

## 토양 제염실험 및 잔류방사능 안전성 평가

### Decontamination Experiment of Contaminated Soil and its Safety Assessment by Residual Radioactivity

강기두, 손중권, 김학수, 박경록, 김경덕

한국수력원자력(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

토양 입도 분리장치와 토양 세척장치로 구성된 토양 제염실증장치를 통해 방사성오염 토양에 대한 제염실험을 하였다. 제염전 토양의 선량을 측정하여 고선량 그룹과 저선량 그룹으로 분리하고 입도분리를 거쳐 0.5 mm이하를 제외한 2.0 ~ 0.5 mm, 2.0 mm이상 토양으로 토양입도, 방사능 준위, 제염수의 양, 제염시간의 변화에 따른 결과를 측정 하였다.

실험 결과 2mm 이상의 입도분리된 토양에 대해서는 초기제염으로 50-80%를, 2.0 ~ 0.5 mm의 저입도에서는 초기제염으로 50%, 반복제염 85%까지 방사능을 줄일 수 있었다.

방사선 오염토양에 대한 핵종 농도별 방출기준을 평가하였다. 제한 선량 0.25 mSv/y를 기준으로 미국 NRC가 해체 안전성 확인에 사용하는 DandD 코드를 이용하여 Co-60, Cs-137, Sr-90의 허용오염기준을 산출한 결과 미국의 screening 기준과 유사함을 확인하였다.

제염완료된 토양을 대상으로 RESRAD코드를 이용하여 방사선 안전성 평가를 한 결과 10 ~ 25Cm의 복토층이 필요한 것으로 계산 되었다.

#### Abstract

Decontamination experiment for contaminated soil was performed by using soil washing machine which were composed of soil separator and washer. For the test, the soil was grouped into low and high level and sieved as 2.0 ~ 0.5 mm, 2.0 mm over. The experiment were done with varying soil size, radiation level, liquid/solid ratio and

time.

The result showed that the activity was reduced by 50-80% for 2mm soil with initial washing, while reduced to 85% from 50% for 2.0 ~ 0.5 mm soil with repeated washing.

Release criteria for the radionuclide of radioactively contaminated soil was calculated. The release criteria of Co-60, Cs-137 and Sr-90 was calculated based on dose limit of 0.25 mSv/y using DandD code which was used for decommissioning safety calculation by NRC. The results was similar to the release criteria using in USA.

Radiation safety of decontaminated soil was assessed using RESRAD code and the cover depth of 10 ~ 25 cm was required.

## 1. 서론

원자력발전소의 운전 과정에서 부지내 방사성 오염토양이 발생하는 경우 오염도가 높은 지역의 토양을 수거하여 단순히 격리관리하고 있다. 그러나 이러한 것은 궁극적으로 방사성폐기물 관리에 불합리하며 특히 원전을 해체하게 될 경우 더 많은 오염된 토양이 발생할 가능성이 있기 때문에, 방사능에 오염된 토양의 적절한 제염과정을 통하여 폐기물 발생량을 최소화시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 오염토양의 제염에 활용되고 있거나 활용 가능성이 높은 여러 가지 제염공정 중에서 특히 물을 이용한 물리적인 토양분리 및 세척방법을 통하여 제염실험을 한 결과를 보여주고자 하는 데 그 목적이 있다. 물을 이용한 제염시 제염폐액이 많이 발생할 것이므로 제염폐액을 재활용하고 2차 폐액 발생을 최소화하기 위하여 폐액 재순환 장치를 고안하여 사용하게 되었다.

제염전 토양의 선량을 측정하여 고선량과 저선량으로 분리하고 입도분리를 거쳐 0.5 mm이하의 토양은 별도로 놓아두고 2.0 mm이상, 2.0 ~ 0.5 mm의 토양으로 토양입도, 방사능 준위, 제염수의 양, 제염시간의 변수를 두고 실험을 수행하였다.

그 다음으로 방사선 오염토양에 대한 핵종 농도별 방출기준을 평가하였다. 이를 위해 적용한 제한 선량은 0.25 mSv/y로 하였으며 미국 NRC가 해체 안전성 확인에 사용하는 DandD 코드를 이용하여 Co-60, Cs-137, Sr-90의 허용오염기준을 산출하였다.

제염완료된 토양의 방사선 안전성 평가를 위해 RESRAD코드를 이용하여 제염토양으로부터의 선량을 평가하였으며 또한 자체처분시의 선량을 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 제염장치 구성

본 연구의 Lab실험으로부터 도출한 최적공정을 바탕으로 토양제염장치를 제작하였다. 토양 제염장치는 크게 토양입도 분리장치(Particle Separator), 토양 세척장치(Soil Washer) 및 폐액 재순환장치(Fluid Waste Recirculator)로 구성된다.

입도분리 공정의 기본 개념은 방사성물질이 포함된 토양을 분리하기 위한 체분리이다. 본 공정에서는 건식 분리를 적용하였지만 경우에 따라서는 물을 이용한 습식분리도 가능하게 제작하였으며 또한 제염효과의 극대화를 위해 물 이외에 산 등의 화학제를 첨가할 경우에 대비하여 화학성분에 강한 재질로 만들어 졌다.

각각의 Sieve는 Vibrator의 정·역회전에 의해 체분리 및 배출이 조절되며, 체분리시에는 수평상태에서 작업을 하고, 배출시에는 역회전을 하여 배출 될 수 있도록 하였다. 또한 망 위에는 Ball을 여러 개 올려놓아 체분리시에 Screen의 체막힘을 방지할 수 있도록 하였다. 동 장치를 습식으로 운전할 경우에는 Sieve 상부를 통하여 물을 공급하도록 되어있다.

오염토양 제염장치는 선별장치를 통해 분리된 방사성물질에 의해 오염된 오염토양을 세척제를 사용하여 제염하는 장치이다. 입도 분리장치에서 분리된 오염토양은 세척액과 혼합시켜 오염물을 탈착 용해시키는 쌍방향(2단)으로 된 스크류를 갖춘 제염장치에 넣어 제염한다. 토양제염장치로부터 분리되어 배출되는 각각의 입도별 토양과 물이 혼합된 폐액은 저장조에 넣어 재순환장치를 거쳐 순환되도록 설계하였다.

