

บทที่ 4

กระบวนการผลิต เค็ก เหลือง

4.1 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (10.12.44)

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน และน้ำมัน ในข้อที่ว่า เชื้อเพลิงประเภทนี้ก่อนจะนำมาใช้จะต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอน เพื่อให้ อยู่ในสภาพและรูปแบบที่เหมาะสม เสียก่อน เช่น ต้องทำให้มีความเข้มข้นของวัสดุฟิสซายล์ในเชื้อเพลิงสูง ทำให้อยู่ในรูปสารประกอบที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูง ถ่ายเทความร้อนดี ไม่เปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์เมื่ออยู่ในสนามของรังสีนิวตรอน และมีเปลือกห่อหุ้ม (Cladding) ที่เหมาะสม เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดนี้ถูกจำกัดโดยประเภทของ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ นอกจากนี้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ยังมีคุณสมบัติพิเศษที่ต่างจากเชื้อเพลิงอื่น คือ หลังใช้งานแล้วนอกจากจะสามารถสกัดส่วนที่เหลือมาใช้ใหม่ได้อีกแล้ว ยังสามารถผลิตเชื้อเพลิงใหม่ขึ้นอีกด้วย

4.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

เราจำแนกเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากธรรมชาติตามรูปสารประกอบทางเคมีได้ เป็น 4 ประเภท ดังนี้

4.1.1.1 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประเภทโลหะ (Metallic type element)

เนื่องจากโลหะยูเรเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้น้ำเป็น ตัวระบายความร้อนจึงไม่ใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้ เพื่อเป็นการป้องกันชั้นหนึ่งในกรณีเกิดการเสื่อมสภาพของเปลือกห่อหุ้ม ในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Magnox ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้ โดยบรรจุแท่งโลหะยูเรเนียมในท่อโลหะผสมแมกนีเซียม

4.1.1.2 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประเภทออกไซด์ (Oxide type element)

เชื้อเพลิงประเภทนี้อาจเตรียมได้จากการอัด (Pressing) ฟงยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) ให้เป็นเม็ด (Pellet) แล้วเผาประสาน (Sintering) และบรรจุเม็ดเชื้อเพลิงเหล่านี้ในท่อโลหะผสมของเซอร์โคเนียมหรือเหล็กไร้สนิม นอกจากนี้อาจเตรียมได้จากการอัดแน่น (Cold-

compacting) ฟงออกไซด์ที่มีความหนาแน่นสูงในท่อโลหะผสมแบบเดียวกันอีกด้วย เนื่องจากยูเรเนียมไดออกไซด์ไม่มีปฏิกิริยากับน้ำ แม้จะอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ดังนั้น เชื้อเพลิงประเภทนี้จึงใช้ได้ดีในเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR PWR และ CANDU

4.1.1.3 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประเภทคาร์ไบด์ (Carbide type element)

โดยเหตุที่ยูเรเนียมคาร์ไบด์ (Uranium carbide) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะให้ยูเรเนียมออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน (Methane) (CH_4) ดังนั้นจึงไม่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบที่ใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน ด้วยเหตุเดียวกันกับในกรณีเชื้อเพลิงประเภทโลหะ เชื้อเพลิงประเภทคาร์ไบด์นี้อาจแยกย่อยเป็น 2 แบบ คือ

ก. แบบโมโนคาร์ไบด์ (Monocarbide) (UC) โดยแบ่งเชื้อเพลิงอาจประกอบขึ้นด้วยวิธีการแบบเดียวกับแบ่งเชื้อเพลิงแบบออกไซด์ คือใช้วิธีอัดแล้วเผา หรืออัดแน่นก็ได้ นอกจากนี้ยังอาจใช้วิธีหล่อให้เป็นแท่งในเบ้าหลอมได้อีกด้วย มีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบลิควิดเมทัล (Liquid metal reactor) ซึ่งกำลังเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากอาจผลิตเชื้อเพลิงขึ้นใหม่ได้ (Breeder) โดยใช้เบ็ดเชื้อเพลิงคาร์ไบด์บรรจุในท่อเหล็กกล้า

ข. แบบไดคาร์ไบด์ (Dicarbide) (UC_2) โดยมีกราไฟต์ (Graphite) เป็นเปลือกห่อหุ้ม แต่เนื่องจากก๊าซที่ได้จากการแตกตัวของยูเรเนียมอาจซึมผ่านกราไฟต์ได้ จึงต้องเคลือบผงเชื้อเพลิงด้วยไพโรไลติกคาร์บอน (Pyrolytic-carbon) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ก่อน มีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ HTGR (High-temperature gas-cooled reactor) โดยเฉพาะในเครื่องปฏิกรณ์เพบเบิลเบด (Pebble-bed reactor) ซึ่งพัฒนาขึ้นในเยอรมันตะวันตก โดยมีเชื้อเพลิงเป็นลักษณะทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 - 6 ซม.

4.1.1.4 เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประเภทเซอร์เมต (Cermets type element)

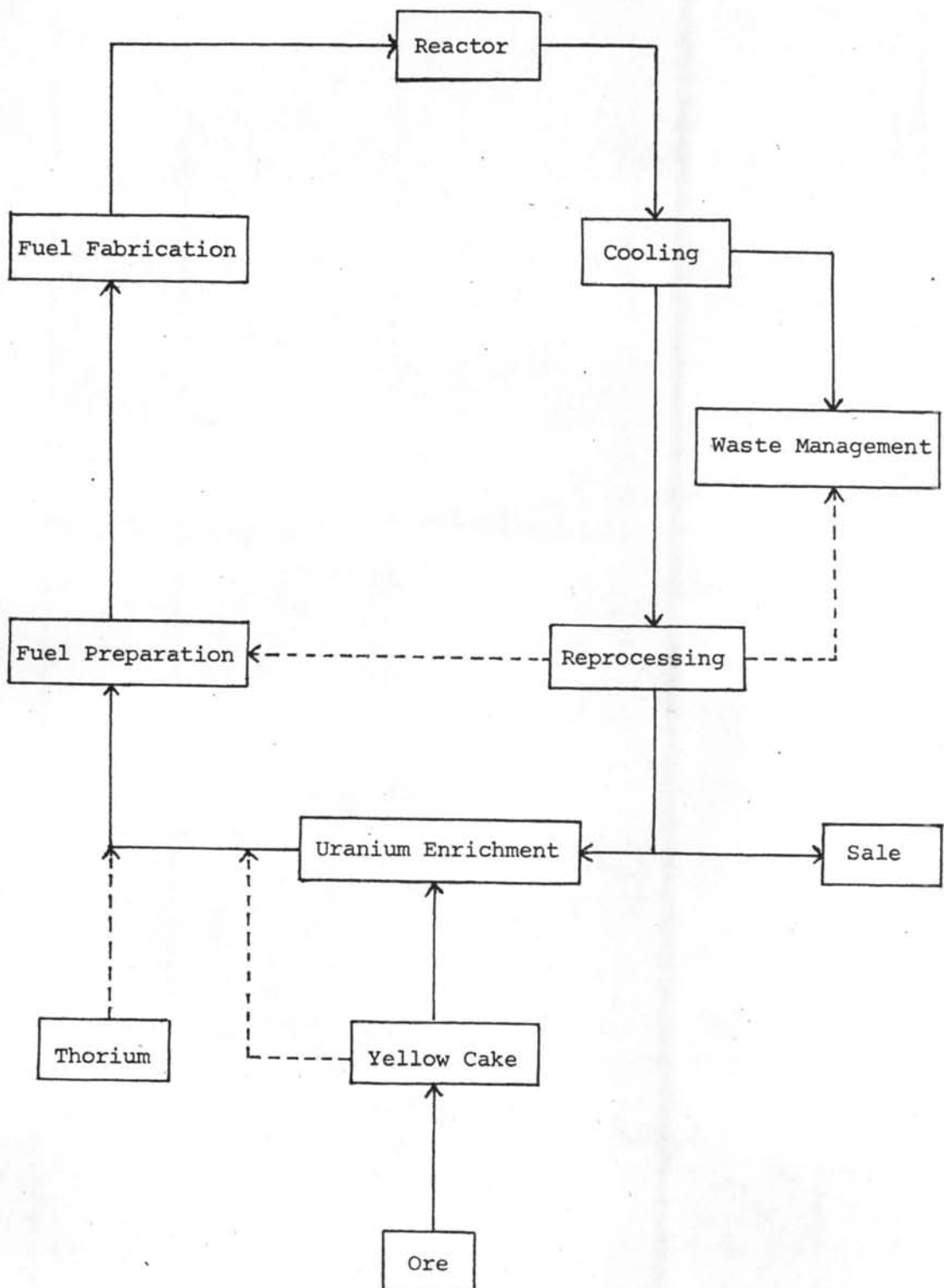
เชื้อเพลิงประเภทนี้ประกอบขึ้นจากโลหะผสมของยูเรเนียมกับอูมิเนียม เหล็กกล้า หรือเซอร์โคเนียม มีลักษณะเป็นแผ่น (Plate) บรรจุในท่ออะลูมิเนียม เหล็กกล้า หรือเซอร์โคเนียม ความเข้มข้นของ ^{235}U สูงกว่าปกติในธรรมชาติมาก ใช้เฉพาะในเครื่องปฏิกรณ์แบบสวิมมิงพูล (Swimming-pool reactor) และใช้ในการทดสอบวัสดุ (Material testing) ไม่พบว่ามีการใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เนื่องจาก ^{238}U และ ^{232}Th นั้น เมื่อถูกรังสีนิวตรอนจะ เปลี่ยน เป็น ^{239}Pu และ ^{233}U ตามลำดับ ซึ่งใช้ทำเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้ โดยเฉพาะในกรณี ^{239}Pu นั้น เมื่อสกัดออกจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว จะต้องนำมาผสมกับยูเรเนียมใหม่ (ยูเรเนียมธรรมชาติ) เพื่อประกอบเป็นเชื้อเพลิงประเภทออกไซด์ผสม (Pu-U mixed oxide fuel) ส่วน ^{232}Th นั้นมีการใช้อยู่ 2 แบบ แบบหนึ่งนั้นใช้ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor core) เลย โดยนำมาผสมกับยูเรเนียมเสริมสมรรถนะซึ่งมีความเข้มข้นของ ^{235}U สูงถึง 93% เชื้อเพลิงประเภทนี้อาจอยู่ในรูปออกไซด์ผสม ดังที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ Indian-Point reactor, Elk River และ Borax IV หรืออาจอยู่ในรูปคาร์ไบด์ผสม ดังที่ใช้ในเครื่อง AVR, Dragon และ Peach Bottom ก็ได้ ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้น ใช้ทอ เรียม (^{232}Th) ทำเชื้อเพลิงเสริมเป็นชั้นคลุม (Blanket) อยู่รอบนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิต ^{233}U อีกทีหนึ่ง โดยหลักการแล้ว เชื้อเพลิงเสริมที่ทำจากทอ เรียมนี้อาจอยู่ในรูปสารประกอบแบบโคแบบหนึ่ง ดังที่กล่าวแล้วในกรณีเชื้อเพลิงยูเรเนียมก็ได้ แต่ที่ปรากฏมีการใช้อยู่ในปัจจุบันอยู่ในรูปออกไซด์ที่อัดเป็นเม็ด อย่างไรก็ตาม วัฏจักรเชื้อเพลิงทอ เรียม/ยูเรเนียม (Thorium/Uranium fuel cycle) นั้น ยังไม่ได้พัฒนาเต็มที่ดังเช่นวัฏจักรเชื้อเพลิงพลูโทเนียม/ยูเรเนียม (Plutonium/Uranium fuel cycle) เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทอ เรียมนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในขั้นทดลองเดินเครื่อง (Prototype-phase) ยกเว้นเครื่องปฏิกรณ์แบบ HTGR ที่ Port St. Vrain ซึ่งเป็นเครื่องอยู่ในขั้นสาธิต (Demonstrate phase)

4.1.2 การผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

จากวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear fuel cycle) ที่แสดงไว้ในรูป 4.1 อาจแบ่งขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จากยูเรเนียมได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ การผลิตเค้กเหลืองจากแร่ดิบ การทำยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ การผลิตนิวเคลียร์-เกรดยูเรเนียม (Fuel preparation) และการประกอบเป็นเชื้อเพลิง (Fuel fabrication) แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงแบบออกไซด์เป็นเม็ด (Oxide pellet) มีการใช้มากที่สุดในปัจจุบัน ฉะนั้นจึงจะเน้นกล่าวการผลิตเชื้อเพลิงประเภทนี้

4.1.2.1 การผลิตเค้กเหลือง เค้กเหลืองเป็นสารประกอบประเภทไดูเรเนต (Diuranate) ของโซเดียมหรือแอมโมเนียที่มี U_3O_8 เป็นองค์ประกอบประมาณ 80% เมื่ออบแห้ง เป็นผลิตภัณฑ์เตรียมจากแร่ดิบ พร้อมทั้งจะจำหน่ายแก่โรงถลุงยูเรเนียม (Uranium refineries) เพื่อผลิตยูเรเนียมที่มีความเข้มข้นทางเคมีสูงต่อไป รายละเอียดการผลิตเค้ก-



รูป 4.1 วัฏจักร เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (44)

เหลืองจะกล่าวในภายหลัง ปกติโรงงานผลิต เค้ก เหลืองจะตั้งอยู่ในบริเวณเหมือง เพื่อทุ่นค่าใช้จ่ายของการขนส่ง

4.1.2.2 การเสริมสมรรถนะยูเรเนียม ขั้นตอนนี้เป็นต้องใช้เฉพาะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นของ ^{235}U สูงกว่าในธรรมชาติเท่านั้น วิธีเสริมสมรรถนะยูเรเนียมที่สำคัญมี 3 วิธี คือ

ก. กระบวนการก๊าซเฉื่อย-คิฟวชัน (Gaseous Diffusion Process) เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด เฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา จะมีโรงงานผลิต ^{235}U เข้มข้นด้วยวิธีนี้อยู่ 3 แห่ง คือ ที่ Oak Ridge รัฐเทนเนสซี Paducah รัฐเคนดิกกี และ Portsmouth รัฐไอโฮไอ นอกจากนี้ในอังกฤษ ฝรั่งเศส รัสเซีย และสาธารณรัฐประชาชนจีน ก็มีโรงงานผลิต ^{235}U เข้มข้นแบบนี้ด้วย

ข. กระบวนการก๊าซเซนตริฟิว (Gas Centrifuge Process) ในปัจจุบันมีโรงงานต้นแบบ (Pilot plant) ที่ Carpenhurst ในอังกฤษ และ Almelo ในฮอลแลนด์ นอกจากนี้ยังมีโรงงานในระดับสาธิต ซึ่งเป็นผลงานร่วมกันระหว่างอังกฤษ เยอรมัน และฮอลแลนด์ อีกแห่งหนึ่งด้วย

ค. กระบวนการเซพาราเรชัน-นอซเซิล (Separation Nozzle Process) เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นในประเทศเยอรมัน มีแผนจะติดตั้งที่บราซิล

ก่อนจะเข้ากระบวนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียม ไม่ว่าจะด้วยวิธีใดก็ตาม จะต้องเปลี่ยนยูเรเนียมที่มีความบริสุทธิ์ทางเคมีได้มาตรฐานแล้วให้อยู่ในรูปของเฮกซะฟลูออไรด์ (Hexafluoride) (UF_6) ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซก่อน การเสริมสมรรถนะยูเรเนียมต้องใช้เทคโนโลยีและการลงทุนสูง ค่าใช้จ่ายในขั้นนี้จะประมาณ 50% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด นอกจากนี้ ^{235}U สามารถนำไปใช้ผลิตอาวุธนิวเคลียร์ได้ ฉะนั้น เทคโนโลยีด้านนี้จึงถูกปิดบัง และกิจการของโรงงานเสริมสมรรถนะยูเรเนียมของประเทศที่อยู่ภายใต้สนธิสัญญาไม่แพร่ขยายอาวุธนิวเคลียร์จะถูกควบคุมทางด้านพิทักษ์ความปลอดภัย โดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) เพื่อป้องกันไม่ให้อาวุธนิวเคลียร์นี้ไปใช้ในการผลิตอาวุธนิวเคลียร์

4.1.2.3 การเตรียมสารประกอบนิวเคลียร์-เกรดยูเรเนียม ยูเรเนียมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องมีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงมาก ดังแสดงในตาราง 4.1 นอกจากความบริสุทธิ์ทางเคมีแล้ว หงยูเรเนียมที่จะนำไปประกอบเป็นเชื้อเพลิงยังจะต้องมีสภาพทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมอีกด้วย การเตรียมสารประกอบยูเรเนียมจากเค้กเหลืองมีแสดงในรูป 4.2

ตาราง 4.1 องค์ประกอบมาตรฐานของเค้กเหลือง⁽¹⁶⁾

Constituent or property	Specification limit without surcharge, % ^a		
	Atomic Energy Commission ^b	Allied Chemical Corporation ^c	Kerr-McGee Corporation ^b
Uranium	75.00 (U ₃ O ₈)	65.00 (U)	60.00 (U)
V ₂ O ₅	2.00	0.23	0.18
PO ₄	4.00	1.08	1.07
Mo	0.60	0.15	0.15
B	0.20	0.15	0.15
Cl, Br, I (as Cl)	0.30	0.15	0.25
F	0.10	0.15	0.15
As	2.00	1.06	1.00
CO ₃	4.00	2.00	2.00
SO ₄	10.00	12.31	10.50
Ca	1.50	1.15	1.00
Th	2.00	—	2.00
Zr	2.00	—	2.00
Na	—	0.78	—
K	—	4.60	—
Fe	—	1.54	—
Sm, Eu, Gd, Dy (each)	0.015	—	—
HNO ₃ insoluble			
uranium	0.10	—	0.10
Organic	0.10	—	0.10
Moisture	10.00	5.00	—
Screen size	-1/4"	-1/4"	-1/4"
Isotopic composition	^d	^d	^e
Flowability	—	—	^f
Amenability	^g	—	^g

^aValues listed are maximum without surcharge except for U₃O₈ which is minimum.

^bAs percent of uranium content (U or U₃O₈ as listed), except moisture and organic.

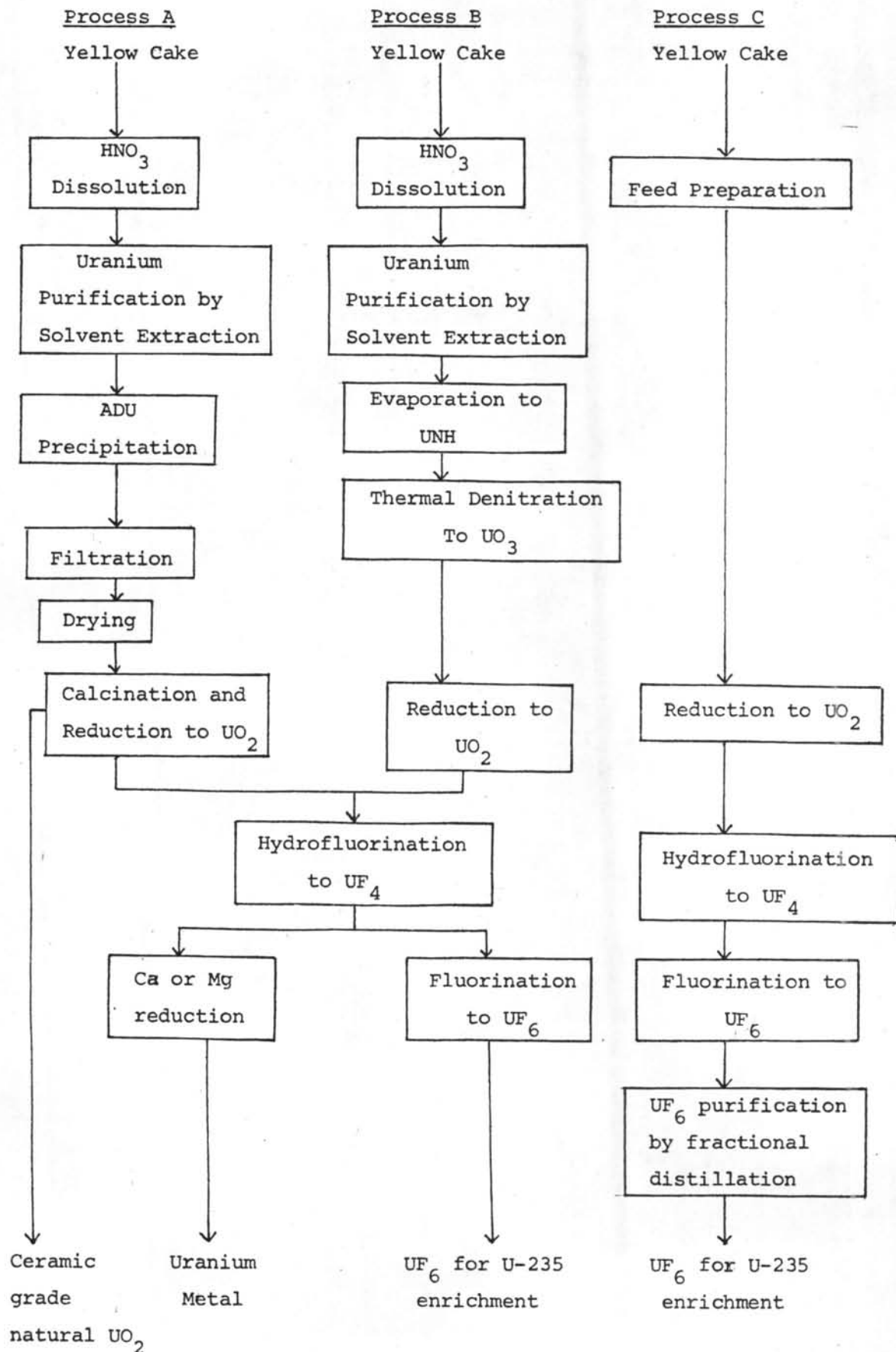
^cAs percent of uranium content except moisture which is on natural weight basis. (Effective upon completion of process modification and plant expansion program January 1, 1970.)

^dIt is usually assumed that concentrates must contain a natural distribution of U-238 and U-235 as in ^e.

^e0.711% ± 0.001% U-235

^fMust be sufficiently free-flowing to be sampled by the falling-stream method.

^gAmenable to refining by solvent extraction as determined by standard tests.



รูป 4.2 แผนภูมิแสดงการเตรียมยูเรเนียมเกรดคิกเคิล

(45)
 วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2.4 การประกอบ เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทุกประเภทต้องมีเปลือกหุ้มมิดชิด เพื่อป้องกันมิให้ผลิตผลจากฟิสชันซึมออกจากแท่งเชื้อเพลิงได้ วัสดุที่ใช้ประกอบเป็นท่อบรรจุ เม็ดเชื้อเพลิง อาจเป็นกราไฟต์ แมกนีเซียม เซอร์โคเนียม อะลูมิเนียม หรือเหล็กไร้สนิม ทั้งนี้เนื่องจากธาตุเหล่านี้มีนิวตรอนแอบซอร์ชัน-ครอสเซกชัน (Neutron absorption cross section) ต่ำ ดังนั้น ในการประกอบแท่งเชื้อเพลิง นอกจากต้องมีเทคโนโลยีการผลิตโลหะเหล่านี้ให้ได้ความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงแล้ว ยังต้องมีเทคนิคการเชื่อมปิดภาชนะเหล่านี้อีกด้วย วิธีทั่วไปที่ใช้คือการเชื่อมด้วยอิเล็กทริก-อาร์ค (Electric arc process) โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีอาร์กอน-อาร์ค (Argon-arc process) ช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิง ปกติจะบรรจุก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอนไว้ เพื่อว่าการถ่ายเทความร้อนจากเม็ดเชื้อเพลิงจะได้ดีขึ้นและเพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบรอยร้าวของการเชื่อมอีกด้วย

4.2 กระบวนการผลิต เค้ก เหลือง

เค้กเหลือง เป็นผลผลิตชนิดกึ่งบริสุทธิ์ (Semi-refined product) ที่มีความเข้มข้นและมีความบริสุทธิ์พอเพียงแก่การนำไปเตรียมสารประกอบวัสดุนิวเคลียร์ของยูเรเนียมในขั้นอุตสาหกรรมได้ การผลิตเค้กเหลืองจากแร่ยูเรเนียมนั้น กระทำได้หลายวิธี การที่จะเลือกใช้วิธีใดนั้นควรจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบในทางสภาวะแวดล้อม เช่น ปัญหาการเกิดมลภาวะเป็นพิษ (Pollution) ของน้ำและอากาศ อันเป็นสิ่งสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกสถานที่ตั้งโรงงานและวิธีการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตเค้กเหลืองจากแร่ในธรรมชาตินั้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ในการผลิต ดังนี้

4.2.1 การทำให้สินแร่มีคุณค่ามากขึ้น (Beneficiation and Upgrading) ^(16,46)

เป็นวิธีการทำให้สินแร่เข้มข้นขึ้นเบื้องต้น (Preconcentration) ซึ่งจะใช้ได้กับแร่เกรดต่ำ (Low-grade ore) แร่ที่มีปริมาณไม่มากนัก หรือแหล่งแร่อยู่ไกลจากโรงงานบดแร่ (Mill) มาก เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย นอกจากนี้อาจใช้กับแร่ใด ๆ ก็ได้ เพื่อลดน้ำหนักของแร่ที่จะต้องขนไปโรงงาน หรือ เพื่อขจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป และยังคงขนาดของโรงงานที่ใช้สกัดแร่ยูเรเนียมได้อีกด้วย

การทำอัพเกรด (Upgrading) หรือบิเนฟิซิเอชัน (Beneficiation) มี 2 กระบวนการคือ กระบวนการแห้ง (Dry processing) ซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพและนิยมใช้กัน และกระบวนการเปียก (Wet processing) ซึ่งเป็นวิธีการทางเคมี การทำบิเนฟิซิเอชันทางกายภาพ (Physical beneficiation) จะอาศัยคุณลักษณะที่ต่างกันของแร่ต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในสินแร่ ซึ่งอาจกระทำด้วยวิธีอาศัยแรงโน้มถ่วง ทำให้เข้มข้นด้วยแรงแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ การบดและแยกขนาด การลอย (Flotation) และการแยกด้วยรังสี (Radiometric sorting) ส่วนการทำให้เข้มข้นด้วยกระบวนการเปียกนั้น จะมีข้อเสียที่มีน้ำปนอยู่ด้วย ทำให้ขนย้ายลำบาก

4.2.1.1 ทำให้เข้มข้นโดยการแยกขนาด (Concentration by Sizing)

วิธีนี้จะใช้ได้ดีกับสินแร่หินทรายที่มีเม็ดหยาบและกลม เพราะจะทำให้เม็ดทรายและส่วนที่เป็นผงละเอียดนั้นแยกออกจากกันได้ดี เครื่องบดที่ใช้คือ Ball and rod mills และ Aerofall dry grinding mills ในการบดนั้นควรจะควบคุมอัตราความเร็ว ความหนาแน่นของพัลพ์ (Pulp density) และตัวกลางที่ใช้บด (Grinding media) เพื่อป้องกันมิให้มีการบดมากเกินไป อันจะทำให้ความเข้มข้นลดลง เมื่อบดแล้วจึงทำการแยกขนาด เม็ดที่หยาบและละเอียดออกจากกันด้วยการพ่นอากาศลงไป (กระบวนการแห้ง) หรือใส่น้ำลงไปแล้วกรองแยกออกจากกัน (กระบวนการเปียก)

การทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยการบดแล้วแยกขนาดนี้จะทำให้ปริมาณยูเรเนียมเพิ่มขึ้น 70 - 90% เมื่อทำให้เข้มข้นขึ้น 2 - 5 เท่า และการทำด้วยกระบวนการเปียกจะดีกว่ากระบวนการแห้งประมาณ 2 - 5%

4.2.1.2 ทำให้เข้มข้นด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Concentration)

วิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะกับสินแร่ที่มีแร่ยูเรเนียมอย่างหยาบและสามารถทนทานต่อการแตกร้าวและเป็น เมื่อกคล้ายโคลนละเอียด (Sliming) หรือเกี่ยวพันอยู่กับแร่อื่น ๆ ซึ่งทำให้สามารถแยกตัวออกมาจากแกงกิวได้ด้วยความแตกต่างของแรงโน้มถ่วง สินแร่ที่ใช้กับวิธีนี้ คือ เพกมาโทต์ โดยยูเรเนียมจะปรากฏอยู่เป็นแร่ยูเรนิไนต์และพิตซ์เบลนด์ เครื่องมือที่ใช้ในการทำให้เข้มข้นด้วยแรงโน้มถ่วงนี้คือ โต๊ะแยกแร่ (Tables) เครื่องร่อนแร่ (Jigs) ลานขดเกลียว (Spirals) และ เซฟวี่มีเดีย เซฟพาเรเตอร์ (Heavy media separators)

เครื่องมือที่นิยมใช้คือ เซพวีมี เคีย เซพพาเร เดอร์ โดยการแขวน-
ลอยด้วยสารละลายของ เฟอร์โรซิลิกอน (Aqueous ferrosilicon suspension) ใช้เฟอร์-
โรซิลิกอนประมาณ 0.38 ปอนด์ต่อสินแร่ 1 ตัน โดยใช้สินแร่ขนาดประมาณ -1 นิ้ว ถึง +10 เมช

4.2.1.3 ทำให้เข้มข้นโดยการจำแนกพวก (Concentration by Sor-
ting)

เป็นวิธีการแยกแยะสินแร่ด้วยการแยก เกรดของแร่และทำการ
กำจัดส่วนประกอบที่ไม่ต้องการออกไป โดยการดูลักษณะสีและการวัดรังสี โดยเฉพาะการจำแนก
พวกด้วยการวัดรังสี (Radiometric sorting) จากยูเรเนียมนั้น มีใช้กันในแคนาดา ฝรั่งเศส
ออสเตรเลีย และฮังการี เครื่องจำแนกพวก (Sorter) เครื่องแรกที่ใช้กันคือ Lapoite
Picker ซึ่งจะใช้หัววัดแบบซินทิลเลชัน (Scintillation counter) โดยใช้น้ำหนักเข้าไป
เพื่อแยกแยะแร่และสิ่งที่ไม่ต้องการออกจากกัน เครื่องนี้มีใช้ในแคนาดา ต่อมาเครื่องจำแนกพวก
ด้วยรังสีที่สามารถจำแนกขนาดได้ด้วยการวัดน้ำหนัก โดยใช้หลักการวัดด้วยโฟโตอิเล็กตริก
(Photoelectric) ไดอิเล็กตริก (Dielectric) และ เมคานิคัล-ฟีลเลอร์ (Mechanical
"feelers") คือเครื่องแบบ Belt-type sorter ซึ่งมีใช้ในฮังการี ในปัจจุบันนิยมใช้เครื่อง
K and H Ore sorter เป็นเครื่องที่มีการวัดและการจำแนกพวกเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ในระหว่าง
ที่ปล่อยก้อนหินลงไป โดยใช้อากาศพ่น เป่าเอาหินอื่นที่ปะปนอยู่ออก และใช้หลักการของโฟโตอิเล็ก-
ตริกและการวัดรังสี ซึ่งจะวัดแร่ได้ตั้งแต่ขนาด 2 - 12 นิ้ว

เนื่องจากการจำแนกด้วยการวัดรังสีนั้นจะมีข้อเสียที่ว่า ถ้าขนาด
ของก้อนหินเล็กเกินไป จะทำให้วัดรังสีได้ต่ำ อันจะทำให้ค่าผิดพลาดได้ง่าย ฉะนั้นจึงไม่ควรใช้
แร่ขนาดเล็กเกินไป ปกติจะใช้ขนาดประมาณ 3 นิ้ว

4.2.1.4 ทำให้เข้มข้นด้วยการใช้แม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ (Magnetic
and Electrostatic Concentration)

ปกติแล้วแร่ยูเรเนียมจะมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะแก่การ
ใช้การแยกแยะด้วยแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ เพราะแร่ยูเรเนียมมีขนาดละเอียดเกินไปหรือมีคุณ-
ลักษณะไม่แตกต่างจากแกงกิว (Gangue) ที่ปะปนอยู่เท่าใดนัก อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีนี้ก็อาจ

จะใช้ได้ดีกับบางท้องถิ่นที่แห้งแล้งและอยู่ไกล โดยการทำบิณฑิ เอชันแบบแห้ง (Dry benefici-
ation)

พบว่าแร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่⁽⁴⁶⁾ รวมทั้งแร่ยูซีนไนต์ (Euxenite) แมรอนเนอไรต์ เฟอร์กูโซไนต์ (Fergusonite) ซามาร์สไกต์ โมนาไซต์ ดาวิดด์ (Davidite) ออกซุไนต์ ซีโนไทม์ (Xenotime) และคาร์โบไนต์ มักจะทำการแยกด้วยแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ หรือทั้งสองวิธีรวมกัน แต่เนื่องจากยูเรเนียมมักจะเกี่ยวพันอยู่ในแร่อื่น ๆ ได้ดี ซึ่งมีผลต่อการแยกด้วยแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตย์ได้เช่นกัน ฉะนั้น วิธีนี้จึงใช้ได้ดีกับแร่ยูเรเนียมชนิดที่ปนติดอยู่กับแร่ที่เป็นตัวนำพา (Carrier minerals)

4.2.1.5 การลอยแร่(Flotation)

เป็นวิธีการทำบิณฑิ เอชันทางกายภาพที่ทำให้ยูเรเนียม เข้มข้นขึ้น ด้วยการปล่อยให้ยูเรเนียมแยกออกจากแกงกิวในแร่ด้วยขนาดที่เหมาะสม แร่ที่มีขนาดละเอียดมากหรือแร่ที่มีโคลนละเอียด (Slime) จะไม่เหมาะแก่การใช้วิธีนี้ แต่วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการทำให้เกิดปูนขาว (Lime) ในปริมาณที่มากและน้อย สำหรับวิธีการแยกด้วยกระบวนการใช้ค่า และกรดตามลำดับ และยังเหมาะแก่การแยกเอาสิ่งที่มีค่าหรือสิ่งที่ไม่ต้องการในแร่ก่อนการชะล้างได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่เหมาะแก่การทำในชั้นอุตสาหกรรม เท่าใดนัก แม้ว่าจะสามารถทำให้ยูเรเนียม เข้มข้นขึ้นถึง 70 - 95% ก็ตาม เพราะว่ามันจะยังคงมียูเรเนียมปนอยู่ในทางแร่

ในแร่ที่มีซิลไฟด์และไมกา (Mica) ปนอยู่มาก ๆ นั้น ควรจะมีการทำการลอยเบื้องต้น (Prefloat) เสียก่อน เพื่อขจัดซิลไฟด์ออกไปด้วยการลอยด้วยซัลไฟไฮดริลไทป์-คอลเลคเตอร์ (Sulphydryl-type collectors) ซึ่งเป็นแซนเทต (Xanthate) ชนิดหนึ่ง และขจัดไมกาด้วยการลอยด้วยเอมีนแคตไอออนิกไทป์-คอลเลคเตอร์ (Amine cationic-type collectors) ซึ่งพบว่าจะทำให้ยูเรเนียม เข้มข้นขึ้น 40 - 50% และมีน้ำหนักลดลงเหลือเพียง 6 - 10% จากเดิม ดังนั้นการลอยเบื้องต้นจึงมีความสำคัญต่อการขจัดพวกแร่ซิลไฟด์ (เช่น Pyrite) คาร์บอนเนต และคาร์บอนไฮโดรคาร์บอน (Carbonaceous) (Hydrocarbon) ออกไป เพราะการมีซิลไฟด์ปนอยู่จะทำให้เป็ลิ่งสารออกซิแดนต์ (Oxidant) และตัวชะล้าง (กรดหรือคาร์บอนเนต) ปกติจะใช้ไอโซโพรพิลแซนเทต (Isopropyl xanthate) เป็นตัวลอยไฟไรต์ออกมา ส่วนคาร์บอนเนตนั้นเราขจัดได้ด้วยการลอยกับสารแอนไอออนิก (Anionic re-

agent) และพวกแร่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon minerals) ซึ่งจะ เป็นส่วนที่ไม่ต้องการ เพราะจะก่อให้เกิดการตกตะกอนได้ไม่ดี ตลอดจนทำให้เรซินและตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในชั้น การทำให้ยูเรเนียมบริสุทธิ์แล้วลงได้ เพราะปกติแล้วแร่ไฮโดรคาร์บอนจะลอยตัวได้ดีและนำพา ยูเรเนียมติดไปได้มากด้วย ได้เป็นของผสมที่เข้มข้นของยูเรเนียม-ไฮโดรคาร์บอน (Uranium-hydrocarbon concentrate) ซึ่งเราสามารถจัดไฮโดรคาร์บอนออกไปได้โดยการเผา

การทำให้ยูเรเนียมเข้มข้นขึ้นด้วยวิธีการลอยนี้จะนิยมทำกันใน ประเทศแคนาดา สหรัฐอเมริกา แอฟริกาใต้ และเม็กซิโก

4.2.2 การเตรียมสินแร่ (Ore Preparation) ⁽¹⁶⁾

เนื่องจากขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตนั้นจะต้องมีการกระทำดังนี้เสียก่อน คือ การซึ่งนำหนักแร่ การหาความชื้นในแร่ การบดหยาบ (Crushing) การวิเคราะห์หาโลหะ ที่ปะปนอยู่ในแร่ การคลุกแร่ (Blending) และการบดแร่ (Grinding) เพื่อจะได้ทราบข้อมูล เบื้องต้น ตลอดจนทำให้แร่เป็นเนื้อเดียวกันและมีขนาด เหมาะแก่การนำไปย่อยและแยกแร่ในชั้น ต่อไป

4.2.2.1 การคลุกแร่ (Ore Blending)

เราทำการคลุกแร่ เพื่อให้แร่มีลักษณะ เป็น เอกรูป (Uniform) ซึ่งจำเป็นมากในกรณีดังต่อไปนี้

ก. ปริมาณ U_3O_8 มีปะปนอยู่ในแร่ไม่เท่ากัน การคลุกแร่จะทำให้ เพิ่มความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นคือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และ กระบวนการตกตะกอน

ข. ในแร่มีองค์ประกอบอย่างอื่นสูง เช่น ปูนขาว โมลิบดีนัม สารอินทรีย์ และอื่น ๆ คือ ปูนขาวจะก่อให้เกิดฟองขึ้นในกระบวนการชะล้างด้วยกรด ส่วนโมลิบ- ดินัมและสารอินทรีย์จะทำให้เรซินและตัวทำละลายมีคุณภาพลดลง

ค. แร่นั้นแข็งหรือ เป็นทราย หรือ เป็น เมื่อกคล้ายโคลนละเอียด เพราะแร่ที่แข็งจะทำให้บดได้ยาก แร่ที่เป็น เมื่อกคล้ายโคลนละเอียดก็ทำให้การทำงานของเรซิน-

อิน-พัลพ์ (Resin-in-pulp) ลดลงได้ ตลอดจนมีปัญหาในการตกตะกอนและการกรอง ส่วนแร่ที่มีลักษณะเป็นทราย จะทำให้มีการตกตะกอน เกิดขึ้น ซึ่งยากแก่การกรอง

การคลุกแร่ เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเปิดแร่ (Ore operation) เพื่อชดเชยความแตกต่างของเกรดในก้อนแร่โดยอาศัยการวัดรังสีช่วย การคลุกแร่กระทำได้โดยการนำร่มากองแยกเป็นชั้น ๆ (Stockpile) ตามความเข้มข้นของ U_3O_8 โดยวัดในขณะบรรทุกใส่รถ ซึ่งชั้นล่างสุดจะมี U_3O_8 ในปริมาณที่ต่ำสุดและชั้นบนสุดจะมี U_3O_8 ในปริมาณที่สูงสุด จากนั้นจึงเอาแร่จากแต่ละชั้นมาบ่อน (Feed) เข้ากระบวนการพร้อม ๆ กัน มีการคลุกผสมกันขึ้น ซึ่งการนำร่มากองไว้ เช่นนี้จะทำให้เกิดการออกซิเดชันกับอากาศตามธรรมชาติได้

4.2.2.2 การบดหยาบ (Ore Crushing)

เป็นการลดขนาดของแร่ลง เหลือประมาณ $-\frac{3}{4}$ นิ้ว ถึง $-1\frac{1}{2}$ นิ้ว ก่อนที่จะนำไปบด การบดหยาบนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคอน คือ

ก. การบดขั้นแรก (Primary Crushing) เป็นการขจัดวัสดุที่มีขนาดเล็ก ๆ ออกไป ปกติจะทำเป็นวงจรมัด โดยใช้เครื่องบดแบบ Impact-type primary crusher ซึ่งจะสามารถใช้กับหินทรายได้ด้วย

ข. การบดครั้งที่สอง (Secondary Crushing) โดยทำเป็นวงจรมัดด้วยการทำให้แผ่นตะแกรงลั่นสะเทือน ปกติจะใช้เครื่องมือระหว่าง Impact-type crusher และ Cone หรือ Gyratory crusher

เมื่อบดหยาบเสร็จแล้วจึงนำไปเก็บไว้ในถังเก็บ (Fine ore storage bin)

ปกติแล้วกำลังความสามารถในการบดหยาบนั้น จะมีอัตราแตกต่างกันคือ พวกแร่ที่มีหินปูนปนอยู่มากจะมีอัตราต่ำกว่าพวกแร่ที่เป็นหินทราย ส่วนแร่ที่มีความชื้นสูงหรือมีดินเหนียวปนอยู่มาก ก็จะลดความสามารถในการบดลงได้มาก ดังนั้น แร่ที่จะนำมาบดจึงไม่ควรมีความชื้นเกิน 10 - 12% และพบว่าถ้าแร่มีความชื้นเกิน 5 - 8% จะทำให้ยากแก่การขนส่ง

การลดความชื้นในแร่ที่กระทำได้หลายวิธี คือ การทำให้แห้งโดยวิธีตามธรรมชาติ เช่น ปล่อยให้ระเหยออกไป หรือวิธีทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือทำให้แห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared) หรือทำให้แห้งด้วยเตาไฟ ปกติแล้ววิธีทำให้แห้งตามธรรมชาติจะประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการใช้เตาไฟ

4.2.2.3 การบดแร่ (Ore Grinding)

เป็นการเตรียมแร่ขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม ก่อนที่จะนำไปทำการชะล้างด้วยการป้อนเข้าด้วยเครื่องแบบมีสายพาน (Belt-type feeder) จากแร่ที่เก็บไว้ในถัง และควบคุมอัตราการบดจากปากถังหรือจากความเร็วของสายพานที่ป้อนแร่เข้ามา ปกติแล้วการชะล้าง (Leaching) ด้วยค่างจะต้องทำการบดแร่ให้มีขนาดเล็กกว่าการชะล้างด้วยกรด ซึ่งบดเพียงแค่นี้มีขนาดเท่าเม็ดหินทรายตามธรรมชาติก็เพียงพอ นั่นคือควรจะบดให้มีขนาดประมาณ -20 ถึง -200 เมช ในการบดนั้นอาจจะบดด้วยวิธีบดแห้ง (Dry grinding) ในโรงบดแร่แบบ Aerofall mill, Rod mill หรือ Ball mill ส่วนการบดของโรงบดแบบ Pebble mill จะใช้สำหรับการบดในขั้นที่สอง โดยเฉพาะการบดแร่เพกมาไทด์

การบดแร่นั้นปกติควรจะบดให้ได้ผลผลิตที่มีความหนาแน่น 50 - 60% ของของแข็ง การบดที่ละเอียดกว่าจะทำให้ได้สารละลายที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการใช้ค่าง และนำสารละลายนั้นกลับไปใช้ใหม่ ปกติเราจะใส่ฟล็อกคูแลนต์ (Flocculant) ลงไปเพื่อช่วยให้มีการตกตะกอนนอนกันได้ดียิ่งขึ้น

4.2.3 การสกัด (Extraction) ^(16,47)

การสกัดยูเรเนียมออกมาจากแร่นั้น คือการชะล้างเอายูเรเนียมแยกออกจากกากแร่ได้เป็นสารละลายยูเรเนียม (Uranium-bearing solution) โดย UO_2 จะกลายเป็นเกลียวูเรนิล เมื่อทำปฏิกิริยากับกรด หรือกลายเป็น เกลียวูเรเนตและ เกลียวูเรเนต (Polyuranate) เมื่อทำปฏิกิริยากับค่าง ส่วน U_3O_8 ก็จะกลายเป็น เกลียวูเรเนตได้เมื่อทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะ โดยมีออกซิเจนค้ำอยู่ด้วย ฉะนั้น การสกัดจึงกระทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับแร่ยูเรเนียมที่มีอยู่ ความเกี่ยวพันของแร่และแกงกิว ราคาของสินแร่ ขนาดและตำแหน่งที่เกิดของสินแร่ กระบวนการสกัดยูเรเนียมจากแร่นั้นมีขั้นตอนดังนี้

4.2.3.1 การเผาแร่ (Roasting) (16,47)

การเผาแร่ เพื่อจุดประสงค์สองประการคือ เพื่อให้พวกองค์ประกอบที่มีคุณค่าละลายได้ดียิ่งขึ้นในระหว่างการชะล้าง และ เพื่อให้สินแร่มีคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้นต่อกระบวนการผลิต เช่นในกรณีที่แร่มีดินเหนียวปนอยู่ เมื่อมีการเผาจะทำให้มีการตกตะกอนและการกรองดีขึ้น การเผาพวกแร่ไฮโดรคาร์บอเนต เพื่อขจัดสารอินทรีย์ที่เป็นคาร์บอน (Organic carbon) ออกไป และทำให้แร่ยูเรเนียมละลายได้ดียิ่งขึ้นในสารละลายชะล้าง ปกติจะเผาแร่ด้วยวิธี Salt-roast อันจะเหมาะแก่การสกัดวาเนเดียมจากแร่ยูเรเนียมที่มีวาเนเดียมปนอยู่เป็นอย่างมาก

การเผาแร่ที่มี U^{+4} โดยภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน จะสามารถทำให้การสกัดด้วยกรดเจือจางหรือสารละลายคาร์บอเนต เกิดได้ดียิ่งขึ้น ถ้าปราศจากการเติมสารออกซิแดนต์ลงไป จะทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ยาก แต่ถ้าแร่ยูเรเนียมอยู่ในรูปที่ถูกออกซิไดซ์แล้วคือ U^{+6} การเผาก็อาจจะทำให้การละลายเกิดขึ้นได้ไม่ดีเมื่อเผาเกิน $650^{\circ}C$. เพราะจะเกิดเป็น U_3O_8 ขึ้น ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นระหว่าง U^{+6} และส่วนประกอบอื่น ๆ ในแร่ เพื่อเกิดเป็นสารประกอบยูเรเนตนั้น จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้เป็นผลเสียต่อการละลายในสารละลายคาร์บอเนต แต่จะทำให้เกิด U^{+6} ได้สมบูรณ์และละลายได้ดีในสารละลายกรด ส่วนประกอบของแร่ที่เป็นกรดหรือสารที่เดิมลงไปนั้น อาจจะช่วยให้เกิดสารประกอบยูเรนิลขึ้นในระหว่างการเผาและเป็นผลให้การสกัดเกิดได้ดีขึ้น

การเผาแร่มี 3 วิธี ดังนี้

ก. เผากับเกลือ (Salt Roasting) เป็นการนำแร่มาเผากับเกลือโซเดียม (ประมาณ 6 - 10% ของแร่) คือโซเดียม คลอไรด์ (Sodium chloride) โดยเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน $600^{\circ}C$. เป็นเวลา 1 - 2 ชั่วโมง เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้มีการเกิดเกลือยูเรเนตที่ไม่ละลายในสารละลายคาร์บอเนตได้ ปกติแล้วการเผากับเกลือนี้จะใช้กับแร่คาร์โนไทต์ เพื่อแยกวาเนเดียมออกจากยูเรเนียมได้เป็นสารประกอบโซเดียม วานาเตด (Sodium vanadate) ซึ่งละลายน้ำได้

โซเดียม คาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียม ซัลเฟต (Na_2SO_4) อาจจะใช้แทนโซเดียม คลอไรด์ได้ โดยโซเดียม คลอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าวาเนเดียม เมื่อในแร่ไม่มี

สารอินทรีย์และคัลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ปะปนอยู่เท่านั้น โซเดียม ซัลเฟตก็จะเกิดปฏิกิริยากับวาเนเดียมไดดีเช่นกัน แต่จะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าและยังเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่า ส่วนโซเดียม คาร์บอเนตจะเกิดปฏิกิริยากับวาเนเดียมไดดี แต่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา ฟอสเฟต และอะลูมินา (Alumina) ได้เป็นสารประกอบของโซเดียม อันเป็นอุปสรรคต่อการนำวาเนเดียมกลับออกมาจากสารละลาย เครื่องมือที่ใช้เผาแร่คือ Multiple hearth roaster แบบ Skinner ซึ่งนิยมใช้กันมาก

ข. เผาเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ (Roasting to Oxidize) ปกติยูเรเนียมจะปรากฏในธรรมชาติในรูปของ U^{+4} และ U^{+6} หรือ U^{+4} ปนกับ U^{+6} ซึ่ง U^{+4} นั้นจะทนทานต่อการชะล้างด้วยกรดหรือด่างเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้การเผาแร่ในอากาศจึงเป็นการเปลี่ยน U^{+4} ไปเป็น U^{+6} นอกจากนี้การเผายังสามารถจะขจัดสารรีดิวซ์ (Reductant) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและมีปนอยู่ในแร่ ซึ่งอาจจะ เป็นอุปสรรคต่อการออกซิเดชันและการละลายของยูเรเนียมในระหว่างการชะล้าง สารรีดิวซ์พวกนี้คือ คาร์บอนเนซัส ซัลไฟด์ เหล็กออกไซด์ และอื่น ๆ

ในระหว่างการเผานั้นอาจมีส่วนประกอบอื่น ๆ ในแร่สามารถจะทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมได้เป็นสารประกอบยูเรนิลและยูเรเนต⁽⁴⁷⁾ ปฏิกิริยาของ U^{+6} กับสารประกอบที่เป็นกรดแก่กว่ายูเรเนียม เช่น V_2O_5 และ P_2O_5 จะได้เป็นสารประกอบยูเรนิลซึ่งละลายได้ดี แต่ถ้ากับพวกด่างออกไซด์ เช่น CaO และ PbO ก็จะได้เป็นยูเรเนต ซึ่งไม่ละลายในสารละลายคาร์บอเนต แต่จะละลายในกรด

ค. เผาเพื่อให้มีคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้น เนื่องจากสินแร่ที่มีดินเหนียวปนน้ำ จะก่อให้เกิดความหนืดอันเป็นอุปสรรคต่อการชะล้าง การตกตะกอน และการกรอง เราสามารถขจัดน้ำในดินเหนียวนี้ได้ด้วยการนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 - 600 °ซ. นอกจากนี้การเผายังจะช่วยลดรูปุนในก้อนแร่ ลดการใช้สารเคมี ทำให้เกิดการรวมตัวกัน เป็นก้อนของอนุภาคที่ละเอียดและทำลายแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ของเม็ดแร่ ทำให้แร่มีขนาดลดลงได้

การเผาเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์และเพื่อขจัดน้ำในแร่ที่มีดินเหนียวปนอยู่นั้น มักจะนิยมกระทำกันใน Rotary kiln

4.2.3.2 การชะล้าง (Leaching)

การชะล้าง คือการละลายยูเรเนียมออกจากแร่มาอยู่ในสารละลายที่ใช้ชะล้าง การที่จะเลือกการชะล้างด้วยวิธีใดนั้น จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางกายภาพของแร่ เช่น ชนิดของแร่ยูเรเนียม ความยากง่ายของการหลุดออกของยูเรเนียม และธรรมชาติขององค์ประกอบอื่นที่ปะปนอยู่ในแร่ การชะล้างอาจสรุปได้ดังนี้⁽¹⁵⁾

ก. การชะล้างเป็นกระบวนการซึมผ่าน (Diffusion process) ซึ่งมีอัตราการชะล้างขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวชะล้าง อุณหภูมิ พื้นที่ผิวของของแข็ง และอัตราการซึมผ่านชั้นของสารละลายที่อยู่รอบ ๆ พื้นที่ผิวของของแข็งนั้น ปกติอัตราการชะล้างจะเพิ่มขึ้น 1.5 - 2.0 เท่าต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10°ซ.

