

# FOSİLLEŞMİŞ DOĞAL ATOM REAKTÖRÜ MÜ?

## Oklo Uranyum Yatakları (Gabon/B-Afrika)

MUHARREM SATIR, Maden Teknik ve Arama Enstitüsü, ANKARA

### ÖZ:

Fransız Atom Enerjisi Komisyonu bilim adamları 1972 Haziranında Oklo Uranyum Yatakları içerisinde 1.7-1.8 milyon yıl önce "spontan Fission" sorucu zincirleme çekirdek tepkimelerinin oluşturduğunu bulmuşlardır. Zincirleme çekirdek tepkimeleri sırasında geçen olaylar aynen bugün enerji üreten çağdaş Reaktör'lerde olduğu gibi olmuştur. Adı geçen yörede bugüne dek minimum 6 fosil Atom Reaktör'ü saptanmış olup, 1 milyon yıl içinde 500 tonun üzerinde Uranyum Oklo-Reaktör'lerinde kendiliğinden bölünerek tüketilmiştir. Bir milyon yıl içerisinde çevreye yayılan enerji, enerji üreten orta boyuttaki çağdaş bir Atom-Reaktör'ünün 50 yılda üretebileceği elektrik miktarına eşdeğerdir.

### GENEL BİLGİ

Uranyum yeryuvarının en ağır elementi olup 1789 yılında Klaproth tarafından bulunmuştur. Atom sayısı 92 olan uranyum mineralinin yapısına 4.5 ve 6 değerli olarak girer. Doğal Uranyum izotoplarının doğada bugünkü dağılımları şöyledir:

$U^{234}$  0.0056 %;  $U^{235}$  0.7205 %;  $U^{238}$  99.274 %

yukarıda belirtilen Uranyum izotoplarının çekirdekleri kararlı olmayıp Alfa-Emisyonu etkisiyle yarılanma katsayısına bağlı olarak diğer çekirdeklere dönüşürler. Uranyum 235 ve 238 izotoplarının yarılanma katsayıları

$U^{235}$  için  $t_{1/2}=7.1 \times 10^8$  yıl

$U^{238}$  için  $t_{1/2}=4.51 \times 10^9$  yıl

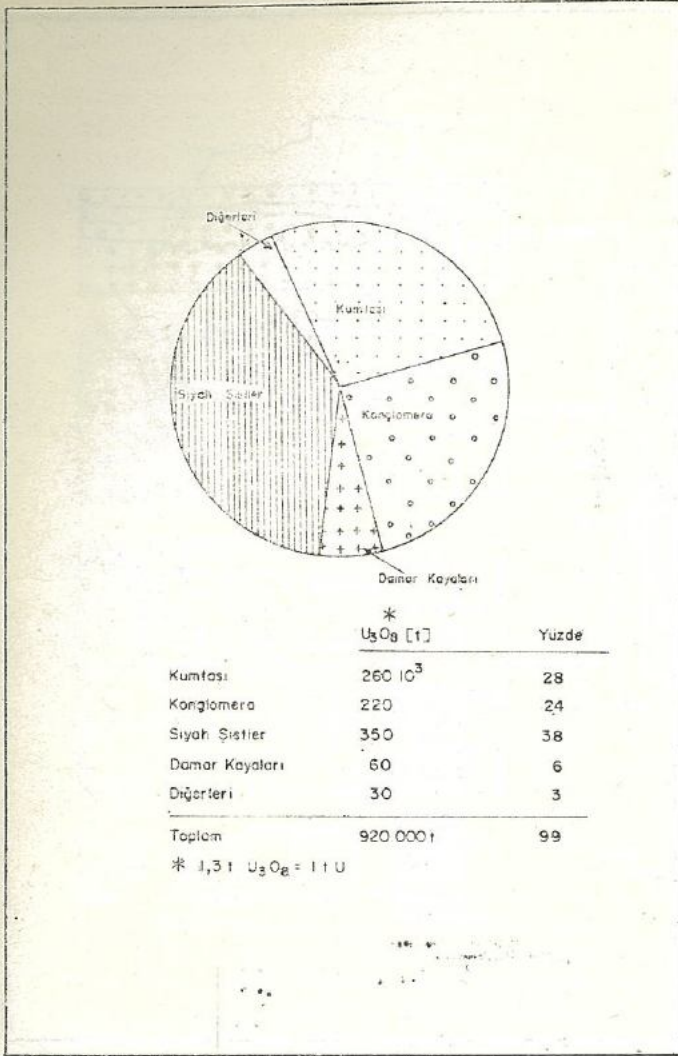
olarak saptanmıştır. (Steiger ve Jager, 1977). Uranyumun yeryuvarının en önemli elementi olmasının nedeni Uranyum çekirdeklerinin kararsız olmaları ve Toryum, Potasyum gibi elementlerle birlikte yerkabuğu (konveksiyon akımlarının) enerji hazinesini vermeleridir. Ayrıca Uranyum enerji üreten çağdaş Reaktör'lerde yapay yollarda parçalanarak insanlığın, önümüzdeki yüzyıllar için, enerji gereksinimini karşılamak üzere kullanılmakta ve kullanılacaktır.

