신뢰성응용연구 신뢰성기술
제10권, 제1호. pp.57-64, 2010

신규 실험설비 운전으로 인한 하나로 연구용 원자로의 운영 신뢰도 변화 분석

정환성 · 임인철

한국원자력연구원 · 하나로운영부

Analysis of Reliability Variation Affected by the Newly Installed Experimental Facilities in the HANARO Research Reactor

Hoan Sung Jung · In Cheol Lim

HANARO Management Division · Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract

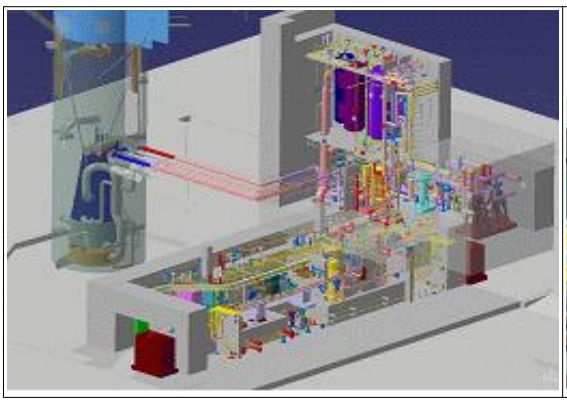
The HANARO nuclear research reactor had been operated successfully and smoothly up to the year 2008 since its first year of instability in year 1995 just after the completion of construction. But the reliability of the reactor has been degraded from the year 2009 due to new experimental facilities such as Feul Test Loop(FTL) and Cold Neutron Source(CNS) which were installed in the HANARO plant. It turned out that these new facilities contributed unexpected stoppage of the plant. This paper describes causes of stoppage and suggestions to improve the reliability of the plant.

Key word : HANARO, nuclear research reactor, operational reliability, FTL, CNS

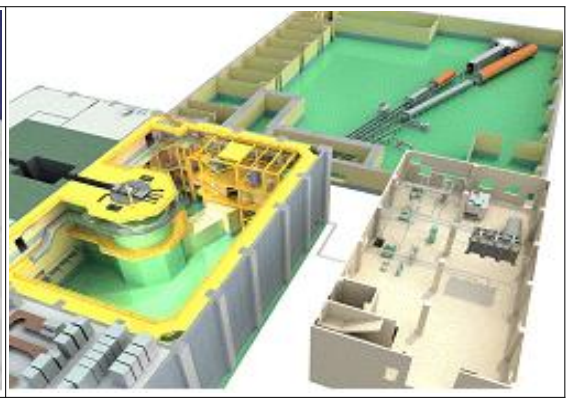
논문접수일 : 2009년 11월 18일 논문수정일 : 2009년 12월 04일 게재확정일 : 2010년 01월 08일

1. 서 론

한국원자력연구원에 설치된 하나로 연구용 원자로는 세계10위권의 중성자 속(flux)을 내는 열 출력 30MW급 고성능 다목적 연구용 원자로이다. 하나로는 첨단 중성자 이용 연구장치를 갖추어 원자력발전 관련 기술의 개발 및 지원, 방사성동위원소와 규소반도체 등 산업 및 의료제품의 생산, 핵연료 및 원자로 재료 조사시험, 중성자 빔을 이용한 기초연구 및 첨단 소재개발, 중성자 방사화 분석, 그 밖의 환경, 의학, 농업, 생명 공학 등 다양한 분야에서 산・학・연 관련기관들이 폭넓게 사용하고 있다. 국내 유일의 원자로를 기반으로 한 안정적인 중성자원인 하나로의 연구역량을 강화하기 위하여 2007년부터 핵연료 노내 조사시험 설비와 냉중성자 연구시설을 설치하여 2010년 4월에 설치를 완료하였다. <그림 1>과 <그림 2>는 핵연료 노내 조사시험 설비와 냉중성자 연구시설을 나타낸다. 핵연료 노내 조사시험 설비는 원자력발전소의 핵연료나 재료의 시험을 할 수 있도록 원자로 노심에 경수형 원자력발전소 또는 중수형 원자력발전소와 동일한 환경 조건을 제공하는 실증실험 설비이다. 원자력발전소에 사용되는 핵연료나 재료들은 방사선의 영향으로 재료의 특성, 물리적 변형 등이 생겨 수명이나 강도가 변화하여 안전성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 재료들은 설계검증 또는 수명 평가 등을 위하여 실제와 동일한 조건에서 방사선 조사를 통하여 실험으로 건전성을 입증하는 것이 중요하다.



