

Tc-99m Generator 차폐용기 개발

Development of Shield Containers for Tc-99m Generator

이경훈, 김현대, 고병령

한국원자력기술(주)
대전광역시 대덕구 신일동 1687-2 벤처타운 다산관

요약

한국원자력기술(주)는 세 가지 종류의 Tc-99m Generator 차폐용기를 개발하였다. 이들은 각각 UltraTech-I, II, III로 명명되었으며, 최대 적재 방사능량은 1.5, 3.0, 10.0 Ci이다.

Tc-99m Generator 차폐용기의 설계 과정에서 차폐용기의 차폐 능력 평가를 위해 MCNP-4b 코드를 사용하였다. 차폐 계산 결과를 실물 크기의 모형 제작에 적용하였으며, 모형의 외부로 누설되는 방사선량률과 비교하였다. 결과적으로, 차폐 계산 결과와 측정 결과는 대부분 서로 일치하였으며, 그 값들은 규제 허용 선량률을 만족했다.

한국원자력기술(주)에 의해 설계된 차폐용기는 2003년 11월 한국원자력연구소에서 생산될 Tc-99m Generator에 사용될 예정이다.

Abstract

Three kinds of shield containers for Tc-99m Generator have been developed by KNT(Korea Nuclear Technology), named UltraTech-I, II and III. Their maximum loading capacities are 1.5, 3.0 and 10.0 Ci, respectively.

In the design process, MCNP-4b computer code was utilized to evaluate the shielding capability of the containers. The calculation results from MCNP-4b were applied to detail design of the mock-up containers and compared to external dose rate from the mock-up. Consequently, calculation and dose rate measurement agreed with each other and they were well within the allowed dose rate by regulation.

The containers developed by KNT will be employed as the source container of the Tc-99m Generator when its production starts from this November at KAERI.

1. 서론

Tc-99m은 체내 투여 진단용 방사성동위원소로서 인체의 뼈, 심장, 뇌, 간, 폐, 갑상선, 신장 등의 거의 모든 장기의 진단용으로 30년 이상의 이용 역사를 가지고 있다. Tc-99m은 세계 전체 의료용 방사성동위원소 이용률 중 80 % 이상을 차지하고 있으며, Tc-99m의 세계 시장의 수요는 1996년 기준 연간 약 300,000 Ci로서 그 수요가 계속 증가하여 2004년에는 600,000 Ci까지 증가할 것으로 예상되며, 향후 경제 성장과 의학의 발달에 따라 향후 이용률이 급속히 증가할 것으로 예상된다. 하지만 현재 Tc-99m의 세계 시장 수요의 75 % 이상을 캐나다 Nordion사가 독점 공급하고 있으며, Tc-99m Generator는 러시아의 IPPE, 일본의 Daiichi, 미국의 Dupont, 영국의 Amersham, 호주의 ANSTO, 독일의 VKTA, 벨기에의 IRE, 남아프리카공화국의 AEC, 중국의 PICN 등에서 자국 및 세계시장에 공급하고 있다. 향후 Tc-99m의 독점 공급으로 인한 가격 상승과 공급 불안의 문제점이 생길 것을 우려하여 미국 등 여러 국가들은 이미 Tc-99m의 자국내 생산 체제를 준비하고 있다. 또한, 국제원자력기구도 반감기가 짧은 Tc-99m의 모핵종인 Mo-99의 특성상 장거리 운송에 의한 손실로 인하여 지역별 공급을 권장하고 있는 실정이다.[1]

국내에서도 Tc-99m은 암 등 난치성 질환의 진단에 널리 이용되고 있으며, 현재 약 110개의 의료기관에서 주당 1~2개의 Tc-99m Generator를 사용하고 있다. 하지만 Tc-99m Generator 국내 수요의 전량을 해외에서 수입하여 공급하고 있는 실정이다. 따라서 향후 Tc-99m의 안정적인 공급을 위해서는 Tc-99m Generator의 국산화가 시급한 실정이며, Tc-99m Generator의 국산화는 나아가 타 용도의 의료용 방사성동위원소 생산 및 제조기술 개발을 유도하고 방사성 의약품을 해외로 수출할 수 있는 국내 기반을 마련하는 계기가 될 수 있을 것으로 판단된다.

Tc-99m Generator의 국산화 사업은 한국원자력연구소와 (주)삼영유니텍이 공동 사업주체가 되어 추진 중에 있다. 하지만 당초 계획했던 하나로(HANARO)를 이용한 Mo-99의 생산 및 제조는 현재 여러 가지 이유로 늦어지고 있으며, 이에 (주)삼영유니텍은 러시아 IPPE(Institute of Physics and Power Engineering)에서 Mo-99 선원(Bulk Source) 및 선원용기(Source Column)를 수입하여 생산하기로 결정하였다. 당사는 과학기술부의 원자력실용화연구과제를 통해 Tc-99m Generator의 국산화에 필요한 차폐용기 및 기타 부품들 일체를 설계하였으며, Tc-99m Generator 차폐용기 및 기타 관련 부품들 일체(선원용기 제외)를 Tc-99m Generator 생산 시기에 맞춰서 (주)삼영유니텍에 공급하기로 합의하였다. (주)삼영유니텍은 수입한 Mo-99 선원을 한국원자력연구소의 방사성동위원소생산시설 내 핫셀(Hot Cell) 시설에서 선원용기에 주입시킨 후, 당사가 공급한 Tc-99m Generator 차폐용기 및 외부용기에 담아 생산할 예정이며, 이를 연내에 국내 시장에 판매 할 계획이다. 당사가 (주)삼영유니텍에 공급하기로 한 Tc-99m Generator 차폐용기는 수용 가능한 동위원소의 방사능량에 따라 UltraTech-I, II, III의 세 가지 모델로 구분되며, 표 1에 각각의 명칭과 방사능량을 나타내었다.

