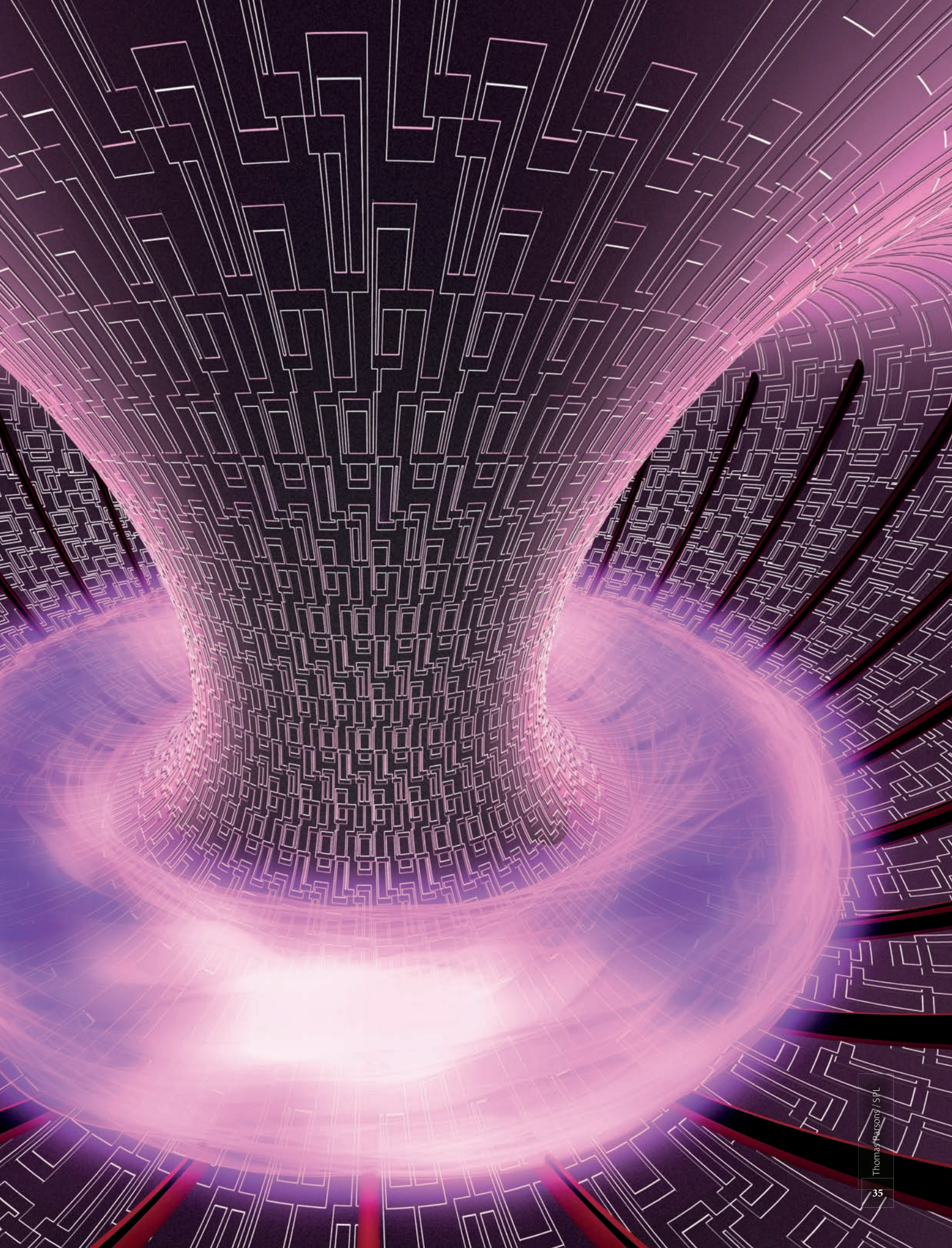


Süperiletken Mıknatıslar Füzyon Enerjisine Giden Yolu Açtı

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

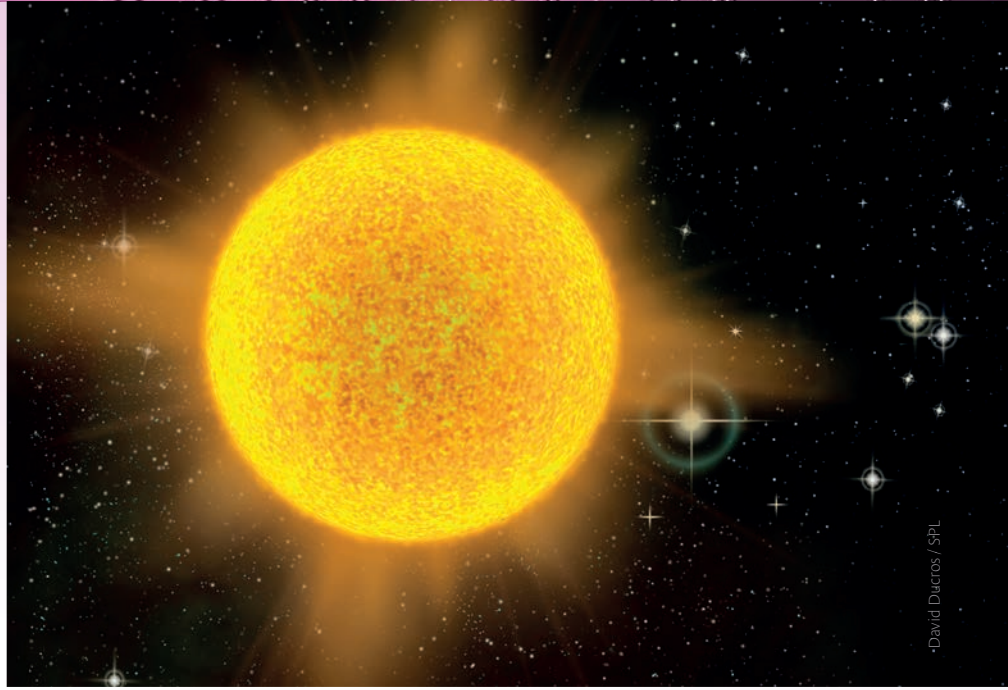
Onlarca yıldır füzyonla enerji elde etme üzerine yapılan çalışmalarda çok önemli bir başarıya imza atıldı. Bir grup araştırmacı nükleer füzyonla net ve ucuz enerji elde edilmesine imkân verecek süperiletken mıknatıslar geliştirmeyi başardı.



Füzyon Enerjisi

Atom çekirdeklerinde gizli enerjiyi açığa çıkarmanın iki yolu var: fisyon ve füzyon. Fisyon süreçlerinde büyük atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla daha ufak atom çekirdekleri