

NASA'nın AY YÜZEYİNDE ROBOTLARLA KURACAĞI NÜKLEER REAKTÖRÜN TEKNİK AYRINTILARINA BİR BAKIŞ..

Hazırlayan: Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com 12.08.2025

Aşağıda, NASA'nın Ay yüzeyinde toprağa gömülü olarak planladığı nükleer reaktör çalışmaları, olası tasarımlar, radyasyon ve koruma konuları ile ilgili bilgiler bulunuyor.

1. Genel Durum ve Programın Amacı

NASA ve ABD Enerji Bakanlığı (DOE), 2030'a kadar Ay yüzeyinde **100 kWe** (kilowatt elektrik) gücünde küçük bir nükleer reaktör kurmayı hedefliyor.

Bu çalışma, daha önce **Kilopower** ve **Fission Surface Power (FSP)** projelerinden elde edilen deneyimlerle gerçekleştirilecek. 2025 Ağustos'unda NASA, sanayiye resmi teklif çağrısında bulunma talimatı verdi.

Temel hedefler:

- Ay'da uzun süreli insanlı görevler için 7/24 kesintisiz elektrik sağlamak
- Güneş ışığının olmadığı 14 günlük "Ay gecesi" periyodunda bile çalışabilmek
- Mimarının daha sonra Mars'a ve diğer gezegen yüzeylerine ölçeklenebilmesi

NASA Utilization of Space Nuclear Systems for Robotic and Human Exploration Missions

Response to EO 13972: Promoting Small Nuclear Reactors for National Defense and Space Exploration



NASA and NNSA engineers lower the wall of the vacuum chamber around the Kilowatt Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY system). The vacuum chamber is later evacuated to simulate the conditions of space when KRUSTY operates. Credits: Los Alamos National Laboratory

2. Olası Reaktör Teknolojileri

a) Katı Çekirdekli, Isı Borulu Reaktör (Kilopower tarzı)

- Uranyum alaşım çekirdek + sodyum ısı boruları + Stirling motorları veya Brayton türbinleri (Ay'da su yok, sıvı sodyum soğutmalı olacak).

- **Avantajlar:** Basit, pasif ısı transferi, düşük basınç, test edilmiş tasarım (KRUSTY deneyi).
- **Dezavantajlar:** Güç kapasitesini artırmak için çekirdek boyutunun büyümesi, ek kütle ve gölgeleme ihtiyacı.

b) Katı Çekirdek + Brayton / Termoelektrik

- Kapalı çevrim gaz türbini veya termoelektrik jeneratörlerle elektrik üretimi.
- Yüksek verimlilik hedeflenir ancak hareketli parça karmaşıklığı artar.

c) Ergimiş Tuz Reaktörleri (MSR)

- Yakıtın erimiş tuz içinde çözünmüş olduğu veya tuzun yalnızca soğutucu olarak kullanıldığı tipler.
- **Avantajlar:** Yüksek sıcaklık (yüksek verimlilik), düşük basınç, potansiyel olarak uzun ömür.
- **Zorluklar:** Korozyon ve malzeme uyumu, sıvı fisil malzemenin fırlatma güvenliği, tuz kimyasının kontrolü.
- Ay görevlerinde henüz uçuşa hazır değil, daha çok orta-uzun vadeli araştırma konusu.

3. Radyasyon ve Koruma Stratejileri

a) Regolit Kalkanı

- Ay toprağı (regolit) metrelerce kalınlıkta yığılarak nötron ve gama radyasyonunu büyük ölçüde azaltır.
- 2–3 metre regolit gömü ile reaktör çevresinde **10–20 mSv/h** seviyesinden → **0,05–0,1 mSv/h** seviyelerine düşüş mümkün.
- Mürettebat barınakları genellikle reaktörden >500 m uzak konumlanır, böylece doz hızı arka plan seviyesine ($\approx 0,001–0,005$ mSv/h) iner.

Not: • **Regolit**, Ay yüzeyini kaplayan ince toz ve kırık taş parçaları karışımıdır.

