

원자력 발전소에서의 방사성 폐기물 처리와 환경

— < 上 > —

이 상 혼

한국원자력연구소

1. 서 론

대규모의 원자력발전 사업이 구체적으로 진행함에 따라서 원자력발전소의 운전에 의해 필연적으로 발생하는 방사성폐기물은 상당한 분량이 될 것으로 예상되며 그들을 안전하고 경제적인 처리처분 방법이 금후의 중요한 과제가 되고 있다.

원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물은 원자로의 형식에 따라 다르나 일반적으로 보아 그 주요한 발생원으로 보면 원자로 냉각제 중에 존재하는 부식생성물, 불순물 및 냉각제 자신이 중성자에 의한 방사성 생성물 또는 연료 피폭의 파손시의 냉각제 중에 누출되는 핵분열 생성물 등을 생각할 수 있다.

이와 같이 원자력발전 규모가 급격히 증가함에 따라서 원자로의 안전분석, 환경보존 공해방지에 대한 큰 과제들이 생기게 된다. 그 중에서도 가장 기본적인 중요한 문제는 방사성물질의 방출에 의한 방사선의 위험이 크게 대두되고 있다. 원자력발전소의 정상적인 운전에 따르는 방사성 폐기물의 방출에 따른 규제는 물론 비정상적인 가상 사고로 인한 방사성물질의 방출에 대한 충분한 배려가 필요하다고 본다. 한편 온배수의 발생원은 열 냉각수의 방출에서 오는 것으로 화력발전소에 비하여 30% 정도의 냉각수를 더 필요로 하고 있으며 이러한 온배수의 방출에

대한 수생생물의 영향도 무시할 수 없으므로 온배수의 방출 관리도 원자력발전소에서는 매우 중요한 문제이다.

2. 기체 폐기물

일반적으로 PWR에서 발생하는 방사성 기체 폐기물은 BWR과 기본적으로 거의 동일하다고 볼 수 있으며 PWR에서는 원자로 냉각제(1차 냉각제(가 폐회로를 이루고 있어 BWR에 비해 그 발생량은 적다고 볼 수 있다.

기체폐기물의 발생원은 원자로 냉각제의 회학, 체적제어계의 체적제어탱크 등에 충전되어 있는 질소 및 냉각수 중에 첨가되어 있는 수소 또는 핵연료 피폭 파손시에 냉각수 중에 새어 나오는 기체상의 핵분열 생성물(稀有元素)이다. 이들은 주로 원자로 냉각수 중의 붕소(원자로의 반응도 제어를 위해 투입된다) 농도를 변경할 때, 액체 폐기물 처리계에서 개스를 제거할 때에 기체폐기물로서 배출된다. 이 배출 개스는 보통 거의 가 비방사성(非放射能性)의 질소와 수소로 되어 있으며 방사성 준위는 극히 낮으며 핵연료 피폭에 파손이 생겨서 방사성 준위가 높은 경우에는 가압 압축에서 개스 저장 탱크에 저장하여 방사능 준위의 감쇄를 시도함과 동시에 기상 조건을 선정하여 여과 후 배기통에서 대기에 방출된다. 탱크는 최대 45일 간 저장이 가능할 정도로 하는 것이 좋으며 전 연료의 1%에 해당하는 피폭

파손이 생겼을 경우에도 대기에 방출되는 희유 가스 방사능에 의한 주위 환경의 영향은 무시할 수 있는 정도이다.

3. 액체 폐기물

3.1. 액체폐기물의 발생

방사성 액체폐기물은 원자력발전소에서 폐액 처리 과정이나, 순환수, Condenser Concentrates, 여과기의 세척, 이온교환수지, 또는 settling aludge에서 발생하게 된다. 이들 일차 농축분은 원자력발전소 내에 있는 수집 저장소에 저장한다. 냉각제 속에 존재하는 방사성 핵종의 종류 및 방사능 농도는 대단히 중요하며 특히 일차 냉각 계통에 있어서 반감기가 γ -핵종의 전 방사능 농도는 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml}$ 이며 이들 속에는 보통 ^{60}Co 가 $1.0 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/ml}$, ^{137}Cs 이 $2.0 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/ml}$ 의 방사능 농도를 함유하고 있다.