ortaya çıkar. Füzyon süreçlerinde ise ufak atom çekirdeklerinin kaynaşmasıyla daha büyük atom çekirdekleri oluşur. Günümüzde var olan nükleer enerji santrallerinde fisyonla enerji elde ediliyor. Füzyonla enerji üreten bir nükleer enerji santrali ise bulunmuyor.

Füzyonla enerji elde etmekle ilgili en büyük zorluk, füzyonun meydana gelebileceği koşulların oluşturulması. Örneğin, Güneş'in çekirdeğinde doğal olarak meydana gelen füzyon, 15 milyon derecenin üzerinde bir sıcaklıkta ve 100 milyar atmosferin üzerindeki bir basınçta



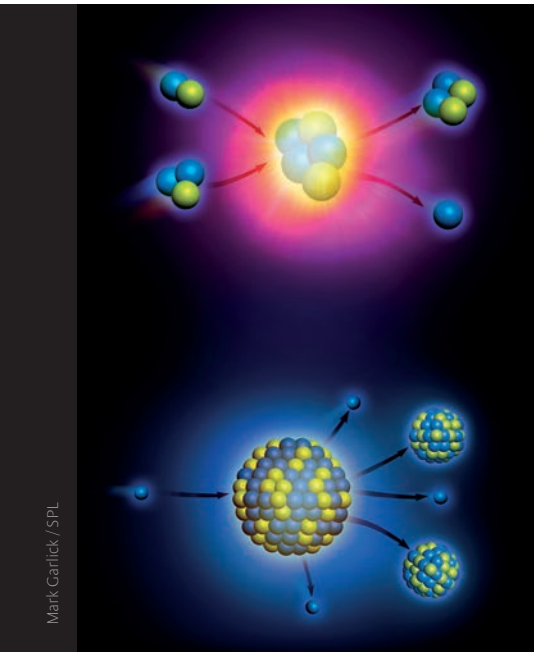
gerçekleşiyor. Benzer koşulları yapay olarak oluşturmaksa kolay değil.

