

Derin Kuyu Nükleer Fisyon Reaktörleri

Bu yazımız ilgili kaynaklardan YZ destekli olarak hazırlanmıştır
Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi Almanya ybatakan4@gmail.com 18.03.2026

Teknoloji · Boyutlar · Yakıt Yönetimi · Soğutma Devreleri · Güvenlik · Ekonomi · Atık & Radyasyon
Deep Fission, Inc. Yerçekimi Nükleer Reaktörü™ — NRC Kavramsal Tasarım Raporu & Akademik Literatür

Bu makale; teknik boyutlar, yakıt yönetimi, kullanılmış yakıt havuzu, soğutma devreleri, baca gazı, atık su kanalı ve radyasyon dedektörlerini de içeren tüm çevresel kontrol sistemlerini kapsamaktadır. Tüm veriler NRC ADAMS ML24172A286, Lazard (2023), IEA (2024) ve peer-reviewed literatür kaynaklıdır.

1. Giriş ve Teknolojik Çerçeve

Nükleer fisyon reaktörleri, birim hacimde en yüksek enerji yoğunluğunda, karbonsuz ve kesintisiz taban elektrik kaynaklarıdır. Lazard (2023) ve Steigerwald vd. (2023) verilerine göre geleneksel büyük reaktörlerin (1.000–1.600 MWe) Dengelenmiş Enerji Maliyeti (LCOE — Levelized Cost of Energy) 14,1–22,1 \$Cent/kWh düzeyine ulaşmaktadır. Küçük Modüler Reaktörler (KMR) kısmi çözüm olarak önerilmiş; ancak NuScale projesinin 2023'te iptal edilmesi ve bağımsız analizlerin LW-KMR medyan LCOE'sini ~21,8 \$Cent/kWh hesaplaması bu yaklaşımın sınırlarını ortaya koymuş ve SMR maliyetlerinin de ucuz olmayacağı anlaşılmıştır. Ayrıca bu fiyatlara oransal olarak şirket işletme giderleri (sigorta, personel, onarım, bakım) ve uranyum yakıtı yenileme giderleri de eklenince kWh fiyatları epey artacaktır.

Not: LCOE = Levelized Cost of Energy: Dengelenmiş Enerji Maliyeti (ya da Eşdeğer Enerji Maliyeti) Ne anlama gelir? Bir enerji santralinin tüm ömrü boyunca ürettiği her bir MWh elektriğin gerçek maliyetidir. Hesaba şunlar dahil edilir:

- İnşaat / yatırım maliyeti
- İşletme ve bakım maliyeti
- Yakıt maliyeti
- Finansman faizi
- Devre dışı bırakma maliyeti

Deep Fission, Inc. (Berkeley, Kaliforniya, 2023; Nobel ödüllü fizikçi Richard Muller ve kızı Liz Muller tarafından kurulmuştur) Bu şirket yukarıda açıklanan yüksek maliyet sorununa köklü bir mühendislik çözümü önermektedir: **milyonlarca dolarlık reaktör basınç kabı, güvenlik binaları ve güvenlik sistemleri, zırhlama çevresi gibi pahalı yüzey yapıları yerine reaktörü ~1,6 km derine gömmekle tüm bunlara gerek kalmayacaktır. Ayrıca reaktör yapımı 10-20 yıl değil sadece 6 ay sürecektir.**

Temel Teknik Parametreler (NRC ADAMS ML24172A286)

- Reaktör silindiri (canister): ~66 cm çap (26 inç), ~9,1 m yükseklik (30 ft)
- Kuyu çapı: min. ~76 cm (30 inç) — reaktör ile kasa arasında su dolaşım kanalı
- Yerleştirme derinliği: ~1.450–1.560 m (~1 mil)
- Çalışma basıncı: ~160 atm — 1.450 m su sütununun hidrostatik basıncıyla pasif olarak sağlanır
- Yakıt: 4 adet 17×17 DZU yakıt destesi — 2×2 kare dizi — toplam ~2.628 kg UO₂
- Güç çıkışı: 15 MWe/ünite (47 MWt termal) — 100 ünite = 1,5 GWe
- Yakıt değişim periyodu: ~18–24 ayda bir (1/3 tükenen yakıt değiştirilir)
- İnşaat süresi: ~6 ay/reaktör — Hedef LCOE: \$50–70/MWh (Deep Fission, 2025)**

20 cm'lik boru notu: Mart 2026'da başlayan 8 inç (20 cm) sondaj reaktör kuyusu değil, zemin karakterizasyonu için veri toplama kuyusudur. Asıl reaktör kuyusu min. 76 cm (30 inç) çapında açılacaktır.

