

天然核分裂 原子爐 : Oklo現象

赤道 아프리카에 있는 가봉共和國의 大西洋沿岸으로 부터 約 440Km쯤 內陸으로는 Oklo江이 흐르고 있다. Oklo라는 이름은 또한 그 地域의 露天우라늄鑛山에도 붙여지고 있는데, 1972년 科學者들은 이곳에서 數百萬年前에 發生하였던 주목할 만한 地質學的 現象인 天然核分裂原子爐의 증거를 發見한 바 있다.

先史時代期間중에 우라늄鑛床내에서 自然連鎖反應이 일어날 수 있었다는 概念은 1956년 美國의 物理學者인 P.K.Kuroda氏에 의해 밝혀진 바 있다.

高濃度の 核分裂性 同位元素가 있다고 가정할 경우 連鎖反應에 必要로 하는 것은 高濃度の 우라늄과 물의 供給, 그리고 中性子吸收率이 높은 要素의 不在條件이 한꺼번에 갖추어 지는 것이다. 따라서 이러한 條件들이 滿足되었을 가능성은 매우 있을 법한 일이며, 또한 時間을 거슬러 올라갈 수록 더욱 높다.

1972년 여름 프랑스原子力委員會의 科學者들은 매우 오래된 過去에 Oklo우라늄鑛床에서 自然的인 連鎖反應이 發生하였다는 珍奇한 發見을 하게 되었다. 鑛床의 어떤 分析들은 수십만 년동안에 原子力發電所의 原子爐에서나 일어날 수 있는 反應을 일으켰던 흔적을 갖고 있었으며, 이 反應으로 인해 대부분의 周邊要素들은 同位元素構造가 변경되어 있었다.

이와 같은 現象이 約 18億年前에 發生하였

다고 假定할 때 Oklo地域에서의 가장 놀랄만한 特徵은 이러한 實存 證據가 오늘날까지 남아있다는 사실이다. 왜냐 하면 그 當時 地球의 表面은 山岳地域의 浸蝕과 地層形成, 大陸의 生成, 變形 및 消滅等 繼續的인 變化를 겪고 있었고, 더 나아가서 우라늄은 물의 循環에 따라 아주 쉽게 位置를 移動할 수 있는 流動性 物質이기 때문이다. 이러한 移動現象은 요즈음의 우라늄鑛山에서도 쉽게 볼 수 있다. 이러한 사실들로 인해 化石化된 原子爐의 發見은 더욱 믿기 어려운 事實로 받아들여지고 있으며 매우 異例的인 狀況과 關聯되어 있다는 것을 나타내고 있다.

Oklo原子爐의 發見

우라늄은 주로 45億年の 半減期를 갖고 있는 우라늄238과, 이보다 짧은 7.1億年の 半減期를 갖은 우라늄235로 構成되어 있다. 우라늄235는 한 때 많은 몫을 차지하고 있었는데 表에서

보는 바와 같이 시간이 過去로 거슬러 올라감에 따라 存在比가 增加하고 있다.

대부분의 原子力發電所에서는 輕水を 中性子 減速材로 使用할 수 있도록 하기 위하여 우라늄 235의 濃縮度를 인위적으로 增加시키고 있다. 約 18億年 前의 天然우라늄構成은 물이 存在하고 中性子を 吸收하는 放射性 核種이 많지 않은 곳에서 풍부한 우라늄鑛石에 의해 自然連鎖反應이 可能할 정도로 우라늄 235의 濃度가 높은 것이었다.

1972年 6月 7日 프랑스 南部에 위치한 Pierrelatte 우라늄濃縮工場에서 分析化學者인 Henri Bouzigue氏는 同位元素構成을 알아보기 위해 6弗化우라늄가스실린더를 分析하고 있었다. 그는 가스에서의 우라늄 235 含量이 0.7171 퍼센트 밖에 되지 않는 것을 發見하였는데, 통상 天然우라늄에서 우라늄 235의 構成比는 0.7202 ± 0.0006 程度가 正常範圍로 간주되고 있었다.

