

# 준공 경위와 앞으로의 운용

## 하나로 HANARO

때는 1995년 2월 8일 오후 4시 09분. 곳은 대덕에 위치한 한국원자력연구소 구내 하나로 건물 주계어실.

17번째 핵연료봉 장전을 마치고 서서히 제어봉을 인출하면서 우리 힘으로 최초로 설계한 원자로의 첫임계를 지켜보는 순간이었다.

우리 기술진의 계산 예측치로는 17

개 내지 18개 연료봉 장전시에 초기 임계에 이르는 것으로 믿고 있었다.

노심 내에 설치된 중성자계측장치들의 신호를 분석하면서 이지복 기술 부장은 「16시 09분 현재 첫임계에 도달하였습니다」를 선언하였고, 대기하고 있던 한국원자력연구소 소장은 과학기술처 장관과 한국전력공사 사장(한국원자력연구소 이사장)에게 즉시 전화로 구두보고를 마치고 격려의 말을 들었다.

참으로 감격스러운 순간이었다. 이 순간은 즉시 전세계의 원자력 관련기관들과 언론매체에 타전되어 하나로 탄생을 온누리에 알리게 된 것이다.

이 자리에 참석하였던 과학기술처, 한국전력공사, 한국원자력안전기술원, 한국원자력연구소, 캐나다원자력공사(AECL), 현대건설(주), (주)대우 등 원자력 전문가 50여명은 일생에 한번 정도 만날 수 있는 역사의 현장에 참석하게 되었다.

당초 계획인 세계 최초의 Fermi

CP-1 원자로 첫임계 기념일인 1994년 12월 2일부터 약 두달간 시운전 마무리 관계로 지연이 되긴 하였으나, 그날의 역사를 기념하는 Chianti 포도주를 증정하는 여유를 보여 주었다.

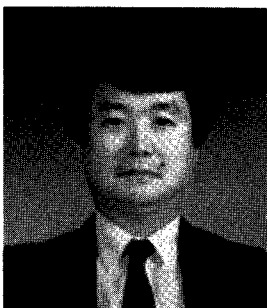
이 포도주는 1942년 CP-1 첫임계 직후 Wiegner 박사가 Fermi 박사에게 축하한다고 증정한 이탈리아산 포도주로 원자력과는 특별한 인연이 있는 술이다.

### 하나로의 탄생

돌이켜 보면 하나로 사업의 잉태는 1978년으로 거슬러 올라간다.

당시 서울 태릉에 있던 한국원자력연구소는 1970년대에 건설중이던 경수형 발전로 고리 1호기와 중수형 발전로 월성 1호기를 지으면서, 1980년대 이후의 장기 원자력발전 프로그램을 놓고 국산화에 비교적 용이한 중수로 국산화 타당성을 연구하고 있었다.

이때 나왔던 건의사항이 우리나라



김 병 구

한국원자력연구소 핵연료그룹장  
(준공 당시 원자로사업단장)

도 선진국과 같이 대규모의 원자력발전을 추진하려면 우리 자체의 본격적인 대형 재료시험로(material testing reactor)가 필요하다는 의견이었다.

이미 선진국들은 1950년대와 1960년대에 자국의 원자력개발 프로그램을 지원하기 위하여 연구용 재료시험로 건설을 마쳤으나, 우리나라는 새로운 우리 고유의 재료시험로 건설의 타당성을 설득하기에는 1970년대의 우리 여건은 그리 성숙되지 못하였다.

그러나 고리 1호기부터 올진 2호기까지 9기의 원전을 외국기술로 지어오던 우리나라도 드디어 1980년대 초부터 한국표준형 원전을 기치로 장기 원자력발전 프로그램에 의거한 기술자립의 전환기를 맞게 된다.

외국에서 실증된 첨단기술을 우리 것으로 만드는 데는 동일 원자로를 반복하여 건설하는 일과 새로운 개념의 설계를 시도하는데 필요한 재료시험로(또는 다목적 연구용 원자로)의 출현이 뒷받침되어야 한다. 이런 의미에서 1985년은 우리나라 원자력기술 역사에서 중요한 전환점을 이룬 해이다.

