

NÜKLEER FİSYON

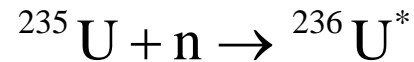
Doç. Dr. Turan OLĞAR

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Fizik Mühendisliği Bölümü

NÜKLEER FİSYON

Fisyonda Enerji

^{235}U , $^{236}\text{U}^*$ bileşik durumunu oluşturmak üzere nötron yakaladığında uyarılma enerjisi



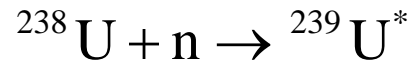
$$\begin{aligned} E_{\text{uy}} &= [m(^{236}\text{U})^* - m(^{236}\text{U})]c^2 \\ &= [236,052589\text{u} - 236,045563\text{u}] \times 931,502 \text{ MeV/u} \\ &= 6,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(^{236}\text{U})^* &= m(^{235}\text{U}) + m_{\text{n}} \\ &= (235,043924\text{u} + 1,008665\text{u}) \\ &= 236,052589\text{u} \end{aligned}$$

NÜKLEER FİSYON

Fisyonda Enerji

^{236}U için aktivasyon enerjisi 6,2 MeV dir. Aktivasyon enerjisi fisyon engelini aşmak için gerekli enerji olarak ifade edilir.



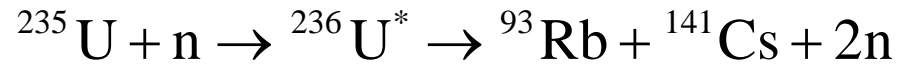
Reaksiyonu için $E_{\text{uy}} = 4,8 \text{ MeV}$ dir. Fakat ^{239}U 'un hesaplanan aktivasyon enerjisi 6,6 MeV'dir.

^{238}U 'in fisyonu için eşik nötron enerjisi MeV mertebesindedir. ^{235}U ise hemen hemen sıfır enerjili nötronlarla fisyonla uğrayabilir.

NÜKLEER FİSYON

Fisyonda Enerji

^{235}U in fisyonunda açığa çıkan belirli bir ürün kümesi için,



$m(^{93}\text{Rb})=92,92172\text{u}$, $m(^{141}\text{Cs})=140,91949\text{u}$ olduğu kullanılırsa

$Q=181\text{ MeV}$ bulunur. Bu enerji ise, nötronların momentumları çok küçük olduğundan ürün çekirdeklerin kinetik enerjisine dönüşür.

NÜKLEER FİSYON

Fisyonda Enerji

^{235}U in fisyonunda açığa çıkan ortalama enerji 200 MeV dir. Bu enerjinin yaklaşık %85'i (165 MeV) fisyon ürünlerine kinetik enerji olarak aktarılır, geri kalan enerji ise

Ani γ ışınları, 8 MeV

Fisyon ürünlerinin β bozunumu, 19 MeV

Fisyon ürünlerinin γ bozunumu, 7 MeV

şeklinde açığa çıkar. Fisyon başına ortalama nötron sayısı 2,5 ve ortalama nötron enerjisi 2 MeV olduğu düşünülürse , nötronlar tarafından taşınan ortalama enerji 5 MeV'dir.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Doğal uranyum (% 0,72 ^{235}U , % 99,28 ^{238}U)

Her fisyonunda 2,5 nötron üretilir. Fisyon başına çıkan enerji 200 MeV'dir. Bu enerji, ağır ürünlerin kinetik enerjisi ve radyasyon olarak ortaya çıkar.

Sonsuz ortam için, nötron çoğalma faktörü k_{∞} olsun. Çoğalma faktörü bir nesilden diğerine termal nötron sayısındaki net artıştır. Zincir reaksiyonunun devamı için $k_{\infty} \geq 1$ olmalıdır.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Fisyon başına açığa çıkan 2.5 nötron hızlı nötronlardır ve fisyon tesir kesitleri düşüktür. Dolayısıyla bu hızlı nötronları termal hızlara yavaşlatılması gerekir.

Yavaşlatıcı olarak en çok grafit bloklar şeklinde karbon kullanılır. Bunun sebebi karbonun katı, kolay işlenebilir, ucuz ve saçıcı atomlarının yoğun oluşudur.

