

# NIST의 冷中性子 研究施設 Cold Neutron Research Facility at NIST\*



황 선 태

한국표준과학연구원 방사선연구실장

## 개 요

냉중성자 연구시설은 원래 미국립표준기술원의 설립강령과 연계되어서 새로운 임무 실현을 위한 훌륭한 본보기가 되고 있다. 이 연구 시설은 종래의 중요한 기초과학 프로그램에 추가하여 산·학·연의 연구원, 교수 및 기술자들에게 재료, 정보 및 통신, 화학, 전자 그리고 생명공학 산업에 직접적으로 관련되는 연구를 위한 첨단측정기술을 새롭게 제공하고 있다. NIST의 20MW급 연구용 원자로에 연결되어 있는 냉중성자 연구시설 중에 이미 7개의 실험분야가 확립·운용되고 있으며 추가하여 새로운 분야가 준비되고 있어서 현재, 시설이 계속 확충되고 있는 중이다. 본 서술논문에서는 이와같은 NIST의 냉중성자 연구시설에 관하여 개괄적으로 소개하고자 한다.

### 1. 머리 말

1950년대에 상당히 높은 중성자 플루언스를 얻을 수 있는 원자로가 출현된 이래로 광범위한 분야의 문제들을 연구하기 위한 열중성자의 이용이 급증하여 왔다. NIST에

연구용 원자로의 계속 가동은 1969년에 처음으로 실현되었으며 1990년 냉중성자연구시설이 운전되기 전까지 이 원자로의 활용성은 연구참여자의 숫자와 참여분야의 너비에 있어서 꾸준히 증가되어 왔다. 오늘날 NIST 원자로는 지역적 연구자원으로부터 전국에서 오고 있는 많은 연구자들을 수용할 수 있는 국가적 연구시설로 각광을 받게 되었다. 현재, 원자로 주변에 설치되어 있는 시설배치 상황은 Fig. 1에서와 같다. 원자로 설계상에 편입되어 있는 특색의 하나는 Fig. 1에 나타나 있듯이 원자로심까지 꿰뚫고 설치되어 있는 커다란 “냉중성자 선원” 장치이다.

NIST에서의 냉중성자는 5 meV보다 작고 특성온도는 약 60K이며 속도가 1000m/s보다 작고 파장은 0.4nm보다 큰 성질을 갖는 중성자로 정의되고 있다. 역사적으로 미국에서 냉중성자 기술의 응용에 관한 관심은 1970년대말과 1980년대에 서부 유럽의 연구용 원자로에서의 냉중성자 이용의 성공에 의하여 대두되었으며 그 중에서도 특히, 불란서 Grenoble 소재의 Institute Laue Langevin

\*NIST : National Institute of Standards and Technology 1270, Gaithersburg, Maryland 20899, U. S. A.