다목적연구로사업이 공식 착수됨과 동시에, 원자력발전 기술전반에 걸친 기술자립운동이 영광 3·4호기사업(원전 11·12호기)을 계기로 그 사업준비가 본격화 된 것도 1985년이었다.

지금까지 외국기술에만 전적으로 의존해 왔던 우리의 원자력기술이, 이

제부터는 우리 주도의 기술로 원자력 발전소를 지어 보겠다는 원대한 꿈으로 펼쳐지기 시작한 것이다.

1987년, 드디어 우리 역사상 처음으로 영광 3·4호기 사업의 건설뿐만 아니라 전 분야에 걸친 기술전수계약이 체결되었고, 1990년에 국내 계약자가 최종성능보장책임까지 지는 올진 3·4호기 사업이 착수되면서 이 원자력발전소는 한국표준 원전 1호기로 칭하게 되었다.

이로부터 10년의 세월이 흐른 1995년 2월, 대덕의 하나로 건설현장과 영광 3호기 건설현장이 10년동안의 건설시운전을 모두 마치고, 하나로 첫임계에 도달하는 쾌거를 이룩하였고, 영광 3호기는 처음으로 100% 출력시험이 한창이었다.

얼핏 보기엔 무관한 두개의 원자력 건설사업이 10년간의 대역사를 무사히 마치고 본격적인 가동체비를 하는 중이었다.

영광 3·4호기 원전을 참조 발전소로 하는 올진 3·4호기, 영광 5·6호기, 그리고 북한 경수로까지도 바로 이 원전으로 추진하게 되고 보니, 다음 세대에 대비하는 원자력 핵심기술의 총본산으로서 하나의 역할과 기대가 크다고 하겠다.

---

### 제1단계(1985 ~ 1988)

---

지난 10년간의 하나로 건설기간을 돌이켜 보면 크게 3단계로 나눌 수 있

다.

제1단계(1985~1988)는 설계단계로서 한국원자력연구소가 서울 공릉동에서 대덕으로 이전함에 따라 정부의 특별한 배려로 세계 첨단의 다목적연구로를 우리 주도로 설계하게 된다.

당초에는 캐나다 AECL사와 공동설계로 시작하였으나, 캐나다 내부 사정으로 MAPLE-X의 건설이 중단되는 바람에 설계단계부터 홀로서기(?)를 체험하게 된다.

그 당시 한국원자력연구소 설계진이 추구하였던 목표는 가장 순수하고 높은 중성자속을 소형 노심에 집결시키면서 다양한 이용자의 요구를 만족시키고자 하였다.

당초부터 하나로 설계의 목적은 10<sup>14</sup>급의 열중성자속을 생산하여 재료조사시험과 동위원소 생산 및 중성자 빔 연구를 동시에 수행할 수 있는 신형 연구용 원자로의 창조·개발이었다.

당시를 회고하면 정확하게 우리가 추구하였던 설계요구사항을 모두 만족시키는 연구로는 지구상에 존재하지 않았던 탓으로, 모방만 하던 연구에서 창조연구의 어려움과 희열을 동시에 맛보았다고 할 수 있다.

---

### 제2단계(1989 ~ 1993)

---

제2단계(1989~1993)는 건설단계로 원자력발전소 건설 유경험업체인 현대건설(주)이 시공을 맡고, 국내의

유수 기업체에서 주요 부품의 제작을 담당하였다.

특히 Al, Zr, SS Steel의 3가지 재질로 이루어진 원자로 본체의 제작은 한국원자력연구소의 기본설계에 따라 캐나다에서 제작하였고, 국내 중소기업체로 삼신밸브와 대신금속이 국내 최초의 특수밸브와 원자로 주변장치 제작에 기여한 바가 크다.

당초 500억원의 공사비로 1985년에 시작하였던 이 사업이 예산증액과 기간연장의 어려움을 겪게 된 것도 바로 이 기간이었다.

