

# 하나로의 이용 기술 개발

최 창 응

한국원자력연구소 하나로이용기술개발팀장



**하**나로는 중성자 빔 이용, 재료 조사 시험, 방사성 동위원소 생산 등 다목적 이용을 위하여 노심과 이를 둘러싸는 중수 반사체 영역에 <그림 1>과 같이 다양한 크기와 중성자 스펙트럼을 갖는 수직·수평 실험공이 구비되어 있으며, 이들 실험공에 대한 주요 자료는 <표 1>과 <표 2>에 요약되어 있다.

수직 실험공 중 노심 가운데 부분에 있는 3개의 육각형 조사공(CT, IR1, IR2)에서는 매우 높은 중성자

속을 얻을 수 있으므로 높은 고속 중성자속을 필요로 하는 발전로 재료의 조사 시험이나 핵연료의 연소 시험 등이 캡슐을 이용하여 수행된다.

노심 바로 가장자리의 중수 반사체 영역에 위치한 8개의 원형 조사공(OR)은 높은 열의 중성자속(epithermal neutron flux)을 제공하므로 비방사능이 높은 동위원소의 생산과 발전로 노심 주변 재료의 조사 시험에 적합하다.

두 개의 NTD공은 규소 반도체 도핑이나 토포즈 조사에 이용할 수 있으며, LH공은 핵연료 조사 시험 루프를 설치하기 위한 곳이다.

CNS공은 냉중성자원을 설치할 수 있도록 설계되었다.

HTS는 수력으로 시료를 넣고 쬐 수 있는 곳으로서 반감기가 비교적 짧은 동위원소의 생산에 적합하다.

3개의 NAA공은 실험실에서 단시간에 시료를 조사공에 넣고 쬐 수 있는 기송관 장치와 연결되어 방사화

분석에 이용되고 있다.

17개의 IP공은 동위원소 생산 및 기타 각종 시료 조사에 이용된다.

수평 실험공은 전부 7개인데 NR공을 제외한 6개의 공은 모두 반사체 영역에서 열중성자속의 피크 자리를 비껴보고 있다(tangential port).

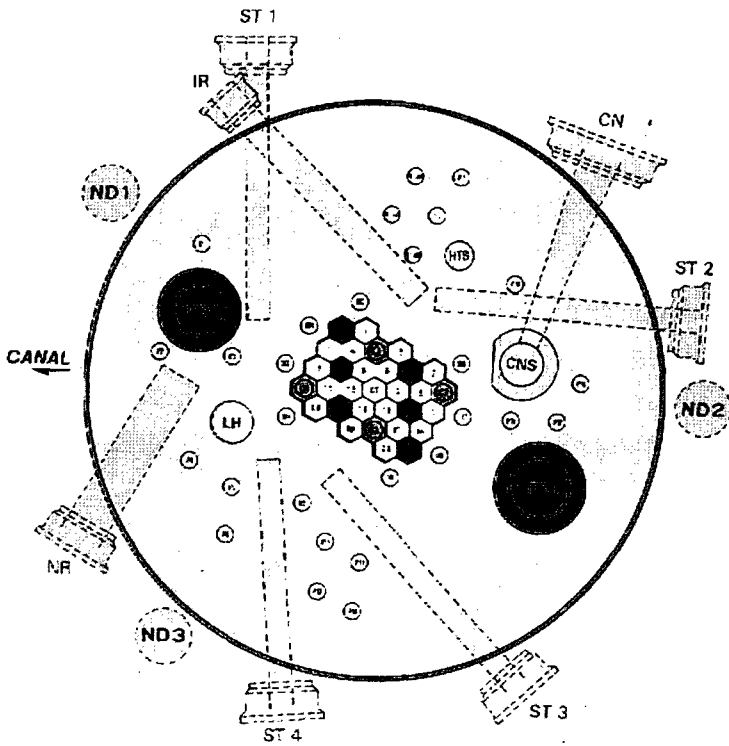
이는 고속 중성자와 감마선은 최소로 하면서 열중성자를 최대로 하여 중성자 빔 실험에 적합하게 하기 위함이다.

NR공은 넓은 빔 단면적에 충분히 감속된 중성자를 얻기 위하여 노심으로부터 더 멀리 떨어져 있다.

이 공에는 중성자 투과 비파괴 검사 장치가 설치되어 있다.

ST 1~4 수평공 4개는 모두 같은 크기의 직사각형 빔 튜브로서 각각에는 다양한 중성자 분광 장치가 설치된다.

CN 튜브는 노심쪽 끝 부분은 ST보다 약간 좁은 직사각형이나 바깥쪽으로 갈수록 넓어져서 원자로 바깥



〈그림 1〉 하나로의 수직·수평 실험공

벽체에서는 원형이다.

이러한 구조는 향후 냉중성자원이 설치될 때 여러 개의 중성자 유도관을 통해 다수의 냉중성자 분광 장치를 설치할 수 있도록 배려한 것이다.

IR공은 원통형 빔 튜브로서 당초에는 저온 조사 시험을 고려한 것이었으나 저온 조사 시험 연구 계획은 수립되지 않았고, 보른 중성자 포획에 의한 암치료 장치가 설치될 예정이다.

위에서 설명한 여러 가지의 실험공을 활용하기 위해서는 각각의 이용

목적에 맞는 활용 시설 및 설비가 설치되어야 한다.

다음은 중성자 빔 이용 분야를 비롯하여 연구 개발 및 시험 분석과 관련된 설비에 대한 현황이다.

방사성 동위원소의 개발 현황에 관한 내용은 별도로 기술되어 있다.

**활용 설비 및 기술 개발 현황**

**1. 중성자 빔 이용 분야**

현재 하나로에는 고분해능 중성자 분말 회절 장치(High Resolution

Powder Diffractometer, HRPD), 중성자 투과 비파괴 검사 장치(Neutron Radiography Facility, NRF)가 설치되어 이용중이며, 4축 단결정 회절 장치(Four Circle Diffractometer, FCD)가 금년 9월 부터 시운전을 실시할 계획이다.

중성자 소각 산란 분광 장치(Small Angle Neutron Spectrometer, SANS)는 95년말부터 개발에 착수하여 99년말을 목표로 현재 설치중에 있으며, 편극 중성자 분광 장치(Polarized Neutron Spectrometer, PNS)는 단색화 결정용 드립만은 서울 연구로 2호기에 설치되었던 것을 하나로에 이설하였으나 하나로 중성자속이 10배 이상 높기 때문에 전면 차폐 보강과 함께 압축 공기를 이용한 구동이 가능한 dance floor를 설치하였다.

분광 장치를 완성하기 위해서는 앞으로도 상당한 연구 개발과 제작·설치 작업이 요구된다.

향후 국내 중성자 빔 이용 연구가 크게 활발할 것으로 기대하여 냉중성자원(cold neutron source) 장치도 개발에 착수하여 2006년대 하반기부터는 이용에 들어갈 수 있도록 대비하고 있다.

