# 日本의 原子爐 冷中性子源 設備

日本의 京都大學 原子爐實驗所에서는 日本 最初의 原子爐冷中性子源設備가 제작되어 현재 各種 試驗이 行하여지고 있다. 이 設備는 所定의 爐外試驗後 곧 爐體內 設置를 위해 옮겨질 것인데, 이 設備의 設計·製作·檢査에 관한 冷中性子源設備實施作業會가 조직되어 각종 작업·검사 등이 추진됨과 함께 實驗所의 原子爐安全委員會에 冷中性子源設備檢討小委員會가 설치되어 있다.

## 生物科學·材料科學·工學分野에 利用

冷中性子라는 용어는 일반적인 용어가 아닌데, 이것은 차가운 中性子라는 뜻이다. 통상 研究用原子爐의 爐心部 等에서 풍부하게 얻어지는 中性子는 熱中性子로서 常温(約25°C)程度의 에너지를 가진 중성자임에 대해 冷中性子는 에너지가 훨씬 작은, 즉 極低温(約－250°C)으로 냉각된 중성자로서 여러가지 試料에 부딪쳐서 散亂시키어 그 양상으로 原子·分子의 마이크로運動이나 構造를 조사한다. 中性子散乱實驗이나 中性子回折實驗은 고체의 物性을 조사하는 방법으로서 뿐만 아니라 최근에는 生物科學이나 材料科學 나아가서는 工學 등의 분야까지 그 이용이 현저하게 광범위해지고 있는데, 특히 冷中性子는 熱中性子(波長 約2Å, 1Å=$10^{-8}$cm; 에너지 約25meV, 1meV≒12K)에 비해 그 物質波(粒子가 항상 屬性으로 갖는 波)의 파장이 길고(5～10Å) 또 그 에너지가 작다(1～5meV)는 점에서 이들 새로운 研究分野에서 중요한 과제, 예를 들면 多數의 원자 모임인 生體分子나 高分子의 구조, 혹은 합금속의 원자배열방법, 이들 물질에서의 여러가지 원자·분자운동 등을 해명하는 실험수단으로 극히 유리하다. 이 때문에 中性子散亂 等의 實驗을 위해서 冷中性子源設置의 요망이 강하게 대두되었다.

이 冷中性子源設備의 기본원리는 20K의 극저온으로 냉각유지한 物質(冷減速材)에 熱中性子를 부딪쳐 그 核散亂에 의해 中性子를 減速冷却시킴으로서 冷中性子로 변환시켜 꺼내는 것이다. 冷中性子源은 西歐諸國에서는 이미 10년이전에 몇 대의 研究爐가 설치되어 그 實用化가 이루어져 왔다.

### 1. 準 備 研 究

日本에서 冷中性子源에 관한 연구가 시작된 것은 이미 20년이 넘었다. 中性子를 냉각하는 冷減速材로 어떤 物質이 우수하며 또 거기서 얻어지는 冷中性子는 어느 정도의 온도인가 등 주로 原子爐物理學上의 많은 研究가 實驗과 理論解析 양면에 걸쳐서 활발한 발표·토론이 계속되어 왔다. 이들 실험연구는 冷減速材를 約20K以下의 極低温에 냉각해야 하며 또한 그 둘레를 高真空으로 유지시켜 열의 침입을 막는 것이 필요한 등 종래의 原子力工學的인 實驗에서는 미경험의 기술영역이어서 실험에 있어서도 여러가지의 새로운 노력이 많았으나, 이것은 그 후 原子爐冷中性子源의 設計製作에 크게 도움이 되었다.

西歐 여러나라에서는 冷中性子源에 관한 원자

로 물리학적인 연구에 이어 곧바로 원자로중성자원의 실용화가 추진되어서 프랑스와 서독의 최첨단 연구소에 實用型原子爐冷中性子源의 설치가 실현되었다. 그동안 일본의 연구소에서는 비교적 소형의 냉중성자원을 電子線型加速器에 부설하여 실용화했다. mesitylen이라는 유기화합물을 冷減速材로 사용하여 이것을 냉동기에 직결해서 約15K로 냉각고화해서 사용하는 것으로서 냉각운전조작이 극히 단순하고 안전과 성능도 우수하며 長年冷中性子의 飛行時間 實驗 등에 활용되고 있다.

