



**TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI**

SMR Teknolojisini Geliştirmek ve Olgunlaştırmak için Yapılan Deneysel Çalışmalar ve Araştırma Konuları

Dr. Ahmet Kağan Mercan

Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği

HUNEM



www.hacettepe.edu.tr

SMR Teknolojisini Geliştirmek ve Olgunlaştırmak için Yapılan Deneysel alışmalar ve Araştırma Konuları / İçerik

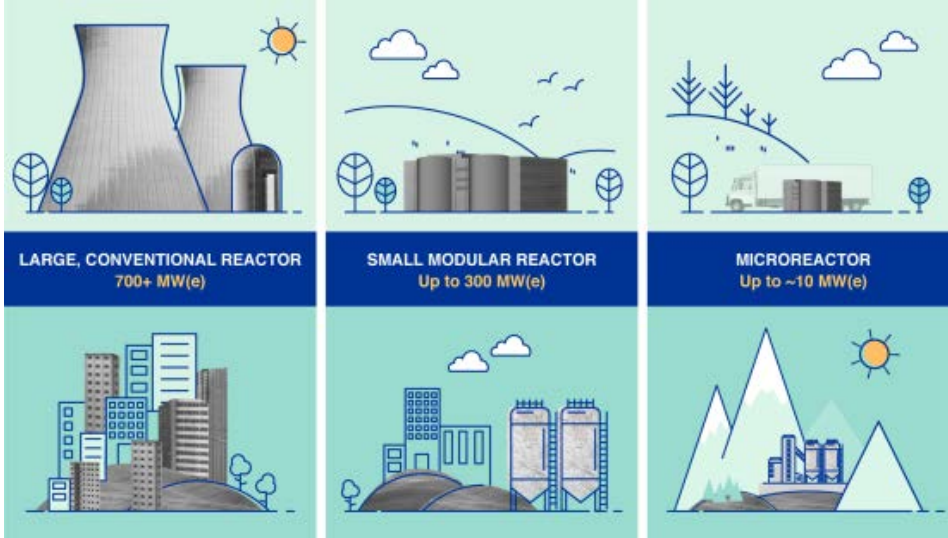


- SMR Tasarımlarının Genel Konsepti
- Yeni Tasarımlarda Araştırma Konuları
- SMR erevesinde Projeler
- SMR Odaklı Deneysel alışmalarSMR
- zet ve Tartışma

SMR Tasarımlarının Genel Konsepti (1/4)



- 300 MWe kadar olan nükleer enerji tesisleri Small Modular Reactor (SMR) olarak adlandırılabilir. 10 MWe ve altındaki güçlerdeki reaktörler de Micro Reactor (MR) olarak isimlendirilmiştir.



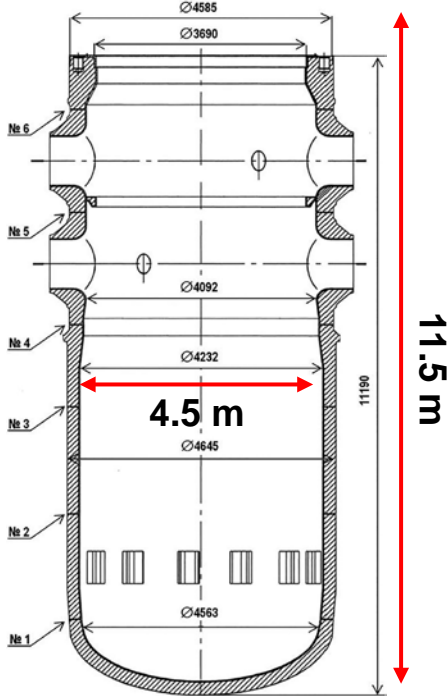
- SMR ve MR'ların genel kullanım alanlarını düşünürsek;
- İzole ve erişime uzak yerlerde elektrik üretimi
 - Bölgesel ısıtma
 - Desalinasyon
 - Karadan uzak bölgelerdeki enerji ihtiyacının giderilmesi
 - Ufak sanayi ve üretim merkezlerinin elektrik ihtiyaçlarının giderilmesi
 - Mobil enerji istasyonları

SMR Tasarımlarının Genel Konsepti (2/4)