중성자 빔을 이용한 재료 물성 연구자들은 1차적으로는 대학과 연구기관이며, 이들의 산업적 응용에 대한 노력에 따라 산업체 이용자가 증가할 것으로 기대되고 있다.

(표 1) 수직 실험공의 특성

| 위치  | 조사공  |    | 내경(cm) | 중성자속<br>(n/cm <sup>2</sup> sec)               |  | 용도                    |
|-----|------|----|--------|---|--|-----------------------|
|     | 명칭   | 수량 |        | 속중성자<br>(>0.82 MeV)                           | 열중성자<br>(<0.625 eV)                            |                       |
| 노심  | CT   | 1  | 8.0    | 1.5×10 <sup>14</sup>                          | 5.3×10 <sup>14</sup>                           | 핵연료, 재료 시험            |
|     | IR   | 2  | 8.0    | 1.3×10 <sup>14</sup>                          | 4.8×10 <sup>14</sup>                           | 연료, 재료 시험             |
|     | OR   | 8  | 6.0    | 2.7×10 <sup>13</sup>                          | 3.0×10 <sup>14</sup>                           | 동위원소 생산               |
| 반사체 | NTD1 | 1  | 22.0   | 1.2×10 <sup>11</sup>                          | 4.4×10 <sup>13</sup>                           | 반도체 생산                |
|     | NTD2 | 1  | 18.0   | 9.3×10 <sup>11</sup>                          | 4.2×10 <sup>13</sup>                           |                       |
|     | CNS  | 1  | 16.0   | 2.7×10 <sup>12</sup>                          | 2.1×10 <sup>14</sup>                           |                       |
|     | LH   | 1  | 15.0   | 1.3×10 <sup>12</sup>                          | 2.3×10 <sup>14</sup>                           | 냉중성자원                 |
|     | HTS  | 1  | 10.0   | 2.7×10 <sup>11</sup>                          | 8.8×10 <sup>13</sup>                           | 핵연료 시험                |
|     | NAA1 | 1  | 6.0    | 2.4×10 <sup>10</sup>                          | 3.9×10 <sup>13</sup>                           | 동위원소 생산               |
|     | NAA2 | 1  | 6.0    | 2.5×10 <sup>11</sup>                          | 9.4×10 <sup>13</sup>                           |                       |
|     | NAA3 | 1  | 6.0    | 1.3×10 <sup>12</sup>                          | 1.6×10 <sup>14</sup>                           |                       |
|     | IP   | 17 | 6.0    | 1.5×10 <sup>9</sup> ~<br>2.3×10 <sup>12</sup> | 2.4×10 <sup>13</sup> ~<br>2.0×10 <sup>14</sup> | 중성자 방사화 분석<br>동위원소 생산 |

(표 2) 수평 실험공의 특성

| 빔류번호 | 형태   | 크기(cm) | 열중성자속(<0.625 eV)     | 용도         |
|------|------|--------|----------------------|------------|
| ST1  | 직사각형 | 7×14   | 1.8×10 <sup>14</sup> | 중성자 물리 시험  |
| ST2  | 직사각형 | 7×14   | 2.4×10 <sup>14</sup> | 중성자 물리 시험  |
| ST3  | 직사각형 | 7×14   | 2.8×10 <sup>14</sup> | 중성자 물리 시험  |
| ST4  | 직사각형 | 7×14   | 2.2×10 <sup>14</sup> | 중성자 물리 시험  |
| CN   | 직사각형 | 6×15   | 1.4×10 <sup>14</sup> | 중성자 물리 시험  |
| NR   | 원형   | 10     | 4.5×10 <sup>13</sup> | 중성자 비파괴 검사 |
| IR   | 원형   | 10     | 2.8×10 <sup>14</sup> | 뇌종양 치료     |

중성자 빔 이용은 기초 연구에서 첨단 소재 개발, 생체 연구에 이르기까지 50년 이상의 연구 역사가 있고, 80년대 중반부터 산업적 이용이 급격히 증가하고는 있으나 아직도 선진 G7 국가들에서조차 대학과 국립 연구소들이 주된 이용자이다.

우리 나라의 현실정을 살펴볼 때

지금까지는 한국원자력연구소 자체 연구 외에는 국내에서 중성자 분광 장치를 이용한 연구를 수행하기 어려웠다.

때문에 해외에서 경험을 축적한 연구자들도 단기간으로 해외에 나가 연구를 수행하거나 이것이 여의치 못하면 시간이 흐를수록 대개는 포기하

는 경향들이었으나, 하나로에서 분광 장치를 이용할 수 있게 됨으로써 이들에게도 대단한 연구 의욕을 증대시키는 기회가 되고 있다.

이들 중에는 해외에서 학위 과정부터 중성자 산란 연구 경험을 지닌 자들도 있어 중성자 분광 장치의 이용이나 신규 분광 장치의 선택과 개발에 깊은 관심을 가지고 있으며, 자신들의 연구 목적과 이용에 보다 적합하도록 설계시부터 반영하거나, 학생 교육과 훈련, 기술 축적 등 여러 가지 방향에서 중성자 분광 장치의 개발과 이용에 참여하기를 원하고 있다.

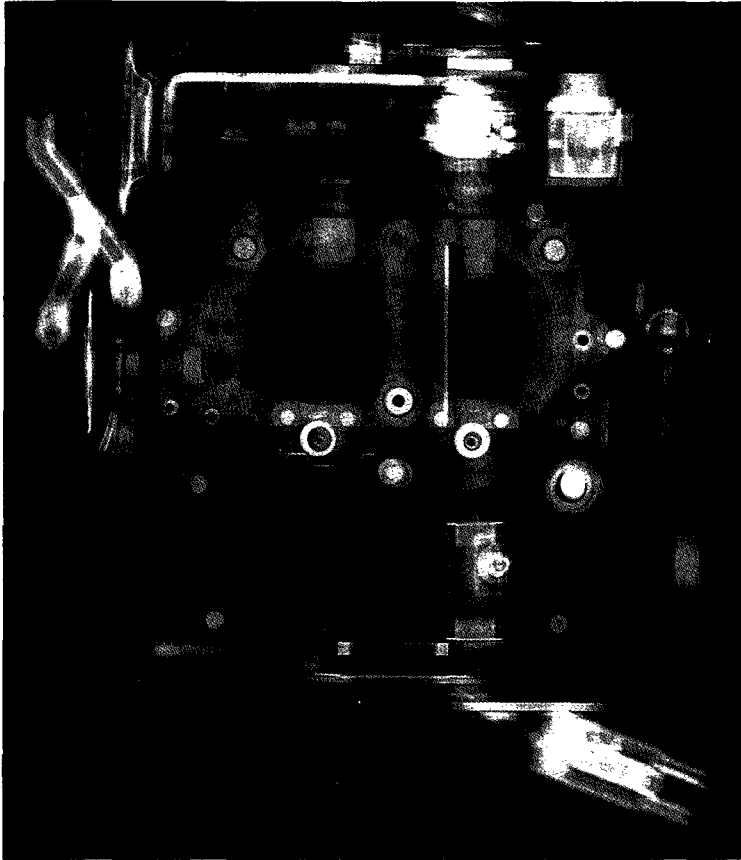
우리 나라에서는 물리·화학·생물·재료 분야의 석사급 이상의 고급 두뇌가 매년마다 1,000여명 이상씩 배출되고 있으므로 이들의 연구를 중성자를 이용한 선진 연구 분야로 접목시키면 엄청난 숫자의 이용자 그룹이 조성될 것으로 전망된다.

