

방어선 방어의 기본원리

— 중요한 개념과 양의 관점에서 —



權 奭 根

韓國에너지研究所
원자력安全센터

1. 서론

방사선방어에 대한 중요한 개념과 양은 주로 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)와 국제방사선 단위 및 측정위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)등에서 소개 및 정의되어왔다.

여기서는 최근의 ICRP 및 ICRU의 간행물에서 많이 기술되고 있는 주요개념과 양에 대하여 방사선량과 선량제한체계의 두가지 관점에서 간단히 기술하므로써 이 분야에 관심있는 독자들에게 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

2. 방사선량

가. 개인에 관련되는 방사선량

• 조사선량(Exposure dose)

공간중의 방사선장의 강도를 나타내기 위하여 사용되는 단위로서 기호로는 X(Exposure unit) 혹은 R(Roentgen)이 사용된다.

1X는 표준상태의 공기 1kg에 대하여 1C(Coulomb)의 전하를 생기게 하는 방사선의 양이며(1X=1C/kg of air), 1R은 표준상태의 공기 1cm²에 대하여 1SC(Stat coulomb)의 전하를 생기게 하는 방

사선의 양이다.(1R=1SC/cm² of air) 그리고 1X는 388/R에 해당된다.

조사선량은 방사선장의 강도를 나타내는 척도로 사용되기 때문에 주로 감마선이나 X선에 대하여 사용된다.

• 흡수선량(Absorbed dose)

방사선과 물질과의 상호작용의 정량적 평가수단으로 사용되는 말이며, 조사된 물질의 단위질량당 흡수된 에너지로 정의된다. 즉,

$$\text{흡수선량}(D) = \frac{dE}{dm}$$

이고, 여기서 dE는 조사된 물질의 질량 dm에 흡수된 방사선의 평균에너지이다.

흡수선량의 기본단위는 Joule/kg이고 조사대상물은 임의의 모든 물질이며, SI(System International) 단위로는 Gy(Gray)를 사용하고 1Gy=1J/kg이다. 구단위는 rad가 사용되었고 1rad는 100erg/g으로 정의되며, 1Gy는 100rad와 같다.

• 선량당량(Dose equivalent)

인체외의 대상물에 대한 방사선영향을 평가하는 데는 흡수선량의 개념으로도 무난하나 피폭대상물이 인체일 경우에는 적절하지 않을 것이다. 왜냐하면 동일한 양의 흡수선량을 피폭받더라도

조사되는 방사선의 종류와 에너지에 따라 인체에 대한 방사선의 영향을 다르게 나타나기 때문이다.

흡수선량의 조직내 분포특성은 피폭받은 방사선의 종류 및 에너지특성(방사선의 선질)에 따라 달라진다. 그러므로 인체에 대한 방사선방어 목적에는 흡수선량은 적합하지 않으며 여기에 해당 방사선의 선질, 인체내에서의 분포특성등의 인자가 고려되어야 한다. 이들 인자들이 고려된 것을 선량당량(H)라고 하며

$$H \equiv D \cdot Q \cdot N$$

으로 나타내며, 여기서 H는 SI단위인 Sv (Sievert) 단위의 선량당량, D는 Gy단위의 흡수선량, Q는 선질계수(Quality factor), N은 기타 고려되는 수정계수로서 ICRP에서는 1.0을 사용하도록 권고하고 있다. 위의 식에서 Sv의 단위는 J/kg이며, 1Sv = 1J/kg = 100rem이고, D의 단위로 구단위인 rad를 사용하면 H의 단위도 역시 구단위인 rem이 된다.

선질계수는 ICRP에서 물에 있어서의 충돌저지능(Collision stopping power, L_{∞})의 함수로 정의하였고 그 값은 다음 표와 같다.

선 질 계 수

L_{∞} in Water (KeV / μ)	Q
≤ 3.5	1
7	2
23	5
53	10
≤ 175	20

• 실효선량당량(Effective dose equivalent)

방사선방어개념에서 이제까지 논의되어 온바에 의하면 어떤 신체조직이나 장기에 대한 확률적 영향의 발생가능성은 해당 장거나 조직에 조사된 선량당량에 비례한다고 생각하였다. 그러나 실제로 신체의 여러 장거나 조직에 일정한 양의 선량당량이 피폭되었을때 전신에 대한 전체적인 위험의 정도는 같을지라도 각각의 조직이나 장기가 받는 장해정도는 서로 다르게 평가된다. 방사성물질의 인체내부흡착의 경우와 같이 인체의 각 조직이나 장기에 대한 선량당량분포가 균일하지 않을 경우에 있어서 전신에 대한 종합적인 위험을 평가하려면 선량당량의 개념으로는 불충분하여 별도의 정의가 필요하다.

