

2001 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

BNCT 조사장치의 설치 및 중성자, 감마 누설 측정

Installation of BNCT Irradiation Facility and Measurement of Neutron and Gamma-ray Leakages

황승렬 · 김명섭 · 전병진 · 이지복 · 박상준 · 이번헌 · 이병철 · 이중희 · 임경환 · 김민진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 IR공에 BNCT를 위한 조사장치를 설치하고 중성자와 감마선 누설을 측정하였다. 조사장치 설치에 전용 장비 개발, 절차 확립, 사전 연습 등을 통하여 안전하게 수행되었다. 조사공의 He 밀봉에는 안티몬이 소량 첨가된 납 가스켓을 개발하여 이용하였다. 설치된 조사장치 전면에서 중성자, 감마선량율과 조사실 내부의 공간선량을 측정하였다. 물통 셔터가 닫혀있을 때 중성자 누설은 무시할 만 하였으며, 원자로 출력 10 MW에서 감마선량은 최대 12 mSv/hr였다. 이 측정 결과를 이용하여 조사장치의 전면 차폐 구조를 결정하였다.

Abstract

The irradiation facility for BNCT was installed at the IR beam tube of HANARO, and the leakages of neutron and gamma-ray were measured. The safety in the Installation work was ensued by using the special jigs with the working procedure verified through the pre-exercises. The lead gasket containing a small amount of antimony was developed and used for He sealing in the IR beam tube. When the water shutter was closed, the neutron leakage was negligible, and the maximum dose rate of gamma-ray at the 10 MW of reactor power was 12 mSv/hr. The geometry of front shielding was determined by using this measurement result.

