YZ Destekli Akademik Bir İnceleme

Radyoaktivitesi Yüksek Yakıt ve Atıkların Derin Jeolojik Depolanması

19 Ülkeyle birlikte Türkiye'nin Karşılaştırmalı İncelenmesi

Hazırlayan: Yüksel Atakan, Dr. Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com, 04.11.2026

Özet

Nükleer enerji üretiminin sonunda radyoaktiviresi yüksek 'kullanılmış yakıt' ve 'atık'ların ortaya çıkacağı açıktır. Özellikle reaktörlerde kullanılmış uranyum yakıtı, yüksek radyoaktivitesi, bozunma ısı enerjisi ve uzun yarılanma süreli (ömürlü) radyoizotopları nedeniyle insan sağlığı ve çevre açısından önemle ele alınan, uzmanların uzun yıllardır çalıştığı bir konudur. Uluslararası bilimsel görüş birliğinde bu malzemenin, kuşaklar boyunca yüzeydeki kurumsal denetime bağımlı kalmaksızın **biyosferden yalıtılabilmesi için en çok kabul gören çözüm ise derin jeolojik depolamadır (Deep Geological Disposal – DGD).**

Bu yazımız; Finlandiya, İsveç, Fransa, ABD, Çin, İsviçre, İngiltere, Almanya ve Türkiye başta olmak üzere 20 ülkenin kullanılmış yakıt ve yüksek düzeydeki radyoaktif atık programlarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir.

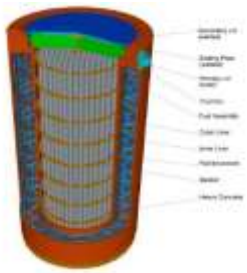
Almanya Gorleben



Finlandiya derin jeolojik depo



Almanya Castor Nükleer Yakıt Fıçısı



Çalışmada önce dünya envanteri ve radyoaktivitenin atık sınıflarına dağılımı ortaya konmuş, ardından derin jeolojik depolamanın teknik temelleri açıklanmıştır. Finlandiya, İsveç ve Fransa programları yapım takvimleriyle birlikte ele alınmış; Almanya'nın Asse II madeniyle başlayan deneyimi ile ABD'nin 1982'den bugüne uzanan Yucca Mountain deneyimi tarih sırasıyla açıklanmıştır.

Bulgular, Finlandiya hükümetinin 22 Ekim 2026'da Posiva Şirketi'ne dünyada ilk kez bir kullanılmış yakıt deposu için işletme lisansı verdiğini, İsveç'te Ocak 2025'te inşaatın başladığını, Fransa'da Cigéo'nun kuruluş izni sürecinin sürdüğünü, ABD'de ise yasal olarak tek aday alan olan Yucca Mountain'ın finansmansız kaldığını göstermektedir. Almanya, Gorleben'in 2020'de eleme dışı kalmasının ardından bilimsel ölçütlere dayalı yeni bir alan seçim sürecini yürütmektedir. **Türkiye'de ise kullanılmış yüksek radyoaktiviteli maddeler için kalıcı depolamaya yönelik bir alan ya da program henüz bulunmuyor.**

Araştırma; IAEA, ABD Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) ve Kongre Araştırma Servisi (CRS), Kanada Nükleer Atık Yönetim Kuruluşu (NWMO) ile ulusal atık yönetim kuruluşlarının (Posiva, SKB, ANDRA, BGE) yayınlarının karşılaştırmalı değerlendirmesine dayanmaktadır.

Temel bulgular

- **Yakıt bugün nerede korunuyor?** Kalıcı depoya yerleştirme bugün için yalnızca Finlandiya'da lisanslanmıştır. Diğer tüm ülkelerde kullanılmış yakıt ve yüksek düzeyli atıklar reaktör

havuzlarında, kuru fıçılarda (örneğin Almanya'da Castor kapları) ve merkezi ara depolarda (örneğin İsveç'te Clab, Hollanda'da HABOG, İsviçre'de Zwilag) tutulmaktadır. Dünya envanteri 447.758 tHM'dir; depolanan yakıtın %41'i ıslak, %31'i kuru depolamadadır [2] (Tablo 3) / Kısaltmaların açılımları yazının en sonunda.

- **Derin jeolojik depolama nerede var ya da planlanıyor?** Tablo 1'de görüldüğü gibi Finlandiya işletme lisansı almış, İsveç inşaata başlamış, Fransa ve İsviçre lisanslama sürecindedir; Kanada alan seçmiş, Çin ve Rusya yeraltı laboratuvarı kurmaktadır. Almanya, İngiltere, Japonya, Güney Kore, Çekya, Slovakya, Macaristan ve Norveç alan seçimi ya da araştırma aşamasındadır; Belçika, Hollanda ve İspanya'da kalıcı depo uzun vadeli seçenektir; ABD'de Yucca Mountain askıdadır; Türkiye'de ise bu konuda bir program yoktur.
- **Derinlik ve takvim:** Depolar genellikle 300–1.000 m derinlikte granit, kil ya da tuz formasyonlarında planlanmaktadır; planlanan tarihler Finlandiya'da 2026'dan Hollanda'da yaklaşık 2030'a uzanmaktadır (Tablo 4).
- **Süreç yavaştır, rıza belirleyicidir:** Almanya'da depo yeri seçim kararı hedefi 2031'den yüzyılın ortasına ertelenmiş, ABD'de Yucca Mountain 2010'dan beri finansmansız kalmıştır; Asse II deneyimi saydamlıktan yoksun kararların bedelinin ne olduğunu göstermektedir.
- **Atık dağılımı ve zaman ölçeği:** Atığın hacminin %1'inden azı yüksek düzeyli olmasına karşın toplam radyoaktivitenin yaklaşık %98'i orta ve yüksek düzeyli atıklarda toplanmıştır [3]; bu atıkların tehlikeli kalma süresi yüz binlerce yıl ölçeğindedir [9]. Bu nedenle geçici depolama bir erteleme çözümü, derin jeolojik depolama ise uzun vadeli yönetimin sonudur.
- **Türkiye:** Akkuyu'da dört VVER-1200 reaktörü inşa edilmekte, 2050 için 20 GWe hedefi bulunmaktadır; yakıtın santral alanında geçici tutulup Rusya'ya götürülmesi öngörülmekte, kalıcı depo ya da program ise bulunmamaktadır. Öncelik; geçici ve kalıcı depolamayı ayıran ulusal bir program ile bir yedek plandır [1][11].

Tablo 1. Ülkelerin derin jeolojik depolama durumları (Kasım 2026)

Durum	Ülkeler
İşletme lisansı verilmiş	Finlandiya
İnşaat aşamasında	İsveç
Lisanslama aşamasında	Fransa, İsviçre
Depo yeri/ alanı seçilmiş ya da yeraltı laboratuvarı /projesi hazırlanıyor	Kanada, Çin, Rusya
Depo alanı seçimi / alan araştırması sürüyor	Almanya, İngiltere, Japonya, Güney Kore, Çekya, Slovakya, Macaristan, Norveç
Kalıcı depo uzun vadeli seçenek; şimdilik uzun süreli ara depolama	Belçika, Hollanda, İspanya
Askıya alınmış	ABD (Yucca Mountain)
Program yok	Türkiye

Türkiye için temel öneriler

- **Ulusal strateji:** Geçici depolama ile kalıcı derin jeolojik depolamayı açıkça ayıran, belgelenmiş, uzun vadeli bir ulusal program oluşturulmalıdır.

- **Yedek plan:** Akkuyu'da yakıtın Rusya'ya götürülmesine ek olarak, anlaşma kapsamı dışında kalan yakıt ve iade edilebilecek atıklar için bir yedek plan hazırlanmalı; güzergah bilimsel güvenlik ölçütleriyle seçilmelidir.
- **Kapasite ve jeoloji:** Geçici depolama kapasitesi 20 GWe hedefine göre planlanmalı; yeraltı suyu, deprem ve fay sistemleri ile uzun dönemli jeolojik kararlılık sistematik biçimde araştırılmalıdır.
- **Denetim, finansman ve katılım:** Bağımsız düzenleyici denetim ve finansman sistemi (özel hesaplar dahil) geliştirilmeli; IRRS'nin önerdiği kamu katılımı ve STK mekanizmaları katılmalıdır.

