

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerji, ekonomik ve sosyal kalkınma için temel girdilerden birisidir. Nüfus artışı, şehirleşme, sanayileşme, teknolojinin yaygınlaşması ve refah artışına paralel olarak enerji tüketimi büyümektedir. Günümüzde, kişi başına enerji tüketimi veya daha doğru olarak, bir birim enerji tüketimi ile sağlanan üretim ve refah seviyesi, ülkelerin gelişmişlik seviyesi olarak görülmektedir.

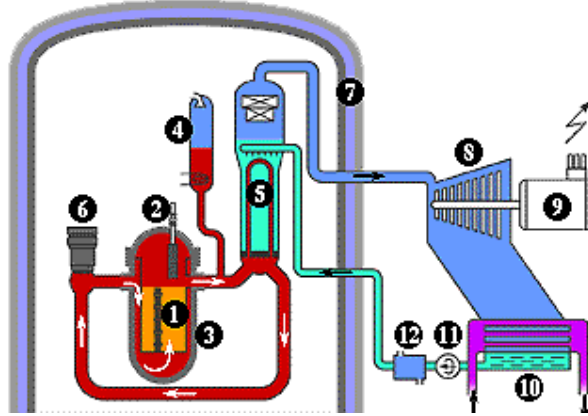
Enerji çağdaş yaşamın vazgeçilmez unsurlarından birisidir. Metabolizmik bir benzetmeyle, toplumsal organizmanın kanındaki şeker gibidir. Tarihte zengin enerji kaynakları üzerine pek çok medeniyet kurulmuş, enerji yetersizliği duvarına çarpmak bu medeniyetlerden bazılarının sonu olmuştur [1].

Nükleer enerji bir atomun çekirdeğinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluşan enerjidir. Çekirdek reaksiyonları genel olarak bir kütle kaybı ile gerçekleşir ve bu kütle kaybı da, 1905 yılında Einstein tarafından önerilen meşhur  $E=mc^2$  eşitliğine göre (E:enerji, m:kütle, c:ışık hızı) enerjiye dönüşür. Bu enerji olağanüstü büyüklükte bir enerjidir. Mesela 1 g kütle enerjiye dönüşürse,  $22 \times 10^9$  kcal'ye eşdeğer bir enerji açığa çıkar ki, bu enerji yaklaşık olarak 2500 ton iyi kaliteli kömürün (ısı değeri 8000 kcal/kg) verebileceği enerjiye eşittir [2].

Bir nükleer enerji santralindeki sistemler diğer güç santralleri ile aynı mantıkla çalışırlar. Aradaki fark ısı kaynağıdır. Tüm termik santrallerde ısı kaynağı olarak kimyasal yanma enerjisi kullanılır. Nükleer santrallerde fisyon yani parçalanma enerjisi kullanılır.

Nükleer reaktör denince, nötron üretimi ile kaçak ve fisyonuz yutulmalar arasında denge sağlamak amacıyla fisyon reaksiyonunu kontrol altında tutan ve çevreye zarar vermeden, gerekli enerjiyi üreten sistem düşünölmelidir.

Nükleer reaktörlerde açığa çıkan enerjinin, yakıt içinde ısı enerjisine dönüşmesi ve kalpten bir ısı eşanjörü(değiştirici) vasıtasıyla çekilmesi, yakıt çubuğundaki aşırı ısınmanın önüne geçilmesi ve reaktör kalbinde oluşacak erimenin önüne geçilmesi bakımından önemi vardır [3].



Şekil 1.1 Nükleer santral şeması

Yukarıda da gösterildiği gibi tipik bir nükleer santralin birimleri aşağıdaki gibidir [4, 5]:

1. Reaktör kalbi (reactor core)
2. Kontrol çubuğu (control rod)
3. Reaktör basınç kabı (pressure vessel)
4. Basınçlandırıcı (pressurizer)
5. Buhar üretici (steam generator)
6. Birincil soğutma su pompası (primary coolant pump)
7. Reaktör korunak binası (containment)
8. Türbin (turbine)
9. Jeneratör - Elektrik üretici (generator)
10. Yoğunlaştırıcı (condenser)
11. Besleme suyu pompası (feedwater pump)
12. Besleme suyu ısıtıcısı (feedwater heater)

Nükleer santraller, enerji üretirken nükleer reaksiyonu kullandıkları ve bunun sonucunda çevreye salınmaması gereken radyoaktif maddeler ürettikleri için, bazı ek sistemler kullanırlar. Örneğin, bir çok nükleer santralde nükleer yakıtı barındıran yakıt tüpleri arasından ısıtarak geçen su, doğrudan türbine gönderilmeyip, türbin için buhar üretilen ikinci bir çevrimi ısıtmak için kullanılır. Bununla ilgili sistemlere birincil sistem adı verilir.

İkincil sistem ise birincil sistemdeki ısıyı alarak türbin jeneratörünü döndürmek için gerekli olan buharın üretildiği sistemdir. Her iki sistem de kapalı birer döngü oluşturmuştur.

Soğutma sistemi ise, ikincil sistem içinde yer alan yoğunlaştırıcıyı soğutmak için kullanılır. Bu sistemde, sıcaklığı yoğunlaştırıcıya göre daha az olan deniz, göl veya ırmaklardaki su kullanılır. Suyun bolca bulunmadığı yörelerde ise soğutma kulelerinden faydalanılır.

Nükleer santraller birincil sistemlerindeki farklılıklara göre basınçlı sulu(PWR), kaynar sulu(BWR), basınçlı ağır sulu(PHWR) olarak adlandırılırlar.

### **1.1. Basınçlı Su Reaktörü**

Basınçlı su reaktörleri (PWR) ticari olarak elektrik üretimi için ABD'de kullanılan ilk reaktör tipidir. Bu tür reaktörlerde korda üretilen enerji birincil devre soğutucu vasıtasıyla kordan çekilir. İkincil devrede buhar üreteçlerinden alınan buhar türbinlerinde genişletilerek jeneratörde elektrik üretilir. Birincil devre basıncı, soğutucu suyun kaynamasını engellemek için, 150-160 atm civarındadır. Soğutucunun kora giriş sıcaklığı 290-300 °C, çıkış sıcaklığı ise 320-330 °C civarındadır. Reaktör korundan çıkan soğutucu türbinlerde kullanılan buharın üretimi için buhar üreteçlerine gönderilir. Reaktörlerin birincil soğutucu devreleri iki, üç ya da dört tane benzer döngüden oluşur. Her bir döngüde bir buhar üretici, bir reaktör soğutucu pompası ve bağlantı boruları bulunur. Ayrıca reaktör basıncını kontrol edebilmek için bir basınçlayıcı bu döngülerden biri üzerinde bulunur [5].

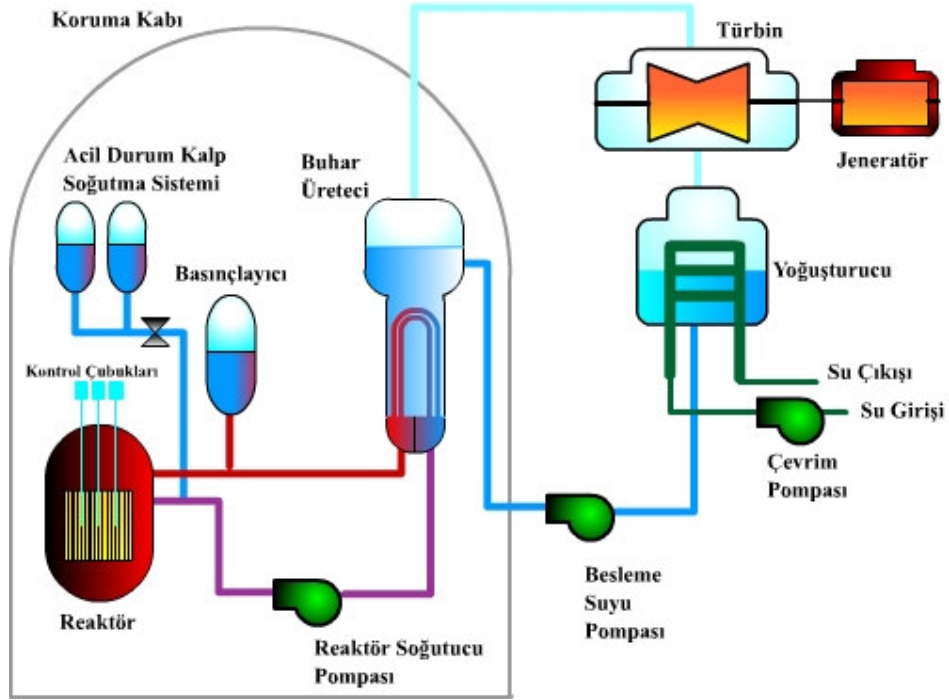
Yakıt içinde fisyonndan açığa çıkan nötronlar soğutucuda yavaşlatılarak zincirleme fisyon reaksiyonunu sağlarlar. Aynı anda açığa çıkan kinetik enerjinin büyük bir kısmı yakıt içinde ısı enerjisiye dönüşür ve bu enerji ısı iletimi ile soğutucuya aktarılır, bir kısmı ise hızlı nötronlar tarafından moderasyon anında moderator vazifesi de gören soğutucuya aktarılmıştır.

Reaktör koru dayanıklı bir çelikten yapılmış silindirik bir basınç kabı içerisinde yerleştirilmiştir. Basınç kabı bu tip reaktörlerin ömrünü kısıtlayan en önemli bileşendir.

Hemen hemen bütün reaktör tiplerinde reaktör basınç kabı ve soğutucu sistemleri koruma kabı adı verilen çelik bir kabuğun içindedir. Bu çelik kabuk betondan yapılmış ikinci bir koruyucu yapının içerisinde yer alır. Bu sistem dış etkilerden reaktör sistemini korumak ya da reaktörden bir kazadan dolayı açığa çıkabilecek radyasyonun çevreye sızmasını önlemek için tasarlanmıştır [4].

Dünyadaki 400 den fazla sayıda nükleer santralin yaklaşık olarak yarısı basınçlı su reaktörüdür. Basınçlı su reaktörlerinde, birincil sistem yaklaşık 150 atmosferlik bir basınç altında tutularak, içinde bulunan suyun yüksek sıcaklıklara kaynamadan çıkarılması sağlanmıştır.

Aşağıda Şekil 1.2’de basınçlı su reaktörü şeması gösterilmiştir.



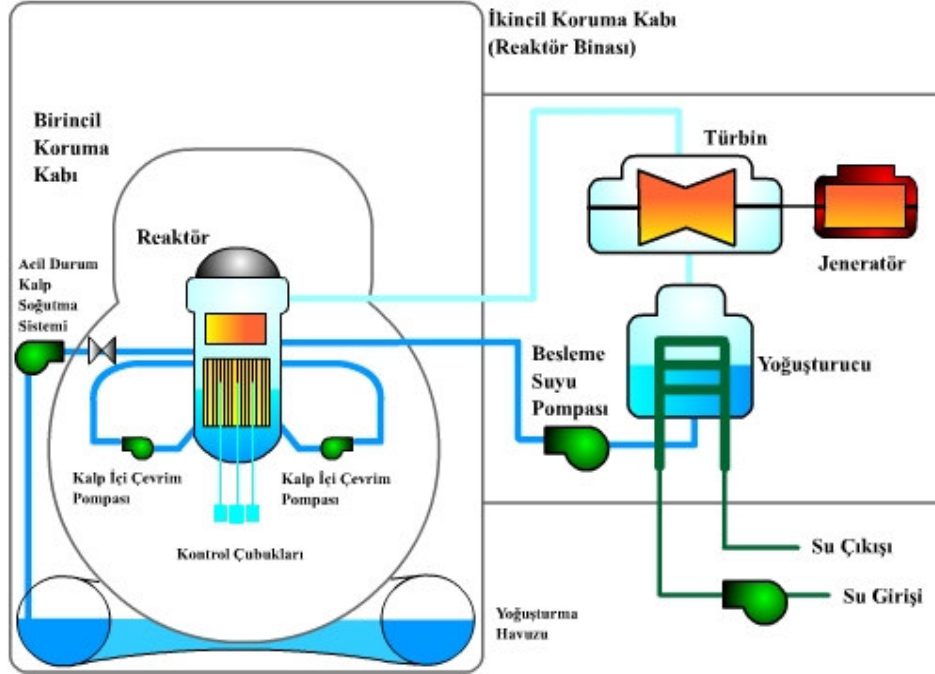
Şekil 1.2. Basınçlı su reaktörü şeması [5]

## 1.2. Kaynar Su Reaktörü

Kaynar su reaktörü (BWR) dünyada basınçlı su reaktöründen sonra en yaygın olarak kullanılan reaktör tipidir. Kaynar su reaktörleri birçok yönden PWR reaktörüne benzemekle birlikte, temel fark reaktör kuru içinde kaynama olayına izin verilmesidir.

BWR tipi reaktörlerin diğer hafif sulu reaktörlere göre üstünlüğü reaktör kuru içinde doğrudan elde edilen buharın türbinlere gönderilmesidir. Bu nedenden dolayı BWR reaktörleri doğrudan çevrim ile çalışır. Basıncın PWR tipi reaktörlere göre daha düşük olması nedeniyle (70 atm) basınç kabı et kalınlığı daha düşüktür [4].

Aşağıda Şekil 1.3’de kaynar su reaktörü şeması gösterilmiştir.

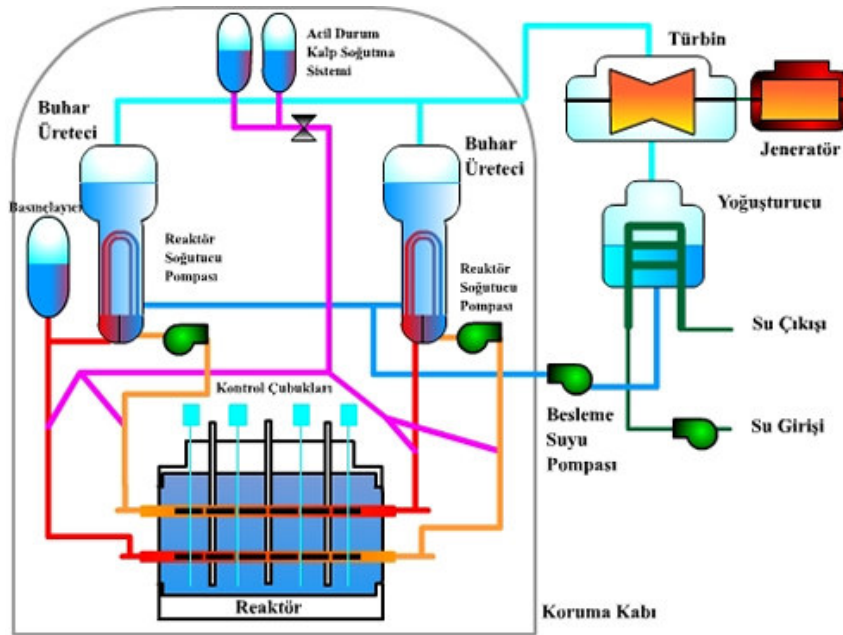


Şekil 1.3. Kaynar su reaktörü şeması [5]

### 1.3. Basıncılı Ağır Su Reaktörü

Basıncılı ağır su reaktörleri (PHWR), basıncılı su reaktörleri ile benzer özellikler taşırlar. Ağır su reaktörü olarak adlandırılmalarının nedeni moderator ve soğutucu için ağır su ( $D_2O$ ) kullanmalarındır.

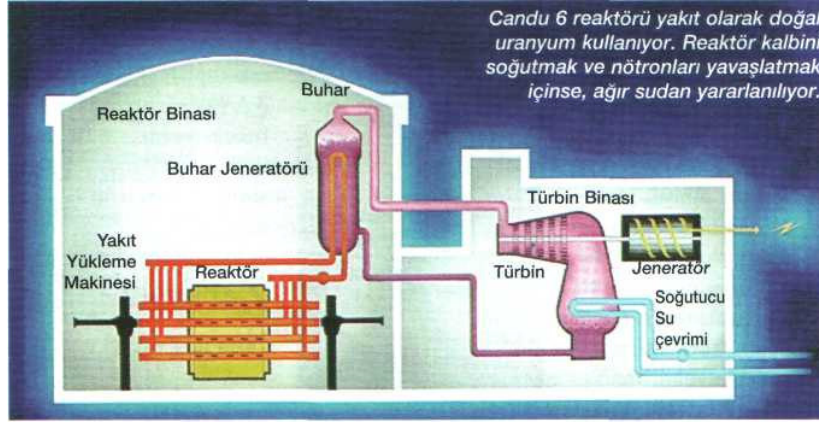
Aşağıda Şekil 1.4'de basınçlı ağır su reaktörü şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Basınçlı ağır su reaktörü şeması [5]

Bu tür reaktörlerin en yaygın olarak kullanıldığı ülke Kanada'dır. Kanadalılar son 40 yılda CANDU (CANada Deuterium Uranium) adını verdikleri Kanada reaktörünü tasarlayıp geliştirerek basınçlı ağır su reaktörü teknolojisinde lider olmuştur.

CANDU reaktörlerinde yakıt olarak doğal uranyum kullanıldığı için zenginleştirme tesislerine ihtiyaç yoktur. Düşük basınçta moderatör, ağır su ( $D_2O$ ) ve yatay silindir şeklinde bir reaktör kabı vardır. Reaktör kabının içinde yatay şekilde geçen 380 adet yakıt kanalı bulunur. Yakıt kanalları doğal uranyum yakıt ve ağır su soğutucusundan oluşur. Yakıt kanalındaki yakıt elemanları basınç tüpü içindedir [6]. Aşağıdaki Şekil 1.5'de CANDU tipi reaktör şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.5. CANDU Tipi reaktör şeması [7]

Nükleer santrallerde, atık maddelerin çevreye bırakılmamasını ve aynı zamanda nükleer reaksiyon sonucunda oluşan ısının her durumda reaktörden alınmasını garantiye alacak şekilde birçok güvenlik önlemi alınmıştır.

