YZ Destekli Bilimsel Değerlendirmeler

Toryum Reaktörü Projeleri

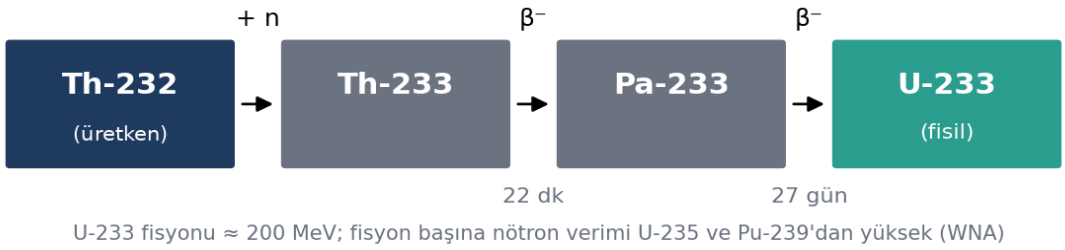
Mevcut programlar, tarihsel deneyim ve ileriye dönük tasarımlar

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com., 31.10.2026

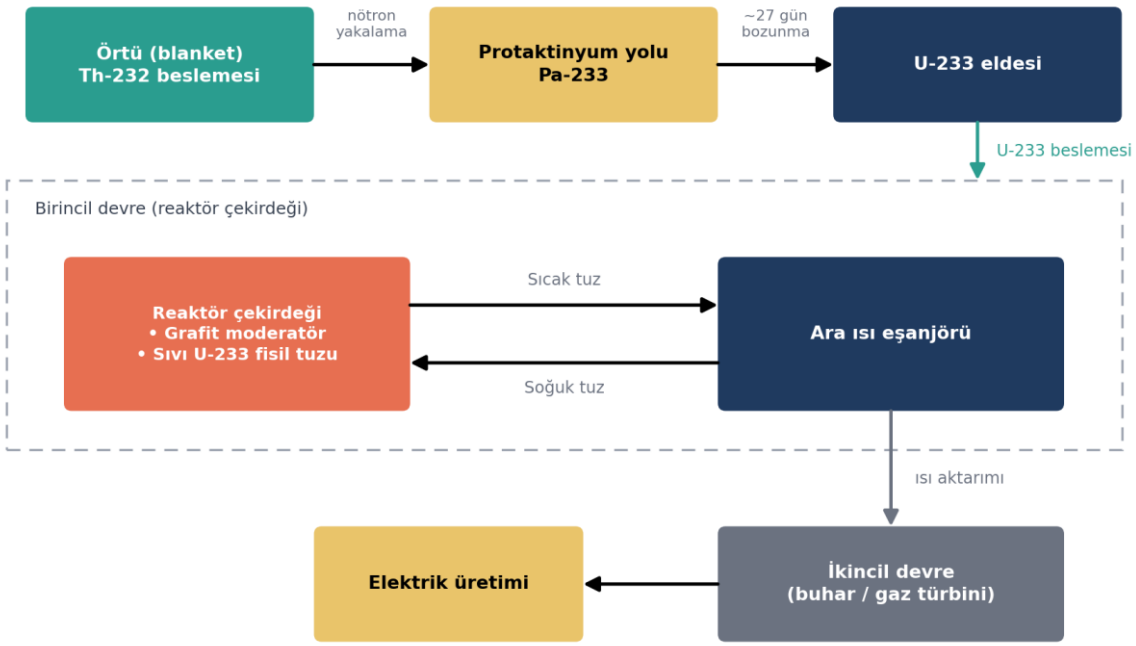
Kaynaklar: IAEA, World Nuclear Association (WNA/WNN), ScienceDirect

1. Özet ve toryum yakıt çevriminin temelleri

Toryum (Th-232) kendi başına fisil değil (bölünemez), fertil (üretken) bir malzemedir: nötron yakalayıp Th-233 ve Pa-233 üzerinden fisil (bölünebilen) U-233'e dönüşür (Şekil 1). Bu nedenle toryum yakıtlarının, zinciri başlatacak fisil (bölünen) bir "sürücüye" (U-233, U-235 veya Pu-239) ihtiyacı vardır. Dünya Nükleer Birliği'ne (World Nuclear Association, WNA) göre toryum yer kabuğunda uranyumdan yaklaşık üç kat bol olup, yakıtın en ayırt edici özelliği yavaş (termal) nötron spektrumunda da fisil madde üretimine (üretken dönüşüm oranı > 1) izin vermesidir; bu, uranyum yakıtlarıyla olası değildir.