<그림 1> 핵연료노내조사 시험설비



<그림 2> 냉중성자 연구시설

2009년에 완공된 핵연료노내조사시험설비는 국내에서 핵연료개발 실증실험을 수행하여 핵연료 개발 기술의 국외 유출을 방지하고 원천기술을 개발하는데 기여할 것이다. 핵연료노내조사 시험설비의 구체적인 활용분야는 아래와 같다.

- ▸핵연료의 연소특성 및 조사거동 종합성능시험
- ▸피복재 또는 격자구조물 등의 건전성 및 부식특성 시험
- ▸설계개선 및 신형핵연료에 대한 안전성 및 신뢰성 자료 확보

냉중성자연구시설은 중성자를 극저온(18°K) 액체수소인 감속재를 통과시켜 상대적으로 저에너지인 중성자를 생산하여 1-100nm 나노 영역에서의 물질 구조와 meV 영역에서의 저에너지 동역학 측정에 독보적인 능력을 가지고 있는 국가기반연구시설로서 재료나 물리 분야 등의 첨단 연구에 이용된다. 냉중성자연구시설의 중성자산란장치, 중성자 영상분석 장치 등은 고분자나 단백질 등 거대생체분자, 나노 자성 박막, 거대 자기 저항 물질, 스핀트로닉스, 분자자석, 고집적 전자재료 등 물질 특성연구에 가장 적합한 연구장치로서 광범위한 물리, 화학, 생물, 재료분야의 측정분석 기술을 획기적으로 발전시키는데 기여할 것이다. <표 1>은 하나로의 중성자 이용 연구장치들의 목록이다.

<표 1> 중성자 이용 연구 장치

<table>
<tr><th>Elastic Scattering (10)</th><th>Inelastic Scattering (3)</th></tr>
<tr><td>▸ Diffractometer
√ Powder Diffraction (2)
√ Single Crystal Diffraction & Texture Measurement (2)
√ Residual Stress Measurement (1)
▸ Small Angle Neutron Scattering (3)
▸ Reflectometer (2)</td><td>▸ Triple-Axis Spectrometer (2)
▸ Time-of-Flight (1)</td></tr>
<tr><td colspan="2">▸ Other Neutron Beam Instruments (3 operating)
√ Neutron Radiography, Ex-core Nuclear Facility
√ Prompt Gamma Neutron Activation Analysis</td></tr>
</table>

2. 운영 신뢰도

2.1. 하나로 운영 신뢰도 정의

하나로의 운영 신뢰도는 운전 성능, 보수 능력, 안전 관리 능력 등을 종합적으로 나타내는 지표이며 연구용 원자로의 경우 다음과 같이 정의된다 IAEA(2008). 불시정지시간은 예고되지 않은 원자로 정지로서 정지된 순간부터 재가동 순간까지의 경과된 시간이다.

운영신뢰도 = (실제 운전 시간)/(실제 운전 시간 + 불시정지시간)

신뢰도는 하나로 플랜트의 운전 시간과 불시정지시간에 의하여 결정된다. 그리고 불시정지시간은 원자로의 운전 중 불시정지에 영향을 받고 실제 운전 시간은 운전성능, 보수능력, 안전관리 능력 등에 영향을 받는다 정환성 외(2009). 불시정지는 노심에 설치된 조사장치의 물리적 현상에 의하여 원자로의 핵 반응도에 영향을 주는 것으로 나타나기도 하고, 사고나 비정상상태를 예방하기 위한 시설계통의 고장신호로도 발생된다. <표 2>는 하나로의 원자로 정지변수를 나타낸다.

<표 2> 하나로 원자로 정지변수

제어 계통 정지변수	보호 계통 정지변수
1. 수동정지 2. 원자로 출구 고 온도(≤47.5°C) 3. 냉각수 저 유량(≥422kg/sec) 4. 중성자 고 출력 (110%) 5. 중성자 대수출력 고 증가율(<6%PP/sec) 6. 반사체 저 유량 7. 반사체 고 온도 8. 제어봉 고장 9. 컴퓨터 고장 10. CNS의 정지 변수	1. 수동정지 2. 원자로 출구 고온도(≤49°C) 3. 냉각수 저 유량(≥492kg/sec) 4. 중성자 고출력 (115%) 5. 중성자 대수출력 고 증가율(<8%PP/sec) 6. 중성자 검출기 저 공급전압 7. 냉각수 저-저 유량 8. 냉각수 고 유량 9. 원자로 수조표면 고 방사능 10. 1차 냉각계통 고 방사능 11. 1차 냉각계통 저 압력 12. 1차 냉각계통 저-저 압력 13. 중성자 출력 준위 14. 1차 냉각계통 감마 고출력 15. 1차 냉각수 고 총감마신호 16. FTL의 정지 변수

