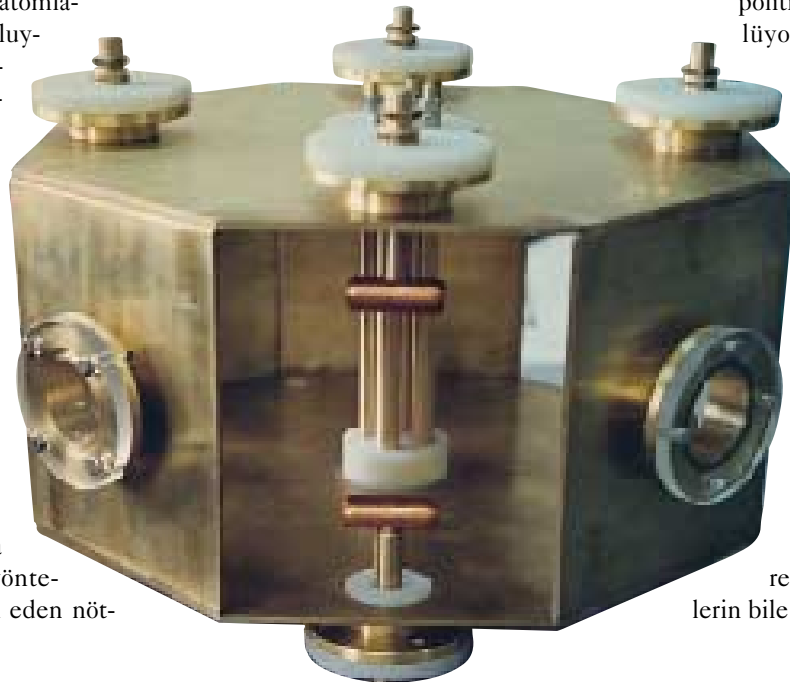


Füzyonda Türk Modeli

Doğrusunu söylemek gerekirse, insan "Acaba yanlış mı duydum" diye geçiriyor kafasından. Nükleer füzyon teknolojisi ve Türkiye!.. Dünyanın en donanımlı laboratuvarlarında, neredeyse sınırsız parasal ve teknolojik olanaklarla desteklenen seçme bilim adamları, ucuz, temiz ve tükenmez bir enerji kaynağı yaratacak makinelerin tasarımıyla uğraşıyorlar. Yapmaya uğraştıkları, koskoca yıldızları taklit etmek. Daha açıkçası, yıldızların merkezlerinde milyonlarca derece sıcaklıkta gerçekleşen süreçle atomları birleştirme (füzyon) yoluyla enerji elde etmek. Gerçi görmüş olduğumuz gibi atom çekirdeklerini birleştirme yerine parçalayarak da (filyon) enerji sağlanabiliyor. Üstelik bu yöntem, tepkimenin başlaması için çok yüksek sıcaklıklar da gerektirmiyor. Çünkü atom çekirdeklerini birleştirmek için, aralarında aynı elektrik yükünden kaynaklanan itim gücünü yenecek bir enerji gerekiyor. Oysa atomun parçalanması yönteminde bu sürece aracılık eden nöt-

ron, elektrik yükü taşımadığından, yenmesi gereken bir itim gücüyle karşılaşmıyor ve dolayısıyla daha düşük enerjilerde de görevini başarıyor. Parçalanma yönteminin kolaylığına karşılık bir sakıncası, ortaya çıkardığı radyoaktif atıkların çok ve uzun ömürlü olmaları. Füzyon enerjisini, güçlüğüne karşın çekici kılsa, görece temiz, atıklarının da az olması. Üstelik hammaddesi de bol. Radyoaktif uranyum

Türkiye'de geliştirilen küresel tokamak modelinin akı koruyucusu

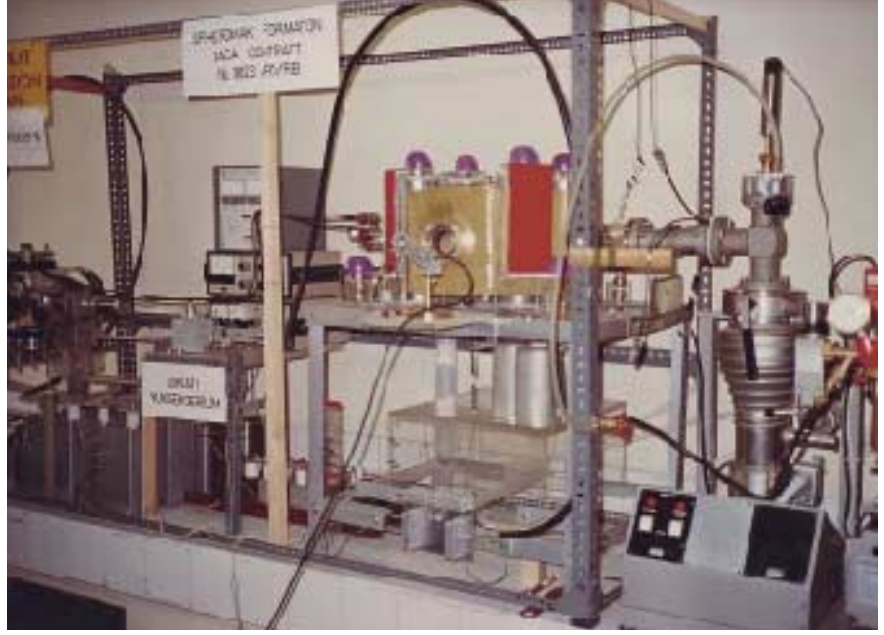


yerine, evrende en bol bulunan element olan hidrojenin ağır izotopları döteryum ve trityumu birleştirerek, helyuma çeviriyor. Yani filyonun birtakım zararlı atıkları olmasına karşılık, füzyonun temel ürünü, zararsız (hatta önemli kullanım alanları bulunan) helyum gazı. Döteryum, su içinde 1/6000 oranında bulunan bir madde. Trityum ise, radyoaktif bir madde olan lityumdan elde ediliyor.