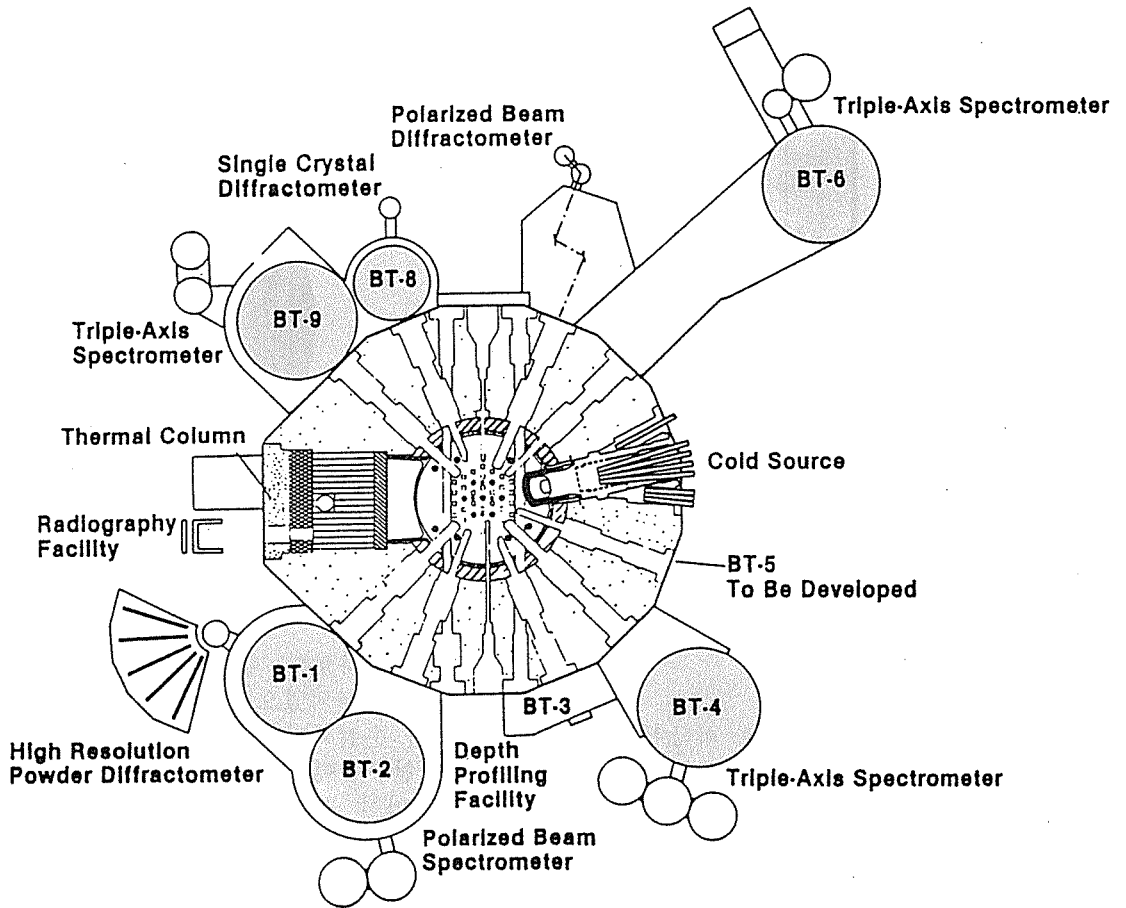


Fig. 1. Principal experimental facilities in the NIST reactor confinement building.<sup>(1)</sup>

(ILL)에서의 성공에 자극된바 크다.

냉중성자 연구 시설에서의 많은 성공들 중에서 이른바 small angle neutron scattering (SANS) 기술은 고분자재료, 생물, 금속 및 기타 분야에서 광범위의 다양한 문제 해결에 냉중성자의 위력을 이용하는 것이다. 현재 NIST에서의 1개의 8m 및 2개의 30m SANS 분광분석 장치가 각각 운용되고 있다. 이러한 장치의 실험적 가능성 및 생산성은 냉중성자 선원을 설치 완성함으로써 눈부시게 증가되고 있다. ILL에서 증명되었던 개발과제중 다른 하나는 길이가 긴 중성자 유도관(neutron guide : NG)을 통하여 원자로심으로부터 수십 m 떨어진 넓은 장소(이른바 guide hall)에까지 강한 냉중성자 비임

(beam)을 유도할 수 있었던 것이다. 이러한 냉중성자 비임의 유도는 반사체와 중성자 에너지의 함수인 임계각 이하에서 생기는 중성자의 전반사에 의해서 이루어진다. 중성자 유도관은 고산란능의 물질( $^{60}\text{Ni}$ )로 도장된 광학적으로 평평한 유리로 만들어진 파이프로 구성되어 있다. 유도관의 내부는 공기산란에 의한 중성자 상실을 최소화 하기 위하여 완전 진공으로 되어 있다. 이렇게 고안된 설비를 사용하면 강한 냉중성자 비임을 1 %/m 이하의 중성자 손실로써 원자로 건물로부터 guide hall로 수송하는 것이 가능하다. 따라서 넓은 실험구역에서 많은 새로운 형태의 중성자 측정능력을 창출해낼 수 있게 되었다. 이러한 성공적 실험 기반

위에서 이미 유럽의 주요 연구센터에서 냉중성자 이용 연구를 수행하고 있으며 NIST에서는 1988년 1월 상무부 주도하에 냉중성자 연구시설의 윤곽이 공개된바 있다.

