

# 기초·응용 연구를 위한 중성자 빔 -ORPHEE 원자로

B. FARNOUX  
M. MAZIERE

CEA

70

년대 말 ORPHEE 원자로가 설계되었을 무렵 중성자 빔은 차세대 중성자 원으로서 기초 및 응용 연구에만 사용되었다.

이러한 용도 때문에 ORPHEE 원자로는 접속 및 수평 빔관(tangential and horizontal beam tubes), 냉/난원(hot and cold source)과 냉중성자(cold neutron) 유도기와 같은 최신식 실험 장비를 갖추게 되었다.

CAE(프랑스 원자력위원회)에서 가동해왔기 때문에 일부 유럽을 포함한 프랑스 과학계에서는 국가적인 차원의 장비라 하겠다.

15년간 지속적으로 사용해 오는 동

안 개발 계획을 추진중에 있으며, 그 개발 목적은 다음과 같다.

첫째, 기존의 장비를 개량하고, 둘째, 향후 최소 15년간 ORPHEE 중성자원을 최상의 등급으로 유지하기 위해 기존 빔을 개량하여 새로운 빔을 개발함에 있다.

## ORPHEE 원자로

ORPHEE 원자로는 중성자 빔을 이용한 기초 및 응용 연구용 중(medium) 선속 중성자원이다.

이는 Grenoble의 고선속 원자로(HFRG)가 개발된 후 몇 년뒤인 70년대 말에 설계되었는데, HFRG와 같은 최신형 원자로의 특수 기능(소형의 풀형 원자로 구간, 접속 빔 관, 냉/난원, 중성자 유도기 등)들이 응용되었다.

이 최신 기능 덕택에 ORPHEE 원자로는 아직까지 가장 우수한 중 선속

중성자원으로 꼽히고 있으며, HFRG를 이상적으로 보완해 준다.

15년간 지속적으로 가동시킨 결과, 이제는 모든 중성자 빔에 24가지의 계획 장비를 포함, 30가지의 실험 장비를 갖추고 있다.

이 설비들은 「Commissariat à l'Énergie Atomique(CEA)」와 「Centre national de la Recherche Scientifique(CNRS)」의 공동 실험실인 「Laboratoire Leon Brillouin」에서 사용하고 있다.

이 중성자원의 수명은 30년 이상으로 예상하고 있으며, 원자로의 부분적인 재개발과 통합된 설비의 현대화 프로그램이 진행중이다.

미래 유럽형 제 3세대 중성자원의 예비 연구 프로그램의 목적은 중성자 빔의 질을 높이고, 빔 위치의 수를 증가시켜 향후 15년간 최신형 중성자 빔을 제공하는 데 있다.

다음은 현대화 프로그램에 대한 세

부 설명이다.

ORPHEE 원자로는 기초 및 응용 연구에 필요한 강 중성자 빔을 제공하기 위해 특별히 설계된 Brookhaven(HFBR 1965)과 Grenoble(HFRG 1971) 이후 세번째 원자로이다. 71년 연구에 착수하여 76년에 제작되었다.

이 원자로는 80년 12월 19일에 처음 평가받은 이래 81년 7월부터 전력 가동되었다.

원자로 설계는 HFGR과 유사하다. 소형의 고농축 우라늄 중심핵은 중수

감속재로 둘러싸여 있어서 소량의 고열 선속을 제공한다.

그러나 소형 중심핵은 경수로 냉각되고, 168개의 MTR형 동일 연료판들로 구성된다는 특징이 있다.

MTR형은 두가지 종류(표준-24개 판, 조정-18개 판)의 높이 요소에 포함된다.

