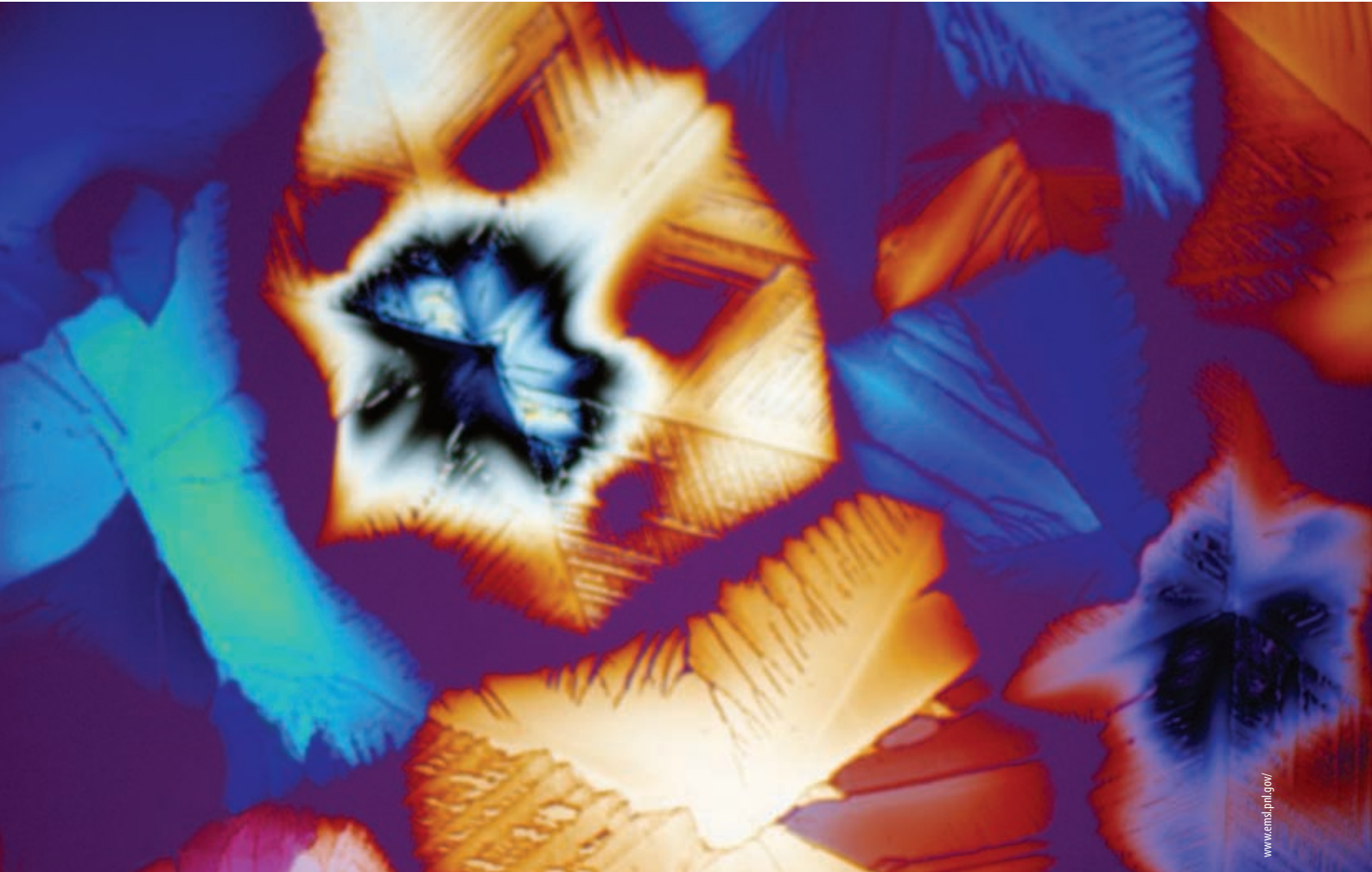


# Nükleer Enerjide Eski Bir Fikir Yeniden Öne Çıkıyor Toryum Reaktörleri

Eğer zamanda 1965 yılına geri gitmemiz mümkün olup da ABD'de nükleer enerji politikasına yeniden bir göz atabilseydik nasıl olurdu? 1965 yılının Haziran ayında ABD'nin Tennessee eyaletindeki Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda (ORNL) sıvı bir tuz bileşeni ile çalışan reaktör ilk defa kritik çalışma seviyesine ulaşmıştı. Modern nükleer reaktörlerde kullanılan katı yakıt çubuklarının aksine bu reaktör sıvı yakıt kullanıyordu. Kullanılan sıvı yakıt, sıcak florür tuzunda çözülmüş ve çalışmada sıcaklığında akışkanlığı suyunkine çok yakın fisyon ürünlerinden oluşmuştu. Yakıtı sıvı tuz bileşeni olan bu reaktör, nükleer teknolojide yeni bir pencere açarak beş yıla yakın bir süre başarılı bir şekilde çalıştı. Maalesef, bu süre sonunda nükleer araştırma programından çıkarıldı.



**Y**eryüzündeki iklim değişikliği hakkında bildiklerimizi ve Three Mile Island, Çernobil, Fukujima gibi reaktör kazalarını, 2010 yılının yaz aylarında ortaya çıkan Meksika Körfezi'ndeki petrol felaketini göz önünde bulundurursak, 1965'lerden beri başka bir nükleer enerji politikası uygulamaya konabilseydi acaba bu türlü felaketler olmayabilirdi miydi? Birçok bilim insanı, şayet sıvı yakıtla çalışan reaktör teknolojisinin geliştirilmesine fırsat verilseydi, bugünün enerji politikası için çok isabetli olacağı düşüncesine sahiptir. İleriye dönük ve önemi giderek artan vizyon, sıvı yakıtla dayalı reaktörlerin enerji ekonomisinde merkezi bir rol oynayacağı yolundadır. Sıvı yakıtla dayalı reaktörler uranyum yerine doğada daha çok bulunan toryum elementleriyle çalışır. Bu reaktörler katı yakıt kullanan uranyum reaktörlerine göre çok daha güvenlidir ve çok daha az miktarda atık ortaya çıkarır. Ayrıca atmosfere sıfır karbon salar ve inşa edilmeleri katı yakıtla çalışan reaktörlere göre çok daha ekonomik ve kolaydır.

