

**DÜŞÜK BASINÇLI EYLEMSİZ ELEKTROSTATİK SIKIŞTIRMALI
FÜZYON CİHAZI YAPIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Arife Seda BÖLÜKDEMİR

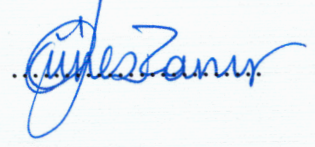
**DOKTORA TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2013
ANKARA**

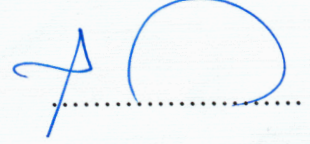
Arife Seda BÖLÜKDEMİR tarafından hazırlanan "DÜŞÜK BASINÇLI EYLEMSİZ ELEKTROSTATİK SIKIŞTIRMALI FÜZYON CİHAZI YAPIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR" adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

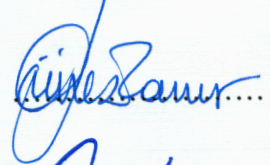


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniv.



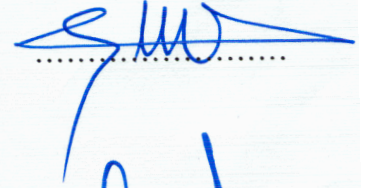
Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniv.



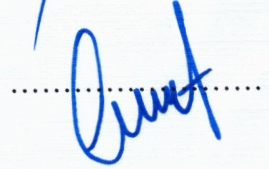
Prof. Dr. Osman YILMAZ
Fizik Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.



Prof. Dr. Şeref OKUDUCU
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniv.




Prof. Dr. Eyyup TEL
Fizik Anabilim Dalı, Osmaniye Korkut Ata Üniv.



Tez Savunma Tarihi: 18/04/2013

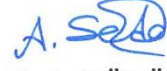
Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Arife Seda BÖLÜKDEMİR

**DÜŞÜK BASINÇLI EYLEMSİZ ELEKTROSTATİK SIKIŞTIRMALI
FÜZYON CİHAZI YAPIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR
(Doktora Tezi)**

Arife Seda BÖLÜKDEMİR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Nisan 2013

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, nükleer füzyon reaksiyonlarının gerçekleştirildiği füzyon cihazlarından bir tanesi olan Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (IEC) cihazı Türkiye'de ilk kez tasarlanmış ve yapılmıştır. IEC cihazı, plazma iyonlarını hızlandırarak füzyon reaksiyonlarını gerçekleştirmek için anoda sıfır, katoda ise yüksek negatif voltajın uygulandığı eş merkezli küresel elektrotlardan oluşan bir sistemdir. Yapılan IEC cihazı ile 85 kV maksimum katot voltajında $1-10 \times 10^{-4}$ mbar düşük basınç bölgesinde döteryum-döteryum (D-D) nükleer füzyon reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. D-D füzyon reaksiyonuyla üretilen nötronlar ve Helyum-3 miktarı nötron dedektörü ve atık gaz analizörü ile ölçülmüştür. IEC cihazında üç farklı çapta katot kullanılmış ve katot çapı ile nötron sayısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuçlardan, aynı şartlar altında orta katotla yapılan çalışmalarda en yüksek nötron sayısı ($1,6 \times 10^4$ n/s) elde edilmiştir. Orta katot ve radyo frekans uyarmalı İndüktif Çiftlenmiş Plazma döteryum iyon kaynağıyla $1-10 \times 10^{-4}$ mbar basınç aralığında nötron değişimi incelenmiş ve en uygun basınç değerinin 9×10^{-4} mbar olduğu görülmüştür. Cihazın merkezindeki iyon konsantrasyonunu arttırmak için sırayla merkez odaklı iki iyon kaynağı ilave edilmiş ve iyon kaynaklarının nötron sayısına etkisi incelenmiştir. İyon kaynağı sayısı arttırıldıkça üretilen nötron sayısının yaklaşık olarak lineer arttığı görülmüştür. Sistem $7,4 \times 10^{-4}$ mbar basınç altında üç iyon kaynağı ile çalıştırıldığında nötron sayısı $3,6 \times 10^5$ n/s değerine ulaşmıştır. Aynı

zamanda D-D füzyon tesir kesiti hesaplamaları yapılmış ve literatürdeki değerlerle karşılaştırılmıştır, sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 202.1.108

Anahtar Kelimeler : Elektrostatik sıkıştırma, nükleer füzyon, nötron üretim hızı, D-D füzyon reaksiyonu, füzyon tesir kesiti

Sayfa Adedi : 88

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR

**THE CONSTRUCTION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF INERTIAL
ELECTROSTATIC CONFINEMENT FUSION DEVICE IN LOW PRESSURE**

(Ph. D. Thesis)

Arife Seda BÖLÜKDEMİR

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

April 2013

ABSTRACT

In this study, Inertial Electrostatic Confinement (IEC) device, one of the nuclear fusion device used to produce nuclear fusion reactions, is firstly designed and constructed in Turkey. The IEC concept utilizes spherically concentric electrodes to create fusion reactions accelerating fusion ions. A high negative voltage is applied to the inner cathode, while the outer anode is held at ground potential. Deuterium-deuterium (D-D) fusion reaction is carried out at maximum 85 kV cathode voltage and $1-10 \times 10^{-4}$ mbar low pressure in this device. Neutrons and Helium-3 produced by fusion reaction are detected Helium-3 filled neutron detector and residual gas analyzer, respectively. In this study, three different size grid-type cathodes are used and the relationship between the number of neutrons with the size of the cathode are investigated. It seems from the results that medium cathode has the highest neutron production rate ($1,6 \times 10^4$ n/s) at the same conditions, so the medium cathode is the most acceptable size for this device. The change in the number of neutron is investigated between $1-10 \times 10^{-4}$ mbar pressure with medium cathode and RF Inductive Coupled Plasma (ICP) deuterium ion sources and it is seen that the most suitable pressure value is 9×10^{-4} mbar. Two center-ion sources are added to increase ion concentration in the center of chamber and the effect of ion sources is examined on neutron production rate. It is seen that total neutron production rate increases approximately linearly as ion source number increase.

When the system is operated using the three deuterium ion sources, maximum neutron production rate is calculated as $3,6 \times 10^5$ n/s at $7,4 \times 10^{-4}$ mbar. Also the fusion cross section of D-D reaction has been investigated and the results have been compared with that of literature.

Science Code : 202.1.108

Key Words : Electrostatic confinement, nuclear fusion, neutron production rate, D-D fusion reaction, fusion cross section

Page Number : 88

Adviser : Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca bana her konuda anlayışlı davranan, yardımcı ve destek olan danışmanım Prof. Dr. Ayşe Güneş TANIR'a, özellikle deneysel çalışmalarımda yardımcı olarak beni yönlendiren hocam Dr. Ali ALAÇAKIR'a (TAEK), çalışmalarım boyunca her konuda yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen arkadaşım Dr. Yeşim AKGÜN'e (TAEK) ve diğer proje arkadaşlarım Dr. Erdal RECEPOĞLU (TAEK), Dr. Hande KARADENİZ (TAEK) ve Elif DURUKAN'a (TAEK) ve diğer laboratuvar çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bana her konuda destek olan ve sabır gösteren sevgili eşim Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR'e, doktora çalışmam süresinde hayatıma giren en güzel varlığa biricik oğlum Tuna'ya ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim anneme ve babama sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda A3.H2.P2.02 kodlu "Küçük Füzyon Makineleri, İyon Kaynakları, Plazma Çalışmaları ve Hızlandırıcı Bileşenleri Tasarımı ve Yapımı" isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca "Yurtiçi Doktora Burs Programı" kapsamında burs vererek akademik çalışmalarımı desteklediği için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Arife Seda BÖLÜKDEMİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. Füzyon.....	8
2.2. Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (IEC) Cihazı	16
2.2.1. IEC cihazında kullanılan sistemler.....	26
2.2.2. IEC cihazının çalışma bölgeleri	33
3. MATERYAL VE METOT	39
3.1. SANAEM-IEC Cihazının Tasarımı ve Bileşenleri	39
3.1.1. Elektrotlar.....	41
3.1.2. Besleme elemanı	42
3.1.3. Vakum sistemi.....	43
3.1.4. Atık gaz analizörü	45
3.1.5. ICP iyon kaynağı.....	46
3.1.6. Güç kaynakları	47

	Sayfa
3.1.7. Dedeksiyon sistemi	48
3.1.8. Zırlama sistemi	49
4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA	52
4.1. Katot Çapının Nötron Sayısına Etkisi	52
4.2. Basıncın Nötron Sayısına Etkisi.....	53
4.3. Füzyon Tesir Kesiti Hesaplamaları	57
4.4. Atık Gaz Analizörü Çalışmaları	60
4.5. İyon Kaynağının Nötron Sayısına Etkisi.....	61
4.6. Üç İyon Kaynağı ile Yapılan Çalışmalar	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	78
EK- 1. Elektrotların SOLIDWORKS Programı Çizimleri.....	79
EK-2. MCNP5 Kodu ile Nötron Zırh Hesabı.....	81
EK-3. Laboratuvar ve Kütle Merkezi Sistemleri	83
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı füzyon reaksiyonlarının tesir kesiti değerleri	13
Çizelge 2.2. Farklı IEC cihazları ile elde edilen nötron sayıları	25
Çizelge 3.1. Katotların ve anodun yapıldıkları malzemelerin içerik yüzdeleri (%)... 42	
Çizelge 3.2. SANAEM-IEC sistem elemanları.....	50
Çizelge 4.1. Üç farklı katot için elde edilen toplam nötron sayıları	53
Çizelge 4.2. Basınca göre nötron sayısı değişimi	54
Çizelge 4.3. RGA spektrumunda bazı kütlelere karşılık gelen olası iyonlar	61
Çizelge 4.4. Tek ve iki iyon kaynağında elde edilen nötron sayısı.....	63
Çizelge 4.5. 5×10^{-4} mbar basınçta nötron sayısının RF gücüne bağlı değişimi	64
Çizelge 4.6. Üç iyon kaynağı ile elde edilen nötron sayısı	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Nükleon başına bağlanma enerjisinin kütle numarası ile değişimi.....	8
Şekil 2.2. Bir magnetron iyon kaynaklı IEC görünümü ve iyon yörüngeleri	17
Şekil 2.3. IEC cihazında iyon yoğunluğu ve potansiyel kuyu	18
Şekil 2.4. İllinois Üniversitesi'nde bulunan pulslu IEC cihazı.....	20
Şekil 2.5. D-T reaksiyonu için IEC cihazı şeması	21
Şekil 2.6. IEC cihazı kullanan mayın belirleme sistemi	23
Şekil 2.7. IEC cihazının kullanım alanları	25
Şekil 2.8. a) Küresel IEC cihazı, b) Silindirik IEC cihazı.....	26
Şekil 2.9. Reaksiyon bölgeleri	34
Şekil 2.10. Bir IEC cihazında potansiyelin yarıçapa bağlı değişimi.....	35
Şekil 2.11. Temel füzyon reaksiyonlarının füzyon tesir kesitleri	38
Şekil 3.1. SANAEM-IEC cihazının şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.2. a) Anot, b) Katot	41
Şekil 4.1. Basınca göre nötron sayısı değişimi	54
Şekil 4.2. $2d$ çaplı molekül, geometrik nokta ve silindir yol.....	55
Şekil 4.4. RGA analizinde $m=3$ ve $m=4$ kütleli gazların a) sistemde gaz yokken b) reaksiyon öncesi döteryum gazı ilave edildikten sonra c) reaksiyon sonrası, miktarları	61
Şekil 4.5. 5×10^{-4} mbar basınçta nötron sayısının RF gücüne bağlı değişimi	64

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Polywell IEC cihazı	20
Resim 2.2. Ticari IEC nötron üretici	24
Resim 2.3. Farklı geometriye sahip katotlar	27
Resim. 2.4. Besleme elemanları.....	28
Resim 3.1. SANAEM-IEC cihazı	40
Resim 3.2. a) Anot, b) Büyük, orta ve küçük katot.....	41
Resim 3.3. a) Besleme çubuğu, b) Yalıtkan kılıf.....	43
Resim 3.4. a) Yeni besleme çubuğu, b) Yeni yalıtkan kılıf.....	43
Resim 3.5. a) Mekanik Pompa, b) Turbo moleküler pompa, c) Döteryum tüpü, d) Vakum ölçer	44
Resim 3.6. Bazı vakum elemanları	45
Resim 3.7. He kaçak detektörü	45
Resim 3.8. Atık gaz analizörü	46
Resim 3.9. Bobin ile iyon kaynağı	47
Resim 3.10. a) İyon kaynağının vakum odacığına bağlantısı, b) Vakum bağlantısı..	47
Resim 3.11. a) 100 kV güç kaynağı, RF güç kaynağı, RF empedans eşleme ünitesi, b) Ayarlı kapasitör, c) RF güç iletim kablosu	48
Resim 3.12. Thermo FH 40 G üniteli ve FHT 752 SH problu nötron dedektörü	49
Resim 3.13. SANAEM-IEC sistemin tam görünümü	51
Resim 4.1. Gaz dağıtıcı aparat	62
Resim 4.2. Vakum odacığının iki iyon kaynaklı görüntüsü.....	62
Resim 4.3. İyon kaynağı bağlantı elemanının a) ~1 mm, b) ~2 mm çap açıklığı	66

Resim	Sayfa
Resim 4.4. SANAEM-IEC cihazında iki iyon kaynağı ile elde edilen plazmanın görüntüsü	66
Resim 4.5. Üç iyon kaynağı ilaveli sistem.....	67
Resim 5.1. Alüminyum makara	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
α	Alfa parçacığı
A_{det}	Dedektör yüzey alanı
Ag	Gümüş
Am-Be	Amerisyum-Berilyum
b	barn
β	Beta parçacığı
Cr	Krom
Cu	Bakır
D_n	Dedektörün ölçtüğü nötron sayısı
D	Döteryum
d	Molekül çapı
e	Birim yük
E_{km}	Kütle merkezinde kinetik enerji
E_{lab}	Laboratuvar sisteminde enerji
eV	Elektron volt
E_α	Kütle merkezi sisteminde mermi ve hedefin birbirlerine göre bağıl hareketinin kinetik enerjisi
F	Füzyon oranı
Fe	Demir
${}^3\text{He}$	Helyum-3
I_{iyon}	İyon akımı
I_{katot}	Katot akımı
κ	Katodun ortalama ikincil elektron yakalama katsayısı
K	Kelvin
keV	Kilo elektron volt

Simgeler	Açıklama
kV	Kilo volt
kWh	Kilo watt saat
λ	Ortalama serbest yol
mbar	Milibar
MeV	Mega elektron volt
Mn	Mangan
Mo	Molibden
mR/h	Mili röntgen/saat
n_m	Mol sayısı
n	Nötron
n/s	Nötron/saniye
N_A	Avagadro sayısı
n_b	Gaz yoğunluğu
nH	Nano Henry
Ni	Nikel
η	Katot geçirgenliği
P	Basınç
p	Proton
Pa	Paskal
Q	Enerji kazanç faktörü
R_c	Dedektörün cihazın merkezinden uzaklığı
R	Gaz sabiti
r_{det}	Dedektörün yarıçapı
R_i	i-inci parçacığın yarıçapı
R_{katot}	Katot yarıçapı
T_K	Sıcaklık
σ	Tesir kesiti
T	Trityum
V	Hacim
V_C	Coulomb potansiyeli

Simgeler	Açıklama
v	Bağlı hız
\bar{v}	Ortalama hız
W	Watt
Z_i	i-inci parçacığın atom numarası
Zn	Çinko

Kısaltmalar	Açıklama
BNCT	Boron Neutron Capture Therapy
CCP	Capacitively Coupled Plasma
ÇANAEM	Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
DEMO	Demonstration Power Plant
ICP	Inductively Coupled Plasma
IEC	Inertial Electrostatic Confinement
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
KM	Kütle Merkezi
LAB	Laboratuvar
MCNP5	Monte Carlo N-Particle Transport Code 5
RF	Radyo Frekans
RGGA	Residual Gas Analyser
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
TOKAMAK	Toroidal Chamber in Magnetic Coils
TOF	Time of Flight

1. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketiminin hızla artması nedeniyle özellikle bu yüzyılın ortalarında enerji kaynaklarının kritik noktada olacağı ve mevcut enerji kaynaklarının artık talepleri karşılamayacağı tahmin edilmektedir. Teknolojik ve ekonomik ilerlemeler kişi başına enerji tüketimi ile yakından ilişkilidir. Bundan dolayı enerji kaynaklarının yetersizliği bir süre sonra uygarlığın gelişmesini sınırlayacaktır. Bu durumda en önemli ihtiyaç yeni, sınırsız ve temiz enerji kaynağı olacaktır. Bu enerji kaynağına en büyük adaylardan birisi de nükleer füzyondur. Enerji tüketimi artışı devam etse bile sadece döteryum nükleer füzyon teknolojisi milyonlarca yıl yetecek olan bir yakıt kaynağına sahiptir. Enerji kaynağı olarak nükleer füzyonu gerçekleştirme çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmalardan ilki 1950'lerde tasarlanan Tokamak (Toroidal Chamber in Magnetic Coils) cihazıdır [Lee ve Saw, 2011]. Dünyanın ve Avrupa'nın en büyük füzyon cihazı ise 1983 yılında İngiltere'de kurulan JET (Joint European Torus) tokamağıdır [Meade, 2010; www.efda.org]. Füzyon çalışmalarında bir sonraki adım Fransa Cadarache'de çalışmalarına başlanmış ve uluslararası işbirliği ile kurulmuş olan ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör)'dir. ITER ve daha sonra DEMO (Demonstration Power Plant) ile 2050 yılı itibariyle ilk ticari nükleer füzyon enerji reaktörünün hayata geçirilmesi planlanmaktadır.

Füzyon enerjisi pahalı olmaması, çevre dostu olması ve neredeyse sınırsız güç kaynağına sahip olması nedeniyle caziptir. Ancak, iyonlar arasında kullanışlı ve kontrol edilebilir nükleer reaksiyonlar oluşturmanın en önemli problemi, belli bir zaman aralığında yeteri kadar yüksek sıcaklıkta enerjik iyonların istenilen yoğunlukta sıkıştırılması gerekliliğidir. Bu nedenle son yıllarda ortaya atılan Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (Inertial Electrostatic Confinement, IEC), manyetik sıkıştırma (tokamak ve stellarator vb.) ve eylemsiz sıkıştırma (lazer, ağır ve iyonlar) yöntemlerine alternatif bir yöntem olmuştur. Eylemsiz sıkıştırma ve manyetik sıkıştırma yöntemlerini iyonları sıkıştırmak için kullanmanın bazı zorluklardan dolayı dünyada pek çok araştırma grubu IEC düşüncesini gerçekleştirmeye çalışmıştır. Küresel geometride elektrik alan kullanarak iyonları

hızlandırmak füzyon yakıtlarına enerji kazandırmanın ve yüksek füzyon verimi elde etmenin en kolay yoludur [Ashley ve ark., 2003].

Füzyon plazmasının elektrostatik sıkıştırılması üzerine ilk makale Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde Lavrentyev tarafından 1963 yılında yayınlanmıştır. Farnsworth bu yayından bağımsız olarak benzer bir fikir ile elektrostatik füzyon üzerine 1950'lerde çalışmış ve 1966'da patent almıştır. Farnsworth'un çalışması küresel simetrik bir geometride büyük negatif elektrostatik potansiyeller kullanarak hafif iyonların sıkıştırılmasına dayanır. Farnsworth füzyonu gerçekleştirmek amacıyla küresel bir hedef oluşturmak için katı bir malzeme yerine kafes yapıda bir sistem kullanmış, böylece hedefin aşınmasını önlemiştir. Katı cisimler hedefe ulaşan yüksek akımlardan dolayı çok çabuk aşınırlar. Kafesli yapıda ise aynı katot akımı için minimum aşınma ile çok daha yüksek devir daim akımları oluşur. [Farnsworth, 1966; Hirsch, 1967; Subramanian, 2004]. Hirsch cihaza altı iyon kaynağı ilave ederek 150 kV katot voltajında D-D reaksiyonundan 5×10^7 n/s, D-T reaksiyonundan 3×10^9 n/s nötron üretmiştir [Hirsch, 1967].

IEC cihazı diğer füzyon cihazları ile karşılaştırıldığında nispeten basit mühendislik tasarımına ve yüksek yoğunluğa sahiptir [Rider, 1995]. IEC cihazının karmaşık yapıda olmaması, nispeten küçük boyutlu ve düşük maliyete sahip olması izotop üretimi, nötron aktivasyonu ve muhtemel küçük enerji üretim cihazlarını içeren pek çok potansiyel uygulamalar için caziptir. Ayrıca, Q kazanç değeri (çıkış gücünün giriş gücüne oranı) $\ll 1$ olsa bile doğrudan uygulamalara imkân vermesinden dolayı bu teknik çok umut verici ve çekicidir. Yakın vadede tıbbi uygulamalar için izotop üretimi, petrol kuyu logu (logging), elmas işleme, bor nötron yakalama terapisi (BNCT), tokamaklar için kalibrasyon kaynağı, mayın dedeksiyonu vs. gibi pek çok uygulamalara sahiptir [Subramanian, 2004].

IEC'nin diğer bir önemli avantajı, özellikle küçük ölçekli laboratuvarlarda, cihaz üzerinde çok az bir değişiklik yapılarak ayarlanabilir x-ışını kaynağına dönüştürülebilir olmasıdır [Miley, 1999].

IEC cihazı dünyada sınırlı sayıda araştırma grubu tarafından çalışılmaktadır. Amerika'da Illinois Üniversitesi'nde 1989 [Miley ve ark., 1991], Wisconsin Üniversitesi'nde 1993 [Thorson ve ark., 1995] ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda 1998 yılından beri çalışılmaktadır [Nebel ve Barnes, 1998]. Bu çalışmalarla ilk olarak IEC cihazının özellikle azot içeren patlayıcıların belirlenmesinde, yüksek akıma sahip pulslu çalışmasında ve uydu istasyonu için itici kuvvet üretilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda Periyodik Salımlı Plazma Küresi (Periodically Oscillating Plasma Sphere-POPS) olarak adlandırılan IEC cihazı üzerine çalışmalar sürdürülmektedir [Nebel ve Barnes, 1998]. D-³He reaksiyonu odaklı çalışan tek grup ise Wisconsin Üniversitesi'dir [Ashley ve ark., 1999].

Japonya'da Osaka Üniversitesi'nde 1992 [Mima ve ark., 1992], Kyoto Üniversitesi'nde 1996 [Ohnishi ve ark., 1997], Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde 2000 [Yamauchi ve ark., 2005] ve Kansai Üniversitesi'nde 2000 [Ohnishi ve ark., 2000], Kyushu Üniversitesi'nde 2001 yılından beri çalışılmaktadır. Bu çalışmalar IEC cihazının ilk kez anti-personel (insan öldürmeye yönelik) kara mayınlarını belirlemek amacıyla aktif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Avustralya'da Sydney Üniversitesi'nde 2000'li yıllardan itibaren Polywell tipi IEC cihazı ile çalışmalar başlamıştır ve IEC araştırmaları için Doppler Spektroskopisi gibi önemli diyagnostik katkılar yapılmıştır [Khachan ve ark., 2010].

İran'da Nükleer Bilim ve Teknoloji Araştırma Enstitüsü'nde 2011 yılında IEC cihazı çalışmaları başlamış ve IEC cihazının nötron üretici olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Damideh ve ark. (2012), İran'ın ilk IEC cihazını (IR-IECF) oluşturmuşlar ve 140 kV'de 10⁷ n/s elde etmişlerdir. Ebrahimi ve ark. (2013) IR-IECF cihazı için farklı katot voltajı ve katot akımı değerlerinde nötron sayısının değişimini incelemişler ve artan voltajın nötron sayısını da arttırdığını gözlemişlerdir.

Kulcinski, Santarius ve Fonck 1993 yılında deneysel ve teorik çalışmalar ile Wisconsin Üniversitesi'nde IEC çalışmalarını başlatmışlardır. Thorson ve Fonck IEC cihazında füzyon reaksiyonlarının radyal dağılımını ve katot içinde potansiyel yapılarını çalışmak için deney sistemini kurmuşlardır [Thorson ve ark., 1995; 1997; 1998]. Thorson, 5 cm büyüklüğünde katot ve 20 cm büyüklüğünde anot kullanarak yaklaşık 2×10^{-3} mbar basınç ve maksimum 35 kV ile deneylerini gerçekleştirmiştir. Thorson 1996 yılından sonra IEC cihazında D-³He füzyon reaksiyonunu gerçekleştirme çalışmalarına yoğunlaşmıştır [Donovan, 2011].

Nadler ve ark. (1992) Idaho Üniversitesi'nde proton dedektörü kullanarak elektrostatik potansiyel profilleri üzerine çalışmıştır. Anderl ve ark. (1995) küçük-ölçekli IEC cihazlarının malzemelerin tahribatsız incelenmesi için kullanımını önermişlerdir. Bu çalışmalar 15-30 kV katot voltajında ve $(5-10) \times 10^{-3}$ mbar basınç aralığında gerçekleştirilmiştir. Miley ve ark. (1997) IEC cihazı için akım-voltaj ve basınç-voltaj karakteristiklerini incelemişlerdir. Ashley ve ark. (2003), su soğutmalı paslanmaz çelik vakum odacığı kullanarak 80 kV'lık katot voltaj değerini 160 kV değerine kadar arttırabilmişler ve bu voltaj artışıyla D-D reaksiyonunda nötron üretimini $4,4 \times 10^7$ s⁻¹'den $1,1 \times 10^8$ s⁻¹ değerine (yaklaşık üç kat) ve D-³He reaksiyonunda proton üretimini ise 10^6 s⁻¹ değerine (40 kat) arttırmışlar ve IEC cihazında ilk kez ^{94m}Tc tıbbi izotopunu üretmişlerdir.

Cipiti (2004), hedef olarak tungsten, titanyum, molibden ve alüminyum oksitten yapılmış, geçirgen olmayan üç metal katot kullanmış ve füzyon reaksiyon oranlarını hem D-³He hem de D-D reaksiyonları için karşılaştırmıştır. D-³He reaksiyonlarının daha yüksek yoğunluğa sahip olduğunu bulmuştur. Aynı zamanda bu çalışmada iki farklı izotop üretilmiştir. Birincisi D-³He reaksiyon ürünü 14,7 MeV enerjili protonlar ile molibden katot kullanılarak, ⁹⁴Mo(p,n)^{94m}Tc reaksiyonu gerçekleştirilmiş ve 52 dakika yarı ömürlü ^{94m}Tc tıbbi izotopu üretilmiştir. İkincisi yine 14,7 MeV enerjili protonlar ile su soğutmalı çelik katot içindeki oksijen arasında ¹⁶O(p,α)¹³N reaksiyonu gerçekleştirilmiş ve 10 dakika yarı ömürlü ¹³N izotopu üretilmiştir.

Subramanian (2004), elektrotlara farklı konfigürasyonlarda farklı frekanslarda radyo dalgaları uygulayarak cihazın füzyon verimini arttırmış, D-D ve D-³He reaksiyonları için diyagnostik çalışmalar yapmıştır. Piefer (2006) IEC cihazında ilk kez ³He-³He reaksiyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmalarını helikon bir iyon kaynağı kullanarak 1/3 oranında daha düşük basınçta gerçekleştirmiştir. Ayrıca atık gaz analizörü ile vakum odacığındaki kirlilik konsantrasyonları üzerine çalışmalar da yapmıştır. Takamatsu ve ark. (2006), magnetron iyon kaynağı kullanarak D-D reaksiyonu gerçekleştirmişler ve katot voltajı ile nötron veriminin değişimini incelemiştirler. Nötron veriminin katot voltajı arttıkça arttığını gözlemişlerdir.

Dietrich (2007), IEC cihazını iki iyon kaynağı ve beş iyon kaynağı ilave ederek çalıştırmış ve iki durum arasındaki sonuçları karşılaştırmıştır. Murali ve ark. (2009), IEC cihazında D-³He reaksiyonu için yakıt oranlarının füzyon tesir kesitine olan etkisini incelemişler ve gaz oranları için en uygun değer D:³He: 1:2 olduğu sonucuna varmışlardır.

