J.Korean Asso. Radiat. Prot.
Vol.24 No.2 : 101-108(1999)

▣技術論文▣

Treatment of Radioactive Liquid Waste Using Natural Evaporator and Resulted Exposure Dose Assessment

Gyeong-Hwan Jeong, Seung-Kook Park, Eun-Han Kim, Ki-Jung Jung, and Hyun-Soo Park
Korea Atomic Energy Research Institute

증발을 이용한 방사성 액체폐기물의 처리와 피폭선량평가

정경환 · 박승국 · 김은한 · 정기정 · 박현수
한국원자력연구소
(1999년 5월 28일 접수, 1999년 7월 29일 채택)

Abstract - The influence of the relative humidity, the temperature and the velocity of supply air on evaporation rate has been studied with non-boiling forced evaporation system in order to treat very low level radioactive liquid wastes produced from the decontamination and decommissioning activities. Experimental data on the evaporation rate have been obtained with the divers variables and experimental equation of air velocity was also obtained by the correlation of those data.
The decontamination factor of this system was also obtained by the experimental data from a simulated liquid waste containing Cs-137 radio isotope ; DF=10^4. Since the commercial system will be operated for the treatment of the very low level radioactive liquid waste produced from decontamination & decommissioning of TRIGA Mark-II&III research reactor, the environmental assessment has been conducted to improve the operational safety. Exposure dose rate for an individual member of general public was assessed, and it showed that it was very lower than individual dose limits. The release of radioactivity of radioisotope material (Cs-137) to the environment was assessed, and result showed that it was 4.637×10^{-14} μCi/cc.
Key Words : very low radioactive liquid waste, forced evaporation, exposure dose assessment

요약 - 극저준위 방사성액체폐기물 처리를 위하여 공기의 온도와 습도 및 유입 공기의 속도에 따른 증발량의 관계를 천을 이용한 강제증발실험 장치로 실험하였다. 그 결과 각각의 변수와 증발량의 상관관계를 실험식으로 도출하였다. 또한 Cs-137을 함유한 모의폐액을 사용하여 본 장치에 대한 제염계수를 얻은 결과 DF=10^4으로 나타났다. TRIGA Mark II & III 연구용 원자로 폐로시 발생되는 극저준위 방사성액체폐기물을 증발장치로 처리할 때 주변의 일반개인에 대한 연간 피폭선량을 보수적으로 평가한 결과, 유효선량(effective dose)은 1.01×10^{-3} mSv이고, 환경으로 배출되는 공기의 방사능 농도(Cs-137)는 4.637×10^{-14} μCi/cc air 이다. 따라서 극저준위 방사성액체폐기물의 처리를 위하여 강제증발장치를 사용하는 것은 주민에 아무런 영향이 없음을 알 수 있었다.
중심어 : 극저준위 액체폐기물, 강제 증발, 피폭선량평가

서 론

1959년 TRIGA Mark II 연구용 원자로가 착공되어 1962년 첫 임계에 도달하였고, 1972년 2MW급의 TRIGA Mark III 연구용 원자로가 정상가동에 들어감으로서, 지난 30여년 동안 원자로를 이용한 기초 및 응용연구와 방사성 동위원소 생산, 원자력 관련학과 학생들의 교육 등 우리 나라 원자력 기술 발전에 크게 기여하였다.

한편, 연구소의 본격적인 대전 이전과 더불어, 1995년 대전 한국원자력연구소에 30MW급 다목적 연구로인 하나로가 준공과 가동에 들어감에 따라

TRIGA Mark II와 III 연구로의 폐로 계획이 검토되기 시작하였다. 연구용 원자로의 폐로에는 각 구조물의 건축학적인 특성 및 방사선학적 상태의 파악 그리고 이를 토대로 해체 계획을 수립하고 가장 적절한 방법으로 안전하게 해체함으로서 작업자뿐만 아니라 환경을 방사선 위험으로부터 보호하는 것이 최우선이다. 또한 해체 시 필연적으로 발생하는 다량의 방사성 폐기물을 효과적으로 관리하는 것은 해체작업 자체와 더불어 폐로 수행에 가장 중요한 업무중의 하나다.