Şekil 1. Toryum-uranyum yakıt çevriminde U-233 üretim zinciri (WNA, 2026 verilerine göre şematik).



Şekil 2. Toryum ergimiş tuz sisteminin işlevsel blok şeması (sistem genel görünümü).

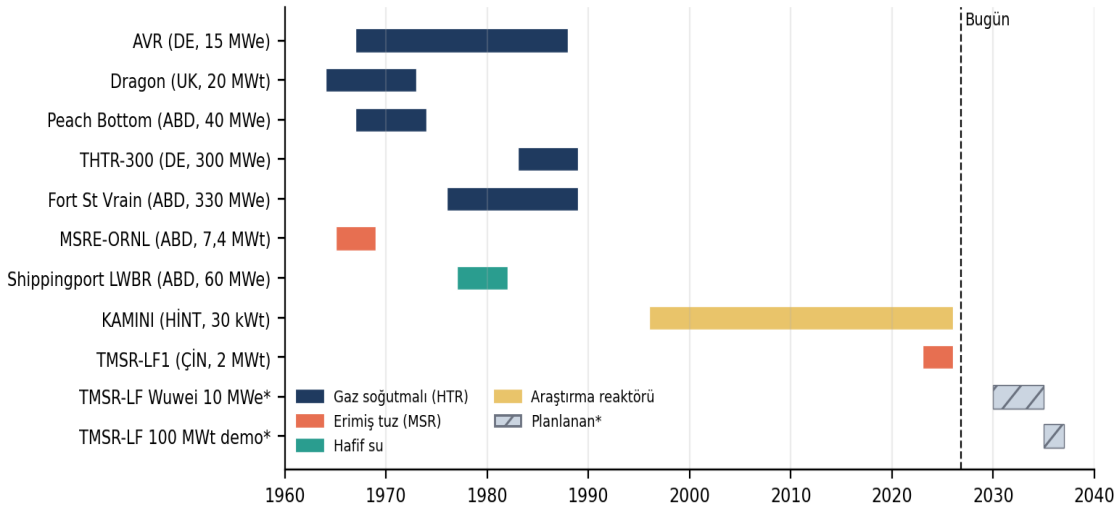
Bugünkü tablo şöyledir: toryumla elektrik üreten geçmiş tasarımlar ve demonstrasyonlar sona ermiştir; çalışır durumdaki başlıca toryum programı Çin'in TMSR-LF1 ergimiş tuz reaktörüdür; Hindistan toryumu uzun vadeli üç aşamalı programının son halkası olarak konumlandırmaktadır; Avrupa ve Kuzey Amerika'da ise ağırlıklı olarak özel şirketlerin yürüttüğü yakıt ve küçük modüler ergimiş tuz reaktörü (SMR) çalışmaları sürmektedir. **Toryumdan ticari ölçekte elektrik üreten bir santral bugün yoktur.**

2. Tarihsel projeler: toryumla çalışmış reaktörler

1960'lardan itibaren farklı reaktör tipleri toryum yakıtıyla işletilmiştir. Bunların çoğu sürücü olarak yüksek zenginleştirilmiş uranyum (HEU) kullanmıştır; bu tercih günümüzde kabul görmemektedir. Tablo 1 ve Şekil 3, WNA ve IAEA derlemelerindeki başlıca örnekleri özetler.