한편, 高出力의 原子爐內에 설치되는 冷中性子源은 냉감속재가 가속기에 비해 자리수가 다르게 강한 중성자선 등의 핵방사선을 쪼이게 된다. 이로 인해, 방사선분해생성물이나 방사선에너지가 내부에 축적하는 固化冷減速材는 사용이 부적당해지고 따라서 極低温에서 사용할 수 있는 액체수소나 액체중수소에 한정된다(액체헬륨은 수소·중수소에 비해 中性子減速의 성능이 극도로 떨어져 특수한 경우 이외에는 실용적이 아니다). 그래서 日本에서는 冷中性子源設備를 想定한 水素液化循環裝置를 試作하여 액체수소에 관한 熱流體的實驗을 하였다. 이 연구 및 경험은 日本 最初의 原子爐冷中性子源實現에 도움이 되고 있다.

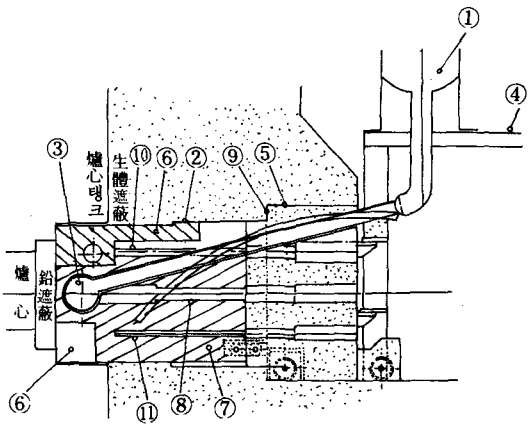
## 2. 基 本 設 計

日本 京都大學研究爐(KUR)는 定格出力5,000 kW의 輕水減速冷却型原子爐이다. 爐心表面의 熱中性子束이 $10^{13}$n/cm$^2$s를 넘으므로 여기에 설치하는 冷中性子源設備는 核放射線照射의 심각한 조건하에 놓이게 되어 안전성의 확보, 장시간 안정운전 등 모든 면에서 原子爐內挿入에 엄격한 요구를 만족시켜야 한다. 또한 이 설비는 제작에 앞서 原子爐施設로 감독관청에 설치허가(승인) 및 설계공사방법인가(승인)를 얻어야 했다. 이와 같은 기술적 과제 및 수속적 과제를 충족시키면서 기본설계에 있어서 이 冷中性子源의 냉중성자공급성능을 되도록 향상시키고자 하였다.

KUR에는 爐心과 接해서 重水設備 및 黒鉛設備라는 2개의 다른 방식의 熱中性子設備가 설치되어 있다. 重水와 黒鉛 모두 잘 알려져 있는 良質의 中性子反射物質이므로 冷中性子源은 이 두가지 설비중 하나의 설비내에 挿入하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 熱中性子束의 크기를 고려하면 爐心內가 좋으나 爐心內에서는 생성된 냉중성자를 이용하기 위해 꺼내는 단계에서 크게 불리한 외에 發生核發熱의 크기 및 核放射線照射損傷의 점에서도 爐心內는 조건이 대단히 불리하기 때문이다.

重水設備는 約1m$^3$의 重水가 들어있는 탱크가 爐心과 직접 면하는 구조로 되어 있다. 또 設備側에서는 爐室內 및 爐室外에 냉중성자를 꺼내어 이용하기 위한 공간을 확보하는 것도 곤란하다. 한편, 黒鉛設備는 斷面 1.5m×1.5m속 깊이 2미터인 黒鉛集合體와 爐心과의 사이에 두께 20cm의 鉛遮蔽를 가지고 있어서 爐心에서부터의 강한 감마선이 흑연집합체 내부에서는 몇 자리 약해진다. 더우기 黒鉛設備側에는 爐心外에 냉중성자이용건물을 설치할 여유가 있다. 이러한 이유에서 KUR의 냉중성자원설비는 흑연설비내에 挿入할 계획으로 그림1에서와 같이 爐體內挿入部의 구조를 설계하기로 했다.

