

[E-MOBİLİTE]

[AKIŞKANLAR MEKANIĞI]
Termodinamik

[MOBİLİTE]

[ARGE DERGİSİ]

[YAPAY ZEKA]

[EĞİTİM]

BuildUp Academy

[TEKNOLOJİ]

*BUILDUP ACADEMY

[NÜKLEER TEKNOLOJİ]

[İLERİ MÜHENDİSLİK]

[YAZILIM]

[YAPISAL ANALİZ]

[MATLAB & SIMULINK]

[SİMÜLASYON]

[SAVUNMA SANATI]

[OTOMOTİV]

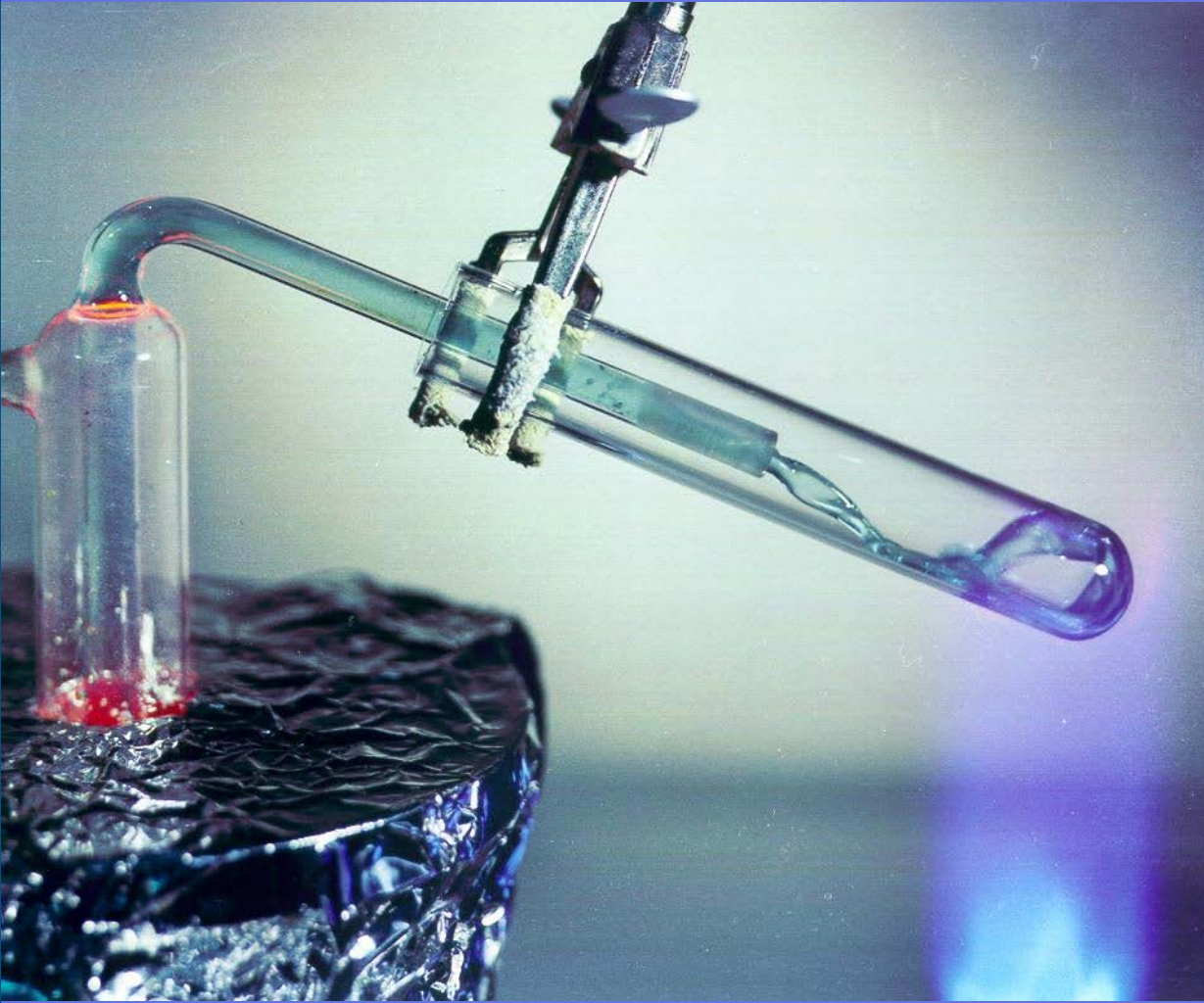
[AR-GE PROJELERİ]



FİGES

[SİMÜLASYON]

[YEŞİL ENERJİ]



TERSANELER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ BİLGİLENDİRME EĞİTİMİ

20-21 Nisan 2021

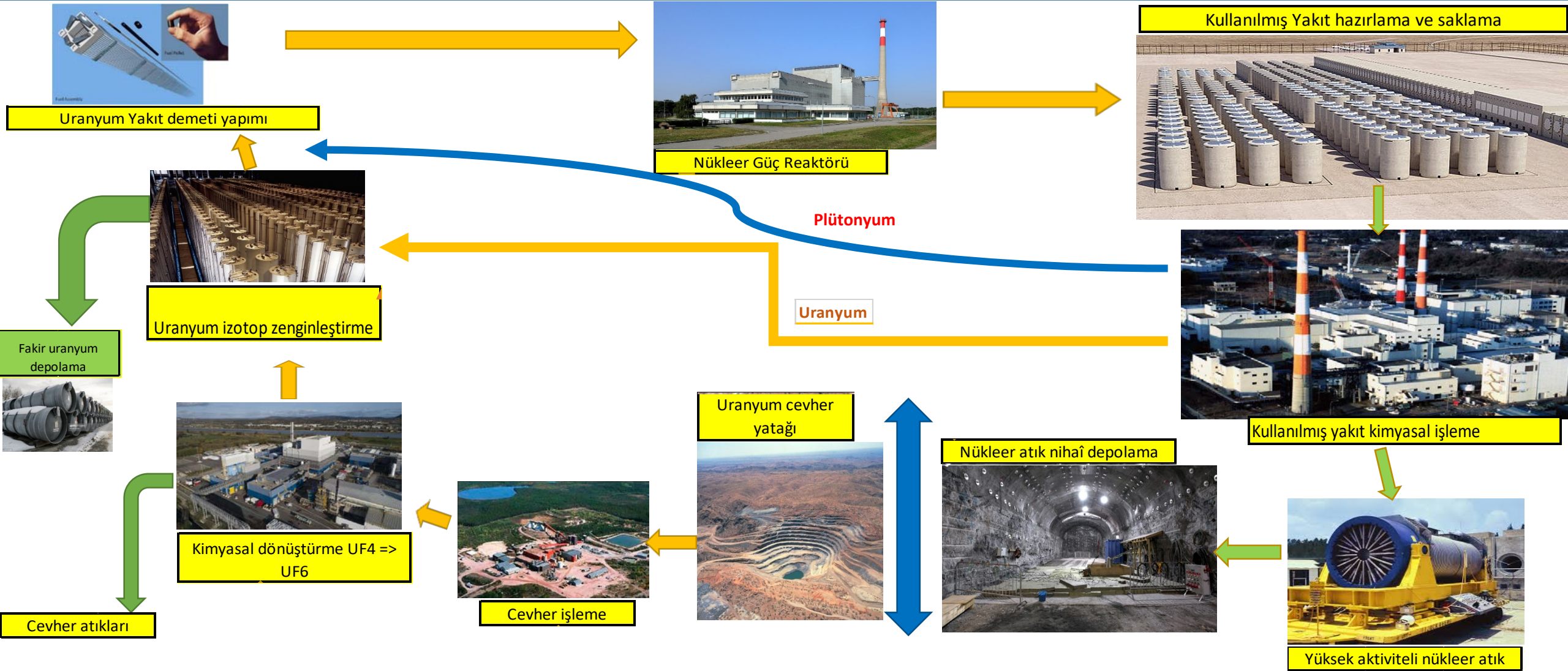
ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ

BÖLÜM-7: Nükleer Yakıt Çevrimi-I

Dr. Reşat Uzmen

- **İÇERİK**
- Nükleer Yakıt Çevrimi Nedir?
- Uranyum: Cevherden Nükleer Yakıt
- Uranyum: Reaktörden Sonraki Adımlar
- Toryum Yakıt Çevrimi
- İleri Nükleer Yakıt Çevrimleri

