

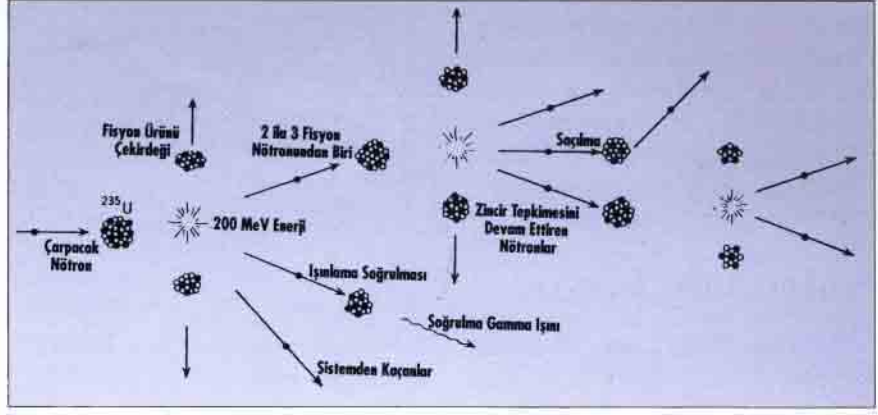
Nükleer Fisyon



İnsanlığın enerji sorununa kalıcı çözümün nükleer enerji olduğu bir çok teknisyen ve bilim adamı tarafından dile getirilmektedir. Nükleer enerjinin iki kullanım türü vardır. Bunlardan biri, gerçekten çok uzun dönemde insanlığın enerji açısından kurtarıcısı olduğuna inanılan füzyon enerjisidir. Kanımca, füzyon enerjiden yararlanılarak elektrik enerjisi elde etmenin ticari boyuta ulaşmasının yaklaşık daha bir asırlık geliştirmeye ihtiyacı vardır. Ama sonunda bu tür enerjiden yararlanma yolları bulunacak ve insanlığın hizmetine sunulacaktır. Diğer tür ise, halen insanlığın hizmetinde bulunan ve en temiz elektrik enerji üretim santrallerinin yapımında kullanılan, fisyon enerjisidir. Bu enerji türünün geçmişi çok kısa olmakla birlikte, ticari kullanım alanı vardır ve bir çok ülkenin elektrik enerjisi üretiminde önemli bir pay almaktadır.

DOĞADAKİ atom çekirdeklerinin kararsız olanları daha kararlı olabilmek için çekirdek içinden bazı parçacıkları atarak değişime uğrarlar. Buna radyoaktivite denir. Örneğin, her canlı varlığın içinde bulunan ve kozmik ışınlar nedeni ile oluşan, karbon 14'ün bir gramının yarısı 5770 yıl içinde değişim geçirerek, azot gazı olur. Bu değişim karbon 14 çekirdeği içinden bir elektronun atılması yani bir β bozulması ile gerçekleşmektedir. Sözü edilen süreye de yarı ömür denir. Bazı ağır çekirdekler, içlerinden daha ağır parçacıklar atarak ilk durumlarından daha kararlı bir çekirdeğe dönüşebilir. Örneğin, toryum bir milyar dörtyüzon milyon yıl yarı ömürle α bozulumu adını verdiğimiz, çekirdek içinden bir helyum atomunun çekirdeğini atarak, biraz daha kararlı bir çekirdeğe dönüşür.

Bazı çekirdekler o denli kararsız olabilirler ki, içlerinden bir parçacık atmak yerine ikiye parçalanabilirler. Bu çekirdek tepkimesinin teknik



Fisyon olayı başladıktan sonra zincir tepkimesine giren her nötrona karşı en az bir nötron bir sonraki nesile kalırsa kritik reaktör elde edilmiş olur.

