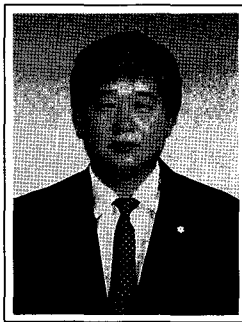


하나로의 특성 및 운전 현황

이 지 복

한국원자력연구소 하나로운영팀장



하나로는 운전중인 여러 연구로를 비교 검토하여 우리 실정에 맞도록 설계한 다목적 연구로이다.

연구용 원자로는 1년이나 1년 반에 한번씩 핵연료 교체시에만 원자로의 접근이 필요한 원자력발전소와는 달리 운전 중에도 수시로 원자로에 접근해야 하므로 접근성이 뛰어난 개방 수조형이 좋다.

또한 개방 수조형은 수조 내에 많은 냉각수를 보유하여 이 물이 노심의 열제거원 역할을 한다.

원자로의 안전 원칙은 비상시 원

자로를 신속하게 정지하고 핵연료의 잔열을 제거하는 것이다.

따라서 원자로에서는 잔열을 확실하게 제거하기 위하여 여러 종류의 잔열 제거 장치를 설치해야 하나, 개방 수조형 원자로에서는 수조수의 자연 대류에 의해 잔열을 충분히 제거할 수 있으며, 안전성도 훨씬 높다.

연구로에서는 높은 중성자 밀도를 얻기 위하여 고농축의 우라늄을 사용해야 하나, 핵확산 방지 정책에 따라 20% 이하의 저농축 우라늄만 사용이 가능하다.

따라서 하나로에서는 낮은 농축도를 보상하기 위하여 단위 부피당 우라늄 함량이 가장 높은 우라늄과 실리콘의 합금 연료를 사용한다.

연구로에서는 여러 가지의 활용 목적을 동시에 만족시키기 위하여 중성자속이 높고 넓은 공간이 필요하다.

노심에서 높은 중성자속을 얻을 수 있지만 공간은 제한적이다.

따라서 연구로에서는 핵적 특성이 좋은 물질로 원자로실을 둘러싸야 실험공간을 확보할 수 있다. 이를 반사

체라 한다.

중수는 가격이 비싸고 운전 유지가 어려운 단점은 있으나 그 특성은 탁월하여 하나로에서 반사체로 중수를 선택하였다.

대형 연구로의 냉각 방법으로는 강제 대류가 필수적이며, 흐름의 방향은 하향과 상향을 생각할 수 있다.

하향은 핵연료 장전, 실험 장치의 설치가 안정되고 용이하나 잔열 제거시 자연 대류의 이용이 불가능하다.

왜냐하면 강제 대류의 하향에서

(표 1) 하나로 특성

구 분	명칭 및 세부 사항
노형	개방 수조형
열출력	30MW
최대 열중성자속	$5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$
핵연료	20% 농축 우라늄 U ₃ Si-Al
냉각재	경수(H ₂ O)
반사체	중수(D ₂ O)
노심 냉각	상향 강제 대류
2차 냉각	냉각탑
잔열 냉각	자연 대류
제어/정지봉	H ₁₀ 관 각4개
원자로 건물	준격납(Confinement)

자연 대류의 상향으로 흐름이 변하는 과정에서 노심의 충분한 냉각을 보장할 수 없어 잔열 제거 계통의 설치가 불가피하다.

반대로 강제 대류의 방향을 상향으로 하면 자연 대류의 방향과 일치하므로 잔열 제거가 가능하며, 자연 법칙에 의해 이루어지므로 안전성도 훨씬 높다.

하나로의 주요 특성은 <표 1>과 같다.

원자로 성능 시험

핵연료 장전으로 시작되는 원자로 성능 시험은 다음과 같은 목적을 가지고 있다.

- ① 설계의 정확성 검증 및 원자로의 안전성 확인
- ② 원자로 운영·관리에 필요한 특성 파악 및 기초 자료 생산
- ③ 원자로 운전 및 점검에 필요한 절차와 방법 확립
- ④ 원자로 운전 및 관리 요원의 훈련

이 가운데 하나로는 참조 원자로 없이 국내 주도로 건설된 최초의 연구용 원자로이므로 우리의 설계 기술이 얼마나 정확한지 검증하는 것이 특히 부각된다.