그다음 사용하는 冷減速材로는 수소, 중수소 또는 이들 혼합물이 고려되는데, 이미 지금까지의 爐物理學的研究에 의해서 이들 각각의 냉중성자냉각성능 및 이에 필요한 냉감속재의 체적은 대체로 알려져 있다. 즉, 液體水素는 冷中性子利得이 10배정도로 그다지 크지 않으나, 그대신 필요한 冷減速材量도 1ℓ정도이다. 한편, 液體重水素는 이상조건에서의 냉중성자이득이 약150배이상으로 극도로 크나, 여기에는 약40ℓ이상의 液量이 필요하다. 따라서 구체적인 설계조건




〈그림 1〉 冷中性子源設備 爐體內插入構造概略圖

| 番號 | 名稱 |
|---|---|
| 11 | 長期照射孔 |
| 10 | 熱中性子비임孔 |
| 9 | 壓氣輸送管 |
| 8 | 冷中性子비임孔 |
| 7 | 可動部黑鉛集合體 |
| 6 | 固定部黑鉛集合體 |
| 5 | 遣 蔽 室 |
| 4 | 耐 震 架 臺 |
| 3 | 冷減速材槽部 |
| 2 | 冷減速材移送管部 |
| 1 | 凝 縮 器 |

하에서 더욱 상세한 解析計算 등을 하여 이들로 부터 가장 적절한 냉감속재의 종류(수소·중수소 혼합비) 및 冷減速材容器(冷減速材槽)의 形狀·크기를 명백히 하였다. 그 결과 약4ℓ의 液體水素·重水素混合物을 사용해서 냉중성자비임을 꺼내는데 가장 알맞는 비임放出面積을 가진 冷中性子源이 얻어졌는데, 이 냉중성자이득은 액체수소 뿐일때보다 대폭 상회한다는 것이다. 그래서 이에 따라 기본설계를 추진하였던 것이다.

原子爐冷中性子源의 設計製作에는 여러가지 면에서 매우 엄격한 요구를 만족시킴이 요구된다. 黑鉛設備內의 爐心근방까지 삽입하는 冷減速材槽部 等은 중성자를 헛되게 흡수하는 정도, 즉 中性子吸收斷面積이 작고 또한 장기간 사용후에 생성되는 放射化量이 되도록 적은 元素로 된 재료를 사용할 필요가 있다. 또한 冷減速材槽 等 長期間極低温下에서 강한 핵방사선에 쪼이는 最重要部分에서 가장 신뢰할 수 있는 部品接合組立方法은 용접이라고 할 수 있는데, 용접성은 사용재료의 선정 등에 있어서 가장 고려해야 할 인자의 하나이다. 동시에 사용온도 범위도 중요한 因子이다. 이들 모든 면에서의 검토결과, 日本의 冷中性子源設備에서는 冷減速材槽部에서 凝縮器部까지 一體인 알루미늄合金製多重殼溶接構造를 채택했다.

液化冷減速材를 貯留하고 냉중성자 성능상 가장 중요한 冷減速材槽는 中性子 性能上 最適形狀인 薄肉容器로 하고 또한 그 加工組立에는 耐壓強度에 특히 留意한 방법을 사용했다. 이 容器의 내압성능이 매우 우수하다는 것은 시험용 용기의 파괴시험에 의해서 확인되었다. 그 外側의 眞工耐壓容器는 내압성능상 더욱 強固히 만들어졌고, 強度上 理想的인 球形으로 되어 있다. 또 冷減速材를 液化供給하는 凝縮器는 저온운전성능상 가장 중요한 장치인데, 이것의 형식 선정에 있어서는 實績, 信賴性 및 液化性能 等을 중시하고 구조가 단순하며 실적·성능이 모두 우수한 shell and tube型을 선택했다. 또 이 凝縮器의 설치위치 및 그 배치방향 등에 대해서도 여러가지 案을 비교한 결과 그림 1에서와 같이 爐體外의 耐震架臺上에 堅型配置키로 했다. 凝縮器와 冷減速材槽部를 冷減速材移送管部의 설계에는 斷熱性能, 液移送性能, 耐震性能 및 放射線漏洩 等 여러 면에서 검토해서 그 결과 완만한 곡선의 同軸多重管으로 했다. 이로 인해 放射線漏洩의 저감화에 대해 매우 유리해졌다.

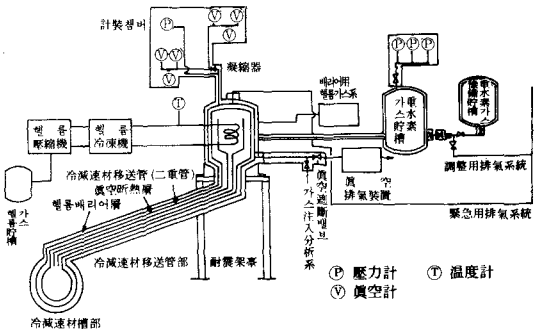
### 3. 安 全 對 策

原子爐施設의 설계에서 가장 중요한 사항은 안전대책이다. 더우기 장시간의 실험용에 제공되는 설비에서는 操作性 및 안전성·신뢰성도

마찬가지로 중요한 사항이다. 이 설비가 挿入設置되는 硏究爐는 이미 20년이상 안전하게 가동·이용되고 있으며 또한 다수의 실험설비가 부설되어 있는 爐이다. 이것을 개조해서 이 설비를 설치하는 것이므로 이 설비의 안전설계에는 한층 더 노력하였다. 이와 같은 관점에서 이 냉중성자원설비의 주된 계통은 그림2에서와 같다.