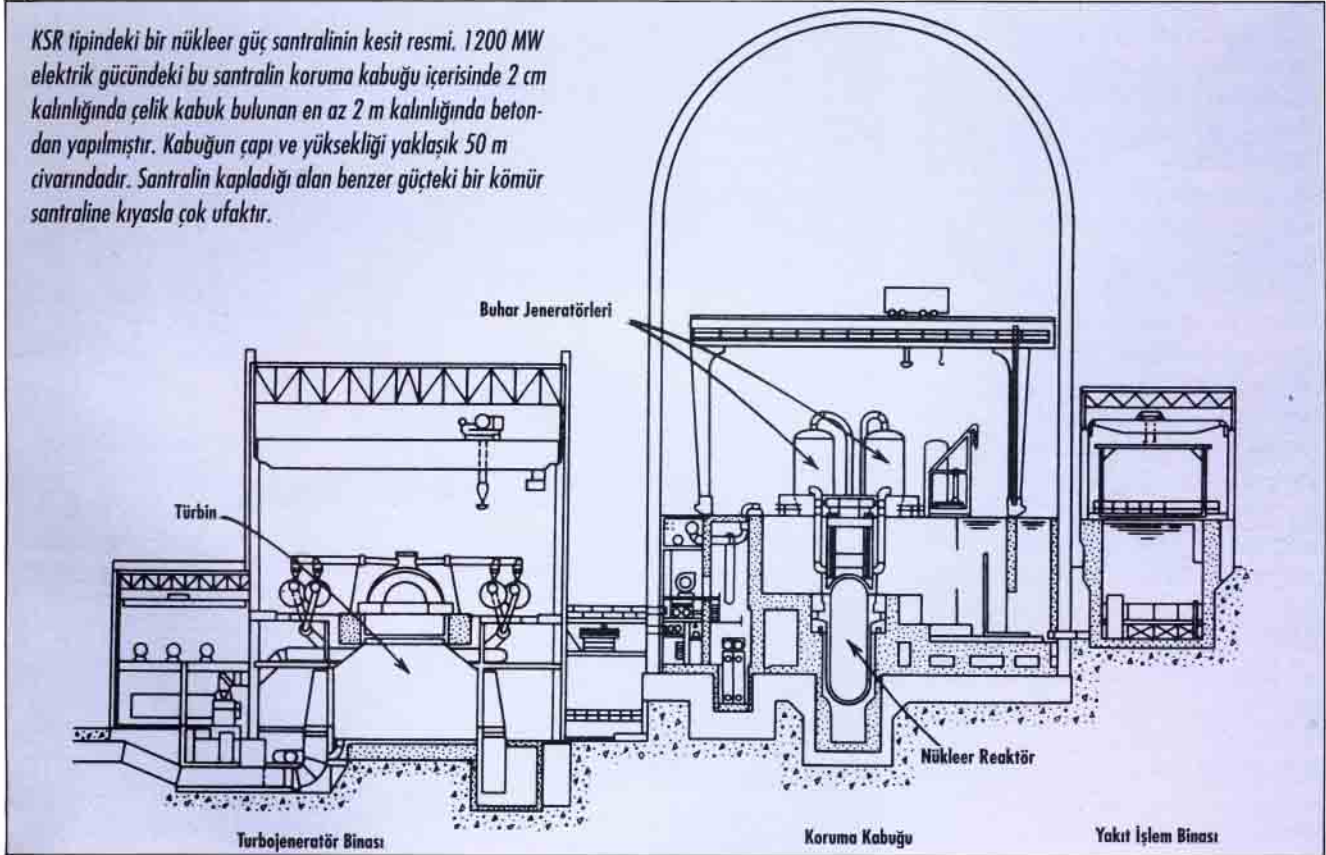
adı da fisyon, yani bölünmedir. Tabii kendi kendine fisyon yapan çekirdeklerin doğada bulunması fevkalade zordur. Bazı çekirdek içi parçacıklar ile etkileşmeye giren ağır çekirdeklerin oluşturduğu çok kararsız çekirdekler fisyon yapabilir. Doğada bulunan uranyum 238 çekirdeğinin kendi kendine fisyon yapma yarı ömrü 10^{16} yıl diğer taraftan insan yapısı olan fermium'un kendi kendine fisyon yapma yarı ömrü bir yıldan daha azdır.

Bir çekirdeğin kararlılığı, çekirdeği oluşturan parçacıkların birbirlerine ne denli sıkıca bağlı oldukları-

nın bir ölçüsüdür. Teknik terim olarak buna çekirdeğin bağlama enerjisi denir. Çeşitli çekirdeklerin parçacık başına düşen ortalama bağlama enerjilerine dikkat edersek, en kararlı çekirdeklerin atom ağırlıklarının demir, nikel, kobalt gibi 60 civarında olduğunu görebiliriz. Dünyada demir ve benzeri metaller bu nedenle uranyum ve toryumdan daha boldurlar.

Hafif çekirdeklerin bağlama enerjileri demire kıyasla daha azdır. Bu tip çekirdekler başka çekirdeklerle bir araya gelerek daha kararlı çekirdek oluşturabilirler. İşte bu sü-

KSR tipindeki bir nükleer güç santralinin kesit resmi. 1200 MW elektrik gücündeki bu santralin koruma kabuğu içerisinde 2 cm kalınlığında çelik kabuk bulunan en az 2 m kalınlığında betondan yapılmıştır. Kabuğun çapı ve yüksekliği yaklaşık 50 m civarındadır. Santralin kapladığı alan benzer güçteki bir kömür santraline kıyasla çok ufaktır.

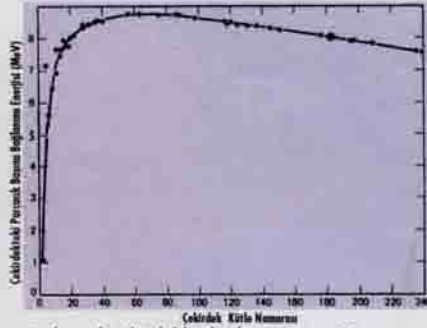


rece füzyon yani kaynaşma diyoruz. Diğer taraftan demirden daha ağır çekirdekler parçalanarak daha kararlı çekirdeklere dönüşebilirler. Bu parçalanma bazen hızlandırılabilir ve bu sürece de fisyon adı verilir.

Nötron ile Fisyon

1932 yılında Sir James Chadwick İngiltere'de, atom çekirdeklerinden çıkan ve elektrik yükü olmayan bir parçacığın varlığını gözledi. Daha sonra adına nötron denilen bu temel parçacığın proton ağırlığında olduğu ve çekirdek içine rahatlıkla girebildiği gözlemlendi. Enrico Fermi bunu izleyen yıllarda İtalya'da nötron ile yaptığı deneylerde ilginç sonuçlar elde etti. Nötronlar ile bazı çekirdekleri bombardıman eden Fermi yeni izotoplar elde ediyordu. Aynı deney tahta masada yapılıncı metal masada yapılanı kıyasla daha fazla nötronun yutulduğu ve üretilen yeni çekirdeklerin daha fazla olduğu gözleniyordu. Daha sonra bu olaya tahtanın içinde bulunan hidrojen ile karbonun yol açtığı ve nötronların uygun maddeler ile yavaşlatılabildiği ortaya çıktı. Daha yavaş hareket eden bir nötron çok daha uzun süre çekirdek civarında kalabilir ve etkileşme yapma olasılığı çok daha artar.