각 장치별 개발 현황은 다음과 같다.

가. 중성자 투과 비파괴 검사 장치 (Neutron Radiography Facility)

\* 주요 이용 분야

- 방위 산업, 항공 우주 산업의 복합 재료의 비파괴 결합 분석
  - 조사후 핵연료 검사 및 고방사능 부품의 결합 분석
- 원자로 가동 직전부터 95년까지 중성자 투과 비파괴 검사 장치



자동차 카브레이터 내부 구조를 중성자 레디오그라피 장치를 이용하여 찍은 사진

(NRF)를 설치하여 96년부터 성능 시험을 실시하였으며, 하반기부터는 자체 이용을 비롯하여 일부 산업체, 국방과학연구소 등에서 활용을 시작하였고, 지금은 대학생들의 정규 교육에도 활용하고 있다.

중성자 투과 비파괴 검사 장치는 2개의 조사실(exposure cell)을 갖추고 있다.

제1실은 900mm(W)×1,800mm(H)×1,650mm(L) 규모로서 핵연료 검사를 비롯한 고방사능 물질의 검사를 위한 것이며, 제2실은 내부 공간이 1,300mm(W)×1,800mm(H)×1,940mm(L)로서 비방사능 물질, 즉 일반 산업체 용품의 검사를 목적으로 하고 있다.

최근에는 방위 산업 부품이나 제트 엔진에 들어가는 turbine blade

결합 분석을 수행하였으며, 우리나라 산업체의 기술 고도화에 따라 자동차·항공·우주·방위 산업 등의 분야에서 이용 빈도가 상대적으로 증가할 것으로 기대되므로, 산업체의 수요에 더욱 부응토록 중성자 TV에 의한 실시간 화상 처리 기술을 개발 중이며, 강철 내에 분포하는 붕소 함량을 측정하는 등 특수 레디오그라피 기술 개발도 수행하고 있다.

#### 나. 고분해능 중성자 분말 회절 장치(High Resolution Powder Diffractometer)

##### \* 주요 이용 분야

- 핵연료 재료의 결정 구조와 상태도, 변태, 정량 분석
- 인코넬 합금, 지르칼로이 재료 결정 구조 연구
- 원자력 재료의 집합 조직과 잔류응력 측정과 해석
- 산화물·수화물·탄화물의 결정 구조 해석과 상전이 현상
- 각종 금속과 산화물의 결정 구조, 정량 분석과 질서-무질서 현상
- 초전도체, 자성체, 거대 자기저항 재료의 구조 해석과 상전이 연구

94년까지 설계를 마치고 제작에 착수하여 97년 중반까지 설치 작업을 완료하였으며 97년 하반기부터 성능 시험에 착수하였다.

성능 시험은 수개월의 장기간에

결친 회절 장치 내 기계 부품의 연속 정밀 구동 시험과 중성자 핵 계측 장치들의 성능과 안정성 등의 시험을 마친 후 미국의 NIST에서 제공한 표준 시료 Si SRM, 한국자원연구소 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말, 건국대학교의 YIG 시료 등을 사용하여 교정과 분해능 등의 검증을 마쳤다.

98년 2월말에 초기 성능 시험을 완료함과 동시에 연구 기관, 대학 및 산업체 등에 개방하여 공동 이용하고 있으며, 98년 6월말 현재 약 80건의 외부 이용 실적이 있다.

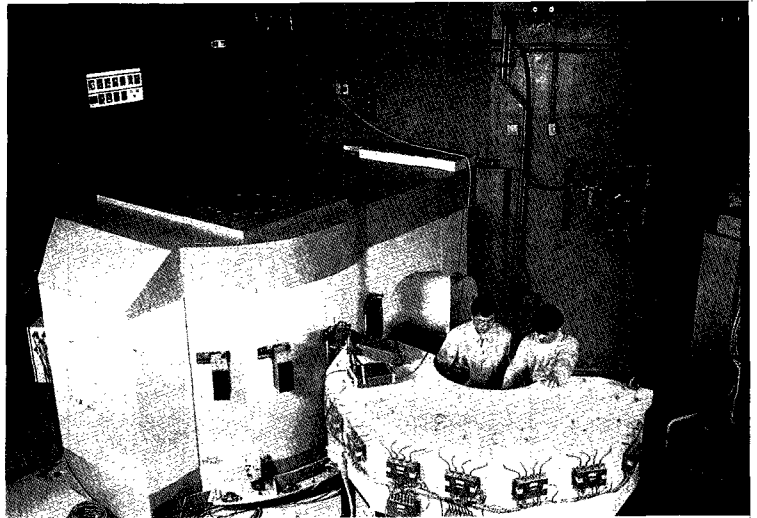
하나로의 HRPD는 장치 성능이 세계적이고 구조가 유연하여 그 이용이 크게 기대되고 있으며, 국내 이용자들에 대한 분석 기술의 보급과 주변 장치 구비에 따라 그 활용성이 결정될 것이다.

장치 소개와 함께 전국적인 활용 증대를 위해서 97년 6월과 98년 6월 각각 이틀간 한국원자력연구소에서 워크숍을 개최하였으며, 이 기간 중 전국에서 100여명 이상의 연구자가 참가하였고, 특히 2회 워크숍에서는 초기 이용자 중 일부가 그들의 결과를 발표하였다.

**다. 4축 단결정 회절 장치 (Four Circle Diffractometer)**

**\* 주요 이용 분야**

- X선 단결정법으로 구하지 못하는 단결정 내 수소 위치 결정
- 유전체, 산화물 단결정의 결정



고분해능 중성자 분말 회절 장치(HRPD)

**구조와 상전이 연구**

- 기타 단백질 구조, 생물학 연구

하나로의 ST2 수평공에서 단색화 결정 차폐체를 HRPD와 공유하는 4축 단결정 회절 장치는 95년 HRPD 제작과 함께 개발에 착수, 98년 전반기에 주요 기계 장치와 부품들의 설치가 완료되었고, 현재는 단색화 결정의 성능 시험과 함께 계측 제어 장치 부문의 설치를 진행 중이다.

98년 하반기에는 성능 시험에 착수하여 시험이 완료되는 98년말부터는 이용이 가능할 것이다.

이 장치가 80년대 국내에 산·학·연에 다수 도입된 X선 단결정 회절 장치와 함께 활용되면 국내 단결정 회절(crystallography) 연구의 기반이 대폭 강화될 것이다.

