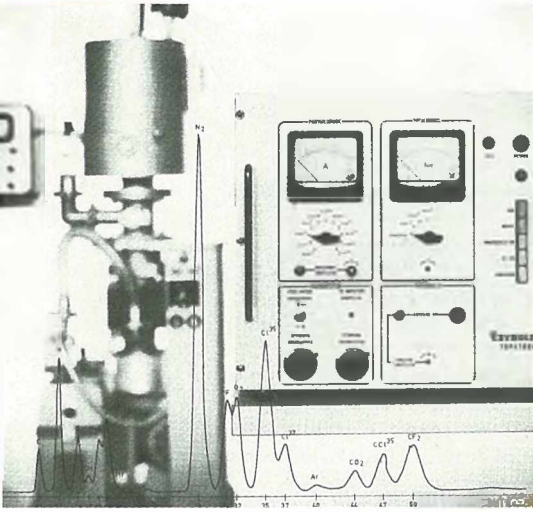


Jeokronoloji ve Mutlak Yaş Tayini



İnsanlığın geçmişini arama konusundaki azmi, onu kendi gezegeni üzerinde 4,5 milyar yıl geriye götürdü. Tüm evrende ne kadar geriye gidebileceği ise hala bir sır....

Okan Zimitoğlu
MTA Genel Müdürlüğü
okan@mta.gov.tr

Radyoaktivitenin geçtiğimiz yüzyıl sonlarına doğru keşfedilmesi, kayaların ve minerallerin yaşının teorik esasta belirlenebilmesine olanak sağlamış ve jeokronoloji gibi bir çalışma disiplininin doğuşuna neden olmuştur. Yerbilimlerinin bu disiplininde son 50 yıl içinde yaşanan gelişmeler, dünya tarihini anlama ve güneş sistemi içindeki yerimizi belirleme tarzımızı da değiştirmiştir. Bugün bu gelişmeler sayesinde, özellikle meteoritlerin, ay taşlarının ve gezegenimizin yaşını belirleyebilme yeteneğine sahibiz.

İnsanoğlu en azından 2000 yıldır dünyanın yaşını tahmin etmeye uğraşmaktadır. Radyoaktivitenin keşfi ve Dünya'nın teolojik esaslara göre yapılan tahminlerden çok daha yaşlı olduğunun ispatlanması, jeoloji biliminde büyük bir devrim olarak kabul edilir. Bu keşif aynı zamanda kayaların yaşını hassas bir şekilde belirleyebilme yeteneğimizin de başlangıcı olmuştur. 1950'lerden sonra radyoaktif yarılanma konusundaki bilgi birikimlerine paralel olarak, elementlerin izotopik bileşimlerinin ölçülebilmesi için gerekli ekipmanların geliştirilmesi, Dünya'nın yaşının hesaplanabilmesine olanak sağladığı gibi, modern jeokronolojinin doğuşunu da sağlamıştır.

Teknolojik Tarihçe

Geçtiğimiz 50 yıl içinde, zamanın yeryüzünde ve dünya dışı materyallerdeki dağılımını anlamamızı sağlayan radyojenik izotopların incelenmesinde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmelerin pek çoğu, tabiatıyla teknolojiktir ve çok daha düşük değerlerdeki izotopik bulunurlukların tesbit edilmesinde ve daha hassas tarihlendirmelerin yapılabilmesinde faydalı olmuşlardır.