1939 yılında, Hahn ve Strassman Almanya'da, uranyumdan daha ağır çekirdek yaratmak için uranyumu yavaş nötronlar ile bombardıman ettiklerini fakat çoğunlukla, örnekte hiç bulunmayan, daha hafif çekirdekler ürettiklerini biraz da çekinerek ve kuşkuyla yayınladılar. Daha sonra bunun nötronlar yardımı ile oluşan fisyon olduğu ortaya çıktı. Aynı yıl Macar Szilard bu yeni buluşun değerini anlayarak Naziler durumunu kavramadan Müttefiklerin savaş için derhal fisyonun faydalanması için çalışmalarına başladı. Bundan sonrası hemen herkesin bildiği, hikayelerini okuduğu, filmlerini izlediği Manhattan projesi olarak tarihe geçti. 1939 yılında bulunan fisyon, 1942 yılında ilk CP1(Chicago Pile 1) nükleer reaktörünün yapımı ile kullanılabilen bir enerji üretme yöntemi olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. 1944 yılında ve daha sonra



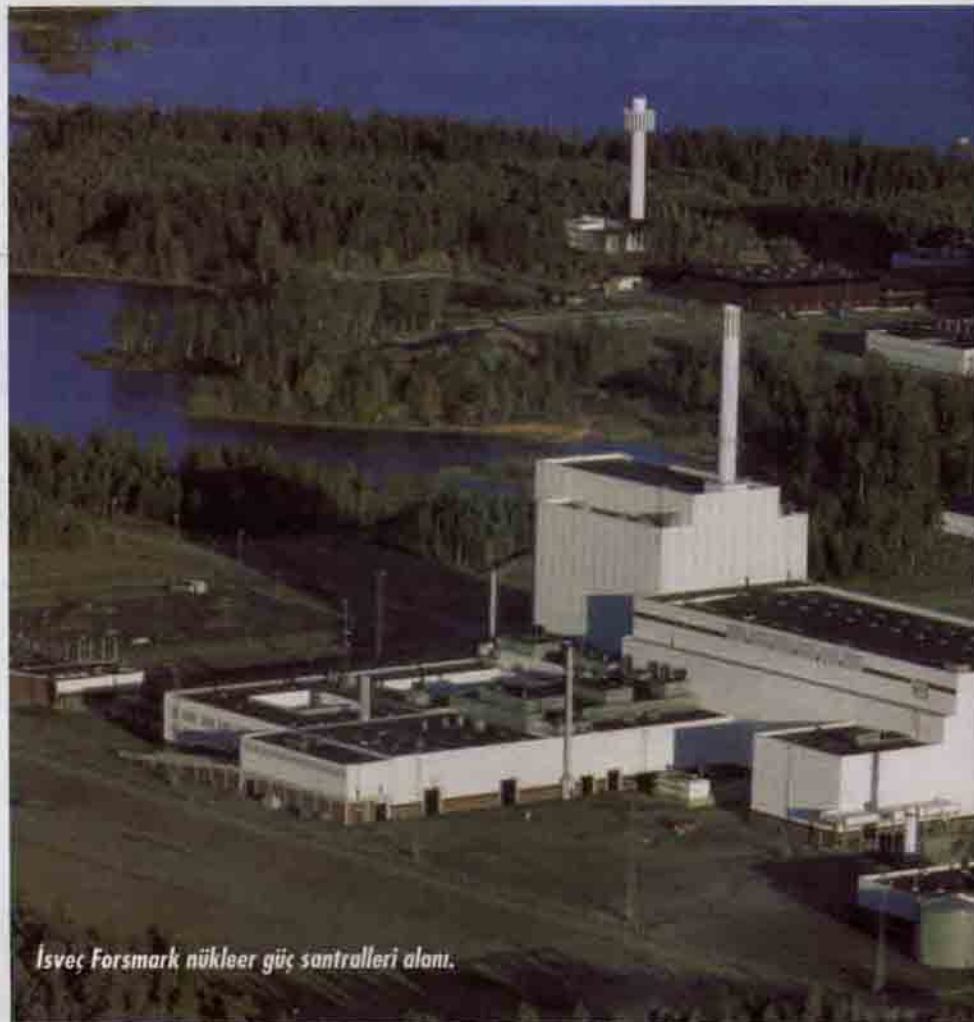
En kararlı çekirdekler kütle numarası 60 civarında olanlardır. Cr(52), Mn(55), Fe(56), Co(59), Ni(58) en kuvvetli bağlı çekirdeklere sahiptir.

yapılan üretim ve araştırma reaktörlerinden sonra ilk elektrik enerjisi üreten reaktör 1954 yılında Rusya'da Obninsk'te 5 MW gücünde üretime başlamıştır.