Nükleer santraller tasarlanırken olabilecek en kötü hayali kaza koşuluna göre tasarlanır. Reaktör tiplerine göre olabilecek en kötü kazalar farklı olabilir. Amaç en kötü kaza durumunda bile nükleer santralden çevreye insan sağlığını tehdit edecek miktarda radyoaktif maddelerin çıkmamasını sağlamaktır. Bu nedenle nükleer santrallere dört ile altı arasında değişen sayıda, radyoaktivitenin dışarı kaçmasını önleyecek engel konur [8].

İlk engel yakıtın kendisidir. Nükleer yakıtların seramik yapıda oluşları nedeniyle radyoaktif maddelerin sadece % 1'i yakıttan dışarı çıkabilir.

**Yakıt Zarfı:** Nükleer yakıt elemanları zirkonyum alaşımı olan Zircaloy'dan yapılmış iki ucu kapalı silindirik bir boru içersindedir. Bu borular aşınmaya karşı çok dayanıklı olup radyoaktif maddelerin soğutucuya geçmesini engeller, ayrıca yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı zarf, seramik nükleer yakıt içinden çıkabilen radyoaktif gaz ve maddeleri tutar.

**Reaktör Kabı:** 25 cm'den daha fazla kalınlıkta, içi paslanmaz çelikten imal edilen bu kap; basınç, sıcaklık ve radyoaktiviteye karşı oldukça dayanıklıdır. Dizaynları,



üretimleri ve testleri titizlikle yapılır. Reaktör kalbi, reflektör ve kontrol çubukları, reaktör kabının içine yerleştirilir. Reaktörün yakıtlarının oluşturduğu ve nükleer teknolojide kor adını verdiğimiz, ısı enerjisinin kaynağından geçen ve koru soğutup elektrik üretmek için gerekli buharı sağlayan su, kapalı bir devrede akar. Birinci devre adı verilen bu döngü yüksek basınca dayanıklı, et kalınlıkları fazla olan borular ve aygıtlar içerisinde akar. Bu üçüncü engeldir.

**Beton Zırh:** Reaktörün en dışında, biyolojik kalkan görevi yapan 120 cm kalınlıkta betondan yapılmış zırhtır. Dışarıya radyasyon çıkmamasını garanti altına alır. Ayrıca reaktör personeli, kalpten kaynaklanan radyasyondan korur.

**Birinci ve İkinci Koruma Kabuğu:** Birinci yapı çelikten imal edilmiştir, santralin nükleerle ilgili tüm parçaları bunun içerisinde yer alır. İkinci yapı ise betonarme olup 1,5-2 metre kalınlığında son koruyucu bariyerdir. Her iki koruma kabuğu da reaktörü olası bir kaza durumunda radyoaktif sızıntıların çevreye ulaşmasına engel olur. Ayrıca uçak düşmesi, füze saldırıları gibi dış etkilerden reaktör ekipmanlarının korunmasını sağlamış olurlar.

Çok zayıf bir olasılıkla eğer bu altı engelde aşılmışsa çıkabilecek radyoaktiviteyi belirli bir bölgede sınırlı tutabilmek için, yedinci engel olarak da, nükleer santral civarında yerleşime kapalı bir yasak bölge oluşturulur. En kötü hayali kazalarda bile, bu bölge dışında nükleer santralin tel örgüsü dibinde yaşayan bir insanın, sağlığı için tehlikeli olabilecek, mücade edilen dozdan daha fazla doz almayacağı şekilde yasak bölgenin sınırı tesbit edilir. Bu bölge yaklaşık 1 km<sup>2</sup> civarındadır.

Nükleer santrallerin yapımında diğer önemli husus, santralin yapılacağı yerin seçilmesidir. Yer seçiminde en önemli kriter, reaktörün yapılacağı bölgenin sismik ve meteorolojik özellikleridir. Sismik özellik denilince meydana gelebilecek bir depremde, santrale ne kadarlık bir ivmeyle kuvvet uygulanacağını göstermesi açısından önemlidir. Nükleer santral genelde santral sahasından yaklaşık 60 km uzaklıkta Richter ölçeğine göre 8 ve santral yerinin 30 km derinliğinde Richter ölçeğine göre 6,5 büyüklüğünde meydana gelebilecek depremlere karşı önlem

alınabilecek tasarımı yapılır. Meteorolojik olaylar da (hortum, tayfun, sel gibi doğal afetler) tasarımda dikkate alınır [9].

Nükleer yakıt, seramik formunda, yaklaşık 1 cm çap ve yüksekliğinde silindirik parçaların art arda dizilmesiyle yine silindirik biçimde 3,5-4 m uzunluğundaki kapalı ince sızdırmaz metal bir zarf içine yerleştirilir [10]. Bu tüplerin binlercesinin, aralarından soğutucu suyun geçmesine izin verecek şekilde bir araya getirilmesi ile de reaktör kalbi oluşturulmuştur. Bu kalp ise paslanmaz çelikten yapılan bir basınç kabının içinde bulunur (basınçlı veya kaynar sulu reaktörlerde). Basınç kabı ve buna bağlı sistemler ise reaktör korunak binası adı verilen betondan yapılmış kubbemsi yapının içinde bulunurlar. Dolayısıyla, yakıt içinde bulunan radyoaktif maddelerin dışarıya salınmalarını, seramik yakıt, yakıt tüpü, basınç kabı, çelik gömlek ve beton korunak binası, kademeli olarak engellemiş olurlar.

Özet olarak Nükleer enerji % 100 güvenli ve çevresel açıdan risksiz bir alternatif değildir. Fakat kömür gibi alternatifleri yanında "kötünün iyisi"dir. Kamuoyu tartışmalarında artık "Nükleere geçit yok" gibi kategorik dışlamalarda bulunmak yerine; bu enerjiyi nasıl ucuz bir maliyetle devreye sokabilir, güvenli bir şekilde çalıştırabilir ve ürettiği atıkların çevre riskini nasıl en aza indirgeyebiliriz konularını tartışmakta fayda vardır [1].

Nükleer reaktörde yakıt, yapı, yavaşlatıcı, kontrol ve soğutucu olarak kullanılan malzemeler hakkında bilgi vermek yerinde olacaktır.

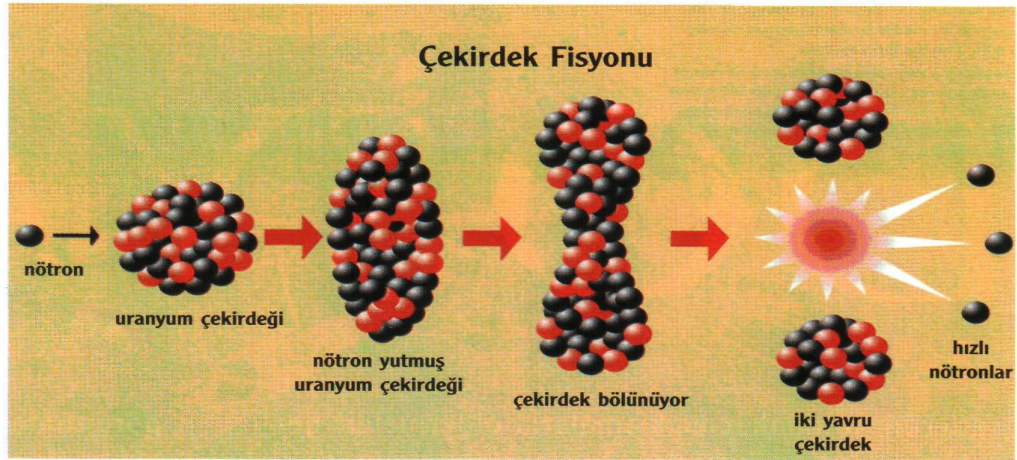
## BÖLÜM 2. YAKIT MALZEMELERİ

### 2.1. Genel Bilgi

Fisyona uğrayarak enerji üretimi için reaktöre konulan malzemelere, reaktör yakıtları denir.

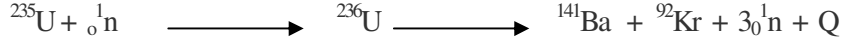
Fisyon, kararsız yapıya sahip ağır bir çekirdeğin parçalanarak kararlı yapıya sahip iki ve daha fazla hafif çekirdek oluşturmasıdır. Fisyona uğrayan radyoaktif çekirdek parçalandıktan sonra, hafif çekirdeklerin oluşması yanında fisyon başına ortalama 2-3 nötron oluşur. Oluşan bu nötronlar diğer ağır çekirdeklere çarparak fisyon reaksiyonunu devam ettirir. Bu olaya da zincirleme fisyon denir.

Aşağıda Şekil 2.1’de fisyon olayı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Fisyon olayı [11]

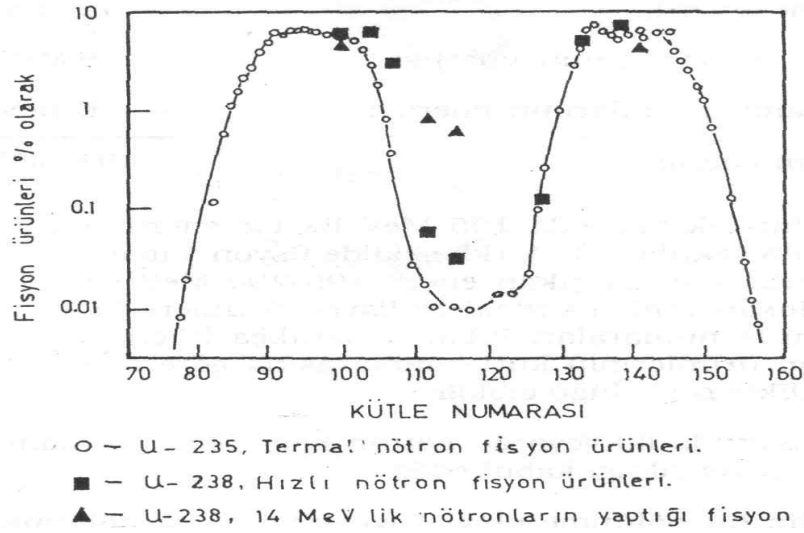
Yukarıda şekil olarak gösterilen fisyon olayını denklemlerle aşağıdaki gibi gösterebiliriz.



Burada Q reaksiyonda açığa çıkan enerjiyi göstermektedir. Bu enerji oldukça büyüktür. Aşağıda bu enerjiyi parçacıklara göre ayrıntılı olarak gösterebiliriz.

Fisyon ürünlerinin (oluşan yeni çekirdeklerin) enerjisi	162 MeV
Beta parçalanma enerjisi	5 MeV
Gamma parçalanma enerjisi	5 MeV
Nötrino enerjisi	11 MeV
Fisyon nötronlarının enerjisi	6 MeV
Ani gamma ısınlarının enerjisi	6 MeV
	<hr/>
Toplam enerji	195 MeV

Görüldüğü gibi bir tek fisyonunda 195 MeV'lik bir enerji açığa çıkar. Uranyum-235 takriben 30 farklı şekilde fisyon yapar. Bu fisyonların her birinde açığa çıkan enerji 195-200 MeV civarındadır. Fisyonunda oluşan yeni çekirdeklere fisyon ürünleri denir. Fisyon ürünleri, kütle sayıları itibarıyla oldukça küçük bir aralıktadır. Fisyon ürünlerinin kütle sayısına göre dağılımı Şekil 2.2'deki grafikte görüldüğü gibidir.



Şekil 2.2 U-235 ve U-238'in üç farklı enerjideki nötronlarla yaptıkları fisyonlarda hasil olan elementlerin (fisyon ürünlerinin) a kütle sayılarına göre dağılım yüzdeleri [12]

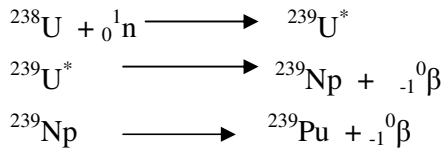
Fisyon olayında kütle sayıları 72 den 162'ye kadar değişen ürün atomlar meydana gelebilir. Ürün elementlerin kütle sayıları toplamı, daima 234 olacak şekilde değişir. Yani 131 kütle sayılı bir ürün element varsa diğeri ( $234-131 =$ ) 103 kütle sayılı element olmak zorundadır. Toplamın kütle sayısının 234 olmasının sebebi olaydan iki tane nötron çıkacağı ve böylece toplamın 236'ya eşit olmasındandır. Bu çeşitli fisyon ürünleri arasında, bir fisyonunda hangi ürünlerin meydana geleceğini söyleyebilmek mümkün değilse de atom ağırlıkları 95 ile 140 civarında olan ürünlerin meydana gelme olasılığının daha yüksek olduğu söylenebilir. Aşağıdaki Şekil 2.3'te, nükleer reaktörlerden elde edilen radyoizotopların listesi verilmiştir [13].

Tablo 2.3 Nükleer reaktörlerden elde edilen radyoizotoplar [13]

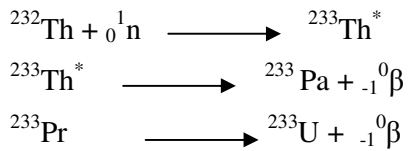
Fisyon Ürünleri	İzotop	Yarı Ömür
Kripton(g)	Kr-85	11 yıl
	Kr-88	3 saat
Stronsiyum	Sr-90	30 yıl
İyot	I-129	17.000.000 yıl
	I-131	8 gün
Xsonon(g)	Xe-133	5 gün
Sezyum	Cs-134	2 yıl
	Cs-137	30 yıl

Nükleer Reaktörlerde fisyon malzemesi olarak kullanılan yakıtları doğal olarak bulunanlar ve yapay olarak üretilenler olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz.

Doğal olarak kullanılacak yakıt  $^{238}\text{U}$ 'tir. Çünkü doğal uranyum içinde %0,71 oranında  $^{235}\text{U}$  ve %99,29 oranında  $^{238}\text{U}$  bulunur. Doğal uranyum reaktör kalbine yerleştirildiğinde birinci izotop fisyon yaparak enerji verir; bu, reaktörü çalıştıran yakıttır. İkinci izotop birincinin fisyonuyla çıkan nötronların bombardımanı altında düşük bir verimle  $^{239}\text{Pu}$ 'a dönüşür.



Böylece bu yöntemle yapay olarak reaktörlerde düşük bir verimle  $^{239}\text{Pu}$  üretilmiş olur. Bunun dışında yapay olarak üretilen diğer bir yakıtta  $^{233}\text{U}$ 'tür. Bu malzemenin üretildiği hammadde ise  $^{232}\text{Th}$ 'dir.



Yukarıda açıklamalar ışığında reaktörlerin en önemli kısmı olan kalbi oluşturacak olan yakıt elemanları içinde  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  veya  $^{239}\text{Pu}$  gibi fisyon malzemelerinin bulunması şarttır. Bu elementler doğada var olan doğal uranyum  $^{238}\text{U}$  veya toryum  $^{232}\text{Th}$  gibi ham maddelerden elde edilirler.

Nükleer yakıtlar çağımızın önde gelen stratejik maddeleridir. Devletlerin sıkı denetimi altındadırlar. Hele ulusal sınırların dışına çıkarılmaları veya satışları ancak ilgili hükümetler arasında yapılacak anlaşma ile mümkündür. Söz konusu malzemeler bomba yapımında kullanılabilir derecede saflaştırılmış iseler, örneğin saf  $^{235}\text{U}$ , saf plütonyum  $^{239}\text{Pu}$ , saf  $^{233}\text{U}$  halinde iseler, izin mecburiyeti gramlar ölçeğinden başlar [14].

Nükleer reaktörlerde yaygın olarak kullanılan yakıt uranyumdur. Bunun dışında uranyum oksitler, metal uranyum, toryum ve plütonyum kullanılmaktadır.

## 2.2. Uranyum

Doğal olarak bulunan elementlerin sonuncusu ve en ağırıdır. Tabiatta hiçbir zaman serbest olarak bulunmaz. Uranyumun atom ağırlığı 238,0289 'dur. Çekirdeğinde 92 proton ile ortalama 146 nötron bulunur. Uranyum bir metaldir. Parlatılmış yüzeyi donuk gümüşidir. Birkaç dakika içinde saman sarısı, birkaç gün içinde mavimsi siyah ve daha sonra tam siyah renklerini alır. Yoğunluğu  $19,07 \text{ g/cm}^3$  'dir. Bu yoğunluk ile kurşundan % 70 daha yoğundur. Erime sıcaklığı  $1132 \text{ }^\circ\text{C}$  ve kaynama sıcaklığı  $3.818 \text{ }^\circ\text{C}$  'dir.

Doğal uranyum dünyada birçok yerde bulunabilmektedir. Granit kayalarda, deniz suyunda 3 ile 4 ppm [*Part(s) Per million*: Milyonda bir] kadar bulunur. Ayrıca turbalarda (bataklıklarda bulunan, kısmen ayrılmış materyalden oluşan yakıt), bitümlü çamurlarda ve linyit küllerinde de bir miktar uranyum vardır. Fakat bu kaynakları değerlendirmek çokta ekonomik değildir.

Uranyum kaynakları, jeolojik yapılarına göre aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

**Görünür Kaynaklar:** Bilinen mineral yataklarda bulunan ve günümüz teknolojisi ile belirlenen, üretim maliyet sınırları içinde elde edilebilir uranyumu ifade eder.

**Muhtemel Kaynaklar (I):** Görünür kaynaklara ilaveten jeolojik yapısı nedeniyle iyi araştırılmış bölgelerin uzantılarında ve jeolojik sürekliliği belirlenmiş yataklarda bulunması beklenen uranyumu ifade eder.

**Bilinen Kaynaklar:** Görünür Kaynaklar ve Muhtemel Kaynaklar (I)'in toplamı olarak tanımlanır.

**Muhtemel Kaynaklar (II):** Muhtemel Kaynaklar (I)'e ilaveten mineralleşmenin olduğu bilinen yatakların bulunduğu bölgelerdeki veya iyi bilinen jeolojik oluşumlarda bulunması beklenen uranyumu ifade eder. Bu kaynakların güvenilirliği Muhtemel Kaynaklar (I)'den daha azdır.

**Mümkün Kaynaklar:** Muhtemel Kaynaklar (II)'ye ek olarak dünyada bulunduğu kabul edilen fakat keşfedilmemiş kaynaklardır.

**Diğer Bilinen Kaynaklar:** Yukarıdaki tanımlara tam olarak uymayan kaynaklardır [15].

%1'den fazla uranyum ihtiva eden kaynaklara zengin kaynaklar denir. Bu zenginlikteki kaynaklar Belçika Kongosu ve Kanada'dadır. Orta zenginlikteki uranyum yatakları ABD'de Arizona, Colorado, New Meksico ve Utah'ta, ABD dışında ise, Kanada ve Avustralya'dadır.

