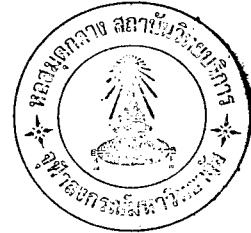


บทที่ ๕

ทฤษฎี



๒.๑ ต้นกำเนิดของกากกัมมันตรังสี

ก. ยูเรเนียม

ยูเรเนียมมีอยู่ในพื้นโลกโดยมีปริมาณเฉลี่ย ๕ กรัมต่อตัน เปรียบเทียบกับ
 ทองจากแหล่งยูเรเนียมที่รู้จัก และนำมาสกัดในปัจจุบันซึ่งมีค่าจาก ๑๕๐ กรัมต่อตัน
 ถึง ๔๐๐ กิโลกรัมต่อตัน สำหรับแร่ที่ขุดจากเหมืองในปัจจุบันโดยทั่วไปจะมียูเรเนียม
 อยู่ในช่วง ๐.๕ ถึง ๑๐ กิโลกรัมต่อตัน ยูเรเนียมตามธรรมชาติมีอยู่ ๓
 ไอโซโทป คือ ยูเรเนียม-๒๓๕ มียูเรียมร้อยละ ๐.๐๕๖ ยูเรเนียม-๒๓๘ มียูเรียม
 ร้อยละ ๐.๙๙๓ และยูเรเนียม-๒๓๘ มียูเรียมร้อยละ ๙๙.๙๕๑

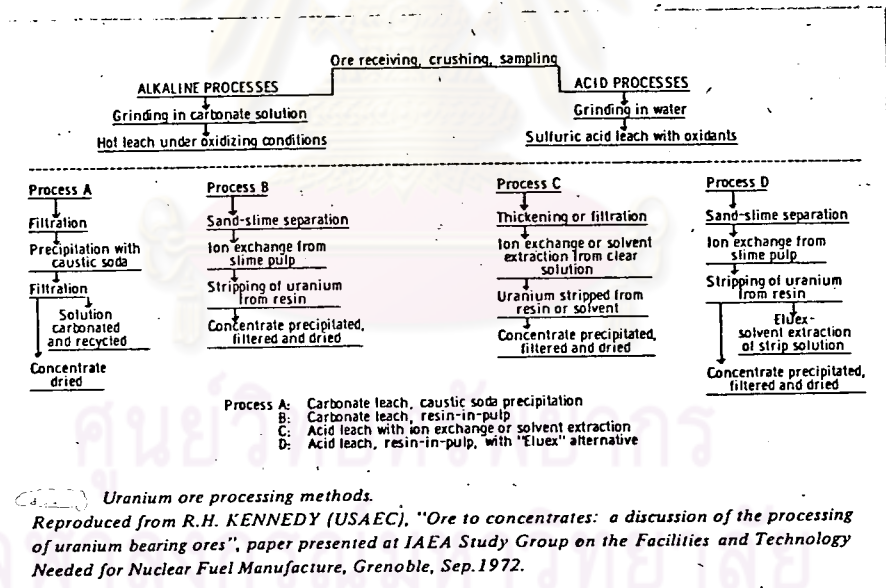
ยูเรเนียมมีความสำคัญมากในด้านเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยที่
 ยูเรเนียม-๒๓๕ เมื่อจับกับนิวตรอนพลังงานต่ำจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (fission
 reaction) ใ้พลังงานออกมาประมาณ ๒๐๐ เอ็ม อี วี (million electron
 volt) ส่วนยูเรเนียม-๒๓๘ เมื่อจับกับนิวตรอนพลังงานต่ำจะเปลี่ยนไปเป็น
 พลูโตเนียม-๒๓๙ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ไม่มีอยู่ในธรรมชาติ และเมื่อจับ
 นิวตรอนพลังงานต่ำจะสามารถแตกตัวให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกันกับยูเรเนียม
 -๒๓๕

อนุกรมยูเรเนียม เป็นชุดของธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปเป็นทอด ๆ
 โดยเริ่มต้นจากยูเรเนียม-๒๓๘ ไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-๒๐๖ ซึ่งอยู่ตัว ไม่สลายไปอีก
 ดังในรูป ๒.๑

92	U	U^{238}, U_I (uranium I) 4.51×10^9 years	U^{234}, U_{II} (uranium II) 2.48×10^4 years				
91	Pu		Pu^{234}, UX_2 (99.85%) 1.18 minutes Pu^{234}, UZ 6.7 hours 1.7 (0.15%)				
90	Th	Th^{234}, UX_1 (uranium X ₁) 24.1 days	Th^{230}, Io (ionium) 7.52×10^4 years				
89	Ac						
88	Ra		Ra^{226}, Ra (radium) 1622 years				
87	Fr						
86	Rn		Rn^{222}, Rn (radon) 3.825 days				
85	At			At^{218} 1.3 seconds			
84	Po		Po^{218}, RaA (radium A) 3.05 minutes	Po^{214} (0.02%) second	Po^{214}, RaC' (radium C') 1.6×10^{-4} second	Po^{210}, RaF (polonium) 138.4 days	
83	Bi		Bi^{214}, RaC (radium C) 19.7 minutes	Bi^{214}, RaC (99.96%) second	Bi^{210}, RaE (radium E) 5.01 days		
82	Pb		Pb^{214}, RaB (radium B) 26.8 minutes	Pb^{214}, RaB (0.04%) second	Pb^{210}, RaD (radium D) 22 years	Pb^{208}, RaG (stable lead isotope) $(5 \times 10^{-6}\%)$	
81	Tl		Tl^{210}, RaC'' (radium C'') 1.32 minutes	Tl^{210}, RaC'' (1.8 x 10 ⁻⁶ %) second	Tl^{208}, RaE' (radium E') 4.3 minutes		
80	Hg				Hg^{208} 8.5 minutes		

รูปที่ ๒.๑ α อนุกรมยูเรเนียม

การทำเหมืองแร่ยูเรเนียมทำได้ที่เหมืองเปิด (open-pit mine) และเหมืองใต้ดิน โดยคำนึงถึง ความลึก ขนาด รวมทั้งลักษณะของแร่ การทำเหมืองนี้ก็คล้ายคลึงกับการทำเหมืองแบบอื่นที่มีขนาดพอ ๆ กัน ยกเว้นแต่ต้องมีข้อกำหนดในกาปกป้องกันรังสีเพิ่มขึ้นมา แร่ที่ไคลาจากการทำเหมืองจะถูกส่งมายังโรงย่อย และแยกแร่ (mill) ซึ่งจะดำเนินการตามขบวนการที่ได้แสดงไว้ในรูป ๒.๒ ข้างล่างนี้ เพื่อให้ได้ยูเรเนียมที่เข้มข้นออกมา เรียกว่า yellow cake



รูปที่ ๒.๒ ขบวนการย่อย และแยกแร่ยูเรเนียม

สำหรับกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวที่ได้จากขบวนการย่อย และ แยกแร่ในทางเคมี จะมีดังนี้

๑. สารละลายบาร์เรน (barren solution)

สารละลายบาร์เรนนี้คือ สารละลายกรด หรือด่างที่ใช้ล้าง หรือ ละลายแร่ที่ได้แยกเอายูเรเนียม (หรือธอเรียม ถ้ามี) ออกไปแล้ว สารละลายพวกนี้จะประกอบด้วยสารเคมีที่สามารถนำมาใช้ได้อีก ในขบวนการสกัดแร่โดยใช้ด่าง สารละลายบาร์เรนนี้จะถูกนำมาใช้ได้อีก และไม่เป็นกากกัมมันตรังสี สำหรับทางแร่ที่ถูกล้าง และละลายแล้ว จะถูกขนส่งไปยังระบบเก็บของเสีย (waste retention systems) ที่ได้จากการทำเหมือง และการสกัดแร่ยูเรเนียมทั้งหมด ซึ่งน้ำเสียในนี้ จะเป็นด่างเล็กน้อย และอาจจะเปราะเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีบางชนิด และสารเคมีบางอย่างซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ ๒.๑ และจำเป็นต้องมีการ ขจัด ก่อนจะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนในขบวนการสกัดแร่โดยใช้กรด สารละลายซึ่งโดยปกติใช้ขนส่งทางแรกจะประกอบด้วยสิ่งเปราะ-เปื้อนที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งรวมทั้ง กรดกำมะถัน โลหะหนัก ในเตรท ซัลเฟต ตัวทำละลายอินทรีย์ และอะมีน (amine) (ซึ่งสองตัวหลัง ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย) คลอไรด์ และสารกัมมันตรังสีอื่น ๆ ซึ่งตัวที่อันตรายมากที่สุดคือ เรเดียม-๒๒๖ ซึ่งมีความแรงรังสีตั้งแต่ ๑๐๐ ถึง ๑๐๐๐ พิโคคูรีต่อลิตร (pCi/l) ซัลเฟต และสิ่งเปราะเปื้อน ตัวอื่น ๆ อยู่ใน ตารางที่ ๒.๑

๒. สารละลายดีแคนท์ (decant solution)

สารละลายดีแคนท์ คือสารละลายซึ่งเก็บ หรือนำเอามาจากผิวบน ของระบบเก็บของเสียหลังจากที่ของแข็งได้ตกลงมาหมดแล้ว สารละลายดีแคนท์นี้จะมีเรเดียม-๒๒๖ ซึ่งมีความแรงรังสีตั้งแต่ ๑๐๐ ถึง ๑๐๐๐ พิโคคูรีต่อลิตร (pCi/l) ซัลเฟต และสิ่งเปราะเปื้อน ตัวอื่น ๆ อยู่

SOME POTENTIAL CONTAMINANTS IN LIQUID WASTES

Contaminant	Mine drainage		Decant solution and tailings seepage		Decommissioned mine drainage	
	Acid	Basic	Acid leach	Alkaline leach	Acid	Basic
<i>Radioactive</i>						
²²⁶ Ra	+	+	+	+	+	+
Rn	+	+	+	+	+	+
²¹⁰ Pb	+		+	+	+	
²¹⁰⁻²³² Pb	+		+	+	+	
²¹⁰ Po	+		+		+	
U	+	+	+	+	+	+
<i>Non-radioactive</i>						
H ₂ SO ₄	+		+		+	
HCO ₃		+	+	+		+
CO ₂		+	+	+		+
NH ₃	+	+	+			+
Cl		+	+	+		+
SO ₄	+	+	+	+	+	+
PO ₄	+		+		+	
F	+		+	+	+	
NO ₃	+	+	+	+		+
Na	+	+	+	+	+	+
Fe	+		+		+	
Mn	+		+		+	
Co	+		+		+	
Ni	+		+		+	
Zn	+		+		+	
Cu	+		+		+	
Pb			+			
V	+		+	+	+	
Cr	+	+	+		+	
As	+		+		+	
Mo	+	+	+	+	+	+
Ba			+		+	
Ca	+	+	+	+	+	+
Mg	+	+	+		+	+
Kerosene alcohol amine TBP			+			
Oil (lubrication or fuel)	+	+				

+ = potential contaminant.

ตารางที่ ๒.๑ แสดงสิ่งเปราะบางที่อาจมีได้ในน้ำเสีย

๓. เพล็ลิ่ง ซีเพ็จ (tailings seepage)

เพล็ลิ่ง ซีเพ็จ เป็นการซึมออกจากระบบเก็บน้ำเสียซึ่งการซึมนี้เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาในขณะที่ระบบเก็บน้ำเสียเต็ม ในตอนต้นการซึมนี้จะมีส่วนผสมคล้ายกับสารละลายดีแค้นท์ ประกอบด้วย สารละลายเรเคียม ๑๐๐๐ พิโคกรัมต่อลิตร นอกจากนี้การเกิดครกในทางแร่ที่ทิ้งไว้นาน ๆ จะนำไปสู่การซึมที่เป็นกรดมาก ซึ่งมีโลหะหนักอยู่มากเช่น แมงกานีสซัลเฟต แม้ว่าความแรงรังสีเรเคียม-๒๒๖ จะต่ำ (๒๐ พิโคกรัมต่อลิตร) โดยปกติสารละลายนี้จะถูกดูดไปพร้อมกับ สารละลายดีแค้นท์ และทำการขจัดด้วยวิธีการเดียวกัน

๔. ธอเรียม

การทำเหมืองแร่ธอเรียมมักพบว่ามธอเรียมปะปนอยู่กับทรายตามชายหาดบางแห่ง มักเกิดร่วมกับยูเรเนียม และแรร์เอิร์ธ (rare earths) ธอเรียมในธรรมชาติมีไอโซโทปเค็ยวคือ ธอเรียม-๒๓๒ ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสี ธอเรียมมีความสำคัญทางด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เมื่อพบว่า ธอเรียม-๒๓๒ จับนิวตรอนพลังงานต่ำ จะเปลี่ยนไปเป็นยูเรเนียม-๒๓๓ ได้ ยูเรเนียม-๒๓๓ เมื่อจับพลังงานต่ำ สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวให้พลังงานออกมาเช่นเดียวกับ ยูเรเนียม-๒๓๕ และพลูโตเนียม-๒๓๙

อนุกรมธอเรียมเป็นชุดของธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปเป็นทอด ๆ โดยเริ่มต้นจากธอเรียม-๒๓๒ ไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-๒๐๘ ซึ่งอยู่ตัวไม่สลายตัวไปอีก ดังในรูป ๒.๓

