

การผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

2.1 การผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์โดยขบวนการแห้ง (Dry Process)

ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ (UF<sub>4</sub>) หรือเรียกว่า เกลือสีเขียว (green salt) เป็นสารประกอบในขั้นตอนที่ใช้เตรียมโลหะธาตุยูเรเนียม หรือผลิตยูเรเนียมเอกซ์เฟลูออไรด์ สำหรับขบวนการเสริมสมรรถนะ (enrichment process) ในขบวนการผลิตประกอบด้วยการเตรียมยูเรเนียมไตรออกไซด์ (UO<sub>3</sub>) หรือเรียกว่า ออกไซด์สีส้ม (orange oxide) รีดักชันยูเรเนียม +6 ในยูเรเนียมไตรออกไซด์ ให้เป็น +4 โดยเผาในบรรยากาศของ ไฮโดรเจนไดยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO<sub>2</sub>) หรือออกไซด์สีน้ำตาล (brown oxide) เตรียมเป็นยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ โดยขบวนการไฮโดรฟลูออรีเนชัน ด้วยก๊าซไฮโดรเจน ฟลูออไรด์ที่แห้ง

2.1.1 ขบวนการผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

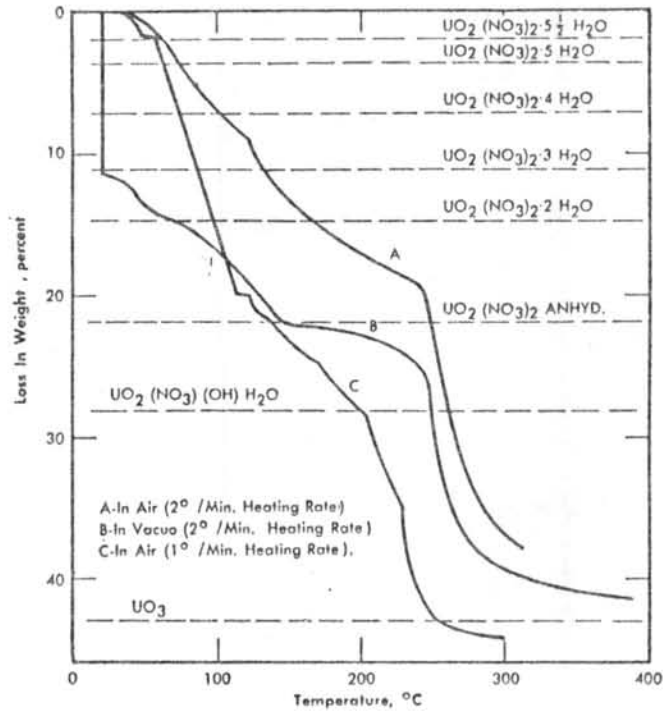
2.1.1.1 ขบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกา<sup>(8)</sup>

โรงงานที่ Ferrald มลรัฐโอไฮโอ ของคณะกรรมการพลังงานปรมาณูของสหรัฐอเมริกา (U.S. Atomic Energy Commission) เตรียมยูเรเนียมไตรออกไซด์จากการเผายูเรนิลไนเตรต โดยควบคุมอุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาดีไนเตรชันตามปฏิกิริยา

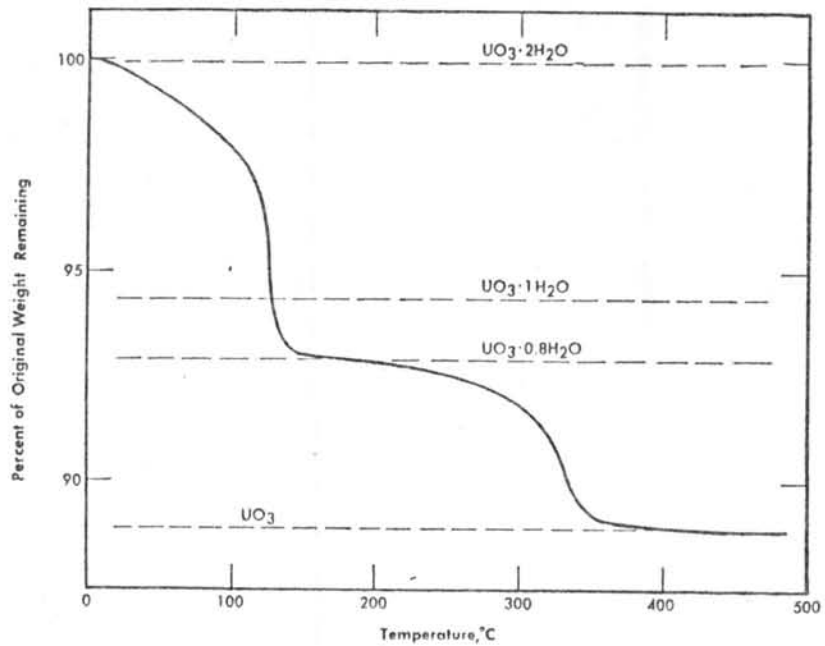


ในรูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของยูเรนิลไนเตรตเอกซ์ไฮเดรตที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าความแตกต่างอยู่ที่การสลายตัวนั้น กระทำในอากาศหรือในสุญญากาศ อัตราการเพิ่มความร้อนก็มีผลกับการเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นได้จากกราฟ A และ C ที่อุณหภูมิต้นน้ำหนักที่ลดลงแตกต่างกันมากในอากาศและสุญญากาศ แต่ยูเรนิลไนเตรตสลายตัวที่อุณหภูมิ

ใกล้เคียงกัน อุณหภูมิเกิน 300 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดีไนเตรชันได้ดีมากและจุดที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยูเรเนียมไดออกไซด์คือ 400 องศาเซลเซียส ดังกราฟในรูป 2.2

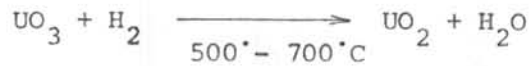


รูป 2.1 การสลายตัวของยูเรนิลไนเตรต เอกซ์ไฮเดรตที่อุณหภูมิต่างๆ

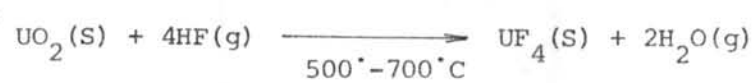


รูป 2.2 การสลายตัวของยูเรเนียมไดออกไซด์ไฮเดรตที่อุณหภูมิต่างๆ

ยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ได้ถูกป้อนอย่างสม่ำเสมอเข้าไปยังเตาเผาแบบนอน ทำด้วย เหล็กโรสซึมเบอร์ 347 ผ่านก๊าซไฮโดรเจนไหลส่วนทาง ไฮโดรเจนนี้ได้จากการสลายอัมโมเนีย ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจนร้อยละ 75 และไนโตรเจนร้อยละ 25 จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันตามสมการ



ยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ได้ถูกป้อนเข้าไปยังเตาเผาที่ทำด้วยโลหะผสมอินโคเนล (Inconel alloy) ผ่านก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่แห้งให้วิ่งส่วนทางจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรฟลูออริเนชันให้ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ตามสมการ



#### 2.1.1.2 ขบวนการผลิตในประเทศอังกฤษ<sup>(1)</sup>

โรงงานของ United Kingdom Atomic Energy Authority ที่ Spring Fields Works เตรียมยูเรเนียมไดออกไซด์โดยการสลายอัมโมเนียมไดยูเรเนต (ammonium diuranate หรือ ADU) ซึ่งไม่ได้มีองค์ประกอบเป็น  $(\text{NH}_4)_2 \text{U}_2\text{O}_7$  ตั้งชื่อที่เรียก แต่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน การตกตะกอนตามปกติได้สารที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับ  $(\text{NH}_4)_2 \text{U}_4 \text{O}_{13}$

เงื่อนไขการตกตะกอนอัมโมเนียมไดยูเรเนต มีผลต่อคุณสมบัติของยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัมโมเนียมไดยูเรเนตที่เป็น อลัทธิฐาน (amorphous) สลายตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในอากาศ และมีขนาดเล็กกว่าตอนเร็วต้นเล็กน้อย ปฏิกิริยาในการเตรียม คือ



ยูเรเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีนี้ มีคุณสมบัติแตกต่างจากการเตรียมโดยการสลายตัว ยูเรนิลไนเตรตด้วยความร้อน ออกไซด์ที่ได้จากไดยูเรเนตจะมีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากยูเรนิลไนเตรต เนื่องจากออลัทธิฐานของไดยูเรเนตไวต่อความร้อนมาก

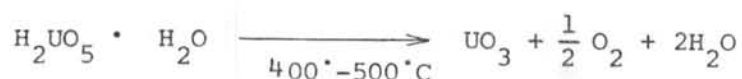
ขั้นตอนการเตรียมยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ต่อไปนั้นเหมือนกับข้อ 2.1.1.1

### 2.1.1.3 ขบวนการผลิตในประเทศฝรั่งเศส<sup>(1)</sup>

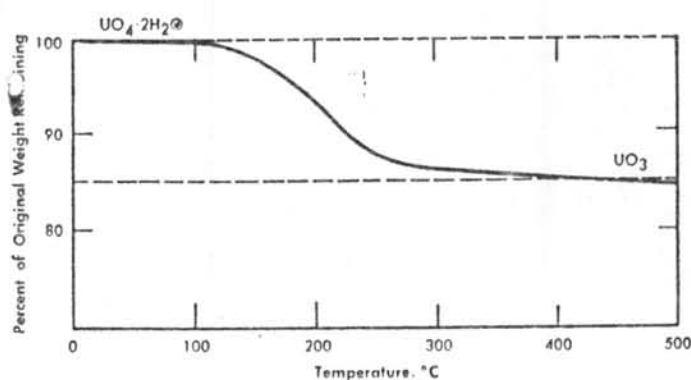
ที่ Bouchet Works ของคณะกรรมการพลังงานปรมาณูของฝรั่งเศส มีขั้นตอนดังนี้

2.1.1.3.1 ตกตะกอนเป็นกรดเปอร์ออกซียูเรนิค ( $\text{H}_2\text{UO}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) โดยปฏิกิริยาของยูเรนิลไนเตรต กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.1.1.3.2 กรดที่ได้ละลายตัวที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสในอากาศ โดยทิ้งออกซิเจน และน้ำจะค่อย ๆ หลุดไปในระหว่างการละลายตัว คุณสมบัติของตะกอนกรดมีอิทธิพลต่อออกไซด์ที่ได้ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้



รูป 2.3 แสดงการละลายตัวของยูเรเนียมเปอร์ออกไซด์ (หรือกรดเปอร์ออกซียูเรนิค) โดยความร้อนที่ความดันบรรยากาศ  $\text{UO}_3$  ที่ได้จากการละลายตัวกรดเปอร์ออกซียูเรนิคมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส



รูป 2.3 การละลายตัวของยูเรเนียมเปอร์ออกไซด์  
ที่ความดันบรรยากาศ

2.1.1.3.3 ขั้นตอนการเตรียมยูเรเนียมไดออกไซด์ และยูเรเนียมเตตระ-  
ฟลูออไรด์ เหมือนข้อ 2.1.1.1

2.1.1.4 ข้อเปรียบเทียบของยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตจาก ยูเรนิลไนเตรท  
อัมโมเนียมโดยเรเนต และกรดเปอร์ออกซียูเรนิค แสดงไว้ในตาราง 2.1

