

AYLIK FEN BİLİM VE TEKNIK DERGİSİ

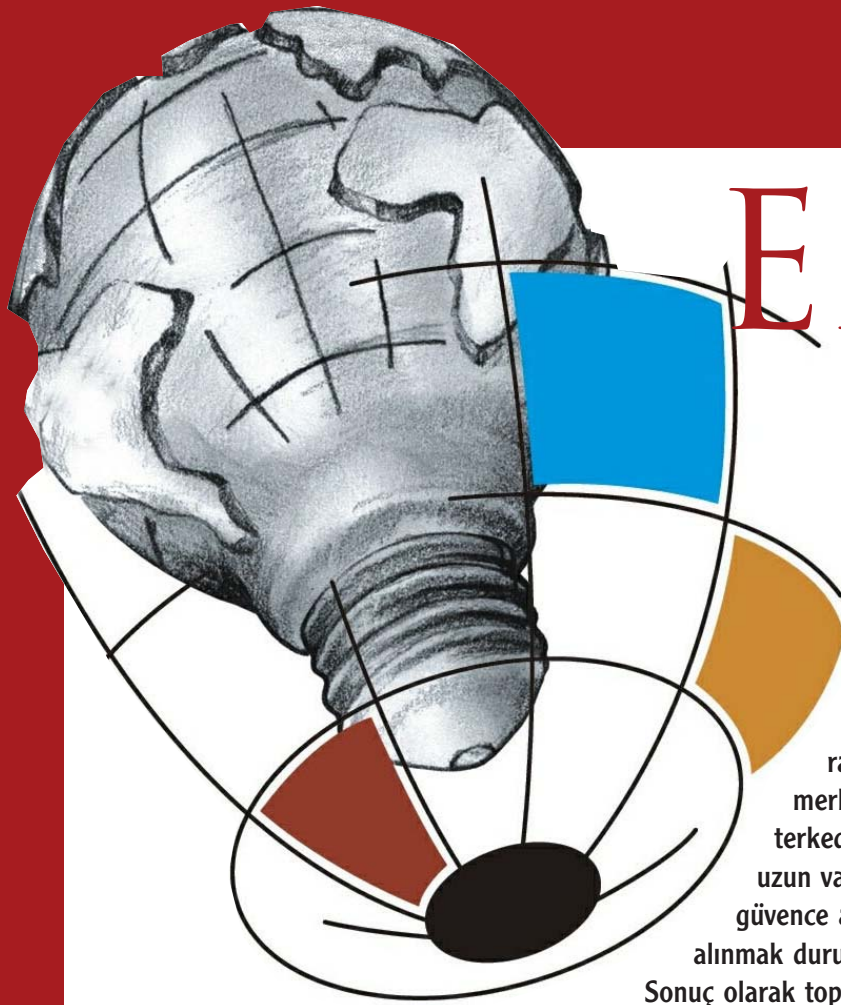
BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR NÜKLEER ENERJİ

AĞUSTOS 2004 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYAN : Prof. Dr. Vural Altın
Bilim ve Teknik Dergisi Yayın Kurulu Üyesi



ENERJİ

rakam gelişmiş ülkeler için 250, ABD için de 400 GJ'ü buluyor. Sonuç olarak, dünya nüfusunun %85'i, kişi başına yılda ortalama sadece 25 GJ tüketiyor.

Türkiye'de, dünya ortalamasının altında, 54 GJ...

2000 yılı itibarıyla yaklaşık 8.6 milyar ton petrol eşdeğeri enerji tüketilmiş ve bu tüketimin %75'i fosil yakıtlardan sağlanmış.

Petrol, doğalgaz ve kömürün payları sırasıyla %39.4, %23.0 ve %22.4. Hidro, nükleer ve 'diğer' kaynaklardan üretilen elektrik, birincil enerji üretimi içinde %7.1, %6.6 ve %0.7'lik paylarla

dördüncü, beşinci ve altıncı sırada geliyor. Birincil enerji üretiminin yaklaşık %30'u elektrik üretiminde kullanılmış ve üretilen 12.5 trilyon kWh elektriğin yaklaşık %80'i, %15 nüfus payına sahip olan sanayileşmiş ülkelerde, %28'i ise ABD'de tüketilmiş.

Dünya ekonomisinin yılda ortalama %3 büyüdüğü, ekonomilerin enerji yoğunluğunun yılda ortalama %1 azaldığı varsayımıyla, dünya enerji talebi 2023 yılına kadar %54 kadar artarak, 650 EJ'a ulaşmış olacak. Bu artışın en büyük kısmı, %60'tan fazlası, geçmiş 150 yıldakinden farklı olarak, Asya, Afrika ve Güney Amerika'nın gelişmekte olan ülkelerinde yer alacak. Dünya nüfusunun %80'ini oluşturan ve enerji arzının üçte birini tüketen bu ülkelerin çoğu sanayileşmelerini, tıpkı Kuzey ülkelerinin daha önce yaptığı gibi, fosil yakıtlara dayandırmayı

raslantıların merhametine terk edilemez ve uzun vadelerle güvence altına alınmak durumundadır.

Sonuç olarak toplumlar,

dünya kapsamındaki insan etkinliklerine, yani medeniyete; akılcı kullanılması kaydıyla, tükettikleri enerji oranında katkıda bulunurlar. Örneğin, aslında dünya nüfusunun sadece %5'ini oluşturan, fakat dünya enerji tüketiminde %25'lik bir paya sahip bulunan ABD, dünya sahnesinde ortaya koyduğu etkinlikler itibarıyla, 6 milyarlık dünya nüfusunun sanki dörtte birini, 1.5 milyarını oluşturuyor gibidir.

2000 yılı itibarıyla, dünyadaki 6 milyar insanın enerji tüketim hızı, yılda 420 EJ'ı (Exa Joule= 10^{18} J) aşmış durumda. Bu tüketimin %68'i, dünya nüfusunun %15'ini oluşturan sanayileşmiş ülkelerin 0.9 milyar insanı; kalan %32'si ise, dünya nüfusunun %85'ini oluşturan gelişmekte olan ülkelerin 5.1 milyar insanı tarafından gerçekleştirilmiş. Dolayısıyla kişi başına ortalama tüketim, 63 GJ kadar. Fakat bu

Canlı bir organizma büyüme sürecinde, bünyesini oluşturan dinamik süreçleri kurup geliştirmek, geliştikten sonra da bu süreçleri, bakım onarımla ayakta tutabilmek için, gereken miktarda hammadde ve enerjiyi çevresinden almak zorundadır. Aksi halde potansiyeli oranında gelişmesi veya gelişmişse eğer, barındırdığı süreçleri zamanın yıkıcı etkisine karşı koruyup ayakta tutabilmesi mümkün değildir. Bünye ne kadar karmaşık ve üst düzeyde bir yapıya sahipse, enerji gereksinimi de o kadar yüksektir. Bu gereksinimin temininde aksamalar başladığında, yaşamsal süreçler teker teker devre dışı kalmaya ve yapı hastalanıp ölüme doğru yol almaya başlar. İnsan toplulukları da böyle...

Dolayısıyla enerji, stratejik olarak nitelendirilen yaşamsal bir girdi oluşturur. 'Temin güvenliği'

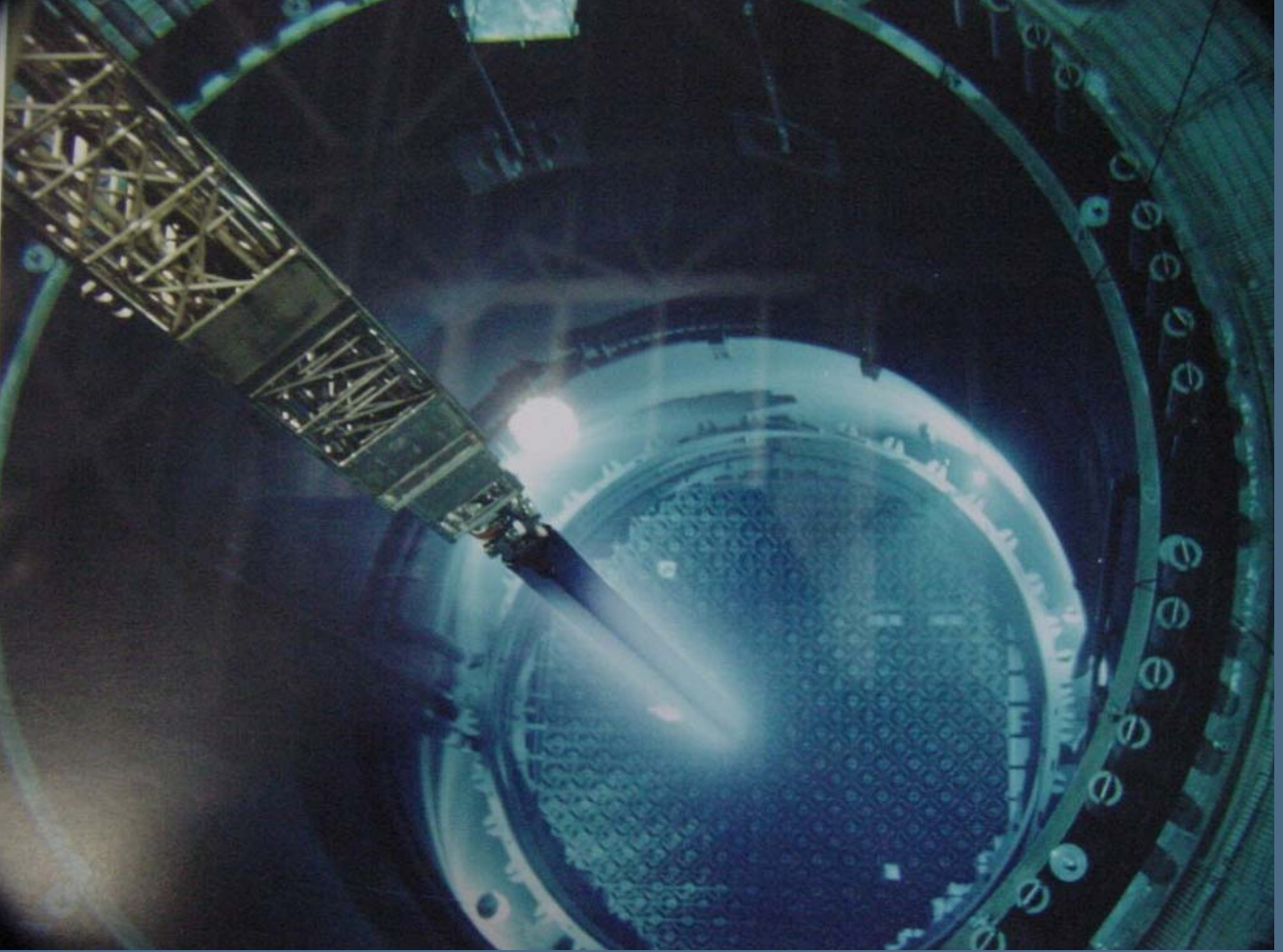
planlıyor. Dolayısıyla 2023 yılı civarında bu ülkelerin, toplam enerji tüketiminde ve karbondioksit emisyonlarında, sanayileşmiş ülkeleri geçmesi bekleniyor. Ekonomilerin fosil yakıt yoğunluğunun şimdiki eğilimler çerçevesinde, yılda %0.2-0.4 civarında azalması halinde, bu yakıtlar 2023 yılına kadarki artışın %95'ini karşılayacak ve o zamanki talebin üçte ikisini sağlıyor olacak. Buna karşın, 1960'larda hakim olan 'kaynaklar tükeniyor' endişesi azalmış durumda. Çünkü dünyanın 'ekonomik rezerv' olarak, şimdiki tüketim hızlarıyla yaklaşık 200 yıl yetecek kadar 1 trilyon ton kömürünün, 80 yıl yetecek kadar 250-350 milyar ton (2-3 trilyon varil) petrolünün, 70-80 yıl yetecek kadar 150 trilyon metreküp doğal gazının olduğu tahmin ediliyor. Bu rakamlar kesin değil, daha iyimser veya daha kötümser olanları da var. Fakat geçmişte olduğu gibi gelecekte de, bir yandan yeni rezervlerin bulunması, diğer yandan yükselen enerji fiyatları karşısında yeni 'çıkarma teknolojileri'nin devreye sokulması sayesinde 'bilinen rezerv'lerin zamanla artacağı kesin. Kısacası, yüzyılın ilk yarısı için dünya enerji arzında yetersizlikler beklenmemekle beraber, temin güvenliği ve fiyatların ekonomikliği açılarından ciddi belirsizlikler var. Yüksek enerji fiyatlarının zararı ise, gelişmiş ülkelerden çok gelişmekte olanlar üzerinde yoğunlaşıyor. Çünkü bu ülkeler, gelirlerinin daha büyük bir kısmını enerjiye harcıyorlar ve artan enerji faturasını karşılamak veya enerji verimliliğini artıracak

yatırımlar açısından kapasiteleri sınırlı. Hem de, ekonomik durgunluktan daha ağır etkileniyorlar. Öte yandan, arz yeterliliği, fiyat istikrarı ve temin güvenliği sorunları aşılabilsede dahi, bir de fosil yakıt bağımlılığının yol açtığı yerel, bölgesel ve küresel çevre sorunları var. Yerel düzeyde en yaygın ve ciddi sorun, kentlerdeki hava kirliliği. Küresel ölçekte ise, nedenleriyle ilgili bulgu ve değerlendirmeler halen tartışılıyor olmakla beraber, iklim değişikliği endişeleri ağır basıyor. Dünya genelinde enerji kaynaklı olarak atmosfere, 2000 yılında 6.2 milyar ton karbon eşdeğeri, yani 22.5 milyar ton karbondioksit salınmış bulunuyor. Petrol, kömür ve doğal gazın payları %44, 35 ve 21. Ülke bazında ABD, Çin, Rusya, Japonya ve Hindistan bu alanda ilk beşi oluşturuyor ve toplam emisyon hacminin %51'inden sorumlular. Arkadan gelen beşli, toplam %12 payla; Almanya, İngiltere, Kanada, İtalya ve Fransa. Bu emisyonlar, eğer hakim beklentiler gerçekleşecek olursa; 2010 yılında 7.8, 2020 yılında da 9.8 milyar ton karbon eşdeğerine yükselecek. Gelişmekte olan ülkelerin payının ise ilk onyılda artışta %81, ikinci onyılda %76 olacağı tahmin ediliyor. Halbuki, iklim değişikliğiyle ilgili Kyoto Protokolü ve Bonn uzantısına göre, karbondioksit emisyonlarının 1990 yılındaki düzeylere geri çekilmesi öngörülüyor. Atmosfere, işletme sırasında net olarak kirletici salmayan enerji türleri; hidro, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle ve nükleer. OECD ülkelerinin hidropotansiyelleri büyük oranda

kullanıma girmiş durumda. Öte yandan, büyük hidroelektrik santrallerin yapımına karşı sosyal ve çevresel itirazlar var. Dolayısıyla bu alanda fazla genişleme imkanı yok. Diğer yenilenebilir kaynaklar, maliyet açısından ve nitelikleri itibarıyla, alternatifleriyle rekabette zorlanıyor. Bu kaynaklardan orta vadede gelişme potansiyeli taşıyanlar; rüzgar enerjisiyle, başta fotovoltaikler ve yakıt hücreleri olmak üzere, çeşitli formlarıyla güneş enerjisi. Hidro ve diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik üretiminin, 2020'lere kadar her yıl %2 artması, buna karşın bu kaynakların toplam enerji tüketimi içindeki payının şimdiki %9'dan %8'e, hatta bazı tahminlere göre %4'e inmesi bekleniyor. Bu eğilim ancak, kamu müdahalesi ve sübvansiyonlar aracılığıyla değiştirilebilir nitelikte olup; bu durumda da, 2020 yılında payları %12'ye kadar çıkartılabilecek. (Türkiye'de halen %13). Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimindeki artışın büyük kısmı, Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan Asya ülkelerindeki büyük hidroelektrik santralleri şeklinde. OECD ülkelerinde ise aynı dönemde, başta rüzgar ve biyokütle olmak üzere, hidro dışı yenilenebilir kaynakların, hem de yılda ortalama %3.3 gibi yüksek oranlarla artması hedefleniyor. Atmosferi kirletmeyen enerji türü olarak, geriye nükleer enerji kalıyor...

Nükleer enerji konusu, yeniden güncellik kazandığı için, bu ek, daha önce dergimizde yayımlanmış yazılar derlenerek hazırlandı.

NÜKLEER



Nükleer enerji bilindiği gibi, atomun çekirdeğiyle ilgili bir olay olup, iki şekilde elde edilebiliyor. Bunlardan birincisi, iki küçük çekirdeğin birleştirilmesi, yani füzyon; ikincisi ise büyük bir çekirdeğin parçalanması, yani fisyon. Her iki halde de, reaksiyondan açığa çıkan enerji ısıya dönüştürülebilir, bu enerji ile su kaynatılıp buhar elde edilebilir. Sonra da bu buhar, tıpkı termik santrallerde olduğu gibi, yüksek basınç altında bir türbine gönderilir ve türbin dönerken, kendisine bağlı bir elektrik jeneratörünü de döndürünce, elektrik enerjisi üretilir. Elektrik enerjisi; kömür, petrol veya nükleer gibi "birincil" enerji kaynaklarının kullanımı sonucu elde edildiğinden, "ikincil" enerji olarak nitelendirilir. Üretimi çoğu kez kirli, fakat kendi temizdir. Hem de çok amaçlı olup, kullanımı kolaydır.

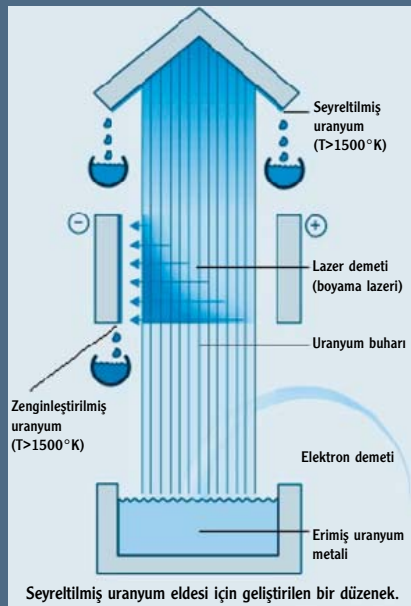
Dünyada halen aktif olan 430'dan fazla nükleer santral, fisyonu dayalı olarak çalışıyor ve başlangıç yakıtı olarak uranyum kullanıyor. Doğada bulunan uranyum, hemen tamamen, iki tip izotoptan oluşur. Bunlardan birisindeki proton ve nötronların toplam sayısı 235, diğerindekilerin ise 238. U-235 ve U-238 notasyonu ile gösterilen bu çekirdeklerin her ikisindeki proton sayısı da aynı ve 92, fakat ikincisindeki nötron sayısı, birincisinden üç daha fazla. U-235 izotopları, yavaş bir nötron çarptığında parçalanma-

ya çok daha yatkındırlar ve parçalandıklarında iki veya üç de nötron çıkarırlar. Bu yüzden, 'kolayca parçalanabilir' anlamında 'fisil' oldukları söylenir.

Dolayısıyla bir uranyum kütlesi alıp, içine bir

avuç nötron salarsak; bu nötronlardan bazıları U-235 çekirdeklerine çarpıp, bu izotopların parçalanmasına yol açacak, parçalanmalardan açığa çıkan nötronlar, gidip başka fisil çekirdeklere çarpacak, buradan yine nötronlar çıkacak vs. Yani kütle uygun şekil ve büyüklükte seçilirse, içinde bir zincirleme reaksiyon yer alabilir ve sürekli olarak açığa enerji çıkabilir. Kütlemin uygun büyüklük, şekil ve kompozisyonda seçilmesi önemlidir. Çünkü santrallerden açığa çıkan nötronların bir kısmı, ilgisiz çekirdeklere yutulur ve ya kütlemin cidarından dışarı kaçarak, bir bakıma ziyan olmaktadır. Kütle küçükse, nötron kaçakları çok fazla olur ve zincirleme reaksiyon, daha başlamadan durur. Öte yandan yeterince büyük bir uranyum kütlesinin içine, dışardan nötron atmak da gerekmez. Çünkü uranyum çekirdeklerinden bazıları, kendilerine çarpan nötronlar bulunmadığı zaman dahi, durup dururken parçalanmakta, çok yavaş bir şekilde de olsa, kendiliklerinden santrallere uğrayıp nötron salmaktadır.

'Atom bombası' da denilen fisyonu dayalı patlayıcılar, uranyum parçaları halinde hazırlanıp son anda bir araya getirilirler. Orijinal parçaların her biri, zincirleme reaksiyonu başlatamayacak kadar küçük, fakat hepsi bir araya geldiğinde oluşan kütle, bunu fazlasıyla başaracak kadar büyüktür. Yani 'süperkritik'tir. Bu 'süperkritik



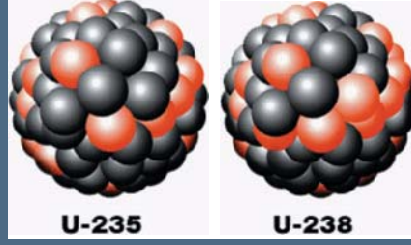
ENERJİ

kütle', orijinal parçaların etrafına yerleştirilen konvansiyonel patlayıcıların patlatılması sonucu sıkıştırılıp bir araya getirildiğinde, zincirleme reaksiyon başlar. Buradaki olay, saniyenin milyonda biri kadar kısa bir süre içerisinde, kütledeki fisil çekirdeklerin hemen tamamının parçalanmasını ve sonuç olarak da açığa, yüzlerce kiloton TNT eşdeğerinde enerji çıkmasını sağlar. (Bakınız: Nükleer Silahlar)

Bir nükleer reaktörde ise bu zincirleme reaksiyon, çok daha yavaş ve kontrollü olarak gerçekleşir. Reaktörün yapısı biraz daha karmaşıktır ve uranyum haricinde, bazı destek unsurları da barındırır. Örneğin, fisyon sonucu açığa çıkan nötronlar hızlıdır. Halbuki yavaş hareket eden nötronlar, U-235 çekirdeklerini daha kolay parçalayabilir. Dolayısıyla hızlı nötronların yavaşlatılması gerekir ve bunu da, reaktör kalbine konulan sudaki hidrojen atomları becerir. Hidrojenlerle çarpışan hızlı nötronlar yavaşlar. Bu durumda, fisyonun yeni çıkmış olan hızlı nötronun, yavaşlamak için hidrojen atomlarıyla çarpışması, bunun için de içinde doğduğu uranyumdan çıkıp, bir süre için su içerisinde dolaşması gerekir. Bu amaçla uranyum metal veya oksidi, çubuklar halinde imal edilip, aralarından su geçirilir ve hidrojen içeren suyun bir 'yavaşlatıcı' görevi gördüğü söylenir. Hem, fisyon sonucu açığa çıkan enerjiyi emmek için zaten bir de soğutucuya ihtiyaç vardır ve su, bu işlevi de üstlenir. Böylelikle bir taşla iki kuş vurulmuş ve hem nötronlar yavaşlatılıp, hem de reaktör kalbi soğutulmuş olur. Su, hem 'yavaşlatıcı' hem de 'soğutucu' görevi görmektedir. Aslında aynı işi sudan başka, karbondioksit veya helyum gibi gazlar da yapabilir. Hangi tür yavaşlatıcı ve soğutucunun kullanıldığı, reaktörün tipine göre değişir. Her durumda, fisyonun hızlı nötronların yavaşlatıldığı reaktörlere, 'yavaş' anlamında, 'termal' reaktör denir. Bu sıfat aslında reaktörün değil, kalbin içinde hareket eden nötronların yavaş olduğunu ifade etmektedir.

Ayrıca, reaktör kalbine konulan uranyum çoğu kez, doğada bulunan uranyum değildir. Çünkü doğal uranyumda az miktarda fisil izotop bulunur. Şöyle ki; doğal uranyumun her bin atomundan sadece, yaklaşık 7'si fisildir. Hal böyle olunca, zincirleme reaksiyon için gerekli olan nötron üretim hızlarına erişmek güçleşir ve doğal uranyumun zenginleştirilmesi gerekir. Bu adeta, bir parça doğal uranyum alıp, içindeki U-238 çekirdeklerini ayıklayıp atmaya ve geride, U-238'le oranla daha fazla sayıda U-235 çekirdeği bırakmaya benzer. Fakat sözkonusu 'izotop zenginleştirme' işlemi, o kadar da basit olmayıp, yavaş çalışan pahalı işlemler gerektirir.

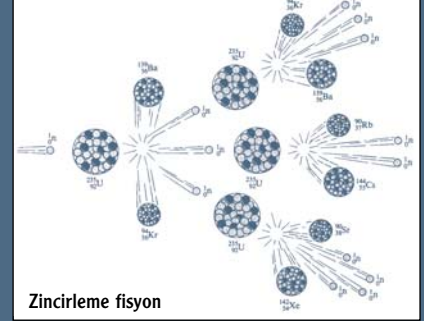
Demek ki doğal uranyumun yüzde birinden azı, nükleer enerji üretimi açısından doğrudan işe yarayan 'fisil' çekirdeklerden oluşuyor. Bu çekirdeklerin 1 gramı, yaklaşık 2.5 ton kömürünkine eşdeğer enerji potansiyeline sahiptir. Fakat uranyum, 'nadir toprak metalleri' sınıfında yer alır. Yani yer kabuğundaki mevcut miktarı, 'nadir' denecek kadar azdır. Dolayısıyla, dünyamızın 'fisil uranyum çekirdeği' stoğu, enerji ihtiya-



cımızı uzun bir süre karşılayabilmekten uzak, yaklaşık 200 yıl yetecek kadardır. Yeni santrallerin kurulması halinde, bu süre daha da kısalmır.