비록 그 誤差가 매우 미미한 것이었지만 統計的으로 볼때 이것은 매우 중대한 意味를 갖고 있었다. 왜냐 하면 우라늄同位元素의 構成은 地球上에서 뿐 아니라 달에서 까지도 정확히 一致하고 있었기 때문이다. 또한 過去 10年동안 프랑스內 設備에서 행해진 20萬件 以上の 類似한 檢査에서도 이와 같은 例外 境遇는 發見된 적이 없었다.

그 化學者의 주의깊은 分析이 없었더라면 이러한 誤差는 아마 별로 눈에 띄지 않은채 지나쳤을지도 모른다. 추가로 실시된 檢査에서도 測定이나 取扱상의 실수로 인해 오차가 발생된 것이 아니라는 것이 證明되었고, 實際로 標準 以下の 모든 數値에 대한 資料가 모아졌다.

濃縮工場 化學陣들은 처음 濃縮工程중에 우라늄이 減損우라늄(Depleted Uranium)과 稀釋되었거나 汚染되었을 可能性에 대해 憂慮를 하였으

〈表〉 우라늄 235 存在 現況

時 期	U-235 存在比
현 재	0.72 %
5억년전	1.08 %
10억년전	1.63 %
15억년전	2.44 %
20억년전	3.65 %
25억년전	5.42 %
30억년전	7.87 %

나, 調査結果 그렇지는 않았다. 또 다른 可能性은 原子爐에서 既 使用되어 우라늄 235가 소모된 우라늄(再處理된 우라늄)에 汚染된 것이 아닌가 하는 것이었으나, 그럴 경우 存在하여야 하는 우라늄 236이 發見되지 않았기 때문에 이 可能性도 排除되었다.

問題의 原因이 무엇인지를 알아내기 위하여 着手된 體系的 分析프로그램에 따라 10週간에 걸쳐 우라늄同位元素에 대한 試驗을 350回 以上 실시하였으며, Pierrelatte濃縮工場에서의 UF₆ 生産段階에서 부터 Malvesi와 Guegnon의 製鍊過程에 이르기 까지 全工程에 대한 點檢이 실시 되었다. 마침내 Mounana와 Oklo地域에서 鑛山을 運營하고 있는 Franceville 우라늄鑛山會社(COMUF)로 부터 供給된 鑛石에 대해서 疑問이 제기되었다.

그러나 科學者들은 비록 그 鑛石들의 成分이 비정상적인 것이었음에도 불구하고 이 會社가 取扱하고 있는 鑛石이 人위적으로 汚染된 것이 아니고 自然鑛石이라는 事實을 깨닫게 되었다. 問題의 鑛石들은 Oklo鑛床의 最北端에 位置해 있었다.

다음 段階의 研究에서는 아주 놀라운만한 結果를 찾아냈다. 즉, Mounana工場에서 過去 2年 사이에 生産되었던 우라늄原鑛에 대한 試料를 採取·分析한 結果 1970년 12월에서 1972년 5월 사이에 이 工場에서 生産된 모든 우라늄이 正常置 보다 낮은 同位元素 存在比를



▲Oklo 原子爐 地域.

갖고 있었던 것을 알아냈다. 모든 船積分을 計算하여 보면 우라늄235의 不足量이 約 200 kg 정도 되었다. 그밖에도 問題地域의 原鑛에 대한 精密分析 결과 處理되지 않은 原鑛에서도 非正常的인 狀態를 찾아낼 수 있었다. 數年前에 파악된 深査用 試錐孔으로 부터 採取된 코어 부스러기(Debris)에서 同位元素의 含量이 0.04퍼센트 정도로 낮은 우라늄이 發見되었으며, 科學者들은 그들이 매우 중요한 現象을 다루고 있다는 認識을 갖게 되었다.

이와 같은 非正常狀態를 說明할 만한 理論은 비록 거의 없는 狀況이었지만, 이 鑛床에서 아주 오래 전에 核連鎖反應이 일어났었다는 意見이 1972년 8월 初에 가서 判明되었다. 이를 뒷받침한 가장 決定的인 증거는 鑛石에서 發見된 核分裂生成物이었다. 生成物들은 매우 不規則한 分布로 檢出되었으며, 특히 核分裂生成물이 많은 地域에서 이러한 現象이 더욱 심했다.