Property	Type of $UO_3$		
	$UO_2(NO_3)_2$	ADU	$H_2UO_5 \cdot H_2O$
Tap density, g/cc	3.6-4.0	0.65-1.7	0.7-1.6
Mean particle size, $\mu$	0.99	0.44-0.08	0.05
Mean aggregate size, $\mu$	22	80-110	90
Surface area, sq m/g	0.73	0.16-0.90	1.4
Crystal type	III	Amorphous	Amorphous

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตจากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ

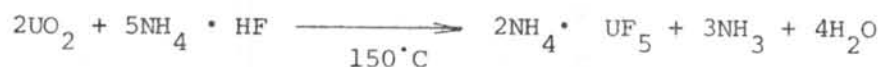
2.1.1.5 ขบวนการผลิตในประเทศเบลเยียม<sup>(g)</sup>

มีการเตรียมยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์โดยใช้สารสำหรับปฏิกิริยาฟลูออรีเนชัน  
ที่ราคาไม่แพง นำกลับมาใช้ใหม่ได้ อันตรายน้อยกว่า และเคลื่อนย้ายได้ง่าย ไม่ต้องใช้เตาเผา  
ที่ทำด้วยโลหะเพื่อที่ทนการกัดกร่อนของกรดไฮโดรฟลูออริก และเมื่อร์ดิวซ์เป็นโลหะก็ให้ยิลด์(yield)  
สูง ขั้นตอนมีดังนี้

2.1.1.5.1 เปลี่ยนยูเรเนียมเปอร์ออกไซด์( $UO_4 \cdot 2H_2O$ ) ซึ่งได้จาก  
ปฏิกิริยาระหว่างยูเรนิลไนเตรต กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้เป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ โดย  
การละลายตัวที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปฏิกิริยาทำในเตาท่อควอร์ตซ์  
(quartz)

2.1.1.5.2 รีดิวซ์  $UO_3$  ด้วยไฮโดรเจนที่ 600 องศาเซลเซียส ให้  $UO_2$

2.1.1.5.3 ให้  $UO_2$  ทำปฏิกิริยากับ อัมโมเนียมไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ( $NH_4 \cdot HF$ ) ซึ่งเป็นของแข็งสีขาวมีพิษน้อยกว่ากรดไฮโดรฟลูออริก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ตามสมการ



ปฏิกิริยาทำในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม และเผาในเตาที่เคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียมใช้ เวลา 8 ชั่วโมง

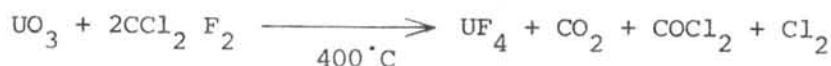
2.1.1.5.4 สลายตัว  $NH_4 \cdot UF_5$  ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งอัมโมเนียม - ฟลูออไรด์ ( $NH_4F$ ) จะระเหยออกมา



สับอัมโมเนียมฟลูออไรด์โดยละลายน้ำ และตกตะกอนใหม่ ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ ที่ได้มีขนาดประมาณ 100 เมช (mesh)

2.1.1.6 เตรียมจากปฏิกิริยาของยูเรเนียมไดออกไซด์ กับ freons (ฟลูออรีเนเตด ไฮโดรคาร์บอน)<sup>10</sup>

โดยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ได้ให้เป็นยูเรเนียม ไดออกไซด์ก่อน เนื่องจากฟรอนสามารถรีดิวซ์สารอื่นได้ ตามสมการ



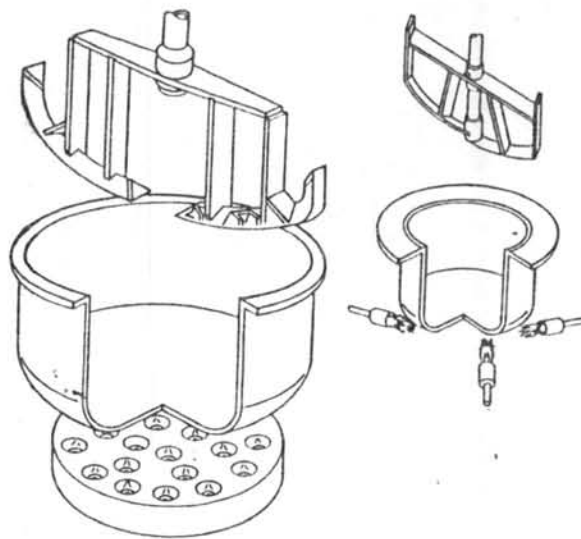
ในปฏิกิริยาถ้ามีออกซิเจน ฟอสจีน ( $COCl_2$ ) จะไม่เกิดขึ้น

2.1.2 ขบวนการผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรม<sup>(1)</sup>

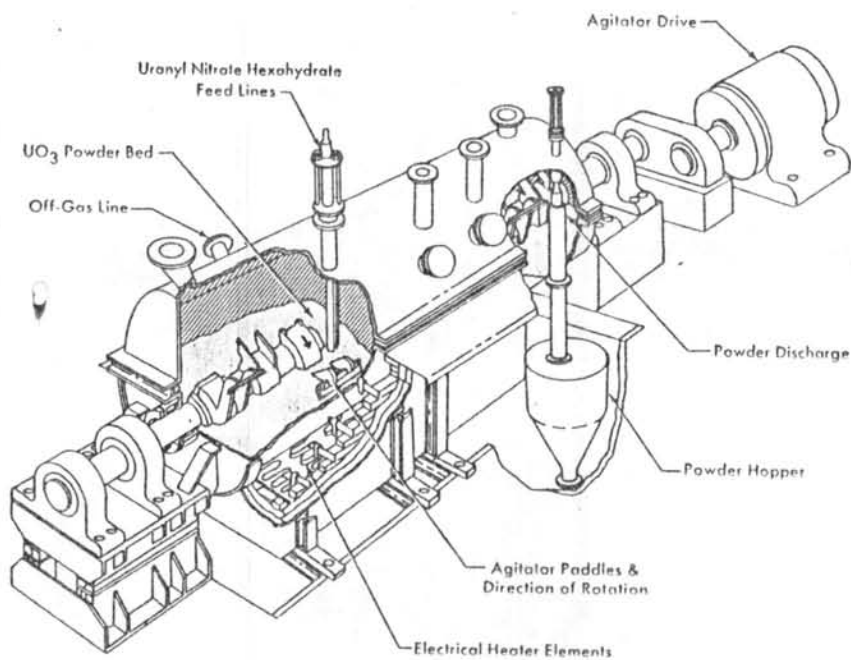
2.1.2.1 การผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

2.1.2.1.1 ทำสารละลายของยูเรนิลไนเตรตให้เข้มข้นขึ้น โดยการระเหย ให้ได้ยูเรนิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (UNH) ปริมาณของยูเรเนียมที่ผลิตมีตั้งแต่ 90 ถึง 280 กรัม ยูเรเนียมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร เครื่องมือที่ใช้มี 2 แบบ คือแบบที่ระเหยแนวตั้ง และแบบถังทำให้เดือด ให้ความร้อนโดยมีท่อไอน้ำภายใน อุณหภูมิที่ใช้ในโรงงานอยู่ระหว่าง 120 ถึง 145 องศาเซลเซียส ภาชนะที่ใช้ทั้งหมดทำด้วยเหล็กโรสดีมเบอร์ 304L

2.1.2.1.2 ให้ความร้อนต่อไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไอเดรชัน และดีไนเตรชัน เครื่องจักรที่ใช้มี 2 แบบคือ แบบทำเป็นชุด(batch) และ แบบต่อเนื่อง(continuous) รูป 2.4 แสดง batch ดีไนเตรชัน ในสหรัฐอเมริกาภาชนะที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 30 นิ้ว ให้ความร้อนโดยตะเกียงก๊าซ 4 อัน ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 66 นิ้ว ให้ความร้อนโดยตะเกียงก๊าซเล็ก ๆ เรียงเป็นวงกลม 3 รอบ วัสดุที่ใช้ทำส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กโรสดีมเบอร์ 340L และ 347 รูป 2.5 แสดงโรงงานดีไนเตรชันแบบต่อเนื่องซึ่งทำในปี ค.ศ. 1953 โดยบริษัท General Electric ที่ Hanford รางที่ให้ความร้อนกว้าง 26 นิ้ว ยาว 12 ฟุต ทำด้วยเหล็กโรสดีมเบอร์ 347 ควบคุมอุณหภูมิที่ 510 ถึง 538 องศาเซลเซียส ตาราง 2.2 แสดงคุณภาพของยูเรเนียมไตรออกไซด์ที่ผลิตทางการค้า นอกจากนี้ยังมีการผลิตในขนาดโรงงานทดลองโดยใช้ฟลูอิดไอซ์-เบด ดีไนเตเตอร์ (fluidized-bed denitator)



รูป 2.4 ภาชนะสำหรับดีไนเตรชัน



รูป 2.5 การเผาอย่างต่อเฟืองในการแปลงยูเรนิลไนเตรต เฮกซะไฮเดรต เป็นยูเรเนียม ไตรออกไซด์

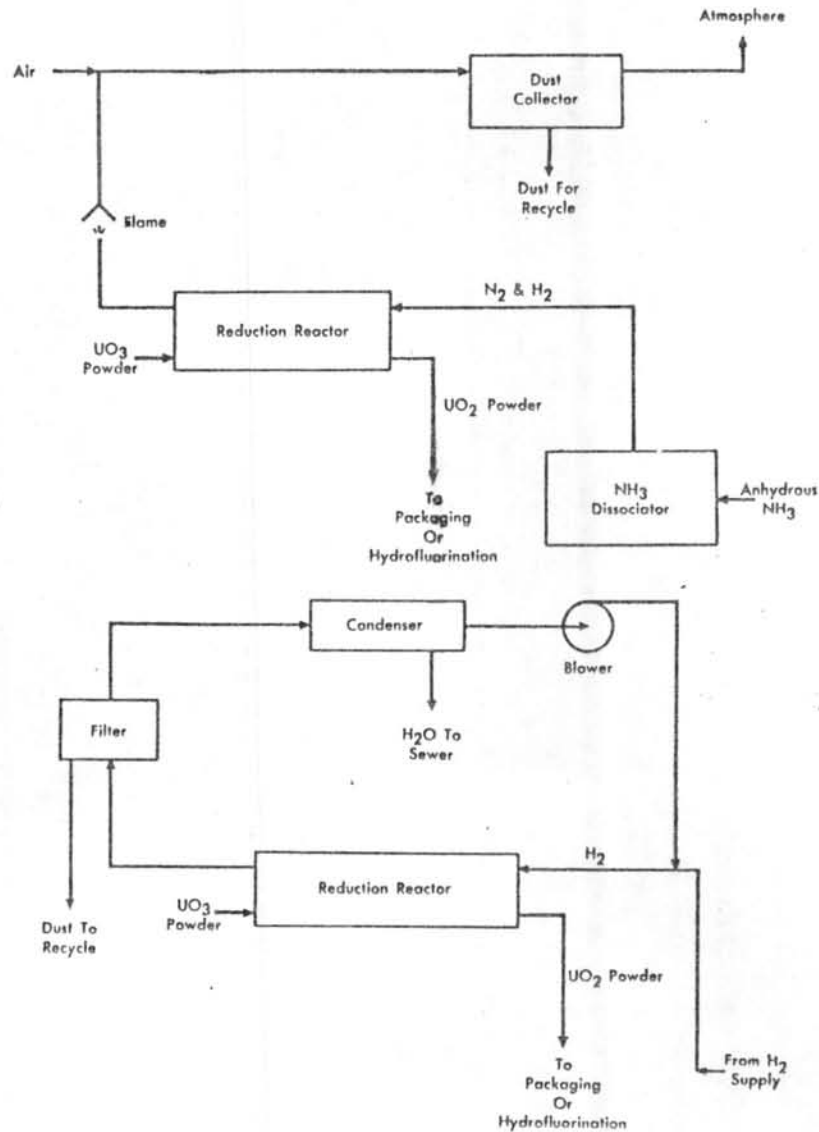
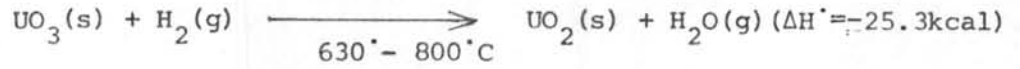
	Batch $UO_3$		Continuous $UO_3$	
	Small Pots	Large Pots	Stirred Trough	Fluid-BED
$UO_3$ , %	97.6	97.8	--	99.4
$NO_3$ , %	0.85	0.58	0.2	0.5
$H_2O$ , %	-	-	1.0	0.15
$U_3O_8$ , %	0.8	0.96	-	0.1
S, ppm	0-220	250	1500-2000	0-800
Tap density, g/cc	3.8	3.5	4.2	4.3