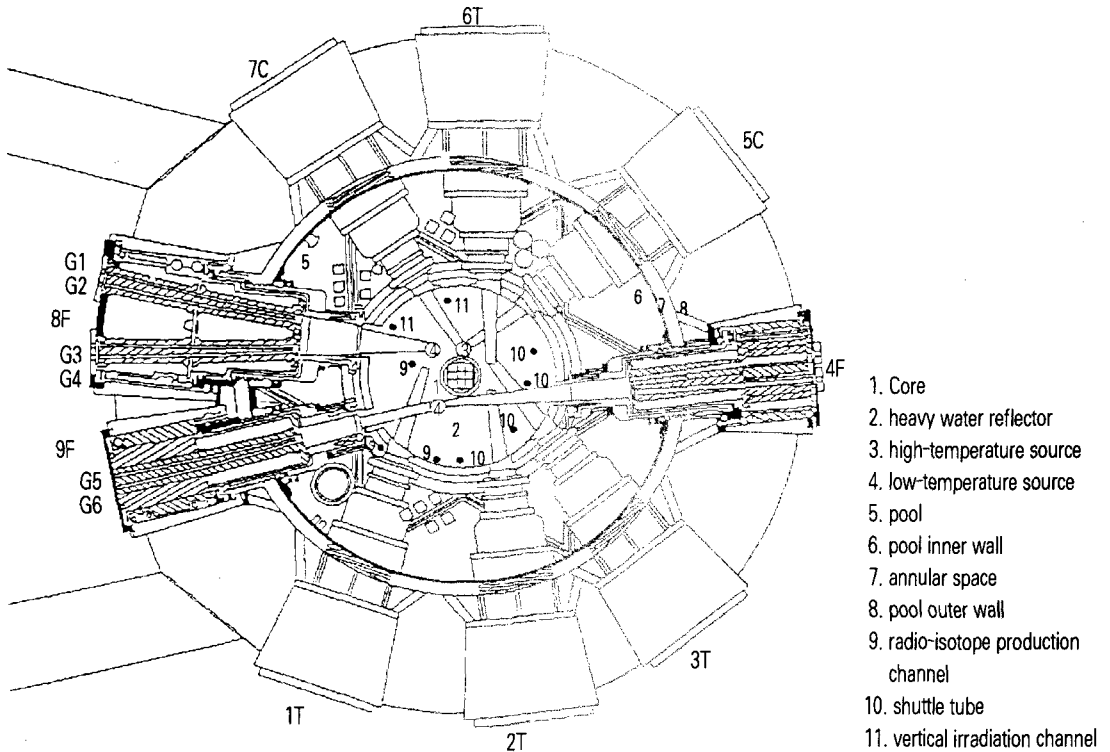
각 판은 측면 길이 82.4mm의 사각형이다. 8개 판은 측면 길이 25cm인 사각형 지르칼로이(Zircalloy)판 표면에 배열되어 있으며, 연료판에 대한 힘의 이상적인 분산을 위해 베릴륨

판이 중간에 위치하도록 고안되었다.

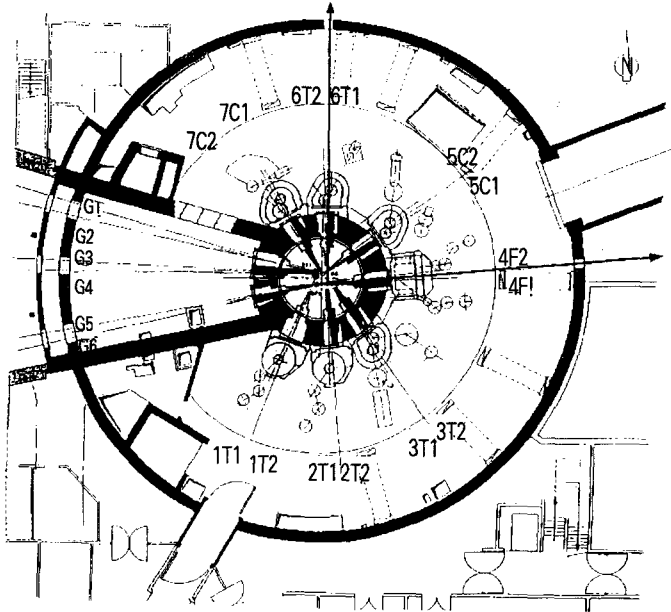
두 개의 연료판이 하프늄 판으로 대체된 네 개의 조절판은 구석에 위치한다.

측방향 힘의 분산을 개선하기 위해 측면판에는 붕소가 부분적으로 포함되어 있어 작동 주기의 2/3가 진행되도록 제어봉은 고정된 위치에서  $\pm 5\text{mm}$  범위내에서 이동하고, 감속재 내의 중성자 선속은 변화가 거의 없다.

감속재는 6톤의 중수를 담은 직경 2m, 높이 2m의 스테인리스강 탱크에



(그림 1)



(그림 2)

들어 있다.

생물체 보호 차원에서 경수 풀과 중수 콘크리트 벽을 사용한다(그림 1).

소스(source)와 실험 장치의 간격을 최소화하기 위한 노력을 기울인 결과, 원자로 구간 전체의 직경은 약 7m 정도이다.

접선 위치에 있는 9개의 수평 빔 출구에 의해 반사기 탱크에서 중성자 빔이 생성된다.

열출력은 14MW이고 최대 열중성자(thermal neutron) 선속은  $3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 이다.

원자로는 주기당 100일씩 2.5주기로 1년에 250일 동안 가동된다.

원자로는 열중성자를 위한 중 선속

원으로 제대로 설계되었다.