Reaktör	Ülke	Güç	Dönem	Öne çıkan sonuç
AVR (Jülich), çakıl yataklı HTR	Almanya	15 MWe	1967–1988	Çoğunlukla Th-HEU; ~100.000 çakıl, yaklaşık 150 GWg/t yanma
Dragon HTR	İngiltere (OECD/Euratom)	20 MWt	1964–1973	Th-HEU ile "üret-ve-yak"; yüksek sıcaklıkta fisyon ürünü tutumu
Peach Bottom-1 HTR	ABD	40 MWe	1967–1974	0,8 milyar kWh üzerinde üretim; kapasite faktörü %74
Fort St Vrain HTR	ABD	330 MWe	1976–1989	~25 t toryum; yaklaşık 170 GWg/t yanma
THTR-300 HTR	Almanya	300 MWe	1983–1989	Th-HEU çakıllar; teknik sorunlar nedeniyle kapatıldı
Shippingport LWBR	ABD	60 MWe	1977–1982	Hafif su üretken reaktörü; çekirdek ömrü sonunda %1,39 fazla fisil madde (üretken dönüşüm kanıtı)
MSRE (Oak Ridge)	ABD	7,4 MWt	1965–1969	İlk ergimiş tuz deneyi; ikinci kampanyada U-233 sürücü
Sulu homojen reaktör	Hollanda	1 MWt	1974–1977	Th + HEU çözeltisi, dışarıda sürekli işleme
KAMINI (Kalpakkam)	Hindistan	30 kWt	1996–	Dünyada U-233 ile çalışan tek reaktör; ~600 g U-233

Tablo 1. Toryum yakıtıyla çalışmış başlıca reaktörler (kaynak: WNA, "Thorium", güncelleme 23 Ekim 2026).

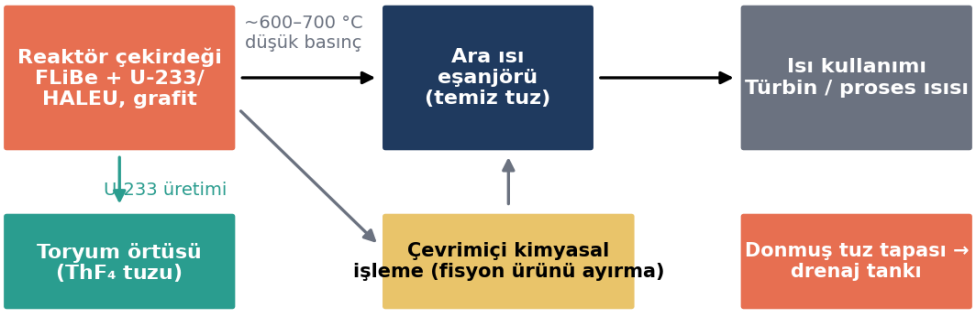


*Şekil 3. Toryum reaktörlerinin zaman çizelgesi. *Planlanan projeler hedef tarihlerdir ve kayabilir.*

3. Bugün sürmekte olan programlar

3.1 Çin: TMSR-LF1 (Wuwei, Gansu)

Çin Bilimler Akademisi'nin 2011'de başlattığı toryum ergimiş tuz reaktörü programı, Şanghay Uygulamalı Fizik Enstitüsü (SINAP) önderliğinde yürütülmektedir. 2 MWt gücündeki sıvı yakıtlı TMSR-LF1 deney reaktörü 2023 Haziran'ında işletme lisansı almış, 11 Ekim 2023'te kritikliğe ulaşmış ve Haziran 2024'te tam güce çıkmıştır. Ekim 2024'te içine toryum yüklenen dünyadaki ilk ergimiş tuz reaktörü olmuş; Kasım 2025'te SINAP, reaktörde toryumun U-233'e dönüşümünü gerçekleştirdiğini duyurmuştur. Reaktör, %20'nin altında zenginleştirilmiş uranyumu lityum-berilyum florür (FLiBe) tuzunda kullanır ve yaklaşık 50 kg toryum envanteri vardır. Enstitü ayrıntılı teknik veri yayımlamamıştır; bu nedenle sonuçlar bağımsız doğrulamadan çok kurumun beyanına dayanmaktadır.

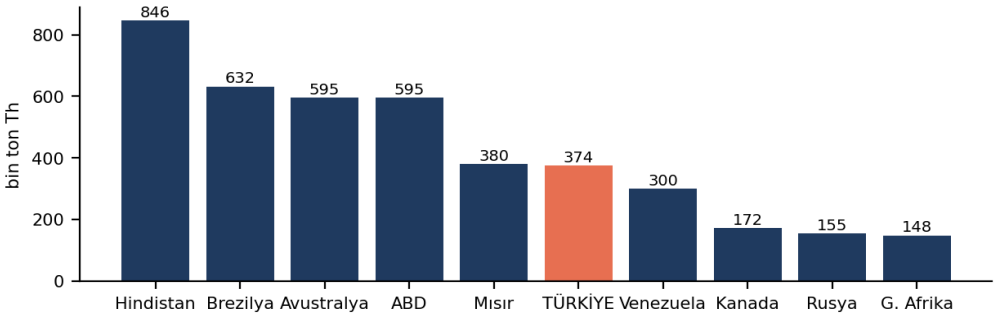


Şekil 4. Toryum ergimiş tuz reaktörünün (LFTR/TMSR) işleyiş şeması — şematik gösterim (WNA'daki LFTR tanımına göre).

