

GÜNÜMÜZDE NÜKLEER ENERJİ



TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU
Temmuz 2010



Bu doküman, nükleer enerjinin genel durumu hakkında bilgi vermek amacıyla OECD/NEA'nın "Nuclear Energy Today" isimli raporundan faydalanılarak hazırlanmıştır.



TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU
Temmuz 2010

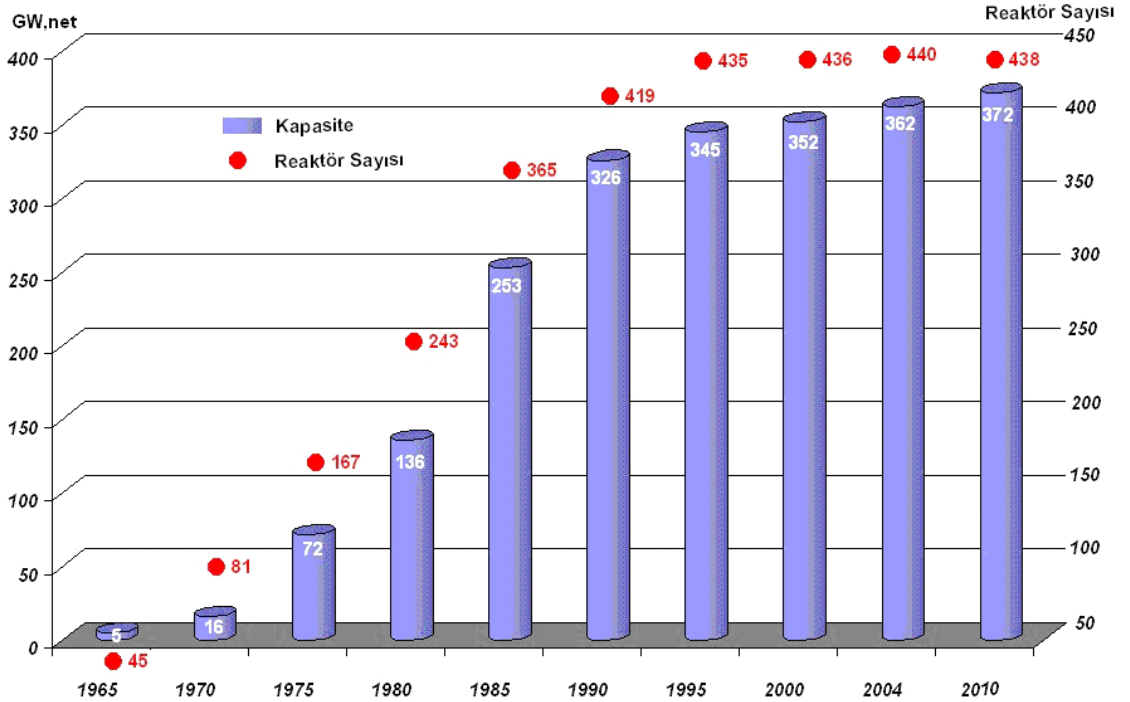
İÇİNDEKİLER

		Sayfa
1.	GÜNÜMÜZDE NÜKLEER ENERJİYE GENEL BAKIŞ	1
2.	NÜKLEER ENERJİNİN TEMEL PRENSİPLERİ	5
	Nükleer Fisyon	5
	Nükleer Reaktörlerin Temel Bileşenleri	7
	Ticari Nükleer Reaktör Teknolojileri	9
	Nükleer Füzyon	12
3.	NÜKLEER YAKIT ÇEVRİMİ	15
	Çevrimin Ön Kısım	15
	Çevrimin Son Kısım	19
	İşletmeden Çıkarma	21
4.	RADYOAKTİF ATIK YÖNETİMİ	24
	Radyoaktif Atık Tipleri	24
	Radyoaktif Atık Yönetimi İlkeleri	26
	Radyoaktif Atık Yönetimi Uygulamaları	26
	Uzun Ömürlü Atıkların Jeolojik Bertarafı	28
	Taşıma	31
	Sosyal ve Politik Hususlar	33
5.	NÜKLEER GÜVENLİK	35
	Nükleer Güvenliğin Temel Unsurları	35
	İşletme Deneyimi	41
	Piyasadaki Serbestleşmenin Güvenlik Üzerine Etkisi	42
	Gelecek Reaktörlerin Güvenliği	43
6.	RADYASYONDAN KORUNMA	44
	Bilimsel ve Tıbbi Geçmiş	44
	Radyasyondan Korunma Sistemi ve Düzenleyici Esaslar	50
	Kaza Durumunda Müdahale	52
	Kaza Sonuçlarının Hafifletilmesi	53
7.	NÜKLEER ENERJİNİN EKONOMİSİ	54
	Maliyetler, Riskler ve Sorumluluklar	54
	Rekabet Hususu	56
8.	ULUSLARARASI NÜKLEER DÜZENLEMELER VE NÜKLEER SİLAHLARIN YAYILMASININ ÖNLENMESİ	61
	Uluslararası Nükleer Düzenlemeler	61
	Nükleer Silahsızlanma	67
9.	NÜKLEER ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA	70
	Enerji Talebi	70
	Sürdürülebilir Kalkınmada Nükleer Enerji	71
10.	GELECEKTE NÜKLEER ENERJİ	80
	Nükleer Enerjinin Alternatif Kullanım Alanları	82
	Araştırma ve Geliştirme	85

1. GÜNÜMÜZDE NÜKLEER ENERJİYE GENEL BAKIŞ

Nötronun 1932 de Sir James Chadwick tarafından keşfinden sonra II. Dünya Savaşı'nın da etkisiyle nükleer bilim hızlı bir şekilde gelişti. 1939'da atomun bölünmesi (filyon) ile enerjinin açığa çıktığı keşfedildi. Bu olaydan daha sonra 1943'te ilk kontrol edilebilen zincirleme reaksiyon, 1945'te ilk atom silahı ve 1951'de nükleer enerji kullanılarak ilk elektrik üretimi gerçekleşti. Böylece nükleer enerji 20 yıl gibi bir süreçte temel prensiplerden pratik uygulama aşamasına geldi.

ABD'de elektrik üretimi için ilk kullanımını takiben nükleer enerji İngiltere'de 1953'te, Rusya'da 1954'te, Fransa'da 1956'da ve Almanya'da 1961'de elektrik üretiminde kullanılmaya başlandı. 1960'larda on ülke ve bunu takiben 1970'lerde on ülke daha nükleere dayalı elektrik üretimine başladı. 1970'lerin başındaki petrol krizi nükleer güç santrallerine talebi artırdı ve bu santrallerin kurulma dalgasını başlattı. Sonraki on yılda dünya ekonomisindeki yavaşlama ve fosil yakıt fiyatlarındaki düşüş, nükleer enerji talebindeki büyümeyi kısıtladı. Bunun yanı sıra ABD'deki *Three Mile Island* (1979) ve Rusya'daki *Chernobyl* (1986) kazalarının etkisi ile nükleer tesislerin güvenliği hakkında kamuoyunda ciddi endişeler oluştu. Bütün bu faktörler 1990'larda nükleer enerjinin gelişmesinde yavaşlamaya sebep oldu. Bununla beraber bazı ülkeler reaktör yapımına devam ettiler ve bu da nükleer enerji üretiminde sınırlı bir artışa neden oldu (Şekil 1.1).



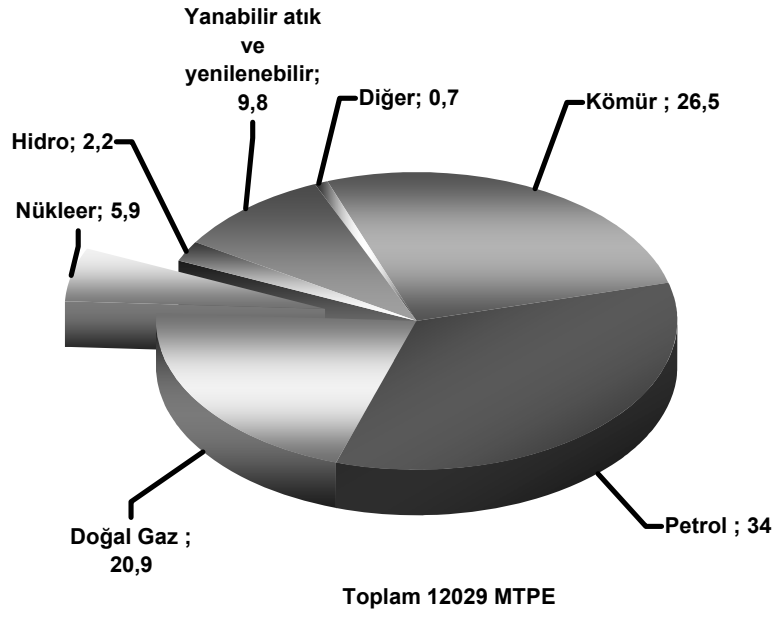
Şekil 1.1. Nükleer Enerjinin Tarihsel Gelişimi (1965-2010).

İlk nükleer çağın sonunda 32 ülke nükleer reaktörlerden elektrik üreterek 10.000 reaktör-yılından fazla işletme deneyimi kazanmışlar ve net 40,000 TWh elektrik üretmişlerdir. Mayıs 2010 itibariyle, 372 GWe kurulu üretim kapasiteli ve dünyadaki birincil enerjinin %6'sını ve elektriğin de %14'ünü sağlayan 438 adet çalışan ticari reaktör vardır (Tablo 1.1). Dünyada toplam 54,6 GWe kapasiteye sahip 57 nükleer santral inşa aşamasındadır (Mayıs 2010).

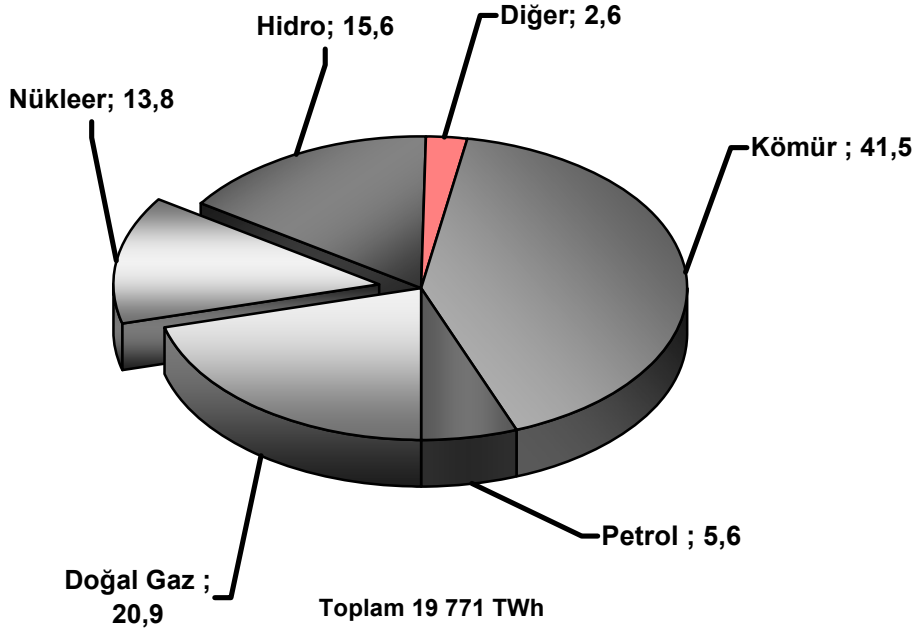
Tablo 1.1. 1 Mayıs 2010 İtibariyle Dünyada Nükleer Enerjinin Durumu¹

Mayıs 2010 itibarıyla	Nükleer Elektrik Üretimi, 2009		İşletmedeki Santraller		İnşa Edilen Santraller		Planlanan Santraller		Önerilen Santraller	
	Milyar kWh	%	Adet	MWe	Adet	MWe	Adet	MWe	Adet	MWe
ABD	796,9	20,2	104	100683	1	1165	9	11800	23	33000
Almanya	127,7	26,1	17	20490	0	0	0	0	0	0
Arjantin	7,6	7,0	2	935	1	692	2	767	1	740
BAE	0	0	0	0	0	0	4	5600	10	14400
Bangladeş	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000
Belçika	45,0	52,7	7	5902	0	0	0	0	0	0
Beyaz Rusya	0	0	0	0	0	0	2	2000	2	2000
Brezilya	12,2	3,0	2	1884	0	0	1	1245	4	4000
Bulgaristan	14,2	35,9	2	1906	2	1906	2	1900	0	0
Çek Cum.	25,7	33,8	6	3678	0	0	0	0	2	3400
Çin	65,7	1,9	11	8438	23	23620	34	38160	120	120000
Endonezya	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000
Ermenistan	2,3	45,0	1	375	0	0	1	1060	0	0
Finlandiya	22,6	32,9	4	2696	1	1600	0	0	1	1000
Fransa	391,7	75,2	58	63130	1	1600	1	1630	1	1630
G. Afrika	11,6	4,8	2	1800	0	0	3	3565	24	4000
Hindistan	14,8	2,2	19	4189	4	2506	20	16740	40	49000
Hollanda	4,0	3,7	1	487	0	0	0	0	1	1000
İngiltere	62,9	17,9	19	10137	0	0	4	6600	6	8600
İran	0	0	0	0	1	915	2	1900	1	300
İspanya	50,6	17,5	8	7516	0	0	0	0	0	0
İsrail	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200
İsveç	50,0	34,7	10	9303	0	0	0	0	0	0
İsviçre	26,3	39,5	5	3238	0	0	0	0	3	4000
İtalya	0	0	0	0	0	0	0	0	10	17000
Japonya	263,1	28,9	54	46823	1	1325	13	17915	1	1300
Kanada	85,3	14,8	18	12569	0	0	4	4400	3	3800
Kazakistan	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600
Kore (Güney)	141,1	34,8	20	17705	6	6520	6	8190	0	0
Kore (Kuzey)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950
Litvanya	10,0	76,2	0	0	0	0	0	0	2	3400
Macaristan	14,3	43,0	4	1889	0	0	0	0	2	2000
Meksika	10,1	4,8	2	1300	0	0	0	0	2	2000
Mısır	0	0	0	0	0	0	1	1000	1	1000
Pakistan	2,6	2,7	2	425	1	300	2	600	2	2000
Polonya	0	0	0	0	0	0	6	6000	0	0
Romanya	10,8	20,6	2	1300	0	0	2	1310	1	655
Rusya	152,8	17,8	32	22693	9	7131	15	17100	30	28000
Slovakya	13,1	53,5	4	1762	2	782	0	0	1	1200
Slovenya	5,5	37,9	1	666	0	0	0	0	1	1000
Tayland	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000
Tayvan (Çin)	39,9	20,7	6	4980	2	2600	0	0	6	8000
Türkiye	0	0	0	0	0	0	2	2400	1	1200
Ukrayna	77,9	48,6	15	13107	2	1900	2	1900	20	27000
Vietnam	0	0	0	0	0	0	4	4000	6	6000
Dünya	2558	14	438	372006	57	54562	149	161999	342	365375

¹ Kaynak: World Nuclear Association. www.world-nuclear.org ve www.iaea.org



Şekil 1.2. 2007 Yılında Dünyada Birincil Enerji Arzları (%)
(MTPE:Metrik Ton Petrol Eşdeğeri)

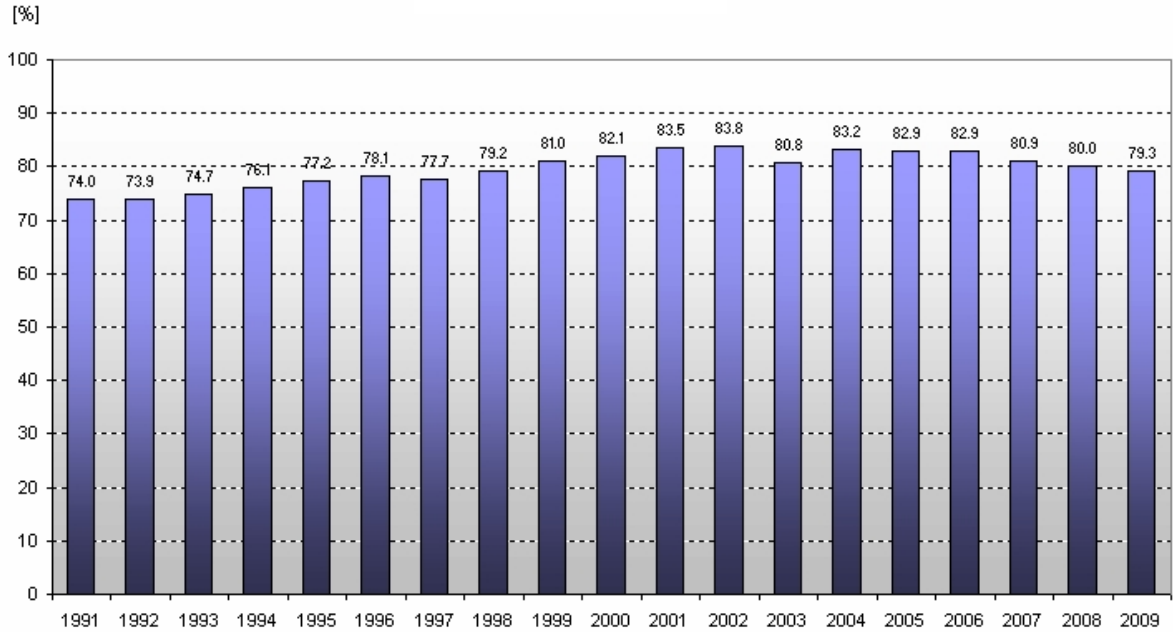


Şekil 1.3. 2007 Yılında Dünyada Elektrik Üretimi (%)

Şekil 1.2 ve 1.3 dünyada enerji temininde ve elektrik üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılığı göstermektedir. Bu koşulların sonucu olarak dünyada iklim değişimlerine neden olan sera gazları üretilmekte, bu da dünya ekonomisinin karbona dayalı büyümesinin önüne geçilmesi için artan bir hassasiyete sebep olmaktadır. Göreceli olarak belirli sayıda üreticiye bağlı olan petrol ve doğal gaz bağımlılığın artması, ulusal enerji politikalarında enerji arzının güvenliği konusundaki kaygıları öne çıkarmaktadır. Nükleer enerjide karbon emisyonunun olmaması ve nükleer yakıt kaynaklarının dünyada göreceli olarak dengeli bir şekilde elde edilebilirliği, enerji politikalarında nükleer enerji üzerine yoğunlaşılmasının temel nedenlerindedir.

Şekil 1.4 dünyada nükleer güç santrallerinin yıllık ortalama emre amadelik faktörünü göstermektedir. Dünyada pek çok ülkede elektrik üretiminde nükleer enerjinin belirgin bir katkısı bulunmaktadır. Örnek olarak üretilen elektriğin Fransa’da %75’i, ABD’de %20’si, Rusya’da %18’i, İngiltere’de %18’i, Almanya’da %26’sı ve Japonya’da %29’u nükleer santrallerden sağlanmaktadır.

Teknolojik olarak olgunlaşmış ve sürekli bir şekilde kullanımı genişlemekte olmasına rağmen, hükümetlerin belirli bir düzeyde rol alması ve halkın endişeleri, nükleer enerjiyi diğer enerji kaynakları arasında farklı kılmaktadır. Askeri amaçlı ortaya çıkışı, silah yapımında kullanılabilme ihtimali, teknik karmaşıklık, nükleer atıkların uzun süreli etkileri, karmaşık sigorta şartları ve güvenlik hukuku, potansiyel kazalarla ilişkili sonuçlar, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın sağlık etkileri ve yüksek ilk yatırım maliyeti gibi bir çok faktör buna katkıda bulunmaktadır. Bu hususların iyi bir şekilde özümsemesi ile nükleer enerji daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 1.4. Dünyada Nükleer Güç Santrallerinin Yıllık Ortalama Emre Amadelik Faktörü

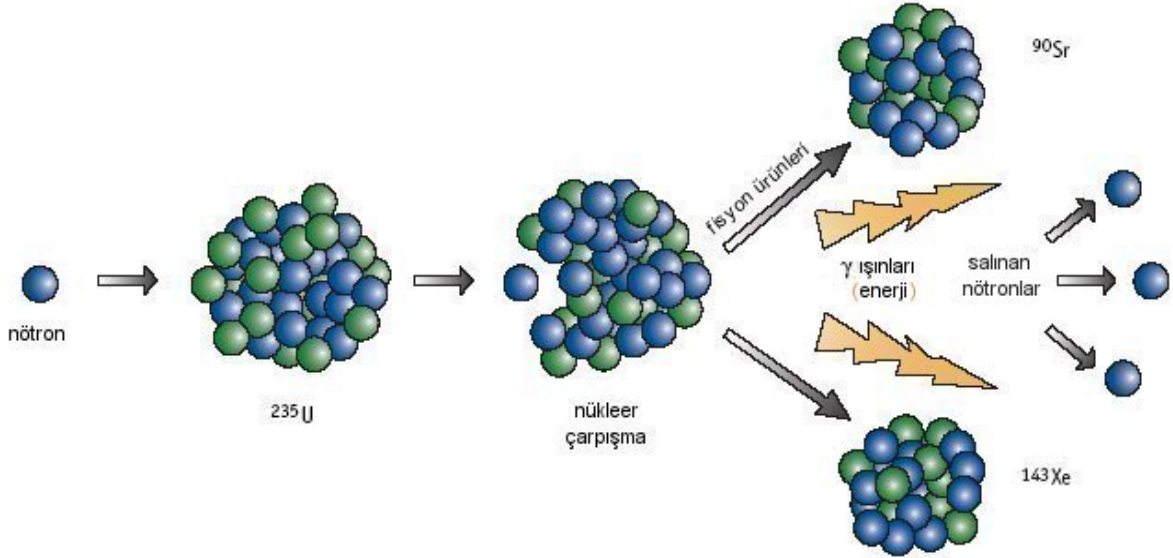
2. NÜKLEER ENERJİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

Bir nükleer reaktör, temel olarak, suyu kaynatacak ısıyı ve sonra elektriğin elde edildiği jeneratör türbinlerine yollanacak buharı üretir. Bu bölüm enerji elde etmek için uygulanan işlemleri ve temel teknolojileri açıklamaktadır.

Nükleer reaksiyon, herhangi bir atom çekirdeğinin alfa parçacıkları, gamma ışınları, nötronlar, protonlar veya herhangi bir atom gibi diğer fiziksel bir varlıkla çarpışması sonucu değişmesiyle meydana gelir. Bu nükleer reaksiyonlardan ikisi olan *fisyon* ve *füzyon*, büyük miktarda enerji açığa çıkardıkları için özel ilgi çekmektedir. Günümüzde bu ikisinden sadece fisyon reaksiyonundan elektrik üretimi için yararlanılmaktadır.

Nükleer Fisyon

Doğada bulunan veya yapay olarak üretilen uranyum ve plütonyum gibi bazı ağır elementler kararsızdırlar. Böyle bir elementin çekirdeğine bir nötron çarptığında çekirdek iki parçaya bölünür (fisyon veya split). Bu esnada iki veya üç nötron ve bir miktar enerji açığa çıkar (Şekil 2.1). Fisyon sonucu ortaya çıkan ve birçok kombinasyonu mümkün olan bu parçalar *fisyon ürünleri* diye isimlendirilirler. Reaksiyon ürünlerinin (fisyon ürünleri ve nötronlar) toplam kütlesi atomun ve çarpan nötronun orijinal kütlesinden biraz daha azdır. Enerjiye dönüşen bu fark Einstein'ın meşhur $E=mc^2$ formülü ile izah edilir.



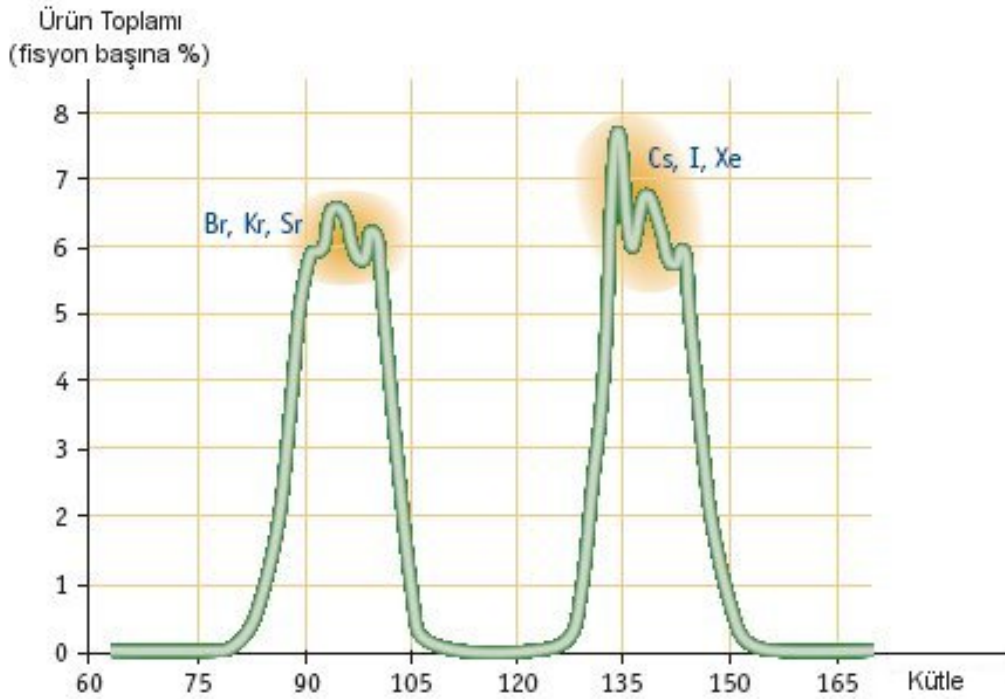
Şekil 2.1. Tipik Bir Fisyon Reaksiyonu

Şekil 2.2 ^{235}U 'in fisyonu sonucu ortaya çıkan fisyon ürünlerinin olasılıklarını verir. ^{235}U 'in fisyonu ile olasılık ve radyoaktifite açısından ortaya çıkacak önemli fisyon ürünleri, Brom (Br), Sezyum (Cs), İyot (I), Kripton (Kr), Stronsiyum (Sr) ve Ksenon (Xe)'dir. Herhangi bir radyoaktif element gibi bu izotoplar da her biri değişik periyotlarla ölçülen ve yarı ömür diye isimlendirilen sürelerle bozunuma uğrarlar. Miktarları ve radyoaktiviteleri sebebiyle bu izotoplar ve bozunma ürünleri nükleer atıkların önemli bir parçasını oluştururlar.

İlk çarpışmadan sonra dışarı atılan fisyon ürünleri yakınında bulunan diğer atomlarla çarpışmaya başlarlar ve hareket enerjilerinin büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşür. Bu ısı daha sonra soğutucunun ısıtılmasında (dolayısıyla elektrik üretiminde) kullanılır.

Fisyon sonucu ortaya çıkan nötronlar yakınlarındaki fisyonu müsait atomlarla reaksiyona girerler ve bu atomlar da fisyon yaparak bir çok nötron serbest bırakırlar. Bu şekilde devam eden bu olaya zincirleme reaksiyon denir. Alternatif olarak bazı nötronlar da çekirdeğe çarparak saçılıp (scattering), reaksiyon yapmaksızın sistemden kaçabilirler veya basit olarak fisyonu neden olmadan çekirdek tarafından yakalanabilirler.

Kaçma ve yakalanmayla kaybedilen sayıyı dengeye getirmek için yeterince serbest nötronun oluşturulduğu pozisyonda, fisyon reaksiyonu kendi kendini devam ettirme durumuna gelir ve bu noktada sistem kritiklik durumuna ulaşmış olur. Kritik kütle, belirli koşullarda zincirleme reaksiyonunun sürdürülebilmesi için gereken minimum bölünebilen (fisil) madde miktarıdır.



Şekil 2.2. ^{235}U 'in Termal Fisyonundan Üretilen Fisyon Ürünleri

Uranyum veya plütonyumda fisyon oluşmasında en verimli olan nötronlar termal nötronlar olarak adlandırılan, göreceli olarak düşük kinetik enerjiye sahip [0.1 elektron volt (eV) dan küçük] nötronlardır. Yüksek kinetik enerjili yani 10 Milyon eV (MeV) civarında enerjilere sahip nötronlar ise hızlı nötronlar diye isimlendirilir. Fisyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan bütün nötronlar hızlı nötronlardır. Hızlı nötronlar uranyumun fisyon yapmasında daha az verimli olmakla birlikte geniş bir izotop yelpazesi üzerinde etkili olabilirler. Günümüzdeki ticari nükleer güç reaktörleri çoğunlukla fisyon reaksiyonunun termal nötronlarla gerçekleştirilmesine dayanan tasarımlardır. Fisyon oluşumuna uygun olan enerji seviyelerindeki termal enerjili nötronlar oluşturabilmek için fisyon sonucu ortaya çıkan hızlı nötronların yavaşlatılması gerekir ve bu bir yavaşlatıcı (moderatör) kullanılarak gerçekleştirilir.

Bir atom çekirdeği bir nötron yakaladığı zaman fisyon oluşmazsa başka bir elemente dönüşebilir. Nükleer reaktörlerde bu sonuç, tabiatta bulunmayan yada nadir bulunan uzun ömürlü elementlerin ortaya çıkmasına sebep olur (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 de listelenen bütün elementler radyoaktifler ve bazıları – özellikle plütonyum–nükleer yakıt olarak kullanılabilir. Bu izotoplar uzun yarı ömürleri, yüksek radyolojik ve biyolojik toksisiteleri sebebiyle nükleer atıkların önemli unsurları ve bazı atıkların çok uzun periyotlarla izole edilmesinin nedenidir.

Nükleer fisyon yüksek enerji yoğunluğuna sahip çok güçlü bir enerji kaynağıdır (enerji/birim yakıt kütlesi). Fosil yakıtların yanması gibi kimyasal reaksiyonlarla karşılaştırıldığında, fisyon reaksiyonu kullanılarak, fosil yakıtlarla üretilen miktara eşdeğer enerji üretmek için çok küçük bir hacimde malzemeye ihtiyaç vardır. Tipik bir reaktörde 1 kg uranyumdan elde edilen fisyon enerjisi ile 45000 kg odun, 22000 kg kömür, 15000 kg petrol ve 14000 kg likit doğal gazdan elde edilen enerji eşdeğerdir (Tablo 2.2).

Tablo 2.1. Nükleer Reaktörlerde Nötron Yakalamayla Oluşan Önemli İzotoplar

Element	Yaklaşık yarı ömür
Neptünyum (^{237}Np)	210 000 yıl
Plütonyum (^{239}Pu)	24 000 yıl
Amerisyum (^{234}Am)	7 400 yıl

Tablo 2.2. Muhtelif Yakıtların Enerji İçerikleri

Yakıt	1 tonunun yaklaşık enerji içeriği (GJ)
Odun	14
Kömür	29
Petrol	42
Doğal gaz (sıvılaştırılmış)	46
Uranyum (LWR, tek geçişli)	630 000

Benzer olarak, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında da aynı miktarda güç üretmek için nükleer enerjinin daha küçük bir alana gereksinimi olduğu görülür. Örneğin günümüzde mevcut teknolojilerle 900 MWe kapasiteli bir nükleer güç santralının bir yılda ürettiği elektrik, verimlilik ve emre amadelik dikkate alınarak 70 km² lik güneş panelleri ve binlerce rüzgar değirmeni ile elde edilebilir.

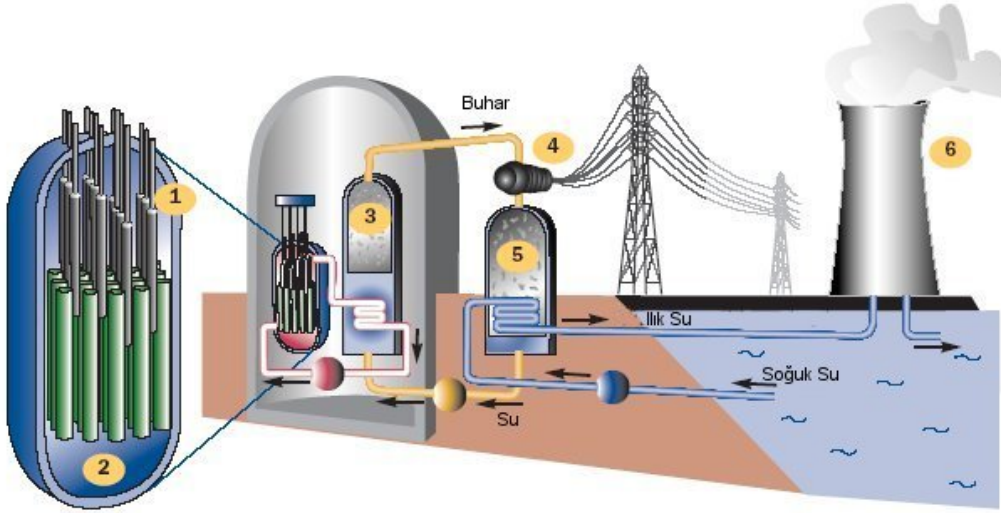
Nükleer Reaktörlerin Temel Bileşenleri

Nükleer fisyon enerjisinden faydalanan ana teknoloji nükleer reaktör teknolojisidir. Bir çok reaktör tipi olmasına rağmen bütün reaktörlerde genellikle yakıt, yavaşlatıcı (moderatör), soğutucu ve kontrol çubukları gibi bileşenler mevcuttur (Şekil 2.3).

Yakıt

Doğal uranyum, büyük oranda ^{238}U izotopunu ve az miktarda ^{235}U izotopunu içermektedir. Tabiatta doğal olarak bulunan tek bölünebilen madde ise ^{235}U 'tir. ^{235}U termal veya hızlı nötronların çarpması ile kolayca fisyon yapabilir. Yaygın ticari reaktörler için üretilen Uranyum yakıtlarında, tabiatta bulunan orandan (%0,711) daha yüksek konsantrasyonlarda ^{235}U kullanılmaktadır (%2-5). Bu yüksek konsantrasyon zenginleştirme ile elde edilir. Doğal uranyumu yakıt olarak kullanan ticari reaktörler de mevcuttur.

Uranyum yakıtının ^{235}U dışındaki kısmı (^{238}U) ancak belirli enerji seviyelerindeki nötronların çarpmasıyla fisyon uğrayabilir. Ancak bu çarpışmalar genellikle nötronun yutulması sonucunda ^{238}U 'in Plütonyum-239'a (^{239}Pu) dönüşmesi ile sonuçlanır. Plütonyumun bu izotopu termal veya hızlı nötronların çarpmasıyla fisyon uğrayabilir; ve hafif sulu reaktörler için enerji üretimine katkısı, üretilen gücün %30'u oluncaya kadar yavaş yavaş artar. Bazı reaktörler başlangıçta plütonyumla karıştırılmış yakıt kullanırlar, buna karışık oksit yakıt (mixed-oxide veya MOX) denir. Bu tip yakıt kullanmak, kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesiyle elde edilen plütonyum stoklarının tüketilme yollarından biridir. Kullanılmış yakıt yeniden işlenmediği takdirde plütonyum atık olarak muamele görür.



1. Reaktör: Yakıt (yeşil) basınçlı suyu ısıtır, kontrol çubukları (gri) fisyon reaksiyonunu kontrol etmek veya sona erdirmek için nötronları yutar.
2. Soğutucu ve yavaşlatıcı: Soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hizmet etmek için yakıt ve kontrol çubukları su ile çevrelenmiştir.
3. Buhar üretici: Reaktörde oluşan sıcak su yüksek basınçlı buhar üretmek için ısı değiştiricisine (buhar üreticine) pompalanır.
4. Türbin jeneratörü: Buhar elektrik üretmek üzere elektrik jeneratörüne yönlendirilir.
5. Kondansatör: Yoğunlaştırıcı, Buharı suya dönüştürmek için ısıyı soğutur.
6. Soğutma kulesi: Dönen soğutma suyundaki ısıyı yakın çevre ısısına dönüştürür.

Şekil 2.3. Bir Nükleer Reaktörün (Basınçlı) Temel Bileşenleri

Yavaşlatıcı

Fisyon sonucu ortaya çıkan hızlı nötronların ileri evredeki fisyon oluşumunda verimliliğini artırmak için bu nötronları termal enerji düzeyine kadar yavaşlatacak bir yavaşlatıcı (moderatör) gereklidir. Yavaşlatıcı, nötronların yutulmadan/tutulmadan yavaşlatılmasını sağlayacak hafif bir malzeme olmalıdır. Genel olarak bu yavaşlatma işlemi için normal su kullanılır, alternatifleri ise bir karbon formu olan grafit ve ağır sudur.

Soğutucu

Nükleer fisyon sonucu oluşan ısıyı yakıttan çekmek ve yakıtın sıcaklığını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için bir soğutucu gereklidir. Daha sonra bu soğutucu elektrik üreten türbinleri çalıştırmak için ısınımlı iletebilir. Eğer soğutucu olarak su kullanıldıysa elektrik üretimi için, elde edilen buhar doğrudan türbinleri beslemek üzere gönderilebilir veya alternatif olarak soğutucu, gerekli buharı üreten ısı değiştiricisinden geçer. Diğer muhtemel

soğutucular karbondioksit, helyum gibi gazlar, ağır su ile sodyum, kurşun veya bizmut gibi sıvı metallerdir. Günümüzde yaygın bir çok reaktörde olduğu gibi, bir soğutucu aynı zamanda yavaşlatıcı görevini görebilir.

Kontrol çubukları

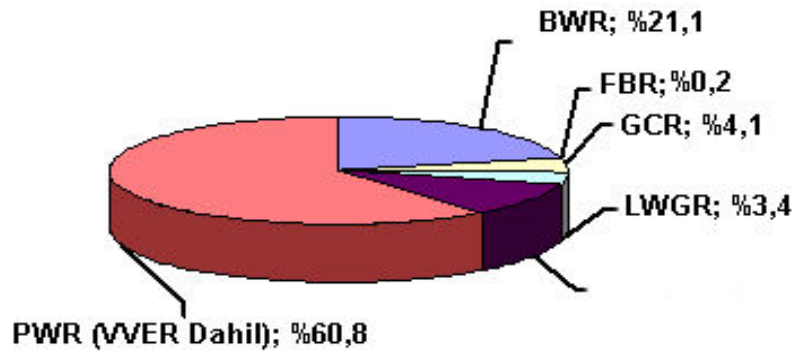
Bor, gümüş, indiyum, kadmiyum ve hafniyum gibi nötron yutucu malzemelerden yapılan kontrol çubukları gerektiğinde nötron sayısını azaltarak fisyonun durdurulması veya çalışma esnasında güç seviyesinin ve reaktördeki lokal güç dağılımının kontrol ve düzenlenmesi için kullanılır.

Diğer bileşenler

Yakıt demetleri diğer mekanik yapılarıyla beraber reaktörün korunda bulunur. Tipik olarak reaktörlerde kordan dışarı kaçan nötronların mümkün olduğu kadar çoğunun geri kazanılabilmesi için koru bir nötron yansıtıcısı çevrelemektedir. Çoğu zaman da soğutucu ve/veya yavaşlatıcı (moderatör) bir yansıtıcı olarak görev yapar. Kor ve yansıtıcı genellikle reaktör basınç kabı denen kalın bir çelik kap içine yerleştirilir. Radyasyon zırhlaması fisyon sırasında ortaya çıkan yüksek seviyedeki radyasyonun azaltılmasını sağlar. Kora yerleştirilen bir çok alet ve destek sistemleri ısı, basınç, radyasyon ve güç seviyesi gibi hususlarda reaktörün kontrol edilmesini ve izlenmesini sağlar.

Ticari Nükleer Reaktör Teknolojileri

Reaktörleri, kullanılan soğutucu tipine göre ayırmak yaygın ve faydalı bir yöntemdir. 2010 yılı başı itibariyle, dünyada kullanılmakta olan ticari reaktörlerin %81,9'unu soğutucu ve yavaşlatıcı olarak normal su kullanan reaktörler teşkil etmektedir. Bunlara hafif sulu reaktörler (light water reactor, LWR) denir ve Rusların VVER modelini de içeren basınçlı su reaktörleri (pressurized water reactor, PWR) ile kaynar sulu reaktörler (boiling water reactor, BWR) olmak üzere iki tip şeklinde sınıflandırılmışlardır. Geriye kalan 18% oranındaki reaktörlerin çoğu ağır su ve gaz soğutmalı reaktörlerdir. Şekil 2.4 dünyada ticari olarak çalıştırılan başlıca reaktör tiplerinin dağılımını göstermektedir.