ตาราง 2.2 ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมไตรออกไซด์



2.1.2.2 การผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์

รูป 2.6 เป็นแนวทาง 2 แบบที่ใช้ในการผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์จากยูเรเนียมไตรออกไซด์

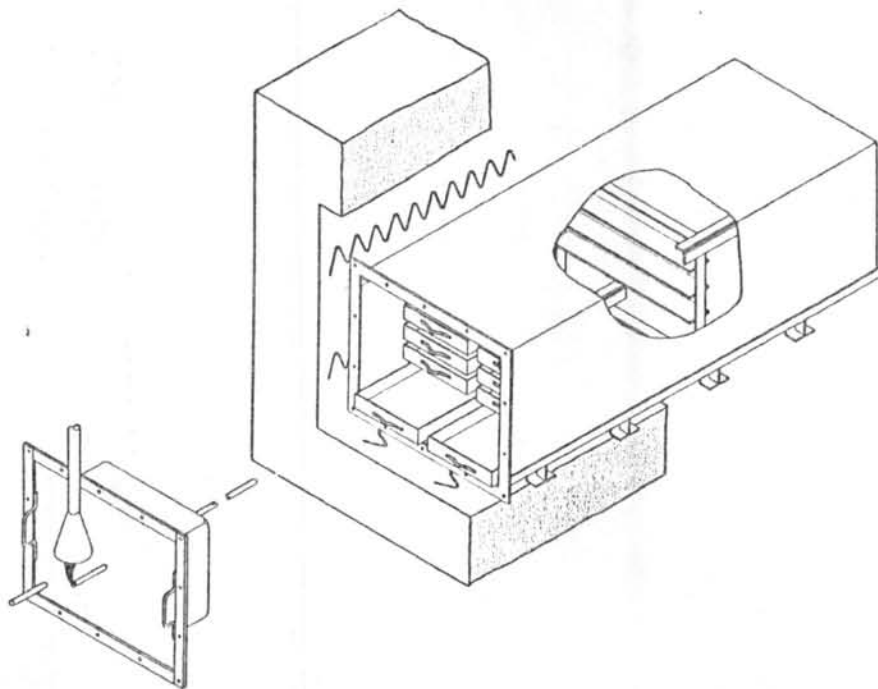


รูป 2.6 แนวทางการผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์

จากยูเรเนียมไตรออกไซด์

เครื่องมีระบบ batch system แสดงในรูป 2.7 ภาชนะทำด้วยเหล็กไร้สนิม(stainless steel) สูง 13 นิ้ว กว้าง 17 นิ้ว และยาว 47 นิ้ว สามารถล่องเข้าไปในเตาเผาได้ ปลายด้านหนึ่งปิด อีกด้านหนึ่งเจาะรูสำหรับให้ก๊าซเข้าและออก ภายในบรรจุถาดได้ 8 ถาด เนื่องจากปฏิกิริยาให้ความร้อน ความร้อนจะระบายออกนอกภาชนะ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องให้ความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในอัตราที่ต้องการ โดยลวดไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิอยู่ราว 816 องศาเซลเซียส

การผลิตแต่ละครั้งได้ยูเรเนียมไดออกไซด์ 40 ปอนด์ ใช้ฮีโมเนียมในอัตรา 4 ปอนด์ต่อ ชั่วโมง โดยใช้เวลาดังนั้น 5 ชั่วโมงที่ 816 องศาเซลเซียส



รูป 2.7 Batch reactor สำหรับผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์

เครื่องมือที่ใช้ผลิตแบบ continuous มีหลายแบบ เช่น

ก. Stirred-Bed reactor แสดงในรูป 2.8 เป็นการผ่านยูเรเนียมไดออกไซด์ ไปในท่อที่ร้อนมีตัวช่วยให้เคลื่อนจากปลายหนึ่งไปอีกปลายหนึ่ง ก๊าซไฮโดรเจนผ่านท่อในทิศทางเดียวกัน หรือทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ ขนาดของท่อยาว 22 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 นิ้ว ทำจาก เหล็กไร้สนิมเบอร์ 309 หนา 0.25 นิ้ว อุณหภูมิของปฏิกิริยาควบคุมไว้ที่ 649 องศาเซลเซียส ผลิต

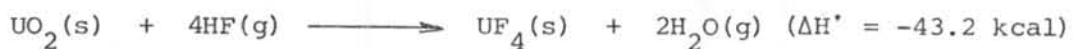
ยูเรเนียมไดออกไซด์ได้ 200 ปอนด์ต่อชั่วโมง

ข. Fluidized-Bed reactor แสดงในรูป 2.9 ประกอบด้วยท่อเหล็กไร้สนิม ตั้งตรง 2 ท่อ เส้นผ่าศูนย์กลาง 14 นิ้ว ปิดทั้ง 2 ด้านและจัดให้ผงยูเรเนียมไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาเรียบร่อยแล้วในท่อแรกไหลออกมายังท่อที่ 2 ท่อสูง 6.5 ฟุต ด้านล่างเป็นแผ่นที่มีรูพรุนยอมให้ก๊าซผ่านได้ ความเร็วของก๊าซอยู่ระหว่าง 0.8 และ 1.5 ฟุตต่อวินาที อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 538 ถึง 621 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของยูเรเนียมไดออกไซด์ ช่วงที่ให้ผลผลิตดีที่สุด คือ 550 ถึง 1,200 ปอนด์ต่อชั่วโมง

### 2.1.2.3 การผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

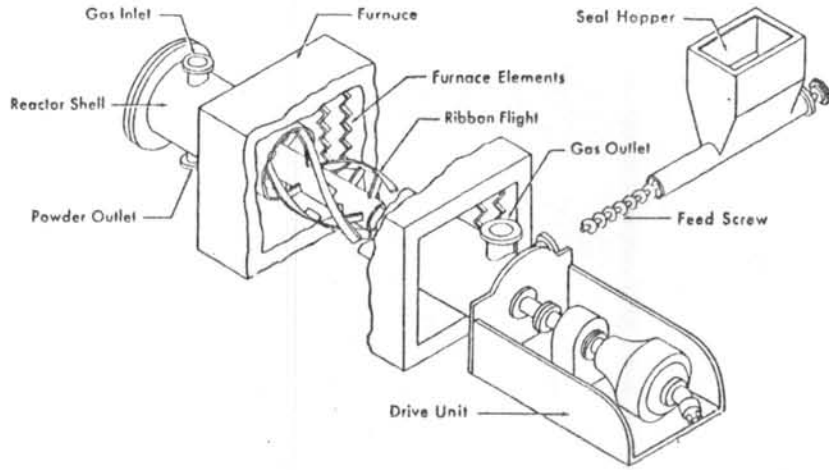
ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่ผลิตในอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด คือ ไซล์สำหรับรีดิฟฟิว เป็นโลหะธาตุยูเรเนียม เรียกว่า metal grade และใช้ในขบวนการฟลูออรีเนชัน เป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ ( $UF_6$ ) สำหรับการเสริมสมรรถนะ เรียกว่า cascade grade ความแตกต่างคือ สำหรับ metal-grade ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์จะต้องบริสุทธิ์อย่างน้อย 96 เปอร์เซ็นต์ ส่วน cascade grade นั้นไม่ได้กำหนดแน่นอน ขึ้นอยู่กับต้นทุนในการทำฟลูออรีเนชัน ส่วนผสมอื่น ๆ ในยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ คือ ยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) ไตรยูเรเนียมออกไซด์ ( $U_3O_8$ ) และยูเรนิลฟลูออไรด์ ( $UO_2F_2$ )

รูป 2.10 แสดงแนวทางการผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ตามปฏิกิริยา

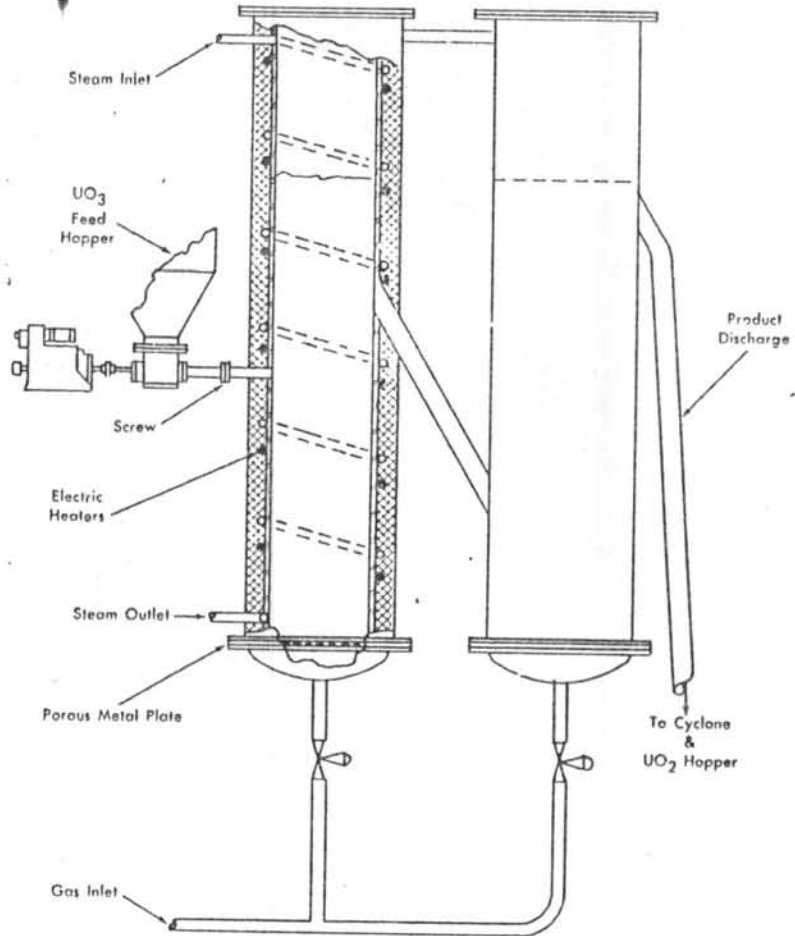


ในการผลิตสมัยแรกใช้แบบ batch reactor ดังแสดงในรูป 2.11 reactor ประกอบด้วยกล่องซึ่งทำด้วยโลหะทนไฟ สูง 24 นิ้ว กว้าง 20 นิ้ว และยาว 68 นิ้ว มีประตูปิดวางอยู่เหนือเตาก๊าซ ภายในมี 4 ถาด ทำด้วยโมนีล (Monel) ขนาด 1.5 x 16 x 62 นิ้ว จัดให้ก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผ่านด้านบนของถาดตามลำดับ โดยเข้าทางด้านล่างและออกทางด้านบน