Elbette zamanı geriye çevirmek mümkün değil. Tarihsel, teknolojik ve idari nedenler dolayısıyla katı yakıt sistemine dayalı uranyumla çalışan reaktörlerden vazgeçmek pek kolay görünmüyor. Bununla birlikte, gelecekte sıvı yakıtla çalışan toryum reaktörlerinin enerji üretiminde yer alması çok cazip görünüyor. Bu yazıda, toryum elementine dayalı enerji üretiminin tarihçesini, teknolojisini, kimyasını ve ekonomisini gözden geçirecek, toryum ve uranyum reaktör sistemlerini karşılaştırmasını yapacağız.

## Seçim

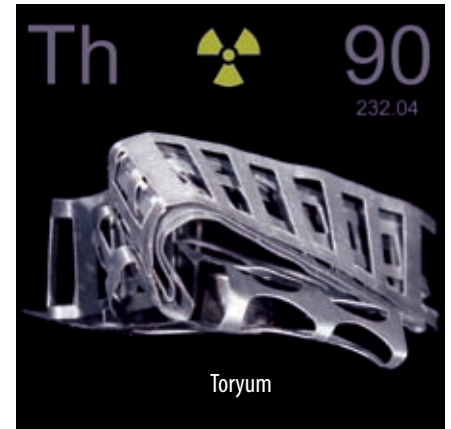
Sıvı yakıtlı nükleer reaktör fikri yeni bir fikir değil. Enrico Fermi, Chicago Üniversitesi'nde 1942 yılında uranyum plakalarını grafit blokları arasına yerleştirerek ilk nükleer reaktörü inşa etti. İki yıl sonra 1944 yılında, suda çözünebilir uranyum sülfat kullanarak ilk defa sıvı yakıtla çalışan reaktörün tasarımını gerçekleştirdi. Nükleer zincirleme reaksiyonda, atom çekirdeği yavaş hareket eden bir nötron soğurur ve fisyonu uğrar. Fisyon sırasında atom çekirdeği çok hızlı hareket eden iki parçaya bölünür ve aynı zamanda yeni nesil hızlı nötronlar açığa çıkar. Bu nötronlar ışık hızının % 10'una yakın bir hızla hareket eder. Bu kadar hızlı hareket eden nötronların Fermi'nin inşa ettiği reaktörde yeni bir fisyon yaratma olasılığı çok düşüktür ve yeni bir fisyon yaratmaları için yavaşlatılmaları gerekmektedir. Fermi'nin reaktöründe uranyum plakaları

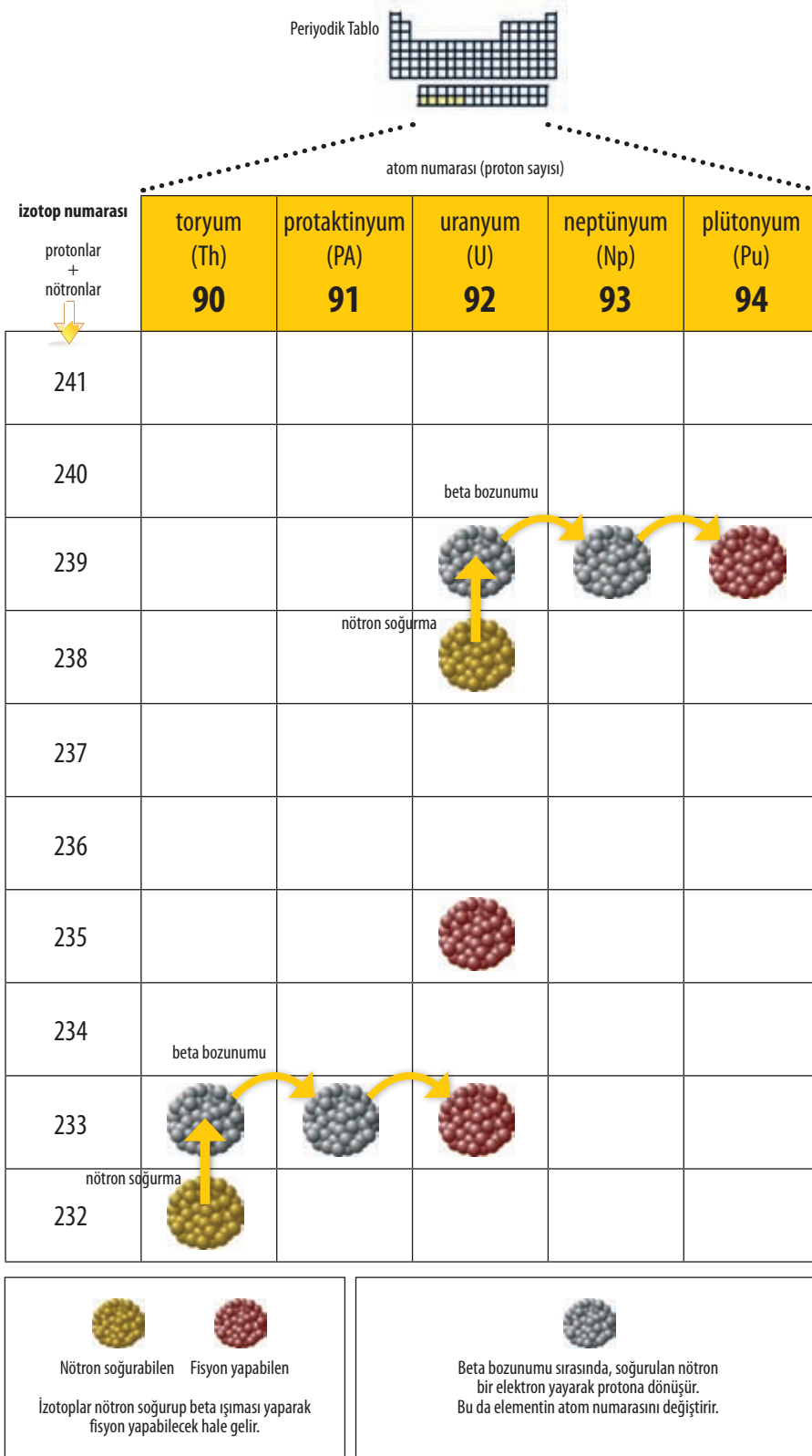
arasına yerleştirilen grafit blokları hızlı hareket eden nötronları saniyede birkaç kilometreye yakın hızlara kadar yavaşlatır. Fermi'nin inşa ettiği reaktördeki kontrol sistemi kadmiyumla kaplanmış plakalardan oluşuyordu. Bu kadmiyum plakaları uranyum plakalarını kapattığı zaman, kadmiyum elementleri nötronları soğurarak zincirleme reaksiyonu yavaşlatıyor veya tamamen durdurabiliyordu. Bu mekanizma, günümüzde kullanılan modern nükleer reaktörlerde oluşan zincirleme fisyon reaksiyonunun hızını kontrol etmek için temel bir prensip olmuştur. Enrico Fermi'nin zincirleme nükleer fisyon olayını keşfetmesinden sonra değişik nükleer reaktör türleri araştırılmaya başlandı. 1955-1973 yılları arasında ABD'de nükleer enerji teknolojisinin geliştirildiği en önemli merkezlerden biri Tennessee eyaletindeki ORNL olmuştur. Bu yıllarda ORNL direktörü olan Alvin Weinberg hatıralarında o yıllardaki gelişmeyi şu şekilde anlatır:

"Araştırmaların ilk günlerinde, değişik tasarımlı birçok reaktör üzerinde durduk, her birinin olumlu ve olumsuz yönlerini inceledik. Reaktörün yakıtı, soğutucusu ve yavaşlatıcısı gibi her bileşeni için bir çok seçenek vardı. Dolayısıyla önümüzde çok sayıda değişik reaktör tasarımları oldu. Yakıt malzemesi uranyum-233, uranyum-235 veya plütonyum-239 olabilirdi. Soğutucu olarak normal su, ağır su, gaz veya sıvı metal kullanılabilirdi. Yavaşlatıcı olarak normal su, ağır su, berilyum veya grafit kullanılabilirdi. Elbette, hızlı nötronla çalışan reaktörlerde yavaşlatıcıya ihtiyaç yoktu. Yakıt, soğutucu ve yavaşlatıcı için bütün farklı olasılıkları göz önüne alırsak neredeyse bine yakın reaktör tasarımı ortaya çıkmıştı. Dolayısıyla, nükleer enerji teknolojisini geliştirmek için bir seçim yapıp araştırmalarımızı o yönde geliştirmek durumundaydık."

Nükleer enerji teknolojisinin geleceğini en çok etkileyen seçimi o zamanlar Deniz Kuvvetleri Reaktörleri'nin yöneticisi olan Amiral Hyman Rickover yaptı. Amiral Rickover ABD'nin ilk nükleer denizaltısında (USS Nautilus) kullanılacak reaktörün yakıt olarak uranyum-235 bakımından zenginleştirilmiş katı uranyum oksit yakan, soğutucu ve yavaşlatıcı olarak normal su kullanan bir reaktör olmasına karar verdi. Nautilus 1955 yılında denize indirildi. Hemen takip eden yıllarda benzer tasarımlı bir reaktör Pensilvanya eyaletinde inşa edildi. Bu reaktör 1957 yılında devreye girdi ve ABD'de çalışmaya başlayan ilk ticari nükleer enerji reaktörü oldu.

Rickover'ın Nautilus'te bu reaktörü kullanmaya karar vermesinin birçok nedeni var. O zamanlar bu reaktör bir denizaltı için en uygun tasarıma sahipti. En kolay ve hızlı şekilde yapılabilecek tasarımdı. Ayrıca reaktörde yan ürün olarak plütonyum-239 ortaya çıkıyordu. Bu ürün de nükleer bomba yapımında kullanılan gerekli bir malzemeydi. Bu nedenler bugün geçerliliğini yitirmiş olsa da o zamanlar önemliydi. Rickover'ın yaptığı tercinin olumsuz yönleri nükleer teknolojiyi bugüne kadar etkiledi. Katı uranyum yakıtının kendine özgü sorunları vardır. Sıcaklık ve reaktörün çekirdeğinden çıkan radyasyon, katı yakıt çubuklarının yıpranmasına yol açar. Bundan dolayı katı yakıt çubukları, içlerindeki uranyum yakıtının sadece % 3 ila 5 oranındaki bir kısmı yandıktan sonra (birkaç yıl içinde) değiştirilmek zorundadır. Ayrıca fisyon ürünlerinin yakıt çubuklarının yüzeyinde birikmesi, yakıt çubuklarının etkinliğini azaltır. Özellikle, ksenon-135'in nötron soğurma tesiri kesiti çok büyük (yani nötron soğurma özelliği kuvvetli) olduğu için ortaya çıkan nötronları soğurarak yakıt çubuklarına fisyon zehirlenmesi etkisi yapar. Ksenon-135'in yarı-ömrü 9,2 saat gibi oldukça kısa olmasına rağmen, reaktörün istenen şartlarda çalışması için bu sorunun dikkate alınması gerekir. Örneğin, ksenon-135 yanmaya başlayıp yakıt çubuklarının yüzeyleri temizlenmeye başlayınca, zincirleme fisyon reaksiyonunun hızı artmaya başlar. Bu durumda kontrol paneliyle dikkatli bir şekilde yakıt çubuklarının etrafı kapatılarak reaktörün dengeli bir şekilde çalışması sağlanmalıdır. Böyle bir durumda gerekenin yapılmaması Çernobil reaktörünün dengesiz çalışmasına yol açtı. Bunun sonucu olarak reaktörün çekirdeği çok yüksek seviyede ısınmadan dolayı eridi ve dolayısıyla patlamasına sebep oldu.





Uranyum fisyonunda ortaya çıkan diğer ürünlerin içinde yarı ömürleri çok uzun olan plütonyum, amerikyum, neptünyum ve kuryum gibi kütleleri uranyumdan daha ağır elementler de vardır. Ortaya çıkan bu atıkları zararsız hale getirme ve güvenli bir şekilde depolama sorunları henüz çözülmüş değildir.