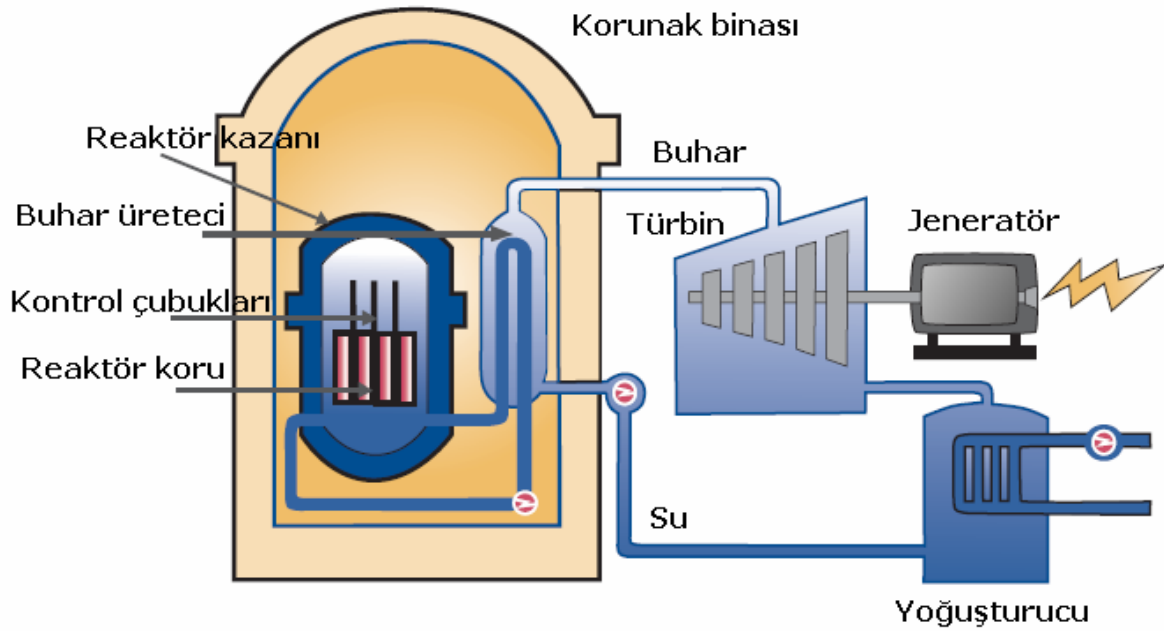


Şekil 2.4. Dünyada Kullanılan Reaktör Tipleri (Şubat 2010)

Basınçlı su reaktörleri

Çoğunluğu Fransa, Japonya ve ABD'de olmak üzere Dünya'da en yaygın olarak çalışan reaktör tipi basınçlı su reaktörüdür (Pressurised Water Reactor, PWR).

Basınçlı su reaktörlerinde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak normal su kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda sıvı olarak kalmasını sağlamak için soğutucu yüksek basınçta (15.5 MPa veya 2 250 psi) tutulur. Kuvvetli pompalar kullanılarak soğutucu birincil sistemde dolaştırılır ve ısı değiştiricileri vasıtasıyla soğutucu ısıyı ikincil devreye transfer edilir. Son olarak üretilen buhar elektriği üretecek türbin jeneratörlerine gider (Şekil 2.5).



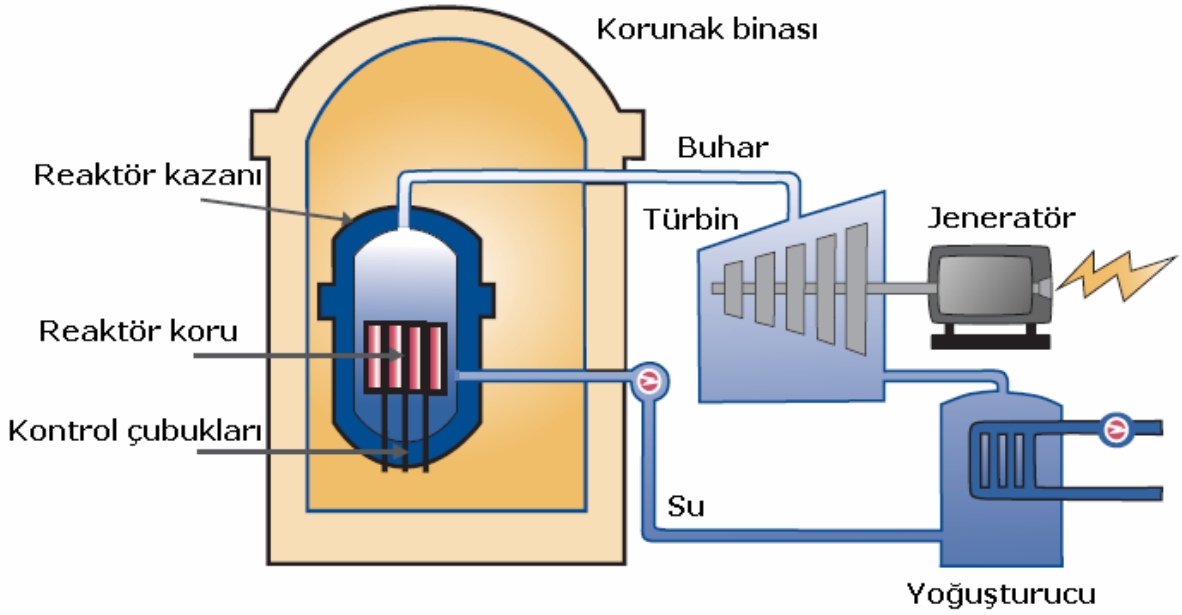
Şekil 2.5. Basınçlı Su Reaktörü (PWR)

VVER

VVER tipi reaktörler Rusya ve Ukrayna'nın yanı sıra Ermenistan, Bulgaristan, Çek Cumhuriyeti, Finlandiya, Macaristan ve Slovak Cumhuriyeti'nde de çalıştırılmaktadır. Reaktörün adı, su soğutmalı ve su yavaşlatıcılı nükleer enerji reaktörlerinin Rusça ifadelerinden oluşmuştur. VVER tipi reaktörler aslında Rus tasarımı PWR tipi reaktörlerdir.

Kaynar sulu reaktörler

Yaygın şekilde kullanılan diğer bir reaktör tipi olan kaynar sulu reaktörler (Boiling Water Reactors, BWR) Japonya ve ABD gibi ülkelerde kullanılmaktadır. Bir kaynar sulu reaktörde normal su hem soğutucu hem de yavaşlatıcı olarak kullanılır. Soğutucu, reaktörden aldığı ısı ile kaynayabilmesi için PWR'da kullanılan basınçtan daha düşük basınçta (7 MPa civarı veya 1000 psi) tutulur. Meydana gelen buhar elektrik üretmek için aynı şekilde türbin jeneratörlerine yollanır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Kaynar Sulu Reaktör (BWR)

Basınçlı ağır su reaktörleri

Basınçlı ağır su reaktörleri (Pressurised Heavy Water Reactor, PHWR) başta Kanada olmak üzere Arjantin, Hindistan, Pakistan, Güney Kore ve Romanya'da kullanılmaktadır. Soğutucu ve yavaşlatıcı olarak ağır su (D_2O , hidrojenin döteryum izotopundan oluşan su) kullanılan bu reaktörler Kanada tarafından geliştirildiği için CANDU reaktörleri (CANadian Deuterium Uranium) diye tanınır. Yavaşlatıcı olarak ağır su kullanılması, yakıt olarak doğal uranyum kullanımına imkan sağlar; bu da uranyumu zenginleştirmek için zaman ve para harcanmasını önler; ancak birim enerji başına zenginleştirilmiş uranyum kullanan reaktörlere nazaran daha fazla yakıt gerekir. Basınçlı su reaktörlerinde olduğu gibi soğutucu, normal suyu ayrı bir devrede kaynatmak için buhar jeneratöründen geçer. PWR ve BWR reaktör tasarımlarında yakıt değiştirmek için reaktörü kapatmak gerekirken CANDU tasarımında yakıt değişimi reaktör çalışırken yapılmaktadır.

Gaz soğutmalı reaktörler

Gaz soğutmalı reaktör (Gas Cooled Reactor, GCR) yalnız İngiltere tarafından ticari olarak kullanılmaktadır. Bunlar Magnox (yakıt elemanlarını kaplamak için magnezyum alaşımının kullanılması nedeniyle bu şekilde isimlendirilmiştir) ve geliştirilmiş gaz soğutmalı reaktör (Advanced Gas Reactor, AGR) olarak iki tiptir. Her iki tipte de soğutucu olarak karbondioksit ve yavaşlatıcı olarak grafit kullanılmıştır. MAGNOX tipi reaktörler yakıt olarak doğal uranyum, AGR'ler ise zenginleştirilmiş uranyum kullanır. Bunlar CANDU reaktöründe olduğu gibi, yakıt değişimi reaktör çalışırken yapılacak şekilde tasarlanmışlardır.

RBMK

RBMK tipi bu reaktörler Rusya Federasyonu ve Litvanya'da faaliyet halindedir. Bu isim Rusça'da büyük güçlü kaynama reaktörü (large power boiling reactor) anlamındadır.

Soğutucu olarak normal su ve yavaşlatıcı olarak grafit kullanılmıştır. BWR tasarımlarındaki gibi reaktörden geçen soğutucu kaynamakta ve oluşan buhar doğrudan türbinlere gitmektedir.

Eski bir tasarım olan RBMK'dan çok fazla sayıda inşa edilmiştir ve bunlardan bazıları hala gereksinim duyulan güvenlik karakteristikleri ve özellikleri olmaksızın çalıştırılmaya devam etmektedirler. 1986'daki büyük nükleer santral kazası, Chernobyl'deki RBMK tipi reaktörde meydana gelmiştir.

Bu tip reaktörlerin özel güvenlik sorunları vardır ve çağdaş güvenlik uygulamalarına uyumlu bir şekilde geliştirilmemişlerdir.

Hızlı üretken reaktörler

Yukarıda şimdiye kadar bahsedilmiş olan reaktör tiplerinin tamamı termal reaktörlerdir ve fisyon ağırlıklı olarak termal nötronlar tarafından yapılmaktadır. Hızlı reaktörler ise yüksek kinetik enerjili nötronları kullanmak için tasarlanmıştır. Hızlı reaktörler her fisyon için termal reaktörlerden daha çok nötron üretirler ve yüksek nötron enerjilerinde nötron yakalanma olasılığı düştüğü için nötronları daha verimli kullanırlar. Bu fazla nötronlar, ^{238}U ve ^{232}Th gibi üretken (fertil) malzemelerin nötron yakalayarak bölünebilir (fisil) malzemeye (^{239}Pu , ^{233}U) dönüşmeleri için kullanılırlar. Ortaya çıkan bu ymni bölünebilir malzeme ise daha sonra reaktöre yakıt olmaktadır. Hızlı üretken reaktörlerde (Fast Breeder Reactor, FBR) tüketilenden daha fazla yakıt üreten reaktörleri tasarlamak mümkündür. Tipik olarak üretken reaktörler, termal nötronları kullanabilecek tasarımlar olmasına rağmen, hızlı reaktörlerdir. Fransa, Hindistan, Japonya ve Rusya gibi ülkelerde çok az sayıda hızlı üretken reaktör vardır.

Reaktörlerin ömrü

İngiltere'deki MAGNOX'lar gibi birçok ilk jenerasyon reaktör hala işletilmektedir. Bugünkü reaktörlerin çoğu 1970 ve 1980'lerde inşa edilmişlerdir. Bu reaktörler ortalama 40 yıllık ömürlerinin sonuna 2015'ler civarında ulaşacaklardır. Bununla beraber, reaktörün çalışması ve malzemelerle ilgili deneyimler özellikle PWR ve BWR tasarımlarında uzun çalışma ömürlerini kısaltacak teknolojik sorunların olmadığını göstermiştir. Tesis performansının dikkatle izlenmesi, çalışma tecrübelerinin analizi, programların modernizasyonu ve yeniden düzenlenmesi bir çok tesiste çalışma ömrünün uzatılması için bir imkan sağlamaktadır. Örnek olarak, Ocak 2003'te ABD'deki Nükleer Düzenleme Kurumu lisanslanmış işletme ömürleri dolan 10 reaktöre, orijinal reaktör ömrünü 20 yıl uzatarak 60 yıllık işletme süresi izni vermiştir. Rusya Federasyonu gibi diğer ülkeler de mevcut reaktörlerinin işletme ömürlerini uzatmak için planlar yapmaktadırlar. Bir çok ülkede santral ömürlerinin uzatılması hakkındaki kararlar, en güncel metotları, bilgileri ve güvenlik kurallarını içeren kapsamlı güvenlik analizlerine dayalı olarak alınmıştır.

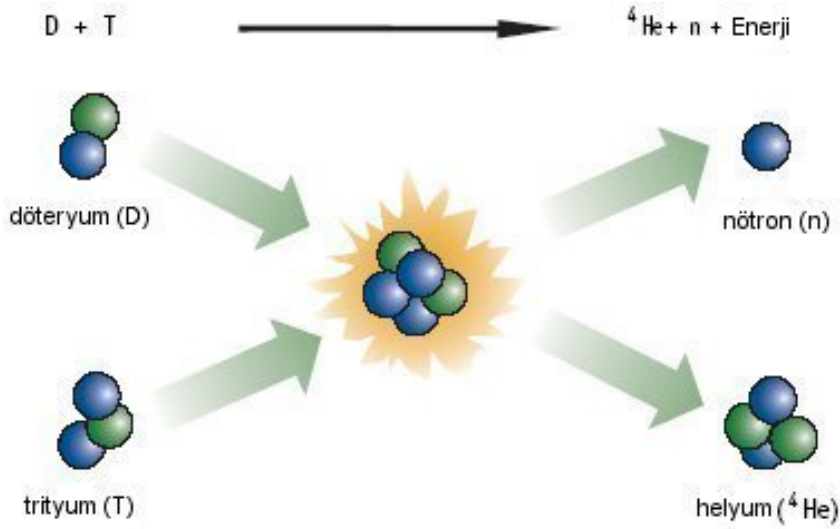
Nükleer Füzyon

Nükleer fisyonun ağır atom çekirdeklerinin bölünmesi sonucu enerji ortaya çıkmaktadır. Nükleer füzyon ise hafif çekirdekleri daha ağır bir çekirdeğe dönüştürerek enerji açığa çıkaran bir reaksiyondur. Bu reaksiyon devamlı olarak evrende meydana gelmektedir. Güneşin merkezinde 10–15 milyon °C lik sıcaklıklarda hidrojen helyuma dönüşerek dünyadaki yaşamın kaynağı olan enerjiyi sağlar.

Ticari kullanım için füzyonla enerji üretme olanakları yıllardır araştırılmaktadır. İncelenen bir füzyon reaksiyonu (D-T füzyon reaksiyonu) Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu reaksiyonda hidrojenin iki izotopundan biri olan bir nötron ve bir protondan oluşan döteryum ile iki nötron ve bir protondan oluşan diğer izotop trityum, helyum ve bir nötron oluşturacak şekilde birleşerek enerji açığa çıkarırlar.

Füzyon reaksiyonunun oluşması için gerekli olan aşırı yüksek sıcaklıkta bütün elektronlar atomlarından ayrılarak çekirdeği yalnız bırakırlar ve yakıt, gaz durumundan plazma durumuna geçer. Füzyon gücünün geliştirilmesinde temel zorluk plazmanın anlaşılması ve kontrolüdür.

Füzyon reaktörünün tasarımı fisyon reaktöründen çok farklıdır. Başlıca problem, reaksiyonun başlaması ve sürdürülmesi için çok yüksek sıcaklıkta tutulması gereken plazma yakıtının muhafazasıdır. Araştırmalar “manyetik” ve “atalet” olmak üzere iki değişik muhafaza kabına odaklanmıştır. Birincisinde plazma manyetik alan tarafından oluşturulan bir şişe veya torusta tutulur. İkincisinde de yakıt kütesinin kendisi süratli sıkıştırma altında plazmanın kaçmasını önler.

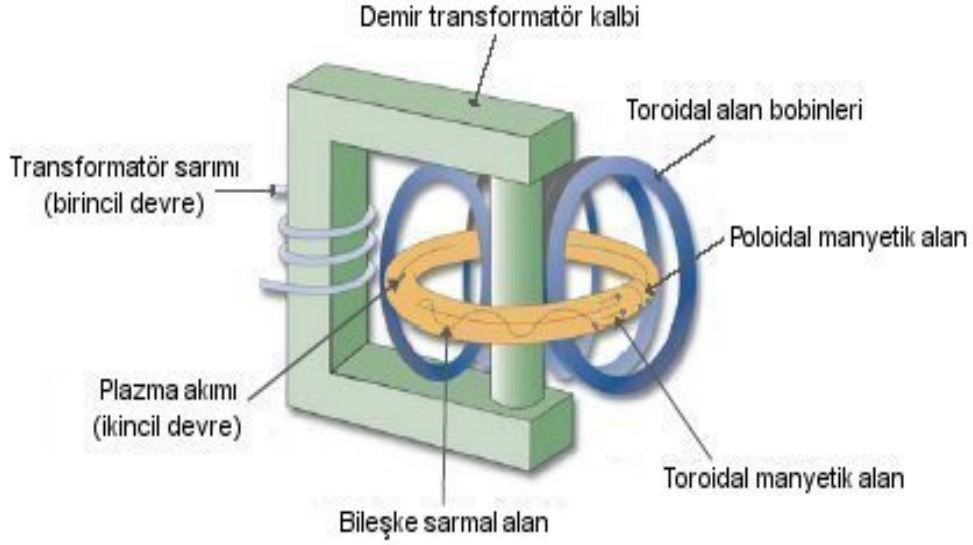


Şekil 2.7. Tipik Füzyon Reaksiyonu

Her iki durumda da soğumasını ve yüzeyden gelecek yabancı maddelerle kirlenmesini önlemek için plazma, malzeme yüzeyinden izole edilmelidir. Bunu sağlayan en umut verici önlemlerden birisi toroidal (halka şeklinde) manyetik hapsedme sistemidir ve Tokamak konfigürasyonu en çok tercih edilenidir (Şekil 2.8).

Eğer pratik aşamaya getirilebilirse füzyon reaktörleri belirli faydalı özelliklere sahip olabilirler. Bunlara örnek olarak şunları gösterebiliriz:

- sınırsız yakıt tedariki (sudan hidrojen ve lityumdan trityum üretimi)
- kendinden güvenli oluşu (plazmanın etkilenmesi halinde füzyonun aniden durması)
- çok az miktarda uzun ömürlü yüksek radyoaktif atık ortaya çıkması (yine de en problemlisi olan trityum olmak üzere diğer tip radyoaktif atıklar ortaya çıkabilir)
- nükleer silah yapımında kullanılan fisil malzeme üretilmemesi.



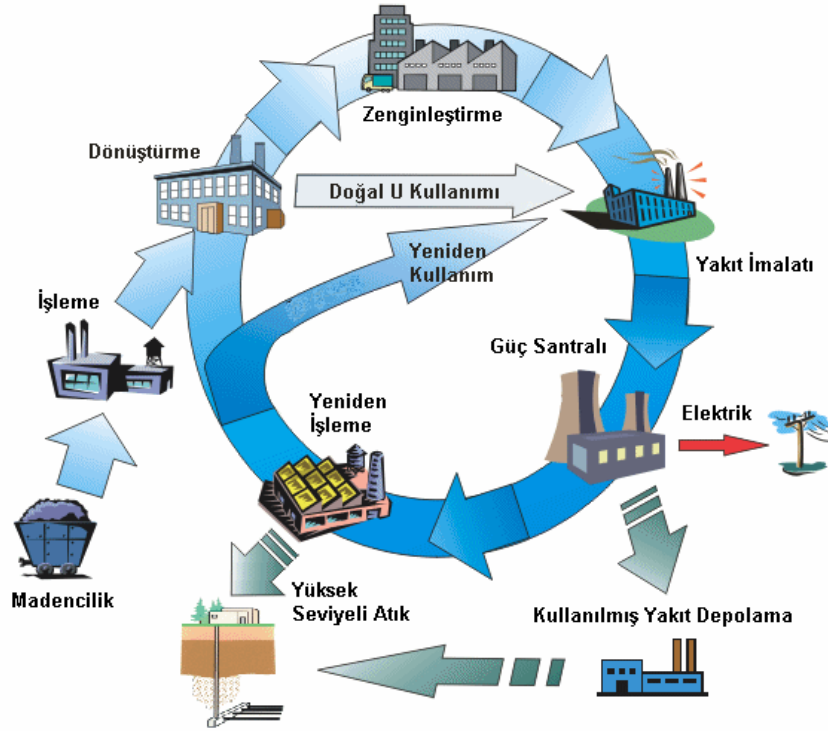
Şekil 2.8. Tokamak Füzyon Reaktörünün Basit Diyagramı

Füzyon ile ilgili çalışmalar devam etmektedir ve dünyanın bir çok yerinde test tesisleri mevcuttur. Yine de belirli bir ilerleme olmasına karşın uygulanabilir bir reaktörün elde edilmesi için uzun yıllar sürecek araştırmalar yapılması gerekmektedir. Kanada, Japonya, Çin, AB, Rusya ve ABD yeni nesil füzyon test reaktörünün (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) kurulması konusunda işbirliği yapmaktadırlar.

3. NÜKLEER YAKIT ÇEVİRİMİ

Nükleer yakıt çevrimi; uranyum aramalarından, kullanılmış yakıtın depolanması, atık olarak işlem görmesi veya kullanılmış yakıtın yeniden işlenerek tekrar yakıt olarak kullanılması ve yeniden işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıkların işleme tabi tutularak gömülmesine kadar olan adımları kapsar. Reaktörde yakıttan enerji elde edilmesi çevrimin bir parçası olarak değerlendirilmemiştir.

Açık ve kapalı olmak üzere iki tip yakıt çevrimi vardır. Aralarındaki fark, kullanılmış yakıtın yönetimi ile ilgilidir. Tipik bir nükleer yakıt çevrimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Açık yakıt çevriminde reaktörden çıkarılan yakıt reaktördeki havuzlarda 7-8 yıl soğutulduktan sonra geçici depolama tesislerine nakledilir. Geri kazanımlı yakıt çevrimi olarak da bilinen kapalı yakıt çevriminde kullanılmış yakıt yeniden işlenerek fisil (bölünebilir) malzemeler (Uranyum, Plütonyum) geri kazanılır ve yeni yakıt olarak enerji üretiminde tekrar kullanılır. Kapalı yakıt çevriminde ise kullanılmış yakıt nükleer atık olarak işlem görür.



Şekil 3.1. Nükleer Yakıt Çevrimi

Çevrimin Ön Kısmı

Madencilik ve Cevher İşleme

Doğada bulunan uranyumun madenciliği bakır gibi diğer mineral kaynaklarının bulunmasına benzer şekilde yönetilir. Uranyum üretiminin %70’inden fazlası bilinen açık ya da yeraltı madenciliği metotları ile elde edilir. Geriye kalanı ise yerinde özütleme yöntemi (in situ leaching, ISL) ile elde edilmektedir. Bu yöntemde yer altındaki cevhere çözücü çözelti enjekte edilir, uranyum çözülerek çözeltiliye geçer ve uranyum içeren bu çözelti, açılan kuyular vasıtasıyla geri alınır.



Uranyumun çoğu klasik madencilik teknikleriyle çıkartılır.

Avustralya olup, bu üç ülke 2008 yılında dünyadaki üretimin yaklaşık %60'ını gerçekleştirmiştir.

Uranyum cevherinin madenciliğinde ve cevherin işlenmesinde her biri uygun yönetim gerektiren farklı tiplerde atıklar ortaya çıkar. Açık işletme ve yer altı madenciliğinde atıklar, toprak ve/veya atık kayalarlardır. Bu atıklar, ekonomik olmayan seviyede uranyum veya çok fazla yüksek seviyede kirlilik içerebilir. Cevherin öğütülmesi sırasında büyük hacimde çok ince taşlar ve üretim sıvısının karışımından oluşan atık ortaya çıkmaktadır. Artıklar büyük hacimleri, radyolojik ve kimyasal kirlilikleri nedeniyle problem yaratırlar. Özel jeolojik formlarda yapılabilen yerinde özütlemeye kayaç atığı veya işletme artığı üretilmez, fakat bu işlem yer altı suyunu korumak için uygun bir şekilde yönetilmelidir.

Açık işletme veya yer altı madenciliğinde, bakır veya uranyumda, bir ton üretim için işlenen cevher miktarı ortalama cevher tenörü ile bağlantılı olarak 10 ile 1000 ton (ortalama tenör %10 - %0.1) arasında değişir. Böylece bu cevherin işlenmesinden oluşan artık hacmi büyüktür. Örneğin, çalıştığı sürece ABD'deki Shirley Basin madeninde ortalama %0.145 tenörlü 9460 ton uranyum üretilmiştir. Bunun sonucunda 7.1 milyon ton artık oluşmuştur.

Dönüştürme

Dönüştürme sarı pastayı uranyum hexaflouride (UF_6) haline getiren bir kimyasal yöntemdir. Dünyada, çoğunlukla OECD ülkelerinde olmak üzere çok az ülkede bu işlem yapılır (Tablo 3.1). Uranyum hexaflouride oda sıcaklığında katı haldedir; fakat suyun kaynama noktasının altındaki sıcaklıkta gaz haline geçer ve bu form zenginleştirme işlemi için çok uygundur. Genellikle çapı 122 cm olan ve 12000 kg UF_6 alan büyük silindirlere depolanır ve taşınır. Bu noktada uranyum hâlâ doğal uranyum izotop bileşimini muhafaza etmektedir.

Uranyum cevherinin elde edilmesi ve çıkarılan cevherin fiziksel olarak uygun büyüklüğe getirilmesinden sonra, uranyumu elde etmek ve saflaştırmak için, cevher kimyasal işleme tabi tutulur. Bu işlemle hacmi küçülen, rengi ve kıvamı ile ifade edilen bu katı ürün (U_3O_8) sarı pasta olarak bilinir. Ancak söz konusu renk gri de olabilir.

2008 yılı verilerine göre 17 ülke uranyum üretmektedir ve bunların sekiz tanesi (Kanada, Kazakistan, Avustralya, Namibiya, Rusya Federasyonu, Nijerya, Özbekistan ve ABD) dünyadaki üretimin %93'nü karşılamaktadır. En belirgin üreticiler Kanada, Kazakistan ve



***Uranyum
"Sarı Pastası"***



Bir UF_6 Silindiri

Tablo 3.1. Dünyadaki Başlıca Uranyum Dönüştürme Tesisleri

Ülke	Bulunduğu yer
Kanada	Blind River ve Port Hope; Ontario.
Fransa	Malvesi; Pierrelatte.
Rusya Federasyonu	Angarsk; Ekaterinburg.
İngiltere	Springfields, Lancashire.
ABD	Metropolis; Illinois.

Zenginleştirme

Zenginleştirme işlemi uranyumun iki temel izotopu olan ^{235}U ve ^{238}U izotoplarının kısmi ayırımını içerir. Bu işlemde, birincisi doğal konsantrasyonundan (% 0.711) daha fazla ^{235}U içeren zenginleşmiş uranyum ve ikincisi ise tabii konsantrasyonundan daha az ^{235}U içeren fakirleştirilmiş (depleted) uranyum olmak üzere iki ürün elde edilir. Günümüzde bir çok ticari reaktör %5'ten daha az zenginleştirilmiş uranyum yakıtı kullanmaktadır. Bazı araştırma reaktörleri ise çok yüksek zenginleştirilmiş (mesela %20 ^{235}U 'ten daha fazla) uranyum yakıtı kullanırlar.



Tricastin Uranyum Zenginleştirme Tesisleri, (Fransa). Bu tesis Fransa'daki bütün reaktörlerin zenginleştirme ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilecek kapasitededir.

olmuştur. Zenginleştirme işlemi sonucunda aynı zamanda tüketilmiş uranyum da ortaya çıkar. 1999 yılı sonunda gaz difüzyon metodu kullanarak ortaya çıkan tüketilmiş uranyum stoku 1.2 milyon tonun üzerindedir. Gaz difüzyon işleminden sonra tüketilmiş uranyum %0.3 civarında ^{235}U içerir.

Değişik ülkeler tüketilmiş uranyumu kontrol altına almak için muhtelif stratejiler benimsemişlerdir. Rusya ve ABD'de tüketilmiş uranyum tipik olarak büyük silindirlerin içinde UF_6 formunda depolanır. Bu formda eğer silindirden sızıntı olursa bu potansiyel bir kimyasal tehlike oluşturur. Fransa gibi diğer ülkeler stoklarını uzun süre depolamak ve hızlı üretken reaktörlerde yakıt olarak tekrar kullanmak için kararlı oksit haline dönüştürürler. Ekonomiye ve santrifüj ile zenginleştirme kapasitesinin uygunluğuna göre Rusya gibi bazı ülkeler kalan kullanılabilir ^{235}U 'i yeniden kullanmak üzere zenginleştirirler.

Ticari olarak kullanılan ve her ikisi de UF_6 temeline dayanan gaz difüzyonu ve santrifüjleme yöntemi olmak üzere iki zenginleştirme metodu vardır. Yüksek elektrik ihtiyacı ve tesisin çok büyük olması faktörleri nedeniyle dünyada sayıları az olan eski tesisler gaz difüzyonu teknolojisini kullanmışlardır (Tablo 3.2). Örnek olarak Fransa'daki Tricastin gaz difüzyon tesisi dört nükleer reaktörün yakıt ihtiyacını karşılamıştır. Son zamanlarda malzeme teknolojisindeki ve fabrikasyon metotlarındaki gelişmeler santrifüj yönteminin kullanımında artış meydana getirmiştir. Bunun sonucunda gerçekleşen zenginleştirme maliyetlerindeki düşüş, enerji tüketiminde %50 oranında bir azalmaya neden



Santrifüj Zinciri (Rokkashomura, Japonya)

Tablo 3.2. Dünyadaki Başlıca Uranyum Zenginleştirme Tesisleri

Ülke	Bulunduğu Yer	Teknoloji
Çin	Lanzhou	Santrifüj
	Shaanxi	Santrifüj
Fransa	Tricastin	Gaz Difüzyonu
Almanya	Gronau	Santrifüj
Japonya	Rokkasho-mura	Santrifüj
Hollanda	Almelo	Santrifüj
Rusya	Angarsk	Santrifüj
	Ekaterinburg	Santrifüj
	Krasnoyarsk	Santrifüj
	Seversk	Santrifüj
İngiltere	Capenhurst	Santrifüj
ABD	Paducah	Gaz Difüzyonu



BWR Yakıt Demeti
(Yaklaşık 4 m uzunluğunda ve 300 kg ağırlığında)

Yakıt Fabrikasyonu

Günümüzde bir çok reaktörde yakıt olarak uranyum dioksit kullanılır. Yakıt üretimi için UF_6 , UO_2 (uranyum dioksit) tozu haline getirilir. Daha sonra zar büyüklüğünde silindirik pelet halinde üretmek için sıkıştırılıp $1400\text{ }^{\circ}C$ gibi yüksek sıcaklıkta ısıtılır. Daha sonra içi boş metal tüplere (yakıt zarfı) yerleştirilir ve yakıt çubukları demetler halinde paketlenir. Bu tüpler paslanmaz çelik veya zirkonyum alaşımı gibi korozyona direnci yüksek metalden yapılır. Tipik bir BWR reaktörünün korunda 46000 yakıt çubuğunu içeren 730'dan fazla yakıt demeti bulunur. Dünyadaki reaktörlerin %10'undan daha azı karışık oksit –uranyum dioksit ve plütonyum dioksit karışımı- yakıt için lisanslanmışlardır. Plütonyum dioksit, kullanılmış nükleer yakıtın yeniden işlenmesi ile elde edilir. MOX üretim işlemi uranyum dioksit yakıt üretimine benzemektedir, ancak buna ek olarak çalışanları ışınlanmış malzemenin oluşturduğu yüksek radyasyondan ve plütonyumu teneffüs etmekten korumak için ilave güvenlik tedbirleri uygulanır.



Yakıt Peleti

Dünyada çok sayıda yakıt üretimi yapan şirket olmasına karşın aralarındaki ticari rekabet özel gereksinimlerin çokluğuna, farklı milli düzenleyici sistemlere ve reaktör tiplerinin çeşitliliğine uygun olarak engellenmiştir. Ayrıca izlenen yakıt yönetim stratejileri çeşitli ülkelerdeki pazar özelliklerine göre artmaktadır.

Çevrimin Son Kısım

Yakıt çevriminin son kısmı, ışınlanmış veya kullanılmış yakıtın reaktörden alınıp reaktör sahasında beş-on yıl arasında muhafaza edilmesiyle başlar. Bu ilk depolama, kullanılmış yakıtın su dolu havuzlara yerleştirilmesini kapsar. Su, hem yeni çıkartılan kullanılmış yakıtın yüksek radyasyonunu tutar hem de soğumasına yardımcı olur. Isısının büyük oranda azaltıldığı bu ilk periyottan sonra kullanılmış yakıt, uzun süre depolamaya veya geri kazanım stratejisi uygulanacaksa yeniden işlemeye hazır duruma gelir.

Kullanılmış yakıtın uzun süreli depolanması ıslak veya kuru şartlarda gerçekleştirilir. Eğer ıslak depolama seçilmiş ise kullanılmış yakıt, soğutmanın ilk periyodunda muhafaza edildiği havuza benzer başka bir su havuzuna transfer edilir. Kuru depolamada ise yakıt, doğal hava sirkülasyonunun olduğu, büyük ve zırhlanmış varillere doldurulur. Bu variller gerektiğinde kamyonlarla veya demiryolu ile diğer yerlere taşınabilirler. Kullanılmış yakıtlar paketlenmeden önce, yeniden paketlenme gerektiğinde veya atık olarak gömülmeden önce kuru veya ıslak şartlarda 30-50 yıl kadar korunabilirler.

Yeniden işleme

Yeniden işleme, reaktörden çıkan yakıtın kullanılmamış enerji içeriğini ileride kullanmak üzere geri kazanmak amacıyla yapılan, bazı durumlarda ise kullanılmış yakıtı nihai gömme işlemine hazırlık için yapılan bir işlemdir (Şekil 3.2). Bu işlem aynı zamanda gömülecek olan atığın hacmini ve radyotoksitliğini azaltır. Kullanılmış yakıt yönetimindeki bu yaklaşım bir çok ülke tarafından henüz uygulanmamakla birlikte bazı Avrupa ülkeleri (Belçika, Fransa, Almanya ve İsviçre), Hindistan, Çin, Japonya ve Rusya tarafından tercih edilmektedir.

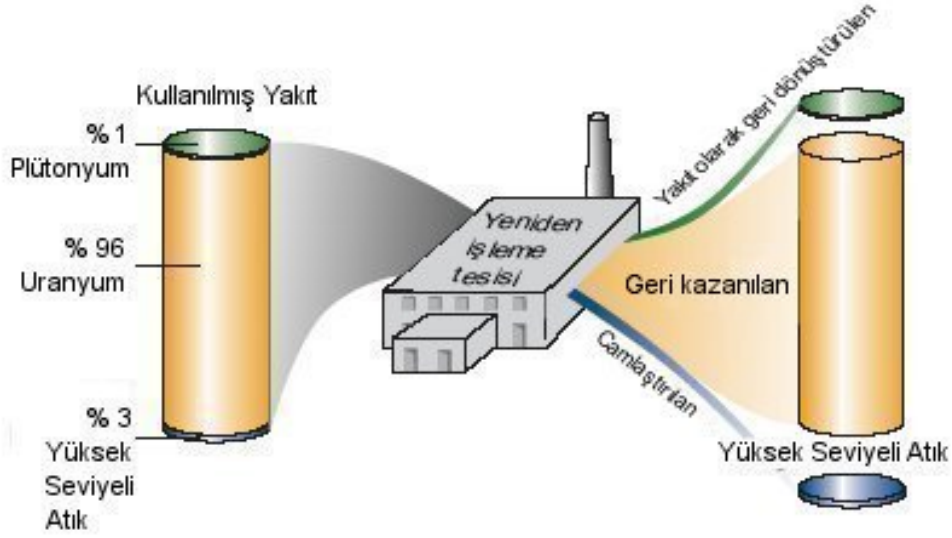
Yeniden işleme, fisyon işlemi esnasında oluşan plütonyumun geri kazanılması ve MOX yakıt üretiminde kullanılması yoluyla doğal uranyum gereksinimini % 10-15 oranında azaltmaktadır. Uranyum ve plütonyumun diğer izotoplardan ayrıştırılması ticari olarak PUREX (Plutonium Uranium EXtraction) diye adlandırılan kimyasal işlem kullanılarak gerçekleştirilir. Fisyon ürünleri ve minor aktinitler yüksek seviyeli atık sınıfına girerler. Diğer kalıntılar yakıt demetinin çözülmeyen metalik yapıları olup kabuk ve uç noktalar diye adlandırılırlar. Yeniden işleme tesisleri büyük, kompleks ve pahalı tesisler olduğu için çok az ülkede bulunmaktadır (Tablo 3.3).



Kullanılmış Yakıt Depolama Havuzu



Kullanılmış Yakıtın Kuru Depolanması



Şekil 3.2. Kullanılmış Yakıtın İçeriği ve Yeniden İşlenmesi

Bugünkü yeniden işleme ve reaktör teknolojisi ile Plütonyumun çevrim sayısı, termal nötronlarla fisyon yapamayan Plütonyum izotoplarının ve özellikle küriyum gibi istenmeyen elementlerin birikmesi nedeniyle sınırlıdır. İki ve üç çevrimden sonra yakıt, açık çevrimdekine benzer şekilde atık olarak muamele görür. Çevrim sayısındaki bu sınırlama, eğer geri kazanılan malzeme hızlı reaktörlerde kullanılırsa ortadan kalkmaktadır.

Kullanılmış yakıttan yeniden işleme ile elde edilen uranyum geçmişte yakıt imalatında kullanılmıştır. Günümüzde ise ileride kullanım için depolanmaktadır. Çünkü yeniden kazanılan uranyum, reaktörde nötrona maruz kalma nedeniyle doğal uranyumdan daha radyoaktiftir ve yeniden kullanılması zenginleştirme ve yakıt üretim tesislerinin kontamine olmasına neden olarak işletimini karmaşık hale getirir. Geri kazanılan Uranyumun yeniden kullanılması bu işe tahsis edilmiş, günümüzde ekonomik olmayan, tesisler gerektirir.

Tablo 3.3. Dünyadaki Ticari, Kullanılmış Nükleer Yakıt Yeniden İşleme Tesisleri

Ülke	Tesis/yeri	Hizmete alma yılı	Yakıt tipi
Çin	Diwopu(Ganzu)	2002	LWR
Fransa	La Hague	1976	LWR
Hindistan	Kalpakkam	1998	PHWR
	Tarapur	1974	PHWR
Japonya	Rokkasho-mura	2005 (Planlandı)	LWR
	Tokai-mura	1977	LWR, ATR
Rusya Federasyonu	Tcheliabinsk-65 Mayak	1984	VVER
İngiltere	B205/Sellafield	1964	Magnox GCR
	Thorp/Sellafield	1994	LWR, AGR

İşletmeden Çıkarma

Reaktör, uranyum madeni veya yakıt çevrim tesisleri gibi tüm nükleer tesislerin kalıcı olarak kapatıldığı zaman halka, çalışanlara ve çevreye zarar vermeyecek bir duruma getirilmesi gerekir. Bu uygulama bir kaç aşamayı içerir ve “işletmeden çıkarma” şeklinde adlandırılmaktadır.

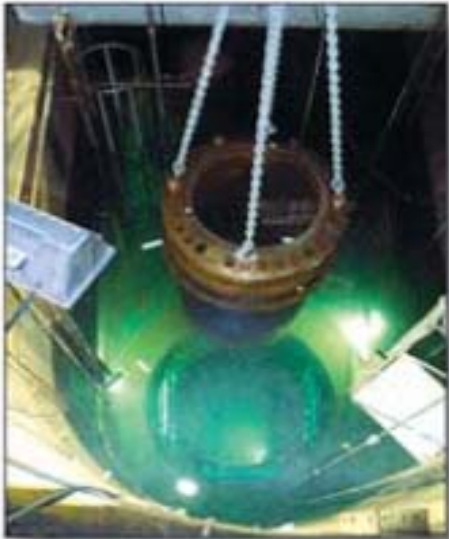
2010 Nisan ayı itibariyle 124 ticari reaktör kapatılmış olup işletmeden çıkarma sürecinin çeşitli aşamalarında bulunmaktadır.

