



복합 처리 방법에 의한 액체 방사성 폐기물의 부피 감소

Tibor Szánya, Gyula Marton,
László Hanák

University of Veszprem, Dept.
Chem. Eng., Hungary

Péter Tilky, János Schunk,
József Viszláy

NPP Paks, Hungary

Béla Kanyár, Zoltán Németh
University of Veszprem, Dept.
Radiochemistry, Hungary

요약 가리 Paks 원자력발전소는 1차 냉각 계통 내 주요 기기인 냉각재 펌프, 증기발생기, 배관 등의 제염을 위하여 알칼리성 산화제(KMnO₄, NaOH, H₂O)와 제산액(Citric acid, Oxalic acid, 물)을 사용하고 있다.

이 제염액을 사용하고 난 후의 제염 폐액을 처리하여 부피를 줄일 목적으로 흡착제와 이온 교환 수지 등으로 구성된 이동형 제염 기기의 개발에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 알칼리성 산화제 제염 폐액의 처리를 위해 활성탄, 양이

온 및 음이온 교환 수지로 구성된 다층 칼럼(multi-layered column)을 이용하여 다양한 실험을 수행하였다.

이 실험에 사용한 폐액 내 ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co 와 ¹¹⁰mAg 의 초기 방사능은 10³ ~ 8×10⁴ kBq/dm³ 이었으나 제염 기기를 거친 후 방사능은 1 kBq/dm³ 이하의 수치를 보여 주었으며, 감용비(VRF)는 50 ~ 500이었다.

또한, ¹¹⁰mAg, ⁹⁵Nb, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁵¹Cr, ⁵⁸Co, ¹²⁴Sb 등의 방사성 동위원소의 분리가 진행되는 동안 액상과 고체상의 방사능 분포를 측정하였으며, KMnO₄-NaOH-H₂O-활성탄계의 흡착 반응과 이동 현상도 조사하였다.

서론

가압 경수로 원자력발전소의 1차 계통 내 열교환기, 증기발생기, 배관 등의 기기는 부식 및 중성자 조사로 인하여 방사능을 띄게 된다. 부식 및 중성자 조사로 인해 기기 안쪽의 용접 부위에 ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co,

¹¹⁰mAg, ⁵⁹Fe, ¹²⁴Sb, ⁹⁵Nb 같은 핵종을 포함하는 부식층이 형성된다.

이들 핵종 중 반감기가 긴 장수명 핵종은 ⁵⁴Mn (312일), ⁶⁰Co (5.26년), ¹¹⁰mAg (250일) 이며, 반감기가 짧은 핵종은 ⁵¹Cr (28일), ⁵⁸Co (71일), ⁵⁹Fe (45일), ¹²⁴Sb (60일), ⁹⁵Nb (66 일) 등이다.

가압 경수로 원자력발전소 (PWR)의 경우 매 3~5년에 한번씩 정기적으로 이들 기기에 대한 제염을 실시해야 한다.

원자력발전소의 가압 경수로가 VVER 400 type일 경우 1차 계통 기기 제염은 AP-CITROX 공정을 이용하고 있다.

이 AP-CITROX 공정은 염기성 조건, 90~95°C의 온도 조건하에서 KMnO₄ 용액을 사용하여 먼저 표면 제염을 수행한다.

최신의 공정인 LOMI 공정은 V²⁺, Cr²⁺, EDTA, gluconic acid, picolinic acid 등의 복합체를 제염에 이용한다.