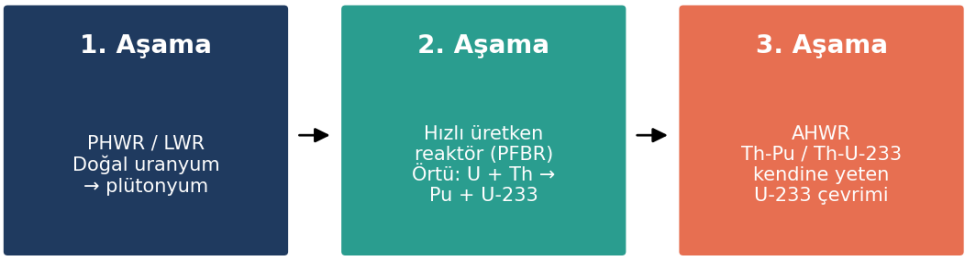
İşleyiş: yakıt, fisil uranyumun ve toryumun florürlerinin ergimiş tuzda çözülmesiyle oluşur; tuz hem yakıt hem ısı taşıyıcıdır ve atmosfer basıncına yakın basınçta 600–700 °C'de dolaşır. Toryum tuzu içeren örtüde oluşan U-233 çevrimiçi kimyasal işlemle ayrılıp çekirdeğe beslenir. Herhangi bir sebepten dolayı reaktör çekirdeğindeki tuz karışımından ısı çekilemezse tuzun sıcaklığı artar; alttaki tahliye borusundaki tuz tapasını soğutan fan durur, tapadaki tuz ergir ve çekirdekteki yüksek sıcaklıktaki tuz yerçekimi etkisiyle alttaki tahliye tanklarına dolar. Geometri değiştiği için (alt-kritik geometri) reaksiyon durur. Ayrıca yakıt genleştiğinde negatif sıcaklık katsayısı da reaksiyonu yavaşlatır.

3.2 Hindistan: üç aşamalı program, AHWR ve KAMINI

Hindistan, 846.000 tonla dünyanın en büyük toryum kaynağına sahiptir (IAEA/OECD-NEA Kırmızı Kitap 2016; Şekil 5). Programın birinci aşamasında doğal uranyumlu basınçlı ağır su reaktörleri (PHWR) plütonyum üretir; ikinci aşamada hızlı üretken reaktörler (FBR) bu plütonyumla çalışır ve örtülerinde toryumdan U-233 üretir; üçüncü aşamada Gelişmiş Ağır Su Reaktörü (AHWR) toryum-plütonyum/U-233 yakıtı yakar (Şekil 6). WNA'ya göre Kalpakkam'daki 500 MWe prototip hızlı üretken reaktör (PFBR) Nisan 2026'da ilk kritikliğe ulaşmıştır; toryumu örtüsünde taşıyarak üçüncü aşama için U-233 üretmesi tasarlanmıştır. AHWR (300 MWe) için ise Ağustos 2025'te hükümet, tasarım doğrulama ve hakem incelemesinin sürdüğünü, projenin resmen başlatılmadığını Meclis'e bildirmiştir. Dolayısıyla Hindistan'da büyük ölçekli toryum kullanımı, yeterli hızlı reaktör kapasitesi kurulduktan sonra beklenmektedir.



Şekil 5. Dünyanın en büyük tanımlanmış toryum kaynakları (bin ton; IAEA/OECD-NEA Kırmızı Kitap 2016; toplam ≈ 6,36 milyon ton).



Şekil 6. Hindistan'ın üç aşamalı nükleer programı ve toryumun yeri.

3.3 Kanada, ABD ve Norveç: yakıt odaklı çalışmalar

- **ANEEL yakıtı (ABD/Kanada):** Clean Core Thorium Energy, Idaho Ulusal Laboratuvarı ve Texas A&M ile HALEU–toryum yakıtı geliştirmektedir; CANDU için ilk toryum bazlı yakıt olarak CNSC ön lisanslama incelemesinin ilk aşamasını geçmiştir. Mayıs 2024'te ATR'ye yüklenen 12 yakıt çubuğundan sekizi 20 ve 40 GWg/tU hedeflerini geçmiş, Mayıs 2026'da kalan dördünün 60 GWg/tU'yu aştığı bildirilmiştir (WNA).
- **Thor Energy (Norveç):** Halden reaktöründe 2013'te başlayan beş yıllık Th-MOX ve Th-katkılı yakıt testleri yapılmış; Halden Haziran 2018'de kalıcı olarak kapatılmıştır.
- **CANDU–Qinshan:** AECL ve Çin kuruluşları, toryum yakıtının CANDU/EC6 tipi reaktörlerde kullanımını ortaklaşa incelemektedir.

3.4 Avrupa: ergimiş tuz girişimleri

Danimarka'nın Copenhagen Atomics şirketi, ağır su ile yavaşlatılan, konteyner boyutunda 100 MWt'lik toryum ergimiş tuz reaktörü geliştirmektedir; İsviçre'deki Paul Scherrer Enstitüsü (PSI) ile Avrupa'nın ilk toryum ergimiş tuz kritik deneyini yapmak üzere anlaşmıştır (WNN). Şirketin yol haritasında 2027'de düşük zenginleştirilmiş uranyumlu alt-kritik prototip ve 2028'de test reaktörü yer almakta, takvim başlangıçtaki 2026 hedefinden kaymıştır. Hollanda-Fransa kökenli Thorizon, kullanılmış yakıttaki uzun ömürlü elementlerle toryumu birleştiren 250 MWt'lik Thorizon One'ı geliştirmekte; WNN'ye göre 16 Ekim 2026'da TNO ile MSR malzeme programı başlatmıştır.

4. İleriye dönük toryum reaktör tasarımları

Tasarım	Tip / güç	Geliştirici	Durum ve hedef (kaynak: WNA, WNN)
TMSR-LF (sıvı yakıt)	MSR, 30 MWt (10 MWe); sonra 100 MWt	SINAP (Çin)	Wuwei'de ilk kritiklik 2030, 100 MWt demonstrasyon ~2035 hedefi; kapalı Th-U çevrimi
TMSR-SF (katı yakıt)	Tuz soğutmalı TRISO çakıl/prizma, 100 MWt	SINAP (Çin)	Yayımlanan yol haritası artık ağırlıklı olarak sıvı yakıt hattına dayanıyor
AHWR-300 ve AHWR300-LEU	Ağır su, 300 MWe	BARC/DAE (Hindistan)	Gücün ~%75'i toryumdan (LEU sürümünde ~%39); tasarım doğrulaması sürüyor, resmi proje başlamadı
Copenhagen Atomics	Üç akışkanlı MSR, 100 MWt	Danimarka	PSI'da kritik deney planı; 2027 alt-kritik prototip, 2028 test reaktörü
Thorizon One	MSR, 250 MWt	Hollanda/Fransa	Fransa, Belçika ve Hollanda'da ön fizibilite; Thorizon Pioneer ilk Avrupa tuz tesisi olacak
ThorCon 500	MSR, 2 × 250 MWe	ThorCon (Endonezya)	Ağustos 2025'te BAPETEN onayı (POWER Magazine); başlangıç yakıtı LEU
RBWR	İndirgenmiş moderasyonlu BWR	Hitachi/JAEA	Epitermal spektrumla yüksek U-233 dönüşümü için değerlendirme aşamasında
ADTR / ADS	Hızlandırıcı destekli alt-kritik	Çeşitli (İngiltere vb.)	Kavramsal; hızlandırıcı güvenilirliği ve ekonomisi engel

Tablo 2. Seçilmiş ileri toryum reaktörü tasarımları ve durumları.

WNA, toryumun girebileceği yedi reaktör tipini sayar: ağır su (PHWR), yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı (HTR), BWR, PWR, hızlı nötron, ergimiş tuz ve hızlandırıcı destekli sistemler. Bunlardan ilk beşi hizmete girmiş, son ikisi girmemiştir; ergimiş tuz yalnızca deneysel ölçekte çalışmıştır. Kuruluş, en uygun adaylar olarak PHWR'ları (mevcut ticari altyapı) ve ergimiş tuz reaktörlerini (yakıt fabrikasyonunu ortadan kaldırması) öne çıkarır.

