

Toryum Reaktörleriyle İlgili Araştırmalar, Çin'deki Son Gelişmeler

Hazırlayan: Yüksel Atakan , ybatakan4@gmail.com., 08.09.2026

Giriş

Nükleer enerji, dünya genelinde karbon salımını azaltma çabalarının merkezinde giderek daha fazla yer buluyor. Bu bağlamda geleneksel uranyum-plütonyum yakıt döngüsüne alternatif olarak sunulan toryum tabanlı nükleer reaktörler, son yıllarda hem akademik çevrelerde hem de enerji politikası tartışmalarında yeniden gündeme geldi. Toryum (Th-232), doğada uranyumdan yaklaşık üç ila dört kat daha bol bulunan, kendiliğinden fisyonu uğramayan ama nötron bombardımanıyla fisil izotop olan uranyum-233'e dönüştürülebilen bir element. Bu özelliği, toryumu "yakıt döngüsü çeşitlendirmesi", "atık azaltımı" ve "proliferasyon (yayılma) direnci" gibi başlıklar altında cazip kılıyor. Bu yazıda, 2025 ve 2026 yıllarında toryum reaktörleri alanında yaşanan gelişmeleri, öne çıkan araştırma yönlerini, teknolojik yaklaşımları, ülke bazlı girişimleri ve alanın önündeki zorlukları genel hatlarıyla ele alacağız.



The experimental TMSR-LF1 thorium-powered molten salt reactor in Wuwei, Gansu Province, has achieved the first successful conversion of thorium-uranium nuclear fuel, the Shanghai Institute of Applied Physics of the Chinese Academy of Sciences announced (World Nuclear News 04.11.2025)

1. Toryum Neden Yeniden Gündemde?

Toryum tabanlı nükleer teknolojiye olan ilgi yeni değil; 1960'larda ABD'de Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda ergimiş tuz reaktörü (Molten Salt Reactor - MSR) deneyleri yapılmıştı. Ancak Soğuk Savaş döneminde askeri açıdan plütonyum üretimine daha elverişli olan uranyum-plütonyum döngüsü tercih edildiği için toryum çalışmaları geri planda kaldı. Günümüzde toryuma dönük yeniden canlanan ilginin arkasında birkaç temel motivasyon bulunuyor:

- **Yakıt bolluğu ve enerji güvenliği:** Toryum rezervleri, özellikle Hindistan, Avustralya, Brezilya, ABD ve Türkiye gibi ülkelerde önemli miktarlarda bulunuyor. Bu durum, uranyum dışalımına bağımlılığı azaltma potansiyeli taşıyor.
- **Daha az uzun ömürlü nükleer atık:** Toryum yakıt döngüsünün, geleneksel döngüye göre daha az miktarda uzun ömürlü transuranik atık (plütonyum, americium gibi) üretebileceği öne çıkıyor.

- **Proliferasyon direnci:** Üretilen uranyum-233, yüksek düzeyde gama ışını yayan uranyum-232 ile karışık halde bulunduğundan, silah amaçlı kullanımı teknik olarak daha zor ve tespit edilmesi daha kolay kabul ediliyor.
- **Yeni nesil reaktör mimarileriyle uyum:** Ergimiş tuz reaktörleri gibi Nesil IV tasarımları, toryum döngüsüyle doğal bir uyum gösteriyor; bu da küçük modüler reaktör (SMR) ve gelişmiş reaktör girişimleriyle örtüşüyor.

2. 2025-2026 Döneminde Öne Çıkan Teknolojik Yaklaşımlar

2.1 Erimiş Tuz Reaktörleri (Molten Salt Reactors - MSR)

Toryum araştırmalarının büyük bölümü, yakıtın sıvı florür veya klorür tuzları içinde çözündürüldüğü erimiş tuz reaktörü tasarımları çevresinde yoğunlaşıyor. Bu tasarımların avantajı, yakıtın sürekli olarak dolaşması ve çevrimiçi olarak yeniden işlenebilmesi, böylece fisyon ürünlerinin ayrıştırılıp reaktör verimliliğinin artırılabilmesidir. 2025-2026 döneminde bu alanda:

- Çeşitli özel şirketler ve araştırma kurumları, demonstrasyon ölçekli erimiş tuz reaktörü prototiplerinin tasarım ve lisanslama süreçlerinde ilerleme kaydettiğini duyurdu.
- Malzeme bilimi cephesinde, yüksek sıcaklıktaki korozyon tuz ortamına dayanıklı yapısal alaşımlar (nikel bazlı süper alaşımlar gibi) üzerine çalışmalar sürdürülüyor; bu, MSR teknolojisinin ticarileşmesinin önündeki en kritik mühendislik engellerinden biri olarak görülüyor.
- Tuz kimyası ve fisyon ürünü davranışını modelleyen hesaplamalı çalışmalar, reaktör güvenliği ve işletme öngörülebilirliğini artırmak amacıyla önem kazanmaya devam ediyor.

