

NÜKLEER FÜZYON

Doç. Dr. Turan OLĞAR

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Fizik Mühendisliği Bölümü

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Füzyon reaksiyonlarından kontrollü bir şekilde kullanılabilir enerji elde edilmesinin temel yolu, termonükleer yakıtı 10^8 K mertebesindeki sıcaklıklara (parçacıkların ortalama kinetik enerjileri bu sıcaklıklarda 10 keV) kadar ısıtmak ve istenilen gücü elde etmeye yetecek miktarda reaksiyon hızı oluşturmak için gerekli yoğunluğu yeterli süre sabit tutmaktır. Bu sıcaklıklarda atomlar iyonlaşmış durumdadır ve yakıt pozitif iyonlar ve elektronlardan oluşan nötr sıcak bir karışımdan ibarettir. Bu duruma plazma denir. Bir plazmanın elektrostatik özelliklerini belirleyen uzunluk ölçüsü Debye uzunluğu,

$$L_D = \left(\frac{4\pi\epsilon_0}{e^2} \frac{kT}{4\pi n} \right)^{1/2}$$

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Burada, n ortalama elektron veya iyon yoğunluğudur. Plazmayı tamamen 10 keV enerjili plazma için $10^{28}/\text{m}^3$ ve $10^{22}/\text{m}^3$ plazma yoğunlukları için debye uzunlukları sırasıyla 10^{-8} m ve 10^{-5} m'dir. Bu yoğunluklara karşılık gelen ve bir birim debye uzunluğuna eşit bir hacim içindeki parçacıkların sayısı sırasıyla 10^4 ve 10^7 'dir. Plazmaya bu parçacıkları hapsedemedeki sorun, sıcak yakıtın içerisinde bulunduğu kabın çeperleri ile enerji alışverişi yaparak yakıtın soğuması ve kendisinin bulunduğu kabın erimesidir. Termonükleer yakıtı sınırlandırmak için iki tane model geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bunlar

1. Manyetik alan sınırlaması
2. Eylemsizlik sınırlaması

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Manyetik alan sınırlamasında, plazma dikkatli bir şekilde planlanan manyetik alanla sınırlandırılır.

Eylemsizlik sınırlamasında ise, yakıt topağı ani bir şekilde ısıtılarak ve her bir taraftan yoğun parçacık veya foton ışın demetleri ile aynı anda bombardıman edilerek sıkıştırılır.

Enerji kayıplarından dolayı plazmayı tamamen sınırlamak mümkün değildir.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

a ivmesine sahip elektronlar tarafından, Bremsstrahlung (frenleme ışınımı) ile enerji kaybı,

$$P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

Elektron Z yüküne sahip iyondan r kadar uzakta ise ivme,

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r^2}$$

τ , elektron ve iyonun karakteristik etkileşme süresi ise, r mesafesinde karşılaşılan iyonların sayısı (Bknz: Şekil 14.6 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane))

$$n(v_e \tau)(2\pi r dr)$$

burada n pozitif iyon yoğunluğudur. Böylece

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

$$dP = \frac{e^2 n}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{Z^2 e^4 v_e \tau (2\pi r dr)}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e^2 r^4}$$

burada, dP , r ile $r+dr$ arasındaki vurma parametreleri ile saçılan elektronlardan kaynaklanan ışınımın toplam güce katkısıdır. $\tau=r/v_e$ alınırsa, dP

$$dP = \frac{4\pi e^6 Z^2 n}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e^2 c^3} \frac{dr}{r^2}$$

