



TMMOB
Maden Mühendisleri Odası

URANYUM

TORYUM

Editör:
Necati Yıldız

Ocak 2017

© Tüm hakları TMMOB Maden Mühendisleri Odası'na aittir. Oda'nın yazılı izni olmaksızın bu kitap ya da kitabın bir kısmı herhangi bir biçimde çoğaltılamaz.

ISBN : 978-605-01-0981-8

Baskı tarihi : Ocak 2017

Teknik hazırlık : Maden Mühendisleri Odası

Baskı : ZİRAAT GURUP MATBAACILIK AMBALAJ SAN. ve TİC. A.Ş.
İstanbul Yolu Trafo Karşısı 06070 Varlık Mahallesi ANKARA

Tel : 0312-384 73 44-45 • Faks: 0312-384 73 46

İsteme adresi : TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Selanik Cad. 19/4 • Kızılay / Ankara

Tel : 0 312 425 10 80 • Faks: 0 312 417 52 90

İnternet adresi : www.maden.org.tr

E-posta : maden@maden.org.tr



SUNUŞ

Kuşkusuz insan yaşamında enerjinin vazgeçilmezliği tartışmasız bir gerçektir. Ancak üretileceği kaynak her zaman tartışma konusu olmuştur. Kömür havayı kirletmekte, hidrolik santraller doğanın dengesini bozmakta, doğalgaz dışa bağımlı, nükleer enerji tehlikeli, rüzgar santralleri göçmen kuşların göç yolları için tehlike oluşturmakta, her bölgede enerji için güneş ışınları yeteri olmayıp zaten bu gün için güneş enerjisi pahalı... O zaman...

Uranyum 1789'da M. H. Klaproth tarafından keşfedilmiş, sonrası bilim insanlarıca üzerinde çalışılmıştır. Bunlardan biri de Madam Curie olarak tanıdığımız Marie Curie'dir. Marie Curie veya doğum ismiyle Maria Salomea Skłodowska Polonya asıllı kimyager ve fizikçi bir bilim insanıdır. Madam Curie Nobel Fizik, Nobel Kimya ödülü sahibi ve radyoloji biliminin kurucusudur. Çalışmalarıyla bir çığır açan Curie, Nobel Ödülü'nü alan ilk kadın, bu ödülü iki kere alan ilk bilim insanıdır.

1934 yılında ölümü, aşırı dozda radyasyona maruz kalmasına bağlanmıştır. Bu yüzden ona "bilim için ölen kadın" adı verilmiştir. Bu gün tıp cihazlarındaki gelişmelerde Madam Curie'nin radyoaktivite üzerine yapmış olduğu çalışmaların katkılarını görmezlikten gelmek mümkün değildir.

Uranyumun diğer yanı, daha doğru bir ifadeyle "kirli yanı" silah olarak kullanılmasıdır. II.Dünya Savaşında 1942 yılında ABD'de New Mexico eyaletinde kurulu bulunan Los Alamos Scientific Laboratuvarı'nda atom fizikçisi Prof. Dr.J.R.Oppenheimer başkanlığında bir çalışma başlatılmıştır. "Manhattan Projesi" olarak isimlendirilen bu çalışmada yer alan 5700 bilim insanı U235 ve Pu239'den, 1945 yılında Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan iki nükleer bomba üretmişlerdir. Binlerce insanın can verdiği bu olay "insanlığın en yüz karası olayı" olarak tarihe geçmiştir.

Uranyum için de dünyada ciddi bir savaş sürmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı sözde nükleer enerjinin barışçıl amaçlı kullanımı, askeri amaç için kullanılmasını engellemek amacıyla 1957 yılında kurulmuştur. İşin ilginç yanı bu örgütü oluşturan, söz sahibi birkaç ülke nükleer başlıklı silahlara sahip olmalarına karşın başkalarının nükleer silah üretmelerine müsaade etmemektedirler. Bu Ajans, başta uranyum olmak üzere nükleer hammaddelerin kullanımına yönelik faaliyetleri ambargo, baskı ve tecrit ile ekonomik uygulamalarla kontrol(!) altında tutmaktadırlar.

Maden Mühendisleri Odası olarak, her zaman barıştan, kardeşlikten yana, silaha, silahlanmaya, savaşlara karşı olduğumuzu, yoksulluğa, açlığa, eşitsizliğe, haksızlığa, adaletsizliğe karşı mücadele etmemiz gerektiğini bir kez daha sizlerle paylaşmakta fayda görüyoruz.

Uranyumun üçüncü yanı elektrik üretilmesinde kullanımındır. Ülkemizde 2016 yılı itibarı ile kurulmuş nükleer santral mevcut değildir. Ancak Ak Kuyu'da nükleer santralin kurulması için Rusya ile anlaşma yapılmıştır. Bu anlaşma metni TBMM'de kabul edilerek 6 Ekim 2010 gün ve 27721 sayılı Resmi Gazetede yayımlanmıştır. Diğer taraftan Sinop ve İğne Ada'ya da iki nükleer santral kurulması çalışmalarının sürdürüldüğü bilinmektedir.

Nükleer santral anlaşmalarının siyasi ve teknik olmak üzere biri birinden ayrılmaz iki boyutu ile tartışılması gerekmektedir. Nükleer santral kurulmasının "karşısında" ya da "tarafında" olmak, "neden", "nasıl", "niçin" gibi sorulara yanıt verebilmek, konunun siyasi boyutu ile teknik yanını yan yana koyabilmek konuyu bilmekle mümkündür.

Bu çalışmayla; uranyum ve toryumun santrallerde nükleer yakıt olarak kullanımı, istatistiki bilgiler, uranyum ve toryumun zenginleştirilmesi konularında meslektaşlarımızla bilgi paylaşımı amaçlanmıştır. Çalışmayı araştırıp derleyen Maden Yük. Mühendisi Necati Yıldız'a üyelerimiz adına Yönetim Kurulu olarak teşekkür ederiz.

Saygılarımızla;

Ayhan Yüksel

TMMOB

Maden Mühendisleri Odası

Yönetim Kurulu Başkanı

İÇERİK

Giriş	1
1. Uranyum	2
1.1 Uranyum mineralleri	2
1.2 Uranyumun genel kullanım alanları	4
1.3 Dünya uranyum rezervleri	5
1.4 Dünya uranyum üretimi	6
1.5 Uranyum fiyatları	8
1.6 Uranyum rezervlerinin ömrü	9
1.7 Uranyum arz ve talebi	9
1.8 Türkiyede uranyum rezervleri	10
1.9 Uranyumun enerji olarak kullanımı.....	11
1.10 Nükleer santraller.....	14
1.10.1 Basınçlı su reaktörleri(PWR).....	16
1.10.2 Kaynar su reaktörleri (BWR)	17
1.10.3 Basınçlı ağır su reaktörü(PHWR)	18
1.10.4 İleri gaz-soğutmalı reaktörler (AGR)	19
1.11 Dünyada kurulu nükleer santraller	23
1.12 Dünyada nükleer santral kazaları	29
1.13 Türkiye'nin uranyum dış ticareti	32
1.14 Uranyum minerallerinin zenginleştirilmesi	32
1.14.1 Kırma ve öğütme	34
1.14.2 Zenginleştirmede yerçekimi yöntemleri	34
1.14.3 Flotasyon	35
1.14.4 Kavurma	36
1.14.5 Özütleme.....	38
1.14.5.1 Özütleme tepkimeleri	41
1.14.5.1.1 Asitle özütleme	41
1.14.5.1.2 Alkali özütleme	42
1.14.5.2 Özütleme yöntemleri.....	44
1.14.5.2.1 Atmosfer basıncında asitle özütleme...	44
1.14.5.2.2 Atmosfer basıncında alkali özütleme....	47
1.14.5.2.3 Otoklavlarda asitle özütleme.....	48
1.14.5.2.4 Otoklavlarda alkali özütlemesi.....	49
1.14.5.2.5 Güçlü asitle ıslatma ve yıkama.....	49
1.14.5.2.6 Yerinde özütleme.....	51

1.14.5.2.7	Yığılma özütlemesi.....	52
1.14.5.2.8	Bakteri özütlemesi	53
1.14.5.3	Özütlemeye uygulamaları	54
1.15	Uranyumun özütlemeye çözeltisinden kazanımı	56
1.16	Uranyumun kullanım amacına uygun zenginleştirilmesi	60
1.16.1	Gaz difüzyonu ile zenginleştirme	62
1.16.2	Isısal difüzyon	62
1.16.3	Elektromanyetik zenginleştirme	63
1.16.4	Merkezkaç uygulamalı zenginleştirme	63
1.16.5	Plazma ayırma	64
1.16.6	Diğer yöntemler	64
1.17	Yakıt bataryalarının hazırlanması	64
1.18	Sonuç	65
1.19	Kaynaklar	67
2.	Toryum	71
2.1	Toryumun kullanım alanları	71
2.2	Nükleer yakıt olarak toryum kullanımı	72
2.3	Dünya toryum rezervleri	74
2.4	Türkiye'nin toryum rezervi	75
2.5	Toryum üretimi	76
2.6	Kaynaklar	79
3.	Türkiye'de uranyum ve toryumla ilgili yasal düzenlemeler	80

Giriş

Albert Einstein atomun parçalanabilirliğini sadece kuramsal olarak ortaya atmış, daha sonraki yıllarda yapılan deneylerle de bu kuram doğrulanmıştır. Laboratuvarında uranyum atomunun nötron bombardımanı sonucunda parçalandığı ve baryumun ortaya çıktığı belirlenmiştir. Deneylerde, uranyum atomu ikiye bölünürken oldukça büyük bir enerji açığa çıktığı, bölünme sonrası oluşan toplam kütlelerin başlangıçtaki uranyumun kütesinden daha az olduğu gözlenmiştir. Çıkan enerji kaynağının ve kaybolan kütlelerin ne olduğu Einstein'ın " $E=mc^2$ " denklemiyle açıklanmıştır.

Einstein'ın bu eşitliğinden yola çıkan fizikçiler, 1942 yılında atom bombasının temelini oluşturan tepkimeyi gerçekleştirmişlerdir. Bu tepkime sonucu açığa çıkan ısının silaha dönüştürülmesi amacıyla 1942 yılında ABD'de New Mexico eyaletinde kurulu bulunan **Los Alamos Scientific Laboratuvarı'nda** atom fizikçisi **Prof.Dr.J.R.Oppenheimer** başkanlığında bir çalışma başlatılmıştır. "**Manhattan Projesi**" olarak isimlendirilen bu çalışmada yer alan 5700 bilim insanı U235 ve Pu239'den iki nükleer bomba üretmişlerdir. Bu bombalar 1945 yılında Hiroşima ve Nagazaki'ye atılmıştır. Binlerce insanın can verdiği bu olay insanlığın en yüz karası olayı olarak tarihe geçmiştir.

Kaynaklarda yer alan bilgilere göre Prof.Dr.J.R.Oppenheimer yaptığı işten pişmanlık duymuş ve "*Bir şey yaptık... Dünyanın doğasını çok seri ve etkili bir şekilde değiştirebilen en tehlikeli silahı.....*" demiştir. Dönemin başkanı Harry S.Truman'a "*Sayın Başkan, ellerimin kanlı olduğunu hissediyorum*" demiş ve Truman yardımcılarına "*Bir daha bu adamı asla karşıma çıkarmayın*" diye talimat vermiştir.

Uranyum atomu parçalandığında oluşan tepkime zinciri; U^{235} 'in bir tetikleme ile parçalanması, parçalanma sonucu ortaya çıkan nötronların diğer atomlara çarparak onları da parçalaması ve bu tepkimenin büyüyen tekrarlanması olayıdır. Atomun parçalanmasıyla çıkan yüksek ısı, kullanılan enerjinin kaynağıdır.

Esasen insanları korkutan uranyumun silah olarak kullanılması ve uranyumdan enerji üretim sürecinde olası nükleer kazalardır. Bu konuda dünyada olumsuz örnek olabilecek birkaç büyük kazalar da yaşanmıştır.

Toryum günümüzde ticari boyutta enerji üretiminde kullanılmamasına karşın gelecek için önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Şu anda toryumdan enerji üretimi üzerinde çalışılmaktadır.

Nükleer santrallerde tepkimenin başlatılması, sürdürülmesi, kontrolü, soğutulması, durdurulması, oluşan atığın bertarafı ve benzeri olaylar başta fizik, nükleer, atom mühendisliği gibi disiplinlerin ilgi alanlarıdır. Bu nedenle çalışma, uranyum ve toryum ile ilgili maden mühendisliğinin mesleki disipline yönelik hazırlanmıştır.

1.Uranyum

Uranyumun atom numarası 92, ergime sıcaklığı 1.132°C, kaynama noktası 3.818°C, yoğunluk 19.07 gr/cm³ olan bir elementtir. İlk olarak 1789 yılında Martin Klaproth tarafından bulunmuştur.

1.1 Uranyum mineralleri

Tabiatta serbest olarak bulunmayan uranyum, değişik elementlerle birleşerek uranyum minerallerini oluşturmuştur.

Uranyum mineralleri; kumtaşları içinde, kuvars çakıllarının oluşturduğu konglomeralarda, damar şeklinde, karmaşık breş yapıların içeriğinde sokulum halinde, fosfat yataklarında, volkanik kökenli kayalarla, siyah şeyl ve linyit ile birlikte değişik bileşiklerde bulunmaktadır.

Çizelge 1.1(1-9)'de uranyum mineralleri ve bu minerallerin kimyasal yapıları verilmiştir.

Çizelge 1.1(1): Uranyum mineralleri;oksitler

Oksitler	
Schoepit	2.UO ₃ .5H ₂ O
Uraninit (Pitchblend)	UO ₂
Uranosiferit	(BiO)(UO ₂)(OH) ₃

Çizelge 1.1(2): Uranyum mineralleri;karbonatlar

Karbonatlar	
Andersonit	Na ₂ Ca(UO ₂)(CO ₃).6H ₂ O
Rutherfordin	(UO ₂)(CO ₃)
Schroekingierit	NaCa ₃ (UO ₂)(CO ₃)(SO ₄)F.10H ₂ O

Çizelge 1.1(3): Uranyum mineralleri;sülfatlar

Sülfatlar	
Johannit	Cu(UO ₂) ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₂ .6H ₂ O
Uranopilit	(UO ₂) ₆ (SO ₄)(OH) ₁₀ .12H ₂ O
Zippeit	2 UO ₃ .SO ₃ .5H ₂ O

Çizelge 1.1(4): Uranyum mineralleri;silikatlar

Silikatlar	
Uranofan	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH) ₂ .5H ₂ O
Betauranofan	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH).5H ₂ O
Coffinit	U(SiO ₄) _{1-4x} (OH) _{4x}
Boltvodit	K(UO ₂) ₂ (SiO ₃)(OH) ₂ .5H ₂ O

Çizelge 1.1(5): Uranyum mineralleri;fosfatlar,arsenatlar

Fosfatlar-Arsenatlar	
Otünit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-12\text{H}_2\text{O}$
Arsenouranilit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Metaotünit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6-8\text{H}_2\text{O}$
Torbernit	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Metatorbernit	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6-8\text{H}_2\text{O}$
Metauranospinit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Zeunerit	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Çizelge 1.1(6): Uranyum mineralleri;vanatlar

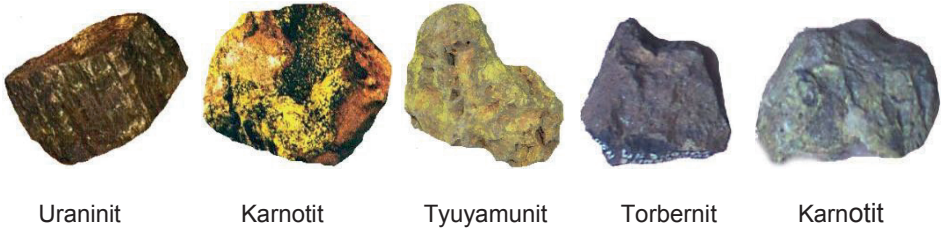
Vanadatlar	
Karnotit	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 1-3\text{H}_2\text{O}$
Tyuyamunit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 7-11\text{H}_2\text{O}$

Çizelge 1.1(7): Uranyum mineralleri;niobatlar, tantalatlar, titanatlar

Niobatlar-Tantalatlar-Titanatlar	
Betafit	$(\text{U}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_3 \text{O}_9 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Brannerit	$\text{U Ti}_2\text{O}_6$
Pisekit	U, Ti, Th, nadir yer niobat tantalat

Çizelge 1.1(8): Uranyum mineralleri;molibdatlar

Molibdatlar	
Kalkuromolit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_3(\text{MoO}_4)_3(\text{OH})_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Umohoit	$\text{UO}_2(\text{MoO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Resim 1.1: Uranyum mineralleri

Uranyum yataklarının günümüzde ekonomik olarak işletilebilmesi için U_3O_8 içeriğinin en az %0.07 olması gerekmektedir. Daha düşük U_3O_8 içeren yatakların kazanılabilecek diğer kıymetli metaller içermesi durumunda bu yatakların da ekonomik olarak işletilebilme olanağı vardır.

Uranyum sağlık sektöründe bazı araç ve gereçlerin yapımında, nükleer santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda uranyumdan nükleer silah da üretilmektedir.