연구용 원자로 폐로 시 발생되는 방사성 폐기물은 그 물리적 형태에 따라 고체, 액체 및 기체로 구분할 수 있다. 방사성 고체폐기물의 경우는 적절한 분류 및 처리과정을 거쳐 저장용기(필요시 차폐)에 넣어 임시저장 혹은 처분과정을 거치게 된다. 방사성 액체폐기물은 농축처리 후 고정화하여야 할 농축액과 방류해야할 극저준위 방사성 액체폐기물로 구분된다.

극저준위 방사성 액체폐기물의 경우는 희석 방류가 원칙이나, 극미량의 방사성 물질마저도 농축하고자 자연증발방법을 이용하기로 하였다. 자연증발을 이용한 극저준위 방사성 액체폐기물의 처리는 태양열과 공기의 상대습도 및 온도에 따라 폐액 중에 순수 수증기를 대기 중으로 증발시키면서 폐액 중의 방사성물질을 농축시키는 개념이다. 방사성 액체폐기물의 자연증발 농축방법을 이용한 처리는 희석방류 가능한 액체폐기물을 다시 처리하는 개념이기 때문에 흔히 보이는 처리기술은 아니다. Australia[1]의 경우 저준위 방사성 액체폐기물을 Aluminum hydroxide 응집제를 이용하여 응집 침전시킨 후 생성되는 슬러지의 건조에 자연증발 방법을 이용하였다. 인도에서도 증발접시를 이용하여 자연증발 가능성을 연구하였으며, 증발표면적을 넓히기 위하여 다공성 물질인 벽돌이나 세라믹의 이용 가능성도 연구하였다. 프랑스 ACEREN[2]에서는 증발 면적을 크게 하기 위하여 PVC sheet에 폐액을 흘려보내고 공기를 강제로 송풍시키는 방법을 이용한 증발연구를 하였다. 그러나 다량의 염을 포함한 중준위 폐액을 처리함으로서 염의 결정화로 인하여 시설오염이 가속화되고 이의 제염에 커다란 어려움을 겪었다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 연구용 원자로(TRIGA Mark II & III)의 폐로시 발생되는 극저준위 방사성 액체폐기물의 안전한 처리를 위하여 천을 이용한 강제 송풍식 자연증발에 대하여 고찰하였다. 강제 송풍식 자연증발에서 공기의 온도 및 습도와 공기의 통과 속도에 따른 증발량의 산출 그리고 모의 폐액을 통한 제염계수의 산출을 시도하였다. 이는 실제 처리규모의 장치 설치 및 가동 시 작업자 및 일반인에 대한 최대피폭선량을 산출하여 법적 허용한도 치와 비교 검토하여 시설의 안전성을 검증하고자 하였다.

실 험

시약과 분석

실험에 사용된 물은 탈염수를 이용하였고, 방사성 모의 폐액 제조에 Cs-137을 사용하였으며, 염을 함유한 폐액에는 $NaNO_3$를 이용하였다. Cs-137의 분석은 MCA(Multi-Channel Analyzer)로 수행하였다.