선진국의 예로 보아 이러한 대형 국가프로젝트가 예산초과와 공기지연 등의 악순환으로 중도에서 도중하차하는 예가 미국의 SSC 초전도 실험장치나 ANS 연구용 원자로의 경우에 있었으나, 하나로사업은 천신만고 끝에 건설예산은 총 934억으로, 공사기간은 총 10년으로 증액·연장되어 준공을 맞게 된 것이다.

### 제3단계(1994 ~ 1995)

제3단계(1994~1995)는 시운전단계로 그간의 모든 설계건설과정을 검증하는 기간이었다.

지난 30년간 서울에서 운전해오던 TRIGA II, III 연구로의 운전경험이 큰 도움이 되었던 것은 사실이나, 제한된 운영예산과 인력문제로 하나로 가동 출력상승 시점인 1995년 7월 까지 서울 연구로 1·2호기는 그 수



〈사진 1〉 첫임계에 도달한 하나의 주제어실, 1995년 2월 8일 16시 09분

명을 다하는 것으로 결정하였다.

일차적으로 필요한 최소 운전요원(RO, SRO) 확보를 위하여 운전요원의 충원 및 집중교육에 힘입어 1994년에 26명이 운전면허를 취득하였고 앞으로도 더욱 많은 운전요원을 확보할 계획이다.

또한 하나의 부대시설로 별도 건설된 조사재시험시설(IMEF : Irradiated Materials Examination Facility)이 1994년부터 시운전에 들어갔고 동위원소생산시설(RIPF : Radioisotope Production Facility)도 1995년부터 부분가동에 들어갈 예정이다.

또한 중성자 빔 연구에 사용될 장비도 부분가동에 들어갈 예정이어서 명실공히 세계 수준의 다목적 연구용

원자로로서의 면모를 갖추게 된 것이다.

### 왜 「하나로」인가?

하나로라는 고유명칭을 결정하게 된 유래는 이러하다.

이 사업의 초기단계인 1986년에 1차 명칭 공모를 소내에서 수행하였으나 마땅한 당선작이 없었고, 1994년에 현상금까지 건 2차 명칭 공모를 소내외에서 수행하여 110여편의 응모작 중에 가장 많은 공통명칭인 「하나로」로 1994년 7월에 선정하였다.

우리 고유의 설계와 기술로 이루어진 작품이니 당연히 그 명칭도 순수 우리말이면 좋겠다는 점과, 세계화·국제화에 대비하여 외국인도 부르기

쉬운 받침이 없는 말이라는 점에서 채택된 것이다.

「하나」는 「옴」이란 뜻이니 우리의 설계와 성능이 세계 정상 수준임을 뜻하고, 하나로는 분열에서 단합으로, 분단에서 통일로 간다는 뜻을 내포하고 있다. 토씨 「로」는 또한 한자어 「爐」로서 원자로를 뜻하고 그리스 문자 「ρ」는 핵공학의 기본상수인 반응도 계수 「ρ」를 뜻한다 해서 여러가지 복합의미를 지니고 있다.

또한 영문 표기의 「HANA」는 「Hi-flux Advanced Neutron Application」을 뜻하니 「고성능 첨단 중성자 이용」장치란 뜻이다.

이리하여 근 10년동안 보통 명사로 불려오던 「다목적연구로」나 「KMRR」 사업이 드디어 자기 고유 이름을 갖게 된 것이다.

이 명칭을 온 누리에 널리 알리고자 국영문 심벌마크를 제정하여 사용하게 되었다.

그러면 하나로가 「옴」이라고 할 수 있는 고성능 첨단기능은 과연 무엇인가?

여기에 대한 명쾌한 답은 오늘 현재 전세계에 가동중인 320여개의 연구용 원자로와 비교해서는 나올 수가 없다.

왜냐하면 전세계의 연구로 중에 출력이 10MWt급 이상인 연구로만 50기가 되는데 그들의 평균 운전경력이 25년 정도로 이미 1960년대에 가동을 시작한 원자로들이 주종을 이룬다.

