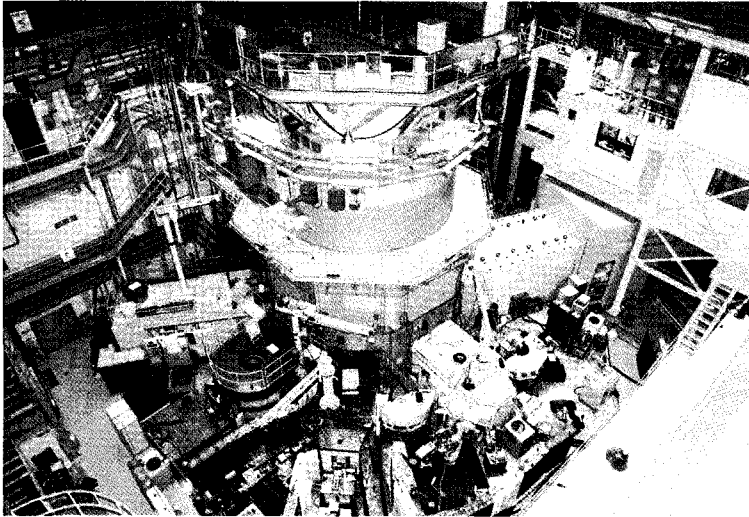




**03 하나로 연구용 원자로
중성자 이용해 물질 분석 ·
방사성동위원소 등 생산**

하나로(HANARO)는 대전 대덕연구단지 한국원자력연구원 내에 있는 열출력 30mw의 연구용 원자로(연구로)이다. 우리나라에서 현재 가동되고 있는 21개의 발전용 원자로가 핵분열 시에 생성되는 열을 이용하여 전기를 생산하는 반면, 연구용 원자로에서는 방사선을 이용한다. 여러 방사선 중에서도 특히 중성자를 이용하여 연구 활동과 산업에 필요한 기술 개발을 하고 있다.



▶▶ 원자로 주변의 실험장치. 원자로 주변에 설치된 7개의 유도관으로 나오는 중성자를 이용하여 재료특성을 분석하는 장치들이 설치되었다.

우리 기술로 설계·건설, 요르단에 수출도

하나로는 1985년도에 설계에 착수하여 1995년에 완공하였다. 하나로 건설과 실험설비 설치에는 약 2천500억 원의 비용이 투입되었으며 국가 대형 연구시설로서 국내외의 이용자가 다양한 용도로 사용할 수 있도록 다목적으로 건설된 연구로이다. 하나로는 지진 등에 대비해 안전하게 설계되었으며, 원자로가 대형수조에 잠겨있어 정전 시에도 자연대류로 충분히 냉각되는 안전한 설비이다. 설계 및 건설이 모두 우리 기술로 이루어졌으며, 이를 바탕으로 2010년에 요르단에 연구용원자로를 수출하게 되었다.

원자로는 약 20%의 농축된 우라늄 핵연료를 사용하며, 원자로심에서는 매초 단위 cm당 약 2×10^{14} 개의 중성자가 움직이고 있는데, 이 중성자를 이용하여 물질특성 분석 연구, 핵연료 및 재료 조사 시험, 방사성 동위원소 생산 및 개발, 실리콘 반도체 생산 등 기술개발과 연구를 하고 있다. 2009년에는 핵분열과 감속과정을 거쳐 노심 내에 생성된 열중성자를 액체수소를 통과시켜 에너지가 낮고 파장이 긴 냉중성자를 생산하는 냉중성자연구시설을 구축하였다. 열중성자를 이용한 원자 크기의 분석 능력에, 냉중성자를 이용한 나노크기의 재료 특성을 분석할 수 있는 성능이 추가되어 바이오분야의 연구에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다.

또한 같은 해에 원자력발전소의 온도, 압력, 수화학 조건을 동일하게 구현한 핵연료노내 시험설비가 추가로 구축되었다. 이 설비는 발전용 원자로의 축소판으로 보면 된다. 하나로에는 이처럼 다양한 연구와 기술개발을 할 수 있는 실험 장치가 설치돼 있으며, 그 상세한 특성과 용도는 다음과 같다.

