

### 1. 核分裂

#### 1.1 核分裂

一般的으로 原子核反應에는 1개의 입자가 原子核과 충돌·반응하여 1~2개의 입자를 放出하는 것이 많다. 그런데 원자번호가 92이상인 무거운 原子核은 核反應의 결과로서 크게 두개로 분열되는 경우가 있는데 이를 核分裂(Fission)이라고 한다.

핵분열을 일으키는 원인에는 여러가지가 있으나 實用的으로 중요한 것은 中性子の 흡수에 의해서 일어나는 核分裂이다. 中性子에 의하여 핵분열을 일으키는 同位元素로는 U-233, U-235, Pu-239 등이 있으며 이를 核分裂性物質이라고 부른다. 核分裂性物質중에서 자연에 존재하는 것은 U-235뿐이며 천연우라늄중에 약 0.72% 존재한다.

核分裂할때는 大量的의 에너지가 放出되며 그와 동시에 2~3개의 中性子를 放出시킨다. 이 中性子를 利用하여 核分裂反應이 잘 계속되도록 하는 것이 原子核에너지의 利用이다.

核分裂이 일어나는 과정은 그림1과 같다. 中性子が U-235의 原子核에 흡수되면 U-236이 된다. 이것을 複合核(Compound Nucleus)이라고 한다. 이 U-236은 核内部에 余分의 에너지를 갖고 있으며 不安定하여 약  $10^{-14}$ 초 만에 2개의 破片으로 나누어 지며 이때 2~3개의 中性子が 방출된다.

#### 1.2 核分裂時 放出되는 中性子

U-235의 核分裂은 中性子에 의하여 일어나

지만 이 中性子를 다른 方法에 의하여 發生시키고자 하면 막대한 에너지를 必要로 한다. 따라서 핵분열로 큰에너지를 얻는다고 하여도 全體적으로 보면 별 의미가 없게 된다. 그러므로 핵분열시 새로운 中性子が 2~3個 발생하는 것은 이러한 의미에서 매우 중요하다.

發生한 中性子 전부를 다음의 U-235에 흡수시키는 것은 불가능하며 여러가지 이유로 인해서 활용되지 못하는 중성자가 있기 때문에 1회의 핵분열에 의해서 발생하는 中性子數가 많으면 많을수록 크다.

실제의 핵분열 1회당 放出되는 中性子數는 0~6個이며 U-235가 熱中性子(低速中性子)를 흡수하여 分裂하는 경우의 平均値는 2.43個이다. 熱中性子吸收에 의한 中性子放出數는 表1과 같다.

核分裂時 放出되는 中性子は 모두 速度가 빠른 高速中性子이다. 고속중성자로서도 핵분열을 일으킬 수 있으며 이 핵분열을 계속 진행시키는 것도 가능하다. 현재 開發되고 있는 高速爐(Fast Reactor)가 바로 이를 實現하는 것이다. 그러나 아주 느린 中性子 즉 熱中性子로 핵분열시키는 原子爐의 설계가 쉬우므로 현재 實用化되어 있는 原子爐는 熱中性子로 核分裂시키는 熱中性子爐(Thermal Reactor)이다.

핵분열시 방출되는 중성자를 핵분열중성자(Fission Neutron)라고 부르며 이 핵분열중성자의 대부분(약 99.35%)은 핵분열 즉시 방출된다. 이것을 即發中性子(Prompt Neutron)라

고 하며 핵분열중성자의 극히 일부(U-235의 경우 0.65%)는 핵분열후 뒤늦게(수분의 1초~수십초) 방출되는데 이것을 遲發中中性子(Delayed Neutron)라고 하며 原子爐運轉上 중요한 역할을 한다.

핵분열중성자의 에너지스펙트럼은 그림 2와 같으며 7 MeV를 넘는 것도 있으나 전체의 평균치는 2MeV이다(U-235, 熱中中性子の 경우).

### 1.3 核分裂時 放出되는 에너지

일반적으로 원자핵반응에서 발생하는 에너지는 보통의 化學反應에 비하여 엄청나게 크다. 그러나 일반적인 원자핵반응은 그것을 발생시키기 위하여 막대한 에너지를 必要로 하기 때문에 實用價値가 없다.

核分裂은 핵반응중에서도 특별히 대량의 에너지를 방출시키며 더우기 그 반응을 자동적으로 계속 진행시킬 수 있기 때문에 큰 實用價値가 있다.