Anahtar kelimeler: Kullanılmış nükleer yakıt, yüksek düzeydeki radyoaktif atık, derin jeolojik depo, bentonit, granit, kil formasyonu, nükleer güvenlik, kalıcı depolama, Asse II, Yucca Mountain.

1.1 Kullanılmış yakıtın reaktör sonrasındaki yolu

Nükleer güç reaktörlerinde kullanılan uranyum temelli yakıt demetleri, öngörülen yanma (kullanım) durumuna ulaştıktan sonra reaktörden alınır. Alınan kullanılmış yakıt, nükleer olarak bölünmeden kalan uranyumun yanı sıra plütonyum, diğer bölünme (fisyon) ürünleri ve uzun yarı ömürlü radyoaktif izotoplar içerir. Tipik bir 1 GWe'lik (1000 MW) hafif su reaktöründen her yıl yaklaşık 30–50 ton ağır metal (tHM) kullanılmış yakıt çıkmaktadır. Reaktörden çıkarıldıktan sonra yakıt genellikle şu aşamalardan geçer:

1.Giriş

1.1 Kullanılmış yakıtın reaktör sonrasındaki yolu

Nükleer güç reaktörlerinde kullanılan uranyum temelli yakıt demetleri, öngörülen yanma (kullanım) durumuna ulaştıktan sonra reaktörden alınır. Alınan kullanılmış yakıt, nükleer olarak bölünmeden kalan uranyumun yanı sıra plütonyum, diğer bölünme (fisyon) ürünleri ve uzun yarı ömürlü radyoaktif izotoplar içerir. Tipik bir 1 GWe'lik (1000 MW) hafif su reaktöründen her yıl yaklaşık 30–50 ton ağır metal (tHM) kullanılmış yakıt çıkmaktadır. Reaktörden çıkarıldıktan sonra yakıt genellikle şu aşamalardan geçer:

- **Havuzda soğutma:** Yakıt öncelikle reaktör alanındaki su havuzlarında tutulur; havuz suyu hem ısıyı uzaklaştırır hem de radyasyona karşı zırhlama sağlar.
- **Kuru depolama:** Yeterince soğuyan yakıt, uygun koşullarda metal ya da betonarme kask, silo veya bina tipi kuru depolama sistemlerine alınabilir (Almanya Castor silindirleri örneği).
- **Yeniden işleme ya da doğrudan depolama:** Uzun vadede iki seçenek değerlendirilir. Yeniden işlemede uranyum ve plütonyum ayrıştırılarak yeniden yakıt olarak kullanılabilir; geriye kalan yüksek düzeydeki atık camlaştırılır. Doğrudan depolamada ise kullanılmış yakıt, hiç işlenmeden kapsüllenerek derin jeolojik depoya yerleştirilir.

1.2 Geçici depolama ile kalıcı depolama arasındaki fark

Geçici depolama (storage) ve kalıcı depolama (disposal) birbirinden farklı kavramlardır ve bu fark yazımızın bütününde gözetilmiştir. Geçici depolama; aktif güvenlik sistemlerinin, sürekli izlemenin ve kurumsal denetimin kesintisiz sürmesini gerektirir; yakıt gerektiğinde yeniden işlenmek ya da başka bir tesise taşınmak üzere erişilebilir tutulur. Derin jeolojik depolamanın amacı ise atıkların, gelecek kuşakların herhangi bir yaptırımına gerek kalmadan, ekosistemden güvenli biçimde yalıtılmasıdır; geçici depolama bir erteleme çözümü, kalıcı depolama ise uzun vadeli yönetimin kapanışıdır.

1.3 Amaç, kapsam ve yöntem

Bu çalışmanın amacı, kullanılmış yakıt ve yüksek düzeydeki atıklar için kalıcı derin jeolojik depolama konusunda dünya ölçeğindeki durumu ortaya koymak ve Türkiye'nin mevcut konumunu bu çerçevede değerlendirmektir. Kapsam; 20 ülkede yakıtın bugün nerede korunduğunu ve derin depoların durumunu, derinliğini ve takvimini, üç programın (Finlandiya, İsveç, Fransa) teknik incelemesini ve Almanya ile ABD deneyimlerinin kronolojik analizini içermektedir. Yöntem olarak, uluslararası kuruluşların envanter ve durum raporları ile atık yönetim kuruluşlarının, düzenleyici kurumların ve parlamento araştırma birimlerinin resmî belgeleri karşılaştırmalı biçimde taranmıştır. Envanter verileri farklı birimlerde (tHM, m³, TBq) ve farklı yıllarda bildirildiğinden, her verinin yılı ve kaynağı belirtilmiştir.

2. Dünyadaki Kullanılmış Yakıt ve Radyoaktif Atık Envanteri

2.1 Küresel kullanılmış yakıt envanteri

IAEA'nın Haziran 2026'da yayımladığı "Global Spent Nuclear Fuel Inventory" aracına göre, güç reaktörlerinden bugüne kadar alınan kullanılmış yakıtın toplamı yaklaşık 448 bin tHM'dir (447.758 tHM). Bunun yaklaşık 322 bin tHM'lik bölümü depolanmakta, yaklaşık 126 bin tHM'lik bölümü (yaklaşık %28) ise yeniden işlenmiştir. Depolanan yakıtın büyük bölümü ıslak depolamada (%41) ya da kuru depolamadadır (%31) [2].

Katı radyoaktif atıkların toplamı ise IAEA'nın Status and Trends raporunun son baskısında yaklaşık 32 milyon m³ olarak verilmektedir; bunun yaklaşık %83'ü kalıcı olarak depolanmış, %17'si kalıcı depolama beklemektedir [3].

2.2 Seçilmiş ülkelerde envanter

Tablo 2. Seçilmiş ülkelerde kullanılmış yakıt ve yüksek düzeydeki atık envanteri

Ülke / bölge	Envanter	Referans yılı	Açıklama ve kaynak
Dünya toplamı	447.758 tHM boşaltılmış; yaklaşık 322.000 tHM depoda; yaklaşık 126.000 tHM yeniden işlenmiş	2026	IAEA Küresel Kullanılmış Yakıt Envanteri [2]
ABD	94.926 tHM	2026	Dünya toplamının %21,2'si; dünyanın en büyük envanteri [2]
Almanya	Yaklaşık 10.500 tHM; yaklaşık 28.000 m³ yüksek düzeydeki atık; yaklaşık 1.900 Castor kabı	2026	Atıklar Castor kaplarında ara depolarda bekletilmektedir [10]
Fransa	Cigéo için öngörülen atık hacmi: 83.000 m³	—	Atık ağırlıklı olarak yeniden işleme sonrası camlaştırılmış atıktır [9]
Finlandiya	2.095 t	2018	ONKALO kapasitesi yaklaşık 6.500 tU ve yaklaşık 3.250 kapsüldür [7]
İsveç	Tasarım kapasitesi 12.000 t	2024	Forsmark deposunun tasarım kapasitesi [8]

Not: Farklı kaynaklar farklı yıllara ve birimlere dayandığından satırlar birbiriyle doğrudan toplanmamalıdır; güncel ve karşılaştırılabilir envanter için IAEA Küresel Kullanılmış Yakıt Envanteri aracına [2] bakılmalıdır.

2.3 Radyoaktivitenin atık sınıflarına dağılımı

Radyoaktif atıklarda hacim ile radyoaktivite arasında ters bir ilişki vardır. IAEA'nın Status and Trends raporlarına göre dünyadaki mevcut radyoaktif atığın hacim olarak yaklaşık %95'i çok düşük ve düşük

düzeydeki, yaklaşık %4'ü orta düzeydeki, %1'den azı yüksek düzeydeki atıktır [3]. Buna karşılık toplam radyoaktivitenin yaklaşık %98'i orta ve yüksek düzeydeki atıklarda toplanmıştır [3].