Kapatma

Kullanılmış yakıt reaktörden alınır ve normal şekilde depolanır; sulu sistemler boşaltılır; işletme sistemleri sökülür ve santraldeki harici aparatlar bloke edilir veya zırhlanır. Gözetim sistemleri kurularak koruma kabının içindeki atmosfer kontrol edilir; girişler sınırlandırılır. Kapatma genellikle, reaktörün durdurulmasından hemen sonra yapılır.

Temizleme ve sökme

Radyoaktivite bulaşmış bütün yüzeyler suyla yıkanır veya mekanik, kimyasal yada elektrokimyasal yöntemlere tabi tutulurlar. Bütün çalışan ekipman ve işleme ilgili binalar taşınır, radyoaktivite düzeyini kontrol etmek için gözetim altında tutulur; özellikle reaktör kazanı ve zırhlaması olmak üzere reaktör kor parçaları hariç diğer parçalar, ya geri kazanım işlemine tabi tutulur ya da geçici depolarda muhafaza edilir. Tesisin ofis, türbin, buhar kazanı v.s. gibi parçaları hurdaya çıkartılır veya başka bir şekilde kullanılır. Kalan parçalar ve çevre, radyoaktivite açısından uygun bir seviyede kalmaları için bir süre izlenir. Bütün bu faaliyetler kapatmadan sonra 10, 20 veya daha fazla yıl sürdürülür.



*Belçika'daki BR3 Santralında
Reaktör Basınç Kazanının Sökülmesi*

Yıkım ve sahanın temizlenmesi

Kalan tesis parçaları başka amaçla kullanılmayacaksa bütün tesis ve malzeme taşınır; sahanın lisansı kaldırılarak yeni kullanımlar için uygun hale getirilir. Bu nihai aşamanın zamanlaması her ülke için ekonomik, teknik ve düzenleyici faktörlerle belirlenir. Bazı durumlarda uzun bir süre (kapatılmadan 100 yıl sonra gibi) geçmeden uygulanamayabilir. Bununla beraber bu işlemler, robotik ve tele-manipülasyon teknikleri ile genellikle daha erken gerçekleştirilir.

Üç aşamanın tamamlanması arasındaki uzun gecikmeler, hizmetten çıkarma işlemi yapan işçilerin korunmasını sağlamak ve radyoaktif malzemelerin depolanmasını ve nihai bertarafını kolaylaştırmak amacıyla, radyoaktivitenin belirli bir düzeye kadar bozunmasına izin vermek amacıyla yaşanır.

ABD ve bazı Avrupa ülkelerinde nükleer güç tesislerinin hizmetten çıkarılması uygulamalarında çok ileri bir aşamaya ulaşılmıştır (Tablo 3.4). Günümüzde hizmetten çıkarma reaktörün ömür çevriminin önceden planlanan bir parçası haline gelmiştir.



**Windscale Gaz Soğutmalı Güç Reaktöründe
Üst Biyolojik Zırhın Sökülmesi**

Hizmetten çıkarma atıkları

Bir nükleer güç santralının veya diğer bir nükleer tesisin hizmetten çıkarılmasında çoğu düşük seviyeli olmak üzere önemli miktarda radyoaktif atık oluşur. Avrupa Komisyonu ortalama bir güç santralının hizmetten çıkarılmasında 10.000 m³'e kadar radyoaktif atık ortaya çıktığını hesaplamıştır. Radyoaktif atığın hacim olarak önemli kısmı çok küçük miktarlarda radyoaktivite içeren beton veya diğer inşaat malzemelerdir.

Reaktördeki en büyük radyoaktivite kaynağı kullanılmış yakıttır ve onun taşınmasıyla sahadaki toplam radyoaktivite %99 oranında azalır. Reaktör basınç kabı ve buhar jeneratörü gibi büyük parçalar da radyoaktif atık olarak işlem görür. Bunlar yönetilebilecek büyüklükteki parçalara kesilerek veya çoğu zaman yapıldığı gibi bütün olarak çıkarılıp düşük seviyeli atık depolarına taşınarak parçalanabilirler.

Hizmetten çıkarma konusunda bir tartışma konusu ise, çok az kirlenmiş malzemenin radyolojik güvenlik kontrolünün dışında tutulması konusunda uluslararası mutabakatın sağlandığı bir kriter oluşturulmasıdır. Hizmetten çıkarmada oldukça az kirlenen beton ve metaller gibi büyük hacimli malzemeleri serbest bırakmak ve yeniden kullanmak, bunların bertaraf etme fiyatını önemli oranda azaltacak ve çok düşük radyolojik risk getirecektir. Diğer taraftan savunulabilir ve kabul edilebilir risk hususunda halkın tutumu nedeniyle hükümetlerin kararı, bu tür hizmetten çıkarma atıklarının serbest bırakılmasına karşı olmuş ve bu atıklar düşük seviyeli atık depolarına yerleştirilmiştir.

Tablo 3.4. Hizmetten Çıkarma Çalışmaları Devam Eden veya Tamamlanmış Bazı Reaktörler

Reaktör	Kapasite (MWe)	Ülke	Açıklama
Niederaicbach	100	Almanya	Gaz soğutmalı reaktör 1974'te kapatıldı. Tesis hizmetten çıkarıldı. Saha 1995'te kısıtsız zirai kullanım için serbest bırakıldı.
Shippingport	60	ABD	Hafif su soğutmalı üretken reaktör 1982'de kapatıldı. 1989'da saha kısıtsız kullanım için serbest bırakıldı.
Trojan	1180	ABD	PWR 1993'de kapatıldı. Buhar jeneratörleri 1995'te çıkarıldı ve bertaraf edildi. Reaktör kazanı 1999'da söküldü ve bertaraf edildi. Yapılar halen temizlenmekte fakat 2018'e kadar yıkım planlanmamakta.
Rancho Seco	913	ABD	PWR 1989'da kapatıldı. Tesis güvenli depolama şartlarına alındı. 23 Ekim 2009'da saha kısıtsız kullanım için serbest bırakıldı.
Chinon	70 210 480	Fransa	Üç gaz soğutmalı santral. Sonucusu 1990'da kapatıldı. Kısmen söküldü; son söküm 50 sene sonraya bırakıldı.
Berkeley	2x138	İngiltere	Gaz soğutmalı reaktör 1989'da kapatıldı. Yakıt boşaltılması 1992'de tamamlandı. Tesis uzun bir süredir bakım ve onarım periyodu için hazırlanmakta.

4. RADYOAKTİF ATIK YÖNETİMİ

Nükleer maddelerin gerek nükleer reaktörlerde gerekse tıbbi ve endüstriyel kullanımı sonucunda radyoaktif atıklar oluşur. Kaynağı ne olursa olsun ortaya çıkan bu radyoaktif atıklar güvenli, ekonomik ve çevrenin ve halkın kabul edebileceği bir şekilde yönetilmek zorundadır.

Radyoaktif Atık Tipleri

Radyoaktif atıklar taşınma, depolama ve atık düzenlemelerini kolaylaştırmak için içerdiği radyoaktif malzemenin konsantrasyonu ve radyoaktif kaldıkları süre dikkate alınarak sınıflandırılırlar. Kategorilerin tanımı ülkeden ülkeye değişmekle beraber radyoaktif atıklar düşük seviye, orta seviye ve yüksek seviyeli atıklar olarak sınıflandırılabilir.

Düşük seviyeli atıklar (DSA), normal olarak işçi tulumları, taşıma kapları, şırıngalar gibi malzemelerin az miktardaki kısa ömürlü radyoaktivite ile teması sonucu oluşur. DSA'lar genellikle lastik eldivenler kullanılarak işleme tabi tutulur. Nükleer güç santrallerinin hizmetten çıkarılması esnasında oluşan bir çok atık DSA sınıfına girer.

Orta seviyeli atıklar (OSA), tipik olarak nükleer malzeme ile birlikte kullanılmış ekipman veya radyoaktif akışkanların temizlenmesinde kullanılmış iyon değişim reçineleri gibi daha çok endüstriyel malzemelerdir. Bunlar tipik olarak ihmal edilebilir düzeyde ısı üretirler, fakat kısa veya uzun süreli radyasyon yayarlar ve korunmak için zırhlama gerekir. Kullanılmış nükleer yakıtların yeniden işlenmesi sırasında yakıtın çözülme metal kısımlarını içeren atıklar OSA kategorisinde değerlendirilir.

Yüksek seviyeli atıklar (YSA), fisyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan yüksek derecede radyoaktif ve uzun ömürlü elementleri içerirler. Yüksek seviyeli atık kategorisinde ayırım yeniden işlenilmeyecek olan kullanılmış nükleer yakıt (KNY) ve yeniden işleme uygulamasının kalıntıları arasında yapılır. Bu iki alt grup biçim ve içerik olarak farklılıklar arz etseler de (örneğin yeniden işleme atıkları akışkandır) benzer şekilde yönetilirler.

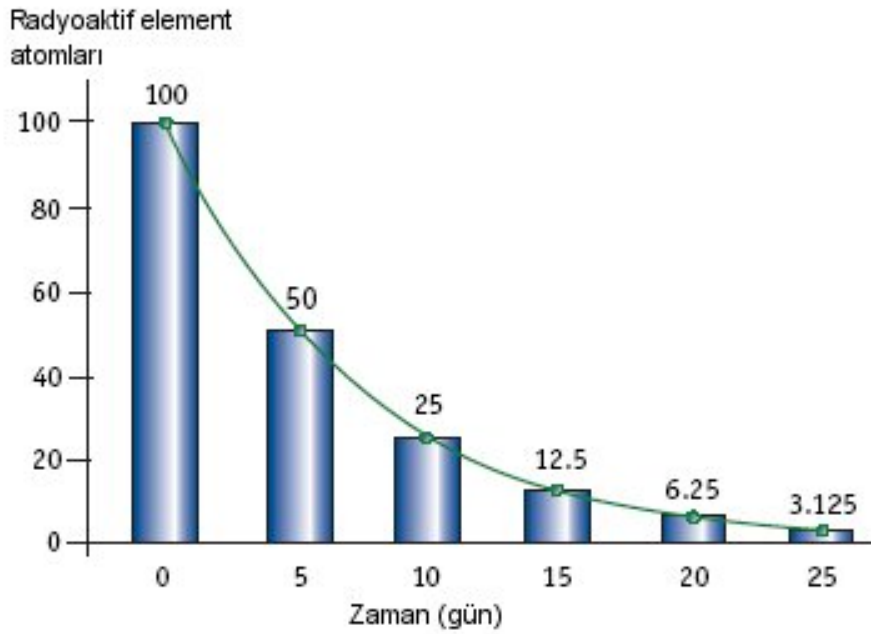
Atıkların işlenmesi ve taşınmasında en önemli faktör atıkların radyoaktivite seviyeleridir. Fakat atıkların nihai depolanması için diğer bir önemli faktör, radyoaktif izotopların yarı ömürleriyle belirlenen izole olarak saklanacak zamanın uzunluğudur. Yüksek seviyeli atık ve kullanılmış nükleer yakıtta bulunan bazı uzun ömürlü izotoplar için binlerce yıllık izolasyon gerekir.

Radyoaktif izotopların yarı ömrü, başlangıçtaki atom sayısının yarısının bozunması için gereken süredir. Yarı ömür izotopa göre, bir saniyeden az bir süreden sonsuza kadar (kararlı durum) değişir. Şekil 4.1'de beş yarı ömürden sonra kalan radyoaktif izotop miktarının orijinal miktarın %3,125'i olduğu görülmektedir. On yarı ömürden sonra ise orijinal miktarın %0.1'inden azına ineceği hesaplanabilir. Tablo 4.1'de yüksek seviyeli atık ve kullanılmış nükleer yakıtların şartlarının saptanmasında önemli olan bazı izotoplar gösterilmektedir.

Tabloda yer alan Sezyum, Stronsiyum ve Teknesyum fisyon ürünleridir; diğerleri ise nötron yakalama reaksiyonunun sonucudur.

Tablo 4.1. Bazı YSA izotopları

İzotop	Yaklaşık yarı ömür
Stronsiyum-90	29 yıl
Sezyum-137	30 yıl
Amerisyum-241	430 yıl
Amerisyum-243	7 400 yıl
Plütonyum-239	24 000 yıl
Teknesyum-99	213 000 yıl



Şekil 4.1. Yarı Ömrü Beş Gün Olan Bir Radyoaktif Elementin Bozunumu

Nükleer enerjiden kaynaklanan radyoaktif atıkların hacimleri

Yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle nükleer enerji üretimi sonucunda diğer enerji üretim seçenekleriyle karşılaştırıldığında üretilen birim enerji başına hacim olarak daha az atık oluşturur. Değişik reaktör ve yakıt çevrimleri, değişik miktarlarda ve tipte atık oluşturur. Tablo 4.2 nükleer enerji üretiminde oluşan atık hacimleri hakkında genel bir fikir vermektedir.

Tablo 4.2. 1000 MWe'lık LWR Tarafından Üretilen Radyoaktif Atık Hacmi (m³/yıl)

Atık tipi	Açık yakıt çevrimi	Kapalı yakıt çevrimi
DSA/OSA	50-100	70-190
YSA	0	15-35
Kullanılmış Yakıt	45-55	0

Geliştirilen uygulamalar ve teknolojiler nedeniyle üretilen birim elektrik başına atık miktarlarında ve bir anlamda işletme ve bakım harcamalarında kısmen azalmaya doğru bir eğilim vardır.

Bu miktarları bir perspektife oturtmak için, çok büyük miktarlardaki radyoaktif atığın, aynı zamanda fabrikalar, hastaneler ve kanser tedavi merkezleri tarafından da ortaya çıkarıldığı ve bir bütün olarak radyoaktif atığın her yıl endüstriden çıkan toksik atıkların sadece ufak bir kısmı olduğu ve yine toplumun toplam atığının daha da küçük bir bölümünü teşkil ettiği unutulmamalıdır (Şekil 4.2).

Radyoaktif Atık Yönetimi İlkeleri

Radyoaktif atıkların yönetimi ve bertarafı her yerde ulusal bir sorumluluk olarak ele alınmıştır. Her ne kadar radyoaktif atık yönetimi için değişik ulusal yaklaşımlar olsa da uluslararası iş birliği ile bir dizi temel ilkeler ve yükümlülükler oluşturulmuştur. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA)'nın “*Radyoaktif Atık Yönetim İlkeleri*” buna bir örnektir.

UAEA'nın “*Radyoaktif Atık Yönetim İlkeleri*” radyoaktif atıkların aşağıdaki hususlar sağlanacak şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır:

- Ulusal sınırları da aşan boyutta çevre ve insan sağlığı için kabul edilebilir seviyede bir koruma vardır.
- Radyoaktif atıkların gelecek nesiller üzerindeki etkisi bugün kabul edilen seviyelerden daha büyük değildir ve gelecek nesillere gereksiz yükümlülüklerin bırakılmasından kaçınılmıştır.
- Yükümlülüklerin açıkça belirlendiği ve bağımsız düzenleme için önlemlerin alındığı yasal bir çerçeve oluşturulmuştur.
- Değişik adımlar arasındaki bağımlılıklar hesaba katılarak, atık üretimi mümkün olan en az seviyede tutulmaktadır.
- Atık yönetim tesislerinin güvenliği uygun bir şekilde garanti altına alınmaktadır.

Radyoaktif Atık Yönetimi Uygulamaları

Radyoaktif atıkların yönetimi için gerekli faaliyetler şu şekilde sınıflandırılabilir:

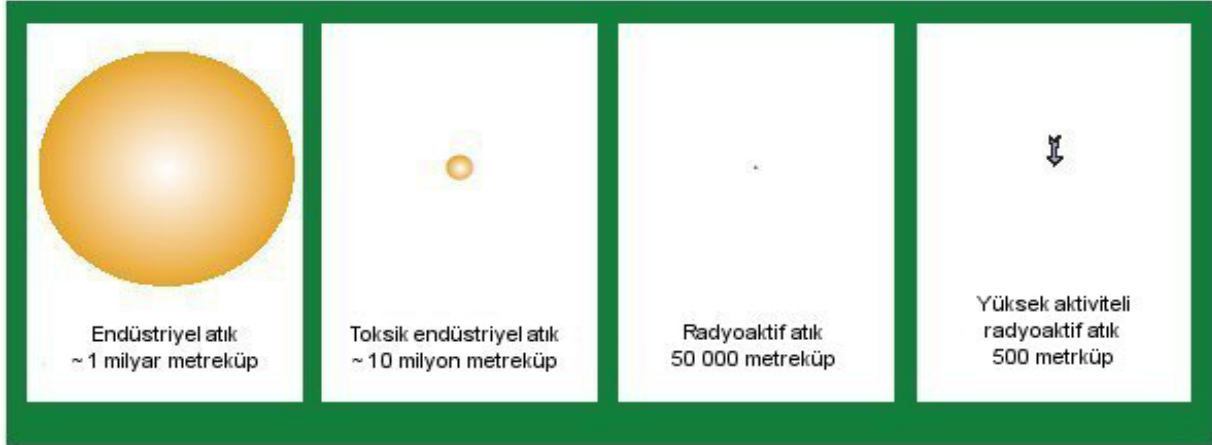
- Üretilen miktarın en aza indirilmesi,
- Güvenli yönetim ve taşıma sırasında koruma için koşullandırma ve paketleme,
- Ara depolama,
- Nihai Depolama.

Atık miktarını azaltma

İleri görüş ve iyi uygulamalarla mevcut tesislerde üretilen atık miktarı azaltılabilir. Yeni teknolojiler ve tesis tasarımları, bakım gereksinimlerinin basitleştirilmesi gibi önlemlerle zaten atık miktarını azaltmayı hedeflemektedir.

Uygunlaştırma ve paketleme

Katı haldeki düşük ve orta seviyeli atıklar çok küçük hacimlerde yoğunlaştırılabilir. Pratikte sıvı haldeki atıklar gömülemez, katı hale dönüştürülmeleri gerekir. Sıvıdaki radyoaktif elementler filtrasyon yahut iyon değişimi ile ayrıştırılırlar ve sonra kurutularak uygun ortama soğurulurlar yahut beton içinde katılaştırılırlar. Uygunlaştırılan düşük ve orta seviyeli atıklar ara depolama için paketlenir veya çelik kap veya kutularda gömülebilir. Örneğin kullanılan yakıtın yeniden işlenmesinden meydana gelen metalik atıklar yoğunlaştırılır; sonra da gömme için çelik kaplar içinde betonlanır.



Şekil 4.2. Atık Üretimini Karşılaştırılması- AB'deki Yıllık Atık Üretimi



Camlaştırılmış yüksek seviyeli atık

Kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden ortaya çıkan yüksek seviyeli atık sıvı haldedir ve normal olarak camlaştırma ile (özel bir cam tipi üretilerek) katı hale getirilir. Seramiğe dayalı diğer atık formları da denenmiştir. Bu atık formları, çok dayanıklı olma ve atıkları uzun süreli sabit tutma özelliklerine haizdir. Yeniden işlenmeyecek olan kullanılan nükleer yakıt ara depolama ve/veya nihai depolama için özel kaplara yerleştirmenin dışında çok fazla uygunlaştırma önemi gerektirmez.

Ara depolama

Depolama, atıkların gelecekte yeniden işleme amacına göre farklılık gösterir. Böylece güvenlik için aktif izleme, bakım ve kurumsal kontroller sürdürülmelidir. Depolama yeri hazırlandığı zaman düşük ve orta seviyeli atıklar doğrudan düzenli aralıklarla gönderilebilir. Yüksek seviyeli atık ve kullanılan nükleer yakıtın ara depolanması, radyasyon ve ısı üretiminin azalmasını sağlar. Atıkların ara depolanması onlarca yıl güvenli olarak sağlanabilir.



Radyoaktif atıkların çelik varillerde depolanması

Nihai Depolama

Nihai depolama radyoaktif atık yönetiminin son adımıdır. Genellikle bu işlem, geri alma amacı olmaksızın atıkları bertaraf etmek, uzun süre izleme ve gözetmeye gerek görmeden halk ve çevreden güvenli bir şekilde izole ederek muhafaza etmek olarak tanımlanır. Radyoaktif atıklar özel olarak hazırlanmış tesislere gömülür ve radyoaktif olmayan atıklarla karıştırılmaz.

Kısa ömürlü atıklar

Kısa ömürlü, düşük ve orta seviyeli atıklar birçok ülkede muhtelif yerlerde rutin bir şekilde bertaraf edilmektedir (Tablo 4.3); bazı sahalar dolmuş ve kapatılmıştır. Bu tesislerin bir çoğu yüzeye yakın olup genellikle izolasyonu artırmak için depo çukurunun içini beton yahut bazı başka malzeme ile kaplamak gibi basit mühendislik bariyerleri ile donatılmıştır. Atık paketleri arasındaki boşluklar toprak, kil veya beton ile doldurulmuştur. Su sızıntısını en aza indirmek için düşük geçirgenlikli örtüler ve depolama ünitelerindeki suyu dışarı atmak için drenaj sistemleri kullanılmıştır.

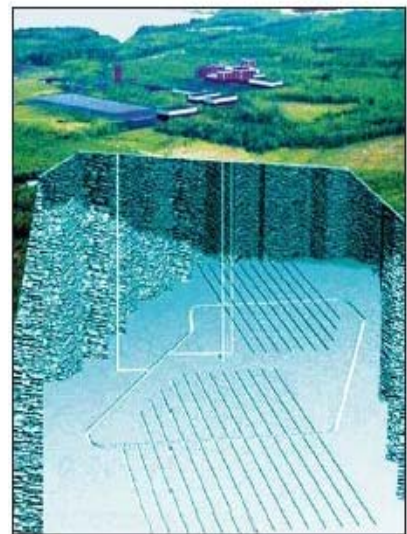
Bu önlemler atık paketlerinin ömrü boyunca devam eden radyoaktivitesinin olası yayılmasını önlemeye yöneliktir. Bu önlemlerle birlikte düşük ve orta seviyeli atıkların gömme yerlerinde 100-300 yıllık periyotlar için yeraltı suyunun izlenmesi, erişimlerin kısıtlanması, periyodik bakım ve toprak kullanımında kısıtlamalar gibi aktif ve pasif kontroller uygulanmaktadır. Bu periyottan sonra radyoaktif izotoplar ihmal edilebilir seviyelere kadar bozunmuş olacaktır.

Uzun ömürlü atıklar

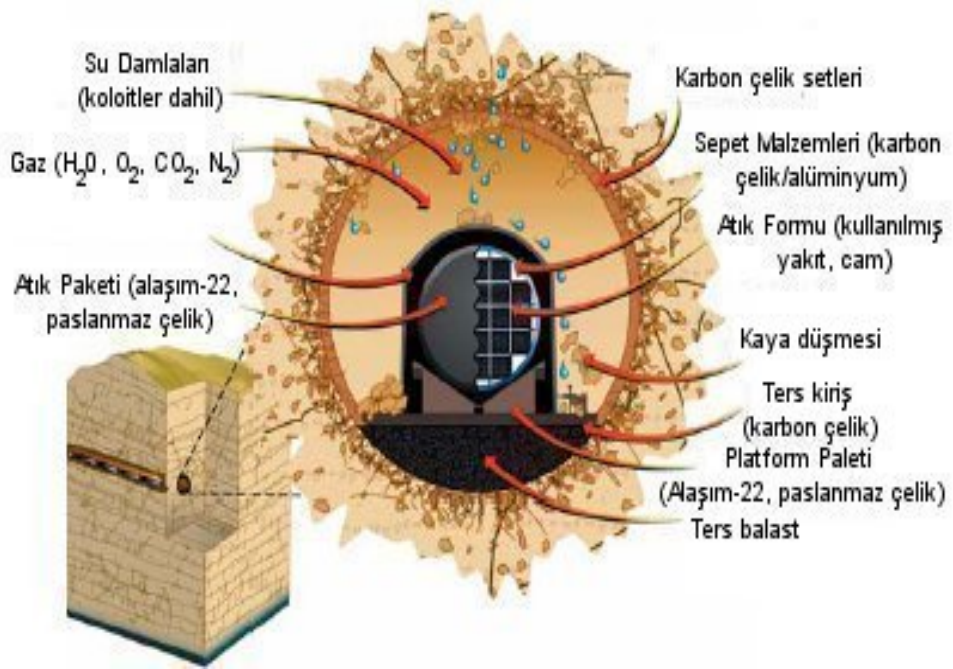
Yüksek seviyeli atık veya kullanılmış nükleer yakıt gibi uzun ömürlü atıklar için önerilen çözümler daha zor kanıtlanmaktadır. Yüksek seviyeli atıklar ve kullanılmış nükleer yakıtlar için henüz bertaraf (gömme) işlemi uygulanan bir yer bulunmamaktadır; bununla beraber ABD’de savunma uygulamalarından ortaya çıkan uzun ömürlü atıkların gömülmesi uygulamaları mevcuttur. Bir çok ülke (Belçika, Kanada, Çin, Finlandiya, Fransa, Almanya, Rusya, İspanya, İsviçre, İngiltere ve ABD gibi) uzun ömürlü atıkların gömülmesinin geliştirilmesi yönünde programlar yürütmektedir.

Uzun Ömürlü Atıkların Jeolojik Bertarafı

Uzun ömürlü atıklar için bertaraf kavramı, uzun zaman dilimi zarfında emniyeti ve muhafazayı garanti altına almak için atıkları yerin altına gömmektir (derin jeolojik depolamalar, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Arzulanan sonuç uzun süre dayanan, çevreye kabul edilemez radyoaktivite salımları olmayan, gelecek nesillere yük getirmeyen ve pasif olarak güvenli bir sistemdir. Günümüzde bu yaklaşımdaki temel husus, jeolojik işlemlerin ve malzeme özelliklerinin dikkate alınan dönem süresince atıkların muhafaza edilmesine yeteceği yönünde kamuoyu güveninin eksik olmasıdır.



Şekil 4.3. Finlandiya'daki Depolama Kavramı



Şekil 4.4. ABD'deki Yucca Dağı Gömme Tesisindeki Mühendislik Bariyerleri

Tablo 4.3. OECD Üye Ülkelerinde Düşük ve Orta Seviyeli Atık Depolama Sahaları

Ülke	Sahalar
Avustralya	Mt. Walton East
Çek Cumhuriyeti	Richard II
	Bratrstvi
	Dukovany
Finlandiya	Loviisa
	Olkiluoto
Fransa	Centre de l'Aube
Almanya	Morsleben
Macaristan	RHFT Puspokszilagy
Japonya	Rokkasho
Meksika	Maquixco
Norveç	Himdalen
İspanya	El Cabril
İsveç	SFR
	Oskarshamn NPP
	Studsvik
	Forsmark
	Ringhals
İngiltere	Dounreay; Drigg
ABD	Barnwell, South Carolina
	Richland, Washington
	Envirocare, Utah

Jeolojik bariyerler

Gömme için potansiyel jeolojik formasyonlar; yeterli büyüklükteki bir tesisi barındırma ve olası bir radyoaktivite salımını önleme veya makul şekilde azaltma kabiliyetlerinin yanı sıra, uzun süre kararlılıkları dikkate alınarak seçilir. Radyoaktivitenin potansiyel olarak insan çevresine çok muhtemel taşınma yolu olan düşük yeraltı suyu akışı bu konudaki anahtar özelliktir. Araştırılan temel formasyon tipleri tuz, kil ve şeyl gibi sedimenter yapılar, granit gibi kristal formasyonları ve bazalt ve tuf gibi volkanik formasyonlardır.

Mühendislik bariyerleri

Mühendislik bariyerleri, atıkların fiziksel ve kimyasal olarak koruyan doğal bariyerleri tamamlayıcı olarak önceden tasarlanmış bariyerlerdir. Bu bariyerler tipik olarak şunları içerir:

- Cam matris (yüksek seviyeli atık için)
- Yakıt peletleri ve zarf (kullanılmış nükleer yakıt için)
- Çimento ve diğer matris malzemesi (diğer atıklar için)

Bu mühendislik bariyerleri, çelik ve beton atık paketleri ve depolardaki kapların çevresine dolgu malzemesi yerleştirilmesiyle oluşturulur.

Jeolojik çevreye ve özel güvenlik fonksiyonlarına dayanan bir çok kap tasarlanmış ve malzeme önerilmiştir. Mühendislerin tasarladığı bariyerler yeraltı suyunun girişini geciktirmeyi hedeflemiştir. Mühendislik bariyerleri paketlemeden atık sızması gibi pek olası görülmeyen olaylarda atıkların kolayca çözülmesini önleyecek ve çözülebilen atıkların da hareketsizleştirilmesini sağlayacak kimyasal şartları oluşturmaktadırlar.

Performans güvencesi

Jeolojik bertarafın zaman ölçeği insan deneyimini oldukça aştığından ve karmaşık kimyasal ve fiziksel etkileşimler mevcut olduğundan, jeolojik depolama sahasının mevcudiyeti süresince güvenli kalacağına gösterilmesi zordur. Bu amaçla uygun modellerin oluşturulması ve performans değerlendirmesi için gerekli verinin elde edilmesi ana hususlardır.

Jeolojik gömmenin güvenli olduğunun gösterilmesi gereken zaman cetveli konusunda ülkeler arasındaki farklı uygulamalar mevcuttur. Bazı ülkelerde bu süre 10.000 yıl olarak belirlenmiş, bazılarında daha uzun süreler istenmiş, bazılarında da bir limit koyulmamıştır. İleriye doğru gerekli zaman tahmini, gömme tesisinin davranışının hassas bir şekilde tahmininden daha çok güvenliğin niteliksel belirtisine göre yapılır. Büyüklüğün birkaç katı belirsizliğe izin verildiği zaman bile, hesaplanan salımların açıkça kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı gösterilmektedir.

Jeolojik bertarafın uygulanabilir olduğu yönündeki teknik güven, yer altı araştırmaları ile kuvvetlendirilmiş jeoloji, hidroloji, malzeme bilimi ve jeokimya gibi temel bilimsel bilgilerden kaynaklanmaktadır. Çoğunlukla kullanılmış madenlere kurulan laboratuvarlar, sahaya özel karakteristiklere ilişkin bilgilerin elde edilmesine ve güvenlik performans güvencesi için kullanılan modellerin testine yardımcı etmişlerdir (Tablo 4.4). Teknik açıdan güven, uranyum ve diğer radyonüklit madenlerinin doğal konumlarındaki çok uzun zaman ölçeğinde davranışlarının incelenmesi (bu tür doğal anolojilerin gömme koşulları ile mukayese edilmesi) ile de sağlanır. Beraberce ele alındığında bu çalışmalar jeolojik gömmenin zararlı salımları engelleyecek şekilde tasarlanabileceğini doğrular. Potansiyel olarak önemli salımların olması için çok az ihtimali olan olayları kabul etmek gerekir.

Mevcut derin depolama faaliyetleri

1999'da ABD savunma amaçlı nükleer faaliyetlerden ortaya çıkan uzun ömürlü, ısı yaymayan radyoaktif atıkları New Mexico'da Atık İzolasyon Pilot Tesisinde (WIPP) tuz formasyonu içinde ve toprağın 650m derinliğindeki büyük mağaralarda gömmeye başlamıştır. 2002'de ise ABD detaylı araştırmayı takiben yüksek seviyeli atık ve kullanılmış nükleer yakıt için ulusal depo olarak hizmet vermek üzere Yucca Dağını resmen önermiştir. 2001'de Finlandiya parlamentosu, yerel idarenin ulusal bir gömme tesisine ev sahipliği yapmayı kabullendiği Eurajoki'de, kullanılmış nükleer yakıt için ulusal jeolojik gömme tesisinin yapılması yönünde prensip kararı almıştır.

Taşıma

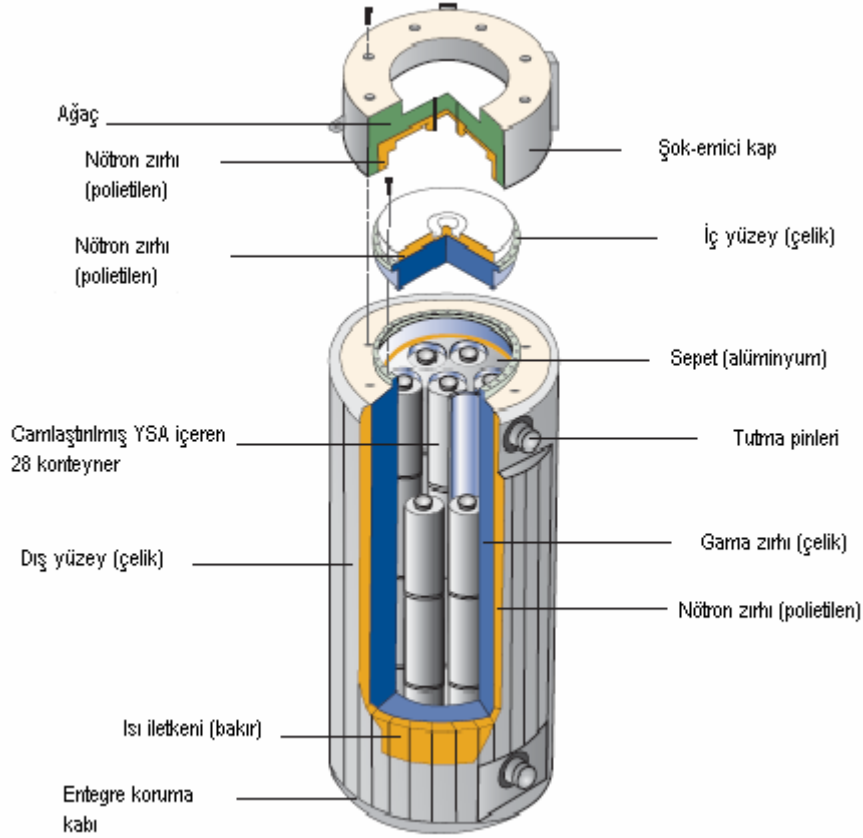
Radyoaktif atıkların hacimlerinin nispeten küçük olması ve uzun süre izolasyon gerektirmesi nedeniyle, genel olarak bu atıklara merkezileştirilmiş ara depolama ve nihai depolama uygulanmaktadır. Bu durum kullanılmış yakıtın veya atığın belirlenmiş yerlere taşınmasını gerekli kılmıştır. Endüstride ve tıbbi uygulamalarda kullanılan radyoaktif maddelerin de tedarikçi ve kullanıcı arasında taşınması gereklidir.

Radyoaktif maddelerin güvenli taşınması öncelikle ulusal bir sorumluluktur. Bununla birlikte 60 civarında ülke UAEA'nın, taşıma uygulamalarının uyumunu ve standardizasyonunu sağlayan “*Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınması için Düzenlemeler)*” ini uygulamaktadır. İlave olarak Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (188 sözleşmeli taraf) ve Uluslararası Denizcilik Organizasyonu (162 üye ülke) deniz ve hava taşımacılığında UAEA'nın bu prensiplerini uygulamayı zorunlu kılmışlardır. Bu düzenlemeler, ne şekilde taşınırsa taşınсын güvenliğin radyoaktif maddenin paketlenmesine bağlı olduğu temel prensibini içerir. Bazı aşamalarda olası trafik kazalarında bu prensip, paketler şiddetli kazalara karışsa bile herhangi bir radyolojik sonuçların önlenmesini sağlar.

Tablo 4.4. Yeraltı Laboratuvarlarına Örnekler

Ülke	Sahalar
Belçika	Mol/Dessel: 1984'den beri sahada özel araştırmalar
Finlandiya	Olkiluoto:1992'den beri sahada özel araştırmalar
Fransa	Bure: Laboratuvar yapımı 2002'de başlamıştır
Almanya	Asse: 1965'den beri sahada özel araştırmalar
	Gorleben:1985'den beri sahada özel araştırmalar
Japonya	Mizunami: 2002'den beri sahada özel araştırmalar
	Horonobe 2001'den beri sahada özel araştırmalar
İsviçre	Grimsel: 1984'den beri sahada özel araştırmalar
	Mont Terri:1995'den beri sahada özel araştırmalar
ABD	Yucca Mountain, Nevada:1993'ten beri sahada özel çalışmalar

Gereksinimler ve kontroller maddenin arz ettiği tehlikeyle orantılıdır. Örneğin, bazı tıbbi izotoplar mukavva paketlerde taşınabilir; içindeki radyoaktif malzeme miktarı sınırlandırılmış olmasına rağmen, paketlerin görülebilir şekilde taşıma etiketleri ile etiketlenmesi, taşıma paketlerinin sertifikalı olması ve taşıyıcının gerekli dokümantasyona sahip olması gerekmektedir. Diğer taraftan kullanılmış nükleer yakıt veya yüksek seviyeli atık, şiddetli kaza şartlarında halkı korumak ve ciddi kaza koşullarında radyolojik sızıntısının oluşmamasını temin etmek için yüksek derecede sağlamlığa ve güvenilirliğe sahip olan kaplarda taşınmalıdır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Tipik Yüksek Seviyeli Atık (YSA) Taşıma Kabı

ABD 1970 ve 1980'lerde nükleer yakıt taşıma kaplarının gerçek yaşamdaki kaza şartlarına maruz kalmasının etkilerini saptamak için bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testler şunları içermektedir:

- Taşıma kabı yüklü bir kamyonun ön gerilmeli beton duvara 130 km/h hızla çarpması,
- Bir traktör römorku üzerinde bulunan kaba 130 km/h hızla hareket eden bir lokomotifin çarpması,
- Bir kabın 600m yükseklikten bırakılarak sert zemine 380 km/h hızla çarpması.

1984'te İngiltere'de yapılan benzer testler gibi bütün bu testlerde taşıma kabı sağlam olarak kalmış, daha sonra yapılan muayenelerde radyoaktivite salımının olmadığı görülmüştür.



Nükleer Yakıt Taşıma Kabının Test Edilmesi

Güvenlik kaydı

Her sene dünyada bir çok formda radyoaktif madde ve atık paketleri nakledilmekte ve çok nadiren istenmeyen olaylar meydana gelmektedir. Örneğin, Fransa'da yıllık yaklaşık 300.000 buna benzer nakil gerçekleştirilmekte, bunun 15.000'i nükleer yakıt çevrimi ile ilgili olup 750'si taze/kullanılmış yakıt veya yüksek seviyeli atık içermektedir. 1975-97 periyodunda ortalama yılda, taşıma kabının kirlenmesi gibi lokal etkileri olan yalnız bir olay olmuştur. Dünyada 1971'den beri tren, kamyon ve gemi kullanarak 20.000'nin üzerinde kullanılmış nükleer yakıt ve yüksek seviyeli atık nakli gerçekleştirilmiştir ve bu nakillerde taşınan toplam malzeme ağırlığı 50.000 ton ve kat edilen mesafe 30 milyon kilometredir. Taşıma kabının yarıldığı veya radyoaktivitenin salındığı bir kaza yaşanmamıştır.

Sosyal ve Politik Hususlar

Radyoaktif atık yönetimi, gömme tesislerinin olmadığı yönündeki algılamadan dolayı, bazen nükleer enerjinin "yumuşak karnı" olarak adlandırılır. Bugünkü ve gelecek nesilleri herhangi bir riskten koruma yönündeki stratejide, sosyal ve politik güveni sağlamada zorluklar yaşanmaktadır.

Teknik uzmanların, yüksek seviyeli radyoaktif atığın insan ortamından derin jeolojik ortamlara gömülmesi ile uzaklaştırılmasının etik ve çevresel olarak uygun, teknolojinin çok iyi gelişmiş ve güvenilebilir olduğu hususunda itimadı vardır.

