

원자력 발전소에서의 방사성 폐기물 처리와 환경

—〈中〉—

이 상 혼
한국원자력연구소

PWR의 방사성 폐액 처리

Condensate는 mixed-bed filter나 mechanical gravity filter에 의해 정화 된다.

서로다른 PWR에서 발생하는 방사성폐액의 추정 발생량과 그 방사능 농도를 표 4에 제시했다. 대략 600MWe PWR에서는 16,000 m³ 가량의 방사성폐액이 발생한다고 보고 있으며 Heitmann reports 4)에 의하면 이들의 80%가 하수에 직접 처분되거나, 처리를 하지 않고 약간의 회석만을 함으로써 외계에 방출된다고 한다. 이들의 연간 생성량을 방사능 농도 별로 보면 10⁻⁷μCi/ml가 3,000 m³, 11⁻⁵~10⁻⁷ μCi/ml가 10,000 m³, 10⁻⁶~10⁻⁵μCi/ml가 3,000 m³, 10⁻³μCi/ml가 20m³정도이고 이들 중 약 3,200m³의 양이 evaporator에 의해 매년 처리되고 나머지는 처리 없이 버려진다고 추정하고 있다. 다음 표 5는 600~1,200MWe PWR에서의 방사성폐액의 발생량 처리등에 대한 자료이다.

방사성폐액 처리장에서의 농축분에 대한 발생량 및 방사능 농도는 evaporator에서 600~800 kg solid/yr. 이고 그 방사능 농도는 4~7μCi/g 정도이다. Gravity filter에서는 3,200~4,600kg/gr. 정도의 양이고 그 방사능 농도는 0.1~2.5μCi/g이다. 감쇄 냉각탱크로 부터의 정수과정은 이온교환수지가 충전된 mixed-bed filter를 사용하고 있으며 이온교환수지의 수명은 6.5~1년 정도이고 사용량은 보통 500L, 그 방사능 농도는 1~5 Ci/m³ 정도이다. PWR에서의 1차 순

환수에는 12% 봉산을 첨가한다. 이 봉산을 포함한 냉각제를 evaporator 처리계에서 처리되고 재순환 된다. 이때 봉산은 봉산 저장소로, deionate는 냉각 저장소로 보내진다. 봉산의 약 $\frac{1}{10}$ 정도가 다른 방사성 폐액과 혼합 유출되어 처리된다. 이때 4% 봉산의 20m³ 정도가 연간 회수된다.

4. 고체폐기물

주로 고체폐기물은 사용재 이온교환수지 및 evaporator의 잔유물이라 볼 수 있다. 사용재 이온교환수지는 저장탱크에 반년 정도 저장후 고화제와 혼합하여 고화 드럼통에 충전된다. 이들의 추정 발생량은 연간 드럼통 450~500개 정도이며 기타 고체폐기물이 연간 50드럼 정도 예상된다.

방사성물질의 고화처리는 최종 지중처분 또는 해양투기 방법을 하는데 방사성 안전관리상 중요한 과제이다. 특히 저준위 폐기물은 반드시 고화처리할 필요는 없으나 중준위 폐기물은 가능한 불용성 고화제(Cement, bitumen)등에 의해 고화처치가 원칙이다. 그 특징을 살펴보면 다음과 같다.

즉 Cement 고화처리 방법은 극히 적은 양을 처리하는데 있어서도 비 경제적인 방법의 하나로 되어 있으며 최종 저장처분하는 입장에서 볼 때 Cement고화 처리된 처분량은 다른 처리량보다 비교적 그 수량이 많아 이들의 저장에는 2

차적인 문제점들이 있다. Bitumen 고화처리든 Cement 고화처리 보다 비용이 덜 들며 최종처분도 비교적 적다. 또한 지하 저장시 bitumen 고화처리된 폐기물은 누수율이 극히 적기 때문에 방사성물질의 안전 폐기에 크게 도움이 된다

5. 방사성폐기물이 환경에 미치는 영향

방사성폐기물이 원자력발전소 및 핵연료 재처리공장으로 부터 방출되면 그림 1과 같은 과정에 의해서 방사선 피폭을 받는다. 즉 환경 중에 존재하는 방사성핵종으로 부터 외부피폭을 받고 또한 공기 중이나 수중의 방사성핵종을 호흡이나 음료를 통하여 섭취하므로써 방사성핵종이 직접 체내에 들어 가거나 혹은 그림2와 같은 음식물 섭취 연쇄과정에 의해서 환경 중의 방사성핵종이 체내에 섭취된다.

