

중수로 계통에서의 C-14 생성량 평가

Estimation of C-14 Production Rates From a Pressurised Heavy Water Reactor

강덕원*, 정근호, 지준화

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

C-14은 감속재 계통(moderator system), 일차 열수송계통(primary heat transfer system), 환형 기체계통(annulus gas system)에서 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$, $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 생성된다. C-14은 49.5keV의 평균에너지와 156keV의 최대에너지를 갖는 β 선을 방출하며 붕괴한다.

일반적으로 C-12, C-13은 안정된 탄소 동위원소로 천연존재비가 각각 98.9%, 1.1%이며, C-14을 제외한 다른 동위원소들은 반감기가 매우 짧아 인체에 흡입될 경우에도 큰 문제는 없다. 그러나 C-14의 경우는 반감기가 매우 길고 일단 체내에 흡입되면 다양한 경로를 통해 인체 각 기관에 영향을 주기 때문에 그 중요성은 매우 크다. C-14 생성량 평가는 발전소 건설을 위한 인허가 시에도 중요한 고려인자가 되고 있으며, 본 논문에서는 중수로인 월성1호기의 운전 특성을 고려한 계통 별 C-14 생성량을 평가하여 보았다.

1. 서 론

C-14은 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$, $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 생성되며 중수 중에는 상대적으로 O-17의 양이 많기 때문에 CANDU형 원자로에서는 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의한 C-14 생성량이 더 많다. 중수로 원자로의 가동과 더불어 소량이나마 지속적으로 대기로 방출되는 방사성 핵종에는 H-3, C-14, 불활성 기체, 방사성 요오드 및 입자성 물질 등이 있으며, 이 중 H-3와 C-14이 대부분을 차지한다. 방출되는 C-14은 주로 $^{14}\text{CO}_2$ 형태이며, 그 외에 2.5~3.4%의 ^{14}C -hydrocarbon과 4% 미만의 ^{14}CO 등의 형태로 존재하는 것으로 알려져 있다.

C-14은 반감기가 5,730년인 탄소의 방사성 동위원소로서 49.5keV의 평균에너지와 156keV의 최대에너지를 지닌 저에너지 β 선을 방출하며 붕괴한다. CANDU형 원전에서는 주로 핵연료, 감속재계통, 일차 열수송계통 및 환형기체 계통에서 C-14이 생성된다. C-14의 주요 생성 반응과 열중성자 단면적을 표 1에 나타내었다. C-13 동위원소의 자연 중 존재 비율은 크지 않기 때문에 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응은 무시할 만 하다. N-14은 열중성자 단면적이 크고 자연 중 존재 비율도 높기 때문에 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응이 중요하며, 특히 환형기체 계통의 경우 C-14의 생성은 대부분 이 반응에 의한다. 그러나, 정상운전 중에 질소는 단지 불순물로 존재하기 때문에 N-14으로 인한 생성량은 상당히 적다. 따라서, CANDU 원자로의 경우 대부분의 C-14은 감속재와 일차 열전달 계통 내의 D_2O 에 존재하는 O-17의 반응으로부터 생성된다.

Table 1. Principal reactions for production of C-14 in CANDU reactors

Target Nuclide	Natural Abundance (%)	Reaction	Thermal Neutron Cross Section	
			(barns)	(cm ²)
O-17	0.037	¹⁷ O(n, α) ¹⁴ C	0.235	2.35 × 10 ⁻²⁵
N-14	99.63	¹⁴ N(n, p) ¹⁴ C	1.82	1.82 × 10 ⁻²⁴
C-13	1.11	¹³ C(n, γ) ¹⁴ C	0.0009	9 × 10 ⁻²⁸

