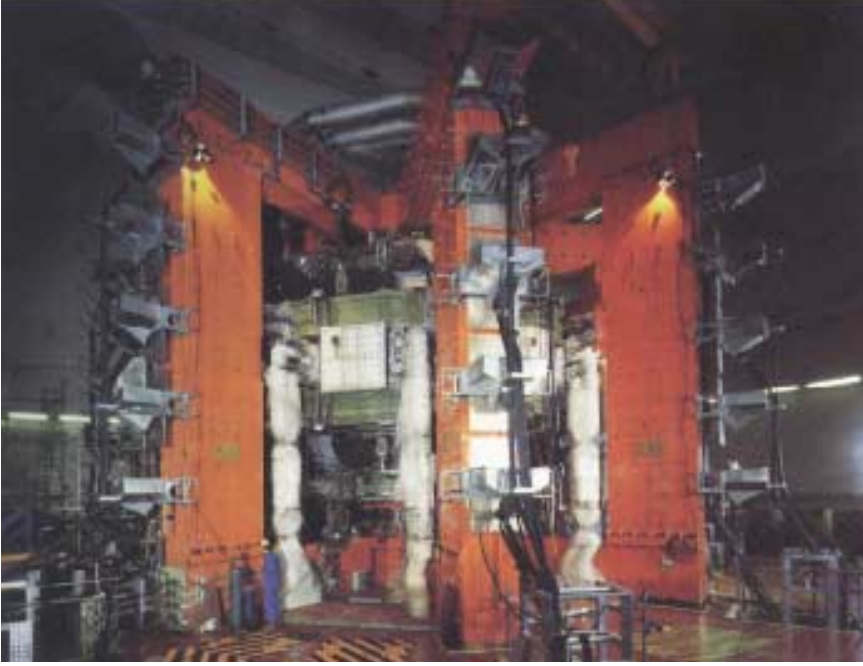


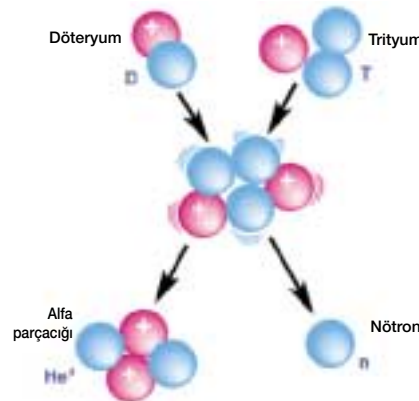
Nükleer Füzyon Reaktörü ve Bazı Yaklaşımlar Füzyon Enerjisi Çok Uzakta mı?



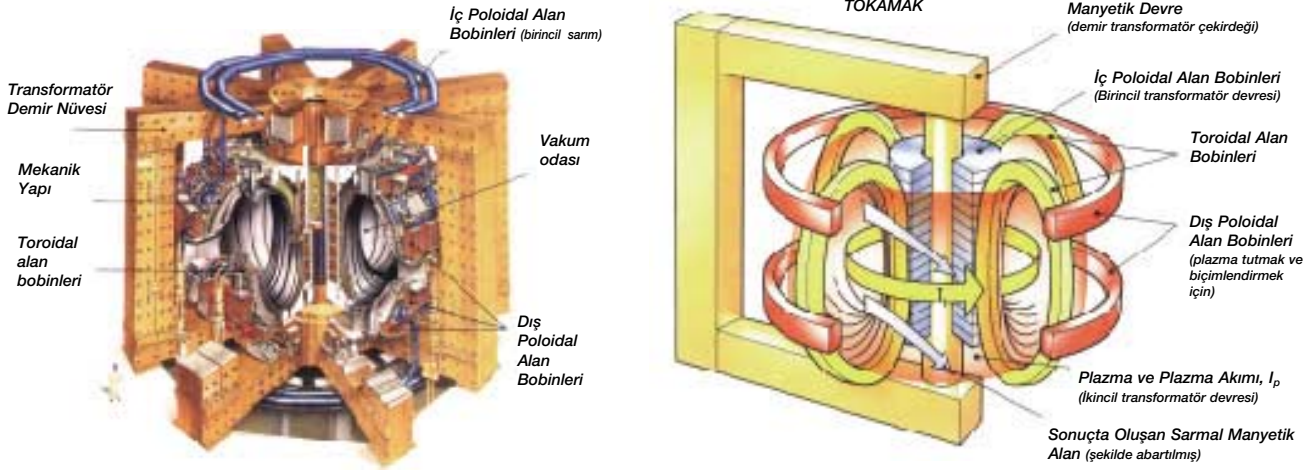
Atom çekirdeklerini yıldızların merkezinde olduğu gibi yoğun sıcaklıkta birleştirerek bol, temiz ve ucuz bir enerji kaynağına kavuşmak, insanlığın düşü. Ancak bunun için, aşılması gereken darboğaz, çekirdek tepkimelerinin düzenli olarak gerçekleşecek biçimde denetim altına alınması. Kamuoyunda yaygın olduğu gözlenen kötümserliğe karşın, tokamak makinelerindeki gelişme, bu düşün sanıldan çok daha erken gerçekleşeceği konusunda araştırmacıları umutlandırıyor.