## Toryum

Enrico Fermi Chicago'da ilk reaktörü tasarladığı zaman, yakıt olarak en kolay şekilde fisyon yapabilen uranyum-235 elementini kullandı. Fakat büyük miktarda uranyum-238 kütlesinin içindeki az miktarda uranyum-235'in reaktörde yakılması sonunda plütonyum-239 gibi kolayca fisyonla uğrayabilen bir elementin yanı sıra çevirime uğramış başka elementlerin de ortaya çıktığı kısa sürede anlaşıldı. Nükleer enerjinin önde gelen liderleri uranyum reaktörlerinde ortaya çıkan atıkların da yanması fikrinin cazibesine kapıldılar. Böylece insanlığa sınırsız ve ucuz enerji üretilebilecekti. Benzer bir çevirme mekanizmasıyla yeryüzünde doğal olarak bulunan toryum-232 elementi fisyon yapabilen uranyum-233 elementine dönüştürülerek enerji yakıtı olarak kullanılabilir. Toryuma dayalı yakıt döngüsü uranyuma dayalı yakıt döngüsünden farklı bir kimya ve farklı bir teknoloji gerektirir ve farklı sorunlar içerir. Fakat toryum reaktörleri, uranyumla çalışan reaktörlerin karşılaştığı çok ciddi sorunları ortadan kaldıracak potansiyele sahiptir. Bugün yeryüzünde üretilen elektrik enerjisinin % 17'sinin ve ABD üretilen elektrik enerjisinin % 20'sinin uranyumla çalışan reaktörlerde üretilmekte olduğu göz önünde bulundurulursa toryum reaktörlerinin potansiyel önemi daha belirgin olarak ortaya çıkar.

Toryum, yerkabuğunda uranyuma göre neredeyse dört kat daha fazla bulunur ve maden yataklarından uranyuma göre daha kolay elde edilir. Atom numarası 90 olan toryum-232, bir nötron soğurduğu zaman toryum-233 elementine dönüşür. Toryum-233 arka arkaya iki beta bozunması yaparak atom numarası 92 olan uranyum-233'e dönüşür. Beta bozunmasında nükleer çekirdek bir elektron ışıması yaparak çekirdek içindeki bir nötron protona dönüşür, bu şekilde yeni bir element ortaya çıkar. Uranyum-233 fisyon yapabilen bir elementtir ve reaktör yakıtı olmaya çok uygun özelliklere sahiptir. Toryum-uranyum yakıt döngüsünün uranyum-plütonyum yakıt döngüsüne göre çok önemli avantajlarının ortaya çıkması bir grup bilim

Reaktörün çekirdeğinde oluşan fisyon reaksiyonları, ortamda bulunan başka elementler tarafından soğurulabilecek, kontrol altında tutulan bir nötron fırtınası yaratır. Toryum-232 bir nötron soğurarak toryum-233 elementine dönüşümünden hemen sonra bir beta ışıması yapar. Toryum-233 proton sayısının bir artmasıyla protaktinyum-233 elementine dönüşür. Hemen ardından protaktinyum-233 bir beta ışıması daha yaparak fisyon yapabilen uranyum-233 elementi ortaya çıkar. Uranyum-233 çekirdeklerinin pek çoğu bir nötron soğurarak fisyon yapar, bazıları fisyon olmadan bir nötron daha soğurarak uranyum-234 elementine dönüşür ve reaksiyon bu şekilde tırmanarak devam eder. Toryuma ve uranyuma dayalı reaktörlerde plütonyumun üretilmesini karşılaştırsak, toryum-232 ile başlayan reaksiyon zincirinde plütonyum-239 elementine erişmek için çok daha fazla nötron soğurulması ve beta ışıması olmalıdır. Dolayısıyla toryum yakıtında ve geri kalan atıkta çok daha az miktarda plütonyum bulunur. Hatta atıkta plütonyum bulunmasının tamamen engellenmesi mümkün olabilir.

insanını ve nükleer mühendisleri harekete geçirmiştir. Bu bilim insanları Alvin Weinberg dönemindeki araştırmaları yeniden gündeme getirerek, toryuma dayalı nükleer enerji araştırmalarını geliştirmeye ve hayata geçirmeye çaba harcamaya başlamışlardır. Günümüzde toryum enerji araştırmaları ABD'de ikinci plandadır. Toryuma dayalı enerji araştırmaları, uranyum yatakları olmayan fakat bol miktarda toryum yatakları olan Hindistan'da çok aktif olarak ilerlemektedir. Dünyada toryum konusunda araştırma yapan en önemli merkez Fransa'nın Grenoble şehrinde Reaktör Fizik Grubu Laboratuvarı'dır. Bu laboratuvar da toryum enerjisi üretmek için ellerinde bütün imkânlar olmasına rağmen, henüz ticari amaçla toryum nükleer reaktörleri inşa etmeye pek niyetli görünmüyorlar. Fransa elektrik enerjisinin % 80'ini uranyuma dayalı nükleer enerjiden elde ediyor. Fransız reaktörleri yüksek basınçlı normal su ile çalışır. Diğer ülkelerden farklı olarak, Fransa'da uranyum yakıt çubuk atıkları yeniden işlenerek tekrar yakılır ve bu şekilde en üst seviyede enerji üretilir. Bu işlemden dolayı kullanılmayacak durumdaki birikmiş nükleer atık miktarı başka ülkelere göre çok az seviyededir.

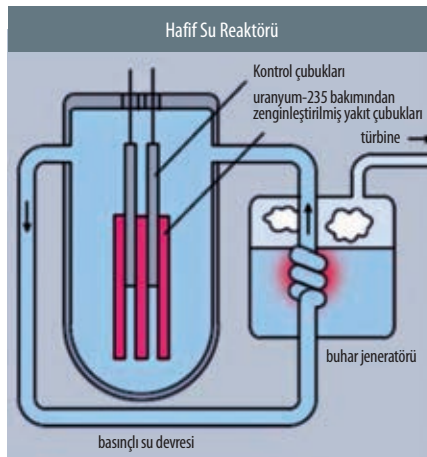
Toryum yakıtıyla çalışan reaktörler katı yakıtla çalışan standart reaktörlerden farklı bir tasarıma sahiptir. Basit olarak söylemek gerekirse, sıvı florür toryum (SFT) reaktörü bir çekirdek ve çekirdeğin etrafını battaniye gibi çevreleyen bir bölgeden oluşur. Bu bölgede reaktörün çekirdeğinin sıcaklığıyla eriyik haline gelmiş lityum ve berilyum içeren florür tuzuyla toryum tedraflorür karışımı bulunur. Reaktörün çekirdeğindeyse eriyik halinde olan lityum ve berilyum florür tuzu ile uranyum-233 tedraflorür karışımı bulunur. Reaktörün çekirdeğinde ayrıca yavaşlatıcı ve nötron yansıtıcı olarak işlev görevi yapan bir grafit yapı mevcuttur. Çekirdeği çevreleyen bölgede bulunan toryum-232, çekirdekte açığa çıkan nötronları soğurarak uranyum-233'e dönüşür. Toryum-233 beta ışınması yaptığı zaman kısa ömürlü protaktinyum-233 elementine dönüşür. Bu element de kısa sürede ikinci bir beta ışınması yaparak fisyon olabilen uranyum-233 ortaya çıkar. Üretilen uranyum kimyasal olarak çekirdeği çevreden bölgeden ayrıştırılarak reaktörün çekirdeğine transfer edilir. Reaktörün çekirdeğinde uranyum-233'ün yanmasıyla ısı ve yeni nötronlar açığa çıkar. Açığa çıkan nötronlar toryumdan yeni uranyum-233 üretilmesi için çekirdeği çevreleyen bölgeye yönlendirilir.