Nükleer Yakıt Çevrimi



Nükleer Yakıt Çevrimi

➤ Uranyum rezervleri, üretim – tüketim



Autenit minerali

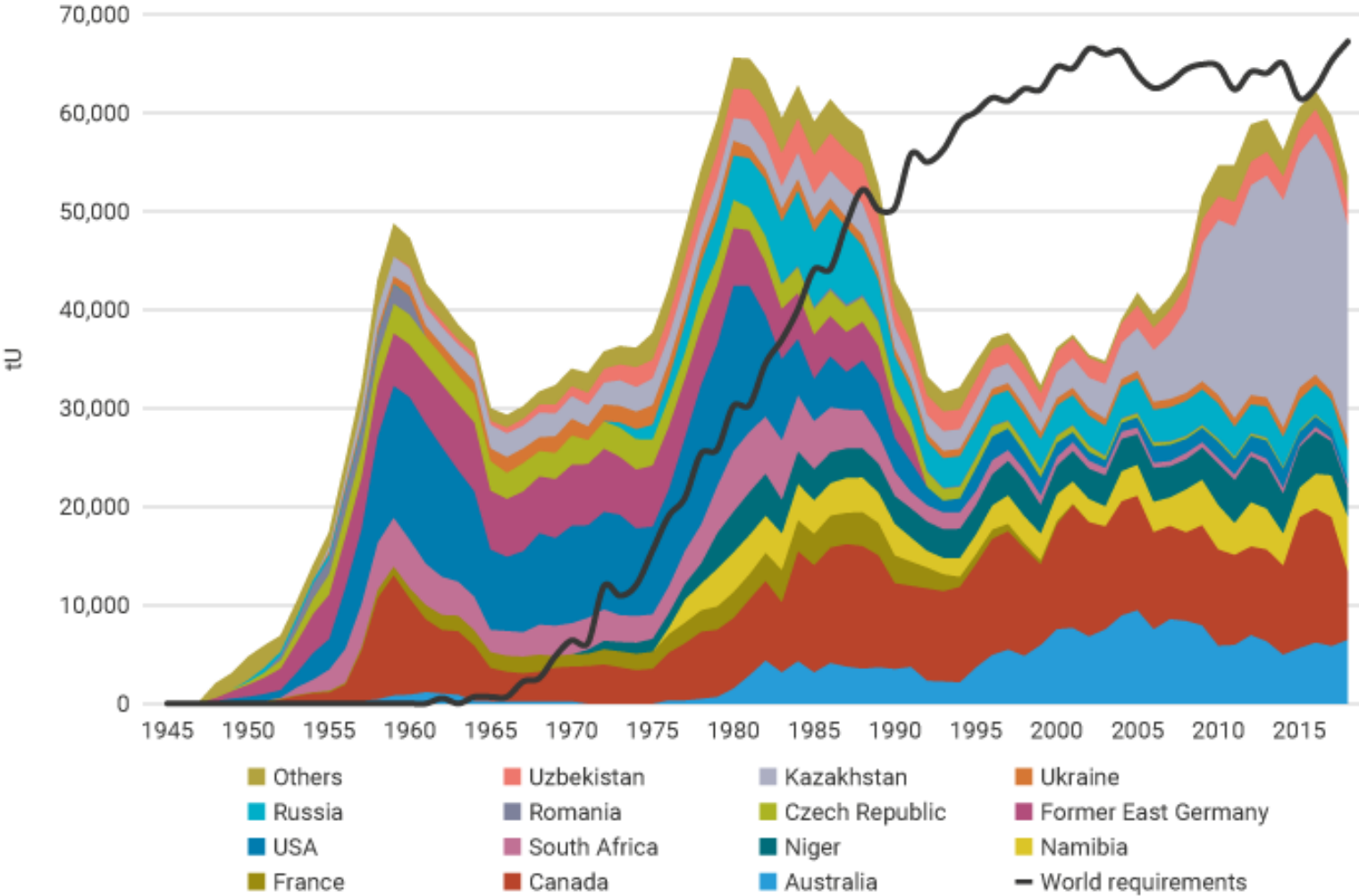
Kaynak: World Nuclear
Association; Supply of
Uranium, 2019

	Ton U	Dünyadaki dağılım oranı
Avustralya	1 692 700	28%
Kazakistan	906 800	15%
Kanada	564 900	9%
Rusya	486 000	8%
Namibya	448 300	7%
Güne Afrika	320 900	5%
Brazilya	276 800	5%
Nijer	276 400	4%
Çin	248 900	4%
Moğolistan	143 500	2%
Özbekistan	132 300	2%
Ukrayna	108 700	2%
Botswana	87 200	1%
Tanzanya	58 200	1%
Ürdün	52 500	1%
ABD	47 900	1%
Diğerleri	295 800	5%
Dünya Toplamı	6 147 800	

Türkiye Uranyum
rezervi: 16 736 ton U
Yozgat – Aydın- Manisa-
Nevşehir
(Uranium 2020, Resources,
Production and Demand, OECD-
IAEA, 2021)

➤ Uranyum Talebi ve Arzı

- 2020 Haziran'ına göre dünyada 390 GWe kurulu gücü temsil eden 440 reaktörün yıllık uranyum talebi 67 500 ton U'a (79 500 ton U₃O₈) ulaşmıştır.
- Uranyum konsantresi «sarı pasta» piyasalarda işlem göre ticarî bir metadır. Son yıllarda 1 kg U 85-90 USD (32-35 USD/lb U₃O₈) arasında bir fiyatla işlem görmektedir.
- Her yeni 1 GWe güç için yılda 150 tU'a denk konsantre gerekir. İlk yükleme için bu değer 300-450 tU'dur.
- III+ nesil nükleer reaktörlerde 40 000 MWd/tU'a erişilen günlük güç üretimi uranyumun daha verimli kullanılmasını, dolayısıyla U talebinin azaltılmasına yol açmıştır.
- Ayrıca Güney Asya bölgesi dışında yeni nükleer reaktör projelerinin çok azalmış olması da U talep ve üretimini de yakında etkilemektedir.



Uranyum Üretimi Tarihsel Gelişimi

- 1975-1985 arası görülen talep ve üretim artışında hızlı yükseliş Çernobil kazasından sonra yeni nükleer reaktör kurulumunu düşürünce U talebi devam etse de üretimde ciddi azalışlara yol açmıştır.
- Dikkat çeken bir durum 1990'dan sonra dünya U üretiminde liderliğin Kazakistan'a geçmiş olmasıdır.

➤ Uranyum Üretimi

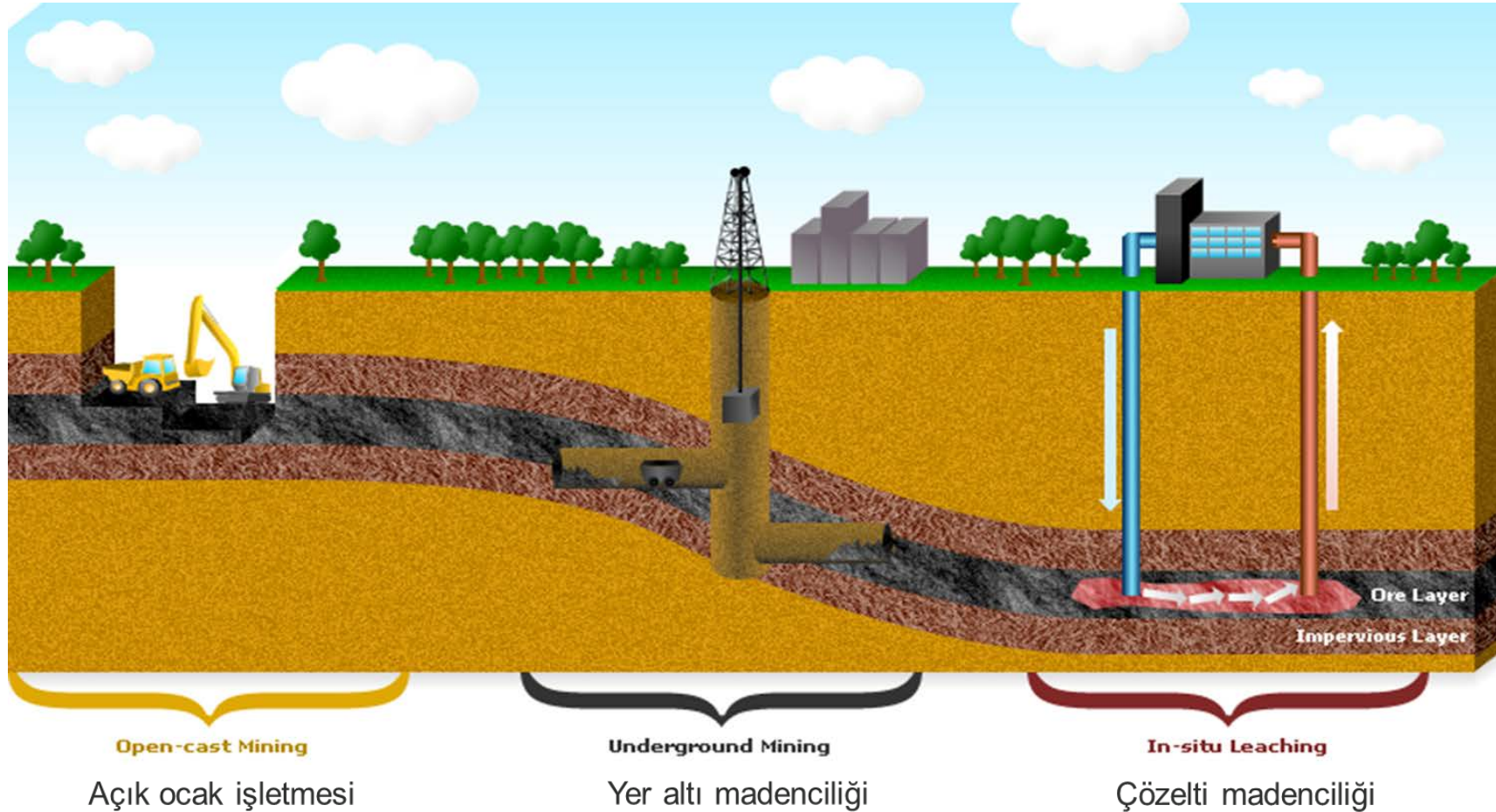
- 2019 yılı sonu itibariyle 53 650 tU (63 273 lbU₃O₈) üretilmiştir.
- Talebi karşılamak üzere aradaki fark daha önceden düşük fiyatla stoklanmış U kaynaklarından sağlanmaktadır.
- 2018 sonunda Avrupa ve ABD'de 90 000 tU, Çin'de 120 000 tU ve Asya'nın geri kalanında 70 000 tU dolayında stok vardır.
- Bundan başka
 - kullanılmış yakıtlardan çıkan uranyum ve plütonyum
 - İzotop zenginleştirme atıklarından yeniden zenginleştirmeye üretilen uranyum.
 - Sökülen nükleer başlıklardan yüksek zenginlikteki uranyumun seyreltilmesi.
 - Sökülen nükleer başlıklardan elde edilen silâh kalitesinde plütonyumun uranyumla karıştırılması, gibi yakıt üretimleri ile uranyum üretimindeki eksiklik telâfi edilmektedir.



shutterstock.com • 388923526



➤ Uranyum Madenciliği: Cevherden Konsantreye



➤ Uranyum Madencilik Türleri: Konvansiyonel Madencilik Türleri

- Uranyumun cevherlerdeki tenörü genellikle %0,1-0,3 U dolayındadır. İşleme ekonomisine göre sınıflandırma yapılır.
- Elde etme maliyeti 80 USD/kgU'nın altında olanlar, 80-130 USD/kgU arasında olanlar ve 130 USD/kgU'dan fazla olanlar olarak sınıflandırma yapılır. Türkiye'deki uranyum cevherleri 80 - 130 USD/kgU sınıfındadır.
- Yeryüzüne yakın cevherler açık işletme ile çıkarılır; daha derinde olan cevher yatakları için galeriler ve kuyular açılarak işletme yapılır.
- Yeryüzüne çıkarılan cevher taşıma, kırma, öğütme, eleme, fiziksel zenginleştirme ve nihayet kimyasal çözündürme (genellikle asitlerle) yapılarak cevherden çözeltiye alınır.
- Çözeltiye geçen uranyum solvent ekstraksiyon yöntemiyle safsızlıklarından ayrılır ve seçimsel olarak çöktürülür.
- Elde edilen uranyum konsantresine renginden dolayı «sarı pasta» denir. İçeriğinde en az %70 U bulunmalıdır.