Topraktan çıkan uranyum madeni, hemen rektörlerde yakıt elemanı olarak kullanılamaz. Cevher halinden reaktöre girecek hale getirilinceye kadar uzun bir hazırlık döneminden geçmesi gerekir. İlk olarak öğütme, elekten geçirme, yıkama ve yüzdürme gibi metodları içeren maden işletmeciliği aşamasında yabancı maddelerden ayıklanır. Daha sonra, maddenin cinsine göre seçilen kimyasal



arındırma işlemine tabi tutulur. Bundan sonrada izotopik zenginleştirme, metallurjik şartlandırma ve mekanik işleme aşamalarından geçer. Uranyumun reaktöre girinceye kadar geçirmek zorunda olduğu bütün bu işlemlere toptan yakıt hazırlama adı verilir [14].

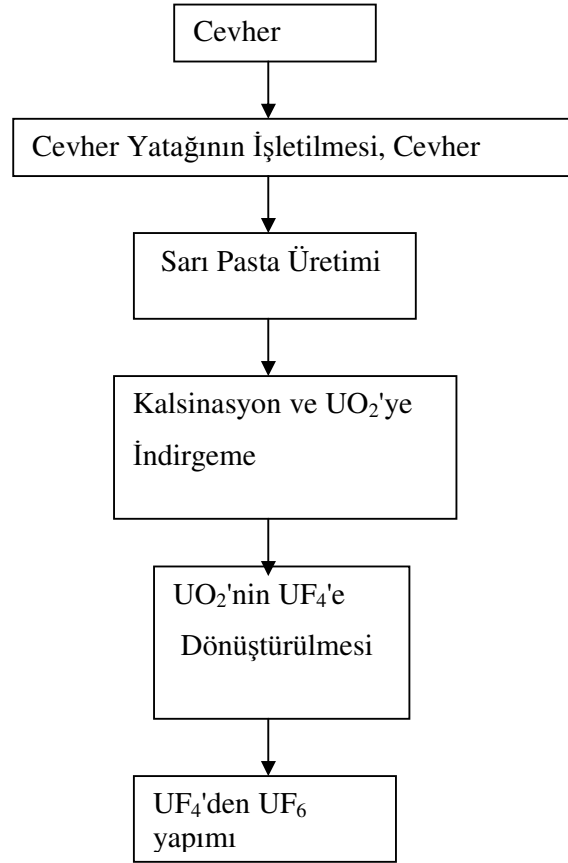
Asit proses adı verilen bir metotta, kalsine edilmiş cevher su ile yıkandıktan sonra  $H_2SO_4$  ve  $HCl$  karışımı ile işlem görür ve Sodium Diuranat adı verilen sarı toz  $Na_2U_2O_7$  elde edilir.

Karbon proses adı verilen diğer bir metotta ise, kalsine edilmiş cevher Sodyum Karbonat eriyiği içine dökülür ve Uranyum'un büyük bir kısmı ayrılır. Ekseriya karışık bir halde bulunan Vanadyum, Sodyum Vanadat şeklinde ayrıldıktan sonra geri kalan kahve renkli toz  $UO_2$ 'dir.

Nükleer endüstride kullanılabilmesi için ön arıtmada elde edilen sarımtırak kahverengi tozun ileri derecede saflaştırılması gereklidir. Ön saflaştırmaya tabi tutulmuş ham malzeme yaklaşık olarak %65 kadar oksit ihtiva eder. Bu malzemenin %90'ın üzerinde bir saflığa getirilmesi gereklidir.

İleri derecede saflaştırılacak malzeme,  $U_3O_8$ 'in saf olmayan koyu siyah hali Picblend, (uranyum oksit içeren maden cevheri)  $Na_2U_2O_7$  Sodium Diuranat tuzu veya  $(NH_4)_2U_2O_7$  Amonyum Diuranat olmak üzere üç çeşittir. Bu üç malzeme içindeki tüm yabancı maddelerin ayıklanarak geriye sadece  $UO_3$ ,  $U_3O_8$  veya diğer oksitlerin kalmasına ileri saflaştırma adı verilir.

Uranyum cevheri doğada bulunuş şeklinden nükleer reaktörde kullanılacak yakıt haline getirilinceye kadar birçok evreden geçer. Bu evreleri şematize edecek olursak, Şekil 2.3'teki gibi olur.



şekil 2.3 Uranyum'un üretim işlemleri [16]

Uranyum uluslararası piyasalarda nükleer enerji hammaddesi olarak, sarı pasta halinde işlem görür. Ürün standardı olarak sarı pastanın en az % 60 U içermesi istenmekte ve artırılmış bir uranyum bileşğinde (UO<sub>2</sub>, UF<sub>6</sub> gibi) diğer elementlerin toplamının 1gr uranyum için 300 ppm'den fazla olmaması gerekmektedir [16].

ABD'de uygulanan metotta, Picblend veya Na<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub> nitrik asit içinde eritilir ve uranyum çıkarma kolonuna yollanır. Burada Tribütil Fosfat (TBP) kullanılıp, eriterek çıkarma metodu ile uranyum, UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 2TBP şeklinde ayrılır. TBP(C<sub>12</sub>H<sub>27</sub>PO<sub>4</sub>), kerozen ile eritilerek alınınca geriye UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> kalır. Bu madde su ile yıkanarak kavrulduktan sonra portakal renkli oksit UO<sub>3</sub>'e dönüşür.

İngiltere'de uygulanan bir metotta ise, nitrik asit içinde eritilerek elde edilen eriyik Hidrojen Peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) yardımı ile çöktürülerek, Uranyum Peroksit UO<sub>4</sub> elde

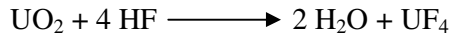
edilmektedir. Bu da kavruarak  $UO_3$ ' e dönüştürülür. Saf oksit içindeki yabancı maddelerin oranı aşağıdaki tablodaki gibi olmalıdır.

Tablo 2.2 Saf oksit içindeki yabancı maddelerin oranı

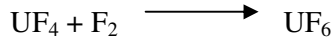
Element	Fe	Mn	Ni	Cr	Cd	Cu	Mo
Ppm	1,5	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3

$UO_3$ ,  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında hidrojen akımı içinde indirgemeye tabi tutularak  $UO_2$ ' ye dönüştürülür.

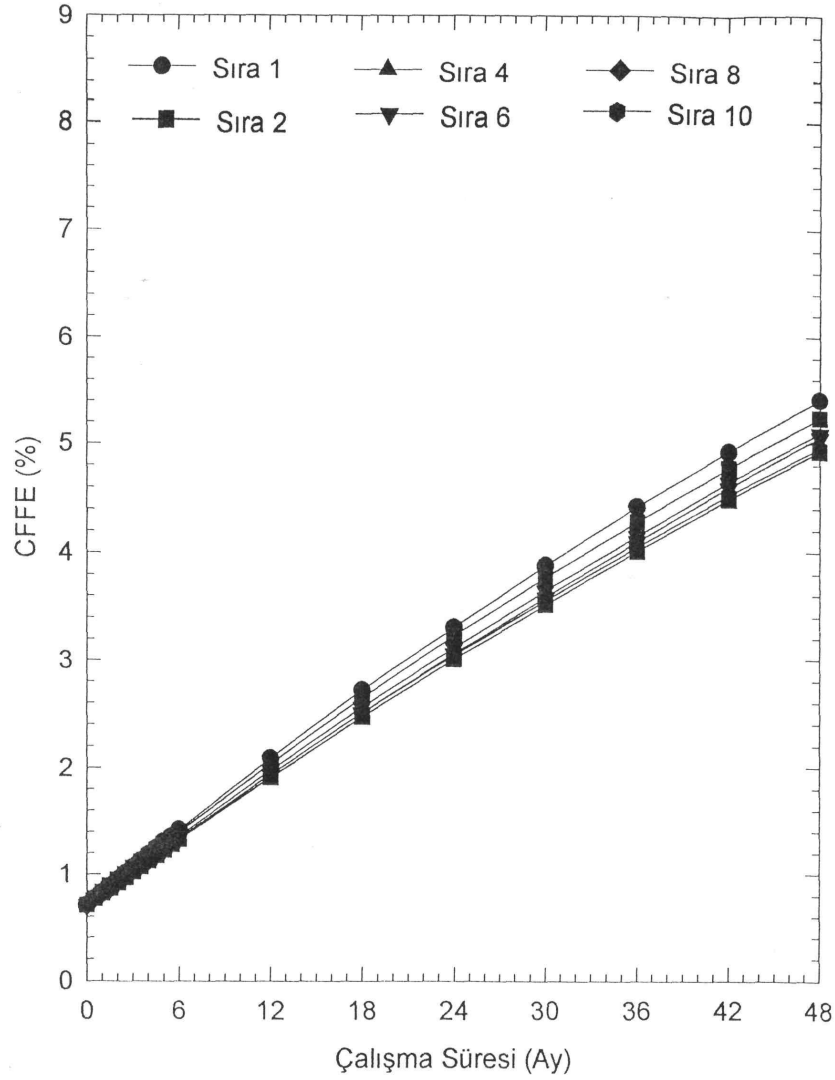
Bu oksit hidrojen florid gazı ile işleme konursa, bu kez de yeşil tuz adı verilen  $UF_4$  elde edilir.



Bu şekilde elde edilmiş olan yeşil tuz  $UF_4$ ,  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de monel veya bakır kaplarda fluor gazı ile temasa getirilerek uranyum hexaflorür elde edilebilir.

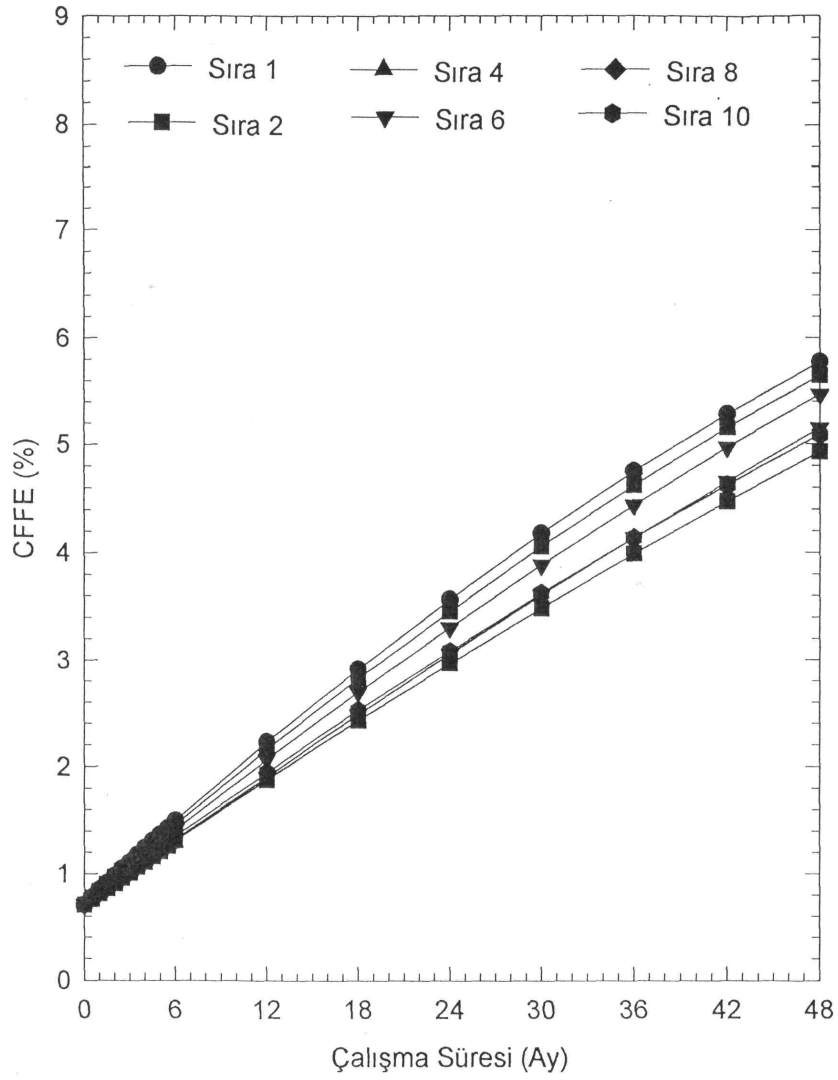


$UF_6$ , uranyumun zenginleştirilmesi aşamasında kullanılan gaz bileşimidir. Aşağıda, bir reaktörde 48 aylık çalışma sonunda  $UF_6$ ,  $UO_3$ ,  $U_3O_8$  ve  $UF_4$  yakıtlarından, gaz soğutuculu blanket için kümülatif fisil yakıt zenginleştirilmesi (CFFE) ile ilgili grafikler verilmiştir.



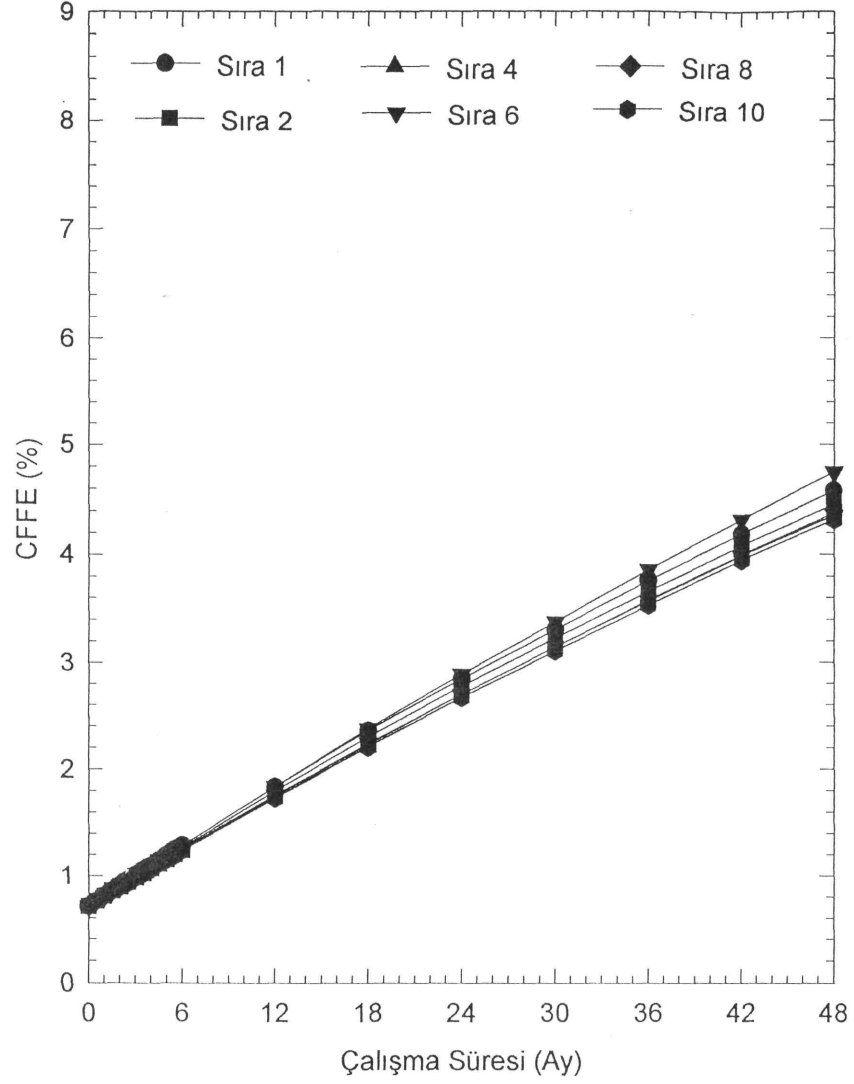
Şekil 2.4 UF<sub>6</sub> Yakıt ve gaz soğutuculu blanket için çalışma süresi esnasında yakıt bölgesinde fisil yakıt kalitesinin zamanla değişimi [14]

Şekil 2.4, 48 ay çalışma durumunda olan gaz soğutmalı bir reaktörde UF<sub>6</sub> yakıt kullanıldığında fisil izotopların izotopik yüzdesinin toplamı yani CFFE değerinin, yakıt sırasına göre 5,4 ile 5,0 arasında değiştiğini göstermektedir.



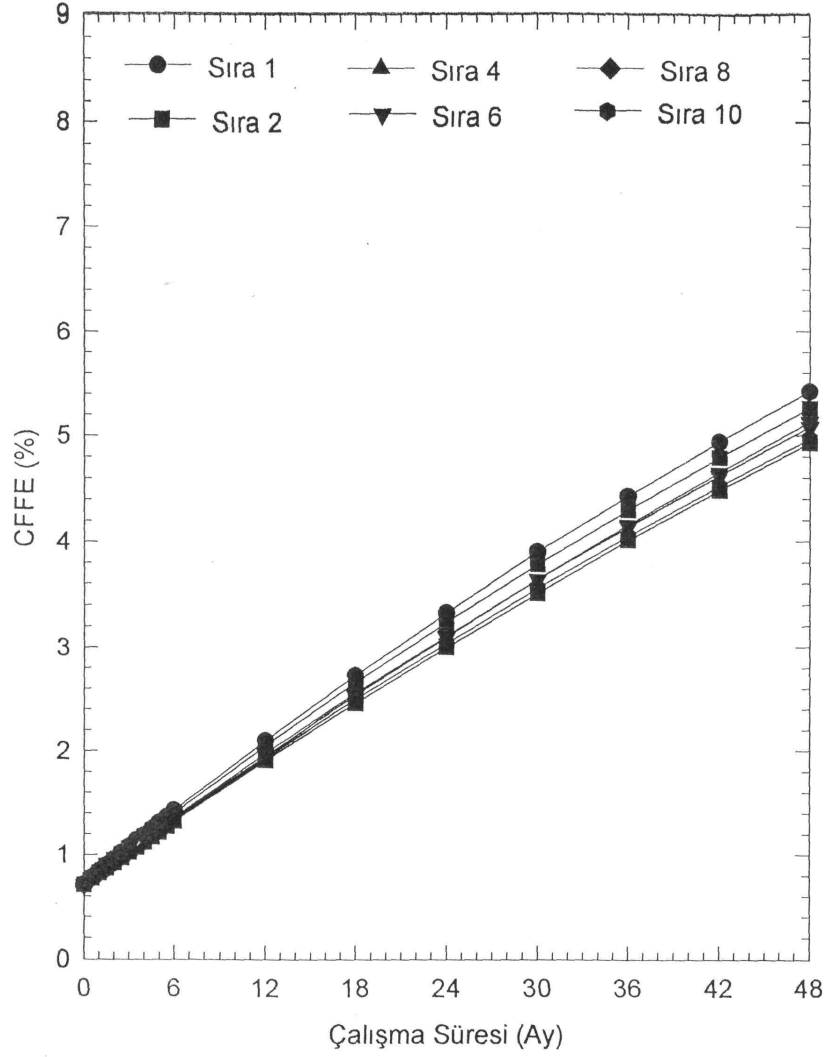
Şekil 2.5  $UO_3$  Yakıt ve gaz soğutuculu blanket için çalışma süresi esnasında yakıt bölgesinde fisil yakıt kalitesinin zamanla değişimi [14]

Şekil 2.5, 48 ay çalışma durumunda olan gaz soğutmalı bir reaktörde  $UO_3$ , yakıt kullanıldığında CFFE değerinin, yakıt sırasına göre 5,8 ile 5,0 arasında değiştiğini göstermektedir.