외부피폭의 선량은 방사성핵종이 어디에 어느 정도 존재하는가를 알면은 비교적 용이하게 계산할 수 있으나 체내피폭은 핵종에 따라 환경원의 이행경로(移行經路)가 다르며, 또 공기, 물, 음식을 통해서 폐, 소화기관에 흡수되는 경우, 흡수된 방사성핵종에 따라 인체 각 기관과의 친화성이 각기 다르며 체외로 배설되기까지의 체유시간 등이 각기 달리 방사성핵종의 물리 화학적 상태나, 방사성핵종이 내부피폭된 인간의 연령, 성별, 기타 생리적 조건에 따라 크게 변화를 가져온다.

5.1. 기체폐기물 방출에 의한 영향

방사성 기체폐기물이 대기에 의해 희석 확산되어 지표나 식물 표면에 흡착하거나 인체에 직접 섭취되어 지고 또한 인체에 외부피폭을 받는다.

방사성 기체폐기물은 대부분 핵연료 재처리 공정에서 대량 배기되고 원자력 발전소에서는 ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{138}Xe , ^{135}Xe , ^{41}Ar , ^{138}I , ^{131}I 등의 반감기가 짧은 여러 핵종이 혼합한 상태로 방출된다.

방사성 Iodine은 발전소 근접지역에서 방부하

고 있는 장소가 있다면 이들은 우유의 오염원이 되어 인체내로 섭취되고, 특히 이러한 우유를 먹는 유아에 대해서 갑상선 피폭이 문제시 되나 우유에 의한 오염원이 아닌 일반적인 조건하에서는 Iodine에 의한 갑상선 장애는 그렇게 위험하지는 않다. 기타 방사성 기체폐기물에 의한 주민의 체외피폭 수준은 대부분 방출 방사성핵종의 반감기가 짧고, 대기 중에서 희석 확산 등에 의해 발전소로부터 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소한다. 또한 방사성 기체의 방출 기준은 개인 피폭 선량의 최대허용치(표6)를 고려하여 배가 시킴으로 문제시 되지 않는다.

미국의 11개소의 원자력발전소에 대해 그 방출에 의한 부지 경계에 있어서의 연간 선량을 계산함과 동시에 발전소 주변의 인구 분포, 풍량, 평균적 기상조건을 고려하여, 발전소로부터 4마일 및 50마일의 원내에 포함되는 집단에 대한 집단선량(1969년도)과 평균선량을 계산한 결과가 <표 7>에 보고되고 있다. 이표의 수치는 사람이 건물내에 있는 시간이나 건물에 의한 차폐를 고려하지 않은 것이므로 실제의 보폭선량보다 높은 값을 보이고 있다. 특히 PWR의 오래된 발전소에서 현저히 높다. 이들을 별도로 하면 50마일 이내의 집단 선량은 거의 1 man-rem/yr의 수준이거나 또는 그 이하로 되어 있다.

^{85}Kr 를 처리하는 기술은 이미 개발되어 있으나 현재 이들의 대부분이 처리되지않고 생성량의 거의 전부가 방출되고 있다. ^{95}Kr 는 반감기도 길고, 해수중에 거의 녹아 들지 않으므로 지구의 대기중에 축적되는 실정이므로 세계의 원자력 시설의 신장을 고려해 볼 때 ^{85}Kr 의 대기 오염은 전 인류의 중요한 피폭 원인의 하나가 될 것이다.

5.2. 액체폐기물 방출에 의한 영향

방사성 액체폐기물은 주로 해양에 방출되어 와동확산(渦動擴散), 대양해류, 조류, 분출 등에 의한 희석 확산과 침전작용 등의 물리적 작용과 해수에 용해돼 있는 여러 핵종들과 방출된

방사성 핵종들이 서로 결합하여 안전한 상태로 되려는 과정과 부유물질과 침전물에 의해서 방사성 핵종들이 흡수 축출되는 여러 화학 작용이 생긴다. 또한 여러 방사성 핵종들이 해양생물계에 직접적으로 흡수되고 한편 각 해양생물의 섭식 습관에 따라 다른 해양생물에 섭취되고 생물학적 과정을 통해 방사성 핵종들이 간접적으로 분포되고 더 나아가서 희석 확산될 수 있다. 이러한 희석 확산 작용은 방사성 물질의 해양 방출에 중대한 요소가 되며 또한 해양 생물계에 미치는 영향이 큼으로 신중히 검토하여야 한다.

