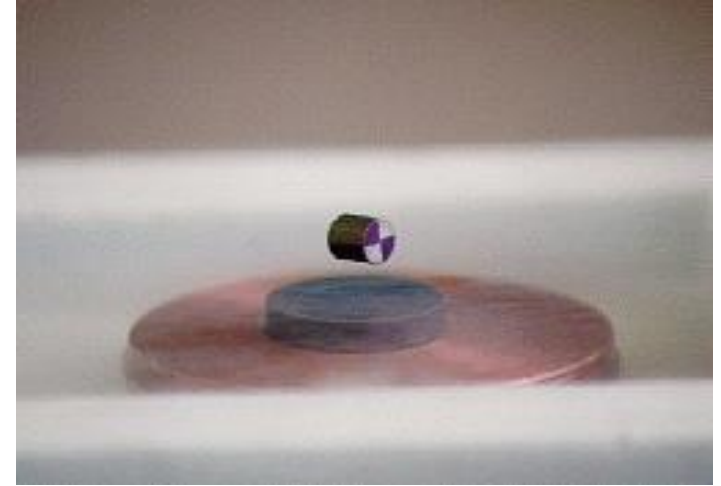
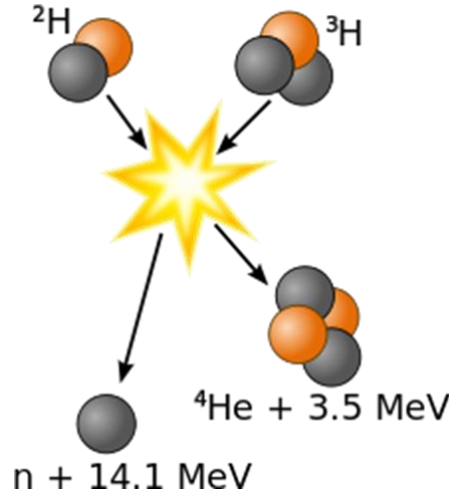
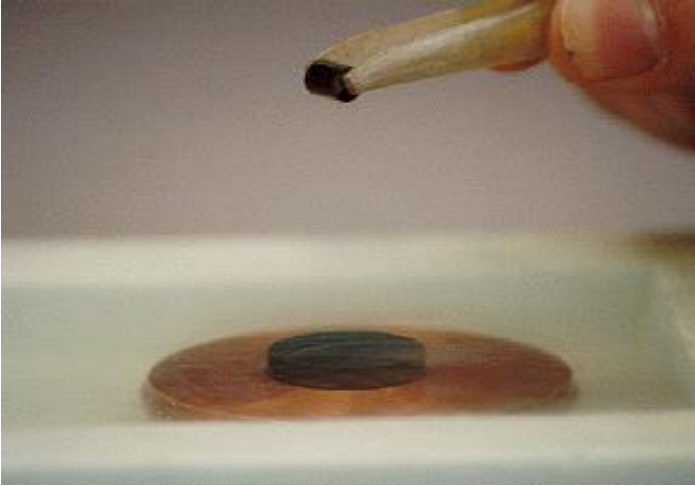


Süperiletken Manyatıklar ile Manyetik Sınırlama Sağlayan Kompakt Füzyon Reaktöründe Gelişmeler

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE GELECEĞİN SINIRSIZ TEMİZ ENERJİSİ: NÜKLEER FÜZYON

Prof. Dr. Ali GENCER



TAKDİM

- Nükleer Füzyon enerjisinin temel prensibi: Güneş'te ve yeryüzünde nükleer füzyon
- Uluslararası Nükleer füzyon Reaktörü: ITER projesi
- Kompakt nükleer füzyon reaktörlerine geçiş ve motivasyonlar
- Kompakt Nükleer Füzyon Reaktörü Çalışmalarına Bazı Örnekler
 - ARC & SPARC (MIT – Commonwealth Fusion Systems) (ABD)
 - Lockheed Martin Compact Fusion Reactor (CFR) (ABD)
 - Küresel Tokamaklar: MAST Upgrade (İngiltere)
 - Stellarator yenilikleri: Wendelstein 7-X (Almanya)
 - EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) – ÇİN
 - BEST (Beijing Experimental Superconducting Tokamak) – ÇİN
- Nükleer Enerji Kompakt Reaktörler (Füzyon, Fizyon ve Toryum) Değerlendirme
- Nükleer Enerji Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları
- Kompakt füzyon reaktörlerinin şebeke entegrasyonu
- Endüstriyel uygulamalar ve yüksek sıcaklık prosesleri
- 2050'ye kadar sıfır karbon emisyonu hedefi
- Nükleer Enerjide Türkiye'nin stratejik fırsatları ve zorlu süreçler!