2. 계통내 C-14의 생성 메카니즘

2.1 감속재와 일차 열수송계통에서의 C-14 생성

CANDU형 원자로의 감속재 계통은 260 × 10⁶g의 D₂O를 감속재로 사용하고 상대적으로 높은 열중성자속을 나타내기 때문에 이 계통에서 생성되는 C-14의 양은 다른 계통에 비해서 상대적으로 많다. 90% 출력운전을 하는 CANDU-6형 원전의 감속재에서 ¹⁷O(n, α)¹⁴C 반응에 의해 생성되는 C-14의 양은 약 17.2TBqa⁻¹이다. C-14은 또한 감속재 상층기체로 사용되는 헬륨 기체 내에 불순물로 존재하는 N-14으로부터 생성되기도 하지만 상층기체에는 열중성자속이 상대적으로 낮고 N-14의 함량도 낮기 때문에 이로부터 생성되는 C-14의 양은 적다.

일차 열수송계통에서 C-14은 ¹⁷O(n, α)¹⁴C 반응에 의해서 생성된다. 이 계통에는 총 206 × 10⁶g의 D₂O가 존재하지만 열중성자속이 높은 지역에서의 중수의 양은 단지 6.4 × 10⁶g으로 전체 중수량의 약 3.1%이다. 뿐만 아니라, 이 계통의 열중성자속은 감속재계통의 열중성자속보다 더 낮다. 90% 출력 운전을 하는 CANDU-6형 원자로의 감속재에서 생성되는 C-14의 양은 약 0.3TBqa⁻¹이다. CANDU 원자로의 각 계통에서 단위 전기에너지 당 생성되는 C-14의 양은 일반적으로 표 2와 같다.

Table 2. Comparison of estimated production rates of C-14 per unit electrical energy generated in various systems of CANDU reactors

system	C-14 production rate per unit electrical energy generated in various systems of CANDU reactors ^{*,**} TBq(GW _e · a) ⁻¹	
	Ontario Hydro CANDUs	CANDU-6
Moderator	25	27
PHT	0.5	0.38
Fuel	0.6	0.96
Annulus Gas with Nitrogen	24	
Annulus Gas with Carbon Dioxide	0.03	0.038

*계산에서는 중수의 생성과정중 O-17이 농축되므로 자연 존재비율인 0.037%가 아닌 0.055%를 이용함.

**ACRP-14 report에서 인용한 값임(ACRP, 1995)

생성된 C-14은, 중수내에서 γ 선과 중성자에 의해 방사분해된 후 자유라디칼(free radical)을 생성하여 ¹⁴CO₂, ¹⁴CO 및 ¹⁴C-Hydrocarbon의 형태로 전환되어 존재한다. 이들 화학종 중 일부는 중수와 상부기체인 헬륨사이의 평형에 의해서 분리되고 중수에 용해된 채 존재하는 ¹⁴CO₂는

$D_2^{14}CO_3$, $D^{14}CO_3^-$, $^{14}CO_3^{2-}$ 로 존재 가능한데 정상 운전에서 중수의 pH가 7.0이므로 대부분 중탄산 이온의 형태로 존재한다. 이 이온들은 이온교환수지에서 대부분 제거된다. 중수로는 경수로보다 C-14의 생성량이 훨씬 많은데 그 이유는, 중수내에 존재하는 O-17의 양이 상대적으로 많아서 $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 반응이 잘 일어날 수 있기 때문이다. 그러나 CANDU 원전의 감속재 계통에서 생성되는 C-14의 95%는 이온교환수지에서 제거되는 것으로 알려져 있기 때문에 대기로 방출 가능한 C-14의 양은 $1Bq(GW_e \cdot a)^{-1}$ 정도밖에 되지 않는다.