Fakat fisil olmayan U-238 çekirdekleri, tümüyle işe yaramaz değildir. Çünkü bir nötron yutmaları halinde, radyoaktif hale gelirler ve iki ışımadan sonra, fisil olan bir plutonyum izotopuna, Pu-239'a dönüşebilirler. Dolayısıyla, zenginleştirme işlemi sırasında ayrılan U-238 çekirdekleri, bir köşeye atılmayıp, reaktör kalbinde uygun bir yere konabilir ve nötron yutarak Pu-239'a dönüşmeleri sağlanabilir. Eğer kalpteki nötron üretim hızı yeterince yüksek ise, hem U-235 çekirdeklerinin parçalanması sonucu enerji üretmek, bir yandan da U-238'leri, fisil Pu-239'lara dönüştürmek mümkündür. Hatta uygun bir tasarımı reaktör, birim zamanda tükettiğinden daha fazla fisil çekirdek üretebilir. Bu durumda reaktörün, net olarak yakıt üretmekte olduğu söylenir. Yani reaktör 'üretken'dir. Bu işlem, yavaş nötronlar yerine hızlı nötronlarla daha kolay başarılabılır. Bu yüzden de 'üretken' reaktörlerdeki nötronlar, santrallerden çıktıktan sonra yavaşlatılmazlar. Suyun yavaşlatıcı etkisinden kaçınmak için soğutucu olarak, su yerine sıvı sodyum kullanılır ve böyle reaktörler 'hızlı üretken' reaktör adını alır. Hızlı üretken reaktörler sayesinde dünya kabuğundaki uranyumun, yüzde birinden azı yerine tamamı, nükleer enerji elde etmek amacıyla kullanılabilir. Ancak hızlı üretken reaktörlerin yakıtlarının, önce termal reaktörlerde üretilmesi lazımdır. Böyle bir 'termal-hızlı üretken' reaktör programı, dünya uranyum rezervlerinin enerji potansiyelini 100 mislinden fazla artırır.

Reaktör kalbinde parçalanarak uranyum çekirdekleri, daha küçük iki çekirdeğe yol açar ve 'santraller ürünleri' denilen bu yeni çekirdekler, yüksek enerjilerle doğar. İçinde bulundukları malzeme tarafından sonunda durdurulur, fakat bu arada, etraftaki çekirdeklerle çarpışarak epeyce hasar yaratırlar. Ayrıca kendileri istikrarsız olup, oluşumlarından belli bir süre sonra, başka çekirdeklerle dönüşürler. Bu arada; gama ışınları denilen yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon veya elektron ve pozitron gibi katı parçacıklar ışınlarlar. Bu türden etkinliğe sahip olan çekirdeklerin, 'radyoaktif' oldukları söylenir. Radyoaktif çekirdeklerin bozunması çoğu kez, diğer radyoaktif çekirdeklerin oluşumu ile neticelenir. Bunlar da bozunduklarında, daha başka radyoaktif çekirdeklerle dönüşebilir. Kısacası; işletmeye alındıktan bir süre sonra, bir nükleer reaktörün kalbinde, 800 kadar farklı radyoaktif çekirdek türü birikir. Bu çekirdeklerin tümünün sahip olduğu 'ışınlama gücü'ne, 'radyoaktivite envanteri'



denir.

Radyoaktif envanter reaktör kapatıldıktan, yani zincirleme santraller reaksiyonları durdurulduktan sonra da ışımasına devam eder. Gerçi bu ışıma zamanla azalır. Herhangi bir radyoaktif izotopun, başlangıçtaki sayısının ve dolayısıyla da ışıma gücünün yarıya inmesi için gereken süreye 'yarı ömür' denir. Bu süre çekirdekten çekirdeğe değişir. Bazıları için saniyenin küçük bir fraksiyonu, bazı diğerleri için ise binlerce yıldır. Birkaç yüz milyon wat gücündeki bir reaktörde, kapatıldıktan hemen sonra, saniyede milyarlarca kere milyarlarca bozunum yer almaktadır. Bu ise reaktörün çalışma halinde ürettiği enerjinin %10 kadarının üretilmeye devam etmesi demektir. Buna 'bozunum ısısı' denir ve azalması için zaman geçmesi gerekir. Bir başka deyişle, kömüre dayalı bir termik santrali kapattığınızda, kazanına kömür atmayı durdurur ve enerji üretimine son verirsiniz. Halbuki bir nükleer santral, kapatılsa dahi, normal gücünün %10'u kadar enerji üretmeye devam eder ve reaktörü soğutmaya devam etmek zorundasınızdır: Ta ki 'bozunum ısısı' önemsiz düzeylere inene kadar... Aksi halde reaktörün kalbindeki uranyum yakıt elemanları eriyebilir, çok yüksek sıcaklıkta sıvı bir kütle oluşturup, önüne gelen herşeyi eritebilir. Uranyum ağır bir metal olduğundan, erittiği kütlenin dibine çöker ve yeni konumunda neyle karşılaşırsa eritmeye devam eder. Reaktör binasının beton temelini dahi eritip, toprağa ulaşabilir. Dolayısıyla; bir 'soğutucu kaybı kazası' sonucu reaktör kalbinin erimesinin olası sonuçları, son derece ciddidir.

Çünkü radyasyon parçacıkları, mikroskopik birer mermi gibidirler ve önlerine çıkan malzeme içerisinde durdurulup soğutulana kadar, o malzemeye enerji enjekte ederler. Malzeme tıpkı, üzerine bir tabanca ile defalarca ateş edilen çelik bir levha gibi ısınır. Bundan öte, radyasyon parçacıkları, yolları üzerindeki moleküler bağları kırarak, maddenin yapısında değişiklikler de yaratır. Eğer malzeme uzun molekül zincirlerinden oluşuyor ise, ışımanın kırıdığı molekül parçaları bazen de, yine radyasyon ışınlarının etkisi sonucu, gelişigüzel yerlerinden birbirlerine bağlanır. Yani radyasyon, tıpkı bir oksijen tüpünün ucundaki alev gibi; uzun çubukları bazı yerlerinden eriterek kesmekte, diğer bazı yerlerinden de, parçaları kaynak edip birleştirmektedir. Bu olguya 'radyasyonla polimerizasyon' denilir ve bazı plastik türleri bu sayede sertleştirilir. Ancak bu olay

eğer canlı bir organizmada yer alıyor ise, bu, organizmanın aleyhinedir.

Canlı hücreler çoğunlukla, uzun protein zincirlerinden oluşur ve hücrenin radyasyona maruz kalması halinde, daha önce de belirtildiği gibi, bu moleküler bağlardan bazıları kırılır ve ortaya çıkan parçalar, gelişigüzel şekilde bağlanır. Bu moleküller artık işe yaramaz olmuştur ve tamir edilmeleri gerekir. Çünkü aksi halde, hücrede arızalı molekül yapıları birikecek, hücrenin metabolizması değişecektir. Nitekim hücrenin bu tür hasarları gidermek için belli bir tamir kapasitesi vardır. Hatta gelişkin organizmalardaki hücreler, molekülleri tek tek kontrol edip rastlanan hasarlıları tamir etmek yerine, tüm molekülleri belli aralıklarla, hasarlı olsun veya olmasın, parçalayıp yeniden inşa etmeyi tercih ederler. Ancak, hücrenin tamir kapasitesi sınırlıdır ve bu sınır aşıldığında, hasarlı moleküller birikmeye, hücrenin yaşam faaliyetleri etkilenmeye başlar. Örneğin kıl dibi hücreleri, dış kaynaklı radyasyona karşı ön cephede yer alırlar ve radyasyona karşı aşırı duyarlıdır. Dolayısıyla aşırı radyasyona maruz kalan insanların, saçları dahil, vücutlarındaki tüyler dökülür. Keza gözün kornea tabakası, radyasyona karşı duyarlıdır; polimerizasyona uğrayarak şeffaflığını yitirir ve bilindiği gibi, buna da 'katarakt hastalığı' denir. Bunlar radyasyonun 'somatik' etkileridir.

Radyasyonun bir de "genetik" etkileri vardır. Eğer radyasyon hücre çekirdeğine ulaşacak olursa, buradaki DNA'nın yapısında bazı değişikliklere yol açar ve insanın özelliklerini belirleyen şifreyi, adeta yeniden ve gelişigüzel bir şekilde yazar. Hücrenin faaliyetlerini yöneten emir komuta zinciri değişmiştir. Hücre, aksayan faaliyetleri dolayısıyla ölebilir veya daha da kötüsü, hızlı bir üreme çabasına girerek kanserleşir. Öte yandan, eğer çekirdeği hasar gören hücre, sperm veya yumurtaları oluşturan 'haploid' hücrelerden birisi ise, bu hücrenin dölleyeceği yavru, yapısal bozukluklarla doğar.

Bunlar düşük miktarlardaki radyasyonun etkileridir. Radyasyonun hasar gücünün bir ölçüsü, hedefe enjekte ettiği enerji miktarıdır ve bu, 'radyasyon dozu' adıyla anılır. Eğer doz yüksek



Bor katkılı paslanmaz çelikten yapılmış profiller, nükleer santrallerde kullanılmış yakıt çubuklarının daha büyük miktarlarda depolanabilmesini sağlıyor.

ise, organizma aşırı miktarda ısı soğurur ve yumuşak dokuları, bir bakıma pişer. Orta güçte bir atom bombasının düştüğü noktayı merkez alan 1 mil yarıçapındaki bir daire içinde bulunan insanın ise, pişmek gibi bir sorunu yoktur. Çünkü onca kısa zamanda yanmak için gerekli oksijeni bulamadığından, yanamayıp buharlaşır. Geride yalnızca iskeleti kalır...

Radyasyonun olası zararlarına kısaca değindikten sonra, tekrar nükleer reaktörlere dönecek olursak; santraller sonucu oluşan bazı radyoaktif izotopların, kalbi soğutan suya karışması mümkündür. Kaldı ki; suyun içerisinde nötronlar dolaşmakta, suyu oluşturan çekirdekler tarafından yutulmaktadırlar. Örneğin hidrojen, bir nötron yutup döteryum, döteryum bir nötron daha yutup trityum olabilir. Her iki ürün de radyoaktiftir. Keza, sudaki oksijen bir nötron yutup radyoaktif bir izotopa dönüşebilir. Dolayısıyla, soğutma suyu, reaktör içerisinde dönüp durdukça radyasyon biriktirir ve dışarı sızması gerekir. Halbuki her endüstriyel girişim, bazı kaza olasılıklarını da beraber getirir. Nükleer reaktörlerin de, ufak tefek kazalar sonucu radyoaktivite sızdırması, çevrede sağlık sorunlarına neden olması kaçınılmaz gibidir. Nitekim geçmişte böyle olmuş, en gelişmiş ülkelerdekiler de dahil olmak üzere, dünyanın muhtelif yerlerinde inşa edilen yüzlerce nükleer

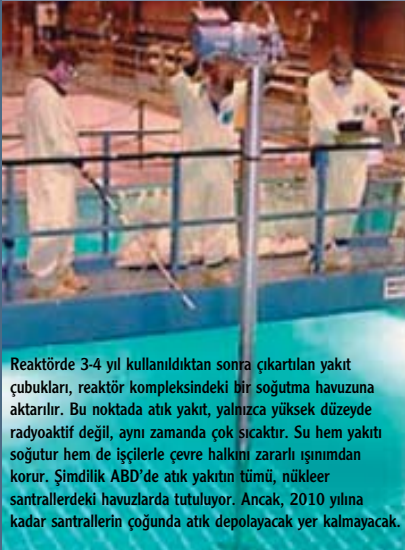
santralde yer alan radyasyon sızıntılarının sayısı, yüzleri bulmuştur.

1979 yılında ise, ABD'nin "Three Mile Island" nükleer santralindeki ünitelerden birinde, olası en kötü kaza gerçekleşmiş, soğutucu kaybı sonucu reaktör kalbi erimiştir. Gerçi kaza esnasında ölen olmamış, çevreye fazla radyasyon salınmamıştır. Ancak 1986 yılında, Sovyetler Birliği'nin Çernobil nükleer santralindeki ünitelerden birisi aynı kazaya uğrayınca, bu seferki kaza kontrol altına alınamamıştır. Oluşan radyasyon bulutunun haftalarca, Türkiye dahil Avrupa üzerinde dolaştığı, yağmurlarla birlikte besin zincirine ulaştığı çoğumuzun hatırlarındadır. Kazadan dolayı 30'dan fazla insanın öldüğü bilinmekte, radyasyona maruz kalmış olup da kanser riski artanlar, onbinlerle ölçülmektedir. Nükleer endüstrinin imajı ağır bir yara almış, kamuoylarının nükleer enerjiye güveni sarsılmıştır.

Reaktör kalbinde santrallere uğrayarak enerji üreten uranyum yakıt, zamanla fakirleşir ve belli bir noktadan sonra, yakıtın değiştirilmesi gerekir. Bu 'kullanılmış yakıt'lar, kimyasal yöntemlerle parçalanıp, içindeki işe yarar izotoplar alınabilir. Buna 'yakıtı yeniden işleme süreci' deniyor. Geride kalan kimyasal çözeltilerde, 'üst düzeyde radyoaktif' olan ve fakat işe yaramayan çekirdekler kalır. Bu 'üst düzeyde radyoaktif sıvı atıklar', radyoaktif olduklarından gelişigüzel atılmamaları, çevreye zarar vermemeleri için özenle zırhlı ve saklanmaları lazımdır. Ta ki radyoaktiviteleri zarsız düzeylere inene kadar. Radyoaktif bir maddenin aktivitesinin yarılanması için gereken zamana 'yarı ömür' demiştik. Böyle bir maddenin aktivitesini artık kaybetmiş olduğunu söyleyebilmek için, parmak kuralı olarak '10 yarı ömür'ün geçmesi gerekir. Nükleer reaktör atıkları arasında; Stronsiyum-90 ve Sezyum-137 gibi çekirdekler önemli bir yer tutar. Bunların yarı ömürleri oldukça uzun olup, sırasıyla 28 ve 30 yıl civarındadır. Dolayısıyla, 300 yıl süreyle, emniyetli bir şekilde saklanmaları lazımdır. Diğer bazı çekirdeklerin yarı ömürleri çok daha uzun olup, örneğin plutonyumunki 24,000 yıl kadardır.

Üst düzeyde radyoaktivite içeren sıvı atıkların, katı hale getirildikten sonra 'vitrifikasyon'

Nükleer Atık Sorunun Çözümü İçin Öneriler



Reaktörde 3-4 yıl kullanıldıktan sonra çıkarılan yakıt çubukları, reaktör kompleksindeki bir soğutma havuzuna aktarılır. Bu noktada atık yakıt, yalnızca yüksek düzeyde radyoaktif değil, aynı zamanda çok sıcaktır. Su hem yakıtı soğutur hem de işçilerle çevre halkını zararlı ışınmadan korur. Şimdilik ABD'de atık yakıtın tümü, nükleer santrallerdeki havuzlarda tutuluyor. Ancak, 2010 yılına kadar santrallerin çoğunda atık depolayacak yer kalmayacak.



1986 yılından bu yana bazı ABD nükleer santralleri, atık depolama kapasitelerini yer üstü kuru depolama tesisleriyle genişletme yoluna gittiler. Bu tesislerde atıklar, çelik, beton ve kurşundan yapılmış ağır konteynerlere yerleştiriliyor. Bunlar da ya kalın beton platformlar üzerine dikey olarak yerleştiriliyor, ya da kalın beton depolarda yatay olarak saklanıyor.

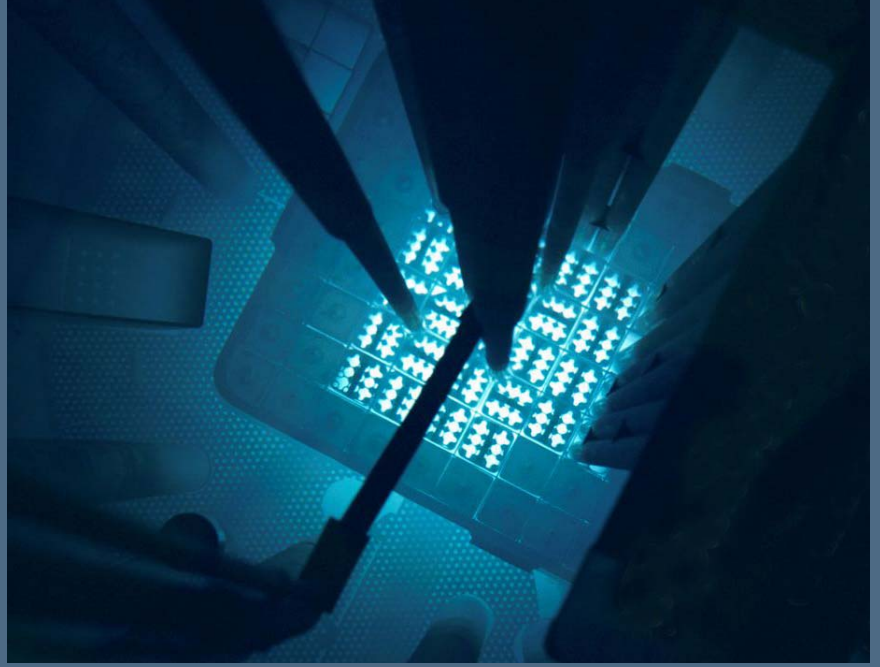
Nükleer atıkların okyanus tabanına gömülmesi, akla yakın bir seçenek. Çünkü, tabanın derinliklerinde radyasyon insanları ya da çevreyi etkilemez. Sorun, gerektiğinde yakıtı yeniden yüzeye çıkarmanın güçlüğü. Ayrıca, 1993 Londra Sözleşmesi 2018 yılına kadar denizlere radyoaktif atık bırakılmasını yasaklıyor.



Atıkların Antarktika ya da Grönland'da buza bırakılması: Atık varilleri, sıcaklıklarıyla buzı eriterek dibe inecekler. Varillere bağlanacak kablolarla atıklar gerektiğinde geri alınabilir. Sorun, gelecekte iklim değişikliklerinin buzları eritmesi ve atıkların çevreye saçılması. Yöntem ayrıca pahalı ve 1959 Antarktika Antlaşması'na aykırı.

yöntemiyle cam bir bünyeye, homojen bir şekilde emdirilmeleri mümkündür. Böyle bir tasarımda, dış kabın delinmesi ve radyoaktif çekirdeklerin çevreye yayılarak besin zincirine girmeleri olasılığı, yok denecek kadar azdır. Çünkü cam kırılrsa dahi, sadece kırılma yüzeyindeki radyoaktif çekirdekler açığa çıkar ve cam bünye içindekiler dışarı sızmaz. Hem de bu cam muhafazaların, paslanmaz çelikten bidonlara yerleştirilip, tuz yatakları gibi 'çok emici' jeolojik tabakalarda açılan yeraltı galerilerinde saklanması tasarlanmakta, böylelikle deprem şoklarından korunmaları amaçlanmaktadır. Bu 'nihai depolama sistemi' tasarımına göre; sözkonusu jeolojik tabakalar geçmişte olduğu gibi, yüzbinlerce yıl süreyle değişmeden duracak, radyoaktif atıkları içlerinde saklayacaklardır. Ancak, zaman ölçeği uzun olduğundan, olası gelişmeleri tümüyle öngörmek zordur. Dolayısıyla tasarım hala tartışılmakta olup, henüz hayata geçirilmemiştir. Nihai depolamaya başlanılmayınca, kullanılmış 'yeniden işleme süreci'ne de geçilmemiş ve kullanılmış yakıtlar, reaktörlerdeki soğutma havuzlarında biriktirilmiştir. Başlangıçta kısa süreli, yaklaşık 100 günlük depolama için tasarlanmış bulunan bu havuzlar dolmak üzeredir. Hatta bazılarında çıkartılan yakıtlar, aktiviteleri artık görece azalmış olduğundan, beton bloklara gömülerek, kuleler halinde reaktör alanına dikilmektedir. İçerdikleri plutonyumun, bomba malzemesi olarak uygunluğu ve kimyasal yöntemlerle ayrıştırılmasının kolaylığı nedeniyle, terörist amaçlara hedef olmasından korkuluyor. Halbuki termal reaktörlerde biriken plutonyum, hızlı üretken reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilir. Ancak dünya 'hızlı üretken reaktör programı' askıya alındığından, bu yapılamıyor.

Nükleer teknoloji adeta, yolda karşılaştığı kazalar nedeniyle, başlangıçta planlanan şekilde çalışamamış, öyle olunca da daha büyük sorunlarla karşı karşıya kalmış gibidir. Bütün bunlara karşın, OECD ülkelerinin Kyoto Protokolü yükümlülüklerini yerine getirmeye karar vermeleri halinde üzerinde durulması gereken en önemli seçeneklerden biri gibi duruyor. Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojik sorunlarını aşması ve



ekonomikliği başarmasına kadarki geçiş döneminde önemli bir rol üstlenmek üzere, kendi sorunlarını aşmaya çalışıyor. Sorunların bir listesi ve çözüm tasarımları şöyle özetlenebilir...

Nükleer santrallerin işletme güvenliğinin artırılması için, işletme sırasında, istenmez ve uğraşsanız da kalbini eritemeyeceğiniz 'ultra güvenlikli' sistemler üzerinde çalışılıyor. Örneğin bunlardan birisinin, ufak çapta bir gölün dibine kurulması tasarlanmakta, bu 'ultra güvenli reaktörün', ne olursa olsun soğutucu kaybına uğramaması amaçlanmaktadır. Bir diğeri gaz soğutmalı olup, top şeklinde yakıtlar kullanıyor ve 'gelişkin gaz soğutmalı reaktör' olarak anılıyor.

Aynı paralelde ABD'nin önderliğinde 10 ülke (Arjantin, Brezilya, Kanada, Fransa, İsviçre, Japonya, Kore, Güney Afrika, İngiltere) tarafından yürütülmekte olan IV. Nesil Nükleer Enerji Sistemleri'yle ilgili çalışmaların ('A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems') ilk aşaması tamamlanmış olup; 2030

ve sonrasında yönelik olarak kullanılması uygun bulunan 6 nükleer reaktör tasarımı belirlenmiş bulunuyor. Bunlardan birisi, geleceğin enerji kaynağı olara görülen hidrojenin, suyun elektrolizi yoluyla eldesine yönelik. (Bakınız: IV. Kuşak)

Nükleer silah teknolojisinin yayılmasını veya bomba malzemesinin terörist emellere hedef olmasını engellemek için, nükleer yakıt döngüsünde değişiklikler tasarlanıyor. (Bakınız: Nükleer Silahlar) Toryuma yönelik bunlardan birisi. (Bakınız: Toryuma Dönüş.) Hatta toryumu doğrudan yakıt olarak kullanmayı hedefleyen bir tasarım dahi var. (Bakınız: Enerji Yükseltici.)

Radyoaktif atıkların uzunca sürelerle kendiliğinden bozunmalarını beklemek yerine, hızlandırıcılarda proton bombardımanına veya nötron ışınlarına tabi tutmak suretiyle daha kısa ömürlü başka çekirdeklere dönüştürülmelerini sağlamak yönünde çalışmalar var. (Bakınız: Transmutasyon.)

Prof. Dr. Vural Altın



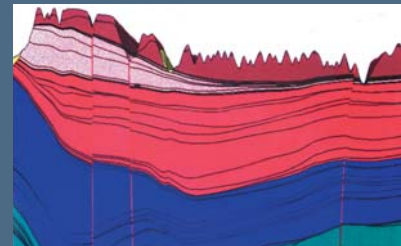
Atıkların, üzerinde insan yaşamayan uzak adalara gömülmesi de sorunlu: Bir kere atıkların okyanuslarda, özellikle kötü havalarda taşınması riskli. Ayrıca, bu adaların birçoğunda yoğun deprem ve yanardağ faaliyeti görülüyor. Bir sorun da adalarda sıkça görülen jeolojik yapıda deniz suyunun ve tatlı suyun yüzey altındaki kaya katmanlarına sızması. Suyun varlığı atık varillerinin paslanmasına ve sonunda radyoaktif parçacıkların ortama sızmasına yolaçabilir. Bir başka sorun da, ada yakınındaki ülkelerin buna karşı çıkması.



Atıkların, uzaya bırakılmasının avantajı bunların insanlı ortamdaki kalıcı biçimde uzaklaşması. Ancak, dezavantajlar daha büyük. Fırlatılış sırasında, radyoaktif maddeleri çevreye saçacak bir kaza olasılığı bu seçeneği kabul edilemez yapıyor. Ayrıca, çok sayıda fırlatmanın gereksinmesi ve bu konuda uluslararası bir anlaşma sağlamanın güçlüğü, yöntemi pratik olmaktan çıkarıyor.