- Kalınlığı yer yer **metrelerce** olabilir.
- Radyasyon zırhı olarak kullanılabilir; reaktörün etrafına regolit yığılarak, kozmik ışınlar ve reaktörün yaydığı radyasyonu engellemek olasıdır.
- NASA planlarında **radyasyon kalkanı olarak Ay regoliti kullanmak**, ek malzeme taşımaya gerek kalmadan doğal kaynakla koruma sağlamak anlamına geliyor.

b) Gölge Zırhlama Kalkan (Shadow Shield)

- Reaktör ile yaşam alanı arasına **yüksek-Z malzemeler (tungsten, çelik)** ve
- **Nötron soğurucu katmanlar (bor, polietilen)** yerleştirilir.
- Kütle tasarrufu sağlar, ancak sadece belirli yönde koruma yapar.

c) Radyasyon Düzeyler (yaklaşık, örnek değerler)

Konum / Koşul	Tipik Doz Hızı (Sv/h)	Açıklama
Reaktör yakın yüzeyi (korumasız)	0,005–0,02 Sv/h (5–20 mSv/h)	Kısa süreli insan varlığı tolere edebilir, uzun süre tehlikeli
2 m regolit ile kaplama sonrası	0,00005–0,0001 Sv/h (0,05–0,1 mSv/h)	ISS içindeki dozhızına benzer
500 m uzak, korumalı habitat	0,000001–0,000005 Sv/h (0,001–0,005 mSv/h)	Dünya deniz seviyesindeki arka plan dozhızına yakın

Not: 1 Sv = 1000 mSv. İnsanlar için yıllık mesleki doz limiti genellikle 50 mSv civarındadır (NASA astronot limitleri görev süresine göre belirlenir).

4. İşletme ve Kontrol

- **Yerel otomasyon:** Işık hızı gecikmesi (2,6 saniye gidiş–dönüş) acil kontrolü engeller. Reaktör kendi üzerinde hızlı scram (acil durdurma) ve koruma sistemlerine sahip olacak.
- **Dünya’dan gözetim:** Mod değişiklikleri, güç ayarları ve planlı bakım komutları Dünya’dan verilir.
- **Radyasyona dayanıklı elektronik:** Hardened işlemciler, yedekli kontrol birimleri ve hata düzeltme devreleri kullanılır.
- **Bakım:** Çoğunlukla robotik sistemlerle, insan müdahalesi minimumda tutulur.

5. Kurulum Senaryosu (Örnek)

1. **Hazırlık:** Otonom kazıcı robotlar, reaktör için çukur açar ve regolitten kalkan zırh hazırlar.
2. **Reaktör İndirimi ve Yerleştirme:** Lander ile modüler reaktör yüzeye indirilir.
3. **Kaplama:** Regolit ile gömme işlemi yapılır.
4. **Başlatma:** Otomatik başlatma dizisi, Dünya’dan onay ile tetiklenir.
5. **Çalışma:** 10+ yıl sürekli güç üretimi; düzenli uzaktan izleme.

6. MSR ve Katı Çekirdek Karşılaştırması

Özellik	Katı Çekirdek (Isı borulu)	Ergimiş Tuz Reaktörü
Teknoloji olgunluğu	Yüksek (KRUSTY testleri)	Düşük/Orta (uçuş tecrübesi yok)
Çalışma sıcaklığı	600–800 °C	700–1000 °C
Basınç	Düşük	Düşük
Korozyon riski	Düşük	Yüksek (malzeme uyumu kritik)
Fırlatma güvenliği	Daha kolay (katı yakıt)	Zor (sıvı yakıt)
Güç yoğunluğu	Orta	Yüksek potansiyel

7. Sonuç

- **İlk Ay Yüzeyi reaktörü:** Muhtemelen ısı borulu katı çekirdek tipi olacak.

- **MSR:** Orta/uzun vadede yüksek verimli ve kompakt bir çözüm olabilir, ancak malzeme, güvenlik ve otomasyon sorunları çözülmeli.
- Radyasyon yönetiminde **regolit gömme + gölge kalkan zırh** kombinasyonu standart yöntem olacak.
- Operasyonlar tümüyle **otomatik + Dünya'dan gözetimli** şekilde yapılacaktır.