방사성 폐기물이 해양에 방출되므로 인하여 방사성 핵종이 해양 생물에 농축되고 인간이 이들을 섭취하므로 직접적으로 체내에 내부피폭을 받게 된다. 한편 연안에 방출된 방사성 핵종들은 어패나 모래, 고기잡이배 등에 오염되어 해안의 인근 주민과 해수욕객들에게 외부피폭을 받게 되고 또한 해조(海鳥)에 의해서도 간접적으로 외부피폭을 받게 된다. 또한 해산물에 방사성 핵종이 농축되어 방사선 장애에 의해서 수산자원을 감소시키기도 한다. 그러므로 해양 생물의 종류 및 그들의 모든 장기 또는 방사성 핵종에 따라 핵종의 농축도는 다양하고 각 해양 생물들은 그들 자신의 고유한 생물학적 농축도를 가진다. 방사성 물질로 오염된 해양에서 서식하고 있는 해양 생물들의 체내에 함유된 방사성 핵종은 그 지역 해수의 방사성 핵종 검출보다 더 높은 값을 보이고 이 농축계수(Fc)는 해양 생물 혹은 그 조직이나 기관의 생조직에 대한 방사성 핵종 농도(C_{MF}; 또는 안전원소량(C'_{MF}))와 생물이 서식하는 해수 중의 방사성 핵종농도(C_{SW}; 또는 안전원소의 농도 C'_{SW})의 비로 나타낼 수 있다.

$$\text{즉 } F_c = \frac{C_{MF}}{C_{SW}} = \frac{C'_{MF}}{C'_{SW}}$$

여러 종류의 해양 생물에 관한 농축계수는 Spooner (1949)⁶⁾, Black와 Mitchel (1962)⁷⁾, Vinogradov(1953)⁸⁾, Ichikawa(1961)⁹⁾ 그리고 Borgston과Paris(1962)¹⁰⁾에 의해서 연구되었고 그 값은 <표 8>에서 보여 준다. 또한 미국의

Chipman, Rice, 영국의 Morgan, Bryan, Bryan, Canada의 Ophel, 일본의 檜山義夫 등에 의하여도 연구한 바 있고 또 해산식물성 plankton(綠藻類, 紅藻類)에 대한 佐伯誠道の 실험에 의하면 농축계수(Fc)는 $^{65}\text{Zn}(\text{Fc}; 10^4 \sim 10^6) > ^{32}\text{P}(\text{Fc}; 10^4) > ^{51}\text{Cr}(\text{Fc}; 10^3) > ^{60}\text{Co}(\text{Fc}; 10^2) > ^{131}\text{I}(\text{Fc}; 10 \sim 10^2) > ^{137}\text{Cs}(\text{Fc}; 10)$ 의 경향을 보여 주고 있다. 이와 같이 방사성 핵종의 농축율이 차츰 밝혀지고 있으나 해양 생물의 종류와 핵종에 따라 매우 변화가 크고 그 변위는 0.1~80,000 정도이다. 또한 실험 방법과 지역에 따라서도 다르다.

해양 생물의 종류와 신진대사, 장기, 조직, 지역의 특성에 따라 핵종들의 농축 관계는 매우 중요한 요인이고 또한 각 방사성 동위원소의 신체 부하와 해양 생물의 생리적 조건에 크게 관계된다.

같은 연안 해역에 폐액을 방출하는 예가 많은 영국에는 비교적 방출량이 많으므로 식용되고 있는 해양 생물 등에 방사성 핵종이 항시 검지되고, 이를 섭취하고 있는 집단과 그 피폭 수준도 상당히 잘 조사되어 있다.