폐액 재순환장치는 토양 세척후 배출되는 폐액을 정화시켜 재사용하기 위해 부착한 장치로서 MF막, 이온교환수지 컬럼, 흡입펌프 및 공기공급기, 제어판 등으로 이루어져 있다. MF막은 폐액저장조에 설치되며 이 막을 통해 폐액내의 미세 입자가 제거되며 미세 입자가 제거된 폐액은 흡입펌프에 의해 이온교환수지 컬럼으로 이송된다. 양이온교환수지 및 음이온교환수지를 통과한 폐액은 다시 세척수 저장조로 이송되어 토양 세척에 활용된다. (그림 3 참조)

### 2.2 제염장치 성능 시험

제염장치의 제작 설치 후 장치의 기계적 동작상태 점검과 최적 잔류 시간과 유량율을 측정하기 위하여 오염되지 않은 토양으로 장치 성능시험을 수행하였다. 성능시험은 오염되지 않은 건조된 일반토양 5kg를 대상으로 하였다. 세척장치의 각도는 20°로 설정하였으며 유량율은 최소 유량과 최대 유량으로 나누어서 약간의 시차를 두고 시험하였다. 잔류 시간은 최단 시간과 최장 시간으로 하여 수행하였다. 유량율의 최소 유량은 노즐에서 물이 흐르지 않고 분사되는 순간의 유량으로 설정하였으며, 최대 유량은 밸브를 최대로

열어놓은 상태로 설정하였다. 잔류 시간의 최단 시간은 토양 제염이 가장 빠른 시간 안에 제염되는 시간을 구하기 위하여 1, 2차 세척조의 회전수를 최대로 하였다. 다만 세척수 유량은 최대보다는 토양의 양을 생각하여 적당한 수준으로 조절하여 토양의 양에 따라 토양이 1차 세척조를 통해 2차 세척조에 전달되기 위한 최소한의 양으로 설정하였다. 최장 시간은 1, 2차 세척조의 회전수를 최저 속도로 하여 실험하였으며 세척수 양을 가능한 적게 조절하였다.

장치의 성능시험 결과 세척조 회전수는 1차 세척조가 최저 6 rpm에서 최고 17 rpm이었으며, 2차 세척조는 최저 8 rpm에서 최고 43rpm의 결과를 보여주었다. 유량율은 토양 투입구의 밸브인 1차 밸브와, 2차 세척조에서 린싱 역할을 하는 2차 밸브 Open시에 최대 유량은 77 lpm이었고, 노즐 분사가 가능한 최소 유량은 26 lpm이었다. 1차 밸브 Open, 2차 밸브 Closed시에는 최대 유량이 16 lpm, 최소 유량이 6.3 lpm이었으며, 1차 밸브 Closed, 2차 밸브 Open시에는 최대 유량이 67 lpm, 최소 유량이 22.5 lpm으로 나타났다. 실험에 가장 적합한 유량을 결정하기 위하여 노즐분사가 가장 원활한 조건을 확인해 본 결과 각각 1차 밸브 10 lpm, 2차 밸브 36 lpm이었다. 잔류시간은 회전수를 최대로 했을 때 15분이었고, 최소로 했을 때 40분으로 측정되었다.

## 2.3 실험 토양 입도분리 및 토양 그룹화

실험용 토양을 전처리의 일환으로 선별작업을 수행하였다. 큰 돌과 의류, 나무 등의 잡고체를 제외한 토양만을 30 kg씩 두꺼운 비닐 봉투에 넣어 분리하였으며, 토양에 수분이 많이 함유되어 있는 토양은 원활한 입도분리를 위하여 충분히 건조시켰다. 건조된 토양 시료를 각각 2.0 mm 이상, 2.0~0.5 mm, 0.5 mm 이하로 입도분리하여 토양을 각각 제염전에 방사능 계측하여 입도별 토양을 방사능 준위에 따라 두 종류로 분류하였다. 입도 분리 결과 0.5 mm 이하의 미세토양은 약 30%를 차지하는 것으로 나타났으며 이 토양은 제염하지 않고 따로 처분하였다. 토양의 분류는 입도별로 방사능 계측된 토양을 방사능 준위 순으로 정렬하여 고준위와 저준위로 분류하였다.

## 2.4 제염장치를 이용한 제염실험

토양을 입도분리한 후 각 토양을 선량율로 그룹화한 후 실험 목적에 따라 섞이지 않도록 라벨링 하였다. 토양은 15~30 kg을 제염장치에 분당 1.5 kg씩 주입하면서 제염실험을 하였다. 토양주입시 1차 세척조는 6rpm, 세척수는 토양을 주입하는 동안 분당 약 10 ℓ를 사용하였으며 2차 세척조는 잔류 시간(40분, 60분)을 고려하여 rpm을 조절하였다. 세척수 양은 토양의 양과 제염수와의 비율이 1:20, 1:40이 되도록 조절하여 제염실험을 하였다.