U-235 1g이 전부 핵분열할때 발생하는 에너지는 良質의 석탄을 3톤 연소시키는 경우에 상

당한다. 즉, 같은 무게로 하면 300만배의 에너지를 발생한다. 原子爐는 이 反應을 제어하면서 서서히 진행시키는 장치이다.

## 2. 原子爐의 基本形

### 2.1 原子爐의 構成要素

原子爐를 構成하는 主要部分을 模型의으로 나타낸 것이 그림 3이다. 中央에 核燃料體가 格子狀으로 配列되어 있고 그 사이와 주위에 減速材(Moderator)가 있으며 이 部分이 連鎖反應이 일어나는 爐心部(Reactor Core)이다.

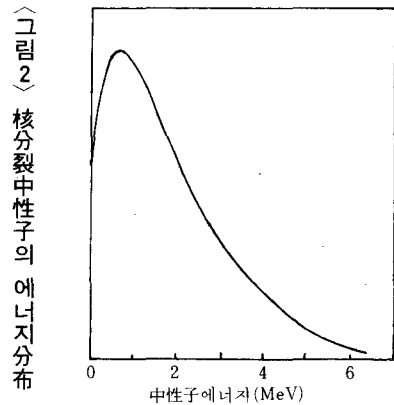
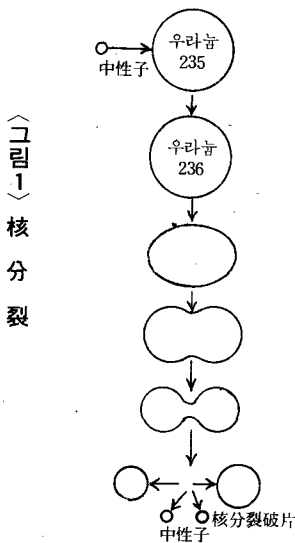
그 外部에 中中性子の 漏洩을 막기위한 中中性子 反射體(Reflector)가 있다. 가장 바깥쪽에는 爐內에서 發生하는 強力한 放射線, 主로  $\gamma$ 線과 中中性子를 막아 人體의 安全을 지키는 역할을 하는 遮蔽體가 있다.

爐內에서 發生한 熱을 바깥으로 運搬하기 위한 冷却系가 獨立되어 있는 것으로 素示하였으나 물(輕水)을 減速材로 使用하는 原子爐에서는 減速材가 冷却材(Coolant)가 되며 減速材 自身이 冷却材로 들어가서 爐外에 搬出되어 冷却된 후 다시 爐內로 되돌아간다.

制御棒驅動裝置(Control Rod Drive Mechanism)는 通常 爐의 上部 또는 下部에 設置되어 中中性子吸收體로 만든 制御棒을 上下로 움직여 細密하게 調整할 수 있도록 되어있다.

	<sup>233</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu
$\nu$	2.48	2.43	2.88
$\eta$	2.28	2.07	2.10

〈表 1〉  
熱中中性子吸收에 의한 中中性子放出數



## 2. 2 爐 心

核燃料體와 減速材로 構成되는 部分이며 制御棒도 그안에 들어 있다. 減速材와 冷却材가 따로 되어 있는 原子爐의 경우는 冷却材는 直接 核燃料體를 冷却할 수 있게끔 設計되므로 冷却材도 爐心內에 흐르게 된다.

### (1) 核燃料

核燃料은 現在까지는 거의 우라늄이며 플루토늄은 아직 試驗的으로 이용하는 단계이다.

原子爐의 開發初期에는 주로 天然우라늄이 많이 사용되었는데 예를 들면 世界最初의 發電爐인 英國의 Calder Hall發電爐는 核燃料로 天然우라늄을 사용하였다. 輕水型原子爐에서는 濃縮우라늄만을 使用할 수 있다.

또한 初期에는 우라늄金屬 또는 合金을 使用하였으나 金屬學的으로 不安定하며 變形하는 등의 難點이 있기 때문에 最近에는 酸化우라늄( $UO_2$ ) 또는 炭化우라늄(UC) 등의 粉末을 燒結하여 成形한 セラミック核燃料(Ceramic Fuel)를 使用하고 있다. セラミック核燃料는 熔融點이 높아 高温에 견디며 高温下에서 또한 強力한 放射線照射下에서도 變形이 적다는 長點을 갖고 있다. 表2는 主要 核燃料 素材의 性質을 表示한 것이다.