化學적으로 分離되어진 數種의 元素들에 대한

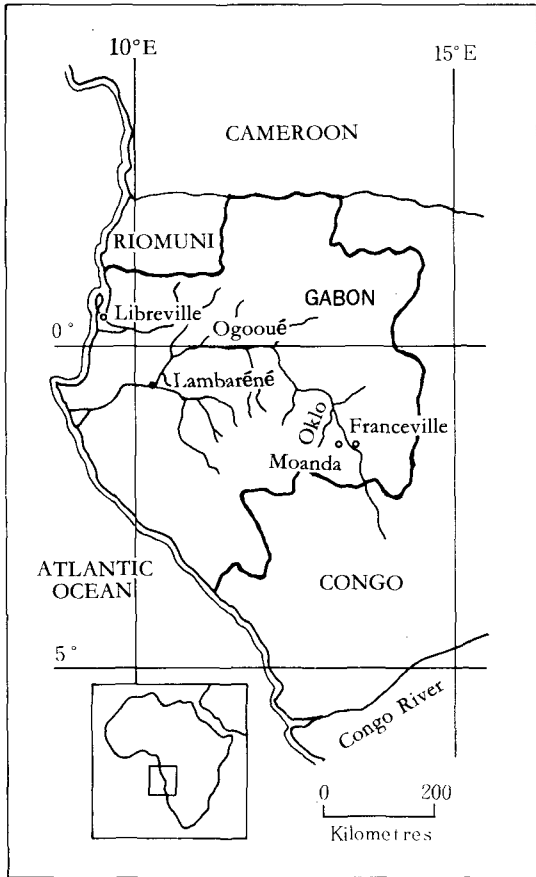
分析은 더욱 精密한 데이터를 提供하였으며, 가장 注目할 만한 事項은 네오디뮴과 사마리움에 대한 試驗으로서 天然成分과는 아주 다르게 비교적 많은 量이 檢出되었다. 이러한 要所들의 不規則性을 勘案하더라도 나머지 成分에 대한 比率는 分裂率(Fission Yield)로 부터의 計算置와 정확히 一致하고 있다(때에 따라서는 1% 以下).

研究에서 얻어진 結果는 매우 注目할 만한 것으로서 이와 같은 比率의 核分裂이 이루어지기 까지는 아주 오래된 期間동안 連鎖反應이 維持되었어야 하였다는 것이며, 우라늄238에서 20億年 以上 동안 이루어진 自然分裂 보다 수십만배 以上の 核分裂이 進行되었던 것으로 보였다. 더우기 鑛床의 매우 오래된 壽命(17億年 以上)으로 인해 그 期間동안에 우라늄混合物에서 發生되었을 여러가지 變化를 고려한다면 臨界形態가 可能했을 것으로 判斷되었다.

原子爐의 位置

上記와 같은 發見內容은 1972년 9월 25일 프랑스科學아카데미에 提供된 資料를 통해 발표되었다. 그 당시에는 核反應이 일어났던 곳으로 推定되는 地域의 物理的 形態에 대하여 구체적 인 사항이 確認되지 않았으나, 問題地域 鑛床에서의 採掘作業은 일시적으로 中斷되었으며, 採掘되었던 모든 鑛石들은 Uranate로 전환된 후 産業工程에 투입되었다.

따라서 우라늄鑛石이 이 地域에 어떤 形態로 배열되어 있는지에 대하여는 斷言할 수 가 없다. 그러나 反應을 겪은 鑛石들은 상당히 변해 있을 것이며, 우라늄이 散布되어 있을 것이라는 것은 추정이 可能하였다. 한편 여러가지 與件들로 이루어질 때 反應이 發生되었던 地域들이 어느 정도 까지는 原形을 유지하고 있는 것으로 보였다.

