

TORYUM DOSYASI

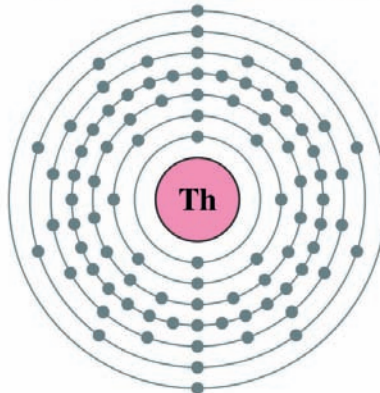
Toryum bazen, çok değerli bir kaynakmış gibi tartışılıyor. Halen öyle değil. Kullanımı sınırlı. Yan ürün olarak ele geçen üretiminin fazlası, düşük düzeyli atık olarak gömülüyor. İlerde öyle olabilir. Nükleer enerji kaynağı olarak uranyumun yerini alabilir. Ne de olsa metal üreticileri bir zamanlar uranyumu da, Manhattan Projesi öncesinde, karşılaştıklarında atıyorlardı. Gerçekçi bir değerlendirme için, henüz emeklemeye çalışan toryumun yakıt döngüsünün, halen kral olan uranyumun döngüsüyle, kısmi de olsa bir kıyaslamasını yapmakta yarar var.

Toryum elementi: Toryum doğadaki, uranyumdan sonra 'atom numarası', yani proton sayısı en yüksek ikinci (90) element. Aktinit serisinin ikinci elemanı. Kütle yoğunluğu oda sıcaklığında 11,7 g/cm³. Bundan 6,6 milyar yıl kadar önce, daha sonra Güneş sisteminin oluşmasına vücut vermiş olan birden fazla süpernova patlamasında oluşmuş. Çekirdeği, o güçlü patlamaların zerkektiği potansiyel enerjiyle dolu. Yerkabuğunda yaygın şekilde, genel olarak uranyum ve diğer 'nadir toprak metalleri'yle birlikte; fosfatlar, silikatlar, karbonatlar ve oksitler halinde, kütlece ortalama milyonda 10 oranında var. Daha çok monazit ve torit minerallerinde bulunuyor. Bileşiminde 'toryum fosfat difosfat' (Th₄(PO₄)₄P₂O₇) olarak yer aldığı monazit mineralinde bolluk oranı %12'ye kadar ulaşıyor; ortalama %6-7. Uranyumdan farklı olarak, yeryüzü koşullarında suda çözünmediğinden, doğal sularda çok az. Buna rağmen, yar-

kabuğundaki bolluk oranının uranyumun üç misli, kurşun veya molibden kadar olduğu sanılmakta.

Belirlenmiş, kütle numarası 210 ile 236 arasında değişen 27 izotopu var. Hepsisi de kararsız. En yavaş bozunani, alfa ışıkyan Th-232. Neredeyse kararlı olan bu izotopun yarılanma ömrü, dünyanın yaşının üç misline yakın; 14,05 milyar yıl. Toryum-230'un 75.380, Th-

90: Thorium 2,8,18,32,18,10,2



229'un 7.340, Th-228'in 1,92 yıl yarılanma ömrü var. Diğer izotopların yarılanma ömrü 30 günden az ve çoğunun 10 dakikadan kısa.

Doğadaki toryumun hemen tamamı Th-232'den oluşuyor. İçeriğinde Th-231 ve Th-234 de eser miktarlarda, başka çekirdeklerin bozunma ürünü olarak var. Elementin diğer izotopları yapay. Bunlardan Th-229 ilginç bir şekilde, temel enerji durumunun sadece 3,6 eV üzerinde 'orta kararlı' ('metastable') bir izomere sahip. Th-232'nin bozunma zinciri, doğadaki üç ana radyoaktivite zincirinden birini oluşturuyor ve 6 alfa, 4 beta bozunmasından geçtikten sonra kurşunun kararlı izotopu olan ⁸²Pb²⁰⁸ ile son buluyor. Arada oluşan ⁸⁶Rn²²⁰, bir alfa ışıkycısı olup, radyasyon riski oluşturmakta. Bu yüzden toryumun depolandığı veya işlendiği yerlerin iyi havalandırılması gerekiyor. Büyük bir kısmı uranyumla birlikte Dünya'nın çekirdeğine çökmüş durumda ve bu iki ele-

mentin bozunma ısı, çekirdeğin dış kısmındaki konveksiyon akımlarını ayakta tutarak, yerkabuğunu oluşturan plakaların tektonik hareketliliğinin devamını sağlıyor. Uranyumun suda bir miktar çözünmesi, canlı organizmalar tarafından alınmasına, toryumun çözünmemesi ise alınamamasına yol açıyor. Dolayısıyla, canlı organizmaların bünyesindeki toryum sadece, doğal uranyumun sayıca %0,0054 kadarını oluşturan U-234 izotoplarının 245.000 yıl yarılanma ömrüyle Th-230'a bozunmasından kaynaklanmakta. Bu durum, 'uranyum-toryum yaş tayini' yöntemiyle canlı organizma kalıntılarının, örneğin hominid fosillerinin yaş tayinini mümkün kılıyor.

Element olarak ilk kez 1828 yılında, İsveçli kimyacı Jon Jakobs Berzelius tarafından ayrıştırıldı ve Kuzey'in Gökğürültüsü Tanrısı 'Thor'a atfen adlandırıldı. 1842 °C'de eriyip, 4788 °C'de kaynıyor ve elementler arasında, 2946 K ile en geniş sıvı sıcaklık aralığına sahip. Saf halde iken, gümüş parlaklığı beyaz bir metal. Parlaklığını birkaç ay koruyabiliyor ve oksitleyici ortamda grileşip, sonunda siyahlaşıyor. Talaşı veya tozu, havada kendiliğinden tutuşabilmekte ('pyrophoric'). Diğer metallerin çoğunda olduğu gibi; ısıtıldığında alev alıp, parlak beyaz bir ışık yayarak yanıyor. Oksiti (ThO₂) ise 3300 °C ile, oksitlerin arasındaki en yüksek ergime sıcaklığına sahip. Yalnızca tungsten gibi birkaç elementin ve tantalkarbid gibi az sayıda bileşenin ergime sıcaklığı daha yüksek. Kimyasal açıdan da çok kararlı bir bileşik olan toryum oksitin bir diğer önemli özelliği, ısıtılıp akkor haline getirildiğinde, siyah cisim ışın spektrumundan beklenene oranla; kırmızıaltı bölgede daha az, görünür ışık aralığında ise daha yoğun bir ışın sergilemesi. Dolayısıyla, aydınlatmada kullanılan diğer akkor malzemelere göre, enerji açısından daha verimli. Bu özelliği nedeniyle, 1885 yılında gazlı fenerlerin keşfinden sonra, nitrat hali, lüks lambaları için gömlek yapımında kullanılmaya başlandı. 1900'lü yılların başlarında elektrikle aydınlatma yaygınlaşana kadar da sokak aydınlatmasında önemini korudu. Ancak, ikincil bozunma ürünleri arasında aktinyum ve radon gazı bulunduğundan, toryum gömlekler sağlık güvenliği açısından riskli. Gerçi ışıdığı alfa parçacıkları deriden