Bununla beraber bir çok kişi bu güveni paylaşmamaktadır. Halkla iletişim hala nükleer enerjinin önündeki en büyük problemlerden biridir. Bununla beraber uzun ömürlü radyonüklit gömme tesisinin topluma yüklediği riskin azaltılması, halkın bir kesiminin zihninde etik olarak tatmin edici olmayan, sonraki nesillere bir çeşit yük olduğu şeklinde algılanmaktadır. Diğerleri, bu düşük düzeydeki riskin fiziksel koşulları ve teknik kapasitelerini öngöremeyeceğimiz nesillere aktarılmasının, gelecek nesillerin yüklenmesi gereken risklerin ölçeğinde, ihmal edilebilir olacağını düşünme eğilimindedir. Her halükarda bu felsefi anlaşmazlık, radyoaktif atıkların bertarafına ilişkin çözümleri engellemektedir. Radyoaktif atıkların var olduğu ve bir noktada çözüm konusunda karar verilmesi gerçeği ortadadır.

Atık bertarafı ile ilgili günümüzde tartışılan diğer hususlar; nihai gömme için beklerken ortaya çıkan uzun süre depolama ihtiyacı, gömme işleminin tersinirliğine izin verilmesi ve bir çok ülkeye hizmet veren gömme tesislerinin kurulması gibi konulardır.

Uzun süreli depolama

Yüksek seviyeli atık ve kullanılmış nükleer yakıtın, yakın vade için gömülmesinin alternatifi yer üstünde uzun süre depolamadır. Bunun genellikle teknik olarak uygulanabilir olduğu bilinmektedir ve aslında mevcut uygulamayı yansıtmaktadır. Bununla birlikte uzun süre depolamaya genellikle “en iyi ikinci” çözüm gözüyle bakılmaktadır. Sahadaki emniyetin sağlanması ve çevresel gözetime olan gereksinim, maliyeti arttırmaktadır. Depolama tesislerinin yıpranması ve atık paketlerinin periyodik değişim ihtiyaçlarından kaynaklanan maliyet ve riskler gelecek nesillere yüklenmektedir; ve bu seçenek eninde sonunda karar verilmesi gereken atık bertarafı sorununu açık bırakmaktadır. Bununla birlikte bu seçenek, orta vadeli veya yarı-kalıcı olarak uygulanabilir bir yöntem olarak mevcuttur.

Tersinirlik

Maliyet ve risk gibi hususlar açısından uzun süreli depolama kavramı ile yakından ilgili olan bir husus, daha önce yerleştirilmiş olan atığın geri alınması yoluyla gömme işleminin tersinmesine ilişkin önlemlerdir. Bu işlem teknik olarak uygulanabilir görülmektedir; fakat azami izolasyonu sağlama amacıyla bir çakışma olabilir. Ayrıca, gömmenin ikinci adımı için gelecekte mali önlemler gerektirebilir. Bununla beraber geri alınamayacak adımları erteleyerek, bütün atıkların yerleştirildiği ve azami pasif güvenliği sağlamak için gömme tesisinin mühürlendiği nihai düzene doğru aşamalı bir yaklaşımın uygulanması teknik olarak mümkün olabilir.



İsveç'te Düşük ve Orta Seviyeli Atık Depolama Tesisi

Uluslararası depolar

Jeolojik gömme gerektiren atık miktarı, birden fazla ülkeye hizmet eden bir gömme tesisi fikrini prensipte cazip kılabilecek kadar azdır. Özellikle bir gömme tesisi geliştirme maliyetinin büyük yük olduğu veya jeolojik ve çevresel açıdan zor koşullara sahip ülkeler için bu kavram cazip olabilir. Çalışmalar, uluslararası bir gömme deposunun geliştirilmesinde teknik ve çevresel itirazların pek olmayacağını göstermektedir. Bununla beraber, saha seçimi ile ilgili etik ve politik problemler ve başka bir ülkenin atığının halk tarafından kabul edilmesindeki isteksizlik, en azından yakın bir gelecek için bu kavramın geliştirilmesindeki temel engeller olarak ortaya çıkmaktadır.

5. NÜKLEER GÜVENLİK

Nükleer güç santralleri, yeniden işleme, atık işleme tesisleri veya kullanılmış yakıt depolama tesisleri gibi nükleer tesisler, çevreye salınması durumunda radyoaktif kirlilik oluşturabilecek ve insan sağlığına zarar verebilecek miktarlarda yüksek radyoaktivite içerirler. Nükleer güvenlik önlemlerinin ana amacı, radyoaktivitenin olası tüm durumlarda bina (korunak/koruma binası) içerisinde kalmasını sağlamak, veya gerçekleşmesi durumunda radyoaktivite salımının önemli bir hasar meydana getirmesini önleyecek şekilde izin verilen sınırlar altında ve kontrollü olarak gerçekleşmesini sağlamaktır.

Genel anlamda nükleer tesisin güvenliği; tesis sistemlerinin ve tesis personelinin kazaların oluşmasını önleme, kazanın olması durumunda ise kaza sonuçlarını en aza indirme yeteneği olarak anlaşılmalıdır. Sonuçta, işletilen nükleer tesislerin çevre ve halk üzerindeki radyolojik etkisi hem normal işletme hem de potansiyel kaza sırasında mümkün olduğunca en düşük seviyede tutulmalıdır. Bunu sağlamak veya diğer bir deyişle tesisin yeterince güvenli olmasını temin etmek için teknik ve kurumsal önlemler, nükleer tesisin her aşamasında (yer seçimi, tasarım, imalat, inşaat, işletmeye alma, işletme ve hizmetten çıkarma) uygulanmalıdır.

Nükleer güç santralleri, fisyon işlemi sonucunda büyük miktarlarda radyoaktivite ortaya çıktığı için, meydana gelebilecek herhangi bir kaza durumunda diğer nükleer tesislerde oluşabilecek kazalardan daha büyük hasar oluşturacak potansiyele sahiptir. Ayrıca reaktörler, büyük miktarda enerji ve radyoaktiviteyi geniş alanlara yayabilecek sıvı ve gaz taşıyıcıları içermektedirler. Bu nedenle buradaki hususlar birinci derecede nükleer güç santrallerine uygulanırsa da, aynı prensipler ve yaklaşımlar diğer nükleer tesislere de uygulanır.

Nükleer Güvenliğin Temel Unsurları

Nükleer güvenlik tamamlayıcı ve iç içe geçmiş birçok faktörle sağlanır (Şekil 5.1):

- Nükleer santralin güvenliğine etki eden bütün faktörlere (yer seçimi, güçlü ve kanıtlanmış tasarım, yüksek kaliteli üretim ve inşaat) azami özen gösterilir ve işletmeye geçmeden önce kapsamlı testler yapılır.
- Tesiste arıza (hata) olasılığının en az olması ve kazayla sonuçlanabilecek herhangi bir hata veya arızanın önlenmesi için çoklu korumalar (derinliğine savunma kavramı) sağlanır.
- Periyodik güvenlik değerlendirmelerini içeren ve işletici ile düzenleyici organizasyonların güvenlik kültürünü geliştiren güçlü işletme uygulamaları ve yönetim sistemleri vasıtasıyla insan faktörüne özen gösterilir.
- İşletme lisansının askıya alınması veya gerektiğinde lisansın iptal edilmesi yetkilerine sahip bağımsız düzenleyici kurum tarafından izleme ve denetim yapılır.

Saha seçimi

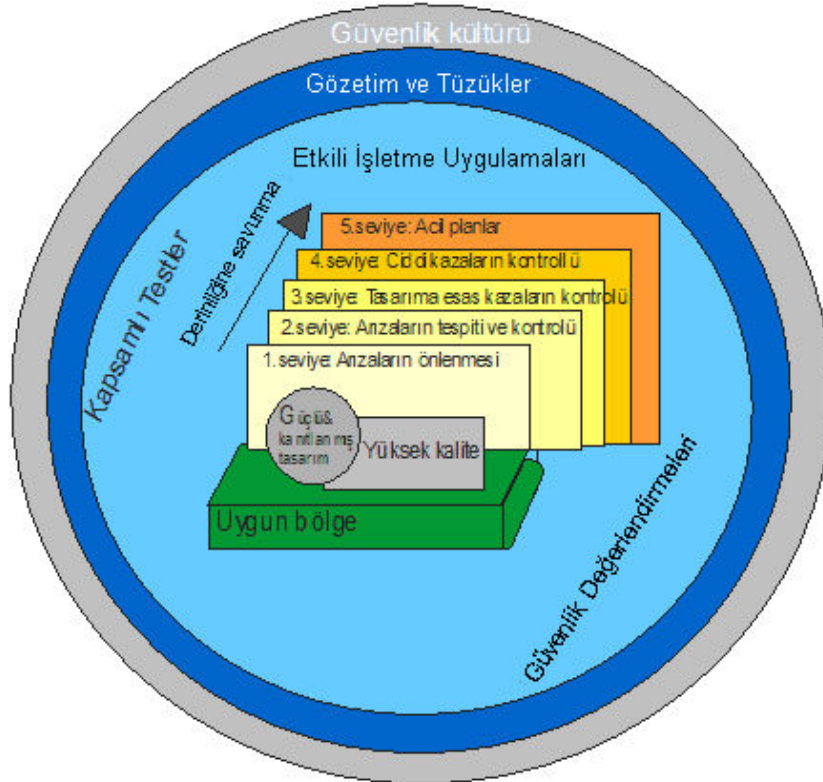
Nükleer güç santralinin (veya herhangi bir nükleer tesisin) saha seçimi, ulusal mevzuata göre yapılır ve güvenlikle ilgili düzenleyici kuruluşun onayını gerektirir. Güvenlik faktörlerinde potansiyel sahanın hidrolojik, jeolojik, meteorolojik, sismik ve demografik karakteristikleri (özellikleri) göz önünde bulundurulur. Amaç, herhangi bir radyoaktivite salımı durumunda insan ve çevrenin radyasyon ile ışınlanmasını en düşük seviyeye indirmek ve öngörülebilir en güçlü doğal (deprem gibi) veya insan kaynaklı olaylara dayanabilecek güvenlikle ilgili

yapı ve sistemleri sağlamaktır. Bu tip nedenlerden dolayı, nükleer güç santralleri yüksek nüfuslu büyük yerleşim merkezlerinden mümkün olduğunca uzakta kurulur. Doğal ve insan kaynaklı tehlikeleri değerlendirme metotları geliştirildiğinde veya yeni bilgiler elde edildiğinde sahanın yeniden değerlendirilmesi ihtiyacı doğabilir.

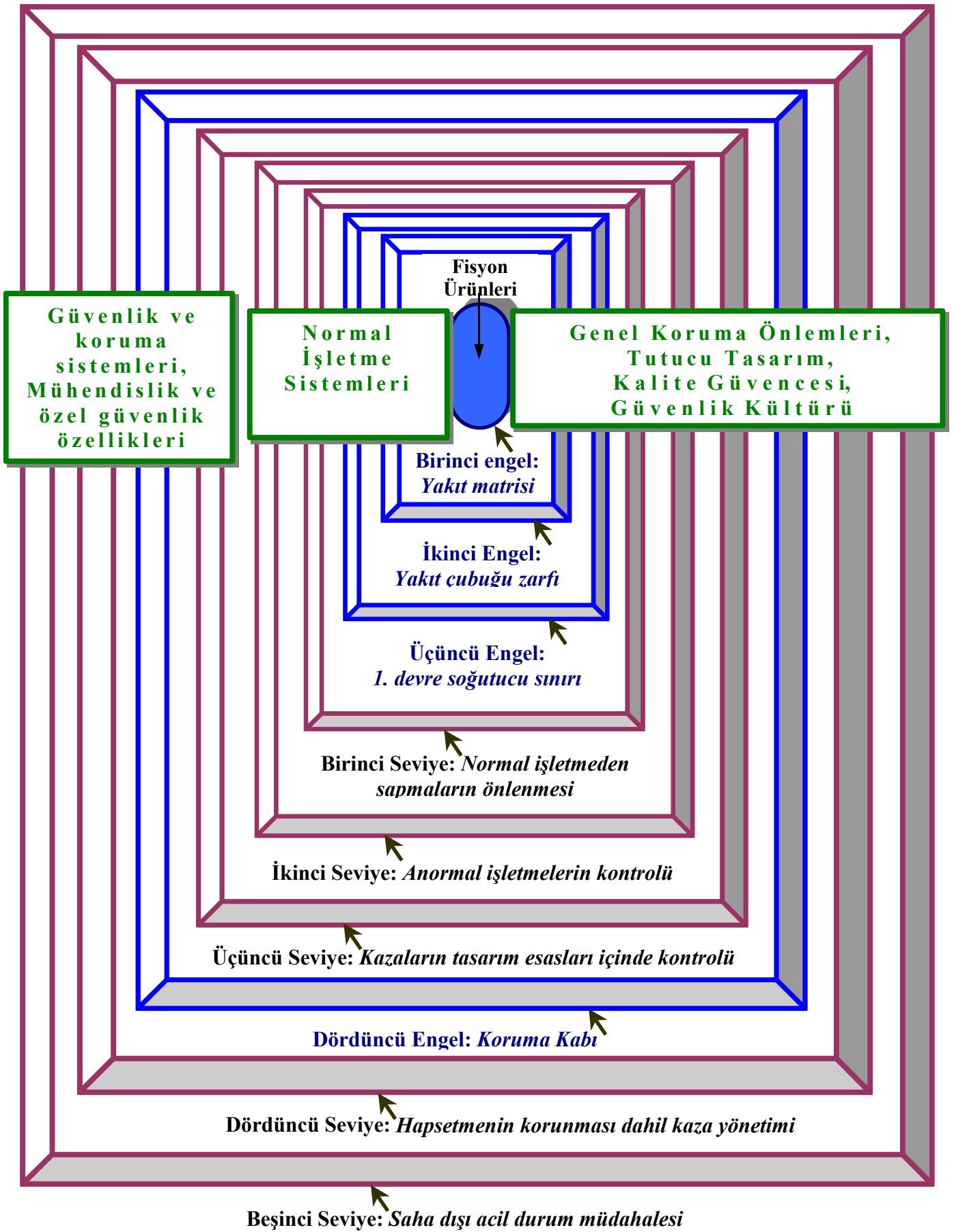
Güçlü ve kanıtlanmış tasarım

Nükleer tesislerin temel tasarım felsefesi, radyoaktif maddelerin salınmasına karşı çeşitli koruma seviyelerini sağlayan derinliğine savunma ilkeleridir (Şekil 5.1, Şekil 5.2). İlk derinliğine savunma seviyesi arızaların önlenmesidir. Nükleer tasarımlar güvenilir, kararlı ve kolay yönetilebilir bir işletme sağlamak için çabalar. Bunun başarılmasındaki en önemli faktör, güvenlik açısından kritik bileşenlerin kapasite ve yapısında makul güvenlik paylarının bırakılmasını sağlayarak yüksek kaliteli teknolojinin kullanılmasıdır. Bu faktörler potansiyel üretkenliği artırmak ve güvenliği ön plana çıkarmak için de geçerlidir.

Arızaların tespiti ve kontrolünü kapsayan ikinci seviye savunma ilkesi, normal işletmede olacak herhangi bir sapmanın kolayca tespit edilmesini ve mümkünse normal işletmeye müdahale etmeksizin proses kontrol ve korunma sistemleriyle otomatik olarak düzeltilmesini sağlamaktır. Bazı anormal işletme koşulları yüzünden arızanın oluşabileceği sistemlerde, tasarlanmış güvenlik sistemleri, reaktörü güvenli konuma getirecek ve radyoaktif maddeleri bina içinde tutacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu sistemler, tasarım aşamasında öngörülen ve ayrıntısı verilen anormal koşullar ve potansiyel kazalardan oluşan bir bütüne karşı koyacak şekilde ve tasarım esaslı kazalara dayanacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu tip tasarım esaslı kazaların kontrolü derinliğine savunmanın üçüncü seviyesidir. Dördüncü ve beşinci seviyeler ise sırasıyla herhangi bir ciddi kazanın gerçekleşmesi durumunda kazanın daha fazla büyümesinin önlenmesi ve sonuçlarını hafifletecek şekilde kaza koşullarının kontrol altında tutulması ve tesisten önemli miktarda radyoaktif madde salınması durumunda, radyolojik sonuçların hafifletilmesidir.



Şekil 5.1. Nükleer Güvenliğin Bileşenleri

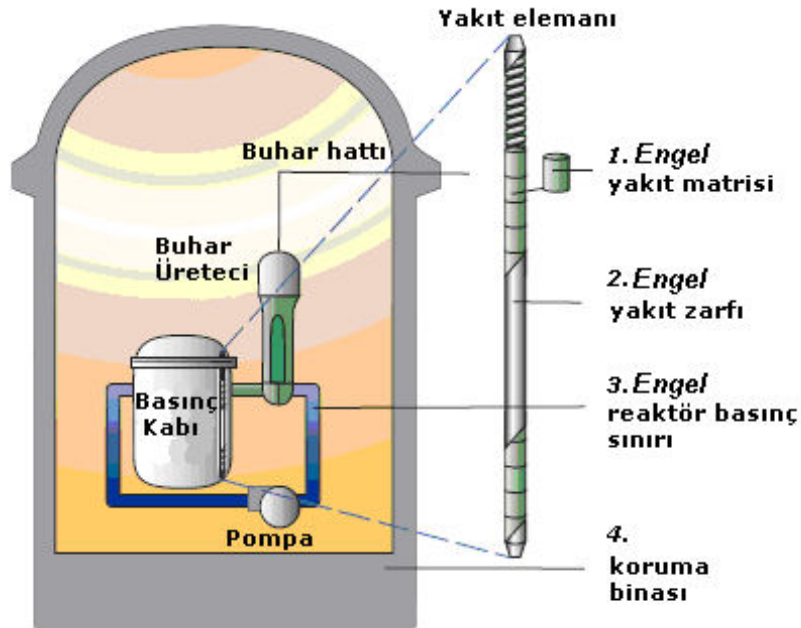


Şekil 5.2. Derinliğine Savunmada Fiziksel Engeller ve Koruma Seviyeleri

Tasarlanmış güvenlik sistemleri

Bir nükleer güç santralinde (1) radyoaktif malzemelerin her zaman hapsedilmesini sağlamak; (2) herhangi bir anormal durumda üretimi durdurmak ve fisyon işleminin her zaman aniden sonlandırılmasını sağlamak; (3) radyoaktivitenin salınmasına karşı bariyerlerin bütünlüğünü korumak ve durdurmadan sonra ortaya çıkan artık ısının çekilmesini temin etmek için çeşitli sistemler kullanılmaktadır.

Nükleer güç santrallerinde radyoaktivitenin serbest kalmasını engelleyen birçok bariyer mevcuttur. Radyoaktif salıma karşı birinci bariyer yakıt matrisi ve sızdırmazlık özelliği olan yakıt zarfıdır. Daha sonraki bariyer ise normal işletme koşullarında soğutucunun dolaştığı reaktör basınç sınıridir (reaktör basınç kabı ve birinci soğutma devresi). En son bariyer ise, büyük güçlendirilmiş beton yapıdan oluşan koruma kabıdır. Koruma kabı, hem içerde serbest kalan radyoaktif maddeleri hapsetmek hem de füze, yangın ve patlama gibi dış etkenlere karşı koruma sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 5.3). Ticari nükleer güç santrallerinde meydana gelen iki ciddi kazadan biri olan Three Mile Island kazasında, (1979) reaktör basınç kabı ve koruma kabı, ciddi kor hasarı sonucunda açığa çıkan yoğun ısı ve radyoaktiviteden halkın herhangi zarar görmesini önlemiştir.



Şekil 5.3. Radyoaktivite Salınımı Engelleyen Bariyerler

Fisyon işlemi nötron yutucu kontrol çubuklarıyla durdurulabilir. Bu çubuklar reaktörü durdurmak için reaktör koru içerisine kontrollü olarak veya fisyon reaksiyonunu aniden durdurmak için hızlı bir şekilde sokulabilirler. Ayrıca, reaktörü durdurmak için kullanılan ikinci bir yöntem ise uzun dönemde reaktörü durdurmak için nötron yutucu sıvıların enjekte edilmesidir.

Bir reaktörde oluşan ısı soğutucu aracılığıyla çekilmektedir. Su soğutmalı reaktörler için elektrik üreten türbin-jeneratörlere bu şekilde buhar sağlanır. Soğutma sisteminin arızalandığı durumlarda ise reaktör kapatıldıktan sonra oluşan artık ısıyı çekmek için tasarlanmış çeşitli

sistemler bulunmaktadır. Bunlar ve gerekli diğer sistemlerin ihtiyaç duyduğu gücü temin etmek üzere, gerektiğinde acil durum yedek jeneratörler (genelde dizel yakıtlı) devreye girer.

Tasarımlanmış sistemlerin sürekli kullanılabilirliği ve güvenilir bir şekilde işletilmesi, derinliğine savunma ilkesinin anahtar unsurudur. Bu sistemler düzenli olarak test edilir. Bu sistemlerin tasarımı yapılırken, herhangi bir tek güvenlik bileşeninin arızalanmasının, tüm fonksiyonların kaybedilmesine (tek hata kriteri) yol açmaması sağlanır.

Ayrıca, güvenlik sistemleri yedeklilik (kötümser kabuller temel alınarak ek yedek sistemlerin veya daha büyük kapasitenin sağlanması), farklılık (ortak nedenli arızaların önlenmesi için farklı çalışma yöntemleri) ve santraldeki proses sistemlerinden güvenlik sistemlerinin fiziksel ayırımı prensiplerinin uygulanmasıyla tasarlanır. Bütün bunların temelini teşkil eden faktörler, arıza risklerine dair bütün kabullerdeki tutuculuk, “olursa ne olur” yaklaşımıyla temel tasarım güvenliğinin uygulanması ile geçmiş bileşen ve malzeme performansının detaylı analizleridir.

Yüksek kaliteli imalat ve inşaat

Güvenilir işletme için yüksek kaliteli ekipman ilk koşuldur. Kalite güvencesi temini nükleer güvenliğin hayati bir bileşenidir. Nükleer tesislerde kullanılan malzeme ve bileşenler için özel kod ve standartlar geliştirilmiştir. Bunların kalite standartlarını karşıladığını doğrulamak için kapsamlı testler gerekir ve bu kriterler sadece iyi kanıtlanmış ve yerleşmiş teknolojilerin kullanılmasını sağlar. Ulusal düzenleyici kuruluşlar bu kalite güvence ve kontrol programlarının uygulamalarını gözetirler. Buna ilişkin maliyetler, nükleer tesislerin inşaat ve bakım masraflarının önemli parçasını oluşturur.

Kapsamlı testler

İşletmeye alma nükleer güç santrali projesinin tamamlanmasında önemli bir aşamadır. Reaktör gücü belirli bir seviyeye kadar kademeli olarak artırılır; proses ve güvenlik sistemlerinin inşa edildiği duruma göre işletme karakteristikleri belirlenir, belgelenir ve daha önceden tanımlanan kriterlere göre kontrol edilir. Sistemlerin ve bileşenlerin ve bir bütün olarak santralin fonksiyonlarının doğruluğunu kanıtlamak için çok sayıda özel testler yapılır. Zayıflıklar giderilir ve istenilen sonuçlar elde edilene kadar testler tekrarlanır.

Ana bakım yapıldıktan sonra veya bileşenlerin değiştirilmesi veya iyileştirilmesinden sonra da kapsamlı testler yapılır.

Güvenlik değerlendirmeleri

Nükleer tesislerin güvenliği, “*deterministik güvenlik yaklaşımı*” olarak bilinen belirlenmiş potansiyel arıza serilerinin ve bunların güvenlik bariyerleri ile olan etkileşimlerinin sistematik analizi yoluyla değerlendirilmektedir. Deterministik yaklaşımda, tasarıma esas bir kaza (soğutucu kaybı gibi) karşısında santral ve güvenlik sistemlerinin tepkisinin, belirlenen düzenleyici sınırlar ve şartlar içerisinde olacağının gösterilmesinde tutucu kabuller kullanılır. Bu yaklaşım, olayların olasılığını hesaba katmaz ve tasarlanan güvenlik fonksiyonlarını yerine getirmek için tüm tasarlanmış güvenlik sistemlerinin kullanılabileceğini kabul eder.

Bu tür değerlendirmeler, önerilen sahanın karakteristiklerini hesaba katarak santralin, belirlenen işletici ve düzenleyici sınırlar içerisinde kolay işletilmesi yetkinliğini onaylamak amacıyla tasarım sonlandırılmadan önce yapılır. Bu değerlendirmeler, “güvenlik analiz raporları” veya “güvenlik durumları” olarak raporlanır. Bu dokümanlar, düzenleyici kurum

tarafından lisans verilmeden önce detaylı bir şekilde incelenir; ve santralin güvenli işletilmesi için referans teşkil eder.

Ulusal mevzuat, nükleer santralin ömrü boyunca lisans koşulları çerçevesinde çalışmasını sağlamak için, işleticilerin iç-değerlendirmelerinin yanı sıra periyodik olarak sistematik güvenlik değerlendirmelerinin yapılmasını da talep eder.

1980'lerden sonra deterministik analizi tamamlayıcı bir analiz tipi olan "Olasılıklı Güvenlik Analizleri- probabilistic safety assessments (PSA)" kullanılmaya başlanmıştır. Olasılıklı Güvenlik Analizleri'nde, kazaya yol açacak insan hataları ve ekipman arızaları dahil olmak üzere bütün durumlar analiz edilir. Ciddi kazalara yol açabilecek arızaların ve olayların kombinasyonları belirlenir ve olma olasılıkları tahmin edilir. Bu çalışmaların sonuçları, tesisin güvenlik iyileştirmelerinde önceliğin belirlenmesi, işletici eğitimleri ve denetim önceliklerinin oluşturulması gibi bir çok amaçlarla kullanılır.

Güçlü işletme uygulamaları

Deneyimler, güvenli işletmenin belirli ilkelere bağlı kalmaya dayandığını göstermektedir. Bu ilkeler şunları içerir:

- Güvenliğe öncelik verecek yönetim ilkeleriyle birlikte güvenlikle ilgili birincil sorumluluğun işleticiye yüklenmesi;
- Uzman ve deneyimli personelin uygun sayıda ve doğru konumda istihdam edilmesini sağlayacak güçlü bir organizasyon oluşturulması;
- İşletme için güvenli sınırları tanımlayan tutucu sınırların ve koşulların oluşturulması;
- Tüm işletme koşulları (testler, bakım ve standart olmayan işletim durumları) için onaylanmış prosedürlerin oluşturulması;
- Tüm işletme, denetim, test ve bakım koşulları için kapsamlı kalite-güvence programının oluşturulması;
- Nükleer güvenliğe doğrudan etki eden faaliyetler için eğitim programlarının oluşturulması;
- Santralin ömrü boyunca gerekli mühendislik ve teknik desteğin oluşturulması;
- Bütün olayların zamanında uygun düzenleyici kuruma bildirilmesi;
- İşletme deneyimlerinin toplanması ve analiz edilmesi, bu deneyimlerin uluslararası kuruluşlar, düzenleyici kurum ve diğer işletme organizasyonları ile paylaşılması ve eğitim faaliyetlerinin oluşturulması için gerekli programların oluşturulması;
- İşletmeye geçmeden önce acil eylem prosedürleri ve planlarının hazırlanması ve kaza sonuçlarının hafifletilmesinde yer alacak çeşitli kuruluşların tepkilerinin uyumlaştırılması amacıyla düzenli tatbikatların yapılması;
- Kontrol odası, alarm ve gösterge sistemlerinin tasarımı ve yerleştirilmesinde insan faktörü ve mühendislik prensiplerinin hesaba katılması.

Güvenlik kültürü

Deneyimler, birçok durumda zayıf güvenlik kültürünün güvenlik performansının azalmasını temel sebebi olduğunu göstermektedir. Güvenliğin sağlanmasını esas alan bütün sistemlere rağmen, herhangi bir nükleer tesisinin güvenliğinin garantisi insandır. Güvenliğe etkisi olacak

bireylerin davranışlarına ve durumuna etki edecek iyi bir güvenlik kültürünün olması, temel nükleer güvenlik ilkesidir. İyi bir güvenlik kültürünün özellikleri güçlü sorumluluk duygusu, öz disiplin ve mevzuata saygılı olmayı içermektedir, fakat bütün bu özelliklerin yanında yönetim biçimi de önemli bir bileşendir. Güvenlik kültürü, ulusal alışkanlıklar ve davranışlarla ilişkilidir, kısa süre içinde kazanılmaz ve bir donanım parçası gibi kurulamaz. İşletici ve düzenleyici kuruluşların tamamında, güvenlik kültürü en üstten en alta doğru sürekli ve hatasız bir şekilde aktarılmalıdır.

Gözetim ve düzenleme

Nükleer güvenlik, en başta nükleer güç santralının sınırları içinde kurulmasına ve işletilmesine izin veren ülkenin ulusal bir meselesidir. Güvenlik için birincil sorumluluk, lisans sahibi olan tesisin işleticisine aittir. OECD Nükleer Enerji Ajansı (NEA) ve Uluslararası Atom Enerji Ajansı (UAEA) gibi organizasyonların yer aldığı uluslararası işbirliği, güvenlik kavramlarının geliştirilmesi ve deneyimlerin paylaşılmasına yardımcı olur.

Mesela, nükleer güç santrali işleten bütün ülkelerin imzaladığı *Nükleer Güvenlik Sözleşmesi (Convention on Nuclear Safety)*, güvenlik teminatının temel bileşenleriyle ilgili uluslararası düzeyde kabul görmüş ilkeleri ve yükümlülükleri tanımlar.

Her ne kadar nükleer güvenliğin sorumluluğu işleticiye ait ise de, düzenleyici bakış açısıyla gözden geçirme ve kontrol şarttır. Nükleer programı olan bütün ülkelerde tesisin lisanslanmasından ve ilgili mevzuatın uygulanmasından sorumlu olan bir nükleer düzenleyici kurum vardır.

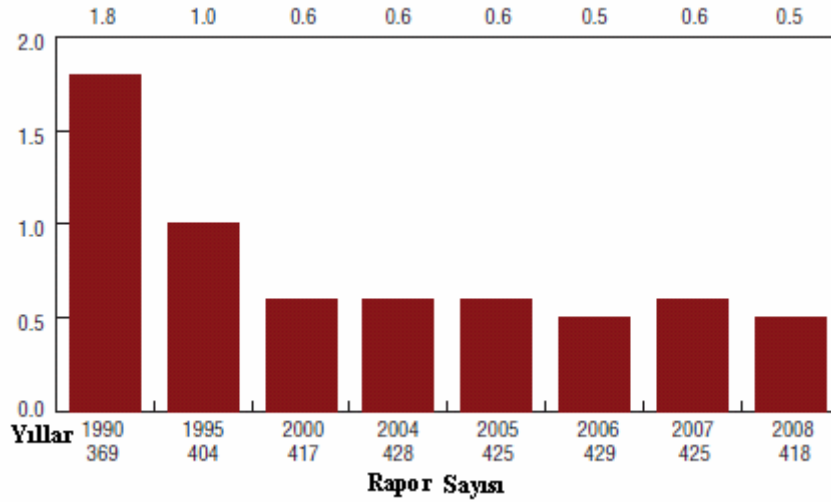
Bu düzenleyici kurum;

- Uygun düzenleyici şartlarını, güvenlik standartlarını ve mevzuatını oluşturur ve uygular;
- Tesisin güvenlik değerlendirmesini takiben lisans verir;
- Lisans sahibinin güvenlik performansını denetler, izler ve gözden geçirir;
- Düzenleyici şartlara veya mevzuata uyulduğunu doğrular; ve tanımlanan standartlardan sapmalar veya yanlış uygulamalar olduğunda düzeltici yaptırım uygular.

Nükleer Güvenlik Sözleşmesi'nde aksettirilen en önemli ilke, düzenleyici kurum ile nükleer enerjiyi özendiren veya kullanan grupların etkin bir şekilde birbirinden ayrılmasıdır. Böylece, güvenlik ile ilgili düzenleyici kuruluşlar karar verme sürecinde dış baskılardan korunmuş olur.

İşletme Deneyimi

Dünyada 10.000 reaktör-yılına aşkın bir işletme süresince elde edilen bilgi ve tecrübeler toplanmış bulunmaktadır. Bu bilgi ve tecrübeler; veri tabanları, uluslararası organizasyonlar, dergiler ve seminerler aracılığıyla paylaşılır. Özellikle son yıllarda nükleer santrallerin işletme güvenlik performanslarında belirgin ve sürekli bir iyileşme kaydedilmektedir. Örneğin, son on yılda, planlanmayan ani otomatik durdurma işleminin sayısı oldukça azalmıştır ki bu da tesisin işletimindeki düzelmeleri göstermektedir (Şekil 5.4). Son yıllarda nükleer güç santrallerinde işletme yılındaki ortalama plansız otomatik durdurma (santralin sistemlerini etkileyen termal ve hidrolik geçişlere yol açar) sayısı 1'in altına düşmüştür.



Şekil 5.4. Dünyadaki Plansız Otomatik Kapatma (7000 saat başına).

(Kaynak: WANO)

Ticari nükleer güç santrallerinin olumlu nükleer güvenlik kaydını iki ciddi kaza bozmaktadır: 1979'daki Three Mile Island (TMI) ve 1986'da Ukrayna'daki Chernobyl kazası. TMI kazasında reaktör korunda ciddi hasarlar oluşmuş fakat reaktör basınç kabı ve koruma kabı binası hasar görmemiş, az miktarda radyoaktif gaz serbest kalmış ve halk etkilenmemiştir. Bu kaza, uluslararası Nükleer Olay Ölçeği (INES)'te 5 olarak derecelendirilmiştir. Temelde güvenlik kültürü eksikliğinden kaynaklanan Chernobyl kazası felaket olarak değerlendirilmiş ve 5'in üstünde (7inci seviye) derecelendirilen tek kaza olmuştur. Chernobyl'de buhar patlamasının eşlik ettiği nükleer yakıt erimesi meydana gelmiştir. Santralde tam bir koruma kabı binasının olmamasından dolayı, çok miktarda katı ve gaz radyoaktif madde Avrupa üzerine yayılmıştır.

Bu iki kazadan önemli dersler alınmıştır. TMI kazası, işletici niteliklerinin iyileştirilmesi ve eğitim, daha iyi acil eylem prosedürlerinin ve halkla iletişim sağlanması dahil olmak üzere, insan faktörüne daha çok dikkat edilmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Chernobyl kazası ise batı ülkelerinde olmayan RBMK tipi (su soğutmalı grafit yavaşlatıcılı tip) nükleer santrallerin tasarımlarındaki zayıflığı ortaya çıkarmanın yanında, güvenlik kültürünün de önemini göstermiştir. Bu kaza; sadece işleticilerin zayıf yönetiminin değil, farklı dış etkilerden kaynaklanan zayıf güvenlik kültürünün de, derinliğine savunmanın her bir unsurunu yıkan bir işletme tarzına yol açabileceğini göstermiştir.

Piyasadaki Serbestleşmenin Güvenlik Üzerine Etkisi

Son yıllarda arz ve fiyatın rekabet ettiği serbest elektrik piyasasına doğru büyüyen bir eğilim vardır. Ekonomik rekabetin, elektrik üretiminin ekonomik açıdan verimliliğini iyileştireceği konusunda çok az kuşku varken, bunun nükleer güvenlik üzerine etkisi tartışılmaktadır. Bağımsız ve ihtiyatlı gözetimin aynen kalmasının sağlanması gerekli olmasına rağmen ilk göstergeler, düzenleyici faktörlerin ve rekabetçi ekonomik performansın zıtlamadığını göstermektedir. İşleticinin serbest piyasada rekabetini gereksiz bir şekilde etkilememek için düzenleyici kurumun, personel ve mevzuatını değişen piyasa koşullarına ayak uyduracak şekilde geliştirmesi veya uyarlaması gerekebilir.

Gelecek Reaktörlerin Güvenliği

Gelecek on yıllar içerisinde, elektrik üretiminde kullanılan diğer kaynaklarla yarışabilecek yeni reaktör tasarımları geliştirilmesi için çalışmalar sürdürölmektedir. Hem elektrik üretim maliyetinin düşürölmesi hem de güvenlik seviyelerinin artırılması yönünde iyileştirmeler içermesi öngörölen bu gelişmiş reaktörlerin güvenlikle ilgili bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ciddi kazaların tasarım esaslarının bir parçası olarak açıkça hesaba katılması;
- İçsel güvenlik özelliklerinin kullanılmasıyla bazı ciddi kaza senaryolarının ortadan kaldırılması;
- Ciddi kaza olsa bile büyük miktarda radyoaktif salımların sınırlandırılması veya ortadan kaldırılması;
- Dijital teknolojinin kapsamlı bir şekilde kullanılmasıyla, işletilebilirlik ve sürdürülebilirliğin iyileştirilmesi;
- Potansiyel insan hatalarının ve sistem karmaşıklılığının azaltılması.

Başarılı bir şekilde uygulanabilirse bu özellikler, saha içi ve saha dışı koruyucu önlemlerin (halkın tahliye edilmesi planları gibi) azaltılmasına imkan verebilir ve mevcut güvenlik seviyesini iyileştirebilir.

6. RADYASYONDAN KORUNMA

1800'lü yılların sonunda varlığının keşfedilmesinden sonra, radyasyon ve radyoaktivitenin birçok kullanım alanı keşfedilmiş ve bundan istifade edilmeye başlanmıştır. Tıp bilimi, radyasyonun giricilik özelliğinin kullanıldığı alanların ilkidir ve X-ışınları insan ile ilgili çalışmalarda ve tedavide devrimsel gelişmelere neden olmuştur. Fakat çok erken safhada yararlarının yanı sıra bazı riskleri de içerdiği anlaşılmış ve kişilerin radyasyondan korunması gerektiği ortaya çıkmıştır. Radyasyonun kullanımında faydalar ve riskler dengesi söz konusudur. Bu dengenin kurulmasına yardım etmek için radyasyon kaynakları, kullanımları ve etkileri anlayışının yayılmasının yanında radyasyondan korunma uygulamaları, teorisi, politikası ve mevzuatı geliştirilmiştir.

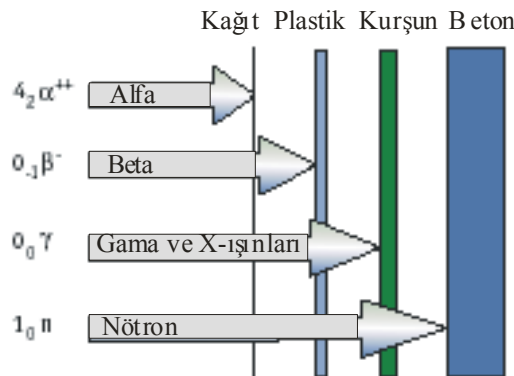
Bilimsel ve Tıbbi Geçmiş

Radyasyon tipleri

Radyasyon, elektromanyetik dalgalar veya atom altı parçacıklar formunda bir enerjidir. Radyoaktivite, radyasyon yayan kararsız atom çekirdeğinde kendiliğinden olan değişimdir. Bu değişim, atomun bozunması olarak adlandırılır. Genellikle, radyoaktif atomlar, ilgili kimyasal elementin “radyonüklitleri” (ışıl çekirdekleri) veya “radyoaktif izotopları” olarak adlandırılırlar.

Parçacık veya elektromanyetik dalga formundaki radyasyon, etkileştiği atomların elektronlarını koparacak kadar yeterli enerjiye sahipse atomlar yüklü hale gelir ve iyonlaşmış olur. Bu da *iyonlaştırıcı radyasyon* olarak adlandırılır. Etkileşim sonucunda oluşan iyonlar, hücrelere hasar veren kimyasal değişimlere neden olabilecek kapasitedirler. Parçacık veya elektromanyetik formdaki radyasyon, atomları iyonlaştırmada yeterli enerjiye sahip değilse *iyonlaştırıcı olmayan radyasyon* olarak adlandırılır.

İyonlaştırıcı radyasyon alfa parçacıkları, beta parçacıkları, nötron veya gama ışınları ve X-ışınları olarak bilinen elektromanyetik radyasyon formunda olabilir. İyonlaştırıcı radyasyonun her bir tipi, madde (insan vücudu da dahil) ile farklı şekilde etkileşir ve bunların her biri, farklı tipteki malzemeyle etkin bir şekilde durdurulabilir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Farklı Radyasyon Tipleri İçin Giricilik Mesafeleri

(Kaynak: Michigan Üniversitesi, USA)

Alfa parçacıkları, atomun çekirdeğinden yayılır ve iki proton ile iki nötron içerirler. Bu parçacıklar Helyum atomu çekirdeği ile aynıdır ve pozitif (+2) yüklüdürler. Ağır ve yüklü oldukları için madde içerisinde enerjilerini çabuk kaybederler. Alfa parçacıklarını bir kağıt tabakası veya insan vücudundaki ölü deri tabakası gibi az bir kalınlıktaki maddelerle durdurmak mümkündür. Alfa parçacıkları, doğrudan hassas hücrelerle temas edeceği için sadece ağız yolu ile vücuda alındığı ve teneffüs edildiği zaman insan sağlığı açısından tehlikeli olurlar.