AP-CITROX 공정에서 발생하는 알칼리성 산화제와 제산 제염 폐액은

〈표 1〉 알칼리성 산화 제염 용액의 초기 성분

(용액 내 KMnO_4 의 함유량은 5 g/dm^3 , NaOH 함유량은 10 g/dm^3)

^{51}Cr (kBq/dm^3)	^{54}Mn (kBq/dm^3)	^{58}Co (kBq/dm^3)	^{60}Co (kBq/dm^3)	$^{110\text{m}}\text{Ag}$ (kBq/dm^3)	^{124}Sb (kBq/dm^3)	^{95}Nb (kBq/dm^3)	Σ (kBq/dm^3)
82	15.4	2.9	1.6	520	77.7	230	929.6

〈표 2〉 활성탄의 물리적 특성

비표면적 S_{BET} (m^2/g)	701.63
pore volume (cm^3/g)	0.5027
평균 pore diameter (nm)	2.866
입자 크기 (mm)	1-3

별다른 처리 없이 보통 방사성 폐액 저장 용기에 저장된다.

이 용기에 들어있는 단반감기의 동위원소는 장시간의 저장 기간 동안에 붕괴되어 자연적으로 소멸된다.

그러나 ^{54}Mn , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 등의 장반감기의 동위원소(장수명 핵종)는 장기간 방사능이 소멸되지 않기 때문에 감시를 엄격히 하며 방사선량이 1 kBq/dm^3 이상이면 방출을 허용하지 않는다.

알칼리성 산화제와 제염 폐액은 종종 화학 반응을 일으켜서 문제가 되기도 하는데, 이러한 경우 옥살산- KMnO_4 간의 반응이 MnO_4 침전물을 형성하여 방사성 슬러지로 저장 용기에 침전되기도 한다.

이러한 방사성 슬러지는 제염 폐액을 추가로 처리할 때에 처리를 어렵게 만든다.

또 하나의 문제점은 알칼리성 산화제 같은 제염 폐액에는 방사성 핵종 운반체 역할을 하는 물질인 여러 종류의 유기물 화합물(기름 지방분 세제 등), 고형 물질, 콜로이드 불순물 등이 함유되기도 한다.

보통 원자력발전소에서는 위에 설명된 폐액들이 증발 과정에서 농축된다.

〈표 3〉 칼럼 통과 후 폐액 내 핵종 농도

Volume dm^3	^{51}Cr (kBq/dm^3)	^{54}Mn (kBq/dm^3)	^{58}Co (kBq/dm^3)	^{60}Co (kBq/dm^3)	$^{110\text{m}}\text{Ag}$ (kBq/dm^3)	^{124}Sb (kBq/dm^3)	^{95}Nb (kBq/dm^3)	$\Sigma^{54}\text{Mn}+^{60}\text{Co}+^{110\text{m}}\text{Ag}$ (kBq/dm^3)
24	0.22	0.08	0.04	0.24	0.26	1.02	0.04	0.58
57	0.4	0.16	0.1	0.36	0.38	1.94	0.12	0.90
77	0.56	0.08	0.06	0.16	0.52	4.8	0.12	0.76
93	0.58	0.06	0.06	0.14	0.16	5.4	0.08	0.36
113	1.16	0.02	0.06	0.12	0.1	6.78	0.06	0.24
136	1.76	0.08	0.08	0.22	0.28	8.06	0.08	0.58
152	3.56	0.16	0.24	0.22	0.30	10.46	0.44	0.68
173	3.24	0.14	0.22	0.24	0.16	10.74	0.36	0.54

이러한 농축액이나 건조 과정에서 형성된 방사성 물질은 별도의 용기에 저장되거나 시멘트나 아스팔트 고화 또는 유리 고화로 처리되기도 한다.

위에 언급한 문제들 중에는 폐기물의 장기간 저장이 가장 중요한 문제로 부각되는데, 이는 발전소 운전이 지속되는 동안에 방사성 폐기물량이 계속 증가하기 때문이다.

헝가리의 Veszprem 대학의 방사화학과의 화학공학과는 Paks 원자력 발전소와 연구 개발 계약을 체결하여 관련 전문가들이 NaOH , KMnO_4 , H_2O 같은 알칼리성 산화제 제염 폐액을 처리하기 위한 새로운 흡착법과 이온 교환 공정 활용에 대한 연구를 하고 있다.