90	Th Th ²³² , Th (thorium) 1.39 × 10 ¹⁰ years		Th ²³⁰ , RdTh (radiothorium) 1.90 years		
89	Ac	Ac ²²⁸ , MeTh ₂ (mesothorium 2) 6.13 hours			
88	Ra	Ra ²²⁸ , MeTh ₁ (mesothorium 1) 6.7 years	Ra ²²⁴ , ThX (thorium X) 3.64 days		
87	Fr				
86	Rn		Rn ²²⁰ , Th (thoron) 54.5 seconds		
85	At				
84	Po		Po ²¹⁸ , ThA (thorium A) 0.158 second		Po ²¹⁴ , ThC' (thorium C') 3.0 × 10 ⁻⁷ second
83	Bi		Bi ²¹⁴ , ThC (thorium C) 60.6 minutes		
82	Pb		Pb ²¹⁴ , ThB (thorium B) 10.6 hours		Pb ²¹⁰ , ThD (stable lead isotope)
81	Tl				Tl ²⁰⁸ , ThC'' (thorium C'') 3.1 minutes

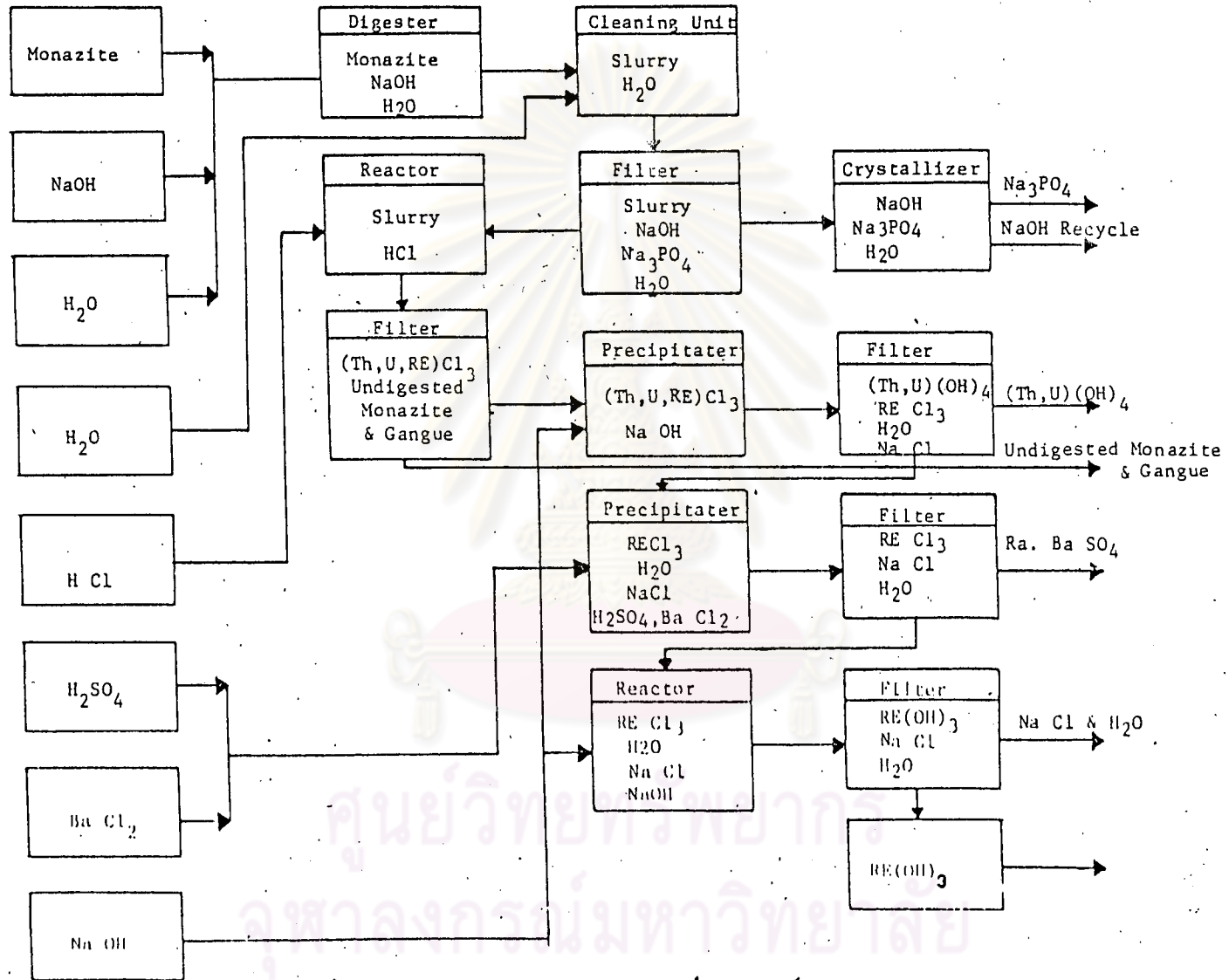
รูปที่ ๒.๓. อนุกรมธอเรียม

สำหรับการสกัดแร่โมนาไซต์ที่โรงงานต้นแบบ สำนักงานพลังงานปรมาณู
เพื่อสันติ (พปส.) จะแสดงไว้ในรูป ๒.๔ ต่อไปนี้

RAW MATERIAL

PROCESSING

PRODUCTS



รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ของไทย

สำหรับกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวที่ได้จากการสกัดแร่โมนาไซต์นี้ ได้แก่ น้ำล้างพื้น ล้างโรงงาน สารละลายกรดที่ใช้ในการทำให้ออเรียม (และ ยูเรเนียม ตามี) ใบบริสุทธิ์ ซึ่งอาจจะประกอบไปด้วย สารบางชนิด เกลือ กรด ออเรียม ยูเรเนียม และแรร่เอิร์ธ และน้ำเสียที่ได้จากการแยกแรร่เอิร์ธ ในขั้นสุดท้าย

๒.๒ ประเภทของกากกัมมันตรังสี

กากกัมมันตรังสีแบ่งออกได้เป็น ๔ ลักษณะคือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และอนุภาคเล็ก ๆ ของของแข็ง หรือของเหลวที่พุ่งอยู่ในอากาศที่เรียกว่า แอโรซอล (aerosol)

สำหรับกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวนี้ ทบวงการพลังงานปรมาณู ระหว่างประเทศ ได้แบ่งออกเป็น ๔ ประเภทดังนี้ ๒๑

ก. กากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีน้อยกว่า หรือเท่ากับ 10^{-6} ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร กากประเภทนี้สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้เลย

ข. กากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีอยู่ระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-3} ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร กากประเภทนี้จะได้รับการขจัดโดยวิธีธรรมดาได้โดยไม่ต้องมีเครื่องกำบังรังสี

ค. กากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีอยู่ระหว่าง 10^{-3} ถึง 10^{-1} ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร กากประเภทนี้จะได้รับการขจัดโดยวิธีธรรมดาได้ แต่เครื่องมือที่ใช้จะต้องมีการกำบังรังสีบางส่วน

ง. กากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีอยู่ระหว่าง 10^{-1} ถึง 10^4 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร กากประเภทนี้จะได้รับการขจัดโดยวิธีธรรมดาได้ แต่เครื่องมือที่ใช้จะต้องมีการกำบังรังสี

จ. กากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีมากกว่า $๑๐^๕$ ไมโครคูรี
ต่อมิลลิลิตร กากประเภทนี้ต้องเก็บไว้ในถังเพื่อให้สลายตัวต่อไป

๒.๓ การกำหนดค่าระดับความแรงรังสีที่ยอมให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

สำหรับกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวที่มีความแรงรังสีในระดับที่
ได้แก่กากกัมมันตรังสีประเภท ข. ก็มีความแรงรังสีอยู่ในช่วงระหว่าง $๑๐^{-๖}$
ถึง $๑๐^{-๓}$ ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร

ในการกำหนดค่าระดับรังสีที่ยอมให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมนี้ จะสัมพันธ์
กับค่าความเข้มข้นสูงสุดของวัสดุกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีอยู่ได้ในน้ำดื่ม (Maximum
Permissible Concentration in Water (MPC)_w) ที่กำหนดโดย
คณะกรรมการว่าด้วยการป้องกันรังสีระหว่างประเทศ (International
Commission on Radiological Protection ICRP)
แต่เนื่องจากค่าที่กำหนดนี้จะใช้ประโยชน์ได้ดีก็ต่อเมื่อมีไอโซโทปเพียงหนึ่ง หรือ
สองชนิดเท่านั้น เมื่อมีไอโซโทปอยู่ด้วยกันหลายชนิด ปัญหาในการวิเคราะห์
แยกความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีแต่ละชนิด เป็นไปด้วยความยากลำบาก
ค่าที่กำหนดไว้แยกแต่ละชนิดก็จะใช้ประโยชน์ไม่ได้ ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์
เป็นบางส่วนเท่านั้นเพื่อแสดงว่าไม่มีไอโซโทปที่มีอันตรายมาก ตามลำดับซึ่ง
แสดงในตารางที่ ๒.๒



MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATION OF
UNIDENTIFIED RADIONUCLIDES IN WATER FOR
CONTINUOUS OCCUPATIONAL EXPOSURE
(MPCU)_w Values^a

Limitations	μCi/ml of water ^b
If none of the radionuclides ⁹⁰ Sr, ¹²⁵ I, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²¹¹ At, ²²³ Ra, ²²⁴ Ra, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²²⁷ Ac, ²³⁰ Th, ²³¹ Pa, ²³² Th, and Th-nat is present, then the (MPCU) _w is:	3×10^{-5}
If none of the radionuclides ⁹⁰ Sr, ¹²⁹ I, ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²²³ Ra, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²³¹ Pa, and Th-nat is present, then the (MPCU) _w is:	2×10^{-5}
If none of the radionuclides ⁹⁰ Sr, ¹²⁹ I, ²¹⁰ Pb, ²²⁶ Ra and ²²⁸ Ra is present, then the (MPCU) _w is:	7×10^{-6}
If neither ²²⁶ Ra nor ²²⁸ Ra is present, then the (MPCU) _w is:	1×10^{-6}
If no analysis of the water is made, then the (MPCU) _w is:	1×10^{-7}

ตารางที่ ๒.๒ ค่า (MPCU)_w สำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีเป็นประจำ

๒.๔ หลักการของขบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และฟลอคคิวเลชัน (flocculation) และเซตกิเมนเตชัน (sedimentation)

ขบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟลอคคิวเลชัน และเซตกิเมนเตชัน โดยทั่วไปเรียกว่า การขจัดทางเคมี (chemical treatment) และได้มีการนำมาใช้ขจัดกากกัมมันตรังสีที่มีความแรงแรงรังสีต่ำ การขจัดทางเคมีของกากกัมมันตรังสีความแรงแรงรังสีต่ำนี้มีการใช้ในสถาบันทางนิวเคลียร์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอกไซด์ (hydroxide) คาร์บอเนต (carbonate) และฟอสเฟต (phosphate) ของผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (fission product) หลายตัวเป็นสารที่ไม่ละลายแต่จะเกิดการตกตะกอนในทางเคมีได้ เพื่อให้มีการขจัดความแรงแรงรังสีออกไปบางส่วน โดยเฉพาะถ้าโคแอกกูแลนต์ (coagulant) และแครีเออร์ (carrier) ถูกเติมลงไป จะทำให้เกิดตะกอนเป็นจำนวนมาก

วัตถุประสงค์ของการขจัดทางเคมีคือ การทำให้สารกัมมันตรังสีรวมกันเป็นก้อนเล็ก ๆ อยู่ในสลัดจ์ (sludge) ซึ่งไม่ละลาย และสามารถจะแยกตัวออกจากสารละลายได้ ทำให้ความแรงรังสีของกากกัมมันตรังสีที่มีปริมาณมาก ๆ ลดลงจนพอเพียงที่จะยอมให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ในบางกรณีการขจัดทางเคมีจะใช้สำหรับกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวที่มีความแรงรังสีสูงขึ้นไป ถ้ามีวิธีการจัดแบบอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ไอออน แอ็กซ์-เชนจ์ (ion exchange) หรือการระเหย วัตถุประสงค์อีกประการหนึ่งของการขจัดทางเคมีคือ การเตรียมของเหลวสำหรับการขจัดขั้นต่อไป

ในการขจัดเรดิโอไอโซโทปบางชนิด สารเคมีซึ่งไม่ใช่โคแอกกูแลนต์ที่แท้จริงจะถูกเติมลงในน้ำ ทำให้เกิดตะกอนขึ้น และตะกอนนี้จะถูกดูดซับ (adsorb) โดยฟล็อก (floc) ที่เกิดจากโคแอกกูแลนต์

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของการขจัดโดยวิธีโคแอกกูเลชัน ฟลอคคิวเลชัน และ เซดทิเมนเทชัน คือ มีราคาถูก และสามารถนำมาใช้ได้กับสารละลายที่มีสารไม่มีรังสีหลายอย่างปนอยู่ในช่วงกว้าง และใช้ได้กับเครื่องมือ และวิธีการที่เคยทำได้มาแล้ว