Yeniden işleme ve dönüştürme giderek benimsenen yöntemler. Yeniden işlemede, plutonyum ve parçalanabilir uranyum kullanılmış yakıt çubuklarından ayrılıyor. Bu süreç, atık nükleer yakıtın hacmini azaltıyor. Dönüştürme yönteminde radyoaktif elementler daha kısa ömürlü maddelere dönüştürülüyor. Bu yöntemlerin ikisi de atıkların sonunda güvenli bir yeraltı deposuna nakledilme gereksinimini ortadan kaldırmıyor. Yeniden işlemeden arta kalan artık ürün, uzun ömürlü ve camlaştırılarak saklanmak zorunda. Yöntemin avantajı, atık miktarını düşürmesi. Dönüştürme, gömülme süresini büyük ölçüde azaltacak.



ABD, elindeki nükleer atıkları, en erken 2010 yılında hizmete girecek olan bir yeraltı deposuna nakletmeyi planlıyor. Tartışmaları bitmeyen proje, Nevada'daki Yucca dağı altında bir depo inşaatını içeriyor. Yer seçimine etken, iklimin kuraklığı ve topraktaki su tablasının derinliği. Depo, yüzeyden 300 m derinde ve su tablasının 300 m yukarısında inşaa ediliyor. Suyu doymamış kaya katmanları gibi doğal engellerin yanı sıra, beton tüneller gibi yapay engellerin de atıkların suya ve atmosfere sızmasını önleyeceği umuluyor.



TORYUMA

kullanılan ince yakıt çubuklarından daha kolay yapılmasını sağlıyor. Dahası, toryum dioksitin erime noktası, uranyum dioksitinkinden 500 °C daha yüksek.. Bu fark, geçici bir aşırı güç yüklenmesi ya da soğutucunun kaybı gibi durumlarda ek bir güvenlik marjı oluşturuyor.

Bu avantajların bilinmesi, nükleer mühendisleri bıkıp usanmadan güç için toryum kullanımına yönelik deneyler yapmaya yönlendirdi. Hatta bazı gruplar, toryum temelli yakıtlarla çalışan ticari santralleri işletme konusunda deneyim bile kazandılar. Örneğin, ABD'nin Pennsylvania eyaletinde Peach Bottom Nükleer Santral'i'nin birinci ünitesi olan gaz soğutmalı, grafit yavaşlatmalı bir reaktör, 1960'lı yıllarda yüksek ölçüde zenginleştirilmiş uranyumla, toryum bileşimi bir yakıt kullandı.

Colorado eyaletindeki Fort St. Vrain kasabasında başka bir gaz soğutmalı reaktör de 1976 ve 1989 yılları arasında benzer bir toryum temelli yakıtla çalıştırdı. Toryum oksitle, yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyumun görece basit karışımları ve su soğutmalı reaktörlerle deneyler de 1960'lı yıllarda yine ABD'deki "BORAX" ve Elk River nükleer tesisleriyle, Indian Point güç santralinde gerçekleştirildi. 1977-1982 yılları arasındaysa, toryumla, uranyum-235 ya da uranyum-233'ün daha karmaşık bileşimleri, tükettiğinden daha fazla parçalanabilir madde üreten bir yakıt geliştirme amacına yönelik bir deney çerçevesinde Shippingport'ta (Pennsylvania) su soğutmalı bir reaktörde kullanıldı.

Toryum tabanlı nükleer yakıt kullanımı yalnızca ABD ile sınırlı değil. Örneğin Alman mühendisler toryumla, yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyum ya da toryum ile plütonyum karışımlarını hem gaz, hem de su soğutmalı güç santrallerinde kullandılar. Toryum tabanlı yakıtlar ayrıca İngiltere, Fransa, Japonya, Rusya, Kanada ve Brezilya'da da denendi. Ancak başlangıçtaki bu yoğun çabalara karşın, bu ülkelerin neredeyse hepsi nükleer enerji santrallerini çalıştırmak için toryum kullanma düşüncesini uzun süre önce terk ettiler. Bu yakıt karşı ilgisini sürdüren tek ülke, güç reaktörlerinden bazılarını 1990'ların ortalarında toryum içeren yakıt demetleriyle besleyen Hindistan. Toryum kullanmanın temel nedenlerinden birisinin, reaktör kalbindeki özel dağılımını eşitlemek olmasına karşın, Hintli mühendisler fırsattan yararlanıp toryumun bizzat bir yakıt kaynağı olarak nasıl çalışacağını da denediler. Elde ettikleri olumlu sonuçlar, günümüzde yapımı sürmekte olan daha ileri tasarımdaki reaktörlerde toryum tabanlı yakıt kullanma planlarına temel oluşturdu.

Toryum tabanlı yakıtların Hindistan'a çekici gelmesinin nedenlerinden biri, bu elementin ülkedeki bolluğu. Hindistan, 290.000 ton olarak hesaplanan toryum rezervleriyle, Avustralya'nın ardından ikinci sırada bulunuyor. Ancak Hindistan'ın bu yakıttan yararlanma konusundaki kararlılığının altında yatan temel nedenin, ülkeyi yabancı uranyum kaynaklarına bağımlı olmaktan kurtararak dış ticaret dengesini düzeltme isteği olmadığını öne sürenler de var. Hindistan, reaktörlerinden bazılarını atom bombaları yapmak üzere plütonyum

Son yıllarda hızlanan ve radikal bir iklim değişikliği tehdidini yakınlaştıran küresel ısınmanın, fosil yakıt kullanımından kaynaklandığını gösteren kanıtların çoğalması, ülkemizin gündeminden çıkmış görünen nükleer enerjinin yararları ve zararları konusundaki tartışmaları yeniden dünya gündemine taşıyor. ABD'nin endişelerininse nükleer enerjinin çevre ve iklim konusundaki olumlu ya da olumsuz etkilerinden çok, Kuzey Kore'nin ardından İran ve başka bazı ülkelerin de barışçı nükleer enerji programları maskesi altında atom silahları geliştirdikleri kuşkusu ve bu silahların bir gün teröristlerin eline geçmesi olasılığı üzerinde odaklandığı anlaşıyor. Biz de bu sayıdan başlayarak, bu tartışmaları ve geliştirilen yeni tasarımları sizlerle aktaracağız. Tabii, bu alandaki siyasal tartışmaların ve karşılıklı suçlamaların olabildiğince dışarda kalmaya özen göstererek. Konuya, ülkemizde hâlâ şiddetli tartışmalara konu olan toryum santralleri ile ilgili olarak American Scientist dergisinin Eylül-Ekim sayısında yer alan bir makalenin kısaltılmış çevirisi ve toryum santrallerinin işleyiş biçiminin anlatımıyla girmenin uygun olacağını düşündük...

TORYUM elementinin güç reaktörlerinde kullanılması, nükleer enerjinin kullanıma girdiği 1950'li yıllardan beri üzerinde düşünülen bir konu. Nedeni basit: Toryumun dünya kabuğu içindeki bolluğu, uranyumun üç katı. Ne yazık ki, toryum atomları kendiliklerinden bölünmeye yatkın değil. Oysa bu, nükleer güç reaktörleri için temel gereksinim. Ancak toryum 232'nin (bu elementin başlıca izotopu) belli bir miktarı bir nükleer reaktör kalbine konduğunda, hemen nötron soğurmaya başlar ve uranyum-233'e dönüşür. Bu izotop da, nükleer güç için en yaygın olarak kullanılan uranyum-235 gibi parçalanma zinciri tepkimelerini destekler.

Dolayısıyla toryum, parçalanabilir (fisil) olmak

tan çok "doğurgan" bir madde olarak tanınır. Bu yönüyle de, reaktörlerde genellikle kullanılan yakıtın %95'ten fazlasını oluşturan uranyum-238'e benzer. Sıradan bir reaktör, u-238'den plütonyum elementinin çeşitli izotoplarını üretir ve bu plütonyumun bir kısmı da reaktör içinde parçalanmaya uğrayarak uranyum-235'in ürettiği güce katkı yapar.

Toryumu bir yakıt olarak kullanmanın sorunlu yanı, kendisinden enerji elde edilmeye başlamadan önce üreme sürecinin (uranyum-233'e dönüşme) gerçekleşmesi gereği ki, bu da ortamda nötronların varlığını gerektiriyor. Bazı mühendisler, gerekli nötronların parçacık hızlandırıcılarından sağlanmasını öneriyorlar. Ama bu yöntem oldukça pahalı. Dolayısıyla günümüzde toryumdan yararlanmanın en pratik yolu, bunu plütonyumdan, zenginleştirilmiş uranyumdan ya da ikisinin karışımından oluşan ve parçalanmaları zincirleme tepkimeleri başlatacak olan sıradan reaktör yakıtlarıyla birleştirmek.

Uranyum-238'den plütonyum üretmek yerine, toryumdan uranyum-233 üretmek daha çok verim sağlıyor. Nedeni, süreç içinde ortaya çıkan çeşitli parçalanamaz izotopların sayısının daha az olması. Reaktör tasarımcıları, bu görece yüksek verimden yararlanarak üretilen birim enerji başına kullanılacak yakıtı azaltabilir, bu da saklanması gereken atık miktarını azaltabilir. Bunlar dışında toryum kullanımının başka artıları da var: Örneğin, toryumun nükleer güç için kullanılan biçimi olan toryum dioksit, günümüzde reaktör yakıtlarında genellikle kullanılan uranyum dioksite göre daha kararlı bir bileşim. Böyle olunca da yakıt kapsüllerinin içine kondukları metal zarflarla, ya da zarfların yarılmaları halinde soğutma suyuyla termal tepkimeye girme olasılığı azalıyor. Ayrıca, toryum dioksitin termal iletkenliği, uranyum dioksitinkinden %10-15 daha fazla. Bu da ısının, reaktör kalbinde

A YÖNELİŞ Mİ?

üretmek için kullanıyor. Dolayısıyla Kanada gibi ticari uranyum satan ülkelerin şart koştukları yükümlülüklerle bağlanmak istemiyor. Bu ülkeler uranyum satışını, alıcı ülkenin bunu ya da bundan üretilen plütonyumun nükleer silah yapımında kullanmadığını belirleyecek denetlemelere izin vermesi koşuluna bağlıyorlar.

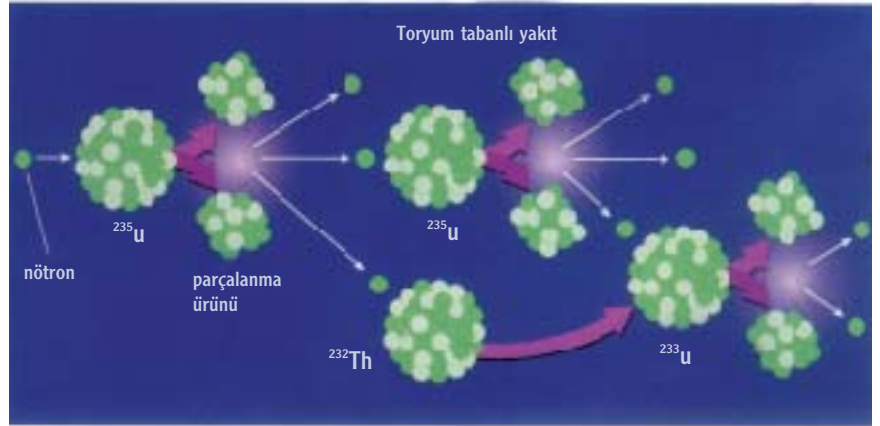
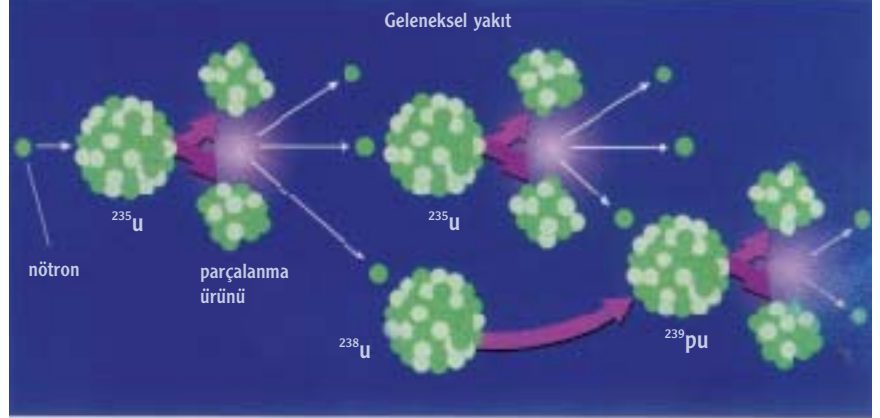
Hindistan'ın dışındaki ülkelere de daha önceki toryum deneylerinin bu elementin yakıt olarak benimsenmesini sağlamamasının başlıca nedeni, su soğutmalı reaktörlerdeki performansının beklentilerin altında kalması.

Neden bu olunca da, toryum tabanlı nükleer yakıtların yeniden ilgi çekmeye başlaması, üstelik nükleer silahların yayılmasını önleyecek bir araç olarak değerlendirilmesi hayli şaşırtıcı. Ancak toryumun, plütonyumun birikmesini önlemek için kullanımı, yakıtın geçmiş yıllardaki deneylerde kullanılandan daha farklı biçimde oluşturulmasını gerektiriyor. Geçmiş deneylerde yakıt bileşenlerinden biri olarak zenginleştirilmiş uranyum kullanılmaktaydı ki, bugün nükleer silahların yayılmasına yol açacağı endişesiyle bu yöntem teşvik edilmiyor. Yine geçmiş deneyler, içindeki parçalanabilir malzemenin alınabilmesi için kullanılmış yakıtın yeniden işleneceği varsayımına dayalıydı. Günümüzde tasarlanmakta olan toryum tabanlı yakıt düzenekleri, başka yönlerden de eskilerden farklı. Örneğin, bir reaktörün kalbi içindeki sıcaklık ve ısıyı daha dayanıklı olarak tasarlanıyorlar. Böylelikle, doğrudan toryum-232, daha büyük miktarlarda uranyum-233'e dönüşecek. Özetle bugün toryum tabanlı yakıt konusunda konuşulanların, eski uygulamaya ve deneyimlerle alakası yok.

Daha önce de belirtildiği gibi, uranyum-233'ün doğada bulunmayışı, toryumla çalışan bir reaktörü harekete geçirmek için uranyum-235 (ya da plütonyum-239) gibi başka bir parçalanabilir malzemenin varlığını gerektiriyor. Ancak, uranyum-235 bakımından fazlaca zenginleştirilmiş ticari yakıtların doğurduğu kuşku ve bu yakıtlara getirilen sınırlamalar da göz önünde tutulduğunda, tetikleyicinin arasına önemli miktarda parçalanamaz uranyum-238 eklenmesi gereği açık. Günümüzde bu miktarın alt sınırı %80, ama genellikle bu miktarın hayli üzerine çıkılıyor. Sıradan reaktörler için olduğu gibi, bu durum satın alınan reaktör yakıtını, teknik açıdan güç olan zenginleştirme aşamasını atlayıp doğrudan bomba yapımı için kullanmayı olanaksız kılıyor.

Bir toryum ve uranyum karışımını yakıt olarak kullanmanın temel avantajı, kullanılmış yakıttaki plütonyum oranının, alışılmış yakıt karışımıyla çalışan bir reaktörden çıkan artıktakine göre hayli düşük olması. Atık yakıttaki plütonyum oranı ne kadar düşüyor? Yanıt, uranyum ile toryumun nasıl karıştırıldığına bağlı. Örneğin, uranyum ve toryum her yakıt çubuğu içinde eşit miktarlarda karıştırılmış olabilir. Bu durumda, oluşacak plütonyumun miktarı aşağı yukarı yarıya iner. Ancak eşit miktarlarda karıştırmak, bu iki elementi bir araya getirmenin tek yolu değil.

Gerçekten de, bugün en çok incelenmekte olan yaklaşım, uranyumca zengin bir "tohumu",



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.

toryumca zengin bir "battaniye" den ayırmak üzerine kurulu.

Bu yaklaşımın en hararetli savunucusu, 1950'lerde donanmanın nükleer reaktörler programının baş araştırmacısı olarak ABD'nin nükleer denizaltı filosunun kurulmasına yardımcı olan ve artık hayatta bulunmayan Alvin Radkowsky idi. Radkowsky 1960 ve 1970 yıllarında ticari nükleer endüstrinin gelişmesine de önemli katkılar yaptı. Daha sonra, nükleer silahların yanlış ellere düşmesini engelleyecek bir yol bulunmasına yardımcı olmasını isteyen eski hocası Edward Teller'in telkiniyle, zaten daha önce nükleer artıkların azaltılmasındaki potansiyelini keşfetmiş olduğu toryum tabanlı yakıtlar üzerinde yoğunlaştı. 1992 yılında Thorium Power Inc. adlı şirketin kurucuları arasında yer alan Radkowsky, rüyasının gerçekleşmesini göremeden 2002 yılında 86 yaşında öldü.

Radkowsky'nin düşüncesi, çok küçük değişikliklerle sıradan su soğutmalı reaktörlerde kullanılabilecek özel yakıt üniteleri oluşturmaktı. Bu ünitelerin merkezinde, reaktör düzeyinde uranyum (yani, parçalanabilir uranyum-235 izotoplarının miktarı %20'yi geçmeyen) ile doldurulmuş bir "tohum" bulunuyor. Bu tohumun çevresindeyse, büyük ölçüde toryum ve bir miktarda uranyum dol-

durulmuş yakıt çubuklarından oluşan bir "battaniye bölgesi" yer alıyor. Battaniyede yalnızca uranyum-238 bulunması, birinin bu çubukları yerlerinden çıkarıp içinde zamanla oluşmuş parçalanabilir uranyum 233'ü kimyasal yöntemlerle ayırıp almasına olanak tanımıyor.

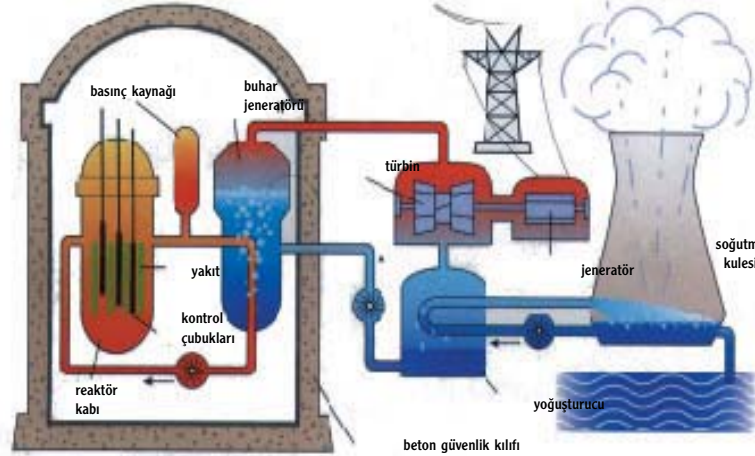
ABD Enerji Bakanlığı'nın desteği ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nın teknik yardımlarıyla Thorium Power şirketi, şimdi Moskova'daki Kurchatov Enstitüsü'yle işbirliği halinde bu stratejiyi daha ayrıntılı biçimde irdeliyor. Geliştirilen konsept, metalik bir bileşimin tohum yakıtı olarak kullanılması ve tohum ünitelerinin, bir Rus reaktöründe üç yıl tutulması temelinde tutuluyor. Battaniye çubuklarıysa reaktörde 10 yıl süreyle kalacak. Ancak, elde edilen sonuçlar, öteki ülkelerin çoğundaki nükleer reaktörlere doğrudan uygulanabilecek gibi değil. Nedeni, hem yakıt malzemesinin Batı'da tercih edildiği gibi oksit formunda olmaması, hem de deneyde kullanılan Rus reaktörlerinde her yakıt ünitesi için altıgen biçiminde dizilmiş yakıt çubukları kullanılması. Batıdaki reaktörlerdeyse genellikle kare biçiminde dizilmiş çubuklar kullanılıyor..

Radkowsky ve meslektaşları, yöntemin aynı enerji çıktısını sağlayan sıradan bir reaktöre göre

%80 oranında daha az plütonyum üreteceğini hesaplamışlardı. Ayrıca, "tohum" yakıtında zamanla oluşan plütonyum izotopu karışımının da askeri bakımdan fazla tercih edilmeyeceğini, çünkü bunlarla yapılacak bir bombanın fazlaca bir patlama gücü yaratmayacağını da keşfetmişlerdi. Dahası, çubuklarda oluşan plütonyum içinde öyle yoğun miktarda ^{238}Pu bulunur ki, bunun bozunmasıyla ortaya çıkacak sıcaklık bir silah yapımında kullanılacak diğer malzemeleri eritir ya da hasara uğrattır.

Bir terörist grubun battaniye plütonyumundan çok güçlü olmasa da, çok ürkütücü bir bomba yapmaya kalkışması halinde, bunu Radkowsky'nin herhangi bir toryum yakıtından elde etmesi, günümüz reaktörlerinden çıkan artıktan sağlamaktan daha zor. Kullanılmış battaniye yakıtı, uranyum-232 içerir ve bu da birkaç ay içinde yüksek enerjili gama ışınları yayan izotoplara dönüşür. Dolayısıyla plütonyum atık yakıtın çekip almak, önemli ölçüde güçlendirilmiş radyasyon kalkanları ve yeneden işleme tesisinde iş görecektir çok sayıda uzaktan kumandalı ekipman gerektirir ki, bu da zaten güç olan bir işi iyice içinden çıkılmaz hale getirir. Ayrıca, atık yakıtta uranyum-232 ve yüksek düzeyde radyoaktif ürünlerin yoğunluğu, (bomba yapımında kullanılabilecek) uranyum-233'ü, uranyum-238'den ayırma girişimlerini engeller.

Nükleer atık miktarını düşürmek ve bomba yapımında kullanılabilecek malzemenin yayılmasını önlemek konusundaki potansiyel göz önünde tutulduğunda, toryum tabanlı yakıtlara olan ilginin yeniden canlanması o kadar şartırtıcı değil. Özellikle ABD Enerji Bakanlığı bu alandaki araştırmaları teşvik etmeye istekli. Radkowsky'nin şirketi ve ortaklarının Rus reaktörleriyle gerçekleştirdikleri deneylerin finansmanını üstlenmekle kalmayan Enerji Bakanlığı, son zamanlarda başlatılan üç ayrı gi-



Toryum tabanlı yakıtlar, suyun hem kalpten ısı transferi için ve parçalanma tepkimesinde ortaya çıkan nötronları yavaşlatmak için kullanıldığı basıncı su reaktörleri (üstte), hem de ısı transferi için helyum gibi gazlar ve nötronları yavaşlatmak için de grafit kullanılan yüksek sıcaklık gaz reaktörleri (sağda) için uygun.

rişime de destek sağlıyor. Bunların biri, iki ABD resmi araştırma kurumunu, Idaho Ulusal Mühendislik ve Çevre Laboratuvarı ile, Argonne Ulusal Laboratuvarı'nı nükleer yakıt üreten iki büyük şirketi, Framatome Technologies (Fransa) ve Westinghouse'u (ABD) ve üç üniversiteyi, Florida Üniversitesi, Purdue Üniversitesi ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nü (MIT) bir araya getiren bir konsorsiyum. Hedef, reaktörlerde toryumun Radkowsky'nin önerdiği gibi tohum ve battaniye üniteleri için ayrı yakıt dizgeleri kullanmaya gerek kalmadan kullanılmasını sağlayacak bir yöntem geliştirmek.

Brookhaven Ulusal Laboratuvarı ve MIT'deki İleri Nükleer Enerji Sistemleri Merkezi (CANES) araştırmacılarını bir araya getiren bir başka çalışmada, ayrı tohum ve battaniye ünitelerinin tasar-

ını basitleştirmenin bir yolunu bulmaya yönelik. "Bölünmemiş Dizimli Tohum ve Battaniye Kalbi" adlı bu düzenekte farklı bileşimdeki yakıt dizgelerinin bir reaktör kalbi içine bir dama tahtası örüntüsünde yerleştirilmesini öngörüyor.

Üçüncü araştırma ekibindeyse Brookhaven Ulusal Laboratuvarı ile Purdue Üniversitesi'nden nükleer mühendisler, plütonyum tetiklemeli toryum kaynak su reaktörlerinde yakıt olarak kullanılabileceklerini araştırdılar. Bu tür nükleer reaktörler, daha yaygın olarak kullanılan basıncı su reaktörlerinden farklı. Basıncı su reaktörlerinde soğutma suyu sürekli olarak yüksek basınç altında tutularak sıvı durumda kalması sağlanıyor. Bu sonucu araştırmanın hedefiye, silah üretiminden arta kalan plütonyum, yeni kuşak bir plütonyum atığı sorunu yaratmadan ekonomik bir biçimde kullanmak.

