

하나로 1차냉각배관의 지발중성자 계측에 의한 핵연료 파손 감시계통의 구현

Implementation of Fuel Failure Detection System by Delayed Neutron Measurement at HANARO Primary Cooling Pipes

김영기, 전병진, 최영산, 김민진, 김명섭, 우중섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

하나로에서는 1차냉각계통의 감마선을 계측하여 핵연료의 파손 여부를 감시하여 왔으나 정상 운전 중에 가장 큰 몫을 차지하는 N-16의 높은 에너지 감마 영향으로 인하여 효과적인 핵연료 파손 감시에 문제가 있음이 지난 6년 간의 운전 경험으로 밝혀졌다. 기존 계통의 문제점을 개선하고 핵연료의 파손을 정확하게 감시하기 위한 새로운 방안으로써, 1차 냉각 배관에서 지발중성자를 계측하는 방법을 도입하였다. 새로운 지발 중성자 계측 채널은 기존의 감마선 측정 방법보다 훨씬 더 미세한 핵연료의 손상을 감지할 수 있음이 현장 적용시험에서 증명되었기 때문에 원자로의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

A fuel failure detection system(FFDS) by monitoring gamma rays at primary cooling pipes had been installed and used in HANARO. It has been confirmed, from 6 years of operating experience that N-16, a dominant high energy gamma radiation of primary coolant adversely affect an efficient detection of fuel failure. As an alternative for solving the current points in issue and ensuring effective fuel failure detection, a delayed neutron measurement concept was suggested. Having been proved by the field application test to be much more sensitive than the previous system in fuel failure detection, the new FFDS will improve the reactor safety.

1.0 서론

하나로 1차냉각계통 배관에서 지발중성자를 측정하는 새로운 개념의 FFDS가 기존의 감

마선 계측법에 비하여 핵연료의 손상을 100배 이상 민감하게 감지할 수 있음이 이전 연구에서 확인되었다[1, 2]. 이에 따라 새로운 측정 개념을 실제 하나로 현장에 적용하기 위한 기존 시스템의 설계 변경 작업을 착수하였다. 중성자 검출기로서는 이미 현장 시험에 사용하여 타당성이 입증된 동일 모델의 BF₃ 비례계수기를 사용하였다. 원자로 안전 계통에 사용되는 계측기임을 고려하여 Class 1E 등급의 설계 요건과 하나로 환경에 필요한 설계 및 제작 사양을 결정하였고, 2001년 8월에 하나로 현장에 설치하여 종합 성능 시험을 실시하였다. 지발중성자 신호의 스펙트럼 분석과 응답 특성을 통하여 계측 채널의 건전성을 확인하였고 핵연료의 특성과 현장 설치 조건을 고려하여 정지 설정값을 결정하였다. 원자로 보호계통의 정지 변수로서 공식적으로 사용하기 전에 약 2개월 동안 Off-line 성능 시험을 실시하였다. 즉, 기존 FFDS를 계속 사용하면서 지발중성자 채널을 병렬로 원자로 출력 운전 에 투입하여 그 성능의 우수함을 재확인하였다. 2001년 12월부터 지발중성자 채널을 정식으로 원자로 보호계통의 정지변수로 사용하기 시작하였고 출력 운전 조건에서 여러 가지 성능 확인과 특성 시험을 통하여 최적의 운전 조건으로 채널 조정을 완료하였으며 현재까지 핵연료 파손 감시 역할을 잘 수행하고 있다.

2.0 측정 채널의 구성과 설치

새로운 FFDS는 원자로 보호계통 정지 변수로 사용되고 있는 지발중성자 측정 채널을 포함하여 2001년 말까지 사용하였던 감마선 측정 채널도 함께 수용하는 통합 개념의 계측 계통으로서 기기의 구성은 그림 1과 같다. 2개의 감마선 측정 채널과 1개의 지발 중성자 채널 등 모두 3개의 채널이 제어실 패널에 설치되어 있는 신호 처리기로 연결된다. 지발중성자 채널은 BF₃ 검출기, 전하증폭기, 전단증폭기, 신호처리기 등으로 구성된다.[3]