NÜKLEER enerjinin bir seçeneği olan füzyon; çevreyi kirletmeyen, temiz, yakıtı hidrojenin izotopları döteryum ve trityum gibi hafif elementler olan bir enerji sistemi. Döteryum deniz suyundan, trityum ise, ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ termonükleer tepkimesiyle, füzyon reaktörünün yakıt çevriminden elde ediliyor. Bu nedenle, doğada varolan ulusal enerji üretim yakıtlarından bağımsız, tükenmez (yaklaşık 3000 yıl) bir enerji potansiyeline sahip. Örneğin; yaklaşık 4 litre deniz suyundaki döteryumun, D-T füzyon tepkimesinde kullanılması halinde, elde edilen füzyon enerjisinin eşdeğeri, yaklaşık 104 kWh olarak verilebilir. Füzyon, yakın gelecekte enerji pazarlamasında yeni ve ileri teknolojileri kullanarak, gündemdeki başka teknolojilerin üzerinde tartışılmaz bir üstünlüğe sahip olacak.

Günümüzde, nükleer füzyon reaktör hedefine en yakın reaktör adayı tokamak makineleri görünüyor. Avrupa Birliği ülkelerinin işbirliği ile tasarlanıp İngiltere’de kurulmuş olan ve 1995 yılında bir deneme fazında 9.5 MWs’lik füzyon enerjisi üretebilen; Culham Laboratuvarındaki JET (Joint European Torus) Şekil 1’de görülüyor. Son yıllarda, Amerika’nın ünlü üniversiteleri (California, Princeton ve Wisconsin),



ulusal araştırma merkezleri (Argonne National Lab., General Atomics, Idaho National Engineering Lab., Los Alamos National Lab. ve MIT) ile diğer kamu ve özel kuruluşlarından (Mc Donnell-Douglas Aerospace Co., Raytheon Engineers and Construction, Rensselaer Polytechnic Institute) oluşan ARIES ekibi, Starlite isimli projesiyle; nükleer füzyon reaktörü olarak tokamak makinelerinin potansiyel özelliklerini ve fizibilitelelerini değerlendirdi [1]. Bu değerlendirme; aynı zamanda kritik plazma fiziği ve teknoloji sorunlarıyla bir tokamak reaktörünün optimum çalışma rejiminin tanımlanmasını da amaçladı. Starlite projesinin ilk evresinde, bir reaktör adayı olarak değişik tokamak plazmalarının çalışma modlarının değerlendirilmesinde 5 farklı tokamak çalışma rejimi ele alındı. Bunlar: (1) ARIES I; I. kararlılık bölgesi sürekli hal (steady state) rejimi, (2) PULSAR; dar-



Tokamak manyetik alanı üç parçadan oluşur. Bunlardan ilki küçük çevre etrafında bulunan bir dizi bobin tarafından oluşturulur. Bu bobinler makinenin büyük eksenini çevresindeki toroidal manyetik alanı oluşturur. İkinci parça (poloidal alan) transformatörce plazma içinden geçmesi sağlanan büyük bir akım tarafından oluşturulur. Bunların bileşkesi, plazmayı vakum halkasının çeperlerinden uzak tutan bir sarmal manyetik alan oluşturur. Alanın son bölümü, plazmayı biçimlendirip kararlı halde tutan bir dizi çember bobin tarafından üretilir.

beli çalışma rejimi, (3) ARIES II ile ARIES IV; II. kararlılık bölgesi sürekli hal rejimi, (4) RSP; Ters kırma profilli sürekli hal rejimi ve (5) ST; küresel tokamak rejimidir. Buna paralel olarak, anılan tokamakların; ilk duvar (first wall) ve D-D kaynaşması sonucunda açığa çıkan nötron bombardımanı ile tritium doğurganlığı yaratan litium blanketinin yapısal malzemeleri, yakıtlama, soğutma ve uygun tritium doğurganlığı gibi, optimum geometrik yapılanma ve mühendislik tasarım opsiyonlarının karşılaştırmalı değerlendirilmeleri yapıldı. Böylece, tokamak makinelerine dayanan nükleer füzyon demonstrasyon (Demo) ve ticari reaktörlerinin gereksinimleri saptanmaya çalışıldı.