öteye geçemiyor. Fakat, gömlekten kopan parçaların solunum veya sindirim yoluyla alınması halinde, alfa ışınımı akciğerlere ve iç organlara nüfuz ederek; akciğer, pankreas ve kan kanseri, karaciğer hastalığı risklerinin artmasına yol açabiliyor. Öte yandan, elementin bulunduğu kadarıyla herhangi bir biyolojik işlevi yok. Dolayısıyla, özellikle imalatında çalışanların sağlık güvenliğine yönelik radyoaktivite riski nedeniyle, aydınlatma alanında artık, daha az verimli veya daha pahalı olmalarına rağmen, itrium veya bazen zirkonyum gibi alternatifleri kullanılıyor.

Toryum oksitin diğer kullanım alanları da var. Tungsten gaz kaynağı elektrotlarının bileşiminde, elektrik ampullerinde kullanılan tungstenin dane iriliğinin kontrolünde ve yüksek ergime sıcaklığı nedeniyle de, ısıya dayanıklı seramiklerin yapımında kullanılıyor. Cama katıldığında yüksek kırılma indisine ve düşük ayırmaya yol açtığından, kameralar ve bilimsel aygıtlar için yüksek kaliteli mercek yapımında; sülfürik asit üretimi, amonyağın nitrik asite dönüştürülmesi ve petrolün ayrıştırılması işlemlerinde katalizör olarak kullanılmakta.

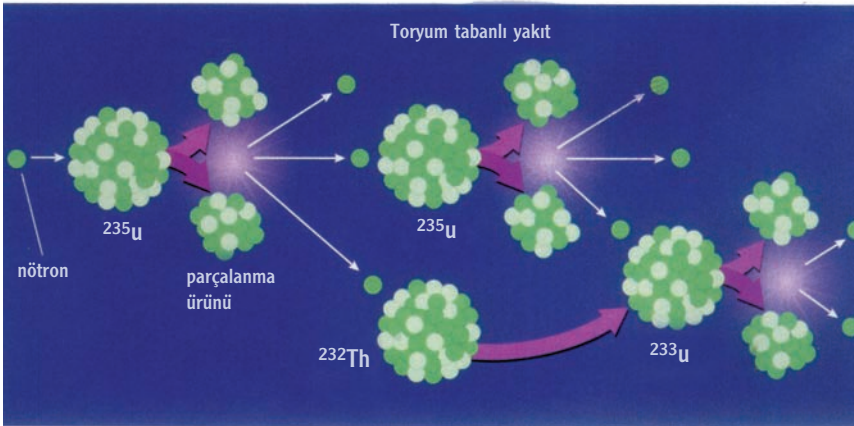
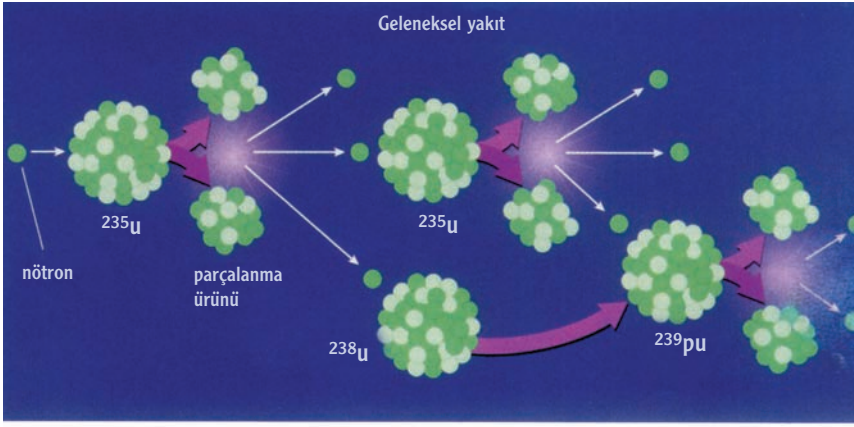
Öte yandan, toryumun metal hali, yüzeyinden bir elektronun salınmasını sağlamak için harcanması gereken enerji ('iş fonksiyonu') düşük olduğundan, yüksek elektron ışın gücüne sahip. Bu özelliği nedeniyle, ark ışın lambalarında, ısıtıldığında elektron ('termiyonik') yayan katot uçların ve elektro-

nik donanımda kullanılan tungsten tellerin kaplanmasında kullanılıyor. Uçak motorlarının yapımında kullanılan magnezyum alaşımlarına, yüksek sıcaklıklarda sertlik ve sünmeye karşı dayanıklılığı sağlamak amacıyla katılıyor.

Toryum genellikle monazit mineralinden elde edilmekte. Monazit ise, esas olarak, ağır elementler içeren kumların; titanyum, zirkonyum ve kalay gibi elementlerin üretimi amacıyla işlenmesi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan bir mineral. En büyük üreticileri; Brezilya, Hindistan ve Malaysiya. Monazit aynı zamanda, seryum ve lantan gibi 'nadir toprak metalleri' için önemli bir cevher. Zaten esas olarak, bu elementlerin eldesi için işleniyor ve sonuçta, toryum bir yan ürün olarak ele geçiyor. Kısacası toryum, bir yan ürünün yan ürünü konumunda. Katalizör olarak kullanımı tekrarlı, diğer alanlardaki tüketiminin ise hacmi sınırlı. Öte yandan, doğal aktivitesi nedeniyle, özellikle seramik yapımında ve lüks gömleği imalatında alternatiflerine doğru bir yöneliş var. Dolayısıyla, yan ürün olarak elde edildiği hızda tüketilemiyor. Biriken miktarının düşük düzeyli atık olarak saklanması lazım. Bunun çevresel gereklerini yerine getirmek pahalı olduğundan, üreticiler için bir sıkıntı kaynağı. Dünyada halen yılda 6000 ton kadar monazit cevheri işlenerek, 300 ton kadar toryum üretiliyor. ABD'deki yıllık tüketimi 10 tondan az. Oksidinin fiyatı saflık derecesine bağlı ve 2006 sonu itibarıyla; %99,9 için 80, %99,99 için 100 \$/kg düzeyinde. Lüks gömleği kalitesindeki nitratı ise, 27 \$/kg. Fazla kullanılan bir metal olmadığından, dünyadaki rezervlerinin belirlenmesine yönelik kapsamlı aramalar yapılmış değil. Bu yüzden, değişik kaynakların belirttiği ülke rezervleri arasında ciddi farklılıklar var.