Füzyon, sayılan nedenlerden ötürü bilim adamlarının, tasarımcıların, hatta politikacıların düşlerini süslüyor. Ancak bu koşulları yeryüzünde oluşturmak son derece güç. Dahası, son derece pahalı. Nedeni, istendiği gibi enerji elde edilebilmesi için, hidrojen çekirdeklerinin birleşmesi sürecinin devamlı olması gerekiyor. Oysa günümüzde varolan deney reaktörlerinde füzyon, çok kısa süreler için sağlanabiliyor. Enerji üretimi koşullarına yaklaşabilecek çapta büyük reaktörler, gelişmiş ülkelerin bile tek başına ayırabilecek-



Üstte, İstanbul Üniversitesinde 1960-1965 yılları arasında geliştirilen birinci tokamak makinesi (hızlı dinamik sıkıştırımlı tokamak). Sağda, 1980'lerde geliştirilen birinci Spheromak.



leri fonların çok ötesinde yatırım gerektiriyor. Hatta, bu alanda iddialı ülkeler bile çok büyük ölçekli füzyon araştırma projelerinin yükünü ortaklaşa paylaşmakta çekingen davranıyorlar. Oysa anlaşılıyor ki, Türkiye de füzyon araştırmaları konusunda zengin sayılabilecek bir deneyime sahip. Anlaşılmasaydı, bu çalışmaların neden 35 yıldır kamuoyunun dikkatinden kaçmış olduğu. Gerçi enerji üretmede, birlikte getirdiği sorunlara karşın atom çekirdeğini parçalama yönteminin (fisyon) sağladığı başarının, füzyon araştırmalarını, yalnızca Türkiye'de değil, tüm dünyada geri plana ittiği bir gerçek. Ancak fisyon enerjisinin yol açtığı sorunlar, sanayileşmiş, yeterli teknoloji birikimine sahip ülkelerde görece temiz füzyon enerjisini yeniden gündeme getirmiş görünüyor. Kuşkusuz, Türkiye'nin parasal ve teknolojik olanakları, bu ülkelerinkine karşılaştırılacak gibi değil. Kullanılan ve sürekli olarak geliştirilen füzyon makineleri de, öyle apartman boyutlarında, görkemli, şatafatlı şeyler değil. Üniversite laboratuvarlarının ve daha sonra da Ankara yakınlarındaki (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) TAEK Nükleer Araştırmalar ve Eğitim Merkezi'nin sınırlı teknik donanım ve parasal kaynaklarıyla gerçekleştirilmiş şeyler. Görünümleri, üzerlerindeki etiketlere pek uymuyor. Delikli profil raflar üzerine dizilmiş, sıradan görünümlü birkaç aygıt. Bir reaktörden çok, iyicesinden bir elektrikçi dükkanının tanı aygıtlarını andırıyor. Reaktörün kendisi,

60 litre hacimli, sekizgen biçimli, pirinçten yapılmış bir kutu. Kenarların birleştiği yerlerde kaynak izleri görünüyor. Gözlerinizin göremediği, ancak varlığını kolayca algıladığınız şeyse on yılların emeği, heyecanı, kuramcısından, teknisyenine değin herkesin alın teri.

Sonuç, bir "küresel tokamak". Ama küçüklüğü, dağınık görünümü aldatıcı. Aslında önemli özellikleri olan bir makine. Öyle ki, uluslararası füzyon enerjisi panellerinde adı geçiyor. Varolan makinelere bir alternatif olarak tanımlanıyor. Hatta tümüyle Türk tasarımcılarının beyin ürünü olan parçalarından biri, İtalyan araştırmacılarca örnek alınmış. Füzyon enerjisi elde etmek için iki genel yaklaşım var. Bunlardan biri, son yıllarda lazer teknolojisinin gelişmesiyle gündeme gelip yandaş toplamaya başlayan ve "eylemsiz" (inertial) füzyon denen teknik. Bilye biçimindeki küçük yakıt toplarının çok güçlü lazer atımlarıyla bombardıman edilerek sıkıştırılması ve böylece atom çekirdeklerinin birleştirilmesi hedefleniyor. Ancak bu, çok güçlü lazerler gerektiren ve ekonomik yararı kuşku götürür pahalı bir yol. Öteki yöntemse, elektronları yörüngelerinden kopacak biçimde enerjiye hale gelmiş (iyonize olmuş), dolayısıyla çekirdekteki protonun artı elektrik yükünü taşıyan hidrojen izotoplarını, yani plazmayı sıkıştırarak füzyonu sağlamak. Teknik, çok güçlü elektrik akımlarıyla hızlanıp ısınan ve manyetik alanlarca tepkime odasının duvarlarına

değip soğuması önlenen plazma içindeki döteryum ve trityum izotoplarının birleşerek helyuma dönüşmesi ve bir nötron yayımlaması temeline dayanıyor. En başarılı ve enerji üretimi için en çok gelecek vaat eden manyetik füzyon aracı, tokamak diye adlandırılıyor. Rusça "toroid kamera magnet katushka" sözcüklerinin kısaltılmış biçimi. Anlamı "toroidal (simit biçiminde) oda ve manyetik bobin". Düzeneci geliştiren, L. A. Artsimovich adlı bir füzyon fizikçisi. 1965 Eylülünde İngiltere'de Culham Laboratuvarı'nda yapılan bir uluslararası toplantıda buluşunu açıklamış. Belirleyici özelliği, simit, ya da pasta kalıbı biçiminde bir vakum odası çevresinde yapılmış olması. Hedeflenen enerji üretimi, döteryum ve trityum iyonlarının birleşip helyuma dönüşmesi sürecinde ortaya çıkan (ve elektrik yükü taşımadıkları için manyetik alanlarca tutulamayan) nötronların oda duvarına çarpıp ısıtılması yoluyla elde ediliyor. Nötronlar düz bir hat izleyerek halka biçimli reaktör kabının duvarlarından geçip, bu kabı çerçeveyen "blanket" (battaniye = ısıtıcı örtü) içindeki lityumu bombardıman ederek trityuma dönüştürüyor. Sıcak trityum, reaktör kabındaki plazmaya karışarak soğumasını önlerken, reaktör çerçevesine ve ısıtıcı örtüye bırakılan enerji, ısı değiştirgeci aracılığıyla alınarak türbinlere veriliyor ve buhar yoluyla elektrik enerjisine dönüştürülüyor. Bu süreçte sorun, nötronların kısa sürede reaktör çerçevesini radyoaktif duruma getirmesi.