Uranyum uzay içerisinde, daha doğrusu güneş sisteminde dağılımı çok az olup 100 milyon Silisyum atomuna karşın 1 uranyum atomu kadardır. Yeryuvarında dağılımı genelde çok az olan Uranyum litofil bir elementtir. Yeryuvarının oluşumu sırasında Uranyum içeren mineraller silikat fazı bağımlılığı ve paralelinde yeryuvarı kabuğunun dış zonlarında zenginleşmişlerdir. Uranyumun Jeolojik formasyonlara bağımlı olarak yeryuvarında dağılımı Şek. 1'de şematik olarak verilmiştir. (Nininger, 1974). Yerkabuğundaki zenginleşme sonucu Wolfram, Molibden ve Kalay'da olduğu gibi Uranyumun ortalama dağılım miktarı 2 ppm'dir (tonda 2 gr). Böylelikle Uranyum yerkabuğunda gümüş'e göre 50, altına göre ise 10 kez daha az olup ortalama 2 mgr/m<sup>3</sup>'den (Brinck, 1974; Nininger, 1974).

Birçok mineralin yapısında iz element olarak bulunan Uranyum kayalarda dağılım çok değişiktir. Örneğin, tek düze bir şekilde diğer elementlerin izomorf tamamlayıcısı olarak Zirkon, Monozit veya Apotit gibi minerallerin ana kimyası içerisinde bulunabileceği gibi mineral sınırlarında derişik veya hatalı kristal yapılarında serbest olarak bulunur. Uranyum konsantrasyonu genelde en geç kristalleşen minerallerde yoğun olup silikatça zengin kayalarda Uranyum miktarında artma görülür. Örneğin, Ultrabazik kayalarda Uranyum konsantrasyonu 1.2 kez daha azdır.

Büyük iyon yarıçapı nedeniyle (50.8-1.1 Å) Uranyum hafif uçucu çözeltiler şeklinde asitik mağmada zenginleşme gösterir. Böylelikle asitik mağmanın son ürünü olarak hidrotermal damar yatakları Pechblend olarak Ni, Co, Ag ve Bi ile birlikte bulunur. Uranyum en önemli özelliklerinden biri oksidlenme sonucu hafif uçucu Uranil iyonuna ( $UO_2^{+2}$ ) dönüşmesidir. Böylelikle Uranyum, Uranil iyonu şeklinde yerüstü ve yeraltı suları ile kolaylıkla taşınıp devingenleşmektedir. Bu nedenle Uranyum birincil kökenli yataklar dışında ikincil olarak oluşmuş Fosfat, Arsenat, ve diğer tuzlar içerisinde rastlanmaktadır. Uranyum içeren çözelti-

(1) Yazar tarafından Haziran 1977 yılında Viyana Üniversitesinde verilen sözlü bildiri ve 1977-1978 kış semestresinde Berlin Teknik Üniversitesinde okunan "İzotop jeolojisi" dergisinin Uranyum-Kurşum-Yöntemi Bölümünden genişletilerek hazırlanmıştır.



Şekil 1: Jeoloji birimlerine bağlı dünya Uranyum rezervleri

lerin organik gerecin etkisiyle tortul sahalarda yeniden gökeli sonu "İmpregasyon" yatakları oluşur. Büyük bir olasılıkla Kolorado Platosunda (USA) Uranyum içeren kumtaşları içerisindeki zengin Carnotit yatakları bu şekilde oluşmuştur. Tortul kökenli olarak oluşmuş ardından şiddetli metamorfizma geçirmiş Uranyum yataklarına son bir örnek olarak Witwatersrand (Afrika) ve Blind River (Kanada) gösterilebilir. Tortul kökenli Uranyum yataklarının yan ürünü olarak siyah sistler (K-Afrika) içerisinde işlenen Uranyum yatakları verilebilir.

En önemli ve sık görülen Uranyum minerali Uraninit veya Pehblend olup kimyasal formülü  $UO_2$  ile  $U_3O_8$  arasında değişir. Ekonomik önemi nedeniyle Carnotit  $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2$ , 1-3  $H_2O$ , Brannerit  $UTi_2O_6$ , Coffinit  $U(SiO_4)_2$ , Gummite (Uranyum mineralleri karışımı), Autunit  $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2$ , 10-12  $H_2O$ , Tormerit  $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2$ , 8-12  $H_2O$  ve Uranofan (Ca-U-Silikat) Uranyum içeren önemli mineraller arasında sayılabilir. Küçük çaptaki Uranyum yatakları işletilebilmesi için Uranyum konsantrasyonunun yüzde 1, büyük Uranyum yataklarında ise yüzde 0.1 oranında olması gerekir. Ayrıca yüzde 0.02 Uranyum konsantrasyonu içeren mineralleşme zonları işletilen diğer maden yatakları

rının ve Endüstriyel ham maddelerin yan ürünü olarak ekonomik değerdedir, (Wlambcke, 1967).