ก. โคแอกกูเลชัน และ ฟลอคคิวเลชัน

ในขบวนการกำจัดของเสีย คำว่า โคแอกกูเลชัน หมายถึงการเติมสารเคมีที่เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ เพื่อลดความคงตัว (destabilization) และเกิดตะกอนที่มีขนาดละเอียดอย่างมากในน้ำเสีย โดยเฉพาะจะใช้ขจัดพวกคอลลอยด์ (colloid) ซึ่งจะจับตัวเป็นก้อนต่อไป ส่วนฟลอคคิวเลชันเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นการรวมตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกิดเป็นฟล็อก โดยการกวนของเหลวอย่างช้า ๆ

สำหรับฟลอกซ์เป็นก้อนตะกอนที่มีขนาดเบา และจะมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และจะมีคุณสมบัติเป็นไอออน เอกซ์เชนจ์ ได้

ในขบวนการเกิด ขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอกคิวเลชัน จะแบ่งออกได้เป็น ๓ ชั้น ดังนี้คือ

ชั้นที่ ๑ เดิมสารเคมีพวกโคแอกกูแลนท์ลงไปของเหลว เพื่อให้แน่ใจว่าสารเคมีพวกนี้จะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และรวดเร็ว จะต้องมี การกวนอย่างรวดเร็ว ซึ่งการกวนนี้เป็นสิ่งจำเป็นมากมิมฉะนั้น โคแอกกูแลนท์ จะกระจายตัวช้า และปฏิกิริยาเคมีจะจำกัดอยู่ ณ จุดที่โคแอกกูแลนท์ ถูกเติมลงไป เท่านั้น ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ นอกจากที่ต้องการได้

ชั้นที่ ๒ เป็นขั้นตอนที่เกิดโคแอกกูเลชันคือ เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่เติมลงไปกับสารที่อยู่ในของเหลวที่ต้องการขจัด เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน และเกิดตะกอนที่มีขนาดละเอียดมากมาย

ชั้นที่ ๓ เป็นขั้นตอนที่เกิดฟลอกคิวเลชัน คือการกวนของเหลวอย่างช้า ๆ อนุภาคที่ละเอียดจะมาจับตัวซึ่งกัน และกันเกิดเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าฟลอก ตะกอนพวกที่ไม่ละลายนี้จะแยกตัว และตกลงมา โดยนำเอาคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวตกลงมาด้วย

ฟลอกจับตัวกับคอลลอยด์ได้ ๓ วิธีคือ

๑. โดยการเข้าไปจับติดกับฟลอก
๒. โดยการดูดซับของคอลลอยด์ไปติดกับฟลอก
๓. โดยการทำให้เป็นกลางของอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ที่มีประจุบวกกับคอลลอยด์พวกที่เป็นฟลอกที่มีประจุลบที่เกิดขึ้นในตอนแรก

ข. เซตกิเมนเทชัน (sedimentation)

วัตถุประสงค์ของเซตกิเมนเทชัน คือการให้ฟล็อกที่จับตัวกันแล้ว ตกลงมา หลังจากโคแอกกูเลชัน และ ฟล็อกคิวเลชันได้เกิดขึ้นแล้ว ในโรงงานขจัดน้ำเสีย วัตถุประสงค์ของเซตกิเมนเทชันคือการลดปริมาณสารที่แขวนลอยในน้ำเสียที่จะต้อง ขจัดโดยการกรอง แพคเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อเซตกิเมนเทชัน ได้แก่ คุณสมบัติของ ฟล็อกที่ตกลงมา ความหนัก และอุณหภูมิของของเหลว และช่วงเวลาการเกิดเซตกิ- เมนเทชัน

๒.๕ ทฤษฎี โคแอกกูเลชัน

ขบวนการโคแอกกูเลชันจะเกี่ยวข้องกับการแยกตัวของสารที่แขวนลอย ในสารละลาย ซึ่งในทางทฤษฎีจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของสารที่เป็นอนุภาค ขนาดเล็ก ในภาษาทางวิทยาศาสตร์ สารที่แขวนลอยไม่ตกตะกอนนี้จะถูกเรียกว่า คิสเพอชัน (dispersion) สารที่ประกอบเป็นคิสเพอชันในน้ำเสียจะมีขนาด ตั้งแต่ ๑ มิลลิไมครอน (millimicron $m\mu$) จนถึง ๑๐๐ ไมครอน (micron μ) ส่วนสารที่แขวนลอยขนาดตั้งแต่ ๑ มิลลิไมครอน ถึง ๑ ไมครอน จะเรียกว่า คอลลอยด์ โดยที่นักเคมี และนักฟิสิกส์ได้พิสูจน์แล้วว่า สารที่แขวนตัวไม่ตกตะกอนนี้ จะแสดงคุณสมบัติของคอลลอยด์ ดังนั้นในการที่จะเข้าใจหลักการของโคแอกกูเลชัน จึงควรที่จะเข้าใจคุณลักษณะ และพฤติกรรมของคอลลอยด์

คุณสมบัติที่สำคัญของคอลลอยด์คือ มีขนาดเล็กซึ่งทำให้มันอยู่ในสภาพที่ เหมาะสมในการรักษาสภาพของคิสเพอชันไว้ได้ แพคเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ คอลลอยด์คงตัวอยู่ได้คือ แรงผลักไฟฟ้าสถิตย์ (eletrostatic repulsion) และ ไฮเดรชัน (hydration) ทั้งสองแพคเตอร์นี้จะมีความสำคัญมาก เนื่องจากอนุภาคเล็ก ๆ นี้จะก่อให้เกิดพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้า ๑ ลูกบาศก์เซนติเมตร มีพื้นที่ผิว ๖ ตารางเซนติเมตร ถ้าแบ่งเป็นรูป

ลูกบาศก์ขนาดเท่าคอลลอยด์ โดยให้แต่ละด้านมีขนาด ๑๐ มิลลิไมครอน พื้นที่ผิวจะเพิ่มเป็น ๖ ล้านตารางเซนติเมตร ด้วยขนาดของผิวเช่นนี้ย่อมจะไม่เป็นที่น่าสงสัยเลยว่าแพคเตอร์ที่สัมพันธ์กับวิชาเคมี และฟิสิกส์อันเกี่ยวข้องกับผิว จะมีความสำคัญยิ่งต่อพฤติกรรมของคอลลอยด์

เมื่อผิวของคอลลอยด์ ที่ชอบหรือดึงดูดน้ำ เรียกว่า ไฮโดรฟิลลิก (hydrophilic) อนุภาคเหล่านี้จะมีแนวโน้มที่จะยอมให้แผ่นฟิล์มของน้ำล้อมรอบผิวของมัน ฟิล์มของน้ำจะเพิ่มความคงตัวของคิสเพอซัน โดยการ บังอนุภาคจากปฏิกิริยากับโคแอกกูแลนต์ และจากการสัมผัสกับอนุภาคตัวอื่น ส่วนคอลลอยด์ซึ่งมีผิวที่ไม่ชอบ หรือไม่ดึงดูดน้ำ เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) พวกนี้จะเกิดความคงตัวทางอ้อมจากไฮเดรชัน โดยที่ถ้ามีสารอยู่ตัวหนึ่งที่มีฟิล์มของสารที่อยู่ระหว่างกลาง ซึ่งจะดูฟิล์มของโมเลกุลของน้ำไว้เช่นเดียวกัน ระบบเช่นนี้จะเรียกว่า protective colloid และสารที่อยู่ระหว่างกลาง เรียกว่า protecting agent

แพคเตอร์สำคัญที่ทำให้เกิดเสถียรภาพของระบบที่เป็นไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์คือ แรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ผิวของอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์จะมีแนวโน้มที่จะได้รับประจุไฟฟ้าอันเป็นผลจากการไอออนไนเซชัน (ionization) ของส่วนประกอบที่ผิวของมัน หรือการดูดเอาไอออนจากสารละลายในระบบที่มีน้ำเกี่ยวข้องกับอยู่ด้วย ไฮโดรเจนไอออน (hydrogen ion) และ ไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ion) จะยังคงมีอยู่แม้ว่าจะไม่มีไอออนของตัวถูกละลายอื่น ๆ ก็ตาม ความแตกต่างในคุณสมบัติของไอออนชนิดต่าง ๆ จะมีผลในการเกิดการดูดบนผิวของคอลลอยด์ โดยที่อนุภาคที่มีส่วนประกอบคล้ายกัน จะได้รับประจุที่มีเครื่องหมายเช่นเดียวกับไอออนที่มันดูดเอาไว้ แรงผลักระหว่างอนุภาคที่มีประจุ จะทำให้คิสเพอซันเกิดความคงตัวโดยการลดโอกาสในการชน ซึ่งมีผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคเป็นก้อนที่มีขนาดที่สามารถตกลงมาได้

แพคเตอร์ที่ทำให้คอลลอยด์มีแนวโน้มที่จะไม่เกิดเสถียรภาพคือ แรงดึงดูดของโลก แรงแวนเดอวาล (Van der Waals forces) และการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) เนื่องจากมีมวลขนาดเล็กที่เกี่ยวข้องกับระบบของคอลลอยด์ ดังนั้นแรงดึงดูดของโลกจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อระบบ แรงแวนเดอวาลจะเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ซึ่งอาจจะมองเห็นได้ว่าเป็นแรงยึกระหว่างโมเลกุล แรงเช่นนี้จะเพิ่มขนาดขึ้นด้วยอัตราเป็นพันเท่าของแรงไฟฟ้าสถิตย์ขณะที่อนุภาควิ่งมาชนกัน แม้ว่าแรงแวนเดอวาลจะมีค่าน้อยมาก แต่มันจะมีค่าเด่นชัดขึ้นถ้ามีการเหนี่ยวนำให้อนุภาคเกิดการชนกันขึ้น

การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะเป็นการเคลื่อนที่อย่างกระจัดกระจาย ของอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ อันเป็นผลจากการชนกับโมเลกุลของตัวกลางที่มันแขวนลอยอยู่ พลังงานจลน์ของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งจะเป็นผลทำให้เพิ่มความเข้มของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดผลต่อความไม่คงตัวของคิสเพอซัน เพราะว่าถ้าการชนมีผล การตกมารวมกันก็จะเกิดขึ้นได้

การจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคที่แขวนลอยนี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นโดยการเติมสารเคมีพวกโคแอกกูแลนต์ลงไปเพื่อลดผลของแพคเตอร์ที่เป็นตัวทำให้เกิดความคงตัวซึ่งได้แก่ ไฮเดรชัน และ Zeta potential และโดยการกวนของตัวกลางเพื่อ เร่งการชนระหว่างอนุภาค แต่ไฮดร่ายที่ปริมาณของสารเคมีที่ใช้เพื่อจะให้มียุทธิพลต่อไฮเดรชันของคอลลอยด์จะต้องใช้ปริมาณมาก ดังนั้นพวกไฮโดรฟิลลิก คิสเพอซัน จะใช้วิธีของโคแอกกูแลนต์ให้ประหยัดไคยาก ส่วนคิสเพอซันที่มีความคงตัวโดยแรงไฟฟ้าสถิตย์นั้นจะเหมาะที่จะใช้ขบวนการโคแอกกูแลนต์เนื่องจากการเติมสารละลายอิเล็กโตรไลต์ลงไปน้อย ๆ ก็จะทำให้มีผลเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนต่อ Zeta potential ของอนุภาค มันเป็นสิ่งจำเป็นที่ตัวโคแอกกูแลนต์จะกระจายไอออนที่มีวาเลนซ์สูง โดยมีประจุที่ตรงกันข้ามกับ Zeta potential ของคิสเพอซัน

เนื่องจากคิสเพอซันส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสียจะมีความคงตัวโดยประจุลบ ดังนั้นโคแอกกูแลนต์จะกระจายแคทไอออน (cation) ที่มีวาเลนซ์สูง เช่น อลูมิเนียมเหล็ก (III) หรือ เหล็ก (II) หรือ คัลเซียม เพื่อลดความคงตัวของคิสเพอซัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการเติมไอออนที่เป็นโลหะซึ่งมีวาเลนซ์สูงลงในของเสีย ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันอย่างสมบูรณ์นัก เหล็ก หรืออลูมิเนียมไอออนที่เติมลงไปของเสียจะกระจายอย่างรวดเร็วทั่วตัวกลางโดยการกวน ไอออนพวกนี้จะไวในการทำปฏิกิริยาจากหลักฐานที่มันสามารถมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาต่อไปนี้

ก. ไอออนจะทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารละลาย เช่น ไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตฟอสเฟต ซัลไฟด์ หรือสารอินทรีย์เพื่อเกิดตะกอนซับซ้อนที่มีลักษณะคล้ายวุ้น มีขนาดเท่าคอลลอยด์ เรียกว่า ไมโครฟลอค (microfloc) ส่วนประกอบสำคัญของตะกอนเหล่านี้ที่พบบ่อย ๆ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ โลหะออกไซด์ (hydrous metal oxide) ไมโครฟลอคจะมีประจุบวก หรือ Zeta potential เป็นบวก ขึ้นกับส่วนประกอบของตะกอน ค่า pH และปริมาณของโคแอกกูแลนต์ ที่ค่า pH ต่ำ ๆ มักจะมีประจุบวกถ้ามีประจุเกิดขึ้นที่ไมโครฟลอค และอนุภาคของคิสเพอซันมีประจุลบ การรวมตัวกันของไมโครฟลอค และอนุภาคที่แขวนลอยอยู่จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโดยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic attraction) ถ้าไมโครฟลอคมี Zeta potential เป็นกลาง หรือ เป็นลบเล็กน้อย การรวมตัวเป็นก้อนยังคงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นโดยการชน มีหลักฐานที่แสดงว่าการรวมตัวเป็นก้อนของไมโครฟลอคกับส่วนผสมที่เป็นคิสเพอซันในน้ำเสียจะเป็นกลไกที่สำคัญมาก ที่มีผลต่อโคแอกกูแลนต์ในการขจัดน้ำเสีย