Füzyon yoluyla enerji üretilmesinde, halka biçimli tepkime odasında havada asılı durumda bulunan plazmanın sıcaklığını koruması ve böylece füzyonun kesintisiz sürmesi büyük önem taşıyor. Çalışır durumdaki bir füzyon reaktöründe, ortaya çıkan enerjinin bir bölümü, halkaya yeni yakıt (döteryum ve trityum) doldurulurken plazmanın soğumasını önüyor. Ancak reaktör ilk devreye girdiğinde, ya da geçici olarak kapandıktan sonra yeniden çalışmaya girerken, plazmanın 100 milyon °K'nin üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekiyor. Ancak böylece çekirdekler, içlerindeki artı elektrik yüklü protonlar arasındaki itme gücünü yenecek bir enerjiye kavuşturuluyor. Bu sıcaklık, yıldızların merkezlerinde füzyon tepkimeleri için gerekli sıcaklıktan kat kat yüksek. Örneğin Güneş'in merkezindeki sıcaklık, yaklaşık 15 milyon derece olarak hesaplanıyor. Bu görece düşük sıcaklıkta füzyon gerçekleşmesinin nedeni, atomların, muazzam kütleçekiminin etkisiyle çok yoğun biçimde sıkışmış durumda bulunmaları. Reaktörlerde çok daha



Odaklanmış plazma akım kanalının hacmini büyütmek için tasarlanıp geliştirilen çok kutuplu yoğun plazma odaklama elektrodu.

yüksek sıcaklık gereksinmesinin nedeniyse, enerji kayıpları.

Bugünkü durumlarıyla gerek tokamaklarda, gerekse öteki manyetik füzyon deney düzeneklerinde, plazmanın sıcaklığını korumak için yeterli enerji düzeylerine çıkılamıyor. Dolayısıyla aygıtlar çok kısa süreli atımlar biçiminde çalışıyor ve her atımdan önce plazmayı yeniden ısıtmak gerekiyor. Ancak 100 milyon derece düzeyinde bir

sıcaklığı oluşturmak kolay bir iş değil. Bunun için birkaç yöntemin bir arada kullanılması gerekiyor. Bunlardan biri, birkaç milyon amper gücünde, plazma içinden geçen bir akım. Poloidal alanı yaratan akım, aslında plazmayı da ısıtıyor. Buna ohmik (ya da dirençsel) ısıtma deniyor. Bu tür ısıtma, bir elektrik ampulünün içinde ya da bir elektrikli ısıtıcıda gerçekleşen ısınmayla aynı. Deney reaktöründe bu yolla ortaya çıkan ısı, akımla ve plazmanın direnciyle ilintili. Ancak ısıtılan plazmanın sıcaklığı arttıkça direnç azalır ve bu nedenle ohmik ısıtma etkinliğini yitirmeye başlar. Bir tokamakta ohmik ısıtma yöntemiyle yaratılabilen maksimum sıcaklık 20-30 milyon dereceyi geçmediği için ek yöntemler de kullanılıyor. Bunlardan biri, plazmanın bulunduğu tepkime halkasına nötr parçacık demetleri enjekte etmek. Nötr (iyonize olmamış, dolayısıyla elektrik yükü taşımayan) atomlar, ohmik olarak ısıtılmış ve manyetik alanlarla hapsedilmiş plazmaya püskürtüldüğünde, hemen iyonize olurlar ve bunlarda manyetik alanca hapsedilir. Yüksek

Türkiyede Yapılan Deneysel Nükleer Füzyon Çalışmaları

Dünyadaki kontrollü nükleer füzyon üzerindeki araştırmalar, ilk kez 1958 yılında Cenevre'de düzenlenen, Birleşmiş Milletlerin atom enerjisinin barışçıl amaçlarla kullanılması ikinci konferansında tartışıldı ve zamanın en büyük füzyon makinesi olan, İngiltere'nin Harwell Laboratuvarında geliştirilen ZETA'ya büyük ilgi gösterildi. Konferansta aynı zamanda, nükleer füzyonun ekonomik bir enerji çıkışına ulaşılmasından önce, sıcak ve yoğun plazmaların özelliklerinin daha iyi anlaşılması gereği vurgulandı. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (IAEA) 1961'de Salzburg'da düzenlediği 1. Uluslararası Konferanstan sonra, İngiltere Atom Enerjisi Kurumu desteğiyle Culham'da 1965 yılında düzenlenen 2. IAEA Konferansında Rus bilim adamı L. A. Artsimovich ve arkadaşları, Rusca kelimelerin baş harflerinden türetilmiş **Tokamak** kavramını ortaya attılar. Daha sonraki yıllarda dünyadaki birçok ulusal füzyon laboratuvarlarında tokamak araştırmalarına başlandı ve aralarında bilgi alışverişi amacıyla işbirliği giderek yoğunlaştı. Bunun bir sonucu olarak, 9 Kasım 1991'de, Avrupa Birliğinin ortak projesi JET (Joint European Tokamak)'de, iki yıl sonra Amerika'nın Princeton laboratuvarındaki TFTR (Thermonuclear Fusion Test Reactor)'de ve 1995 yılında da Japonya'nın JT-60U'de olmak üzere üç ayrı tokamak makinesinde, füzyon gücü reaktörüne ilk adım olarak, sistemdeki giriş ve kayıp enerjilerinden daha büyük bir enerjinin üretildiği anlamına gelen, Q=1 düzlüğe çıkış (breakeven) noktasına ulaşılarak, yeryüzünde kontrollü bir yapay güneş oluşturulması yolunda, insanlığın temiz ve

tükenmez bir nükleer enerjiye kavuşabileceğini gösteren, büyük bir mesafe katedilmiş oldu.

Türkiye'de, nükleer füzyon araştırmalarına, dünyadakine paralel olarak 1960 yılında, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Atom ve Çekirdek Fiziği Kürsüsünde, şu anda kendisini saygı ve rahmetle andığımız, değerli ve onurlu hocamız, merhum Prof. Dr. Fahir Yeniçay önderliğinde başlandı. O tarihte henüz tokamak kavramı tanımlanmamış olmakla beraber, hâlâ şu anda güncelliğini koruyan, önce; eksenel toroidal manyetik alan uygulanmadan, Toroidal Dinamik Pinç (TDP) makinesi [1] ve daha sonra; programlanabilir manyetik alanlı Yüksek Beta Tokamak (YBT) makinesi [2] çalışmalarına başlandı. Bu arada, eğitim faaliyetleri kapsamında, üç M.Sc. ve bir Ph.D. çalışması da sonuçlandırıldı. Ülkemizde ilk kez bu konuda çalışma başlatıldığı için, bilgi alışverişi amacıyla, Max Planck Enstitüsü-Almanya, Cambridge Üniversitesi, Culham Laboratuvarı-İngiltere ve Nükleer Araştırma Merkezi-Polonya gibi zamanın önde gelen laboratuvarları ile yoğun bilgi alışverişi faaliyetlerine girişildi. Unutmamak gerekir ki, o dönemde; Amerika, Avrupa, Japonya ve Rusya'daki tokamaklar ile TDP ve YTP makinesinin standart deneysel verileri açısından pek büyük fark yoktu.