**라. 중성자 소각 산란 분광 장치 (Small Angle Neutron Spectrometer)**

**\* 주요 이용 분야**

- 조사 손상에 의한 원자로 압력 용기의 석출, 공극, cluster의 거동
- 고분자 중합체(polymer)의 구조와 동력학, 생체 고분자 연구
- 금속과 세라믹 재료의 거대 구조와 결합, 고분자 중합체의 구조와 동력학 등에 세계적으로 그 이용도와 중요성이 입증된 중성자 소각 산란 분광 장치는 또한 가속기연구소의 방사광 소각 산란 분광 장치와 함께 국내 소각 산란 연구의 강력한 수단이 될 것이다.

95년말 원자로 재료의 조사 결합 연구 분야에서의 요구에서부터 착수

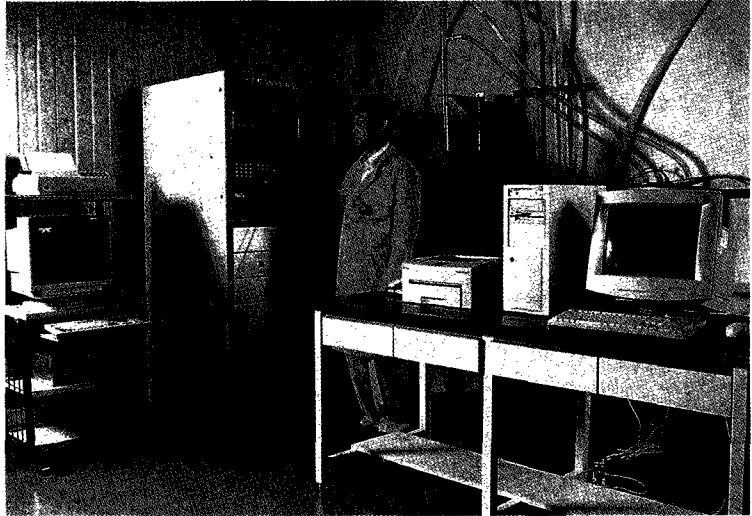
된 소각 산란 분광 장치 개발은 단계적인 설계와 제작, 시험과 현장 설치, 성능 확인 등 현재 약 60% 정도의 개발이 진행중이며 99년말까지 설치 완료할 계획이나, 현 여건에서는 제작에 장기간이 소요되는 고가의 부품을 적기에 제작해야 하는 데서 오는 어려움이 있다.

97년부터는 국내 고분자 연구자들이 참여하여 고분자 분야로의 이용 연구에 대비한 준비를 함께 하고 있으며, 목표 기간 내에 설치를 마치기 위해 자원과 인력을 집중적으로 투입하고 있다.

현재의 SANS 장치는 냉중성자원이 없는 CN 수평공의 중성자속 스펙트럼에서 액체 질소로 냉각되는 Bi-Be 필터와 고속 중성자 속도 선별기를 이용하여 4Å 이상의 냉중성자를 이용하는데, 우선적으로 CN 수평공에서 SANS를 이용한 분광 기술의 확립, 원자로 재료 등 조사 시료의 결합 연구와 고분자 연구, 이용자 훈련 등을 수행할 계획이다.

국내의 연구자들의 연구와 인력 양성, 기술 축적을 이루면서 이후 냉중성자원이 설치되면 냉중성자 실험 등으로 이설하여 높은 냉중성자속을 이용한 수준 높은 연구, 고도의 장치 변수를 갖는 새로운 중성자 소각 산란 분광 장치의 개발에 이용할 계획이다.

마. 편극 중성자 분광 장치  
(Polarized Neutron Spectro-



자동 공압 이송 장치를 이용한 중성자 방사화 분석 장치

meter)

\* 주요 이용 분야

- 강자성체, 반강자성체, 상자성체 등 자성체 구조 연구
- 자기 능률 분포, 형상 인자 측정, 동력학적 연구

중성자는 독특한 산란 특성에 의한 자성체 구조 연구에 필수적인 직접적인 탐색자(probe)이며, 이에 특화된 편극 중성자 분광 장치는 중성자가 갖고 있는 자기 능률을 이용한 편극 중성자 빔을 생산하고, 여러 분광기술을 적용하여 고도의 자성체 연구를 수행할 수 있다.

이 장치가 설치되면 다른 중성자 분광 장치와 마찬가지로 국내 유일의 장치가 될 것이며 학계와 산업계의 중요한 연구 장치가 될 것이다.

현재 주요 차폐체 부분, 단색화 결

정용 드럼 구조, dance floor형의 바닥 구조가 설치되어 있으며, 향후 편극 단색화 결정이나 편극 거울 등 중성자 광학 부품, 편극기와 전자석, 유도 자기장 등의 부품, 시료대 고니오미터 등 기계 부품과 제어 계측 장치, 3축형 편극 분광을 위한 구동 S/W 제작 등의 작업이 이루어질 것이며 2000년말 설치 완료를 목표로 하고 있다.

바. 3축 중성자 분광 장치(Triple Axis Spectrometer)와 중성자 반사율 측정 장치(Neutron Reflectometer)

3축 중성자 분광 장치는 기본적으로 비탄성 산란을 연구할 수 있는 구조를 갖는 분광 장치로서, 92년의 최초 계획에서는 2000년대 초반 설치

할 계획이었다.

이 장치는 그 특성상 대학의 기초 연구에 널리 이용할 수 있는 장치이고 현재까지 국내에서는 한번도 설치된 적이 없는 장치이다.

장치 구조와 실험 성격상 고가의 설치비와 기술, 운영과 이용에서도 고도의 연구 능력과 실험 비용이 요구되는 분야로서, 특히 연구소와 대학에 다수의 연구자들이 업무를 분담하여 참여하는 공동 장치 개발을 통해 대학의 기초 연구 여건과 중성자 빔 이용 물질 연구 환경을 신속히 개선하는 효과를 거둘 수도 있다.

중성자 반사율 측정 장치는 92년의 최초 계획에는 없던 장치였으나 지난 10년간의 급속한 기술 개발과 연구 결과에 의해 이제는 중성자 분광 장치 중 SANS에 버금가는 중요성을 갖게 되었으며, 특히 산업체의 수요가 높다.

국내에서도 최근 2~3년간 실험실 X선 반사율 측정 장치들이 속속 도입되고, 포항 방사광 가속기에 방사광 X선 반사율 측정 장치가 설치되는 등 반사율 측정에 의한 계면 연구 수요가 급속히 높아지고 있는데, 세계적으로 중성자 빔 이용 연구 분야 중 가장 급속히 변모하는 분야이다.

하나로에서도 이와 같은 추세를 반영하여 97년 원자력 연구개발 중장기과제 계획 작성시 향후 신규 개발해야 할 장치 중 최우선 순위로 설정한 장치이며, 기초적인 조사와 기기

구조에 대한 검토를 진행중이다.