Beta parçacıkları, atomun çekirdeğinden yayılan elektronlardır ve sadece bir negatif yüke sahiptirler. Bunlar, alfa parçacıklarına göre madde ile daha az etkileşime girerler ve böylece maddenin daha içlerine nüfuz edebilirler. Plastik veya metal gibi ince nesnelere durdurulabilirler ve alfa parçacıklarında olduğu gibi ağız yoluyla vücuda alındığı veya bulunduğu zaman tehlikelidirler. Işınlama yeteri kadar büyük ise deriye radyasyon hasarı verebilirler.

Nötronlar, atomun çekirdeğinde bulunurlar ve çarpışma veya fisyon ile açığa çıkarlar. Proton ile yaklaşık aynı kütleye sahip elektriksel olarak yüksüz parçacıklardır. Yüksüz oldukları için madde ile zayıf etkileşime girerler ve dolayısıyla madde içerisine kolaylıkla nüfuz edebilirler ve kolayca durdurulamazlar. Kalın beton tabakası veya hidrojen atomları açısından zengin (su veya yağ gibi) bir malzemeye durdurulabilirler.

Gama ışınları ve X-ışınları, her ikisi de elektromanyetik dalgalardır. Gama ışınlarının kaynağı atom çekirdeğidir ve atom elektron seviyelerindeki değişim sonucu meydana gelir. Röntgen ışınları da denilen **X ışınları**, görünür ışık ve mor ötesi ışınları gibi dalga şeklindedir. Bir atoma dışarıdan gelen veya gönderilen yüksek enerjili elektronlar o atomun ilk halkalarından elektronlar koparılır. Atomdan kopan bu elektronun yerine daha yüksek seviyelerden (üst halkalardan) elektronlar atlayarak kopan elektronun yerindeki boşluğu doldururlar. Bu sırada ortaya çıkan enerji fazlalığı X ışını şeklinde dışarı salınır. Gama ve X-ışınlarının ikisi de yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon formunda olduklarından madde ile daha az etkileşime girerler. En iyi, kalın kurşun tabakası veya yoğun malzemelerle durdurulabilirler.

Radyasyon kaynakları

Radyasyon kaynakları doğal ve yapay olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar:

Doğal radyasyon

İyonlaştırıcı veya iyonlaştırıcı olmayan doğal radyasyon kaynakları “kozmetik” veya “karasal” olarak tanımlanabilirler. Gökyüzünden gelen kozmik radyasyon, yıldızların oluşumu ve ömrünü tamamlaması gibi çeşitli olaylarla oluşmaktadır. Kozmik radyasyonun dünyada bizi ilgilendiren şimdiye kadarki en büyük yayıcısı güneştir. Karasal radyasyon ise dünyanın kendisinden gelmektedir ve yer kabuğunda başlangıçtan beri var olan bozunmalar ve kozmojenik radyonüklitlerle oluşurlar. Uranyum ve toryum elementi milyonlarca yıldır azar azar bozularak iyonlaştırıcı radyasyon yayarlar ve en sonunda, kararlı ve radyasyon yaymayan kurşuna dönüşürler.

Uranyumun bozunma zincirlerinin üyelerinden birisi olan radon, dünya yüzeyine yakın bir yerde oluşursa atmosfere gaz halinde dağılır. Radyasyon, sadece direkt olarak dünyadaki kaynaklardan yayılmaz, aynı zamanda yaşadığımız yerdeki radyoaktif elementlerin çeşidine ve miktarına bağlı olarak az yada çok miktarda soluduğumuz atmosferde de bulunur.

Bitkiler ve hayvanlar çevreden radyoaktif maddeleri soğurdukları için yiyeceklerimiz bile doğal olarak radyoaktiftir. Sonuç olarak, vücudumuzda özellikle kemiklerimizde az miktarda Karbon-14, Potasyum-40 ve Radyum-226 bulunmaktadır. Potasyum önemli bir besin mineralidir ve muz, potasyum açısından oldukça zengin olup radyoaktif izotop Potasyum-40 içermektedir. Doğal olarak oluşabilen, aynı zamanda insan üretimi de olan (yapay) ve dünyadaki suların bir kısmında oluşan hidrojen izotopu Trityum, vücudumuzda özellikle yumuşak dokular ve kan dolaşımında az miktarda bulunur.

Yapay radyasyon

Nükleer enerjinin ve bilimin gelişmesi, çeşitli yeni radyasyon kaynaklarının (yapay radyasyon) üretimini mümkün hale getirmiştir. Başlangıçta yerüstünde gerçekleştirilen nükleer silah denemeleri, dünyanın en üst atmosfer tabakasında çok miktarda radyoaktif maddelerin birikmesi ile sonuçlanmıştır. Kuzey Yarımküre nüfusunun büyük çoğunluğu ve Güney Yarımkürenin bir kısmı bu maddelerden kaynaklanan radyasyona maruz kalmış ve halen kalmaktadır.

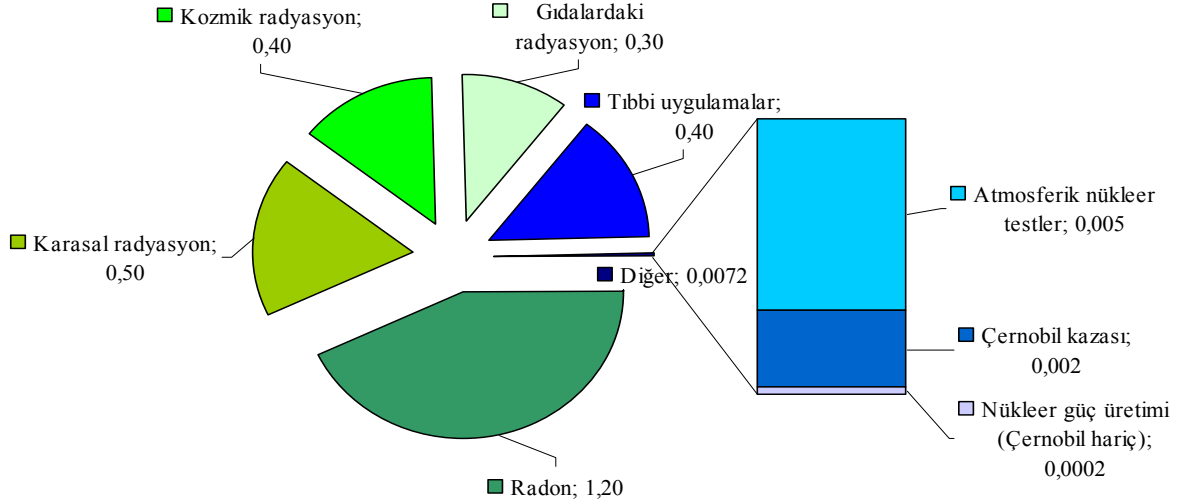
1950'li yıllardan beri nükleer gücün gelişimi yakıt çevrimindeki çeşitli aşamalarda atmosfere ve sulara radyoaktivite salınmasına neden olmaktadır. Bu radyoaktivite salımı, çoğunlukla kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi ve az miktarda da yakıt imalatı ve güç üretiminden kaynaklanmaktadır.

Radyasyon, keşfedildiğinden beri tıp biliminde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. X-ışınının kullanılmasıyla önemli miktarda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınmaktadır. Son yıllardaki gelişme ise, cerraha cerrahi aletlerini insan vücudunda doğru şekilde konumlandırmasına olanak sağlayan gerçek zamanlı X-ışını görüntüleme sistemleridir. Gama ışınlarının diğer karmaşık tıp kullanım alanları, bilgisayarlı tomografi (CT) ve pozitron emisyon tomografisi (PET)'dir.

Radyasyon, tümör hücrelerini yok edebilmesi nedeniyle kanser tedavisinde de kullanılmaktadır. Radyasyon kaynakları, cerrahi olarak tümör hücrelerine yerleştirilebilmektedir (implant tedavisi). Sıvı radyasyon kaynakları ise kan dolaşımına enjekte edilmekte ve tümör hücrelerinde toplanabilmektedir. Bu yöntem, tiroit kanseri tedavisinde kullanılmaktadır. Hem hastalar hem de tıbbi görevliler için bütün bu işlemler birer iyonlaştırıcı radyasyon kaynağıdır.

Radyasyon ışınlanmasının seviyeleri

İnsanların tipik olarak maruz kalacağı radyasyon seviyesi ne kadardır ve en önemli radyasyon kaynakları nelerdir? Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), 1995'ten beri bu bilgileri toplamaktadır ve her dört yılda bir tüm kaynaklardan alınan ortalama ışınlanma seviyelerini içeren rapor olarak sunmaktadır. Şekil 6.2'de UNSCEAR'nin 2000 yılı sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Toplum Işınlanmalarında Tipik Radyasyon Kaynakları (mSv/yıl).
(Kaynak: UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. 1, 2000)

Radyasyon ışınlanmasının etkileri

Herhangi bir ortamdan- örneğin insan vücudundan- geçen radyasyonun birincil sonucu enerjinin ortamda birikmesi, depolanmasıdır. Bir maddeden radyasyon geçmesi sonucunda o maddede enerji depolanması olur. Madde ile etkileşim sonucunda radyasyon enerjisini kaybederken, madde enerji kazanır. Radyasyon ışınlanmasını ölçmek için kullanılan birim, soğurulan enerji miktarını temel alır. Günümüzde radyasyon ışınlanması (doz olarak ifade edilir) gray (Gy) ile ölçülür ve 1 gray, maddenin 1 kg'ında 1 joule'lük enerji soğurulması meydana getiren radyasyon miktarı olarak tanımlanır.

İyonlaştırıcı radyasyonun bazı tipleri diğerlerine göre daha çok hasar verir. Mesela, alfa parçacıkları büyük kütle ve elektrik yüküne sahip olduklarından oldukça kısa mesafede yüksek miktarda enerjiyi çarptığı hücreye iletirler ve hassas biyolojik dokularla temas ettiklerinde önemli hasarlara neden olabilirler. Nötronlar, atomlarla oldukça nadir etkileşime girer, ancak etkileştiğinde de etkileri büyük olabilir. Bu fiziksel sebeplerden dolayı, farklı tipteki radyasyonlara, fiziksel olarak depolanan enerji ile radyasyonun neden olacağı hasarın biyolojik olarak anlamlı hale getirilmesini sağlayan ağırlık faktörleri verilmiştir.

Biyolojik hasarı ölçmek için kullanılan birim Sievert (Sv), gray ile ifade edilen depolanan enerji miktarı ile ilgili ağırlık faktörünün çarpımına eşittir. Yüksek ağırlık faktörlerinde tahmin edilen hasarlar da büyük olur. Alfa parçacıkları için bu faktör 20, nötron için enerjisine bağlı olarak 5-20 aralığında, gama ışını, beta ışını ve X-ışını için ise 1'dir.

Hasar tahminindeki hesaplamalarda, ışınlamaya maruz kalan vücudun tamamı veya hasar gören parçası ve dokusu dikkate alınmalıdır. Akciğer, karaciğer ve kemikler gibi farklı dokular, radyasyona karşı farklı duyarlılık gösterirler. Mesela, uranyum için biyolojik olarak anlamlı ışınlama alfa parçacıklarıdır. Bu parçacıklar, insan derisinden geçemezler ve bu yüzden genellikle derinin uranyum tozlarına maruz kalmasının bir zararı yoktur. Fakat aynı tozlar bulunduğu zaman hassas akciğer dokularına ulaşmakta ve hücrelere oldukça hasar verebilmektedir. Bu durumda, aslında tek doku ışınlamaya maruz kalmıştır ve depolanan

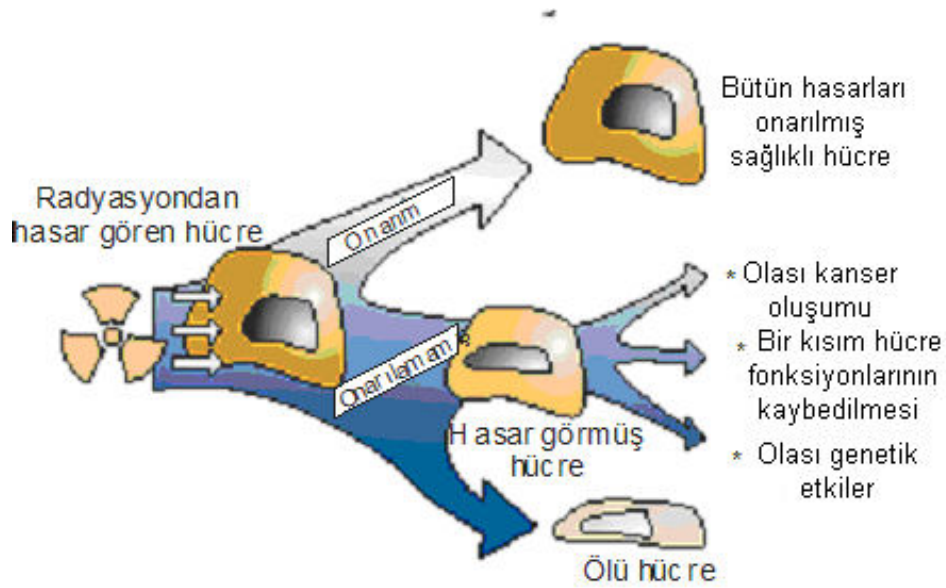
enerji sadece o dokuyla sınırlı kalmıştır. Bu ışınlamayı diğerlerine eşitlemek için araştırmacılar doku-ağırlık faktörlerini geliştirmişlerdir.

Radyasyon ışınlanmasının biyolojik etkileri

Radyasyon, tüm zehirli ajanlar içinde üzerinde en çok çalışılan konulardan biridir. Kansere neden olan kimyasallardan farklı olarak dokunulmamasına, tadılmamasına veya koklanmamasına rağmen kolayca tanımlanabilir ve miktarı ölçülebilir. Madde içerisinden geçen radyasyonun fiziği kolayca anlaşılır ve bu da farklı miktardaki radyasyon ışınlanmasının insan üzerindeki etkilerinin bilimsel olarak incelenmesine olanak tanır.

İyonlaştırıcı radyasyon enerjisi, içinden geçtiği maddenin atomuna aktarılır. Su, vücutta en çok bulunan moleküldür ve oldukça kolay iyonlaşır. Radyasyonla normal olmayan kimyasal reaktivite kazanır. Bu su molekülleri, insanın doku hücrelerindeki deoksiribonükleik asit (DNA) moleküllerinin yakınında bulunursa hücrelerin üretim merkezi olan DNA'lar zarar görebilir. Radyasyonla hasar gören hücrede üç farklı sonuç ortaya çıkabilir (Şekil 6.3):

1. Hücre başarılı bir şekilde kendi kendini onarır.
2. Kendi kendini onaramaz ve ölür.
3. Kendi kendini onaramaz ve ölmez.



Şekil 6.3. Radyasyondan Hasar Gören Hücrede Meydana Gelebilecek Olası Biyolojik Sonuçlar

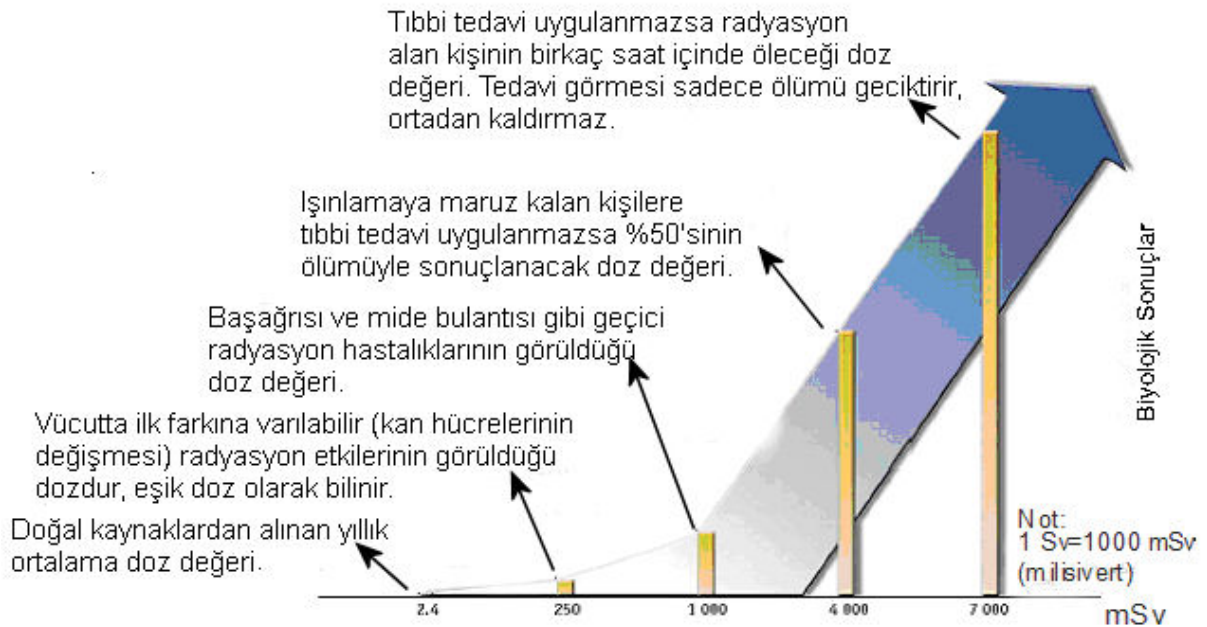
Uzun dönem etkilerin olasılığı üçüncü durum ile ifade edilebilir, hasar hücrenin kanserleşmesine neden olabilir. Ayrıca hasar gören hücreler yumurta ve sperm hücresi gibi üreme hücreleri ise DNA hasarı genetik bozukluklarla sonuçlanabilir. Burada özetlenen iki potansiyel durum, radyasyon sağlığı ile uğraşan bilim insanlarının temel ilgi alanıdır.

İnsanların iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında oluşabilecek etkiler ise şu şekilde sınıflandırılmıştır:

1. *Erken etkiler*; radyasyona maruz kalınır kalınmaz oluşan etkilerdir ve deterministik (belirli) etkiler olarak adlandırılır.
2. *Gecikmiş etkiler*; etkileri yıllar sonra açığa çıkar ve stokastik (olası) etkiler olarak adlandırılır.

Deterministik etkiyle sonuçlanan radyasyon ışınlanmasının eşik doz seviyesi, insanlar için yaklaşık 250 mSv civarındadır. Bu eşik dozun üstünde, doz miktarlarına bağlı olarak farklı biyolojik reaksiyonlar oluşmaktadır. Doz miktarı arttıkça etkilerin şiddeti de artmaktadır (Şekil 6.4). Neyse ki yüksek dozda radyasyon ışınlanması olan kazalar oldukça azdır ve yüksek dozda radyasyon almış kişiler için tıbbi tedavi imkanları oldukça gelişmiştir ve gelişmeye de devam etmektedir.

Stokastik etkilerin kesin olarak oluşması söz konusu değildir, fakat ışınlanma miktarı arttıkça oluşum olasılığı da artmaktadır. Stokastik etkilerin en önemli çeşidi kanserdir (lösemi-kan kanseri). Teorik olarak üreme hücreleri ışınlamaya maruz kaldığında genetik bozukluklar olabilir. Ancak, Hiroşima, Nagasaki ve Çernobil'de meydana gelen olaylar sonrası hayatta kalan insanlar üzerinde yapılan çalışmalarda herhangi bir genetik bozukluk gözlenmemiştir.



Şekil 6.4. Yüksek Dozlarda Radyasyonun Deterministik Etkileri

Yüksek dozlardaki riskler

55 yıl önce Japonya'ya atılan atom bombasından radyasyona maruz kalıp sağ kalan 100.000 insan tıbbi olarak gözlenmiştir. Bu gruptaki insanların yaklaşık %20'sinin ölüm sebebi kanserdir. Bu ölüm oranı, yaklaşık batı toplumlarındaki benzer nitelikteki gruplar için geçerli olan ortalama değerdir. Atom bombasının etkilerine maruz kalmayan Japonlarla bir karşılaştırılma yapıldığında, atom bombası sonucunda hayatta kalan gruptaki kanser ölümlerinin yaklaşık 400'ünde bombanın etkisi sonucunda aldıkları radyasyonun etkisi bulunmaktadır.

Japonya'daki atom bombasının da dahil olduğu yüksek dozlu kazalardan elde edilen bilgiler kullanılarak doz-tepki eğrisi oluşturmak mümkündür. Bu eğri, belirli seviyedeki ışınlar ile kanserden ölüm riski arasında bir ilişki kurmak için kullanılır. Alınan her bir sievert ışınlama dozu için toplam yaşam riski (kansere için) %20'den %25'e yükselir.

Düşük dozlardaki riskler

Radyasyonun biyolojik etkileri hakkında bilinenlerin yanı sıra bilinmeyenler de vardır. Bugüne kadarki istatistikler göreceli olarak yüksek dozları temel almıştır. Yüksek dozdaki radyasyon ışınlamasının kanser riskini ne kadar arttıracığı bilinmemektedir. Ancak, düşük radyasyon dozlarının aynı etkiyi gösterip göstermeyeceği bilinmemektedir.

Yüksek doz gruplarından alınan bilgiler, doz miktarı ile kansere yakalanma riskinin artmaya başladığı doğal seviyenin üstündeki yaklaşık 100 mSv değeri arasında bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Bu seviyenin altındaki ışınlama çalışmalarında istatistiğe ait herhangi bir hasar olayı gözlenmemiştir. 100 mSv altında radyasyon dozu alan gruplarda kanser artışı gerçekleşmemiştir.

Yüksek dozlarda radyasyonun kansere neden olduğu bilinmesine rağmen düşük dozdaki radyasyon ışınlamasının kansere neden olmadığını söylemek mantıklı olarak kabul edilemez. Çünkü, konu ile ilgili biyolojik mekanizmaların anlaşılması tamamlanmamıştır.

Herhangi bir seviyedeki radyasyon dozunun biraz da olsa risk taşıdığı ve riskin de dozla orantılı olduğu kabulleri *doğrusal eşiksiz hipotez* (linear no-threshold hypothesis (LNT)) olarak bilinir. Bu hipotez radyasyondan korunma uygulamaları ve mevzuatları için en önemli temeli oluşturur ve oldukça tutarlı bir modeldir. Düşük dozlarda kanser riskinin olduğuna dair kesin bir bilimsel sonuç olmamasına rağmen, gerekli tedbirler alınmalıdır.

Radyasyondan Korunma Sistemi ve Düzenleyici Esaslar

Radyasyondan korunmanın amacı, yararlı ışınlanmalara izin verirken radyasyonun potansiyel zararlı etkilerine karşı insanların korunmasıdır. Dünyada yaygın olarak uygulanan radyasyondan korunma sistemi, 1928'de Uluslararası Radyoloji Kongresi'nde Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) kuruluşundan bu yana yukarıda bahsedilen ışınlanmış gruplarda yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler ve radyasyonun bitkiler ve hayvanlara (flora ve fauna) olası etkileri de dikkate alarak geliştirilmektedir. Dünya genelinde kabul gören bu sistem üç temel ilkeyi esas alır:

- √ Işınlamaya neden olan uygulamaların gerekçelendirilmesi,
- √ Korunmanın optimizasyonu,
- √ Bireylerin ışınlanmalarının sınırlandırılması (doz sınırları).

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonunun Tavsiyeleri şeklinde yayınlanan dokümanlar tüm ulusal düzenleyici kuruluşlar tarafından takip edilmektedir. ICRP komisyonu yılda bir defa toplanmakta ve yeni gelişmeleri içerecek tavsiyelerde bulunmaktadır. ICRP tarafından 1991 yılında yayımlanan bu tavsiyeler 2007 yılında güncellenmiştir ve iyonlaştırıcı radyasyona karşı kişilerin korunmasının sağlanmasına yönelik tavsiyelerin yanı sıra flora ve faunanın da korunmasına yönelik özel tavsiyeler içermektedir.

ICRP tavsiyeleri, UAEA tarafından yayımlanan Temel Güvenlik Standartları (BSS) gibi uluslararası standartlara ve Avrupa Birliği'nin direktifleri (96/29/EURATOM) gibi bölgesel düzenlemelere de aksettirilmektedir.

Radyasyondan korunmanın temel ilkeleri sıralanırsa;

Uygulamaların Gerekçelendirilmesi

İlke olarak, gerekçelendirilmedikçe uygulamalara izin verilmemelidir. Bu durumlarda karar kriteri sadece bilimsel görüşlere dayandırılmamalı, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve etik faktörlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Bilimsel komite değerlendirme yapabilir ve riskler hakkında bilgi verebilir ama sonuçta demokratik süreçlerin işletilmesiyle risk-sebep uygulamasının gerekçelendirilmesine karar verecek toplumdur. İlkeler, durum bazında temel alınarak uygulanmalıdır. İnsanların ışınlanmasına karar verecek kişiler, uygulamanın gerekçelerini hazırlamak zorundadır.

Genel durumlarda X-ışınlarının tıbbi kullanımlarının gerekçelendirilmesi rutin olarak yapılmaktadır. Yine de tıbbi personelin X-ışını uygulamasından önce her bir ışınlama getirisini dikkate alması gerekir. Ayrıca, kesin teşhisten beklenen faydaya karşı kanser oluşum riskinde oldukça ufak bir artış olabileceği de değerlendirilmelidir.

Optimizasyon

Korunmanın optimizasyonu ilkesi sadece gerekçelendirilmiş uygulamalara uygulanır. Bütün ışınlamaların mümkün olan en düşük doz değerinde (ALARA-as low as reasonably achievable) tutulması gerekir. Optimizasyonun (veya ALARA'nın) amacı, ışınlanmayı sıfıra indirmek değil riskleri, bulunduğu koşullarda kabul edilebilir seviyeye düşürmektir. "Bilim ve toplum yargılarında kabul edilebilir seviye nedir?" sorusu önemlidir.

Radyasyon kaynaklarının boyutunun küçültülmesi, ışınlamaya maruz kalan personelin çalışma zamanının sınırlanması ve insanlar ile radyasyon kaynakları arasındaki mesafenin arttırılması, zırhlama malzemelerinin kullanılması gibi uygulamalarla bu optimizasyon yapılabilir. Optimizasyon işleminde dikkate alınacak önemli unsurlardan biri de herhangi bir işlemde ışınlamaya maruz kalan insanların sayısı ve dozların bölgesel dağılımlarıdır.

Sınırlama

ALARA testi kullanılarak dozların optimize edildiği yukarıda belirtilen ilkeler doğrultusunda bireyler, belirlenen doz sınırları üzerinde ışınlanmaya maruz kalmamalıdır. Toplum üyeleri için ulusal ve uluslararası olarak kabul edilen ışınlama sınır değeri yıllık 1 mSv'dir. Radyasyon çalışanları için uluslararası sınır beş yılda toplam 100 mSv'dir (yılda 50 mSv

değerini aşmayacak şekilde). Bazı ulusal otoriteler çalışanlar için yıllık 20 mSv değerini uygulamaktadır.

Doz sınırları, karayollarındaki hız sınırları gibi korkunç sonuçlar oluşturacak veya oluşturmayacak değerlerle sınırlı değildir. Sadece, toplum ve hükümetlerin tercihinin, bu sınırların üstünde rutin uygulamaların yürütülmesine izin vermemesidir.

Herhangi bir gerekçelendirilmiş uygulama için radyasyondan korunma optimize edilmelidir. Bireylerin ışınlanması mümkün olan en düşük doz değerinde ve uluslararası düzenleyici sınırların altında olmalıdır.

Nükleer endüstride radyasyondan korunma

Radyolojik korunma, nükleer endüstrinin en önemli güvenlik meselesidir. Çünkü uranyum, izotopları ve nükleer fisyon radyasyon yaymakta, ayrıca atıklar oluşmaktadır. Nükleer yakıt çevriminin değişik bölümlerinde farklı radyasyondan korunma meseleleriyle karşılaşmaktadır. Mesela, uranyum madenciliğinde çalışanlar uranyum ve ürünlerinin tozuna maruz kalırlar. Bunlar solunduğunda akciğerler için tehlikeli olabilirler. Bu yüzden, madenin gerekli uygun havalandırma sistemi ve işçilerin solunumuyla ilgili korunma sistemlerinin olması gereklidir. Alfa yayıcı radyonüklitler de nükleer yakıt çevriminin ilk kısmında en önemli potansiyel tehlike kaynaklarıdır.

Genellikle, nükleer güç santrallerinde çalışanların radyasyon ışınlanması, Kobalt-60 gibi gama-yayıcı radyonüklitlerden kaynaklanmaktadır. Çalışanlar, santraldeki sistemlerin (pompa ve reaktör soğutma suyu sistemi gibi) bakımı esnasında bu tehlikeye maruz kalabilirler. Normal işletme esnasında bu sistemler zırhlanmakta ve çalışanlar tehlikeli alanlar dışında tutulmaktadır. Bakım esnasında çalışanların korunması, zırh sistemlerinin kullanılmasıyla ve görev sorumluluklarının uygun olarak seçilmesiyle sağlanmaktadır.

Kullanılmış yakıt işlemleri esnasında gene gama yayıcı radyonüklitler açığa çıkmaktadır. Düşük ve orta seviyeli atıklarla birlikte Kobalt-60 da önemli bir radyasyon kaynağıdır. Yüksek seviyeli atıklar ve kullanılan yakıtlardaki Sezyum-137 ve Stronsiyum-90 gibi fisyon ürünleri önemli radyasyon kaynaklarıdır. Atık yönetimindeki radyasyon ışınlanması, özel tasarım tesisleri, malzemesi ve prosedürlerinin kullanılmasıyla azaltılabilir.

Nükleer yakıt çevriminin bazı bölümlerinde çevreye az miktarda radyoaktivite yayılır. Bu daha çok kullanılan nükleer yakıtın yeniden işlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Çevrenin ve halkın korunması için bunun azaltılması ve ölçülmesi gerekir. Hava ve su akımlarının filtre edilmesi ve saflaştırılması, radyoaktivite samlını azaltır ve nükleer tesislerin etrafındaki dış çevre kontrol ölçümleriyle bu sistemler kontrol edilir.



Çevrenin sürekli izlenmesi nükleer tesisler için bir zorunluluktur.

Kaza Durumunda Müdahale

Hiçbir insan faaliyetinde sıfır risk yoktur. Radyolojik faaliyetlerde de oldukça yüksek seviyede güvenlik olmasına rağmen, çalışanların ve halkın ışınlanacağı kazalar olabilir. Bu kazalar Çernobil'de olduğu gibi uluslararası kapsamlı da

olabilir. Bu yüzden, Uluslararası kamuoyu nükleer kaza acil eylem hazırlıkları ve nükleer kaza yönetimi için ayrıntılı programlar ve yaklaşımlar geliştirmektedir.

Bu yaklaşımlar ve programların amacı kaza ile ilgili olayların sonuçlarını azaltmaktır. Nükleer kaza acil eylem hazırlıkları, acilen uygulanacak plan ve prosedürlerin geliştirilmesini içermektedir. Birçok kaza senaryosu düşünülür ve üzerinde çalışılır. İlgili birimlerle işbirliği yapılarak temel bir organizasyon yapısı geliştirilir ve koşullara göre değişen eylem planları hazırlanır. Bu esnek planlar her zaman hazır tutulur ve tatbikatlar ile sınanır.

Hazırlık programlarında geliştirilen organizasyon yapısı emirlerini, iletişim sistemlerini, çeşitli otorite ve hizmet sorumluluklarının dikkatli tanımlanmasını ve personelin eğitimini kapsar. Dünyadaki bütün nükleer tesislerin yerel ve ulusal otoritelerle bağlantılı planları ve yapıları vardır. Kaza esnasında karar verecek olan kişiler, düzenli olarak teknik uzmanlar ve birbirleri tarafından eğitilirler. Birçok ülkede nükleer santralin çevresindeki halk bilgilendirilir ve eğitim uygulamalarına katılır.

Büyük nükleer tesislerde özellikle güç santrallerinde kazaların ilerlemesini durdurmak için birçok engel sistemleri vardır. Genellikle, saatler ve günlerce süren koruyucu önlemlerin alınması gerekir.

Nükleer ve radyolojik acil durumların ilk basamağında alınması gereken üç tip önlem vardır:

- *Sığınma*: Açığa çıkan radyoaktivite bulutunun etkisini azaltacak basit bir yoldur. Rüzgar veya hava ile radyoaktif bulut dağılana kadar evin içine sığınılır, tüm pencereler ve havalandırma sistemi kapatılır.
- *Tahliye*: Bu önlem açığa çıkması beklenen radyoaktivite miktarının fazla olması durumunda uygulanır. Açıkçası, tahliye radyoaktivite salımı olmadan ve meteorolojik tahminler ile desteklenmesi durumunda çok etkili bir önlemdir.
- *İyot tabletleri*: Radyoaktif olmayan, kararlı formdaki iyot bileşikleridir. Kararlı iyot, fisyon sonucunda üretilen ve nükleer güç tesislerindeki ciddi kaza sonucunda açığa çıkan radyoaktif iyodun etkisini büyük ölçüde azaltır. Vücudumuza giren radyoaktif iyot tiroit bezlerinde birikir ve yüksek dozlarda, özellikle çocuklarda kansere neden olur. Aynı şekilde, radyoaktif iyot süt ve diğer besin maddelerinde birikir ve aynı etkiyi yaratır. İyot tabletlerinin alınmasıyla tiroit bezleri radyoaktif olmayan, kararlı iyotla doyurulmuş olur ve vücuda giren fazla iyot, ter veya idrar yoluyla kolayca atılır.

İyot tabletlerinin dağıtılması sığınma veya tahliye önlemlerine ek olarak yapılmalıdır.

Kaza Sonuçlarının Hafifletilmesi

Acil durumlar kontrol altına alındığı ve halkın korunması sağlandığı zaman uzun süreli iyileştirme çalışmalarına başlanmalıdır. Bu da genellikle çevrede depolanan kirlilik seviyesinin belirlenmesi, bireylerin aldığı dozların tespit edilmesi ve uygun temizleme ve tıbbi takip programlarının geliştirilmesi şeklinde yapılır. Bunların içinde en önemlisi özellikle tarım için kullanılan arazilerin temizlenmesidir.

Çernobil kazası gibi çok ciddi kirlenmelerin olduğu durumlarda toprağın üst tabakasının ve bitki örtüsünün kaldırılarak uzaklaştırılması veya yerel ürünlerin tüketiminin kısıtlanması gibi önlemler alınarak kazadan önceki koşullara geri dönülebilir.

7. NÜKLEER ENERJİNİN EKONOMİSİ

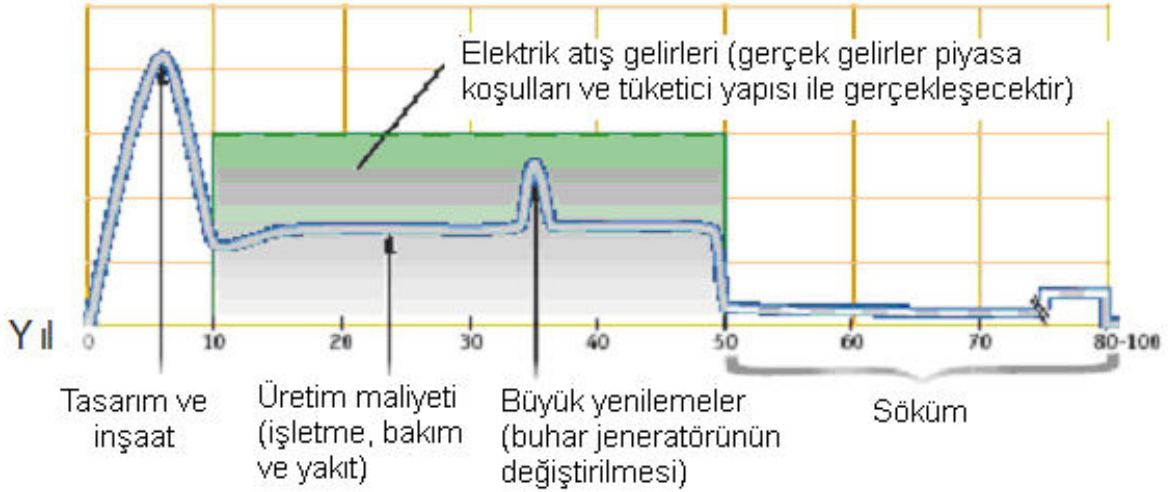
Nükleer enerji, düşük üretim ve yüksek yatırım maliyeti, yakıt fiyatlarının dalgalanmasından etkilenmemesi, uzun işletme ömrü ve düzenleyici maliyetleriyle karakterize edilir. Kurulu nükleer güç tesislerinin, özellikle başlangıç yatırım maliyetlerini amorti ettiği zaman, serbest piyasada bile rekabet edebileceği görülmektedir.

Maliyetler, Riskler ve Sorumluluklar

Nükleer enerji ekonomisine etki eden faktörler

Şekil 7.1'de tipik bir nükleer güç santralının ömrü boyunca gelirleri ve maliyetleri gösterilmektedir. Nükleer enerji ekonomisini karakterize eden faktörler olarak

- Yüksek yatırım maliyetleri,
- Uzun planlama dönemi ve işletme ömrü,
- Düşük yakıt, işletme ve bakım maliyetleri,
- Nükleer enerji üretiminin durdurulmasından sonraki maliyetler (özellikle radyoaktif atıkların idaresi ve depolanması ve nükleer santralin sökülmesi) gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Bir Nükleer Güç Santralının Ömrü Süresindeki Gelir ve Giderler

Nükleer enerji üretim maliyetinin bileşenleri

Elektrik üretim maliyetleri genellikle, yatırım, işletme-bakım ve yakıt maliyetleri olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır.

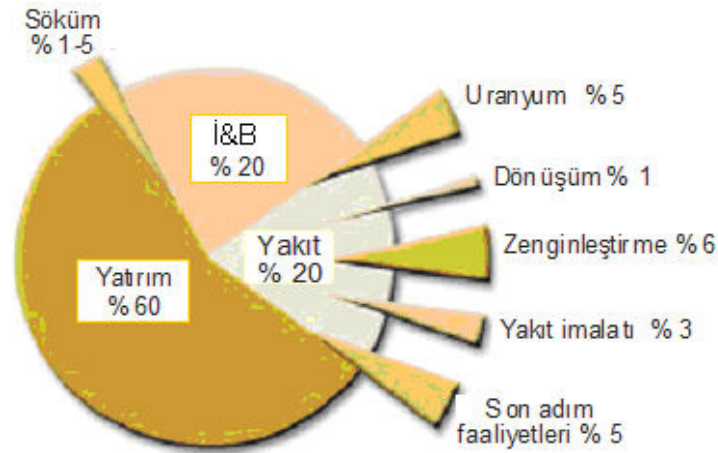
Yatırım maliyetlerine tasarım ve inşaat, büyük yenileme ve söküm maliyetleri dahildir. Söküm maliyeti, tesis kapatıldıktan sonra ulusal politikaya göre bölge tamamen tahliye edilene kadar olan bütün maliyetleri kapsar. Ayrıca, buna söküm esnasındaki radyoaktif ve diğer katı atıkların maliyetleri de dahildir. Bu maliyetlere, inşaat ve işletimi devam ettirecek güvenliği düzenleyici onay maliyetleri de eklenir.

Yatırım maliyetleri finanse edilmelidir. Bu maliyetler faiz komisyonlarına da maruz kalırlar. Yatırım maliyetleri belirli bir süre içinde kendini amorti eder ve borçlar elektrik üretim maliyetlerinin bir parçası olur. Atıkların nihai depolanması ve santralin sökülmesi gibi faaliyetler için işletici tarafından ödenecek ödeme planı hazırlıklarının yapılması gerekir.