2. Tc-99m Generator

방사성동위원소인 Tc-99m은 모핵종인 Mo-99의 베타 붕괴로부터 얻는 방법이 유일한 제조수단이기 때문에 Tc-99m의 제조는 바로 Mo-99의 제조를 의미한다. Mo-99의 제조 방법으로는 천연 혹은 농축 Mo-98 표적(Target)을 동위원소생산전용 원자로에서 중성자를 조사시켜 얻은 방법과 농축우라늄 표적을 원자로에서 핵분열 시킴으로서 생성되는 여러 가지 핵분열 생성물 중 Mo-99를 분리, 정제하여 얻은 소위 Fission Moly 제조 방법이 있다. 그러나 농축 Mo-98 표적에 의한

제조 방법에 의해 얻어지는 Mo-99는 단위질량당 방사능을 나타내는 비방사능(Specific Activity)이 낮아 Tc-99m의 모핵종 원소로서 이용하는 데는 한계가 있다. 때문에 거의 Fission Moly를 Tc-99m의 모핵종 원소로서 사용하고 있다. Tc-99m은 반감기(Half Life)가 66시간인 유일한 모핵종 Mo-99의 베타 붕괴로부터 얻어지는 딸핵종이며, 생성된 Tc-99m은 반감기가 6시간으로 이성핵 천이(Isomeric Transition, IT)에 의해 140 keV의 감마선을 방출하고 Tc-99를 거쳐 최종적으로 안정한 핵종인 Ru-99로 된다. 따라서 Tc-99m은 모원소인 Mo-99와 혼합 상태로 Tc-99m Generator에 저장, 운반되어 사용된다. 그림 1은 Mo-99의 생성과 Mo-99의 베타 붕괴로부터 생성되는 Tc-99m, 최종적으로 안정핵종인 Ru-99가 생성되기까지의 붕괴 과정을 나타낸다.

Tc-99m이 의료용 방사성동위원소로서 가장 널리 사용되는 이유는 다음과 같은 특징 및 장점들을 가지고 있기 때문이다. 첫째, Tc-99m은 반감기가 6시간으로 짧기 때문에 같은 체내 진단 투여용으로 사용되는 다른 의료용 방사성동위원소(Sr-98m, I-131, Au-198 등)에 비해 체내 피폭량이 약 1/10 정도로 매우 작다. 둘째, Tc-99m은 140 keV의 낮은 에너지 감마선을 방출하기 때문에 체내 피폭량이 적을 뿐만 아니라, 인체 조직에 정확하게 도달할 수 있는 침투성이 우수하며, 감마카메라(γ -Camera)에 검출이 용이해서 진단 정확성이 높다. 셋째, Tc-99m은 다양한 산화가(-1~+7)를 가져서 진단 용도별 다양한 표지화합물의 사용이 가능해서, 신체의 거의 모든 장기(뼈, 심장, 뇌, 간, 폐, 갑상선, 신장 등)의 진단이 가능하다. 이와 같은 Tc-99m의 방사선 특성 때문에 Tc-99m은 대표적인 체내 진단 투여용 의료용 방사성동위원소로서 핵의학적 진단에 널리 사용되고 있다.

Tc-99m Generator는 방사성동위원소(Mo-99, Tc-99m, Tc-99의 혼합체)를 내장하기 위한 방사선기기이다. 당사가 설계한 Tc-99m Generator 차폐용기 및 기타 관련 부품들 일체는 (주)삼영유니텍에 공급하기 전에는 방사성동위원소를 내장하지 아니하지만, 향후 명백하게 방사성동위원소를 내장하기 위한 목적으로 제작된 방사선기기이기 때문에, 과학기술부 고시 제2001-22호 “방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준”의 제2조 적용범위와 제15조, 제20조에 따라 그 구조상 “휴대 개방형 방사선기기”로 분류되며, 제29조에 따라 그 종류는 “일반 의료용 기기”로 분류된다. 하지만, Tc-99m Generator는 그 사용 목적상 방사성동위원소를 포장 또는 반복 운반하기 위한 목적이 아닌 내장된 방사성동위원소를 사용하기 위한 목적이기 때문에, Tc-99m Generator 그 자체를 운반용기로 볼 수 없다. 따라서, 당사가 설계한 Tc-99m Generator 차폐용기 및 기타 관련 부품들 일체는 방사선기기에 대한 설계승인 대상에만 포함되며, 운반용기에 대한 설계승인 대상에는 포함되지 않는다.