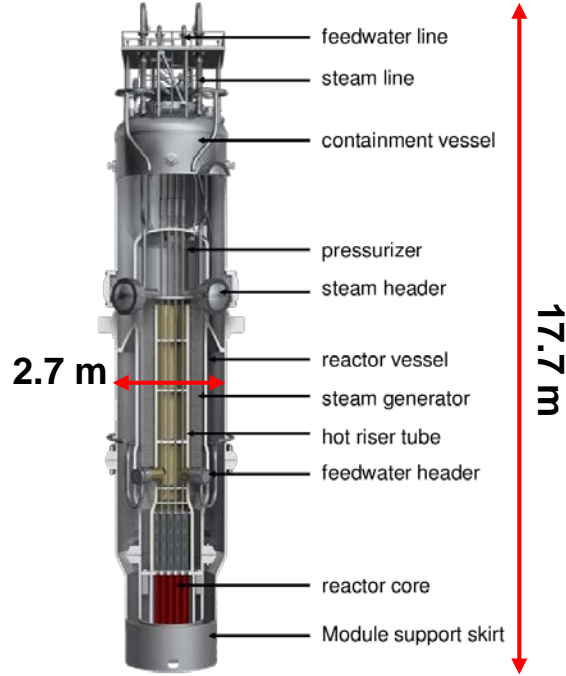


Artıları	Eksileri
<ul style="list-style-type: none">+ Boyutsal olarak küçük olması+ Taşınabilir olması+ Görece kısa inşaat süreleri+ Arttırılmış güvenlik+ Çeşitli kullanım alanları+ Hızlıca elektrik sistemine dahil edilebilmesi+ İzole veya inşaatı sorunlu bölgelerde yapılabilmesi+ Araştırma ve geliştirme imkanı	<ul style="list-style-type: none">+ Küçük boyutlarından dolayı yeni ihtiyaçlar+ Yeni lisanslama gereksinimleri+ Herhangi bir kurulu sistemin bulunmaması+ Yeni kaza ve senaryoların geliştirilmesi+ Zırhlama ve yeni güvenlik gereksinimleri+ Araştırma geliştirme gereksinimi

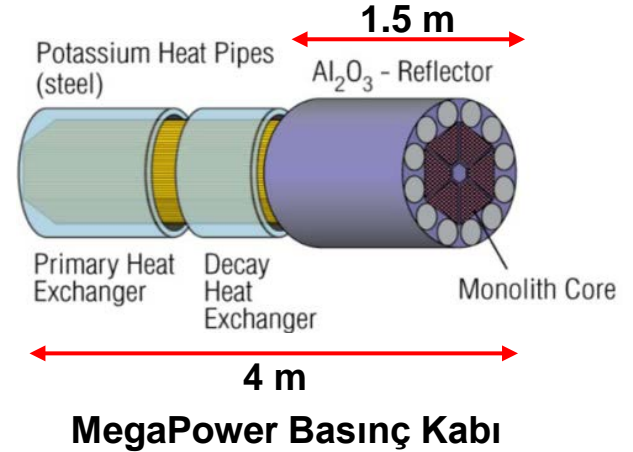
SMR Tasarımlarının Genel Konsepti (3/4)



VVER-1200 Basınç Kabı



NuScale Basınç Kabı



MegaPower Basınç Kabı



SMR Tasarımlarının Genel Konsepti (4/4)

- Küçültülmüş kor yapıları üreticileri istenen güçlere ulaşmak adına farklı tasarımlara yönelmektedir. Bunlar beraberinde yeni tasarımsal sorunlar getirmektedir.

Çözümler

1. Yüksek zenginlikte yakıtlar
2. Yeni nesil yakıt (ATF), zarf (ACM)ve yavaşlatıcı malzemeler
3. Yenilikçi sistem tasarımları
4. Etkin soğutucular

Sorunlar

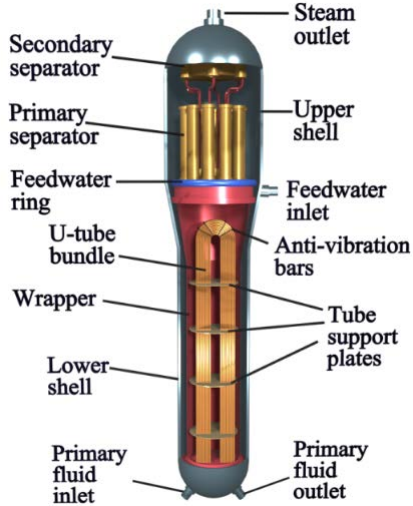
1. IAEA'nin belirlediği sınırların üstüne çıkılması
2. Kimyasal ve fiziksel araştırmaların azlığı
3. Validasyon problemleri
4. Çift fazda sıvı metaller, korozyon



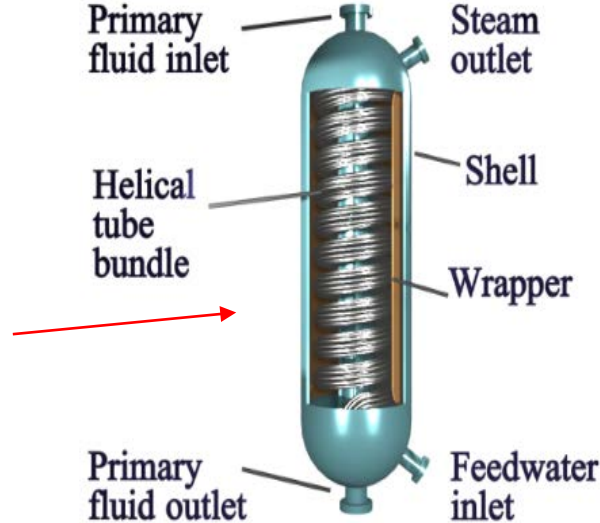
Yeni Tasarımlarda Araştırma Konuları (1/3)

Yeni buhar üretici tasarımları

Geleneksel reaktörlere kullanılan buhar üretici tasarımlarına alternatif olarak küçük alanlarda daha fazla güç üretebilmek adına helazoik geometride tasarımlar gerçekleştirilmiştir.