ข. อัตราการซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นที่จะต้องซึมผ่าน (Diffusion layer) การปั่นกววนจะสามารถลดความหนาของชั้นนี้ได้ และเพิ่มอัตราการชะล้างได้ดียิ่งขึ้นด้วย นอกจากนี้การปั่นกววนยังเป็นสัดส่วนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวแร่หรือที่พื้นที่ผิวได้เป็นอย่างดี

ค. ในการชะล้างด้วยความดันนั้น อัตราการเกิดออกซิเดชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวและความดันของออกซิเจนในระบบ

ง. อัตราการซึมผ่านจะลดลง เมื่อตัวกลางนั้นมีความหนืดมากขึ้น เพราะเมื่อมีความหนืดสูงขึ้นก็就会有ความหนาแน่นสูงหรือมีความเข้มข้นของเมือกคล้ายโคลนละเอียดนั้นสูงขึ้นด้วย

การชะล้าง มีหลายวิธีคือ

4.2.3.2.1 การชะล้างด้วยกรด (Acid Leaching)

ก. หลักการทั่วไป^(16,48,49,50)

แร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างในลักษณะที่ยูเรเนียมติดแน่นในแร่ และทนทานต่อการชะล้างด้วยค่ามากกว่าการชะล้างด้วยกรด การชะล้างด้วยกรดนั้นมีข้อเสียคือ จะมีธาตุอื่น ๆ นอกจากยูเรเนียมซึ่งละลายได้ในสารละลายด้วย ฉะนั้นการชะล้างด้วยกรดจึงมีข้อดีกว่าในแง่แร่ไม่ต้องละเอียดมาก ใช้ตัวชะล้าง (Leaching reagent) (หรือ Lixiviant) ไม่เข้มข้นมาก ใช้เวลาชะล้างสั้นกว่า และมีการชะล้างโดยใช้อุณหภูมิล้อมรอบซึ่งจะดีกว่าการชะล้างด้วยอุณหภูมิสูง

กรดที่ใช้เป็นตัวชะล้างมีหลายชนิด การที่จะเลือกใช้ตัวชะล้างชนิดใดนั้น จะต้องคำนึงถึงราคา หาซื้อได้ง่ายหรือไม่ ผลิตขึ้นได้ง่ายหรือไม่ องค์ประกอบต่าง ๆ ของแร่ ตลอดจนขั้นตอนการสกัดและการผลิต เค้ก เหลือง

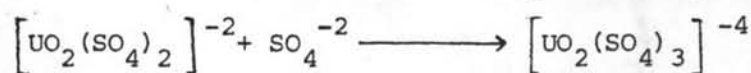
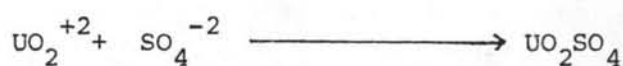
1. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นกรดที่นิยมใช้เป็นตัวชะล้างในกระบวนการชะล้างด้วย กรดมากที่สุด เพราะราคาถูกกว่า หาซื้อและผลิตขึ้นได้ง่าย และได้ยูเรเนียมออกมาในสารละลาย ในรูปของยูเรนิลไอออน อันเหมาะแก่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

2. กรดไนตริก (HNO_3) จะมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงด้วย แต่จะมีราคาแพง กว่าและจะก่อให้เกิดยูเรนิลไนเตรตได้ในสารละลายนั้น อันเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการแลกเปลี่ยน ไอออนลบ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้กัน

3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) มักจะใช้ชะล้างในกรณีที่มีการเผาแร่ด้วย เกลือ ($NaCl$) เพราะสามารถจะได้กรดนี้จากก๊าซที่เกิดขึ้นจาก เตาเผา แต่ปกติ HCl มีราคาแพงมากและเกิดการ กัดกร่อนได้สูง ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้กัน

เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และ เฟอร์ริกซัลเฟต $[Fe_2(SO_4)_3]$ ก็อาจจะใช้ เป็น ตัวชะล้างกับแร่ยูเรเนียมบางชนิดได้⁽⁴⁸⁾

ปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริกและ U^{+6} หรือ UO_2^{+2} จะได้ เป็นยูเรนิลซัลเฟตและยูเร- นิลซัลเฟตแอนไอออนเชิงซ้อน ดังสมการ



ยูเรเนียมอาจเกิด เป็นแบบโคออร์ดิเนตเชิงซ้อน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดและยูเร- นียม อุณหภูมิ และองค์ประกอบอื่น ๆ ในระบบ

ถ้าในแร่นั้นมียูเรเนียมอยู่ในรูป U^{+4} เราจะต้องออกซิไดซ์ไปเป็น U^{+6} เสียก่อนการ

ละลาย ปกติจะใช้ Fe^{+3} (Ferric ion) เป็นตัวออกซิแดนต์⁽⁴⁹⁾ โดยเหล็กนี้อาจจะมีปะปนอยู่ในแร่ นั้น หรือ เป็นโลหะ เหล็กที่สึกหรอหลุดจาก เครื่องมือที่ใช้บดแร่

ปริมาณของกรดที่ใช้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่เป็นแกงกิวในแร่ นั้น คือ พวกลีซายต์ (Calcite) โดโลไมต์ (Dolomite) แมกนีไซต์ (Magnesite) และซิเคอไรต์ (Siderite) จะเกิดปฏิกิริยาได้กับกรด เจือจางและมีอุณหภูมิช่วย ส่วนพวกซิลิเกต โลหะ เหล็ก ฟอสเฟต โมลิบดีนัม วานาเดียม ออกไซด์ ฟลูออไรด์ โมกา และดินเหนียว จะเกิดปฏิกิริยากับกรดที่มีความเข้มข้น และอุณหภูมิสูงได้เป็นตะกอน เกิดขึ้น นอกจากนี้การละลายของพวกอะลูมิโนซิลิเกตเชิงซ้อน (Aluminosilicate complex)⁽⁵⁰⁾ ซึ่งมีปะปนอยู่ในดินเหนียวหรือซิลิเกตอื่น ๆ นั้น อาจเกิดขึ้นได้ ที่อุณหภูมิสูง ได้เป็นกรดซิลิสิก (Silicic acid) (H_2SiO_3) อันจะทำให้เกิดเป็นตะกอนคล้ายวุ้น (Colloid) ขึ้นในสารละลาย ทำให้ตะกอนกลายเป็นวุ้นขึ้น (Gel) ยากแก่การกรอง ดังสมการ

$$(Mg, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O + 4H_2SO_4 \longrightarrow Al_2(SO_4)_3 + 5H_2SiO_3 + (Mg, Ca)SO_4 + (n-1)H_2O$$

ถ้าสารละลายไม่อยู่ในภาวะที่ถูกออกซิไดซ์ก็อาจจะมีตะกอนของ เกลือยูเรนิล เกิดขึ้นที่ pH ซึ่งยูเรนิลไอออนยังคงละลายอยู่⁽⁴⁹⁾ แต่ยูเรนิลอาซิเนต (Uranyl arsenate) และฟอสเฟต จะไม่มีเกิดขึ้น ถ้า Fe^{+3} มีมากพอ

ในการชะล้างด้วยกรดนั้นพบว่า อาจจะมีการสูญหายไปของยูเรเนียมได้ อันเนื่องมาจากการเกิดการตกตะกอนใหม่ หรือถูกดูดซึมโดยดินเหนียวหรือคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้หรือมียูเรเนียมซิลิเกตหรือแร่อื่น ๆ ที่มีความทนทานต่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น

ข. เงื่อนไขของกระบวนการ^(15,16,51,52,53,54,55)

ปฏิกิริยาของการเกิดการชะล้างและการสกัดนั้นจะขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขดังนี้

1. ขนาดของแร่ ในการบดแร่ เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมต่อการชะล้างด้วยกรดนั้น ควรบดให้มีขนาดเล็กกว่า -28 เมชก็เพียงพอ ส่วนใหญ่แร่ยูเรเนียมในสหรัฐอเมริกา มักจะบดแร่ให้มีขนาด -200 เมช อยู่ประมาณ 30 - 40% ส่วนแร่ยูเรเนียมในแคนาดาและออสเตรเลีย มักจะบดแร่ให้มีขนาด -200 เมชอยู่ประมาณ 55 - 65% เพราะแร่ที่ละเอียดจะเพิ่มขึ้น

ที่ผิวของแร่ที่สัมผัสกับตัวชะล้างได้มากขึ้น ทำให้อัตราการสกัดมีมากขึ้น และทำให้ยูเรเนียมหลุดออกมาได้มากขึ้น แต่การบดให้ละเอียดเกินไปจะก่อให้เกิดความหนืด (Puly viscosity) ได้มากขึ้น แล้วยังจะทำให้เม็ดแร่ดูดซับ (Absorp) ยูเรเนียมไว้ที่ผิวได้มาก อันเป็นอุปสรรคต่ออัตราการชะล้าง ปกติในกระบวนการชะล้างด้วยกรดนั้นมักจะบดแร่ในน้ำหรือในสารละลายกรดที่ค่อนข้างเป็นกลาง ด้วยการใช้เครื่องบดแบบ เซรามิก-ไลน์ เพม มิล (Ceramic-lined pebble mill)

2. ความเข้มข้นของกรด เนื่องจากหลักการสำคัญในการชะล้างก็คือการให้มีกรดอิสระ เข้มข้นพอ เพียงแก่การทำปฏิกิริยากับยูเรเนียมในแร่ โดยไม่มีการละลายเอาพวกแกง-กิวออกมามาก ดังนั้นจึงต้องใส่กรดลงไปทำสะเทินกับคาร์บอเนตแกงกิว (เช่น ลินแร่ที่มีหินปูน) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้ก่อนแร่ยูเรเนียม ปกติจะใช้กรดอิสระที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1 - 90 กรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ยูเรเนียมและปริมาณของกรดที่ใช้ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 40 - 120 ปอนด์ต่อแร่ 1 ตัน

การมี เหล็ก (Fe^{+3}) ในแร่นั้น มันสามารถจะตกตะกอนออกมาได้ที่ pH ต่ำ ก่อนการตกตะกอนของยูเรเนียม ทำให้มีการสูญเสียยูเรเนียมได้

ภายหลังจากละลายยูเรเนียมออกมาอยู่ในสารละลายแล้ว ควรจะมีกรดมากเกินพอไว้ เพื่อป้องกันมิให้ยูเรนิล (U^{+6}) และยูเรนิส (U^{+4}) มีการตกตะกอนใหม่อันเนื่องมาจากอิออนอื่น ๆ ในสารละลายซัลเฟตนั้น ดังแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ช่วงของ pH ที่อิออนลบชนิดต่าง ๆ สามารถตกตะกอนยูเรเนียมจากสารละลายซัลเฟตได้⁽⁵¹⁾

Cation	pH Range			
	Hydroxide	Phosphate	Arsenate	Carbonate
Uranyl	3.8-6.0	1.9-2.5	1.3-1.7	3.5-6.0
Uranous	2.5-6.0	<1.2	<1.2	—

ดังนั้น ผลของความเข้มข้นของกรคือ การเพิ่มอัตราการละลายของแร่ยูเรเนียม และละลายสิ่งที่ห่อหุ้มแร่ซึ่งจะมีอยู่ล้อมรอบแร่ยูเรเนียมและจำกัดการเข้าถึงของสารละลายชะล้าง

๑. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการชะล้าง โดยตัวประกอบทั้งสองนี้จะเกี่ยวพันกันคือ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิก็จะสามารถลดเวลาที่ใช้ย้อยลงได้ ดังนั้นจึงทำให้เพิ่มความจุ (Capacity) ของเครื่องมือได้ และสามารถจะสกัดยูเรเนียมจากแร่รีแฟรคตอรี (Refractory minerals) ได้ดียิ่งขึ้น ข้อเสียของการใช้อุณหภูมิสูงคือ จะเปลืองสารเคมีมากขึ้น มีการละลายของแร่อื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกับยูเรเนียม เครื่องมือจะถูกกัดกร่อนมากขึ้น แม้กระทั่งสแตนเลส-สตีลบางชนิด นอกจากนี้พวกซิลิไฟต์ โมลิบดีนัม เฟอสเฟต และแร่วิลลิเกตบางชนิด จะละลายได้ในที่อุณหภูมิสูง

เวลาที่ใช้ในการชะล้างจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของกร ชนิดของแร่ การปั่นกววน และอื่น ๆ ในทางปฏิบัตินั้นพบว่าถ้าใช้เวลาในการชะล้างมาก ๆ และใช้อุณหภูมิต่ำ ๆ ในสารละลาย จะเป็นการประหยัดดีที่สุด ปกติจะใช้เวลาระหว่าง 4 - 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิประมาณ 80°ซ.

ความร้อนที่ให้แก่กระบวนการสกัดด้วยกรนี้ อาจให้ได้หลายทางคือ ใช้ไอน้ำพ่นลงไปของผสมนั้น หรืออาจจะใช้น้ำร้อนในกระบวนการบดก็ได้ ในบางครั้งอาจใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) หรือขดลวดความร้อนจุ่มลงไป (Submerged coils)

4. ความหนาแน่นและความหนืดของแร่ที่ปนกับน้ำ (Pulp Density and Viscosity) ความหนาแน่นของพัลพ์ที่ดีที่สุดคือการชะล้างนั้น ควรจะมีความหนาแน่นมากเท่าที่จะมากได้ และยังคงมีการไหลเวียนของของเหลวได้ดี เพื่อมิให้ของเหลวสัมผัสกับผิวของของแข็งได้น้อยลง การที่มีความหนืดมากเกินไปหรือมีการปั่นกววนไม่ดีพอ จะทำให้อัตราการชะล้างในการซึมผ่านลดน้อยลง แร่ที่มีโคลนละเอียดปนอยู่สูงจะมีคุณสมบัติเป็นไทโซโทรฟิก (Thixotropic) ทำให้พัลพ์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังสมการ

$$\mu_m = \mu_o(1+4.5f)$$

โดย μ_m = ความหนืดของส่วนผสมของวัตถุ (slurry)

μ_0 = ความหนืดของสารละลาย

f = ปริมาตร เฉพาะของส่วนที่เป็นโคลนละเอียด

การบดมาก เกินไปก็จะทำให้มีความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้ความหนาแน่นของพัลพ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่และขนาดของแร่ที่บด ปกติในการชะล้างแร่ทั่ว ๆ ไปจะใช้ความหนาแน่นของพัลพ์ โดยมีของแข็งประมาณ 50 - 60% แต่สำหรับแร่ที่มีดินเหนียวปนอยู่สูง ควรจะใช้ความหนาแน่น เพียง 40%

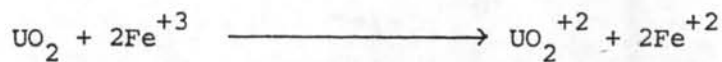
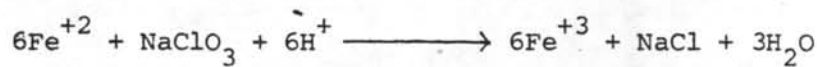
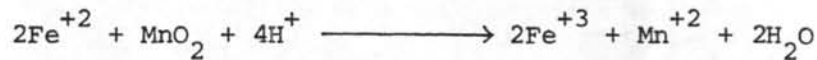
ที่ความหนาแน่นสูง ๆ จะทำให้องค์ประกอบอื่น ๆ ในแร่เหล่านั้นสามารถละลายได้มากจนมีความ เข้มข้น เพียงพอที่จะทำให้อัตราการละลายของยูเรเนียมลดต่ำลง และทำให้ยูเรเนียมตกตะกอนได้ใหม่ แต่การที่จะทำให้พัลพ์ เจือจางนั้นควรจะต้องมีการปั่นกวาน เพื่อให้อนุภาคที่หยาบอยู่ในภาวะแขวนลอย (Suspension) สม่าเสมอ การใช้การพ่นอากาศลงไปก็อาจจะได้ผลเช่นกัน หรืออาจจะใช้ถังกั้นรูปกรวย เพื่อให้มีการตกตะกอนลงนอนกันถึงของวัตถุ แล้วจึงป้อนน้ำกลับไปปากถังใหม่ นอกจากนี้ในบางโรงงานจะใช้กาวที่ทำมาจากสัตว์ใส่ลงไป เพื่อให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่มีการตกลงนอนกันของอนุภาคที่หยาบได้น้อยลง

5. ออกซิเดชัน เป็น เงื่อนไขสำคัญต่อการสกัดยูเรเนียมรองลงมาจากความ เข้มข้นของกรด สารออกซิแดนต์ที่ใช้ในการชะล้างด้วยกรดนั้น ปกติจะใช้ยังมีกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) (MnO_2) หรือแร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) และโซเดียมคลอเรต (Sodium chlorate) ($NaClO_3$) การออกซิไดซ์ด้วยอากาศก็อาจใช้ได้ แต่จะเกิดขึ้นได้ช้า การปั่นกวานอากาศที่อุณหภูมิสูงในถังปachuca (Pachuca tanks) จะสามารถออกซิไดซ์ Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} ได้⁽⁵²⁾ แล้วจึงจะไปออกซิไดซ์ยูเรเนียมอีกที ก๊าซคลอรีนก็อาจจะใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ได้ แต่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนและเป็นอันตรายได้ ส่วนโซเดียมไนเตรด ($NaNO_3$) จะใช้ได้ดีเมื่อมีความร้อนช่วย และโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) ($KMnO_4$) ซึ่งจะเป็นตัวออกซิแดนต์ที่แรง แต่จะมีราคาแพง ฉะนั้นจึงไม่นิยมใช้กัน

การออกซิไดซ์โดยใช้ปฏิกิริยาทางชีววิทยา⁽⁵³⁾ ก็สามารถจะทำได้โดยออกซิไดซ์ Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} ด้วยการใช้อแบคทีเรีย (Bacteria) ชนิดเฟอร์โรบาซิลลัส-เฟอร์โรออกซิแดนต์ (Ferrobacillus ferrooxidans) หรือชนิดไทโอบาซิลลัส-เฟอร์โรออกซิแดนต์ (Thiobacillus ferrooxidans) ซึ่งจะทนทานต่อความ เข้มข้นของอ็อกซิไดต์ โดยใส่

พวกหินภูเขาไฟลงไปเป็นตัวนำพา (Carrier) ที่อุณหภูมิ 15 - 40°ซ. และ pH 0.8 - 3.0

เฟอร์ริกไอออน (Ferric ion) (Fe^{+3}) และวานาดีกไอออน (Vanadic ion) (V^{+5}) ซึ่งถูกออกซิไดซ์มาด้วยการใช้สารออกซิแดนต์ดังกล่าวข้างต้นนั้น จะใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ U^{+4} ไปเป็น U^{+6} ต่อไป ดังรูป 4.3 และดังสมการ

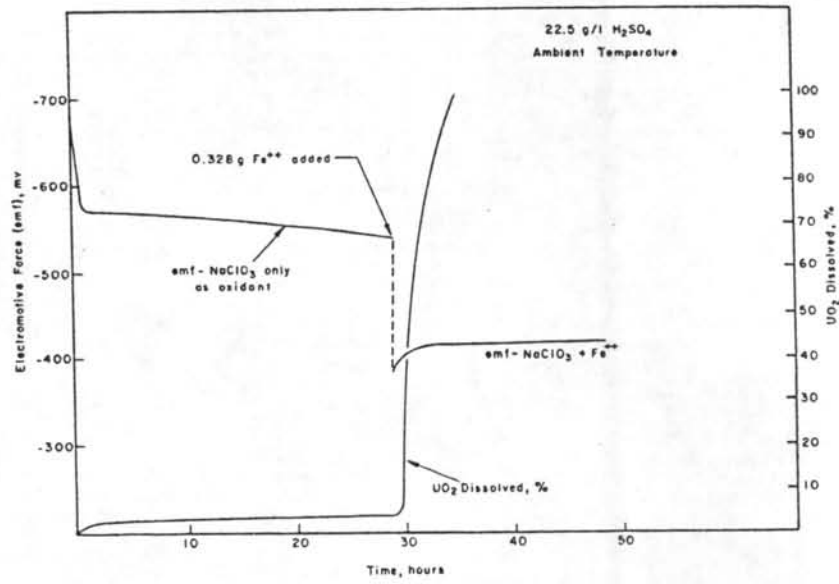


สัดส่วนของ Fe^{+3} ต่อ Fe^{+2} นั้นพบว่ามีผลต่อการละลายของ UO_2 คือ อัตราการสั้กจะเพิ่มขึ้น เมื่อ Fe^{+3}/Fe^{+2} เพิ่มขึ้น หรือ Mn^{+2} มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นนั่นเอง
 ดังรูป 4.4

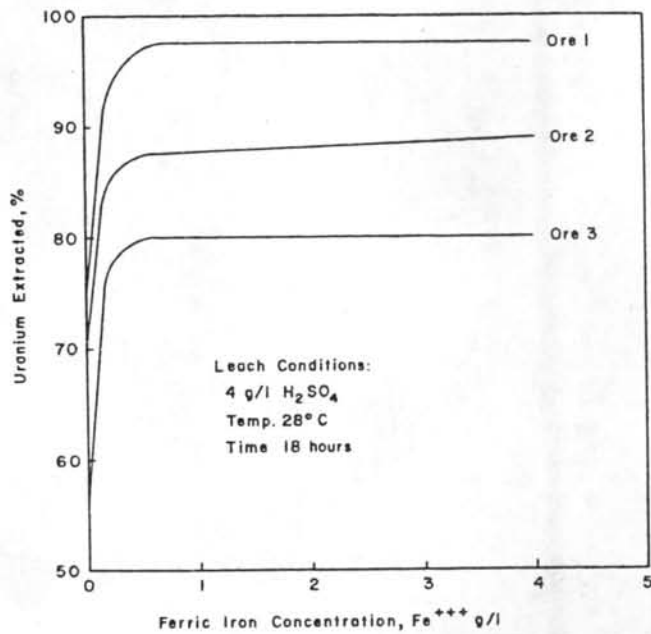
ทั้ง Fe^{+3} , Fe^{+2} และ Mn^{+2} ต่างก็สามารถจะทำปฏิกิริยาที่ผิว UO_2 ได้ ดังนั้น จึงทำให้อัตราการละลายของ UO_2 ลดลงได้ ฉะนั้นจึงไม่ควรมี Fe^{+2} และ Mn^{+2} อยู่ในสารละลายนั้น การที่จะให้ UO_2 ละลายได้ดีนั้นควรมี Fe^{+3} อิสระอย่างน้อย 0.5 กรัมต่อลิตรปนอยู่กับ MnO_2 หรือ $NaClO_3$ ^(15,51) แต่เนื่องจากฟอสเฟต อาร์ซีเนต (Arsenate) และฟลูออไรด์ไอออน จะสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็กได้ ทำให้ Fe^{+3} อิสระลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเติมเหล็กลงไปเพิ่ม

สารออกซิแดนต์ควรจะต้องเติมลงไปภายหลังที่ปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเหล็กหรือซัลเฟตเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว เพราะก๊าซ H_2 หรือ H_2S หรือปฏิกิริยาระหว่างโลหะเหล็กและ Fe^{+3} ที่เกิดขึ้นนั้น จะทำให้สารออกซิแดนต์ต้องถูกใช้ไปโดยไม่จำเป็น ปกติจะใช้ MnO_2 (100%) ประมาณ 3 - 7 ปอนด์ต่อแร่ 1 ตัน หรือ $NaClO_3$ ประมาณ 3 ปอนด์ต่อแร่ 1 ตัน การใช้ $NaClO_3$ มากเกินไปจะทำให้เกิดเฟอร์ริกคลอเรต (Ferric chlorate) ขึ้น อันจะทำให้ Fe^{+3} อิสระลดลงได้ ⁽⁵¹⁾

ระดับของภาวะการถูกออกซิไดซ์ที่ใช้ในสารละลายเหล่านั้น ควรจะมีศักดาไฟฟ้าออกซิเคชัน-รีดักชัน หรือ EMF อยู่ระหว่าง -400 ถึง -500 มิลลิโวลต์ (Millivolts) ซึ่งจากการวัดศักดาไฟฟ้าด้วยการไตเตรต (Titrate) ของสารละลายเหล่านั้น



รูป 4.3 การเปลี่ยนแปลง EMF และอัตราการละลายของ UO₂ เมื่อใช้คลอเรตกับ เมื่อใช้เหล็กผสมคลอเรต (54)



รูป 4.4 ผลของ Fe⁺³ ต่อการสกัดยูเรเนียม (50)

หลังการเกิดออกซิเดชันสมบูรณ์แล้ว ด้วยคาไล เมล-แพลทินัมอิเล็กโทรด (Calomel-platinum electrode) มีแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ศักดาออกซิเดชัน-รีดักชันในสารละลายขี้ด่างของยูเรเนียม (55)

Reduced form	Oxidized form	Oxidation completed volts ^a
V ⁺⁺	V ⁺⁺⁺	-0.09 ± 0.06
U ⁺⁺⁺	U ⁺⁴	
V ⁺⁺⁺	V ⁺⁴	-0.32 ± 0.04
U ⁺⁴	U ⁺⁶	
Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	-0.61 ± 0.04
V ⁺⁴	V ⁺⁵	-0.93 ± 0.04

^aPlant liquors, 20 to 80°C, 2 to 5% H₂SO₄.

ค่า EMF ยิ่งเป็นลบมากจะยิ่งมีการออกซิไดซ์ได้แรง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือ H⁺ เข้มข้นมากขึ้น ก็จะทำให้ EMF เป็นลบมากขึ้น ดังนั้นการเกิดออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ คือ EMF อุณหภูมิ สัดส่วนของออกซิไดซ์อ็อกไซด์หรือไอออน ความเข้มข้นของออกซิเดนต์ และชนิดของออกซิเดนต์ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการของเนอส์ (Nernst equation) (16) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} [\text{Red}] + a\text{H}_2\text{O} &= [\text{Ox}] + x [\text{H}^+] + ne^- \\ E &= E_0 - \frac{0.1984T}{n} \cdot \left[\log_{10} R - x(\text{pH}) \right] \end{aligned}$$

โดย $[\text{Red}] =$ ความเข้มข้นของรีดิวซ์อ็อกไซด์ (โมลาร์)

$[\text{Ox}] =$ ความเข้มข้นของออกซิไดซ์อ็อกไซด์ (โมลาร์)

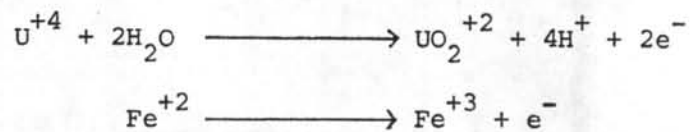
$$R = \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Red}]}$$

$[\text{H}^+] =$ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (โมลาร์)

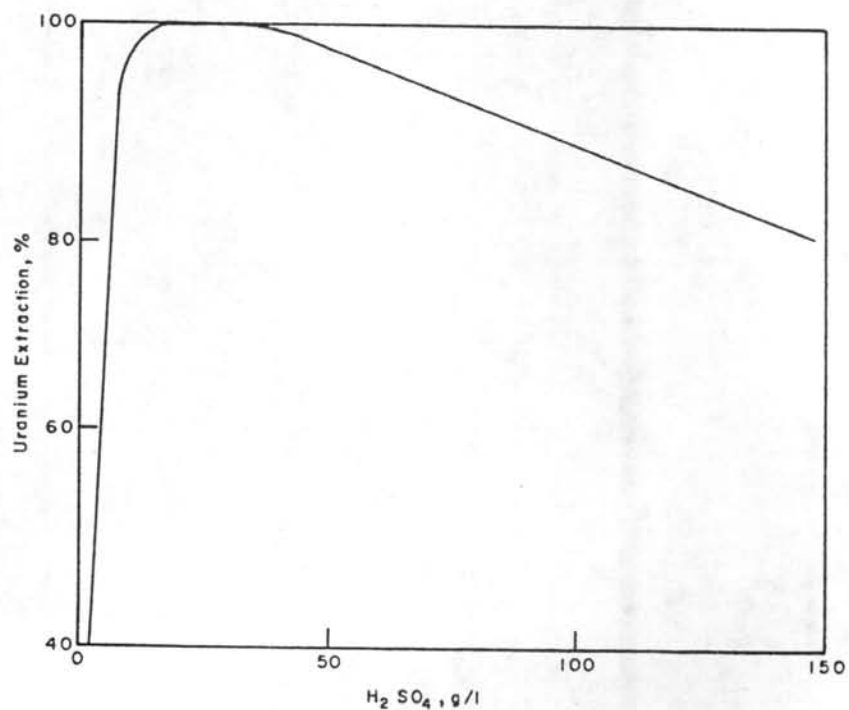
$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+]$$

- x = จำนวนโมลของ H^+ ที่ทำปฏิกิริยา
 n = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น
 E = ค่า EMF ที่วัดได้ (มิลลิโวลต์)
 E_0 = ออกซิเดชัน-รีดักชันศักยมาตรฐาน (มิลลิโวลต์)
 T = อุณหภูมิแอบโซลูต (Absolute) ($^{\circ}K$)

เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความต่างศักย์ระหว่างยูเรเนียม-ยูเรนิล และเฟอร์รัส-เฟอร์ริกลดลง ดังสมการ



ทำให้มีการลดอัตราการละลายของ U^{+4} ไปเป็น U^{+6} ที่กรดเข้มข้นสูงนั้นลงได้ ดังแสดงในรูป 4.5 ซึ่งจะสกัดยูเรเนียมออกมาได้มากที่สุดที่กรดเข้มข้น 20 - 35 กรัมต่อลิตร



รูป 4.5 ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่อการสกัดยูเรเนียม (51)

ค. อุปกรณ์การชะล้าง (Leaching Equipment) ⁽¹⁶⁾

ในการชะล้างไม่ว่าวิธีใดจะต้องมีระบบการปั่นกวน (Agitated system) เพื่อให้พัลพ์มีการเคลื่อนที่ได้ดี อันเอื้ออำนวยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวของแร่ได้ดี เป็นผลให้มีการละลายได้ดีขึ้น ปกติจะปั่นกวนด้วยอากาศหรือ เครื่องในถังซึ่งวางต่อ ๆ กัน ในปัจจุบันจะนิยมใช้เครื่องมือที่มีถังชนิดปาชูกาและมีการปั่นกวนด้วยอากาศ (Air-agitated Pachuca-type tanks) สำหรับการชะล้างด้วยกรด ซึ่งจะดีกว่าการปั่นกวนด้วยเครื่อง เพราะการใช้ปาชูกาจะเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำน้อยกว่าและมีปัญหาน้อยกว่า

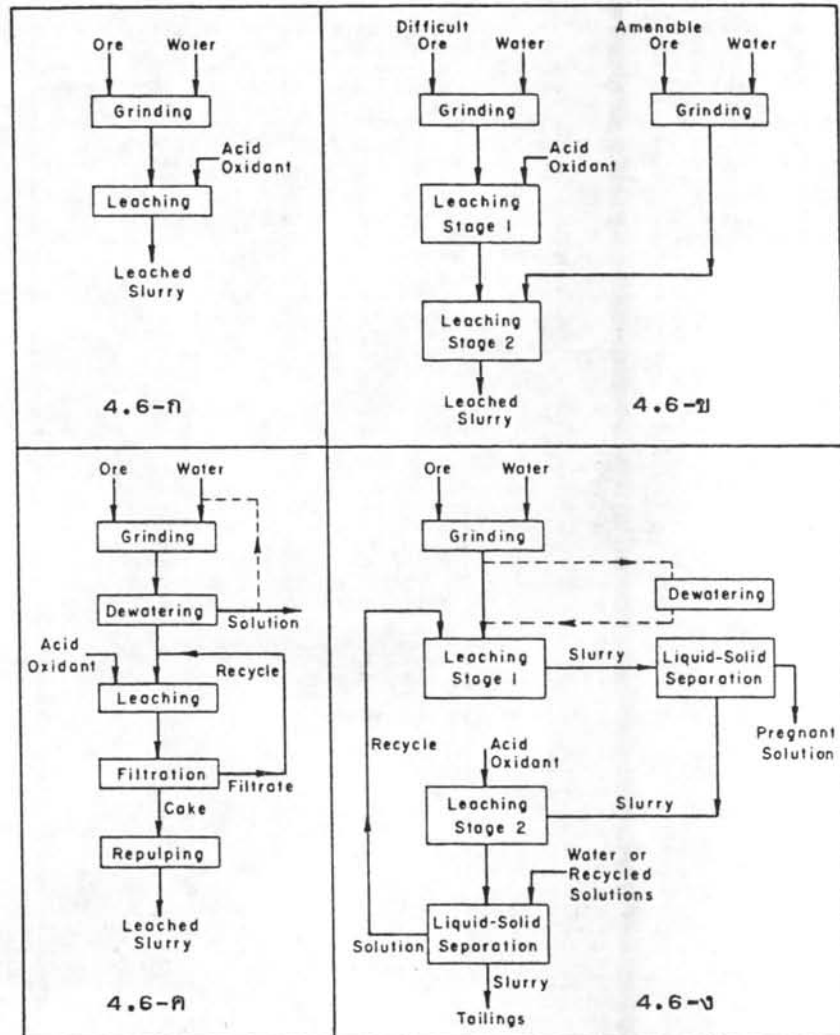
ถังแบบปาชูกานั้นจะเป็นรูปก้นกรวย เป็นมุม 60 องศา และตอนบนเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งมีความสูงคือเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 2.5:1 มีการพ่นอากาศจากตรงกลางหรือจากก้นกรวย อาจมีการฉีดไอน้ำลงไปด้วย ซึ่งปกติแล้วความดันของอากาศที่ฉีดพ่นลงไปนั้นจะขึ้นอยู่กับความสูงของถังและความหนาแน่นของพัลพ์

ง. วิธีการชะล้างด้วยกรด (Acid Leaching Methods) ^(15,16,56,57)

การชะล้างด้วยกรดมีหลายวิธี ดังนี้

1. การชะล้างที่มีการปั่นกวน (Agitation Leaching) เป็นวิธีที่นิยมทำกัน ดังแสดงในรูป 4.6 โดยเฉพาะการชะล้างที่มีการปั่นกวนแบบต่อเนื่องนั้น จะใช้ได้ดีมาก เพราะมีข้อดีหลายอย่างคือ ควบคุมสารที่ใช้ได้ดีกว่า เปลืองสารเคมีน้อยกว่า กระทำได้ง่ายและเปลืองค่าใช้จ่ายในการกระทำน้อย และการใช้ที่รวมทั้งการบ้อนวัตถุจะไม่ยุ่งยากมาก

วิธีนี้จะมีถังต่อกันประมาณ 4 - 14 ใบ โดยใส่ลงทางด้านบนของถังและปล่อยออกทางด้านก้นถัง ปกติจะใส่กรดลงไปก่อนสารออกซิแดนซ์ เพื่อลดปริมาณของออกซิแดนซ์ที่อาจถูกใช้ไปโดยไม่จำเป็นกับก๊าซที่เกิดขึ้นหรือโลหะ เหล็กที่เกิดมาจากการบด การใส่กรดลงไปนั้นมักจะใส่ลงไปเป็นระยะ ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการมีฟองเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากคาร์บอนเนตหรือก๊าซอื่น ๆ ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การเติมกรดลงไปเป็นระยะ ๆ นั้นยังจะทำให้สามารถควบคุม pH ได้ดีขึ้น อันเป็นการประหยัดการใช้กรด รวมทั้งป้องกันการเกิดอุณหภูมิสูง เฉพาะแห่งในระหว่างการชะล้างได้



รูป 4.6 แผนภูมิการชะล้างด้วยกรด (16)

รูป 4.6 แบบ ก เป็นแบบอย่างง่ายใช้กับแร่ทั่ว ๆ ไป

รูป 4.6 แบบ ข เป็นแบบที่ดัดแปลงแก้ไขใหม่ ใช้กับแร่ที่ยากแก่การชะล้าง โดยใช้ชุดหม้อสูงและกรดเข้มข้นมากขึ้น แล้วจึงนำกรดอิสระที่เหลือไปใช้กับแร่ธรรมดาได้อีก

รูป 4.6 แบบ ค เป็นแบบที่ดัดแปลงแก้ไขแบบที่สอง ซึ่งพัลพ์ที่ถูก

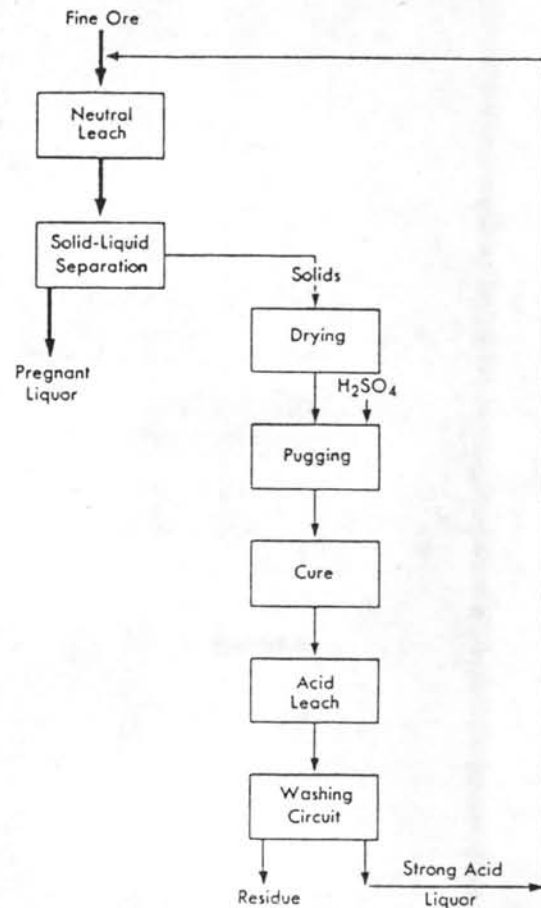
ชะล้างแล้วจะถูกกรอง ค่อยจากนั้นจึงนำสารละลายที่กรองได้ซึ่งมีกรดอิสระ เหลืออยู่กลับไปใช้ชะล้างใหม่ได้อีก ทำให้ไม่ต้องใช้ปูนขาวใส่ลงไปทำสะเทินกับกรดที่เหลือ ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะมีสิ่งเจือปน เข้มข้น เพิ่มมากขึ้น

รูป 4.6 แบบ ง เป็นแบบที่มีการใช้กรดอย่างสมบูรณ์ โดยใช้การชะล้างสองขั้นตอน สารละลายจะไหลทวนกระแส น้ำ มักจะใช้กับกรณีที่ต้องมีภาวะที่กรด เข้มข้นสูง กรดที่เหลือจะนำกลับมาใช้ใหม่โดยจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเนต และโลหะ เหล็กในแร่ที่ใส่ลงไปใหม่ เป็นผลให้สภาพความเป็นกรด เป็นด่าง และ EMF ถูกปรับให้เหมาะสมโดยไม่ต้องเติมสารใด ๆ ลงไป วิธีนี้จะไม่มีสิ่งเจือปนในสารละลายหรือถ้ามีก็มักจะมี ความเข้มข้นลดลง อันเนื่องมาจากการตกตะกอนใหม่

2. การย่อยด้วยความร้อน (Hot Digestion)⁽¹⁵⁾ เป็นวิธีที่มีปฏิกิริยา รุนแรง ปกติจะใช้กับแร่ เนิยมีคุณสมบัติ เป็นรีแฟรกตอรี (Refractory) วิธีนี้กระทำได้โดย การนำแร่มาย่อยกับกรดที่เข้มข้นสูงและมีอุณหภูมิสูง พร้อมทั้งมีการปั่นกววนตลอด เวลาที่ช่วงจุดเดือด การชะล้างด้วยวิธีนี้จะ เปลืองค่าใช้จ่ายสูง ฉะนั้น แร่ที่บ่อน เข้ามาในกระบวนการนี้จึงควรมี เกรด สูง

3. เอซิดพักกิง (Acid Pugging) หรือ เอซิดเคียวริง (Acid Curing) โดยนำกรด เข้มข้นและแร่ที่แห้งแต่น้ำปนอยู่เล็กน้อย (Pugging) มาผสมรวมกัน แล้วนำมาอบ ด้วยความร้อน ค่อยจากนั้นนำมวลคล้ายพลาสติกที่ได้มาเก็บไว้ เพื่อนำไปผสมกับน้ำในถังที่มีการปั่น- กวน จะได้ยูเรเนียมและวาเนเดียมออกมาอยู่ในสารละลายดังรูป 4.7 การใส่น้ำลงไปเล็กน้อย ในตอนแรกนั้น ก็เพื่อผสมกับยิมซัม (Gypsum) ที่เกิดขึ้นและเพื่อป้องกันส่วนผสมนั้นแห้งกลายเป็น มวลแข็ง ส่วนปริมาณของกรดที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนขาวที่มีปะปนอยู่ในแร่ โดยเฉพาะการ ละลายพวกแร่รีแฟรกตอรี-วานาเดียมซิลิเกต (Refractory vanadium silicate minerals) นั้น จะต้องใช้กรดประมาณ 250 - 300 ปอนด์ต่อแร่ 1 ตัน ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้น้ำ 10% กรด 20% อบประมาณ 6 - 8 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในระหว่างการอบประมาณ 100 - 150 °ซ. (56)

4. ชะล้างด้วยการไหลซึม (Percolation Leaching) เป็นการชะ- ล้างโดยการผ่านสารละลายขึ้นหรือลงไปยังแร่ที่วางอยู่กับที่ โดยใช้แท่งหรือถังใหญ่ซึ่งมีท่อให้ สารละลายไหลผ่านจากข้างบนหรือข้างล่าง สารละลายที่ไหลขึ้นจะสามารถนำโคลนและ เเย็ดหรือ อนุภาคละเอียดคิดไปได้ ส่วนการไหลของสารละลายนั้น จะสามารถกรองให้สารละลายมีของแข็ง



รูป 4.7 แผนภูมิการชะล้างด้วยการทำหักกิ่ง (15)

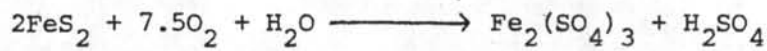
แขวนลอยน้อยลงด้วย

วิธีนี้จะไม่เหมาะกับแร่ที่มีขนาดละเอียดหรือยังไม่ได้แยกขนาด ถ้าให้สารละลายไหลผ่านในอัตราที่ช้าเกินไป ข้อเสียของวิธีนี้คือจะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่แร่ที่มีลักษณะเป็นเม็ดและแยกขนาดแล้ว ซึ่งมียูเรเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวเม็ดแร่ ก็อาจจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้วิธีนี้ เพราะแร่นี้จะยากแก่การแขวนลอยในการชะล้างด้วยการปั่นกววน นอกจากนี้วิธีนี้ยังจะทำให้ได้น้ำชะล้างที่ใสมากขึ้น อันทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ในการแยกของแข็งกับของเหลวออกจากกัน

5. ชะล้างด้วยการใช้ความดัน (Pressure Leaching) (57, 58).