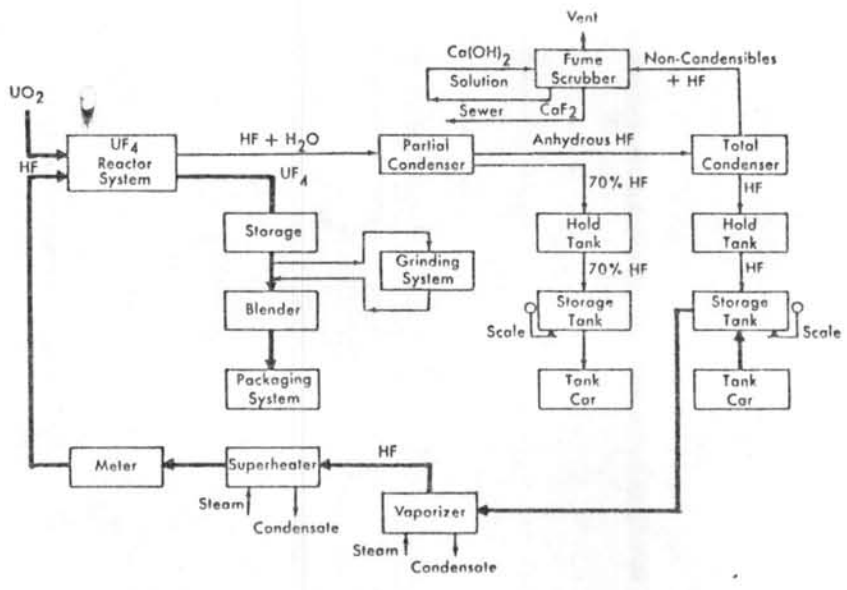
แต่ละถาดบรรจุยูเรเนียมไดออกไซด์ 75 ปอนด์ อุณหภูมิที่ใช้คือ  $485 \pm 28$  องศาเซลเซียส ควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (thermocouple) ซึ่งอยู่ใต้ถาด อุณหภูมิที่สูงกว่านี้มีผลทำให้ผิวหน้าแตกและปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ปริมาณของก๊าซที่ใช้มากกว่าปริมาณที่คำนวณได้ 2 เท่า อัตราไหล



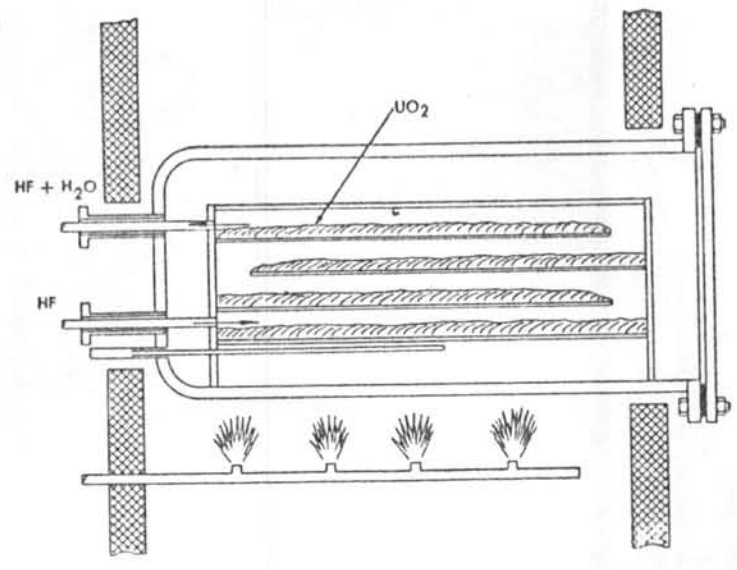
รูป 2.8 Reactor สำหรับรีตักขึ้นแบบต่อเนื่อง (1)



รูป 2.9 Fluidized-bed reactor สำหรับผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์ (1)

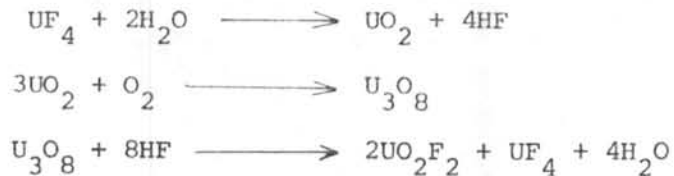


รูป 2.10 แบบระบบการผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์



รูป 2.11 กล่องไล่ถาดสำหรับผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

44-50 ปอนด์ต่อชั่วโมง อัตราการผลิตประมาณ 86 ปอนด์ ของ 97 เปอร์เซนต์ยูเรเนียมเตตระ-ฟลูออไรด์ต่อชั่วโมง หลังจากปฏิกิริยาลิ้นสุดต้องผ่านไนโตรเจนในขณะที่เริ่มเป็นลง เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเตตระฟลูออไรด์ที่ยังร้อนสัมผัสกับอากาศหรือความชื้นในอากาศ ตามปฏิกิริยา

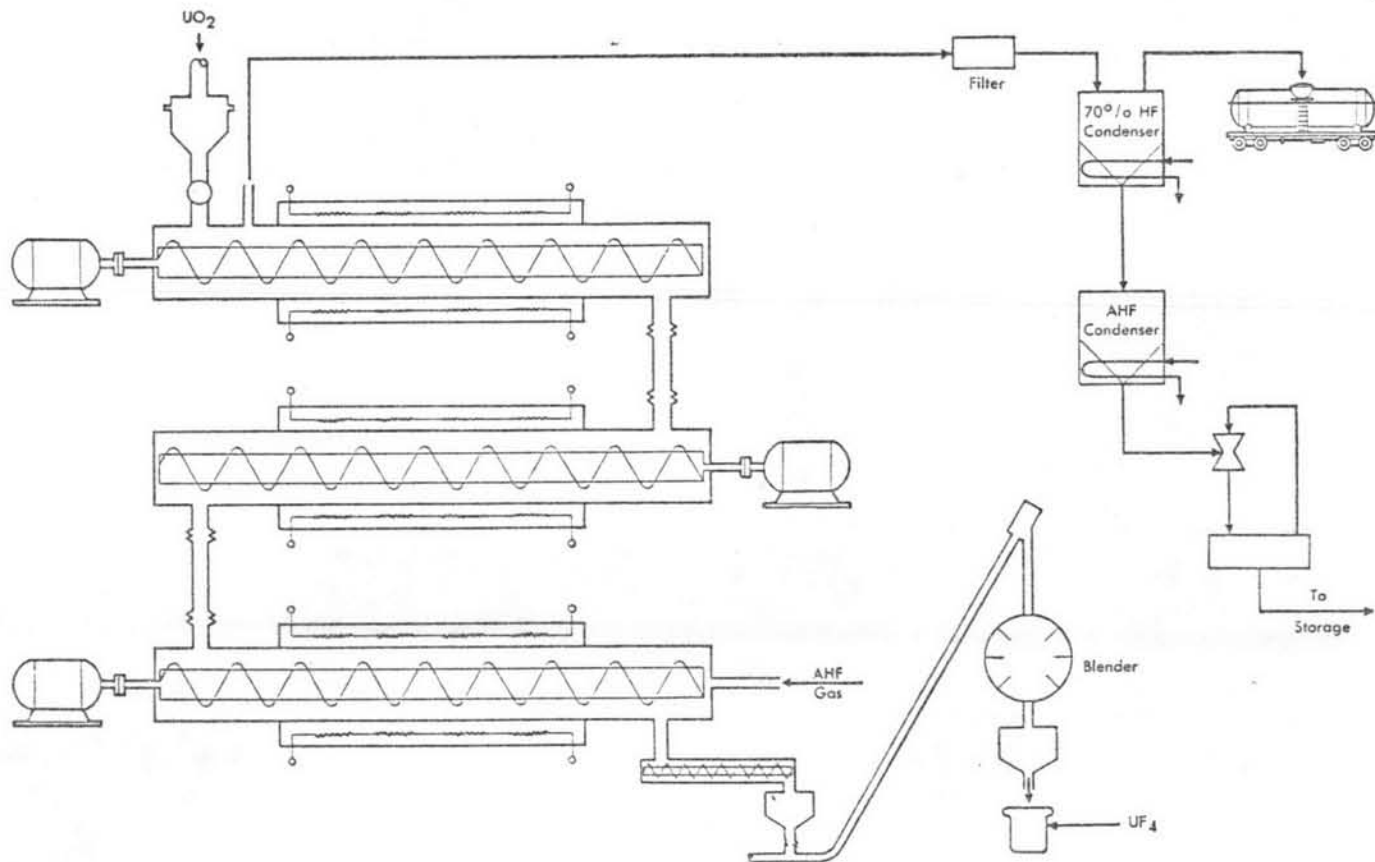


ปฏิกิริยาข้างต้นทำให้ความบริสุทธิ์ของยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ลดลง

การผลิตแบบ continuous reactor มีหลายแบบด้วยกัน เช่น stirred-bed process, vibrating-tray process, fluidized-bed process, moving-bed process เป็นต้น รูป 2.12 แสดง stirred-bed reactor ของ National Lead Company ที่มลรัฐโอไฮโอ แต่ละ reactor ประกอบด้วยท่อทำด้วย Inconel หนา 0.2 นิ้ว ม้วนเป็นท่อยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 นิ้ว ยาว 22 ฟุต เกสสิวที่ใช้กวนเหมือนกับแบบที่ใช้ในผลิตยูเรเนียมไดออกไซด์ ในรูป 2.8 ทำด้วย Hastelloy C ขณะที่ผลิตได้ 400 ปอนด์ต่อชั่วโมงนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของท่อแบ่งเป็น 9 แถบ (zone) ดังนี้

	แถบที่ 1	แถบที่ 2	แถบที่ 3	แถบที่ 4
ท่อที่ 1	371	427	482	524
ท่อที่ 2	454	538	566	
ท่อที่ 3	579	593		

(หน่วย องศาเซลเซียส)