실험 및 결과 고찰

알칼리성 산화제 제염 폐액을 95°C 온도에서 $100\sim 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ 의 유량으로 $300 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ I.D. 규모 칼럼을 통과시킨다.

제염 폐액의 성분은 〈표 1〉과 같다. 칼럼의 상부 180cm는 활성탄으로 채웠으며(Top-Sorb type, University of Veszprem, Dep. Chem. Eng.), 활성탄의 물리적 특성은 〈표 2〉와 같다.

칼럼 하부는, 위 40cm는 Varion-KSN 양이온 교환 수지(입자 크기: $0.4\sim 1.2 \text{ mm}$, Fe(II) form)를, 다음 40cm는 Varion-KSN 양이온 교환 수지(입자 크기: $0.4\sim 1.2 \text{ mm}$, H^+ form)를, 마지막 40cm는 VarionATN

〈표 4〉 처리중 칼럼 수직 거리별 액체상 방사능 분포

칼럼 축상 위치 cm	처리 부피 (dm ³) (유량) (cm ³ /min)	액체상 방사능 Bq/dm ³						
		⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹²⁵ Sb	⁸⁵ Nb
0		82000	15400	2900	1600	5.2.10 ⁵	7.7.10 ⁴	2.3.10 ⁵
30	24 (200)	4200	1160	-	480	3.10 ⁴	13200	6800
60		2720	240	120	740	220	11000	60
90		3120	320	220	1266	240	11200	120
120		3120	140	100	580	140	11200	80
150		3660	120	60	380	140	11800	60
180		3660	220	140	960	300	11000	60
210		220	220	80	780	120	880	60
240		180	60	60	180	120	720	60
270		260	60	40	280	200	1380	60
300		220	80	40	240	260	1020	40
30	57 (200)	2460	1280	220	520	6.10 ⁴	1.1.10 ⁴	1.4.10 ⁴
60		3200	160	100	340	7.2.10 ³	8.10 ³	1.7.10 ³
90		3120	140	60	380	340	8.8.10 ³	80
120		2920	80	80	280	1.1.10 ³	10 ⁴	300
150		3120	60	80	200	280	1.1.10 ⁴	80
180		180	40	-	60	300	220	80
210		920	160	60	400	360	3.10 ³	80
240		320	60	-	180	220	640	80
270		320	80	40	320	140	240	80
300		400	160	100	560	580	1.94.10 ³	120

〈표 4a〉 처리 중 칼럼 수직 거리별 액체상 방사능 분포

칼럼 축상 위치 cm	처리 부피 (dm ³) (유량) (cm ³ /min)	액체상 방사능 Bq/dm ³						
		⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹²⁵ Sb	⁸⁵ Nb
30	77 (400)	3.6.10 ³	1.9.10 ³	340	380	1.2.10 ³	1.2.10 ⁴	3.10 ⁴
60		3.8.10 ³	460	220	260	5.6.10 ⁴	10 ⁴	1.4.10 ⁴
90		3.2.10 ³	80	80	320	660	9.10 ³	180
120		3.3.10 ³	60	60	300	180	9.6.10 ³	60
150		3.10 ³	60	60	240	180	9.8.10 ³	60
180		2.7.10 ³	100	60	300	300	10 ⁴	60
210		1.8.10 ³	120	60	100	140	6.4.10 ³	80
240		6.2.10 ³	120	60	340	820	1.8.10 ³	200
270		5.4.10 ³	80	40	140	166	5.10 ³	80
300		5.6.10 ³	80	60	160	520	4.8.10 ³	120
30	93 (200)	3.6.10 ³	1.2.10 ³	380	400	1.5.10 ³	1.2.10 ⁴	3.6.10 ⁴
60		6.10 ³	420	280	880	7.6.10 ⁴	10 ⁴	1.9.10 ⁴
90		3.7.10 ³	100	120	300	1.1.10 ⁴	8.6.10 ³	3.10 ³
120		2.7.10 ³	60	60	120	300	9.4.10 ³	80
150		3.10 ³	60	60	140	120	10 ⁴	60
180		3.10 ³	80	80	180	180	1.1.10 ⁴	60
210		1.1.10 ³	60	80	300	520	6.10 ³	140
240		1.2.10 ³	120	60	380	200	2.8.10 ³	100
270		6.4.10 ³	80	60	260	640	5.8.10 ³	160
300		5.8.10 ³	60	60	140	160	5.4.10 ³	80