그러나 대부분의 실험 장치가 더 낮은( $E < 5\text{meV}$ ) 또는 더 높은 에너지( $E > 100\text{meV}$ )를 필요로 하므로 감속재가 부분적으로 저온(냉원) 또는 고온(난원) 감속재로 대체된다.

저온 감속재는 액체 수소인데, 헬륨 냉각기가 응축기 내의 수소 기체를 지속적으로 액화시켜준다.

안전 관리상 수소부(Hydrogen part)는 원자로 풀 내에 위치시킨다.

20K에서 액체 수소는 빔 관 앞부분의 수직 진공실 내에 있는 실린더 셀과 응축기 사이의 열흡수관을 통해 순환한다.

한번에 냉중성자 빔을 여러 실험 장

치에 제공하기 위해, 두 개의 냉원은 중심축에서 400mm 떨어진 중수 탱크 내에, 셀 형태는 직경 150mm의 진공실 내부에 위치한다.

중성자의 흡수량을 줄려면 실린더의 속이 비어 있어야 한다. 액체 수소층의 두께가 15mm 일 때, 대다수의 장치에 사용되는 파장 범위 7Å 이하의 중성자를 얻을 수 있다.

셀의 직경은 130mm이며, 최대 높이는 300mm이다.

난원은 직경 120mm, 높이 200mm의 원통형 흑연체 구간으로 중심핵에서 270mm의 간격에 위치한 수직 관이다.

이 흑연체 구간은 복사열만으로도 1,450K의 온도에 이를 수 있다.

8개의 수직 관 중 2개는 방사성 동위원소 생산, 4개는 활성화 분석, 그리고 2개는 방사선 조사에 의한 실리콘 도핑에 각각 사용된다.

알루미늄 합금으로 만들어진 9개의 수평 빔은 생물체 보호막을 통과한다(그림 1).

7개의 빔 출구는 원자로 실험관 내에 위치하며(그림 2), 그 중 4개는 열원에, 2개는 난원에, 3개는 냉원에 있다. 각 빔 포트는 2개의 중성자 빔을 제공한다.

사용하는 중성자 빔의 총 수는 11개로 열원에 6개, 냉원에 2개, 난원에 3개이다.

냉원에 위치한 다른 2개의 빔은 6개의 냉 중성자 빔을 커다란 실험관에

제공한다.

이 때 사용되는 중성자 유도관은 진공실로 사용할 수 있을 만큼 두꺼운 니켈 코팅 붕소화 실리콘 유리관으로 만들어졌고, 곡선으로 이루어졌다.

**실험기구 설치**

중성자 빔에는 총 24개의 장비가 설치된다.

10개는 원자로 관에, 14개는 중성자 유도관에, 2/3 이상은 냉중성자에, 5개는 열중성자에, 3개는 난중성자에 사용된다.

그 중 3개는 외국 기술진(독일과 오스트리아)에 의해 설치, 가동되었다. 설치 가능한 장비 유형은 아래와 같이 다양하며, 각 장비의 수는 괄호 안에 표시되었다.

**1. 분말 회절(diffraction)**

분말 회절에는 3개의 회절 분석기가 사용되는데, 2개는 열중성자에 1개는 저온 유도관에 필요하다.

분말 회절은 결정학·자기학·상전이(phase transition) 연구에 주로 이용된다.

한 장비에는 수 초내에 상전이를 확인할 수 있는 고감도의 검출기가 설치된다. 다른 하나는 다양한 시준 장치와 함께 20개의 헬륨3 검출기로 구성된 장비가 설치된다.

구조 연구에 사용되는 회절 분석기는 원자로 홀에 위치하며, 열중성자

빔을 사용한다. 그 주요 목적은 구조물의 변형과 재결정성을 특정 짓는 데 있다.

냉중성자 유도관에 위치한 또 다른 회절 분석기는 대량 물질의 잉여 응력 측정에 사용된다.

이러한 비파괴 검사 기술은 빠른 속도로 발전하고 있으며, 열이나 기계적인 조작 또는 용접으로 생기는 변형을 연구하는 데 사용된다.

**2. 단(single) 결정 회절**

관례적으로 분극 중성자 회절 분석기는 고온 중성자 빔(0.86Å)에 위치한다.

초전도 자기는 견본물에 6T 자기장을 형성한다. 이러한 기술은 미세한 자기 구조값을 측정할 때 매우 높은 감도를 제공한다.

4주기 회절 분석기는 두번째 중성자 빔을 사용해 같은 빔 출구에 장치한다. 실질적으로 중요한 것은 높은 임계 온도(Tc)를 갖는 초전도체의 구조적 성질을 연구하는 것이다.