รูป 2.12 Stirred-bed สำหรับไฮโดรฟลูออรีเนชัน  
แบบต่อเนื่อง

อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ทำให้เกิดก้อนแข็งและมียูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณตรงกลาง อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเป็นผลให้อัตราการเกิดช้า ในการแก้ปัญหาจึงให้อุณหภูมิของยูเรเนียมไดออกไซด์ที่ป้อนอยู่ที่ 317 องศาเซลเซียส และยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่ได้ออกจาก reactor ที่ 543 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับผลผลิตชั่วโมงละ 400 ปอนด์ ควบคุมไว้ที่ 224 ปอนด์ต่อชั่วโมง ปริมาณนี้มีค่าเป็น 2.2 เท่าของปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎี ตาราง 2.3 แสดงคุณภาพของยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ metal-grade ที่ผลิตโดยคณะกรรมการพลังงานปรมาณู ของสหรัฐอเมริกา (USAEC)

ตาราง 2.3

ผลวิเคราะห์ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์เกรดโลหะของ USAEC

$UF_4$ (%)	96.8
AOI (%)	1.0
$UO_2F_2$ (%)	2.0
Tap density (g/c.c)	3.5
Trace Impurities	PPM (Uranium Basis)
Fe	35
Ni	15
Cr	6
Cu	3

## 2.2 การผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ โดยขบวนการเปียก (wet Process)

ขั้นตอนไฮโดรฟลูออรีเนชันของยูเรเนียมไดออกไซด์ของการเตรียมโดยวิธีแห้ง (dry process) นั้นต้องใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรฟลูออริก เช่น Inconel, Illium R, Hastelloy C ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีราคาสูงหาได้ยาก การใช้กรดไฮโดรฟลูออริกในสภาพที่เป็นก๊าซนั้นทำให้ขบวนการผลิตยุ่งยาก ต้นทุนและค่าบำรุงรักษาสูง



### 2.2.1 ประวัติการวิจัยการผลิต<sup>(1)</sup>

ในปี 1946 Mallinckrodt Chemical Works รายงานการทดลองเพื่อผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ โดยปฏิกิริยาของยูเรเนียมไดออกไซด์กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกและการรีดิวซ์สารละลายยูเรนิลคลอไรด์ โดยโลหะสังกะสี (zinc) แล้วตกตะกอนยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์โดยเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ในปี 1949 ได้มีรายงานการทดลองรีดิวซ์ยูเรเนียมในสารละลายด้วยสแตนท์คลอไรด์ ( $\text{SnCl}_2$ ) และการทำอิเล็กโทรไลติกรีดักชันของสารละลายยูเรนิลซัลเฟต วิธีหลังนี้จะตกตะกอนยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ นอกภาชนะที่ใส่ไฟฟ้ารีดักชัน โดยการเติมกรดไฮโดรฟลูออริก

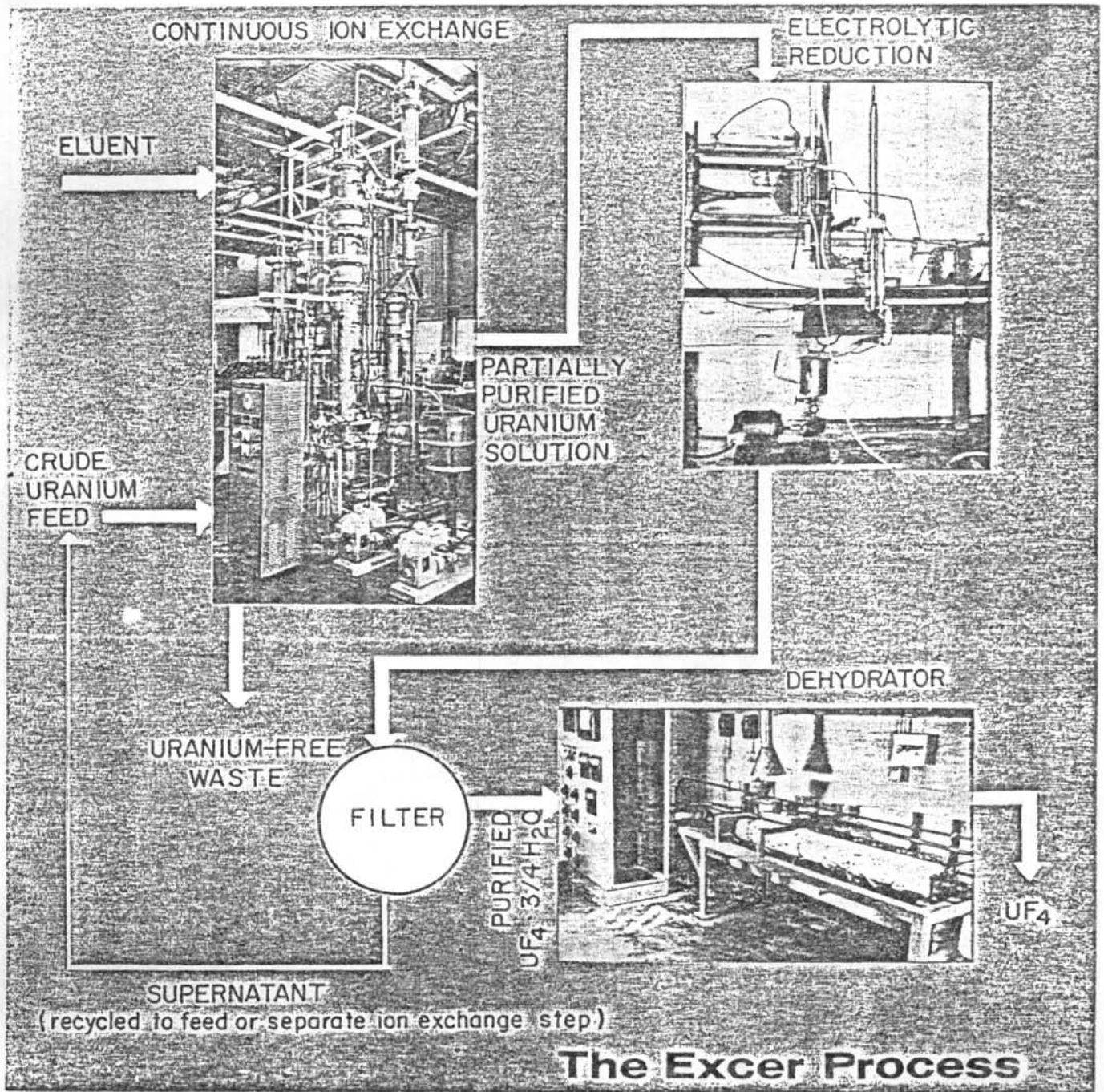
ในปี 1950 Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant ได้รายงานการผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์โดยอิเล็กโทรไลติกรีดักชัน ใช้เซลล์ที่มีโลหะปรอท (mercury) เป็นขั้วไฟฟ้าลบ (cathode) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ (40 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 90 องศาเซลเซียส)

### 2.2.2 ขบวนการเอกเซอร์ (Excer Process)<sup>(11)</sup>

ขบวนการเอกเซอร์ (รูป 2.13) เป็นวิธีการเตรียมยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงจากยูเรเนียมที่ได้จากแร่ หรือจากยูเรเนียมที่ใช่เป็นเชื้อเพลิงแล้วในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อที่จะรีดิวซ์ต่อไปให้เป็นโลหะธาตุยูเรเนียม หรือ ทำฟลูออริเนชันให้เป็น ยูเรเนียมเอกซะฟลูออไรด์ ขั้นตอนของขบวนการแบ่งเป็น

#### 2.2.2.1 อีออนเอกเชนจ์ (Ion exchange)

ขั้นตอนนี้เพื่อผลิตยูเรนิลฟลูออไรด์ หรือ คลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับทำขั้นตอนอิเล็กโทรไลติกรีดักชัน คือ มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ประมาณ 120 กรัมยูเรเนียมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร) ขั้นตอนของขบวนการนี้อยู่กับธรรมชาติของยูเรเนียมที่ป้อน ว่าเป็นซัลเฟต, คลอไรด์ หรือไนเตรต สารละลายซัลเฟตหรือคลอไรด์ได้นั้นจากการสกัดแร่ยูเรเนียมหรือละลายหัวแร่ยูเรเนียม (Uranium Concentrate) ผลผลิตที่ได้จากแอนไอออนเอกเชนจ์ (anion exchange) คือ ยูเรนิลคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ ในกรดไฮโดรคลอริก 0.3 โมลาร์ สารละลายยูเรนิลไนเตรตอาจได้มาจากขบวนการสกัดยูเรเนียมที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ใช่แล้ว ซึ่งสารกัมมันตรังสีและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ได้ถูกแยกออก



รูป 2.13 ขบวนการเอกเซอร์

แล้ว สารละลายนี้ถูกจับโดยแคทไอออนเรซิน (cation resin) ได้ยูเรนิลฟลูออไรด์ 0.5 โมลาร์ ในกรตไฮโดรฟลูออริก 1 โมลาร์ โดยใช้แคนน์เตอร์เคอร์เรนต์ อีออนเอกเชนจ์คอนแทคเตอร์ (countercurrent ion exchange contactor) .

#### 2.2.2.1.1 สารละลายซัลเฟต

ทำโดยละลายหัวแร่ด้วยกรดซัลฟูริก ปรับสภาพให้ความเข้มข้นของยูเรเนียม เป็น 25 กรัมต่อลูกบาศก์เดซีเมตร และซัลเฟตทั้งหมดเป็น 0.2 โมลาร์ ผ่านไปยังอีออนเอกเชนจ์ เรซิน เช่น Amberlite IRA-400 Permutit SK ; Duolite A-40 และ Dowex 1 เป็นต้น ยูเรเนียมจะถูกจับเป็นแอนไอออนคอมเพลกซ์ (anion complex)  $UO_2(SO_4)_2^{-2}$  หรือ  $UO_2(SO_4)_3^{-4}$  โดยสารเสียอื่น ๆ ที่เป็นแคทไอออนผ่านออกไป เปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นคลอไรด์โดยกรตไฮโดรคลอริก 8 โมลาร์ ยูเรเนียมจะอยู่ในรูปคอมเพลกซ์ยูเรนิลคลอไรด์  $UO_2Cl_3^-$  หลังจากนั้นล้างคลอไรด์ออกจากเรซินด้วยน้ำ

#### 2.2.2.1.2 สารละลายคลอไรด์

โดยละลายหัวแร่ในกรตไฮโดรคลอริก คลอไรด์ทั้งหมดอย่างน้อย 6 โมลาร์ สารละลายป้อนมี ยูเรเนียม 1 ถึง 100 กรัมต่อลูกบาศก์เดซีเมตร ใช้กรตไฮโดรคลอริกล้างสิ่ง เสียออก แต่ใช้น้อยกว่า 2.2.2.1.1 เพราะเรซินอยู่ในรูปคลอไรด์แล้ว

#### 2.2.2.1.3 สารละลายไนเตรต

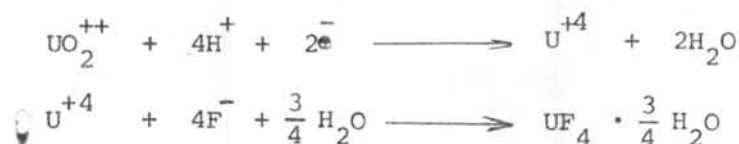
สารละลายที่ใช้ คือ ยูเรนิลไนเตรต 0.2 โมลาร์ โดยมีกรตไนตริก 0.1 โมลาร์ ยูเรนิลไอออนถูกจับโดยแคทไอออนเอกเชนจ์เรซิน เช่น Dowex 50 หรือ Amberlite IR-120 น้ำสำหรับล้างประกอบด้วยกรดออกซาลิก 0.01 โมลาร์ ล้าง (elute) ยูเรเนียมออกจากเรซิน โดยกรตไฮโดรฟลูออริก 1 โมลาร์ ให้ได้ยูเรนิลฟลูออไรด์ 0.5 โมลาร์