ENERJİ YÜKSELTECİ

Toryum-232 tabanlı yakıt kullanımıyla elde edilen parçalanabilir uranyum-233'ün güç üretimi için taşıdığı avantajların çekiciliği karşısında, Carlo Rubbia adında bir fizikçi, toryum temelli ve kendi adıyla anılan bir enerji santrali tasarımı geliştirmiş. Bu tasarımda Th-232, nötron yerine yüksek enerjili proton bombardımanıyla U-233'e dönüştürülüyor:



Tabiî bir de, ortaya çıkan U-233'ü fisyonla uğratacak nötronlar lazım. Rubbia'nın tasarımı bunu, hiç değilse başlangıçta, kurşun gibi ağır çekirdeklerin, yine protonlarla bombardımanı sonucu parçalanarak nötron üretmesi temelinden yararlanarak başarmayı hedefliyor. Buna 'primerleme' deniyor ve proton ışını kesildiğinde, ortada dolaşan nötronlardan bazıları Th-232 çekirdekleri tarafından yutulurken bazıları U-233'e dönüştürürken, diğer bazıları mevcut bir U-233'e çarparak bunların fisyonuna yol açıyor. Ancak U-233 fisyonundan;

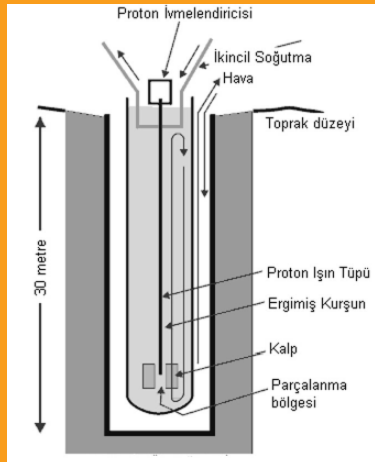


yalnızca iki nötron çıkıyor olmasının önemli bir sonucu var: Proton ışını kesildikten sonra, bir zincirleme reaksiyon devam edemiyor. Çünkü bunun mümkün olabilmesi için, iki nötronun birinin bir Th-232 çekirdeğini U-233'e çevirirken, diğerinin de mevcut bir U-233 çekirdeğini fisyonla uğratması; yani her iki nötronun da %100 verimle kullanılabilmesi lazım. Oysa bu olanaksız. Çünkü, nötronlardan bazılarının sistemin dışına kaçması, bazılarının da fisil olmayan çekirdekler tarafından yutulması kaçınılmaz. Dolayısıyla, proton ışını kesildiğinde, fisyonlar duruyor. Ancak bu arada meydana gelmiş olan çekirdek parçalanmaları sonucu, protonların

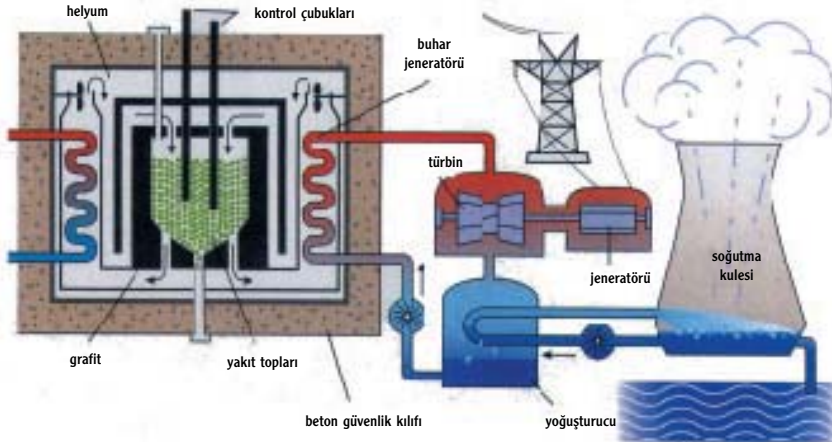
imlendirilmesi için harcanan enerjinin 60 katı kadar enerji elde edilmiş oluyor. Bu yüzden de Rubbia'nın tasarımı "enerji yükseltici" deniyor. Hem de, tasarımıda yakıt hammaddesi olarak sadece toryum kullanıldığından ve doğal toryum %100 Th-232 izotopundan oluştuğundan, uranyumda olduğu gibi bir zenginleştirme işlemine gerek kalmıyor.

'Toryum Temelli Enerji Yükseltici'nin kalbi, şekilde görüldüğü gibi; toprak düzeyinin altına yerleştirilmiş, 30 m yüksekliğinde ve 6 m yarıçapında, çelik bir silindirik kap biçiminde tasarlanıyor. İçi yaklaşık 10,000 ton kurşunla dolu olan kabın alt kısmında, yakıt hammaddesini oluşturan toryum bulunuyor. Yukarıdan aşağıya, bu toryum malzemesine doğru, bir proton imlendiricisi 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. Kabin kendisiyse dışından, havanın zorlamalı konveksiyonuyla soğutuluyor.

Tasarım çekici görünmekle birlikte; örneğin çelik kabın, 1200 santigrad dereceye kadar ısınan kurşunun içinde erimesi gibi; ciddi bazı mühendislik problemlerinin aşılmasını gerektiriyor. 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



MIT ve CANES araştırmacıları, toryum uranyum bileşimi yakıt kullanımı için öne sürülen tasarımlar üzerinde geçtiğimiz yıllarda yaptıkları incelemelerin sonuçlarını şöyle açıklıyorlar.

Tasarımcılar Sınavda

Farklı tiplerdeki yakıt ünitelerinin kendi içlerinde homojen bir yapıya sahip oldukları Bölünmemiş Dizimli Tohum ve Battaniye Kalbi tasarımında bile yakıtın oluşturulması ve reaktör kalbi içinde kontrol edilmesinin, alışılmış yöntemlere kıyasla daha karmaşık olacağı açık. Tipik bir nükleer güç reaktöründe yakıt ünitelerinin yerleri belirli zaman aralıklarıyla değiştirilir ve böylece hepsinin ortalama olarak aynı ısı ve radyasyon koşullarına maruz kalmaları sağlanır.

Bir tohum ve battaniye kalbindeyse, tohumların ortalamanın oldukça üzerinde güç düzeylerinde kalması beklenirken, battaniye birimleri çok daha az stresli koşullar altında bulunurlar. Böylece, tohum çubukları içindeki yakıt daha yüksek sıcaklıklara tırmanır, gaz halindeki parçalanma ürünlerini, çubuk içinde kendilerine ayrılmış sınırlı alana daha büyük miktarlarda salar ve dolayısıyla da battaniye bölgelerinde kullanılan yakıtı göre daha fazla soğutma gerektirir.

Bu gereksinimler, çeşitli yollarla karşılanabilir. Örneğin, tohum düzenekleri içinden daha fazla soğutucu akmasını sağlayarak ya da yakıt malzemesini ısı akışına daha az dirençli biçimde üreterek.

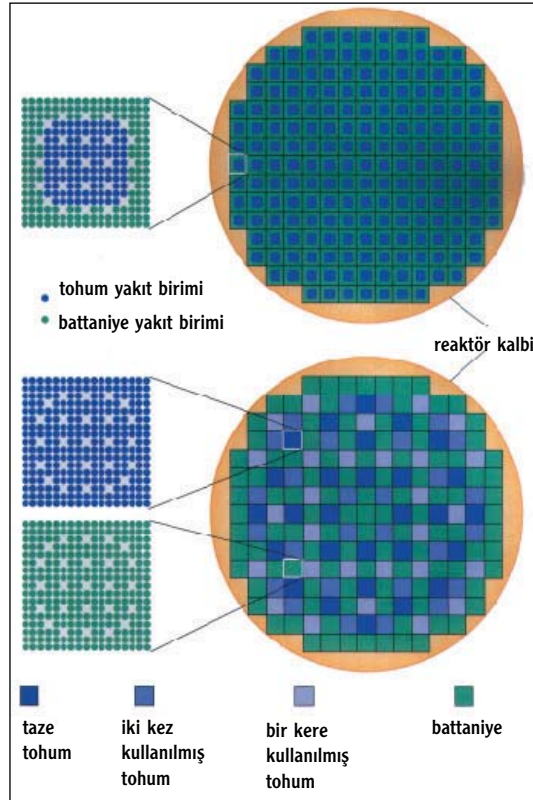
Radkowsky-Kurchatov yaklaşımında, tohum çubukları Rus denizaltılarında denenmiş tasarımlara uygun olarak metalik bir uranyum bileşiminden yapılıyor ve bu da termal iletkenliklerini artırıyor.

MIT-Brookhaven tasarımında, tohum çubuklarının içindeki uranyum oksit kapsüllerinin ortaları boş. Bu da, sıcaklıklarının düşmesine yardımcı oluyor. Battaniye çubukları bu bakımdan daha az sorunlu olsa da, bunların da dış kılıflarının reaktör kalbindeki koşullara dayanabilmesi için titiz bir mühendislik ürünü olmaları gerekiyor. Çünkü bazı tasarımlarda bu çubukların kullanım ömürleri 13-14 yıl olması öngörülüyor.

Farklı tasarımları mühendislik ölçütlerine göre incelemenin dışında CANES araştırmacıları, tohum-ve battaniye tasarımlarını, bomba

yapımında kullanılabilecek malzemelerin yayılmasını ne derece önleyebilecekleri ölçütüne göre de değerlendirdiler. Çalışmada üzerinde durulan bir kıstas da, bunların ekonomik artı ve eksileri.

Sonuçlar, tohum-ve-battaniye tasarımlarının, uranyum ve toryumun rakip konseptlere kıyasla



Toryum tabanlı nükleer yakıtlar farklı biçimlerde tasarlanabilir. Radkowsky tarafından önerilen bir düzenek, her nükleer yakıt ünitesinin (kareler) uranyumca zengin "tohum" çubuklarıyla bunların etrafına dizilmiş toryumca zengin "battaniye" çubuklarından oluşmasını öngörüyor (üstte). %20 kadari parçalanabilir ²³⁵U izotopundan oluşan uranyum çevresindeki "doğurgan" toryumu bir başka parçalanabilir uranyum izotopu olan ²³³U'ya dönüştürüyor. Bir yakıt ünitesi içinde bu şekilde farklı yakıtlar kullanmak bir nükleer reaktörde yakıt değiştirme işlemini karmaşılaştırıyor. Çünkü tohum çubuklarının, battaniye çubuklarına kıyasla çok daha sık değiştirilmesi gerekiyor. Bölünmemiş ünite tohum ve battaniye kalbi denen alternatif yaklaşım (altta), yalnızca zenginleştirilmiş uranyum dolu tohum çubukları ve toryum tabanlı yakıt doldurulmuş battaniye çubuklarını yan yana kullanıyor. Bu yakıt ünitelerinin yerleri belirli aralıklarla kolayca değiştirilebiliyor ve çubuklar vakti geldiğinde aynı kolaylıkla kalpten çıkarılıp yerlerine yenileri konuyor.

daha az plütonyum ürettiklerini ortaya koyuyor. Yine de sonuçlar, Radkowsky'nin daha önceki çalışmalarının beklentileri kadar iyimser değil. Radkowsky'nin tohum-ve-çekirdek düzeneklerinin plütonyum üretimini ne kadar düşüreceği konusunda tahmini, %80. CANES sonuçlarındaysa bu oran, bölünmemiş tasarımdaki tohum-çekirdek düzeneği için %60, her yakıt ünitesinde tohum ve battaniye çubuklarının bir arada yerleştirildiği tasarımlar içinse, %70 olarak çıkıyor.

İnceleme ekibinin plütonyum üretimi konusundaki hesapları, Radkowsky'nin atık yakıtın, yüksek düzeyde bir radyoaktif izotop olan ve bu nedenle büyük ölçüde ısı üreten plütonyum-238'i önemli miktarlarda içereceği konusundaki öngörüsünü doğruluyor. Gerçekten de atık yakıttaki Plütonyum-238 miktarı, yaygın kullanımlı uranyum yakıtlarına göre üç-dört kat fazla. Bu durumda, Radkowsky'nin de belirttiği gibi bu izotopun yaydığı ısı, bir nükleer silah yapıp depolamayı son derece güç, hatta olanaksız bir girişim olmaya mahkum ediyor.

Plütonyum-238'in böylesine büyük miktarlarda çıkmasının nedeni, uranyumla çalışan geleneksel tasarımdaki reaktörlere kıyasla toryum santrallerinin daha fazla yakıt "yakmaları" yani enerjiye dönüştürmeleri.

Yalnızca uranyumdan oluşan bir yakıtlı da aynı miktar plütonyum-238 oluşturmak tabii ki mümkün. Ancak, bunun için başlangıçtaki yakıttaki parçalanabilir uranyum-235 oranının, günümüzde benimsenmiş oranlardan daha yüksek olması gerekiyor. Bunun maliyetiyle, böyle bir yakıtı ekonomik olmaktan çıkarıyor.

Sonuç olarak, teknik açıdan ele alındığında inceleme, çeşitli mühendislik sorunlarının üzerinden gelinebileceğini ve reaktörleri toryumla çalıştırmanın nükleer atıklardan silah geliştirmeyi amaçlayan gizli programları boş çıkartacağını doğruluyor.

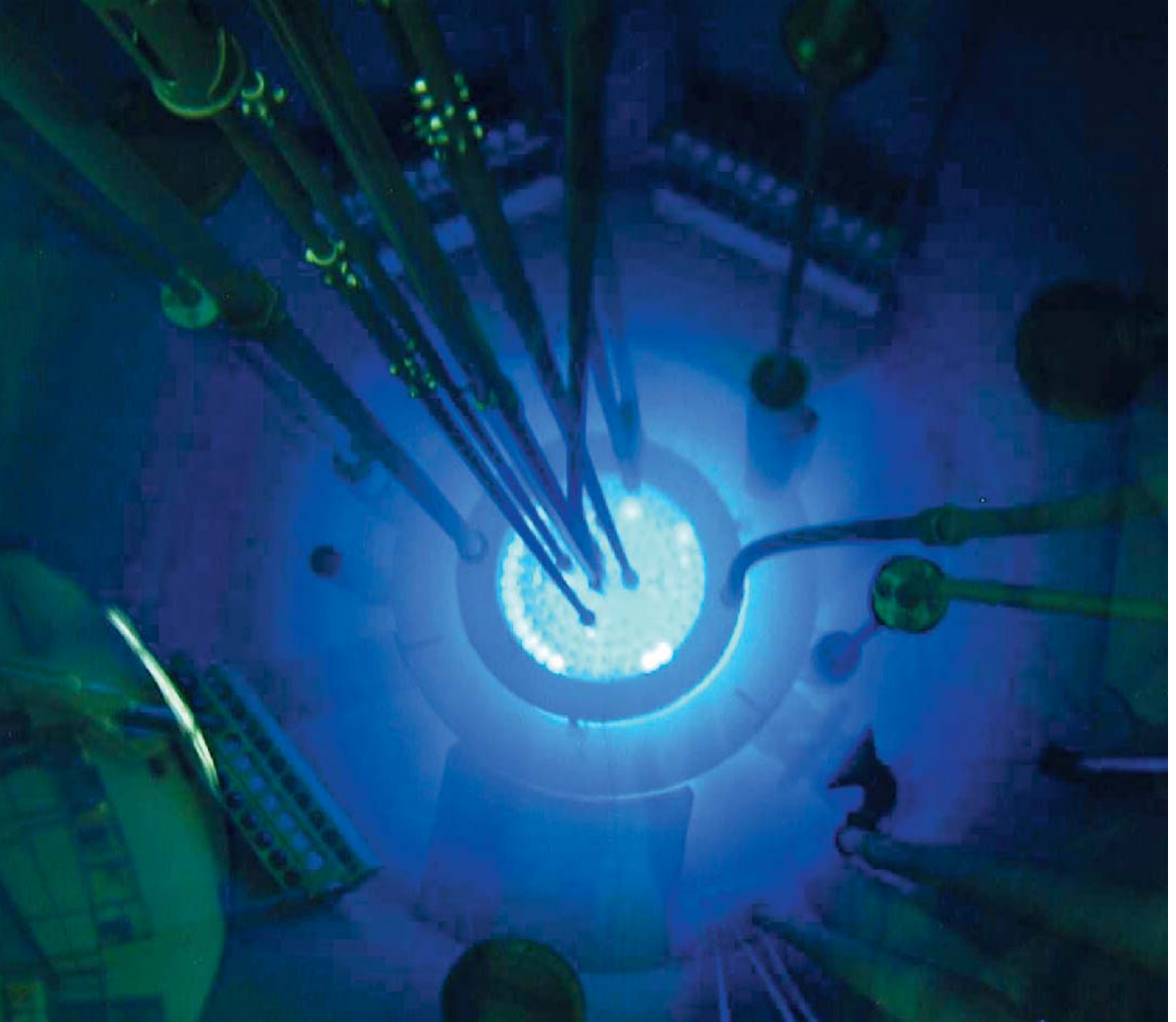
Ancak toryumun ekonomik getiri ve götürüsü konusundaki sonuçlar o kadar net değil: CANES ekibinin hesaplarına göre toryum-tabanlı yakıtlar, sıradan nükleer yakıtların maliyetinin yüzde 10 üzerinde ya da altında olabilir. Aralığın genişliği, tohum olarak kullanılan yakıtın uranyum-235 içeriğinin, sıradan santral yakıtındakinden dört kat fazla olmasının, yakıt üniteleri üretiminin ve az atık üretilmesinin gelecekte depolama maliyetlerinde sağlayacağı düşüşün hesaplanmasındaki güçlüklerden kaynaklanıyor.

Toryum yakıtlarının benimsenip benimsenmeyeceği, elbette yalnızca maliyet hesaplarıyla belirlenecek bir şey değil. Önemli olan, değerlendirme yapılırken toryuma geçişi engelleyecek aşılmasız teknik sorunların olmadığı bilinmesi. Gerçi toryuma geçiş için, eldeki ticari nükleer santrallerde bir takım değişiklikler yapılması zorunlu; ama yepyeni yeni bir teknoloji de gerekmiyor. Ayrıca, gerekli malzemenin (toryum ve zenginleştirilmiş uranyum) reaktörlerde uzun süre deneysel olarak kullanılmış olması da, siyasetçilerin nükleer endüstriye o yönü göstermeleri halinde toryum santrallerinin kısa sürede yaygın kullanım kazanabileceği görüşünü inanılır kılıyor.

Mujid S. Kazimi, "Thorium Fuel for Nuclear Energy", American Scientist, Eylül-Ekim 2003

Çeviri: Raşit Gürdilek

DÖRDÜNCÜ



Nükleer endüstri, çevreci lobi ile on yıllardır süren mücadelede sıkıştığı köşeden çıkmak için sessiz sedasız bir hazırlık içinde. Nedeni küresel ısınmanın giderek yadsınamaz bir olgu haline gelmesi ve bunda insan parmağının, daha doğrusu fosil yakıt kullanımının güçlü izinin belirlenmiş olması. Nükleer endüstri bu fırsattan yararlanmak üzere nükleer enerjinin “temiz enerji” kategorisinde sayılması için bir yandan lobi faaliyeti yürütürken, bir yandan da iki zayıf noktasından biri olan santral güvenliği sorununun çözümüne yönelik “4. kuşak” santral tasarımları geliştirmiş bulunuyor. Günümüzde yaygın olarak kullanılan basınçlı su reaktörlerine alternatif radikal tasarımlar, reaksiyona girmeyen helyum gazıyla soğutulan ve en az altı yıl yakıt yenileme gerektirmeyen reaktörlerden başlıyor. Soğutma suyu dolaşım ve ısı değiştirgeç sistemlerini reaktör kabının içine yerleştirip atmosfere sızma tehlikesinin ortadan kaldıran sistemlerden tutun da; suyu “süperkritik” noktaya kadar ısıtan, ya da kalp-

teki reaksiyonlarda ortaya çıkan nötronları, yakıtı yeniden işlemekte kullanan tasarımlara kadar değişiyor.

Nükleer endüstriyi yıllar süren hareketsizlikten çıkartan etkenler arasında kuşkusuz ABD başkanı George W. Bush’un, geçtiğimiz yıl nükleer endüstrinin canlandırılması ve ülkede 20 yıldan bu yana kurulacak ilk nükleer santrallerin inşası için direktif vermesi. Gerçi Bush geleceğin enerji vizyonu olarak hidrojen enerjisini göstermişti. Ama aslan payının (14-16 milyar dolar) yapılması hedeflenen altı ya da yedi yeni nükleer santrale sübvansiyon olarak ayrılması bekleniyor. Bu yeni santrallerin üreteceği 8400 megawatt güç, halen ABD’de faaliyet halinde bulunan ve ülkenin enerji gereksiniminin beşte birini karşılayan 103 nükleer santralin ürettiği toplam gücün yalnızca %1’ini oluşturacak. Yine de nükleer endüstri bunun sera gazları salınımının ciddi biçimde azaltılmasına katkıda bulunabilmek için gerekli binlerce yeni santral için ilk adım olacağı

konusunda umutlu. Bu umutların sınırsız, ucuz ve her şeyden öte temiz bir enerji vaadeden füzyon teknolojisinin önümüzdeki on yıllar içerisinde ‘ticari maliyetler çerçevesinde kesintisiz üretim’ hedefini yakalayamaması, hidrojen yakıt pillerinin büyük ölçekli üretimini engelleyen teknolojik sorunların ya da otomobillerde sıvı hidrojen kullanımını engelleyen üretim, depolama ve alt yapı sorunlarının kısa sürede aşılamaması halinde yeşereceği açık. Ancak, öyle görünüyor ki, nükleer endüstri, “temiz” kategorisine, bu niteliği tartışılmaz öteki enerji türlerinin sırtında girmenin yollarını da arıyor. Nitekim ABD hükümetinin destekleyeceği santrallerden 1,1 milyar dolar fiyat etiketli bir tanesi de bu amaca yönelik. Idaho eyaletinde kurulması planlanan bir deney santrali, üreteceği enerjiyi kullanarak suyu ayrıştıracak ve yakıt hücreleri için gerekli hidrojeni üretecek. Nükleer enerjinin hidrojen enerjisine sağladığı bu desteğin ardında yatan hedef açık. Günümüzün petrol yakan araba motorları için en

ÜÇÜNCÜ KUŞAK

gerçekçi alternatif hidrojen yakıt hücreleri olduğundan, dolaylı yoldan da olsa nükleer enerji, petrolün yerini alabilecek. Uzmanlar, bunun nükleer enerji için en iddialı uzun dönem hedefi olabileceğini söylüyorlar.

Nükleer endüstri, fosil yakıt kullanımından kaynaklanan karbondioksit salımlarına ciddi bir temiz enerji alternatifi olma iddiasının içini doldurmak için büyük düşünmek ve güç sınavları geçmek zorunda. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden nükleer enerji uzmanı Neil Todreas'a göre karbondioksit salımlarını önemli ölçüde azaltabilmek için 2050 yılına kadar 1000-1500 gigawatt (milyar watt) nükleer güç üretim kapasitesi gerekiyor. Bu da halen dünyada faal durumda bulunan 400'ün üzerinde nükleer enerji santralinin üretebildiğinin 3 ila 5 katı güce anlamına geliyor. Todreas, bu hedefi tutturmanın, günümüzde bilinen uranyum rezervlerinden çok daha fazlasını gerektireceğini de kabul ediyor. Ancak, uzmana göre bu durum nükleer enerji için bir darboğaz değil. Ne zaman bir madenin fiyatı iki katına çıksa, yeni rezerv arayışının hızlanması sonucu arzının 10 kat arttığını vurguluyor.

Yine de nükleer lobi bu hedefi dünya kamuoyuna satabilmekte zorlanacağı benziyor. ABD'deki Üç Mil Adası ve Ukrayna'daki Çernobil kazalarının külleri henüz sıcaklığını korurken,



şimdi bir de felaket senaryolarına nükleer santrallere terörist saldırısı ya da radyoaktif santral atıklarının teröristlerin eline geçme olasılığı eklendi. Tabii bir de nükleer santral atıklarının uzun süreyle güvenli bir biçimde depolanması so-

runu var.

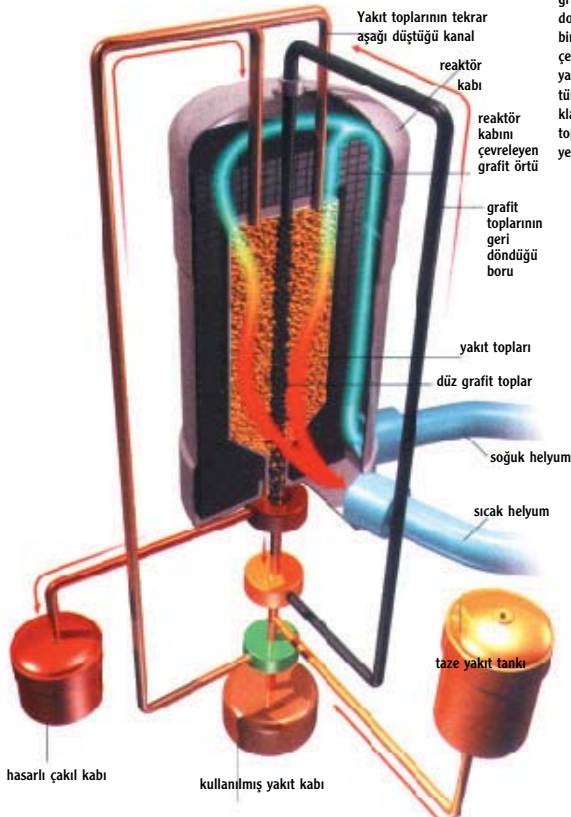
Terörizm tehdidine karşı nükleer santral tasarımcılarının inceledikleri bir kulvar, toryum tabanlı yakıtlarla çalışan reaktörler. Nükleer endüstrinin imaj kabusu olan nükleer atık sorunu için de Bush yönetimi, Nevada eyaletinden gelen protestolar ve açılan davalara karşın, Yucca Dağı altında hazırlanan bir deponun inşasında kararlı görünüyor. Bu arada ABD'nin yanı sıra Avrupa ve Japonya'da da resmi ya da devlet destekli araştırma kurumları, uzun vadeli bir çözüm olarak nükleer santral atıklarını zararsız hale getirecek ya da uzun ömürlü radyoaktif atıkları daha kısa ömürlü hale getirecek dönüştürme (transmutasyon) reaktörleri üzerinde çalışıyorlar.