Ayrıntılar

1. Reaktörün Kurulum Süresi ve Personel Sayısı

NASA'nın Fission Surface Power (FSP) ve Kilopower çalışmalarında öngörülen senaryolara göre:

- **Kurulum süresi:**
 - **Yüzeye inişten sonra tamamen robotik/yarı-otonom kurulum yapılırsa yaklaşık 30–45 gün içinde devreye alma mümkün.**
 - İnsanlı görevle birlikte indirilirse, önceden hazırlanmış çukur ve regolit zırh yapımı 1–2 hafta sürebilir, devreye alma dahil toplam **2–4 hafta** sürede hazır olabilir.
- **Kurulum ekibi:**
 - Eğer tümüyle robotik yapılırsa **0 insan** (Dünya'dan kontrol + yerel otonomi).
 - İnsanlı görev sırasında kurulursa, **2–4 astronot** destek verebilir (esas olarak kablo/radyatör bağlantıları, sistem kontrolü).
- Bu sayılar, NASA'nın Kilopower/FSP operasyon konsepti raporlarındaki görev süreleri ve insan-robot iş bölümü tahminlerine dayalıdır.

2. Parça Taşıma ve Montaj Yeri

NASA konseptinde:

- **Dünyadan götürülecek ana parçalar:**
 - Reaktör çekirdeği (ergimiş tuz veya katı çekirdek)
 - Isı değiştiriciler
 - Güç dönüştürücüler (Stirling motoru, Brayton türbini veya termoelektrik modüller)
 - Radyatör panelleri
 - Kontrol elektroniği ve güç dağıtım ünitesi
 - Yerde açılacak/alüminyum–çelik modüller (montaj için)
- **Ay'da üretililecek/yerinde hazırlanabilecek parçalar:**
 - Regolitten üretilen koruyucu bloklar (zırh)
 - Reaktörün gömüleceği çukur ve temel
 - Bazı yapısal destek parçaları (ISRU metal döküm veya 3D baskı ile)
- Montaj işlemleri Ay yüzeyinde, genellikle **önceden hazırlanmış yerleşim alanı** içinde yapılır.

3. Reaktörün İşletme Aşamasında Personel Gereksinimi

- **Normal çalışma:** Tümüyle otomatik; Dünya'dan gelen komutlarla mod değişimi. Personel gereksinimi 0.
- **Bakım:** Yılda bir veya birkaç kez **robotik bakım**. İnsan müdahalesi sadece acil durumlarda veya planlı teknoloji yenilemelerinde.
- **Örnek:** Kilopower/FSP'de **10+ yıl bakım gerektirmeyecek** şekilde tasarım hedefleniyor.

Not: “Kalkan” Yerine “Zırhlama”

- **Kalkan** (shield) genelde radyasyonun geldiği tek bir yönü kaplayan, hafif ama sınırlı yönlü korumadır.
- **Zırhlama** (armor/armor shielding) ise reaktörün tüm gövdesini veya geniş açılı alanı çevreleyen, çok katmanlı ve yüksek kütleli korumadır.
- Ay reaktörlerinde:
 - **Başlangıçta:** Düşük kütle için gölge kalkan (tek yönlü).
 - **Yerleşim tamamlandığında:** Regolitten yapılmış tam zırhlama (360° koruma).
- Zırhlama malzemeleri: yüksek-Z metal (tungsten/çelik) + hidrojenli polietilen + bor katkılı beton/regolit.

EK: NASA Makalesinin Türkçe Özeti

Kaynak: NASA — *Fission Surface Power System Initial Concept Definition* (NTRS)

Özet:

- **Amaç:** Ay yüzeyinde 40 kWe gücünde, 10 yıl ömürlü, otonom çalışan fisyon güç sistemi geliştirmek.
- **Tasarım:**
 - Katı çekirdek, sodyum ısı boruları
 - Stirling motorları ile elektrik üretimi
 - Radyatörlerle ısı atımı
- **Kurulum:**
 - Robotik kazı ile 2 m derinliğinde çukur
 - Reaktör modülünün indirilmesi
 - Regolit ile zırhlama
- **Kontrol:**
 - Yerel otomasyon (reaktör koruması ve scram)
 - Dünya'dan yüksek seviyeli komut
- **Radyasyon Yönetimi:**
 - Zırhlama sonrası habitatta doz hızının $<0,1$ mSv/h olması hedeflenir.
- **Ömür:**
 - $8.760 \text{ saat/yıl} \times 10 \text{ yıl}$ kesintisiz çalışma (~ 87.600 saat)
 - Yakıt yüklemesi görev süresince değiştirilmez.