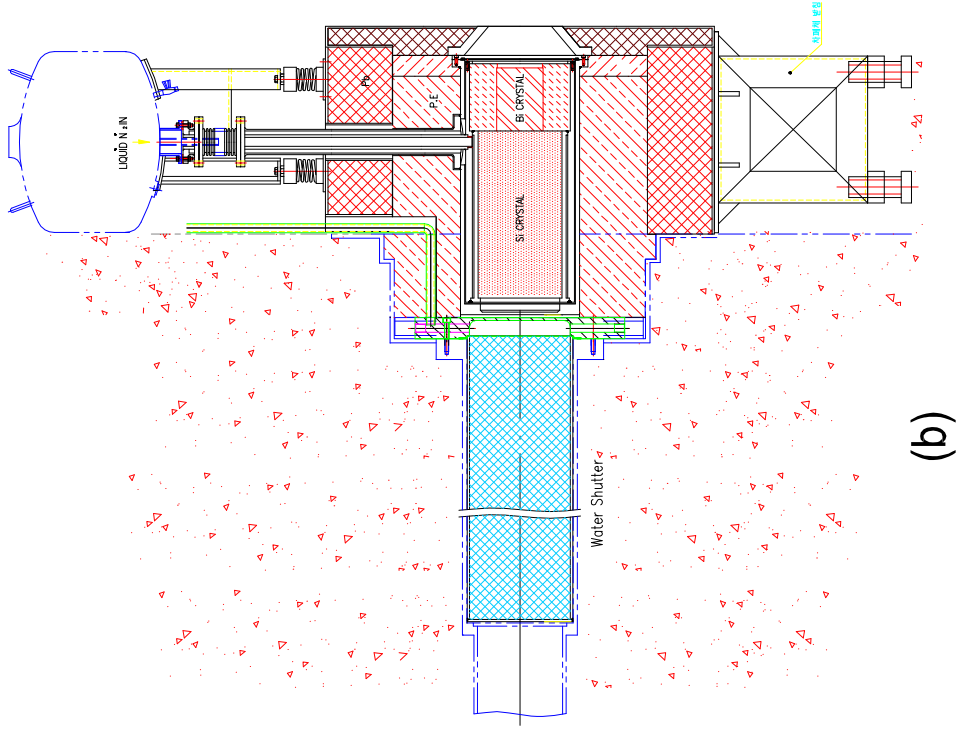
1. 서론

붕소 중성자 포획 암 치료(BNCT: Boron Neutron Capture Therapy)는 암 세포에 선별적으로 모이는 붕소 화합물을 투여한 뒤에 중성자를 쏘여서 암 세포를 선별적으로 죽이는 원리상 매우 유망한 암 치료법이다[1,2,3]. 하나로에서는 수년 전부터 이러한 BNCT를 구현할 수 있는 중성자 조사장치의 개발에 대해 연구해 왔으며, 그 가능성을 확인하였다[4]. 하나로 BNCT 조사장치는 액체질소로 냉각된 Si와 Bi 단결정을 이용하여 BNCT에 불리한 성분인 고속 중성자와 감마선을 차폐시키고 열중성자는 최대한 투과시키도록 설계, 제작된 조사장치로써 사전 성능 검사를 마쳤다. 이 조사장치를 하나로 조사공에 설치하는 작업은 고방사능 작업이므로 사전에 치밀한 계획을 세우고 설치에 필요한 각종 보조장치도 제작 사용해야 한다. 이 작업은 하나로가 고출력 운전을 시작한 후 처음으로 시도 되는 것이다.

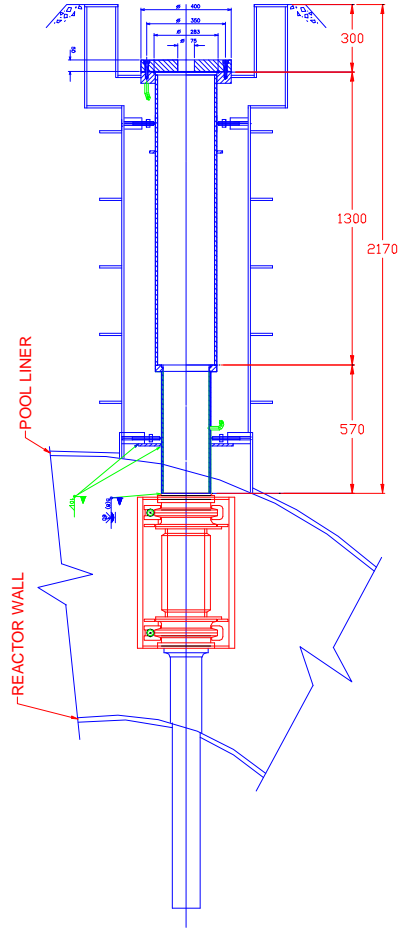
BNCT 조사실에서는 BNCT를 위한 간이 수술도 할 수 있도록 설계되어 있다. 이를 위하여 물통셔터에 물이 채워져 있으면 조사실 내부의 방사선 준위는 원자로가 운전중일 때에도 매우 낮아야 한다. 그러나 조사장치 설계시 사용한 중성자 및 감마 수송 프로그램인 MCNP의 통계적인 계산 특성으로 인하여 고방사선 영역과 매우 낮은 방사선 영역이 함께 취급되는 구조에 대하여는 낮은 준위를 갖는 영역의 값을 정확하게 예측하는 것이 어렵다. 따라서 조사장치에서 마지막 단계에 설치하는 조사 부위 쪽의 전면 차폐체는 차폐 두께를 사전에 정확하게 결정할 수 없었으므로 미리 제작하지 않았다. 이에 따라 조사공에 조사장치를 설치한 후 중성자 및 감마선량을 측정하여 이 차폐 구조를 결정하였다.