사전 준비시험의 일환으로 재순환장치 성능 시험을 수행하였으며 오염토양 제염 후 발생

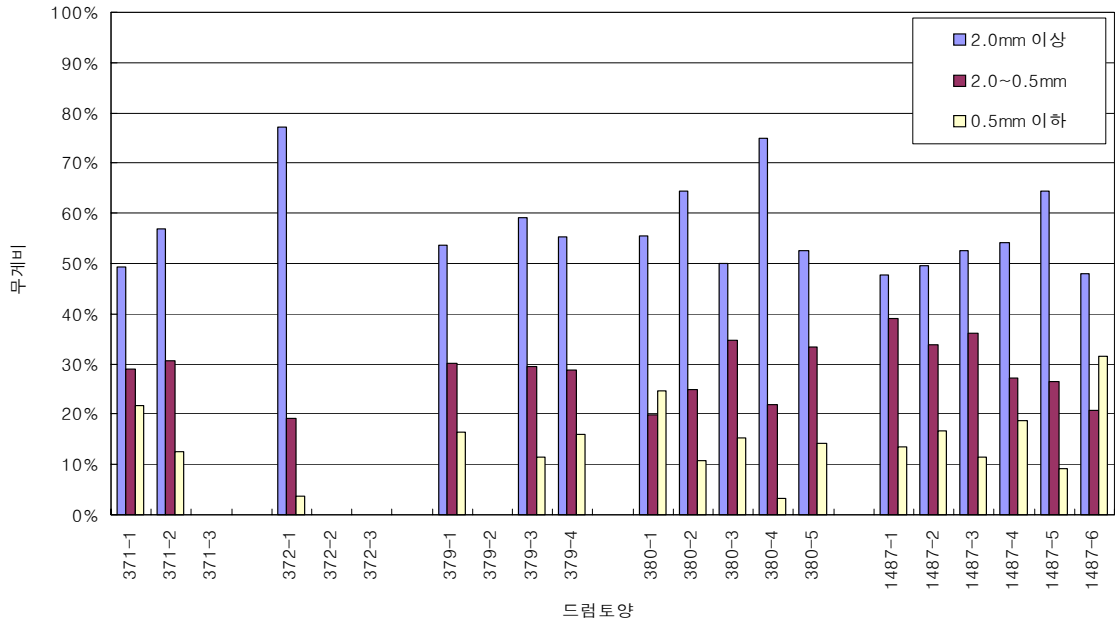


그림1. 토양 입도분리 후 입도별 무게 비율

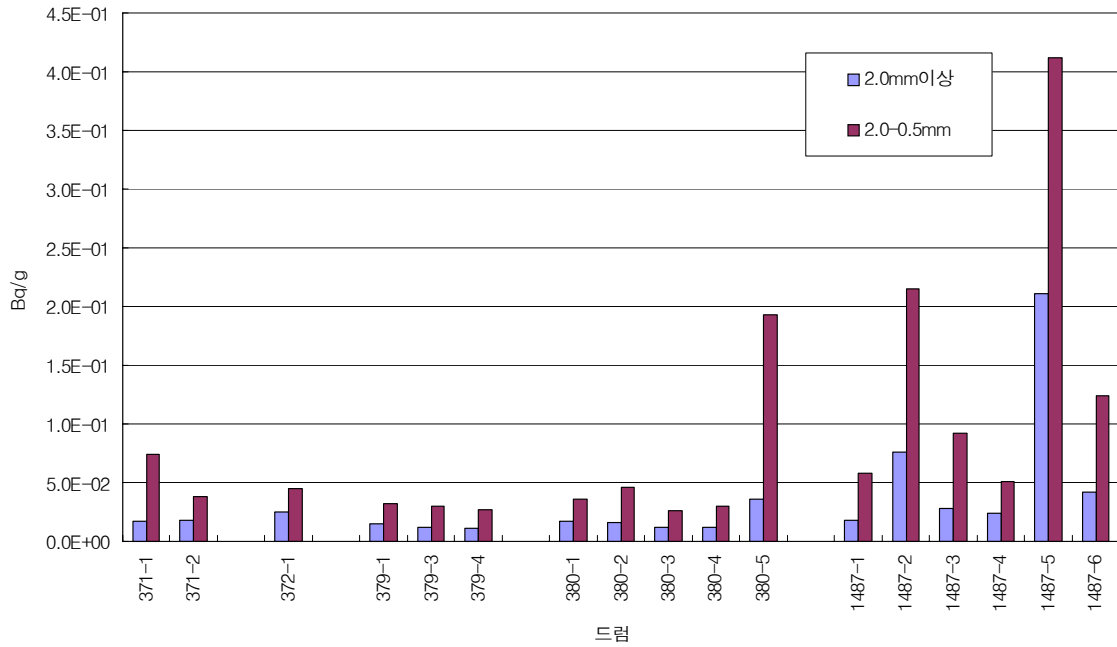


그림2. 토양의 입도분리 후 입도별 방사능 농도

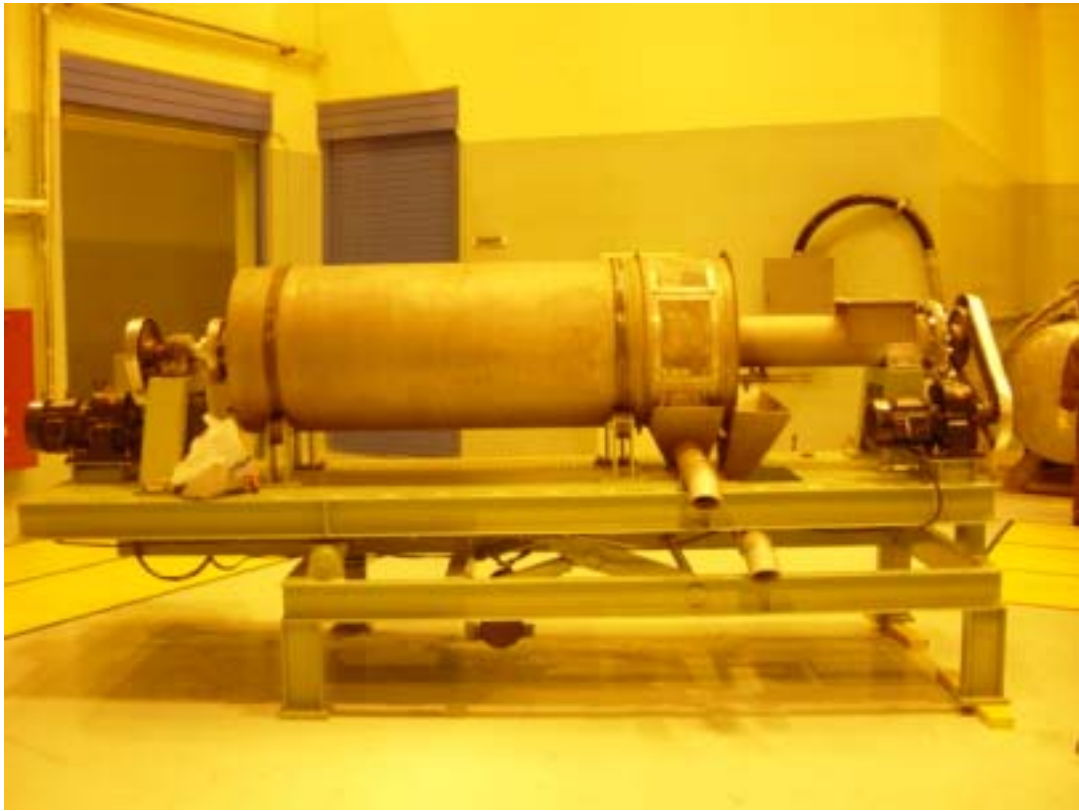


그림 3. 토양제염 실험장치

표 1 재순환장치를 거친 제염수의 계측 결과

구 분	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/g)
제염전 깨끗한 제염수 ①	MDA 미만
제염 후 제염폐액 ②	1.264E-03
제염폐액이 재순환장치 거친 후 제염수 ③	MDA 미만
재순환장치 거쳐 제염된 제염폐액 ②-1	1.417E-03
제염폐액 재순환장치 후 제염수 ③-1	MDA 미만