Uranyumun kullanılmasında parçalanması ile açığa çıkan ısı ile saldırdığı radyoaktif ışınlardan yararlanılmaktadır. Uranyum fizyonu; U^{235} 'in bir tetikleme ile bölünüp parçalanması, parçalanma sonucu ortaya çıkan nötronların diğer atomlara çarparak onları da bölüp parçalaması, bölünmenin her defasında büyüyecek devam etmesi olayıdır. Uranyumun bölünmesiyle ortaya çıkan yüksek ısı yararlanan enerjinin kaynağıdır. Tepkimenin başlatılması, sürdürülmesi ve durdurulması işlemlerinin kontrol altında tutulması uranyumun enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için önemlidir.

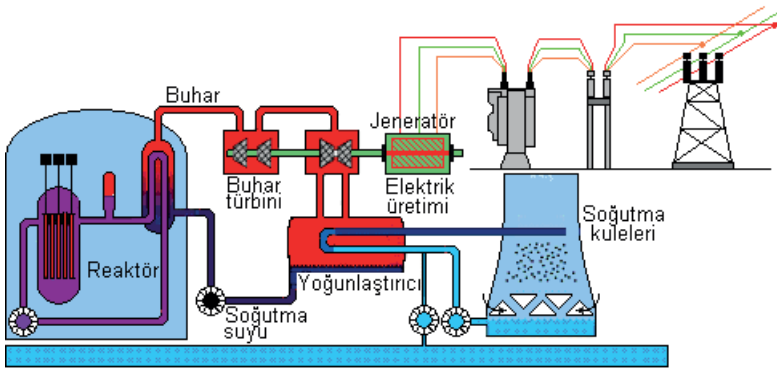
1.2 Uranyumun genel kullanım alanları

Uranyumun önemli bir bölümü nükleer santrallerde, denizaltı ve gemilerde nükleer yakıt ve silah olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra uranyum:

- *Seramiklere renk vermek amacıyla,*
- *Tıp alanında bazı cihazların üretiminde,*
- *Endüstriyel uygulamalarda bazı cihazların yapımında,*
- *Fotoğrafçılıkta ve bazı tepkimelerde katalizör olarak da kullanılmaktadır.*

Nükleer santrallerde uranyumun bölünmesi ile açığa çıkan enerji kullanılarak buhar, buhar basıncıyla da türbinler döndürülerek elektrik enerjisi üretilmektedir. Dünyada uranyumun %90'ını enerji üretiminde kullanılmaktadır.

Şekil 1.1'de nükleer santralin temel çalışma akışı gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Nükleer santralin çalışma akışı

Uranyum yakıt çevriminin “açık” ve “kapalı” olarak isimlendirilen iki uygulaması vardır. Açık çevrimde cevherden üretilmiş uranyum zenginleştirilip yakıt haline getirildikten sonra reaktörde kullanılmaktadır. Kullanım sonrası açığa çıkan atıklar çoğu zaman gömülerek bertaraf edilmektedir. Kapalı çevrimde ise

















reaktörden çıkan kullanılmış yakıt atığı yeniden işlenip içerdiği uranyum ve plütonyum tekrar yakıtı dönüştürülmektedir. Kapalı çevrimde reaktörde kullanılacak yakıtın yaklaşık 1/3'ü plütonyumdan sağlanmaktadır. Yakıt atığının geri kazanımı için gerekli süreç ortamda oluşan yüksek radyasyon nedeniyle özel güvenlik önlemlerinin alınmasını gerektirmektedir.

1.3 Dünya uranyum rezervleri

Uranyum rezervinde Avustralya ilk sırada yer almaktadır. Avustralya 1.7×10^6 ton uranyum rezervi ile dünya rezervlerinin yaklaşık %30'una sahiptir. Avustralya'yı 679×10^3 ton rezervle Kazakistan takip etmektedir.

Çizelge 1.2'de dünya uranyum rezervleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.2: Dünya uranyum rezervleri

Ülke	Rezerv, ton	Dünya, %
 Avustralya	1.706.100	28
 Kazakistan	679.300	11
 Rusya	505.900	8
 Kanada	493.900	8
 Nijerya	404.900	7
 Namibya	382.800	6
 G.Afrika	338.100	6
 Brezilya	276.100	5
 ABD	207.400	4
 Çin	199.100	4
 Mongolya	141.500	2
 Ukranya	117.700	2
 Özbekistan	91.300	2
 Botswana	68.800	1
 Tanzanya	58.500	1
 Ürdün	40.000	1
Dİğer	191.500	3
Dünya toplamı	5.920.000	~100

Kaynak: World Nuclear Association

Dünya uranyum kaynakları çok değişiktir. Ancak bu kaynakların bazılarında uranyum ekonomik olarak üretilebilmektedir. İçeriğine göre bu kaynakları Çizelge 1.3'deki gibi gruplandırma olanağı vardır.

Deniz sularındaki uranyumun ekonomik olarak kazanılabilmesi ve buna uygun nükleer santrallerin kurulması durumunda süre olarak uranyum arzı ile ilgili kaynak sorunu yaşanmayacağı ifade edilmektedir.

Çizelge 1.3: Uranyumun gruplandırılması

Kaynak çeşiti	Tenör
Çok yüksek tenörlü yataklar, Kanada, %20U	200,000 ppm U
Yüksek tenörlü yataklar, %2 U,	20,000 ppm U
Düşük tenörlü yataklar, %0.1 U,	1,000 ppm U
Çok düşük tenörlü yataklar, Namibia, %0.01U	100 ppm U
Granit	3-5 ppm U
Sedimenter kayalar	2-3 ppm U
Yerkürede ortalama	2.8 ppm U
Deniz suyu	0.003 ppm U

1.4 Dünya uranyum üretimi

Kazakistan tek başına dünya uranyum üretiminin %39'unu, Kanada %22'sini, Avusturalya'ya %9'unu gerçekleştirmektedirler. Bu üretim de toplam dünya uranyum üretiminin 2/3'üne karşılık gelmektedir.

Çizelge 1.4'de dünyanın en büyük uranyum madenleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.4: Dünyanın en büyük uranyum madenleri, 2015

Maden	Ülke	Yöntem	Üretim, ton U	Dünya %
McArthur River	Kanada	Kapalı	7.354	12
Cigar Lake	Kanada	Kapalı	4.345	7
Tortkuduk & Myunkum	Kazakistan	Özütleme	4.109	7
Olympic Dam	Avusturalya	Yan ürün/Kapalı	3.179	5
SOMAIR	Nijerya	Açık	2.509	4
Inkai	Kazakistan	Özütleme	2.234	4
Budenovskoye 2	Kazakistan	Özütleme	2.061	4
South Inkai	Kazakistan	Özütleme	2.055	3
Priargunsky	Rusya	Kapalı	1.977	3
Langer Heinrich	Namibya	Açık	1.937	3
Central Mynkuduk	Kazakistan	Özütleme	1.847	3
Ranger	Avusturalya	Açık	1.700	3
Budenovskoye 1, 3 & 4	Kazakistan	Özütleme	1.642	3
Rabbit Lake	Kanada	Kapalı	1.621	3
COMINAK	Nijerya	Kapalı	1.607	3
		İlk 15 toplamı	40.177	66.4

Dünyanın üretim kapasitesi olarak en büyük uranyum madeni Kanada'da McArthur River madeni olup üretimi yılda 7.500 ton civarındadır. Dünyanın en büyük 15 işletmesi dünya uranyum üretiminin yaklaşık %65'ini gerçekleştirmektedir.

Ülke ve yıllara göre Dünya uranyum üretimi Çizelge 1.5'de gösterilmiştir. Kazakistan ve Kanada toplam dünya üretiminin yarısından çoğunu gerçekleştirmektedirler.

Çizelge 1.5:Dünya uranyum üretimi, ton U

Ülke	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Kazakistan	6.637	8.521	14.020	17.803	19.451	21.317	22.451	23.127	23.800
Kanada	9.476	9.000	10.173	9.783	9.145	8.999	9.331	9.134	13.325
Avustralya	8.611	8.430	7.982	5.900	5.983	6.991	6.350	5.001	5.672
Nijerya	3.153	3.032	3.243	4.198	4.351	4.667	4.518	4.057	4.116
Rusya	3.413	3.521	3.564	3.562	2.993	2.872	3.135	2.990	3.055
Namibya	2.879	4.366	4.626	4.496	3.258	4.495	4.323	3.255	2.993
Özbekistan	2.320	2.338	2.429	2.400	2.500	2.400	2.400	2.400	2.385
Çin	712	769	750	827	885	1.500	1.500	1.500	1.616
ABD	1654	1430	1453	1660	1.537	1.596	1.792	1.919	1.256
Ukrayna	846	800	840	850	890	960	922	926	1.200
Güney Afrika	539	655	563	583	582	465	531	573	393
Hindistan	270	271	290	400	400	385	385	385	385
Çekoslovakya	306	263	258	254	229	228	215	193	155
Romanya	77	77	75	77	77	90	77	77	77
Pakistan	45	45	50	45	45	45	45	45	45
Brezilya	299	330	345	148	265	326	192	55	40
Fransa	4	5	8	7	6	3	5	3	2
Almanya	41	0	0	8	51	50	27	33	0
Malawi			104	670	846	1101	1132	369	0
Dünya Toplam	41.282	43.764	50.772	53.671	53.493	58.489	59.331	56.041	60.514
Ton, U₃O₈	48.683	51.611	59.875	63.295	63.084	68.976	69.969	66.089	71.364
Dünya talebi, %	64	68	78	78	85	86	92	85	90

Kaynak: World Nuclear Association

1990'lı yıllarda dünya üretiminin yaklaşık %55'i yeraltı madenciliği ile gerçekleştirilirken 2015'li yıllarda bu oran değişmiştir. Günümüzde uranyumun önemli bir kısmı yerinde özütleme yöntemiyle üretilmektedir.

Çizelge 1.6'da dünya uranyum üretiminin yöntemlere göre dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 1.6: Uranyum üretim yöntemleri

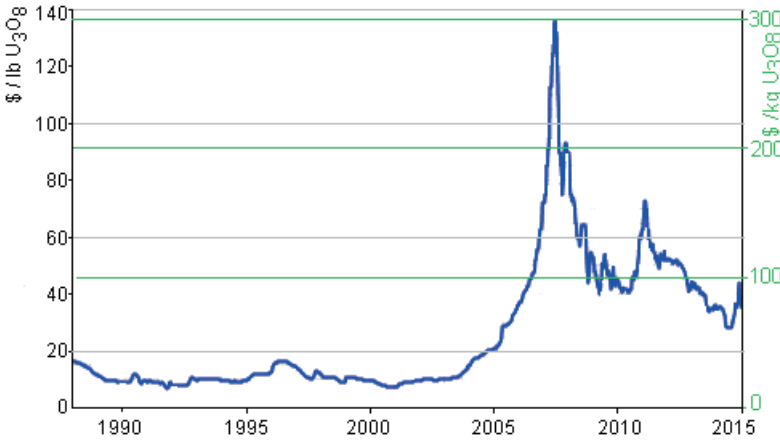
Yöntem	Üretim, ton U	Dünya %
Yerinde özütleme yöntemi	29.197	48%
Kapalı&açık işletme	27.791	46%
Yar ürün	3.525	6%

1.5 Uranyum fiyatları

2015 yılında nükleer enerji dünya elektrik ihtiyacının yaklaşık %11'ini karşılamaktadır. Önümüzdeki yıllarda bu oranın bazı ülkelerinin nükleer kapasitelerini geliştirmesiyle artması beklenmektedir.

ABD'de uranyum stoklaması sonucunda 2014 yılında 33 \$/lb olan ortalama U_3O_8 fiyatları 2015 yılında %18 artış ile 39 \$/lb'ye yükselmiştir. 2015 yılında spot pazardaki 36.00 \$/lb olan uranyum fiyatı 2016 Ağustos ortasında fiyatı 26.00\$/lb'a düşmüştür.

Grafik 1.1'de dünya uranyum fiyatları gösterilmiştir.

Grafik 1.1: Dünya uranyum fiyatları

Dünya Nükleer Birliğine göre dünya'da 2015 yılında 68.000 ton uranyum kullanılmıştır. 2015 yılında 9.000 ila 12.000 ton olan uranyum borsadan talep edildiğinde alınıp kullanılma olanağı 2020 yılına kadar 3.500 tona düşeceği tahmin edilmektedir.

Uzun dönemli uranyum fiyatları alıcı-satıcı arasında, alım süresini ve alınacak miktara göre yapılan pazarlık ve anlaşmalara bağlı olarak belirlenmektedir. Anlaşmalardaki fiyatlar geniş bir aralıkta farklılık göstermektedir. Dünyanın en büyük uranyum üreticisi olan Kazakistan, Çinli şirketler ile Kazakistan'da bir

nükleer yakıt üretim tesisi kurmak için anlaşmışlardır. Dünyanın en büyük uranyum üreticisi şirketi olan Kanadalı Cameco ise Hindistan'a önümüzdeki 5 yıl uranyum sağlamak üzere anlaşma imzalamışlardır.

Çin 2020'li yıllara kadar her yıl yeni yeni nükleer reaktörü işletmeye almayı planlamaktadır. Hindistan 2050 yılına kadar elektrik ihtiyacını nükleer enerjiden karşılamayı hedef edinmiştir. Japonya geçici olarak durdurduğu nükleer santrallerini yeniden açmayı planlamaktadır.

Bank of America-Merrill Lynch 2020 yılında Dünya uranyum tüketiminin 85.000 tona ulaşacağı öngörüsünde bulunmaktadır(Kaynak:Nükleer Akademi).

1.6 Uranyum rezervlerinin ömrü

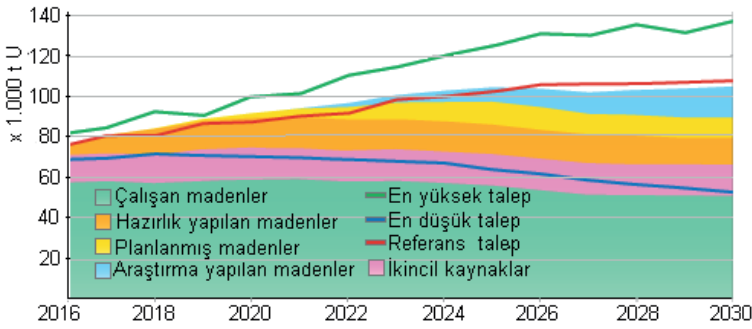
Nuclear Energy Agency (NEA) tarafından dünyada belirlenmiş uranyum rezervlerinin bugünkü tüketim koşullarında 200 yıl yeterli olduğunu ifade edilmiştir. Yapılacak araştırmalar sonucu yeni arz kaynakların devreye sokulmasıyla bu sürenin 250 yıla kadar çıkacağı tahmin edilmektedir.

1.7 Uranyum arz ve talebi

Fransa'da yapılan iklim değişikliği konferansı sonrasında küresel ısınmaya karşı çözüm olarak nükleer enerji ön plana çıkmıştır. Bu nedenle gelecek yıllarda uranyum talebi artmaya devam edecektir.

Grafik 1.2'de dünya uranyum arz ve talebi gösterilmiştir.

Grafik 1.2: Dünya uranyum arz ve talebi



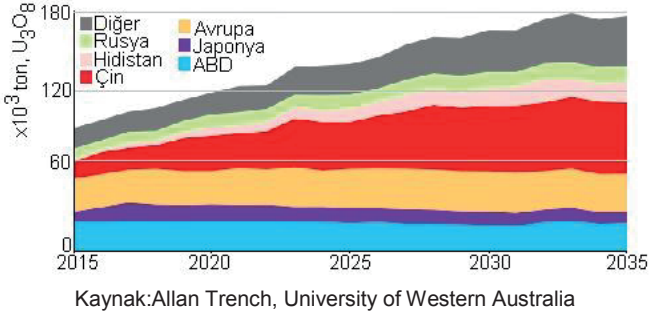
Kaynak: World Nuclear Association

Dünya uranyum arz ve talebini dar bir aralıkta düşünmemek gerekmektedir. Uranyum arz ve talebi kuşkusuz yeni enerji kaynaklarına, dünya nüfusuna, yeni teknolojilere ve en önemlisi de dünyadaki politik gelişmelere bağlı olarak değişecektir. Bir taraftan insanlar nükleer enerjiye tepki gösterirken diğer taraftan da ülkeler yeni nükleer santraller kurmaktadır.

2025 yılında yaklaşık 480 kadar elektrik enerjisi üreten reaktörün çalışıyor olacağı tahmin edilmektedir. Bu da uranyum talebinin artacağı anlamına gelmektedir. Yıllık olarak yaklaşık %3 büyüme hızı ile 2025 yılında 300 milyon dolar/yıl genişliğinde bir pazar beklenmektedir.

Grafik 1.3'de ülkelere göre uranyum talebi gösterilmiştir.

Grafik 1.3: Dünya uranyum talebi



Grafikte Çin'in gelecekte yıllarda en önemli uranyum kullanıcısı ülke olacağı görülmektedir.