Bradwell 발전소의 ^{65}Zn 의 매월 방출량은 약 50mCi, 방출구에서 약 500 m 떨어진 수역에서의 농도는 약 $5 \times 10^{-5} \text{PCi/ml}$ 이고 이곳에서 서식하는 굴의 농축계수는 약 100,000 ^{65}Zn 으로 굴에 있어 5 PCi/g의 농도는 약 5 PCi/g이다. 이러한 굴을 매월 75g씩 먹어 온다면 그 사람이 받는 전체 선량은 연간 약 1 mrem이 된다고 보고 있다. 오염된 굴을 매일 25g씩 먹는다는 것은 특수한 예이겠지만, 음식물 섭취 연쇄과정을 통해서 내부피폭의 계산에 있어서는 핵종의 이행 경로, 음식물의 종류, 섭취량에 대해서 가장 영향이 크게 나타나는 경우를 생각해서 선량의 최대치를 구하고 이것이 정하여진 선량 한도 이하로 방사성 핵종의 방출량 관리가 행하여지고 있다.

또한 Windscale 재처리공장과 Calder Hall 원자력발전소의 방사능 감시 결과에 의하면 해양 생물의 오염이 관찰되어 그 방사능 농도는

농도가 가장 높고 연체동물의 조개류가 다음이고 갑각류의 새우, 어류의 순으로 되어 있다. 물고기와 해초의 방사성핵종 농도와 농축계수를 <표 9>와 <표 10>에 제시했다. 해초에는 ^{106}Rn 의 농축율이 높고, Scotland나 Wales 지방의 일부 주민은 해초(*Porphyra umbilicalis*)를 빵과 같이 주식으로 1일에 75g씩 먹는 습관이 있다. 이와 같이 특수한 식생활을 갖은 주민이 매일 오염된 해초를 계속 먹는다면 최대 허용 섭취량의 1/2 정도까지 달하게 됨으로 해초의 방사능 감시를 엄중히 행하여야 할 것이다. Windscale 재처리 공장에서 방출되는 방사성 핵종의 각 해산물에 대한 내부피폭 및 외부피폭의 선량을 <표 11>에 보여 준다. 그리고 Windscale, Bradwell, Hinkley Point, Trawsfynydd 원자력 발전소의 피폭 경로와 Derived Working Limit(DWL)을 종합 정리한 것이 <표 12>이다. 담수 수역에 방출하는 Trawsfynydd의 경우 방사성 폐기물을 방출하고 있는 호수의 담수어 섭취에 의한 선량이 타보다 높으므로 방사성 액체 폐기물 방출 관리를 타발전소보다 더 신중히 하여야 할 것이다.

미국의 원자력 시설의 한 예로서는 Npu 생산용 대형로 8기에서 냉각수와 함께 방사성 액체 폐기물이 Columbia 강에 처분되는 Hanford 원자력 시설을 들 수 있다. 이 때에 배척되는 방사성 액체 폐기물에 포함된 중요 핵종은 ^{24}Na , ^{31}Si , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{56}Mn , ^{60}Co , ^{64}Cu , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{90}Y , ^{131}Cs , ^{239}Np 등이다. Columbia 강의 물고기 오염은 송어무리(White fish)로 가장 현저하게 관측된다. <표 13>에서 본 수 있는 것 같이 ^{32}P 의 농도가 높고 ^{24}Na , ^{65}Zn , ^{60}Co 도 매우 농축되어지고 있다. 송어무리의 생조직에서 방사성 핵종의 최고 농도는 ^{32}P : 2,800PCi/g(생조직), ^{65}Zn : 120PCi/g(생조직)이었다. 만일 이와 같은 오염된 물고기를 매주 1회씩 계속 먹는다면 년간의 피폭 선량은 전신에 40mrem, 소화기관에 약 100mrem가 되며 뼈에는 최대허용 섭취량의 30%가 된다. 한편 Columbia 강 하구 부근의 어패류에서 측정 결과 ^{65}Zn , ^{51}Cr , ^{32}P 가 검성되고 그 농도는 <표 14>와 같다. Columbia 강 하

구 Vancouver 부근에는 굴 양식장이 있고 이들 굴에서 ^{65}Zn 가 $10^{-5} \mu\text{Ci/g}$ 정도로 농축되어 있다. 가령 이와 같은 오염 굴을 ICRP에서 정하는 직업인에 대한 최대허용 섭취량까지 먹기에는 주당 700 Pound(Lb). 원자력 시설 주변 일반 주민의 최대허용 섭취량은 주당 70 Lb를 계속 먹어도 된다.