#### 사. 냉중성자원(Cold Neutron Source : CNS) 개발

\* 주요 이용 연구 분야

- 물질의 계면/표면의 특성 연구
- 복합 재료, 고분자 중합체, 접착제, 기능성 플라스틱 등의 결합 구조 해석

- 생체의 생합성 규명, 자성체의 특성, 초전도체 특성 연구

하나로의 반사체에는 내경 16cm의 수직홀과 냉중성자를 추출하기 위한 수평관(6cm×15cm)이 이미 설치되어 있으므로, 하나로로 원자로 구조 특성에 맞고 또한 매우 한정적인 원자로 수조 이용 공간에 적합한 냉중성자원 장치를 개발하기 위한 개념 설계를 러시아의 PNPI 연구소와 97년에 약 6개월간 공동으로 수행하였다.

이 개념 설계 결과를 프랑스의 Technicatome, Air Liquide, Cilas와 일본 교토대학의 냉중성자원 전문가로부터 평가를 받았으며, 이들 평가 결과를 근거로 하여 가장 핵심적 요소 기술을 연구소가 개발하고 기타 시설들은 이미 산업화된 고도의 시설들이므로 선진국으로부터 도입토록 하는 방안을 수립중이다.

기본 설계의 1단계까지만 수행토록 하고, 2단계의 설계부터 시설 설치에 이르기까지는 고가의 예산이 소요될 것으로 추정되기 때문에 예상 활용 수요 및 재원 조달 방안 등을 충분히

히 검토하여 추진할 계획이다.

## 2. 재료 조사 시험

가동중인 원자력발전소 구조 재료의 건전성 평가를 위해서, 그리고 원자력 신소재 연구 개발 및 새로운 핵연료 개발을 위해서는 노내 조사 시험을 통한 조사 거동의 실증이 요구되며, 높은 중성자 속을 내는 하나로에서 이 같은 조사 시험들이 가능하도록 캡슐을 이용한 조사 기술과 루프 설치를 위한 장치 설계 기술이 93년부터 개발되어 왔다.

### 가. 노내 조사 시험 시설 (Fuel Test Loop)

핵연료의 노내 조사 거동 시험은 원자력발전소와 동일한 운전 조건(온도·압력 등)에서 개발하고자 하는 시제품 핵연료에 대한 성능 평가와 안전성 확인에 필수적이다.

정상 상태 노내 조사 시험 시설은 고온·고압의 운전 조건에서 연소도에 따른 핵연료의 구조적 건전성 평가, 핵분열 물질의 방출 거동 평가, 소결체와 피복관의 상호 작용 연구 등에 필요한 실증 자료를 생산하여 미래형 핵연료, 신형 핵연료, CANFLEX 및 DUPIC 핵연료 등의 국내 핵연료 개발에 이용 예정이다.

노내 조사 시험 시설은 시험 핵연료를 장착하여 하나로 수직공인 LH에 설치되는 IPS(In-Pile Section) 부분과 운전 조건을 맞추어주는 공정

계통인 OPS(Out-Pile Section)부분으로 크게 나눌 수 있다.

93년 7월부터 노내 시험 시설 설계 건조 과정을 착수하여 개념 설계와 상세 설계를 완료하였다.

하나로 운전시 설치에 어려움이 예상되는 수조 내 배관 지지물과 IPS와 OPS를 연결해주는 배관은 설치 완료하였다.

OPS 구성에 필요한 기기·탱크·밸브 등은 하나로 현장에 입고되어 설치 대기중이며, 전기 계통과 계장 계통에 필요한 기기 및 계기는 사양이 확정되었으나 아직 미발주 상태이다.

노내 조사 시험 시설을 설치하기 위해서는 하나로가 약 6개월 정도 운전 정지 되어야 하나, 지속적인 동위원소 생산을 위해서 운전 정지를 할 수 없어 노내 조사 시험 시설의 설치 연기가 불가피하게 되었다.

또한 97년말에 닥친 국내 경제 여건의 악화로 IPS 부분의 대규모 투자가 요구되는 노내 시험 시설 설계 건조 과정에 대한 전반적인 재검토 필요성이 대두되었다.

따라서 사용자 요건 및 시험 목적의 재정립, 하나로 특성에 맞는 시험 요건 확립 등 설계의 기술적인 검토를 진행하고 있으며, 검토 결과에 따라서 설계 내용의 수정 등으로 설치비용의 절감을 이루고자 한다.

#### 나. 조사 시험용 캡슐 개발

조사 시험용 캡슐 개발은 단순 조

사 시험용인 무계장 캡슐 개발과 조사중 시료의 조사 온도와 분위기의 조절 및 측정 기능을 보유한 계장 캡슐 개발 두 가지로 추진되었다.

무계장 캡슐은 95년에 관련 기술 국산화에 성공하여 최초의 캡슐이 이미 하나로 조사 시험에 사용되었다.

현재 조사재 시험 시설(IMEF)에서 해체된 후 관련 시료의 조사 후 분석 시험이 수행중이고, 생산된 조사 관련 자료들을 바탕으로 하여 캡슐 설계 제작 기술들에 대한 보완/향상 작업을 수행하고 있다.

원자력 재료의 계장 캡슐을 이용한 조사 시험이 하나로에서 가능하도록 재료 조사용 계장 캡슐 기술의 개발 연구를 94년 9월부터 수행하였다.

현재 하나로에서 캡슐을 이용한 원자력 재료의 조사 시험을 수행하기 위해서 원자로 수조 안에 CT, IR1, IR2용 캡슐 고정 장치를 3 set 개발하여 안정성 평가를 마친 후 설치하였으며, 캡슐의 온도 제어 장치 및 관련 제어 시스템을 개발하여 원자로 홀안에 설치하였고, 계장 캡슐의 개발도 완료되어 98년 3월에 하나로 CT홀 내에 장착하여 성능 시험을 수행하였다.

성능 시험을 마친 후 한국중공업(주)에서 수탁받은 RPV(reactor pressure vessel) 재료인 SA508, SA533의 조사 시험을 98년 5월부터 수행하고 있으며, 여러 원자력 재료

의 조사 취화 특성 분석에 다양하게 이용될 예정이다.

핵연료 캡슐 분야에서는 DUPIC 핵연료 조사 시험용 무계장 캡슐을 제작 중에 있다.

아울러 DUPIC 핵연료 개발 과정에서 캡슐을 이용한 조사 시험을 수행할 수 있도록 연소된 핵연료의 취급에 필요한 제반의 기반 기술을 경험에 있는 미국의 아이다호 국립연구소(INEEL) 혹은 노르웨이 Halden Project로부터 도입하여 핵연료의 캡슐 조사 시험이 하나로에서 수행되도록 준비중이다.

또한 금속 핵연료 조사 시험을 위한 무계장 캡슐, 신형 핵연료 조사 시험을 위한 계장 캡슐, 조사 시험중 설계 제원 측정을 위한 핵연료 미세 가공 기술 등을 개발하고 있다.