2.2.2.2 อิเล็กโทรไลติกรีดักชัน (Electrolytic reduction) และการ ตกตะกอน (Precipitation)

รูป 2.14 แสดงขั้นตอนอิเล็กโทรไลติกรีดักชัน สารละลายสำหรับป้อนประกอบด้วยยูเรนิลไอออน 0.5 โมลาร์ ฟลูออไรด์ไอออน 2.0 โมลาร์ คลอไรด์ไอออน 1.0 ถึง 1.5 โมลาร์

และไฮโดรเจนไอออน 3.0 ถึง 3.5 โมลาร์ คลอไรด์ไอออนที่เติมลงไปช่วยให้เกิดการนำไฟฟ้าเมื่อ ฟลูออไรด์ตกตะกอนลง ยูเรเนียมร้อยละ 90 ถึง 95 จะถูกรีดิวซ์ จาก  $U^{+6}$  เป็น  $U^{+4}$  ที่ขั้วไฟฟ้าลบ (cathode) ที่ทำด้วยปรอท ประสิทธิภาพของกระแส (current efficiency) สูงถึงร้อยละ 90 ถึง 95 โดยความหนาแน่นของกระแส (current density) เท่ากับ 2 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว ผลผลิตเท่ากับ 2.7 ปอนด์ต่อชั่วโมงต่อตารางฟุตของคาโทด สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อยูเรเนียมที่ถูกรีดิวซ์ 1 ปอนด์ ประสิทธิภาพของการรีดิวซ์จะดีขึ้นถ้ามีเซลล์ 2 ถึง 3 เซลล์ มาต่อลำดับกัน ปฏิกิริยาในเซลล์ คือ

ที่ขั้วคาโทด



ไอออนที่วิ่งผ่าน เมมเบรน (membrane)



ที่ขั้วอโนด

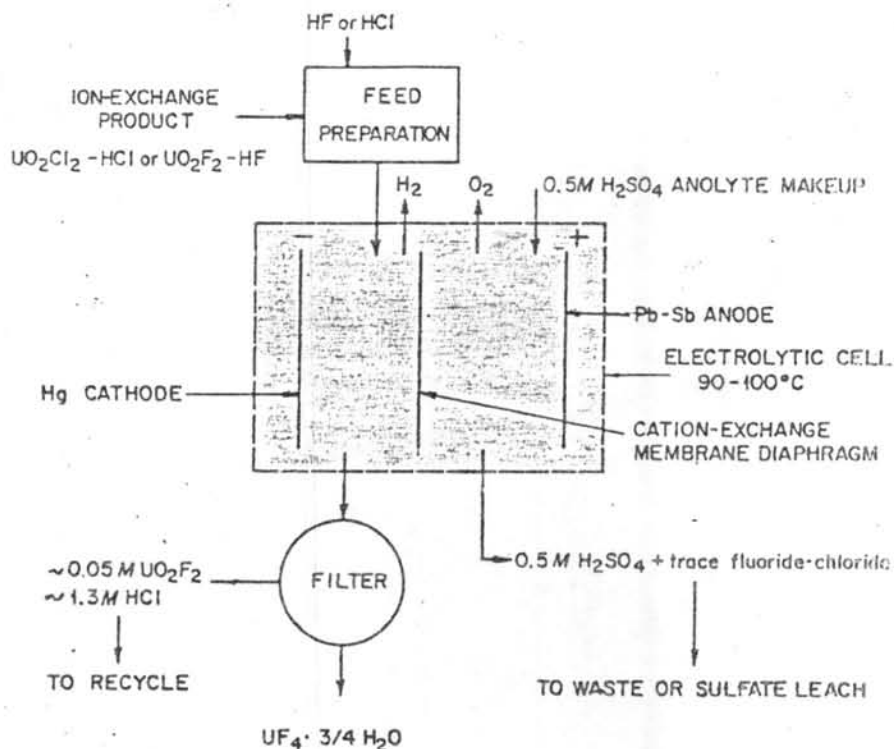


ปฏิกิริยารวม



จุดหมุมที่ใช้ในการผลิต คือ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส ที่จุดหมุมนี้จะได้ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่มีน้ำผลึก  $\frac{3}{4}$  โมเลกุล ( $UF_4 \cdot \frac{3}{4} H_2O$ ) ที่จุดหมุมต่ำกว่าจะได้  $UF_4 \cdot 2.5 H_2O$  ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำสักขณะเป็นวัฏจักรได้อีก

ส่วนสำคัญที่สุดของการรีดิวซ์ โดยขบวนการนี้ คือ แคทไอออนเอกเซนต์เมมเบรน ซึ่งใช้แยกห้องของคาโทดและอโนด เมมเบรนนี้ป้องกันการกัดกร่อนของฟลูออไรด์ และคลอไรด์ไอออนที่



รูป 2.14 เซลล์สำหรับอิเล็กโทรไลติก รีดักชันและตกตะกอน

มีต่ออาโนด ทำให้สามารถใช้อาโนดที่ทำจากสารที่ราคาไม่สูง เหมือนแพลทินัม(platinum) ที่ใช้ในเซลล์ทั่ว ๆ ไป ตัวอย่างเช่น Ionic CR-61 membrane ปิดด้วยผ้า Saran ซึ่งทนต่ออุณหภูมิสูงได้ ถ้าใช้เมมเบรนนี้ขั้วของ anode อาจจะใช้โลหะตะกั่ว หรือโลหะแข็งโดยมีตะกั่วร้อยละ 94 และพลวงร้อยละ 6 โลหะแข็งนี้ทนกัดกร่อนดีกว่าตะกั่วบริสุทธิ์ เมมเบรนยังช่วยแยกผลผลิตจากอาโนดและออกซิเจน ป้องกันการเกิดรีออกซิเดชัน (reoxidation) ของยูเรเนียม +4

การทำผิวหน้าของปรอทให้ปราศจากตะกอนที่เกิดขึ้นทำได้ 2 วิธี คือ กวนผิวหน้าของปรอทด้วยเครื่องกวน และใช้ปรอทที่ไหลลงเป็นฟิล์มบาง ๆ ซึ่งผิวจะสะอาดอยู่เสมอ

ยูเรเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจากการรีดิวซ์ยูเรเนียมไอออนจะทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกทันที เกิดเป็นตะกอน ส่วนสิ่งเจือปนอื่น ๆ ยังคงอยู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถแยกจากกันโดยการกรอง (filtration) หรือการเหวี่ยง (centrifugation) หรือรินส่วนที่ใสทิ้ง (decantation) ตะกอนมี tap density 2.5-2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากทำให้แห้งโดยหลอดไฟ

ที่ร้อน ตะกอนที่แห้งประกอบด้วย ยูเรเนียม 75 เปอร์เซ็นต์ เป็น U (IV) 70-71 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเท่ากับ  $\frac{3}{4}$  โมเลกุลของน้ำ

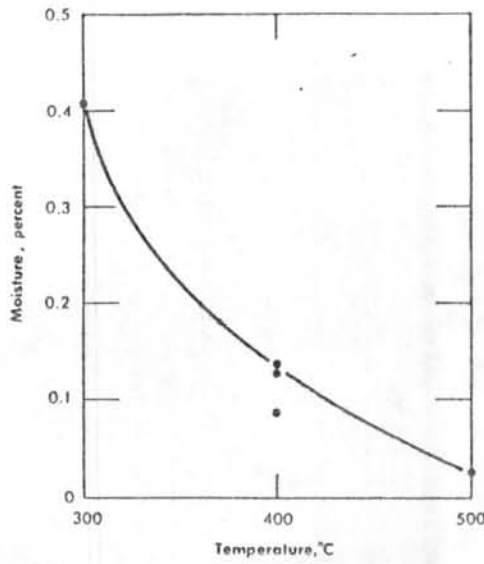
### 2.2.2.3 ดีไฮเดรชัน (Dehydration)

น้ำในโมเลกุลของยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ จะเป็นตัวเพิ่มความดัน ในรีดักชันบอมบ์ (reduction bomb) ของการทำโลหะธาตุยูเรเนียม และเป็นผลให้โลหะที่ได้เป็นไฮไดรด์ (hydride) ถ้านำไปทำขบวนการฟลูออรีเนชันจะสิ้นเปลืองฟลูออรีนเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 75

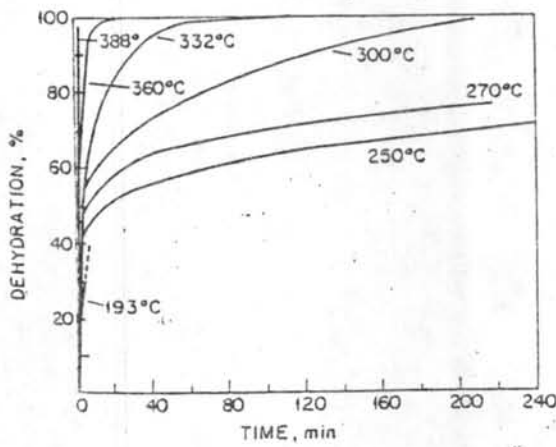
ถ้าให้ความร้อนแก่  $UF_4 \cdot \frac{3}{4} H_2O$  ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยผ่านก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่แห้ง จะได้ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่แห้งมีน้ำอยู่ประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (รูป 2.15) ยูเรเนียมออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ จะเปลี่ยนกลับไปเป็นยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ดั้งเดิม โดยเงื่อนไขเดียวกันถ้าผ่านก๊าซไนโตรเจนแทน โดยค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น และน้ำที่หลุดออกมาถูกพาออกไปโดยไนโตรเจนแล้ว ไฮโดรไลซิสก็จะไม่เกิดขึ้น (รูป 2.16 และ 2.17)

จากการศึกษาโดยใช้ท่อโมนีล (monel) หรือแมกเนเซียม เส้นผ่าศูนย์กลาง  $1\frac{3}{4}$  นิ้ว ยาว 18 นิ้ว ใช้ผ่านก๊าซไนโตรเจนที่แห้งและปราศจากออกซิเจนได้ยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่มี Tap density เท่ากับ 2.5 ถึง 2.7 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีสิ่งเจือปนอื่น คือ

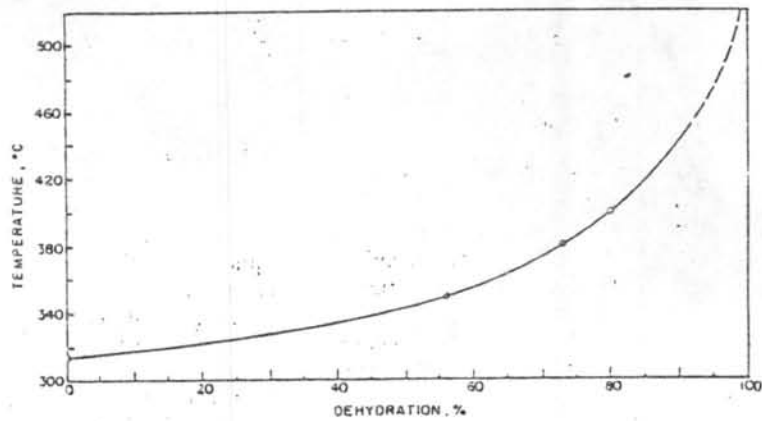
$H_2O$	$\leq$	0.2 %
$UO_2$	$\leq$	1 %
$UO_2F_2$		1.0-1.5 %