안전성의 면에서 특히 중요시해야 할 것은 냉감속재에 관한 水素防爆設計 외에 強放射線照射에 대한 배려 및 高眞空·極低温에서 장시간 작동하는 설비로서의 각종 검토 등이다. 먼저, 水素防爆設計의 기본선은 외부공기의 漏入防止및 水素·重水素의 누출방지이다. 이를 위해 저온의 수소계통은 그림2에서와 같이 眞空斷熱增에 의해 둘러싸여 있으며, 이 진공층은 진공도 확보와 엄중한 감시가 행해지고 수소계통 각부의 압력이 연속적으로 감시되도록 되어 있다. 그밖에 兩面의 누설방지대책을 이 시설에서 근본적으로 달성하기 위해서 gas barrier방식을 채택하고 있다. 그림2에서와 같이 이 설비중 常時 수소 또는 중수소를 보유하고 있는 중요한 계통은 모두 기본적으로 닫혀져 있는 系로 하는 동시에 이들 系全體를 헬륨가스 또는 질소가스 배리어層으로 전체를 둘러싸서 외부공기와의 접촉을 단절함과 동시에 내부에서 부터의 누설에 대해서도 민감하게 검지되도록 되어 있다. 헬륨은 水素液化温度에서도 기체이므로 極低温部를 둘러싼 眞空斷熱增에 배리어用 헬륨가스의 漏入이 발생하였을 경우에도 極低温部에 固着한다든가, 바로 眞空度劣化에 의해 검지된다.

信賴性의 面에 대해서 가장 중요한 것은 異常發生이나 狀態變化에 있어서 검지 및 각종 대처동작의 확실화이며, 이를 위해서 스페이스샤틀이나 原子力發電所에서 채택되고 있는 2 out of 3方式을 그림2에서와 같이 진공계 등 중요한 計測系統에 채택했다. 이 방식은 하나의 사




〈그림 2〉 冷中性子源設備系統概略圖

태를 검지하기 위해 3가지의 檢知器系統을 되도록 독립시켜서 설치하고, 이들로 부터의 신호 多數決로 상태를 판단하는 방식이다. 이 방식에 의해 계기 등의 단독고장이나 이상으로 인한 誤報·誤判斷의 確率은 훨씬 저감된다.

水素防爆의 기본적 대책으로 수소계 전체를 닫힌 계로 했는데, 이와 관련해서 중요한 부분은 眞空排氣裝置이다. 이 設備에서는 우선 運轉에 앞서 眞空斷熱層內의 殘留가스를 배기하기 위해 主排氣裝置로 터보分子펌프가 설치되어 있는데, 이외에 저온정상운동에 들어가서도 低温水素系統의 眞空斷熱層을 장시간 고진공으로 유지시키기 위해서는 용기표면 등에서 부터 미량의 out gas를 배기해 줄 필요가 있다. 그러나 이 배기를 위해 외부 대기중에 방출하는 루트를 설치하는 것은 만일의 경우 공기가 역류할 가능성이 있어 바람직하지 못한데다가 이 공기 漏入이 아주 조금씩이라면 저온부에 固着蓄積하기 때문에 檢知하기가 매우 어려울 것으로 생각된다. 이를 위해 이 설비에서는 저온운전에 들어가는 시점부터 主排氣系統은 閉鎖하고 대신에 閉構造인 이온펌프의 補助排氣系統에 진공도 유지를 맡긴다. 이외에 수소·중수소를 導入·分析하는 조작과 설비의 冷凍液化運轉操作은 기본적으로 동시에 행하지 않을 뿐더러 계통은 수소계통과 이온의 양 구역으로 명확하게 구분되며, 각 조작·작업 및 감시를 혼동하는

일이 없도록 배려하고 있다.