Neden Şimdi? – Kompakt Füzyon Reaktörleri

⚡ Enerji Arz Güvenliği

Artan küresel enerji talebi
Jeopolitik riskler ve tedarik kırılganlığı
Sürekli ve yerli üretim ihtiyacı

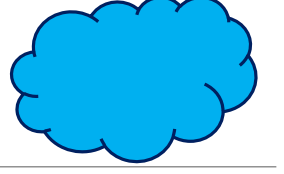
🌍 Karbon Nötr Hedefler

2050 net-sıfır taahhütleri
Elektriklendirilmesi zor sektörler
Karbonsuz, kesintisiz baz yük ihtiyacı

🔬 Teknolojik Kırılma Noktası

Yüksek sıcaklık süperiletkenler (REBCO)
Güçlü ve kompakt manyetik hapsi
Büyük reaktörlerden **kompakt tasarımlara geçiş**

2050'ye Kadar Sıfır Karbon Emisyonu Hedefi



Paris Uluslararası Anlaşması (Paris International Agreement), küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlamayı hedefleyen yasal bağlayıcı bir taahhüt sunmaktadır. Bu iddialı ancak uygulanabilir hedef, hükümetleri, işletmeleri ve bireyleri daha temiz ve sürdürülebilir uygulamalara yönlendirmektedir. Küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlamak için sera gazı emisyonlarının en geç 2025'te zirve yapması ve 2030'a kadar %43 oranında azaltılması gerekmektedir; mevcut ilerleme ise bu hedefi tehlikeye atmaktadır. 2050'ye kadar sıfır karbon emisyonu hedefine ulaşmak için ise tüm sektörlerin koordineli çabaları şarttır.

Başlıca Gereklilikler:

- Politika ve düzenlemeler
- Temiz enerji Ar-Ge yatırımları
- Uluslararası işbirliği
- Kamu/özel finansal destek

Stratejiler:

- Yenilenebilir enerjiye geçiş
- Sürdürülebilir arazi ve tarım
- Elektrik temelli dönüşüm & Yerel enerji üretimi
- Enerji verimliliği
- Döngüsel ekonomi



<https://digital4planet.org/digital4planet-celebrates-paris-agreement/>

Süperiletkenlik, bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde kritik rol oynayacak.

Sürücü Kuvvetler-Dört Başlıca Faktör

Yeşil Ekonomi
Mevcut ve Gelecek
Ekonomi için Bir Trend



Birleşmiş Milletler
Sürdürülebilir Kalkınma
Amaçları
(Toplam 17 Hedef)



Düşük Sıcaklık
Süperiletkenleri için
Kriyojen Gerektirmeyen
Çözümler



Geleceğin Teknolojisi:
Yüksek Sıcaklık
Süperiletkenleri

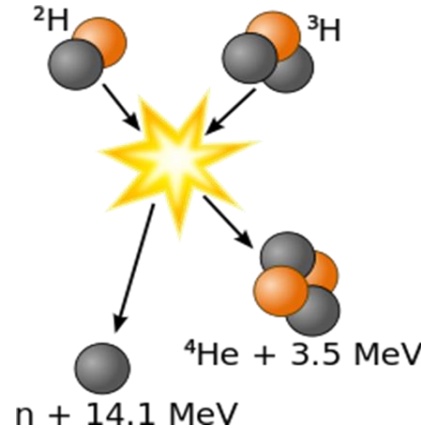
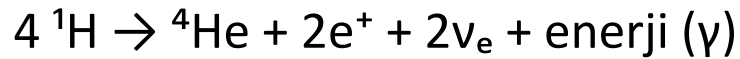


Daha Yeşil, Daha Sağlıklı, Daha Gelişmiş ve Sürdürülebilir Bir Gelecek

Nükleer Füzyon Enerjisi: Dünyada Kontrollü Suni Güneş

GÜNEŞ'TE ENERJİ ÜRETİMİ:

Proton–Proton zincir reaksiyonu olarak bilinen nükleer füzyon süreciyle gerçekleşir. Bu süreçte dört hidrojen çekirdeği (proton), bir dizi ara adım sonunda birleşerek tek bir helyum çekirdeği oluşturur. Birleşme sırasında kütlenin küçük bir bölümü enerjiye dönüşür ve bu enerji, Güneş'in ışık ve ısı yaymasının temel kaynağını oluşturur.

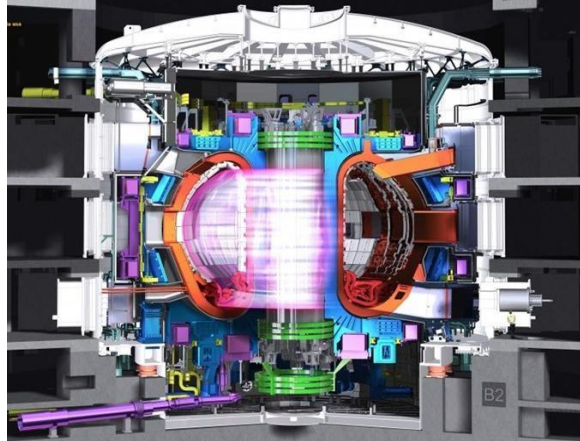


NÜKLEER FÜZYONLA ENERJİ ÜRETİMİ:

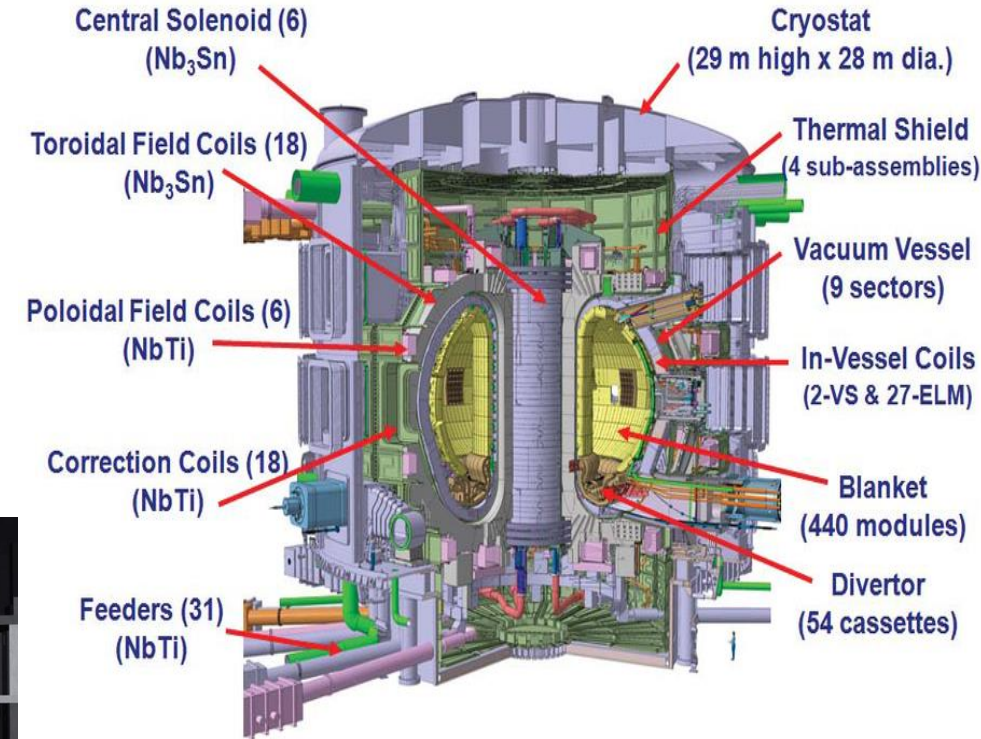
Döteryum (D) ve Tritiyum (T) çekirdekleri çok yüksek hızlarda çarpışarak aralarındaki Coulomb potansiyelini (elektrostatik itme kuvvetini) aşar ve birleşerek He oluşturur ve çok yüksek enerji açığa çıkar. Bu füzyon reaksiyonu sonucunda bir helyum çekirdeği ve bir nötron oluşur. Süreç sırasında kütlenin çok küçük bir bölümü, oluşan helyum çekirdeği ve nötronun kinetik enerjisine dönüşür. Her bir füzyon reaksiyonunda yaklaşık **0,0199 akb** kütle enerjiye dönüşerek **$2,8 \times 10^{-12}$ joule** büyüklüğünde enerji açığa çıkar.

ITER PROJESİ

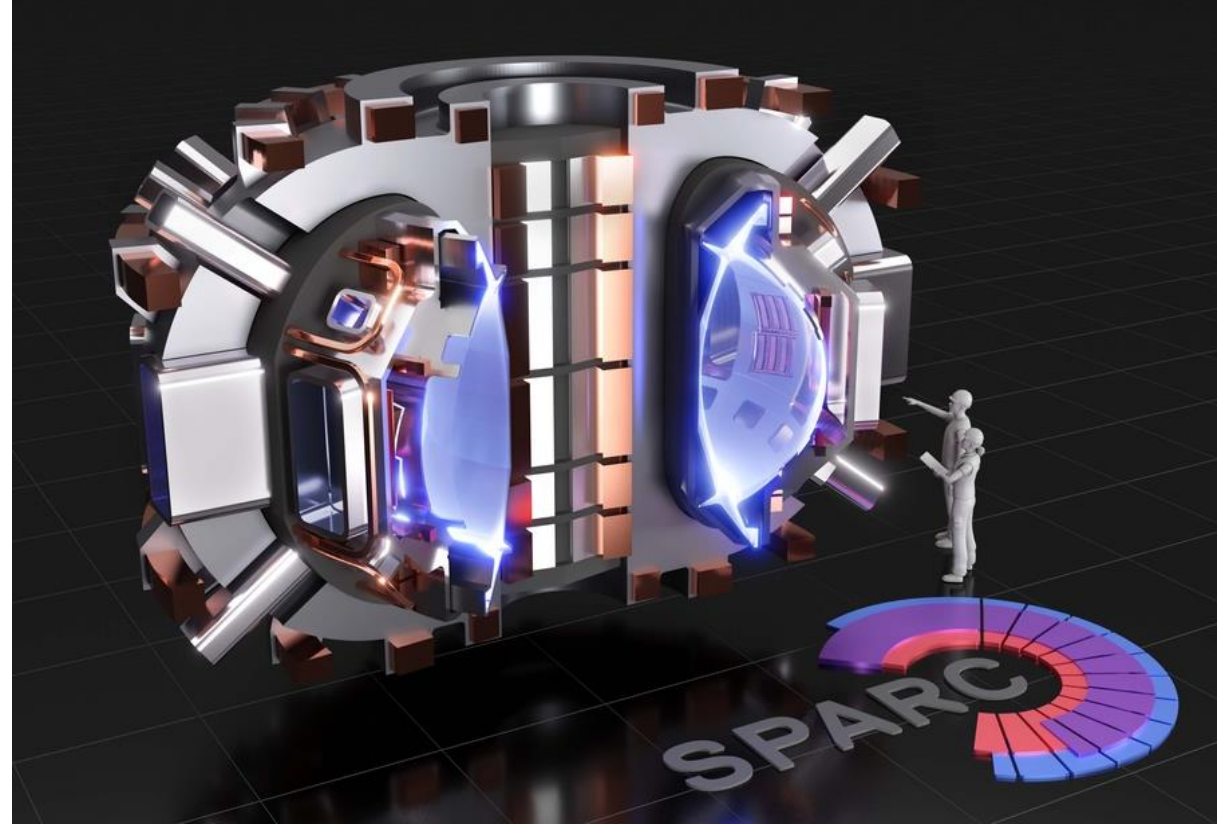
Cadarache Araştırma Merkezi, Saint-Paul-lez-Durance, Güney Fransa
ITER (International Thermonuclear “Experimental” Reactor) projesinde manyetik hapsi sağlamak amacıyla kullanılan bobinler, her biri binlerce NbTi veya Nb₃Sn süperiletken tel içeren kablolarla sarılmaktadır. Bu süperiletken teller, yaklaşık 4 K sıcaklığa kadar soğutulan sıvı helyum ile çalıştırılarak süperiletkenlik durumunda tutulur. ITER’in manyetik sisteminde toplamda yaklaşık 100.000 km uzunluğunda Nb₃Sn süperiletken tel kullanılmaktadır; bu da projenin şimdiye kadar inşa edilen en büyük ve en güçlü süperiletken manyetik sistemlerinden biri olmasını sağlamaktadır.