Yeryuvarında önemli Uranyum Yatakları ve bunların rezervleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Brink, 1974).

| Önemli Uranyum Yöreleri                   | Rezerv (% olarak) |
|---|-------------------|
| Colorado + Wyoming                        | 30                |
| Witwatersrand                             | 23                |
| Prekambriyum Kratonları                   | 21                |
| N-Territory (Avustralya)                  | 8                 |
| Herseniye yörelerinde                     | 6                 |
| Nijerya, Gabu, Merkezi Afrika Cumhuriyeti | 8                 |
| Diğer Yörelerde                           | 4                 |

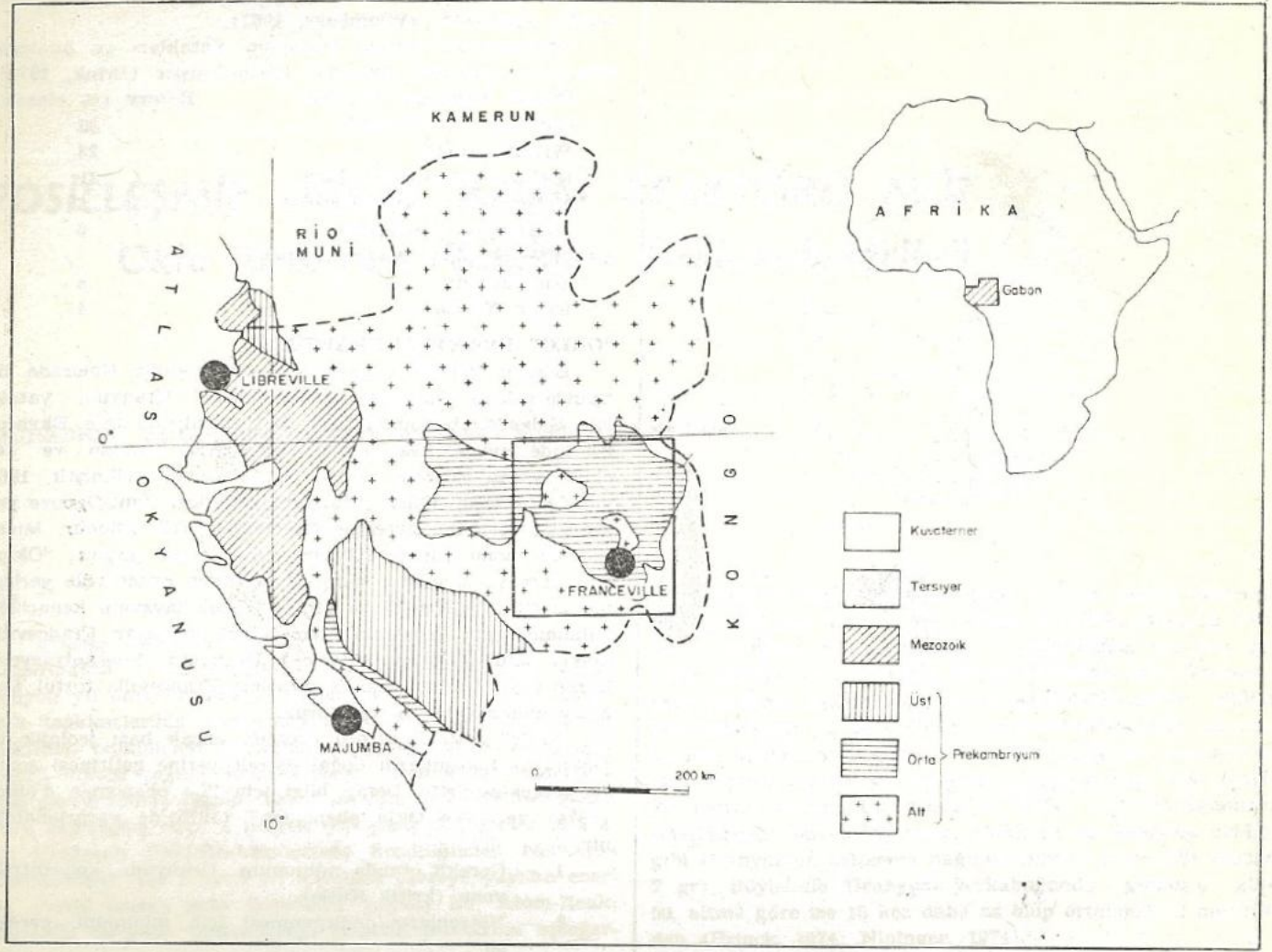
### "OKLO" URANYUM REAKTÖRÜ

Burada yakından incelemek istediğimiz Kolorado tipinde çok az Vanadyum içeren "Oklo" Uranyum yatakları Gabon'da bulunmaktadır. Batı Afrika'da tam Ekvator üzerinde bulunan Gabon ülkesinin coğrafi konumu ve Jeolojik yapısı gematik olarak Şek. 2 de gösterilmiştir. 1968 yılında bulunan "Oklo" Uranyum yatakları Haut-Ogoove yakınında, başkent Livreville'nin 500 km GD bulunur. Mineralleşme zonu yörede 900x600 millik alana yayılır. "Oklo" Uranyum ve Mounana Manganez yatakları Franceville yerleşme merkezi yöresinde ve büyük tortul havzanın kenarında bulunmaktadır. Yöredeki tüm tortul kayalar Franceville adıyla anılır. Ortalama yüzde 1 Uranyum konsantrasyonu içeren 5-8 kalınlığındaki Kumtaşları Franceville tortul formasyonunun tabanını oluşturur.