Bu ifadenin r_{\min} 'den r_{\max} 'a kadar integrali alınırsa tek bir elektronun yaydığı toplam güç elde edilir. Elde edilen sonuç elektron yoğunluğu (n_e) ile çarpılırsa plazma tarafından birim hacim başına yayınlanan güç elde edilmiş olur.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

$$r_{\min} = \frac{\hbar}{m_e v_e} \quad \text{ve} \quad r_{\max s} \approx \infty$$

alınırsa,

$$P_{\text{fr}} = \frac{4\pi n n_e Z^2 e^6 v_e}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e c^3 \hbar}$$

v_e yerine Maxwell-Boltzmann dağılımının ortalama kinetik enerjisine karşılık gelen,

$$v_e \cong \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$$

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

hız ifadesi kullanılırsa,

$$P_{\text{fr}} = 0,5 \times 10^{-36} Z^2 n n_e (kT)^{1/2} \frac{W}{m^3}$$

bulunur. Füzyon reaksiyonları için reaksiyon hızı,

$$n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$$

ile verilir. Burada n_1 ve n_2 iki farklı füzyon iyonunun yoğunluğudur.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Bir füzyon reaktöründe çalışma sıcaklığı, füzyon ile kazanılan enerjinin frenleme ışınımı ile kaybedilen enerjiyi aştığı sıcaklıklarda seçilir.

Füzyon ile kazanılan enerjinin, frenleme ışınımı ile kaybedilen enerjiyi aştığı sıcaklık değerleri D-D ile D-T reaksiyonları için sırasıyla, 40 ve 4 keV'tur. (Bknz: Şekil 14.7 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane))

Eğer füzyon sonucu açığa çıkan enerji, radyasyon kayıpları ve plazmayı çalışma sıcaklığına kadar ısıtmak için gerekli enerjiyi aşıyorsa, füzyon reaktörü net enerji kazancına sahip olacaktır.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Plazma içerisinde füzyon reaksiyonlarından birim hacim başına açığa çıkan enerji,

$$E_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau$$

Q , reaksiyon başına açığa çıkan enerji (D-T için 17,6 MeV), τ reaksiyonların gerçekleşebilmesi için plazmanın sınırlanma süresidir. D ve T yoğunluklarının her biri $n/2$ olarak alındığında, $n = n_e$ olur.

İyonları ve elektronları T sıcaklığına yükseltmek için gerekli birim hacimdeki termal enerji, sırasıyla $3nkT/2$ ve $3n_e kT/2$ 'dir. $n=n_e$ alınırse termal enerji,

$$E_{\text{ter}} = 3nkT$$

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Plazmayı ısıtmak için E_{ter} enerjisi sağladıktan sonra, plazma τ süresince sınırlanırsa füzyon enerjisi elde edilebilir.

$$E_f > E_{\text{ter}}$$

$$\frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau > 3nkT$$

veya

$$n\tau > \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle Q}$$

ise reaktör net kazanca sahiptir.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

D-T reaksiyonu için 10 keV'lik bir çalışma sıcaklığında

$$\langle \sigma v \rangle \sim 10^{-22} \text{ m}^3 / \text{s} \quad \text{ve} \quad n\tau > 10^{20} \text{ s} / \text{m}^3$$

iyon yoğunluğu ile sınırlama süresinin çarpımının minimum değerine *Lawson ölçütü* denir.

D-D reaksiyonları için reaktörün 10 keV'de çalıştırılması uygun değildir. Çünkü frenleme radyasyonu olarak kayıp fazladır. kT=100 keV'de çalıştırılırsa

$$\langle \sigma v \rangle \approx 0,5 \times 10^{-22} \text{ m}^3 / \text{s} \quad \text{ve} \quad n\tau > 10^{22} \text{ s} / \text{m}^3$$

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

D-D reaktöründe enerji kazanabilmek için iyon yoğunluğunun veya sınırlama süresinin yada ikisinin çarpımının yüz kez arttırılması gerekir.