เป็นวิธีที่ใช้กับแร่ยูเรเนียมที่มีซิลิโคไซด์ปนอยู่ (เช่น ไพไรต์) หรือใส่ซิลิโคไซด์ลงไปในแร่ยูเรเนียมที่สกัดยากและไม่มีซิลิโคไซด์ปนอยู่ ด้วยการใช้อุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น โดยมีต้องเติมสารอื่นลงไป

จะทำให้มีกรดซัลฟูริกและเฟอร์ริกซัลเฟตเกิดขึ้นแบบอิน-ซิตู (In situ) ด้วย ปฏิกิริยาระหว่าง ออกซิเจนกับซัลไฟด์ ดังสมการ

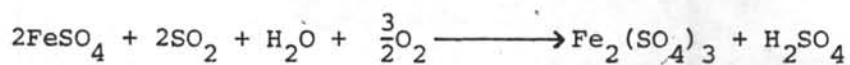


ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์ เมื่อใช้อุณหภูมิสูงและเพิ่มความดันให้มากขึ้น เพื่อให้ออกซิเจนละลายในสารละลายได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามจะก่อให้เกิดการไฮโดรไลซ์และตกตะกอนของ เหล็ก ไทเทเนียมและโมลิบดีนัมขึ้นได้ ดังสมการ



ดังนั้น ข้อดีของการชะล้างด้วยการใช้ความดันนี้คือสกัดได้ดีขึ้น ลดค่าใช้จ่าย ลดสิ่งเจือปนและกรดอิสระในสารละลายชะล้าง และกรองของผสม (Slurry) ได้ดีขึ้น แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือจะมีการกัดกร่อนมากขึ้นและการบำรุงรักษาจะมีเพิ่มมากยิ่งขึ้น ปกติจะใช้ไทเทเนียมหรือตะกั่ว โดยมีอิฐทนกรดมาอยู่ผิวนอก ทำเป็นอุปกรณ์ในกระบวนการชะล้างด้วยความดันที่อุณหภูมิสูงนี้

6. เกิดออกซิเดชันขึ้นเอง (Auto-Oxidation) โดยการผ่านอากาศ และ SO_2 ลงไปในสารละลายที่มีเฟอร์รัสซัลเฟตอยู่ จะเกิดเป็นเฟอร์ริกซัลเฟตและกรดซัลฟูริกขึ้น เมื่อมีการเร่งปฏิกิริยา (Catalyze) ที่เหมาะสม (Fe^{+3} และ Mn^{+2}) ดังสมการ



4.2.3.2.2 การชะล้างด้วยคาร์บอเนต (Carbonate Leaching)

ก. หลักรั่วไป⁽¹⁶⁾

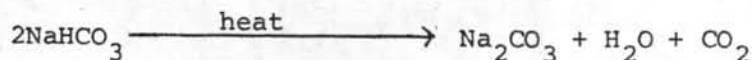
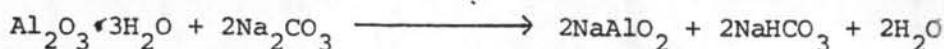
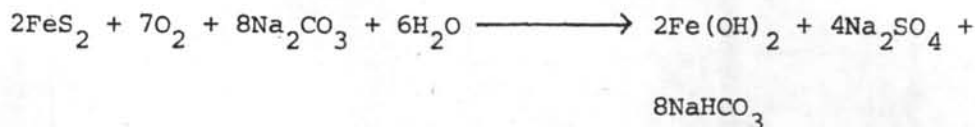
การชะล้างด้วยคาร์บอเนตนั้นจะ เหมาะแก่การแปรสภาพสินแร่ที่มีคาร์บอเนตปนอยู่สูง เพราะแร่จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายคาร์บอเนต ในสินแร่ยูเรเนียมส่วนใหญ่

ที่มีคาร์บอนเนตปนอยู่ด้วยนั้น ควรที่จะมีการบดให้ละเอียดมากพอที่จะให้พื้นที่ผิวของแร่สัมผัสกับสารละลายด้วยอัตราที่สูง ส่วนพวกแร่ยูเรเนียมที่มีซิติล เกิดปนอยู่ หรือพวกแร่ออกไซด์ทิวไรต์ซึ่งเป็นรีแฟรกตอรีนั้น จะใช้วิธีนี้ไม่ได้ และพบว่า U^{+6} จะละลายได้ดีในสารละลายคาร์บอนเนต แต่ U^{+4} จะไม่ละลาย จะต้องออกซิไดซ์เสียก่อน และปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสูง เป็น เวลานานจึงจะละลายได้ นอกจากนี้การชะล้างด้วยคาร์บอนเนตยังมีข้อดีในแง่ ทำให้ได้สารละลายที่บริสุทธิ์ ซึ่งง่ายต่อการตกตะกอนยูเรเนียมจากน้ำชะล้าง และสารละลายคาร์บอนเนตจะไม่มีอำนาจการกัดกร่อนและจะปลอดภัยมากกว่าสารละลายกรด

การชะล้างด้วยคาร์บอนเนตจะไม่เหมือนกับการชะล้างด้วยกรด เพราะจะต้องให้สิ่งต่าง ๆ ทำปฏิกิริยากันครบบริบูรณ์ในระบบปิด โดยมีการนำสารละลายชะล้างมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดสารเคมี การชะล้างกระทำได้โดยการนำพัลฟ์ของแร่ยูเรเนียมมาปล่อยทิ้งไว้ให้ถูกอากาศ แล้วนำมาผสมกับ Na_2CO_3 ประมาณ 40 - 50 กรัมต่อลิตร และ $NaHCO_3$ ประมาณ 10 - 20 กรัมต่อลิตร โดยยูเรเนียมจะถูกชะล้างละลายแยกออกมาจากกาก ดังสมการ



โซเดียมคาร์บอนเนตจะทำปฏิกิริยาได้กับซัลเฟตและซิลิเกต ส่วนที่อุณหภูมิและความดันสูงนั้น โซเดียมคาร์บอนเนตอาจจะทำปฏิกิริยาได้กับองค์ประกอบที่เป็นกรด เช่น ซิลิกาและอะลูมินา ดังสมการ



เราใส่ไบคาร์บอเนตลงไปในสารละลายชะล้าง เพื่อป้องกันการตกตะกอนใหม่ของยูเรเนียมในสารละลายบางส่วน แล้วคาร์บอเนตจึงเกิดปฏิกิริยากับยูเรเนียมได้ดังนี้



ในขั้นการตกตะกอนยูเรเนียมนั้น ควรเติมโซดาไฟลงไปให้มากเกินไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสะเทินกับไบคาร์บอเนต อันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนยูเรเนียมได้ดียิ่งขึ้น ดังสมการ



ตะกอนของยูเรเนียมที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อได้กับไบคาร์บอเนต

ดังสมการ



มักจะมีสารประกอบของเหล็ก อะลูมิเนียม โทเทเนียม และอื่น ๆ เกิดเป็นตะกอนไม่ละลายในสารละลายคาร์บอเนตเป็นจำนวนมาก และยังพบโมลิบดีนัม ซิลิเกต วานาเดต ฟอสเฟต อะลูมิเนียม และโลหะคาร์บอเนตเชิงซ้อน (Complex metal carbonate) เกิดขึ้นเล็กน้อย ละลายอยู่ในสารละลาย ส่วนวาเนเดียมในแร่ซิลิเกตและออกไซด์นั้น ปกติจะไม่ละลายได้เลย ทำให้แยกออกจากยูเรเนียมได้ยากมาก เว้นแต่จะเผาไหม้เสียก่อน เป็นผลให้เค้กเหลืองที่ได้มีวาเนเดียมปนอยู่ด้วยเสมอ

ปกติแล้วการละลายยูเรเนียมออกจากแร่ด้วยวิธีการชะล้างด้วยคาร์บอเนตนี้ มักจะใช้เกลืออัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali carbonate) และแอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) เป็นตัวชะล้าง

ข. เจือไนและการแปรเปลี่ยนของกระบวนการ

1. อุณหภูมิและความดันของออกซิเจน (Temperature and Oxygen Partial Pressure) ^(16,58) ปกติในการชะล้างด้วยคาร์บอนเนตนั้น อุณหภูมิและความดันของออกซิเจนจะมีผลต่ออัตราการละลายของ UO_2 และสัมพันธ์กันด้วย โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก $10^{\circ}C$. จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น เป็นสองเท่าตัว เมื่อความดันคงที่ และการเพิ่มความดันของออกซิเจนจะมีผลมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิในการชะล้างโดยมีความดันรวมคงที่นั้น จะทำให้ความดันของออกซิเจนลดลง แต่ความดันไอน้ำ (Water vapor pressure) จะเพิ่มขึ้น

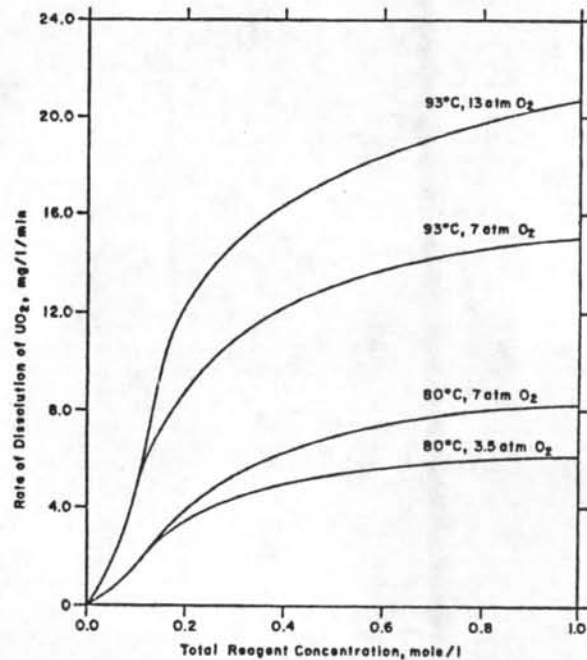
2. ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต ^(16,58,59) เนื่องจากไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวบ่งกันมิให้ยูเรเนียมตกตะกอน นั่นคือยิ่งมีมากจะยิ่งละลายยูเรเนียมได้มาก ฉะนั้นความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตที่ใช้จึงขึ้นอยู่กับแร่แต่ละชนิด เพราะไบคาร์บอเนตอาจจะถูกใช้ไปหรือมีเกิดขึ้นในระหว่างการชะล้างก็ได้ แต่ควรจะใช้ให้น้อยที่สุด เพราะส่วนที่เหลือใช้นั้นจะต้องทำสะเทินกับโซดาไฟ เสียก่อนการตกตะกอนยูเรเนียม

การเติม CO_2 ผ่านลงไปเล็กน้อย (Aerating gas) ⁽⁵⁸⁾ (ประมาณ 1% ของก๊าซที่ปล่อยให้สัมผัส) ในระหว่างการชะล้าง จะทำให้ยูเรเนียมถูกสกัดได้ดีขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องมีไบคาร์บอเนตอยู่ด้วยเลย ในสินแร่ที่มีซิลิไฟด์ปนอยู่นั้น เมื่อให้ถูกอากาศที่มี CO_2 อยู่ด้วยนั้นก็อาจจะสกัดยูเรเนียมออกได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องมีอากาศหรือออกซิเจนใช้ในการออกซิเดชัน ปกติจะใช้อากาศที่มี CO_2 ปนอยู่ ซึ่งจะดีกว่าการใช้ออกซิเจนอย่างเดียว

การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนเนตมากขึ้น ก็จะทำให้ยูเรเนียมละลายได้มากขึ้น นั่นคือความเข้มข้นรวมของไบคาร์บอเนตและคาร์บอนเนตยิ่งเพิ่มมากขึ้น จะยิ่งละลายยูเรเนียมได้ดีขึ้น ดังรูป 4.8

3. ขนาดของเม็ดแร่ การชะล้างด้วยคาร์บอนเนตนี้จะสกัดยูเรเนียมออกมาได้มาก เมื่อใช้แร่ที่มีขนาดเล็ก ยิ่งเล็กยิ่งสกัดออกได้มาก

4. เวลาที่ใช้ชะล้าง ถ้าใช้เวลามากก็จะชะล้างออกได้มาก



รูป 4.8 ผลของอุณหภูมิ ความดันของออกซิเจน และความเข้มข้นรวมของไบคาร์บอเนต-คาร์บอเนต ต่ออัตราการละลายของยูเรเนียม⁽⁵⁹⁾

ค. วิธีการชะล้างด้วยคาร์บอเนต (Carbonate Leaching Method)

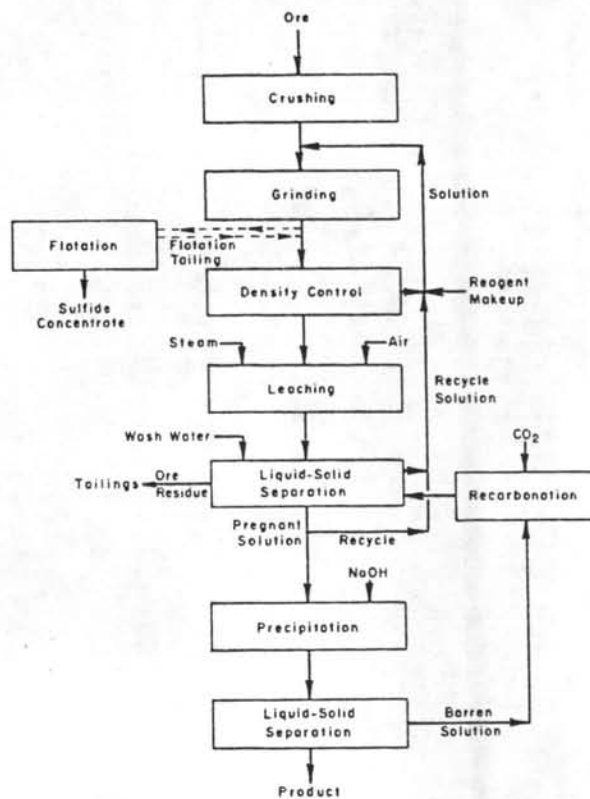
1. กระบวนการที่ทำกันมานานแล้ว (Conventional Process)^(16,60,61)

เป็นกระบวนการที่ใช้อัลคาไลน์คาร์บอเนตเป็นตัวชะล้าง และใช้แร่ที่มีขนาด -200 เมช ประมาณ 70 - 80% อยู่ในพัลพ์ มาทำการลอยเพื่อขจัดซิลไฟด์ออกเสียก่อน แล้วจึงทำการขจัดน้ำออกไป (Dewater) ในทิกเคนเนอร์ (Thickener) เพื่อให้มีความหนาแน่นของของแข็งประมาณ 50 - 60% ดังแสดงในรูป 4.9

ในการชะล้างด้วยคาร์บอเนตนั้น สิ่งสำคัญคือจะต้องใช้ดินแร่ที่มีเม็ดละเอียดเพียงพอที่แร่ยูเรเนียมจะหลุดแยกเป็นอิสระออกจากแกนกิว เพราะถ้าไม่ละเอียดพอก็จะทำให้อัตราการละลายลดลง และใช้เวลาในการชะล้างเพิ่มมากขึ้น

เครื่องมือที่ใช้ในการชะล้างด้วยคาร์บอเนตที่นิยมกันมี 3 แบบ คือ

- 1) ออโตเคลฟ (Autoclaves) มักจะนิยมใช้แบบเวอร์ติคัล



รูป 4.9 แผนภูมิการชะล้างด้วยอัลคาไลน์คาร์บอนเนต⁽¹⁶⁾

(vertical-type) ที่มีเครื่องปั่นกวน (Agitator) แบบเดี่ยว (Single) หรือแบบใส่ลงทาง ด้านบน (Top-mounted) หรือแบบใบพัด (Turbine-type) โดยทำให้ส่วนผสมที่จะบ้อนเข้า นั้นร้อนเสียก่อนในถังที่มีขดไอน้ำ (Steam coil) หรือได้รับความร้อนจากกากที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และความร้อนจากขดไอน้ำนี้จะนำไปใช้ในอโตเคลฟด้วย ปกติจะทำเป็นชุดขนานกันอย่างน้อย 4 ชุด มีการควบคุมความดันและอากาศที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชุด ของผสมที่บ้อนเข้าไปนั้นจะ เคลื่อน ที่จากถังหนึ่งไปยังอีกถังหนึ่งด้วยแรงโน้มถ่วง ในการชะล้างนั้นจะใช้อุณหภูมิประมาณ 95 - 120°ซ. และความดันรวมประมาณ 30 - 90 psig ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปนั้นจะอยู่ในระหว่าง 350 - 2,800 ลูกบาศก์ฟุตต่อแรม 1 ดัน ขึ้นอยู่กับ เวลาที่ใช้ชะล้าง

2) ถังปาซูกา (Pachuca Tanks) จะเหมาะกับการชะล้างด้วย คาร์บอนเนตเป็นอย่างมาก เพราะอากาศที่ใช้ในการปั่นกวนนั้นสามารถจะทำให้เกิดออกซิ เคชันได้

ด้วย ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่จะทำให้มีความดันที่กักกันถึงประมาณ 25 - 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีอากาศเข้าทางท่อกันถึง เพื่อให้ฟิล์มมีการหมุนเวียนได้ดี มีขดไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน มีท่อให้อากาศที่ใช้แล้วผ่านออก จะสามารถควบคุมความดันได้ด้วย ปกติในการชะล้างนั้นจะใช้อุณหภูมิประมาณ 75 - 80°ซ. มีอากาศผ่านเข้าประมาณ 0.4 - 1.0 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อแรม 1 ตัน

3) ถังธรรมดามีการปั่นกววน (Agitated Tanks)

ในกระบวนการชะล้างด้วยคาร์บอนเนตของวิธีนี้นั้น จะมีการทำให้มีคาร์บอนเนตเกิดขึ้นใหม่ (Recarbonation) ด้วย เพื่อจัดโซดาไฟส่วนเกินในสารละลายให้กลายเป็นคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต โดยให้สารละลายไหลผ่านลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง และก๊าซจากการเดือดซึ่งมี CO₂ ปนอยู่จะผ่านขึ้นสู่ด้านบน แล้วนำสารละลายที่มีคาร์บอนเนตเกิดขึ้นใหม่นี้ไปใช้ในกระบวนการแยกของ เหลว-ของแข็งต่อไปได้

เนื่องจากการชะล้างด้วยคาร์บอนเนตนั้น เป็นกระบวนการแบบปิด (Closed circuit) ฉะนั้นจะต้องรักษาให้น้ำและสารเคมีอยู่ในภาวะสมดุล คือปริมาณน้ำที่เติมลงไปจะต้องไม่มากไปกว่าที่ถูกลำเอียงออกไป การสูญเสียยูเรเนียมจะต้องค่าหรือสารละลายที่เจือปนจะมีการสูญเสียน้อยและมียูเรเนียมอยู่ในสารละลายค่า ซึ่งเราอาจจะควบคุมภาวะสมดุลเช่นนี้ได้ด้วยการมีการล้างของการแยกของ เหลว-ของแข็งหลายชั้นคอน พร้อมทั้งมีความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำล้างครั้งแรกค่าด้วย ส่วนการสูญเสียสารเคมีนั้นอาจชดเชยได้ด้วยการเติมโซดาไฟลงไปในช่วงของการตกตะกอน ถ้าจำเป็นอาจจะเติมโซดาแอส (Soda ash) ลงไปเพื่อให้สารละลายชะล้างมีการหมุนเวียนดีขึ้นก็ได้ ในกรณีที่สารละลายมีไบคาร์บอนเนตในปริมาณมาก อันทำให้ต้องใส่โซดาไฟลงไปทำสะเทินมาก เป็นเหตุให้ขาดความสมดุลของโซดาไฟ ซึ่งเราอาจแก้ไขได้โดยการใช้ปูนขาวใส่ลงไปแทนโซดาไฟ เพื่อลดความเข้มข้นของไบคาร์บอนเนตให้ต่ำกว่า 2.0 กรัมต่อลิตร จึงจะไม่มีเกิดการตกตะกอนของยูเรเนียม ดังสมการ



ในสินแร่บางชนิดที่เหมาะสมแก่การใช้กระบวนการนี้ แต่มักจะมีพวกสารอินทรีย์หรือโคลนละเอียดของสารอินทรีย์ (Organic slime) ที่ละลายได้ปนอยู่ในแร่ด้วย สารประกอบอินทรีย์พวกนี้เรียกว่า คีโรเจน (Kerogen) หรือลิกนิน (Lignin) ซึ่งคล้ายกับพวกโซเดียมลิกนินที่ใช้เป็นตัวดีสเปอร์แซนต์ (Dispersants) สารพวกนี้จะก่อให้เกิดอุปสรรคดังนี้⁽⁶⁰⁾

- ก) ก่อให้เกิด เป็นคราบคล้ายน้ำมันดิบ (Tarry) ขึ้นที่กระดาษกรอง อันยากแก่การกรอง
- ข) จะ เป็นตัวคิส เปอร์แซนด์ ทำให้ยากแก่การจับกัน เป็นก้อนของของผสม และยากแก่การล้างตะกอน เค้กที่กรองได้
- ค) อาจ จะ เกิด เป็นสารประกอบ เชิงซ้อนของออร์กาโน-ยูเรนิล (Organo-uranyl complex) ขึ้น อันจะไปยับยั้งการตกตะกอนยูเรเนียมได้
- ง) เพิ่มการระจัดกระจายของตะกอน เค้ก เหลือง ทำให้ประสิทธิภาพการกรองเสียไป และมีตะกอน เค้ก เหลืองปนอยู่ในสารละลาย
- จ) สารอินทรีย์บางส่วนอาจจะมีปนอยู่ใน เค้ก เหลือง

เราอาจจะขจัดอุปสรรคเหล่านี้ได้ด้วยการควบคุมสารอินทรีย์เหล่านี้ โดยการดูดกลืนจากสารละลาย ทำลายโดยการออกซิเดชันหรือขจัดออกโดยการตกตะกอน

การดูดกลืนสารอินทรีย์ออกจากสารละลายนั้นจะใช้ MgO ที่ถูกเผาไหม้เต็มที่แล้ว หรือแอคติเวต-คาร์บอน (Activated carbon) ใส่ลงไปในพัลพ์ของสินแร่ ในขั้นตอนการบดและชะล้าง⁽⁶¹⁾ ปกติจะเติม MgO ลงไปประมาณ 8 - 22 ปอนด์ต่อแร่ 1 ตัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้กับแร่ ส่วนแอคติเวต-คาร์บอนและตัวดูดกลืน (Absorbent) อื่น ๆ เช่น ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth) ฟูนาขาว แอคติเวต-อะลูมินา (Activated alumina) และแมกนีเซียมซิลิเกตสังเคราะห์ (Synthetic magnesium silicate) ก็ยอมใช้ได้ แต่จะไม่สามารถดูดกลืนได้ดีเท่า MgO

การออกซิเดชันพวกสารอินทรีย์อาจทำได้โดยวิธีการทางเคมี กับโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite) และเปอร์ออกไซด์ หรือโดยการออกซิเดชันด้วยอากาศในอโตเคลฟ ส่วนการขจัดด้วยการตกตะกอนนั้นจะใช้เกลือควอเตอรารี-แอมโมเนียม (Quaternary ammonium salts) เป็นตัวตกตะกอนพวกสารอินทรีย์

2. กระบวนการคาร์บอนเนต-เรซิน-อิน-พัลพ์ (Carbonate Resin-In-Pulp Process)⁽⁶²⁾ เป็นวิธีที่ดัดแปลงแก้ไขขึ้นมาใหม่ ใช้อัลคาไลน์คาร์บอนเนต เป็นตัวชะล้าง โดยมีทิกเคนเนอร์ 2 ชุดใช้ในการนำไบคาร์บอนเนตและคาร์บอนเนตจากพัลพ์กลับมาใช้ใหม่ในการ

บดและชะล้าง เป็นผลให้ได้สารละลายที่มียูเรเนียมเข้มข้นขึ้น และสารละลายจะไหลจากทึค เคน-เนอร์ผ่านตู้วงจรการแยก เม็ดแร่-โคลนละเอียดใน เรซิน-อิน-พัลพ์

3. กระบวนการแอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium Carbonate Process) ⁽⁶³⁾ เป็นการชะล้างด้วยแอมโมเนียมคาร์บอเนต เป็นวิธีที่ไม่มีการใช้กันในทางการค้า เพราะไม่มีข้อดีกว่ากระบวนการโซเดียมคาร์บอเนตเลย วิธีนี้จะใช้การชะล้างด้วยการใช้ความดัน โดยมีแอมโมเนียมคาร์บอเนต $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต $(\text{NH}_4\text{HCO}_3)$ เป็นตัวชะล้าง และ NH_4OH ที่มีเกิดขึ้นนั้นจะไม่ไปตกตะกอนยูเรเนียมแต่ประการใด ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้ไบคาร์บอเนตดัง เช่นในกระบวนการโซเดียมคาร์บอเนต

เราตกตะกอนยูเรเนียมได้ด้วยการสตรีฟด้วยไอน้ำ (Steam stripping) ที่ความดันบรรยากาศและ pH ประมาณ 8.0 โดยไปละลายแอมโมเนียมยูเรนิล-ไตรคาร์บอเนต (Ammonium uranyl tricarbonate) $[(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$ และแอมโมเนียมคาร์บอเนตกลายเป็น NH_3 กับ CO_2 พร้อมทั้งตะกอนของ $\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

การชะล้างด้วยแอมโมเนียมคาร์บอเนตจะมีข้อดีกว่าการชะล้างด้วยโซเดียมคาร์บอเนตในแง่ประหยัดสารที่ใช้ในการตกตะกอน และเกิดปฏิกิริยากับแร่ซิลิเกตได้น้อย แต่พวกยิบซั่มและซิลิเฟตจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับแอมโมเนียมคาร์บอเนต ข้อเสียของกระบวนการนี้คือใช้ไอน้ำในปริมาณที่สูงมากและจะสกัดยูเรเนียมได้ไม่ดี โดยเฉพาะแร่ที่มีวานาเดียมปนอยู่เพราะวานาเดียมในสารละลายแอมโมเนียมคาร์บอเนตจะสามารถลดการละลายของยูเรเนียมลงได้ เนื่องจากมีแอมโมเนียมยูเรนิล-วานาเดต (Ammonium uranyl vanadate) เกิดขึ้น นอกจากนี้ก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะยากแก่การนำกลับมาใช้ใหม่ และทำให้เปลืองปริมาตรเนื้อที่ของระบบ เป็นผลให้เปลืองค่าใช้จ่ายสูงขึ้น ในพวกแร่ที่มีซิลิเฟตปนอยู่ด้วยจะมี $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เกิดขึ้นเป็นผลผลิตพลอยได้

ง. การออกซิเดชันในกระบวนการชะล้างด้วยคาร์บอเนต ^(16,64,65)

ยูเรเนียมจะละลายได้ดีในตัวกลางคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนตก็คือ เมื่ออยู่ในรูปของ U^{+6} (Oxidized uranium) ดังนั้นจึงต้องมีการทำออกซิเดชันให้ U^{+4} (Reduced uranium) กลายเป็น U^{+6} และจะต้องรักษามันไว้ไม่ให้ถูกเปลี่ยนไปเป็น U^{+4} อันเนื่องมาจาก

สารรีดิวซิงในแร่หรือโลหะ เหล็กที่เกิดจากการบดด้วย

กระบวนการเกิดออกซิเดชันมี 3 กระบวนการ คือ

1. ออกซิเดชันจากอากาศ (Aeration) เป็นการออกซิเดชันจากอากาศโดยตรง โดยให้อากาศผ่านลงไปของผสมที่จะชะล้าง (Leach slurry) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในถังปachu และแท่งคัธรมตาที่มีการปั่นกววนและปรับความดันได้ แต่วิธีนี้จะให้ผลดีสู่การใส่สารเคมีไม่ได้ เพราะมันค่อนข้างจะยากแก่การจะกระจายอากาศลงไปให้ทั่วพัลฟ์ได้ และออกซิเจนจะละลายได้ต่ำที่สุดทฤษฎีจะทำการชะล้าง ปกติแล้วการกระจายของอากาศในพัลฟ์นั้นจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของเครื่องมือ ชนิดของการปั่นกววน การหมุนเวียนของพัลฟ์ สัดส่วนของอากาศต่อพัลฟ์ วิธีการผ่านอากาศเข้าไป และอื่น ๆ

2. ออกซิเดชันด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Oxidation) เป็นการออกซิเดชันโดยการใส่สารเคมีเติมลงไปในพัลฟ์ตามปริมาณของสทอยชิโอเมตรี พบว่า $KMnO_4$ จะใช้ได้ดี มีประสิทธิภาพในคาร์บอนเนตพัลฟ์สูง และนิยมใช้กันมากที่สุด แต่ก็ยังมีข้อเสียที่ว่า มีราคาแพงและจะทำให้เกิดตะกอน MnO_2 ขึ้นบนผิวของแร่ยูเรเนียม ทำให้ประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้ออกซิเดนต์ที่อาจใช้แทนได้โดยราคาไม่แพงมากนักคือ $NaOCl$, H_2O_2 , $K_2S_2O_8$ และ $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ผสมกับ $0.15M NH_3$) โดย H_2O_2 จะมีข้อเสียที่ว่า มีราคาแพง สลายตัวในสารละลายได้ง่าย และ $NaOCl$ จะมีข้อเสียที่ว่า จะเกิดคลอรีนมากขึ้นในสารละลาย อันทำให้เกิดการกัดกร่อนและเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของค่าง (Alkaline ion exchange process) อย่างไรก็ตาม $NaOCl$ ก็ยังคงเป็นออกซิเดนต์ที่นิยมใช้กัน เพราะมีความแรงในการออกซิไดซ์ต่อหน่วยน้ำหนักสูงและราคาไม่แพง ทำให้คุ้มค่าทางการค้าได้มากที่สุด ส่วนพวกเฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferricyanide) จะไม่นิยมใช้กัน เพราะแพงมากและต้องใช้ในปริมาณมาก แต่อาจจะมีเกิดขึ้นในพัลฟ์ได้ด้วยการเติมคลอไรด์ โซเดียมไซยาไนด์หรือโซเดียมไซยาไนด์ลงไปทำปฏิกิริยากับเหล็กที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบดแร่ นอกจากนี้โซเดียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (Sodium ferrocyanide) ซึ่งมีราคาถูก จะสามารถถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้เป็นเฟอร์ริกไซยาไนด์ ฉะนั้นจึงอาจใช้ได้ดีเช่นกัน ส่วนออกซิเดนต์ตัวอื่น ๆ มีแสดงในตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ผลของออกซิแดนส์ต่อการละลายของ UO_2 (64)

Oxidant	Amount added grams ^a	Percent extraction UO_2
Ag_2SO_4	1.16	100
$K_3Fe(CN)_6$	2.44	100
$HgCl_2$	1.01	96
Hg_2Cl_2	1.75	96
$NaOCl$	0.28	81
$KMnO_4$	0.39	76
H_2O_2	0.13	69
$K_2S_2O_8$	1.00	65
$CuSO_4 \cdot 5H_2O + 0.15MNH_3$	1.85	64
PbO_2	0.89	47
Pb_3O_4	2.54	36
Air (induced by impeller only)	—	20

^aStoichiometric quantity.

๓. ออกซิเดชันด้วยการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Oxidation) (65)

เป็นการออกซิเดชันโดยใช้สารออกซิแดนส์ที่แรงมาก ๆ (ราคาแพง) เพียงเล็กน้อยผสมกับสารออกซิแดนส์ตัวที่สอง (Secondary oxidants) ซึ่งมีราคาถูกกว่าและแรงน้อยกว่า ได้เป็นของผสม เรียกว่า คู่ของสารออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction couple) ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยคู่ของสารนี้จะต้องมีศักดาไฟฟ้าลมน้อยกว่าออกซิแดนส์ตัวที่สอง แต่มีศักดาไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าคู่ของ $UO_2-UO_2(CO_3)_3^{-4}$ แต่พบว่ามีจะไม่ค่อยได้ผลดีเท่าใดนัก เพราะมักจะไม่เกิดออกซิไดซ์ใหม่ เมื่ออยู่ในภาวะรีดิวซ์ หรือ เพราะมีการสลายตัวหรือ เกิดความซับซ้อนขึ้นในสารละลาย

ปกติจะใช้อากาศ, $NaOCl$ และ $K_2S_2O_8$ เป็นแหล่งกำเนิดของสารออกซิแดนส์ตัวที่สอง โดยใช้คู่กับ $HgCl_2$, Ag_2SO_4 , $K_3Fe(CN)_6$, คอมเพล็กซ์ไซยาไนด์เชิงซ้อน (Copper cyanide complex) ทองแดง, นิกเกิล และโคบอลต์เชิงซ้อน ซึ่งคู่ที่จะใช้ได้ผลดีคือ $HgCl_2-NaOCl$, $Ag_2SO_4-NaOCl$, $HgCl_2-K_2S_2O_8$, $KMnO_4-NaOCl$, $Fe(CN)_6^{-3}-NaOCl$ อย่างไรก็ตามการใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนส์ตัวที่สองนั้นจะนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมกันมาก

4.2.3.2.3 การชะล้างด้วยวิธีอิน-ซิตู (In Situ Leaching) ^(16,66,67)

เป็นวิธีการชะล้างที่ง่ายที่สุด อาจจะเรียกว่า เป็นการชะล้างใต้ดิน (Underground leaching) หรือการชะล้างตามธรรมชาติ (Natural leaching) คือจะเป็นการละลายยูเรเนียมออกมาตามธรรมชาติด้วยน้ำใต้ดิน ซึ่งได้ไหลผ่านแหล่งแร่ อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของยูเรนิล ไตรคาร์บอเนต (Uranyl tricarbonate complex) และนำยูเรเนียมกลับออกมาได้ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน

การชะล้างจากแหล่งแร่ (In-place leaching) ที่เรียกว่าการทำเหมืองสารละลาย (Solution mining) นั้นจะเหมาะแก่สินแร่บางชนิดที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เมื่อใช้วิธีปกติที่นิยมกัน วิธีนี้จะสามารถขจัดอันตรายที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินได้ เป็นอย่างมาก และทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย นอกจากนี้ยังขจัดปัญหาจากการขนถ่ายนำแร่ไปโรงงานและการขจัดผลผลิตที่เป็นของเสีย พร้อมทั้งใช้พื้นที่ผิวของ เครื่องที่ติดตั้งน้อยลงและไม่มีหลุมหรือบ่อของแร่เกิดขึ้น

สิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการชะล้างด้วยวิธีนี้คือ คุณลักษณะของสิ่งแวดล้อมในชั้นแร่ โดยสินแร่ควรจะมียูเรเนียมอยู่ข้างล่าง และไม่มีโครงสร้างที่เปราะหรือ เป็นร่องอยู่ล้อมรอบ อันจะก่อให้เกิดการสูญเสียสารละลายไปได้อย่างมาก เราอาจอุดพื้นที่ที่มีรูรั่วเหล่านี้ได้ด้วยการใช้ซีเมนต์หรือพลาสติกหรือเจล (Gel) อุด ⁽⁶⁶⁾ ควรจะมีบ่อหลาย ๆ บ่อให้ไหลเข้าและไหลออกเพื่อป้องกันการสูญเสียของสารละลาย โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า "Flooding" โดยสินแร่จะถูกทำให้อิ่มตัวกับตัวทำละลาย (สารละลายไบคาร์บอเนต-คาร์บอเนต) ที่ความดันและอัตราการไหลต่ำ เพื่อเปิดเป็นช่องของการชะล้าง (Leaching channel) ในสินแร่นั้น ซึ่งจะมีความแตกต่างของความดันของบ่อทั้งสองชนิด โดยเฉพาะบ่อที่ให้ไหลออกนั้นควรจะมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ลดการสูญเสียของสารละลายออกนอกสินแร่ได้มาก เทคนิคอันนี้จะทำบ่อ เป็นรูรูปหกเหลี่ยม โดยตรงกลางเป็นรูใหญ่ให้สารละลายไหลออก แล้วจึงล้อมรอบด้วยรูเล็ก ๆ ให้สารละลายไหลเข้าหลาย ๆ รู ⁽⁶⁶⁾

การทำเหมืองสารละลายนั้นต่อมาได้มีการพัฒนาใหม่ ⁽⁶⁷⁾ โดยให้น้ำใต้ดินไหลผ่านสินแร่ซึ่ง เกิดทับถมกัน เป็นชั้น ๆ และจะต้องประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้ คือ

ก) สินแร่ควรจะปรากฏ เป็นพื้นราบอยู่ในระยะที่ เบื้องล่าง เป็นชั้นที่ไม่มี การไหลซึมผ่านได้

- ข) ลินแร่ต้องอยู่ในตำแหน่งที่อยู่ข้างล่างของแหล่งน้ำใต้ดิน
- ค) ต้องรู้ทิศทางและความเร็วของน้ำที่ไหล
- ง) แร่ยูเรเนียมในลินแร่จะต้อง เป็นชนิดที่ต้องการจะให้ละลายออกมา
- จ) ลินแร่ควรมีขนาดและ เกรด เพียงพอและคุ้มค่าแก่การตัดสินใจกระทำ

ทำการ

ในกรณีที่มีหินปูนหรือปูนขาวปนอยู่ในลินแร่ นั้น และใช้กรดซัลฟูริกใส่ลงไป เป็นตัวละลายนั้น จะก่อให้เกิดตะกอนของคัลเซียมซัลเฟตขึ้น อันจะไปอุดตันช่องของการชะล้าง ฉะนั้นจึงต้องระมัดระวังโดยค้อย ๆ เติมกรดซัลฟูริกลงไป จากความเข้มข้นประมาณ 1 - 1.5 กรัมต่อลิตร จนกระทั่ง มีความเข้มข้นไม่เกิน 5 กรัมต่อลิตร แต่ถ้าใช้กรดไนตริกหรือไฮโดรคลอริก เป็นตัวทำละลายก็จะไม่มีปัญหาการเกิดตะกอนของคัลเซียมซัลเฟต แต่จะมีราคาแพง ทำให้ไม่ค่อยใช้กัน นอกจากนี้กรดไนตริกยังจะทำให้หน้าใต้ดินมีสารประกอบไนเตรด เกิดขึ้น เป็นสิ่งเจือปน

4.2.3.2.4 การชะล้างกองแร่ (Heap Leaching) (16,68)

เป็นวิธีการชะล้างแร่ที่อยู่กับที่หรือกึ่งอยู่กับที่ โดยการปล่อยให้สารละลายไหลผ่านลงสู่กองแร่ด้วยแรงโน้มถ่วง หรือให้ท่วม (Flooding) อยู่บนกองแร่ ซึ่งเรียกว่าการชะล้างด้วยการไหลซึม การชะล้างแร่ด้วยวิธีนี้มักจะใช้กับลินแร่ที่มี เกรดต่ำหรือมีปริมาณเล็กน้อยและอยู่ห่างไกลกว่าปกติ

การชะล้างกองแร่นี้ เครื่องมือที่ใช้จะไม่สิ้น เปลืองค่าใช้จ่ายมากเท่าใดไม่จำเป็นต้องบดแร่ก่อนนำไปชะล้าง การปั่นกวนและการแยกของ เหลว-ของแข็งออกจากกันก็ไม่จำเป็น เพราะสารละลายที่ผ่านออกมาจากกองแร่นั้นมักจะใส

การสร้าง เป็นกองแร่สำหรับการชะล้างด้วยวิธีนี้นั้น ควรจะมีการจัดให้มีระดับและลำค้ำ มีความชันตรงไปยังด้านที่เก็บสารละลายและมีแอ่งค้ำ ๆ คัดขวางด้านกว้างของกองแร่ ซึ่งจะมีความชันลาดลงไปตามด้านข้างของกองแร่ รอบ ๆ พื้นที่กองแร่ที่ใส่ชะล้างนี้จะมีสันค้ำ ๆ ล้อมรอบเพื่อป้องกันมิให้สารละลายไหลออกด้านข้าง โดยพื้นที่ทั้งหมดรวมทั้งด้านในของสันรอบ ๆ จะถูกหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกหรือยางบาง ๆ เพื่อป้องกันมิให้สารละลายไหลซึมสู่ดิน มีท่อพลาสติกหรือแอสเบสตอส (Asbestos) ซึ่งมีรูพรุน วางไปตามความยาวอยู่ข้างใต้ของกองแร่ นี้ เพื่อให้สารละลายไหลซึมผ่านออกมาอยู่ในท่อ นี้ แล้วไหลลงรางไปรวมกันที่หลุมเก็บ ขนาดของกอง

แร่นี้จะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการสร้าง น้ำหนัก ความสามารถในการถูกซึมผ่านของแร่ ช่องว่างที่เหมาะสมและอื่น ๆ ปกติแล้วกองแร่กองหนึ่งควรจะมีความยาว 300 - 400 ฟุต สูง 20 - 30 ฟุต ข้อเสียของวิธีนี้คือ เมื่อชะล้างแร่สมบูรณ์แล้วก็ต้องทิ้งกองแร่ไปเลย

การชะล้างกองแร่จะมีเฟอร์ริก คลอไรด์ เฟอร์ริก ซัลเฟต อัลคาไลน์ คาร์บอเนต และกรดซัลฟูริกปนอยู่ในสารละลาย เพราะในการชะล้างนั้นจะใช้น้ำฝนตามธรรมชาติ หรือพ่นน้ำเป็นสเปรย์ลงไปเป็นระยะ ๆ และใส่พวกไพไรต์หรือเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ลงไป หรือถ้าเป็นแร่ที่มีไพไรต์หรือซัลไฟด์ปนอยู่ก็ไม่ต้องใส่ โดยแบคทีเรียที่มีปนอยู่จะไปเปลี่ยนซัลไฟด์ เป็นกรดซัลฟูริกหรือเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งจะละลายยูเรเนียมได้ดี ปกติยูเรเนียมจะละลายออกมาได้มากเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 16 เดือน แต่ถ้าเติมไพไรต์หรือเฟอร์รัสซัลเฟตลงไป ก็จะใช้เวลาเพียง 20 สัปดาห์หรือน้อยกว่า⁽⁶⁸⁾

การชะล้างกองแร่มีวิธีดำเนินการหลายแบบ คือ

ก. ทำให้ผิวของแร่เปียกด้วยการไหลซึมผ่านอย่างสม่ำเสมอ โดยทำให้เป็นชั่วคราวที่ผิวของกองแร่หรือใช้พ่นแบบสเปรย์

ข. ให้น้ำระบายออกผ่านกองแร่เป็นระยะ ๆ ทำให้เกิด เป็นรีเวอร์สแคปิลลาริตี (Reverse capillarity)

ค. ให้มีการท่วมกองแร่หรือมีการจมของกองแร่ โดยให้สารละลายไหลซึมผ่านขึ้นหรือลงอย่างสม่ำเสมอหรือ เป็นชุด ๆ

ง. ผสมแร่กับกรดเข้มข้น แล้วตามด้วยการอบ (Acid curing) และล้างด้วยสารละลาย

4.2.3.2.5 การชะล้างด้วยแบคทีเรีย (Bacterial Leaching)^(16,53,69,70,71)