U-Tube Buhar Üretici



Helikal Buhar Üretici

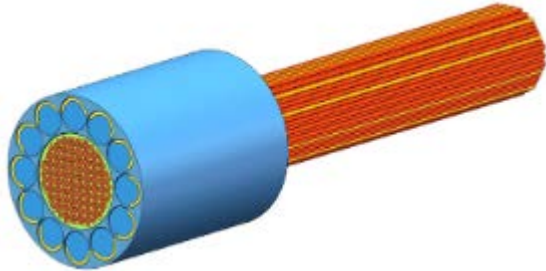
- Helikal yapıların Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) uygulamaları üzerinde çalışmalara odaklanılmıştır.
- Bununla beraber, nükleer güvenlik analizlerinde kullanılan sistem kodlarında (TRACE, RELAP, ASTEC, ATHLET vb.) çalışmalar gerçekleştirilmektedir.
- Ayrıca buhar üreticileri özellikle fisyon ürünleri ile etkileşimleri incelenmektedir.



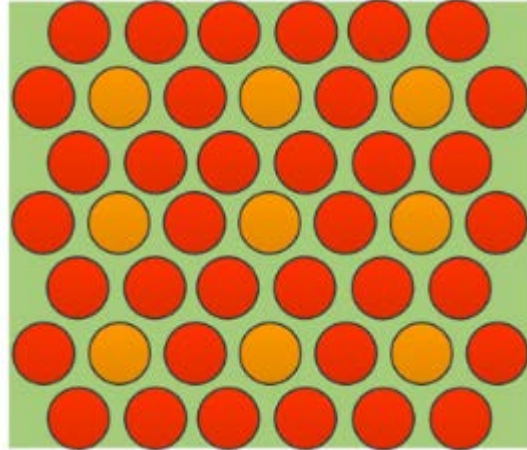
Yeni Tasarımlarda Araştırma Konuları (2/3)

Isı Borusu(Heat Pipe) sistemleri

Daha küçük kor yapılarında (çoğunlukla MR'lerde) ısı borusu sistemleri korda yakıtların arasına konularak sistemden ısı çekilmesi ve enerji üretilmesi tasarlanmıştır



Isı borusu şematığı



Isı borusu kullanılan kor yapısı (kırmızı yakıtlar, sarı ısı borusu)

- Isı borusu içinden sodyum, potasyum, lityum gibi materyaller kullanılmaktadır. Bu materyaller sıvı-gaz formlarına ulaşmaktadır.
- Sıvı metaller son derece reaktif materyallerdir ve nükleer kaza senaryoları üzerinde çalışmaların yapılması gerekmektedir.
- Çoklu fizik çalışmalarının yeni başlamıştır.
- Yüksek sıcaklık ortamında (kaza gibi) malzeme dönüşümleri ve kimyasal etkileşim çalışmaları yetersizdir



Yeni Tasarımlarda Araştırma Konuları (3/3)

Yeni nesil yakıt, zarf ve yavaşlatıcı malzemeler

Küçük alanlarda daha yüksek enerjiler elde edebilmek için daha yüksek sıcaklığa dayanabilen yakıtlar (ATF) ve zarfların (ACM) kullanılması planlanmıştır. Bununla beraber daha etkin yavaşlatma yeteneği olan yavaşlatıcılar da gündeme gelmiştir.

- ATF yakıtlara örnek verecek olursak U_3Si_2 , $U - Mo$, UN , U_3O_8
- Düşünülen ACM materyelleri $FeCrAl$, SiC , $E110M$, $M5$
- Benzer şekilde YH_2 termal reaktörler için yavaşlatıcı olarak önerilmiştir.

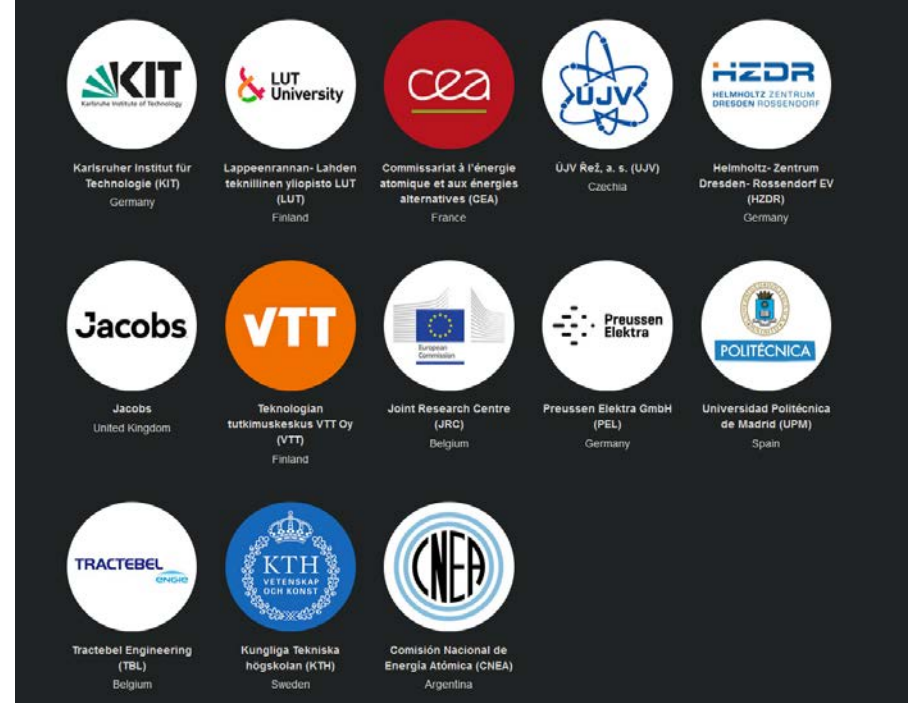
Artıları	Eksileri
+ Daha yüksek sıcaklıklara dayanıklılık	+ Farklı kimyasal etkileşimlerin araştırılması
+ Yüksek oksidasyon direnci	+ Kaza durumlarındaki bilinmezlik
+ İstenen güçlere daha düşük zenginliklerle ulaşma imkanı	+ Yeni çoklu fizik çalışmalarının gereksinimi
+ Kazalar için daha yüksek marjinler	+ Değişen maliyetler
	+ Deneysel eksiklikler