단결정 회절은 원자의 위치, 분포 확률, 다른 물리·화학적 성질과 연관된 열 진동을 정확히 판단하는 데 사용된다.

**3. 확산 산란(scattering)**

두 개의 회절 분석기는 냉중성자 유도 빔에 설치되어 화학적인 단파장 범위 계수에 사용된다.

원자로 홀의 고온 중성자 빔에 있는

세번째 회절 분석기는 무정형 또는 액상 조직에서의 단파장 범위 계수 연구에 주로 사용된다.

**4. 작은 각(small angle) 산란**

3개의 냉중성자 유도관의 끝부분에 위치한 3개의 장비는 광역 검색기와 기계적인 파장 선택기를 사용한다(4~20Å범위내).

이들은 약간 응축된 물질 연구(용액, 경계면, 젤, 액정상, 생물에서의 콜로이드, 계면활성제, 중합체 등)에서 큰 분자의 형태를 연구하는 데 주로 사용된다.

네번째 회절 분석기는 핵 분극에 의해 대비 변화를 연구하도록 설계된 특수 장비이다.

**5. 반사 분석**

비행 시간 기술을 이용한 두 개의 장비가 중성자 유도관의 벤더 끝에 위치하는데, 액체 표면 구조의 농축 프로파일 결정에 이용된다.

세번째 장비는 흑연 단색화 장치와 함께 유도관에 위치한다. 자기층 구조 연구에 이용되는 이 장비는 분극 중성자와 분극 분석을 사용할 수 있다.

**6. 3중 축(axis)**

5개의 장비가 비탄성 중성자 산란을 측정하는 데 사용된다. 2개는 열빔에, 3개는 저온 빔에 위치한다.

이는 0.05~100 mV범위의 응축된 물질에 대한 역학적 성질을 연구하는

데 대단한 융통성을 부여한다.

**7. 비행 시간**

냉중성자 유도관의 끝에 위치한 이 장비는 반대 방향으로 회전하는 직렬 단절기 세트를 사용하는데, 설정된 회전 속도에 비해 두배의 분해력을 가지며, 비행 시간의 끝에 위치한 300여 개의 검색기를 이용한다.

이 장비는 주로 유사 탄성 산란, 터널링, 진동 상태의 밀도, 대부분의 낮은 에너지 전이 등에 응용된다.

**8. 스피인 에코(spin echo)**

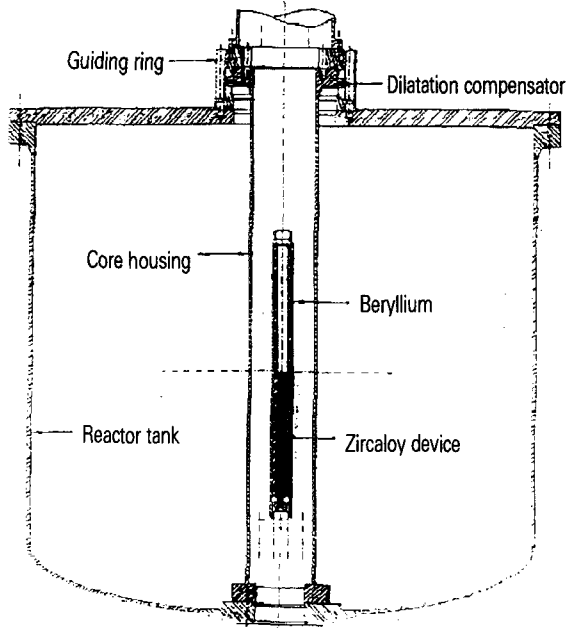
작은 각 중성자 스피인-에코 분광기는 냉 중성자 유도관의 끝에 설치되어 있다.

이것은 중합체, 미셀(micelles), 초유상액(micromulsions), 생물학적 물질 등과 같은 큰 분자의 역학 연구에 이용된다.

**부분별 재조명**

중심핵 요소는 사각형의 지르칼로이 관에 위치하며 다음과 같은 목적으로 사용된다.

- 연료 요소를 포함하고, 원래 위치를 유지하도록 한다.
- 경수가 중심핵을 통해 흐르며 냉각 작용이 이루어지도록 조정한다.
- 원자로 탱크내의 초기 경수와 중수 사이의 경수화 현상을 방지한다.
- 원자로에서의 위치 때문에 중심부



〈그림 3〉 ORPHEE 원자로의 수직구조도

덮개의 지르칼로이는 거대한 중성자 방출하에 놓이게 된다.