Fisyon'dan Enerji Üretimi

Nötronların çekirdek ile etkileşme yapma olasılığının ölçüsü, teknik terminolojide tesir kesiti olarak

adlandırılır. Fisyon tesir kesitleri bir çok malzeme için ölçülmüştür. Ağır çekirdeklerin fisyon tesir kesitleri, bazı tip çekirdekler için nötron hızı azaldıkça artmakta, bazılarında ise nötronun hızı çok büyük değerlere çıkmadıkça hep sıfır değerinde kalmaktadır. Yavaş nötronlar ile fisyon yapabilen çekirdeklere fisil, çok hızlı nötronlar ile fisyon yapabilenlere de fertil (verimli) çekirdekler denir. Doğada bulunabilen tek fisil çekirdek uranyumun 133 nötronlu çekirdeği olan ve doğal uranyum içinde % 0.7 miktarında bulunan U^{235} 'dir. Fertil çekirdekler ise uranyumun diğer izotopu U^{238} ve toryum'dur. İnsan yapısı olan plutonyum ve U^{233} diğer fisil izotoplardır. Az miktarda malzeme kullanarak fisyonun enerji alabilmek için fisil bir maddeye veya teknik söylenişi ile yakıtı ihtiyacı vardır. Fisyon reaktörlerinin yakıtı % 0.7 veya biraz daha fazla U^{235} içeren bir uranyum bileşimidir. Nötron ile yaratılan fisyon sonucunda çekirdek parçalanırken bir miktar



İsveç Forsmark nükleer güç santralleri alanı.

nötron da ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu nötronların bir sonraki fisyon etkileşmesini gerçekleştirecek sayıda olmaları gerekir. Birbirini izleyen bu bölünme etkileşmelerine zincir etkileşme adı verilir. Zincir etkileşmesinin devam edebilmesi için belirli bir geometride belirli miktarda fisil malzeme gereklidir. Gerekli olan bu en az madde miktarına kritik kütle denir.

Fisyon sonucunda ortaya çıkan nötronların sayısı kadar hızları veya enerjileri de önemlidir. Fisyon sonucu ortaya çıkan nötronların enerjileri çok yüksektir (1 MeV). Fisil maddelerin tesir kesitlerinin düşük enerjilerde yüksek olması nedeni ile az miktarda fisil madde kullanabilmek için yavaşlatılmış nötronlar gereklidir (0.025 eV). Fisyon sonucu ortaya çıkan nötronları yavaşlatmak için hafif çekirdekli maddeler kullanılır. Nötronlar tıpkı bilardo topları gibi atom çekirdekleri ile çarpışarak enerjilerini çekirdeklere verirler ve yavaşlarlar. Bu yavaşlama sırasında

nötronların bir kısmı çarpıştıkları çekirdekler tarafından yutulur ve yok edilirler. Bir kısmı ise maddeden dışarı kaçarak bir daha geri dönemezler ve kaybolurlar. Nötronların yavaşlatılması nötron sayısında bir azalmaya sebep olur. Diğer bir deyişle, zincir etkileşmesini devam ettirebilmek için her fisyon etkileşmesi başına ikiden fazla nötron yaratılması gerekmektedir.

Zincir etkileşmesini sağlayacak bir sistemde nötronlar fisil çekirdekler ile etkileşmeye girerler ve bu çekirdekleri parçalarlar. Parçalanmış uranyum atomlarının bu parçalarına fisyon ürünleri denir. Fisyon ürünleri periyodik tabloda bulunan bir çok elementi kapsar. Fisyon ürünleri büyük bir hızla madde içinde hareket ederler. Ayrıca bu parçalanmış çekirdeklerin etrafında elektronlar da yoktur. Yani çok iyonize olmuş büyük parçalar madde içinde yol alırlar. Fisyon ürünleri enerjilerini maddeye bırakarak yavaşlarlar ve maddeyi ısıtırlar. İşte, fisyon enerjisi



Point Lepreau Nükleer Güç Santrali.

bu yolla ısı enerjisine dönüştürülür. Uranyumun fisyonu sonucunda yaklaşık 200 MeV enerji açığa çıkar. Bu enerjinin çok azı dışında hemen tümünü ısı enerjisine çevrilebilir. Fisyonun elde edilen enerji füzyondan elde edilen enerji ile kıyaslanırsa ilk bakışta 10-50 misli fazla gibi görünür. Bu bakış açısı biraz yanıltıcıdır. Kütle başına elde edilen enerji hesaplanırsa, füzyonun fisyonun 2-4 misli daha fazla enerji üretebileceği görülür.