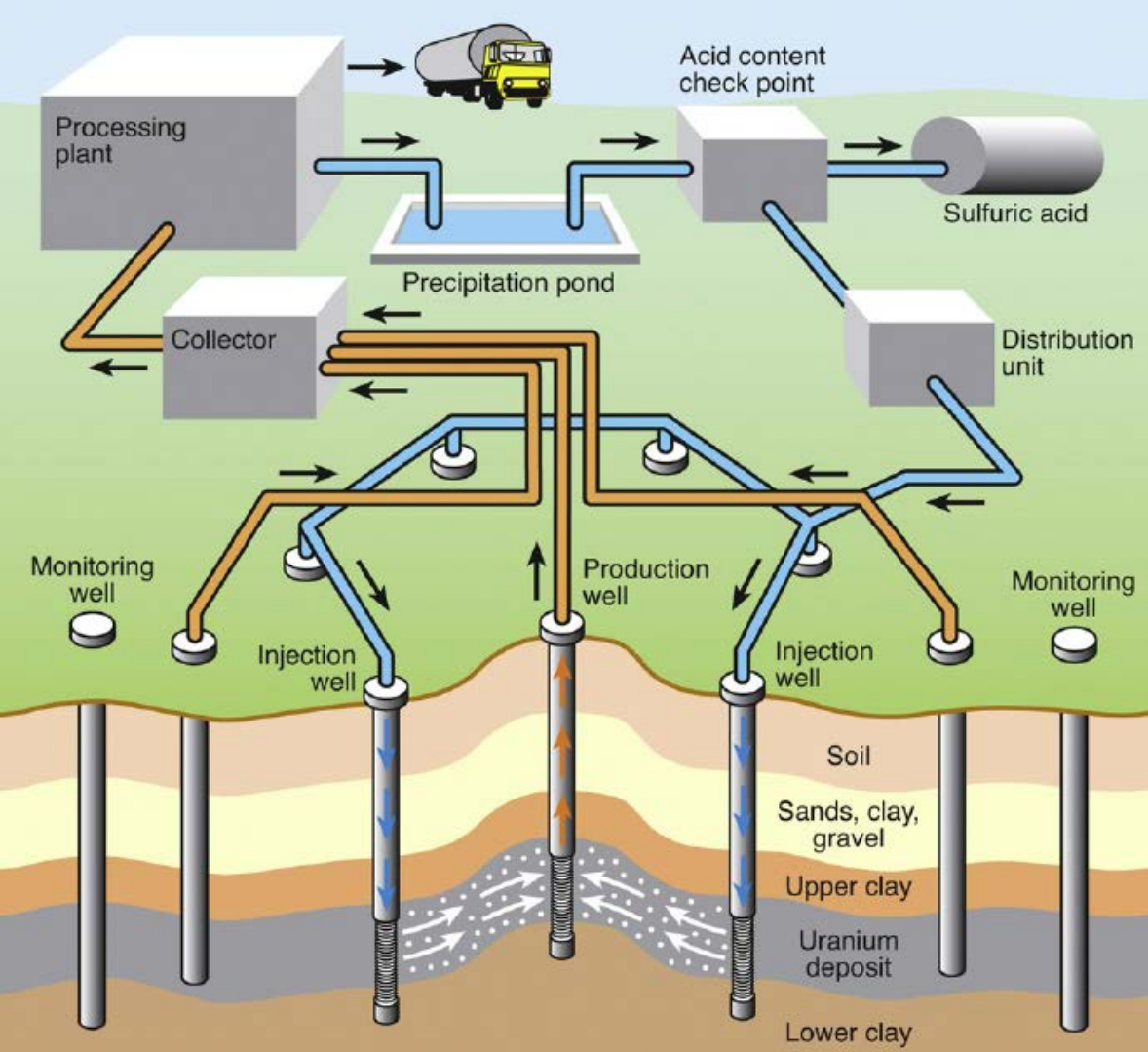
Nükleer Yakıt Çevrimi



Uranyum açık işletme madenciliği. Kanada

Yeraltı uranyum madenciliği. Cigar Lake, Kanada





➤ Çözelti madenciliği (ISL)

- Uranyum cevherleşmesi yeraltında uygun bir jeolojik yapıdaysa cevher dışarı çıkarılmadan yeraltında uranyum dışarı aktarılır.
- Kırma, öğütme, fiziksel zenginleştirme yapılmadığından çıkarma maliyetleri oldukça düşer.
- Açılan delikli kuyulardan aşağıya basılan asitli (veya alkali) çözelti kayaç içindeki uranyumu çözer.
- Ortadaki toplama kuyusundan zengin çözelti dışarı alınır. Uranyum çöktürülür. Saflaştırılır.
- 2019'da üretilen uranyumun %57'si ISL yöntemiyle gerçekleştirilmektedir.
- ISL yöntemi ABD, Kazakistan ve Özbekistan'da yaygın olarak kullanılmaktadır.

➤ Konsantreden İzotop Zenginleştirmeye

- Doğal uranyum içinde %99,27 oranında U-238; %0,711 oranında U-235 izotopu yer alır. Nükleer bölünme (fisyon) için sadece U-235 izotopu gereklidir.
- Dünyada kullanılan nükleer reaktör teknolojilerinin çoğunda (Hafif Sulu Reaktörler) kullanılan yakıtlar %3,7 ile %5 U-235 oranında «zenginleştirilmiş» uranyumdan imâl edilir.
- İzotop zenginleştirme yapabilmek için cevherden elde edilen uranyum konsantresinin «solvent ekstraksiyon» yöntemiyle nükleer saflığa getirilmesi ve uranyum tetraflüorür (UF_4) bileşiğine dönüştürülmesi gerekir.
- Uranyum konsantresinde (U_3O_8) uranyum (U) oranı %70-75 dolayındadır. Gerisi cevherde bulunan diğer elementlerden (Al, Fe, Mg, Ca, Cr...) oluşur. Bu elementlerin standartlarda belirtilen içerikten daha yüksek olmaması gerekir.
- Uranyum konsantresi asitte (HNO_3) çözülerek özel bir organik çözücü (TBP) ile SX yöntemiyle «nükleer saflıkta» uranyum okside dönüştürülür.

➤ Uranyum Saflaştırma Temel İşlemler

- Sarı pasta (U_3O_8) [TBP kullanarak saflaştırma] $UO_2(NO_3)_2$

- [Nitratt giderme, kavurma] UO_3 [H₂ indirgeme] UO_2
 
- [Hidroflürlleme HF] UF_4 [Flüörürleme F₂] UF_6
 

Bu işlemler
1985'den
2000'lere kadar
ÇNAEM'de
gerçekleştirildi

➤ Uranyum Saflaştırma Aşamaları



Uranyum oksit konsantresi



U saflaştırma -SX

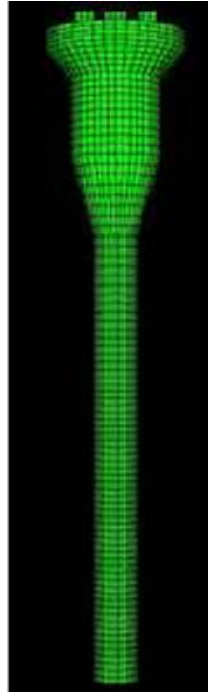


Nükleer saflıkta U oksit (UO_3)
ÇNAEM Nükleer Yakıt Pilot tesisi

➤ Uranyum Flüorür Bileşikleri



Nükleer saflıkta Uranyum dioksit – UO_2



Akışkan yatak flüorürleme fırını
 $\text{UO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{UF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$