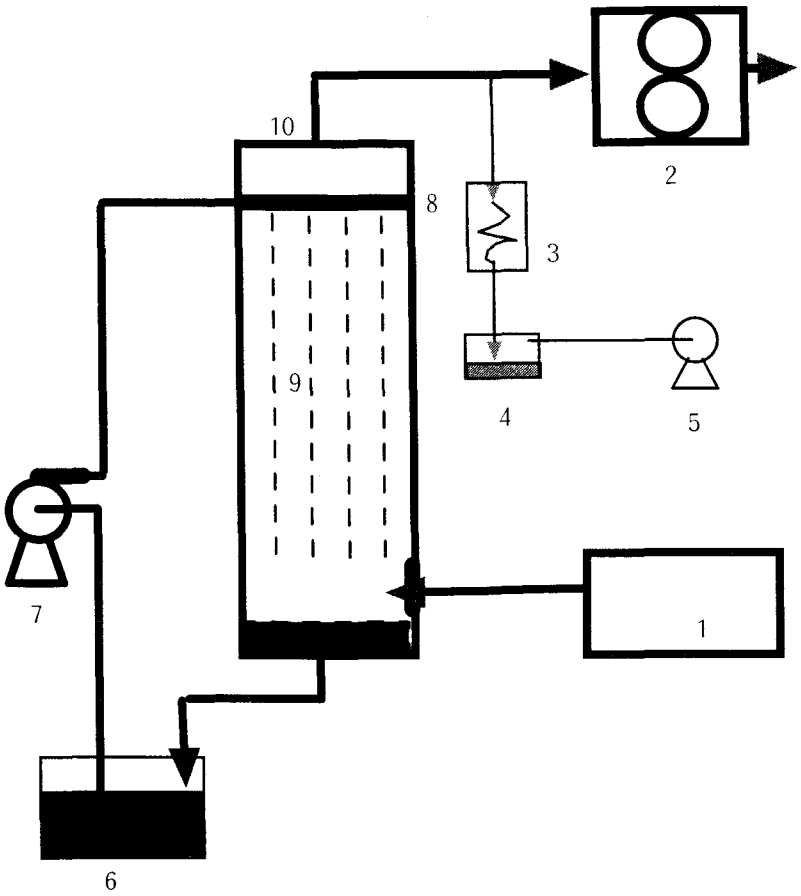
실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타냈다. 장치는 공기와 물의 접촉으로 증발을 일으키게 하는 증발부, 폐액의 공급과 순환을 담당하는 순환 시스템, 그리고 공기의 유입과 배기를 담당하는 시스템으로 구성되어 있다. 공기와 물의 접촉을 안정적으로 하고 접촉면적을 크게 하기 위하여 천을 수직으로 고정시킨 다음 상부의 물 분배 관을 이용하여 천을 따라 물을 흘려 내리게 하였다. 천의 크기는 0.85m(W) x 1.5m(L)이다. 폐액의 순환 시스템은 폐액 저장조, 순환펌프, 유량계 그리고 물 분배관으로 구성되어 있다. 공기의 유입과 배기 시스템은 공기의 온도 및 습도 조절을 위한 Weatherometer, 그리고 배기 Fan으로 구성되어 있다. 주입공기의 유량은 송풍기에 부착된 전압 및 주파수 변조기로 조절되고, 유속은 Anemometer로 측정하였다. 또한 공기의 온·습도는 공기 배출구에서 측정하였다.

실험방법

폐액 펌프를 이용하여 폐액을 장치내 분배관을 통하여 천 표면에 공급한다. 공급된 폐액은 천의 표면에 얇은 막을 형성하며 흐르게 된다. 공기는 Weatherometer를 가동시켜 공기의 온도와 습도를 유지시킨다. 정상상태에 도달하면 송풍기를 가동시켜 증발장치 하단에 위치한 공기 유입구로 공급한다. 증발공기의 방사능 농도는 배출공기 일부를 감압 펌프로 흡입하여 급속 냉각시켜 시료를 채취한 후 측정하였다.

실험은 공기의 조건 즉 상대 습도, 온도, 그리고



1. Weatherometer
2. Exhaust fan
3. Heat exchanger
4. Sampler
5. Vaccum pump
6. Waste storage tank
7. Pump
8. Waste distributer
9. Clothes
10. Hygrometer probe

Fig. 1. Schematic Diagram.

풍속의 변화에 따른 증발량을 관찰하였고, 그리고 폐액의 방사능 농도 변화 따른 제염효과를 관찰하였다. 실험된 주요 변수에 대한 실험범위가 Table 1에 있다.

Table 1. Experimental Variables.

Variables	Range
Relative Humidity of Air (%)	40 ~ 90
Supply Air Temperature (℃)	15 ~ 40
Air Velocity (m/sec)	0.5 ~ 4
Radioactivity of simulated waste (μCi/cc)	10^{-1} ~ 10^{-5}

결과 및 고찰

공기의 조건(상대습도, 온도)에 따른 증발효과

습윤 표면에 대하여 대기이동이 없을 때 공기의 상대습도와 온도는 증발 표면에서 증발 driving force인 증기압 차를 결정하는 중요한 역할을 한다. 증발표면의 어느 점에서 단위면적과 단위시간당의 증발량은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3-7].

$$dE = k \cdot \frac{P_s - P_w}{H} \cdot dt \qquad (1)$$

여기서 dE는 단위시간과 단위면적당 증발량(ℓ /m^2sec), Ps는 어느 점(point)의 온도 T에서의 포화

증기압(mmHg), Pw는 공기의 수증기압(mmHg), H는 대기압(mmHg), 그리고 k는 상수이다.