Halbuki toryumun nükleer enerji üretiminde kullanılması mümkün...

Toryum reaktörü: Genelde aktinidler serisinin tüm diğer üyeleri gibi toryum da, yüksek enerjili nötronların isabetiyle parçalanabilir. Fakat, yavaş nötronlarla parçalanmadığından, fisil değildir. Yavaş bir nötron yuttuğunda, Th-233 oluşturur. Bu çekirdek, nötron sayısı fazla geldiğinden, kararsızdır. Nötronlarından biri elektron (β^-) ışınarak protona, dolayısıyla çekirdeğin kendisi, 23 dakikalık yarılanma ömrü-



Geleneksel nükleer yakıt hem parçalanabilir (^{235}U) ve hem de parçalanamaz (^{238}U) izotopları içerir.

^{235}U çekirdeğinin bir nötron çarpması sonunda parçalanması 2 ya da 3 nötronun serbest kalmasına yol açar. Bunlar da bir başka ^{235}U çekirdeğini parçalar ya da ^{238}U atomlarının plütonyum-239'a dönüşmesine yol açarlar.

Bu element de parçalanabilir olduğundan reaktörün güç üretme sürecine katkıda bulunur. Toryum tabanlı nükleer yakıtlarsa (altta) büyük ölçüde aynı biçimde işlev yapar. Aradaki fark, ^{238}U 'dan plütonyum üretilmesi yerine bir başka parçalanabilir uranyum izotopu (^{233}U) üretimi.

olan reaktörler için, yaklaşık 60 yıl süreyle yeterli olduğu göz önünde bulundurulursa; toryuma dayalı termal reaktör üretken reaktörler, bu süreyi 10 bin yılın üzerine çıkartarak, nükleer güç üretiminin sürdürülebilirliğini artırabilir. Dahası var...

U-233(Th-232)U-233 yakıt döngüsü fazla plütonyum üretmediğinden, nükleer silahların yayılmasına karşı dirençlidir. Gerçi U-233'ün, namı tüpi basit bir bombanın yapımında kullanılması ve bu amaçla toryumdan kimyasal yöntemlerle görece kolay ayrıştırılması mümkündür. Fakat, U-233'le birlikte oluşan U-232, 73,6 yıl yarılanma ömrüyle radyoaktif olduğu gibi; bozunma ürünleri çok daha kısa yarılanma ömrüyle yüksek ışınma gücüne sahiptir ve ayrıca, ürünlerinden Bi-212 ve Tl-208 gibi bazıları, güçlü gama ışını yayıcıdır. Dolayısıyla, U-233'ün kullanılmış yakıttan ayrıştırılması, kimyasal yöntemlerle de olsa zordur. Kaldı ki; döngüye baştan bir miktar fakir uranyum katmak suretiyle, içeriğindeki U-233; çok daha zor olan zenginleştirme işlemine tabi tutularak U-238'den ayrıştırılmadığı sürece bomba yapımında kullanılamayacağı şekilde 'kirlenebilir'. Dahası da var...

Pu^{239} iyi bir fisil çekirdek olduğundan, fisyonla uğrayıp enerji üretebilir. Bazıları nötron yutmaya devam ederek, plütonyum-240, 241, 242 izotoplarına dönüşür. Pu^{241} beta bozunmasına uğrayarak Am^{241} , alfa yutarak da kürüm-245 üretir. Amerisyum, kürüm ve neptünyum da plütonyum gibi, periyodik tablodaki 'aktinidler' serisinin, 'uranyum ötesi' elementlerindedir. Reaktörde plütonyum ve uranyuma oranla çok daha az miktarlarda oluştuklarından, 'ikincil aktinidler' olarak nitelendirilirler. Aktinidler serisinin ortak özelliği, bazı radyoaktif izotoplarının çok uzun yarı ömürlü olmasıdır. Pu^{239} 'un yarı ömrünün 24.000 yıl olması gibi. Aktinidlerin uzun süreyle radyoaktif kalması, radyoaktif atık yönetimini zorlaştıran en önemli unsurdur. Genel kural olarak, uranyumda olduğu gibi; plütonyumun da tek kütle sayılı izotopları fisil iken, çift kütle sayılı izotopları, ancak hızlı nötronlar tarafından parçalanabilir. Dolayısıyla, reaktör kalbinde bir yandan fisil U-235 çekirdeklerinin parçalanmasıyla enerji üretilirken, diğer yandan, bazıları fisil olan plütonyum izotopları oluşmaktadır. Oluşan plütonyumun tek kütle sayılı izotoplarının bir kısmı fisyonla uğrayarak enerji üretimine katkıda bulunur. Yeterince uzun bir işletme süresinden sonra, plütonyum izotoplarının oluşma ve nötron yutarak yok olma süreçleri dengeye ulaşır. Sonuç olarak; termal bir reaktörde olu-

şan Pu^{239} 'un yarısı fisyonla uğrayıp, üretilen enerjinin 1/3 kadarını sağlar ve yaklaşık 1/6 kadarı, nötron yutmaya devam ederek, daha yüksek kütle sayılı izotoplara dönüşürken; kalan 1/3'ü birikir. Öte yandan, nötron yutan U^{235} çekirdeklerinden bazıları, henüz fisyonla uğrayamadan bir nötron daha yuttuktan sonra beta bozunmasına uğrayarak, neptünyum-237 izotopuna dönüşür. Np^{237} izotopu, U^{238} çekirdeğinin bir nötron yutup iki nötron saldıktan (n,2n) sonra beta bozunması uğramasıyla da oluşur. Fisyonla uğrayan çekirdekler ise; stronsiyum (Sr), sezyum (Cs), kripton (Kr), baryum (Ba), iyot (I) gibi fisyon ürünlerine parçalanmaktadır. Kalpte en fazla biriken çekirdekler, parazit işlevi gören bu fisyon ürünleridir. Zamanla reaktörün kritikliğinin devamını güçleştirir ve yakıtın, kısmen de olsa yenilenmesini zorunlu kılarlar.

