

하나로의 산업적 이용



전 병 진

한국원자력연구소 부장

한국원자력연구소는 1995년부터 다목적 연구용 원자로인 『하나로』를 운영하고 있다. 이 원자로는 다양한 과학 기술 분야에 이용되고 있으며, 산업적 이용도 중요한 분야이다. 이에 원자력 산업을 위한 핵연료나 재료 조사 시험과 방사선 계측기 개발이나 시험 등도 포함되지만, 이 보고서에서는 전통적인 산업에 이용되는 내용을 주로 다루었다.

방사성동위원소는 보건, 산업, 환경 등 다양한 분야에 활용되고 있으며, 『하나로』에서는 산업용 방사선원으로서 비파괴 검사 및 계측기 교정용 선원 등을 생산하고 있다. 물질의 미시적인 내부 구조를 관찰하는데 사용되는 중성자 산란은 전자 현미경, X-선 회절과 상호 보완적인 도구로서 소재 연구와 재료의 산업적인 안전성 분석 등에 활용되고 있다. 중성자 빔을 비파괴 검사에 활용하는 중성자 래디오그래피도 농업, 방위 산업, 항공기, 자동차 등으로 확대되고 있다. 『하나로』에서는 급증하는 중성자 빔 수요를 수용하고 한층 향상된 분석 능력을 확보하기 위하여 냉중성자 실험 설비를 설치하는 과제를 수행하고 있

다. 다양한 재료, 물질의 극미량 성분 원소를 동시에 분석하는 중성자 방사화 분석법은 매우 넓은 분야에 활용되고 있으며, 산업적인 활용도 중요한 분야이다. 그리고 강전용 반도체 소자에 필요한 고품질의 n-형 실리콘 반도체를 생산하는 중성자 핵변환 도핑도 하고 있으며, 용량 증가를 추진하고 있다.

1. 서론

1995년 준공되어 활발히 이용되고 있는 『하나로』는 30MW 출력의 전형적인 다목적 연구용 원자로로서 중성자 빔 이용, 핵연료 및 재료 조사 시험, 방사성동위원소 생산, 방사화 분석, 중성자 핵변환 도핑 등에 이용되고 있다. 이를 위하여 원자로 노심과 이를 둘러싸고 있는 중수 반사체 영역에는 다양한 중성자속과 스펙트럼을 갖는 수직 및 수평 실험공이 설치되어 있다.

노심 내부에는 열중성자 및 고속중성자속이 모두 높은 수직 실험공이 3개 있으며, 이곳은 핵연료 및 재료 조사 시험과 고비방사능의

방사성동위원소를 생산하는데 활용되고 있다. 노심과 가까운 곳에는 열중성자속과 열외중성자속이 매우 높은 4개의 외부 노심 수직 실험공이 있고, 이곳도 핵연료 및 재료 조사 시험과 방사성동위원소 생산에 주로 활용되고 있다. 노심 내부 및 외부 노심의 실험공은 원자로 1차 냉각수의 강제 대류로 냉각되는 곳이므로 시료는 특별히 설계된 캡슐, 리-그, 루-프 속에서 조사되며, 실험 목적에 따라 각종 계측 및 제어 장치도 포함될 수 있다.

노심과 비교적 멀리 떨어진 중수 반사체 영역에는 많은 수직 및 수평 실험공이 있고, 이곳에서는 양질의 열중성자속을 얻는다. 이 가운데 7개의 수평 실험공은 중성자 빔을 이용하는 각종 실험에 사용되고, 수직 실험공은 방사성동위원소 생산, 방사화 분석, 중성자 핵변환 도핑 등에 사용된다. 각 수평 실험공은 고유한 목적에 할당되어 있으며, 각 실험에 적합한 실험 설비가 설치되어 있다. 이 가운데 5개는 각기 다른 기능을 갖는 중성자 산란 실험, 한 개에는 중성자 투과 비파괴 검사, 나머지 한 개에는 다목적 노외 중성자 조사에 할당되어 있다.