2. Reaktör Silindir Kesiti ve Ekipman Dizilimi

Şekil 1, dikey kuyu kesitini (A), reaktör kabı büyütülmüş kesitini (B) ve enine kesiti (C) bir arada sunmaktadır. 76 cm'lik kuyuya 66 cm'lik reaktör silindiri yerleştirilir; aralarındaki halka boşluğundan soğutma suyu dolaşır.

Şekil 1. Reaktör Silindiri Dikey Kesiti ve Kuyu İçi Ekipman Dizilimi (Kaynak: NRC ADAMS ML24172A286)



3. Dağıtım Konfigürasyonları ve Ekonomik Analiz

Her ünite 6 ay içinde devreye alınabilir; aynı alana 1–100+ ünite yerleştirilerek 15 MWe'den 1,5+ GWe'ye kademeli büyüme sağlanır. **LCOE = \$Cent 5–7/kWh hedefi; yüzey yapılarının elimine edilmesi ve 6 aylık inşaat döngüsüyle elde edilmesi planlanmaktadır.**

Tablo 1. Dağıtım Konfigürasyonları ve Teknik Parametreler

Parametre	Teknoloji & Enerji	Ticari / Endüstriyel	Askeri / Uzak yerlerde kurulursa	Tek Ünite
Reaktör sayısı	20–100 adet	10–19 adet	1–9 adet	1
Güç çıkışı	300 MWe–1,5+ GWe	150–285 MWe	15–135 MWe	15 MWe
Reaktör çapı / boyu	~66 cm / ~9,1 m	~66 cm / ~9,1 m	~66 cm / ~9,1 m	~66 cm / ~9,1 m
Hedef LCOE	\$Cent 5–7/ kWh	\$Cent 5–7/ kWh	\$Cent 5–7/ kWh	\$Cent 5–7/ kWh
İnşaat süresi	~6 ay/reaktör	~6 ay/reaktör	~6 ay/reaktör	~6 ay
Yerleştirme derinliği	~1.450–1.560 m	~1.450–1.560 m	~1.450–1.560 m	~1.450–1.560 m

Şekil 2. LCOE Karşılaştırması — Enerji Teknolojilerine Göre (Kaynak: IEA 2024, Lazard 2023, ScienceDirect 2023)



4. Yakıt Destesi, Değişim Süreci ve Kullanılmış Yakıt Yönetimi

4.1 Yakıt Destesi Özellikleri

Her reaktör çekirdeği 4 adet 17×17 standart PWR yakıt destesi barındırmaktadır. Her destenin 289 konumundan 264'ü yakıt çubuğu, 24'ü kontrol çubuğu kılavuzu, 1'i enstrümantasyon tüpüdür. Yakıt peleti: ~8 mm çap, ~10 mm boy UO₂ sinterlenmiş seramik; zenginleştirme < %5 U-235 (DZU). Bir deste kütlesi ~657 kg, 4 deste toplam ~2.628 kg UO₂.

4.2 Yakıt Değişim Süreci

Reaktör ~18–24 ayda bir durdurulur. Bir iş makinesi (workover rig) reaktör silindirini kuyudan yüzeye çeker. Kullanılmış 4 yakıt destesi kurşun/çelik zırlı taşıma kaseti (cask) içine alınır; 4 adet yeni DZU yakıt destesi kanistıra yüklenir. Kanistır kuyuya yeniden indirilir. Toplam kapalı kalma süresi yaklaşık 2–5 gün olup geleneksel reaktörlere göre çok kısa bir bakım penceresidir.

4.3 Kullanılmış Yakıt — Bekletme Havuzu ve Uzun Dönem Yönetimi

Kullanılmış yakıt çıkarıldığında ~290–300 °C sıcaklıkta ve yoğun gama radyasyonu yayan yüksek aktiviteli atık niteliğindedir. Deep Fission iki seçenek sunmaktadır:

Seçenek 1 — Derin Kuyu Depolama (Tercihli): Kullanılmış yakıt destelerinin reaktörün bulunduğu derin borehole içinde kalıcı olarak depolanması. Derin jeolojik izolasyon, radyonüklid göçünü yüz binlerce yıl boyunca engeller. Bu yöntem NRC (Nuclear Regulatory Commission) onayı gerektirmekte olup Deep Fission'ın patentli yaklaşımıdır.