따라서 ICRP는 간행물 26과, 28을 통하여 이에 적합한 양을 정의하였다. 즉,

$$H_E = \sum_T W_T H_T$$

여기서 W_T 는 조직 T의 가중치(Weighting fac-

tor)로서 조직T가 방사선조사로 받는 확률적인 위험의 정도를 나타내며 ICRP에서 권고한 이들 값이 다음표에 나타나 있다. H_T 는 조직 T에 대한 평균선량당량이고 H_E 가 ICRP에서 정의한 실효선량당량이다.

인체조직의 가중치

장기 또는 조직	가중치
생식선	0.25
가슴	0.15
적색골수	0.12
폐	0.12
갑상선	0.03
뼈의표면	0.03
기타 조직 또는 장기	0.30

실효선량당량을 평가하는데 외부피폭이나 내부피폭, 선원의 종류등에는 무관하며 각 조직이 받는 선량당량에 해당 가중치만 곱하여 합산하면 된다.

ICRP에서 권고한 가중치는 사람의 연령이나 성, 방사선작업종사자나 일반인등 모두에게 적용되며, 기타 조직이나 장기에 대하여 0.30의 값을 배정하고 이 값을 기타의 조직중에서 가장 피폭이 많이된 5개 장기 또는 조직을 택하여 각각 0.06의 가중치로 분배하기를 권고하고 있음.

• 예탁선량당량(Committed dose equivalent)

방사선장에서 외부방사선조사로 인한 흡수선량은 피폭되는 시간동안 동시에 인체조직에 전달될 것이다. 그러나 방사선물질이 인체내에 섭취되었을 경우에는 섭취된 핵종의 물리적 및 화학적성질로 인한 신체조직 및 장기와의 친화성, 그 핵종의 물리적붕괴 또는 생물학적인 붕괴등에 따라 각 조직이나 장기가 받는 흡수선량은 다르게 나타날 것이다.

ICRP는 인체내에 섭취된 방사성동위원소로부터 섭취후 50년 동안 어떤 조직이나 장기가 피폭 받는 총선량당량(H_{50})을 예탁선량당량으로 정의하였다. 즉,

$$H_{50} = \int_0^{50} \dot{H}(t) dt$$

로 나타낼 수 있고 여기서 $H(t)$ 는 섭취후의 해당 조직이나 장기가 받는 선량당량이며 적분구간을 50년으로 잡은 것은 통상의 작업수명이 50년 정도이기 때문이다. 다음 그림은 방사성핵종 섭취후의 유효반감기가 긴 핵종과 짧은 핵종에 의하여 해당 조직이나 장기가 받는 선량당량을 나타내며, 사선부분은 예탁선량당량을 나타내고 있다.

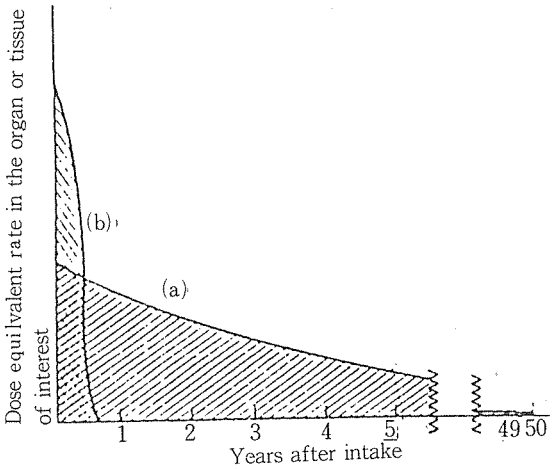


그림. 방사성 핵종의 섭취로 인하여 조직이나 장기가 받은 선량당량률(a: 긴 유효 반감기의 핵종, b: 짧은 유효 반감기의 핵종)

• 예탁실효선량당량(Committed effective does equivalent)

예탁선량당량에 해당장기나 조직의 가중치(W_T)를 고려하여 합산한 것을 예탁실효선량당량(H_{50-E})라 한다. 즉,

$$H_{50-E} = \sum_T H_{50-T} \cdot W_T$$

와 같이 나타낼 수 있고, 여기서 H_{50-T} 는 조직 T에서의 예탁선량당량이다.