Türkiye'de ilk ve Dünya'da yedinci sırayı alan TDP makinesinin; toroidal pyrex vakum odası, 35 cm büyük ve 5 cm küçük yarıçaplarında idi. Döteryum gazı kullanarak, TDP'de elde edilen tipik deneysel referans verileri: primer akımı 25-50 kA, plazma akımı 10-16 kA, elektron yoğunluğu 10^{14} -

10^{15} cm⁻³, electron sıcaklığı 40-70 eV, poloidal alan 2-3.5 kG, plazma korunma zamanı 45 µs, toplam giriş enerjisi 2.7 kJ (60 MW darbe kipi), beta (plazma kinetik basıncı/manyetik baskı) %40-50, verim %18-30, füzyon enerjisi 490-810 J (10.9-17.8 MW darbe kipi), nötron yoğunluğu $\approx 10^4$ cm⁻³ (45 µs)⁻¹, nötron enerjisi 2.48 MeV, plazma akım kanalının biçimi helisel ve kararsızlık m=1 kipi şeklinde idi.

Yapımı 1966 yılında tamamlanan YBT makinesinin toroidal kuartz vakum odası ise, 50 cm büyük ve 6 cm küçük yarıçaplı idi. Elde edilen tipik deneysel referans verileri: kullanılan gaz döteryum, primer akımı 25-50 kA, plazma akımı 35 kA, elektron yoğunluğu 10^{14} cm⁻³, electron sıcaklığı 60-90 eV, toroidal manyetik alan 3.5 kG (tersine dönmüş), hilal ve eğri alan şekillenmeleri, poloidal manyetik alan 2.5 kG, plazma korunma zamanı 150 µs, toplam giriş enerjisi 2.7 kJ (18 MW darbe kipi), beta %20-30, verim %22-30, füzyon enerjisi 494-943 J (3.96-6.3 MW darbe kipi), nötron yoğunluğu $\approx 6 \times 10^4$ cm⁻³ (150 µs)⁻¹, nötron enerjisi 2.52 MeV ve kararsızlık m=0 kipi idi. Karşılaştırma sonucunda, hilal biçiminde programlı manyetik alanlar kullanılması halinde, geleneksel alanların kullanıldığı duruma göre, çok daha uzun kararlılık zamanlarına ulaşılabilceği deneysel olarak kanıtlandı.

1970 yılında deneysel füzyon çalışmalarına Ankarada, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Nükleer Füzyon Laboratuvarı'nda Ortadoğu Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümüyle işbirliği çerçevesinde; 775 sayı-

enerjili iyonlar, çok sayıda çarpışma sonucu enerjilerinin bir bölümünü plazma parçacıklarına naklederek plazma sıcaklığının yükselmesini sağlarlar.

Sıcaklık, manyetik sıkıştırma yoluyla da yükseltilir. Çünkü ani bir sıkışma gazı ısıtır. Aynı biçimde plazma sıcaklığı, kendisini hapseden manyetik alanın artırılması yoluyla da yükseltilebilir. Bir tokamak sisteminde bunun en kolay yolu, plazmayı, manyetik alanın daha güçlü olduğu bir yere, yani halkanın ortasına çekmektir. Plazmanın sıkıştırılması, iyonları da birbirine yaklaştıracığından, bir füzyon reaktörü için gerekli yoğunluğun sağlanmasını da kolaylaştırır.

Nihayet plazmanın sıcaklığını yükseltmek için radyo frekansı yönteminde de yararlanılıyor. Torus (plazmanın içinde bulunduğu halka) dışına yerleştirilen osilatörler, yüksek frekanslı radyo dalgaları üretiyor. Dalgalar uygun frekanstaysa enerjileri, plazma içindeki elektrik yüklü parçacıklara naklediliyor. Enerjisi artan bu parçacıklar, başka parçacıklara çarparak

plazma sıcaklığının yükselmesini sağlıyor.

Tüm bu yöntemlere karşın füzyon reaktör tasarımcıları, plazmanın sıcaklığını korumakta zorlanıyorlar. Nedeni, manyetik alan çizgilerinin tümüyle aynı olmaması. Reaktör kabı içindeki plazma, Lorentz kuvveti ile hapsediliyor. Bunun anlamı, elektrik yüklü parçacıkların, manyetik alan çizgilerini izleyerek hareket etmeleri.

Ama bir tokamak içindeki alanda kıvrılan manyetik alan içinde, alanın genel doğrultusunu izleyen "iyi" çizgilerin yanı sıra, bu doğrultudan sapan ve plazma içindeki parçacıklarda kaçığa neden olan "kötü" çizgiler de var.

TAEK, Nükleer Araştırma Laboratuvarı'ndaki küresel tokamak makinesinin son biçimi.



çin bir kondansatör bataryası, yağ tanklı Tesla tipinde bir transformatör, bir darbe biçimlendirme iletim hattı, kontrollü iki kıvılcım aralığı ve bir Alan Emisyonu Diyod'undan (AED) ibarettir.

Yükleme gerilimi 150 kV, elektron demet akımı 3.5 kA, elektron demet süresi 20 ns olan Mini-RED-1 makinesinden elde edilen RED'in, atmosferdeki yayılma karakteristiğinin saptanması amacıyla, termoluminesans dozimetreler kullanılarak, yatay ve düşey bileşenleri ölçüldü ve radyasyon histerizisleri incelendi. Böylece, atmosfer basıncında, enine oluşturulan elektrik alanlar yardımcıyla, denetimli ve yüksek akımlı boşalmalar gerçekleştirilerek, TEA lazerlerinin yapılması için ilk adım atılmış oldu. Bu kapsamda, darbe rejiminde çalışan bir argon-iyon lazeri de gerçekleştirildi [5].

Özel tasarımı, yapraklı (foil) ve yapraksız (foilless) AED ile; reflex triyod, polietilen vakum odası ve farklı diyod polarizasyonları gibi yapılarla, iyon hızlandırması mekanizması deneysel olarak incelendi. Yüksek empedanslı ve yapraklı AED için; elektrik alan ile akım limitlemesi arasındaki

Füzyon fizikçileri, bu kaçığı en aza indirmek için yeni tasarımlar geliştiriyorlar. Bunlar arasında giderek popüler duruma gelen birisi, halka biçimli reaktör kabının çevrelediği merkezdeki bobini küçültmek; yani bir anlamda, simitin ortasındaki deliği daraltmak. Bunlara küresel tokamaklar deniyor. Bu tasarımda "iyi" manyetik alan çizgileri arttığından, pahalı bobinlerle üretilen akıma olan bağımlılık belli ölçüde azalıyor. Bu da daha küçük ölçeklerde deney reaktörleri yapılmasına olanak sağlıyor. Hatta merkezdeki bobinin tümüyle ortadan kaldırıldığı "spheromak" (küremak) diye adlandırılan makineler de yapılmaya başlandı.