SMR Çerçevesinde Projeler (1/6)



High-Performance Advanced Methods and Experimental Investigations for the Safety Evaluation of Generic Small Modular Reactors (McSAFER)

- McSAFER'in ana hedefi, güvenlik değerlendirmeleri için farklı yaklaşımların sayısal simülasyonları ile güvenlik açısından önemli termal hidrolik deneyleri birleştirerek SMRlar için güvenlik araştırmalarının ilerletilmesidir.
- Nötron fiziği, termal hidrolik ve güvenlikle ilgili araştırmalarda odaklanılan reaktörler
 - CAREM (CNEA),
 - SMART (KAERI),
 - Nuward (CEA)
 - NuSCALE (NuScale)



SMR Çerçevesinde Projeler (2/6)



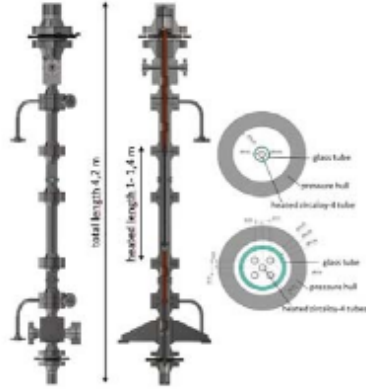
High-Performance Advanced Methods and Experimental Investigations for the Safety Evaluation of Generic Small Modular Reactors (McSAFER)

- Üç Avrupa laboratuvarında anahtar deneysel araştırmalar gerçekleştirmek, SMR'lere özgü çekirdek içi ve reaktör basınç kabuğundaki fenomenlere odaklanarak, kod doğrulama için veriler sağlamak.
- Termal hidrolik kodlarının (CFD, alt kanal ve sistem termal hidrolik) doğrulanması, konsorsiyum içinde üretilen deneysel verilerle, güvenlik gösterimi için kullanılan sayısal araçlara olan güveni arttırmak
- SMR çekirdeklerinin nötron fiziği, termal hidrolik ve termos-mekanik simülasyonlarını iyileştirmek, statik ve kazalı koşullar altında (örneğin REA) ve lisanslama süreçlerinde geleneksel yöntemlerle birlikte ileri düzey ve yüksek doğrulukta çekirdek analiz yöntemlerinin tamamlayıcılığını göstermek.
- Entegre SMR konseptlerinin reaktör basınç kabuğundaki üç boyutlu termal hidrolik fenomenlerin simülasyonunu iyileştirmek, çok ölçekli termal hidrolik araçlar kullanarak, geleneksel bir boyutlu sistem termal hidrolik kodlarıyla birleştirmek.
- İyileştirilmiş ve doğrulanan sayısal araçları, SMR tesislerinde seçilen kazaların analizinde uygulamak ve sonuçları geleneksel yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırmak.
- Avrupa WENRA gereksinimlerine uygun güvenlik analizleri yapabilen gelişmiş hesaplama araçları sağlamak, SMR'lerin Avrupa'da yakın vadeli devreye alınması için ulusal düzenleyici yönergelerin özelliklerini dikkate alınması.
- Yüksek doğrulukta kodların pratik lisanslama sürecindeki avantajlarını göstermek ve düşük dereceli ile yüksek dereceli çözümlerin tamamlayıcılığını sergileyerek, güvenlik gösterimlerinde aşırı temkinliliği azaltmak ve karbonsuz elektrik üretimi için karmaşık ağda operasyonel esnekliği artırmak.