〈표 4b〉 처리중 칼럼 수직 거리별 액체상 방사능 분포

칼럼 축상 위치 cm	처리 부피 (dm ³) (유량) (cm ³ /min)	액체상 방사능 Bq/dm ³						
		⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹²⁵ Sb	⁸⁵ Nb
30	113 (200)	6.10 ³	2.10 ³	560	1.5.10 ³	2.8.10 ⁴	1.2.10 ⁴	7.6.10 ⁴
60		4.1.10 ³	980	380	380	1.3.10 ³	1.1.10 ⁴	3.6.10 ⁴
90		2.7.10 ³	200	240	220	5.6.10 ⁴	8.6.10 ³	1.5.10 ⁴
120		3.10 ³	60	60	100	180	9.4.10 ³	80
150		2.5.10 ³	80	60	200	760	9.6.10 ³	200
180		2.9.10 ³	60	80	80	500	10 ⁴	80
210		2.6.10 ³	60	60	80	160	8.10 ³	80
240		2.7.10 ³	40	40	140	140	2.6.10 ³	60
270		3.3.10 ³	140	160	140	360	6.7.10 ³	180
300		1.2.10 ³	20	60	120	100	6.8.10 ³	60
30	136 (200)	10 ⁴	2.10 ³	640	520	2.6.10 ³	1.2.10 ⁴	8.6.10 ⁴
60		8.8.10 ³	1.3.10 ³	560	1.2.10 ³	1.9.10 ³	9.7.10 ³	6.2.10 ⁴
90		6.10 ³	220	320	240	7.8.10 ⁴	8.8.10 ³	2.6.10 ⁴
120		3.4.10 ³	80	80	340	260	8.4.10 ³	160
150		3.3.10 ³	60	80	200	320	1.1.10 ⁴	80
180		4.1.10 ³	140	100	440	720	1.1.10 ⁴	320
210		2.1.10 ³	120	80	180	260	8.7.10 ³	80
240		1.3.10 ³	80	80	340	400	4.10 ³	100
270		1.9.10 ³	80	60	240	380	7.8.10 ³	120
300		1.8.10 ³	80	80	220	280	8.10 ³	80

〈표 4c〉 처리 중 칼럼 수직 거리별 액체상 방사능 분포

칼럼 축상 위치 cm	처리 부피 (dm ³) (유량) (cm ³ /min)	액체상 방사능 Bq/dm ³						
		⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	¹²⁵ Sb	⁸⁵ Nb
0	152 (145)	8.2.10 ⁴	1.6.10 ⁴	2.4.10 ³	1.3.10 ³	5.6.10 ⁵	1.4.10 ⁴	4.10 ⁵
90		8.6.10 ³	920	700	660	6.4.10 ⁴	1.2.10 ⁴	1.3.10 ³
120		9.6.10 ³	140	240	160	880	1.2.10 ⁴	440
150		3.4.10 ³	180	240	100	280	1.2.10 ⁴	380
180		3.8.10 ³	160	240	260	2740	1.2.10 ⁴	500
210		3.1.10 ³	180	240	240	520	1.1.10 ⁴	440
240		3.10 ³	140	200	100	480	7.10 ³	360
270		3.2.10 ³	240	240	140	520	10 ⁴	380
300		3.6.10 ³	160	240	220	180	10 ⁴	440
0		173 (100)	8.2.10 ⁴	1.5.10 ⁴	2.9.10 ³	1.6.10 ³	5.2.10 ⁵	7.8.10 ⁴
60	1.6.10 ⁴		3.8.10 ³	1260	700	2.2.10 ⁵	1.7.10 ⁴	1.2.10 ⁵
90	7.2.10 ³		2.10 ³	600	860	3.5.10 ⁴	1.5.10 ⁴	2.10 ⁴
120	3.4.10 ³		140	240	240	550	1.3.10 ⁴	420
150	3.6.10 ³		160	280	140	120	1.3.10 ⁴	420
180	3.8.10 ³		160	260	240	180	1.3.10 ⁴	500
210	3.2.10 ³		160	240	300	220	9.8.10 ³	420
240	3.2.10 ³		120	220	140	280	4.10 ³	380
270	3.2.10 ³		160	200	220	340	1.1.10 ⁴	360
300	3.2.10 ³		140	220	240	160	1.1.10 ⁴	360