## 2. 냉중성자 선원(Cold Neutron Source)

NIST의 연구용 원자로에는 중수(D<sub>2</sub>O)가 감속재로 이용되고 있으며 Fig. 2에서와 같이 정상의 D<sub>2</sub>O 감속재에 대해서도 5meV(냉중성자) 이하의 에너지를 갖는 중성자가 발생되나 그 숫자는 적다. 이러한 냉중성자의 숫자는 감속재의 온도를 낮게 함으로써 분명히 증가시킬 수 있다. 여기에 바로 높은 플루언스율의 냉중성자를 얻게 되는 기본적인 착상이 있는 것이다. 감속재의 온도에 따라 중성자의 특성온도가 변하며 중성자의 특성온도가 낮아짐에 따라서 중성자 스펙트럼 분포가 오른쪽으로 치우쳐 이동된다. 예를 들어서 5meV의 냉중성자는 특성온도가 60K이며 그 에너지는 열중성자 에너지 25meV의 0.2배에 해당된다.

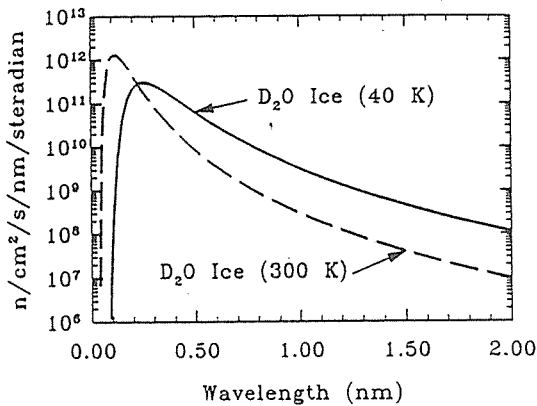


Fig. 2. Neutron fluence rates for the cold moderator cavity filled with liquid D<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O ice.<sup>(3)</sup>

한편, Fig. 3에서는 NIST의 연구용 원자로 심에 설치되어 있는 냉중성자 선원과 중성자 유도관을 보여 주고 있다. 선원자체의 감속재는 8%의 경우(H<sub>2</sub>O)가 첨가된 중수(D<sub>2</sub>

O)의 ice block으로서 헬륨가스(He gas)의 순환에 의하여 평균 40K로 유지된다. 중수에 의하여 냉각이 유지되는 납-비스무트(Pb-Bi) 차폐체는 중성자 입사창구(beam port) 안쪽에 장착되어 있어서 감속재 내에서 감마선 열을 대부분 제거하며 재입사공(reentrant hole)은 중성자 플루언스율을 증가시켜 주는 중요한 역할을 한다. 냉중성자 선원은 중성자유도관(NG)과 직선 방향으로 통하도록 설계되어 있으며 NG-0은 기존의 원자로 건물(confinement building)내에서 사용할 수 있는 것이고 NG-1부터 NG-7까지의 7개 유도관은 냉중성자 연구시설(cold neutron research facility: CNRF)의 실험 구역으로 직접 연결되어 있다. 특히 8개의 중성자 유도관의 내벽은 10μcm 두께로 borosilicate glass에 니켈(<sup>58</sup>Ni)을 입힌 것으로서 단면적은 15cm×6cm이다.

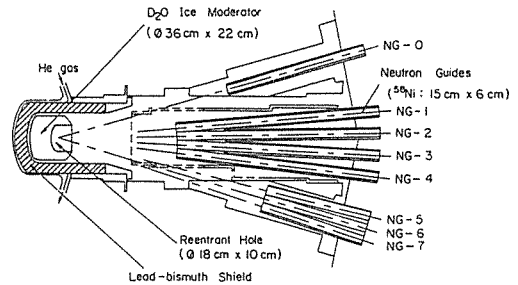


Fig. 3. D<sub>2</sub>O cold neutron source and neutron guides.<sup>(1)</sup>

Fig. 3에는 포함되어 있지 않지만 He gas refrigerator는 1.0kW의 냉각 용량으로써 유량률(mass flow rate) 28 g/s의 He gas를 냉중성자 선원장치에 공급한다. NIST 원자로가 20MW에서 가동될때 He gas는 37K로 cryostat에 진입되어 43K 퇴출됨으로써 감속재 D<sub>2</sub>O ice의 평균온도를 유지시켜 준다. 이러한 중성자 감속재는 양질의 중성자 beam과 안전성을 고려하여 선택된 것이다. 한편, 방사선에 의한 D<sub>2</sub>O ice의 화학적 손상을 복원하기 위하여 2일에 1회씩 D<sub>2</sub>O ice의 온도를 약 80K~100K로 상승시켜서 D<sub>2</sub>O ice의

구성 성분을 재결합시킨다.