Her ne kadar gerçeğe dönüştürmesi çok zor olsa da füzyonla enerji elde etmenin fisyonla enerji elde etme karşısında pek çok avantajı bulunuyor. Örneğin, fisyon santrallerinde enerji elde edebilmek için yakıt olarak ağır radyoaktif elementlerin kullanılması gerekir. Bu yakıtlar doğada nadir bulunur, elde edilmeleri zordur. Ayrıca enerji üretim sürecinin ortaya çıkardığı yan ürünler sağlığa ve çevreye zararlıdır. Füzyon santrallerinde enerji elde edebilmek içinse hafif elementlerin kullanılması gerekir. Bu yakıtlar doğada bol bulunur, elde edilmeleri de kolaydır. Ayrıca enerji üretim sürecinin ortaya çıkardığı yan ürünler sağlığa ve çevreye zararlı değildir.

Füzyonun fisyon karşısındaki en önemli avantajlarından biri ise

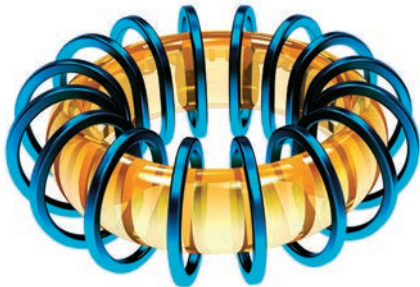
çok daha güvenli olmasıdır. Bir fisyon reaktöründeki çekirdek tepkimelerinin, bir kez başladıktan sonra, kontrol altında tutulması kolay değildir. Sürecin kontrolden çıkması durumunda 1986'da Çernobil'de meydana gelene benzer felaketler yaşanabilir. Füzyon santrallerinde ise bu kadar büyük çaplı kazalar yaşanması olası değildir. Çünkü füzyonun meydana geldiği koşulları sağlamak çok zordur. Sistemin kontrolden çıkması durumunda, ortam koşullarının değişmesiyle enerji üretimi kendiliğinden durur.

Füzyon santrallerinde kullanılmaya en uygun yakıtların başında hidrojen elementinin izotoplarından biri olan döteryum geliyor. Üstelik deniz sularındaki her 6500 hidrojen atomundan biri, döteryum izotopu. Sadece deniz sularından elde edilecek döteryum bile milyonlarca yıl tüm insanların enerji ihtiyacını karşılayabilir.



Füzyon Reaktörleri

Geçmişte pek çok füzyon reaktörü tasarımı üzerine çalışmalar yapıldı. Ancak pek çoğundan başarılı sonuçlar elde edilememesi nedeniyle vazgeçildi. Günümüzde üzerine çalışmalar yapılan füzyon reaktörleri iki ana gruba ayrılıyor. Bir grupta yakıt topaklarının lazerlerle ısıtıldığı reaktör tasarımları var. Bu reaktörlerde ısınan topağın içe çökmesiyle yakıt sıkıştırılıyor ve böylece füzyon için gerekli sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşıyor. Geçmişte bu yöntemi kullanarak başarılı çalışmalara da imza atıldı: ABD Ulusal Ateşleme Merkezinde çalışan araştırmacılar, 2022 yılında üzerine 2,05 MJ enerji gönderdikleri bir yakıt topağından 3,15 MJ enerji açığa çıkarmayı başardı. Ancak sitemde kullanılan lazerler 300 MJ'den fazla enerji tüketiyordu. Dolayısıyla deneyler sırasında tüketilen toplam enerji, füzyonun açığa çıkardığı enerjiden daha fazlaydı. Bu sistemlerin toplam enerji tüketimi, yakıt topaklarını hazırlamanın yüksek maliyeti gibi etkenler göz önüne alındığında, bu gruptaki füzyon reaktörlerinin



yakın gelecekte insanların enerji ihtiyacını karşılamaya başlayacak seviyeye gelmesi beklenmiyor.