ข. ไอออนที่มีประจุสูง ๆ อาจจะทำลายฟิล์มของไอออน และน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคที่มีประจุลบของคิสเพอซัน ทำให้ Zeta potential เป็นกลางไปบางส่วน ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่มันจะถึงจุดที่เหนี่ยวนำให้เกิดโคแอกกูแลนต์ กลไกอันนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองของขบวนการกำจัดน้ำเสียนี้

ค. การเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายจะรบกวนการส่งแรงผลักรังสีที่ทำให้สีเพอซันมีความคงตัวกับอนุภาคที่มีประจุลบ ถ้าแคลเซียมไอออนมีวาเลนซ์สูง การรบกวนก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเติมไอออนที่มีวาเลนซ์สูง ๆ จะลดทั้งแรงจากสนามไฟฟ้า และขอบเขตของช่องที่ป้องกันอนุภาคจากการชน

ในระหว่างขบวนการฟลอคคิวเลชันซึ่งเกี่ยวข้องกับการกวนอย่างช้า ๆ สภาพนี้ จะถูกรักษาไว้เพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อนต่อไปของส่วนผสมที่ไม่มี ความคงตัวของไมโครฟลอค และอนุภาคของสารอื่นในน้ำเสียนั้น การกวนนี้จะถูกควบคุมเพื่อมิให้มีความเร็วสูง มิฉะนั้นจะทำลายฟลอคที่มีขนาดพอจะตกลงมาได้ และการกวนนี้ยังทำให้อนุภาคที่แขวนลอยมีโอกาสชนกันได้

๒.๖ แพคเตอร์อื่น ๆ ที่มีส่วนช่วยในขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชัน

การเกิดฟลอค และโคแอกกูเลชันจะได้รับอิทธิพลจากสารที่ละลายในน้ำเสีย (ทั้งแอมโมเนียม และแคลเซียมไอออน) pH ที่กระของการผสม และฟลอคคิวเลชัน อุณหภูมิ และสารที่แขวนลอยอยู่ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแกนกลางให้สารที่ตกลงมาไปรวมตัวกันเกิดเป็นฟลอค ช่วงขอบเขตของ pH ที่โคแอกกูแลนต์จะทำหน้าที่ดีที่สุด และความเข้มข้นของไอออนอื่น ๆ ที่มีอยู่จะมีความสัมพันธ์กันในบางส่วน เช่น น้ำที่มีสีเข้ม และมีความขุ่นน้อย และของแข็งที่ละลายปนอยู่มีความเข้มข้นต่ำ ช่วงของ pH ที่จะเกิดโคแอกกูเลชันจะแคบมาก และถ้ามีการใช้สารส้ม ขอบเขตของ pH ที่มีประสิทธิภาพอาจจะขยายให้กว้างขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณของซิลิเกต ที่มีอยู่ในน้ำนั้น โดยทั่วไปแล้วช่วงขอบเขตในการเกิดโคแอกกูเลชันที่เหมาะสมของน้ำที่มีสี และไมไฮซีนำกระด้างกับสารส้ม มีค่า pH ๕.๐ และอาจจะต่ำกว่านั้นถ้าเป็นเกลือของเหล็ก และขอบเขตของ pH ที่เหมาะสมสำหรับสารส้มอาจจะขยายไปจนถึง pH ๑.๕ ขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่ผสมอยู่ ส่วนเกลือของเหล็กจะเกิดที่ pH สูงกว่า ๕.๐

ช่วงการผสม และฟลอคคิวเลชัน ต้องเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา และ ช่วงขบวนการฟลอคคิวเลชันต้องมีการให้โอกาสให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ เพื่อการเกิดฟลอค โดยทั่วไปแล้วยังมีสารผสมผสมอยู่ในน้ำมาก หรือมีสารเคมี ที่จะเติมปริมาณมาก จะใช้เวลาในการผสม และการเกิดฟลอคน้อยลง เวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันเป็นส่วนกลับกับอุณหภูมิ และจะต้องใช้โคแอกกูแลนต์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ตัวอย่างผลของอุณหภูมิซึ่งพบได้จากขบวนการ ไลม์-โซดา (lime-soda process) ที่ ๘๖ ๐ ฟลอคคิวเลชันจะเกิดสมบูรณ์ มากกว่าในเวลา ๑๐ นาทีเมื่อเทียบกับที่ ๑๐ ๐ เวลา ๒๔ ชั่วโมง ความสัมพันธ์ กันอย่างซับซ้อนระหว่างสารเคมีที่เติม และส่วนประกอบของของเหลวที่จะนำมาจัด และช่วงเวลา และคีรีของการกวนทำให้เป็นไปได้ที่จะหาปริมาณของโคแอกกูแลนต์จากผลการวิเคราะห์เสีย ในทางปฏิบัติจาร์เทส (Jar test) จะใช้อย่างกว้างขวางในการหาปริมาณที่เหมาะสมของสารเคมีที่จะเติมลงไป เช่นเดียวกัน Zeta potential test ซึ่งในปัจจุบันได้นำมาใช้ในงานขจัดน้ำเสีย หลายแห่ง ปริมาณของโคแอกกูแลนต์จะสัมพันธ์กับเวลาในการกวน ถ้าปริมาณน้อย ๆ จะต้องใช้ช่วงเวลากวนนาน และใช้ความเร็วสูงในการกวน โดยทั่วไปแล้วช่วง เวลา และความเร็วในการกวนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโรงงาน โดยปริมาณจะเปลี่ยน ไปเพื่อให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของน้ำ ความขุ่น และ pH เป็นต้น

ตั้งแต่มีการใช้แอคติเวตเตด ซิลิกา (Activated silica) เพื่อ ปรับปรุงคุณสมบัติของฟลอคในปี ค.ศ. ๑๙๓๗ โดยเบริส ได้มีความสนใจอย่างมาก ต่อโคแอกกูแลนต์ เอค (coagulant aid) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมลงในโคแอกกูแลนต์ เพื่อช่วยในขบวนการโคแอกกูเลชัน

โพลีอิเล็กโทรไลต์ โคแอกกูแลนต์ เอค (polyelectrolyte coagulant aids) จะประกอบด้วยสารประกอบสังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 สารประกอบพวกนี้เกิดขึ้นโดยการเชื่อมหน่วยที่ซ้ำ ๆ กัน

ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เพื่อให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีขนาดของคอลลอยด์ แต่ละหน่วย จะประกอบด้วยโพลิเมอร์ (polymer) ซึ่งมีเรดิคัล (radicals) ที่สามารถ ไอออนไนซ์ (ionize) ได้อย่างน้อย ๑ หรือมากกว่านั้น

แอนไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ (anionic polyelectrolytes) จะมีประจุลบภายใต้การเกิดไอออนไนเซชัน เช่น พวกโพลีคาร์บอกซีลิก แอซิด (polycarboxylic acid) พวกแอคติเวตเตด ซิลิกาที่ประกอบด้วยโซ่ที่มี การเชื่อมโยงของโมเลกุลของซิลิซิก แอซิด (silicic acid) เกิดโพลิเมไร-เซชัน (polymerization) ก็จะมีอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย พวกไอออนที่มีวาเลนซ์สูง พวกนี้จะใช้ได้กับคัลด์สเฟอซันที่มีเสถียรภาพอยู่ได้ด้วยประจุบวก ยิ่งกว่านั้นพวกนี้ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของฟลอคที่เกิดขึ้นโดยการเติมเกลือของออลูมิเนียม หรือเหล็ก ไอออนพวกนี้ถูกเชื่อว่ามีจะเป็นแกนกลางที่มีประจุเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเป็น ก้อนของไมโครฟลอค

แคทไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ (cationic polyelectrolytes) เป็นพวกโพลีอะมีน (polyamine) จะมีประจุบวก เมื่อเกิดไอออนไนเซชัน กลุ่มพวกนี้จะมีประสิทธิภาพต่อคัลด์สเฟอซันที่เสถียรภาพด้วยประจุลบ โพลิเมอร์พวกนี้ จะใช้ในการช่วยโคแอกกูแลนต์ที่เป็นเกลือโลหะ และเป็นแกนกลางสำหรับให้เกิดฟลอค และเป็นตัวเพิ่มน้ำหนักเพื่อช่วยการรวมตัวของฟลอคโคคิชั่น แต่โดยทั่วไปสาร ประเภทนี้จะใช้จำกัดในสภาพเฉพาะอย่างเท่านั้น

ปัจจุบันมีการนำโคแอกกูแลนต์ เอด มาใช้เพื่อประโยชน์ดังนี้

- ก. ช่วยลดเวลาการเกิดฟลอค
- ข. ช่วยเพิ่มขนาด ความหนาแน่น และความหยาบของฟลอค
- ค. ขยายช่วงที่มีประสิทธิภาพของสารเคมีที่จะนำมาใช้
- ง. ขยายช่วงที่มีประสิทธิภาพของ pH

๒.๑ ขบวนการที่ใช้ในโคแอกกูเลชัน

ขบวนการโล้ม-โซดา สารส้ม (alum) และ ฟอสเฟต (phosphate) เป็นการพัฒนาการขจัดน้ำเสีย แต่เทคนิคเบื้องต้นนี้ยังไม่ประสบความสำเร็จในการขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวมากนัก ซึ่งพบว่าการขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวของผลผลิตจากฟิสชัน (fission products) ที่เกิดจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ที่ตกลงมา จะขจัดได้เพียง ๕๐ - ๖๐ % (สำหรับความแรงรังสีเบตา รวม) โดยใช้ขบวนการดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการควบคุมขบวนการอย่างใกล้ชิด

สำหรับค่า decontamination factor ได้มีการรายงานไว้สำหรับไอโซโทปชนิดเดียวกัน และใช้ขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชันแบบเดียวกัน จะมีค่าแตกต่างกันไปหมด และก็เป็นการยากที่จะอธิบายข้อแตกต่างนี้ อย่างไรก็ตาม เหตุผลสำคัญสำหรับความแตกต่างก็คือ

- ก. ความเข้มข้นของสารที่ผสมอยู่ในน้ำเสียซึ่งไม่มีกัมมันตภาพรังสี ที่เป็นส่วนสำคัญของน้ำ
- ข. ความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่ผสมอยู่
- ค. รูปแบบทางเคมีของสารกัมมันตรังสี
- ง. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่นำมาใช้
- จ. ค่า pH ที่ใช้ในการขจัด



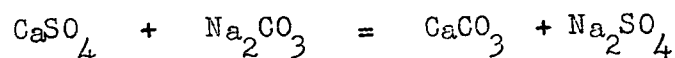
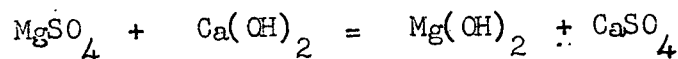
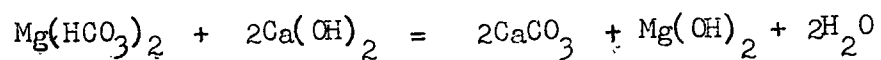
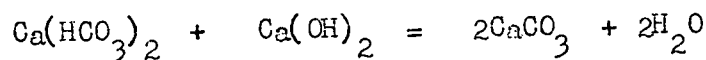
ขบวนการขจัดกากกัมมันตรังสีที่ใช้โดยทั่วไปคือ

๑. ขบวนการไลม์-โซดา

วิธีการมาตรฐานในการขจัดความกระด้างของน้ำในระดับของโรงงานอุตสาหกรรมจะประกอบด้วยการเติมปูนไลม์ (lime) และโซดาแอช (soda ash) เพื่อตกตะกอนคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ยกเว้นโลหะอัลคาไลน์ (alkali metals)

ถ้าเป็นน้ำกระด้างชั่วคราว เช่น ไบคาร์บอเนต (bicarbonate) ปูนไลม์ปริมาณพอเพียงจะถูกเติมลงไปเพื่อตกตะกอนคาร์บอเนตรวมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนต ถ้ามีความกระด้างถาวร (เช่น ซัลเฟต) อยู่ โซดาแอชปริมาณมากเกินไปจะถูกเติมลงไปเพื่อให้แน่ใจว่าจะขจัดแมกนีเซียม และแคลเซียมโคหิมต์ในรูปของคาร์บอเนต ปริมาณของปูนไลม์และโซดาแอชจะคำนวณได้จาก การวิเคราะห์ความกระด้างชั่วคราวหรือถาวร

ในน้ำกระด้างถาวร โซดาแอชจะถูกเติมลงไปก่อนให้สมดุลกับความกระด้างถาวร คัดตามด้วยปูนไลม์เพื่อปรับ pH สำหรับการขจัดที่เหมาะสมในกรณีที่มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมสูง (มากกว่า ๖๐ พีพีเอ็ม) ปูนไลม์ที่มากเกินไปจะใช้เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ pH สูงกว่า ๑๐.๕ และสารละลายสุดท้ายจะมีปริมาณของแข็งอยู่สูงกว่าน้ำที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมเล็กน้อย ปฏิกริยาเคมีจะเป็นดังนี้