2. BNCT 조사장치 설치

BNCT 장치가 설치될 하나로 IR 조사공은 그림 1의 (a)와 같으며, BNCT 조사장치는 (b)와 같다. BNCT 장치의 물통셔터가 설치될 수평 조사공 내부에는 그림 1의 (a)와 같이 강한 방사선의 외부 누출을 차폐하기 위한 차폐 마개들이 설치되어 있다. 물통셔터를 설치하려면 이들 차폐 마개를 빼내야 한다. 차폐 마개를 빼내면 노심에서 조사공 바깥으로 강한 방사선이 나오며, 차폐 마개 자체도 장기간 조사되어 강한 방사선을 낸다. 이에 따라 고방사선 환경에서 방사화된 차폐 마개를 안전하게 취급하고 새 장치를 설치하기 위한 전체적인 설치 공정도를 작성하였으며, 전체 작업 참여자들에게 작업의 내용을 숙지시키고, 매 공정에 필요한 장비 및 보호 장치를 준비하였다. 그리고 이러한 내용을 모두 포함한 종합 작업 절차서를 작성하였으며, 몇 차례의 사전 연습을 거쳐 절차서를 보완하였다. 방사선 준위를 최대한 낮추어 작업하기 위하여 원자로가 10일간 정지되는 기간에 노심의 모든 핵연료를 인출하고 작업에 임하였으며, 각 작업 단계별로 방사선량을 수시로 측정하고 확인하였다.



(b)



(a)

그림 1. 하나로 IR 조사공(a) 및 BNCT 조사장치(b).

전체 작업 과정 중 기존의 차폐 마개를 빼내고 그 자리에 물통셔터를 설치하는 공정이 가장 위험 부담이 높으며, 이 작업을 위하여 차폐 용기, 차폐체, 인출/설치 안내관, 중량물 취급 수레, 원거리 취급 장치 등을 설계, 제작하였다. 그림 2는 작업자의 차폐를 유지하면서 차폐 마개들을 제거하고 물통셔터를 장입하기 위하여 제작된 취급 수레이다. 가장 안쪽에 있는 차폐 마개는 자체의 방사능이 매우 높을 뿐만 아니라 노심 방향 끝 부위에 냉각용 스프링이 설치되어 있는데 이것이 인출하는 동안 튀어나갈 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 냉각 패드 이탈방지용 원통 jig를 제작하여 사용하였다.



그림 2. 고방사선 중량물 취급 수레.

물통셔터가 설치된 후에는 조사공 안쪽에 채워지는 He의 밀봉이 유지되어야 한다. 조사공의 빔 튜브는 스테인레스 강이며 여기에 설치되는 물통셔터 통은 60계열의 알루미늄이다. 하나로에서는 스테인레스 강 사이에서 헬륨 밀봉을 유지시키는 가스켓으로 10계열의 순수 알루미늄을 사용하고 있다. 그러나 강도와 표면 경도가 다른 스테인레스와 60계열의 알루미늄 사이의 밀봉에는 알루미늄 60계열의 표면 경도와 조임 볼트의 조임력의 한계로 인하여 순수 알루미늄을 사용할 수 없다. 이에 따라 중성자 조사에 의하여 성질이 변화되지 않으며, 헬륨 밀봉 기능을 발휘할 수 있는 납 가스켓을 개발하였다. 납은 연성이 좋아서 쉽게 모양을 변화시킬 수는 있으나 그 형상의 재현성이 없어서 취급이 어렵다. 이에 따라 납의 경도를 높이기 위하여 안티몬을 미량 첨가하였다. 납에 안티몬을 첨가하면 경도가 향상되며, 과다하게 첨가하면 납의 연성 특성을 해치게 되고, 외부 충격에 균열이 발생할 수 있다. 따라서 첨가량을 변화시키면서 안티몬의 최적 첨가량을 결정하였다. 이렇게 제작한 납

가스켓을 이용하여 물통셔터를 설치한 후 22 kPa의 압력으로 He 누설 시험을 실시하였으며, He이 누설되지 않음을 확인하였다.

차폐 물통의 설치가 완료된 후 중성자 여과 장치와 액체 질소 냉각 장치, 주변 차폐 장치 등을 순차적으로 설치하였다. 그림 3은 설치가 완료된 후 납벽돌로 임시 차폐한 BNCT 조사장치 전면부의 모습이다. 이로써 원자로 운전이나 다른 이용에 전혀 지장을 주지 않고 안전하게 고방사선 작업을 마쳤으며, 물통셔터와 관련 계통의 성능 시험 결과, 충수 시간은 약 3분 10초, 배수 시간은 약 4분 30초였다.



그림 3. 설치가 완료된 BNCT 조사장치 전면부(납벽돌로 임시 차폐).