2.2 환형기체 계통에서의 C-14 생성

CANDU형 원자로에서 칼란드리아 튜브와 압력튜브 사이의 환형공간은 먼저 CO_2 로 채워지고 부피비로 0.5~2% 정도의 산소가 주입된다. 이 기체의 압력은 45~55kPa, 온도는 66°C 이하, 이슬점은 -30°C 정도로 유지되면서 계속해서 순환된다. 환형기체 계통에서 C-14의 생성에 기여하는 반응은 $^{13}C(n, \gamma)^{14}C$, $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$, $^{14}N(n, p)^{14}C$ 인데 이 중 처음 두 반응에서 생성되는 C-14의 양은 각각 $43MBq \cdot a^{-1}$ 과 $510MBq \cdot a^{-1}$ 이다. 그러나 이 계통에 존재하는 C-14의 대부분은 불순물로 존재하는 질소로부터 생성되는데 이는 환형공간에서 열중성자속이 상대적으로 높고 다른 반응에 비해서 $^{14}N(n, p)^{14}C$ 의 중성자 단면적이 높기 때문이다. 질소 불순물이 부피비로 1,000ppm과 5,000ppm 존재한다고 가정하였을 때 CANDU-6형 원자로에서 생성되는 C-14의 계산상의 양은 각각 $0.01TBq \cdot a^{-1}$ 과 $0.05TBq \cdot a^{-1}$ 로 나타났다. 현재 국내 CANDU형 원자로의 경우는 CO_2 를 환형기체로 사용하고 부피비로 0.5~2%의 산소를 주입하므로 대부분의 C-14은 산화된 상태인 CO_2 로 존재할 것으로 예상된다.

2.3 핵연료 중 C-14의 생성

CANDU 원전의 우라늄 연료(UO_2) 중 존재하는 O-17은 C-14 생성의 주요 원인으로, 이 반응에 의한 C-14의 예상 생성량은 $0.59TBq \cdot a^{-1}$ 이다. C-14은 또한 연료에서 삼핵체분열(ternary fission)에 의해서 생성되기도 하며, 핵연료의 제작 중 사용되는 윤활유 중에 존재하는 C-13의 $^{13}C(n, \gamma)^{14}C$ 반응에 의해서도 생성된다. $^{13}C(n, \gamma)^{14}C$, $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$, $^{14}N(n, p)^{14}C$ 반응에 의해서 생성되는 C-14의 양은 연료의 농축 정도, 상대 질량, 연료 중 질소의 농도에 따라서 달라진다. 외국 원자로의 경우, 핵연료에서 생성되는 C-14이 연료관(fuel sheath)안에 포함되어 있으므로 핵연료관에 작은 구멍이라도 생긴다면 C-14이 소량 누출될 것이다. CANDU형 원자로는 이러한 누설을 조기에 검출하고 제거할 수 있도록 설계되었기 때문에 연료로부터 방출되는 C-14의 양은 무시할 수 있다. 그러나, 사용한 핵연료를 재생할 경우에는 상당량의 C-14이 방출될 것이다.

3. 계통내 C-14 생성량 계산

C-14은 대부분 감속재 계통에서 생성되고 일부는 열 수송 계통과 환형기체 계통에서 생성된다. C-14은 또한 핵연료에서도 생성되지만 냉각제로 방출되는 양은 무시할 만 하다. 중수를 사용하는 감속재와 열수송 계통은 O-17의 존재비가 경수로에 비해 높기 때문에 이 계통에서 주로 C-14이 생성된다. CANDU-6형 원자로에서 이산화탄소로 채워져 있는 환형기체 계통은 C-14의 생성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.1 감속재 계통

감속재에서 생성되는 C-14의 95% 이상은 $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 반응에 의해서 생성되고 C-14의 생성량은 다음의 식으로부터 계산되어 진다.

