

하나로의 중성자 이용 기술

김학노 · 이기흥 · 이창희

개요

우라늄과 같은 핵연료가 하나의 중성자와 반응하여 핵분열을 하게 되면 2-3개의 중성자와 함께 방사선이 방출되고 우라늄은 두 개의 핵종으로 분열된다. 분열된 핵종을 핵분열 생성물이라고 하며 이들의 운동에너지가 열에너지로 전환될 때 이를 이용하여 전기를 생산하는 시설을 원자력발전소라고 하며 핵분열시 생성된 2-3개의 중성자를 이용하여 다양한 연구에 활용하는 시설을 연구용 원자로 혹은 연구로라고 한다.

하나로는 1985년 설계에 착수, 1995년 가동을 시작하여 지난 10년간 중성자빔 이용연구, 중성자 영상연구, 중성자 방사화 분석, 조사 시험 연구, 동위원소생산, Si ingot에 대한 상업적 수준의 중성자 핵변환 도핑 등의 분야에서 중성자를 이용한 연구를 수행하고 있는 국내 유일의 중성자 선원으로서 열출력 30MW, 수평공 전단에서의 평균 중성자속 $2 \times 10E+14 \text{ n/cm}^2\text{sec}^{-1}$ 수준의 세계 10위권 안의 고중성자속 연구로다.

이용 연구

중성자를 이용한 측정도구인 중성자 산란장치는 현재 5기

의 장치가 운영 중이며 수직 및 수평형 중성자 반사율 측정 장치, 고중성자속 회절장치, 중성자 3축 분광장치 등이 개발 중에 있다.

이들에 대한 개발 전략과 순서는 원자력연구개발 중장기계획 사업이 추진하는 전체적 정책 방향과 한국원자력연구소 및 하나로의 내부적인 전략 및 국내 이용자 그룹 및 연구개발 기관에 대한 광범위한 조사, 주요 분야별 이용자 그룹과의 지속적인 협의에 의해 수립, 수정 보완되며 현재에 이르렀다.

1993년 말부터 원자력연구개발 중장기 계획 프로그램에 의해 순차적인 산란장치 개발에 착수하여 1995년 하나로 최초 입계 시기를 거쳐 1997년 가동한 중성자 영상장치는 하나로 출력 운전 후 설치된 첫 중성자빔 이용 장치로서 X-선과는 차별화된 영상을 생산하여 원자력 분야 뿐 아니라 전투기 터빈 블레이드와 같은 국방소재, 우주항공산업, 수소연료 전지를 포함한 자동차 산업, 고고학, 생물학 등에 응용된다. 초기에는 주로 직접법 및 간접법에 의한 원자력 및 방위산업, 고고학 분야의 비파괴 검사에 이용되다 2000년 이후부터 중성자 동영상(neutron dynamic radiography), 위상차대비법(phase contrast method) 및 토모그래피(neutron tomography)

저자약력

김학노 박사는 1994년 KAIST에서 원자력공학 박사학위를 취득하였으며, 1980년에 한국원자력연구소에 입소하여 CANDU 핵연료 국산화 사업, 하나로설계건조사업, 하나로 운영, 하나로이용기술개발을 수행하였으며 2002-2005년까지는 지난 3년간 연구소 R&D 총괄 관리업무도 수행하였다. (hrkim@kaeri.re.kr)

이기흥 연구원은 1986년 미국 퍼듀대학교 원자력공학과에서 석사학위를 취득하였으며 1989년까지 미국 RPI에서 박사과정을 수료하고, 1989년부터 한국원자력연구소에서 연구원으로서 하나로 설계, 건설 및 이용업무를 수행하고 있다. (khlee@kaeri.re.kr)

이창희 연구원은 1984년 서울대학교에서 물리학 석사학위를 취득하고, 1985년 한국원자력연구소에 입소하여 중성자물리실에서 근무하며 1992년까지 TRIGA-Mark III 연구소에서 중성자회절연구를 하였으며, 1993년부터는 하나로서 중성자 산란장치 개발 및 그 이용연구를 수행하였다. (leech@kaeri.re.kr)