3. 방사선 안전성 평가

3.1. 평가 기준 및 방법

Tc-99m Generator는 “휴대 개방형 방사선기기”로 분류되며, 그 구조기준에 따라 방사선기기의 표면방사선량률(표면으로부터 10 cm 떨어진 위치에서의 방사선량률)은 시간당 2 mSv를 초과하지 아니하여야 하며, 방사선기기의 표면으로부터 1 m 떨어진 위치에서의 방사선량률은 시간당 0.02 mSv를 초과하지 않아야 한다.

차폐 계산 코드(MCNP-4b)[2]를 사용해서 세 가지 모델의 Tc-99m Generator 표면으로부터 10, 100 cm에서의 방사선량률이 각각 2.0, 0.02 mSv/h를 초과하지 않도록 차폐 용기의 차폐 설계를 수행하였다. 또한, 차폐 계산 결과를 바탕으로 제작한 실물 크기의 모형(Mock-up)을 이용해서 누

설되는 방사선량을 측정 시험을 수행하였으며, 계산 결과와 실제 측정 결과를 비교함으로써 Tc-99m Generator의 방사선 안전성 평가를 수행하였다.

3.2. 차폐 계산 기하학적 모델

Tc-99m Generator에 내장되는 선원용기는 Pyrex Glass 재질의 관과 관 내부에 채워져 있는 알루미늄, 상하부의 알루미늄 뚜껑 및 생리식염수 주입관, Tc-99m 추출관으로 구성된다. 이 선원용기는 그림 2와 같이 차폐용기(Shield Container) 내에 Loading되고, 차폐뚜껑(Shield Cap)으로 봉합되며, 차폐용기는 외부 플라스틱 용기(Plastic Container) 내에 Loading되고, 플라스틱 뚜껑(Plastic Cap)으로 봉합된다. 위와 같은 구조를 갖는 Tc-99m Generator의 외부 플라스틱 용기 및 뚜껑, 주입 및 추출관들은 차폐 계산의 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되며, 차폐 계산을 위한 기하학적 모델은 선원용기, 차폐용기 및 뚜껑으로 결정하였으며, 특히 UltraTech-I의 옆면에 돌출된 부분(UltraTech-II의 외부 플라스틱 용기에 맞추기 위해 도입된 돌출부) 또한 차폐 계산에서 제외하였다.

선원용기는 높이 8 cm, 직경 1.1 cm의 Pyrex Glass 재질의 유리관으로서 관 밑에서부터 높이 1.4~6.7 cm, 직경 0.8 cm의 영역에 알루미늄이 채워져 있으며, 나머지 영역은 모두 Pyrex Glass로 가정하였다. 특히 알루미늄이 분포된 영역 중 높이 4.4~5.8 cm 영역에 Mo-99가 골고루 흡착된다고 가정하였으며, 따라서 선원용기 내 방사선원은 Mo-99가 흡착되어 있는 영역 전체로서 실린더 모양의 체적 선원(Cylindrical Volume Source)이다. 또한, 선원용기 상하부의 알루미늄 뚜껑 및 Mo-99 주입관, 생리식염수 주입관, Tc-99m 추출관은 차폐 계산에서 무시하였다. 그림 3, 4, 5는 각각 Tc-99m Generator의 차폐 계산을 위한 기하학적 모델로서 차폐뚜껑과 차폐용기 사이에 Gap을 두어 실제 상태를 그대로 묘사하였다.

3.3. 방사선원형 결정

Tc-99m Generator의 모핵종인 Mo-99는 시간이 지남에 따라 각 핵종들의 붕괴 과정을 거쳐 Mo-99, Tc-99m, Tc-99 핵종들이 서로 혼합된 상태의 평형상태 혼합물(Equilibrium Mixture)로 존재하게 되며, 각 핵종들로부터 방출되는 감마선(γ -ray)과 베타선(β -ray)들도 여러 가지 에너지를 가지고 혼합되어 있다. 각 핵종별 방출되는 방사선의 종류 및 에너지로부터 방사선 차폐 계산 시 고려해야 할 비교적 높은 발생률과 높은 에너지를 갖는 방사선만을 발췌하여 표 2에 나타내었으며, 각 핵종들의 붕괴시 방출되는 방사선의 종류와 에너지 및 발생률도 함께 나타내었다.[3][4]

표 2에서 알 수 있듯이, Tc-99m Generator의 방사선 차폐 계산의 대상이 되는 방사선원은 다섯 가지 종류의 감마선과 한 가지 베타선으로 정리된다. 하지만 베타선은 투과력이 약하기 때문에 그 자체만으로는 차폐 설계 시 무시할 수 있지만, 높은 에너지(1.3572 MeV)를 갖는 베타선은 무거운 물질(납 차폐체)과의 제동복사(Bremsstrahlung)에 의하여 연속 x선(제동복사선)이 발생될 수 있다. 이 경우 제동복사를 최소화하기 위해 알루미늄(Aluminum)과 같은 가벼운 원소를 선원 가까이 설치하고, 외부에 무거운 원소로 차폐 설계를 하는 것이 바람직하다. Tc-99m Generator에서 Mo-99 선원은 내부에 알루미늄이 채워진 Pyrex Glass 재질의 선원용기에 주입되고, 선원용기 상하부는 알루미늄 뚜껑으로 밀봉되기 때문에 선원용기 자체로서 충분히 제동복사를 최소화 할 수 있다고 판단되지만, 베타선에 의해 생성되는 제동복사선의 생성량을 해석적인 방법을 통해 간단히 계산해 보았다.