Uranyum tetraflüorür – UF_4

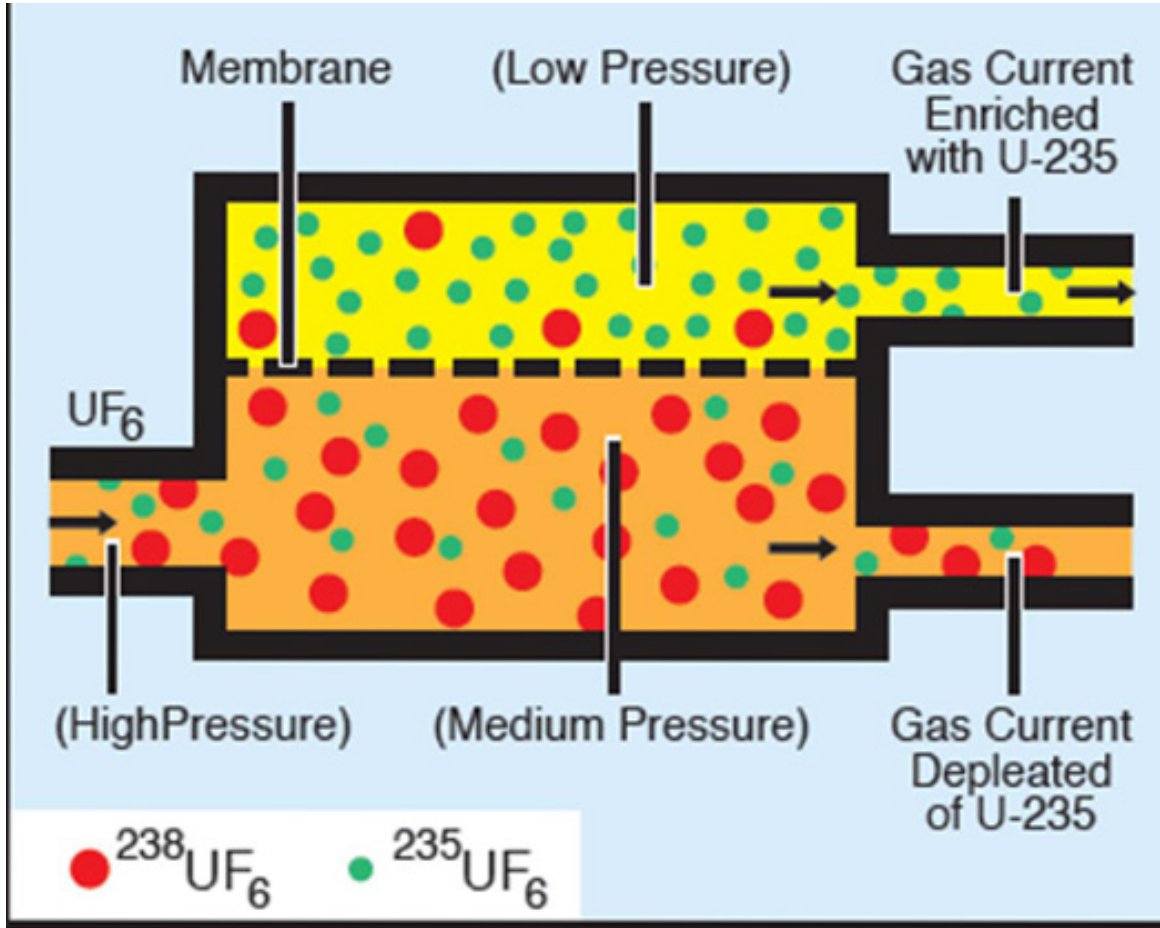


Uranyum hekzaflüorür – UF_6 kristalleri
 $\text{UF}_4 + \text{F}_2 \rightarrow \text{UF}_6$

➤ Uranyum İzotop Zenginleştirme

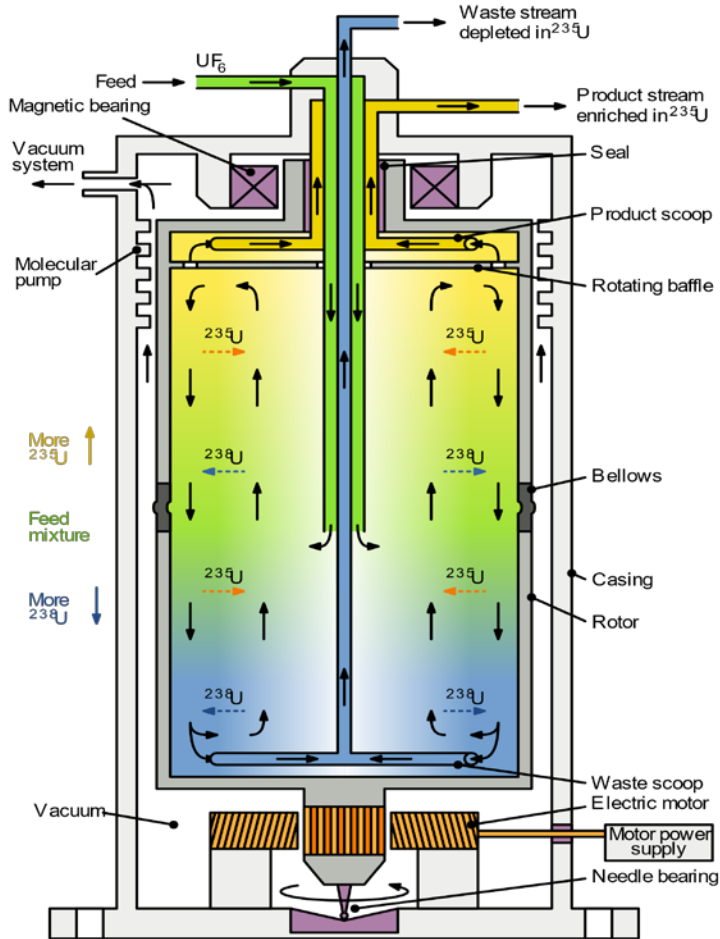
- Yılda yaklaşık 60 000 tU flüorürleme ile önce UF₄'e sonra UF₆'ya dönüştürülür.
- İzotop zenginleştirme için uranyum gaz hâlinde bileşiğine ihtiyaç olduğundan UF₆ üretilir. UF₆ 56,4 oC'ta süblimleşerek katıdan gaz hâline geçer.
- Uranyum izotopları aynı kimyasal özelliklere sahiptir. Dolayısıyla kimyasal yöntemlerle değil atom ağırlıkları farkına dayanan fiziksel özelliklerine göre ayrılmaları esas alınır. İzotop zenginleştirme için sınaî ölçekte kullanılan üç yöntem vardır:
 - **Gaz difüzyonu**
 - **Gaz santrifüj**
 - **Lazer ayırma**
- Her üç yöntem de gaz hâlinde UF₆ kullanır.

➤ Gaz Difüzyonu ile İzotop Zenginleştirme



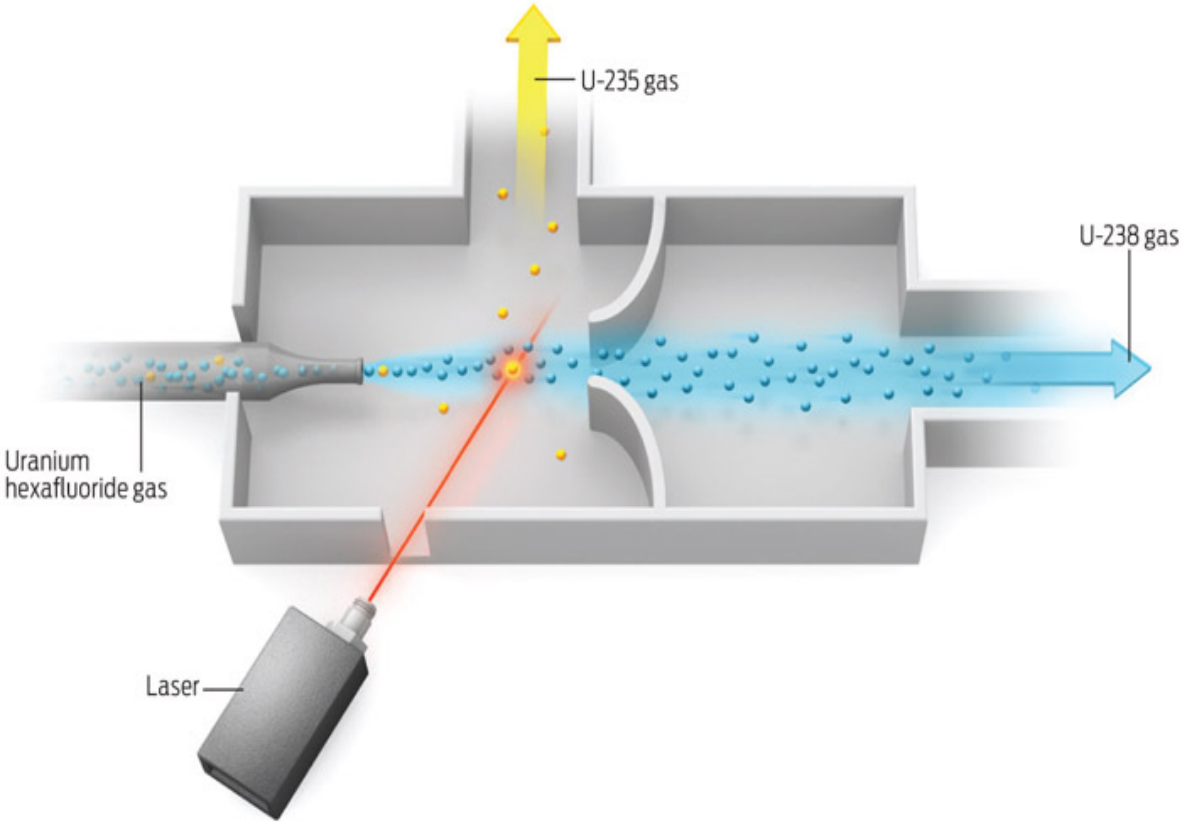
- UF_6 gazı yüksek basınçta hücreye girer. Ortadaki gözenekli diyaframdan daha hafif olan U-235 atomları tercihan düşük basınçlı bölgeye geçer.
- Bir miktar zenginleşmiş olan bu karışım arka arkaya yüzlerce hücreden geçirilerek istenen izotop zenginliğine erişilir.
- Sistemde yüksek basınç pompası, difüzör hücreleri ve sıkıştırmadan oluşan ısıyı uzaklaştıran ısı değiştirici bulunur.
- % 3 - 5 U-235 zenginliğinin erişmek için 1400 kadar kademe gereklidir.
- ABD'de USEC ve Avrupa'da Eurodiff en önemli gaz difüzyon kullanıcısı tesislerdir.

