Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society
Vol. 1, No. 2, November, 2003

# 사용후핵연료 금속전환공정시설의 방사선환경영향평가

# Radiation Dose Evaluation for Metallization Process Facility of Spent Fuel

국동학, 정원명, 구정회, 조일제, 이은표, 유길성
한국원자력연구소

## 요 약

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 원자력연구소에서는 사용후핵연료인 이산화우라늄을 금속우라늄으로 전환시키는 차세대관리 종합공정(ACP)을 개발하고 있으며 공정의 기초가 되는 핫셀을 설계 중에 있다. 핫셀의 설계에 앞서 사용후핵연료를 취급하게 되는 과정에서 발생하는 방사성물질들에 대한 환경영향평가를 수행하여 시설 운영에 대한 안전성을 평가하였다. 각 핵종별 발생량과 방출량을 계산하고 정상운전시와 사고시의 피폭선량을 평가하여 원자력법관련 규제기준과 핫셀이 위치하게되는 IMEF 건물의 안전성분석 기준보다 매우 안전한 결과를 얻음으로써 시설 운영에 대한 안전성을 확보하였다.

## Abstract

The Advanced spent fuel Conditioning Process(ACP) is under development for the effective management of spent fuel which had been generated in nuclear plants. The ACP needs a hot cell where most operations will be performed. To give priority to the environment safety, radiation doses evaluation for the radioactive nuclides were preliminarily performed in both normal operation and accident case. The evaluation result shows a safe margin for regulation limits and SAR limit of IMEF where this facility will be constructed.

## 1. 서 론

사용후핵연료 차세대관리 종합공정(Advanced spent fuel Conditioning Process)은 고온의 염화리튬용액속에서 이산화우라늄을 금속우라늄으로 전환하고, 고발열성 핵종인 Cs과 Sr을 효율적으로 제거하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 감소시키고, 처분용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2이상으로 축소시킬 수 있는 방안을 제시하고 있다. 이 공정을 실증하기 위한 차폐시설의 확보를 위하여 조사재시험시설(IMEF)의 지하에 있는 예비 핫셀을 공정의 특성 및 용도에 맞게 α-γ 타입의 셀로 설계변경하여 사용하며 이에 따른 시설의 안전성 확보를 위해 실증시설의 운영시 발생하게되는 방사선원들이 주변 주민들에게 미칠 영향을 평가하는 것이 이 연구의 목적이다.

## 2. 평가 방법

2.1 방사선원 결정

차세대관리 종합공정[1,2]은 건식 처리공정이고, 공정에서 필요한 냉각도 불활성 가스인 아르곤(Ar) 가스를 사용하게 되므로 액체 방사성 폐기물은 발생하지 않으며, 기체 및 고체 방사성 폐기물만 발생하게 된다. 핵물질의 취급 기준량을 설정하기 위한 사용후핵연료의 특성은 초기 농축도 3.5wt%, 연소도 43,000 MWD/MTU, 냉각기간 10년을 기준으로 하였으며 한 배치당 20kg, 연간 5배치의 100kg을 취급할 예정이다. 이와 같은 기준을 바탕으로 실증 공정 범위, 공정 운전 개념을 고려한 ORIGEN-II 계산을 수행하여 주요 핵종의 발생량을 표1과 같이 얻었다.

2.2 정상운전시 평가

2.2.1 대기확산인자 결정

대기확산인자의 평가는 미국 원자력규제위원회의 규제기준(NRC Regulatory Guide 1.111)에 제시된 모델[3,4]에 준한다. 본 시설에서 방출될 방사성물질은 하나로의 굴뚝을 통해 외부로 방출되므로 고도방출에 해당하며, 기상관측탑의 67m 높이에서 측정된 자료를 사용한다. 대기확산인자에는 방사성물질의 붕괴와 침적을 고려한 값을 적용할 수 있는데 가장 보수적인 계산을 위해 두 가지를 모두 고려하지 않은 인자를 선택하였으며 구체적인 값은 본 연구소 환경연구팀에서 매년 발간하는 환경영향평가서[5]의 최근 2002년도 값을 적용하였다. 이 평가서에서는 하나로 스택으로 연결된 원자로굴뚝과 RCI굴뚝, 그리고 방사성동위원소 이용연구동과 조사재시험시설쪽에서 이어지는 채널 각각에 대한 대기확산인자값을 연구소 부지 기상자료를 바탕으로 XOQDOQ프로그램을 이용하여 제시하고 있으므로 이 값을 이용하였고 본 핫셀이 건설될 조사재시험시설 채널의 값을 최종적으로 택하여 그 수치를 표2에 나타내었다.

2.2.2 피폭선량 계산방법

주민피폭선량의 계산은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.111에 근거한 GASDOS 프로그램을 통해 수행하였으며 국제방사선방호위원회의 신권고(ICRP 60)를 반영한 선량환산인자를 적용하여 평가하였다. 하나로 스택을 통해 방출되는 주요 핵종의 특성을 고려하여 본 평가에서는 유효선량과 상대적으로 선량환산인자가 높은 중요 장기에 대한 등가선량만 고려하였다. 방사능운에 의한 외부피폭의 경우 실효선량은 국제원자력기구의 기본안전기준 (IAEA Safety Series 115)에 제시된 선량환산인자를, 공기중 흡수선량과 피부선량은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 값을 적용하였다. 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우에는 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 선량환산인자 값을 적용하였다.