이 검증이 끝나야 비로소 우리의 능력에 대한 자신감을 가질 수 있고, 이 기술의 응용 영역을 한층 높일 수 있게 된다.

특히 원자로의 각종 핵적 특성 시험은 정상 운전 중에도 많이 수행하지만, 시운전시 수행한 시험이 다음과 같은 면에서 특히 중요하다.

- ① 핵연료가 연소되지 않은 상태이므로 핵연료 조성 자료가 매우 정확하다. 따라서 계산과 실험을 비교하기에 가장 좋은 자료가 생산된다.
- ② 원자로가 일단 방사능을 띠고 난 뒤에는 불가능하거나 매우 어려운 실험이 많다.
- ③ 원자로의 초기 상태에서 각종 특성을 파악하여 향후 비정상적 상황이 발생하였을 때 이를 정확하게 빨리 파악할 수 있다.

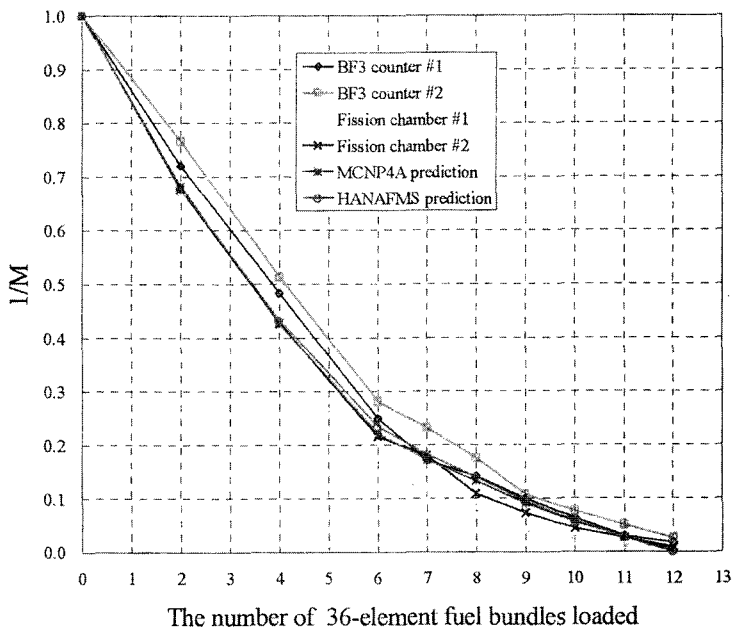
원자로의 성능 시험은 ① 첫 임계와 초기 노심 구성 ② 영출력 시험 ③ 출력 상승 시험의 3단계로 나누어 수행된다.

첫 임계와 초기 노심 구성

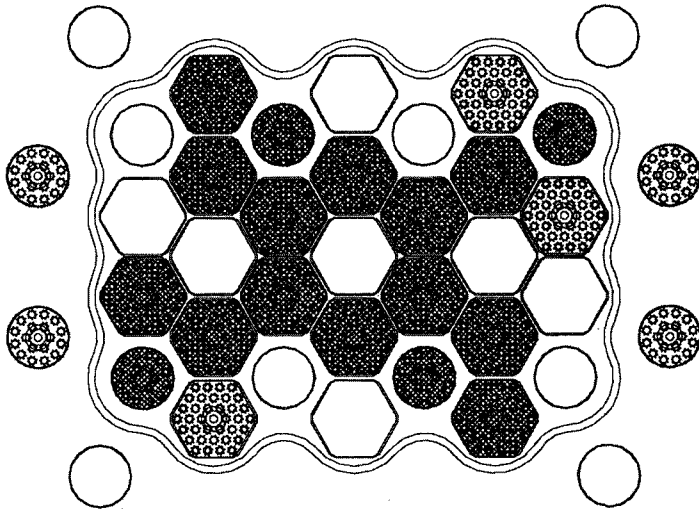
하나로의 첫 임계는 역증배법으로 측정하였다.