➤ Gaz Santrifüj ile İzotop Zenginleştirme



- UF₆ gazı santrifüjde çok yüksek hızlarda dönerek biraz daha ağır olan U-238 atomları dipte toplanır ve dışarı alınır.
- Orta bölgelerde bir miktar zenginleşen U-235 karışımı bir sonraki santrifüje beslenir.
- Santrifüjün ayırma kabiliyeti difüzörden daha yüksektir. Ama gaz santrifüjün elektrik tüketimi %5 daha yüksektir.
- En büyük gaz difüzyon tesisi Hollanda'daki URENCO'ya aittir.
- İran Natanz'daki izotop zenginleştirme de bu yöntemle çalışır.
- Motor hızı 50 000 – 70 000 dev/dak. Kullanılan malzeme: 316 Paslanmaz; 7000 Al alaşımı veya sert çelik

➤ Lazer Ayırma ile İzotop Zenginleştirme



- Sisteme giren UF₆ gazı içindeki U-235 moleküllerinin elektronları monokromatik bir lazer demeti altında uyarılır.
- Uyarılan U-235 moleküller ayırma ünitesinde sistemde ayrılır. Geriye U-235'ce fakirleşmiş UF₆ gazı kalır.
- ABD'de GE-Hitachi şirketi Silex yöntemiyle yüksek tenörlü (HALEU - %19,75 U-235'ce zengin) zenginleştirilmiş uranyum üretmek üzere ticarî lazer ayırma tesisi kurmaktadır.
- Çok daha etkin, verimli ve az enerji tüketimi olması bakımından lazer ayırma tekniğinin büyük ilgi görmesi beklenmektedir.

➤ İzotop Zenginleştirme Mühendisliği

- İzotop zenginleştirmeye giren doğal U kütlesi M_d , U-235 içeriği C_d ; zenginleşmiş U kütlesi M_z , U-235 içeriği C_z ; fakirleşmiş U kütlesi M_f , U-235 içeriği C_f alınırsa;
- Fakirleşmiş U içeriği C_f olduğu durumda, C_z içeriğinde U-235 içeren 1 kg zenginleştirilmiş U üretmek için gerekli olan U kütlesi (kg) oranını gösteren boyutsuz K değeri şöyle elde edilir:
- $K = M_d/M_z = (C_z - C_f)/(C_d - C_f)$
- Ayırma İşi Birimi (Separative Work Unit - SWU): C_d içeriğinde M_d kütlesinde giren U'u, C_f içeriğinde fakirleşmiş U atığı durumunda, C_z içeriğinde zenginleşmiş U'a dönüştürmek için gerekli olan iş birimidir ve kgSWU olarak gösterilir.
- $V(c) = (2c - 1) \log c / 1 - c$ formülünde $V(c)$ her U-235 (C) içeriği için boyutsuz bir değerdir.
- Uranyum «kütle değeri» ise:
 - a) zenginleştirmeden önce $U_1 = M_d \cdot V(C_d)$
 - b) zenginleştirmeden sonra $U_2 = M_z \cdot V(C_z) + M_f \cdot V(C_f)$, olarak hesaplanır.
- Ayırma işi birimi (kgSWU) şöyle bulunur: $\Delta U = U_1 - U_2$

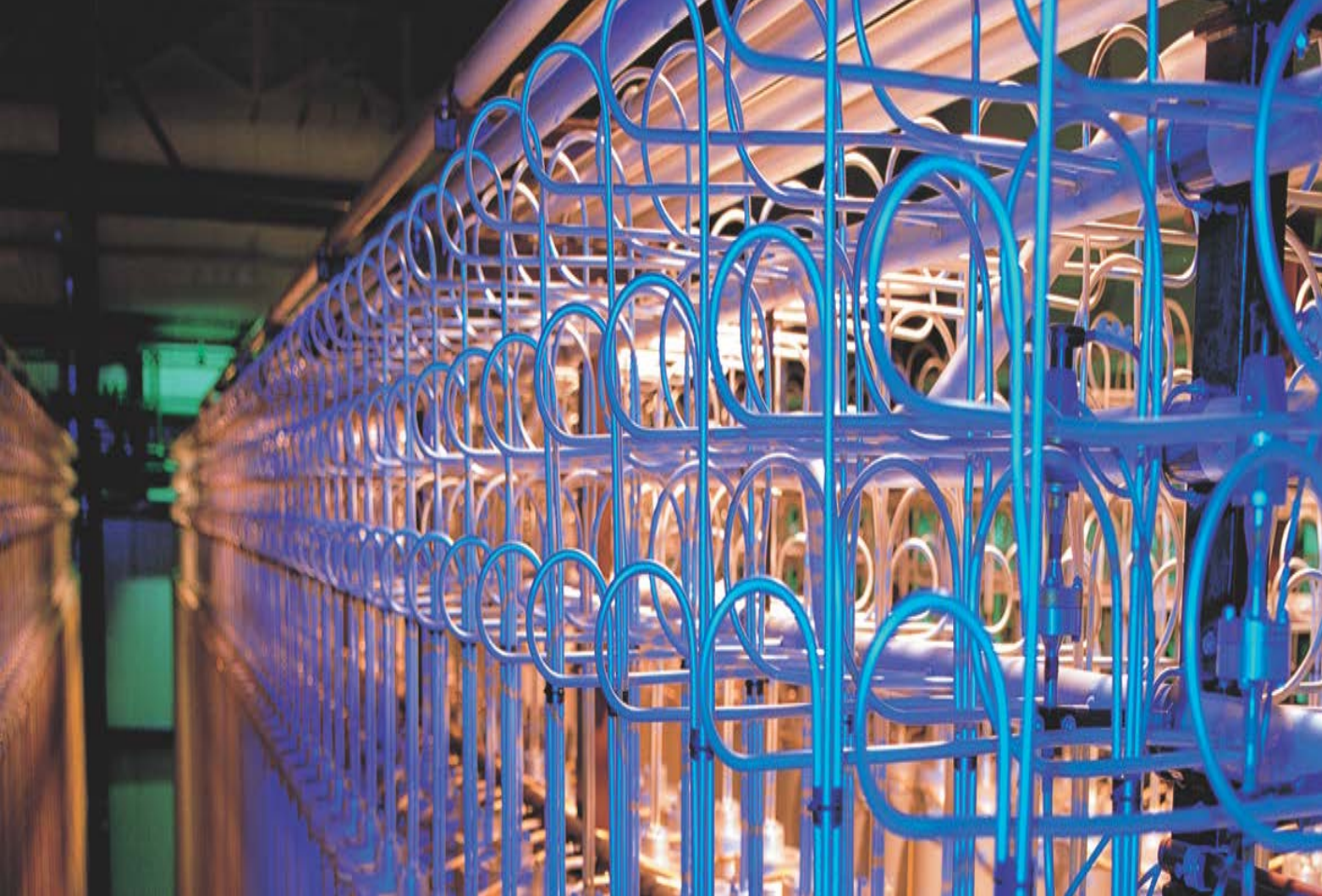
➤ Zenginleştirme örnek hesaplamaları:SWU ve doğal Uranyum (kg)

- Doğal U içeriği %0,711 U-235; çıkan fakirleştirilmiş U içerikleri %0,2 ve 0,3 olduğu durumlarda gerekli doğal U kütlesi

Zenginleşme oranı (% U-235)	Fakir U içeriği: % 0,2 (U-235)		Fakir U içeriği: % 0,3 (U-235)	
	SWU	Doğal U (kg)	SWU	Doğal U (kg)
3,00	4 306	5 479	3 425	6 569
3,40	5 191	6 262	4 154	7 543
3,80	6 090	7 045	4 899	8 516
4,00	6 544	7 436	5 276	9 002
4,40	7 460	8 219	6 039	9 976
4,80	8 385	9 002	6 810	10 949
5,00	8 851	9 393	7 198	11 436

Kullanılan tekniğe göre izotop ayırmada tüketilen enerji: 2800 kWh/SWU (difüzyon)
50-60 kWh/SWU (santrifüj)

➤ Gaz Santrifüj Tesisi (URENCO)



- Dünya **SWU** kapasitesi **2020 yılında 66 700** değerine erişmiştir.
- Mevcut izotop zenginleştirme tesisleri:
- Fransa (Orano)
 - Almanya-Hollanda-İngiltere (Urenco)
 - Japonya (JNFL)
 - ABD (USEC, Urenco, Global laser Enrichment)
 - Rusya (Tenex)
 - Çin (CNNC)
 - Diğerleri (Arjantin, Brezilya, Hindistan, Pakistan, İran)

Nükleer Yakıt Çevrimi

➤ İran Gaz Santrifüj Tesisi





TERSANELER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ BİLGİLENDİRME EĞİTİMİ

20-21 Nisan 2021

ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ

BÖLÜM-7: Nükleer Yakıt Çevrimi-II

Dr. Reşat Uzmen

➤ Nükleer Yakıt Yapımı

- İstenen oranda zenginleştirilmiş UF₆, reaktör yakıtı olarak kullanılmak üzere yeniden UO₂'ye dönüştürülür.
- UO₂ tozu reaktörlerin tasarımına uygun biçimlerde «pelet» denen küçük silindirler hâlinde preslenir/biçimlendirilir
- ve 1250 oC dolayında hidrojen atmosferinde «sinterlenir». Bunlara seramik yakıt peletleri denir



Sinterlenmiş gözenekli UO₂ seramik yakıt peleti

PWR yakıt peletleri özellikleri:

Pelet uzunluğu: ~11 - 13 mm
Pelet çapı: ~8,19 - 9,66 mm
Pelet yoğunluğu: 10,52 g/cm³

Her 1000 MWe reaktör için yılda yakl.