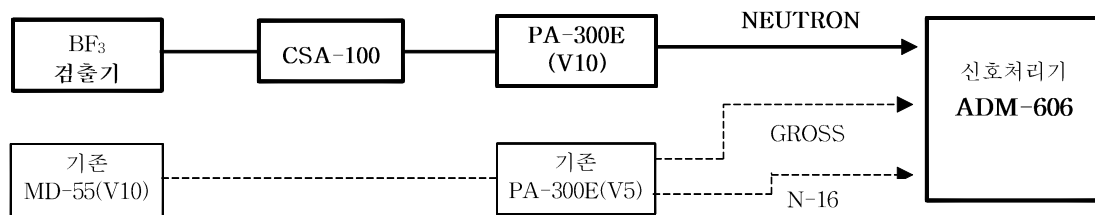


그림 1 통합 FFDS의 기기 구성도

NaI 검출기는 1차냉각계통 배관 공동구(Pipe Gallery)의 16인치 인입배관 직하단에 설치되어 있고 지발중성자 측정을 위한 BF₃ 검출기는 핵연료 파손을 최대한 신속하게 감지하기 위하여 원자로 노심으로부터 가장 가까운 그림 2의 14인치 토출배관 하단에 설치하였다. 1차 배관 공동구 검출기로부터의 신호 케이블은 독립된 포설 경로를 통하여 원자로실 동쪽 벽에 설치되어 있는 전하증폭기로 연결되는데 연결 케이블의 길이는 약 15 미터이다.

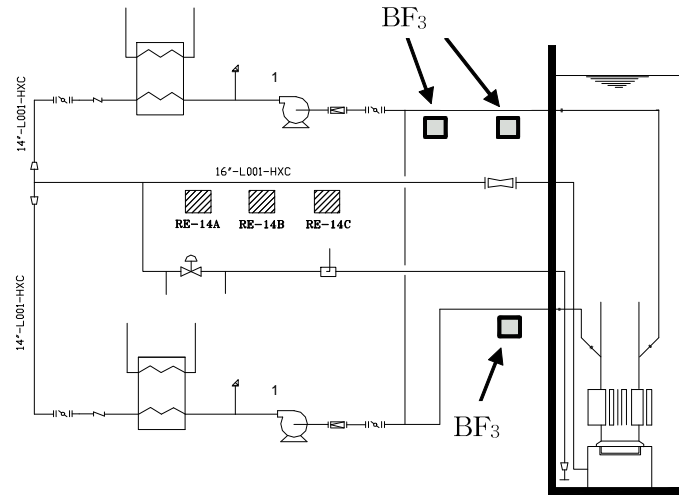


그림 2. FFDS 검출기 설치 위치

3.0 지발중성자 채널의 성능 시험

3.1 플라토(Plateau) 특성

여러 가지 방사선 검출기는 원하는 계측 성능을 발휘하기 위하여 고전압의 공급이 필요하다. 필요로 하는 고전압은 검출기의 종류에 따라 다르지만 어떤 경우라도 안정되고 잡음 등이 포함되지 않아야 한다. 고전압의 정도에 따라 출력펄스의 형태가 크게 차이가 날 수 있으므로 성능시험을 착수하기 전에 하나로에 사용되는 BF_3 검출기 및 전하증폭기의 고전압 플라토 특성시험을 수행하여 적절한 고전압 공급값을 결정하였다. 그림 3은 하나로 측정 채널에 대한 플라토 특성을 나타낸 그래프이다.