맨 처음 18봉 핵연료 다발 4개를 장전하고 이를 기본 자료로 하여 36봉 핵연료 다발을 1개씩 장전하면서 중성자를 측정하여 1/M 그림을 그렸다.

첫 임계는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 18봉 다발과 36봉 다발이 각각 4개와 13개 장전되었을 때 도달하였



<그림 1> 첫 임계시의 1/M 곡선



〈그림 2〉 첫 임계를 위한 핵연료 장전 모형 및 1주기 운전 노심 장전 모형

으며 계산 값이 측정치와 정확히 일치함을 보여주고 있다.

〈그림 2〉는 첫 임계시와 초기 노심의 핵연료 장전 모형으로서, 진한 부분이 첫 임계시의 장전 모형이다.

초기 노심은 첫 임계에 도달한 후 36봉 다발 3개와 18봉 다발 4개를 추가로 장전하였다.

즉 36봉 다발 16개와 18봉 다발 8개 모두 24개의 핵연료 다발로 구성되었다.

초기 노심은 〈그림 2〉에서 검은 부분이며, 빈 곳에는 핵연료 다발과 같은 모양이나 핵연료 대신에 알루미늄으로 구성된 모의 다발이 장전되었다.

첫 임계에 도달한 후 초기 노심이

구성될 때까지 핵연료 다발을 추가 장전할 때마다 제어봉의 다양한 위치 조합에 따라 임계가 되는 조건과 제어봉과 정지봉의 반응도 값을 측정하였다.

임계 측정은 실험 그 자체가 매우 정확하므로 설계에 사용되는 컴퓨터 코드와 계산 절차의 정확성을 검증하는데 효과적이다.

따라서 많은 경우에 대하여 계산하고 실험하여 상호 비교하고, 핵연료 장전량과 임계가 되는 제어봉의 다양한 위치를 조합하여 신뢰성 있는 자료를 도출할 수 있었다.

정지봉 및 제어봉의 반응도가는 반응도의 영향을 주는 다른 요소의 반응도가를 결정하는 기준 자료로 사

용될 뿐만 아니라, 원자로의 안전 운전에 필요한 초과 반응도가와 정지여유도를 결정하는 데 사용된다.

영출력 시험

영출력이란 핵분열로 발생하는 열이 노심의 온도 변화에 영향을 주지 않는 정도의 출력을 말하는데, 하나로의 경우에는 1차 냉각 계통을 가동하지 않고 실험할 수 있는 실험으로 다음 사항들이 포함된다.

- ① 정지봉과 제어봉의 낙하 시간 측정
- ② 등온 온도 계수 측정
- ③ 핵연료 반응도가 측정
- ④ 기포 반응도가 측정
- ⑤ 원자로 잠음 측정
- ⑥ 원자로 전달 함수 측정
- ⑦ 감마선 분포 측정
- ⑧ 열중성자속 분포 측정과 출력 계 교정
- ⑨ 고속 중성자속 분포 측정
- ⑩ 핵연료 다발당 출력 분포 측정

정지봉과 제어봉의 낙하 시간은 핵연료 장전 전후, 1차 냉각 펌프의 정지 및 가동시, 냉각수의 온도 변화 등 여러 조건에서 측정하였으며, 모두 설계치와 잘 일치하였다.

등온 계수는 원자로 사고시의 고유 안전성과 밀접한 관계가 있어 0보다 작은 것이 바람직하다.

그러나 하나로의 초기 노심의 경우 핵연료가 채워지지 않는 자리가

많아 노심 전체의 핵연료/감속재비(比)가 정상 노심보다 작아 등은 온도 계수가 0보다 약간 큰 값을 나타내었다.

따라서 핵연료 배열을 다양하게 변경하여 정상 노심이 되면 온도 계수가 0보다 작아질 것이라는 것을 보여 주었다.

핵연료의 반응도가와 기포 반응도가는 동시에 측정하였다.

모의 기포를 모든 핵연료에 장착하여 실험할 수 없으므로 2개의 핵연료에만 모의 기포를 장착하고 이 다발을 노심 내 각 위치에 장전하여 기포 반응도를 측정하였다.