Psychrometric chart로부터 상대습도(Ps/H)와 온도(T)와의 관계는 실험적으로 잘 알려있다. Psychrometric chart에 의하면 공기의 온도가 높을수록, 그리고 상대습도가 낮을수록 증기압 차는 커지며 결국 증발량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 공기의 습도변화와 온도변화에 따른 증발율의 변화를 나타냈다. 실험 온도범위에서 동일한 상대습도를 갖는 공기의 경우 온도 증가에 따른 증발율은 선형적으로 증가함을 알수 있었다. 또 공기의 상대습도가 증가함에 따라 증발율은 점점 작아지는데, 상대습도가 80% 이상에서는 증발율이 급격히 작아져 효율적이지 못한 것으로 나타났다. 따라서 고온 다습한 여름철의 증발기 가동은 비효율적이라 하겠다.

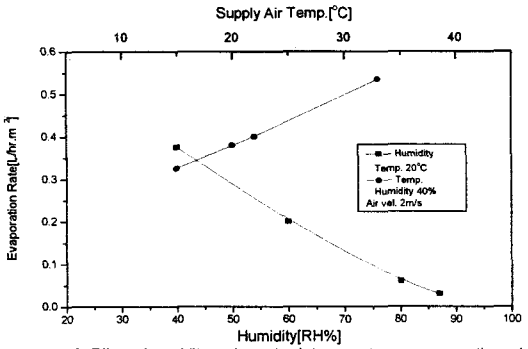


Fig. 2. Effect of humidity and supply air temperature on evaporation rate.

풍속의 변화에 따른 증발효과

강제 송풍식 자연증발장치에서 통과되는 공기의 속도에 따른 이론적 증발량은 다음과 같이 나타난다[2].

$$E_h = 0.41x10^{-6}\frac{Sv}{Vo}(T_0 - \theta_1)(1 - \exp(\frac{-K(\theta_1-\theta_2)}{Mv})) \quad (2)$$

여기서 E_h 는 시간당 증발되는 물의 양, S는 공기통과 단면적, v는 공기 통과 속도, V_0는 건조공기 단위질량 함유한 습윤 공기의 부피, T_0는 장치입구에서 절대온도, θ_1과 θ_2는 주입공기의 습윤 상태에 의존하는 값, K는 상수이고 M은 장치의 크기에 따른 상수이다. 이 식을 다시 간단히 쓰면 다음과 같다.

$$E_h = A\,v\,(1 - \exp(\frac{-B}{v}) \quad (3)$$

여기서 A>0, B>0이다.

식 (3)에서 증발량을 유속에 대해 미분하여 기울기와 변곡점을 추적하면, 풍속이 증가함에 따라 증발량도 증가하나 풍속이 무한대로 높아지면 증발량은 어느 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다. 따라서 풍속이 어느 점 이상에는 더 이상 효율적이지 못하며, 오히려 흘러내리는 액체의 비말동반을 유발시킴으로서 방사성물질의 환경방출을 야기 시킬 수 있다.

본 증발연구에서의 증발조는 단위 체적 당 증발면적의 증가 및 물의 박막 형성을 위하여 천을 팽팽하게 고정시킨 후 물을 상부로부터 일정하게 흘려보내게 하였다. 그러나 공기의 속도가 크면 천이 흔들려 물방울이 생길 우려가 있으며, 이것은 바로 비말동반의 원인이 될 수 있다. Fig. 3은 공기의 속도에 따른 증발량의 관계를 나타냈다. 증발천이 잘 고정되어 있으면 공기의 속도가 4 m/sec 이하에서는 흔들리는 현상이 발견되지 않았다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 실험범위에서는 공기의 속도 증가에 따라 증발량은 비례적으로 증가함을 보여주고 있다. 식(1)에서 공기의 속도 증가에 따라 증발량은 비례적으로 증가함을 알 수 있는데 여기에 공기의 온도와 상대 습도의 변화에 따른 증발량을 실험식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E = 0.036 \cdot (1 + \frac{v}{1.15})\frac{P_s - P_w}{H} \quad (4)$$

증발조 설계시 설치장소의 기상인자(온도 및 상대습도)가 조사되고, 증발시킬 폐액의 양이 산출되면, 식(4)에 따라서 공기의 속도와 증발면적을 계산할 수 있다.