Kaza olasılığına karşın, başta ABD şirketleri olmak üzere çeşitli ülkelerdeki nükleer santral yapımcıları, farklı yöntemlerle güvenliği öne çıkaran dördüncü kuşak reaktörlerle, piyasa kapma yarışına hazırlanıyorlar. Nükleer reaktörler, parçalanabilir yakıttan sağlanan ısının buhara dönüştürülmesi ve buharın da elektrik üreten türbinleri çevirmesi temelinde çalışıyor. Sıradan reaktörlerin çok büyük bölümü, suyu aynı zamanda parçalanma tepkilerinin gerçekleştiği reaktör kalbini soğutmak için de kullanıyor. Yeni tasarımlardaysa reaktörü soğutmak için gaz, kurşun, erimiş tuz, sodyum ve hatta süperkritik sıcaklıkta su kullanılması da öngörülüyor. Bu dördüncü kuşak reaktör tasarımlarının önemli bir avantajı; uranyumun değişik izotoplarının, hatta toryumu da içeren karma yakıtların kullanımına izin vermesi. Bir diğer yararıysa, kullanılmış yakıt içindeki radyoaktif ürünlerin miktarının azaltılması ve teröristlerin eline geçmesinden korkulan parçalanabilir plütonyum çekirdeklerinin atık içindeki miktarını en aza indirmek.

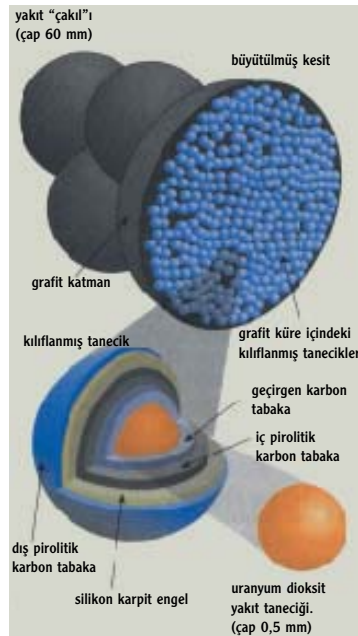
Aman Dikkat!..

Dördüncü kuşak reaktörlerin, nükleer enerji karşıtlarının üzerinde odaklandıkları bir özelliği,

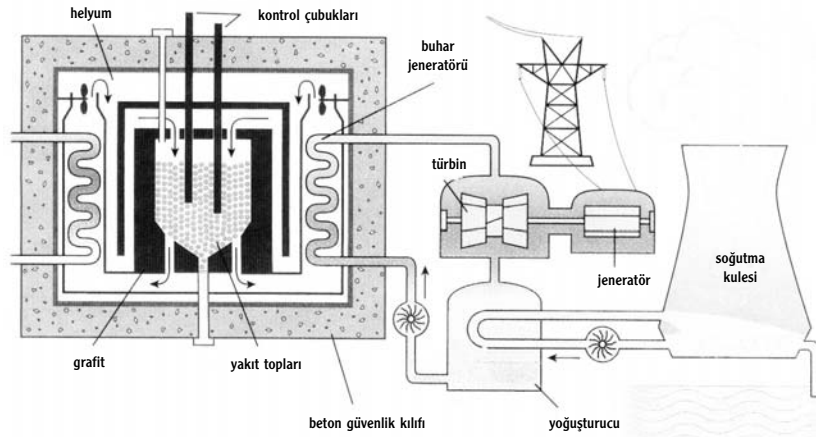
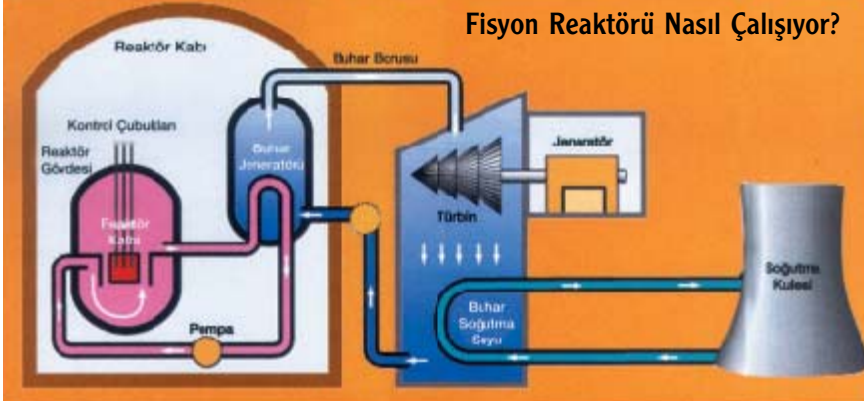
3,5. Kuşak: “Çakıl Yatağı” Reaktörü



Klasik reaktörlerde, uranyumoksit yakıt çubukları, hem nötronları yavaşlatan, hem de reaktör kalbini soğutan su içinde tutuluyor. Çakıl yatağı reaktöründe, uranyumoksit toparakları, bilardo topu büyüklüğünde grafitten bir kılıf içine yerleştiriliyor. Bu “çakıl”lar, grafitte çevrelenmiş, helyumla soğutulan reaktör kalbine dolduruluyor. Otomatik sakız makinelerinde olduğu gibi, ortadaki bir kanaldan aşağı düşen yakıt topları, bir boru aracılığıyla tekrar çevrime alınıyor. Bir yakıt topu, bu şekilde üç yıl içinde 10 tur yapabiliyor. Çakıllardan çıkan nötronların ısıttığı helyum gazı, bir türbin aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülüyor. Tasarımın klasik hafif su reaktörlerine üstünlüğü, kullanılmış yakıtın grafit toprak içinde uzun süre güvenli bir biçimde depolanabilmesi ve yeraltı suyunun aşındırıcı etkilerine karşı, çok daha dirençli olması.



Fisyon Reaktörü Nasıl Çalışıyor?

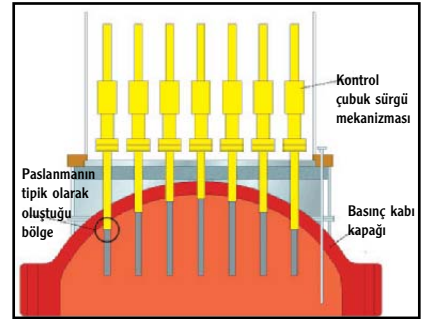


sıradan reaktörlere göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışmaları. Nükleer karşıtı lobinin sözcüleri, bu sıcaklıkların kullanılan malzeme ve ekipmanda önceden öngörülmemiş bazı hasarlara yol açması olasılığını dile getiriyorlar. Görece daha düşük sıcaklıklarda çalışan günümüz reaktörlerinde, özellikle ABD'de olanlarda ortaya çıkan önemli bir sorun, bu korkunun tümüyle temelsiz olmadığını gösteriyor. İlk kez 1991 yılında Fransa'da ortaya çıkan bir hastalık, ABD'deki nükleer reaktörlerin önemli sayıdaki bir bölümünü etkiler.

görünüyor: Reaktör kapaklarının üzerinde bulunan ve içlerinden reaksiyonu durduran ya da yavaşlatan kontrol çubuklarının geçtiği yuvalar üzerindeki çatlaklar ve bunlardan sızan borik asidin yol açtığı korozyon. İki yıl önce Ohio'daki David-Besse reaktöründe böyle bir çatlaktan yıllardır sızdığı anlaşılan asidin, reaktörün 138 atmosfer basınca dayanması gereken karbon çeliği kapağında futbol topu büyüklüğünde bir delik oluşturduğu anlaşılmış. Reaktör içinde yüksek basınç altındaki radyoaktif suyun delikten dışarı-

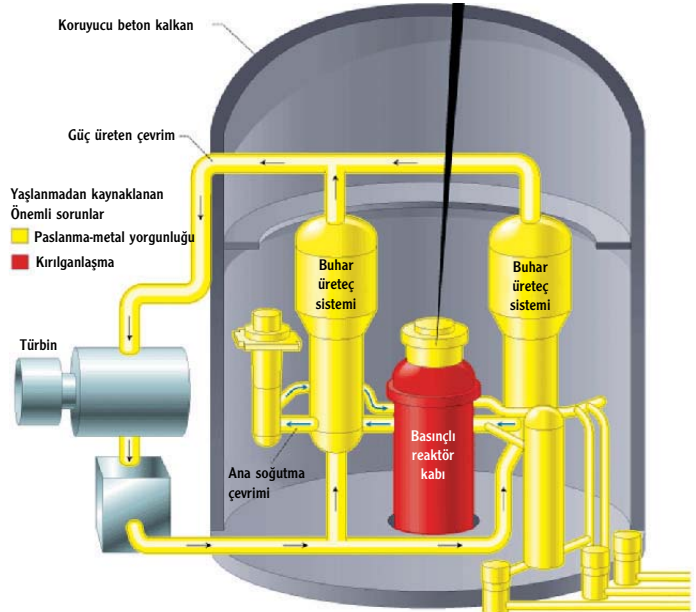
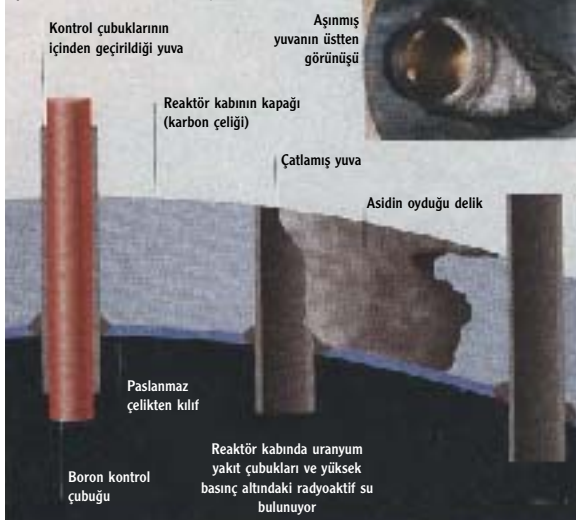
ya fıskırmasını önleyen; karbon çeliğinden yapılmış kapağın tabanında bulunan, yalnızca 1 cm kalınlığındaki paslanmaz çelik astarmış ki, olay farkedildiğinde bu astarın da balonlaşmaya başladığı görülmüş. Reaktör içinde soğutma ve yakıtın parçalanma verimini artırmak için nötronları yavaşlatma görevi yapan suyun reaktörden kaçması, reaktörün aşırı ısınarak erimesi ve yüksek derecede radyoaktif maddelerin atmosfere sızması demek. 1979'da, ABD'nin en büyük nükleer kazasında olan da bu idi. David-Besse reaktöründe yeni bir felaketin son anda önlenmesi üzerine hızlandırılan denetimler sonucu, 14 başka reaktörde çatlaklar bulunmuş. Nükleer santralleri işleten şirketler, şimdi her biri 25 milyon dolar maliyetle 29 reaktörün kapağını değiştirmeyi planlıyor. Santraller yaşlandıkça, bu hastalığın daha da yayılacağı, nükleer karşıtlarınca vurgulanıyor.

Dördüncü kuşak reaktör tasarımlarının bazıları, özellikle bu soruna yanıt getirme iddiasında. Ancak, yeni tasarımlar demek, arkalarında devlet desteği bile olsa bunlar hemen yarın devreye girecek demek değil. Nedeni, radikal tasarımların henüz kağıt üzerinde olması ve ekonomik sorunlar bir tarafa bırakılacak olsa bile, gerçekleştirmeleri için başka bazı teknik sorunların üzerinden gelinmesi gereği. Tabii bunların ekonomik işletim için gerekli koşulları da sağlamaları gerekiyor. Tüm bunlarsa, radikal tasarımdaki reaktörlerin 20 yıldan önce faaliyete geçmesinin güç olduğunu gösteriyor.



Davis - Besse'de Ucuz Atlatılan Felaket

Boron kontrol çubuklarının reaktörün içine indirildiği yuvalardan birinin üst kenarında meydana gelen çatlaktan sızan borik asit zamanla kapak üzerinde bir delik oyuyor. Radyoaktif suyun dışarı fıskırmasını önleyen yalnızca ince çelik kılıf.

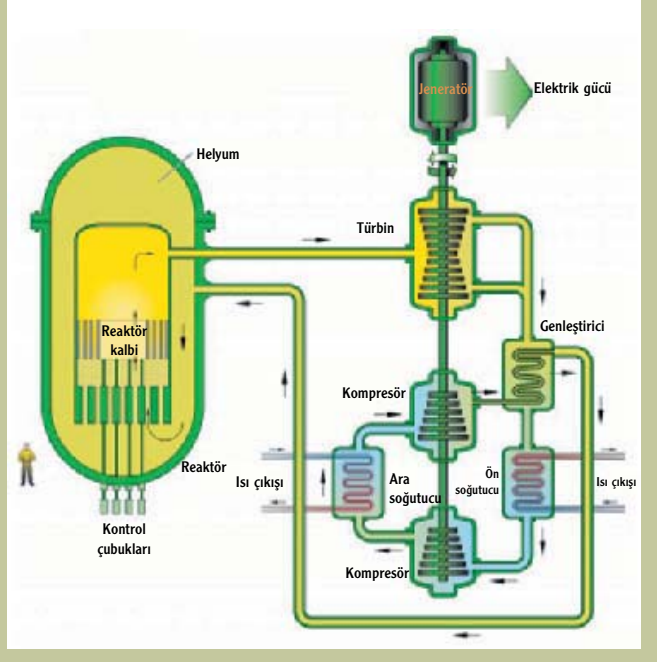


Gaz-Soğutmalı Hızlı Reaktör Sistemi

Gas-Cooled Fast Reactor System - GFR

Sistem, hızlı nötron spektrumlu helyum soğutmalı bir reaktör ve kapalı yakıt döngüsüne sahip. Termal spektrumlu helyum-soğutmalı reaktörlerde olduğu gibi, soğutucu helyum gazının yüksek çıkış sıcaklığı, elektrik, hidrojen ya da işletme ısısında yüksek verim sağlıyor. Tasarımdaki reaktör, 288-megawatt'lık bir helyum-soğutmalı sistem. Yüksek termal verim için direkt Brayton döngülü gaz türbini kullanarak 850°C çıkış sıcaklığıyla çalışıyor. Çok yüksek sıcaklıklarda çalışma ve parçalanma ürünlerini etkili biçimde tutma kapasitesine sahip çeşitli yakıt formlarıyla çalışabilir. Örneğin; kompozit seramik yakıt, ileri tasarımda yakıt karışımları, ya da seramikle kaplanmış aktinid bileşimleri gibi. Kalp, prizmatik bloklar ya da iğne veya plaka tabanlı yakıt blokları kullanımına göre tasarlanabilir. Tasarımda ayrıca santral sahasında atık işleme ve yeniden üretme tesisi de bulunuyor.

GFR, elektrik üretimi için doğrudan döngülü bir helyum türbini kullanabilir, ya da isteme bağlı olarak, süreç ısısını hidrojenin termokimyasal yolla üretimi için kullanabilir. Hızlı bir spektrum ve aktinidlerin yeniden işlenmesi sayesinde, GFR uzun yarılanma ömürlü nükleer atık üretimini en aza indiren bir tasarım. GFR'nin hızlı spektrumu, (seyreltilmiş uranyum da dahil) mevcut parçalanabilir ya da üretken yakıtları, tek kullanımlı yakıt döngülerine sahip termal spektrum gaz reaktörlerine kıyasla çok daha verimli kullanma olanağı sağlıyor.



Ara Sıcaklar...

Ancak, geleneksel reaktör yapısına göre yakın bir tasarım, şimdiden ringe atılmış görünüyor. Bu, küçük ölçekteki modelleri Almanya ve Çin'de denenmiş olan "çakıl yataklı reaktör". Güney Afrika hükümeti, deneme amaçlı değil, ilk kez büyük ölçüde güç üretecek olan 1200 megawatt kapasiteli "çakıl yataklı" santralinin inşasını başlatmış durumda. Çakıl yataklı reaktörlerin önemli bir özelliği, modüler yapıda olmaları. Bunun anlamı, her biri 120 megawatt güç üretmek üzere tasarlanmış reaktörleri, gereksinimlerinize göre istediğiniz sayıda yan yana koyarak, daha küçük ya da daha büyük santraller kurabilmeniz.

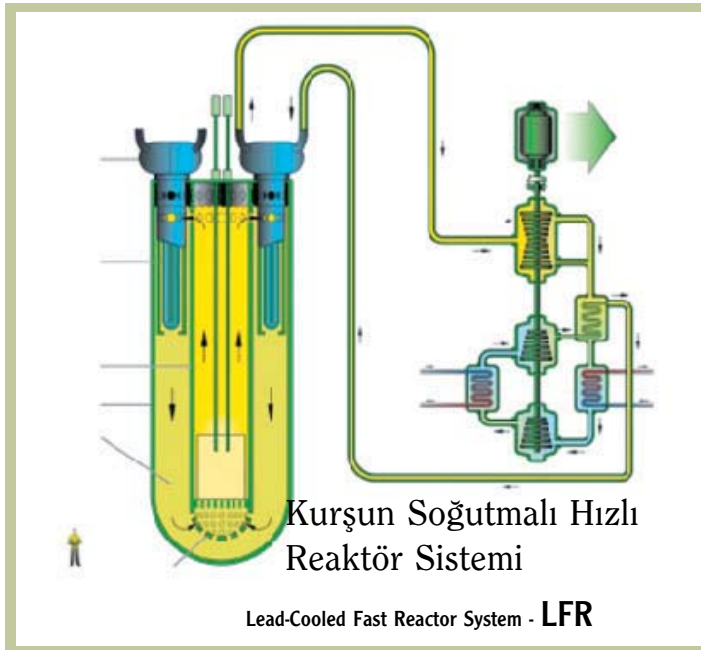
Dünyada halen çalışan santrallerin büyük çoğunluğunda kullanılan basınçlı su reaktörlerinde yakıt, uzun çubuklar içine yerleştirilmiş tablet bi-

çimli kapsüllerden oluşur. İçinde çok sayıda kapsülün dizili olduğu binlerce çubuk, reaktör kalbine yerleştirilir. Yakıtta meydana gelen nükleer tepkimelerin ürettiği ısı, reaktör içinde yüksek basınç altında dolanan soğutma suyunca alınır ve reaktör dışındaki bir ısı değiştirgecinde, daha düşük basınçlı buhara aktarılır. Buhar da bir türbin içinde genişler ve bir jeneratörü çevirerek elektrik üretir. Geleneksel reaktörlerdeki yakıt çubuklarının her iki yılda bir, bir bölümünün değiştirilmesi gerekir. Bu da nükleer santralin bir süre devre dışı kalması anlamına gelir.

Çakıl yataklı reaktöre yüksek sıcaklıkta çalışan bir gaz soğutmalı reaktör. Reaktöre adını veren "çakıllar" da, ikide bir yakıt yüklemesini ortadan kaldırıyor. Bir kere, bu çakıllar plajda gördüklerimize benzemiyorlar. Yaklaşık bir bilardo topu büyüklüğünde (6 cm çapında)

grafit küreler. Grafit kabuğun içindeyse herbiri bir haşhaş tohumu büyüklüğünde 15.000 adet küçük uranyum dioksit tanecığı bulunuyor. Taneciklerin özelliği, herbirinin, parçalanma (santraller) ürünlerini hapseden yüksek yoğunlukta karbondan yapılmış birkaç kat kılıfla çevrili olmaları. Bu "pyrolitik" kılıflar, (sıkıştırılmış karbon) üzerine metal atomları püskürtülerek hazırlanıyor. Böylece hem dayanıklılık hem de esneklik kazanan kılıflar, birbirinin üzerinden kayıp dururken kolayca aşınmadıkları gibi, yüksek sıcaklıkta biçimlerini değiştirebiliyor ve çatlayıp içlerindeki yakıtı saçmıyorlar.

Bir reaktör modülüne, grafit kaplı ve içi tıka-basa tanecik dolu toplardan ya da "çakıllardan" 330.000 tane konuyor. Bunlara ek olarak 185.000 tane de içi boş "çakıl" konuyor. Bunların göreviyse reaktör içindeki ısı dağılımını eşit-



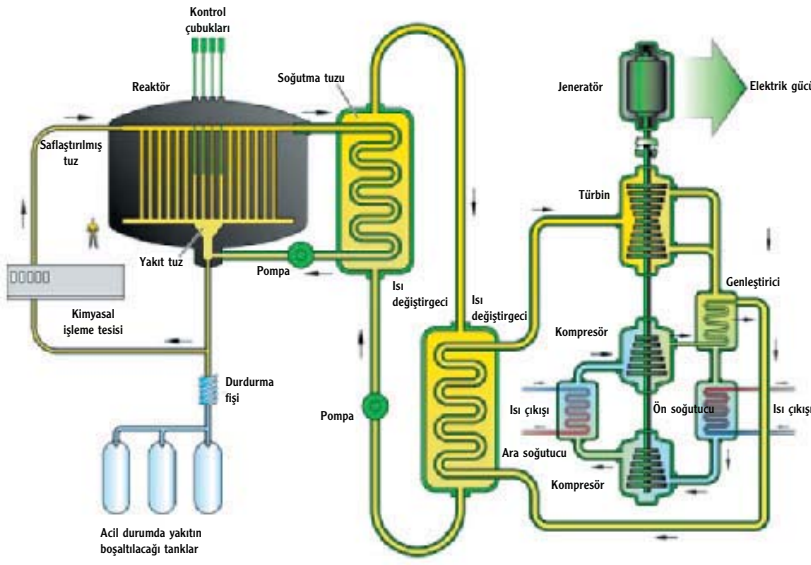
Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör Sistemi

Lead-Cooled Fast Reactor System - LFR

Üretken uranyumun işlenmesi ve aktinidlerin etkin biçimde azaltılması için hızlı-spektrumlu, kurşun ya da kurşun/bizmut ve yüksek erime yetenekli metalle soğutulan bir reaktörle, kapalı bir yakıt döngüsünden oluşuyor. Sistem, merkezi ya da yerel yakıt döngü tesisleriyle aktinidlerin tümüyle yeniden işlenmesini sağlayan bir yakıt döngüsüne sahip. Reaktörler, isteme bağlı olarak 50-150 megawatt'lık, uzun süre yeni yakıt gerektirmeyen bir güç kaynağı, 300-400 megawatt gücünde bir modüler sistem (şekilde) ya da tek üniteli 1200 megawatt'lık büyük bir santral olarak inşa edilebiliyor. Üretken uranyum ya da transuranik elementler içeren yakıt, metal ya da nitrid temelli olabilir. LFR, doğal konveksiyon yoluyla soğuyor. Soğutucunun 550 °C olan reaktör çıkış sıcaklığı, daha ileri teknolojiye malzeme kullanımıyla 800 °C'ye kadar yükselebilir. Yüksek sıcaklık, hidrojenin termokimyasal yoldan eldesi için gerekli.

LFR güç kaynağıysa, çok uzun yakıt yenileme aralıklarıyla (15-20 yıl) ve kapalı bir yakıt döngüsüyle çalışan, bir kaset kalp ya da yenilenebilir reaktör modülüne sahip bir güç üretim düzeneği. Performans özellikleri; küçük ağırlara elektrik üretimine yönelik olması, ya da nükleer enerji sistemlerinde entegre bir yakıt döngü altyapısı da kurmak istemeyen gelişme yolundaki ülkelerin gereksinimlerine yanıt vermek üzere tasarlanmış bulunması. Bu güç kaynağı, dağıtım amaçlı elektrik ya da, örneğin hidrojen gibi öteki diğer enerji kaynaklarının veya içme suyunun üretiminde kullanılabilir.

Eriyik Tuz Reaktör Sistemi Molten Salt Reactor System - MSR



Sistem içinde dolaşan eriyik tuz karışımıyla beslenen bir 'termal üstü spektrum' (epitermal) reaktörüyle (aşağıdaki şekil) nükleer güç üretmek için tasarlanmıştır. Sistem aktinidleri tümüyle yeniden işleyen bir yakıt döngüsü içeriyor. MSR sisteminde kullanılan yakıt, sürekli dolanan sodyum ile, zirkon ve uranyum floridlerinden oluşan bir karışım. Eriyik tuz yakıtı kalp içindeki grafit kanallardan geçerek epitermal bir spektruma yol açıyor. Eriyik tuzda oluşan ısı, bir ara ısı değiştirgeciyle ikincil bir soğutma sistemine, daha sonra da üçüncü bir ısı değiştirgeciyle güç çevrim sistemine aktarılıyor. Güç santrali 100 megawatt güç üretim kapasitesine sahip. Sistem, istenirse 800°C'ye kadar yükseltilebilen, 700°C'lik bir soğutucu çıkış sıcaklığıyla çalışıyor. Kapalı yakıt döngüsü, plütonyum ya da küçük aktinidlerin etkin biçimde yakılması için de ayarlanabiliyor. MSR'nin sıvı yakıtı, plütonyum gibi aktinidlerin eklenmesine uygun ve yakıtın fabrikada yapımına gerek bırakmıyor. Aktinidler ve parçalanma ürünlerinin büyük çoğunluğu, sıvı soğutucu içinde floridler oluşturuyor. Erimiş florid tuzları, mükemmel ısı transfer yeteneğine sahip. Ayrıca bunların düşük buhar basınçları, reaktör kabı ve borulardaki gerilim düzeylerini de azaltıyor.

lemek ve uranyumun parçalanması sonucu serbest kalan nötronları yansıtıp yavaşlatarak tepkilerin şiddetini azaltmak.

