

D-D 중성자 발생장치 시제품 설계 및 차폐계산

Design of a Prototype D-D Neutron Generator and Shielding Calculation

김인중, 김선호, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

서울대학교에서 개발중인 D-D 중성자 발생장치의 설계개념을 요약하고 시제품(prototype) 개발의 진행사항을 기술하였다. 중성자 발생장치의 설계 목표는 중성자 수율 10^8 n/s, D^+ 이온빔 전류 50 mA, 가속전압 120 kV이다. 현재는 이온빔 전류 10 mA, 가속전압 30 kV, 중성자 수율 10^4 n/s의 시제품에 대한 세부적인 설계를 수행하고 있다. 추가로 중성자 발생장치로부터 방출되는 중성자와 감마선에 대한 방사선 차폐를 위해 단순한 기하 조건에 대한 단순계산과 MCNP 모사를 수행하여 방사선 차폐설계의 정량적 기준을 마련하였다.

Abstract

The design concept of the D-D neutron generator, being developed in Seoul National University, is summarized and the development procedure of the prototype device is described. The designing goal of the neutron generator is; neutron yield 10^8 n/s, D^+ ion beam current 50 mA, acceleration voltage 120 kV. The detail of the prototype device, aiming at ion beam current 10 mA, acceleration voltage 30 kV, neutron yield 10^4 n/s, is being designed now. In addition, the simple calculation and MCNP simulation, for the radiation shielding against the neutron and γ -ray emitted from the neutron generator, was done on simple geometric condition and the quantitative criterion for the radiation shielding design was established.

1. 서 론

본 연구진에서는 D-D 핵융합 반응을 이용한 중성자 발생장치 개발 연구를 수행하고 있다. D-D, D-T 반응을 이용한 중성자 발생기술은 이미 상용화된 기술이다. 국내에서도 1980년대에 한국원자력연구소에서 D-T 중성자원 개발 연구[1]가 수행된 바 있다. 그러나 국내에서는 연구가 지

속적으로 수행되지 못하였고, 현재 국내에서 중성자 이용은 연구용 원자로나 대형 가속기를 보유하고 있는 몇몇 기관에 국한되고 있다. 본 연구에서는 기존 기술을 재검토하고 이온원 개선 등의 핵심기술 개발을 통해 중성자 수율 증대, 안정적인 운전수명 연장 등의 가능성을 찾는 것과 함께 기존 중성자원에 대한 대체 중성자원 확보를 목표로 하고 있다. 장치 개발을 위한 개념설계를 마쳤으며, 개발 단계로서의 시작품(prototype) 제작을 위해 시작품의 상세설계를 진행하고 있다. 개발 중인 장치의 설계개념을 요약하고 시작품의 상세설계 내용과 방사선 차폐를 위한 단순계산 및 MCNP 계산 결과를 기술하였다.

2. 중성자 발생장치 개념설계

중성자 발생장치의 목표 수율은 10^8 n/s이고, 사양은 D^+ 이온빔 전류 50 mA, 가속전압 120 kV, 운전수명은 수 백 시간이다. 중성자 발생장치는 D^+ 이온원 발생을 위한 플라즈마 이온원과 이온빔 인출, 수송 및 가속부, 표적부로 구성되며, 발생장치로부터의 중성자와 감마선 차폐를 위한 차폐계통이 추가된다. 이온원은 RF plasma source를 사용하고 RF 안테나가 플라즈마 외부에 놓이는 방식을 채택함으로써 이온원의 운전수명 및 안정도를 향상한다. 이온빔 인출 및 가속에서는, 이온빔 인출전압을 +50 kV로 하고 표적에 -70 kV의 고전압을 인가하여 이온빔에 총 120 kV 가속전압을 인가한다. 이온빔 수송은 이온빔의 수송 및 집속 조절을 위해 Einzel lens를 사용하고 인출부-표적간 거리가 되도록 짧게 함으로써 전체 계통의 구성을 단순화하고 소형화한다. 차폐계통은 다량의 고속중성자 차폐를 위해 두꺼운 감속재 층을 두고 차례로 열중성자 흡수층과 감마선 차폐층을 둬으로써, 보건의물리적으로 해로운 고속중성자에 대한 차폐능을 향상시키고, 이차적인 감마선 발생을 최소화한다.