<https://www.iter.org/few-lines>



Nükleer Füzyon Teknolojisi-Kompakt Reaktör



MIT'deki proje liderleri ve Commonwealth Fusion Systems (CFS) tarafından tasarlanan ve üretilen yüksek sıcaklık süperiletken mıknatıslar sayesinde, yaklaşık 20 Tesla manyetik alan üretebilen kompakt bir füzyon reaktörü konsepti geliştirilmiştir.

<https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>

Cutaway of SPARC engineering design (image courtesy of CFS/MIT-PSFC, rendering by T. Henderson)

<https://doi.org/10.1017/S0022377820001063> Status of the SPARC physics basis

Kompakt Nükleer Füzyon Reaktörü Çalışmalarına Bazı Örnekler

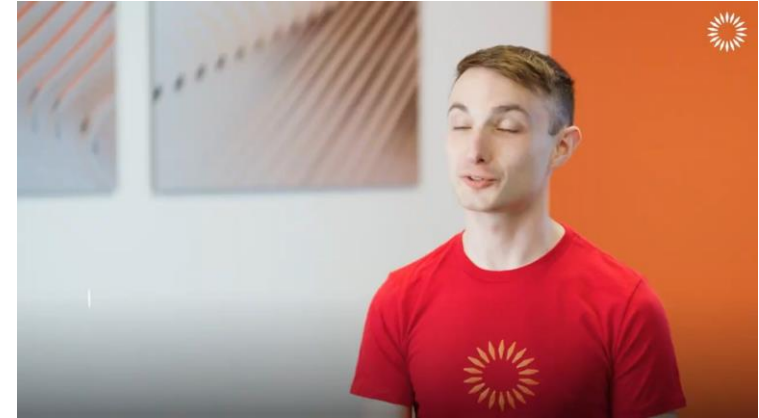
ARC & SPARC (MIT & Commonwealth Fusion Systems, ABD)

SPARC, MIT ve Commonwealth Fusion Systems (CFS) tarafından geliştirilen kompakt bir füzyon gösterim reaktörüdür. Temel hedefi, net füzyon enerji kazancına ($Q > 1$) ulaşmak, yani plazmayı sürdürebilmek için sisteme verilen enerjiden daha fazlasını füzyon reaksiyonları yoluyla üretmektir. SPARC, plazma fiziği modellerinin doğrulanması ve ticari ölçekli ARC füzyon enerji santralini tasarımı için kritik deneysel verilerin elde edilmesini amaçlayan önemli bir deneysel platform olarak hizmet etmektedir. Yüksek sıcaklık süperiletken (REBCO) mıknatısların kullanılması sayesinde SPARC, çok daha güçlü manyetik alanlar üretebilmekte; bu durum plazma hapsini iyileştirirken reaktörün toplam boyutunu ve maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır.

ARC, SPARC'ın doğrudan ardılı olarak tasarlanan ticari ölçekli bir füzyon enerji santrali konseptidir. SPARC'tan elde edilecek işletme deneyimi ve deneysel verilerin, ARC'nin tasarımının şekillendirilmesi ve doğrulanmasında merkezi bir rol oynaması hedeflenmektedir. ARC için şebeke bağlantısı, 2030'lu yıllar için öngörülmektedir.