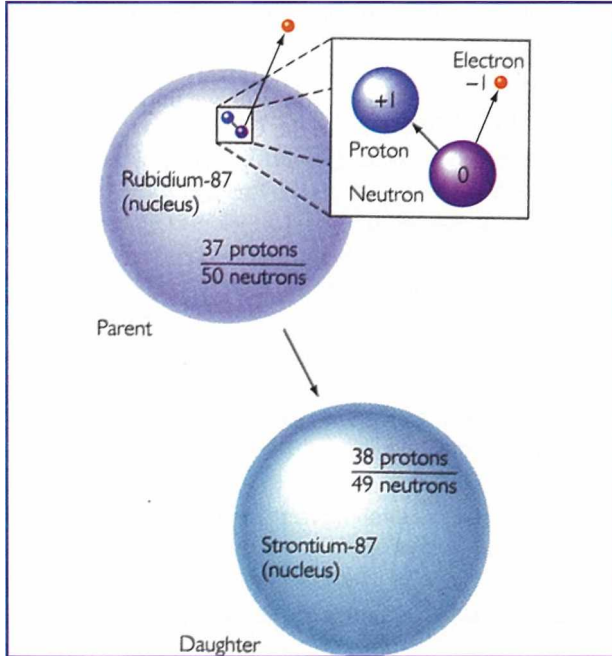
Bu anlamda ilk büyük gelişme, bundan yaklaşık 60 yıl önce A.O. Nier'in çoğu modern kütle spektrometresi cihazının prototipinin tasarımını ve yapısal unsurlarını bilim alemine tanıtmalarıyla yaşanmıştır. Bunu takip eden gelişme ise ilk bilgisayar kontrollü cihazların yapılması olmuştur. Bilgisayar kontrollü sistemlerin geliştirilmesine katkıları elektronik ve vakum teknolojilerindeki gelişmeler de eklenince, kütle spektrometre cihazları dünya çapındaki yerbilimleri laboratuvarlarında gittikçe yaygınlaşan ve seri üretimi yapılan ticari birer araç olarak yer almaya başladılar.

İki tip kütle spektrometre geliştirilmiştir. Bunlar katı kaynaklı ve gaz kaynaklı kütle spektrometreleridir. Katı kaynaklı cihazlar (TIMS=Thermal Ionization Mass Spectrometer) katı şekilde işlenebilen kimyasal olarak saflaştırılmış ana element veya ondan türeyen elementlerin (U, Pb, Sm, Nd, Rb, Sr) termal yolla iyonize edilmesinde kullanılırlar. Gaz kaynaklı cihazlar ise ana elementlerin veya ondan türeyen elementlerin sadece gaz halde bulunmaları (örneğin, Ar) durumunda kullanılırlar. Başlangıçta büyük miktarlarda kayaç ve mineral örneklerinin analiz edilmesini gerektiren kimyasal ayırtlama teknikleri ve cihazlardaki gelişmeler devam ettikçe, çok daha küçük miktarlarda (miligram) örneklerin analiz edilmeleri mümkün olmuştur.

Jeokronolojik uygulamalarda son derece kullanışlı olan ve yüksek hassasiyetli izotopik ölçümlerin yapılabilmesine olanak tanıyan iyon mikroprob analiz teknikleri, 1970'lerin sonlarına doğru Avusturyalı iki bilim adamı (Stewen Clement, William Compston) tarafından geliştirilmiştir. Geliştirdikleri cihaz SHRIMP (Sensitive High Mass Resolution Ion Microprobe) olarak adlandırdı. SHRIMP özellikle zirkon gibi minerallerdeki U ve Pb izotoplarını analiz etmek üzere kullanılmıştı. İyon mikroprob analiz cihazları kullanıcılarına birkaç nanogramlık örnekleri temsil eden, yaklaşık 25 mikron kadar küçük minerallerdeki izotopik değişimlerin yerinde analizine (kimyasal ayırtlama olmaksızın) olanak sağlamıştır.

Jeokronolojik Yaşlandırma Teknikleri

Kayaçların ve sedimanların nicel ve nitel yaşlarının belirlenmesinde kullanılan jeokronolojik araçlar ve yöntemler oldukça kapsamlıdır. Bu teknikler jeolojik materyallerin milyar yıl öncesinden tarihsel dönemlere kadar



Rubidyum-87 izotopundaki bir nötron ardında ek bir proton bırakarak bir elektron fırlattığında stronsiyum-87 oluşur.

yaşlandırılmalarında kullanılırlar. Jeokronolojik yaşlandırma teknikleri sadece kayaların ve minerallerin mutlak yaş tayinlerinin yapılmasında değil, canlıların evrim safhalarının tarihlendirilebilmesinde ve yakın tarihimizdeki iklimsel değişimlerin ve insanlığı büyük ölçüde etkilemiş doğal felaketlerin kayıtlarının tutulabilmesinde de kullanılırlar.

