

2003 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

**ACP 실증에 따른 시설 주변
주민피폭선량 평가**
**Human Radiation Dose Assessment of
ACP Experimentation**

국동학, 정원명, 구정희, 조일제, 이은표, 유길성, 박성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 원자력연구소에서는 차세대관리 종합공정(ACP: Advanced spent fuel Conditioning Process)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. 평가에 필요한 자료들은 공정의 개념설계 보고서와 최근 연구소부지 기상데이터 및 부지특성 자료를 바탕으로 하였으며 기존의 유사한 시설에 대한 평가방법을 참조하였다. 각 핵종별 발생량과 방출량을 계산하여 피폭선량을 계산하였으며 평가결과 원자력법관련 규제기준과 핫셀이 위치하게되는 IMEF 건물의 안전성분석 기준보다 매우 안전한 결과를 얻어 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 was preliminarily performed with the basic concept design report, the meteorological data and the recent site specific data. According to the production and release rate of nuclides, dose evaluations for residents around facility were performed. The evaluation result shows a safe margin for regulation limits and SAR limit of IMEF where this facility will be constructed.

1. 서론

계속적인 원자력발전소의 운영에 따른 사용후핵연료 발생량은 해마다 늘어나고 있지만 사용후핵연료의 저장 및 처분에 대한 최종적인 방안이 마련되지 않아 향후 해결책이 시급한 상황이다. 이에 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 연구를 수행하고 있다.

이 공정을 실증하기 위한 차폐시설의 확보를 위하여 조사제시험시설(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. 방사선원 결정

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

방사성물질이 최종적으로 환경으로 방출되기 전까지는 각종 배기체 처리 장치를 통과해야 하므로 환경방사능에 주요 원인이 되는 핵종들을 중심으로 각 공정별(그림1 참조) 핵종 생성량 예측과 그 핵종 제거에 필요한 제거장치의 설치 및 제거효율 등이 고려되어야 한다. 따라서 먼저 핵종 생성량 예측을 위해 각 공정별 여러 핵종들에 대한 정확한 방사능 물질 수치(그림2 참조)를 작성하여 주요 핵종들의 공정내 발생량을 계산하였다.

공정별로 좀더 자세히 살펴보면 탈피복 및 분말화 공정에서 H-3는 전량 방출되는 반면 Kr, Xe, I의 경우 50%에 해당하는 상당량이 U_3O_8 분말의 기공 또는 matrix 내에 체류할 가능성이 있고 일부는 과량으로 공급된 공기와 함께 방출되며, 이들은 배기체 처리장치를 거쳐 핫셀 배기계통을 통해 배기된다. 일반적인 건식 재처리 공정의 방사선누출 특성에서 알 수 있듯이 건식 재처리공정의 산화·환원공정에서는 700℃의 환원공정을 포함하므로 핵분열가스뿐 만이 아니라 Cs, Te, Rb와 같은 일부의 휘발성 핵종도 방출하나 본 분말화 공정에서는 핵연료의 온도를 500℃ 이하로 억제하므로 Kr, Xe, I, H와 같은 방사성 기체를 제외한 대부분의 휘발성 핵종은 방출하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 분말화 공정에서는 방사성 기체만이 전량 방출하는 것으로 가정한다.

금속전환 공정에서 발생하는 배기체로는 잔류 Fission Gas, 일부의 휘발성 핵종, LiCl이 증발하면서 발생하는 용융염 Fume, 산화전극에서 방출되는 O_2 Gas, Inert Cover Gas 및 Purge Gas로 공급되는 Ar 등이 고려되어야 하며, 배기체 처리장치를 거쳐 핫셀의 배기계통을 통해 배기 된다. 본 공정의 운전온도(680℃)의 설정은 휘발성 핵종의 방출을 억제할 수 있

는 온도를 기준으로 한 것이므로 금속전환 공정에서는 보수적으로 Cs, Ru, Tc, Mo, Se, Rb, Te와 같은 휘발성 핵종만이 1% 방출하는 것으로 가정한다.

주조공정에서 발생하는 Off-gas로는 금속전환체 내부와 표면에 붙어 있던 일부 LiCl이 증발하면서 발생하는 용융염 Fume과 잔류하는 Cs, Sr 화합물, 극히 일부 Fission Gas 등이 고려되어야 하며, 이들은 Cold Trap과 Cs, Sr Trap을 거친 후 Off-gas 처리장치를 거쳐 배기된다. 본 공정에서는 보수적인 평가를 위하여 금속전환체에 잔류하는 휘발성 핵종 및 준휘발성 핵종이 전량 방출되고 기타 핵분열생성물은 0.1%, 우라늄 및 액티나이드 핵종은 0.01% 방출하는 것으로 가정한다.