현재 중성자 소각 산란 장치가 설치되어 있는 수평 실험공은 CN 수직 실험공을 쳐다보고 있다. 이 CN 수직 실험공에는 액체 수소 냉중성자원을 설치하고, 중성자 유도관을 설치하여 원자로실 바깥으로 냉중성자 빔을 뽑고 여기에 많은 중성자 빔 실험 장치를 설치하는 과제가 진행되고 있다. 이 영역에 있는 수직 실험공은 모두 원자로 수조수의 자연 대류로 냉각되며, 각 이용 목적에 따라 조사 설비가 설치되어 있다. 반감기가 비교적 짧은

방사성동위원소를 생산할 때는 원자로가 운전 중일 때 수시로 시료를 장전/인출하여야 하므로 이를 편리하게 할 수 있는 수력 이송 조사 장치가 한 개 있다. 반감기가 짧은 핵종에 대한 중성자 방사화 분석을 위하여 3개의 공압 이송 장치가 설치되어 있어 원자로에서 멀리 떨어진 실험실에서 원자로에 재빨리 시료를 넣고 뺄 수 있다. 중성자 핵변환 도핑을 위하여 직경이 큰 2개의 실험공이 있다. 이 실험공에서는 현재 수요가 가장 많은 5인치 실리콘과 점차 수요가 증가하고 있는 6인치 실리콘을 쪼일 수 있을 뿐만 아니라 현재 단결정 생산 기술이 개발되고 있는 8인치 실리콘도 쪼일 수 있다.

방사성동위원소(RI: Radioisotope) 생산이나 핵연료 및 재료 조사 시험 등을 위하여 원자로에서 조사된 시료는 높은 방사능을 가지므로 이를 안전하게 취급할 수 있는 핫셀을 갖춘 시설이 필요하다. 『하나로』는 부속 설비로서 동위원소 생산 시설과 조사재 시험 시설을 가지고 있다.

이 보고서에서는 하나로의 다양한 이용 가운데 산업적인 이용에 대하여 소개한다. 핵연료 및 재료 조사 시험과 중성자 계측기 개발 및 시험 등도 원자력 산업에 이용하는 것이지만 본 보고서에서는 전통적인 산업에 이용하는 내용을 위주로 하여 이하의 각 절에서 분야별로 나누어 설명한다.

2. 방사성동위원소 생산

한국원자력연구소에서는 『하나로』와 동위원소 생산 시설을 운영하여 의료 및 산업용

RI를 생산하여 공급하고 관련 기술을 개발하고 있다. 공급하는 RI 가운데에는 『하나로』 이외에서 생산되었으나 『하나로』의 동위원소 생산 시설을 이용하여 최종 제품을 만드는 것도 있다. 이 절에서는 이 가운데 RI의 산업적 이용과 관련된 부분에 대하여 설명하며, 이에 는 비파괴 검사(NDT: Non-Destructive Test), 게이지 선원, 교정 선원, 추적자 등이 있다.

NDT용 선원으로는 Ir-192를 상업적으로 공급하고 있으며, 저에너지 감마 선원을 개발하고 있다. 비파괴 검사용 Ir-192 선원은 300~400 keV의 감마선을 방출하므로 10 ~ 50 g/cm² 두께의 물질에 대한 비파괴 검사에 최적의 선원으로서 한국에서 가장 널리 사용되는 산업용 비파괴 검사 선원이다. 한국원자력연구소에서는 1965년부터 TRIGA 원자로에서 3 × 3 mm 원통형 Ir 금속 표적을 조사하여 Ir-192 NDT 선원을 생산하여 왔다. 그러나 검체의 두께가 두꺼워짐에 따라 낮은 비방사능의 선원은 더 이상 사용할 수 없었으므로 1985년에 공급을 중단하였다. 1995년에 『하나로』가 가동됨에 따라 고비방사능을 갖는 Ir-192 선원 어셈블리를 개발하여 직경 2.5 mm, 두께 0.25 mm인 디스크형 Ir 표적을 10장 이내로 쌓아서 100 Ci 이상의 선원을 제조하고 있으며, 비방사능은 200 Ci/g 이상이다. 사용자의 요구에 따라 캡슐내의 디스크의 개수를 조절하여 선원의 방사능을 조절할 수 있다. Ir-192의 2004년 국내 수요는 93 kCi였으며, 이의 약 79%를 공급하였다. 그리고 약 53 kCi를 수출하였다.