Manyetik alan sınırlamasının en basit yöntemi, yüklü parçacıkların alan doğrultusu etrafında spiral çizecek şekilde düzgün bir manyetik alan uygulamaktır (Bknz: Şekil 14.9 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane)). Bu tasarım parçacıkları sadece iki yönde sınırlar fakat eksen boyunca parçacık kayıplarını engellemez. Eksen boyunca parçacık kayıplarını önlemenin bir yolu, parçacıkları düşük manyetik alan bölgesine yansıtabilen, yüksek yoğunluklu manyetik alan çizgilerinin oluşturulduğu bir düzenek kullanmaktır.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Torodial sargı tasarımında manyetik alan toroidin yarıçapı ile ters orantılıdır. Böylece spiral bir yörüngede hareket eden yüklü parçacık, kendisini dış duvara yaklaştıran zayıf şiddetli bir manyetik alan bileşeni ile karşılaşır. Bu etkiyi azaltmak için, toroidin yüzeyi boyunca bir manyetik alan uygulanır. Bu alana poloidal alan denir (Bknz: Şekil 14.9 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane)).

Poloidal alan, plazma içinden toroidin ekseni boyunca bir akım geçirilerek yada bir dış bobin kümesi kullanılarak oluşturulabilir. Akımın burda iki görevi vardır.

1. Plazmayı ısıtmak
2. Parçacıkların sınırlanması

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Toroidal ile poloidal alanlarının birleşimine Tokamak denir ve bu bileşke alan, parçacıkları kapalı yörüngelerde hareket zorlayan bir sarmal oluşturur (Bknz: Şekil 14.9 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane)).

Tokamak temel füzyon reaktörü tasarımında kullanılan bir düzenektir. Tokamak tasarımında Poloidal alan, dış bobinler kümesi aracılığıyla değil (stellerator denilen bir tasarımda bu dış bobinler kullanılmaktadır), plazma içinde primer transformator görevi gören dış bobin kümesinin meydana getirdiği akım tarafından sağlanmaktadır.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Eylemsizlik sınırlamalı füzyonda döteryum ve trityum içeren ince bir yakıt topağı ani olarak yoğun bir laser darbesiyle bombardıman edilir. Böylece yakıt topağı bu darbe ile hem ısınır hem de sıkışarak yüksek yoğunluğa oluşur. 1 mm çapındaki küresel bir yakıt topağını, parçacık başına $kT = 10$ keV'lik bir ortalama termal enerjiye kadar ısıtmak için gerekli toplam termal enerji,

$$E_{\text{ter}} \sim \frac{4}{3} \pi (0,5 \text{ mm})^3 \times 10^{29} \text{ m}^{-3} \times 10^4 \text{ eV} \approx 10^5 \text{ J}$$

Burada çapı 0,1-1,0 mm aralığına sıkıştırılmış yakıt topağının yaklaşık 10^{-9} - 10^{-10} s'de parçalanacağı varsayılmıştır. Dolayısıyla D-T reaksiyonu için Lawson kriteri uygulanırsa bu kısa sıkıştırma zamanları (10^{-9} - 10^{-10} s) için yoğunluğun en az 10^{29} - $10^{30}/\text{m}^3$ olması gerekir. 10^{-9} - 10^{-10} s sıkıştırma zamanı ve 10^5 termal enerji için verilmesi gereken güç 10^{14} W mertebesindedir.

NÜKLEER FÜZYON

Kontrollü Füzyon Reaktörleri

Laser etkili füzyon reaksiyonlar dizisi şu adımlardan oluşur.

1. Yakıt topağı her yönden laser pulsusu ile bombardıman edilir.
2. Sınırlanmamış plazma hızla buharlaşır. Yakıt topağı korun geri kalan kısmına doğru sıkıştırıcı bir şok dalgası uygular. Bu şok dalgası, koru termonükleer tutuşmanın meydana gelebileceği merkez civarındaki en yüksek yoğunluklu noktaya kadar sıkıştırır ve ısıtır.
3. Füzyon sonucu açığa çıkan alfa parçacıkları, yoğun yakıt içindeki iyonlarla yaptıkları çarpışmalar sonucu enerjilerini hızla kaybederler.
4. Bu kaybedilen enerji ek ısıtmaya katkı sağlar ve termonükleer yanma dışı doğru gelişir. (Bknz: Şekil 14.14 Nükleer Fizik II. Cilt (Kenneth S. Krane)).