Şekil 2.6  $U_3O_8$  Yakıt ve gaz soğutuculu blanket için çalışma süresi esnasında yakıt bölgesinde fisil yakıt kalitesinin zamanla değişimi [14]

Şekil 2.6, 48 ay çalışma durumunda olan gaz soğutmalı bir reaktörde  $U_3O_8$ , yakıt kullanıldığında CFFE değerinin, yakıt sırasına göre 4,8 ile 4,2 arasında değiştiğini göstermektedir.

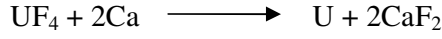


Şekil 2.7 UF<sub>4</sub> Yakıt ve gaz soğutucu blanket için çalışma süresi esnasında yakıt bölgesinde fisil yakıt kalitesinin zamanla değişimi [14]

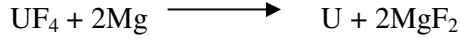
Şekil 2.7, 48 ay çalışma durumunda olan gaz soğutmalı bir reaktörde UF<sub>4</sub>, yakıt kullanıldığında CFFE değerinin, yakıt sırasına göre 5,4 ile 5,0 arasında değiştiğini göstermektedir.

Şekillerden de anlaşılacağı gibi zenginleştirme için kullanılacak yakıt uranyum oksitli bir bileşik olmalıdır.

Nükleer teknolojinin başlangıç devirlerinde çokça kullanılmış olan metal uranyum,

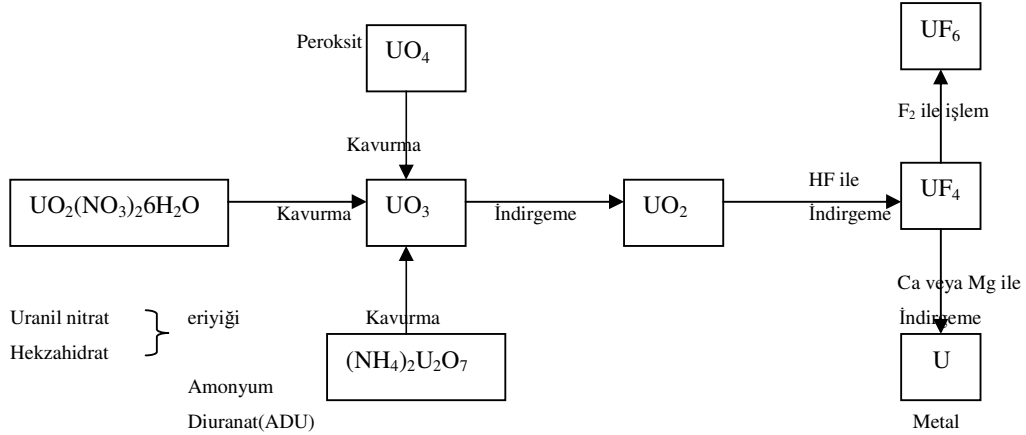


veya



şeklindeki “ Metallotermik İndirgeme” prosesi ile elde edilir. Patlama şeklinde olan bu reaksiyon, korunmuş çelik bomba içinde yapılır. Bu reaksiyon sonunda oluşan  $\text{CaF}_2$ 'nin erime sıcaklığı  $1418^\circ\text{C}$ ,  $\text{MgF}_2$ 'nin ise  $1263^\circ\text{C}$  'dir. Bu malzemelerin sıvı halde uranyum'dan ayrılması kolayca mümkün olduğu için reaksiyon sonunda bu sıcaklıkların geçilmiş olması istenir [17].

Yukarıda açıklanmış olan işlemler şematik olarak aşağıdaki Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Uranyum'un çevirme işlemleri [17]

Uranyum mühendislik açısından dayanıksız bir metaldir. Mekanik mukavemeti de düşüktür. Isı ve elektrik iletkenlikleri demirin yarısı kadardır. Saf metal halinde elde olunması güç ve pahalıdır. Kolayca korozyona uğrayan bu malzemeyi işletmenin devamı süresince oksitlenmeden alıkoymak da bir sorundur. Bu özellikler uranyumu nükleer reaktörlerde saf metal halinde kullanılmasını önler. Saf metal



uranyum sadece bomba yakıtı olarak kullanılır. Nükleer reaktör yakıtı uranyum oksitten yapılır [15].

### 2.3. Uranyum Oksitler

Uranyum oksitin fisyon malzemesi olarak kullanılabilmesi için teorik yoğunluğunun %90'ın üzerinde olması gerekir. Bu amaçla toz halindeki  $UO_2$ , 5 ile 10 ton/cm<sup>2</sup>, lik bir basınçla soğukta sıkıştırıldıktan sonra 1 ile 1,5 cm çapında ve 1,5 ile 2 cm yüksekliğinde lokumlar haline getirilip 1700 °C sıcaklığında sinterlenir.

$UO_2$  ;

- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık
- Parazit nötron yutma etkin kesitinin çok ufak olması
- Radyasyon hasarına karşı dayanıklılık
- Korozyon

bakımından LWR(Light Water Reactor) tipi santrallerde kullanılmaya çok uygundur.

$UO_2$  kullanmanın sakıncalı tarafları ise,

- İmalat giderlerinin büyük olması,
- Verilen bir hacim içinde yarıya yakın az uranyum içermesi
- Isı transfer özelliklerinin fena olmasıdır.

Bu nedenle küçük çaplı çubuklar grup halinde birleştirilerek yakıt elemanı yapılmaktadır.

$UO_2$ 'nin teorik yoğunluğu  $\rho = 10,97 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kahverenginde olan bu oksit 350 °C sıcaklığın üstünde ısıtıldığı zaman  $U_3O_8$  siyah oksit oluşur. Isıtmaya devam edilirse, 1.100 °C sıcaklığın üstünde yeniden  $UO_2$ 'ye dönüşür. Uranyumun en dengeli oksiti  $UO_2$ 'dir [17].

## 2.4. Toryum

Toryum doğada, monazit ve torit mineralleri halinde bulunur. Güçlü alaşımların ve ultraviyole fotoelektrik gözelerin yapımında kullanılan bu 'nadir toprak elementi', hemen tümüyle Th-232 izotopundan oluşmaktadır.

Türkiyede belirlenmiş 380.000 tonluk rezerv vardır. Muhtemel 500.000 tonluk rezervle dünyada, Hindistan'dan sonra en büyük rezerve sahip ülke konumundadır [17, 18]. Ayrıca Brezilya'da da önemli miktarda toryum bulunduğu tahmin edilmektedir. Dünya kabuğunda Uranyum'a nazaran 2 ilâ 5 kere daha fazla toryum bulunduğu sanılmaktadır. Hindistan'daki rezervler kalite bakımından en iyisi olup, % 9,4 ThO<sub>2</sub> ve % 0,2 kadar da U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ihtiva etmektedirler.

Dünyada bulunan önemli toryum rezervleri Tablo 2.3. 'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Dünyadaki toryum rezervleri (ton)

ÜLKELER	Çıkarılabilir	Belirlenmiş*
ABD	158 000	298 000
Avustralya	44 000	49 000
Brezilya	16 000	18 000
Kanada	100 000	100 000
Hindistan	292 000	300 000
Malezya	4 000	4 000
Norveç	166 000	183 000
G. Afrika Cum.	117 000	196 000
<b>TÜRKİYE</b>		380 000

\* Derinlik, kalınlık, cins ve kalite bakımından madencilik ve üretim işlemlerine bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş kısımdır.

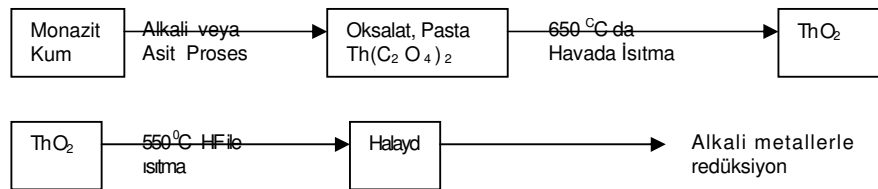
Tablo 2.3 'de görüldüğü gibi dünyadaki genel rezervlere bakıldığında Türkiye'deki miktarın önemi, yakın gelecekte enerji sektörü için oldukça önem teşkil edecektir.

Türkiye'deki rezerv, toryum-232 olarak yüzde yüz oranında oksitlenmiş toryum içermektedir. Reaktörlerde yakıt olarak kullanılırken kurşun hedef denilen bir

muhafaza (silindirik boru) içersinde toryum tabletler kullanılır. Bu sistem üzerine (kurşun hedefler takımı) hızlı protonlar gönderilerek atomsal parçalanma neticesi enerji elde edilir. Bu yeni nesil reaktörlerin eskileriyle mukayese edilmesi mümkün değil ayrıca kesinlikle patlama (reaktör kor erimesi) tehlikesi olmadığı gibi Çernobil benzeri bir felaketle karşılaşılması söz konusu değildir. Radyoaktif kalıntı da minimum seviyelerde olmaktadır. Bu da nötronlarla yok edilerek kontrol altında tutulabilmektedir. Herşeyden önemlisi doğa kirlenmesi olmayarak temiz bir çevre etkileşimi ortaya çıkacaktır.

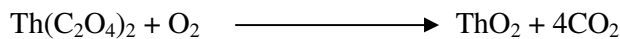
Dünya toryum rezervlerinin Türkiye'de dahil olmak üzere belirli birkaç ülke elinde toplanmış olması, uranyum üretiminde şimdilik bir sıkıntı çekilmemesi nedeni ile, toryuma dayalı nükleer santraller üzerindeki geliştirme çalışmaları şu an yavaş ilerlemektedir. Fakat yine de bu tür santrallerle ilgili ön araştırmalar tamamlanmıştır. Ayrıca Japonya ve ABD yeni nesil kendi santrallerini yapma çalışmalarını sürdürmekte ve bizler gibi gelişmekte olan ülkeler için, pazar sahasını şimdiden araştırmaktadırlar. Buna göre Türkiye, nükleer stratejisini en kısa zamanda belirleyerek orta ve uzun dönemde toryum yataklarının değerlendirilmesiyle ilgili tüm çalışmalara bir an önce başlamalıdır [9].

Toryum'un monazit kumlardan elde edilmesi Şekil 2.9'daki gibi olur [17].

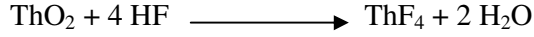


Şekil 2.9 toryum'un monazit kumlardan elde edilmesi [17]

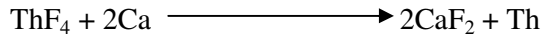
Monazit kumlardan alkali veya asit prosesle  $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$  oksalat pasta elde edilir. U ve nadir topraklar nitrik asit eriyiği ile ayrılır, ve oksalat  $650\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta havada ısıtılır.



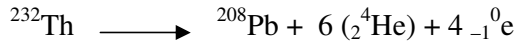
550 °C sıcaklığında ThO<sub>2</sub> üzerinden HF gazı geçirilerek toryum'un halojenlerinden oluşan halayd elde edilir.



ThF<sub>4</sub> ve diğer halojenler Na, Mg ve Ca ile indirgemeye tâbi tutularak Th metali elde edilir.

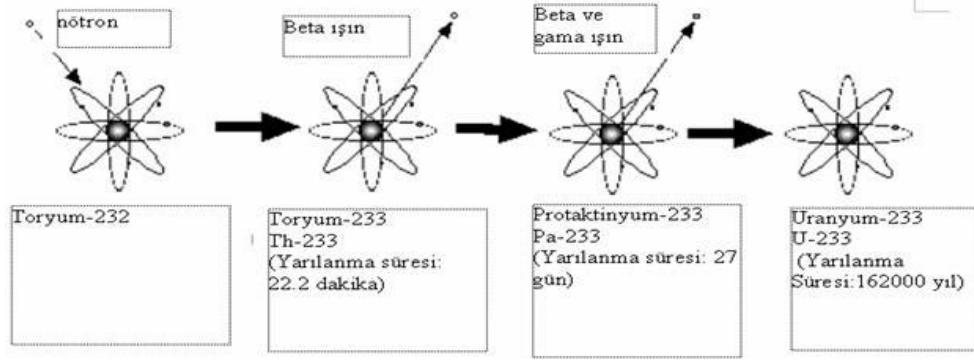


Toryum'un yarı ömrü 1,39.10<sup>10</sup> yıl olup radyoaktif bir çekirdektir, bozunma zinciri sonunda <sup>208</sup>Pb çekirdeğine dönüşür.



Nükleer teknolojide Toryum'un önemi, nötron bombardımanı altında, çok iyi bir fisyon çekirdeği olan <sup>233</sup>U'e dönüşmesidir. Bu nedenle Toryum hem doğada, bulunan bir «Ham malzeme», hem de yeni bir fisyon çekirdeği üretiminde kullanılan «Üretim Malzemesi»dir. Toryum nükleer reaktörlerde zengin Uranyum veya Pu ile karışık olarak kullanılır. Bu surette, <sup>235</sup>U ve <sup>239</sup>Pu fisyon yaparken, <sup>232</sup>Th üretim yapar [17].

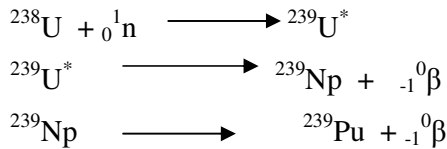
Fakat, Th-232 izotopu 'parçalanabilir' bir çekirdek değildir. Dolayısıyla, nükleer enerji üretimi amacıyla, doğrudan yakıt olarak kullanılmaz. Ancak 'doğurgan' bir çekirdektir. Th-232 termal nötron bombardımanı altında bir nötron yuttuktan sonra, iki β bozunumundan geçerek, parçalanabilir olan U-233 çekirdeğine dönüşebilir [19]. Şekil 2.10'da Th-232 'den Uranyum-233 elde edilmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Th-232 'den uranyum-233 elde edilmesi [19]

Dolayısıyla, toryumu mevcut nükleer santrallarda doğrudan yakıt olarak kullanmak mümkün olmamakla birlikte, kalpteki U-235 'ce zengin yakıt çubuklarının içine ya da yanına yerleştirilerek, bir yandan U-235'ten enerji üretirken, diğer yandan Th-232 izotoplarını U-233'e çevirmek mümkün olabilmektedir. Bu U-233 çekirdekleri de zamanla fisyonla uğrayarak, enerji üretimine katkıda bulunabilirler. Nitekim Hindistan uzun zamandır zengin toryum rezervlerini değerlendirebilmek amacıyla, nükleer santrallerinde toryum takviyeli bir yakıt çevrimini kullanabilmek için çalışmaktadır. Ancak böyle bir yakıt çevrimi şimdilik, ekonomik açıdan pek anlamlı görünmemektedir. Çünkü, yeni nükleer santrallerin yapımı dünya genelinde yavaşlamış ve dünya uranyum rezervleri üzerindeki baskı hafifleyince de, bu metalin fiyatı fazla artmamıştır. Dolayısıyla halen, toryumu doğurgan malzeme olarak yakıt takviyesi için dolaylı bir şekilde kullanmak yerine, uranyumu doğrudan yakıt olarak kullanmak daha ekonomiktir...

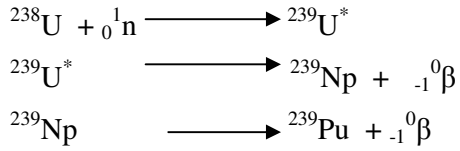
Ayrıca, doğal uranyumun hemen tamamını oluşturan ve zenginleştirilmiş uranyum yakıtta da zaten bolca bulunan U-238 izotopu, bir başka doğurgan çekirdektir. Bu çekirdek de Th-232 gibi, bir nötron yutup iki  $\beta$  bozunumundan geçtikten sonra, parçalanabilir bir çekirdek olan Pu-239'a dönüşebilmektedir.



Dolayısıyla, kalpte doğurgan malzeme olarak U-238 zaten varken, onun yerine toryum yerleştirmeye çalışmak, sırf enerji eldesi açısından pek bir anlam taşımamaktadır.

## 2.5. Plütonyum

Doğal bir element olmayan plütonyum, nükleer reaktörlerde, U-238 izotopunun bir nötron yuttuktan sonra bozunması sonucu oluşur. Yani insan yapımı radyoaktif bir metaldir.



Gümüş renginde, kokusu ve tadı yoktur. Farklı bir element olduğundan, uranyumdan kimyasal yöntemlerle ayrıştırılabilir ve zenginleştirme işlemi gerektirmez. Fakat elde etmek için, hazırda çalışan bir nükleer reaktörün bulunması ve yakıtına uygun zamanlamalarda müdahale edilmesi gerekir [20].



Şekil 2.11. Plütonyum elementinin resmi

Nükleer teknolojiye en önemli ham malzeme olan doğal uranyum içinde % 99,29 oranında bulunan  $^{238}\text{U}$ , nötron yutarak Plütonyum'a dönüşmesi nedeni ile önemli bir üretim malzemesidir.