Türkiye'nin kurama katkısı burada devreye giriyor. Otuz beş yıl süren çalışmaların ürünü, küçük, ama belki de sürekli ve kontrollü füzyon hedefinin daha kısa sürede ve daha ucuza gerçekleştirilmesine katkıda bulunacak bir makine. Ana ünitesi, başta da belirtildiği gibi 60 litre hacminde bir pirinç odacık, ya da teknik adıyla bir akı koruyucu. Oluşturabildiği plazma sıcaklığı da boyutlarıyla orantılı. Yalnızca 70

korelasyon saptandıktan sonra, yüklü iletim hattı, işaret ve dalga şekillenmeleri ile AED nun fizikini tanımlayan, sistemin bir nümerik modeli yapıldı. Daha sonra, Mini-RED-I makinesinin gücünün yükseltilmesi amacıyla Mini-RED-II makinesinin kurulması için, yapraklı ve yapraksız AED, geçitli (gated) kipi özel yüksek gerilim yağ tankı, Tesla transformatörü, gliserin yalıtımlı darbe biçimlendirme iletim hattı ve dereceli halkalı (graded discs) vakumla yalıtılmış AED'un ayrı ayrı yapımları tamamlanarak, yükleme gerilimi 350 kV, elektron demet akımı 3.5 kA ve süresi 20 ns olan Mini-RED-II makinesi kuruldu ve çalıştırıldı. Mini-RED-II makinesi, yersizlikle nedeniyle sökülerek, bu durumda bekletildi ve şu sırada OD-TÜ Fizik Bölümünde yeniden kurulması için hazırlıklar devam etmektedir.

1980-1985 yılları arasında, DPT desteğiyle, kullanılan gazın türüne bağlı olarak bazı nükleer taneciklerin (proton, döteron, alfa, nötron) hızlandırılması amacıyla "Çok Yönlü bir Nükleer Tanecik Üretici" başlığı altında bir Yoğun Plazma Odağı (Dense Plasma Focus) (YPO) projesi üzerinde çalışıldı [6]. Füzyon düzenekleri arasında YPO sistemleri, geleneksel hızlandırıcılara nazaran çok daha basit şekilde nükleer tanecik hızlandırma olanağına sahip olduklarından ve hatta çok yüksek güçlü YPO sistemleri ile güçlü lazerlerin sürülmesi ve fisyon yakıt transmutasyonu uygulamalarında kullanıldığından büyük önem taşır. Oldukça basit bir yapıya sahip olan YPO sistemi, bir kondansatör bataryasında toplanmış olan enerjinin özel yapı, eşeksenli bir elektrod sisteminde denetimli şekilde boşaltılması esasına dayanır.

lı AEK projesi olan "Magnetron Enjeksiyonlu bir Demet-Plazma Sistemi" geliştirilerek, enerjik elektron demeti yardımı ile plazmanın oluşturulması ve ısıtılması mekanizmaları incelendi [3]. Yerli yapım, eş eksenli elektrostatik mercekle ve bölgesel manyetik alanlı elektron demet sisteminde; sürekli şekilde oluşturulan enerjik elektron demetinin boyuna enerjisi en çok 1.5 keV olup demet hidrojen gazı içinden geçirildiğinde elde edilen plazmanın yoğunluğu ise 10^7 cm^{-3} ile 10^{10} cm^{-3} arasında değişti. Demet yoğunluğu, deneysel koşula bağlı olarak, $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ e kadar yükseldi. Deneyler sırasında, plazma frekansı, elektron siklotron frekansı ve iyon siklotron frekansı ile armoniklerine yakın, sırasıyla karakteristik ω_e , ω_e ve ω_i frekansları, daha sonra bu frekansların sönümü saptanarak, plazma dalgası ile manyetik alan etkisiyle oluşan iyon siklotron dalgalarından, plazmaya enerji aktarımı yolu ile, plazmanın elektron ve iyon sıcaklıkları olarak 100 eV ve 2 eV'a yakın değerler bulundu.

1974-1975 dönemi, IAEA'nin araştırma burusu ile Hollanda'nın Amsterdam FOM Enstitüsündeki, Rölativistik Elektron Demeti (RED) ile plazmanın ısıtılması deneylerine katıldıktan sonra yurda dönüşte, kolektif iyon hızlandırması, kısa süreli ve güçlü X ışını üretimi, enine uyarılmış atmosferik (TEA) ile serbest (free) elektron lazerlerinin tetiklenmesi ve güçlü mikro-dalga üretimi gibi çok geniş bir uygulama alanı bulunan RED teknolojisinin yerli olanaklarla yurdumuza kazandırılması amacıyla incelemeler yapıldı. Bu konuda eğitim ile birlikte RED uygulamaları amacıyla bir RED Tesla Hızlandırıcı (RTH) sistem olan Mini-RED-I projesine başlandı [4]. RTH; enerji birikimi



Küresel tokamağın deney verilerini kullanarak çizdirilmiş enine akım halkaları.

eV; ya da 810 000 °K dolaylarında. Bu durumuyla, bırakın kontrollü füzyonu, bir nötron kaynağı olması ve üniversite öğrencilerine plazma deneyleri konusunda olanak sağlamasının ötesinde, pratik bir kullanımı yok. Ancak bu halile bile kendisine uluslararası füzyon topluluğu içinde bir isim yapma yolunda. Marifeti, ohmik ısıtma ve bunun için gerekli dev transformatörler ve bobinler gerekmeden de bir küresel tokamak oluşturması. Yapılan, 1 milyon amper gibi yüksek akımlı bir merkezi iletken çubuk yerine, Türk tasarımı, hilal biçimli plazma topları kullanılarak yüksek akımlı merkezi plazma kuşak-

ları oluşturulması. Buluşun patenti, füzyon çalışmalarına on yıllarını vermiş olan Profesör Dr. Sadrettin Sinman ve eşi Doç. Dr. Ayten Sinman'a ait.