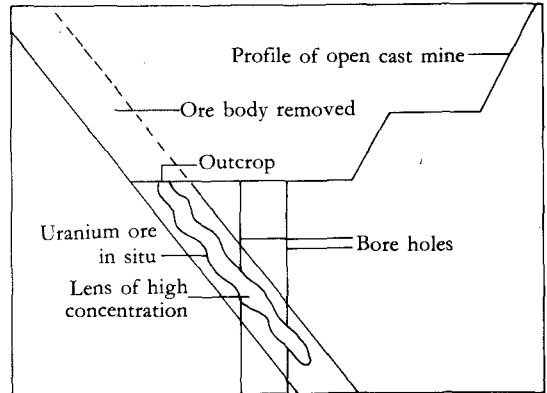


〈그림 1〉 가봉공화국과 Oklo江 위치도

非正常的 同位元素를 갖고 있는 샘플이 發見된 곳이 바로 이 地域으로서 鑛山의 試錐孔에서 放射能을 띤 통나무를 試驗한 結果 많은 量의 鑛物이 덩어리로 모여 있는 것을 알게 되었다. 이에 따라 臨界質量의 形態가 構成되어 核反應이 전개된 곳이 바로 이 地域이라는 것이 분명해 졌다.

Oklo鑛床은 45°傾斜 形態로 5~8m 두께의 우라늄層을 갖고 있는 沈積型 鑛床으로 採掘은 수평계단을 掘鑿하는 방식으로 수행되었다. 확인된 岩層 方向은 아직 발굴이 되지 않은 광상의 아래 쪽을 향해 계속 進行되고 있었다.

推定되는 鑛脈을 따라 高濃度 우라늄鑛石을 찾기 위한 深査가 進行된 끝에 非正常 우라늄을



〈그림 2〉 Oklo鑛床과 試錐孔 단면도

發見하게 되었는데 그림2에서와 같이 수직으로 試錐孔을 뚫고 調査를 시작하였다. 그 結果 反應이 일어났던 자리(Seat)가 毀損되지 않았다는 것을 確認할 수 있었다. 高濃度 鑛物은 조밀하고 평평한 形態의 鑛床 方向을 따라 발견되었고, 그 範圍를 精確하게 밝혀낼 수 있었다.

이 덩어리의 크기는 10~20m의 길이에 1m 정도의 두께로서 우라늄 平均 含量이 一般 광석의 50배가 넘는 25~40퍼센트에 달하고 있었으며, 일부 구역에서는 50~60퍼센트의 含量을 보이기도 하였다. 이곳 주변에서의 우라늄濃度는 매우 급격하게 감소되어 있었고, 이에 따라 농축된 물질들은 우라늄鑛床 내부에서 렌즈形態를 形成하였다.

同位元素分析에 의하면 高濃度의 鑛床내에서 우라늄同位元素의 品位가 매우 低下되어 있었는데 반하여, 一般우라늄들은 極少量의 減損우라늄이 存在하고 있는 汚染무리(Halo of Contamination)로 부터 2~3m가량 떨어져 있었다. 反應이 일어났던 區域들이 계속하여 發見되었는데, 약 800톤 정도의 우라늄金屬이 反應을 일으키는 役割을 하였던 것으로 보였다.

한편 鑛床表面에 대한 많은 研究가 進行됨과 아울러 反應發生地域에 추가로 150個 以上の 구멍을 뚫어 岩心의 試料를 採取·分析하였다.

대부분의 境遇 우라늄²³⁵同位元素의 濃縮度는 0.6퍼센트 以上이었으나 0.5에서 0.6퍼센트 정도의 濃縮度를 갖고 있는 우라늄도 많이 있었다. 그러나 反應地域 일부에서의 우라늄 濃縮度는 0.5퍼센트 以下였으며, 심지어 0.4퍼센트 이하의 경우도 記錄되었다. 採取된 試料 가운데 가장 낮은 濃縮度는 0.296퍼센트였다.

核分裂性 同位元素의 절반 以上이 核分裂로 인해 소모된 우라늄도 存在하고 있었다. 어떤 地點에서의 反應率은 그곳에 있던 우라늄 톤당 25,000MW·日 以上으로 추정되었으며, 반응이 일어났던 지역 전체를 합하면 生産된 에너지가 15,000MW·年 정도인 것으로 예측되었다.