Halen ABD'de, endüstri ve elektrik kullanıcılarının öneri ve etkilemelerine göre, füzyon gücü için ölçütler saptanmaya çalışılıyor. Bunlardan biri de, Electric Power Research Institute (EPRI) füzyon grubu

tarafından geliştirilmiş bulunuyor. Bu ölçüt, amaç ve gereksinimler açısından: 1) Elektrik üretim tutarı (COE), 2) Güvenlik ve çevre özellikleri ve 3) Güvenilirlik, uygunluk ve bakım şeklinde üç bölüme ayrılıyor.



Culham'daki (İngiltere) Avrupa Ortak Tokamak Reaktörü (JET).

Elektrik üretim tutarı için amaç ve gereksinimler, enerji pazarlamasında füzyonun kullanılmaya başlandığı anda var olan elektrik kaynakları için hesaplanmış rekabet fiyatları esas alınarak, Starlite projesine uyarlanmış. Bulunan değerler, enerji tah-

min modellerine dayanan geleceğin reaktör fiyatları tahmin düzeyinde.

Güvenlik ve çevre gereksinimleri açısından, ileriye yönelik nükleer füzyon (atom çekirdeğinin parçalanmasıyla enerji elde edilmesi) ve fosil yakıtlarında karşılaşılabilecek güçlüklerin aşılmasındaki önlemlerin yanı sıra, nükleer füzyonun ulusal ve yerel yetkililer tarafından verilecek lisansının kolaylaştırılması ve halk onayının kazanılması açısından, füzyonun çok düşük düzeyde bir çevre kirlenmesi yaratacağı avantajının vurgulanması gündeme getirilmiştir.

Nükleer füzyon reaktör tasarımında güvenilirlik, uygunluk ve bakım dikkate alındığında, her konuda özenli davranılması ve radyasyona karşı düşük aktivasyonlu özel malzemelerin seçilip kullanılması gibi ara sistem seçimlerinde bir dizi zorluk ile karşılaşılıyor.

Tasarımlarda reaktör maliyet karşılaştırmasına basit bir temel oluşturmak üzere, benzer blanket (ısı koruyucu örtü) ve ekranlamalar kullanılmakta, divertor (saptırıcı) ve ilk duvar yapısal malzemesi olarak vanadyum alaşımı, blanket doğurganlığı içinse sıvı lityum tercih ediliyor. Böylece kabın bakımı kolaylaştırılarak büyük yüklenmeye dayanıklı bir sürekli yapı büyümesine ve sistem etrafında daha küçük bir bakım alanı ile program kesinti sakıncalarını

Tablo 1 Starlite Tokamak Reaktör Adaylarının Önemli Parametreleri

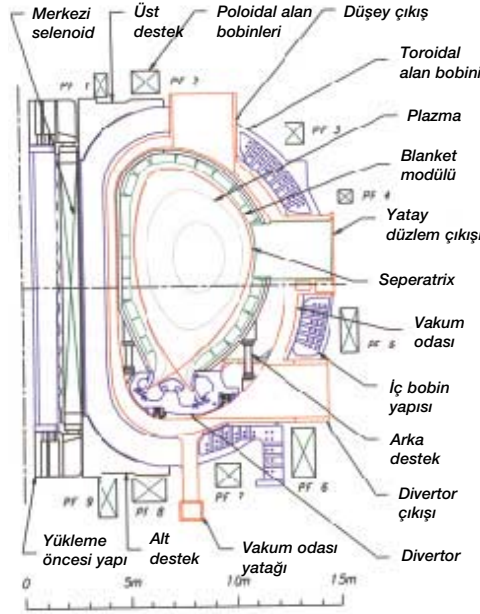
Tokamak reaktör adayı:	1	2	3	4	5
Büyük yarıçap R[m] :	7.96	8.68	5.04	6.40	5.00
Plazma yarıçapı a_p [m] :	1.99	2.17	1.26	1.60	4.00
Görünüm oranı $A=R/a_p$:	4.0	4.0	4.0	4.0	1.25
Merkezi toroidal alan B_0 [T]	8.99	7.46	7.35	8.37	1.77
Plazmanın enine uzama sabiti K:	1.81	1.80	1.99	2.03	3.40
Plazma akımı [MA] :	12.6	15.0	10.3	7.72	40.1
Bootstrap akım sürme oranı f_{BS} :	0.57	0.34	0.89	>1	0.99
Akım sürme verimi:	0.56	--	2.02	0.49	34.2
Korunma zamanı ölçeklemesi H	1.71	2.38	2.40	2.47	3.02
Elektrik fiyatı COE [mill kW ⁻¹ saat ⁻¹]	99.7	130.2	69.7	92.6	116.0