된 폐액을 재순환 장치의 막을 거쳐 재생시키면서 20~30분 간격으로 탁도, 흡인압력 (cmHg), 처리수 유량( $l/min$ )을 측정하였다. 재순환장치는 투과 7분, 역세 1분으로 설정하여 가동 시켰다. 실험결과 탁도는 약 35시간 동안 변화없이 0 NTU를 유지하였음을 확인하였다.

표 1에서 보는 바와 같이 두 번의 Cycle동안 에 제염장치를 거친 폐액에서는 방사능이 검출되지 않았다. 여러 번의 반복 측정에서도 방사능은 검출되지 않았는데 이는 제염 폐액에 용존하는 미세 토양입자가 주요 방사선원이며 MF막만으로도 폐액의 정화가 가능하였음을 알 수 있다. 따라서 재순환장치를 이용해서 얻은 제염수로 실험한다고 하더라도 제염성능에는 영향이 없는 것임을 알 수 있게 해준다

입도분리한 후 방사능 준위 순으로 분류한 토양을 이용하여 제염실험을 수행하였다. 제염실험은 방사능 준위, 제염수 양, 제염시간, 토양 입도별로 제염율(방사능 제거율)을 비교할 수 있도록 실험을 수행하였다. 제염전 토양, 제염후 토양(건조), 제염폐액의 시료를 채취하여 방사능을 계측하였다.

#### 가. 방사능 준위에 따른 제염율

그림 4는 방사능 준위에 따른 제염율(방사능 제거율)을 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 2.0 mm이상의 입자가 굵은 토양에서는 준위에 따른 제염율의 차이가 크게 나타나지 않았으며, 2.0~0.5 mm토양의 입자기 비교적 작은 토양에서는 고준위 토양과 저준위 토양의 제염율 차이가 17%가 되었다.

#### 나. 토양입도에 따른 제염율

그림 4는 토양 입도에 따른 제염율의 차이를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 저준위 토양의 제염한 결과(B-1) 제염율의 차이가 46%로 가장 크게 나타난 반면 고준위 토양의 제염 결과(B-3)가 2%로 입도별 제염율의 차이가 거의 나타나지 않았다.

본 실험을 통해서 토양의 입도가 큰 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 제염율이 더 좋아진다는 것을 확인할 수 있었으며 이는 굵은 토양에 붙어있던 미세입자들이 물에 씻겨 나감으로서 방사능이 저감된 것으로 판단된다.

따라서 토양오염은 주로 굵은 토양보다는 미세한 입자에 오염이 더 많이 되어있으며 제염 대상 토양의 입도분포가 전체 제염율에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

#### 다. 반복제염의 제염효과

오염토양 제염시 반복제염으로 어느 정도의 제염효과를 얻을 수 있는지 알아보기 위하여 제염했던 토양을 이용하여 반복제염 실험을 수행하였다. 제염실험은 위의 제염했던 토양을 이용하여 실험하였으며 고준위 토양 중에서 2.0 mm이상, 0.5~2.0 mm 토양을 선택하여 실험하였다. 실험조건은 처음 실험했던 조건과 같도록 설정하였다. 제염실험 조건은 20:1, 제염시간 60분으로 하였다. 그림 5와 같이 1차 제염했을 경우는 입자가 굵은 토양

에서 제염율이 높게 나타났으나 2차 제염시에는 입자가 비교적 작은 토양에서 제염율이 조금 더 높게 나타났다. 입자가 작은 토양은 초기 제염으로는 원하는 만큼의 제염율을 얻을 수 없지만 반복 제염할 경우 80%이상의 제염율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

제염장치를 이용한 제염실험을 종합해본 결과 제염수의 양, 토양의 방사능 농도, 제염시간은 제염율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 결과가 나타났으며, 반복제염의 방사능 저감 효과가 비교적 크게 나타났다. 이는 반복제염을 하게 되면 세척조안에서 토양이 서로 부딪히는 시간이 그만큼 길어진다고 설명할 수 있다. 이는 긴 시간동안 토양이 서로 부딪히게 되면 토양의 표면을 깎아 미세입자를 많이 제거되기 때문에 방사능 저감율이 더 높게 나타나게 되었다.

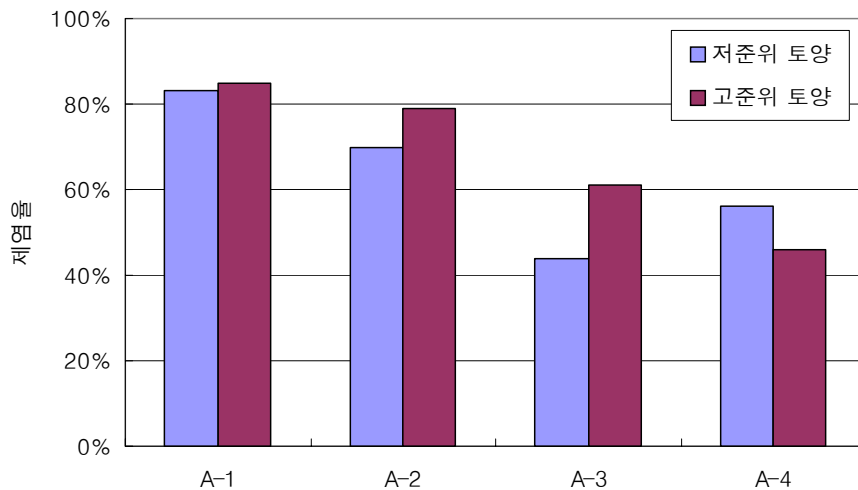


그림 4 방사능 준위에 따른 제염율

A-1 : 2.0 mm 이상 토양, 20:1, 40분 제염    A-3 : 2.0~0.5 mm 토양, 40:1, 60분 제염  
 A-2 : 2.0 mm 이상 토양, 20:1, 60분 제염    A-4 : 2.0~0.5 mm 토양, 20:1, 60분 제염