미국은 최근 수년 동안 환경 보존의 영향에 대하여 범광위한 체제의 필요성을 생각하고 1969년 발효한 국가환경정책법(National Environmental Policy Act)을 제정하였으며 원자력 발전소 근해의 방사능 허용 한계 문제에 있어서는 이 법에서 강력히 규제하고 있는 실정이다. 한편 USAEC는 ORNL에 의뢰하여 원자력 발전소 방사성 물질 배수의 수생물에 대한 피폭선량 추산을 시도했다. BWR 및 PWR의 원자력 발전소에 대해서 얻은 결과는 <표 15>와 같다. 이 계산의 기초가 되어 있는 것은 각 원자력발전소 배수 중 각 핵종의 농도이며 이들 핵종이 수생생물에 대한 농축계수를 적용하여 얻은 최대 농도에 의해서 체내 피폭선량을 산출한 것이다. 더욱이 수중에 존재하는 방사성 핵종의 농도는 체내 피폭농도에 해비 무시할 정도로 적다. 식물, 연체동물 갑각류, 어류 수조(水鳥) 등은 대체적으로 1 rad/yr 이하이었다. 그러나 그 변화 범위는 1 mrad/yr로부터 62,000 mrad/yr에 걸쳐 크게 변화하고 있다. 이러한 주 요인은 발전소마다 배수 중의 핵종 농도가 크게 다르다는 것이다. 주의해야 할 것은 이 표에 제시한 수치는 실제 피폭 수준보다 과대평가되어 있다. 즉 배수 농도만을 고려하였으며 수역에서의 희석이 고려되지 않았다. 또한 수조(水鳥)에 대한 값은 방사성 폐액 방출 지점에 존재하는 사료생물만을 섭취한다는 조건으로 피폭선량을 계산했다. 이들 수생생물의 피폭선량은 주로 ^{134}Ce , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{131}I , ^{133}I , ^{137}Cs 의 핵종들에 의한 오염으로 발생한 것들이다.

한편 일본의 福井縣 浦底만의 자주색 섭조개에 1PCi/g의 ^{60}Co 가 검지된 때가 있으며 또 도미류의 소화 기관 내용물에서 120 PCi/kg의 ^{60}Co 가 측정된 경우가 있으나 근육 등에서는 검지한

계 이하이었다. 이들은 매일 100 g씩 연간 먹어 온다고 가정할 경우 피폭 수준은 소히기관에 1.4 mrem/yr. 전신에 0.2 mrem/yr 이다.

각국 원자력 발전소의 방사성 폐액방출량 방사능 농도, 방출 지역의 특성은 물론 방사성 핵종의 오염 지역에 사는 수생 생물은 다양하고 각 나라마다 음식을 섭취하는 습관도 다르다. 그러므로 방사성 핵종이 오염된 음식물의 섭취와 방사성 오염 지역에서의 작업 행위를 고려하여 최대 허용 섭취량을 작업 시간 또는 일일 섭취량으로 제하여 얻은 Derived Working Limit

(DWL)

$$\text{즉 } DWL = \frac{1}{10} \times (\text{MPC}) \omega \times 2,200 \times \frac{1}{a} (\mu\text{Ci/g or hr})$$

주 : $\frac{1}{10} (\text{MPC}) \omega \times 2,200$: 최대 허용 섭취량

a : 작업 시간 또는 일일 섭취량을 권고하고 있다. 예로서 영국의 제처리 공장(Wind-scale)에서 방사성 핵종의 각 해산물에 대한 DWL를 <표 12>에 제시한 바와 같다.

영국과 미국의 여러 학자들은 물고기군에 대한 저준위 방사선 조사(放射線照射)¹⁴⁾에 관한 연구를 시도하였으며 다음과 같은 점을 지적하고 있다.

i) 현재까지의 대부분 연구 조사는 급성방사선피폭에 의한 것이 대부분이고 해양 환경 내에서 만성적으로 조사(照射)되는 해양 생물의 방사선 선량에 대해서는 큰 관심을 갖이고 있지 않았으며 오염된 물 속에서 방사선 조사에 의한 생태에 대해서는 보문이 매우 적다.

ii) 저준위 방사선 조사시는 같은 종류의 종족과 발전 과정의 종족 사이에는 고려할 만한 차이점이 존재한다.

iii) 급성방사선 조사에 있어서는 성장이 덜된 형태가 성장이 된 형태보다 방사선 선량에 대해 더 많은 장애와 유전적인 장애를 받는다.