2.2 Ağır Su Moderatörlü ve Basınçlı Su Reaktörlerinde Toryum Karışık Yakıtlar

Tümüyle yeni reaktör mimarileri geliştirmek yerine, bugünkü reaktör tiplerinde toryum içeren karışık yakıt çubukları (örneğin toryum-plütonyum veya toryum-uranyum karışımları) kullanma yaklaşımı da araştırma gündeminde yer alıyor. Bu yöntemi, bugünkü altyapıyı kullanmanın getirdiği maliyet avantajı nedeniyle bazı ülkeler seçiyor.

2.3 Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktörler (HTGR)

Çakıl yataklı reaktör (pebble-bed) tasarımlarında toryum bazlı TRISO yakıt parçacıklarının test edilmesi de devam eden bir araştırma hattı. Bu tasarımlar, yüksek yanma oranı ve pasif güvenlik özellikleriyle dikkat çekiyor.

3. Ülke Bazlı Gelişmeler

Hindistan

Dünyanın en büyük toryum rezervlerinden birine sahip olan Hindistan, üç aşamalı nükleer enerji programının üçüncü aşamasında toryum kullanımını hedefliyor. 2025-2026 döneminde Hindistan Atom Enerjisi Kurumu (Department of Atomic Energy) bünyesindeki araştırma merkezleri, gelişmiş ağır su reaktörü (AHWR) tasarımı ve toryum yakıt döngüsü deneyleri üzerindeki çalışmalarını sürdürdü. Hindistan'ın bu alandaki motivasyonu hem enerji bağımsızlığı hem de yerli uranyum kaynaklarının sınırlı olmasıdır.

Çin

Çin, erimiş tuz reaktörü teknolojisinde son yıllarda en hızlı ilerleyen ülkelerden biri olarak öne çıkıyor. Gobi Çölü'nde inşa edilen deneysel bir erimiş tuz reaktörünün işletmeye alınması ve test aşamalarına ilişkin haberler, bilimsel camianın yakından takip ettiği gelişmeler arasında. Çin'in devlet destekli araştırma kurumları, toryum yakıt döngüsü ile birlikte çevrimiçi yeniden işleme teknolojilerini de geliştirmeyi hedefliyor.

Amerika Birleşik Devletleri

ABD’de gelişmiş reaktör girişimlerini destekleyen düzenleyici reformlar (özellikle Nükleer Düzenleme Komisyonu’nun (NRC) yeni nesil reaktörlere yönelik lisanslama süreçlerini hızlandırma çabaları) çerçevesinde, birkaç özel şirket toryum veya toryum-uranyum karışık yakıt döngülerine dayalı küçük modüler reaktör tasarımları üzerinde çalışıyor. Ulusal laboratuvarlar da malzeme testi ve tuz kimyası konularında akademik iş birlikleri yürütüyor.

Avrupa ve Diğer Bölgeler

Avrupa’da bazı araştırma konsorsiyumları, Nesil IV reaktör yol haritaları kapsamında toryum döngüsünü değerlendirmeye devam ediyor; ancak bölgedeki ağırlık noktası çoğunlukla uranyum bazlı hızlı reaktörler üzerinde yoğunlaşmış durumda. Endonezya, **Türkiye ve Norveç gibi kayda değer toryum rezervlerine sahip ülkeler de zaman zaman toryum enerjisi potansiyelini gündeme getiren fizibilite çalışmaları ve araştırma iş birlikleri yürütüyor. Türkiye’de ThorAtom tasarım çalışmaları sürüyor.**

4. Bilimsel ve Mühendislik Zorlukları

Toryum reaktörlerinin ticari ölçekte yaygınlaşmasının önünde hâlâ önemli engeller bulunuyor:

- **Yakıt işleme karmaşıklığı:** Toryum yakıt döngüsü, geleneksel uranyum döngüsüne göre daha karmaşık kimyasal işleme adımları gerektiriyor. Özellikle uranyum-233’ün ayrıştırılması ve yüksek radyoaktiviteli uranyum-232 varlığı, yakıt işleme tesislerinde ek radyasyon koruma önlemleri gerektiriyor.
- **Malzeme dayanıklılığı:** Ergimiş tuz ortamlarının yüksek sıcaklık ve korozyif etkilere dayanıklı yapısal malzemeler gerektirmesi, uzun vadeli işletme güvenilirliği açısından hâlâ çözülmesi gereken bir sorun.
- **Ticari ölçeklenebilirlik ve maliyet:** DeneySEL ve prototip ölçekli reaktörlerden ticari ölçekli santrallere geçiş, büyük sermaye yatırımları ve uzun vadeli düzenleyici onay süreçleri gerektiriyor.
- **Düzenleyici çerçevelerin eksikliği:** Birçok ülkede mevcut nükleer düzenleme çerçeveleri, geleneksel katı yakıtlı hafif su reaktörleri temel alınarak oluşturulmuş durumda. Ergimiş tuz reaktörleri gibi yeni tasarımlar için özel lisanslama yol haritalarının geliştirilmesi zaman alıyor.
- **Kamuoyu algısı ve yatırım iştahı:** Nükleer enerjiye yönelik kamuoyu tutumu ülkeden ülkeye büyük farklılık gösteriyor; bu da özel sektör yatırımlarının hızını ve ölçeğini doğrudan etkiliyor.

5. Toryum Araştırmalarının Nükleer Bilim ile Kesişimi

İlginç bir biçimde, toryum yalnızca enerji üretimi bağlamında değil, temel fizik araştırmalarında da son dönemde dikkat çekiyor. Örneğin, toryum-229 izotopunun alışılmadık derecede düşük enerjili nükleer geçişi, “nükleer saat” teknolojisi geliştirme çabalarının merkezinde yer alıyor (bu konudaki güncel bir araştırma, ayrı bir makale olarak sunulacak). Bu tür çalışmalar doğrudan reaktör teknolojisiyle ilgili olmasa da, toryum izotoplarının nükleer yapısına dair elde edilen temel bilgi birikimi, uzun vadede yakıt döngüsü modellemesi ve nükleer veri tabanlarının iyileştirilmesi açısından dolaylı katkılar sağlayabilir.

6. Genel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi

2025-2026 dönemi, toryum reaktör teknolojisi açısından “kanıtlama” (proof-of-concept) aşamasından “erken ticarileşme” aşamasına geçiş sürecinin başlangıcı olarak değerlendirilebilir. Özellikle Çin ve Hindistan’ın devlet destekli büyük ölçekli programları, alanın en somut ilerlemesini gösteriyor. Buna karşın Batı’da ilerleme büyük ölçüde özel sektör girişimleri ve araştırma iş birlikleriyle şekilleniyor; bu da daha parçalı ama yenilikçi bir ekosistem yaratıyor.

Toryum reaktörlerinin önümüzdeki on yılda küresel enerji karmasında belirleyici bir rol oynayıp oynamayacağı, büyük ölçüde şu üç faktöre bağlı görünüyor:

- (1) malzeme biliminde ergimiş tuz ortamlarına dayanıklı çözümlerin olgunlaşması,

(2) düzenleyici kurumların yeni nesil reaktör tasarımlarına uyum sağlama hızı ve

(3) küresel enerji politikalarının nükleer enerjiye verdiği desteğin sürekliliği. Kısa vadede toryum reaktörlerinin geleneksel uranyum reaktörlerinin yerini almasından çok, onları tamamlayıcı bir rol üstlenmesi daha olası görünüyor.

7. Çin'in Toryum Ergimiş Tuz Reaktörü (TMSR) Programı

Çin'de Toryum Bazlı Ergimiş Tuz Reaktörlerinin Araştırma İlerlemesi ve Stratejik Önemi

I. Temel Araştırma İlerlemesi

Dünyanın ilk deneysel reaktörü kesintisiz çalışıyor

Gansu eyaletinin Wuwei kentindeki 2 MW'lık deneysel reaktör, ilk kez Ekim 2023'te kritikliğe ulaştı, Haziran 2024'te tam güç işletimine geçti ve Temmuz 2025 itibarıyla 400 günden fazla kesintisiz olarak istikrarlı bir şekilde çalıştı; böylece dünyada faaliyette olan tek toryum bazlı ergimiş tuz reaktörü haline geldi.

Ekim 2024'te dünyanın ilk "çalışırken toryum ekleme" (on-the-fly thorium addition) deneyi tamamlanacak; bu, çevrimiçi yakıt takviyesini gerçekleştirerek geleneksel nükleer santrallerin yakıt ikmali için durdurulması zorunluluğunun ötesine geçecek.