Almanya bu dağılımın somut bir örneğini sunmaktadır. Alman Federal Depolama Şirketi BGE'ye göre ülkedeki yüksek düzeydeki atıklar (kullanılmış yakıt ve yeniden işleme sonrası camlaştırılmış atıklar) toplam atık hacminin yalnızca yaklaşık %5–10'unu oluştururken, radyoaktivitenin %99'undan fazlasını taşımaktadır [10]. Düşük ve orta düzeydeki atıklar ise Almanya'daki atık hacminin yaklaşık %90'ını oluşturmasına karşın toplam radyoaktivitenin yalnızca yaklaşık %0,1'ini içerir [10].

Radyoaktivite zamanla azalır; ancak kullanılmış yakıttaki uzun yarı ömürlü radyonüklidler nedeniyle yüksek düzeydeki atıkların tehlikeli kalma süresi yüz binlerce yıl ölçeğindedir. Fransa'nın Cigéo projesi için resmî kaynaklar bu süreyi birkaç yüz bin yıl olarak ifade etmektedir [9]. Derin jeolojik depolama yaklaşımının zaman ölçeği bu nedenle insan kurumlarının ömrünün çok ötesine uzanır.

2.4 Veri sınırlılıkları

Ülkeler arasında envanter karşılaştırması üç nedenle sınırlıdır: kullanılmış yakıt ağır metal tonajıyla (tHM), atık ise hacimle (m^3) ve aktiviteyle (TBq) bildirilir; atık sınıflandırma ölçütleri ülkeden ülkeye farklıdır; bildirim dönemleri farklıdır (IAEA Ortak Konvansiyon raporlaması iki–üç yılda bir yapıldığından veriler farklı yıllara aittir). Bu nedenle burada atık sınıfı payları ve örnek ülke verileri sunulmuştur.

3. Derin Jeolojik Depolama Teknolojisi

3.1 Derinlik ve jeolojik ortam

Derin jeolojik depolama sistemleri genellikle yer yüzeyinin 250–1.000 metre altında, jeolojik açıdan kararlı kayaç formasyonlarında geliştirilir. Almanya'nın yasal çerçevesi, depo alanının en az 300 metre derinde olmasını ve çevresinin en az 100 metre kalınlığında bir bariyer kayaç ile sarılı bulunmasını öngörmekte; atığın en az bir milyon yıl boyunca güvenle yalıtılması hedeflenmektedir [10]. Başlıca konak kaya ortamları şunlardır:

- **Granitik (kristalin) kayaçlar:** Mekanik olarak dayanıklıdır; yeraltı suyu hareketi çatlaklar boyunca gerçekleştiğinden mühendislik bariyerlerine büyük önem verilir (Finlandiya, İsveç).
- **Kil ve kiltaşı formasyonları:** Çok düşük geçirgenlikleri ve radyonüklidleri tutma kapasiteleri sayesinde doğal bir izolasyon sağlar (Fransa'da Callovo-Oxfordian kili, İsviçre'de Opalinus kili, Macaristan'da Boda kiltaşı).
- **Kaya tuzu formasyonları:** Plastik davranışları nedeniyle çatlakları kendiliğinden kapatır; ancak suyla temasa karşı hassastır (Almanya'da tuz kubbeleri ve ABD'de WIPP).
- **Diğer düşük geçirgenlikli ortamlar:** Volkanik tüf gibi ortamlar (ABD, Yucca Mountain) alan koşullarına bağlı olarak değerlendirilebilir.

3.2 Çoklu bariyer yaklaşımı

Derin jeolojik depolamanın temelinde, tek bir bileşenin başarısızlığının sistemin tamamını tehlikeye atmamasını sağlayan çoklu bariyer yaklaşımı yer alır. İç içe geçmiş bariyerler şunlardır: yakıtın ya da atığın fiziksel ambalajı (yakıt matrisi, camlaştırılmış atık formu); bakır, çelik veya dökme demirden kapsüller; kapsülü saran, suyla şişerek geçirgenliği çok düşük bir tampon oluşturan bentonit gibi mühendislik bariyerleri; atığı çevreleyen doğal jeolojik formasyon ve yeraltı suyu hareketinin kontrolü.

Bu sistemlerin amacı atıkların radyoaktif özelliklerini ortadan kaldırmak değildir; radyonüklidlerin biyosfere ulaşmasını uzun bir zaman boyunca sınırlandırmak ve olası salımların insan ve çevre için önemsiz düzeylerde kalmasını sağlamaktır. İsveç ve Finlandiya'nın uyguladığı KBS-3 yöntemi (bakır kapsül, dökme demir iç yapı, bentonit tampon ve granit konak kaya) bu yaklaşımın en olgun örneğidir.

3.3 Geri döndürülebilirlik

Bazı ülkeler, depolama tamamlandıktan sonra bile kararların yeniden gözden geçirilebilmesine izin veren geri döndürülebilirlik ilkesini yasal güvenceye bağlamıştır. Fransa'da Cigéo için geri döndürülebilirlik en az 100 yıl süreyle zorunludur ve bu süre kuruluş izniyle belirlenecektir [9]. Bu yaklaşım, gelecek kuşaklara karar yetkisi bırakırken pasif güvenlik ilkesini korumayı amaçlar.

4. Dünyada 20 Ülkenin Değerlendirilmesi

Tablo 3, 20 ülkede kullanılmış yakıt ve yüksek düzeyli atıkların bugün nerede güvenle korunduğunu; Tablo 4 ise derin jeolojik depolamanın var olup olmadığını, planlanıp planlanmadığını, konak kaya ve derinliğini ve planlanan tarihi göstermektedir. Bilgiler Kasım 2026'da ulaşılabilen resmî ve kurumsal kaynaklara dayanır [4][5]; "belirlenmedi" ifadesi, ilgili ülkede değerin henüz resmen belirlenmediğini gösterir.

Tablo 3. Kullanılmış yakıt ve yüksek düzeyli atığın bugün güvenle korunduğu yer

Ülke	Bugün korunduğu yer	Tür
Finlandiya	Olkiluoto ve Loviisa santral alanlarında reaktör havuzları ve ara depolar	Havuz / ara depo
İsveç	Reaktör havuzları; Oskarshamn'daki merkezi ara depo Clab (kaya mağarasında su havuzları)	Havuz / merkezi ara depo
Fransa	Yakıt La Hague havuzlarında; camlaştırılmış atık yeniden işleme tesislerinde (La Hague, Marcoule) özel ara depolarda	Havuz / özel ara depo
İsviçre	Reaktör havuzları; Würenlingen'deki merkezi ara depo Zwilag	Havuz / merkezi kuru ara depo
Kanada	Reaktör sahalarında havuzlar ve beton konteynerlerde kuru depolama	Havuz / kuru depo
Çin	Reaktör havuzları; Gansu'daki merkezi havuz depolama ve yeniden işleme tesisi	Havuz / merkezi havuz
Rusya	Reaktör havuzları; Zheleznogorsk'ta (Krasnoyarsk) merkezi havuz ve kuru depo; Mayak'ta yeniden işleme	Havuz / merkezi depo
Almanya	Castor kaplarında kuru ara depolar: Gorleben, Ahaus, Lubmin ve santral alanları; yaklaşık 1.900 Castor kabı [10]	Kuru fıçı (Castor)
İngiltere	Sellafield havuzları; camlaştırılmış yüksek düzeyli atık Sellafield'deki özel depolarda; Sizewell B'de kuru depo	Havuz / özel depo / kuru depo
Japonya	Santral havuzları; Rokkasho havuzu; Mutsu'da (Aomori) reaktör dışı kuru fıçı deposu (2024'ten beri işletmede)	Havuz / kuru fıçı
Güney Kore	Tümü reaktör sahalarında; havuzlar ve kuru fıçı depoları [4]	Havuz / kuru fıçı
Çekya	Dukovany ve Temelín'de önce havuz, ardından CASTOR kaplarında kuru ara depo	Havuz / kuru fıçı (Castor)
Slovakya	Jaslovské Bohunice'deki merkezi ıslak ara depo ve santral havuzları	Havuz / merkezi ıslak depo
Macaristan	Paks'ta havuzlar ve modüler kuru kasa (vault) ara deposu	Havuz / kuru depo
Norveç	Güç reaktörü yoktur; araştırma reaktörü yakıtı (yaklaşık 16 t) Halden ve Kjeller'de geçici depoda	Geçici depo
Belçika	Doel'de kuru fıçı, Tihange'de havuz depolaması; camlaştırılmış atık Dessel'de (Belgoprocess)	Havuz / kuru fıçı
Hollanda	COVRA'nın HABOG deposu (Vlissingen); depolama en az 100 yıl sürecek	Merkezi ara depo