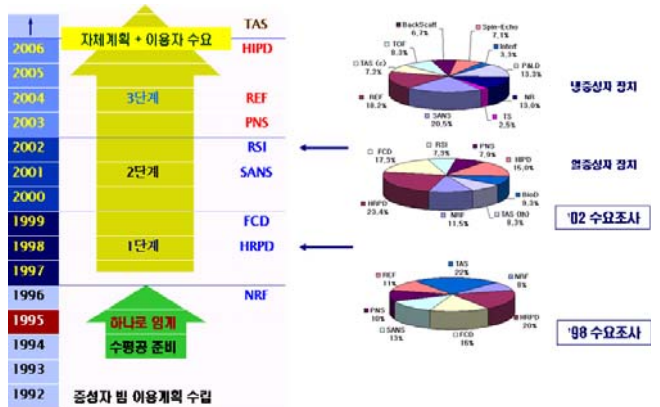


그림 1. 1998년과 2002년에 수행한 이용수요 조사 및 연구시설 개발역사.

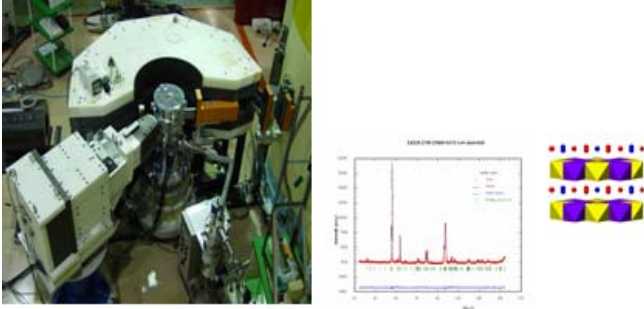


그림 2. 결정구조 분석에 사용되는 고분해능 중성자 분말 회절장치와 측정결과.

등 신기술을 개발, 이용하고 있다.

운영 중인 5기의 중성자빔 이용시설을 살펴보면 고분해능 중성자 분말 회절장치(high resolution powder diffractometer) (그림 2)는 결정구조 및 자성구조 해석, 상전이 연구, 정량상 분석(quantitative phase analysis)에 이용되며 1998년 국내 산학연에 개방, 공동 이용을 시작하여 2003년에는 261명의 가장 많은 이용자 수를 기록한 바 있다.

중성자 4축 단결정 회절장치(four-circle diffractometer)는 하나로 임계 이후 4년 후인 1999년부터 이용이 가능하였으며 중성자 회절에 의한 단결정 구조해석, 집합조직 측정 및 해석에 유용한 장치이다. 2004년 후반부터 점진적인 성능개선에 착수, 2006년 말까지 1차 성능개선 작업을 마칠 예정으로서 정교한 단결정 회절 측정모드 및 대폭적인 측정효율(throughput) 향상을 위한 전반적인 개조 및 보완, 10-600K 시료환경장치 부착 등과 함께 부가장치로서 2차원 위치 민감형 검출기(2-dimensional position-sensitive detector) 및

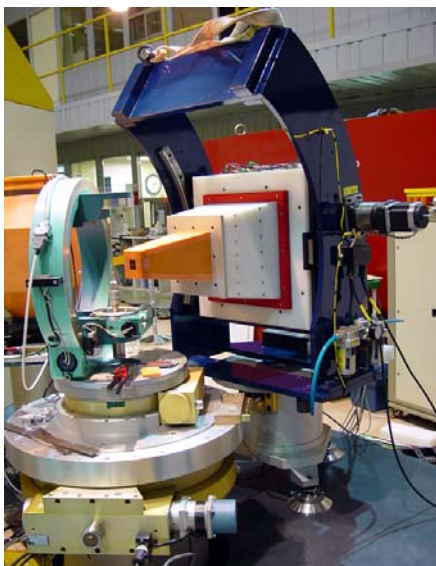


그림 3. 최근 성능개선중인 중성자 4축단결정 회절장치.