สตรอนเตียม (strontium) ก็ถูกขจัดด้วยวิธีนี้ แสดงว่า
มีการเกิดผลิตภัณฑ์ของคัลเซียมคาร์บอเนต และสตรอนเตียมคาร์บอเนต
การขจัดสตรอนเตียมจะควบคุมไปกับการขจัดความกระด้าง และจะมี
ประสิทธิภาพมากกว่าในขบวนการที่ร้อน (hot process) เช่น
ที่ ๘๖ ° ซ มันจะตกตะกอนสมบูรณ์ในเวลา ๑๐ นาทีมากกว่าที่ ๑๐ ° ซ
ใช้เวลา ๒๔ ชั่วโมง

โรงงานที่ โอค ริชจ์ ได้ดำเนินการสำเร็จในปี ค.ศ. ๑๙๕๘
วิธีการคล้ายคลึงกับที่ได้อธิบายไปแล้ว สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้น
ของคัลเซียมค่อนข้างสูง การตกตะกอนของคัลเซียมคาร์บอเนตด้วย
โซเดียมคาร์บอเนตจะเกิดได้ที่ pH ๑๑ การขจัดซีเซียมจะดีขึ้น
โดยการเติมเคลย์ (clay) ที่มีปริมาณของอิลไลต์ (illite)
อยู่สูง น้ำที่ผ่านการขจัดแล้วยอมให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้เลย
แม้ว่าจะมีความยุ่งยากเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายที่ปล่อยออกมีสารเคมี
ที่ซับซ้อน หรือกรดที่มากเกินไป การขจัดความแรงรังสีเบตา รวมอยู่ระ-
หว่าง ๘๓ - ๘๖ % เฉพาะสตรอนเตียมจะขจัดได้เพียง ๑๕ % ถ้ามี
ความเข้มข้นของคัลเซียมตกค้างในน้ำน้อยกว่า ๑๕ พี พี เอ็ม แล้ว
การขจัดความแรงรังสีอัลฟา และเบตา รวมกันจะได้น้ำมากกว่า ๘๐ %
และไคตา D.F. สูงกว่า ๑๐

๒. การตกตะกอนของอลูมิเนียม และเฟอร์ริค ไฮดรอกไซด์

วิธีการในการขจัดน้ำเสียจะประกอบด้วย การเติมเกลือของอลูมิเนียม
หรือเกลือของเฟอร์ริค และเพิ่ม pH โดยการเติมปูนไลม์ โซดาแอช หรือ
โซดาไฟ เพื่อตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะพวกนี้ วิธีการเหล่านี้จะนำ
มาใช้ในการขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีต่ำ สารเคมีที่ใช้

จะรวมทั้งสารส้ม โซเดียม อลูมิเนต (sodium aluminate)
 เกลือเฟอริค หรือคอปเพอราส (copperas) ปฏิกริยาเบื้องต้น
 นี้เป็นผลจากการใช้โคแอกกูแลนต์ชนิดโคเรนิคหนึ่งข้างต้น ขึ้นอยู่กับความ
 เป็นด่างในบางรูปแบบ และฟลอคที่เพิ่มขึ้นจะเป็นทั้งอลูมิเนียม หรือ
 เฟอริค ไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนตที่มีแคลซิอออนที่มีวาเลนซ์สูง
 จะถูกดูดไว้โดยตะกอนของฟลอค ยกเว้นพวกโลหะอัลคาไลน์ จะไม่ได้
 รับอทธิพลอันนี้ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นแกนกลางสำหรับสารละลาย
 ซึ่งมีปริมาณของแข็งอยู่น้อยทำให้ปริมาณรวมของตะกอนน้อยเกินไปที่จะตก
 เมื่อฟลอคเกิดขึ้นภายใต้สภาวะของด่างจะมีประจุลบเนื่องจากการดึงดูด
 เอาไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ions) และจะดูดเอาไอออน
 บวกไว้ด้วย สารที่แขวนลอยอยู่ที่มีประจุบวกก็จะถูกขจัดออกไปอย่างมี
 ประสิทธิภาพ ส่วนอนุภาคที่แขวนลอยจะทำตัวเป็นแกนกลางสำหรับการ
 เจริญเติบโตของอนุภาคของฟลอค ประสิทธิภาพของการขจัดจะปรับปรุง
 ให้ดีขึ้นโดยที่มีไอออนของซัลเฟตอยู่สูงกว่า ๕ พี พี เอ็ม โซเดียม-
 อลูมิเนตจะไม่ใช้ตัวเดียว แต่จะใช้กับสารส้มเพื่อให้ได้ผลดีเป็นพิเศษ
 ความล้มเหลวในการเกิดโคแอกกูแลนต์โดยใช้สารส้มอย่างเดียวจะ
 แก้ไขได้โดยการเติมโซเดียมอลูมิเนต ๓.๕ พี พี เอ็ม กับสารส้ม

น้ำอ่อน (soft water) ที่มีปริมาณแร่ธาตุต่ำจะเกิดโคแอก-
 กูแลนต์ได้ดีที่สุดที่ pH ระหว่าง ๕.๕ - ๖.๕ โดยใช้สารส้ม ขณะที่น้ำ
 กระด้างขึ้นมาเล็กน้อยจะเกิดโคแอกกูแลนต์ที่ pH ๖.๕ - ๗.๕ ส่วนเฟอริค
 ไฮดรอกไซด์ จะใช้ pH สูงขึ้นมาอีกเล็กน้อย ในการเปรียบเทียบ
 ฟลอค และโคแอกกูแลนต์ต่างชนิดกันแสดงให้เห็นว่า ฟลอคจากเฟอริค
 ไฮดรอกไซด์จะให้การขจัดได้ดีกว่าอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เพราะว่า
 ตัวแรกจะตกตะกอนที่ pH สูงกว่า โซดาแอสบางที่จะให้ผลดีกว่าโซเดียม

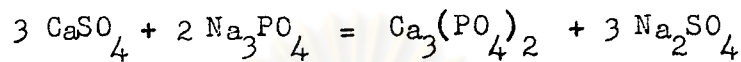
ไฮดรอกไซด์เนื่องจากสามารถขจัดสตรอนเตียมได้บางส่วน และเพิ่ม การขจัดตัวอื่นในรูปคาร์บอเนต การขจัดฟอสเฟตในน้ำกระด้างจะดีกว่า ในน้ำอ่อนเนื่องจากการตกตะกอนของ $(Ca_3PO_4)_2$ การเติมพวกเคลย์ เช่น เบนโทไนท์ (bentonite) ในน้ำอ่อนก็จะช่วยให้การขจัด ดีที่สุดได้

เมื่อพลูโตเนียม (plutonium) เป็นตัวหลักที่จะขจัดแล้ว การเติมเกลือของเหล็กจะช่วยการขจัดได้ ที่ลอส อลาโมส กากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวจะถูกขจัดโดยใช้เกลือเฟอร์ริก และปูนไลม์ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จะเกิดการตกตะกอนรวมกันกับพลูโตเนียม โดยจะดูด พลูโตเนียม และยึดมันไว้ให้ตามทานต่อการถูกล้างด้วยน้ำ ขบวนการนี้ เมื่อกระทำรวมกับการกรองจะลดปริมาณพลูโตเนียมจนพอเพียงที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้

๓. การตกตะกอนของฟอสเฟต

โคแอกกูเลชันด้วยฟอสเฟตจะไดผลเป็นที่น่าพอใจ ในสถาบันทาง นิวเคลียร์หลายแห่งในการขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลว ความแรงรังสีต่ำ โดยทั่วไปแล้วไตรโซเดียมฟอสเฟต (trisodium phosphate) จะใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ แต่บางแห่งจะใช้โมโนโซเดียม ฟอสเฟต (monosodium phosphate) ที่ซาร์เวล กากกัมมันตรังสี ที่เป็นของเหลว ความแรงรังสีต่ำจะถูกขจัดโดยการเพิ่ม pH เป็น ๙.๕ ด้วยโซดาไฟ แล้วเติมไตรโซเดียมฟอสเฟตปริมาณมากเกินพอ ถ้าเป็นกากที่มีความแรงรังสีสูงกว่านี้จะถูกปรับ pH เป็น ๑๑.๕ ด้วยโซดาไฟ แล้วเติมไตรโซเดียมฟอสเฟต ถ้าหากว่ามีคลอรีนต่ำกว่า ๕๐ พี พี เอ็ม จะต้องเติมคลอรีนคลอไรด์เพื่อให้อัตราส่วนของ Ca^{+2} ต่อ PO_4^{3-} มีค่า ๕/๘

เพื่อให้เกิดฟล็อกที่มีความแน่นขึ้น เฟอร์ริซัลเฟตจะถูกเติมลงไปเพื่อให้
ความเข้มข้นของ Fe^{+3} เป็น ๔๐ พี พี เอ็ม มันเป็นไปได้ที่วานอกจาก
ปฏิกิริยาต่อไปนี้



จะเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxy apatite) มีส่วนประกอบคือ
 $3 Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$ พบว่าสารประกอบพวกนี้มีความ
สามารถที่จะแลกเปลี่ยนแคทไอออนได้ และพวกแคทไอออนบางอย่างเช่น
สตรอนเตียม และพลูโตเนียมจะเข้าไปอยู่ในแลตทิซ (lattice) ของ
อะพาไทต์ (apatite) ได้

ขบวนการฟอสเฟตนั้นจะสามารถขจัดความแรงรังสีอัลฟาได้ถึง ๙๙ %
และความแรงรังสีเบตาได้ถึง ๘๐ % จากกากกัมมันตรังสีที่มีผลผลิตจาก
ฟิชชั่นผสมอยู่

๔. ขบวนการตกตะกอนโดยเฉพาะ

สารกัมมันตรังสีหลายชนิดในกากกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงรังสีต่ำ
ควรจะถูกขจัดออกไป ขบวนการขจัดโดยโคแอกกูแลชัน และฟล็อกคิวเลชัน
ไม่พอเพียงที่จะขจัดลงให้ถึงค่า MPC ได้ จำเป็นต้องมีขบวนการขจัดโดย
เฉพาะในกรณีพิเศษคือ กากกัมมันตรังสีที่ได้จากเหมืองแร่ และโรงงานย่อย
และแยกแรยูเรเนียม และเรธอเรียม ซึ่งบ่อยครั้งจะพบเรเดียมในระดับ
ที่ต้องถูกขจัดก่อนปล่อยออก

ก. การขจัดรูทีเนียม (ruthenium) . สารกัมมันตรังสีที่
ขจัดออกจากกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวได้ยากที่สุดตัวหนึ่งได้แก่
รูทีเนียม เนื่องจากมันอยู่ได้ทั้งในรูปแคทไอออนิก (cationic)

แอนไอออนนิค (anionic) หรือไม่มีประจุก็ได้ นอกจากวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) แล้ว การขจัดที่ดียิ่งที่สุดทำได้โดยการตกตะกอนร่วมกับคอปเปอร์ ซัลไฟด์ (copper sulphide) ในสารละลายที่เป็นกรด การขจัดวิธีหนึ่งที่ฮาร์เวลล์คือ การเกิดตะกอนของเฟอร์รัส ซัลไฟด์ (ferrous sulphide) โดยการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulphate) และโซเดียม ซัลไฟด์ (sodium sulphide) ที่ pH สูงกว่า ๘.๐ น้ำเสียบางชนิดจำเป็นต้องเติมเกลือคลอริเดียมเพื่อให้ได้ตะกอนที่ดี ขบวนการอันนี้โดยปกติจะติดตามหลังจากการขจัดโดยวิธีโซฟอสเฟตแล้ว จะช่วยเพิ่มการขจัดตัวปล่อยรังสีเบตาได้ประมาณ ๕ % ประสิทธิภาพของการขจัดวิธีนี้ย่อมจะแปรผันไป ขึ้นอยู่กับสภาพที่เป็นอยู่ แต่ขบวนการนี้จะมีประโยชน์โดยเฉพาะในการขจัดคอลลอยด์ที่มีรังสี

ข. การขจัดซีเซียม ซีเซียมจะถูกขจัดได้ดีที่สุดด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการใช้อิโอสโลที่มีในธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้น หรือตัวแลกเปลี่ยนไอออนสังเคราะห์ที่เป็นสารอินทรีย์ วิธีการอื่นนั้นได้แก่การเติมเคลย์ ระหว่างขบวนการโคแอกกูเลชัน การขจัดซีเซียมที่ได้นี้ประสบความสำเร็จก็โดยการตกตะกอนรวมของโลหะเพอโรไซยาไนด์ (metal ferrocyanide)

ค. การขจัดพวกสารกัมมันตรังสีที่ผลิตขึ้นมา แบเรียม และตะกั่ว คลอไรด์ จะใช้ตกตะกอนฟอสเฟต และเทลลูเรท (tellurates) ติดตามด้วยเฟอร์ริก ซัลเฟต เพื่อขจัดแบเรียม และตะกั่วส่วนเกิน และเป็นตัวช่วยให้เกิดฟลอค ไอโอดีนที่มีรังสีอาจอยู่ในรูปไอออนลบ จะถูกขจัดโดยใช้เกลือเงิน หรือสารที่แลกเปลี่ยนประจุตัวอื่น ๆ