### (2) 核燃料棒(또는 核燃料要素)

金屬우라늄의 경우는 그대로 棒狀으로 成形된

다. 2酸化우라늄( $UO_2$ )은 通常 直徑 10~15mm, 길이 2~3cm程度의 円筒形으로 만들어지며 이를 펠릿이라고 부른다. 2酸化우라늄은 검은 粉末이며 이를 燒結하여 굳게 한 펠릿은 炭素塊와 같은 外觀을 보인다.

原子爐에는 金屬우라늄이든 2酸化우라늄이든 그대로의 形態를 核燃料로 使用하지 않는다. 減速材 또는 冷却材에 의하여 腐蝕될 可能性이 있으며 또한 核燃料中에 溶解되어 混入하여 爐外로 搬出되면 放射能때문에 사람이 接近할 수 없게 되어 곤란하다. 이 때문에 核燃料被覆材가 必要하게 된다. 被覆材로서는 中性子の 吸收가 적고 機械的, 熱的, 化學的 諸特性이 좋은 材料가 使用되며 溫度가 높지 않은 研究爐에서는 알루미늄이 使用되며 가스冷却爐에서는 마그네슘 合金이 使用되고 輕水型과 重水型發電爐에서는 지르코늄 合金이 使用된다.

被覆材는 核燃料 펠릿이 들어갈 수 있을 정도의 內徑이며 두께 1mm以下의 管의 形態로 成形되어 그 안에 펠릿을 채운다. 管의 兩端을 密閉하면 核燃料棒이 되는데 氣體狀의 核分裂生成物의 生成에 對備하여 管의 上端에 약간의 空間을 남겨 놓는다. 이렇게 하여 만들어진 各 核燃料棒을 核燃料要素(Fuel Element)라고 부른다.

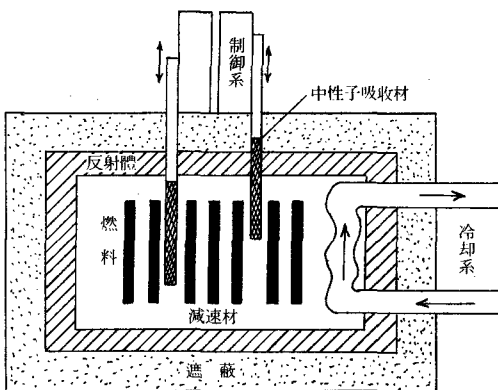
### (3) 核燃料集團體

〈表2〉 各種燃料素材의 性質

素材名	化學記號	融點 °C	密度 g/cm <sup>3</sup>	素材 1cm <sup>3</sup> 中のU 또는 Pu量 g
金屬우라늄	U	1130*	19.06	
金屬플루토늄	Pu	640	19.64	
二酸化우라늄	$UO_2$	2805	10.97	9.6
炭化우라늄	UC	2523	13.63	12.98
窒化우라늄	UN	2850	14.32	13.55
酸化플루토늄	$PuO_2$	1290	11.45	10.1
炭化플루토늄	PuC	1653	13.54	13.55

\*金屬우라늄은 670°C에 變態點이 있으며 이 온도 이상에서의 使用은 어렵다. 金屬플루토늄은 더욱 낮은 온도에서 使用될 수 밖에 없다.

〈그림 3〉 原子爐의 基本形



核燃料要素는 直徑1~1.5cm로, 길이는 數m나 되기 때문에 取扱上 여러가지 難點이 있다. 더욱이 1基의 原子爐에는 數萬個의 核爐料要素가 들어간다. 實際의 原子爐에서는 數십個~數백個를 한 묶음으로 한個의 集合體를 만들며 이를 單位로 取扱한다. 이를 核燃料集合體(Fuel Assembly)라고 부른다.

核燃料集合體는 核燃料要素를 1邊에 5~18個씩 正方形으로 適當한 間隔으로 配列하여 이를 上下支持台로 固定하여 움직이지 않도록 하며 이 核燃料集合體의 取扱을 편리하게 할 수 있는 構造와 各種의 測定設備를 設置할 수 있게 設計된다.