제동복사선 방출율(Bremsstrahlung Fraction, f)은 다음 식과 같이 정의되며, 그 값은 약 0.039로 계산된다.[5]

$$f = 3.5 \times 10^{-4} Z E_{\max} = 3.5 \times 10^{-4} \times 82 \times 1.3572 = 0.039$$

또한, 베타선은 연속스펙트럼을 가지기 때문에 베타선의 평균에너지는 다음 식과 같이 정의되며, 베타선의 평균에너지는 약 0.4524 MeV로 계산된다.

$$E_{\text{avg}} = 1/3 E_{\max} = 1/3 \times 1.3572 = 0.4524 \text{ MeV}$$

따라서 방사선원을 점등방선원(Isotropic Point Source)으로 가정할 경우, 거리 r 에서 제동복사선속(Bremsstrahlung Flux)은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{f E_{\text{avg}}}{4\pi r^2 E_{\max}} = \frac{0.039 \times 0.4524 \text{ MeV}/\beta \times 3.7 \times 10^{11} \beta/\text{sec}}{4\pi \times (1 \text{ cm})^2 \times 1.3572 \text{ MeV}/\text{photon}} \\ &= 3.8277 \times 10^8 \text{ photons}/\text{cm}^2 \text{ sec} \end{aligned}$$

위의 식으로부터 최대 10 Ci 베타 선원(1.3572 MeV)에서 1 cm 떨어져 있는 납 차폐체 표면에서 제동복사선의 발생량은 3.8277×10^8 photons/cm²-sec이다. 따라서 베타선과 납 차폐체와의 상호작용에 의해 생성되는 제동복사선의 발생량은 본 차폐 계산에서 사용되는 감마선원의 양에 비해 매우 적기 때문에 Mo-99에서 방출되는 1.3572 MeV의 베타선은 Tc-99m Generator의 방사선 차폐 계산을 위한 방사선원에서 충분히 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4. 차폐 계산 방법 및 평가 위치

앞 절에서 결정한 Tc-99m Generator 차폐용기의 기하학적 구조와 방사선원항에 대해 MCNP-4b 코드를 사용해서 각 차폐용기의 차폐 계산을 수행하였다. 차폐용기는 최대 적재 방사능량에 따라 UltraTech I, II, III의 세 가지 모델로 구분되며, 각각 차폐 계산 시 선원의 방사능량은 각 모델의 최대 적재 방사능량인 1.5, 3.0, 10.0 Ci를 적용하였다.

Tc-99m Generator의 누설되는 방사선량 평가위치는 차폐뚜껑 상부(Top), 차폐용기 윗부분의 경사면(Top Side), 차폐용기 옆면(Side), 차폐용기 아랫부분 경사면(Bottom Side), 차폐용기 밑면(Bottom), 차폐용기와 차폐뚜껑 사이 0.5 mm의 틈(Gap)의 여섯 부분의 위치에서 방사선기기 표면으로부터 10 cm에서의 방사선량률과 추가적으로 방사선기기 표면(1 cm)에서의 방사선량률을 계산하였으며, 방사선기기 표면으로부터 100 cm에서의 방사선량률은 차폐용기 옆면에서만 계산하였다. 차폐용기 표면으로부터 100 cm 떨어진 곳에서는 상대적으로 차폐용기의 크기가 작기 때문에 차폐용기의 각 면으로부터의 효과가 아닌 종합적인 효과로 나타나기 때문에, 선원으로부터 가장 단거리에 있는 차폐용기 옆면에 대해서만 계산 모델을 고려하였다.

MCNP-4b 코드에서 선량률은 측정 지점에서의 감마선 에너지에 따른 Flux 분포를 구한 다음 각 에너지에 맞는 광자속-방사선량률 전환인자(Photon Flux-to-Dose Rate Conversion Factor)를 적용하여 평가한다. 이러한 전환인자는 여러 가지가 있지만, 본 계산에서는 ICRP-74에 수록된 값

을 사용하였으며, 그 값을 표 3에 나타내었다.

Tc-99m Generator에서 누설되는 방사선량률의 평가는 MCNP-4b 코드의 계산 결과인 Flux에 다음의 값들을 곱해서 결정할 수 있다.[6]

$$Dose\ Rate[mSv/hr] = \phi[photons/cm^2] \times M[photons/sec] \\ \times DF[\frac{rem/hr}{photons/cm^2sec}] \times 10[\frac{mSv/hr}{rem/hr}]$$

여기서, ϕ : MCNP-4b 코드에서 계산된 광자속

M : Multiplier(각 Tc-99m Generator의 최대 방사능량)

DF : 광자속-방사선량률 전환인자(Photon Flux-to-Dose Rate Conversion Factor)

3.5. 누설 방사선량률 측정 시험

차폐 계산 결과를 바탕으로 제작한 차폐용기 모형(Mock-up)에 시험용 선원으로 호주 ANSTO사의 GenTech Tc-99m Generator 선원용기를 사용하였다. 선원용기는 한국원자력연구소의 핫셀(Hot Cell)에서 분리하여 당사가 제작한 차폐용기 모형에 넣은 후 누설 시험을 실시하였다. 측정 시험은 선원용기가 담긴 각각의 차폐용기 모형을 대상으로 낮은 에너지 감마선 측정에 사용되는 휴대용 디지털 Survey Meter(FH40F4, Eberline)를 사용하였다.