İşletme ve bakım (İ&B) maliyetlerine, yatırım ve yakıt maliyetleri dışındaki tüm maliyetler (işletme ve personel, eğitim, emniyet, sağlık ve güvenlik ve işletilen atığın idaresi ve depolanması maliyetleri) dahildir. Bu maliyet, günlük ve periyodik bakım ile denetim maliyetlerini de kapsar. Yatırım maliyetleri inşaat aşamasından sonra sabittir. Ancak, kurulu tesislerde İ&B maliyetlerinin azaltılması mümkündür.

Yakıt maliyetleri yakıt çevrimi ile ilgili satın alma, uranyum dönüştürülmesi ve zenginleştirilmesi, yakıt imalatı, kullanılmış yakıtın iyileştirilmesi ve yeniden işlenmesi, nihai depolanması ve taşınması gibi maliyetleri içerir. Nükleer elektrik üretiminde yakıt maliyetleri, üretim maliyetlerinin yaklaşık %20'si kadar olup fosil yakıtların aksine yakıt fiyatının dalgalanmasından fazla etkilenmez.

Üretim maliyetleri ülkeden ülkeye farklılık göstermekle birlikte Şekil 7.2'de nükleer elektrik üretim maliyetindeki bileşenlerin etkisi gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Nükleer Elektrik Üretim Maliyetinin Bileşenleri

Uzun vadeli mali riskler ve sorumluluklar

Bir nükleer güç santralının inşa edilmesi veya işletmeye devam etmesi kararı, diğer alternatif enerji kaynaklarından daha çok ticari risk taşımaktadır. Sebepleri ise:

- Uzun planlama süreci ve işletme ömrünün, piyasada, gelirleri olumlu veya olumsuz etkileyecek olası uzun vadeli değişimler oluşturması,

- Büyük ölçüde yüksek yatırım maliyeti yüzünden olan yüksek sabit-maliyet unsurunun piyasa koşullarındaki kısa vadeli dalgalanmalara karşı büyük hassasiyet yaratması,
- Güçlü düzenleyici uygulamaların işletme esnekliğini azaltması ve düzenleyici gereksinimlerde maliyetler üzerinde ters etki edebilecek olası değişiklikleri ortaya çıkarması,
- Söküm ve uzun-vadeli nihai atık depolama maliyetlerindeki belirsizlik,
- Nükleer olmayan tesislerde olumsuz ekonomik koşullarda baz maliyetlerinin çoğunun satış veya ticaretinin yapılabilmesine karşı bu durumun nükleer güç santralleri için geçerli olmamasıdır (mesela gaz santralleri gazlarını serbest piyasada satabilirler) .

Söküm ve atık idaresi maliyetlerinin yüksek olmasına karşın bunlar, santralin ömrü süresindeki toplam maliyetlerde oldukça küçük bir pay oluşturur. Tahmin edilen gelecek maliyetlerdeki belirsizlik ile reaktörlerin uzun ömürlü hizmet vermesi ve de değiştirilmiş ve güçlendirilmiş düzenleyici gereksinimlere ihtiyaç duyulması mümkündür. Bu yüzden belirsizlikler için olan harcamalar, söküm maliyetlerini kapsayan ödeneklerin bir kısmını oluşturur.

Bu maliyetler, tesisin ömrü boyunca proje gelirinden sağlanırsa, tesisin erken kapanması veya tesisin projede belirlenen seviyenin altındaki gelirlerde üretim yapması gibi riskler ortaya çıkar. Uygulamada, bu kaynaklar gerçekte düşünülen zamandan daha kısa sürede toplanır. Geliştirilen teknolojilerde maliyetlerin öngörülenden daha da aşağı çekilmesi söz konusudur.

Rekabet Hususu

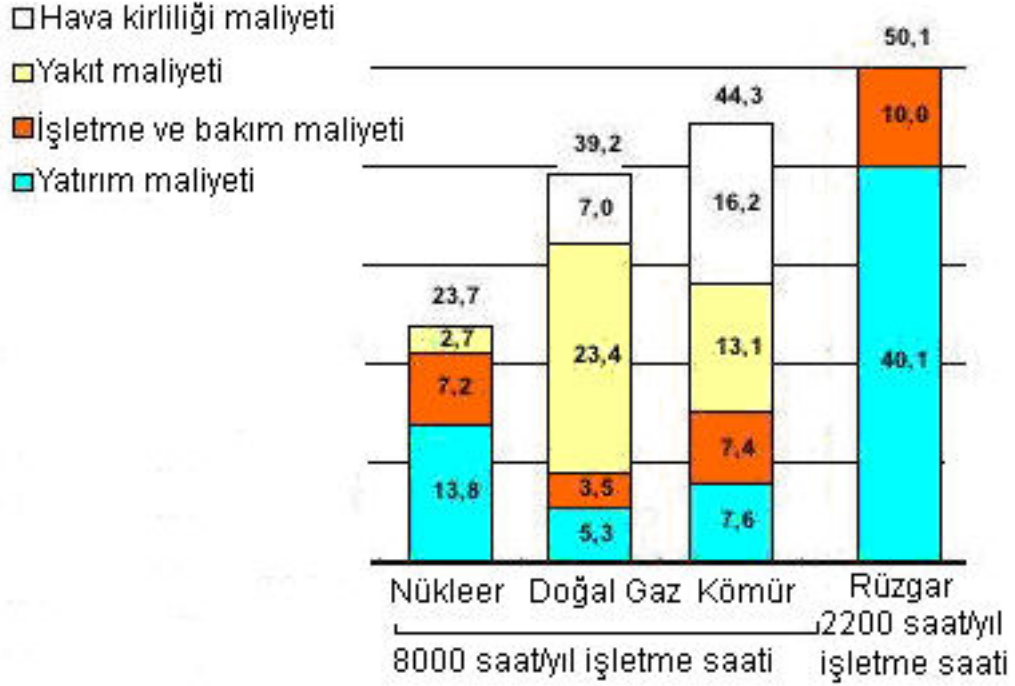
Karşılaştırmalı elektrik üretim maliyeti

Şekil 7.3'te nükleer ve bazı fosil yakıtlardan üretilen elektriğin üretim maliyetleri karşılaştırılmaktadır.

Doğal gaz santralleri nükleer enerji santralleriyle karşılaştırıldığında düşük yatırım ve yüksek yakıt maliyeti özelliği göstermektedir. Kömür santralleri ise orta yatırım ve yakıt maliyetiyle karakterize edilir. Fosil yakıtlı santrallerin üretim maliyetleri yakıt fiyatlarındaki değişimlere karşı oldukça duyarlıdır. Yenilenebilir kaynaklı santraller (rüzgar ve hidroelektrik gibi) yüksek yatırım maliyeti ve birim güç başına düşük üretim fiyatı açısından nükleer enerji ile benzer özellik gösterir.

Kurulu santraller

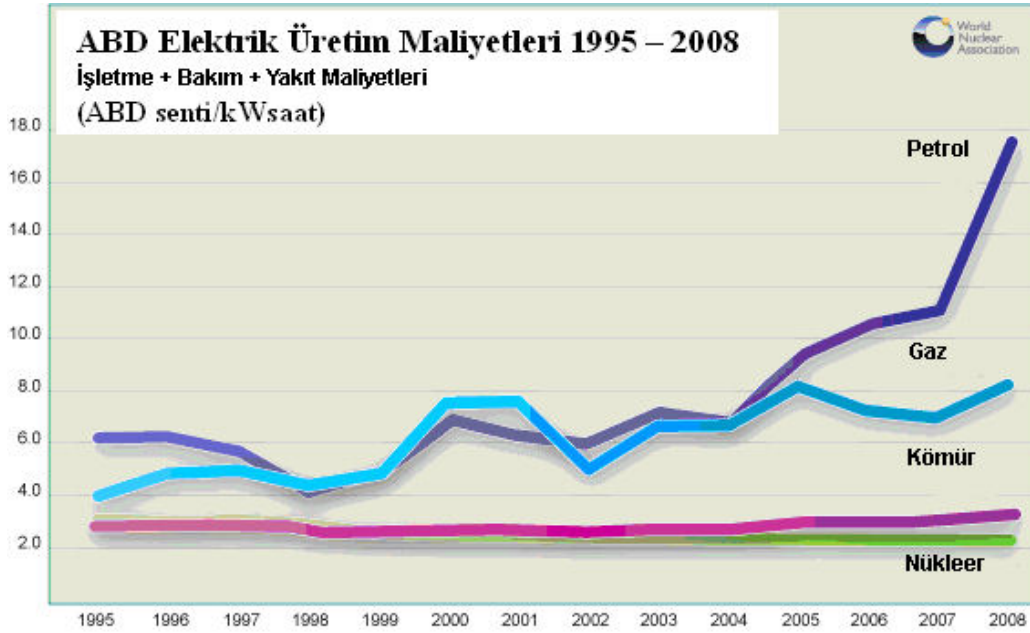
Düşük nükleer yakıt maliyeti, verimliliğin artırılmasındaki son gelişmeler ve birçok durumda ilk yatırım maliyetlerinin kendini amorti etmesi kurulu nükleer güç santrallerinin dünya çapında rekabetçi olduğunu kanıtlamıştır. 2005 yılında yapılan bir çalışmada, bazı OECD ülkeleri için %5 iskontolu nükleer, kömür ve gaz fiyatları Tablo 7.1 de gösterilmiştir. Nükleer Enerji fiyatının en yüksek olduğu yer Japonya'dır. 10 ülkenin 7'sinde nükleer kömürden ucuz, bütün ülkeler için ise gazdan daha ucuzdur. ABD için 1995 – 2008 yılları arasındaki işletme, bakım ve yakıt maliyetlerinin toplam değişimi Şekil 7.4 de görülmektedir.



Şekil 7.3. Nükleer ve Bazı Fosil Yakıtların Üretim Maliyetlerinin Avro Olarak Karşılaştırması (Mart 2003)

Tablo 7.1. Bazı OECD Ülkeleri için %5 İskonto ile Hesaplanan 2010 Yılı Elektrik Üretim Maliyetleri (OECD/IEA NEA 2005) (2003 ABD Senti/Kwsaat)

	Nükleer	Kömür	Gaz
Finlandiya	2.76	3.64	-
Fransa	2.54	3.33	3.92
Almanya	2.86	3.52	4.90
İsviçre	2.88	-	4.36
Hollanda	3.58	-	6.04
Çek Cumhuriyeti	2.30	2.94	4.97
Slovakya	3.13	4.78	5.59
Romanya	3.06	4.55	-
Japonya	4.80	4.95	5.21
Kore	2.34	2.16	4.65
ABD	3.01	2.71	4.67
Kanada	2.60	3.11	4.00



Şekil 7.4. ABD Elektrik Üretim Maliyetleri Karşılaştırması

Kurulu santraller, tesislerin sürekli kullanılması, özellikle ömrünün uzatılması ve kapasitenin artırılması maliyetlerinin yeni bir santral kurulmasından daha düşük olması özellikleriyle avantajlıdır.

Serbest piyasada nükleer enerji

OECD/NEA 2000 yılında yayınlanan *Rekabetçi Elektrik Piyasasında Nükleer Güç* çalışmasında Finlandiya, Almanya, Hollanda, İspanya, İsveç, ABD ve İngiltere'deki nükleer güç santrallerinin serbest piyasada rekabet edebildiği gösterilmektedir.

Genelde, piyasa fiyatlarının serbest kalmasına karşılık, işletme verimliliği ve kazancında düzelmeler olmaktadır.

Yeni santraller

1998'deki OECD-NEA'nın *Elektrik Üretiminde Proje Maliyetleri* çalışmasında çeşitli yakıt tipleri için elektrik fiyatları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, inşa edilen yeni santrallerin cazibesinin ülkeye özgü faktörlere (iskonto oranları) bağlı olduğunu göstermiştir. Mesela, çalışmalara göre 12 ülkeden 5'inde nükleer enerji yılda %5 iskonto oranında en ucuzken diğerlerinde yılda %10 iskonto oranında en ucuzdur.

Yeni nükleer güç santralleri için esas faktör büyük yatırım maliyetleridir. Rekabetçi koşullarda yeni santrallerin inşasını ticari olarak daha cazip hale getirmek için yatırım maliyetleri azaltılmalıdır. Maliyet etkinliği daha çok olan tasarımlar, geliştirilmiş inşaat metotları, standartlaştırma, seri inşaatlar ve çoklu ünite inşaatı nükleer güç santrallerinin yatırım maliyetini azaltma yöntemleridir. Mesela, 1990'lı yıllarda Japonya'da standartlaştırılmış gelişmiş tasarım tekniğiyle tek bir alana iki inşaatın kopyalanması tekniği kullanılarak daha önce 7-10 yılda bitirilen reaktör inşası altı yıldan daha az zamanda bitirilmiştir. Kashiwazaki-Kariwa'daki iki ileri kaynar sulu reaktörün (Advanced Boiling Water Reactor, ABWR) inşası 62 ve 65 ayda tamamlanmıştır (Şekil 7.5).

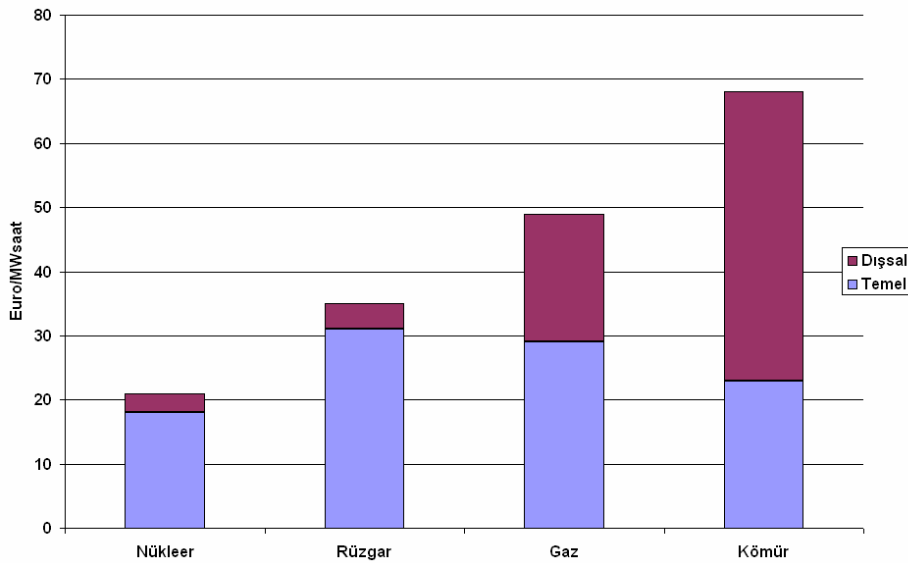
Buna rağmen rekabetçi piyasada mali taahhüt ve riskin yüksek seviyede olması, zaman ve maliyet tasarrufu sağlasa bile özel sektörün yalnız başına yeni nükleer santral yatırımına girmesini zorlaştırmaktadır. Yenilikçi esaslara göre nükleer enerjinin işletilmesi, devlet ve özel sektör işbirliğiyle devam etmektedir. Şu anki sorun bu ilişkinin serbest piyasa koşullarında var olup olamayacağıdır.



Şekil 7.5. Japonya'daki Kashiwazaki-Kariwa Nükleer Güç Santrali

Dışsal maliyetler

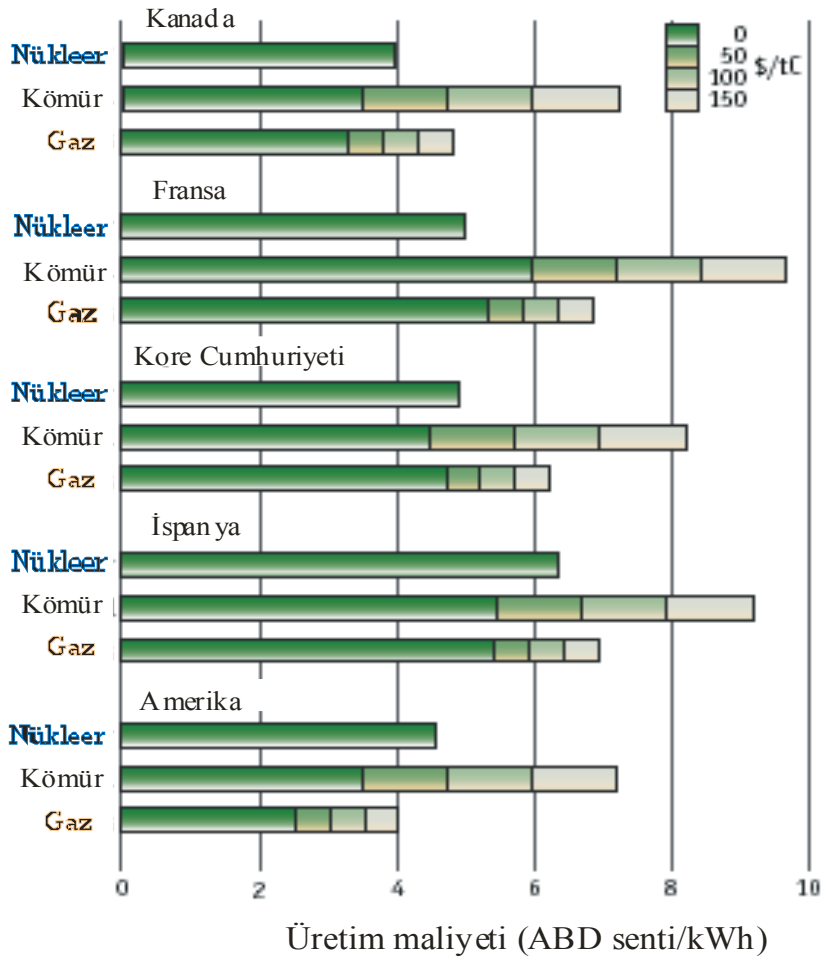
Nükleer enerji bazı dışsal maliyetlere de sahiptir. Serbest piyasada, satılan elektrik fiyatının da dahil olduğu nükleer elektrik üretim maliyetlerinin bir kısmına radyoaktif atık idaresi ve depolama maliyetleri dahildir. Şekil 7.6 da Fransa'da yakıt çeşitlerine göre elektrik üretiminin dışsal maliyetleriyle ilgili çalışmanın sonuçları verilmektedir. Bu maliyetlere sadece atık depolama maliyetleri değil aynı zaman da halkın sağlığına etkileri içeren maliyetler dahildir.



Şekil 7.6. Elektrik Üretiminde Fransa için Temel ve Dışsal Maliyetler (2003)

Fosil yakıtlı elektrik üretiminin dışsal maliyetleri, iç maliyetlere dahil edilirse nükleer gücün ekonomik olarak rekabet edebilme yeteneği değişebilir. Mesela, karbon emisyonu dışsal maliyeti karbon vergisinin konmasıyla iç maliyete dahil edilirse üretim maliyetlerine etkisi önemli olabilmektedir (Şekil 7.7).

Nükleer enerji kapital maliyetlerinde basamaklı azaltma yapılamaz, fosil yakıtların maliyetlerinde ise önemli ve sürekli artış olmaz veya fosil yakıtların dışsal maliyetlerinden bazılarını iç maliyetlere katacak politik kararlar alınmazsa, yeni nükleer güç santrallerinde özel sektör yatırımları eksik kalır. Yeni nükleer güç santrallerinin kurulması kararında, kamuoyu görüşü faktörünün daha etkili olması muhtemeldir.



Şekil 7.7. Çeşitli Ülkelerdeki Üretim Maliyetine Karbon Vergisinin Etkisi (İskonto Oranı %10). (Kaynak: Nuclear Energy and Kyoto Protocol, NEA/OECD, 2002)

8. ULUSLARARASI NÜKLEER DÜZENLEMELER VE NÜKLEER SİLAHLARIN YAYILMASININ ÖNLENMESİ

Nükleer enerjinin neredeyse tüm kullanım biçimleri, uluslararası anlaşmalar ya da diğer dokümanlarda sıkça yansıtılan ve uluslararası alanda kabul görmüş prensiplere dayalı ulusal yasalar çerçevesinde düzenlenmektedir.

Nükleer silahların yayılmasının önlenmesi ile ilgili anlaşma ve dokümanlar, kamuoyunun bu konudaki endişesine yanıt veren düzenlemeler bakımından özel bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, 1968 Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Antlaşması uluslararası nükleer silahların yayılmasının önlenmesine temel bir yasal dayanak oluşturmaktadır.

Uluslararası Nükleer Düzenlemeler

Nükleer enerjinin kullanımında düzenleme, kamuoyu güveni açısından daima gerekli olmuştur. Bu güvenin sağlanması için halkın sağlık, güvenlik ve emniyeti ile doğal çevrenin korunmasını hedefleyen kapsamlı ve etkin yasal bir çerçeve gereklidir. Kamuoyu güveni ayrıca ilgili kuruluşlar olan düzenleyici ve düzenlemeye tabi kuruluşlara güveni de gerektirir. Bu da, diğer unsurlar yanında, şeffaflık ve sağlıklı bir iletişimi gerekli kılmaktadır.

Etkin bir yasal çerçeve, sağlam gereklerle birlikte, bu gereklere uyumun sağlanmasına yönelik alınacak yürütme önlemlerine bağlıdır. Bu çerçevenin, aynı zamanda, teknoloji ve kamuoyu ilgisindeki değişime ayak uydurabilmesi için yeterince esnek olması gereklidir. Son olarak, nükleer enerjinin kullanımından kaynaklanabilecek kazaların sonuçlarının ulusal hudutlarla sınırlanamamasından dolayı, bu çerçevenin uluslararası bir nitelik taşıması gereklidir.

Ulusal gereklilikler

Nükleer enerjiyi kullanan tüm OECD ülkeleri, sivil nükleer faaliyetlerin yürütülmesine yönelik yasamaya ilişkin genel gerekleri ve bu gereklere uygunluğun sağlanmasına yönelik yetkilerle donatılmış bir kamu otoritesini oluşturmuşlardır.

Ülkelerin çoğu, belirli faaliyetlerin bir kamu otoritesince verilen lisansta belirtilen hüküm ve koşullara uygun olarak, sadece yasaya uygun yapılabileceği bir düzenleme biçimi olan zorunlu lisanslama sistemini oluşturmuştur. Birçok durumda uygunluk, lisanslayıcı otorite tarafından yapılan sistematik denetim ve lisans sahibine uygulanan gereklerin rapor edilmesi ile doğrulanır. Lisans şartları ile uyumsuzluk, ihlalin derecesine bağlı olarak, lisansın askıya alınması veya iptali, para cezası veya lisans sahibi ya da başka bir sorumlunun tutuklanması ile sonuçlanabilir.

Hükümetler, geçmiş yıllarda bilim ve teknolojiye hızlı gelişmeler neticesinde yasamaya ilişkin gereklerin, yeni teknolojilerin kullanımı ile mevcut teknolojilerin yeni kullanımına ayak uydurmasını sağlamak durumunda kalmıştır. Bu yapılırken, ulusal yasamanın kapsamı, kamu ve çevrenin yeni gelişmelerden kaynaklanabilecek risklerden korunması amacıyla sürekli genişletilmiştir.

Böylece, günümüz ulusal yasama gerekleri;

- uranyum madenciliği ve işleme;
- nükleer madde ile radyasyonun tıp ve araştırmalarda kullanımı;

- nükleer yakıt da dahil olmak üzere, radyoaktif malzemelerin paketlenmesi ve nakli;
- güç santrallerinden radyasyon tedavi ünitelerine ve tasarımdan sökülmeğe değin tüm aşamalarda, nükleer tesislerin ömrü süresince nükleer güvenlik;
- nükleer tesis ve maddelerin fiziksel korunması (emniyet);
- uluslararası nükleer madde, ekipman ve teknoloji ticareti;
- kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık yönetimi;
- nükleer silahların yayılmasının önlenmesi ve koruma yükümlülükleri;
- radyolojik acil durum hazırlıkları ve olaya müdahale prosedürleri;
- kazalardan kaynaklanan zararların tazmini ve sorumluluklar

dahil olmak üzere çok sayıda faaliyeti kapsamaktadır.

Bu yasama gereklerinin birçoğu uluslararası alanda kabul görmüş prensip ve standartlardan türetilmiştir veya bunları esas almaktadır. Örneğin, bazıları hala çok katı şartlar uygulamasına karşın, endüstrileşmiş ülkelerin çoğu doz limitleri bakımından “Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonunun Tavsiyeleri”ni takip etmektedir. Benzer şekilde, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’nın (IAEA) “*İyonlaştırıcı Radyasyondan Korunma ve Radyoaktif Kaynakların Güvenliği için Temel Güvenlik Standartları*” ile “*Radyoaktif Maddelerin Güvenli Nakli için Düzenlemeleri*”ni takip etmektedirler. Bu uluslararası dokümanlar, ulusal hükümetler ile uzmanların işbirliği ve önerileri ile ortaya çıkmaktadır.

Uluslararası çerçeve

Nükleer alanda, çoğu OECD ülkesinin de taraf olduğu, nükleer silahların yayılmasının önlenmesi, nükleer maddelerin fiziksel korunması, nükleer bir kaza durumunda işbirliği ve karşılıklı yardım, nükleer güvenlik ve radyoaktif atık yönetimi gibi çeşitli uluslararası sözleşmeler bulunmaktadır. Bunlardan en önemli olanları aşağıda verilmektedir:

- Nükleer silah ve teknolojilerinin yayılmasını önlemeyi ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanımının teşvik edilmesini sağlamayı amaçlayan *Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması* (1970 yılından beri yürürlükte).
- Sözleşmeye taraf ülkelere, ülke sınırları dahilinde veya uluslararası taşımacılıkta¹ nükleer maddelerin fiziksel korunmasına dair yükümlülükler getiren *Nükleer Maddelerin Fiziksel Korunması Sözleşmesi* (1987 yılında yürürlüğe girmiştir).
- Sınır ötesi sonuçlar yaratabilecek bir nükleer kaza durumunda IAEA ile komşu ülkelere bildirimde bulunulmasını sağlamaya yönelik bir sistem oluşturan *Nükleer Kazaların Erken Bildirimi Sözleşmesi* (1986 yılında yürürlüğe girmiştir).
- Bir nükleer kaza veya acil radyolojik durumda yardım ve desteğin derhal sağlanmasına yönelik uluslararası bir çerçeve oluşturan *Nükleer Kaza veya Acil Radyolojik Durumlarda Yardım Sözleşmesi* (1987 yılından beri yürürlükte).
- Nükleer güvenlik uygulamaları ve düzenlemelerine uluslararası ölçütler saptanarak işletmedeki nükleer güç santrallerinde yüksek bir güvenlik seviyesinin korunmasını

¹ Bu sözleşmenin revizyonu halen görüşülmektedir. Mevcut konvansiyon halen sadece uluslararası taşımacılıkta nükleer maddelerin fiziksel korunmasını kapsamına karşın bunun, ülke içinde kullanım, depolama veya taşıma ve bu maddelere sabotajı da kapsamı beklenmektedir.

amaçlayan özendirici bir sözleşme² olan *Nükleer Güvenlik Sözleşmesi* (1996 yılında yürürlüğe girmiştir).

- Ulusal önlemler ve uluslararası işbirliğinin geliştirilmesi ile yüksek bir güvenlik seviyesine ulaşmayı ve bunu sürdürmeyi hedefleyen ve özendirici bir sözleşme olan *Kullanılmış Yakıt Yönetimi ile Radyoaktif Atık Yönetim Güvenliği Ortak Sözleşmesi* (2001 yılında yürürlüğe girmiştir).

Bu sözleşmelere ilaveten, Çek Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu ve Slovak Cumhuriyeti ile Ukrayna arasında nükleer maddelerin taşınmasına dair 1998 yılında yapılan işbirliği anlaşmaları örneklerinde olduğu gibi komşu ülkeler arasında önemli sayıda çok taraflı anlaşmalar yürürlüğe girmiştir. Ayrıca, teknik bilgi ve uzman değişimi; deneysel ekipman ve malzeme sağlanması; ortak projelerin yürütülmesi gibi konularda ikili işbirliği anlaşmaları ile güvenlik ve radyolojik korunma konularında benzer anlaşmalar mevcuttur.

Son olarak, kılavuz ve standartların belirlenmesi, uluslararası tartışma ortamı ve karşılıklı yardım sağlamaya yönelik olarak Avrupa Birliği gibi uluslar üstü organlar ile UAEA ve OECD/NEA gibi uluslararası organizasyonlar rutin faaliyetler gerçekleştirmektedir. Avrupa Birliği'nde bu faaliyetler, üyeleri bağlayıcı nitelikte çeşitli Konsey Düzenlemeleri, direktif ve diğer dokümanları kapsamaktadır.

Sorumluluk ve tazminatlar için özel bir rejim

OECD ülkelerinin çoğu, nükleer kazalardan zarar görenlerin tazminat başvurusunda bulunmalarını sağlamak üzere özel sorumluluk ve tazminat yasaları benimsemiştir. Bu özel rejimler, riskli faaliyetlerden kaynaklanan zararlarda sorumluluğu belirleyen, normal yasal prensiplerden ayrılan özel durumlardır.

Bu rejimlere bağlı olarak, bir nükleer tesis³ işleticisi, işlettiği tesiste meydana gelen nükleer bir kaza neticesinde veya bu tesisten kaynaklanan nükleer madde ile ilişkili olarak üçüncü şahısların göreceği nükleer zararlardan, tamamen ve sadece kendisi sorumludur. Bununla birlikte genellikle, sorumluluk ve zararlara ilişkin davacı olunma süresi için bir limit belirlenir. OECD dahilindeki bir nükleer tesis işleticisinin, uğranılan zararların karşılanması bakımından sorumluluğu kapsamındaki mali güvenceyi sağlaması gereklidir. Mali güvencenin banka garantisi, teminatlar, devlet garantisi veya devlet sigortası gibi çeşitli araçlarla elde edilebilmesine karşın, pratikte özel sigorta en yaygın mali güvence şeklidir.

Kapsanan riskler ve yüksek tazminatlar dikkate alındığında tek bir sigorta şirketinin bu riski yalnız başına üstlenmesi mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla her ülkede, özel nükleer sigorta, bir sigorta şirketi grubunun ortak sigorta esasına⁴ dayalı olarak oluşturduğu bir havuzla sağlanır. 1950'lerin ortasında başlayan oluşumlardan günümüze, daha fazla sayıda şirketin katılımı ve artan deneyimlerle birlikte sigorta havuzlarının kapasiteleri birkaç kat artarak daha fazla riski üstlenmeleri olanaklı olmuştur. Ancak, kaynakların birleştirilmesine karşın toplam finans kapasiteleri genellikle nükleer güç santral işleticisinin talep ettiği finansal garanti miktarının altında kalmaktadır. Sonuç olarak, ulusal sigorta havuzları diğer ulusal sigorta havuzları ile işbirliği yaparak sigorta miktarı ve kapsamını dengelemeye çalışmaktadırlar.

² Uygunluğun sağlanmasına yönelik olarak, denetim ve yaptırımlardan ziyade gönüllülük esasına dayalı bir sözleşme oluşturulmuştur.

³ Nükleer tesis tanımı ülkeden ülkeye değişiklik göstermekle birlikte burada genel olarak, nükleer reaktör, nükleer yakıt üretim ve işleme tesisleri, izotop ayrıştırma tesisleri, ışınlanmış nükleer yakıt yeniden işleme tesisi, nükleer yakıt veya radyoaktif ürün ya da atık depolama veya nihai depolama tesislerini kapsamaktadır.

⁴ Ortak sigorta, payları toplamı % 100 olacak şekilde bir sigorta şirketler grubunun belirli riskleri ortaklaşa üstlenmeleri demektir.

Genel olarak, ulusal sponsor havuzu sigortalıya sigortanın tümünü sağlayacağını taahhüt etmekte ve başka bir havuzla yapılan yeniden sigorta⁵ kontratı yoluyla bu miktarın büyük bölümünü sigortalamaktadır.

İşletici sorumluluk miktarlarının ciddi bir nükleer kazanın sonuçlarını karşılamaya yeterli olamayacağı kabul edilmektedir. Dolayısıyla bu mali güvenlik gereklerinin desteklenmesi için, çoğu OECD üye ülkesinin, işleticinin mali teminatının uğranan zararları karşılamaya yeterli olmadığı durumlarda kamu fonları dışında ilave mali yardım veya tazminatın sağlanması için mekanizma veya politikaları mevcuttur. Buna ilişkin önlem ve miktarlar ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir.

Bu ulusal tazminat rejimlerine ilaveten, birçok ülke sınır ötesi etkileri olan bir nükleer kazadan tazminat talep etme işlemindeki karmaşıklığın üstesinden gelmek üzere sorumluluk ve tazminat rejimlerini tesis eden çeşitli uluslararası sözleşmelerden biri ya da birkaçına taraf olmuş veya bunları imzalamış bulunmaktadır. Bu sözleşmeler aşağıdakileri kapsamaktadır.

- Nükleer Enerji Alanında Üçüncü Taraf Sorumluluğuna dair 1960 Paris Sözleşmesi (Paris Sözleşmesi).
- Paris Konvansiyonuna Ek 1963 Brüksel Sözleşmesi (Brüksel Ek Sözleşmesi).
- Nükleer Zararlardaki Sivil Sorumluluğa dair 1963 Viyana Sözleşmesi (Viyana Sözleşmesi).
- Viyana Konvansiyonu ile Paris Konvansiyonunun Uygulanmasına İlişkin 1988 Ortak Protokolü (1988 Ortak Protokolü).
- Nükleer Zararlardaki Sivil Sorumluluğa dair Viyana Sözleşmesinin değiştirilmesine yönelik 1997 Protokolü (Viyana Değişiklik Protokolü)⁶,
- Nükleer Zararların İlave Tazminine dair 1997 Sözleşmesi⁷.

Paris ve Viyana Sözleşmeleri ile Viyana Değişiklik Protokolü aynı temel ilkeleri içermektedir. Bunlar;

- Üçüncü tarafın nükleer zararlarından işleticinin sadece ve tam olarak sorumluluğu,
- İşleticinin bu sorumluluğu mali olarak sağlama zorunluluğu,
- İşleticinin sorumluluk miktarındaki sınırlama ve mağdurların taleplerini gündeme getirmedeki zaman sınırlaması,
- Mağdurların milliyet, konut veya ikamet ayrımına tabi tutulmaması,
- Yargılama yetkisi: belirli bir kazadan kaynaklanan tazminata ilişkin tüm iddiaların tek bir mahkemece belirlenmesidir.

1988 Ortak Protokolü, Paris ile Viyana Sözleşmeleri arasında coğrafi bir bağ işlevi görmektedir. Brüksel Ek Sözleşmesi, Paris Sözleşmesine tabi ilave tazminatlar sağlamaktadır. Destekleyici Tazminat Sözleşmesi, Paris Sözleşmesi, Viyana Sözleşmesi veya bu Sözleşmede tanımlanan bir ülke grubunun yasamasına tabi destekleyici tazminatın sağlanmasına yönelik olarak tasarlanmıştır.

Nükleer işleticilerin bu sözleşmelere tabi yükümlülük miktarları:

⁵ Yeniden sigortalama, sigortacı ya da ortak sigortacının üstlendiği riskin bir bölümünü başka bir sigortacıya esasen kendinin sigortaladığı riskin primlerini ödemeyerek devretmesidir.

⁶ Bu sözleşme 2003 yılında az bir sayıdaki üye tarafından yürürlüğe sokulmuştur.

⁷ Bu sözleşme 1 Ocak 2010 tarihi itibarıyla henüz yürürlüğe girmemiştir.

- Viyana Sözleşmesi minimum 5 Milyon A.B.D. Doları tutarında bir yükümlülük koymaktadır⁸.
- Kontrat taraflarının çoğunun, nükleer işleticilere ulusal yasamaya uygun olarak genellikle 150 Milyon SDR (yaklaşık 220 Milyon Euro) mertebesinde olmak üzere daha yüksek meblağlarda yükümlülük koymalarına karşın Paris Sözleşmesi, maksimum yükümlülük miktarı için 15 Milyon SDR (yaklaşık 22 Milyon Euro) kadar bir yükümlülük getirmektedir.
- Brüksel Ek Sözleşmesi işleticinin mali güvencesi, sorumlu işletici tesisinin bulunduğu ülkece sağlanan kamu fonları ve tüm sözleşme taraflarınca sağlanan kamu fonları yoluyla maksimum 300 Milyon SDR tutarında bir miktarın sağlanmasını gerekli kılmaktadır.
- Viyana Değişiklik Protokolü minimum sorumluluk miktarını 300 Milyon SDR (yaklaşık 450 Milyon Euro) (bunun yarısı tesisin bulunduğu bölgedeki ülkece sağlanabilecektir) olarak belirlemektedir.

Paris ve Brüksel Ek Sözleşmeleri halen revizyon aşamasındadır. Bu revizyonların yürürlüğe girmesi ile Paris Sözleşmesince belirlenen sorumluluk sınırları taraflarca 700 Milyon Euro'dan daha az olarak belirlenemeyecek, birleşik Paris-Brüksel rejimince sağlanması gereken miktar maksimum 1,5 Milyar Euro'ya çıkacaktır.

OECD ülkelerinin taraf olduğu tazminat sözleşmeleri ve uluslararası sorumluluklarının bir özeti Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1, ülkelerin taraf olduğu sözleşmeler çerçevesinde farklılık gösteren, nükleer işleticilerin ulusal yasama tarafından belirlenen sorumluluk miktarlarını göstermektedir. Nükleer tesis işleticileri sorumluluk miktarlarına eşit mali güvenceyi sağlamak durumundadır. Buna karşın, bazı ülkeler çok yüksek, hatta sınırsız sorumluluk miktarları belirlemiştir. Bu gibi durumlarda, işleticilerin sigorta edinebilmesini sağlamak üzere daha düşük mali güvence sınırları konmuş olup bunlar tabloda belirtilmiştir.

Görüldüğü üzere, çoğu ülke ulusal yasalarında özdeş prensipleri benimsemelerine karşın, ABD, Çin, G. Kore, İsviçre, Japonya, Kanada ve Rusya Federasyonu gibi önemli miktarlarda nükleer güç üreten birçok ülke bu konvansiyonlara taraf değildir.

Nükleer yasalar, geçmişte olduğu gibi gelecekte de hem ulusal hem de uluslararası düzeylerde evrimleşmeye devam edecektir. Bu evrimleşme, nükleer alandaki bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel kullanımla birlikte halkın sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve çevrenin korunması sağlanırken, nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanımından azami faydanın sağlanması ihtiyacını da yansıtacaktır.

⁸ Bu miktar 29 Nisan 1963 tarihli altın fiyatı (bir troy ons saf altın 35 A.B.D. Doları) referans alınarak belirlenmiştir.

Tablo 8.1. Uluslararası Yükümlülük, Tazminat Sözleşmeleri ve OECD Üye Ülkelerindeki Miktarlar⁹.

	Paris Sözl.	BSC	Viyana Sözl.	Ortak Protokol	Ulusal yasalarca konan yaklaşık işletici yükümlülük miktarları ¹⁰
A.B.D.					9700 Milyon A.B.D. Doları (mali güvence sınırı 200 Milyon A.B.D. Doları olarak belirlenmiş olmasına karşın)
Almanya	✓	✓		✓	~2,5 Milyar Euro tutarında bir mali güvence belirlenmesine karşın sorumluluk sınırsızdır
Avustralya					Belirli bir yasal düzenleme yoktur
Avusturya					Maksimum ~400 Milyon Euro tutarında bir mali güvence belirlenmesine karşın sorumluluk sınırsızdır
Belçika	✓	✓			300 Milyon Euro
Çek Cum.			✓	✓	
Danimarka	✓	✓		✓	60 Milyon SDR (~90 Milyon Euro)
Finlandiya	✓	✓		✓	175 Milyon SDR (~260 Milyon Euro)
Fransa	✓	✓			91.5 Milyon Euro
G. Kore					300 Milyon SDR (~450 Milyon Euro)
Hollanda	✓	✓		✓	340 Milyon Euro
İngiltere	✓	✓			140 Milyon Sterlin
İspanya	✓	✓			150 Milyon Euro
İsveç	✓	✓		✓	300 Milyon SDR (~450 Milyon Euro)
İsviçre					~1 Milyar Euro tutarında bir mali güvence belirlenmesine karşın sorumluluk sınırsızdır
İzlanda					Belirli bir yasal düzenleme yoktur
İrlanda					Belirli bir yasal düzenleme yoktur
İtalya	✓	✓		✓	4 Milyon Euro
Japonya					10 MW'tan büyük reaktörler için 60 Milyar Japon Yen'i tutarında bir mali güvence belirlenmesine karşın sorumluluk sınırsızdır ¹¹ .
Kanada					75 Milyon Kanada Doları tutarında mali güvence
Lüksembourg					Belirli bir yasal düzenleme yoktur
Macaristan			✓	✓	100 Milyon SDR (~150 Milyon Euro)
Meksika			✓		100 Milyon Meksika Pesetası
Norveç	✓	✓		✓	60 Milyon SDR (~90 Milyon Euro)
Polonya			✓	✓	150 Milyon SDR (~225 Milyon Euro)
Portekiz	✓				Belirli bir yasal düzenleme yoktur
Slovak Cum.			✓	✓	2 Milyar Slovak Kronu
Türkiye	✓				Belirli bir yasal düzenleme yoktur
Yeni Zelanda					Belirli bir yasal düzenleme yoktur
Yunanistan	✓			✓	Belirli bir yasal düzenleme yoktur

⁹ OECD Nükleer Enerji Ajansının resmi olmayan istatistikleri (Ekim 2002).