แท้จริงแล้วจะมีใช้การใช้แบคทีเรียเป็นตัวชะล้าง แต่แบคทีเรียจะไปเปลี่ยนซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์ให้เป็นกรดซัลฟูริกและการเกิดออกซิเดชันจาก Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนต์และตัวชะล้างสำหรับการละลายยูเรเนียม ปกติจะใช้แบคทีเรียชนิดไทโอบาซิลลัส-เฟอร์โรออกซิแดนต์ (Thiobacillus ferrooxidans) ไทโอบาซิลลัส-ไทโอออกซิแดนต์ (Thiobacillus thiooxidans) และเฟอร์โรบาซิลลัส-เฟอร์โรออกซิแดนต์ (Ferrobacillus ferrooxidans)⁽⁶⁹⁾ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นออโตทรอฟ (Autotrophs) คือ เจริญเติบโตได้เอง

โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนเนตเป็นแหล่งของคาร์บอน และสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแหล่งของไนโตรเจน และได้รับพลังงานจากการออกซิเดชันของสารอินทรีย์พวก เหล็ก เฟอร์รัส ซัลเฟอร์ และโลหะซัลไฟด์ โดยไทโอบาซิลลัส-เฟอร์โรออกซิแดนส์จะออกซิไดซ์ Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} และซัลไฟด์หรือไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) บางตัวไปเป็นซัลเฟอร์ ส่วนไทโอบาซิลลัส-ไทโอออกซิแดนส์จะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไป เป็นกรดซัลฟูริก ดังนั้นวิธีนี้จึงต้องมี เหล็กและซัลเฟอร์ พร้อมทั้งมีระยะเวลาการชะล้างที่ยาวเพียงพอ แต่วิธีนี้จะใช้ไม่ได้ผลกับแร่ที่มีความเป็นด่างสูง (Highly basic ores)

องค์ประกอบสำคัญต่อการชะล้างด้วยแบคทีเรียนี้คือ สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อุณหภูมิ ความชื้น การได้รับอากาศ (Aeration) เวลา แสงสว่าง และส่วนประกอบของสารละลายชะล้าง⁽⁵³⁾ โดยใช้ ในช่วง 1.1 - 2.8 อุณหภูมิประมาณ 18 - 30°ซ.⁽⁷⁰⁾ ควรมีออกซิเจนให้เพียงพอแก่การเกิดออกซิเดชันของซัลเฟอร์ และมีคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ หรือคาร์บอนเนตให้แก่แบคทีเรียอย่างเพียงพอ ส่วนแสงสว่างนั้นพบว่าแสงอุลตราไวโอเลต (Ultra-violet light) หรือแสงแดดจะไปยับยั้งปฏิกิริยาของแบคทีเรียได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขนาดของเม็ดแร่ก็มีผลต่อการชะล้างได้เช่นกัน

ปกติแบคทีเรียพวกนี้จะไม่ทนทานต่อภาวะเงื่อนไขที่จำเป็นต่อการชะล้างจะตายได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 50°ซ. หรือต่ำกว่า 0°ซ. ดังนั้นจึงต้องมีการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียพวกนี้ในอาหารพิเศษ เพื่อให้มีความทนทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาหารพิเศษที่ใช้เลี้ยง เชื้อแบคทีเรียพวกนี้คือ Silverman 9K มีส่วนประกอบดังแสดงในตาราง 4.5

ปกติการชะล้างด้วยแบคทีเรียนี้จะใช้สำหรับการทำเหมืองใต้ดิน

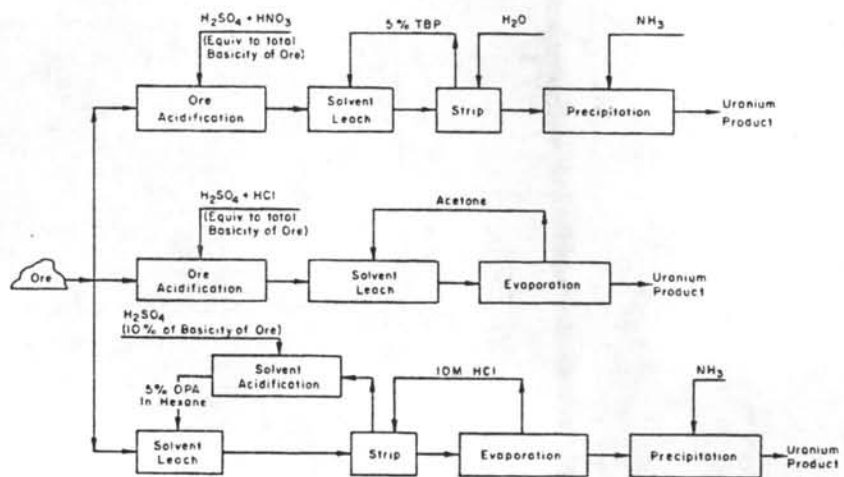
4.2.3.2.6 การชะล้างด้วยตัวทำละลาย (Solvent Leaching)^(16,72)

เนื่องจากในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยตัวทำละลายนั่นจะต้องมีขั้นตอนที่เป็นน้ำ (Aqueous phase) อยู่ด้วย ซึ่งอาจจะขจัดขั้นตอนนี้ออกไปโดยให้ยูเรเนียมถูกสกัดออกจากภาวะของแข็งไปอยู่ในตัวทำละลาย (Solvent phase) เลย ซึ่งเรียกว่า โลโอมทัลเลอร์จี (Lyometallurgy) มี 3 กระบวนการ ดังแสดงในรูป 4.10

ตาราง 4.5 ส่วนประกอบอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิดที่ใช้ในการชะล้าง (Silverman 9K) (71)

Constituent	Concentration grams/liter
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	44.2
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3.0
K_2HPO_4	0.5
KCl	0.1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.02
H_2SO_4	0.5*

*pH adjusted to 2.6 with H_2SO_4



รูป 4.10 แผนภูมิการชะล้างด้วยตัวทำละลาย (72)

4.2.3.3 การแยกของ เหลว-ของแข็งออกจากกัน (Liquid-Solid Separation) (15,73)

กระบวนการแยกของ เหลวออกจากของแข็ง เป็นกระบวนการหนึ่งในไฮโดรเมทัลลอร์จี (Hydrometallurgy) ซึ่งเรียกว่าคลาสสิฟิเคชัน (Classification) อันเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสกัดยูเรเนียม เพื่อแยกสารละลายยูเรเนียมออกจากกากแร่ที่ไม่มีประโยชน์แล้ว (Spent ore residues) แต่อาจจะต้องมีขั้นตอนนี้ในกรณีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนแบบเรซิน-อิน-พัลพ์ (Resin-in-pulp) (RIP) หรือการชะล้างแบบอิน-ซิดู และแบบกองแร่ เพราะแร่จะเป็นเครื่องกรองไปในตัว หรือการชะล้างแบบไหลซึม ซึ่งมีการกรองที่กั้นด้วยผ้าหรือกากมะพร้าว (Coco matting)

ปัญหาของการแยกของ เหลว-ของแข็งออกจากกันนั้นจะเป็นข้อกำหนดในการเลือกใช้วิธีการ เพื่อให้คุ้มค่าทาง เศรษฐกิจ ดังนั้นการแยกของ เหลว-ของแข็งจึงมีหลายวิธี

ก. การแยกของ เหลว-ของแข็งในระบบที่ใช้ด่าง (Liquid-Solids Separations in Alkaline System)

เนื่องจากสารละลายโซเดียม คาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต ที่ใช้ชะล้างแร่ยูเรเนียมนั้น จะมีปฏิกิริยาต่อแมทริกซ์ของหิน (Rock matrix) ไม่รุนแรง ดังนั้นจึงมีโคลนละเอียดคล้ายเมือก (Slime) เกิดขึ้นใหม่น้อยกว่าการชะล้างด้วยกรด การกรองจะช่วยลดการทำให้ น้ำชะล้าง เจือจางลงได้มาก เพราะการทำให้ เจือจางนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการตกตะกอนยูเรเนียมหรือการนำน้ำชะล้างกลับมาใช้ใหม่ แต่การล้างพัลพ์ด้วยคาร์บอเนตนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้เครื่องกรองที่ทนทานต่อการกัดกร่อน อันเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้มาก ส่วนการชะล้างด้วยการไหลซึมนั้นจะรวมขั้นตอนการชะล้างและการแยกของ เหลว-ของแข็ง เข้า เป็นกระบวนการ เดียวกัน

การแยกของ เหลว-ของแข็งออกจากกัน ในระบบที่ใช้ด่างนั้น มีหลายวิธี ดังนี้

1. การกรอง (Filtration) ปกติพัลพ์ที่ถูกล้างด้วยคาร์-

บอเนคั้นจะใช้วิธีการกรองหลาย ๆ ขั้นตอน อาจจะมีการทำให้เข้มข้น (Thickening) เสียก่อนจะนำไปกรอง โดยใช้เครื่องกรองแบบรูปกลองที่มีขดลวด (Wire-wound drum filter) หรือรูปกลองที่บุชั้นในด้วยผ้า (Panel-type drum filter) และใช้น้ำล้างที่ร้อนในขณะทำการกรอง โดยใส่ฟล็อกกูแลนต์ (50% ของแข็ง) ลงไปประมาณ 0.2 - 1.0 ปอนด์ต่อแรม 1 ดัน การกรองทำได้ด้วยวิธีการพ่นสารละลายที่ใช้ล้าง เป็นสเปรย์ลงไปบน เครื่องกรองมาก ๆ หรืออาจใช้วิธีการทำเป็นพัลส์และกรองใหม่เป็นครั้งที่สอง การเป่าจะช่วยขจัดตะกอน เค้กที่เกิดขึ้นได้สะดวก นอกจากนี้ยังจะต้องบีบให้เป็นสูญญากาศด้วยอัตราประมาณ 1 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อตารางฟุตของพื้นที่เครื่องกรอง ปกติจะมีการสูญเสียยูเรเนียมไปปนอยู่กับตะกอนเค้กประมาณ 0.5 - 2% ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้นตอนที่ใช้ และความสามารถซึมผ่าน เค้ก

นอกจากนี้ยังมี เครื่องกรองที่ประกอบด้วยกลอง 3 ใบ โดยใช้ผ้าไนลอนเป็นตัวกรอง และ เครื่องกรองชนิดที่ใช้ความดันแบบ เบิร์ต (Burt-type pressure filter) ซึ่งจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่า เครื่องแบบรูปกลอง แต่ก็สามารถใช้กับแร่ที่เม็ดหยาบกว่าได้

2. การล้าง เคน์ เคอร์ เคอร์ เรนค์-ดี แคน เดชัน (CCD)

ในทิกเคนเนอร์ (Countercurrent Decantation Washing in Thickeners) ปกติการล้างทิกเคนเนอร์จะกระทำก่อนการกรอง โดยใช้สารละลายที่จะใช้ล้างประมาณ 1 ดันต่อแรม 1 ดัน ใส่ลงไป ในทิกเคนเนอร์ ซึ่งจะได้พัลส์ที่มีของแข็งอยู่ประมาณ 33% พร้อมทั้งใส่ฟล็อกกูแลนต์ ลงไปในสารละลายที่ใช้ล้างก่อนที่จะมีการคลุกผสมกัน

3. การล้างด้วยการไหลซึม ปกติจะใช้ถังไม้ขนาดใหญ่มีเส้น

ผ่าศูนย์กลาง 30 ฟุต และลึก 10 ฟุต สำหรับการชะล้างด้วยการไหลซึม โดยมีกากมะพร้าวอยู่ที่ก้นถังเพื่อช่วยป้องกันการถูกขูด วิธีนี้กระทำได้โดยการนำเกลือที่ถูกเผาแล้ว (Salt-roast calcine) มาจุ่มลงในสารละลายคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต ให้มีความเข้มข้นมีของแข็งประมาณ 30 - 40% แล้วจึงนำไปใส่ถังที่จะใช้ล้างด้วยการไหลซึมนี้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปล้างด้วยสารละลายคาร์บอเนต แล้วล้างต่อด้วยน้ำ ซึ่งจะกินเวลาอีกประมาณ 24 ชั่วโมง

4. การทำให้สารละลายจากการชะล้างด้วยคาร์บอเนตใสขึ้น (Clarifying Pregnant Solutions from Carbonate Leaching)⁽⁷³⁾ ในการทำ

ให้สารละลายใสขึ้นนั้นจะใช้เครื่องกรองที่มีการอัดด้วยความดันและมีการปล่อยออกแบบ เปิดหรือแบบ ปิด (Open or closed discharge press) ซึ่งมักจะใช้เครื่องกรองชนิดซ็อก (Filter-sock clarifier) หรือชนิดมีใบพัดแบบมอร์ (Moore-type leaf clarifier) ซึ่งมีการเคลือบเสียก่อน (Precoat filter)

5. การกรองยูเรเนียมที่เข้มข้น (Filtering the Uranium Concentrate) ยูเรเนียมจะตกตะกอนเป็นโซเดียม ไคยูเรเนต เมื่อเติมโซดาฟอสไป ในสารละลายโซเดียม คาร์บอเนต ในการกรองตะกอนยูเรเนียมที่เข้มข้นนี้จะใช้เครื่องกรองชนิดอัดความดันแบบเป็นแผ่นและมีกรอบ (Plate-and-frame filter press) นำตะกอนคล้ายเค้กที่กรองได้ซึ่งจะมีของแข็งประมาณ 50% ไปทำเป็นพัลพ์ใหม่ แล้วจึงนำไปทำให้แห้งบนเครื่องทำให้แห้งด้วยไอน้ำ (Steam-heated drum drier) ปกติจะทำให้เจือจางลงเหลือของแข็งประมาณ 35% ก่อนจะนำไปทำให้แห้ง เพื่อให้ได้เป็นฟิล์มบาง ๆ อันจะสะดวกต่อการทำให้แห้ง

ข. การแยกของเหลว-ของแข็งในระบบที่ใช้กรด (Liquid-Solids Separation in Acid Systems) (15,73)

พัลพ์ที่ถูกล้างด้วยกรดนั้นปกติจะใช้การแยกแบบ CCD ในทิกเคนเนอร์ หรือการกรองหลาย ๆ ขั้นตอนด้วยเครื่องกรองแบบรูปกลอง แต่ทิกเคนเนอร์หรือเครื่องกรองก็อาจจะใช้ในการบดและการชะล้างได้ เพื่อควบคุมความเจือจาง ประหยัดการใช้กรดและทำให้ได้สารละลายใส (Pregnant solution) มากยิ่งขึ้น

การแยกของเหลว-ของแข็งออกจากกันในระบบที่ใช้กรดนั้นมีหลายวิธีดังนี้

1. เคาน์เตอร์เคอร์เรนต์-ดีแคนเตชัน (CCD) ในบางแห่งจะแยกระบบการใส่เม็ดแร่ไว้ต่างหากในคลาสสิไฟเออร์ (Classifier) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะต้องทำให้มีการกระจายและการสูบพ่นในทิกเคนเนอร์ แต่เม็ดแร่ก็อาจจะดำเนินการตกลงนอนกันของพวกตะกอนคล้ายโคลนละเอียดได้ เมื่อใช้ฟล็อกกูแลนต์ใส่ลงไป ดังนั้น เม็ดแร่และตะกอนคล้ายโคลนละเอียดก็จะสามารถแยกออกจากกันได้ด้วยการล้างส่วนที่เป็นเม็ดแร่ในคลาสสิไฟเออร์ และล้างตะกอนโคลนละเอียดในทิกเคนเนอร์ โดยใช้ น้ำล้างประมาณ 2.2 ดันต่อแร่ 1 ดัน ในแต่

ละทิก เคน เนอร์จะถูกทำให้เจือจางลง เหลือของแข็งประมาณ 10% และใส่ฟล็อกกูแลนต์ (0.03%) ลงไปประมาณ 0.1 - 0.2 ปอนด์ต่อแรม 1 ตัน ปกติการไหลข้างใต้ของทิก เคน เนอร์จะมีของแข็ง อยู่ประมาณ 40% ในขณะที่คลาสสิไฟเออร์จะมีของแข็งอยู่ประมาณ 75 - 80%

2. การล้าง เคน์เตอร์ เคน์ เรนต์ในคลาสสิไฟเออร์และไซโคลน (Countercurrent Washing in Classifiers and Cyclones) ปกติจะใช้ไซโครลิกไซโคลน (Hydraulic cyclone) เป็นตัวจัดขนาดของพัลพ์โคลนละเอียดที่โตเกินไป ขจัดและแยกโคลนละเอียดออกจาก เม็ดแร่ ไซโคลนมักจะเชื่อมต่อกับคลาสสิไฟเออร์ ในโรงงานที่สกัดยูเรเนียมจากของผสมที่เป็นโคลนละเอียดโดยใช้เรซิน-อิน-พัลพ์ จะใช้ไซโคลนและคลาสสิไฟเออร์ เพื่อให้โคลนละเอียดปราศจาก เม็ดแร่ปนและ เพื่อล้าง เม็ดแร่แบบ เคน์เตอร์ เคน์ เรนต์ อาจมีการเติมฟล็อกกูแลนต์ลงไป ใน RIP เพื่อยับยั้งมิให้ เม็ดแร่ละเอียดมีการไหลเวียนมากเกินไป แต่ถ้าใช้ฟล็อกกูแลนต์มากเกินไปก็อาจจะทำให้มีโคลนละเอียดจับ เป็นก้อนใน เรซินได้ นอกจากนี้อาจใช้ไซโคลนและคลาสสิไฟเออร์ควบคู่ไปกับทิก เคน เนอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการใส่ เม็ดแร่ที่มีขนาดหยาบ ๗ ลงไปในทิก เคน เนอร์

3. การล้างในทิก เคน เนอร์แบบ เคน์เตอร์ เคน์ เรนต์ (Countercurrent Washing in Thickeners) ปกติจะใช้ทิก เคน เนอร์อยู่ในระหว่าง 4 - 8 เครื่องต่อหนึ่งระบบ ทิก เคน เนอร์จะมีขนาด 30 - 120 ฟุต โดยโคลนละเอียดจะมีความหนาแน่นของของแข็งประมาณ 30 - 40% และพัลพ์ที่ถูกล้างแล้วจะมีความหนาแน่นของของแข็งประมาณ 50 - 60% ใส่ฟล็อกกูแลนต์ลงไปเพื่อให้มีน้ำล้างที่ใสอยู่ประมาณ 2 - 3 ฟุต ประมาณสองในสามของฟล็อกกูแลนต์จะใส่ลงไปในทิก เคน เนอร์ครั้งแรก ส่วนที่เหลือจะใส่ลงไปในการล้างทิก เคน เนอร์ พื้นที่ของทิก เคน เนอร์จะอยู่ในระหว่าง 2 - 6 ตารางฟุตต่อแรม 1 ตันต่อวัน

4. การกรองพัลพ์ที่ถูกล้างด้วยกรด (Filtering Acid-leach Pulps)⁽⁷³⁾ โดยจะกรองพัลพ์ที่ล้างแล้วผ่านเครื่องกรองแบบรูปกลอง 2 ชั้นตอน โดยใช้ผ้ากรองชนิดไดเนล (Dynel filter cloths) จะใช้กาก เป็นฟล็อกกูแลนต์ใส่ลงไปในพัลพ์ เพื่อให้มีอัตราการกรองเป็น 1.5 - 3.0 ตารางฟุตต่อตันต่อวันต่อหนึ่งชั้นตอน ปริมาณที่ใช้ล้างจะอยู่ในระหว่าง 0.25 - 4.0 ตันต่อแรม 1 ตัน ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของสารละลาย (Pregnant solution) ต่อแรมเป็น 1.6 - 1.8

5. การล้างด้วยการไหลซึม จะใส่เม็ดแร่ลงในถังที่ใช้ล้างด้วยการไหลซึม ซึ่งจะมีซาราน-สกรีนเป็นตัวกลางในการกรอง (Saran-screen filter media) อยู่ที่ก้นถัง แล้วทำการล้างด้วยการไหลซึม ล้าง และเอาออกในเวลารวมประมาณ 24 ชั่วโมง นั่นคือ เป็นอัตราประมาณ 2 ตารางฟุตต่อเม็ดแร่ 1 ตันต่อวัน ก่อนจะใส่ฟล็อกกูแลนต์ควรว จะจับเครื่องกรองรูปแผ่นจานกลม (Disk filter) ลงไปในถัง เพื่อขจัดน้ำออกจากตะกอนคล้ายโคลนละเอียด แล้วจึงกรองทึดเคนเนอร์ด้วยเครื่องกรองรูปแผ่นทรงกลมนี้ ปกติจะใช้วิธีนี้กับโรงงานที่มีการเผาแร่ด้วย เกลือ

6. การทำให้สารละลายจากการชะล้างด้วยกรดใสขึ้น (Clarifying Pregnant Solutions from Acid Process) เป็นการทำให้สารละลายหลังการชะล้างแล้วใสขึ้นก่อนจะนำไปเข้ากระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยอีลูเอต (Eluate) และสารละลายสตริป (Strip solution) จะถูกทำให้ใสด้วยการกรองที่มีการอัดด้วยความดันแบบ เป็นแผ่นและมีกรอบ ปกติจะทำให้ใสด้วยอัตรา 1 ตารางฟุตของพื้นที่เครื่องกรองต่อสารละลาย 1 ตันต่อวัน ในการทำให้อีลูเอตใสขึ้นนั้น (บางครั้งจะรวมถึงการขจัดซิลิเกตและเหล็กออกไป) จะตกตะกอนด้วยปูนขาวที่ pH ประมาณ 3.1 - 3.5 แต่อีลูเอตจาก RIP อาจจะยากแก่การทำให้ใสด้วยการกรองที่มีการอัดความดัน เพราะอาจจะมีตะกอนคล้ายโคลนละเอียดปนอยู่ จากนั้นจึงกรองตะกอนโดยใช้เครื่องกรองรูปกลองชนิดมอร์

7. การกรองยูเรเนียมที่เข้มข้น ยูเรเนียมสามารถแยกออกจากอีลูเอตจากการแลกเปลี่ยนไอออนและน้ำล้างสตริปจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้ด้วยการตกตะกอนด้วย NH_3 , MgO และ NaOH โดยใช้เครื่องกรองชนิด เป็นแผ่นและมีกรอบ กับชนิดสวีทแลนด์ (Sweetland-type filter) ในอัตราการกรอง 4 - 5 ตารางฟุตต่อสารละลาย 1 ตันต่อวัน และระบบการตกตะกอน การทึดเคนนิ่งและการกรองนั้นควรมีต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ ปกติจะใช้ผ้ากรองทำด้วยไนลอน จากนั้นจึงนำเค้กที่ได้ (มีของแข็งอยู่ประมาณ 50%) ไปเผาที่อุณหภูมิ 450°ซ.

ค. ฟล็อกกูแลชั่น (Flocculation) (15,16,74,75)

เทคนิคการแยกของ เหลว-ของแข็งในปัจจุบันมักจะใช้ฟล็อกกูแลนต์ เป็นตัวช่วย เพิ่มการตกลงนอนกัน และเพิ่มอัตราการกรองหวกดิน เหนียวและตะกอนคล้าย

โคลนละ เอียคที่เกี่ยวพันอยู่กับสินแร่ยูเรเนียม ซึ่งปกติจะใช้ในกระบวนการกรองและในทิกเคนเนอร์ ฟลอกคูแลนต์ที่ใช้จะเป็นสารพวกโพลีอะครีเลไมด์-โพลีเมอร์ (Polyacrylamide polymers) เช่น แอโรฟลอก (Aerofloc) และเซพาราน (Separan) หรือยางเหนียวจากพืชตระกูลผัก (Vegetable gums) โดยเฉพาะยางจากพืชที่ชื่อกัวร์ (Guar gum) เช่น จากัวร์ (Jaguar) กัวร์เทค (Guartec) และ เบอร์โทไนต์ (Burtonite) หรือกาวที่ทำจากสัตว์ (Animal glues) (74)

กลไกของปฏิกิริยาของฟลอกคูแลนต์นั้นยังไม่แน่นอน (75)

อย่างไรก็ตามพวกโพลีอะครีเลไมด์จะมีปฏิกิริยาเกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "บริดจิง" (Bridging) โดยโมเลกุลที่ต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ของฟลอกคูแลนต์จะถูกดูดซับ (Adsorb) บนอนุภาคที่เป็นของแข็ง และลูกโซ่นี้ก็จะมีไปยึดติดกับผิวของอนุภาคของแข็งหรือลูกโซ่อื่น ๆ ได้อีกด้วย ซึ่งการเกิดการยึดติดกันเช่นนี้จะทำให้ยึดเหนี่ยวอนุภาคเอาเข้าไว้ด้วยกัน เกิดเป็นก้อนฟลอกคูล (Flocule) ขึ้น ส่วนพวกยางจากพืชกัวร์หรือกาวที่ทำจากสัตว์นั้น ก็อาจจะมียุทธศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นบริดจิงหรือ อิเล็กโตรไลติก ซึ่งแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับผิวของอนุภาคของแข็งนั้น จะถูกทำให้สะท้อน เป็นผลให้อนุภาคถูกดึงไปด้วยกันและถูกยึดติดกัน (Cohesive force)

โมเลกุลของฟลอกคูแลนต์จะยึดเกาะกับผิวของของแข็งและถูกดูดซับออกจากสารละลายได้อย่างรวดเร็ว ฟลอกคูแลนต์จะยังมีปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อสารละลายยิ่งเจือจางมากขึ้น ดังนั้นจึงควรใส่ลงไปทีละน้อย ๆ และค่อย ๆ ทำการผสมกัน เพราะอนุภาคของแข็งจะเกาะกับโมเลกุลของฟลอกคูแลนต์ได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้ามีการทำการผสมหรือบีบ (ปั่นกววน) ต่อไปก็จะทำให้โมเลกุลที่เกาะติดกันนั้นหลุดออกจากกัน ทำให้ก้อนฟลอกคูลถูกทำลายไป อันจะต้องทำฟลอกคูเลชันขึ้นใหม่อีก ทำให้เปลืองฟลอกคูแลนต์

ปกติน้ำล้างและสารละลายที่ได้จากการกรองจะไม่ใสเสมอไป เพราะแร่บางชนิดหรือแร่บางขนาดจะค้ำทานฟลอกคูเลชันได้ อาจแก้ไขให้ได้สารละลายใส โดยการใส่ฟลอกคูแลนต์ผสมกัน การใช้พวกเจลาตินหรือกาวใส่ผสมลงไปกับฟลอกคูแลนต์ก็ยอมใช้ได้ดีเช่นกัน

การเตรียมและเก็บพวกโพลีเมอร์สังเคราะห์นั้นจะไม่มีปัญหา แต่พวกยางจากพืชจะต้องเก็บไว้ในที่แห้ง เพื่อมิให้จับกันเป็นก้อนและให้มีลักษณะเรียบเกลี้ยง ปกติสารละลายฟลอกคูแลนต์จะเตรียมโดยใช้ผงของกาวหรือยางเหนียวใส่ลงไป ในน้ำ พร้อมทั้งมีการ

ป็นกวนที่อุณหภูมิ 80°ซ. ประมาณ 15 นาที ควรจะใส่ฟอกสารฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ลงไป เป็นตัวยับยั้งการเกิดการหมัก การเตรียมสารละลายของกาวหรือยาง เหนียวด้วยวิธีนั้นจะสามารถเก็บไว้ได้หลายวันในอุณหภูมิห้อง

องค์ประกอบสำคัญคือการเลือกใช้ฟลอกคูแลนต์คือ ชนิดของฟลอกคูแลนต์ ปริมาณที่ใช้ วิธีการเติม ความเข้มข้นของสารละลาย ชนิดของระบบที่ใช้ (กรดหรือด่าง) ความหนาแน่นของของผสม pH ของของผสม ลักษณะทางกายภาพของของแข็งในด้านขนาด และของแร่ ลักษณะทางเคมีของของแข็ง ส่วนประกอบของน้ำล้างและอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดขึ้น และลำดับของการเติมสาร⁽¹⁵⁾

ในบางกรณีอาจมีสารละลายถูกเก็บกักไว้ในฟลอกคูแลนต์ อันยากแก่การล้างออก แต่ในขณะเดียวกันก็อาจจะป้องกันการมีความหนาแน่นสูงของตะกอน เค้กที่กรองได้ หรือการไหลข้างใต้ของทึคเคนเนอร์ ทำให้การล้างตะกอนและการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายนั้นมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงควรทำให้เป็นพัลฟ์ใหม่ขึ้นอีกในระหว่างการทำทึคเคนเนอร์ เพื่อทำลายฟลอกคูแลนต์และการแทนที่ของสารละลาย แล้วจึงทำฟลอกคูแลนต์ใหม่ขึ้นอีก ซึ่งจะใช้น้อยกว่าตอนแรก

ปกติมักจะนิยมใช้โซลิวชันของเลมโบคทั้งในระบบกรดและด่าง โดยใช้ประมาณ 0.04 - 0.1 ปอนด์ต่อแรม 1 ตัน สารละลายของฟลอกคูแลนต์ที่เก็บไว้มักจะเตรียมเป็น 1% และเวลานำมาใช้จะทำให้เจือจางเป็น 0.025 - 0.05% ส่วนยางเหนียวของพิชกัวร์จะใช้ได้ดีกับการกรองสารละลายด่าง

4.2.4 การทำให้เข้มข้นและบริสุทธิ์ (Concentration and Purification)

การทำให้ยูเรเนียมเข้มข้นขึ้นและมีความบริสุทธิ์นี้ จะมีความจำเป็นและสำคัญต่อการผลิตยูเรเนียมให้ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากในการชะล้างด้วยกรดนั้น เป็นกระบวนการที่ไม่ซีเลกทีฟ (Non-selective) เพราะจะมีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากยูเรเนียมละลายออกมาด้วย และจะได้สารละลายที่มีเกรดต่ำในปริมาณที่มาก ส่วนการชะล้างด้วยด่างนั้นจะซีเลกทีฟมากกว่าการชะล้างด้วยกรด ดังนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนและการสกัดด้วยตัวทำละลายจึงเป็นเทคนิคสำคัญและคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจ ต่อการที่จะทำให้ยูเรเนียมเข้มข้นและบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยด่าง (Alkaline ion exchange) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการ

ตกตะกอน โดยมีสิ่งเจือปนน้อยลง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน⁽⁷⁶⁾

การสกัดด้วยตัวทำละลายและการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินนั้น เป็นการแลกเปลี่ยนกันระหว่างไอออนของสารละลายที่เป็นน้ำ (Aqueous solution) และเรซินหรือตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นของเหลว ซึ่งจะทำให้ได้ยูเรเนียมจากน้ำชะล้างในปริมาณที่สูงและมีซีเลกทิฟสูงด้วย ส่วนการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นจะเป็นวิธีที่ของเหลวกับของเหลวแยกกัน เป็นคนละชั้นและสัมผัสกัน ซึ่งมีการกระทำแบบค่อเนื่องกัน ข้อดีของการสกัดด้วยตัวทำละลายคือจะมีซีเลกทิฟดีกว่า และสามารถกระทำได้หลาย ๆ ทาง (Versatility) มากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน อย่างไรก็ตามการสกัดด้วยตัวทำละลายจะกระทำไม่ได้คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เมื่อใช้กับน้ำชะล้างคาร์บอนเนตหรือส่วนผสมของวัตถุต่าง ๆ (Slurry) ในขณะที่การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินจะให้ได้ผลดี การเกิดอิมัลชัน (Emulsion) ขึ้นในตัวทำละลายก็เป็นปัญหาที่สำคัญ และการสูญเสียตัวทำละลายไปเล็กน้อยกับส่วนที่จะทิ้ง ก็อาจจะเป็นมลพิษในกระแสน้ำ และทำให้เปลืองค่าใช้จ่าย แต่การสกัดด้วยตัวทำละลายจะสัมพันธ์กับปริมาตรและเกรดของน้ำชะล้างได้มากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน ซึ่งเกรดของสารละลายชะล้างที่จะใช้ได้ดีคือประมาณ 1.0 กรัม U_3O_8 ต่อลิตร

4.2.4.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ก. เรื่องทั่วไป^(16,77,78,79)

การแลกเปลี่ยนไอออนนั้น เป็นการทำให้พวกโลหะมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งการให้น้ำให้บริสุทธิ์ โดยอาศัยคุณสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออนต่อกันในสารละลายของสารประเภทหนึ่ง ซึ่งสารประเภทนี้อาจเป็นสารที่หาพบได้ในธรรมชาติ เช่น กรีนแซนด์ (Greensands) และซีโอไลต์ (Zeolites) หรือสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น เช่น อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) โพลีเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers) และเรซินอินทรีย์ (Organic resins) โดยทั่วไปแล้วโลหะส่วนใหญ่จะไม่กระทำการให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน เพราะมีวิธีอื่นที่ง่าย ดี และถูกกว่า

เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins)

นั้นถือว่าเป็นกรดหรือด่างที่ไม่สามารถจะถูกละลายได้ รวมทั้งเกลือของกรดหรือด่างเหล่านี้ก็จะไม่ถูกละลายได้เช่นกัน⁽⁷⁸⁾ เรซินนี้จะประกอบด้วยแมคโคร-โมเลกุล (Macro-molecules) ที่

รวมตัวกัน เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ลูกโซ่ (Polyelectrolyte chains) โดยลูกโซ่นี้จะเชื่อมโยงกัน (Cross-linked) และมีกลุ่มที่เป็นกรดหรือด่าง (Acidic or basic groups) เป็นจำนวนมากบรรจุอยู่ ซึ่งสามารถจะเกิดไอออนในเซชัน (Ionization) ได้ ทำให้พวกไอออนลบอิสระ (Free anions) หรือไอออนบวกอิสระ (Free cations) ที่เกิดขึ้น สามารถจะแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกหรือไอออนลบอื่น ๆ ในสารละลายได้ ดังนั้นในสภาวะของจลน์สมดุลย์ (Dynamic equilibrium) จะมีไอออนลบและไอออนบวกใหม่เกิดขึ้น และสามารถจับกับกลุ่มที่เป็นกรดหรือด่างแทนที่ไอออนเดิมได้

ขั้นตอนการ เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนมีดังนี้ (79)

1. นำไอออนในสารละลายผ่านของเหลวที่เป็นฟิล์ม (Liquid film) อยู่รอบ ๆ เม็ดเรซิน (Resin bed)
2. มีการแพร่กระจายไอออนที่เข้ามา (Ingoing ion) ผ่านเข้าไปในเรซิน
3. จะมีปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกันทางเคมีระหว่างไอออนที่เข้ามากับไอออนที่จะออกไป (Outgoing ion) เกิดขึ้นภายในเรซิน
4. มีการแพร่กระจายไอออนที่ออกไปนั้น ผ่านออกไปยังผิวของ เม็ด เรซิน
5. เกิดการแพร่กระจายของไอออนที่ออกไป ผ่าน เข้าไปตลอดของเหลวที่เป็นฟิล์มออกไปยังสารละลาย (Bulk solution)

หลักการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น จะอาศัยการที่ไอออนลบเชิงซ้อนของยูเรเนียมในสารละลายของกรดซัลฟูริก เจือจางหรือโซเดียม คาร์บอเนต ถูกดูดซับจากน้ำชะล้างได้โดยใช้เรซินสังเคราะห์และภายใต้ภาวะที่เหมาะสม เมื่อยูเรเนียมถูกทำให้เข้มข้นขึ้นในเรซินแล้ว จึงแทนที่ด้วยสารละลายของเกลือที่เหมาะสม จะได้น้ำล้างที่มียูเรเนียมบริสุทธิ์สูงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงดีกว่าการตกตะกอนโดยตรงในแง่ของปริมาณของสารละลายยูเรเนียมจะลดลง สามารถรู้ปริมาณของยูเรเนียมที่แยกออกมาจากสารละลายได้ และได้แค้กของยูเรเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง

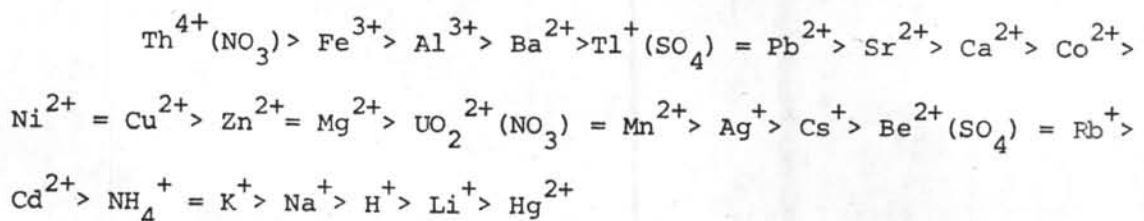
ข. เคมีของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

1) เรซิน

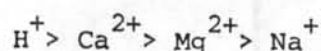
เรซิน เป็นสารสังเคราะห์ซึ่งมีหลายชนิด ดังแสดงในตาราง 4.6 และ 4.7 ถ้าแยกตามความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จะแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่⁽⁸⁰⁾ คือ

ก. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation-Exchange Resins) หรืออาจเรียกว่าตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchangers) ซึ่งประกอบด้วยสองกลุ่มย่อยคือ เรซินที่เป็นกรดแก่ (Strongly acid resin) โดยมีกลุ่ม $-SO_2OH$ หรือ $-OH$ หรือ $-CH_2SO_2OH$ อยู่ในเรซิน กับกลุ่มเรซินที่เป็นกรดอ่อน (Weakly acid resin) โดยมีกลุ่ม $-COOH$ อยู่ในเรซิน เรซินพวกนี้จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกจากกลุ่มที่เป็นของเรซินได้กับไอออนที่เป็นบวกของเกลือที่มีอยู่ในสารละลายซึ่งสัมผัสกับเรซินนี้ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีหลายชนิด ดังในตาราง 4.8

ปกติเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกนี้จะใช้ในรูปของกรดอิสระหรือไฮโดรเจน และรูปของเกลือ (โซเดียมหรือแอมโมเนียม) ซึ่งศักดาการแลกเปลี่ยน (Exchange potential) ของการดูดซับคือเรซินที่เป็นกรดแก่ นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลวาเลนซี และความเข้มข้น โดยพบว่าที่สารละลายกรดที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้ไอออนที่มีวาเลนซีต่ำแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซีสูง แต่ถ้าในสารละลายกรดเจือจางนั้น พวกไอออนที่มีวาเลนซีสูงจะแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าพวกไอออนที่มีวาเลนซีต่ำ ดังลำดับต่อไปนี้⁽⁸⁰⁾



ส่วนในเรซินที่เป็นกรดอ่อนนั้น จะมีลำดับการแลกเปลี่ยนดังต่อไปนี้⁽⁸⁰⁾



ศูนย์พัฒนาเทคโนโลยี
 วิทยาลัยเทคโนโลยีอาชีวศึกษา
 กรุงเทพมหานคร

ตาราง 4.6 องค์ประกอบของเรซินสังเคราะห์ (80)

Type of Resin Matrix	Functional Group(s)	Characteristics
Cross-linked polystyrene.	-SO ₃ H	Strongly acid cation exchangers
Cross-linked polystyrene.	Quaternary ammonium type	Strongly basic anion exchangers
Phenolic	-OH, -CH ₂ SO ₃ H, -SO ₃ H	Strongly acid cation exchangers
Phenolic	-OH, -NH ₂ , -NHR, -NR ₂ , -NR ₂ R ₃	Weakly basic anion exchangers
Cross-linked polystyrene.	-NH ₂ , -NHR, -NR ₂ , -NR ₂ R ₃	Weakly basic anion exchangers
Cross-linked methacrylic acid	-COOH	Weakly acid cation exchangers

ตาราง 4.7 เรซินสังเคราะห์ที่ใช้ในทางต่างๆ (81)

Type	The Permuit Co. Ltd. London	Rohm & Haas, U.S.A.	Chemical Process Co., U.S.A.	Dow Chemical Co., U.S.A.	Farbenfabriken Bayer, Leverkusen	I. G. Farben Wolfen
Zeo-Karb 215	Amberlite IR-1	Duolite C-10	Dowex 30	Lewatit KS (or DN)	Lewatit PN	Wofalit KS
Zeo-Karb 315	Amberlite IR-100	Duolite C-3	—	—	—	Wofalit P
Zeo-Karb HI	—	—	—	—	—	—
Zeo-Karb Na	—	—	—	—	—	—
Zeo-Karb 216	Amberlite IRC-50	Duolite CS-100	—	Lewatit C	—	Wofalit C
Zeo-Karb 226	Amberlite IR-50	—	—	Lewatit KSN*	—	—
Zeo-Karb 225	Amberlite IR-120	Duolite C-20	Dowex 50* (Nalcite HCR)*	—	—	—
De-Acidite E	Amberlite IR-4B	Duolite A-2	(Nalcite WBR)*	Lewatit M1	Wofalit M	Weak base anion-exchangers
De-Acidite G*	Amberlite IR-45	—	—	Lewatit M2	—	Strong base anion-exchangers
De-Acidite FF*	Amberlite IRA-400*	—	Dowex 1* (Nalcite SAR)*	—	—	Porous anion-exchangers
Decolorite	—	Duolite S-30	—	—	—	Sodium aluminum silicate exchangers
Decalso Y	—	—	—	—	—	—

* These resins are in bead form.

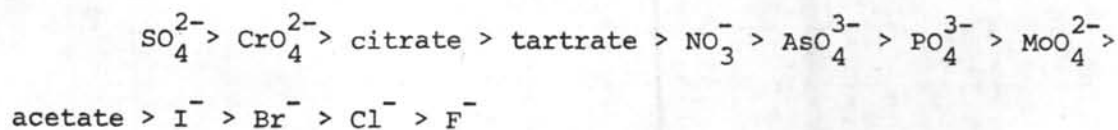
ตาราง 4.8 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่าง ๆ (80)

Commercial Name	Type	Functional Group(s)	Total Exchange Capacity in mg-equivalents per ml (backwashed and drained) (approx.)
Amberlite IR-120	Cross-linked polystyrene	-SO ₃ H	2.0
Zeo-Karb 215	Phenolic	-OH ; -SO ₃ H	1.1
Zeo-Karb 225	Cross-linked polystyrene	-SO ₃ H	2.1
Amberlite IRC-50	Cross-linked methacrylic acid	-COOH	3.8*†
Zeo-Karb 226	Cross-linked methacrylic acid	-COOH	2.0*

* Exchange capacities increase markedly in highly alkaline media.
† Capacity at pH 7.0.

ข. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion-Exchange Resins) หรืออาจเรียกว่าตัวแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchangers) จะประกอบด้วยสองกลุ่มย่อยคือ กลุ่มเรซินที่เป็นด่างแก่ (Strongly basic resin) ซึ่งจะมีกลุ่มควอเตอรารี - แอมโมเนียม (Quaternary ammonium group) (-NR₃⁺ OH⁻) อยู่ในเรซิน กับกลุ่มเรซินที่เป็นด่างอ่อน (Weakly basic resins) ซึ่งจะมีกลุ่ม -OH หรือ -NH₂ หรือ -NHR หรือ -NR₁R₂ อยู่ในเรซิน เรซินพวกนี้จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบจากกลุ่มที่เป็นด่างของเรซินได้กับไอออนลบในสารละลายซึ่งสัมพันธ์กับเรซินนี้ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบมีหลายชนิด ดังแสดงในตาราง 4.9

ปกติจะใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบนี้ในรูปของคลอไรด์ ไฮดรอกไซด์ ซัลเฟตและไนเตรต ซึ่งการแลกเปลี่ยนของเรซินนี้จะเกิดได้ดีแค่ไหนจะขึ้นอยู่กับว่าเลขซีดิงลำดับต่อไปนี้⁽⁸²⁾



ในอุตสาหกรรมการผลิตยูเรเนียมนั้นจะใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนลบที่เป็นด่างแก่หรือปานกลาง เรซินพวกนี้จะมีลักษณะเป็นเจลที่ค่อนข้างแข็ง (Semi-rigid gels) รูปทรงกลม (Spherical beads) ขนาดและชนิดของการเกี่ยว-

ตาราง 4.9 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่าง ๆ ⁽⁸⁰⁾

Commercial Name	Type	Functional Group(s)	Total Exchange Capacity in mg-equivalents per ml (backwashed and drained) (approx.)
Amberlite IRA-400	Cross-linked polystyrene	Quaternary ammonium groups	1.2
Amberlite IRA-401	Cross-linked polystyrene	Quaternary ammonium groups	1.0
Amberlite IRA-402	Cross-linked polystyrene	Quaternary ammonium groups	1.35
Amberlite IRA-410	Cross-linked polystyrene	Quaternary ammonium groups	1.35
Amberlite IR-4B	Phenolic	-OH ; nuclear amino groups	2.5
Amberlite IR-45	Cross-linked polystyrene	-N(C ₂ H ₅) ₂	2.0
De-Acidite FF	Cross-linked polystyrene	Quaternary ammonium groups	1.5
De-Acidite E	Phenolic	-OH ; nuclear amino groups	1.7
De-Acidite G	Cross-linked polystyrene	-N(C ₂ H ₅) ₂	1.5
De-Acidite H	Cross-linked polystyrene	>N(CH ₃) ₂ ⁺	1.3
De-Acidite J	Cross-linked polystyrene	Primary, secondary and tertiary amine groups	3.0
Decolorite 'Asmit'	Colour-removing resin		

พันกันของโพลีเมอร์นี้จะแตกต่างกันในแต่ละบริษัทที่ผลิต และจะมีผลต่อคุณลักษณะทาง เคมีและเชิงกลของเรซิน ^(83,84) ซึ่งเรซินไอออนลบที่นิยมใช้กับยูเรเนียมมีแสดงในตาราง 4.10

พวกเรซินไอออนลบที่เป็นด่างแก่ นั้น จะมีกลุ่มของควอเตอร์นารี - แอมโมเนียม เป็นไอออนส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยา เรซินนี้เตรียมได้โดยการทำคลอโรเมทิลเลชัน (Chloromethylation) กับเม็ดโพลีสไตรีน (Polystyrene bead) แล้วจึงนำมาทำปฏิกิริยากับเทอร์ติเอรี เอมีน (Tertiary amine) ⁽⁸³⁾ จะได้ เป็น เรซินที่อยู่ในรูปของคลอไรด์ (Chloride form) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูป 4.11 แต่เรซินที่สังเคราะห์ขึ้นบางชนิดจะมีกลุ่มไพริดีเนียม (Pyridinium groups) แทนกลุ่มเอมีน (Amine groups) ⁽⁸⁶⁾ ปกติเรซินไอออนลบที่เป็นด่างแก่นี้จะถูกไอออนไนซ์ได้สูง ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้ใน pH ช่วงกว้าง ไม่ละลายในตัวทำละลายธรรมดา เสถียรอยู่ในที่ซึ่งไม่มีสารรีดิวซ์หรือออกซิไดซ์แรง ๆ และทนต่ออุณหภูมิได้จนถึงประมาณ 60 °C.