### 2.3 制御系

原子爐의 増倍因子는 여러가지 條件에 의하여 變化한다. 이를 測定하여 原子爐의 狀態를 파악하고 人爲적으로 中性子吸收比率을 變化시켜 爐의 出力上昇, 一定出力의 維持 또는 停止 등을 遂行하는 것이 制御系이다. 實際로는 硼素, 또는 카드뮴으로 된 制御棒을 爐內에 插入하며 이 插入程度를 微細하게 調整하는 것에 의해서 이 역할을 行한다.

制御棒은 이를 全部 爐內에 插入한 狀態에서 爐全體로서의 増倍因子를 1보다 充分히 적게 할 수 있는 中性子吸收能力을 가지고 있어야 한다. 그러나 1個의 制御棒으로서는 이의 影響이 미치는 範圍가 制限되어 있으며 그 근처의 中性子は 적게 되지만 조금 떨어진 場所에서는 크게 變化하지 않는다. 이것으로서는 爐全體로서의 増倍因子를 1以下로 만드는 것이 不可能할 뿐만 아니라 中性子分布가 크게 不均一하게 되어 出力分布가 심한 歪曲이 생기며 核燃料管理上 問題가 많아진다. 이러한 理由로 制御棒은 적은 原子爐에서도 數個로 나누어 設置하며 1個씩으로는 不可能하지만 全部 插入하면 充分히 連鎖反應을 抑制할 수 있게 된다.

大型發電爐에서는 1,000個程度の 制御棒을 使

用하는 경우도 있다. 이러한 原子爐에서는 20個程度の 制御棒을 한 묶음으로하여 한個의 驅動裝置에 連結되며 이러한 制御棒群을 制御棒集合(Control Rod Cluster)라고 부른다. 따라서 大型發電爐에는 制御棒集合이 50個程度 있게 된다. 高溫度, 高出力密度로 運轉되고 있는 原子爐에서는 出力分布 即, 中性子分布가 均一하게 되는 것이 무엇보다 重要하며 따라서 많은 數의 制御棒을 配置하게 된다.

通常 制御棒 또는 集合은 모터와 齒車로 組立되어 驅動되고 있으나 原子爐에 異常事態가 發生하거나 地震으로 緊急히 爐를 停止시킬 必要가 생길 경우에는 瞬間적으로 全部의 制御棒을 爐心에 插入시켜야 한다. 따라서 이때에는 모터로 驅動하여 插入하는 것으로는 안되며 制御棒을 重力에 의하여 落下시키는 方法을 使用하고 있다. 全部의 制御棒을 瞬間적으로 爐心內에 落下(또는 插入)시켜 原子爐를 停止시키는 것을 緊急停止 또는 急停止(Scram)이라고 부른다.

驅動裝置는 下端에 電磁石이 달린 棒을 驅動시키며 電磁石에 制御棒이 吸着되어 電磁石과 같이 上下運動하며 非常時에 電磁石의 電流를 斷切하면 制御棒自體는 自己重量으로 爐心에 落下하는 方式을 使用한다. 制御棒驅動裝置가 爐心 下部에 位置하여 爐心이 왼쪽에 있는 경우에는 空氣壓 또는 水壓으로 制御棒을 爐心으로 插入하게끔 한다.

最惡의 경우 大地震으로 爐가 傾斜되거나 制御棒이 들어가는 導管이 變形되어 落下하지 못하는 경우를 고려한 非常停止機構도 設備한다. 이것은 硼素를 包有한 鋼鉄球을 大量 準備하여 非常事態에 爐內에 굴러 들어가게 하는 것이다.

### 2.4 反射體, 冷却系, 遮蔽

反射體로는 減速材와 同一한 材料 即 輕水, 重水, 酸化베릴륨, 黑鉛 등이 使用된다.

冷却系도 물을 減速材로 하는 原子爐에서는 그것이 그대로 冷却의 1次系로서 사용되는 경우가 大部分이다. 水中에 微量이라도 不純物이 包含되어 있으면 爐心을 通過하는 동안에 中性子를 吸收하여 放射化되며 冷却系統의 補修, 點檢作業時 큰 支障을 준다. 펌프, 밸브 등에 사용되는 耐磨耗性合金의 成分중에는 코발트元素가 있으며 이것이 磨耗되어 微粉狀으로 되어 水中에 包含하여 放射化된 Co-60은 強力한  $\gamma$ 線을 放出하며 守命도 길기 때문에 原子爐의 補修에 큰 問題가 된다.