U-Th-Pb Yöntemi

Yüzyılın bitimine doğru uranyum ve toryumun radyoaktivitesinin keşfi, bu olayın uranyum içeren minerallerin tarihlendirilebilmesine yardımcı olmuştur. Uranyum ve toryumun çöküş ürünü olarak helyum ve kurşunun yığılmasına bağlı birkaç metod geliştirilmiştir:

- Pb-U, Th metodu
- Pb-alfa metodu
- U-He metodu
- U, Th-Pb izotopik metodu
- Adi Pb metodu

Bununla birlikte, bu metodların ilk üçü bunların esas alındıkları varsayımlar büyük ölçüde geçersiz kabul edildiği için nadiren kullanılırlar. Uranyum ve toryumun kurşuna çöküşü zirkon, monazit, sfen, apatit ve bu iki elementi içeren diğer bazı minerallerin yaşlarının belirlenmesinde işe yarar.

Uranyum serisi yaşlandırma metodu özellikle Kuvaterner yaşlı sedimanter karbonat, sills ve fosil kalıntılar için en güvenilir olanıdır. Kuvaterner dönemi yaşlandırması yakın geçmişteki iklimsel ve jeolojik değişimlere ait kayıtların tutulmasına da olanak sağlar. Zirkon, baddeleyit ve monazit gibi yüksek uranyum içerikli minerallerin U-Pb jeokronolojisi, bileşimi fark etmeksizin bütün magmatik kayaçların Arkeen (3.8 milyar yıl) ile Tersiyer (65 milyon yıl) zaman aralığında, yerleşim yaşının belirlenmesinde kullanılır. Bununla birlikte zirkon, sfen ve monazit gibi metamorfik minerallerin U-Pb yaşları ise meteor çarpması gibi termal olayların ve metamorfik sahaların termokronolojik geçmişlerinin incelenmesinde kullanılırlar.

Rb-Sr Yöntemi

Periyodik cetvelde IA Grubuna (lityum, sodyum, potasyum, rubidyum, sezyum, fransiyum) ait bir alkali metal olan rubidyum, iyonik yarıçapı (1.48 Å) potasyuma (1.33 Å) yakın olan bir elementtir. Bu nedenle tüm K içeren minerallerde (muskovit, biyotit, flogopit, lepidolit, ortoklaz, mikroklin, kil mineralleri, silvit ve karnallit gibi evaporitik mineraller) potasyumun yerini alabilir. Doğada ⁸⁵Rb ve ⁸⁷Rb izotopları şeklinde bulunur.

Stronsiyum elementi Grup IIA olarak bilinen alkali toprak elementlerin (berilyum, magnezyum, kalsiyum, stronsiyum, baryum, radyum) bir üyesidir. İyonik yarıçapı (1.13 Å) kalsiyuma (0.99 Å) yakın olduğu için kalsiyum içeren minerallerde (plajiyoklaz, apatit, kalsit, aragonit) onun yerini alabilir. Doğada ⁸⁸Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁶Sr, ⁸⁴Sr izotopları şeklinde bulunur.

Rb-Sr jeokronolojisi, belirli minerallerin yerleşim ve soğuma yaşlarının belirlenmesinde yardımcı bir metod olarak U-Pb veya ^{40}Ar - ^{39}Ar yaşları ile birlikte kullanılır. Yaş aralığı Arkeen (3.8 milyar yıl) ile Tersiyer (65 milyon yıl) olup, yüksek dereceli metamorfik sahalarda sınırlı kullanıma sahiptir. Sr izotop jeokronolojisi denizde çökelmiş saf karbonatların ve fosil mercanların yaşlandırılmasında kullanılan bir yöntemdir ve yaşlandırma aralığı Kuvaterner (2 milyon yıl) ile Tersiyer (65 milyon yıl) arasındadır.

Sm-Nd Yöntemi

Sm-Nd yaşlandırma metodu magmatik kayaların kristalizasyon ve yerleşim yaşlarının bulunmasında işe yarar. Tarihlendirme aralığı bazı istisnai durumlarda Prekambriyen'e (570 milyon yıl) kadar uzanır. Normalde yardımcı bir metod olarak veya U-Pb tekniklerinin uygulanması için uygun minerallerin olmadığı durumlarda, mafik kayaların yaşlandırılması için kullanılır.