(표 5) 처리 후 칼럼 수직 거리별 고체상 방사능 분포

칼럼 축상 위치 cm	총진물	고체상 방사능 Bq/kg						
		^{110m} Ag	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	¹²⁴ Sb	Σ*	Σ**
0	활성탄	3.8.10 ⁷	2.1.10 ⁶	3.10 ⁶	4.10 ⁶	4.10 ⁶	3.87.10 ⁷	3.97.10 ⁷
30	활성탄 Top-Sorb	2.10 ⁶	1.4.10 ⁴	5.1.10 ³	2.2.10 ⁴	8.10 ⁴	2.078.10 ⁶	2.1218.10 ⁶
60	활성탄 Top-Sorb	10 ⁷	3.7.10 ⁴	7.3.10 ⁴	2.8.10 ⁵	3.3.10 ⁶	1.053.10 ⁷	1.0720.10 ⁷
90	활성탄	1.2.10 ⁷	2.6.10 ⁴	1.4.10 ⁵	3.7.10 ⁵	3.7.10 ⁴	1.2384.10 ⁷	1.2447.10 ⁷
90	활성탄	8.8.10 ⁶	1.4.10 ⁴	7.8.10 ³	1.4.10 ⁵	1.7.10 ⁴	8.3218.10 ⁶	8.4788.10 ⁶
120	활성탄 Top-Sorb	1.1.10 ⁷	1.8.10 ⁴	10 ⁴	2.3.10 ⁵	2.9.10 ⁵	1.124.10 ⁷	1.2548.10 ⁷
150	활성탄 Top-Sorb	1.1.10 ⁶	5.7.10 ³	3.5.10 ³	1.1.10 ⁴	5.7.10 ⁴	1.1145.10 ⁶	1.1772.10 ⁶
180	활성탄	1.52.10 ⁴	3.3.10 ³	2.3.10 ³	2.10 ³	5.1.10 ³	1.93.10 ⁴	2.77.10 ⁴
210	Fe ²⁺ form Variion-KSN	1.8.10 ⁴	3.10 ³	2.7.10 ³	1.6.10 ³	3.6.10 ³	2.23.10 ⁴	2.89.10 ⁴
240	H ⁺ form Variion-KSN	1.3.10 ³	960	1.1.10 ³	825	830	3.225.10 ³	5.01.10 ³
270	OH form Variion-ATM	8.1.10 ³	1.9.10 ³	1.6.10 ³	626	3.7.10 ⁴	5.326.10 ³	4.42.10 ⁴
300	OH form Variion-ATM	2.6.10 ³	1.5.10 ³	1.5.10 ³	740	3.3.10 ⁴	4.34.10 ⁴	3.93.10 ⁴

$$\Sigma^* = \Sigma^{110m}Ag + ^{60}Co + ^{54}Mn$$

$$\Sigma^{**} = \Sigma^{110m}Ag + ^{58}Co + ^{60}Co + ^{54}Mn + ^{124}Sb$$

음이온 교환 수지 (Nitrokemia Ipartelepek, Balatonfuzfo; 입자 크기: 0.4~1.2mm, OH form)를 위로부터 차례로 채웠다.