Seçenek 2 — Geleneksel Yol: Kullanılmış yakıt yüzeyde soğutma havuzuna (minimum 3–5 yıl, < 50°C, sürekli sirkülasyonlu su içinde) alınır. Ardından pasif hava soğutmalı CASTOR kasete konularak NRC lisanslı geçici kuru depo sahasında bekletilir. Nihai bertaraf: ABD'de henüz işlevsel olmayan derin jeolojik nihai depo (Yucca Mountain projesi beklemede).

Şekil 3. Yakıt Destesi Yapısı, Değişim Süreci ve Kullanılmış Yakıt Yönetim Zaman Çizelgesi



5. Soğutma Devreleri — Su Kaynakları ve Atık Su

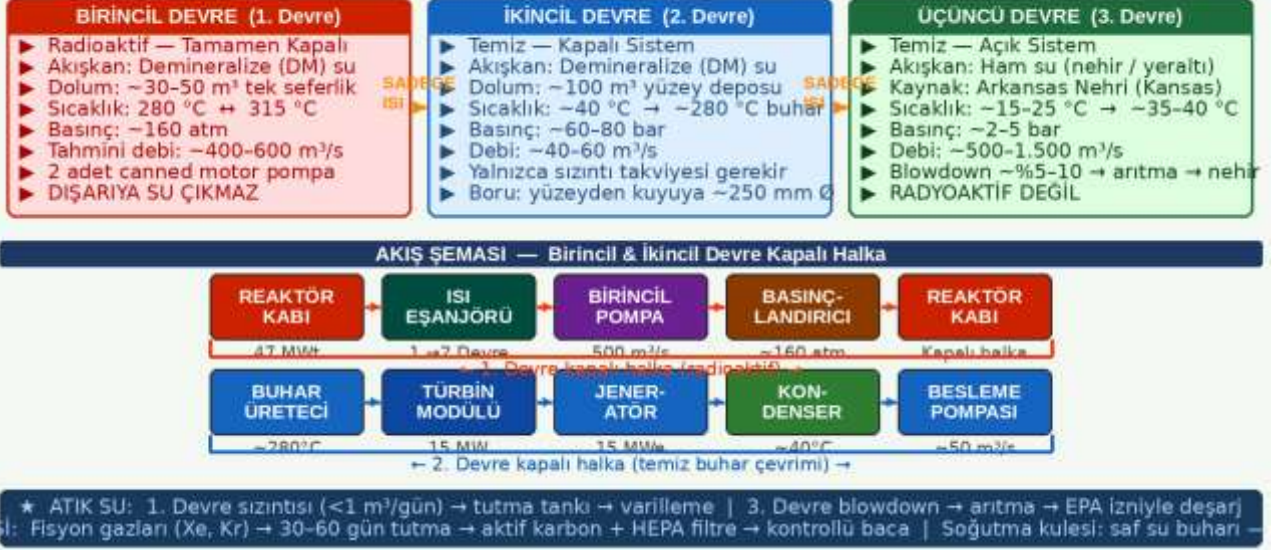
Sistem üç bağımsız soğutma devresiyle çalışır; sular hiçbir koşulda birbirine karışmaz. Her devre yalnızca ısı aktarımıyla bağlantılıdır.

- Devre (Radioaktif, Kapalı):** ~30–50 m³ demineralize su tek seferlik dolum. 280–315 °C, ~160 atm, ~400–600 m³/s. 2 adet canned motor pompa. Sızıntı < 1 m³/gün hedefi.
- Devre (Temiz, Kapalı):** ~100 m³ demineralize su. ~280 °C buhar, ~60–80 bar, ~40–60 m³/s. Yüzeyden kuyuya ~250 mm Ø çelik boru hattı.
- Devre (Temiz, Açık):** Arkansas Nehri — ~500–1.500 m³/s. Arıtma → soğutma kulesi. Blowdown ~%5–10 → EPA NPDES izniyle deşarj.