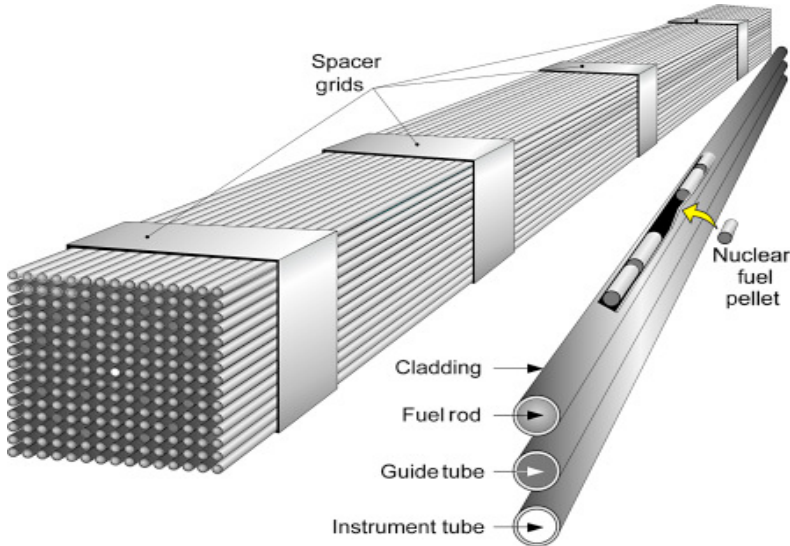
- 27 ton zenginleştirilmiş U
- 18 milyon yakıt peleti
- 50 000'den fazla yakıt çubuğu kullanılır



Preslenmiş UO₂ ham pelet

➤ Yakıt Çubukları ve Demeti

- Üretilen peletler özel zirkonyum alaşımından (Zircalloy-Zy4) imâl edilmiş ve önceden içleri helyum gazıyla doldurulmuş borulara (yakıt çubukları/zarfları) dizilir.
- Yakıt çubuklarının alt ve üstlerine inert gaz altında tapalar kaynaklanır.
- Yakıt çubukları reaktör tasarımına göre belli sayıda birleştirilerek yakıt demeti yapılır.

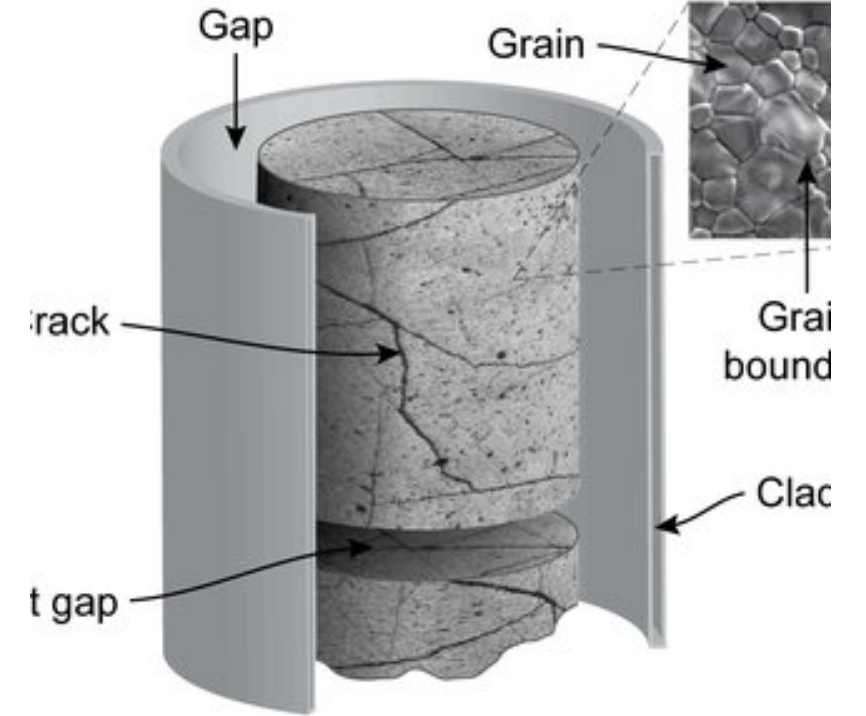


PWR Yakıt demetinde 176 ile 264 çubuk bulunur. Demet geometrisi, 14X14 ile 17X17 olabilir. Demet boyu: 3,9 - 4,795 m Demet genişliği: 20,6 – 21,4 cm



➤ Kullanılmış Yakıt

- Reaktör kalbine yerleştirilen yakıt demetleri içindeki uranyum termal (veya hızlı) enerjili nötronlarla tepkimeye girerek bölünür ve enerji üretir
- Bölünme sonucu daha küçük atom sayılı elementler oluşur, bunların çoğu radyoaktif özellik taşır. Önemli bir kısmı peletlerin eriştiği sıcaklıkta gaz hâlinindedir.
- Bölünme ısısının eriştiği yüksek sıcaklık ile peletlerin gözenekli yapısı içinde sıkışan gazın basıncı peletleri çatlatabilir, biçimini bozabilir.
- Yakıtın kullanma sonuna geldiği ürettiği enerji veya yanma oranı (MWd/tU) ile hesaplanır
- Kullanılmış yakıt içinde U-238, U-235, plütonyum izotopları, bölünme ürünleri (BÜ), aktinitler (U ötesi elementler) bulunur.
- Yakıtlar U-235 tükeninceye kadar kullanılmaz, aksi takdirde yakıt zarfları bozular, nötron ekonomisi zarar görür ve nükleer güvenlik zafiyeti doğar.



➤ Işınlanmış Nükleer Yakıtın İçeriği

- [1300 MWe gücünde Hafif Sulu Reaktörün 3 yıl bekletmeden sonra kalan ürünler kg/t yakıt]
~ %1 U-235 içeren 935,548 kg U

Aktinitler	Kütle (kg)
Neptünyum	0,43
Plütonyum	10
Amerikyum	0,38
Küriyum	0,042

Kısa yarı-ömürlü bölünme ürünlerinin miktarca azalması ve yakıtlardan çıkan ısının azaltılması maksadıyla reaktörden çıkan yakıt elemanları sulu havuzlarda bekletmeye alınır

Bölünme ürünleri	Kütle (kg)	Bölünme ürünleri	Kütle (kg)
Kr, Xe	6,0	Tc	0,23
Cs, Rb	3,1	Ru, Rh, Pd	0,86
Sr, Ba	2,5	Ag, Cd, In, Sn Sb	0,25
Y, La	1,7	Ce	2,5
Zr	3,7	Pr	1,2
Se, Te	0,56	Nd	4,2
Mo	3,5	Sm	0,82
I	0,23	Eu	0,15

➤ Kullanılmış Yakıt Demetleri Bekletme Havuzu



- Kullanılmış Yakıt elemanları içinde bölünme yapabilecek, dolayısıyla enerji üretebilecek U-235, Pu-239, 241, Np, Am gibi elementler bulunur.
- 12 m derinliğindeki havuzlar, hem soğutma hem radyolojik kalkan görevi yapmak üzere suyla doldurulmuştur.
- Bekletme havuzları nükleer santral alanı içinde ama reaktörden uzak bir konumda bulunur.
- Yakıtlar kimyasal temizlemeye veya kuru depolamaya gönderilmeden önce 10 – 20 yıl bu havuzlarda bekletilir.

➤ Kimyasal Temizleme veya Yeniden İşleme

- Nükleer enerjiden elektrik üreten birçok ülke kullanılmış yakıtlar içinde önemli miktarda bulunan uranyum (238 ve 235) ile daha az miktardaki bölünebilir maddeleri (aktinitler) tekrar enerji üretiminde kullanmak üzere yakıt temizleme yapmaktadır.
- Bu bakımdan kullanılmış yakıtlar «nükleer atık» olarak değil «değerli kaynak» olarak kabul görmektedir. Fransa, İngiltere, Belçika, Japonya, Rusya, Çin...
- Ancak kullanılmış yakıtların içinde yer alan plütonyumun bazı izotopları (239 ve 241) aynı zamanda nükleer patlayıcıların ana maddesi olduğundan sivil reaktörlerden çıkan yakıtların kimyasal temizleme yapılmadan uzun süre saklanması politikası olarak kabul eden ülkeler vardır: ABD, Kanada, G. Kore...
- Yeniden işleme oldukça zor mekanik ve kimyasal süreçler gerektirir. İşlenen maddelerin çok yüksek radyoaktiviteye ve zehirlenme özelliğine sahip olması işlemleri daha da zorlaştırır.
- Hidrometalürji prosesi olan yeniden işlemede yakıt demetleri özel makaslarla kesilir zarf malzemesi ayrıldıktan sonra peletler nitrik asit ile çözündürülür. Metallerin ayrılması PUREX denen solvent ekstraksiyon yöntemiyle gerçekleştirilir.

➤ Yeniden İşleme Tesisleri

Hafif Sulu Reaktör (LWR) yakıtları	Fransa, La Hague	1 700 t/yıl
	Rusya, Ozersk (Mayak)	400 t/yıl
	Japonya (Rokkaşo -2022)	800 t/yıl
	Toplam LWR	2 100 t/yıl
Diğer nükleer yakıtlar	İngiltere, Sellafield (Magnox)	1 500 t/yıl
	Hindistan (Ağır Su R.)	260 t/yıl
	Toplam diğerleri	1 760 t/yıl
Toplam sivil kapasite	3860 t/yıl	

- Yeniden işlemeden çıkan U, %1 U-235 içerir. Yeniden izotop zenginleştirmeye gönderilir
- Çıkarılan plütonyumdan [U,Pu oksit} veya MOX yakıtı yapılır. Her %1 Pu, doğal uranyumdan %30 tasarruf sağlar
- Günümüze kadar dünyada 400 000 t kullanılmış yakıt çıkmıştır. Bunun %30'u yeniden işleme girmiştir.

➤ Radyoaktif Atıklar (RA)

- Radyoaktivite özelliği gösteren pek çok madde nükleer yakıt çevrimi adımları sırasında ortaya çıkar. Bundan başka sanayi ve tıpta da değişik radyoaktif atıklar üretilir.
- RA'lar iki şekilde sınıflandırılır: radyoaktivite düzeyi ve radyonüklitlerin yarılanma ömrü.
- Çok düşük aktivite : gram başına birkaç Bq radyoaktivite (alfa veya beta); zırlama gerekmez
- Düşük aktivite: 10 – 100 000 Bq/g; işleme veya taşımada özel koruma gerekmez.
- Orta aktivite: 1MBq-1GBq/g;
- Yüksek aktivite: >1GBq/g. Isı yayarlar.