Ek soru ve yanıtlar

1. Trafo, Kablolama ve Elektrik Dağıtım

NASA'nın 40 kWe Fission Surface Power (FSP) sistemi kapsamında güç üretimi sonrası dağıtım teknikleri planlanmıştır:

- **Güç iletimi:**
FSP sisteminde üretilen elektrik, 1–3 km uzaklıktaki kullanıcı yüklerine iletilmek üzere planlanıyor ntrs.nasa.gov+1. Bu mesafe, hem reaktör radyasyonunu Zzorhlama/gölgeleme açısından kritik hem de Ay ufkunu aşmak ve güvenlik sağlamak açısından önemli.
- **Kablolu sistem:**
Şu ana kadar “metal iletkenler (bakır/alüminyum)” en güvenilir ve düşük riskli seçenek olarak öne çıkıyor ntrs.nasa.gov.
Yüksek voltajlı kabloların tasarımı (örneğin ~3000 Vrms AC ya da DC tarafıyla) kütleyi minimize ederken verimliliği artırıyor ntrs.nasa.gov+1.
- **Trafo (voltaj yükseltici/düşürücü):**
Trafolar, Stirling türündeki güç dönüştürücülerinden gelen AC elektrik kaynaklı gerilimi, iletim hattı için uygun yüksek gerilime dönüştürmeye yarıyor. Bu iki aşamalı yükseltme/değişim mimarisi (örneğin önce temel yükseltme, sonra kablo iletimine uygun seviyeye dönüştürme) güvenlik ve yedekliliği artırıyor ntrs.nasa.gov.
- **Alternatif iletim yöntemleri:**
Kablolu sistem dışında “power beaming”, süperiletken kablolar veya karbon nanotüp tabanlı iletim gibi ileri teknolojiler değerlendirildi, ancak henüz daha fazla risk ve kütle getirdiği için tercih edilmiyor ntrs.nasa.gov.

1. Soğutma Detayları (Cooling System)

NASA'nın Fission Surface Power (FSP) konseptinde reaktör tarafından üretilen atık ısı enerjisinin uzaya etkili bir şekilde uzaklaştırılması için şu soğutma sistemi bileşenleri öngörülmüştür:

- **Soğutma Döngüsü ve Radyatör Panelleri:**
 - Stirling veya Brayton güç dönüştürücülerinin atık ısı enerjisi, **pompalı bazlı bir soğutma döngüsü** aracılığıyla toplanır ve yatay/iki taraflı radyatör panellerine iletilir [NASA Technical Reports Server+1Electra](#).
 - Bu radyatör paneller, **titanyum-su (titanium-water) ısı boruları** içerir; kompozit yüzeyler (“facesheet sandwich”) aracılığıyla ısıyı uzaya yaymaya yarar [NASA Technical Reports Server+2NASA Technical Reports Server+2](#).

Not: Ay’da doğal sıvı su bulunmadığı için bu cümle ilk bakışta kafa karıştırıcı görünebilir. Burada “titanyum–su ısı borusu” ifadesi **Ay yüzeyinde bulunan suyu değil, ısı borularının içinde kapalı devre olarak dolaşan suyu** kastediyor.