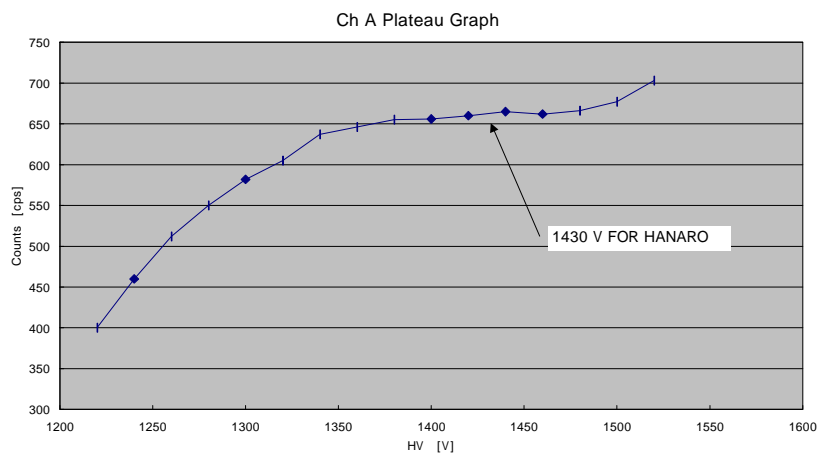


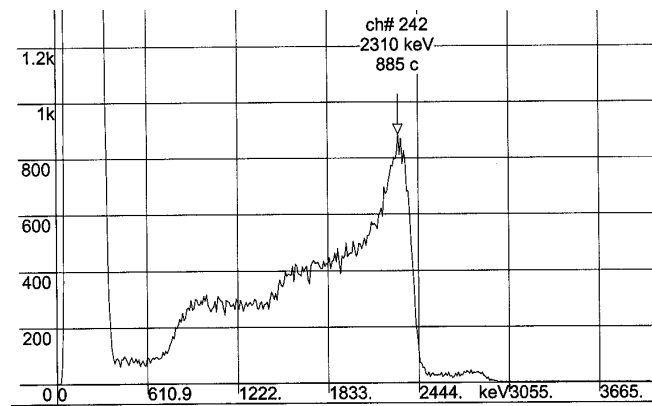
그림 3. 하나로 지발중성자 채널의 플라토 특성

그림 3에서와 같이 고전압의 변화에 관계없이 일정한 계수율을 출력하는 플라토 영역이 약 150V로서 양호한 결과를 보여주었으며 플라토 영역의 중간인 1430V로 고전압을 최종

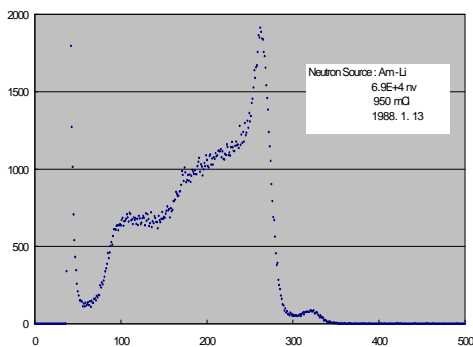
결정하여 현재까지 유지하고 있다. 실제 제작사 사양에 따르면 적정 고전압을 1320V로 기술하고 있으나 이는 현장의 설치조건, 케이블의 길이, 전하증폭기의 설계 등에 따라 차이가 날 수 있고 또, 검출기로부터의 미세한 누설 전류가 고전압 회로에 설치된 100MΩ 저항소자로 흐르면서 전압 강하 등이 발생되어 더 높은 전압이 필요할 수도 있다.[4] 사양서보다 100V 이상 높은 고전압을 공급할 경우 BF₃ 검출기의 수명이 단축될 수도 있으므로 간단한 계산을 수행한 결과 무시할 수 있을 정도이었고 제작사 역시 큰 문제가 되지 않을 것임을 확인하여 주었다.

3.2 지발중성자 펄스 스펙트럼 분석

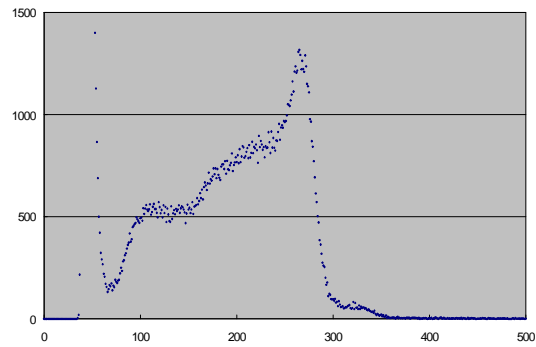
계측계통이 감마선이나 전기적인 잡음과 분별되는 중성자 신호를 잘 나타내고 있는지를 확인하기 위하여 다중 채널 분석기(Multi-Channel Analyser: MCA)를 이용하여 펄스 스펙트럼을 분석하였다. 측정 채널의 구성 또는 설치 환경에 따라 펄스 특성이 달라질 수 있으므로 제작사 공장 검사 결과와 중성자 선원을 이용한 스펙트럼, 그리고 원자로 현장에 설치한 상태에서의 스펙트럼을 비교 분석하였다. 각각에 대한 펄스 스펙트럼 분석 결과를 그림 4에 나타내었다