3. 중성자 발생장치 시작품 설계

중성자 발생장치 개발을 위해 시작품 설계와 제작을 진행하고 있다. 시작품의 목표 수율은 10^4 n/s이고, 사양은 이온빔 전류 10 mA, 가속전압 30 kV 이다. 시작품은 중성자 발생검증, 표적 냉각 시험, 표적 냉각 및 제작 방법에 따른 중성자 수율 변화, 표적에의 고전압인가 시험, 차폐체 차폐능 시험 등의 목적을 위해 설계하였다. 시작품을 이용한 실험 결과는 이온빔 수송 코드, 전자장 해석 코드, 열전달 해석 코드, MCNP 코드 등을 이용한 계산 결과와 함께 최종적인 중성자 발생 장치의 설계 변수 결정에 반영한다.

시작품 중성자 발생장치의 계통 구성도는 그림 1과 같다. 시작품의 주요한 특징은 중성자 수율의 절대 측정을 위해 표적부에 표적함을 두고 표적부와 이온원 사이에 gate valve를 두어 이온원부와 표적부의 진공계통을 독립적으로 운용할 수 있도록 한 것과 이로 인해 이온빔 수송거리가 길어진 것이다. 이온원으로는 helicon plasma source를 사용한다. Helicon plasma source는 현재 다양한 인출조건에 따른 대전류 이온빔 인출특성에 대한 실험을 수행하고 있다. 시작품에서 이온빔의 인출 전압은 30 kV이며 표적은 전기적으로 접지이다. 이온빔 수송부에서는 표적함 설치로 이

온빔의 수송 거리가 늘어남에 따라 두 개의 Einzel lens를 도입하였다. Einzel lens를 이용한 이온빔 수송 설계에는 IGUN 코드[2]를 사용하였으며, 계산 결과 10 mA의 이온빔을 표적까지 대략 1 m의 거리를 수송하기 위해 필요한 Einzel lens 고전압 전극의 전압은 약 40 kV이고, 이때 표적 위치에서 이온빔의 직경은 약 6 cm 이다. IGUN 코드 모사 결과를 바탕으로 Einzel lens의 상세설계를 수행하고 있다. 표적함, 표적, 고전압 feedthrough, coolant feedthrough의 구성 및 배치는 그림 2와 같다. 표적 지지, 냉각 및 고전압 인가를 위한 target mount와 coolant feedthrough를 제작하였다. Target mount는 열 전도도와 전기 전도도가 좋은 Cu를 사용하였고, 냉각을 위해 target mount 내에 냉각수 채널을 내었다. 냉각수 채널의 단면적은 0.18 cm² 이고, 직경 4 cm의 표적에 대한 예상 열부하는 0.02 kW/cm²이다. 표적 냉각을 위한 coolant feedthrough는 고전압이 인가된 조건에서 냉각수 공급이 가능하도록 진공 중의 coolant line을 Teflon tube로 하고, Teflon fitting을 제작하여 feedthrough와 표적함을 절연시킬 수 있도록 하였다.