예탁실효선량당량은 방사성물질 섭취로 인하여 어떤 개인이나 그의 자손에 대한 만성적 및 유전적 영향에서 오는 위험의 총합과 섭취후 받는 계속적인 위험을 나타낸다.

• 선량당량지수(Dose equivalent index)

방사선장내에 있는 밀도가 1 g/cm^3 인 등가연조직(Phantom이라고 함)으로 된 직경 30cm의 구형 물질내에서의 선량분포중의 최대선량당량은 선량당량지수(H_d)라고 정의하고 이 양을 비제한 선량당량지수(Unrestricted dose equivalent index)라고도 한다. 그러나 한가지 중요한 사실은 방사선원이 구의 표면으로부터 15cm 이내에 있을 경우에는 이 양은 통용되지 않는다. 최대선량당량치는 구내부 어떤 위치에서나 분포될 수 있고 가끔은 구의 중심부에 분포할 수도 있다.

그러므로 투과력이 작은 방사선에 대해서는 이 양을 재음미할 필요가 있다. 즉, 구의 내부 14cm의 길이에서의 최대선량당량과 1cm 길이에서의 최대선량당량을 구분하여 전자를 심부선량당량지수(Deep dose equivalent index)라 하고 후자를 표피선량당량지수(Shallow dose equivalent index)라 하며 기호로는 H_{1d} , H_{1s} 로 표기하고, 이 둘을 제한된 선량당량지수 Restricted dose equi-

valent index)라고 한다. 그리고 심부 및 표피선량당량지수중 큰 쪽이 비제한 선량당량지수가 될 것이다. 한편 표피선량당량지수중 구의 표면으로부터 0.07mm 이내에서의 선량당량은 무시된다. 예를 들어 0.07mm 정도의 피부층은 세포활동이 없는 일종의 죽은 피부로서 0.07mm 범위내의 피부에 대한 방사선의 영향은 무시된다.

나. 공중에 관련되는 방사선량

• 집단선량당량

방사선에 의한 영향은 피폭받은 선량당량에 직접적으로 비례한다. ICRP는 피폭받은 집단의 위해를 적절히 나타낼 수 있는 양을 다음과 같이 정의하였다. 즉,

$$S = \int_0^{\infty} HN(H)dH$$

와 같이 표현되고, 여기서 H는 선량당량, N(H)는 피폭된 선량당량이 H와 H+dH 사이에 있는 사람의 수이다. 이 적분치 S를 집단선량당량이라고 하며 단위로는 man-sievert가 사용된다.

• 집단실효선량당량(collective effective dose equivalent)

집단선량당량은 구하는 식에서 선량당량(H) 대신에 실효선량당량을 사용하면 집단실효선량당량(S_E)이 된다.

• 개인당선량당량(Per caput dose equivalent)

어떤 인구집단이 방사선의 선량분포가 균일한 방사선장에서 피폭되었다면 각 개인에 조사된 선량당량도 서로 같을 것이다. 이 때에는 집단의 각 구성원이 받는 선량당량이 전 집단에 대한 평균 선량당량이 될 것이다. 이 양을 정의하는데 있어서 수학적인 개념으로는 평균선량당량이 되나 방사선방어측면에서는 개인당선량당량으로 정의한다. 그리고 이 양에 가중치를 고려하여 평가한다면 개인당실효선량당량(Per caput effective dose equivalent)이 될 것이다.

그러나 방사선량분포가 균일하지 않은 지역에서의 인구집단 각 구성원에 대한 피폭선량은 서로 다르게 나타날 것이다. 이 때의 개인당선량당량은 집단선량당량을 전체집단의 구성원수로 나누면 얻어진다.

어떤 집단에 대한 미래의 거주특성이나 생활유형등을 예측할 수 있는 경우에는 이 집단 구성원에 대한 미래의 어떤 시점에서의 개인당선량당량치도 예측될 수 있다. 그러나 이 값은 어디까지나 예측치일 뿐이지 실제적인 값은 아니다. 예를 들

어, 어떤 방사선 관련시설에서 방사성물질이 방출되었을때 방출지역에 있는 평균나이 한살 정도의 어린이 집단에 대한 개인당선량당량값을 방출시점 및 방출후 100년동안 계산할 수 있을 것이다. 방출시점에서의 값은 실제적인 값이 될 것이나 방출후 100년동안의 계산값은 어디까지나 가능치일 뿐이다. 이들 값은 이들 어린이 집단에 대한 미래의 영향을 평가하는데 참고자료가 될 것이다.