Japonya'da Kyoto Üniversitesi, Kansai Üniversitesi ve Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde IEC cihazlarının performansını arttırmak için farklı katotlar ile çalışmalar sürdürülmektedir [Masuda ve ark., 2012; Matsuura ve ark., 2000, Ohnishi ve ark., 1997, 2000; Yamauchi ve ark., 2001]. Kansai Üniversitesi'ndeki IEC cihazında elmas ve kadeh şeklinde katotlar ve küresel bir anot kullanılarak D-D reaksiyonu için nötron verimi incelenmiştir. Elmas şeklinde olan katodun kadeh şeklinde olan katottan 1,5 kat daha fazla verime sahip olduğu görülmüştür [Nakano ve ark., 2010; Osawa ve ark., 2010]. Taniuchi ve ark. (2010) farklı voltaj değerlerinde katot tel sayısını yani katot geçirgenliğini değiştirerek nötron veriminin değişimini incelemişler ve tel sayısı arttıkça 10 kV gibi düşük voltaj değerlerinde nötron sayısının arttığını, 30 kV gibi daha yüksek voltaj değerlerinde ise tel sayısı arttıkça nötron sayısının azaldığını gözlemişlerdir.

2001 yılında Marshall Space Flight Center tarafından IEC fikrinin roketler için itme gücü olarak kullanılması araştırılmıştır [Hrbud, 2001].

Egle (2010), altı tane küresel yakınsak odaklı iyon demeti (SIGFE) kullanarak D-D ve D-³He reaksiyonlarını gerçekleştirmiştir. Bu şekilde bir tasarım 1967 yılında Hirsch tarafından yapılmıştır. Egle, Hirsch'in sistemine optik tasarım, kontrol ve ölçüm sistemleri ilave etmiştir. Çalışma basıncı $1-3 \times 10^{-4}$ mbar aralığında D-D reaksiyonu için 130 kV'de $4,2 \times 10^7$ n/s değerini elde etmiştir.

Donovan (2011), uçuş zamanı (TOF) yöntemini kullanarak IEC cihazında gerçekleşen füzyon reaksiyonlarının konum (spatial, uzaysal) ve enerji değişimlerini çıkarmıştır ve Wisconsin Üniversitesindeki IEC cihazını optimize ederek çalışma voltajını 175 kV'den 300 kV değerine yükseltmiştir. D-D reaksiyonu sonucunda elde edilen 2,45 MeV'lik nötronlar ile özellikle azot içeren kaçak malzemelerin dedeksiyonu üzerine çalışma yapmıştır.

Hashimoto ve ark. (2012), IEC cihazını malzeme analizi için hem x-ışını hem de nötron radyogörüntüleme çalışmalarında kaynak olarak kullanmışlar ve 5 mm'den daha ince örnekler için IEC cihazının nötron kaynağı olarak uygun olduğunu gözlemişlerdir.

Bu çalışmada öncelikle küçük füzyon cihazlarından birisi olan Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (IEC) cihazının yapısı, çalışma prensibi ve cihazda kullanılan sistemler incelenmiştir. Cihaz için gerekli malzeme alt yapısı temin edilerek cihaz tasarlanmış ve Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Teknoloji Bölümü Hızlandırıcı Teknolojisi Birimi Plazma Laboratuvarı'nda oluşturulmuş ve "SANAEM-IEC" olarak adlandırılmıştır. SANAEM-IEC cihazında döteryum gazı kullanılmış optimizasyon ve D-D füzyon reaksiyonu çalışmaları yapılmıştır.

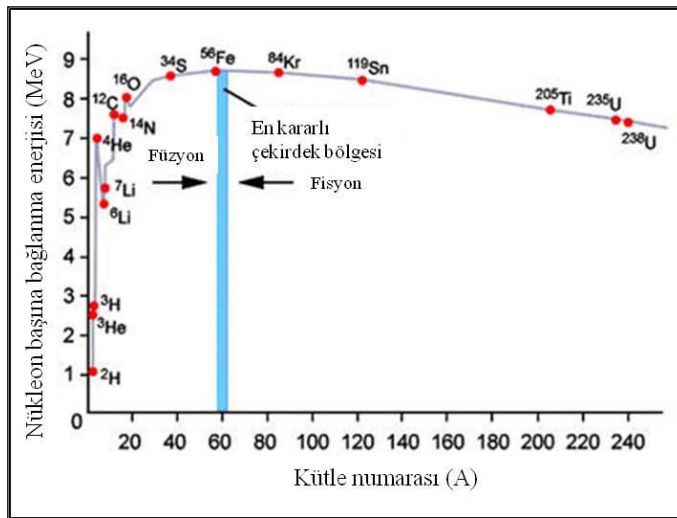
Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde nükleer füzyon, nükleer füzyon tesir kesiti ve eylemsiz elektrostatik cihazı yapısı, cihazda kullanılan sistemler, cihazın çalışma bölgeleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde deneysel çalışmaların yapıldığı SANAEM-IEC cihazının tasarımı ve cihazda kullanılan sistemler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde

SANAEM-IEC cihazı ile yapılan deneysel füzyon çalışmaları, sistemin optimizasyonu anlatılmış; basıncın ve ilave iyon kaynaklarının nötron sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışmaların sonuçları, yorumları ve ileriki çalışmalar için öneriler verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Füzyon

Çok hafif çekirdeklerden başlayarak daha kararlı çekirdeklere doğru gidildikçe bağlanma enerjisi artar. Kütle numarası ile nükleon başına bağlanma enerjisinin değişimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, eğri $A=56$ yakınlarında bir maksimum değere ulaşır; burada çekirdekler çok sıkı bağlıdır. Bu bize iki şekilde enerji kazanılabileceğini gösterir. Birincisi $A=56$ 'nın altında, hafif çekirdekleri daha ağır çekirdekler meydana getirmek üzere birleştirmek; ikincisi ise $A=56$ 'nın üstünde ağır çekirdekleri daha hafif çekirdeklere ayırmaktır. Bu yöntemlerden birincisi güneşin enerji kaynağı olan nükleer füzyon, ikincisi nükleer fisyon olayıdır [Krane 2002].



Şekil 2.1. Nükleon başına bağlanma enerjisinin kütle numarası ile değişimi

Füzyon, hafif çekirdeklerin bol miktarda bulunmaları ve kolay elde edilebilmeleri, ürünlerin genellikle hafif çekirdekler olması ve ağır radyoaktif çekirdeklere göre daha kararlı olmaları gibi avantajlara sahip olduğundan enerji kaynağı olarak düşünülür. Avantajlarının yanı sıra hafif çekirdeklerin birleşmeden önce Coulomb engelini aşmak zorunda olması gibi önemli bir dezavantaja sahiptir. Füzyon Coulomb engeli nedeniyle, dünyada doğal (fisyonda olduğu gibi) bir işlem değildir.

Yani kendiliğinden meydana gelmez ancak Coulomb engeli aşıldığında füzyon gerçekleşir ve çekirdekler minimum enerji durumuna sahip olacak şekilde hızla birleşirler. Etkileşen parçacıkların yarıçapları R_a ve R_x ise parçacıkların yüzeylerinin temas ettiği andaki ($R = R_a + R_x$) Coulomb engeli;

$$V_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_x}{R} = 1,44(\text{MeV}\cdot\text{fm}) \frac{Z_a Z_x}{R} \quad (2.1)$$

'dir. Coulomb engelini füzyon reaksiyonu üzerindeki etkisi, Coulomb engelini α bozunumundaki etkisine çok benzer. $Z_a Z_x$ çarpımı bir üstel engel delme olasılığı ifadesinde bulunduğu için füzyon tesir kesiti Coulomb engeline aşırı derecede bağlıdır. Bu durumda füzyon olasılığı $Z_a Z_x$ çarpımı ile hızla azalır ve engel hidrojen izotopları için en küçük değerini alır. Döteryum-Trityum (D-T) reaksiyonu için $V_C = 0,4$ MeV'dir, bu değer çok küçük olmasına rağmen tipik bir gelme enerjisi olan 1-10 keV değerinden oldukça büyüktür. Parçacıkların enerjilerinin Coulomb engelinden büyük olması gerekmez; α bozunumunda olduğu gibi engel delme ihtimali de önemlidir [Krane, 2002].

Füzyonda, Coulomb engelini aşmak için ısı enerjisi kullanılıyorsa termonükleer füzyon olarak adlandırılır. Bir füzyon reaktörü ile (10^9 W) kıyaslanabilir büyüklükte enerji elde etmek için, füzyon yapabilen çekirdeklerin 10^8 K mertebesine kadar ısıtılması ve yüksek reaksiyon tesir kesiti elde edebilmek için de yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. Bu nedenle sıcaklık, füzyon başlangıcı için önemli bir parametredir. Bu sıcaklıklar yaklaşık olarak D-T reaksiyonu için $4,6 \times 10^7$ K ve Döteryum-Döteryum (D-D) reaksiyonu için $4,6 \times 10^8$ K mertebesindedir. Bu sıcaklıklarda atomlar iyonlaşmış durumdadır. Dolayısıyla yakıt pozitif iyonlar ve negatif elektronlardan oluşan plazma halindedir [Krane, 2002].

Füzyon için önemli problemlerden bir tanesi de plazmanın sıkıştırılması olayıdır. Sıcak yakıtın içerisinde bulunduğu kabın çeperleri ile enerji alışverişi yapması sırasında kabın erimesi, plazma sıkıştırma işlemini en önemli sorun yapmaktadır. Bu

nedenle plazma sıkıştırma iki yöntemle yapılmaktadır: Eylemsiz sıkıştırma, Manyetik sıkıştırma. Eylemsiz sıkıştırmada, lazer ve parçacık demetleri kullanılarak yakıt peletleri (topağı) sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemde yakıt topağı ani olarak ısıtılır ve yoğun parçacık veya foton ışın demetleri ile her yönden aynı anda bombardıman edilerek sıkıştırılır. Manyetik sıkıştırmada ise plazma manyetik alanlar kullanılarak sıkıştırılır [Kammash, 1975; Krane, 2002]. Kontrollü nükleer füzyon araştırmaları çoğunlukla sıcak plazmanın güçlü manyetik alanlarla sınırlandırılmasına odaklanmıştır. Manyetik sıkıştırmalar kapalı uçlu toroidaller ve açık uçlu aynalar ile yapılmaktadır [Miyamoto, 2000].

Füzyon sonucu açığa çıkan enerji, gelecekte enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. Bu amaçla tüm dünyada füzyon çalışmaları yapılmaktadır. Dünyada füzyon çalışmaları ilk olarak 1930'lu yıllarda başlamıştır. Füzyon araştırmalarının başlamasından itibaren, kontrollü füzyon çalışmalarının neredeyse hepsi enerji üretmeyi amaçlamıştır [Cipiti, 2004].

Reaksiyon tesir kesiti

Reaksiyon tesir kesiti bir reaksiyonun gerçekleşme olasılığının bir ölçüsüdür ve σ ile gösterilir. Eğer demet doğrultusuna göre (θ, \emptyset) doğrultusunda yayınlanan b parçacığını kaydetmek için bir dedektör yerleştirirsek, dedektör hedef çekirdekte küçük bir $d\Omega$ katı açısı ile tanımlanır. Birim zamanda gelen parçacıkların akımı I_a olsun ve birim alandaki hedef çekirdek sayısını N ile gösterelim. Çıkan parçacıkların sayısı R_b ise reaksiyon tesir kesiti,

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanır. Bu şekilde tanımlanan σ , çekirdek başına alan boyutuna sahiptir, birimi “barn” dır ve $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 100 \text{ fm}^2$ dir [Krane, 2002].

Dedektörler yalnızca küçük bir $d\Omega$ katı açısı işgal ederler ve bu nedenle çıkan parçacıkların tümünü gözleyemez; aslında, parçacıkların sadece küçük bir dR_b kesri sayılır ve dolayısıyla tesir kesitinin yalnızca küçük bir $d\sigma$ kesri elde edilir. Ayrıca, giden parçacıklar genel olarak tüm doğrultularda eşyönlü yayınlanmazlar; θ 'ya ve muhtemelen ϕ 'ye bağlı olan bir açısal dağılıma sahip olurlar. Açısal dağılım fonksiyonunu keyfi olarak $r(\theta, \phi)$ ile gösterirsek, $dR_b = r(\theta, \phi)d\Omega/4\pi$ olur. O halde,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N} \quad (2.3)$$

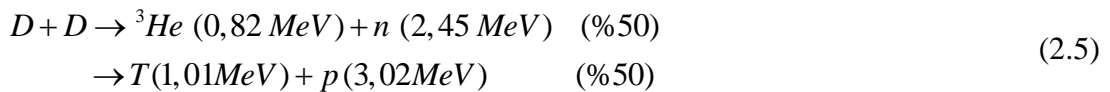
olur. $d\sigma/d\Omega$ niceliğine diferansiyel tesir kesiti denir ve bu niceliğin ölçülmesi, reaksiyon ürünlerinin açısal dağılımı ile ilgili önemli bilgi verir. Katı açı steradyan cinsinden ölçüldüğünden diferansiyel tesir kesitinin birimi barn/steradyan'dır. $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ olmak üzere,

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.4)$$

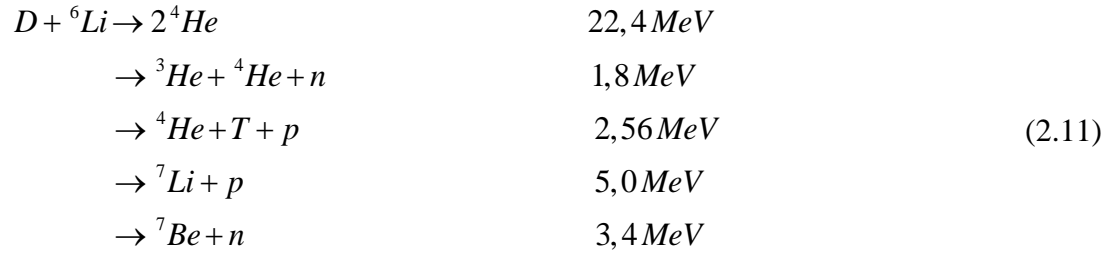
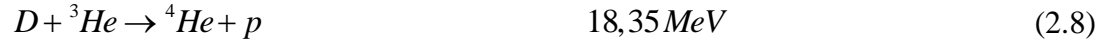
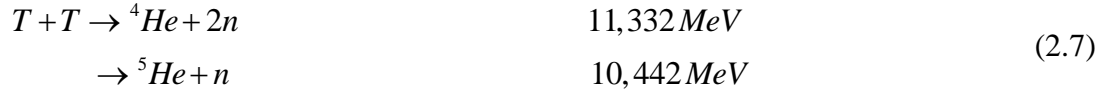
elde ederiz. Eğer $d\sigma/d\Omega$ sabit (açıdan bağımsız) ise, integral $\sigma = 4\pi(d\sigma/d\Omega)$ olur. Bu integral değeri Eş. 2.3'de yerine konursa, Eş. 2.3 ve Eş. 2.2 aynı olur [Krane, 2002].

Temel nükleer füzyon reaksiyonları

En temel nükleer füzyon reaksiyonları D-D ve D-T reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar aşağıdaki eşitlikler ile verilmiştir [Krane, 2002]:



Enerji üretimi için en olası diğer füzyon reaksiyonları ise aşağıdaki gibidir [Miley, 1976]:



Döteryum (${}^2_1\text{H}$), hidrojen elementinin kararlı izotopu olup çekirdeği bir nötron ve bir protona sahiptir. D simgesi ile gösterilir. Döteryum suyun bütün formlarından elde edilebildiği için kaynak sorunu yoktur. Dünyanın elektrik ihtiyacı füzyon santrallerinden sağlanabilecek olsa döteryum kaynakları milyonlarca yıl yetecektir. Tritiyum (${}^3_1\text{H}$) ise hidrojenin diğer bir izotopudur ve çekirdeği bir proton iki nötrona sahiptir. Tritiyum radyoaktif olup yarı ömrü 12,3 yıldır ve doğal olarak bulunmaz ancak lityumdan elde edilebilir. Tritiyum elde etme reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



Lityum hafif bir metaldir ve yer kabuğunda bol miktarda bulunur. Asıl füzyon yakıtı döteryum ve trityum olmasına rağmen gerçekte ihtiyaç duyulan malzeme döteryum ve lityumdur. Örneğin, 500 litre sudan elde edilen 10 gram döteryum ile 30 gram lityumdan elde edilen 15 gram trityum sanayi ülkesinde yaşayan bir insanın ömrü

boyunca ihtiyaç duyacağı ortalama elektrik enerjisini karşılayabilir [Dumbrajs, 1998; Krane, 2002].

Döteryum füzyon reaksiyonları, deneysel olarak 1934 yılında Rutherford, Oliphant ve Harteck tarafından gerçekleştirilmiştir [Dendy, 1993]. D-T füzyon reaksiyonu sonunda açığa çıkan enerji (17,58 MeV), D-D füzyon reaksiyonu sonunda açığa çıkan enerjiden (4 MeV) daha yüksektir (1 MeV=4,45×10⁻²⁰ kWh). D-T reaksiyonu gelecekteki füzyon santralleri için en uygun reaksiyon olarak öngörülmektedir. D-D reaksiyonu yüksek enerjili (2,45 MeV) nötron veya (3,02 MeV) protonların salındığı iki eşit olasılıklı reaksiyon kanalına sahiptir. D-T reaksiyonunda ise 14,07 MeV enerjiye sahip bir nötron yayınlanır. Bu reaksiyonlar sıklıkla hızlı nötron kaynağı olarak kullanılmaktadır [Krane, 2002]. Bazı füzyon reaksiyonlarının tesir kesiti değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (www. <http://www.kayelaby.npl.co.uk>). Çizelge 2.1'den D-T reaksiyonunun tesir kesitinin D-D reaksiyonunun tesir kesitinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha yüksek enerji çıkışı olması ve daha yüksek tesir kesitine sahip olması bakımından D-T reaksiyonu, D-D reaksiyonuna göre daha üstündür. Ancak trityumun radyoaktif olması ve kaynaklarının kısıtlı olması nedeniyle yakıt olarak genellikle döteryum kullanılmaktadır [Krane, 2002].

Çizelge 2.1. Bazı füzyon reaksiyonlarının tesir kesiti değerleri

Reaksiyon	Tesir Kesiti (barn.keV)
D-D _p	52,6
D-D _n	52,6
D-T	9821
T-T	175
D- ³ He	5666
³ He- ³ He	5500

Füzyon, kirlilikler veya küresel ısınmaya neden olmadığı için çevre dostudur ve ekonomik olarak çekicidir. Reaksiyon ürünlerini içeren “kül” yakıtı ve uzun ömürlü radyoaktif atıklar olmadığı için tehlike potansiyeli sınırlıdır, güvenlidir. Yakıt

rezervlerinin bol olması nedeniyle gelecek nesiller için gerekli enerjiyi üretebilir. Kömür, petrol veya doğalgazın yanması gibi kimyasal reaksiyonlara oranla dört milyon kat daha fazla güçlü bir enerji kaynağıdır. Bu sebeplerden dolayı nükleer, enerji gerçekten sürdürülebilir ve uzun vadede enerji kaynakları için tek seçenek olarak görülebilir. [Barlett, 2006; Dumbrajs, 1998; Freidber, 2007; Krane, 2002].

Tokamak füzyon cihazı ile yapılan ilk deneysel çalışmalar 1950'lerin ortaları itibariyle Moskova'da başlamıştır. Bu kapsamda oluşturulan tokamaklardan bir tanesi 1968 yılında test edilmiş ve füzyon çalışmalarında önemli yer tutan iki temel kriter olan, plazma hapsedilmesi ve gerekli sıcaklık seviyesine ulaşıldığı gözlenmiştir [Smirnov, 2010; www.efda.org]. Bu aşamadan sonra tokamaklar, füzyon çalışmalarında yer alan en önemli cihazlar olmuştur. Dünyada pek çok ülkede tokamak cihazı kurulmuş ve tokamak araştırmaları üzerine son elli yıldaki yoğun çalışmalar 10^7 kat daha fazla füzyon ürünleri ile sonuçlanmıştır [Meade, 2010].

Dünyanın ve Avrupa'nın en büyük füzyon cihazı JET tokamağı için 2000 yılında füzyon enerji kazanç faktörü değeri $Q=0,6$ olarak belirlenmiştir. Q için 1 değeri kritik değerdir, 10 değeri ise iyi bir hedeftir [Lee, 2011]. Tokamak çalışmalarında bir sonraki adım plazma fiziğinin bugünkü çalışmaları için deneysel projelerin yürütüleceği ve geleceğin füzyon nükleer santrallerinde elektrik üretmeyi amaçlayan uluslararası bir tokamak olan ITER'dir [www.iter.org]. ITER'in amacı enerji kaynağı olarak füzyonun olabilirliğini göstermek için $Q=10$ değerine 2020 yılına kadar ulaşmaktır. ITER'den sonraki adım ise 2–4 GW füzyon gücü ve 1000-3500 m³ hacimde bir füzyon reaktörü olan DEMO'dur. DEMO'da amaç yakıt (trityum) yeterliliğini test etmek, ITER'in çalışmaya başlamasından 30-35 yıl sonra ilk elektrik üretimine geçmek ve endüstriyel alanda füzyonu kullanmaktır. ITER ve DEMO başarılı olursa dünya bu yüzyılın son çeyreği itibariyle “Füzyon Çağı”na girecektir [Lee, 2011; www.iter.org].

Düşük enerjilerde oluşturulan füzyon sadece enerji üretimi için değil, reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ürünlerin kullanımı açısından da çok önemlidir. Böyle bir süreçte kullanılan füzyon yakıtına bağlı olarak yüksek enerjili (2-14 MeV) nötronlar,

yüksek enerjili protonlar (3-15 MeV) ve elektromanyetik radyasyon (mikrodalga, x-ışınları ve gama ışınları) üretilir. Bu füzyon ürünleri potansiyel olarak pek çok ticari uygulamalara sahiptir, bunlardan bazıları aşağıda listelenmiştir:

- Pozitron emisyon tomografi (PET) gibi tıbbi uygulamalar ve araştırmalar için radyoizotop üretimi,
- radyoterapi,
- gıda ve ekipman sterilizasyonu,
- pulslu nötron, proton ve x-ışını kaynağı,
- katıların elektrik, optik ve mekanik özelliklerinin değiştirilmesi,
- askeri ve sivil uygulamalar için trityum üretimi,
- nükleer savaş başlıklarındaki fisil malzemenin imha edilmesi,
- gelişmiş patlayıcı cihazlardaki patlayıcıların, kara mayınlarının, fisil malzemelerin ve gizli nükleer silahların, karmaşık bir ortamdaki özel element ve izotopların dedeksiyonu.

Bu uygulamaların bazıları, çıkış enerjisinin giriş enerjisine göre çok düşük oranda ($Q \ll 1$) olduğu durumlarda bile gerçekleştirilebilir. Füzyonun kolay uygulanabilirliği özel yatırımlar için çekici olacaktır. Kısa vadeli uygulamaların ticarileştirilmesi, elektrik enerjisi kaynağı olarak nükleer füzyon teknolojisini geliştirecektir [Egle, 2010; Kulcinski, 1996]. Bu kapsamda son yıllarda tokamak ve küresel tokamak gibi geleneksel füzyon makinelerine ilaveten plazma odak cihazı ve küresel geometriye sahip eylemsiz elektrostatik sıkıştırma (Inertial Electrostatic Confinement, IEC) cihazı gibi yeni füzyon makineleri literatürde tanıtılmıştır.

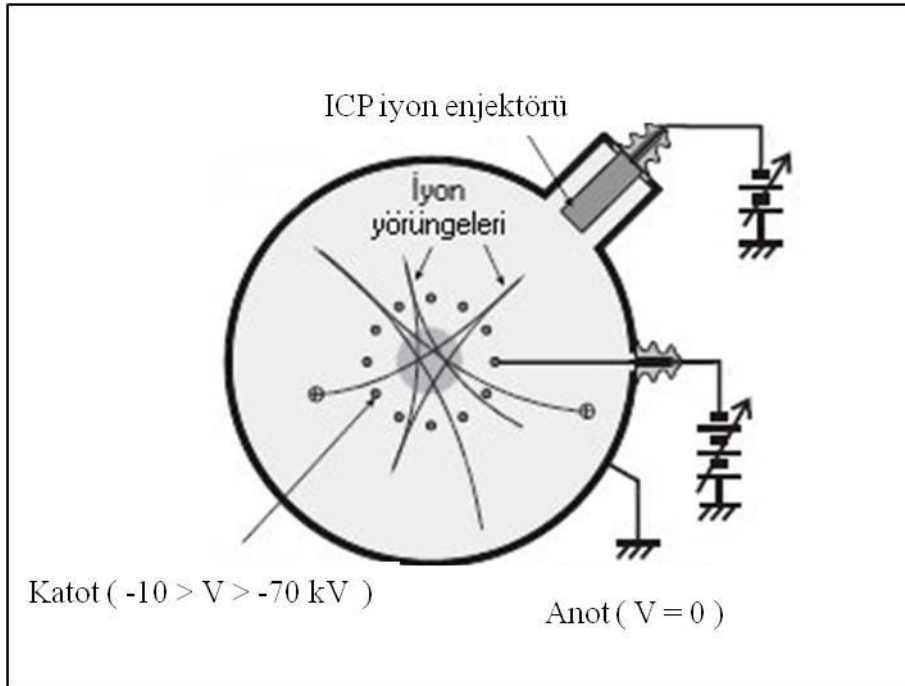
Plazma odak cihazı, kısa süreli, yüksek yoğunluklu plazma bölgesi oluşturan eş-eksenli silindirik elektrotlar arasında bulunan, düşük basınçlı gazda plazmanın sıkıştırıldığı bir nokta oluşturan cihazdır. Bu cihazlarla yüksek parçacık yoğunluğu, yoğun radyasyon yayımı, yüklü ve nötr parçacık üretimi gerçekleştirilebilir. Bu nedenle nötron, proton, x-ışını üretimi, elektron demeti hızlandırılması, nötron ve x-ışını görüntüleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca astrofizik, materyal bilimi

ve füzyonla ilgili temel ve uygulamalı araştırmalar için de önemli bir çalışma alanıdır [Akgün, 2010; Bölükdemir ve ark., 2009; Soto, 2005].

2.2. Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (IEC) Cihazı

Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma cihazı, durağan plazma topu oluşturmak için kullanılan bir sistemdir. Elektrik alan kullanılarak plazma oluşturulmakta ve sistem içerisinde hapsedilmektedir. IEC cihazında küresel eşmerkezli (iç içe) elektrotlar kullanılarak parçacıklar yüksek kütle merkezi enerjilerine (40-200 keV) hızlandırılır ve füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi sağlanır [Ashley ve ark., 1999; Cipiti, 2004; Dietrich, 2007; Farnsworth, 1966; Hirsch, 1967; Yoshikawa, 2007]. Cihaz basit olarak, yakıt gazı ile doldurulmuş küresel anot olarak kullanılan vakum odacığı ve merkezinde ızgara şeklindeki bir katottan oluşur. Katoda yüksek negatif voltaj uygulanırken anot sıfır potansiyelde tutulur. Elektrotlara yüksek gerilim uygulanması elektrotlar arasındaki çalışma gazının iyonlaşmasına sebep olmaktadır. Üretilen iyonlar elektrostatik kuvvet yardımıyla küre merkezindeki negatif potansiyelli katoda doğru hızlandırılır ve iyonların çoğu delikli katot içine nüfuz ederek yoğun kor bölgesine ulaşır. Bu iyonlar yoğun kor bölgesine ulaştıklarında yeteri kadar enerjiye sahip iseler iki iyonun birleşmesi ve çok yüksek enerji ortaya çıkması ihtimali çok yüksektir. Küresel simetriye sahip kor boyunca ilk geçişleri esnasında birleşmeyen iyonlar elektrostatik potansiyel içinde salınmaya devam edebilir ve kor boyunca sonraki geçişlerinde füzyon gerçekleştirebilirler. İyonların bir kısmı küre içindeki yavaş gaz iyonlarıyla ve katodun telleri ile çarpışarak enerjisini kaybedebilir [Weidner, 2003].

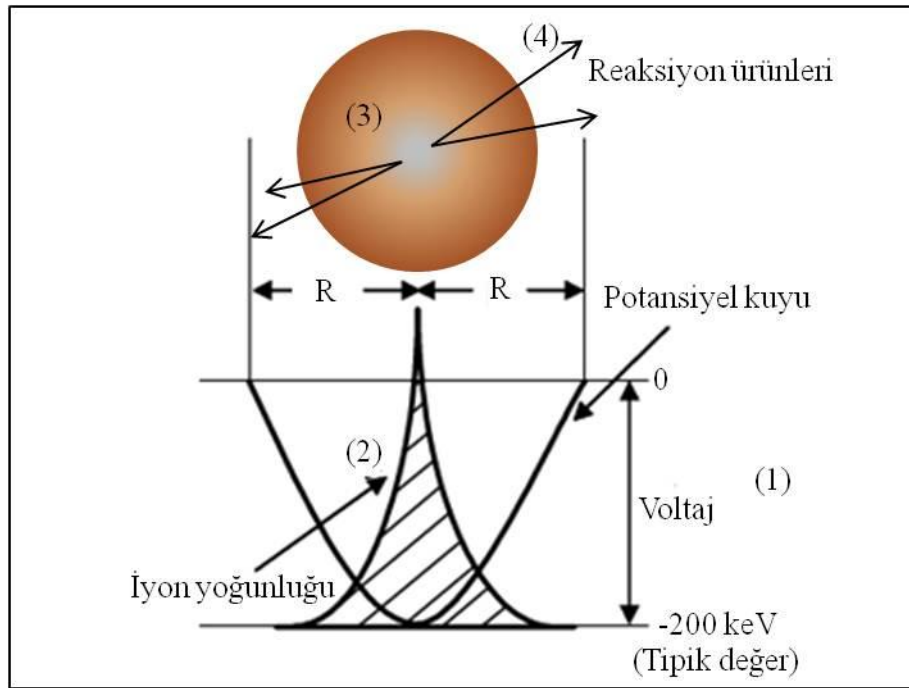
İdeal bir sistemde iyonlar, kafa kafaya arpışana kadar devir daim yaparlar. Maxwellian plazma formunda, giriş enerjisinin çoğu füzyona kayda değer katkı sağlamayan düşük enerjili iyonlara ve elektronlara aktarılır. Fakat iyonları IEC ile sıkıştırma yaklaşımında küresel geometrinin merkezine doğru iyon yoğunluğunun arttığı Maxwellian olmayan plazma formu oluşur (şekil 2.2) [Bussard, 1991; Cipiti, 2004; Rider, 1995].