(a) 제작사 공장에서 실시한 펄스 스펙트럼



(b) 중성자 선원을 이용한 펄스 스펙트럼



(c) 24MW 운전상태에서의 펄스 스펙트럼

그림 4. 지발중성자 신호의 펄스 스펙트럼 분석

제작사 공장 검사에서 측정된 스펙트럼은 길이가 짧은 시험용 케이블을 사용하였고 시험 장소도 일반 실험실이었기 때문에 낮은 에너지 영역에서 신호잡음과 중성자 펄스를 구분해 주는 골짜기가 충분히 넓어 신호잡음의 영향이 거의 없는 모양이다.[5] 그러나 그림 (b)와 (c)는 스펙트럼의 형태가 (a)와 약간의 차이가 있다. 그림 (b)는 BF₃ 검출기와 증폭기들이 모두 현장에 설치되어 있는 상태에서 950mCi Am-Be 중성자 선원을 이용한 분석 결과이다. 전반적인 스펙트럼은 거의 같으나 신호잡음과 중성자 펄스 사이의 골짜기가 약간 좁아졌다. 이는 잡음이 증가하였음을 뜻하며, 그 원인은 케이블 길이가 길어졌기 때문이다. 24MW 운전조건에서의 스펙트럼 역시 큰 차이는 없었으나 골짜기가 더욱 좁아졌다. 이는 검출기 설치 위치에서의 감마 준위가 매우 높기 때문이다. 그러나 계측 채널의 정상적 기능에는 문제가 되지 않는다.

3.3 지발중성자 신호의 원자로 정지 설정값과 응답 특성

원자로 출력 운전 상태에서의 지발중성자 계수율은 BF₃ 검출기의 설치 상태에 따라 크게 다른데, 계측에 적합한 계수율을 내도록 계측기를 선정하고 설치 방법을 정하여야 한다. 정상 운전 중에는 가능하면 짧은 계측 시간에 통계적인 신뢰도를 갖도록 하기 위하여 계수율이 어느 정도 높아야 하지만 핵연료 손상이 발생하였을 때 포화 계수율에 도달하여 파손 정도를 판단하기 어려우면 곤란하다. 정지 설정값에 비하여 정상 운전 시의 계수율이 충분히 낮지 않다면 계측값의 통계적인 요동으로 불필요한 정지가 발생할 수도 있으므로 이를 피할 수 있도록 하여야 하며, 정지 설정값에는 도달하지 않았으나 비정상적인 현상이 발생하였을 때 미리 발견할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

이전의 정지 설정값은 한 개의 연료봉이 가지고 있는 핵분열 생성물의 1%가 방출되는 경우를 기준으로 하여 정해진 것이다. 그러나 지발 중성자를 계측하는 경우에는 이보다 훨씬 낮은 수준의 핵연료 손상도 감시할 수 있을 것으로 판단되어 핵연료 제조 시 허용되는 우라늄의 최대 허용 표면 오염도를 기준으로 하였다.

1차 냉각수에 핵분열 생성물이 전혀 존재하지 않더라도 냉각수에 미량 존재하는 중수소가 높은 에너지의 감마선을 받아 생성되는 광중성자가 있기 때문에 중성자가 계측된다. 또한 핵연료 표면에 약간의 우라늄 오염은 허용하므로 이로 인한 지발 중성자도 계측된다. 이전 시험에서 정상 운전 시에 이러한 성분이 전체 계수율에서 차지하는 비율을 측정하여 광중성자가 약 30%, 지발중성자가 약 70%임을 확인하였다[1,2]. 또한 계측기가 설치된 배관 부분에 대한 중성자 수송 계산을 통하여 정상 운전 시의 지발중성자 발생량은 약 130 μ g의 우라늄 표면 오염에 해당하였다. 하나로 핵연료의 표면 오염도 허용 기준은 3.25 μ g-U²³⁵/ft² 이하로 설정되어 있으므로 진노심 구성에 필요한 36봉 20개와 18봉 12개를 장전하였을 때 노심 전체에 대한 표면 오염 상한값은 942 μ g이다. 즉 최대 표면 오염 허용값은 통상적인 오염의 약 7.2배이다. 핵분열 생성물의 누출이 증가하면 1차 냉각수의 감마 준위도 높아지므로 광중성자도 증가하지만 광중성자를 발생시킬 수 있는 감마 에너지는 2.225

MeV 이상이며 이의 대부분은 N-16이 내므로 무시한다. 이럴 경우 핵연료의 표면 오염이 최대 허용값을 가질 때의 중성자 계수율은 정상값의 약 5.4배이다. 이런 기준으로 정지 설정값을 정하였다.