측정모드를 개발하고 있다.(그림 3) 이들을 활용하여 단결정을 이용한 중성자 회절, 상전이 및 자성체 구조 연구, 산탄산란 등 연구 영역을 확대하고, 정밀 정확한 측정 데이터 생산에 노력하고 있다.

중성자 소각산란장치(small angle neutron spectrometer)는 2001년 가동 후 6년째를 맞이하고 있으며 금속 및 세라믹 소재의 결합분석, 마이셀, 고분자 및 나노구조 분석 등에 활용되는데, 2008년 이후 냉중성자 실험동(cold neutron laboratory)이 완공되면 성능개선을 거쳐 이설될 예정이다. 현재 하나로에서 HRPD와 함께 가장 이용자가 많은 장치이며, 산업적 이용은 물론 기초 및 응용 분야에서도 다양하게 이용되는 중요한 시설이다.

2003년에는 오랫동안 어려움을 겪어오던 측정방법론 및

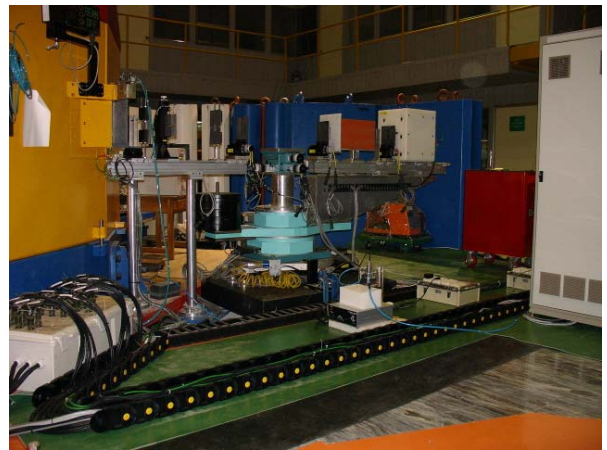


그림 4. 수직시료형 반사율 측정장치.



그림 5. 위쪽의 개발중인 HIPD와 앞쪽의 FCD.

개발 부품의 연구개발을 위해 편극 중성자 분광장치, 잔류 응력 측정장치(residual stress instrument), 단색기, 검출기, 콜리메타, 중성자 거울 등의 성능시험 및 개발에 사용되는 test station 등이 가동을 시작하였다. 이와 같은 5기의 중성자 산란장치는 대부분 0.025 eV의 평균에너지를 갖는 열중성자 스펙트럼을 이용하여 산란장치와 연구 영역에 적절한 파장대의 단색빔(monochromatic beam)을 인출, 산란실험에 이용한다.

10년에 걸쳐 3단계로 진행되어 2007년 2월에 종료되는 원자력연구개발 중장기 계획하에 2003-2006 회계연도의 현 단계에서는 최근 높은 관심을 받고 있는 중성자 반사율 측정장치(neutron reflectometer)가 수직 시료형과 액체 시료를 측정할 수 있는 수평 시료형 장치, 2기가 동시에 설치 진행되어 2006년에는 수직 시료형 중성자 반사율 측정장치가 가동되고, 2007년에는 수평 시료형 중성자 반사율 측정장치가 가동될 것이다.

또한 급증하는 이용 수요에 대처하기 위해 산란장치 개념부터 단색기에서 검출기까지 전 부분을 자체 기술력으로 고성능의 고중성자 중성자 회절장치(high intensity powder diffractometer)를 개발 2006년까지 개발을 마치고 산학연 공동이용에 개방될 것이다.

현재 세계적으로 연구가 심화되고 있는 나노영역의 물질 구조와 저에너지 동력학 측정 및 분석을 위해서는 4 meV의 평균에너지를 갖는 냉중성자(cold neutron)가 더 적절하다. 이를 위해 2002년 냉중성자 이용 수요조사와 면밀한 과제 기획을 거쳐 2003년부터 냉중성자 연구기반시설을 구축하고 그 시설의 이용기술을 개발하는 사업이 착수되었다.