칼럼을 통과한 유출 용액의 체적당 핵종 구성 성분은 <표 3>과 같다.

방사능 측정은 Canberra Series 80 multichannel instrument γ energy spectrum analysis로 수행하였다.

실험을 수행하는 동안 칼럼의 수직 거리별 액체상(liquid phase) 방사능

을 측정하였다.

제염 처리 체적이 알려진 상태에서 액체상 시료를 칼럼축을 따라 일정한 거리별로 채취하여 Canberra Series 80 multichannel instrument γ energy spectrum analysis로 분석하였다.

측정 데이터는 <표 4>에 수록하였다.

처리 실험 마지막 단계에서 (대략 173 dm³ 체적의 폐액 처리 후) 흡착제의 무게가 일정하게 될 때까지

100°C에서 건조한 후 고체상의 방사능을 측정했다.

방사능 측정은 Canberra Series 80 multichannel instrument γ energy spectrum analysis로 수행했으며, 측정 데이터는 <표 5>에 나타냈으며, 또한 측정 데이터를 이용하여 <그림 1~9>를 도시하였다.

실험 결과는 활성탄인 Top-Sorb 흡착제가 ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ¹²⁴Sb, ^{110m}Ag의 방사성 동위원소를 강하게 흡착했으며, 173 dm³ 체적의 폐액이 제염될 때 까지 ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ^{110m}Ag 방사성 동위원소의 농도가 대략 1 kgBq/dm³ 이하의 수치를 보였다.

제염 계수(DF: Decontamination Factor)는 다음처럼 나타났다.

$$DF \text{ } ^{51}Cr = 256 \quad ^{54}Mn = 107$$

$$^{58}Co = 13,2$$

$$DF \text{ } ^{60}Co = 6,7 \quad ^{110m}Ag = 3250$$

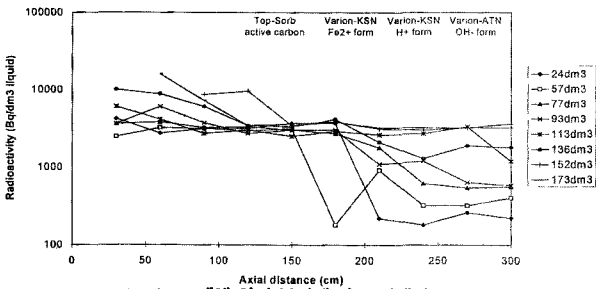
$$^{124}Sb = 7,1$$

$$DF \text{ } ^{95}Nb = 639$$

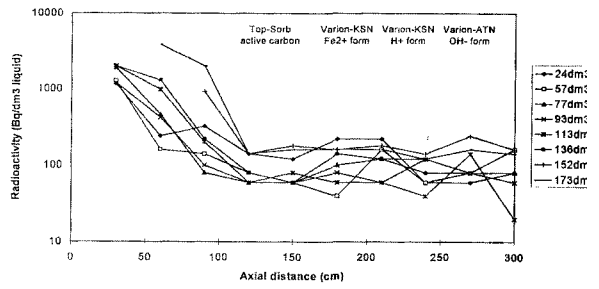
$$(^{54}Mn + ^{60}Co + ^{110m}Ag) = 993$$

칼럼 구성에 사용된 모든 흡착제에 대한 감용비(VRF: Volumetric Reduction Factor)는 $VRF = 24.3$ 이었고 활성탄에 대해서만은 40.5이었다.

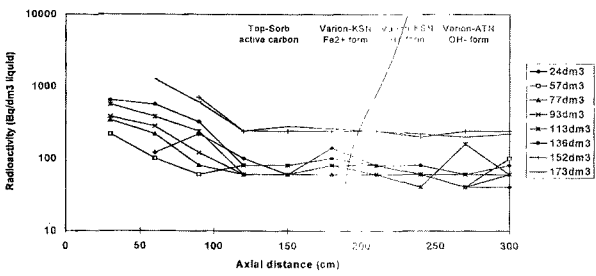
위에 언급한 결과는 매우 만족스러우며 활성탄 흡착제 -KMnO₄-NaOH-H₂O계의 화학 반응과 이동 현상에 대해 더욱 넓게 연구할 필요성이 제시되었다.