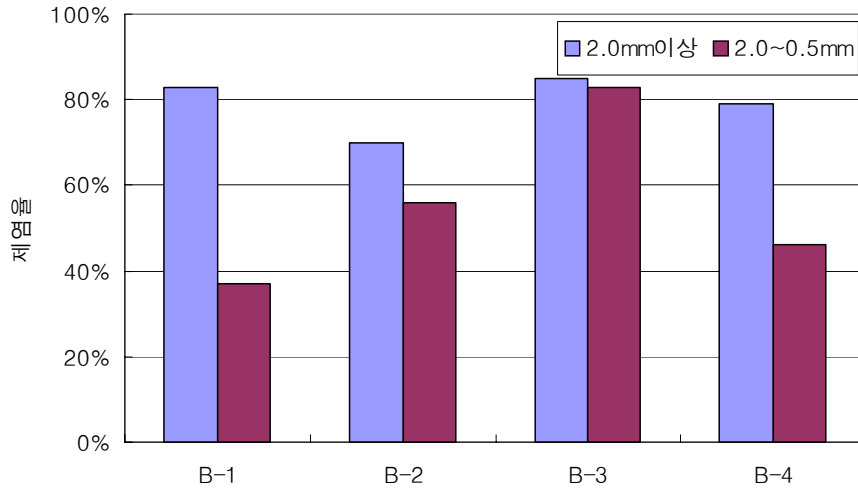


그림 5 토양 입도에 따른 제염율

B-1 : 저준위토양, 20:1, 40분 제염      B-3 : 고준위토양, 20:1, 40분 제염  
 B-2 : 저준위토양, 20:1, 60분 제염      B-4 : 고준위토양, 20:1, 60분 제염

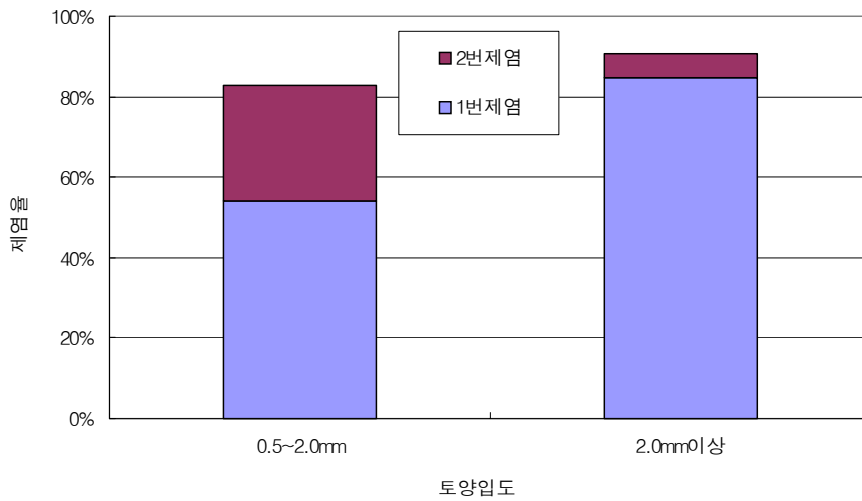


그림 6 입도별 반복제염에 따른 제염효율

## 2.5 토양 잔류오염 허용기준 계산

원자력발전소에서 운전중이나 해체중에 오염 토양이 발생할 수 있는데 발전소에서 발생할 수 있는 부지토양의  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 등을 포함한 주요핵종의 경우 아직까지 핵종 농도별 방출기준은 별도로 설정이 되어있지 않다. 원자력법에서는 개인에 대한 연간 피폭방사선량이 10  $\mu\text{Sv}$  미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1 Person·Sv 미만이 되는 것이 입증되는 농도의 물질에 대해서는 소각·매립 또는 재활용 등의 방법으로 처분하는 "자체처분"을 허용하고 있다. 그러나 원자력발전소, 처분장 및 핵주기시설에 등 원자력시설의 가동으로 인한 연간 주민선량을 전 세계적으로 0.25 mSv 내지 0.30 mSv 수준에서 허용하고 있으며 이는 자연에서 받는 피폭이나 ICRP 60 권고에 따르면 주민선량 기준이 1 mSv인 점을 감안하면 큰 무리가 없으므로 본 0.25 mSv 기준에 근거하여 주요 핵종별 토양 허용(잔류)오염 기준을 미NRC가 해체 안전성 확인에 사용하였던 DandD 코드를 이용하여 시산하였다. 이 결과는 추후 발표될 핵종 농도별 허용오염 기준에 크게 다르지 않을 것이라 판단된다.

개인 최대선량(10  $\mu\text{Sv}/\text{년}$ )에 근거한 규제 해제 준위로 자체처분에 따라 주민에게 미치는 영향이  $5 \times 10^{-7}/\text{년}$ 으로  $10^{-6}/\text{년}$  이하라고 하였는데 토양 잔류 오염 기준으로 사용하려는 0.25 mSv/년 경우에도  $1.25 \times 10^{-5}/\text{년}$ 으로 용인할 수 있는 수준이다. 원전 해체에 대해서는 미국이 원자력시설을 해체한 사례가 많고 핵주기 시설이 오염된 사례가 많다. 따라서 토양 오염 허용 기준을 계산할 수 있는 코드도 다양하며 DandD와 RESRAD가 주로 사용되고 있다. 특히 DandD는 RESRAD에 비해 보수적이라고 알려져 있으며 NRC에서 해체 안전성 분석 도구로서 개발하고 있다. 토양이 방사능에 오염될 경우 크게는 외부 피폭을 받을 수 있고 호흡과 섭취 경로를 통하여 개인이 피폭되게 된다. DandD 코드는 NUREG/CR-5512의 시나리오, 모델 및 파라미터를 사용하고 있다. 이 코드는 각각 부지의 부지특성 자료를 사용할 수도 있고 default값을 사용할 수도 있으나 일부만 부지특성 자료를 활용할 경우 오류를 범할 수도 있기 때문에 ICRP 72나 74의 선량환산인자를 적용하는 대신 default값을 사용하여 오염된 원자력발전소 부지를 재활용하는 경우를 가정하여 3개 주요 핵종으로 무한 평면이 오염되었을 경우 모든 경로 (Inhalation, Secondary Ingestion, Agricultural, Drinking Water, Irrigation 및 Surface Water Pathway)를 고려하고 default 파라미터를 이용 경로별 피폭량을 구하였다.