Kullanılmış PWR yakıtı: 1000 MWe gücündeki PWR tipi bir reaktörde kullanılan, 100 ton civarındaki ve %4 oranındaki düşük zenginlikli yakıt stoğunun, yaklaşık üçte biri, 18-24 ayda bir yenilenir ve bu işlem en az iki hafta alır. Yani ortalama olarak, reaktör yılda en az 11 gün servis dışı kalır ve yakıtının 20 ton kadarı değiştirilir. Çıkarılan kısım, en yüksek nötron nüfusunu görmüş olan ve dolayısıyla en fazla fisyonla uğramış bulunan merkez civarındaki demetlerdir. Geride kalan demetler merkeze doğru kaydırılır ve yeni ya-



kıt demetleri kalbin çeperine yerleştirilir. Yani, yakıt yenileme işlemi; 'merkezden dışarı, çeperden içeri' ilkesine göre yapılır. Amaç, gücün yarıçap doğrultusunda homojen dağılmasını sağlamaktır.

Reaktörden çıkan yakıtta, 'kullanılmış yakıt' denir. Yakıtın çıkartılma nedeni, enerji içeriğinin tükenmiş veya hatta fisil çekirdek oranının azalmış olması değil, nötron yutan ve fakat fisyonla uğramayan çekirdeklerin birikmiş olması nedeniyle, reaktörün kritikliğini sürdürmenin güçleşmiş olmasıdır. İçeriğinde hala, kütlece %1 kadar, fisyonla uğramamış U^{235} bulunur. Bunun dışında; %95'i U^{238} , %1 kadarı plütonyum, %3'ü de fisyon ürünleri ve ikincil aktinidlerden oluşmaktadır. Kullanılmış yakıt, bir nükleer reaktörde oluşan radyoakti-

U-233(Th-232)U-233 yakıt döngüsü Pu-239(U-238)Pu-239 döngüsüne oranla; Np, Am, Cm gibi ikincil aktinitleri ve plutonyumu çok daha az miktarlarda üretir. Her ne kadar, döngünün arka cephesinde Pa-231, Th-229 ve U-230 gibi başka 'radyotoksik' çekirdekler varsa da, miktarları görece az olduğundan, atıklarının uzun vadeli radyolojik etkisi çok daha azdır. Kaldı ki; toryum döngüsüyle çalışan reaktörler nötron zengini olduğundan, bu nötronların bir kısmı, enerji ve fisil çekirdek üretiminin dışında, örneğin aktinitlerin fisyonu uğratarak 'yakılması'nda kullanılabilir. Böylelikle, uranyuma dayalı termal reaktörlerde oluşan atıkların en önemli bileşeni ortadan kaldırılmış olur. Ayrıca, toryum döngüsünde yakılacak çekirdekler arasında plutonyum da katılabilir. Böylelikle, uranyuma dayalı termal reaktörlerin ürettiği 'sivil' ve nükleer silahların azaltılması anlaşması kapsamına yokedilmesine karar verilen başlıkların içeriğindeki 'askeri' plutonyum, enerji üretiminde kullanılarak, çok daha hızlı bir şekilde ortadan kaldırılabilir mümkün hale gelir. Yani toryum döngüsü yayılmaya karşı dirençli olduğu gibi, uranyum döngüsüne de dirençli hale getirebilir.

Yalnız, bir sorun var...

Bir reaktörün çalışması sırasında kalbinde, gerek nötron yutmaları, gerekse fisyonlar sonucunda, yakıtın başlangıçta içerdiğinden farklı çekirdekler oluşmakta ve bir yandan da bunların pek çoğu, keza nötron yutarak veya kararsız olduğundan bozularak başka çekirdeklere dönüşmektedir. Genel olarak, yarılanma ömrü saniye veya dakika düzeyinde kısa olan radyoaktif çekirdekler, pek sorun yaratmazlar. Çünkü, hızla bozunup yok olurlar ve bu arada ışıdıkları parçacıklar, reaktörün korumalı hacmi içerisinde durdurulur. Yarılanma ömrü onlarca yıl düzeyinde olan radyoaktif çekirdekler ise, bu arada nötron yutup başka çekirdeklere dönüşmedikleri takdirde, varlıklarını uzun süre devam ettirirler ve işletme sırasında bazı olumsuzluklara yol açıyorsa eğer, reaktör buna tahammül edecek şekilde tasarlanmıştır ve tahammül edilerek işletilir. Ancak bu, 'yakıt döngüsü'nün, işletme sonrasıyla ilgili bir 'arka cephe' sorunudur. İşletme açısından asıl dikkate alınması gereken çekirdekler, yarılanma ömrü aylar düzeyinde olan 'orta vadeli' radyoaktif izotoplardır.

Şimdi bu bilgilerin ışığında, Th-232'nin U-233'e dönüşme sürecine biraz yakından bakalım. Th-232 aslında, nötron yakalamaya pek de eğilimli sayılmaz; termal nötronlar için oldukça küçük bir 'yakalama tesir kesiti'ne sahiptir ($\sigma_c = 7,4$ barn) (Interpreted ENDF file. (1 barn = 10^{-24} cm²). Yakalama olasılığı gerçekleştiğinde oluşan Th-233 ise; çok daha büyük ($\sigma_c = 643$ barn) bir yakalama kesitine sahip olmakla beraber; hayli kararsız olduğundan, çoğunlukla nötron yakalamaya fırsat bulamadan, 22 dakika yarılanma ömrüyle beta bozunmasına uğrayarak, protaktinyum-233'e dönüştür (Pa-233). Buraya kadar sorun yok. Fakat Pa-233'ün yarılanma ömrü, görece uzun olup, 27,1 gündür. Dolayısıyla, beta bozularak U-233'e dönüşene kadar, aylarca beklemesi gerekebilir. Halbuki bu izotop aynı zamanda, nötron yakalamaya oldukça eğilimlidir ($\sigma_c=22$ barn). Reaktörde bırakıldığı takdirde, bir nötron yutarak Pa-234'e dönüşebilir. Pa-234 ise nötronlara karşı ilgisiz olup, 1,2 dakika yarılanma ömrüyle, keza beta bozularak U-234'e dönüşür. Halbuki uranyumun bu izotopu, genelde aktinitlerin tek kütle sayılı izotopları fisil iken çift sayılıları böyle olmadığından, fisil değildir. Ya nötron yu-