"Oklo" fosil Reaktörü olasılığı ancak bazı jeolojik ve jeokimyasal koşulların doğal olarak yerine getirmesi sonucu gerçekleşmiştir. Detay bilgi için "Le phenomene d'oklo" (1974) ve "The Oklo phenomene" (1975)'de yararlanabilmiz.

1. — Gerekli oranda minimum Uranyum konsantrasyonu (kritik Kütle)
2. — Nötronların indirgenmesi için minimum, gerekli su
3. — Zincirleme çekirdek tepkimelerinde bugüne dek yörede volkanizma, deprem v.s. gibi Jeolojik süreçlerin olmaması

"Oklo" fosil Reaktörünün bugün çekirdek fiziği yönünden çok iyi tanınmasının nedeni adı geçen Uranyum yatağının son 2 milyar yıl içerisinde konumu dışında herhangi bir jeolojik süreç geçirmemiş olması sonucudur. Uranyum içeren kumtaşları tortullaşma sonucu yatak konumunda teşekkül etmiş ve ardından kumtaşı serisi tektonik itilmelere bağlı olarak 45° kaldırılmıştır. Şek. 3 ve Şek. 4 itilmeler sırasında zincirleme çekirdek tepkimelerini içeren Kumtaşı formasyonunda herhangi bir değişim olmamıştır. Genelde yüzde 0.4-0.5 Uranyum zenginleşmesi içeren 20.000 ton rezervli "Oklo" Uranyum yatakları ekonomik açıdan çok önemlidir (Naudet 1975) ve Keller (1975). Küçük boyutta (1 x 2 m) Uranyumca zengin bazı yörelerin yüzde 85  $UO_2$  konsantrasyonunu içermesi gerekir. Fakat bugüne dek yapılan araştırmalarda saptanan en yüksek  $UO_2$  değeri yüzde 60 olmuştur. Böylelikle saptanamayan yüzde 25  $UO_2$  miktarının radyoaktif parçalanma sonucu Kurşun'a dönüştüğü ortaya çıkar. Büyük bir varsayım ile yüzde 85  $UO_2$  içeren yörelerde Uranyum zenginleşmesi tektonik itilmeler sonucu oluşmuştur. Bu yörelerde Uranyum Uraninit ( $UO_2$ ) şeklinde, diğer yörelerde ise genellikle Pehblend ( $U_3O_8$ ) olarak bulunur. Pehblend 300° sıcaklıkta Uraninite dönüşmektedir. Fakat



Sekil 2: Gabon'un (B-Afrika) basitleştirilmiş Jeoloji Haritası.

bu tür bir sıcaklık "Oklo" Uranyum yataklarında bugüne dek saptanamamıştır. "Oklo" Uranyum yatakları az miktarda nötron absorbe eden iz elementleri içerir. Örneğin Vanadyum (200-800 ppm). Krom, Nikel, Bakır (her biri 50-100 ppm). Bor (20-250 ppm), Lantan, Lityum (her biri 100 ppm) ve Hafniyum (<20ppm). Keller (1976).

Akarsu ve Delta tortullaşma koşullarını içeren Uranyum Franceville Kumtaşları genelde kıvrımlı Kuvars, az miktarda Feldspat ile Asfalt ve Silikat bakımından zengin ana elementlerinin yüzde olarak dağılımı şöyledir;

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 30-40    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7-23     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1-5      |
| FeO                            | 2-6      |
| CaO                            | 0.2-1.6  |
| MgO                            | 2-17     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,1-3    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,2-0,6  |
| MnO                            | 0.05-0.3 |