遮蔽는 두꺼운 콘크리트層을 主體로 하여 主要한 部分을 납(鉛)또는 鋼鐵로 補強하는 경우가 많다. 콘크리트自體도 鐵鑛石, 鐵片 등을 混合하여 密度를 크게한 中·重콘크리트를 使用한다(普通콘크리트의 密度는  $2.3g/cm^3$  정도이며 重콘크리트의 밀도는  $3.2g/cm^3$  까지 된다.) 鐵鑛石을 使用한 콘크리트의 密度는  $2.6\sim 2.8g/cm^3$  이다). 特히 中性子の 遮蔽가 問題되는 곳에는 中性子를 잘 吸收하는 硼素 또는 이를 包含하는 鑛石을 混合하는 경우도 있다.

### 3. 原子爐의 種類

#### 3.1 原子爐의 分類

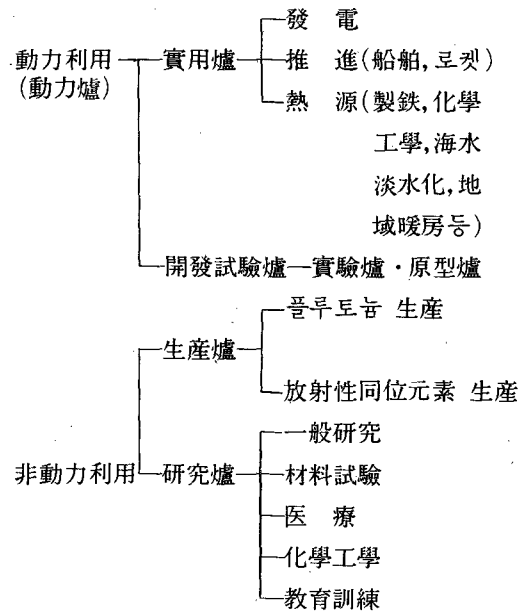
開發初期에는 連鎖反應을 實現하기 위하여 모든 可能性이 追究되었으며 別난 構想까지 試圖되어 왔으나 安全性, 技術的難易의 檢討와 經驗의 蓄積이 進展됨에 따라 自然的으로 整理되어 온 것 같다.

이들 原子爐를 分類하는 데에도 分類하는 方法에 따라 여러가지로 分類된다. 以下 몇가지 分類와 解説을 試圖해 보고자 한다.

##### (1) 目的에 의한 分類

動力利用의 中心은 發電으로서 現在까지는 輕水減速·輕水冷却의 加壓水型(PWR)과 沸騰水型(BWR)이 大部分을 占하고 있다.

船舶用 原子爐는 主로 航空母艦, 潛水艦 등의



軍事目的에 使用되고 있으며 그 數가 대단히 많으며 主로 輕水減速·輕水冷却의 加壓水型(PWR)을 利用하고 있다.

原子爐의 熱을 電氣로 轉換하지 않고 그대로 利用하는 計劃이 進行되고 있다. 製鐵用으로는  $1000^{\circ}C$  以上の 溫度가 要求되고 있기 때문에 高溫가스爐(HTGR)의 開發이 進行되고 있다. 물이 不足한 地域에 海水를 蒸溜하여 淡水를 얻기 위한 熱源, 一般化學工業用的 熱源 또는 地域暖房 등에 利用하는데 技術的으로 特別히 問題되는 것은 없으나 主로 經濟性的의 問題가 있어 實用되지는 못하고 있다. 이러한 몇가지의 目的과 發電을 兼하는 原子爐의 多目的利用이 現在의 하나의 課題로 되고 있다.

實用動力爐는 大出力이며 現在까지 最大出力은 電氣量으로 約130萬KWe規模이며 發生熱出力로서는 380萬Kwt에 達하고 있다. 이것은 그 以下の 出力規模로 어느程度 經驗이 蓄積되고 技術이 確立된 후에 規模를 增加시킨 結果이다.