계산결과  $^{60}\text{Co}$ 의 경우  $0.037 \times 0.25 / 6.69\text{E}-02 = 0.138 \text{ Bq/g}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  경우  $0.037 \times 0.25 / 0.206 = 0.045 \text{ Bq/g}$  및  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우  $0.037 \times 0.25 / 2.34\text{E}-02 = 0.395 \text{ Bq/g}$ 를 토양 허용 잔류기준으로 얻을 수 있었으며 이는 현재 미국에서 0.25 mSv를 기준으로 하여 임시로 사용중인 미국 screening 기준 [Federal Register: December 7, 1999 (Volume 64, Number 234)]과 거의 유사하였다.

표 2 선정된 핵종별 농도(Bq/g)

핵종	잔류 오염 농도 (Bq/g)
$^{60}\text{Co}$	0.037 (1pCi/g)
$^{90}\text{Sr}$	0.037 (1pCi/g)
$^{137}\text{Cs}$	0.037 (1pCi/g)

표 3 단위핵종 농도(1Bq/g)로 무한 평면 오염시 경로별 피폭량(mSv)

핵종	Agricultural	Drinking Water	Surface Water	External	Inhalation	Secondary Ingestion	Irrigation	All Pathways Dose
$^{60}\text{Co}$	4.93E-03	6.90E-26	4.69E-25	6.20E-02	5.79E-07	3.57E-06	2.09E-25	6.69E-02
$^{90}\text{Sr}$	1.90E-01	3.18E-17	3.37E-17	3.35E-06	3.59E-06	1.99E-05	5.84E-17	1.96E-01
$^{90}\text{Y}$	8.48E-03	2.37E-18	1.26E-18	1.06E-04	2.29E-08	1.49E-06	4.20E-18	9.75E-03
$^{137}\text{Cs}$	8.78E-03	7.76E-22	3.45E-20	3.55E-06	8.84E-08	6.99E-06	6.23E-21	8.79E-03
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	0.00E-02	0.00E-02	0.00E-02	1.46E-02	0.00E-02	0.00E-02	0.00E-02	1.46E-02
모든핵종	2.05E-01	2.07E-15	2.18E-15	7.67E-02	4.29E-06	3.20E-05	6.84E-15	2.88E-01

표 4 계산된 잔류 오염 허용 농도

핵종	잔류 오염 허용 농도 (Bq/g)	임시로 사용중인 미국 screening 기준 (Bq/g)	KINS 잠정(안)
$^{60}\text{Co}$	0.138	0.141	0.1
$^{90}\text{Sr}$	0.045	0.063	0.01
$^{137}\text{Cs}$	0.395	0.407	0.1

## 2.6 제염토양 잔류방사능 안전성 평가

제염이 완료된 토양은 적절히 잔류방사능 안전성을 평가한 후 규제해제(자체처분)를 고려해 보아야 한다. 본 절에서는 미국 ANL에서 DOE와 NRC 지원하에 개발된 RESRAD 코드를 사용하여 제염완료 토양을 매립 하였을 시의 방사선 위험도를 평가하였으며 적절한 매립조건을 도출하였다. 선량계산시 사용된 시나리오는 거주자 시나리오(Resident Farmer)와 작업자 시나리오(Industrial Worker)였으며 각 입력인자는 고리지역에 맞게 수정하였다.

### 가. 고리 부지의 지질구조

고리 부지의 오염 토양으로부터 상부 거주민에 대한 선량평가를 수행하기 위해서는 RESRAD에서 기본적으로 요구하는 오염부지의 토양 종류를 알아야 한다. 정확한 자료를 얻기 위해서는 실제 해당 부지의 지질 조사를 수행해야 하나 본 연구에서는 고리 1호기 최종안전성분석보고서에 있는 자료를 사용하여 고리 부지의 지질 구조와 토양 종류를 선정하였다. 아래 그림 7에서 보는 바와 같이 토양의 종류는 주로 Silty sand로 구성되어 있으며 보수적 평가를 위해 복토층은 고려하지 않았으며, 포화지역은 해수면의 높이를 기준으로 삼았다.

### 나. 주요 가정 사항

#### 1) 자체처분시 선원항 및 매립토양의 양

자체처분의 목적으로 제염토양을 매립한 후 거주자 시나리오 및 작업자 시나리오로 피폭선량을 평가하기 위해 우선적으로 매립할 제염토양의 양, 매립 깊이, 매립 면적 및 복토층의 유무 및 길이등 여러 가지를 고려하여야 한다. 또한 제염토양내 방사성 핵종과 핵종농도를 역시 결정되어야 한다. 이들 변수는 여러 가정에 의해 다양하게 변할 수 있으며 이는 선량평가결과에 지대한 영향을 미친다. 제염토양을 방사능 분석을 수행한 결과 검출된 핵종은  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$  이었다. 이들 핵종의 농도는 반복제염을 실시함으로 방사능은 더 낮아지지만 보수적으로 평가하기 위하여 1회 제염후의 평균농도를 사용하였다. 따라서 RESRAD 프로그램의 선원항은  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우  $3.47 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 의 경우에는  $1.50 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ 으로 선정하였다.

자체처분할 토양을 약 1,500드럼으로 가정할 경우 제염토양의 양을 산출하였다. 입도 분리로 제거할 수 있는 입도 0.5 mm이하의 미세토양은 약 30%이며 이와 같이 실험에 근거한 자체처분 할 토양의 양은 표 5와 같이 계산된다.