폐용융염 처리는 성형공정으로서 운전온도가 550℃로 제한되므로 휘발성 핵종을 포함한 대부분의 핵종이 용융염에 잔류할 것으로 예상된다. 보수적인 평가를 위해 폐용융염에 잔류한 핵분열성 핵종은 0.01%, 우라늄 및 액티나이드 핵종은 0.001% 방출하는 것으로 가정한다.

그 다음으로 위와 같이 발생하는 기체 방사물질들을 처리하기 위한 배기체 처리장치가 설치되는데 준휘발성 핵종은 온도구배관, 미립자는 metal wool, 요오드는 Silver Impregnated Zeolite, 삼중수소는 Molecular Sieve 5A로 제거하며 최종적으로 HEPA 필터를 설치하여 미처리된 배기체를 처리한 후 핫셀의 주환기계통으로 방출한다. HEPA필터는 셀 내외로 2개가 설치되지만 보수적 안전성을 위해 1개 (제거효율 : 3×10^{-4})만 적용하였으며 요오드 제거를 위한 활성탄 필터는 1개가 설치된다(제거효율 : 2.5×10^{-3}).

공정에서 발생한 기체상 방사성물질은 위에 기술한 배기체 처리장치를 거쳐 핫셀의 배기설비를 통해 하나로의 스택을 통해 환경으로 방출되므로 환경으로의 방출량은 배기체 처리장치의 제거율에 영향을 받으며 본 연구에서 결정된 중요 방사선원의 방출량을 표1에 나타내었다.

3. 평가 방법

방사선의 피폭의 경로는 크게 외부피폭과 내부피폭으로 나눌 수 있는데(그림3 참조) 외부피폭에는 방사성물질들이 대기로 확산되어 공중의 구름속에 떠 다니는 방사능운과 지표면에 떨어지는 침적의 경우가 해당되고 내부피폭으로는 사람의 호흡을 통한 경우와 채소 및 육류의 섭취로 인한 경우가 해당된다[3-5].

대기확산인자는 방사성물질이 대기중에 확산되는 정도를 나타내며 특히 액체상 방사선 선원이 없는 본 공정에서와 같은 경우에는 공정 전반에 걸친 방사능 영향을 결정짓는 가장 중요한 인자이다. 대기확산인자의 평가는 미국 원자력규제위원회의 규제기준(NRC Regulatory Guide) 1.111에 제시된 모델[4,5]에 준한다.

본 시설에서 방출된 방사성물질은 하나로의 굴뚝을 통해 외부로 방출되므로 고도방출에 해당하며, 기상관측탑의 67m 높이에서 측정된 자료를 사용한다. 기상데이터는 해당 시설을 중심으로 16개의 방위와 반경 80km내의 10단계 거리에 대해 사용하는데 보통 부지경계(약 300m 이내)에서의 값이 최고치를 나타내며 이 값을 이용하게 된다(그림4 참조).

대기확산인자에는 방사성물질의 붕괴와 침적을 고려한 값을 적용할 수 있는데 가장 보수적인 계산을 위해 두 가지를 모두 고려하지 않은 인자를 선택하였으며 구체적인 값은 본 연구소 환경팀에서 매년 발간하는 환경영향평가서[3]의 최근 2002년도 값을 적용하였다. 이 평가서에서는 하나로 스택으로 연결된 원자로굴뚝과 RCI굴뚝, 그리고 방사성동위원소 이용연구동과 조사제시험시설쪽에서 이어지는 채널 각각에 대한 대기확산인자값을 연구소 부지 기상

자료를 바탕으로 XOQDOQ 프로그램을 이용하여 제시하고 있으므로 이 값을 이용하였으며 본 핫셀이 건설될 조사제시험시설 채널의 값을 최종적으로 택하였고 그 수치를 표2에 나타내었다.

주민피폭선량의 계산은 GASDOS 프로그램을 통해 수행하였는데 이 프로그램은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.111에 근거하여 개발된 전산프로그램 GASPARD를 한국원자력안전기술원(KINS)에서 우리나라의 실정에 맞게 수정·보완한 것이다[5]. 최근 과기부 고시[6]에서 국제방사선방호위원회의 신권고(ICRP 60)를 법제화하면서 새롭게 반영한 선량환산인자를 적용하여 평가하도록 규정하고 있으므로 본 평가에서도 그와 같은 선량환산인자를 적용하였다.