ตาราง 4.10 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบที่ใช้กับยูเรเนียม (16)

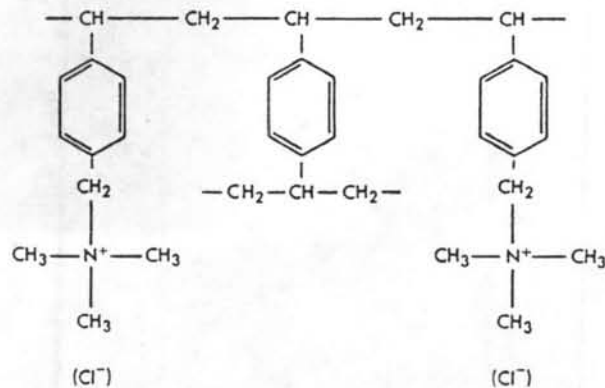
Resin	Manufacturer	Total capacity	
		Milli-equivalents per gram	Milli-equivalents per milliliter
Amberlite IRA-400	Rohm & Haas Co.	3.9	1.2
Amberlite IRA-405	Rohm & Haas Co.	—	1.6
Amberlite IRA-425 ^a	Rohm & Haas Co.	—	1.3
Dowex 1	Dow Chemical Co.	3.5	1.33
Dowex 11	Dow Chemical Co.	4.0	1.24
Dowex 21K ^a	Dow Chemical Co.	4.5	1.25
Duolite A-101D	Diamond Alkali Co.	4.2	1.4
Nalcite	^b	—	—
Ionac A-580	Ionac Chemical Co.	—	1.30 (min.)
Ionac A-590 ^a	Ionac Chemical Co.	—	1.30 (min.)
Permutit SK	^c	4.3	1.40
Permutit SKB ^a	^d	—	—

^aAvailable as coarse-bead product for use in resin-in-pulp circuits.

^bDowex resins marketed by Nalco Chemical Company.

^cSame as Ionac A-580.

^dSame as Ionac A-590.



ร่างของควอเตอร์นารี-แอมโมเนียมซึ่งเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (85)

นอกจากนี้ตัวแลกเปลี่ยนไอออนทั้งสองชนิดจะมีคุณสมบัติพอสรุปได้ ดังแสดงในตาราง 4.11

ตาราง 4.11 คุณสมบัติของตัวแลกเปลี่ยนไอออนทั้งสองชนิด (80)

	Cation Exchangers		Anion Exchangers	
	Strongly acid	Weakly acid	Strongly basic	Weakly basic
Functional group	Sulphonic acid	Carboxylic acid	Quaternary ammonium	Amino
Effect of increasing pH value on capacity	No effect	Increases	No effect	Decreases
Stability of salts	Stable	Hydrolyse on washing	Stable	Hydrolyse on washing
Conversion of salts to free acid or free base	Requires excess of strong acid	Readily regenerated	Requires excess of sodium hydroxide	Readily regenerated with sodium carbonate or ammonia
Rate of exchange	Rapid	Slow unless ionised	Rapid	Slow unless ionised

2) แอมเบอร์ไลต์-ไออาร์เอ-400 (Amberlite IRA-400) (80)

เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบที่เป็นต่างแก้ว โดยมี โพลีสไตรีนเกี่ยวพันอยู่กับ 3 - 5% ไดวินิล-เบนซีน (Divinyl benzene) กลายเป็นกลุ่มของควอเตอร์นารี-แอมโมเนียม ปกติจะอยู่ในรูปของคลอไรด์มีลักษณะเป็นเม็ด (Bead) ขนาด 20-50 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 650 กรัม (เปียก) ต่อลิตร จะไม่เกิดปฏิกิริยาหรือทนทานต่อตัวทำละลายทั่ว ๆ ไป กรดแก่หรือด่าง และสารออกซิไดซิงหรือรีดิวซิงที่ไม่รุนแรง แต่ไม่ควรจะให้สัมผัสกับสารออกซิไดซิงที่รุนแรงโดยเฉพาะ เมื่อมีความเข้มข้นสูง ต้องให้เรซินมีความชื้นและมีลักษณะบวมอยู่เสมอ ไม่ควรปล่อยให้แห้งซึ่งจะแตกได้ง่าย ปริมาณของเรซินจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20% เมื่อเปลี่ยนรูปจากคลอไรด์ไปเป็นไฮดรอกไซด์ คุณสมบัติอื่น ๆ มีแสดงในตาราง 4.12

สารละลายที่มีกรดหรือเกลือที่เข้มข้นและมีไอออนลักษณะพิเศษปรากฏอยู่นั้น จะไม่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินชนิดนี้ ในสารละลายซึ่งมี pH ต่ำกว่า 10 นั้น เรซินนี้จะสามารถดูดซับไอออนลบไว้ได้หมด เรซินในรูปของไฮดรอกไซด์นั้นอาจจะขจัดพวกฟีนอล (Phenols) ครีซอล (Cresols) ซิลิกา และกรดที่ไอออนไนซ์ได้

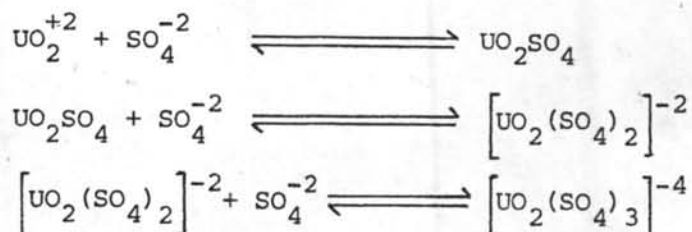
ตาราง 4.12 คุณสมบัติของ Amberlite IRA-400⁽⁸⁰⁾

Shipping Weight (lb/ft ³)	42
Moisture Content (%)	42-48
Effective Size (mm)	0.38-0.45
Total Exchange Capacity : Kg as CaCO ₃ per ft ³ resin	26.2
meq./ml wet resin	1.2
meq./g dry resin	3.3
Maximum Operating Temperature (°F)	140(OH form) 170(Cl form)
Effective Operating pH Range	0-12

อ่อน ๆ ออกจากสารละลายนั้นได้ และเนื่องจากเรซินนี้เป็นชนิดค่างแก่ ฉะนั้นจึงอาจเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้แม้กระทั่งที่ pH เป็นกลาง

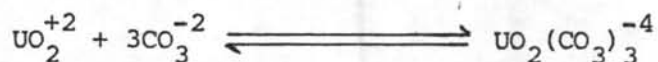
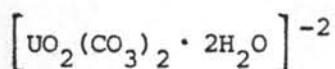
3) ปฏิกริยาของการแลกเปลี่ยนไอออน^(15,16,24)

ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นจะรวมถึงการที่ ยูเรนิลไอออน (U⁺⁶ or UO₂⁺²) เกิดเป็นไอออนลบเชิงซ้อน (Anionic complex) ได้กับซัลเฟตไอออน (SO₄⁻²) และคาร์บอเนตไอออน (CO₃⁻²) โดยในสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางนั้น ยูเรนิล-แคทไอออน (Uranyl cation) ยูเรเนียมซัลเฟต และยูเรเนียมซัลเฟตไอออนลบเชิงซ้อน (-2,-4) จะมีเกิดขึ้นดังสมการ



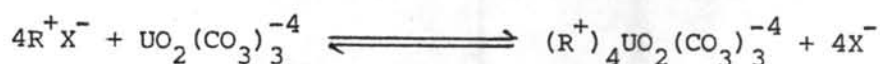
ส่วนในสารละลายคาร์บอเนตนั้น จะเกิดเป็นยูเรนิล

ไตรคาร์บอเนตไอออนลบเชิงซ้อน (+4) ดังสมการ แต่ถ้าสารละลายเจือจางมากจะได้เป็น



การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้น เมื่อเรซินแลกเปลี่ยน

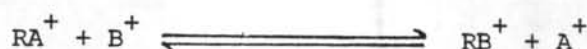
ไอออนลบได้คู่กับไอออนลบเชิงซ้อนเหล่านี้ ดังสมการ



โดย R^+ = the fixed ion-exchange sites of the resin

X^- = mobile ion = Cl^- or NO_3^-

ปฏิกิริยาของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะแปรผันได้ ดังตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในปฏิกิริยา (24)



ดัชนีที่แสดงการเข้าร่วมจับ (Index of affinity) ของเรซินต่อไอออนทั้งสองคือ

K_C (Selectivity coefficient of Thermodynamic equilibrium constant)

$$K_C = \frac{[\text{RB}^+][\text{A}^+]}{[\text{RA}^+][\text{B}^+]}$$

ปกติค่า K_C จะคงที่ แต่ค่าที่ใช้วัดสัมพันธภาพของการแลกเปลี่ยนไอออนคือ D_B (Distribution coefficient)

$$D_B = \frac{[\text{RB}^+]}{[\text{B}^+]}$$

ค. ลักษณะทางกายภาพของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (15, 87, 88)

1) ความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange

capacity) จะขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Fixed ion-exchange sites) ในเรซิน ซึ่งสามารถจะทราบได้ด้วยการวัดโมไบล์ไอออน (Mobile ions) ที่ถูกดูดซับหรือหลุดออกโดยเรซินซึ่งทราบน้ำหนักและปริมาตร ปกติแล้ว เรซินที่ใช้กับยูเรเนียมนั้นควรมีความสามารถแลกเปลี่ยนรวมอยู่ในช่วง 3.5 - 5.0 มิลลิอีควิวาเลนต์ (Milliequivalents) (meq) ต่อกรัม (เรซินแห้ง) หรือ 1.2 - 1.8 มิลลิอีควิวาเลนต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (เรซินเปียกหรือ wet settled resin) หรือ 100 กรัมต่อลิตร (เรซินเปียก)

2) ไฮเดรชัน (Hydration) เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดจะรวมตัวกับน้ำได้ง่าย (Hydrophilic) เพราะการมีกลุ่มตำแหน่งของการแลกเปลี่ยนไอออนนั่นเอง แม้ว่าตำแหน่งเหล่านี้จะไม่มีน้ำก็ตาม⁽⁸⁷⁾ ดังนั้นไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยน จำนวนโมไบล์ไอออน รวมทั้งกลุ่มและชนิดของการเกี่ยวพันของโพลีเมอร์ในเรซิน ปกติเรซินที่ใช้กับยูเรเนียมควรมีความชื้นอยู่ในระหว่าง 40 - 60%

3) ขนาดของเรซิน ในการใช้เครื่องมือแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์ (Columnar Operation) นั้น จะใช้ขนาดเม็ดเรซินอยู่ในระหว่าง 0.3 - 0.9 มิลลิเมตร (+48 ถึง -16 เมช) หรือเฉลี่ย 0.5 มิลลิเมตร⁽⁸²⁾ ซึ่งจะเหมาะสมต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน อัตราการแลกเปลี่ยนและคุณลักษณะทางไฮดรอลิก (Hydraulic) ของเรซิน ส่วนเครื่องมือแลกเปลี่ยนไอออนแบบ RIP จะใช้ขนาดเม็ดเรซินอยู่ในระหว่าง 0.84 - 1.6 มิลลิเมตร (+20 ถึง -10 เมช) เพื่อให้เหมาะแก่การแยกเม็ดเรซินและตะกอนโคลนละเอียดของลินแร่ออกจากกัน

4) ความหนาแน่น เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนควรมีความหนาแน่นจริง (True density) มากกว่าตัวกลางที่ใช้ โดยความหนาแน่นที่ปรากฏ (Apparent or Bulk density) จะวัดจากน้ำหนัก (ปอนด์) ของเรซินที่ถูกล้างและเปียกซึ่งแทนที่ปริมาตรที่ว่าง (Void space) 1 ลูกบาศก์ฟุต ปกติที่ว่างนี้จะมีประมาณ 40% ของปริมาตรทั้งหมด ความหนาแน่นที่ปรากฏของเรซินที่ใช้กับยูเรเนียมจะอยู่ในระหว่าง 38 - 45 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นจริงดังนี้

$$\text{apparent density} = \text{true density} (1 - \text{fraction of void space})$$

5) การสึกกร่อนและการสูญเสียการละลาย (Attrition And Solubility Losses) การสูญเสียอันเนื่องจากการสึกกร่อนของเรซินนั้นจะเป็นผลมาจากการบวมและการสัมผัสกันของเรซิน (คือการถลอกที่เกิดจากเรซินสัมผัสกันและจากเรซินที่สัมผัสกับอุปกรณ์ที่ใช้) การสูญเสียโดยการสึกกร่อนนี้มักจะเกิดขึ้นมากในการแลกเปลี่ยนแบบคอลัมน์ชนิดฟิกซ์-เบด (Fixed-bed column) แต่ก็อาจจะเกิดขึ้นบ้างในแบบ RIP ส่วนการสูญเสียการละลายนั้นจะเกิดขึ้นน้อยมาก

6) คุณลักษณะทางไฮดรอลิก (Hydraulic Characteristics) จะคล้ายกับอนุภาคทรงกลมอื่นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญต่อการแลกเปลี่ยนแบบคอลัมน์ได้ก็คือ ความดันตก (Pressure drop) ที่ผ่าน เม็ด เรซินลงมา และการขยายตัวของ เม็ด เรซิน ในขณะที่ผ่านสารละลายขึ้น

ความดันตกและการผ่านไปต่อความลึกของเรซิน จะขึ้นอยู่กับขนาด ความสม่ำเสมอ การปิดตัว และรูปร่างของ เม็ด เรซิน ตลอดจนความหนืดและอัตราไหลของน้ำชะล้างที่คงที่ ปกติในการใช้กับยูเรเนียมนั้นจะใช้อัตราการไหลประมาณ 1 - 6 แกลลอนต่อลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ซึ่งจะทำให้มีความดันตกประมาณ 0.1 - 0.2 ฟีเอสไอ (psi) ต่อความลึกของเม็ดเรซิน (ฟุต) ต่อแกลลอนต่อตารางฟุตต่อนาที เมื่อมีตะกอนคล้ายโคลนละเอียดและการตกตะกอนเกิดขึ้นที่เม็ดเรซิน จะทำให้ความดันตกนั้น ซึ่งจะเป็นเหตุให้มีการไหลที่ไม่สม่ำเสมอและยังต้องการไหลเกิดขึ้น

เราสามารถป้องกันการเกิดตะกอนคล้ายโคลนละเอียด และการเกิดตะกอนได้ด้วยการล้างกลับ (Backwash) เม็ดเรซินหลาย ๆ ครั้งภายหลังที่มีการดูดซึมแล้ว การล้างนี้จะให้ไหลผ่านขึ้น เพื่อว่าเม็ดเรซินจะได้เกิดการขยายตัวและวัสดุละเอียดถูกขจัดออกจากคอลัมน์ได้ง่าย ปกติแล้วคอลัมน์ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนมักจะออกแบบให้มีการขยายของเม็ดเรซินได้เท่าตัว เนื่องจากความหนาแน่นจริงของเรซินจะไม่เหมือนกันตลอดการแลกเปลี่ยนไอออน เพราะจะขึ้นอยู่กับโมโนลไอออนที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์ไอออน⁽⁸⁸⁾ ด้วยเหตุนี้การขยายปริมาตรของเบด (Bed volume) ของคอลัมน์จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและแบบของไอออนของเรซิน

7) อัตราการแลกเปลี่ยนคือ ระยะเวลาที่ไอออนซึมผ่านเข้าไปในเรซิน โดยปกติเมื่อใช้แลกเปลี่ยนด้วยคอลัมน์จะใช้เวลาประมาณ 3 - 10 นาทีต่อคอลัมน์

สำหรับน้ำชะล้างที่ใส ก็เพียงพอแก่การทำให้เรซินอิ่มตัวไปด้วยยูเรเนียมและยังคงได้น้ำที่ไหลออกที่เป็นมาร์เรน (Barren effluent)

8) ซีเลกทิวิตี (Selectivity) คือการเกิดปฏิกิริยาเฉพาะ ซึ่งในการแยกยูเรเนียมออกมาส่วนมากแล้ว จะต้องใช้เรซินที่ซีเลกทิฟต่อยูเรนิลซัลเฟตเชิงซ้อนมากกว่าพวกเฟอร์ริกซัลเฟต เชิงซ้อน ไบซัลเฟตและซัลเฟตอออน มิฉะนั้นอออนเหล่านี้จะเข้าแทนที่ยูเรเนียมได้ ซึ่งอออนพวกนี้มักจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนสูงกว่ายูเรเนียม

9) อายุการใช้งานของเรซิน (Resin Life) เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนอออนนั้นควรจะต้องมีการเปลี่ยน เมื่อหน่วยของการแลกเปลี่ยนอออนไม่สามารถใช้กับน้ำชะล้างได้อีกต่อไป และเมื่อค่าใช้จ่ายในการกระทำสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเรซินรวมกับค่าใช้จ่ายในการกระทำ เพราะทั้งสองกรณีนี้จะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ฉะนั้นจึงควรเปลี่ยนถึงแม้ว่าจะยังใช้ได้กับยูเรเนียมก็ตาม ปกติอายุการใช้งานของเรซินจะขึ้นอยู่กับสารละลายชะล้างที่ใช้ เช่น โรงงานในประเทศอัฟริกาได้นั้น ในน้ำชะล้างมักจะมีสารต่าง ๆ ที่ทำให้มีการไหลช้าลงคงที่ ค่าหนึ่งใช้เรซินได้ไม่เกินสองปี

ง. หลักการแลกเปลี่ยนอออน

การแลกเปลี่ยนอออนนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่สองขั้นตอนคือ การดูดซับ (Adsorption) และอีลูชัน (Elution)

1) การดูดซับ^(16,86,89)

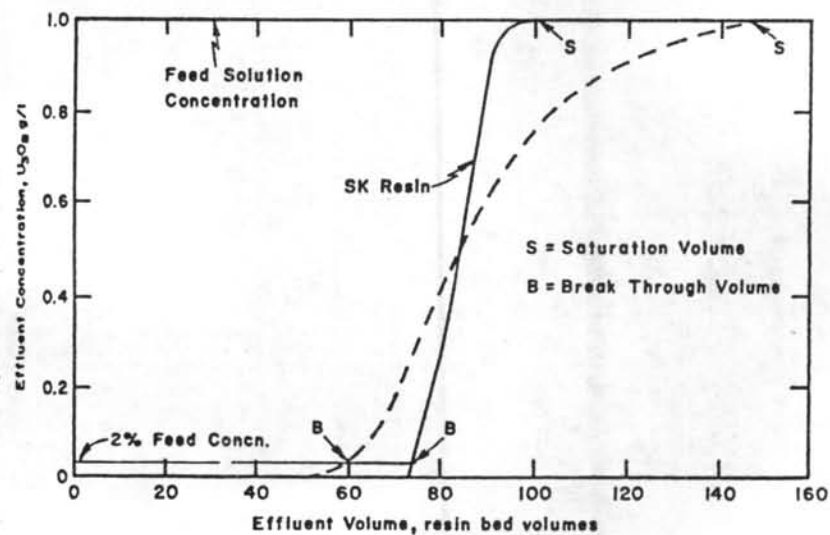
เป็นกระบวนการขจัดอออนในสารละลายออกด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนอออนดูดซับเอาไว้ ซึ่งปกติแล้วปริมาณยูเรเนียมที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอออนลบเชิงซ้อนที่มีปรากฏอยู่ในสารละลาย สำหรับอออนลบเชิงซ้อนของยูเรนิลนั้น จะเป็นเครื่องชี้ถึงความสามารถทั้งหมด และแทนด้วย U_3O_8 โดยจะถูกดูดซับประมาณ 1.25 มิลลิกรัมวาเลนซ์ต่อมิลลิลิตร ส่วนความสามารถดูดซับของอออนต่าง ๆ ของยูเรเนียมมีแสดงในตาราง 4.13 แต่ปกติแล้วตำแหน่งในเรซินแต่ละแห่งจะแย่งกันดูดซับอออนลบในสารละลาย รวมทั้งภาวะการกระทำปกติจะเป็นเหตุให้เรซินสามารถดูดซับได้เพียง 2 - 5 ปอนด์ $-U_3O_8$ ต่อลูกบาศก์ฟุต - เรซิน

ตาราง 4.13 ความสามารถดูดซับได้ของอออนแบบต่าง ๆ ของยูเรเนียม (16)

Uranyl complex	Theoretical maximum capacity lb U_3O_8 /cu ft
$[UO_2(SO_4)_2]^{--}$	10.9
$[UO_2(SO_4)_3]^{-4}$	5.5
$[UO_2(CO_3)_3]^{-4}$	5.5

การดูดซับของ เรซินในการกระทำแบบคอลัมน์นั้นอาจแสดง

ได้ดังรูป 4.12 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ U_3O_8 ในน้ำล้างที่ไหลออก (Effluent liquor) กับปริมาณของสารละลายที่ไหลออกซึ่งแสดงเป็น เบคควอลูม (คือปริมาณของสารละลายที่เท่ากับปริมาณของเรซินที่มีอยู่ทั้งหมดในคอลัมน์) โดย เบรคทรู-วอลูม (Break-through volume) จะ เป็นปริมาณของสารละลายที่ไหลเข้าจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกมีความเข้มข้นของยูเรเนียมเหลืออยู่เพียง 2% ของสารละลายที่ผ่านเข้าไป คือที่จุด เบรคทรูนี้เรซินจะเริ่มดูดซับอออนได้น้อยและช้าลงมาก ส่วนปริมาตรอิ่มตัว (Saturation volume) นั้นจะเป็นปริมาณของสารละลายที่ผ่านเข้าไปจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกมีความเข้มข้นของยูเรเนียมเท่ากับในสารละลายที่ไหลผ่านเข้าไป คือที่จุดอิ่มตัวนี้เรซินจะไม่ดูดซับอออนอีกต่อไป เส้นกราฟที่ชันจะมีปริมาณยูเรเนียมไหลผ่านคอลัมน์ในระหว่างจุด เบรคทรูและจุดอิ่มตัวน้อย ซึ่งจะแสดงว่า

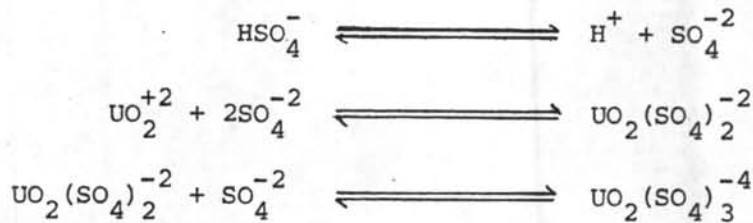


รูป 4.12 จุด เบรคทรูและจุดอิ่มตัวของการดูดซับยูเรเนียมด้วยเรซิน (86)

เรซินมีประสิทธิภาพดีกว่า เส้นกราฟที่ลาด ดังนั้นสัดส่วนของปริมาณเบรคทรูต่อปริมาณอิมตัวจึงไม่ควรต่ำกว่า 0.5 จึงจะใช้แยกยูเรเนียมได้ดี ในกรณีใช้สองคอลัมน์ เพราะในคอลัมน์แรกจะอิมตัวก่อนที่คอลัมน์ที่สองจะถึงจุดเบรคทรู ส่วนใน RIP นั้นการถึงจุดอิมตัวจะแตกต่างจากแบบคอลัมน์คือ จะมีการดูดซับเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความสมดุลกันระหว่างยูเรเนียมในเรซินและยูเรเนียมที่ยังคงอยู่ในสารละลาย ซึ่งจะต้องใช้เวลาานพอสมควรหรืออาจใช้การไหลผ่านที่ต่อเนื่องกันก็ได้⁽⁸⁹⁾

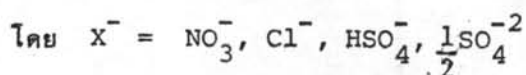
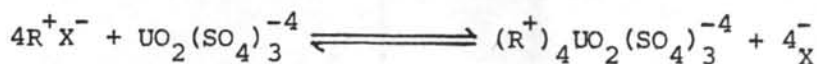
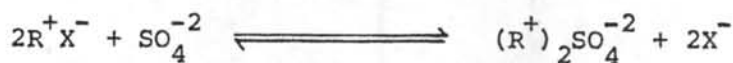
ก) การดูดซับสารละลายกรด (Adsorption-Acid Solution) (15, 16, 24, 55, 90, 91, 92, 93)

ในน้ำชะล้างที่เป็นกรดนั้นจะมีไอออนต่าง ๆ ปนอยู่มากมาย เช่น แอมโมเนียม อัลคาไล อัลคาไลน์เอิร์ท อะลูมิเนียม และธาตุทรานซิชัน (VO^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2}) ซึ่งจะไม่สามารถเกิดเป็นซัลเฟตเชิงซ้อนที่แรงได้ ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อเรซินเท่าใดนัก แต่ไอออนสำคัญที่มีผลต่อความสามารถดูดซับยูเรเนียมของเรซินคือ H^+ , HSO_4^- และ SO_4^{-2} ซึ่งมีปฏิกิริยาดังสมการ



จะเห็นว่าสารละลายมียูเรเนียมอยู่ในรูปของไอออนบวกและไอออนลบ ฉะนั้นจึงอาจจะสกัดยูเรเนียมออกมาได้ด้วย เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกและเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ แต่ปกติแล้วพวกไอออนบวกอื่น ๆ ที่มีปนอยู่ในสารละลายนั้น มักจะมีมากกว่า UO_2^{+2} ซึ่งถูกดูดซับได้ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และอีกประการหนึ่งคือพวกโลหะอื่น ๆ ซึ่งมีน้อยกว่ายูเรเนียม เช่น Fe^{+3} , V^{+5} และ Mo^{+6} ซึ่งสามารถเกิดเป็นไอออนลบได้กับกรดซัลฟูริกนั้น สามารถจะควบคุมให้มัน้อยลงได้ด้วยการควบคุมศักดาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนลบจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการสกัดแยกยูเรเนียมออกมาจากน้ำชะล้างที่เป็นกรด

ไอออนลบของยูเรเนียมในสารละลายกรดซัลฟูริกคือ $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{-2}$ และ $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{-4}$ ซึ่งจะเข้าแทนที่ SO_4^{-2} และ HSO_4^- ในเรซิน ดังสมการ



ปกติแล้ว HSO_4^- จะถูกเรซินดูดซับได้ดีกว่า SO_4^{2-} ทำ-

ให้ถูกแทนที่ได้น้อยกว่า ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของ HSO_4^- ให้มี pH ค่า ๆ ประมาณ 1.5 - 2.0 ซึ่งจะทำให้ $UO_2(SO_4)_3^{-4}$ ถูกดูดซับได้มากที่สุด ส่วน $UO_2(SO_4)_2^{-2}$ นั้นจะถูกดูดซับได้เพียงเล็กน้อย แต่จะถูกดูดซับได้มากเมื่อยูเรเนียมมีความเข้มข้นสูง ๆ ⁽⁹⁰⁾

การที่ไอออนลบ เหล่านี้จะถูก เรซินดูดซับได้มากแค่ไหน นั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนลบนั้นในสารละลายที่สัมพันธ์กับไอออนชนิดอื่น การเข้าร่วมจับของเรซินต่อไอออนลบนั้น และ pH ดังจะกล่าวต่อไปนี้

ก. ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) พบว่า pH จะมีผลต่อการดูดซับยูเรเนียม เพราะถ้าเพิ่ม pH มากขึ้น (เมื่อความเข้มข้นของยูเรเนียมและซัลเฟตคงเดิม) ก็จะทำให้ความเข้มข้น HSO_4^- ลดลง ความเข้มข้น SO_4^{2-} เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของ $UO_2(SO_4)_3^{-4}$ และ $UO_2(SO_4)_2^{-2}$ เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ยูเรเนียมถูกเรซินดูดซับได้ดียิ่งขึ้น แต่การเพิ่ม pH ก็อาจจะมีการจำกัดเพราะ Fe^{+3} ซึ่งเกิดเป็นซัลเฟตเชิงซ้อนนั้นจะถูกดูดซับได้ดีที่ pH มากกว่า 1.8 ⁽⁹¹⁾

ข. ความเข้มข้นของยูเรเนียม ความเข้มข้นของยูเรเนียมยิ่งสูงก็จะยิ่งทำให้เรซินดูดซับได้มากขึ้น เพราะเมื่อยูเรเนียมเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ $UO_2(SO_4)_2^{-2}$ และ $UO_2(SO_4)_3^{-4}$ มีความเข้มข้นมากขึ้น อย่างไรก็ตามในความเข้มข้นปกติของน้ำชะล้างจะมี $UO_2(SO_4)_3^{-4}$ เกิดขึ้นเป็น 7 เท่าของ $UO_2(SO_4)_2^{-2}$ และ 50 เท่าของ UO_2SO_4 ⁽⁹⁰⁾

ค. ความเข้มข้นของซัลเฟต การเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตรวม (Total sulphate) จะทำให้มี $UO_2(SO_4)_2^{-2}$ และ $UO_2(SO_4)_3^{-4}$ ในน้ำชะล้างเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามในการเพิ่มซัลเฟตมากขึ้นก็จะทำให้ไบซัลเฟตมีเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้การดูดซับยูเรเนียมของเรซินลดลง เพราะไบซัลเฟตจะถูกยูเรเนียมแทนที่ได้น้อยกว่า นอกจากนี้ซัลเฟตและไบซัลเฟตยังจะไปแย่งที่ยูเรเนียมที่ถูกเรซินดูดซับได้อีกด้วย

ง. เหล็ก ปกติในน้ำชะล้างส่วนมากแล้ว เหล็กจะปรากฏอยู่ 2 แบบ คือ Fe^{+2} และ Fe^{+3} โดย Fe^{+2} นั้นจะไม่เกิด เป็นซัลเฟต เชนิซ็อน ทำให้ไม่ถูกดูดซับโดย เรซินแลกเปลี่ยนอออนลบ ส่วน Fe^{+3} นั้นสามารถจะเกิด เป็นซัลเฟต เชนิซ็อน $[Fe(SO_4)_n]^{(3-2n)}$ และ $FeOH(SO_4)_2^{-2}$ ขึ้นได้ จะเป็นแบบไหนขึ้นขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย ซึ่งสาร เชนิซ็อน เหล่านี้จะถูกดูดซับโดยเรซินแลกเปลี่ยนอออนลบได้ แต่ก็ยังน้อยกว่ายูเรเนียม ทำให้ไปแย่งที่ยูเรเนียมที่จะถูกดูดซับโดยเรซินได้^(๑๒) ในขั้นตอนของการดูดซับแรก ๆ นั้น เรซินจะอ้อมตัวด้วย Fe^{+3} ก่อนเป็นเวลานาน แล้วยูเรเนียมจึงจะอ้อมตัว และเมื่อยูเรเนียมถูกดูดซับต่อไปก็จะทำให้เฟอร์ริก เชนิซ็อนถูกแทนที่ ดังนั้น เมื่อเรซินอ้อมตัวด้วยยูเรเนียมแล้วจะมีเหล็กปนอยู่เพียง เล็กน้อย เท่านั้น เหล็กที่เรซินดูดซับไว้นี้จะหลุดไปบางส่วนในระหว่างการล้างกลับและฟลัชซิง (Flushing) ส่วนเหล็กที่เหลือจะหลุดออกมาในระหว่างการอีลูชันตอนแรก ๆ ผลของเหล็กต่อการดูดซับยูเรเนียมของเรซินนั้นจะมีน้อยมาก เว้นแต่ว่าจะมี Fe^{+3} เข้มข้นมากกว่า 5 กรัมต่อลิตร (ที่ pH ต่ำ ๆ) ที่ pH สูงกว่า 1.8 นั้น Fe^{+3} จะถูกดูดซับได้มากจนทำให้ยูเรเนียมถูกดูดซับได้น้อยลง

จ. วาเนเดียม มักจะมี เกิดขึ้นในการชะล้างด้วยกรดซัลฟูริกกับลินแร่คาร์โบไนต์ โดยละลายปนอยู่ในสารละลายในรูปของ V^{+4} (VO^{+2}) และ V^{+5} (VO_3^- และ VO_4^{-3}) ซึ่ง V^{+5} นี้สามารถจะเกิดการแลกเปลี่ยนได้กับ เรซินแลกเปลี่ยนอออนลบ เช่นกัน^(๑๒) แต่ V^{+5} ก็หลุดออกมากับยูเรเนียมในคอนอีลูชัน ทำให้เค็กของยูเรเนียมมีวาเนเดียมปนอยู่ด้วย วาเนเดียมที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะไม่มีผลต่อการดูดซับเท่าใด แต่ถ้ามีความเข้มข้นมากกว่า 1 กรัมต่อลิตรก็จะทำการดูดซับยูเรเนียมลดลงได้

เนื่องจากในการชะล้างยูเรเนียมนั้นจะใช้ Fe^{+3} เป็นตัวออกซิไดซ์ให้ U^{+4} กลายเป็น U^{+6} ส่วน Fe^{+2} ที่ยังมี เหลืออยู่ก็สามารถจะไปรีดิวซ์ V^{+5} ให้กลายเป็น V^{+4} ได้ ซึ่งพบว่าเมื่อ Fe^{+3}/Fe^{+2} มีค่า EMF อยู่ระหว่าง -350 ถึง -400 มิลลิโวลต์แล้ว จะทำให้เหล็กส่วนใหญ่อยู่ในรูป Fe^{+2} ^(๑๕) วิธีที่จะทำให้ค่า EMF ต่ำลงคือ การใช้เศษเหล็กหรือเฟอร์รัสซัลเฟตใส่ลงไป สังกะสีหรืออะลูมิเนียมก็อาจใช้ได้ ควรมีการระมัดระวัง เพราะอาจจะทำให้ยูเรเนียมถูกรีดิวซ์ได้

ฉ. ฟอสเฟตและอาร์ซิเนตอออน อีออนทั้งสองนี้จะถูกดูดซับโดยเรซินแลกเปลี่ยนอออนลบในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ $H_2AsO_4^-$ และในน้ำชะล้างนั้นฟอสเฟตและอาร์ซิเนตก็จะเกิด เป็นอออน-

ลบเชิงซ้อนได้กับยูเรเนียมซึ่งถูกดูดซับได้เช่นกัน การดูดซับของเรซินจะไม่มีผลมากนักเมื่อฟอสเฟตและอาร์ซิเนตมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 กรัมต่อลิตร และพบว่าถ้ามี Fe^{+3} อยู่ด้วย ก็จะมีผลน้อยมาก เพราะ Fe^{+3} จะไปทำให้เกิด เป็นอออนบวกและลบเชิงซ้อนของฟอสเฟตได้

ปัญหาจากอออนทั้งสองนี้ก็คือ ยูเรเนียมฟอสเฟตเชิงซ้อนจะตกตะกอนได้ในเรซินขณะทำอีลูชัน ทำให้เอายูเรเนียมออกจากเรซินได้ช้าขึ้น แต่แก้ไขได้ด้วยการใช้อีลูแอนต์ (Eluant) ที่เป็นกรด และอีกประการหนึ่ง ฟอสเฟตและอาร์ซิเนตจะมีปะปนอยู่ในเค้กของยูเรเนียม

ข. คลอไรด์และไนเตรตอออน ปกติแล้วเรซินแลกเปลี่ยนอออนลบจะดูดซับคลอไรด์และไนเตรตอออนได้ดี ทำให้ไปแย่งที่ยูเรเนียมที่ถูกเรซินดูดซับ เป็นเหตุให้การดูดซับยูเรเนียมของเรซินลดลงได้ คลอไรด์และไนเตรตอออนที่มีความเข้มข้นมากกว่า 2 กรัมต่อลิตร จะมีผลเสียต่อการเกิด เป็นยูเรนิลซัลเฟตอออนลบเชิงซ้อน⁽⁹²⁾ เพราะยูเรเนียมจะเกิด เป็นคลอไรด์อออนลบเชิงซ้อน ซึ่งถูกเรซินแลกเปลี่ยนอออนลบดูดซับได้ดี ยูเรนิลอออนอาจจะเกิด เป็นอออนบวกเชิงซ้อนและสารประกอบเชิงซ้อนได้กับคลอไรด์หรือไนเตรต เป็นผลให้ความเข้มข้นของยูเรนิลซัลเฟตอออนลบในสารละลายลดลงได้⁽⁹³⁾

คลอไรด์ที่มีปนในน้ำล่างนั้นอาจเกิดขึ้นได้หลายทาง อาจเกิดจากการแห้วแร่กับเกลือโซเดียมคลอไรด์ หรืออาจเกิดจากการใช้อีลูแอนต์ที่เป็นสารละลายคลอไรด์ ส่วนไนเตรตจะมีเกิดในน้ำชะล้างได้ เมื่อใช้อีลูแอนต์ที่เป็นไนเตรต ปกติแล้วไนเตรตจะถูกดูดซับได้ดีกว่าคลอไรด์อออน แต่เลวกว่าคลอเรตอออน

ข. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำชะล้าง จะทำให้อัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลยูเรเนียมเข้าไปในเรซินแมทริก (Resin matrix) นั้นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เพิ่มความสามารถในการเกิดเบรคทูร แต่จะไม่มีผลต่อการอิมตัวของยูเรเนียม

ที่อุณหภูมิค่า (35 - 40°ฟ.) จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับช้าลงได้ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิยังมีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดอีลูชันด้วย โดยปริมาตรของอีลูเอต (Eluate volume) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ปกติแล้วการใช้อุณหภูมิสูงจะไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐกิจ

ข) การดูดซับสารละลายคาร์บอเนต (Adsorption-Carbonate Solution) (15,16,93,94,95)

ปกติการชะล้างด้วยคาร์บอเนตนั้นจะซี เลคทีฟมากกว่า และมีไอออน เจือปนที่แย่งถูกดูดซับกับยูเรเนียมในปริมาณที่น้อยกว่า ฉะนั้น ในปัจจุบันจึงไม่จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำชะล้างคาร์บอเนต เพราะมีความบริสุทธิ์เพียงพอแล้ว แต่การแลกเปลี่ยนไอออนก็อาจนำไปใช้กับสารละลายและส่วนผสมที่ใสซึ่งยังมิได้กรอง

ในน้ำชะล้างคาร์บอเนตจะประกอบด้วยไอออน Na^+ , $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{-4}$, CO_3^{-2} , HCO_3^- และ SO_4^{-2} ซึ่งการดูดซับยูเรเนียม ไครคาร์บอเนตไอออนลบจากสารละลายคาร์บอเนตโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบที่เป็นค่างแก่ นั้น เกิดขึ้นได้โดยการแลกเปลี่ยนกับซิลิเกต เซิงซ็อนในสารละลายกรด ดังสมการ



โดย $\text{X} = \text{NO}_3^-$ หรือ Cl^-

การดูดซับสารละลายคาร์บอเนตของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบนั้นจะขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

ก. ความเข้มข้นของคาร์บอเนตทั้งหมด (Total carbonate concentration) การดูดซับยูเรเนียมโดยเรซินจากสารละลายน้ำล้างคาร์บอเนตนั้น จะเกิดขึ้นได้น้อยเมื่อสารละลายนั้นมีความเข้มข้นของคาร์บอเนตทั้งหมดสูง ปกติแล้วการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อคาร์บอเนตทั้งหมดมีความเข้มข้นประมาณ 10 กรัม (CO_3^{-2}) ต่อลิตร ซึ่งจะทำให้ยูเรเนียม 1 ไมลถูกดูดซับได้โดยตำแหน่งแลกเปลี่ยน (Exchange sites) จำนวน 4 ไมล

ข. อัตราส่วนคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต ปกติแล้วควอเตอร์นารี-เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบนั้น จะดูดซับไบคาร์บอเนตได้ดีกว่าคาร์บอเนต คาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะลดการดูดซับยูเรเนียมของเรซินลงได้⁽⁹⁴⁾ ส่วนไบคาร์บอเนตนั้นจะทำให้เกิดเป็นยูเรเนียมไอออนลบ เซิงซ็อน

ทำให้ไปแย่งที่ยูเรเนียมในเรซิน เป็นผลให้ยูเรเนียมถูกดูดซับได้น้อยลง⁽⁹²⁾ ซึ่งจากการวัด pH ของอัตราส่วนคาร์บอนเนต-ไบคาร์บอนเนตพบว่า การดูดซับยูเรเนียมจะลดลงประมาณ 50 - 80% เมื่อ pH ลดลงจาก 10.0 เป็น 9.0⁽⁹³⁾

ค. อีออนอื่น ๆ อีออนลบอื่น ๆ จะมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำน้ำล้างคาร์บอนเนตกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะอีออนลบพวกคลอไรด์ ไนเตรต และซัลเฟต ซึ่งจะมีผลไปยังการดูดซับยูเรเนียมของเรซินได้ เช่นเดียวกับในกรณีของสารละลายกรด ส่วนอีออนลบที่อาจเกิดขึ้นจากการละลายลิแวนด์ด้วยสารละลายคาร์บอนเนตนั้นได้แก่ อะลูมิเนต ฟอสเฟต โมลิบเดต และวานาเดต

ฟอสเฟตและอะลูมิเนตจะถูกดูดซับได้ด้วยเรซินที่เป็นค่างแก่ แต่จะถูกแทนที่ได้เกือบหมดโดยยูเรนิล-ไตรคาร์บอนเนต ไบคาร์บอนเนต และคาร์บอนเนตอีออน⁽⁹⁴⁾ ปกติอะลูมิเนตจะถูกขจัดออกไปได้ง่ายกว่าฟอสเฟต

โมลิบเดตจะถูกดูดซับได้น้อยกว่าในสารละลายกรด และยูเรนิล ไตรคาร์บอนเนตสามารถจะแทนที่โมลิบเดตจากเรซินได้⁽⁹⁵⁾ โดยเรซินจะอิ่มตัวด้วยโมลิบเดตก่อนที่ยูเรเนียมจะเบรคทู และโมลิบเดตจะถูกแทนที่ได้เกือบสมบูรณ์ก่อนที่เรซินจะอิ่มตัวด้วยยูเรเนียม

วานาเดตจะถูกดูดซับแย่งที่ยูเรเนียมในเรซินได้ดี เมื่อ pH ต่ำกว่า 10.8 แต่ถ้า pH สูงกว่านี้แล้ว วานาเดตก็จะถูกแทนที่ในเรซินได้โดยยูเรนิล ไตรคาร์บอนเนต

2) อีลูชัน (Elution)^(16,86,92)

อีลูชัน เป็นขั้นตอนของการ เอายูเรเนียมออกจากเรซิน ที่ดูดซับยูเรเนียมเอาไว้ อาจจะเรียกว่ารีเจเนอเรชัน (Regeneration) แทนก็ได้ สารละลายที่ใช้ทำอีลูต (Elute) เรียกว่า อีลูแอนต์ (Eluant) และสารละลายที่ไหลออก (Effluent) ในตอนท้ายสุดเรียกว่า อีลูเอต (Eluate) ส่วนอีออนอื่น ๆ ที่แยกออกไปด้วยกระบวนการปกติไม่ได้เรียกว่า พอยซัน (Poison)

อัตราการเกิดอีลูชันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอีออนที่จะถูกแทนที่ภายใน เม็ดเรซินสูงก่อนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยน และการควบคุมการซึมผ่านของอีออนลบทั้งสองได้โดยสิ้นเชิง นั่นคือจะต้องใช้เวลาให้มีการสัมผัสและใช้อีลูแอนต์ในปริมาณมาก

ฉะนั้นจะต้องใช้อิออนที่ไปเปลี่ยนแปลงยูเรเนียมอิออนลบเชิงซ้อนโคในขณะที่ยังเข้าไปแทนที่ เช่น สารละลายเจือจางของไนเตรตหรือคลอไรด์ ซึ่งจะเกิดเป็นยูเรเนียมอิออนบวกเชิงซ้อน ซึ่งจะ ไม่ถูกดูดซับได้⁽⁹²⁾ แล้วอิออนพวกนี้ก็จะหลุดออกจากเม็ดเรซินสู่สารละลายภายนอกได้โดยการแพร่กระจาย ซึ่งอัตราการเกิดอิออนจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่กระจายในกรณีนั้นเอง

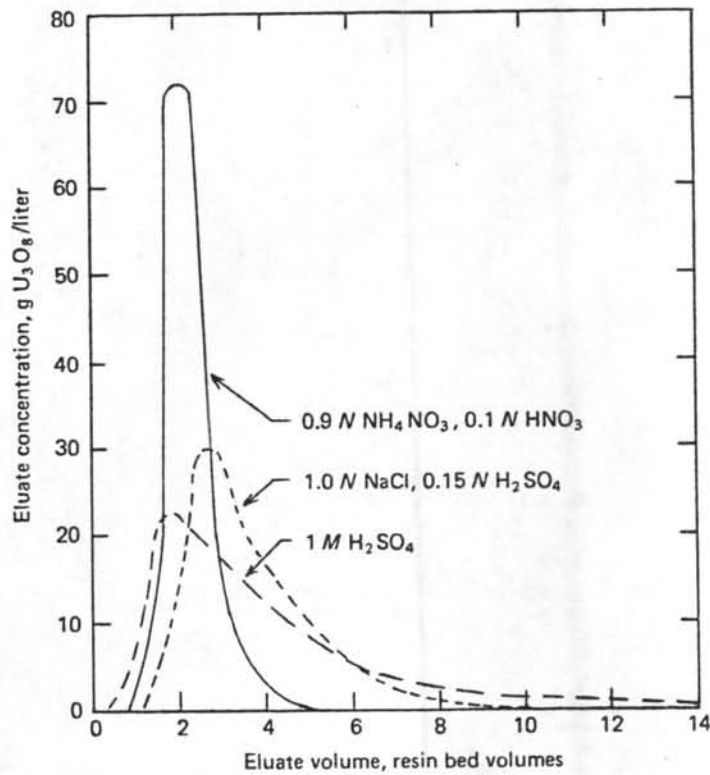
ในการทำอิออนนั้นควรจะให้เกิดปฏิกิริยาเร็ว พร้อมทั้งมีปริมาณของอิออนแอตทิงที่สุด พวกเรซินแลกเปลี่ยนอิออนลบที่เป็นค่างแก่จะทำให้เรซินมีความพรุน (Porosity) เพิ่มมากขึ้น อันเป็นเหตุให้เกิดอิออนได้เร็วขึ้น เรซินที่มีขนาดเล็กก็จะเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนได้ เพราะจะสามารถลดระยะทางของการแพร่กระจายลงได้ ส่วนเรซินที่เป็นค่างอ่อนจะมีอัตราการเกิดอิออนได้ช้ากว่า