minimumuna indirmek mümkün oluyor. Böylece, tasarımlarda plazma kinetik basıncının, manyetik basınca oranıyla tanımlanan teorik β değeri %90 gibi çok büyük değerlerde tutulmuştur. Aslında, birinci reaktör adayı, mevcut veri tabanına en yakındır ve sıcak plazmaların uzun süreli darbeleri boşalmalarını sergilemektedir; fakat performansı zayıf olduğundan ekonomik isteklere cevap veremez. İkinci reaktör adayı daha iyi bir ekonomik performansa sahip olmakla beraber, deneysel veri tabanı düşüktür. Öte yandan, küresel tokamak reaktör adayının henüz veri tabanı tam olarak oluşmadığından ve bazı kritik sorunları bulunduğundan, daha bir dizi tasarım çalışmasına gereksinime var.

Yapılan kavramsal tasarım çalışmalarına göre, demo ve ticari füzyon reaktörlerinde gerekli güvenlik derecelerine erişilebileceği görülüyor. Günümüzde var olan deneyim ve teknoloji birikimiyle hemen bir nükleer füzyon enerji reaktörünün tasarımı, kurulması ve işletilmesi için gerekli mühendislik yetersiz olmakla birlikte, doğacak sorunlar zamanı geldiğinde sırayla çözülerek, 21. yüzyılın ilk on yılları içinde nükleer füzyon enerjisi hedefine varılacağına kesinlikle inanılıyor.

Tablo 1 de, yukarıda sözü edilen 5 tokamak adayının sonuçları veriliyor. Tablo incelendiğinde, 5 ayrı tokamak rejimindeki nükleer füzyon reaktör adayının Manyetohidrodynamic (MHD) kararlılığı, akım sürekliliği ve enerji korunma zamanı gibi üç üstün nitelik etkeni (figure of merit) göz önüne alındığında, dördüncü ve beşinci tip reaktör adaylarının çok üstün ekonomik performanslara sahip oldukları sonucuna varılıyor. Bunlardan beşinci aday küresel tokamak yaklaşımı, füzyon reaktörlerine gidiş yolunda, düşük bir fiyat ve son derece küçük ölçeklerle pazara giriş kolaylığı gibi çok önemli anahtar özelliklere sahip.

Küresel tokamakların, sıradan tokamaklara göre en önemli farkları şunlar: Plazmanın vakum odası içinde duvarlara değmeden merkezde asılı kalmasını sağlayan manyetik alan, küresel tokamaklarda çok basit biçimde merkezi yüksek akımlarla



ITER reaktör tasarımı

elde edildiğinden, sıradan tokamaklardaki çok büyük hacimli manyetik alan bobinleri kaldırılarak, R makinenin yarıçapı ve a_p plazma yarıçapı olmak üzere $A=R/a_p$ ile tanımlanan görünüm oranı (aspect ratio) 1'e yaklaşıyor. Buna bağlı olarak da makine boyutu küçültülerek basit bir yapıyla son derece ilgi çekici hale geliyor.