vitenin %99'unu bünyesinde barındırır. Kalan %1, reaktörün basınç kabı gibi yapı elemanlarında oluşur. Yakıt bu haliyle, radyoaktivitesi nedeniyle ısı üretmektedir. Dolayısıyla, zırhlı ve soğutulması lazımdır. Reaktör koruma binasının içindeki bekletme havuzlarına konur. Havuzdaki su iyi bir zırh malzemesi oluşturur ve ayrıca, zorlamalı taşınım ile yakıtı soğutur. Yakıt bu şekilde, bir yıl kadar bekletilir. Amaç, daha sonraki işlemlere görece daha kolay tabii tutulabilmesi için, radyoaktivitesinin azalmasıdır.

Bundan sonrası için iki seçenek vardır: Ya yakıtı gözden çıkarıp 'atık' saymak, ya da yeniden işlemek. Yeniden işlemenin amacı, kullanılmış yakıtın içeriğindeki, başta uranyum ve plutonyum olmak üzere, işe yarar izotopları ayırıştırıp, yeni yakıt üretiminde kullanmaktır. İşlem aynı zamanda atıkların hacmini azaltarak, yönetimini kolaylaştırır.

Yeniden işleme: Yeniden işleme sürecinde, yakıt çubukları mekanik olarak kesilip parçalandıktan sonra, derişik nitrit asit çözeltisinde çözülür. İçindeki uranyum ve plutonyum ayırıştırıldıktan sonra, toz halinde UO₂ ve PuO₂ elde edilir. Geri kazanılan uranyum bileşeni, U²³⁵ açısından %0,8-1 oranında zengindir. Fakat içinde ayrıca; doğal uranyumda bulunmayan, yakıtın reaktörde kullanımı sırada oluşmuş olan ve fisil olmayan U²³², U²³⁶ (%0,4) izotopları da vardır. Bu çekirdekler, U²³⁵ ve

U²³⁸'den çok daha hızlı bozunurlar ve U²³²'nin ürünlerinden, talyum-208 gibi bazıları güçlü gama ışıyıcısıdır. Dolayısıyla, yeniden işlemenin, bu bozunma ürünlerinin fazlaca birikmesine fırsat vermeden önce yapılması lazımdır. Aksi halde, imal edilecek olan yeniden işlenmiş yakıt, doğal uranyumdan imal edilen taze yakıtla oranla çok daha fazla radyoaktif olur. Bu durum, sözkonusu yakıtın özel önlemlerle işleme tabii tutulması ve ayrıca, kullanılacağı reaktörün daha etkin bir şekilde zırhlanması gereksinimlerini doğurur. Öte yandan, U²³⁶ fisil olmadığı gibi, güçlü bir nötron soğurucusudur da. Bunun telafisi için, yeniden işlenmiş yakıttaki U²³⁵ zenginliğinin, taze yakıttakine oranla daha yüksek olması gerekir. Oysa ki, kullanılmış yakıttan elde edilen uranyumun zenginleştirme işlemi, radyoaktivitesinin yüksekliği nedeniyle, doğal uranyumunkinden ayrı yapılmak zorundadır. Bütün bunlar, süreçlerinin çok sayıdalığı ve karmaşıklığı nedeniyle taze uranyum kullanmaya oranla zaten pahalı olan 'yeniden işleme' süreciyle elde edilen yakıtın maliyetinde ek artışlara yol açar. Bu ise, zamanında işlenmeyen kullanılmış yakıtın, yeniden işlenmesinin giderek zorlaşması anlamına gelir. Plutonyuma gelince...

20 ton kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden elde edilen plutonyum 230 kg kadardır. Bu plutonyumun izotop bileşimi, bom-

ba yapımına uygun değildir. Çünkü, bu amacın gerektirdiği süperkritik düzeyini başara bilmek için, plutonyumun %90'dan fazlasının fisil izotoplardan oluşması gerekir. Halbuki, U²³⁸'in nötron yutması sonucunda oluşan Pu²³⁹, reaktörde kaldığı sürede art arda nötronlar yutarak, daha yüksek kütle numaralı izotoplar oluşturmuştur. Sonuç olarak; kullanılmış yakıttan elde edilen plutonyumun ancak 2/3 kadarı fisildir (%50 Pu²³⁹, %15 Pu²⁴¹). Kalan 1/3'ü ise, fisil olmayan izotoplardan (Pu²⁴⁰, Pu²⁴²) oluşur. Fakat, bu malzeme yine de, çok yüksek bir enerji içeriğine sahiptir. Çünkü, plutonyumun tek veya çift izotopları, yüksek enerjili nötronlarla fisyonu uğratabilir. Dolayısıyla, %65 düzeyindeki fisil çekirdek oranıyla etkin bir yakıt malzemesi oluşturan bu plutonyumu, aslında %3-5 civarında 'düşük zenginlikli uranyum' (LEU) için tasarlanmış olan hafif su reaktörlerinde (LWR) de yakmak mümkündür. Bunun için PuO₂'nin, UO₂ ile karıştırılma oranının daha düşük, %5 civarında tutulması gerekir. Çünkü, %5'lik bir karışım; uranyum bileşeninin %1 zengin olduğu varsayılırsa; %4,2 oranında zengin yakıtla eşdeğerdir. Kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden elde edilen plutonyumun hafif sulu termal reaktörlerde kullanılmasına; 'plutonyum döngülü karışık oksit' (PUREX) veya 'metal oksitli yakıt' (MOX) anlamında 'PU-

tarak ($\alpha_a=95$ b) U-235'e, ya da yaklaşık 250.000 yıl yarılanma ömrüyle alfa ışınarak, Th-230'a dönüşür.