$$P = N \sigma \phi$$

여기서,

N = O-17의 원자의 수

σ = 열중성자 단면적, cm^2

φ = 감속재의 평균 열중성자속, $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$

감속재 중 O-17원자의 수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} N &= \frac{1 \text{ atom O}}{\text{molecule D}_2\text{O}} \times \frac{0.6023 \times 10^{24} \text{ molecule D}_2\text{O}}{20 \text{ g D}_2\text{O}} \times \frac{10^3 \text{ g D}_2\text{O}}{\text{kg D}_2\text{O}} \\ &\quad \times \frac{5.5 \times 10^{-4} \text{ }^{17}\text{O}}{\text{O atom}} \times 2.62 \times 10^5 \text{ kg D}_2\text{O} \times 0.91 \\ &= 3.95 \times 10^{27} \text{ }^{17}\text{O atoms} \end{aligned}$$

여기서, ^{17}O 의 동위원소 존재비 : 5.54×10^{-4} , 감속재의 총량 : $2.62 \times 10^5 \text{ kg}$, 칼란드리아내에서 중성자 속에 노출되는 D_2O 의 비율 : 0.91 임.

$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응의 열중성자 흡수단면적은 $0.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ (0.24b)이다. 칼란드리아내의 총 감속재의 약 70%는 중심영역(core region)에 있고, 나머지 30%는 평균중심반경 외부의 반사영역(reflector region)에 있다. 감속재의 중심영역의 열중성자속은 $2.30 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이고, 반사영역의 열중성자속은 $8.87 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이다. 따라서, 100% 출력운전 중 칼란드리아 감속재내 평균열중성자속은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{평균 열중성자속} &= 0.7 \times (2.30 \times 10^{14}) + 0.3 \times (8.87 \times 10^{13}) \\ &= 1.89 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

이러한 조건에서 감속재내 C-14의 생성량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= N \sigma \varphi \\ &= (3.95 \times 10^{27}) \times (2.4 \times 10^{-25}) \times (1.89 \times 10^{14}) \\ &= 1.79 \times 10^{17} \text{ atoms/s} \end{aligned}$$

따라서, 생성되는 C-14에 의한 방사능은 다음과 같이 계산된다.

$$A = P \lambda = \text{atoms/s per s} = \text{Bq/s}$$

여기서, $\lambda = 3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ (C-14의 붕괴상수로부터 계산)

$$\begin{aligned} A &= \frac{(1.79 \times 10^{17} \text{ atom/s}) (3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})}{(3.7 \times 10^{10} \text{ dis/s per Ci})} \\ &= 1.86 \times 10^{-5} \text{ Ci/s (1.40Ci/d) 또는} \\ &= 587 \text{ Ci/a at 100\% capacity factor} \\ &= 470 \text{ Ci/a at 80\% capacity factor} \end{aligned}$$

3.2 열수송 계통

C-14은 대부분 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해서 생성된다. 감속재에서 생성되는 C-14을 계산하는 방법과 마찬가지로 냉각재 중 C-14의 양을 계산한다.

$$N = 1.15 \times 10^{22} \text{ } ^{17}\text{O atoms/kg D}_2\text{O} \times 6.0 \times 10^3 \text{ kg}$$

여기서, $6.0 \times 10^3 \text{ kg}$ 은 중심영역에 있는 냉각재의 질량이다.

$$N = 6.87 \times 10^{25} \text{ } ^{17}\text{O atoms}$$

$$\sigma = 0.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\varphi = 1.23 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$P = N \sigma \varphi$$

$$= (6.87 \times 10^{25}) \times (2.4 \times 10^{-25}) \times (1.23 \times 10^{14})$$

$$= 2.03 \times 10^{15} \text{ atoms/s}$$

따라서, 생성되는 C-14에 의한 방사능은 다음과 같이 계산된다.

$$A = P \lambda$$

$$= \frac{(2.03 \times 10^{15} \text{ atom/s}) (3.84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})}{(3.7 \times 10^{10} \text{ dis/s per Ci})}$$

$$= 2.10 \times 10^{-7} \text{ Ci/s (0.018 Ci/d) 또는}$$

$$= 6.62 \text{ Ci/a at 100\% capacity factor}$$

$$= 5.30 \text{ Ci/a at 80\% capacity factor}$$

3.3 환형기체 계통

이산화탄소로 채워진 환형기체 계통에서 생성되는 C-14의 양은 극히 적다. C-14은 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 와 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 의 반응에 의해서 생성된다.