Lu-Hf Yöntemi

Lu-Hf jeokronolojisi mantonun evrimi, tüketilmesi ve heterojenitesi için kullanılan bir tekniktir. 35.4 milyar yıllık yarılanma ömrü ile günümüzde kullanılan çoğu USGS (United States Geological Survey) jeokronoloji metodlarında sınırlı kullanıma sahip bir sistemdir.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Yöntemi

Jeolojik meteryallerin termal geçmişlerini ortaya koymak için kullanılan bir izotopik tarihlendirme tekniğidir. Dünya tarihi boyunca herhangi bir döneme ait kayaç örneklerinin yaşı, bu yöntem sayesinde doğru ve hassas bir şekilde belirlenebilir ancak örnek günümüzden en az 10 bin yıl öncesine ait olmalıdır. Bu teknik özellikle, bir örnek içindeki değişik minerallere uygulandığında ve diğer jeokronolojik tekniklerle birlikte kullanıldığında, oluşumun sadece yaşını değil, ayrıca

oluşum sonrası termal ve alterasyon (yaklaşık 100-550°C arası sıcaklıklarda) özelliklerini de öğrenmemizi sağlar. Bu teknik; hornblend, muskovit, biyotit, sanidin, anortoklaz, mikroklin, plajiyoklaz, adulariya, ortoklaz ve K-evaporitler gibi mineraller ile sleytler, su içermeyen volkanik camlar, ve bazaltlar gibi kayalara uygulanır.

^{210}Pb Yöntemi

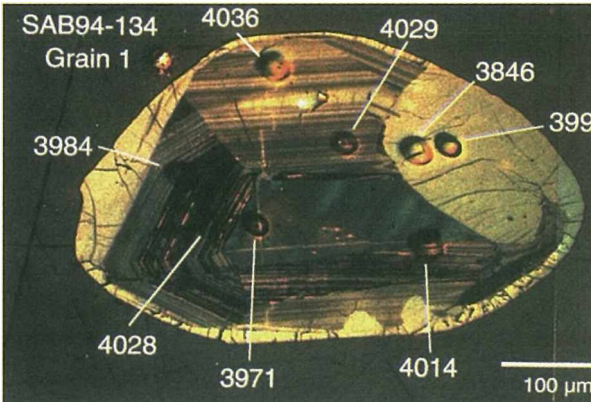
^{238}U çöküş zincirinin bir halkası olan Radyum-226, ^{222}Rn izotopunu meydana getirir. Bu izotop da atmosfere kaçarak, 3.8 günlük bir yarılanma ömründen sonra çöker ve daha uzun ömürlü olan ve birkaç gün içinde yeryüzüne geri düşecek olan ^{210}Pb radyoizotopunu oluşturur. ^{210}Pb izotopunun 22.3 yıllık yarılanma ömrü, yaklaşık 150-200 yıllık bir zaman aralığı için kullanışlı bir jeokronolojik araç sağlar. Bu sayede yağın karların, güncel tatlısu ve denizel sedimantasyonun ve yakın geçmişteki çevresel kirlenme olaylarının tarihlendirilmesi yapılabilmektedir.

^{14}C Yöntemi

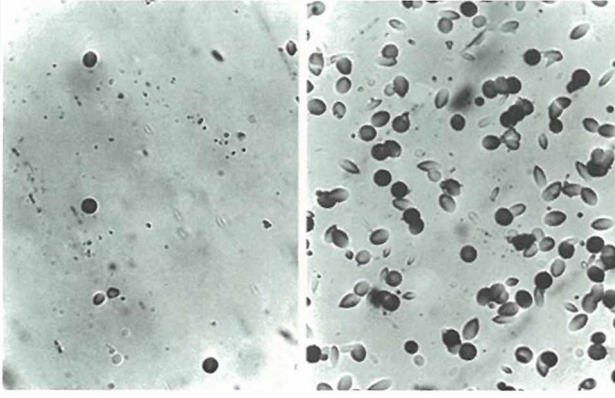
Kozmik ışınların oluşturduğu termal nötronların atmosferin üst seviyelerinde nitrojen çekirdeğine çarpması ile meydana gelen reaksiyonlar sonucunda karbon-14 izotopları oluşur. Bu izotopun hızlıca okside olarak karbondioksit'e dönüşmesi ve 2-3 yıl içinde meydana gelen küresel homojenizasyon, $^{14}\text{CO}_2$ izotopunun yeryüzündeki karbon döngüsüne katılmasını ve daha sonradan fotosentezle alıkonmasını veya karbonat minerali şeklinde çökmesini sağlar. ^{14}C izotopu yaklaşık 5700 yıllık bir yarılanma ömrüne sahiptir. Bu özelliği ile günümüzden 80-100.000 yıl öncesini kapsayan bir zaman aralığı için kullanışlı bir tarihlendirme tekniği sunar.