3. 중성자 및 감마선량 측정

BNCT 조사실에서는 치료를 위한 간이 수술도 할 수 있도록 설계되어 있다. 이를 위하여 물통셔터에 물이 채워져 있으면 조사실 내부의 방사선 준위는 원자로가 운전중일 때에도 매우 낮아야 한다. 이를 위한 차폐체는 계산으로 정확하게 예측하여 설계하기가 곤란하므로 조사장치가 설치된 후 조사장치 전면으로 누설되는 중성자 및 감마선량을 측정하여 조사장치 전면의 차폐 구조를 결정하였다. 각 측정기의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 중성자 및 감마선량 측정기의 주요 제원.

Specifications	Neutron detector	Gamma-ray detector
Model	2202D(Studsvik)	6150ADT(Automess)
Detector Type	BF3 proportional tube surrounded by a shield	GM tube
Range	1~100000 $\mu\text{Sv/h}$	0.01 $\mu\text{Sv/h}$ ~9.99 mSv/h
Energy Range	0.025 eV~17 MeV	60 keV~3 MeV
Neutron Sensitivity	0.36 cps/ $\mu\text{Sv/h}$.
Gamma Sensitivity	2 Gy/h gives $<5 \mu\text{Sv/h}$.
Applied Voltage	+2500 V	.

원자로 정지 상태에서 물통셔터에 물을 채웠을 때 측정한 조사장치 전면의 방사선량은 그림 4의 (a)와 같으며, 물통셔터가 완전 배수된 상태에서 측정한 조사장치 전면의 방사선량은 그림 4의 (b)와 같다. 그림의 수치는 모두 감마선량이며, 중성자선량은 두 경우 모두 background 수준이었다. 물통셔터의 물을 완전히 배수한 경우에는 붕소를 함유하는 폴리에틸렌(BPE)면에서의 감마선량이 크게 증가하였으나, 전면 차폐체가 설치되지 않은 상태에서 원자로 정지시에는 충분히 낮은 방사선 준위를 유지함을 확인하였다. 조사실의 공간선량은 물통셔터 배수시 $1.3 \mu\text{Sv/hr}$ 로서 매우 작았다.

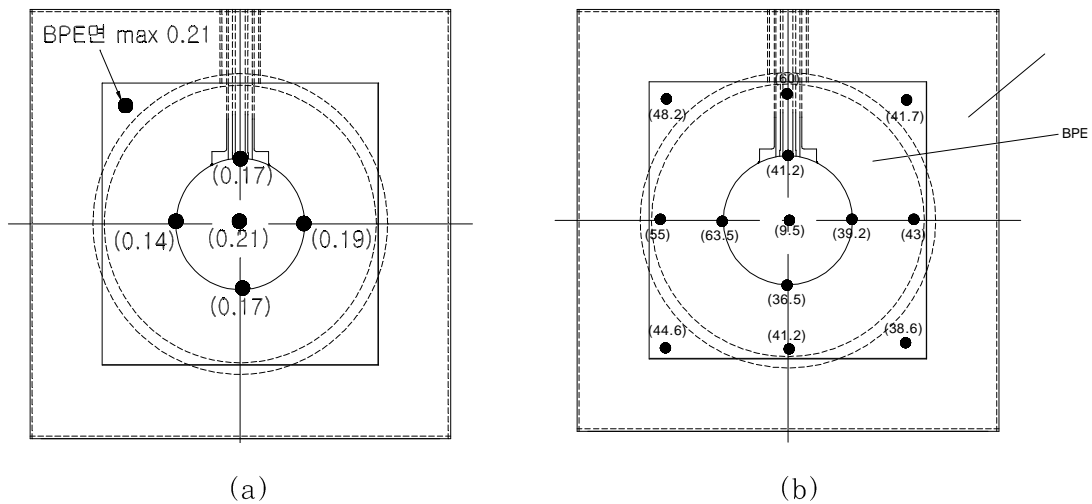


그림 4. 물통셔터 충수시 조사장치 전면의 방사선량(a) 및 완전 배수시 방사선량(b)
(단위 : $\mu\text{Sv/hr}$).