SMR Çerçevesinde Projeler (3/6)



High-Performance Advanced Methods and Experimental Investigations for the Safety Evaluation of Generic Small Modular Reactors (McSAFER)

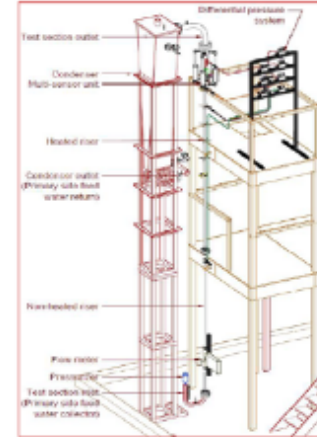


COSMOS-H (KIT)

- Code validation



MOTEL (LUT)



HWAT (KTH)

Codes	COSMOS-H		
	KIT	LUT	UJV
CFD	CFX	OpenFOAM	CFX
SubCH	SCF		VIPRE
SysTH	TRACE		RELAP3D

Codes	MOTEL				
	KIT	LUT	UJV	UPM	TBL
CFD	CFX		FLUENT		
SubCH			VIPRE		COBRA-TF
SysTH		APROS		TRACE	

Codes	HWAT	
	KTH	UPM
CFD	OpenFOAM	
SubCH		
SysTH	GOTHIC/TRACE	TRACE

McSAFER Projesinde Validasyonu Yapılan Testler ve Validasyon Yazılımları

SMR Çerçevesinde Projeler (4/6)



Core analysis (Static /transient)

- Traditional with system code and point kinetics
 - RELAP5, ATHLET, TRACE
- 1D system code + 3D nodal diffusion
 - TRACE/PANTHER
 - TRACE/PARCS
- Low order transport + subchannel codes
 - PARCS-SP3/Subchanflow (SMART)
 - APOLLO3/FLICA (F-SMR)
 - WIMS/ARTHUR (NuScale)
 - DYN3D-SP3/Subchanflow (NuScale)
- High-fidelity MC + subch + TM codes
 - SERPENT2/Subchanflow/TU

- 1D system TH code + PK
 - TRACE
 - ATHLET
 - RELAP5-3D
- 3D system TH-code + Subchannel code
 - TRACE/Subchanflow
 - TRACE/ARTHUR
- 3D system TH + CFD code
 - TRACE/SCF/OpenFOAM (TrioCFD)
 - ATHLET/OpenFOAM (CFX)
 - ATHLET/FLUENT

- 1D system TH code + 3D nodal diffusion
 - TRACE/PARCS (KIT)
 - TRACE/PANTHER (TRACTEBEL)
 - TRACE/ANTS (VTT)
 - ATHLET/DYN3D (HZDR, UJV)
- 3D system TH-code + Subchannel code + 3D nodal diffusion
 - TRACE/PARCS/SCF (KIT)
 - TRACE/WIMS/ARTHUR (JACOBS)
- 3D system TH code + 3D nodal diffusion + CFD code
 - TRACE/PARCS/OpenFOAM (KIT)
 - ATHLET/DYN3D/OpenFOAM (HZDR)
 - TRACE/ANTS/OpenFOAM (VTT)
 - ATHLET/FLUENT/DYN3D (UJV)

McSAFER Projesinde Kullanılan Yazılımlar

SMR Çerçevesinde Projeler (5/6)



Safety Analysis of SMR with PASSive Mitigation strategies - Severe Accident (SASPAM-SA)

AB fonlu SASPAM-SA projesi, büyük hafif su reaktörlerinin işletme bilgisi ve tecrübesinin, tasarım ötesi kazalar ve Acil Durum Planlama Bölgesi için Avrupa lisanslama analiz ihtiyaçları göz önünde bulundurularak, iPWR'lere uygulanabilirliğini ve transferini araştırmayı amaçlamaktadır.

- Büyük hafif su reaktörü (LWR) bilgisi ve tecrübesinin, yakın vadede devreye alınacak iPWR'lere uygulanabilirliği, SA (Güvenlik Analizi) ve EPZ (Acil Durum Planlama Bölgesi) Avrupa lisanslama analiz ihtiyaçları doğrultusunda değerlendirilecek ve pekiştirilecektir;
 - Araştırma öncelikleri, metodoloji, kod geliştirme ve deneysel ihtiyaçlar açısından belirlenecektir;
 - Elde edilen bilgi, düzenleyicilerin karar verme süreçlerini desteklemenin yanı sıra, sanayi ve Teknik Destek Organizasyonları (TSO'lar) için iPWR güvenlik özelliklerinin uygulanabilirliğini değerlendirmelerine yardımcı olacaktır.



LITHUANIAN
ENERGY
INSTITUTE



POLITECNICO
MILANO 1863



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



SMR Çerçevesinde Projeler (6/6)



Microreactor Applications Research Validation and Evaluation Project (MARVEL)

Idaho Ulusal Laboratuvarı (INL) liderliğindeki program, mikroreaktörlerin yeni teknoloji performansı ve üretim hazır bulunuşlukları ile ilgili riskleri azaltmak için hem temel hem de uygulamalı Ar-Ge çalışmaları için MARVEL projesi tasarlanmıştır.

