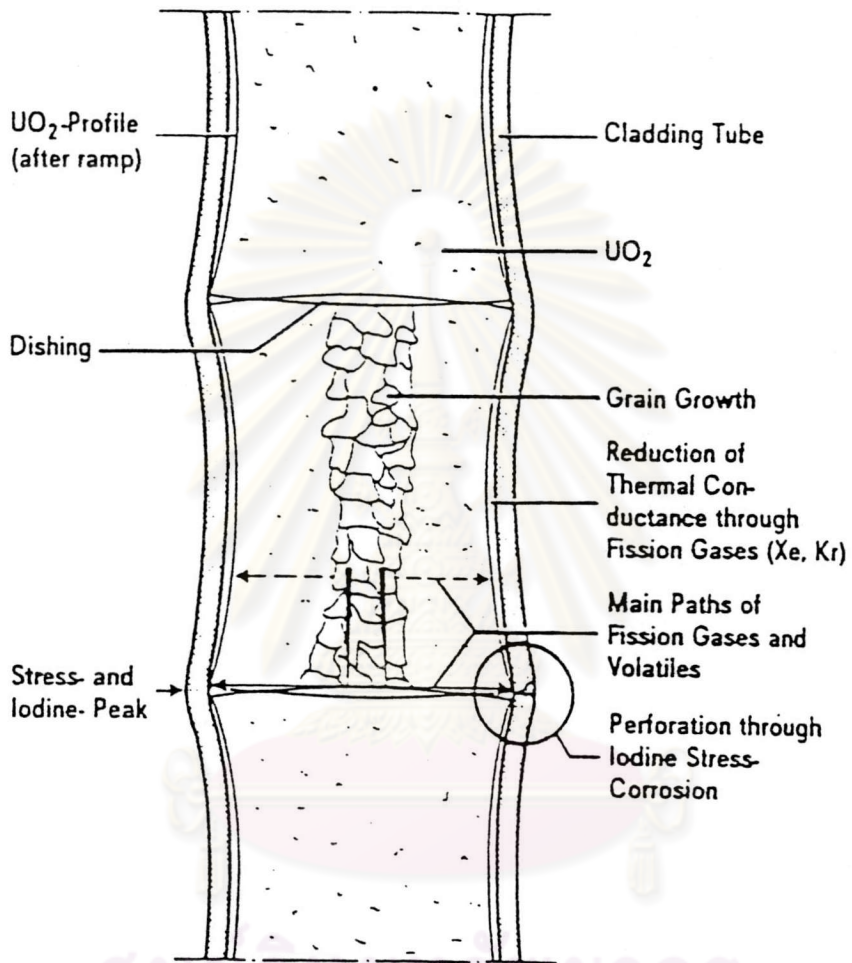


รูป 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารูพรุนเปิดกับความหนาแน่น  
ของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ (14)

#### 2.3.3.4 การเกิดปฏิกิริยากับวัสดุห่อหุ้ม ( Interaction with the Cladding ) (14)

สำหรับกรณีที่ตัวห่อหุ้ม เป็น เซอร์คาลอย ( Zircalloy Cladding )

จะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนที่ปลดปล่อยจากยูเรเนียม ไดออกไซด์ ในระหว่างการเพิ่มกำลัง ( power ) จนมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ ทำให้เกิดการแตกขึ้นเนื่องจากมีความเค้น ( stress ) ขึ้น และการบวมเนื่องจากมีการปลดปล่อยฟิชชันก๊าซ ก็จะทำให้เกิดการขยายตัวของเม็ดยูเรเนียม ไดออกไซด์ สำหรับฟิชชันก๊าซที่มีส่วนในการทำให้เกิดกระบวนการนี้คือ ไอโอดีน หรือสารประกอบไอโอดีน และหรือแคดเมียม สำหรับกระบวนการนี้ เรียกว่า ฟิชโซ (14,15) ( PCI = Pellet/Clad Interaction ) ดังแสดงในรูป 2.19 การเกิดทะลุเป็นรู ( perforation ) ของผนังวัสดุห่อหุ้ม ปรากฏที่ผิวรอยต่อของเพลลเล็ต คุณสมบัติที่มีผลต่อพฤติกรรมของฟิชโซ คือความหนาแน่น ความเป็นรูพรุนแบบเปิด ขนาดเกรน และรูปร่างของเพลลเล็ต



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 2.19 กลไกการเกิด พิซีไอ ( Pellet/Clad interaction ) (14,15)