(표 1) 세계의 차세대 연구용 원자로와 하나로의 특성비교

Project	ANS	IRF	FRM-II	하나로
주 관 기 간	미국 ORNL	캐나다 AECL	독일 TUM	한국 KAERI
'95 현 황	기본설계	개념설계	기본설계	가 동
준 공 년 도	2004(?)	2003	2000	1995
사 용 목 적*	①, ②, ③	①, ③	①, ③	①, ②, ③
노 형	open pool	open-tank-in-pool	open pool	open-tank-in-pool
열 출 력	330MW	40MW	20MW	30MW
최대열중성자속	10 <sup>15</sup>	4 × 10 <sup>14</sup>	8 × 10 <sup>14</sup>	5 × 10 <sup>14</sup>
냉 각 재	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
반 사 체	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O
핵 연 료	HEU(?) U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Al판	19.7wt%U-235 U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Al봉 (하나로와 동일)	HEU(?) U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Al판	19.7wt%U-235 U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Al봉
제 어 봉	하프늄봉	하프늄봉	하프늄봉	하프늄봉
총 투자 규모	29억\$	5억\$ (1994\$)	7억DM	2억\$

\* 사용목적 : ① 재료시험, ② 동위원소 생산, ③ 중성자 빔 연구

(표 2) 하나로의 우수성

1	Uranium-silicide 핵연료의 선택으로 안전성과 성능이 탁월하다.
2	수직·수평 조사공을 중수 탱크 반사체 안의 노심대에 밀집시킴으로써 고순도 중성자의 이용도를 높였다.
3	제어봉과 정지봉의 재질이 하프늄 봉으로 뛰어난 제어력을 갖추었다.

따라서 선진국들이 현재 신규 건설을 구상하고 있는 개념설계단계인 차세대 연구용 원자로의 설계특성과 하나로를 비교해 보면 그 차이가 뚜렷이 나타난다(표 1).

하나로의 우수성을 요약하면 (표 2)와 같다.

### 1. 핵연료

Uranium-silicide(U<sub>3</sub>Si-Al) 연료 봉은 이미 오래전부터 연구용 원자로의 핵연료로서 우수성이 인정되어 왔

으나, 원자로의 설계단계부터 기본연료로 채택된 것은 하나로가 세계 최초이다.

(표 1)에 나타난 선진국들이 21세기 가동목표로 추진중인 외국의 차세대 연구로들도 모두 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 연료를 채택하고 있는 점이 이를 증명한다.

특히 1980년대 초의 국제핵주기평가사업(INFCE) 결과로 신규 연구용 원자로에 고농축우라늄(93% U-235 HEU) 사용을 금지한 조치는 핵확산의 우려를 방지하기 위한 국제사회의

새로운 약속이었다.

19.7% U-235 농축도를 채택한 하나로는 바로 RERTR(Reduced Enrichment Research & Test Reactor) 기준에 모두 만족하는 핵연료이다.

아직도 HEU를 주연료로 사용하고 있거나 신규 연구로에서 HEU를 고려하고 있는 예는 있으나(미국 ANS 등), 이 핵물질의 장기공급상 문제를 우려하는 시각이 높다.