Kısacası, Pa-233'ün bozunmadan önce nötron yutması, hem bir nötronun ziyarı, hem de fisil bir çekirdek oluşumundan mahrum kalınması demektir. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin oluşuktan sonra tümüyle bozunana kadar; yaklaşık 10 yarılanma ömrü, yani 1 yıl kadar süreyle, nötron ortamından uzaklaştırılması gerekir. Bu ise, mevcut reaktör tasarımlarında, işletmenin sık sık durdurulması ve ekonomik olmaktan uzaklaşması anlamına geliyor. Öte yandan, yakıtta oluşan U-232 ile bozunma ürünlerinin yüksek radyoaktivitesi nedeniyle, yakıt işleme sürecinin uzaktan kumandalı aygıtlarla yapılması gerekmektedir. Bu da keza, döngü maliyetini yükselten bir unsur. Toryum kullanımı esas olarak bu yüzden yaygınlaşmadı. Bu engelleri aşmak için, Güney Afrika'nın uluslararası bir ortaklıkla geliştirmeye çalıştığı 'çakıl yataklı' reaktör tasarımı üzerinde çalışılıyor. Bir diğer seçenek, 1970'li yıllarda geliştirildikten sonra terkedilmiş bulunan, sıvı yakıtlı 'ergimiş tuz reaktörü'. Yakıtın reaktöre sürekli bir şekilde girip çıktığı her iki ta-

sarım da, geliştirilmesine çalışılan IV. Nesil tasarımları arasında. Toryum döngüsünün ön ve arka cephe aşamalarında aşılması gereken başka engeller de var...

ThO₂'nin yüksek ergime sıcaklığına ve kimyasal kararlılığa sahip bir bileşik olması, yakıtın reaktörde kullanımı açısından üstün bir özellik olmakla birlikte, imalatı ve işlenmesi sırasında güçlüklerle yol açıyor. Örneğin, yakıt toz halinde dioksitin fırınlanması için 2000 °C'nin üzerinde sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Öte yandan, kullanılmış yakıtın işlenmesine yönelik THOREX sürecinde, ThO₂ kimyasal kararlılığı nedeniyle, derişik nitrik asitle pek çözümlüyor. Çözünmesini arttırmak için çözeltiliye hidrojen florid (HF) katılması gerekmektedir. Bu ise, paslanmaz çelik ve boruların paslanmasına yol açıyor. Buna rağmen, çözünme uzun zaman aldığından, süreç hala ekonomik değil. Ayrıca, toryumu uranyum ve plutonyumdan ayırıştırmanın 'üç akışlı' tatminkar bir kimyasal yöntemi, kuramsal olarak mümkün görünmekle beraber, geliştirilmeye muhtaç. Son olarak, toryum döngüsünde ortaya çıkan izotopların nükleer tepkimeler açısından davranışlarını belirleyen 'tesir kesiti' özellikleri,

henüz ayrıntılı bir şekilde incelenip belirlenmiş değil.

Sonuç olarak, toryum döngüsünün hayata geçirilebilmesi için, tamamlanmaya muhtaç pek çok araştırma-geliştirme kalemi var. Buna karşılık, uranyum döngüsünün teknolojisi oturmuş ve nükleer enerji alanındaki kullanımı yaygınlaşmış halde. Uranyum temininde şimdiye kadar herhangi bir darboğazın yaşanmamış olması, toryum çalışmalarının geri planda kalmasına yol açtı. Giderek yaygınlaşan enerji yetmezliği algısı, bu çalışmalara hız kazandırdı. Tasarımlar arasında, esas olarak 'hızlandırıcıyla atık dönüştürme'ye (ATW) yönelik olarak geliştirilmesine çalışılan, 'enerji yükseltici' de var...

Toryum esaslı enerji yükseltici: U-233'ün çekiciliği karşısında, Nobel ödüllü fizikçi Carlo Rubbia, toryum esaslı ve kendi adıyla anılan bir enerji santrali tasarımı geliştirdi. Bu tasarımda Th-232, nötron yerine yüksek enerjili proton bombardımanı ile U-233'e dönüştürülüyor. (Th-232 + p → Pa-233 → U-233 + e⁻).

Tabii bir de nötron üretilerek, oluşan U-233 çekirdeklerinin fisyonu uğratılması lazım. Rubbia'nın tasarımı bunu, yine protonların bombardımanı sırasın-

REX/MOX yakıt döngüsü' deniyor. MOX yakıtını bu reaktörlerde, %30'a varan oranlarda yakıt olarak kullanmak mümkündür. Fakat bu kullanım sırasında, plutonyumun içeriğindeki fisil olmayan çift sayılı izotopların oranı artar. Dolayısıyla, kullanılmış olan MOX yakıt, yeniden işlenip, yine termal reaktörlerde ikinci kez yakıt olarak kullanılmaya uygun değildir. Halbuki, kullanılmış MOX yakıtın içeriği hala, ciddi bir enerji potansiyeli barındırmaktadır. Örneğin, plutonyumun tek sayılı izotopları fisil olduğu gibi, çift sayılı izotopları, tüm aktinidler de dahil olmak üzere, görece yüksek enerjili nötronlarla fisyonu uğratılabilir. Dolayısıyla, kullanılmış MOX yakıttan elde edilen plutonyumu, 'hızlı' reaktörlerde 'yakmak' mümkündür. İleride bu şekilde kullanılmaları olasılığı nedeniyle saklanıyorlar. Süreç; Fransa, Almanya, İngiltere, Belçika gibi Avrupa ülkeleri ve Japonya tarafından uygulanıyor. Nedeni, nükleer yakıt döngüsünden kaynaklanan atıkların hacmini azaltması. ABD ise 1977 yılında, Carter yönetimi tarafından yasaklandı. Nedeni, özellikle plutonyumdan kaynaklanan güvenlik endişeleriydi...

Çünkü plutonyum, kimyasal açıdan güçlü bir zehir. Hem de ağır olduğu için, vücuda girdiği takdirde, atılması zor bir element. Ayrıca, izotoplarının alfa ve beta aktivitesi nedeniyle, özellikle solunum yoluyla alındığında, akciğerlere yerleşerek ölümcül varan sağlık risk-

lerine yol açar. Dolayısıyla, kullanılmış yakıttan ayrıştırılan plutonyum, her ne kadar çift sayılı izotoplarının çokluğu nedeniyle enerji verimi yüksek bir nükleer bomba yapmaya uygun değilse de; terör amacıyla yakıt işleme tesislerinden çalınıp, alışıldık patlayıcılarla karıştırılarak, 'kirli bomba' yapımında kullanılabilir. İç veya dış güvenlik açısından tehdit oluşturan bu olasılık, tesislerin çoğalması ve ortalıkta dolaşan plutonyum miktarının artmasıyla birlikte artar. Öte yandan, yakıt işleme teknolojisini edinen ülkeler için; yakıtı reaktörden sık sık çıkartıp işleyerek içinde oluşan plutonyumu, çift sayılı izotoplarının çoğalmasına imkan vermeksizin ayırıştırıp biriktirmek imkanı doğar. Birkaç kilogramlık plutonyum, kaba da olsa bir bombanın yapımı için yeterlidir. Bu durum, nükleer silahların yayılmasının kolaylaşması ve uluslararası güvenlik risklerinin artması anlamına gelir.