Şekil 2.2. Bir magnetron iyon kaynaklı IEC görünümü ve iyon yörüngeleri
[Takamatsu ve ark. 2006]

IEC cihazında akkor boşalma (glow-discharge) durumunun devamı için tipik olarak yaklaşık 1×10^{-5} mbar'lık D_2 gaz basıncına ihtiyaç duyulur. Bu basınçta 100 keV'de D_2 gazının ortalama serbest yolu yaklaşık olarak 10 cm'dir. Bu mesafe anot ile katot arasındaki radyal boşluk ile karşılaştırıldığında daha düşük ise iyonların büyük bir kısmının katoda ulaşmadan istenilen çoklu geçişler yerine birinci devir daimden önce enerjisini kaybettiği düşünülür. Akkor boşalma güdümlü IEC cihazlarında bu dezavantajların üstesinden gelmek için ilave iyon kaynakları kullanarak çalışma basıncı azaltılmış ve böylece füzyon etkinliği artırılmaya çalışılmıştır [Masuda, 2001; Miley, 2004; Piefer, 2006; Takamatsu ve ark., 2006]. IEC füzyon cihazına iyon kaynaklarının ilave edilmesi daha düşük gaz basıncında çalışmaya izin verir ve demet gibi davranan iyon enerji dağılımı ile füzyon reaksiyonunu artırır. Düşük gaz basıncı altında yük değiş-tokuş çarpışmaları (Bkz. Hacim bölgesi) azalır ve dolayısıyla iyon ömrü daha uzun olur, böylece iyon devir daimi güçlenir [Cipiti, 2004].

Kafesli yapıya sahip IEC cihazlarında D-D reaksiyonları ile nötron üretimi 10^7 - 10^8 n/s mertebesine ulaşabilmektedir. Bu nötron oranları için iki farklı olası reaksiyon bölgesi görülür. Birincisi Hirsch'ün öncülük ettiği düşük basınç bölgesi, ikincisi ise diğer IEC çalışmalarında baskın olan yüksek basınç bölgesidir. Hirsch 10^{-4} - 10^{-2} mbar aralığında nötral gaz basıncında çalışmış ve daha düşük gaz basınçlarında nötron üretiminin arttığını gözlemiştir. Hirsch çalışmalarında baskın olarak demet-demet reaksiyonları gözlemiştir [Hirsch, 1967].



Şekil 2.3. IEC cihazında iyon yoğunluğu ve potansiyel kuyu [Boris, 2009]

Bu düşüncenin temel prensibi Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Şekil 2.3'den görüleceği gibi, IEC füzyonu aşağıdaki şekilde oluşturulur:

- 1) Derin negatif bir elektrik potansiyel kuyu oluşturulur.
- 2) Potansiyel kuyu pozitif iyonları tuzaklar.
- 3) Pozitif iyonlar potansiyel kuyu içerisinde radyal olarak (merkezden çevreye doğru) salınır.
- 4) Radyal salınım, iyonlar birleşip füzyon yapıncaya kadar veya yük değiş tokuşundan dolayı enerji kaybedinceye kadar devam eder.

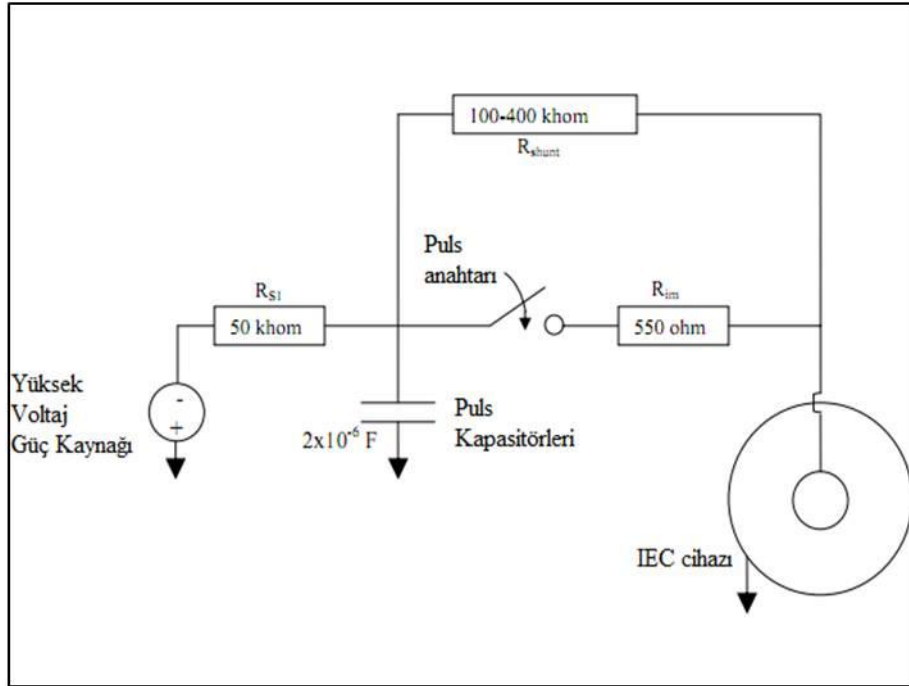
IEC cihazının füzyon reaktör parametrelerinde Maxwellian olmayan enerji dağılımına sahip olduğu ve iki farklı iyon çeşidinin önemli ölçüde farklı enerjilerde bulunabileceği kabul edilir. Bu iki özellik füzyon cihazı için diğer cihazların yapabildiğinden daha fazla tesir kesitinde rezonans pikinden faydalanma yeteneği sağlar. Böyle bir cihaz $D-^3He$ ve $p-^{11}B$ reaksiyonları gibi geliştirilmiş yakıtlar için uygun olabilir. Bu reaksiyonlarda enerjinin neredeyse tamamı, çok yüksek verimlilikte direk olarak elektriğe dönüştürülebilen yüklü parçacıklar formunda üretilmesi gibi avantajlara sahiptir [Bussard, 1991]. Bu reaksiyonlar sonucunda birkaç nötron çıktığı için radyasyon zırhına ihtiyaç yoktur ve bu nötronların reaktör kabı ile reaksiyona girerek onu aktifleme ihtimali çok azdır [Rider, 1995].

90'lı yılların başında IEC sistemine alternatif olan Penning Trap [Barnes ve ark., 1993] ve Polywell sistemler geliştirilmiştir [Bussard, 1991; Krall, 1992]. Penning Trap, elektronları yoğun, küresel bir bölgede sıkıştırmak için manyetik ve elektrik alanın bir kombinasyonunu kullanır. Polywell elektronları sıkıştırmak için yarı küresel bir geometriyle hapseden manyetik alanlar kullanır. Yoğun elektron bulutu iyonları hızlandırabilir ve bir katodun çalışmasına benzer şekilde iyonları sıkıştırabilir. Eğer IEC cihazının bir reaktöre dönüştürülmesi istenirse Polywell tarzı bir deney sistemi daha uygun olacaktır. Çünkü metal katotta iyon enerjisi kaybı olmayacaktır [Cipiti, 2004]. Polywell IEC cihazına bir örnek Resim 2.1'de verilmiştir.

Sürekli IEC cihazına ilave olarak pulslu IEC cihazı çalışmaları da yapılmaktadır. Pulslu IEC cihazı ilk olarak 1990'ların başlarında Miley tarafından Illinois Üniversitesi'nde 43 kV, 17 A özelliklerinde yapılmıştır [Gu ve ark., 1995]. Pulslu IEC cihazında yüksek voltaj anahtarı ve kapasitörler doğrudan katoda bağlıdır. Illinois Üniversitesi'nde bulunan pulslu IEC cihazının şematik gösterimi Şekil 2.4'deki gibidir.



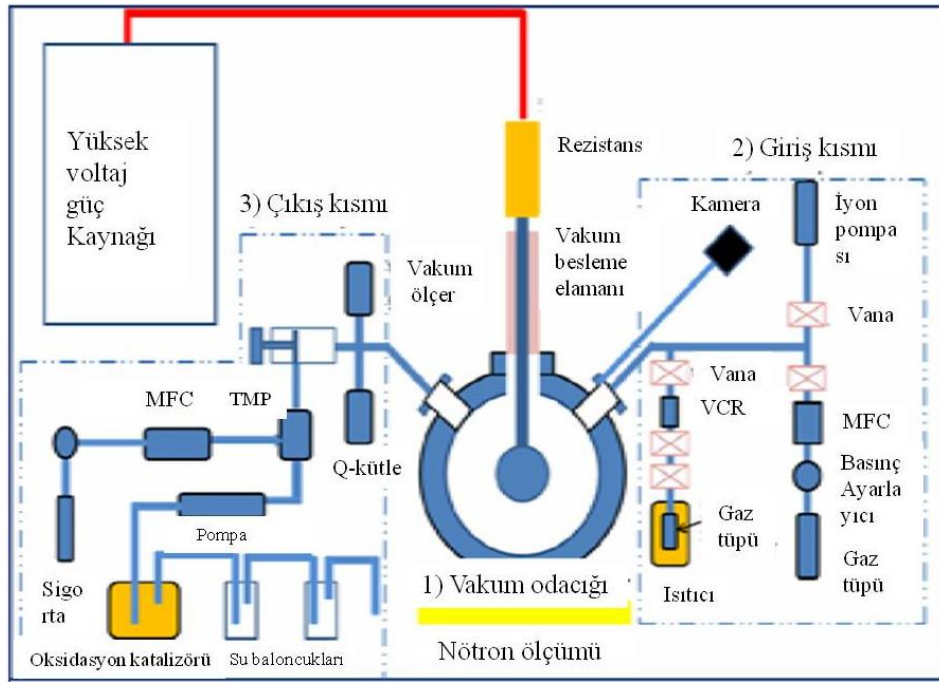
Resim. 2.1. Polywell IEC cihazı [Bussard, 2006]



Şekil 2.4. İllinois Üniversitesi'nde bulunan pulslu IEC cihazı [Nebel ve Barnes, 1998]

Daha sonraları Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde Yamauchi ve ark. (2005) tarafından benzer bir pulslu cihaz yapılmış ve D-D reaksiyonu ile yapılan çalışmalar sonucunda 2×10^8 n/s nötron elde edilmiştir. Ayrıca yine Yamauchi ve ark. (2006) tarafından silindirik pulslu IEC cihazı yapılmış ve bu cihazla 70 kV voltaj değerinde saniyede $6,8 \times 10^9$ nötron elde edilmiştir.

Radel (2007), pulslu IEC cihazı kullanarak patlayıcılar dahil olmak üzere gizli malzemelerin ve zenginleştirilmiş uranyumun dedeksiyonu ve katot olarak kullanılan tungsten yüzey üzerine gelen yüksek enerjili döteryum ve helyumun etkisini inceleyen çalışmalar yapmıştır. Bu tür malzemelerin dedeksiyonunun IEC cihazı ile yapılabileceğini göstermiştir. Çalışmada 94 kV'de D-D reaksiyonu sonucunda $4,7 \times 10^9$ n/s elde etmiştir.



Şekil 2.5. D-T reaksiyonu için IEC cihazı şeması [Kamakura ve ark., 2012]

Kamakura ve ark., (2012), IEC cihazında 2013 yılının ortaları itibariyle Şekil 2.5'de şeması görülen D-T reaksiyonu gerçekleştirmeyi planlamaktadırlar. Trityumu yakıt olarak kullanabilmek için sistemin zırhlaması ve laboratuvar koşullarının değişmesi gerekmektedir. Ayrıca D-D ve D-T reaksiyonlarından ortaya çıkacak nötronları ayırt etmek için de çalışmalar yapmaktadırlar. Monte Carlo programı ile D-D ve D-T reaksiyonu için termal ve toplam nötron akılarını hesaplamışlar ve D-T reaksiyonunun D-D reaksiyonuna göre termal nötron akısının 60 kat, toplam akının ise 200 kat daha büyük olacağını belirlemişlerdir.

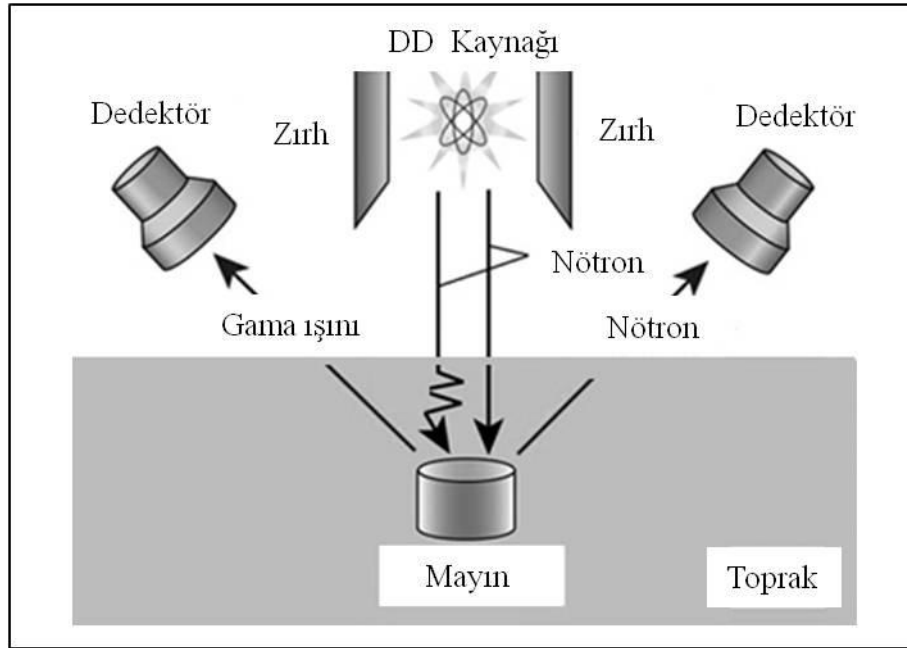
IEC cihazının en önemli avantajları kompakt olması, karmaşık bir yapıya sahip olmaması ve maliyetinin ucuz olmasıdır [Cipiti, 2004; Nadler ve ark., 1992; Weidner, 2003]. Kafes yapıya sahip IEC cihazlarında manyetik alana ihtiyaç olmadığı için büyük, ağır mıknatıslara gerek duyulmamaktadır.

IEC çalışmaları yalnızca füzyonu kapsamamaktadır. Ayrıca kanser teşhisi için radyoizotop üretimi (Positron Emitter production), kanser tedavisi için borla nötron yakalama terapisi (Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)) ve anti-personel kara mayını tanımlamada, patlayıcıların dedeksiyonunda, gıda sterilizasyonunda, pozitron, x-ışını ve nötron üretiminde, bagaj güvenlik kontrolünde, yüksek oranda zenginleştirilmiş Uranyum dedeksiyonunda, IEC cihazlarından yararlanılmaktadır [Boris, 2009; Cipiti, 2004; Damideh ve ark., 2012; Kulcinski, 1996; Meyer, 2007; Ohnishi ve ark., 1998; Yoshikawa ve ark., 2007; Weidner, 2003].

Günümüzde pek çok endüstriyel veya medikal izotop, nötron akısı büyük nükleer reaksiyonlarla veya 10-20 MeV enerjili protonlar kullanan hızlandırıcılarda (linac veya siklotron) üretilir. D-³He füzyon reaksiyonu sonucunda izotop üretmek için kullanılabilir 14,7 MeV'lik proton salınır. İyileştirilmiş IEC cihazlarında D-³He füzyonu ile proton üretimi siklotronlarda üretilen akıya ulaşabilir. Tipik bir siklotron 10¹⁴ p/s mertebesinde proton üretir [Cipiti, 2004]. IEC cihazının yaklaşık 100,000 \$'a kurulabilecek basit bir cihaz olması izotop üretiminde kullanımını avantajlı hale getirmektedir. Siklotronlar ve LINAC'lar büyük ve pahalı aletlerdir. Siklotronların maliyeti yaklaşık olarak 1,2-1,7 milyon \$ arasındadır. Bu maliyetlerle karşılaştırıldığında bir IEC izotop üretici pahalı değildir ve uygulama alanına göre kolayca dizayn edilebilir. Bu tarz bir cihaz kurarak merkezden uzak yerleşim yerlerinde veya küçük bölgelerde medikal izotop üretimi uygun hale gelebilir [Cipiti, 2004].

Yoshikawa ve ark. (2007) patlayıcıların tespitinde nötron kaynağı olarak IEC cihazının kullanımı üzerine çalışmışlardır. Mevcut mayın temizleme işlemlerinin çoğu, metal dedektörler, mayın çubukları ve köpeklerin kullanılması gibi çok yavaş ve tehlikeli geleneksel yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Bu işlem için yeni, hızlı

metotlara ihtiyaç vardır. Mayın patlayıcıları nötronla etkileşen elementleri içerdiğinden, nötron geri saçılması ve nötron-indüklenmiş gama ışınları gibi olaylarla mayınların tanımlanması ve dedeksiyonu mümkün olmuştur (Şekil 2.6). ^{252}Cf ve Am-Be gibi radyoizotop kaynaklar kullanarak nötron geri saçılması olayı sadece sığ ve kurak topraklar için mümkündür. ^{252}Cf veya D-T tüpleri kullanılarak nötron-indüklenmiş γ -ışınları teknikleri anti personel mayınlarda düşük ağırlıkta ve özellikle derine gömülmüş patlayıcıların etkin dedeksiyonunda yeterli hassasiyete sahip değildirler. Bu durumlar dikkate alındığında D-D reaksiyonu gerçekleştiren bir IEC cihazı, hem kesikli hem de sürekli modda yeterli yoğunluğa sahip ideal bir nötron kaynağı olarak kullanılabilir. IEC cihazı ucuz, kompakt ve basit yapıya sahip olmasının yanı sıra ^{252}Cf veya Am-Be radyoizotop kaynaklarına göre güvenlidir. Çünkü cihaz kapatıldığında radyasyon ortadan kalkar [Yoshikawa ve ark., 2007].



Şekil 2.6. IEC cihazı kullanan mayın belirleme sistemi [Yoshikawa ve ark., 2007]

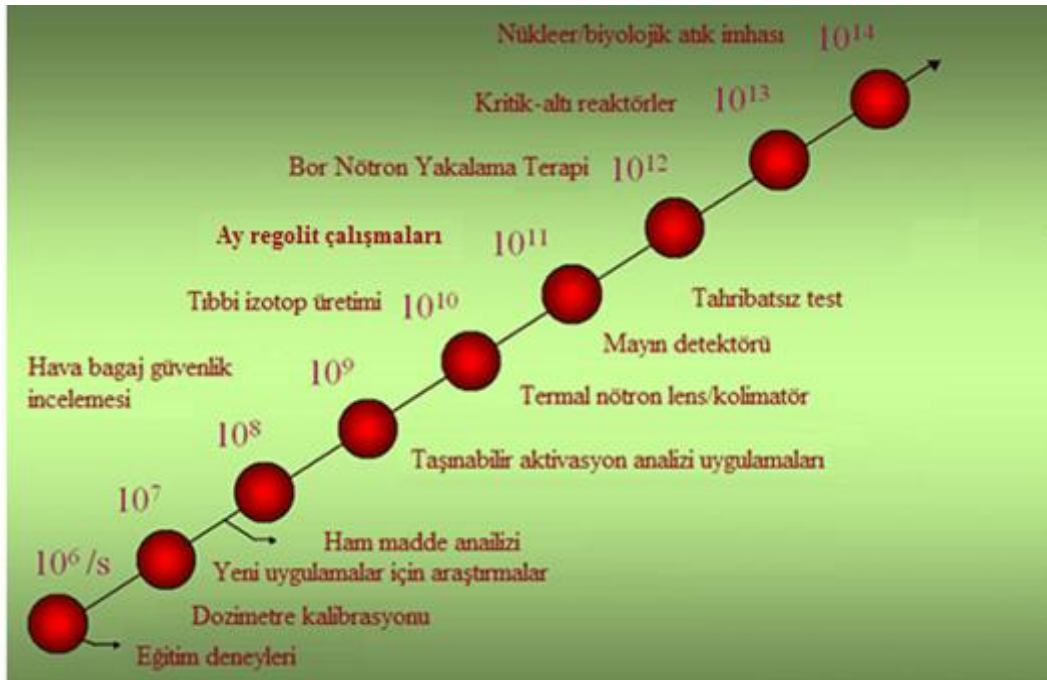


Resim 2.2. Ticari IEC nötron üretici [www.nsd-fusion.com]

IEC cihazının nötron jeneratörü olarak kullanılması konusunda 1990'lı yılların ortalarında çalışmalar yapılmış [Donovan, 2011] ve IEC cihazı ilk kez Daimler Chrysler Aerospace şirketinde çalışan bir ekip tarafından "Fusion Star" ismi verilerek, portatif bir nötron kaynağı olarak ticarileştirilmiştir. Bu cihaz 2,45 MeV enerjili saniyede 5×10^6 nötron akıya sahiptir [Miley, 1991; 1999; 2000]. Ayrıca NSD-Fusion firması da farklı bir nötron üretici (jeneratör) geliştirmiştir. Geleneksel küresel IEC cihazında değişiklik yapılarak reaktör kabı lineer geometrili hale getirilmiştir. Bu nötron jeneratör, endüstriyel nötron uygulama sistemlerini optimize etmek için büyük bir esneklikte tasarlanmıştır. D-D reaksiyonu için 5×10^4 - 1×10^8 n/s arasında, D-T reaksiyonu için 5×10^8 n/s- 5×10^9 n/s arasında nötron üreten modelleri mevcuttur [www.nsd-fusion.com] Bu jeneratörlerden bir tanesi Resim 2.2'de gösterilmiştir.

IEC cihazının nötron ve proton kaynağı olarak, akı yoğunluğuna göre uygulama alanları Şekil 2.7'de gösterilmektedir [Subramanian, 2004; Yoshikawa ve ark., 2007].

Farklı IEC cihazı ile gerçekleştirilen deneylerden alınan nötron yoğunlukları sayısı Çizelge 2.2'den görülmektedir.



Şekil 2.7. IEC cihazının kullanım alanları [Subramanian, 2004; Yoshikawa ve ark., 2007]

Çizelge 2.2. Farklı IEC cihazları ile elde edilen nötron sayıları [Egle, 2010; Damideh ve ark., 2012; Hotta ve ark., 2011; Masuda ve ark., 2010]

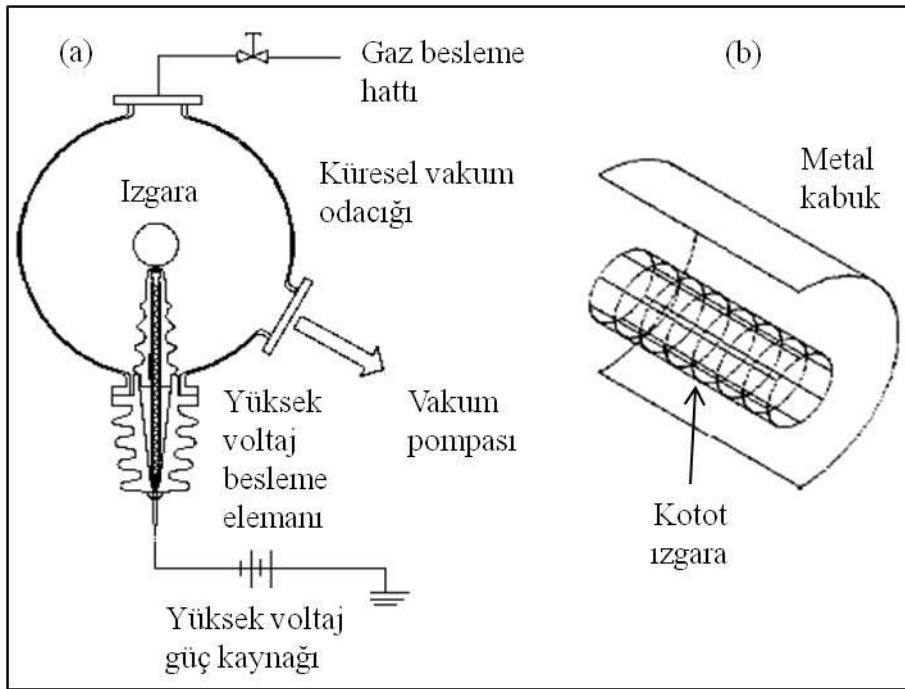
Bulunduğu Yer	Nötron Sayısı (n/s)
Kyoto Üniversitesi (Japonya)	2×10^7 (sürekli)
Kansai Üniversitesi (Japonya)	$4,8 \times 10^8$ (sürekli)
Idaho Nükleer Mühendislik Laboratuvarı (ABD)	3×10^5 (sürekli)
Daimler Benz Aerospace-Space (Almanya)	5×10^6 (sürekli) 1×10^7 (pulslu)
Illinois Üniversitesi (ABD)	2×10^6 (sürekli) 7×10^8 (pulslu)
Wisconsin Üniversitesi (ABD)	$2,4 \times 10^8$ (sürekli) $4,7 \times 10^9$ (pulslu) 3×10^7 (sürekli, D- ³ He)
Los Alamos Ulusal Laboratuvarı (ABD)	1×10^6 (sürekli)
Hitachi (Japonya)	6×10^7 (sürekli)
Tokyo Teknoloji Enstitüsü (Japonya)	$7,4 \times 10^9$ (pulslu)
Nükleer Bilim ve Teknoloji Araştırma Enstitüsü (İran)	$2,6 \times 10^7$ (sürekli)

2.2.1. IEC cihazında kullanılan sistemler

IEC cihazlarının temel bileşenleri, elektrotlar (anot ve katot), vakum sistemi, güç kaynakları, ölçüm sistemleri ve zırhlamadır.

Elektrotlar

IEC cihazları genellikle küresel geometriye sahiptir ancak silindirik geometriye sahip IEC cihazları ile çalışmalar da mevcuttur [Gu ve ark., 1994; Hotta ve ark., 2011].



Şekil 2.8. a) Küresel IEC cihazı, b) Silindirik IEC cihazı

Katot geometrisi genelde küresel ve kafes yapıya sahiptir fakat elmas, kadeh ve silindirik şeklinde katotlarla da çalışmalar yapılmıştır [Ishikura ve ark., 2011; Nakano ve ark., 2010; Osawa ve ark., 2010]. Demet-hedef reaksiyonlarında ve tıbbi radyoizotop üretimlerinde kafes yapıda olmayan katı katotlar kullanılmaktadır. Farklı geometriye sahip katotlar Resim 2.3'de gösterilmiştir:



Resim 2.3. Farklı geometriye sahip katotlar

Kafes şeklindeki katotlarda katot malzemesi olarak çoğunlukla paslanmaz çelik, tungsten (W), molibden (Mo), renyum (Re), tantal (Ta), titanyum (Ti), tungsten-renyum (WRe) ve molibden-renyum (MoRe) alaşımları [Boris, 2009; Cipiti, 2004; Damideh ve ark., 2012; Donovan, 2011; Ebrahimi, 2012; Egle, 2010; Piefer, 2006; Radel, 2007; Subramanian, 2004; Takamatsu ve ark., 2006; Weidner, 2003; Wehmeyer, 2005]; katı katotlarda ise tungsten, molibden, titanyum, alüminyum oksit (Al_2O_3) ve ince duvarlı, içinde su dolaşan paslanmaz çelik tüp kullanılmaktadır. Wisconsin Üniversitesi'ndeki IEC cihazında gerçekleştirilen deneylerde katot teli için tungsten-renyum alaşımı kullanılmaktadır. Tungstenin hem manyetik hem de eylemsiz sıkıştırma çalışmalarında plazma yüzey materyali olarak kullanımı çalışmaları devam etmektedir [Cipiti, 2004].