새로운 爐型을 開發하는 경우에는 最初부터 이와 같은 大型으로 建設하는 것은 經濟性面에

서 보나 安全性面에서 보나 賢明하지 못하다. 따라서 우선 實用規模의 1/10以下の 爐를 만들어 그 性能이나 技術上的 問題를 檢討한 후에 最初의 設計를 改良하든가 變更한다. 이를 土台로 實用規格의 1/2~1/3程度인 것을 設計·建設하여 實際의 運轉에서의 問題點과 經濟性 등을 充分히 驗討한 후 實用爐를 設計하는 것이 一般的인 方法이다. 이와 같은 2個의 準備段階 爐중 前者를 實驗爐(Experimental Reactor), 後者를 原型爐(Prototype Reactor)라고 부른다. 勿論 2段階를 반드시 거쳐야 하는 것은 아니며 實情에 따라 한段階를 省略하여 다른 한段階로 兩段階에서의 試驗을 兼하는 경우도 있다. 試驗結果에 따라서는 實驗爐 또는 原型爐의 段階에서 開發을 中斷하는 일도 있을 수 있다.

플루토늄生産爐는 주로 原爆製造用的 軍事目的으로 만드는 것이다. 普通의 發電爐 등에서도 副産物로서 플루토늄이 生成되며 原子爐의 核燃料로서 充分히 使用할 수 있으나 原爆用으로는 良質의 플루토늄이 要求되기 때문에 이것을 生産하는 目的의 專用爐를 만든다.

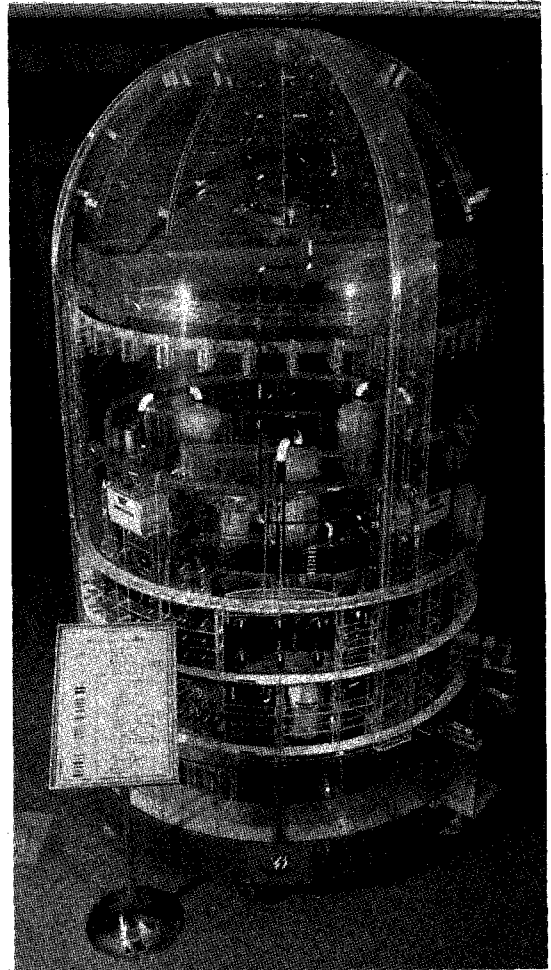
放射性同位元素는 各種의 目的으로 利用되며 그 需要는 每年 增加하고 있으며 이의 生産에는 原子爐가 가장 效果的인 裝置이다.

그러나 現在까지는 放射性同位元素生産을 위한 專用爐는 거의 없으며 他 目的의 原子爐에서 製造되는 경우가 많다.

一般研究爐라 함은 原子爐에서 나오는 中性子를 利用하여 原子力 開發에 必要한 基礎實驗이나 原子核物理, 放射化學 등의 研究를 行하기 위한 것이며 各種의 實驗設備가 原子爐周邊에 設置된다.

우리나라에 設置되어 있는 TRIGA MARK-II와 MARK-III은 이 研究爐에 屬한다.

材料試驗爐라 함은 原子爐, 特히 發電用爐에 使用하는 材料가 原子爐內的 強力한 放射線에



〈韓國電力技術(株)의 原子爐模型〉

어느程度로 견디는가를 試驗하기 위한 原子爐를 말한다. 核燃料體는 放射線뿐만 아니라 熱的으로도 가장 嚴格한 條件에 견딜 수 있어야 하기 때문에 核燃料素材(2酸化우라늄펠릿 등)나 被覆管에 대해서 嚴格한 試驗을 거쳐야 한다.

實用爐內에서 核燃料는 3~5年, 爐心構造物質은 20~30年동안 使用하는 材料를 短期間에 試驗하기 위해서는 材料試驗爐는 實用爐의 10倍以上의 中性子數와 放射線強度를 갖고 있어야 한다.