따라서 각 위치에서, 장전된 핵연료의 인출과 재장전이 불가피하므로 핵연료의 반응도값도 얻을 수 있었다.

측정된 기포 반응도 계수와 핵연료 반응도가는 설계치와 잘 일치하였다.

원자로 잦음 측정은 원자로 동특성 인자 가운데 지발 중성자 분율과 중성자세대비(β_{eff}/λ)를 구하고, 다른 방법으로 측정이 불가능한 아주 낮은 출력 준위(μW)에서 핵분열 출력을 측정하는 데 사용하였다.

측정 방법은 연구로 1·2호기에서 개발한 PC 이용법 가운데 VTMR (variance to mean ratio)을 사용하였다. 측정된 β_{eff}/λ 는 설계치와 잘 일치하였다.

잦음 측정은 중성자원이 거의 없

는 상태에서만 가능하나, 하나로가 출력을 내기 시작하면 반사체인 중수에서 발생하는 광중성자의 준위가 높아 더 이상 사용이 불가능하다.

전달 함수 측정은 1·2차 냉각 펌프나 중수 펌프가 가동될 때, 그리고 원자로 출력 준위와 노심 연소에 따라 측정하여 정상적인 상태에서 전달 함수를 파악해 주는 것이다.

만일 노심 구조물이나 계통의 이상이 발생하면 이로 인한 주파수 특성의 변화가 전달 함수에 나타나므로 계통의 이상이 발생했다는 것을 알 수 있다.

감마 분포는 노심 내 주요 조사공

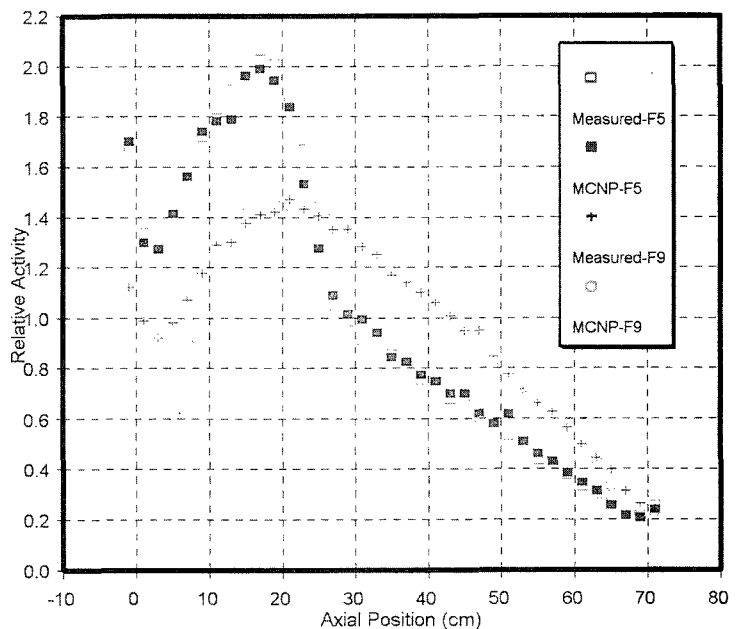
에서 감마 발열을 추정하기 위하여 측정하였다.

일반적으로 보전 물리에서 사용하는 TLD를 이용하였는데, TLD 내부의 소자만 조사시켰기 때문에 측정 결과는 정확히 해석할 수 없었다.