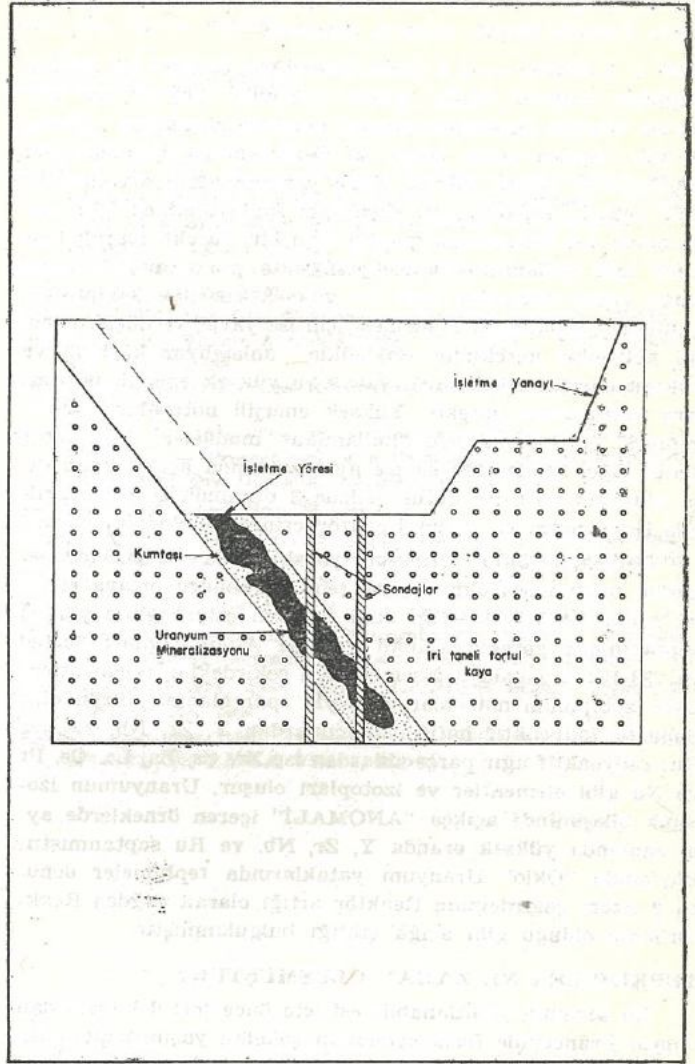
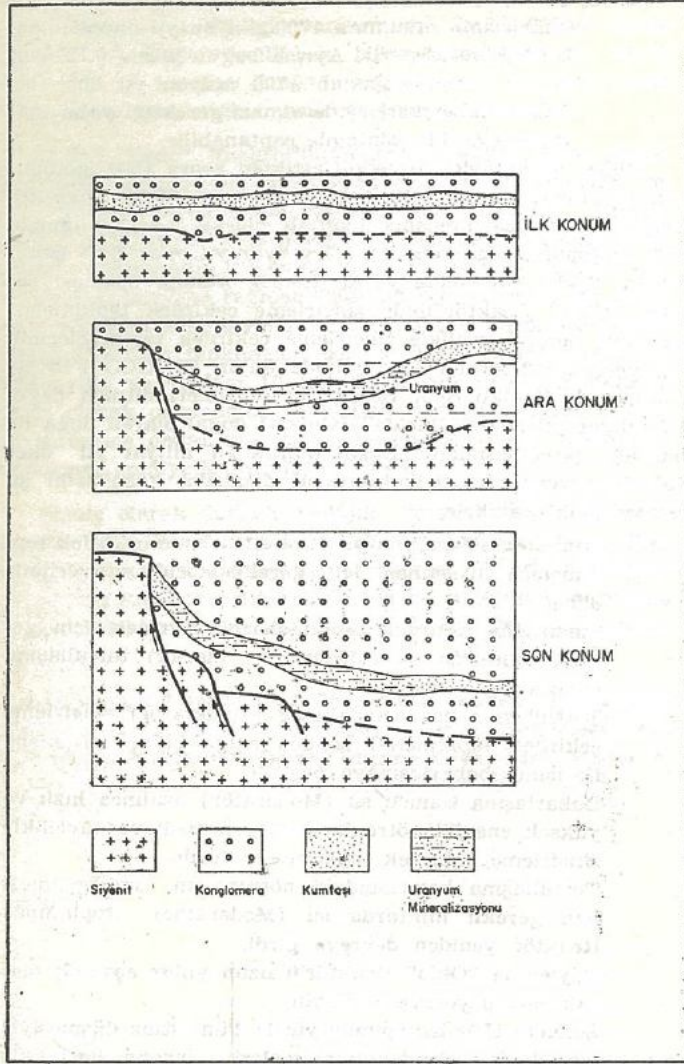
Bunların dışında iz element olarak Sodyum, Fosfor, Kurşun Su ve yerel olarak konsantrasyonu yüzde 0,01-0,5 arası değişir hatta bazı yerlerde yüzde 60 zenginleşme gösteren

Uranyum içerir. 'Oklo' uranyum yatakları içerisinde saptanan mineraller şunlardır: Pechblend (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), Coffinit [U(SiO<sub>4</sub>)<sub>1-x</sub>(OH)<sub>4x</sub>], Rutharfordit (UO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub>), Chalkolith [Cu(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. B-12 H<sub>2</sub>O], Fourmarimit (Pb O 4UO<sub>2</sub>. 5H<sub>2</sub>O) ve Wöllsendörfit [(Pb, Cu) U<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 2H<sub>2</sub>O].

Uranyum konsantrasyonu, belli zengin mineralleşme zonları dışında, genelde kum taşlarının matriksinde bulunur. "Oklo" Uranyum yataklarının jenezi ile ilgili olarak değişik görüşler var olup güçlü bir varsayımla Franceville tortul havzası kenarında asitik volkanik küllerin yıkınması sonucu oluşan çözellilerin kum taşları içerisine taşınması ve çökelmesiyle oluşmuştur. Bu nedenle birbiriyle konum olarak doğrudan bağlı olmayan değişik oranda uranyum konsantrasyonu içeren "Oklo" Uranyum yataklarının oluşumuna güçlü bir varsayımla volkanik kökenli çözellilerin çökelim alanında dolaşım ve dolaşım sırasında tektonik itilmelerin katkısı büyüktür.

#### REAKTÖRÜN BULUNMASI:

"Oklo" fosil Atom Reaktörü saha çalışmalarıyla değil laboratuvarında yapılan çok titiz ve duyarlı izotop Jeolojisini içeren çalışmalar sonucu bulunmuştur. 150 millik dairesel bir



Sekil 3: Oklo Uranyum Yataklarında basitleştirilmiş tektonik süreçler.

alana yayılım yörede bugüne dek minimum 6 doğal Atom Reaktörü özelliklerini içeren nokta saptanmıştır. Çekirdek tepkimelerinin 1972 yılına dek 20.000 ton rezerv içeren Uranyum Yatağının yüzde 50'si işletilmiştir. Böylelikle bilinmeden çekirdek tepkimelerini içeren pekçok nokta yok edilmiş olabilir.