### 3. 냉중성자 연구 및 응용

중성자는 투과성이 강하여서 재료내에 존재할 수 있는 미세한 결함이나 기포를 내부 깊은곳까지 면밀히 조사하는데 이용될 수 있다. 중성자는 수소와 중수소를 구별할 수 있어서 고분자화학 연구와 분자생물학 연구에 매우 유리하다. 또한 중성자는 자성물질과 상호 작용할 수 있어서 재료의 성질을 매우 정교하게 연구하는데 이용될 수도 있다. 이와같이 다른 어떤 기술과도 견줄수 없는 방식으로 모든 물질내에 원자규모를 면밀히 조사할 수 있다. 근래에 와서 보다 더 다양한 연구를 위하여 긴 파장과 낮은 에너지를 갖는 냉중성자의 이용에 관한 관심이 높아지고 있다. 이러한 냉중성자는 고분자 화합물 및 생물학적 구조, 분자 집합물의 완만한 운동 그리고 기초물리 및 양자터널효과 등을 연구하는데 이용된다. 냉중성자의 긴 파장으로 인하여 물체의 경계면에서의 전반사 작용은 냉중성자를 수십 m까지 수송하여 한 지점에 집중될 수 있도록 유도하는 역할을 한다. 특히, 냉중성자가 새로운 연구 분야에서 각광을 받게 된 연유는 에너지 및 사이즈 분해능이 각각  $10^5$ 배 및  $10^3$ 배

로 증가될 수 있는 특성에 있다. 이와같이 증가된 분해능은 고체 및 액체상 고분자 화합물의 구조, 금속합금내 침전물의 크기 및 분포상태, 합성물의 구조, 금속 creep 및 피로의 초기단계, ceramics의 미세균열 및 농축도, 자성과 초전도성의 공존상태, 미세다공성 재료의 구조, 고체의 터널링 및 상변환, 고체 및 액체중의 분자거동, 고체내 원자의 확산 등에 관한 연구를 가능하게 하여 준다.

저자는 NIST에 핵화학 연구분야에서 냉중성자를 이용하여 depth profiling과 prompt-gamma 방사화 분석 연구에 참여한다. 현재, NIST의 냉중성자 연구시설에서 가동중에 있는 연구장치는 다음과 같다.

- (1) Neutron Reflectometer
- (2) 8m Small Angle Neutron Scattering (SANS) Instrument
- (3) 30m SANS Instrument (2 sets)
- (4) Spin Polarized Inelastic Neutron Scattering (SPINS) Instrument
- (5) Prompt-Gamma Spectrometer
- (6) Time-of-Fight (TOF) Spectrometer
- (7) Neutron Lifetime Experiment Instrument