Şekil 4. Soğutma Devreleri Özeti — Üç Bağımsız Devre, Akış Şeması, Atık Su ve Gaz Tahliyesi

ŞEKİL 2. SOĞUTMA DEVRELERİ — ÜÇ BAĞIMSIZ DEVRE (Sular Hiçbir Zaman Karışmaz)

1. Devre: Radioaktif / Kapalı / Kuyu İçİ · 2. Devre: Temiz Buhar / Kapalı · 3. Devre: Nehir Suyu / Açık / Yüzey

**6. Baca, Atık Su Kanalı ve Radyasyon Ölçüm Sistemleri****6.1 Baca ve Gaz Tahliye Sistemi**

Filyon gazları (Xe-133, Kr-85, I-131 izleri) reaktörün kapalı birincil devresinde oluşur. Küçük miktarlarda birincil devre basınçlandırıcı tahliyesiyle serbest kalabilir. İşlem zinciri: Tutma tankı (30-60 gün radyoaktif bozunma) → Aktif karbon adsorpsiyonu → HEPA filtresi (> %99,97 etkinlik) → Sürekli Emisyon İzleme Sistemi (CEMS) dedektörü → 30-40 m yüksekliğindeki kontrollü baca. Soğutma kulesi yalnızca saf su buharı (H₂O) atar — radyoaktif değildir; drift eliminatörle damla kaybı < %0,01 sınırlıdır.