비례 계수관을 사용하였을 때 신뢰성 있는 계수율을 얻을 수 있는 상한은 보통 10^5 cps까지이며 10^6 cps 이하에서 포화된다. 계측 계통의 불감 시간은 $1\mu\text{s}$ 정도이므로 10^5 cps에서 10% 정도의 불감 시간 효과가 있으며 불감 효과를 보정하면 수%의 정밀도로 유추할 수 있다. 따라서 신뢰성이 있는 계수율 상한을 10^5 cps로 가정하였다. 정지 설정값은 1mg 이하의 매우 적은 U-235가 냉각수에 노출되는 경우에 대한 것이므로 누출량이 이의 10배인 경우까지 어느 정도 정확하게 예측할 수 있도록 10^4 cps 이하에서 정지가 되도록 하는 것을 목표로 하였다.

한편 정상 운전시의 계수율은 통계적인 요동으로 값의 변화 추이를 관찰하는데 무리가 없도록 1000 cps 수준이 되도록 하였다. 이러한 계수율을 갖는 계측기의 효율은 이전 실험에서 사용한 것이 적절하다고 판단하여 같은 계측기를 사용하였으며, 이의 계측 효율은 1.5 cps/nv이다.

1차 배관에서 계측기의 위치가 이전 실험에 비하여 노심에 더 가까운 쪽으로 옮겨졌으므로 적절한 계수율을 얻을 수 있는 계측기 설치 조건을 다시 모색하였다. 계측기와 관 사이의 거리가 가까우면 계수율이 증가하며, 위치가 같더라도 주변에 폴리에틸렌과 같은 중성자 반사 물질을 두면 계수율이 2배 이상 증가할 수도 있다. 그러나 관과 계측기 사이에 너무 두꺼운 폴리에틸렌을 두면 오히려 중성자 차폐 효과가 생겨서 계수율이 감소한다. 실험 결과 반사체를 두지 않더라도 충분한 계수율을 얻는 것으로 확인되었다. 폴리에틸렌은 오랜 시간 방사능을 받았을 때 재료 성능이 변하므로 가능하면 사용하지 않는 것이 유리한 측면도 고려되었다.

그림 5는 폴리에틸렌 판이 있는 경우와 없는 경우에 대한 원자로 출력과의 선형성 특성을 보여주고 있다. 2002년 12월 이후 출력 상승 시마다 선형성을 측정하고 있는데 반복성과 정확성이 매우 잘 유지되고 있다.

지발중성자 계측 계통을 설치한 뒤에도 기존의 감마 계측 계통을 철거하지 않고 활용할 수 있는 방안을 모색하고 있다. 이 신호는 1차 냉각계통의 감마 준위 변화를 감시할 수 있을 뿐만 아니라 이의 대부분을 차지하는 N-16이 원자로 출력과 좋은 비례성을 나타내므로 출력 감시용으로도 활용할 수 있는 가능성이 있다. 원자로 출력을 감시하는 노외 중성자 계측기는 노심 배열이나 제어봉의 위치 변화로 인한 중성자속 분포 변화의 영향을 받지만 N-16 준위는 노심의 전체 현상을 나타내므로 열출력과 유사한 특성을 갖는다. 지발 중성자 및 감마 계측기의 펄스는 3개 채널까지 받을 수 있는 같은 계수기에서 처리한다. 이 계수기는 설정된 시간 폭의 계수율을 0.1초 단위로 연속 측정하는데 설정할 수 있는 최소 시간 폭은 2초이다. 이 시간 폭은 모든 채널에 공통으로 적용된다. 따라서 감마 계측계통에서도 안정된 계수율을 나타낼 수 있도록 시간 폭을 정하여야 한다.

이 시간 폭을 짧게 설정하면 응답 시간은 빠르지만 신호의 흔들림이 증가한다. 응답 시간

과 신호의 안정성을 동시에 만족시키는 최적의 조건을 찾기 위하여 원자로 출력 24 MW 상태에서 지발중성자 신호의 흔들림 정도를 관찰하였다. 그림 6은 시간 폭을 10초, 20초, 30초로 각각 설정한 상태에서의 지발중성자 신호의 상태를 기록한 것이다. 시간 폭을 10초로 설정하였을 경우 지발중성자 신호의 흔들림(최대와 최소의 차이)은 약 5.4%이고 30초로 설정하였을 경우는 2.8% 정도이다. 10초로 하였을 때에도 충분히 안정된($\pm 2.7\%$ 이내) 값을 나타내므로 앞으로 더 줄여서 시험할 예정이다.