อิออนแอตทิงที่จำเป็นต้องมีราคาถูก ไม่ถูกเรซินดูดซับได้มากจนเกินไป และเกิดการแทนที่ในขั้นตอนการดูดซับครั้งต่อไปได้ช้า จากรูป 4.13 จะแสดงการเกิดอิออนจากอิออนแอตทิง 3 ชนิด คือ ไนเตรต ($0.9 \text{ N NH}_4\text{NO}_3 + 0.1 \text{ N HNO}_3$) คลอไรด์ ($\text{NaCl} + 0.15 \text{ N H}_2\text{SO}_4$) และกรดซัลฟูริก ($1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$)⁽⁸⁶⁾ โดยการอิออนด้วยไนเตรตนั้นจะเร็วกว่าคลอไรด์ประมาณสองเท่าและได้อิออนแอตทิงที่มีเกรดสูงกว่า อีกทั้งยังจะไม่มีกากครอนเหมือนอย่างเช่นคลอไรด์ แต่จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่า ทั้งไนเตรตและคลอไรด์จะมีข้อเสียที่ว่าจะไปเป็นอุปสรรคต่อการดูดซับ เพราะจะต้องเปลี่ยนเรซินไปเป็นรูปซัลเฟตด้วยกรดซัลฟูริก เสียก่อนที่จะทำการดูดซับครั้งต่อไป ส่วนการอิออนด้วยเกลือซัลเฟต (ใช้กรดซัลฟูริก) นั้น จะเกิดขึ้นช้ามาก พวกโซลเฟตส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยเรซินในระหว่างการอิออนด้วยกรดที่มีความเข้มข้นสูง และเปลี่ยนไปเป็นซัลเฟตโคในระหว่างการล้างด้วยการเกิดไฮโดรไลซิส ดังสมการ



ดังนั้น การอิออนด้วยซัลเฟตนั้นจะสมบูรณ์ได้เมื่อใช้อิออนแอตทิงในปริมาณสูง ๆ แต่จะมีข้อดีกว่าอิออนแอตทิงอื่น ๆ ในแง่

- 1) เรซินจะยังคงอยู่ในรูปของซัลเฟต อันจะถูกดูดซับยูเรเนียมได้อย่างสะดวกกว่าในรูปของไนเตรตหรือคลอไรด์
- 2) ไม่ก่อให้เกิดอิออนลบชนิดอื่นเกิดขึ้น อันจะต้องกำจัดออกไป
- 3) ใช้กรดซัลฟูริกในการอิออนครั้งต่อไปได้อีก



รูป 4.13 กราฟของการเกิดอีลูชันของอีลูแอนด์ชนิดต่าง ๆ (86)

ก) อีลูชันของกระบวนการที่เป็นกรด (Elution-Acid Process) (15,16,92,96,97,98) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



โดย $X = NO_3^-$ หรือ Cl^-

ปกติจะเติมกรดลงไปให้อีลูแอนด์ เมื่อในเรซินมี ยูเรนิลซัลเฟตอีออนลบ แข็งซ้อนอยู่ เพื่อป้องกันการเกิดการตกตะกอนของอีออนที่อีลูตได้ (Eluted ions) จากการเกิดไฮโดรไลซิส และ เพื่อนำอีลูตอีออนที่เกิดขึ้นซ้กว่าออกไปจากเรซินโดยเร็ว

โดยปกติจะใช้กรดเข้มข้นเพียง 0.1 N ก็เพียงพอ แต่บางทีอาจจะต้องถึง 0.5 N ก็ได้ กรดที่ใช้เดิม มักจะใช้กรดซัลฟูริก เพราะราคาถูกกว่ากรดไนตริกและไฮโดรคลอริก^(92,96)

ก. อีลูชันด้วยคลอไรด์ (Chloride Elution) จะใช้ได้ดีที่สื่อกับกระบวนการที่เป็นกรด โดยใช้ความเข้มข้นของคลอไรด์ (Cl^-) ประมาณ 0.5 - 1.5 M เพราะคลอไรด์จะมีผลไปสลายการดูดซับของเรซิน ประสิทธิภาพของคลอไรด์จะลดลง เมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 1.5 M โดยเฉพาะที่ 5 - 6 M นั้นจะทำให้เกิดเป็น $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{-2}$ ซึ่งถูกดูดซับโดยเรซินได้ดี

ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้คลอไรด์เป็นอีลูแอนต์กันมาก โดยใช้ 0.9 M NH_4Cl หรือ NaCl ผสมกับ 0.1 M HCl หรือ H_2SO_4 (pH ประมาณ 1.0) ปกติคลอไรด์จะถูกใช้กับเรซินที่มีความจุ 1.25 มิลลิอีควิวาเลนต์ต่อเรซิน 1 c.c. นั้น จะประมาณ 2.76 ปอนด์ (Cl^-) ต่อลูกบาศก์ฟุต (เรซิน) หรือประมาณ 0.5 - 2.5 ปอนด์ต่อ U_3O_8 1 ปอนด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การสูญเสียในทางเชิงกลและปริมาณของซิลเฟตและไบซิลเฟตที่มีอยู่ในสารละลาย ซิลเฟตและไบซิลเฟตจะมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำอีลูแอนต์กลับมาใช้ใหม่ ทำให้คลอไรด์อีลูแอนต์สูญเสียประสิทธิภาพไป ดังนั้นควรมีความเข้มข้นของซิลเฟตประมาณ 35 - 50 กรัมต่อลิตร แต่ถ้ามีซิลเฟตเข้มข้นเกิน 60 กรัมต่อลิตรแล้วจะมีความยุ่งยากเกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับอ็อนบวคที่มีอยู่มากกว่า ถ้าเป็น NH_4^+ ก็จะใช้ปริมาณของอีลูแอนต์ลดลง และเพิ่มความเข้มข้นของซิลเฟตเป็น 150 กรัมต่อลิตร แต่ปริมาณของอีลูแอนต์จะไม่ต้องลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของซิลเฟตเพิ่มขึ้น เมื่ออ็อนบวคนี้เป็น Na^+ หรือ Mg^{+2} ผลที่เกิดขึ้นจากอ็อนบวคเหล่านี้คือ จะไปเพิ่มการดูดซับ HSO_4^- ของเรซินโดยลำดับต่อกัน ดังนี้ Mg^{+2} , Na^+ และ NH_4^+ ⁽⁹⁷⁾ และพบว่าซิลเฟตจาก MgSO_4 จะไปลดประสิทธิภาพของอีลูชันได้มากกว่าซิลเฟตจาก $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ หรือ Na_2SO_4

ข. อีลูชันด้วยไนเตรต (Nitrate Elution) จะคล้ายกับคลอไรด์และจะใช้ได้ดีเมื่อไนเตรตมีความเข้มข้นประมาณ 1 M แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.8 M แล้ว จะทำให้การอีลูชันเกิดขึ้นช้ามาก⁽¹⁵⁾ เพราะจะเกิดเป็นอ็อนลบเชิงซ้อนกับยูเรเนียม ปกติแล้วควรใช้ในเตรตเข้มข้นประมาณ 1.2 M จะดีที่สุด เพราะการสูญเสียไนเตรตในสารละลายมักจะสูง โดยยังคงมีป้อนอยู่ในสารละลายภายในคอลัมน์ และจะไปปะปนอยู่กับ เค้กของยูเรเนียมและเหล็ก

สภาพความเป็นกรดเป็นด่างที่จะใช้กับไนเตรตอีลูแอนต์นั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณของไนเตรตและปริมาณของสารละลายที่ใช้ สภาพความเป็นกรดเป็นด่างยิ่งสูง ก็จะมีเพิ่มประสิทธิ-

ภาพของการอิลูชันกับยูเรเนียม ถ้าสภาพความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 0.1 N จะทำให้อิลูชันเกิดได้ช้า และใช้สภาพความเป็นกรดเป็นด่างสูง 0.3 - 0.4 N เมื่อมีโพลีไทโอเนต (Polythionate) เกิดเป็นตะกอนขึ้นในเรซิน ซึ่งจะถูกละลายได้ด้วยการออกซิเดชันของสารละลายไนเตรดที่เป็นกรดนี้ นอกจากนี้สภาพความเป็นกรดเป็นด่างที่สูงนี้ยังจำเป็น เมื่อฟอสเฟตถูกดูดซับโดยเรซินพร้อมกับยูเรเนียม

ปกติจะใช้ไนเตรดกับเรซินที่มีความจุ 1.25 มิลลิอีควิวาเลนต์ต่อลิตรนั้นประมาณ 4.82 ปอนด์ (NO_3^-) ต่อลูกบาศก์ฟุต (เรซิน) ในบางกรณีอาจมีซิลิเกตและไบซิลิเกตเกิดขึ้นไปแทนที่ในเรซินแทนไนเตรดได้ ทำให้ต้องใช้ไนเตรดเพิ่มมากขึ้น

การเพิ่มขึ้นของซิลิเกตจะมีผลต่ออิลูชัน เช่นเดียวกับกรณีของคลอไรด์ อาจทำละลายซิลิเกตเหล่านี้ได้ด้วยการตกตะกอนเป็น CaSO_4 โดยใช้ปูนขาวใส่ลงไป เพื่อให้เหลือซิลิเกตอยู่ในระดับปกติประมาณ 10 - 20 กรัมต่อลิตร⁽¹⁵⁾

ค. อิลูชันด้วยกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Elution) จะใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นประมาณ 1 M เป็นอิลูแอนต์ที่ทำให้เกิดอิลูชันช้าและมีประสิทธิภาพสูงในเตรดหรือคลอไรด์ไม่ได้ แต่ด้วยการใช้กระบวนการอิลูเอก (Eluex Process) ซึ่งจะสกัดยูเรเนียมออกไปด้วยตัวทำละลาย แล้วนำอิลูแอนต์ที่เป็นกรดนี้กลับมาใช้ใหม่ได้อีก ด้วยเทคนิคอันนี้รวมทั้งกรดซัลฟูริกก็หาได้ไม่ยากและราคาถูก จึงทำให้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กัน ปกติแล้วจะใช้กรดซัลฟูริกประมาณ 2.5 ปอนด์ต่อ U_3O_8 1 ปอนด์

ง. อิลูชันด้วยเกลือที่เป็นกลาง (Neutral Salt Elution) จะใช้สารละลายของเกลือโซเดียม คลอไรด์ ที่เป็นกลางมีความเข้มข้น 5 M โดยใช้อิลูแอนต์นี้ 1 เบคควอลลูมต่อเรซิน 1 เบคควอลลูม สารละลายนี้จะเปลี่ยนยูเรเนียมซิลิเกตเชิงซ้อนไปเป็นคลอไรด์เชิงซ้อน ซึ่งสามารถขจัดออกได้ด้วยน้ำในปริมาณ 4 เบคควอลลูม แต่น้ำส่วนที่ไหลออกนั้นจะมีคลอไรด์ปนอยู่เจือจางมากจนไม่สามารถจะนำกลับไปใช้ใหม่ได้

การเปลี่ยนเรซินจากรูปไนเตรดหรือคลอไรด์ไปเป็นซิลิเกตก่อนที่จะนำไปใช้ดูดซับ โดยทำปฏิกิริยากับ 5 - 10% H_2SO_4 นั้น จะมีผลดีหลายประการ คือ

- 1) เป็นการประหยัดการใช้ไนเตรดหรือคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารที่แพงมากกว่า

- 2) ลดปริมาณของไนเตรตและคลอไรด์ที่จะนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการดูดซับ (กรณีที่สารละลายนั้นมีคลอไรด์และไนเตรตเพิ่มขึ้น)
- 3) ขจัดความสูญเสียยูเรเนียมแรกเริ่มของการเริ่มทำการดูดซับในคอลัมน์ เพราะไนเตรตและคลอไรด์จะถูกแทนที่จากเรซินและปนไปกับสารละลาย อันเป็นเหตุให้มีการสูญเสียยูเรเนียม แต่ถ้านำสารละลายนี้มาใช้ใหม่ ก็จะทำให้เกิดมีคลอไรด์และไนเตรตในสารละลายเพิ่มมากขึ้นได้อีกเช่นกัน
- 4) เพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนยูเรเนียมในขั้นตอนการดูดซับ
- 5) ขจัดตะกอนซึ่งมียูเรเนียมปนอยู่ เช่น อาร์ซิเนตและฟอสเฟตหรือสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกไฮโดรไลซ์ ซึ่งอาจมีปนอยู่ในสารละลาย⁽⁹⁸⁾

ในการทำการเปลี่ยนเรซินให้อยู่ในรูปของซิลเฟตนั้น กระทำได้โดยการนำเรซินมาใส่ลงในสารละลายกรดประมาณ 1 - 2 ปริมาตร-คอลัมน์ (ในกรณีที่ใช้คอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออน) การแทนที่ไนเตรตโดยซิลเฟตนั้นจะเกิดได้ไม่ดีเท่าคลอไรด์ และจะได้สารละลายที่มีไนเตรตปนอยู่อย่างมาก อีลูเอตที่ได้ออกมาในตอนแรก ๆ จะมีคลอไรด์หรือไนเตรตปนอยู่ต่ำ แต่จะมีซิลเฟตปนอยู่สูง ฉะนั้นจึงนำแยกออกมา เพื่อนำไปแยกยูเรเนียมออกไปใหม่ แล้วจึงจะทิ้งสารละลายมาร์เรนนั่นไป

ข) อีลูชันของกระบวนการที่เป็นคาร์บอเนต (Elution-Carbonate Process)^(94,99) เนื่องจากในกระบวนการที่ใช้คาร์บอเนตนั้น ยูเรเนียมจะถูกดูดซับในรูปของยูเรนิล ไตรคาร์บอเนตไอออนลบ และการใช้อีลูแอนต์ที่มีสภาพเป็นกรดนั้นจะก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น เป็นผลให้คอลัมน์แตกหรือเป็นเหตุให้เม็ดเรซินแตกได้ ดังนั้นการใช้โซเดียม คลอไรด์สำหรับการทำอีลูชันในกรณีนี้จึงดีที่สุดและมีราคาไม่แพงด้วย

ปกติจะเติมโซเดียม คาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนตลงไปในคลอไรด์หรือไนเตรตอีลูแอนต์ เพื่อป้องกันการเกิดไฮโดรไลซิส และสามารถขจัดยูเรเนียมที่ปนค้างอยู่ในเรซินได้ประมาณ 2 - 3%⁽⁹⁴⁾ ในอีลูแอนต์ที่เป็นไนเตรตควรจะใช้คาร์บอเนต แต่สำหรับอีลูแอนต์ที่เป็นคลอไรด์ควรจะใช้ไบคาร์บอเนต เดิมลงไปจึงจะดีที่สุด⁽⁹⁹⁾

(15, 16, 83,
98, 100-104)
3) เรซิน-พอยซันนิง (Resin Poisoning)

ในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินนั้น มักจะมีไอออนอื่นๆ แข่งกับยูเรเนียมในตำแหน่งของเรซิน (Resin sites) และแล้วก็จะถูกขจัดออกไปพร้อมกับยูเรเนียมในระหว่างทำอีลูชัน ไอออนพวกนี้เรียกว่า คอมพิติงไอออน (Competing ions) แต่มีไอออนบางชนิดจะถูกเรซินดูดซับได้และต้านทานต่อการอีลูชันปกติ ไอออนพวกนี้เรียกว่า พอยซัน (Poisons) พวกพอยซันชนิดชั่วคราวจะถูกขจัดออกได้ด้วยการใช้เทคนิคการทำรีเจเนอเรชัน (Regeneration) ส่วนพวกพอยซันชนิดถาวรนั้นจะไม่สามารถถูกขจัดออกได้มากพอก่อนที่เรซินจะถูกทำลาย ความแตกต่างของพอยซันทั้งสองจะไม่มี เพราะประการแรกนั้นรีเจเนอเรชันจะไม่สามารถทำให้เรซินมีความสามารถกลับเหมือนดังเดิมได้ ประการที่สอง รีเจเนอเรชันอาจจะไม่รุนแรงเท่ากับสาเหตุของการทำให้เรซินบางส่วนเสื่อมลง อายุการใช้งานของเรซินจะหมดลงเมื่อความสามารถในการดูดซับของเรซินต่ำลงมากเกินไปจนไม่สามารถจะใช้ได้ในเวลาปกติ โดยปราศจากการรั่วออก (Leakage) มาก หรือ เมื่อการใช้เรซินต่อไปจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่าการเปลี่ยนเรซินใหม่

การเกิดพอยซันนั้นปกติจะไม่เกิดจากการดูดซับไอออนเสมอไป แต่อาจจะเกิดในทางเชิงกลอันเนื่องมาจากการมีวัสดุเกิดขึ้น อันจะไปจำกัดการเปิดรูในเรซินได้ ทำให้อัตราการแพร่กระจายเข้าและออกจากเรซินถูกยับยั้งลงได้ พอยซันที่เกิดในทางเชิงกลนี้อาจจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำลงได้โดยปราศจากการทำให้ความสามารถดูดซับของเรซินลดต่ำลง

องค์ประกอบที่ทำให้เรซินเกิดพอยซัน (Resin poisons) หรือฟาวลิงเอเจนต์ (Fouling agent) คือ ซิลิกา โมลิวดีนัม โพลีไทโอเนต ซัลเฟอร์ไทเทเนียม และไทโอไซยาเนต (Thiocyanate) กับโคบอลต์ไซยาไนด์เชิงซ้อน (Cobalt cyanide complexes) ซึ่งไม่มีพบในประเทศอัฟริกาใต้ พวกเซอร์โคเนียม ฮาฟเนียม (Hafnium) ทอเรียม และไนโอเบียม (Niobium) ก็มีพบเป็นบางแห่งในโรงงานในประเทศแคนาดา และสหรัฐอเมริกา อาจมีความสกปรกจากสารอินทรีย์ (Organic fouling) เกิดขึ้นได้จากการมีโมเลกุลใหญ่ของสารอินทรีย์ที่ละลายได้เกิดขึ้น ซึ่งจะปิดรูของเรซินได้อย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากน้ำมันหรือวัสดุแอสฟัลต์ (Asphaltic materials) ในสารละลาย ความอุดตันของเรซินอัน

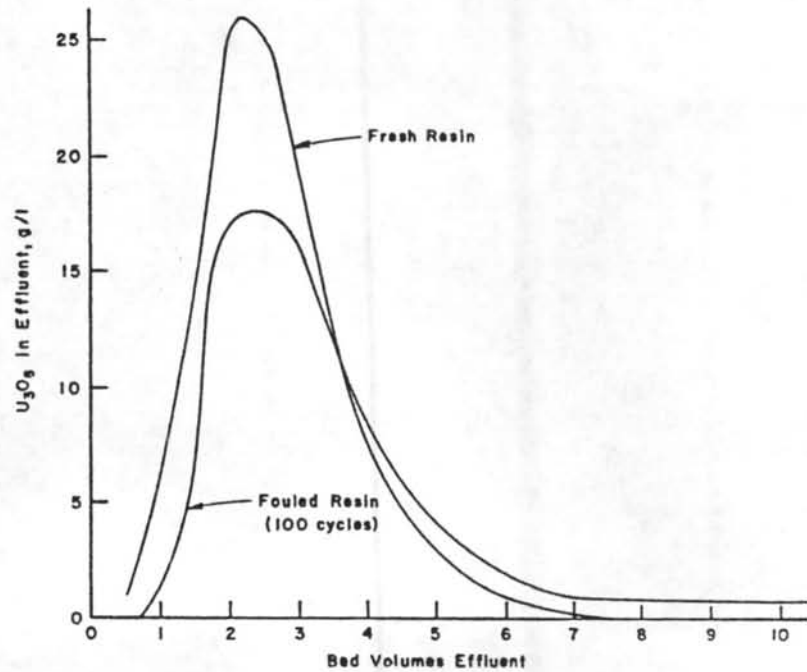
เนื่องมาจากการเกิดตะกอน CaCO_3 ขึ้นบนผิวหรือในช่องว่างระหว่าง เม็ดของ เรซิน ก็อาจมีพบได้ ในกระบวนการที่ใช้ต่างและในการทำกับน้ำจาก เหมือง

ก. ซิลิกา จะมีอยู่ในสารละลายกรดในรูปของสารที่ละลายได้แต่มีไฮดรอกไซด์ (Non-ionic soluble form) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อ pH ต่ำกว่า 4 แล้วต่อมา เมื่อซิลิกาม่าน เรซินก็จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอ่อนกับไอออนลบใน เรซินด้วยลำดับ⁽¹⁰⁰⁾ : $\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-}$ การเพิ่ม pH ขึ้นภายใน เรซินจะทำให้เกิด เป็นโพลีเมอร์ใหญ่ของซิลิกาหรือ เจลขึ้นภายในโครงสร้างของเรซิน เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบจะมีคุณสมบัติ เป็นคอนนาน-เมม เบรน เอฟ เฟกต์ (Donnan membrane effect)⁽⁸³⁾ สามารถจะเพิ่ม pH ภายในได้ การล้างด้วยน้ำจะสามารถจับ H^+ ออกจาก HSO_4^- ที่ถูกเรซินดูดซับได้ ทำให้ pH ภายในเรซินเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีการเกิดตะกอนของซิลิกาเพิ่มมากขึ้น การเกิดตะกอนซิลิกาขึ้นภายใน เม็ด เรซินจะทำให้ไปปิดกั้นรูของเรซิน เป็นเหตุให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง ถ้าในเรซินมีซิลิกาสูงถึง 8 - 10% (4 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต) ก็จะทำให้ความเกี่ยวพันกันของเรซิน (Resin crosslink) แดกลง⁽¹⁰¹⁾

ข. โมลิบดีนัม จะเกิด เป็นซิล เฟตไอออนลบเชิงซ้อน ซึ่งถูกดูดซับได้โดยเรซินในสารละลายกรดก่อนยูเรเนียม พวกทั้งสะ เคนก็พบว่าจะถูกดูดซับโดยเรซินได้ เช่นเดียวกับโมลิบดีนัม ปกติในสารละลายจะมีความเข้มข้นของโมลิบดีนัมอยู่ระหว่าง 20 - 50 ppm. และมักจะถูกดูดซับประมาณ 40 - 50% ภายในเรซินจะมีโมลิบดีนัมอยู่ในรูปของตะกอนหรือโพลีเมอร์ และจะไม่เข้าไปในตำแหน่งไอออนของเรซิน (Resin ion sites) ทำให้ความสามารถดูดซับยูเรเนียมของเรซินไม่ลดลงแต่อย่างใด⁽¹⁰⁰⁾ นั่นคือโมลิบดีนัมนี้จะเป็นพอยซันแบบเชิงกล (Mechanical poison) และสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกับซิลิกา เป็นผลให้ลดความสามารถในการดูดซับได้ในทางอ้อม การอีลูชันด้วยไนเตรดจะทำให้โมลิบดีนัมถูกออกซิไดซ์ไปเป็นโพลีเมอร์อย่างแรง ซึ่งจะไม่เข้าไปในตำแหน่งไอออนของเรซิน

ค. ไอออนอื่น ๆ ซึ่งเป็นพอยซันเชิงกล รวมทั้งโท เทเนียม เซอร์โคเนียม ฮาฟเนียม ไนโอเบียม แอนติโมนี (Antimony) และอาร์ซี เนคหรือฟอส เฟต เชิงซ้อน^(15,98,102) การดูดซับโดยเรซินในรูปของซิล เฟตไอออนลบหรือไอออนลบ เชิงซ้อนอื่น ๆ นั้น อาจจะไฮโดรไลซ์และตกตะกอนได้ในรูปของเรซินในขณะที่ pH ภายในของเรซินเพิ่มขึ้น การเกิดความผิดปกติ (Fouling) ชนิดนี้จะมีผลทำให้ยูเรเนียมรั่วออกไปกับสารละลายที่ไหลออก ก่อนที่จะถึงจุดอิ่มตัวได้ดังแสดงใน

รูป 4.14 ฉะนั้น จึงต้องใช้ไอลูแอนต์มากกว่าปกติ เพื่อสตริป (Strip) เรซินที่ผิดปกตินี้ ความผิดปกติชนิดนี้สามารถป้องกันมิให้เกิดได้โดยการควบคุม pH หรือการใช้การชะล้างแบบสองขั้นตอน ที่มี pH สูงในน้ำล้าง



รูป 4.14 ไอลูชันของเรซินบริสุทธิ์กับ เรซินที่มีพอยชัน⁽¹⁰²⁾

ง. ทอเรียม อาจจะมีปรากฏในสารละลายกรดในรูปของซิลเฟตอออนสมเชิงซ้อน ซึ่งปกติจะถูกแทนที่โดยยูเรเนียม ที่สภาพความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ อาจจะทำให้เกิดไฮโดรไลซิสและมีการตกตะกอนของทอเรียมบางส่วนภายในเรซิน ซึ่งจะเกิดในลักษณะเดียวกันนี้ได้กับไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมด้วย

จ. โพลีไทโอเนต (Polythionates) จะก่อให้เกิดพอยชันทางเคมีซึ่งถูกดูดซับโดยเรซินได้เป็นอย่างดี และเป็นเหตุให้ความสามารถของเรซินต่อยูเรเนียมนั้นลดลง สารประกอบนี้เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ของการออกซิเดชันของสารประกอบซัลเฟอร์ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการชะล้าง การใช้ MnO_2 (หรือไพไรต์) เป็นออกซิแดนต์ จะทำให้เกิดโพลีไทโอเนตที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นได้ในสารละลาย⁽¹⁰³⁾ การใช้โซเดียมคลอเรต (Sodium chlorate) แทน MnO_2 จะทำให้การออกซิเดชันของซัลเฟอร์เกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากกว่า และจะมีโพลีไทโอเนตเกิดขึ้นในสาร-

ละลายน้อยกว่า 10 ppm. ซึ่งปกติแล้วที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 50 ppm. มักจะไม่มีผลรบกวนแต่อย่างใด ถ้าปล่อยทิ้งไว้ในรูปของไนเตรตนาน ๆ จะทำให้โพลีไทโอเนตในเรซินเกิดการสลายตัวได้เป็นซัลเฟอร์และก๊าซ NO_2 เกิดขึ้น⁽¹⁰⁴⁾. โดยซัลเฟอร์จะเป็นตัวก่อให้เกิดพอยซันเชิงกลอันยากแก่การขจัดออก การใช้ไอออนต์ที่มีกรดอยู่ระหว่าง 0.25 - 0.3 N จะสามารถช่วยขจัดโพลีไทโอเนตออกจากเรซินได้ และทำให้มันสลายตัวในสารละลายได้

(15, 16, 100,
4) รีเจนเนอเรชัน (Regeneration) 102, 104, 105)

รีเจนเนอเรชัน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการขจัดพอยซันของเรซิน ซึ่งปกติแล้วพอยซันธรรมชาติจะถูกขจัดออกได้ด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โมลิบดีนัมจะถูกขจัดออกได้ด้วยการใช้อิออนต์ประมาณ 5 - 10 เมควอลลุ่ม ซึ่งมี 0.5% NaOH หรือ NH_4OH และ 0.1 M Cl^- หรือ NO_3^- ผสมอยู่ พวกเตตระไทโอเนต (Tetrathionate) จะถูกขจัดออกได้ด้วยการใช้ 5 - 10% สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพวกไตรไทโอเนต (Trithionate) และไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) นั้นจะยังคงมีอยู่ในเรซิน แต่จะถูกขจัดออกได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือหรือกรดเจือจาง⁽¹⁰⁵⁾ ส่วนซัลเฟอร์ก็จะถูกขจัดออกได้ด้วยการเปลี่ยนไปเป็นโพลีซัลไฟด์ (Polysulfide) โดยใช้ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วจึงจะถูกแทนที่ได้ด้วยคลอไรด์⁽¹⁰⁰⁾

การขจัดซัลไฟด์ออกด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นการละลายให้แพร่กระจายออกจากเรซินได้โดยตรง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 12 - 20 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (เรซิน)⁽¹⁵⁾ ในการใช้แบบคอลัมน์นั้นควรจะทำให้เรซินที่เป็นกรดนั้นสะเทินเสียก่อนด้วยสารละลายของเกลือที่เป็นกลาง หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เจือจาง (0.5 - 10%) เพราะการทำปฏิกิริยากับ 5% NaOH โดยตรงนั้นจะก่อให้เกิดการตกตะกอนขึ้นใหม่ของมวลที่เป็นวัณในคอลัมน์ได้ ในขณะที่สารละลายต่างซึ่งมีซัลไฟด์อยู่บนที่สูงนั้นผ่านคอลัมน์ และจะทำให้ถูกทำให้เป็นกรดได้ใหม่⁽¹⁰⁴⁾ ซึ่งเป็นผลให้เกิดเป็นช่องขึ้นในเม็ดเรซิน แต่อาจแก้ไขได้ด้วยการให้เรซินทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างแก่เสียก่อน เพื่อมิให้สารละลายที่มีซัลไฟด์อยู่นั้นถูกกลายเป็นกรดขึ้นใหม่ได้ การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเปลี่ยนเรซินไปเป็นรูปของเกลือก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดนั้น ควรจะระวังมิให้เกิดปฏิกิริยาที่เป็นต่างขึ้นกับเหล็กอะลูมิเนียม และการเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์และตะกอนซัลไฟด์ขึ้นใหม่ภายในเม็ดเรซิน

สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 12 N นั้น จะใช้ใน การรีเจเนอเรชันกับเรซินที่เปราะเปื้อนด้วยไทเทเนียม เซอร์โคเนียม โมลิบดีนัม ทอเรียม เหล็ก ซิลิกา และสารอินทรีย์⁽¹⁰²⁾ แต่พวกซิลิกาและโมลิบดีนัมบางส่วนจะยังคงเหลืออยู่ ซึ่งขจัดออกได้ ด้วยการทำให้ปฏิกิริยากับ 10% สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนครั้งที่สอง

เทคนิคการทำรีเจเนอเรชันนั้นมีแสดงในตาราง

4.14 โดยจะใช้การให้ทำปฏิกิริยากับค่างก่อนแล้วจึงตามด้วยกรด เพราะการให้ทำปฏิกิริยากับ ค่างก่อนนั้นจะสามารถเพิ่มความไวของพอยซ์นต่อการอิฐชันด้วยกรด การให้ทำปฏิกิริยาเสียก่อนกับ สารละลายแอมโมเนียมไนเตรด-กรดซัลฟูริกนั้น จะสามารถออกซิไดซ์พวกโมลิบดีนัมและสารอินทรีย์ ไค ๆ ที่ทนทานต่อการถูกขจัดออกได้ การเกิดเรซินช็อก (Resin shock) จะลดลงได้ด้วยการ

ตาราง 4.14 กระบวนการรีเจเนอเรชันของเรซิน⁽¹⁶⁾

Process	Reagent sequence	Contact Bed time, volumes hr		Ash %		Capacity resin lb U ₃ O ₈ /cu ft		Effluent U ₃ O ₈ , mg/liter*
				Initial	Final	Breakthrough	Saturation	
Complete inverse process	0.8 N NH ₄ NO ₃ -0.25 N H ₂ SO ₄	9	7.5	14.6	0.11	3.35-3.55	3.90-4.10	<10
	10% Na ₂ CO ₃	7	8					
	10% NaOH	8	8					
	10% NaCl	6	4					
	42% H ₂ SO ₄	4.5	20					
Condensed inverse process	10% NaOH-10% NaCl	6	15	18.7	0.71	3.55	—	—
	10% NaCl	6	6					
	20% H ₂ SO ₄	7	24					
Fresh resin capacity		—	—	—	—	3.72	4.48	<10

*On 13th bed volume.

เปลี่ยนเรซินจากรูป OH⁻ ไปเป็น Cl⁻ ก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับกรดแก่ ส่วนเทคนิคการทำรีเจเนอเรชันด้วยวิธีอื่นนั้นคือ การใช้ส่วนผสมของกรดซัลฟูริกกับแอมโมเนียม ไบฟลูออไรด์ ในการขจัดพวกซิลิกาและไทเทเนียม⁽¹⁵⁾ และการใช้สารละลายค่างเจือจางของโซเดียมไคในการทำอิฐชันกับ โพลีไทโอเนต ซัลเฟอร์ และซิลิกา นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลายซัลไฟด์หรือโซเดียมซัลไฟด์ ในการขจัดพวกโพลีไทโอเนต การเกิดสกรกที่ผิวด้วย CaCO₃ ก็อาจจะขจัดออกได้ด้วยการใช้สาร-

ละลายของกรดไฮโดรคลอริกหรือไนตริกที่ pH ใกล้เคียง 1.0

จ. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและอุปกรณ์ที่ใช้

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโรงงานส่วนใหญ่

จะเป็นการกระทำที่ต่อเนื่องกันของการดูดซับ อีลูชัน รวมทั้งขั้นตอนของการล้าง การรีเจเนอเรชันและอื่น ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นแบ่งเป็นสองแบบใหญ่ ๆ คือ แบบคอลัมน์และแบบ RIP โดยแบบคอลัมน์จะมีสองชนิดคือ ชนิดฟิกเบด (Fixed bed) และชนิดมูฟวิงเบด (Moving bed) ส่วนแบบ RIP ก็จะมีสองชนิดคือ ชนิดบาสเกต (Basket) และชนิดต่อเนื่อง (Continuous)

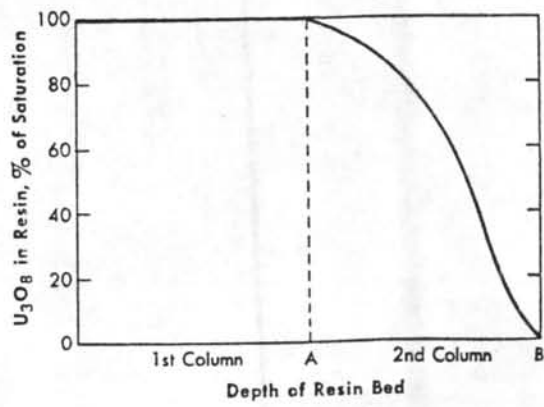
1) การแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์ (Columnar Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์นี้จะต้องมีความจุของการอึดตัวของเรซินที่อยู่เรเนียมที่คงที่ ควรออกแบบอุปกรณ์ให้เรซินมีการอึดตัวของยูเรเนียม ณ จุดซึ่งถูกขจัดออกจากการดูดซับและการถูกอีลูชัน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะค่าใช้จ่ายในการอีลูชันต่อหน่วยของเรซินนั้นจะไม่คำนึงถึงปริมาณของยูเรเนียมที่ถูกดูดซับบนเรซิน

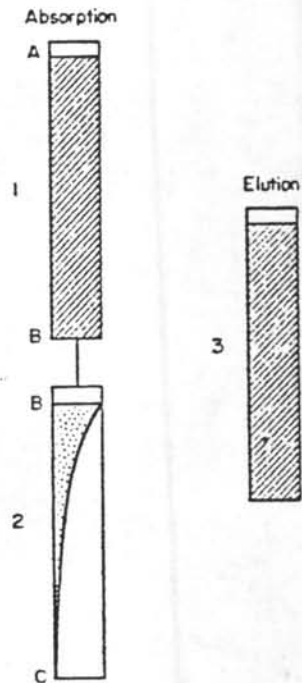
ก) กระบวนการ^(10,15,24)

กระบวนการในการแยกยูเรเนียมออกมาด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์นี้จะประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

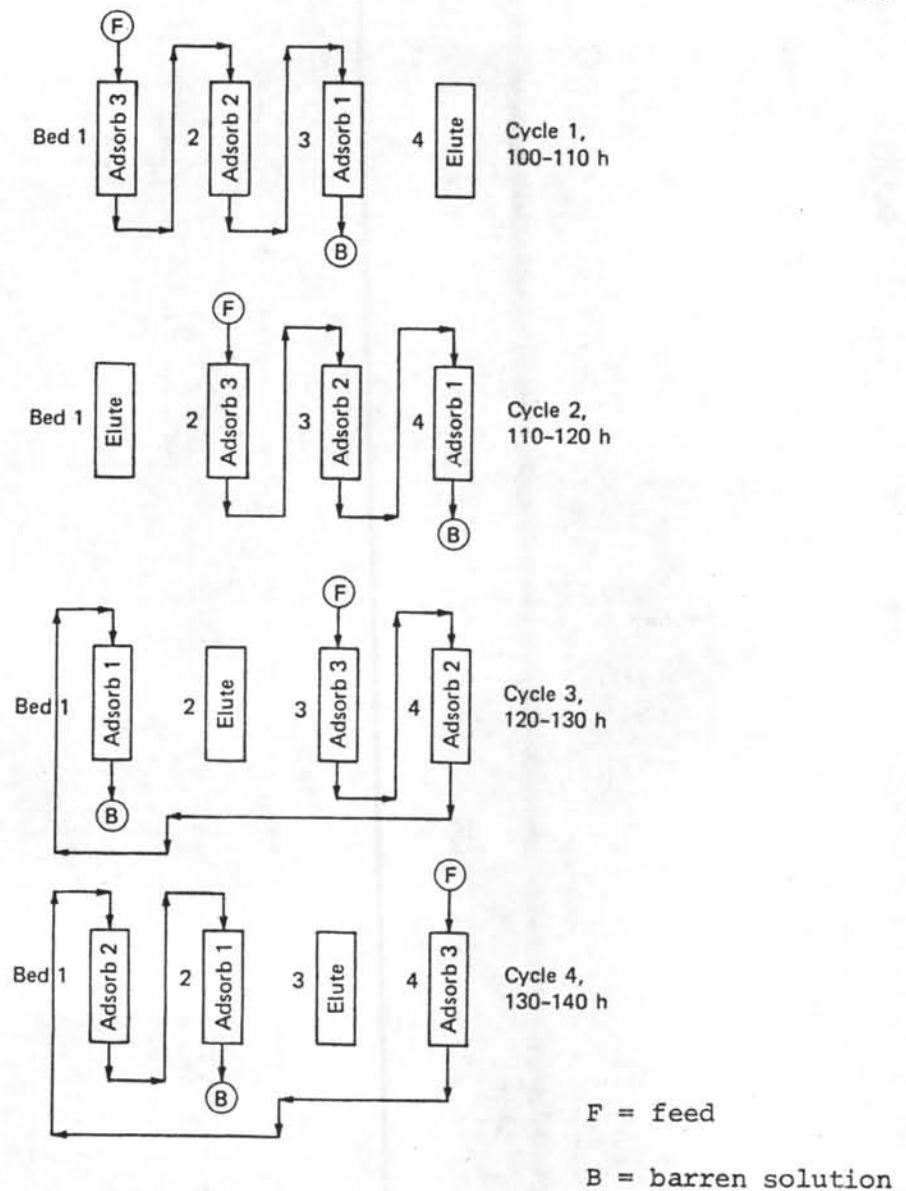
1. การดูดซับ โดยยูเรเนียมจะมีความอึดตัวกับเรซินส่วนบนและส่วนล่างจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมลดลง ดังในรูป 4.15 โดยใช้ 3 คอลัมน์ เริ่มจากให้คอลัมน์แรกอึดตัวด้วยเรซิน แล้วจึงนำคอลัมน์ที่สองมาต่อ เมื่อเริ่มมียูเรเนียมปรากฏร่วออกมาอยู่ในส่วนที่ไหลออก ก็นำเอาคอลัมน์แรกออก และนำเอาคอลัมน์ที่สามมาต่อเพื่อดูดซับยูเรเนียมที่ร่วออกจากคอลัมน์ที่สอง เมื่อคอลัมน์ที่สามเริ่มมียูเรเนียมร่วออก ก็นำคอลัมน์แรกซึ่งทำอีลูชันแล้วมาต่อ เพื่อดูดซับยูเรเนียมที่ร่วออกนี้ ดังนั้นจะเห็นว่าจะมีการดูดซับสองคอลัมน์และอีลูชันหนึ่งคอลัมน์ ดังแสดงในรูป 4.16 หรืออาจจะใช้คอลัมน์มากกว่านี้คือ 4 คอลัมน์ ดังในรูป 4.17 ซึ่งเรียกว่า กระบวนการหลายคอลัมน์



รูป 4.15 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในเรซินที่สัมพันธ์กับความลึกของเม็ดเรซินในคอลัมน์ที่สอง (15)



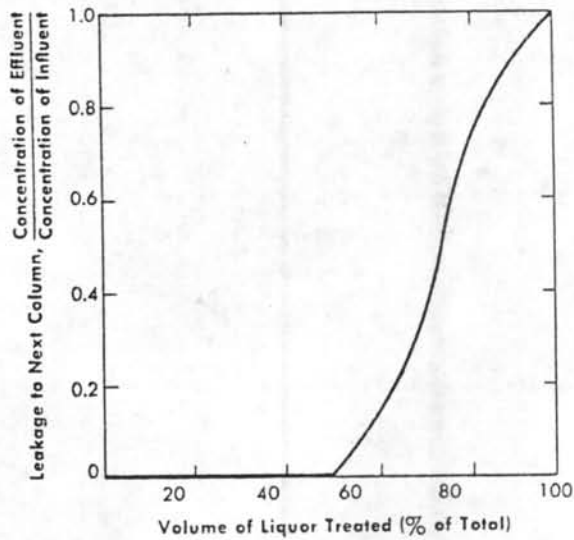
รูป 4.16 การแลกเปลี่ยนไอออนแบบสามคอลัมน์ (24)



รูป 4.17 การแลกเปลี่ยนไอออนแบบสี่วัฏจักร (คอลัมน์)⁽¹⁰⁾

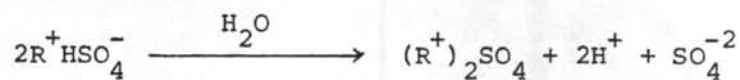
(multi-column processes)

วัฏจักรในการทำการดูดซับ (Loading cycle) จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำล้าง และความจุของเรซิน ปกติในระหว่างการปฏิบัติในกระบวนการนั้น จะมีการวิเคราะห์สารละลายที่อืดได้ (Pregnant liquor) สารละลายส่วนที่ไหลออกจากคอลัมน์แรก (Semi-pregnant) และสารละลายส่วนที่ไหลออกจากคอลัมน์ที่สอง (Barren effluent) ซึ่งระบบของกระบวนการแสดงไว้ดังรูป 4.18



รูป 4.18 กราฟแสดงการรั่วออกของยูเรเนียมในการแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์⁽¹⁵⁾

2. ฟลัช (Flush) เมื่อคอลัมน์ที่สองเริ่มมียูเรเนียมรั่วออก ก็หยุดการผ่านสารละลายที่ต้องการดูดซับยูเรเนียม แล้วทำการผ่านน้ำเข้าไปฟลัชตลอดคอลัมน์แรกผ่านมายังคอลัมน์ที่สอง ด้วยอัตราการไหลที่เท่ากับตอนที่ผ่าน เข้าไปดูดซับ ปกติจะใช้น้ำ เข้าไปฟลัชประมาณ 1 - 3 ปริมาตรของเบด จุดประสงค์ของการทำฟลัชก็เพื่อไปแทนที่น้ำชะล้างที่อยู่ตามช่องว่างของเรซิน และแทนที่ช่องว่างที่อยู่เหนือเรซินในคอลัมน์ การฟลัชจะทำให้เหล็กและยูเรเนียมบางส่วนถูกจัดออก นอกจากนี้ยังสามารถลดสภาพความเป็นกรดของเรซินลงได้โดยการไฮโดรไลซิส ดังสมการ



3. การล้างกลับและทำให้อนกั้น (Backwash and Settling) เนื่องจากในระหว่างการดูดซับยูเรเนียมนั้น น้ำล้างจะถูกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรองไปในตัว ปกติแล้วเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่แรง (Strong polyelectrolyte) และสามารถจะทำให้วัสดุที่เป็นคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งมีอยู่ในสารละลายชะล้างที่ผ่านการกรองและทำให้ใสแล้วนั้น เกิดการรวมตัวเป็นก้อน (Floculate) ขึ้นได้ ตามปกติของแข็งที่จะเกิดเป็นก้อนนี้จะรวมตัวกันเป็นชั้นอยู่ส่วนบนของเบดเรซิน ซึ่งจะ เป็นเหตุให้เกิดการไหลที่ไม่สม่ำเสมอหรือเกิดเป็นช่องในเบดเรซิน และทำให้ความดันลดลงมากขึ้น การขจัดก้อนของแข็งที่เกิดขึ้นนี้สามารถกระทำได้ด้วยการล้างกลับ เพื่อให้เรซินถูกขยายตัวออกโดยกำลังน้ำอัน เกิดจากการให้น้ำผ่าน เรซินชั้นข้างบน

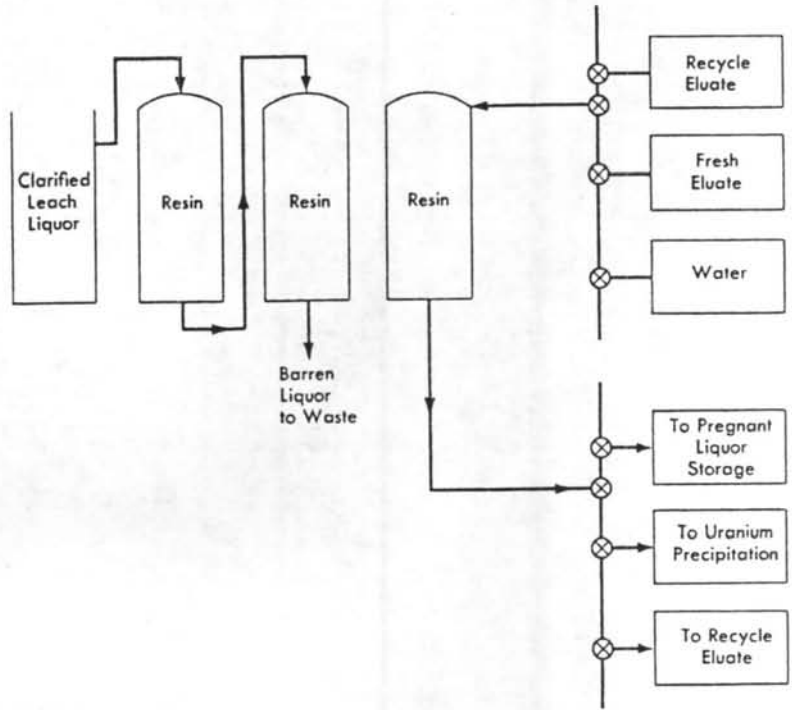
และด้วยเหตุที่อนุภาคที่เป็นของแข็งนี้จะตกลงนอนกันได้ช้ากว่า เม็ด เรซิน ฉะนั้นจึงสามารถจัดออกจากเรซินได้ ปกติจะทำการล้างกลับด้วยอัตราการไหลประมาณ 3 - 4 แกลลอนต่อตารางฟุตต่อ นาที จนกระทั่งน้ำที่ไหลออกนั้นใส ซึ่งจะใช้น้ำประมาณ 4 - 5 เท่าของปริมาตรของ เบด การล้างกลับนี้จะทำให้ยูเรเนียมถูกขจัดออกไปประมาณ 0.5% จากปริมาณที่ถูกดูดซับไว้ตอนแรก ภายหลังการล้างกลับแล้วนั้น เรซินจะถูกทำให้ตกลงนอนกันก่อนที่จะใช้ทำอีลูชันต่อไป

