

原子力 講座

原子爐理論

— 原子力基礎 —

1. 核分裂과 原子力

原子核은 陽子와 中性子로 構成되어 있으며 이들은 10^{-12}cm 라고 하는 좁은 空間內에 갇혀있다. 헬륨原子核은 2個의 陽子와 2個의 中性子로 되어있고, 우라늄 92의 235는 92個의 陽子와 $(235-92)=143$ 個의 中性子로 되어있는 것으로 알려져 있다.

이와 같이 原子核이 2個以上の 陽子와 中性子로 構成되어 있다면, 當然히 이것들을 조개어 몇個의 粒子群으로 만들 수 있을 것이다.

實際로 水素原子核을 除外한 모든 原子核은 分裂함을 알아냈으며 이 現象을 核分裂이라고 한다. 核分裂시키는데 要하는 에너지보다 核分裂時 放出되는 에너지가 크다면 우리는 이를 에너지원으로 사용할 수 있을 것이다.

核分裂時 放出되는 核分裂에너지는 核分裂 前後에 있어서의 質量差에 빛의 速度의 自乘을 곱한 값이 되겠으며, 에너지 放出樣式은 核力에 묶여있던 쿨롱斥力이 解放되면서 運動에너지로 주어졌다가 거의 빛의 速度의 10分の 1의 速度로 物質속을 通過하면서 摩擦에 依한 熱에너지로 變換되게 된다.

두 物體사이의 距離 r 제곱에 反比例하고 떠고 있는 電氣量의 곱에 比例하는 쿨롱斥力을 우라늄 92의 235에 適用하여 보자. 우라늄原子核의 크기로 $1.7 \times 10^{-12}\text{cm}$ 를 採擇하고, 떠고 있는 電氣量으로는 原子番號 92를 任意로 42와 50으로 나누고, 電子의 電荷量 $4.8 \times 10^{-10}(\text{e.s.u.})$ 를 代入하면

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{42 \times 50 \times (4.8 \times 10^{-10})^2}{(1.7 \times 10^{-12})^2} = 1.7 \times 10^8 (\text{다인})$$

이라고 하는 莫大한 斥力이 나온다.

이 莫大한 斥力을 받고 튕겨나간다고 할때 두 個의 核分裂生成物이 얻어나가는 에너지 E 는

$$E = \frac{42 \times 50 \times (4.8 \times 10^{-10})^2}{1.68 \times 10^{-12}} (\text{erg})$$

$$= 180 \text{MeV} (\text{질량결손치와 같다}) (1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{erg}) \text{에 該當되게 될 것이다.}$$

이것을 化學에너지와 比較하여 보자.

化學反應의 世界는 原子·分子의 크기인 10^{-7}cm 이고, 反應에 參與하는 電荷量도 1내지 2 e. s. u. 이므로

$$E = \frac{q_1 \times q_2 (\text{esu})}{r} = \frac{1 \times 1 \times (4.8 \times 10^{-10})^2}{10^{-7}}$$

$$= 2.304 \times 10^{-18} \text{erg} = 1.44 \text{eV}$$

즉, eV order의 에너지가 放出될 것이다.

原子力은 $\sim 100 \text{MeV} = 100 \times 10^6 \text{eV} = 10^8 \text{eV}$

즉, 化學에너지의 1億倍의 에너지를 放出할 수 있는 것을 알게된다.

原子力이 갖는 強한 優越性은 바로 原子核과 原子크기의 差異에서 온다고 말할 수 있다. 이것이 現代科學의 大容量高效率의 動力發生裝置의 燃料로서 化石燃料를 앞서는 根本的 理由가 되겠다.

한편, 이 막대한 쿨롱斥力이 作用하고 있는 物體들을 10^{-12}cm 라고 하는 原子核의 좁은 空間內에 가두어 놓고 있는 그 막대한 힘은 무엇일까? 이들은 이 斥力보다 強한 引力에 依하여 갇혀 있다고 볼 수 있다. 이 引力을 우리는 原

子核内에서 作用하는 힘이란 뜻으로 核力이라고 한다.

이 核力은 核分裂되는 것과 原子核의 크기를 보아서 10^{-12} cm라고 하는 좁은 空間内에서만 作用하는 近距離力임을 알 수 있고 中性子和 陽子도 帶電符號에 關係없이 作用하고 있어야 할 引力이므로 荷電獨立일 것이다.