Açıklama: Titanyum–su ısı boruları

- **Isı borusu (heat pipe)**, kapalı, hava geçirmez bir tüp içindeki sıvının buharlaşma–yoğuşma döngüsüyle ısıyı çok verimli taşıyan bir sistemdir.
- Bu tasarımda tüpün gövdesi **titanyumdan** yapılmış, içindeki çalışma sıvısı ise **su**.
 - Titanyum: Hafif, güçlü, korozyona dayanıklı ve uzay radyasyonuna karşı kararlı.
 - Su: Orta sıcaklık aralığında (yaklaşık 100–300 °C) yüksek ısı taşıma kapasitesine sahip, ısı borularında çok verimli bir akışkan.
- **Ay’da su bulunmaması sorun değil**, çünkü bu su **yerinde üretilmez** — zaten Dünya’dan getirilmiş ve borunun içinde kapsüllenmiş şekilde çalışır.
Isı borusu ömrü boyunca suyu kaybetmez.

Çalışma Prensibi

1. Reaktörden gelen ısı, titanyum borunun “evaporatör” kısmındaki suyu buharlaştırır.
2. Su buharı boru içinde “yoğuşturucu” kısma gider ve burada uzaya ısı yayarak tekrar sıvıya döner.
3. Sıvı su yerçekimi ya da kapiler etki (fitil yapısı) ile tekrar evaporatöre döner.
Bu döngü tamamen kapalıdır.

Neden Su?

- Çok ucuz ve bilinen bir akışkan.
- Orta sıcaklıklarda yüksek ısıl iletkenlik sağlar.
- Yüksek özgül ısısı (4,18 kJ/kg·K) sayesinde ısı taşıma kapasitesi yüksektir.
- Radyasyona dayanıklıdır ve uzay ortamında bozunmaz (kapalı sistemde).

Boyut ve Performans:

- FSP sisteminin yaklaşık **140 kW_t** atık ısı enerjisini 400 K civarında bir sıcaklıkta uzaklaştırması gerekir [NASA Technical Reports Server](#).
- Kompozit radyatör paneller (örneğin 1,7 m × 2,7 m) özellikle vakumlu simulasyon ortamlarında test edilerek oldukça iyi performans sağlamışlardır [NASA Technical Reports Server+1](#).
- **Brayton Bazlı Alternatifler:**
 - Brayton çevrimli sistemlerde benzer şekilde, su soğutmalı bir döngü ile radyatör paneller aracılığıyla ısıнын uzaya uzaklaştırılması planlanmıştır [NASA Technical Reports Server](#).
- **Dayanıklılık & Yedeklilik:**
 - Kompozit radyatörler, micrometeorit ve küçük enkaz çarpmalarına karşı POCO köpük destekli ve gövde içi yapıya sahiptir — tek bir boru hasarı sistem performansını çok ciddi zedelemes [NASA Technical Reports Server+1](#).

Özetle: Isı transferi, pompalı su-soğutma döngüsü + titanyum-su ısı borulu kompozit radyatör paneller ile uygulanır; sistem, yüksek verim, yedeklilik ve dayanıklılık sağlamak üzere tasarlanmıştır.

2. Personel İçin Su Gereksinimi

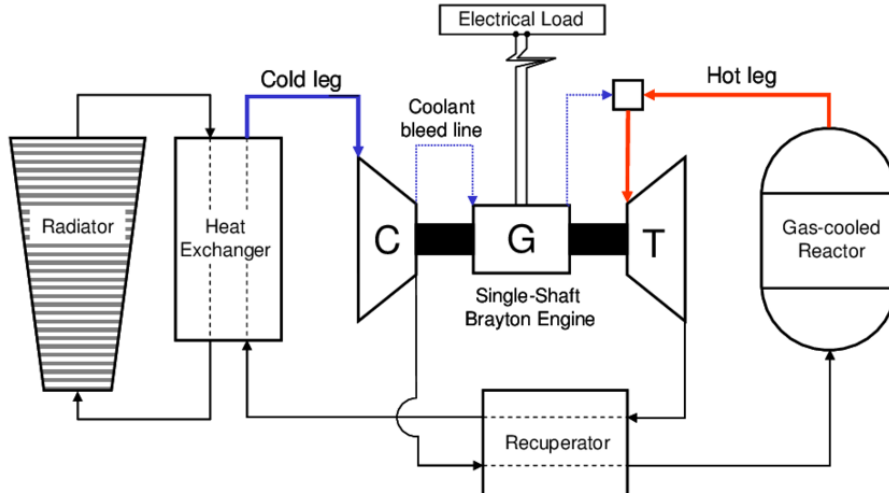
Ay’da kurulacak bir insanlı üssün bir reaktörle değil, günlük yaşamla ilgili su ihtiyacı aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir:

