고방사선 환경 하 중성자 측정을 위한 탄화규소 중성자 계측기 개발

박준식, 김한수, 이철호*, 신희성, 김호동, 김용균*, 박세환
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
*한양대학교, 서울시 성동구 행당동 한양대학교
ex-spark@kaeri.re.kr

1. 서론

Silicon carbide(SiC)는 발견 초기부터 우수한 내열성으로 주목을 받은 물질이며, 1980년 이후 결정 성장기술의 발전과 함께 SiC substrate의 상업적 제공이 가능해 짐에 따라 SiC를 이용한 검출기 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 4H 구조의 SiC는 3.26 eV의 넓은 band gap energy로 인하여 가시광선에 대한 영향이 없고 타 반도체 검출기와 달리 냉각 없이 고온에서 동작이 가능하며 높은 displacement threshold energy로 인하여 내방사성이 우수하다. 또한 빠른 동작 및 낮은 전압에서의 동작이 가능하며 600 ℃ 까지 견디는 내열 특성으로 인하여 차세대 원자로 내 열중성자 선속 감시를 위한 검출기로서 기대되는 물질이다. 열중성자 검출은 SiC diode 상에 ^{10}B, ^{6}LiF의 중성자변환막을 증착함으로써 (n,α) 반응을 통해 발생되는 하전입자 α, T 를 측정하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 열/고속중성자 측정용 SiC 반도체 검출기를 제작하여 내열성 및 내방사성, 방사선 반응의 선형성의 특성평가를 수행하고 원자로 내 및 사용후핵연료의 파이로프로세싱 과정 중 발생하는 TRU 잉곳에서의 응용성을 평가하였다.

2. 본론

2.1 검출기 제작

406 μm 두께의 4H SiC PIN diode를 $5\times5\,mm^2$ 면적으로 잘라 Si 면 위에 Cr/Au, Ni/Au, Ti/Cr, Ti/Au의 전극 및 $\phi2\,mm\times2\,\mu m$의 ^{6}LiF를 증착하여 중성자 검출 센서를 제작하였다. 제작한 센서는 열중성자 측정용 2 종류, 고속중성자 측정용의 4종류로서 두 종류를 제작하였으며 ^{6}LiF의 증착 유무로써 신호의 차이가 발생하도록 하였다. Diode에서 발생된 신호전달을 위하여 0.5 μm 두께의 gold 전극이 plating된 두 세라믹 기판 사이에 SiC 센서를 결합시킴으로써 접착 물질 없이 물리적 연결 방식으로 검출기를 제작하였다.

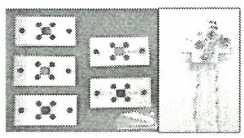

Fig. 1. Fabricated SiC neutron detectors.

2.2 I/V 측정

제작된 검출기의 전기적 특성을 평가하기 위해 $-200\,V\sim10\,V$의 bias에 대한 current-voltage (I/V)특성을 측정하였으며 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

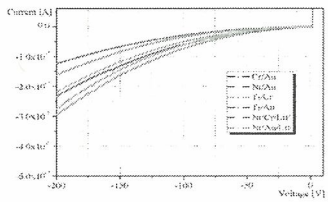

Fig. 2. Forward and reverse bias characteristics of SiC detector.

누설전류는 증착 금속 종류에 따라 약간의 차이를 보였으며 reverse bias가 200 V에서 평균 220 nA까지 증가함을 보였다.

2.3 알파 스펙트럼 측정

Fig. 2와 같이 알파스펙트럼 측정 시스템을 구성하여 ^{238}Pu의 알파선을 측정하였다. SiC 센서와 선원과의 거리는 5 mm였고 0 ~ 50 V까지 전압을 인가하여 5분간 측정을 하였으며 알파스펙트럼 결과와 각 센서에 대한 50 V에서 5.1 MeV 알파선에 대한 FWHM을 Fig. 3및 Table. 1에 나타내었다.

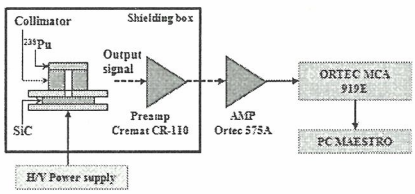

Fig. 3. Experimental setup of alpha spectroscopy.

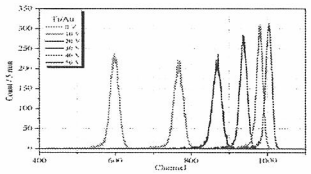

Fig. 4. Alpha peak with respect to bias volatage.