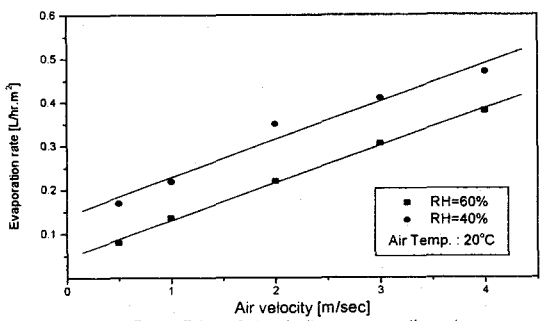


Fig. 3. Effect of air velocity on evaporation rate.

제염계수(Decontamination Factor) 결정

제염계수는 Cs-137을 함유한 모의폐액을 증발시

켰을 때 배기체에서 응축된 시료를 채취하여 농도 분석을 하는 방법으로 결정하였다. 공급 공기의 조건과 모의폐액의 방사능 농도 변화에 따른 제염계수는 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Decontamination Factor on Supply Air Condition.

Run No.	Supply Air Condition			Waste Activity (μCi/cc)	Sample Activity (μCi/cc)	Decon. Factor
	Temp. (℃)	Humidity (%)	Velocity (m/s)			
1	20	40	2	2.3×10^{-4}	N.D.	-
2	17	40	3	1.7×10^{-4}	N.D.	-
3	30	60	2	5.7×10^{-3}	N.D.	-
4	20	60	2	1.3×10^{-1}	3.3×10^{-6}	3.9×10^{4}
5	33	60	2	1.3×10^{-1}	5.9×10^{-6}	2.2×10^{4}

N.D. = Not Detected

모의 폐액의 농도가 10^{-4} ~ 10^{-3} μCi/cc,liq 일 때 배기체에서 채취된 시료의 방사능 농도는 방사능 분석기기로 검출되지 못하였다 (분석한계 10^{-7} μCi/cc). 따라서 보수적으로 추론하여도 최소 제염계수(DF)는 104 이상이다. 모의 폐액의 농도가 10^{-1} μCi/cc 일 때 배기체에서 채취된 시료의 방사능 농도는 3 x 10^{-6} μCi/cc 정도로 나타나, 제염계수는 역시 10^{4} 이상이다. 폐로 과정에서 처리하여야 할 실제 방사성폐액의 농도는 10^{-6} μCi/cc이하로서, 이를 본 자연증발장치로 증발 농축할 경우 제염계수를 최소 10^{4}으로 결정하여도 될 것으로 판단하였다.

피폭선량 계산

TRIGA Mark II&III 연구용 원자로 폐로시 발생될 것으로 예상되는 극저준위 폐액을 오염형태별 발생량 및 방사능농도를 평가하였다. 극저준위 방사성폐액의 농축 처리를 위한 자연증발 처리설비 용량과 장치설계인자를 고려한 배기 공기의 방사능 농도가 분석되고, 이에 따른 인근 주민의 피폭선량이 산출되었다.

선원항(Source term)

TRIGA Mark-II&III 연구용 원자로 폐로시 발생 형태별로 평가된 방사성 액체폐기물의 방사능 농도와 양이 Table 3에 나타나 있다. 여기서 증발대상 액체폐기물은 Type-A와 Type-B이나 Type-A의 경우 검출한계 치 이하로서 농축시 문제가 없을 것으로 보이며, Type-B의 경우 오염 핵종이 Cs-137로서 방사능 농도는 4.38 x 10^{-7} μCi/cc로서 이를 계산 기준으로 삼았다. 즉 보수적인 계산을 위하여 증발대상 폐액의 방사능 농도를 Type-B와 동일하다고 가정하고, 증발장치의 처리용량 등 설계인자와 source term을 요약하면 다음과 같다.

- 처리량 : 200 m^3/yr
- 폐액 방사능 농도 : 4.38 x 10^{-7} μCi/cc (Cs-137 기준)
- 감용비 (Volume Reduction Factor : VR) : 100
- 예상 최대 증발량 : 0.25 m^3/hr
- 제염계수(DF) : 104
- 공기 배기량 : 6.56 m^3/sec

따라서 계 외의 환경으로 배출되는 연간 방사선량(처리량 x 방사능농도 x DF)은 8.76×10^{-9} Ci/yr로서 극히 미미함을 알 수 있다.

Table 3. Radioactive Liquid Waste.