4. 중성자 차폐계산

중성자 발생장치의 중성자와 감마선 차폐설계를 위해 단순계산과 MCNP를 이용한 모사를 수행하였다. 중성자원과 차폐체는 고속중성자 감속층, 열중성자 흡수층, 감마선 차폐층의 순으로 이루어진 구형의 차폐체 중심에 점선원 형태의 중성자원이 놓이도록 배치하여 단순한 기하구조에 대해 계산을 수행하였다. 고속중성자의 감속재에는 물과 polyethylene(PE)을 고려하고, 열중성자 흡수층에는 9%의 natural boron과 91% urethane으로 이루어진 boron plate를 고려하였으며, 감마선 차폐물로는 납과 concrete를 고려하였다. 계산의 목적은 중성자 발생률 10⁸ n/s의 D-D 중성자 발생장치로부터 방출되는 고속중성자, 열중성자, 중성자 흡수반응에 의한 감마선을 효과적으로 차폐하는데 필요한 차폐물질과 규모를 결정하기 위함이다. 열중성자 흡수를 위한 boron plate는 가격이 매우 고가이기 때문에 boron plate 층의 두께는 0.7 cm로 고정하고 계산을 수행하였다.

중성자 차폐계산은 3 MeV 중성자만을 고려한 단순계산을 수행하고, 단순계산 결과로부터 중성자 차폐층의 특징한 반지름 조건에 대해 MCNP 모사를 수행하여 중성자 차폐체 표면에서의 선량률을 계산하는 방식으로 수행하였다. 중성자 차폐층의 반지름을 r이라고 할 때, 중성자 차폐체 표면에서 3 MeV 중성자에 의한 선량률 $D_{3\text{MeV}}$ 는,

$$D_{3\text{MeV}} = C \cdot \frac{S_n}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\Sigma_t r) \quad (1)$$

과 같이 주어진다. 여기서 C는 neutron flux to dose rate conversion factor, S_n 는 중성자원의 세기, Σ_t 는 3 MeV 중성자에 대한 차폐체의 macroscopic total cross section이다. C는 3 MeV 중성자에 대해 ICRP-21[3]에 의해 1.44 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 주어지고, Σ_t 는 물과 PE에 대해 각각 $1.94 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 과 $7.28 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 이다[4]. Boron plate는 너무 얇기 때문에 boron plate에서 3 MeV 중성자

의 감쇠는 무시할 수 있다. 중성자 차폐체의 반지름에 따른 중성자 차폐체 표면에서의 선량률 계산 결과는 그림 3와 같다. 계산 결과 고속중성자 감속재로 물을 사용한 경우 50 cm, PE를 사용한 경우 100 cm 이상일 때 중성자 차폐체 표면에서의 선량률이 약 1 $\mu\text{Sv/hr}$ 수준으로 낮아진다.

3 MeV 중성자에 대한 단순계산 결과로부터, 물과 PE 고속중성자 감속층의 반지름이 각각 50 cm인 경우와 100 cm인 경우에 대해 MCNP 모사를 수행하였다. MCNP 모사에서는 감마선 차폐체가 없는 경우를 가정하고 고속중성자 감속층의 표면과 boron plate의 표면에서의 중성자속과 선량률을 계산하였다. 모사에는 MCNP4C2[5,6] 코드를 사용하였고, flux tally를 이용하여 중성자의 전 에너지 구간에 대한 중성자속을 모사하고, 에너지 구간에 따른 선량률을 평가하였다. 선량률 계산에서 neutron flux to dose rate conversion factor는 ICRP-21[3] 값을 사용하였다. MCNP 모사 결과는 그림 4와 표 1과 같다. 그림으로부터 50 cm 두께의 물층을 고속중성자 감속층으로 사용할 경우 감속층 표면에서나 boron plate 바깥 표면 모두에서 전 에너지 구간에 걸쳐 중성자속이 훨씬 낮은 것을 볼 수 있다. 선량률 또한 50 cm 두께의 물층을 사용하는 경우가 100 cm 두께의 PE 층을 사용하는 경우에 비해 약 3배 가량 낮았다.