¹⁰ 1 SDR=1,48 Euro (20 Şubat 2003 tarihinde IMF'nin SDR için belirlediği değer).

¹¹ 10 MW'tan daha küçük reaktörlerin güvence limiti 12 Milyar , diğer reaktörler için ise 2 Milyar Japon Yenidir.

Nükleer Silahsızlanma

Nükleer silahların yüksek tahrip potansiyeli, uluslararası toplumu bunların yayılmasını önlemeye yöneltmiştir. Bununla birlikte, nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanımının bir çok yarar sağladığı da görülmüştür. Nükleer enerji ve nükleer araştırma tesislerinin kullanımına yönelik çalışmalar sırasında nükleer silahlara ilişkin bilgilerin edinilebilmesi, dolayısıyla sivil nükleer gelişmenin sürdürülmesi sırasında nükleer silahların yayılmasının önlenmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle nükleer silahların yayılma riski, nükleer enerji için önemli bir konu olarak kalmaya ve nükleer enerjinin sivil ve askeri kullanımı arasındaki bağın etkin ve kalıcı bir biçimde kesilememesi durumunda kamuoyu için önemli bir kaygı meselesi olmaya devam edecektir. Nükleer silahların edinilmesi sadece özel fisil malzeme değil, aynı zamanda tasarımı, yapımı, yönetimi ve taşınabilmesi için gerekli bilgi ve teknoloji gerektiren karmaşık bir girişimdir.

1946 yılından başlamak üzere uluslararası toplum, nükleer madde ve kritik teknolojilere erişimin önlenmesi, denemelerin engellenmesi ve nükleer silahların naklinde gerekli olan teknolojilere erişimin denetlenmesi amacıyla bu esasların her birini hedeflemiştir. Bu çabalar, nükleer silahların yayılmasının önlenmesine yönelik tüm çalışmalara temel oluşturmayı sürdüren *Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması* (NPT, 1970 yılından beri yürürlükte), *Nükleer Denemelerin Kapsamlı Yasaklanması Antlaşması* (CTBT- Kasım 2009 da 151 ülke yürürlüğe sokmuş, 31 ülke imzalamış ama yürürlüğe sokmamıştır) gibi bir dizi antlaşmayla sonuçlanmıştır.

NPT Antlaşması dünyayı, antlaşmanın yürürlüğe girdiği tarihte nükleer silah sahibi ülkeler (A.B.D., Çin, Fransa, Rusya ve İngiltere) ve antlaşmaya taraf ancak nükleer silah sahibi olmayan ülkeler olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Antlaşmayı 189 ülke kabul etmiştir. Bu antlaşma ile nükleer silah sahibi her ülke nükleer silahları transfer etmemeyi, nükleer silah sahibi olmayan ülkelerin bu silahları geliştirmesine yardımcı olmamayı ve nükleer silahsızlanmaya ulaşılmasına yönelik çalışmalarda bulunmayı taahhüt etmektedir. İsrail, Hindistan ve Pakistan bu güne kadar NPT Antlaşmasını imzalamayı reddetmiştir. Kuzey Kore 2003 yılında anlaşmadan çekilmiştir.

Nükleer maddelerin denetimi

UAEA denetimleri ülkelerin sahip oldukları nükleer maddelerin barışçıl amaçlar dışındaki kullanımını gözetleyen ve caydırıcı önemli araçlardır. NPT Antlaşmasına taraf, nükleer silah sahibi olmayan ülkeler sahip oldukları tüm nükleer maddelere ilişkin UAEA güvenlik denetimi uygulamalarını kabul etmek durumundadır. Bu tür kapsamlı güvenlik denetimi anlaşmaları nükleer silah sahibi olmayan ülkelerin nükleer silah yapmama taahhüdünü sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, buna zorunlu kılınmamakla birlikte, nükleer silah sahibi ülkeler sivil nükleer faaliyetlerinin bir kısmı veya tümünün UAEA tarafından doğrulanmasına izin veren güvenlik denetimi anlaşmalarını sonuçlandırmıştır (gönüllü teklif olarak adlandırılmaktadır). UAEA güvenlik denetimleri, tesis veya ilgili nükleer madde tedarikçilerinin talepleri doğrultusunda sadece belirlenen tesislere ilişkin olarak NPT Antlaşmasını imzalamayan ülkelere (İsrail, Hindistan ve Pakistan) de uygulanmaktadır. Olası bildirilmemiş nükleer faaliyetlerin tespit kabiliyetini geliştirmeye dair önlemleri içeren ilave güvenlik denetimleri protokolü 1997 yılında kabul edilmiştir.

Güvenlik denetimlerinin esası nükleer madde, tesis ve faaliyetlere sahip bir ülkenin bunlara dair bildirimde bulunması ve UAEA denetim veya erişimi ile bu bilginin doğrulanmasıdır. Denetimler genellikle önceden bildirilmekle birlikte yılda bir defadan az olmamak üzere

rasgele yapılır. Hatta en hassas tesislerdeki fiziki denetimler sürekli yapılabilir. UAEA denetim faaliyetleri nükleer tesis tasarımlarının bildirildiği gibi olup olmadığının doğrulanması, işletme kayıtlarının incelenmesi, nükleer maddelerin örneklenmesi ve ölçümü, maddelere dair bilgilerin korunmasına yönelik gözetim ekipmanları ile mühürleme araçlarının kullanımı gibi unsurları kapsayabilmektedir. Ek güvence denetim protokolü ülkelerin nükleer faaliyetlerine (nükleer madde içermeyen ve çift kullanım faaliyetlerini kapsayacak kadar) ilişkin daha kapsamlı bilgiler vermesini ve UAEA'nın ilgili tüm yerlere habersiz olarak ya da davete dayanarak erişimine izin vermesini gerektirmektedir.



Şekil 8.1. Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesindeki Unsurlar

UAEA güvence denetimleri, Euratom güvence denetimleri programı ve Brezilya-Arjantin Nükleer Maddelerin Sayım ve Kontrolü gibi diğer bölgesel düzenlemelerle tamamlanmaktadır. Ayrıca, ulusal emniyet tedbirleri nükleer madde ve teknolojilerin çalınması veya barışçıl amaçlara aykırı kullanımının önlenmesi ile birlikte sabotajların engellenmesine yönelik olarak da kullanılmaktadır. Bu emniyet tedbirleri büyük oranda emniyetli tesisler, silahlı muhafızlar, özel kilitler, giriş kodları ve kameralar gibi fiziksel emniyet kontrollerinden oluşmakla birlikte hassas bilgilere erişimin sınırlandırılması ve bireysel adli sicil kayıtları gibi kurumsal denetimleri de kapsamaktadır.

Anahtar teknolojilerin denetimi

Bazı anahtar teknolojiler ve maddeler çok katı uluslararası ihracat denetimlerine tabidir. Nükleer Tedarikçiler Grubu (NSG, “Nuclear Suppliers Group”), anahtar teknolojiler ve maddelerin transferini düzenleyen bir dizi nükleer tedarikçi kılavuzlarına sahiptir. Nükleer Transferler Kılavuzu, ihracat tetikleme listesinde tanımlanan nükleer madde, ekipman, teknoloji, bileşen ve tesislerin transferi ile ilgilidir. NSG üyeleri tetik listesinde tanımlanan kalemleri UAEA ile kapsamlı güvenlik denetimleri anlaşması bulunmayan ve nükleer silah sahibi olmayan ülkelere transfer etmeyeceklerini kabul etmiştir. Ayrıca NSG'nin, yüksek hızlı bilgisayarlar gibi nükleer alanlardaki kullanımla birlikte nükleer dışı kullanım özelliğine sahip teknolojilerin transferine dair kılavuzları da bulunmaktadır.

Benzer şekilde, NPT'ye taraf ülkelerin çoğu, *Füze Teknolojileri Denetim Rejimi* yoluyla nükleer silah fırlatabilecek füze teknolojilerinin denetiminde de işbirliği yapmaktadır. Örneğin, G-8 yasadışı ticaret programı ile UAEA'nın tamamlayıcı faaliyetleri olmak üzere nükleer madde kaçakçılığının engellenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, birçok ülke kuşkulu yasadışı nükleer madde ve teknoloji ticareti konusundaki bilgileri paylaşmakta ve şüpheli ya da gerçek silahlanma faaliyetlerinin olması durumunda yaptırımlar uygulayabilmektedir.

Nükleer silah denemelerinin denetimi

“Nükleer denemelerin kapsamlı yasaklanması” görüşmeleri Ocak 1994'te başlatılmış ve CTBT Eylül 1996'da sonuçlandırılmıştır. Ancak bu antlaşma, nükleer güç tesisi veya araştırma reaktörü bulunan 44 ülkenin tümünün onaylamasına kadar yürürlüğe girmeyecektir. Söz konusu Antlaşma, sivil ve askeri tüm nükleer patlamaları yasaklamaktadır. Antlaşma hükümleri gereğince imza sahipleri, denetimlerinde olan veya yetkili oldukları tüm bölgelerdeki nükleer patlamaları yasaklamayı veya önlemeyi ve de hiçbir nükleer patlamaya herhangi bir şekilde katılarak destek vermeyeceklerini kabul etmiştir. Antlaşma; yerinde denetim, danışma ve açıklığa kavuşturma koşulları ile karşılıklı güvenin tesisi gibi önlemler dahil olmak üzere kapsamlı bir doğrulama rejimini getirmektedir.

Nükleer terörizm

Son gelişmeler, nükleer veya radyoaktif maddelerin terör amaçlı kullanımına dair kaygıları yinelemiştir. “Kirlili bomba“ olarak adlandırılan ve geleneksel patlayıcıların kullanılmasıyla radyoaktif maddelerin saçılma potansiyeli olan bu maddelere ilişkin ulusal ve uluslararası denetimin önemini arttırmaktadır. Buna yönelik olarak örneğin, UAEA radyoaktif kaynakların emniyetini geliştirmeye yönelik uluslararası bir çerçeve oluşturmaya çalışmaktadır.

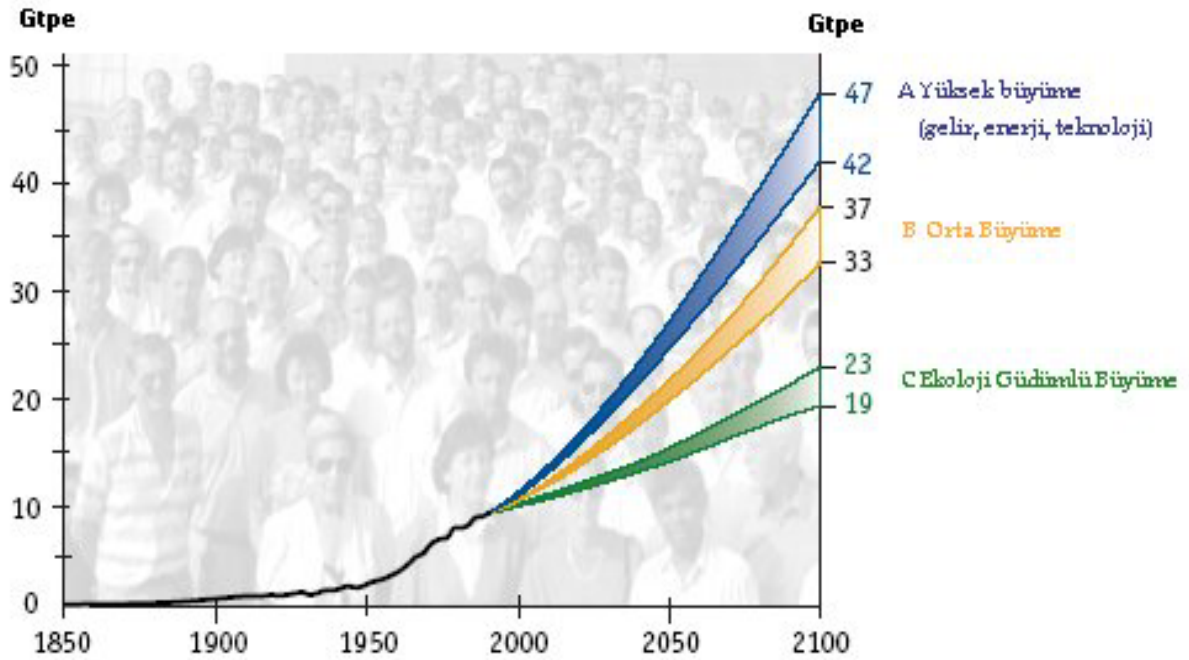
Nükleer madde, denemeler ve anahtar teknolojilere yönelik ulusal ve uluslararası denetimler nükleer silahların yayılmasını yavaşlatmayı sağlayabilmiştir. Ancak, uluslararası yükümlülüklerini ihlal eden ve nükleer silahların yayılmasının önlenmesi rejimine katılmayı reddeden ülkelere kaynaklanan zorluklar şimdiye kadar gösterilen çaba ve dikkatin sürdürülmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

9. NÜKLEER ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA

Enerji kaynaklarının çevresel etkileri ve bu yöndeki kamuoyu duyarlılığının gelişmesine rağmen, dünya enerji talebinin, hızla artması beklenmektedir. Ancak, sınırlı fosil kaynaklar ve bunların bilinen olumsuz yönleri dikkate alındığında, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve dolayısı ile enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınma bakımından daha fazla önem arz edeceği kuşkusuzdur. Bu bağlamda, başta çevre ve sağlık etkileri olmak üzere değişik yönlerden fosil enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, nükleer enerjinin elektrik ve ısı üretimi için kullanımının yanında arz emniyeti bakımından da önemli avantajları bulunmaktadır.

Enerji Talebi

Dünya enerji talebinin ekonomik gelişme ve nüfus artışı doğrultusunda çeşitli faktörlere bağlı olarak artması beklenmektedir (Şekil 9.1). Enerji talebindeki artışın önemli bölümünün artan nüfusun yaşam standardının yükseltilmeye çalışıldığı gelişmekte olan ülkelerde meydana gelmesi öngörülmektedir. Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü ile Dünya Enerji Konseyince 1998 yılında yapılan değerlendirmelerde, 2050 yılı itibariyle dünya enerji talebinin 1.5-3.0 kat arasında artabileceği; elektrik talebinin ise en azından ikiye katlanacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 9.1. 2100 Yılı Enerji Talep Projeksiyonları

İngiliz Kraliyet Cemiyeti ile Kraliyet Mühendislik Akademisi 1999 yılında “Enerji tüketiminin .dünya nüfusunun artması ve yaşam standartlarını yükseltmeye yönelik çalışmalar sonucu, gelecek 50 yılda en azından ikiye katlanacağı ve bunun gelecek 100 yılda 5 katına kadar çıkabileceği”sonucuna varmıştır.

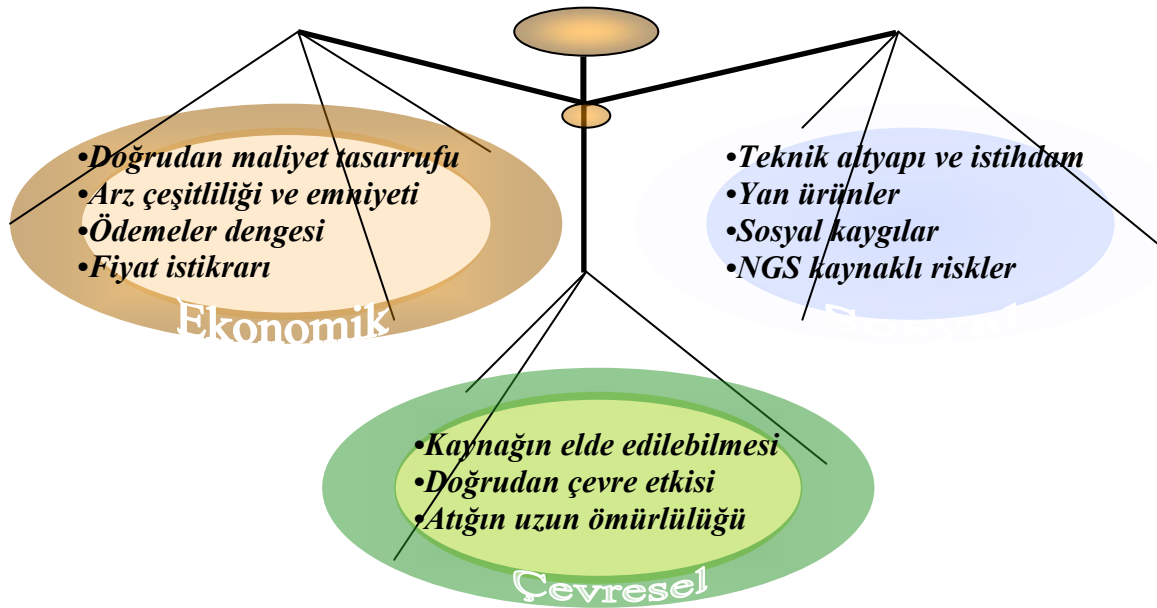
2000 yılı Birleşmiş Milletler Gelişme Programı Dünya Enerji Değerlendirmesinde “Dünyada 2 milyar kişinin elektrikten yoksun olduğu ve temel ihtiyaçlarını karşılamada geleneksel katı yakıt kullanmaya devam ettikleri” belirtilmektedir.

Buradaki zorluklardan biri bu taleplere, gelecek nesiller üzerine aşırı yükler yüklemeksizin toplumun mevcut ihtiyaçlarını karşılama yönünde uygun bir şekilde yanıt verebilmek olacaktır.

Sürdürülebilir Kalkınmada Nükleer Enerji

Enerji, beşeri faaliyetler ve ekonomik gelişme bakımından taşıdığı hayati önem dolayısıyla tüm sürdürülebilir kalkınma¹ politikalarının önemli bir bileşeni durumundadır. Enerji sağlamada kullanılan mevcut teknolojilerin sürdürülebilirlik bakımından yetersiz görülmesi hem fırsat hem de zorluklar yaratmaktadır. Nükleer enerjinin sürdürülebilirlik ölçütü, enerji arzı spektrumundaki yerini önemli derecede belirleyecektir.

Herhangi bir gelişmenin sürdürülebilirliği, ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere genellikle üç boyutta tartışılmaktadır (Şekil 9.2).



Şekil 9.2. Sürdürülebilir Kalkınmanın Nükleer Enerjiye Uygulanabilecek Bileşenleri

¹ Sürdürülebilir kalkınma: günümüz ihtiyaçlarının, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama imkanlarını tehlikeye atmadan karşılanmasını sağlayan kalkınma.

Ekonomik yönler

Doğrudan maliyet tasarrufları

Güvenilir ve düşük maliyetli elektrik sağlama kabiliyeti sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir yönünü oluşturmaktadır. Nükleer enerji, çevresel maliyetlerin özümsemesi, sosyal kabul ve yakıt temini emniyetinin sağlanmasına yönelik faaliyetlerle de desteklenerek uzun vadede diğer başlıca elektrik üretim yöntemleri ile rekabet edebilir. Rekabetçi özelliği kısa dönemde, dalgalanma eğilimi gösteren fosil yakıt fiyatlarına bağlı olarak ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir.

Enerji arzının çeşitliliği ve emniyeti

Petrol ve doğal gaz, Orta Doğu ülkeleri ile Rusya'nın dünya ham petrol rezervlerinin %70'ini, doğal gaz rezervlerinin ise 2/3'ünü kontrol etmeleri ile coğrafi bakımdan sınırlanmış bulunmaktadır. Tedarikçi bölgeleri niteleyen politik istikrarsızlıklarla birlikte, başlıca piyasalara olan uzak mesafeler arzın çeşitli nedenlerle kesintilere açık olmasına yol açabilecektir.

Öte yandan OECD ülkeleri, dünyadaki uranyumunun yaklaşık %55'ini üretmekte ve % 7 lik petrol, % 12 lik doğal gaz ve %40'luk kömür rezervleri ile karşılaştırıldığında bilinen rezervlerin % 40'ına sahip durumdadır. OECD ülkeleri ayrıca, doğal uranyumun nükleer yakıtla dönüştürülmesinde kullanılan başlıca teknolojiler yönünden kendi kendine yeterlidir.

Fosil yakıtların aksine, nükleer yakıt ve yakıt hammaddesi enerji yoğun madde olup kolay depolanabilir ve büyük miktarlar göreceli olarak düşük maliyetle muhafaza edilebilmektedir. Yaklaşık 25 tonluk nükleer yakıt, 1 GWe'lik mevcut bir basınçlı su reaktörünün 1 yıllık yakıtını sağlayabilmektedir. Aynı miktardaki elektrik enerjisini üreten kömür yakıtlı bir santral ise 3 milyon ton yakıtla gereksinim duymaktadır.

Bir ülkenin enerji bakımında dış kaynaklara olan bağımlılığı arttıkça, temindeki herhangi bir aksamının hem maliyet hem de ekonomik sonuçlarının olması kaçınılmazdır. Dış yakıt kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmaya katkısı olacak her enerji kaynağının enerji arzı emniyeti ve dolayısıyla ulusal güvenliği güçlendireceği söylenebilir. Güvenlik tüm OECD ülkelerindeki enerji politikalarının her zaman ana hedefi olmuştur.

Ödemeler dengesi

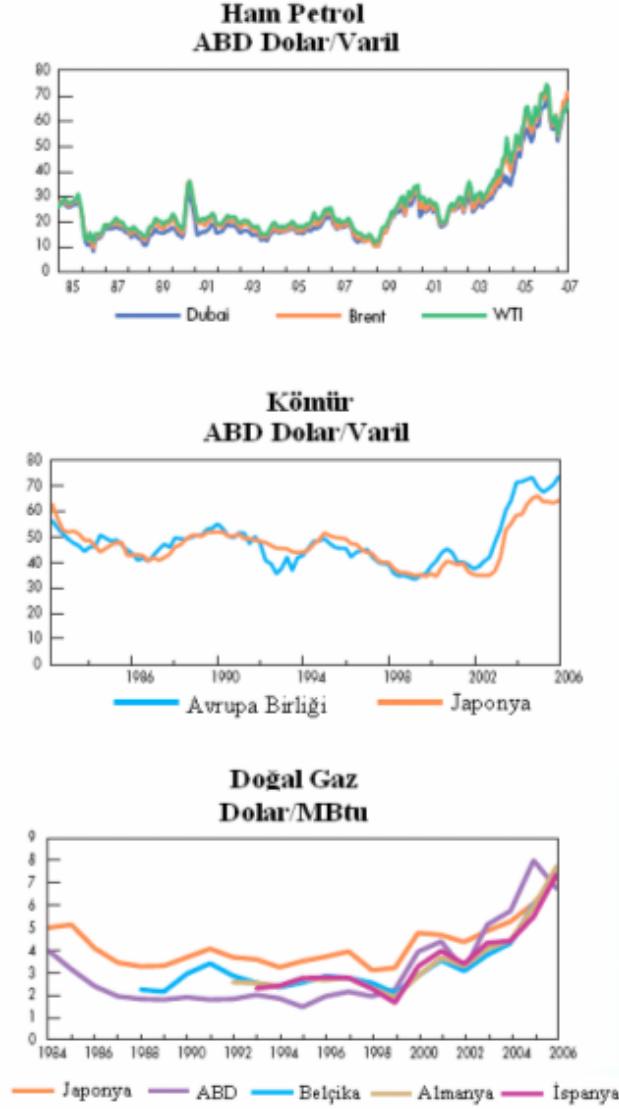
Nükleer enerjinin, maliyet bakımından rekabetçi olduğu kabul edildiğinde ticaret dengesine potansiyel iki olumlu etkisinin olduğu görülebilir. Bunlardan birincisi, nispeten küçük miktarlardaki düşük maliyetli uranyum ithalinin, büyük miktarlarda ve yüksek maliyetli kömür, petrol veya doğal gaz ithalatından daha cazip olmasıdır. Diğer ise, nükleer endüstrinin geliştirilmesi için gerekli yüksek teknoloji altyapısının oluşturulması veya genişletilmesi ile teknoloji ihracatına katkıda bulunabilmesidir.

Fiyat istikrarı

Yakıt fiyatları, fosil yakıtlara dayalı elektrik üretim maliyetinin başlıca bileşenini oluşturmaktadır. Dolayısıyla, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, özellikle rekabetçi piyasalarda, elektrik fiyatındaki değişimlere önemli oranlarda yansımaktadır (Şekil 9.3). Buna

karşın, nükleer elektrik üretiminde, düşük yakıt maliyeti elektrik üretim maliyeti ve fiyatları üzerinde potansiyel bir istikrar etkisi yaratmaktadır.

Genel olarak, alternatif enerji kaynaklarının olası en yaygın biçimde kullanımı, herhangi bir enerji kaynağı üzerindeki talep baskısının azaltılması ve dolayısıyla toplam makroekonomik istikrara potansiyel katkı sağlayacaktır.



Şekil 9.3. Fosil Yakıt Fiyatlarındaki Tarihsel Dalgalanmalar

Çevresel yönler

Herhangi bir maddenin çevresel açıdan sürdürülebilirliği genellikle onun kullanılabilirliği (kaynak rezervlerinin yeterliliği ve çevreye doğrudan etkisi gibi) açısından tartışılmaktadır.

Kaynak kullanılabilirliği

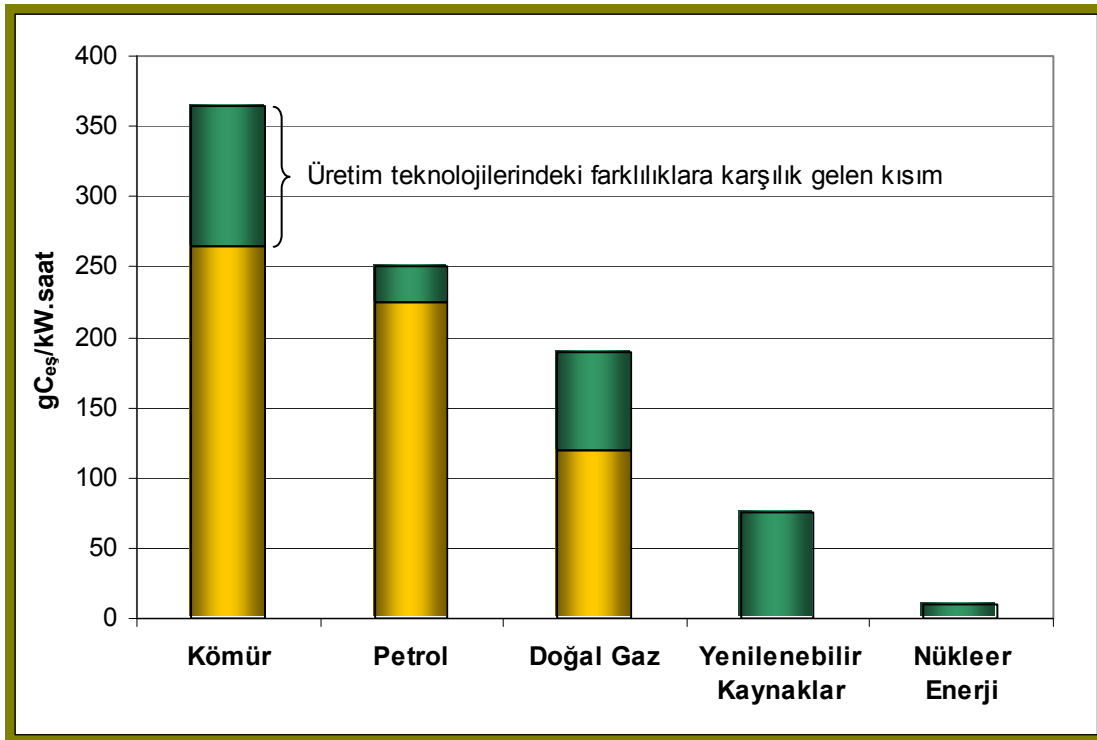
Uranyum, gümüşten daha bol olarak yer kabuğu ve okyanuslarda bulunmaktadır. 2001 yılı başında yapılan tahminler, uranyum kaynaklarının (bilinen ve henüz keşfedilmemiş) toplam olarak 16 milyon ton olduğunu ve bunun da mevcut kullanım oranında 250 yıllık ihtiyacı karşılayabileceğini belirlemiştir. Buna ilaveten, çok düşük saflıkta veya yan ürün olarak elde

edilen geleneksel olmayan uranyum kaynakları da mevcuttur. Bu miktar, fosfat çöktürmelerdekiyle birlikte 22 milyon ton ve deniz suyunda bulunan miktarla da 4 milyar ton uranyuma ulaşmaktadır.

Bununla birlikte, uzun vadede doğal uranyum kaynaklarının yeterliliği reaktör teknolojilerine ve benimsenecek yakıt çevrimi stratejilerine bağlı olacaktır. Kullanılmış yakıtın mevcut hafif sulu reaktör teknolojisiyle yeniden işlenmesi prensip olarak uranyum talebini % 10-15 kadar düşürebilecektir. Hızlı reaktörlerin kullanımı ile yakıt veriminin daha da artacağı, hızlı reaktörlerin tüm mevcut termal reaktörlerin yerini alması ve yeniden işleme yakıt çevrimlerinin kullanılması ile uranyum kaynaklarının 50 kat kadar artabileceği öngörülmektedir. Halen göz önüne alınan diğer ileri tekniklerle toryumun yakıt hammaddesi olarak kullanılması ile nükleer yakıt kaynaklarının daha da artması sağlanabilecektir. Özellikle Hindistan, büyük toryum rezervine sahip bir ülke olarak toryum yakıt çevrimini uygulamaya çalışmaktadır. Esasen, nükleer enerji açısından kaynak sınırlamasının olmadığı düşünülmektedir.

Doğrudan çevresel etki

Nükleer enerji, havayı kirletmeyen ve sera gazları salmayan çok az sayıdaki enerji kaynağından biridir. Cevher madenciliği dahil olmak üzere nükleer yakıt çevriminin tüm aşamalarında ve nükleer santral inşasında, üretilen kilovat saat başına 2,5-5 gram karbon salındığı öngörülmektedir. Bu miktar yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar, hidrolik ve güneş) salınan miktarlara yaklaşık olarak eşit olup, mevcut fosil kaynaklar arasında en temiz olarak düşünülen doğal gaz santrallerindekinden 20-75 kat daha düşüktür (Şekil 9.4).

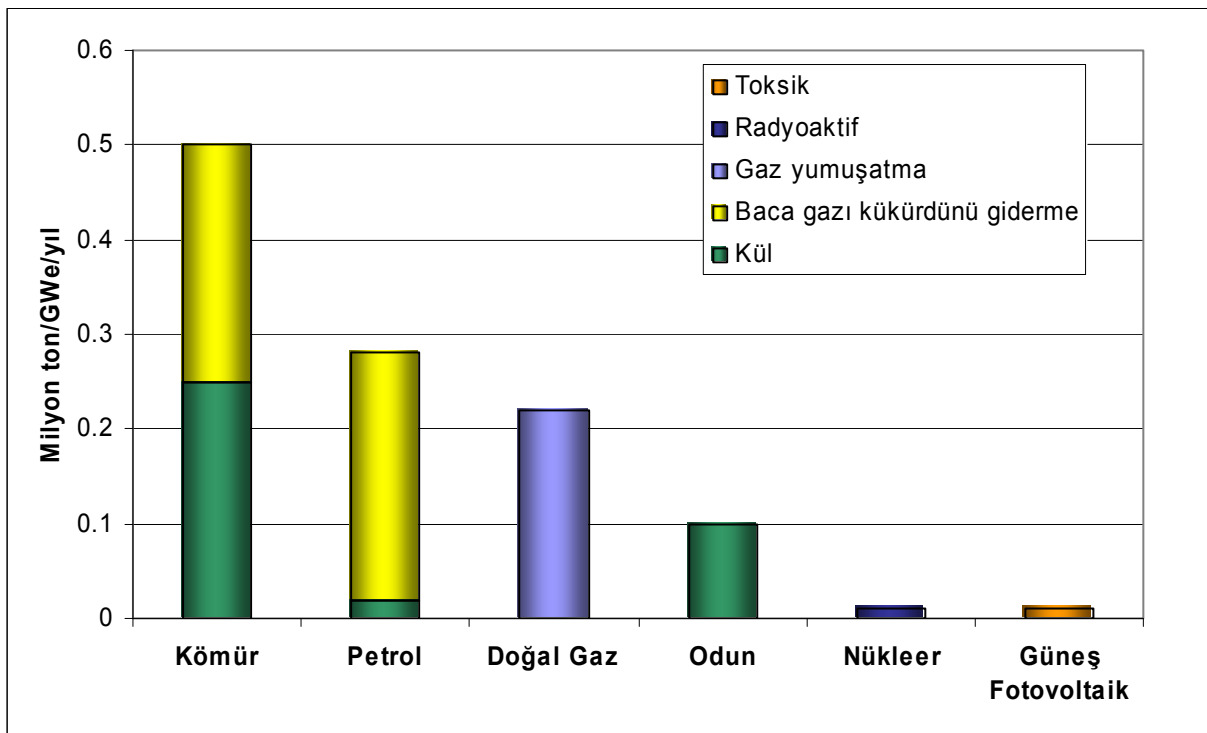


Şekil 9.4. Farklı Kaynaklarla Gerçekleştirilen Elektrik Üretimindeki Sera Gazı Emisyonları

(Kaynak: UAEA)

Dolayısıyla nükleer enerji, çevreye salınan karbonun sınırlandırılması bakımından kullanılabilir mevcut araçların başında gelmektedir. Sadece OECD ülkelerindeki nükleer santraller yılda 1200 milyon ton CO₂ salımına engel olmaktadır. Mevcut nükleer santraller yerine modern fosil yakıtlı santraller kullanılması durumunda dünya enerji sektöründe salınan CO₂ miktarının %8 oranında artacağı hesaplanmaktadır.

Nükleer enerjinin kullanımı ile fosil yakıtlı santrallerden kaynaklanan ve asit yağmurları ve solunum yolu hastalıkları ile ilişkilendirilen sülfür ve azot oksitler gibi yerel hava kirletici gaz ve parçacıkların salınması engellenmektedir. Diğer fosil yakıt kaynakları ile karşılaştırıldığında, birim elektrik üretimi başına ortaya çıkan katı atık miktarı nükleer yakıt kaynakları için çok daha düşüktür. Esasen bu miktar, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarındakine denktir (Şekil 9.5).



Şekil 9.5. Yakıt Kaynaklarından Üretilen Toplam Atık (Kaynak: UAEA)

Ancak, nükleer enerjinin aşırı küresel ısınmanın engellenmesine büyük bir oranda katkıda bulunabilmesi için nükleer üretim kapasitesinde önemli bir artışın gerçekleşmesi gerekmektedir. Nükleer enerjiden halen büyük oranda elektrik üretiminde yararlanılmaktadır. Mevcut tahminlere göre, nükleer güç kapasitesinin 2100 yılı itibariyle 10 katına çıkması durumunda birincil enerji kaynağı kullanımındaki payı mevcut %6'lık orandan ancak %25'e kadar çıkabilecek, böylece bu süre zarfında öngörülen toplam karbon salımının %15'i önlenmiş olacaktır. Ancak, bu kapasite artışının mevcut teknolojilere dayalı olarak gerçekleşmesi durumunda mevcut radyoaktif atık miktarına önemli ilaveler söz konusu olabilecektir.

Nükleer enerji dünya enerji talebinde öngörülen artışı, karbon emisyonuna katkıda bulunmaksızın karşılayabilecek seçeneklerden biri durumundadır. Ancak, bu düzeyde etkin ve kabul edilebilir olması için ileri reaktör teknolojileri ile geri dönüşüm yakıt stratejileri

gerekecektir. Esasen, bu yüzyılın sonu itibariyle, mevcut termal hafif sulu reaktörlerin yerini yakıt geri dönüşümlü hızlı üretken reaktörler gibi ileri teknolojilerin alması gerekecektir.

Uzun ömürlü atıklar

Az miktarda olmasına karşın yüksek seviyeli atık çok uzun süre radyoaktif kalmaktadır. Derin jeolojik depolama konularındaki araştırmalar uzun yıllardır sürdürülmekte olup, uzmanların görüşü yüksek standartlarda bir jeolojik depolama tesisinin yapımına teknik bir engelin bulunmadığı yönündedir. ABD ve Finlandiya’da çeşitli ilerlemeler sağlanmakla birlikte henüz herhangi bir derin jeolojik gömme tesisi işletmeye girmemiştir. Bu nedenle, yüksek seviyeli atıkların bertarafı halen nükleer enerjinin sürdürülebilir gelişmesinin önündeki en önemli husus durumunda bulunmaktadır.

İleri yakıt çevrimleri ile atık işlemeye yönelik sürdürülen araştırma ve geliştirme çalışmaları izolasyon gerektiren atık miktarı ve bunun izole durumda kalması için gereken sürenin azaltılmasına dair umut verici gelişmeler ortaya koymaktadır.

Sosyal yönler

Teknik altyapı ve istihdam

Her teknolojiyi üreten ve geliştiren insandır. Bu bakımdan, 20. yüzyıldaki başlıca bilimsel ve teknolojik gelişmelere dayanan nükleer enerji bazı özel niteliklere sahiptir. Nükleer tesis maliyetinin önemli bölümü, güvenliğin sürdürülmesi ve gelecekteki gelişmelere esas olacak bilim ve teknolojiyi kapsamaktadır. Nükleer endüstri, diğer başlıca enerji ve üretim endüstrilerinin çoğuna nispeten büyük oranda kalifiye personel istihdam etmektedir. Bu, önemli sosyal maliyetler, hassas olmalarına karşın endüstrideki sürekli gelişmenin temeli olarak önemlidir.

Nükleer enerjinin sürdürülebilirliği, bu sosyal maliyetin temelini oluşturan, yitirilmesi durumunda hızla ve ucuza telafi edilemeyecek kadar karmaşık ve pahalı bir altyapıya bağlıdır.

Yan ürünler

Nükleer enerjinin desteklenmesi bakımından teknik ve bilgi altyapısının korunması ve geliştirilmesi topluma çok sayıda yan ürünler sağlamaktadır. Nükleer enerji, diğer ileri teknolojilerde olduğu gibi tarihsel olarak, yeni malzemeler ile teknik ve becerilerin (tıp, üretim, halk sağlığı ve tarım gibi diğer sektörler) yan ürün sağlaması sonucu önemli ekonomik faydalar sağlamaktadır) geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamıştır.

Sosyal kaygılar

Tüm enerji teknolojilerinin sosyal kaygılar, hatta anlaşmazlık yaratma eğilimi bulunmaktadır. Nükleer enerji söz konusu olduğunda bu kaygılar güvenlik, nükleer silahlanma ve atık depolama konularına odaklanmaktadır. Kömür, tıpkı petrol konusunda uluslararası ölçekte olduğu gibi, kendine özgü büyük fikir ayrılıklarının olduğu bir geçmişe sahiptir. Hatta yenilenebilir enerjilerin istismarı yeniden incelemeye tabi tutulmakta ve bunların görsel karışıklık ve büyük ölçekli toprak talebi muhalefet yaratmaktadır. Ayrıca, büyük hidrolik

projeler büyük sel taşkınlarına ilişkin sosyal ve çevresel etkileri dolayısı ile küresel ölçekte yine muhalefete yol açmaktadır.