1.8 Türkiyede uranyum rezervleri

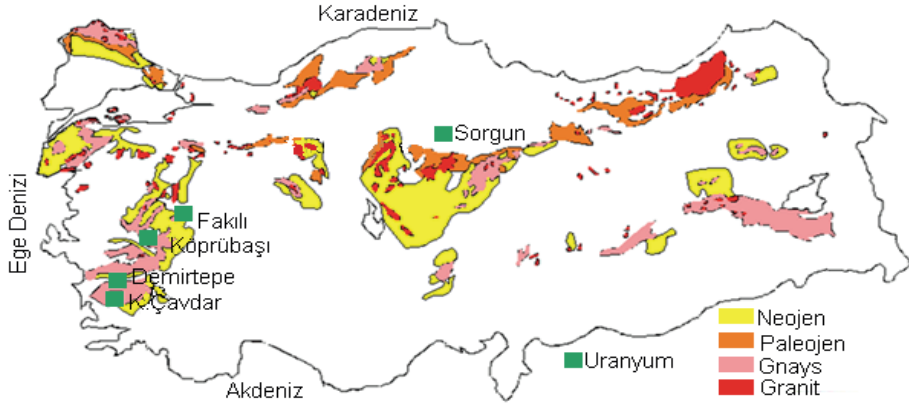
Ülkemizde aramalar sonucunda 9.129 ton uranyum bulunmuştur. Belirlenmişlerin çoğunluğu sedimanter tip yataklardır. Yanlızca Demirtepe yatağı damar tipi uranyum yatakları grubunda değerlendirilmektedir. Jeolojik yapı olarak potansiyel uranyum rezervlerinin oluşabileceği bölgeler sistematik olarak yapılacak yeni aramalarla bu rezervlerin daha da artırılması söz konusudur.

Bilinen uranyum yataklarının tenör ve rezervleri aşağıda verilmiştir:

- Köprübaşı: %0,4-0,05 U3O8 ortalama tenörlü, 1.351 tonu Kasar tipi, 1.201 tonu Taşharman tipi, 300 tonu Ecinlitaş tipi olmak üzere toplam 2.852 ton görünür rezervi vardır. Cevher, Neojen yaşlı sedimanlar içindedir.
- Fakılı: %0,05 U3O8 ortalama tenörlü, 490 ton görünür rezervi vardır. Cevher, Neojen yaşlı sedimanlardadır.
- Küçükçavdar: %0,04 U3O8 ortalama tenörlü, 208 ton görünür rezervi vardır. Cevher, Neojen yaşlı sedimanlardadır.
- Sorgun: %0,1 U3O8 ortalama tenörlü, 3.850 ton görünür rezervi vardır. Cevher, Eosen yaşlı sedimanlardadır.
- Demirtepe: %0,08 U3O8 ortalama tenörlü, 1.729 ton görünür rezervi vardır. Cevher, Paleozoyik yaşlı şistlerdeki fay zonlarındadır.

Harita 1.1'de Türkiyedeki uranyum yatakları gösterilmiştir.

Harita 1.1: Uranyum yatakları



Kaynak: MTA Genel Müdürlüğü

1.9 Uranyumun enerji olarak kullanımı

Nükleer teknoloji iyi ve doğru yönetildiği sürece uranyum dünyanın uzun yıllar enerji gereksinimini karşılayacak durumdadır. Bunun için de dünyada öncelikle nükleer silah üretimi durdurulmalı, üretilmiş nükleer başlılardaki uranyumlar da barışçıl amaçlı, enerji üretiminde kullanılmalıdır. Ancak, dünyanın geleceği günümüz koşullarında değerlendirildiğinde, bu da tamamen iyi niyet temennisinden öteye gitmeyecektir.

Uranyum topraktan üretilmesi ile son kullanım aralığında değişik mühendis ve meslek disiplinleri görev almaktadır. Bu aralık içinde uranyumun üretilmesi, zenginleştirilmesi ve kullanıma sunulması aşamaları maden mühendisliği disiplinin görev ve sorumluluk alanına girmektedir. Ancak sorumlu her bireyin uranyum ve nükleer enerji konusu gündeme gelip kamuoyunda yapılan tartışmaları kavrayabilmesi, kafasında bir fikir oluşturabilmesi, bilgi dağarcığını genişletebilmesi adına araştırma yapabilmesi ve hatta görüş oluşturabilmesi için bu konudaki temel bilgilere sahip olması gerekmektedir.

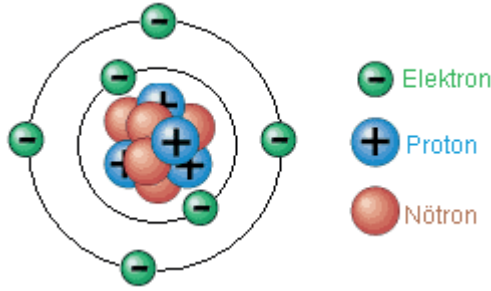
Öncelikle uranyumun nasıl enerji kaynağına dönüştüğünü bilmekte yarar vardır:

Atomun yüksüz olabilmesi için proton sayısının elektron sayısına eşit olması gerekmektedir. Proton sayısı aynı zamanda çekirdek yükünü de belirtmektedir.

$Kütle\ numarası = Proton\ sayısı + Nötron\ sayısı$

$Atom\ numarası = Proton\ sayısı = Elektron\ sayısı(yüksüz) = Çekirdek\ yükü$

Şekil 1.2'de basit bir atomun yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Atomun yapısı

Uranyum elementi 99.3% U^{238} , 0.7% U^{235} ve $< 0.01\%$ 'i U^{234} içermektedir. Bu bileşenler uranyumun değişik izotopları olup fiziksel olarak birbirinden farklıdır. Bu izotoplar atom merkezinde 92 proton içermektedir. U^{235} atomunun 92 protonu ve 143 nötronu olup kütle numarası 235'dir. U^{238} 'in 92 proton ve 146 nötronu vardır.

Yer küre üzerinde düşük oranda da olsa çoğu kayaçla birlikte, ırmak ve deniz suları ile bazı kömür rezervlerinde uranyuma rastlanmaktadır. Uranyum içeren en önemli mineral uranit olup UO_2 ve düşük oranda UO_3 içermektedir. %0.1 seviyelerinde uranyum içeren mineraller zenginleştirilerek U_3O_8 elde edilmektedir. *Sarı pasta olarak isimlendirilen zenginleştirilmiş konsantre %80'den fazla U_3O_8 içermektedir.* Ancak üretilen uranyum konsantrasyonunun doğrudan kullanıma elverişli olmadığıdır.

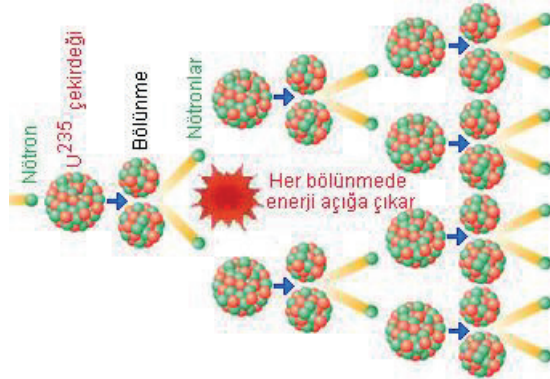
Fizikte “**fizyon**” olarak isimlendirilen nükleer bölünmeye ve bu bölünmeyi sürdürmeye uygun yapıya sahip malzeme “**fizil**” malzeme olarak isimlendirilmektedir. Doğal uranyumun ancak %0.7'si “fizyon” olayına uygun özellik taşıyan “fizil” malzeme olan U^{235} izotopudur. Yalnızca U^{235} parçalanma şeklinde tepkimenin başlatılmasına ve tepkimenin sürdürülmesine uygun bir yapıya sahiptir. Uranyumun bünyesinde geri kalan %99.3'ü fizyona doğrudan bir katkısı olmayan U^{238} izotopudur.

Uranyumun yakıt olarak kullanılabilmesi için U^{235} oranının zenginleştirilerek %0.7'lerden %3-5 seviyelerine, silah amaçlı kullanımda U^{235} oranının, daha zenginleştirilerek %95'lere çıkarılması gerekmektedir. Enerji ve askeri amaçlı kullanım için gerekli U^{235} izotopu sarı pastanın gaz difüzyonu, merkezkaç ve lazer gibi yöntemlerle zenginleştirilmesiyle üretilmektedir. Askeri amaçlı kullanılan U^{235} izotopu seyreltilerek yakıt amaçlı olarak da kullanılmaktadır.

Fizyon olayında U^{235} çekirdeğine bir nötron gönderildiğinde çekirdek bu nötronu yutarak parçalanmakta ve parçalanma sonucu yapısından 2 veya 3 nötron çıkmaktadır. Açığa çıkan nötronlardan bazıları ortamdaki diğer U^{235} çekirdeklerine çarparak yeni bölünmelere neden olmaktadır. Birden fazla nötronun bölünmeye neden olduğu kütle “*süper kritik*” kütle olarak isimlendirilmektedir. Özet olarak her bölünme olayı sonrası birkaç aktif nötron açığa çıkmakta, açığa çıkan yeni nötronlar yeni bölünmelere neden olmaktadır. Sonuçta çok

hızlı büyüyen bir tepkime yumağı oluşmaktadır. Bölünme olayı sonrası **1 gr U^{235} 'den 2.5 ton kömüre eşdeğer enerji üretilebilmektedir.**

Şekil 1.3'de uranyumun bölünme olayı gösterilmiştir.

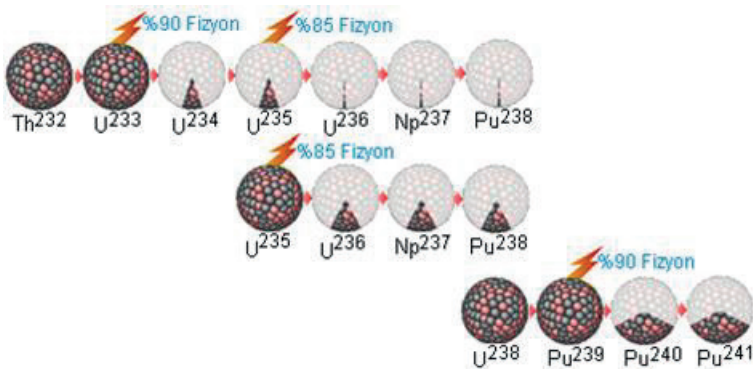


Şekil 1.3: Uranyum²³⁵'in bölünmesi

Bölünme sonucunda açığa çıkan yeni nötronlar başka U^{235} çekirdeklerine çarparak bir taraftan bölünme tepkimesi sürerken diğer taraftan da enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerji de uygun şekilde kullanılabilir enerjiye dönüştürülmektedir.

Pu^{239} doğal bir element olmayıp nükleer reaktörlerde U^{239} izotopunun bir nötron yutmasıyla oluşmaktadır. Pu^{239} da U^{235} gibi "fizil" malzeme olup "fizyon" özelliğine sahiptir. Nükleer santrallarda kullanılan, bölünmeden üretilen enerjinin yaklaşık 1/3'ü Pu^{239} 'den sağlanmaktadır.

Şekil 1.4'de toryum ve uranyumun dönüşüm süreçleri gösterilmiştir.



Şekil 1.4: Toryum ve uranyumun dönüşüm süreçleri

Minerallerden uranyum üretilip zenginleştirmek, zenginleştirilmiş uranyumu enerji üretilmesi amacıyla yakıt olarak kullanmak, bu kullanım sonrası çıkan atığı bertaraf etmek, üzerlerinde özel önem gösterilmesi ve her aşaması bilimsel ve teknik uygulamaları gerektiren süreçlerdir.

Nükleer reaktörlerde bölünme tepkimesi kontrollü olarak yavaşlatılmaktadır. Bölünme sonrası açığa çıkan nötronlar oldukça hızlıdır. Yavaş hareket eden nötronlar U^{235} çekirdeğini daha kolay parçaladıklarından santrallerde “moderatör” adı verilen malzemelerle nötronların hızı kontrol edilmektedir. Nötron yavaşlatıcı olarak normal (H_2O), ağır su (D_2O) ve katı grafit en yaygın kullanılan malzemelerdir. Ağır su hidrojen yerine ağır hidrojen (döteryum) izotopuna sahip yoğunluğu yüksek sudur. Su soğutmalı reaktörlerde bunu sağlayan sudaki H atomlarıdır. Parçalanma sonucu hareket eden nötronların su içinde hidrojen atomlarına çarparak hızları düşmektedir. Bu amaçla uranyum metali ya da uranyum oksit çubuk haline getirilerek aralarından su geçirilmekte, suyun içerdiği hidrojen nötronların hızını yavaşlatmaktadır.

Ortamdaki su aynı zamanda bölünme sonucu açığa çıkan enerjiyi taşıma ve reaktörü soğutma görevlerini de yerine getirmektedir.

İçerdiği U^{235} oranındaki azalma sonucu bölünme olayı gerçekleştiremeyen, yakıt demetleri reaktörden alınmaktadır. Alınan bu yakıt demetleri “kullanılmış yakıt” olarak isimlendirilmektedir. Kullanılmış yakıtlar ağırlıklı olarak uranyumdioksit, hafif izotopları, plütonyum ve ağır izotopları içermektedir. Bunlar tekrar çözültüye alınarak içerdiği uranyum ve plütonyum geri kazanılmaktadır. Geri kazanım sonrası arda kalan, bölünme sonrası meydana gelen, hafif izotoplar ile ağır izotoplardan oluşan kısım “nükleer atık” olarak isimlendirilmektedir. Bu atıkların alınacak önlemlerle uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Nükleer atıklar, bertarafı için yaklaşık 1.000 metre derinlikte hazırlanan depolara gömülmektedir. Bu depoların yeraltı sularıyla temas etmemesi gerekmektedir. Daha etkili önlem alma adına atıklar yeraltında cam eriği ile karıştırılıp su ile temas etme durumunda da yapısı bozulup çözültüye geçmeyecek şekilde depolanmaktadır. Nükleer atıkların radyoaktivitesi zamanla azalmaktadır. Atıkların bertarafında üzerinde durulması gereken ülkelerin nükleer atık bertarafı için yüksek maliyet nedeniyle gerekenleri yapmamalarıdır.

Nükleer santrallerde enerji üretiminde en önemli sorunu “**santral güvenliği**”dir. *Santrallerin güvenlik içinde çalıştırma süreci; bölünme olayının kontrollü olarak başlatılması, sürdürülmesi, bölünme sonucu açığa çıkan ısının reaktöre zarar vermemesi için kontrolü olarak faydalı enerjiye dönüştürülmesi, kontrollü bir yakıt değişimi ve istenildiğinde de santralin kontrollü olarak durdurulmasıdır.*

1.10 Nükleer santraller

Termik santrallerin çalışma prensibi bir enerji kaynağı kullanılarak suyun buhar haline dönüştürülmesi, buharın jeneratöre bağlı bir türbini döndürerek elektrik enerjisi üretilmesidir. Enerji kaynağı olarak da kömür, doğalgaz ve nükleer enerji kullanılmaktadır.

Dünyanın ilk nükleer santrali Moskova'ya 110 kilometre mesafede Obninsk kentinde kurulmuştur. ONİNSK adı verilen bu santralin inşaatı 3 yılda tamamlanmış 1954 yılında devreye alınmıştır. 6 MW gücündeki bu santralden üretilen elektrik 2000 konutluk bölgenin enerji gereksinimi karşılanmıştır. 2002 yılından sonra bu santral eğitim amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. O günden bu yana dünyada 667 adet nükleer santral kurulmuştur. Günümüzde yaklaşık 31 ülkede 444 adet nükleer santral çalışır durumdadır. 2020 yılında bu sayının 480 olacağı tahmin edilmektedir.

Resim 1.2: Oninks nükleer santrali

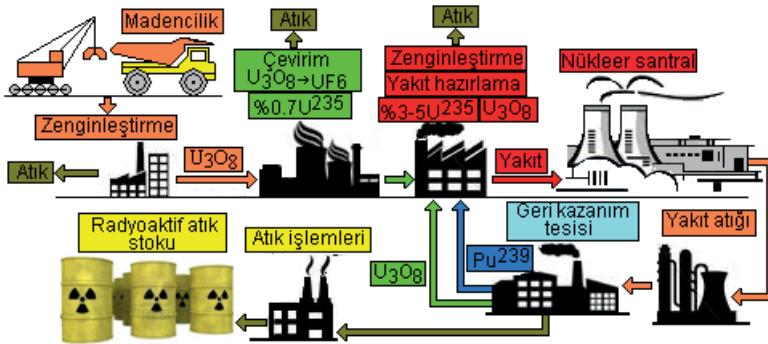


Resim 1.3: Kontrol odası



Nükleer reaktörlerde amaç reaktörde üretilen ısının güvenli olarak alınarak faydalı enerjiye dönüştürülmesi, bu süreçte ortamın soğutulması reaktörün fiziksel özelliklerinin korunarak bölünme olayının sürekliliğinin sağlanmasıdır.

Uranyumun klasik enerji üretim süreci Şekil 1.5'de gösterilmiştir.

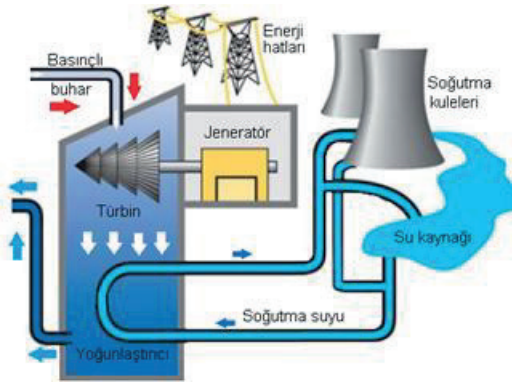


Şekil 1.5: Uranyumdan klasik enerji üretim süreci

Nükleer santrallerde bölünme hızının kontrolü, bölünme sonucu açığa çıkan ısının kullanılabilir faydalı enerjiye dönüştürülmesi, kontrol dışında oluşan enerjinin yarattığı ısının kontrolü, reaktörün soğutulması amacıyla temel sistemlerin yanı sıra yardımcı sistemler mevcuttur.