K-Ar Yöntemi

Potasyum yer kabuğunda en bol bulunan 8 elementten biridir ve çoğu kayaç oluşturan mineralin önemli bir bileşenidir. K-Ar metodunun teorik temelleri 1950'lerde ortaya konmuştur ve o zamandan beri K içeren kayaçların ve minerallerin yaşının belirlenmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. K-Ar yönteminin esası, doğal ^{40}K izotoplarının duraylı ^{40}Ar izotoplarına çöküşüne dayanır. Bu yöntemin uygulanabileceği en elverişli mineraller biyotit, muskovit, hornblend (magmatik ve yüksek dereceli metamorfik kayaçlar), feldispatlar (volkanik kayaçlar), glaukonit (metamorfize olmamış sedimanter kayaçlar) şeklinde sıralanabilir. Genç volkanik kayaçlardan türeyen K-Ar yaşları yer manyetik alanının terslenmeleri için bir zaman ölçeği oluşturulmasına yararlar. Böylece plaka tektoniği teorisinin formülasyonuna yol açan kıtasal uzaklaşma olayına açıklık getirilebilmiştir.



Kuzeybatı Kanada'nın 4.03 milyar yıllık gnayslarından ayırtlanmış bir zirkon mineraline ait parlatılmış incokesit fotoğrafı. Rakamlar milyon yıl cinsinden elde edilen $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ yaşlarını gösterirler (Geotimes, November, 1998, sf. 37).



Kendiliğinden olan (solda) ve sonradan olan (sağda) fizyon izleri

Fizyon İzi Yöntemi

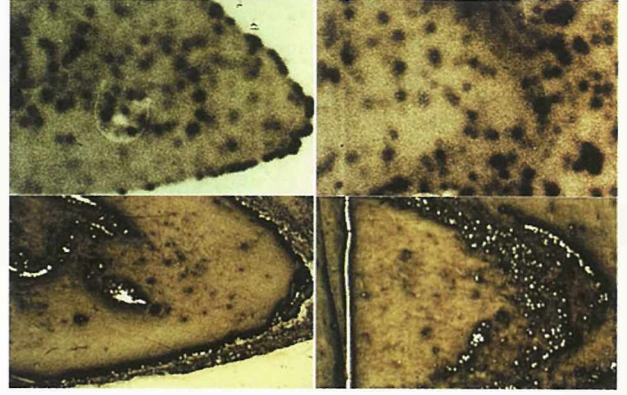
Bu yöntem ^{238}U izotopunun kendiliğinden ayrışması yüzünden meydana gelen radyasyon hasarlarını (izlerini) esas alır. Fizyon izi yöntemi, bir örneğin veya bölgenin termal geçmişinin belirlenmesinde oldukça kullanışlıdır. Fizyon izleri küçük miktarlarda uranyum içeren apatit, sfen, zirkon gibi minerallerde korunurlar. Parlatılmış bir mineral yüzeyindeki izlerin sayısı ve mineralin uranyum içeriği belirlendiğinde, mineral bünyesinde korunmuş olan izlerin ne kadar sürede oluştuğunu hesaplamak mümkündür. Fizyon izi içeren bir mineral yeryüzüne yakın seviyelerde ve katı halde korunabilmişse, bu izler birbiri üzerine yığılacaktır. Ancak bu tip mineralleri içeren kayalar ısındıkça, minerallerdeki bu izler ortadan kaybolacaktır. Bununla birlikte, bu metod fizyon izlerinin sıcaklıktan bağımsız olarak korunabilmesi ve farklı minerallerin fizyon izlerini farklı sıcaklıklarda kaybetmeleri nedeniyle yaşlı kayaların termal geçmişleri hakkında da faydalı bilgiler sağlar. Kayaların volkanik faaliyetlerde veya sığ soku- lumlarda olduğu gibi hızlı soğudukları durumlarda, fizyon izi yaşları bu ilk soğuma olayına ait yaşı verir. Eğer mineral derinlerde oluşmuşsa veya daha sonradan bir şekilde derinlere gömülmüşse, fizyon izi yaşı daha sonraki ısınma ve soğuma yaşını yansıtabilir.