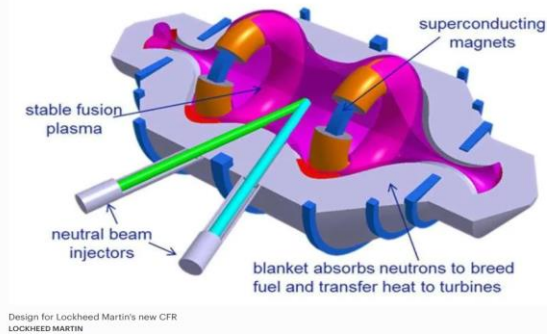
[SPARC®: Proving commercial fusion energy is possible | Commonwealth Fusion Systems](#)



[We will bring clean fusion energy to the grid from our campus in Chesterfield County, Virginia. | Commonwealth Fusion Systems](#)
[ARC Power Plant in Chesterfield County, Virginia](#)

Lockheed Martin's Compact Fusion Reactor (CFR) - ABD

Lockheed Martin'in Kompakt Füzyon Reaktörü (CFR), Amerika Birleşik Devletleri'nde Lockheed Martin'in Skunk Works birimi tarafından geliştirilen, tokamak dışı, kompakt ve modüler bir füzyon reaktörü konseptidir. Bu yaklaşım, cusp manyetik hapsi konfigürasyonuna dayanmaktadır ve geleneksel büyük ölçekli füzyon reaktörlerine kıyasla daha küçük, taşınabilir ve daha hızlı konuşlandırılabilir füzyon sistemleri geliştirmeyi hedeflemektedir.



Design for Lockheed Martin's new CFR
LOCKHEED MARTIN

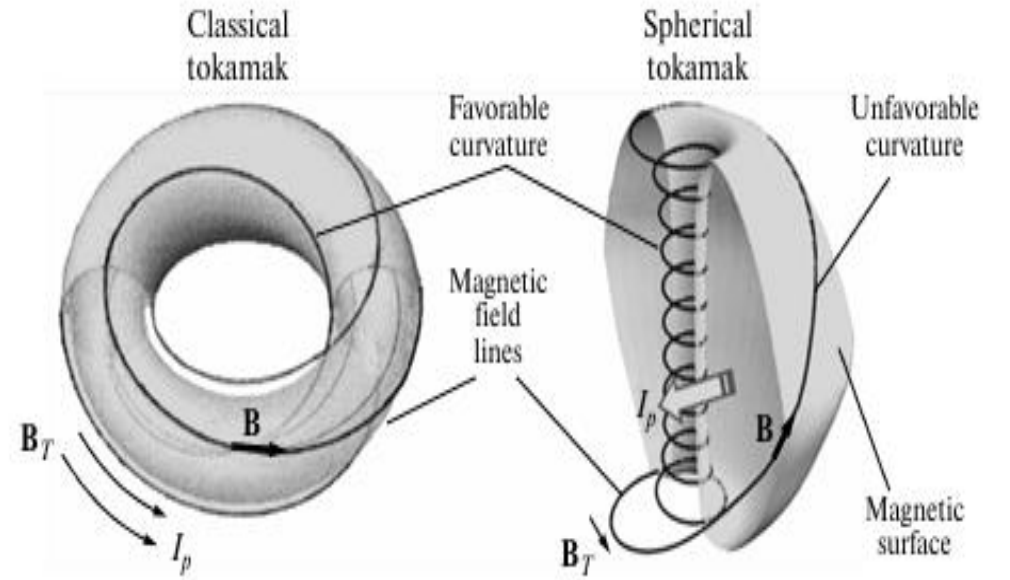


Members of the CFR program team at Skunk Works work on an experimental fusion reactor., Lockheed Martin
<https://www.twz.com/29074/skunk-works-exotic-fusion-reactor-program-moves-forward-with-larger-more-powerful-design>

<https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2018/08/01/will-lockheed-martin-change-the-world-with-its-new-fusion-reactor/>

MAST Upgrade - İngiltere – Küresel Tokamak Konsepti

Küresel tokamaklar, düşük en-boy oranına sahip kompakt tokamak tasarımlarıdır ve Birleşik Krallık'ta geliştirilmiştir. MAST Upgrade, gelişmiş divertör konfigürasyonları aracılığıyla ısı egzozu ve plazma-yüzey etkileşimlerini incelemekte olup, gelecekteki kompakt füzyon reaktörlerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahip veriler sağlamaktadır.