➤ MARVEL test sisteminin geliştirilmesi, gelecekteki mikroreaktör gösterimlerini desteklemek için anahtar yetenekleri oluşturma ve uygulama fırsatı sunmaktadır. Bu, aşağıdaki konularda çözüm üretmeyi hedeflemektedir:

- Mikroreaktör sistemlerinin uygulama ihtiyaçlarını nasıl karşılayacağına dair daha fazla bilgi isteyen potansiyel son kullanıcılarla yapılan görüşmelerde belirlenen ihtiyaç.
- Yaklaşık 50 yıl sonra ilk kez, araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) amacıyla küçük ölçekli bir reaktör geliştirilmesi.
- Son kullanıcılar ve paydaşlarla etkileşim ve iletişim kurarak, mikroreaktörlerin, elektrik talebine göre yük takip etme, proses ısısı, hidrojen üretimi ve su arıtma gibi çeşitli öngörülen uygulamalarla entegrasyonuna yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları.
- Mikroreaktörlerin üretimi, montajı, hızlı kurulum, dağıtım, yetkilendirilmesi ve işletilmesi ile ilgili karşılaşılan sorunları araştırmak ve bu sorunları çözmek amacıyla yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, böylece son kullanıcıların mikroreaktörleri benimsemesini kolaylaştırmak.



MARVEL Reactor

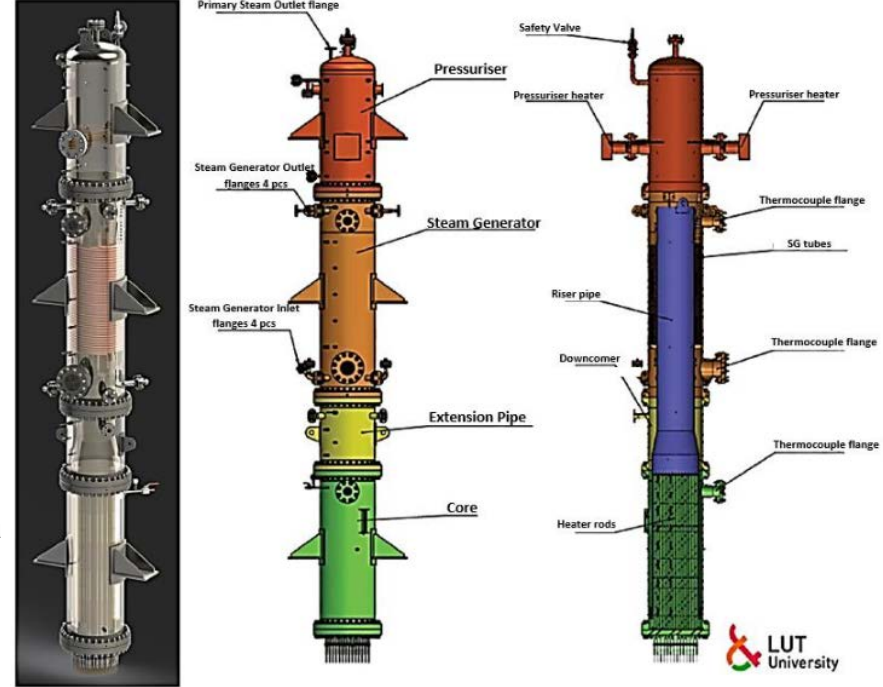
SMR Odaklı Deneysel Çalışmalar (1/4)



Modular Test Loop (MOTEL)

Doğal sirkülasyonla çalışan kompakt bir test döngüsü oluşturmak için, helisel bobinli buhar jeneratörü, çekirdek ve basınçlandırıcı modüllerinin birbirinin üzerine yerleştirildiği temel bileşenlerle, NuScale'in SMR tasarımına oldukça benzer bir yapıya sahip olan MOTEL test sistemi SMR'lara özel testler için Finlandiya'da yapılmıştır.

- McSAFER projesinde, MOTEL iki test serisinde kullanılmıştır.
 - İlk test serisi, helisel bobinli buhar jeneratörünün davranışına odaklanacaktır. Birincil taraftan ikincil tarafa ısı transferi, farklı çekirdek güç seviyelerinde farklı kararlı durumlarda incelenmiştir.
 - İkinci seri, çekirdek çapraz akış deneylerini içermektedir. Özellikle altkanallar arasındaki karışım incelenmiştir.



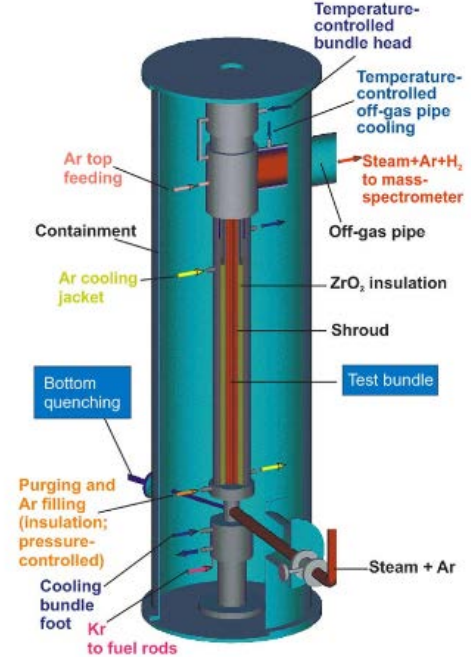
MOTEL Test Sistemi

SMR Odaklı Deneysel Çalışmalar (2/4)