^{60}Co และ ^{51}Cr มักอยู่ในรูปแอนไอออนจะถูกขจัดโดยการเติมเฟอรัส ซัลเฟต ติดตามด้วยการตกตะกอนของเฟอรัส ไฮดรอกไซด์ เมื่อ pH สูงขึ้น

ง. การขจัดพวกสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ เมื่อมีการย่อย และแยกยูเรเนียม น้ำเสียจะเปราะเปื้อนด้วยยูเรเนียม และเรเดียม จากกัมมันตรังสีที่มีความสำคัญมากนั้นจะประกอบด้วย ยูเรเนียม และ เรเดียมที่ปล่อยออกมาจากสารละลายบาร์เรินที่ถูกทำให้เป็นกลาง และ จากการล้าง การขจัดจะใช้แบไรท์ (barite) หรือ แบเรียม ซัลเฟต ตกตะกอน การตกตะกอนของแบเรียม ซัลเฟต (barium sulphate) ด้วยความช่วยเหลือของโคแอกกูแลนต์ที่เป็นกรดไขมันที่มี ไซตรง ไดถูกนำมาใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรม

๕. ขบวนการรวมกัน

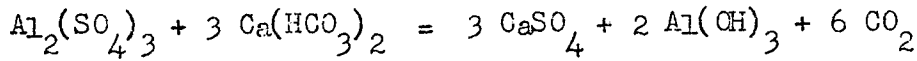
เมื่อน้ำเสียในธรรมชาติอาจจะมีสารกัมมันตรังสีเป็นส่วนประกอบ ขบวนการขจัดโดยใช้ขบวนการอย่างเดียวน่าจะไม่เพียงพอ ดังนั้น บ่อย ๆ ที่ขบวนการโคแอกกูแลชัน - ฟลอคคิวเลชันจะถูกใช้ก่อนจะขจัด แบบอื่น เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน หรือการระเหย (evaporation) ที่โอ๊ค ริคส์ จะมีการทำให้เกิดฟลอคคิวเลชันของเหล็ก และแคลซ์ ก่อนจะใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออน

๒.๔ สารเคมีที่ใช้ในขบวนการโคแอกกูแลชัน

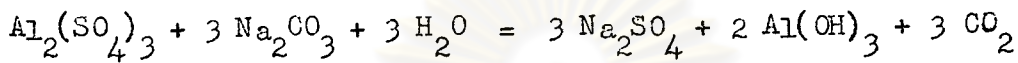
ก. อลูมิเนียม ซัลเฟต

อลูมิเนียม ซัลเฟต หรือ filter alum หรือเรียกง่าย ๆ ว่า สารส้ม จะนำมาใช้ในรูปของเหลว หรือในรูปเป็นก้อนก็ได้ เมื่ออลูมิเนียม ซัลเฟตถูกเติม

ลงไปใต้น้ำที่มีคลอรีน ไบคาร์บอเนต จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



เมื่อน้ำประกอบด้วยไฮเดียม คาร์บอเนต จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



อลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่ละลาย และอยู่ในสภาพคอลลอยด์จะเกิดเป็นฟล็อก ฟล็อกที่เกิดขึ้นนี้จะชี้ว่าใช้ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ถูกต้องหรือไม่ ถ้าเกิดเป็น ก้อนเบา ๆ กระจายชนก แสดงว่าใช้ปริมาณของโคแอกกูแลนต์มากเกินไป โดยปกติอนุภาคของฟล็อกควรมีขนาดเท่าหัวเข็ม

ผลดีที่สุดเกิดจากการใช้อลูมิเนียมซัลเฟตเมื่อปรับค่า pH อยู่ระหว่าง ๖.๕ - ๘.๕ แต่โคแอกกูแลนต์จะเกิดขึ้นเมื่อ pH มีค่า ๘.๕ ถ้าน้ำเสียที่จะขจัด ด้วยอลูมิเนียมซัลเฟตไม่เป็นค่าง จะใช้ปูนโลม์ หรือโซดาแอชช่วยในการปรับค่า pH

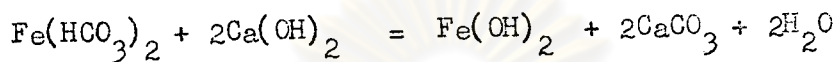
ข. เฟอร์รัส ซัลเฟต

เฟอร์รัส ซัลเฟต หรือเรียกว่า คอปเฟอร์รัส จะถูกใช้อย่างกว้างขวาง ในรูปของโคแอกกูแลนต์ ร่วมกับปูนโลม์ในน้ำที่ไม่มีสี สารชนิดนี้ราคาถูกกว่าอลูมิเนียม ซัลเฟต ในกรณีที่น้ำมีสีจัด การเติมเฟอร์รัส ซัลเฟต และปูนโลม์จะไม่เกิดผลที่น่าพอใจเพราะว่า ถ้านี้มีความเป็นค่างสูงเมื่อใช้การขจัดแบบนี้ สารประกอบ ที่จะทำให้เกิดสีจะเกิดขึ้นก่อนฟล็อกที่เหมาะสมในการขจัดสีจะเกิดขึ้น เฟอร์รัส ซัลเฟต และปูนโลม์อาจจะนำมาใช้ทั้งที่เป็นสารละลาย หรือของแข็งเช่นเดียวกับ อลูมิเนียม ซัลเฟต

ปูนโลม์อาจจะเติมได้ทั้งก่อน หรือหลังคอปเฟอร์รัส เมื่อเฟอร์รัส ซัลเฟต ถูกเติมในน้ำที่มีคลอรีน ไบคาร์บอเนตก่อน จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



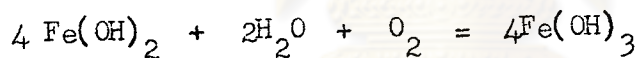
และเมื่อเติมปูนไลม์ลงไป ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังนี้



ถ้าปูนไลม์ถูกเติมลงไปก่อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อเติมเฟอร์รัส ซัลเฟต จะเป็นดังนี้



ในทั้งสองกรณีจะเกิดเฟอร์รัส ไฮดรอกไซด์ขึ้น ไฮดรอกไซด์นี้จะถูกออกซิไดซ์ โดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังนี้



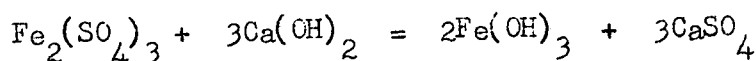
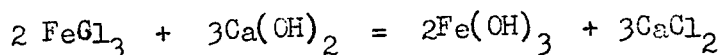
และเฟอร์ริก ไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นฟลอก

ค. คลอรีเนตเต็ด คอปเพอราส (Chlorinated copperas)

เมื่อคลอรีนถูกเติมลงไปในการละลายเฟอร์รัส ซัลเฟต จะเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเฟอร์ริก ซัลเฟต และเฟอร์ริก คลอไรด์ ดังนี้



และเมื่อเติมปูนไลม์ลงไปจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



พวกคลอรีเนตเต็ด คอปเฟอร์ราสนี้ จะเป็นโคแอกกูแลนต์ที่มีค่ายิ่งในการกำจัดสี โดยเฉพาะเมื่อน้ำมีค่า pH ต่ำ ตอนแรกคลอรีเนตเต็ด คอปเฟอร์ราสจะไล่ลงไป ให้เกิดฟล็อกที่ดี และเมื่อการผสมดำเนินไปได้สักครึ่งหนึ่งก็เติมพวกที่ปรับ ให้เป็นด่างลงไป ซึ่งอาจเป็นอลูมิเนียม ซัลเฟต กับปูนไลม์ หรือคลอรีเนตเต็ด คอปเฟอร์ราส กับปูนไลม์

ง. เฟอร์ริก คลอไรด์

เฟอร์ริก คลอไรด์มีสูตรเคมีคือ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ของแข็งจะบรรจุใน ถังไม้ หรือของเหลวบรรจุในภาชนะแก้ว หรือถังหุ้มด้วยยาง เฟอร์ริก คลอไรด์ จะกัดสนิมได้ดีมาก และควรระวังไว้กับวัสดุที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา ผลึกประกอบด้วย $FeCl_3$ ๖๐ % แอนไฮดรัส $FeCl_3$ จะประกอบด้วย $FeCl_3$ ๘๘ % และไม่มีน้ำผลึก ซึ่งมันจะไม่กัดถังเหล็กตราบโคที่ยังไม่มีความชื้นอยู่ ถังจะต้องปิดสนิทจนกระทั่งถูกนำมาใช้ และควรใช้ให้หมดถังในคราวเดียว เฟอร์ริก คลอไรด์เป็นสารที่นำมาใช้ได้ยากเนื่องจากคุณสมบัติกัดกร่อนของมัน และจะใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ pH ๔ - ๑๑

จ. ไตรโซเดียม ฟอสเฟต (Tri sodium phosphate)

จะอยู่ใน จะอยู่ในรูปผลึก ๓ แบบคือ หยาบ ปานกลาง และมาตรฐาน มีสูตรเคมีคือ $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ จะบรรจุในถัง หรือถุง ไม่ละลายมากในน้ำเย็น แต่จะมีการละลายสูงในน้ำอุ่นหรือน้ำร้อน pH ของสารละลาย ๑ % คือ ๑๑.๘

ฉ. โซเดียมคาร์บอเนต หรือโซดา แอช

เป็นผงสีขาวละลายได้ดีมากในน้ำ จะใช้เพื่อให้ความเป็นด่างมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โคแอกกูแลนต์เกิดขึ้นได้ และใช้เป็นตัวขจัดความกระด้างที่ไม่ใช่เกิดจาก คาร์บอเนต สารละลายของสารเคมีชนิดนี้จะไม่ทำให้ท่อตัน หรืออุดปากท่อ

ปฏิกิริยาของสารส้ม กับโซดา แอช จะผลิตคาร์บอน ไดออกไซด์ ขึ้นมาครั้งหนึ่งของที่เกิดจากความเป็นด่างโดยธรรมชาติของน้ำที่ทำปฏิกิริยากับสารส้ม จะไม่มีคาร์บอน ไดออกไซด์เกิดขึ้นถ้าใช้โซดา แอชมากเกินไป เพราะส่วนเกินจะไปรวมกับคาร์บอน ไดออกไซด์ เกิดเป็นโซเดียม ไบคาร์บอเนต โซดา แอชมักจะให้ผลในการขจัดได้ดีกว่าโซเดียม ไฮดรอกไซด์ เพราะว่ามีสารขจัดสตรอนเทียมได้เล็กน้อย และเพิ่มการขจัดธาตุอื่น ๆ ในรูปของคาร์บอเนต โซดา แอชจะมี Na_2CO_3 ๙๙ % เป็นอย่างน้อย และบรรจุในถุง หรือถัง และอยู่ในรูปของเหลว และของแข็ง pH ของ ๑ % ของสารละลาย มีค่า ๑๑.๒

ข. โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

จะใช้เพิ่มความเป็นด่าง ละลายได้ดีในน้ำ และอยู่ในรูปของ เกล็ด ก้อน ผง หรือของเหลว รูปที่เป็นผลึกของมันจะดูดความชื้นได้ดี และเกรด (grade) ที่ดีที่สุดในการค้าจะมี NaOH อยู่ประมาณ ๙๙ % pH ของสารละลาย ๑ % มีค่า ๑๒.๙

ข. ปูนไลม์

จะถูกใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อให้ความเป็นด่างพอเพียงที่จะใช้ลুমินีเยียม หรือเฟอรัส ซัลเฟต ปกติจะใช้ในรูปของควิกไลม์ (quick lime) หรือในรูปผลึกที่มีน้ำ สำหรับโรงงานเล็ก ๆ ใช้ปูนไลม์ที่มีน้ำจะสะดวกกว่า

ฉ. โคแอกกูแลนท์ เอ็ด (Coagulant aid)

เป็นสารที่ช่วยในขบวนการโคแอกกูเลชัน และจะใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานขจัดน้ำเสีย แต่นอกจากเคลย์แล้ว มักจะพบว่า มีประโยชน์อย่างจำกัดกับขบวนการโคแอกกูเลชันในการขจัดพวกกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของเหลวที่มีความแรงรังสีต่ำ อย่างไรก็ตามก็มักจะพบว่าการใช้โคแอกกูแลนท์ เอ็ด จะมีค่ามากเฉพาะกับ

กากกัมมันตรังสีบางชนิดเท่านั้น โคลแอคทิวแลนท์ เอค ที่สำคัญจะอธิบายข้างล่าง
ดังนี้ คือ

๑. แอคติเวตเต็ด ซิลิกา (Activated silica)

เตรียมโดยการทำให้เป็นกลางบางส่วนของโซเดียม ซิลิเกต สารที่ใช้รวมกันก็มี กรดซัลฟูริก อลูมิเนียม ซัลเฟต แอมโมเนียม-ซัลเฟต คลอรีน โซเดียม ไบคาร์บอเนต หรือคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ของซิลิกา เกิดขึ้นมาในช่วงทำปฏิกิริยา