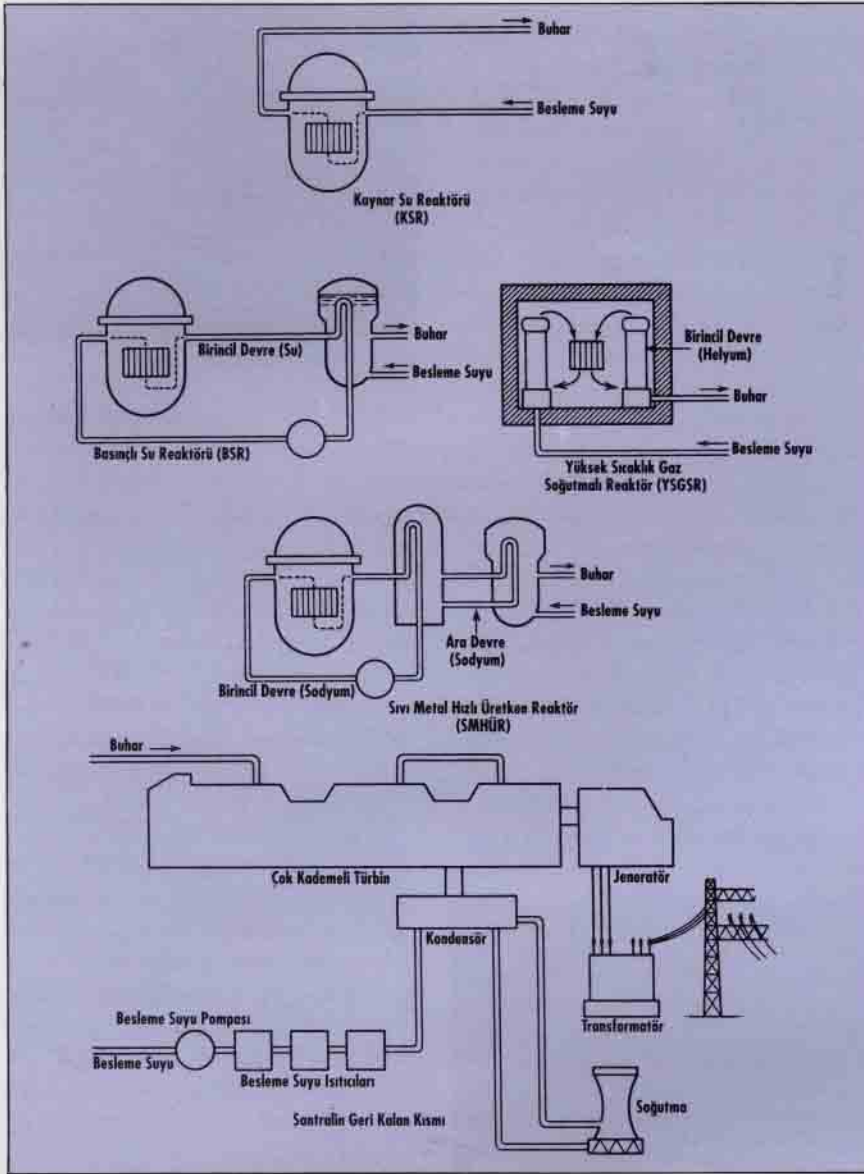
Kritik bir kütlede ortaya çıkacak bir tek fisyon etkileşmesi dahi zincir etkileşmesini yavaş yavaş azaltır. Reaktörlerin uzun süre çalışabilmeleri ve ortaya çıkan fisyon ürünlerinin nötron azaltıcı etkilerini karşılayabilmesi için, kritik kütlede daha fazla fisil maddenin bir araya getirilmesi gerekir. Kritik kütlede fazla miktarda fisil malzeme içeren bir reaktörün gücü çok büyük bir hızla artar ve sistem ısınarak erir. Bu nedenle reaktörlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Reaktörlerin kontrolü nötron yutucu maddelerin reaktör içine gerektiğinde sokulması ile yapılır.

Fisyon nedeni ile ısınan yakıtın soğutulması ve sıcaklığının güvenli bir sınırdan tutulması gerekir. Bu iş için soğutucu adı verilen bir akışkan kullanılır ve yakıttan çekilen ısı ile elektrik üretimi için gerekli buhar veya sıcak gaz temin edilir.

Fisyon Reaktörleri

Yukarıda çok kısa ve ana hatları ile özetlenen olaylar teknoloji yardımı ile kontrol altında tutulabilirse, bir nükleer reaktör tasarlanmış olur. Her ne kadar fisyon teknolojisinin geçmişi elli yıl kadarsa da hemen hemen denenmemiş, tasarlanmamış





Ağır su ve doğal uranyum kullanan CANDU adı ile anılan basınçlı tüplü nükleer güç santralının reaktör kazanı. Bu reaktör, 600 MW gücünde diğer reaktör tiplerine kıyasla en büyük kor hacmine sahip ticari reaktördür

veya düşünülmemiş bir nükleer reaktör tipi bulmak çok zordur. Nerede ise yüzlere varan nükleer reaktör tasarımları içinde çok azı ticari olmuş ve halen kullanılmaktadır. Bu bize fisyon teknolojisinin ne denli bilinen tanınan ve güvenilir bir teknoloji olduğunun bir kanıtıdır. Füzyon teknolojisinin daha belki bir asır sürececek belirsizliğine karşın fisyon teknolojisi insanlığın en az otuz yıldır emrindedir.

Fisyon reaktörlerinin ticari olanlarının ortak bazı yönleri vardır. Hepsinin yakıtı doğal veya az zenginleştirilmiş uranyum oksittir. Nerede ise onbin reaktör yılına varan deneyim birikiminin olduğu oksit yakıt, kararlı ve güvenilir bir yakıttır. Diğer bir ortak yön ise elektrik üretimi için buhar elde edilmesidir. Buhar teknolojisi ne yazık ki elekt-

Nükleer santraller de bir termik santral tipidir. Santralde elde edilen buhar türbinde genişleyip iş yaparak jeneratörün milini döndürür ve elektrik üretilir. Türbinden çıkan basıncı düşük buhar kondansörde soğutma kulesinden gelen soğuk su ile soğutulur ve besleme suyu ısıtıcılarından geçerken ısınarak besleme suyu pompası ile tekrar santralin içine basılır.

KSR tipi bir reaktörde, gelen besleme suyu reaktörün koru içindeki yakıtların üzerinden geçerken ısınır ve buharlaşır.

BSR tipi bir reaktörde ise koru içinde dolaşan birinci devre suyunun ısıttığı buhar üreteçlerine giren besleme suyu burada buharlaşır ve türbine yollar. YSGSR tipinde reaktör koru içinden ısınarak geçen helyum buhar üreteçlerinde besleme suyunu buharlaştırarak soğutulur.

Bu tip nükleer güç santraller, hem çok güvenli, hem de diğer tiplere kıyasla daha verimlidir. Gelecekte ticari kullanımı giderek artacaktır.

Dünyada uranyumun azalması ve fiyatlarının artması kaçınılmaz olduğunda çok az uranyum ile çalışabilen SMHÜR tipi nükleer güç santralleri kullanılabilir.