Çok kısa ömürlü: <100 gün. **Kısa ömürlü:** <31 yıl. **Uzun ömürlü:** >31 yıl

➤ Radyoaktif Atık Yönetimi

- Koruma önlemleri ve özel işlem gerektiren RA'lar yüksek aktiviteli-uzun ömürlü atıklardır. Bunlar çoğunlukla kullanılmış yakıtlardan kaynaklanır.
- Radyoaktiviteleri yüz binlerce, hatta milyonlarca yıl devam eder. Jeolojik oluşumlarda yeraltında özel kaplarda depolanır. Örnek: U ve Pu dışındaki aktinitler (Np, Am, Cm).
- Yüksek aktiviteli-çok kısa veya kısa ömürlü RA'lar radyolojik korumalı kaplarda yer üstünde depolanabilir (BÜ: Cs, I,...)
- Çok düşük aktiviteli-uzun ömürlü RA'lar özel bir koruma gerektirmez: uranyum madencilik atıkları, doğal uranyum, fakirleşmiş uranyum...
- Düşük ve orta aktiviteli-kısa ömürlü RA'lar hacimce çok büyük miktarlara erişmektedir: yakıt çevrimi işlemlerinde kullanılan bulaşma olmuş önlükler, eldivenler, âletler, kullanılmış yakıt zarf malzemeleri,vb... Aktivitelerinin zararsız hâle gelmesi 300 yıl kadardır. Özel kaplarda radyolojik koruma altında depolanırlar.
- RA'lar gaz, sıvı veya katı olmalarına göre de tasarlanan koruyucu kaplar ve depolama yöntemlerine göre işlem görürler

➤ Toryum Yakıt Çevrimi

- Toryum doğada bulunan düşük radyoaktivite özelliği gösteren bir metaldir. %100 Th-232 izotopundan oluşur. Yarılanma ömrü 14,05 milyar yıldır.
- Th tek başına bölünebilir değildir, aynı U-238 gibi üretkendir. İlk başlangıçta zen. U veya Pu-239 gibi bölünebilir bir madde ile işleme sokulur.
- $232\text{Th} + n \rightarrow 233\text{Th} \rightarrow 233\text{Pa} \rightarrow 233\text{U}$. Nötronlarla tepkimeye girerek Th-233'ü verir; bu da 22 dak.lık yarılanma ömrüyle bozunarak Pa-233'ü (yarılanma ömrü:27 gün); o da U-233 izotopunu verir.
- U-233 doğada bulunmayan, ama U-235 veya Pu-239 gibi çok kaliteli bir bölünebilir maddedir. U-233 üredikçe bölünme tepkimesine katılır ve teorik olarak Th-232 sonuna kadar kullanılabilir.
- Th yakıt çevriminde aktinitler de bölünmeye uğrayarak düşük atom sayılı BÜ'ne dönüşür (transmütasyon) ve enerji üretimine katkı sağlar.
- Dolaysıyla Th yakıt çevriminde yüksek aktiviteli-uzun ömürlü RA'lar üremez.

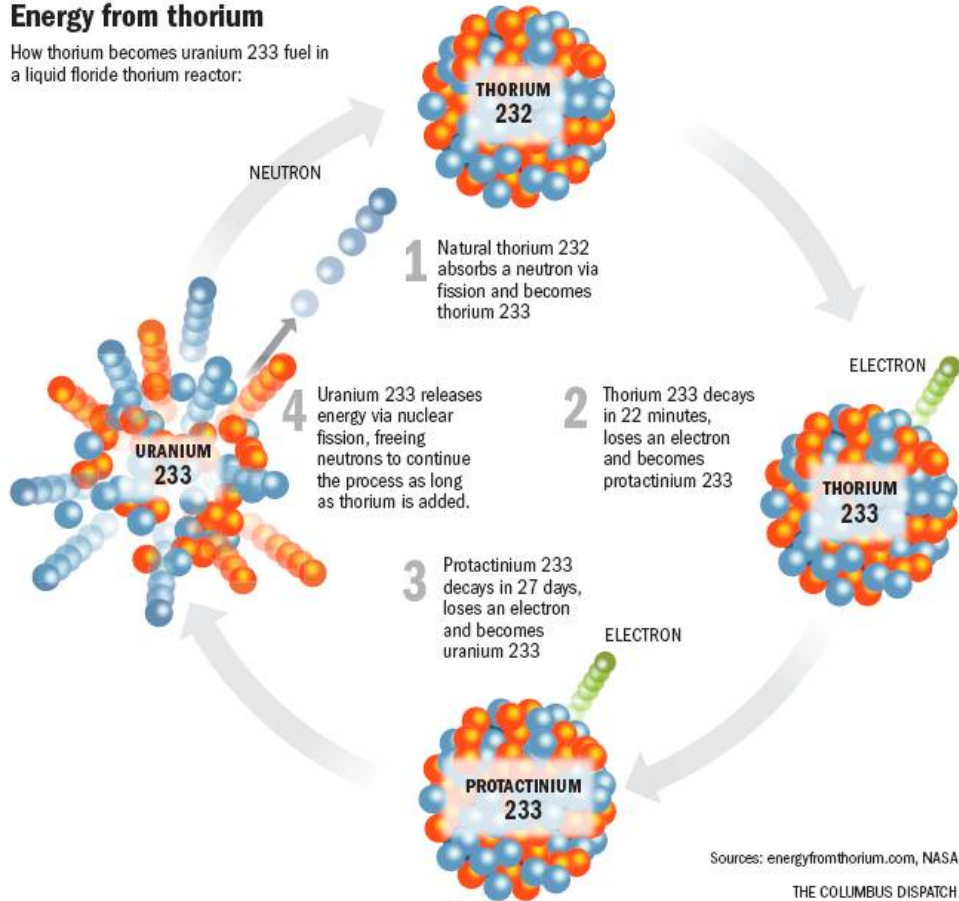
➤ Toryum Yakıt Çevrimi

- Th-232 hem ısı, hem hızlı nötron spektrumuyla yüksek verimde bölünebilme ve enerji üretebilme özelliğine sahiptir.
- Bugüne kadar Th yakıt çevriminin hemen bütün konvansiyonel reaktör sistemleriyle (Hafif Sulu, Ağır Sulu, Gaz soğutmalı, Hızlı Spektrumlu) gayet uyumlu olarak çalıştığı denenmiştir.
- Ama yakıt yapım teknolojisi gayet basitleştirilmiş olan Ergimiş Tuz Reaktörlerinde (ETR) Th'un zeng. U ($<19,5\%$ U-235 veya U-233), Pu (reaktör kalitesinde) ve kullanılmış nükleer reaktör yakıtlarından elde edilen aktinitler (TRU) ile birlikte başarılı olarak çalıştığı hesaplanmış ve kanıtlanmıştır (ORNL-MSRE çalışması, A. Weinberg; CNRS-Grenoble, D. Heuer ve E. Merle).
- Th'un verimli olarak kullanılabildiği bir sistem de Proton Hızlandırıcı sistemlerdir (ADS). Bu sistemde üretilen nötronlar Th-Pu karışımı ile tepkimeye girerek enerji üretebilir.
- Toryum doğada çoğunlukla Nadir Toprak Elementleri (NTE-Lantanitler) ile birlikte bulunur. Lantanitler üretilirken yan-ürün olarak Th ayrılır.
- Türkiye, 300 000 ton'luk ekonomik Th rezervine sahiptir.

➤ İleri Yakıt Çevrimleri

Energy from thorium

How thorium becomes uranium 233 fuel in a liquid fluoride thorium reactor:



- Konvansiyonel reaktörler için uygulanan yakıt çevriminde, özellikle reaktör sonrası, kullanılmış yakıtların kimyasal temizleme işlemi sırasında çıkan yüksek aktiviteli-uzun ömürlü aktinitlerin çok uzun süre depolanması zorunluluğu ciddi riskler taşımaktadır.
- Son yıllarda toryum çevrimi tasarımları ve ETR'lerin yeniden doğuşu, yüksek aktiviteli-uzun ömürlü RA'ların hem üretilmesini hem de mevcut olanların «dönüştürülerek» risklerinin azaltılmasına hizmet edecek şekilde ele alınmaktadır.

➤ ETR Yakıt Çevriminin Üstünlükleri

- Seçilecek ETR tipinde toryum seçeneği olsa dahi, başlangıçta zenginleştirilmiş U ile karışık toryum tuzu kullanılacaktır.
- %5 ilâ %19,5 U-235 içeren zeng.U yurtdışından temin edilme yoluna gidilecektir.
- Konvansiyonel yakıt çevriminde çok hassas ve yüksek teknoloji gerektiren UO₂ üretimi, pelet yapımı, sinterleme, yakıt çubukları, vb. işlem ve malzemelere gerek olmayacaktır.
- ETR'lerde işletme sırasında ergimiş tuz kütlesi içinden sürekli gaz geçirileceğinden gaz hâlindeki pek çok BÜ ayrılmış olacaktır.
- Ayrıca ETR içinde oluşan Aktinitler de bölünme tepkimelerine katılacağından reaktör sonrası çok hassas, riskli ve yüksek maliyetli «yeniden işleme/kimyasal temizleme» tesisine de gerek kalmayacaktır.
- ETR yakıtlarından çıkacak olan orta aktiviteli ve kısa ömürlü atıklar hacimce de az olacağından saklanmaları ve yönetimi görece kolay olacaktır.