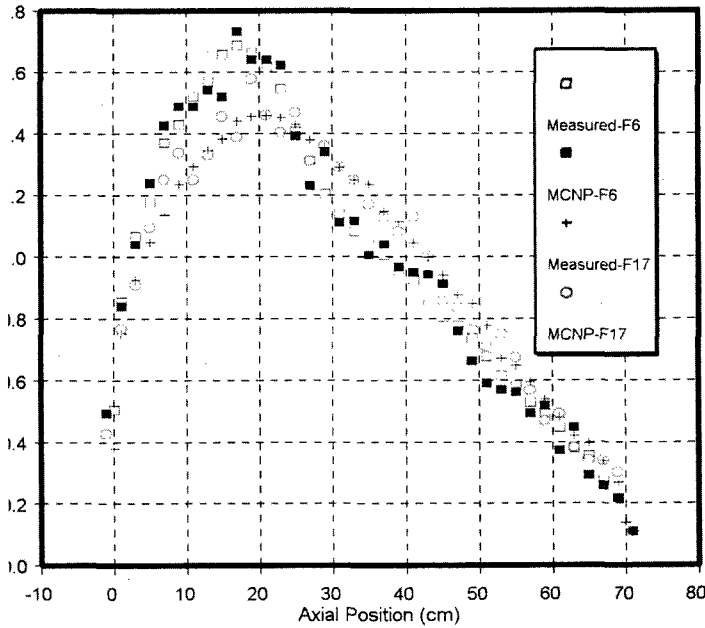
열 중성자속과 고속 중성자속 분포 측정은 핵연료 다발 가장 자리 한곳에 Au와 Ni선을 설치하여 측정하였다.

그러나 측정 결과와 MCNP를 이용한 계산 결과를 비교하는 데 어려움이 있었다.

즉 핵연료 다발 내에서 평면적인 위치가 조그만 차이가 나도 중성자



〈그림 3〉 F5와 F9에서 열 중성자속의 수직 분포



(그림 4) F6와 F17에서 속 중성자속의 수직 분포

속 분포는 크게 변하며, 계산에서는 직경이 0.1mm인 Au선은 점에 불과하므로 정확한 계산을 할 수 없다.

더욱이 금은 에너지 폭이 매우 좁으면서 큰 공명 흡수대를 가지고 있다.

(그림 3)과 (그림 4)는 각각 2 핵연료 다발에서의 열 중성자속과 고속 중성자속의 실험과 계산을 비교한 것이다.

측정과 계산은 비교적 잘 일치함을 보여준다.

계산의 신뢰도를 높이기 위하여 3,000만개의 중성자 선원에 대해 계산하였으며, 공명 자기 차폐 효과와

카드뮴비는 각각과 계산과 측정으로 고려하였다.

핵연료 다발의 감마 스캐닝은 고속 중성자속 측정에 사용한 핵연료 다발을 사용하였다.

측정은 조사재 시험 시설의 핫셀을 이용하였으며, 측정 결과 핵연료의 수직 출력 분포는 계산값과 잘 일치하였다.

출력 상승 시험

출력 상승 시험의 시험 항목은 다음과 같다.

- ① 자연 대류 냉각 운전 시험

- ② 출력 결손 측정
- ③ Xe 효과 측정
- ④ 열 제거 능력 측정
- ⑤ 주변 방사능 측정
- ⑥ 상용 전원 상실 시험

하나로는 충분한 수조수를 이용하여 잔열을 자연 대류에 의해 제거하도록 설계되었다.

1차 펌프가 정지되면 1차 냉각 계통을 통한 자연 대류와 플랩 밸브를 통한 수조수의 자연 대류가 2중으로 작동된다.

시험 결과 2개의 루프를 통한 자연 대류가 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

출력 결손은 원자로 출력에 따른 반응도의 변화량을 측정하는 것으로, 하나로의 경우 출력 결손이 Xe의 효과에 비해 매우 작아 측정이 어려웠지만 측정 결과는 설계값과 잘 일치하였다.

Xe 효과는 측정 결과가 설계값보다 약 10% 크게 나타났다.

이는 초기 임계 상태보다 제어봉이 훨씬 더 많이 뽑힌 상태의 제어봉 반응도가를 사용했기 때문으로 생각된다.

열제거 능력 측정은 실제 열출력을 측정하여 중성자 계측기의 지시값과 비교하는 것이다.

2차 냉각 계통으로 나가는 열에는 핵분열 출력, 펌프 열량, 붕괴열 등이 포함된다.

이 가운데 핵분열 출력은 중성자

속에 비례하고 나머지는 거의 일정한 값을 가진다.

원자로 주변에서의 방사선 준위는 설계 목표치보다 훨씬 낮았으나 수조 상부는 높았다.

따라서 수조의 방사선 준위를 낮추기 위하여 수조 표면에 고온층을 설치하였다.