Anot malzemesi olarak ise genellikle paslanmaz çelik ve alüminyum kullanılmaktadır. Anot malzemesi ile etkileşme IEC cihazının çalışmasını etkiler. Herhangi bir kabartı (blister) oluşumu veya püskürtme (sputter) cihazın elektriksel çalışmasını etkileyebilir. D-D reaksiyonu sonucu oluşan 3,02 MeV'lik protonlar ve 2,45 MeV'lik nötronlar düşünüldüğünde çelik ve alüminyum ile reaksiyon tesir kesitleri düşük olduğu için bu malzemeler tercih edilir [Cipiti, 2004].

Katot yüksek voltaj besleme elemanı

Katoda yüksek voltajı iletmek için yüksek voltaj besleme elemanı (feedthrough) kullanılır. Farklı geometride ve farklı malzemelerden yapılmış besleme elemanları mevcuttur. IEC cihazında genelde çubuk şeklinde Molibden (Mo) [Boris, 2009;

Piefer, 2006; Weidner, 2003], paslanmaz çelik besleme elemanları ve daha yüksek voltaj değerlerinde kullanılan su soğutmalı [Subramanian, 2004], yağ dolu ve daha karmaşık geometride [Cipiti, 2004; Piefer, 2006; Weidner, 2003] besleme elemanları kullanılmaktadır. Bu besleme elemanlarından bazıları Resim 2.4'de gösterilmiştir.



Resim 2.4. Besleme elemanları

Ayrıca yüksek voltaj değerlerinde çalışıldığı için besleme elemanı ile vakum odacığının duvarları arasında kısa devre olmasını engellemek için besleme elemanı yalıtkan bir kılıfın içine yerleştirilir. Bu yalıtkan kılıfın malzeme seçimi çeşitli faktörler göz önüne alınarak yapılır. Malzemenin yüksek voltajlarda yüksek sıcaklığa dayanıklılığı, vakum odacığında çıkış portlarına uyumluluğu, yüksek enerjili iyonlar ile bombardımana dayanıklılığı ve işlenebilir yani kolay şekil verilebilir olması önemlidir. Yalıtkan malzeme olarak genelde Bor Nitrit (BN), Alüminyum oksit (Al_2O_3) [Piefer, 2006; Wehmeyer, 2005], porselen, poliamid, teflon ve kuvars gibi malzemeler kullanılmaktadır [Boris, 2009; Cipiti, 2004; Damideh ve ark., 2012; Donovan, 2011; Egle, 2010; Piefer, 2006, Radel, 2007; Subramanian, 2004; Weidner, 2003]. Ayrıca yalıtkan kılıfın geometrisi de yüksek voltaj dalgalanmalarına karşı dayanıklılığı açısından çok önemlidir. Kılıfın kalınlığı arttıkça çalışma voltajı arttırılabilir ancak daha kalın kılıf vakum odacığı içerisinde iyon akışını kesintiye uğratabilir. İyon akışının azalması da füzyon olasılığını azaltacaktır. Bu sebeple kılıfın kalınlığı dikkatle ayarlanmalıdır.

Vakum sistemi

Mekanik ve turbo vakum pompaları, vakum vanaları, vakum ölçerler ve çalışma gazı vakum sistemini oluşturmaktadır. Sistemde çalışma gazı olarak döteryum, trityum, Helyum-3 kullanılmaktadır. IEC cihazlarında, gaz basıncı genellikle $1-10 \times 10^{-3}$ mbar aralığında olmakla birlikte sisteme iyon kaynakları ilave edilerek basınç daha düşük seviyelere ($\sim 10^{-4}-10^{-5}$ mbar) düşürülmektedir [Cipiti, 2004; Damideh ve ark., 2012; Donovan, 2011; Ebrahimi ve ark. 2013; Piefer, 2006; Radel, 2007; Santarius ve ark., 2005; Subramanian, 2004; Weidner, 2003].

Güç kaynakları

Genellikle 0-200 kV'luk DC güç kaynakları kullanılmaktadır. Yüksek negatif potansiyel, güç kaynağından katoda yalıtkan bir malzeme ile çevrilmiş yüksek voltaj besleme elemanı (feedthrough) ile iletilir. Elektrotlar arasındaki voltaj farkı dolayısıyla füzyon yakıtı iyonlarına aktarılan enerji arttıkça füzyon tesir kesiti artmaktadır. Son yıllarda güç kaynakları 300 kV değerine kadar yükseltilmiştir. Bu voltaj değerinde çalışabilmek için yeni yüksek voltaj besleme elemanı tasarımı yapılmıştır [Donovan, 2011]. IEC cihazında yüksek voltajlarda çalışmayı engelleyen en önemli sınırlama, yüksek potansiyelde tutulan besleme çubuğundan sıfır potansiyelde tutulan anoda elektrik atlamasıdır. Bu elektrik atlamalarına engel olmak için genellikle yalıtkan bir kılıf yapılır ve besleme çubuğu içine yerleştirilir. Yüksek voltaj değerlerinde elektrik atlamasını azaltmak için en iyi yol yüksek voltaj ve sıfır voltaj arasındaki mesafeyi arttırmak veya yalıtkanı daha kalın yapmaktır. Fakat bu durumda vakum problemi ve ekstra maliyet gibi problemler ortaya çıkacaktır. Bu nedenle besleme elemanı ve yalıtkanın tasarımı bu parametreler dikkate alınarak yapılmalıdır.

Ölçüm sistemleri

D-T ve D-³He reaksiyonlarında olduğu gibi iki farklı füzyon yakıt malzemesi kullanılıyorsa gazların uygun oranlarda vakum odacığına verilmesi gerekmektedir.

Gazların bu oranını ölçmek için gaz akış kontrolörleri ve atık gaz analizörü kullanılır. Ayrıca atık gaz analizörü reaksiyon öncesinde ve sonrasında vakum odacığindeki gazların miktarını ölçmek için ve vakum odacığı içindeki kirlilik konsantrasyonlarının füzyon tesir kesitine etkisini incelemek için de kullanılır [Cipiti, 2004; Egle, 2010; Piefer, 2006; Radel, 2007; Subramanian, 2004; Wehmeyer, 2005; Weidner, 2003]. Katot sıcaklığını ölçmek için bir pyrometre kullanılır [Cipiti, 2004; Murali ve ark. 2010; Piefer, 2006; Radel, 2007; Subramanian, 2004].

Dedeksiyon sistemleri

Protonu dedekte etmek için silikon dedektörler ve beraberlerinde çok kanallı analizörler kullanılır [Cipiti, 2004; Egle, 2010; Hirsch, 1967; Nadler ve ark. 1992; Weidner, 2003].

Hızlanan iyonların, füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan trityum, helyum-3, helyum-4, nötron ve protonların duvar etkileşimlerinden dolayı x-ışınları ve gama ışınları oluşur. Ayrıca katottan salınan elektronlar vakum odacığının duvarına çarpmadan önce hızlanacaklardır ve bunun sonucunda Bremsstrahlung radyasyonu yayılacaktır [Hirsch, 1967]. Bu radyasyonları dedekte etmek için de sisteme x ve gama ışını dedektörleri yerleştirilir.

Nötron dedeksiyonu

Füzyon reaksiyonları sonucu üretilen nötronu dedekte etmek için nötron dedektörü kullanılmaktadır. Çok düşük enerjili (eV veya altında) nötronlar bile Coulomb engelinden etkilenmeden çekirdeğe girerek çekirdek reaksiyonlarını başlatabilirler. Serbest nötron β ışını yayınlayarak bozunan kararsız bir çekirdektir ve 10,6 dakika yarı-ömre sahiptir. Nötron demetleri çeşitli nükleer reaksiyonlarla elde edilebilirler. Nötron, yüklü parçacıklar gibi hızlandırılmaz, fakat yüksek enerjili nötronların enerjileri farklı maddelerin atomlarıyla yaptıkları çarpışmalar sonucunda azaltılabilir. Buna “yavaşlatma” işlemi denir. Bir nötron demeti katı madde içinden geçerken nötron akım şiddeti, oluşan nükleer reaksiyonlar nedeniyle zayıflar. Böylece

nötronlar çok düşük enerjilere ulaşabilirler. Nötronlar enerjilerine göre başlıca aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

Termal nötronlar	$E \sim 0,025 \text{ eV}$
Epitermal nötronlar	$E \sim 1 \text{ eV}$
Yavaş nötronlar	$E \sim 1 \text{ keV}$
Hızlı nötronlar	$E = 100 \text{ keV}-10 \text{ MeV}$

Hızlı nötronlar için (n,p), (n, α) veya (n,2n) gibi birçok reaksiyon mümkündür, ancak yavaş veya termal nötronlar başlıca (n, γ) yakalama reaksiyonu yapmaktadır.

Nötronlar doğrudan iyonlaşma meydana getirmedikleri için, nötron dedektörleri (n,p), (n, α), (n, γ) veya (n,fisyon) gibi ve hafif yüklü parçacıkların nükleer saçılmaları gibi nükleer reaksiyonların oluşturdukları ikincil olayların ölçülmesine dayanır. Yavaş ve termal nötronlar (n,p), (n, α) reaksiyonlarına dayanan dedektörler ile belirlenir, bu reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan yüksek enerjili p veya α 'nın neden olduğu sinyaller yardımı ile nötronlar dolaylı olarak belirlenir. Nötron dedektörleri termal nötronlar için tesir kesiti yaklaşık $\sigma=3840 \text{ b}$ değerine sahip $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyonunu, termal nötronlar için $\sigma=940 \text{ b}$ değerine sahip $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ reaksiyonunu ve $\sigma=5330 \text{ b}$ değerine sahip $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ reaksiyonlarını kullanırlar. Dedektörde moderatör mevcut değilse nötronları termal enerjilere yavaşlatmak için dedektörün önüne moderatör malzeme yerleştirildikten sonra nötronlar dedekte edilir [Krane, 2002].

İyon kaynakları

İyon kaynağı, yüklü parçacıklar üretmek için kullanılan bir sistemdir. Bir iyon kaynağında önce plazma üretilir ve sonra plazmadan iyonlar çekilerek hızlandırılır. Plazma maddenin dördüncü hali olup elektron, iyon ve nötr atomlardan oluşur. İyon kaynakları pek çok şekilde oluşturulabilir. Bunlar; plasmatron iyon kaynakları, magnetron ve freeman tipi iyon kaynakları, penning iyon kaynakları, mikrodalga ve

ECR iyon kaynakları, lazer güdümlü iyon kaynakları, Elektron bombardımanlı iyon kaynakları, vakum ark iyon kaynakları, negatif iyon kaynakları, yüzey ve termal iyonizasyon iyon kaynakları ve radyo frekans iyon kaynaklarıdır.

IEC sistemine iyon kaynağı ilave edilerek daha düşük basınçlarda çalışılabilmektedir, böylece iyonların küre merkezine daha hızlı ulaşmaları sağlanarak yüksek iyon konsantrasyonu elde edilebilmekte ve füzyon tesir kesiti arttırılabilmektedir [Dietrich, 2007; Egle, 2010; Hirsch, 1967]. IEC cihazlarında genelde magnetron [Masuda ve ark., 2001; Takamatsu ve ark., 2006], helicon [Becerra, 2011; Piefer, 2006] çoklu hapsetme (multi cusp) ve radyo frekans iyon kaynakları [Miley ve ark., 2004; Nakano ve ark., 2010] kullanılmaktadır.

Bu çalışmada radyo frekans iyon kaynakları kullanılmıştır. Radyo frekans (RF) voltajının plazma oluşturmak için kullanımı 1940'lı yılların sonuna dayanır. RF iyon kaynakları, ortamda çok çeşitli gazların kullanımına izin verdiği için önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca RF iyon kaynakları uzun ömürlü oldukları ve iyi plazma üretebildikleri için oldukça kullanışlıdır. Pratik olarak gaz ile doldurulmuş ortamda RF deşarjı için gerekli basınç değeri 10^{-2} - 10^{-3} mbar civarındadır. İyi bir deşarj için birkaç yüz watt RF gücü gereklidir.

RF voltajı kullanılarak, bahsedilen basınç değerlerinde plazma üretmenin iki yöntemi vardır. Birincisi Kapasitif Çiftlenmiş Plazma (CCP, capacitively coupled plasma) deşarjı, diğeri ise İndüktif Çiftlenmiş Plazma (ICP, inductively coupled plasma) deşarjıdır. CCP, gaz dolu vakumlu tüpün etrafına iki paralel plaka veya elektrot yerleştirilerek değişen RF voltajı uygulanarak elde edilir. ICP ise gaz dolu vakumlu ortamın etrafına bir uyarılma bobininin yerleştirilmesi ve RF uygulanması ile oluşturulur. RF iyon kaynaklarının büyük bir kısmı ICP tipi deşarj ile çalışır. Bu durumda RF elektrik alan, deşarj bölgesindeki değişen manyetik alan ile oluşturulur. Gaz hacmindeki elektronlar RF elektrik alanı ile salınım yapmak üzere uyarılırlar ve ortamdaki gazı iyonize ederek plazma oluşturacak kadar yeterli enerjiye sahip olurlar. Daha sonra iyonlar kaynağın vakum ortamından çekilirler [Jan, 2004; Wolf, 1995].

Zırhlama sistemi

Genellikle IEC sistemleri zırhlı bir odaya yerleştirilir. Bu oda ile kontrol odası arasında betonarme duvar ve kurşun kapı bulunur. D-D reaksiyonu ile gerçekleştirilen deneylerde çıkan 2,45 MeV'lik nötronlardan korunmak için, yüksek oranda hidrojen içeren moderatörler kullanılır. En iyi nötron moderatörü düşük Z'li element olan hidrojeni yüzde olarak en çok bulunduran malzemedir. Su (H_2O), polietilen ($C_{2n}H_{4n+2}$) ve parafin (C_nH_{2n+2}) malzemeleri kullanılabilir. Protonları durdurmak için de silikon ve kurşun levha kullanılabilir. 50 μm kurşun 3 MeV enerjiye sahip protonları tamamen durdurmak için yeterlidir. Yüklü parçacıkların özellikle elektronların ve protonların sebep olduğu Bremsstrahlung X-ışınlarından korunmak için ise kurşun plakalar kullanılır [Cipiti, 2004; Donovan, 2011; Egle, 2010; Radel, 2007].

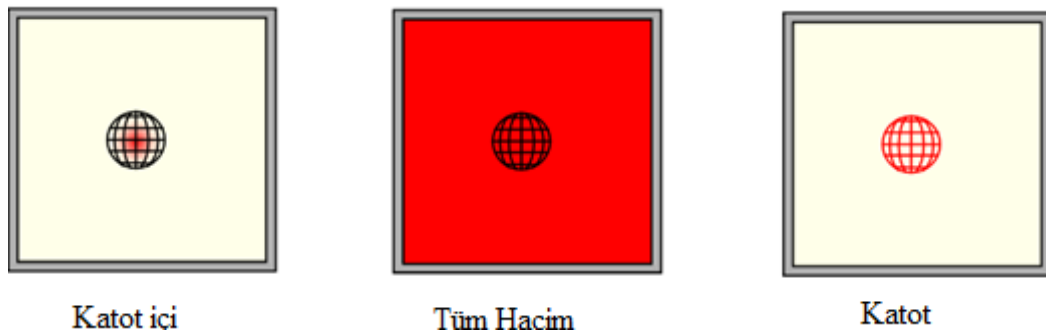
2.2.2. IEC cihazının çalışma bölgeleri

Bir IEC cihazında füzyon reaksiyonları 4 farklı biçimde gerçekleşebilir: demet-demet, demet-yavaş nötraller (demet-background), demet-katot ve hızlı nötraller-yavaş nötraller. Bu 4 reaksiyon bölgesi ilk kez Thorson ve ark. (1998) tarafından Wisconsin Üniversitesi'ndeki IEC cihazı için tanımlanmıştır. Burada demet, küresel potansiyel kuyu ile hızlandırılan birincil hızlı iyonları; yavaş nötraller, yavaş nötr gaz atomlarını veya moleküllerini; katot, katotta tuzaklanan yakıt yoğunluğunu; hızlı nötraller, demet iyonları ile hacimdeki gaz arasındaki yük değiş-tokuş reaksiyonları ile üretilen enerjik nötr atomları belirtir [Thorson ve ark., 1998].

Demet-demet reaksiyonları, iki hızlandırılmış iyonun cihazın merkezinde birleşmesidir. *Demet-yavaş nötral* reaksiyonları, hızlandırılmış bir iyon ile bir yavaş nötral gaz molekülünün merkez yakınlarında birleşmesi sonucu olur. İyonlar katot telleri veya vakum odacığının duvarları gibi katı bir hedefe girince *demet-katot* reaksiyonları gerçekleşir. Katodun iyonlarla bombardımanı sonucu füzyon reaksiyonları oluşur. Son olarak *hızlı-yavaş nötral* reaksiyonları, yavaş bir gaz atomu ile iyon yük değiş-tokuşu olduğunda hızlı nötr atomlarının yavaş nötraller ile

birleşmesi sonucu gerçekleşir ve vakum odacığının içinde her yerde meydana gelebilir. [Cipiti, 2004; Donovan, 2011; Piefer, 2006; Subramanian, 2004].

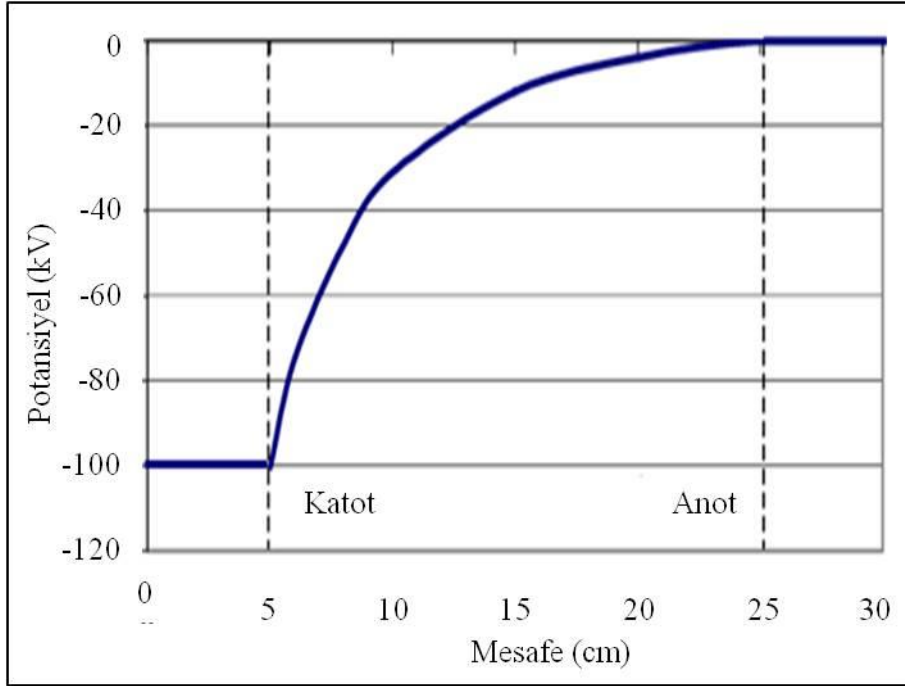
Bu dört durum üç kaynak bölge ile özetlenmiştir. Bu bölgeler katot içi, tüm hacim ve katot bölgesi olarak isimlendirilir (Şekil 2.9). Katot içi bölge, cihazın merkezinde katodun içinde veya merkezin çok yakınında meydana gelen reaksiyonları içerir. Bu bölge hem demet-demet hem de demet-yavaş nötral reaksiyonlarını içerir. Tüm hacim bölgesi, tüm vakum odacığı boyunca meydana gelebilecek hızlı nötral-yavaş nötral reaksiyonlarını içerir. Son olarak katot bölgesi, iyonlar ile katoda implant edilen iyonlar birleştiği zaman oluşan demet-katot reaksiyonlarını içerir.



Şekil 2.9. Reaksiyon bölgeleri (füzyon reaksiyonunun gerçekleştiği bölgeler kırmızı ile işaretlenmiştir) [Cipiti, 2004; Donovan, 2011]

Katot içi bölgesi

Katot içi bölgesinde, hızlandırılmış tüm iyonların cihazın merkezinde toplanmasıyla ve iyonların diğer hızlı iyonlarla veya yavaş nötral gaz molekülleri ile çarpışmaları sonucu füzyon gerçekleşir. Uzun vadede bu bölge, cihaz performansı için en istenen durumdur. Cihazın merkezinde yüksek yoğunluk oluşturulması ve böylece katot içi durumun arttırılması muhtemelen IEC cihazının füzyon enerji kaynağı olarak geliştirilmesinin tek yoludur. Hızlandırılmış iyonlar katot içinde veya katot yakınında en yüksek enerjiye sahiptir, böylece füzyon reaksiyonunun cihazın merkez yakınlarında olma olasılığı daha yüksektir. Şekil 2.10 Wisconsin Üniversitesi IEC cihazının katot parametreleri kullanılarak 100 kV'luk katot potansiyelinin yarıçapın bir fonksiyonu olarak değişimini gösterir:



Şekil 2.10. Bir IEC cihazında potansiyelin yarıçapa bağlı değişimi [Cipiti, 2004]

İyonlar ulaşabilecekleri maksimum enerjinin çoğunu katoda ulaşmadan bir kaç cm önce kazanırlar. Böylece füzyon tesir kesiti cihazın merkezine doğru daha güçlü olur. Ayrıca iyonlar $1/r^2$ ile değişerek birbirlerine yaklaşırlar dolayısıyla merkezdeki yoğunluk daha yüksek olur. Bu etkiler sonucu reaksiyonların çoğunluğu küçük bir kor ile sonuçlanır.

Katot içi bölgesi füzyon verimi basınca da bağlıdır. Basıncın azalması iyonlar cihazın merkezine ilerlerken yavaş gaz molekülleri ile çarpışma olasılığını azaltır. Pek çok çarpışma hızlı nötraller ile yavaş iyonları oluşturan yük değiş-tokuş reaksiyonlarına sebep olacaktır. Yavaş iyonlar çok daha düşük bir enerji ile merkeze doğru hızlanmaya devam edeceklerdir. Reaksiyonların tamamen demet-demet olarak gerçekleşmesi için sistemin çok iyi vakumlanması yani çok düşük basınçlarda olmasının gerektiği düşünülür. Fakat gerçekte böyle bir durum söz konusu değildir. Çok düşük basınç değerlerinde bile yavaş nötrallerin yoğunluğu hızlı iyonların yoğunluğundan daha fazladır ve dolayısıyla kora doğru ilerleyen hızlı iyonların diğer hızlı iyonlarla çarpışmadan önce katodun içindeki veya civarındaki yavaş nötraller ile çarpışma olasılığı yüksektir. Böyle bir durumda demet-yavaş nötral reaksiyonları

ihmal edilemez [Donovan, 2011]. Ancak sisteme fazladan iyon kaynakları eklenerek ortamdaki hızlı iyonların yoğunluğu arttırılabilir ve demet-yavaş nötral reaksiyonu ihmal edilebilir. Wisconsin Üniversitesi IEC cihazında $1-10 \times 10^{-3}$ mbar basınç aralığındaki vakum odacığında nötral gaz yoğunluğu (10^{20} m^{-3}), hızlı iyon yoğunluğundan (10^{15} m^{-3}) daha fazladır. Dolayısıyla bu basınç altında demet-yavaş nötral reaksiyonları, demet-demet etkileşimlerinden daha baskındır [Cipiti, 2004; Thorson, 1998]. Yüksek basınç değerleri katot içi bölgesinde reaksiyon sayısını azaltacaktır. Çünkü yüksek basınç değerlerinde hızlı iyonların ortalama serbest yol değeri düşecek ve iyonlar katoda ulaşmadan enerjilerinin çoğunu kaybedeceklerdir [Piefer, 2006].

Hacim bölgesi

Hacim bölgesinde çoğunlukla hızlı nötral-yavaş nötral molekülleri arasında yük değiş-tokuş reaksiyonları gerçekleşir. Bir iyon bir yavaş nötral molekülü ile çarpışır ve yük değiş-tokuşu yaparsa yüksek enerjili hızlı nötraller oluşur. Bu nötraller belli bir enerjiye sahiptir fakat artık elektrostatik kuyuda hapsedilemezler. Yük değiş-tokuş reaksiyonları iyonların orjinal yollarını değiştirmez, böylece hızlı nötraller aynı doğrultuda yollarına devam ederler [Miyamoto, 1997]. Hızlı nötraller IEC içindeki elektrostatik potansiyelden etkilenmez, dolayısıyla vakum odacığının duvarına ulaşmaya kadar izlediği doğrultuda her bir noktadaki füzyon olasılığı eşittir.

Hızlı nötraller için füzyon tesir kesiti yarıçaptan bağımsızdır fakat akım yoğunluğuna bağlıdır. Hızlı nötraller ya merkeze ve kor dışına ya da sadece doğrudan kor dışına hareket ettiği için nötrallerin akım yoğunluğu yarıçapa bağlıdır. Bundan dolayı hacim bölgesi $1/r^2$ bağılılığına sahiptir [Cipiti, 2004].

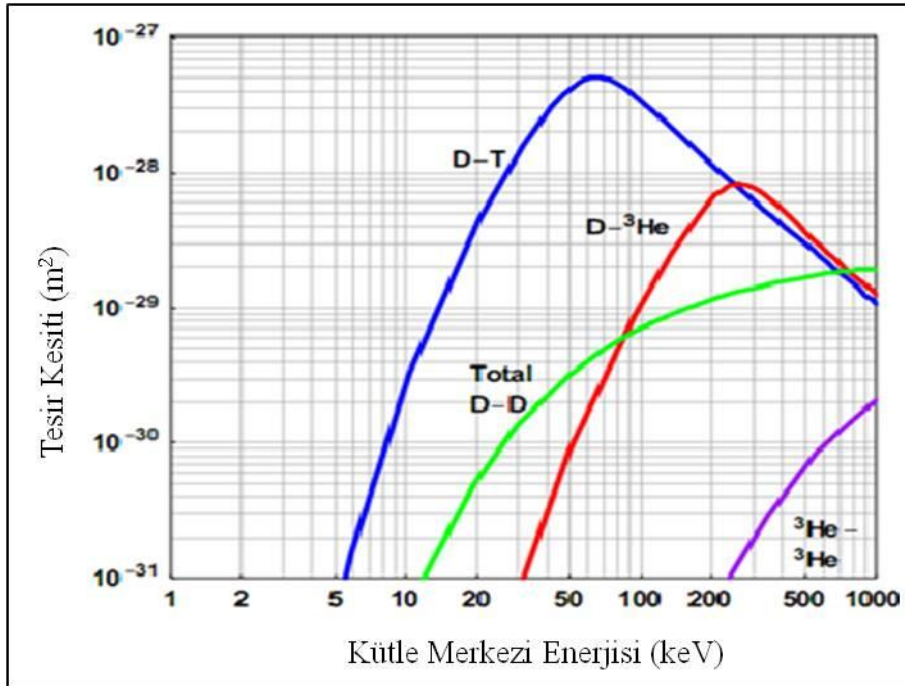
IEC cihazının çalışması yük değiş tokuşu ile ilgili olarak uzun ve kısa ortalama serbest yol (λ) değerleri için iki bölgede incelenebilir. $\lambda \gg (r_0 - r_i)$ (burada r_0 anodun, r_i ise katodun yarıçapıdır) ise kaynak bölgeden gelen iyonlar cihazın merkezine ulaşacaklardır. Bu durumda reaksiyon baskın olarak katot bölgesinde

gerçekleşecektir. Reaksiyona giren iyonlar, anot ve katot arasına uygulanan potansiyel farkın neredeyse tamamına sahip olacaklardır. $\lambda \ll (r_0 - r_i)$ ise, iyonlar anot ve katot arasına uygulanan potansiyel farkın sadece bir kısmına sahip olduktan sonra yük değiş tokuşu olacak ve oluşan nötr atomlar katot bölgesindeki durumundan daha düşük bir kütle merkezi enerjisinde çok düşük enerjili yavaş nötraller ile çarpışacaktır [Ashley ve ark., 1999].

Katot bölgesi

Katot bölgesi demet-katot (hedef) reaksiyonlarından oluşur. İyonlar katoda implant edildiği için bu şekilde adlandırılır. Demet-katot reaksiyonları, hızlı parçacıkların katot tellerinin yüzeyi ile çarpışması ve yüzeyin bir kaç μm içinde gömülü gaz parçacıkları ile birleşmesi sonucu oluşur [Donovan, 2011]. Normalde IEC cihazı çalışırken katot tellerinde yüksek bir iyon akımı (~ 2 mA) bulunur. Bu akımdaki iyonlar, katotta önemli miktarda atomik yoğunluk oluşturabilirler. Katot tellerinin füzyon iyonlarıyla sürekli bombardımanı demet-katot reaksiyonları ile sonuçlanır. Genellikle bu deneyler için katı katot kullanılır. Katı katotlar iyonların hepsini yüzeyine çekecek ve füzyon reaksiyonu katot yüzeyinde olacaktır. Bu reaksiyonların oranı katodun yapıldığı malzemeye ve malzeme içine implant edilen parçacıkların yoğunluğuna bağlıdır [Cipiti, 2004].

