

II. TEMİZ ENERJİ TEKNOLOJİLERİ ULUSAL ÇALIŞTAYI



GÜNCEL SMR TASARIMLARI

Doç. Dr. Ali TİFTİKÇİ

Sinop Üniversitesi, Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi

İçindekiler

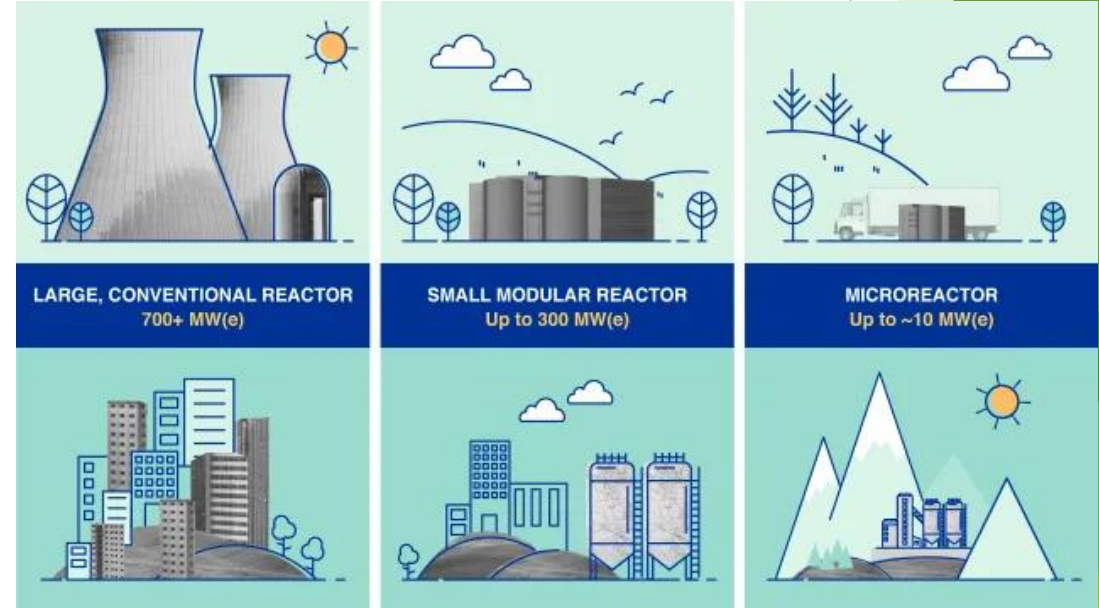
- ▶ Küçük Modüler Reaktörler: Tanım, Kapsam ve Teknolojik Temelleri
- ▶ SMR Geliştirme Süreci
- ▶ SMR Teknolojileri
- ▶ İşletmede Olan ve İnşaat Aşamasındaki SMR'ler
- ▶ Tasarım Onayı Almış ve Ticarileşmesi Muhtemel SMR'ler
- ▶ Genel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi

SMR (Küçük Modüler Reaktörler)

Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler),

- ▶ genellikle ≤ 300 MWe elektriksel güce sahip,
- ▶ fabrika ortamında seri üretime uygun (standartlaştırılmış tasarım),
- ▶ modüler bileşenler halinde tasarlanmış,
- ▶ sahada sınırlı montaj gerektiren,
- ▶ pasif veya içsel güvenlik sistemlerine dayanan

nükleer fisyon reaktörleridir.



SMR (Küçük Modüler Reaktörler)

- ▶ Maliyet ve finansal risk
- ▶ İnşaat Süresi
- ▶ Yer Seçimi
- ▶ Güvenlik

Maliyet

- Modülerlik:** Seri üretim → kısa inşaat süresi → düşük finansman maliyeti
- Tasarım sadeleştirme:** Daha az sistem
- Standartlaşma:** Tek tasarım–çok proje → öğrenme eğrisi kazanımı
- Düzenleyici uyum:** Tekrarsız lisanslama → düşük risk ve gecikme maliyeti

İnşaat Süresi

- **Fabrika üretimi (off-site manufacturing):** Ana bileşenlerin sahaya hazır gelmesi, saha inşaat faaliyetlerini önemli ölçüde kısaltır
- **Modüler kurulum:** Reaktör modüllerinin paralel olarak üretilebilmesi ve kurulabilmesi toplam inşaat süresini azaltır.
- **Basitleştirilmiş tasarım:** Daha az sistem ve bileşen, montaj ve entegrasyon sürelerini kısaltır.
- **Standart tasarım kullanımı:** Tekrarlı projelerde öğrenme eğrisi sayesinde inşaat süresi giderek azalır.
- **Daha küçük saha ve yapı gereksinimi:** Daha az beton, çelik ve altyapı ihtiyacı inşaatı hızlandırır.

Yer Seçimi

- ▶ Daha küçük arazi gereksinimi- büyük ölçeklilere göre
- ▶ Esnek saha seçimleri-kıyı, iç bölgeler, endüstriyel saha yakınları
- ▶ Düşük soğutma suyu ihtiyacı-nehir, deniz, hibrit soğutma seçenekleri
- ▶ Yer altı yerleşim olanağı
- ▶ Artan pasif güvenlik özellikleri-acil durum planlama bölgelerinin küçülmesi

Güvenlik



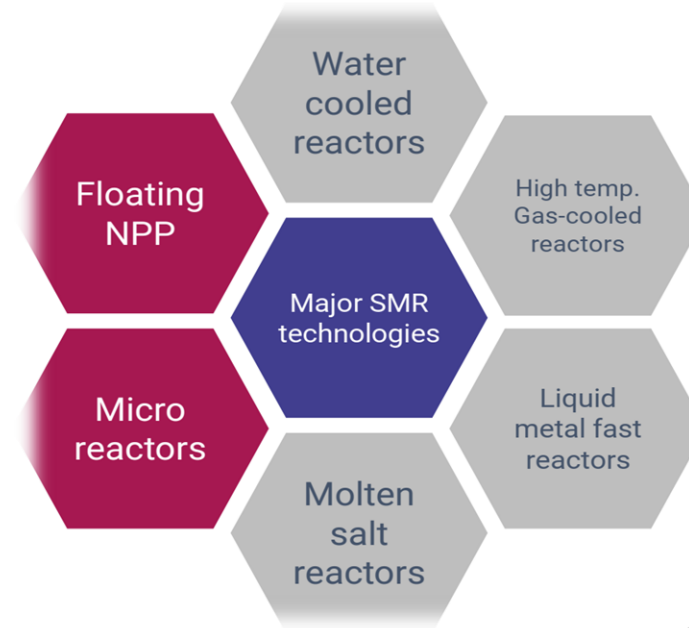
SMR Geliştirme Süreci

- Temel ve uygulamalı araştırmalar yürütülmekte ve bu çalışmalar nihayetinde bir prototipin ya da işlevsel olarak eşdeğer bir sistemin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.
- Test faaliyetleri ve ilave geliştirme çalışmaları sonucunda, bileşenleri başarıyla doğrulanmış ve teknik açıdan tamamlanmış bir tasarıma ulaşılmaktadır.
- İlk-örnek (first-of-a-kind, FOAK) uygulaması ile prototipin ve ilişkili bileşenlerin ticari ölçekte ölçeklenebildiği gösterilmekte ve bu türün ilk reaktörü inşa edilmektedir.
- Birden fazla kopya üretilip (scale up) pazara sunulmakta; bu sayede birim maliyetler düşmekte ve teknoloji mevcut enerji kaynaklarıyla rekabet edebilir hale gelmektedir.

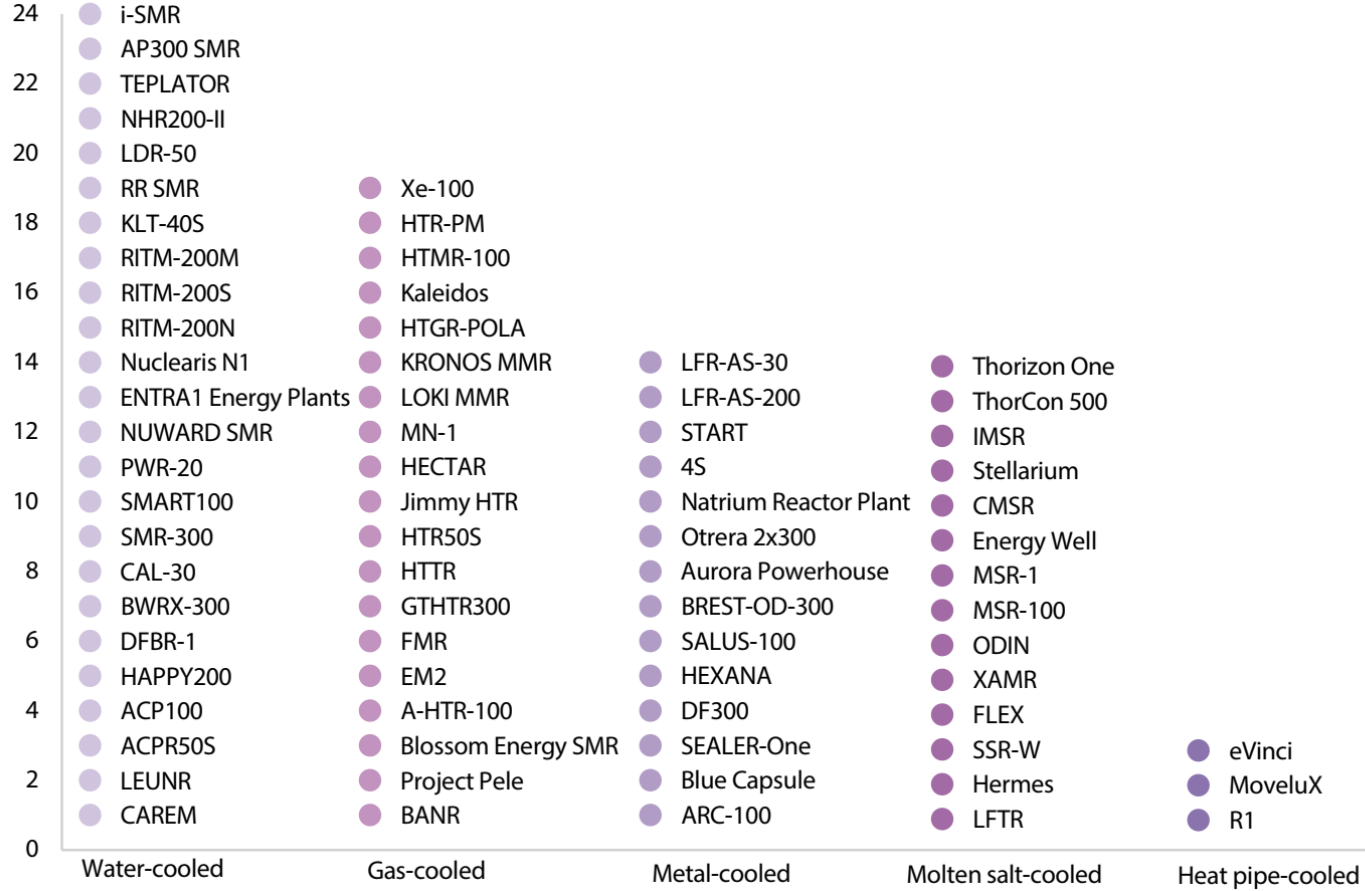


SMR Teknolojileri

- ▶ Hafif su soğutmalı reaktörler
- ▶ Gaz Soğutmalı Yüksek Sıcaklık Reaktörleri
- ▶ Ergimiş Tuz Reaktörleri
- ▶ Sıvı Metal Soğutmalı Hızlı Reaktörler
- ▶ Mikroreaktörler
- ▶ Yüzer Santraller



Soğutucu Türlerine Göre SMRler



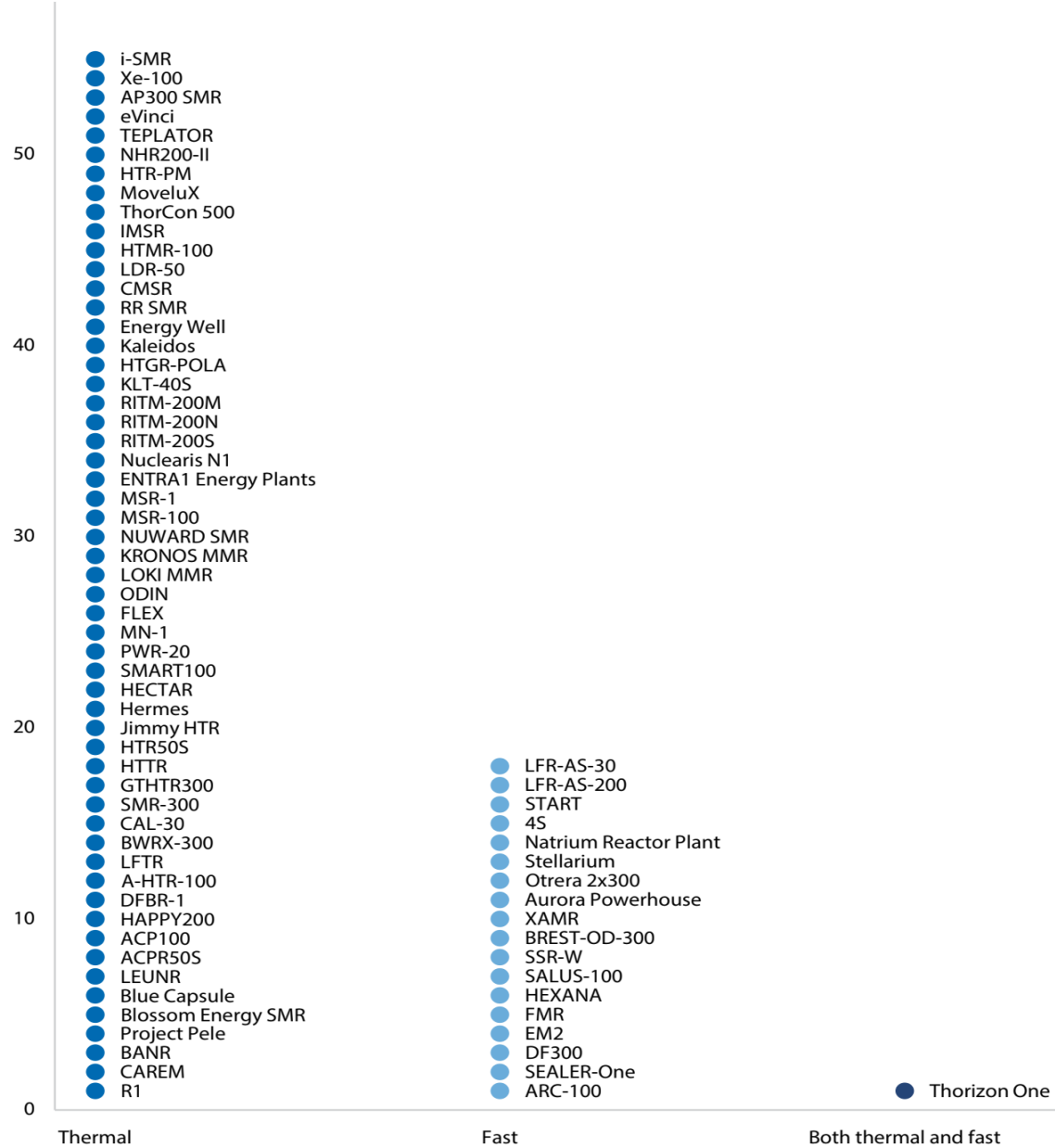
Şekil 1. Soğutucu Türlerine Göre SMRler [1]

► 127 adet SMR tasarımı var ancak bunların 74 tanesi paylaşılıyor.

► Bunlardan 24 tane su soğutmalı, 19 gaz soğutmalı, 14 metalik soğutuculu, 14 ergimiş tuz yakıt ve soğutuculu ve 3 adet ısı-borusu soğutuculu reaktörlerdir.

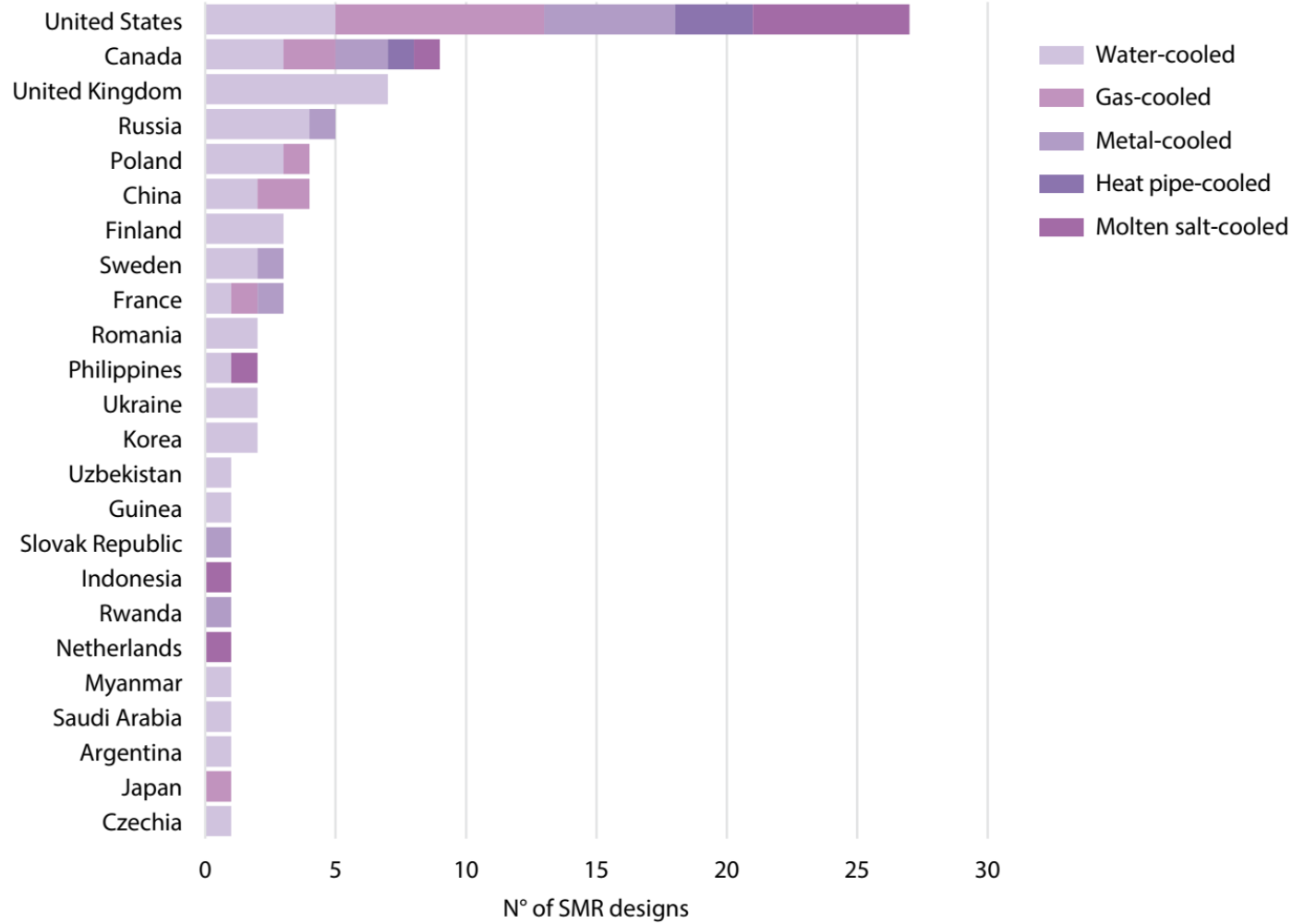
Nötron Spektrumlarına Göre SMRler

► 55 termal, 18 hızlı spektrum



Şekil 2. Nötron Spektrumlarına Göre SMRler [1]

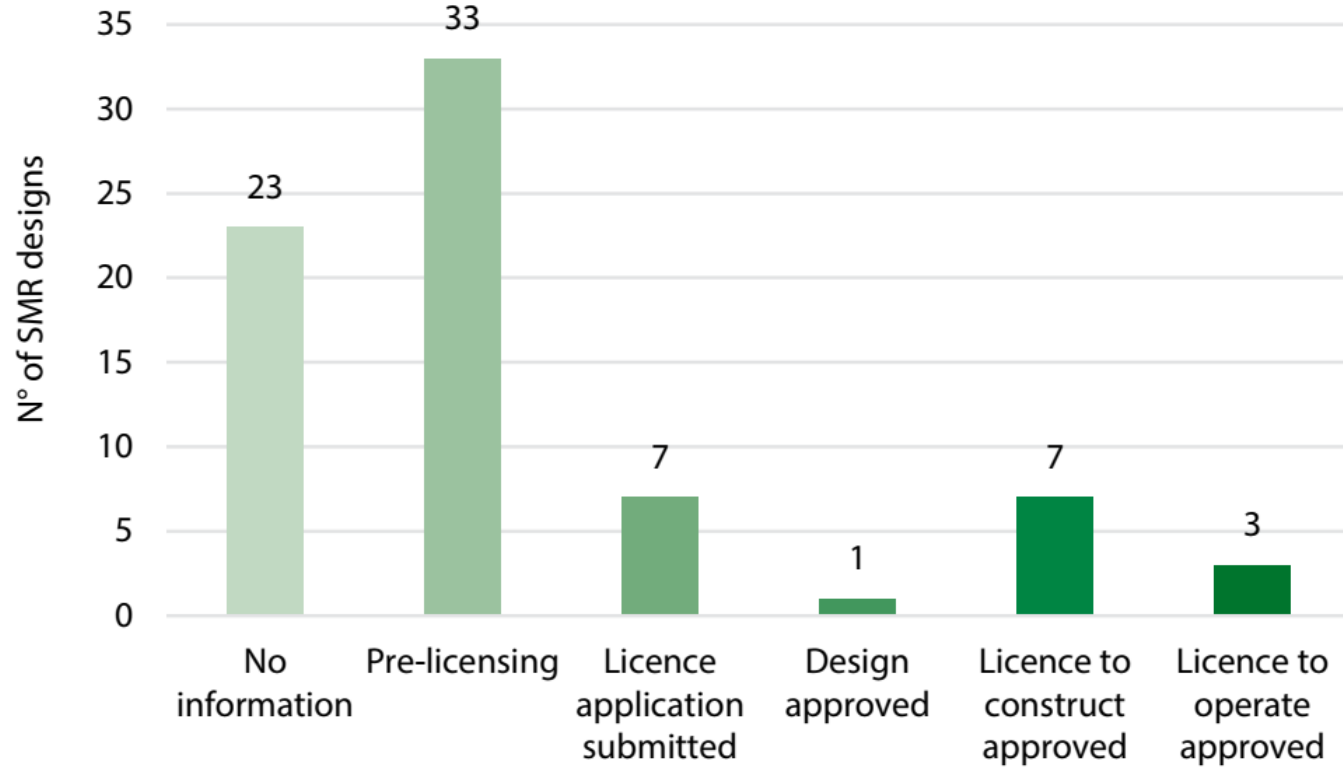
Ülkelere Göre SMR Tasarımları



Şekil 3. Ülkelere Göre SMR Tasarımları [1]

Lisans Süreçlerine Göre SMRler

- Üç reaktör işletmede, yedi reaktör inşaat lisansı almış durumda, bir reaktör tasarım onayı almış ve yedi reaktör lisans başvurusu yapmış durumdadır.



Şekil 4. SMRlerin lisanslama durumları [1]

Ticarileşmiş, İnşaat ve Tasarım Onayı Almış ve Lisans Sürecindeki Küçük Modüler Reaktörler

İşletmede Olan SMR'ler

Reaktör	Ülke	Reaktör Tipi	Durum
HTR-PM	Çin	Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı (HTGR)	İşletmede
KLT-40S	Rusya	Yüzer, Hafif Su Soğutmalı	İşletmede
HTTR	Japonya	Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı (Araştırma)	İşletmede

İnşaat Lisansı Onaylanmış SMR'ler

Reaktör	Ülke	Reaktör Tipi	Not
Project Pele	ABD	Mobil Mikroreaktör	Savunma amaçlı
Hermes	ABD	Erimiş Tuz Soğutmalı	Gösterim reaktörü
MSR-1	ABD	Erimiş Tuz Soğutmalı	Araştırma reaktörü
CAREM	Arjantin	Entegre PWR-SMR	İnşaat aşamasında
ACP100	Çin	PWR-SMR	İnşaat aşamasında
RITM-200N	Rusya	Hafif Su Soğutmalı	Kara konuşlu
BREST-OD-300	Rusya	Kurşun Soğutmalı, Hızlı	Demonstrasyon

Tasarım Onayı Almış SMR'ler

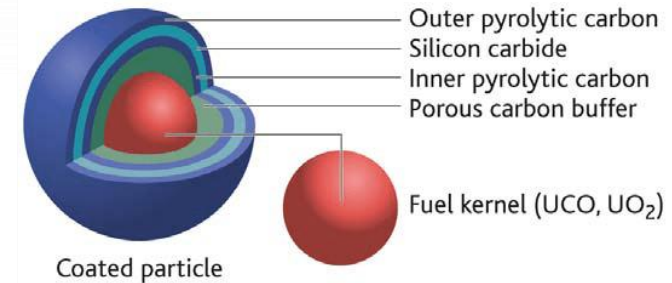
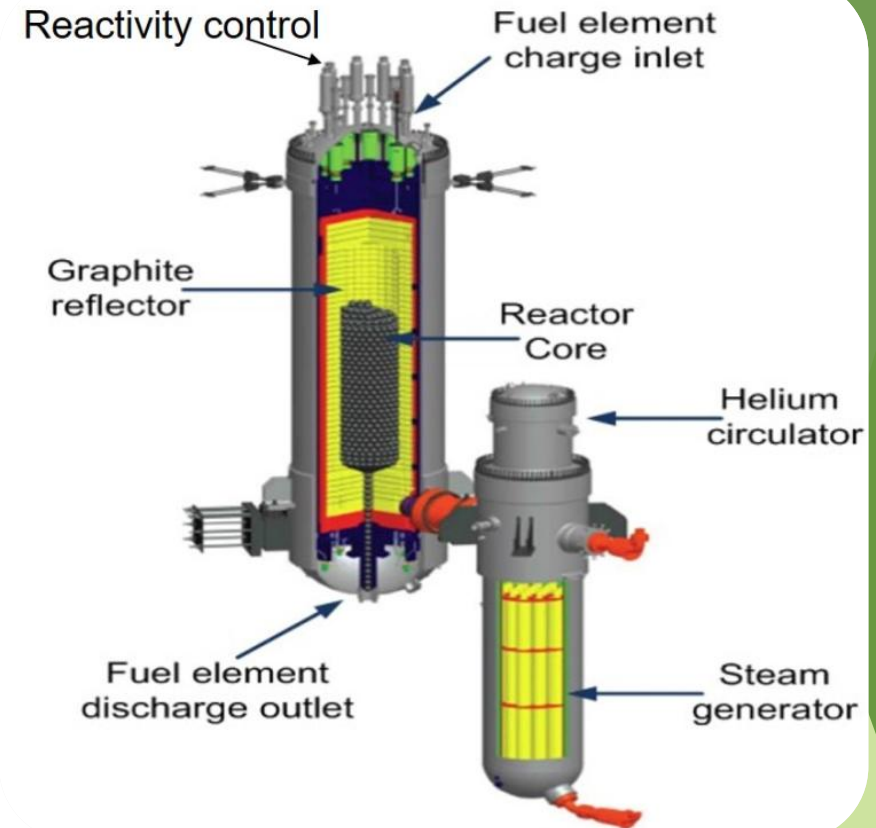
Reaktör	Ülke	Reaktör Tipi	Durum
SMART100	Güney Kore	Entegre PWR-SMR	Tasarım onayı (2024)

Lisans / İnşaat / Tasarım Başvurusu Yapılmış SMR'ler

Reaktör	Ülke	Reaktör Tipi	Başvuru
BWRX-300	Kanada	Kaynar Sulu Reaktör	CNSC
ACPR50S	Çin	Yüzer PWR-SMR	Ulusal düzenleyici
Jimmy HTR	Fransa	Yüksek Sıcaklık Reaktörü	ASN
RITM-200S	Rusya	Yüzer Hafif Su Reaktörü	Ulusal düzenleyici
Rolls-Royce SMR	Birleşik Krallık	PWR-SMR	GDA
ENTRA1 (NuScale)	ABD	Entegre PWR-SMR	NRC
Natrium	ABD	Sodyum Soğutmalı Hızlı	NRC

HTR-PM Reaktörü

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi / Menşei	INET, Tsinghua University, Çin
Reaktör tipi	Modüler çakıl yataklı HTGR
Soğutucu / Moderatör	Helyum / Grafit
Termal / Elektrik Gücü (MWt / MWe)	2 × 250 / 210
Birincil dolaşım	Zorlanmış dolaşım
NSSS işletme basıncı (birincil / ikincil), MPa	7 / 13.25
Kor giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	250 / 750
Yakıt tipi / dizilimi	Kaplamalı parçacık yakıt içeren küresel elemanlar (TRISO)
Çekirdekdeki yakıt elemanı sayısı	420 000 (her bir reaktör modülü için)
Yakıt zenginliği (%)	8.5
Kor çıkış yanma oranı (GWd/t)	90
Yakıt değiştirme çevrimi	Çevrim içi (on-line) yakıt yükleme
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubukları
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Aktif + pasif sistemlerin birleşimi
Tasarım ömrü (yıl)	40
Tesis alanı (m ²)	256 100
Reaktör basınç kabı (RPV) yüksekliği / çapı (m)	25 / 5.7 (iç çap)
RPV ağırlığı (metrik ton)	800
Yakıt çevrimi yaklaşımı	LEU, açık çevrim, sahada ara depolama
Ayrırt edici özellikler	İçsel güvenlik, saha dışı acil durum önlemlerine gerek yok
Tasarım durumu	İşletmede

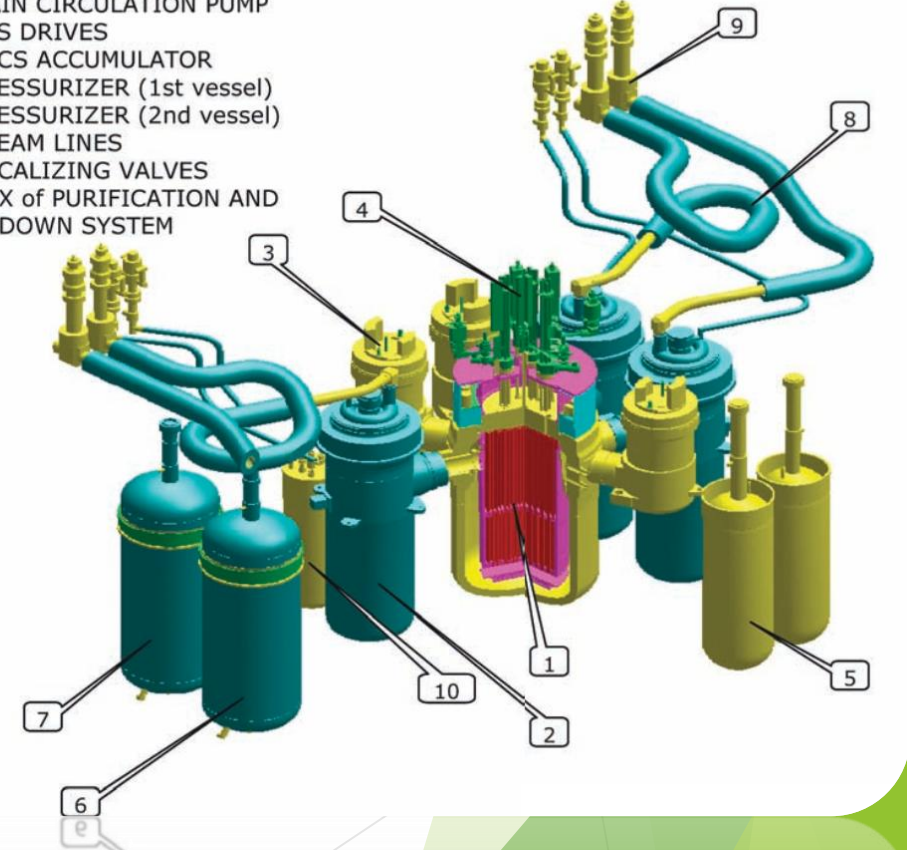


Şekil 5. HTR-PM ve TRISO Yakıt [3]

KLT-40S Reaktörü

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi / Menşei	JSC "Afrikantov OKBM", Rosatom, Rusya Federasyonu
Reaktör tipi	PWR (Basınçlı Su Reaktörü)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik Gücü (MWt / MWe)	150 / 35
Birincil dolaşım	Zorlanmış dolaşım
NSSS işletme basıncı (MPa)	12.7
Kor giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	280 / 316
Yakıt tipi / dizilimi	Silumin matris içinde UO ₂ pelet
Çekirdekdeki yakıt demeti sayısı	121
Yakıt zenginliği (%)	18.6
Kor çıkış yanma oranı (GWd/t)	45.4
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	30-36
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu tahrik mekanizması
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Aktif (kısmen pasif)
Tasarım ömrü (yıl)	40
Tesis alanı (m ²)	4 320 (Yüzer NGS)
Reaktör basınç kabı (RPV) yüksekliği / çapı (m)	4.8 / 2.0
RPV ağırlığı (metrik ton)	N/A
Ayrırt edici özellikler	Isı ve elektrik eş-üretimi için yüzer güç ünitesi; sahada yakıt değişimi yok; kullanılmış yakıt geri alınır
Tasarım durumu	Aralık 2019'da Pevek'te şebekeye bağlandı; Mayıs 2020'de tam ticari işletmeye geçti

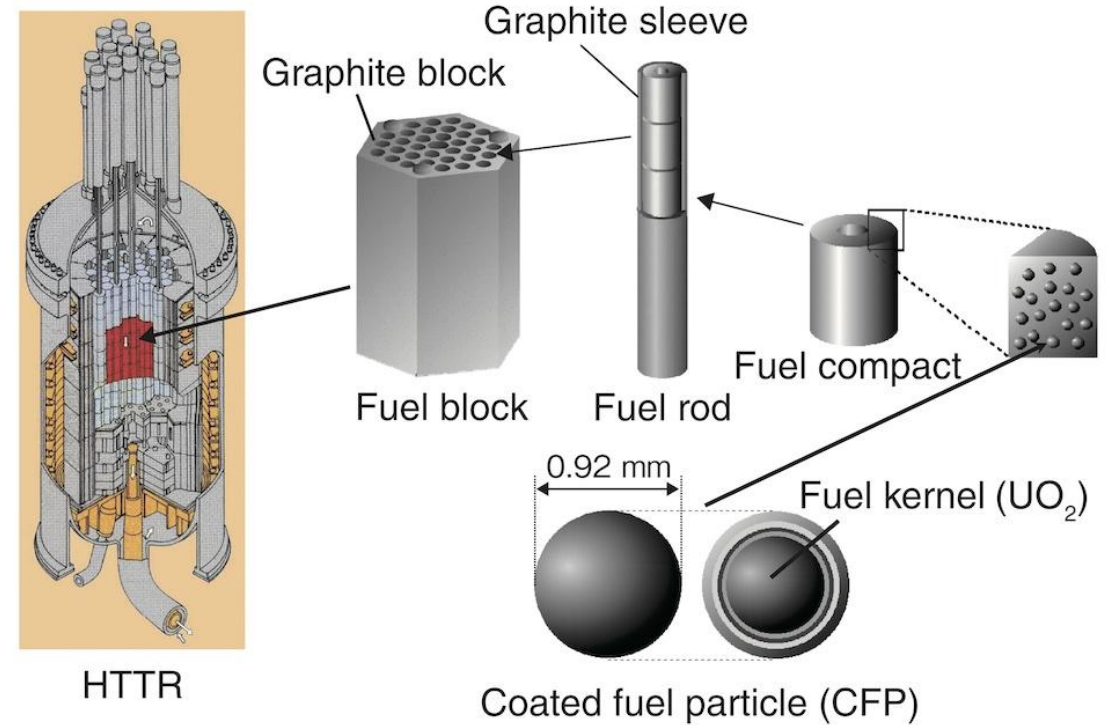
- 1- REACTOR
- 2- STEAM GENERATOR
- 3- MAIN CIRCULATION PUMP
- 4- CPS DRIVES
- 5- ECCS ACCUMULATOR
- 6- PRESSURIZER (1st vessel)
- 7- PRESSURIZER (2nd vessel)
- 8- STEAM LINES
- 9- LOCALIZING VALVES
- 10- HX of PURIFICATION AND COOLDOWN SYSTEM



Şekil 6. KLT-40S Reaktörü [2]

HTTR Reaktörü

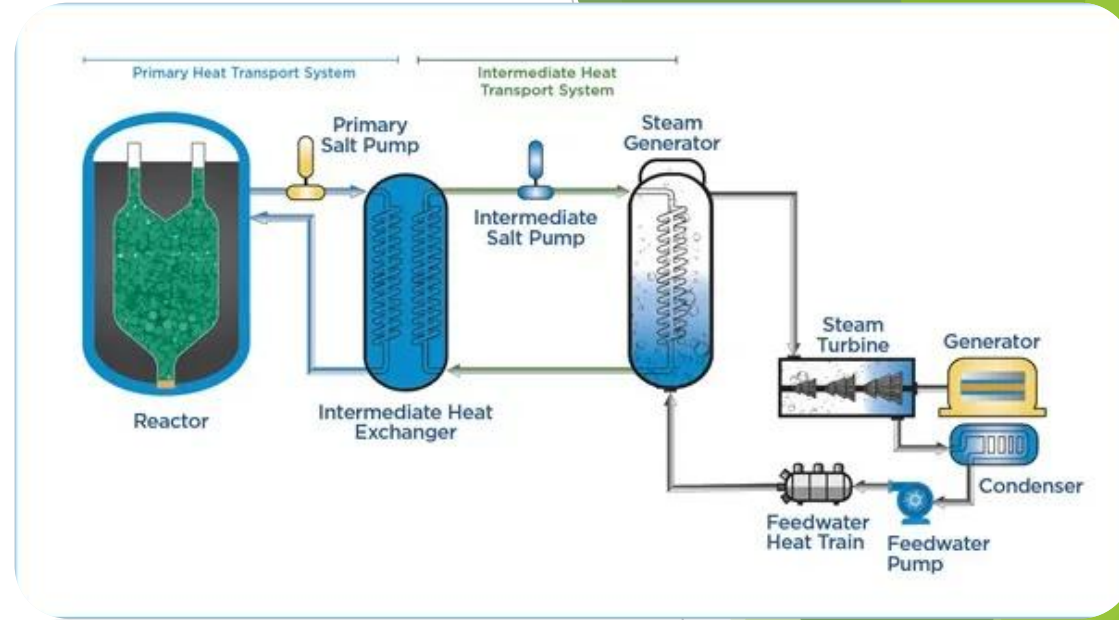
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi / Menşei	JAEA (MHI, Toshiba, IHI, Hitachi, Fuji Electric, NFI, Toyo Tanso iş birliğiyle), Japonya
Reaktör tipi	Prizmatik HTGR
Soğutucu / Moderatör	Helyum / Grafit
Termal güç (MWt)	30
Birincil dolaşım	Gaz sirkülatörleri ile zorlanmış
Birincil soğutucu basıncı (MPa)	4
Kor giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	395 / 850 (maks. 950)
Yakıt tipi / blok dizilimi	UO ₂ TRISO seramik kaplı parçacık yakıt
Çekirdekdeki yakıt bloğu sayısı	150
Yakıt zenginliği (ağırlıkça %)	3 - 10 (ortalama 6)
Ortalama yakıt yanma oranı (GWd/tHM)	22 (maks. 33)
Yakıt çevrimi	660 EFPD
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu sokulması
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Aktif
Tasarım / işletme ömrü (yıl)	-20
Tesis alanı	~200 m × 300 m
Reaktör basınç kabı (RPV) yüksekliği / çapı (m)	13.2 / 5.5
Ayrırt edici özellikler	Güvenlik gösterim testleri
Durum	İşletmede



Şekil 7. HTTR Reaktörü ve prizma yakıt [4]

HERMES Test Reaktörü

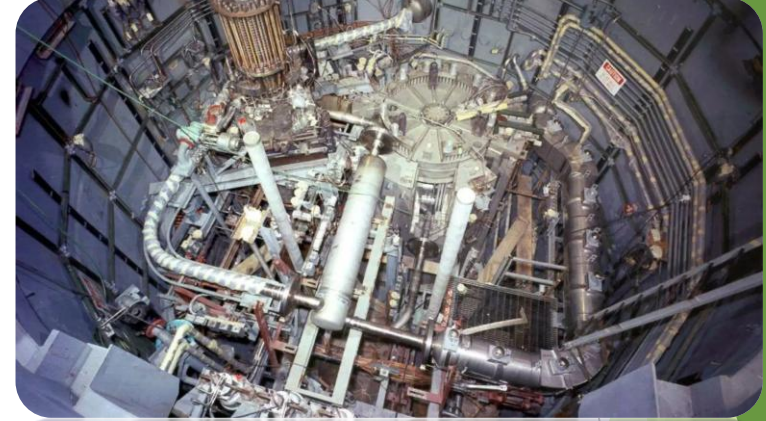
Parametre	Değer[2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	Kairos Power, ABD
Reaktör tipi	Florür Tuz Soğutmalı Yüksek Sıcaklık Reaktörü (FHR) - Deneme reaktörü
Soğutucu / Moderatör	Erimiş florür tuzu (FLiBe) / Grafit
Termal güç, MW(t)	~35
Elektrik gücü, MW(e)	Yok (elektrik üretimi amaçlanmamaktadır)
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış dolaşım (erimiş tuz)
Birincil sistem çalışma basıncı	<0,2 MPa
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	~550 - 650 (tasarım aralığı)
Yakıt tipi / dizilimi	TRISO kaplı parçacık yakıt, küresel (pebble) form
Yakıt zenginliği (%)	19,75
Yakıt değiştirme çevrimi	Çevrimiçi yakıt yükleme (öngörülen)
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubukları , boron
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Ağırlıklı olarak pasif güvenlik özellikleri
Tasarım ömrü (yıl)	Deneme süresi odaklı (çok yıllık test operasyonu)
Ayırt edici özellikler	<ul style="list-style-type: none">Düşük basınçlı erimiş tuz soğutmaTRISO yakıt kullanımıModern ABD'de NRC tarafından lisanslanan ilk erimiş tuz soğutmalı reaktörElektrik üretimi olmayan saf teknoloji gösterim reaktörü
Tasarım durumu	İnşaat aşamasında (NRC inşaat izni Aralık 2023)



Şekil 8. HERMES Reaktörü [5]

MSR-1 Araştırma Reaktörü

Parametre	Değer[2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	Natura Resources, ABD
Reaktör tipi	Erimiş Tuz Reaktörü (MSR) - Araştırma ve gösterim reaktörü
Soğutucu / Moderatör	Erimiş florür tuzu / Grafit
Termal güç, MW(t)	~1
Elektrik gücü, MW(e)	Yok (elektrik üretimi amaçlanmamaktadır)
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış dolaşım (erimiş tuz)
Birincil sistem çalışma basıncı	Düşük basınç (atmosferik seviyeye yakın)
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	~650 (maksimum)
Yakıt tipi / dizilimi	Erimiş tuz yakıt+soğutma (grafit moderatör)
Yakıt zenginliği (%)	Düşük zenginlikli uranyum (LEU,%10 < %20)
Yakıt değiştirme çevrimi	Araştırma reaktörü
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubukları
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Ağırlıklı olarak pasif güvenlik özellikleri
Tasarım ömrü (yıl)	Deneme ve araştırma süresi odaklı
Ayırt edici özellikler	<ul style="list-style-type: none">• ABD'de üniversite kampüsünde kurulması planlanan ilk MSR• Düşük basınçlı işletme• Erimiş tuz teknolojileri için eğitim, test ve lisanslama platformu• Elektrik üretimi olmayan saf Ar-Ge reaktörü
Tasarım durumu	İnşaat lisansı onaylandı (NRC) - Kurulum aşamasında

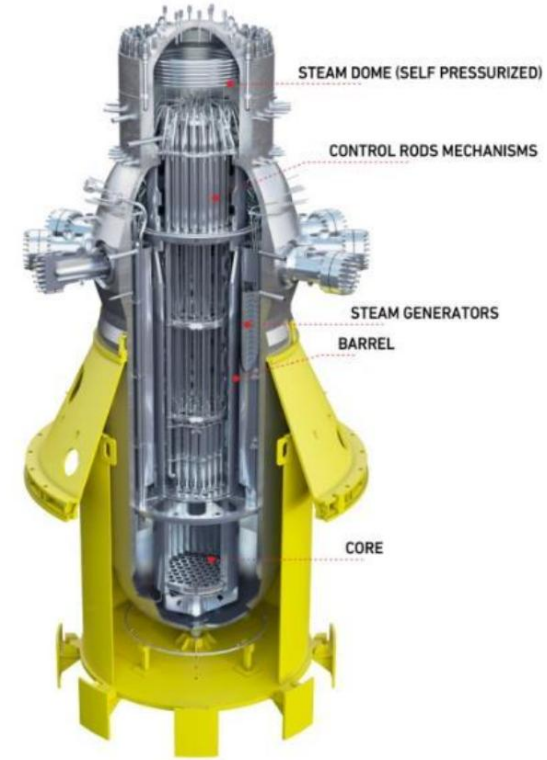


20

Şekil 9. MSR-1 Reaktörü [6]

CAREM-25 Reaktörü

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), Arjantin
Reaktör tipi	Entegre Basıncılı Su Reaktörü (Integral PWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	100 / ~30 (CAREM-25)
Birincil çevrim dolaşımı	Doğal dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	12.25 / 4.7 (CAREM-25)
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	284 / 326 (CAREM-25)
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ pelet / altıgen (hexagonal)
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	61 (CAREM-25)
Yakıt zenginliği (%)	3.1 (CAREM-25)
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	24 (CAREM-25)
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	14 (CAREM-25)
Reaktivite kontrol mekanizması	Yalnızca kontrol çubuğu tahrik mekanizması (CRDM)
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	40
Tesis alanı (m ²)	36 000 (CAREM-25)
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	11 / 3.2 (CAREM-25)
RPV ağırlığı (metrik ton)	267 (CAREM-25)
Yakıt çevrimi yaklaşımı	390 tam güç günü ve çekirdeğin %50'sinin değiştirilmesi (CAREM-25)
Ayrt edici özellikler	Doğal dolaşım ile çekirdek ısı uzaklaştırma, basınç bastırmalı (pressure suppression) muhafaza
Tasarım durumu	İnşaat aşamasında (CAREM-25)



Şekil 10. CAREM-25 Reaktörü [2]

ACP100 Reaktörü

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	CNNC (NPIC - Nuclear Power Institute of China), Çin
Reaktör tipi	Entegre Basınçlı Su Reaktörü (Integral PWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	385 / 125
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	15 / 4.6
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	286.5 / 319.5
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ / 17 × 17 kare adımlı
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	57
Yakıt zenginliği (%)	< 4.95
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	24
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	< 52
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu tahrik mekanizması (CRDM), Gd ₂ O ₃ katı yanabilir zehir ve çözünebilir borik asit
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	60
Tesis alanı (m ²)	200 000
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	10 / 3.35
RPV ağırlığı (metrik ton)	300
Yakıt çevrimi yaklaşımı	Kullanılmış yakıtın geçici olarak yakıt havuzlarında depolanması
Ayırt edici özellikler	Tüp-içinde-tüp (tube-in-tube) tek geçişli buhar jeneratörlü entegre reaktör tasarımı; nükleer ada yer altına gömülü
Tasarım durumu	İnşaat devam ediyor



Şekil 11. ACP100 Reaktörü [2]

RITM-200N Reaktörü

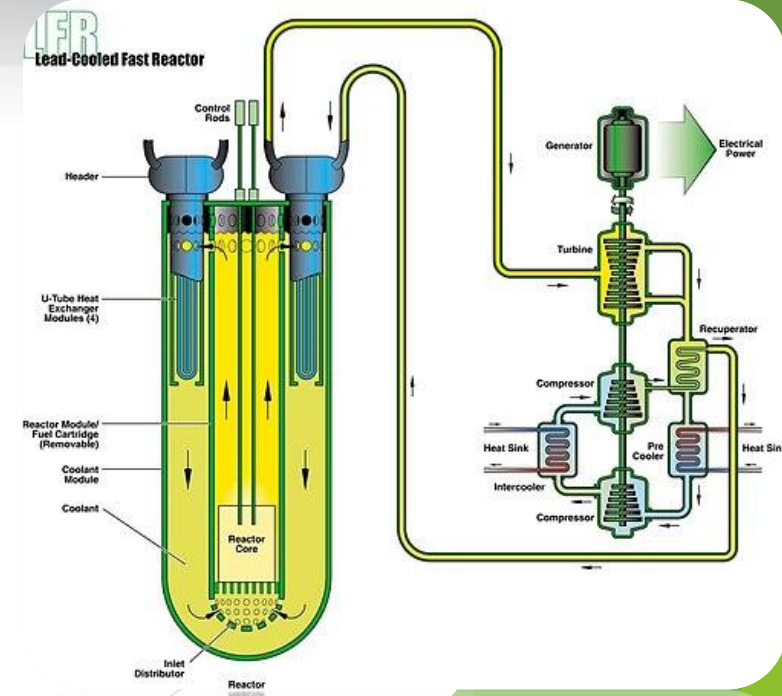
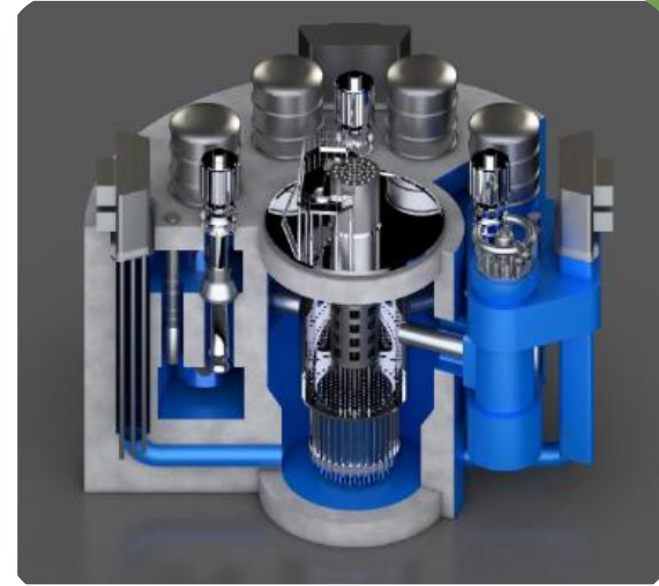
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	Afrikantov OKBM, Rosatom, Rusya Federasyonu
Reaktör tipi	Entegre Basıncılı Su Reaktörü (Integral PWR)
Soğutucu / Moderatör	Su / Su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	190 / 55
Birincil soğutma sistemi dolaşımı	Zorlanmış dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	15.7 / 3.83 (buhar basıncı)
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	283 / 321
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ pelet / altıgen (hexagonal) yakıt demeti
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	199
Yakıt zenginliği (%)	< 20
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	60 - 72
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	Belirtilmemiş
Reaktivite kontrol mekanizması	CPS'ye ait kontrol çubuğu tahrik mekanizmaları (CRDM)
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Aktif ve pasif güvenlik sistemlerinin birleşimi
Tasarım hizmet ömrü (yıl)	60
Nükleer santral ayak izi (m ²)	120 000 (dikdörtgen bina zarfı)
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	7.5 / 3.4
RPV ağırlığı (metrik ton)	164
İşletme çevrimi yaklaşımı	Her 5 - 6 yılda bir yakıt değiştirme
Ayrırt edici özellikler	Modüler tasarım; entegre reaktör; ağır kazalarda kap içi koryum tutma (in-vessel corium retention)
Tasarım durumu	Detaylı tasarım aşamasında



Şekil 12. CAREM-25 Reaktörü [2]

BREST-OD-300 Reaktörü

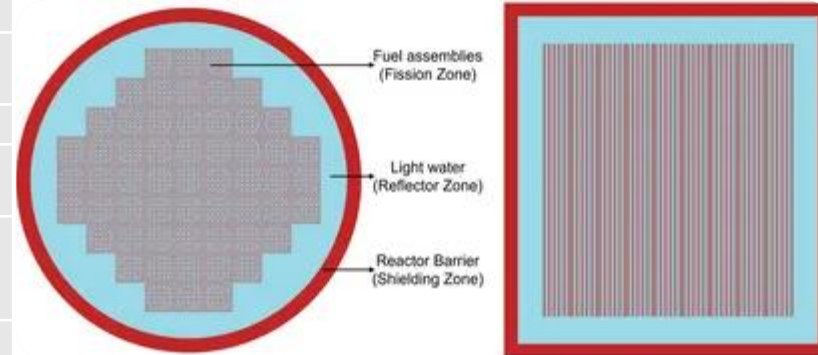
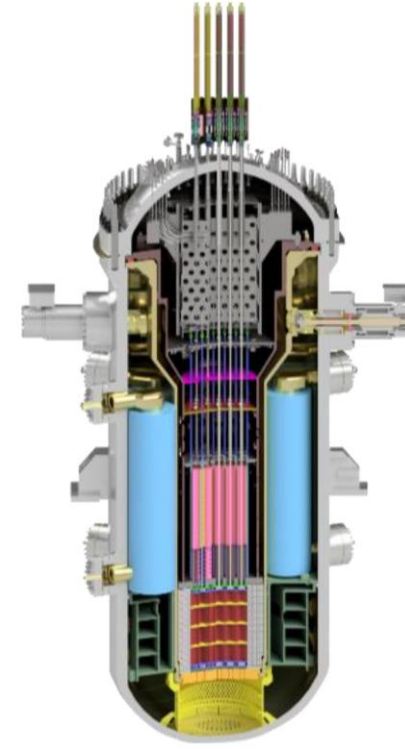
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	NIKIET, Rusya Federasyonu
Reaktör tipi	Sıvı metal soğutmalı hızlı reaktör (Kurşun soğutmalı)
Soğutucu	Kurşun (Pb)
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	700 / 300
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	0.1 / 17 - 18.5
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	420 / 535
Yakıt tipi / demet dizilimi	Karışık uranyum-plütonyum nitrür yakıt
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	169
Yakıt zenginliği (%)	≤ 14.5
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	36 - 78
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	61.45
Reaktivite kontrol mekanizması	Reaktivite dengeleme (RC), acil koruma (EP) ve otomatik kontrol (AC) elemanları
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	30
Tesis alanı (m)	80 × 80
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	17.5 / 26
RPV ağırlığı (metrik ton)	27 000
Yakıt çevrimi yaklaşımı	Kapalı yakıt çevrimi; tükenmiş uranyum nitrürü + plütonyum kullanımı
Ayrırt edici özellikler	Kurşunun, yakıtın, çekirdeğin ve soğutma tasarımının doğal özellikleri sayesinde yüksek düzeyde içsel (inherent) güvenlik
Tasarım durumu	İnşaat devam ediyor



Şekil 13. BREST-OD-300 Reaktörü [2]

SMART100 Reaktörü

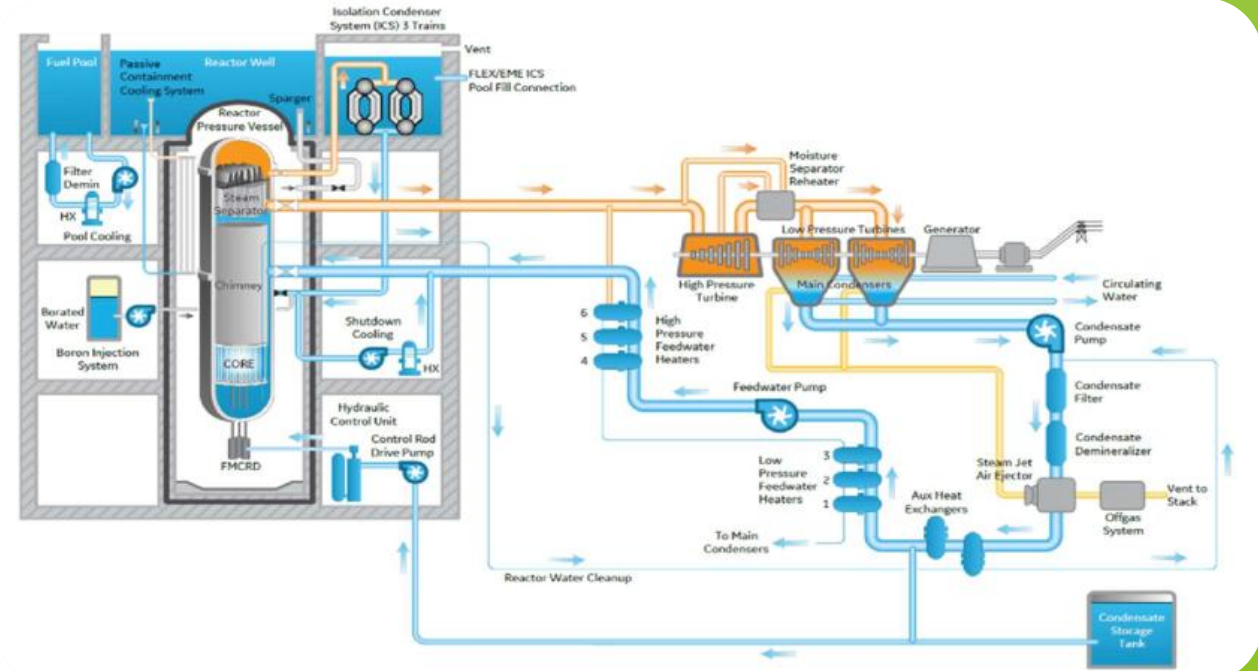
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	KAERI (Kore Cumhuriyeti) ve K.A.CARE (Suudi Arabistan Krallığı)
Reaktör tipi	Entegre Basıncılı Su Reaktörü (Integral PWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	365 / 107
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	15 / 5.8
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	296 / 322
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ pelet / 17 × 17 kare adımlı
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	57
Yakıt zenginliği (%)	< 5
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	30
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	< 54
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu tahrik mekanizmaları ve çözünebilir bor
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	60
Tesis alanı (m ²)	90 000
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	16.8 / 6.0
RPV ağırlığı (metrik ton)	1 070 (soğutucu dâhil)
Yakıt çevrimi yaklaşımı	Geleneksel LWR gereklilikleri; kullanılmış yakıt depolama kapasitesi: 30 yıl
Ayırt edici özellikler	Deniz suyu arıtımı (desalinasyon) ve proses ısısı uygulamalarıyla eşleştirilebilirlik; entegre birincil sistem
Tasarım durumu	Detaylı tasarım aşamasında



Şekil 14. SMART-100 Reaktörü [2]

BWRX-300 Reaktörü

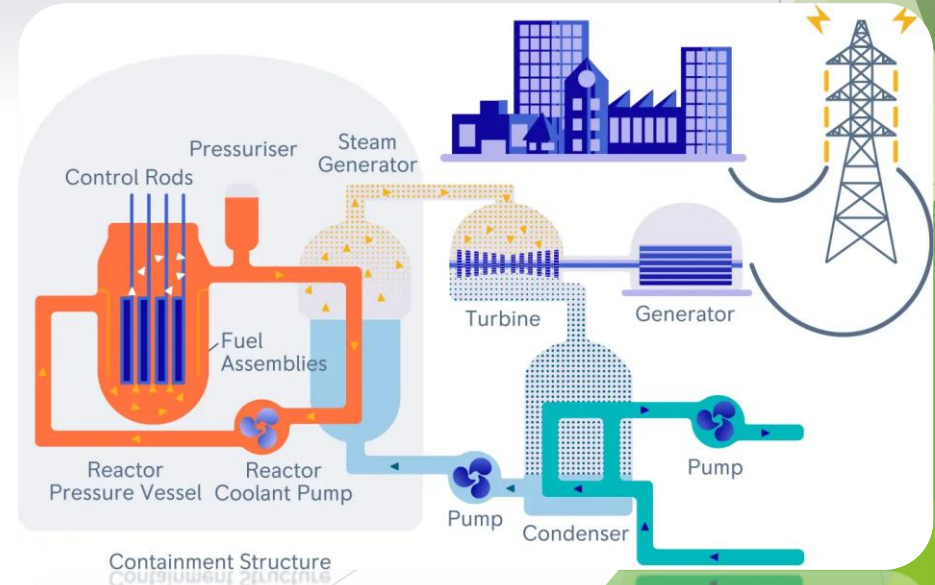
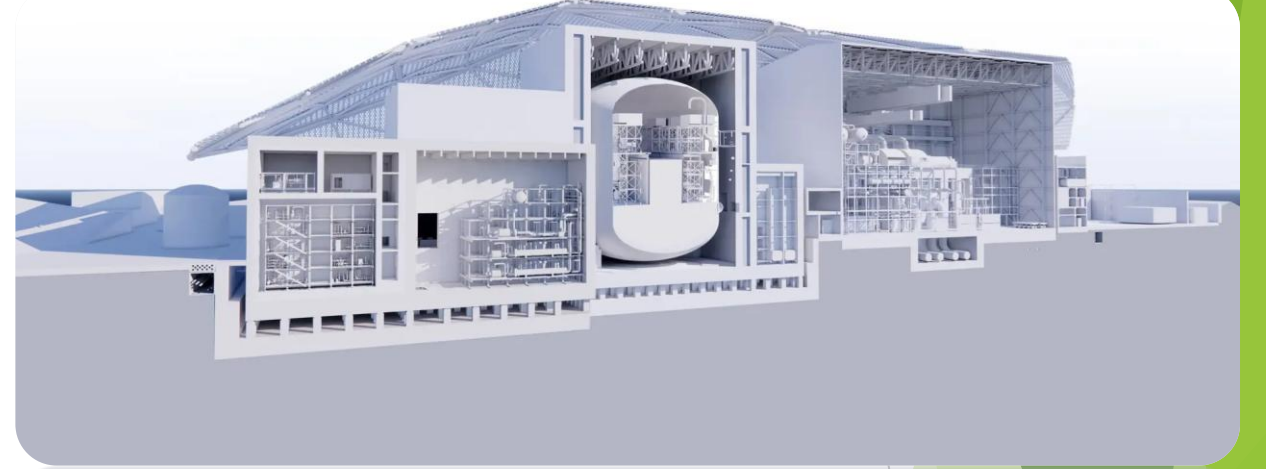
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	GE Hitachi Nuclear Energy (ABD) ve Hitachi-GE Nuclear Energy (Japonya)
Reaktör tipi	Kaynar Su Reaktörü (BWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	870 / 300
Birincil çevrim dolaşımı	Doğal dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil), MPa	7.17 MPa (mutlak)
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	270 / 288
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ / Kare kafes (square lattice)
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	240
Yakıt zenginliği (%)	Ortalama 3.8 / Maksimum 4.95
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	~55
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	12 - 24
Reaktivite kontrolü	Kontrol çubukları
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemlerini içeren çok katmanlı savunma (Defense-in-Depth)
Tasarım ömrü (yıl)	60
Tesis alanı (m ²)	11 550
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	27 / 4
RPV ağırlığı (metrik ton)	650
Ayrırt edici özellikler	Basitleştirilmiş BWR tasarımı, doğal dolaşım, pasif güvenlik özellikleri, doğal gaz santralleriyle maliyet açısından rekabet edebilirlik
Tasarım durumu	Detaylı tasarım aşamasında



Şekil 15. BWRX-300 Reaktörü [7]

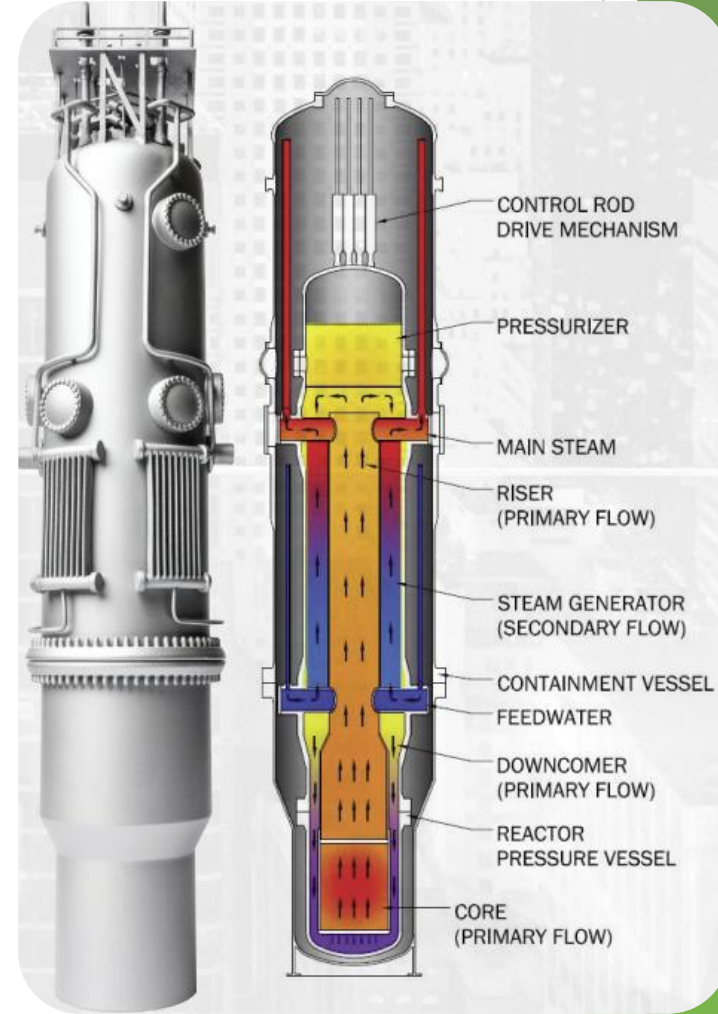
ROLLS-ROYCE SMR

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	Rolls-Royce SMR Limited, Birleşik Krallık
Reaktör tipi	3-döngülü Basınçlı Su Reaktörü (3-loop PWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	1 358 / 470
Birincil çevrim dolaşımı	Güç işletiminde pompajlı dolaşım; artık ısı uzaklaştırma için yedek doğal dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	15.5 / 7.4
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	295 / 322
Yakıt tipi / demet dizilimi	Endüstri standardı UO ₂ yakıt / 17 × 17 kare kafes
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	121
Yakıt zenginliği (%)	< 4.95
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/tHM)	-65
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	18
Reaktivite kontrolü	Kontrol çubukları
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif ve aktif güvenlik sistemlerinin birleşimi
Tasarım ömrü (yıl)	60
Tesis alanı (m ²)	54 500
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	7.82 / 4.20
RPV ağırlığı (metrik ton)	169
Ayır edici özellikler	Hızlı ve maliyet etkin inşa için tüm santrali kapsayan modüler tasarım yaklaşımı
Tasarım durumu	Olgun kavramsal tasarım (mature conceptual design)



NuScale SMR

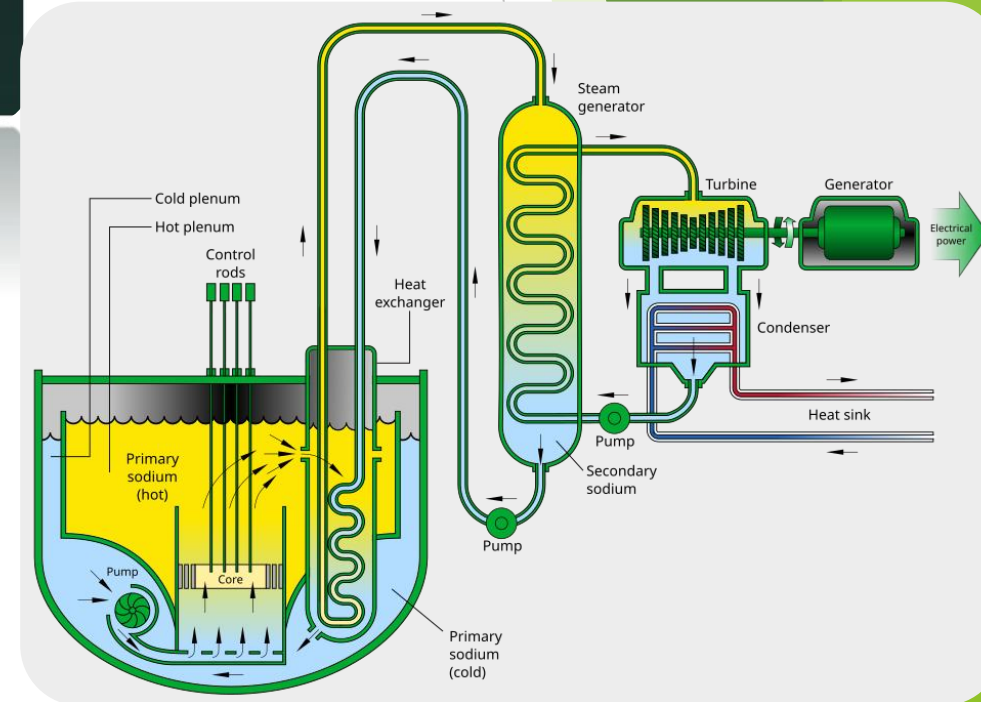
Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	NuScale Power LLC., ABD
Reaktör tipi	Entegre Basıncılı Su Reaktörü (Integral PWR)
Soğutucu / Moderatör	Hafif su / Hafif su
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	250 / 77 (brüt)
Birincil çevrim dolaşımı	Doğal dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	13.8 / 4.3
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	249 / 316
Yakıt tipi / demet dizilimi	UO ₂ pelet / 17 × 17 kare adımlı
Çekirdekteki yakıt demeti sayısı	37
Yakıt zenginliği (%)	≤ 4.95
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	50 - 55 (çevrim optimizasyonu ile)
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	Nominal 18
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu tahriki ve bor
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	60
Tesis alanı (m ²)	Santral konfigürasyonuna bağlı
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	17.7 / 2.7
RPV ağırlığı (metrik ton)	TBC (henüz kesinleşmedi)
Yakıt çevrimi yaklaşımı	Nominal üç aşamalı giriş-çıkış yakıt değiştirme şeması
Ayırıcı özellikler	AC/DC güç, su ilavesi veya operatör müdahalesi olmaksızın sınırsız süre çekirdek soğutma yeteneği
Tasarım durumu	Ekipman imalatı devam ediyor



Şekil 17. Rolls-Royce SMR Reaktörü [9]

NATRIUM Reaktörü

Parametre	Değer [2]
Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke	TerraPower, LLC - ABD
Reaktör tipi	Hızlı nötron spektrumlu reaktör
Soğutucu / Moderatör	Sıvı metal sodyum / Moderatör yok
Termal / Elektrik gücü, MW(t)/MW(e)	840 / 345
Birincil çevrim dolaşımı	Zorlanmış (pompalı) dolaşım
NSSS çalışma basıncı (birincil/ikincil), MPa	Düşük basınç / atmosferik
Çekirdek giriş / çıkış soğutucu sıcaklığı (°C)	-540
Yakıt tipi / demet dizilimi	Metalik uranyum alaşımı (HALEU) / Altıgen (hexagonal)
Yakıt zenginliği (%)	Maksimum %19.75
Çekirdek boşaltma yanması (GWd/t)	~150
Yakıt değiştirme çevrimi (ay)	18 - 24
Reaktivite kontrol mekanizması	Kontrol çubuğu tahrik sistemi
Güvenlik sistemleri yaklaşımı	Pasif güvenlik sistemleri
Tasarım ömrü (yıl)	60
Reaktör basınç kabı (RPV) yükseklik / çap (m)	20.4 / 11.6
RPV ağırlığı (metrik ton)	2450
Ayrırt edici özellikler	Eritilmiş tuz tabanlı, termal olarak entegre enerji depolama sistemi; yerleşik gigavat ölçeğinde enerji depolama ve yük takibi kabiliyeti
Tasarım durumu	Detaylı tasarım aşaması



Şekil 18. Natrium Reaktörü [2]

Sonuçlar

- ▶ SMR teknolojileri, büyük ölçekli nükleer santrallerin alternatifi değil, tamamlayıcısı olarak konumlanmaktadır.
- ▶ Kısa vadede ticarileşmesi en gerçekçi tasarımlar, mevcut lisanslama altyapısıyla uyumlu LWR (hafif su soğutmalı) tabanlı SMR'lerdir.
- ▶ İleri reaktör konseptleri (hızlı reaktörler, MSR'ler) yüksek potansiyele sahip olmakla birlikte, yakıt, malzeme ve regülasyon alanlarında ek Ar-Ge gerektirmektedir.
- ▶ SMR'lerin en büyük zorlukları, FOAK maliyetleri, seri üretimin henüz gerçekleşmemiş olması ve finansman riskleridir.
- ▶ Pasif güvenlik sistemleri ve modüler tasarım yaklaşımı, SMR'leri güvenlik, esneklik ve saha çeşitliliği açısından avantajlı kılmaktadır.
- ▶ SMR'ler, yenilenebilir enerji entegrasyonu, endüstriyel proses ısısı ve karbonsuz enerji dönüşümü için stratejik bir rol üstlenmektedir.

Kaynakça

1. NEA (2025), *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.82155/nqz2-hp44>.
2. International Atomic Energy Agency. (2024). *Small modular reactors: Advances in SMR developments 2024* (IAEA/PAT/008) (48 s., 8 fig.). <https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum>
3. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-02/gif_webinar_htr-pm_dong_201801v2_final.pdf, Erişim Tarihi: 04 Ocak 2026
4. https://rdreview.jaea.go.jp/review_en/2021/e2021_6_3f6_6.html, Erişim Tarihi: 06 Ocak 2026
5. <https://neutronbytes.com/2024/07/28/nrc-completes-safety-review-for-kairos-hermes-2>, Erişim Tarihi: 05 Ocak 2026
6. <https://interestingengineering.com/energy/us-nrc-permit-first-advanced-liquid-salt-fueled-nuclear-reactor>, Erişim Tarihi: 03 Ocak 2026
7. https://www.researchgate.net/figure/BWRX-300-SCHEMATIC-DIAGRAM-22_fig3_377151028, Erişim Tarihi: 05 Ocak 2026
8. <https://www.rolls-royce-smr.com/about-the-rolls-royce-smr>, Erişim Tarihi: 02 Ocak 2026
9. <https://neutronbytes.com/wp-content/uploads/2025/05/nuscale-77-mwe-smr-3.png>
10. Kang, J. S., Chang, I. G., & Cheong, J. H. (2026). *Comprehensive review of small modular reactor development focusing on challenges in the backend nuclear fuel cycle*. *Nuclear Engineering and Technology*, 58(3), Article 104000. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.104000>.
11. Gaster, R. (2025, April 14). Small modular reactors: A realist approach to the future of nuclear power. The Information Technology and Innovation Foundation (ITIF).



Teşekkürler...