이와 같은 입력자료를 토대로 선량을 계산하였으며 기본적인 RESRAD 입력값을 고리원전 부지에 맞게 수정한 값은 아래에 기술하였다. 또한 REARAD는 원통형 선원항으로 계산되기 때문에 매립 지오메트리의 변화 또한 선량 계산값에 영향을 미친다.

표 5. 자체처분 토양의 양

드럼	드럼 무게	총 양	입도분리에 의한 미세토양 제거율	자체처분 토양의 양
1,500	0.32 ton	505.6 ton	30%	328.64 ton

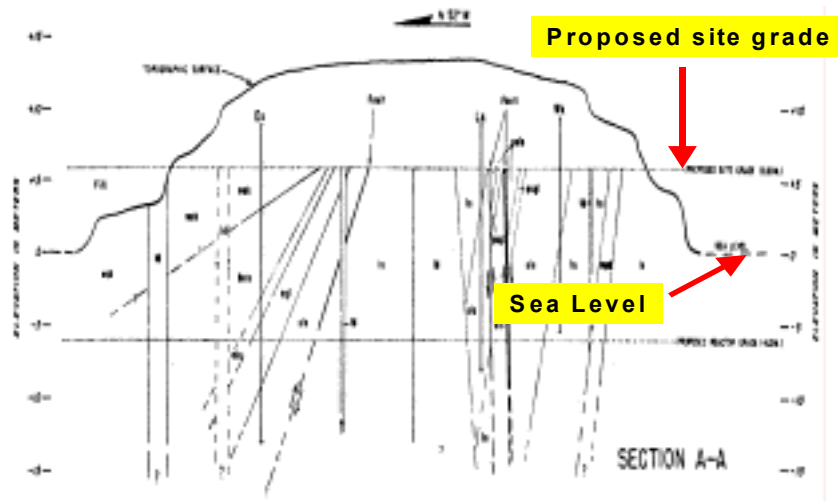


그림 7. 고리 부지의 지질학적 구조

## 2) 피폭경로 및 기타 주요 가정사항

자체처분시 피폭선량을 평가하기 위해서는 선원로부터 인체까지의 피폭경로를 고려해야 한다. 본 평가에서는 RESRAD 프로그램에서 고려하고 있는 피폭경로인 External gamma pathway, Inhalation pathway(w/o radon), Plant ingestion pathway, Meat/Milk ingestion pathway, Aquatic food pathway, Drinking water pathway 및 Soil ingestion를 모두 고려하여 평가하였다.

또한, 본 평가에서는 매립 시나리오에서 중요한 인자로 사용되는 복토층의 경우 매립 부지가 그대로 노출되어 있는, 즉 복토층이 없는 것으로 가정한 평가와 복토층이 최대 1 m라고 가정하여 10 cm씩 변화시키며 계산하였다. 평가기간의 경우 RESRAD 프로그램은 기본적으로 1,000년의 평가기간 동안 최대 선량이 발현되는 점을 감안하여 발전소 운영종료시점부터 1000년까지 평가 기간을 설정하였다.

RESRAD 프로그램에서 고려하고 있는 중요한 모델중에 하나가 물의 이동현상으로 오염지역이 넓은 경우( $\geq 1,000 \text{ m}^2$ )에는 Non- dispersion모델을, 오염지역이 협소한 경우( $\leq 1,000 \text{ m}^2$ )에는 Mass- balance 모델을 적용하기를 권고하고 있다. 본 평가에서는 매립 부지의 면적이  $1,000 \text{ m}^2$  이하이기 때문에 물의 이동모델은 Mass- balance 모델을 적용하였다. 기타 RESRAD 코드에서 요구되는 부지특성인자값은 가능한 한 고리 부지값을 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 국내에서 구할 수 없는 값은 RESRAD default 값을 적용하였다. 또한 섭생관련 자료는 INDAC에서 사용 중인 평균가상개인중 성인에 대한 값을 적용하였다.

### 다. 피폭선량 평가 결과

#### 1) 복토층이 없는 경우

매립지의 깊이는 해외 유사 연구사례 및 보고서를 참고로 하여 1 m로 하였다. 다른 해외 연구사례에는 복토층을 사용하고 있는 경우도 있고 사용하지 않는 경우도 있지만 최대한 보수적으로 평가하기 위하여 복토층이 없는 것으로 먼저 선량평가를 수행하였다. 거주자 시나리오와 작업자 시나리오 모두에 대해 계산을 수행하였으며 결과는 표 6과 같다.

표 6. 복토층이 없는 경우의 선량평가( $\mu\text{Sv/yr}$ )

년	0	1	5	10	50	100	1000
거주자	58.1	53.3	38.9	27.9	7.3	2.2	1.5
작업자	46.7	42.5	30.0	20.7	4.8	1.5	0.0

표 6에서 알 수 있는 바와 같이 매립 깊이를 1 m으로 하여 330 t의 제염토양을 자체 처분할 경우 매립 당시의 거주자 시나리오를 이용한 선량평가결과는 약 58.1  $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ 로 제한치를 상회하며 매립후 약 50년이 지난 시점에서 제한치를 만족하는 것으로 계산되었다.

## 2) 복토층이 있는 경우

토양의 양과 선원항이 다소 높게 적용하였으며 보수적인 평가를 위해 변경하지 않고 단지 복토층에 의한 선량 감소효과만을 평가하였다. 이를 위해 RESRAD 프로그램을 이용한 선량 계산시 복토층의 두께를 10 cm씩 변경하며 1 m 까지 계산하였다. 표는 복토층을 20 cm 및 30 cm까지의 결과를 보여준다.