Temel füzyon reaksiyonların tesir kesitleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Şekilden en yüksek tesir kesitinin D-T reaksiyonuna ait olduğu görülür. Yaklaşık 80 keV'de D-D reaksiyonunun tesir kesiti D- ^3He reaksiyonunun tesir kesitinden daha büyüktür fakat daha sonra D- ^3He reaksiyonunun tesir kesiti artar [Bosch ve Hale, 1992; Miley, 1976; Piefer ve ark., 2005; Wehmeyer, 2005].



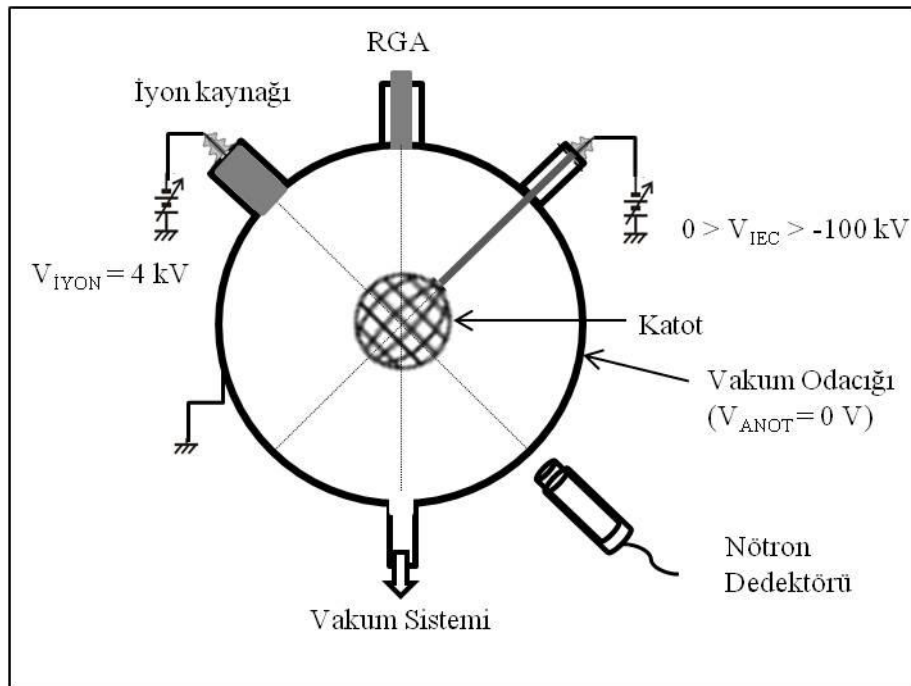
Şekil 2.11. Temel füzyon reaksiyonlarının füzyon tesisir kesitleri [Bosch ve Hale, 1992; Miley, 1976; Piefer ve ark., 2005; Wehmeyer, 2005]

3. MATERYAL VE METOT

3.1. SANAEM-IEC Cihazının Yapımı ve Bileşenleri

Bu çalışmada bahsedilen eylemsiz elektrostatik sıkıştırma cihazı, D-D füzyon reaksiyonunu gerçekleştirmek üzere Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) Plazma Fiziği Laboratuvarı'nda A3.H2.P2.02 Kodlu " Küçük Füzyon Makineleri, İyon Kaynakları, Plazma Çalışmaları ve Hızlandırıcı Bileşenleri Tasarımı ve Yapımı" isimli proje kapsamında oluşturulmuş (Resim 3.1) ve SANAEM-IEC olarak adlandırılmıştır.

Küresel geometride oluşturulan SANAEM-IEC cihazı 10 adet girişe sahiptir. Bu girişlerden bir tanesi katot için, diğer girişler ise, vakum sistemi, döteryum iyon kaynakları ve kamera ile vakum odacığını gözlemlemek için kullanılmaktadır. Tüm sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. SANAEM-IEC cihazı yüksekliği 150 cm, 85x85 cm² alana sahip alüminyum profil üzerine yerleştirilmiştir (Resim 3.1).



Şekil 3.1. SANAEM-IEC cihazının şematik gösterimi



Resim 3.1. SANAEM-IEC cihazı

Vakum odacığının iç çapı 300 mm, kalınlığı 4mm'dir. Vakum odacığı Şekil 3.2a'dan görüldüğü gibi iki yarım küre olarak tasarlanmış ve Ankara OSTİM'de yaptırılmış olup her yarım kürede 5 girişe sahiptir. Vakum odacığı ve katodun teknik çizimleri EK1'de verilmiştir. SANAEM-IEC'nin bileşenleri aşağıdaki gibidir.

3.1.1. Elektrotlar (Anot ve Katot)

SANAEM-IEC cihazında anot olarak paslanmaz çelikten yapılmış küresel bir vakum odacığı, katot olarak ise üç farklı çapta paslanmaz çelik ve pirinçten yapılmış grid kullanılmıştır. Anot ve katotun SOLIDWORKS programı ile yapılan çizimi Şekil 3.2'de gösterilmektedir:



Şekil 3.2.a) Anot, b) Katot

Küçük (çapı 50 mm), orta (çapı 80 mm) ve büyük (çapı 110 mm) olmak üzere üç farklı büyüklükte katot kullanılmıştır. Katotlar teknik çizimleri (EK1) oluşturularak SANAEM Mekanik Atelyesi'nde yaptırılmıştır. Üç katodun da yapımında kullanılan telin kalınlığı 3 mm'dir ve tel sayısı 8'dir. Katotların geçirgenliği küçük, orta ve büyük katot için sırasıyla %70, %82 ve %85'dir. Yalıtkan içine yerleştirilmiş katotlar ve anot Resim 3.2a ve 3.2b'de gösterilmektedir:



Resim 3.2.a) Anot, b) Büyük, orta ve küçük katot

Katotların ve anodun yapıldıkları malzemelerin x-ışını floresans (X-RF) cihazı analizi sonucu elde edilen yüzde (%) değerleri Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Katotların ve anodun yapıldıkları malzemelerin içerik yüzdeleri (%)

Anot	Küçük Katot	Orta ve Büyük Katot
Çelik	Pirinç	Çelik
%68,78 Fe	%62 Cu	%99,66 Fe
%17,1 Cr	%36 Zn	%0,27 Mn
%9,56 Ni	%0,8 Ag	%0,07 Cr
%2,13 Mo	%0,8 Fe	
%1,75 Mn	Çelik	
%0,61 Cu	%71 Fe	
	%18 Cr	
	%7,5 Ni	
	%1,7 Mn	
	%1 Cu	

3.1.2. Besleme elemanı

Katoda yüksek voltaj aktarmak için çubuk şeklinde besleme elemanı (feedthrough) kullanılmıştır. Besleme çubuğu çelikten yapılmış olup boyu 24,5 cm, çapı 0,65 cm' dir. Besleme çubuğu katoda kaynak yapılarak tutturulmuştur. Besleme çubuğu, anot ve katot arasında elektrik sparklarına engel olacak poliamitten yapılmış yalıtkan bir malzeme içine yerleştirilmiştir. Böylece anot ile katot yalıtkan bir malzeme olan poliamit ile birbirinden ayrılmıştır. Poliamit yüksek ısı çalışmalarına dayanıklı, yalıtkan ve sert bir plastik malzemedir. Poliamit yalıtkan boyunca iki nokta arasındaki mesafeyi uzatmak için halka şeklinde boğumlar (oluklar) açılmış ve vakum odacığına giren kısmı inceltilerek sivriltilmiştir. Bu besleme çubuğu ve oluklu yalıtkan kılıf Resim 3.3'de gösterilmiştir.



Resim 3.3.a) Besleme çubuğu, b) Yalıtkan kılıf

Besleme çubuğu ve yalıtkan kılıf kullanılarak yapılan çalışmalarda 50 kV değerine kadar yalıtım sağlanmış fakat daha yüksek voltaj değerlerinde sparklar meydana gelmiştir. Bu nedenle 50 kV üzerinde çalışılamamıştır. Bu sorunu gidermek için besleme çubuğunun boyu uzatılmış ve üzerindeki yalıtkan geometrisi değiştirilmiştir. Bu işlemler sayesinde 85 kV değerine kadar ulaşılabilmektedir. Yeni besleme çubuğu çelikten yapılmış olup boyu 35,5 cm, çapı 0,65 cm'dir. Yeni yalıtkan ise yine poliamit malzemeden yapılmış ve besleme çubuğu ile orantılı olarak boyu uzatılmış ve kalınlığı arttırılmıştır. Yeni besleme çubuğu ve yalıtkan kılıf Resim 3.4'de gösterilmiştir. Besleme çubukları ve yalıtkan kılıf SANAEM Mekanik Atelyesi'nde yaptırılmıştır.



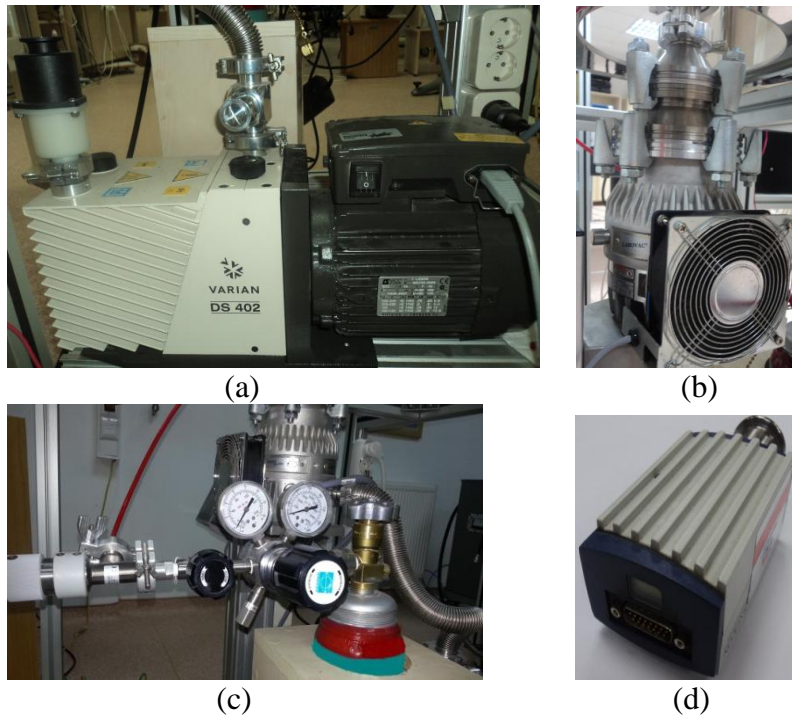
Resim 3.4.a) Yeni besleme çubuğu, b) Yeni yalıtkan kılıf

3.1.3. Vakum sistemi

SANAEM-IEC cihazında çalışma gazı olarak döteryum kullanılmış ve çalışmalar yüksek vakum ortamında (10^{-3} - 10^{-6} mbar) gerçekleştirilmiştir. Uluslararası tanıma göre vakum, basıncı “Atmosferik Basıncın” altında olan gazların doldurduğu kapalı bir ortam olarak tarif edilmiştir. Bir vakum odacığı içinde bulunan yabancı gazlar ve buhar deneyin gerçekleşmesini engeller. Bu nedenle deneyin yapılacağı ortamın çok temiz olması ve yabancı maddelerden (istenmeyen gazlar ve buhar) arındırılması şarttır. Böyle bir ortamın sağlanabilmesi vakum pompaları kullanılarak gerçekleştirilebilir. SANAEM-IEC sisteminde vakum seviyesini sağlamak için Varian DS 402 mekanik pompa ve Ilmvac turbo moleküler pompa kullanılmıştır. Mekanik pompa ile 10^{-3} mbar vakum seviyesinde ön basınç sağlanmakta ve turbo

moleküler pompa ile 10^{-6} mbar basınç değerine kadar ulaşılmaktadır. Basınç değeri Inficon iyon vakum ölçer ile ölçülmektedir. Sistemde kullanılan pompalar, vakum ölçer ve döteryum gazı Resim 3.5'de gösterilmiştir.

SANAEM-IEC cihazındaki tüm girişlere bağlanan elemanlar, istenilen vakum değerine ulaşılabilmesi için vakum o-ringleri, kelepçeler, gerekirse adaptörler ve kapaklar ile kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan bazı vakum elemanları Resim 3.6'da gösterilmiştir.



Resim 3.5.a) Mekanik Pompa, b) Turbo moleküler pompa, c) Döteryum tüpü, d) Vakum ölçer

Bu çalışmada, çalışma basıncı ($1-10 \times 10^{-4}$ mbar) aralığındadır. Ayrıca vakum odacığında istenilen basınç seviyesine ulaşamadığı, sistemde vakum kaçağı olduğu durumlarda kaçağın yerini tespit etmek için Varian BR15 Helyum kaçak dedektörü kullanılmaktadır. Helyum kaçak dedektörü Resim 3.7'de gösterilmiştir.



Resim 3.6. Bazı vakum elemanları

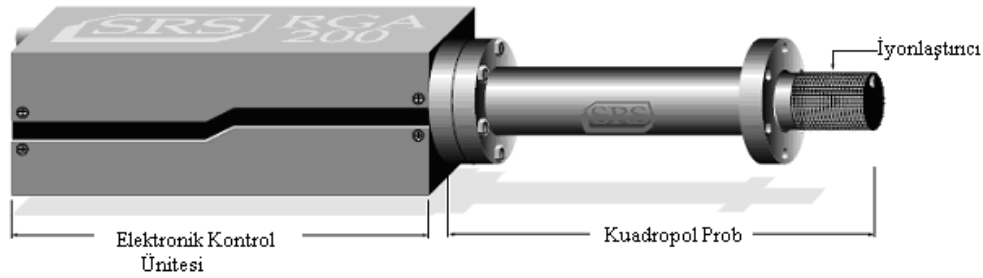


Resim 3.7. He kaçak dedektörü

3.1.4. Atık gaz analizörü

Vakum odacığındaki mevcut gazları belirlemek için Stanford Research Systems CIS 200® model bir atık gaz analizörü kullanılmıştır. Atık gaz analizörü bir vakum sistemine doğrudan bağlanabilen ve vakum odacığı içindeki gazları analiz eden küçük fiziksel boyutlara sahip bir kütle spektrometresidir. Bir atık gaz analizörünün çalışma prensibi şu şekildedir: gaz moleküllerinin küçük bir kısmı iyonlaşır (pozitif iyonlar) ve iyonlar moleküler kütlelerine göre ayrılır ve dedekte edilir. Analizör genellikle 1.3×10^{-12} - 2.6×10^{-3} mbar seviyesinde çalıştırılır. Atık gaz analizörü Resim 3.8'deki gibi bir kuadropol prob (sonda) ve Elektronik Kontrol Ünitesi'nden oluşur. Toplam prob ekipmanları 3 parçadan oluşur: iyonlaştırıcı, kuadropol kütle filtresi ve

iyon dedektörü. Analiz esnasında iyonlaştırıcıda iyonlaştırılan pozitif iyonlar spektrometrenin kuadropol kütle filtresine yönlendirilir. Kuadropol kütle filtresi herhangi bir zamanda dedektöre ulaşan iyonları belirler. Cihaz ile çubuk ve analog olmak üzere iki modda ölçümler alınabilmektedir [Manual SRS; Subramanian, 2004]. Bu çalışmada çubuk grafik modu tercih edilmiştir. Atık gaz analizörü Resim 3.8'de gösterilmiştir.

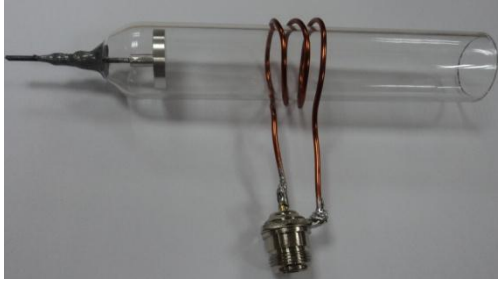


Resim 3.8. Atık gaz analizörü

3.1.5. ICP iyon kaynağı

SANAEM-IEC cihazında iyonların daha hızlı biçimde küre merkezine ulaşmalarını sağlayarak yüksek iyon konsantrasyonu elde etmek için ve füzyon tesir kesitini arttırmak için vakum odacığına radyo frekans uyarmalı ICP (Inductively Coupled Plasma) tipli döteryum iyon kaynakları ilave edilmiştir.

İyon kaynağı için 16 cm uzunluğunda 3 cm çapında cam boru kullanılmaktadır. İyon kaynağı 3,2 cm çapında 3 tur sarılmış, 600 nH indüktansa sahip bakır bobin kullanılarak oluşturulmuştur. İyon kaynağının cam borusu SANAEM Cam Atölyesi'nde yaptırılmıştır. İyon kaynağı ve bobin Resim 3.9'da gösterilmiştir. Resim 3.9'da bakır bobin uçlarına takılan konnektör aracılığıyla RF (13,56 MHz) sinyali uygulanır ve cam boru içinde döteryum plazması oluşturulur.



Resim 3.9. Bobin ile iyon kaynağı

İyon kaynağının vakum odacığına bağlantısı, gaz bağlantısı ve iyonların vakum odacığına giriş açıklığı (deliği) Resim 3.10'da gösterilmiştir:



Resim 3.10.a) İyon kaynağının vakum odacığına bağlantısı, b) Vakum bağlantısı

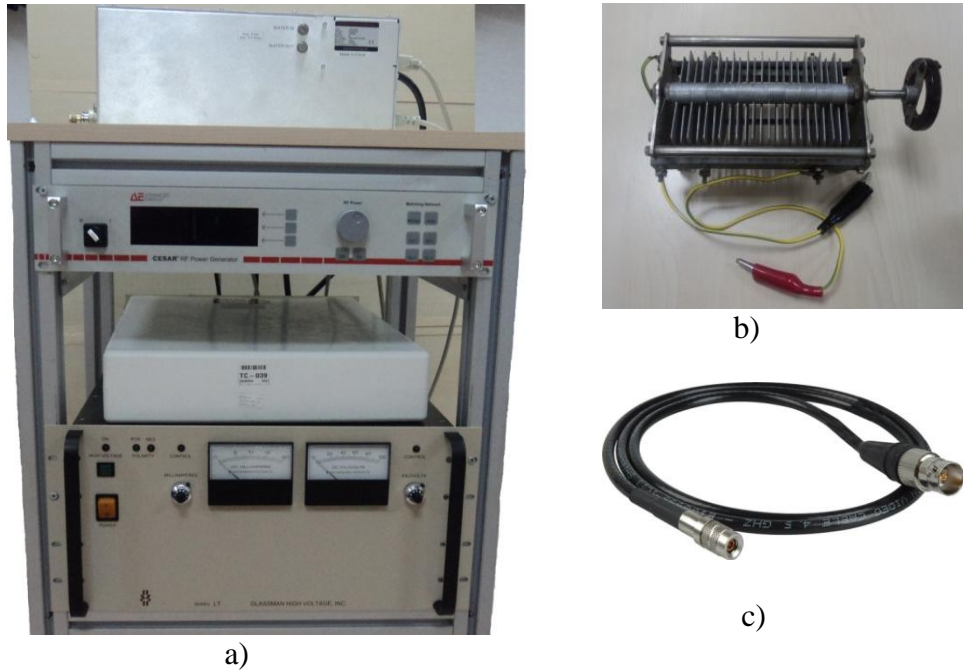
Katoda uygulanan negatif potansiyel Resim 3.10b'de görülen delik aracılığıyla plazmanın içinden döteryum iyonlarının katoda çekilmesini sağlar. Ayrıca cam tüpün içine alüminyumdan yapılmış bir elektrot yerleştirilerek ucuna tungsten tel tutturulmuştur. Bu tel ve elektrot sayesinde iyon kaynağına dışarıdan bir DC itekleme voltajı uygulanarak da iyonların katot içerisine çekilmesi sağlanmaktadır.

3.1.6. Güç kaynakları

Glassman marka yüksek voltaj güç kaynağı kullanılarak katoda 100 kV ve 20 mA'lik bir güç uygulanmıştır. Ancak izolasyon problemlerinden dolayı deneylerde katot voltajı olarak 85 kV değerinde çalışılmıştır.

İyon kaynağına uygulanan itekleme voltajı için 4-5 kV'lik güç kaynağı kullanılmıştır. İyon kaynağında bobin 13,56 MHz ve maksimum 1000 Watt RF Güç jeneratörü ile

beslenmektedir. RF güç aktarımının maksimum olması için RF güç kaynağı ile iyon kaynağı arasında empedans uyumu gereklidir. İyon kaynağı içinde oluşan plazmanın bir empedansı olacaktır. Eğer plazma ile cihaz arasında bir empedans uyumsuzluğu varsa, RF çıkış gücü bobine tam olarak aktarılamaz. Gönderilen sinyalin bir kısmı geri döner ve kayıplar oluşur. Bunun için empedans eşleme ünitesi kullanılmaktadır. Fakat bu ünitenin yeterli olmadığı durumlar da mevcuttur, bu durumlarda empedans uyumunu sağlamak için ayarlı kapasitör yapılmıştır. RF güç kaynağından bobine güç aktarımı için özel RF kabloları ve konnektörler kullanılmıştır (Resim 3.11). Sistemde kullanılan güç kaynakları, empedans eşleme ünitesi ve ayarlı kapasitör Resim 3.11a ve 3.11b' de gösterilmiştir:



Resim 3.11. a) 100 kV güç kaynağı, RF güç kaynağı, RF empedans eşleme ünitesi, b) Ayarlı kapasitör, c) RF güç iletim kablosu

3.1.7. Dedeksiyon sistemi

D-D füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan nötronları ölçmek için nötron dedektörü olarak Thermo FH 40 G ölçüm ünitesi ve FHT 752 SH probu kullanılmıştır. Bu problemler nötronları yavaşlatmak için 7 mm polietilen moderatöre sahip ^3He gazlı nötron dedektörleridir. Moderatörden geçerek termal duruma gelen nötronlar, ^3He

dolu dedektöre ulaştıklarında ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ reaksiyonu yaparlar ve reaksiyon sonucu açığa çıkan yüksek enerjili protonların oluşturduğu sinyaller yardımıyla gözlenirler. Dedektör Am-241/Be-9 3,7 GBq'lık nötron kaynağı ile kalibre edilmiştir. Nötron dedektörü Resim 3.12'de gösterilmiştir.



Resim 3.12. Thermo FH 40 G ünitesi ve FHT 752 SH problu nötron dedektörü

Yüklü parçacıkların vakum odacığı ile etkileşmesi sonucu oluşan Bremsstrahlung x-ışınlarını ölçmek için Geiger-Müller sayacına sahip, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇANAEM) tarafından yapılan ve kalibre edilen bir alan dedektörü ile kullanılmaktadır. Dedektörün taban sayımı 10-25 $\mu\text{R}/\text{h}$ 'dir. Sistem çalışırken x-ışını miktarı 40 mR/h değerine kadar çıkabilmektedir.

3.1.8. Zırlama sistemi

Sistem çalışırken füzyon reaksiyonu sonucu çıkan 2,45 MeV enerjili nötronlardan korunmak amacıyla zırlama hesabı MCNP5 (Monte Carlo N-Particle Transport Code) kodu ile yapılmıştır (EK 2).

MCNP5 kodu nötron, foton, elektron veya çiftlenmiş nötron/foton/elektron transportu için kullanılabilen genel amaçlı, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından Fortran-90 programında yazılmış bir Monte Carlo N-parçacıklı Transport kodudur. Nötron enerji bölgesi tüm izotoplar için 10^{-11} MeV'den 20 MeV, bazı izotoplar için ise 150 MeV aralığında, foton enerji bölgesi 1 keV'den 100 GeV aralığında ve elektron enerji bölgesi 1 keV'den 1 GeV aralığındadır. Program noktasal tesir kesiti verilerini kullanır. Uygulama alanları arasında radyasyondan

korunma ve dozimetri, radyasyon zırhlaması, radyografi, medikal fizik, nükleer kritiklik güvenliği, dedektör tasarımı ve analizi, hızlandırıcı hedef tasarımı, fisyon ve füzyon reaktör tasarımı ve dekontaminasyon bulunmaktadır. MCNP5, geometrik hücrelerdeki malzemelerin rastgele üç boyutlu konfigürasyonunu ele alır. Kullanıcı MCNP5 tarafından okunan bir giriş dosyası oluşturur. Bu dosya problem hakkında şu bilgileri içerir: Geometrik tanımlama, malzemenin tanımlanması ve tesir kesiti hesaplamalarının seçilmesi, nötron, foton veya elektron kaynağının konumu ve karakteristik özellikleri, istenilen çıktılar ve sayım türleri [<http://mncp.lanl.gov>].

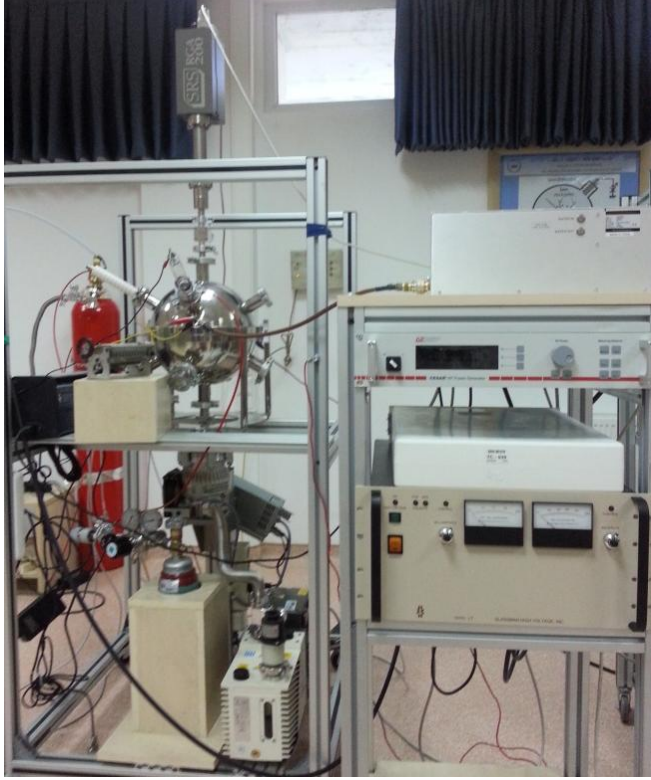
SANAEM-IEC cihazı için MCNP5 kodu ile yapılan hesaplama göre 40 cm kalınlığında parafin kullanıldığı zaman çalışma bölgesine toplam 0,03 n/s kadar yani taban sayım değeri kadar nötron gelmektedir. Cihaz çalışırken parafin blokların arkasında çalışma bölgesinde ikinci bir nötron dedektörü ile ölçüm yapıldığında da nötron sayılmamıştır. Böylece 40 cm parafin blokların nötronları durdurmada yeterli oluşu görülmüştür. X-ışınlarından korunmak için ise 1,5 mm kalınlığında kurşun levhalar kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan sistem elemanları Çizelge 3.2 ile özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. SANAEM-IEC sistem elemanları

Anot	Malzeme: Paslanmaz Çelik Çap: 300 mm
Küçük Katot	Malzeme: Paslanmaz Çelik, Pirinç Çap: 50 mm
Yalıtkan	Malzeme: Poliamit, Uzunluk :33 mm
Orta Katot	Malzeme: Paslanmaz Çelik Çap: 80 mm
Yalıtkan	Malzeme: Poliamit, Uzunluk :33 mm
Büyük Katot	Malzeme: Paslanmaz Çelik Çap: 110 mm
Yalıtkan	Malzeme: Poliamit, Uzunluk :33 mm
Katot Voltajı	85 kV
Çalışma Basıncı	$(1-10) \times 10^{-4}$ mbar
İyon Kaynağı Bobini	Çap: 32 mm Sarımlar sayısı: 3 İndüktans=600 nH

Tüm sistemin görüntüsü Resim 3.13'deki gibidir.



Resim 3.13. SANAEM-IEC sistemin tam görünümü

4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Katot Çapının Nötron Sayısına Etkisi

SANAEM-IEC cihazı oluşturulduktan sonra en uygun katodu belirlemek için üç farklı çapta küresel katot tasarlanarak kullanılmıştır. Katot çapının füzyon tesir kesitine etkisini belirlemek için, sistem aynı basınç ve aynı voltaj değerinde 3 katot için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Çalışma basıncı $4,5 \times 10^{-4}$ mbar ve anoda uygulanan voltaj değeri 85 kV'dir. İyon kaynağına uygulanan itekleme voltaj değeri 4 kV, iyon kaynağındaki bobine uygulanan RF gücü 40W değerindedir.