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.

국제방사선방호위원회와 국제원자력기구에서는 6개의 연령군으로 분류하고 있으나 최대 피폭 연령군과 최소피폭 연령군의 피폭량 차이가 작으므로 본 평가에서는 표3와 같이 4가지 연령군을 고려하였고 또한 피폭을 받는 장기로는 전신, 소화기관, 뼈, 간, 신장, 갑상선, 폐 및 피부 등이 있다.

4. 결과

위에서 결정한 방사선원과 평가방법을 통하여 ACP 공정의 실증시설 주변 주민의 최대피폭 선량을 아래 표4와 같이 각 연령별, 피폭장기별로 구하였다. 외부피폭으로는 공기중 부유선원에 의한 피폭과 지표면에 침적된 선원에 의한 값을 고려할 수 있으며 표4에서 보는 바와 같이 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 내부피폭으로는 호흡기관을 통한 호흡과 체소 및 육류, 우유의 섭취가 주된 영향을 미치는 데 각 연령군의 소계는 내부피폭의 합을 말한다.

표4의 내용중 최대개인피폭 개념을 위하여 가장 영향을 크게 받는 장기에 대하여 관련 규제기준과의 비교를 표5에 나타내었다. 표5의 공기중 베타흡수선량, 감마 흡수선량, 외부피폭에 의한 유효선량 및 피부 등가선량은 Kr85가 주된 원인으로 공정중 발생량이 전량 환경으로 방출된다는 가정하에서도 안전한 수치를 보이고 있다. 장기등가선량은 소아 연령군의 소화기에서 최대 수치를 나타냈으며 Sb와 Ru이 주된 원인으로 분석되었고 이 역시 규제기준에 만족함을 알 수 있다. 그 밖에 장기 중 갑상선에 대한 분석을 한 결과 Cs, I, Sb등이 주된 영향을 주는 것으로 나타났다.

방사선 피폭 영향 분석에 있어서 일반적으로 Cs과 I에 대한 평가가 매우 중요한데 본 연구의 결과에서 큰 영향을 미치지 않은 것은 각 공정별 방출량에 대한 설정과 효과적인 배기효율 계산에 원인이 있는 것으로 판단된다. 좀더 자세히 살펴보면 Cs는 여러단계의 공정을 통해 전체 양의 대부분이 폐용융염 속에 잔류하고 단지 2.3% 정도만 금속우라늄과 같이 남아 다음 공정으로 이어져 Cs trap과 HEPA 필터를 통하게 된다. 또한 갑상선에 가장 큰 영향을 주는 핵종으로 알려진 I-129의 경우는 요오드를 제거하기 위한 요오드 trap의 설치로 인해 그 영향을 대폭 줄일 수 있었다.

본 실증시설이 위치하게 될 IMEF(Irradiated Material Examination Facility) 건물에서 방사성물질로 인해 주변거주 개인이 받게되는 방사능피폭량의 법규상 제한치는 유효선량 5.0 mSv/yr 및 갑상선 30 mSv/yr이며 시설의 설계기준치는 법규상 제한치의 1/100로서 전신피폭의 경우 0.05 mSv/yr와 갑상선의 경우 0.3 mSv/yr이므로 본 연구의 계산결과는 이 기준에도 부합되는 것으로 나타났다.

결론적으로 사용후핵연료 차세대관리 종합공정 실증시설의 방사성 물질에 대한 환경영향평가를 통해 시설의 운영중 일반주민에 대한 피폭선량은 법규상의 기준치를 만족한다는 것을 알 수 있으며 시설의 안전성 인허가 확보에 중요한 자료로서 활용할 수 있다.

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. 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. 피폭 연령군

구분	연령 구분	선량환산계수의 계산
성인	17세 이상	성인
십대	11세 - 17세 미만	15세
소아	1세 - 11세 미만	5세
유아	신생아 - 1세 미만	3개월