Bu makinenin öncülü olan Alternatif Küresel Tokamak (AST) bile uluslararası füzyon toplantılarında tartışıldı ve büyük teknik ve mali olanaklara sahip sanayileşmiş ülkelerin geliştirdiği örneklerin yanı sıra alternatif bir model olarak kabul gördü. Yeni tasarımı, özellikle hilal biçimleri nedeniyle "C-topları" diye adlandırılan plazma enjektörleriyle ve ohmik ısıtma olmaksızın toroidal akım oluşturulması yöntemiyle gene uluslararası ilgiye odak oldu. Yeni İtalyan küresel tokamak tasarımlarında da, merkezi çubuk yerine plazma toplarının yer aldığı belirtiliyor. Gene "çok kutuplu yoğun plazma odaklama sistemi" (multipole dense plasma focusing system) adıyla geliştirilen ve odaklanmış plazma akım kanalının hacmini büyütmede kullanılan bir elektrod sistemi de orijinal bir katkı.

Küresel tokamaklar için ortaya çıkarılan Türk seçeneği, daha önce de

değindiği gibi yalnızca bir modelleme. Füzyon modellemeleri üzerinde çalışan başka ülkeler de var. Brezilya, Çek Cumhuriyeti, İran, İspanya, ve Portekiz bunlar arasında. Ancak bu ülkelerden şimdiye değin seçenек oluşturabilecek bir model çıkmamış. Ancak bu, Avrupa Birliği üyeliğine hazırlanan Türkiye'yi geride bırakmayacakları anlamına gelmiyor. Çünkü olması gerektiği gibi füzyon araştırmaları için bir program belirlemişler ve bunun hayata geçirilmesi için gerekli kurumsal, akademik ve teknik altyapıyı hızla oluşturmaya başlamışlar. Türkiye ise, şimdilik böyle kısa, orta ve uzun dönemli dilimlere bölünmüş, kapsamı, odağı, hedefi belli bir füzyon araştırmaları programını oluşturamamış görünüyor. Profesör Sadrettin Sinman, bu alanda bir hamlenin "olmazsa olmaz" koşulları arasında, böyle bir programın ötesinde, disiplinlerarası bir işbirliğini ve değişik bilim dallarından uzmanları bünyesinde toplayacak bir araştırma yapısı ve laboratuvarları sayıyor. Gene Sinman'lara göre, daha serbest bir üniversite ortamı ve deney

Proje kapsamında, tamamen yerli olanaklarla Mather tipinde geliştirilen YPO-I sistemi, 1.0 kJ'lük kondansatör bataryası, denetimli kıvılcım aralığı, iç ve dış elektrod yarıçaplarıyla uzunluğu değiştirilebilen eş eksenli hızlandırıcı tüneli ile gerekli elektronik denetim ve ölçümler için; hızlı manyetik sonda, Rogowsky bobinleri, Faraday kabı, ışıltama sayacı, polaroid kamera, osiloskop gibi alt tanı sistemlerinden ibarettir. Yoğun plazma odağı boşalması fazında; farklı plazma tabakalarını şekillendirmek için, değişik anod ve katod elektrod geometrileri kullanıldı, batarya gerilimi ve gaz basıncı arasındaki ilişki sistematik deneyler sonucunda saptanarak, anod üzerindeki hasar desenlerinden, plazma odağındaki iyonlara göre ters yönde hızlanan elektronlarda rölativistik özellikler görüldü. Sistemden RED'in muhtemel çıkış bölgeleri saptanarak, YPO sistemlerinin aynı zamanda 2-3 MeV enerjili, darbe tipi RED üretici olarak da kullanılabilceği anlaşıldı.

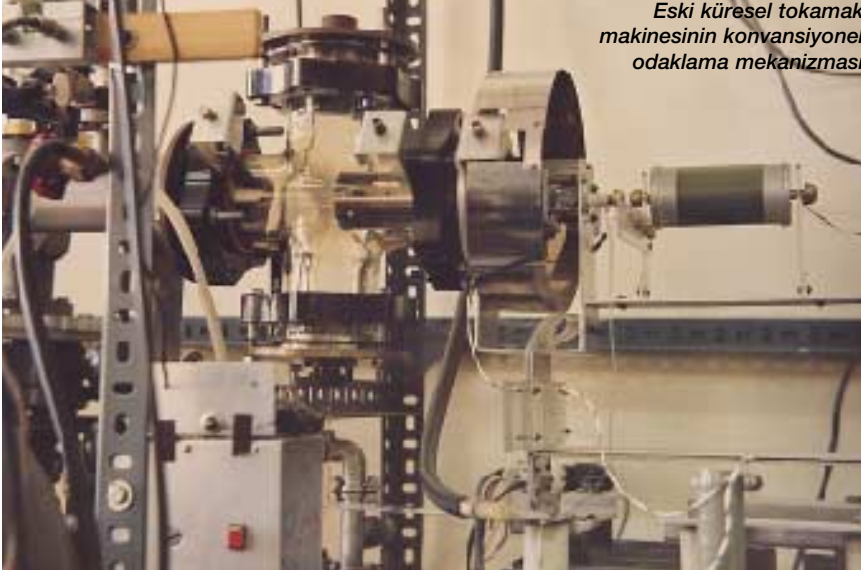
YPO'da döteryum gazı kullanılması halinde, D-D reaksiyonu sonucunda meydana gelen nötronları aktivasyon analizi yöntemi ile ölçmek amacıyla özel bir orantılı sayıcı sistemi geliştirildi. Boşalmanın sıkışma fazında, anod bölgesindeki plazmanın odaklanması sırasında, yoğunluğun katıların yoğunluğuna kadar yükseldiği düşünülerek, bu yoğun plazmanın bir tablet olarak değerlendirilmesi araştırıldı. Bu kapsamda, tablet bölgesi uzatılarak örneğin bir laser-tablet füzyon reaktörü için çok kutuplu bir YPO elektrod sistemi kuruldu. Ayrıca YPO-I makinesinin gücünün yükseltilmesi için YPO-II makinesinin bileşenleri tamamlandı fakat yine yer sorunu ne-

deniyle sökülmiş durumda bekletildi. Şu anda ODTÜ Fizik bölümünde sistemin kurulması için hazırlıklar devam etmektedir.