Doğal Uranyum elementi genelde  $U^{238}$  izotopunu içerir.  $U^{235}$  izotop yüzde 0.7 ve  $U^{234}$  izotopu ise iz olarak doğada bulunur, BODU ve diğerleri (1972). Bilindiği gibi enerji üreten bugünkü çağdaş Reaktör'lerde  $U^{235}$  izotopu yapay olarak Gaz-Difüzyon-Yöntemi ile yüzde 3 oranında zenginleştirilerek kullanılır. Yeryuvarında bugüne dek yapılan tüm Uranyum izotop analizlerinde  $U^{235}$  izotop ortalama 0.7113 olarak saptanmıştır. Bu denli duyarlı ve sağlıklı bulguları ancak Kütle-Spektrometre aygıtı ile ortaya çıkarmak olanaklıdır. Bu aygıtla "Oklo" Uranyum Yataklarının izotop araştırması yapılan Pierrelatte Araştırma laboratuvarında (Fransa) bugüne dek 20.000 üzerinde izotopik ölçüm yapılmıştır. Uranyum-Heksa-Florit olarak Haziran 1972 yılında analiz yapılan ilk "Oklo" örneğinde  $U^{235}$  izotopu 0.7082 olarak bulununca örnekler dikkati çekti ve yörede ayrıntılı ça-

Sekil 4: Oklo Uranyum Yataklarının basitleştirilmiş işletme konumu.

ışmalara başlanılması gereksinimi duyuldu. Örnekte ölçülen  $U^{235}$  (0.7082) gerçekte doğada ortalama 0.7113 olarak saptanmıştır. Sistemli çalışmalar yönünde yeryuvarındaki inanılmaz "ANOMALİ" gerçek olarak ortaya kondu.

Bugüne dek "Oklo" örneklerinde saptanan en düşük  $U^{235}$  değeri yüzde 0.296 olarak bulunmuştur. Doğadaki doğal inanılmaz izotopik anomali ancak iki şekilde açıklanabilir.

1. — Jeokimyasal Anomali; Uranyum izotoplarının atom ağırlıklarının birbirinden çok az farklı olmaları nedeniyle doğadaki fiziksel ve kimyasal süreç izotop fraksiyonu.

2. — Uranyum çekirdeğinde sözü edilen zincirleme tepkimeler sonucu tek bir izotopla ( $U^{235}$ ) anomali gibi hafif elementlerde çok sık saptanıp, ispatlanmış olup ağır elementlerde, Uranyum v.b. gibi, söz konusu olamaz.

Atom Reaktörleri gibi zaman alıcı ve pahalı sistemlerde Uranyum yapay olarak zenginleştirilmektedir. "Oklo" Uranyum yataklarında  $U^{235}$  izotopunda saptanmış anomalinin çekirdek tepkimelerine bağımlı olduğunu gösterebilmek için bugün herhangi bir Atom Reaktörü'ndeki süreçleri kısaca hatırlatmakta yarar vardır.  $U^{235}$  izotopunun yavaş ve

düşük enerji nötronlar etkisiyle parçalandırılması genelde Atom Reaktör'lerinin çalışma sistemidir.

$U^{235} + 1$  Nötron  $\rightarrow$  2 Atom Çekirdeği + Enerji + 2-3 Nötron  
Tepkime sonucu açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmı ısı enerjisi üzerinden normal elektrik enerjisine dönüşür. Ayrıca açığa çıkan iki Çekirdeği ise bilindiği gibi depolanması birçok ülkede sorun yaratan atom artıklarıdır. Çekirdekdeki tepkimelerin sürmesini sağlayabilmek için açığa çıkan 2-3 Nötron'dan gerekli olan biri sürekli olarak tepkime için kullanılır. Fakat çekirdekte parçalanma sonucu açığa çıkan nötronlar hızlı ve yüksek enerjiye sahiptirler. Çekirdekli tepkimelerin sürmesi için ise yavaş ve düşük enerjili nötronlar gereklidir. Böylelikle anlaşılıyor ki hızlı ve yüksek enerjili nötronların yavaş ve yüksek enerjili nötronlara indirilmesi gerekir. Yüksek enerjili nötronların indirilmesi (frenlenmesinde) kullanılan maddeler Moderatör denir. Eğer Moderatör su ise aynı zamanda açığa çıkan dışarı aktarma görevini görür. Yüzde 3 oranında zenginleştirilmiş  $U^{235}$  izotopuna Atom Reaktör'lerinde gereksinim vardır.

Gerçekte "Oklo" Uranyum yataklarında zincirleme çekirdek tepkimeleri oluşmuş ise tepkime sonucu ortaya çıkan ve Atom Reaktör'ü artığı olan 2 Atom çekirdeğinin yörede saptanması gerekir. Çünkü genelde Atom sayıları 90-100 ve 133-144 arasında değişen kararlı çekirdekler (elementler)  $U^{235}$  izotopunun nötronlar etkisiyle parçalanma ürünüdür. Sonuçta radyoaktif hafif parçacıklardan Y, Zr, Nb, Mo, ve Ru; radyoaktif ağır parçacıklardan ise Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr ve Nd gibi elementler ve izotopları oluşur. Uranyumun izotopik bileşiminde açıkça "ANOMALİ" içeren örneklerde aynı zamanda yüksek oranda Y, Zr, Nb, ve Ru saptanmıştır. Böylelikle "Oklo" Uranyum yataklarında tepkimeler sonucu 2 Atom çekirdeğinin Reaktör artığı olarak çağdaş Reaktör'lerde olduğu gibi açığa çıktığı bulgulanmıştır.