Çakıl yataklı reaktörler, 900 °C gibi, basınçlı su reaktörlerinin çalışma sıcaklığından çok daha yüksek bir sıcaklıkta çalışmak üzere tasarlanmış. Bu nedenle, termal verimi iyi ve enerjisinin büyük bölümünü elektrige dönüştürebiliyor. Soğutma için helyum gazı kullanılıyor. Helyum, sıcaklığı iyi ileten bir element ve suyun aksine, öteki malzemelerin paslanarak aşınmasına yol açmıyor.

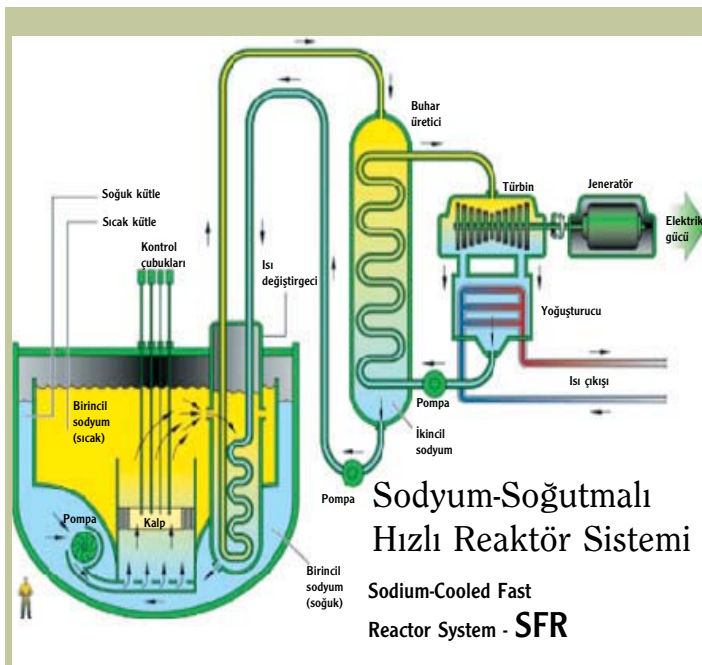
Bu reaktörlerin önemli bir avantajı da, reaktörün kapatılmasına gerek olmaksızın yakıtın sürekli olarak yenilenebilmesi. Yakıt yandıkça, "çakıllar" bir ciklet makinesinde olduğu gibi yavaş

yavaş aşağı doğru iniyor ve dakikada bir tane olmak üzere reaktör kalbinin altından dışarı çıkıp, sonra yeniden reaktörün tepesinden içeri giriyorlar. Her top, reaktör kalbi içinden on kez geçecek şekilde tasarlanmış ve çakıl yataklı reaktörlerin üreticisi Eskom şirketi, reaktörün yeni yakıt yüklenmeksizin 6 yıl kadar çalışabileceğini söylüyor.

Nihayet, çakıl yataklı reaktörün tasarımcılarının üzerine basa basa vurguladıkları bir başka özellik de, "pasif güvenlik" sistemi. Yukarıda da değinildiği gibi, geleneksel basınçlı su reaktörlerinde en büyük tehlike, herhangi bir su kaybı nedeniyle reaktörün aşırı ısınması ve çevreye radyasyon saçması. Oysa, çakıl yataklı reaktördeki helyumun tümü kaçsa bile reaktör yalnızca du-

rup, doğal bir biçimde sıcaklığını yitirmeye başlıyor. Bu nedenle de reaktörün, geleneksel reaktörlerde olduğu gibi betondan bir kubbe içine yerleştirilmesine gerek olmuyor. Acil bir durum nedeniyle ya da bakım için reaktörü kapatmak gerektiğinde reaktör kalbine kontrol çubuklarının sokulması yeterli.

Tüm bu çekici özelliklerine karşın çakıl yataklı reaktörlerin, nükleer endüstrinin hazırlandığı geleceğe birinci mevki biletle gitmesi zor gibi görünüyor. Önemli bir sorun, reaktörün fiyatı. Uzmanlar, Güney Afrikalı şirket bu reaktörü, örneğin İngiltere'deki reaktörlerin yarı fiyatına mal etse, güvenliğin dünya standartlarının üzerine yükselse ve santrali işletme masraflarını Amerika'dakilerin seviyesine düşürse bile, bunların hâ-



Sodyum-Soğutmalı Hızlı Reaktör Sistemi

Sodium-Cooled Fast Reactor System - SFR

Hızlı spektruma sahip sodyum soğutmalı bir reaktör ve kapalı yakıt devresinden oluşuyor. Aktinidlerin kontrolü ve üretken uranyumun çevrimi için uygun. Yakıt döngüsü, iki seçenekle aktinidleri yeniden işliyor. Birinci seçenek, uranyum-plütonyum-küçük aktinid-zirkon metal bileşimi yakıtla çalışan ve reaktörle entegre edilmiş bölmelerde pirometalurjik süreçlere dayanan bir yakıt döngüsüyle desteklenen 150 -500 megawatt arası güç üretmek için tasarlanmış orta ölçekte bir reaktör. İkinci seçenekse, birden çok reaktöre hizmet veren ileri sıvı işleme süreçleriyle çalışan merkezi bir yakıt döngüsüyle desteklenen, yakıt olarak uranyum-plütonyum oksitlerinin karışımını kullanan, sodyum soğutmalı, orta-yüksek ölçekli (500-1500 megawatt) bir reaktör. Her iki tipte reaktörün soğutucu çıkış sıcaklığı 550°C.

SFR, başta plütonyum ve diğer aktinidler olmak üzere yüksek düzeyde radyoaktif atıkların yok edilmesi ya da azaltılması için geliştirilmiş bir tasarım. Sistemin önemli güvenlik avantajları arasında; uzun bir termal tepki süresi, soğutucunun kaynama noktasına varmasını önleyecek bir çalışma sıcaklığı, atmosfer basıncı civarında çalışan bir ana sistem ve ana sistemdeki radyoaktif sodyum ile güç üreticisindeki su ve buhar arasında dolanan bir ara sodyum sistemi sayılabilir. Yatırım maliyetini düşürecek yeniliklerle, sistem elektrik üretimi için pazar bulabilir görünüyor. SFR'nin hızlı spektrumu, (seyreltilmiş uranyum da dahil) mevcut parçalanabilir ya da üretken yakıtları, tek kullanımlı yakıt döngülerine sahip termal spektrum gaz reaktörlerine kıyasla çok daha verimli kullanma olanağı sağlıyor.

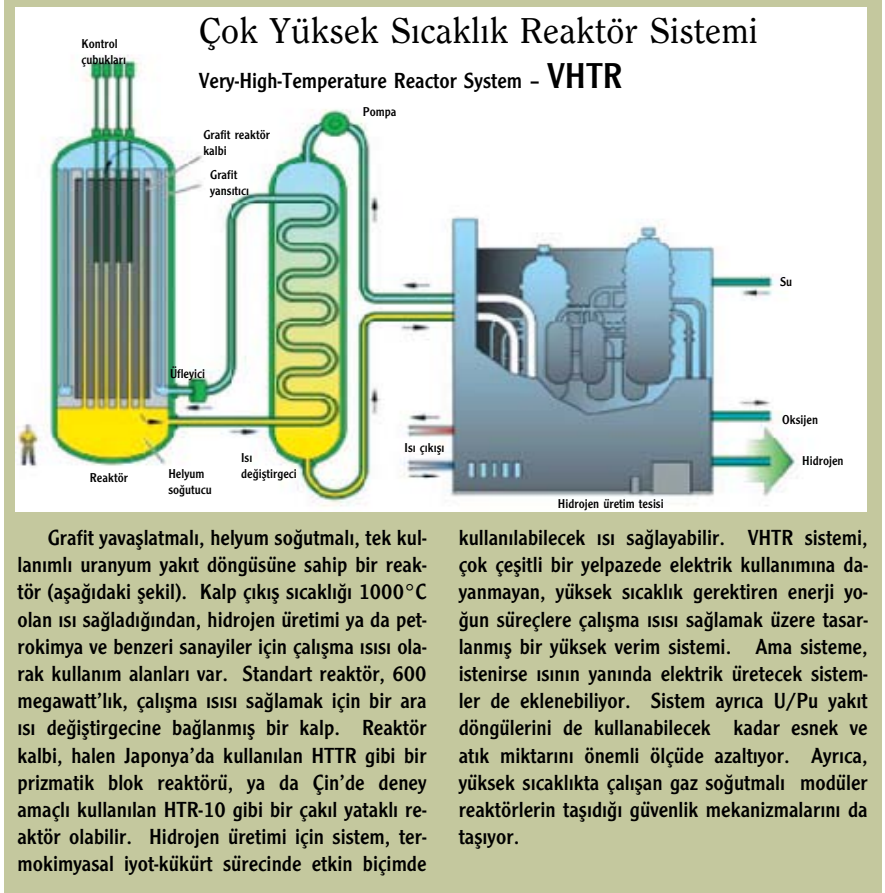
lâ doğal gaz santrallerinden daha pahalı olacağını vurguluyorlar. Santralin yüksek teknolojisi de, iş maliyet hesaplarına geldiğinde pazarlamacıların karşısına dikiliyor. Nedeni, 10 reaktör modülünden oluşan bir enerji santrali için her yıl, her biri kusursuz hazırlanmış 10 milyar yakıt tanecığının gerekmesi. Bu, aynı kapasitede bir basınçlı su reaktörü için gerekli yakıt kapsülü sayısının bin katı.

IV. Kuşak

Artıları, eksileriyle çakıl yataklı reaktörün, geleneksel basınçlı su reaktörlerinden radikal ölçüde farklı özelliklere sahip olduğunu gördük. Yine de bu tasarım, IV. Kuşak Uluslararası Forumu (Generation IV International Forum – GIF) diye adlandırılan uluslararası bir uzmanlar komitesince belirli ölçütlere göre seçilen 6 değişik tasarım arasında girebilmiş değil.

Komite nin seçimini yaparken üzerinde durduğu ölçütler arasında; yaratıcı çözümlerle sağlanacak uzun işletme ömrü, kabul edilebilir işletme maliyetleri, proje riskini azaltacak modüler tasarım gibi ekonomik öğelerin yanı sıra, “sürdürülebilirlik” ve “güvenlik” ağırlıklı önem taşıyor. Komite, sürdürülebilir nükleer enerjinin, kirlenici enerji kaynaklarına alternatif olarak çevreye olumlu bir etki yapması gerektiğinin altını çizmiş bulunuyor. Bu arada, nükleer enerjiyle üretilmiş hidrojen de önemli hedefler arasında sayılıyor. Ayrıca, nükleer atıkların uzun sürelerle (1000 yıl ve ötesi) yer altı depolarında güvenli biçimde saklanabilmesi ve atıkların, depolanmadan önce (dönüştürme yoluyla) yarılanma ömürlerinin ve zehirliliklerinin önemli ölçüde azaltılması da vurgulanan öncelikler arasında. Nükleer enerjiden gelecek kuşakların da yararlanabilmesi için yakıt kaynaklarının hızlı tükenmesini engellemek üzere, kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi ve U-238’in parçalanabilir yakıtla dönüştürülmesi de “sürdürülebilirlik” için gereken adımlar olarak sayılıyor.

Komite ayrıca, reaktör ve santrallerin güvenli biçimde işletilebilmesi için tasarımların içsel

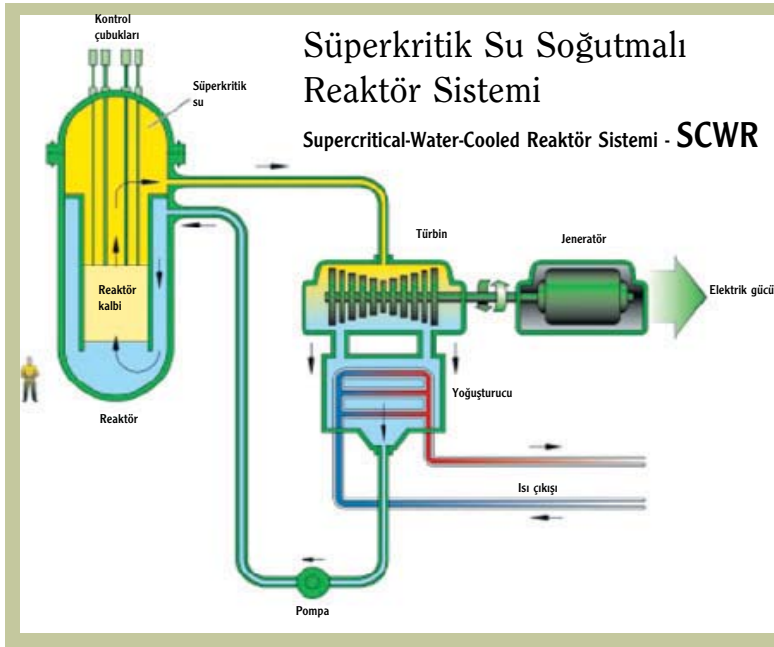


güvenlik mekanizmalarının, konunun uzmanı olmayanlara da güven verici biçimde geliştirilmesi, böylece kamuoyunun nükleer enerjiye güveninin artırılması gereğine de işaret ediyor. Nihayet 4. kuşak için konulan ölçütler arasında parçalanabilir radyoaktif malzemenin nükleer silah yapımı için kullanılması ya da teröristlerin eline geçmesini önlemek için reaktör tasarımlarında içsel engeller ve santrallerin harici güvenliğiyle ilgili etki önlemler de yer almış bulunuyor.

Bu gereksinimlere yanıt verdiği sonucuna varılan 6 adet IV. kuşak tasarım, çerçevelerde özetleniyor.

Derleyen: Raşit Gürdilek

Kaynaklar
Durrani, M., “New Designs on Nuclear Energy”, Physics World, Temmuz 2002
Chandler, D., “America Steels Itself to Take the Nuclear Plunge”, New Scientist, 9 Ağustos 2003
Overview of Generation IV Technology Roadmap, Roadmap Background RQ07-01, 18 Eylül 2002
<http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/nov01/nrecof1.html>



yüksek sıcaklıkta, yüksek basınçta suyla soğutulan reaktör (şekilde), suyun termodinamik kritik noktasının (374°C, 22,1 megapascal) üzerindeki (süperkritik) sıcaklıkla çalışıyor. Süperkritik soğutma suyu, günümüzde kullanılan hafif su reaktörlerinininkinden üçte bir daha fazla termal verim sağlamanın yanı sıra, santralin kararlılığının basitleştirilmesine de olanak tanıyor. Santral kararlılığının basitleştirilmesinin nedeni, soğutucunun reaktör içinde faz değişikliğine uğramaması ve doğrudan güç çevrim sistemine bağlanabilmesi. Standart sistem, 1700 megawatt gücünde bir reaktör. Çalışma basıncı 25 Mpa. 510°C'lik reaktör çıkış sıcaklığı, 550°C'ye yükselebilir. Kullanılan yakıt, uranyum oksit. Basitleştirilmiş kaynak su reaktörlerindeki benzer pasif güvenlik özellikleri taşıyor.

SCRW sistemi, temel olarak verimli elektrik üretimi için tasarlanmıştır. Ancak, kalp tasarımında iki ayrı seçenekle aktinid azaltmak için de kullanılabiliyor. SCRW termal ya da hızlı bir spektruma sahip olabilir. Bu nedenle de iki yakıt döngü seçeneğiyle çalışabilir. Bunlardan birincisi, hızlı spektrum reaktörüyle çalışan açık yakıt döngüsü, ikincisiyse, hızlı spektrum reaktörüyle çalışan ve aktinidleri yeniden işlemek için merkezi konumlu sıvısal işleme tesisi içeren kapalı yakıt döngüsü.

SİMYANIN



Glasgow'daki Strathclyde Üniversitesi'nden Ken Ledingham, 2003 yazının ortalarında gururla açıklıyordu: "Geçen gün bir deney gerçekleştirdik ve altını cıvaya dönüştürdük!.." İskoç lazer uzmanı marifetini ortaçağda duyursaydı, loncasından kovulacağından kuşku olmazdı. Çünkü simyacıların yüzyıllardır yapmaya çalıştıkları bunun tam tersiydi ve bu hedef bir türlü gerçekleştirilemediği için meslek zamanla gözden düştü ve sonunda tümüyle yok oldu.

Şimdiyse simya, sürpriz bir dönüşün işaretlerini veriyor. Günümüz simyacıları artık bodrumlardaki atölyelerde engizisyon soruşturmacılarından kaçmak ya da halktan büyücü damgası yemek korkusu şöyle dursun, pahalı aygıtlarla donatılmış devlet laboratuvarlarında büyük bütçelerle çalışıyorlar. Üstelik simyayı gerçek anlamında uygulayarak.

Geçmişteki simyacılar, tüm çabalarına karşın altın elde edemezlerdi. Nedeni basit: Yaptıkları simya değil kimyaydı!.. Kimyaysa, yalnızca atomların yüzeyindeki elektronları etkiler. Gerçek simya, yani bir elementi başka bir elemente dönüştürmek ya da doğada bulunmayan yeni bir element yaratmaksa, atomların çekirdeklerini değiştirmeyi gerektiriyor. Yani, çekirdeklere ya fazladan proton ya da nötron eklenecek, ya da bunlardan bazıları çekirdekten koparılıp çıkartılacak. Çekirdekteki protonların sayısını değiştirmek, bir elementi başka bir elemente dönüştürür. Nötronların sayısıyla oynamaksa, atomların kararlılık derecelerini etkiler, yani kararlı bir izotopu kararsız hale getirir ya da bunun tam tersini yapar.

İşte çağdaş simyanın yıldızının parlamasına

yol açan da vadettiği büyük potansiyel. Altın külçeleri, simyacıların ağır metalleri başka ağır metallere dönüştürmeleri için kesenin ağzını açmaya başlayan hükümetlerin akıllarındaki belki en son şey. Asıl hedeflenen, dönüştürme (transmutasyon) denen modern simya yöntemleriyle tehlikeli nükleer atıkları bir çırpıda zararsız hale getirmek.

Atıkları bu derece önemli bir sorun yapan, bazılarının tehlikeli ısınım yayma özelliklerini çok uzun yıllar sürdürmeleri. Örneğin, teknyum-99: Bu izotop, uranyumun parçalanmasıyla ortaya çıkan radyoaktif bir yan ürün. Dünyadaki reaktörler bu izotoptan her yıl toplam altı ton üretiliyorlar. Yarılanma ömrü (taşıdığı ısınım düzeyinin yarıya inmesi için gereken süre) 200.000 yıl. Suda çözüldüğünden gıda zincirine de hızla bulaşabiliyor. Nükleer endüstri yüzünden okyanuslardaki birikimi, 1960'lardan bu yana 100 kat fazla artmış.

Bunların dışında nükleer silahlar için üretilen, ya da silahsızlanma antlaşmaları sonucu devreden çıkarılan silahlardan alınıp depolanması gereken plütonyum ve uranyum gibi binlerce ton yüksek düzeyde radyoaktif madde var. Başta ABD olmak üzere birçok ülke ellerindeki bu atıkları yeraltında inşa edilecek depolarda saklamanın planlarını yapıyorlar. Uzmanlara göre bu atıkların saklanması gereken süreleri, yarılanma ömürlerinin onlarca katıyla çarpmanızı gerekiyor. Örneğin, Avrupa Parçacık Fiziği Laboratuvarı CERN'de dönüştürme uzmanı Robert Klapisch, "Eğer elinizde yarılanma ömrü 10.000 yıl olan bir şey varsa, bir kere bunu 1 milyon yıl güvenli biçimde saklamanın yollarını bulmanız gerekir"

diyor. "Üstelik, bunların yeniden biyosfere (yaşam küreye) dönmelerini istemiyorsanız, deprem olasılığını da ciddi biçimde hesaba katmalısınız."

Ağır çekirdeklerin kısa ömürlü radyoaktif ürünlere bölünmeleri, uzun ömürlü izotopların da kararlı elementlere dönüştürülmesiyle bir yeraltı atık saklama deposunun dayanması gereken süreyi birkaç milyon yıldan, birkaç yüz yıla indiriyor.

Modern simyanın büyük potansiyelini daha iyi anlamak için teknyum-99'a geri dönelim. Dizginlenemez gibi görünen bu canavarın hakkından gelen, tek bir nötron. Teknyum-99'a bir nötron ilave edince teknyum-100 elde ediyorsunuz. Bu izotopun yarılanma ömrüye yalnızca 15,8 saniye! Yani siz daha radyoaktivite düzeyini ölçmeye fırsat bulamadan tümüyle kararlı ve zararsız bir madde olan rutenyum-100'e bozunuz. Dönüştürmenin bir yolu da, elementlere ilave bir nötron yutturup başka bir elemente dönüştürmek yerine, ağır ve kararsız çekirdekleri ki, bunlara aktinid ya da trans-uranik elementler (TRU) deniyor (Ör: plütonyum, uranyum, amerikyum), bir nötronla parçalayıp kararlı, daha küçük çekirdeklere bölmek.

Bu yöntem, nükleer enerjinin istenmeyen yan ürünlerini ortadan kaldırmanın çekici bir yolu olarak bir süredir gündemde. Elektrik enerjisinin %80'ini nükleer güç santrallerinden sağlayan Fransa'da araştırma kurumları, yasayla dönüştürme teknolojisini incelemekle yükümlü kılınmış bulunuyorlar. ABD de, bu tür bir simya programını aktif biçimde sürdürüyor. İngiltere de böyle bir program başlatıp başlatmama konusunda karar aşamasında. Ayrıca Avrupa'da ve Japonya'da

DÖNÜŞÜ

da dönüştürme araştırmaları yürütülüyor ve yenileri planlanıyor.

Çetrefil Bir Sorun

Nükleer atık sorununa çözüm, özellikle ABD için acil. Nedeni 2003 yılı itibarıyla ülkedeki nükleer enerji santrallerinde 40.000 ton kullanılmış atık yakıt birikmiş olması. Bu miktarın 2035 yılında 105.000 tona yükselmesi bekleniyor. Hükümetin, katı yakıt çubukları biçimindeki bu atıkları depolamak için bir yol bulması gerekiyor. Çünkü bu atıklar geçici olarak nükleer santrallerin soğutma havuzlarında tutuluyor ve ülkede bulunan 131 nükleer santralin soğutma havuzu da hemen hemen dolmuş gibi. Ülke nüfusunun yaklaşık yarısı, bu nükleer tesislere 120 kilometre daha yakın yerleşim birimlerinde yaşıyor. Ticari santral atıklarına ek olarak ABD'nin güvenli bir biçimde saklamak zorunda olduğu yüksek düzeyde radyoaktif atıklar da var. 1970'li yılların sonlarından itibaren ABD, nükleer silah yapımında kullanmak üzere, resmi kurumlarınca işletilen nükleer reaktörlerin atık yakıtlarını yeniden işleme-ktedir. Yeniden işleme, kullanılmış nükleer yakıtı kimyasal işlemlere tabi tutarak içindeki parçalanabilir uranyum ve plütonyumu ayırma işlemine deniyor. Yeniden işlemin yan ürünüyse, oldukça yüksek düzeyde ısıtım yayan, cıvık çamur kıvamında bir atık. Bunların ancak özel olarak hazırlanmış, paslanmaz çelikten varillerde depolanmasına izin veriliyor. Ayrıca, devre dışı kalmış nükleer silah fabrikalarından, ya da silahsızlanma antlaşmaları gereği yok edilmiş ya da edilecek savaş başlıklarından gelen yüksek düzeyde atık da var. Bunlar, güvenli ve uzun süreli depolanmayı gerektiren 22.000 varil dolusu tehlikeli atık anlamına geliyor. ABD'de üretilen tüm nükleer atıkları bir araya getirip depolamaya kalksanız, bunlar bir futbol sahası büyüklüğünde bir alanı kaplar ve yaklaşık 5 metre yüksekliğinde bir yapı oluşturur.

Bu nükleer atıkların, patlama tehlikesi yok. Örneğin, bunları taşıyan bir trende ya da tankerde bir patlama meydana gelse bile, bunların bir zincirleme tepkime oluşturmaları mümkün değil. Ayrıca, çoğu metal formunda olduğu ve uzun dönemli saklama için seramik ya da cam haline getirildiği için yanma tehlikesi de yok. Asıl tehlike, bunların içinde tutuldukları kalın beton, çelik ve kurşun kılıfları aşındırarak, ya da bunların kaza eseri parçalanması sonucu yer altı sularına ve dolayısıyla ırmaklara, denizlere, hatta içme suyu şebekelerine sızmaları.

Nükleer mühendisler ve hükümet yetkilileri, bu atıkların güvenli biçimde ortadan kaldırılması için çeşitli seçenekler üzerinde durmuş, ancak sonunda tek çözümün, yeryüzünün derinliklerinde, kaya katmanlarının altında saklamak olduğu toprak altında saklanması gerektiği üzerinde birleşmiş bulunuyorlar. (Bkz: Çerçeve).

Dönüştürme tekniği, toprak altında saklanma zorunluluğunu ortadan kaldırmıyor. Ancak tehlikeli atıkların miktarını ve yarılanma ömürlerini kısaltıyor.



Dönüştürme: Teknetyum 99 son derece uzun ömürlü ve tehlikeli bir parçalanma ürünü. Ancak, bir nötron eklenmesiyle tümüyle zararsız hale geliyor. Bu işlem, sıvı kurşunla soğutulan dönüştürme reaktöründe gerçekleştiriliyor (sağda).

Umut Kaf Dağının Ardında mı?