### 2. 중수 반사체 탱크 구조

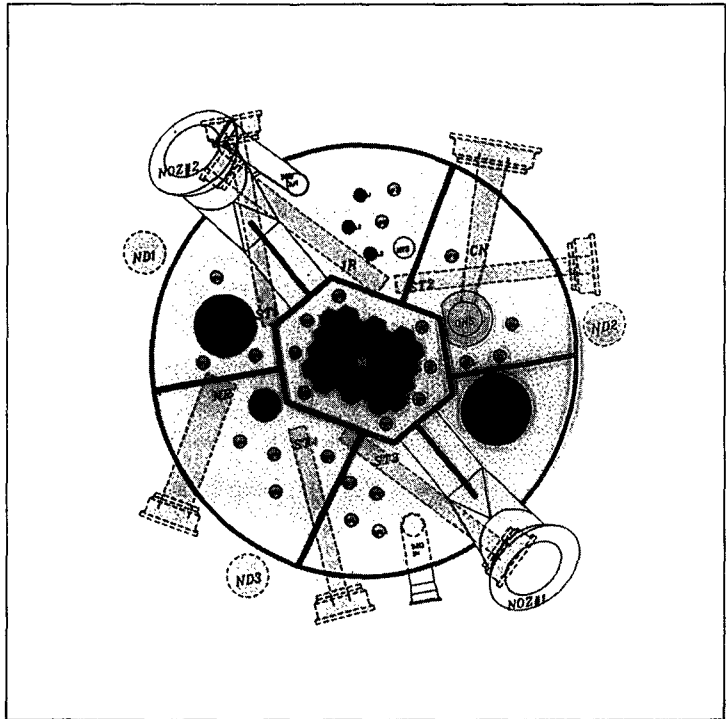
하나로의 노심은 높이 1.2m, 직경 2.0m의 중수 반사체 탱크로 이루어져 있다.

중수를 반사체 재질로 채택한 것은 조사공 위치에서의 중성자 순도를 균질하게 만드는데 기여하는 것으로서 이 역시 <표 1>의 선진국 차세대 연구로가 채택하고 있는 노심구조이다.

가장 밀집된 형태의 수직조사공(CT 3개, OR 4개, IP 17개 등)과 수평조사공(7개)이 모두 중수 반사체 탱크를 관통하고 있으며, 이는 다양한 이용자에게 최대의 고품질 중성자속을 제공하기 위한 설계 기본 고려사항이다.

### 3. 하프늄 제어봉 / 정지봉

제어봉과 정지봉의 재질이 과거에는 보론이나 카드뮴을 주로 써 왔으나, 폐기물 발생량과 수명상의 문제점이 있었다.



(그림 1) 하나로 노심 조사공 배치도

이를 기본적으로 개선한 것이 하프늄(Hf) 제어봉과 정지봉 채택으로 원자로 조정의 신뢰도와 경제성을 제고하는데 기여하였다.

<표 1>의 외국 차세대 연구로에도 예외없이 모두 하프늄 봉을 채택하고 있다.

이상 열거한 하나로의 핵연료, 노심 구조 및 제어봉 설계만 보아도 1985년 설계 착수단계에서부터 혁신적인 개념을 과감히 채택한 것은 세계 최고를 지향한 우리 설계진의 소신있는 결정으로 평가된다.

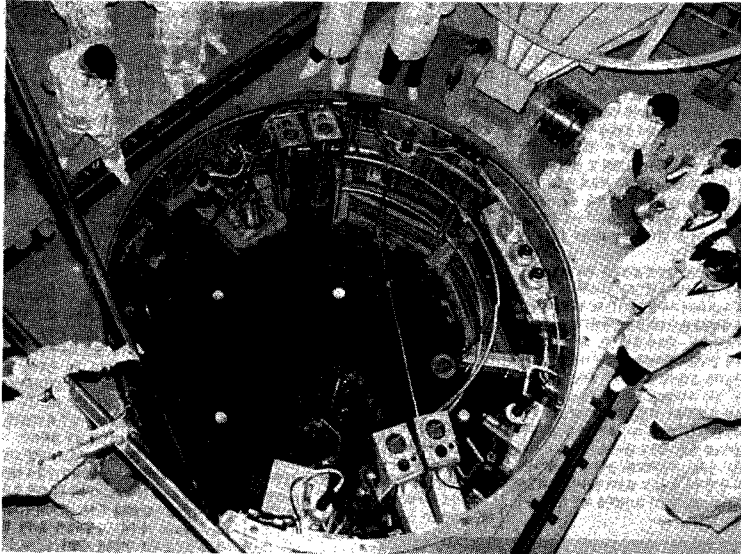
현재 선진국들이 신규 건설을 목표

로 설계중인 미국의 ANS, 캐나다의 IRF, 독일의 FRM-II 연구로와 기존 연구로의 전면 개조를 추진중인 미국 MIT 공대 원자로도 하나로의 원자로 특성과 대부분 일치하고 있다.