Ayrıca, bu basit yapıyla makinenin fiyatı da çok ucuzluyor. Tokamaklarda makine boyutunu etkileyen blanketin küresel tokamaklarda nötron duvar yüklenmesi, plazma kolonunun enine uzamasıyla sınırlı kalıyor. Dışardan bir manyetik alan uygulanmadığından tamamen plazma kinetik basıncının hakim olduğu en yüksek β değerine ulaşılabilir. Merkezi ohmik ısıtma bobini bulunmadığından küresel tokamaklarda endüktif olmayan akım sürülmesi yüksek oranlarda gerçekleşebilir. Son olarak, çalışırken ortaya çıkan

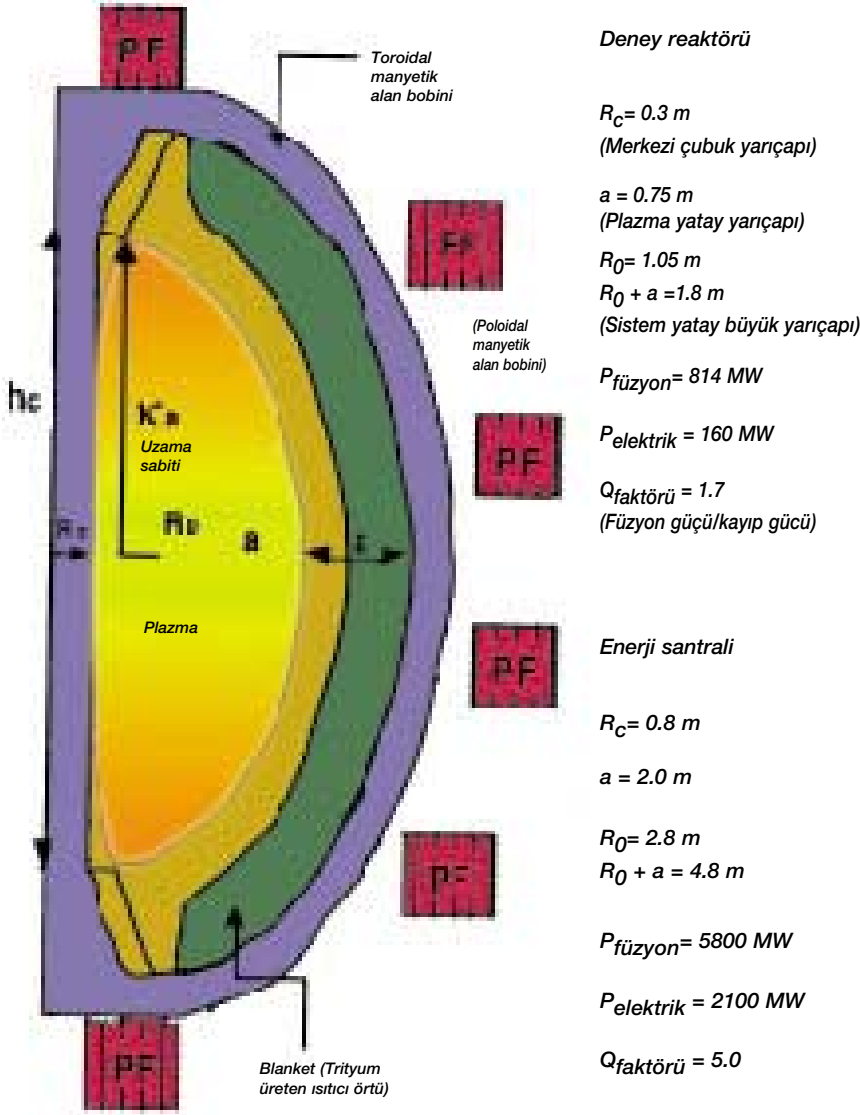
türbülanslar, kendiliğinden oluşan birbirine dik akım ve manyetik alan vektörlerinin $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ kırpma kuvvetiyle kararlı hale dönüştürülebilir.

Şu anda çalışmakta olan JET (Avrupa Birliği) ile TFTR ve DIII-D (ABD) geleneksel tokamak makineleri boyutlarında yeni kurulacak küresel tokamak makineleriyle, 800 MW termal enerji ve 160 MW net elektrik enerjisi elde edilebileceği hesaplanıyor. Böyle bir küresel tokamak makinesi, bir nükleer füzyon reaktörünün bütün çalışma ve sistem özelliklerine sahip bir pilot tesis olarak kabul ediliyor. Bu pilot tesisin boyutları, şu anda mevcut boyutun 2,5 katına çıkarılması halinde, 5,8 GW (milyar watt) füzyon ve 2,1 GW'lık net termal enerji çıkışı, ekonomik bir küresel tokamak reaktörüne ulaşılabilir.