- 선량당량예탁(Dose equivalent commitment) 피폭이 시간에 따라 변하고 또 장기간 계속될 때에는 피폭의 시간적분이 필요하게 된다. 어떤 행위로인한 집단의 개인에 대한 시간의 함수로 표시된 개인당선량당량율을 $\dot{H}(t)$ 라 할때 이의 무한시간적분치

$$H_c = \int_0^{\infty} \dot{H}(t) dt$$

를 선량당량예탁이라 한다.

이 식에서 적분구간이 $0 \sim \infty$ 인 경우의 값을 비제한 선량당량예탁이라 하고 적분구간이 $0 \sim T$ 인 경우를 절단된 선량당량예탁(Truncated dose equivalent commitment) 또는 불완전선량당량예탁(Incomplete dose equivalent commitment)라 한다. 흔히 방사선관리실무에서는 불완전선량당량예탁치가 이용될 때가 있다. 식에서 개인당선량당량율을 개인당실료선량당량율로 치환하면 실효선량당량예탁(Effective dose equivalent commitment) 을 얻을 수 있다.

- 집단실효선량당량예탁(Collective effective dose equivalent commitment)

어떤 주어진 선원이나 행위에 대한 집단실효선량당량율이 시간에 따라 변한다면 총집단실효선량당량은 시간의 함수인 집단실효선량당량율을 무한시간에 대하여 적분하면 구할 수 있다. 즉,

$$S_{E \cdot c} = \int_0^{\infty} \dot{S}_E(t) dt$$

와 같이 되고, 여기서 $\dot{S}_E(t)$ 는 시간의 함수인 집단실효선량율이고 $S_{E \cdot c}$ 가 집단실효선량당량예탁이다.

집단실효선량당량은 때때로 정당성(Justification) 이나 최적성(Optimization)을 평가하는데 사용되고 집단실효선량당량예탁을 집단에 대한 전체적인 보건상의 위험을 평가하는데 주로 사용된다.

3. 선량제한체계와 관련되는 개념과 양

ICRP는 기본적인 선량제한 체계를 간행물 26을 통하여 다음과 같이 3가지 사항으로 요약 발표하였다.

- 어떠한 행위도 실질적인 이익을 가져다 주지 않으면 행하지 않아야 한다.
- 행위로 야기되는 모든 피폭은 경제적, 사회적 여건을 고려하여 합리적으로 달성가능한 낮게(ALARA) 유지되어야 한다.
- 개인에 대한 선량당량은 ICRP에서 적절한 상황에 따라 권고한 한도를 초과하지 않아야 한다.

위의 3가지 사항을 간단히 정리하면,

- 행위의 정당화(The justification of the practice)
- 방사선방어의 최적화(The optimization of radiation protection)
- 개인에 대한 선량한도(The dose limits for individuals)

가. 정당화(Justification)와 최적화(Optimization)

- 정당화

이 용어의 근본개념을 비용-이익의 분석결과 실질적인 순이익이 있어야 하며 방사선 피폭에 수반되는 모든 행위는 비용-이익의 분석결과에 의하여 결정되어야 한다는 것이다.

원자력 관련산업도 다른 비원자력산업과 비교하여 볼때 근본적으로 이윤을 추구한다는 데는 하등 다를 바가 없다. 비원자력산업에도 산업수행상의 재해, 주위환경상의 문제등 허다하게 문제점이 많으며, 원자력산업에도 유사한 위험이 존재하나 공해와 같은 일반적인 위험요소는 훨씬 적고 단지 방사선이란 일반적으로 잘 알려져 있지 않고 보통의 방법으로는 감지되지 않는 것이 존재하며, 또 일반인에게 핵무기라는 가공할 만한 공포를 연상시키게 한다는 것이다. 그러나 실제로 원자력관련산업과 핵무기와는 관련될 수 없는 것이다.

원자력관련시설도 인간에게 순이득만 가져다 준다면 비원자력산업과 같이 계속 발전되어야 한다는 것이 ICRP간행물 26의 개념중의 하나이다.

- 최적화

이익을 가져다 주는 어떤 행위를 행함에 있어서 그 행위로 인한 방사선피폭은 합리적으로 달성가능한 낮게(As Low As Reasonably Achievable, ALARA) 유지되어야 한다는 것이다.