이외에도 특수 목적 캡슐 분야에서는 첫 단계로 조사 시험 중 응력 부과 기술 및 변형 측정 시스템과 금속 벨로우즈 이용 응력 부과 장치 등의 기초 연구가 진행중이다.

### 3. 암치료 분야

BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)는 암세포에 집중적으로 모이는 붕소 화합물을 인체에 주입한 뒤에 중성자를 조사시켜 암을 치료하는 방법이다.

이 치료법은 주로 악성 뇌암에 적용하는데, 그 원리는 이미 오래전에 알려졌으나 일본에서 열중성자를 이



(표 3) 중성자 방사화 분석의 감도(열중성자속 :  $10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ , 조사시간 : 5시간, 계측시간 : 100분)

| 검출 감도, %                  | 분석 원소                                   |
|---------------------------|---|
| $1 \sim 3 \times 10^{-7}$ | In, Eu, Dy                              |
| $4 \sim 9 \times 10^{-7}$ | Ho                                      |
| $1 \sim 3 \times 10^{-6}$ | Mn, Sm, Au                              |
| $4 \sim 9 \times 10^{-6}$ | Rh, Lu, Re, Ir                          |
| $1 \sim 3 \times 10^{-5}$ | Co, Cu, Ga, As, I, Cs, La, Er, W, Hg, U |
| $4 \sim 9 \times 10^{-5}$ | Na, V, Br, Ru, Pd, Sb, Yb, Th           |
| $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ | Sc, Ge, Sr, Te, Ba, Nd, Ta              |
| $4 \sim 9 \times 10^{-4}$ | Cl, Cd, Gd, Se, Tb, Tm, Pt, Hf          |
| $1 \sim 3 \times 10^{-3}$ | Al, Zn, Mo, Ag, Sn, Ce, Os              |
| $4 \sim 9 \times 10^{-3}$ | K, Ti, Cr, Ni, Rb, Y, Pr                |
| $\sim 10^{-2}$            | Mg, Zr                                  |
| $\sim 10^{-1}$            | F, Ca, Nb                               |
| $\sim 10^0$               | Fe, Si, S                               |
| $\sim 10^1$               | Pb                                      |

용하여 실제로 치료에 성공한 이후 근래에 와서 전 세계적으로 연구가 활발하게 진행되어 왔다.

열중성자의 제한성을 극복하고 더 깊이 있는 암을 치료하기 위하여 열외 중성자(epithermal neutron)를 이용하는 방법이 최근에는 개발되고 있다.

하나로의 설계 당시에는 BNCT 설치 요건이 고려되지 않았으나 국내에서도 그 필요성이 대두되어 타당성 검토를 통하여 열중성자 BNCT가 가능하다는 판단을 얻어 97년부터 개발에 착수하였다.

뇌 표면 가까이 있는 종양 치료에 가장 적절한 중성자장을 얻을 수 있는 조사 장치의 개발과 붕소 농도를 측정하기 위한 즉발 감마선 방사화 분석 장치의 설계가 진행 중이다.

이 중성자장을 이용하여 치료법을 개발하는 것은 원자력병원에서 별도의 과제로 추진 중이다.

현재 여건상 열외 중성자의 이용은 어려우나 열중성자 치료 장치만으로도 상당수의 뇌종양 환자의 치료가 가능할 것으로 전망되며, 이 장치는 치료 기술 개발을 위한 각종 시험에도 활용될 것이다.

#### 4. 중성자 방사화 분석

중성자 방사화 분석(Neutron Activation Analysis, NAA)은 연 구용 원자료를 이용하여 중성자로 시료를 방사화시킨 후, 시료로부터 방출되는 감마선 및 방사능의 세기를 측정하여 핵종 및 성분 원소를 정량하는 기술로서 여러 가지 핵반응을 이용한 핵분석 기술(Nuclear

Analytical Techniques) 중 가장 큰 이용도를 갖는 분석법이다.

환경 시료, 지질 광물 시료, 해양 시료, 핵재료 및 산업용 고순도 재료의 분석에 강점을 갖고 있으며 범죄 과학, 고고학 및 농업·생명 과학 분야의 기초·응용 연구를 위한 극미량 원소를 비파괴·다원소 동시 분석할 수 있는 유용한 고감도 분석법이다(표 3).

하나로 내에서 중성자를 조사하기 위하여 시료 용기로서 원자로의 조사공과 실험실을 왕복할 수 있는 공압이송 장치(Pneumatic Transfer System, PTS)가 이용된다.

본 장치는 원자로 내 세 개의 조사공을 사용하며, 수동식(PTS #1)은 조사 시간을 미리 설정해 주는 계시기가 부착된 조정기에 의해서 운전되며, 자동식(PTS #2)은 컴퓨터 프로그램에 의해서 조사, 냉각 그리고 계측시간을 설정하여 수동 및 자동으로 운전할 수 있게 구성되었다.

PTS #2는 두 개의 조사공을 이용하며 단수명 핵종의 자동 분석, 지발 중성자 방사화 분석용으로 사용되고, 그 중 하나는 카드뮴으로 내장하여 열외중성자 방사화 분석용으로 사용된다.

이 장치는 95년에 설치되어 활용되고 있으며, 분석 장치의 성능 개선을 위한 개발, 기초 및 산업적 응용 기술 개발이 계속적으로 수행되

고 있다.

중성자 방사화 분석을 이용한 대기 오염 관측 연구를 통해서 원자력 기술이 대기 오염 측정에 효과적으로 이용될 수 있다는 사실을 입증하였다.

생물 시료의 ppb-ppm급 성분 원소의 분석법 개발을 위하여 여러 가지 동·식물 표준 시료를 INAA, ENAA, RNAA에 의하여 분석하였다.

특히 수 ng 이하의 극미량 U, Th의 정량을 위하여 방사화학적 분리 정량법을 연구하였다.

중성자 방사화 분석에 의한 플라스틱류의 고정밀 분석법 개발로서 시료 전 처리 기술을 확립하고 조사 용기의 재료 선택을 위해 국산의 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 시료들에 대한 물성 검사와 ppb-ppm급의 30여종 성분을 분석하였다.

공장 근로자의 모발 분석에 의한 작업장의 환경 영향 연구와 생물학적 시료의 보건 환경 응용 연구를 위해서 방사화 분석법을 이용하였다.

밥·육류·김치·생선·total diet 등의 한국의 대표 식품 및 음식류의 미량 성분을 분석 정량하였고, 체내에 기본적으로 유입되는 원소의 종류와 양을 평가하였다.

중성자 방사화 분석법에 의한 채소의 동일성 식별 연구를 통해서 성분 원소가 일치하는 확률 처리를 하

였으며 현장 수사에서의 이용 가능성을 검토하였다.

산·학·연 기술 지원을 위하여 각종 산업 재료나 생물·광물·환경 시료의 성분 분석, 핵종 분석 및 중성자 조사 등의 대내외 지원 업무를 연간 500~1000건의 시료에 대해 수행하였다.