Nötron dedektörü vakum odacığının etrafında 60 derecelik açılarla yer değiştirerek ölçüm yapılmış ve ölçülen nötron sayısının değişmediği yani izotropik olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç dikkate alınarak tüm deneylerde nötron dedektörü katottan 17,5 cm uzaklığa sabitlenmiştir. Öncelikle küçük katot kullanılarak sistem çalıştırılmış ve nötron dedektörü kullanılarak katı açısı üzerinden toplam nötron sayısı, yani füzyon oranı hesaplanmıştır. Daha sonra sistem aynı şartlarda orta ve büyük katot için çalıştırılmış ve toplam nötron sayıları hesaplanmıştır.

Dedektörle ölçülen nötron sayısından toplam nötron sayısını elde etmek önemlidir. Toplam nötron sayısı yani füzyon oranı F , dedektörün ölçtüğü sayı D_n ile orantılıdır. Dedektör yüzey alanı (A_{det}), dedektörün cihazın merkezinden uzaklığı (R_c) ve $4\pi R_c^2$ katı açısı dikkate alınarak füzyon oranı Eş. 4.1 ile verilir [Piefer ve ark., 2005]:

$$F = \frac{D_n 4\pi R_c^2}{A_{det}} = \frac{D_n 4\pi R_c^2}{\pi r_{det}^2} \quad (4.1)$$

Burada r_{det} dedektörün yarıçapıdır. Bu çalışma için $R_c = 175$ mm, $r_{det} = 10,5$ mm'dir. Bu değerler Eş. 4.1'de yerine yazılırsa, dedektörden ölçülen sayı ile füzyon oranı arasında aşağıdaki gibi bir katsayı olduğu görülür:

$$F = D_n \times 1111.11 \quad (4.2)$$

Tüm çalışmalar boyunca toplam nötron sayısını hesaplamak için Eş. 4.2 kullanılmıştır ve üç katot için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir

Çizelge 4.1. Üç farklı katot için elde edilen toplam nötron sayıları

Katot	Çap (mm)	Katot Voltajı (kV)	Çalışma Basıncı (mbar)	İtekleme Voltajı (kV)	RF Gücü (Watt)	Toplam Nötron Sayısı (n/s)
Küçük	50	85	$4,5 \times 10^{-4}$	4	40	$2,0 \times 10^3$
Orta	80					$1,6 \times 10^4$
Büyük	110					$1,1 \times 10^4$

Çizelgeden görülmektedir ki yapılan deneyler sonucunda SANAEM-IEC cihazı için en çok nötron sayısının elde edildiği katot, 80 mm çapa sahip orta katottur. Bu nedenle bundan sonra yapılan tüm çalışmalarda orta katot kullanılmıştır.

En uygun katot belirlendikten sonra cihazı optimize etmek için farklı basınçlarda ve ilave iyon kaynakları ile çalışmalar sürdürülmüştür.

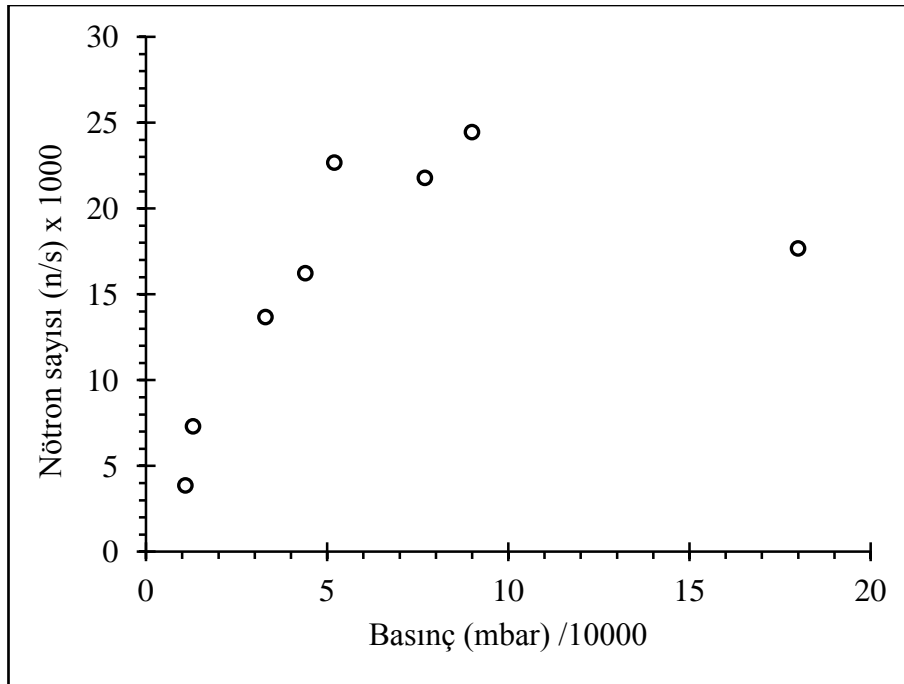
4.2. Basıncın Nötron Sayısına Etkisinin İncelenmesi

IEC cihazında çalışma basıncı reaksiyon bölgesini, füzyon reaksiyon oranını ve dolayısıyla üretilen nötron sayısını fazlasıyla etkiler. Düşük basınçlarda katot içi ve katot telleri ile olan reaksiyonlar daha baskın iken yüksek basınçlarda tüm hacim bölgesinde reaksiyon olma olasılığı daha yüksektir [Subramanian, 2004]. Bu çalışmada nötron sayısının basınç ile değişimi ve füzyon reaksiyonu tesir kesiti incelenmiştir. IEC cihazı orta katot kullanılarak sekiz farklı basınç değerinde tek iyon kaynağı kullanılarak çalıştırılmış ve reaksiyon sonucu üretilen nötron sayısı ölçülmüştür. Her basınç değeri için Eş. 4.2 kullanılarak toplam nötron sayıları hesaplanmıştır. Katot voltajı 85 kV, iyon kaynağına uygulanan DC voltaj değeri 4 kV, iyon kaynağındaki bobine uygulanan RF gücü 40 W'tır. Katot akımı 80 μ A olarak ölçülmüştür. Elde edilen toplam nötron sayıları (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1)

kullanılarak füzyon tesir kesiti hesaplanmış ve literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2. Basınca göre nötron sayısı değişimi

Basınç (mbar)	Dedektörün ölçtüğü sayı (D_n)	Toplam nötron sayısı (n/s)
$1,09 \times 10^{-4}$	3,47	$3,86 \times 10^3$
$1,30 \times 10^{-4}$	6,57	$7,30 \times 10^3$
$3,30 \times 10^{-4}$	12,30	$1,37 \times 10^4$
$4,40 \times 10^{-4}$	14,60	$1,62 \times 10^4$
$5,20 \times 10^{-4}$	20,40	$2,27 \times 10^4$
$9,00 \times 10^{-4}$	22,00	$2,44 \times 10^4$
$1,80 \times 10^{-3}$	15,90	$1,77 \times 10^4$

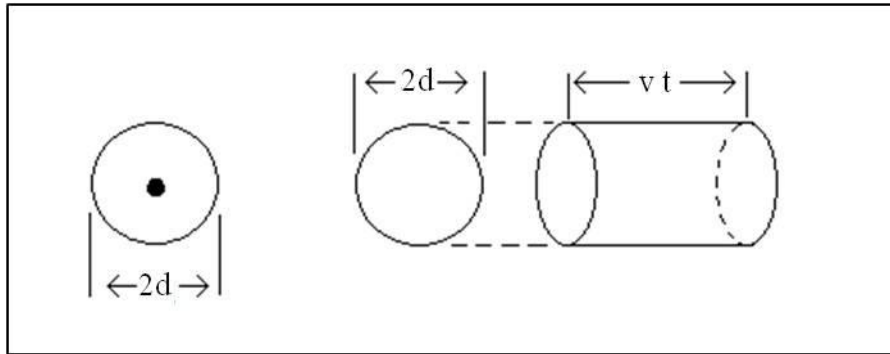


Şekil 4.1. Basınca göre nötron sayısı değişimi

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi, en çok nötron 9×10^{-4} mbar'da elde edilmiştir. Bu değerden sonraki basınç değerlerinde plazma bozulmaya başlamaktadır. Bu basınç değeri için döteryum iyonlarının vakum odacığı içerisindeki ortalama serbest yolu hesaplanabilir. Ortalama serbest yol, bir gaz ortamında moleküllerin çarpışma

yapmadan gittiği yol olarak veya ardışık çarpışmalar arasındaki ortalama yol olarak tanımlanır ve λ ile gösterilir. Moleküllerin çapına ve gazın yoğunluğuna bağlı olan ortalama serbest yol bu tür deneylerde çok önemli bir kavramdır. Vakum odacığı içerisindeki molekül sayısı dolayısıyla basınç ne kadar fazla ise moleküller arası çarpışma o kadar fazla olmaktadır. Ortamın basıncı doğrudan bu fiziksel değeri etkilemektedir. Ortalama serbest yol kinetik teori kullanılarak bulunabilir [Bramer, 1998; Chapman ve Cowling, 1990; <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu>; Serway, 1995].

Bu hesaplama için moleküller d çaplı küreler olarak kabul edilir. İki molekülün merkezleri arasındaki uzaklık d 'den daha küçük olmazsa moleküller çarpışmayacaklardır. Çarpışmanın diğer bir tanımı, moleküllerden birini $2d$ çaplı ve diğerlerini geometrik noktalar şeklinde tasarlamaktır. Bir t süresince, ortalama hızı \bar{v} olan bir molekül $\bar{v}t$ yolunu alacaktır. Aynı sürede, $2d$ çaplı molekülün πd^2 kesit alanlı ve $\bar{v}t$ boylu bir silindiri geçer. $2d$ çaplı molekül, geometrik nokta ve silindir Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. $2d$ çaplı molekül, geometrik nokta ve silindir yol

Silindirin hacmi $\pi d^2 \bar{v} t$ olur. Birim hacimdeki parçacık sayısı n_v ise, silindirin içindeki parçacık sayısı $(\pi d^2 \bar{v} t) n_v$ olur. $2d$ çaplı molekül, t zamanında bu silindirin içindeki tüm parçacıklarla çarpışır. Bu nedenle t zamanı süresince oluşan çarpışma sayısı, silindir içindeki parçacık sayısı olan $(\pi d^2 \bar{v} t) n_v$ 'ye eşittir. Ortalama serbest

yol λ , t süresince alınan ortalama $\bar{v} t$ yolunun, bu sürede oluşan çarpışma sayısına bölümüne eşittir:

$$\lambda = \frac{\bar{v} t}{(\pi d^2 \bar{v} t) n_v} = \frac{1}{\pi d^2 n_v} \quad (4.3)$$

burada ortalama görelî hıza geçiş yaparsak;

$$\bar{v}_{görelî} = \sqrt{2} \bar{v} \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{\bar{v} t}{(\pi d^2 \bar{v} t) n_v} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n_v} \quad (4.5)$$

Birim hacimdeki parçacık sayısı Avagadro sayısı cinsinden yazılabilir:

$$n_v = \frac{n_m N_A}{V} = \frac{n_m N_A}{\frac{n RT}{P}} = \frac{N_A P}{RT_K} \quad (4.6)$$

Eş. 4.6., Eş. 4.5'de yerine yazılırsa

$$\lambda = \frac{RT_K}{\pi \sqrt{2} d^2 N_A P} \quad (4.7)$$

olur. Burada R gaz sabiti, n_m mol sayısı, T_K sıcaklık, d molekül çapı, N_A Avagadro sayısı ve P basınçtır. Eş. 4.7 kullanılarak döteryum iyonları için ortalama serbest yol yaklaşık olarak 18 cm olarak hesaplanmıştır. SANAEM-IEC cihazının yarıçapı (15 cm) ile bu değer karşılaştırıldığında, döteryum iyonlarının ortalama serbest yol uzunluğunun büyük olduğu görülür. Bu durumda iyonların hemen hemen tamamının çarpışmadan cihazın merkezine ulaştığı tahmin edilir. IEC cihazlarının tamamında, füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için füzyon iyonlarının ortamdaki diğer iyonlarla mümkün olduğu kadar az çarpışma yapması istenir. Bu durum başarılırsa iyonlar enerjilerini kaybetmeksizin katoda ulaşarak salınım yaparlar ve birbirleriyle birleşerek füzyon reaksiyonunu gerçekleştirirler.

4.3. Füzyon Tesir Kesiti Hesaplamaları

Bu çalışmada düşük basınç bölgesinde çalışıldığı için füzyon reaksiyonlarının büyük çoğunlukla katot-içi bölgede gerçekleştiği kabul edilmiştir. Katot içi bölgede Bölüm 2'de bahsedildiği gibi demet-demet ve demet-yavaş nötral reaksiyonları gerçekleşir. Eğer demet-demet reaksiyonları gerçekleşirse döteryum iyonlarının tamamı, katoda uygulanan potansiyel kadar enerji kazanacaktır ve iki hızlı döteryum iyonu birleşecektir. Demet-yavaş nötral reaksiyonları gerçekleşirse hızlı döteryum iyonu ile vakum odacığında hızlanmamış durgun döteryum iyonu çarpışacaktır. Dolayısıyla birinci durum kütle merkezi, ikinci durum laboratuvar sistemindeki duruma uyacaktır. Laboratuvar ve kütle merkezi sistemi arasındaki bağıntılar EK3'de verilmiştir.

D-D reaksiyonu göz önüne alındığında $m_a=m$ ve $m_b=m$ 'dir. Döteryum iyonlarının LAB sistemindeki enerjisi ile KMK sistemindeki enerjileri arasındaki bağıntı EK3 Eş. 3.7. dikkate alınarak aşağıdaki gibi bulunabilir [Egle, 2010; EK 3]:

$$E_{km} = \frac{m_a}{m_a + m_b} = \frac{1}{2} E_{Lab} \quad (4.8)$$

Döteryum iyonlarının kütle merkezi enerjileri laboratuvar sistemindeki enerjilerinin yarısı kadardır. Aynı zamanda hızlandırılan döteryum iyonları molekül halinde (D_2) bulduklarından, döteryum başına bu enerjinin yarısı düşer. Dolayısıyla hem kütle merkezi sisteminden 1/2 hem de döteryum molekülündeki iki döterondan dolayı 1/2 faktörü dikkate alındığında enerji, başlangıçtaki enerjinin 1/4'üne eşit olacaktır. Bu yüzden bu çalışmada katoda uygulanan potansiyel fark 85 kV olmasına rağmen demet-yavaş nötral reaksiyonları için döteronların sahip olduğu enerji 21,25 kV'dir. Ayrıca demet-demet reaksiyonlarını gerçekleştiren döteryum iyonlarının bir kısmı 85 kV enerjisine sahipken bir kısmı durgun yavaş nötral iyonlarıyla çarpışarak enerjilerinin bir kısmını kaybedeceklerdir. Dolayısıyla hızlı iyonların enerjileri 0-85 kV aralığında bir dağılıma sahiptir.

IEC cihazında katot içi bölgede demet-yavaş nötral füzyon reaksiyonu için, cihazın herhangi bir r yarıçapındaki füzyon oranı df , iyon enerjisi E , gaz yoğunluğu n_b ve toplam iyon akımı I_{iyon} ile orantılıdır [Piefer ve ark., 2005]:

$$df(r) = n_b \frac{I_{iyon}}{e} \sigma(E) dr \quad (4.9)$$

Burada $\sigma(E)$ enerjiye bağlı füzyon tesir kesiti ve e birim yüküdür. n_b gaz yoğunluğu ideal gaz denkleminde yararlanılarak hesaplanabilir.

Toplam iyon akımı I_{iyon} katot akımı ile,

$$I_{iyon} = \frac{I_{katot}}{(1-\eta)(1+\kappa)} \quad (4.10)$$

olarak ilişkilidir. Burada I_{katot} katot akımı, η katot geçirgenliği ve κ katodun ortalama ikincil elektron yakalama katsayısıdır ve aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$\frac{V I_{katot}}{1+\kappa} = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (4.11)$$

E katot içinde r 'ye bağlı olmadığı için, Eş. 4.9 katot yarıçapı üzerinden integre edilir ve toplam füzyon oranı F aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F = n_b \frac{I_{katot} 2R_{katot}}{e(1-\eta)(1+\kappa)} \sigma(E) \quad (4.12)$$

Burada Eş. 4.1 ve 4.12 yeniden düzenlenirse dedektörün ölçtüğü nötron sayısı ile füzyon tesir kesiti arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı bulunur.

$$\sigma(E) = \frac{D_n 4\pi R_{det}^2}{A_{det}} \frac{e(1-\eta)(1+\kappa)}{I_{katot} 2R_{katot} n_b} \quad (4.13)$$

Bu çalışmada orta katotla elde edilen en yüksek nötron sayısı ve Eş. 4.13 kullanılarak demet-yavaş nötral reaksiyonu için füzyon tesir kesiti hesaplanabilir. Bu çalışma için

ilgili parametre değerleri $P=9 \times 10^{-4}$ mbar, $D_n=22$ n/s, $R_{det}=175$ mm, $A_{det}=\pi(10,5 \text{ mm})^2$, $e=1,6 \times 10^{-19}$ C, $\eta=0,80$, $\kappa=0,25$, $I_{katot}=80 \mu\text{A}$, $R_{katot}=80$ mm ve $n_b=2,18 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 'dir. Değerler yerine yazılırsa $\sigma(E)=3,43 \times 10^{-30} \text{ m}^2$ veya 34,3 mb olarak bulunur. Elde edilen bu değer demet-yavaş nötral reaksiyonu için füzyon tesir kesiti olduğundan füzyon tesir kesiti grafiğinde (Şekil 2.11) 21,25 kV değerindeki D-D reaksiyonu, için tesir kesiti değerine bakılırsa yaklaşık olarak $\sigma(E)=6 \times 10^{-31} \text{ m}^2$ veya 6 mb olduğu görülür. D-D reaksiyonu eşit olasılıklı iki çıkış kanalına sahip olduğu için, bu reaksiyon oranının yarısı nötron yarısı proton kanalına aittir. Dolayısıyla nötronlar için tesir kesiti değeri $3 \times 10^{-31} \text{ m}^2$ veya 3 mb olduğu görülür. Eş. 4.13 kullanılarak hesaplanan değer ve grafikten elde edilen değer karşılaştırıldığında tesir kesitlerinde 10 kat bir fark görülmektedir. Bu fark Eş. 4.13'de füzyon reaksiyon oranını (füzyon oranı aynı zamanda bize reaksiyon sayısını dolayısıyla çıkan parçacıkların, nötron ve proton sayısını verir) hesaplarken ölçtüğümüz tüm nötron sayısını hesaba kattığımızdan kaynaklanmaktadır. Oysaki bu sayının içinde hem demet-yavaş nötral hem de demet-demet reaksiyonları sonucu açığa çıkan nötronlar vardır. Çalışılan basınç değerinde ortaya çıkan nötronların yüzde olarak ne kadarının demet-yavaş nötral reaksiyonlarına ait olduğunu bulmak için, tesir kesiti grafiğinden (Şekil 2.11) 21,25 keV için tesir kesiti değeri ($3 \times 10^{-31} \text{ m}^2$) Eş. 4.12'de yerine yazılırsa demet-yavaş nötral reaksiyonları sonucu ortaya çıkan nötron sayısı bulunabilir.

Gerekli tüm değerler yerine yazılırsa, demet-yavaş nötral füzyon reaksiyonunun füzyon oranı yani nötron sayısı $2092,8 \text{ s}^{-1}$ ($2,09 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$) olarak bulunur. 9×10^{-4} mbar basınç değerinde orta katot için yapılan çalışmalarda ölçülen nötron sayısı Çizelge 4.2'de görüleceği gibi $2,44 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 'dir. Eğer yüzde olarak hesaplarsak demet-yavaş nötral füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan nötron sayısı (dolayısıyla demet-yavaş nötral füzyon reaksiyonu sayısı), ölçülen nötronların yaklaşık olarak %10'udur. Dolayısıyla döteryum atomlarının hızlanıp birbirleriyle demet-demet reaksiyonları yapma oranı oldukça yüksektir.

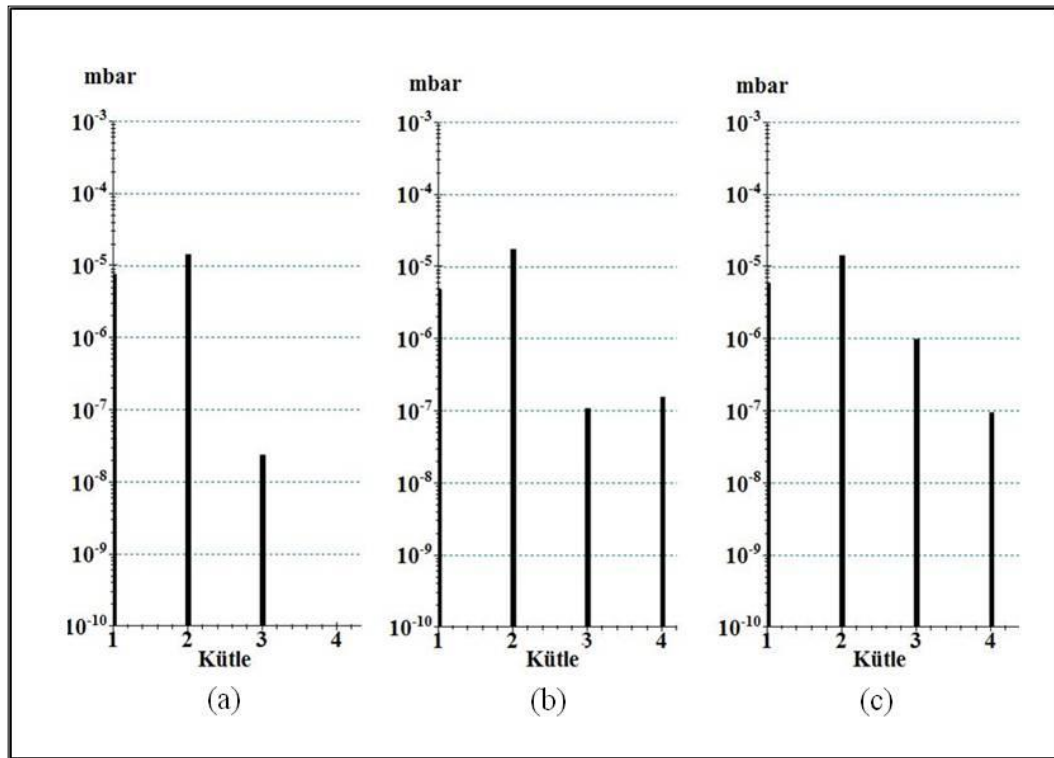
4.4. Atık Gaz Analizörü (RGA) Çalışmaları

SANAEM-IEC cihazı için atık gaz analizörü ile spektral ölçümler alınmıştır. Bu çalışmada özellikle vakumlu ortamdaki $m=3$ ve $m=4$ kütleli gazların değişimine üç aşama göz önüne alınarak bakılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu aşamalar: sistemde gaz yokken, sisteme döteryum gazı verildikten sonra ve sistem çalıştırılıp D-D füzyon reaksiyonu gerçekleştirildikten sonra (Şekil 4.4). Atık gaz analizörünün filamanının zarar görmemesi için analizör, sistem çalışırken kapatılmak zorundadır. Dolayısıyla sistem çalışırken D-D reaksiyonu gerçekleştirildiği anda atık gaz analizörü ile ölçüm alınamamaktadır. Bu sebeple sistem çalıştırılıp D-D reaksiyonu gerçekleştirildikten sonra sistem kapatılmış ve atık gaz analizörü tekrar devreye sokulmuş ve reaksiyondan kısa bir süre sonra (yaklaşık 2 dakika) gazların miktarı incelenmiştir. İstenilen gaz miktarlarını net olarak karşılaştırabilmek için atık gaz analizörünün çubuk grafik modunda ölçümler alınmıştır. Çizelge 4.3'den görüldüğü gibi RGA grafiklerinde $m=3$ kütlesi ($^3\text{He}^+$) helyum-3 veya (T^+) trityum atomunu veya (HD^+) proton-döteryum moleküllerini, $m=4$ kütlesi ise (D_2^+) döteryum molekülünü göstermektedir.

Şekil 4.4a, $m=4$ kütleli döteryum gazının sistem vakumda iken mevcut olmadığını, $m=3$ kütleli gazların ise 10^{-8} mbar mertebesinde olduğunu göstermektedir. Şekil 4.4b, döteryum gazı verildikten sonra doğal olarak $m=4$ kütleli döteryum gazının miktarı artmıştır ve $m=3$ kütleli gaz miktarı 10^{-7} mertebesine yükselmiştir. Buradaki artış çok büyük olasılıkla HD^+ molekülünden dolayıdır. Şekil 4.4c'de ise D-D reaksiyonu gerçekleştikten sonra $m=4$ döteryum miktarının azaldığı görülmektedir. D-D reaksiyonunda yakıt olarak döteryum gazı kullanıldığı için $m=4$ kütleli gazın azalması beklenen durumdur. $m=3$ kütleli gaz miktarı ise 10^{-6} mbar mertebesine yükselmiştir. Bu sonuç bize reaksiyon sonucu ^3He gazının oluştuğunu ve D-D reaksiyonunun gerçekleştiğini gösterir.

Çizelge 4.3. RGA spektrumunda bazı kütlelere karşılık gelen olası iyonlar

Kütle	Olası iyon türleri
2	H_2^+ , D^+
3	$^3He^+$, T^+ , HD^+
4	D_2^+
6	D_3^+

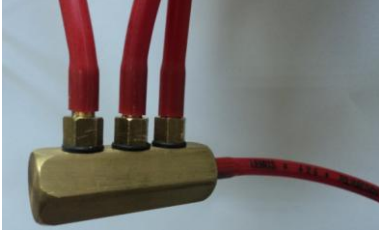


Şekil 4.4. RGA analizinde m=3 ve m=4 kütleli gazların a) sistemde gaz yokken, b) reaksiyon öncesi döteryum gazı ilave edildikten sonra, c) reaksiyon sonrası, miktarları

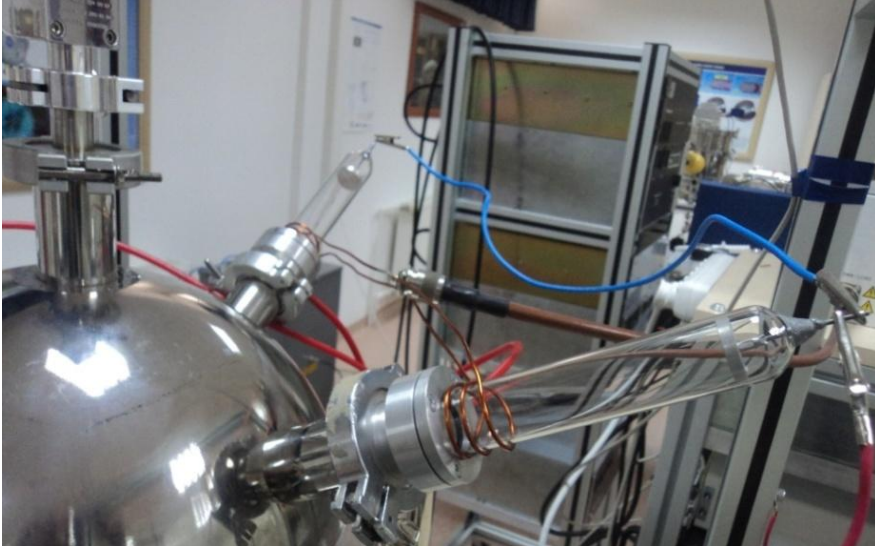
4.5. İyon Kaynağının Nötron Sayısına Etkisi

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda tüm ölçümler tek iyon kaynağı ile kullanılarak alınmıştır. Sistemde füzyon tesir kesitini arttırmak ve daha düşük basınçlarda çalışabilmek için iyon kaynağı sayısı ikiye çıkarılmıştır. Yine ICP tipli, 16 cm uzunluğunda 3 cm çapında cam boru ile 3,2 cm çapında 3 tur sarılmış, 600 nH indüktansa sahip bir iyon kaynağı kullanılmıştır. İki iyon kaynağına gazı dağıtmak

için çoklu girişe (3 girişe) sahip dağıtıcı bir aparat (Resim 4.1) yaptırılarak sisteme takılmıştır. Sistemin iki iyon kaynağı ilaveli yeni görüntüsü Resim 4.2'de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Gaz dağıtıcı aparat



Resim 4.2. Vakum odacığının iki iyon kaynaklı görüntüsü

Bu çalışmada iki iyon kaynaklı sistem öncelikle tek basınç değerinde çalıştırılmış ve tek iyon kaynağı elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve iyon kaynağı ilavesinin bu sistem için nötron sayısı üzerine bir etkisi olup olmadığı incelenmiştir. İyon kaynaklarının daha etkin çalışması için iyon kaynağına uygulanan RF yansımalarını azaltarak RF gücünü arttırmak için sistemin empedans uyumu yapılması gerekmektedir. Bu amaç için ayarlı bir kapasitör kullanılarak RF gücünün yansımaları yaklaşık olarak ortadan kaldırılmıştır. Sistem 5×10^{-4} mbar basınç ve 85 kV voltaj değerinde çalıştırılmıştır. Tek RF güç kaynağından iki iyon kaynağına da güç iletmek için iki iyon kaynağı birbirine paralel bağlanmış ve her iki iyon

kaynağında da plazma oluşması sağlanmıştır. İki iyon kaynağına yine 4 kV itme voltajı uygulanmış ve önceki deneylerde uygulanan 40 W RF gücü uygulanmıştır. Sistemde D-D reaksiyonu sonucu elde edilen toplam nötron sayısı Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tek iyon kaynağı ile elde edilen nötron sayısı ile karşılaştırılmıştır.