이러한 조건에서의 지르칼로이 상태를 파악하기 위해 베릴륨 반사기 구간 내부의 원자로 중심핵 가운데에 특수 장비가 설치되어 있다.

중심핵 가운데의 중성자 선속이 대부분의 중심부 덮개의 방사된 영역에서보다 20%정도 빠르기 때문에 방출되는 지르칼로이 성분 측정이 가능하다.

86년에 발표된 다른 연구 결과와 더 중요한 방사선량을 위해 합리적인 방출 과정을 따르는 외삽법(extrapolation)은, 중심부 덮개의 최대 수명은 예상했던 원자로의 수명 이전에도

달한다는 것을 증명해주는 계기가 되었다.

이 길이의 최대치는 부품(너트·볼트·감속재 탱크 뚜껑 등의 변형)의 일반적인 변형 정도를 유지하는 것을 기준으로 계산되었다.

최대 한계 길이는 대부분의 중심부 덮개 조사 영역의 1,000mm당 0.79mm이었다. 이 한계 길이는 98년 한 해 동안 도달할 수 있는데, 97년에 중심핵의 내부를 교체하기로 결정되었다.

중심부 덮개는 최고 3개월 정도의 간격으로 교체해야 하며, 주요 과정은 다음과 같다.

- 원자로 탱크 내의 중수를 비운다

음, 건조시킨 후 경수로 다시 채운다.

- 조절봉의 전기계 부품을 분해한다.
- 위치 조정 격자, 중심핵 격자 및 수렴관을 분리한다.
- 중심부 덮개의 위쪽 볼트를 모두 분해한 다음, 아래쪽 볼트를 해체한다 (원자로 탱크의 바닥에서 아래쪽 플랜지를 고정시킨다).
- 저장 풀로 중심부 덮개를 옮긴다.
- 원자로 탱크 내에 새 중심부 덮개를 장착한다.
- 누출 검사
- 원자로 탱크의 경수를 비우고 건조시킨다.
- 탱크내에 중수를 다시 채운다.

새 중심부 덮개의 설계는 방사내의 지르칼로이의 증가를 고려하여 수정되었다.

두 개의 풀무(concentric bellows) 사이에 누출 검색기가 있는 두 개의 중심 풀무로 만들어진 팽창 보정기(dilatation compensator)를 중심부 덮개의 상단에 위치시킨다 (그림 3).

### 현대화 프로그램

원자로는 현대식으로 설계되었고, 주기적·체계적으로 갱신해왔기 때문에 중성자원 자체에 대한 별다른 현대화 계획은 없다.

다음에 설명할 현대화 프로그램은 95년에 시작되었으며, 보다 효율적으

로 중성자 빔 사용에 주력하고 있다. 6가지 프로젝트가 고려 중이며, 각기 다른 진척을 보이고 있다.

첫번째 프로젝트는 냉중성자 빔 생산에 관한 것으로, 저온셀과 냉동공정을 전부 대체하여 완료할 예정이다.

나머지 다섯 가지 프로젝트

는 중성자 유도관을 통해 전송되는 중성자 빔의 개발을 목표로 하는데, 그 유도관은 표면을 거울로 코팅하는 새로운 산업 기술 개발에 힘입었다.

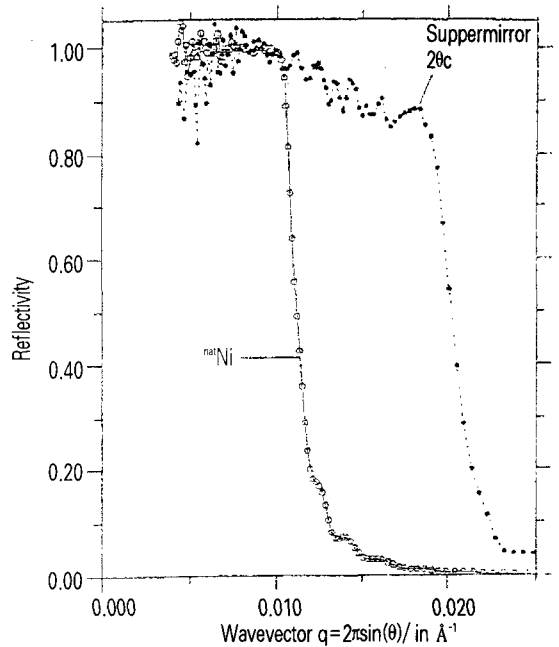
이 개발은 중성자 유도기 제조 회사인 LLB와 CILAS의 협력 연구 프로그램의 결과이며, 기존의 중성자 유도관과 새로운 중성자 설계에 적용된다.