Uranyum bloklarının, grafit bloklar ile dönüşümlü olarak yerleştirilmiş şekline *zincir reaksiyon pili* denir.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Sonlu bir pil için k çoğalma faktörü,

$k=1$ için pil kritik

$k < 1$ için pil kritikaltı

$k > 1$ için pil kritiküstü

Kararlı enerji çıkışı için pil kritik durumda olmalıdır.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Şu anki nesilde termal nötron sayısı N olsun. Her fisyonda ortaya çıkan nötron sayısı ν olsa da, herbiri fisyona sebep olan νN hızlı fisyon nötronu bulunmayacaktır. Çünkü bazıları ^{235}U ve ^{238}U de (n,γ) reaksiyonu ile soğurulacaktır.

Orjinal termal nötron başına ortalama fisyon nötronlarının sayısı η tanımlanır.

Bazı termal nötronlar fisyona neden olmadığından $\eta < \nu$

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Yavaş nötronlar için fisyon tesir kesiti σ_f , diğer soğurulmalara karşılık gelen tesir kesiti σ_s olarak tanımlanırsa, bir nötronun fisyonla sebep olma bağılı olasılığı,

$$\eta = v \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_s}$$

^{235}U için $\sigma_f = 584\text{b}$ ve $\sigma_s = 97\text{b}$ olduğundan termal nötron başına $\eta = 2,08$ hızlı nötron oluşur. ^{238}U için $\sigma_f = 0$ ve $\sigma_s = 2,75\text{b}$ 'dır.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Doğal uranyum için (% 0,72 ^{235}U , % 99,28 ^{238}U), fisyon ve soğurma tesir kesiti,

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \frac{0,72}{100} \sigma_f(^{235}\text{U}) + \frac{99,28}{100} \sigma_f(^{238}\text{U}) \\ &= 4,20 \text{ b}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \frac{0,72}{100} \sigma_s(^{235}\text{U}) + \frac{99,28}{100} \sigma_s(^{238}\text{U}) \\ &= 3,43 \text{ b}\end{aligned}$$

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Doğal uranyum için σ_f ve σ_s etkin fisyon ve soğurulma tesir kesitlerinin kullanılması ile $\eta=1,33$. Zenginleştirilmiş uranyumfa ^{235}U oranı %3'tür ve $\eta=1,84$ olur.

Hızlı nötronlar zincir reaksiyon kümesi boyunca hareket ederken hızlı nötronlarla fisyonla uğrayabilen ^{238}U ile karşılaşabilir. Bu durumda fisyon sonucu nötron sayısı artabilir. Başlangıçta ηN kadar hızlı nötron varsa, yeni hızlı fisyon faktörü ile bu sayı $\epsilon \eta N$ olur. Doğal uranyum için ϵ yaklaşık 1,03 tür.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Nötronları grafit şeklindeki karbon gibi hafif bir yavaşlatıcıda termal enerjilere kadar yavaşlatırken nötronlar 10-100 eV enerji bölgesinden geçerler. Bu enerji aralığında ^{238}U , tesir kesitleri yaklaşık 1000b olan yakalama rezonanslarına sahiptir. Bu rezonans bölgesinden kaçmak için grafit çok büyük parçalar halinde hazırlanır ve böylece grafiti terk etmeden ve ^{238}U ile karşılaşmadan nötronların grafit içinde birçok elastik saçılmaya uğraması sağlanır.

Bir fisyon nötronunun grafit içinde yavaşlayarak termal enerjiye ulaşabilmesi için yaklaşık 19 cm'lik mesafeye ihtiyaç vardır.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Pil yakıt elemanları bu sebeple 19 cm'lik grafitlerle ayrılarak bir örgü oluşturulur. Bu tasarım ile rezonans yakalamsından nötron kaybı en aza indirilmiş olur. Ama yine de bu etki tamamen yok edilemez. Bu etki rezonans kaçma olasılığı olarak p azaltma faktörü şeklinde sürece dahil edilir. Rezonans kaçma olasılığı p nin tipik değeri 0,9'dur. Yavaşlamadan sonra geri kalan nötron sayısı, $\eta\epsilon pN$ 'dir.

Karbonun yavaşlatıcı olarak seçilmesinin sebebi, termal nötron tesir kesiti (0,0034b) çok düşük olmasıdır. Termal faydalanma katsayısı f , ^{235}U ve ^{238}U tarafından soğurulan yavaş nötronların kesrini verir. Bu faktörün değeri yaklaşık 0,9'dur.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Yavaşlatıcı da ve diğer malzemeler tarafından yakalamalardan sonra geri kalan nötron sayısı, $\eta\epsilon pfN$ 'dir.