Nükleer bir santralde üretilen plütonyum Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu 241, Pu-242 izotopları halinde ortaya çıkar. Bu izotoplar ve özellikleri Tablo 2.4 'de verilmiştir.

Tablo 2.4 Plütonyumun önemli izotopları ve özellikleri [14]

Pu izotopları	I	II	III	IV
	Yarı ömür (yıl)	Fisyon tesir kesiti (Barn)	Dönüşüm tesir kesiti (Barn)	İzotopik oran (%)
$^{238}\text{Pu}$	88	16,5	547	2,5
$^{239}\text{Pu}$	$24.10^3$	742	269	55
$^{240}\text{Pu}$	6537	0,030	290	24
$^{241}\text{Pu}$	15	1009	368	14
$^{242}\text{Pu}$	$387.10^3$	<0,2	18,5	4,5

Tabloda verilen izotoplar arasından çift sayılı izotoplar kolay fisyonla uğramayan, dolayısıyla parçalanabilir olmayan izotoplardır. Tek sayıda olanlarsa, yani Pu-239 ve Pu-241, fisyonla yatkın izotoplardır. Ama nükleer reaktörde hem fisyonla yatkın hem de fisyonla uğramayan izotoplar bir arada bulunduğu için, yakıt kirlidir. Bu izotopları fisyon olayında kullanabilmek için, çift sayılı izotopların ayıklanması gerekir. Bu da oldukça teknik ve bir hayli pahalı zenginleştirme işlemleri gerektirir [20]. Tablo 2.4 'de II ve III nolu sütunlardaki fisyon ve dönüşüm tesir kesitleri karşılaştırıldığında, fisyon / dönüşüm olasılığı  $^{239}\text{Pu}$  ve  $^{241}\text{Pu}$  için yaklaşık olarak 3 'tür ( $^{239}\text{Pu}$  için  $742/269=2,75$  ve  $^{241}\text{Pu}$  için  $1009/368=2,74$ ). Buda yuvarlak hesap bu izotopların üçünün fisyon yaparken birinin de dönüşüm yapacağını gösterir. IV'ncü sütun hafif su reaktörünün normal çalışma rejimi içinde ve yakıtın reaktörde kaldığı üç yıllık bir süre sonundaki izotop oranlarını göstermektedir. Tablodan da görüleceği gibi, reaktörden çıkarılan yakıtta fisyon yapabilecek yakıt oranı % 69'dur. Ancak plütonyumun yakıt olarak kullanılacak kısmı bundan azdır. Çünkü reaktörden

çıkarılan yakıt uzun süre bekletildikten sonra tekrar yakıt olarak kullanılır. Bu da  $^{241}\text{Pu}$  izotopunun yarı ömrü kısa olduğu için fisyon yapabilecek yakıt miktarının daha az olacağını ifade eder. Kullanılmış yakıt bekletildikten sonra radyoaktivite değerini de kaybeder. Ayrıca bekletilen yakıtın özgül ısı değeri de zamanla düşer. Tablo 2.5'te LWR tipi reaktörden çıkarılan yakıtın, verilen bekleme süreleri sonunda radyoaktivite ve özgül ısı üretim değerleri verilmiştir.

Tablo 2.5 LWR Reaktöründen çıkan yakıtın radyoaktivitesinin zamanla sönümü [14]

Reaktörden çıktıktan sonraki bekleme süresi	Özgül radyoaktivite (Ci/Kg)	Özgül ısı üretimi (W/Kg)
150 gün	4600	24,3
1 yıl	2300	10,4
10 yıl	320	2,3

1000 MW-elektrik gücündeki bir hafif su soğutmalı nükleer reaktörden çıkan kullanılmış yakıt yaklaşık % 95,5 Uranyum, % 3,5 fisyon sonucu oluşan hafif elementler, % 0,1 uranyum ötesi ağır elementler ve yalnızca % 0,9 oranında plütonyum içerir. Bu plütonyumun % 59'u Pu-239, gerisi diğer plütonyum izotoplarıdır. Bu izotoplardan yalnızca plütonyum-239 enerji üretiminde kullanılır.

Plütonyum, yarı ömrü 24.400 yıl olan, aktif bir çekirdektir. Fisyon özellikleri  $^{235}\text{U}$ 'e nazaran çok daha üstündür, ancak aktivitesinin fazla olması nedeni ile kullanılması zordur.

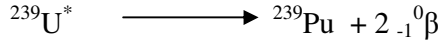
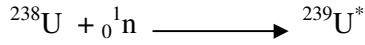
Plütonyumun 117 °C, 200 °C, 300 °C ve 475 °C sıcaklıklarda değişen beş kristal yapısı vardır. Bu şekillerdeki yoğunluk ve termal genleşme sayıları çok farklılıklar gösterir. Bu nedenle Plütonyum üzerindeki radyasyon hasarı büyüktür.

Plütonyum Dioksit ( $\text{PuO}_2$ ), hızlı üretken reaktör yakıtlarında  $\text{UO}_2$  ile karıştırılarak kullanılmıştır.  $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$  karışımı bir seri katı eriyik oluşturur. Bunlar, istenilen orandaki karışımların 800 ilâ 1.000 °C'da hidrojen akımı içinde kavrulması ile



yapılabilirler. Karışık oksitlerin sıkıştırılıp sinterlenmesi ile de katı eriyik yapılması mümkündür [21].

Nükleer reaktörlerde kullanılan uranyum  $^{235}\text{U}$  ve  $^{238}\text{U}$  karışımıdır. U-235 çekirdeği, parçalanabilir yapıdadır. Bir nötron isabet ettiğinde, parçalanıp enerji açığa çıkarır. U-238 çekirdeği parçalanmaz. Bir nötron yuttuğunda U-239 olur, daha sonrada 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 parçaladığımız, U-235'den çok Pu-239 üretebiliyorsanız birim zaman içinde, yakıtınız sürekli olarak artıyor demektir. Böyle bir sisteme göre çalışan reaktörlere üretken reaktör denir [20].

Günümüzde Purex adı verilen ve çözücü olarak tri-bütil fosfat kullanan solvent ekstraksiyonu yöntemi plütonyum üretim reaktörlerinden elde edilen karışımın ve kullanılmış nükleer yakıtların işlenmesinde (reprocess) rakipsiz olarak uygulanmaktadır. Purex yönteminde kullanılmış nükleer yakıtlar, önce nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ) ile çözülür; daha sonra organik tri-bütil- fosfat çözeltisi ile temasa geçirilerek nitrik asit fazındaki uranyum ve plütonyum organik faza çekilir (ekstraksiyon). Bu şekilde hafif elementlerden (ve aktiviteden) arınan uranyum ve plütonyum karışımına bir indirgeyici madde eklenerek uranyum ve plütonyum birbirlerinden ayrılması sağlanır. Sonuçta temiz saf uranyum ile plütonyum ayrı ayrı çözeltiler halinde elde edilir. Böylece geri kazanılan uranyum ve plütonyum, gerekli kimyasal dönüştürme ve fabrikasyon işlemlerinden sonra tekrar nükleer reaktörlere yüklenerek enerji üretimine önemli ölçüde katkı sağlanabilir.

## BÖLÜM 3. YAPI MALZEMELERİ

### 3.1. Genel Özellikleri

Reaktörlerde kullanılan yakıt malzemesinin bir zarf içinde kullanılması şarttır. Uranyum, toryum ve plütonyum içeren tüm yakıt elemanlarının zarflanması, fisyon ürünlerinin içinde tutulması kadar, kimyasal bakımdan çok aktif olan bu malzemelerin korunması bakımından da önemlidir. Bu nedenle reaktör yapı malzemelerinin (strüktür malzemeleri) başında yakıt zarfı gelmektedir. Yakıt çubuklarının zarflanması, radyoaktif fisyon ürünlerini içinde tutmak kadar, çok aktif bir metal olan uranyumun korozyondan korunması bakımından da yararlıdır.

Nükleer teknolojinin gelişme safhalarında ve alçak sıcaklıklarda çalışan araştırma reaktörlerinde magnezyum ve alüminyum çok kullanılmışlardır. Zengin uranyum kullanıldığı ve yüksek sıcaklıkta çalışmak gerektiği zaman, paslanmaz çelik kullanılmaya başlanmıştır. Paslanmaz çeliğin nötron yutma etkin kesitinin büyük olması, yapımcıları yeni malzemeler bulmaya yöneltmiş ve az zengin yakıtla kullanılmak üzere, nispeten çok yüksek olmayan sıcaklıklarda uygun olan zirkonyum, berilyum ve titanyum gibi yeni malzemeler bulunmuştur. Çok yüksek sıcaklıklar için de grafit, berilyum oksit, berilyum karbür ve molibden gibi refrakter malzemeler geliştirilmiştir [17].

Zarf olarak seçilecek malzemenin:

- Mekanik özellikleri
- Ergime derecesi
- Korozyona dayanıklılık
- Nötron yutma tesir kesiti

gibi özellikleri çok önemlidir. Tablo 3.1’de bazı sarf malzemelerinin önemli özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Zarf malzemeleri ve özellikleri [3]

Zarf Malzemesi	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Ergime derec. °C	Isı İletkenliği cal/cm.°C.snn	Termal Nötron σ barn
Magnezyum	1,74	650	0,376	0,063
Alüminyum	2,70	660	,0503	0,230
Berilyum	1,85	1283	0,395	0,010
Zirkonyum	6,44	1845	0,054	0,180
Pasl.çelik	7,92	1425	0,035	2,990
Magnox-A12	1,44	650	0,276	0,064
Zircalay-2	6,45	1845	0,040	0,194
Grafit	1,65	2500	0,055	0,004

Zarf malzemelerinden nötron yutma tesir kesiti çok ufak olan Magnox A-12 alaşımı doğal uranyum reaktörleri için çok uygundur. Alüminyum hem yutma tesir kesitine nispeten büyük hem de yüksek sıcaklıkta su ile korozyon yapması yüzünden araştırma reaktörlerine uygundur. Berilyum her bakımdan iyi olmakla beraber hem pahalı, hem de yüksek sıcaklıkta dayanıklı değildir.

Paslanmaz çeliğin yutma tesir kesiti çok büyüktür. Bu ancak zengin uranyum ile kullanılabilir. Zircalay-2 bugün, az zengin yakıtla çalışan güç reaktörlerinde en çok kullanılan zarf malzemesidir. Grafit çok yüksek sıcaklıkta çalışan reaktör tipinde kullanılmıştır.

Hem zarf olarak hem de diğer maksatlarla reaktörlerin yapımında kullanılan malzemeler, termal nötron yutma etkin kesitlerine göre üç sınıfa bölünerek Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Reaktörlerde kullanılan yapı malzemeleri [17]

Malzeme	$\sigma$ (barn)	E.D (°C)	Malzeme	$\sigma$ (barn)	E.D (°C)	Malzeme	$\sigma$ (barn)	E.D (°C)
Karbon	0,0032	2500	Fe	2,5	1539	Mn	13,2	1244
Pb	0,009	1280	Mo	2,5	2625	Wu	19,2	3410
Mg	0,068	651	Cr	3,0	1850	Co	37	1495
Magnox-12	0,064	650	Pasl.Çelik	3,1	1540	Ag	62	962
Zr	0,18	1845	Cu	3,6	1053	Li	71	180
Zircolay-2	0,20	1845	İnconel	4,1	1455	Hf	105	2227
Al2S	0,26	660	Ni	4,5	1900	B	755	2300
Sn	0,60	232	V	5,1	1670	Cd	2550	320
Zn	1,06	420	Ti	5,6	1668			

Yukarıdaki tabloyu 3 grupta incelediğimizde, I. Gruptaki malzemelerin 0 ile 1,06 arasında değişen termal nötron yutma etkin kesitine sahip oldukları görülür. Aynı şekilde II. Gruptakilerin 2-6 arası, III. Gruptakilerin 13-2250 arasında termal nötron yutma etkin kesitine sahip oldukları görülür.

Termal nötron yutma etkin kesitinin küçük olması bize bu malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabilmesini gösterir. Yapı malzemesini seçerken termal nötron yutma etkin kesitinin küçüklüğü yanında Mekanik özelliklerine, erime derecesine, korozyona dayanıklılığına da bakmamız gerekir. Malzemenin mekanik özellikleri iyi, erime derecesi yeterince yüksek ve korozyona da dayanıklı olması gerekir.

Yapı malzemesi olarak kullanılacak malzemelerden alüminyum, magnezyum, zirkonyum, paslanmaz çelik ve seramik malzemelerle ilgili aşağıda bilgiler verilmiştir.

### 3.2. Alüminyum

Birinci gruptaki elemanlardan Berilyum pahalı ve Magnezyum kimyasal bakımdan çok aktif oldukları için kullanılmamışlardır. Bu grupta, alçak sıcaklıkta çalışan reaktörlerde, en çok Alüminyum 2S kullanılmıştır. Al'ün termal nötron yutma etkin kesiti yeterince ufaktır, mekanik özellikleri (mukavemeti) fena değildir ve radyasyon altında çalışmaya oldukça elverişlidir. Yeterince saf olduğu zaman, pH derecesi iyi kontrol edilen demineralize su içinde 100°C sıcaklığına kadar korozyona dayanıklıdır. Bu nedenlerle Al, güç reaktörleri için uygun bir yapı malzemesi değildir, en fazla 50°C civarında çalışan araştırma reaktörlerinde başarı ile kullanılmıştır.

Genellikle reaktörlerde tercih edilen 2S — Al alaşımının terkihi Tablo 3.3'deki gibidir [17].

Tablo 3.3 2S — Al alaşımının terkihi

Element	Si	Cu	Mn	Zn	Al	Fe
%	99	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

### 3.3. Magnezyum

Magnezyum saf halde kullanılmamış olmakla beraber, içine % l'den daha az Al ve Be katılmış bir alaşımı olan Magnox A-12, metal U çubuklu, grafit yavaşlatıcılı ve gaz soğutmalı (GCR) güç reaktörlerinde yakıt zarfı olarak çok kullanılmıştır. Termal yutma etkin kesiti 0,068 barn ve erime derecesi 651 °C'dir. Yutma etkin kesitinin ufak olması iyi, erime derecesinin düşük olması fena tarafıdır. Fransız ve İngiliz'ler tarafından 1962 -1972 arasında kullanılmış olan güç reaktörlerinin zarfları Magnox A-12 alaşımından yapılmıştır. Bu nedenle, bu reaktörlere MGCR adı verilmiştir. İngiltere'de daha sonra geliştirilen, zengin UO<sub>2</sub> tipi yakıt elemanlı güç reaktörlerinde daha yüksek sıcaklıklarda çalışmak amaçlandığı için, Magnox A-12 yerine paslanmaz çelik zarf kullanılmaya başlanmıştır [17].

### 3.4. Zirkonyum

Atom numarası 40, atom ağırlığı 91,224 g/mol'dür. Termal yutma etkin kesiti 0,18 barn ve erime derecesi 1.845 °C'dir. Korozyona dayanıklılık ve nötron absorplama özelliklerinin az olması nedeniyle, zarf malzemesi olarak en çok kullanılan metal zirkonyum olmuştur. Bu malzeme, 400 °C sıcaklıklara kadar su içinde korozyona dayanıklıdır, 320 °C sıcaklığındaki kopma gerilmesi 3.120 kg/cm<sup>2</sup>'dir, ve radyasyon altında az hasar görür. Bundan dolayı, LWR tipi zengin uranyum yakıtlı ve su soğutmalı, reaktörlerde özellikle zarf malzemesi olarak çok kullanılmıştır [22].

Zirkonyum metalinin çok kullanılan bir alaşımı olan zircaloy - 2'nin bileşimi aşağıdaki gibidir [17].

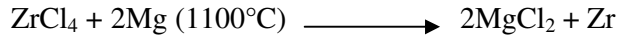
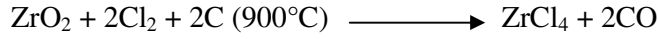
Tablo 3.4 Zircaloy - 2'nin bileşimi

Sn	Fe	Ni	Cr
% 1,5	%0,12	%0,1	%0,1

Zircaloy-2'nin korozyona dayanıklılığı daha iyi olduğu gibi, 500 °C sıcaklıktaki kopma gerilmesi 23.100 kg/cm<sup>2</sup>'dir. Bu nedenle LWR tipi modern güç reaktörlerinde zarf olarak çok kullanılmaktadır.

Zirkonyum'un en büyük sakıncası, cevheri içinde % 0,5 ilâ % 3 kadar "Hefnium" bulunmasıdır. Yutma etkin kesiti 115 b. olan bu elementin mutlaka ayrılması gereklidir. Kimyasal özellikleri Zirkonyum'a çok benzediği için de bu ayırma işlemi çok zor olmaktadır.

Zirkonyum doğada, silikat (zirkon:ZrSiO<sub>4</sub>) veya oksitler (baddeleyit:ZrO<sub>2</sub>) karışımı halinde, Brezilya, Hindistan, Avustralya, Seylan ve ABD'de bulunmaktadır. Mekanik usullerle temizlenmiş cevher, elektrik fırınlarında karbon ile ısıtarak Zirkonyum karbüre, sonra da klorinasyon ile tetraklorüre' dönüştürülür ve Mg ile indirgemeye tâbi tutulur.



Yukarıdaki reaksiyon, zirkonyumun havadaki oksijen ve azot gazı ile etkileşmemesi için çelik kaplarda gerçekleştirilmesi gerekir [17, 22].

### 3.5. Paslanmaz Çelik

Ham demir içinde yaklaşık olarak %4 ağırlık oranında karbon bulunur. Bu oran %2 nin altına düşürüldüğünde çelik elde edilmiş olur. Korozyona dayanıklı olan bu metal yapı malzemesi olarak çok kullanılır.

Reaktörlerde nötron yutma etkin kesidinin 3-5 b. olmasına müsaade edildiği durumlarda, bir tür paslanmaz çelik olan 2. grup elemanlarından (Tablo 3.1'de) Monel, Inconelin yapı malzemesi olarak kullanılması da mümkündür. Paslanmaz çelik zengin uranyum yakıtlı reaktörlerde, zarf malzemesi olarak ve çeşitli kapların yapımında kullanılmıştır. Reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanılan SS-304 krom - nikel çeliğinin bileşimi aşağıdaki gibidir [17, 23].