➤ Nükleer Yakıt Çevrimi ve Uluslararası Siyasete Etkileri

- II. Dünya savaşının sonunda Japonya'ya atılan 2 nükleer bombanın (U-235 ve Pu-239) yarattığı müthiş tesir nükleer enerjinin inanılmaz stratejik üstünlüğünü de ortaya koyuyordu.
- 1960'larda, yüzyılın sonunda 30-35 ülkenin nükleer silâh sahibi olacağı tahmin ediliyordu. Oysa bugün bile o sayı 8'dir.
- 1950'lerde ABD tarafından nükleer enerjinin barışçı amaçlarla - özellikle çok düşük maliyetli elektrik üretiminde- kullanılması yönünde başlattığı «Atom for Peace» programıyla Türkiye dahil birçok ülkeye araştırma reaktörü kuruldu.
- Nükleer araştırmalar hızla gelişirken, nükleer silâha sahip olmanın getireceği büyük siyasî avantajlar ve stratejik üstünlük birçok ülkeyi nükleer silâha yönelik araştırmalara sevk ediyordu.
- Hem nükleer enerjinin insanlığa getireceği faydalardan yararlanmak hem de insanlığa büyük zarar verecek olan nükleer silâha yönelmeyi engellemek nasıl mümkün olacaktı?



➤ Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Antlaşması

- 1953'de ABD'nin başlattığı «Barış için Atom» programının dünyada yayılmasını bir teşkilât aracılığıyla teşvik etmek maksadıyla yürütülen çalışmalar 29 Temmuz 1957'de Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın (UAEA) Viyana'da kurulmasıyla sonuçlandı.
- UAEA'nın o yıllarda Cenevre'de tertiplediği genel konferanslarda nükleer yakıt çevriminin bütün adımları ayrıntılarıyla ortaya kondu. Birçok ülke kendi nükleer enerji programını başlattı.
- Ama çalışılmaların önemli bir kısmı nükleer silâh yapımına yönelmeye başlayınca siyasî endişeler de artmaya başladı.
- 1960'ların ortasında «Nükleer Silâhların Yayılmasını önleme antlaşması-NSYÖA» (İng. Non-proliferation Treaty-NPT) için müzakereler başlatıldı.
- 1968'de anlaşmaya varıldı ve imzaya açıldı. Nihayet 1970'te yürürlüğe girdi.



➤ Nükleer Güvence Denetimleri

- NSYÖA antlaşma öncesi nükleer silâha sahip 5 ülke ile nükleer silâhı olmayan diğer ülkeler arasında karşılıklı güvence anlaşmasıdır. Nükleer silâh sahibi olmayanlar «barışçı» amaçlar için nükleer malzeme, teknoloji ve bilgi edinebilmek için nükleer silâha yönelmeyeceklerini taahhüt etmek zorunda kalıyorlardı.
- Antlaşmayı imzalamayanlar ile imzalayıp «gizli» yollardan nükleer silâh yapımına girişenlere hassas nükleer teknoloji ve malzeme verilmemesi karar altına alınmıştır.
- Güvencenin işleyişini denetlemek için UAEA ile diğer ülkeler arasında «güvence anlaşması» (Safeguard Agreement) yürürlüğe konmuştur.
- Buna göre imzacı ülke her türlü nükleer tesisini, çalışmasını, nükleer yakıt faaliyetlerini UAEA denetçilerine açmak zorundadır. [Söz gelişi, nükleer araştırma reaktörleri ile kullanılmış yakıt havuzlarında gizlice nükleer malzeme giriş ve/veya çıkışı olmasın diye 24 saat mühürlü kamera denetimi vardır]
- Günümüzde nükleer silâh sahibi olmayan 57 ülkede 900'den fazla nükleer tesis ve yüzlerce noktada düzenli UAEA denetimi yapılmakta, kayıtları ve nükleer malzeme miktarları denetlenmektedir.

➤ UAEA Denetim ve Doğrulama Faaliyetleri

- Araştırma reaktörü veya kullanılmış yakıt havuzu gözle denetimi



➤ Nükleer Güvence Denetimlerinin Alanı

- UAEA'nın denetimleri üç temel alanda gerçekleştirilir.
 1. Nükleer malzeme akışı, çalışma alanlarından örnek alınması ve işletme kayıtlarının doğrulanması;
 2. Fiziksel güvenlik denetimleri hassas nükleer malzeme bulunan yerlerden hırsızlık veya sabotaj gibi olaylara karşı alınan önlemleri kapsar
 3. Gözetim faaliyetleri kapsamında cihaz ve malzeme kaplarının mühürlenmesi, otomatik kameralarla sürekli gözetim sağlanarak bildirimi yapılmamış malzeme ve faaliyetlerin tespiti sağlanır.
- NSYÖA'na taraf olan bütün ülkeler denetimleri eksiksiz kabul etmek durumundadır. Nükleer silâh sahibi ülkeler denetimlerden muaftır. Ancak kendi istekleriyle bazı (askerî olmayan) tesis ve faaliyetlerini denetimlere açabilirler.
- NSYÖA'ya taraf olmayan ülkeler: İsrail, Hindistan, Pakistan. Kuzey Kore antlaşmadan çekildiğini tek taraflı olarak bildirmiştir.

➤ NSYÖA'na Ek Protokol

- 1980-90 yıllarında NSYÖA'ya taraf olan bazı ülkelerin antlaşmanın zayıf noktalarından hareketle bildirilmemiş nükleer faaliyetlere (plütonyum üretimi, izotop zenginleştirme, yeniden işleme) giriştiği anlaşılmıştır. (Irak, Libya, İran, Kuzey Kore, Brezilya, Arjantin, G. Afrika)
- Bunun üzerine Antlaşmaya bir Ek Protokol hazırlanmış ve 1997 yılında yürürlüğe sokulmuştur.
- Ek Protokolün eklerinde «çift kullanım» kavramını geliştiren malzeme ve cihazlar eklenmiş; ayrıca nükleer tesis olarak bildirilmemiş yerlere denetim yapılması, hassas projelerde çalışanlara soru yönlendirilmesi gibi daha ağır denetim rejimi uygulanmaya başlanmıştır.
- UAEA denetçilerine sürekli vize uygulaması, kısa süreli ziyaret bildirimi, kolaylıkla UAEA merkeziyle iletişim kurma imkânı da Ek Protokol ile sağlanmıştır.
- 2020 sonunda 150 ülke Ek Protokolü imzalamış, 136'sında yürürlüğe girmiştir. Türkiye NSYÖA ve Ek Protokole taraf ülkeler içinde yer almaktadır.

➤ Zangger Komitesi

- 1971 yılından başlayarak 15 kadar ülke İsviçreli Prof. Claude Zangger'in başkanlığında toplanarak NSYÖA'nın ilgili hükümlerine göre nükleer donanım, malzeme ve teknoloji ihracatçısı ülkelere açıklama ve yönlendirme çalışmalarına başlamıştı.
- Özellikle NSYÖA'nın III. Maddesi, 2. paragrafında belirtilen «...her taraf ülke, üçüncü bir ülkeye, o ülke güvence denetimlerini yapmayı kabul edinceye kadar barışçı amaçlarla da olsa her türlü özel bölünebilir madde ve bu maddeleri işlemeye elverişli özel tasarımlanmış donanımı **vermemeyi taahhüt eder..»** hükmünün nasıl yorumlanması gerektiği hususunda yönlendirici açıklamalar yaparlar.
- Bugün Türkiye'nin de içlerinde olduğu 39 üyesi vardır (www.zanggercommittee.org)
- Zangger Komitesi UAEA ile sıkı işbirliği içinde çalışmaktadır ve nükleer güvence konularında ciddî bir ağırlığı vardır.
- Zangger Komitesi, oluşturduğu «nükleer silâh yapımını kolaylaştıracak malzeme ve donanım listesi- trigger list» sayesinde hangi malzeme ve donanımların hangi ülkelere ihraç edilip edilmemesi konusunda tavsiye kararı alır ve taraf ülkeler ile UAEA'ya bildirir.

➤ Nükleer Tedarikçiler Grubu

- Nükleer Tedarikçiler Grubu (Nuclear Suppliers Group-NSG) 1974'te Nükleer silâh sahibi olmayan bir ülkenin (Çin) barışçı amaçlarla aldığı malzeme ve teknolojiyle nükleer silâh yapabileceğinin ortaya çıkmasıyla kuruldu. 1994'te resmen faaliyete geçti.
- Türkiye'nin içinde bulunduğu 48 üyesi vardır. NTG'nin UAEA aracılığıyla yayınladığı yönergesi (INFCIRC/254/Part1 ve 2) ve ekleri tedarikçi ve üretici ülkelere hassas malzemelerin neler olduğu hususunda ayrıntılı bilgi vermektedir.
- Özellikle INFCIRC/254 Part 2, «çift kullanımlı» malzeme ve bilgisayar sistemlerinin listesini vermektedir. Part 1'e ait üç Ek, malzeme ve donanımı; buna ait ayrıntıları ve fiziksel korunma düzeyleri hakkındaki listelerden oluşmaktadır.
- NTG, teknik uzmanların ikinci planda olduğu diplomatların ön plana çıktığı bir örgüttür. Dünyada nükleer konulardaki her türlü faaliyeti ve nükleer malzeme ile donanım alış verişini dikkatle izler. UAEA ve nükleer silâhların yayılmasını önleyici bütün antlaşmalarla ilintilidir.
- Üye ülkelerdeki irtibat noktaları, üçüncü ülkelere kendi üzerlerinden yapılan hassas ve «çift kullanımlı» malzeme ve donanımın ithal ve ihraç denetimlerini yaparak NTG'ye bildirmekle yükümlüdür.

[E-MOBİLİTE]

[AKIŞKANLAR MEKANIĞI]
Termodinamik

[MOBİLİTE]

[AR-GE DERGİSİ]

[YAPAY ZEKA]

[EĞİTİM]

BuildUp Academy

[AR-GE PROJELERİ]

[SİMÜLASYON]

[SAVUNMA SANATI]

[OTOMOTİV]

[TEKNOLOJİ]

*BUILDUP ACADEMY

[NÜKLEER TEKNOLOJİ]

[İLERİ MÜHENDİSLİK]

[YEŞİL ENERJİ]

[SİMÜLASYON]

[YEŞİL ENERJİ]

TEŞEKKÜRLER

[YAPISAL ANALİZ]

[MATLAB & SIMULINK]

FİGES A.Ş.