Tc-99m Generator의 누설 방사선량률 측정위치는 계산 결과와 측정 결과의 비교를 위해 차폐 계산시 적용한 평가 위치와 동일하게 적용하였다.

Mo-99, Tc-99m은 선원용기 내에서 과도 평형(Transient Equilibrium) 상태로 존재하게 된다. 시험용 선원은 2003년 02월 03일 07시 00분에 이미 과도 평형 상태에 도달하였으며, 이 시점에서 Mo-99와 Tc-99m의 평형상태 혼합물의 교정 방사능량은 3.2432 Ci(120 GBq)이다. 이 선원의 경우 Tc-99m을 한번도 추출하지 않았기 때문에, 시간 경과에 따른 선원의 방사능량은 방사성 붕괴 법칙을 적용하여 예측하였다. UltraTech-I, II, III의 경우 최대 방사능량이 각각 10.0, 3.0, 1.5 Ci이며, 각각의 차폐용기에 대한 측정 당시 선원용기의 방사능량은 각각 1.3794, 1.3745, 1.3697 Ci이다. 계산 결과와 측정 결과를 비교하기 위해서 측정시의 방사능량을 각 차폐용기의 최대 방사능량으로 보정해 주었다.

4. 방사선 안전성 평가 결과

표 4, 5, 6에서 볼 수 있듯이, 방사선 안전성 평가 결과 여섯 부분의 모든 평가 위치에서 방사선 기기 표면으로부터 10, 100 cm에서의 방사선량률이 각각 2.0, 0.02 mSv/h 이하의 법적 규제 조건을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 표 4, 5, 6에 계산 결과와 함께 각 측정 결과들을 나타냈으며, 계산 결과에 대한 측정 결과의 %오차도 함께 나타내었다. 이 %오차(% Error)는 기준값으로 정한 계산 결과에 대해 측정 결과가 얼마나 차이가 나는지를 나타내며, 다음 식을 이용해서 계산할 수 있다.

$$\% \text{ Error} = \frac{M - C}{C} \times 100$$

여기서, C : MCNP-4b로 계산한 누설 방사선량률 계산 결과(기준값)

M : 차폐용기 모형을 대상으로 측정된 누설 방사선량률 측정 결과

방사선기기 표면으로부터 10 cm에서 측정된 방사선량률의 경우 계산 결과와 최대 1~191 %의 오차를 가졌으며, 이 차이는 특히 방사선기기 상부와 하부에서 크게 나타났다. 이 오차는 차폐용기 모형 제작의 오차, 재질의 오차(납 순도), 측정 오차, 측정 장비의 오차 등이 복합되어 나타난 것으로 판단된다. 하지만 이 오차를 고려하더라도 측정 결과는 법적 규제 조건 2.0 mSv/h 이하의 값을 가짐을 볼 수 있다. 또한, 방사선기기 표면으로부터 100 cm에서 측정된 방사선량률의 경우에는 계산 결과와 2~19 %의 오차를 가졌으며, 법적 규제 조건 0.02 mSv/hr 이하의 값을 가짐을 볼 수 있다.

5. 결론

Tc-99m Generator의 국산화를 위해 당사는 Tc-99m Generator 차폐용기를 설계하였다. 차폐용기의 방사선 안전성을 평가하기 위해, 차폐 계산을 수행하였으며, 실물 크기의 모형을 이용해서 실제 누설되는 방사선량률을 측정하였다. 계산 결과와 모형에 대한 측정 결과를 종합해 볼 때, 당사가 설계한 세 가지 모델의 Tc-99m Generator 차폐용기(UltraTech-I, II, III)는 모든 위치에서의 방사선량률이 법적 규제치 이하의 값을 가졌다. 따라서 당사가 설계한 세 가지 모델의 Tc-99m Generator 차폐용기(UltraTech-I, II, III)는 충분한 방사선 안전성을 가지며, 상업적 이용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 연구는 과학기술부 원자력실용화연구사업의 “Tc-99m Generator 차폐용기 개발” 과제를 통해 수행한 것입니다.

참고문헌

1. 박진호 외, “방사성 동위원소 생산이용연구-Fission Mo-99 생산기술 개발,” 한국원자력연구소 보고서, KAERI/RR-2008/99, 2000.
2. J. F. Briesmeister, “MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B,” LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
3. <http://www2.bnl.gov/ton/>
4. <http://rinet.kins.re.kr/>
5. H. Cember, “Introduction to Health Physics,” 1983.
6. J. F. Briesmeister, “Practical MCNP for the Health Physicist, Rad Engineer, and Medical Physicist Course Manual,” LAUR 99-4469, Los Alamos National Laboratory, 1997.