İyon kaynağı sayısı ve nötron sayısı arasındaki ilişki Çizelge 4.4'de verilmiştir. Sistem iki iyon kaynağı ile çalıştırıldığında elde edilen nötron sayısı $4,6 \times 10^4$ n/s olarak bulunmuştur. Bu değer tek iyon kaynağı ile aynı basınçta yapılan çalışmalardaki değer ($2,27 \times 10^4$ n/s) yaklaşık olarak iki katıdır. Bu değerler iyon kaynağı ilavesinin nötron sayısını arttırdığını göstermektedir. Dolayısıyla iyon kaynağı sayısını ne kadar arttırırsak nötron sayısını dolayısıyla füzyon reaksiyonu olasılığını da arttırmış oluruz.

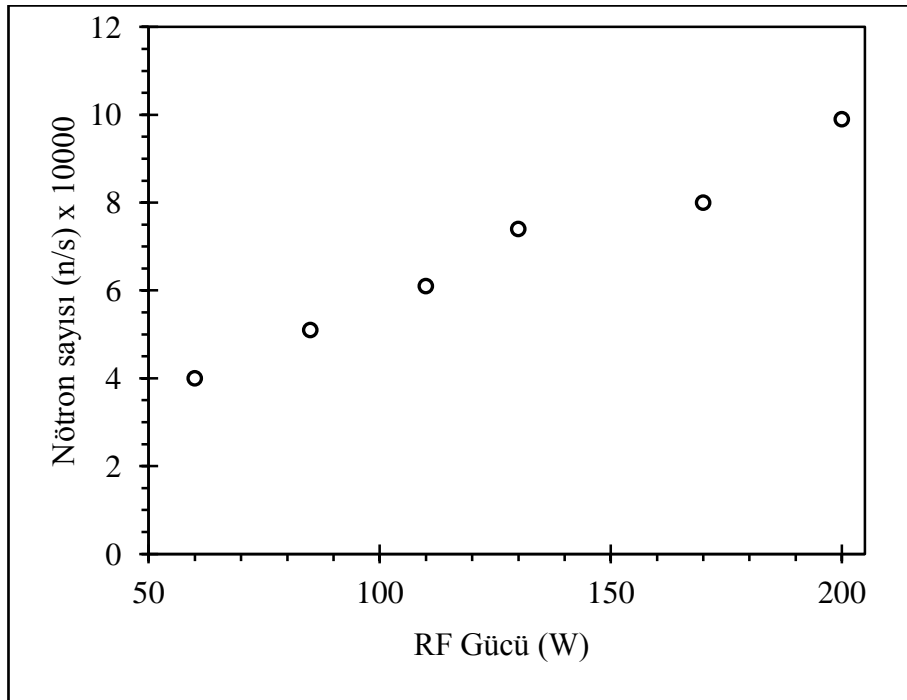
Çizelge 4.4. Tek ve iki iyon kaynağında elde edilen nötron sayısı

	Katot Voltajı (kV)	Çalışma Basıncı (mbar)	İyon Kaynağı Voltajı (kV)	RF Gücü (Watt)	Toplam Nötron Sayısı (n/s)
Tek İyon Kaynağı	85	5×10^{-4}	4	40	$2,27 \times 10^4$
İki İyon Kaynağı					$4,6 \times 10^4$

Daha sonra iki iyon kaynaklı sistem üzerine uygulanan RF gücü artırılarak RF gücünün nötron sayısı üzerine etkisi incelenmiştir. RF gücü arttırıldıkça iyon kaynağında oluşan plazma yoğunlaşmakta ve iyon sayısı artmaktadır. Dolayısıyla RF gücü arttıkça nötron sayısının da artması beklenir. Sistem 5×10^{-4} mbar basınç değerinde iken iyon kaynaklarına uygulanan RF gücü değiştirilerek nötron sayısı değişimi incelenmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. 5×10^{-4} mbar basınçta nötron sayısının RF gücüne bağlı değişimi

RF gücü (Watt)	Nötron Sayısı (n/s)
40	$4,6 \times 10^4$
60	$6,7 \times 10^4$
85	$8,8 \times 10^4$
110	$1,0 \times 10^5$
130	$1,2 \times 10^5$
170	$1,4 \times 10^5$
200	$1,7 \times 10^5$



Şekil 4.5. 5×10^{-4} mbar basınçta nötron sayısının RF gücüne bağlı değişimi

Çizelge ve grafikten, RF gücü arttıkça nötron sayısının arttığı açıkça görülmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda SANAEM-IEC sistemini optimize etmek için iyon kaynağında bazı değişiklikler yapılmıştır. ICP iyon kaynağının çalışıp plazma üretmesi için basıncın yaklaşık 10^{-2} - 10^{-3} mbar değerinde olması gerekmektedir. Oysaki D-D reaksiyonu gerçekleşirken vakum odacığının basınç değeri 10^{-4} mbar civarındadır. İyon kaynağından vakum odacığına iyon girişi bir delik sayesinde

olmaktadır. Bu deliğin çapı iyon kaynağında plazma oluşturabilecek şekilde ayarlanmalıdır. Genelde bu çap mm mertebesinde dir. Delik çapı çok büyük olursa vakum odacığını pompalayan vakum sistemi iyon kaynağını da çok etkin bir şekilde vakumlayacak ve basınç değeri 10^{-4} mbar değerlerine düşecektir. Bu durumda iyon kaynağında plazma oluşturulamayacaktır.

SANAEM-IEC cihazında şimdiye kadarki yapılan çalışmalarda iyon kaynağından vakum odacığına iyonların çekildiği delik çapı yaklaşık 1 mm olarak ayarlamıştır. Bu iyon kaynaklarının açıklık çapları yaklaşık 2 mm'ye çıkarılmış ve iyon kaynaklarının döteryum gazı basılmadan hava (Azot) ortamında çalışıp çalışmadıkları kontrol edilmiştir. 2 mm çap değerinde de plazma oluşturulabildiği gözlenmiştir. İyonların vakum odacığına girişini sağlayan delikli bağlantı elemanının önceki ve sonraki hali Resim 4.3'de gösterilmiştir.

Sistem, 5×10^{-4} mbar basınç değerinde iki iyon kaynağı çalıştırılmıştır. İyon kaynağına uygulanan itekleme voltajı 4 kV, RF gücü 130 W civarında olup $1,98 \times 10^5$ n/s nötron sayısı elde edilmiştir. Açıklık çapı büyümeden önceki sonuçla ($1,2 \times 10^5$ n/s) karşılaştırıldığında yaklaşık %70 artış sağlanmıştır. Sonuçlar doğrultusunda bundan sonraki çalışmalarda 2 mm delik çapına sahip iyon kaynaklarının kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

SANAEM-IEC cihazı ile yapılan çalışmalarda füzyon oranını arttırmak için iyon kaynağı sayısını arttırmanın gerekliliği tek ve iki iyon kaynağı ile yapılan çalışmaların karşılaştırılmaları sonucu görülmüştür. Bu kapsamda SANAEM'de gerçekleştirilen "Küçük Füzyon Makineleri ve Hızlandırıcı Bileşenleri" projesi kapsamında ikinci bir RF güç kaynağı alımı sağlanmıştır. İkinci RF güç kaynağının gelmesiyle üçüncü bir ICP iyon kaynağı yapılarak sisteme dahil edilmiştir.



Resim 4.3. İyon kaynağı bağlantı elemanının a) ~1 mm, b) ~2 mm çap açıklığı

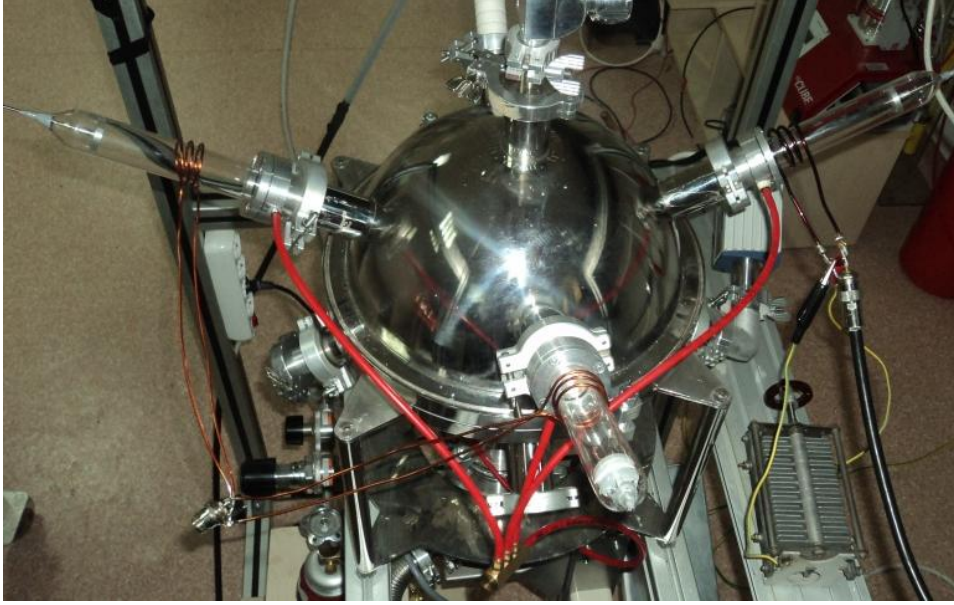


Resim 4.4. SANAEM-IEC cihazında iki iyon kaynağı ile elde edilen plazmanın görüntüsü

4.6. Üç İyon Kaynağı ile Yapılan Çalışmalar

İkinci bir RF güç kaynağının ve empedans eşleme ünitesinin alınmasıyla birlikte sisteme üçüncü bir iyon kaynağı ilave edilmiştir. Bu iyon kaynağı da diğer iki iyon kaynağına özdeş olarak aynı boyda payreks cam borudan ve aynı indüktans değerine sahip bobinden yapılmıştır. İki iyon kaynağına yine birbirlerine paralel bağlanan bobinlerle RF gücü verilmiş üçüncü iyon kaynağı ise yeni RF güç kaynağına bağlanmıştır. Üç iyon kaynağı olması sebebiyle plazma empedansını ayarlamak daha güçtür. Bu sebeple RF gücü 50 W değerinde uygulanabilmiş daha yüksek değerlerde

RF gücünün geri yansması çok fazla olmuştur. Bu şartlar altında sistem çalıştırılarak ölçümler alınmıştır. Sistemin üç iyon kaynağı bağlantılı görüntüsü Resim 4.5'te ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Resim 4.5. Üç iyon kaynağı ilaveli sistem

Çizelge 4.6. Üç iyon kaynağı ile elde edilen nötron sayısı

Katot Voltajı (kV)	Çalışma Basıncı (mbar)	İyon Kaynağı İtekleme Voltajı (kV)	RF Gücü (Watt)	Toplam Nötron Sayısı (n/s)
80	5×10^{-4}	4	50	$3,6 \times 10^5$

Sonuçlar göstermiştir ki, üç iyon kaynağı ile elde edilen nötron sayısı ($3,6 \times 10^5$ n/s) iki iyon kaynağı ile elde edilen ($1,98 \times 10^5$ n/s) değerden yaklaşık %85 daha fazladır. Katot voltajında arklardan dolayı 80 kV üzerine çıkılamamıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle literatür araştırması yapılarak küçük füzyon cihazlarından birisi olan Eylemsiz Elektrostatik Sıkıştırma (IEC) cihazının yapısı, çalışma prensibi ve cihazda kullanılan sistemler incelenmiştir. Gerekli malzeme alt yapısı temin edilerek cihaz tasarlanmış ve Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Teknoloji Bölümü Hızlandırıcı Teknolojisi Birimi Plazma Fiziği Laboratuvarı'nda oluşturulmuş ve "SANAEM-IEC" olarak adlandırılmıştır. SANAEM-IEC cihazında döteryum gazı kullanılmış ve D-D füzyon reaksiyonu çalışmaları yapılmıştır.

SANAEM-IEC cihazında üç farklı çapta katot kullanılarak sistem pek çok kez çalıştırılmış ve en uygun katodun 80 cm yarıçapa sahip orta katot olduğu görülmüştür.

Orta katot ile farklı basınç değerlerinde bir iyon kaynağı ve 85 kV katot voltajı ile sistem çalıştırılmış ve basınç değerlerine karşı nötron değişimi incelenmiştir. En çok nötron sayısının ($2,44 \times 10^4$ n/s) 9×10^{-4} mbar değerinde olduğu görülmüştür. Aynı zamanda atık gaz analizörü ile spektroskopik ölçümler alınmış ve D-D reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan ^3He ürün çekirdeği gözlenmiştir. Bu basınç değeri için döteryum moleküllerinin ortalama serbest yolu $\lambda=18$ cm olarak hesaplanmıştır. Vakum odacığının yarıçapı 15 cm'dir (Bölükdemir ve ark., 2013). Bu durumda döteryum moleküllerinin çoğunluğu çarpışma yaparak enerjilerini kaybetmeden vakum odacığının merkezine ulaşacak ve demet-demet reaksiyonlarını gerçekleştireceklerdir. Bu basınç değerinde demet-yavaş nötral reaksiyonları için nötron sayısı hesaplanmış ve $2,1 \times 10^3$ n/s olarak bulunmuştur. Demet-yavaş nötral reaksiyonları sonucu elde edilen nötronlar toplam nötronların ($2,44 \times 10^4$ n/s) %10'u kadardır. Bu sonuç da bize oluşan nötronların çoğunluğunun demet-demet reaksiyonları sonucu oluştuğunu göstermektedir.

Cihazı optimize ederek cihazın füzyon hızını arttırmak için sisteme ikinci iyon kaynağı takılmıştır. Tek iyon kaynağı ile aynı şartlarda yapılan çalışmada nötron sayısı $2,27 \times 10^4$ n/s iken iki iyon kaynağı ile yapılan çalışmada nötron sayısı $4,6 \times 10^4$

n/s olarak bulunmuştur. Bu sonuç bize iki iyon kaynağı ile yapılan çalışmada elde edilen nötron sayısının %100 arttığını göstermektedir.

İyon kaynağına uygulanan RF gücünün nötron sayısına etkisini incelemek için sistem 5×10^{-4} mbar basınç değerinde iki iyon kaynağı ile çalışırken RF gücü değiştirilmiştir. RF gücünün artmasıyla nötron sayısının da arttığı gözlenmiştir. Sistem maksimum 200 Watt RF gücünde çalıştırılmış ve nötron sayısı $1,7 \times 10^5$ n/s olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda iki iyon kaynağında (5×10^{-4} mbar) tek iyon kaynağına (9×10^{-4} mbar) göre daha düşük basınç değerinde çalışılabilmiştir.

İyon kaynağının vakum odacığına iyon girişini sağlayan açıklık çapı büyütülerek iki iyon kaynağı ile çalışmalar tekrar edilmiştir. 1 mm çaptaki açıklıkta ölçülen nötron sayısı $1,2 \times 10^5$ n/s iken 2 mm açıklıkta $1,98 \times 10^5$ n/s olmuştur. Böylece yeni iyon kaynağı ile alınan sonuçların önceki sonuçların yaklaşık olarak iki katı olduğu görülmüştür.

Sisteme üçüncü bir iyon kaynağı eklenmiş ve üç iyon kaynağı ile elde edilen nötron sayısının ($3,6 \times 10^5$ n/s) iki iyon kaynağı ile elde edilen ($1,98 \times 10^5$ n/s) değerden yaklaşık %85 daha fazla olduğu görülmüştür.

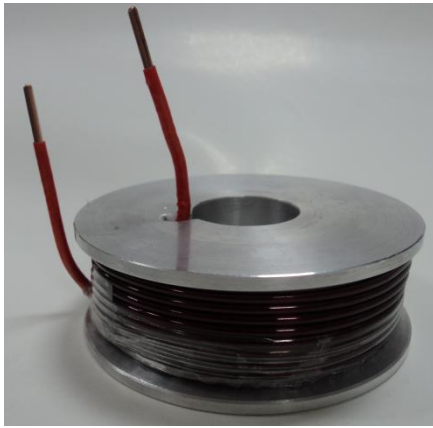
Yapılan çalışmalar sonucunda SANAEM-IEC füzyon cihazında gelecekte yapılması önerilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

IEC cihazlarında füzyon oranını en çok etkileyen faktör katot voltajıdır. Katot voltajı arttıkça füzyon oranı da artmaktadır. SANAEM-IEC cihazı maksimum 85 kV'de çalıştırılabilmektedir. Ancak çalışma sırasında meydana gelen arklardan dolayı bu voltaj değerinde uzun süre çalıştırılmamakta ve daha yüksek voltaj değerlerine çıkılamamaktadır. Bu problemlerin giderilmesi ve daha yüksek voltajlarda çalışabilmek için yeni bir besleme elemanına ve yalıtıkana ihtiyaç vardır. Öncelikle bu kısımların yenilenmesi gerekmektedir. Daha sonra üç iyon kaynağı ile daha yüksek RF güçlerinde çalışmalar yapılabilir ve sisteme yeni iyon kaynakları ilave edilebilir. İki RF güç kaynağı ile daha fazla sayıda iyon kaynağını beslemek için bir

dağıtıcı devre hazırlanabilir ve böylece RF gücü her iyon kaynağına eşit olarak dağıtılabilir.

Katot ile ilgili olarak ise, katodun yapıldığı malzeme değiştirilerek malzemenin nötron sayısına etkisi incelenebilir. Ayrıca katot geçirgenliği artırılabilir ve katot geometrisi değiştirilebilir. Demet-katot reaksiyonlarını gerçekleştirmek için tungsten veya titanyum gibi döteryum ile reaksiyon tesir kesiti yüksek malzemeden yapılmış katı katotlar kullanılabilir.

Vakum odacığı içinde daha çok iyonu katoda odaklamak ve sıkıştırmak için IEC cihazının içine yerleştirilmek üzere 10 tane alüminyum makara üzerine bakır tel sarılarak bobin oluşturulmuştur (Resim 5.1). Bu bobinleri uygun bir şekilde vakum odacığına yerleştirmek suretiyle bir manyetik alan oluşturulabilir ve iyonların büyük bir kısmı katotta hapsedilebilir, böylece nötron sayısını artırma çalışmaları yapılabilir.



Resim 5.1. Alüminyum makara

SANAEM-IEC cihazında daha fazla nötron üretilmeye başlandığında, vakum odacığı içerisine nötron tesir kesiti büyük bir malzeme yerleştirilerek nötron aktivasyon analizi çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akgün, Y., "Düşük enerjili plazma odak füzyon cihazı yapımı ve nötronik ölçümler", Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16 (2010).
- Anderl, R. A., Hartwell, J. K., Nadler, J. H., DeMora, J. M., Stubbers, R. A., Miley, G. H., "Development of an IEC neutron source for NDE", *Fusion Engineering, 16th IEEE/NPSS Conference*, 1482-1485 (1995).
- Ashley, R.P., Kulcinski, G. L., Santarius, J.F., Murali, S.K. And Piefer, G., "D-³He fusion in an inertial electrostatic confinement device", *18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*, New Mexico, 35 (1999).
- Ashley, R.P., Kulcinski, G. L., Santarius, J.F., Murali, S.K. And Piefer, G., Cipiti, B. B., Radel, R. F., Weidner, J., "Recent progress in steady state fusion using D-³He", *Fusion Science and Technology*, 44: 564-566 (2003).
- Bartlett, D., "The European fusion programme", *Transactions of Fusion Science and Technology*, 49: 27-35 (2006).
- Barnes, D. C., Nebel, R. A., Turner, L., "Production and application of dense penning trap plasmas", *Phys. of Fluids B*, 5(10): 3651-3660 (1993).
- Becerra, G. E., Kulcinski, G. L., Santarius, J. F., "Enhancement of an IEC device with a helicon ion source for Helium-3 fusion", *13th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Sydney, (2011).
- Boris, D. R., "Novel diagnostic approaches to characterizing the performance of Wisconsin inertial electrostatic confinement plasma", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 1-3, 42-61, 167-172 (2009).
- Bosch, H. S., Hale, G. M., "Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities", *Fusion Technology*, 32: 611 (1992).
- Bölükdemir, A. S., Akgün, Y., Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A., "D-D fusion studies at ODAK-3K plasma focus device", *International Journal of Electrical Energy Systems*, 1(2): 65-69 (2009).
- Bölükdemir, A. S., Akgün Y. and Alaçakır, A., "Preliminary results from experimental studies of low pressure inertial electrostatic confinement device", *Journal of Fusion Energy*, (2013, DOI:10.1007/s10894-013-9607-z).
- Bramer, S. E. V., Mean Free Path vs Pressure and Altitude, 1/18/98.
- Bussard, R. W., "Some physics considerations of magnetic inertial electrostatic confinement: A new concept for spherical converging-flow fusion", *Fusion Technology*, 19: 273 (1991).

Chapman, S., T.G. Cowling, T.G., "The mathematical theory of non-uniform gases", 3rd. edition, *Cambridge University Press*, ISBN 0-521-40844-X, 88 (1990).

Cipiti, B.B., "The fusion of advanced fuels to produce medical isotopes using inertial electrostatic confinement", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 1-10, 16-19, 21-27, 31-32, 75-76 (2004).

Damideh, V., Sadighzadeh, A., Koohi, A., Aslezaem, A., Heidarnia, A., Abdollahi, N., Davani, F. A., Damideh, R., "Experimental study of the Iranian inertial electrostatic confinement fusion device as a continuous neutron generator", *J Fusion Energ.*, 31: 109–111 (2012).

Dendy, R., "Plasma Physics: An Introductory Course". *Cambridge University Press*, United Kingdom, 513 (1993).

Dietrich, C. C., "Improving particle confinement in inertial electrostatic fusion for spacecraft power and propulsion", PhD Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, 14 (2007).

Donovan, D. C., "Spatial profiling using a time of flight diagnostic and applications of deuterium-deuterium fusion in inertial electrostatic confinement fusion devices", PhD Thesis, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 6-9, 25-26, 83-86, 97-98 (2011).

Dumbrajs, O., "Nuclear Fusion", *RAU Scientific Reports. Computer Modeling & New Technologies*, 2: 50-56 (1998).

Ebrahimi, E.H., Amrollahi, R., Sadighzadeh, A., Torabi, M., Sedaghat, M., Sabri, R., Pourshahab, B., Damideh, V., "The influence of cathode voltage and discharge current on neutron production rate of inertial electrostatic confinement fusion (IR-IECF)", *J Fusion Energ.*, 32 (1): 62-65 (2013).

Egle, B. J., "Nuclear fusion of advanced fuels using converging focused ion beams", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 1-13, 49-66, 77-78, 104-126 (2010).

Farnsworth, P.T., "Electric Discharge Device for Producing Interaction Between Nuclei," U.S. Patent #3,258,402, patented June 28 (1966).

Freidberg, J. P., "Plasma Physics and Fusion Energy", *Cambridge University Press*, United Kingdom, 671, (2007).

Gu, Y., Javedani, J. B., Miley, G. H., "A portable cylindrical electrostatic-fusion device for neutron tomography", *Fusion Technology*, 26 (3): 929-932 (1994).

Gu, Y., Miley, G., DelMedico, S., "Pulsed IEC neutron Generator", Digest of Technical Papers, *Tenth IEEE Trans.*, 2: 1500-1505 (1995).

Hashimoto, G., Masuda, K., Kajiwara, T., Nagasaki, K., Ohnishi, M., Yoshida, T., "Study of simultaneous x-ray and neutron radiography by use of glow discharge driven D-D fusion device", *14th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, College Park, (2012).

Hirsch, "Inertial-Electrostatic Confinement of Ionized Fusion Gases," *Journal of Applied Physics*, 38: 4522 (1967).

Hotta, E., Takakura, K., Wantapon, N., Tomiyasu, K., Yamauchi, K., Watanabe, M., "Overview of current and past research in TITech", *13th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Sydney, (2011).

Hrbud, I., "IEC research status at MSFS," *The 3rd U.S.-Japan Exchange on Inertial Electrostatic Confinement*, Alabama, (2001).

Ian G. B., "The Physics and Technology of Ion Sources", Wiley, 163 (2004).

Ishikura, Y., Yamashita, N., Fukuta, K., Maeda, A., Osawa, H., Onishi, M., "IEC operation with the cathode designed for extracting ion from ion source", *13th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Sydney, (2011).

Internet : "A General Monte Carlo N-Particle (MNCP) Transport Code", <http://mcnp.lanl.gov/> (2012).

Internet : European Fusion Development Agreement "JET's main features", <https://www.efda.org/jet/jet's-main-features> (2012).

Internet : International Thermonuclear Experimental Reactor "Building ITER", <http://www.iter.org/construction> (2012), <http://www.iter.org/sci/beyonditer> (2012).

Internet : "Mean Free Path", <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/kinetic/menfre.html> (2012).

Internet : National Physics Laboratory "Nuclear Fusion", http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_4.html (2012).

Internet : "NSD Neutron Generators "Hardware Overview", <http://www.nsd-fusion.com/hardware.php> (2012).

Kamakura, K., Takaoka, K., Osawa, H., Hatano, Y., Murata, T., Masuda, K., Yamamoto, Y., Onishi, M., "Tritium gas handling on D-T burning IEC", *14th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, College Park, (2012).

Kammash, T., "Fusion Reactor Physics", *Ann Arbor Science*, United States of America, 6-7 (1975).

Khachan, J., Carr, M., Cornish, S., Gummersall, D., Israel, A., Tuft, C., "Overview of IEC at the University of Sydney", *12th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Osaka, (2010).

Krall, N. A., "The Polywell™: A Spherically convergent ion focus concept", *Fusion Technology*, 22: 42 (1992).

Krane, K. S., "Nükleer Fizik 2", Başar Şarer, *Palme Yayıncılık*, Ankara, 392-393, 478-479, 528-535 (2002).

Kulcinski, G.L., "Near Term Commercial Opportunities from Long Range Fusion Research," *Fusion Technology*, 30(3): 411 (1996).

Lee, S., Saw, S. H., "Nuclear fusion energy- Mankind's Giant Step Forward", *J Fusion Energ.*, 30:398-403 (2011).

Masuda, K., Taruya, K., Koyama, T., Hashimoto, H., Yoshikawa, K., Toku, H., Yamamoto, Y., Ohnishi, M., Horiike, H. And Inoue, N., "Performance characteristics of an inertial electrostatic confinement fusion device with a triple-grid system", *Fusion Technology*, 39 (3): 1202-1210 (2001).

Masuda, K., Kipritidis, J., Kajiwara, T., Yamagaki, Y., Nagasaki, K., Yamamoto, Y., Noborio, K., "Overview of IEC research at Kyoto University", *12th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Osaka, (2010).

Masuda, K., Misawa, T., Takahashi, Y., Yagi, T., Hashimoto, G., Kajiwara, T., "Active interrogation of special nuclear materials by use of IEC fusion neutron source", *14th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, College Park, (2012).

Matsuura, H., Takaki, T., Funakoshi, K., Nakao, Y., Kudo, K., " Ion distribution function and radial profile of neutron production rate in spherical inertial electrostatic confinement plasmas", *Nuclear Fusion*, 40(12): 1951-194 (2000).

Meade, D., "50 years of fusion research", *Nuclear Fusion*, 50(1): 014004 (2010).

Meyer, R., "Inertial electrostatic confinement: theoretical and experimental studies of spherical devices", PhD Dissertation, *University of Missouri Faculty of the Graduate School*, Columbia, 53 (2007).

Miley G.H. et al., "Inertial Electrostatic Confinement: An Approach to Burning Advanced Fuels", *Fusion Science and Technology*, 19: 840 (1991).

Miley, G. H., "Fusion Energy Conversion", *American Nuclear Society*, United States of America, 19-30 (1976).

Miley, G. H., Gu, Y., DeMora, J. M., Stubbers, R. A., Hochberg, T. A., Nadler, J. H., Anderl, R. A., "Discharge Characteristics of the Spherical Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Device", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 25(4): 733-738 (1997).

Miley, G.H. "A portable neutron/tunable x-ray source based on inertial electrostatic confinement", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 422: 16 (1999).

Miley, G. H., Sved, J., " The IEC star-mode fusion neutron source for NAA-status and next-step designs", *Applied Radiation and Isotopes*, 53: 779-783 (2000).