### 1. 기존 중성자 유도관의 향상

설계 초기에 ORPHEE 원자로에는 6개의 곡면 냉중성자 유도관이 장착되었다.

빔의 크기는 기계적인 제한과 원하는 최대 빔 사이에서 절충되었다.

빔은 가로 2.5cm, 세로 15cm의 사



(그림 4)

각형이다.

현대화 프로그램의 첫 단계에서는 중성자 유도관에 사용되는 거울의 개발로 얻어진 새로운 결과를 이용한다.

이것은 같은 기하학으로 전송을 증가시켰으며, 새로운 빔을 추출하는 데 사용되는 벤더로 빔을 공유할 수 있다.

15년 이전에 설계되었을 무렵에는 천연 니켈(산화 붕소를 첨가/비첨가해서)로 코팅한 유리에 광택을 내서 중성자 유도부의 반사기로 사용하였다.

중성자 반사 기술로 알려진 표면 구조에 대한 세밀한 연구가 진행된 이래, 표면이 이제까지 사용된 기계적

공정의 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다.

유리 표면을 보다 매끈하게 하기 위해 새로운 공정이 설계되었다.

또 다른 개선은 천연 니켈 입계각의 두배 값을 갖는 우수하고 효율적인 다중 거울의 공업적 생산이 가능해진 점을 들 수 있는데, 이로써 유도관을 통해 전이되는 냉중성자 선속을 증가시킬 수 있게 되었다.

천연 니켈이 코팅된 거울과 우수한 새 거울에 대해 측정된 반사도 곡선은 <그림 4>에서 보여진 것과 같으며, 그러한 장비를 사용했을 때의 기대치 값들을 나타낸다.

초거울 범위의 반사값은 현재 90% 이상이다.

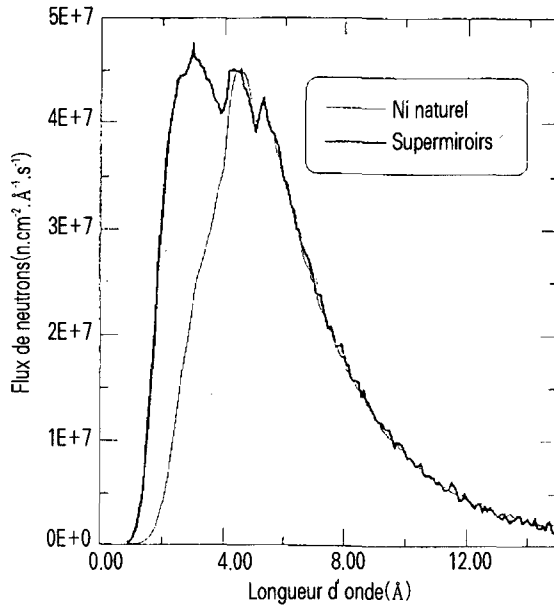
새로운 코팅 방법은 기존의 급한 곡면을 갖는 2개의 유도기에 대한 중성자 유도 요소의 대체를 위해 처음으로 응용이 이루어졌다.

고유 파장은 각각 6Å과 4Å인데, 작은 각 분광기에 적합하도록 정해진 값이다.

요즘은 일반적으로 더 짧은 파장이 사용된다. 과거엔 고유 파장을 변경할 수 있는 유일한 방법은 곡면의 반경을 증가시키는 것 뿐이었다.

초거울 코팅을 사용함으로써 이제 는 기하 구조를 변조하지 않고도 단파장 범위에서의 전이를 확장시킬 수 있게 되었다.

4Å의 중성자 유도기를 사용한 결과는 <그림 5>와 같다.



<그림 5>

초거울은 천연 니켈 거울과 대조되는데, 명백한 결과치가 얻어졌다.

이 유도기는 현재 가동중이며, 조만간 6Å 유도기로 대체될 계획이다.

전송 선속을 증가시키는 또 다른 방법은 곡선형 유도기를 직선형으로 대체하는 것이다.

이 방법은 91년 천연 니켈 코팅을 동위원소 니켈 58 코팅으로 대체한 2 Å 고유 파장을 갖는 유도기에 사용되었는데, 벤더와 함께 설치하여 수행했다.

유도관의 유도 요소는 모두 더 작은 직선 유도기(높이 85mm)로 대체되었다.

유일한 곡면부는 빔 포트에서 제한 구역의 출구까지 12.5m 이다.

이러한 변경 후에 유도기(전체 길이 56m) 끝에서 전체 선속이 30% 증가된 것으로 기록되었다.