Ülke	Bugün korunduğu yer	Tür
İspanya	Santral alanlarında kuru fıçı ara depoları ve havuzlar; merkezi depo (ATC) projesi terk edilmiştir	Havuz / kuru fıçı
ABD	Reaktör sahalarında havuzlar ve kuru fıçı/silo sistemleri; merkezi depo yoktur [5][6]	Havuz / kuru depo
Türkiye	**Kullanılmış güç reaktörü yakıtı için depo yoktur; Akkuyu'da yakıtın önce santral alanında geçici depolanması, sonra Rusya'ya götürülmesi öngörülmektedir [1][11]**	Planlanan geçici depo

Not: Satırlar [4], [5] ve ilgili ulusal kuruluşların (Zwilag, SÚRAO, COVRA, ENRESA, NND, ÚJD/JAVYS, RFS, PURAM) güncel yayınlarından derlenmiştir.

Tablo 4. Derin jeolojik depolama: durum, kaya, derinlik ve planlanan tarih

Ülke	Derin depo durumu	Kaya ve derinlik	Planlanan tarih
Finlandiya	**Var, lisanslı:** ONKALO (Posiva); 22 Ekim 2026'da işletme lisansı verildi [7]	Granit; 400–430 m	İşletme dönemi 2070 sonuna kadar; kapatma yüzyıl sonuna doğru [7]
İsveç	**İnşaatta:** Forsmark (SKB) [8]	Granit; yaklaşık 500 m	İnşaat Ocak 2025'te başladı (yaklaşık 10 yıl); yerleştirme 2030'ların ortası–sonu
Fransa	**Lisanslamada:** Cigéo (ANDRA) [9]	Callovo-Oxfordian kili; yaklaşık 500 m	Kuruluş kararı 2027 sonu–2028 başı; pilot evre 2050 ve sonrası
İsviçre	**Lisanslamada:** Nördlich Lägern (Nagra); Kasım 2024'te genel lisans başvurusu	Opalinus kili; yaklaşık 800–900 m	Yüksek düzeyli atık için yaklaşık 2060
Kanada	**Alan seçildi:** Ignace (NWMO), Kasım 2024; etki değerlendirmesi sürüyor	Kristalin granit; 500 m'den derin	İşletme 2040'ların başı
Çin	**Yeraltı laboratuvarı:** Beishan (Gansu); kazı sürüyor	Granit; laboratuvar yaklaşık 560 m, depo 500–1.000 m	Depo yaklaşık 2050
Rusya	**Yeraltı laboratuvarı:** Nizhnekansky (Krasnoyarsk)	Gnays / granitoid; 450–525 m	Laboratuvar yaklaşık 2028; depo kararı araştırmalardan sonra (2040 sonrası)
Almanya	**Alan seçimi:** BGE; 36 alt bölge kaldı (Ekim 2026) [10]	Tuz, kil, kristalin (belirlenmedi); en az 300 m	Alan kararı en geç yüzyılın ortasında; işletme tarihi belirlenmedi
İngiltere	**Alan belirleme:** Cumbria'da Mid ve South Copeland toplulukları; Lincolnshire 2025'te süreçten çekildi	Belirlenmedi; 200–1.000 m	Belirlenmedi
Japonya	**Alan araştırması:** Hokkaido (Suttsu, Kamoenai), Saga (Genkai), Ibaraki	Belirlenmedi; en az 300 m (yasal ölçüt)	Belirlenmedi
Güney Kore	**Yasal çerçeve ve laboratuvar planı:** yeraltı araştırma laboratuvarı 2033 [4]	Belirlenmedi	Depo 2060'tan önce hedefleniyor [4]
Çekya	**Alan seçimi:** dört aday alan (SÚRAO)	Kristalin kaya; yaklaşık 500 m	Nihai alan yaklaşık 2030; işletme 2050–2065 (kaynaklara göre değişir)
Slovakya	**Alan araştırması:** iki alan ayrıntılı inceleniyor (JAVYS) [4]	Belirlenmedi (ölçüt: 300–500 m)	Yaklaşık 2065
Macaristan	**Alan seçimi:** Boda kiltaşı (PURAM) [4]	Kiltaşı; derinlik belirlenmedi	Alan seçimi 2030'a kadar; işletme tarihi belirlenmedi
Norveç	**Başlangıç aşaması:** alan seçim süreci için belediyelere çağrı	Belirlenmedi	Belirlenmedi
Belçika	**Karar öncesi:** Boom kili araştırılıyor (HADES laboratuvarı, Mol; yaklaşık 225 m)	Kil; depo derinliği belirlenmedi	Belirlenmedi
Hollanda	**Uzun vadeli seçenek:** jeolojik depolama; şimdilik COVRA'da ara depolama	Belirlenmedi	Yaklaşık 2130

Ülke	Derin depo durumu	Kaya ve derinlik	Planlanan tarih
İspanya	**Strateji düzeyinde:** 7. Genel Radyoaktif Atık Planı (2023)	Belirlenmedi	Yaklaşık 2073
ABD	**Askıda:** Yucca Mountain (DOE); finansman 2010'dan beri yok [6]	Volkanik tüf; yaklaşık 300 m	Takvim yok
Türkiye	**Yok:** tanımlanmış alan ya da program yok [1]	—	—

Önemli açıklama: Bu tablolar, 20 ülkenin tamamında kullanılmış yakıt için onaylanmış bir derin jeolojik depo bulunduğu anlamına gelmez. Ülkeler; proje olgunluğu, atık kategorisi ve ulusal karar aşaması bakımından birbirinden belirgin biçimde ayrışmaktadır. Özellikle düşük ve orta düzeydeki atıklar için geliştirilen tesisler, kullanılmış yakıtın kalıcı deposu olarak değerlendirilmemelidir.

5. Öne Çıkan Üç Programın Teknik İncelemesi

Bu bölümde kullanılmış yakıt için en ileri düzeye ulaşmış üç program (Finlandiya, İsveç, Fransa) ele alınmıştır; konak kaya ve derinlik Tablo 4'tedir. Almanya ve ABD deneyimleri, kronolojik yapıları nedeniyle 6 ve 7. bölümlerde incelenmiştir.

5.1 Finlandiya – ONKALO

Finlandiya, kullanılmış nükleer yakıtın doğrudan jeolojik depolanması konusunda dünyanın en ileri programına sahiptir; ülkede kullanılan tüm yakıtın yasa gereği Finlandiya içinde depolanması gerekmektedir [7]. Projeyi, Olkiluoto santralinin sahibi TVO ile Loviisa santralinin sahibi Fortum'un ortak kuruluşu Posiva yürütmektedir. Temel yaklaşım KBS-3 çoklu bariyer sistemidir: bakır kapsül, dökme demir iç yapı ve kuyularda bentonit tampon. Kapasite yaklaşık 6.500 tU kullanılmış yakıttır (yaklaşık 3.250 kapsül) [7]. Depolama tünelleri doldurulup tapalarla kapatıldığında depo, kuruluşlarca izlenmeye ihtiyaç duymadan pasif biçimde güvenliği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır; kapatma işlemlerinin 21. yüzyılın sonlarına doğru tamamlanması öngörülmektedir.