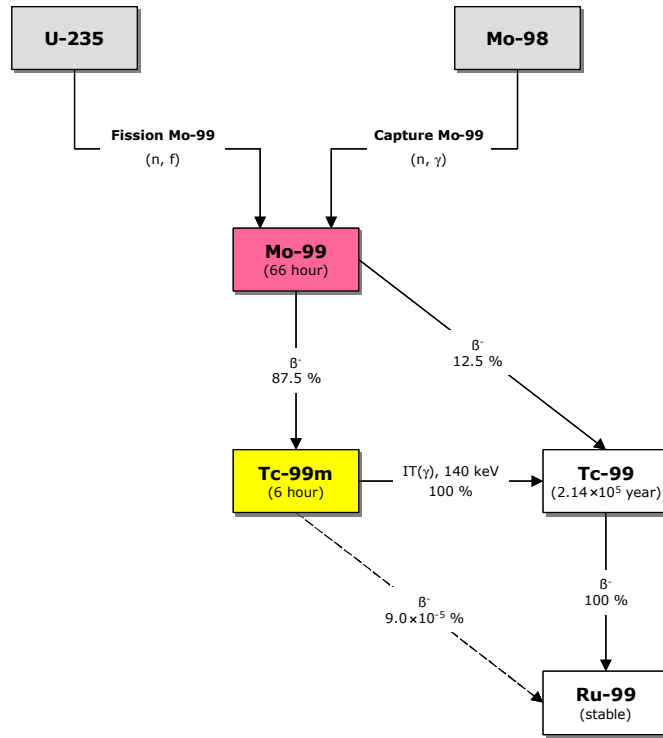


그림 1. Mo-99 및 Tc-99m의 생성 및 붕괴 과정

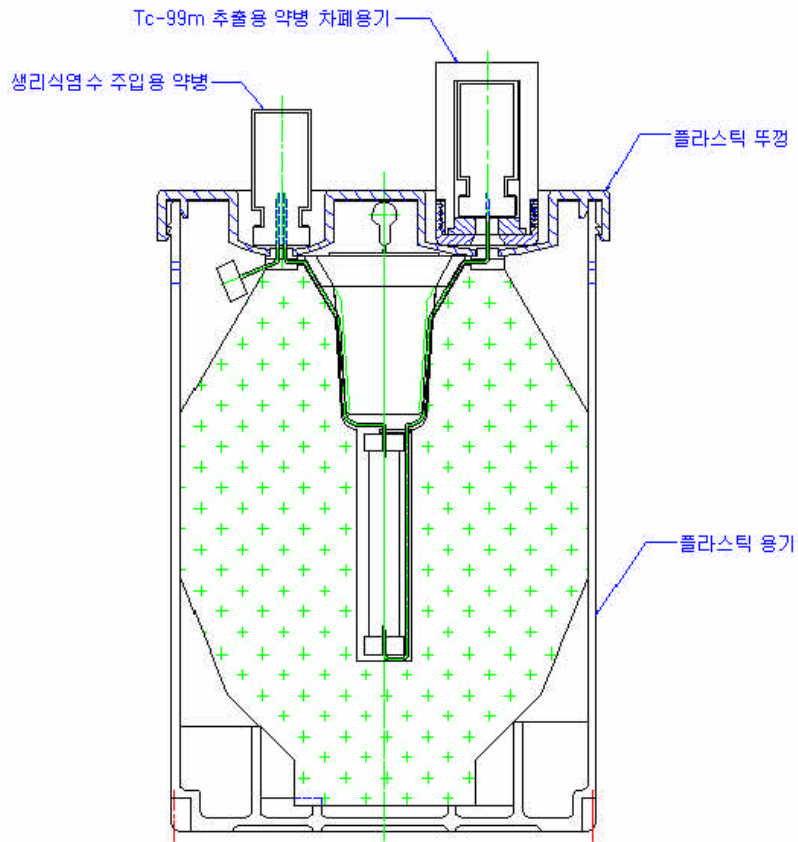


그림 2. Tc-99m Generator 전체의 조립도(UltraTech-III)