체내적인 장애와 유전적인 장애를 받는다.

iv) 체내적인 장애와 유전적인 장애에 대한 방사선 준위는 주목할 만하게 다르다.

v) 소련 과학자들은 해양 물고기에서의 방사선 장애에 관해 10^{-10} Ci/l 만큼 적은 ^{90}Sr 의 농도를 검출할 수 있다고 주장하고 이 수치는 해수의 ^{40}K 의 준위 같은 정도이다.

또한 해양 생물의 방사선에 의한 난(卵) 발생의 영향에 대해 비교한 것을 <그림 3>에 도시했다. 즉 Polikarpov 등은 흑해의 어류종의 알을 각기 다른 농도 ^{90}Sr - ^{90}Y 의 해수에 사소한 경우 10^{-10} Ci/l 이상에서 배발생(胚發生)이 높고, 10^{-7} Ci/l 이상에서는 배(胚)의 사망율이 상승하고 치어(稚魚)의 체장(體長)이 소형히됐고, 10^{-8} Ci/l 이상에서 배기(胚期)의 세포분열 능력이 저하되고 염색체의 이상 증가를 보였고, 10^{-9} Ci/l에서는 기형치어의 발생율이 증가된다고 보고되었다.

Fedrov는 해수 중에 있는 송어알을 농도 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ Ci/l의 ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{137}Cs 핵종에 사육한 결과 기형 발생율이 높다고 기술했다. 그러나 Templeton 등은 송어알을 방사능 농도 $10^{-10} \sim 10^{-4}$ Ci/l인 ^{90}Sr - ^{90}Y 의 해수에서 사육하여 부화율, 기형 발생율을 본 결과 다같이 차이를 본 수 없었고, Seynour도 굴의 알을 농도 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ Ci/l인 ^{65}Zn , ^{51}Cr , ^{90}Sr - ^{90}Y 핵종이 녹아 있는 해수에서 사육 결과 ^{65}Zn 와 ^{51}Cr 에서는 10^{-4} Ci/l 이상에서, ^{90}Sr - ^{90}Y 에서는 10^{-3} Ci/l 이상의 농도에서 비로서 기형 발생을 볼 수 있었다고 보고되고 있다. 또한 일본의 檜山 등은 도미의 알을 농도 $10^{-12} \sim 10^{-3}$ Ci/l인 ^{90}Sr - ^{90}Y 해수에 사육했으나 부화율, 기형 발생율에 차이를 찾아 보지 못했고 자주색섬계(雲丹), 붉은색섬계의 알에서도 10^{-4} Ci/l 까지 pluteus(발생 단계의 제 1시기의 명칭)에서는 성장율에 차가 없고 10^{-3} Ci/l에서 비로서 pluteus가 되는 것이 거의 없어짐을 관찰했다. 한편 秋田 등은 붉은색섬계, 자주색섬계의 알을 농도 $1.8 \times 10^{-7} \sim 1.8 \times 10^0$ Ci/l 범위의 중수($^3\text{H}_2\text{O}$)에 사육한 결과 pluteus 형성

울을 붉은색섬계가 10^{-1} Ci/l에서 자주색섬계가 5×10^{-5} Ci/l에서 각각 50%로 저하되었으며 자주색섬계는 1.8×10^{-6} Ci/l에서 이미 Pluteus형 알의 저하가 시작됨을 볼 수 있었다. 또 江上 등은 방사능 농도 10^{-6} , 10^{-5} , 5×10^{-6} Ci/l인 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 핵종을 갖은 담수에서 killifish 알을 사육하여 사망을 및 이상배(異常胚) 발생율을 관측한 결과 다같이 별다른 차이를 인정하지 못했다. 그러나 그대로 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 사육수에서 사육을 계속하면 부화 후 54일째 및 70일째의 체중을 비교할 경우, 발생이 저해되는 경향을 볼 수 있었다. 그리고 70일째의 난소는 약간 이상을 볼 수 있고 정소에서는 그의 정자 형성이 현저히 저해되어 있었다. 이와 같은 성어(成魚)에서도 볼 수 있어 killifish을 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Ci/l의 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 에 사육하여 15일과 30일째에서의 관찰 결과는 10^{-6} Ci/l 이상에서 정소가 완전히 파괴되어 있었다고 한다. 단 10^{-7} Ci/l에서는 정소가 파괴되는 결과를 볼 수 없었다. 그러나 이들의 농도는 발전소 배수가 나오고 있는 해수의 농도보다 훨씬 높은 것이라 생각된다. 그리고 얼마간의 영향이 있다 하더라도 해수 중에서 급속히 확산 희석되기 때문에 극히 한정된 범위일 것이다.