5.2 İsveç – Forsmark

İsveç'in kullanılmış yakıt deposu, Forsmark bölgesinde Östhammar belediyesi sınırları içinde, ülkenin nükleer işletmecilerine ait SKB tarafından geliştirilmektedir; kapsülleme tesisi Oskarshamn'da yapılacaktır. Forsmark yakınında 1988'den beri düşük ve orta düzeydeki atıklar için SFR deposu işletilmektedir; böylece bölge, atık yönetimi konusunda mevcut bir deneyim ve kurumsal güven birikimine sahiptir. Sistem Finlandiya'nın KBS-3 yaklaşımıyla aynıdır (bakır ve dökme demir iç yapılı kapsül, bentonit tampon); tasarım kapasitesi yaklaşık 12.000 ton kullanılmış yakıttır [8]. İki program arasında yakın teknik işbirliği vardır; SKB'nin Posiva için kapsül tabanlarını kaynaklama anlaşması bunun bir örneğidir [8].

5.3 Fransa – Cigéo

Fransa'nın Cigéo projesi (Centre industriel de stockage géologique), yüksek düzeydeki ve uzun ömürlü orta düzeydeki radyoaktif atıkların Bure'de (Meuse ve Haute-Marne sınırı) jeolojik depolanması için ANDRA tarafından geliştirilmektedir. Fransa, İsveç ve Finlandiya'dan farklı olarak kullanılmış yakıtın büyük bölümünü yeniden işlemekte; Cigéo'ya ise esas olarak yeniden işleme sonrasında ortaya çıkan camlaştırılmış atıklar yerleştirilecektir. Proje, kilin doğal izolasyon kapasitesinden yararlanmayı amaçlar; granit tabanlı sistemlerde mühendislik bariyerlerine verilen ağırlık, burada daha çok kil formasyonunun doğal bariyer işlevine kaymaktadır.

Tablo 5. Finlandiya, İsveç ve Fransa programlarında yapım, aşamaları ve lisanslama takvimi

Ülke	Tarih başlangıç	Aşama
Finlandiya	Aralık 2000 / 2001	Hükümet depolama tesisi için ilke kararını vermiş (Ocak 2002'de Olkiluoto 3 yakıtını kapsayacak şekilde genişletilmiş), Parlamento 2001'de onaylamıştır [7].Dünya'da ilk!
Finlandiya	2004	ONKALO yeraltı araştırma tesisinin kazısı başlamıştır; tesis bugün depolama tesisinin ayrılmaz bir parçasıdır [7].
Finlandiya	12 Kasım 2015	Hükümet, kullanılmış yakıt depolama tesisi için dünyada verilen ilk inşaat lisansını vermiştir; inşaat Aralık 2016'da başlamıştır [7].
Finlandiya	30 Aralık 2021	Posiva, işletme lisansı başvurusunu sunmuştur; başvuru 2070 sonuna kadar süren bir işletme dönemi içindir [7].
Finlandiya	22 Ekim 2026	Hükümet işletme lisansını vermiştir; bu, kullanılmış yakıt depolama için dünyada verilen ilk işletme lisansıdır [7].
İsveç	2009	SKB, beş yıllık alan araştırmalarının ardından Forsmark'ı seçmiştir [8].
İsveç	Mart 2011	SKB, Forsmark deposu ve Oskarshamn kapsülleme tesisi için başvurmuştur.
İsveç	27 Ocak 2022	Hükümet, projenin Çevre Kanunu açısından uygun olduğuna karar vermiş ve izni vermiştir.
İsveç	Ocak 2025	Forsmark'ta temel atma töreniyle inşaat başlamıştır; inşaatın yaklaşık on yıl süreceği tahmin edilmektedir [8].
İsveç	2030'ların ortası–sonu	Depolamanın başlaması öngörülmektedir; kaynaklar arasında takvim farkı vardır.
Fransa	1991 / 2006	Bataille Yasası ile 15 yıllık araştırma programı başlamış (30 Aralık 1991); 28 Haziran 2006 tarihli yasa geri döndürülebilir derin jeolojik depolamayı kabul etmiştir [9].
Fransa	8 Temmuz 2022	Proje, Danıştay kararnamesiyle kamu yararına olduğu ilan edilmiştir [9].
Fransa	16 Ocak 2023	ANDRA kuruluş izni başvurusunu (DAC) sunmuştur; başvuru 23 ana belgeden oluşmaktadır [9].
Fransa	Nisan–Temmuz 2026	Devlet proje maliyetini 33,4 milyar avro olarak değerlendirmiş (ilk öngörü 25 milyar); DAC için kamuya açık soruşturma yapılmıştır (18 Mayıs–2 Temmuz) [9].
Fransa	2027 sonu / 2028 başı	Kuruluş kararnamesinin çıkması beklenmektedir; ardından inşaat başlayacaktır.
Fransa	2050 ve sonrası	Pilot endüstriyel evreyle sınırlı işletme izni beklenmekte; tüm yüksek düzeydeki atığın yerleştirilmesi 2080'lerde, deponun kapatılması 2170'lerde öngörülmektedir.

6. Almanya'nın Deneyimi: Asse II'den Alan Seçim Yasasına

Almanya'nın radyoaktif atık deneyimi, kalıcı depolama alanında yaşanan başarısızlıklardan öğrenerek yeniden başlamanın örneğidir. Süreç, 1960'larda tuz madenlerinin atık deposu olarak kullanılmasıyla başlamış; Asse II madenindeki su girişi ve kamuoyu tepkisinin ardından alan seçiminin bilimsel ve katılımcı bir yasal çerçeveye oturtulmasıyla sonuçlanmıştır.

6.1 Asse II: deneysel bir madenden kalıcı depoya

Asse II, tuz üretimi 31 Mart 1964'te sona eren bir madendi. Federal hükümet madeni 1965'te satın almış; 1967–1978 arasında toplam 125.787 varil ve atık paketi (yaklaşık 47.000 m³ düşük ve orta düzeydeki atık) 13 odada depolanmıştır [10]. Maden "araştırma madeni" sıfatıyla işletilmiş, nükleer hukuka tabi bir planlama ve onay prosedürü uygulanmamış; depolama 1978'de durdurulmuştur [10]. Madene su girişi kamuoyunca 2008'de bir skandal olarak öğrenilmiş; 2009'dan itibaren maden BfS'nin işletmeciliğine geçerek nükleer hukuk kapsamına alınmıştır. Nisan 2013'te yürürlüğe giren "Lex Asse" atıkların geri çıkarılmasını yasal zorunluluk hâline getirmiş; BGE geri çıkarma planını Nisan 2020'de sunmuştur [10].

6.2 Morsleben, Gorleben ve Konrad

Doğu Almanya'daki Morsleben tuz madeninde atık depolama 1971'de lisanslanmadan başlamış; 1994–1998 arasında yeniden atık yerleştirilerek toplam 36.754 m³ atık depolanmış ve depolama 25 Eylül 1998 tarihli mahkeme kararıyla durdurulmuştur; tesisin tuz betonuyla doldurularak kapatılması planlanmaktadır [10]. Yüksek düzeydeki atıklar için ise 1977'de Gorleben tuz kubbesi "nükleer atık yönetim merkezi" alanı olarak belirlenmiş; onlarca yıl tek araştırılan alan olarak siyasi tartışma ile toplumsal direnişin odağına dönüşmüştür. **Konrad deposu ise** eski bir demir cevheri madenidir; 2002'de izin verilmiş, 2007'de mahkeme kararıyla doğrulanmış ve 2029–2030 arasında işletmeye girmesi beklenmektedir [10].