Tokamak sistemlerinin yanısıra, yeni alternatif bir manyetik korunma sistemi olarak Spheromak kavramı, daha basit yoldan füzyon reaktörüne varma açısından önem taşır. Spheromak; bir plazma hacmindeki manyetik akı yoğunluğu ile aynı hacim içindeki vektör potansiyeli çarpımının entegrali anlamına gelen manyetik helisite prensibinin, topolojik yorumu ile elde edilen bir biçimdir. Manyetik helisite ideal şekilde bir magnetohidrodinamik (MHD) invaryantıdır. J.B.Taylor, MHD teorisine, kuvvetten bağımsız (force free) denge yahut minimum enerji hali ilkesi ışığında, yeni bir görüş getirmiştir. Pratikte, eş eksenli bir plazma topuyla daha önce biçimlendirilmiş bir spheromak, akı koruyucusuna itildikten sonra korunmaktadır. Oysa, IAEA'nın bir araştırma kontratı desteğiyle geliştirilen sistemde, C-topu olarak isimlendirilen manyetik sürmeli plazma topu, akı koruyucusunun içine yerleştirildiği için, spheromak akı koruyucusu içinde biçimlenir ve C-toplarının sayısı arttıkça buna bağlı olarak spheromakın gücü de yükselir. Üstelik, C-topunun plazma kuşağındaki şok dalgasıyla ısıtılmış sıcak (70-100 eV) elektronları, plazma kuşağı halkasının oluşturduğu manyetik alanla etkileşerek, helisel bir plazma akımı meydana getirir. Sonuç olarak, spheromak biçimlenirken toroidal ve poloidal manyetik alanlar da dışardan uygulanmaksızın akı koruyucusu içinde kendi kendilerine bağlanır. Bu mekanizma, Taylor ilkesine iyi uyum sağlar.1986 yılında IAEA'nın Kyoto'da düzenlediği uluslararası konfe-

ransda, Ankara spheromak'ı olarak literatüre geçen SK/CG-1 makinesinin [7] üstün yanları arasında; a) Deneysel koşullar değiştirilerek, spheromak, küresel pinç ve küresel tokamak türünde değişik kompakt torları oluşturulması mümkündür. b) C-topu yardımıyla, akı koruyucusunda demet plazma etkileşmeleri ve bu kapsamda plazmanın ısınması yönünden önemli olan, karakteristik frekanslarda dalgalar oluşarak, dalgalardan plazmaya enerji aktarılabilir. c) spheromak akı koruyucusu içinde oluşturulduğundan, kondansatör bataryasından daha yüksek verimle enerji dönüşümü olur. d) Spheromak plazması başlangıçta şok ısıtmasıyla termalize olur. e) biçimlenme ve bağlanma fazında, diğer eş-eksenli plazma toplu sistemlerde görülen geometrik deformasyon, C-toplu sistemde minimum düzeydedir. f) C-toplarının sayısı akı koruyucusu çevresinde arttırılabildiğinden, simetri bozulmadan reaktör ölçüğüne varılabilir. Eş eksenli plazma enjektörü ile biçimlendirilen spheromak sistemlerde ise, top sayısı ikiden fazla arttırılmaz. g) Sürekli kararlı ve yarı kararlı çalışma moduna geçilerek reaktör ölçüğüne ulaşılabilir.

Spheromak projesini geliştirmek amacıyla çalışmalar; küresel tokamağa doğru yönlendirildi. Küresel tokamağın, spheromak ve tokamak'dan en önemli farkı; büyük yarıçap R'in plazma yarıçapı a_0 ye oranı ile tanımlanan görünüm oranı (aspect ratio) $A=R/a_0 < 2.5$ ve plazma çevresindeki güvenlik faktörü (safety factor) $q(a)=a_0 B_z / R B_0 > 1$ ile karakterize edilir. Burada, B_z ve B_0 sırasıyla toroidal ve poloidal manyetik alan şiddetlerini gösterir. Bu bir anlamda, Z düşey ve



Eski küresel tokamak makinesinin konvansiyonel odaklama mekanizması

araçlarının tasarım ve geliştirilmesinde kamu-özel sektör işbirliğinin önemini vurguluyor.

Bugünkü koşullarda füzyon enerjisi için Türk modelinin belirgin bir hedefi, hatta geleceği görünmüyor. Oysa uzun bir deney birikimi ve kuramsal alt yapı hazır bekliyor. İş, geliştirilen küresel tokamak modelinin, bire üç oranında büyütülerek, 3 keV gücünde

bir reaktör tasarımına dönüştürülmesi. Bunun için tepkime odasının (bizimkinde akı koruyucu) yarıçapının 40 cm'den, 1m'ye çıkartılması gerekiyor. Böyle bir makinede oluşturulacak plazma sıcaklığıysa yaklaşık 35 milyon derece. Profesör Sinman, hibrid (karma) tasarımlı böyle bir makinede yanma süresinin 10 milisaniye düzeyinden, saniyenin çok daha daha büyük

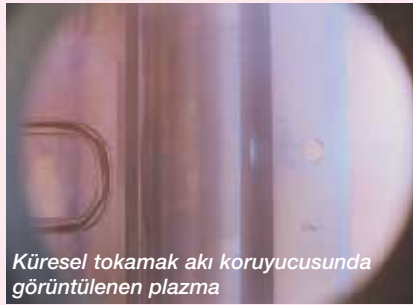
kesirlerine yükseleceğini ve deney koşullarında enerji bile üretebileceğini vurguluyor. Gereken boyut büyütmenin gerçekleşmesi halinde Türkiye'nin füzyon makinesi, bugün dünyanın en büyük füzyon makinesi sayılan, Culham'daki Joint European Torus (JET) reaktörünün 4 yıl önceki durumuna gelecek. Profesör, böyle bir ölçek büyütmenin salt teknik maliyetinin (personel giderleri hariç), 150 000 doları geçmeyeceğini hesaplıyor. Ama şunu da vurguluyor ki, iş yalnızca eldeki makinenin boyutlarını üçle çarpmakla bitmiyor. Merkezi bir program çevresinde sayılan öteki koşulların da yerine getirilmesi gerekiyor. Ama anlaşılıyor ki, iş paraya dayanınca, Türkiye'nin füzyon araştırmaları alanında daha güvver bir sese kavuşmasının parasal faturası, orta halli bir futbol kulübünün, ya da bazı kamu kuruluşlarının makam otomobili parkının boyutları dışında değil...