국제방사성방호위원회와 국제원자력기구에서는 6개의 연령군으로 분류하고 있으나 최대 피폭 연령군과 최소피폭 연령군의 피폭량 차이가 작으므로 본 평가에서는 4가지 연령군을 고려하였다.

2.2.3 정상운전시 평가 결과

위에서 결정한 방사선원과 평가방법을 통하여 ACP 공정의 실증시설 주변 주민의 최대피폭선량을 각 연령별, 피폭장기별로 구하여 가장 큰 값을 기준으로 규제치와 비교한 결과를 표3에 나타내었다. 이 표에서 공기중 베타흡수선량, 감마 흡수선량, 외부피폭에 의한 유효선량 및 피부 등가선량은 Kr-85가 주된 원인으로 공정중 발생량이 전량 환경으로 방출된다는 가정 하에서도 안전한 수치를 보이고 있다. 장기등가선량은 Sb와 Ru이 영향을 미친 소아 연령군의 소화기에서 최대 수치를 나타냈으나 이 역시 규제기준에 못 미치는 결과를 나타내었다.

2.3 사고시 평가

2.3.1 사고 선정 및 방사선원 계산

핫셀의 운영중에 발생 가능한 사고를 도출하기 위해서 사용후핵연료를 취급하는 기존시설들의 안전성분석보고서에 기술된 사고의 종류를 참조하여 우라늄 분말로 인한 분진 폭발, 핵분열생성물의 붕괴열에 의한 위험, 배기덕트 파단사고, 배기팬실 및 핫셀내 화재 등을 고려하였고 결과적으로 핫셀내 화재를 제외하고는 차세대관리 종합공정의 도입으로 인해 사고해석의 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되므로 본 연구에서는 사고 발생시 가장 큰 영향을 미치는 핫셀내 화재의 경우에 초점을 맞추었다. 이 경우 보수적 계산을 위해 핫셀내의 배기필터에는 최대 5 Batch 분의 핵연료를 취급할 때 발생하는 방사성물질이 최대로 축적되어 있는 것으로 고려하고 단기 대기확산인자 적용을 위해 불활성기체는 2시간 이내에 전량 방출되는 것으로 가정하였다. 위와 같은 가정 하에서의 방사성물질의 방출량을 표4처럼 계산하였으며 포집이 불가능한 불활성기체와 I-129는 화재시 생성된 전량이 방출되는 것으로 고려하였고 방사성입자에 대해서는 HEPA 필터의 효율을 99.97%(제염계수 1000)로 적용하여 하나로 스택 밖으로의 최종 방출량을 결정하였다.

2.3.2 단기대기확산인자 및 호흡률 결정

사고시에는 단기간의 빠른 대기확산인자를 적용함으로써 보수적인 평가를 수행하게 되며 시설부지에서 측정된 기상자료[5]를 바탕으로 사고의 특성상 2시간 이내에 모든 방사선원이 방출한다는 가정과 더불어 사고시 방사성 물질은 유일하게 하나로 스택을 통해 방출되므로 고도방출 모델을 적용하였다. 본 평가에서는 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.145에 따라 개발된 PAVAN 전산프로그램을 사용하여 단기대기확산인자를 계산하였으며 방출지점주위의 지형효과를 고려하였다. 방향별 최대의 x/Q 값을 갖는 거리에 대한 대기확산인자값을 각각 Nonfumigation 조건하에서의 소구역별 대기확산인자($(x/Q)_{99.5}$), Fumigation 조건에서의 소구역별 대기확산인자($(x/Q)_f$) 및 모든 방향에 대한 대기확산인자($(x/Q)_{95}$)를 구하고 이 중에서 최대 값인 W 방향 400m 지점의 값 $1.38\times10^{-2}$을 적용하였다. 방사성운 내에서의 호흡에 의한 내부피폭 유효선량 환산인자와 갑상선 등가선량 환산인자는 국제방사선방호위원회의 신권고(ICRP 60)에 따른 값을 택하였고 사고기간 동안의 호흡율은 US NRC Regulatory Guide 1.4에 제시된 $3.47\times10^{-4}m^3/sec$를 적용하였다.

2.3.3 사고시 평가결과

사고시의 최대개인 외부피폭선량을 표5에, 피폭선량 기준 및 피폭선량 계산결과를 표6에 나타내었다. 외부피폭의 경우 Kr-85가 전량을 차지하는데 핫셀내 화재발생시 불활성기체는 핵연료봉내에 있는 양까지 모두 방출됨을 가정했음에도 불구하고 규제치에 못 미치는 것을 알 수 있다. 내부피폭의 경우 유효선량은 H-3과 입자상 방사성물질인 Ru-106의 영향이 가장 큰 것으로 나타났고 갑상선 등가선량은 반감기가 긴 I-129이 주된 원인으로 나타났다. 그러나 표6에서 보는 바와 같이 핫셀내의 화재시 발생하는 방사선누출에 따른 본 연구의 결과 값은 관련기준[6,7]에서 제시한 제한 치와 핫셀이 건설될 조사재건물의 설계기준에 훨씬 못 미치는 안전성을 보여준다.