Dönüştürmenin ilk olumlu deneyleri bir süre- dir gerçekleştiriliyor. Ancak, teknoloji henüz de- neme aşamasında. Ayrıca ölçek ve maliyet so- runlarının aşılmasına çalışılıyor. Dönüştürme alanındaki araştırmalar iki rakip kulvarda yürü- yor: Birincisi, lazer teknolojisi; ikincisiye radyo- aktif atıkların proton ya da nötronlarla bombar- dmanı.

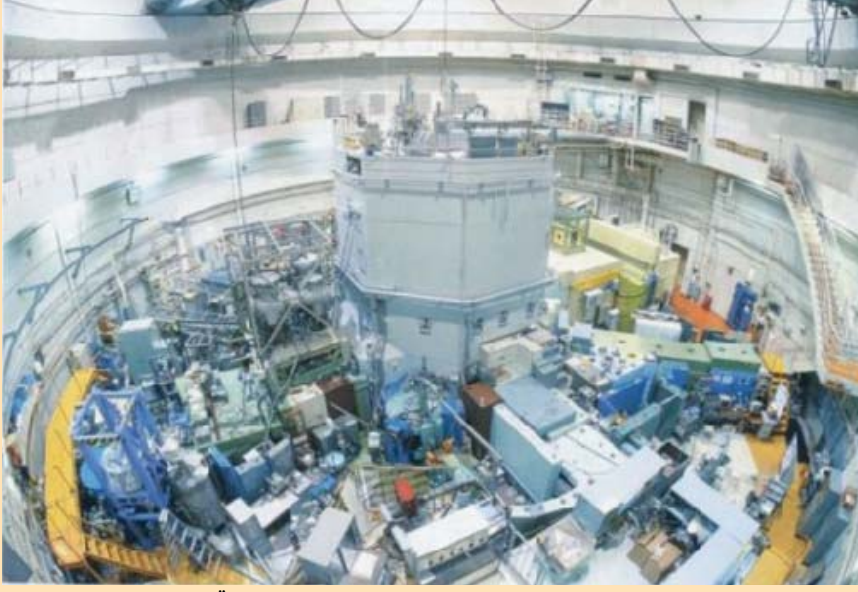
Her iki yöntemin de sorunları var. Genel bir sorun, uzun ömürlü parçalanma ürünlerinin bir nötron yakalayıp dönüşüme uğramalarının rast- lantıyla bağlı olması. Ama her izotopun sahip ol- duğu rezonans denen uygun enerji düzeylerinde nötron yakalama ve dönüşüm geçirme şansı da-

ha yüksek olduğundan, araştırmacılar bu rezonans düzeylerini yakalamanın yollarını arıyorlar.

Ledingham ve ekibi, lazer yolunu seçenler- den. Ekip, milyonlarca yıl radyoaktif kalan iyot- 129 izotopunu, yalnızca birkaç dakika içinde kar- rarlı bir hale bozulan iyot-128'e dönüştürmeyi başarmış. Ancak, sorun bu işin en azından şim- dilik güçlü lazerler gerektiriyor olması. Nitekim Strathclyde ekibinin deneylerde kullandığı, Ox- fordshire'eki Rutherford Appleton Laboratuva- rı'nda bulunan dünyanın en güçlü lazeri Vulcan. Boyutları, bir otelin boyutları kadar! Dönüştür-meyi gerçekleştirmek için araştırmacılar bir piko- saniye (saniyenin trilyonda biri) süreli lazer atı- mını altın bir hedef üzerine göndermişler. Lazer demetinin yoğun enerjisi altın atomlarını, serbest çekirdeklerden ve elektronlardan oluşan bir plaz- ma haline getiriyor. Bu parçacıklar da hedefin geri kalanı içinden geçerken gama ışınları yayı- yorlar. Bu yoğun gama ışınları iyot-129 atomla- rıyla çarpışıyorlar ve çekirdeklerini öyle şiddetli bir biçimde sarsıyorlar ki, çekirdek içinden bir nötron dışarı fırlıyor.

Ledingham ve ekip arkadaşları lazerle dönüş- türme konusunda iyimserler. Lazer teknoloji- sinin hızla ilerlediğini ve beş yıl içinde koskoca Vulcan kadar güçlü lazerlerin, bir masa üstüne yerleştirilebilecek kadar küçüleceğini söylüyor- lar. Ama sorun, yalnızca ölçek sorunu değil: La- zer ışığının önce gama ışınlarına dönüştürülmesi- nin gerekmesi, bunların da ancak çok küçük bir bölümünün hedef atomlarıyla çarpışması nede- niyle Ledingham'ın uyguladığı yöntem son dere- ce verimsiz. Deneylerde yalnızca 3 milyon kadar iyot-129 atomu iyot-128'e dönüşmüş. Bu mik- tar, bir mikrogramın milyarda birinden daha az. Deneyde kullanılan ve yalnızca 2 cm genişliğinde- ki hedefin tümünü dönüştürmek için, saatte tek bir atım yapabilen Vulcan'ın 100 katrilyon kez ateşleme yapması, bunun için de muazzam mik- tarda enerji harcaması gerekiyor. Londra Impe- rial College'dan lazer fizikçisi ve Ledingham'ın ekip arkadaşı Karl Krushelnick, bu enerjiyi sağla- mak için büyük bir güç santrali kurulması gere- keceğini kabul ediyor.

Nükleer yakıt atıklarındaki bazı radyoaktif zehirler	
İZOTOP	YARILANMA ÖMRÜ
Hidrojen-3 (trityum)	12 yıl
Berilyum-10	1.600.000 yıl
Karbon-14	5.700 yıl
Fosfor-32	14 gün
Potasyum-40	1.000.000.000 yıl
Kobalt-60	5 yıl
Selenyum-79	65.000 yıl
Rubidyum-87	47.000.000.000 yıl
Strontiyum-90	29 yıl
Niobyum-94	20.000 yıl
Molibdenum-93	3.500 yıl
Teknetyum-99	200.000 yıl
Rutenyum-106	1 yıl
iyot-129	15.700.000 yıl
Sezyum-135	2.300.000 yıl
Hafniyum-182	9.000.000 yıl
Tantalum-182	100 gün
Renyum-187	50.000.000.000 yıl
Kurflun-205	14.300.000 yıl
Polonyum-210	138 gün
Radyum-224	37 gün
Radyum-226	1.600 yıl
Aktinyum-225	10 gün
Toryum-228	2 yıl
Toryum-231	1 gün
Toryum-232	14.000.000.000 yıl
Uranyum-233	200.000 yıl
Uranyum-234	200.000 yıl
Uranyum-235	700.000.000 yıl
Uranyum-236	23.000.000 yıl
Uranyum-238	4.000.000.000 yıl
Neptünyum-237	2.000.000 yıl
Plütonyum-238	88 yıl
Plütonyum-239	24.100 yıl
Plütonyum-240	6.500 yıl
Plütonyum-241	14 yıl
Plütonyum-242	400.000 yıl
Amerikyum-241	400 yıl
Amerikyum-242	100 yıl



Japonya'nın Kyoto Üniversitesi'nde bir proton hızlandırıcısı eklenmekte olan emektar reaktör.

Şimdilik İş Nötronlarda

Buna karşılık dönüştürme için lazer dışında önerilen teknolojilerin ayağı daha çok yere basar durumda. Bunlardan biri, halen kullanımda olan bir nükleer reaktörde değişiklikler yaparak, atomun parçalanması (filyon) sürecinde ortaya çıkan nötronların istenmeyen izotoplarla çarpışarak bunları dönüştürmesi. Ancak, prototipleri üzerinde çalışılan bu yöntemin sorunu da, nükleer enerji karşıtlarınca, nükleer enerjiyi canlandırma için bir hile olarak değerlendirilmesi.

Yine de, parçacık bombardımanıyla dönüştürme araştırmaları hızlanarak ve yeni önerilerle zenginleşerek sürüyor. Bu önerilerden bir tanesi de dönüştürme için parçacık hızlandırıcılarından dolayı yolla yararlanmak. Ancak, bu iş için gerekli olan parçacık hızlandırıcılarını, temel fizik araştırmalarında kullanılan milyarlarca dolarlık, kilometrelerce uzunlukta halka biçimli tüneller ve dev süperiletken mıknatıslara sahip parçacık çarpıştırıcılarıyla karıştırmamak gerek. Bunlar daha küçük ebatlı, örneğin, bir odaya, hiç olmazsa bir laboratuvara sığabilecek ölçeklerde hızlandırıcılar.

Bir de, bu tür dönüştürme için, kritik olmayan (zincirleme tepkimeye olanak tanımayan) bir reaktör gerekiyor.

Dönüştürmede hükümetlerin temel önceliği, atıklarda oran bakımından daha büyük yer tutan ve dolayısıyla depolanma sorununa çözüm gereği daha acil olan TRUlar. Bunlar, yukarıda gördüğümüz gibi bir nötron yakalayıp dönüşüm geçirmek yerine daha kararlı çekirdeklere bölünerek radyoaktif özelliklerini yitiriyor, ya da azaltıyorlar. Bunları parçalanmaya "teşvik eden" de yüksek enerjili nötronlar. 1990'lı yılların sonuna doğru ortaya çıkan ve eskilerine göre daha küçük ve daha güvenli olan yeni kuşak parçacık hızlandırıcıları, enerjik nötron üretme güçlüğü'nün üzerinden gelmiş görünüyorlar. Eski hızlandırıcılar, elektrik şebekesinden sağladıkları gücün ancak %5'ini bir parçacık demeti haline dönüştürebilirken, yeni modeller bu oranı %50'ye yükseltmiş bulunuyorlar.

Yine 1990'ların sonunda geliştirilen tasarımlarda, dönüştürme makinelerinin şöyle çalışması öngörülmekteydi. Radyoaktif izotoplar uzun borulara doldurulacak ve bunlar da büyük bir kurşun blok içinde hazırlanmış yuvalara indirilecek. Daha sonra bir parçacık hızlandırıcısından gelen yüksek enerjili proton demeti kurşun blok üzerine nişanlanacak. Çarpışan protonlar, TRU'ları

parçalayacak kadar yüksek enerjilerde nötron yağmuruna yol açacak. Nötronlar da kurşun çekirdekleriyle çarpıştıklarında enerji yitirecek. Enerji düzeyleri teknetyum-99 gibi izotopların rezonant enerji düzeylerinden geçerken, nötronlar büyük olasılıkla dönüşüme yol açacak.

Kurşun bloksa, sisteme nötron üretmesinin yanı sıra, soğutucu işlevi de görecek. Çekirdek parçacıklarının yaratacağı ısı, kurşunu eriterek reaktör kalbi içinde yükselmesini sağlayacak. Yükselen kurşun, bir ısı değiştiriciden geçerken soğuyarak tekrar aşağıya çökecek. Atık ısıysa elektrik enerjisine dönüştürülecek.

Tasarımcılar, bu yöntemin etkin soğutma yeteneğine karşılık taşıdığı önemli bir sorunu da daha o tarihlerde Ruslar sayesinde aşmışlardı. Kurşunun olumsuz yanı, son derece aşındırıcı bir metal olması. Ruslar kurşunla çalışmaya alışıktilar ve soğutucu olarak kurşun kullanan reaktörlerle çalışan bir nükleer denizaltı filoları vardı. Sorunu şöyle çözmüşlerdi. Kurşuna basınçlı oksijen karıştırıyorlar ve böylece reaktör duvarlarında, sürekli olarak kendini tamir eden bir oksit tabaka oluşmasını sağlıyorlardı. Ruslar teknik yardım karşısında bu sırlarını Batı'ya açmışlardı.

ABD'nin Los Alamos Ulusal Laboratuvarı mühendisleri, kurşun sorununun böylece giderilmesinden sonra, dönüştürme işlemini yapacak makine için bir tasarım geliştirdiler. Makine, santral

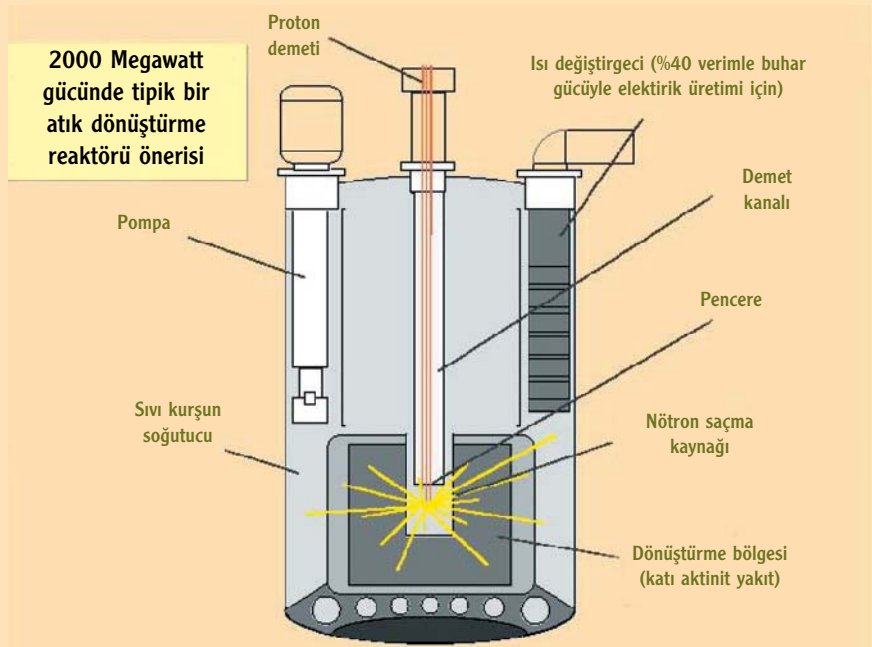
atıkları ve plütonyumdan oluşan yükünü üç yıl süreyle "pişirecek". Bu işlemden sonra radyoaktif özelliklerini sürdürebilen atıklar, 'sıcak kimyasal ayırıştırma' (pyrochemical separation) denen bir teknikle yeniden işlenecekleri yerlere gönderilecek. Bu ikinci süreçte atık erimiş bir elektrolit haline getirilecek ve parçalanmamış TRU parçacıkları, son derece yüksek sıcaklıktaki bir elektrotta toplanacak. Kapandan kurtulabilen TRUlar, eriyikte kalmış olabilecek uzun ömürlü izotoplar ve yeni atıklarla bileştirilerek, yeniden pişirilmek üzere dönüştürme makinesine gönderilecek. Böylece her turda radyoaktif izotopların en az %20'sinin yokedileceği hesaplanmaktaydı. Sonuçta geriye kalan kısa ömürlü radyoaktif izotoplarınsa yeraltı depolarında saklanması öngörülmekteydi.

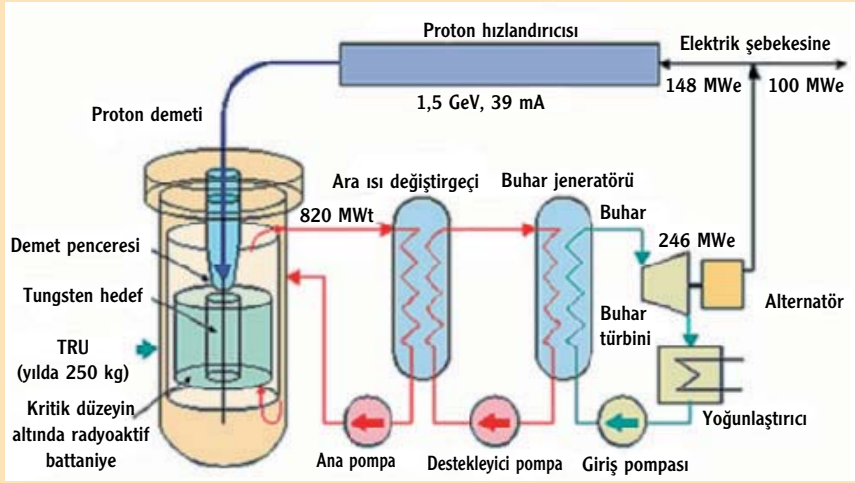
Amerika bu tasarım üzerinde çalışırken, Avrupa'da Carlo Rubbia tarafından geliştirilen "enerji yükseltici" projesi üzerinde durulmaktaydı.

2000'li yıllarda, nükleer enerjinin yeniden ciddi bir alternatif olarak gündeme gelmesiyle birlikte dönüştürme makineleri için çalışmalar da hız kazandı. Yeni yaklaşımların ortak görünen özelliği, hızlandırıcıların reaktörlerle birlikte kullanılması.

Örneğin Japonya'nın Kyoto Üniversitesi'nde 30 yıllık bir araştırma reaktörüyle birlikte çalıştırılmak üzere bir proton senkrotronu inşa ediliyor. 2005 yılı sonbaharında bitirildiğine senkrotron, reaktör kalbine proton gönderecek. Protonlar, nükleer yakıtla sarılmış bir ağır metal silindirin eksenini boyunca hedefle etkileyecek. Heften fırlayan nötronlar da yakıttaki atomlara çarparak bunları parçalayacak. 'Hızlandırıcıyla Çalışan Sistem' (accelerator-driven system -ADS) denen düzeneğin çeşitli türleri, farklı merkezlerde deniyor.

Örneğin, 10 milyon dolara malolması beklenen Kyoto Üniversitesi'ndeki 'Kumatori Hızlandırıcıyla Çalışan Reaktör Deney Tesisi'nin (KART) ardından, Rusya'nın Dubna kentindeki Ortak Nükleer Araştırmalar Enstitüsü de (JINR), halen faaliyette olan bir proton hızlandırıcısında nükle-





Kyoto Üniversitesi'ndeki KART dönüştürme düzeneği konsepti.

er tepkimeler için 1,75 milyon dolarlık bir deney odasının inşaatına girişiyor. İtalya'nın 'Yeni Teknolojiler Ulusal Ajansı' (ENEA), Fransa Atom Enerjisi Komisyonu (CEA) ve Almanya'nın Forschungszentrum Karlsruhe araştırma kurumu, 22 milyon dolar fiyat etiketli TRIGA Hızlandırıcıyla Çalışan Deney (TRADE) adlı araştırma için güç birliği yapmış bulunuyorlar. Üç araştırma kurumu, bu parayla ENEA'nın Roma'daki Casaccia Araştırma Merkezi'ndeki deney reaktörüne bir proton hızlandırıcısı ekleyecekler. Avrupa'dan bu yıl içinde beklenen ek fonlarla inşaatın 2005 yılında başlaması bekleniyor. Bu arada tasarım çalışmalarına katılan ABD'nin Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nın da katılımını resmileştirmesi bekleniyor.

İlk plandaki bu girişimlerin ardından ufukta yeni projeler de var: Japon araştırmacılar, halen Tokai'de inşaatı süren Japonya Proton Hızlandırıcı Araştırma Kompleksine bir reaktör odası eklenmesi için siyasetçileri sıkıştırıyorlar. Avrupa'da da araştırmacılar, TRADE'in ardından bağımsız bir hızlandırıcıyla çalışan deney sisteminden söz etmeye başladılar.

'Hızlandırıcı Temelli Sistemler'in geliştirilmesi için harcanan paralar, maliyetleri yüzlerce milyon, hatta milyarlarca doları bulan büyük fizik projeleriyle karşılaştırılınca şimdilik oldukça önemsiz kalıyor. Ancak, deneyler sırtlarını sağlam ve devamlı bütçelere dayamış görünüyorlar. Bunda en azından Avrupa'da nükleer enerjinin kıta çapında kabulünün, nükleer atık sorununa bağlı olmasının önemli rolü var.

Nitekim, Japonya'daki KART ve Dubna'daki kritik düzey altı düzenek (2006 yılında devreye girecek) hızlandırıcı temelli sistemlerin temel fiziği ile ilgili deneyler yürütürken, bu düzeneklerin en kapsamlısı olan TRADE, daha da öteye giderek geniş çaplı nükleer atık dönüştürümüyle ilgili pratik sorunları ve çözümleri üzerinde yoğunlaşacak. KART ve Dubna düzeni, son derece düşük güçle çalışır-

ken, TRADE yüzlerce kilowatt güç üretecek. Bu da, araştırmacılar reaktör kalbindeki ısı düzeyini artırmanın tepkimeleri nasıl etkilediğini inceleme olanağı sağlayacak. Araştırmacılar ayrıca, hedefi soğutmak, başlatma, kapatma ve düzenli yanma aşamalarında tepkimeleri izlemek ve kontrol etmek gibi pratik sorunlarla ilgili deneyler de yürütecekler. Bunlar, 2015 yılı için planlanan, yüzlerce milyon dolar maliyetli büyük ölçekli bir atık dönüştürme gösteri projesi için gereken ilk adımlar.

Hızlandırıcı temelli dönüştürme sistemleri, tüm bu sınavları başarıyla geçseler bile, bu uygulama için para musluklarının sonuna kadar açılacağı anlamına gelmiyor. Örneğin, ABD TRADE projesine katılım konusunda istekli görünmekle birlikte, yüksek düzeyde radyoaktif atık sorunu-

nu tümüyle, Nevada'daki Yucca Dağı altında hazırlamakta olduğu atık depolama tesisiyle çözmeye karar verebilir.

Yan Ürünler

Gerçi hızlandırıcı temelli çözümler, nükleer atık sorununun çözümü için mevcut seçeneklerden bir tanesi. Ancak, etkinliğinin yanı sıra önemli bir ekonomik avantaj taşıdığı da kuşkusuz. Tam ölçekli bir hızlandırıcı atık dönüştürme tesisi, önemli miktarda termal güç oluşturacaktır. Bu yan ürünü elektrik ya da hidrojen üretmek için kullanmak isteyen hükümetlerin ya da şirketlerin sayısıysa herhalde az olmayacaktır.

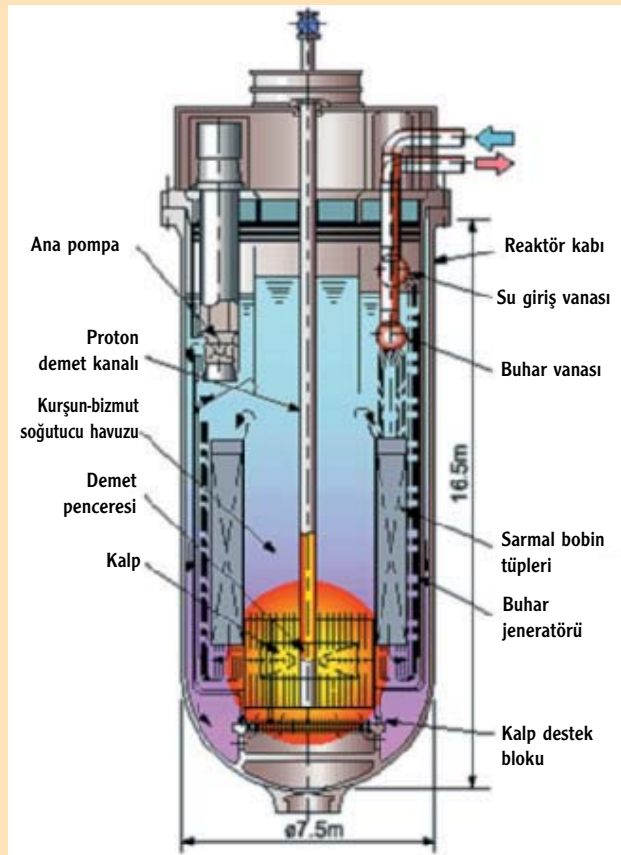
Yan ürünler konusunda lazerli simya teknolojisi de iddialı. Genel kullanımı yan ürünler için arananlar listesinin baş sıralarında da, eski simyacıların da geliştirmeye çalıştıkları hastalık sağaltım araçları geliyor. Modern simya, tıp kullanımlı radyoizotopların üretimi için özellikle uygun bir araç. Bu ürünler, genellikle tıbbi görüntülemelerde kullanılıyor. Örneğin flor-18, pozitron denen bir karışım (elektronun, + elektrik yükü taşıyan karşıtı) yayınlarken bozunur. Pozitron da bir elektronla çarpışınca, her iki parçacık enerjik bir patlamayla yok olur. Bu olay eğer vücut içinde meydana gelirse, dışarıda dizilmiş olan detektörler, yayınlanan fotonları saptayarak flor izotopunun yerini belirleyebilir. Bu teknik, Pozitron Yayın Tomografisi ya da PET taraması olarak adlandırılıyor ve genellikle tümörlerin aranmasında kullanılıyor.

Flor-18 ve tıpta kullanılan öteki radyoizotopların; hem tarama sırasında belirlenebilmesi, hem de vücutta fazla kalmaması için hızla bozunması gerekiyor. Bu da, kullanımdan birkaç saat önce yapılmasını zorunlu kılıyor. Ancak, bunları üretmek için gereken küçük parçacık hızlandırıcıları sınırlı sayıda hastanede bulunuyor. Ayrıca, hastaların ve hastane personelinin üretilen radyasyondan korunabilmesi için bu hızlandırıcıların kalın beton duvarlarla çevrili mahzenlerde tutulması gerekiyor.

Lazerli simyanın taşıdığı potansiyel de burada ortaya çıkıyor. Ledingham, 5 yıl içinde ortaya çıkmasını beklediği güçlü "masaüstü" lazerlerin, radyoizotop üretim işini çok daha ekonomik koşullarda parçacık hızlandırıcılardan devralacağına inançlı. İskoç simyacılar, Vulcan gibi dev bir lazer kullanmış olsalar da ilk sınavı başarıyla geçmişler. Ledingham ve ekibi oksijeni flor-18'e dönüştürmüş ve radyoizotop Manchester'daki Patterson Kanser Araştırmaları Enstitüsü'nde hastaların tedavisinde kullanılan şekerli bileşimlere aşılanmış. Ledingham, şimdilik Vulcan'ın tek bir ateşlemesiyle, bir doz için gerekli florin-18 miktarının onda birinin elde edildiğini söylüyor.