4. อีลูชัน การอีลูชันยูเรเนียมจากเรซินนั้น ปกติจะใช้ในเตรตหรือคลอไรด์ ซึ่งในเตรตจะเป็นอีลูแอนต์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าคลอไรด์ประมาณ 2 - 3 เท่า โดยการอีลูชันด้วยในเตรตนั้นจะใช้อีลูเอครวมประมาณ 8 เท่าของปริมาตรของ เบด ส่วนการอีลูชันด้วยคลอไรด์นั้นจะใช้อีลูเอครวมมากกว่า 25 เท่าของปริมาตรของ เบด ดังนั้นในการใช้คลอไรด์ทำอีลูชันจึงต้องใช้คอลัมน์ 4 ฟุต ในการทำอีลูชันนั้นอัตราการไหลจะแตกต่างกันไป โดยในเตรตอีลูแอนต์จะใช้อัตราการไหลประมาณ 0.05 แกลลอนต่อลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ส่วนคลอไรด์อีลูแอนต์จะใช้อัตราการไหลประมาณ 0.25 - 0.50 แกลลอนต่อลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เนื่องจากจะมีอีลูแอนต์ปนอยู่ในสารละลายที่เกิดจากอีลูชัน ฉะนั้นจึงควรมีการนำอีลูเอคกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เพื่อเป็นการประหยัด ดังนั้นโรงงานจึงต้องมีระบบการอีลูชันแบบปิด เพื่อให้มีการสมดุลย์ของสารละลาย ดังแสดงในรูป 4.19 นอกจากนี้ยังจะต้องมีการสมดุลย์ของอิเล็กโตรไลต์ โดยสารละลายจากอีลูชันที่จะนำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องไม่มีไอออนที่เป็นอุปสรรคต่อประสิทธิภาพของอีลูชัน

ปกติแล้วในอีลูเอคจะมีซิลเฟต 3 M ต่อยูเรเนียม 1 M และไบซิลเฟตที่มีอยู่ในเรซินก็จะหลุดออกมากลายเป็นกรดซิลฟูริกในอีลูเอค เมื่อตกตะกอนยูเรเนียมออกจากอีลูเอค จะทำให้ซิลเฟตยังคงมีอยู่ในสารละลาย ซึ่งจะมีเพิ่มขึ้นเมื่อนำสารละลายนั้นกลับมาใช้ใหม่ การเพิ่มขึ้นของซิลเฟตจะทำให้อีลูชันเกิดขึ้นยากกว่าและเด่นชัดน้อยกว่า การบ่งกันการเพิ่มขึ้นของซิลเฟตนั้น กระทำได้ด้วยการใช้การตกตะกอนสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะใส่สารละลายปูนขาว เจือจางลงไปอีลูเอค เพื่อปรับ pH เป็น 3.5 ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นการทำให้ตะกอนที่ประกอบด้วยสารเคมีที่ราคาถูก ขจัดซิลเฟตออกจากอีลูเอคในรูปของคัลเซียมซิลเฟต และสามารถตกตะกอน เหล็กที่มีปนอยู่ในอีลูเอค ทำให้ได้สารละลายที่มียูเรเนียมบริสุทธิ์มากขึ้น แต่จะทำให้ยูเรเนียมถูกตกตะกอนไปด้วยมากกว่า 5% ซึ่งเรียกว่า เค้กเหล็ก (Iron cake) ดังนั้นจึงต้องนำไปชะล้างน้ำยูเรเนียม

กลับออกมาใหม่ สารเคมีที่ใช้ตกตะกอนยูเรเนียมจากอีลูเอตคือ แอมโมเนีย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซีย (Magnesia) โดยใช้ pH ประมาณ 6.8 - 7.0



รูป 4.19 สารละลายที่ไหลผ่านระบบการแลกเปลี่ยนไอออนแบบสามคอลัมน์⁽¹⁵⁾

5. การล้างกลับภายหลังการทำอีลูชัน เพื่อจัดไนเตรดที่ยังคงติดค้างอยู่ในที่ว่างของเรซินและที่อาจแพร่กระจายไปยังส่วนบนของคอลัมน์ มิฉะนั้นจะมียูเรเนียมรั่วออกมาได้ เมื่อมีการดูดซับใหม่ ยูเรเนียมที่รั่วออกนี้เรียกว่า รอยัลบาร์เรน (Royal barren) ฉะนั้น การล้างกลับในขั้นตอนนี้จึงสามารถครอยัลบาร์เรนลงได้ ทำให้แยกยูเรเนียมออกมาได้มากกว่า นอกจากนี้การล้างกลับนี้ยังสามารถจัดของแข็งที่ตกตะกอนขึ้นภายหลังการทำอีลูชัน อัตราการไหลของการล้างกลับภายหลังอีลูชันจะต่ำกว่าอัตราการไหลของการล้างกลับภายหลังการดูดซับ เพราะเรซินในรูปของไนเตรดหรือคลอไรด์นั้นจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าเรซินที่อยู่ในรูปของยูเรนิลซัลเฟต

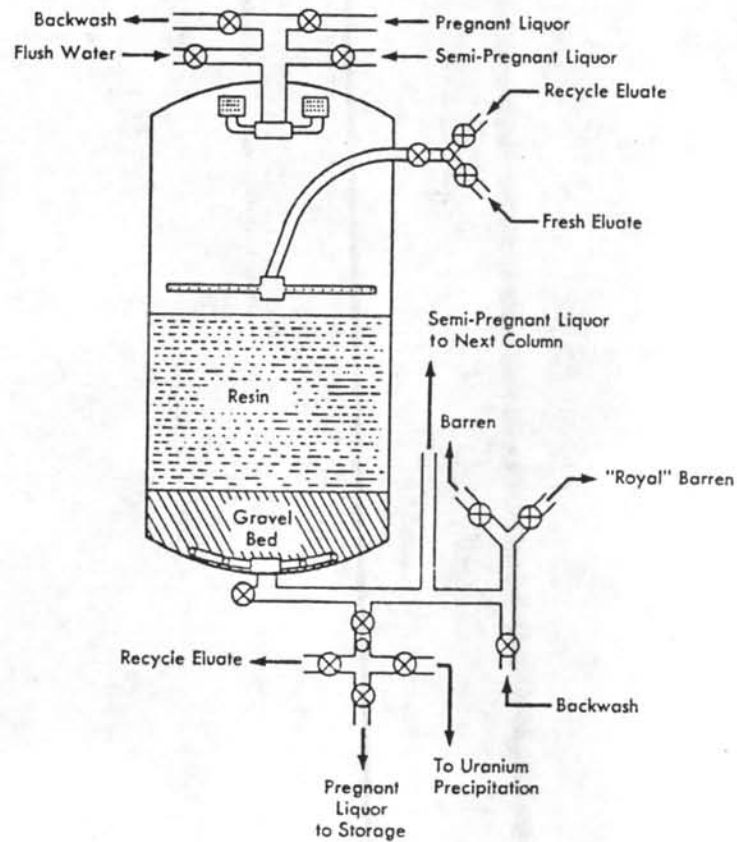
6. การเตรียมพร้อม (Standby) เพื่อไว้ใช้ในครั้งต่อไป โดยปล่อยคอลัมน์ทิ้งไว้เพื่อให้เรซินเปลี่ยนรูปจากไนเตรดหรือคลอไรด์ไปเป็นไฮซัลเฟต ก่อนที่จะใช้ในการดูดซับยูเรเนียมต่อไป

ข) อุปกรณ์

- 1) คอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนแบบฟิกซ์ เบด
(Fixed Bed Column Ion Exchange)^(15,104) เป็นคอลัมน์รูปทรงกระบอกปรับความดันได้
ตั้งในรูป 4.20 มีก้นด้านล่าง เป็นรูปจาน คอลัมน์จะทำด้วย เหล็กกล้าที่มียางบุอยู่ผิวใน เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ปกติในทางการค้าแล้วจะใช้คอลัมน์ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 - 9 ฟุต สูง
ประมาณ 12 - 15 ฟุต บรรจุเรซินประมาณ 200 - 300 ลูกบาศก์ฟุต มีอัตราของการไหลระหว่าง
0.25 - 1.00 แกลลอนต่อลูกบาศก์ฟุตต่อนาที หรือใช้เวลาริเทนชัน (Retention time) ประ-
มาณ 3 - 12 นาทีต่อคอลัมน์ ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสารละลายขี้ด่างและ เงื่อนไขของ เรซิน
ปกติจะใช้แบบระบบสามคอลัมน์หรือสี่คอลัมน์
- 2) คอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนแบบมูฟวิง เบด
(Moving Bed Column Ion Exchange)^(10,106) เป็นระบบการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดัดแปลง
แก้ไขจากระบบฟิกซ์ เบด โดยจะให้มีการทำงานกันเป็นชุด ๆ ใช้คอลัมน์ 10 คอลัมน์ต่อระบบ โดย
ใช้ในการดูดซับสองชุด ๆ ละ 3 คอลัมน์ อีลูชันสองชุด ๆ ละ 3 คอลัมน์ และสำหรับการเปลี่ยน
ย้ายและการล้างกลับอีก 1 คอลัมน์⁽¹⁰⁶⁾ นอกจากนี้ยังมีท่อสำหรับให้ เรซิน เคลื่อนย้ายด้วยแรงน้ำ
ได้ ๗ ตำแหน่งสูงจากฐานประมาณ 10 ฟุต เรซินที่ใช่จะเป็น เม็ด เล็ก ๆ ทรงกลม ซึ่งจะช่วยให้มัน
สามารถจะ เคลื่อนตัวออกนอกคอลัมน์ได้ด้วยแรงจากการให้ของ เหลวไหลผ่านขึ้นและแรงจากการ
บีบของ เหลวไปสู่คอลัมน์หรือถังอื่นต่อไป

การทำงานของคอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนแบบมูฟวิง เบดนี้ จะเป็นวงจรแบบระบบฟิกซ์ เบด
โดยจะเคลื่อนย้าย เอาเรซินที่ดูดซับยา เร เนียมแล้ว (Loaded resin) จากคอลัมน์ดูดซับไปยังคอก-
ลัมน์ใดคอลัมน์หนึ่งในสามคอลัมน์ของคอลัมน์อีลูชัน และหลังจากอีลูชันสมบูรณ์แล้ว เรซินที่ถูกสกัด
แล้วจะถูก เคลื่อนย้ายไปยังคอลัมน์ใดคอลัมน์หนึ่งในสองคอลัมน์ของคอลัมน์ดูดซับ นอกจากนี้ยังจะ
ต้องล้าง เรซินด้วยน้ำที่ปล่อยให้ไหลลง (Down-flowing water) แล้วจึงถูกพาขึ้นด้วยน้ำ (Up-
flowing water) ไปยังถังที่ใช่เก็บ (Resin transfer and backwash tank) และจะ
ถูกล้างอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะเคลื่อนย้ายไปใช้ยังคอลัมน์ต่อไป ดังนั้น จึงมีข้อดีหลายประการอันจะ
ทำให้สามารถลดการปะปนของสารละลายจากแต่ละระบบ (ดูดซับและอีลูชัน) ลงได้ คือ

- มีระบบท่อและลิ้น (Valve) แบบง่าย ๆ

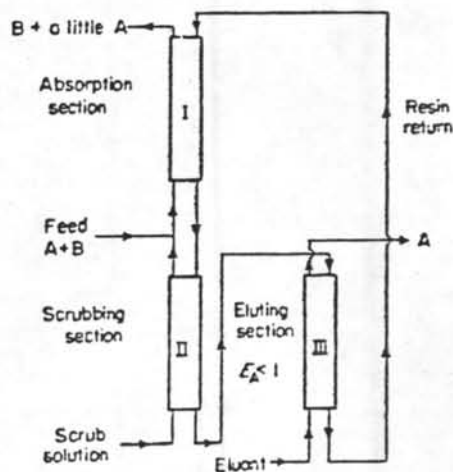


รูป 4.20 คอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนแบบฟิกซ์ เบดที่ใช้กับยูเรเนียม (104)

- คอลัมน์ดูดซับจะต่อเฉพาะกับแหล่งจ่ายน้ำชะล้าง ด่างสารละลาย และถังใส่เรซินที่เคลื่อนเข้ามาเท่านั้น
- คอลัมน์อีลูชันจะต่อเฉพาะกับแหล่งอีลูแอนต์ แหล่งจ่ายน้ำ อีลูเอต และถังใส่เรซินที่เคลื่อนเข้ามาเท่านั้น

3) คอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนแบบต่อเนื่อง (Continuous Ion Exchange Column) (24,107) เนื่องจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นมักจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง อาจเป็นเพราะอัตราการแพร่กระจายของไอออนสู่เรซินนั้นมักจะช้า ทำให้เกิดการหน่วงเหนี่ยวผลผลิตและเรซินขึ้นได้ ซึ่งอาจปรับปรุงได้ด้วยการกระทำแบบต่อเนื่องเพื่อให้เรซินถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และยังสามารถควบคุมกระบวนการได้ง่ายกว่า

การแลกเปลี่ยนไอออนแบบต่อเนื่องนี้จะใช้หลักการของการไหลแบบสวนทาง ดังเช่นใน



รูป 4.21 การแลกเปลี่ยนไอออนแบบค้อเนื่องด้วยระบบสามค้อลัมน์⁽¹⁰⁷⁾

ระบบสามค้อลัมน์ ดังแสดงในรูป 4.21 ซึ่งเป็นการแยกส่วนประกอบสองชนิด A และ B ออกจากกัน โดยให้ไหลผ่านแบบสวนทางกัน อันเป็นหลักการ เดียวกันกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งมี $E_A > 1$ และ $E_B < 1$ ดังสมการ

$$E_A = \frac{R}{S} \cdot K_A$$

$$E_B = \frac{R}{S} \cdot K_B$$

โดย E_A, E_B = สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficients) ของทั้งสององค์ประกอบ

R, S = อัตราการไหลของ เรซินและสารละลายตามลำดับ

2) การแลกเปลี่ยนไอออนแบบ เรซิน-อิน-พัลพ์ (Resin-in-pulp Ion Exchange)

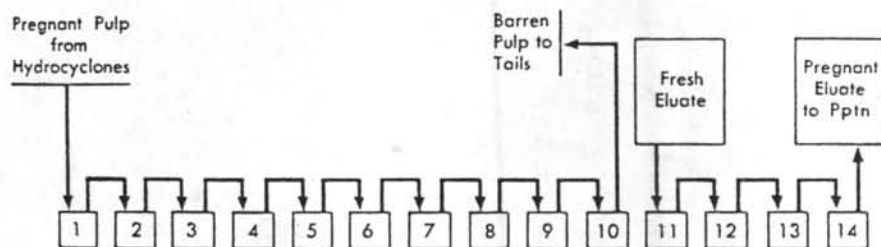
เนื่องจากลินแร่ยูเรเนียมบางชนิดนั้น ภายหลังจากชะล้างแล้วจะกรองได้ไม่ดีและยังคงมีการตกลงนอนกัน เกิดขึ้นในภายหลังได้ อันจำเป็นจะต้องใช้อุป-

กรณีในการแยกของ เหลว - ของแข็งออกจากกันที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งการใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแบบ RIP นี้ จะสามารถสกัดยูเรเนียมออกจากน้ำล้างพัลพ์ (Leach pulp) ได้โดยตรง (89,108) ซึ่งจะมีปฏิกิริยาทาง เคมีของกระบวนการ เหมือนกับการแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์ แต่หลักการของอุปกรณ์จะแตกต่างกัน

ก) กระบวนการ⁽¹⁵⁾

กระบวนการในการแยกยูเรเนียมออกมาด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนแบบ RIP นี้ จะประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) วัฏจักรของการผ่านเข้า (Loading Cycle) ในกระบวนการแบบ RIP นี้ จะมีชุด (Banks) สำหรับการดูดซับต่อเนื่องกันถึง 10 ชุด โดยเฉพาะในกระบวนการ RIP ชนิด 14 ชุด ดังในรูป 4.22 นั้น จะมีชุดที่ 1 - 10 เป็นชุดสำหรับการดูดซับ โดยจะเริ่มใส่พัลพ์จากชุดที่หนึ่ง แล้วผ่านไปในอีก 9 ชุด ซึ่งพัลพ์ที่ได้จากชุดที่ 10 นี้ จะเป็นสารละลายที่ไม่มียูเรเนียมแล้ว



รูป 4.22 วงจรแสดงการไหลของสารละลายในกระบวนการ RIP แบบ 14 ชุด⁽¹⁵⁾

เมื่อปรากฏยูเรเนียมขึ้นในน้ำส่วนที่ไหลออกจากชุดที่ 10 แสดงว่า ชุดที่ 1 จะอิ่มตัวด้วยยูเรเนียมแล้วต้องนำออก และชุดที่ 11 ซึ่งเพิ่งจะอีลูชันใหม่ ก็จะเข้าแทนที่ชุดที่ 1 เพื่อดูดซับยูเรเนียมที่รั่วออกจากชุดที่ 10 นี้ ระยะเวลาในการเปลี่ยนแต่ละครั้งจะประมาณ 1.5 - 3.0 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยูเรเนียมในพัลพ์ อัตราการไหล และความจุเรเนียมของเรซิน

2) ฟลัช (Flush) เมื่อชุดที่ 1 ถูกเอาออกจากวงจรของการดูดซับ ก็นำมาทำให้แห้งแล้วจึงฉีดด้วยน้ำเล็กน้อย เข้าไปแทนที่สารละลายที่ไม่มียูเรเนียมแล้ว และขจัดตะกอนโคลน

ละเยียดที่ติดแน่นอยู่ออกไป นำน้ำส่วนที่ไหลออกจากการล้างนี้ไปเก็บไว้เพื่อนำไปแยกยูเรเนียมออกมาใหม่

3) อีลูชัน ปกติจะใช้อีลูชันด้วยไนเตรด โดยใช้ 1 N NH_4NO_3 ผสมกับ 0.1 - 0.2 N H_2SO_4 หรือ HNO_3 การอีลูชันแบบหลายชั้นคอนนั้นจะแตกต่างจากแบบคอลัมน์ โดยในแบบ RIP ชนิด 14 ชุดนี้ จะมีชุด 4 ชุดซ้อนกันสำหรับทำอีลูชัน แล้วอีลูเอตจากชุดที่ 14 จะถูกขับไปสู่ชุดที่ 1 ใหม่ ดังในรูป 4.22

การตกตะกอนของยูเรเนียมจะเหมือนกับแบบคอลัมน์ จะแตกต่างกันก็เพียงแต่ต้องทำให้ใสเสียก่อนเท่านั้น การตกตะกอนแบบสองชั้นคอนนั้น พวกตะกอนโคลนละเยียดจะรวมตัวกันเป็นก้อนดีอย่างดี และขจัดออกไปได้ในรูปของเค้ก เหล็ก ปกติจะใช้ MgO เป็นตัวตกตะกอนยูเรเนียม

การสมมูลของสารละลายในแบบ RIP นี้จะเกิดได้ยากกว่าในแบบคอลัมน์ เพราะในแบบคอลัมน์นั้นปริมาตรของ เบดแรกหรือน้ำส่วนที่ไหลออกจากการอีลูชันนั้น จะสามารถให้ไหลกลับไปยังน้ำชะล้างได้ แต่ในแบบ RIP จะไม่สามารถกระทำได้ ปกติแล้วอีลูเอตที่ไม่มียูเรเนียมนั้น จะต้องถูกทิ้งไปในแต่ละวงจรประมาณ 10% โดยจะมี NH_4NO_3 สูญเสียไปด้วยประมาณ 3.8 - 4.5 ปอนด์คือ U_3O_8 1 ปอนด์

การสมมูลของอิเล็กโตรไลต์จะเกิดขึ้นได้ด้วยการทำลีด-ออฟ (Bleed-off) ในการตกตะกอนแบบสองชั้นคอนนั้นจะมีซิล เฟตเพิ่มขึ้นจนถึง 40 กรัมต่อลิตร ในขณะที่การตกตะกอนแบบชั้นคอนเดียวจะมีซิล เฟตเพิ่มขึ้นจนถึง 100 กรัมต่อลิตร

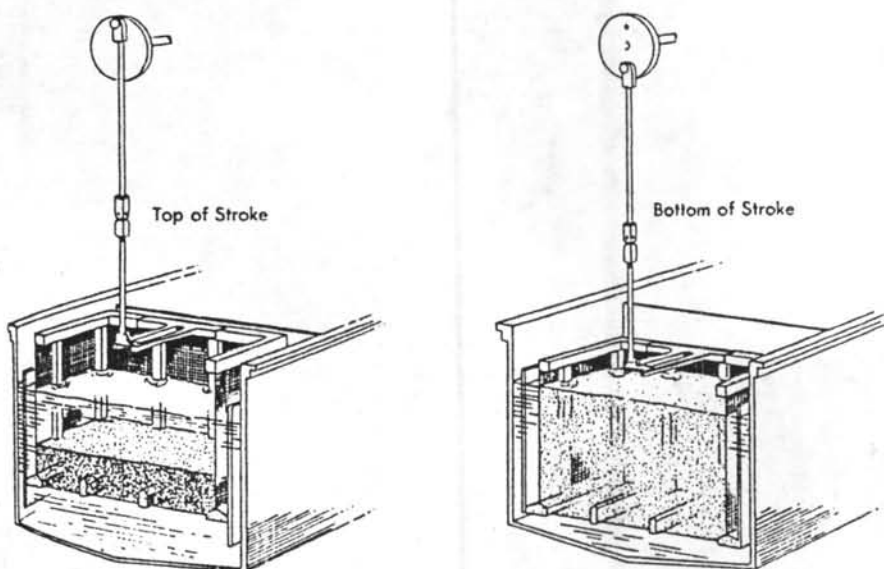
ข) อุปกรณ์

1) การแลกเปลี่ยนไอออนแบบ เรซิน-อิน-พัลพ์ ด้วยตะกร้า (Basket Resin-In-Pulp Ion Exchange) (16,89,109,110) ปกติแล้วภายหลังการชะล้างสินแร่ พวกอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ ๆ นั้น จะถูกขจัดออกด้วยคลาสิฟิเออร์ โดยทำการแยก เม็ดแร่และตะกอนคล้ายโคลนละเยียดนี้ด้วยไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclones) เพราะถ้าผ่านของผสมนี้ไปยังคอลัมน์ของการแลกเปลี่ยนไอออนแบบฟิกซ์ เบดแล้ว จะทำให้พัลพ์ไปสะสมอยู่ในระหว่าง เม็ด เรซินและทำให้การไหลของสารละลายถูกขวางกั้น ฉะนั้นปัญหาที่อาจแก้ไขได้ด้วย

การใช้การแลกเปลี่ยนไอออนแบบ RIP ในตะกร้า

ในทางปฏิบัติจะใช้เรซินใส่ไว้ในตะกร้ารูป

ลูกบาศก์ที่ทำด้วยเหล็กไร้สนิม และปิดกั้นด้วยตะแกรงเหล็กไร้สนิมหรือพลาสติก แต่ด้านบนจะเปิด⁽⁸⁹⁾ ดังแสดงในรูป 4.23 ตะกร้าจะมีขนาดด้านข้างอยู่ระหว่าง 4 - 6 ฟุต จูเรซินได้ประมาณ 15 - 40 ลูกบาศก์ฟุต ปกติ เม็ดเรซินที่ใช้มันต้องมีขนาดประมาณ 10 - 20 เมช อย่างน้อย 90% ส่วน ตะแกรงที่กั้นนั้นจะมีรูขนาด 28 เมช ในการสร้าง RIP นั้นจะใช้ยางเคลือบผิวของตะแกรงเหล็ก ไร้สนิมและใช้แผ่นไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) ดัดแน่นกับตะแกรงพลาสติก⁽¹¹⁰⁾ และจะมี ตะกร้าประมาณ 10 ใบในแต่ละชุดหรือถังสี่เหลี่ยม แต่ละตะกร้าจะ เชื่อมต่อกันด้วยข้อเหวี่ยงมอเตอร์ เพื่อให้ตะกร้าเคลื่อนขึ้นลงได้ในอัตรา 6 - 12 สโตรค (Stroke) ต่อนาที โดยในขณะที่สโตรค ขึ้นจะทำให้ตะกร้ามีการเคลื่อนไหวและทำให้ เม็ดเรซินมารวมตัวกันมีบ เหาสารละลายที่เหลือนอกมา แต่ในขณะที่สโตรคลงก็จะทำให้ เม็ดเรซินขยายตัวออกและสารละลายผ่าน เข้ามาถึงใหม่อีก นอกจากนี้ การเคลื่อนไหวของตะกร้าจะทำให้พวกตะกอนโคลนละ เเย็ด เกิดการแขวนลอยขึ้นด้วย พัลฟ์ที่ใช้จะ ต้องมี เม็ดแร่อยู่ไม่เกิน 8% และมีขนาดไม่เกิน -325 เมช จะถูกบีบหรือไหลไปด้วยแรงโน้มถ่วง ผ่านชุดอย่างต่อเนื่องกัน



รูป 4.23 ตะกร้า RIP⁽¹⁰⁹⁾

เวลาที่พัลพ์อยู่กับเรซิน (Retention time) สำหรับระบบ RIP นี้จะนานกว่าในระบบคอลัมน์ คือประมาณ 7 - 17 นาทีต่อชุด นอกจากนี้ยูเรเนียมจะถูกสกัดออกได้ดีเมื่อมีอัตราส่วนพัลพ์ต่อเรซินเป็น 6:1 ส่วนเงื่อนไขอื่น ๆ มีแสดงในตาราง 4.15

ตาราง 4.15 เงื่อนไขของระบบ RIP⁽¹⁶⁾

Adsorption	
Solution feed rate (average)	0.65 gpm/ton ore/day
Total resin to pulp feed ratio	10 to 1, to 15 to 1 gal resin/gpm pulp
Pulp to resin ratio per bank	4.5 to 1, to 6.5 to 1
Residence time per bank	8 to 16 minutes
Cycle time	90 to 150 minutes
Loading	3.5-4.5 lb U ₃ O ₈ /cu ft
Elution	
Pulp to resin ratio per bank	4.5 to 1, to 6.0 to 1
Eluate grade	8 to 12 g U ₃ O ₈ /liter

2) การแลกเปลี่ยนไอออนต่อเนื่องแบบเรซิน-อิน-พัลพ์ (Continuous Resin-In-Pulp Ion Exchange)^(16, 111) ในกระบวนการนี้เรซินและพัลพ์หรือเรซินและอีลูแอนต์จะเคลื่อนที่ด้วยการไหลผ่านชุดของถังแบบสวนทางกัน โดยเรซินและของเหลวจะอยู่แยกกันคนละถัง เรซินที่ดูดซับแล้วจะเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องจากถังที่ดูดซับสู่ถังที่อีลูชันและบาร์เรนเรซิน (Barren resin) จะเคลื่อนตัวจากถังอีลูชันกลับสู่ถังที่ดูดซับ ในถังจะมีการปั่นกวาดด้วยอากาศหรือมิกเซอร์ (Mixer) เพื่อให้ผสมกันอย่างทั่วถึงและปราศจากการเสียดสีกันอย่างรุนแรงของเม็ดเรซิน โดยส่วนจากแต่ละถังจะถูกบีบหรือยกด้วยอากาศขึ้นไปยังอุปกรณ์ที่ใช้แยกเรซิน ซึ่งอยู่สูงกว่า จากนั้นเรซินจะตกลงมายังถังข้างล่างด้วยแรงโน้มถ่วง ในขณะที่ของเหลวจะไหลไปยังถังที่อยู่ลำดับก่อน ต้นแบบของการแลกเปลี่ยนไอออนต่อเนื่องแบบไหลสวนทางกันนี้คือ ระบบของ Infilco CST Exchanger⁽¹¹¹⁾

บาร์เรนเรซินจากวงจรอีลูชันจะถูกทำให้เป็นพัลพ์ใหม่ด้วยน้ำ แล้วจึงปล่อยสู่วงจรดูดซับ ส่วนเรซินที่ดูดซับแล้วจากวงจรดูดซับจะถูกล้างบนตะแกรง เพื่อแทนที่สารละลายพัลพ์ และสารละลายนี้จะนำกลับไปบดหรือแยกจำพวกใหม่ ปกติในการดูดซับจะใช้ประมาณ 6 - 8 ถัง และถังที่ 7 - 14 จะใช้ทำอีลูชัน

ส่วนผสมที่ป้อนเข้าระบบ RIP แบบค่อ

เนื่องนี้จะมีของแข็งผสมอยู่สูงกว่าในแบบตะกร้า และไม่ควรมีของแข็งเกิน 11 - 12% ปกติในระบบ RIP แบบค่อเนื่องนี้จะมีเวลาของการดูดซับ 18 - 20 นาทีต่อถังในวงจรดูดซับ และ 25 - 30 นาทีต่อถังในวงจรอีลูชัน เม็ดเรซินที่ใช้จะเล็กกว่าในแบบตะกร้าคือจะใช้ขนาด -20 ถึง 50 เมช เม็ดเรซินที่เล็กนี้จะทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า เหนียวมากกว่า และราคาถูกกว่า ข้อสำคัญคือไม่ควรให้อนุภาคที่มีขนาด เม็ดหยาบผ่านลงไปในวงจร เพราะวัตถุพวกนี้จะยากแก่การขจัดออก และมักจะทำให้เรซินถูกเสียดทานมากยิ่งขึ้น

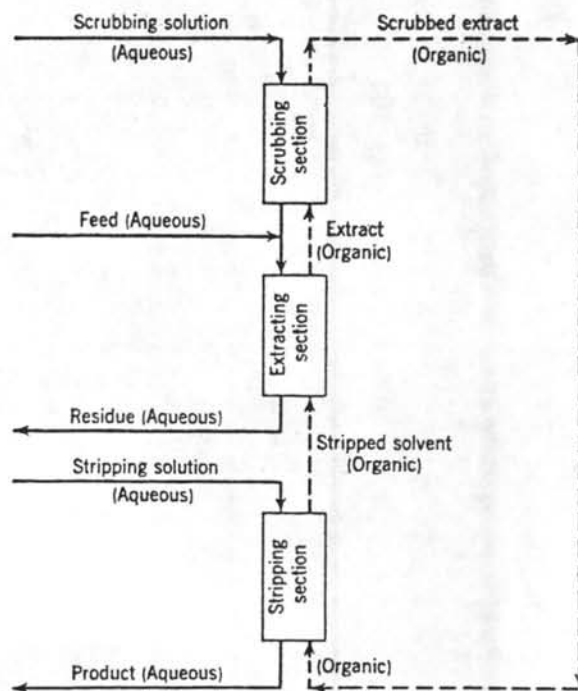
4.2.4.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ^(10,15,16)

การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นกระบวนการที่ใช้ในการสกัดและทำให้ยูเรเนียมบริสุทธิ์ได้ดี เช่นเดียวกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และปกติมักจะเรียกว่า เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของของเหลว (Liquid ion exchange) การสกัดด้วยตัวทำละลายนี้จะอาศัยคุณสมบัติในการละลายของธาตุในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) โดยเฉพาะยูเรเนียมนั้นจะสามารถเกิด เป็นสารประกอบที่ละลายได้ในสารอินทรีย์และตัวกลางที่เป็นน้ำ (Aqueous media) ดังนั้นกระบวนการนี้จึงสามารถสกัดแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายที่เป็นน้ำและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ได้ ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการ 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูป 4.24 ดังนี้

ก. ขั้นตอนการสกัด (Extracting Stage) เป็นขั้นตอนที่สกัดเอายูเรเนียมให้ละลายเข้าไปอยู่ในชั้นของสารอินทรีย์ (Organic phase) โดยใช้สารอินทรีย์ดังในตาราง 4.17 เป็นตัวสกัด (Extractant)

ข. ขั้นตอนการล้าง (Scrubbing Stage) เป็นขั้นตอนที่ล้างเอาโลหะเจือปนที่ยังเหลือค้างอยู่ในชั้นของสารอินทรีย์นั้น ให้ออกไปกับน้ำล้าง (Scrubbing agent) โดยน้ำล้างนี้จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการสกัด ส่วนสารอินทรีย์ที่ถูกล้างแล้วก็จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการสตรippingต่อไป

ค. ขั้นตอนการสตรipping (Stripping Stage) เป็นขั้นตอนที่แยกเอายูเรเนียมจากในชั้นของสารอินทรีย์ ให้ละลายกลับออกมาอยู่ในชั้นของน้ำ (Aqueous phase) โดยใช้สารสตรipping (Stripping agent) เป็นตัวละลาย แล้วสารอินทรีย์ที่ละลายยูเรเนียมออกแล้วนี้ก็สามารถนำกลับไปใช้ได้ใหม่



รูป 4.24 ระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย (10)

ตาราง 4.16 ตัวทำละลายที่ใช้แยกยูเรเนียมโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (10)

Solvent	Formula	Application	Name of process
Diethyl ether	$(C_2H_5)_2O$	Uranium purification	
Methyl isobutyl ketone	$CH_3(CO)C_4H_9$	Irradiated fuel	Redox
Dibutyl ether of diethylene glycol	$(C_4H_9OC_2H_4)_2O$	Irradiated fuel	Butex
Triglycol dichloride	$(ClC_2H_4O)_2C_2H_4$	Irradiated fuel	Trigly
Tributyl phosphate	$(C_4H_9)_3PO_4$	Uranium purification and irradiated fuel	Purex
Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid	$(C_8H_{17}O)_2PO(OH)$	Extract uranium from leach liquors	Dapex
Trioctylamine	$(C_8H_{17})_3N$	Extract uranium from leach liquors	Amex

เนื่องจากการละลายของเกลืออนินทรีย์ในตัวทำละลายอินทรีย์นั้น จะมีการเกิดไอออนในเซชันได้น้อยมาก แต่จะรวมตัวกับตัวทำละลายนั้นได้เป็นสารประกอบที่เป็นกลางโดยไฟฟ้า (Electrically neutral co-ordination compounds) ซึ่งละลายในตัวทำละลายนั้นได้

นอกจากนี้สารประกอบนี้อาจจะรวมตัวได้เล็กน้อยกับสารเชิงซ้อนในสารอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นตัวไดลูเอนต์ (Diluent) (เช่น น้ำมันก๊าด) ได้เป็นสารประกอบใหม่ที่ละลายได้ในไดลูเอนต์ แต่ไม่ละลายในน้ำ ฉะนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียของตัวทำละลาย จึงควรใช้ตัวทำละลายที่ไม่เกิดการรวมตัวกับน้ำได้ ดังในตาราง 4.16 ข้างต้น ส่วนของเหลวที่ใช้เป็นชั้นของน้ำ (น้ำชะล้าง) นั้น ต้องมีคุณสมบัติจุดอนุภาคของแข็งปนอยู่ต่ำที่สุด จึงจะใช้ได้ดี

ในการสกัดยูเรเนียมแยกออกมาจากสารละลายน้ำ กระทำได้ทั้งการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของของเหลว (Liquid cation exchange) และการแลกเปลี่ยนไอออนลบของของเหลว (Liquid anion exchange) เพราะยูเรเนียมจะปรากฏอยู่ในสารละลายน้ำได้ทั้งไอออนลบและไอออนบวก ซึ่งสารที่ใช้ในการสกัดยูเรเนียมจากสารละลายนี้มีแสดงในตาราง 4.17

ตาราง 4.17 สารที่ใช้ในการสกัดยูเรเนียมด้วยตัวทำละลายจากสารละลายน้ำ⁽¹⁶⁾

Reagent name	Reagent type	Manufacturers
Monododecyl phosphoric acid (DDPA)	Alkyl phosphoric acid	b
Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid (EHPA)	Alkyl phosphoric acid	a b c
Heptadecyl phosphoric acid (HDP A)	Alkyl phosphoric acid	b
Dialkyl pyrophosphoric acid (DPPA)	Alkyl phosphoric acid	b
Tributyl phosphate (TBP)	Alkyl phosphoric acid	b
Amine S-24, Amberlite LA-1, Amberlite LA-2	Secondary amines	c d
Alamine 336 (Tricapryl) Alamine 304 (Trilauryl) Adogen 364 Triisooctylamine	Tertiary amines	e f
Aliquot 336 Adogen 464	Quaternary amine	e f

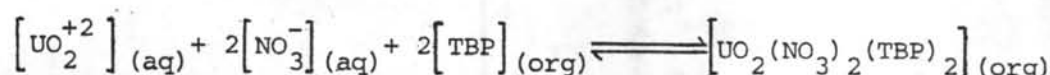
^aMobil Chemical Company.
^bStauffer Chemical Company.
^cUnion Carbide Corporation.

^dRohm and Haas Company.
^eGeneral Mills.
^fArcher Daniels Midland Company.

4.2.4.2.1 การสกัดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง (Extraction of Neutral Complexes)

เป็นการสกัดสารประกอบยูเรเนียมเชิงซ้อนที่เป็นกลาง (Neutral uranium complex) คือ UO_2SO_4 โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนคู่ของไอออน (Ion-pair transfer) ⁽¹¹²⁾ ซึ่งมักจะไม่นิยมใช้กับกระบวนการของสินแร่ยูเรเนียม แต่มักจะใช้กับกระบวนการผลิตยูเรเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง ๆ ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้คือ

ก. ไดเอทิลอีเทอร์และไตรบิวทิลฟอสเฟต (Diethyl Ether and Tributyl Phosphate or TBP) ซึ่งจะใช้ในการสกัดยูเรเนียมจากสารละลายกรดไนตริกหรือสารละลายของยูเรนิล-ไนเตรต ^(113, 114) ดังสมการ



สารละลายที่มีไนเตรตเข้มข้นสูงจะทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดไปทางขวามือ สามารถใช้น้ำเป็นสารสกัดพึงกับสารอินทรีย์นี้ได้ เพราะไนเตรตที่เข้มข้นต่ำจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางซ้ายมือ

การใช้ไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวสกัดนั้น จะไม่ต้องใช้โคลูเอนต์ แต่การใช้ TBP เป็นตัวสกัดนั้นจะต้องใช้น้ำมันก๊าด (Kerosene) เป็นโคลูเอนต์ ซึ่งสารละลาย TBP นี้สามารถจะสกัดเอาพวกไนเตรต ไทโอไซยาเนต และคลอไรด์เชิงซ้อนของยูเรเนียมออกมาได้ ⁽¹¹³⁾ พวกคลอไรด์เชิงซ้อนที่สามารถสกัดออกได้นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เข้มข้นเท่านั้น ข้อดีของการสกัดด้วย TBP หรืออีเทอร์นี้คือ ทำสารพึงได้ง่าย มีซีเลกทิวิตีต่อยูเรเนียมสูงกว่าองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นผลให้ได้ผลผลิตที่บริสุทธิ์ นอกจากนี้ TBP ยังเป็นสารที่ไม่ระเหยง่าย มีความเสถียร และใช้กับยูเรเนียมธรรมชาติ (Natural uranium) ได้ดี

ข. ฟอสฟีนออกไซด์ (Phosphine Oxides) โดยใช้ไตรอัลคิล-ฟอสฟีนออกไซด์ (Trialkyl phosphine oxides) ในการสกัดยูเรเนียมเชิงซ้อนที่เป็นกลางจากสารละลายซัลเฟต ^(112, 115) จะใช้สารละลายคาร์บอนเนตเป็นตัวสกัดพึง

4.2.4.2.2 การสกัดไอออนบวก (Extraction of Cation)^(15,116)

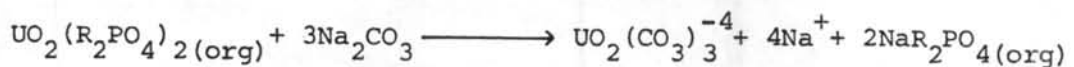
วิธีนี้จะใช้กรดอัลคิล-ฟอสฟอริก (alkyl phosphoric acid) เป็นตัวสกัดยูเรเนียมไอออนจากสารละลายกรดซัลฟูริก⁽¹¹⁶⁾ ซึ่งจะใช้ได้ทั้งโมโน (mono) และไดอัลคิล-เอสเทอร์ (Dialkyl ester) และมีปฏิกิริยาค้ำย ๗ กัน ดังสมการ



โดย R = Alkyl group

การสกัดยูเรเนียมไอออนก็จะมีปฏิกิริยาค้ำยคลึงกัน

ในการสกัดยูเรเนียมออกจาก DDPA นี้ จำเป็นจะต้องใช้สารละลายของกรดแก่ คือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีปฏิกิริยาเป็นส่วนกลับของปฏิกิริยาในการสกัด เพราะสภาพความเป็นกรดสูงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางด้านซ้าย ส่วนการสกัดจาก EHPA นั้น จะสามารถกระทำได้กับทั้งกรดแก่หรือสารละลายคาร์บอนเนต โดยการสกัดด้วยสารละลายคาร์บอนเนตนั้นจะต้องเติมอัลกอฮอล์ปริมาณที่สูงกว่าหรือ TBP ลงไปในปริมาณที่เท่ากันเพื่อป้องกันการเกิดแยกของของเหลวเป็นสามชั้น คือ น้ำมันก๊าด (ชั้นบนสุด) เกลือโซเดียมของ EHPA และสารละลายคาร์บอนเนต (ชั้นล่างสุด) เพราะอัลกอฮอล์หรือ TBP ที่เติมลงไปนี้จะไปละลายโซเดียม-EHPA และขจัดชั้นที่สามออก การสกัดด้วยคาร์บอนเนตมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ



พวกโลหะอื่น ๆ ที่สกัดได้จากสารละลายนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายในสารละลายคาร์บอนเนตนี้และจะตกตะกอนแยกออกมา ซึ่งจะ เป็นผลดีต่อการขจัดสิ่งเจือปนในตัวสกัดที่จะใช้ในขั้นการสกัดต่อไป แต่ตะกอนพวกนี้มักจะยากแก่การกรองออก

พวกตัวสกัดเหล่านี้อาจจะถูกสกัดได้ด้วยการตกตะกอนเป็น UF_4 แยกออกจากสารอินทรีย์ โดยการใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกใส่ลงไปในตัวทำละลาย (ตัวสกัด) นั้น พร้อมทั้งเติมสารรีดิวซิง (เช่น FeSO_4) ลงไปด้วย นอกจากนี้พวกโมโนอัลคิล-เอสเทอร์อาจจะใช้ได้ดีกว่าไดอัลคิล-เอสเทอร์ เมื่อในระบบนั้นมีการใช้กรดแก่ของ HF และ HCl ซึ่งจะต้านทานการเกิด

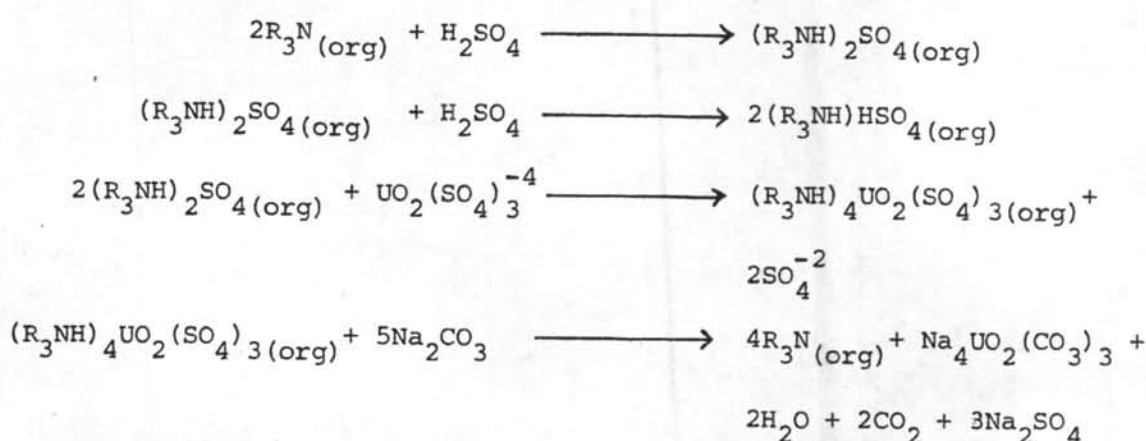
ไฮโดรไลซิสได้ดีกว่า

ในการสกัดยูเรเนียมด้วยกรดอัลซิล ไพโรฟอสฟอริก (Alkyl pyrophosphoric acid) จากสารละลายกรดนั้นจะเกิดขึ้นได้ดี เพราะ 1 - 2 โมเลกุลของไพโร ฟอสเฟต (Pyrophosphate) จะสกัดยูเรเนียมได้ 1 อะตอม ปกติสารนี้จะไม่เสถียรมากนัก มักจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นออร์โทฟอสเฟต นอกจากนี้พวกยูเรเนียมสอออนจะถูกสกัดด้วยกรดฟอสฟอริกทั้งสองชนิดนี้ได้ดีกว่า ยูเรเนียมสอออน เพราะยูเรเนียมสอออนจะเกิด เป็นสารเชิงซ้อนกับฟอสเฟตอออนได้ไม่แรงมาก ดังนั้นจึงควรใส่เหล็กลงไปรีดิวซ์ยูเรเนียมในกรดฟอสฟอริกนี้เสียก่อนทำการสกัด