Nükleer güç santrallerinden kaynaklanan riskler

Diğer başlıca endüstriyel tesislerde olduğu gibi ve alınan tüm önlemlere karşın nükleer santraller personele, yakın yerleşim bölgelerinde yaşayan insanlara ve Çernobil kazasındaki gibi çok ciddi bir kaza durumunda çok uzaktaki insanlara da riskler oluşturmaktadır. Bu riskler genellikle, (1) normal işletme ve (2) kazalardan kaynaklanan radyolojik sonuçlar bakımından analiz edilmektedir. Yüksek kalifiyedeki personel, önemli işletme deneyimi ve sıkı düzenleyici gözetim ve denetimleri dikkate alındığında endüstriyel güvenlik bakış açısından nükleer enerji görece olarak daha güvenlidir. Örneğin, 2000 yılı A.B.D. verileri ülke çapındaki işyeri kaza oranı 200 000 çalışma saati başına ortalama 3,0 olmasına karşın bu oranının nükleer güç santralleri için 0,26 olduğunu göstermektedir.

Normal işletmeden kaynaklanan riskler

Normal işletmeden kaynaklanan radyolojik riskler radyoaktif maddelerin periyodik olarak hava ve suya verilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu deşarjlar, tüm OECD ülkelerinde ilgili düzenleyici kurumların onayları ile sıkı bir biçimde denetlenmektedir. Bu faaliyetler ayrıca, Kuzey-Doğu Atlantik Deniz Çevresinin Korunması Konvansiyonu (OSPAR) ve deniz deşarjlarındaki ilave radyoaktif madde, emisyon ve kayıpların düşürülerek 2020 yılı itibariyle sifıra yakın olmasına yönelik olarak 1998 yılında Portekiz'in Sintra kentinde Bakanlar düzeyindeki en son yapılan anlaşma gibi uluslararası anlaşmalara tabidir.

İlkesel olarak, bu tip deşarjlar insan gıda zincirini (örneğin kabuklu deniz ürünleri yoluyla) etkileyebilir ve böylece bir risk oluşturabilir. Nükleer santrallere yakın ikamet eden veya bol miktarda deniz ürünü tüketenlerin düşük seviyeli deşarjlardan olumsuz etkilenme olasılıkları kestirilebilmektedir. Buna yönelik yapılan öngörüler, teorik olarak risk altında olan kişiler bakımından bu riskin yılda milyonda birden çok daha düşük olduğunu göstermektedir.

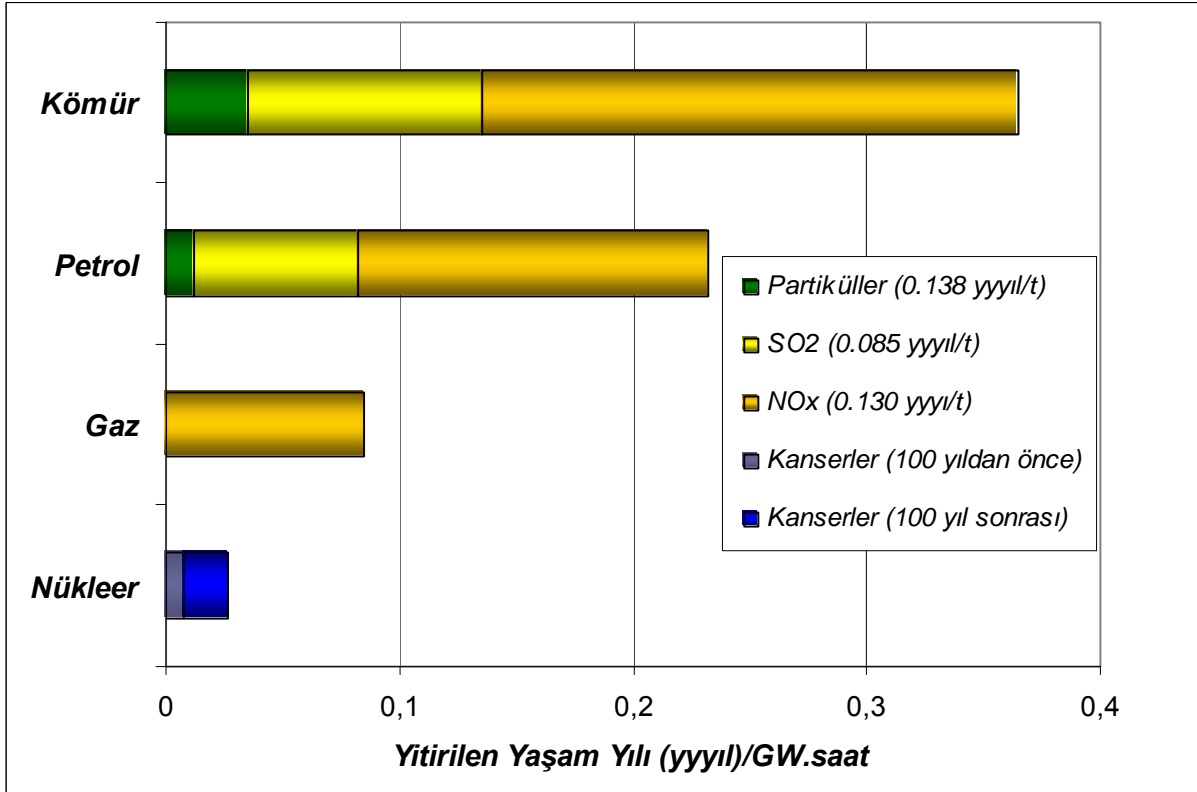
Kazalardan kaynaklanan riskler

Kazalardan kaynaklanabilecek risklerin öngörülmesi, kısmen tüm nükleer kaza tiplerinin çok nadir olması kısmen de sonuçların büyük farklılıklar göstermesi nedeniyle çok daha zordur.

Modern nükleer güç tesislerinde kullanılan koruyucu engellerin bir kaza durumunda arızalanarak çeşitli farazi ölçeklerde radyoaktif salımlara yol açma olasılığını kestirmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar, TMI (Three Mile Island) ve Çernobil kazalarından alınan dersler çerçevesinde güncelleştirilen modern bir reaktörde bu türden herhangi bir kazanın olma olasılığının tipik olarak yılda yüz binde birden daha düşük olduğunu göstermiştir. Gelecekte kullanılması planlanan reaktör tasarımlarında ciddi kazalar çok daha kapsamlı olarak dikkate alınmış olup yapılan hesaplamalar ciddi bir kaza olma olasılığının yılda milyonda birden çok daha düşük bir mertebede olduğunu göstermektedir. Bu rakamların yanında, ciddi bir nükleer kazanın bireysel ölümlere (kazadan onlarca yıl sonra olabilecek), toprakların yerleşim veya tarımsal kullanıma açılmaması ve büyük miktarda elektrik üretim kapasitesinin kaybı gibi ciddi toplumsal sonuçlara yol açabileceği unutulmamalıdır.

Nükleer enerjinin potansiyel riskleri düşünüldüğünde, bunun artan toplumsal enerji talebi çerçevesinde dikkate alınması gerekmektedir. Farklı enerji kaynaklarından kaynaklanan potansiyel riskler göz önüne alındığında ise nükleer enerjinin çevre ve halk sağlığı

bakımından oluşturduğu potansiyel risklerin fosil yakıtlardan kaynaklanan risklerden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 9.6).



Şekil 9.6. Enerji Sistemlerinin Karşılaştırmalı Sağlık Riskleri

Daha geniş bir bakış açısıyla incelendiğinde, uzak bölgelerden yakıt temini gibi herhangi bir kesintiye uğraması durumunda önemli ekonomik sorunlara neden olabilecek risklerin de dikkate alınması gereklidir. Ayrıca, küresel ısınmaya neden olduğuna daha fazla inanılan fosil enerji kaynakları, çeşitli bölgelerdeki kıyı şehirlerinin bazı bölümlerinin yaşanamaz hale gelmesi gibi ciddi sonuçlara neden olabilecektir.

Nükleer tesislerin tümü terörist eylemlerin potansiyel hedefi durumundadır. Ancak, diğer birçok endüstriyel faaliyetlerden farklı olarak nükleer güç santralleri, mutlak güvenliğin hiçbir zaman garanti edilememesine karşın, bu potansiyel tehditlere karşı aktif önlemler almaktadır. Bu tip risklerin değerlendirilmesindeki güçlükler karşın, nükleer güç santralleri kendilerine özgü dayanırlılıkları, iç koruma, güvenlik kuvvetleri ve genellikle uzak olan konumlarından dolayı saldırılar bakımından nispeten cazip olmamaktadır.

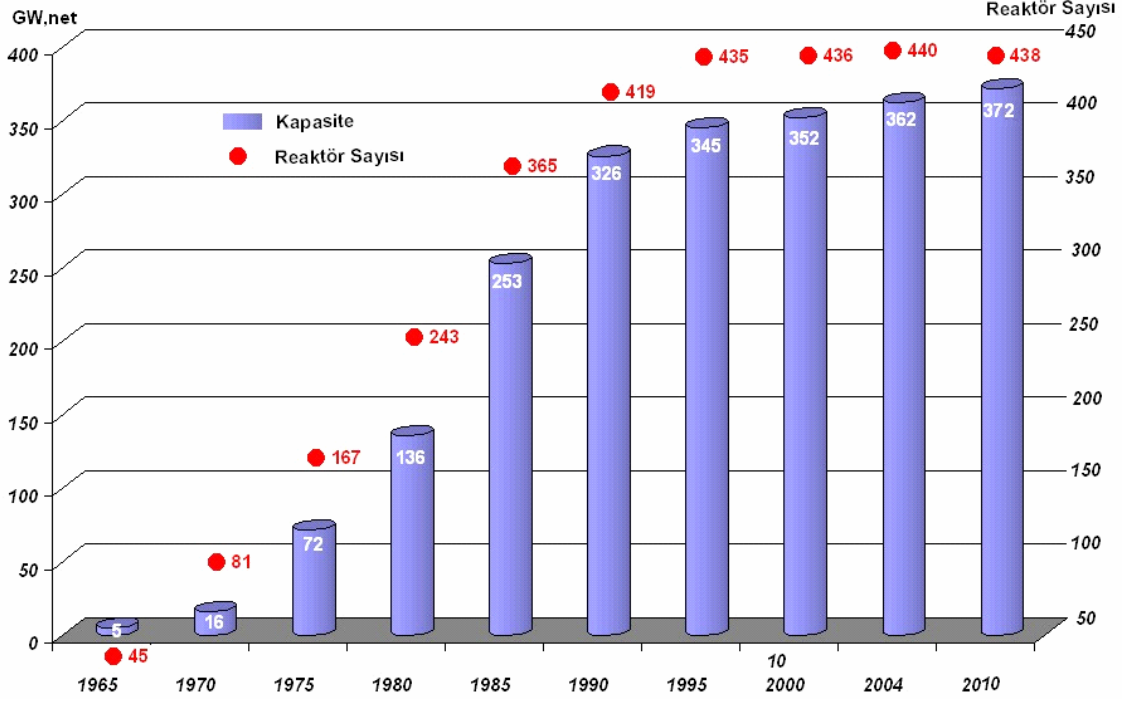
Sonuçta, sadece bireyler belirli risklerin kendilerini ne kadar ilgilendirdiğine karar verebilir. Bu bağlamda karşılaştırmalı risk rakamlarının sadece sınırlı önemi olabilir ancak yine de bunlar meseleleri oranlar biçiminde ifade etmenin bir şekli olarak dünyanın riskli bir yer olduğunu kendimize hatırlatmanın bir aracı durumunda olup, elektrik üretiminde kullanılan mevcut tüm araçların belirli riskler oluşturduğu bir gerçektir.

Sürdürülebilir kalkınmanın sosyal bileşeni sadece kamuoyu duyarlılıklarının dikkate alınması ve kamuoyu güveninin sağlanması ile karşılanabilir. Kamunun, nükleer enerjiden dolayı gündeme gelen sosyal, etik ve politik konular ile alternatif elektrik üretim kaynakları yüzünden ortaya çıkan konuları farklı, ancak tümünden ayrı olmamak üzere bir perspektife oturtması önemli olacaktır.

Genel olarak sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutu da göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 9.2) nükleer enerjinin, sürdürülebilir kalkınmanın hem birçok hedefini karşıladığı hem de dünyanın gelecekteki enerji talebinin önemli bir bölümünü karşılama potansiyeli olduğu görülebilir. Sürdürülebilirliğin üç boyutu arasındaki kapsamlı politik muhasebe ülkeden ülkeye farklı olacaktır ve hem alınan kararları hem de kamu duyarlılığının dikkate alınmış biçimini ve kamuoyu güveninin sağlanmasını etkileyecektir.

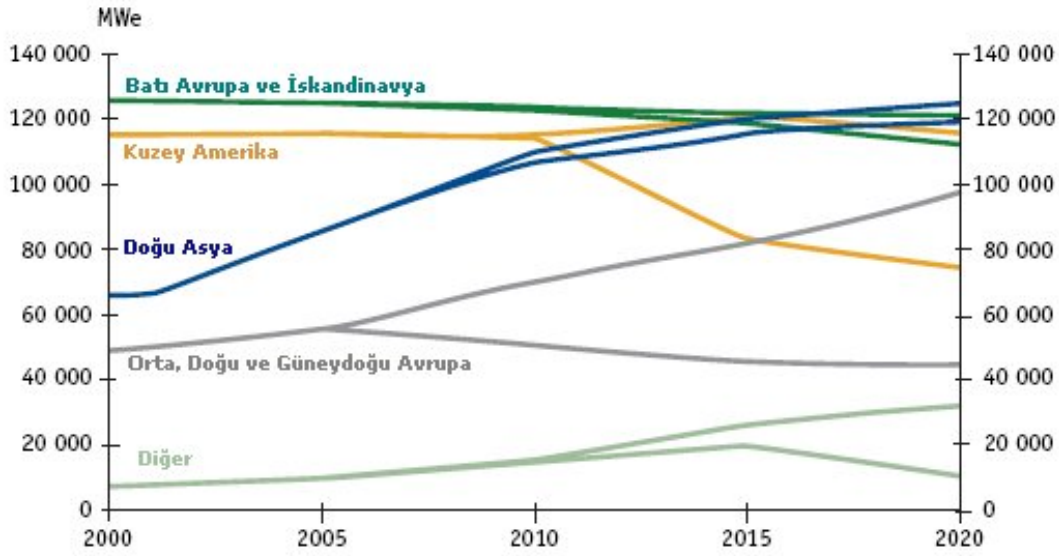
10. GELECEKTE NÜKLEER ENERJİ

Nisan 2010 tarihi itibarıyla dünyada işletmedeki nükleer reaktör sayısı 438 adet, toplam kurulu kapasite 372.006 GWe olup dünya elektrik üretiminin yaklaşık % 14'ünü karşılamaktadır. Halen 57 adet nükleer reaktör inşa halindedir (Şekil 10.1).



Şekil 10.1. Nükleer Gücün Tarihsel Gelişimi

Büyük bölümü 1990 yılından önce kurulmuş olan bu kapasiteye, mevcut tesislerden bir bölümünün ömrünü doldurması neticesinde, bazılarının kapatılması ve birkaç yeni santralin kurulması ile az miktarda yeni ilaveler yapılmıştır. 2020 yılı ve sonrası için yapılan projeksiyonlar, mevcut 372 GWe'lik kurulu kapasiteye karşın 334-446 GWe aralığında kararlı bir tablo ortaya koymaktadır. Bununla birlikte Şekil 10.2, bu projeksiyonlara yansımayan önemli bölgesel değişimleri göstermektedir. Mevcut eğilimler ve mevcut tesislerin ömründeki artışa karşın, en azından Batı Avrupa'da kurulu kapasitenin yavaşça azalacağı beklenmektedir. Buna karşın, Uzak Doğuda yaşanan ve artacağı öngörülen hızlı büyüme sonucu Çin, Güney Kore ve Japonya çok sayıda nükleer santral inşa etmektedir. Doğu Avrupa'da, özellikle Rusya ve Ukrayna'da önemli büyüme yaşanmakla birlikte, diğer ülkelerdeki yaşlı tesislerin planlı olarak hizmetten alınmasına rağmen, kapasite artışları dengelenmektedir. Kuzey Amerika'da ise, mevcut tesislerin kullanım sürelerinin uzatılmasına yönelik lisanslama ve yenileme çalışmaları ile birlikte başta yeni nesil nükleer sistemler olmak üzere nükleer enerjiye ilişkin yeniden önemli değerlendirmeler yapılmaktadır.



Şekil 10.2. 2020 Yılı İçin Yapılan Kurulu Nükleer Elektrik Üretim Kapasitesi (düşük ve yüksek projeksiyonlar)

Gelecekte nükleer enerjinin durumu; enerji talebindeki artış, fosil yakıtlarla ekonomik rekabet, çevresel duyarlılıklar ve kamuoyu tutumu ve algısına ilişkin konular olmak üzere bu dört etmenin birbiriyle ilişkisine bağlıdır. Bu etmenlerin istenen biçimde çözümlenmesine ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, hidrojen üretimi, deniz suyundan tatlı su üretimi ve tıbbi amaçlara yönelik kapsamlı radyoizotop üretimi dahil olmak üzere nükleer enerjinin yeni ve çok sayıda uygulaması gündeme gelebilecektir. Potansiyel uygulamalar ve nükleer enerji sistemlerinin performansının geliştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma sürdürülmektedir.

Nükleer enerjinin geleceğini etkileyen etmenleri kestirmek oldukça zordur. Bu etmenlerin, mevcut eğilimlerde değişiklik olmaksızın sadece ekonomik faktörlerden kaynaklanması durumunda nükleer enerjinin yüksek yatırım ve düşük üretim maliyeti özelliği, serbest ve yüksek rekabetçi piyasada, mevcut santrallerin ömürlerini doldurana dek işletilmesi ve yenilerinin kurulmaması gibi bir duruma yol açabilecektir. Ancak, artan dünya enerji talebi yeni santrallerin kurulmasına yönelik kararların alınmasını gerektirecek ve bu senaryo aşağıda belirtilen etmenlerden olumlu veya olumsuz etkilenmesine bağlı olarak değişebilecektir:

- Nükleer enerjinin sera gazı emisyonunu düşürme hedeflerini sağlamada görülen katkısının ölçüsüne bağlı olarak çevresel duyarlılıklar,
- Yakıt temini güvenliğine ilişkin kaygılar,
- Nükleer silahların yayılmasına dair endişeler,
- Yeni nükleer santrallerin, yenilenebilir enerji kaynakları dahil olmak üzere diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilirliği,
- Nükleer enerji ve önerilen atık depolama planlarına yönelik kamuoyu eğilimleri,
- İleri teknolojilerin çeşitli enerji kaynaklarının göreceli rekabetini değiştirebilme ölçüsü.

Nükleer Enerjinin Alternatif Kullanım Alanları

Nükleer enerjiden bugüne kadar sadece elektrik üretiminde yararlanılmamıştır. Bununla birlikte, diğer kullanım ve uygulama alanlarındaki potansiyeli de nükleer enerjinin geleceğini etkileyecektir.

Hidrojen üretimi

Hidrojen, halen dünyada yıllık 45 milyon tonluk tüketim ile önemli bir endüstriyel madde durumundadır. Başlıca kullanım alanları kimyasal madde, gübre üretimi ve petrol rafinesi olan hidrojene olan talebin, yüksek kalitedeki petrol stoklarının tükenmesi ve daha temiz yakıtlar ön plana çıkana kadar önemli oranda artması beklenmektedir. Hidrojenin temiz yakıt olarak önemli bir potansiyeli bulunmaktadır. Hidrojenin, dünya enerji talebinin en hızlı büyüyen bileşeni olan motorlu taşıtlarda kullanılan karbon yakıtların yerini alması potansiyeline yönelik çok sayıda araştırma yürütülmektedir. Bunun başarıyla kanıtlanması durumunda hidrojene olan talep önemli ölçüde artacaktır. Ancak, mevcut hidrojen üretimi, kendisi de karbon salıcı olan doğal gaz kullanımını içermektedir. “Sürdürülebilirlik“ testini geçmeden önce ve tükenmez olmasına karşın, karbon yakıtlar kullanmaksızın doğrudan sudan hidrojen üretimi için daha ekonomik yöntemlerin bulunması gereklidir.

Nükleer enerji, gerekli yüksek sıcaklıklı ısının veya elektriğin üretimi yoluyla önemli bir “sürdürülebilir” hidrojen üretim kaynağı olabilir. Nükleer Enerji Kullanılarak Hidrojen Üretimi (2001) konulu Nükleer Enerji Ajansı raporunda şu sonuca varılmıştır: “*Nükleer enerjinin kullanımı ile hidrojen üretiminin 21.yy küresel enerji arzına önemli katkıda bulunma potansiyeli mevcuttur. Hidrojenin, suyun ayrıştırılması ve fosil hammaddenin nükleer destekli dönüşümü yoluyla üretimi, teknik olarak yapılabilir ve bu küresel sera gazı emisyonunu azaltacak enerjiyi sağlayabilir.*”

Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler veya sıvı metal soğutmalı reaktörler gibi çeşitli yüksek sıcaklıklı reaktör tipleri doğrudan hidrojen üretimi için gerekli sıcaklıkları (1000°C’ye yakın) sağlayabilecektir. Nükleer enerjinin kullanımı ile hidrojen üretimine yönelik araştırma ve geliştirme faaliyetleri çeşitli ülkelerde ve NEA ile UAEA gibi bazı uluslararası kuruluşlar aracılığıyla yürütülmektedir.

Deniz suyundan tatlı su üretimi

Gerekli kalitede tatlı su yaşam için şarttır. Özellikle başta Afrika, Asya ve Orta Doğu olmak üzere dünyanın birçok bölgesinde, tarım, endüstri, kentsel gelişim ve artan nüfusun talebinin karşılanmasındaki zorluk artmaktadır.

Deniz suyunun arıtılması önemli miktarda ısı gerektirmekte olup halen nükleer güçle işletilen arıtma tesisleri Japonya ve A.B.D.’de kullanılmaktadır. Bu tesisler büyük ölçekli üretimden ziyade tesis bölgesine gerekli tatlı suyu sağlamaktadır. Bununla birlikte, tuzlu suların arıtılmasına gereksinimin artması durumunda, nükleer enerjinin fosil kaynaklara alternatif olarak ısı kaynağı sağlayabileceğini başarıyla göstermektedir. Arjantin, Çin, Hindistan, Fas, Pakistan, Kore Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu bu seçeneğe ilgi göstermektedir.

Proses ısısı ve ısıtma

Nükleer enerjinin mevcut ve gelecekte de artma potansiyeli olan uygulamalarından biri de nükleer reaktörlerin, elektrik üretimi ile birlikte ya da sadece endüstriyel proses ısısı veya bölgesel ısıtma için gerekli sıcak su veya buhar sağlamak amacıyla kullanılmasıdır. Nükleer enerjinin bu amaçlı kullanımında A.B.D., Almanya, Bulgaristan, Çin, İsviçre, Japonya, Kanada, Kazakistan, Macaristan, Rusya Federasyonu, Slovak Cumhuriyeti ve Ukrayna'da önemli deneyim elde edilmiştir. Halen dünyadaki nükleer reaktörlerde üretilen ısıнын yaklaşık %1'i bu uygulamalarda kullanılmakta olup küçük ve orta ölçekli nükleer reaktörlerin özellikle ısı üretimine yönelik olarak geliştirilmesi bunun artmasına katkıda bulunabilecektir. Buna yönelik çalışmalar çeşitli ülkelerde sürdürülmektedir.

İzotop üretimi

Hem radyoaktif hem de kararlı izotoplar başta tıp, endüstri, tarım, gıda ve araştırmalar olmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. 2000 yılında, 60'tan fazla ülkede 70 araştırma ve güç reaktöründe izotop üretilmiştir.

Birçok uygulamada izotoplara alternatifler bulunamamakta, çoğunda da diğer alternatiflere göre izotoplar daha etkin ve ekonomik olmaktadır. Geçmişte genellikle araştırma faaliyetlerinde yan ürün olarak üretilmekle birlikte son yıllarda izotop üretimine yönelik birçok tesis ya işletmeye alınmış, ya inşa halinde ya da kurulması planlanmaktadır. Uygulamalardan bazılarını kısaca değinildiğinde önemi ve uygulama çeşitliliği ortaya çıkacaktır.

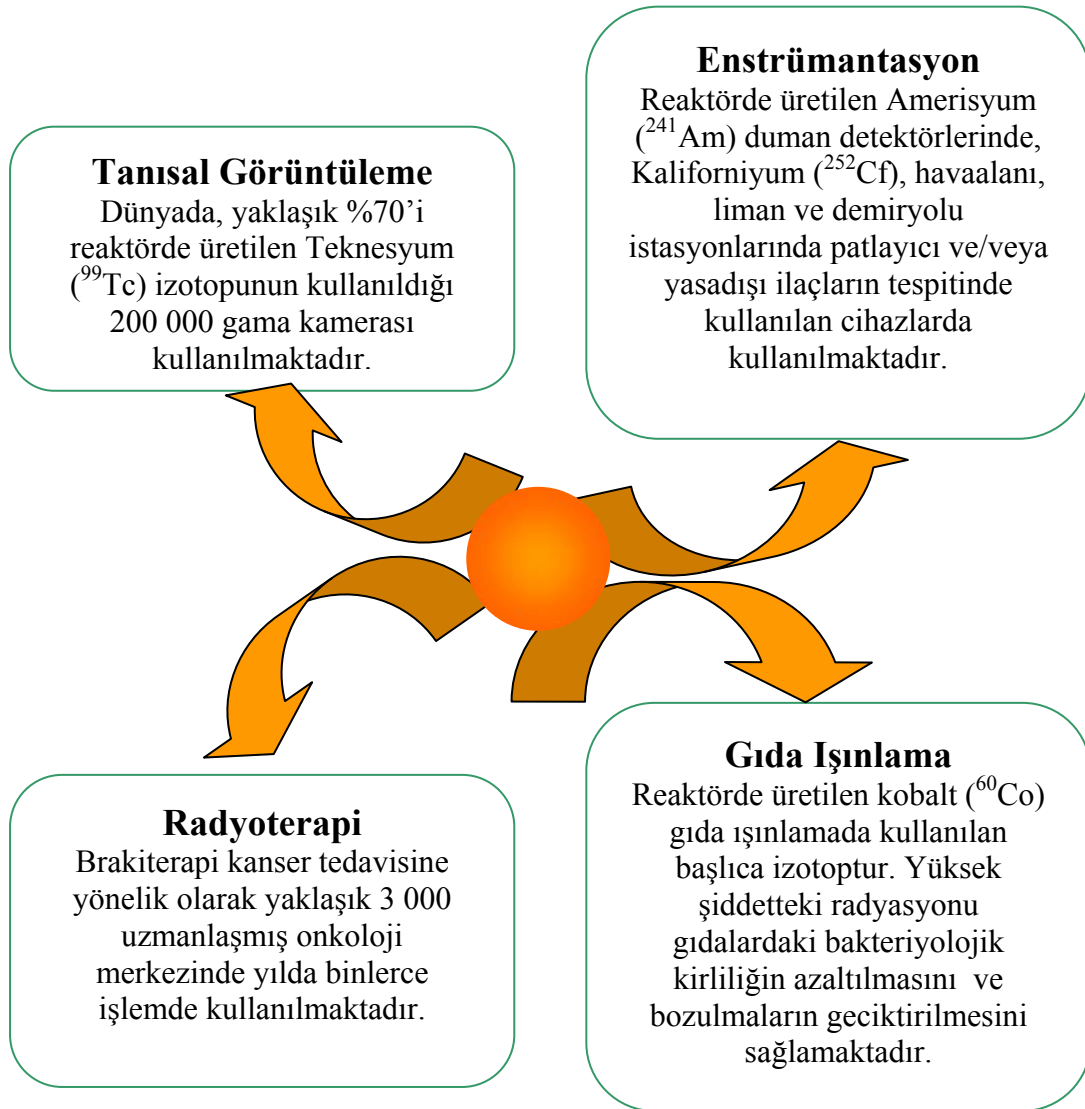
Tıp uygulamaları

İzotoplar tıpta 30 yılı aşkın süredir rutin olarak kullanılmakta ve halen dünyada yılda 30 milyon önemli işlemde uygulanmaktadır. Gama görüntüleme teşhis kameraları ile tümörlerin ve çok çeşitli diğer rahatsızlıkların tespitinde (kardiyolojik hastalıklar gibi) yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu amaçlarla kullanılan başlıca izotop reaktörlerde üretilen ⁹⁹Tc'dur.



Vücuda uygulanan radyoaktif kaynaklar (brakiterapi) serviks, uterus, göğüs, akciğer, pankreas ve prostat gibi çeşitli kanserlerin tedavisinde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan önemli izotoplar reaktörlerde üretilen iyot (¹²⁵I) ve paladyumdur (¹⁰³Pd).

*Tıpta Kullanılan PET
(Pozitron Emisyon Tomografisi) Görüntüleme Cihazı*



Şekil 10.3. Reaktörlerde Üretilen İzotopların Çeşitli Kullanım Alanları

Tarım ve endüstriyel uygulamalar

Endüstri, başta enstrümantasyon ve proses ekipmanlarında olmak üzere izotop kullanımının önemli alanlarından biridir. Uygulamalar analitik ve güvenlik enstrümantasyonu, kirlilik ölçümü, fiziki ölçüm, gıda ışınlama ve tahribatsız muayeneyi kapsamaktadır. Gıda ışınlama, baharat, meyve, et, balık ve kümes hayvanı etlerine başarıyla uygulanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve A.B.D. Gıda ve İlaç İdaresi bu uygulamaları onaylamıştır. Güvenlik ve gıda besin değerlerinin iyileştirilmesinde kullanılmak üzere buna izin veren ülke sayısı artmaktadır.

İzotop kullanım eğilimleri

İzotop kullanım eğilimleri, bazı izotoplar önem kaybederken bazılarının önem kazanması ve sektörden sektöre yada bölgeden bölgeye farklılık göstermesi nedeni ile kolayca belirlenememektedir. Tıp alanında, gittikçe genişleyen uygulama alanları ile izotop kullanımı artarak sürmektedir. Ancak, her belirli uygulama için eğilim değişmektedir. Örneğin, uzaktan kumandalı kobalt terapisinin devamlı azalacağı, buna karşın izotopların brakiterapideki kullanımında ani artışların olacağı beklenmektedir. Palyatif bakım gibi yeni uygulamaların geliştirilmesi, yeni izotoplarla birlikte halen kullanılmakta olan izotoplara da ilave talep yaratacaktır.

Endüstriyel uygulamalardaki izotop talebi nispeten kararlıdır. Ancak, gıda ışınlamasının yaygınlaşması durumunda büyük miktarlarda radyoaktif kobalt talebi ortaya çıkacaktır.

Araştırma ve Geliştirme

Tüm nükleer enerji uygulamalarının temeli olan Ar-Ge bilgi birikiminin gelişmesine önemli katkılarda bulunmuştur. Ar-Ge faaliyeti alanlarına giren konular arasında ağırlıklı olarak ileri reaktörler ve yakıt çevrimleri, ileri atık yönetimi ve güvenli işletme desteği gibi üç ana konu görünmektedir. Araştırmalar; akademiler, hükümetler (düzenleyici kurumlar dahil olmak üzere) ve endüstrilerce, nükleer Ar-Ge alanında uluslararası işbirliklerine daha fazla önem verilerek, yalnız veya işbirliği halinde yürütülmektedir.

Gelişmiş reaktörler ve yakıt çevrimleri

Hafif Sulu Reaktörler (LWR) günümüzde esasen olgun teknolojilerdir. Dolayısı ile, güvenlik, işletme ekonomisi ve esnekliği iyileştirmeyi amaçlayan yeni reaktör tasarımları mevcut kavramların evrimini temsil etmektedir. 2015 yılı itibariyle ya da daha önce ticari kullanıma hazır olması beklenen tasarımlar şunlardır:

- İki Japonya’da yeni kurulmuş olan ileri kaynar sulu reaktör (ABWR), BWR 90+ ve basitleştirilmiş sulu reaktör tasarımı (SWR 1000) dahil olmak üzere yeni kaynar sulu reaktör (BWR) tasarımları.
- A.B.D. düzenleme kuruluşu (NRC) tarafından onay almış AP600 ile 1000 MWe gücündeki AP1000 versiyonu, ayrıca Avrupa Basınçlı Su Reaktörü (EPR) ile “yenilikçi ve güvenli uluslararası reaktör” (IRIS) gibi ileri basınçlı su reaktörleri.
- Çakıl yataklı modüler reaktör (PBMR) ile gaz türbinli modüler helyum reaktörü (GT-MHR) dahil olmak üzere gaz soğutmalı yüksek sıcaklıklı reaktör tasarımları.

İlgi uzun vadede, yenilikçi nükleer enerji teknoloji ve yakıt çevrimlerine odaklanmıştır. Araştırılmakta olan kavramlar arasında sıvı metal soğutmalı reaktörler, yüksek sıcaklıklı reaktörler, toryum yakıt kullanan reaktörler ile uranyum ve plütonyum kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayan geliştirilmiş yakıt çevrimleri bulunmaktadır. Bu ileri teknolojiler nükleer enerjinin sürdürülebilirliğini büyük oranda iyileştirmeyi vaat etmektedir. Örneğin, hızlı üretken reaktörler, prensip olarak, uranyum kaynaklarının kullanım etkinliğini yaklaşık 50 kata kadar iyileştirebilmektedir (Tablo 10.1).

Tablo 10.1. Teknolojik İlerlemelerin Kaynak Kullanılabilirliğine Etkisi¹

Reaktör/Yakıt Çevrimi	Elektrik Üretim Süreleri (Yıl)	
	Sadece konvansiyonel uranyum ve toryum kaynakları	Toplam uranyum ve toryum kaynakları
Mevcut yakıt çevrimi (LWR, tek geçişli)	326	8 350
Kapalı (çevrimli) yakıt çevrimi (sadece plütonyum, tek çevrimli)	366	9 410
Hafif sulu reaktör ve kapalı yakıt çevrimli hızlı reaktör	488	12 500
Sadece, kapalı yakıt çevrimli hızlı reaktör	10 000	250 000
Kapalı (çevrimli) ileri toryum/uranyum yakıt çevrimi	17 000	35 500

Dördüncü Nesil Uluslararası Forumu (GIF)

Bu girişim, 2030 yılı itibarıyla ticari olarak kullanılabilir bir veya daha fazla sayıda nükleer sistemin (“dördüncü nesil” nükleer sistemler) geliştirilmesine yönelik olarak ilgili ülke, endüstri ve araştırma topluluklarının işbirliği ile 2000 yılı sonunda başlatılmıştır. Buradaki amaç; ekonomi, güvenlik ve güvenilirlik, sürdürülebilirlik, nükleer silahların yayılmasına direnç ve fiziksel korunma alanlarında ilerlemeler sağlamaktır. 2003 yılı başı itibarıyla bu grubun üyeleri A.B.D., Arjantin, Brezilya, Fransa, G. Afrika, G. Kore, İngiltere, İsviçre, Japonya ve Kanada’dır.

2002 Ekim ayında, altı nükleer enerji sistemi ortak Ar-Ge çalışmaları için seçilmiştir. Bu sistemler: sodyum soğutmalı hızlı reaktör (SFR), çok yüksek sıcaklıklı reaktör (VHTR), süper kritik su soğutmalı reaktör (SCWR), kurşun soğutmalı hızlı reaktör (LFR), gaz soğutmalı hızlı reaktör (GFR) ve eriyik tuz reaktörünü (MSR) kapsamaktadır. Bunlardan biri hariç diğerleri kullanılmış nükleer yakıt geri dönüşümünü içermektedir.

¹ “Key World Energy Statistics”ten alınan 1999 yılı dünya elektrik üretimi (Paris: IEA, 2001)

Uluslararası Yenilikçi Nükleer Reaktörler ve Yakıt Çevrimleri Projesi (INPRO)

Nükleer teknolojinin güvenli, sürdürülebilir, ekonomik ve nükleer silahların yayılmasına dirençli kullanımının desteklenerek 21.yüzyıl küresel enerji ihtiyaçlarının karşılanmasını amaçlayan bu uluslararası işbirliği projesi 2001 yılında UAEA tarafından başlatılmıştır. 2010 yılı itibarıyla 30 ülke ve Avrupa Komisyonu bu projeye üye olmuştur. Üye ülkeler arasında Türkiye de bulunmaktadır.

Gelişmiş atık işleme yöntemleri

Bölme ve dönüştürme, coğrafi depolama gerektiren atıkların yapısını değiştirme potansiyeli olan oldukça yeni bir yaklaşımdır. Bu işlem, yüksek seviyeli atığın radyoaktivite ve ısı üretimine en fazla katkıda bulunan uzun ömürlü radyonüklitlerin, nötron yakalama veya fisyonla daha kısa ömürlü olanlara dönüştürülmesini içerir.

Bu yönetime yönelik yoğun araştırma çalışmaları çeşitli işbirlikleri ile yürütülmektedir. Başlıca araştırma konuları, fisyon ürünleri ve uranyum ötesi elementlerin daha etkin olarak ayrıştırılmasına yönelik olarak ileri ayrıştırma teknolojileri ve dönüştürmeye yönelik olarak da hızlandırıcı güdümlü sistemlerin kullanılmasıdır.

A.B.D., Çin, Belçika, Fransa, İtalya ve Rusya Federasyonu dahil olmak üzere çeşitli ülkeler bu konularda araştırmalar gerçekleştirmektedir. Ayrıca, Fransa, Japonya, Güney Kore, A.B.D. ve Avrupa Komisyonu küçük ölçekli ortak işbirliği çalışmaları yürütmektedir.

Nükleer güvenlik araştırmaları



Reaktör kazanı fenomenlerini araştıran MASCA deneysel programı için hazırlanmakta olan RASPLAV düzeneği

Nükleer teknolojilerde ilerlemeler sağlamaya yönelik Ar-Ge çalışmaları ile birlikte nükleer santrallerin güvenli işletimini desteklemek üzere hem ulusal hem de uluslararası programlar yürütülmektedir. OECD/NEA, Norveç'teki Halden Reaktör Projesi örneğinde olduğu gibi uluslararası düzeyde gerçekleştirilen çeşitli araştırma projelerini yürütmektedir. 40 yılı aşkın bir süredir yürütülmekte olan bu proje 20 ülkeden 100 kadar kuruluş tarafından desteklenmektedir. Diğer araştırma alanları ile birlikte, yakıt ve malzeme, santral performansı ve işletme güvenliğinin iyileştirilmesine yönelik araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

Diğer Uluslararası Ar-Ge Faaliyetleri

Avrupa Birliği, üye ülke programlarını desteklemek üzere, Avrupa Komisyonu ve Ortak Araştırma Merkezleri (JRC) aracılığıyla çeşitli araştırma projelerini desteklemekte ve bunları yürütmektedir. Nükleer enerji alanındaki araştırmalar 7 JRC merkezinden 4'ünde yürütülmektedir. Bu merkezlerden, Belçika'nın Geel kentindeki *Referans Malzemeler ve Ölçümler Enstitüsü (IRMM)*, yüksek çözünürlüklü tesir kesiti ölçümleri de dahil olmak üzere nötron malzeme etkileşimi ölçümlerini gerçekleştirmektedir. Almanya'nın Karlsruhe kentindeki *Uranyum Ötesi Elementler Enstitüsü'nde (ITU)* temel aktinit araştırmaları, alfa-bağışıklık tedavisi, nükleer yakıt güvenliği, kullanılmış yakıt nitelendirme ile bölme ve dönüştürmeye yönelik araştırmalar yürütülmektedir. Hollanda'nın Petten kentindeki *Enerji Enstitüsü'nde (IE)* nükleer güvenlik, yeni nükleer enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve nükleer tıp konularında araştırmalar gerçekleştirilmektedir. İtalya'nın Ispra kentindeki *Vatandaşların Korunması ve Güvenliği Enstitüsü'nde (IPSC)* ise nükleer silahların yayılmasının önlenmesi ve nükleer güvenlik denetimleri alanlarında araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

UAEA, Eşgüdümlü Araştırma Programları aracılığıyla nükleer enerji, radyoaktif atık güvenliği, atık teknolojisi ve güvenlik denetimleri alanlarındaki diğer Ar-Ge çalışmalarını da desteklemektedir.

Bu doküman, nükleer enerjinin genel durumu hakkında bilgi vermek amacıyla OECD/NEA'nın "Nuclear Energy Today" isimli raporundan faydalanılarak hazırlanmıştır.



TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU
Temmuz 2010