상질 분해능이 좋은 저에너지 감마 선원으

로 Yb-169 및 Se-75 밀봉 선원을 개발하고 있다. Yb-169 선원의 어셈블리 가공 및 조립 기술이 완료되어 시험 생산하고 있다. 20% 농축 산화이트륨을 1 mm × 1 mm의 펠렛으로 만들어 알루미늄 용기에 밀봉하여 1.8 mm × 3.0 mm 원통형 표적을 제작한다. 이것을 원자로에 조사하여 8-10 Ci의 선원 어셈블리를 제조한다. 제조된 어셈블리는 Ir-192 조사기를 사용하여 운반하고 이것을 사용하여 박판 용접물의 선명한 감마선 영상을 얻었다. 이 선원에 대해 ISO 표준 절차에 따라 품질 시험을 수행할 예정이다.

반감기도 상대적으로 길고 에너지도 낮은 Se-75 선원의 용도가 증가하여 앞으로 경제성을 고려하여 개발 중에 있다. 농축 산화 셀레늄으로 3.0 mm × 3.0 mm의 펠렛을 제작하여 티타늄 캡슐에 밀봉한 후 『하나로』에서 조사하면 80 Ci의 선원 제조가 가능하다. 선원 제작과 관련된 기초 실험을 하고 있다.

Co-60 산업용 게이지 선원은 준위계 및 밀도계로 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. 한국원자력연구소는 1 내지 1000 mCi의 산업용 게이지 선원 생산기술을 개발하여 사용자의 요구에 따라 생산 공급하므로 생산량과 빈도가 일정하지 않다.

감마선 에너지 보정과 검출효율을 측정하기 위한 교정용 선원을 개발하였다. 교정 선원은 5가지로 Cs-137, Eu-152, Na-22, Co-57, Co-60 핵종을 밀봉한 1 μCi 정도의 원반형 선원으로 제작되었다. 개발된 선원의 방사능 불확실도는 1.5% 이내이다.

다양한 산업 분야에 방사선원이나 추적자를 활용하는 연구를 하고 있다. Co-60이나 Cs-137 핵밀봉 선원을 이용하여 화학 공정의 내부를 진단하고, Ar-41, Kr-79, La-140 등 비교적 높은 에너지의 감마선을 내는 추적자를 이용하여 정유 설비 내부에서 발생하는 공정을 관찰하며, Sc-46 화합물을 이용하여 폐수 슬러지 소화조의 내부 순환을 관찰하는 등의 응용을 하고 있다. 그 외에도 추적자를 이용하여 하천이나 해수 등 환경 관련 산업에 응용하는 연구도 하고 있다.

3. 중성자 산란

중성자 산란은 전통적으로 기초 과학 분야의 도구로 알려져 있었으나 이용 기술과 연구 기법의 발달, 산업의 고도화, 기초 연구에서 산업화로 짧은 시간에 이어지는 최근의 추세에 따라 세계적으로도 1980년대 후반부터 산업적 응용이 활발히 시도되고 있으며 성공적인 결과들이 축적되고 있다.

