

지상 단거리 중성미자 검출기를 이용한 원자로 모니터링 기술 연구

한보영^{1*}, 선광민¹, 오유민², 이재승², 김영덕², 박강순², 이정연², 전은주², 박향규², 이무현², 박현서³, 김홍주⁴, 이주영⁴, 서경민⁵, 주경광⁶, 김바로⁶, 여인성⁶, 김시연⁷, 고영주⁷, 김현수⁸, 김진유⁸

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111,
²한국기초과학지원연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 70,
³한국표준과학연구원, 대전광역시 유성구 가정로 267,
⁴경북대학교, 대구광역시 북구 대학로 80,
⁵전북대학교, 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567,
⁶전남대학교, 광주광역시 북구 용봉로 77,
⁷중앙대학교, 서울특별시 동작구 흑석로 84,
⁸세종대학교, 서울특별시 광진구 능동로 209

*byhan@kaeri.re.kr

1. 서론

원자로 베타붕괴로부터 발생된 반중성미자는 1956년 발견된 이후로 수 십년간 중성미자의 정체성과 특성에 관한 연구로 물리학자들에게 관심을 받아왔다[1]. 또한 원자력 산업의 증가와 원자력 사용에 대한 관심이 높아지면서 원자로 중성미자 측정은 순수 물리학 분야뿐만 아니라 원자력 발전시설의 오사용을 감시하고 시설의 투명성을 제고에 목적으로 원자로에서 일어나는 연소과정을 모니터링 할 수 있는 연구에 관심을 두고 있다[2]. 본 논문은 원자로 모니터링 기술 개발을 위해 하나로 연구구와 영광한빛발전소 원자로 시설에 반중성미자 검출기를 설치와 중성미자 측정 실험을 소개한다.

2. 본론

2.1 원자로 모니터링

원자로에서 발생하는 반중성미자는 주로 두 개의 핵분열 동위원소인 ²³⁵U 과 ²³⁹Pu 로부터 생성된다 (Fig. 1). ²³⁹Pu 은 ²³⁸U 중성자 포획반응으로부터 연속되는 두 번 베타붕괴를 통해 생성된다: ²³⁹U → ²³⁹Np → ²³⁹Pu. 원자로 안에서 두 동위원소의 핵분열 반응은 원자로 연소과정(Burn-up)과 관련된다. 시간에 따라 살펴보면 Fig. 1에서처럼 ²³⁹Pu이 증가함에 따라 ²³⁵U의 수는 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 1의 오른쪽 그림과 같이 핵분열 동위원소에서 생성된 반중성미자의 에너지 스펙트럼을 측정한다면 원자로 연소이력을 직접적으로 결정할 수 있다 [3]. 지상 단거리 중성미자 측정실험(NEOS)는 한빛원자로 1GW thermal power 시 초당 약

2x10²²개의 중성미자가 발생되고 원자로 코어 중심 단거리안에 1톤규모의 검출기를 통해 반중성미자의 에너지 스펙트럼을 측정하려고 한다.

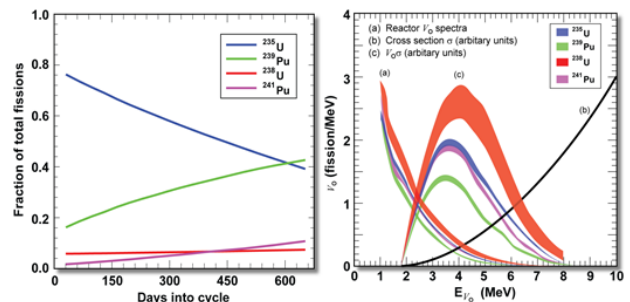


Fig. 1. Fission rate vary in time(left) and antineutrino rate vary with isotope(right).

2.2 중성미자 검출기

이 실험에서 사용되는 검출기는 액체섬광체(Gd, liquid scintillator)로 LAB(Linea Alkyl Benzene)이 주요 성분이며 약 1톤규모로 원자로 열출력이 30 MW일 경우, 원자로로부터 수 미터 떨어진 거리에서 하루 100개 정도의 중성미자가 측정될 것으로 예상된다.