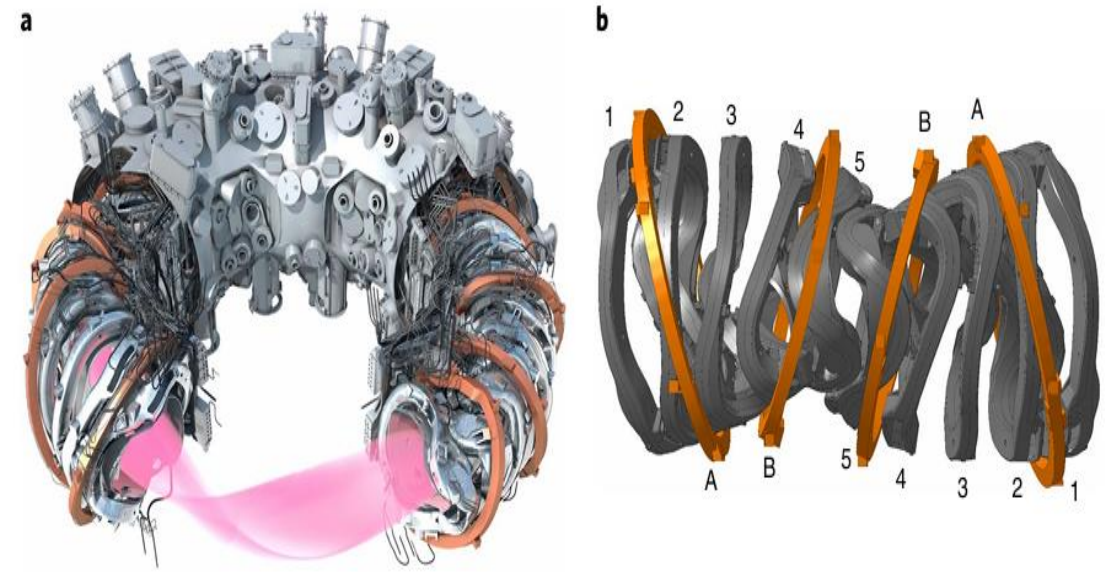


Magnetic configurations of classical and spherical tokamaks.
DOI: 10.1134/S1063780X12110086 Do Spherical Tokamaks Have a Thermonuclear Future?

[A Huge Fusion Experiment in The UK Just Achieved The Much Anticipated 'First Plasma' : ScienceAlert](#)
(136) Shaping fusion power for the future - Mega Amp Spherical Tokamak Upgrade - YouTube

Wendelstein 7-X – Kararlı Durum (Steady-State) İşletimi için Optimize Edilmiş Stellarator - Almanya

Stellaratorlar, plazma içinde akım gerektirmeden manyetik alanın hapsini sağlayan füzyon reaktörü tasarımlarıdır. **Wendelstein 7-X (Almanya, Max Planck IPP)**, karmaşık üç boyutlu bobin geometrileriyle optimize edilmiş manyetik alanlar üretmeyi hedefleyen en gelişmiş stellarator deneyidir. Uzun süreli plazma deşarjları ve azaltılmış plazma kayıpları üzerine elde edilen sonuçlar, gelecekteki kompakt ve güvenilir stellarator tabanlı füzyon reaktörleri için kritik veriler sunmaktadır.



Outline of Wendelstein 7-X and its magnet system. a, Schematic CAD drawing of Wendelstein 7-X (© IPP). <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0141-9> Magnetic configuration effects on the Wendelstein 7-X stellarator

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) – ÇİN

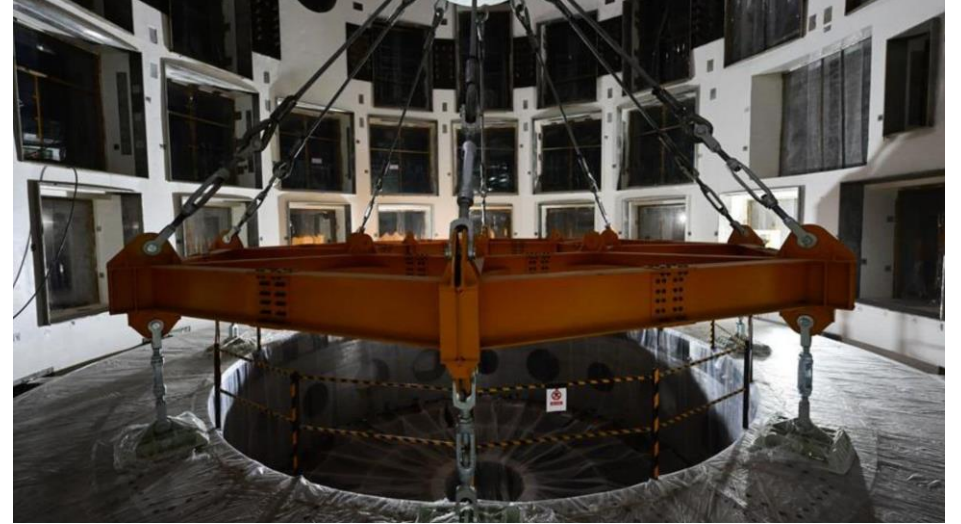
Çin Bilimler Akademisi'ne bağlı **Hefei Plazma Fiziği Enstitüsü (ASIPP)** tarafından geliştirilen ileri düzey bir süperiletken tokamak füzyon reaktörüdür. Tamamen süperiletken bobinler ve non-dairesel plazma kesiti gibi özellikleriyle **yüksek sıcaklıkta ve kararlı plazma işletimi** odaklanır. 2012'den itibaren yapılan H-modu deneylerinde 30 saniyelik plazma hapsedilmesinden başlayarak, 2025'te dünya rekoru niteliğinde **1.066 saniye** plazma hapsedilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu başarılar, sürekli plazma çalışması, yüksek sıcaklık stabilitesi ve füzyon fiziği alanında önemli veriler sunarak EAST'i **ITER gibi uluslararası projelere doğrudan katkı sağlayan bir deney platformu** haline getirmiştir.