한국원자력연구소는 TRIGA 시절부터 산업 재료의 집합 조직 측정 분석을 하여 왔으며, 신규 중성자 분광 장치가 개발되면 항상 산업적 이용과 함께 기초 분야 이용에 중점을 두는 이중의 목표를 추구하여 왔다. 고분해능 중성자 회절장치는 물질의 결정 구조와 상전이 분석, 다상 조직의 정량 상분석, 미량상의 정량 평가에 활용하고, 4축 단결정 회절 장치는 집합 조직 측정 분석에 주로 활용한다. 중성자 소각 산란 장치는 석출물의 크기 분포 및 정량 평가, 고분자 물질의 구조와 상전이 등 나노 크기의 거시적 물질 구조 분석에 활용하고 있으며, 최근에 가동된 잔류

응력 측정 장치는 산업 구조물의 내부에 남아 있는 응력 분포를 측정하여 재료의 안전성을 평가한다. 이러한 사례는 중성자만이 할 수 있는 고유의 측정 분석이거나 기존 전자선, X선 등의 측정 방법과 상보적이거나 비교적인 분야에서 특히 산업적 응용에 기여하고 있다. 이들 측정 분석 장치와 기술은 재료 과학의 광범위한 분야에 적용되고 있으며, 특히 금속, 세라믹스, 화학, 광물, 고분자, 바이오의 신소재가 합성되면 그 구조와 물성 연구에 필수적인 도구로서 자리 잡아 가고 있다.

앞으로도 우리나라 산업이 고도화하면서 중성자 산란의 이용 분야는 더욱 다양하고 새로운 활용처를 찾을 것이며 새로운 아이디어와 장치 및 이용 기술 개발, 새로운 활용 방법의 적용 등 점차 기초적 이용과의 이분법적 구별도 없어질 것으로 예측하며, 하나로에서 머지않아 가동될 수직형 및 수평형 중성자 반사율 측정장치가 가동되면 표면과 계면, 다층면 및 액체-고체, 액체-기체 계면 등 '표면' 측정과 분석에 새로운 계기가 될 것이다. 특히 수평형 반사율 측정 장치는 생물학적 연구 및 산업적 응용 분야인 BT로 통칭되는 분야에서 많은 기여를 할 것으로 기대되고 있다.

이와 함께 냉중성자 연구 시설을 설치하는 과제가 진행되고 있다. 이 과제에서는 원자로 반사체의 CN 수직공에 냉중성자원을 설치하고, 현재 SANS가 설치되어 있는 CN 수평공에는 냉중성자 안내관을 설치하며, 원자로 건물 바깥에 중성자 실험실을 건설하여 이곳에 많은 냉중성자 실험 장치를 두게 된다.

중성자 실험실은 원자로실에 있는 모든 중성자 빔 실험 장치보다 더 많은 실험 장치를 제공할 것이며, 장치의 성능도 훨씬 우수하다. 이후 중성자 빔 이용 수요가 더욱 증가한다면 열중성자 안내관을 추가로 설치할 수도 있다. 이와 같이 2010년대에는 하나로에 설치된 세계적 수준의 냉중성자 연구 시설을 활용하여 국내외 연구자들의 기초 및 응용 연구는 물론 산업체에서 예상되는 고도의 이용 수요에도 대처할 것으로 예상하고 있다.

4. 중성자투과 비파괴 검사

중성자 투과 비파괴 검사(NR : Neutron Radiography)는 중성자가 물질을 투과하는 특성이 X-선이나 감마선과는 매우 다른 것을 이용하여 다른 NDT로는 보기 어려운 물질의 내부 구조를 보는 기술이다. 『하나로』에는 한 개의 중성자 투과 비파괴 검사 설비(NRF: NR Facility)가 1997년에 설치된 이래 성공적으로 이용되고 있다. 이후 다른 한 수평공에 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)를 위한 조사실(ENF : Ex-core Neutron Irradiation Facility)이 설치되었는데, 이 설비는 NR에도 좋은 여건이어서 필요에 따라 NRF나 ENF를 사용할 수 있다.