고분해능 중성자분말 회절장치(HRPD)

중성자는 시료 내부의 원자핵 및 전자들의 스핀과 회절 현상을 일으키고 이 회절상을 분석하면 시료 내부의 격자상수, 원자 위치, 온도변수 등의 격자구조 정보를 얻을 수 있다. 또한 자성을 가진 물질의 경우 그 물질의 스핀의 크기 및 정렬 방향 등의 자기구조를 연구할 수 있다. 중성자가 가지는 강한 투과성을 이용하면 극저온, 초고압, in-situ 측정 등의 다양한 시료 환경을 쉽게 구성할 수 있다. 최근 들어 중성자회절 실험 방법은 이차전지, 수소 저장체 연구, 자성물질, 초전도 물질 연구 등에 매우 광범위하게 이용되고 있으며 고체물리 연구에 있어서 기본적이고 중요한 장치이다.

글 **정한성** 한국원자력연구원
하나로운영부장
hsjung@kaeri.re.kr
글쓴이는 한양대학교 전기공학
학과 졸업 후 KAIST 원자력
공학과에서 석사학위를 받았
으며, 동대학원에서 박사과
정을 수료했다.



▶ 1 전술력 운전 중인 원자로 노심. 핵분열 시에 방출된 고에너지 방사선과 물 분자의 상호작용으로 발생되는 체렌코프 방사선으로 푸른빛이 난다. 2 소각산란장치. 원통이 검출기이며 길이가 각각 40m, 18m인 진공으로 된 공간에 정밀 검출기가 설치된 계측장치이다. 3 반사율 측정장치. 냉중성자연구실험동에 설치된 수직형 반사율 측정장치

잔류응력측정 장치(RSI)

재료의 피로와 파괴의 주원인인 잔류응력을 측정, 분석하는 장치로 원자력, 자동차, 조선 및 항공용 첨단 구조재 등의 안정성 및 내구성 검증을 위한 연구에 활용된다. 최근 최대 70mm 두께, 900mm 폭과 길이의 후판 벌크 구조물을 실측하여 부품 깊이방향 응력분포를 제시하였으며, 차량용 경량 고강도 신소재의 변형거동을 실시간으로 측정하여 첨단 강재 개발의 기초자료를 제공하였다. 이러한 성과는 중성자 빔의 최적 단결정 및 장파장 선택 기술 개발로 극대화된 투과능과 부대 장치인 인장제어 시험 시스템 덕분이다.

중성자소각산란 장치(SANS)

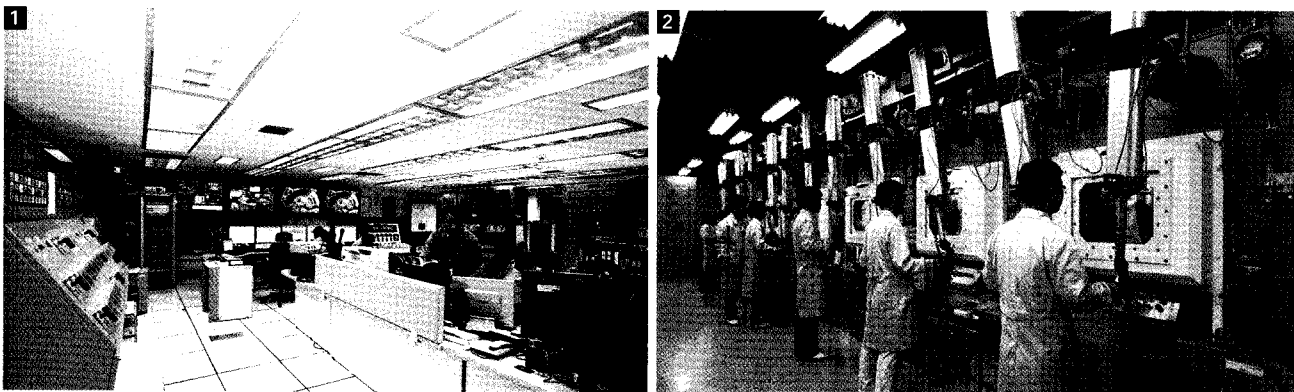
중성자소각산란장치는 나노크기(1~500nm)의 미세구조를 분석하는데 가장 효과적인 분석 장치로 알려져 있으며 그 연구대상으로는 고분자, 마이셀, 콜로이드, 복잡유체, 생체재료, 금속 및 세라믹 재료 등 넓은 범위에 이르고 있다. 따라서 물리, 화학, 생물, 재료 과학 등의 기초 연구뿐만 아니라 산업적인 응용연구에서도 널리 활용되고 있다. 특히 최근 개발된 냉중성자를 활용하는 중성자소각산란장치는 이전에 설치된 열 중성자소각산란장치에 비해 중성자빔 강도가 최소 100배 이상 높고 훨씬 넓은 물리적 측정영역을 확보할 수 있기에 나노, 바이오 분야의 최신 연구에 널리 활용될 전망이다.