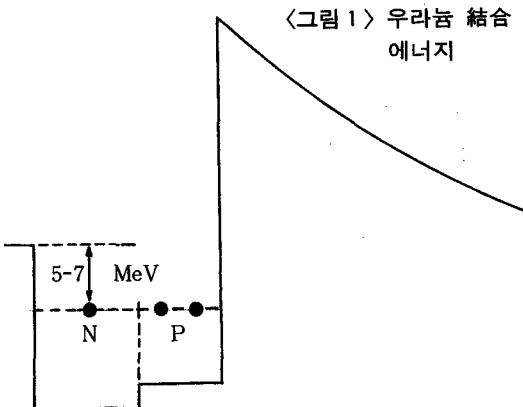
바꾸어 말하면 原子力이란 核力에 묶여있던 쿨롱斥力을 解放시킨 것이라고도 할 수 있겠고, 核分裂이란 原子核을 쪼개어서 核力이 미치는 空間밖으로 밀어내어 쿨롱斥力에 의하여 튕겨져 나가는 現象이라고도 할 수 있겠다.

原子核이란 이 核力이 미치는 空間에 構成粒子인 陽子和 中性子が 갇혀 있는 狀態라고 할 수 있고, 이 引力의 우물에서도 相當히 깊은 곳에 있을 것이다. 만약에 얕은 곳에 있는 것이라면 外部에서 약간의 힘만 加하여도 쉽게 核變換하여 地球의 生成以來 오늘날까지 남아 있지 못하였을 것이다.

그런데 우라늄보다 무거운 原子核은 天然에는 남아있지 않을 뿐만아니라 人工적으로 만든 칼리포늄 252 같은 것도 自發적으로 核分裂하여 버리고 마는 것을 보면 우라늄 235의 引力우물의 깊이가 제일 얇음을 알 수 있다.

構成粒子는 結合에너지를 原子核에 줄수 있다.

${}_{92}\text{U}^{238}$ 結合에너지(6MeV) < 分裂에 必要한 에너지(7MeV)



${}_{92}\text{U}^{235}$ 結合에너지(6.8MeV) > 分裂에 必要한 에너지(6.6MeV)

中性子が 포획되는 것만으로도 U^{235} , Pu^{239} 는 核分裂한다.

構成粒子를 原子核에서 부터 떼어내는데 要하는 에너지를 結合에너지라고 한다면, 構成粒子가 外部에서부터 原子核内部로 들어가면 이 結合 에너지를 原子核에 주는 것이 될 것이다.

原子核 變換을 시키는데 있어 原子核의 構成粒子인 中性子和 陽子는 다른 放射線보다 有利하다. 陽子보다도 中性子が 더욱 더 有利하다. 陽子는 正電荷를 띠우고 있어 原子核에 接近할 때 쿨롱斥力을 받게 되어 이에 이기는 힘을 陽子에게 주어야 하기 때문이다.

中性子の 結合에너지는 우라늄의 同位元素인 우라늄-235에서는 6.8MeV이고, 우라늄-238에서는 6MeV가 되어 우라늄-235가 有利하다. 이는 홀수의 質量數가 中性子の 吸收로 짝수가 되기 때문이다.

한편 核分裂시키는데 드는 最少의 에너지는 우라늄-235에서 6.6MeV이고 우라늄-238에서는 7 MeV 程度이다.

우라늄-235는 中性子が 들어가기만 하면 核分裂을 하는데 反하여 우라늄-238은 1MeV程度의 에너지를 갖는 中性子が 들어가야 核分裂을 일으키며 그보다 낮은 에너지의 中性子는 補獲만 되고 核分裂시키지 못한다.

原子爐에서 우라늄-235가 重要な 가담은 여기에 있다.

200MeV의 核分裂에너지보다 적은 에너지로 中性子를 만들어 낼 수 있으면, 우리는 原子力 에너지를 우리의 에너지源으로 쓸 수 있을 것이다.

그러면 中性子는 어디에서 조달되는가?

放射性崩壞를 하지않는 安定된 元素의 陽子數에 對한 中性子數 比를 求하여 보면 하나의 秩序가 있다.

무거운 原子核인 우라늄 92의 235는

$$\frac{235-92}{92}=1.55$$

中間程度 무거운 原子核 폴리브덴 42의 96에서는

$$\frac{96-42}{42}=1.28$$

가벼운 原子核인 헬륨 2의 4에서는

$$\frac{4-2}{2}=1$$

이 된다.