Reaktördeki ortam sıcaklığının kontrolü için sürekli soğutulması gerekmektedir. Bunun için de yaygın olarak su kullanılmaktadır. Nükleer santrallerin uygun büyüklükte doğal su kaynaklarına yakın yapılmasının nedeni de nükleer santrallerde soğutmanın hayati önem taşıması ve soğutmada kullanılması gereken su miktarıdır. Reaktörün gerektiği şekilde soğutulmaması durumunda açığa çıkan ısının aşırı yükselip reaktörü eritmeye kadar varabilecek büyük nükleer kazalara neden olması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Şekil 1.6'da gösterildiği gibi nükleer reaktörlerde üretilen yüksek sıcaklıktaki sudan genellikle eşanjörlerde buhar üretilip jeneratörün bağlı olduğu türbinler döndürülmektedir. Nükleer enerjiyle çalışan gemi ve deniz altlarında da benzer yöntemlerle üretilen enerji kullanılmaktadır.



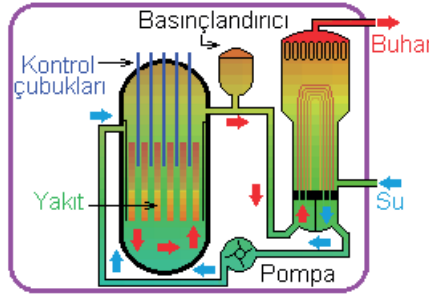
Şekil 1.6: Buharın elektrik enerjisine dönüştürülmesi

Klasik su soğutmalı nükleer reaktör santrallerde bölünme olayı sonucunda oluşan yüksek ısı, soğutma suyuyla ortamdan alınmaktadır. Yaklaşık 300°C'de olan sıcak su borular yardımı ile eşanjörden geçirilmekte, eşanjörlerde ısı transferi ile buhar oluşturulmaktadır. Üretilen buhar ile türbinler döndürülerek ısı enerjisi jeneratörlerde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Türbinden çıkan basınç ve sıcaklığı düşmüş buhar, yoğunlaştırıcıdan geçirilerek tekrar sistemde kullanılmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört değişik nükleer reaktör mevcuttur:

1.10.1 Basıncılı su reaktörleri (PWR, Pressurized water reactors)

Bu reaktörlerin tasarımında "soğutma devresi" diyebileceğimiz nötron hız kontrolünde ve çekirdeğin soğutmasında birinci devrede basınçlı su kullanılmaktadır. İkinci devrede birinci devreden alınan kaynar su kullanılarak, türbinleri çevirmek amacıyla "buhar üretilmektedir". Şekil 1.7'de basınçlı su reaktör kesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Basıncılı su reaktörleri

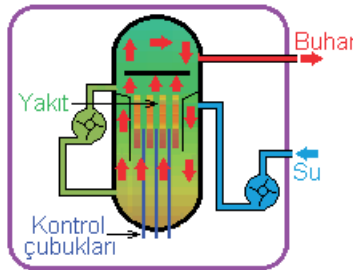
Uranyum bölünmesinin gerçekleştiği reaktör kapalı bir sistemdir. Çekirdeği soğutan su, kaynamanın önlenmesi için yaklaşık 150 bar basınç altında olup 325°C sıcaklığa kadar çıkmaktadır. Her biri 200-300 çubuktan oluşan 150-250 adet nükleer yakıt ünitesinin toplam ağırlığı yaklaşık 80-100 ton kadardır.

Daha düşük basınç altındaki ikinci devrede eşanjörlerde türbinleri döndürmek amacıyla buhar üretilmekte, türbin çıkışı buhar yoğunlaştırıcılardan geçirilerek tekrar kullanılmaktadır.

Basıncılı su reaktörlerde yakıt olarak kullanılacak uranyumun %3-5 gibi düşük oranda zenginleştirmek yeterli olmaktadır. İşletme maliyetleri düşük ve üzerinde önemli önemli deneyimler edinilmiştir. Sistem yüksek basınç altında çalıştığı için daha güçlü malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bu reaktör ABD donanmasının nükleer denizaltı yapım programı sırasında projelendirilmiştir. 1955 Ocak ayında ilk nükleer denizaltı Nautilus denize indirilmiştir. Bugün, dünyada ticari olarak en yaygın kullanılan reaktör tipidir.

1.10.2 Kaynar su reaktörleri (BWR, Boiling water reactor)

Kaynar su reaktörleri de basınçlı su reaktörlerine benzemektedir. Aradaki fark kaynar su reaktörlerinde buhar üretilen ikinci devrenin olmamasıdır. Devrede yaklaşık 75 bar basıncında bir su vardır. Bu su çekirdekte 285°C sıcaklığa kadar çıkmaktadır. Reaktörün üzerinde suyun %10-12'si buhara dönüşmektedir. Şekil 1.8'de kaynar su reaktör (BWR) kesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.8: Kaynar su reaktörleri

Reaktörün üstünde oluşan buhar separatörlerden geçirilerek reaktörün bir parçası durumunda olan türbine verilmektedir. Dolayısıyla türbinler de radyasyonlu buhar ile döndürülmektedir. Buharlaşan su soğutucu, nem ayırıcı ve kurutuculardan geçtikten sonra taşıdığı ısı enerjisi türbin-jeneratör biriminde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Bu santrallerde buharın elektriğe dönüştürüldüğü türbin ve jeneratör devrelerinde radyasyona karşı ilave özel önlemler alınması gerekmektedir.

Reaktörlerde 90-100 yakıt çubuğundan oluşan yaklaşık 140 ton ağırlığında 750 yakıt ünitesi kullanılmaktadır.

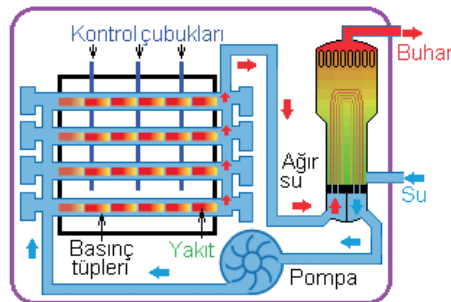
Dünyada elektrik enerjisi üreten reaktör çeşitleri arasında basınçlı su reaktörlerinden sonra en yaygın olarak kullanılan Kaynar sulu reaktörlerin ticari amaçlı ilk örneği 1961 yılında işletmeye alınmıştır. Bu reaktörlerde, %3-%5 oranında zenginleştirilmiş uranyum yakıt kullanılmaktadır.

1.10.3 Basınçlı ağır su reaktörü (PHWR, Pressurized heavy water reactor)

Bu reaktörler 1950'ler sonrası Kanada'da CANDU, 1980'li yıllardan sonra da Hindistan'da üretilmiştir. Genellikle %0.7 U^{235} doğal uranyum oksit kullanılmaktadır.

Ağır sulu reaktörleri, tasarımında fiziksel ve termodinamik özellikleri suya çok benzeyen ancak nötron özellikleri farklı olan ağır suyu (D_2O) soğutucu ve yavaşlatıcı olarak kullanan reaktörlerdir. Ağır suyun nötron yavaşlatma gücünün normal sudan daha iyi olması ve soğuma özelliğinin daha az olması, bu çeşit reaktörlerde yakıt olarak doğal uranyumun kullanılmasına olanak vermektedir.

CANDU reaktörlerde değişik yakıtlar kullanılabilir. Bu santrallerde toryumun da yakıt olarak kullanım olanağı vardır. Şekil 1.9'da basınçlı ağır su reaktör kesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.9: Basınçlı ağır su reaktörü (PHWR)

Ağır sulu reaktörler içinde en çok tercih edilen basınçlı ağır su reaktörleridir. Bu reaktörlerde de soğutucu su basınç altında tutularak suyun kaynaması önlenmektedir.

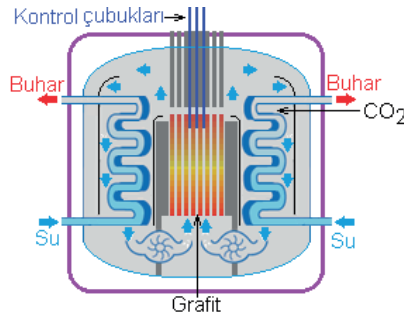
Basınçlı ağır su reaktörleri Kanada tarafından geliştirilip ticari hale getirildiği için bu reaktörler CANDU (**C**anadian **D**euterium **U**ranium) olarak anılmaktadır.

CANDU reaktörün kazanı büyük silindirik şeklindedir. Tankın içinden yakıt çubukları yerleştirilen yakıt kanallarına mevcuttur. Kontrol sisteminde çekirdeği soğutmak için birkaç yüz adet, içinden basınçlı su geçen yatay tüpler kullanılmaktadır. Kaynamanın engellenmesi için basıncı 100 atm olan ağır su kullanılmaktadır. Çekirdekte sıcaklık 290°C'a kadar ulaşmaktadır.

CANDU reaktörlerinde yakıt sistemi olarak 37 adet 0.5 metre, zirkonyum alaşımından üretilmiş tüpler içinde seramik peletlerinden oluşmuş 12 yakıt ünitesi kullanılmaktadır.

1.10.4 İleri gaz-soğutmalı reaktörler (AGR, Advanced gas-cooled reactor)

Bu reaktörler II.nesil İngiliz gaz soğutmalı reaktörlerdir. Reaktörlerde soğutma sisteminde CO₂ gazı, hız kontrolünde grafit kullanılmaktadır. Şekil 1.10'da ileri gaz-soğutmalı reaktör kesiti gösterilmiştir.

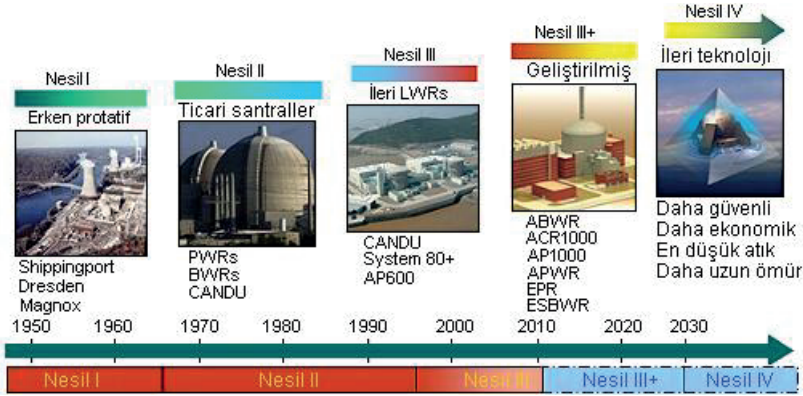


Şekil 1.10: İleri gaz-soğutmalı reaktörler (AGR)

Yakıt olarak çelik tüpler içinde %2.5-3.5 zenginleştirilmiş U₂O₃ kullanılmaktadır. Çekirdekte CO₂ sıcaklığı 650°C kadar çıkmaktadır. Buhar üretim sistemi bu ortamdadır.

Reaktör; kontrol çubukları grafit ve sistemin kapatılmasında soğutucu olarak kullanılacak nitrojen enjekte sistemi içermektedir.

Resim 1.4'de gösterilen nükleer enerji nesillerinin tartışıldığı Forum (GIF) Ocak 2000'da 9 ülkenin katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu Form'a üye ülke sayısı Arjantin, Brezilya, Kanada, Çin, Eoroatom, Fransa, Japonya, G.Kore, Rusya, G.Afrika, İsviçre, İngiltere ve ABD olarak 13'e çıkmıştır. Bu ülkeler gelecekle ilgili teknolojik yol haritası çizerek daha güvenli, daha ekonomik, en az miktarda atık üreten ve daha uzun ömürlü nükleer santraller kurulması konusunda ortak karar almışlardır.

Resim 1.4: Nükleer santral nesilleri

2002 yılında Form'da yapılan çalışmayla yaklaşık 100 seçenek içinden, aşağıdaki 6 sistem IV.nesil teknoloji için seçmişlerdir:

- Gaz soğutmalı hızlı reaktörler, “gas-cooled fast reactor, GFR”,
- Kurşun soğutmalı hızlı reaktörler, “lead-cooled fast reactor, LFR”,
- Ergimiş tuz reaktörler, “molten salt reactor, MSR”,
- Sodyum soğutmalı hızlı reaktörler, “sodium-cooled fast reactor, SFR”,
- Süper kritik su soğutmalı reaktörler, “supercritical-water-cooled reactor, SCWR”
- Çok yüksek sıcaklıkta çalışan reaktörler, “very-high-temperature reactor, VHTR”.

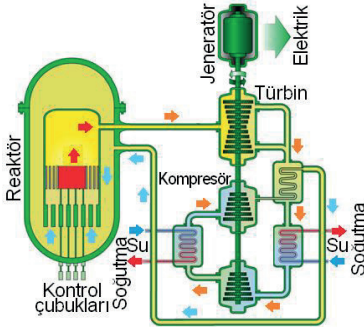
Çizelge 1.7’de IV.nesil teknoloji için seçmiş 6 nükleer santral sistemlerinin özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.7: IV.nesil seçilmiş nükleer santraller

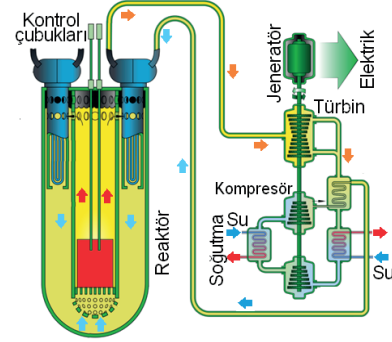
Sistem	Soğutucu	Sıcaklık, (°C)	Yakıt döngüsü	Boyut, (MW)
GFR	Helyum	850	Kapalı	1200
LFR	Kurşun	480–800	Kapalı	20–180, 300–1200, 600–1000
MSR	Florit tuzu	700–800	Kapalı	1000
SFR	Sodyum	550	Kapalı	30–150, 300–1500, 1000–2000
SCWR	Su	510–625	Açık/kapalı	300–700, 1000–1500
VHTR	Helyum	900–1000	Açık	250–300

Aşağıdaki şekillerde IV.nesil nükleer santral kesitleri gösterilmiştir. Bu reaktörleri birbirinden farklı kılan en önemli özellikleri soğutma sistemleridir. Diğer taraftan bu reaktörlerde jeneratörlerin çalışması için gerekli buharın üretiliş şekli ile bu santrallerin yakıt döngüleri de farklıdır.

Şekil 1.11'de gaz soğutmalı hızlı reaktörler, Şekil 1.12'de kurşun soğutmalı reaktörler gösterilmiştir.

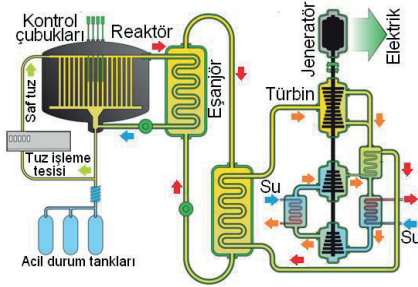


Şekil 1.11: Gaz soğutmalı hızlı

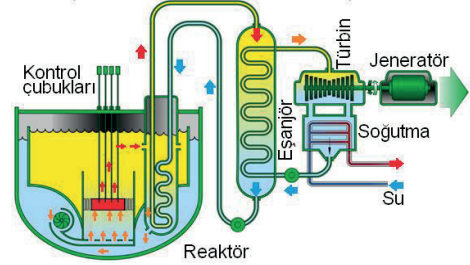


Şekil 1.12: Kurşun soğutmalı

Şekil 1.13'de ergimiş tuz soğutmalı reaktörler, Şekil 1.14'de sodyum soğutmalı hızlı reaktörler gösterilmiştir.

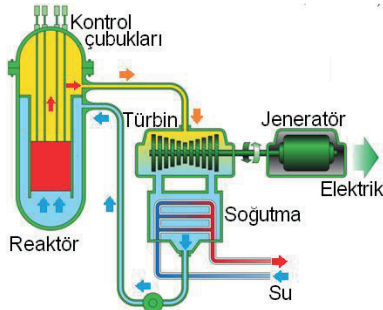


Şekil 1.13: Ergimiş tuz soğutmalı

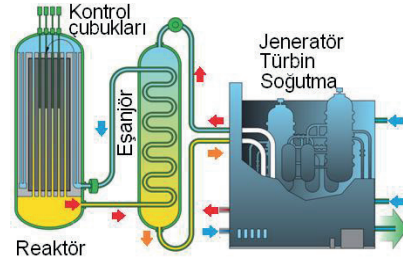


Şekil 1.14: Sodyum soğutmalı

Şekil 1.15'de yüksek hızlı su soğutmalı reaktörler, Şekil 1.16'de çok yüksek sıcaklıkta çalışan reaktörler gösterilmiştir.



Şekil 1.15: Yüksek hızlı su soğutmalı



Şekil 1.16: Çok yüksek sıcaklıkta

IV. nesil reaktörlerin üç yönü ile geliştirilmesi kararlaştırılmıştır:

- İlk aşamada genel çalışma koşullarında yaşanabilecek sorunlar ve çözümleri
- İkinci aşamada sorunları mühendislik olarak çözülmüş tesislerin performans testleri,
- Üçüncü aşamada detaylı projelendirme, lisans alma, imalat ve işletme aşamaları ile uygulamayı ticari anlam kazandırmak.

III. ve IV. nesil reaktörlerin geleneksel ticari reaktörlerden en büyük farklılığı, herhangi bir arıza veya sistemlerdeki yetersizliğin kazalara yol açmasını önlemek için aktif kontrol veya operatör müdahalesi gerektirmeyen, yerçekimi, doğal dolaşım ve yüksek sıcaklıklara dayanma gibi **pasif** veya **kendiliğinden güvenli** özelliklere sahip olmalarıdır.