구 분	방사능 농도 (μCi/cc)	발 생 량 (M^3)	비 고
Type - A	No Significant	98	
Type - B	Cs-137 : 4.38 x 10^{-7}	173	
Type - C	Co-60 : 4.22 x 10^{-6}	16	
Type - D	Co-60 : 1.78 x 10^{-6} Cs-134 : 9.41 x 10^{-7} Zn-65 : 1.02 x 10^{-6}	4	

피폭선량 평가

인근 주민에 대한 개인피폭선량 계산은 주민의 거주지까지의 거리와 증발조 설치장소 주변의 기상자료로부터 대기확산 인자를 산출하여야 한다. 방사성물질의 방출유형은 방출높이가 낮아 지표면 방출에 해당되며, 연간평균 대기확산인자($\overline{\chi}/Q(x,k)$, sec/m^3)[10]는 다음 두 식에서 큰 값을 선택한다.

$$\overline{\chi}/Q(x,k)=\frac{2.032}{x}RF(x,k)\sum_{ij}DEPL_{ij}(x,k)$$
$$(x,k)DEC_i(x)f_{ij}(k)\cdot[U_i\sigma_{zj}^2(x)+CD_z^2/\pi]^{-1} \quad (5)$$

$$\overline{\chi}/Q(x,k)=\frac{2.032}{x}RF(x,k)\sum_{ij}DEPL_{ij}(x,k)$$
$$DEC_i(x)f_{ij}(k)\cdot[\sqrt{3}U_i\sigma_{zj}(x)]^{-1} \quad (6)$$

여기서 i = 풍속구간
j = 대기안정도 등급
k = 방향소구역
x = 풍하거리 [m]
U = 평균풍속 [m/sec]
σ_z = 수직확산계수 [m]
f = 바람의 발생빈도
RF = 재순환과 정체에 의한 보정계수
$DEPL$ = 침적에 의한 감손계수
DEC = 방사능붕괴에 의한 감손계수
C = 건물와류상수 (=0.5)
D_z = 건물높이 [m] 이다.

또 지표면 침적계수($\overline{D}/Q$, m^{-2})는 다음 식으로 평가된다.

$$\overline{D}/Q(x,k)=\frac{RF(i,k)\sum_{ij}f_{ij}(k)}{(2\pi/16)\,x} \quad (7)$$

대기 안정도별 바람의 연간 발생빈도를 이용하여 미국 원자력규제위원회(NRC)의 규제지침 1.111에 근거하여 NRC에서 개발한 전산프로그램 XOQDOQ[9]를 사용하여 연간평균 대기확산인자와 침적인자를 평가하였다. Table 4는 방향별 부지경계에서 연간평균 대기확산인자를 나타냈으며, 서남서(WSW) 방향 부지경계에서 최대치를 나타냈다[10].

Table 4. 부지경계에서의 연간평균 대기확산인자 및 침적인자

방 향	거 리 (m)	$\overline{\chi}/Q$ (sec/m^3)	$(\overline{\chi}/Q)^D$ (sec/m^3)	$(\overline{\chi}/Q)^{DD}$ (sec/m^3)	$\overline{D}/Q$ (m^{-2})
N	160	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.4×10^{-4}	9.7×10^{-8}
NNE	100	2.9×10^{-4}	2.9×10^{-4}	2.8×10^{-4}	2.1×10^{-7}
NE	80	5.4×10^{-4}	5.4×10^{-4}	5.3×10^{-4}	1.1×10^{-6}
ENE	75	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.5×10^{-6}
E	75	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.6×10^{-6}
ESE	75	3.3×10^{-3}	3.3×10^{-3}	3.3×10^{-3}	3.9×10^{-6}
SE	75	6.3×10^{-3}	6.3×10^{-3}	6.1×10^{-3}	3.3×10^{-6}
SSE	70	2.3×10^{-3}	2.3×10^{-3}	2.2×10^{-3}	9.8×10^{-7}
S	70	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	7.4×10^{-7}
SSW	70	2.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}	6.1×10^{-7}
SW	55	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	3.2×10^{-6}
WSW	45	1.4×10^{-2}	1.4×10^{-2}	1.4×10^{-2}	7.5×10^{-6}
W	45	4.9×10^{-3}	4.9×10^{-3}	4.8×10^{-3}	4.0×10^{-6}
WNW	70	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}	3.5×10^{-4}	2.3×10^{-7}
NW	70	7.4×10^{-4}	7.4×10^{-4}	7.3×10^{-4}	4.2×10^{-7}
NNW	110	9.7×10^{-5}	9.7×10^{-5}	9.5×10^{-5}	1.4×10^{-7}