#### TEPKİMELER NE ZAMAN OLUŞMUŞTUR?

Bu sorunun yanıtlanabilmesi için önce tortul kayalardan oluşan Franceville formasyonunun çökelim yaşını saptamakta yarar vardır. Bu nedenle tortul Franceville formasyonundan ve intrüfiz Siyenit kaynaklarından alınan örneklerde (30-200 kg) K/Ar ve Rb/Sr-Yöntemleri ile elde edilen radyometrik yaş sonucu kayaların yaşı  $1740 \pm 40$  milyon yıl olarak saptanmıştır, Lancelot ve diğerleri (1975). Mineralleşme yaşı ise Uranyum-Kurşun-Yöntemi ile yörenin değişik noktalarından alınan örneklerde  $1780 \pm 40$  milyon yıl olarak bulunmuştur. Böylelikle tortul Franceville formasyonlarının ve Uranyum mineralleşmesinin  $1740-1780$  milyon yıl önce (pre-kambriyum) oluşturduğu ortaya konmuştur. "Oklo" fosil Reaktör'ünde zincirleme çekirdek tepkimelerinin tortul Franceville formasyonundan daha eski olması söz konusu olamaz. Çünkü,

1. — Yarılanma katsayısı 24 milyon yıl olan  $U^{238}$  izotopuna "Oklo" Uranyum yataklarında rastlanılmamış olması, çekirdek tepkimelerinin 500 milyon yıldan daha eski olması gerektiğini ortaya koyar.  $U^{238}$  izotopu Uranyum çekirdeğinin parçalanması sırasında bir nötron yakalanması sonucu (neutron capture) yan ürün olarak oluşur.
2. — Tepkime içeren yörelerden alınan örnekler üzerinde yapılan titiz ve duyarlı Uranyum-Kurşun çalışmaları sonucu çekirdek tepkimelerinin 1780 milyon yıldan çok fazla genç olmayacağı ortaya konmuştur.

3. —  $U^{235} / U^{238}$  izotopik oranı "Oklo" çekirdek tepkimelerinin minimum 1700 milyon yıl öncesi oluştuğunu gösterir. Ayrıca bugün yüzde 0.72 olan doğal  $U^{235}$  izotopunun 1700 milyon yıl önce ise yüzde 3.07 değerlerinde olması gerektiği yalnız matematiksel bir yöntemle saptanabilir.

Güneş sisteminden teşekkül ettikten sonra  $U^{235}$  izotopunun yeryuvarında dağılımı bugüne göre çok daha yüksekti. Yeryuvarının yaşlanmasına bağlı olarak yerkabuğunda  $U^{235}$  izotopunun azalması ve 1.7 milyar yıl önce  $U^{235}$  izotopunun "Oklo" yöresinde yüzde 2.8-3.0 oranına düşmesi sonucu "Oklo" Reaktör'ünde zincirleme çekirdek tepkimelerinin başlamış oldu. Böylelikle zincirleme çekirdek tepkimelerinin iki gerçekte 2 Aralık 1942 yılında Sayın ENRİCO FERMİ yönteminde Şikago Spor Stadyumu tribünleri altında değil, 1.7 milyar yıl önce "Oklo'da" (Gabon) doğal olarak doğa ile başbaşa gerçekleşmiştir. Doğal olarak 1.7 milyar yıl önce doğada gerçekleşen fizikokimyasal dönüşüm koşullarını şu şekilde açıklayabiliriz.

- Minimum 1.7 milyon yıl önce zincirleme çekirdek tepkimelerinin başlaması için gerekli koşullar verilmiş oldu.
- Zincirleme çekirdek tepkimelerinin sürmesi için gerekli miktarda su (Moderatör olarak) tortullaşma havzasında var idi.
- Tortullaşma havzasındaki su (Moderatör) zincirleme çekirdek tepkimeleri sonucu açığa çıkan ısı enerji ile ısınıp buharlaşmaya başladı.
- Buharlaşma sonucu su (Moderatör) azalınca hızlı ve yüksek enerjili nötronlar indirgenemedi ve böylelikle zincirleme çekirdek tepkimeleri durdu.
- Tortullaşma havzasındaki nötronların indirgenmesi için gerekli miktarda su (Moderatör) toplanınca Reaktör yeniden devreye girdi.
- Böylelikle "Oklo" Reaktör'ü uzun yıllar aşamalı olarak çalışıp yöreye ısı yaydı.
- Sonuçta  $U^{235}$  izotopunun yüzde 3'ün altına düşmesiyle zincirleme çekirdek tepkimeleri birgün kesinlikle durdu ve doğal Reaktör fosilleşti.