รูป 2.15 ดีไฮเดรชันของ  $UF_4 \cdot 3H_2O$  ในบรรยากาศของไนโตรเจนฟลูออไรด์



รูป 2.16 ดีไฮเดรชันของยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ในบรรยากาศของไนโตรเจน



รูป 2.17 ดีไฮเดรชันโดยค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิ จะไม่เกิดไฮโดรไลซิส

### 2.2.3 ขบวนการ พี เอ็น ซี (P N C Process)<sup>(12)</sup>

ขบวนการนี้ได้รับการพัฒนาโดย Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation และ Asahi Chemical Industry Co., Ltd. แห่งประเทศญี่ปุ่น เป็นขบวนการที่ผลิตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแร่ที่เหมือง Ningyo-toge ซึ่งเป็นแร่ Ningyoite (U 0.5%) และ Autunite (U 0.09%) หลังจากผ่านขบวนการสกัดด้วยสารละลาย (solvent extraction) แล้ว ได้สารละลายยูเรนิลคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมยูเรเนียมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ขบวนการแบ่งเป็น

#### 2.2.3.1 อีเล็กโตรไลติกรีดักชัน

ส่วนประกอบของอิเล็กโตรไลเซอร์ (electrolyzer) คือ เซลล์แบ่งเป็น 2 ช่อง มี 2 ขั้ว ขนาดของขั้วเท่ากับ 48 ตารางเดซิเมตรต่อขั้ว มีเซลล์ 5 คู่ ผลิตยูเรเนียมได้ 60 ตันต่อปี ในการศึกษาหาสภาพที่เหมาะสมในการทดลองพบว่า

2.2.3.1.1 ต้องพัฒนารูปร่างของเซลล์ เพื่อลดการรั่วไหลของกระแสและสารละลาย

2.2.3.1.2 ต้องพัฒนาคุณภาพของฉนวนเอกเซินจ์เรเมเบรน ให้ทนต่อสภาพทางเคมีและฟิสิกส์ทำให้ประสิทธิภาพของกระแสสูงขึ้น และอัตราการรีดักชันสูงขึ้น

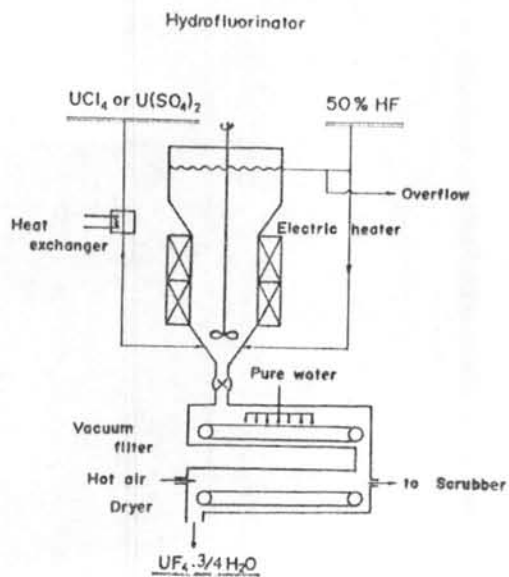
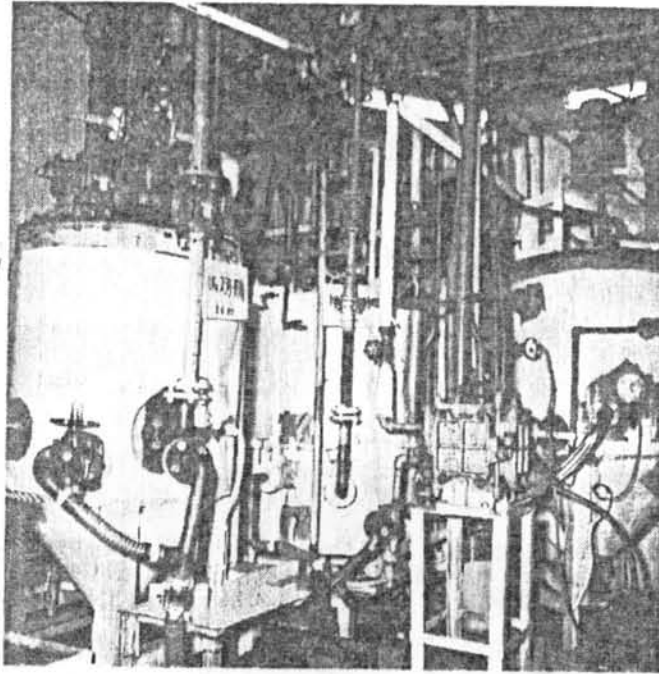
2.2.3.1.3 ต้องพัฒนา ขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ noble metal ที่บางและเบากว่าเดิม

2.2.3.1.4 สารละลายที่ป้อนต้องบริสุทธิ์ เพราะฉนวนของโลหะที่ใช้อุปกรณ์ผลต่อประสิทธิภาพของกระแส

#### 2.2.3.2 ไอโตรีฟลูออรีเนชัน สารละลายยูเรนิล (รูป 2.18)

ภาชนะที่ใช้เป็นกระบอกยาวเรียวที่ปลายด้านล่างมีขนาด 400 ลูกบาศก์เดซิเมตร ทำจาก fibre-reinforced plastic (FRP) ฉาบด้วย Furan resin มีเครื่องกววนความเร็ว 50 ถึง 250 รอบต่อนาที และมีลวดให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าอยู่รอบภาชนะ สารละลายที่ป้อนเป็นยูเรนิลคลอไรด์ ( $UCl_4$ ) หรือยูเรนิลซัลเฟต  $[U(SO_4)_2]$  ที่มีความเข้มข้น 100 กรัม ยูเรเนียมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร มีคลอรีนอิสระ (free Cl) 20 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร หรือ ซัลเฟตอิสระ





รูป 2.18 ไฮโดรฟลูออรีเนเตอร์ที่โรงงาน Ningyo-toge

(free  $\text{SO}_4$ ) 60 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร และกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้นร้อยละ 50

ในการทดลองจะให้ความร้อนสารละลายสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส แล้วป้อนเข้าไปในไฮโดรฟลูออริเนเตอร์ (hydrofluorinator) ทางด้านล่าง กรดไฮโดรฟลูออริกถูกทำให้เดือดโดยน้ำที่ล้นออกมา ปฏิกิริยาเกิดที่ด้านล่างของเซลล์  $\text{UF}_4 \cdot \frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$  ที่เกิดมีขนาด 30 ถึง 150 ไมโครเมตร ลอยอยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาสภาวะที่ดีที่สุด คือ

2.2.3.2.1 ผลึกต้องแขวนลอยอยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยา

2.2.3.2.2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกต้องเจือจางมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.2.3.2.3 อุณหภูมิของสารละลายต้องสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส

2.2.3.2.4 ความเร็วของเครื่องกวนต้องสูงพอให้ผลึกแขวนลอยอยู่ได้ และไม่สูงจนผลึกล้นออก

2.2.3.3 ดีไอเตรซินของไฮเตรตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

ในการทำดีไอเตรซิน ใช้ fluidized-bed reactor โดยที่  $\text{UF}_4 \cdot \frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$  มีคุณสมบัติทาง fluidizing ที่ดีมาก ทำให้ควบคุมความเร็วของ fluidize ใน reactor ได้ง่าย ขนาดของ  $\text{UF}_4 \cdot \frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$  แสดงในตาราง 2.4 จากการศึกษาโดย diffraction (รูป 2.19) พบว่าลักษณะและการจัดผลึกก่อนและหลังดีไอเตรซินไม่แตกต่างกัน แต่พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เพิ่มขึ้น ขนาดของผลึกเล็กลงแล้วในตาราง 2.5

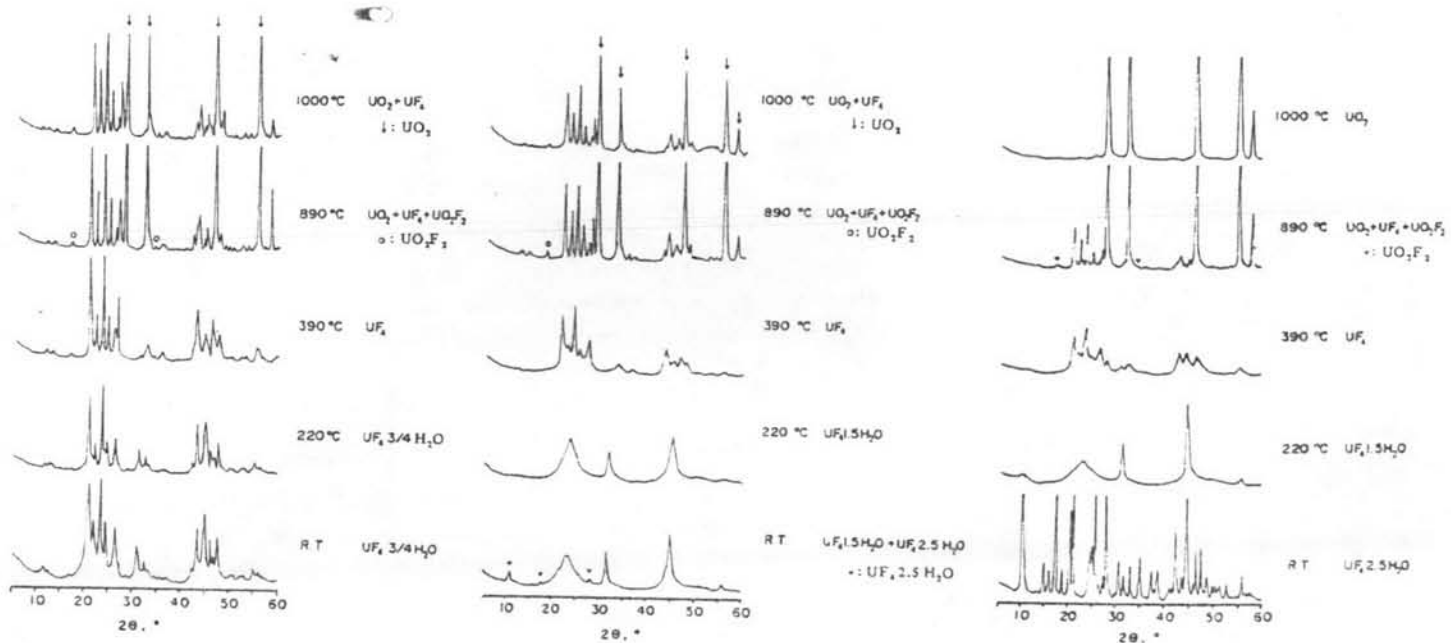
ออกซิเจนที่เกิดจากการสลายตัวของ  $\text{UF}_4 \cdot \frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$  ทำให้เกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ จาก peak ใน x-ray diffraction แสดงให้เห็นว่าในบรรยากาศของไนโตรเจน เกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิเหนือ 350 องศาเซลเซียส ในการทดลองโดย fluidized-bed reactor พบยูเรนิลฟลูออไรด์ และยูเรเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณน้อย คือ ร้อยละ 0.83 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนักตามลำดับ ภายใต้สภาวะดังนี้

