

CANDU Reaktörü Nasıl Çalışır ve Dünya’da Neden Yaygın Değil?

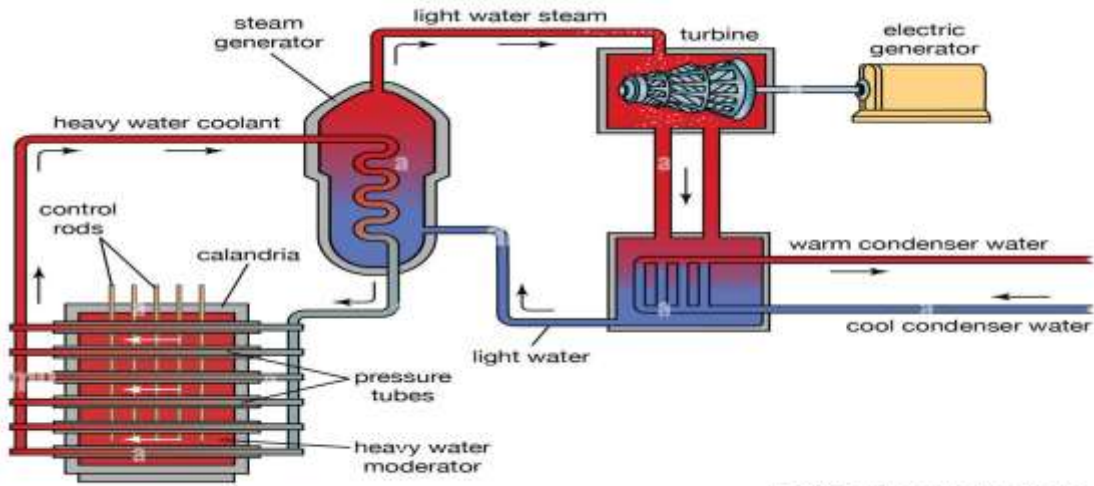
Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com, 09.11.2025 / I/

CANDU adı, "Kanada'nın Ağır Su Nükleer Uranyum Reaktörleri" İngilizce sözcüklerinin baş harflerinden oluşuyor. Bu reaktörler, **doğal uranyumda %99 bulunan U238** kullanırlar. Ayrıca bunlar **ağır suyla** (D_2O , deuterium oksit) çalışarak hem nötronları, moderatör olarak, yavaşlatırlar hem de ağır su, reaktörü soğutur (**Şema**). CANDU reaktörleri özellikle **yüksek verimlilik**, **çevrimiçi yakıt sağlanması** (reactor refueling) ve **gelişmiş güvenlik özellikleri** ile dikkat çeker. İlk CANDU reaktörü, 1950'lerin sonunda Kanada'da yapıldı. O zamandan beri, Kanada ve başka ülkelerde de birçok CANDU reaktörü kurulmuştur. Ancak bunlar hafif sulu zenginleştirilmiş nükleer reaktörler kadar yaygın değildir. 2025’de çalışan CANDU sayısı 28 iken, hafif sulu olan nükleer reaktörlerin sayısı 390 kadardır (Aşağıdaki reaktör listesinde verilen CANDU reaktör sayısı 28’den fazladır, ancak bir bölümü bu arada kapatılmıştır).

Aşağıdaki listeden görüleceği gibi CANDU reaktörlerinin bir çoğu 70’li ve 80’li yıllardan kalmış eskiliktir. Bu reaktörün Vatanı olan Kanada’da ise son yapılan reaktörün işletmeye açılış yılı: 1983. Kanada hükümeti, CANDU’yu modernleştirerek yeni modelini piyasaya sürmeyi ve ayrıca SMR yapmakla ilgili projeler için fon ayırarak reaktör teknolojisini tekrar canlandırmayı düşünüyor Bkz. /3/. Buna karşın Romanya (2007) ve Çin’de(2003) daha yeni CANDU reaktörleri bulunuyor (Liste-Ek1).

Aşağıda CANDU reaktörü çalışma şeması ve reaktörlerin dıştan resimleri gösteriliyor . Soldaki Kanada, sağdaki Çin CANDU reaktörü.

Canada Deuterium Uranium (CANDU) reactor



© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.



CANDU reaktörlerinin Dünya’da daha yaygın olarak kullanılmamasının nedenleri, başta yüksek başlangıç sermayesi ve ağır su üretiminin maliyetli olmasıdır. Bu reaktörler için gerekli olan ağır su, hem pahalı hem de üretimi zor bir malzemedir. Diğer faktörler arasında karmaşık basınç tüpü tasarımı, trityum üretimi ve silah yapılabilecek plütonyumun yayılma riski bulunmaktadır. CANDU reaktörleri doğal uranyum (% 99 U 238) kullanabilme ve çevrimiçi yakıt sağlanması gibi avantajlar sunmalarına rağmen, bu yararlar, bir çok ülkede, yüksek maliyetler, karmaşıklık ve riskler nedeniyle genellikle ön plana çıkamıyor.

U-238’den enerji nasıl elde edilir? Kısa açıklama

Doğrudan U-238, termal (yavaş) nötronlarla bölünemez, ama U-238 nötron yakalayarak önce U 239, sonra Np 239 ve Pu-239’a dönüşür. Oluşan Pu-239 termal nötronlarla kolaylıkla bölünebilir (fisyona uğrayabilir) ve böylece yaklaşık 200 MeV/fisyon enerji açığa çıkar.

Reaksiyon zinciri:

1. Nötron yakalama (U-238 → U-239):
2. Beta bozunumu 1 (U-239 → Np-239):
3. Beta bozunumu 2 (Np-239 → Pu-239):
4. Pu-239 fisyonu uğrar yani bölünür ve enerji açığa çıkar.

(Not: Ortalama açığa çıkan nötron sayısı ve enerji reaktörden reaktöre ve fisyon bölünmesine göre değişir; genellikle ~2.4–3 nötron / fisyon ve ~200 MeV/fisyon enerjisi kabul edilir).

Pratikte Durum: CANDU Reaktörlerinde Maliyet ve Karmaşıklık

Tasarım Karmaşıklığı: Ağır su maliyetinin yanı sıra , CANDU reaktörlerinin basınç tüplü tasarımı çok sayıda zirkonyumlu uranyumun konulduğu boru sistemi ya da yatay tüplerden oluşur, bu da yapım ve bakım maliyetlerini artırır ve tasarımın karmaşıklığını yükseltir. Buna karşın, bu yatay tüp sistemi, işletme sırasında da, kullanılmış yakıtın değiştirilmesine olanak sağladığından, hafif sulu reaktörlere karşı bir üstünlüktür.

Pazar Payı: CANDU reaktörlerinin hafif su reaktörlerine göre daha küçük bir pazar payı olması, araştırma, geliştirme, inşaat ve lisanslama maliyetlerini artırır, çünkü teknoloji daha standartlaşmamıştır.

Güvenlik ve Atık

Trityum Üretimi: Ağır suyun yüksek nötron akışı ortamında kullanılması, hidrojenin radyoaktif bir izotopu olan trityumun üretilmesine yol açar. Trityumun yönetilmesi oldukça dikkat ve emek gerektirir.

Nükleer Silah Yayılma Riski: CANDU reaktörlerinde doğal uranyumdan plütonyum üretilmesi, bu reaktörlerde nükleer silah yapılabilir kaygısını doğurur. Bu durum, plütonyumun yayılma risklerini artırır.

CANDU Reaktör çalışmasını etkileyen faktörler

Şebeke Yük İzlemesi: CANDU reaktörlerinde, kısa ömürlü fisyon ürünü olan Xenon-135’in oluşumu ve bunun nötronları yakalıyarak reaktörün gücünü azaltmasıyla, reaktörün hızla şebeke talebine göre ayarlama yeteneği, engellenebilmesi bir dezavantajdır.

Elektrik Santrallerindeki Termal Verimlilik ve Soğutma Nedir, Neden Gerekir?

- **Termal verimlilik**, bir enerji santralindeki yakıtın kimyasal ya da nükleer enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme oranıdır. Yüksek verimlilik, daha az enerji kaybı anlamına geliyor.

- Her tip reaktörde olduğu gibi CANDU reaktörleri de nükleer enerji ürettiğinde **çok ısıtır** ve bu ısı enerjisini **soğurma sistemleriyle dışarı aktarmak** gerekiyor. Bu genellikle **su ile yapılıyor**. Eğer CANDU reaktörü **büyük bir su kaynağına yakın değilse**, soğutma sistemi verimli çalışmayabilir ve bu da **enerji üretim verimliliğini** olumsuz etkileyebilir. Yani, reaktörün daha az enerji üretmesi veya daha düşük verimle çalışması anlamına geliyor.

Ek 1: CANDU Reaktör Listesi (Bugün çalışan toplam reaktör sayısı: 28)

Ülke	Reaktör Sahası / Adı	Birim Sayısı	Her Birimin Gücü (MW _e)	Devreye Alma Yılı	Durum	Başlıca Üretici / Tedarikçi
Kanada	Point Lepreau Nuclear Generating Station	1	~660 MW _e	1983	Çalışıyor	AECL
Kanada	Pickering Nuclear Generating Station	4	518-530 MW _e	1971-1976	Çalışıyor	AECL
Kanada	Bruce Power	8	~630 MW _e / toplam ~6.288 MW _e	1970'ler, modernizasyon	Çalışıyor	AECL
Romanya	Cernavodă Nuclear Power Plant	2	~655-706 MW _e	1996 (Unit 1), 2007 (Unit 2)	Çalışıyor	AECL / Candu Energy
Arjantin	Embalse Nuclear Power Station	1	~600 MW _e	1984	Çalışıyor	AECL
Çin	Qinshan Phase III NPP	2	~665-706 MW _e	2002-2003	Çalışıyor	AECL + Çin ortakları
Güney Kore	Wolsong Nuclear Power Plant	3	~684-730 MW _e	1997-1999	Çalışıyor	AECL + yerel firmalar
Hindistan	Kakrapar Nuclear Power Plant	2	~220-235 MW _e	1993-2000	Çalışıyor	AECL
Pakistan	Chashma Nuclear Power Plant	4	~300 MW _e	2000	Çalışıyor	AECL
Arjantin	Atucha Nuclear Power Plant (CANDU-6)	1	~600 MW _e	1984	Çalışıyor	AECL
Kanada	Gentilly-2 Nuclear Power Plant	1	~635 MW _e	1983	Kapalı	AECL
Kanada	Nuclear Power Plant of Ontario	1	~400 MW _e	1962	Kapalı	AECL
Kanada	Nanticoke Nuclear Plant	1	~750 MW _e	1960	Kapalı	AECL
Kanada	Douglas Point Nuclear Plant	1	~200 MW _e	1966	Kapalı	AECL
Kanada	Chalk River Nuclear Laboratories	1	~40 MW _e	1958	Kapalı	AECL
Kanada	Douglas Point Nuclear Plant	1	~200 MW _e	1966	Kapalı	AECL
Romanya	Cernavodă Unit 3	1	~700 MW _e	2016	Kapalı	AECL / Candu Energy
Pakistan	Chashma Unit 1	1	~300 MW _e	1997	Kapalı	AECL
Pakistan	Chashma Unit 2	1	~300 MW _e	2000	Kapalı	AECL

Ek 2: CANDU reaktörlerinin yaklaşık fiyatları ne kadar

CANDU Türevi PHWR Nedir? PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor), ağır su kullanan ve doğal uranyum yakıtı ile çalışan reaktör ailesidir. CANDU, PHWR'ün Kanada tarafından geliştirilmiş standart tasarımıdır. Hindistan ise CANDU tasarımını temel alarak kendi yerli PHWR reaktör serisini geliştirmiştir.

Bugün işlemekte olan CANDU ve Türevi PHWR Reaktörlerinin tahmini fiyatları?

(Kesin maliyetler açıklanmadığından tahmin aralıkları geniştir)

Ülke / Santral	Tip	Net Güç (MWe)	Şebekeye Bağlantı	Yeni İnşa Tahmini Maliyeti (USD)
Kanada – Bruce, Darlington, Pickering, Point Lepreau	CANDU / CANDU-6	500–900	1970–1990 arası / bazı yeniden devreye girişler	1.0–4.5 milyar / ünite
Romanya – Cernavodă 1 & 2	CANDU-6	≈706	1996 / 2007	1.4–3.5 milyar / ünite
Arjantin – Embalse	CANDU-6	≈648	1983 → büyük yenileme sonrası 2019	1.3–3.2 milyar
Çin – Qinshan III-1 & III-2	CANDU-6	≈610	2002 / 2003	1.2–3.0 milyar / ünite
Güney Kore – Wolsong 2, 3, 4	CANDU-6	≈570–700	1997 / 1998 / 1999	1.1–3.5 milyar / ünite
Hindistan – PHWR Serisi	CANDU-türevi yerli PHWR	220–700	1980–günümüz	Yerel maliyet yapısına göre değişken

Yeni CANDU Satışı Kim Tarafından Yapılıyor?

Bugün yeni CANDU reaktörlerinin ticari satışı:

- Kanada: SNC-Lavalin / CANDU Energy tarafından yürütülmektedir.

Model: **CANDU EC6 (~700 MWe)**

Tahmini maliyet: **1.2 – 4.2 milyar USD**, ülke işçilik ve finansman koşullarına göre değişir.

Ek 3: Neden Dünyada CANDU sayısı az? Bu teknik + ekonomik + politik nedenlerle açıklanır:

1) Zenginleştirme Ekonomisi Değişti

- CANDU’nun en büyük avantajı: **Doğal uranyum ile çalışabilmesi yani** uranyum zenginleştirme gerekmez.
- Ancak **1990 sonrası uranyum zenginleştirme çok ucuzladı** (özellikle santrifüj teknolojisi nedeniyle).
- Sonuç: LWR’lerin yakıt maliyeti CANDU’ya karşı ucuzladı → CANDU’nun “yakıt avantajı” **zayıfladı** (LWR: Hafif sulu genellikle kullanılan reaktör tipi)

2) LWR endüstri zinciri devasa ve küreselleşmiş

- ABD (Westinghouse), Fransa (EDF), Rusya (Rosatom VVER), Çin (Hualong-One) → hepsi **LWR satıyor**.
- CANDU sadece **Kanada (SNC-Lavalin/CANDU Energy)** tarafından temsil edildi.
- **Sonuç: Pazar ağı LWR lehine devasa ve siyasi olarak destekli.**

3) Ağ etkisi / Standartlaşma

- Ülkeler **lisans, mühendislik, eğitim, güvenlik dokümantasyonu** için bir teknoloji ailesine bağlanmayı seçerler.
- Bir ülke LWR kurduysa → yenilerini de LWR seçer.
“Tek teknolojiye bağlanma avantajı” → filolar LWR ağırlıklı büyüdü.

4) CANDU’nun mühendislik karmaşıklığı (Calandria, zirkonyum basınç tüpleri)

- CANDU’da **yüzlerce yakıt kanalı** ve **ağır su moderatör + ağır su soğutma** sistemi vardır.
- Bu, bakım ve üretim zincirinde **daha fazla özel parça ve eğitim** gerektirir.
- “LWR daha basit” denemez ama **daha yaygın ve üretim kolaylığı daha genel**

5) Ağır su pahalıdır

- İlk dolun için **yüzlerce ton D₂O** gerekir.
- Ağır suyunu üretebilen ülke sayısı azdır.
- Bu yüksek giriş maliyeti bazı ülkeleri caydırdı.

Özetle:

- 1990 sonrası uranyum zenginleştirme ucuzladı → LWR yakıtı ekonomik oldu.
 - LWR reaktörleri ABD, Fransa, Rusya, Çin tarafından küresel olarak yaygınlaştırıldı.
 - CANDU ağır suya dayanır → ağır su pahalıdır.
 - CANDU üretim zinciri Kanada merkezlidir → küresel ağ etkisi LWR lehine oluştu.
- Bu nedenle ~30 CANDU’ya karşılık ~400 kadar hafif sulu reaktör işletmededir.

Ek 4: CANDU reaktörlerinde Cobalt-60 üretimi

CANDU reaktörleri, **Co-60** üretimi için oldukça verimli reaktörlerdir. Çünkü bu reaktörler **ağır su kullanımı** sayesinde yüksek nötron akısı sağlar ve düşük enerjiyle bile etkili şekilde radyoaktif izotoplar üretilebilir.

Cobalt-60 üretimi, aşağıdaki şekilde gerçekleşir:

Cobalt-59 hedef malzeme: Cobalt-59 hedefi reaktör içinde yerleştirilir. **Nötron bombardımanı:** Reaktörün içindeki nükleer reaksiyonlardan çıkan nötronlar, hedef malzemeyi bombardıman eder. **Co-60 üretimi:** Co-59 izotopu, nötronlarla etkileşime girerek Co-60’a dönüşür. Co-60 genellikle **radyoterapi, gıda sterilizasyonu ve endüstriyel uygulamalar** için kullanılır.

Kaynaklar /I/

1. **IAEA - International Atomic Energy Agency:**
Nükleer enerji teknolojileri hakkında derinlemesine kaynaklar sunar. CANDU reaktörleri ile ilgili spesifik dokümanlar da burada bulunabilir.
www.iaea.org ;
2. **World Nuclear Association:**
Nükleer enerjiye dair geniş bir bilgi kaynağı sunan bu site, CANDU teknolojisi hakkında da bilgi sağlar.
www.world-nuclear.org ve yüksek fizik kitapları
3. <https://www.innovationnewsnetwork.com/canada-announces-major-investments-in-candu-reactor-and-smr-technology/56176/>