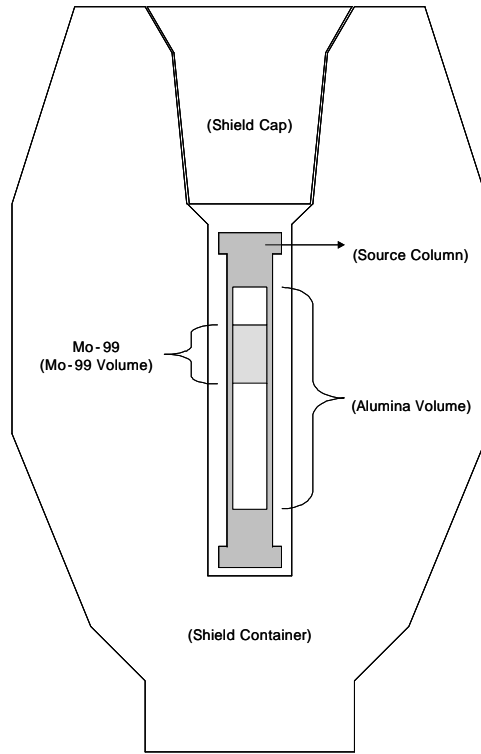


그림 3. UltraTech-I의 차폐계산 기하학적 모델

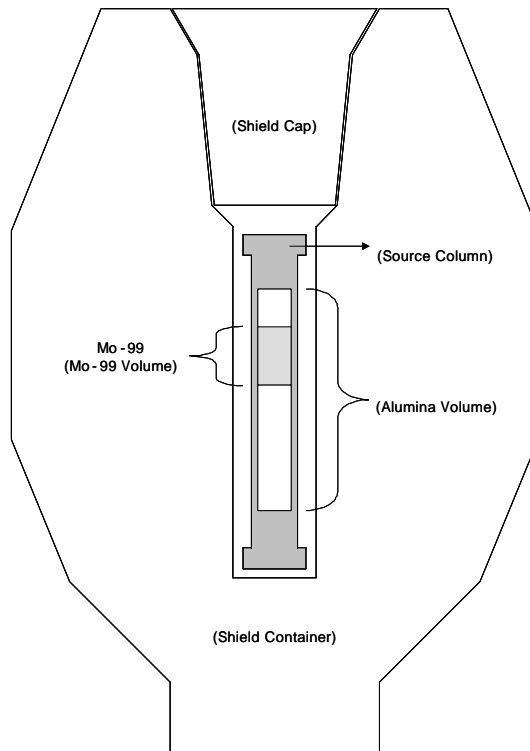


그림 4. UltraTech-II의 차폐계산 기하학적 모델

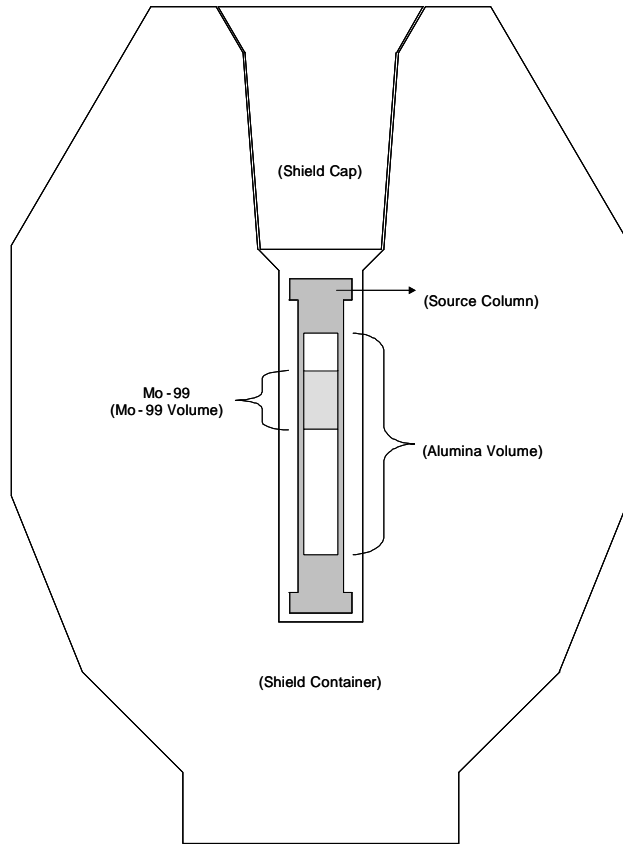


그림 5. UltraTech-III의 차폐계산 기하학적 모델

표 1. Tc-99m Generator 및 차폐용기의 명칭과 각각의 방사능량

차폐용기의 명칭	방사선기기의 명칭	최대 적재 방사능량 [Ci]	교정 방사능량 [Ci]
UltraTech-I	UniTech 500	1.5	0.5
UltraTech-II	UniTech 1000	3.0	1.0
UltraTech-III	UniTech 3000	10.0	3.0

표 2. Mo-99의 붕괴 시 방출되는 방사선의 종류 및 에너지

핵종의 종류	방사선의 종류	에너지 [MeV]	강도 [%]
Mo-99 ($T_{1/2} = 65.94 \text{ hr}$)	γ 선	0.7395	12.13
		0.1810	6.00
		0.1405	4.52
		0.7780	4.26
		0.3664	1.19
		0.0406	1.05(무시)
	β 선	1.3572	100.00
Tc-99m ($T_{1/2} = 6.01 \text{ hr}$)	γ 선	0.1405	89.00
	β 선	0.4350	27.30(무시)
		0.3470	70.30(무시)
Tc-99 ($T_{1/2} = 2.111 \times 10^5 \text{ yr}$)	β 선	0.2940	100.00(무시)
Mo-99과 Tc-99m의 평형상태 혼합물	γ 선	0.1405	91.00
		0.1810	6.00
		0.3664	1.19
		0.7395	12.13
		0.7780	4.26
	β 선	1.3572	100.00

표 3. 광자속-방사선량률 전환인자(ICRP-74, 1995)

