

## D-D 중성자 발생장치 시제품 개발

### Development of Prototype D-D Neutron Generator

김인중, 정남석, 최희동

서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

#### 요 약

D-D 중성자 발생장치 시제품[2]을 설계하고 제작하였다. 시제품은 이온원, 이온빔 수송계통, 표적계통, 방사선 차폐체, 중성자 검출계통으로 구성되며 개별 계통의 제작을 완료하였다. 전체 계통에 대해 간단히 요약하고 표적계통과 중성자 검출계통의 개발 내용에 대해 상세히 기술하였다.

#### Abstract

A prototype D-D neutron generator[2] is designed and manufactured. The prototype device consists of ion source, ion beam transport system, target system, radiation shield and neutron detection system. Every component has been fabricated now. The whole system is summarized briefly, and the details of target system, neutron detection system are described.

#### 1. 서 론

D-D 반응을 이용한 중성자 발생장치 개발[1,2,3]을 위해 시제품[2] 설계를 수행하고 개별 구성계통에 대한 제작을 완료하였다. 발생장치의 최종 목표 사양은 이온빔 가속전압 120 kV, 이온빔 전류 50 mA, 중성자 수율  $10^8$  n/s 이며, 시제품은 가속전압 30 ~ 80 kV, 이온빔 전류 10 mA, 중성자 수율  $10^4$  n/s 이상을 목표로 하고 있다. 시제품은 중성자 발생 검증 및 수율 측정 방법 확립, 표적에서의 고전압 인가, 표적 냉각 시험, 표적의 냉각 및 제작 방법에 따른 중성자 수율 측정 등을 목적으로 설계하였다. 시제품은 이온원, 이온빔 수송계통, 표적계통, 방사선 차폐체, 중성자 검출계통으로 구성된다. 시제품의 개별 계통 제작이 완료되었고 이온원, 표적계통, 중성자 검출계통에 대한 특성 실험이 수행되었다. 현재 전체 시제품 계통에 대한 조립이 진행 중에 있으며, 이온원에서 표적까지의 이온빔 수송만 이루어지면 곧 중성자를 발생시킬 수 있을 것으로 기대된다. 시제품의 실험 결과는 이온빔 수송 코드, 전자장 해석 코드, 열전달 해석 코드, MCNP 코드 등을

이용한 계산 결과와 함께 최종적인 D-D 중성자 발생장치의 설계에 반영될 것이다.

## 2. D-D 중성자 발생장치 시제품 설계 제작

중성자 발생장치 시제품 전체 계통의 대략적인 구성은 그림 1과 같다. 이온원은 helicon plasma ion source이고, 30 kV 인출 조건에서 10 mA 인출 전류를 달성하였다. Einzel lens는 IGUN 코드 [4]를 이용한 이온빔 수송 계산을 바탕으로 설계하였다[2]. 계산 결과 두 개의 Einzel lens를 사용하여 10 mA의 이온빔을 표적까지 대략 1 m의 거리를 수송하였을 때 이온빔의 직경은 약 60 mm이고 Einzel lens에 필요한 전압은 대략 40 kV이다. 제작 완료된 Einzel lens는 사진 1과 같다. Beam collimator의 직경은 이온빔 수송 계산 결과로부터 이온빔이 이차전자 억제 전극에 부딪히지 않고 표적의 크기 안으로만 들어갈 수 있도록 결정하였다. 표적에서 이온빔에 의한 이차전자 방출은 표적 앞에 이차전자 억제 전극을 두고 이차전자 억제 전극의 전압을 표적의 전압 보다 낮게 함으로써 억제하도록 하였다. 이차전자 억제 전극과 표적간의 전압차는 표적과 이차전자 억제 전극 사이에 고전압 저항을 두어 표적에서의 이온빔에 의한 전류를 이용하여 고전압 저항에서 전압 강하를 일으킴으로써 발생시키도록 하였다. 표적과 이차전자 억제 전극 사이의 고전압 저항은 1 MΩ과 0.1 MΩ을 사용하여 각각 1 mA 이온빔 전류와 10 mA 이온빔 전류에 대해 1 kV의 전압차를 얻을 수 있도록 하였다. 중성자 발생 표적의 직경은 -50 kV의 고전압을 인가할 수 있어야 하기 때문에 표적함 내부 공간에 제약을 받는다. 표적의 직경은 M.R. Shubaly and M.S. de Jong[5]의 진공에서의 방전 특성식을 이용하여 결정하였다. 표적집합체의 직경은 80 mm이고, 이때 표적집합체와 표적함 사이의 간격은 40 mm 이상이고, 이온빔과 반응하는 표적의 직경은 35 mm이다. 표적의 직경이 35 mm일 때 이온빔의 수송 효율은 이온빔 수송 계산으로부터 대략 34%로 예상된다. 이때 beam collimator의 직경과 이차전자 억제 전극에서 빔이 지나갈 수 있는 열린 면의 직경은 각각 20 mm와 35 mm이다. 표적함은 표적으로의 냉각수 및 고전압 공급이 가능하고, 표적함 내에 검출기를 위치시킬 수 있도록 모두 7 개의 다용도 port를 갖는다. 표적함의 체적은 대략 20 l이며, 300 lps의 분자펌프와 600 lpm의 로터리펌프를 이용하여 진공계통을 구성하였다. 표적함 만의 진공도는  $5 \times 10^{-7}$  torr이다. 표적함에서 표적집합체와 beam collimator, 이차전자 억제 전극, 진공계통, 냉각계통, 고전압계통 등의 구성은 그림 2와 같다. 표적의 냉각계통은 최대 토출량이 20 lpm, 최대 압력은 6 bar, 냉각수 온도는 5 ~ 20 °C까지 조절이 가능하고 냉각 용량은 약 10 kW이다. 표적집합체와 검출계통 구성은 3장과 4장에서 상세히 기술하였다.