방사선방어에서 ALARA를 달성하기 위하여 경제적, 공학적 측면에서의 비용-이익이 분석되어야 하고 방어수단 자체에 대한 질적·양적 평가도 되어야 한다.

나. 선량한도(Dose limits)

• 선량당량한도(Dose equivalent limits)

ICRP는 선량제한체계의 일환으로 선량당량한도(일차한도 또는 기본한도)를 직업상피폭자와 일반공중의 구성원에 대하여 분리하여 권고하고 있다. ICRP의 선량당량한도에 대한 권고의 기본 방침을 요약하면 다음과 같다.

- 방사선피폭의 영향을 확실적인 것과 비확률적인 것으로 구분하고 확실적 영향을 달성할 수 있는 한 낮게 유지하여 비확률적 영향을 예방한다.
- 비확률적 영향을 방지하기 위해서는 눈의 수정체를 제외한 전조직에 대한 연간 피폭이 0.5Sv(50rem)을 초과하지 않아야 하고 눈의 수정체에 대해서는 0.3Sv(3.0rem)을 권고하였다.
- 확실적영향의 제한은 정당화와 최적화의 과정을 거침으로서 ALARA를 지향하고 선량당량한도를 초과하지 않도록 함으로써 달성한다.
- 확실적영향에 대한 한도는 과거에는 결정장기(조직)개념에 의거하였으나 이제 피폭받은 조직의 위험도의 총합의 개념에 의하여 설정한다.
- 선량당량한도는 1년간의 체외피폭에 의한 선량당량과 같은 해에 체내에 섭취한 방사성물질로 인한 예탁선량당량의 합을 적용한다.
- 선량당량한도에는 자연방사선에 의한 피폭이나 의료상의 피폭은 포함되지 않는다.
- 선량당량한도는 제어가 가능한 피폭에 대하여 적용하며 사고의 경우와 같이 제어가 불가능한 경우의 피폭은 별도로 취급한다.
- 방사선작업종사자에 대한 연간 섭취량
- 취한도(Annual limit on intake for workers)

방사선작업종사자에 대한 선량당량한도를 평가하는 데는 외부피폭과 내부피폭에 의한 선량당량을 각각 평가하여 합산하여야 한다. 내부피폭에 의한 선량당량 평가는 방사성물질의 섭취로 인한 예탁실효선량당량을 계산하면 되나 섭취한 핵종마다 선량당량을 평가하는 것은 번거롭고 어려운 일이다. 이를 위하여 ICRP에서는 핵종별로

연간 최대가능섭취량을 권고하였고 이를 2차한도 즉, ALI(Annual limits on intake)라 한다. 이 양을 방사성물질의 섭취로 인한 선량당량한도로서의 예탁실효선량당량의 척도로 간주한다. 방사선작업종사자가 매년 섭취하는 방사성핵종의 양은 ALI보다 적게 제한하여야 한다. 이렇게 하면 비록 50년 동안 매년 계속하여 방사성물질을 섭취한다 하더라도 이로 인한 최대 연간선량당량은 선량한도를 초과하지 않을 것이다.

방사선작업종사자가 매년 작업에 종사함으로써 위험은 증가하게 되므로 이 위험을 가급적 제한하여야 한다. 미래에 있어서의 피폭조건이 개선이나 보다 적은 위험요소에 대한 보장은 없다. 이러한 불확실한 점 때문에 ICRP는 외부 피폭에서와 마찬가지로 내부피폭문제에 있어서도 철저한 내부오염의 감시 및 관리와 관련 기록보존등을 강조하고 있다.

실무에 있어서 2차한도량도 선량당량한도를 평가하는데 사용된다. 즉,

$$\frac{H_{i,d}}{H_{E,1}} + \sum_j \frac{I_j}{I_{j,1}} \leq 1$$

$$\frac{H_{i,d}}{H_{sk,1}}$$

이 되어야 하고, 여기서

$H_{i,d}$ = 연간 피폭받은 실효선량당량

$H_{E,1}$ = 연간 실효선량당량한도

I_j = 핵종 j의 연간 섭취량

$I_{j,1}$ = 핵종 j의 연간섭취한도(ALI)

$H_{i,s}$ = 피부가 연간 피폭받은 선량당량

$H_{s,k,1}$ = 피부에 대한 연간 선량당량 한도

이다.