환형기체 계통의 부피는 11.0 m^3 이고, 이 중 97%인 10.67 m^3 이 기체가 차지하는 부피이다. 운전 온도와 압력은 각각 $195^\circ\text{C} (468^\circ\text{K})$ 와 $82 \text{ kPa(g)} (11.9 \text{ psig})$ 정도이며 환형기체 중 O-17과 C-13의 수는 이상기체 상태방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$PV = nRT \text{에서,}$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

여기서,

$$P = 0.082 \text{ MPa(g)}$$

$$V = 1.07 \times 10^7 \text{ cm}^3$$

$$R = 8.314 \text{ MPa(g)} \cdot \text{cm}^3/\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$T = 468^\circ\text{K} \text{을 각각 대입하면,}$$

$n = 225.5$ moles of CO_2 가 된다.

O-17의 동위원소 존재비가 0.038%이고, C-13의 동위원소 존재비가 1.1%이므로, 환형기체 중 O-17과 C-13의 수는 각각 1.03×10^{23} 과 1.49×10^{24} 이다. 환형기체 계통의 평균 열중성자속이 $1.5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 이고, $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 의 흡수단면적은 0.24barn이므로 O-17로 인한 C-14의 생성량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= N \sigma \varphi \\ &= (1.03 \times 10^{23}) \times (2.4 \times 10^{-25}) \times (1.5 \times 10^{14}) \\ &= 3.63 \times 10^{12} \text{ atoms/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= P \lambda \\ &= (3.63 \times 10^{12}) \times (3.84 \times 10^{-12}) \\ &= 13.9 \text{ Bq/s} \\ &= 3.76 \times 10^{-10} \text{ Ci/s} \\ &= 0.012 \text{ Ci/a at 100\% capacity factor} \end{aligned}$$

C-13의 흡수 단면적은 0.9mb이므로 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응에 의한 C-14의 생성량을 같은 방법으로 계산하면 $2.0 \times 10^{11} \text{ atoms/s}$ 이고 방사능은 $2.1 \times 10^{-11} \text{ Ci/s}$ 또는 0.0007Ci/a으로 소량의 방사능이 생성된다. 따라서, CANDU-6형 원자로의 환형기체 계통에서 생성되는 총 C-14의 양은 0.013Ci/a로 예상된다.

3.4 핵연료 다발

C-14은 UO_2 연료로부터 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해서 생성된다. 핵연료 다발의 평균 열중성자속은 $1.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이다. 격자 셀당 UO_2 흡수단면적은 41.0 cm^2 이고 UO_2 의 밀도는 10.67 g/cm^3 이다. 따라서, 셀 1cm당 산소 원자의 질량은 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} &\frac{32 \text{ g O}}{270 \text{ g UO}_2} \times 10.67 \text{ g/cm}^3 \times 41 \text{ cm}^2 \text{ UO}_2 \\ &= 51.85 \text{ g O/cm cell} \end{aligned}$$

연료 중 산소 원자의 수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} &\frac{51.85 \text{ g O}}{\text{cm cell}} \times 49.53 \text{ cm cell length} \times \frac{0.6023 \times 10^{24} \text{ atoms O}}{16 \text{ g O}} \\ &\times 380 \text{ channels} \times \frac{12 \text{ bundles}}{\text{channel}} \\ &= 4.41 \times 10^{29} \text{ O atoms in UO}_2 \text{ (whole core)} \end{aligned}$$

O-17 동위원소의 존재비는 0.038%이므로, 연료 중 O-17원소의 수는 $1.68 \times 10^{26} \text{ atoms}$ 이 되므로 C-14의 생성량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
P &= N \sigma \phi \\
&= (1.68 \times 10^{26}) \times (0.24 \times 10^{-24}) \times (1.0 \times 10^{14}) \\
&= 4.0 \times 10^{15} \text{ atoms/s}
\end{aligned}$$