즉, 安定된 原子核에서는 무거운 原子核에서의 1.55에서 부터 가벼운 原子核에서의 1의 값 사이의 값을 갖는다.

우라늄 原子核이 核分裂하여 2개의 原子核이 되면 當然히 우라늄보다 가벼운 中間程度 무거운 原子核이 될 것이며, 陽子數에 對한 中性子數 對比가 1.28近處이어야 安定할 것이나, 여전히 1.55이므로 中性子 過剩인 不安定한 原子核이 된다.

核分裂生成物은 一般的으로 中性子過剩인 原子核으로서 中性子を 放出하여 보다 安定된 原子核이 되고자 한다.

이 結果 平均的으로 한번의 核分裂時 發生하는 中性子數는 다음과 같다.

${}_{92}\text{U}^{233}$	2.51
${}_{92}\text{U}^{235}$	2.47
${}_{94}\text{Pu}^{239}$	2.90
${}_{94}\text{Pu}^{241}$	3.06

個의 中性子を 核分裂時 放出하고 있다.

이와 같이 核分裂에 必要한 中性子を 調達하는데에는 따로 에너지를 消耗하지 않는다.

다음으로 이렇게 放出되는 中性子是 어떤 에너지를 갖고 나오는가를 밝혀보자.

核分裂되어 만들어진 核分裂生成物은 中性子過剩이며 높은 勵起狀態에 있다고 하더라도 構成粒子 各個가 갖고 있는 平均的에너지가 結合 에너지를 능가할 수 있을 만한 크기를 갖고 있는 것은 아니다.

만약 그렇다면 核分裂生成物이 채 모양을 갖추기 전에 산산 조각이 나버렸을 것이기 때문이다.

그러나 이들 構成粒子들이 서로 衝突하면서 에너지를 주고 받는 過程에서 하나 또는 두어 個의 粒子에 에너지가 몰려서 結合에너지를 능가하는 크기를 갖게 할 경우가 생긴다. 마치 沸騰點에 있는 물에서 수증기가 증발할 때와 같은 原理이다. 勵起狀態가 높을수록 比較的 짧은 時間內(10^{-11}sec)에 높은 에너지의 中性子を 放出하게 될 것이고, 勵起狀態가 낮은 核分裂生成物은 比較的 긴 時間(秒單位)을 요하면서 낮은 에너지의 中性子を 放出하게 될 것이다. 앞의 경우를 即發中性子라 하며 2MeV程度에서 最頻値를 갖는 증발스펙트럼의 높은 에너지分佈를 가지며, 後者는 遲發中性子라 불리며 아주 작은 數이기는 하지만 KeV領域의 特性에너지를 갖고 放出된다.

即發中性子是 連續反應을 持續시키는데에, 遲發中性子是 原子爐의 運轉을 可能케 하는 重要한 役割을 擔當하게 된다.

2. 原子力發電

술에 물을 넣고 끓이던 歷史가 오래 持續되다가 불에 닿는 面積을 넓히고자, 파이프 다발 속에 물을 흘려주고 이 파이프 다발을 불꽃속에 넣어주는 보일러가 만들어졌다. 다음에 불꽃과 물의 자리를 바꾸어, 파이프속에 電熱線을 넣고 밖으로 물이 흐르도록한 瞬間溫水器가 만들어졌다.

이 電熱線을 우라늄核燃料로 바꾸어주고, 中性子が 있는 곳에 넣어주어 核分裂시켜 물을 끓이도록 한 것이 原子力發電所이다. 天然우라늄이나 濃縮우라늄을 튜브다발속에 넣고 이 튜브다발을 적당한 간격으로 묶어 重水나 물과 같은 감속재속에 담그어 주면 原子爐가 된다(그림2).