안전확보의 기본선은 장치 및 조작이 단순하다는 것이며, 이를 위해 이 설비의 설계에 있어서 불필요하게 복잡화하지 않도록 주의했다. 이 설비의 순환시스템을 熱사이폰형의 매우 단순한 것으로서 단순히 닫혀진 용기내에 있는 가스를 冷媒에 의해 밖에서 냉각시켜 액화하고 이것을 重力에 의해 流下貯留하는 것이다. 또 이 冷却系統도 터빈식 냉동기 및 스크루式 壓縮機라는 回轉型機器의 채택에 의해 往復動型에 비해 구조적으로 대폭 간단화되어 있다. 다만, 安全制御系統은 여러가지의 상태감시 및 連動機構의 확실화를 위해서 약간의 복잡화는 면치 못했다.

## 4. 製作 및 品質管理

原子爐冷中性子源設備는 冷減速材조部 等의 본체주요부분, 중수소가스貯槽 및 豫備貯槽, 헬륨냉동기 및 電氣計裝設備 等으로 구성되어 있다. 다음은 원자로내에 설치하는 冷減速材槽部 等 本體主要部分의 제작 및 품질관리에 대해서 기술한다.

### (1) 製 作

冷減速材槽部 等 本體主要部分의 外觀圖를 그림3에 나타내었다. 冷減速材槽部 및 移送管部는 爐體內에 설치되며, 凝縮器部 및 主排氣裝置, 補助排氣裝置, 計裝設備는 爐體壁外의 耐震架臺上에 설치된다. 冷減速材槽部 等 本體主要部分의 제작을 추진함에 있어서는 다음과 같은 설계상의 기본방침을 설정했다.

① 原子爐內에 설치하여 極低温高眞空下에서 실질상 가스누설 제로를 보증하기 위해 冷減速材槽部, 移送管部 및 凝縮器部의 접속은 시일材를 사용하지 않는 溶接一體型構造로 한다.

② 使用材料는 방사화가 적고 용접성이 좋은 알루미늄合金(A5052)을 사용한다.

③ 爐體內에서의 發熱量을 적게 하기 위해서 冷減速材槽部 및 移送管部의 板두께는 강도상 허용되는 최소의 두께로 한다.

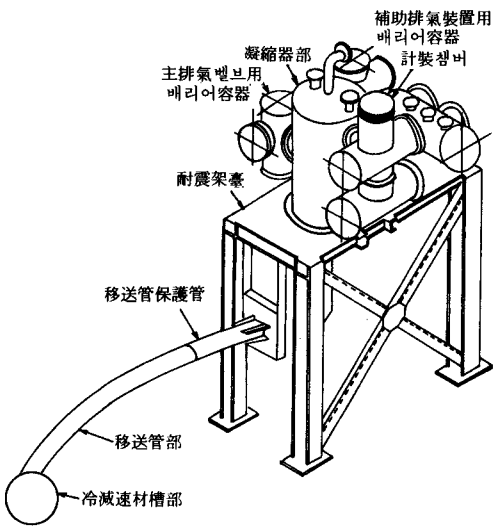
④ 耐震強度는 水平震度 0.6, 垂直震度 0.3에 견디는 것으로 固有振動數가 20Hz以上이 되는 구조로 한다. 주요한 지지점은 耐震架臺이다.

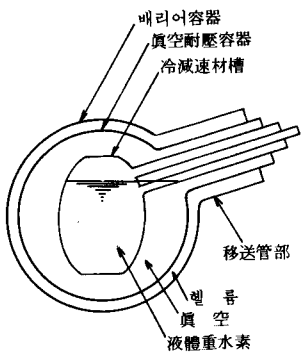
⑤ 冷減速材槽의 形狀은 冷中性子利得이 크고 또한 冷減速材(液體水素·重水素混合物)의 貯液量當의 냉중성자를 꺼내는 部面積이 최대가 되도록 球에 가까운 楕圓體構造로 한다.

⑥ 冷減速材槽部의 구조는 眞空耐壓容器와 배리어容器를 설치한 3重殼構造로 한다. 그 구조는 그림4와 같다.

⑦ 移送管部는 液降下管과 가스上昇管을 설

〈그림 3〉 冷中性子源本體主要部分外觀圖




〈그림 4〉 冷減速材槽部構造圖

치하고 또 眞空耐壓管과 배리어管을 설치한 4重管構造로 한다. 이송관부의 외경은 중성자나 감마선의 外部漏洩을 줄이기 위해 가능한한 최소로 한다.

⑧ 凝縮器部는 冷減速材槽部와 마찬가지로 眞空耐壓容器와 배리어容器를 설치한 3重殼構造로 한다.