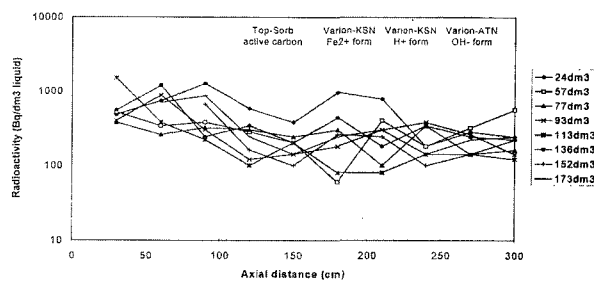
〈그림 1〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{51}Cr 의 분포



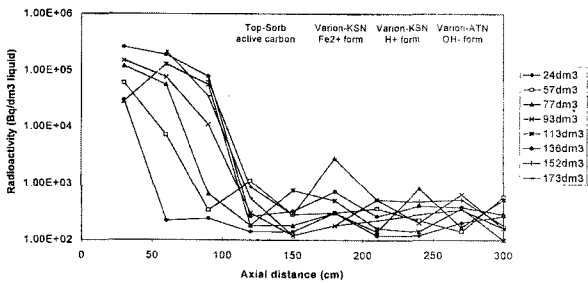
〈그림 2〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{54}Mn 의 분포



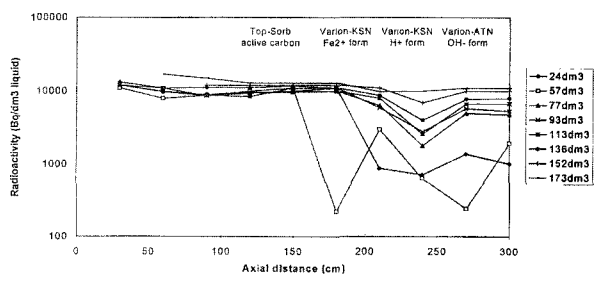
〈그림 3〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{58}Co 의 분포



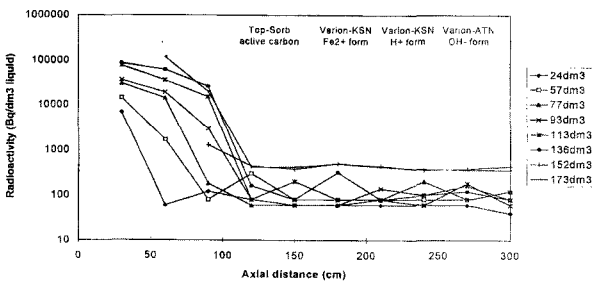
〈그림 4〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{60}Co 의 분포



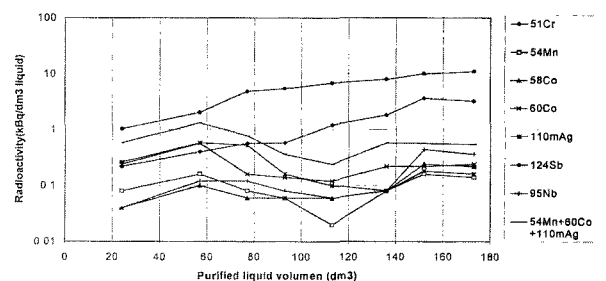
〈그림 5〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 의 분포



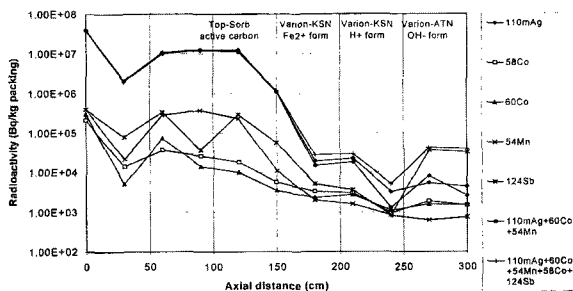
〈그림 6〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{124}Sb 의 분포