NRF는 NR 전용으로 만들어졌으며, 하나로 수평공 빔 장치중에는 최초로 만들어졌다. 그 이유는 그 당시 핵연료 개발이라는 시급한 과제에 필요하였기 때문이다. 그 후로 중성자 영상의 응용 분야는 매우 증대되었으며, 일반 산업 뿐 아니라, 국방 및 학계에서도 널리 사용되고 있다. 최근의 주요 응용 분야로는 연료 전지 구동시 유동 가시화, 인삼 뿌

리 생장 측정, 항공기 및 자동차 부품의 비파괴 검사 등이 있다. 디지털 영상 기술 발전에 힘입어 디지털 NR 및 토모그래피도 일상적으로 사용되고 있다.

ENF는 본래 BNCT를 위해 설계·제작되었지만 중성자 선속이 높아서 동적인 현상을 관측하는데도 유용하게 사용되고 있다. 특히, 세계 수준의 중성자 품질 때문에 일본의 기계공학자들이 자주 사용하고 있다. 실내가 넓고 선속이 넓어서 실험에 편리하지만 NR 전용으로 만들어진 것이 아니라서 빔의 해상도(L/D)가 부족한 단점을 가지고 있다. 2상 유동, 디젤엔진의 인젝션 노즐 등 동적 현상 관측에 유용하게 사용하고 있다. 뿐만 아니라, 위상 대비(phase contrast) NR도 이곳에서 성공적으로 수행되었다.

중성자 영상은 국내 산업체, 국방, 학계에서 뿐만 아니라 해외에서도 많은 사용자들을 불러들이고 있으며, 『하나로』에서 성공적인 장치중의 하나로 손꼽히고 있다. 앞으로 중성자 실험동과 중성자 안내관이 설치되면 냉중성자 NR 실험 장치도 추가될 것이다. 하나로는 NR 분야에 있어서 아시아뿐만 아니라 세계적으로도 매우 경쟁력이 있는 곳이 되리라 믿어 의심치 않는다.

5. 중성자방사화분석

중성자 방사화분석(NAA : Neutron Activation Analysis)은 다양한 재료, 물질의 성분 원소 정량에 민감, 정확하고 신뢰도가 좋은 분석법중의 하나이며, 다양한 과학기술 분야에서 응용되고 있다. 핵재료 물질, 지

질 시료, 환경 시료, 생물 시료, 고순도 재료 및 인증 표준물질, 범죄과학 시료, 고고학 시료, 고분자 재료 등의 미량 성분 분석에 유용하며, 기초 및 응용 연구 개발, 분석법 검증 및 표준화와 품질화에 활용되고 있다. 따라서 산업적인 응용도 큰 부분을 차지하고 있다.

『하나로』에는 가동 초기부터 NAA를 위한 3개의 수직 실험공에 공압 이송 장치를 설치하여 비교적 단반감기의 핵종을 분석하는데 활용하고, 장반감기 핵종 분석에는 중수 반사체에 있는 다른 실험공을 활용하여 왔다. 이후 2003년에는 한 수평 실험공에서 중성자 산란에 사용하고 남은 여분 빔을 활용하는 즉발 감마 방사화 분석(PGNAA: Prompt Gamma Neutron Activation Analysis) 장치를 설치하여 지발 감마선을 내지 않는 핵종도 분석할 수 있게 되었다. 분석 기술의 대부분은 감마 분광 분석에 의존하고 있으나 알파선이나 핵분열 생성물의 track 측정을 통한 붕소 또는 우라늄 분포 분석도 하고 있다. 앞으로는 지발 중성자 측정을 추가하여 분석 범위를 더욱 확대할 계획이다. 국내에 60여 명의 이용자가 있으며 『하나로』의 NAA 전문 연구회와 한국중성자방사화분석연구회(KA3)에 등록하여 활동하고 있다.