원자로 출력이 10 MW일 때 물통셔터가 완전히 닫힌 상태에서의 측정값은 그림 5와 같다. 이 경우에도 그림의 수치는 모두 감마선량이며, 중성자선량은 background 수준이었

다. 원자로 출력이 증가함에 따라 감마선량은 크게 증가하여 BPE면에서 최대 12 mSv/hr 정도로 측정되었다.

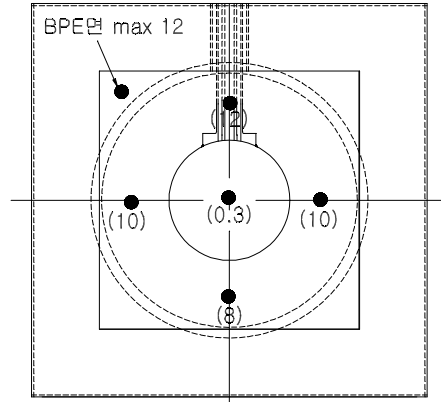


그림 5. 원자로 출력이 10 MW이고, 물통셔터가 완전 증수시 측정된 방사선량 (단위 : mSv/hr).

위와 같은 측정 결과를 이용하여 조사장치 전면에서의 방사선량을 허용치 이하로 유지하기 위한 차폐 구조를 설계하였다. 이 차폐체는 20 cm 두께의 납으로 이루어져 있으며, 환자에 중성자를 조사할 때 조사 지점 이외의 방사선 조사를 억제하기 위해 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 와 폴리에틸렌을 섞어 소결한 재료로 만든 중성자 collimator가 설치될 수 있는 구조이다. 20 cm의 납 차폐체를 설치하고 원자로 출력 24 MW에서 측정한 감마선량은 그림 6과 같다. 역시 중성자선량은 background 수준이었다. 출력이 24 MW일 때 여과 장치 중심 부분이 $0.105 \mu\text{Sv/hr}$, BPE면은 최대 $4.8 \mu\text{Sv/hr}$ 로서 충분한 차폐를 유지함을 확인하였다.

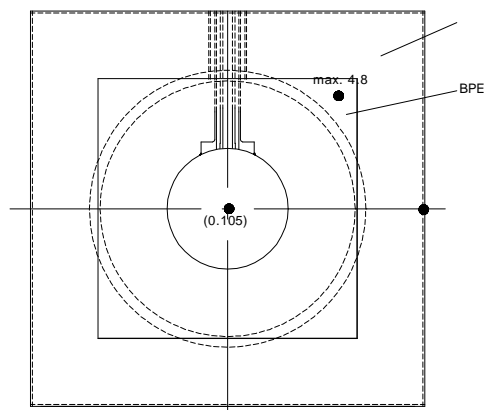


그림 6. 원자로 출력이 24 MW이고, 20 cm의 납 차폐체를 설치한 상태에서 측정된 방사선량(단위 : $\mu\text{Sv/hr}$).

4. 결 론

하나로 IR공에 BNCT를 위한 조사장치를 안전하게 설치하였으며, 중성자와 감마선 누설을 측정하였다. 설치 과정에서 중성자공내의 He 밀봉을 유지하기 위하여 안티몬을 소량 첨가한 납 가스켓을 개발하였다. 설치된 조사장치 전면에서 중성자 및 감마선량을 측정하여 물통셔터가 완전히 충수되어 있을 때에 조사실 내부에서 수술 등의 작업을 수행하기에 충분한 차폐 구조를 결정하였다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. 전병진, “중성자 포획 암 치료”, 기술현황분석보고서-KAERI/AR-517/98, 한국원자력 연구소, 1998.
2. D.N. Slatkin, “A History of Boron Neutron Capture Therapy of Brain Tumors”, *Brain*, **114**, 1991, p.1609.
3. “Boron-Neutron Capture Therapy for Tumors”, edited by H. Hatanaka, Nishimura Co. Ltd., 1986.
4. 전병진 외, “하나로를 이용한 암 치료 장치 개발”, KAERI/RR-2018/99, 한국원자력 연구소, 2000.