이 사업을 통해 냉중성자를 생산하는 냉중성자원(cold neutron source)이 원자로에 설치되며 감속재(neutron moder-

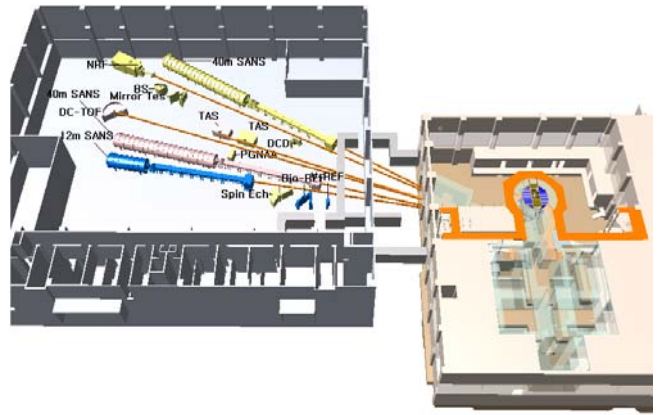


그림 7. 우측의 기존 연구용 원자로 본체 시설과 좌측의 냉중성자 실험동 계획도.



그림 8. 냉중성자 실험동 전경. 좌측에 이용자 등이 사용할 연구사무동, 우측에 시설계통을 포함하는 부속기동.

ator)로 사용되는 액체수소를 냉각하고 단열하며 안전하게 사용하기 위한 시설계통이 원자로실 내에 설치된다. 또한 냉중성자 실험동(cold neutron laboratory)이 하나로에 인접하여 건설되는데 인허가가 완료되는 2006년 4월 착공될 것으로 예상된다.

하나로에서 생산한 냉중성자를 중성자 유도관(neutron guide)을 이용하여 냉중성자 실험동으로 유도해내어 중성자산란장치에 쓰게 되는데 이를 위한 원자로실에서 가동중인 3기의 산란장치(중성자 소각산란장치, 수직 및 수평형 반사율 측정장치)가 냉중성자 실험동으로 이설되고, 대규모 설비로서 국제적으로 1급의 성능을 갖춘 40M 중성자 소각산란장치, 냉중성자 3축산란장치, 디스크 초퍼형 비행시간분광장치로 구성되는 3기의 신규 장치를 현 단계 사업에서 개발, 설치한다. 냉중성자 연구기반시설은 재료과학 전반의 기초 및 응용연구, 고분자, 거대분자 등 soft matter 분야 및 생물학적 연구에 강력한 분석 도구로서 이용되어 국가 핵심 기반연구시설로서 뿐만 아니라 동북아 중성자과학연구의 거점으로서 발돋움하게

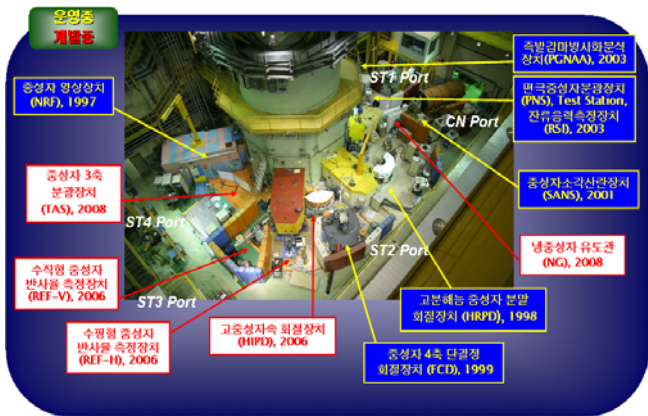


그림 6. 2006년 초 현재 하나로에 설치되어 공동이용중인 산란장치 배치 현황.



그림 9. 캡슐 이송용기.



그림 10. Mo^{99}/Tc^{99m} 발생기 생산용 Bank-IV 납셀(lead cell).

될 것이다.