敷地の地質

이번 現象은 地表面 부근에서 發見되었기 때문에 鑛物學的 研究와 함께 여러가지 地質學的 調査가 可能하였다. 鑛化現象은 두 週期동안에 發生되었다는 것이 認定되었는데, 初期의 경우 沈澱物이 蓄積되는 동안과 蓄積이 끝난 바로 직후 1次濃集이 이루어 졌으며 酸素還元 過程에 이은 表面水의 循環과 함께 시작되었다.

그러나 우라늄 濃集을 통한 反應地域의 형성은 地殼運動의 결과로 나중에 가서야 이루어 졌다. 反應地域의 풍부한 광물은 그곳을 둘러싸고 있는 周邊과는 아주 相異하였는데 前者의 경우, 주로 沙岩을 함유하고 있는 鑛床에서는 보기드물게 粘土렌즈(Clay Lenses) 形態였다.

Oklo鑛床層에서 통상적으로 볼 수 있는 礫岩이 없는 곳과 粘土렌즈의 位置는 정확히 일치하고 있었다. 이에 따라 高濃度를 이루게 된 地殼運動과 破壞현상에 대한 分析이 수행되었다. 鑛床내의 여러 곳에서 發見된 有機物들이 超高濃集過程에 중대한 역할을 한 것으로 생각되었다. 처음에 有機物들은 파괴된 지역(Fracture

Zone)에 축적되어 있다가 다시 移動되었으며, 박테리아도 역시 우라늄沈澱에 역할을 담당하였던 것 처럼 보였다.

反應地域에서의 鑛物들은 鑛物學的으로는 보기드문 樣相을 띠고 있었는데, 有機物이 存在하고 있지 않은 것은 별개로 하더라도 有機堆積(Detritic)鑛物도 함유하지 않고 있었다. 이것은 核反應의 결과 때문에 일어난 것으로 생각되었다.

우라늄은 無定型 微晶이 집합되어 산출되는 瀝靑우라늄鑛(Pitchblende) 形態가 아닌 結晶狀態의 Uraninite로 發見되었다. 다양한 형태의 UO_2 는 300~350°C 정도의 溫度에서 生成된다. 이는 중요한 의미를 내포하고 있는데, 즉 鑛物 가운데서는 核反應 및 核分裂의 흔적을 찾아볼 수 없으며 貯藏에너지와 結晶體의 無秩序 흔적도 찾아볼 수 없었다. 따라서 鑛物들이 放射線에 의해 琉璃化되고 그로 인해 再結晶을 이룬 것으로 생각되었다.

核分裂生成物の永續性

核分裂生成物들은 새로운 核種을 만들어냄으로써 흔적을 남기게 되는데, 이러한 核種들은 매우 오래된 過去에 生成되었기 때문에 誘導放射能도 이미 오래 전에 멈추어져 있다. 우라늄²³⁸에 중성자가 吸收됨으로써 생성되는 플루토늄은 半減期가 24,000년이나 되므로 플루토늄의 發見에 관하여는 의문의 여지가 없었다. 우라늄²³⁶은 2,400만년의 半減期를 갖고 있으며, 우라늄²³⁵에 중성자 흡수로 인해 생겨난다. 이 우라늄²³⁶이 완전히 사라져 버렸는데, 이는 鑛物내에 현재 極少量 存在하고 있는 토륨으로 變換되었다. 連鎖反應 마지막 段階에서의 핵분열생성물들만이 발견되었으며 따라서 그들의 化學的 스펙트럼은 産業用 原子爐에서 발견된 것들과는 아주 相異하였다.