## 3. 표적집합체 제작

중성자 발생장치 시제품의 표적집합체를 그림 3과 같이 설계하고 제작하였다. 진공 중에서 냉각수를 순환시키고 동시에 고전압을 견딜 수 있도록 하기 위해 냉각수 공급 라인과 표적집합체의 외부 구조물을 절연물질로 구성하였다. 이온빔과 반응하는 표적은 0.5 mm 두께의 Ti를 사용하였으며, 냉각수가 Ti 표적의 뒷면을 직접 냉각할 수 있도록 하였다. 고전압은 표적집합체의 뒷면으

로부터 Cu 구조물을 통해 인가할 수 있도록 하였다. Cu 구조물은 표적집합체의 외부구조물과 함께 냉각수의 유로를 형성한다. 구조물간의 체결에는 O-ring을 사용하여 냉각수로부터 외부 진공 환경을 유지할 수 있도록 하였다. 냉각수 공급라인은 직경 4 mm의 Teflon 튜브를 사용하였다. 표적집합체의 외부 구조물에는 Teflon, Luthite, Acetal, ceramic 등을 고려하였으나 Luthite와 Acetal이 가장 적합한 특성을 보였다. Teflon은 절연성과 가공성이 우수하지만 시간에 따라 영구 변형이 진행되어 진공에 적합하지 못하였고, ceramic은 비용과 가공 면에서 적합하지 못하였다.

제작된 표적집합체에 대해 진공, 냉각 특성, 고전압에 대한 시험을 수행하였다. 진공 특성은 표적함 자체의 base pressure인  $5 \times 10^{-7}$  torr까지 도달함으로써 뛰어난 성능을 보였다. 냉각특성으로서 표적에서의 유량을 측정하였다. 표적에서의 유량은 최고 2 lpm으로 표적 냉각계통의 최대토출량 20 lpm의 10% 수준으로 매우 낮은 결과를 보였다. 이는 진공 중에서 표적까지 냉각수를 공급하는 냉각수 라인의 직경이 4 mm로 작고, 표적집합체 내에서도 냉각수 유로가 너무 좁기 때문이다. 고전압은 -50 kV까지 고전압을 인가하며 안정성을 살펴본 결과 대략  $6 \times 10^{-7}$  torr 진공 조건에서 -40 kV까지는 한 시간이상 방전 없이 안정적인 운전이 가능했으나 -45 kV와 -50 kV에서는 안정성이 확보되지 못하였다. 표적집합체가 -45 kV 이상의 고전압에서 방전을 일으키는 이유에 대해서는 좀더 살펴보아야 할 문제이다. 또한 표적집합체의 고전압 특성은 표적함의 진공도와 매우 밀접한 관계를 갖는 특성을 보였다. 고전압을 인가한 조건에서 방전이 일어나게 되면 표적함의 진공도는 순간적으로  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  torr 수준으로 급격히 증가한다. 이때 표적함의 기본 진공도가  $7 \times 10^{-7}$  torr 이하의 수준일 경우에는 급격히 증가한 진공도는 서서히 정상으로 돌아오게 되는데, 기본 진공도가  $1 \times 10^{-6}$  torr 이상인 경우에는 방전에 의해 악화된 진공도에 의해 연속적으로 방전이 일어나게 되어 고전압의 안정성을 확보할 수 없다. 그리고 이러한 연속 방전이 O-ring 주변에서 일어날 경우에는 O-ring을 영구히 손상시켜 진공도를  $10^{-5}$  torr 수준으로 악화시킬 뿐 아니라 즉시 표적집합체를 교체해야 하는 문제를 발생시켰다. 표적집합체의 고전압 안정성이 표적함의 진공도에 밀접한 관계를 갖는 것은 이온원과 표적함을 결합시켰을 때 표적함 위치에서의 충분한 진공도를 확보하지 못하면 표적에서의 고전압을 낮은 수준으로 인가할 수밖에 없기 때문에 장치 성능의 큰 제약으로 작용할 수 있다. 현재 이온원 위치에는 500 lps의 분자펌프가 장착되어 이온원 인출부에서의 진공도를  $10^{-5}$  torr 수준으로 유지하고 있다.  $6 \times 10^{-7}$  torr 진공 조건에서 표적집합체에 -40 kV의 고전압을 인가했을 때의 누설 전류는 0.3 mA 수준이다.