Tablo-3.5 SS-304 krom - nikel çeliğinin bileşimi

C	Cr	Ni
%0,08	%18-20	%8-11

Yutma etkin kesidi 10 b.'dan büyük olan üçüncü gruptaki malzemeler (Tablo 3.1'de) reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanılamazlar. Ancak, Gümüş, Hafnium, Bor ve Kadmiyum gibi yutma etkin kesiti çok büyük olan elementler kontrol malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [17].

### 3.6. Seramik Malzemeler

Yutma etkin kesidi ufak olan metallerin çoğunun ergime derecesi düşüktür ve bunların yüksek güç yoğunluğuna sahip reaktör kalbi yapımında kullanılmaları zor olmaktadır. Bu nedenle de, reaktör kalbi yapımında yüksek sıcaklıklara dayanıklı seramik malzemeler kullanılmalıdır. Ancak mekanik özellikleri iyi olmayan seramiklerin tek başlarına yapı malzemesi olarak kullanılmaları da mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, seramiklerin mekanik özellikleri iyi olan bazı metaller ile karışık kullanılmaları düşünülmüştür. Örneğin % 10 ilâ 20 Alüminyum ile karışık olarak kullanılan Alüminyum oksit ve Magnezyum oksit, sıcağa dayanıklılık ve mukavemet bakımından uygun bulunmaktadır. «Cermets» adı ile anılan bu tip malzemeler ilginç bulunmaktadır. Tablo 3.6'de bazı seramiklerin sıcaklık ve korozyon bakımından özellikleri verilmektedir [17].

Tablo 3.6 Seramik malzemeleri özellikleri

Malzeme	Ergime Sıcaklığı (°C)	Çekme gerilmesi Kg/cm <sup>2</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2080	2520
BeO	2520	980
MgO	2800	140
ZrO <sub>2</sub>	2700	1260
SiC	2200(*)	140

(\*) Servis sıcaklığı

Burada yüksek sıcaklığa dayanıklılık bakımından maddeler arasında ciddi fark olmamakla birlikte, korozyona dayanıklılık bakımından Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile ZrO<sub>2</sub> öne çıkmaktadır. Buda yapı da bu malzemelerin kullanımını ön plana çıkarır.

### 3.7. Işınlama ile Oluşan Radyoaktif Elementler

Yapı malzemesi olarak kullanılan bazı elementler veya bunların alaşımlarında bulunan bazı katkı malzemeleri, nötron bombardımanı altında radyoaktif izotoplara dönüşebilirler. Bunlardan 0,3 MEV'den daha büyük enerjili gamma ışınları yayan ve yarı ömrü 1 saatten daha büyük olanlar önemli sayılırlar. Tablo 3.7'da yapı



malzemesi olarak kullanılan elementler ve bu elementlerin bazılarının özellikleri verilmiştir [17].

Tablo 3.7 Yapı malzemeleri içinde bulunan ve aktif hale gelebilen çekirdeklerin özellikleri

izotop	Doğal bolluk yüzde %	Yutma etk. kesidi barn	Aktif izotopu	Yarı ömrü	$\gamma$ ışını enerjisi Mev
<sup>50</sup> Ti	5,3	0,04	<sup>51</sup> Ti	5,8 dk	1,0
<sup>50</sup> Cr	4,4	16	<sup>51</sup> Cr	27 gün	0,32
<sup>55</sup> Mn	100	15,3	<sup>56</sup> Mn	2,6 saat	2,1
<sup>58</sup> Fe .	0,38	1,2	<sup>59</sup> Fe	46 gün	1,3
<sup>59</sup> Co	100	20	<sup>60</sup> Co	5,3 yıl	1,3
<sup>63</sup> Cu	69	4,3	<sup>64</sup> Cu	12,8 saat	1,35
<sup>64</sup> Zn	48,9	0,8	<sup>65</sup> Zn	250 gün	1,12
<sup>68</sup> Zn	18,5	0,1	<sup>69</sup> Zn	13,8 saat	0,4
<sup>94</sup> Zr	17,4	0,1	<sup>95</sup> Zr	65 gün	0,84
<sup>98</sup> Mo	23,8	0,13	<sup>99</sup> Mo	67 saat	0,84

## **BÖLÜM 4. YAVAŞLATICI MALZEMELER**

### **4.1. Yavaşlatıcıların (Moderatörlerin) Genel Özellikleri**

Nükleer reaktörlerde kullanılan moderatörlerin aşağıda verilen şartları taşımaları uygun olur. Bu şartları şöyle sıralayabiliriz:

- Kimyasal olarak kararlı olma,
- Ucuz ve bol olma,
- Kütlesi yaklaşık bir olmalıdır (Nötronla yapacağı çarpışmada soğuracağı enerjinin maximum olması için),
- Yoğunluğu büyük bir sıvı veya katı olabilir,
- Nötron yakalama tesir kesiti minimum olmalıdır [24].

Nötronları yavaşlatma özellikleri bakımından en uygun malzemeler su, ağır su, grafit Berilyum ve BeO 'dir. Bu yavaşlatıcı malzemelerinin bazı özellikleri aşağıdaki Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1 Yavaşlatıcı malzemelerinin bazı özellikleri

	Hafif su	Ağır su %99,75 D <sub>2</sub> O	Berilyum metal	BeO	Grafit
Kütle sayısı	18,0	20,0	9,01	25,0	12,0
Yoğunluk (gr/cm <sup>2</sup> )	1,0	1,1	1,84	2,80	1,62
$\sigma$ (epitermal) (b.)	49	10,5	6,0	9,8	4,8
$\sigma$ (termal) (b.)	0,66	0,0026	0,009	0,0092	0,0045
Yavaşlatma gücü $\epsilon \Sigma_s$ (cm <sup>-1</sup> )	1,5	0,18	0,16	0,11	0,063
Yavaşlatma oranı $\epsilon \Sigma_s / \Sigma_a$	70	21,000	150	180	170

## 4.2. Hafif Su

Su, yavaşlatıcı olarak ilgi çekici bir malzemedir. Göç etme uzunluğu ufak, yavaşlatma gücü diğer yavaşlatıcılara göre çok büyüktür; ucuz ve kolay bulunur. Buna mukabil nötron yutma etkin kesidi büyüktür. Dolayısı ile yavaşlatma oranı ufaktır ve bu nedenle doğal Uranyum yakıtlı reaktörlerde kullanılamaz. Aksine, zengin Uranyum reaktörlerinde H<sub>2</sub>O çok kullanılan bir yavaşlatıcıdır. Göç etme uzunluğunun ufak olması, reaktör boyutlarının ufak olmasına neden olur. Ayrıca, aynı zamanda soğutucu olarak da kullanılabilmesi, reaktör tasarımında kolaylık sağlar. Geçmişte, zengin Uranyum'lu araştırma reaktörlerinde, yavaşlatıcı, yansıtıcı, soğutucu ve zırh gibi çeşitli görevlerde çok kullanılmıştır [17, 24].

Hafif suyun buharlaşma sıcaklığının düşük olması, güç reaktörlerinde, kullanılmasını nispeten zorlaştırmıştır. Örneğin, PWR tipi güç santrallerinde yavaşlatıcı ve soğutucu olarak kullanılmasında 280 °C ilâ 320 °C sıcaklıklarında buharlaşmaması için, reaktör kabının yüksek basınç altında bulundurulması gerekmektedir.

Soğutucuya radyoaktivite bulaşmasını önlemek amacı ile reaktörlerde demineralize su kullanılmaktadır. Bu durumda su içinde diğer yabancı maddeler yok denecek kadar azdır ve içerde sadece havadan alınan ergimiş azot bulunur.

Soğutma suyu içinde bazı oksijen reaksiyonları, radyoaktif izotoplar oluşmasına neden olur. Bunlardan biri  $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$  reaksiyonudur, ve bu reaksiyon, etkin kesidi 0,02 mb. olan bir hızlı nötron reaksiyonudur. Reaksiyon ürünü olan  $^{16}\text{N}$  izotopunun yarı ömrü 7,4 saniye olup 6-7 MEV enerjili sert gamma ışınları yayınlamaktadır. Diğer bir Oksijen reaksiyonu da  $^{17}\text{O} (n, p) ^{17}\text{N}$  reaksiyonudur. Bu reaksiyon da, etkin kesidi 0,0007 mb. olan bir hızlı nötron reaksiyonudur.  $^{17}\text{N}$  radyoizotopunun yarı ömrü 4,14 saniye olup, 3,7 MEV  $\beta$  ile 1 MEV enerjili gecikmiş nötron yayınlar. Bu nedenle soğutma sistemine nötron zırhı yapmak gerekmektedir. Daha önemsiz olmakla beraber, diğer bir Oksijen reaksiyonu da  $^{18}\text{O} (n, \gamma) ^{19}\text{O}$  reaksiyonudur. Termal nötron reaksiyonu olan bu ışınımlı yakalanma reaksiyonunun etkin kesidi 0,21 mb.'dır.  $^{19}\text{O}$  izotopunun yarı ömrü ise 29 saniyedir. Bütün bu radyoizotopların yarı ömürleri çok kısa olduğu için, bunlar sadece reaktör çalışırken etkili olmaktadır [17].

### 4.3. Ağır Su

Yavaşlatma gücü yeterli sayılan, yutma etkin kesidinin çok ufak olması nedeni ile de yavaşlatma oranı çok büyük olan  $\text{D}_2\text{O}$ , çok iyi bir yavaşlatıcı malzemedir. Bu özellikleri ile, doğal uranyum yakıtlı reaktörlerde aranan bir yavaşlatıcı olmuştur. Heterojen yapıllı doğal uranyum reaktörlerinde yavaşlatıcı olarak grafit yerine  $\text{D}_2\text{O}$  kullanıldığı zaman reaktör boyutları daha ufak olmaktadır[17].

$\text{D}_2\text{O}$ 'nun saf haldeki yoğunluğu  $1,1 \text{ g/cm}^3$ , ergime noktası  $3,82 \text{ }^\circ\text{C}$ , "buharlaşma sıcaklığı ise  $101,42 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Bu nedenle, aynen  $\text{H}_2\text{O}$  gibi, PHWR tipi santrallerde kullanıldığı zaman basınç altında bulunması gereklidir.

$\text{D}_2\text{O}$ 'un nötron yakaladığında biyolojik sistemler için zararlı olan radyoaktif trityum oluşturması ve pahalı olması sakıncalı taraflarıdır. Zira normal su içinde 1/6.500

oranında (% 0,015) bulunur ve H<sub>2</sub>O'dan ayrılması zordur. Bununla beraber ağır hidrojeni normal hidrojenden ayırmak, uranyumun bir izotopunu diğerinden ayırmak kadar zor değildir; kütleleri arasındaki oran 2:1'dir ve çarpıcı etkilere yol açar. Ticari olarak halen başlıca üç yöntem, bu ayırıştırma işleminde kullanılmaktadır .

- a. Katalitik değişme ve elektroliz ile sudan ayırma,
- b. Damıtma ve elektroliz ile sudan ayırma,
- c. Sıvı Hidrojenin damıtılması.

Çeşitli yöntemlerle elde edilen H<sub>2</sub>O ve D<sub>2</sub>O karışımları sonradan elektroliz ile % 99,8 saflığa kadar çıkartılmaktadır [17, 24].

Ağır suyun bu günkü fiyatı, % 99,996 saflık için 2.255 \$/kg, % 99,8 saflık için ise 509 \$/kg dolaylarındadır.

#### 4.4. Grafit

Grafitin yavaşlatma gücü nispeten ufak olmakla beraber, yavaşlatma oranı yeterince büyüktür ve heterojen reaktörlerde, doğal uranyum ile kullanılmaya uygundur. Karbonun allotropik bir şekli olan grafit, nispeten yumuşak ve siyah görünümlü bir malzemedir. Bu madde doğada doğal olarak bulunmakla beraber içindeki yabancı maddeler nedeni ile reaktörlerde kullanılamaz. Karbonlu malzemelerin yüksek sıcaklıkta kısmen kristalizasyonu ile yapay grafit imal edilmektedir.

Reaktör kalitesinde grafit petrol koku veya baca kazıntılarından yapılmaktadır. Dolgu malzemesi, 1200 °C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra öğütülür ve asfalt, zift, şeker veya kola gibi yapıştırıcı bir malzeme ile karıştırılarak ekstrüzyon (küçük çapa basma) ile şekillendirilir. Yeşil çubuklar ismini taşıyan bu malzeme inert atmosfer içinde 20 gün kadar 1.100 °C sıcaklığında «karbonizasyon» işlemine tâbi tutulur. Bir kere fırınlanmış grafit, elektrik fırınlarında 25 ilâ 35 gün 2.600 ilâ 2.800 °C sıcaklığında «grafitizasyon» işlemine tâbi tutulur. Saflık derecesini arttırmak için klorlu gazlar ile 2.500 °C sıcaklığında tekrar fırınlanır. Bu şekilde yapılmış, reaktör

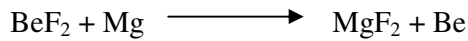
kalitesindeki yapay grafitin yoğunluğu  $1,65 \text{ g/cm}^3$  olup içindeki yabancı maddeler miktarı 20 ppm kadardır. Grafitin içinde yabancı maddelerin, özellikle de bor'un bulunması, onun özelliklerini önemli ölçüde etkiler [17].

#### 4.5. Berilyum

Periyodik sistemin ikinci grubunda yer alan berilyum, Be şeklinde sembolize edilir. Atom numarası (Z) = 4, atom ağırlığı (A) = 9,01'dir. Kararlı izotop olmayıp birkaç radyoaktif izotopu bilinmektedir. Bileşiklerinde +2 değerli olur. Tabiatta az rastlanan elementlerdendir. Yer kabuğunda % 0,001 oranında bulunur. Berilyum minerallerinin yataklarının çoğu Brezilya, Arjantin, Afrika ve Hindistan'dadır.

Saf berilyum, eritilmiş berilyum klorürün ( $\text{BeCl}_2$ ) elektrolizi ile elde edilir. Eritilmiş berilyum klorürün iletkenliği az olduğundan elektroliz sırasında ortama NaCl eklenir.

Diğer bir yöntem ise berilyum florürünün Mg ile  $1300^\circ\text{C}$  indirgenmesi ile elde edilir [29].



Metalik berilyum çok sert ve çelik gibi parlak olup oda sıcaklığında kırılımandır.

Erime noktası  $1283^\circ\text{C}$ , kaynama noktası  $2970^\circ\text{C}$ , özgül ağırlığı da  $1,86 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

Berilyum kimyasal özellikleri bakımından alüminyuma benzer. Kuru havada dayanıklı olup, ancak kızıl derecede yükseltgenir. Kaynar haldeki suya karşı bile oldukça dayanıklı olan berilyum, seyreltik HCl ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 'te çözünür. Fakat seyreltik  $\text{HNO}_3$ 'ten etkilenmez.

Berilyum, teknikte doğrudan doğruya kullanılmaz; bazı alaşımların bileşiminde yer alır. Mesela % 3 oranında bakırla karıştırıldığında, bakırın kopma direncini altı katına kadar artırır. Atom numarası küçük olduğundan röntgen ışınlarını kolayca geçirir. Bundan dolayı röntgen lambalarının pencereleri bu metalden yapılır.

Nükleer teknolojide berilyum ve radyum karışımı proton kaynağı olarak kullanılır. Radyum, radyoaktif bozunmalarda devamlı bir alfa partikül kaynağıdır. Bu alfa partikülleri ile berilyum bombardıman edildiğinde nötron üretilir.

Hafif bir element olması sebebiyle nötron reflektörü elementlerinde, güç kontrol silindirlisinde kullanılır. Keza berilyum, mermi ve uzay araçlarında yapı malzemesi olarak kullanılır. Yüksek elastik modülü ve elastik limiti sebebiyle roket ve uçaklarda ciroskopla idare sisteminde bu madenden istifade edilir [25].

Yavaşlatma gücü grafitinkine yakın olan Berilyum, iyi bir yavaşlatıcıdır. Ayrıca Berilyum'un ısı iletkenlik katsayısı iyi olup, korozyona çok dayanıklıdır ve radyasyon altında çalışmaya çok elverişlidir.

Bu gibi iyi taraflarına rağmen Berilyum'un reaktörlerde şimdiye kadar kullanılmamış olmasının bazı nedenleri vardır. Berilyum çok pahalıdır, çekilebilme özelliği çok fenadır ve ayrıca toz halinde sağlığa zarar verici zehirli özelliklere sahiptir.

Berilyum, MTR reaktöründe yansıtıcı olarak kullanılmıştır; SIR deniz altı reaktöründe de yavaşlatıcı olarak kullanılması projesinde öngörülmüştür.

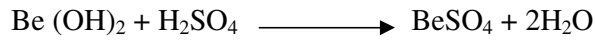
Dünyada çeşitli şekilde Berilyum içeren depozitlere rastlanmaktadır. Ancak Berilyum'un ticari üretiminde ham madde olarak «Beryl» kullanılmaktadır, (3 BeO,  $Al_2O_3$ , 6 SiO<sub>2</sub>). Brezilya, Arjantin ve Hindistan'da % 8 ilâ % 14 kadar BeO ihtiva eden mineraller bulunmaktadır.

Metal Berilyum üretiminde, öğütülmüş ve ısıtılmış cevher, sülfürik asitle işleme sokularak, berilyum, alüminyum ve diğer alkali metaller, eriyebilen sülfatlara dönüştürülür. Bu yolla çöktürülen Be (OH)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>, içinde eritilerek BeF<sub>4</sub> elde edilir. Bu tetraflüorür 800 °C sıcaklıkta ısıtılarak BeF<sub>2</sub> haline getirilir ve Mg bombasında indirgenerek Be elde edilir. Be'un teorik yoğunluğu 1,85 g/cm<sup>3</sup>'dür [17].

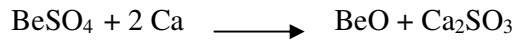
#### 4.6. Berilyum Oksit

BeO, nükleer özellikler bakımından Be kadar iyidir. BeO'in yavaşlatma yoğunluğunun grafitten iyi olması, onu cazip bir yavaşlatıcı konumunda kılmaktadır. Seramik bir malzeme olan bu oksitin, kimyasal bakımdan oldukça sakinliği, ısı iletkenliği iyi olması, su ve su buharı ile hiçbir şekilde reaksiyon vermemesi iyi taraflarıdır. Berilyum oksitin fena tarafları, çok kırılkan olması ve radyasyon hasarına dayanıklı olmamasıdır. Bu nedenle ancak ufak güçlü reaktörlerde kullanılabilir [17].