Bu santrallerde, reaktör korundan geçen ve yakıt tarafından ısıtılan sıvı sodyum, ara ısı değiştiricisinde soğutulur. Ara ısı değiştiricisinde birinci devre soğutucusu sodyumdan ısı çeken ikinci devre soğutucusu sodyum ısınıp buhar üreticinde besleme suyuna vererek buhar üretir. Bu tip nükleer güç santralleri, çalışan örnekleri olmasına rağmen ticari değillerdir.

rik üretiminde en iyi ve verimli teknoloji olmamasına rağmen çok bilinen ve denenmiş bir teknolojidir.

Uranyumun U^{235} yüzdesini artırmağa zenginleştirme işlemi denilir ve çok pahalı bir işlemdir. Nükleer silahlanma ile ilgili olduğu için ayrıca elde edilemeyen ve transfer edilemeyen bir teknolojidir. Doğal uranyum ve yavaşlatıcı olarak su kullanırsak hiç bir zaman sonlu bir kritik kütleli olan bir reaktör tasarlayamayız. Eğer bunun tersi geçerli olsa idi Dünya'da doğal olarak çalışan fisyon reaktörleri bulunurdu. Gabon'da milyonlarca yıl önce bu tür bir reaktörün, suyun uranyumca zengin kayaların arasına girmesi ile oluştuğu bulunmuştur. Nükleer fizik bilenenlerin bu reaktörün ne zaman çalıştığını bulmaları çok kolaydır. Su ile yavaşlatılacak ve soğutulacak reaktör-

ler için zenginleştirilmiş yakıtı gerek vardır. Doğal uranyum kullanılması için daha az nötron yutan yavaşlatıcı ve soğutucular gereklidir. Hidrojenin bir izotopu olan deuteriyumdan yapılan ve ağır su adı ile anılan yavaşlatıcı aynı zamanda soğutucu olarak ta kullanılır. Yine çok iyi bir yavaşlatıcı olan grafitin katı fazda olması soğutucu olarak helyum gazının kullanımını gerektirir. Buna göre ticari fisyon reaktörleri; hafif su reaktörleri, ağır su reaktörleri ve gaz soğutmalı reaktör tipleridir.

Nükleer Elektrik

Fisyon reaktörleri kullanarak elde edilen elektrik enerjisi fosil yakıtlar kullanarak elde edilen elektrik enerjisinden daha ucuz ve temizdir. Fransa elektrik enerjisinin % 75'den fazlasını nükleer santrallerden elde etmekte ve Avrupa'da en ucuz elektrik üretimini sağlamaktadır. Farklı reaktör tiplerinin elektrik üretim maliyetleri birbirine çok yakındır ve bazı istisnalar dışında kömürden daha ucuzdur. Nükleer santraller enerji üretimi süresince çevreye ve özellikle atmosfere zararlı seviyelerde katı, sıvı ve gaz atıklar salmazlar. Fosil yakıtlı santraller ise, sera etkisine neden olan CO₂, ozon tabakasına zarar veren NO_x, asit yağmurlarına neden olan SO₂ gazları, kül, alçı taşı ve bazı toksik bileşikler gibi atıkları çevreye salarlar.

Nükleer santrallerin kullanılması yakıtları topluma bazı çevrelerce, bir sorun olarak sunulmaktadır. Yanmış yakıtların depolanması ve güvenli bir şekilde yok edilmesi bilinen ve kullanılan bir teknolojidir. Diğer taraftan yeterli bilgi edinilememesi nedeni ile toplumu endişeye sevk eden bir konu da reaktör güvenliğidir.

Nükleer Güvenlik

Nükleer reaktörler insanoğlunun yaptığı en güvenilir makinadır. Her makinanın ömrü boyunca her hangi bir sebepten bozulması çok olağan bir şeydir. Bir makina ne denli karmaşık ve ne kadar çok parçası varsa o denli çabuk bozulabilir. Çeşitli

AECL firması tarafından imal edilmiş bulunan ve CANDU tipi 8 nükleer güç santralini barındıran bu tesiste görülen uzun binada türbinler vardır. Dörtlü reaktör grupları arasında ve türbin binasının ters tarafında bulunan büyük silindirik bina, kaza durumunda oluşacak yüksek basıncı azaltacak su püskürtme sistemlerini barındırır. Bu tesisin kurulu gücü Türkiye'nin kurulu gücünün dörtte biri kadardır.



mühendislik bilimleri arıza yapabilecek makinalarda ne tip arızaların olabileceğini ve bu arızaların nasıl önleneceğini çok uzun zamandan beri incelemektedirler. Otomobil, uçak ve petrol sanayileri kaza analizi ve güvenlik konularında uzmanlık dalları oluşturmuşlardır.

Nükleer santral işletilirken ortaya çıkabilecek en kötü kazada bile, topluma zarar vermeyecek miktarda radyoaktiviteden daha fazlasının çevreye yayılmaması için her türlü önlem tasarım ve imalat sırasında alınır. Nükleer santrallerde iç içe yerleştirilmiş güvenlik engelleri vardır. Bunlardan ilki yakıtın kendisidir. Uranyum dioksit seramiktir ve evde kullanılan seramiklerin özelliklerine çok benzer sızdırmazlık özelliği vardır. Radyoaktif maddeler seramik yakıt içinden dışarıya fevkalade zor sızabilirler. İkinci engel seramik yakıtı saran ve basınca dayanıklı metal zarftır. Su ile etkileşmeye girip korozyona uğraması fevkalade yavaş olan bu metal zarf seramik yakıttan olabilecek sızıntılar için bir engel oluşturur. Yakıtların tümünü barındıran ve buhar üretmek için kullanılan yüksek basınçtaki soğutma suyunu içinde tutan