표적의 냉각 특성을 살피기 위해 실험과 병행하여 전산코드를 이용한 해석을 수행하였다[6]. 해석에는 CFX4.2 code[7]를 사용하였다. 해석결과 유속이 2 lpm일 때 250 W의 열부하 조건에 대해 표적위치에서 냉각수의 최대 온도는 대략 60 °C였다. 여기서 250 W는 표적에서의 고전압을 -40 kV, 이온원에서 이온빔 전류를 10 mA, 이온빔 수송효율을 34% 이상으로 가정한 경우에 해당하는 열부하이다. 표적에서 고전압이 -50 kV, 이온빔 전류가 10 mA인 경우에 해당하는 800 W의 열부하 조건에서는 냉각수의 온도가 100 °C를 훨씬 초과하는 해석 결과를 얻었다. 현재의 표적집합체계통은 시작품을 이용한 중성자 발생 검증과 기본적인 실험에는 활용이 가능하지만 장치의 성능을 개선하고, 가속전압 120 kV, 이온빔 전류 50 mA의 최종의 D-D 중성자 발생장치에서의

표적을 개발하기 위해서는 새로운 구조의 표적집합체를 개발하는 것이 필요하다.

#### 4. 중성자 검출계통 구성

중성자 발생장치 시작품에서 중성자 검출계통은 He-3 검출기를 이용한 중성자속 감시계통과  $D(d,n)^3\text{He}$  반응과  $D(d,p)\text{T}$  반응으로부터 방출되는 하전입자 -  $^3\text{He}$ , p, T를 검출하는 중성자 수율 측정계통으로 구성된다. 중성자속 감시계통은 He-3 검출기를 이용해 시간에 따른 중성자속의 상대적인 변화를 감시하여 시간에 따른 중성자 수율의 변화를 측정한다. 중성자 수율측정계통은 하전입자 검출용 반도체 검출기를 이용하여 D-D 반응으로부터 방출되는 하전입자 -  $^3\text{He}$ , p, T를 검출하여 하전입자의 발생율을 분석하고, 이로부터 D-D 반응 단면적을 고려하여 중성자 수율을 결정한다. 중성자속 감시계통은 구성이 단순하고 측정 또한 용이하여 장치의 상태를 실시간으로 감시할 수 있다. 하전입자 검출을 통한 중성자 수율측정은 하전입자의 검출효율이 매우 높기 때문에 낮은 수율의 중성자 발생을 검증하고 수율을 결정하기에 적합하다. 본 연구에서는 중성자 수율 측정계통의 구성에 대해 기술하였다.