[China's Experimental Advanced Superconducting Tokamak smashes fusion confinement record – Physics World](#)

BEST (Beijing Experimental Superconducting Tokamak) - ÇİN

Çin’de **süperiletken tokamak** teknolojilerini temel alan bir füzyon deney reaktörü konseptidir. BEST, kompakt bir tokamak tasarımında süperiletken bobinlerin performansını test etmeyi ve ileri plazma işletim rejimlerinde güvenilir çalışma verisi elde etmeyi amaçlar. Proje, ITER ve EAST gibi büyük ölçekli deneylerin ardından füzyon teknolojilerinin **daha küçük boyutlu, verimli ve sürdürülebilir sistemlere** dönüşümüne katkıda bulunacak kritik bilimsel ve mühendislik verilerinin toplanmasına odaklanmaktadır. BEST’in geliştirilmesi, süperiletken manyetik hapsin uzun süreli işletimdeki davranışını inceleyerek, geleceğin ticari kompakt füzyon reaktörleri için önemli bir bilgi tabanı sağlamayı hedeflemektedir.

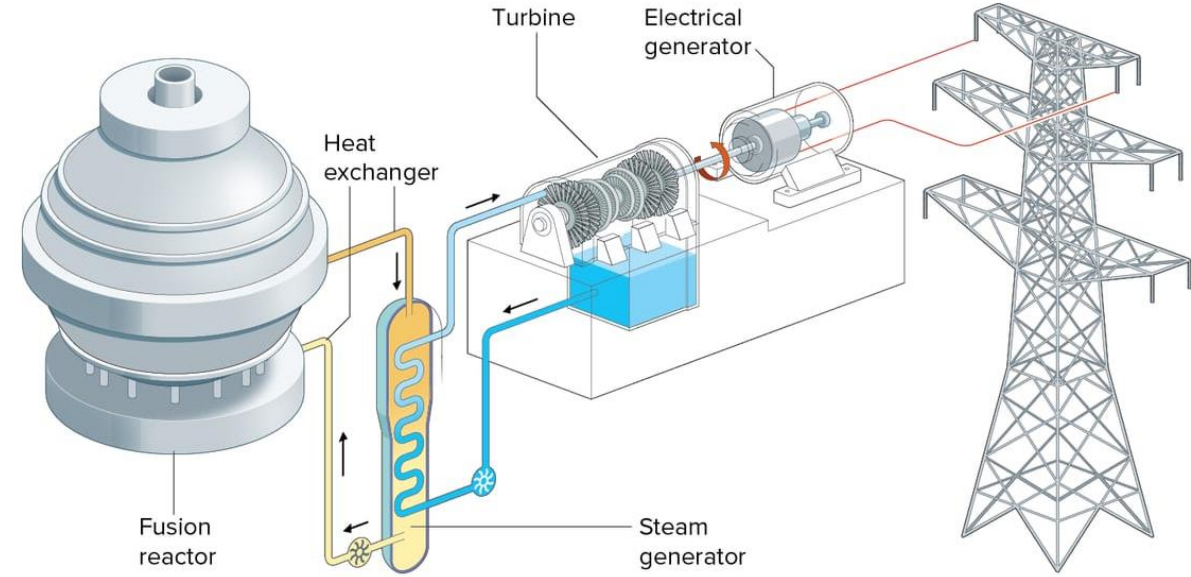


The base of the Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak (BEST).
[China's BEST fusion reactor moves closer to power generation goal](#)

Şebeke Entegrasyonu

Kompakt füzyon reaktörleri, sürekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve güvenilir bir baz yük (baseload) elektrik üretimi sağlar. Güneş ve rüzgâr enerjisinin aksine, füzyon enerjisi hava koşullarından bağımsızdır. Bu özelliği sayesinde, yenilenebilir enerji payının yüksek olduğu modern elektrik şebekelerinin dengelenmesi için ideal bir çözüm sunar.

A fusion power plant



SOURCE: REPORTING BY M. MITCHELL WALDROP

5W INFOGRAPHIC / KNOWABLE

<https://www.canarymedia.com/articles/nuclear/can-the-dream-of-fusion-power-be-realized>

Endüstriyel Uygulamalar

Elektrik üretiminin yanı sıra, kompakt füzyon reaktörleri elektrikleştirilmesi zor olan sektörler için yüksek sıcaklıkta proses ısısı sağlayabilir(çelik, çimento, kimya). Bu özellik, karbon salımı yüksek ve fosil yakıtlara bağımlı endüstrilerde fosil yakıt kullanımını azaltmak için uygulanabilir bir yol sunmaktadır.



Nükleer Enerji Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları



Toryum Reaktörleri

Avantajlar

- Toryum, uranyuma göre daha bol bulunan bir yakıttır.
- Daha az ve daha kısa ömürlü radyoaktif atık üretir.
- Erime (meltdown) riski çok düşüktür.
- Nükleer silahlanma riski daha düşüktür.