Berilyum oksit de Beryl'den üretilmektedir. Be imalatı sırasında oluşan Be (OH)<sub>2</sub> sülfürik asitte eritilerek tekrar kristalize edilince, Berilyum sülfat elde edilir.



Berilyum sülfat, kalsiyum ile indirgemeye tabi tutularak berilyum oksite dönüştürülür. Sıcak olarak preslenmiş BeO'in yoğunluğu 2,8 g/cm<sup>3</sup> tür.





## BÖLÜM 5. KONTROL MALZEMELERİ

### 5.1. Nötron Yutucuların Genel Özellikleri

Fisyon reaksiyonunu kontrol ederek reaktörleri istenilen bir güçte çalıştırmak, reaktörü durdurmak ve tekrar yol vermek, reaktör içine nötron yutucu çubuklar sokup çıkartmakla yapılmaktadır. Kontrol malzemelerinde aranılan özellikler şunlardır:

- Nötron yutma etkin kesidinin büyük olması,
- Mekanik özelliklerinin iyi olması,
- Korozyona dayanıklı olması,
- Radyasyon altında dengeli olması,
- Ucuz, kolay bulunur ve imalatı kolay olması.

Kontrol malzemesi olarak kullanılması mümkün olan bazı malzemeler ve bunların nötron yutma etkin kesitleri Tablo 5.1’de verilmiştir [17].

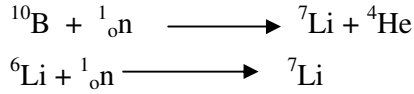
Tablo 5.1 Kontrol malzemesi olarak kullanılması mümkün olan bazı malzemeler ve bunların nötron yutma etkin kesitleri

Eleman	Sembol	$\sigma$ (termal) barn
Bor	B	755
Kadmiyum	Cd	2550
Lityum	Li	71
Hefniyum	Hf	105

Tablo 5.1’de görüleceği gibi termal nötron yutma etkin kesiti en büyük olan malzeme cadmiyumdur. Dolayısıyla fisyon reaksiyonunda açığa çıkan nötronları en iyi yutan malzemedir. Korozyona dayanıksız (kopma gerilmesi 630-959 kg/cm<sup>2</sup>) olması kullanımını sınırlar. Bu özelliği çelikle beraber kullanılarak olumlu hale getirilebilir. Termal nötron yutma etkin kesiti cadmiyundan sonra iyi olan diğer bir malzeme de bordur. Ülkemizde iç Anadolu bölgesinde zengin miktarda bor olduğu düşünüldüğünde ucuza mal edilebilirlik açısından ve korozyona dayanıklılık bakımından cadmiyuma göre üstündür.

İnce ayar çubuğu olarak paslanmaz çelik, yukarıdaki elemanların bazı bileşkeleri, gümüş, indiyum ve bazı nadir topraklar, kullanılması mümkün görülen diğer malzemelerdir.

Kontrol çubuğu olarak kullanılan malzemeler, etkin kesitlerinin büyüklüğü nispetinde, bol sayıda nötron yutmak sureti ile, nötron nüfusunu azaltıp çoğaltabilirler. Örneğin,



Şimdiye kadar en çok kullanılmış olan malzemeler bor ve kadmiyum'dur. Ancak bor metalik bir malzeme değil, ametalik bir malzemedir. Dolayısıyla mekanik özellikleri iyi değildir. Bu nedenle, ya mekanik özelliklerini iyileştirici bir bileşke halinde, ya da uygun bir zarf içinde kullanılır.

Zirkonyum üretimi esnasında yan ürün olarak elde edilen hafniyum da kontrol malzemesi olarak son zamanlarda önem kazanmaya başlamıştır. Bu elementin termal nötron yutma etkin kesidinin bor ve kadmiyum'ununki kadar yüksek olmamasına rağmen, epitermal yutma etkin kesitinin daha büyük olması nedeni ile kadmiyum'dan daha etkili bir kontrol malzemesidir [17].

## 5.2. Bor

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numarası 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur.

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte ABD'nin batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Deniz suyunda 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,01-1,5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonlarda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikler olarak daha çok Türkiye ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır.

Tarihte ilk olarak 400 yıl önce Babiller Uzak Doğu'dan boraks ithal etmiş ve bunu altın işletmeciliğinde de kullanmışlardır. Mısırlıların da boru, mumyalamada, tıpta ve metalürji uygulamalarında kullandıkları bilinmektedir. İlk boraks kaynağı Tibet göllerinden elde edilmiştir. Boraks, koyunlara bağlanan torbalar ile Himalayalar'dan Hindistan'a getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar boratları temizlik malzemesi olarak kullanmıştır. İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Borik Asit 1700'lü yılların başında borakstan yapılmış, 1800'lü yılların başında ise elementer bor elde edilmiştir [26].

Elementer bor 1808 yılında Fransız kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humphry Davy tarafından bulunmuştur.

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa rombohedral strüktür 1.200 °C'nin üzerinde bozulur ve 1.500 °C'de beta rombohedral form oluşur. Amorf form yaklaşık 1.000 °C'nin üzerinde beta rombohedrale dönüşür ve her türlü saf bor ergime noktasının üzerinde ısıtılıp tekrar kristalleştirildiğinde beta rombohedral forma dönüşür [26].

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur [26].

Tablo 5.2. Bor elementinin fiziksel özellikleri [26]

Özellikler	Değeri
Atom ağırlığı	10,811 veya 0.007
Ergime noktası	2190+20°C
Kaynama noktası	3660°C
Isıl genleşme katsayısı (25-1050°C arası, 1°C için)	5x10 <sup>-6</sup> -7x10 <sup>-6</sup>
Knop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği	11
Vickers sertliği	5000 HV

Doğal Bor iki izotoptan oluşmaktadır:

% 19,8 oranında <sup>10</sup>B  $\sigma = 3900$  b.

% 80,2 oranında <sup>11</sup>B  $\sigma = 0,5$  b.

Bu suretle ortalama yutma etkin kesidi  $\sigma = 750$  barn olmaktadır. Bor izotoplarının ayrılması, BF<sub>4</sub> (CH<sub>3</sub>)<sub>12</sub>O'nun kademeli olarak damıtılması ile mümkündür. % 95 zengin <sup>10</sup>B, Plütonyum kadar pahalı bir malzemedir [17].

ABD'de California'da zengin Bor madenleri bulunmaktadır. Bu maden hemen hemen saf boraks (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O) şeklinde olup, su ile yıkama ve tekrar kristalizasyon ile Bor elde edilmektedir. Bor'un erime noktası 2.000-2.300 °C arasındadır. Yoğunluğu ise 2,3 g/cm<sup>3</sup>'dür. Mekanik özellikleri iyi olmadığı için, alaşım veya toz metalürjisi ile hazırlanmış bileşke halinde kullanılır. Türkiye'de de Kütahya ve Eskişehir dolaylarında zengin Bor cevheri yatakları bulunmaktadır [17].

Bor izotopları nükleer reaksiyonların denetlenmesine yardımcı olur. Çünkü  $^{10}\text{B}$  ve  $^{11}\text{B}$  izotopların nötron absorblama tesir kesiti yükselir. Bazı reaktörlerde fazla reaktiviteyi önlemek için soğutma suyuna borik asit ilave edilir. Ayrıca bor, nükleer atık depolayıcı olarak ta kullanılır [26, 27].

Nükleer reaktörlerde kullanılan kontrol çubukları % 2 bor içeren çelik ve alüminyum alaşımından yapılmaktadır [26].

% 0,012 karbon içeren yumuşak çelik, elektrik ark fırınlarında eritilerek, % 1 ilâ 2 Bor ile birleştirilir. Alaşımın yoğunluğu  $7,6 \text{ g/cm}^3$  kadardır. Bu çeliğe su vermek ve kaynak yapmak mümkündür.

% 1,5 Bor içeren Bor - karbon çeliği kontrol çubukları X-10 ve BNL araştırma reaktörlerinde kullanılmıştır.

% 19 Cr, % 9 Ni ve % 0,08 C içeren paslanmaz çelik ile % 2 ilâ 3 Bor aynı şekilde birleştirilerek yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek mukavemetli ( $6860 \text{ kg/cm}^2$  kopma) çubuklar yapılabilmektedir. % 90 zengin  $^{10}\text{B}$ 'un paslanmaz çelik içine serpilmesi ile yapılmış kontrol çubukları, Hefniyum'dan daha üstün yutma özelliklerine sahiptir [17].

Epitermal nötron yutma etkin kesitinin büyük ve korozyona dayanıklı olması nedenleri ile hefniyum çok iyi bir kontrol malzemesidir. Doğal zirkonyum % 0,5 ilâ 2 kadar hefniyum içermektedir. İçinde % 35 kadar hefniyum bulunan depozitler de bulunmuştur. Zirkonyum üretiminden yan ürün olarak elde edilen hefniyum pahalı bir malzemedir.

Yoğunluğu  $13,36 \text{ g/cm}^3$ , ergime noktası  $2.130^{\circ}\text{C}$ , termal genişleme sayısı  $5,9.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  olan hefniyumun kopma gerilmesi  $2.870 \text{ kg/cm}^2$ 'dir.

Hefniyumdan yapılmış kontrol çubuğu ilk defa STR reaktöründe kullanılmıştır. PWR tipi reaktörlerde zarfsız olarak hefniyum çubukların kullanılması teklif edilmektedir.

### 5.3. Bor Karbür

B<sub>4</sub>C, toz metalürjisi ile hazırlanan metalik bağlama malzemeleri ile birlikte kullanılır. Bor karbürün özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Yoğunluğu 2,51g/cm<sup>3</sup> 'dir.
- Ergime noktası 2.450 °C'dir.
- Çok yüksek sertliğe sahiptir. (Elmas ve CBN'den sonra üçüncü sıradadır),
- Kimyasal ataklara karşı dirençlidir,
- Çok yüksek nötron absorpsiyon kabiliyetine sahiptir
- Elektrik iletkenliği 25 °C, 0.1-10 ohm.cm'dir.
- Maksimum kullanma sıcaklığı (oksitleyici şartlarda) 600 °C'dir.
- Isı iletim katsayısı 33,5 W/m.<sup>0</sup>K. 25 °C'dir.

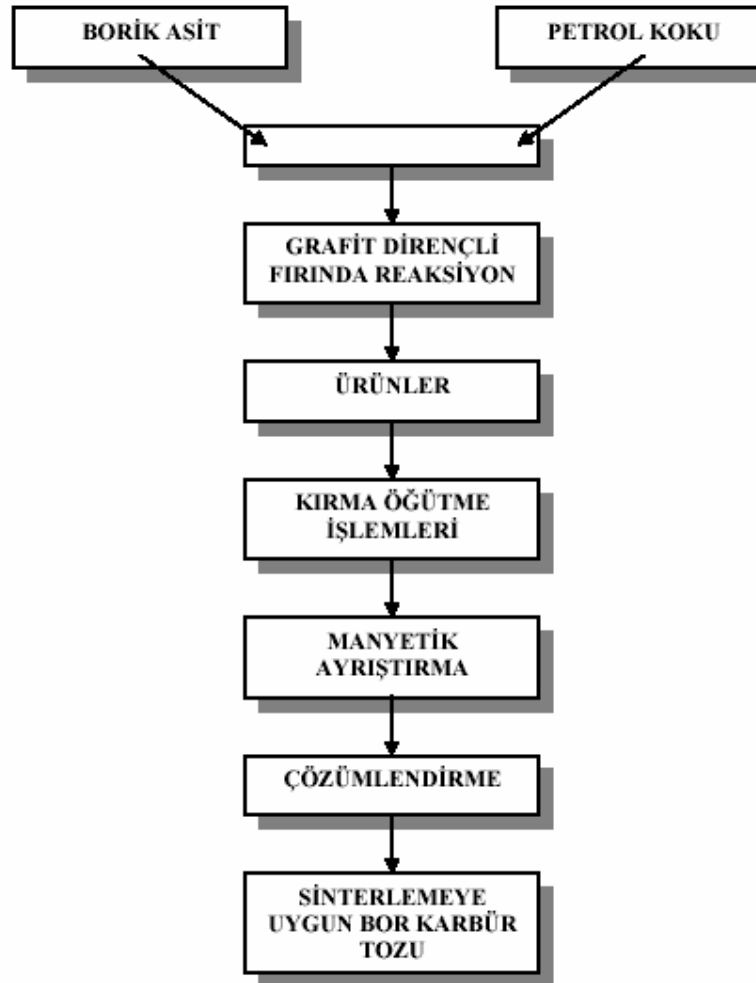
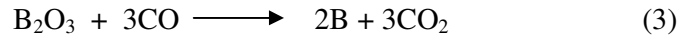
Bağ malzemesi olarak Al kullanıldığı zaman 600 °C sıcaklığa kadar, demir ile de 1.000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Türkiye'nin ilk araştırma reaktörü TR-1'de kontrol çubuğu olarak kadmiyum zarf içinde B<sub>4</sub>C kullanılmıştır [17].

Borun en stratejik ve ara hammaddesi niteliğinde olan bu malzemenin en önemli özellikleri, elmadan sonra ikinci sertliğe sahip olması, nötron absorpsiyon kabiliyetidir. Yüksek sıcaklığa dayanımı diğer bor bileşiklerinin sentezlenmesinde ara hammadde özelliğine sahip olmasıdır. Örneğin TiB<sub>2</sub> üretebilmek için çok yüksek sıcaklıkta TiO<sub>2</sub>'in B<sub>4</sub>C ile reaksiyona sokulması gerekmektedir [26].

Nükleer reaktörlerde kontrol çubuklarında, radyasyondan koruyucu duvarlarında kullanılmaktadır.

Ark ocağında veya rezistanslı fırınlarda borik asidin veya B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün karbonla birlikte aşağıdaki reaksiyona sokularak elde edilmektedir.





Şekil 5.1. Bor karbür üretim akım şeması [26]

Başlıca üreticileri ESK-Almanya ve Mudanjiang-Çin başlıca üreticileridir.

Bor karbürün ( $B_4C$ ) alüminyum matris içinde serpmeye yolu ile hazırlanmış kompozitine **boral** adı verilir. Al zarf içinde hazırlanmış boral levhaların kopma gerilmesi  $385 \text{ kg/cm}^2$  olup, diğer özellikleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.3. Al zarf içinde hazırlanmış boral levhaların özellikleri

Yoğunluk	Ergime noktası	Genleşme sayısı	Termal iletkenlik
$2,5 \text{ g/cm}^3$	$2.350-2.500 \text{ } ^\circ\text{C}$	$4,5.10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$0,29 \text{ cal/san.cm.} ^\circ\text{C}$ ( $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ de)

Bu maddenin su içinde korozyona dayanıklılığı Al gibidir. Havada oksidasyona dayanır, radyasyon altında dengelidir.

Karbür yerine  $B_2O_3$  kullanılarak aynı şekilde yapılan Al kompozitine **boraksal** adı verilir. Bu malzemenin yoğunluğu  $1,85 \text{ gr/cm}^3$ , ergime noktası  $580 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'dir.

#### 5.4. Kadmiyum

Kadmiyum, Çinko ve Bakır gibi metallerin üretiminde yan ürün olarak elde edilmektedir. Doğal kadmiyum içinde bir kaç izotop vardır. % 12,3 miktarındaki bir izotopun yutma etkin kesidi  $\sigma = 25.000 \text{ barn}$ 'dır. Ortalama etkin kesit ise  $2.600 \text{ barn}$  dolaylarındadır.

Metalik Kadmiyum'un teorik yoğunluğu  $8,65 \text{ g/cm}^3$ , lineer genleşme sayısı  $31,8.10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  ve oda sıcaklığındaki termal iletkenliği  $0,22 \text{ cal/cm.san.} ^\circ\text{C}$ 'dir. Ergime noktası  $321 \text{ } ^\circ\text{C}$  ve kaynama noktasının  $765 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'dir. Kaynama noktasının düşük olması, uygulama alanını sınırlar. Mukavemeti fazla değildir, soğuk çalışma ile bir miktar artar. Kopma gerilmesi  $630 \text{ ilâ } 959 \text{ kg/cm}^2$  kadardır. Kadmiyum tuzları ve buharı



zehirlidir. Nemli havalarda metalin yüzeyi beyaz-gri renkli oksit tabakası ile kaplanır. 300 °C'da oksit tabakası kahve renkli olur ve daha fazla oksitlenme olmaz. Metalik kadmiyum birçok araştırma reaktöründe kullanılmıştır. Mekanik mukavemeti fazla olmadığı için, ekseriya çelik ile takviye edilerek kullanılır. CP-1 ve CP-2 reaktörlerinde çelik şerit ile takviyeli olarak, MTR reaktöründe çelik boru içinde sandöviç şeklinde kullanılmıştır. CP-3 ve CP-5 reaktörlerinde Al zarf içinde Kadmiyum kontrol elemanları kullanılmıştır. Kadmiyum'un zarf olarak kullanıldığı da görülmektedir. NRX reaktöründe kadmiyum zarflı bor çubuklar kullanılmıştır.

### 5.5. Gümüş - İndiyum – Kadmiyum

Gümüş-Kadmiyum alaşımına indiyum eklendiği zaman korozyon mukavemetinin arttığı gözlenmiştir.

Doğal İndiyum iki izotoptan oluşmaktadır :

$^{113}\text{In}$ , % 4,2 bollukta,  $\sigma = 58$  barn

$^{115}\text{In}$ , % 95,8 bollukta,  $\sigma = 197$  barn

Böylece indiyum'un ortalama etkin kesiti  $\sigma = 190$  barn olmaktadır. Ayrıca indiyum'un 1,46 ev 'da,  $\sigma = 30.000$  barn şeklinde bir rezonans tepesi bulunmaktadır. Yüzde ağırlık cinsinden Ag-15, In-5 alaşımı ilginç bulunmuştur. Yoğunluğu 10,17 g/cm<sup>3</sup> ve ergime noktası 7.553 °C olan bu alaşım korozyona dayanıklıdır. Bu tip bir kontrol çubuğu Indian Point-2 reaktöründe kullanılmıştır.