중성자 수율측정계통을 그림 4와 같이 구성하였다. 검출기는 CANBERRA PD-100-13-100AM, Preamplifier는 ORTEC 142 (또는 CANBERRA 2003 BT), AMP는 CANBERRA 2020 spectroscopy AMP, bias power supply는 ORTEC 710 Quad Bias Supply, MCB에는 ORTEC EtherNIM 919E, pulser는 CANBERRA 1407 Reference Pulser를 사용하였다. 검출계통은 모두 3 개의 검출기를 이용하여 중성자 수율을 측정할 수 있도록 구성하였다. 검출기는 표적으로부터 180 mm 거리에 이온빔의 진행방향에 대해 각각  $150^\circ$ ,  $165^\circ$ ,  $-150^\circ$  방향에 놓도록 설정하였다. 검출기의 거리와 방향에 따른 입체각 계산결과를 그림 5에 나타내었다. 계산에서 표적으로부터 이차전자 억제 전극의 거리는 15 mm로 가정하였다. 그림으로부터 검출기의 입체각은  $10^{-3}$  수준으로 중성자의 수율이  $10^4$  n/s 일 때 검출기에서의 계수율은 대략 10 cps를 예상할 수 있다. 검출계통의 noise에는 60 Hz, 9.5 kHz, 13.56 MHz, 0.7 GHz noise가 주요하게 기여하였다. 이 중에서 60 Hz noise는 전원의 접지에 포함되어 있는 noise이고, 13.56 MHz는 이온원의 RF에 의한 noise이다. 9.5 kHz noise와 0.7 GHz noise는 근원을 파악하지 못하였지만 하전입자의 분광에는 크게 영향을 주지 못하는 수준이다. 60 Hz noise의 기여를 줄이기 위해 검출계통의 전원에 UPS와 power conditioner를 추가하였다. 60 Hz noise는 검출기 bias를 인가한 상태에서 100 mV 이상이었으나, 검출계통의 접지를 전원의 접지로부터 분리시킴으로써 20 mV 이하로 낮추었다. 13.56 MHz noise는 수백 mV 이상으로 이온원을 운전하는 동안에는 측정이 전혀 불가능한 수준이었다. 13.56 MHz noise를 차단하기 위해 검출계통에 대한 RF shield를 제작하여 구성하고 전원에 isolation transformer와 RF filter를 추가하였다. 검출계통을 RF로 shield 계통을 구성한 결과 검출계통의 신호에서 13.56 MHz noise에 의한 약한 기여 만을 확인할 수 있었다. 검출계통에 대한 noise conditioning 이후 검출기에 bias를 인가한 조건에서 전체 noise 수준은 20 mV 이하이다.

## 5. 결 론

중성자 발생장치 시작품의 개별 구성 계통의 제작을 완료하였다. 이온원은 30 kV의 인출전압에서 10 mA의 이온빔 인출을 달성하였고, 표적계통에서는 -40 kV 까지 안정된 고전압을 인가할 수 있었으며, 열부하 해석결과 가속전압 70 kV, 이온빔 인출전류 10 mA, 이온빔 수송율 34% 조건까지 표적에서 냉각수 온도를 60 °C 이하로 유지할 수 있음을 확인하였다. 중성자 검출계통을 구성하였으며, 중성자 수율측정계통의 검출기 배치를 결정하고, 검출계통의 noise 수준을 20 mV 이하로 억제하였다. 중성자를 발생시키고 발생을 검증하기 위해서는 장치의 전체적인 조립과 이온빔 수송, 차폐체 설치, 중성자 수율측정계통의 채널-에너지 검정 등이 추가로 이루어져야 한다.

## 참고문헌

1. 김인중, 최희동, “D-D 중성자 발생장치 개념설계”, 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
2. 김인중, 김선호, 최희동, “D-D 중성자 발생장치 시작품 설계 및 차폐계산”, 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
3. 김인중, 최희동, “D-D 중성자 발생장치 중성자 수율 계산”, 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
4. 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.
5. M.R. Shubaly and M.S. de Jong, IEEE Trans. Nucl. Scien. NS-30 (1983) 1399.
6. N.-S. Jung, “Analysis of Thermal Load on the High Energy and High Current Ion Beam Target”, Proceeding of NtUss Forum 2004, submitted, Jeju, Korea.
7. AEA Technology, User's Manual to CFX Version 4.2, AEA Technology plc, (1998).