QUENCH-ATF

- Almanya'da bulunan QUENCH test sistemi de ATF projesiyle beraber Tasarıma Dayalı Kazaları (DBA) ve Tasarım Ötesi Kazalar (BDBA) senaryolarında, ATF kaplamalarının kimyasal, mekanik ve termal-hidrolik davranışlarını araştırmak için çalışmaktadır.
- Yapılan çalışmalarda kaplama malzemeleriyle ilgili üç deney önerilmektedir. İlk iki testin odak noktası, daha yüksek teknoloji olgunluk seviyesine sahip olan Cr kaplamalı Zr alaşımları olacaktır. Bunlar
 1. Cr kaplamalı ZIRLO zarfının DBA koşullarında testi
 2. Cr kaplamalı ZIRLO zarfının BDBA koşullarında testi
- Üçüncü test için de SiC zarf malzemesini BDBA senaryolarında test edilmesi düşünülmektedir.



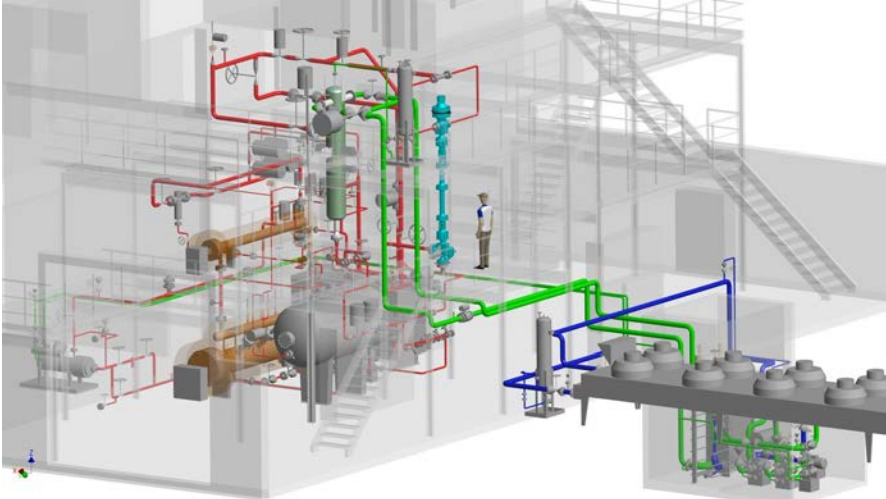
QUENCH Test Sistemi

SMR Odaklı Deneysel Çalışmalar (3/4)

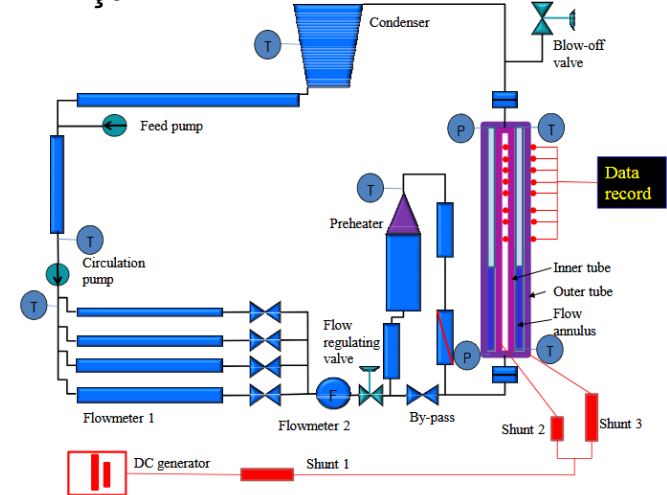


High-pressure Water Test (HWAT) ve Critical heat flux On Smooth and MOdified Surfaces- High pressure loop (COSMOS-H)

İsveç'te bulunan HWAT sistemi ve Almanya'da bulunan COSMOS-H test merkezi özellikle kuruma sonrası (post-dryout) evrelerdeki ısı aktarım modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır ve özellikle McSAFER projesinde Kaynamalı SMR modellerinin validasyonları için kullanılmıştır.



COSMOS-H Test Merkezi



HWAT Test Sistemi



SMR Odaklı Deneysel Çalışmalar (4/4)

In-pile Creep Studies of ATF Cladding (INCA)

Çekya'da gerçekleştirilen INCA testleri özellikle SiC ve FeCrAl gibi zarf malzemelerinde ışınlama sonrası sünekleşmeni incelemektedir. Kaplama ve kılavuz tüp malzemelerinin izleme (in-pile) kısa sürede akma (creep) çalışmalarına yönelik gelişmiş yöntemler, ekipmanlar ve yenilikçi ölçüm cihazlarının geliştirilmesi için de çalışmalar sürdürülmektedir.