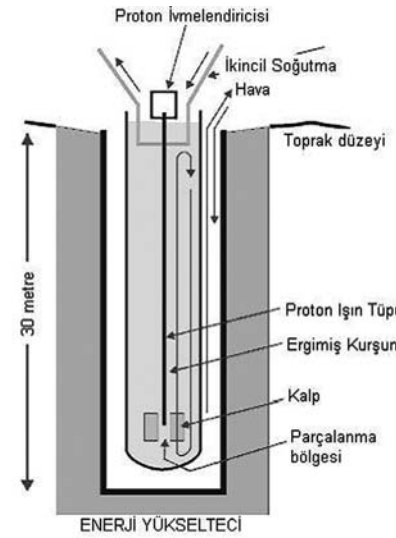
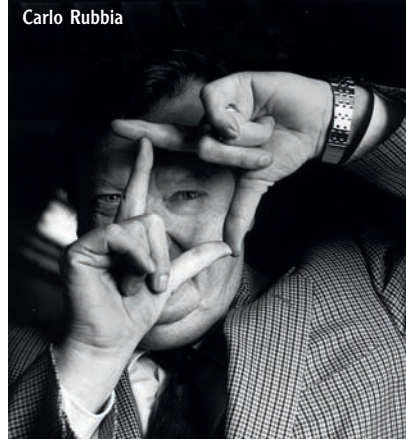
Halbuki bu plutonyumu oksite çevirip, nötron enerji spektrumu görece yüksek olacak şekilde tasarlanmış olan 'hızlı' reaktörlerde 'yakmak' mümkündür.

Hızlı üretken reaktör (FBR): U-235'in düşük enerjili nötronlara karşı fisyon kesiti büyük olduğundan, termal nötronların büyük çoğunluğu bu çekirdekler tarafından soğurulur. Plutonyumun daha hızlı üretilmesi isteniyorsa, nötron nüfusunu düşük enerjilerden orta yükseklikte enerjilere doğru kaydırmak

gerekir. Ki, U-238'lerde yutulma olasılığı yaklaşık aynı kahrken, U-235'lerin fisyon olasılığı azalsın. Bu; hem soğutucu hem de yavaşlatıcı işlevi gören suyun yerine, nötronları pek de yavaşlatmayan, örneğin sıvı sodyum veya bismut-kurşun karışımı gibi, orta ağırlıkta çekirdeklerden oluşan bir soğutucu kullanmakla gerçekleştirilebilir. Tabii, U-235'in fisyon olasılığı azaldığına göre, aynı güç düzeyini tutturabilmek için; nötron nüfusunun veya yakıtın zenginlik oranı anlamına gelen birim hacmindeki U-235 sayısının artırılması gerekmektedir. Bu; fisil U-235 çekirdeklerini tüketirken, doğurgan U-238 çekirdeklerini fisil Pu-239 çekirdeklerine dönüştüren döngü; U-235(U-238)Pu-239 şeklinde gösterilebilir. Yakıt; %20 oranında, 'yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyum'un (HEU) oksiti olabileceği gibi, %20-%80 oranında PuO₂-UO₂ karışımı da olabilir. Reaktör bu ikinci durumda; bir yandan Pu-239 tüketirken, diğer yandan U-238 çekirdeklerinden, keza Pu-239 üretir. Yani, döngü Pu-239(U-238)Pu-239 şeklini alır. Bu döngüde kullanılan plutonyumun daha önceden, başka bir termal veya hızlı üretken reaktörde üretilmiş olması gerekir. Uygun bir tasarımla reaktör, birim zamanda tükettiğinden daha fazla fisil çekirdek dahi üretebilir. Bu durumda reaktörün, net yakıt üreticisi olduğu söylenir. Yani bu 'hızlı reaktör', 'hızlı üretken'dir. Çıkarılan yakıt, daha sonra kimyasal işleme-

da kurşun gibi ağır çekirdeklerden ‘parça kopması’ (‘spallation’) sonucunda ortaya ortaya çıkan nötronlarla başarmayı hedefliyor. Nötronlardan bazıları Th-232 çekirdekleri tarafından yutulularak bunları U-233’e dönüştürürken, diğer bazıları mevcut U-233’lere çarparak bunların fisyonuna yol açmakta. Proton ışını kesildiğinde, fisyonlar duruyor. Ancak, öngörülere göre; bu arada yer almış olan çekirdek parçalanmaları sonucunda, protonların ivmelenmesi için harcanan enerjinin 60 misli kadar enerji elde edilmiş olacak. Bu yüzden de Rubbia’nın tasarımına ‘enerji yükseltici’ deniyor. Hem de, tasarımda yakıt hammadresi olarak sadece toryum kullanıldığından ve doğal toryum %100 Th-232 izotopundan oluştuğundan, uranyumda olduğu gibi bir zenginleştirme işlemine gerek kalmıyor.

‘Toryum Esaslı Enerji Yükseltici’nin kalbi, şekilde görüldüğü gibi; toprak düzeyinin altına yerleştirilmiş, 30m yüksekliğinde ve 6m yarıçapında, çelik bir silindir kap biçiminde tasarlanmaktadır. İçi yaklaşık 10,000 ton kurşunla dolu olan kabın alt kısmında, yakıt hammadresini oluşturan toryum bulunuyor. Yukarıdan aşağıya, bu toryum malzemesine doğru, bir proton ivmelen-



diricisi uzanıyor. Protonlar ‘parçalanma bölgesi’ne vardıklarında, bir yandan Th-232’yi U-233’e çeviriyor, bir yandan da kurşun çekirdeklerini parçalayarak, U-233’ün fisyonu için gerekli nötronları üretiyor. Çoğunlukla fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi olarak açığa çıkan enerji kurşunu ısıtıp eritiyor. Isınan kurşun, çelik kap içerisinde, doğal konveksiyonla yükseliyor. Dolayısıyla bir yandan da, soğutucu görevi görüyor. Kabın kendisi ise dışından, havanın zorlamalı konveksiyonuyla soğutulmakta.