MCNP를 이용한 중성자 차폐계산에 이어, 중성자의 차폐체내 흡수반응에 의한 감마선에 대한 차폐계산을 수행하였다. 중성자 차폐체로부터 중성자의 흡수반응에 의해 방출되는 감마선은 주로 H(n, γ)D 반응에 의한 2.26 MeV 감마선과 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 반응에 의한 0.48 MeV 감마선이다. 그러나 MCNP 계산 결과와 같이 대부분의 중성자는 물이나 PE 층에서 감쇄되기 때문에 감마선 차폐를 위해 고려해야할 대상은 2.26 MeV 감마선이다. 감마선 차폐계산은 단순계산을 통해 수행하였다. 감마선원은 중성자 차폐층의 표면을 따라 고루 분포하는 구형의 면선원이며, 10^8 v/s의 세기를 갖는 것으로 가정하였다. 중성자 차폐층의 반지름을 r, 감마선 차폐층의 두께를 t라고 하면, 감마선 차폐층 표면에서 감마선에 의한 선량률 D_γ 는,

$$D_\gamma = \phi_\gamma \times E \times 1.6 \times 10^{-13} \times \frac{\mu_m}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\phi_\gamma \approx \frac{S}{8\pi r \cdot (r+t)} \times \ln\left(\frac{2r+t}{t}\right) \times \exp(-\mu_a t) \quad (3)$$

이다. 여기서 ϕ_γ 는 감마선속, E는 감마선의 에너지 [MeV], $\frac{\mu_m}{\rho_m}$ 은 신체 연조직에서 감마선의 질량 에너지 감쇄계수 [cm^2/kg], S_r 은 감마선의 세기 [v/s], μ_a 는 감마선 차폐체에서 감마선의 감쇄계수 [cm^{-1}]이다. 2.26 MeV 감마선에 대한 $\frac{\mu_m}{\rho_m}$ 는 $24.99 \text{ cm}^2/\text{kg}$ 이고, μ_a 는 납과 concrete에 대해 각각 0.5117 cm^{-1} , 0.0997 cm^{-1} 이다[9]. (3)식의 감마선속 계산에서는 계산을 간단하게 하기 위해 감마선원 임의 위치에서 방출된 감마선이 투과해야 하는 감마선 차폐체의 두께가 차폐층의 두께 t로 일정한 경우를 가정하였다. 이상의 조건들로부터 5 cm 두께의 납과 20 cm 두께의 concrete로 구성된 감마선 차폐층에 대한 계산 결과는 그림 5과 같다. 그림으로부터 고속중성자 감속층이 반지

름 50 cm의 물인 경우는 10 cm 두께의 납층이나 5 cm의 납과 20 cm의 concrete 층을 함께 사용할 경우 감마선 차폐층 표면에서의 선량률을 1 μ Sv/hr 이하로 낮출 수 있다. 반면 100 cm 두께의 PE를 고속중성자 감속층에 사용하는 경우에는 두께 5 cm의 납층이나 20 cm의 concrete 층을 사용할 때 감마선에 의한 선량률은 \sim 4 μ Sv/hr 수준으로 다소 높다.

이상의 계산 결과를 정리하면 차폐체 구성에 따른 전체 차폐체의 총중량과 차폐체 가장 바깥쪽 표면에서의 총선량률은 표 2와 같다. 표로부터 고속중성자의 감속제로 50 cm 두께의 물층을 사용한 경우의 선량률이 100 cm 두께의 PE 층을 사용한 경우의 30% 가량으로 차폐능이 우수하고, 전체 차폐체의 총중량 면에서도 절반정도밖에 되지 않는 것을 알 수 있다. 50 cm 물층으로 고속중성자 감속층을 구성한 경우에서 감마선 차폐체는 5 cm 두께의 납층과 20 cm 두께의 concrete 층을 차례로 배치한 경우가 10 cm 두께의 납층만을 둔 경우보다 선량률이 30% 이상 더 감소하였고, 중량에서는 큰 차이가 없었다. 차폐체로서 물을 사용하는 경우에는 물을 가두기 위한 별도의 구조물이 추가로 필요하고 장치의 운전중 물의 누수 등의 우려가 있다. 이에 반해 PE는 고체이기 때문에 이러한 번거로움을 해결할 수 있다. 그러나 계산 결과 PE만을 사용하는 경우에는 차폐체의 크기가 지나치게 커야하고 중량 또한 매우 커서 부적합함을 알 수 있다. 방사선 발생장치의 신고사용 기준인 10 μ Sv/hr와 비교하였을 때, 지극히 단순한 기하조건에 대한 계산 결과임에도 불구하고, 고속중성자 감속제로 PE 만을 사용하여 신고사용 기준을 만족하기 위해서는 10 metric ton이 훨씬 넘는 양의 차폐체가 요구된다. 따라서 차폐체는 PE와 물을 함께 감속제로 사용하는 방향으로 설계를 수행하여야 한다.