Material Cluster Assemblies Accident Tolerant Fuel (MCA-ATF)

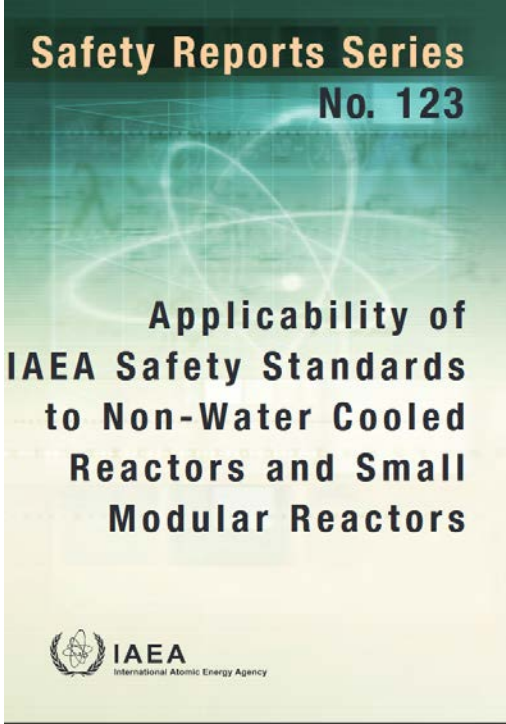
MCA-ATF dört farklı tedarikçi tarafından sağlanan Cr kaplamalı kaza toleranslı kaplama malzemelerinin uzun vadeli ışınlama davranışının, ticari ve modüler PWR nükleer reaktörünün temsili bir işletme ortamında incelenmesine adanmıştır

SMR Teknolojisini Geliştirmek Ve Olgunlaştırmak İçin Yapılan Deneysel alışmalar Ve Araştırma Konuları / zet ve Tartışma

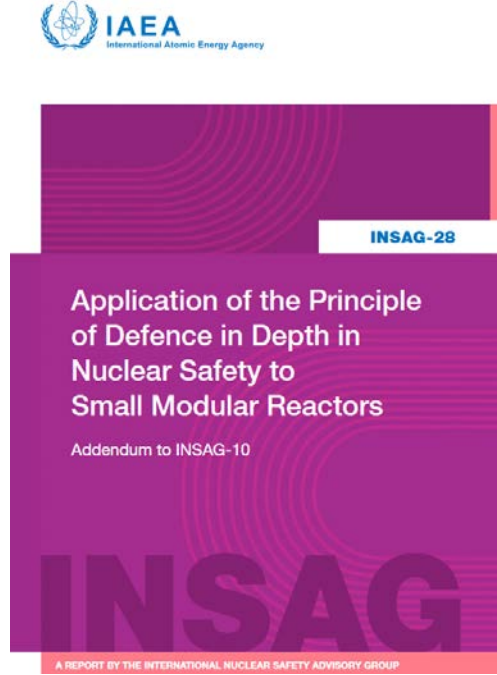


- Birçok lke SMR üzerinde ortak çalışmalar yapmaktadır. Literatür incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.
- 1. Yeni nesil materyallerin **yüksek sıcaklıkta karakteristik kimyasal değişimleri** ve **kordaki diğer materyallerle etkileşimi** ilgili literatürde eksiklikler göze çarpmaktır.
- 2. Yeni nesil materyallerin nükleer analiz kodlarında incelenmesi için **yoğun kaynak kodu geliştirme** alışmaları gerekmektedir.
- 3. Yeni reaktörlerin nötronik, termal-hidrolik, malzeme ve sistem analizleri yapılmakta olsa da **oklu fizik çalışmalar** devam etmektedir.
- 4. Yeni tanımlanan reaktör tasarımlarının lisanslanması adına **yenilikçi ve gelişmiş kaza senaryoları** ve bunların sonuçlarının irdelenmesi gereklidir.
- 5. Özellikle mikro-reaktörlerde literatür yeterli miktarda veri sunmamaktadır. Bunun başlıca sebebi tasarımların henüz bir organizasyon tarafından **prototiplenme/test aşamasına geçmemesinden** kaynaklanmaktadır.

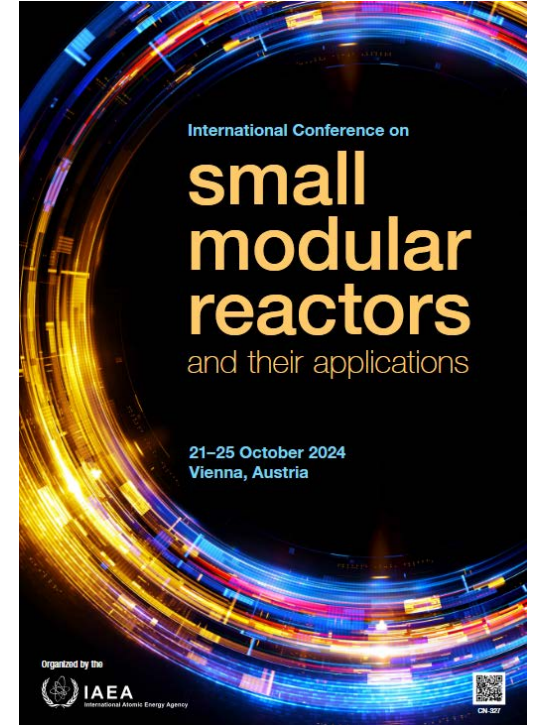
SMR Teknolojisini Geliştirmek Ve Olgunlaştırmak İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar Ve Araştırma Konuları / Özet ve Tartışma



<https://www.iaea.org/publications/15228>



<https://doi.org/10.61092/iaea.w9s3-1k5y>



<https://www.iaea.org/events/smr2024>