## Sıvı Yakıtın Avantajları

Sıvı yakıtla çalışan toryum reaktörlerinin tasarım, işleme metodu, güvenlik, atık kontrolü, maliyet fiyatı ve askeri amaçlara yönelik çalışmalar açısından konvansiyonel nükleer santrallerden birtakım önemli avantajları bulunur.

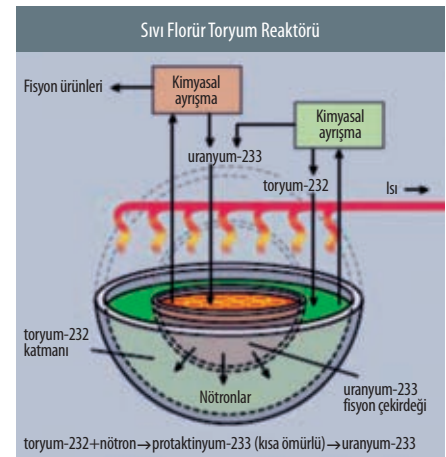
Katı nükleer yakıtın aksine, sıvı florür tuzları radyasyon yıpranmasından etkilenmez. Daha önce bahsettiğimiz gibi katı yakıt çubukları sıcaklıktan ve radyasyondan dolayı yapısal yıpranmaya uğrar. Dolayısıyla her on sekiz ayda bir reaktörün çalışması durdurularak yakıt çubuklarının üçte biri yenilenir; geri kalanlarının da konumları değiştirilir. Yeni yakıt çubukları tehlikeli değildir, ama kullanılmış yakıt çubukları yüksek seviyede radyoaktif olduğu için konumları uzaktan kumandalı sistemlerin yardımıyla değiştirilir. Kullanılmış yakıt çubukları, içlerinde bulunan yüksek seviyede radyoaktif fisyon ürünlerinin parçalanıp nispeten kararlı hale ulaşması için, birkaç yıl boyunca derin su havuzlarında tutulur. Daha sonra, yakıt çubukları kuru depolama kutularında saklanır. Buna karşılık, sıvı florür yakıtı, katı yakıt çubukları gibi yapısal bozulmaya uğramaz ve iyon bağları radyasyon etkisine karşı dayanıklılığını korur. Bu şekilde yüksek maliyetli katı yakıt çubuklarının hazırlanmasından ve reaktörün periyodik olarak çalışmasını durdurup yakıt çubuklarının değiştirilmesinden kaynaklanan yüksek maliyetten tasarruf edilmiş olur.

Uranyum oksit yakıt çubuklarında plütonyum-239 gibi çok sayıda uranyum ötesi yani uranyumun atom numarasından büyük atom numarasına sahip elementler üretilir.



Örneğin, plütonyum-239, uranyum-238 elementinin bir nötron soğurduktan sonra beta ışınması yapmasıyla ortaya çıkar. Üretilen plütonyumun bir kısmı fisyon yaparak uranyum reaktörlerinde enerjinin yaklaşık olarak üçte birinin üretilmesine katkı yapar. Bütün bu uranyum ötesi elementler nötron akışıyla doğrudan fisyonla uğratarak ya da fisyon yapabilecek bir elemente çevrilerek kullanılabilir. Fakat katı yakıt çubukları bu şekilde yanma olayının tamamlanmasından çok önce değiştirilmek zorundadır. Buna karşılık sıvı yakıtlarla çalışan reaktörlerde uranyum ötesi fisyon ürünleri sıvı yakıtın bulunduğu reaktör çekirdeğinde hemen hemen hepsinin fisyonla dönüşüme uğramasına kadar kalabilir.

Katı yakıt çubuklarında, ortaya çıkan fisyon ürünleri yakıt malzemesinin bünyesinden dışarı çıkamaz. Buna karşılık sıvı yakıtla çalışan reaktörlerde, fisyon ürünleri reaktörün çekirdeğinden kolayca dışarı çıkarılabilir. Örneğin, yakıt tuzu pompalanırken, fisyon zehiri olarak davranan ksenon gazı çözültiden kabarcıklar halinde kaynarak ayrışır. Malzemelerin bu şekilde ayrışması toryum reaktörlerinin temel özelliklerinden biridir. Reaktörün çekirdeğini çevreleyen bölgedeki toryum florür tuzunda yaratılan uranyum-233 çözülebilen uranyum tedraflorür ( $UF_4$ ) haline dönüşür. Çekirdeği çevreleyen bölgedeki çözeltide fokurdayan florür gazı, sıvı haldeki uranyum tedraflorürü, gaz halindeki uranyum heksaflorüre ( $UF_6$ ) dönüştürür. Çözeltiden ayrışan gaz halindeki uranyum heksaflorür, hidrojen gazı yardımıyla tekrar çözülebilir sıvı haline ( $UF_4$ ) indirgenir. Bu işlemden sonra ( $UF_4$ ) reaktörün çekirdeğine sıvı yakıt olarak yönlendirilir.