Type	Structure	Property of crystal		
		Form	Colour	Grain size (Å)
UF <sub>4</sub> · 2.5 H <sub>2</sub> O (R-type)	Orthorhombic	Needlelike	Light blue	700
UF <sub>4</sub> · 1.5 H <sub>2</sub> O (C-type)	Cubic	Needlelike	Light blue	500
UF <sub>4</sub> · 3/4 H <sub>2</sub> O (M-type)	Monoclinic	Granular	Emerald green	1040
UF <sub>4</sub> (M(s)-type)	Monoclinic	Granular	Emerald green	1050

ตาราง 2.4 คุณสมบัติของไฮดรตยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์

Characteristics		Sample	Before dehydration	After dehydration
		Average particle size (μm)		
Particle size distribution (mesh)				
	+ 42		—	—
- 42	+ 60		—	—
- 60	+ 100		—	—
- 100	+ 150		—	—
- 150	+ 200		3%	7%
- 200	+ 250		48	46
- 250	+ 300		46	44
- 300			3	3
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)			1.6	3.4
Apparent density (g/ml)			2.15	2.25

ตาราง 2.5 ขนาดผลึกของ UF<sub>4</sub> · 3/4 H<sub>2</sub>O



รูป 2.19 X-ray powder patterns ของไฮดรอกไซด์ และดีไฮดรอกไซด์เตรียมด้วยวิธีไฮดรอลิติก

หอสมุดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

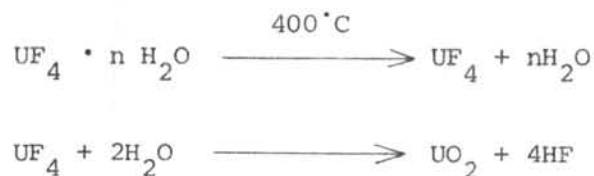
Fluidizing gas	dried nitrogen gas
Linear velocity of gas	11.4 cm/s
Heating rate	3°C/min
Maximum temperature	350°C
Holding time at maximum temperature	2h.

ความชื้นภายหลังดีไฮเดรชันลดลงจากร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนักเหลือเพียง 200-300 ส่วนในล้านส่วนเท่านั้น

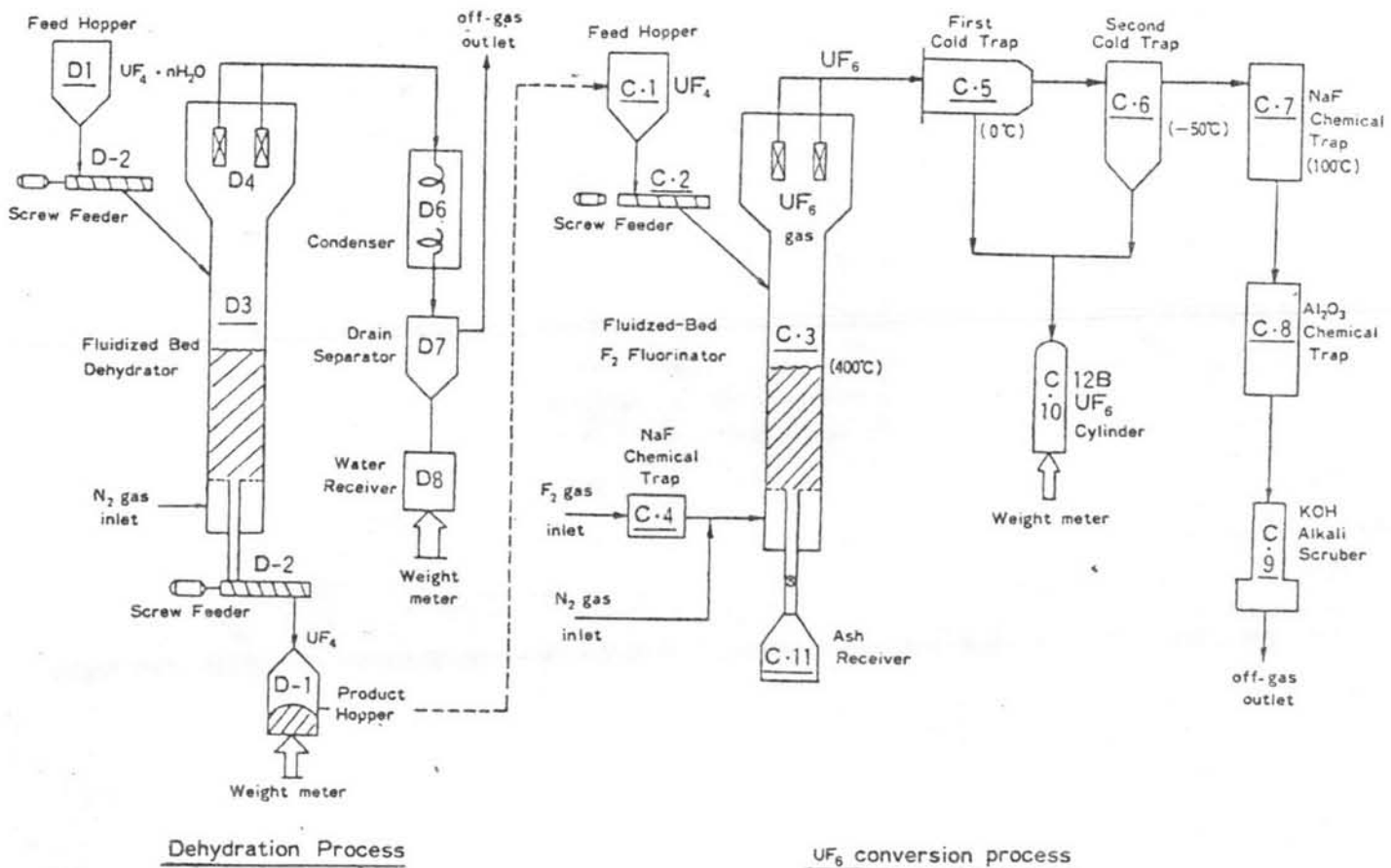
ในปลายปี ค.ศ. 1977 ได้มีการทดลองขบวนการดีไฮเดรชันของ  $UF_4 \cdot n H_2O$  ที่ Ningyo-Toge mine<sup>(13)</sup> โดย fluidized-bed reactor (รูปที่ 2.20) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว  $UF_4 \cdot n H_2O$  ถูกป้อนเข้าไปใน fluidized-bed reactor ( $D_3$ ) จากถัง (hopper) ( $D_1$ ) ที่อยู่สูงกว่า โดยแก๊สยวป้อน ( $D-2$ ) reactor ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส ไนโตรเจนแก๊สเป็น inert fluidizing gas และน้ำที่มอดไฮโดรฟลูออริกถูกควบแน่นที่เครื่องควบแน่น (condenser) ( $D_6$ ) นำมายังเพื่อวิเคราะห์ที่  $D_8$

ผลการทดลอง พบว่าคุณสมบัติของสารที่ป้อนมีผลต่อการควบคุม fluidized-bed reactor  $UF_4 \cdot n H_2O$  ที่ได้จากการตกตะกอนมีลักษณะเป็นผงละเอียด และหลังจากดีไฮเดรชันแล้วผงนี้ จะละเอียดมากขึ้น ดังแสดงในตาราง 2.6

ยูเรเนียมไดออกไซด์ เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้ตามสมการดังนี้



การเติมแก๊สไฮโดรเจนฟลูออไรด์จะช่วยป้องกันการเกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ลดลงตามลำดับเมื่อเติมไฮโดรเจนฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น ตามรูป 2.21 เมื่อทำดีไฮเดรชันในไนโตรเจนอย่างเดียวจะเกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.8 ถึง 1 โดยน้ำหนัก เมื่อทำเป็น batch และร้อยละ 1 ถึง 3 โดยน้ำหนักเมื่อทำอย่างต่อเนื่อง โดยใช้อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส เกิดยูเรเนียมฟลูออไรด์ประมาณร้อยละ 0.25 ถึง 0.5

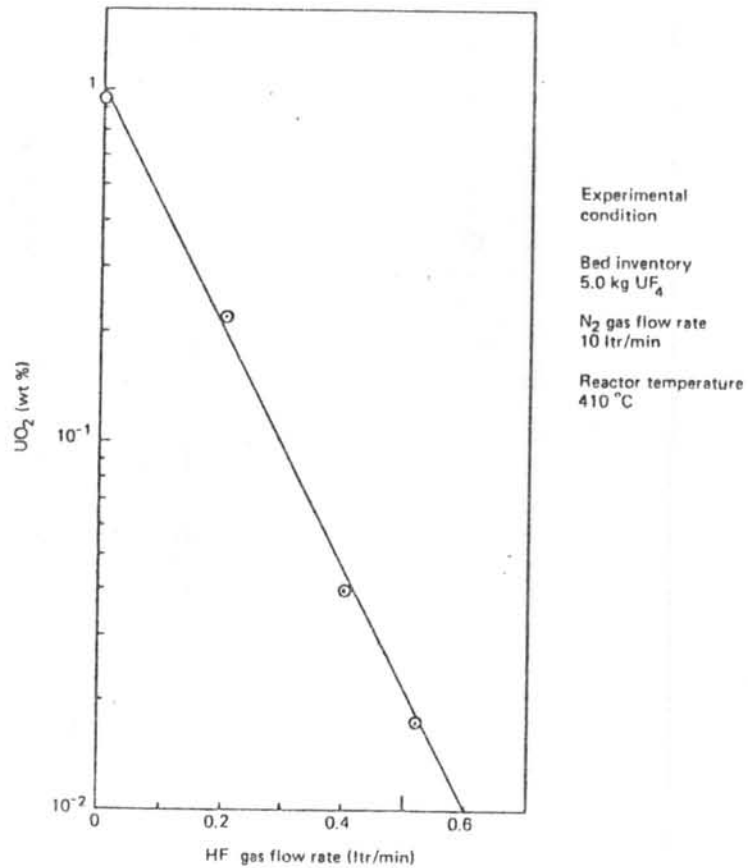


รูป 2.20 ขบวนการดีไฮเดรชันเพื่อแปลง  $UF_4 \cdot nH_2O$  ให้เป็น  $UF_6$

โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า batch ดีกว่าทำต่อเนื่องกัน

Measuring items		Samples	
		Hydrated UF <sub>4</sub>	Dehydrated UF <sub>4</sub>
Bulk density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.051	2.23
True density	(g/cm <sup>3</sup> )	5.0	5.0
Average particle size	(μm)	72	65
Minimum fluidizing velocity (air)	(cm/s)	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0

ตาราง 2.6 คุณสมบัติทาง fluidizing ของยูเรเนียมเตตระฟลูออไรด์



รูป 2.21 การเกิดยูเรเนียมไดออกไซด์ลดลงเมื่อเติมก๊าซ HF