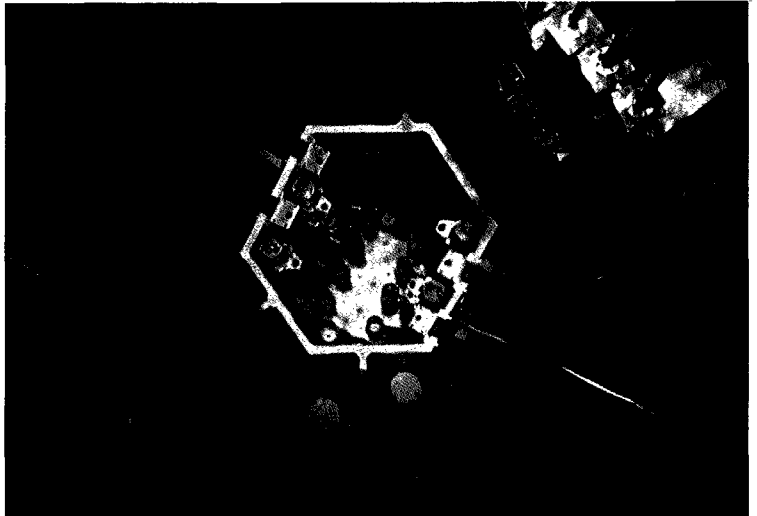
원자로 운전 중 외부 전원이 정전 되었을 때 원자로가 설계된 대로 긴급 정지되고 노심이 충분히 냉각되는지를 확인하기 위하여 여러 출력에서 상용 전원 상실 시험을 수행하였다.

시험 결과 각 계통은 설계된 기능을 유지하였으며, 1차 냉각 펌프의 관성 바퀴에 의한 점진적인 유량 감소, 1차 냉각 계통을 통한 자연 대류, 수조수를 통한 자연 대류로 노심이 안전하게 냉각되는 것을 확인하였다.

장시간 시험 운전

96년부터는 초기 노심의 15MW 부터 핵연료를 추가 장전하고 출력을 상승하면서 장시간 시험 운전을 시작하였다.

장시간 시험 운전의 목적은 ① 각 기기와 장치에서 어떤 고장이 발생하며, 문제점은 무엇인지 ② 관련 운전, 점검, 보수 절차서는 실제와 잘 맞는 지 ③ 운영 조직은 효율적이며, 각 개인의 능력은 충분한지 ④ 원자로 운전과 이용과의 간섭 사항은 무엇이며



Cerenkov 방사선으로 빛나고 있는 하나로. 육각형의 안쪽이 노심이고, 그 밖의 원통이 중수 반사체로서 다양한 크기의 수직 실험공이 보인다.

(표 2) 하나로 운전 실적

연도	운전 시간(일)	출력 생성량(MWD)
1996	168.36	2687.5
1997	130.87	2035.9
1998. 6	67.0	1339.8
계	366.23	6063.2

해결책은 무엇인지 등을 점검하는 것이다.

〈표 2〉는 96년부터 98년 6월말까지 연도별 운전 실적이다.

총 운전일수는 366일이며, 출력 생성량은 6,063MWD이다.

운전일수가 적은 것은 발전로와 달리 하나로는 4주 운전하고 핵연료를 교체해야 하는 설계 특성 외에도, 참조 원자로가 없는 고유 원자로이므로 설계 검증과 운전 자료 생산을 위

하여 같은 종류의 실험을 반복 수행하였고 주기초 뿐만 아니라 주기말에도 특성 시험을 수행하였다.

또한 하나로는 다목적 연구로이므로 활용을 위한 준비, 즉 시료의 장전, 신규 이용 장치의 설치 및 철거 등으로 정지 기간이 정상보다 길었다.

특히 하나로 활용 설비는 하나로가 완공된 후에 대부분의 설치 작업이 진행되고 있어 하나로 가동에 지

장을 주고 있다.

특히 하나로 운영에 지장을 주는 것은 핵연료 검사이다.

주기적으로 모든 핵연료를 작업 수조로 이동하고 육안 검사를 실시하고 있기 때문이다.