대학 및 산업체를 대상으로 교육 훈련 프로그램을 운영하고 있으며, 산·학·연 협동 연구회 활동을 계속하고 있다.

산업과 환경 분야의 지속적인 연구 개발을 위한 1단계 국제협력사업(UNDP/RCA/IAEA Sub-Project on Nuclear Analytical Techniques)에 참여하여 핵분석 기술(주로 NAA)의 표준화 및 데이터 처리 기법의 개선을 위한 세미나 및 워크숍, 지역 훈련 과정, 전문가 활용, 국제 인증을 위한 적용 훈련 등의 활동과 국제 협동 연구 과제를 수행하였다.

현재는 2단계 사업(Air Pollution and its Trends)을 실행하고 있다.

IAEA/AQCS(Analytical Quality Control Services) 프로그램과 관련하여 분석 품질 관리를 위한 비교 분석 연구를 수행하였으며, 일본 과학기술청이 주관하고 있는 연구용 원자로의 이용 지역간 협력 사업에도 참여하고 있다.

앞으로 핵분석 기술의 국가 공인 시험 검사기관으로서의 역할 확립을

〈표 4〉 하나로의 활용 설비 개발 현황

| 분야/설비              | 설치 연도 | 현황    |
|--------------------|-------|-------|
| 중성자 빔 이용분야         |       |       |
| · 열중성자 이용          |       |       |
| - NRF              | 1996  | 사용중   |
| - HRPD             | 1997  | 사용중   |
| - FCD              | 1998  | 시험중   |
| - SANS             | 1999  | 설치중   |
| - PNS              | 2000  | 설치중   |
| - TAS              | 2002  | 계획중   |
| - Reflectometer    | 2003  | 계획중   |
| · 냉중성자 이용          |       |       |
| - 냉중성자원            | 2005  | 설계중   |
| - CN-SANS          | 2006  | 계획중   |
| - CN-TAS           | 2007  | 계획중   |
| - CN-Reflectometer | 2007  | 계획중   |
| - CN-PD            | 2008  | 계획중   |
| 재료 조사 시험           |       |       |
| · Capsule 이용       |       |       |
| - 재료 시험 캡슐         | 1998  | 사용중   |
| - 핵연료 시험 캡슐        | 2000  | 설계중   |
| - 특수 계장 캡슐         | 2002  | 계획중   |
| · Loop 이용          |       |       |
| - Fuel Test Loop   | 2004  | 설계수정중 |
| 암 치료 분야            |       |       |
| · BNCT             | 2002  | 설치중   |
| 중성자 방사화 분석         |       |       |
| · PTS/감마선 계측 장치    | 1995  | 사용중   |

위해 국립 품질기술원으로부터 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme) 인증을 품목별로 취득할 계획이며, 더 나아가 국제 경쟁력 확보를 위해 ISO 인증 취득도 계획하고 있다.

지금까지 기술된 여러 가지 활용 설비들의 개발 현황을 정리하면 〈표 4〉와 같다.

〈표 5〉 하나로 이용 의향서

| 구분   | 이용 분야   | 현황                           | 의향 | 번호 |
|--|---|------------------------------|----|----|
| 중성자 빔<br>(Neutron Beam)                    | 중성자 비파괴 검사: 산업체/방위산업/항공/원자력/고고학 등(NRF)  | 이용중                          |    | 1  |
|  | 중성자 분말 회절: 합금/세라믹스/수화물/자성체/유전체 등 구조 해석(HRPD)                                    | 이용중                          |    | 2  |
|  | 단결정 구조 해석: 무기/유기화합물, 고온 초전도체, 수화물 등 연구(FCD)                                     | 시험중                          |    | 3  |
|  | 소각 산란: 고분자 구조 및 합금/세라믹스의 석출물/재료 결합 등(SANS)                                      | 설치중                          |    | 4  |
|  | 편극 중성자: 자성체 구조 및 excitation, 상전이, 물질 구조 연구(PNS)                                 | 설치중                          |    | 5  |
|  | 중성자 반사율 측정: 각종 계면과 박막, 다층막 구조 및 현상(REF)   | 계획                           |    | 6  |
|  | 비탄성 산란: 물질 구조, excitation, 상전이, 비정질 구조 연구(TAS)                                  | 계획                           |    | 7  |
| 냉중성자 빔<br>(Cold Neutron Beam)              | 높은 냉중성자속 소각 산란: 고분자, 재료 연구(CN-SANS)   | 계획                           |    | 8  |
|  | 냉중성자 분말 회절: 재료 결합 구조 해석(CN-HRPD)  | 계획                           |    | 9  |
|  | 높은 냉중성자속의 반사율 측정: 계면과 박막, 다층막 구조 연구(CN-REF)                                     | 계획                           |    | 10 |
|  | 냉중성자 비탄성 산란: 고분해능, 고민감도 실험 수행(CN-TAS)   | 계획                           |    | 11 |
| 조사 시험<br>(Material Test)                   | 재료 캡슐: 재료/부품의 조사 특성 연구, 안전성 및 건전성 평가  | 이용중                          |    | 12 |
|  | 핵연료 캡슐: 핵연료/피복체의 조사 특성 연구, 성능 평가  | 개발중                          |    | 13 |
|  | 특수 캡슐: 사용자 요구에 따른 물리·화학적 특성 연구 및 자료 생산  | 계획                           |    | 14 |
|  | 핵연료 조사 시험 루프: 핵연료 조사 관련 기초 성질 시험, 연소도에 따른 핵연료 거동 시험, 핵연료 성능 검증 시험               | 제조중                          |    | 15 |
| 동위원소                                       | 진단/치료 (Tc-99m, I-131, Ho-166 치료제, Tc-99m 진단제, 치료용 선원 등)                         | 생산중                          |    | 16 |
|  | 산업적 이용( Ir-192, Co-60, 게이저용 선원 등)   | 개발중                          |    | 17 |
|  | 생명과학 연구(P-32, S-35, P-33, I-125, Re-188 등)                                      | 생산/개발                        |    | 18 |
|  | RI 취급 및 기술 지원(선원 취급, 특수 핵종 공급)  | 지원중                          |    | 19 |
| 중성자 방사화 분석<br>(NAA)                        | 극미량 원소 정량 분석(파괴/비파괴), 중성자 지원  | 지원중                          |    | 20 |
|  | 자 조사, 방사성 핵종 분석: 핵 재료, 환경 열중성자 AA   | 이용중                          |    |    |
|  | (대기·수질·해양), 생명과학 분야 동식물, 비열 중성자 AA  | 이용중                          |    |    |
|  | 물, 고순도/첨단 소재, 지질/생물, 의학, 농/임/수산업, 고고학, 범죄 과학 등의 시료, 즉발 감마 AA, 저발 중성자 NAA, 분석 공증 | 계획                           |    |    |
| 암치료  | 봉소의 중성자 포획에 의한 암 치료 기술 개발, 환자 치료(BNCT)  | 제작중                          |    | 21 |
| 반도체 도핑                                     | 2개의 조사공, 연간 약 10톤 시일 용량, 목표 저항률 정밀도 ±5% 이내 (NTD)                                | 제작중                          |    | 22 |
| ** 이외에 필요한 것은 아래에 써 주십시오! **               |   |                              |    |    |
| *** 하나로 이용자 협의회에 참여를 희망하는 경우 표시해 주십시오! *** |   |                              |    |    |
| 이용자 협의회                                    | 중성자 빔 협의회   | 중성자 빔, 중성자 투과 비파괴 검사         |    | 23 |
|  | 동위원소 협의회  | RI, BNCT, NAA, NTD, 기타 시료 조사 |    | 24 |
|  | 조사 시험 협의회   | 핵연료/재료 조사 시험, 발전로 기술 검증      |    | 25 |
| 발신인  | 이름 : _____ 전화 : _____ 팩스 : _____<br>E-mail : _____                              |                              |    |    |
|  | 소속과 주소 : (우)  |                              |    |    |
| 기타 의견                                      |   |                              |    |    |