Raşit Gürdilek

Kaynaklar:
Spherical Torus MAY Improve Tokamak Cost and Performance,
Physics Today, Mayıs 1999
http://ippex.ppl.gov/ippex/About_fusion
<http://www.users.comcity.de/~henIning/fusion.htm>

R yatay eksenlerle tanımlanan düzlemde oluşan sıcak plazma çekirdeğinin kutup noktalarından çekilerek uzatılmış biçimindedir. Böylece, yeni eşgüdümlü bir IAEA araştırma kontratı ile, AST (Alternative Spherical Tokamak) makinesi tasarlandı, kuruldu ve çalıştırıldı. Elde edilen sonuçlar, periyodik olarak düzenlenen Uluslararası ve Avrupa füzyon enerjisi toplantılarında sunuldu [8,9]. Tokyo üniversitesi ile IAEA birlikte organize ettiği ve 26-28 Ekim 1998 tarihinde yapılan küresel tokamak teknik komite toplantısının değerlendirme makalesinde [Nuclear Fusion, [Vol.39 (1999) 1057]; AST makinesi dünyadaki diğer küresel tokamaklar arasında yer aldı. Geçtiğimiz yılda, AST makinesinin yeni versiyonu tamamlanarak, STPC (Spherical Tokamak with Plasma Centerpost) makinesi [10] dünyadaki diğer CDX-U, HIT, HIST, NSTX (USA), START MAST (UK) ve TS-3,4 (Japonya) gibi küresel tokamak makinelerinden farklı olarak, toroidal akım oluşturmak için, 10⁶ Amper düzeyinde yüksek akımlı merkezi iletken çubuk yerine, çok katlı plazma toplarıyla oluşturulan yüksek akımlı (10⁴-10⁵ Amper) merkezi plazma kuşakları kullanıldı. Şekil de STPC makinesinin genel bir görünümünü verilmekte. Modüler tasarımlı STPC'de; sekizgen prizma biçimindeki ve 60 litre hacmindeki bir akı koruyucusu içinde; 90 derece açılı aralıklarla yerleştirilen, dört çift elektrod sistemiyle çalışan plazma toplarından önce; kompakt toroid plazma enjektörü ve daha sonra da hep birlikte diğer plazma topları ateşlenerek oluşan küresel tokamak, kendi oluşturduğu manyetik alan yardımıyla merkezde korunur ve kutup noktalarından çekilerek uzatılmış bir küresel

tokamak oluşur. Şekilde, STPC makinesinde yapılan deneyler sırasında, akı koruyucusu üzerindeki dairesel tanı penceresinden, "open-shutter post fogging" yöntemi ile ve özel optik filtreler kullanılarak alınan fotoğrafta merkezi çubuk etrafında toplanmış ve kutuplardan uzatılmış küresel tokamak plazmasının sol yansı görülmekte. Resimde, ilk önce sağ taraftaki enjektör topu ateşlenip önden filmin sağ tarafını etkilediğinden, daha sonra diğer topların ateşlen-



Küresel tokamak akı koruyucusunda görüntülenen plazma

mesi ile esas küresel tokamak plazmasının sağ taraftaki simetrik bölümü resimde doğal olarak fark edilmez. Ancak, tüm çalışma evresindeki görüntülerin toplamı durumundaki fotoğraf dikkatle incelendiğinde, MHD kararlılığın tüm çalışma süresince korunduğu gözlenmektedir. Aynı zamanda küresel tokamakların karakteristik şekli olan uzama da oluşarak, dünyadaki diğer küresel tokamak makinelerinden alınan fotoğraflarla uyum içinde olduğu gözlemlendi. STPC makinesinin deneysel referans verileri: boşalmanın oluşum sürekliliği yaklaşık 10 ms, maksimum

toroidal alan yoğunluğu 1.3 kG, plazma yoğunluğu $n_e=10^{14}-10^{16} \text{ cm}^{-3}$, korunma zamanı 45-60 ms, elektron sıcaklığı $T_e=30-45 \text{ eV}$, ortalama helis biçimindeki plazma akımı $\langle I_p \rangle=1.5-1.8 \text{ kA}$, maksimum poloidal alan $B_{\theta}^{\text{max}}=0.8 \text{ kG}$ olarak saptandı. Bir modülle alınan bu değerler, modül sayısı artırılarak, oluşum sürekliliğinin 100 ms'ye a kadar yükselmesi mümkündür.

Ayten Sinman¹, Sadrettin Sinman²

¹TAEK Nükleer Füzyon Laboratuvarı,
²ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Kaynaklar

- [1] Sinman S., A Study on the Operational Characteristic and Reproducibility Conditions of Toroidal Discharge without Axial Magnetic Field, Rev. Fac. Sci. Univ. Istanbul C. Tome xxx, Fasc. 3-4 (1965) 177-252, Nuclear Science Abstracts, Vol. 21, No 16, August 31, 1967, Abst. No. 29246, U.S. Atomic Energy Commission.
- [2] Sinman S., Sinman A., An Experimental Study on Programming Modes in high-Beta Small Tokamak, Fusion Energy, 1981, Selected Lecture Presented at a Spring College on Fusion Energy, Trieste 26 May-19 June 1981, IAEA-SMR-82 (1982) 73, Plasma Physics Index Vol. 17, No. 10, 1982 Abst. No. 4369, Max-Planck-Institut für Plasma Physik, Garching bei München.
- [3] Sinman S., Sinman A., On the Instabilities in a Beam-Plasma System of Zonal Magnetic Field, Technical Journal, Vol. 1, No. 2, (1974) 57., INIS, A14-Plasma Physics and Thermonuclear Reactions, Vol. 5, No. 22, IAEA Vienna (1974).
- [4] Sinman S., Sinman A., Design and Realization of a mini-REB Machine (RETA) and Preliminary Results, in Radiation in Plasmas, Proc. Of the Topical Conf. on Rad. in Plasmas Trieste Italy 1983, Vol. 2 Edited by B. McNamara (Livermore), World Scientific Publishing Co. Pre. Ltd., New York-Singapore (1984) 1045.
- [5] Sinman S., Sinman A., Some Operational Characteristics of a Pulsed Ar+3 Laser, XVI Int. Conf. on Phen. In Ionized Gases, Düsseldorf 29 August-2 September 1983, Contributed Papers, Vol. 2 (1983) 208.
- [6] Sinman S., Sinman A., A Study of REB Observed From a DPF System for Different Focus Plasma, ibid [4], 1055.
- [7] Sinman S., Sinman A., Preliminary Experiments in a Compact Toroid Formed by Four C-Guns in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986 (Proc. 11th Int. Conf. Kyoto, 1986) Vol. 2, IAEA, Vienna (1987) 731.
- [8] Sinman S., Sinman A., A Spherical Tokamak Employing Magnetically Driven Plasma Guns, in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (Proc. 15th Int. Conf. Seville, 1994) Vol. 2, IAEA, Vienna (1995) 303.
- [9] Sinman S., Sinman A., Profile Control for an Alternative Spherical Tokamak, in Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal 1996) Vol. 2, IAEA, Vienna (1997) 297.
- [10] Sinman S., Sinman A., A Paramagnetic Spherical Tokamak with Plasma Centerpost, in 26th European Physical Society Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Contributed Papers, Vol.23, Conference CD (1999) P1.111.