2014 yılında IV. nesil teknolojiler içinde seçilmiş 6 sistem içinde yeniden bir değerlendirme yapılmış **SFR, VHTR, SCWR ve GFR** olmak üzere 4'ünün geliştirilmesi üzerinde mutabakat sağlanmıştır (Kaynak:www.gen-4.org/)

Reaktörler kullanım amacına uygun seçilmektedir. Bazı reaktörlerde elektrik üretimi yanı sıra plütonyum ve tritium gibi askeri amaçlı olarak radyoaktif malzemeler de üretilmektedir.

Yakıt, soğutucu ve nötron yavaşlatıcı seçimi de reaktörün kullanım amacına bağlıdır. Aynı reaktörde birden çok çeşit yakıt kullanılabilir şekilde de kurulabilmektedir. Bazı reaktör de askeri ve araştırma amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 1.8'de sivil amaçlı kullanılan reaktörler gösterilmiştir.

Çizelge 1.8: Sivil amaçlı kullanılan reaktörler

Reaktör çeşiti	Hafif su reaktör (LWR)		Ağır su reaktör (HWR)
	Kaynar su reaktörler	Basınçlı su reaktör (PWR)	
Amaç	Elektrik üretimi	Nükleer gemiler, ABD	Plütonyum üretimi
Soğutucu	Su	Su	Ağır su, D ₂ O
Hız kesici	Su	Su	Ağır su
Yakıt	UO ₂	UO ₂	UO ₂ veya metal
Yakıt seviyesi	Az zenginleştirilmiş	Az zenginleştirilmiş	Zenginleştirilmemiş U
Düşünceler	Buhar üretici sistem reaktör içindedir	Buhar üretici sistem reaktör dışındadır.	Kanada'da kullanılır: "Canadian Deuterium Uranium"

Çizelge 1.9'da askeri amaçlı kullanılan reaktörler verilmiştir.

Çizelge 1.9: Askeri amaçlı kullanılan reaktörler

Reaktör çeşiti	Grafik soğutucu reaktör		Hızlı nötron reaktörler (FBR)
	Gaz soğutucu	Su soğutucu	Sıvı metal (LMFBR) reaktör
Amaç	Plutonyum üretimi	Plutonyum üretimi	Plutonyum üretimi
Soğutucu	CO ₂ veya He gazı	Su	Ergimiş sıvı sodyum
Hız kesici	Grafit	Grafit	Gerekmez
Yakıt	uranyum dikarbid (UC ₂) veya metal uranyum	UO ₂ (RBMK) veya metal (N-reaktor)	Değişik oranlarda Plütinyum dioksit ve Uranyum dioksit karışımı
Yakıt seviyesi	Az zenginleştirilmiş doğal uranyum	Az zenginleştirilmiş	Değişik oranlarda P ²³⁹ ve U ²³⁵ karışımı
Düşünceler	İngiltere ve Fransa kullanır, AGR, MAG-	Eski Sovyetler Birliği, Chernobyl (RBMK)	Kullandıklarından daha çok fizil malzeme üretmek için işletilmektedir. Monju; Phenix

Kaynak: IEER's report The Nuclear Power Deception

1.11 Dünyada kurulu nükleer santraller

Çizelge 1.10'da dünyada elektrik üretme amaçlı kullanımdaki nükleer santraller ve özellikleri gösterilmiştir.

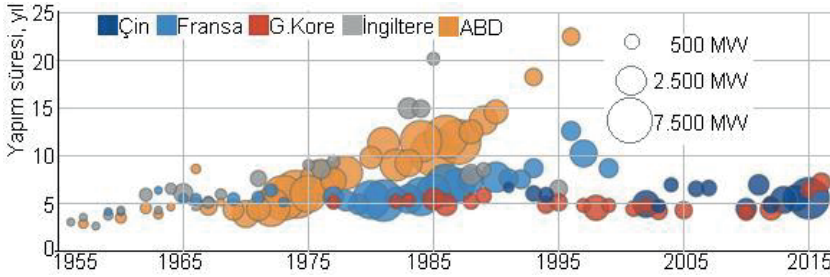
Çizelge 1.10:Dünyada kullanımdaki reaktörler

Reaktör çeşiti	Kullanan ülkeler	Sayısı	Gücü, GWe	Yakıt	Soğutucu	Hız kontrol
Basınçlı su reaktörler, PWR	ABD, Fransa, Japonya, Rusya,	277	257	Zen. UO ₂	Su	Su
Kaynar su reaktörler, BWR	ABD, Japonya, İsveç	80	75	Zen. UO ₂	Su	Su
Basınçlı yoğunlaştırılmış su reaktörler, PHWR	Kanada, Hindistan	49	25	Doğal UO ₂	Yoğun su	Yoğun su
Gaz soğutmalı reaktörler, AGR & Magnox	İngiltere	15	8	Doğal U (metal), Zen. UO ₂	CO ₂	Grafit
Hafif su-grafit reaktörler, RBMK & EGP	Rusya	11 + 4	10.2	Zen. UO ₂	Su	Grafit
Hızlı nötron reaktörler, FBR	Rusya	2	0.6	PuO ₂ ve UO ₂	Sıvı sodyum	-
	TOPLAM	438	376			

Kaynak:IAEA, 2015

Dünyada inşaatı 20 yıldan daha uzun sürelerin yanı sıra inşaatı 3 yıl içinde biten santraller de mevcuttur. Günümüzde orta ölçekli bir nükleer santral 4-5 yıl içinde kurulabilmektedir.

Grafik 1.4'de nükleer santral kuruluş yıl ve kuruluş süreleri gösterilmiştir.

Grafik 1.4: Nükleer santral kuruluş yıl ve kuruluş süresi

<http://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Nisan 2016 yılı itibarıyla dünyada çalışan nükleer santral sayısı 444'dür. Toplam kapasite olarak 99 adet nükleer santral ve 99.185 MW kapasite ile ABD önde gelmektedir. Diğer kaynaklar da değerlendirmeye alındığında ABD'de enerji gereksiniminin %19.5'i nükleer santrallerden karşılanmaktadır.

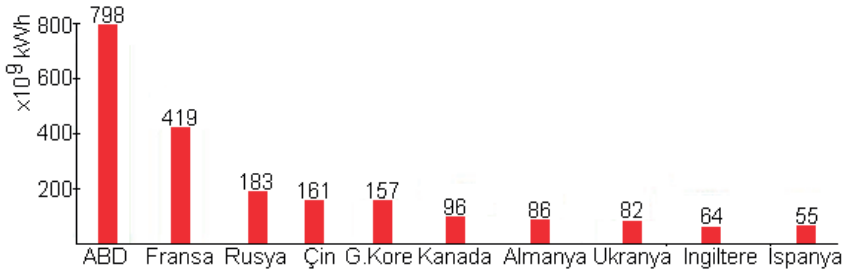
Fransa 58 adet nükleer santral ve 63.130 MW kapasite ile ikinci sırada yer almaktadır. Fransa aynı zamanda enerji gereksiniminin %76.3'ünü nükleer santrallerden karşılayarak bu oranla dünyada ilk sıradadır.

Çizelge 1.11'de dünyada çalışan nükleer santraller ve güçleri verilmiştir.

Çizelge 1.11: Dünyadaki çalışan nükleer santraller

Ülke	Nisan 2016		2015	
	Sayısı	Kapasite, MW	Üretim, BkWh	Oranı,%
ABD	99	99.185	798.0	19.5
Fransa	58	63.130	419.0	76.3
Rusya	35	25.443	182.8	18.6
Çin	33	28.792	161.2	3.0
G. Kore	25	23.133	157.2	31.7
Kanada	19	13.524	95.6	16.6
Almanya	8	10.799	86.8	14.1
Ukrayna	15	13.107	82.4	56.5
İngiltere	15	8.918	63.9	18.9
İspanyan	7	7,121	54.8	20.3
Hindistan	21	5.308	34.6	3.5
Japonya	43	40.290	4.3	0.5
İsveç	10	9.651	54.5	34.3
Diğerleri				
Dünya toplam	444	386.276	2.441.3	

Grafik 1.5'de dünyadaki çalışan nükleer santrallerin güçleri esas alınarak ülkelere göre karşılaştırmaları gösterilmiştir.

Grafik 1.5: Dünyadaki çalışan nükleer santraller güçleri

Dünyadaki çalışan nükleer santrallerin yoğunlaştığı bölgeler Harita 1.2'de gösterilmiştir.

Harita 1.2: Çalışan nükleer santraller

Kaynak: <http://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Nükleer santrallerin ABD, Çin, Japonya, ABD ülkeleri ile Rusya ve Rusya'nın batısında kalan başta Ukrayna ve diğer ülkelerde yoğunlaşmaktadır. Güney Afrika Cumhuriyeti dışında Afrika kıtasında nükleer santral mevcut değildir. Çin'de de nükleer santraller sanayinin yoğunlaştığı doğu bölgesinde yer almaktadır.

Bir taraftan nükleer santrallerin tehlikesinde bahsedilip mevcut santrallerin kapatılacağı ifade edilirken diğer taraftan da hız kesilmeden yeni nükleer santrallerin yapılmasına devam edilmektedir. Nükleer santrallerde yaşanmış kazalardan edinilen deneyim ve karşılaşılmış sorunlar yeni yapılan santrallerde dikkate alınmaktadır.

Çizelge 1.12'de 2016 yılı itibariyle inşaatı devam eden yeni nükleer santraller gösterilmiştir.

Çizelge 1.12: İnşaat halindeki nükleer santraller

Ülke	Sayısı	Toplam gücü, MWe
Arjantin	1	0.025
Belarus	2	2.218
Brezilya	1	1.245
Çin	22	22.110
Tayvan	2	2.600
Finlandiya	1	1.600
Fransa	1	1.630
Hindistan	6	3.907
Japonya	2	2.650
Pakistan	2	0.630
Rusya	8	6.582
Slovakya	2	0.880
G. Kore	3	4.020
Ukrayna	2	1.900
Birleşik A.E.	4	5.380
ABD	4	4.468
Toplam	63	61.845

Çizelgeden toplam gücü 61.845 MW olan 63 adet nükleer santral inşaatının devam ettiği görülmektedir. Bu da 2016 yılı itibarıyla kurulmuş ve çalışan nükleer santrallerin yaklaşık 1/6'sına karşılık gelmektedir.

Harita 1.3'de de inşaat halindeki nükleer santralının dünyadaki yerleşim bölgeleri gösterilmiştir.

Harita 1.3: İnşaat halindeki nükleer santraller

Kaynak: <http://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Haritada; nükleer santrale sahip ülkelerin yanı sıra nükleer santrale sahip olmayan birkaç ülkeye daha nükleer santral kurulduğu, Çin'de de çok sayıda yeni nükleer santralin inşaat halinde olduğu dikkati çekmektedir.

Dünyanın ilk nükleer santralının üretime başlamasından sonra yapılmış ancak ekonomik ömrünü doldurmuş bazı santraller de kapatılmıştır. Harita 1.4'de kapatılmış santrallerin bölgeleri gösterilmiştir.

Harita 1.4: Kapatılmış nükleer santraller



Kaynak: <http://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Bu arada dünyada başta bakım ve diğer nedenlerle uyutulmuş nükleer santraller de mevcuttur. Ağırlıklı olarak Japonya'daki bu santraller de kısa sürede de üretime alınabilecek durumdadır. Harita 1.5'de bu santrallerin bölgeleri gösterilmiştir.

Harita 1.5: Uyuyan nükleer santraller



Kaynak: <http://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

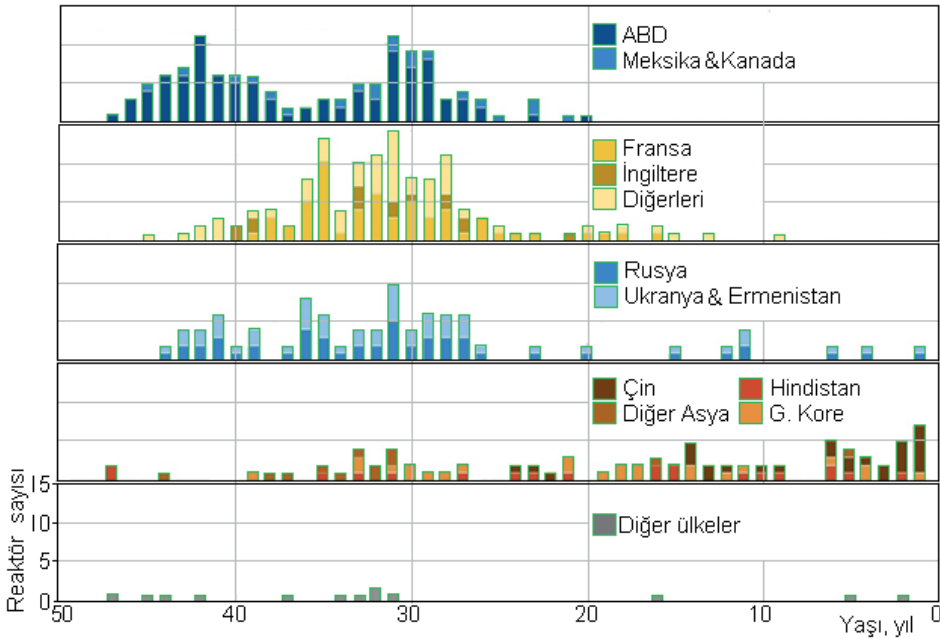
Dünyada kurulu nükleer reaktörlerin çalışma ömrü 25 ile 40 yıl arasında değişmektedir. Bu reaktörlerin tasarımları çalışma sürelerinin daha da uzun olacağı şeklinde yapılmaktadır. Çalışma süreleri sonucunda bir değerlendirme yapılarak ya santral kapatılmakta ya da mevcut şartlarına uygun olarak çalışmaları sürdürülmektedir. Örneğin ABD’de işletilen reaktörlerden yaklaşık 60’nın çalışma lisansları yenilenerek ömrü 40 seneden 60 seneye uzatılmıştır.

Diğer taraftan işletilmesi ekonomik olmaktan çıkan santrallerle, güvenlik koşullarını yerine getiremeyen ya da veri olarak ülkenin yasal düzenlemelerine uygun faaliyetlerini sürdüremeyen santraller de süresinden önce kapatılabilmektedir.

Dünyanın en yaşlı nükleer santrali Hindistan’daki Tarapul santrali olup yaşı 47’dir. İlk nükleer santralin 1954 yılında kurulduğuna göre o tarihten bu yana aradan 62 yıl geçmiştir.

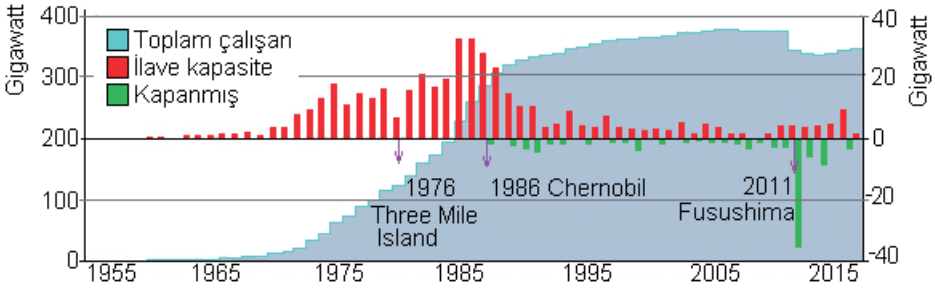
Grafik 1.6’da dünya nükleer santrallerin yaşları gösterilmiştir.

Grafik 1.6. Dünya nükleer santral yaşları



Grafiklerde dikkat çeken nükleer santrallerin çoğunun yaşının 25 yıldan daha fazla olduğudur. Bunun nedeni de yakın geçmişte yapılan nükleer santral sayısının fazla olmamasıdır. Ancak santrallerin yenilenmesi ve mevcut santrallere yeni ünitelerin ilave edildiği de unutulmamalıdır.

Grafik 1.7’de Dünya nükleer santral gücündeki gelişme gösterilmiştir.

Grafik 1.7: Dünya nükleer santral gücündeki gelişme

Grafikten görüldüğü gibi 1988 Chernobil kazası sonrası bazı nükleer santraller öncelikle ekonomik ömürleri, sonra güvenlik ve diğer nedenlerle kapatılmaya başlanmıştır. Ancak güç olarak kapatılanların yerine daha büyükleri yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir.

Nükleer santrallerin gelişmesiyle ilgili olarak dünyaya genel olarak bakıldığında batılı ülkelerde nükleer güç kapasitesinin küçüldüğü görülmektedir. Buna karşın Çin, Rusya ve Güney Kore'de sayı ve kapasite olarak artış gözlenmektedir.

2024 yılında Amerika'da 125, Avrupa'da 130, Asya'da 74, Çin'de 83 Hindistan'da 37, Rusya ve Doğu Avrupa ülkelerinde 51 ve diğer ülkelerde 18 olmak üzere dünyada toplam olarak 518 adet nükleer santralin çalışıyor olacağı ifade edilmektedir (Kaynak: Cameco).