Bu sayının N 'den küçük yada büyük olması reaktör kritikliğini belirler. Çoğalma faktörü,

$$k_{\infty} = \eta\epsilon pf$$

Bu bağıntı *dört-faktör* formülü olarak bilinir.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Doğal uranyum ve grafit pili için çoğaltma faktörü, $k_{\infty} = 1,11$ olarak hesaplanır. Bu değer yüzeyden kaçan nötronları hesaba katmadığından bu formüle bir düzeltme yapmak gerekir. Bu düzeltme hem yavaş hem de hızlı nötronlar için yapılmalıdır. l_y ve l_h yavaş ve hızlı nötronlar için bu kayıpların kesirleri ise çoğalma faktörü,

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f (1 - l_y)(1 - l_h)$$

Pil ne kadar büyükse, yüzey alanının hacme oranı ve kaçak nötron kesri o kadar küçük olur. l_y ve l_h çok küçükse,

$$k_{\infty} - k \approx k_{\infty} (l_y + l_h)$$

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Yüzey alanı arttıkça toplam kaçak, $(l_y + l_h)$ artar. Ayrıca nötronun soğurulmadan önce katettiği mesafe arttıkça kaçak artar. Bu mesafeye M göç mesafesi denir. M, termal nötronlar için L_d diffüzyon mesafesi ve L_y yavaşlama mesafesi olmak üzere iki katkı içerir.

Diffüzyon mesafesi, bir termal nötronun soğurulmadan önce katettiği ortalama mesafedir. Yavaşlama mesafesi ise bir hızlı nötronun termal enerjiye yavaşlayana kadar katettiği mesafedir.

$$M = \left(L_d^2 + L_y^2 \right)^{1/2}$$

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

Grafit için $L_y=18.7$ cm ve $L_d= 50,8$ cm dir.

Eğer pil R boyutuna (örgü küresel ise yarıçap, küp ise kenardır) sahipse,

$$(k_{\infty} - k) \propto R^{-2}$$

Ve aynı zamanda $k_{\infty}-k$, M ye bağlıdır.

$$(k_{\infty} - k) \propto \frac{M^2}{R^2}$$

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

$k=1$ için kritik büyüklük R_c ,

$$R_c = \frac{\pi M}{\sqrt{k_\infty - 1}}$$

olacaktır. Doğal uranyum – grafit reaktör için yapılan hesaplamalar. $R_c = 5\text{m}$ dir. Yarıçapı 5m olan uranyum ve grafit bloklardan oluşan küresel bir örgü kritikliğe gidecektir.

Nötronlar, yavaşlamaları için gerekli süre ($\approx 10^{-6}\text{s}$) ve termal enerjide soğuruluncaya kadar geçen diffüzyon süresi ($\approx 10^{-3}\text{s}$) olmak üzere bir τ zaman sabiti ile karakterize edilir.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

t anında N tane nötron varsa, $t+\tau$ anında ortalama kn , $t+2\tau$ anında k^2n tane nötron bulunur. Kısa bir dt zaman aralığı içinde nötron sayısındaki çoğalma,

$$dN = (kN - N) \frac{dt}{\tau}$$

olacaktır. Buradan,

$$N(t) = N_0 e^{(k-1)t/\tau}$$

bulunur. $k=1$ ve N sabit ise bu reaktörün istenilen çalışma modudur. $k<1$ ise nötron sayısı üstel olarak azalacaktır. $k>1$ ise nötron sayısı zamanla, karakteristik zaman sabiti $\tau/(k-1)$ olmak üzere üstel olarak artar.

NÜKLEER FİSYON

Kontrollü Fisyon Reaksiyonları

$k=1,01$ yani reaktör hafifçe kritikse, zaman sabiti $0,1s$ mertebesindedir. Nötron sayısı $1s$ de $e^{10} = 22000$ çarpanı kadar artar. Bu artış katsayısı ile reaktörü çalıştırmak tehlikeli olacaktır.

Uygulamada nötron sayısının kontrolü, pil içine yavaş nötronlar için yüksek soğurma özelliği olan kadmiyum gibi maddeler sokularak yapılır.

Kadmiyum kontrol çubukları mekanik olarak kontrol edilerek ya yavaş yavaş pilden çıkarılır yada hızlıca içine sokulur.