에너지 [MeV]	광자속-방사선량률 환산인자 [(rem/hr)/(#/cm ² -s)]	에너지 [MeV]	광자속-방사선량률 환산인자 [(rem/hr)/(#/cm ² -s)]
0.010	1.75E-08	5.43E-07	0.300
0.015	4.52E-08	7.19E-07	0.400
0.020	7.38E-08	8.88E-07	0.500
0.030	1.08E-07	1.05E-06	0.600
0.040	1.22E-07	1.34E-06	0.800
0.050	1.29E-07	1.61E-06	1.000
0.060	1.36E-07	2.70E-06	2.000
0.070	1.46E-07	4.33E-06	4.000
0.080	1.58E-07	5.76E-06	6.000
0.100	1.86E-07	7.17E-06	8.000
0.150	2.71E-07	8.55E-06	10.000
0.200	3.61E-07		

표 4. UltraTech-I 차폐용기의 외부 방사선량률 계산, 측정 결과 및 오차

측정 위치		차폐용기로부터 거리		
		1 cm	10 cm	100 cm
법적 규제 값		-	≤ 2.0	≤ 0.02
계산 결과 [mSv/hr]	Top	0.8370±0.0139	0.2099±0.0280	-
	Top-side	0.5223±0.0181	0.2151±0.0242	-
	Side	2.2346±0.0085	0.5040±0.0179	0.0118±0.0060
	Bottom-side	0.7240±0.0154	0.2245±0.0252	-
	Bottom	0.6369±0.0163	0.1618±0.0323	-
	Gap	0.9640±0.0170	0.2342±0.0260	-
측정 결과 [mSv/hr]	Top	1.6186±0.0187	0.4415±0.0109	-
	Top-side	0.5078±0.0076	0.1729±0.0072	-
	Side	1.7390±0.0193	0.5994±0.0126	0.0116±0.0009
	Bottom-side	0.4637±0.0106	0.1507±0.0062	-
	Bottom	0.6178±0.0234	0.2586±0.0115	-
	Gap	1.0486±0.0167	0.2448±0.0071	-
계산 결과에 대한 측정 결과의 % 오차 [%]	Top	93 %	110 %	-
	Top-side	-3 %	-20 %	-
	Side	-22 %	19 %	-1 %
	Bottom-side	-36 %	-33 %	-
	Bottom	-3 %	60 %	-
	Gap	9 %	5 %	-

표 5. UltraTech-II 차폐용기의 외부 방사선량률 계산, 측정 결과 및 오차

측정 위치		차폐용기로부터 거리		
		1 cm	10 cm	100 cm
법적 규제 값		-	≤ 2.0	≤ 0.02
계산 결과 [mSv/hr]	Top	1.6878±0.0129	0.4239±0.0264	-
	Top-side	0.8407±0.0188	0.2742±0.0309	-
	Side	2.2109±0.0111	0.5347±0.0230	0.0134±0.0078
	Bottom-side	1.3916±0.0147	0.3273±0.0299	-
	Bottom	1.3098±0.0151	0.3347±0.0295	-
	Gap	1.9262±0.0166	0.4683±0.0268	-
측정 결과 [mSv/hr]	Top	3.2520±0.0231	0.8551±0.0089	-
	Top-side	0.9186±0.0090	0.2857±0.0041	-
	Side	1.9763±0.0118	0.6716±0.0061	0.0160±0.0004
	Bottom-side	1.0753±0.0106	0.3250±0.0044	-
	Bottom	1.7837±0.0193	0.6258±0.0163	-
	Gap	2.3332±0.0242	0.7582±0.0101	-
계산 결과에 대한 측정 결과의 % 오차 [%]	Top	93 %	102 %	-
	Top-side	9 %	4 %	-
	Side	-11 %	26 %	19 %
	Bottom-side	-23 %	-1 %	-
	Bottom	36 %	87 %	-
	Gap	21 %	62 %	-

표 6. UltraTech-III 차폐용기의 외부 방사선량률 계산, 측정 결과 및 오차

측정 위치		차폐용기로부터 거리		
		1 cm	10 cm	100 cm
법적 규제 값		-	≤ 2.0	≤ 0.02
계산 결과 [mSv/hr]	Top	1.7016±0.0232	0.4342±0.0471	-
	Top-side	0.8814±0.0330	0.2733±0.0594	-
	Side	2.0558±0.0207	0.5458±0.0415	0.0153±0.0123
	Bottom-side	0.9745±0.0318	0.2675±0.0569	-
	Bottom	1.3100±0.0262	0.3799±0.0504	-
	Gap	1.9441±0.0268	0.5243±0.0770	-
측정 결과 [mSv/hr]	Top	3.3110±0.0081	1.0280±0.0064	-
	Top-side	0.7050±0.0048	0.2299±0.0006	-
	Side	2.2909±0.0087	0.6873±0.0036	0.0149±0.0003
	Bottom-side	1.0309±0.0040	0.3436±0.0017	-
	Bottom	2.7285±0.0115	1.1055±0.0044	-
	Gap	2.5613±0.0154	1.2180±0.0054	-
계산 결과에 대한 측정 결과의 % 오차 [%]	Top	95 %	137 %	-
	Top-side	-20 %	-16 %	-
	Side	11 %	26 %	-2 %
	Bottom-side	6 %	28 %	-
	Bottom	108 %	191 %	-
	Gap	32 %	132 %	-