2.2.1 반중성미자 신호

NEOS 실험에서는 검출기에 입사된 반중성미자가 식 (1)에서처럼 액체섬광체 내 양성자와 반응하여 양전자와 중성자를 생성하는 Inverse Beta decay를 한다. Fig. 2와 같이 생성된 양전자(즉발, 1~8MeV, γ s)와 중성자 (Delayed, $\tau \sim 30\mu$ s for Gd)를 식별하여 중성미자를 결정한다.

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1)$$

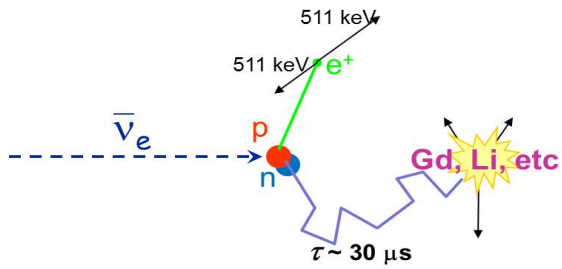


Fig. 2. Antineutrino signal in liquid scintillator.

2.2.2 배경방사능 신호

주요 배경방사능은 우주로부터 온 뮤온등으로 생성된 중성자원(Cosmogenic Neutron)으로 주신호의 중성자와 구별이 어렵기 때문에 차폐를 통해 차단해야만 한다. 검출기 자체 차폐체를 통한 제거는 한계가 있으며, 한빛원자로의 경우 원자로의 지하 10 m 지점 텐돈갤러리에 위치시켜(Fig. 4 참조) 원자로 콘크리트 구조체와 지하 조건으로 배경방사능을 다량 줄이는 효과를 보았다.

2.3 Prototype 검출기 설치

주검출기 제작 전 검출기 성능을 최적화하고 신호대 잡음비를 높이기 위해 Prototype 검출기를 제작하여 하나로 연구로에 설치하였다 (Fig. 3 참조). 25 cm 두께 액체섬광체를 가진 뮤온제거(muon veto) 검출기와 10 cm 두께 납차폐체 그리고 50 L 액체섬광체(0.5% Gd, LAB)로 구성하였다. 현재 하나로 운영정지로 배경방사능 데이터 분석만 이루어지고 있다.



Fig. 3. Prototype detector installation in HANARO.

2.4 주 검출기 설치

주 검출기는 영광 한빛 원자로에서 27 m(지하 10 m) 떨어진 곳에 검출기를 2015년 7월에 설치하였고(Fig. 4) 배경방사능 제거를 위해 플라스틱 섬광체 광전증배관, 납 그리고 붕소를 첨가한 폴리

에틸렌을 차폐체로 사용하였다. 액체섬광체 특성을 이용한 PSD(Pulse Shape Discrimination) 방법을 이용해 중성자와 감마선을 구별하고 배경방사능을 크게 낮추었다.

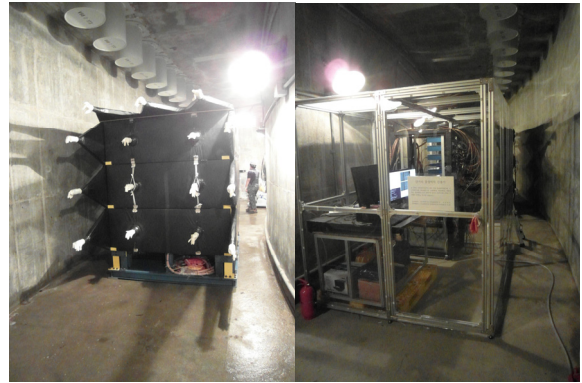


Fig. 4. Main detector installation in Tendon gallery at Hanbit power station.

3. 결론

현재 9월부터 본격 가동되고 있으며 약 6개월간 데이터를 수집할 예정으로 주 검출기 성능과 배경방사능을 이해하고 있다. 앞으로 수집된 데이터를 이용해 중성미자 에너지 스펙트럼을 결정하고 원자로 모니터링을 위한 분석을 진행할 예정이다.

4. 참고문헌

- [1] C. L. Cowan Jr, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire, "Detection of the Free Neutrino: a Confirmation", Science 124 (3212): 103-4 (1956).
- [2] Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, A. Letourneau, S. Cormon, M. Fechner, L. Giot, T. Lasserre, J. Martino, G. Mention, A. Porta, and F. Yermia, "Improved predictions of reactor antineutrino spectra", Physical Review C83, 054615 (2011).
- [3] Patrick Huber, "Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors", Physical Review C84, 024617 (2011).