최근에는 NAA의 분석품질시스템을 확립하였으며 국제표준절차(ISO/IEC 17025)를 따르고 국가간 상호인정체제를 적용하는 한국교정시험인증기구(KOLAS-ILAC)의 인정을 받음으로서 분석 결과의 객관성과 신뢰성이 더욱 향상된 품질화된 분석 지원을 하게 되었다.

6. 중성자 핵변환 도핑

중성자 핵변환 도핑(NTD : Neutron Transmutation Doping)을 다양하게 응용하는 방법에 대하여 전 세계적으로 많은 연구가 있다. 이 가운데 고품질의 n-형 실리콘 반도체를 생산하는 NTD-silicon이 많은 연구로에서 활용되고 있다. NTD-silicon은 대개 전기를 효율적으로 사용하는데 필요한 강전용 소자로 사용되고 있다. 이 소자는 전력 손실 절감, 태양/풍력/연료전지 발전, 하이브리드나 수소 연료 전지 자동차 등에 필수적인 부품이다. 이와 같이 지구 환경에 중요하므로 근래에 NTD-silicon의 수요는 급증하고 있다. 현재의 시장은 직경 5인치 단결정이 주도하고 있지만, 최근에 6인치의 수요가 괄목할만한 증가를 나타내고 8인치 수요도 생기고 있다. 그런데 6, 8인치 조사공을 가진 연구로는 제한적이고 NTD 역량을 가진 많은 연구로가 매우 오래되어 가까운 장래에 NTD 공급 부족이 예상된다.

하나로에는 NTD를 할 수 있는 조사공이 2개(NTD1, NTD2) 마련되어 있다. 이 가운데 NTD2에서는 5인치를 쪼이고 있고 근래에 6인치를 쪼이는 시험도 성공적으로 한 바 있다. 중성자속이 높아서 NTD 용량이 크고 중성자의 질도 매우 좋다. NTD2에서의 조사 기록도 매우 좋아서 NTD의 기본 요건인 균일도와 정확도 모두 탁월하다. NTD2에서의 이러한 기록에 힘입어 직경이 더 큰 NTD1 조사공을 이용하기 위한 연구를 하고 있다. 이 조사공에서는 8인치까지 쪼일 수 있을 것으로 보고 있으며, 현재 6인치 및 8인치 조사 장치를 개발하고 있다.

7. 향후 전망

앞으로 『하나로』의 활용이 가장 크게 확대될 수 있는 분야는 중성자 빔 이용이다. 원자로실에는 여러 개의 새로운 중성자 빔 실험 장치가 설치되고 있기 때문에 곧 중성자 빔 이용의 범위가 크게 확대될 것이다. 이와 함께 냉중성자 실험 설비를 설치하는 과제도 함께 진행되고 있다. 이 실험 설비가 완성되면 원자로실에 있는 모든 중성자 빔 실험 장치보다 더 많은 실험 장치를 제공할 것이며, 장치의 성능도 훨씬 우수하다. 이후 중성자 빔 이용 수요가 더욱 증가한다면 열중성자 안내관을 추가로 설치할 수도 있다. 중성자 투과 비파괴 검사 분야의 경우에도 중성자 실험동과

중성자 안내관이 설치되면 실험 장치가 추가될 것이다. 그 외의 분야에서 추가로 설치될 중요한 실험 설비는 핵연료 조사 시험 루프이며, 이들이 모두 설치되어 이용되면 하나로의 기능을 거의 한껏 이용하는 단계가 될 것이다.

방사성동위원소 생산의 경우에는 이미 각종 실험공을 거의 한껏 이용하고 있으므로 생산량이 크게 증가하지는 않을 것이나, 새로운 핵종 개발 등의 노력은 계속될 것이다. 중성자 방사화 분석은 지발중성자 분석 등 분석 방법을 더욱 다양화 할 것이다. 실리콘 도핑은 남은 한 개의 실험공을 활용하여 지금보다 2배 이상의 용량을 갖게 될 것으로 기대된다. **KRIA**