중성자반사율측정 장치

중성자가 재료에 부딪혀 반사되는 현상을 측정하는 장치로 자성, 유전체, 초전도 및 바이오, 생화학, 고분자 등의 첨단 산업 분야의 박막 재료 연구에 활용된다. 장치의 성능은 선진국 수준이며 나노 자성박막의 자기구조 평가, 액체 및 고체 박막 시료의 중성자 반사율을 모두 측정할 수 있으며, 최대 온도가 400℃인 고온체임버, 중성자셀 등의 다양한 시료환경장치를 준비함으로써 다양한 박막의 상전이 구조 연구가 가능하다.

중성자비탄성 산란장치

중성자 비탄성 산란장치는 열중성자 삼축분광장치, 냉중성자 삼축분광장치와 디스크 초퍼 비행시간 분광장치의 3기가 있다. 그 중 삼축 분광장치는 단결정 시료에 특히 강점이 있고, 비행시



▶▶ 1 원자로제어실 모습. 조종사 면허를 가진 운전원들이 24시간 상주하며 원자로를 제어 및 감시한다. 2 방사성동위원소 생산시설

간 분광장치는 주로 분말시료 내의 동역학 연구에 주로 이용된다. 초전도체, 다강체, 저차원 자성체 및 유기 복합 자성체 등 주로 자성체 내 스핀의 상호작용에 의한 동역학 연구에 주로 활용된다.

열중성자 삼축 분광장치는 이중 집속모드의 집속형 단색기를 이용해 시료 위치에서의 중성자 속이 매우 높아 세계적 수준으로 평가되며, 튜브형 검출기 외에 1차원 위치 민감형 검출기를 추가로 설치하여 고분해능 모드와 더불어 고속 측정이 가능하다. 냉중성자 삼축 분광장치는 냉중성자 산란장치의 특성 상 신호값 대비 배경값 비율이 뛰어나 1meV 이하의 에너지 분해능이 요구되는 자성체 등의 연구에 이용된다.

디스크초퍼 비행시간 분광장치는 디스크 초퍼를 이용하여 입사하는 중성자빔을 단색화, 펄스화시킨다. 시료에 입사하는 중성자빔은 2A~10A 영역에서 자유롭게 파장 및 분해능을 선택할 수 있다. 다수의 1차원 위치민감형 검출기를 이용하여 한꺼번에 넓은 운동량 영역에서의 동역학을 측정할 수 있으므로 자성체뿐만 아니라 연성물질, 고분자, 생체분자 등 다양한 재료의 동역학을 측정하는데 널리 쓰일 수 있다.

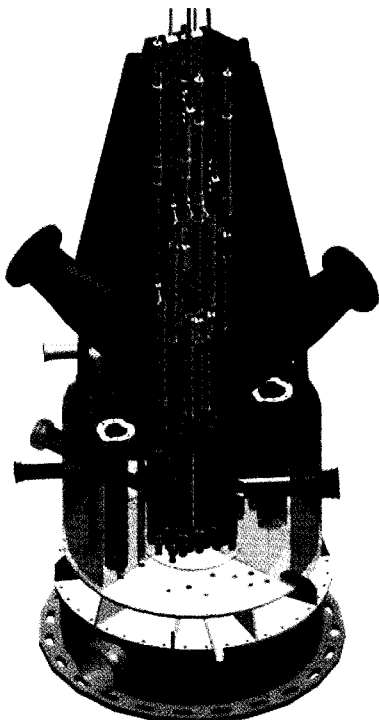
중성자 영상 장치

중성자를 이용한 영상은 X선과 유사한 방법이지만, 선원을 중성자를 사용하는 것으로 X선 장치와는 다른 특성을 가진다. X선은 재료의 원자번호에 비례하는 감쇄현상, 즉 무거운 원소로 만들어진 것은 투과하지 못하는 특성이 있지만 중성자는 수소와 같은 특정한 원소에 잘 감쇄되는 특성이 있다. 예를 들면 수소가 많이 포함된 유기물질이나 물은 영상에 잘 나타난다.