5. 결 론

중성자 발생율 10^8 n/s의 D-D 중성자 발생장치 개발을 위한 설계개념을 요약하고, 시작품의 상세설계 내용을 기술하였다. 시작품은 중성자 발생율은 10^4 n/s를 목표로 하고 있으며, 중성자 발생장치 설계변수의 최적화를 위한 연구에 활용될 예정이다. 추가로 중성자 발생장치 가동으로 인한 중성자와 감마선에 대한 차폐설계를 위한 계산을 수행함으로써 차폐설계의 정량적 기준을 마련하였다.

참고문헌

1. 최병호, 강희동, “D-T 중성자원의 이용과 개발현황”, KAERI/AR-239/83, Korea Atomic Energy Research Institute, 1983.
2. R. Becker, IGUN(C) 1992 - 96, 32-bit version for 400,000 meshes with interactive graphics, running under DOS-5.X, WINDOWS-3.XX, WINDOWS-95, and WINDOWS-NT on INTEL 486 and Pentium processors.

3. ICRP Committee 3 Task Group, P. Grande and M.C. O’Riordan, chairmen, “Data for protection against ionizing radiation from external sources: supplement to ICRP publication 15”, ICRP-21, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, 1971.
4. C.L. Dunford and T.W. Burrows, “Online Nuclear Data Service”, Report IAEA-NDS-150 (NNDC Informal Report NNDC/ONL-95/10), Rev. 95/10, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1995.
5. J.F. Briesmeister, Ed., “MCNP – a general Monte Carlo N-particle transport code, version 4C”, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
6. J.S. Hendricks, “MCNP4C2”, X-5:RN(U)-JSH-01-01, Memorandum, Los Alamos National Laboratory, 2001.
7. J.H. Hubbel and S.M Seltzer, “Tables of X-Ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients (version 1.03)”, [Online], Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi> [2003, April 1], National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., 1997.