〈표 6〉 하나로 이용 수요자 접수 현황

| 구분   | 응답자 수  |
|------|--------|
| 대학   | 499명   |
| 병원   | 334명   |
| 산업체  | 119명   |
| 연구기관 | 190명   |
| 공공기관 | 20명    |
| 기타   | 11명    |
| 합계   | 1,173명 |

하나로 이용 수요 조사

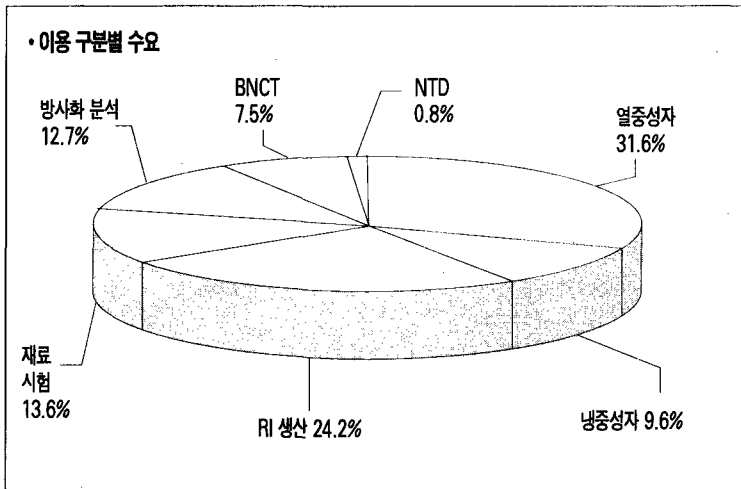
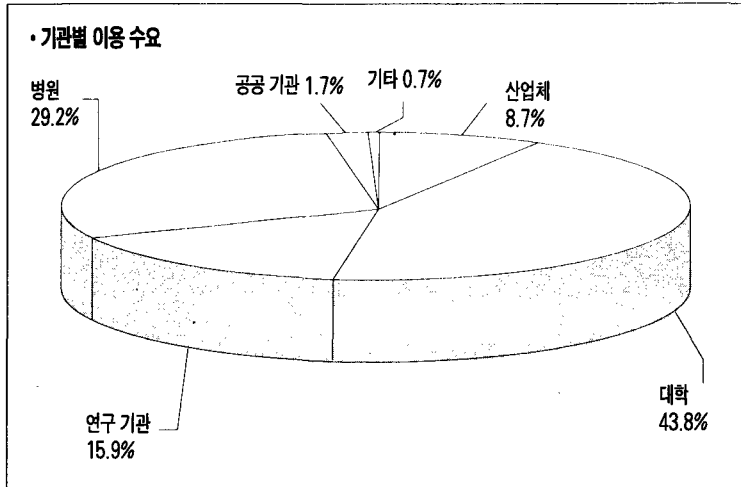
하나로의 이용 수요를 알아보기 위해서 98년 5월 7일부터 6월 30일까지 하나로이용의향서(〈표 5〉 참조)를 각 대학을 비롯하여 연구기관·산업체·병원 등에 직접 송부하고, 또한 인터넷을 이용하여 전국적으로 알려져 전부 1,173명으로부터 의향서를 접수하였다.

이번에 이용자 수요 조사를 실시하게 된 데에는 세 가지의 목적이 있었다.

첫째는 현 시점에서의 실수요자 현황을 파악하고, 둘째는 하나로 이용 가능 설비들을 폭 넓게 홍보하며, 셋째는 이용 분야별로 협의회를 구성하기 위한 이용자 명단을 준비하기 위해서였다.

기관별 이용 수요 현황은 대학이 43.8%, 연구기관이 15.9%, 산업체가 8.7%, 병원이 29.2%, 공공기관이 1.7%로 나타났다.

분야별로 수요 사항을 분석한 결



(그림 2) 하나로 이용 수요 분석

과는 중성자 빔 이용 분야(냉중성자 이용 포함)에 41.2%, 방사성 동위원소 이용 분야에 24.2%, 재료 시험 이용 분야에 13.6%, 방사화 분석 분야에 12.7%, 중성자 포획에 의한 암치료 이용 분야에 7.5%, 기타 분야에 0.8%로 나타났다.

접수 현황 자료는 <표 6>에, 이용 수요 분석 자료는 <그림 2>에 정리되어 있다.

금번에 실시한 수요 현황의 분석 결과를 볼 때, 국내외 산·학·연의 연구 수준과 연구 의욕이 성장해감에 따라 하나로를 이용한 연구에 관

심이 높아지고 있음을 알 수 있고, 하나로 이용 분야 전반에 걸쳐서 이용 의사를 표명하고 있음을 알게 되었다.

중성자 빔 이용에 대한 대학의 강한 요구는 기초 및 첨단 과학 분야에서 연구 선진화의 필요성이 인식되어 감을 나타낸다고 볼 수 있다.

병원의 하나로 이용에 대한 높은 관심 표명은 의료 기술의 선진화가 핵의학과 밀접히 연관되고 있어 진단 및 치료에 방사성 동위원소가 널리 이용되고 있다는 것과 뇌종양이나 피부암 등의 난치성 질병 치료에 중성자 조사 기술의 활용을 기대하고 있다는 것을 보여준다.

아울러 산업체의 하나로 이용에 대한 관심은 중성자 조사 시험에 의한 구조 재료의 취화, 변형 특성의 정밀한 규명 및 방사화 분석에 의한 극미량 불순물 추적 기술의 활용 등으로 산업 기술의 선진화가 조성되어감을 나타내고 있다.

이처럼 이용 수요 조사에서 나타난 수요자의 이용 욕구를 만족시키기 위해서는 활용 시설을 이용한 연구 실적과 활용 성과가 꾸준히 이어져 나가도록 지속적인 연구 지원 체계가 구축되어야 할 것이며, 앞으로 상호 보완적이거나 또는 성능이 개량된 연구 시설들이 추가로 설치되어야 할 것이다. ❁