- **Astronot Metabolik İhtiyaçlar:**
 - Ortalama bir astronotun günlük ihtiyacı yaklaşık **3,5 kg su**, yanında 0,84 kg oksijen ve 0,62 kg gıda bulunur [Wikipedia](#).
 - Günlük biyolojik kullanım dışındaki temizlik, hijyen, çamaşır gibi ihtiyaçlar nedeniyle gerçek su tüketimi bu değerin 2 katına kadar çıkabilir.
- **Su Geri Kazanım Sistemleri (ECLSS):**
 - Uluslararası Uzay İstasyonu’nda kullanılan ECLSS sistemi, atık sudan (idrar, ter, nefes nemi) **%90’ın üzerinde su geri kazanımı** sağlar [The Washington Post](#).
 - Geri dönüşümlü sistemler, uzun süreli Ay veya Mars görevi gibi senaryolarda kritik önem taşır.
- **Yerel Kaynaklar & Madencilik (ISRU):**
 - NASA, Ay’ın güney kutbunda su buzunu aranması ve çıkarılması konusunda ekipman geliştiriyor (örneğin PRIME-1 misyonu) [NASA](#).
 - Bu sayede su ihtiyaçlarının bir kısmı Ay kaynaklarından sağlanabilir.

Özetle:

Günlük su ihtiyacı kişiye bağlı olarak yaklaşık 3,5–7 kg olabilir. Ancak geri dönüşüm sistemleri sayesinde bu su büyük ölçüde yeniden kullanılır. Uzun süreli misyonlarda devamlı su tedariki için hem geri dönüşüm hem yerinde kaynaklardan su çıkarımı (ISRU) kritik hale gelir.

Aşağıdaki şekilde **uzay nükleer reaktör sistemine ait soğutma döngüsü ve ana bileşenlerin şematik diyagramı** yer alıyor. Bu sistem, reaktör çekirdeğinden ısıyı çeken ve güç dönüştürücüler aracılığıyla elektrik üretimine ileten bir dolaşım çevrimi içerir; atık ısı ise radyatörler aracılığıyla uzaya atılır.



Şekilde de Yer Alan Ana Bileşenler ve İşlevleri

- **Reaktör çekirdeği (Core):** Fisyon yoluyla ısı üretir.
- **Soğutucu döngüsü:** Genellikle sıvı-metal (örneğin NaK) veya gaz soğutucularla çekirdekteki ısıyı alır.
- **Güç dönüşüm modülü:**
 - **C (Compressor)** – Gaz soğutucuyu döngüye sokan kısım.
 - **G (Generator)** – Termal enerjiyi elektrik enerjisine döndürür.
 - **T (Turbine)** – Mekanik enerjiyi üretmeye yardımcı olur.
- **Radyatör paneli:** Atık ısıyı uzaya dağıtarak sistemi soğutur.

Bu yapı, özellikle yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Özetle

Bu Şekil ve açıklamalar, Ay'daki bir nükleer reaktör sisteminde:

1. **Isı transferi**, çekirdekten güce dönüştürücülere ve son olarak radyatörlere yönlendirilir; bu süreç, birinci veya ikincil döngülerle sağlanır.
2. **Heat pipe radyatör sistemi**, pasif soğutma avantajı sunar; yerçekimiyle desteklenen dolaşım sayesinde güvenilir ve düşük bakım gerektirir.
3. **Kompozit ısı değiştirici ve radyatör konfigürasyonları**, verimliliği maksimize eder ve Ay'ın zorlu koşullarına uygun tasarım sağlar.

Kaynaklar:

- /1/ [NASA Utilization of Space Nuclear Systems for Robotic and Human Exploration Missions](#)
- /2/ [20200003163.pdf](#)
- /3/ YZ ile bir dizi yazışma