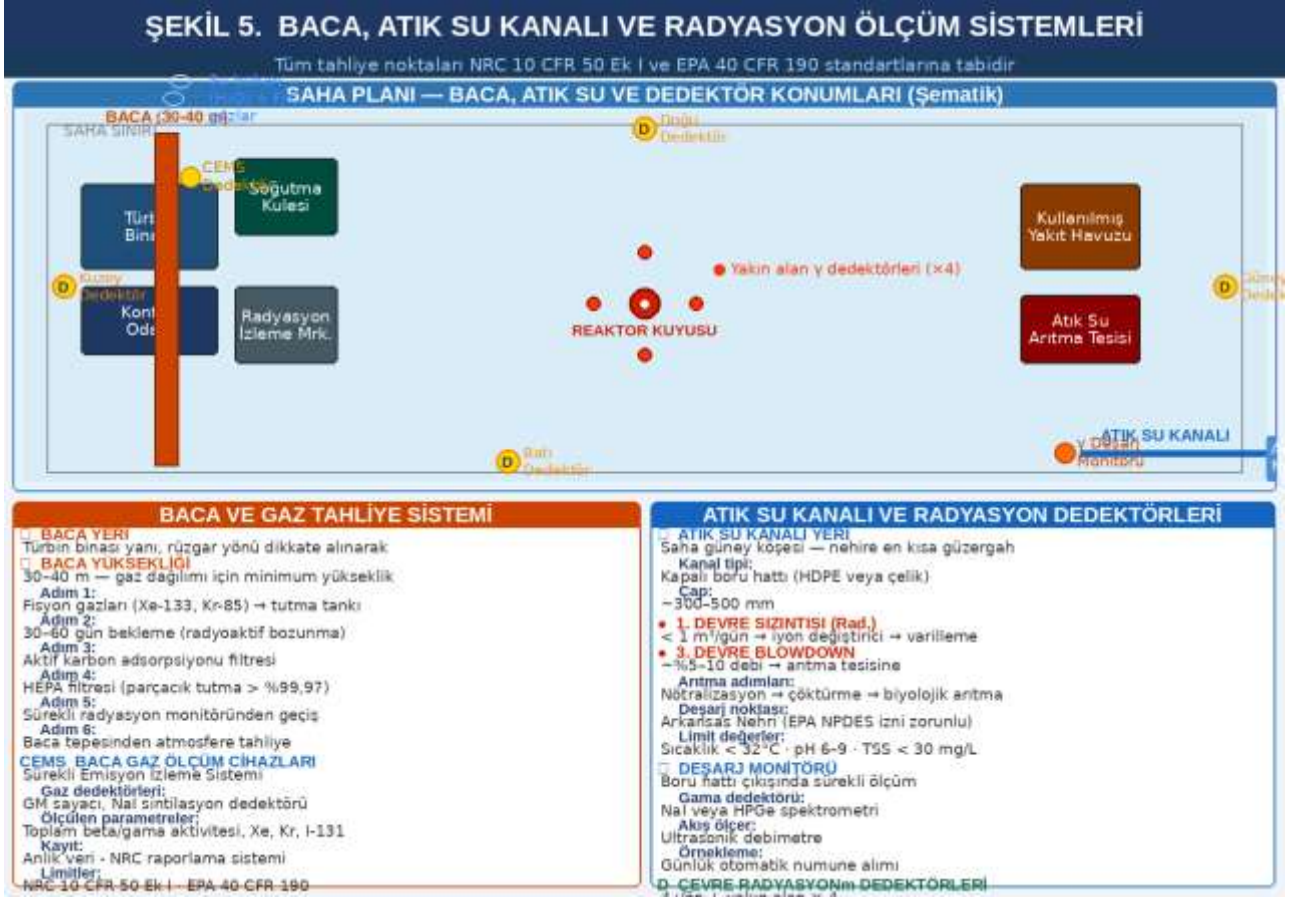
6.2 Atık Su Kanalı

Kapalı boru hattı (HDPE veya çelik, ~300-500 mm çap) sahadan Arkansas Nehrine uzanır. Birincil devre sızıntısı (< 1 m³/gün) varillenecek ayrıca bertaraf edilir, kanala verilmez. Üçüncü devre blowdown suyu arıtma tesisinden geçtikten sonra EPA NPDES izniyle nehre deşarj edilir; sıcaklık < 32 °C, pH 6-9, askı katı < 30 mg/L sınırlarına uyulur.

6.3 Radyasyon Dedektörleri

- Reaktör yakın alanı: 4 yönde GM sayacı + Nal sintilasyon dedektörü — anlık sürekli izleme
- Baca gazı: CEMS — toplam beta/gama aktivitesi, Xe-133, Kr-85, I-131 ölçümü
- Deşarj kanalı: Nal veya HPGe gama spektrometrisi + ultrasonik debimetre
- Çevre (4 yön): TLD (Termoluminesans Dozimetre) + GM sayacı dizisi — aylık okuma
- Çalışanlar: Kişisel TLD + Elektronik Kişisel Dozimetre (EPD) — tüm saha personeli
- Limitler: NRC 10 CFR 50 Ek I · EPA 40 CFR 190 · IAEA Güvenlik Kılavuzları

Şekil 5. Saha Planı — Baca, Atık Su Kanalı ve Radyasyon Dedektörlerinin Konumları



ÖZET — Çevresel Kontrol: Baca (HEPA+aktif karbon filtreli, CEMS'li, 30–40 m) → Fiyon gazı tahliyesi. Atık su kanalı (kapalı boru, arıtmalı, EPA izinli) → Nehir deşarjı. Çevre dedektörleri (4 yön TLD+GM) + baca CEMS + deşarj monitörü + kişisel dozimetre → Tüm tahliyeler NRC ve EPA denetimiyle.

7. Güvenlik Analizi ve Gelişme Durumu

7.1 Pasif Güvenlik

- Hidrostatik basınç: ~1.450 m su sütunu ~160 atm sağlar — aktif basınçlandırıcı gerekmez
- Pasif çekirdek soğutma: Doğal sirkülasyon artık ısıyı pompa olmaksızın uzaklaştırır; ısı eşanjör AÇSS görevi görür
- Fiziksel izolasyon: Ana kaya — radyasyon kalkını, sismik sönüm, yüzey tehlikelerine karşı koruma
- Otomatik kapatma: Soğutucu kaynarsa buhar moderasyonu yitirir; zincirleme tepkime müdahalesiz durur

7.2 Kilometre Taşları

Aralık 2025: DOE Reaktör Pilot Programı anlaşması — Kansas, Parsons, Great Plains Endüstri Parkı

Şubat 2026: 80 milyon dolar finansman — Urenco USA DZU yakıt anlaşması

Mart 2026: İlk 8 inç (20 cm) veri toplama kuyusu sondajı (~1.830 m)

Temmuz 2026 (Hedef): Reaktör kuyusu + kanıştırma yerleştirme + ilk kritiklik

2029: Endeavour II — 2 GW taahhütlü ticari veri merkezi reaktörleri

SORULAR YANITLAR

Soru 1: Kontrol Çubukları ve Yakıt Elemanları 1.500 m Derinlikte Nasıl Hareket Ettirilecek?