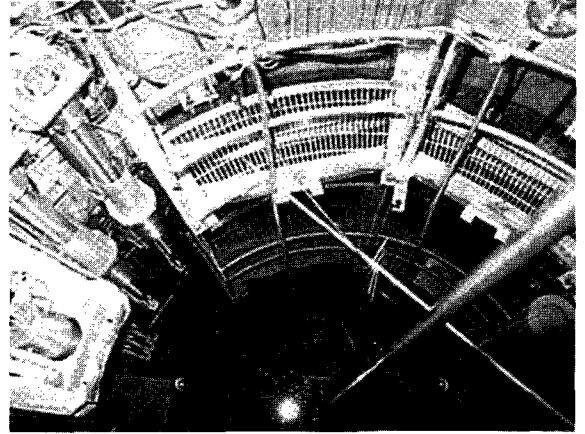
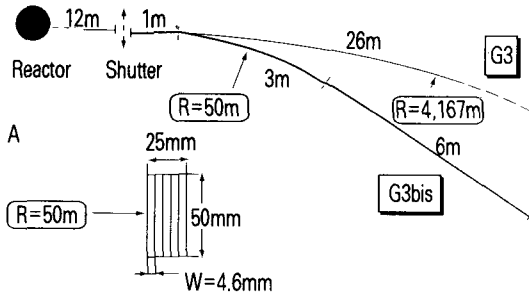
중성자 유도기 단말부의 수요는 막대하다.

6개의 모든 단말부는 채워져 있고, 새로운 유도 단말부를 얻는 유일한 방법은 기존의 유도기에 벤더를 접합시키는 것이다.

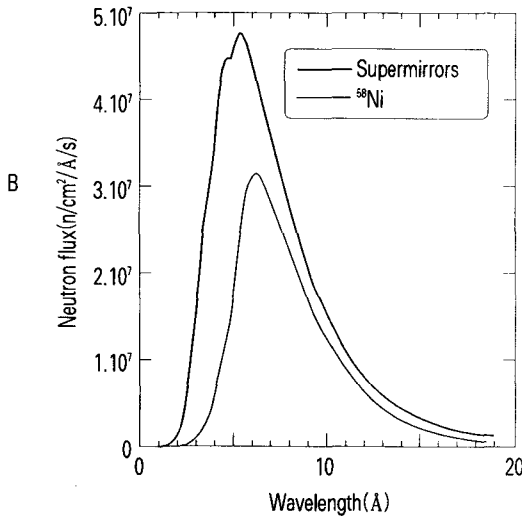
따라서 빔은 축소된 크기의 보통 유도기와 벤더 사이에서 수직 범위에서 공유된다.

고전적인 다중 채널 벤더는 각각 4.6mm 채널 5개로 구성된다. 더 짧은 굴곡 방사선 때문에 전송 빔은 단파장 면에서 보다 약하다.

세 개의 곡선형 유도기들이 세 개의



연구용 원자로 수조



(그림 6)

유도부에 장치되었다.

새로운 효율적 초거울 코팅은 유도기로 전송되는 파장 범위를 증가시킨다(그림 6).

## 2. 새로운 중성자 유도관

실험 장비의 위치가 딱 차있기 때문에 장비의 수를 늘릴 수 있는 유일한 방법은 새로운 중성자 유도관을 만드는 것이다.

최근의 초거울 코팅 개발로 냉중성

자 그 이후 프로젝트의 수정 작업에 대한 세밀한 연구가 진행되었다.

대부분의 모든 빔관이 수정되어야 하며, 빔의 크기는 40×80mm²에서 50×120mm²로 확장할 예정이다.

신중성자 유도 장치의 추가 삽입으로 인해, 신 냉중성자 3축 분광기 작동시 유지하기 위해 새로운 냉중성자 빔관이 필요하다.

이는 빔관 N°1을 냉원까지 확장시

자 뿐만 아니라, 고온 중성자에 대해서도 새로운 가능성이 생겼다.

가. 냉중성자

ORPHEE PLUS로 불리는 이 프로젝트는 첫 번째 IGORR 회의에서 초보 단계의 설계가 선보였다.

켜 제작할 수 있다.

이 빔관은 기존 빔관과 거의 직각을 이루며, 신소재 실린더 냉매는 이 두 냉중성자 빔관의 문제를 완전히 해결해 줄 것으로 기대하고 있다.

이 프로젝트에서 초거울로 코팅된 두 개의 직선형 중성자 유도 장치는 저온 빔관에서 추출할 예정이다.

원자로의 시준기가 이미 설계되었고, 초거울 중성자 유도기를 가득 비추기 위해 니켈 동위원소의 수렴 부분을 포함시킬 예정이다.