원자력발전소에서 방사성폐액 문제는 냉각제 누수, plant 배수계통, 폐액 처리 계통에 의한 세심한 대책이 필요하다.

PWR에서의 방사성 폐기물

PWR에서의 방사성폐기물은 냉각제 정화 과정에서 100Ci/m^2 의 비방사능을 갖은 중준위 이온교환수지가 연간 $2 \sim 3\text{m}^2$ 정도 발생하고 방사성 폐액 처리과정에서 비방사능이 $4 \sim 7\mu\text{Ci/g}$ 의 고형분을 갖은 evaporator 농축분이 연간 $600 \sim 800\text{kg}$ 정도이며 비방사능이 $0.1 \sim 2.5\mu\text{Ci/kg}$ 의 고형분을 갖은 sludge 양이 연간 $3.2 \sim 4.6\text{ton}$ 정도 발생하고 pool water filter 과정에서 방사능이 $1 \sim 5\text{Ci/m}^2$ 인 사용제 이온교환수지가 연간 500t 정도이다. 또 냉각수 처리 과정에서 4% 붕산이 연간 20m^2 정도 발생된다.

BWR에서의 방사성폐기물

BWR의 방사성폐기물은 냉각제 정화 과정에서 100Ci/m^2 의 비방사능을 갖은 중준위 이온교환수지가 연간 $1 \sim 2\text{m}^2$ 정도 발생하고 condensate Purification 과정에서 $50 \sim 150\text{mCi/m}^2$ 의 이온교환수지가 연간 $10 \sim 12\text{ton}$ 정도, 방사성폐액 처리 과정에서 $0.025\mu\text{Ci/g}$ 이하의 filter retention

sludho가 연간 0.4ton . $1.5 \sim 4\mu\text{Ci/g}$ 의 고형분이 연간 $4 \sim 6\text{ton}$ 정도 발생하며, $0.5 \sim 9\mu\text{Ci/g}$ 의 evaporator 농축분(20 Wt. % 고형분)이 연간 $20 \sim 40\text{m}^2$ 발생하고 $6 \sim 18\mu\text{Ci/g}$ 의 사용제 이온교환수지가 연간 $1 \sim 2\text{m}^2$ 발생한다. 또한 저장탱크와 냉각수 여과기에서 $2\mu\text{Ci/g}$ 의 이온교환수지가 연간 약 1m^2 정도 발생한다.

3.2. 액체폐기물의 처리

순환 냉각수의 방사능

원자력발전소의 방사성폐기물 내의 방사성 핵종의 발생은 냉각제 정화과정, Condensate purification, 방사성폐액 처리과정에서 발생한다고 볼 수 있다. 냉각제 중의 방사성핵종은 부식 생성물, 냉각제 첨가물, 냉각수 내의 불순물, 냉각수 자체의 방사화에 의거한다고 본다. 대표적인 반응으로는 $^{16}\text{O}(\text{P}\alpha)^{13}\text{N}$, $^{18}\text{O}(\text{P}\cdot\text{n})^{18}\text{F}$, $^{58}\text{Ni}(\text{n}\cdot\text{P})^{59}\text{Co}(\text{n}\cdot\gamma)^{60}\text{Co}$, $^{59}\text{Co}(\gamma\cdot\text{n})^{58}\text{Co}$ 등 이외에 부식물 생성, 냉각제 속에 핵연료 물질의 피폭 파피에 의한 핵분열 물질의 존재에 의거한다. 이들 중에서 반감기가 긴 ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs 등은 폐기물 처리에 중요한 의의를 갖고, 냉각제 속에 이들 핵종의 농도는 다음의 제요인의 지배를 받게 된다. 즉 부식물, 순도율, 첨가제의 농도, 로심 내에서 냉각제 체류 시간, 핵연료 피폭파피빈도와 성질 등이다.