따라서, 생성되는 C-14에 의한 방사능은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
A &= P \lambda \\
&= (4.0 \times 10^{15})(3.84 \times 10^{-12}) \\
&= 1.54 \times 10^4 \text{ dis/s} \\
&= 4.17 \times 10^{-7} \text{ Ci/s} \\
&= 0.036 \text{ Ci/d} \\
&= 13.2 \text{ Ci/a}
\end{aligned}$$

3.5 중수의 손실로 인한 C-14 방출량의 계산

월성 1호기에서 중수의 손실은 평균 3.9Mg/a이다. 중수 손실의 96%는 온도가 높은 가압 열수송 계통에서 생기며, 4%는 감속재 계통에서 발생한다. 각 계통의 연간 C-14 생성량과 중수의 양으로부터 C-14 방출량을 계산할 수 있다.

액체의 손실이 C-14의 방출 전에 정화계통에 의해 처리되지 않았다고 가정하면, 중수의 손실로 인한 C-14의 방출량은 아래와 같이 예측 가능하다.

$$\begin{aligned}
&\frac{3,900\text{kg} \times 0.96 \times 6.62\text{Ci/yr}}{185,000\text{kg}} + \frac{3,900\text{kg} \times 0.04 \times 587\text{Ci/yr}}{265,000\text{kg}} \\
&= 0.48 \text{ Ci/a}
\end{aligned}$$

4. 결론

지구상에 존재하는 C-14 화합물은 우주선과의 상호작용과 같은 자연적인 생성 요인 뿐만 아니라, 원자로 내 연료와 중성자간의 반응과 핵무기 실험과 같은 인위적인 요인에 의해서도 생성된다. 본 연구를 통해 월성 1호기의 운전 특성을 고려한 상태에서 각 계통별 C-14의 생성량을 평가해 본 결과, 중수로의 감속재 계통에서는 470Ci/yr, 열수송 계통에서는 5.3Ci/yr, 환형기체 계통에서는 0.013Ci/yr, 핵연료에서는 13.2Ci/yr가 생성되는 것으로 계산되었다. 이는 중수로에서의 C-14 생성량이 design base 상에서 계산된 PWR의 C-14 생성량보다 약 6~8배 정도 높음을 나타낸다. 이는 경수로보다 중수로에서의 C-14 방출감시가 보다 요구되어짐을 의미하며, 특히 감속재 계통에서의 C-14 생성이 전체의 약 96% 이상을 차지하고 있어, 감속재 계통의 C-14 방출 저감화와 관리기술 확보가 중요함을 시사하고 있다.

5. 참고 문헌

- [1] 강덕원, 김연희 외 1인 “중수로 운전중 발생하는 C-14 방출 감시 기술 개발”, (1998.1) pp9-53
- [2] M. J. Kabat, "Carbon-14 in Ontario Hydro's Nuclear Stations: Production, System and Effluent Levels, Dosimetry", Environmental Data(1980)
- [3] W. Davis, "Carbon-14 Production in Nuclear Reactors", Management of Low-Level Radiation Wastes, Vol. 1 (Mogshiss, A. A., Kahn, B., Eds), Pergamon Press, New York, (1979) 151

- [4] C. R. Boss and P. J. Allsop, "Radiative Effluents from CANDU6 Reactors During Normal Operation", AECL-11506(1995)
- [5] ICRP-14 "The Management of Carbon-14 in Canadian Nuclear Facilities" Jan (1995)
- [6] H. Braun., et al., "Retention of Carbo-14 in Nuclear Facilities", Management of Gaseous Wastes from Nuclear Facilities (Proc. Symp. Vienna, 1980), IAEA, Vienna(1980)