核反應 制御機能

Oklo에 관한 가장 중요한 質問은 “어떻게 이와 같은 原子爐가 作用을 하였는가?”하는 것이다. 連鎖反應이 일어나는 곳에서는(中性子 増倍係數가 1 以上인 경우)單位 基數당 核反應數가 계속 增加하게 된다. 즉, 增加되는 中性子を 制御할 수 있는 기능이 없다면 核反應은 爆發현상으로 될 수 있다는 것이다. 制御기능은 거의 항상 中性子束에 干渉하여 어느 정도 수준에서 中性子束을 安定시키는 것이다. 이는 出力의 增加가 中性子 増倍係數를 감소시키고 또한 이의 逆기능도 가능한 상태를 말한다.

그러나 오랫동안 核反應을 持續시키기 위하여는 이것 만으로도 충분하지는 않으며 生成된 同位元素構成의 中대한 變化에도 불구하고 反應度를 유지할 수 있도록 하는 補償方法이 있어야만 한다. Oklo地域에서 特記할 만한 사항은 이 지역의 일부에서 分裂性 核種의 절반 이상이 사라진 곳이 있다는 사실이다.

그렇다면 어떻게 補償과 安定的의 두가지 과정이 Oklo地域에서 이루어질 수 있었는가? 이에 관한 가능성있는 假定은 다음과 같다. 원래 核反應이 일어날 수 있도록 한 시초가 우라늄의 濃集過程인 것으로 생각되었다. 그러나 그후 과학자들은 우라늄 濃集이 分裂性 核種의 소멸을 補償하여 核反應 유지에 寄與하는게 가능한지 與否와, 우라늄 퇴적과정 자체가 核反應에 의해 방해를 받았는지 與否에 관해 疑問을 갖게 되었는데 後者일 가능성에 대하여 몇가지 事由를 갖게 되었다.

殘餘物의 濃度

核反應이 일어날 당시 그 地域에는 비록 微量 일지라도 中性子 吸收力이 높은 要素인 보론과 희귀한 土類의 사마리움, 가돌리니움 등이 存在

해 있었으며 이러한 要素들은 毒成分의 物質이었다. 이와 같은 核種들은 照射에 의해 아주 빠르게 破壞되며 중성자 増倍係數를 增加시키는 경향이 있다(반면에 分裂性 核種의 破壞는 増倍係數를 減少시킴). 따라서 反應度는 증가하기 시작한다. 그러나 이러한 毒物質들이 대부분 破壞되는 末期에 가서는 分裂性 核種의 破壞가 우세한 因子가 되므로, 이 時間으로 부터는 反應度가 감소하게 된다.

毒物質들의 이러한 活動이 우라늄의 持續的인 供給이 없이도 反應이 계속될 수 있었는지를 說明하고 있다. 그러나 이러한 進行은 그 본래의 성격상 불안정한 형태이므로 安定化 過程이 반드시 증재역할을 하여야 하고, 局部的이지만 물의 제거만이 가능한 방법이었다. 만약에 물의 양이 충분하지 못하게 되면 중성자의 減速이 불완전하게 되므로 중성자 증배계수는 매우 적게 될 것이다. 核反應은 따라서 常軌를 벗어나게 되며 에너지가 平衡狀態 各 순간 순간마다 적절한 濃度を 유지하기 위하여 물을 除去할 수 있을 만큼 에너지가 충분한 位置에 까지 이르게 된다.

중성자의 均衡은 毒物質의 상당수가 破壞되었을 때 가장 알맞은 狀態였으며 放射能은 持續的으로 減少하는 경향을 보였다. 出力水準이 천천히 감소되면서 물은 다시 되돌아 올 수 있었다. 에너지레벨과 核反應期間은 따라서 熱傳達條件과 關係가 있었다. 臨界는 우라늄濃도가 높았던 일부 制限된 地域에서 처음 도달되었던 것에 틀림이 없다. 中性子들이 擴散되어 나가면서 反應地域 주위의 鑛石들은 毒物質을 破壞할 수 있을 만큼의 中性子束을 받게 되었고, 이에 따라 周邊地域에서도 나중에 臨界에 도달할 수 있게 되었다. 따라서 核反應은 불길과 같은 전달과정을 거쳐 점차적으로 高濃度の 鑛石을 함유하고 있는 地域의 대부분으로 번져나간 것으로 생각된다.