$\overline{\chi}/Q$: 방사능 붕괴와 침적을 고려하지 않은 대기확산인자
$(\overline{\chi}/Q)^D$: 방사능 붕괴만을 고려한 대기확산인자
$(\overline{\chi}/Q)^{DD}$: 방사능 붕괴와 침적을 고려한 대기확산인자
$\overline{D}/Q$: 침적인자

피폭선량평가는 국제방사선방호위원회(ICRP-60)의 신 권고에 따른 선량환산인자를 적용한 NRC의 규제지침 1.109에 근거, NRC에서 개발한 전산프로그램 GASPAR를 한국원자력안전기술원(KINS)에서 수정 보완한 GASDOS[8]를 사용하여 수행하였다. 평가에 적용된 피폭경로별 선량환산인자를 Table 5에 나타냈다.

Table 5. 선량환산인자

장기 / 연령군	유효	소화기	뼈	간	콩팥	갑상선	폐
● 호흡에 의한 선량환산인자 (Sv/Bq)							
성인	3.9E-8	1.1E-8	3.6E-9	7.3E-9	3.0E-9	3.6E-9	3.0E-7
십대	4.2E-8	1.1E-8	3.8E-9	7.8E-9	3.3E-9	3.8E-9	3.1E-7
소아	7.0E-8	1.8E-8	6.6E-9	1.3E-8	6.0E-9	7.3E-9	5.2E-7
유아	1.1E-7	5.6E-8	1.1E-8	1.8E-8	9.7E-9	1.1E-8	8.2E-7
● 음식물섭취에 의한 선량환산인자 (Sv/Bq)							
성인	1.4E-8	1.7E-8	1.4E-8	1.4E-8	1.3E-8	1.3E-8	1.3E-8
십대	1.3E-8	1.6E-8	1.3E-8	1.3E-8	1.3E-8	1.3E-8	1.3E-8
소아	9.7E-9	1.9E-8	8.8E-9	8.9E-9	8.8E-9	9.0E-9	8.4E-9
유아	2.1E-8	4.8E-8	1.9E-8	1.9E-8	1.9E-8	1.9E-8	1.8E-8
● 지표침적에 의한 선량환산인자 (Sv d^{-1} per Bq m^{-2})							

유효	피부
0	2.95E-11

최대 피폭지점을 나타내는 서남서(WSW) 방향 부지경계에서 주민에 대한 피폭경로, 장기별 연간 최대 개인피폭선량을 Table 6에 나타냈다. Table6에 따르면 유효선량(effective dose)은 1.01 x 10^{-3} mSv로 과기부 고시 기준치 1 mSv[11]와 비교하여 1000배 나 낮은 수치이다. 또한 사람이 자연방사능으로부터 받게되는 연간 평균피폭선량 2.4 mSv에 비해 백만 배 이상 낮기 때문에 극히 무시할 만한 값이다. 또한 피부에 대한 선량당량(equivalent dose)은 2.94 x 10^{-3} mSv로 과기부 고시 기준치 50 mSv와 비교하여 17000배나 낮아 무시할 만한 피폭선량이다.

Table 6. 부지경계(WSW방향)에서 전신에 대한 최대 개인피폭선량

(단위 : mSv/yr)

장기 / 피폭경로		유효	소화기	뼈	간	콩팥	갑상선	폐	피부
방사능운		0	0	0	0	0	0	0	0
지표침적		0	0	0	0	0	0	0	2.94E-3
호 흡		4.74E-4	1.24E-4	4.31E-5	8.83E-5	3.73E-5	4.31E-5	3.51E-3	0
음식물 섭취	농작물	4.71E-4	5.79E-4	4.71E-4	4.71E-4	4.71E-4	4.71E-4	4.71E-4	0
	육 류	4.31E-5	5.30E-5	4.31E-5	4.31E-5	4.31E-5	4.31E-5	4.31E-5	0
	우 유	1.85E-5	2.28E-5	1.85E-5	1.85E-5	1.85E-5	1.85E-5	1.85E-5	0
	소 계	5.33E-4	6.55E-4	5.33E-4	5.33E-4	5.33E-4	5.33E-4	5.33E-4	0
합 계		1.01E-3	7.79E-4	5.76E-4	6.21E-4	5.70E-4	5.76E-4	4.04E-3	2.94E-3