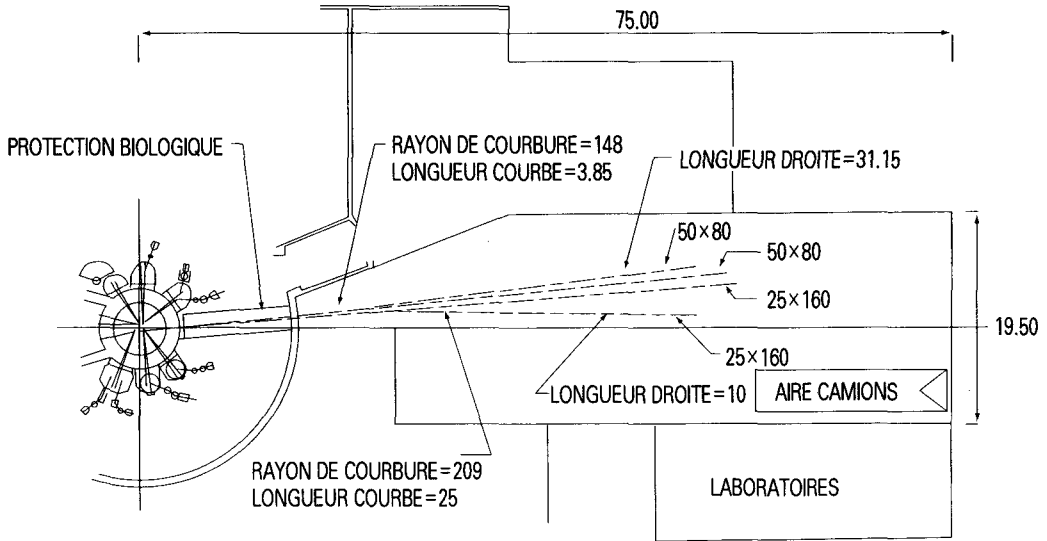
빔 크기는 원자로에서 봉쇄벽까지 높이 160mm, 길이 50mm이다.

이 벽 다음에는 2개의 유도기가 각각 2개의 유도기로 분해된다(그림 7).

따라서 새로운 중성자 유도관이 만들어지면 실험 장비 수가 30%까지 증가한다.

이 프로젝트는 현재 세부 설계 단계





(그림 7)

에 있고, 제작 결정은 유럽 연구진의 참여 가능성에 달려있다.

나. 열중성자

설계 초안 연구에서 열중성자를 외부 인접 구조물로 추출하는 것에 대한 가능성이 평가되었다.

추출은 고효율 초거울 코팅으로 가능할 것으로 예측하고 있다.

결론

유럽에서의 중성자 빔 미래 저장 가능성과 ORPHEE 원자로의 예측 수명(30년 이상)때문에 HFRG 보완물에 중성자와 파쇄(spallation)원을 제공하는 것이 필수적이다.

진행중인 현대화 프로그램은 냉중성자 생산 향상과 밀접한 관계가 있

다.

이는 평평한 냉원셀과 냉각 장치를 대체시켜서 이루어지는데, 기존 유도기에 세 개의 벤더를 장착함으로써 빔 위치 수가 급격히 증가했다.

초거울 코팅으로 기존의 거울 유도요소를 변경하면 전송 선속이 바로 증가된다.

이것은 가장 많이 휘어진 2개의 유도기의 경우, 가까운 시일내에 실현될 것으로 전망하고 있다.

다음으로 중요한 단계는 새로운 냉중성자 유도기 제작인데, 설계중인 프로젝트(ORPHEE PLUS)는 7, 8개의 새 분광기 설치로 LLB의 실험 장비의 수를 30% 정도 증가시킬 것이다.

이 증가로 과학계에 새로운 중성자

빔으로 접근할 수 있는 가능성을 제공한다. 이 프로젝트의 외국 기술진 참여 여부에 대한 논의가 진행중이다.

이 프로젝트와 관련하여, 원자로 내의 시준기 플러그에 대한 주요 재개발로 인해 원자로 주변 분광기 세트의 중성자 선속이 증가될 것이다.

시준기 플러그, 새로운 생체 보호막과 중성자 유도기, 유도관 등의 장비가 실현될 때까지는 약 3년이 소요되며, 원자로를 폐쇄하는 데는 다소 오랜 시간(3개월)이 필요하다.

아직 확정되지는 않았으나 가까운 장래에 완성될 것으로 예상하고 있으며, 열중성자 유도기의 빔관에서 또 다른 확장이 가능한 경우, 개발중인 고효율의 초거울 유도기를 사용할 수도 있다. ☺