การใช้แอคติเวตเต็ด ซิลิกา ร่วมกับสารส้ม หรือเฟอร์ริก ซัลเฟต เพื่อช่วยการเกิดโคแอคทิวเลชันของคัลเซียม คาร์บอเนต ในการทำให้น้ำลดความกระด้าง ขนาดของแอคติเวตเต็ด ซิลิกาที่จะนำมาใช้ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวที่จะขจัด สารละลายของแอคติเวตเต็ด ซิลิกา อาจจะใช้ผสมกับสารละลายของสารส้มเพื่อลดปริมาณการใช้สารส้ม วิธีการ และขนาดที่ใช้ที่มีประสิทธิภาพที่สุด ทดลองโดยใช้ จาร์ เทส

๒. เกลย์ (Clay)

พวกเบนโทไนท์ (Bentonite) ฟูลเลอร์ เออร์ธ (Fuller's earth) หรือเกลย์ชนิดอื่น ๆ จะสามารถใช้เพื่อช่วยโคแอคทิวเลชัน อย่างไรก็ตามก็ไม่มีรายงานแน่นอนว่าเมื่อไรจะใช้เกลย์ และใช้ปริมาณเท่าใด เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของเกลย์ ตลอดจนแหล่งที่เกิดของมัน และปฏิกิริยาในน้ำที่ต่างชนิดกัน เกลย์จะช่วยโคแอคทิวเลชันของน้ำที่ค่อนข้างใส โดยการให้สารที่แขวนลอยไปล้อมรอบฟลอคที่เกิดขึ้น เกลย์บางชนิดจะพองเมื่อเติมลงในน้ำ และจะเกิดฟลอคเมื่อใช้อย่างเดียว หรือกับโคแอคทิวแลนท์

ที่มีปริมาณจำกัด การใช้เคลือบจะช่วยขบวนการโคแอกกูเลชันให้ดีขึ้น และลดราคาของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ การทดลองใช้เคลือบควรจะทำเมื่อพบความยุ่งยากในการทดลองขจัดของเสียที่ค่อนข้างใส และเมื่อของเหลวเปราะเปื้อนควายนำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเคลือบบางชนิดจะถูกกลืน สี โดยเฉพาะสารที่เป็นน้ำมัน

๓. โพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte)

การใช้พวกโพลีอิเล็กโทรไลต์นี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม สารนี้จะเป็นทั้งโพลิเมอร์ และอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่ส่วนใหญ่จะเป็นพวกโคแอกกูแลนท์ แอต แต่บางตัวจะทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนท์มันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อน โดยปกติจะเป็นสารสังเคราะห์ มันอาจจะเป็นสารประกอบที่มีประจุลบ เช่น โพลีอะซิลาไมด์ (polyacrylamide) หรือเป็นสารประกอบที่มีประจุบวก เช่น โพลีไวนิล ไพริดีเนียม บิวทิล โบรไมด์ (polyvinyl pyridinium butyl bromide) หรืออาจมีทั้งประจุบวก และประจุลบรวมกัน หรือไม่มีประจุก็ได้ หน้าที่ของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่จะชี้ให้เห็นอย่างง่าย ๆ ก็คือ เป็นตัวเชื่อม (binder) มันจะหุ้มอนุภาคของฟลอค และจะช่วยให้ฟลอคมารวมตัวกันได้เร็วขึ้น โพลีอิเล็กโทรไลต์จะมีประสิทธิภาพในการช่วยโคแอกกูเลชันโดยใช้ขนาดในช่วง ๐.๕ - ๕.๐ พี พี เอ็ม และโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่ ๆ จะถูกใช้ในขนาดน้อยกว่านี้ ปัจจุบันมีโพลีอิเล็กโทรไลต์อยู่ถึง ๓๐ ชนิดที่ถูกลำเอามาใช้ และก็มีมีการค้นคว้าเพิ่มเติมขึ้นเรื่อย ๆ

๔. สารเคมีอื่น ๆ

สารเคมีที่อาจนำมาใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชัน อาจแบ่งได้เป็น ๒ พวก คือ ตัวที่ทำตกตะกอน (precipitants) และ

แครี่เออร์ (carriers)

ตัวทำใหตกตะกอนนี้ไดแก ตะกั่ว คลอไรด์ (lead chloride) จะตกตะกอน ฟอสเฟต (phosphate) เกลือเงิน จะตกตะกอนไอโอดีน (iodine) แบริียม คลอไรด์ จะตกตะกอนซัลเฟต และเทลลูเรท (tellurate) และโปแตสเซียม หรือโซเดียม เฟอโรไซยาไนด์ (ferrocyanide) จะทำปฏิกิริยากับนิเกิล หรือเหล็ก ซัลเฟต เพื่อตกตะกอนซีซีเอ็ม

พวกแครี่เออร์ จะใช้ช่วยขจัดสิ่งเประอะเปื้อน ประกอบด้วยเกลือของธาตุที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อเติมลงในสารละลายจะเพิ่มการขจัดสิ่งเประอะเปื้อนของสารกัมมันตรังสีซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยจากของเหลวใด เช่น การเติมสตรอนเตียมที่ไม่มีรังสีลงไป จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสตรอนเตียมที่เป็นสารกัมมันตรังสีได้ในขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชันที่ทำให้ฟอสเฟต หรือคาร์บอเนตตกตะกอนลงมา

๒.๘ ขบวนการที่เกี่ยวข้องกับโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชัน

โดยไม่คำนึงถึงชนิดของเครื่องมือที่ใช้แยกสลักค์ ของเหลวซึ่งถึงแม้ว่าจะขจัดเอาสลักค์ออกไปแล้ว ก็ยังมีสารแขวนลอยอยู่บ้าง ซึ่งอาจมีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ จำเป็นต้องขจัดออกก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมด้วยการกรอง ตัวกรองที่ใช้มี ๒ แบบ คือ ตัวกรองที่เป็นทราย (sand filter) และตัวกรองสุญญากาศ (vacuum filter) ส่วนสลักค์จากขบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอคคิวเลชัน และเซตติเม้นเตชัน ก็ยังมีปริมาณน้ำอยู่สูง ต้องขจัดด้วยการเหวี่ยง (centrifuge) หรืออาจจะนำเอาสลักค์มากกรองน้ำออกก็ได้

๒.๑๐ แพคเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเลือกขบวนการในการขจัดกาก

เมื่อออกแบบโรงงานขจัดกากกัมมันตรังสี ต้องจำไว้ว่ากัมมันตภาพรังสี

จะไม่ถูกทำลายโดยขบวนการขจัดกากใด ๆ สิ่งที่สามารถจะทำให้ดีที่สุดในที่สุดก็คือ พิจารณาในด้านสุขภาพ ความปลอดภัย และเศรษฐศาสตร์ และพิจารณาถึงความเข้มข้นของตะกอนที่จะต้องนำมาขจัดในภายหลัง ก่อนที่จะปล่อยออกไป แพคเตอร์หลายอย่างจะใช้ในการเลือกขบวนการที่ใช้ ส่วนใหญ่จะมีความสัมพันธ์กัน และยากที่จะศึกษาแต่ละอย่างแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาซึ่งมีความสัมพันธ์ทั้งด้านความปลอดภัย และค่าใช้จ่ายที่จะนำมาใช้ก็คือ การหาความเป็นไปได้ที่จะปล่อยออก ณ ที่ใดที่หนึ่งโดยเฉพาะ และการหาคุณสมบัติของกากกัมมันตรังสีที่จะขจัด

ในการขจัดกากกัมมันตรังสี แพคเตอร์ในด้านสุขภาพ และความปลอดภัย จะได้รับความสนใจเป็นอันดับแรก ในการพยายามขจัดให้ระดับของกัมมันตภาพรังสีมีค่าใกล้เคียงกับของไอโซโทปที่เสถียร จะต้องมีการหาความสมดุลระหว่างการใช้ความจุของสิ่งแวดล้อมที่จะรับกากกัมมันตรังสีโดยไม่เกิดความเสียหาย และการขจัดที่จำเป็นเพื่อให้มั่นใจว่าระดับการปล่อยออก ไม่เกิดอันตราย ด้วยเหตุผลนี้เอง ในปี ค.ศ. ๑๙๖๕ และ ๑๙๖๖ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ จึงได้จัดประชุมเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์ของการขจัดกาก วัตถุประสงค์สำคัญก็คือ ตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดในการขจัดกาก และแนะนำระบบการรายงานค่าใช้จ่ายซึ่งจะใช้เป็นเครื่องชี้แนะที่เป็นประโยชน์สำหรับค่าใช้จ่ายที่แท้จริงของการขจัดกากกัมมันตรังสี

๒.๑๑ การหาระดับที่ยอมให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

กฎหมายควบคุมการจัดการ

ระดับที่ยอมให้ปล่อยออกสำหรับที่หนึ่งที่ใด อาจจะถูกจัดตั้งขึ้นโดยฝ่ายนิติบัญญัติ ซึ่งจะอ้างถึงสิ่งพิมพ์ของ IAEA เกี่ยวกับ Safety Standards หรือขอแนะนำของ ICRP สำหรับความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้สูงสุด (MPC values) ในทางกลับกัน กฎหมายอาจจะยอมรับข้อจำกัดในการปล่อยออกซึ่งกำหนดขึ้นทางอ้อม

แต่จะคำนึงถึงการใส่สิ่งแวคลอม และความสามารถที่รับรังสีของมัน สำหรับสหภาพ
โปเวียต และสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดข้อจำกัดในการปล่อยออกที่จะใช้ได้อย่าง-
กว้าง ๆ แต่สหราชอาณาจักรได้กำหนดข้อจำกัดเป็นกรณีไป

กฎหมายของชาติ หรือท้องถิ่นที่จะควบคุมเกี่ยวกับการปล่อยออกของสาร
กัมมันตรังสีจะต้องได้รับการศึกษาอย่างละเอียดจากผู้จัดการเกี่ยวกับกากกัมมันตรังสี
ถ้ายังไม่มีกฎหมายกำหนดไว้ จะต้องมีการกำหนด หรือข้อชี้แนะบางอย่างไว้ก่อนที่จะมี
กฎหมาย กัมมันตรังสีที่มีอยู่จากกากที่ได้จากขบวนการต่าง ๆ อาจจะเป็นเพียง
ส่วนเล็กน้อยที่ก่อให้เกิดอันตราย กฎหมาย หรือข้อกำหนดที่ควบคุมผลภาวะของสิ่ง-
แวคลอมจากสารประเภทอื่นก็ต้องมีการพิจารณาอย่างละเอียด

ในทุกกรณี การสำรวจก่อนปฏิบัติการของสภาพสิ่งแวคลอม จะต้องมีการ
กำหนดขึ้น ซึ่งจะช่วยให้แน่ใจถึงโปรแกรมการตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้เชื่อได้
ว่าจะไม่มีกัมมันตภาพรังสีเกิดขึ้น

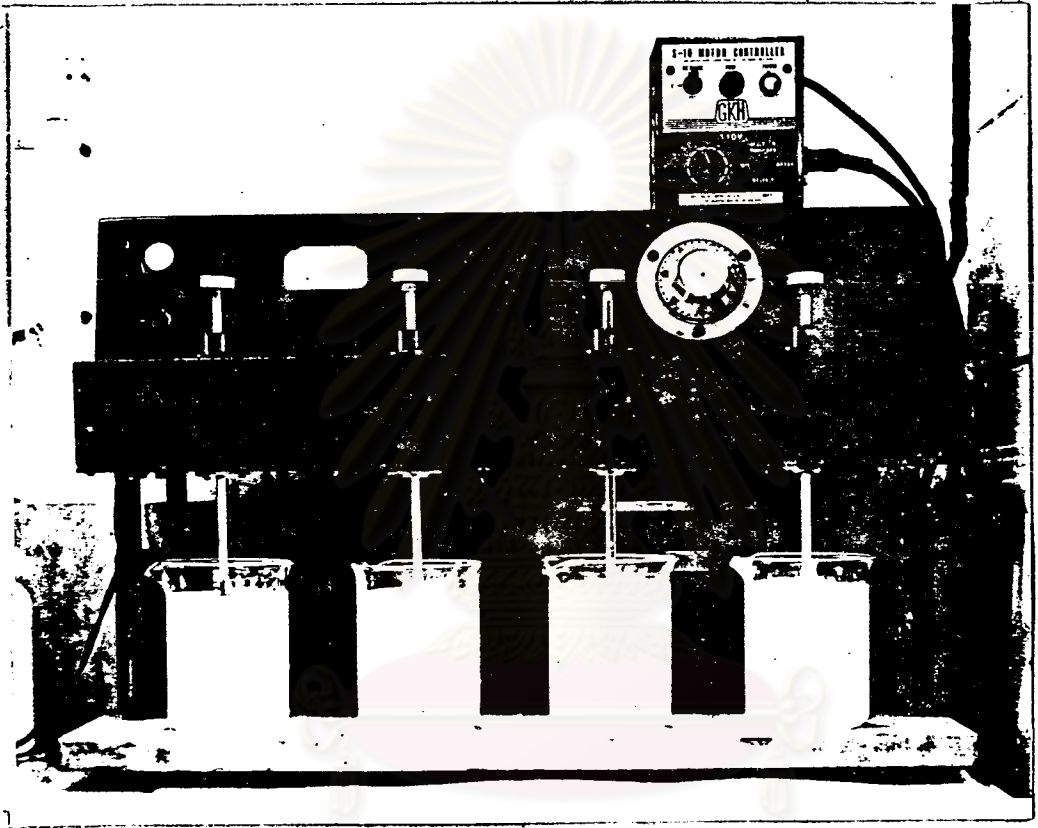
๒.๑๒ จาร์ เทส (jar test)