다음은 실제의 제작방법이다.

① 冷減速材槽部, 移送管部 및 凝縮器部는 알루미늄합금을 사용한 溶接一體型構造이기 때문에 용접부의 관리, 시행에서 各 機器의 조립순서 등을 충분히 검토하여 실시했다. 특히, 凝縮器部와 移送管部의 접합부에서는 상당히 곤란한 자세에 의한 용접이 필요하게 되었는데, 용접부위의 방사선시험결과 JIS 1級의 판정기준에 합격하는 것을 제작할 수 있었다.

② 冷減速材槽部의 板두께는 核發熱을 최소로 하기 때문에 두께의 관리에 특별한 주의를 기울여서 제작했다. 제작도중에서 高精度의 超音波두께計를 사용해서 측정과 가공을 되풀이하였다. 測定點은 冷減速材槽全面에 걸쳐 100개소 이상을 측정했다.

③ 冷減速材槽에 설치되는 移送管取付用 노즐은 貯液位를 높게 잡을 수 있고 또한 냉중성자를 외부로 꺼내는데 방해되지 않게 3次元의 傾斜角을 가지고 성형해야 하며 노즐부의 가공방법을 확립하기 위해 試作品을 만들어 제작했다.

④ 移送管部는 螺線狀의 완만한 曲同軸4重管構造이다. 가공은 재료의 강도를 내리게 하지 않는 冷間加工을 채택했고, 加工器具도 新設計의 것을 사용했다.

⑤ 眞空耐壓管과 冷減速材移送管 사이에 설치하는 斷熱用 스페이서는 移送管部外徑을 가늘게 하기 위해 종래형의 것을 사용하지 않고 신규설계로 했다. 사용재료는 방사화가 적은 低Co-SUS材를 사용했고, 形狀은 스포우크 형상으로 했다. 스페이서에는 耐震設計上의 強度가 필요하므로 實機와 동일한 제조로트의 것을 사용해서 강도의 확인하였다. 시험 결과 破壞荷重 265kg을 확인할 수 있어서 想定되는 耐震用荷重 8kg에 대해 충분한 강도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 品 質 管 理

이 설비는 원자로내에 설치되기 때문에 품질관리를 엄격히 실시했다. 특히, 耐壓性·氣密健全性의 확인에 관해서는 電氣事業法 및 高壓가스取扱法 등 압력용기를 규정하는 일본의 法·省令보다 각 기기의 중요도를 고려해서 적절한 기술기준을 준용하여 각 공정마다 검사를 실시했다. 검사내용은 재료검사, 용접부의 檢査, 耐壓·氣密試驗 및 두께·크기검사였는데, 다음은 특히 중요한 용접부의 검사와 耐壓·氣密試驗에 대해 기술하겠다.

① 溶接部의 검사에서는 開先檢査, 施工檢査, 機械強度試驗, 液體浸透探傷試驗 및 방사선검사를 실시했다. 冷減速材槽 및 眞空耐壓容器에서의 용접부에는 방사선검사가 100% 실시가능하도록 설계단계부터 검토를 행하였으며, 검사방법에는 여러가지를 연구하여 判定識別性을 시행에 의해 확인한 후 실시했다.

② 耐壓試驗에서는 특히 冷減速材槽에 설치된 移送管取付用노즐 및 冷減速材槽本體의 강도확인을 위해 實機와 동일한 제조로트의 것을 사용해서 강도확인시험을 하였다.

시험 결과, 破壞壓力 66kg/cm²G를 확인할 수 있어서 사용압력인 6kg/cm²G에서의 충분한 안전성을 확인할 수 있었다.

③ 氣密性의 확보는 이 시설의 성능을 보증하는데 있어서 키 포인트로서 이를 위해 高感度의 기밀성을 확인할 수 있는 헬륨漏洩試驗을 채택했다. 누설시험의 실시에 있어서는 冷減速材槽部가 3重殼構造이기 때문에 第1層에서 第3層까지 조립되는 과정에서 각층의 내부에 헬륨가

스가 잔류하면 移送管部 等을 접속해서 一體化해 나갈 때 그 후의 누설시험이 불가능해지기 때문에 工程中의 시험은 모두 眞空外覆法에 의해서 실시했다. 특히 冷減速材槽에서는 액체질소를 사용한 低温漏洩試驗도 실시하여 만전을 을 기했다.