2.2. 실험설비로 인한 불시 정지 요인

2.2.1. 핵연료 노내 조사시험 설비

핵연료노내조사시험설비는 원자력발전소와 동일한 환경 조건을 제공하기 위하여 노심부(IPS)와 노심 외부에 설치된 다양한 기기/부품들로 구성되며, 고온 고압의 안전 관련 설비들이 포함되어 있다. 노심에 설치된 IPS 내부의 물리적인 특성 변화는 원자로 핵 반응도에 변화를 일으켜 과도현상을 초래한다. 이러한 과도현상이 <표 2>의 하나로의 정지변수 설정치를 초과하는 경우에는 원자로가 불시에 정지된다. 안전성에 영향을 주는 냉각 계통과 같은 시설계통의 공정 변수들도 감시되며 안전 설정치를 벗어나면 원자로를 정지하도록 설계되어 있다. <표 3>은 상세한 핵연료 노내 조사시험 설비의 정지변수를 나타낸다.

<표 3> 핵연료 노내조사 시험 설비 정지변수

정지변수명	정지 설정치
원자로 정지	
1.수동정지	-
2. 주냉각수 저유량	1.37 kg/s
3. 주냉각수 고유량	1.84 kg/s
4. 주냉각수 고온	329.7 ℃
5. 주냉각수 저압	13.57 MPa,g
6. 주냉각수 고압	16.76 MPa,g
7. 노내시험부 압력용기 단열가스 고-고압력	8.63 MPa,g
8.냉각수 고-고방사능	900 cps
FTL 비상정지	
1. 수동정지	-
2. 주냉각수 저-저 유량	1.05 kg/s
3. 주냉각수 고유량	1.84 kg/s
4. 주냉각수 고-고 온도	337.7 ℃
5. 주냉각수 저-저 압력	12.77 MPa,g

2.2.2. 냉중성자 연구 시설

냉중성자 연구시설은 중성자의 에너지를 감쇄시키는 노심부(IPA)와 극저온, 고 진공설비 등으로 구성되어 있다. 노심부인 IPA에는 액체 수소가 채워져 있으며, 내부의 상태를 수소의 압력으로 감시하고, 압력에 이상이 생기면 원자로를 정지하도록 설계하였다. 수소 압력은 원자로 노심부의 상태뿐만 아니라 냉동기등의 운전 상태에도 영향을 받으므로 냉중성자 시설계통의 과도 상태를 반영한다. <표 4>는 냉중성자 시설계통의 정지 변수를 나타낸다.

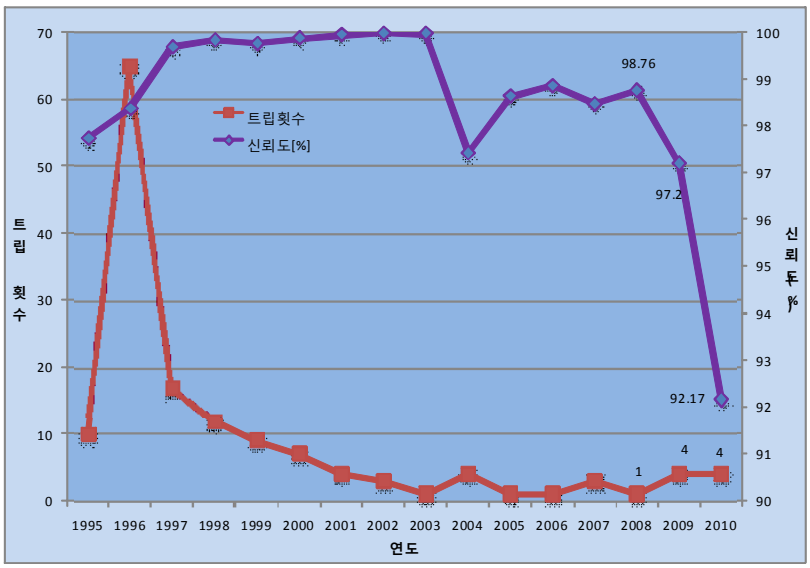
<표 4> 냉중성자연구시설 정지 변수

정지변수(제어계통)	정지설정 값
냉중성자원 수소계통 고 압력	200 kPa(a)
냉중성자원 수소계통 저 압력	120 kPa(a)