放射線은 醫療目的에 널리 使用하고 있으며

특히 中性子照射가 有効한 경우에는 原子爐가 편리하다. 外國에서는 腦腫瘍의 治療에 使用되는 例가 많다. 이들은 모두 一般研究爐에서 行해지고 있으나 將次에는 医療專用的 原子爐를 建設하는 경우도 생각할 수 있다.

放射線은 化學工業에도 널리 應用되고 있다. 放射性同位元素나 放射線發生裝置를 쓰고 있으나 大量的의 中性子線이나  $\gamma$ 線을 照射시켜야 하는 경우에는 原子爐가 有利하다. 그러나 이것은 아직 具體的段階에 있지는 않다.

原子力技術者, 原子爐運轉要員 등의 養成訓練에 小型爐가 必要한 것은 當然하다. 小型의 一般研究爐는 大體로 이 教育訓練의 目的을 兼해서 使用되고 있다.

(2) 使用하는 中性子の 速度에 의한 分類

- 高速中性子爐
- 中速中性子爐
- 熱中性子爐

(3) 使用하는 材料에 의한 分類

核燃料, 減速材 및 冷却材의 各各에 대하여 數種類의 選擇이 있으므로 이들의 組合에 따라 많은 型이 생긴다.

表3은 爐材料의 一覽表이다. 이들중 天然우라늄과 輕水의 組合을 除外하고는 거의 모든 選擇이 可能하기 때문에 多樣한 型의 原子爐가 생기는 理由를 理解할 수 있을 것이다. 原子爐의 型을 表示할 때 이 세種의 材料를 表示하는 경우가 있다.

〈表 3〉 原子爐爐心部材料一覽  
(被覆材・構造材는 제외)

燃 料	減 速 材	冷 却 材	
天 然 우 라 늄	輕 水	헬륨	氣體
低濃縮우라늄	重 水	炭酸가스	
高濃縮우라늄	黑 鉛	水蒸氣	
플루토늄	베릴륨	輕 水	液體
(플루토늄 우라늄의混合物)	有機化合物	重 水 나트륨	

### 3.2 高速中性子爐와 熱中性子爐

中性子を 減速하여 熱中性子(느린 中性子)로 만드는 것이 連鎖反應의 實現을 容易하게 하기 때문에 現在까지 開發된 原子爐는 모두 熱中性子爐이다.

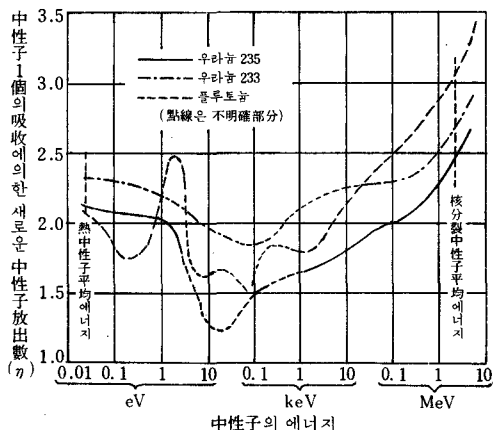
그런데 전혀 다른 見地에서 高速中性子에 의한 連鎖反應을 實現시킬 必要가 생겨 高速爐의 開發이 推進되고 있다.

天然우라늄중에 0.72%含有되어 있는 U-235는 核分裂하지만 나머지 U-238은 核分裂하지 않는다. 따라서 現代까지의 原子爐에서는 우라늄資源에서 極히 小部分만이 利用되고 있을 따름이며 이것으로서는 새로운 에너지源으로서의 原子力은 資源으로서 크게 依存할 것이 없게 된다.

U-238은 中性子を 吸收하면 Np-239를 거쳐 Pu-239로 轉換한다. 이것은 核分裂하는 性質을 갖고 있어 새로운 核燃料로 使用될 수 있다. 이와 똑같이 核分裂을 일으키지 않는 Th-232(天然토륨은 全部 이 同位體이다)에 中性子を 吸收시키면 Pa-233을 거쳐 核分裂性物質인 U-233으로 된다.

이와 같이 U-238과 Th-232로부터 새로운 核燃料를 만들 수 있다면 原子力의 資源은 數백

〈그림 4〉 中性子에너지에 의한 放出中性子の 變化



배로 증가하여 長期間에 걸쳐 安心하고 使用할 수 있게 될 것이다.