Uranyum yakıtı ve normal suyla çalışan reaktörlerde, yakıt çubukları, kontrol çubukları, yavaşlatıcı ve soğutucu olarak normal su bulunur. Buna karşılık, SFT reaktörlerinin çekirdeğinde eriyik halinde florür tuzuyla uranyum-233 karışımı (portakal rengi) ve çekirdeğini çevreleyen bölgede (yeşil) gene eriyik halinde florür tuzuyla toryum-232 karışımı bulunur. Fisyon sonucu çekirdekte ortaya çıkan nötronların bir kısmı çekirdeği çevreleyen bölgede bulunan toryum-232 tarafından soğurularak uranyum-233'e dönüşür. Uranyum-233 ve diğer fisyon ürünleri kimyasal metotlarla ayrıştırılarak zincirleme reaksiyonun devamı için reaktörün çekirdeğine yönlendirilir.

Molibdenyum, neodimyum ve teknetyum gibi diğer fisyon ürünleri çeşitli tekniklerle sıvı yakıttan kolayca ayrıştırılabilir. Bu şekilde sıvı yakıtın dayanıklılığı ve etkinliği büyük ölçüde artırılabilir.

Sıvı florür çözeltilerinin özellikleri kimyada çok iyi bilinmektedir. Her gün alüminyum üreten yüzlerce fabrikada milyonlarca metreküp sıvı florür tuzlar devridaim yapar. Bugün reaktörlerde kullanılan uranyumun, zenginleşmesi için florür tuzu haline girip çıkması gerekmektedir. Bu yüzden sıvı florür toryum (SFT) teknolojisi birçok yönden nükleer kimya mühendisliği için yeni bir uygulama alanı olarak ortaya çıkıyor.

## Atık yok

SFT reaktörü tasarımının en önemli özelliklerinden biri, ortaya çıkardığı atık profildir. Çok az miktarda nükleer atık bırakır. Son zamanlarda, katı yakıtlarla çalışan uranyum reaktörlerinde üretilen atık sorunu, aynı zamanda hem acil hem de acil olmayan bir hal almıştır. Daha önceleri ABD nükleer atıklar için Yucca Dağı'nda bir depolama tesisi kurulmasına karar vermişti. 2009 yılının başında Obama hükümeti Yucca Dağı'ndaki tesisin bu amaçla kullanılmayacağını açıkladı. Aslında, nükleer atıklardan kurtulmak için devamlı bir çözüm bulunana kadar, gerekli güvenlik önlemlerini alarak sağlam yapılmış depolarda saklanmasının yakın gelecek için olduk-

ça güvenli olduğu görülüyor. Fakat, uzun vadeli planlamada en önemli konulardan biri, dünyada artan enerji ihtiyacını karşılamaya devam ederken gittikçe artan atık problemi de kalıcı bir çözüm bulmaktır. Bu amaca ulaşmak için nükleer enerjiyi çok daha az atık üreten teknolojiler geliştirerek ulaşabiliriz. SFT reaktörleri bu amaca ulaşmanın gerçekçi bir yolu olarak görülüyor.

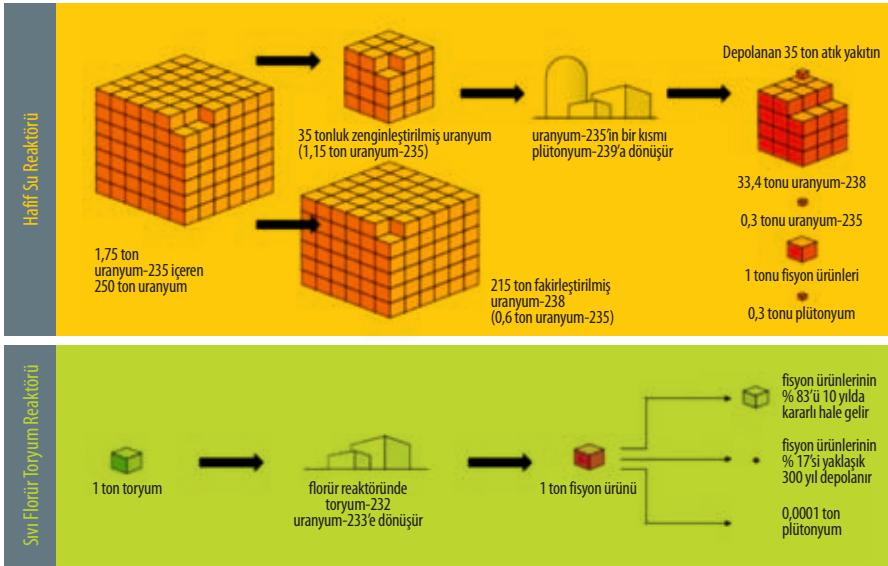
Toryum ve uranyum reaktörleri aslında benzer fisyon ürünlerini üretir, fakat üretilen aktinidlerin miktarı ve çeşidi her bir reaktörde farklı farklıdır. Aktinidler, periyodik tabloda aktinyum elementinin üstünde yer alan elementlere verilen genel bir isimdir. Reaktörde bu elementler nötron soğurulmasını takip eden dönüşüm sonucunda ortaya çıkar. Nükleer atıklar içinde yarı ömürleri çok uzun olan zararlı elementler, reaktörde yaratılan aktinidlerin değişik izotoplarından oluşur. Toryum-232'nin kütle numarası uranyum-238'inkinden altı sayı daha küçüktür. Dolayısıyla toryum elementini uranyum ötesi bir elemente dönüştürmek için birçok nötronun soğurulması gerekir. Aşağıdaki şekilde toryum-uranyum yakıt döngüsünde ortaya çıkan atıkların radyotoksin seviyesinin, uranyum-plütonyum yakıt döngüsünde ortaya çıkan atıkların radyotoksin seviyesinin çok altında olduğunu gösteriyor. 300 yıl sonra, toryum atıklarının toksin seviyesi uranyum atıklarının toksin seviyesinden yaklaşık 10.000 kat daha düşük olmaktadır.