냉각제 정화 과정이나 폐액 처리시 발생하는 방사성폐기물의 장기 저장에 있어서는 특히 ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{60}Co 등의 핵종이 특히 중요하다. 순환 냉각제 속의 핵종들은 부분적으로 용해되거나 용해되지 않은 상태로 있는 것이 보통이며 대형 PWR에서는 1% 핵연료봉 피폭 파피 가상하에서 ^{137}Cs 의 약 $60\mu\text{Ci/ml}$ 가 존재한다고 보고 있다. 일반적으로 경수로의 냉각제에서의 전 γ -방사능은 $0.1 \sim 1 \mu\text{Ci/ml}$ 정도이고 이 중 반감기가 긴 핵종은 $10^{-3}\mu\text{Ci/ml}$ 정도를 표시하는 것이 퍼퓸이다. 또한 방사화된 부식 생성물(^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{110}mAg , ^{65}Zn)은 원자로 운전 기간이 길수록 증가한다는 것은 명백한 사실이다. 경수로에서 순환 냉각제 속에 존재하는

여러 핵종들의 농도별 평균치를 보면 다음 <표-1>과 같다.

냉각제 정화

냉각제 속의 부식물 및 핵분열 물질의 농도를 최소한으로 줄이고 또한 부식 요인이 되는 불순물(halogen ion)은 물론 핵연료 피폭 표면에 부착되어 열 전달 효율을 저하시키는 고형 물질의 제거를 감안하여 냉각제를 by pass시켜 항시 청정시키고 있다. BWR를 예로 들면 처리된 냉각제의 순도를 고형물질 함유량이 0.5ppm 정도이며 전기 전도도는 0.2μs/cm로 되어 있다. 전 냉각제의 7~9%는 mixed bed filter나 series형 resin trap 또는 혼형으로 된 냉각제 정화 계통을 통과하며 이때 이온교환수지는 재생을 하지 않고 filter시켜 이온교환수집탱크에 보내지고 새로운 이온교환수지로 대체한다.

mixed bed filter에 들어가기 전에 냉각수는 50°C로 냉각되고, 이온교환수지는 70°C 이상에서 운전할 해서는 안된다. 이때 filter의 up-down stream에서 냉각제의 압력, 온도 그리고 전기 전도도를 측정해야 한다. 사용재 이온교환수지의 량과 방사능 농도는 BWR에서 사용되는 mixed-bed filter에서 5~25μg/l의 Fe, 20μg/l의 Cu, 5~10μg/l의 Ni 등이 filter의 up stream에서 발견되었으며 보통 mixed-bed는 양(陽) 및 음(陰)이온이 1:2 정도의 비율로서 200m² H₂O/l.resin으로 충전되어 있다. 대형 PWR형 원자로에서는 청정계에서 40m²hr의 류량을 보이고 있으며 연간 1.6m²의 이온교환수지가 소요된다¹⁾. 사용된 이온교환수지는 이온교환수지 저장탱크에 1년간 저장하였다가 반듯이 다른 곳으로 격리 수용되어야 한다.

1년 후에 감쇄 냉각 후이온교환수지 속에 존재하고 있는 잔류 방사능 농도를 반감기 70일 이하 되는 것은 무시하고, filter 상에서 aging하게 되는 핵종의 aging rate는 다음과 같다.

$$\frac{dN_1}{dt} = P - \lambda N_1$$

boundary condary condition t=0, N=0로 하고 직분하면

$$N_1 = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \dots \dots \dots (1)$$

감쇄 냉각 기간의 최종에는

$$N_2 = N_1 e^{-\lambda t_2} = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \dots \dots \dots (2)$$

$$P = C \cdot U \cdot \left(\frac{DF - 1}{DF} \right)$$

- N₁ : 축적 최종시의 핵종의 량
- N₂ : 감쇄 냉각 최종시의 핵종의 량
- t₁ : 축적시간
- t₂ : 감쇄 냉각 기간
- λ : 핵종의 붕괴상수
- P : 상위 시간에 filter에 부착된 핵종의 량
- C : filter의 up stream에서의 핵종의 농도
- DF : 제렴계수

$$= \frac{\text{filter의 up stream 핵종농도}}{\text{filter의 downstream 핵종농도}}$$

표1에 표시한 핵종의 도농 값과 식(2)에 의거해서 일년 축적기간 후 일년 감쇄냉각후 이온교환수지에 존재하는 핵종의 방사능 농도는 표2와 같다.