그러나 이들 새로운 核燃料을 만들기 위해서는 天然에 存在하는 唯一의 核燃料인 U-235를 消耗하지 않으면 안되며 消耗量에 比하여 生産量이 더 많지 않다면 큰 意義가 없다.

U-235가 熱中성자를 吸收하여 核分裂할 때 放出하는 中性子數는 平均 2.43個이지만 中性子が 吸收된 U-235 중에서 核分裂하지 않는 것이 約15%이므로 吸收된 中性子1個當의 放出 中性子數는 2.07個로 된다. 이 중에서 1個는 連鎖反應을 維持하게 하기 위하여 다음의 U-235에 吸收시켜야 하므로 나머지는 1.07個로 된다.

各種 物質의 吸收와 爐外로의 漏洩을 고려하면 1.07個中 1.00個以上을 U-238에 吸收시키는 것은 不可能한 일이다. 이것은 U-235를 使用한 熱中성子爐에서 核燃料의 增殖은 不可能하다는 것을 意味한다.

그림4와 같이 核分裂을 일으키는 中性子の 에너지가 달라지면 中性子の 放出數도 달라진다. 核分裂로 放出되는 中性子の 에너지(2Mev) 그대로 吸收되어 核分裂을 일으켜 放出數는 2.50에 가깝게 되어 上記와 같은 消耗를 考慮하여도 增殖의 可能性이 있게 된다. 더욱이 Pu-239를 核燃料로 使用하면 放出數는 3個를 超過하여 核燃料(즉 Pu-239)의 原子1個의 消耗에 따라 새 核燃料(즉 Pu-239)의 原子 1.5個以上을 生産하는 可能性이 있어 增殖의 能率이 向上된다.

여기에서 增殖比(Breeding Ratio)을 定義한다. 이는 때때로 轉換比(Conversion Ratio)라고도 하며 消耗된 核分裂性物質 原子 1個當에 새로 生成된 核分裂性物質의 原子數를 말한다. 위의 경우 Pu-239原子1個를 核分裂하여 새로 生成된 Pu-239 原子가 1.5個라면 增殖比는 1.5이다. 一般的으로 이 比率이 1보다 적으면 轉換比라고 하며 1보다 클 때에는 增殖比라고

부른다.

熱中성子爐(輕水減速爐)에서는 轉換比가 約 0.65程度이며 같은 熱中성子爐인 重水減速爐에서는 約0.80程度인데 反해서 高速中성子爐에서는 增殖比가 1.1~1.6으로 되어 核燃料를 消耗하면서 그 以上の 核燃料를 生産한다.

增殖性能이 이와 같이 좋은 것은 다음과 같은 理由로 核分裂中성子の 有效利用度가 높기 때문이다.

(1) 高速中성子에 의한 核分裂에서는 1個의 分裂當 放出하는 核分裂中성子が 많아진다.

(2) 爐心の 構成材料·核分裂生成物은 高速中성子에 대해서는 吸收가 적어진다.

(3) U-238은 1Mev以上の 高速中성子에 의하여 核分裂을 일으키며 高速核分裂效果  $\epsilon$ 이 熱中성子爐에서 보다 커진다.

위와 같은 理由로 原子爐의 中性子の 平均에너지가 클수록 좋으며 可能하면 核分裂中성子の 에너지를 그대로 維持할 수록 增殖에 有利하기 때문에 減速材가 必要없으며 中性子の 減速을 될수록 피하기 위하여 質量이 큰 冷却材를 使用한다.

現在 開發되어 實用化段階에 있는 高速中성子爐에서는 熔融金屬이나 토륨이 冷却材로 使用되고 있으며 그 理由는 比熱이 크고 熱傳導度가 좋으며 放射線에 對해서도 安定된 性質을 갖고 있으며 沸點이 880°C, 融點이 98°C이며 發電爐의 要求溫度 領域에도 適合하기 때문이다.

原子爐의 爐心周圍에는 U-238의 層(이를 B-ranket라고 한다)으로 둘러쌓아 爐心으로부터 漏洩되는 中性子를 全部 吸收하여 U-238이 Pu-239로 轉換되게끔 한다.

現在 多數 建設되고 있는 輕水型 發電爐는 熱中성子爐이며 高速增殖爐가 完成되어 實用化되면 原子力發電의 主役은 이 高速增殖爐가 될 것이다.