하나로의 설계특성이 과연 세계 첨단단의 「 으뜸 」 가는 중성자 조사장치로 자타가 인정하는 이유가 바로 여기에 있다.

### 어떻게 쓸 것인가?

연구용 원자로는 그 사용목적에 따라 크게 세가지로 분류된다.



(사진 2) 2월 2일 오후 2시부터 하나로 수조 상부에서 실시한 하나로 핵연료 최초장전 장면

첫째는 핵연료 및 노재료 조사시험 용이고, 둘째는 동위원소 생산용이고, 셋째는 중성자 빔 실험용이다.

따라서 지구상에서 가동중인 총 320여개의 연구로는 각각 그 나라의 수요요구에 따라 상기 목적중의 한가지, 두가지 또는 세가지 모두를 수행하는 연구로로 구분된다.

다목적 연구로라고 칭하는 원자로 는 조사시험·동위원소·중성자빔의 세가지 목적을 모두 동시에 수행할 수 있는 연구로로서 최근 각광을 받고 있는 원자로 형태이다(그림 1).

### 1. 핵연료·노재료 조사시험용

조사시험용 목적은 발전용원자로 내부와 유사한 유체조건중에서 높은 중성자속에 쫓임으로써 발전용 원자

로에서 장시간 걸쳐 일어나는 조사효과를 비교적 짧은 시간에 가속적으로 실험하는 것이다.

핵연료의 조사시험은 높은 열중성자속을 요구하는 반면, 노재료 조사시험은 높은 속중성자속을 필요로 한다.

하나로 노심부위에는 경수로(PWR) 핵연료 6×6 집합체 또는 중수로(CANDU) 실물크기의 핵연료 다발이 장전될 수 있는 핵연료시험루프(fuel test loop)가 현재 건설중이며 1997년부터 가동할 예정이다.

이 루프가 가동되면 현재 원자력연구개발 중장기 과제중 DUPIC, CAN FLEX 등 차세대 개량 핵연료의 시제품들이 이곳에서 조사시험을 받게 된다.

하나로 노심 중앙에는 3개의 CT공

이 있고, 여기는 가장 높은 속중성자속을 받는 곳으로 노재료의 시험을 위한 조사공이다.

현재 무게장 캡슐은 제작 완료되어 시험단계에 있고, 피시험체의 온도·중성자속 등을 측정하는 계장캡슐도 1996년까지는 완성되어 사용된다.

이 조사공은 신소재개발팀의 개량 지르코늄 합금, 인코넬 합금 및 구조강들의 노내시험에 이용된다.

하나로에서 조사를 마친 핵연료/노재료 시편은 인접한 조사재시험시설(IMEF)로 수송되어 조사후 시험을 치르게 된다.

### 2. 동위원소 생산

동위원소란 의료진단 및 치료용과 비파괴검사원인 산업용으로 그 이용도와 핵종이 다양한 것이 특징이다.

이 중에서도 특히 의료진단용(감마 카메라용)과 치료용은 최근의 생명과학 첨단기술의 발전에 힘입어 급신장하고 있는 국민보건과 직결된 중요한 분야이다.

지금까지 우리나라는 서울 TRIGA 연구로에서 Co-60, I-131, Ir-192 등을 소규모로 생산하여 국내 의료계 및 산업계에 공급하여 왔으나, 그 양은 국내 총소요량의 1~2%에 불과한 실정이었다.

향후 하나로가 전격 가동되면 국내소요는 물론 해외시장까지도 고려할 수 있는 발전 유망분야이기도 하다.

국제 수준의 동위원소 생산을 위하여는, △ 최대 열중성자속  $> 5 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ , △ 조사공 내부의 중성자속 균질도 유지, △ 단수명 반감기 핵종 생산을 위한 타깃 신속이송장치 등이 요구된다.