Fosilleşmiş "Oklo" Reaktör'ü gibi başlıca bir Reaktör'ün yeryuvarında varlığını bugünkü bilgilerimizle yanıtlamamız çok güçtür. Orr (1949). Fakat, güçlü bir varsayımla Afrika ve güney Amerika kıtalarının yaklaşık 1000 milyon yıl önce birbirinden ayrılmış olmaları nedeniyle benzer bir olayın Brezilya'daki Uranyum Yataklarında saptanması olanaklıdır. Zincirleme çekirdek tepkimeleri genelde bazı Jeolojik, Jeokimyasal ve Fiziksel koşulları içermesinden ötürü bu tür doğal bir Reaktör'ü yeryuvarında saptayabilmek çok güçtür ve öncelikle bunun bilim adamları tarafından yeryuvarında bulunması gerekir. Doğada bugün bu tür doğal çekirdek tepkimelerinin olasılığı aşağıdaki nedenlerden ötürü yoktur.

- a. — Yerkabuğunun her yöresinde  $U^{235}$  izotopunun yüzde 0.72 oranında bulunması
- b. — Var olan suların Moderatör özelliğinden çok uzak olması

#### OKLO'NUN YERBİLİMLERİNE KATKISI

"Oklo" Uranyum yataklarını yöredeki insanlara ekonomik katkı ötesi bilim adamlarınca sorun olan Jeolojik, Jeokimyasal ve Fiziksel pek çok sorunun yanıtlanıp açıklığa kavuşmasına neden olmuştur. Bağlantıda doğal "Oklo" Re-

aktör"ü akademik açıdan yerbilimlerini içeren disiplinlerde sınırlı bir heyecan ve ilgi uyandırmıştır. Doğal "Oklo" Reaktör'ünün insanlığa, özellikle bilim adamlarına en büyük katkısı sorun yaratan Reaktör artıklarının nerelere, nasıl depolanması gerektiğine yanıt getirmekle olmuştur.

Doğal "Oklo" Reaktör'ünde aynen çağdaş Atom Reaktör'lerinde olduğu gibi zincirleme çekirdek tepkimeleri sonucu Reaktör artıklarını içeren Niob, Yitrium, Zirkon, Lantan, Neptunyum, Plütonyum ve Uranyum (özellikle  $U^{235}$ ) izotopu) elementleri olmuştur. Güçlü varsayımın varolan yeraltı suyu doluşumuna rağmen Plütonyumun ve öteki yan ürünlerin yöredeki migrasyonu birkaç milimetreden öte gitmemiştir. Çekirdek tepkimeleri sonucu doğal Reaktör'de 1 ton Plütonyum ve toplam 10 ton öteki yan Ürünler Reaktör artığı olarak oluşmuştur. Böylelikle görüyoruz ki 1.7 milyar yıl süresince doğal toplam 11 ton tutan "Oklo" Reaktör'ü artıklarını emniyetle depolayabilmiştir.

Sonuç olarak duraylı Jeolojik formasyonlar içerisinde Reaktör artıklarının düşünmeksizin depolanabileceği ve Biosfer için tehlikenin varsayımı gerçek dışı olduğu öğrenilmiştir. Ayrıca Reaktör artıklarının en iyi ve en sağlıklı depolama yerinin Reaktör'ün kendisi olabilir fikri tartışmayı gerektirir.

Doğanın 1.7 milyar yıl önce doğal olarak kullanıldığı yüzde 3 oranındaki  $U^{235}$  izotopunu bugün zenginleştirilebilmek için milyarlarca Dolar, Frank, Mark, Lira, Ruble ve

Yen harcayıp enerji üreten çağdaş Reaktör'lerin dikilebilmesi için uğraşı verilir.

#### DEĞİNİLEN BELGELER

- Bodu, R., Bonzignes, H., Morin, N and Pfiffelmann, J. p., 1972, Compt. Rend. 275 d, 1731.
- Brinck, J. W., 1974, The Geochemical Distribution of Uranium as a Primary Criterium for the Formation of Ore Deposits. \_Proceedings of a Symposium on the Formation of Uranium Ore Deposits, I.A.E.A. Athens, 21-32
- Keller, C., 1975, Die Natur baute einen Reaktor. -Bild der Wissenschaft 11, Nr. 12.70.
- Keller, C., 1976, Das Oklo-Phänomen. -Chemiker Zeitung, 276-285.
- Lancelot, J. R., Vitrac, A and Allegre, C.J., 1975. - Earth Planet. Sci. Lett. 25, 189.
- Naudet, R., 1975, Oklo; Des Réacteurs Fossiles. - la Recherche 6, Nr. 57-508.
- Nininger, R. D., 1974, The world Uranium Supply Challenge, an Appraisal. — Proceedings of a Symposium on the Formation of Uranium Ore Deposits, I.A.E.A., Athens, 3-17.
- Orr, J. B., 1949, Phys. Rev. 76, 155.
- Steiger, R. H. and Jäger, E., 1977, Subrommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in Geo-and Cosmochronology. - Earth Planet. Sci. Lett. 36, 359-362.
- Wlambeke, van L., 1967, Some Geologic Concepts as a Guide for the Search of Uranium in the Precambrian shields. - European Atomic Energy Community-Euratom. EUR 3481 Brüssel.
- Le Phenomen d'Oklo., 1974, Bull. Informations Scient, Techn. du CEA. Nr. 193, 86p.
- The Oklo phenomenon, 1975, Proceedings of a Symposium, Libreville, STI/PUB/405, I.A.E.A, Vienna, 648 pp.