Tasarım çekici görünmekle birlikte; tepkime dizisinin enerji açısından karlı bir şekilde sürdürülebilmesi, 14 MW güç düzeyinde bir hızlandırıcı gerektiriyor. Halbuki şimdiye kadar yapılmış olan en güçlü hızlandırıcı 1,2 MW güce sahip. Öte yandan çelik kabın, 1200 °C’ye kadar ısınan kurşunun içinde erimesi gibi, ciddi bazı mühendislik problemlerinin aşılması lazım. Şimdilik, bilgisayar benzetişimleri ve küçük ölçekli bazı testleri yapılmış. CERN’den başka, ABD, Japonya ve Rusya’da da laboratuvar ölçeğinde çalışmalar planlanıyor. Ama sistem, çalışan bir prototip olarak henüz ortada yok. Ekonomikliği de meçhul...

Prof. Dr. Vural Altın

re tabi tutulup, içindeki plutonyum ayrıştırılarak, tekrar yakıt üretiminde kullanılabilir. Bu sürecin art arda birkaç kez tekrarlandığı döngüye, ‘kapalı yakıt çevrimi’ denir. Hatta, doğal uranyumun zenginleştirilmesi işleminden geriye kalan ‘fakirleşmiş uranyum’ da döngüye sokulup, içeriğindeki U²³⁸ çekirdekleri, örneğin kalbin etrafına ‘battaniye’ olarak yerleştirilerek, kalpten sızan nötronların bombardımanıyla Pu²³⁹’a dönüştürülebilir. Böylelikle doğal uranyumun tümünü yakıt olarak kullanmak mümkündür.

Termal reaktörler ise çoğunlukla, ‘tek geçişli yakıt çevrimi’ne dayalı olarak çalışmak üzere tasarlanmıştır. Yani kalbe konan yakıtın, içerdiği U²³⁵ oranı belli bir düzeyin altına inene kadar kullanıldıktan sonra çıkarılıp beklemeye alınması ve yerine yenisinin konması hedeflenir. Dolayısıyla, termal reaktörler esas olarak, doğal uranyumdaki çekirdeklerin yalnızca %0,7 kadarını oluşturan U²³⁵ izotoplarının parçalanmasıyla enerji üretimine yöneliktirler. Halbuki, hızlı üretken reaktörlerin desteğine dayalı bir ‘kapalı yakıt çevrimi’ sayesinde, doğal uranyumun birim ağırlığından, ‘tek geçişli yakıt çevrimi’ne göre, kuramsal olarak 60 misli daha fazla enerji elde etmek mümkündür. Ancak, hızlı reaktör teknolojisi, doğal uranyum fiyatlarının başlangıçta tahmin edilen hızla artmaması nedeniyle, gelişip yaygınlaşamadı. Fransa’da

223 MWe gücündeki prototip Phénix hızlı reaktörü 1973 yılından bu yana kesintili olarak çalıştırılmaktadır. 1200 MWe gücündeki halefi Superphénix, sodyum soğutucusundan kaynaklanan sorunlar nedeniyle kapatıldı. Rusya’da ise, 600 MWe gücündeki BN-600 hızlı üretken reaktörü 1980 yılından beri sürekli devrede. Dolayısıyla, yeniden işleme sürecinden elde edilen plutonyumun hızlı reaktörlerde kullanımı hayli sınırlı. Fazlası biriktiriliyor...

Atıklar: Kullanılmış yakıtın yeniden işlenerek, içeriğindeki uranyum ve plutonyumun ayrıştırılmasından sonra geride, kullanılmış yakıtın tonu başına 5 m³ kadar asit çözeltisi kalır. Çözeltide; kılıfı oluşturan zirkonyum alaşımındaki metaller ile, başta Sr⁹⁰, Cs¹³⁷ olmak üzere fisyon ürünleri, plutonyum ve uranyumun haricindeki ‘ikincil aktinidler’ bulunmaktadır. Üst düzeyde radyoaktif atık oluşturan bu malzeme, kullanılmış yakıtın kütlelerinin %3’üne karşılık geldiğinden, 30 kg civarındadır. Hatta bu miktar, ikincil aktinidlerin de plutonyumla birlikte ayrıştırılıp yakılmasıyla, biraz daha azaltılabilir. Bu amaçla, ‘hızlandırıcı güdümlü sistem’ler (ADS) üzerinde çalışılıyor. İkincil aktinidler, CANDU tipi ağır sulu reaktörlerde de, bir dereceye kadar yakılabilir. Ancak, hafif sulu termal reaktörlerin yakıtında kullanılmaları sakıncalıdır. Çünkü düşük enerjili nötron spektrumuna tabi tu-

tulduklarında, bazıları fisyonla uğrarken, bazıları nötron yutup güçlü radyoaktif çekirdekler; bunlardan örneğin kiryum (Ci), güçlü bir nötron ışını yayıcı olan kaliforniyuma (Cf) dönüşür ve yakıt döngüsünün arka cephe işlemlerini zorlaştırır. İkincil aktinidler termal reaktörlerde yakılacaksa eğer, element olarak birbirlerinden %99’un üzerinde saflıkla ayrıştırılıp, reaktörün her biri için uygun farklı yerlerine konmaları gerekir. Ki bu düzeyde ayrıştırma, pahalı bir işlemdir. Dolayısıyla, ikincil aktinidler içeren yakıtın hızlı reaktörlerde kullanılması gerekir. Buna ‘tüm aktinidlerin yakılma döngüsü’ deniyor. Döngünün asıl yararı, atığın miktarını azaltmaktan çok, gözetim altında tutulması gereken süreyi kısaltmaktır. Çünkü bu süre, eğer ikincil aktinidler çözeltiden alınmışsa, geride kalan Sr⁹⁰ ve Cs¹³⁷ çekirdeklerinin yarılanma ömrü 30 yıl civarında olduğundan, kabaca bu sürenin 10 misli, yani 300 yıl kadardır. Aksi halde saklanma süresi, aktinidlerin yarılanma ömrü çok daha uzun olduğundan, 3000 yılı aşar. Bunca uzun süreler söz konusu olunca, depolamadan önce; atığın hacminin olabildiğince azaltılması, fiziksel hareket ve kimyasal tepkime yeteneğinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu amaçla cam tozuyla karıştırılıp eritilip ve paslanmaz çelikten varillere aktararak saklanırlar. Batı’da kullanılan cam tipi, borosilikat. Rusya’da ise fosfat camı...