Bir küresel tokamağın pilot tesis ve boyutları 2,5 kez büyütüldüğünde; elde edilen küresel tokamak füzyon reaktörünün parametreleri Şekil 2'de görülüyor. Bu küresel tokamak reaktörüyle, eğer bakır toroidal alan bobin ayakları, süperiletken alanlarla değiştirilebilir ve uygun ekranlamalar yapılabilirse, $D-^3He$ ileri füzyon yakıtının da yakılabilir hale getirilmesi mümkün olacak. Öte yandan, geleneksel tokamak sistemlerinde, plazmanın vakum odasının duvarlarına değerek kirlenmesini önlemek ve sonucunda plazmanın sıcak korunma zamanını yükseltmek amacıyla özenle tasarlanıp kullanılan ve bozuldukça değiştirilen divertor kaset sistemi, küresel tokamaklarda doğal şekilde oluşturuluyor. Böylece, hem plazmanın merkezde asılı tutulması için, pasta kalıbı biçimindeki kabı içten sarmalayan çok sayıda dev toroidal bobin kaldırılıyor; hem de doğal divertor oluşumuyla, boyutlar minimuma indirgeniyor. Bu nedenle, son yıllarda küresel tokamaklarda sağlanan bu gelişmeler göz önüne alınarak, uluslararası işbirliği

Tablo 2 Tokamak Karma Reaktör Tasarım Parametreleri

Füzyon-Füzyon Karma Reaktörü	TFTR	JET	Küresel tokamak
Büyük yarıçap R [m]	2.9	3.0	1.4
Plazma yarıçapı a_p [m]	0.9	1.2	1
Plazma hacmi V [m ³]	45	100	50
Plazma akımı I_p [MA]	2	5	12.54
Toroidal alan B [T]	5	2.8	2.5
Ortalama plazma yoğunluğu $\langle n_{e^+} \rangle$ [10 ²⁰ cm ⁻³]	0.3	0.4	1.6
İyon sıcaklığı T_i [keV]	20	10	10
Füzyon gücü P_{fuz} [MW]	30	15	40
DT yanma süresi [s]	1	2	Süreklili
Ortalama duvar yüklenmesi [MW/m ²]	0.2	0.2	1.02



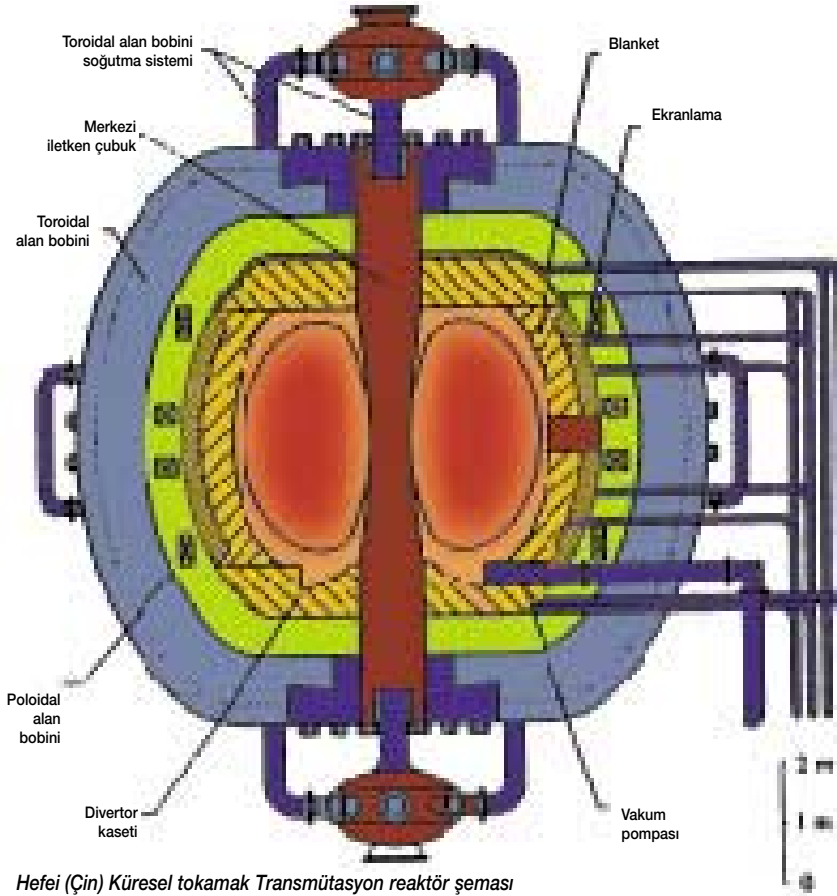
yonu (dönüştürülmesi) ile nükleer elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 200 GW_e idi. 1 GW_e gücünde bir hafif su reaktörü ²³⁵U'nun çoğunu kullanarak, 30 yıllık yarı ömrü sırasında "sarı pasta"nın (U₃O₈) 5600 tonundan ²³⁸U'nun çok az bir kısmını kullandı. Bilindiği gibi, doğal uranyum % 99.27 oranında ²³⁸U ve % 0.72 oranında ²³⁵U içerir. Böylece, mevcut fisyon reaktörleri şu anda uranyumun sadece küçük bir bölümünü kullanıyorlar. Yakıt olarak ²³⁹Pu ve ²³³U fisyon reaksiyonu verebilen (fissionable) yakıtları geliştirmedikçe 2030'dan önce mevcut yakıtlar görevlerini tamamlayacaklar. Doğada bol bulunan ²³⁸U ve ²³²Th gibi verimli yakıtlar, nötronlarla ²³⁸U(n,γ)²³⁹U → ²³⁹Np → ²³⁹Pu ve ²³²Th(n,γ) → ²³³Pa → ²³³U reaksiyonları sonucunda, γ ve β ışınları yayarak ²³⁹Pu ve ²³³U fisil yakıtları ortaya çıkıyor. Böyle bir katkıda bulunmak üzere, Q= 2 düzeyindeki bir küresel tokamak makinesinden DT füzyon tepkimesi sonucu meydana gelen nötronlardan yararlanılabilir.