1.12 Dünyada nükleer santral kazaları

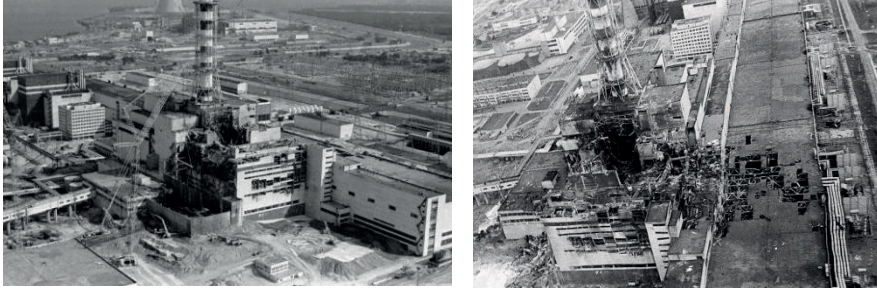
Uluslararası Atom Enerji Kurumu nükleer kazaların boyutunu ifade etmek için INES Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Ölçeğini kullanmaktadır. Ölçekte kaza büyüklüğü logaritmik olarak ifade edilmiş ve her kaza seviyesi bir önceki- ne göre 10 kat artırılmıştır. Bu nedenle kaza büyüklüğünü ifade eden rakamlar arasında meydana gelmiş kazanın etkisi yönüyle çok büyük fark vardır.

Şekil 1.17'de için INES Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Ölçeği gösterilmiştir.

**Şekil 1.17: INES Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Ölçeğini**

Dünyada çok sayıda nükleer kaza meydana gelmiştir. Bunların en büyüğü 1986 yılında, INES ölçeğine göre 7 büyüklüğünde Ukrayna'nın kuzeyinde Çernobil nükleer enerji santralinde meydana gelmiş kazasıdır.

Resim 1.5:Çernobil nükleer santralinin kaza sonrası durumu



Kaynak: Reuters/Vladimir Repik Vr/Vb

Çernobil nükleer santrali Ukrayna'da Kiev'in 140 km kuzeyinde kurulmuş ve 4x1.000 Megawatt (MW) gücünde bir santraldir.

Bu santralde reaktörlerden biri ani olarak durdurulduğunda buhar türbinlerinin daha ne kadar süreyle çalışmayı sürdürebileceği ve böylece ne kadar süre acil güvenlik sistemine güç sağlayabileceğini öğrenmek amacıyla test yapılmak istenmiştir. Deney sırasında reaktörün tamamen kapanmasını önlemek için tehlike anında çalışmaya başlayan güvenlik sistemi devre dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla test sürecinde sistemde basınç ve su seviyesi sinyalleri de acil durum sinyali vermemiştir.

Bunun sonucunda dolaşım pompaları ve reaktörün soğutma sistemi yavaşlamış, yakıt kanallarında ani ısı yükselmesi sonrası yapısal özellikleri nedeniyle reaktör tümüyle kontrolden çıkmıştır. Tehlike fark edildiğinde müdahale edilmek istenmiş, ancak geç kalındığından aşırı derecede ısınmış bulunan reaktörlerde mevcut çekirdeklerden biri patlamış, kontrolsüz bölünme sonucu ortamda ani oluşan buhar basıncı ile reaktör ve reaktörün bulunduğu binanın çatısı havaya uçmuştur. Reaktördeki zirkonyum ve grafitin yüksek sıcaklıktaki buharla karşılaşması sonucu oluşan hidrojen yanarak bütün santrali alev içinde bırakmıştır.

Özet olarak bu kaza işletme(insan) hatasından meydana gelmiş de olsa özünde soğutma sisteminin çalışmaması ya da kısa sürede devre dışı bırakılmasından kaynaklanmıştır. Yaşanan insanlık dramına bütün dünya şahit olmuştur.

Fukuşima nükleer santralindeki kazada, 2011 yılında Tohoku depremi sonrası tsunaminin etkisiyle deniz dalgaları santrali su altında bırakmış ve santralin bazı ünitelerinin yönetim sistemi devre dışı kalmıştır. Santraldeki üç ünitesindeki kaza seviyesi 5, bir ünitenin 3 ve kazanın tamamı da 7 büyüklüğünde kabul edilmiştir.

Resim 1.6: Fukuşima Nükleer Santrali

Japonya'da deprem sonrası elektrik kesintisi olmuş, çalışan reaktörler kapatılarak reaktörleri soğutmak için su pompalarına enerji veren acil durum jeneratörleri devreye alınmıştır. Santralin 5.7 metrelik olası bir tsunamiye dayanabilmesi için yapılmış duvar, 14 metrelik bir tsunami karşısında herhangi bir koruyucu etkisi kalmamıştır. Sonuçta jeneratörler de dahil olmak üzere tüm santral sular altında kalmış, sonuçta jeneratörler de devre dışı kaldığından, soğutma sistemi görev yapamaz hale gelmiş, kontrolsüz devam eden bölünme olayı sonucu reaktörler aşırı ısınmaya başlamıştır.

Sonuçta reaktörlerde kısmi erime başlamış, hidrojen patlamaları sonrası reaktör ve binaların tavanları uçmuş, santralde yangın başlamış, ortam ve santral çevresinde radyasyon etkisi altında kalmıştır.

28.Mart.1979 tarihinde ABD'de Middletown, Pensilvanya yakınındaki Nükleer enerji santralinde meydana gelmiş Three Mile Island olarak bilinen kaza seviyesi 5 olarak değerlendirilmiştir.

Resim 1.7: Three Mile Island Nükleer Santrali

Three Mile Island nükleer santralinde 1979 yılında soğutma ana su pompaları bir dizi arızalar nedeniyle durmuş, soğutma sistemi devre dışı kalmış, sonucu

reaktördeki sıcaklık düşürülemedi, kontrolsüz sıcak artışı yanı sıra ortamdaki basınç da aşırı yükseltilmiştir. Sonuçta da reaktör kalbi erimeye başlamıştır.

Büyük olasılıkla yaşanmış nükleer kazalar uzmanlarınca detaylı olarak incelenmiş, nedenleri ve çözüm önerileriyle ortaya konulmuştur. IV. nesil santraller üzerindeki çalışma da bu değerlendirmelerin bir sonucudur. *Ancak çoğu insan hala nükleer santralleri potansiyel birer tehlike olarak algılamaktadır. Esasen bu konudaki kararları siyasilere ya da bu işten menfaat sağlayanlara değil, bilgisini, deneyimini hür iradesiyle birlikte kullanan, konunun gerçek uzmanı kişilere bırakılması gerekmektedir.*

1.13 Türkiye'nin uranyum dış ticareti

Türkiye değişik bileşiklerde radyoaktif malzeme ithal etmektedir. Bu ithalat Türkiye Atom Enerjisi Kurumu kontrolünde yapılmakta, çoğu da araştırmaya yönelik kullanılmaktadır. Çizelge 1.13'de Türkiye uranyum dış ticareti gösterilmiştir.

Çizelge 1.13: Türkiye'nin uranyum dış ticareti

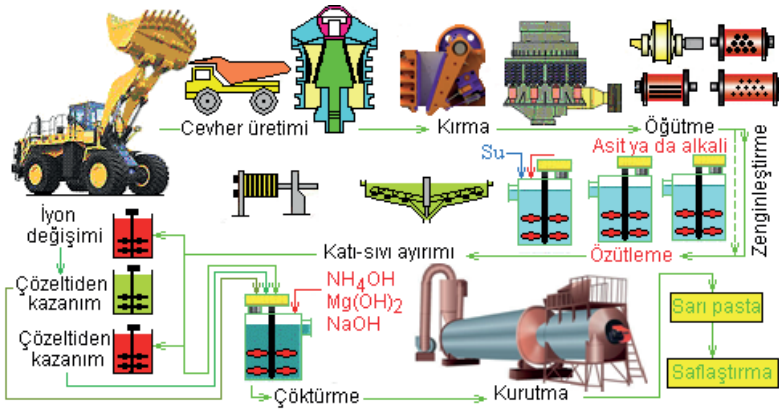
2015 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Diğer zenginleştirilmiş uranyum ve bileşikleri; U 235	2 kg	3.797
U235 olarak fakirleştirilmiş uranyum, bileşiklerini içeren alaşım, karışımlar vb.	3 kg	535
2014 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Diğer zenginleştirilmiş uranyum ve bileşikleri; U 235	1 kg	177
Uranyum ve plutonyum karışımları; diğer	8 kg	6.523
U235 olarak fakirleştirilmiş uranyum, bileşiklerini içeren alaşım, karışımlar vb.	3 kg	662
2013 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Sermetler (U 235 olarak fakirleştirilmiş uranyum vb. bileşiklerini içeren)	1 kg	2.828
U235 olarak fakirleştirilmiş uranyum, bileşiklerini içeren alaşım, karışımlar vb.	1 kg	6.208

Ülkemizde nükleer araştırmalar Türkiye Atom Enerji Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde yapılmaktadır. Bunun dışında birkaç üniversitede nükleer enerji konusunda da eğitim verilmektedir.

1.14 Uranyum minerallerinin zenginleştirilmesi

Uranyum minerallerini klasik yerçekimi ya da flotasyonla zenginleştirip yüksek tenörlü zengin konsantre üretme olanağı yoktur. Ancak flotasyonla cevherin içerdiği safsızlıklar mümkün olduğunca ortamdaki alınarak bir sonraki aşamada zenginleştirilmenin kolay yönetimi için ön konsantre üretilmektedir. Ön konsantre üretmek için uygulanan yöntem de cevherin yapısı ve içerdiği uranyum tenörüne göre değişmektedir. Üretilen konsantre ve gerekli boyuta öğütülmüş uygun tenörlü cevher özütlenerek zenginleştirilmektedir.

Şekil 1.18'de uranyum minerallerinin zenginleştirilmesinde temel akış gösterilmiştir.



Şekil 1.18: Uranyum minerallerinin zenginleştirilmesinde temel akış

Uranyum zenginleştirmenin akım şemalarında cevher yapısına ve işin ekonomisine bağlı olarak değişiklikler yapılabilmektedir.

Uranyumun zenginleştirilmesi aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmektedir:

- İlk aşamada cevher gravite, flotasyon gibi yöntemlerle içerdiği safsızlıklar olduğunca temizlenerek sonraki aşamalarda daha az cevherle uğraşılması sağlanmaktadır. Cevherin içerdiği uranyum oranına göre çoğu zaman cevher kırılıp öğütüldükten sonra zenginleştirilmeden özütleme devrelerine gönderilmektedir.
- Cevherin içerdiği uranyum asit ya da alkali özütleme yöntemiyle çözeltilmektedir.
- Özütleme sonrası "sarı pasta" üretilmektedir.
- Yakıt olarak kullanılacak sarı pastanın U^{235} oranı %0.7'lerden %5'lere,
- Askeri amaçla kullanılacak sarı pasta daha da zenginleştirilerek içindeki %5 civarındaki U^{235} oranı %95'in üzerine çıkarılmaktadır.

Uranyumu özütlemeye çözeltilmek için yaklaşık 250-500 kg/ton cevher arasında H_2SO_4 kullanılmaktadır. Özütleme süresini kısalttığı için pulp ısı 40-60°C çıkarılmakta gerektiğinde daha da artırılmaktadır. Uranyum kazanımını yükseltmek amacıyla oksitleyici olarak mangan dioksit veya sodyum klorat sürece ilave edilmektedir. Çünkü çoğu cevherde uranyum indirgenmiş ya da U^{+4} değerli olarak bulunmaktadır. Bu yapıdaki uranyum da asitte çok az çözülür. Oksitleyicilerin ilavesi ile uranyum asitte kolay çözülebilen U^{+6} formuna dönüşmektedir.

Kalsit, kireçtaşı veya kalkerli kayalar gibi uranyumunun çözülebilmesi için yüksek miktarda asit tüketimi gerektiren cevherler için alkali özütleme yöntemi uygulanmaktadır.

Özütleme sonrası %85-95 uranyum kazanımıyla “sarı pasta” olarak isimlendirilen %75-80 U_3O_8 tenörlü konsantre üretilmektedir. Kurutulup paketlenen sarı pasta da rafine edilerek değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Uranyum minerallerinin zenginleştirilip sarı pasta üretimi, uranyumun kullanılabilir hale getirilebilmesinin en kolay ve ilk aşmasıdır.

1.14.1 Kırma ve öğütme

Çoğu uranyum mineralleri cevher içinde ince taneli dağılmış olarak bulunmaktadır. Bu nedenle zenginleştirme yöntemine göre cevherin belirli boyuta kırılıp öğütülmesi gerekmektedir. Kum taşı içindeki uranyum mineralinin zenginleştirilmesi için cevherin yapısına bağlı olarak taneleri birbirine bağlayan çimento malzemesinin dağıtılması yeterli olurken refrakter tipi oluşumlarda cevher ince boyutta öğütülmektedir.

Uygulanacak zenginleştirme yöntemine göre cevher boyutu 5mm ile 74 μ arasına kırılıp öğütülerek küçültülmektedir. Örneğin karıştırmalı asit özütlemeye kumtaşlarının 400-600 μ arasında öğütülmesi yeterli olurken aynı cevherin alkali özütleme için -200 μ 'na öğütülmesi gerekmektedir. Bazı cevherlerin de 1.0-1.5 mm boyutunda kırılması y ada öğütülmesi özütleme için yeterli olmaktadır.

Kırma işleminde kapasiteye göre çeneli, konili, konik kırıcılarla öğütmede çubuklu, bilyalı, otojen, yarı otojen değirmenler kullanılmaktadır. Zenginleştirme işlemine bağlı olarak öğütme çoğu zaman sulu olarak yapılmaktadır. Vanadyum içerikli cevherlerin süreç başlangıcında kavrulması gerektiğinden öğütmenin kuru olarak yapılmasında yarar vardır.

Tüvenan üretim ile özütleme işlemi arasında uranyum cevherinden ön konsantre üretmek için cevherin radyoaktivite, şekil, boyut, yoğunluk, yüzey özelliklerinden yararlanılarak ayırım yapılmaktadır. Bu ayırımlarda insan gücü yanı sıra, manyetik, optik ya da radyoaktif ayırıcılar kullanılmaktadır. Başlangıçta yapılacak ayırım işin ekonomikliğini artırmakta, zenginleştirme işlemi sürecinde miktar olarak daha az safsızlıklarla uğraşmaktadır.

1.14.2 Zenginleştirmede yerçekimi yöntemleri

Yerçekimi yöntemiyle uranyum minerallerini içerdiği safsızlıklardan serbest hale getirerek zenginleştirmek zor olmasına karşın yoğunluk farkından yararlanarak uranit minerallerini zenginleştirme olanağı vardır. İkincil uranyum mineralleri yoğunlukları yüksek de olsa yumuşak olduklarından öğütülürken şlam oluşturmaya meyillidir.

Uranyum minerallerinin yerçekimi yöntemiyle zenginleştirilmesinde Reichert konileri, spiral, sallantılı masalar, manyetik ayırıcılar, jigler, ağır ortam tambur ve siklonları kullanılmaktadır. Masa tipi, eşik yükseklikleri ve diğer işletme değişkenleri doğru seçildiğinde uranyum zenginleştirmede sallantılı masalardan iyi sonuç alınabilmektedir. Ağır ortam zenginleştirilmesinde ferrosilis veya manyetit kullanılmaktadır.

Jigler 25 mm ile 75 μ , sallantılı masalar da 3 mm ile 15 μ arasındaki uranyum cevherlerinin zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır.

Zenginleştirmede jig ve masalardan %15 U_3O_8 içerikli ön konsantre alınmıştır. Diğer bir tesiste masalarda %35.7 U_3O_8 tenörlü ve %5.2 kükürt içerikli konsantre üretilmiştir. Bir sonraki aşamada flotasyonla konsantredeki U_3O_8 tenörü %40.4'e çıkarılırken S oranı da %0.7'ye düşürülmüştür.

Uranyum mineralleri yeterli manyetik duyarlılığa sahip olmadıklarından manyetik sınıflandırıcılarla zenginleştirme olanağı yoktur. Ancak bu minerallerin düşük de olsa manyetik duyarlılığa sahip minerallerle birlikte bulunmaları durumunda bu mineralleri manyetik ayırıcılarla uranyumdan ayırma olanağı vardır. Örneğin %0.45 uranyum ve % 0.15 toryum içeren refrakter tipi bir cevherde uranyum, orta derecede manyetik duyarlılığa sahip nadir yer minerali rinkolit ile birlikte bulunduğu cevher yüksek alanlı manyetik ayırıcılardan geçirilmiştir. Manyetik ayırma sonrası beslenen cevherin %30'u rinkolit ile birlikte % 0.08 tenörlü uranyum ve %0.06 toryum içerikli manyetik atık olarak alınmıştır. Bu ayırmada atıktaki uranyum kaybı %5 seviyelerinde olmuştur.

1.14.3 Flotasyon

Yüksek oranda karbonatlı mineral içeren cevherlerin asitle özütlenmesinde yüksek miktarda asit, yüksek oranda sülfürlü mineral içeren cevherlerin de alkali özütlenmesinde yüksek miktarda karbonat kullanımı gerekmektedir. Özütlemeye sorun yaratacak sülfürlü ve karbonatlı mineraller, özütleme öncesi flotasyonla yöntemiyle ortamdan alınarak cevherlerin içerdiği uranyumun %70-95'i kazanılarak ön konsantre üretilmektedir.

Ortalama olarak 0.2-0.5% U_3O_8 , 5% kalsit, 0.3% pirit içeren bir cevher öğütme sonrası asit ya da karbonat özütlemeye uygun değildir. Bu cevherin özütleme öncesi flotasyonla içerdiği pirit ve kalsit yüzdürülüp ayrılarak asitle özütlemeye uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Pirit, altın ve uranyumun beraber bulunduğu bir cevherde öğütülmüş cevher flotasyonla zenginleştirilebilmektedir. Böyle bir zenginleştirme sonucu %10 civarında kazanılan konsantrenin %80'i altın, %20 kadarı da uranyum içermektedir. Konsantre daha ince öğütülüp siyanür özütleme ile altın ve uranyum kazanımı artırılabilir. Konsantrenin siyanürle özütlenmesinden altın, asitle özütlenmesinden de uranyumun kazanılabilmektedir.