Kontrol Çubukları — İşletme Sırasında

Kontrol çubuklarının reaktörü durdurmak veya güç ayarlamak için birkaç santimetre yukarı-aşağı hareket ettirilmesi sorunu, 1.500 m derinliğe rağmen çözülebilir bir mühendislik sorunudur — çünkü bu hareketler kuyu dibindeki yerel mekanizmalar tarafından gerçekleştirilir:

- Kontrol çubuğu tahrik mekanizması (**Control Rod Drive Mechanism — CRDM**) doğrudan reaktör kabının üst kısmına monte edilir
- Yüzeyden ince elektrik kabloları (~1.500 m) bu motor mekanizmasına güç ve sinyal iletir
- Tüm kontrol ve enstrümantasyon bağlantılarının uzaktan yöntemlerle yapılması/sökülmesi gerekmektedir [MDPI](#); **bu petrol & gaz sektöründe** tel kablo (wireline) ve bobin boru (coiled tubing) yöntemleriyle rutin biçimde yapılmaktadır
- Elektrik kesilirse kontrol çubukları **yerçekimiyle** düşerek reaktörü güvenli kapatar (pasif güvenlik)

Yani kontrol çubukları için mesafe sorun değildir — kumanda yüzeyden kablo ile yapılır, hareket ettiriciler ise kuyu dibindedir.

Yakıt Elemanlarının Değiştirilmesi — Asıl Zorlu Soru

Deep Fission kendi web sitesinde tüm reaktörün "lifting cables" (kaldırma kabloları) ile kuyudan bütünüyle yukarı çekileceğini belirtmektedir. [MDPI](#) Yani yakıt elemanları **tek tek çıkarılmaz** — tüm reaktör kabı bir bütün olarak yüzeye getirilir:

Adımlar:

1. Reaktör kapatılır
2. Kuyu ağzına ağır kaldırma vincine yer hazırlanır
3. Yaklaşık **1.500 m uzunluğundaki kablo + reaktör kabı** vinçle çekilir — vincin kaldırma kapasitesi hem 1,5 km uzunluğundaki kablo ağırlığını hem reaktör modülü ağırlığını karşılamalıdır [MDPI](#)
4. Reaktör kabı yüzeye çıktığında yakıt elemanları değiştirilir, yeni yakıt yüklenir
5. Reaktör yeniden kuyuya indirilir

Petrol & gaz sektöründe bu işlem rutin kabul edilmektedir. Deep Isolation şirketine göre "derin kuyulara ekipman yerleştirme ve geri alma yöntemleri son derece gelişmiştir; wireline, traktör, coiled tubing veya sondaj borusu yöntemleriyle rutin olarak gerçekleştirilmektedir." [Strategyinternational](#)

Soru 2: Yüksek Radyasyonlu Yakıt, İnsanlar Işınlanmadan Nasıl Çıkarılacak?

Bu soru, tasarımın **en ciddi mühendislik belirsizliğini** işaret etmektedir. Dürüst yanıt şudur:

Temel Zorluk: Radyasyon Dozu

Reaktör kuyudan çıktığında yakıt elemanları yüksek aktivitedir. Geleneksel reaktörlerde yakıt değişimi **su altında** yapılır — su hem soğutucu hem radyasyon kalkanıdır. Burada durum farklıdır:

- Reaktör kabı yüzeye çıktığında su kalkanı azalır
- Çalışanların doğrudan temas etmesi **kesinlikle mümkün değildir**

- IAEA belgelerine göre kullanılmış yakıt yönetiminin tüm aşamaları — reaktör havuzundan kasete yerleştirmeye kadar — uzaktan kontrol sistemleri, su altı kameralar ve robot maşaları (manipülatörler) ile gerçekleştirilmektedir [ScienceDirect](#)

Önerilen Yaklaşım

Deep Fission'ın NRC'ye sunduğu kavramsal tasarım raporuna göre reaktör kuyudan çıkarıldıktan sonra aynı kuyuya yeni bir reaktör indirilebilmektedir; bazı boru hatlarının yeniden kullanılması mümkün görünmektedir. Kullanılmış yakıtla birlikte reaktörün kuyuda bırakılması da bir seçenek olarak önerilmektedir — bu durumda kuyu bir kuru depo kaseti işlevi görür. [GLOBSEC](#)

Yakıt **kuyuya bırakılırsa** (Seçenek 1 — Deep Fission'ın tercih ettiği patentli yöntem):

- Sorun büyük ölçüde ortadan kalkar — kimse yakıtı dokunmak zorunda kalmaz
- Deep Fission, kullanılmış yakıt yönetimi için Deep Isolation şirketiyle bir mutabakat muhtırası (MOU) imzalamıştır; bu anlaşma Deep Isolation'ın derin kuyu bertaraf teknolojisinin lisanslanmasını ve kullanılmasını araştıracaktır [World Nuclear Association](#)