6.3 Yeniden başlangıç: Alan Seçim Yasası ve BGE

2011'deki Fukushima kazasının ardından Almanya nükleer enerjiden çıkış kararı almış; son reaktörler Nisan 2023'te kapatılmıştır. 2013'te kabul edilen ilk Alan Seçim Yasası (StandAG), sürecin "beyaz harita" ilkesiyle sıfırdan başlatılmasını öngörmüş; aynı yıl Gorleben'e Castor taşımaları yasalarla yasaklanmıştır; 2016'da kurulan BGE, Nisan 2017'de Asse II, Konrad ve Morsleben'in işletme sorumluluğunu devralarak alan seçimini yürütmeye başlamıştır [10]. Süreç, tamamen bilimsel ölçütlere dayanmakta; sonuçta Bundestag'ın onayı gerekmektedir.

BGE, 28 Eylül 2020'de yayımladığı Teilgebiete ara raporunda 90 alt bölge belirlemiş; Gorleben, üzerindeki örtü kayacın yetersizliği gibi jeolojik nedenlerle bu aşamada elenmiştir [10]. 27 Ekim 2026'da yayımlanan yeni çalışma durumuna göre Almanya'nın yalnızca %5'inden azını kapsayan 36 alt bölge kalmıştır; Berlin, Hessen ve Sachsen artık süreçte değildir. BGE, 2027'de "bir ila iki avuç" alan bölgesi önermeyi planlamakta, kalıcı depo yeri kararını ise en geç yüzyılın ortasında vermeyi hedeflemektedir [10]. Bu, 2031 olan ilk hedefin ciddi biçimde ertelendiği anlamına gelmektedir.

Tablo 6. Almanya'nın radyoaktif atık yönetiminde kronoloji

Tarih	Gelişme
1965–1978	Federal hükümet 1965'te Asse II'yi satın almış; 1967–1978'de 125.787 varil ve paket (yaklaşık 47.000 m³) 13 odada depolanmış, 1978'de depolama durdurulmuştur [10].
1971–1998	Morsleben'de depolama (1971'de başlamış); 25 Eylül 1998'de mahkeme kararıyla durdurulmuştur; toplam 36.754 m³ [10].
1977	Gorleben tuz kubbesi nükleer atık yönetim merkezi alanı olarak belirlenmiştir.
2002 / 2007	Konrad için plan onay kararı (22 Mayıs 2002); Federal İdare Mahkemesi onayı (26 Mart 2007) ve dönüştürme çalışmaları [10].
2008–2009	Asse II'deki su girişi kamuoyuna duyurulmuş; maden nükleer hukuka tabi kılınarak BfS işletmeciliğine geçmiştir [10].
2013	Lex Asse yürürlüğe girmiş (Nisan); StandAG kabul edilmiş ve Gorleben'e Castor taşımaları yasaklanmıştır [10].
2016–2017	BGE kurulmuş (2016); 25 Nisan 2017'de Asse II, Konrad ve Morsleben'in işletmeciliğini devralmıştır [10].
2020	BGE geri çıkarma planını sunmuş (Nisan); Teilgebiete ara raporu yayımlanmış (28 Eylül); Gorleben elenmiştir [10].
27 Ekim 2026	Çalışma durumu güncellenmiş: 36 alt bölge, ülke yüzeyinin %5'inden az; 2027'de alan bölgesi önerisi planlanmaktadır [10].

7. ABD'nin Deneyimi: Yucca Mountain ve Sonrası

ABD, dünyanın en büyük kullanılmış yakıt envanterine (94.926 tHM) sahip olmasına rağmen kullanılmış yakıt için kalıcı bir depo bulundurmayan ülkelerden biridir [2]. Deneyim, teknik yeterliliğin

tek başına yetmediğini; yasal çerçevenin, siyasi tutarlılığın ve yerel rızanın da belirleyici olduğunu göstermektedir.

7.1 1982 Yasası ve Yucca Mountain'ın seçilmesi

1970'lerin sonunda ticari yeniden işlemeye ilişkin politikanın değişmesinin ardından Kongre, 1982 Nükleer Atık Politikası Yasası'nı (NWPA) kabul etmiştir. Yasa, kullanılmış yakıtın derin jeolojik depoda depolanmasını esas almış; alan seçimi, inşaat ve işletme sorumluluğunu Enerji Bakanlığı'na (DOE), lisanslamayı Nükleer Düzenleme Komisyonu'na (NRC), çevre standartlarını ise Çevre Koruma Ajansı'na (EPA) vermiştir [6]. 1987 değişiklikleriyle Kongre, DOE'nin çalışmalarını yalnızca Nevada'daki Yucca Mountain ile sınırlamıştır; Nevada eyaleti rıza göstermediği için bu karar bilimsel değil siyasi bir seçim olarak algılanmıştır [6]. DOE 2002'de Yucca Mountain'ın uygun olduğunu bildirmiş; Başkan ve Kongre bunu kabul etmiş, lisans başvurusu 3 Haziran 2008'de NRC'ye sunulmuştur [6]. 2009'da lisans kurulu Nevada'nın 300 itirazını kabul etmiştir.

7.2 Programın askıya alınması

Obama yönetimi 2010'da projeye finansmanı durdurmuş ve DOE, 3 Mart 2010'da lisans başvurusunu geri çekme talebinde bulunmuştur; NRC lisans kurulu bu talebi 3–0 oyla reddetmiş, ancak süreç 2011'de askıya alınmıştır [6]. Kongre, 2010'dan sonra Yucca Mountain programına kaynak ayırmamıştır [6]. Federal temyiz mahkemesi 13 Ağustos 2013'te NRC'ye lisans sürecini sürdürmesi için emir vermiş; NRC personeli güvenlik değerlendirme raporunun (SER) ciltlerini tamamlayarak deponun uygulanabilir standartları karşılayacağını belirtmiş, ancak arazi ve su hakları koşulları ile çevresel etki raporuna ek tamamlanmadan inşaata izin verilmemesini önermiştir [6].

7.3 Rıza temelli yaklaşım ve güncel durum

Amerika'nın Nükleer Geleceği Mavi Şerit Komisyonu 26 Ocak 2012'de sonuç raporunu yayımlayarak depolama tesislerinin rızaya dayalı bir süreçle seçilmesini önermiştir; DOE, Aralık 2015'te görüş çağrısı yapmış, 12 Ocak 2017'de taslak süreci yayımlamıştır [6]. Trump yönetiminin 2018–2020 mali yıllarında Yucca Mountain'ı canlandırmaya yönelik bütçe talepleri Kongre'ce onaylanmamış; DOE rıza temelli yerleştirme yaklaşımları geliştirmek üzere 12 konsorsiyuma yaklaşık 2'şer milyon dolar kaynak sağlamıştır [6]. 28 Ocak 2026'da DOE, eyaletleri kullanılmış yakıt depolama ve kalıcı depolama alanlarını da içerebilecek "Nuclear Lifecycle Innovation Campuses" projesine ev sahipliği yapmaya davet etmiştir [6]. Yucca Mountain, finansmansız olsa da yasal olarak tek aday alan olarak kalmaktadır [6].

7.4 WIPP: savunma kaynaklı atıklar için işleyen bir jeolojik depo

New Mexico'daki Carlsbad yakınında, yaklaşık 650 metre derinlikteki tabakalı tuz formasyonunda kurulan Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 1999'da işletmeye açılmıştır; ancak yalnızca savunma faaliyetlerinden kaynaklanan transuranik atıklar için tasarlanmıştır ve ticari kullanılmış yakıtın deposu değildir. 2014'te yaşanan yangın ve radyolojik sızıntı olayları, jeolojik depoların işletme güvenliğinin ayrıca ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Tablo 7. ABD'nin kullanılmış yakıt ve atık depolama politikasında kronoloji

Tarih	Gelişme
1982	Nükleer Atık Politikası Yasası (NWPA) kabul edilmiş; DOE, NRC ve EPA'nın rolleri belirlenmiştir [6].
1987	NWPA değişiklikleri DOE'nin alan çalışmalarını yalnızca Yucca Mountain ile sınırlamıştır [6].
1999	WIPP işletmeye açılmıştır (savunma kaynaklı transuranik atıklar).