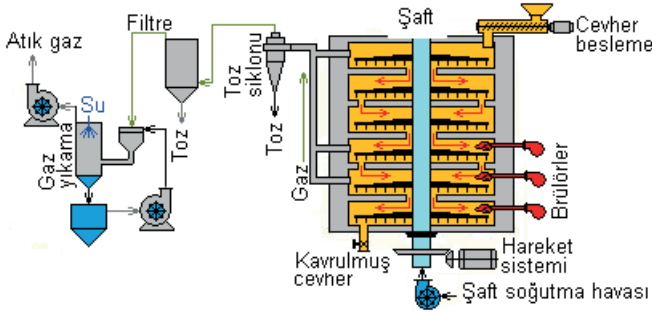
Atıklardan uranyumun alınabilme olanağı da vardır. Atık olarak ayrılmış %80 oranlarında karbonat mineralleri içeren kumtaşlarında bulunan düşük orandaki U_3O_8 kazanılması için hazırlanan pülpün pH değeri soda külü ile 9.4'e yükseltilmiş, pülpe karbonatlı minerallerin dışındaki diğer mineraller için bastırıcı ilave edilmiştir. Toplayıcı olarak hurma çekirdeği yağı, fuel-oil, triethoxybutane kullanılarak flotasyonla atıktaki uranyum kazanılmıştır.

1.14.4 Kavurma

Uranyum cevheri özütlemeye çözünürlüğün artırılması için kimyasal yapısının değiştirilmesi ve cevherin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için kavrulmaktadır. Kavurma özütlemeyi ve özütleme sonrası sıvı-katı ayırımını kolaylaştırmaktadır. Ancak kavurma işlemi zenginleştirme sürecinin maliyetini artırmaktadır.

Karnotit cevherinin içerdiği vanadyumun su ile özütlenerek kazanılabilmesi için özütleme öncesi kavrulması gerekmektedir.

U^{+4} değerli uranyum karbon, bazı sülfür veya demir oksitlerle U^{+6} değerli uranyuma oksitlenerek özütlenilme özelliği artırılmaktadır. Özütleme öncesi kavurma işlemi ile cevherin içerdiği kil gibi minerallerinin bünye suları da ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Uranyum mineralı çok katlı yatay ya da döner fırınlarda kavrulmaktadır. Şekil 1.19'da uranyum cevherinin kavruğu çok katlı yatay fırın gösterilmiştir.



Şekil 1.19: Çok katlı yatay fırın

Çok katlı yatay fırınlarda katların sıcaklığını ayrı yönetilme olanağı vardır. Bu fırınlarda şaft soğutma çıkış havası yakma havası olarak kullanılmaktadır. Hava akış hızı ayarlanabildiğinden döner fırınlardaki kavurma işlemine göre daha az toz çıkmaktadır. Ancak bu fırınların kapasitesi düşük, işletme ve bakım maliyetleri yüksektir.

Uranyum cevherinin kavrulmasıyla:

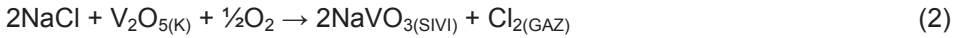
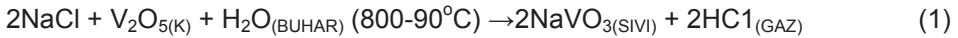
- Cevherin içerdiği vanadyum suyla özütlenmeye uygun hale getirilmektedir.
- Cevherin içerdiği kükürt ortamdaki uzaklaştırılmaktadır.
- Uranyum cevheri oksitlenmektedir.
- Cevherin içerdiği karbon yakılmaktadır.
- Cevherdeki kil minerallerinin içerdikleri bünye suları alınmaktadır.

UO_2 formu uranyumun temelini oluştururken uranyum atmosfer ortamında UO_3 formundadır. UO_3 formu asitlerle UO_2SO_4 gibi uranyum tuzlarını, bazlarla Na_2UO_4 veya $Na_2U_2O_7$ gibi alkaliyi oluşturmaktadır.

Cevher içindeki UO_3 450-600°C sıcaklığa kadar dengede olup bu sıcaklıktan sonra UO_3 oksitlenerek U_3O_8 formuna dönüşmektedir. 650-900°C sıcaklık aralığında U_3O_8 dengededir. Geçiş formu olan U_3O_8 metal oksitlerle tepkimeye girerek kısmen ya da ortamdaki bir oksitleyici ile tamamen alkalilere dönüşmektedir. Kavurma ortamında silis varsa uranyumun silikatlar oluşmaktadır. 900°C sıcaklık üzerinde U_3O_8 bozularak UO_2 formuna dönüşmeye başlamakta ve dönüşüm 2000°C'da tamamlanmaktadır.

Vanadyumun kazanılması için cevher 1.5 mm civarında kuru olarak öğütülüp içine ağırlıkça %6-10 oranında tuz ilave edilerek 825-850°C sıcaklıkta 1-2 saat kavrulmaktadır. Kavrulmuş cevher su içine atılarak hızlı soğutulmakta, suda yaklaşık 1 saat kadar karıştırıldıktan sonra katı-sıvı ayrımı yapılmaktadır. Kavurma sürecinin iyi yönetilmesi durumunda kavurma sonrası cevherin içerdiği vanadyumun %75-80'ni suda çözülebilir forma dönüşürken uranyum da suda çözülmeden katı formda kalmaktadır. Katı-sıvı ayrımı sonrası sıvı kısım vanadyum kazanım, uranyum içeren katı da asitle özütleme devresine gönderilmektedir.

Kavurma ortamında gerçekleşen tepkimeler karmaşık olmasına karşın temel tepkimeler aşağıdaki gibidir:



Tuzla kavurma uranyumun asitle özütleneme özelliğini iyileştirmemektedir. Çoğu zaman vanadyumun kazanılması için tuzla kavurma yerine hidrometalürjik yöntemler tercih edilmektedir. Hidrometalürjik yöntemlerde cevher 80-90°C sıcaklıkta özütlenerek uranyum ve vanadyumun önce çözeltiye alınmakta, sonraki işlemlerle birbirinden ayrılmaktadır.

Kavurma sürecinde ortamdaki sülfür mineralleri de etkilenecek özütlenebilecek duruma gelmektedir. Bu arada kükürt ortamdan SO_2 ve SO_3 olarak uzaklaştığından fırın baca gazının çevreye olası etkisinin önlenmesi gerekmektedir. 500°C sıcaklıkta mineral en yüksek oranda boşluk içerecek duruma gelmektedir. Sıcaklık 600-650°C'e çıktığında ortamda çözülemeyen uranyum silikat formu oluşmaktadır.

Uranyumun özütlenmesi için içerdiği karbonun uzaklaştırılması gerekmektedir. Kavurma sürecinde 450°C sıcaklıkta mineralin içerdiği karbonun önemli bir kısmı yanarak CO_2 'e dönüşerek ortamdan uzaklaşmaktadır.

Uranyum içeren cevherlerin yapısında kil mineralleri de bulunmaktadır. Bu mineraller zenginleştirme sürecinin her aşamasında, özellikle katı-sıvı ayrımında çökmede ve filtrelemede sorun yaratmaktadır. Koyulaştırıcıda ortama çöktürücü kimyasallar ilave edilip kilin çökme hızı artırılarak sorun önemli ölçüde giderilmektedir.

Kilin içerdiği yüzey ve bünye sularının hemen hemen tamamı kavurma sürecinde ortamdan uzaklaşmaktadır. Yüzey ve bünye suyu alınmış kil de özütlemeye sorun yaratmamaktadır.

1.14.5 Özütleme

Özütlemedeki temel süreç cevherin uygun boyuta öğütülmesi ya da kırılması sonrası çözeltiye almaya dayanmaktadır. Diğer taraftan değişik yöntemlerle zenginleştirilmiş konsantré içindeki uranyumun da özütlemeyle kazanılmaktadır.

Şekil 1.20'de özütlemeyle zenginleştirme yöntemlerinin seçimindeki temel akış süreçleri gösterilmiştir.



Şekil 1.20: Uranyum zenginleştirme yöntemi seçiminde temel akış

Uranyum içeren cevherin kimyasal yapısı seçilecek yöntem konusunda başlangıçta bir fikir vermektedir. Özütleme yöntemi ve tesis seçilirken laboratuvar da cevherle ilgili gerekli testlerin yapılmış olması gerekmektedir.

Özütleme testleri her boyut için ayrı yapılip sonuçlarının karşılaştırılması, cevherin serbestleşme boyutu, özütleme ortamı, özütleme kimyasalı, miktarı, özütleme süresi, ortam sıcaklığı, pH değeri, basıncı, kullanılacak özütleme derişiminin başlangıçta mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Çoğu zaman özütleme için cevherin serbestleşme boyutuna kadar öğütülmesi de gerekmemektedir. Bu arada yataktaki uranyum oluşumundaki olası mineral değişimleri de göz ardı edilmemeli, gerek örnek alma ve gerekse laboratuvar testlerinde bu değişim dikkate alınmalıdır.

Cevher tenörü yüksek olduğunda klasik tankta özütleme, tenör düşük olduğunda da yığın ya da yerinde özütleme uygulanması ekonomik olmaktadır. Yerinde özütleme uygun yapıdaki kumtaşı gibi geçirgenliği yüksek cevherler için uygulanmaktadır. Jeolojik yapının geçirgenliği düşükse cevherin üretilmeden yerinde özütlenmesinden iyi sonuç alınması oldukça zordur. Bu cevherlerin yığın ya da

klasik yollarla zenginleştirilmesi gerekmektedir. Rezervin büyüklüğü de yöntem seçimini ve yapılacak işin ekonomikliğini etkilemektedir.

Uranyum mineralinin iyi çözülebildiği ortam özütleme kimyasalını belirlemektedir. Cevherin kil mineralleri içermesi özütleme öncesi cevherin kavrulmasını, kavrulma sonrası da bu cevherin tankta ya da basınç altında özütlenmesini gerektirmektedir. Refrakter cevherler de tenörüne ve yapısına bağlı olarak öğütülüp asitle özütlenmektedir. Diğer taraftan atmosfer basıncı altında cevherin içerdiği uranyumun çözünürlüğü yeterli değilse cevher basınç altında özütlenmektedir. Yerinde özütlemeye çoğu zaman alkali özütleme, yığılda özütlemeye asidik ortamda uygulanmaktadır.

Refrakter tipi cevherlerin özütlenmesi oldukça zordur. Bu cevherlerin özütlenmesinde derişimi yüksek asit kullanılmaktadır. Cevher derişimi yüksek asitle karıştırılıp asitle yıkanmaktadır. Bu yöntemin uygulanması için cevherin öğütülmesi gerekmemektedir. Cevherin belirli ince boyutta kırılması yeterli olmaktadır. Yöntemde daha az asit kullanılırken kil ve silika çözülmeden uranyum çözeltiye alınabilmektedir.

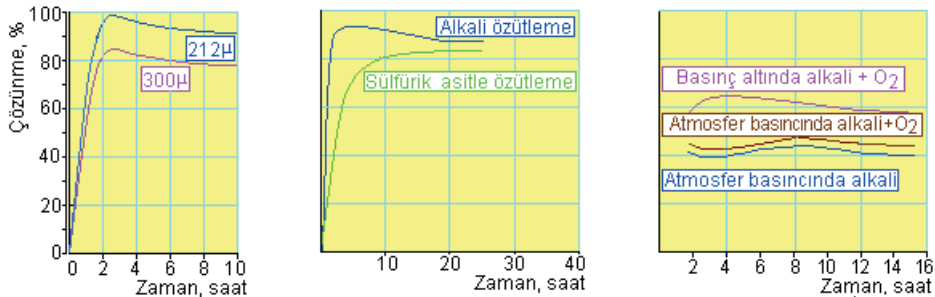
Özütleme süreci kullanılan kimyasala göre;

- Asitle özütleme ve
- Alkali özütleme olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

Uygulanacak yöntem belirlenip özütleme değerlerinin çerçevesi çizildikten sonra daha detaylı testlerle en uygun zenginleştirme şartları belirlenmektedir. Test sonuçlarının da doğruluğunun kurulacak pilot tesiste kontrol edilmesinde yarar vardır.

Grafik 1.8'de laboratuvarda yapılmış bazı testlerin sonuçları gösterilmiştir.

Grafik 1.8: Özütleme testleri



Düşük karbon içerikli cevherlerin yerinde özütlenmesinde H₂SO₄ kullanılmaktadır. Cevherin özütlenebilme özelliğine bağlı olarak 2-5g/lit derişimli asit özütleme için yeterli olmaktadır. Oluşum ve yeraltındaki yapıya bağlı olarak yerinde

özütmeyle cevherin içerdiği uranyumun \approx %80'nini kazanma olanağına karşın uygulamalarda çoğu zaman bu orana ulaşamamaktadır.

Özütlemeye seyreltik sülfürik asit ile birlikte H_2O_2 ve oksijen gibi uygun bir oksitleyici kullanılarak U^{+4} değerli bileşikler çözülebilir U^{+6} değerli bileşiklere yükseltilmektedir. Atmosfer ortamında özütlemeye sodyum klorat, mangan dioksit, hava, oksijen ve sülfürik asit kullanılmaktadır. Basınç altında özütlemeye H_2SO_4 ile birlikte oksitleyici olarak hava ya da oksijen yeterli olmaktadır.

\approx %8'den daha yüksek oranda karbonatlı mineraller içeren cevherlerdeki uranyumun kazanılmasında alkali özütlemesi uygulanmaktadır. Asitle özütlemeye karbonatlı mineraller sülfürik asitle tepkimeye girerek sülfat oluşturduklarından sülfürik asit tüketimi yüksektir. Bu da zenginleştirme sürecinin ekonomik olmasını engellemektedir.

Oksitli ortamda eriyebilen anyonik uranyum karbonat bileşiği oluşmaktadır. Alkali özütlemeye mineralin içerdiği uranyumun dışındaki mineraller alkali ortamdan etkilenmemektedir. Alkali özütlemeye 1-3 g/lit derişimli seyreltilmiş amonyak, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ya da sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) kullanılmaktadır. Yöntemden iyi sonuç alınabilmesi için uygulamanın $100^\circ C$ 'den yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Sodyum hidroksit ilave edilerek çözültiden yüksek uranyum kazanımı için ortamın pH değeri yükseltilmektedir. Asidik ortamda anyonik bileşikler bozulup uranyum, uranyum sodyum diuranet şeklinde çökmektedir.

Alkali korozyonu asit korozyonundan daha az ekilidir. Alkali özütlemeye için cevherin daha küçük boyutta öğütülmesi gerekirken, cevherin boyutu -1 mm altına düşürülmektedir. Cevherin içerdiği $CaSO_4$ ve pirit gibi safsızlıklar alkali tüketimini artırmaktadır. Refrakter tipi cevherler alkali ortamdan etkilenmemektedir. Bütün bunlara karşın uranyum minerallerinin özütlenmesinde yaygın olarak sülfürik asitle özütlemeye yöntemi uygulanmaktadır.

Özütlemeye işleminden sonra uranyumu özütlenmiş katı ve uranyum yüklü sıvı fazlar birbirinden ayrılmaktadır. Katı-sıvı ayırımı için çöktürücü ile birlikte büyük çaplı ya da yüksek kapasiteli koyulaştırıcılar, filtreleme işlemi için tambur, disk ve basınçlı filtreler kullanılmaktadır. Daha hızlı ve küçük alanda çöktürme işlemi için koyulaştırıcı öncesi pülpe kimyasal çöktürücüler de ilave edilebilmektedir. Koyulaştırıcıdaki katı-sıvı ayırımının son aşamasında pülp yıkanarak katıdaki uranyum kalıntılarının tamamı temizlenmektedir.

Yüklü özütlemeye çözültisi; uranyum, demir, alüminyum, magnezyum, vanadyum, kalsiyum, molibden, bakır, selenyum gibi iyonlar içermektedir. Çözültideki uranyum derişimi yaklaşık 1-2 g/litre kadardır. Diğer iyonların derişimi cevherin içeriğine bağlıdır.

Çözelti içindeki uranyum iyon derişimi ya da solvent-sıyırma ile kazanılmaktadır. Solvent-sıyırma için genellikle kerosanla seyreltilmiş organik amin tuzu kullanılmaktadır. Bu tuzlar uranyum iyonlarına suda erimeyen organik bir yapı

kazandırmaktadır. Çözeltideki organik bileşikler çöktürülmekte, çökenler de ortamdan alınmaktadır. Alınan çökelti bileşikleri içindeki uranyum da sodyum klorit ya da amonyum sülfat gibi inorganik bir tuzla sıyırılmaktadır. “Sarı pasta” olarak isimlendirilen sıyırılmış uranyum kurutulup rafineri tesislerine gönderilmektedir.

1.14.5.1 Özütleme tepkimeleri

Uranyum U^{+4} değerli UO_2 ve U^{+6} değerli UO_3 oksit bileşikleri oluşturmaktadır. U^{+4} değerli uranyum daha önce oksitlenmiş olduğundan indirgeme ortamında dengede olmasına karşın U^{+6} değerli uranyum silikat, sülfat, vanadat, arsenat, fosfat bileşikleri şeklinde bulunmakta, bu bileşikler özütleme sürecinde doğrudan çözeltiyi geçmektedir:



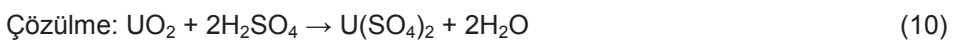
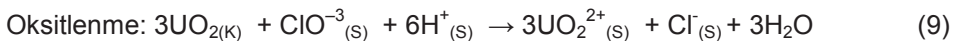
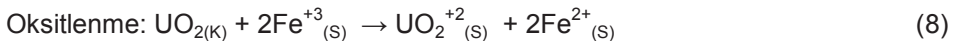
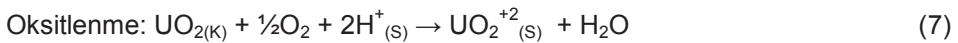
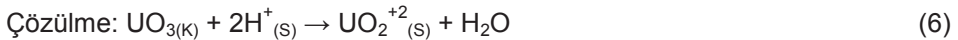
Alkali özütlemeye bu tepkimede için gerekli olan H^+ iyonları bikarbonat tarafından sağlanmaktadır.