basınç kabının kalınlığı 25 cm kadardır. Basınç kabı ve borular üçüncü güvenlik engelidir. Basınç kabı, buhar üreteçleri gibi tüm reaktör parçalarını barındıran koruma kabının içi yaklaşık 2 cm kalınlığında çelik bir kabuk ve onun dışında 2-5 metre kalınlığında bir beton kabuktan oluşur. Ayrıca reaktörde tehlike durumunda kor soğutma sistemi, koruma kabuğu su püskürtme sistemi gibi bir çok güvenlik sistemi vardır. Nükleer santral tasarlanırken güvenlik sistemlerinin yetenekleri, gerçekleşmesi çok güç de olsa bazı kaza senaryolarına göre hesaplanır. Örneğin, koruma kabı üzerine bir jet savaş uçağı düşse, ya da deprem sebebiyle en önemli boru kırılıp soğutma sıvısı dışarı aksa bile güvenlik sistemleri, toplumun ancak kabul edilebilir bir sınırdan altında radyoaktiviteye maruz kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanır. Nükleer santrallerin ilk yatırım maliyetlerinin diğer santral tiplerine kıyasla fazla olmasının nedeni budur.

Kaynaklar:

Çakır, S. Termonükleer Fizyon, Bilim ve Teknik S.315, Subat 1994.
Kaplan, I. Nuclear Physics Addison-Wesley Publishing Co. 1963.
Özden, N. Nükleer Çağın İlk 40 yılı, Cilt-1, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü Genel Yayınları, No. 17, 1983.
Rahn, F.J. Adamantides, A.G. Kenton, J.E. Braun, C. A Guide To Nuclear Power Technology, A Wiley Interscience Publication, 1984.

Nükleer Teknolojinin Tarihçesi

Mehmet Tombakoğlu

H.Ü. Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Bizlerin anladığı anlamda radyoaktivitenin ilk bulunuşu 1895 yılında olmuştur. Alman fizikçi, Profesör Wilhelm Roentgen vakumdan elektrik boşalmasının etkilerini araştırırken bilmediği bir ışını keşfetmiş ve buna matematikte bilinmeyen anlamında kullanılan X-ışını adını vermiştir.

X-ışınlarının keşfinden sonra bir çok bilim adamı bu ilginç ışınların sırrını çözmek için deneylere başlamışlar ve sonunda bunun görülebilen ışığın yapısında, kısa dalga boyulu bir radyasyon olduğunu göstermişlerdir. X-ışınlarını araştıran Fransız fizikçisi Henri Becquerel uranyum tuzunun da benzer ışınlar yaptığını gözlemlemiştir. Bu olaydan esinlenen fizik doktora öğrencisi Marie Sklodowska Curie ile eşi Piere Curie, polonyum ve radyumu keşfetmişlerdir. Daha sonra Curie'ler yeni bir olgu olan radyoaktivite üzerine araştırmalarını yoğunlaştırmışlar ve bu olayın ağır radyoaktif elementlerin doğal bir bozunumu sonucu olduğuna karar vermişlerdir. 1903 yılında Curie'ler ile Becquerel bu çalışmalarından dolayı Nobel ödülünü kazanmışlardır. Bu olayın ardından bir çok bilim adamı yeni buluşlar yapmak ve Nobel ödülünü almak için çalışmalara başlamıştır. Bu bilim adamlarından bazıları, İngiltere'den Rutherford ve Soddy, Almanya'dan Hahn ve Meitner, İtalya'dan Fermi, Danimarka'dan Bohr'dur. 1919 yılında, Rutherford havadaki azotu alfa ışınları ile bombardıman ederek oksijene dönüştürmeyi başarmıştır. 27 Şubat 1932'de ise, James Chadwick alfa parçacıklarıyla berilyumu bombalayarak yüksüz bir parçacık olan nötronu keşfetti.

Frederic Joliot ve Irene Curie çiftinin kararlı bir element olan alüminyumun alfa parçacıkları ile bombardımanı sonucu yapay olarak radyoaktif olabileceğini göstermelerinin ardından, fizikçiler yeni radyoizotoplar bulmak için araştırmalara başladılar. Bu gelişmeler olurken, bir çok fizikçi yanlışya düşmüş ve deneysel olarak fisyon reaksiyonunun gözlenmesine karşın böyle bir reaksiyonun olabileceğini hayal bile edememişlerdir. Örneğin, Rutherford 1933 yılında yaptığı bir konuşmada atomun parçalanarak enerji elde edileceğini çok basit bir düşünce ve hayal olduğunu söylemekteydi. Bu olaydan sadece altı yıl sonra, 6 Ocak 1939 yılında Berlin'de Otto Hann ve Eritz Strassmann'ın makalesi Naturwissenschaften (Doğalbilimler) dergisinde yayınlanır. Ancak, atomun yapısını anlamamızda büyük katkılan olan Lord Rutherford bu olayı görece kadar yaşayamamıştır. Daha sonra bu buluşu destekleyen deneyler Amerika'da da yapılmıştır. Uranyum atomu nötron bombardımanı altında yaklaşık yarı ağırlıkta iki atoma bölünebil-