3. 불시정지 및 운영 신뢰도 변화

3.1. 변화 추이

2009년에 설치 및 시운전을 종료한 핵연료 노내 조사시험 설비(FTL) 과 냉중성자 연구시설(CNS)가 2009년 하반기부터 원자로 운전과 병행하여 운전을 시작하였다. FTL과 CNS에 비정상적인 과도상태가 나타나면 이는 계통이나 노심부에 변화를 초래하고 결과적으로 표 2, 3, 4에 나타낸 것과 같이 원자로, FTL, CNS정지 변수에 영향을 주어 원자로가 불시에 정지하게 된다. 1995년부터 2010년 4월까지 하나로의 불시정지횟수와 신뢰도를 <그림 3>에 나타내었다. 그리고 불시 정지를 관련 시설 별로 분류한 <표 5>을 보면 2009년부터 가동한 신규 실험설비인 FTL과 CNS로 인하여 불시정지가 증가되었음을 알 수 있다. 2010년의 신뢰도와 불시정지 횟수는 2010년 4월까지 기록된 값으로 운전시간이 증가하면 신뢰도는 증가할 것이다.



<그림 3> 원자로 불시정지 횟수와 신뢰도

<표 5> 년도별 불시정지 횟수 및 관련 시설

년도 \ 구분	RX	FTL	CNS	합계
1995	10	-	-	10
1996	65	-	-	65
1997	17	-	-	17
1998	12	-	-	12
1999	9	-	-	9
2000	7	-	-	7
2001	4	-	-	4
2002	3	-	-	3
2003	1	-	-	1
2004	4	-	-	4
2005	1	-	-	1
2006	1	-	-	1
2007	3	-	-	3
2008	1	-	-	1
2009	-	3	1	4
2010	1	0	3	4
합 계	139	3	4	146

3.2 원인 분석

기존 원자로설비로 인한 불시 정지는 2009년에는 없었고 2010년에 1건이 있었다. 이는 최근의 불시정지 횟수와 비슷하며 특이한 변화 요인이 없음을 나타낸다. 정지 원인은 시설 계통의 부품이나 기기가 노후하여 생기는 현상으로 분석되며, 개선을 위해서는 주기적인 시험, 점검 및 노화관리를 강화하는 것이 필요하다.

FTL로 인한 불시정지는 FTL을 고온고압으로 운전한 2009년에 집중적으로 발생하였다. 시설 계통이 운전되는 초기의 부품의 불안정과 운전절차의 미정착 등이 원인으로 분석 되었다. 또한 시운전을, 기존 원자로 운전과 병행해야 하는 시간적인 제약으로, 충분히 하지 못한 것도 원인으로 볼 수 있다.

CNS로 인한 불시정지는 2010년에 집중적으로 나타났는데, 원인으로 제어계통의 불안정, 기기의 고장, 운전절차의 미정착 등으로 분석되었다. 역시 시운전 기간이 짧은 것도 원인으로 볼 수 있다.

따라서 원자로 운전 초기인 1995년과 같이 1년 정도의 초기의 불안정한 기간이 경과하면 부품의 초기 고장이 해소되어 불시정지가 감소할 것이다. 그리고 운전절차확립 및 설계개선

등을 통하여 근본적인 원인을 제거하면 불시정지가 2008년 이전과 비슷하게 유지될 것으로 전망된다.

4. 결론

하나로는 2009년도에 설치가 완료되어, 가동을 시작한 실험설비로 그 동안 원자로 불시정지가 증가하고 운영신뢰도가 감소하였다. 하나로의 불시정지 추이에서 나타난 현상은 일반적인 신뢰도변화 추이를 전형적으로 나타내며, 이는 부품의 사용 초기에 나타나는 고장과 시설 계통의 운전 절차가 안정화되는 과정에서 나타나는 과도현상으로 분석되었다. 앞으로 운전 이력이 증가하고, 불시 정지 원인으로 파악된 근본 원인을 제거하면 불시정지가 줄고, 운영 신뢰도가 증가할 것이다.

참고문헌

[1] IAEA (2008), Optimization of research reactor availability and reliability

[2] 정환성, 이충성, 안국훈, 임인철 (2009), 하나로 연구용 원자로의 운영 신뢰도 분석, 2009년 한국신뢰성학회 추계학술대회 논문집(p191-p196)