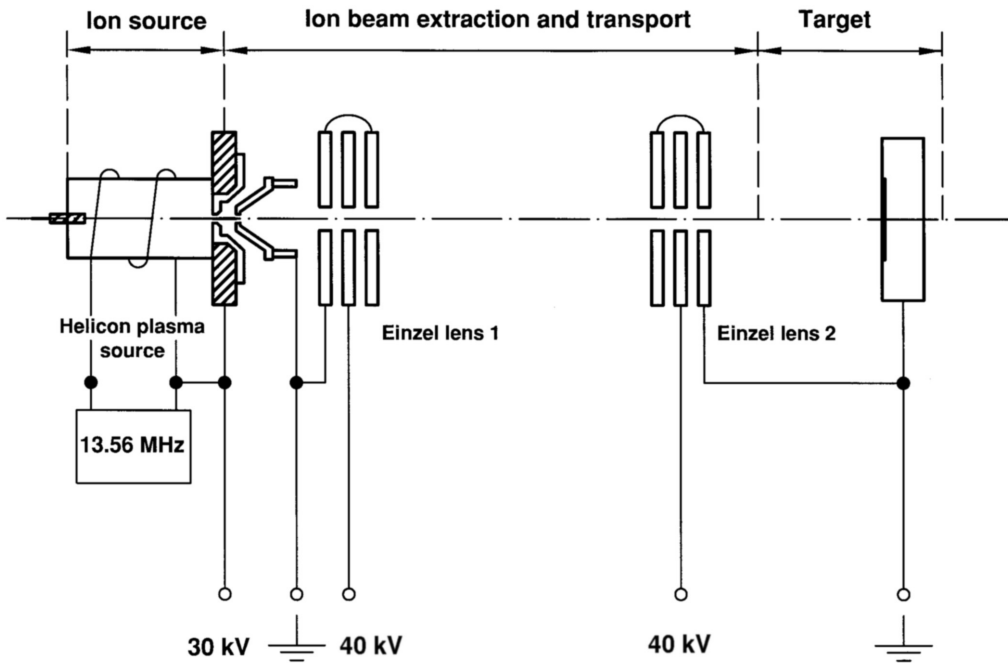


Fig. 1. Schematic drawing of the prototype D-D neutron generator.

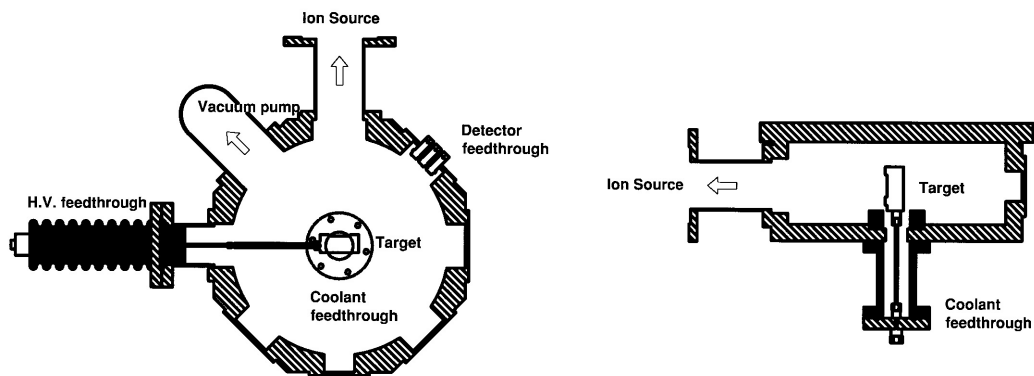


Fig. 2. Schematic drawing of target chamber and the related components.

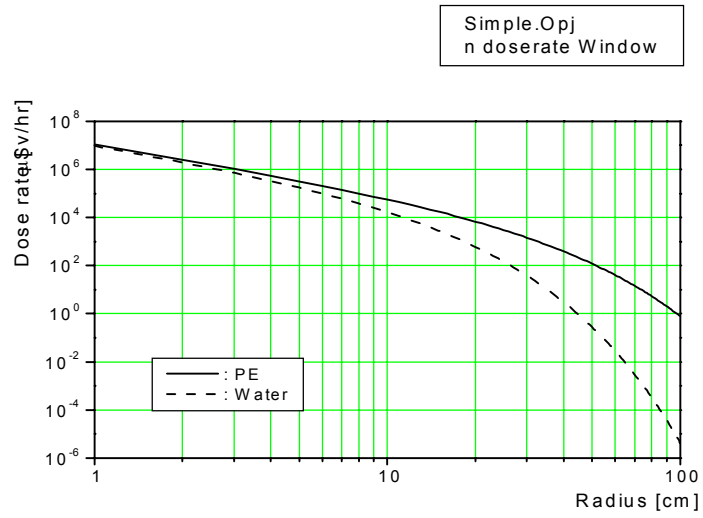


Fig. 3. Dose rate of 3 MeV neutron, at the outer surface of neutron shielding layer, according to the neutron shield thickness. It is obtained by the simple calculation.