표 7. 복토층 20 cm인 경우의 선량 평가( $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ )

년	0	1	5	10	50	100	1000
거주자	12.8	12.0	9.5	7.4	2.6	1.0	7.460E-10
작업자	4.2	3.8	2.7	1.8	0.6	0.4	6.613E-10

표 8. 복토층 30 cm인 경우의 선량 평가( $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ )

년	0	1	5	10	50	100	1000
거주자	8.6	8.1	6.6	5.3	1.9	0.7	8.060E-10
작업자	1.2	1.1	0.8	0.5	0.1	0.1	6.836E-10

표 7에서 보는 바와 같이 복토층을 20 cm만 쌓아도 처분 즉시의 선량이 작업자 시나리오를 적용할 경우 4.2  $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ 로 제한치인 10  $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ 을 훨씬 밑도는 것을 알 수 있다. 일반 주민에 대한 거주자 시나리오를 적용할 경우에는 표 8에서 보는 바와 같이 복토층을 30 cm만 쌓아도 8.6  $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ 로 제한치를 하회함을 알 수 있다. 표 25, 26에서 보는 바와 같이 복토층을 90 cm 이상으로 한다면 거주자 시나리오나 작업자 시나리오 모두 선량이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 8은 거주자 시나리오로 평가한 처분 즉시의 선량을 복토층 두께별로 나타낸 것이고 그림 9는 작업자 시나리오로 평가한 처분 즉시의 선량을 복토층 두께별로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 거주자 시나리오를 적용할 경우에는 약 25 cm, 작업자 시나리오를 적용할 경우에는 약 15 cm가 최소한의 복토층 두께임을 알 수 있다.

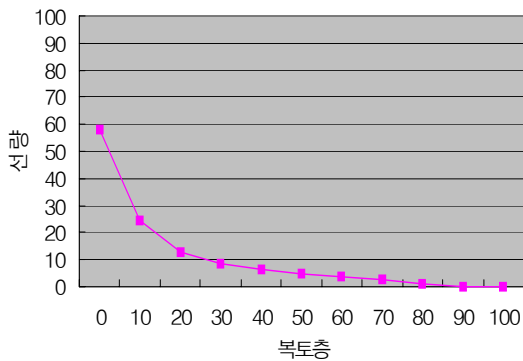


그림 8 거주자 시나리오를 적용할 경우의 복토층 두께별 선량

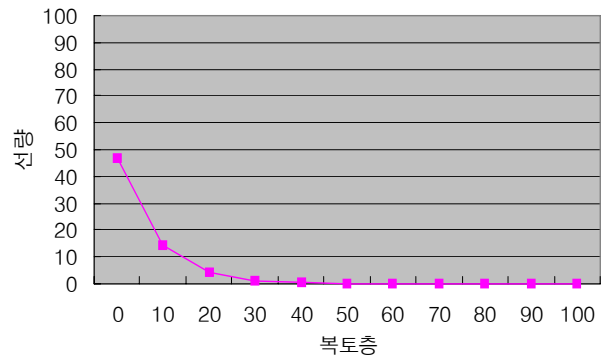


그림 9 작업자 시나리오를 적용할 경우의 복토층 두께별 선량

### 3. 결론

원자력발전소의 운전 과정에서 부지내 방사성 오염토양이 발생하는 경우 오염도가 높은 지역의 토양을 수거하여 단순히 격리관리하고 있다. 그러나 이러한 것은 궁극적으로 방사성폐기물 관리에 불합리하며 특히 원전을 해체하게 될 경우 더 많은 오염된 토양이 발생할 가능성이 있기 때문에 방사능에 오염된 토양의 적절한 제염을 통하여 폐기물 발생량을 최소화시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 오염토양의 제염에 활용되고 있거나 활용 가능성이 높은 여러 가지 제염공정 중에서 특히 물을 이용한 물리적인 토양분리 및 세척방법을 통하여 제염실험을 한 결과를 보여주고자 하는 데 그 목적이 있다. 물을 이용한 제염시 제염폐액이 많이 발생할 것이므로 제염폐액을 재활용하고 2차 폐액 발생을 최소화하기 위하여 폐액 재순환 장치를 고안하여 사용하게 되었다. 제염전 토양의 선량을 측정하여 고선량과 저선량으로 분리하고 입도분리를 거쳐 0.5 mm이하의 토양은 별도로 놓아두고 2.0 mm이상, 2.0 ~ 0.5 mm의 토양으로 토양입도, 방사능 준위, 제염수의 양, 제염시간의 변수를 두고 실험을 수행하였다.

실험 결과 2mm 이상의 입도분리된 토양에 대해서는 초기제염으로 50-80%를, 2.0 ~ 0.5 mm의 저입도에서는 초기제염으로 50%, 반복제염 85%까지 방사능을 줄일 수 있었다.

방사선 오염토양에 대한 핵종 농도별 방출기준을 평가하였다. 제한 선량 0.25 mSv/y 를 기준으로 미국 NRC가 해체 안전성 확인에 사용하는 DandD 코드를 이용하여 Co-60, Cs-137, Sr-90의 허용오염기준을 산출한 결과 미국의 screening 기준과 유사함을 확인하였다.

제염완료된 토양을 대상으로 RESRAD코드를 이용하여 방사선 안전성 평가를 한 결



과 10 ~ 25Cm의 복토층이 필요한 것으로 계산되었다.

원전의 가동연수의 증가와 함께 오염토양의 발생가능성은 증가할 수 있으나 오염된 토양이 생기더라도 입도분리 및 토양의 제염공정등을 거쳐 상당한 제염효과가 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 참고문헌

- [1] 원자력환경기술원, 기술보고서 ‘토양환경방사능 관리기술개발’ 2004.3
- [2] DOE/RL-95-46, Soil Washing Pilot Plant Treatability Test for the 100-DR-1 Operable Unit
- [3] EPA, Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb
- [4] IAEA, Clearance levels for radionuclides in solid materials Application of exemption principles, Interim report for comment, IAEA-TECDOC-855 (January 1996).
- [5] IAEA, International Basic Safety Standards for Protection against Ionization Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No.115 (1996)
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Residual radioactive contamination from decommissioning: parameter analysis. NUREG/CR-5512, vol.3; Washington, DC: 1999.
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Comparison of the models and assumptions used in the DandD 1.0, RESRAD 5.61, and RESRAD-Build 1.50 computer codes with respect to the residential farmer and industrial occupant scenarios provided in NUREG/CR-5512. Draft report for comment. NUREG/CR-5512, vol.4; Washington, DC: 1999.
- [8] 한국수력원자력(주), 고리1호기 최종안전성 분석보고서(FSAR)