• 공중의 구성원에 대한 연간 섭취한도(Annual limits on intakes for members of the public) ICRP는 방사선작업종사자에서와 마찬가지로 공중의 구성원에 대해서도 ALI를 적용하고 있다. 원자력 시설에서 방출된 방사성물질로 부터의 선량당량 산출은 환경에서의 방사성핵종의 물리적 및 화학적 특성, 유아, 어린이, 성인등과 같은 신체적 크기의 차이, 신진대사작용의 특성등으로 인하여 대단히 어렵다. 공중의 구성원으로서 성인에 대한 잠재피폭기간은 예탁선량당량계산시 적용된 적분구간인 50년으로 보며, 신진대사와 기타 생물학적인 인자는 참고인에 대한 것을 적용한다. 그리고 공중에 대한 위해평가에서도 방사선작업종사자에서와 마찬가지로 가중치가 고려된 실효선량당량이 적용된다. 공중의 구성원인 성인에

대한 ALI는 핵종의 물리화학적 특성과 환경조건이 같은 경우에는 방사선작업종사자의 $\frac{1}{10}$ 로 한다.

평가대상인 공중의 구성원중 유아나 어린이등과 같이 참고인으로 선정된 성인과 생물학적인 조건이 다를 경우에는 장기나 조직의 크기, 신진대사의 특성등이 평가에 고려되어야 한다. 이 경우에도 적분구간은 50년이 적용되고 특별한 경우에도 $\frac{70}{50}$ 의 보정인자를 초과하지 않는다.

- 결정집단(Critical group)

공중의 구성원에 대한 선량한도에는 결정집단의 구성원에 대한 평균실효선량당량이 적용된다. 이 집단은 다른 집단에 비해 가장 높은 선량당량을 받거나 받을 가능성이 있는 집단이며, 집단의 구성원수가 충분히 작아야 하며 나이나 생활습성등이 비교적 같아야 한다. 결정집단에 대한 선량당량을 계산하는데는 방출된 방사성핵종의 피폭경로를 조사하여야 한다. 이때 이 중요 피폭경로를 결정경로(Critical pathway)라 하고 피폭의 주원인이 되는 핵종을 결정핵종(Critical nuclide)라 한다.

적절한 결정집단을 정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 하나의 중요한 결정조건은 결정집단의 구성원의 수이며, 집단에 대한 선량당량한도는 비교적 균질집단에서의 평균선량당량이 적용된다. 일반적으로 결정집단은 일인의 개인도 아닐 것이고 많은 수의 사람 및 동종의 사람일 필요도 없다. 통상의 결정집단의 크기는 20~30명 정도의 수로 구성된다.

- 유도한도(Derived limits)

방사선관리의 실무에 있어서 1차한도 및 2차한도를 직접 적용하는 것은 어려운 경우가 많다. 방사성오염문제등과 같은 경우에는 새로운 양인 유도한도를 적용하는 것이 편리하다. 2차한도인 ALI로부터 유도공기중농도(Derived air concentration DAC)를 산출해 보자. 표준인의 호흡량과 신체

조건을 사용하고 주간 작업시간을 근거로 계산이 가능하다. 즉,

$$DAC = \frac{ALI}{(주간작업시간)(년간작업하는 주의수)(작업시간당호흡량)}$$

와 같이 되고, 이 양을 선정함에 있어 ICRP는 기본근거로 종사자에 대해서는 50mSv, 일반인에 대해서는 5mSv를 적용할 것을 권고하고 있다. 그러나 모든 경우에 있어서 ALARA원칙이 고려되어야 한다. ICRP에서 권고한 ALI와 DAC 값은 간행물 30에 주어져 있다.

- 인정한도(Authorized limits)

인정한도는 방사선방어의 목표를 더욱 적극적으로 성취시키고 ALARA원칙에 부합되게 하기 위하여 규제당국이나 관리층에 의하여 1차 및 2차한도, 유도한도의 범위내에서 결정되는 것이다.

참고 문헌

1. ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1977
2. ICRP Publication 28, The Principles and General Procedures for Handling Emergency and Accidental Exposures of Workers, 1978
3. ICRP Publication 30, Part 1, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, 1979
4. ICRP Publication 42, A Compilation of the Major Concepts and Quantities in Use by ICRP, 1984
5. 하정우, 권석근, 이재기, 전관식, "방사선 방어원리", 한국에너지연구소, 원자력연수원, 1986.