배출 공기의 방사능 농도

배출공기의 순간 최대 방사능 농도를 보수적으로 산출하기 위하여 폐액의 방사능 농도는 감용비를 적용하여 4.38×10^{-5} μCi/cc이 된다. 예측되는 초당 최고의 배출 방사선량 계산은 폐액의 방사능 농도, 예상 최대 증발량 그리고 제염계수의 곱에 공기 배기량으로 나눈 값으로 4.637×10^{-14} μCi/cc이다. 그런데 Cs-137의 배출공기의 법적 허용량, 즉 배기구에서 방사성 동위원소의 허용농도가 2×10^{-9} μCi/cc이고, α방사핵이 없거나 Sr-90, I-129, Pb-210, Ac-227, Ra-228, Pa-230, Pu-241 및 Bk-249의 β방사핵이 없는 경우 일반인에 있어서 개인에 대한 최대허용공기중 농도가 1×10^{-10} μCi/cc[11]이다. 따라서 본 자연증발 설비의 운전으로 인한 법적 최대 허용농도와 비교하여 수만 배 낮기 때문에 자연증발시설 운영으로 주민에 미치는 방사선적 영향은 전혀 없음을 알 수 있다.

결 론

연구용 원자로(TRIGA Mark II & III)의 폐로시 발생되는 극저준위 방사성 액체폐기물의 안전한 처리를 위하여 천을 이용한 강제 송풍식 자연증발 연구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

송풍식 증발에서 주입 공기의 속도와 온도 및 상대습도는 중요한 증발 인자로서, 실험조건 범위 내에서는 공기의 속도 증가에 따라 증발량은 선형으로 증가함을 보였고, 공기의 온도와 상대습도에 의한 증기압 차도 증발량에 선형의 증가를 나타냈다. 이에 따라 실험범위 내에서 공기의 속도 및 온도와 상대습도에 따른 증발량의 관계식을 실험적으로 얻었다.

한편 Cs-137을 함유한 모의폐액으로 증발실험 결과 제염계수(DF)가 최소한 10^4임을 알 수 있었다. 그리고 TRIGA Mark-II&III 연구로 폐로시 실제 처리규모의 장치 설치 후 가동으로 인한 일반 개인에 대한 최대피폭선량의 유효선량(effective dose)은 1.01×10^{-3} mSv이었다. 이는 일반 개인의 연간피폭선량 한계 과기부 기준치인 1 mSV와 비교하여 1000배나 낮은 피폭선량으로서 아주 안전한 것으로 평가되었다. 또한 배출공기의 최대 방사능 농도는 4.637×10^{-14} μCi/cc(Cs-137)인데 배출공기의 법적 허용량인 2×10^{-9} μCi/cc(Cs-137)에 비해 수십만 배나 적게 배출되어 절대적으로 안전한 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 기관고유사업의 일환으로 수행한 것입니다.

참고문헌

1. IAEA, Treatment of low and intermediated level radioactive waste concentrates, IAEA TR-No. 82(1968).
2. CENG, Technical report, CENG(1964).
3. Penman, Natural evaporation from open water proceedings of royal society of London, Series A., 120(1948).
4. Penman, Evaporation on introductory survey, Netherlands, T. of Agr. Sci., Vol. 4,9(1956).
5. Bird, Transport phenomena, John Willey & sons Co.(1974).
6. Penman, Estimating evaporation, Transactions, Am. Geophysical Union, Vol. 37, 43(1956).
7. Merlivat and Coantic, Study of mass transfer at the air-water interface by an isotopic method, J. Geophy. Research, Vol. 80, 24, 3455(1975).
8. 한국원자력연구소, 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 환경영향평가보고서(1998).
9. U. S. NRC, XOQDOQ : A computer program for the meterological evaluation of routine effluent release at nuclear power stations, NUREG/CR-2919(1982).
10. 한국원자력안전기술원, 고리주변 환경종합평가 및 관련모델개발 : 고리원자력주변 주민피폭선량 계산지침서, KAERI/NSC-397/89(1989).
11. 과기부 고시 제 98-12호, 방사선량 등에 관한 규정(1998).