표 4. 각 연령군 별, 각 장기 별 피폭선량

구분	피폭경로	전신	소화기	폐	간장	신장	갑상선	폐	피부
공기중	외부	5.353E-04	5.353E-04	5.353E-04	5.353E-04	5.353E-04	5.353E-04	1.017E-03	3.485E-02
지표면	외부	4.217E-03	4.217E-03	4.217E-03	4.217E-03	4.217E-03	4.217E-03	4.217E-03	4.841E-03
성인	호흡	3.406E-04	1.985E-04	4.534E-04	1.768E-04	1.432E-04	1.562E-04	2.107E-03	1.177E-06
	채소류	3.749E-03	1.142E-02	9.984E-03	3.523E-03	4.693E-03	4.276E-03	2.588E-03	4.583E-05
	육류	3.410E-04	4.274E-04	3.602E-04	3.387E-04	3.185E-04	3.731E-04	3.123E-04	4.083E-06
	우유	5.080E-05	7.446E-05	6.442E-05	4.826E-05	4.632E-05	7.418E-05	4.357E-05	4.729E-06
	소계	9.235E-03	1.688E-02	1.562E-02	8.839E-03	9.954E-03	9.632E-03	1.029E-02	3.975E-02
십대	호흡	4.222E-04	2.335E-04	4.628E-04	2.247E-04	1.884E-04	1.974E-04	2.777E-03	1.257E-06
	채소류	4.220E-03	1.399E-02	1.053E-02	3.450E-03	3.039E-03	5.247E-03	2.846E-03	5.165E-05
	육류	3.357E-04	4.265E-04	3.526E-04	3.315E-04	3.285E-04	4.109E-04	3.263E-04	4.262E-06
	우유	5.179E-05	7.967E-05	6.465E-05	4.789E-05	4.740E-05	8.910E-05	4.575E-05	4.954E-06
	소계	9.782E-03	1.949E-02	1.616E-02	8.807E-03	8.356E-03	1.070E-02	1.123E-02	3.975E-02
소아	호흡	6.084E-04	5.276E-04	8.878E-04	3.552E-04	2.945E-04	2.296E-04	3.932E-03	1.840E-06
	채소	3.910E-03	2.149E-02	1.396E-02	2.425E-03	1.877E-03	3.547E-03	1.567E-03	5.665E-05
	고기	1.644E-04	3.428E-04	1.821E-04	1.462E-04	1.434E-04	2.091E-04	1.349E-04	4.679E-06
	우유	3.361E-05	8.880E-05	5.381E-05	2.643E-05	2.578E-05	6.192E-05	2.283E-05	5.417E-06
	소계	9.469E-03	2.720E-02	1.983E-02	7.705E-03	7.093E-03	8.800E-03	1.089E-02	3.976E-02
유아	호흡	2.596E-04	3.454E-04	2.967E-04	1.240E-04	9.166E-05	7.399E-05	1.576E-03	7.924E-07
	우유	6.727E-04	1.867E-03	1.246E-03	4.979E-04	4.719E-04	9.662E-04	4.088E-04	6.784E-05
	소계	5.685E-03	6.965E-03	6.296E-03	5.375E-03	5.316E-03	5.793E-03	7.219E-03	3.976E-02