Dezavantajlar

- Henüz ticari ölçekte çalışan bir santral bulunmamaktadır.
- Yakıt döngüsü ve işletme süreci karmaşıktır.
- Yasal ve düzenleyici altyapı yeterince gelişmemiştir.
- Başlangıç yatırım maliyeti yüksektir.



SMR (Small Modular Reactors)

Avantajlar

- Küçük ve modüler yapısı sayesinde daha hızlı kurulabilir.
- İlk kurulum maliyeti daha düşüktür.
- Güvenlik sistemleri büyük reaktörlere göre daha gelişmiştir.
- Elektrik şebekesine esnek entegrasyon sağlar.

Dezavantajlar

- Nükleer atık üretimi devam eder.
- Sınırlı sayıda ülkede pilot ve erken ticari aşamada uygulanmaktadır.
- Ekonomik verimlilik seri üretime ölçeğine (MW) bağlıdır.
- Nükleer güvenlik, atık yönetimi ve geçmiş kazalara bağlı endişeler nedeniyle bazı bölgelerde kamuoyu desteği sınırlıdır.



Nükleer Füzyon Reaktörleri

Avantajlar

- Karbon emisyonu ve uzun ömürlü nükleer atık üretmez.
- Erime (meltdown) riski yoktur.
- Yakıt kaynakları bol ve küresel olarak erişilebilirdir.
- Küçük alanlarda yüksek enerji üretme potansiyeline sahiptir.

Dezavantajlar

- Henüz ticari kullanım aşamasında değildir.
- Yüksek teknoloji ve ileri mühendislik gerektirir.
- İlk nesil sistemlerin maliyeti yüksektir.
- Uzun vadeli dayanıklılık testleri devam etmektedir.

Özet:

- **Artan Enerji Talebi:**

Türkiye'nin enerji talebi yılda yaklaşık %4 oranında artmakta olup, fosil yakıtlara bağımlılık hâlen %75'in üzerindedir.

- **Nadir Toprak Elementleri ve REBCO Avantajı:**

Nükleer füzyon reaktörlerinde kullanılan REBCO tabanlı yüksek sıcaklık süperiletkenler, nadir toprak elementleri içeren ileri malzemelerdir. Türkiye, sahip olduğu nadir toprak element potansiyeli sayesinde REBCO üretimi ve süperiletken mıknatıs teknolojileri için elverişli bir konumdadır.

- **Süperiletkenler ve Mıknatıs Teknolojileri:**

Süperiletken malzemeler ve sistemlerin araştırılması, geliştirilmesi ve yüksek teknoloji üretimi için yüksek potansiyel mevcuttur.

- **Enerji Bağımsızlığı:**

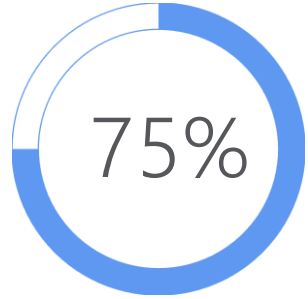
Kompakt füzyon teknolojileri, Türkiye'nin temiz, sürdürülebilir ve güvenli enerjiye yönelik uzun vadeli hedefleriyle güçlü biçimde örtüşmektedir.

- **Liderlik Vizyonu:**

Türkiye'yi ileri enerji teknolojileri ve füzyon alanında bölgesel bir merkez konumuna taşıma fırsatı sunmaktadır.

- **Malzeme Bilimi Gücü:**

Füzyon teknolojileriyle ilişkili malzeme bilimi alanında güçlü akademik altyapı ve gelişmiş Ar-Ge yetkinlikleri bulunmaktadır.





TEŞEKKÜRLER...

Nükleer Enerji Teknolojilerinin Karşılaştırması

	 Toryum Reaktörleri	 SMR (Small Modular Reactors)	 Nükleer Füzyon Reaktörleri
Enerji Prensibi	Fisyon (Th-232 → U-233)	Fisyon (U-235 / Pu-239)	Füzyon (D + T)
Tipik Elektrik Gücü	300–1000 MW	50–300 MW	200–500 MW (ARC hedefi)
Ticari Olgunluk	AR-GE / Prototip	Pilot → erken ticari	Deneyisel / erken ticari (2030+)
Toplam Kurulum Süresi	15–20 yıl	5–8 yıl	10–15 yıl (öngörülen)
Kapladığı Alan	~1–2 km ² (klasik santral ölçeği)	~0,1–0,3 km ²	~0,05–0,2 km ² (kompakt hedef)
Tahmini İlk Kurulum Bütçesi	6–12 milyar USD	1–4 milyar USD	5–10 milyar USD (ilk nesil)
MW Başına Maliyet (öngörü)	6–10 M\$/MW	4–8 M\$/MW	3–6 M\$/MW (olgunlaşınca)
Radyoaktif Atık	Az, kısa ömürlü	Uzun ömürlü	Çok düşük (aktivasyon atığı)
Erime (Meltdown) Riski	Çok düşük	Düşük	Yok
Karbon Emisyonu	Yok	Yok	Yok
Uzun Vadeli Potansiyel	Orta	Orta–yüksek	Çok yüksek