Günümüzde üzerine yoğun araştırmalar yapılan diğer füzyon reaktörleri ise tokamaklar. Bu reaktör tasarımlarında düşük yoğunluklu yakıt belirli bir hacmin içine hapsedilerek füzyon için gerekli sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşılmaya çalışılır. Herhangi bir malzemenin füzyonun başlayacağı aşırı yüksek basınçlara ve sıcaklıklara dayanması mümkün değil. Bu durum yakıtları belirli bir hacmin içine hapsedebilmek için güçlü manyetik alanların kullanılmasını gerektiriyor. Yeteri kadar güçlü manyetik alanları üretmekse ancak süperiletken mıknatıslarla mümkün. Bugüne kadar tokamaklarda füzyonla enerji elde edilebilmiş değil.

REBCO Süperiletken Mıknatıs

Bugüne kadar süperiletken mıknatıslar ve füzyon üzerine pek çok araştırma yapılmıştı. Ancak yakın zamanlara kadar geliştirilen mıknatısların ve reaktör tasarımlarının hiçbiri füzyon santrallerinin kurulmasına imkân verecek nitelikte değildi. MIT Plasma Bilimi ve Füzyon Merkezinde (PSFC) ve Commonwealth Füzyon Sistemleri (CFS) şirketinde çalışan bir grup araştırmacı ise kendi



PIOTR TRACZYK / MAXIMILIEN BRICE / CERN / SPL

geliştirdikleri bir mıknatısla net, ucuz enerji elde edilmesine imkân verecek büyüklükte manyetik alan üretmeyi başardıklarını açıkladı. Hem geliştirilen mıknatısın hem de mıknatısın performansını ölçen ekipmanların tasarımı ve üretimi ile ilgili detaylar ve ayrıca yeni teknoloji üzerinde gerçekleştirilen testler ve bu testlerden öğrenilen dersler, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*'nin bu konuya ayrılmış Mart özel sayısında yayımlanan altı makalede ayrıntılı bir biçimde açıklandı. Geliştirilen mıknatısın gelecek yıllarda füzyon enerjisi santrallerini gerçeğe dönüştürmesi bekleniyor.

Yeni geliştirilen mıknatısın daha önce geliştirilenlerden en önemli farklarından biri, yakın zamanlarda keşfedilmiş bir süperiletken malzemenin kullanılması. PSFC ve CFS



spiral sargılar arasında kısa devre meydana gelmesini önlemek amacıyla elektriksel yalıtkanlar kullanılır. Ancak PSFC ve CFC araştırmacıları, kullanılan malzemenin süperiletken özellikte olmasına güvenerek, elektriksel yalıtkan kullanmamayı tercih etmişler. Bu durum hem sistemin dayanıklılığını sağlayan aksamlara hem de soğutma sistemlerine daha fazla yer açılmasını sağlamış.

Deneyler

Araştırmacılar, geliştirdikleri mıknatısı Eylül 2021’de testlerden geçirdi. Daha sonra mıknatıs parçalarına ayrıldı ve her bir parça tek tek incelendi. Sistemin durumunu ölçen cihazların topladığı veriler, ilerleyen zamanda analiz edildi. Sonuçta verilerin, simülasyonlarla ve tahminlerle uyumlu olduğu görüldü. Bu sonuçlar, kullanılan teknolojilerin füzyon enerjisi santralleri kurmaya imkân verecek yeterlilikte olduğunu gösterdi.

Araştırmacılar geliştirdikleri sistemi, meydana gelebilecek arızaların ortaya çıkaracağı sonuçları görmek için de testlerden geçirdi. Sistemin

araştırmacılarının geliştirdiği mıknatısta kısaca REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) olarak adlandırılan bir süperiletken malzeme yer alıyor. REBCO’nun en önemli özelliklerinden biri, görece yüksek bir sıcaklıkta süperiletken özellik gösterebilmesi. Daha önceleri kullanılan süperiletken malzemeler ortam sıcaklığının mutlak sıfırın 4 derece üzerine kadar düşürölmesini gerektiriyordu. REBCO ise 20 Kelvin sıcaklıkta da çalışabiliyor. Her ne kadar bu sıcaklık günlük hayatımız açısından aşırı derecede düşük olsa da aradaki 16 derecelik fark, mühendislik faaliyetleri açısından önemli kolaylıklar sağlıyor.