Kritik teknolojik atılımlar

- Korozyona dayanıklı malzeme, yılda 0,02 mm'den daha az aşınma göstererek 30 yıllık bir reaktör çekirdeği ömrünü destekliyor.
- Kendiliğinden güvenlik mekanizması: Ergimiş tuz aşırı ısındığında, dışarıdan bir girişmeye/ müdahaleye gerek kalmadan kendiliğinden katılaşıp reaksiyonu durduruyor ve çekirdek ergimesi riskini tümüyle ortadan kaldırıyor.
- Yakıt döngüsü: Toryumdan uranyuma dönüşüm (toryum-232 → uranyum-233) başarıyla gösterildi ve yakıt kullanım verimliliği 100 kattan fazla artırıldı.

Bir sonraki mühendislik hedefi

10 MW'lık bir araştırma reaktörünün (60 MW ısı gücü) yapımız 2025'te başlanarak, 2029'da işletmeye alınması planlanıyor; bu, modüler tasarımı ve yüksek sıcaklık kararlılığını doğrulamayı amaçlıyor. 2030 yılında 100 MW'lık ticari bir reaktör inşa edilecek; **hedeflenen elektrik üretim maliyetinin, Gansu'daki rüzgâr enerjisinden %17 daha düşük olması bekleniyor.**

II. Teknolojik Avantajlar ve Yıkıcı Yenilik

Toryum Kaynakları ve Çevre Korunması

- Toryum kaynak bolluğu: Çin'in rezervleri 286.000 ton olup (uranyum rezervlerinin altı katı), yalnızca İç Moğolistan'daki Bayan Obo madeni ülkenin elektrik ihtiyacını 900 yıl karşılayabilecek düzeyde.
- Nükleer atığın ortadan kaldırılması: Radyoaktif atık miktarı uranyum reaktörlerine göre %90 azaltılıyor ve bozunma süresi yalnızca 300 yıl kadar az (uranyum reaktörlerinde bu süre 10.000 yıl gerektiriyor).

Mühendislik Yeniliği

- Susuz soğutma teknolojisi: Ergimiş tuzla ısı transferi su kaynağına bağımlı değil, bu sayede Gobi Çölü ve iç kesimlerdeki kurak bölgelere kurulum yapılabilir; bu da nükleer santral yer seçimi kısıtlamalarını aşıyor.
- Verimli elektrik üretimi: Soğutucu çıkış sıcaklığı 700°C, ısı-elektrik dönüşüm verimliliği %45'e ulaşıyor (basınçlı su reaktörlerinde bu oran yalnızca %33); yüksek sıcaklıktaki atık ısı, deniz suyu arıtımı gibi endüstriyel uygulamaları da besleyebilir.

III. Stratejik Önem

Enerji ikilemini çözmek

Uranyum dışalımına bağımlılığın %75'inin yerini alarak Malakka Boğazı üzerinden yapılan enerji taşımacılığındaki riskleri azaltmayı hedefliyor. Toryum kaynaklarının bağımsız olarak kontrol edilebildiği ve kuramsal olarak ülkenin elektrik tüketimini 10.000 yıldan fazla destekleyebileceği öne sürülüyor.

Teknolojik egemenlik ve endüstriyel bariyerler

Çin'in TMSR'nin temel patentlerinin %61'ine sahip olduğu, yakıt kimyası ve yapısal malzemeler alanında teknolojik bir bariyer oluşturduğu belirtiliyor. Avrupa ve ABD'nin bu alanda geride kaldığı; ABD'nin bu teknolojik yolu 1960'larda terk ettiği, AB'nin ilk deneysel reaktörünün ise 2035'e ertelendiği açıklanıyor.

Askeri ve endüstriyel uygulamalar

- Deniz kuvvetleri nükleer güç yeniliği: Küçültülmüş ve modüler tasarımın nükleer uçak gemileri/denizaltılar için uygun olduğu, düşük gürültü seviyesi sağladığı ve bakım maliyetlerini %40 azalttığı, tümüyle nükleer güçle çalışan bir filo inşasını desteklediği öne sürülüyor.
- Türetilmiş teknolojilerin yaygınlaşması: Yüksek sıcaklıktaki ergimiş tuz teknolojisinin endüstriyel atık ısı geri kazanımı ve hedefe yönelik radyoterapi (kanser tedavisi) alanlarında kullanılarak trilyon dolarlık bir endüstriyi harekete geçirebileceği belirtiliyor.