표2에 제시한 바와 같이 총 이온교환수지의 방사능 농도는 약 77Ci/m³ 정도 이고, 비교적 반감기가 긴 Co, Cs의 핵종들이 우세하게 존재하기 때문에 이온교환수지의 감쇄 냉각 기간을 연장한다 해도 효과적인 방사능 농도의 감쇄는 기대)기 어렵다. 연간 방출되는 사용재 이온교환수지의 발생량은 운전방법, 기타 여러 여건에 관련될 뿐만 아니라 냉각제의 순환량과 원자로 출력과 크게 기인된다고 본다.

PWR에서의 한 예를 들면 표3과 같다.

Condensate purification

Condensate는 mixed-bed resin filter를 통해서 정화되는 Condensate purification system을 거쳐 재순환된다. 이때 사용되는 이온교환수지는 보통 1~2년이면 재생하는 것이 보통이다. 재생 - 폐액은 보통 1~5×10⁻³ μCi/ml 정도의 방사능 농도를 갖는다.

최근의 자료에 의하면²⁾ 대형 PWR에서 분말 이온교환수지가 연간 20~30m³ 소요되고 매

<표-1>

경수로 냉각제 내의 중요 방사성 핵종

Isotope	Half-life	Total concentration μCi-ml	Dissolve fraction	Undissolved fraction
Mn 54	278 d	1×10 ⁻⁵	0.1	0.9
Co 58	71 d	1×10 ⁻³	0.1	0.9
Co. 60	5.27 a	1×10 ⁻⁴	0.1	0.9
Zn 65	245 d	5×10 ⁻⁶	0.5	0.5
Ag 110m	253 d	1×10 ⁻⁵	0.9	0.1
Cs 134	2.1 a	2×10 ⁻⁴	1.0	0.0
Cs 137	30 a	2×10 ⁻⁴	1.0	0.0
Total		1.5×10 ⁻³	5.2×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³

<표-2>

냉각제 정수용 이온교환수지 방사능

Nuclido	Half-life (d)	Bound as ion (Ci)	Mechanically bound (Ci)
Mn 54	278	0.14	1.1
Co 58	71	0.4	3.5
Co 60	1,900	4.3	34
Zn 65	245	0.3	0.3
Ag 110m	253	1.2	0.1
Ce 134	755	40.7	0
Cs 137	10.800	99	0
Total		146	39

* 일년 간 작업 및 냉각수 2.4m³ 이온교환수지에 축적된 방사능

<표 3>

중준위 이온교환수지의 발생량 (PWR)³⁾

Power (MWd)	Resin volume in Ci per mixed-bed filter
300	550
450	800
600	1,200
1,200	2,200

m³당 방사능 농도는 50mCi 이하 정도이다. 또한 단일 감기가 긴 핵종 ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co. 등 들이 원자로 냉각수에 10⁻⁴~10⁻³ μCi/ml의 농도로 있다면 condensate에서는 10⁻⁶~10⁻⁸ μCi/ml의 방사능을 갖는 농도를 얻을 수 있다. DF=5의 값으로써 약 0.2~30 Ci 정도가 연간 분말이온수지에 미적하게 된다. 연간 20~30m³의 분말이온수지를 사용하면 폐기물으로써는 7~1,500 mCi/m³ 정도의 비방사능을 갖는 것이 발생하는

이러한 추정량에 대해서는 이온교환수지 저장기간에 핵종의 감쇄는 무시해도 좋을 정도이다.

PWR의 방사성폐액 처리

PWR에서의 처리 기술은 BWR이나 거의 비슷하고 폐기물의 발생원도 별차이가 없으나 일반적으로 BWR의 방사성폐액 발생량 보다 확실히 적다고 볼 수 있다. 방사성폐액은 일차적으로 전도도, 오염도, 방사능 농도 차이에 따라서 구분된 냉각탱크에 수집되며 evaporater에 의해 처리된다.