5.3. 방사성 물질의 방출 허용 농도

인간 환경에서의 방사성 물질에 대한 영향은 간단하지 않다. 더구나 해양에 서식하고 있는 어류 plankton 해초, 여러 가지 미생물 및 인간에 체내에서의 방사성 동위원소의 화학적 특성에 따른 물리학적, 생리학적으로 복잡함으로 해양에서의 방사성 동위원소의 방출에 대한 허용 기준치의 설정에는 해양화학, 미생물 및 해양성 생물에 대한 충분한 조사 연구가 수행되어야 한다.

실제로 방출 기준의 허용 농도는 비방사능 농도(specific activity: 같은 조건하에 화학원소의 총 동위원소에 대한 방사성 동위원소의 비, mm/g)로서 규정하고 있는 것이 보통이다. 인체와 타 생물에서의 여러 원소들이 생리학적인 변

환 과정에 관한 자료는 각 장기에서의 안전 동위원소의 분포와 일일 섭취량을 알아 내므로서 그 원소의 생물학적 반감기를 계산할 수 있다.

I. C. R. P. Hand Book 52¹⁵에서는 다음 원리를 진술했다. '인체 자체는 동위원소를 분리할 수 있는 기능이 없으므로 만약 안전 동위원소나 방사성 동위원소들의 화학 형태가 같다면 체내에서의 방사성 동위원소는 안전 동위원와 동일한 행동을 취한다고 볼 수 있다. 즉 섭취, 체내에서의 분포 생리학적 배설은 방사성 동위원소나 안전 동위원소나 반듯이 똑같은 과정을 받는다.' 미국 방사선 방호위원회에서 비방사능을 제정하는데 있어서 인체내에서의 화학 원소의 분배에 대한 자료는 안전 원소의 자료를 우선적으로 고려하였고 각종 방사성 동위원소의 방사선 신체 부하에 대한 허용 부하치는 다음과 같은 점을 고려하였다. 즉 방사선의 형태와 energy, 방사선 감수도, 원소의 물리학적 반감기, 그리고 주된 자원소이다. 일반적으로 신체 내의 흡수 및 각 기관의 조사 과정에서 방사성 동위원소의 소비는 제한되어지고 체내에 방사성 동위원소의 흡수로서 생기는 장애는 인체 내에서 각 원소에 대한 허용 비방사능을 넘지 않는 한 허용 신체부하를 초과하지 않는다는 사실이 명백해졌다. 또한 체내의 흡수가 아닌 소화기관의 조사로 말미암아 생겨나는 장애에 있어서는 식용 해산물의 각 성분 원소에 대한 비방사능을 초과하지 않는 한 이들 성분 원소들에 대한 최대 허용 농도(MPC)를 넘지 않는다는 사실도 명백하다.

해수 중의 방사선 허용 농도를 결정하는 데는 다음과 같은 문제를 고려해야 된다고 본다. 즉 해양 생물들이 성장하고, 발생하고, 서식하는 지역에 있어서 해수 중에 존재하는 원소들의 비방사능은 인간이 섭취하는 해산물 내의 핵종들을 허용 비방사능치 이하로 줄인 수 있다면 각 개인이 받는 방사선량은 해산물을 섭취하더라도 허용치 이상을 초과하지 않는다. 그리고 안전 동위원소나 방사성 동위원소나 체내에서 동일한 행동을 할 수 있고 체내의 비방사능이 해수 중

의 비방사능과 동일하다면 체내의 의계는 쉽게 평형 상태에 도달한다는 것을 알 수 있다.