## 3. 결 론

본 환경영향평가를 통해 사용후핵연료를 금속전환하는 과정에서 발생하는 방사성물질들에 의한 주민피폭선량은 정상운전시와 가장 보수적 사고시 모두 관련법규상의 기준치를 만족하며 향후 시설운영의 안전성 확보에 중요한 판단자료로서 평가된다.

표 1. 주요 핵종별 선원 및 방출량

| 핵종 | 선원 (Ci) | 방출량 (Ci) |
|---|---|---|
| H-3 | 5.76E+01 | 5.76E-02 |
| C-14 | 7.55E-02 | 1.74E-03 |
| Kr-85 | 6.21E+02 | 6.21E+02 |
| Ru-106 | 7.82E+01 | 2.30E-03 |
| I-129 | 4.10E-03 | 4.10E-05 |
| Sb-125 | 1.529E+02 | 4.50E-02 |
| Cs-137 | 1.08E+04 | 7.45E-03 |

표 2. 정상운전시 대기확산인자 및 침적인자

| 방위 | 거리(km) | 지역 | x/Q ($sec/m^3$) | $(x/Q)^D$ ($sec/m^3$) | $(x/Q)^{DD}$ ($sec/m^3$) | D/Q ($m^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| w | 0.8 | 부지경계 | 1.308E-4 | 1.278E-4 | 1.186E-4 | 6.353E-8 |

표 3. 정상운전시의 규제기준과 평가 결과의 비교

| 평가 항목 | 기 준 (mSv/yr) | 평 가 (mSv/yr) | 분율 (%) |
|---|---|---|---|
| 공기중 베타 흡수선량 | 0.20 | 5.05E-02 | 25.11 |
| 공기중 감마 흡수선량 | 0.10 | 4.43E-04 | 0.44 |
| 유효선량 | 0.05 | 5.35E-04 | 1.07 |
| 피부 등가선량 | 0.15 | 3.49E-02 | 23.23 |
| 장기 등가선량 | 0.15 | 2.67E-02 | 17.78 |

표 4. 핫셀내 화재시 주요방출선원

| 핵종 | 사고시 부유선원(Ci) | HEPA 여과기 DF=1000 | 방출선원 (Ci) |
|---|---|---|---|
| H-3 | 5.76E+01 | 1.000E+00 | 5.76E+01 |
| C-14 | 1.74E-03 | 1.000E+00 | 1.74E-03 |
| Kr-85 | 6.21E+02 | 1.000E+00 | 6.21E+02 |
| Tc-99 | 1.65E+00 | 3.000E-04 | 4.95E-04 |
| Ru-106 | 7.74E+01 | 3.000E-04 | 2.32E-02 |
| Sb-125 | 1.50E+02 | 3.000E-04 | 4.50E-02 |
| I-129 | 4.10E-03 | 1.000E+00 | 4.10E-03 |
| Cs-137 | 2.49E+02 | 3.000E-04 | 7.46E-02 |

표 5. 외부피폭 선량환산인자와 피폭선량

| 핵종 | 방출선원 (Ci) | 외부피폭 환산인자 (mSv/sec PER pCi/㎥) | 유효선량 (mSv) |
|---|---|---|---|
| Kr-85 | 6.21E+02 | 4.403E-15 | 3.77E-02 |

표 6. 핫셀내 화재시의 피폭선량 평가결과 및 규제치와의 비교

| 구 분 | | 피폭선량 (Sv) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 유효선량 (외부) | 유효선량 (내부) | 장기등가선량 (갑상선) |
| 피폭선량 기준 | 10CFR[7] | 0.25 | 0.25 | 3.0 |
| | IMEF 설계기준 | $2.5 \times 10^{-3}$ | $2.5 \times 10^{-3}$ | $3.0 \times 10^{-2}$ |
| 핫셀내 화재시 평가결과 | | $3.77 \times 10^{-5}$ | $4.76 \times 10^{-4}$ | $1.65 \times 10^{-3}$ |

## 참 고 문 헌


1. 한국원자력연구소, 차세대관리 종합공정 실증시설 개념설계보고서, KAERI/TR-2092/2002
2. 한국원자력연구소, 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, KAERI/TR-2004/2002
3. 한국에너지연구소, 고리 주변 환경종합평가 및 관련모델 개발, KAERI/NSC-397/89
4. 한국원자력안전기술원, 주민피폭선량 평가지침, 1999
5. 황원태 외, 대덕 원자력관련시설의 운영중 방사선 환경영향평가(2002년보)
6. 과학기술부 고시 제2002-23호, "방사선방호 등에 관한 기준"
7. 10 CFR 100.11, "Determination of exclusion area, low population zone, and population center distance."