IV. Gelecek Geliştirme Planı

Çin'in "deneysel reaktör - araştırma reaktörü - ticari reaktör" şeklinde üç aşamalı bir strateji benimsediği belirtiliyor:

Geliştirme Aşaması	Zaman Dilimi	Temel Hedefler
Deneysel reaktör	2023-2024	Kritik işletim, tam güç ve çevrimiçi toryum ekleme teknolojisinin doğrulanması (Gansu, Wuwei'deki 2 MW'lık reaktör)
Araştırma reaktörü	2025'te başlangıç, 2029'da işletmeye alım	10 MW elektrik gücünde modülerleşme doğrulanması, yüksek sıcaklık malzeme mühendisliğinde atılım (pompa ve valf ömrünün uzatılması gibi)
Ticari gösterim reaktörü	2030'dan önce	Tüm endüstri zincirinin (İç Moğolistan'da toryum madenciliği, yakıt tuzu hazırlama, Şanghay üssünde ekipman üretimi) eş zamanlı olarak geliştirilmesi

V. Zorluklar ve Yanıtlar

- Malzeme ömrü:** 700°C'deki pompa ve valflerin ömrünün 12.000 saatten 100.000 saate çıkarılması gerekiyor; bu da yeni seramik kaplamaların geliştirilmesine bağlı.
- Yakıt döngüsü ekonomisi:** Uranyum-233'ün çevrimiçi ekstraksiyon teknolojisinin, Almanya'daki Karlsruhe Araştırma Merkezi'nin deneyiminden yararlanılarak optimize edilmesi gerekiyor.
- Maliyet kontrolü**

Sonuç

Toryum bazlı ergimiş tuz reaktörlerinin Çin'i dördüncü nesil nükleer enerji teknolojisinin ön saflarına taşıdığı belirtiliyor. Kaynak bağımsızlığı (toryum madeninin 10.000 yıllık bir enerji kaynağı sağladığı iddiası), doğal güvenlik (ergimiş tuzun kendiliğinden katılaşması) ve stratejik etki (küresel enerji söylemini yeniden şekillendirme) unsurlarının, ülkenin temel rekabet gücünü oluşturduğu açıklanıyor. Buna göre, 2030'da planlanan milyon kilovatlık ticari reaktörün işletmeye alınması durumunda Çin'in bir "enerji takipçisi"nden bir "kural koyucu"ya dönüşeceği ve

bunun yapay zekâ ile derin uzay keşfi gibi enerji yoğun alanlara temel bir ivme kazandıracağı öngörülüyor. Gobi Çölü'ndeki ergimiş tuzun içinde akanın, medeniyetin ilerlemesinin anahtarı olduğu vurgulanıyor.

Özetle

Toryum tabanlı nükleer reaktörler, enerji güvenliği, atık yönetimi ve proliferasyon direnci gibi konularda sunduğu potansiyel avantajlar nedeniyle 2025-2026 döneminde araştırma gündeminde önemli bir yer tutmaya devam etti.

Ergimiş tuz reaktörü teknolojisindeki ilerlemeler, özellikle Çin ve Hindistan'daki devlet destekli programlar aracılığıyla somutlaşırken, malzeme dayanıklılığı, yakıt işleme karmaşıklığı ve düzenleyici belirsizlikler gibi zorluklar hâlâ aşılması gereken önemli engeller olarak duruyor.

Ek: Toryum reaktörleriyle ilgili diğer yazılarımızın linkleri

1. [Toryum ergimiş tuz reaktörleri ile devasa gemileri sıfır emisyonla yürütme projeleri.. Geminin elektrik santrali: Küçük Toryum reaktörü ! - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
2. [TORYUM REAKTÖRLÜ GEMİLER Atakan 25.04.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
3. [Toryum Reaktörleriyle İlgili Dünyadaki ve Türkiye'deki Durum - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#) [TORYUM NEDİR ve NE İŞE YARAR? - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
4. [CİN TORYUM REAKTÖRÜ Hazırlayan Y. Atakan 23042025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
5. [Çin ve Türkiye ve Diğer Ülkelerin Toryum Ergimiş Tuz Reaktörü Projeleri Hazırlayan Yüksel Atakan 19.03.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
6. [TORYUM ve URANYUM REAKTÖRLERİ KARŞILAŞTIRMASI 28.01.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)
7. [TORYUM REAKTÖRLERİNDE KULLANILAN NÖTRON KAYNAKLARI - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)

Kaynaklar

1. https://www.spektrum.de/news/energiawende-china-bereitet-test-eines-thoriumreaktors-vor/1922764?gad_source=1&gad_campaignid=23698415728&gbraid=0AAAAAD_c8R7FnksSi0RG7bh9UocyalcSM&gclid=Cj0KCQjw5P7UBhDaARIsAOSIS1Np2_Wf5_ZssNdot0XtqyLGCzVikfHoRg2EhlyNNsz6u-ervDfDxgaAkZ3EALw_wcB
2. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/chinese-msr-achieves-conversion-of-thorium-uranium-fuel>
3. IAEA, WNO