## 5. 爐外運轉과 性能

### (1) 運 轉 經 過

爐外試驗을 위한 기기의 설치, 배관, 배선공사를 시공후 單體機器의 성능확인, 루프체크를 하고 그후 헬륨系統, 水素·重水素系統, 배리어系統의 가스置換에 들어갔다. 중수소계통의 가스는 이번의 爐外運轉에서는 高純度의 수소가스로 하고 系內眞空을 한후 일단 헬륨으로 치환하였다가 다시 진공으로 한후 高純度水素가스를 充塡했다. 充塡後의 가스純度分析에서 불순물은 gas-chromatograph의 檢出感度以下로 매우 양호했다. (gas-chromatograph의 檢出感度 $O_2$ 2.8ppm, $N_2$ 4.2ppm, $CH_4$ 7.6ppm, $CO_2$ 5.8 ppm).

이 가스의 치환과 병행해서 冷減速材槽 等 둘레의 眞空斷熱層의 眞空排氣를 행함과 함께 헬륨冷凍機系의 단독운전에서 냉동능력을 확인하고 마지막에 安全制御系統의 확인과 冷減速材槽로의 液體水素貯液의 종합성능시험을 실시했다. 그 동안에 일본과학기술청 입회하의 原子爐施設使用前檢査로서 組立, 單體作動, 總合作動 등 여러 검사가 행해졌으며 모두 합격했는데, 이들의 爐外運轉期間은 약1개월이었다.

〈表 1〉 熱負荷計算値(爐內設置時)

| | |
|---|---|
| 接続部熱傳導 | 92W |
| 凝縮器等熱輻射 | 113W |
| 스페이서熱傳導 | 16W |
| 트랜스퍼 튜브部熱負荷 | 24W |
| 核 發 熱 | 184W |
| 合 計 | 429W |

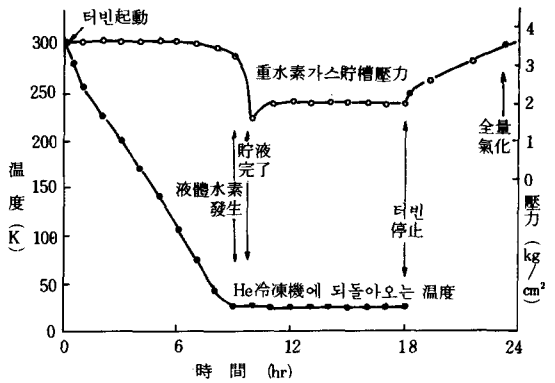
### (2) 性 能

爐外運轉의 목적은 앞으로의 爐內設置에 대비하여 설비의 성능이 안전하고 또한 충분한가를 확인하는데 있다. 특히, 응축기에서 액화된 수소를 길이 약4미터의 移送管 끝에 붙여진 밀폐용기의 冷減速材槽에 안정되게 貯液시키는 것이 가장 중요한 포인트이다.

이 貯液運轉에 앞서서 헬륨冷凍機單體의 냉동측정능력을 冷凍機內의 바이패스밸브와 負荷調整用 히터를 사용해서 실시했다. 필요냉동능력은 表1의 各部熱負荷計算値에서 22K 以下에서 440W以上으로 했는데, 측정결과는 21.8K에서 510W로서 충분히 사양을 만족시키는 것이었다. 表1의 열부하에서 접속부의 열전도가 약간 많은 것은 凝縮器가 알루미늄합금제라는 것과 耐壓을 고려해서 厚肉管으로 되어 있기 때문이다. 또, 熱輻射로는 核發熱에 의한 주위기기의 온도상승을 전망하고 있다. 이 冷凍機單體의 豫冷時間은 약1시간이었다.

그림5는 헬륨냉동기에 의해 冷減速材槽의 豫冷, 貯液과 運轉終了後의 昇温結果를 나타낸 것이다. 온도는 冷減速材槽를 직접 측정한 것이 아니므로 凝縮器를 냉각후 헬륨냉동기로 되돌아온 헬륨가스의 온도를 대표로 표시했다. 압력은 중수소가스貯槽의 압력인데, 이것은 응축기와 직접배관으로 접속되어 있으므로 냉감속