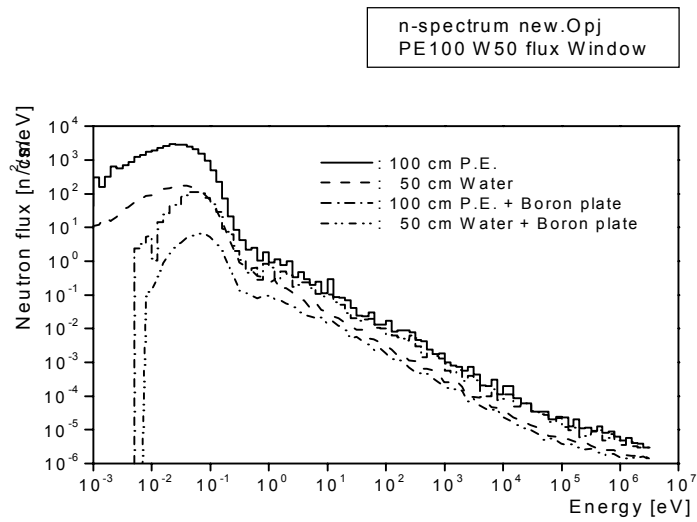


Fig. 4. The simulated neutron flux spectrum at the surface of the fast neutron moderation layer and the outer surface of boron plate layer.

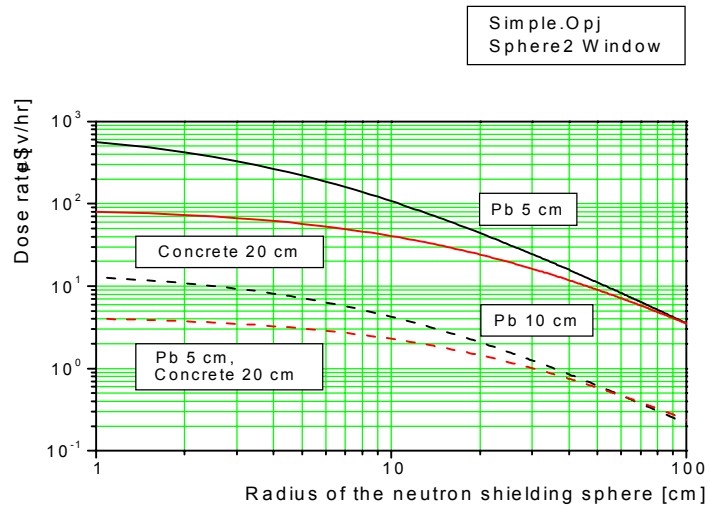


Fig. 5. Dose rate of the ν -ray emitted from the neutron absorption reaction, at the outer surface of the ν -ray shielding layer, according to the neutron shield thickness. It is obtained by the simple calculation.

Table 1. Dose contribution and flux of neutron per energy bin at the outer surface of boron plate.

| Neutron moderation layer | Neutron energy | 10 keV | 100 keV | 2 MeV | Total | |
|--------------------------|----------------|--------|---------|-------|-------|------------------------------|
| | Weigh factor | 5 | 10 | 20 | 10 | - |
| Water : 50 cm | Flux | 2.172 | 0.564 | 2.823 | 2.287 | 7.846 [n/cm ² s] |
| | Dose rate | 0.088 | 0.050 | 2.373 | 3.248 | 5.759 [μSv/hr] |
| PE : 100 cm | Flux | 18.44 | 2.850 | 9.313 | 4.752 | 35.353 [n/cm ² s] |
| | Dose rate | 0.762 | 0.278 | 9.569 | 4.514 | 15.123 [μSv/hr] |

Table 2. Dose rate at the outer surface of γ-ray shielding layer and the total weight of various shielding composition.

| Neutron shield | γ-ray shield | Dose rate [μSv/hr] | | | Total weight [Metric ton] |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------|-------|--------|---------------------------|
| | | Neutron | γ-ray | Total | |
| Water 50 cm, boron plate 0.7 cm | Pb 10 cm | 4.018 | 0.611 | 4.629 | 4.99 |
| | Pb 5 cm + concrete 20 cm | 2.583 | 0.579 | 3.162 | 5.08 |
| PE 100 cm, boron plate 0.7 cm | Pb 5 cm | 13.726 | 3.514 | 17.240 | 11.55 |
| | Concrete 20 cm | 10.526 | 3.496 | 14.022 | 11.06 |