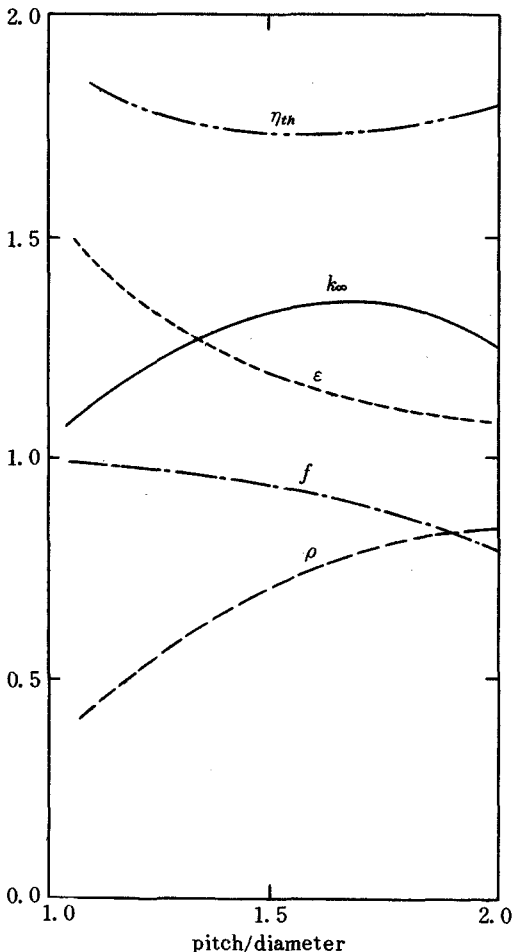
우리 인간이 터득한 生活의 知惠란 어떻게 얻어진 것일까?

어떤 刺戟을 주어보고 이에 對한 反應을 살피고 이들을 體系的으로 分類, 記憶하여 두었다가 類似한 境遇에 類似하게 對處하는 것이라고 말할 수 있을 것이다.

自然科學의 發達도, 原子力의 開發도, 이러한 行動樣式에서 벗어나지 않고 그대로 踏襲한 흔적이 역역하다.

그림3은 99.3%의 우라늄-238과 0.7%의 우라늄-235로 이루어진 天然우라늄에 여러가지 에너지의 中性子를 入射시켜 보아서 各 에너지別 核分裂이 일어나는 確率과 中性子補獲이 일어

〈그림 2〉 피치대 半徑比에 따른 k_{∞} 變化



나는 確率을 그래프로 그린 것이다.

巨視的 斷面積이란 原子核 하나가 核反應하는 確率(微視的 斷面積)과 그러한 反應에 參與하는 原子核의 數를 곱한 것이다.

橫軸, 縱軸 다 다루어야 할 範圍가 넓기 때문에 log scale을 使用하여 한 눈금이 10 배씩 된다.

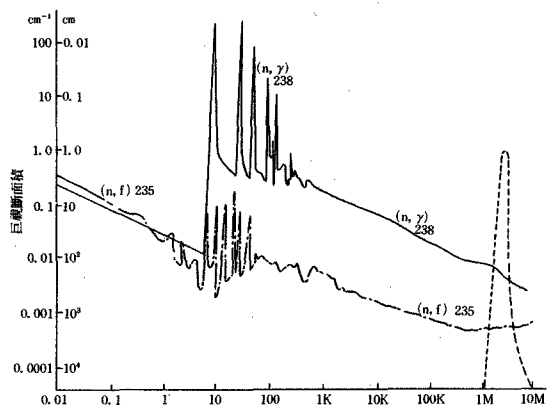
點線은 卽發中性子에너지分布를 나타내고 있다.

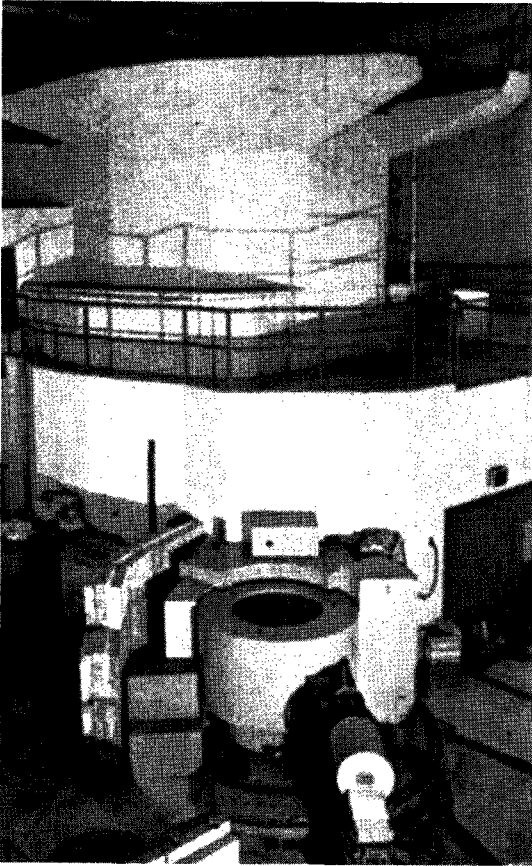
그림에서 알 수 있는 것은 中性子の 에너지가 아주 적은 領域(이 에너지領域의 中性子를 熱中性子라고 한다)을 除外하고는 거의 모든 領域에서 우라늄-238에 依한 포획이 우라늄-235의 核分裂確率보다 10배 이상 크다.