Yakıt **yüzeye çıkarılacaksa** (Seçenek 2):

- Reaktör kabı özel zırhlı bir transfer kasası içinde çekilir
- Tüm işlemler **uzaktan kumandalı robotik manipülatörler** ile yapılır
- İnsanlar güvenli uzaklıkta, kurşun camdan izler
- Süre: Geleneksel reaktörlerde yakıt transferi 1–3 hafta sürer; bu tasarımda daha uzun sürebilir

NRC Onayı Gerekli mi?

Kesinlikle evet — ve bu süreç henüz tanımlanmamıştır.

Dünyanın hiçbir yerinde bir mil derinliğe reaktör yerleştirmeye NRC'nin nasıl lisans vereceği hâlâ yanıtız bir sorudur. [MDPI](#) NRC'nin yakıt değişim prosedürleri ve radyasyon koruması için çok ayrıntılı kuralları (10 CFR 50, 10 CFR 20) mevcuttur; ancak bunların tümü **yüzey reaktörleri** için geliştirilmiştir. Deep Fission vakası için:

- Yeni prosedürel gereklilikler tanımlanmalıdır
- Uzaktan operasyon ve robotik sistemler NRC tarafından onaylanmalıdır
- İşçi radyasyon dozu (ALARA prensibi) ve kazaya müdahale planları hazırlanmalıdır
- Uzmanlar, geri alınabilirlik (retrievability) gerekliliklerinin derin kuyu sistemlerine uygulanmasının maliyeti önemli ölçüde artırabileceğini ve teknik güçlükler doğurabileceğini vurgulamaktadır [NucNet](#)

Özet Değerlendirme

Konu	Durum
Kontrol çubuğu kumandası	Çözülebilir — kablo ile uzaktan kumanda
Reaktörü yüzeye çekme	Petrol & gaz sektöründe benzer işlemler rutin
Yakıt değişimi — tercihlili yol	Yakıtı kuyuda bırakmak (derin depo)
Yakıt değişimi — alternatif	Robotik uzaktan manipülasyon, zırhlı transfer kasası
İnsan ışınlaması riski	Robotik sistemlerle önlenabilir — ancak prosedür tanımlanmamış
NRC onayı	Zorunlu — henüz mevcut değil, yeni çerçeve gerekiyor
En büyük belirsizlik	Yakıt değişim prosedürünün NRC tarafından lisanslanması

8. Sonuç ve Kaynaklar

Deep Fission Yerçekimi Nükleer Reaktörü, fiziksel temelleri sağlam ve çevresel kontrol sistemleri tasarlanmış özgün bir teknolojik yaklaşımdır. Yakıt değişim periyodu 18–24 ay, değişim süresi 2–5 gündür. Kullanılmış yakıt için derin kuyu kalıcı depolama (patentli yöntem) veya geleneksel havuz+kuru depo zinciri uygulanabilir. Tüm radyoaktif tahliyeler baca CEMS, deşarj monitörü ve çevre dedektörleriyle sürekli izlenir; NRC ve EPA standartlarına tabidir.

- [1] Deep Fission, Inc. (2025). Technology Overview. deepfission.com/technology
- [2] Deep Fission / NRC (2024). Conceptual Design Report: Deep Borehole PWR. ADAMS No. ML24172A286.
- [3] Deep Fission, Inc. (2026, Şubat). \$80M Finansman Turu ve Urenco USA Yakıt Anlaşması.
- [4] Deep Fission, Inc. (2026, Mart). İlk Veri Kuyusu Sondajı Basın Bülteni. Parsons, Kansas.
- [5] Asuega, A. vd. (2023). Techno-economic analysis of advanced SMRs. *Applied Energy*, 334.
- [6] Steigerwald, B. vd. (2023). Uncertainties in SMR production costs. *Energy*, 281.
- [7] IEA (2024). World Energy Outlook 2024. Paris: IEA.
- [8] Lazard Ltd. (2023). Levelized Cost of Energy Analysis v16.0.
- [9] IAEA (2024). Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors. Vienna: IAEA.
- [10] NRC (2024). Dry Cask Storage of Spent Nuclear Fuel. NUREG-1923.
- [11] World Nuclear Association (2025). Small Modular Reactors Handbook.