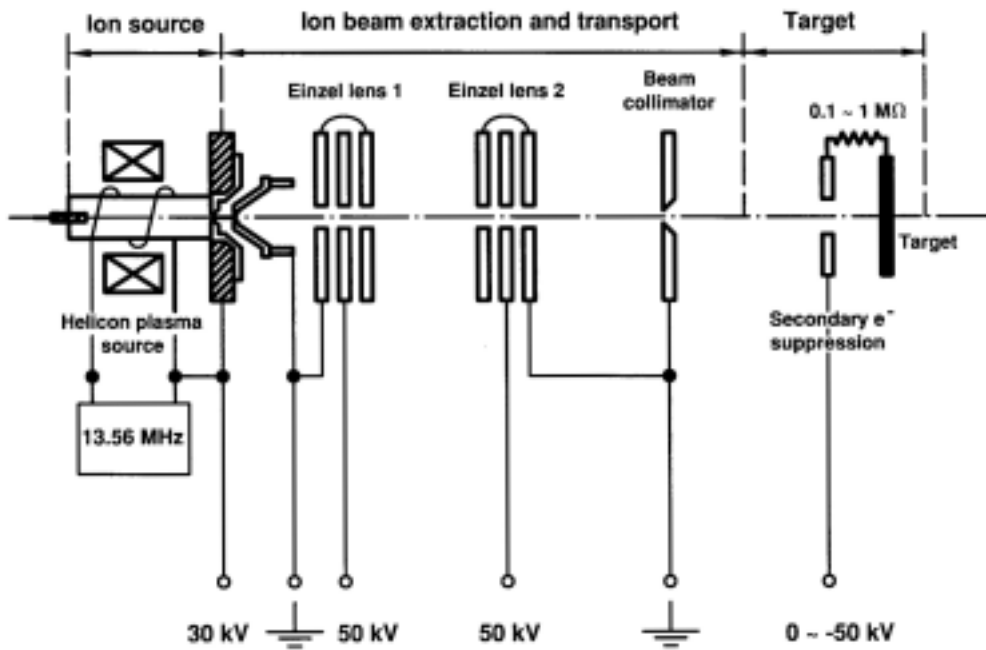


Fig. 1. Schematic drawing of the prototype device.

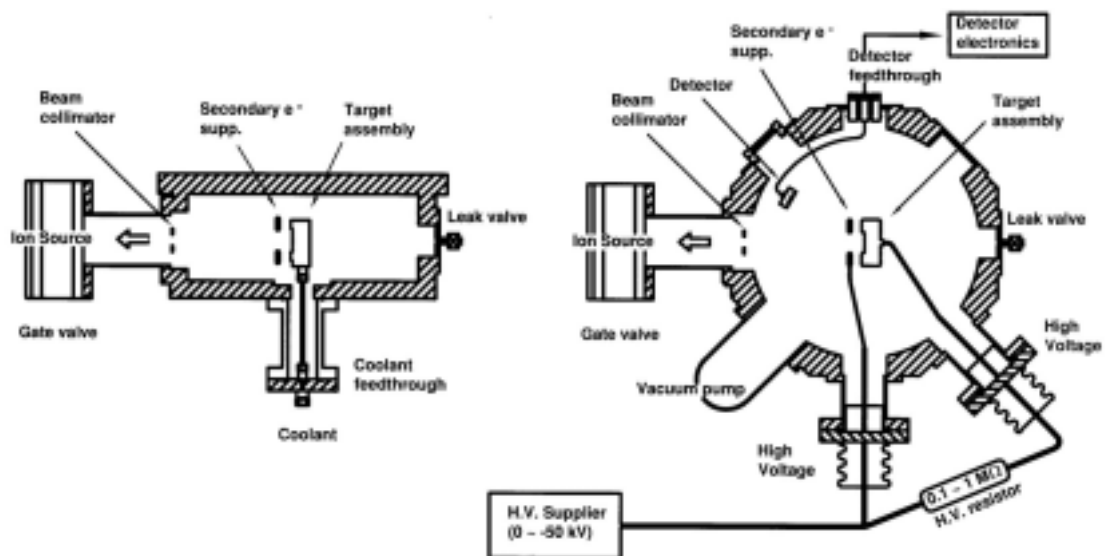


Fig. 2. Schematic drawing of target chamber and the related components.

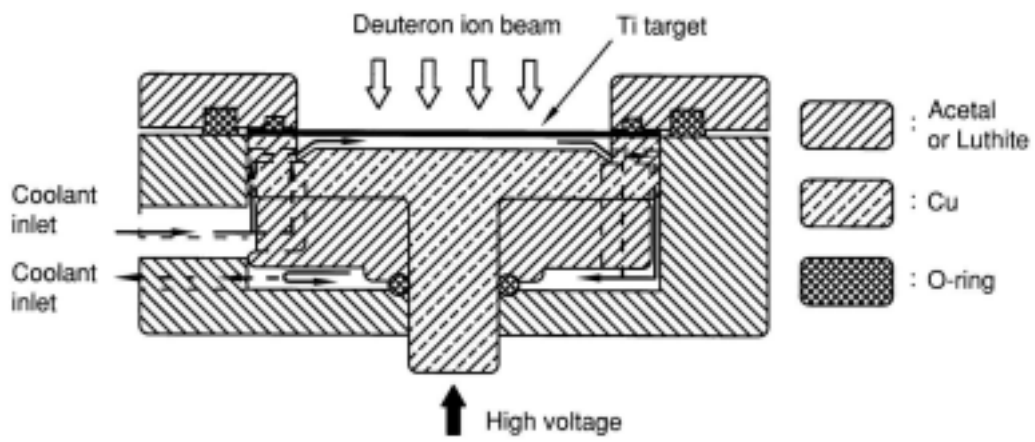


Fig. 3. Schematic drawing of the neutron generation target assembly.