하나의 예로써 이 그래프는 1KeV의 中性子 11個가 天然우라늄을 만나게 되면 10個는 우라늄-238에 포획되고 한個만이 우라늄-235에 吸收되어 核分裂함으로써 約 2.5個의 中性子를 만들어 내음을 우리에게 알려주고 있다.

11個의 中性子が 2.5個 卽, 1/4以下로 줄어들 것이다. 따라서 核分裂하여 생겨난 中性子는 우라늄을 만나지 말고 물이나 흑연과 같은 減速材속에서 에너지를 充分히 잃어 核分裂確率이 補獲確率보다 큰 領域인 熱中性子が 된 다음에 우라늄을 만나야 한다. 바꾸어 이야기하면

〈그림 3〉 天然우라늄의 巨視的 斷面積





우라늄을 막대모양으로 製作하여 減速材속에 잠기게 함으로써 核分裂中性子が 減速材를 거치지 않고는 우라늄 核燃料를 못만나게 하여주는 構造가 必要하다.

그림3의 熱中性子領域에서 熱中性子は 核分裂 : 中性子補獲이 10 : 8 程度가 되므로 가령 18개의 熱中性子が 우라늄과 衝突하면 10個만이 核分裂하여 25개의 核分裂中性子를 만들어 낼 것이며 8個는 우라늄-238에 포획되어 核分裂에는 寄與하지 않는다.

몇個의 反應이 연달아서 일어나고, 이의 反應生成物의 一部가 새로운 反應體의 一部로서 쓰여지면서, 되풀이 生成·消滅하여 全體의 反應이 進行될 때 이러한 反應을 連鎖反應이라고 한다.

이와 같은 連鎖反應이 核分裂, 特히 天然우라늄을 使用하는 核分裂에서 繼續되기 爲하여는

25個의 核分裂中性子 가운데 最少限 18個는 熱中性子が 되어 天然우라늄과 衝突하고 다시 25個의 核分裂中性子를 탄생시켜야 한다.

減速過程이나 原子爐밖으로 새어나가는 中性子損失이 7個로 되고 熱中性子が 되어 天然우라늄을 만나는 中性子數가 18個, 여기서 생겨나는 것이 25個 이 가운데 다시 7개는 減速過程, 構造材, 原子爐밖으로의 漏出로 없어지고 나머지 18개가 熱中性子로 되어 天然우라늄을 만나면 連鎖反應이 持續되는 臨界狀態가 될 것이다.

우리 人類가 既히 保有하고 있는 技術은 火力發電所 技術이다. 工業施設인 原子力發電所에다가 잘 알려진 물과 鐵構造物를 使用하면, 물과 構造材에 吸收되는 中性子が 7個보다 많아져서 連鎖反應을 持續시킬 수가 없다. 따라서 減速材로는 中性子吸收는 적으면서 減速能力 및 冷却能力은 물에 비견할 만한 重水를 使用하고, 核燃料被覆材 等 構造材로는 지르코늄과 같은 合金을 使用하는 原子爐가 만들어진다.

되풀이 밝히면 天然우라늄을 核燃料로 使用코자 하는 原子爐는 重水나 黑鉛과 같은 減速材, 지르코늄合金과 같은 構造材로서 中性子吸收가 적은 材料를 使用하여야 한다. 이러한 型의 原子爐가 캐나다에서 開發한 CANDU 原子爐로서 現在 慶北 월성에서 稼動中에 있다.

이달의 到着資料

- ◇ Nuclear News (ANS) 85年 1月號
- ◇ Nuclear Europe (ENS) 85年 1月號
- ◇ Nuclear Engineering International (NEI) 85年 2月號
- ◇ 原子力産業新聞 (日本原産) 1266號, 1267號
- ◇ 原子力工業 (日本日刊工業新聞社) 85年 2月號
- ◇ 原子力文化 (日本原子力文化振興財團) 85年 1月號