영상장치는 확산형 집속기를 사용해서 비교적 큰 면적의 비파괴검사 및 영상실험에 적합하게 설계되었다. 영상장치에는 수소발생공급기가 설치돼 있어 국내 기업체의 수소연료전지 자동차 엔진 내부에서의 물의 움직임 현상을 연구하는데도 사용되고 있다. 또한 2011년도부터 국내 이차전지 기업 등과 함께 리튬전지 전해액이 내부에서 거동하는 현상에 대해서 연구하는 도구로도 활용하고 있다. 폭약이나 항공기 터빈 날개의 품질관리에도 사용하며, 국가인장인 옥새의 품질 검증에 사용된 적도 있다.

중성자 방사화 분석 장치

중성자 방사화 분석법은 시료를 중성자에 노출시킨 후 방사화된 시료에서 방출되는 방사선(감



▶▶ 원자로 본체 모습. 핵연료와 제어봉이 노심 중앙과 노심 상부에 배치되어 있고 냉각수 입구(하부 1개)와 출구(상부 2개)가 있다.

마선)을 측정하여 극미량의 원소까지도 검출해내는 장치로서 비파괴적인 고감도 분석방법이다. 열중성자와 냉중성자를 이용하여 분석하며 열중성자를 이용한 방사화 분석 기술은 광범위한 적용성과 선택성으로 지질광물 탐사, 인체보건·영양 연구, 환경오염관측, 고순도 재료 품질관리 및 보증, 표준물 제작 및 시험 분야에 응용되는 극미량 성분의 비파괴 정량 분석기술로서 활용되고 있다. 원소마다 다르지만 보통 kg당 수 마이크로그램까지 정량이 가능하다. 일반적인 화학분석에서 나타나는 검출신호와 분석원소 농도에 대한 비선형효과에 의한 간섭이 없어 전 농도 범위에 대한 선형성을 가지고 있으며 시료 구성에 대한 정보가 전혀 없는 경우에도 절대 분석이 가능하다.

방사성동위원소 및 의약품 생산 설비

최근 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서는 의료용으로 사용하는 방사성동위원소인 테크니슘의 원료인 폴리브텐을 안정적으로 공급받지 못하게 됨에 따라 방사성동위원소를 이용한 질병 진단에 차질이 발생한 적이 있었다. 하나로에서는 산업용 방사선원인 코발트, 이리듐 등의 산업용 동위원소와 갑상선 암 치료 등에 사용되는 방사성 옥소 등 국내에서 사용하는 주요 의료 및 산업용 동위원소의 약 70%를 생산하고 있다. 또한 방사성동위원소를 이용한 암 등 난치성 질환 치료에 필요한 새로운 동위원소를 개발할 수 있는 연구시설을 갖추고 있어 국내 핵의학 치료 연구 분야를 활성화시키고, 나아가 국내 독자기술 확보를 통하여 세계 핵의학 치료분야에서의 입지 선점으로 미래 의료 수출 신산업을 창출하여 국민 복지 및 삶의 질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

핵연료 및 원자력재료 조사시험 장치

원자력발전소나 우주에서 사용할 재료들은 방사선환경에도 견딜 수 있음이 확인된 것을 사용한다. 하나로에는 재료나 핵연료를 캡슐이나 특별한 조사 장치에 넣어 원자로에서 방사선(중성자)을 조사시키는 장치가 있다. 이러한 설비를 이용하여 운전 중인 원자력발전소의 계속 운전에는 필요한 재료의 한계 수명 파악이나 미래 원자력 시스템 개발에 쓰일 재료의 사전 검증을 실시하고 있으며, 핵연료 개발을 위하여 필요한 실제 발전소환경에서의 성능 검증시험도 할 수 있다.

중성자 반도체 도핑 장치

부도체인 순수한 실리콘 덩어리를 원자로에서 중성자를 조사하면 실리콘(Si) 원소가 인(P) 원소로 변환되는 특성을 이용하여 고품질의 반도체를 만들 수 있다. 도핑 장치는 전도성이 큰 인의 생성량을 정밀하게 제어하여 부도체인 실리콘 덩어리를 요구되는 비저항을 가진 반도체로 만든다. 전기적 극성이 없는 중성자는 투과성이 좋아 이 방법으로 생산된 반도체는 화학적 방법으로 생산되는 것보다 품질이 우수하여 주로 전력용 반도체로 사용된다. 하나로에는 최대 직경 8인치 까지 조사시킬 수 있는 장치가 있으며 주로 일본과 덴마크 반도체 회사의 의뢰를 받아 서비스를 제공하고 있다. 