## Birinci Öncelik Güvenlik

Bilim insanları ve nükleer mühendisler, hem reaktör yapısı bakımından hem de yakıt ve enerji üreten bileşenleri bakımından en güvenli nükleer enerji santrallerini inşa etmeyi hayal etmişlerdir. Hayal edilen tasarımlarda, herhangi bir kaza ortaya çıktığında, elektrikler kesildiğinde veya reaktöre aşırı bir yüklemeye olduğunda, insan müdahalesi olmadan, reaktörün kararlı çalışmasına devam etmesi veya çalışmasını otomatik olarak durdurması düşünülmüştür. SFT reaktörü, bugüne kadar yapılan araştırmalarda ve reaktör tasarımında görüldüğü üzere, çok yüksek seviyede güvenlik özelliğine sahiptir. Basınçlı su sistemi, reaktörlerde güvenliği tehlikeye atan en önemli olan unsurdur. Kaynayan normal su, basınç altında normal su ve basınç altında ağır su ile çalışan reaktörlerde (halen çalışan 441 reaktör bu grupta yer alır), su hem soğutucu ve hem de nötron yavaşlatıcı görevini yapar. Fisyon ısısı suyu ya doğrudan reaktörün çekirdeğinde kaynatır ya da buharlaşma aygıtında kaynatılarak elektrik türbinlerini çalıştıracak yüksek basınçlı buhar ortaya çıkarır. Kaynama sıcaklığını yukarı çekmek için reaktörde dolaşan su yüksek basınç altında tutulur. Reaktör sistemindeki yüksek basınç, ileri teknolojiye dayalı ve maliyeti yüksek olan boru ve basınç aygıtları yardımıyla kontrol altında tutulur. Güvenlik sistemindeki son halka reaktörün etrafını sarmalayan yüksek basınca dayanıklı, çelik ve yeterli kalınlıkta betondan yapılmış koruma binasıdır. Koruma binası yüksek basınçtan kaynaklanan patlamalara karşı dayanıklıdır ve bir patlama sonucunda dışarıya radyoaktif sızıntı olmasına engel olacak şekilde tasarlanmıştır.

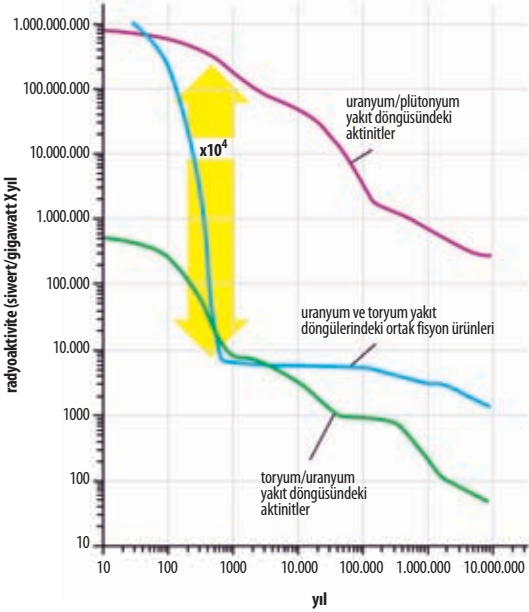
SFT reaktörü tasarımının en başta gelen güvenlik unsuru, soğumayı sağlayan sıvı florür tuzunun basınç altında olmayışıdır. Normal atmosfer basıncı altında sıvı florür tuzunun kaynama noktası 1400 derecenin üzerindedir. Dolayısıyla SFT reaktörlerinde yüksek basınca karşı reaktörü çevreleyen koruma binasına gerek olmadığından inşaa maliyeti katı yakıtla çalışan reaktörlere göre çok daha düşüktür. Reaktör içindeki aygıtlarda bir sızıntı olursa, yüksek basınç olmadığı için patlamaya yol açmaz. Böyle bir sızıntı durumunda reaktör soğutulur ve gerekli müdahale yapıldıktan sonra tekrar devreye sokulur.

Yeni nesil reaktör tasarımlarında katı yakıt çubuklarının yapısı ve konumları uygun bir şekilde seçilerek reaktörün çekirdeğinin erimesine sebep olacak sıcaklıklara ulaşılması-



Toryum-uranyum yakıt döngüsüyle zenginleştirilmiş uranyum-plütonyum yakıt döngüsü arasında birçok fark vardır. Şekilde aynı miktarda elektrik enerjisi üretmek için harcanması gereken yakıt miktarlarının karşılaştırılması görülüyor. Toryum yeryüzünde ender bulunan madenlerin yataklarından çıkarılır ve diğer ender madenlerden kolayca ayrıştırılır. Buna karşın, büyük miktarlarda doğal uranyum madeni yataklardan çıkarıldıktan sonra çok pahalıya mal olan metotlarla fisyon yapabilen uranyum-235 izotopu bakımından zenginleştirilmesi gerekir. Ayrıca, uranyum yakıt döngüsü binlerce yıl depolarda saklanması gereken çok daha fazla miktarda atık bırakır. Buna karşılık toryum yakıt döngüsü çok daha az miktarda atık bırakır ve bu atıkların toksin seviyesinin düşmesi için depolarda sadece üç yıl kadar saklanması yeterlidir.

nin engellenmesi mümkün olur. Benzer şekilde SFT reaktörlerinde sıvı yakıtın ve sıvı yakıtı içinde tutan yavaşlatıcı aygıtın sıcaklıkla genleşmesi, reaktör çekirdeğindeki fisyon aktivitesini yavaşlatır. Bu şekilde reaktör istenilen verime kendisini otomatik olarak ayarlayabilir.



Şekilde toryum ve uranyum reaktörlerinde ortaya çıkan benzer fisyon ürünlerin radyotoksin seviyelerinin zamana bağlı olarak değişimi mavi çizgiyle gösterilmiştir. Pembe çizgi normal su reaktörlerinde çıkan aktinit atıklarına, yeşil çizgi de SFT reaktörlerinde ortaya çıkan aktinit atıklarına karşılık gelir. 300 yıl sonunda toryum yakıt döngüsünün toksin seviyesi, uranyum yakıt döngüsünün toksin seviyesinin 10.000 daha düşük olmaktadır.

SFT reaktörlerindeki başka bir güvenlik mekanizması da reaktör çekirdeğinin altına yerleştirilen donmuş tuz kapağıdır. Bu tuz kapağı vantilatörler yardımıyla tuzun donma noktasının altında tutulur. Eğer reaktör çekirdeğinin sıcaklığı kritik bir seviyenin üstüne çıkarsa, tuz kapak erir, sıvı yakıt anında aşağıya akarak reaktörün çekirdeği boşalır. Bu çok etkin güvenlik sistemi sadece sıvı yakıtla çalışan reaktörlere uygulanabilir.