〈그림 7〉 폐액 처리 부피에 따른 액체상 ^{95}Nb 의 분포



〈그림 8〉 폐액 처리 부피에 따른 유출액의 방사능



(그림 9) 173 dm³의 폐액을 처리한 후의 고체상 방사능

활성탄 흡착제- KMnO₄- NaOH-H₂O 계의 화학 반응과 이동 현상

KMnO₄-NaOH-H₂O-깨끗한 활성탄계에 비방사성 Ag 콜로이드를 흡착하게 될 경우 다음과 같은 화학 반응과 이동 현상이 존재하게 된다:

① 과망간산염 음이온(MnO₄⁻)과 Ag 콜로이드는 Nernst 경계층을 통과하여 활성탄 흡착면으로 이동된다 (외부 확산).

② 과망간산염 음이온(MnO₄⁻)과 Ag 콜로이드는 활성탄 흡착제의 pore (macro, meso, micro)로 이동되며(내부 확산), Ag 콜로이드는 활성탄 표면에 흡착된다.

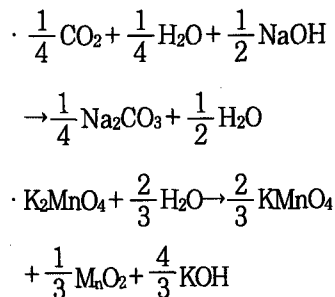
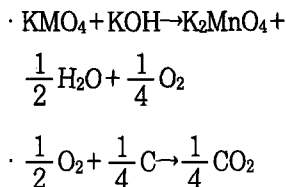
③ 과망간산염 음이온(MnO₄⁻)과 탄소간에 화학 반응이 일어난다. 산화 환원 반응이 진행되는 동안 과망간산염 음이온(MnO₄⁻)은 망간산염 음이온 (MnO₄²⁻)으로 환원된다. 반응 산물인 이산화탄소 (CO₂)는 NaOH와 화학 반응을 일으켜

Na²CO³ 를 생성한다.

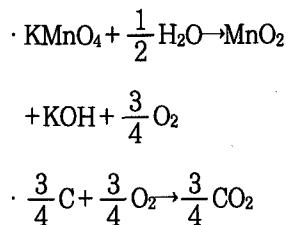
④ 불균등(disproportionation) 화학 반응이 진행되는 동안 망간산염 음이온 (MnO₄²⁻)으로부터 활성탄 흡착제의 기공 속이나 외부 표면 또는 액체 상 외부에 MnO₂ 침전이 형성된다. 불균등 화학 반응의 산물인 과망간산염 음이온(MnO₄⁻)도 이의 침전을 일으킨다.

⑤ 앞에서 언급한 것처럼 Ag 콜로이드는 내·외부로의 확산을 통해 활성탄 흡착제의 기공 속으로 침투하여 활성탄 표면에 흡착되는데, MnO₂와 공침전을 일으키기도 한다. MnO₂ 침전층은 Ag 콜로이드의 탈착을 방해한다.

이들 화학 반응식은 다음과 같다.



위 식을 정리하면,



위의 화학 반응과 이동 현상은 온도, 수소 이온 농도, 활성탄 흡착제의 질에 달려있다.

위의 system과 관련하여 실험실 연구가 수행되었으며, kinetic 실험, 활성탄 선정, 칼럼 측정, 비표면적 측정, pore size, 전자 현미경 실험 등 실험실에서 수행된 상세 내용은 다음 보고서에 실려 있다.

University of Veszprem: VE 165-4987

Hungarian Atomic Energy Bureau: OAH-MMT-28/97

DF와 VRF 수치를 증가시키기 위한 액체 내 KMnO₄ 농도의 감소, 유량 감소, 온도의 증가는 pH≥12에서 가장 효율적이다. ☞