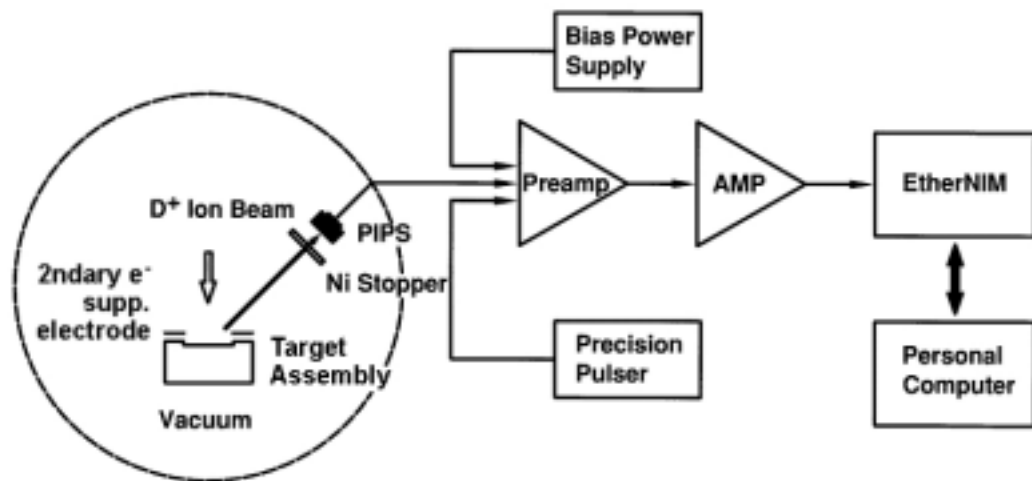


Fig. 4. Schematic diagram of the neutron yield measurement system.

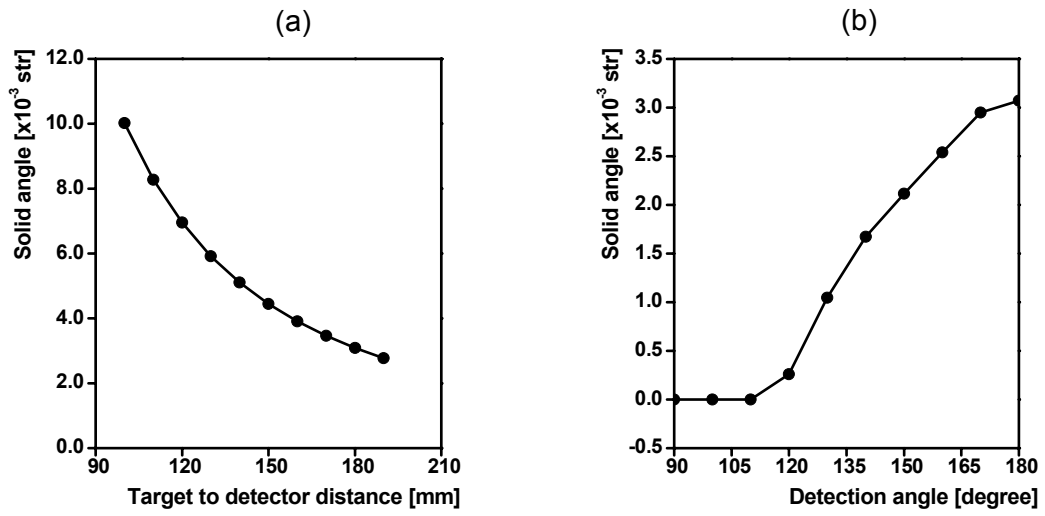


Fig. 5. Result of the detector solid angle calculation. (a) : detector solid angle according to target to detector distance at 180° detection angle. (b) : detector solid angle according to detection angle at target to detector distance 180 mm.



Photo 1. Fabricated Einzel lenses. Right side shows the cross sectional desing of the lenses.