원자로실에서 중성자빔을 수평으로 뽑아 이용하는 또 하나의 장치로는 핵화학연구(nuclear chemistry) 시설의 하나인 즉발 방사화 분석장치(prompt gamma activation analysis)로서 2003년부터 이용자에게 개방되었다. 중성자가 시료의 원자핵에 흡수될 때 그 즉시 나오는 감마선을 즉발감마선, 베타선 등을 방출한 뒤 나오는 감마선을 지발감마선이라고 하는데 이러한 감마선은 핵종마다 고유한 에너지를 갖고 있으므로 이 에너지를 측정하여 시료를 분석하는 장치를 방사화분석장치라고 하며 미량의 환경, 생물, 대기분진, 고분자 재료 등의 시료분석에 광범위하게 쓰이는 장치이다. 지발감마선을 측정하고자 할 때는 원자로의 수직공에 시료를 넣어 짧은 시간 중성자를 쬐이고 (중성자 조사라고 함) 꺼내어 분석한다. 이러한 즉발 및 지발 방사화 분석장치는 2005년

706 시료를 조사하였으며 28개 기관에서 195명이 이용하였다.

원자로에는 이외에도 수직공을 이용하여 다음과 같은 다양한 연구 및 상업생산을 하고 있다. 원자력 재료와 핵연료는 실제 사용 전에 그 건전성을 평가하기 위해 연구로에 장전하여 조사시험을 하게 되는데 이 중 연구로의 압력 및 열수력 조건 하에서 중성자 조사 거동만을 평가하는 장치를 캡슐(그림 9)이라고 하며 원자력발전소의 압력 및 열수력 조건과 같도록 계통을 구성하여 중성자 조사시험을 수행하는 장치를 노내조사시험설비라고 한다. 2005년 장기간 원자로 정지로 인해 캡슐 이용조사시험은 753개에 대해 4,990시간 수행되었으며 이용자 수는 26명으로서 예년의 50% 수준에 그쳤다. 캡슐 내 시료의 온도와 중성자 조사량을 조절할 수 있도록 개발 중이며 이에 는 별도의 캡슐제어장치가 필요하다. 재조사 및 원격조립을 위한 요소기술, 시료의 피로 측정이 가능한 캡슐 등이 개발 중에 있다. 핵연료 노내조사시험설비는 2008년 2월말 가동을 목표로 현재 건설 중인 국내 핵연료주기 자립 기술의 핵심시설로서 핵연료의 원자로내 종합실증시험을 통한 핵연료개발 기술 및 국내 자료 확보에 필수적이다. 이 설비의 설치를 위한 인허가 업무가 진행 중이며 2006년 중반기에는 설치 업무가 시작될 수 있을 것으로 보인다.

반도체 실리콘 웨이퍼 생산은 중성자 반도체 도핑 시설을 이용한다. 2002년 상업 도핑을 시작하여 2005년에는 7t을 공급하였다. 공급대상 회사는 기존 2개에서 3개로 늘어났고 인고트 직경도 기존 5인치뿐 아니라 6인치도 가능하게 되었으며 8인치 도핑도 개발 중이다. 2010년대에는 전세계 중성자 도핑 용량이 하이브리드 자동차의 수요를 충족하지 못할 것으로 예상되어 이에 대한 방안을 모색 중에 있다.

하나로에서는 2005년 102.9 kCi의 산업용 및 의료용 동위원소를 공급하였다. 원자로심에서 조사된 동위원소는 4개의 뱅크(그림 10)에 있는 4기의 콘크리트 핫셀과 21기의 납실에서 작업을 거쳐 상품화되는데 Ir-192, Yb-169, Co-60 등의 산업용 동위원소와 I-131, Ho-166 등의 의료용 동위원소를 취급하고 있다.

맺음말

하나로는 국가거대과학연구시설로서 국민에게 공개되어 이용되고 있으며 원천기술개발을 위한 과제를 발굴하여 이용자를 지원하고 국가 성장 동력 창출을 위한 도구로서 보다 안전하고 안정적으로 중성자를 공급할 것이다.