ก. วัตถุประสงค์ และคำจำกัดความของจาร์ เทส

มันเป็นไปไม่ได้ที่จะบอกปริมาณทั้งโคแอกกูแลนท์ และโคแอกกูแลนท์ เอค
จากการวิเคราะห์น้ำเสีย ซึ่งจะแน่ใจได้ว่าการขจัดรังสีได้ดีพร้อมทั้งมีการตกตะกอน
ที่สามารถยอมรับได้ ปริมาณของสารเคมี และโพลีอิเล็กโตรไลท์พร้อมทั้งอัตราการ-
กวนที่เหมาะสม จะต้องหาจากการทดลองสำหรับกากกัมมันตรังสีแต่ละชนิด
อย่างไรก็ดี มันก็อาจเป็นไปได้ที่จะทราบปริมาณอย่างหยาบ ๆ โดยการวิเคราะห์
ของเหลวที่จะขจัด

ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองจากตัวอย่างของกากกัมมันต-
รังสี ภายใต้สภาพเดียวกันโดยเพิ่มปริมาณของสารเคมี โดยจะเลือกค่าที่เหมาะสม

จากการทดลอง การทดลองนี้อาจทำในจาร์ หรือบีกเกอร์ที่มีความจุประมาณ ๑ ลิตร การทดลองนี้จะทำเป็นชุด ๆ ละ ๔ หรือ ๖ หรือมากกว่านั้น เนื่องจากจำเป็นต้องทำการทดลองหลายครั้ง ตัวอย่างที่จะนำมาจะต้องมีปริมาณพอเพียงระหว่าง ๒๐ - ๔๐ ลิตร



รูปที่ ๒.๕ เครื่องมือ จาร์ เทส

ข. เครื่องมือที่ใช้ (ดังในรูปที่ ๒.๕)

เครื่องมือจะประกอบด้วยระบบการกวนที่สามารถปรับความเร็วได้ ใบพัดจะหมุนด้วยความเร็วเดียวกัน (ระหว่าง ๒๐ ถึง ๑๐๐ รอบต่อนาที) และพื้นที่ของใบพัดจะต้องน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรที่กวนในแนวตั้ง

เนื่องจากจะต้องมีการหยุด หรือเปลี่ยนความเร็วของการกวนโดยทันที ดังนั้นจึงมีประโยชน์ที่จะทำให้เครื่องมือนี้มีช่วงความเร็ว ๒ ช่วง เพื่อสามารถทำการกวนได้อย่างรวดเร็ว และกวนซ้ำในสภาพเกิดฟลอคคิวเลชัน

ก. วิธีการ

ในขั้นต้นจะต้องทราบค่า pH ความขุ่น (turbidity) ความกระด้างรวม (total hardness) และความแรงรังสี

กากกัมมันตรังสีที่เป็นของเหลวจะถูกเติมลงในจาร์ หรือบีกเกอร์ การเติมโคแอคกูแลนต์จะต้องทำให้รวดเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และการกวนจะถูกปรับใหม่ให้ความเร็วสัมพันธ์กับการผสมอย่างรวดเร็วในเวลาที่กำหนด (๑ - ๕ นาที)

อัตราเร็วของการกวนจะลดลงจนสัมพันธ์กับสภาพการเกิดฟลอคคิวเลชัน ในเวลาที่กำหนด (๑๐ - ๓๐ นาที) โคแอคกูแลนต์ เอด จะถูกเติมลงในเวลาอันสมควร การเกิดของฟลอค และคุณสมบัติในการเกิดของมันจะต้องสังเกตได้ในขณะนี้

การกวนจะหยุดลง และที่กวน (stirrer) จะถูกนำออกจากจาร์ การตกตะกอนจะสิ้นสุดลงในเวลา ๑ - ๕ ชั่วโมง จะต้องสังเกตคุณสมบัติของตะกอน ความเร็ว ปริมาณของสลัดกที่เกิดขึ้น ดีกรีของความใสของสารละลาย

หลังจากเกิด เซตกิเมนเตชันแล้ว ของเหลวใสจะถูกคูดออกจากด้านบน และกรองผ่านกระดาษกรอง และส่วนใสที่กรองแล้วจะถูกส่งไปทำการวัดปริมาณรังสีเช่นเดียวกับตอนแรก การปฏิบัติการนี้จะทดลองโดยใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ จนได้ปริมาณที่เหมาะสม เช่นเดียวกัน การทดลองควรใช้สารเคมีชนิดเดียวกับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และความเข้มข้นเหมือนกัน

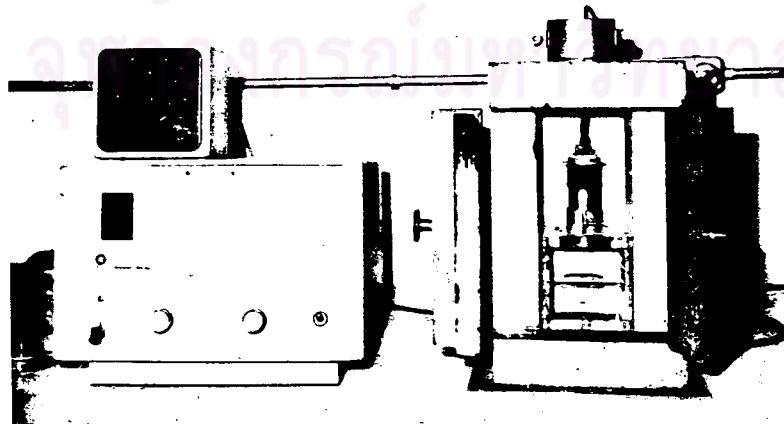
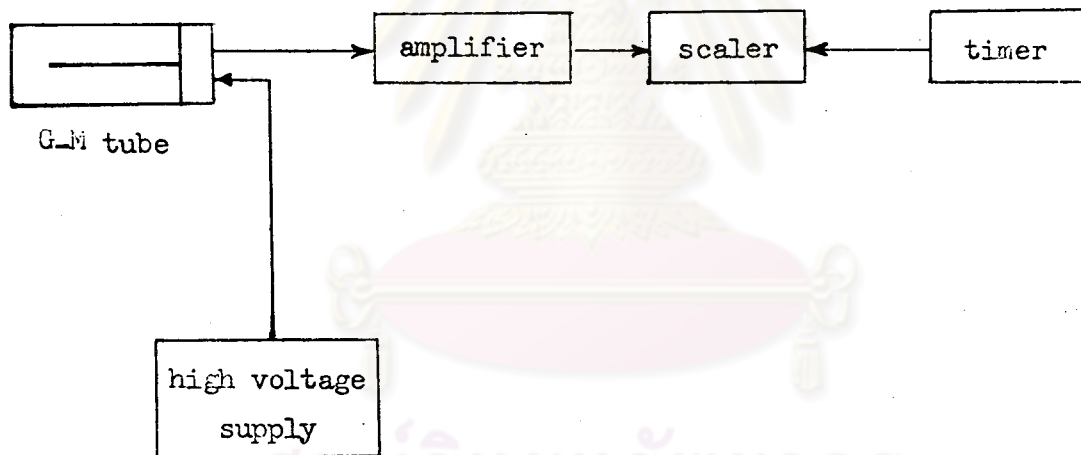
๒.๑๓ เครื่องนับรังสีที่ใช้

ก. ไกเกอร์ - มุลเลอร์ เกาน์เตอร์ (Geiger-Muller counter)

เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์ - มุลเลอร์ใช้หัววัดรังสีไกเกอร์ - มุลเลอร์

หรือเรียกสั้น ๆ ว่า จี เอ็ม หัววัดรังสีแบบนี้เป็นหลอดโลหะตัวนำ ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ ตรงแกนกลางมีลวดเส้นเล็ก ๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก มีฉนวนกันไว้ เมื่อมีรังสีเข้าไปชนกับก๊าซภายในหลอด ทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบ ไอออนลบจะวิ่งไปขั้วบวก เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวก และขั้วลบ ที่ใช้กับ หัววัดรังสีแบบนี้มีค่าสูงขนาดที่ทำให้ไอออนลบที่เกิดขึ้นมีพลังงานมากพอที่จะวิ่งไปชนกับ อะตอมของก๊าซตัวอื่น เกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้นจนถึงขั้นอิ่มตัว

หัววัดไกเกอร์นี้ใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถวัดรังสีได้ทั้งรังสีอัลฟา เบตา และแกมมา อุปกรณ์ และวงจรของหัววัดไกเกอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และใช้ในการทดลองนี้จะแสดงดังรูป ๒.๖



รูปที่ ๒.๖ วงจร และอุปกรณ์ของเครื่องวัดไกเกอร์ ที่ใช้ในการวิจัย

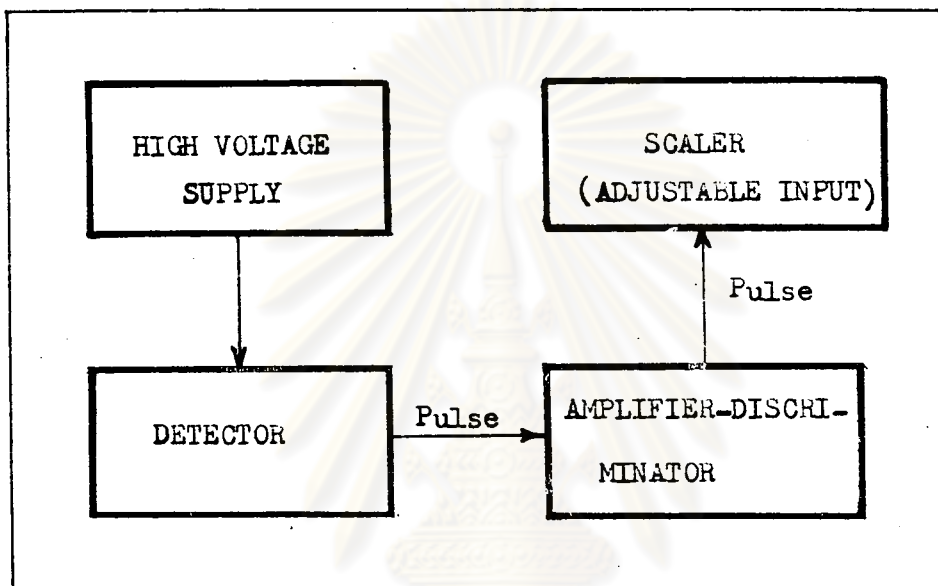
ข. อัลฟา ซิลทิลเลชัน เคาน์เตอร์ (Alpha-Scintillation counter)
ใช้ ซิงค์ ซัลไฟด์ ฟอสฟอรัส (Zinc sulfide phosphors)

เมื่อรังสีอัลฟาชนกับผลึกที่ไม่บริสุทธิ์ของ ซิงค์ ซัลไฟด์ รังสีอัลฟาจะเกิดอันตรกิริยากับฟอสฟอรัส เกิดแสงวาบขึ้น (scintillate) ซึ่งเกิดจากการคายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกเอกซไซเทชันในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงนี้จะไปเกิดอันตรกิริยากับโฟโตแคโทด (photo cathode) ในโฟโต มัลติพลายเออร์ เกิดโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ออกมา อิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งในสนามไฟฟ้า เพิ่มปริมาณขึ้น แล้วจึงเข้าสู่แอโนด (anode) เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรซึ่งเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องนับ (scaler) ต่อไป

อัลฟา ซิลทิลเลชัน เคาน์เตอร์ จะประกอบด้วย

๑. ฟอสฟอรัสที่อยู่ใกล้ หรือสัมผัสกับสารที่ปล่อยรังสีอัลฟา และถูกวางในตำแหน่งที่หลอดโฟโต มัลติพลายเออร์จะรับแสงวาบที่เกิดขึ้นได้
๒. หลอดโฟโต มัลติพลายเออร์ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่า หรือใหญ่กว่า ตัวอย่างที่จะวัด และหลอดโฟโต มัลติพลายเออร์จะมีปลอกหุ้มกันแสงเข้า
๓. แหล่งจ่ายไฟแรงสูง ที่จะให้แรงดันไฟฟ้าแก่หลอดโฟโต มัลติพลายเออร์
๔. แอมพลิฟายเออร์ (amplifier) ที่เก็บสัญญาณจากหลอดโฟโต มัลติพลายเออร์ แล้วขยายสัญญาณ
๕. การตั้งค่า แลล แลล ดี และ ค่ายู แลล ดี ให้เหมาะสม (Lower Level Discriminator and Upper Level Discriminator)
๖. สเกลเลอร์ (scaler) ทำหน้าที่นับสัญญาณที่ผ่านจากดิสคริมิเนเตอร์ (Discriminator)

ในรูปที่ ๒.๑ จะแสดงวงจร และอุปกรณ์ของอัลฟา ซิลทิลเลชั่น เคาน์เตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง (ใช้ อัลฟา ซิลทิลเลชั่น เคาน์เตอร์ ของ EBERLINE โมเดล อาร์ ที - ๑๔ และใช้ มินิ - สเกลเลอร์ โมเดล เอ็ม เอส - ๒)



รูปที่ ๒.๑ แสดงวงจร และอุปกรณ์ของ อัลฟา ซิลทิลเลชั่น เคาน์เตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง