



NÜKLEER MÜHENDİSLER DERNEĞİ

İTÜ



KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER-101

Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE

Nükleer Mühendisler Derneği Başkanı

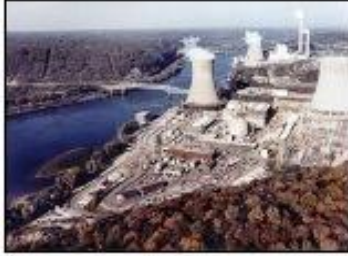
İTÜ Enerji Enstitüsü

08.01.2026

Nükleer Güç Santrali Gelişimi

1. Nesil

İlk Protatip Reaktörler



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

2. Nesil

Ticari Güç Reaktörleri



- PWR, BWR, VVER
- CANDU
- GCR, RBMK

3. Nesil

İleri Su Soğutmalı Reaktörler



- CANDU 6
- System 80
- AP600

3+. Nesil

Evrimsel Reaktörler



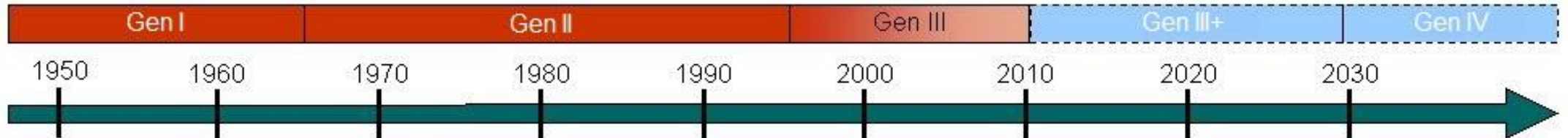
- ABWR, ESBWR
- AP1000, APWR
- ACR1000

4. Nesil

Devrimsel Reaktörler



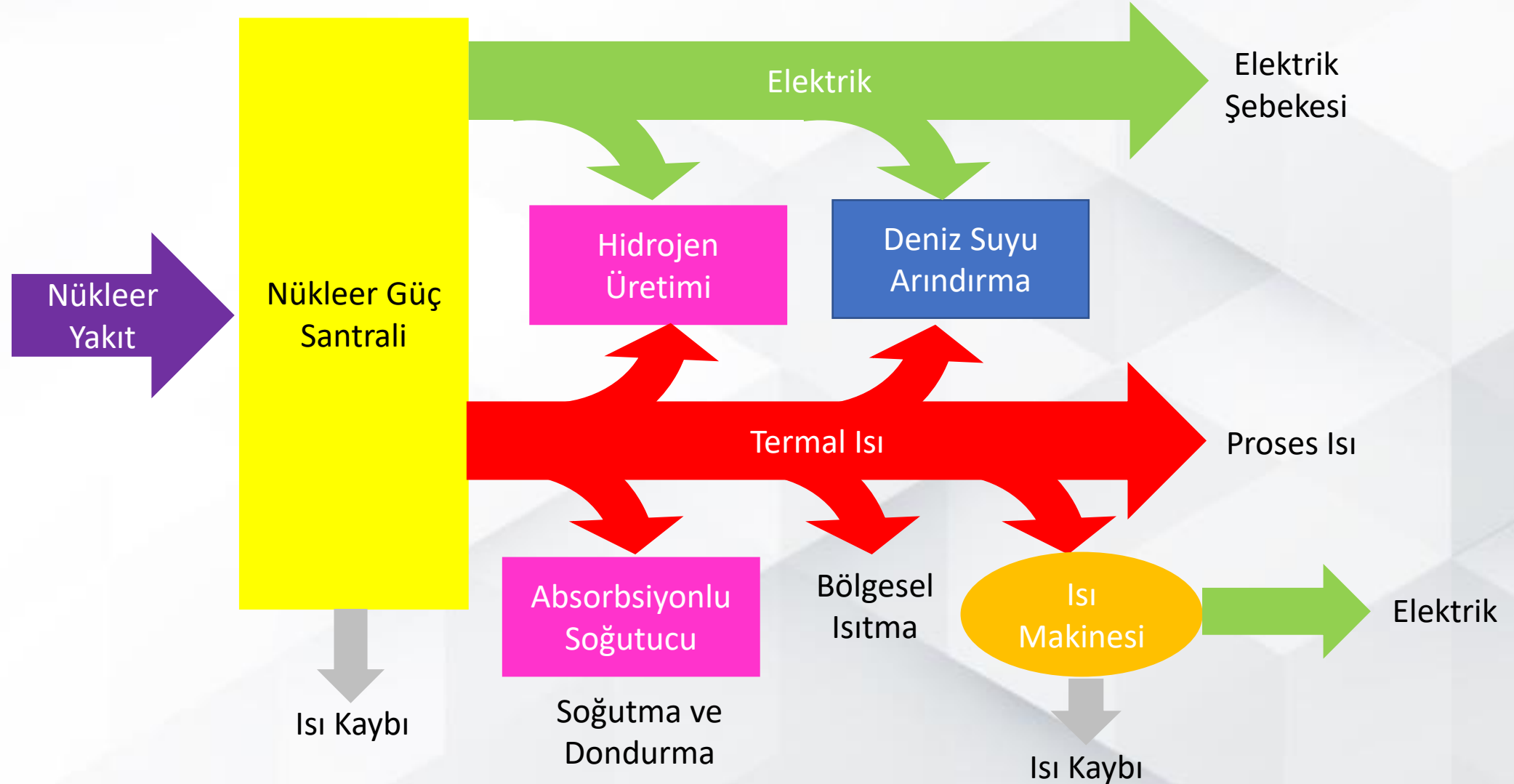
- Çok ekonomik
- Daha güvenli
- Minimum atık
- Kaçakçılık direnci



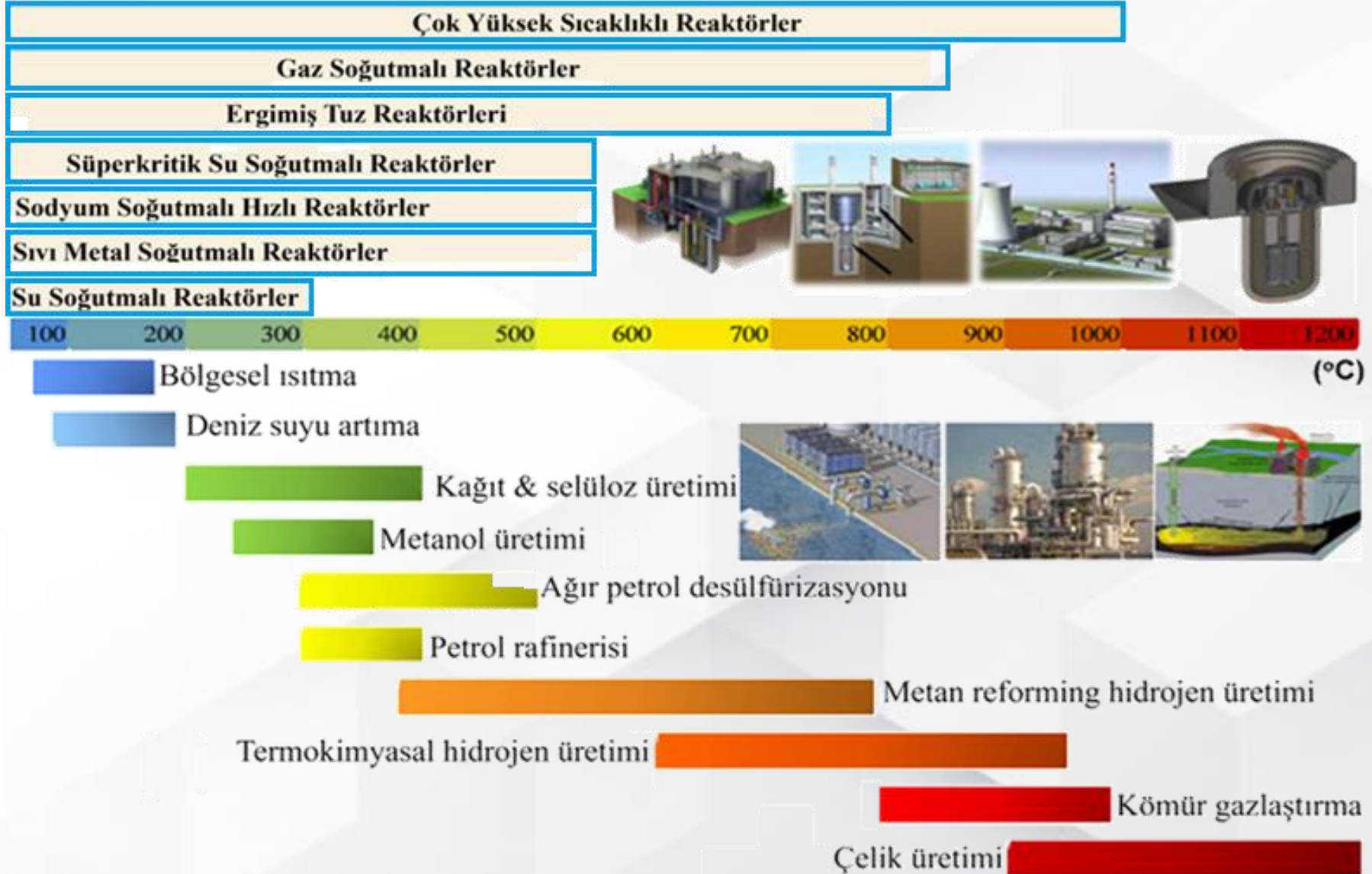
Şu anda elektrik üreten 7 çeşit reaktör vardır:

- Basınçlı Su Reaktörü (PWR)
- Kaynar Sulu Reaktör (BWR)
- Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)
- Gaz Soğutmalı Reaktör (GCR)
- Su Soğutmalı Grafit Yavaşlatıcılı Reaktör (RBMK)
- Hızlı Üretken Reaktör (FBR)
- Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör (HTGR) – Küçük Modüler Reaktör- 4. nesil

Reaktör Kullanım Alanları



Reaktör Kullanım Alanları



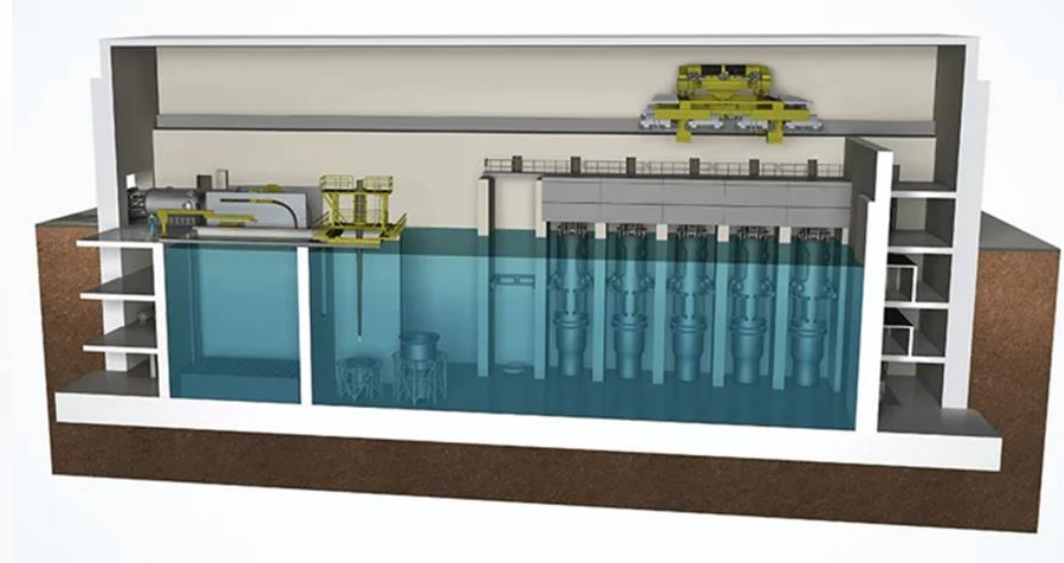
Reaktör Kullanım Alanları

Seçenek	Yeniden kullanılabilirler	Reaktör teknolojisi	Termik santral durumu	Entegrasyonun kolaylığı	CAPEX kazancı	Süre
Yeniden güç verme	İzinler Şalt sahası Şebeke Binalar Türbin adası	Sadece GEN IV reaktörler (sıcaklık >500 °C)	Yeni-orta yaşta tesisler	Orta-zor	%25-30	Orta-uzun vade (lisanslama sürecine bağlı)
Yeniden kullanım	İzinler Şalt sahası Şebeke	Hem GEN IV hem su soğutmalı reaktörler	Uzun süredir kullanılan tesisler	Düşük	%10-20	Kısa vade
Değiştirme	İzinler	Hem GEN IV hem su soğutmalı reaktörler	Uzun süredir kullanılan tesisler	Entegrasyon yok	<%10	Kısa vade

Küçük Modüler Reaktörler

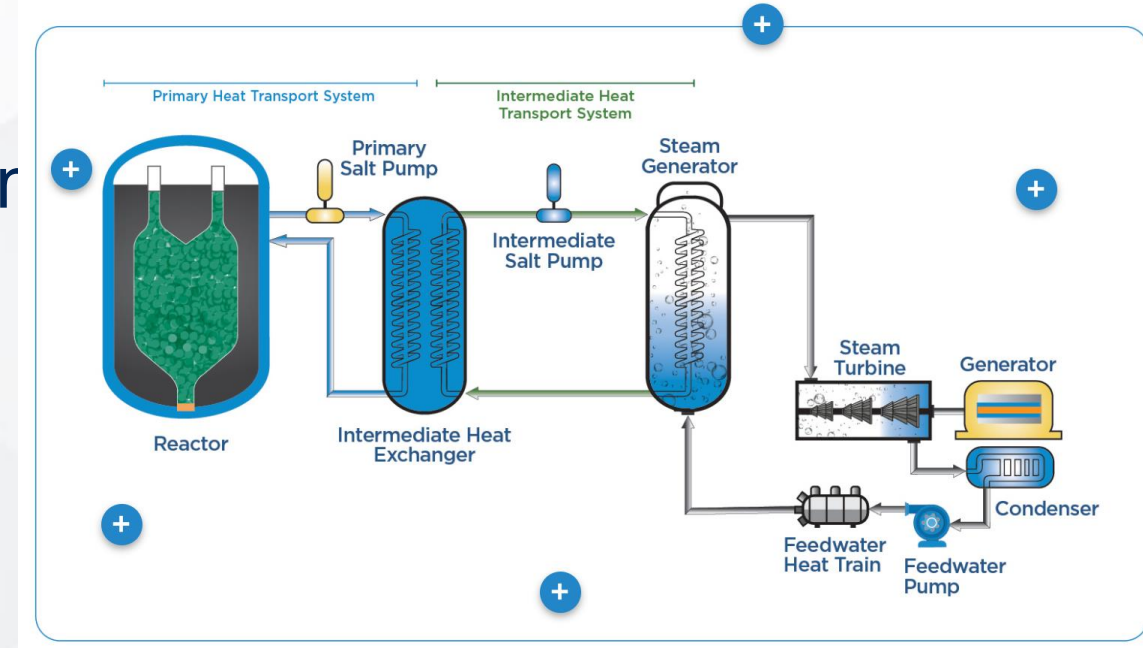
10 MW_e – 300 MW_e güç aralığında tasarlanmış,

- Parçaları ve sistemleri fabrikada imal edilebilen,
- Talep edildiğinde kurulum için sahalara modül halinde taşınabilen,
- Tek modül halinde veya birden fazla modülün ortak bir biçimde çalışabildiği reaktör sistemleridir.



Küçük Modüler Reaktörler

- Yalın tasarım
- Standartlaşmaya uygun
- Küçük elektrik şebekelerine bağlanabilir
- Düşük yatırım maliyetli
- Fabrika ortamında seri üretilebilme
- Sahalara kolaylıkla taşınabilme
- Kısa inşaat süresi
- Üst düzey güvenli hatta kendiliğinden güvenli
- Çoklu modüller halinde konumlandırılabilme

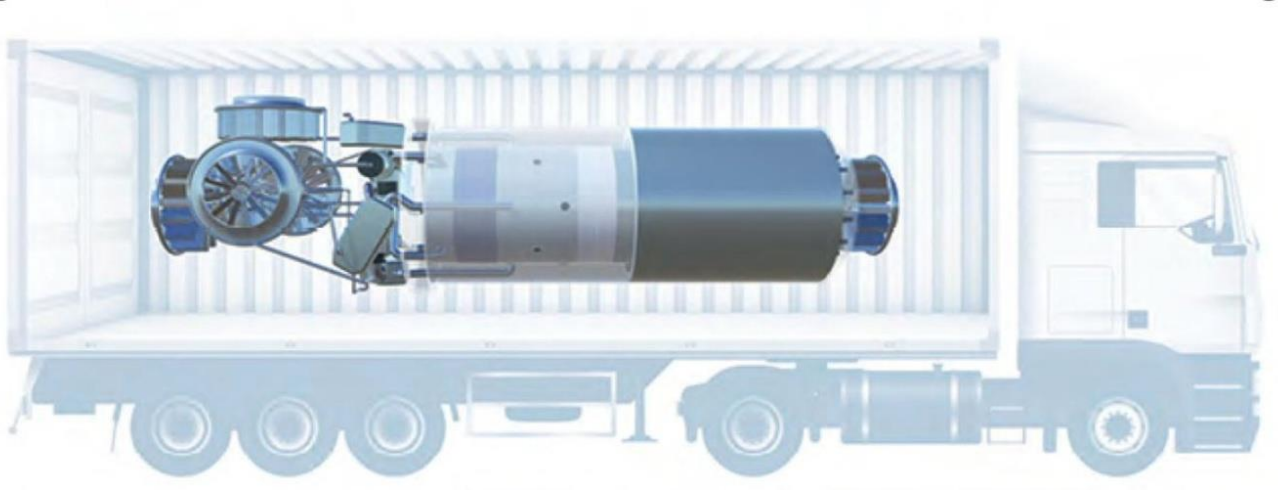


Mikro Reaktörler

10 MW_e değerinden az güç üretmek için tasarlanmış

- Bir bütün olarak tır, gemi veya tren ile taşınabilen,
- Hızlıca devreye alınabilen,
- Pasif güvenlik sistemleri ve basit tasarım sayesinde işletme sırasında kendini güvenli çalışma sınırları içinde tutabilen,

reaktör sistemleridir.



Mikro Reaktörler

- Elektrik üretimi veya ısı kaynağı olarak kullanılabilme.
- Mikro şebekelerde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla sorunsuz entegrasyon.
- Doğal afetler sırasında ve sonrasında elektrik sağlama.
- Yakıt değiştirmeden 5-10 yıl çalışabilme.
- Sahadan hızlı kaldırılabilme.



KMR Tasarımları

Su Soğutmalı Reaktör (LWR)

- 24 adet

Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı (HTGR)

- 20 adet

Sıvı Metal Soğutmalı Reaktör (LMR)

- 12 adet

Ergimiş Tuz

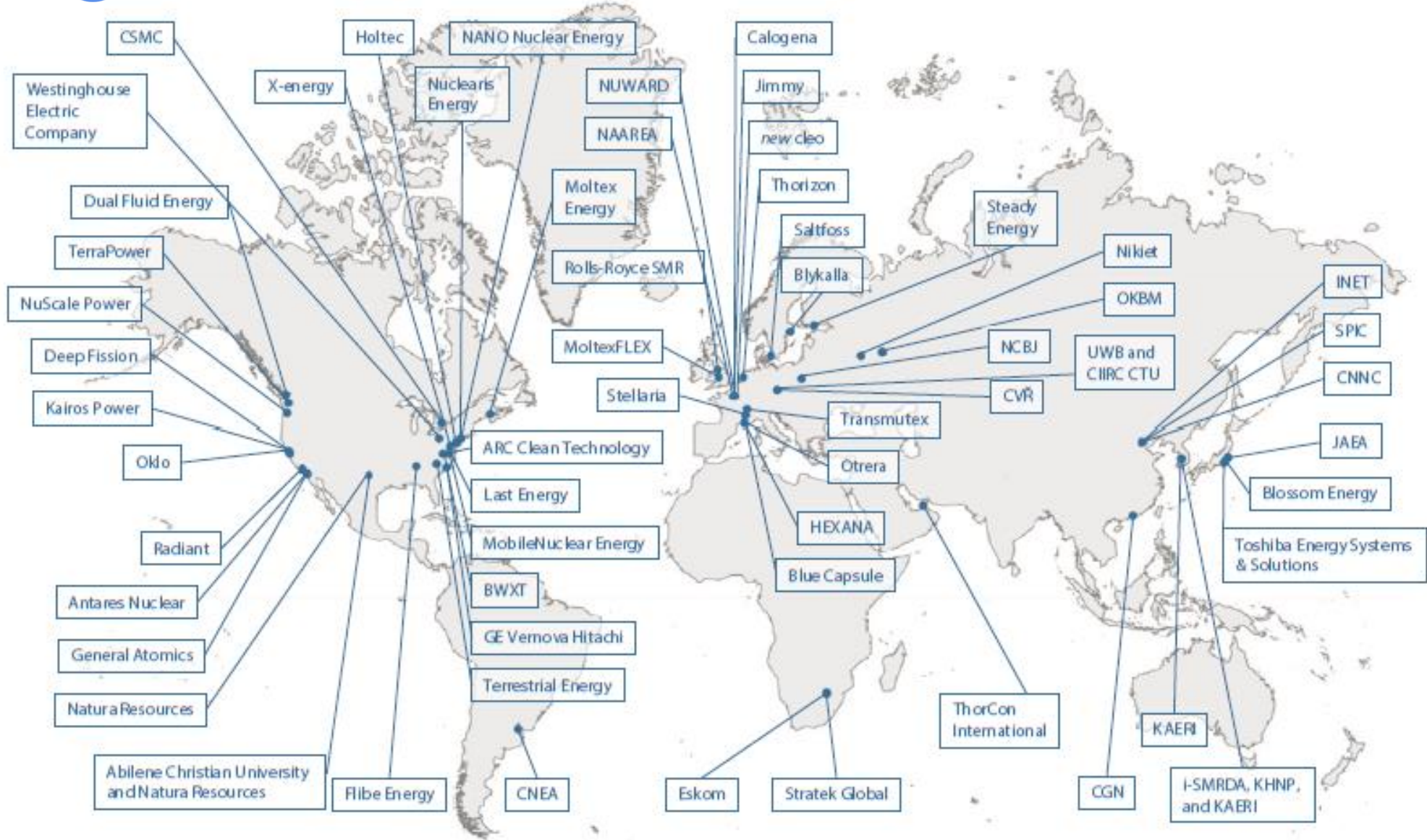
- 13 adet

Isı Borulu

- 2 adet

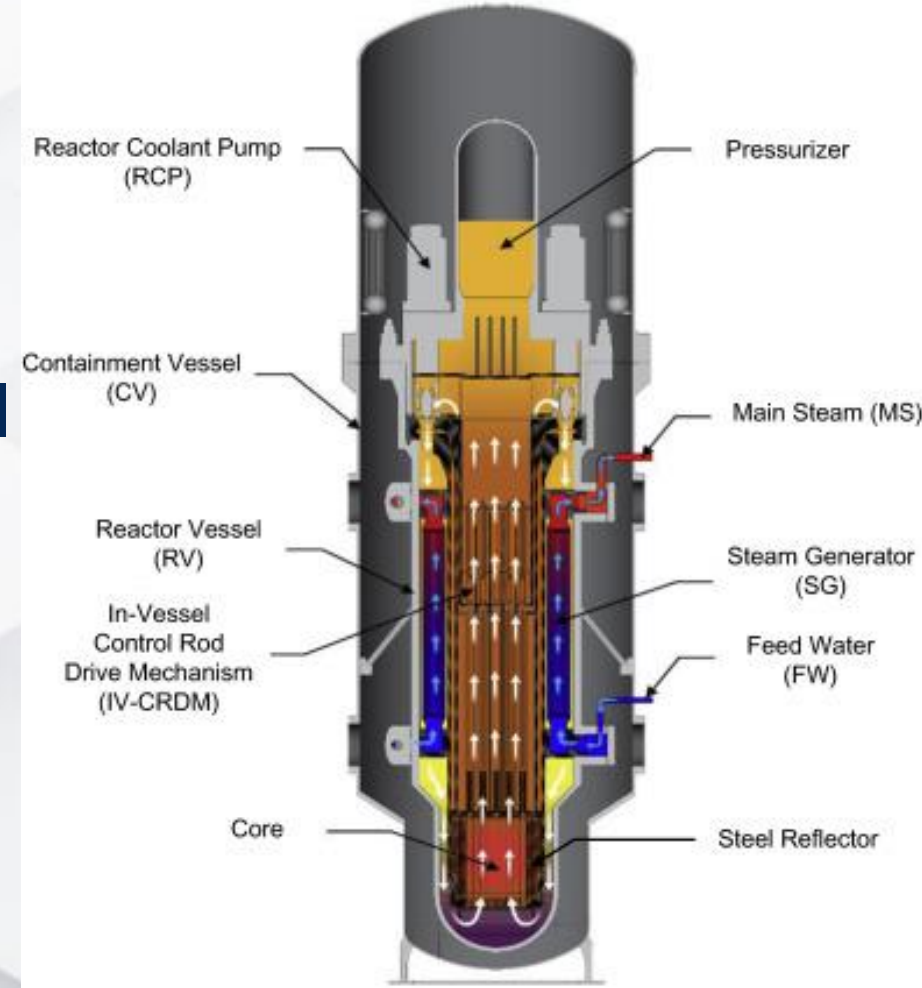
71 farklı tasarım!

KMR Tasarımları



Su Soğutmalı KMR

- En yaygın reaktör teknolojisidir.
- PWR (basıncı su) ve BWR (kaynar sulu).
- Gelişmiş pasif güvenlik sistemleri ile 3+. Nesil tasarım.
- Pompa ve buhar üretici tek bir basınç kabı içine alan entegre tasarım.
- Soğutucu kaybı kazası (LOCA) riski yok.

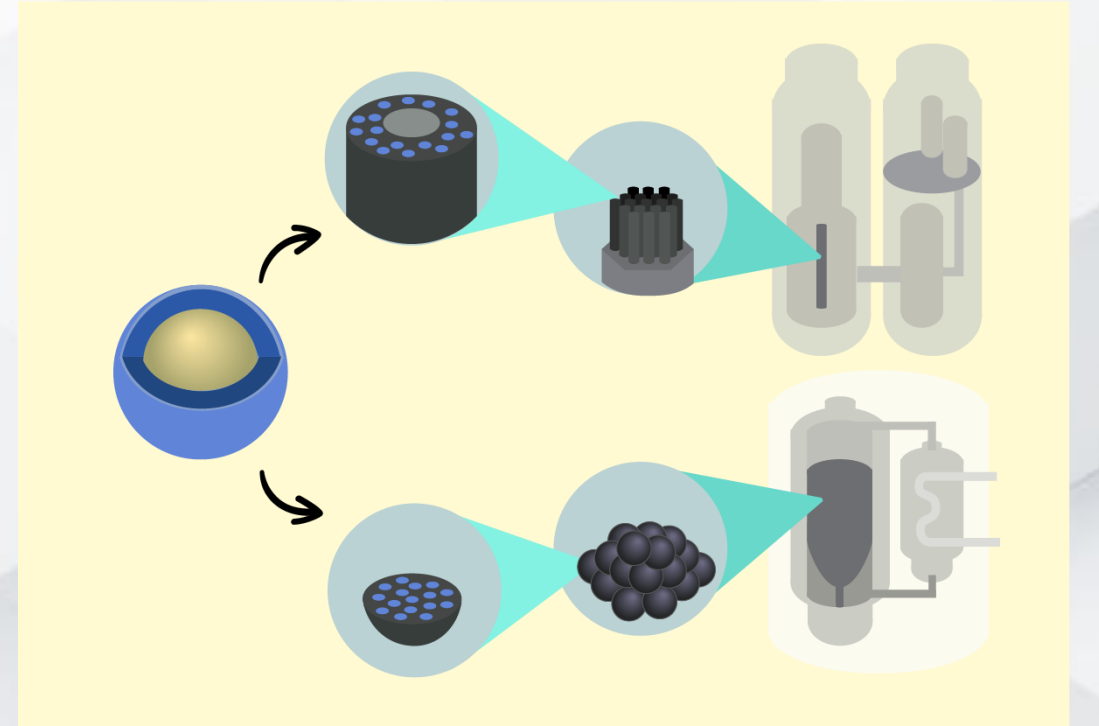


Su Soğutmalı KMR

Teknoloji Hazırlık Seviyesi	7–8
Teknolojik olgunluk	Çok yüksek
Lisanslanabilirlik seviyesi	Çok yüksek
Ticarileşme beklentisi	2028–2032

Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı KMR

- TRISO parçacık yakıt.
- Kendinden güvenli.
- Negatif reaktivite katsayısı.
- Yüksek sıcaklık ve radyasyon dozuna dayanıklı malzeme araştırmaları devam ediyor.
- HALEU tedariki sorun olabilir.

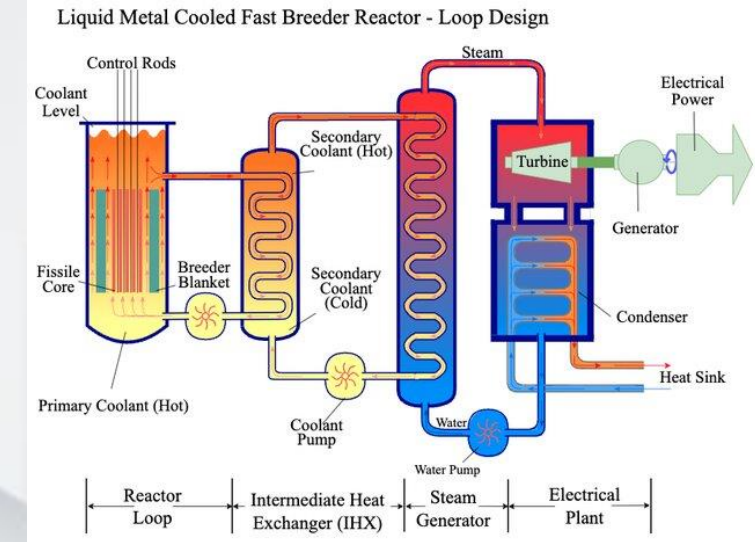
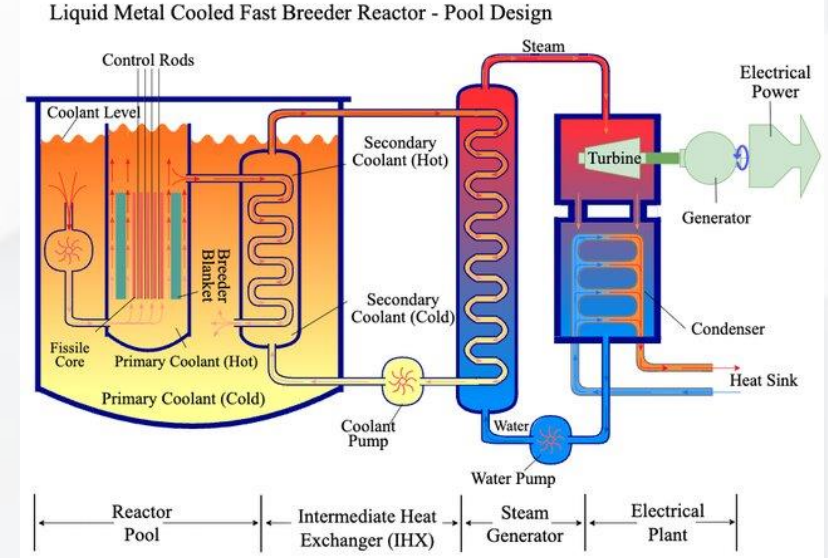


Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı KMR

Teknoloji Hazırlık Seviyesi	5-7
Teknolojik olgunluk	Yüksek
Lisanslanabilirlik seviyesi	Yüksek
Ticarileşme beklentisi	2030–2035

Sıvı Metal Soğutmalı KMR

- Na, Pb veya Pb-Bi ötektik soğutucu kullanımı.
- Atmosferik basınçta işletme özelliğine sahiptir.
- Yüksek ısıl iletkenlik sayesinde kaza senaryoları sırasında bile verimli ısı çekilmesi (pasif güvenlik özelliklerini destekler).
- Basınçla ilgili arıza ve kaza riski olasılığı düşüktür.
- Yakıt çevrimi ve sürdürülebilirlik avantajları.
- Korozyon ve gevrekleşme sorunu.
- Gelişmiş kaplama malzemeleri ihtiyacı.

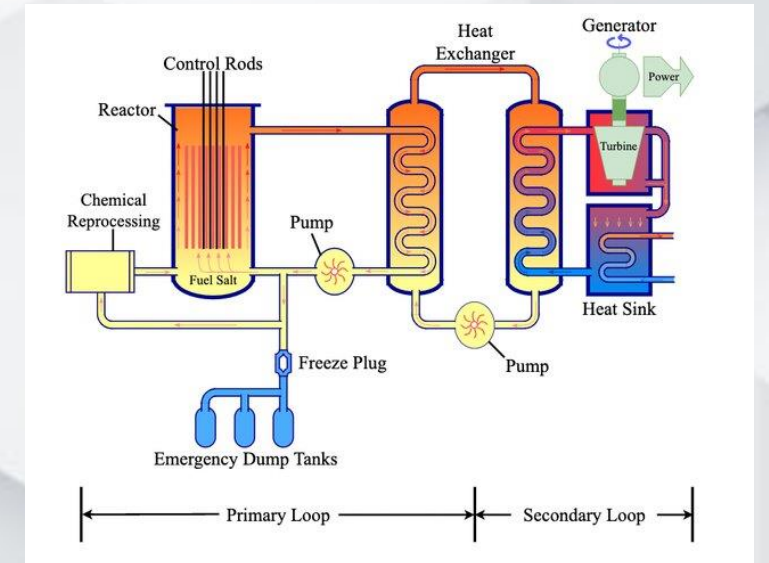
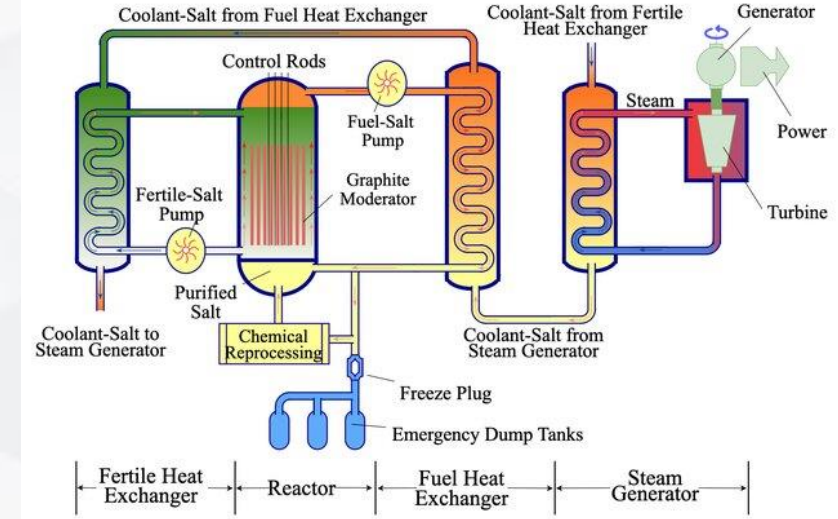


Sıvı Metal Soğutmalı KMR

Teknoloji Hazırlık Seviyesi	4-7
Teknolojik olgunluk	Orta
Lisanslanabilirlik seviyesi	Orta
Ticarileşme beklentisi	2030–2035

Ergimiş Tuz KMR

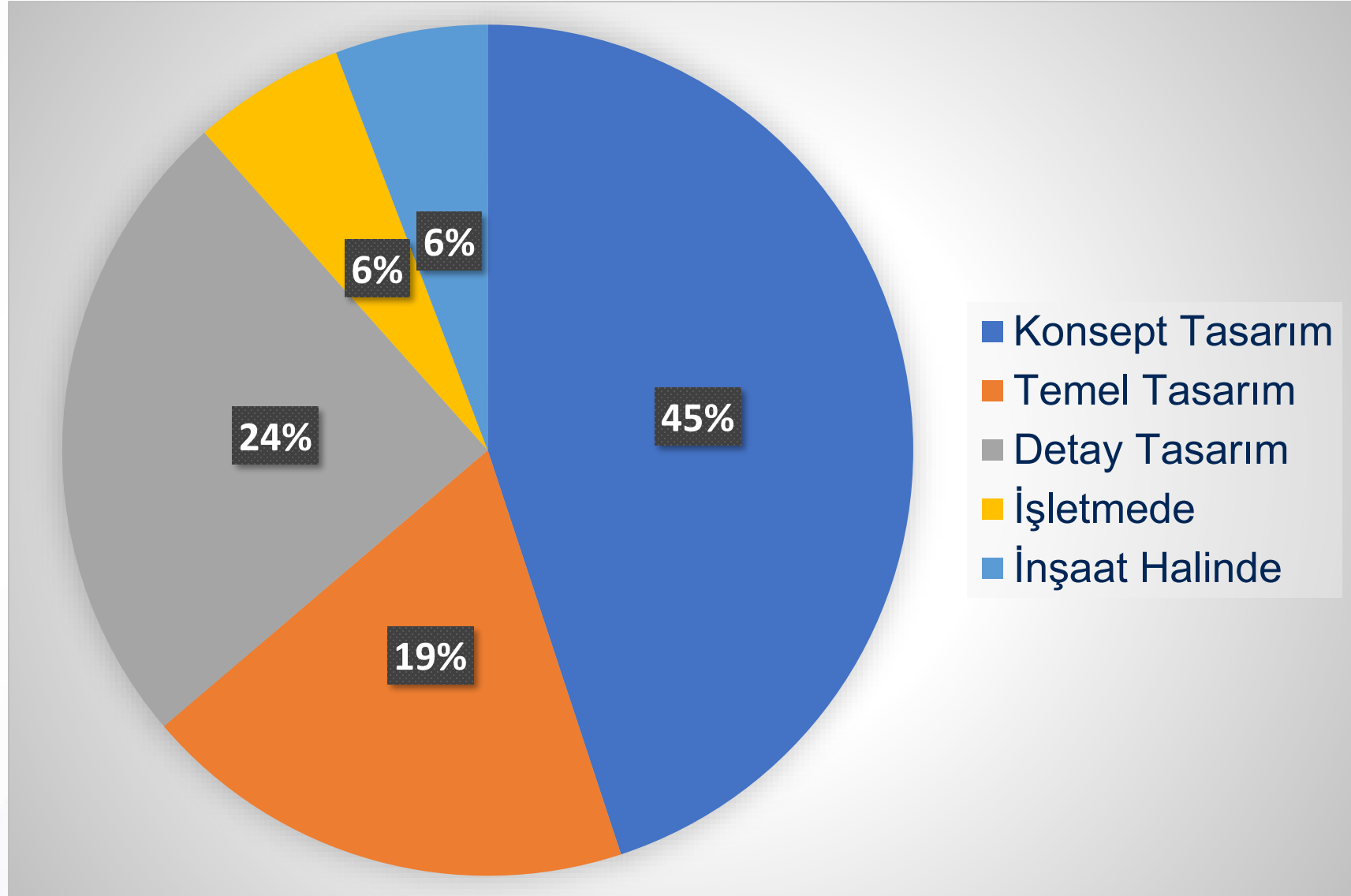
- Ergimiş tuz yakıt kullanımı.
- Atmosferik veya düşük basınçta çalışarak yüksek basınçlı kaza riskini azaltır.
- Negatif sıcaklık katsayısı.
- Kalp erime riski olmaması.
- Fisyon Ürün Yönetim sistemi tasarımı karmaşıktır.
- Korozyon ve malzeme dayanıklılığı sorunları vardır.



Ergimiş Tuz KMR

Teknoloji Hazırlık Seviyesi	3-4
Teknolojik olgunluk	Düşük
Lisanslanabilirlik seviyesi	Düşük
Ticarileşme beklentisi	2030–2035

KMR Gelişim Evreleri



KMR Mevcut Durum

Ülke	İsim	Güç	Çeşit	Aşama
Rusya	KLT-40S	2 x 35 MWe	Yüzer PWR	İşletmede
Çin	HTR-PM	210 MWe	HTGR	İşletmede
Çin	HTR-10	2 MWe	HTGR	İşletmede
Japonya	HTTR	30 MWt	HTGR	İşletmede
Rusya	BREST-OD-300	300 MWe	LMFR	İnşaat halinde
Çin	ACP100	125 MWe	PWR	İnşaat halinde
Arjantin	CAREM	30 MWe	PWR	İnşaat halinde
ABD	Marvel	15 kWe	Sıvı Metal Soğutmalı Termal Reaktör	İnşaat halinde
ABD	KP-FHR	2x 75 MWe	Modüler Çakıl Yatak Flor Tuzu Soğutmalı Reaktör	İnşaat halinde

(1) Proje oluşturma,
Kavramsal tasarım,
finansal ve ekonomik

(2) Temel Tasarım ve Mühendislik Geliştirme



Lisanslama öncesi
dokümanların hazırlanması

(3) Detay tasarım, test ve doğrulama (Müşteri katılımı FOAK)



Test planlarının
tamamlanması



Lisans
dokümanlarının
hazırlanması



Son tasarım
dokümanların

(4) Yakıt tasarımı değerlendirmesi ve kalite yönetimi



Saha izni onayı



İnşaat izni onayı



İşletme lisansı onayı

(5) Tedarik zinciri geliştirilmesi ve kalite yönetimi



Tedarik zinciri
planları



Onaylanmış
tedarikçi listesi

(6) Lisanslama öncesi görüşmeler / tasarım sertifikası alım süreci



İlk düzenleyici kurum
geri bildirimi



Lisans alımı

(7)

OWNER/LICENSEE & INTERNATIONAL INTERACTIONS



Müşteri talepleri



UAEA
değerlendirmesi



Müşterinin tasarım
kalite programını
kabulü

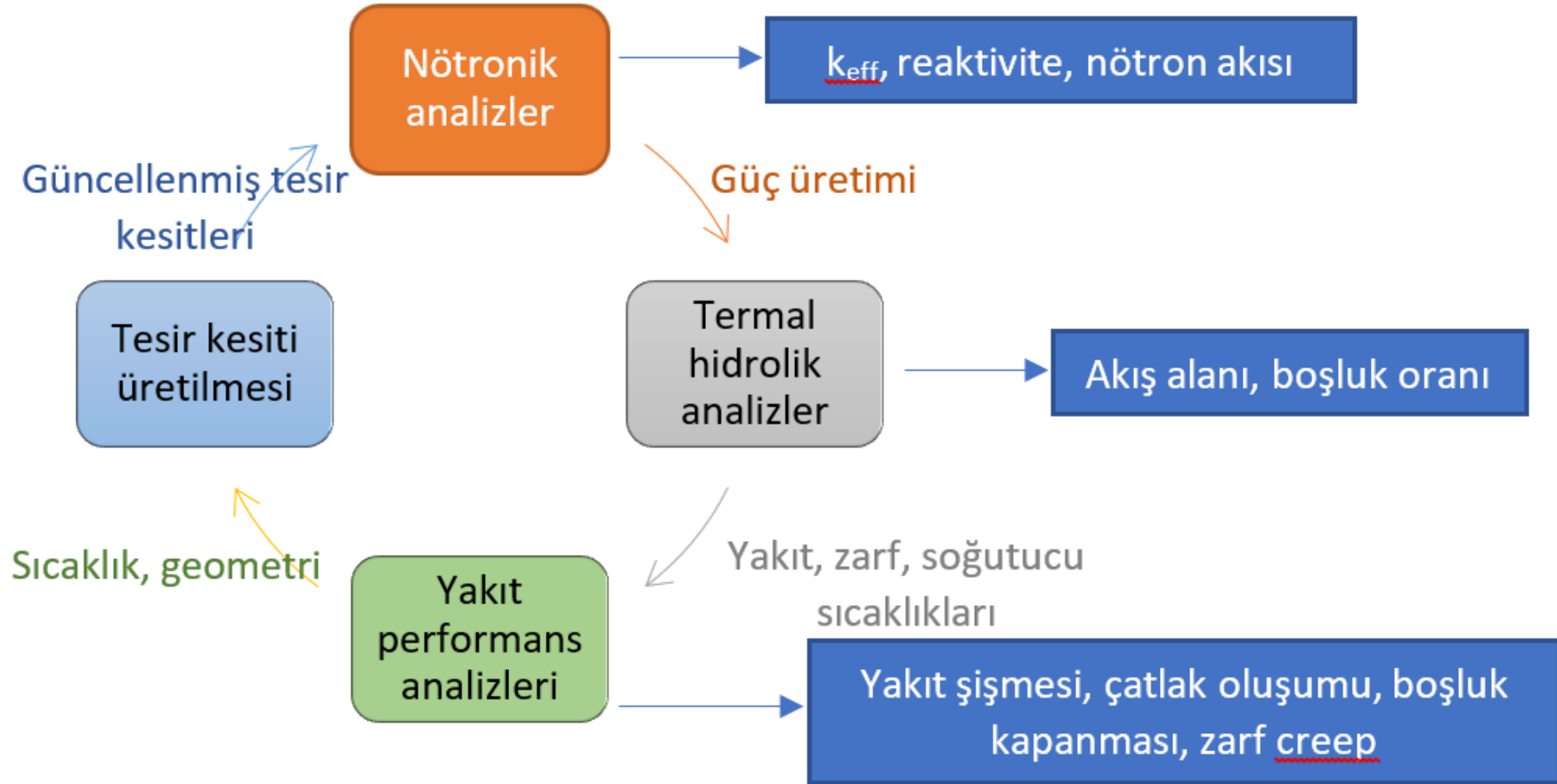


İşbirliği onayı
(FOAK)



UAEA güvence
değerlendirmesi

Reaktör Tasarımı



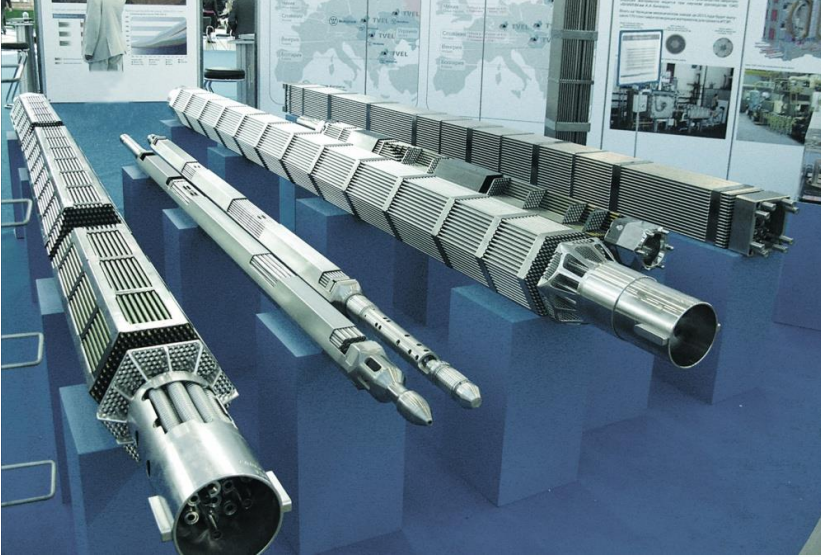
$$\begin{aligned} & \frac{1}{v} \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t)}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E, t) \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) \\ &= s(\mathbf{r}, E, \hat{\Omega}, t) + \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \varphi(\mathbf{r}, E', \hat{\Omega}', t) \\ & \quad + \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v(E') \Sigma_f(\mathbf{r}, E', t) \varphi(\mathbf{r}, E', \hat{\Omega}', t) \end{aligned}$$

Reaktör Tasarımı

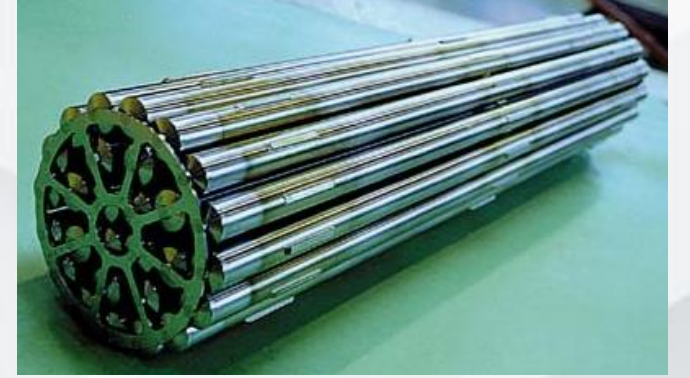
Parametre	Seçenekler
Yakıt/Zarf malzemesi	UO ₂ , UC, ThO ₂ , MOX / Zircaloy, SiC...
Yakıt geometrisi	Silindirik, küresel, içi boş silindir ...
Yakıt boyutları/Yakıt dizilimi	En, boy, çap, .../Kare, halka, altıgen, rastgele, ...
Yakıt zenginliği	1,5, 2,5, 3,0, ...
Yakıtlar arası mesafe	
Yakıt sayısı	
Kontrol çubuğu malzemesi	Bor, hafniyum, kadmiyum
Kontrol çubuğu geometrisi	Artı, silindirik, plaka ...
Kontrol çubuğu sayısı	
Yavaşlatıcı malzemesi	Su, ağır su, grafit, yok
Soğutucu malzemesi	Su, ağır su, helyum, CO ₂ , Na, ...
Yanabilir zehir	Var, yok, varsa malzemesi, miktarı, ...

Reaktör Tasarımı

Yakıt demeti



Yakıt demeti



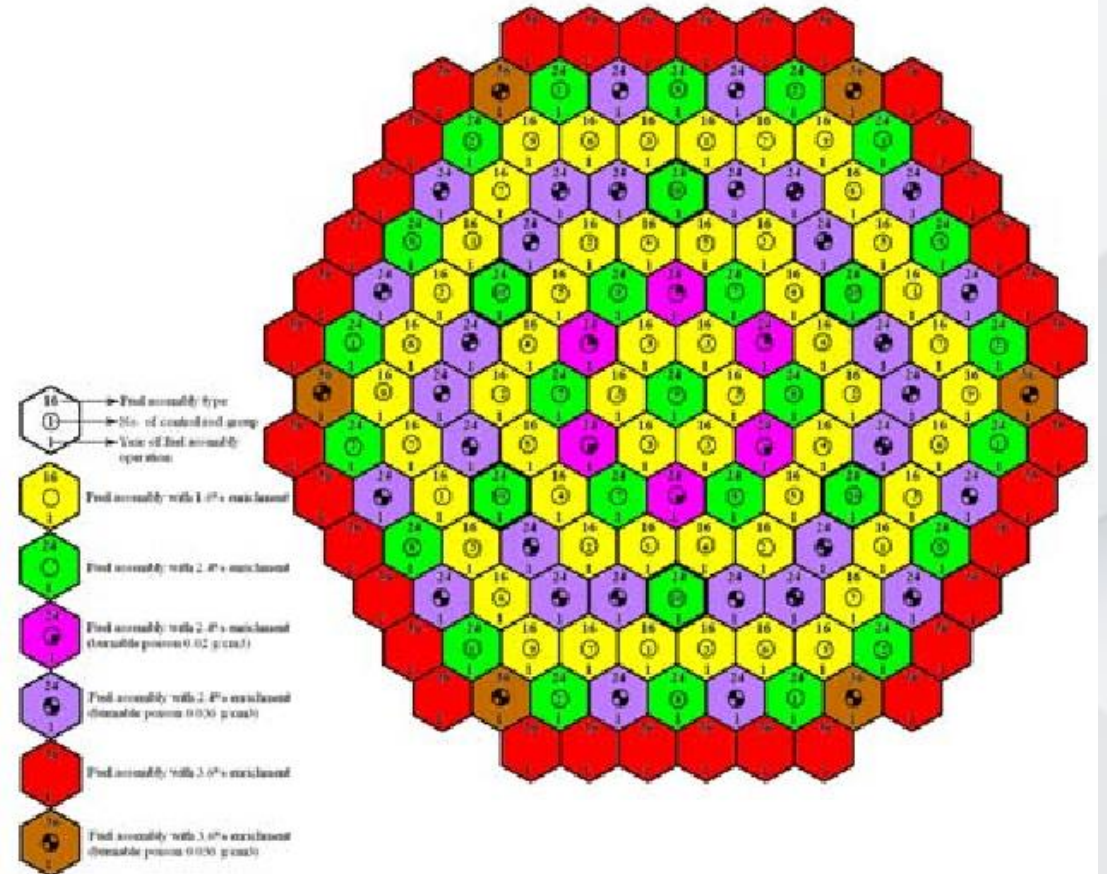
Yakıt peleti



Yakıt çakılı



Reaktör Tasarımı



Reaktör Tasarımı

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu [\nabla^2 \cdot \vec{V}] + \rho \vec{g}$$

$$\rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \nabla T \right) = \mu \phi_v + k \nabla^2 T$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i h_i) = \nabla (k_i \nabla T)$$

Parametre

Soğutucu sıcaklığı

Soğutucu hızı

Kritik ısı akısı

Kaynama durumu

Kabarcıklı kaynama

Basınç

Reaktör Tasarımı

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta - \nu \sigma_z) + \alpha T$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r - \nu \sigma_z) + \alpha T$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_r - \nu \sigma_\theta) + \alpha T$$

Parametre

Uzama

Şişme

Bükülme

Şekil bozulmaları

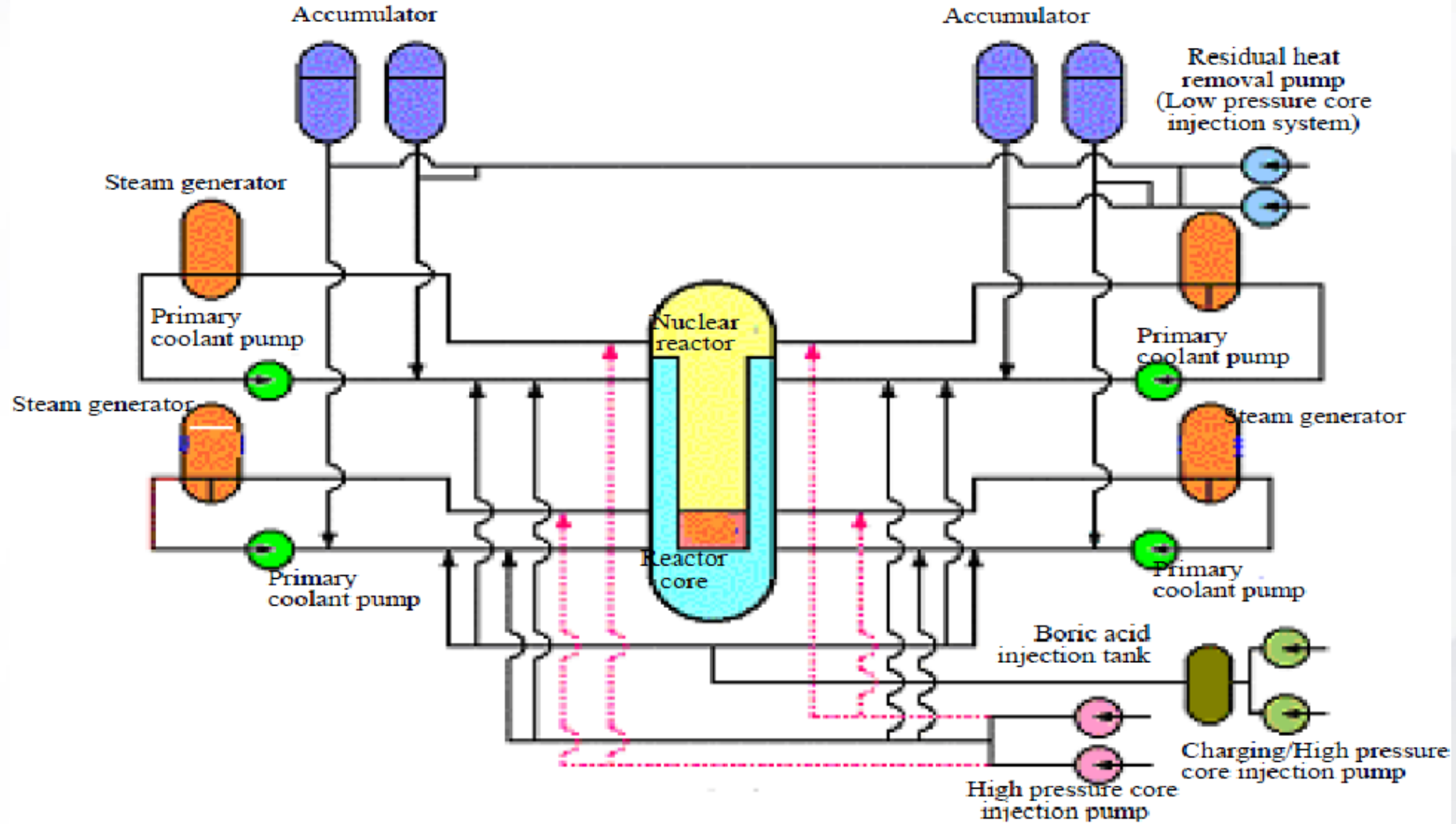
Parametre

Yeni sıcaklıklarda tesir kesiti

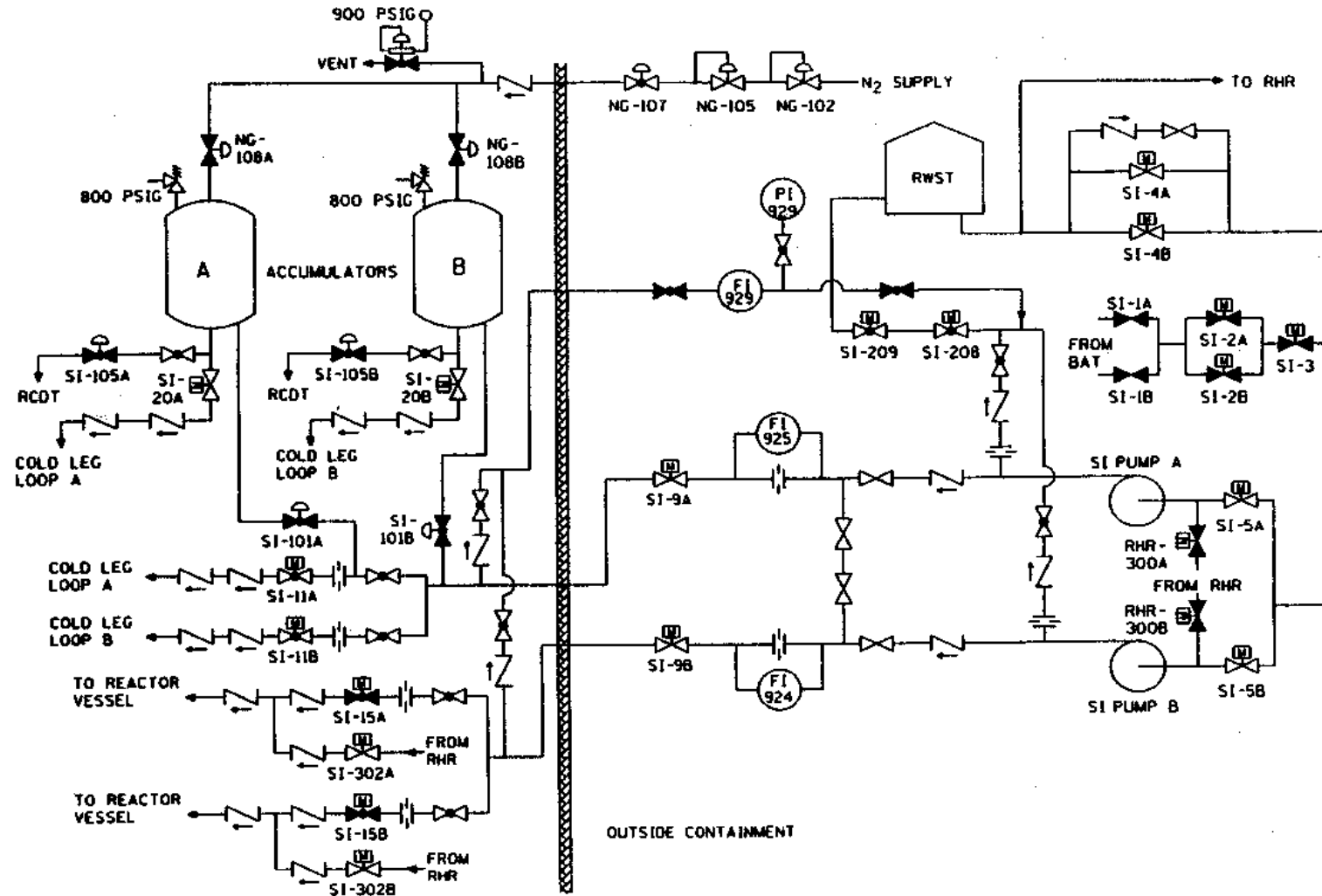
Reaktör Tasarımı

Parametre	Paramre
Soğutma sistemi	Vanalar
Yedek sistemler	I&C
Kontrol ve koruma sistemi	Acil durum soğutma sistemleri
Reaktör basınç kabı	Acil durum müdahale
Borular	Nükleer Güvence
Bağlantılar	Nükleer Emniyet
Yandın sistemi	Elektrik sitemi

Reaktör Tasarımı



Reaktör Tasarımı



KMR bir nükleer tesistir NDK mevzuatına tabiidir.
Türkiye’de nükleer güç santrali kurmak için alınması gereken izinler

1. Elektrik üretim lisansı almak için EPDK'ya başvurulması gerekmektedir. 1 MW üzeri projeler için ön lisans başvurusu yapılmalıdır.
2. Projenin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için Şehir ve Çevrelik Bakanlığı’ndan ÇED raporu alınmalıdır.
3. Nükleer Düzenleme Kurumundan yer lisansı alınması gereklidir.
4. Nükleer Düzenleme Kurumundan işletme lisansı alınması gereklidir.
5. Elektrik dağıtım veya iletim şirketi ile bağlantı anlaşmaları yapılmalıdır. Büyük ölçekli projeler için TEİAŞ, küçük ölçekli projeler için TEDAŞ ile anlaşma yapılır.
6. Tesis işletmeye alındıktan sonra EPDK’dan üretim lisansı alınır.

Yetkilendirme Sertifikası

İmalatçılar

Denetleme
Kuruluşları

Personel

Eğitmenler

İzin

Saha Hazırlama

İmalat

İnşaat

İşletmeye Alma

İşletmeden Çıkarma

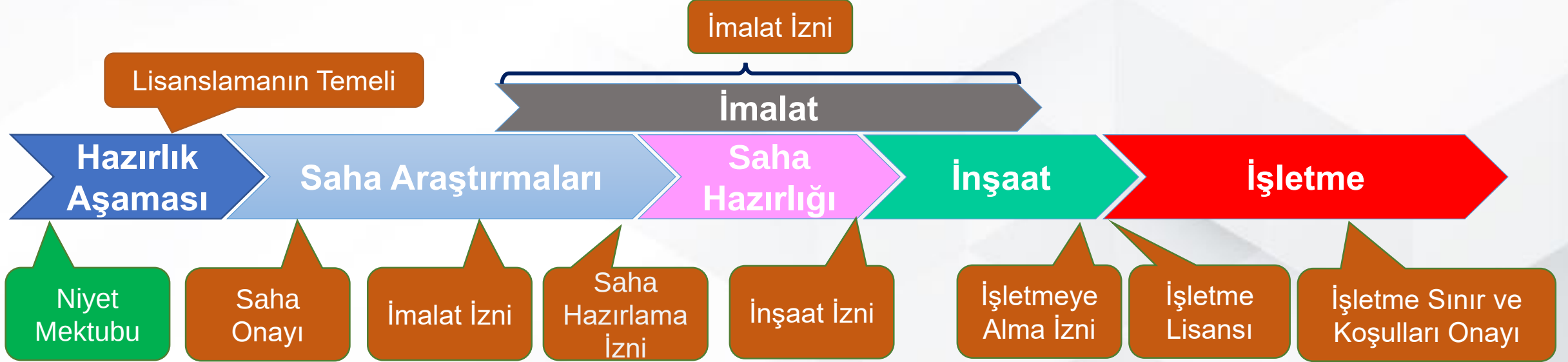
Yeniden İşletmeye Geçiş

Değişiklik

Lisans

İşletme

Lisanslama Süreci



NÜKLEER RİSKLERE İLİŞKİN SORUMLULUK SİGORTASINA VE TEMİNATINA DAİR YÖNETMELİK

İşleten, Kurum tarafından faaliyetine ilişkin yetkilendirme yapılmadan önce nükleer tesis için sigorta yaptırmak veya teminat göstermek zorundadır.

Sigortanın veya teminatın kapsamı

İşleten tarafından yaptırılacak sigortanın veya gösterilecek teminatın, Paris Sözleşmesinin 2 nci maddesi çerçevesinde nükleer zarar gören kişilerin;

- a) Can kaybı ya da yaralanmalarını,
- b) Mal varlığının zarar görmesini ya da kaybını,
- c) (a) ve (b) bentlerine dâhil edilmeyen ancak yetkili mahkeme tarafından tespit edilen, bu bentlerde yer alan kayıp ya da zarardan ötürü vuku bulan kayıp ya da zararlar ile ilgili olarak tazminat talep etme hakkına sahip olan bir kişi tarafından uğranan ekonomik zararı,
- ç) (b) bendine dâhil edilmeyen ancak yetkili mahkeme tarafından tespit edilen, zararın önemsiz olmaması ve gerekli önlemlerin alınmış ya da alınacak olması kaydıyla, zarar görmüş olan çevrenin eski haline dönüştürülmesi için alınan önlemlerin maliyetini,
- d) (b) bendine dâhil edilmeyen ancak yetkili mahkeme tarafından tespit edilen, çevrenin kullanılmasından elde edilen doğrudan bir ekonomik çıkardan kaynaklanan, çevrenin önemli derecede zarar görmesi sonucu uğranan gelir kaybını,
- e) Önleyici tedbirlerin maliyetleri ve bu tedbirlerden doğan diğer kayıp ve zararlarını, karşılaması şarttır.

Sigorta veya teminat tutarları

İşleten tarafından sunulan sigorta bedeli veya teminat tutarı her bir nükleer hadise başına;

- a) Termal gücü on megavatın üzerinde olan nükleer reaktörler ile Kurum tarafından nükleer tesis işletmek için verilecek lisans öncesi yapılacak değerlendirme ile belirlenecek diğer nükleer tesisler için yedi yüz milyon avro,
 - b) (a) bendi kapsamına girmeyen nükleer tesisler için yetmiş milyon avro,
 - c) Nükleer maddelerin taşınması için seksen milyon avro,
 - ç) Nükleer maddelerin transit geçişlerinde seksen milyon avro,
- ile sınırlıdır.



NÜKLEER MÜHENDİSLER DERNEĞİ

İTÜ



MERAK EDİLENLER?

Teşekkürler

26.11.2025