Raşit Gürdilek

Kaynaklar
Science, 17 Ekim 2003
New Scientist, 23 Ağustos 2003
New Scientist, 16 Ocak 1999
<http://www.oerwm.doe.gov/factsheets/doeymp0338.shtml>
<http://inisjp.tokai.jaeri.go.jp/ACT95E/11/1103.htm>



Bir dönüştürme tesisi konsepti

NÜKLEER ENERJİNİN KARANLIK

Gizli nükleer silah programı kuşkuları, nükleer endüstrinin zayıf karnı. Bu konuda nükleer mühendis Prof. Dr. Vural Altın'la ilk kez Temmuz 2001 sayımızda yer alan bir söyleşiyi kısaltılmış ve güncellenmiş biçimiyle yeniden yayımlıyoruz.

Nükleer santrallerdeki plütonyum, atom bombası yapımı için uygun nitelikte mi?

Nükleer bir santralde üretilen plütonyum Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 izotopları halinde ortaya çıkar. Bunlardan çift sayılı izotoplar kolay fisyonu uğramayan, dolayısıyla parçalanabilir olmayan izotoplar. Tek sayıda olanlara, yani Pu-239 ve Pu-241, fisyonu yatkın izotoplar. Ama nükleer reaktörde bu iki tür bir arada bulunduğundan, yakıt kirlidir. Bomba malzemesi yapmak için çift sayılı izotopların ayıklanması gerekir. Bu da oldukça teknik ve bir hayli pahalı zenginleştirme işlemleri gerektirir. Öte yandan aynı yakıt kompozisyonunu, araştırma reaktörlerinin yakıtından elde etmek de mümkün. Dolayısıyla bomba malzemesi yapmak amacıyla nükleer güç santrallerine yönelmek hiç de akılcı bir yol değil.

Nükleer enerji reaktörleri ve araştırma reaktörleri arasındaki nitelik farkı nedir?

Nükleer enerji santralleri boyut olarak daha büyük olduklarından, görece az düzeyde zenginleştirilmiş uranyum kullanırlar. Bunun anlamı, yakıtın çok büyük kısmının parçalanamaz U-238 izotopundan, yalnızca %1,5-%3'lük kısmının parçalanabilir U-235 izotopundan oluşuyor olması. Halbuki araştırma re-

TAŞIMA Pu'YLA BOMBA OLMAZ

aktörleri çok daha küçük hacimli olduklarından, çok daha zengin yakıt kullanmak zorundadırlar. Yani yakıtın yaklaşık %98-%99'a varan bir kısmı parçalanabilir U-235 izotopundan oluşur. Böyle bir reaktörün yakıtını doğrudan uranyuma dayalı bir bomba yapmak üzere kullanmak mümkün olabilir.

Üretken (breeder) reaktör nedir?

Üretken reaktör, tükettiğinden fazla parçalanabilir çekirdek üretebilen reaktör anlamına geliyor. Bir çelişki gibi geliyor ilk anda. Tükettiğinden fazlasını nasıl üretir? Bunun bir örneği, üretken reaktör yakıtı uranyum-235/uranyum-238 karışımıdır. U-235 çekirdeği, parçalanabilir yapıdadır. Bir nötron isabet ettiğinde, parçalanıp enerji açığa çıkarır. U-238 çekirdeği parçalanamaz. Bir nötron yuttuğunda U-239 olur, daha sonra da iki beta bozunmasına uğrayarak elektron atıp, plütonyum-239'a dönüşür. Plütonyum-239 çekirdeği de parçalanabilir yapıdadır. Yani parçalanabilir olmayan U-238, parçalanabilir olan Pu-239'a dönüşür. Öte yandan parçalanabilir olan U-235, parçalanıp kaybolur. Eğer kullandığınız, yani parçaladığınız, U-235'den çok Pu-239 üretebiliyorsanız birim zaman içinde, yakıtınız sürekli olarak artıyor demektir. Üretken reaktör bu. Başka yakıt pozisyonları örnekleri de mevcut.

Üretken reaktörde üretilen Pu-239, bomba yapımında kullanılıyor mu? Yani bu Pu-239, enerji santrallerindeki kirliliğe göre daha mı temiz?

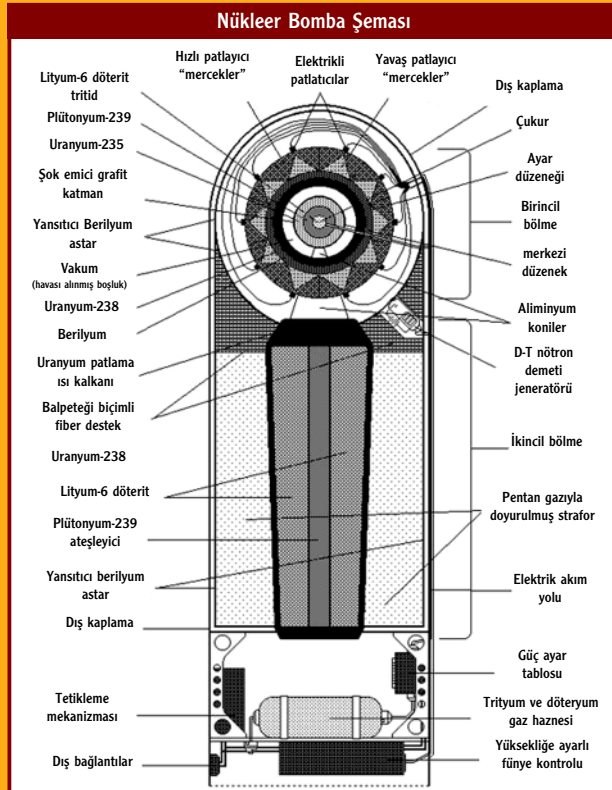
Şimdi burada üretken santrallerin ön plana geçmesinin nedeni şu: Hızlı üretken santrallerde yakıtın kendisi başlangıç itibarıyla zaten uranyumla plüton-

yum karışımıdır. Harman üretken reaktörde plütonyumun yanına biraz da uranyum katıp hızlı üretken reaktöre koyuyorsunuz. Hızlı üretken reaktörde bomba malzemesi olarak plütonyuma yönelirseniz yapacağınız şey kimyasal ayırmadır. Bu kolay bir şey. İzotop zenginleştirme de söz konusu. Nerede söz konusu? O plütonyumun hepsi "bomb-grade"dir, yani bomba yapımına uygun zenginliktedir. Ama kalite farkı vardır. Eğer içinde çift sayılı izotoplar az veya çoksa, kalitesi düşük veya yüksektir. Hatta çift sayılı izotopların bolluğu, plütonyumu bomba malzemesi olarak kirliliğe hale getirir denir. Kirlidir; temizlenmesi gerekir. Yani o çift sayılı izotopların ayrılması lâzım ki, bomba "puf" demesin, "bum" diye patlasın.

Bir ülkeden şüphelendiğinde, ilk olarak araştırma reaktörlerine bakılıyor. Araştırma reaktöründe ne kullanılıyor?

Araştırma reaktörleri küçük boyutlu oldukları için, çok daha zengin yakıt kullanmak durumundadır. Ya fakir yakıt kullanıp büyük kalp (core-tepkiye odası) yaparsınız, ya da zengin yakıt kullanıp, küçük kalp yaparsınız. Araştırma reaktörleri enerji üretmeyecekleri için zaten küçük olmak durumunda. O zaman kritik kütleli sağlamak için zengin yakıt kullanmak durumundasınız. Örneğin %99 U-235, %1 de U-238 diyelim. U-238 zaten zamanla plütonyuma dönüşecek. O plütonyumu alıp kullanabileceğiniz gibi, %99 oranındaki U-235'i kullanarak uranyum bombası da yapabilirsiniz. Eğer sizin aklınızda bomba fikri varsa, gidip bir enerji santrali kurmazsınız; bu birkaç milyar dolarlık iş. Bir araştırma reaktörü peşinde olursunuz; yani birkaç 10 milyon dolarlık iş. Maliyeti daha dü-

NÜKLEER SİLAH NASIL YAPILIR?



Nükleer silahlar nükleer enerjinin, büyük miktarlarda ve ani denilebilecek kısa sürelerde, kontrolsüz şekilde üretimine dayalıdır. Nükleer enerjise, ya çekirdek parçalanması ya da fisyon, ya da çekirdek birleşmesi ya da füzyon yoluyla elde edilir.

Fisyon olayında, örneğin U-235 gibi bir çekirdek, nötron bombardımanına tabi tutulduğunda, bir nötron yutarak parçalanır ve 2 ya da 3 nötron çıkarır. Böyle çekirdeklerin, parçalanabilir ya da 'fisil' olduğu söylenir. Açığa çıkan nötronlardan bazıları, ortamın dışına kaçarak ya da ilgisiz çekirdekler tarafından yutulularak 'ziyan' olurken, bazıları diğer U-235 çekirdeklerine çarpıp yeni fisyonlara yol açar. Eğer bir uranyum kütleğinde ortalama olarak, fisyonu açan her nötron başına açığa çıkan nötronların; 'birden fazlası, biri ya da birden azı' tekrar fisyonu açabiliyorsa, o uranyum kütlelerinin 'süperkritik, kritik ya da altkritik' olduğu söylenir. Geometrisine ve kimyasal bileşimine bağlı olarak, olası en küçük kritik kütle 7-8 kg düzeyindedir. Uygun bir şekilde hazırlanması gereken böyle bir kütlede, her fisyon bir yenisine yol açar ve 'zincirleme reaksiyon,' aynı düzeyde devam eder. Süperkritik bir kütledeyse, her fisyon birden fazla yenisine yol açtığından, fisyonların sayısı çığ gibi artar. Büyüyen bir 'zincirleme reaksiyon' oluşur ve fisyon başına açığa, 200 milyon elektronvolt enerji çıkar. Kömürün yanmasından elde edilen enerjise, karbon atomu başına 4 elektronvolt kadar. Dolayısıyla 1 gram U-235'in fisyonu, 2,5 ton kömüre eşdeğer.

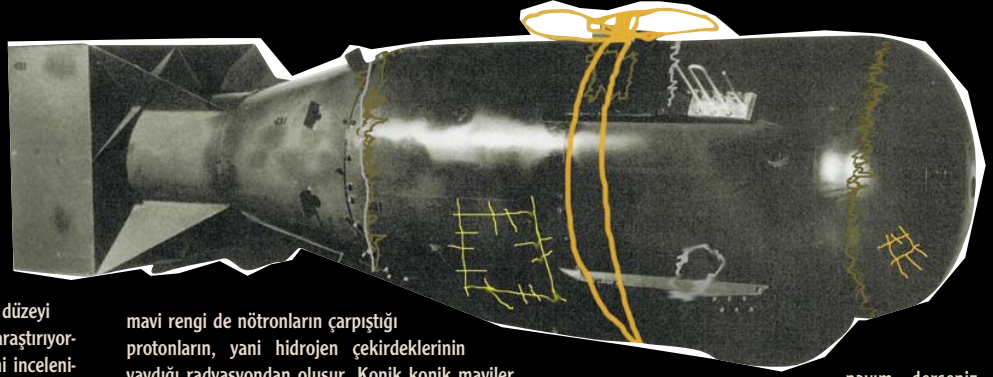
Fakat doğada bulunan uranyumun, sadece %0.71 kadarı U-235'ten, kalanıysa, parçalanmayan bir izotop olan U-238'den oluşur. Dolayısıyla doğal uranyumdaki 235 bileşiminin, hele bomba yapılmak isteniyorsa, %90'lar düzeyinde zenginleştirilmesi gerekiyor. Zenginleştirme yöntemlerinden birisi, 'gaz diffüzyonu' yöntemi. Normal şartlar altında metal olan uranyum, UF₆ gazı haline getirilir ve bir kabın, aralarında gözenekli bir zar bulunan iki bölmesinden birine konup, yüksek basınç altında sıkıştırılır. Gaz moleküllerinden U-235 içerenler, diğerlerine göre daha hafif olduklarından, herhangi bir sıcaklıkta daha hızlı hareket eder ve zarın diğer tarafına sızmakta daha başarılı olurlar. Dolayısıyla, diğer bölmedeki U-235'li molekül konsantrasyonu, az biraz artar. Kayda değer bir zenginleştirme için bu sürecin binlerce kez tekrarlanması, böylesi kaplardan binlercesinin art arda kullanılması gerekir. Böyle bir tesiste, yılda tonlarca zenginleştirilmiş uranyum üretilir. Fakat basınçlanmanın gerektirdiği güç binlerce MW, kap sisteminin tesis maliyeti milyar dolar düzeyindedir. Oysa, bir nükleer bombanın yapımı için onlarca kilogram zengin uranyum gerekir. Zengin uranyumu az miktarlarda elde etmenin daha ucuz yolları

şük olur, bir de alacağınız yakıt zaten doğrudan kullanıma uygun bile olabilir.

Peki araştırma reaktörlerinde üretilen ürün nedir? İzotoplar mı?

Genellikle mühendislik kollarında, güç düzeyi sıfıra yakın bir reaktör nasıl çalışır, onu araştırıyorlar. Nötron dağılımları, radyoizotop üretimi inceleniyor. Tıbbi uygulamalara yönelik olarak radyoizotop üretilebiliyor. Fizik deneyleri yapılıyor, nötron kaynağı olarak kullanılıyor, çünkü diğerlerinden sızıyor. Nötronların sonuçta belli bir ömrü var. Örneğin serbest nötronun mesela dakika düzeyinde bir ömrü var.

En düşük enerji grubundaki nötronlardan olan termal nötronların bile hızı 2200 m/s. Yani bu nötronlar 25°C sıcaklıkta, saniyede 2,2 km yol katediyor. Yani gözünüzü açıp kapayınca kadar o çekmece'den çıkıp Yeşilköy'e gidiyor. Duvar dediğim de tabii havuzun içindeki duvar. Yoksa reaktörün duvarı değil. Reaktörün duvarının dışındaki radyasyon düzeyi, yol üzerindeki korunma tedbirleri, yutucu çekirdekler nedeniyle normal radyasyon düzeylerinde olmak zorunda. Bu duvar kurşun ağırlıklı beton, yani kurşun karıştırılmış beton olabilir. Reaktörün kendi içinde, zincirleme reaksiyonu kontrol altına almak için kobalt kullanılır. Güçlü bir yutucudur ama, pahalı olduğu için duvarlara konmaz. Daha çok kurşun kullanılır. Reaktör yakıt kafesinin etrafı kurşundur. Reaktör binasının dışındaki nötron düzeyi izin verilebilir sınırların altında olmak zorundadır. Ama havuzun içindeki reaktörün duvarında, hatırı sayılır miktarlarda nötron düzeyi akışı vardır. Hatta havuzun



mavi rengi de nötronların çarpıştığı protonların, yani hidrojen çekirdeklerinin yaydığı radyasyondan oluşur. Konik konik maviler... Aslında o koninin ucunda bir proton seyahat ediyor; imelenmeye tabi olduğu için de zorunlu olarak radyasyon yayıyordur. Bu o ışıktır. Herbir koninin ucunda bir proton vardır.

Özetle, bomba yapmak istiyorsanız araştırma reaktörü tavsiye edilir. Yakıtı daha zengindir, kendisi daha ucuzdur. Bir bomba yapmak için gereken miktarlar 7-8 kg'dır. Tabii araştırma reaktörünüz ciddi bir denetim altında. Toplam yakıtı ne kadar? Diyelim 100 kg. 100 kg'dan çıkartmadan 7 kg çıkmak zordur. Ama bunu 10 yıl boyunca yapabilirsiniz, günde 1-2 gram bir köşeye saklayarak. Çünkü bu maddelerin fire payları da var; olmak zorunda. Gerçekten de, yakıtı bir yere koyuyorsunuz, alıyorsunuz, koyduğunuz yere az miktarlarda yakıt bulaşıyor, dolayısıyla ağırlıktan bir kaybı var. Ancak bu fire payları içine 7 kg'ı kısa süre içinde gizlemek, 100 kg'lık bir yakıt stokunda ya da birkaç yüz kiloluk yakıt stokunda, çok zor.

Türkiye, İran ya da Irak gibi ülkelerin "bodrumda" bir araştırma reaktörü yapmaları mümkün mü?

Amacınız "bodrumda" bir araştırma reaktörü yapmaksa, o zaman CANDU yapacaksınız. Bu tip reaktörlerde zenginleştirilmemiş yakıt kullanılır: doğal uranyum. Yani eğer ben zenginleştirmeden yakıt ya-

payım dersenez, CANDU tipi bir reaktör uygun. Çünkü bir enerji santali için, hatta bir araştırma reaktörü için zenginleştirme yapmak zorundasınız. Kilolarca yakıtı zenginleştirmek, çok pahalı bir iş. Miktar arttıkça, gaz difüzyon (ayırıştırma) tekniklerine yönelmek durumundasınız. Bu da çok büyük tesisler gerektirir. Yaklaşık 4000 MW elektrik gücüyle desteklenmesi gerekir. Yok ben zenginleştirmeden doğal uranyumdan (şans eseri var doğal uranyumunuz) yapayım dersenez CANDU tipi reaktöre yönelmeniz şart. O zaman da ağır su teknolojisine sahip olmanız gerekiyor. Orada da o zorluk var. Ağır su da nedir? Hidrojen yerine döteryum kullanımı. Orada da izotop zenginleştirme işi var. O da kolay iş değil. Ama kafaya koyduktan sonra, eğer doğal uranyum kaynaklarınız varsa, yaparsınız. Örneğin, **Ziya ül Hak bu iş için, "halkım ot yese de ben bu bombayı yapacağım" dedi.** Ot yedirdi, yaptı. İyi mi etti, o tartışılır. Ama yanibaşınızda öyle ciddi bir tehdit olunca, paranoya içinde yaşıyorsanız, halk da ot yemeye razı oluyor. Bir de üzerine alkışlıyor.

Bir de saçma sapan gurur sembolleri var dünya'da. Yani geçmiş yüzyılın kamuoyu psikolojisinde yattığı tahrifat o kadar derin ki, olmayacak şeyleri statü sembolü olarak görüyoruz.

vardır.

Bir başka zenginleştirme yöntemi, uranyum izotoplarının, aynı frekanstaki lazer atımları karşısında verdikleri farklı tepkiye dayanır. Buysa zahmetli ve yavaş çalışan bir yöntem. Malzemeyi küçük miktarlarda ve yavaş yavaş elde etmenin bir diğer yolu, uranyum izotoplarını iyonlaştırıp bir manyetik alanın üzerinden geçirmek. Aynı hızla hareket etmekte olan iyonlar manyetik alandan geçerken, daha ağır olanlar daha küçük, hafif olanlara daha büyük yarıçaplı daireler üzerinde sapırlır ve karşıdaki bir 'toplayıcı levha'nın farklı yerlerine düşerler. Bu, fakirinin zenginleştirme yöntemidir. Ancak sabır gerektirir. Çünkü gün boyunca hedef levhasında, gram düzeyinde az ürün birikir.

Parçalanmaya uygun bir diğer 'fisil' çekirdekse, Pu-239 izotopu. Ancak, plutonyum doğal bir element değil. Nükleer reaktörlerde, U-238 izotopunun bir nötron yuttuktan sonra bozunması sonucu oluşur. Farklı bir element olduğundan, uranyumdan kimyasal yöntemlerle ayrıştırılabilir ve zenginleştirme işlemi gerektirmez. Fakat eldesi için, hazırda çalışan bir nükleer reaktörün bulunması ve yakıtına uygun zamanlamalarla müdahale edilmesi gerekir. Halbuki, bomba malzemesi olarak zenginleştirilmiş uranyum ya da plutonyum elde etmenin en kestirme yolu, bu malzemeyi, nükleer santrallara hizmet veren yakıt işleme tesislerinden almak ya da çalmak.

Fisil malzeme elde edildikten sonra bomba yapması, görece kolay bir iş. İlkel bir nükleer bomba, bir araya geldiklerinde süperkritik olacak olan iki altkritik uranyum kütlelerini bir topun namlusuna yerleştirip, birini diğerine doğru ateşlemekle yapılabilir. Sonuç, büyük bir patlamaya yol açan süperkritik bir küttedir ve açığa çıkan toplam enerjiye 'bombanın verimi' denir. Hiroşima'ya atılmış olan bomba böyle bir düzenekten oluşmuştur. Ancak 'top tipi bomba' fazla uranyum gerektirir; ağır ve hantal, hem de düşük verimlidir. Bir diğer yöntem; süperkritik bir fisil malzeme küresinin etrafına güçlü patlayıcılar yerleştirip, bu patlayıcıları fevkalade simetrik ve eşzamanlı biçimde patlatarak, küreyi homojen bir şekilde, çok daha süperkritik küçük bir küreye 'göçertmek'. Bu tip bir 'göçertme aygıtı'nda, Pu-239 tercih edilmekle birlikte, U-235 de kullanılabilir. Yöntemin, fisil malzeme sağlamadan sonraki en zor tarafı, patlamaların eşzamanlılığını sağlayan elektronik devre elemanlarının yapımı ya da ele geçirilmesi. Fakat zahmetine de değer: Bomba küçük, verimi yüksek olur.

Füzyon olayıysa, hidrojen ya da hidrojenin izotopları olan döteryum ve trityum çekirdeklerinin birleşmesine dayalıdır. Bu çekirdeklerin kaynaşması, birim ağırlık başına fisyonundan bile daha fazla enerji açığa çıkarır. O kadar ki, 1 gram hidrojen yaklaşık 50 ton kömüre eşdeğerdir. Ancak, çekirdeklerin kaynaştırılabilmeleri için, çok yüksek hızlarla çarpıştırılmaları gerekir. Yeterince yüksek sıcaklıktaki hidrojen

gazında, her bir yöne doğru hareket etmekte olan atomlar, yeterince yüksek hızlarla çarpışıp kaynaşabilirler. Nitekim, güneşin merkezindeki sıcaklık 15 milyon °C'yi buluyor ve buradaki hidrojen çekirdekleri, yüksek basınçın da yardımıyla füzyona uğrayarak, güneşe ısıdığı enerjiyi sağlıyorlar. Ancak, yeryüzünde basınç çok daha düşük olduğundan, hidrojenin füzyonu için gereken sıcaklık çok daha yüksek ve 100 milyon °C'nin üstüne çıkılması gerekiyor. Bu yüzden 'hidrojen bombası'nın yapımında, füzyonu biraz daha kolay olan döteryumla trityum tercih edilir. Döteryum normal sudaki hidrojen atomları arasında, 1/666 oranında bulunuyor ve fizikokimyasal yöntemlerle ayrıştırılabilir. Trityumsa, Li-6 (lityum) izotopunun nötron bombardımanına tabi tutularak, helyum ve trityuma parçalanmasıyla elde edilebilir. Ancak trityum; normal şartlar altında uçucu, kaçıcı bir gaz. Hem de, görece kısa bir yarılanma ömrüyle kendiliğinden bozunuyor. Dolayısıyla, önceden üretilip saklanması yerine, kullanımının hemen öncesinde ve sırasında üretimi tercih ediliyor. Bu amaçla döteryum lityumla karıştırılır ve her ikisi birlikte, strofor ambalaj malzemesiyle kaplanır. Patlama anı geldiğinde, lityum nötron bombardımanına tabi tutularak trityum üretilir, bu trityumlar da, içindeki döteryumlarla çarpışıp füzyona yol açarlar. Ancak; Lityumun bombardımanı için nötronlar, füzyon için de yüksek sıcaklıklar gerekir. Bunlarsa, 'birincil' denilen bir uranyum ya da plutonyum bombasının patlatılmasıyla elde edilir. Bu bombanın ürettiği ısınma etkisi, yani termal şok, görece yavaş yayılır ve füzyon düzeneğine ulaşana kadar, düzeneğin dağılması olasılığı belirir. Halbuki, yayınlanan gama ışınları ışık hızıyla hareket eder ve strofor bunları emerek, içindeki karışımın ısınmasını sağlar. Bir yandan da, birincil bombanın basınç şoku füzyon karışımını dışardan ve her yandan homojen bir şekilde sıkıştırır, yaydığı nötronlar lityumu parçalayıp trityum açığa çıkarırlar. Karışımın sıcaklığı 100 milyon °C'nin üstüne çıktığında, 'ikincil' füzyon bombası devreye girer.

Nötron bombası, küçük bir hidrojen bombasıdır. Diğer nükleer silahlardan farkı, asıl öldürücü etkisinin, yaydığı nötronların yol açtığı radyasyon hasarından kaynaklanmasıdır. Bu özelliğiyle, 'güçlendirilmiş radyasyon silahı' olarak da adlandırılır. Patlamasının yol açacağı basınç ve ısı etkisi düşük olacak şekilde tasarlandığından, civardaki binalar ve sanayi tesisleri gibi fiziksel yapılar, patlamadan daha az etkilenir. Öte yandan, nötronlar fazla uzaklara yayılmadığından, bu silahın öldürücü menzili ötekilere göre kısa. Soğuk Savaş döneminde NATO kuvvetlerinin, Doğu Avrupa'daki nüfus yoğun bölgelerde savaşa hazırlıklı olma gereksinimine göre, 'kısa menzilli bir antipersonel silahı' olarak üretildiler.

Prof. Dr. Vural Altın