Fizyon izi analizleri yerbilimlerinin volkanoloji, maden yatakları, stratigrafi, basen analizi, tektonik ve meteor çarpmaları gibi pek çok alanına başarıyla uygulanabilmektedir.

Tefrakronoloji

Yeryüzünde Kuvaterner ve Neojen yaşlı tefra seviyeleri (volkan külü yatakları ve tüfler) yaygındır. Bu seviyeler, jeolojik olayların tarihlendirilmesi veya volkanik püskürmeler ve püskürüm frekansları, volkanik provenans, fay yerdeğiştirmeleri ve deprem tekrarlanma aralıklarını kapsayan jeolojik süreçlerin oluş hızları ile çökelim olaylarına ait yaşlar ve diğer yüzey ve yüzeyaltı olayların ve süreçlerin tarihlendirilebilmelerine ve stratigrafik korelasyonların yapılabilmesine olanak sağlarlar.

Tefra seviyeleri yaş kontrolü gerektiren kritik lokasyonlardan örneklenirler. Daha sonra tefraya ait bileşenlerin fiziksel karakteristikleri (mineroloji, cam kıymığı morfolojisi



Fizyon izleri minerallerdeki uranyumun dağılımını belirlemek için kullanılır. Üstteki fotoğraflar bir kaprolit örneğinin fizyon izi haritasıdır ve uranyumun mineral içinde belirli bölgelerde siyah noktacıklar şeklinde zenginleştiği gözlenir. Altta fotoğraflar ise aynı mineralin yansıyan ışıkta çekilmiş fotoğrafıdır. Bu fotoğrafta uranyum zenginleşmeleri beyaz noktacıklar şeklinde gözlenir.

ve diğer bileşenlerin varlığı ve tabiatı) tanımlanır ve volkanik cam tefradan bileşimsel karakteristikleri belirlenmek üzere ayrılır. Volkan camının bileşimsel karakteristikleri, daha önceden analiz edilmiş tefra örnekleri ile karşılaştırılır ve bunlar içinde benzer bileşime sahip olanların petrografik, stratigrafik ve kronolojik özellikleri değerlendirilerek, kronolojik kriterlere göre en uygun olanlar seçilir. Bu işlemler kritik lokasyonlarda bulunan tefra seviyelerinin, yaşı daha önceden nümerik yöntemlerle ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ gibi) belirlenmiş diğer yerlerdeki benzer tefra seviyeleri ile karşılaştırılmalarına olanak sağlar.

Termolüminesans

Bu tarihlendirme tekniği sedimanlar için kullanılan bir tekniktir ve yaşlandırma aralığı 1.000 ile 500.000 yıl arasında değişir. Bu yöntem, gömüldüğünde doğal bir radyasyon dozimetresi gibi işlevi olan kristal hatalarına ve sopsizliklere sahip sediman tanelerinde uygulanır. Topraktaki K, U, Th ve Rb gibi elementlerin radyoaktif çöküşlerinin bir bölümü ve kozmik ışıklardan gelen radyoaktivite, zaman içinde sedimanlarda hapsolür. Gömülmenin süresi uzadıkça, sediman içinde daha fazla doz absorblanır. Burada doz, örnek ısıtıldığında veya değişik ışık kaynaklarından gelen ışığa maruz bırakıldığında, elde edilen ışığın parlama eğrisi ile orantılıdır. Işığın dozu arttıkça örneğin yaşı da artar.

Termolüminesans tekniği U serisi, ^{14}C yöntemi ve stratigrafi ile birlikte kullanılır ve lős ve silt yatakları, kumullar ve kum örtüleri, A ve C toprak horizonları, fisür dolguları, volkanik kül ve cam, kolüvyal ve alüvyal materyaller, delta, göl ve kıyı çökelleri, eski kaya siperleri, höyükler, mağara tabanları ile bataklık ve turba çökellerinin tarihlendirilmesinde kullanışlı bir yöntemdir.

Kaynaklar

- Gunter Faure, 1997. Principles of Isotope Geology, John Wiley and Sons Inc.
Bowring, S.A., 1998. Geochronology, Geotimes, November, vol.43, No:11, sf. 36-40.