Tarih	Gelişme
2002	DOE Yucca Mountain'ı uygun bulmuş; Başkan ve Kongre onaylamıştır [6].
3 Haziran 2008	DOE, NRC'ye Yucca Mountain inşaat izni için lisans başvurusu yapmıştır [6].
2010–2011	DOE 3 Mart 2010'da başvurunun geri çekilmesini talep etmiş, program finansmanı kesilmiş; lisans süreci 2011'de askıya alınmıştır [6].
26 Ocak 2012	Mavi Şerit Komisyonu sonuç raporunu yayımlamış; rıza temelli yaklaşımı önermiştir [6].
13 Ağustos 2013	Federal temyiz mahkemesi, NRC'ye Yucca Mountain lisans sürecini sürdürme emri vermiştir [6].
2014	WIPP'te yangın ve radyolojik sızıntı olayları yaşanmıştır.
2015–2020	DOE rıza temelli süreç için görüş toplamış ve taslak süreci yayımlamış (Aralık 2015–Ocak 2017); Yucca Mountain'ı canlandırma bütçe talepleri Kongre'ce kabul edilmemiştir (2018–2020) [6].
28 Ocak 2026	DOE, eyaletleri "Nuclear Lifecycle Innovation Campuses" için davet etmiştir [6].

8. Türkiye'nin Mevcut Durumu

8.1 Nükleer program ve hukuki çerçeve

Türkiye, Mersin'deki Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nde dört VVER-1200 reaktör inşa etmekte; Sinop bölgesinde dört ünitelik bir genişleme programlamaktadır [1]. Resmî hedef, 2050 yılına kadar 20 GWe nükleer kapasiteye ulaşmaktır [12]. Radyoaktif atık yönetimi alanında temel yasal çerçeve, Mart 2022'de çıkarılan 7381 sayılı Nükleer Düzenleme Kanunu ve 95 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile kurulan Nükleer Düzenleme Kurumu'dur (NDK) [1]. TENMAK ise İstanbul'da bir radyoaktif atık işleme ve depolama tesisi işletmekte ve ulusal radyoaktif atık envanterinin oluşturulmasından sorumlu olup envanter beş yılda bir güncellenmektedir [1].

8.2 Kullanılmış yakıt yönetiminin planlanması

Türkiye'nin radyoaktif atık yönetimi açısından değerlendirilmesi gereken temel hususlar şunlardır:

- **Akkuyu'da radyoaktivitesi yüksek atık yönetiminin planlanması:** Akkuyu anlaşması kapsamında kullanılmış yakıtın bir süre santral alanında tutulduktan sonra Rusya'ya götürülmesi öngörülmektedir [11].
- **Geçici depolama:** Kullanılmış yakıtın ve diğer atıkların santral alanında geçici olarak depolanması.
- **Kalıcı depo:** Uzun vadeli kalıcı depo yeri ve buna ilişkin projeler belirsizdir.

IAEA'nın Türkiye hakkındaki Eylül 2022 tarihli IRRS değerlendirmesi, ulusal strateji belgesinin 2020 tarihli Ulusal Radyoaktif Atık Yönetim Planı olduğunu; kullanılmış yakıtın bir depolama tesisi hazır olana kadar santral alanında tutulmasının öngörüldüğünü; yeniden işlemenin de bir seçenek olarak değerlendirildiğini belirtmektedir [1]. Aynı raporda 2020 planına göre, Akkuyu'daki çok düşük düzeydeki atık depolama kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle bir yüzey deposunun en geç 2036'da işletmede olması gerektiği kaydedilmiştir [1].

Rusya'ya iade seçeneği, uzun vadeli sorumluluğu ortadan kaldırmamaktadır. Rusya'nın kendi mevzuatı uyarınca yeniden işleme sonrasında ortaya çıkan atıkların ülkeye iade edilebileceğine dikkat çeken değerlendirmeler vardır [11]; bu nedenle iade senaryosundan bağımsız olarak, atık iadesi, anlaşma kapsamı dışında kalan yakıt ve ileride beklenen kapasite artışı için ulusal bir yedek plana ihtiyaç duyulmaktadır.

8.3 Değerlendirme

IRRS raporu, Türkiye'de ulusal güvenlik politikası ve stratejisinin belgelenmediğini ve mevzuatta kamu katılımına ilişkin bir hüküm bulunmadığını tespit etmiştir [1]. Atık yönetimine ilişkin mevcut plan ise geçici depolamaya ve çok düşük düzeydeki atıklar için yüzey deposuna odaklanmakta; kullanılmış yakıt ve yüksek düzeydeki atıklar için derin jeolojik depolamanın alan seçimi, araştırma programı ve takvimi bulunmamaktadır. Türkiye'nin öncelikli olarak yapması gereken, kullanılmış yakıt için geçici depolama ile derin jeolojik depolamayı açık biçimde birbirinden ayıran, uzun vadeli bir ulusal programın belirlenmesidir. Kamuya açık belgeler temelinde bu yönde bir hazırlık görülmemektedir.

9. Sonuç ve Öneriler

Dünyadaki uygulamalar, kullanılmış nükleer yakıtın ve yüksek düzeydeki atıkların uzun vadeli yönetiminde derin jeolojik depolama yaklaşımının öne çıktığını göstermektedir. Finlandiya'nın Ekim 2026'da işletme lisansı alması bu yaklaşımın ilk kez uygulamaya geçtiğini; İsveç'te inşaatın başlaması ve Fransa'da lisanslama sürecinin ilerlemesi ise ikinci kuşak programların olgunlaştığını göstermektedir. Bu üç programın ortak özelliği, alan seçiminden inşaata kadar gelen sürecin onlarca yıl sürmesi ve yerel rızanın, düzenleyici güvence ile kamu katılımının sürecin bir parçası olmasıdır. Bugün için ise kullanılmış yakıtın büyük bölümü, Tablo 3'te görüldüğü gibi, havuzlarda, kuru fıçılarda ve ara depolarda korunmaktadır.

ABD'nin Yucca Mountain deneyimi, siyasi, hukuki ve toplumsal kabul süreçlerinin teknik kararlar kadar belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Almanya'nın Asse II'den Morsleben ve Gorleben'e uzanan deneyimi ise bilimsel ölçütlerden ve şeffaflıktan yoksun kararların uzun vadede çok büyük mali ve toplumsal maliyetlere yol açtığını, buna karşılık yasal güvence altındaki, bilimsel ve katılımcı bir alan seçim sürecinin yeniden başlangıç için zemin sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak Almanya'nın alan kararı hedefinin 2031'den yüzyılın ortasına ertelenmesi, bu sürecin de hızlı olmadığını göstermektedir.

Türkiye açısından öneriler:

- Kullanılmış nükleer yakıt için uzun vadeli, belgelenmiş bir ulusal strateji oluşturulmalı; bu strateji geçici depolama ile kalıcı derin jeolojik depolamayı açıkça birbirinden ayırmalıdır.
- Akkuyu'da kullanılmış yakıtın Rusya'ya götürülmesi öngörüsüne ek olarak, anlaşma kapsamı dışında kalan durumlar ve iade edilebilecek atıklar için bir yedek plan hazırlanmalıdır. Ayrıca en uygun güzergah bilimsel güvenlik kriterlerine göre seçilmeli ve uygulanmalıdır.
- Geçici depolama kapasitesi ve güvenlik gereklilikleri 20 GWe hedefi dikkate alınarak planlanmalıdır.
- Türkiye'nin jeolojik formasyonları bilimsel ölçütlerle değerlendirilmeli; yeraltı suyu, deprem, fay sistemleri ve uzun dönemli jeolojik kararlılık sistematik biçimde araştırılmalıdır.
- Uluslararası deneyimlerden yararlanılarak bağımsız düzenleyici denetim ve finansman sistemi (özel hesaplar dahil) geliştirilmelidir.
- Kalıcı derin jeolojik depo seçimi öncesinde bilimsel, çevresel ve toplumsal değerlendirmeler yapılmalı; çevre ve sivil toplum kuruluşlarının görüşleri alınmalı, IRRS'nin önerdiği kamu katılımı mekanizmaları kurulmalıdır.