장시간 시험 운전을 시작한 이후 98년 6월말까지 계획되지 않은 불시 정지는 모두 99건이며 이중 75건은 96년에, 17건은 97년에, 7건은 98년에 발생하였다.

이를 원인별로 보면 운전원 실수가 26건, 계통 고장이 68건, 정전이 5건이다.

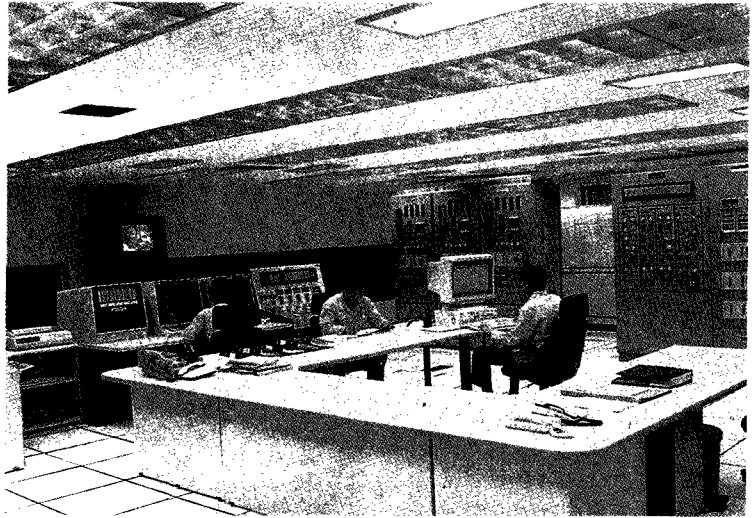
불시 정지 건수가 96년에 75건에서 97년 17건으로 대폭 감소한 것은 그 동안 운전원들이 실무와 훈련을 통해 더욱 숙달되고, 계통상의 문제 점도 많이 개선되었음을 나타낸다.

앞으로의 운전 계획

현재 하나로는 이용자들의 특별한 요청이 없는 한 출력 20MW에서 주 3일 운전하고 있다.

이와 같이 운전 출력이 정격 출력보다 낮고 운전 시간이 많지 않은 것은 활용 시설이 충분히 갖추어지지 않은 것이 큰 원인이지만, 인허가의 조건 사항도 원인중의 하나이다.

하나로는 핵연료 장전과 출력 운전에 대한 인허가시 핵연료의 연소 시험과 임계 열속에 대한 추가 자료를 제출하여 설계의 보수성을 입증할



원자로 제어실 : 원자로를 운전하기 위한 자동 제어 장비들과 운전원

때까지 정격 출력 30MW의 80%인 24MW 이하로 운전하라는 조건 사항을 받았다.

이는 참조 원자로가 없는 세계 유일의 하나로에 대한 당연한 조치로 생각된다.

이에 따라 현재 시험 다발 3개를 하나로에서 시험 연소중이며, 이를 냉각 후 비파괴 시험을 수행하여 그 결과를 99년 말에 인허가 기관에 제출할 계획이다.

또한 임계 열속에 대한 것은 핵연료 공급자인 캐나다 AECL에서 추가 시험 자료를 입수하고 재해석하여 보수성을 입증하였다.

하나로는 핵연료의 기계적 건전성을 입증하기 위하여 매 2주마다 핵연료를 육안 검사하고 있다.

노심의 모든 핵연료를 검사하는

데는 2주 정도가 소요되나, 반감기가 짧은 의료용 동위원소를 안정적으로 공급하기 위하여는 원자로가 1주 이상 정지되어서는 안된다.

따라서 98년부터 핵연료 검사를 분할하여 수행하면서 매주 3일 운전하여 동위원소를 안정적으로 공급하고 있다.

2000년에는 하나로에의 조건 사항이 해결되어 정격 출력인 30MW로 운전이 가능하며, 핵연료의 건전성도 입증되어 핵연료 검사 간격도 길어져 주당 7일 연속 운전이 가능할 것이다.

또한 활용 시설도 계속해서 추가 설치되어 가고, 이와 병행하여 이용자들의 요구도 점차 늘어가게 되어, 2002년 이후에는 연 250일 이상 운전하여야 할 것으로 전망된다.