mektedir ve bir fisyon reaksiyonu sonucu yaklaşık 150 milyon elektron-volt enerji açığa çıkmaktadır. Bunun anlamı ise, 1 kg U^{235} izotopunun parçalanmasından çıkan enerjinin ancak 3 milyon ton kömür yakılarak elde edilebileceğidir. Bu haberin Nazi Almanyası ve Faşist İtalya'da duyularak fisyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerjinin bomba yapımında kullanılabileceği endişesi, Nazi Almanyası'ndan kaçan bir çok göçmen bilim adamının bu olayın üzerine düşmesine sebep olmuştur. Eylül 1939 tarihinde Hitler Almanyası'nın Polonya'yı işgali sonrasında, Macar göçmen bilim adamlarından Leo Szilard ve Eugene Wigner'in uranyumun önemini, Başkan Roosevelt'in dikkatine sunulması gereği konusunda girişimde bulunmalarına neden olmuş ve Albert Einstein'ın Başkan Roosevelt'e konunun önemini belirten bir mektup yazmasını sağlamışlardır. Einstein, Roosevelt'e yazdığı mektupta, E. Fermi ve L. Szilard'ın çalışmaları hakkında bilgi vererek uranyumun zincirleme reaksiyonu sonucu açığa çok fazla miktarda enerji ve radyum benzeri elementlerin çıkacağını belirtmiştir. Bu olgunun bomba yapımında kullanılması halinde çok güçlü olacağı vurgulamıştır. Aynı zamanda Almanların da bu konuyla ilgili çalışmalarını olduğunu uyarıda bulunmuştur. Bu olaylardan sonra, Başkan Roosevelt'in girişimleri sonucu uranyum üzerine olan araştırmalara hız verilmiştir. Bu sırada Amerikan Deniz Kuvvetleri de uranyum maddesinin denizaltılarda kullanılabileceğini ve fisyon reaksiyonunun oksijene gereksinimi olmamasından dolayı, denizaltıların su yüzüne çıkmadan kıtalararası yolculuk yapabileceğini düşünmekteydiler. 1940'lı yıllarda Deniz Kuvvetleri bu konuda çalışmaları başlatmış ve bunun mümkün olacağı saptanmıştır. Savaş boyunca Deniz Kuvvetleri bu konudaki araştırmaları desteklenmiş ama tüm kaynaklar öncelikle atom bombasının geliştirilmesi ve yapımı için yönlendirilmiştir. Bu çalışmalar sonucu, California Üniversitesinden E. M. McMillan atom numarası 93 olan ve Uranüs'den sonraki gezegen Neptün'den adını alan, neptünyum'u, daha sonrada neptünyum'un bozunumu sonucu açığa çıkan 94 atom numaralı element olan ve Neptün gezegeninden sonra gelen Plüton'dan adını alan, plütonyum'u bulmuşlardır. Bu elementte U^{235} izotopu gibi fisyon reaksiyonu yapabilmektedir. Bu gerçek, atom bombası yapımı konsundaki çalışmaları hızlandırarak, U^{235} ve plütonyum'un alternatif malzemeler olarak düşünülmesine neden olmuştur. Bu süreç ilerlerken, Alman bilim adamlarından Walter Bothe ve Peter Jensen 1941 yılında grafit ile ilgili ölçümler yap-



Ernest Rutherford



Niels Bohr



Erwin Schrödinger



Werner Heisenberg

mışlardır. Fakat, sonuç olarak grafitin doğal uranyumla kullanılamayacağına karar vermişlerdir. Bu yanlış Almanların, Amerika'da çalışmalarını sürdüren Fermi ve Szilard'ın aksine, ağır suyu seçmelerine sebep olacaktır. Fransa'da çalışmalarını sürdüren Joliot-Curie ekibi de ağır su kullanarak zincirleme fisyon olayının gerçekleştirilmesi için çalışmalarını sürdürmekteydiler. Fransa'nın işgali sonucu, bu ekip elemanlarından Halban ve Kowarski İngiltere'ye, oradan da Kanada'ya gidecekler ve ilk ağır su ile zincirleme fisyon olayını 1945'de Kanada'da başaracaklardır.

2 Aralık 1942 yılında, Enrico Fermi ve grubu, Chicago Üniversitesinin spor sahasının altında bulunan squash sahasında 6 ton metal uranyum, 24 ton uranyum oksit ve nötronları yavaşlatmak için kullanılan 385 ton grafitden oluşan Chicago Pile (Şikago Yığını) adı verilen yapıda, saat 09.45'ten itibaren kadmiyum kontrol çubuklarını yavaş yavaş elle dışarı çekerek, saat 15.20'de kritik değere ulaşmışlar ve ilk kontrollü fisyon reaksiyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bir kaç yıl süre ile bu tür zincirleme reaksiyonları yapan sistemlere, Chicago Pile'in grafit bloklarının üst üste yığılması sonucu inşa edilmesi nedeni ile, Pile (yığın) ismi verilmiş ve bu isim daha sonra kimyasal endüstride kullanılan reaktör ile değiştirilmiştir. Atom bombasının yapılabilmesi için, doğal uranyum'un izotoplarına ayrıştırılarak U^{235} izotopunun oranının % 90'lara çıkarılması gerekmektedir. Fakat, kimyasal olarak bu işlem yapılamadığından ve difüzyon yönteminin çok yavaş sonuç vermesi nedeniyle reaktörde yakıt içinde bulunan U^{238} izotopu nötronla bombardıman edilerek plütonyum elde etmek ve açığa çıkan plütonyum'u kimyasal yollarla ayırtmak amaçlanmıştır. Bu nedenle inşa edilen ilk pilot reaktör X-10, 1943 yılında çalışmaya başlamış ve ilk kimyasal ayırma işlemi 1944 yılında gerçekleştirilmiştir. İlk atom bombası denemesi ise 16 Temmuz 1945 yılında New Mexico'da başarıyla ulaşımıştır.