## Maliyet

Günümüzdeki nükleer santrallerin inşaat maliyeti genel olarak fosil yakıtlar kullanan santrallere göre daha yüksektir. Buna karşın nükleer yakıt maliyeti daha düşüktür. Nükleer santrallerin inşaat maliyetinin fazla olma nedeni santral yapılarının çok yüksek güvenlikli halka sistemlerine uygun olarak inşa edilmelerinden ve ömürleri dolunca santrallerin yıkımı için gereken masraflardan kaynaklanır. 2003 yılında yapılan ve sonra 2009 yılında

yenilenen "Nükleer Enerjinin Geleceği" başlıklı Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) çalışmasına göre kömür santrallerinin yapım maliyeti vat başına 2,3 dolardır. Bu değer normal suyla çalışan nükleer santrallerde 4 dolar civarındadır. SFT reaktörlerinin maliyet fiyatlarının düşük beklenmesinin başlıca nedeni SFT reaktörlerinin basınçlı suya gerek kalmadan, normal atmosfer basıncında çalışmasından kaynaklanır. Yüksek basınç altındaki boruları korumak gerekmediği için SFT reaktörleri çok daha küçük boyutlu yapılarda inşa edilebilir. Ayrıca reaktöre yüksek basınç altında soğutucu yükleyen sisteme de gerek yoktur. Bir tasarım olarak SFT reaktörü betondan küçük boyutlu bir yapının içine, toprak altına yerleştirilebilir. Uçak çarpmalarını veya başka türlü kaza ve tehlikeleri önlemek için yapının toprak seviyesinde kalan üst kısmı sağlam bir beton kapakla kapatılabilir.

SFT reaktörlerinin avantajlarını, daha uygun maliyet fiyatı, nükleer yakıtın daha kolay hazırlanması, boyutlarının küçük olması, yakıt fiyatının belirgin olarak düşük olması ve oldukça yüksek verimlilikle çalışması olarak sıralayabiliriz. SFT reaktörleri 800 derecede çalışan yüksek sıcaklık reaktörleridir. Bundan dolayı, tipik kömür ve eski tasarımlı nükleer santrallerin verimlilik faktörü % 33'ken SFT reaktörlerinin verimlilik faktörünün yüzde 45 civarında olması bekleniyor. Ayrıca çevreye bırakılan atık ısı, hidrojen ve sanayide kullanılan başka kimyasal ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir. SFT reaktörlerinin kuruldukları yerlere bağlı olarak, atık ısı evlerde ve işyerlerinde bile kullanılabilir.

Toryum ekonomik açıdan enerji kaynaklarını etkin şekilde kullanma girişimleriyle ve yenilenebilir enerji üretimiyle rekabet edilecek durumdadır. Mevcut kaynakları etkin şekilde kullanarak ve yenilenebilir kaynakları devreye sokarak ve bir de ucuz fosil yakıtların çevreye verdiği muazzam zararı göz önünde tutarak, dünyada (özellikle Çin, Hindistan ve diğer gelişen ülkelerde) hızla büyüyen enerji ihtiyacını karşılamının mümkün olup olmayacağı hakkında ciddi bir karar vermek durumundayız. Toryum enerji santrallerine geçişte maliyet hesaplanırken, özellikle gelişmekte olan ülkelerde fosil yakıtlara dayalı enerji tüketiminin yüksek seviyelere ulaşmasına engel olmanın çok yararlı olduğunun bilincinde olmalıyız. Atmosferi gittikçe artan bir hızla kirleten fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarını hayata geçiremezsek sonuçlarına katlanmak zorunda kalacağımızı bilmemiz gerekir.

Belki de toryuma dayalı nükleer enerjiye kısa zamanda geçmenin en uygun yolu, toryum reaktörlerinin seri bir şekilde imal edilmesi ve hızlı bir şekilde enerji üretimine başlamaları olabilir. Duruma ekonomik açıdan baktığımızda, yeni bir teknolojinin seri üretime geçmesi hem maliyeti düşürür ve hem de kazanılan deneyimler sonucu ürün tasarımı daha etkin ve daha verimli çalışır hale getirilebilir. Ayrıca, SFT reaktörleri fosil yakıt kullanan santrallerde mevcut elektrik şebekesine kolayca adapte edilebileceği için masraflardan gerçekten büyük ölçüde tasarruf yapılabilir.

## İleriye Bakış

ABD Enerji Bakanlığı katı yakıtla dayalı yeni nesil nükleer santrallerin geliştirilmesi amacıyla 2010 yılının ikinci yarısından başlamak üzere beş milyar dolarlık proje desteği yapmayı planlamıştır. Yeni nesil nükleer reaktörlerin, elektrik üretiminin yanı sıra, mümkün olursa yüksek sıcaklıkta çalışan nükleer enerji kaynağını kullanarak hidrojen de üretmesi bekleniyor. Ayrıca III+ nesil olarak bilinen bu yeni nükleer enerji santrallerinde güvenlik sorununun çözülmüş olması ve ucuz maliyetli elektrik üretilmesi de isteniyor. ABD Enerji Bakanlığının nükleer santrallerin bu süredeki geliştirme planında toryuma dayalı reaktör tasarımı düşünülmüyor. Şimdiden onaylanmış durumda olan III+ nesil devasa büyüklükteki enerji santrallerinin seri bir şekilde üretimi yapılamayacak. Dolayısıyla bu santraller, fosil yakıtlardan nükleer enerjiye hızlı ve büyük ölçekte yaygın bir geçiş bir çözüm getirmemektedir. Özellikle fosil yakıtların hızlı bir şekilde tüketildiği ülkelerde bu durumun ciddi bir sorun yaratacağı görülmektedir.

Bu reaktörlerin önümüzdeki 10-20 yıl içinde kömür ve doğalgazla çalışan enerji santrallerinin yerini alıp üretken duruma geçmelerini beklemek gerçekçi değildir. Dolayısıyla, yeni nesil nükleer reaktörler ciddi boyutlara ulaşacak enerji soruna bir çözüm getirmektedir. Fakat, Alvin Weinerg'in eriyik tuz reaktör projesinde olduğu gibi, yeni nesil reaktörler için yapılan araştırmalar, yeni teknolojilerin gelişmesine yön verebilir.

Önümüzdeki neslin tüketeceği enerjiyi nasıl üreteceğimizi yeniden düşünürken toryum enerjisini dikkate almalıyız. Toryum yakıtı bilim insanları ve mühendisler arasında uluslararası platformda <http://energyfrom-toryum.com> internet sayfasında her yönüyle tartışılıyor.