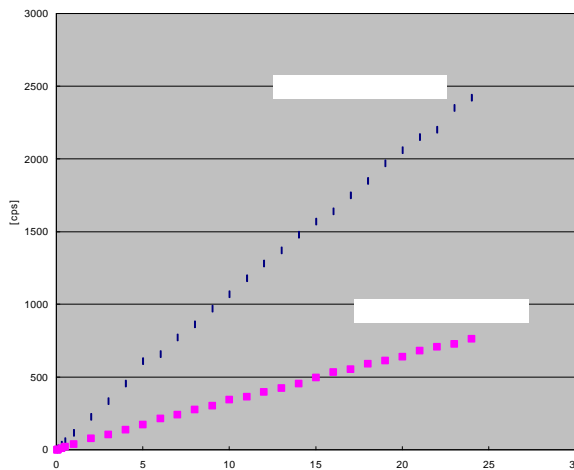


그림 5. 지발중성자 신호의 계수율과 선형성 특성

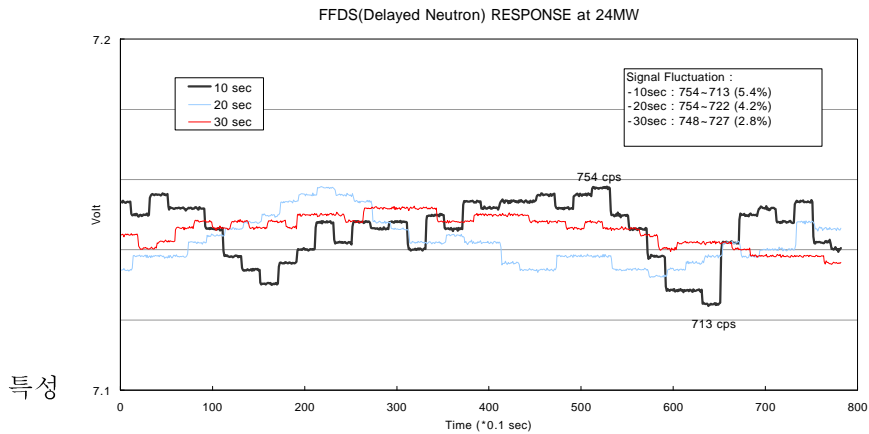


그림 6. 데이터 평균시간 설정에 따른 신호

한편 지발중성자 계측계통은 원자로가 정지되었을 때 또는 기동 시와 같이 출력이 매우 낮을 때는 계수율이 거의 0이어서 계측계통에 고장이 난 경우와 구별이 되지 않는다. 시험 신호를 주어 계측 회로를 점검할 수는 있으나 계측기 자체가 고장이 난 것을 미리 알 수는 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 약한 중성자 선원을 계측기 주변에 두기로 결정하였

으며, 이에 필요한 선원의 세기와 설치 위치에 대한 검토를 마쳤다.

4.0 결론

하나로에 새로 설치한 지발중성자 계측채널은 이전 연구에서 예측한 것처럼 기존의 감마선 측정법보다 훨씬 민감하게 핵연료 파손을 감지하면서 매우 안정된 신호를 내는 것이 현장 운전 시험으로 확인되었다. 기존의 감마선 측정 채널은 그대로 존속시켜 원자로 출력 감시 등에 활용하는 방안을 시험하고 있다. 앞으로 측정 시간 폭을 더욱 줄여서 신뢰도를 확인할 예정이며, 중성자 선원을 두어 계통의 고장 여부를 감시할 수 있도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- [1] 김명섭, 전병진, 김영기, 박상준, 이병철, “하나로 1차배관에서의 중성자 측정을 이용한 핵연료 파손 감시 가능성 검토”, 기술보고서, KAERI/TR-1608/2000, 2000. 6
- [2] 김명섭, 전병진, “몬테카를로 방법을 이용한 1차 배관에서의 중성자 발생량 계산”, 98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998 10.
- [3] Aptec-NRC, “Operations and Maintenance Manual - Failed Fuel Monitor System Upgrade”, MO 439-002, Rev.-.
- [4] G.F Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, Jonh Wiley & Sons, 1989
- [5] Aptec-NRC, “Factory Isotopic Check - BF₃ Detector / Preamplifier for Failed Fuel Detection System Upgrade”, TP-400648, Rev.A