Yeni geliştirilen mıknatısta 300 kilometre uzunluğunda süperiletken malzeme bulunuyor.

Toplam ağırlığı yaklaşık 10 ton olan ve yaklaşık 6 m² yer kaplayan mıknatıs, 20 Teslanın biraz üzerinde durağan bir manyetik alan üretmeyi başarıyor. Bu manyetik alan büyüklüğünün, büyük ölçekli mıknatıslar açısından bir rekor ve tokamaklarda füzyonu gerçeğe dönüştürmeye yetecek kadar yüksek olduğu belirtiliyor.

Üretilen mıknatısta 16 ayrı plaka bulunuyor. Plakaların bir tarafında spiral sargılı süperiletken, diğer tarafında ise süperiletkeni soğuk tutmak için kullanılan helyum gazının dolaştığı kanalları yer alıyor.

Yeni süperiletken mıknatısın daha öncekilerden en önemli farklarından biri de mıknatısta yalıtım malzemesi kullanılmaması. Bu tür mıknatıslarda genel olarak



Süperiletken mıknatıs (a), 15 K sıcaklıkta yapılacak testler için hazırlanmış mıknatıs (b).

tüm güç kaynaklarının ani olarak kapatıldığı bir test sırasında, mıknatısı meydana getiren 16 levhanın birinin bir köşesinde aşırı ısınmaya bağlı

hasar meydana geldi. Hasarın incelenmesiyle elde edilen bilgilerden, bu tür kazalar hakkında tahminler yapmak için kullanılan modellerin iyileştirilmesinde yararlandı. Gelecekte kurulacak füzyon enerjisi santrallerinde, en aşırı koşullar altında bile bu tür hasarların meydana gelmemesi için yapılması gereken iyileştirmeler belirlendi.

Füzyon Enerjisinin Geleceği

Eylül 2021’de yapılan deneylerden önce de 20 Tesla büyüklüğünde manyetik alan üretecek süperiletken mıknatıslar inşa etmek mümkündü. Ancak mıknatısların sahip olması gereken büyüklük ve maliyetler göz önüne alındığında, bu mıknatısları üreterek füzyon enerjisi elde etmeye çalışmak ekonomik ve pratik değildi. PSFC ve CFS araştırmacılarının Eylül

2021’de gerçekleştirdiği testlerden sonrası füzyonla enerji üretmenin maliyeti yaklaşık kırkta birine düştü. Araştırmacıların, yeni bir süperiletken malzeme kullanarak geliştirdikleri süperiletken mıknatıs sayesinde füzyonla enerji üretimi pratik ve ekonomik hale geldi.

PSFC ve CFS araştırmacılarının yaptığı çalışmalar, SPARC adı verilen süperiletken mıknatıs teknolojileriyle füzyon enerjisi reaktörü geliştirmeyi amaçlayan bir projenin parçası. Araştırmacılar henüz reaktörün üretimini tamamlamış değil. Ancak geliştirilen süperiletken mıknatısın bir füzyon enerjisi santralının kurulmasına imkân verecek tüm koşulları sağlaması ve tüm testlerden başarıyla geçmesi çok önemli bir gelişme olarak görülüyor. Yakın gelecekte insanların enerji ihtiyacını karşılayacak füzyon enerjisi santrallerinin kurulmasının önündeki en büyük engeller aşıldı. ■

Kaynaklar

- Hartwig, Z. S., “The SPARC Toroidal Field Model Coil Program”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600316, 2024.
- Vieira, R. F. ve ark., “Design, Fabrication, and Assembly of the SPARC Toroidal Field Model Coil”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600615, 2024.
- Golfopoulos, T. ve ark., “Building the Runway: A New Superconducting Magnet Test Facility Made for the SPARC Toroidal Field Model Coil”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600416, 2024.
- Fry, V. ve ark., “50-kA Capacity, Nitrogen-Cooled, Demountable Current Leads for the SPARC Toroidal Field Model Coil”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600518, 2024.
- Michael, P. C. ve ark., “A 20-K, 600-W, Cryocooler-Based, Supercritical Helium Circulation System for the SPARC Toroidal Field Model Coil Program”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600113, 2024.
- Whyte, D. G., “Experimental Assessment and Model Validation of the SPARC Toroidal Field Model Coil” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Cilt 34, Makale No: 0600218, 2024.