Milyenyumun ilk on yılı içinde kullanılması planlanan, fisyon-füzyon karma nükleer reaktörlerinde, son yıllarda küresel tokamağın da, bir hacimsel nötron kaynağı olarak kullanılması düşünülüyor. Anılan fisyon-füzyon karma reaktör kavramında; geleneksel fisyon reaktöründen çıkmakta olan actinide'ler ve diğer nükleer artıkların (Np, Am, Cm ve Pu) transmütasyonu (zararsız ya da kısa yarılanma ömürlü izotop ya da elementlere dönüştürülmesi) amacıyla küçük ölçekli küresel tokamak makinelerinin devreye sokulması planlanıyor. Yapılan analizler, makine duvarlarına nötron yüklenmesinin, uygun bir transmütasyon kapasitesi ve etkinliği için, 1 MW/m² düzeyinde tutulabileceğini gösteriyor. Nötron duvar yüklenmesi, çok yakın bir gelecekte 0,5 MW/m² düzeyine kolayca düşürülebilir. Küresel tokamakların blanket güç yoğunlukları 200 MW/m³ düzeyinde oluyor. Küresel tokamağın doğal divertor özelliği de kıyaslanarak; fisyon hızlı üretken reaktörleri, basınçlı su reaktörleri ve hızlandırıcılar gibi diğer sürücülerle karşılaştırmaları yapılmış bulunuyor. Yeni fisyon-füz-

(ABD, Avrupa Birliği, Japonya ve Rusya Federasyonu) çerçevesinde Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (IAEA) desteklediği, büyük boyutlu, toplam maliyeti 6,8 milyar dolar olan ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) deneysel tokamak reaktör projesi geliştirildi. Ancak maliyetinin üyelerin destek gücünü aşması boyutların minimize edildiği küresel tokamaklardaki başarılı sonuçların, bir füzyon reaktörü için yeterliliği kanıtlanıncaya kadar, proje bir süre askıya alındı. Şekil 3'te, mühendislik tasarım çalışmaları tamamlanan ITER tokamak reaktörünün enine bir yarı kesiti görülüyor.

Dünyadaki nükleer füzyon araştırmacıları; daha uzun vadeli füzyon enerji reaktörlerinin gerçekleşmesinden önce kısa vadede nükleer enerjiye katkı amacıyla, halen mev-

cut fisil (bölünebilir) yakıt üretimine ve çok sayıda fisyon reaktör artık ürünlerinin işlenmesine, mevcut füzyon sistemleriyle nasıl yardımcı olabileceklerini düşünüyorlar. Bunun için JET büyüklüğündeki (R₀=2.8 m, a_p=1.0 m) bir füzyon makinesinin DT yakıtıyla 10 keV sıcaklık ve %15-20 lik bir çalışma faktörüyle (duty factor) 0.2 MW/m² düzeyinde bir duvar yüklenmesi elde edilebileceğini hesapladılar. Bu, yılda 250 kg'lık aktinidin işleneceği anlamına geliyor. Eğer makinenin boyutu R₀=4 m'ye çıkarılırsa, sene de 100 kg'lık fisil yakıt üreten 0.42 MW/m² duvar yüklenmesi ve %50'lik çalışma faktörüne ulaşılır. 2015-2020 yılları arasında bu tip makinelerin gerçekleşmesi amacıyla özellikle malzeme araştırmacılarına büyük görev düşüyor. ABD'de 90'lı yıllarda, fisil yakıtların transmütas-