하나로의 중성자 조사공은 17개의 IP공과 4개의 OR공이 있고, 이들은 모두 첫번째, 두번째 조건을 훌륭히 만족시키고 있다.

또한 동위원소 타깃의 신속한 취급을 위해서 원자로 노심에서 인·출입을 자동화시킨 HTS(Hydraulic Transport System)가 설치됨으로써 세번째 조건도 만족하고 있다.

따라서 동위원소 생산분야는 국제 시장으로 진출할 수 있는 최상의 조건을 갖춘 셈으로, 수요와 공급의 시장 경제논리에 따라 사업성이 우수한 핵종을 검토중에 있다.

특히 조사기간중 냉각을 요하는 타깃 조사를 위해 노심지역내의 OR 조사공은 핵연료와 유사한 타깃의 조사도 가능케 한다.

조사를 마친 동위원소 타깃들은 하나로에 인접한 동위원소생산시설(RIPF)의 핫셀내로 수용되어 최종 상품화하는 과정을 거치게 된다.

또한 방사화분석(NAA : Neutron Activation Analysis)도 동위원소 생산과 유사하게 극미량의 시편을 원자로내부 NAA 조사공에서 PTS(Penumatic Transport System)를 이용하여 이송하고 분석하여 환경시료

등의 정량정밀분석을 수행한다.

### 3. 중성자 빔 실험용

세계 수준의 중성자 빔 실험을 위하여는 최소한 열중성자속이  $1 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 은 되어야 하며 노심에서 tangential 방향으로 빔포트가 설치되는 것이 안전성 면에서 유리하다.

하나로에는 중성자 빔 실험용 수평 빔 포트가 7개 설치되어 있어, 상기 조건들을 모두 만족시키고 있다.

중성자 빔 실험은 주로 재료·물성 변화규명을 위한 기초연구성격이나, 그 중 중성자 라디오그래피 분야 등은 산업계와 밀접한 관계가 있다.

향후 냉중성자를 이용한 연구목적으로 하나의 빔포트가 설계되어 있다.

외국에서 첨단 생명과학 기술로 최근 각광을 받고 있는 뇌종양 치료법인 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 기술도 본 하나로 빔포트를 써서 개발이 가능하다.

이상 열거한 하나로의 이용은 착실하게 개발되어 사용자의 편의를 위한 방향으로 원자로의 운전을 지원할 방침이다.

---

### 세계속의 「하나로」

---

오늘날 가동중인 전세계의 320여 개 연구로중에서 하나로는 어떤 위치에 있는 것인가?

앞서 설명한 바와 같이 하나로

의 수성은 그 성능과 기능면에서, 그리고 최신의 첨단기술이 접목되었다는 면에서 외국의 고성능 다목적 연구로와 견주어 볼 만하다.

여기서 유의할 점은 국제적으로 하나로와 경쟁대상이 될 만한 연구로들은 거의 1960년대에 가동되면서 이미 30여년 이상 운전한 원자로들로 향후 수명이 얼마 남지 않았다는 점이다.

이런 연유로 해서, 또한 국제적인 첨단 수준의 연구 유지를 위해 선진국들은 새로운 연구로의 신설에 안간 힘을 쓰고 있다.

미국 Oak Ridge National Lab.의 ANS(Advanced Neutron Source) 사업이나 캐나다 AECL사의 IRF(Irradiation Research Facility) 사업이 모두 이 범주에 속한다.

그러나 초기 투자재원의 방대하므로 이들 신규 사업의 실현성 여부는 아직도 미지의 상태에 놓여 있다.

이러한 국제적 여건하에서 1995년에 새로이 탄생한 하나로

는 우리나라의 원자력산업을 이끌어 가는 선도적 역할은 물론, 세계속의 중성자 연구시설로서, 혹은 세계시장에 공급하는 동위원소생산시설로서 그 진면목을 키워 나아갈 것이다.

향후 30년간 하나로가 가동되는 기간은 우리의 원자력기술이 세계로 뻗어가는 교두보의 역할을 할 것으로 기대한다. ☞