또한 방사성 폐액의 해양 방출로 인한 인간이 받는 낮은 내부 조사 선량에 대한 이유에 대해 Isaacs¹⁶⁾는 흥미있는 관측을 보였다. 즉 인간 체내에서 보편적으로 잘 농축되는 I, Ca, Sr 등의 원소들은 해양 생물계에 매우 풍부하게 존재하고 또한 이들 원소들의 방사성 동위원소는 결과적으로 매우 쉽게 희석되고 한편 해양 생물계에는 매우 드물게 존재하나 해양 생물에 의해서 주로 농축되는 Co, Fe, Zn, Vd, Ni 과 같은 원소들은 인체 내에서 매우 짧은 생물학적 반감기를 가졌으므로 결과적으로 이들 원소들에 의한 체내에서의 방사선 효과는 쉽게 약화된다.

일본 원자력 연구 협회에 의한 해수 오염 영향, Isaacs-NAS 에 의한 해수 중 최대 허용 농도 및 Prithard-NAS 에 의한 방사선 핵종의 해수 허용 농도를 결정하는 여러 식을 유도해 냈고, 또한 미국 원자력 위원회에서 위촉 연구된 방사성 물질의 해수 중 방출에 대한 NAS-NRC-985¹⁷⁾ table 1-B 의 MPCC(해수의 최대 허용 농도) 범위를 보면 <표 16>과 같다. 이 표는 인체의 최대 허용 부하량을 장기와 급소 기관의 최대 허용 비방사능에 인자 $\frac{K+B}{B}$ 를 곱했고(K: 원소의 물리학적 붕괴상수, B: 원소의 생물학적 붕괴상수) 또한 음료수의 최대 허용 농도는 해산물 내의 안전 원소의 최대 비방사능에서 유도해 냈다.

실제에 있어서 저준위 폐액 속의 핵종의 구분은 아주 정확하게 파악하기는 힘들다 개략적인 방사능도를 측정함으로써 보편적으로 방사능 허용 농도를 알아낼 수 있다. 따라서 폐기물의 해양 방출에 있어서 핵종을 충분히 알고 있는 방출 기준은 물론, 방출 성분을 일부 알거나 전연 미지 핵종을 포함한 폐기물 방출에 대한 기준치

를 설정하는 것이 매우 중요하다. <표 16>을

보면 ^{32}P , ^{59}Fe , ^{106}Pa , $^{114\text{m}}\text{In}$, $^{127\text{m}}\text{Te}$, ^{210}Po , ^{231}U , ^{239}Pu , ^{241}Am 등의 핵종을 제외한 대부분의 핵종들의 최대 방출 허용 농도(MPCCC)는 4×10^{-9} mm/g 보다 높은 값을 가지고 있는 것은 특기할 만한 일이다. 그리고 방사선 폐기물의 해양 방출시에는 다음 경우를 고려해야 한다.

첫째, 방사성 폐기물의 모든 핵종을 충분히 알고 있을 때, 둘째, Critical element 를 포함하고 있지 않을 경우, 셋째, Critical element 를 포함하고 있는지 없는지 전연 몰랐을 경우, 알더라도 전체 방사능도의 Critical element 의 비율 몰랐을 경우, 또한 폐기물 전체의 성질을 몰랐을 경우이다. NAS-NRC-985에서는 첫째의 경우 각 핵종의 MPCC 의 역의 값이 절대 1을 초과하지 않는 방향으로 방출을 제한하고, 둘째의 경우는 해수의 MPCC 농도가 $4.0 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/g}$, 셋째의 경우 MPCC 농도가 $3 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/g}$ 으로 제한 방출을 하여야 한다고 보고하고 있다. 더 추가해서 일반적으로 방사성 폐기물 방출시 방사선 핵종과 동일한 화학형을 가진 안전 동위원소의 존재가 허용 비방사능에 도달하는 데 도움이 된다면 그 방사성 동위원소가 외부 장해와 화학적 특성이 일어나지 않는 한 적정한 양을 첨가 배출할 수 있다.

한편 폐기 물질의 조성, 해수 물질의 특성, 해양 생물의 종류, 인간에 관계하는 습성 방출 관리에 기초를 두고 방사성 폐기물 방출은 가능한 보다 적게 방출하여 어떤 경우에도 ICRP 에서 권고한 농도 이하이어야 하고 원자력 발전소 근방의 주민이 받는 방사선 피폭선량은 30년에 1 rad 이하로 권고하고 있다. 또한 최근 NSAEC 에서 권고하고 있는 방사성 폐액 방출의 방출 허용 정책인 "As low as practicable"의 적용 문제도 아울러 충분히 고려되어야 할 줄 안다.