yon karma reaktörlerinde, yüksek düzeyde nükleer artık transmutasyonu için, bir sürücü olarak 10-100 MW'lık alçak bir füzyon gücü ile, D-T reaksiyonları sonucu kuvvetli bir nötron kaynağı olarak küresel tokamaklar kullanılıyor. Fiyon-füzyon karma reaktör blanket tasarımında, 10-100 düzeyinde bir blanket enerji katlanmasına erişebilecek şekilde bir nötron akısı alınıyor. Nötron duvar yüklenmesi, 1 MW/m² ve hatta

ilerde, 0,5 MW/m² olduğunda, blanket içinde şiddetli termal nötron akısı $>5 \times 10^{15}$ n cm⁻² s⁻¹ sağlanacaktır. Şekil 4'te Çin bilim adamlarının transmütasyon amacıyla kullanmak üzere tasarladıkları ve 2002 yılında çalıştırmayı planladıkları Hefei Küresel Tokamak makinesi ile makinenin blanket şekillenmesindeki malzeme kompozisyonu görülüyor.

Bir fiyon-füzyon karma reaktör modelinde, nükleer teknoloji ve

plazma parametrelerinin, daha ileride gerçekleştirilecek bir nükleer füzyon reaktörü için gerekenden çok daha düşük düzeylerde tutulabileceği öne sürülüyor. Şu anda, yaklaşık 10 MW füzyon gücü üretmekte olan JET ve TFTR geleneksel tasarımı tokamakları ve yapımı sürdürülmekte olan Mega Ampere Spherical Tokamak MAST (İngiltere) ve National Spherical Tokamak (NSTX) gibi küresel tokamak makineleriyle; reaktör çekirdeği, divertör, ilk duvar, kaplama tuğlaları, transmütasyon blanket sistemi ve toroidal alan bileşenleri üzerinde gerekli düzeltmeler sonucunda bir karma reaktör tasarlanabilir. Tablo II'de JET ve TFTR ile, kurulacak bir küresel tokamağın fiyon-füzyon karma reaktörü olarak değişik parametreleri veriliyor.

Blanket olarak, yüksek düzeyde nükleer artık transmütasyonu ve füzyon reaktör çekirdeğinde kullanılmak üzere, trityum doğurganlığı gibi iki fonksiyonu bir arada başaran bir blanket tasarlanıyor. Blanket üzerinde oluşan yüksek sıcaklık, hızlı fiyon reaktörlerinde kullanılan mevcut teknoloji yardımıyla giderilebilir.

Sonuç olarak, füzyon uzmanlarının yapmış olduğu bütün bu değerlendirmeler dikkate alındığında; son zamanlarda sıkça rastlanan, Türkiye'de yeni bir fiyon nükleer reaktörünün kurulması ile ilgili tartışma programlarında, bazı konuşmacıların dile getirdikleri gibi, füzyon gücünün kullanılmaya başlanması için 50-60 yıl(!) gibi çok uzun bir zamana gerek kalmayacağına; önce kısa sürede, 21. yüzyılın ilk on yılı içinde, küresel tokamakların fiyon-füzyon tipi karma reaktörlerde kullanılmaya başlayacağına ve daha sonra uzun dönemde, milenyumun birkaç on yılı içinde, yepyeni teknolojilerle, tek başına nükleer füzyon reaktörü olarak devreye gireceğine kesinlikle inanılıyor.

Ayten Sinman* - Sadrettin Sinman**

*TAEK Nükleer Füzyon Laboratuvarı

**ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,

Kaynaklar:

[1] F. Najmabadi, et al., Fusion Energy, Vol. 3, IAEA (1997) 383.

[2] R.D. Stambaugh, et al., ibid., 395.

[3] L.J. Qiu, et al., ibid., 701.

[4] S. Sinman and A. Sinman, 26th EPS Conf. on Cont. Fusion, Vol. 23], Conf. CD (1999) P1.111.