〈그림 5〉 冷減速材槽의 冷却貯液運轉結果



재조의 압력을 나타내고 있다고 생각해도 좋다. 터빈起動에 의한 냉각개시부터 약9시간후에 되돌아오는 헬륨가스의 온도가 27K가 되며 중수소가스貯槽의 압력도 3.6kg/cm²에서 급격히 내려가기 시작해서 냉감속재조에 액체수소가 모이기 시작했음을 알 수 있다. 貯液完了는 중수소가스저조의 압력이 2kg/cm²인 시점이므로 貯液 開始부터 약40분에서 規定量이 貯液하게 되므로 貯液完了까지의 시간은 터빈起動부터 합계 약10시간이었다. 이 貯液開始時에는 上方에 있는 응축기에서 부터 액체수소가 降下, 移送管과 냉감속재조는 이 액체수소로 냉각되게 되는데 흐름이 二相流가 되기 때문에 不安定現象이 염려되기도 했으나 결과는 극히 안정된 것이었다. 이것은 凝縮器의 液降下部의 構造, 移送管의 口徑選定 등이 적절했다는 것을 증명하고 있다.

한편, 冷減速材槽의 豫冷과 貯液時間에 대한 계산치는 헬륨냉동기의 냉동능력을 각 온도 레벨에서 고려해서 凝縮器, 移送管, 冷減速材槽 및 수소가스의 냉각에 관해서 계산해 보면 貯液開始까지에 8.5時間, 貯液에 1.5시간 總10時間이며 實測値와 거의 일치했다. 그리고 냉감속재조의 液體水素貯液에 관해서는 중수소가스貯槽의 압력강하로 판단되는데, 簡易中性子源($^{98}Cf$)를 사용한 冷減速材槽部의 中性子透過率變化에 의해서도 확인되었다.

冷減速材槽의 액면유지는 중수소가스 貯槽의 압력을 일정하게 되도록 헬륨냉동기내의 負荷調整用 히터와 헬륨온도와의 카스케이드制御로 행하고 있는데, 제어성은 매우 안정된 것임이 확인되었다. 冷却運轉終了後의 액체수소는 輻射熱에 의해 증발해가는데 전량증발시간은 5시간10분으로서 이것도 계산치와 잘 일치했다.

眞空斷熱增의 진공성능은 이 설비가 수많은 연결부를 사용하고 있다는 것과 측정하는 진공계가 防爆을 위한 배리어를 가진 計裝챔버內에 설치되어 있다는 것, 계장챔버와 응축기의 眞空耐壓容器가 計測導管(口徑 50A, 길이 약4m)으로 접속되어 있다는 등 곤란한 조건이 겹쳐서 성능달성에 가장 시간을 요했는데, 마지막으로는 스패트 이온 펌프 單獨排氣에 의한 維持眞空度(冷減速材槽 等을 냉각하기 전의 상온상태에서)로 $1.2\times10^{-3}$Pa가 얻어졌다.

〈表2〉 性 能 確 認 結 果

| 項 目 | 判 定 基 準 | 測 定 結 果 |
|---|---|---|
| ①헬륨冷凍機의 冷凍能力 | 22KW以下에서 440 W 以上 | 21.8K에서 510W |
| ②冷減速材槽의 予冷時間 | 10時間以內에 貯液完了 | 9 時間 40分 |
| ③液面安定維持 | 核發熱等槽擬負荷 195W以上에서 液面維持할 수 있을 것 | 滿液狀態에서 8 時間의 連続運轉하여 實施하여 液面維持를 確認 |
| ④昇 溫 時 間 | 約6 時間程度에서 液體水素가 氣化할 것 | 5 時間 10分 |
| ⑤維 持 眞 空 度 | $1.3\times10^{-3}$Pa以下 ($1\times10^{-5}$Torr以下) | $1.2\times10^{-3}$Pa ($9\times10^{-6}$Torr) |

表2에 이 설비의 주요성능을 표시했는데 그 외에 安全制御系統 基本的動作, 배리어容器의 기밀성 등을 포함한 전 시스템으로서의 기능도 爐外設置에 있어서 조건을 만족할 수가 있다.

## 6. 展 望

이 冷中性子源設備는 현재 爐體內挿入에 앞서서 安全制御系統의 확충과 확인 및 運轉操作性의 충실 등을 포함한 各種爐外試驗을 실시하고 있다. 한편, 原子爐本體에 관해서는 1987년 봄으로 예정되어 있는 黑鉛熱中性子設備의 개조와 冷中性子源本體 주요부분의 爐體內挿入을 위한 설계와 공사준비가 추진되고 있다. 冷中性子源設備全體의 爐體內 設置가 끝날때 까지는 배선이나 배관 등도 필요하며, 이들이 끝난 후 원자로냉중성자원으로서 최종적인 特性試驗이 행해질 예정이다.