Miley, G. H., Yang, Y., Webber, J., Shaban, Y., Momota, H., "RF ion source-driven IEC design and operation", *16th TOFE Technical Program*, Madison, (2004).

Mima, K., Yoshikawa, K., Morimiya, O., et al., "Preliminary studies of direct energy conversion in a D-³He inertial confinement fusion reactor", *Fusion Technology*, 22(1): 56-65 (1992).

Miyamoto, K., "Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion 2nd ed.", *National Institute of Fusion Science NIFS-PROC-4*, Toki, 1-5 (2000).

Miyamoto, K., "Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion", *Iwanami Book Service Center*, Tokyo (1997).

Murali, K., Santarius, J. F., Kulcinski, G. L., "Study of fuel ratios on the fusion reactivity in an inertial electrostatic confinement device using a residual gas analyzer", *J Fusion Energ*, 28: 314–322 (2009).

Nadler, J. H., Gu, Y. B., Miley, G. H., "Potential profile measurement using a collimated proton detector in spherical inertial-electrostatic plasma confinement", *Review of Scientific Instruments*, 63(10): 4810-4812 (1992).

Nakano, I., Maeda, A., Sakai, A., Tokuyama, M., Nakamura, Y., Ishikura, Y., Osawa, H., Ohnishi, M., " Measurement of neutron production rate in pulsed IEC device", *12th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Osaka, (2010).

Nebel, R. A., Barnes, D. C., "The periodically oscillating plasma sphere", *Fusion Science and Technology*, 34(1): 28-45 (1998).

Ohnishi, M., Sato, K., Yamamoto, Y., Yoshikawa, K., "Correlation between potential well structure and neutron production in an inertial–electrostatic confinement fusion", *Nucl. Fusion*, 37: 611–619 (1997).

Ohnishi, M., Yamamoto, Y., Hasegawa, M., Yoshikawa, K., Miley, G. H., "Study on an inertial electrostatic confinement fusion as a portable neutron source", *Fusion Engineering and Design*, 42: 207–211 (1998).

Ohnishi, M., Hoshino, C., Yoshikawa, K., Masuda, K., Yamamoto, Y., "Beam optics in inertial electrostatic confinement fusion", *Review of Scientific Instruments*, 71(2): 1210-1212 (2000).

Osawa, H., Maeda, A., Nakano, I., Yoshida, T., Nakajima, Y., Ohnishi, M., "Overview of recent IEC studies at Kansai University", *12th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, Osaka, (2010).

Piefer, G. R., Santarius, J. F., Ashley, R. P., Kulcinski, G. L., "Design of an ion source for ^3He Fusion in a low pressure IEC device", *Fusion Science and Technology*, 47(4): 1255-1259 (2005).

Piefer, G. R., "Performance of a low-pressure, helicon driven IEC ^3He fusion device", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 12-20, 42-48, 62-78 (2006).

Radel, R.F., "Detection of highly enriched Uranium and tungsten surface damage studies using a pulsed inertial electrostatic confinement fusion device", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 1-5, 66-95, 169-175 (2007).

Residual Gas Analyzer Operating manual and programming reference, stanford research systems, Manual SRS, Chapter 2, 2-3, 2-6, Revision 1.8 (May-2009).

Rider, T., "A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems", *Phys. Plasmas*, 2(6): 1853-1872 (1995).

Santarius, J. F., Kulcinski, G. L., Ashley, R.P., Boris, D. R., Cipiti, B. B., Murali, S. K., Piefer, G. R., Radel, R. F., Radel, T. E., Wehmeyer, A. L., "Overview of University of Wisconsin inertial electrostatic confinement fusion research", *Fusion Science and Technology*, 47(4): 1238-1244 (2005).

Serway, R. A., "Fen ve Mühendislik için Fizik, 1", Çolakoğlu, K., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 577-578 (1995).

Smirnov, V. P., "Tokamak foundation in USSR/Russia 1950–1990", *Nucl. Fusion*, 50: 014003 (2010).

Soto, L., "New trends and future perspectives on plasma focus research", *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47: A361-A381 (2005).

Subramanian, K. M., "Diagnostic study of steady state advanced fuel (D-D and D-³He fusion in an IEC device", PhD Dissertation, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 1-6, 15-20, 112-129 (2004).

Takamatsu, T., Masuda, K., Kyunai, T., Toku, H. And Yoshikawa, K., "Inertial electrostatic confinement fusion device with an ion source using a magnetron discharge", *Nucl. Fusion*, 46: 142-148 (2006).

Taniuchi, Y., Matsumura, Y., Taira, K., Utsumi, M., Chiba, M., Shirakawa, T., Fujii, M., "Effects of Grid Cathode Structure on a Low-Input-Power Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device", *J. Nucl.Sci. and Tech.* 47(7): 626-63 (2010).

Thorson, T. A., Durst, R. D., Fonck, R., Foucher, B. S., Wainwright, L. P., "Initial results from the Wisconsin spherically convergent ion focus experiment", *IEEE International Conference Plasma Science*, (1995).

Thorson, T. A., Durst, R. D., Fonck, R., Wainwright, L. P., "Converge, electrostatic potential, and density measurements in a spherically convergent ion focus", *Phys. Plasmas*, 4(1): 4-15 (1997).

Thorson, T. A., Durst, R. D., Fonck, R. J., Sontag, A. C., "Fusion reactivity characterization of a spherically convergent ion focus", *Nuclear Fusion*, 38: 495 (1998).

Wehmeyer, A. L., "The detection of explosives using an inertial electrostatic confinement D-D fusion device", Master of Science, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 9-20, 30, 67-81 (2005).

Weidner, J. W., "The production of ¹³N from inertial electrostatic confinement fusion", Master of Science, *University of Wisconsin Fusion Technology Institute*, Madison, 9-12, 71-74 (2003).

Wolf, B., " Handbook of ion source", CRC Press, 101, (1995).

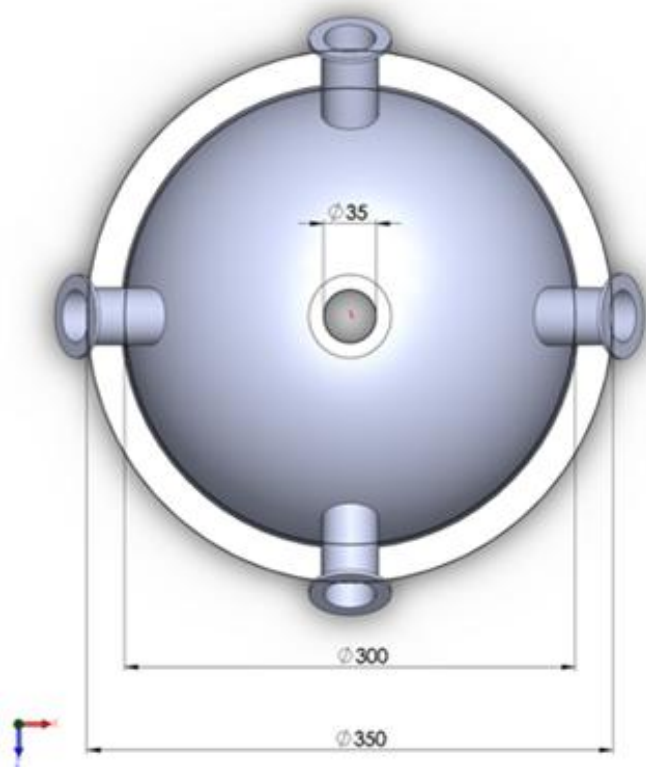
Yamauchi, K., Ogasawara, K., Watanabe, M., Okino, A., Sunaga, Y., Hotta, E., "Neutron Production Characteristics and Emission Properties of Spherically Convergent Beam Fusion", *Fusion Sci. and Tech.* 39(3): 1182-1187 (2001).

Yamauchi, K., Watanabe, M., Okino, A., Kohno, T., Hotta, E., Yuura, M., "Pulsed Operation of a Compact Fusion Neutron Source Using a High Voltage Pulse Generator Developed for Landmine Detection", *Fusion Sci. and Tech.* 47(4): 1229-1232 (2005).

Yoshikawa, K., Masuda, K., Takamatsu, T., Shiroya, S., Misawa, T., Hotta, E., Ohnishi, M., Yamauchi, K., Osawa, H., Takahashi, Y., "Research and development of a compact discharge-driven D-D fusion neutron source for explosive detection", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 261: 299-302 (2007).

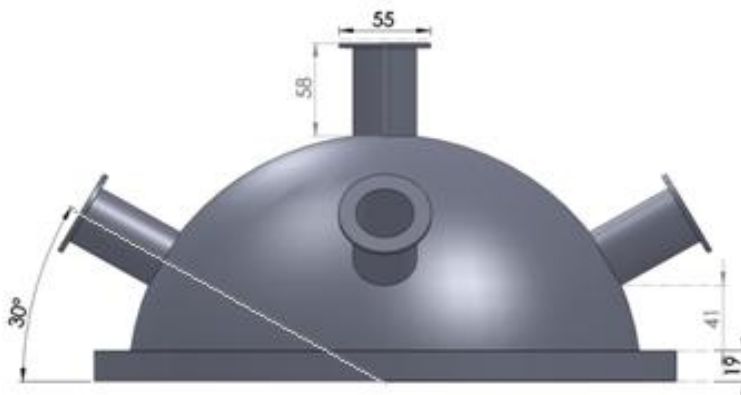
EKLER

EK - 1. Elektrotların SOLIDWORKS Programı Çizimleri



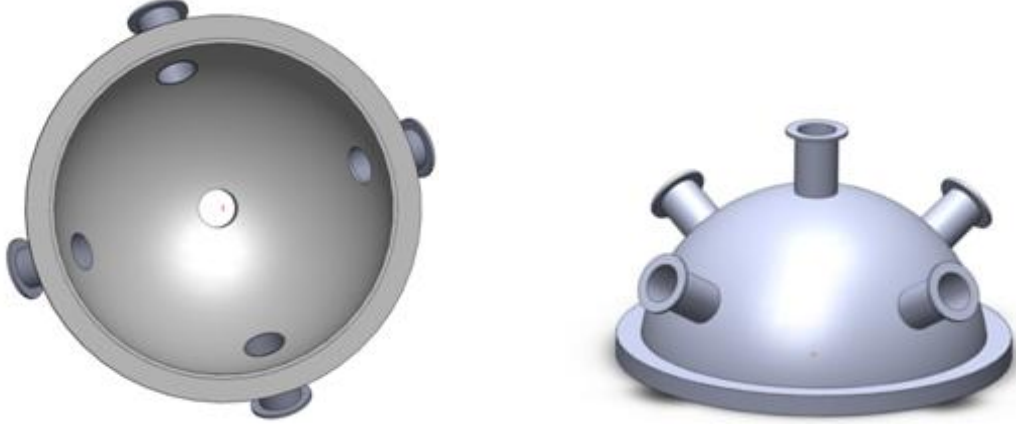
Şekil 1.1. Vakum odacığının üstten görünümü

Şekillerde Ø simgesi boşluk çaplarını gösterir. Ölçüler mm cinsinden verilmiştir ve çizimler SOLIDWORKS programında yapılmıştır.

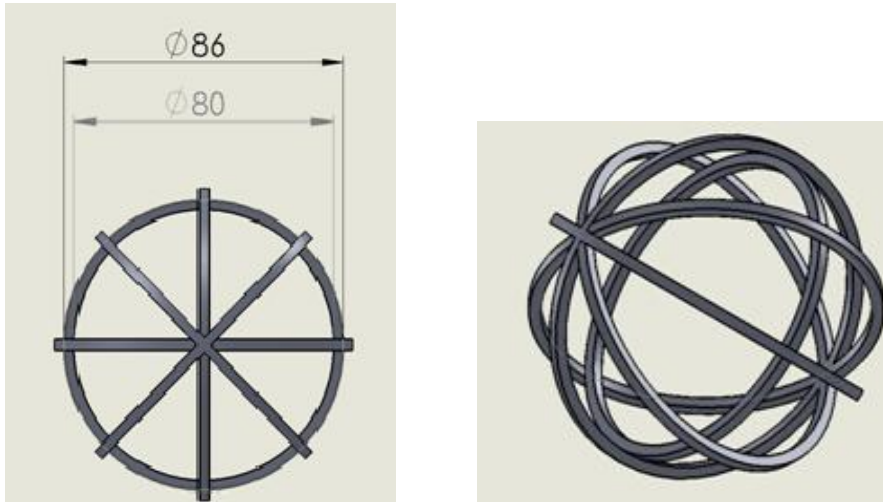


Şekil 1.2. Vakum odacığının karşıdan görünümü

EK- 1.(Devam) Elektrotların SOLIDWORKS Programı Çizimleri



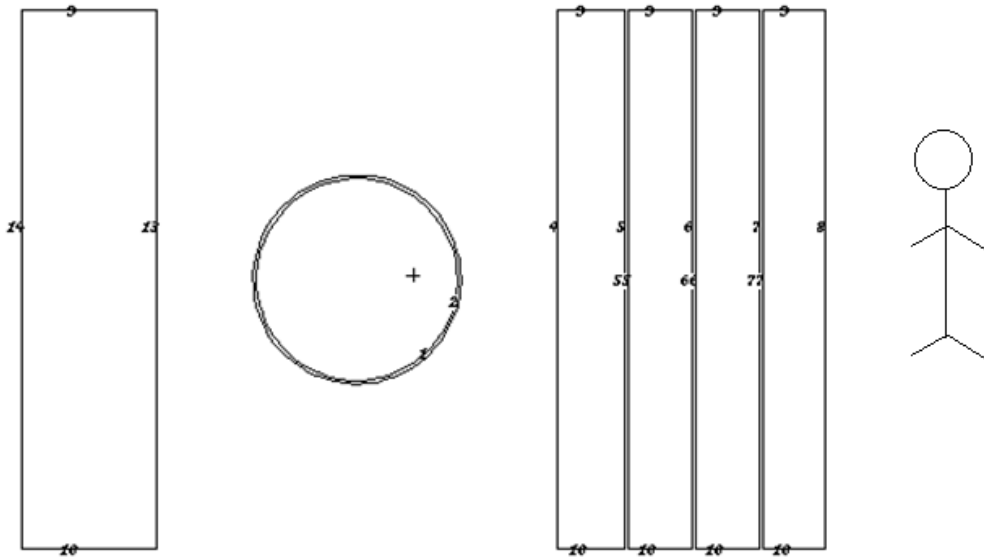
Şekil 1.3. Vakum odacığının farklı açılardan görüntüsü



Şekil 1.4. Orta katodun üstten ve karşıdan görüntüsü

EK- 2. MCNP5 Kodu ile Nötron Zırh Hesabı

Aşağıdaki gibi SANAEM-IEC sistemi MCNP5 kodu ile numara verilerek bölgelere ayrılmıştır. Merkezde 10^6 n/s için 40 cm parafin zırh malzemesinin her bölgesine ulaşan nötron sayısı hesaplanmıştır.



Şekil 2.1. MCNP5 kodu ile zırhlama hesabının şematik gösterimi

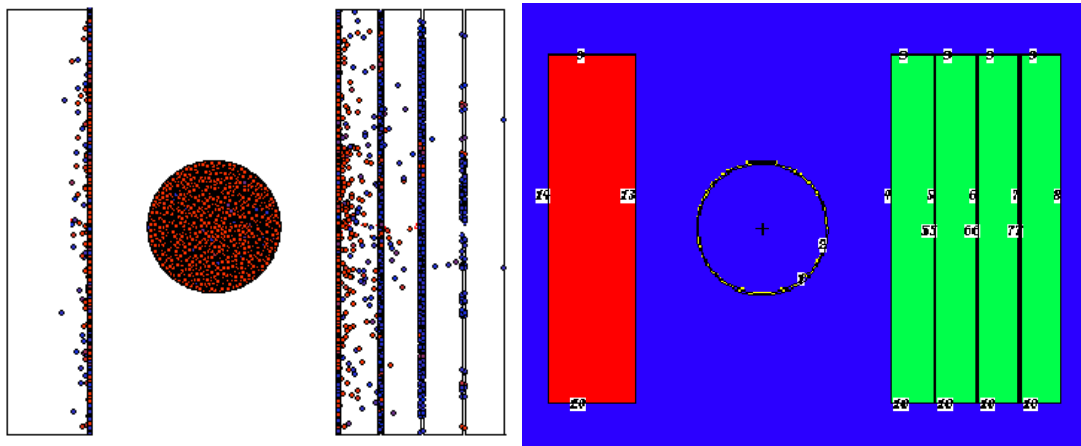
Şekil 2.1'deki insan gösterimi cihaz çalışırken çalışanların bulunduğu bölgeyi temsil etmektedir.

Çizelge 2.1. Bölgelere göre nötron sayısı dağılımı

Bölge numarası	Nötron sayısı (n/cm ² s)
2	400,00
4	56,20
55	34,90
66	5,20
77	0,54
88	0,03

Ek -2.(Devam) MCNP5 Kodu ile Nötron Zırh Hesabı

Şekil 2.2'de mavi renkli bölge havayı, kırmızı renkli bölge betonu, yeşil renkli bölge parafinleri ve vakum odacığının etrafındaki beyaz bölge pazlanmaz çeliği temsil etmektedir. Şekil 2.2'de diğer resimde ise kırmızı noktalar hızlı nötronları maviler ise yavaş nötronları temsil etmektedir.



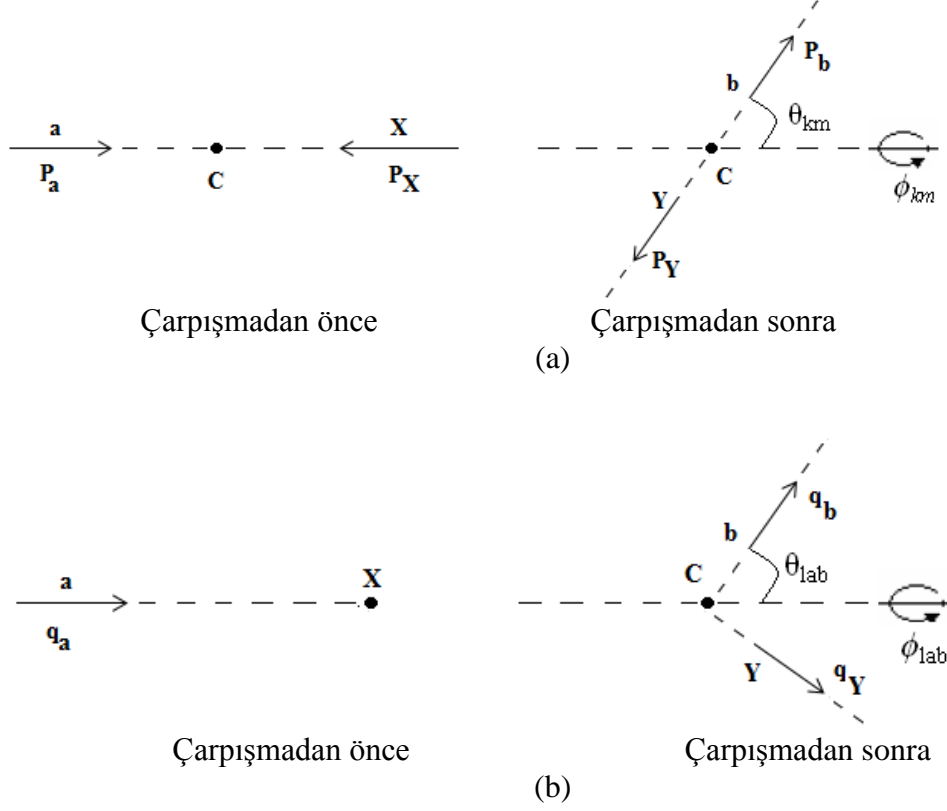
Şekil. 2.2. 10^6 n/cm²s akıllı D-D reaksiyonu için MNCP5 kodu ile hesaplanan nötronların zırh derinliğine bağlı değişimi

EK-3. Laboratuvar ve Kütle Merkezi Sistemleri

Güneş ve dünya gibi makro sistemler arasında kütle çekim kuvveti biçimindeki etkileşim kuvvetleri kütleler cinsinden net bir şekilde ifade edilebilirken, iki çekirdek gibi mikro sistemler arasındaki etkileşim kuvvetlerini direkt olarak yazmanın mümkün olmadığı görülür. Bu kuvvetleri elde etmek için ortalama bir potansiyel tanımlanmalı ve dolayısıyla böyle bir potansiyelde sistemin davranışını açıklamak için kütle merkezi sistemi seçilmelidir. Böyle bir durumda laboratuvar sistemi (LAB) ile kütle merkezi (KM) sistemi arasında ilişki kurulmalıdır. Parçacıkların ve kütle merkezlerinin, laboratuvara göre tespit edildiği koordinat sistemi ise laboratuvar sistemi olarak adlandırılır. LAB sisteminde reaksiyonlar genellikle, durgun hedef parçacıkları üzerine bir parçacık demeti gönderilerek gerçekleştirilir [Krane, 2002]. Fakat çarpışma olayının teorik yorumu için, olayın temel simetrisini yansıtan bir referans sistemi seçmek yerinde olur. Toplam momentum iki sistemin çarpışmasında korunan bir nicelik olduğundan dolayı, toplam momentumun sıfır olduğu bir referans sisteminin seçilmesi gerekir. Bu sebeple iki parçacık arasındaki etkileşmelerde KM sistemi kullanılır. KM referans sisteminde kütle merkezi sabit olup, parçacıklar kütle merkezine göre eşit ve zıt momentumla hareket etmektedir. Benzer olarak reaksiyon ürünleri de eşit ve zıt momentumla hareket ederler.

Kütle merkezi ile laboratuvar sistemi arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla $a + X \rightarrow Y + b$ formundaki bir reaksiyonu göz önüne alalım (Şekil 3.1); LAB sisteminde X hedefinin hareketsiz olduğunu ve m_a kütleli a mermisinin v_a hızıyla hedefe gönderildiği varsayalım. Bu durum KMK sisteminde hem mermi hem de hedefin $p_a = -p_X$ şeklinde eşit ve zıt yönlü momentumlarla birbirlerine doğru hareket ettiği şeklinde algılanacaktır. Simetri şartında, toplam momentumu sıfır yapacak şekilde bir referans noktası seçilmesi gerektiği, buna göre her iki sistemde de toplam momentum korunmaktadır [Satchler, 1980].

EK-3.(Devam) Laboratuvar ve Kütle Merkezi Sistemleri



Şekil 3.1a. Kütle merkezi sistemi b. Laboratuvar sistemi

Parçacıkların enerji ve momentumlarının korumu ayrı ayrı incelenir. Etkileşmeden sonra, LAB sisteminde ürünler farklı momentum ve farklı yönlerde hareket ederken (Şekil 3.1b), KM sisteminde ürünler birbirlerine zıt yönde eşit momentumla ($p_b = -p_Y$) hareket etmektedirler (Şekil 3.1a). Bu durumda KM sistemi, LAB sisteminde bir \vec{v}_{km} hızı ile hareket etmektedir:

$$\vec{v}_{km} = \frac{m_a}{m_X + m_a} \vec{v}_a \quad (3.1)$$

EK-3.(Devam) Laboratuvar ve Kütle Merkezi Sistemleri

Bu eşitlikte \vec{v}_a LAB sisteminde mermi parçacığının hızıdır. Mermi parçacığının KM sistemindeki \vec{p}_a momentumu ile LAB sistemindeki \vec{q}_a momentumu arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\vec{p}_a = \vec{q}_a - m_a \vec{v}_{km} = \frac{m_X}{m_X + m_a} \vec{q}_a \quad (3.2)$$

Böylelikle KM sisteminde mermi çekirdeğin hızı;

$$\vec{v}_a' = \vec{v}_a - \vec{v}_{km} = \frac{m_X}{m_X + m_a} \vec{v}_a \quad (3.3)$$

şeklinde elde edilir. Burada üst işareti, KM sistemine göre ölçülen hızları göstermekte kullanılmıştır. Hedef çekirdeğin KM sistemindeki hızı ise $\vec{v}_X = -\vec{v}_{km}$ olur. KM sisteminde etkileşen bu çiftin toplam momentumları sıfır olacağından,

$$m_a \vec{v}_a' = m_X \vec{v}_X' \quad (3.4)$$

olur, dolayısıyla hızların büyüklükleri arasındaki oran

$$\frac{v_a'}{v_X'} = \frac{m_X}{m_a} \quad (3.5)$$

olarak elde edilecektir.

Mermi parçacığının LAB sistemindeki bombardıman enerjisi $E = \frac{1}{2} m_a v_a^2$,

$$\begin{aligned} E_{lab} &= \frac{1}{2} m_a v_a^2 \\ &= \frac{1}{2} m_a v_a'^2 + \frac{1}{2} m_X v_X'^2 + \frac{1}{2} (m_a + m_X) v_{km}^2 \\ &= \frac{1}{2} \mu_\alpha v_a^2 + \frac{1}{2} M v_{km}^2 \\ &= E_a + E_{km} \end{aligned} \quad (3.6)$$

EK-3.(Devam) Laboratuvar ve Kütle Merkezi Sistemleri

olarak dönüştürülebilir. Burada μ_a mermi-hedef çiftinin indirgenmiş kütlesi

$\mu_a = \frac{m_a m_x}{m_a + m_x}$ ve M ise çiftin toplam kütlesidir ($M = m_a + m_x$). Eş. 3.6'da E_{km} , kütle

merkezinin hareketi ile ilgili kinetik enerjiyi, E_a enerjisi ise KM sisteminde mermi ve hedefin birbirlerine göre bağıl hareketinin kinetik enerjisini göstermektedir.

$E_a = \frac{1}{2} \mu_a v_a^2$ ve $E_{lab} = \frac{1}{2} m_x v_a^2$ ifadeleri göz önüne alınarak bağıl hareketin enerjisi ile

LAB sisteminin enerjisi arasında,

$$E_a = \frac{m_x}{m_x + m_a} E_{lab} \quad (3.7)$$

bağıntısı da elde edilebilir. Hedef çekirdeğin kütlesinin mermi parçacığın kütlesinden çok büyük olması durumunda, LAB sistem ile KM sistemi arasındaki fark çok küçük olacaktır; ancak hafif iyonlar için oldukça büyük olacaktır. Örneğin, hedef ve mermi parçacığın eşit kütleye sahip olmaları durumunda, kütle merkezinin kinetik enerjisi laboratuvar sisteminin kinetik enerjisinin yarısına eşit olacaktır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BÖLÜKDEMİR, Arife Seda
 Önceki soyadı : EKENOĞLU
 Uyuşuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.10.1981, TOKAT
 Medeni Hali : Evli
 Telefon (İş) : 0 (312) 815 15 69
 Fax : 0 (312) 815 43 07
 e-mail : arifeseda@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gaziosmanpaşa Üniversitesi/Fizik ABD	2006
Lisans	Gaziosmanpaşa Üniversitesi/Fizik Bölümü	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-2006	Gaziosmanpaşa Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2006-	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu	Fizikçi

Yabancı Dil

İngilizce (KPDS=78, ÜDS=80)

Yayınlar

- Bölükdemir, A. S.**, Akgün Y. and Alaçakır, A., "Preliminary results from experimental studies of low pressure inertial electrostatic confinement device", *Journal of Fusion Energy*, (2013, DOI:10.1007/s10894-013-9607-z).
- Bölükdemir, A. S.**, Akgün, Y., Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A., "D-D fusion studies at ODAK-3K plasma focus device", *International Journal of Electrical Energy Systems*, 1(2): 65-69 (2009).

3. Akgün, Y., **Bölükdemir, A. S.**, Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A., "Preliminary plasma focus studies at ODAK-3K device using track detectors", *Plasma Devices and Operations*, 17(4): 293-300 (2009).
4. Mamedov B. A., **Ekenoğlu, A. S.**, "On the evaluation of Bernoulli numbers using binomial coefficients", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109(3): 527-530 (2008).
5. Guseinov, I. I., Mamedov, B. A., **Ekenoğlu, A. S.**, "Analytical evaluation of two center Franck-Condon overlap integrals over harmonic oscillator wave function", *Z. Naturforsch*, 61a: 141-145 (2006).
6. Guseinov, I. I., Mamedov, B. A., **Ekenoğlu, A. S.**, "Exact analytical expressions and numerical analysis of two-center Franck-Condon factors and matrix elements over displaced harmonic oscillator wave functions", *Computer Physics Communications*, 175: 226-231 (2006).
7. Mamedov B. A., **Ekenoğlu, A. S.**, "Evaluation of the Hantush's $M(\alpha, \beta)$ function using binomial coefficients", *Water Resources Research*, 42: W09502 (2006).
8. Guseinov, I. I., Mamedov, B. A., **Ekenoğlu, A. S.**, "A new algorithm for accurate and fast evaluation of the Hubbell radiation rectangular source integral", *Radiation Physics and Chemistry*, 74: 261-263 (2005).

Hobiler

Kitap okumak, Puzzle yapmak, Sinema