### 5.6. Nadir Topraklar

Gadolinyum, samaryum ve europyum gibi bazı nadir toprakların nötron yutma etkin kesitleri oldukça büyüktür. Bunların kontrol çubuğu olarak kullanılması düşünülmekte ve Eu ilk aday olarak görülmektedir.

Gd'un ve Sm'un bazı bileşkelerinin, örneğin oksitlerin, Ti veya Zr içine serpilmiş olarak hazırlanmış örnekleri halen incelenmektedir. % 20 ağırlık oranında  $Gd_2O_3$  'un Zr matris içinde kopma gerilmesi  $8.400 \text{ kg/cm}^2$ 'dir. Gadolinyum'un termal nötron yutma etkin kesiti, ortalama  $\sigma = 44.000 \text{ b.}$  kadardır.

Bazı kontrol malzemelerinin termal nötron yutma makroskopik etkin kesitleri ve hafniyuma oranla etkinlikleri aşağıdaki Tablo 5.4'de verilmektedir.

Tablo- 5.4 Bazı kontrol malzemelerinin karşılaştırılması

	%3 10B-PÇ (serpme)	%15 Hf EU2A2-PÇ	In	Ag	Cd	%8,7 Gd-PÇ
$\Sigma \text{ cm}^{-1}$	27,2	2,4 – 8,7	3,68	1,85	77,5	31,1
Kontrol etkisi Hf=1	1,12	1 – 0,96	0,93	0,88	0,80	0,79

## BÖLÜM 6. SOĞUTUCU MALZEMELER

### 6.1. Soğutucuların Genel Özellikleri

Soğutucu, reaktör kalbinin erimesine (meltdown) fırsat vermeden ısı çıkışını sağlayan başlıca elemandır. Filyon reaksiyonunda önemli miktarda ısı enerjisi serbest kaldığına göre, reaktör kalbinin soğutulması gereklidir. Aslında, bir reaktörün nükleer gücü sınırsızdır. Reaktörün gücünü belirleyen hususlar soğutma sistemi ile koruma düzenleridir. Soğutma sistemi, kalbi oluşturan malzemelerin kritik sınırların altında kalmasını temin edecek yetenekte olmalıdır. Güç reaktörlerinin tasarımında başlıca özellik, soğutucunun ısı transferindeki verimliliğidir. Bunun dışında bir soğutucuda başka özellikler de aranır [14, 17].

Bu özellikler şunlardır:

- a- Yüksek ısı transfer oranı,
- b- Pompalama gücü ufak yada kolay pompalanabilen,
- c- Buharlaşma sıcaklığı yüksek, ergime sıcaklığı düşük,
- d- Radyasyon ve yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı,
- e- Seçilen diğer malzemelerle korozyon açısından uyumlu,
- f- Nötron yutma etkin kesiti ufak,
- g- Güvenceli bir şekilde kullanılabilir (yangın, patlama v.b.),
- h- Kolay bulunur ve ucuz olmalıdır,
- ı- İyi nükleer özellikler,
- j- Yüksek özgül ısı,
- k- Maddenin halinin iyi bilinmesi

## 6.2. Gaz Soğutucular

Gazlar kolay bulunur ve kolay kullanılabilir olmaları, yüksek sıcaklık ve radyasyon altında dayanıklı (dengeli) olmaları nedenleri ile nükleer reaktörlerde soğutucu olarak kullanılmışlardır. Dezavantajları ise düşük ısı kapasitesi ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmedir. Nükleer reaktörlerde soğutucu olarak bir çok gaz denenmiştir. Reaktörlerde kullanılan gaz soğutucular hava, helyum, karbondioksit, azot, hidrojenidir. Gaz soğutucular ve özellikleri aşağıdaki Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Reaktörlerde kullanılan gaz soğutucuların özellikleri

Soğutucu	Sıcaklık °C	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Özgül ısı cal/g	iletkenlik cal/cm.sn°C	Etkin kesit σ <sub>s</sub> barn	Işınlama
Hidrojen	100	6,6.10 <sup>-3</sup>	3,43	5,3.10 <sup>-4</sup>	σ <sub>s</sub>	Yok
Helyum	100	1,4.10 <sup>-3</sup>	1,25	4,0.10 <sup>-4</sup>	0,33	yok
Hava	100	9,5.10 <sup>-3</sup>	0,24	7,6.10 <sup>-5</sup>	~0	<sup>16</sup> N, <sup>41</sup> A
CO <sub>2</sub>	100	1,5.10 <sup>-3</sup>	0,218	5,0.10 <sup>-5</sup>	1,5	<sup>16</sup> N
Azot	300	9,5.10 <sup>-3</sup>	0,231	9,0.10 <sup>-5</sup>	0,22	7,3 saniye

Nükleer teknolojinin ilk çağlarında X-Pili, GLEEP, BEPU ve BNL gibi bazı araştırma reaktörleri hava ile soğutulmuşlardır. Ancak havanın ısı transferi katsayısı iyi değildir, oksitleyicidir, yanıcıdır ve pompalanması için gerekli güç büyüktür. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda havanın oksijeni (hatta bazen azot'u), grafit ve berilyum gibi yavaşlatıcılar ve bazı zarf malzemeleri ile korozyona neden olabilmektedir. Bu nedenlerle, hava ile soğutma artık kullanılmamaktadır [14, 17].

Isı iletimi ve pompalama gücü bakımından hidrojen çok uygun olmakla beraber, bazı metallerle karşı aktif olması ve hava ile karıştığında patlama tehlikesi göstermesi bakımından şimdiye kadar kullanılmamıştır.

Birçok bakımlardan Helyum çok daha iyi bir soğutucu gazdır; ısı iletimi özellikleri hidrojen'inki kadar iyi olmamakla beraber, nötron yutma etkin kesitinin çok ufak olması ve tehlikeli olmaması bakımlarından ilgi çekicidir. Ayrıca kimyasal bakımdan

aktif olmadığı gibi, yüksek ısı ve radyasyon etkilerine de dayanıklıdır. Sakıncalı tarafları, pompalama gücünün nispeten büyük olması ve pahalı bir gaz olmasıdır.

Helyum, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerde (HTR) kullanılır. Burada yakıt grafit içerisinde uranyum karbür kaplaması formunda olup hem kaplama elemanı hem de moderatör olarak davranır. Teorik olarak, helyumla moderatör veya kaplamaya bir kimyasal etki olmadan böyle bir reaktörü çok yüksek sıcaklıklarda (800 °C) çalıştırmak mümkündür. Ne var ki helyum soğutucuyu her zaman saf halde tutmak imkansızdır, çünkü çevrimde bir buhar sızıntısı olacak ve grafit tarafından absorbe edilmiş gazları açığa çıkaracaktır. Helyum kendisi grafitle ya da diğer çelik yapıyla reaksiyona girmese de pislikler girer ve bu sıcaklıkları sınırlayarak reaktör dizaynında problem doğurur [14].

Azot gazı nispeten büyük nötron yutma etkin kesitine sahip olması ve (n, p) reaksiyonu ile  $^{14}\text{C}$  oluşmasına neden olması nedenleri ile soğutucu olarak kullanılmamıştır.

$\text{CO}_2$ , şimdiye kadar en çok kullanılan gaz soğutucu olmuştur. Bu gaz, hem oksijen hem de karbon'un nötron yutma etkin kesitlerinin ufak olması bakımından olduğu gibi, metallerde korozyon etkisi bulunmaması ve tehlikeli olmaması bakımlarından da uygundur. Yüksek sıcaklıkta grafit ile etkileşmeye girmesi özelliğine rağmen, grafit yavaşlatıcılı doğal uranyum reaktörlerinde çok kullanılmıştır.

İlk olarak Fransa'da G-2 ve İngiltere'deki Calder - Hall üretim reaktörlerinde kullanılmış olan  $\text{CO}_2$ , daha sonraları Fransa ve İngiltere'deki MGCR tipi güç reaktörlerinin hepsinde kullanılmıştır. Çok büyük hacimli oldukları için üretimine son verilen GCR'lerle birlikte  $\text{CO}_2$  'nin soğutucu olarak kullanılması da durmuş bulunmaktadır.

### 6.3. Sıvı Soğutucular

Su, aynen hava gibi, kolay bulunur ve ucuz bir malzeme olduğu için nükleer reaktörlerde, yavaşlatıcı olduğu kadar, soğutucu olarak da çok kullanılmıştır. Suyun özgül ısısı büyüktür, termal iletkenliği, sıvı metallere nazaran biraz ufak olmasına rağmen, soğutma özellikleri iyi sayılır. Ayrıca, viskozitesi büyük olmadığı için, pompalama gücü de büyük değildir. Bu nedenlerle, nükleer reaktörlerin gelişmesinin en başından beri MTR, STR ve PWR gibi ünlü reaktörlerde yavaşlatıcı ve soğutucu olarak kullanılmıştır. Şüphesiz en büyük avantajlarından biri, bu iki görevi birden görebilmesidir.

Suyun, soğutucu olarak kullanılmasının bazı sakıncalı tarafları vardır. Bunların en başında nötron yutma etkin kesitinin büyük olması gelir. Bu nedenle, doğal Uranyum yakıtlı reaktörlerde kullanılamamaktadır. Buharlaşma noktasının düşük olması nedeni ile, güç reaktörlerinde yüksek basınç altında kullanılması gerekmiştir. Örneğin, PWR tipi modern güç reaktörlerinde 300-320 °C sıcaklıklarında ve 120-160 atmosfer basıncında kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklarda metaller üzerinde korozyon etkisi vardır ve su içindeki yabancı maddelerin radyasyon altında radyoaktif hale gelmeleri de mümkündür. Bu nedenle, reaktörlerde kullanılan su daima minerallerinden temizlenmiş sudur. Radyasyon altında saf suyun bile  $^{16}\text{N}$ ,  $^{17}\text{N}$  ve  $^{19}\text{O}$  gibi kısa ömürlü izotopları üretmesi söz konusudur.

Ayrıca su, hidrojen ve oksijen'ine ayrılmak sureti ile, dekompozisyona da uğrayabilir. Bu nedenle su ile soğutulan reaktörlerde, gazlardan temizleme «Degazeifikasyon» ve tekrar birleştirici «Recombiner» gibi bazı ilave tesisler kullanılması gereklidir. Su ile birlikte, paslanmaz çelik zirkonyum alaşımları, inconel ve monel gibi yüksek sıcaklıkta korozyona dayanıklı metaller kullanılmalıdır. Hafif suyun soğutucu olarak kullanılmasının diğer bir şekli, reaktör içinde buharlaşma yolu ile soğumayı temin etmesidir. Bu suretle, güç reaktörlerinde türbinlere yollanacak olan buhar, doğrudan reaktör içinde üretilir ve buhar üretici adı verilen ısı değiştiricilere gerek kalmaz. Başlangıçta, reaktör kalbi içinde buhar oluşmasının ve buhar miktarının ani değişikliklerinin reaktivite dengesini bozacağından korkulmuştu. Ancak bugün, türbinlere gidecek kuru doymuş buharı tamamen reaktör

basınç kabı içinde üreten BWR tipi güç reaktörleri başarılı bir şekilde çalışmaktadırlar. Bu suretle reaktör basınç kabı 70 ilâ 80 atm. basıncında olmakta ve buhar üreticileri tamamen kaldırılmış bulunmaktadır. Bu sistemin tek sakıncası türbin dairesinin hafifçe radyoaktif olmasıdır.

Ağır su da soğutucu olarak kullanılabilir. Bu malzemenin hafif su ile soğutucu özellikleri bakımından tek farkı, nötron yutma etkin kesitinin çok ufak olmasıdır. Bu nedenle, doğal uranyum yakıtlı reaktörler için çok uygun bir yavaşlatıcı ve soğutucudur.

Bu iki fonksiyonu birden yerine getirdiği zaman,  $D_2O$ 'nun bir kısmı ısı değiştiricilere yollanarak soğutulmuş olarak geri getirilir. Bu sistem, ilk  $D_2O$ 'lu araştırma reaktörlerinde kullanılmış olup en klâsik örneği Norveç'teki 350 kw gücündeki JEEP araştırma reaktörüdür. Ağır su ile soğutulan güç reaktörleri de yapılmıştır. CANDU - PHWR tipi güç reaktörlerinde yavaşlatıcı ağır su, soğutucu şebekesinden ayrılmıştır ve Kalandria adı verilen bir tank içinde bulunur. Soğutucu  $D_2O$  ise basınçlı borular içindeki yakıt elemanları arasından geçerek ısı değiştiriciye gider. Bu tipin en yeni bir örneği, Arjantin'de 1983 yılı sonunda servise girmiş olan 600 Mwe gücündeki Embalse nükleer santralidir.

Ağır su yavaşlatıcılı reaktörlerin hafif su ile soğutulmaları mümkündür. Kanada'daki, Chalk River NRU araştırma reaktöründe yavaşlatıcı  $D_2O$ , fakat soğutucu, yakıt çubukları dışındaki halka kesitinde dolaşan  $H_2O$ 'dur.

Soğutucu olarak kullanılan suyun reaktör içindeki kanallarda buharlaşmasına müsaade etmek sureti ile reaktörleri soğutmak mümkündür. Bunun  $D_2O$  yavaşlatıcılı reaktörlerdeki örneği, İngiltere'de 1968 yılında işletmeye alınmış olan 92 Mwe net gücündeki SGHW reaktörüdür, (Winfrith). Grafit yavaşlatıcılı kanal tipi bir reaktördeki tipik bir örneği ise 1.000 Mwe gücündeki Chernobyl Rus reaktörüdür.

Reaktörün  $D_2O$  buharlaşması ile soğutulması ise Norveç'te Halden reaktörü inşaatında denenmiş ise de bu proje başarılı olamamıştır [17].

#### 6.4. Sıvı-Metal Soğutucular

Yüksek sıcaklıkta çalışan, termal akısı ve güç yoğunluğu yüksek olan reaktörlerde, sıvı halde bulunan bazı metaller soğutucu olarak kullanılmışlardır. Bunların ısı iletkenlikleri büyük, buhar basınçları alçak olduğu gibi, Lityum gibi atom ağırlığı ufak olanlarda özgül ısıları da nispeten büyüktür. Ayrıca sıvı metaller yüksek sıcaklıklara ve radyasyon etkisine dayanıklıdırlar. Bismut, Kurşun, Sodyum gibi bazı metallerin nötron yutma kesitleri de oldukça ufaktır.

Sıvı metallerin ısı iletim özellikleri sudan iyidir, yoğunluğu çok büyük olmayanlarda pompalama gücü de uygundur. Bunların başlıca sakıncası daima ergime noktası üzerinde tutulmaları zorunluluğu ile yüksek sıcaklıklarda metaller ile korozyona neden olmalarıdır.

Na-K alaşımı, ergime noktasının düşüklüğü nedeni ile, en uygun sıvı metal görünümündedir. Nötron yutma etkin kesiti saf sodyum'a nazaran daha yüksektir. Buna mukabil, saf Sodyum'un özgül ısı ve ısı iletkenliği daha büyüktür. Saf Potasyum'un süperoksit' formasyonu şeklinde patlama tehlikesi önemli bir sakıncadır. Sodyum'un da su ile sert reaksiyona girmesi bir sakınca ise de, Sodyum ve Na-K alaşımı hızlı üretken reaktörlerde (LMFBR) soğutucu olarak kullanılmaktadırlar [17].

#### 6.5. Organik Sıvı Soğutucular

Bir organik bileşke, Karbon ve Hidrojen içerdiği için su kadar iyi bir yavaşlatıcı olmalıdır. Böyle bir sıvının kaynama noktası da yüksek ise, yüksek basınca gerek kalmadan, su yerine, yavaşlatıcı olarak kullanılması ilginç olabilir. Buna bir örnek olarak, endüstride «Dowtherm A» adı ile anılan difenil ve difenil oksit otektik karışımı gösterilebilir. Bu organik maddenin ergime noktası 25 °C ve buharlaşma sıcaklığı 252 °C'dir. Bunun tek sakıncası radyasyon altında fazla stabil olmamasıdır. Bu konuda araştırmalar sürmektedir [17].



## **BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada nükleer güç reaktörlerinde kullanılan yakıt, yapı, yavaşlatıcı, kontrol ve soğutucu malzemeler ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar ayrıntılı bir taramadan geçirilerek incelendi.

Nükleer reaktör kurarken, öncelikle ülke hammadde kaynakları da göz önünde bulundurularak hangi tipte reaktör kurulması gerektiğine karar verilmelidir. Bunun akabinde bu reaktörde kullanacağımız yakıt, yapı, yavaşlatıcı, kontrol ve soğutucu malzemeler hakkında karar vermeliyiz. Bu kararları verirken santralin kurulum maliyeti yanında genel olarak malzemelerin kolay bulunurluk ve ucuzluk, radyasyon karşısındaki davranış, korozyona dayanıklılık, erime ve kaynama derecesi, fisyon sonucunda oluşan nötronları absorplama kabiliyeti gibi özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Yakıt seçiminde malzemenin yukarıda sayılan özelliklerinden başka mekanik özellikleri, cevher işleme aşamaları da bilinmelidir.

Yapı malzemesi korozyona ve radyasyona dayanıklı, fisyon sonucunda oluşan nötronları absorplama kabiliyeti az olmalıdır. Ayrıca yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalıdır.

Moderatör seçiminde yavaşlatma oranı büyük, radyasyona dayanıklı, erime derecesi düşük kaynama derecesi yüksek, maddeler üzerinde korozyona neden olmayan bir malzeme tercih edilmelidir.

Kontrol malzemesi olarak korozyona dayanıklı, fisyon sonucunda oluşan nötronları absorplama kabiliyeti çok iyi, yüksek sıcaklığa dayanıklı, mekanik özellikleri iyi olan malzeme seçilmelidir.

Soğutucu seçiminde ise ısı transfer özelliği iyi, kolay pompalanabilen nötron absorplaması az olan, kolay ve ucuz bulunan malzeme tercih edilmelidir.

Yukarıda sözedilen tüm özellikler göz önüne alındığında:

Yakıt olarak uranyum,

Yapı malzemesi olarak zirkonyum,

Moderatör olarak su yada ağır su,

Kontrol malzemesi olarak bor karbür,

Soğutucu olarak su yada ağır su seçilebilir.