Genel olarak kalıcı derin jeolojik depolama yalnızca bir mühendislik sorunu değildir. Jeoloji, malzeme bilimi, radyokimya, hidrojeoloji, çevre mühendisliği, hukuk ve kamu politikalarının birlikte ele alınmasını gerektiren çok disiplinli bir konudur.

10. Kaynakça

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA)

[1] IAEA (2022), Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Türkiye, Final Report, IAEA-NS-IRRS-2022/07, 5–16 Eylül 2022.

[2] IAEA (22 Haziran 2026), IAEA Releases First Public Tool to Map the World's Spent Nuclear Fuel (Global Spent Nuclear Fuel Inventory).

[3] IAEA, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 ve ilgili basın bildirimi.

Karşılaştırmalı program derlemeleri ve Amerika Birleşik Devletleri

[4] Nuclear Waste Management Organization (NWMO, Kanada), What other countries are doing (ülke programları derlemesi, 2026).

[5] U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, Status of Repository Programs for Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, Mart 2026.

[6] Congressional Research Service, Civilian Nuclear Waste Disposal (RL33461); Congressional Research Service, Nuclear Energy: Overview of Congressional Issues (R42853), 5 Ağustos 2026 güncellemesi.

Avrupa ve ulusal kuruluşlar

[7] Finlandiya Ekonomi ve İstihdam Bakanlığı (30 Aralık 2021), Posiva to apply for an operating licence for a spent nuclear fuel disposal facility; Posiva, ONKALO bilgi sayfaları; CP24 (22 Ekim 2026), Finland grants licence for world's first nuclear waste repository; Euronews / AP (9 Nisan 2026), In Finland, the world's first facility to bury nuclear waste is set to begin operations.

[8] SKB, Our task; Construction begins on Swedish Spent Fuel Repository (Ocak 2025); World Nuclear News (2025), Sweden breaks ground for used fuel repository; ANS Radwaste Solutions (29 Ekim 2024), Sweden's SKB approved to begin construction of spent fuel repository.

[9] World Nuclear News (18 Ocak 2023), Application lodged for construction of French repository; AFP / Connaissance des Énergies (16 Mayıs 2026), Déchets radioactifs: encore des années de demandes d'autorisations pour le projet Cigéo.

[10] BGE, History of the Asse II mine; Radioactive waste in the Asse II mine; Morsleben ve Konrad bilgi sayfaları; BASE, Morsleben ve Konrad repository bilgi sayfaları (2024); epd / evangelisch.de (27 Ekim 2026), Atommüll: Kommission schließt weitere Flächen für Endlagerung aus; BGE (27 Şubat 2026), Bürgerforum 2026.

Türkiye

[11] EDAM, Turkey's Nuclear Power Plans and Nuclear Fuel Cycle Options; Bellona Foundation (24 Mayıs 2017), Rosatom's vague plans could create radwaste crisis in Turkey.

[12] Kılıç S. S. ve diğ., Economic and financial approaches to spent nuclear fuel, radioactive waste, and decommissioning: an international review and implications for Türkiye.

YAZIMIZIN SONU

Kaynaklara doğrudan erişim

- IAEA – Global Spent Nuclear Fuel Inventory (etkileşimli araç)
- IAEA – Türkiye IRRS Değerlendirmesi (2022)

- NWMO – What other countries are doing
- ABD NWTRB – Status of Repository Programs (Mart 2026)
- CRS – Nuclear Energy: Overview of Congressional Issues
- BGE – History of the Asse II mine
- Posiva – Operating licence application (Finlandiya Hükümeti, 2021)
- SKB – Our task
- World Nuclear News – Cigéo kuruluş izni başvurusu
- epd – BGE Ekim 2026 çalışma durumu

Kısaltmalar

Kısaltma	Açılım	Kısaltma	Açılım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri	**MW**	Megawatt
AFP	Agence France-Presse (Fransız haber ajansı)	**NDK**	Nükleer Düzenleme Kurumu (Türkiye)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Fransa Ulusal Radyoaktif Atık Yönetim Ajansı)	**Nagra**	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (İsviçre Ulusal Radyoaktif Atık Depolama Kooperatifi)
ANS	American Nuclear Society (Amerikan Nükleer Topluluğu)	**NND**	Norsk Nukleær Dekommisjonering (Norveç Nükleer Söküm Kuruluşu)
AP	Associated Press (haber ajansı)	**NRC**	Nuclear Regulatory Commission (ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu)
ATC	Almacén Temporal Centralizado (İspanya merkezi geçici depo projesi)	**NWMO**	Nuclear Waste Management Organization (Kanada Nükleer Atık Yönetim Kuruluşu)
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenliği Dairesi)	**NWPA**	Nuclear Waste Policy Act (ABD Nükleer Atık Politikası Yasası)
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz (Almanya Federal Radyasyondan Korunma Dairesi)	**NWTRB**	Nuclear Waste Technical Review Board (ABD Nükleer Atık Teknik İnceleme Kurulu)
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung (Alman Federal Depolama Şirketi)	**ONKALO**	Posiva'nın Olkiluoto'daki yeraltı araştırma ve depo tesisi (Fince "mağara")
Castor	Cask for Storage and Transport Of Radioactive material (kullanılmış yakıt depolama ve taşıma kabı)	**PURAM**	Public Limited Company for Radioactive Waste Management (Macaristan Radyoaktif Atık Yönetim Şirketi)
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (Hollanda Merkezi Radyoaktif Atık Kuruluşu)	**RFS**	Recyclable-Fuel Storage Company (Japonya, Mutsu reaktör dışı kuru depo işletmecisi)
CRS	Congressional Research Service (ABD Kongre Araştırma Servisi)	**SER**	Safety Evaluation Report (Güvenlik Değerlendirme Raporu)
DAC	Demande d'autorisation de création (Cigéo kuruluş izni başvurusu)	**SFR**	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (Forsmark düşük ve orta düzeyli atık deposu)
DGD	Derin Jeolojik Depolama (Deep Geological Disposal)	**SKB**	Svensk Kärnbränslehantering (İsveç Nükleer Yakıt ve Atık Yönetim Şirketi)
DOE	Department of Energy (ABD Enerji Bakanlığı)	**StandAG**	Standortauswahlgesetz (Alman Alan Seçim Yasası)
EDAM	Ekonomi ve Dış Politika Araştırmalar Merkezi	**SÚRAO**	Správa úložišť radioaktivních odpadů (Çekya Radyoaktif Atık Depoları İdaresi)
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (İspanya Ulusal Radyoaktif Atık Şirketi)	**TBq**	Terabekerel (aktivite birimi)
EPA	Environmental Protection Agency (ABD Çevre Koruma Ajansı)	**TENMAK**	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
GWe	Gigawatt elektrik	**tHM**	Ton ağır metal (kullanılmış yakıt miktarı birimi)
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslaggebouw (Hollanda yüksek düzeyli atık depolama binası)	**tU**	Ton uranyum
HADES	High-Activity Disposal Experimental Site (Belçika, Mol yeraltı araştırma laboratuvarı)	**TVO**	Teollisuuden Voima Oyj (Finlandiya, Olkiluoto santral işletmecisi)

Kısaltma	Açılım	Kısaltma	Açılım
IAEA	International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı)	**ÚJD**	Úrad jadrového dozoru (Slovakya Nükleer Düzenleme Kurumu)
IRRS	Integrated Regulatory Review Service (IAEA Bütünleşik Düzenleyici Gözden Geçirme Hizmeti)	**VVER**	Rusya tasarımı basınçlı su reaktörü (Akkuyu'da VVER-1200)
JAVYS	Jadrová a vyraďovacia spoločnosť (Slovakya Nükleer ve Söküm Şirketi)	**WIPP**	Waste Isolation Pilot Plant (ABD savunma kaynaklı transuranik atık deposu)
KBS-3	İsveç ve Finlandiya'nın kullanılmış yakıt için kullandığı çoklu bariyer yöntemi	**Zwilag**	Zwischenlager Würenlingen AG (İsviçre merkezi ara depo)