5. Değerlendirme: avantajlar ve engeller

IAEA-TECDOC-1450 (2005), toryum çevriminin potansiyel faydalarını düşük uzun ömürlü atık, termal spektrumda üretkenlik, Pu yakımında üstünlük ve ADS ile uyum olarak sıralar; ön ve arka uçtaki zorlukları da vurgular: ışınlanmış ThO_2'nin nitrik asitte zor çözünmesi, uzak/otomatik yeniden işleme ve Pa-233 sorunu. ScienceDirect'te yer alan derlemeler de benzer sonuca varır: Humphrey ve Khandaker (2018, Renewable and

Sustainable Energy Reviews) toryumun yakıt sürdürülebilirliğini ve ticari reaktörler için önündeki engelleri değerlendirir; Du Toit ve ark. (2024, Progress in Nuclear Energy, 170:105136) hafif su reaktörlerindeki toryumlu yakıtlarda dönüşüm, yanma, radyotoksisite ve ekonomi konularında sonuçların varsayımlara çok duyarlı olduğunu gösterir.

- **Yaygınlaşmaya direnç:** U-233 ile birlikte oluşan U-232 şiddetli gama alanı yaratır; malzemeyi kullanmayı zorlaştırır, izlenmesini kolaylaştırır. Yine de IAEA, U-233'ü HEU ile aynı "doğrudan kullanılabilir" kategoride sayar (anlamlı miktar: 8 kg).
- **Ekonomi:** Uranyum ucuz ve boldur; U-233 fabrikasyonu ve yeniden işleme maliyetleri yüksektir. Bu yüzden WNA'ya göre ticarileşme açık bir iş modeli ve devlet desteği gerektirir.
- **Teknik olgunluk:** Ergimiş tuzda korozyon, malzeme ve çevrimiçi işleme sorunları tamamen çözülmemiştir; TMSR-LF1 bu sorunlar için bir test zeminidir.
- **Zaman ölçeği:** Hindistan'da büyük ölçekli kullanım hızlı reaktör kapasitesine, Avrupa ve Çin'de ise 2030'lardaki demonstrasyonlara bağlıdır.

6. Sonuç

Toryum reaktörü teknolojisi bugün araştırma ve demonstrasyon aşamasındadır. En somut gelişme, Çin'in TMSR-LF1 reaktöründe toryum yüklemesi ve U-233 dönüşümü beyanıdır. Hindistan uzun vadeli programını hızlı reaktör kapasitesi üzerinden sürdürmekte; Avrupa'daki şirketler 2027–2030 aralığına yayılan prototip hedefleri açıklamaktadır. Gerçekleşme tarihleri geçmişte defalarca kaymıştır; bu nedenle tablolardaki hedefler taahhüt değil, program beyanı olarak okunmalıdır.

Kaynaklar

[1] World Nuclear Association, "Thorium", Information Library, güncelleme 23 Ekim 2026 — world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium

[2] World Nuclear News: "Copenhagen Atomics enlists PSI to validate reactor technology"; "Thorizon, TNO launch MSR materials programme" (16 Ekim 2026) — world-nuclear-news.org

[3] IAEA, Thorium Fuel Cycle — Potential Benefits and Challenges, IAEA-TECDOC-1450, 2005; Thorium Fuel Utilization: Options and Trends, IAEA-TECDOC-1319, 2002

[4] OECD NEA & IAEA, Uranium 2016: Resources, Production and Demand (Kırmızı Kitap) — kaynak rakamları WNA aracılığıyla

[5] Humphrey, U.E.; Khandaker, M.U., Renewable and Sustainable Energy Reviews 97 (2018) 259–275, doi:10.1016/j.rser.2018.08.019 (ScienceDirect)

[6] Du Toit, M.H. ve ark., "Review of thorium-containing fuels in LWRs", Progress in Nuclear Energy 170 (2024) 105136, doi:10.1016/j.pnucene.2024.105136 (ScienceDirect)

[7] POWER Magazine, "China's molten salt reactor reaches thorium-uranium conversion milestone", Aralık 2025 (TMSR-LF1 ve ThorCon bilgileri için ikincil kaynak)