Table. 1. Each SiC sensor's FWHM at 50 V.

Electrode	Cr/Au	Ni/Au	Ti/Cr	Ti/Au	Ni/Cr/LiF	Ni/Au/LiF
FWHM(%)	2.06	2.07	2.6	1.89	2.8	4.52

2.4 내열성 및 내방사성 평가

SiC 센서의 온도에 따른 특성변화를 평가하기 위해 350 ℃까지 온도를 증가시켜 가며 I/V 측정을 하였으며 Fig. 4에 측정 결과를 나타내었다.

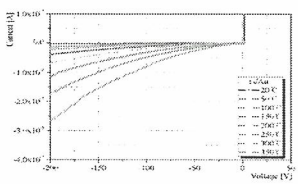

Fig. 5. I/V curve with respect to temperature.

고온 환경 하에 있던 센서의 알파 스펙트럼을 측정하여 가열 전 결과와 비교하였다. 350 ℃ 환경에서 약 2 시간동안 있던 센서의 알파 peak centroid는 가열 전과 차이를 보이지 않았으며 FWHM 변화율이 3 % 이내로 변화가 적었다.

또한 SiC 검출기의 내방사성을 평가하기 위하여 하나로 원자로 내에서 2 차례($3\times10^{13}n/cm^2s$ 5 시간, $3\times10^{10}n/cm^2s$, 20 시간) 중성자를 조사하여 이에 따른 검출기의 특성 변화를 보았다.

2.5 감마 및 중성자 반응 선형성

Ni/Au/^{6}LiF와 Ti/Au가 증착된 두 SiC 센서를 이용하여, 원자로 내 및 사용후핵연료 저장수조에서 사용이 가능하도록 10 m의 MI cable 및 SUS 하우징을 통해 동시 계측 어셈블리를 제작하였다. 제작된 어셈블리의 방사선 반응성을 평가하기 위하여 원자력연구원 감마조사시설에서 감마유도전류 실험 및 하나로 ENF 시설에서 중성자유도전류 실험을 수행하였다. 어셈블리에 입사되는 중성자 선속은 검출기 전면의 polyethylene. 두께를 변화하여 조절하였고, 각 두께에 따른 선속은 gold foil activation을 통해 결정된 중성자 선속을 바탕으로 MCNPX 계산을 통해 결정하였다.

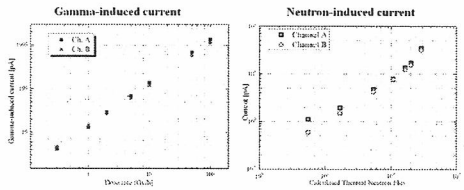

Fig. 6. Gamma and neutron induced current.

감마선 반응 선형성은 열/고속중성자 SiC 검출기에 모두에 대해 0.3 ~ 100 Gy/h의 감마선 선량에서 99.99 % 이상으로 나타났으며, 중성자 반응 선형성은 열/고속중성자 검출기에서 각각 92.2 %, 0.935 %로 나타났다.

2.6 시뮬레이션을 통한 유도전류 예측

MCNPX 시뮬레이션을 통하여 하나로 ENF 환경에서의 중성자유도전류를 계산하였으며 실험치와 3 % 이내로 일치함을 확인하였다. 또한 이를 바탕으로 TRU 잉곳에 적용하였을 시 예상되는 전류를 도출하였다. 예상되는 전류는 열/고속중성자 SiC 검출기에 대하여 각각 40.5, 18.12 pA로써 이는 TRU 중심으로부터 10 cm 떨어진 지점에서의 감마선량률 측정값 1 mSv/h가 반영된 값이다. 이를 통해 두 검출기 반응 차를 이용한 감마 및 고속중성자 신호의 분리가 가능함을 확인하였다.

3. 결론

본 연구를 통하여 원자로 및 사용후핵연료 저장시설 환경에서 중성자를 계측할 수 있는 SiC 중성자 검출기를 개발하였으며 TRU 잉곳에 대한 검출기 반응을 예상하고 적용 가능성을 평가하였다. 향후 원자로 내에서의 검출기 반응 평가 및 열중성자 신호 분리 시스템 개발이 이루어질 계획이며 노 내 열중성자선속 모니터 및 사용후핵연료 연소도 측정에 활용될 것으로 기대된다.

4. 감사의 글

이 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원 하에 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] C, Manfredotti et al., NIM A 552, pp. 131-137, 2005.