4.2.4.2.3 การสกัดอออนลบเชิงซ้อน (Extraction of Anionic Complexes)

1) การสกัด^(15,16) จะใช้อัลซิล-เอมีน

(Alkyl amines) เป็นตัวสกัด โดยยูเรเนียมในสารละลายชะล้างซัลเฟตจะถูกสกัดออกมาเป็นซัลเฟตอออนลบเชิงซ้อนได้ด้วยการใช้เอมีนที่ละลายได้ในน้ำมัน (Oil-soluble amines)^(117,118) ซึ่งเอมีนที่ใช้ก็คือไพรมารี (Primary) เซคันดารี (Secondary) และเทอร์เชียรี-เอมีน (Tertiary amines) โดยจะมีปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน เหมือนกับการแลกเปลี่ยนอออนด้วย เรซินชนิดค่างอ้อน ดังปฏิกิริยาการเกิด เอมีนซัลเฟต ไบซัลเฟต การสกัดและการสตริปต่อไปนี้

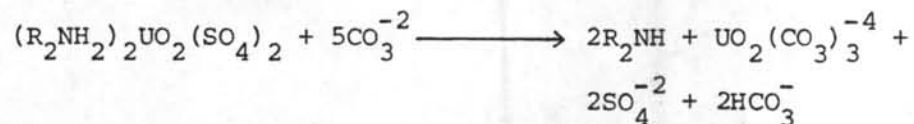


ปกติจะใส่โคลูเอนต์ลงไปด้วย เพื่อลดความหนืดของตัวทำละลายและกระจายให้ตัวทำละลายสัมผัสกับสารละลายที่มีน้ำได้ง่ายขึ้น เพราะส่วนมากแล้วพวกตัวทำละลายมักจะมี ความหนืดอันเนื่องมาจากโมเลกุลที่มีน้ำหนักสูง โคลูเอนต์ที่ใช้ี้ควรจะมีราคาถูกและมีการละลายปนไปกับชั้น

ของน้ำได้น้อย พบว่าน้ำมันก๊าด เป็นโคลู เอนต์ที่ดีที่สุด เพราะมีราคาถูกและใช้ได้กับ เซคันดารี-เอมีนที่มีโมเลกุลยาว (Long-branched-chain secondary amines) และกับ เทอร์เชียรี-เอมีนที่มีโมเลกุลเชื่อมโยงกันแบบสมมาตร (Straight-chain symmetrical tertiary amines) ซึ่งมีคาร์บอนมากกว่า 10 อะตอมขึ้นไป ควรเติมอัลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลยาว (Long-chain alcohol) ลงไปในน้ำมันก๊าดประมาณ 2 - 5% (ปริมาตร) เพื่อเพิ่มซีเลคทีวิตีต่อยูเรเนียม

ปกติเอมีนจะมีซีเลคทีวิตีต่อยูเรเนียมได้มากกว่ากรดฟอสฟอริก โดยไพรมารี-เอมีนจะมีซีเลคทีวิตีเลวที่สุดและสกัดเพอร์ริคออกมาได้มากด้วย แต่เซคันดารี-เอมีนจะมีซีเลคทีวิตีดี ส่วนเทอร์เชียรี-เอมีนจะมีซีเลคทีวิตีต่อยูเรเนียมมากที่สุด นอกจากนี้เอมีนและกรดฟอสฟอริกนี้จะดูดซับได้ทั้ง U^{+4} และ U^{+6}

2) การสกัดพิง⁽¹⁵⁾ ยูเรเนียมจะถูกสกัดออกจากเอมีนได้ด้วยสารละลายของคาร์บอนเนต คลอไรด์ และไนเตรต โดยการสกัดด้วยคาร์บอนเนตนั้นอาจจะทำให้เกิดไฮโดรไลซิสของอัลคิลแอมโมเนียมไอออนบวก กลายเป็นโมเลกุลของเอมีนไอออนลบ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการสกัด คือ



การสกัดด้วยคลอไรด์นั้น เปรียบได้กับการอีลูชันของ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ปกติจะใช้ความเข้มข้นประมาณ 1 - 3 M ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



การสกัดด้วยไนเตรตก็มีปฏิกิริยาเหมือนกับการสกัดด้วยคลอไรด์ ซึ่งพบว่าไนเตรตจะเป็นตัวสกัดพิงที่มีประสิทธิภาพดีกว่า แต่ไม่สามารถจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยตรง เพราะจะไปยับยั้งการสกัดยูเรเนียม ต้องทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียหรือโซเดียมคาร์บอนเนตเสียก่อนจึงจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

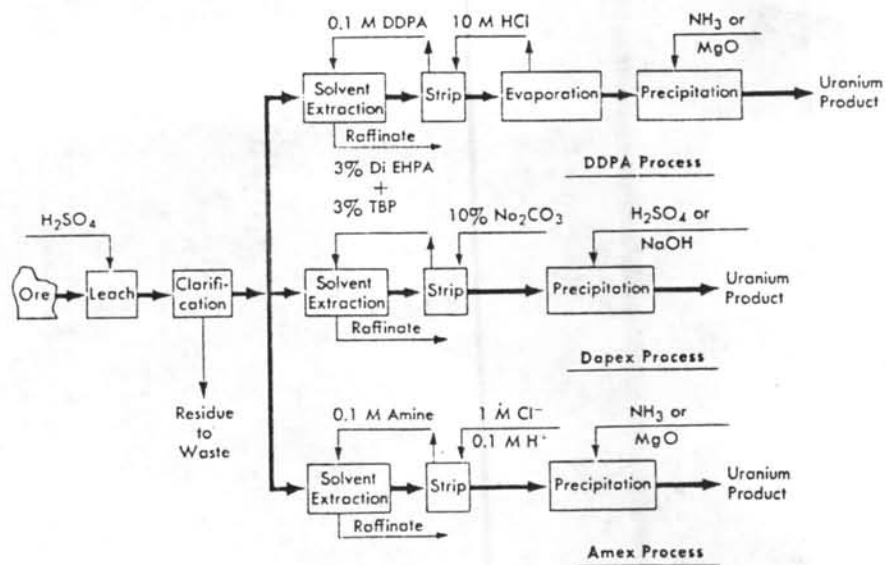
4.2.4.2.4 กระบวนการต่าง ๆ ที่นิยมใช้

ก. กระบวนการอีลูเอ็กซ์ (Eluex Process) ^(15,119)

เป็นกระบวนการในการทำให้ยูเรเนียมบริสุทธิ์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำอีลูชันด้วย 10% H_2SO_4 แล้วตามด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งจะสกัดยูเรเนียมในกรดซัลฟูริกนี้ด้วย Di-2-ethylhexyl phosphoric acid ในน้ำมันก๊าด ⁽¹¹⁹⁾ จากนั้นจึงสกัดด้วยโซเดียมคาร์บอเนต แล้วจึงแยกยูเรเนียมออกมาโดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือทำให้เป็นกรดแล้วต้มไล่ CO_2 และตกตะกอนด้วย NaOH หรือ NH_3 หรือ MgO

ข. กระบวนการเอแม็กซ์ (Amex), ดาเป็กซ์ (Dapex) และดีดีพีเอ (DDPA)

ซึ่งล้วนแต่เป็นกระบวนการสกัดยูเรเนียมด้วยตัวทำละลายทั้งสิ้น ดังแสดงในรูป 4.25



รูป 4.25 แผนภูมิกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่าง ๆ ในการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายซัลเฟต ⁽¹⁵⁾

4.2.5 การตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอน เป็นกระบวนการสุดท้ายในการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายที่ทำให้บริสุทธิ์แล้ว โดยตกตะกอนเป็นเค้กเหลือง ซึ่งปกติแล้วสารละลายของยูเรเนียมบริสุทธิ์นี้มักจะอยู่ในรูปของสารละลายที่เป็นกรดของคลอไรด์ ไนเตรต และซัลเฟต หรือสารละลายที่เป็นด่างของคาร์บอเนต นั่นคือ เป็นกระบวนการตกตะกอนยูเรเนียมจากสารละลายขี้ผึ้ง รวมทั้งการขจัดน้ำออก (Dewatering) การล้างและการทำให้แห้ง เพื่อให้มีคุณลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของยูเรเนียมและสิ่งเจือปน เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

4.2.5.1 การตกตะกอนจากสารละลายกรดที่บริสุทธิ์ (Precipitation from Purified Acid Solutions) (16)

สารละลายกรดที่จะใช้ในการตกตะกอนเป็นเค้กเหลืองนี้ ควรทำให้บริสุทธิ์หรือเข้มข้นเสียก่อน เพื่อให้ปราศจากอิมพริวริตี้เจือปน แต่ก็ยังอาจจะมีปนอยู่บ้างคือ เหล็กจากอีลูเอชันของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และวาเนเดียมและโมลิบดีนัมทั้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ปกติสารละลายกรดเหล่านี้จะเป็นของผสมของไนเตรต คลอไรด์ และซัลเฟต ซึ่งจะมี pH อยู่ระหว่าง 1.5 - 4.0 มี U_3O_8 อยู่ระหว่าง 10 - 40 กรัมต่อลิตร พบว่าสารละลายที่มีไฮโดรเจนคลอไรด์และซัลเฟตปนอยู่ จะเกิดการตกลงนอนกันและกรองได้ยากขึ้น และมักจะปนอยู่กับยูเรเนียม ส่วนพวกคลอไรด์และไนเตรตนั้นมักจะติดไปกับตะกอนและขจัดออกได้โดยการล้างออก การตกตะกอนเค้กเหลืองจากสารละลายกรดนี้มีสองวิธีคือ การทำสะเทินด้วยด่าง เช่น ปูนขาว ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ แมกนีเซีย หรือแอมโมเนีย และวิธีตกตะกอนด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.2.5.1.1 การทำสะเทิน (Neutralization)

ก. วิธีการ (16,120,121) ในกรณีที่สารละลายมีเหล็กปนอยู่มากและต้องการควบคุมปริมาณซัลเฟตแล้ว ควรจะทำการตกตะกอนแบบสองขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะใช้ปูนขาวใส่ลงไปตกตะกอนพวกเหล็ก อะลูมิเนียม โทเทเนียม และทอเรียม เป็นซัลเฟตของด่างและไฮดรอกไซด์ และตกตะกอนซัลเฟตเป็นคัลเซียมซัลเฟต พร้อมทั้งมีตะกอนซิลิกาบางชนิดเกิดขึ้นด้วย การใช้ปูนขาวนี้จะทำให้ประหยัดการใช้สารอื่นที่จะทำสะเทินลงได้เป็นอย่างดี

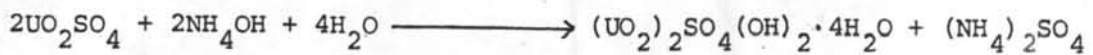
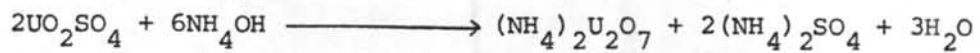
มาก ในกรณีที่มีฟอสเฟตก็ควรใส่เหล็กลงไปตกตะกอน เป็นเฟอร์ริก ฟอสเฟต เพื่อป้องกันมิให้ยูเรเนียมกลายเป็นตะกอนยูเรนิล ฟอสเฟต⁽¹²⁰⁾ นอกจากนี้ในกรณีที่มีแค้กเหล็กเกิดขึ้นในสารละลายก็อาจขจัดออกได้ด้วยการทำตกเคมันและการกรอง และในกรณีที่เกิดเป็นตะกอนร่วมกับยูเรเนียมก็นำมาชะล้างใหม่

ยูเรเนียมจะตกตะกอน เมื่อทำสะเทินจน pH อยู่ระหว่าง 6.5 - 8.0 โดยการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซีย (MgO) หรือแอมโมเนียเป็นตัวตกตะกอน โดยแมกนีเซียควรจะใช้ในรูปของสเลอรี่ (Slurry) เพื่อให้มีการกระจายในสารละลายได้ดี โซเดียมไฮดรอกไซด์ควรใช้ในรูปของสารละลาย 10% NaOH หรือในรูปของแข็งก็ได้ ส่วนแอมโมเนียนั้นถ้าใช้ในรูปของก๊าซ จะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนดียิ่งขึ้น อาจทำเป็นวงแหวนสำหรับให้ก๊าซแพร่กระจายไว้ที่ข้างใต้ของถังในถังตกตะกอน และป้องกันการเกิด pH สูงเฉพาะแห่งได้ด้วยการผสมอากาศ 2 - 4 ส่วนกับก๊าซแอมโมเนีย ทำให้ไม่มีการเกิดตะกอนไปอุดตันช่องผ่านก๊าซได้

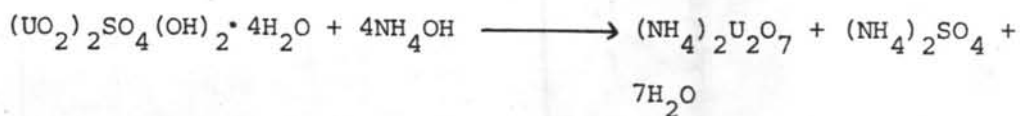
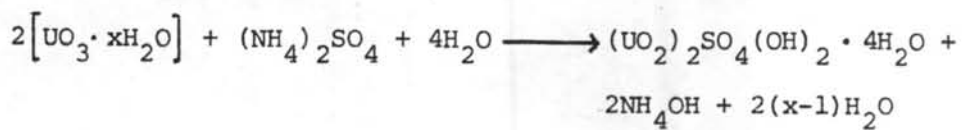
การที่จะใช้ตัวทำสะเทิน (Neutralizing reagent) ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับราคา การหาได้ง่าย ผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลผลิต ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ความง่ายต่อการควบคุม และสิ่งเจือปนอื่นปนมากในผลผลิต ปกติจะใช้ตัวทำสะเทินในระหว่าง 0.2 - 0.4 ปอนด์ต่อ U_3O_8 (ในตะกอน) 1 ปอนด์ แมกนีเซียที่เผาแล้วจะได้ตะกอนที่เป็นผลึกมากกว่าแต่จะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า และต้องใช้ในรูปของของแข็งและสเลอรี่ ทำให้ไม่เหมาะแก่การควบคุมได้อย่างเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามปกติแล้วโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นตัวตกตะกอน (Precipitant) ที่ดี แต่บางทีอาจจะมีตะกอนคล้ายเมือกเกิดขึ้นและมีโซเดียมปนมากกว่ามาตรฐานที่กำหนด ในปัจจุบันจะนิยมใช้แอมโมเนียปนกับการใช้แมกนีเซีย โดยใช้แอมโมเนียปรับ pH เป็น 5.0 - 5.5 แล้วจึงใช้แมกนีเซียปรับ pH เป็น 7.0 เพราะถ้าใช้แอมโมเนียอย่างเดียวก็จะมีตะกอนคล้ายโคลนละเอียดเกิดขึ้นปนได้⁽¹²¹⁾

ข. ผลผลิต^(16,122,123) ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนสารละลายกรดโดยใช้การทำสะเทินนี้ จะประกอบด้วยโคยูเรเนต ไฮเดรตออกไซด์ และเบสิกยูเรนิล ซัลเฟต (Basic uranyl sulfate) รวมทั้งอาจจะมีไอออนอื่น ๆ ที่ถูกดูดซับติดมาด้วย⁽¹²²⁾ นอกจากนี้จะมีสิ่งเจือปนในสารละลายตกตะกอนปนติดมาในรูปของไฮเดรต โมลิบ-

เคต วานาเคต และอื่น ๆ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแอมโมเนียและยูเรนิลซัลเฟต คือ



โดย x จะเข้าใกล้ 2 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°ซ. แต่จะเป็น 1 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°ซ. หรือที่อุณหภูมิห้องและสารละลายมี pH เป็น 5.0 ตะกอนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะเปลี่ยนไปเป็นโคยูเรเนตเมื่อมีค่ามากพอ หรือเป็นค่างยูเรนิลซัลเฟต เมื่ออยู่ในสารละลายซัลเฟต⁽¹²²⁾ แล้วค่างซัลเฟตนี้จะทำปฏิกิริยากับค่างได้เป็นโคยูเรเนต⁽¹²³⁾ ดังสมการ



ปกติแล้วค่างยูเรนิลซัลเฟตจะเป็นผลึก สามารถจะตกลงนอนกันและกรองออกได้ดี พวกโคยูเรเนตจะเป็นตะกอนคล้ายเมือกหรือตะกอนละเอียดหรือผลึก ขึ้นอยู่กับน้ำชะล้างและตัวตกตะกอน ส่วนไฮเดรต ออกไซด์จะเป็นตะกอนเจลาติน ซึ่งยากแก่การแยกออก นอกจากนี้พบว่ายูเรเนียมในรูปของตะกอนไฮเดรต ออกไซด์จะมีความบริสุทธิ์มากที่สุด แต่มักจะยากแก่การจัดน้ำออกและการล้าง ในโคยูเรเนตนั้นจะมีไอออนบวกของพวกค่าง (Alkali cations) รวมตัวอยู่

ตะกอนที่เป็นผลึกหยาบจะเกิดขึ้นได้ด้วยการตกตะกอนอย่างช้า ๆ โดยให้ตะกอนบางส่วนยังคงละลายอยู่ในสารละลายจนกระทั่งเกิดผลึกขึ้น ซึ่งผลึกหยาบนี้จะเกิดขึ้นได้ยากเมื่อสารละลายเจือจาง ใช้อุณหภูมิสูง pH ค่า และเพิ่มความเข้มข้นของไอออน (เช่น ซัลเฟต) โดยเฉพาะตะกอนที่เป็นผลึกหยาบของค่างยูเรนิลซัลเฟตนั้น จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ⁽¹²²⁾ ในน้ำล้างมีซัลเฟตเข้มข้น

ชั้นสูง ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนสูง ให้เกิดการทำสะเทินอย่างช้า ๆ pH ค่า ใช้เวลานานและใช้แมกนีเซียมเป็นตัวตกตะกอน

ค่าของเรนิลซัลเฟตจะเกิดขึ้นได้ที่ pH ประมาณ 5.5 แต่จะตกตะกอนได้น้อยลง เมื่อในสารละลายนั้นมีไฮเดียมปนอยู่ด้วย และค่าของเรนิลซัลเฟตนี้จะเปลี่ยนไป เป็นโคยูเรเนคได้ เมื่อใช้อุณหภูมิสูงช่วย โดยปกติแล้ว เมื่อใช้อุณหภูมิในขณะตกตะกอนสูงก็จะได้ตะกอนที่มีซัลเฟตปนอยู่สูง เป็นเหตุให้มีเปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียมต่ำลง⁽¹²²⁾

4.2.5.1.2 การตกตะกอนด้วยไฮโครเจน เปอร์ออกไซด์⁽¹²⁹⁾ (16,124-

ในการใช้ไฮโครเจน เปอร์ออกไซด์ตกตะกอนยูเรเนียมจากสารละลายกรคนั้น จะได้เป็นตะกอนของไฮเดรตยูเรเนียม เปอร์ออกไซด์ (Hydrated uranium peroxide หรือ $UO_4 \cdot xH_2O$) ซึ่งเป็นวิธีที่ซีเลคทีฟต่อยูเรเนียมในสารละลายได้มากที่สุด โดยจะได้ตะกอนที่เป็นผลึก และปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ได้เมื่อใช้ไฮโครเจนในปริมาณมากพอ ดังสมการ



ผลผลิตในรูปของ $UO_4 \cdot 2H_2O$ นี้จะเสถียรมากที่สุดภายหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °ซ. แต่ไฮเดรตที่สูงกว่านี้มักจะมีเกิดในตอนตกตะกอนแรก ๆ⁽¹²⁴⁾

การตกตะกอนด้วยไฮโครเจน เปอร์ออกไซด์นี้จะขึ้นอยู่กับ pH อุณหภูมิ และไอออนอื่นที่มีปนในสารละลาย โดยปกติแล้วจะใช้ค่าแอมโมเนียม ไฮโครออกไซด์เดิมลงไปปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 2.5 - 4.0 แล้วจึงเติม 30% H_2O_2 ลงไป โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 30 - 65 °ซ.⁽¹²⁵⁾ ส่วนพวกไอออนของเกลือที่เป็นกลางในสารละลายนั้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการตกตะกอน เพราะพวกซัลเฟตไอออนลบและไอออนลบอื่น ๆ ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.5 M นั้น จะสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้กับยูเรเนียม อันจะไปยับยั้งการตกตะกอนได้⁽¹²⁶⁾ พบว่าพวกไฮเดียมแมกนีเซียม หรือแอมโมเนียม ซัลเฟต นั้น สามารถจะช่วยให้เกิดผลึกยูเรเนียม เปอร์ออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น⁽¹²⁷⁾ นอกจากนี้อาจจะมีทอเรียม เซอร์โคเนียม ฮาฟเนียม และวาเนเดียมตกตะกอนร่วมออกมาด้วยยูเรเนียมได้⁽¹²⁶⁾ แต่ปกติแล้วตะกอนยูเรเนียม ไฮโครออกไซด์นี้มักจะมีสิ่งเจือปนจากในสารละลายติดออกมาน้อยมาก

ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์จะสลายตัวได้ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยของ Fe^{+3} ในสารละลาย แต่จะไม่มีผลเมื่อมีเหล็กในสารละลายน้อยกว่า 0.5 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังอาจหลีกเลี่ยงการสลายตัวของไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ได้ด้วยการตกตะกอนยูเรเนียมจากสารละลายที่ถูกทำให้เย็นจนถึงจุดที่เกิดผลึกน้ำแข็ง⁽¹²⁸⁾ หรือด้วยการเติมกรดมาโลนิก กรดแลคติก กรดอะซิติก หรือฟลูออไรด์อื่นลงไป⁽¹²⁹⁾

4.2.5.2 การตกตะกอนจากสารละลายด่าง (Precipitation from Alkaline Solutions)⁽¹⁶⁾

สารละลายด่างที่จะนำมาตกตะกอนนี้อาจได้จากกระบวนการชะล้างด้วยแอมโมเนียหรือโซเดียม คาร์บอเนต หรือจากสารละลายของอีลูชันและสตรีฟิงของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และสกัดด้วยตัวทำละลาย ปกติสารละลายเหล่านี้จะมีสิ่งเจือปนน้อยกว่าในสารละลายกรด และวิธีที่ใช้ในการตกตะกอนยูเรเนียมจากสารละลายด่างนั้น มี 4 วิธีคือ

ก. เติมด้วยด่างแก่ ใช้ในการแยกแวนเดียมและยูเรเนียมออกจากกัน

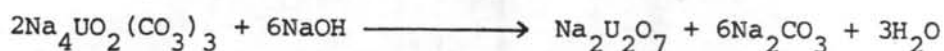
ข. ทำให้เกิดสภาพกรด แล้วไล่ CO_2 ออกจากนั้นจึงทำสะเทินด้วยด่าง เป็นวิธีที่ใช้ในการแยกแวนเดียมและยูเรเนียมออกจากกันเช่นกัน

ค. รีคักชันด้วยไฮโดรเจน

ง. อิเล็กโตรไลซิส เป็นวิธีที่ใช้เฉพาะกับกระบวนการชะล้างด้วยแอมโมเนีย คาร์บอเนต โดยอาศัยความดันซึ่งมีการสตรีฟิงที่จะมีแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้ได้เป็นตะกอนยูเรเนียมออกไซด์เกิดขึ้น

4.2.5.2.1 การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์^(16,130,131)

เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนตนั้น ในตอนแรกจะเกิดปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตก่อน จากนั้นเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปมากพอจนทำให้ pH มากกว่า 12.0 ก็จะทำให้ยูเรเนียมเกิดการไฮโดรไลซ์และตกตะกอน ซึ่งตะกอนที่ได้นี้จะเป็นของผสมของโซเดียม ไดยูเรเนตและโพลียูเรเนตเชิงซ้อน (Complex polyuranate)⁽¹³⁰⁾ ดังสมการ



ในตัวอย่างที่มีน้ำ (Aqueous media) จะไม่มี Na_2UO_4 เกิดขึ้น

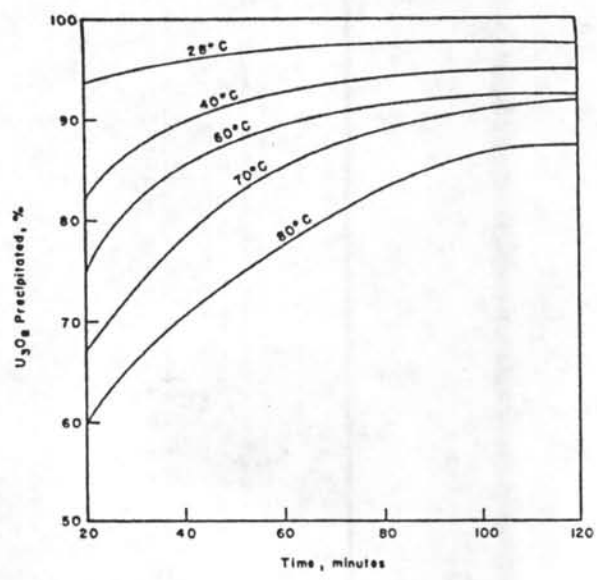
ปกติแล้วเรเนียม ไตรคาร์บอเนตอ้อนจะมีความเสถียรมาก ทำให้ยากแก่การตกตะกอน ฉะนั้นจึงต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินพอ จึงจะไปละลายอ้อนนี้ได้ สารละลายที่มีความเข้มข้นยูเรเนียมสูงและความเข้มข้นคาร์บอเนตต่ำ จะตกตะกอนได้ง่ายกว่า โดยทั่วไปจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 5 - 6 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการตกตะกอนระหว่าง 6 - 12 ชั่วโมง และสารละลายที่ตกตะกอนนั้นควรจะมี U_3O_8 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 ประมาณ 3, 30, 10 กรัมต่อลิตรตามลำดับ

ตามปกติว่าเนเดียมที่มีปนอยู่ในสารละลายนั้นจะไม่ถูกตกตะกอนได้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และจะมีผลในการยับยั้งการตกตะกอนของยูเรเนียมได้ดี เพราะบางส่วนของยูเรเนียมและวาเนเดียมจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกว่าตะกอนยูเรเนียมธรรมดา แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีวาเนเดียมปนติดไปกับเค้กเหลืองได้บ้างพอสมควร

อุณหภูมิเป็นองค์ประกอบสำคัญของการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งในแง่การแยกยูเรเนียมออก และคุณลักษณะทางกายภาพของผลผลิต การใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนสูงจะทำให้เกิดการตกตะกอนน้อยลง ดังแสดงในรูป 4.26 ในทางปฏิบัติจะใช้อุณหภูมิระหว่าง 50 - 80°C. การใช้อุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้ได้ตะกอนที่ละเอียดและยากแก่การกรอง

ในสารละลายคาร์บอเนตที่มีซิลิเกตและซัลไฟด์ละลายปนอยู่ จะทำให้มีโซเดียม ซิลิเกตเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้มี Na^+ มากขึ้น อันจะช่วยให้ออ้อนตกตะกอนได้ดีขึ้น

เค้กเหลืองที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นี้ มักจะมีสิ่งเจือปนจากโซเดียม คาร์บอเนต ซิลิกา โมลิบดีนัม และวาเนเดียม



รูป 4.26 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการตกตะกอนยูเรเนียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์⁽¹³¹⁾

4.2.5.2.2 การทำสะเทิน⁽¹⁶⁾

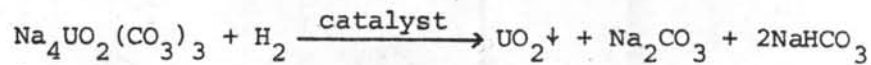
การทำสะเทินจะเหมาะแก่การใช้กับสารละลายของคาร์บอเนตจากการสกัดในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพราะจะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมในปริมาณสูง วิธีนี้กระทำได้โดยการนำสารละลายมาทำให้มีสภาพเป็นกรดเสียก่อนแล้วต้มไล่ CO₂ ออก จากนั้นจึงใส่ด่างลงไปทำสะเทินสารละลายที่เป็นกรดนี้อีกที ตะกอนยูเรเนียมที่เกิดขึ้นมักจะมีวาเนเดียมและโมลิบดีนัมปนติดออกมาด้วย

ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้กรดซัลฟูริก เดิมลงไปในการละลายคาร์บอเนตจนกระทั่งมี pH ประมาณ 3 - 5 พร้อมทั้งให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 50 - 100 °ซ. เพื่อไล่ CO₂ ออกไป ปกติจะทำการทำสะเทินด้วยด่างแก่ เช่น NaOH, MgO หรือแอนไฮดรัสแอมโมเนีย

4.2.5.2.3 รีดักชันด้วยไฮโดรเจน (Hydrogen Reduction)⁽¹⁶⁾

วิธีนี้เหมาะแก่การใช้กับสารละลายคาร์บอเนต

ที่มียูเรเนียมเข้มข้นต่ำ และยังสามารถนำสารละลายบาร์เร็นนี้กลับไปใช้ได้ใหม่ในกระบวนการชะล้าง วิธีนี้กระทำได้โดยการให้สารละลายทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนภายใต้ความดันและที่อุณหภูมิปานกลาง พร้อมทั้งมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย ดังสมการ



อัตราการตกตะกอนจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยูเรเนียม แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปกติควรจะใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 100°C. และใช้ความดันของไฮโดรเจนในระหว่าง 6 - 10 บรรยากาศ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือโคบอลต์ แพลทินัม นิกเกิล และยูเรเนียม ไดออกไซด์

ในสารละลายที่มีเกลือของโซเดียม คลอไรด์หรือโซเดียม ซัลเฟต หรือมีความเข้มข้นของโซเดียม คาร์บอเนตมากกว่า 120 กรัมต่อลิตร จะมีผลต่ออัตราการตกตะกอนของยูเรเนียมบ้างเล็กน้อย นอกจากนี้พวกวานาเดียมและโซเดียมอาจจะสามารถตกตะกอนร่วมออกมากับยูเรเนียมได้

การตกตะกอนยูเรเนียมด้วยวิธีนี้จะมีข้อดีคือ ใช้สารเพียงเล็กน้อย ไม่มีสิ่งเจือปนเกิดขึ้น ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่น และสามารถแยกยูเรเนียมออกมาได้ เป็นผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ฉะนั้นจึงมักใช้กับการขจัดผลผลิตตะกอนนี้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เท่านั้น

4.2.5.2.4 การตกตะกอนด้วยอิเล็กโทรไลซิสและโซเดียมอะมัลกัม (Electrolytic and Sodium Amalgam Precipitation) (132-137)

เนื่องจากยูเรเนียมในสารละลายคาร์บอเนตนั้น อาจจะถูกรีดิวซ์ด้วยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสม และตกตะกอนเป็นยูเรเนียนัส ไฮดรอกไซด์สีเขียว (Green uranous hydroxide) $[\text{U}(\text{OH})_4]$ หรือภายใต้ภาวะที่มี pH สูงหรืออุณหภูมิสูง จะได้เป็นออกไซด์ผสมที่มีน้ำปน (Hydrated mixed oxides) หรือ UO_2 (132) นอกจากนี้วานาเดียมก็สามารถจะถูกรีดิวซ์ได้พร้อมกับยูเรเนียมและตกตะกอนเป็น $\text{V}(\text{OH})_3$ วิธีที่ใช้ในการทำรีดักชันนี้คือการทำรีดักชันด้วยวิธีอิเล็กโทรไลติกและโซเดียมอะมัลกัม การใช้สารเคมีอื่นเป็นตัวรีดักแตนต์นั้นมักจะไม่ค่อยนิยม เพราะจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจและจะมีสิ่งเจือปนเกิดขึ้นได้

ในการทำอิเล็กโทรไลซิสนั้น จะใช้เซลล์ที่แบ่ง เป็นสองห้อง⁽¹³³⁾ โดยในตอนแรกจะทำการรีดักชันบางส่วนในห้องแคโทด (Cathode compartment) ต่อมาจึงเกิด เป็น OH^- อีออนขึ้นที่แคโทดนี้ ซึ่งจะตกตะกอนยูเรเนียมในรูปของไฮดรอกไซด์และออกไซด์ ส่วน Na^+ อีออนจะเคลื่อนไปสู่ห้องแอโนด (Anode compartment) ในขณะที่มีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนดและไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด เป็นผลให้เกิด เป็นโบคาร์บอนเนตขึ้นในห้องแอโนดและคาร์บอนเนตกับไฮดรอกไซด์ในห้องแคโทด จากนั้นจึงแยกเอาตะกอนยูเรเนียมออกจากสารละลายในห้องแคโทด (Catholyte solution) แล้วจึงบ้อนสารละลายคาร์บอนเนตเข้ามาใหม่อีก ส่วนสารละลายในห้องแอโนด (Anolyte solution) ก็นำออกไปใช้ในการชะล้างได้ใหม่อีก ปกติจะใช้กระแสไฟฟ้า 25 - 90 แอมแปร์ต่อลูกบาศก์ฟุต และพบว่า การตกตะกอนยูเรเนียมบางส่วนด้วยอิเล็กโทรไลซิส แล้วจึงตกตะกอนต่อไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ประหยัดได้มากกว่า⁽¹³⁴⁾ ส่วนพลังงานที่ใช้จะประมาณ 28 KWH ต่อตะกอน U_3O_8 1 ปอนด์

โซเดียมอะมัลกัมจะเป็นสารรีดิวซิงที่แรง สามารถจะตกตะกอนได้ทั้งยูเรเนียมและวานาเดียมในสารละลายต่างแก่ รีดักชันจะเกิดขึ้นได้ดีโดยปราศจากการเกิดไฮโดรเจนมากเกินไปเมื่อใช้อะมัลกัมที่มีโซเดียมอยู่ประมาณ 0.05 - 0.30%⁽¹³⁵⁾ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะมัลกัมและยูเรเนียมนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อพื้นที่ผิวของอะมัลกัม นั่นคือประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ การกระจายของอะมัลกัม การมีวานาเดียมในสารละลายจะช่วยให้ยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ก็จะมีปนมากับตะกอนยูเรเนียมด้วย⁽¹³⁶⁾ ตะกอนที่ได้จากการรีดักชันด้วยโซเดียมอะมัลกัมนี้ มักจะเป็นเจลาตินและยากแก่การกรอง

การรีดักชันด้วยโซเดียม อะมัลกัมนี้ กระทำได้โดยการทำอิเล็กโทรไลซิสในเซลล์ที่บรรจุปรอทอยู่ ซึ่งแบ่ง เป็นสองห้องเช่นกัน ควรมีการปั่นกววน เพื่อป้องกันการเกิดโซเดียมในปรอทเพิ่มมากขึ้น ปกติวิธีนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 0.25 แอมแปร์ต่อลูกบาศก์นิ้ว และใช้พลังงาน 0.30 KWH ต่อ U_3O_8 (ในสารละลาย) 1 ปอนด์ แต่ทางที่ดีควรจะรีดักชันด้วยโซเดียม อะมัลกัมนี้เพียงครั้งหนึ่งและตกตะกอนต่อไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์⁽¹³⁴⁾

การรีดักชันด้วยอิเล็กโทรไลติกและโซเดียม อะมัลกัมนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับสารละลายกรดจากอีลูเอตของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยจะเกิดรีดักชันและการทำสะเทินขึ้นในห้องแคโทด ส่วนสารละลายจากห้องแอโนดซึ่งเป็นกรด ก็สามารถนำไปใช้เป็นอีลูแอนต์ได้⁽¹³⁷⁾

4.2.6 การเตรียม เค้ก เหลือง

เป็นการนำตะกอนยูเรเนียมที่ได้มาทำการขจัดน้ำออก แล้วจึงทำให้แห้งและนำไปเผา เพื่อให้ได้เค้กเหลืองตามมาตรฐานที่กำหนด

4.2.6.1 การขจัดน้ำออก (Dewatering) (16,138-140)

การขจัดน้ำออกนี้อาจจะกระทำได้หลายวิธี ถ้า เป็นแบบแบช (Batch) ก็จะใช้เครื่องกรองแบบ เป็นแผ่นจานและมีกรอบชนิดอัดด้วยความดัน (Plate and frame filter presses) ส่วนแบบระบบต่อเนื่องนั้นจะใช้ทิกเคนเนอร์และเครื่องกรองรูปกลองชนิดดูดอากาศ (Vacuum-type drum filter) หรือ เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge)

ก. ทิกเคนเนอร์ จะทำการคัดขนาดด้วยการให้สารละลายที่มีตะกอนเจือจางไหลผ่าน โดยมีของแข็งอยู่ประมาณ 15 - 30 กรัมต่อลิตร สารละลายส่วนบนจะใสและถูกนำไปใช้ใหม่ ส่วนสารละลายข้างล่างจะมีของแข็งอยู่ประมาณ 15 - 30% และมักจะรวมตัวกัน เป็นของแข็งอยู่ที่ก้นของทิกเคนเนอร์ มักจะใช้พื้นที่ของทิกเคนเนอร์อยู่ในช่วง 5 - 20 ลูกบาศก์ฟุตต่อแกลลอนต่อนาที ปกติจะใช้ฟลอคคูแลนต์ใส่ลงไป เป็นตัวช่วยให้เกิดการตกลงนอนกันได้ดีขึ้น ในกรณีที่สารละลายนั้นร้อน ก็จะต้องให้ทิกเคนเนอร์มีฉนวน เพื่อป้องกันมิให้ความร้อนไปรบกวนการตกลงนอนกันของอนุภาคของแข็งที่ละเอียด และจะมีโฟมปิดข้างบน เพื่อป้องกันการเกิดการกลายเป็นไอและการสูญเสียความร้อน (138)

ข. การกรองด้วยการดูดอากาศแบบต่อเนื่อง จะใช้ได้ดีในกรณี ที่ตะกอนมีลักษณะ เป็น เม็ดมากพอสมควร แต่จะไม่ค่อย เหมาะกับกรณีที่จะต้องขูดเอาเค้กที่เหนียวออกจากผ้ากรอง (139) ปกติจะกรองด้วยไนลอนหรือออร์ลอน (Orlon) ที่มีเส้นใยมากและตึง เค้กที่กรองได้จะมีความชื้นปนอยู่มากถึง 70% สำหรับเค้กที่ละเอียดและเป็นทิไซโทรปิค (Thixotropic) และ 35% สำหรับเค้กที่เป็นเม็ดบางๆ ปกติจะใช้เครื่องดูดอากาศขนาด 3 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ต่อตารางฟุตที่ความดัน 20 นิ้วปรอท ส่วนอัตราการกรองตะกอน เค้กเหลืองแบบต่าง ๆ มีแสดง ในตาราง 4.18

การมีคลอไรด์ปะปนในเค้กเหลือง โดยเฉพาะจากคลอไรด์อีลูเอตนั้น อาจจะถูกขจัดได้ด้วยการล้างด้วยสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ซึ่งจะสามารถลดโซเดียมและ

ตาราง 4.18 อัตราการกรองของตะกอน เค้ก เหลืองแบบต่าง ๆ (140)

Type of process	Continuous vacuum filter rate ^a lb/hr/sq ft	Filter press ^b rate lb/hr/sq ft
Acid leach, IX		
Ammonia precipitation	5-10	0.8
MgO precipitation	10-15	2.0
NaOH precipitation	3	0.8
Acid leach, SX		
Ammonia precipitation	15-25	1-2
MgO precipitation	20-40	2.3
Caustic leach		
NaOH precipitation	6-8	1-3 ^c

^aBased on total filter cycle.

^bSpecifically of the Burwell type.

^cThis rate will be largely affected by the concentration of precipitate in the slurry.

คลอไรด์ใน เค้ก เหลืองได้ด้วยการแทนที่และกระบวนการทาง เคมี ดังสมการ



การล้างหรือทำให้เจือจางมาก ๆ นั้น อาจจะทำให้เกิด

ออกไซด์ที่เป็นคอลลอย (Colloidal oxides) ขึ้นได้ ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการ เดิมอิ เลคโตรไลต์ ที่เข้มข้นเล็กน้อยลงไปในน้ำล้าง ประสิทธิภาพของการล้าง เค้ก เหลืองจะมาก เมื่อตะกอน เค้ก เหลือง นี้มีความชื้นอยู่สูงและแตกบน เครื่องกรองได้น้อย (140)

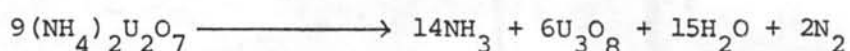
ค. เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) จะใช้ในการขจัดน้ำออก จากส่วนผสมของเค้กเหลืองที่เข้มข้นมาก ๆ ซึ่งจะทำให้ได้เค้กที่มีความหนาแน่นมากกว่า และสารละลายใสกว่าการกรองด้วยการดูดอากาศ โดยจะมีของแข็งอยู่ใน เค้กถึงประมาณ 65 - 75%

ง. การกรองแบบแบบพท์ด้วยการอัดความดัน ปกติจะใช้พื้นที่ในการกรองเป็น 4 - 10 เท่าของการกรองแบบต่อเนื่อง แต่จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและง่ายแก่การรักษามากกว่า สารละลายที่ป้อนเข้ามากกรองจะไม่ต้องมีการทำทึค เคนนิ่งก่อน ซึ่งอัตราการกรอง มีแสดงดังในตาราง 4.18 ข้างต้น ส่วนการล้างตะกอนจะกระทำแบบต่อเนื่องกัน จากนั้นนำเค้ก

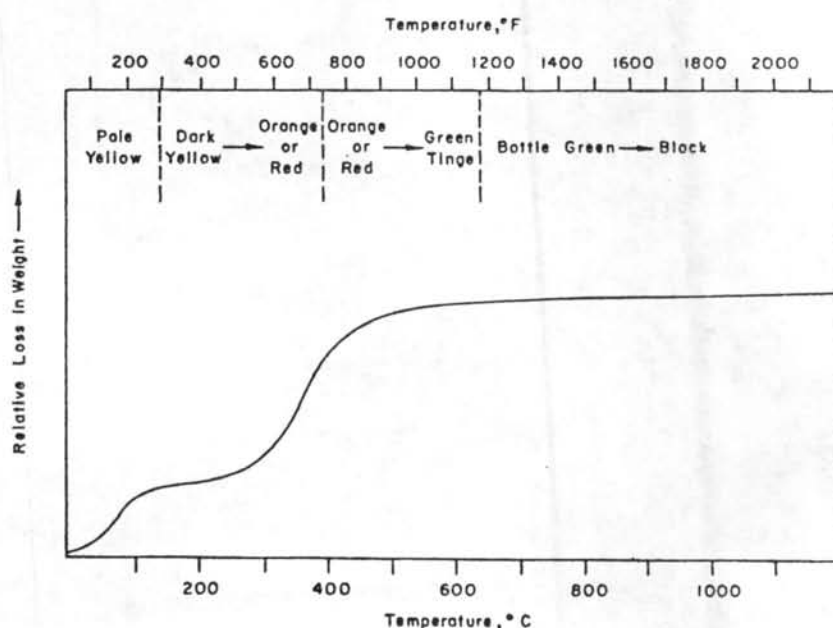
ที่กรองได้นี้ไปทำเป็นพัลพ์ใหม่ด้วยน้ำ โดยให้มีของแข็งอยู่ประมาณ 60% แล้วจึงนำไปทำให้แห้ง

4.2.6.2 การทำให้แห้งและการเผา (Drying and Calcining)

เป็นขั้นตอนการทำให้เค้ก เหลืองแห้ง และใช้ความร้อนในการเปลี่ยนสลายแอมโมเนียมโคยูเรเนต ดังรูป 4.27 และดังสมการ



โดยเมื่อให้ความร้อนจนถึง 260°ซ. จะทำให้น้ำถูกขจัดออกไปหมดและแอมโมเนียมกับไนโตรเจนบางส่วนจะเกิดขึ้น ส่วนยูเรเนียมจะได้เป็น UO_3 เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 320 - 370°ซ. ที่อุณหภูมิมากกว่า 450°ซ. ไนโตรเจนจะหลุดออกหมด ส่วน UO_3 จะเริ่มสลายตัวที่ 400°ซ. และเปลี่ยนไปเป็น U_3O_8 ได้สมบูรณ์ที่ 650 - 800°ซ. แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 900°ซ. จะทำให้ U_3O_8 บางส่วนสลายตัวเป็น UO_2 นอกจากนี้พบว่าพวกโซเดียมและแมกนีเซียมยูเรเนตและโคยูเรต จะไม่สลายตัวในอุณหภูมิที่ใช้เผานี้ ส่วนพวกต่างยูเรนิล ซัลเฟต จะสลายตัวกลายเป็น U_3O_8



รูป 4.27 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสลายแอมโมเนียมโคยูเรเนต (141)

การใช้ความร้อนสลายด้วย เร เนียม-เปอร์ออกไซด์ไฮเดรตนั้น จะเริ่มเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 150° ซ. ซึ่งจะสลายตัวอย่างช้า ๆ กลายเป็น $UO_{3.5} \cdot H_2O$ ได้ที่ อุณหภูมิ 290° ซ. และผลึกน้ำนี้จะถูกขจัดได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 480° ซ. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปก็จะได้เป็น U_3O_8 (142)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำให้ แคล์ เหลืองแห้งและถูกเผาสลายนั้นมีหลาย ชนิด ถ้าเป็นการทำให้แห้งแบบแบทช์ก็จะใช้เตาอบ (Oven) แต่ถ้าเป็นการกระทำแบบต่อเนื่องก็ จะใช้การทำให้แห้งด้วยไอน้ำ (Steam dryer) ซึ่งจะใช้อุณหภูมิระหว่าง 120 - 175° ซ. หรือ อาจจะใช้ความร้อนจากไฟที่เกิดจากก๊าซที่อุณหภูมิสูงถึง 400° ซ. แต่ปกติจะใช้ เครื่องแบบมัลติเพิล- ฮาร์ทโรสเตอร์ (Multiple-hearth roaster) ในการทำให้แห้งและเผา แคล์ เหลืองที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700° ซ. ซึ่งจะสามารถสลายและขจัดแอมโมเนีย ซัลเฟต และคลอไรด์ออกจากแคล์- เหลืองได้ พร้อมทั้งมีน้ำปนอยู่เพียงเล็กน้อย