표 5. 규제기준과 평가 결과의 비교

평가 항목	기준 (mSv/yr)	평가 (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

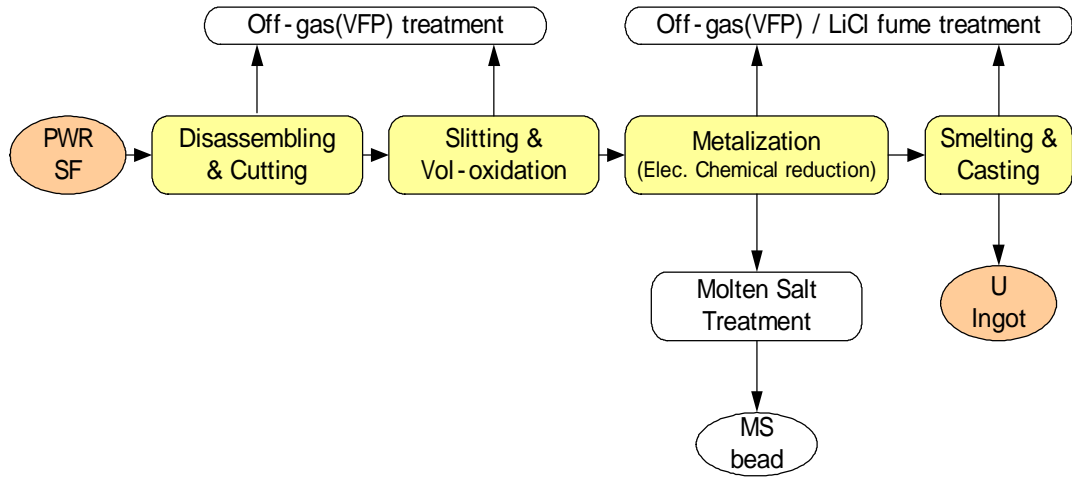


그림 1. ACP 공정 개략도

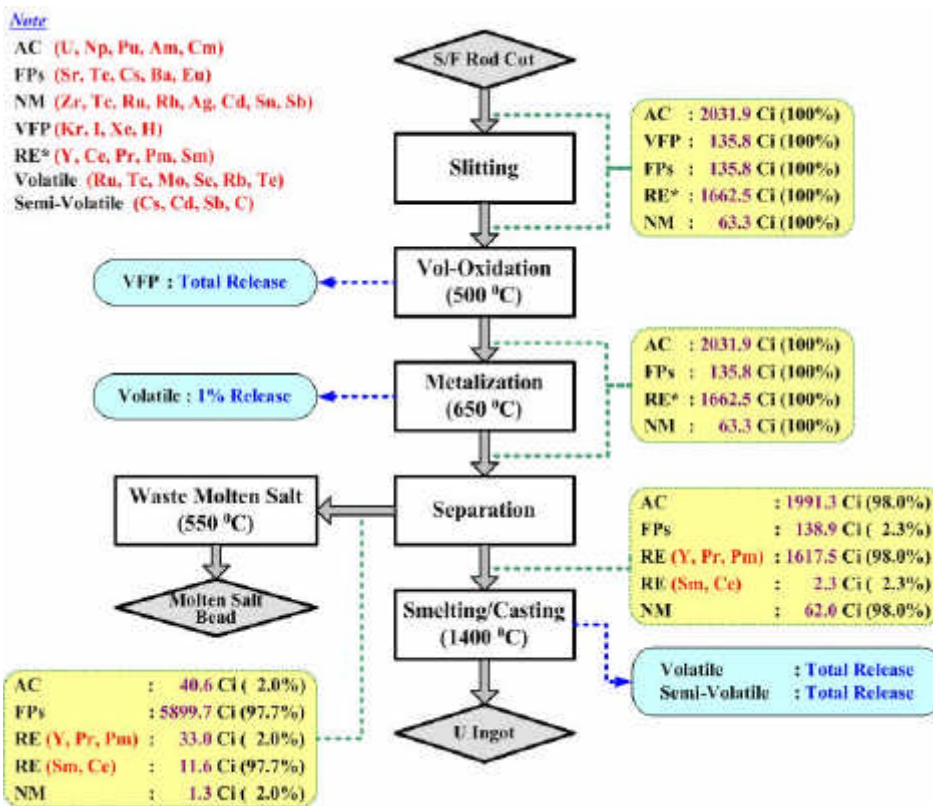


그림 2. 공정별 각 핵종의 방사능 수치

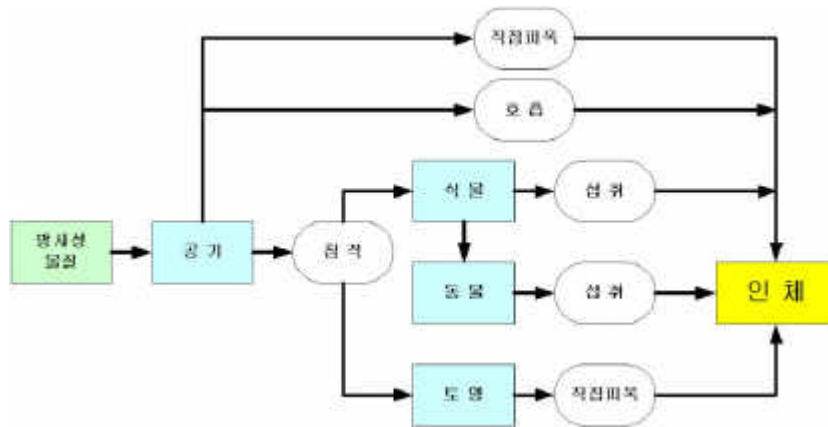


그림 3. 피폭경로



그림 4. 평가 방위 및 거리

참 고 문 헌

1. 한국원자력연구소, 차세대관리 종합공정 실증시설 개념설계보고서, KAERI/TR-2092/2002, 2002
2. 한국원자력연구소, 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, KAERI/TR-2004/2002, 2002
3. 황원태 외, 대덕 원자력관련시설의 운영중 방사선 환경영향평가(2002년보), 2002
4. 한국에너지연구소, 고리 주변 환경종합평가 및 관련모델 개발, KAERI/NSC-397/89, 1989
5. 한국원자력안전기술원, 주민피폭선량 평가지침, 1999
6. 한국방사성동위원소협회, 과학기술부 고시 제2002-23호, “방사선방호 등에 관한 기준”