NIST는 추가하여 1993년과 1994년에 걸

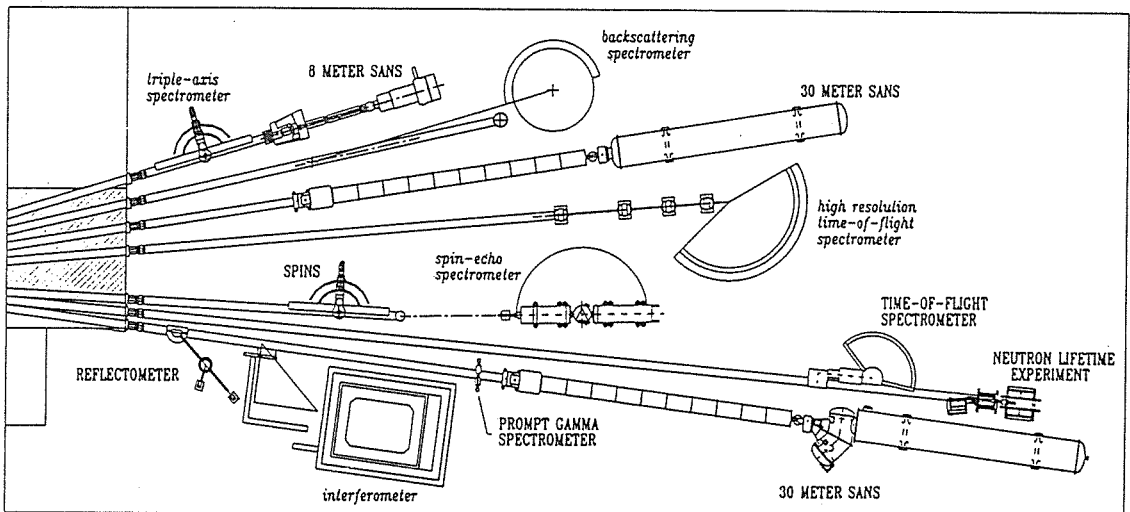


Fig. 4. Floor plan of the CNRF on completion.<sup>(4)</sup>

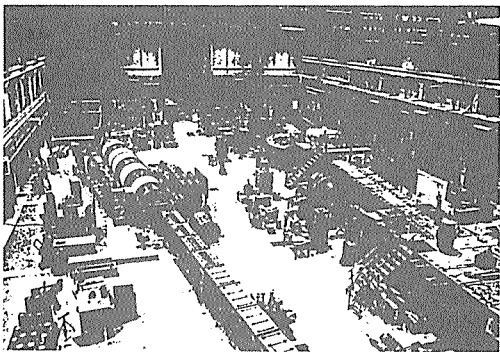
쳐서 Polarized Triple-Axis Spectrometer, High Resolution Time-of-Flight Spectrometer, Neutron Interferometer 등의 연구장치를 설치할 계획이다. Fig. 4에서는 NIST의 냉중성자 연구시설이 완성될 때의 CNRF내의 12개 연구분야의 시설배치를 보여주고 있다. 한편, Neutron Depth Profiling Instrument는 NIST 연구용 원자로 건물내에 배치되어 있다.

#### 4. 맺는 말

선진국에서는 이미 신화학물질, 통신 및 전산, 교통 및 우주항공, 그리고 첨단기술용 자성물질, 소형축전지용 이온도체 등의 관한 연구를 위하여 여러 산업체와 대학이 냉중성자 연구에 관련되어 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. The guide hall (a) looking toward the reactor confinement building; (b) looking away from the reactor confinement building.<sup>(4)</sup>

예로서, 미국의 GE와 Rockwell International은 제트엔진용 turbine blade 연구에 냉중성자를 도입하고 있으며 Allied Corp.에서는 첨단기술용 자성물질이라는 고급신소재 개발을 위하여 냉중성자 연구에 참여하고 특히, 30m SANS Instrument는 NIST와 EXXON 및 University of Minnesota가 공동으로 제작·설치하여 small angle neutron scattering 연구에 활용하고 있다. 2000년대에 과학 선진국 대열에 진입하려는 우리나라에서도 냉중성자 연구시설이 조속히 설치되어 산·학·연이 상호 보완적으로 냉중성자 연구 및 개발을 적극 추진·수행함으로써 “과학기술의 선진국화”라는 국가적 소망을 이룩하는데 냉중성자 연구와 그 응용이 한몫을 담당할 수 있기를 바라는 바이며 끝으로 독자들의 참고를 도모하여 NIST가 1994년까지 완성을 서두르고 있는 냉중성자 연구시설의 사진전경을 Fig. 5에 소개합니다.

#### 참고 문헌

1. I. G. Schroder, NIST Cold Neutron Research Facility, Private Communication, 1987.
2. 황선태, “극저에너지 냉중성자에 의한 미세구조 측정.” 측정표준 제12권 제3호, 1989.
3. J.M. Rowe, NIST Reactor, Private Communication, 1991.
4. H.J. Prask, et al., “The NIST Cold Neutron Research Facility,” J. Research of NIST Vol.98. No.1, 1993.