İki değerli uranyum oksit iyonları asitle özütlemeye sülfat, alkali özütlemeye ya da karbonat iyonları ile tepkimeye girerek dengeli bileşikler oluşturmaktadır.

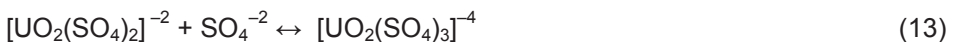


1.14.5.1.1 Asitle özütleme

Asitle özütlemeye aşağıdaki tepkimeler gerçekleşmektedir:



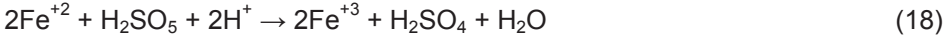
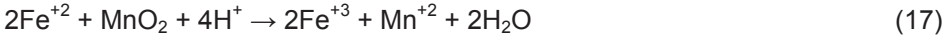
Özütleme ortamında uranyum U^{+6} değerli değişik uranyum sülfanat bileşikleri oluşturmaktadır:



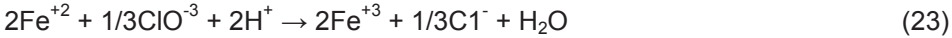
Özütleme ortamındaki anyon derişimi, uranyum ve sülfat iyonları ortamın pH değerini belirlemektedir. Özütleme ortamındaki U^{+4} değerli uranyumu oksitlemeden çözeltiye alma olanağı yoktur. Ortamdaki üç değerli demir Fe^{+3} uranyumun oksitlenmesini sağlamaktadır:



Tepkimede H^+ iyonlarına geresinim duyulmamasına karşın asidik ortamda oksidasyon çözeltideki demir iyonları tarafından gerçekleştirilmektedir. Tepkimenin sürekliliği için ortamda Fe^{+3} değerli iyon varlığının sürmesi gerekmektedir. Bunun için de ortama pirolusit (MnO_2) ilave edilmektedir:



Asit tüketimini düşürmek için mangan dioksit yerine sodyum klorat ya da Caro's asit olarak isimlendirilen peroksomonosulfonik asit H_2SO_5 kullanılmaktadır:



Ortamda 1-2 g/lit derişimde Fe^{+3} iyonlarının olması UO_2 'nin çözeltiye alınması için yeteri olmaktadır. Fe^{+3} iyonları alkali karbonat eriyiği içinde varlığını sürdürmemektedir. Özütleme ortamında Fe^{+2} iyonlarının da kontrol edilmesi gerekmektedir.

1.14.5.1.2 Alkali özütleme

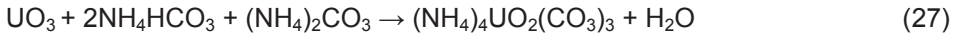
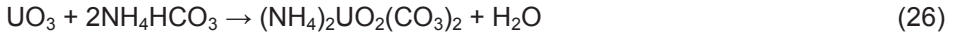
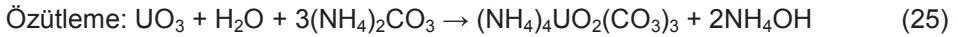
Alkali özütleme ortamında ısı ve basınca bağlı olarak çok değişik tepkimler gerçekleşmektedir. Asitle özütlemeye göre cevherin daha ince boyutta öğütülmesi ve daha uzun özütleme süresi gerektirmektedir.

U^{+6} değerli uranyum zayıf alkali ortamda çok kolay çözeltiye geçmektedir. Bu ortamda Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları katyon gibi davranış göstermektedirler. Anyonlar ortamda uranil trikarbonat $[UO_2(CO_3)_3]^{-4}$ veya uranil dikarbonat $[UO_2(CO_3)_2]^{-2}$ oluşturmaktadır. U^{+4} değerli uranyum bileşiklerinin oksitlenmeden karbonatlar tarafından çözeltiye alınma olanağı yoktur.

Alkali ortamda oksijen U^{+4} değerli uranyumu çok yavaş oksitlemektedir. Alkali özütlemeye ortama HCO_3 ve CO_2 gazı verilmektedir. CO_2 gazı cevherdeki karbonatlarla tepkimeye girerek çözülmüş HCO_3 iyonları oluşturmakta, ortamda

pH değeri biraz yükselmektedir. Ortamın oksijen derişimini artırmak için H_2O_2 de kullanılmaktadır.

Amonyum karbonat kullanılarak uygulanan alkali özütlemeye aşağıdaki tepkimeler gerçekleşmektedir:



Cevherdeki sülfürlü mineraller de alkali özütlemeye sorun yaratabilmektedir. Örneğin ortamda pirit olması durumunda aşağıdaki tepkime gerçekleşmektedir:



Cevherdeki sülfür oranı %3-4'ü geçtiğinde özütleme ortamında jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) oluşmaktadır. Sodyum karbonatla özütlemeye $NaHCO_3$ 'ün ortamdaki kili şişirme olasılığına karşı NH_4HCO_3 kullanılmaktadır. Yeraltı su seviyesinde basınca bağlı olarak oksijen ve CO_2 'i oluşturan özütleme kimyasallarının kullanımı ile ortamda oluşan bikarbonat, amonyum bikarbonatın özütleme etkisine eşdeğer bir ortam oluşturmaktadır.

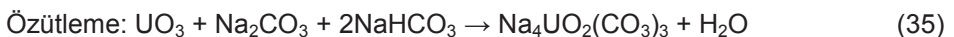
Alkali ortamda özütlemeye karbonat-bikarbonat çözeltisi içindeki toplam tepkime aşağıdaki şekildedir:



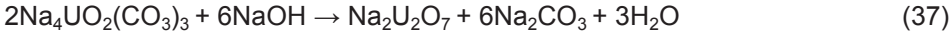
Na_2CO_3 yüksek sıcaklık ve basınç altında silika ve alümina gibi asit yapıları bileşiklerle tepkimeye girerek sülfat, bikarbonat, silikat ve alimünat bileşiklerini oluşturmaktadır. $NaHCO_3$, yüksek sıcaklıklarda sodyum karbonat ve CO_2 'ye dönüşmektedir:



Özütleme sürecinde pH değerininin yükselip uranyumun tekrar çökmesini önlemek için ortama sodyum bikarbonat $NaHCO_3$ ilave edilmektedir:



Çökeltme sürecinde ortamdaki bikarbonat fazlalığı önce kostik soda ile nötrali- ze edilmekte, daha sonra ortama yeterli miktarda kostik soda eklenerek çö- keltme sağlanmaktadır:



Kısaca cevherin içerdiği U^{+4} değerli uranyum dengede olup her kimyasalla çö- zeltiye alınamamaktadır. Uranyumun çözeltiye alınabilmesi için U^{+4} değerli uranyumun U^{+6} değerli uranyuma oksitlenerek indirgenmesi gerekmektedir. Bu da, gerektiğinde ortama indirgeyiciler ilave edilerek cevherin asit ya da alkali ortamda özütlenmesiyle sağlanmaktadır.

1.14.5.2 Özütleme yöntemleri

Özütlemeyi cevherin tenörüne, içerdiği safsızlıklara, uranyum mineralinin ve içerdiği safsızlıkların asit ve alkalilere verdiği tepkimelere göre değişik şekiller- de uygulanmaktadır.

Uygulama şekline bağlı olarak özütleme; atmosfer basıncı altında tanklarda, yığılma, yerinde, basınç altında otoklavlarda, kullanılan özütleyiciye göre de asit ve alkali özütleme şeklinde sınıflandırma olmağı vardır.

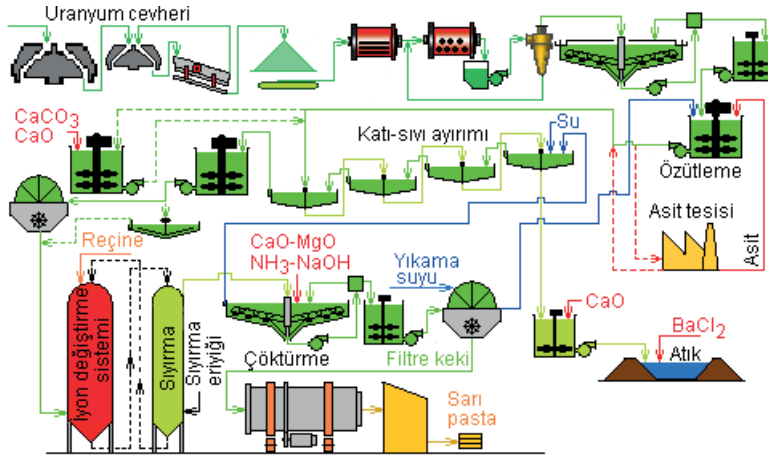
1.14.5.2.1 Atmosfer basıncında asitle özütleme

Uranyumun asitle özütlenmesinde, bulunabilirliği, üretim kolaylığı ve maliyeti- nin düşük olması nedeniyle sülfürik asit kullanılmaktadır.

Sülfürik asit kükürt ya da SO_2 gazından üretilebildiği gibi süreç içinde sülfürlü minerallerin işlenmesi ile de elde edilebilmektedir. Özütleyici olarak nitrik asidin kullanıldığı özütleme süreçleri de vardır.

Öğütme devresinden siklon üst akımı olarak alınan pülpün katı oranı %35 civa- rındadır. Özütlemeye bu oranın %55-60 arasında olması, ortamın pH değerinin ve serbest asit miktarının sürecin yönetimi için sabit bir değerde kalması isten- mektedir. Bunun için pülp yoğunluğu koyulaştırıcıda ayarlanmakta, bu arada pülpdeki kil de şlam olarak ortamdaki alınabilmektedir.

Şekil 1.21'de atmosfer basıncı altında özütleme süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.21: Atmosfer basıncı altında özütleme süreci

Özütlemeye işlemi için Şekil 1.22'deki gibi karıştırma kanatları olan birkaç tank seri olarak bağlanmaktadır.



Şekil 1.22: Özütleme tankları

Tankların gövdesine gerektiğinde karıştırmayı sağlamak, hava ve buhar vererek pülpün sıcaklığını yükseltmek için vanalar konulmuştur.

Karıştırma sistemindeki bakım, onarım, arıza ve tankların delinerek devre dışı kalma olasılığına karşı pülpün bir sonraki tanka gönderilebilmesi için yan geçişler ve pompa bağlantıları yapılmıştır.

Özütlemeye kullanılan tanklar, karıştırma kanatları ve kanatların bağlandığı miller, boru hatları aside dayanıklı malzemeden yapılmış ya da asitle temas halinde olan metal kısımlar aside ve aşınmaya karşı lastik kaplanmıştır. Tankın iç yapısı beslenen pülpün kısa devre yapıp çıkış kanalına yönelmesine engel olacak ve içindeki pülpün karışabileceği şekilde tasarlanmıştır. Tankların üstü özütleme ortamından çıkacak gazın yönetimi, işçi güvenliği için kapatılmış, üste kontrol ve havalandırma boruları yerleştirilmiştir.

Özütlenecek pülpdeki katı oranı, tank sayısı, hacmi, özütleme süreci ve süresi ile en düşük oranda özütleme kimyasalı kullanılarak en yüksek etkinlikle özütleme şartları laboratuvarında belirlenmektedir. Pülpdeki katı oranının yüksek olması çözeltinin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Katı oranının düşük

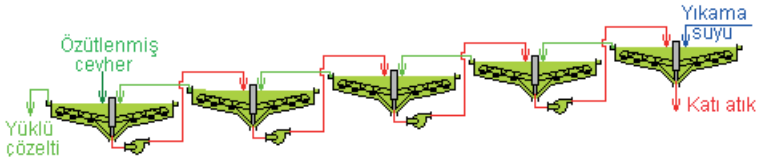
olması durumunda da gereksiz yere fazla pülp hacmiyle uğraşılmakta, tesis kapasitesi düşmektedir. Tanklar, pompa kullanmaya gerek kalmadan pülpün bir tantan diğerine serbestçe akabileceği şekilde yerleştirilmektedir.

Özütleme sıcaklığı, ortam derişimi, tanka verilen oksitleyici miktarı, pülpün pH'ı özütleme etkinliğine ve çökmeye bağlı olarak belirlenmektedir. Ortamda U^{+4} değerli uranyum kalması ve oksitleyicilerin miktar olarak yetersiz olması durumunda ortamdaki fosfat ve arsenatlar pH değeri 1.2'nin altına düştüğünde, uranil arsenat pH 1.3-1.7 aralığında, fosfat da pH 1.5-2.5 aralığında çökmektedir. Son aşamada özütlenmiş malzemenin su ile yıkanması sürecinde de bir miktar uranyumun çökme olasılığı vardır.

Asitle özütlemelerde tanklardaki demir ve diğer iyonların çökmemesi için pH değerinin 2'nin üzerine çıkması istenmektedir. Bu nedenle özütleme için kullanılan asidin yaklaşık yarısı tanklara beslenmektedir. Son tankta da çökme olmaması için pH değerinin yeteri kadar düşük olması gerekmektedir.

Özütleme ortamında Fe iyon derişimi yüksekse, bu iyonlar arsenat ve fosfat iyonlar ile şlam yapıları bileşikler oluşturduğundan uranil arsenat ve fosfat bileşikleri oluşmamaktadır. Süreçte ferrik sülfat $Fe_2(SO_4)_3$ özütlenmesinin sonucu çözeltideki demir iyon derişimi artmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında ortamdaki demir derişiminin artması ile uranyumun oksitlenerek çözültüye alınabilme özelliği mangan dioksitin oksitleyici olarak kullanıldığı ortamlardan daha yüksek olmuştur. Özütleme süreci sonrası yüksüz çözelti tekrar kullanıldığından bu çözeltiyle birlikte demir iyonları tekrar devreye girerek oksitleme özelliklerini sürdürmektedirler. Ferrik sülfat sülfürik asit tesislerinde üretilmektedir.

Katı sıvı ayırımında Şekil 1.23'deki gibi yeteri kadar sayıda ters akışlı bağlanmış koyulaştırıcılarda gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.23: Ters akışlı katı-sıvı ayırımı

Koyulaştırıcının üst akımı olarak alınan yüklü çözelti disk filtreden ya da diğer bir koyulaştırıcıdan geçirilerek olası içerdiği katı parçacıklar iyon değişimi ve sıyırma öncesi temizlenmektedir. Bu parçacıkların temizlenmemesi durumunda iyon değişim kolonlarında kanalları tıkanma olasılığı vardır. İyon değiştirmede uranyum yüklü çözelti kolonlarda reçine içinden geçirilerek yükü alınmaktadır. Yüklü reçineden sıyrılan uranyum çöktürülüp kurutulularak sarı pasta elde edilmektedir.

Uranyum zenginleştirme tesislerinde süreç yönetimi tamamen elektronik cihazlarla gerçekleştirilmektedir. Atmosfer basıncı altında tanklarda ortamın pH değeri, sıcaklığı, yoğunluğu, metal derişimi sürekli ölçülmektedir. Bu ölçümlerin

belirli sınırların dışına çıkmaması için ortama zamanında gerektiği kadar asit, buhar, oksitleyici, hava ve değişik kimyasallar ilave edilmesi gerekmektedir. Bu ilaveler elektronik sistemlerle otomatik vanalar yönetilerek sağlanmaktadır. Düşük kapasiteli tesislerde bu müdahaleler operatörler tarafından da yapılabilmektedir.

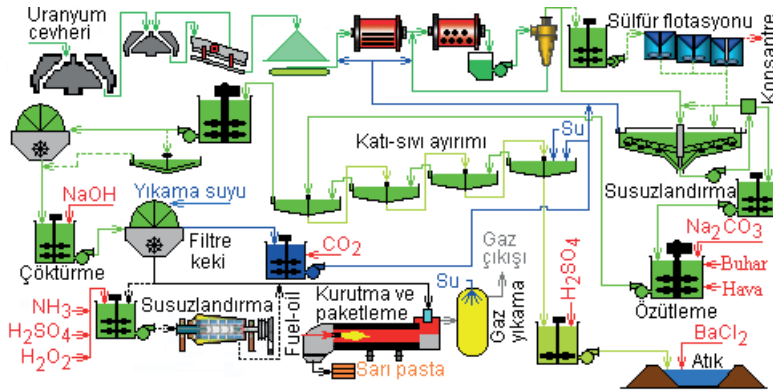
Yönetim sistemi için ölçüm cihazlarının doğru yerlere yerleştirilmiş olması ve bu cihazların sürekli olarak temizlenip ayar ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Özütleme sürecinde kullanılan kimyasallar birkaç tanka ilave edilmesine karşın yapılan ölçümlerle bütün özütleme tanklarının gözlenmesinde yarar vardır.

1.14.5.2.2 Atmosfer basıncında alkali özütleme

Yöntemde pülp ısıtılıp ortama hava ya da oksijen verilerek cevher alkalilerle özütlenmektedir.

Alkali özütlemelerde çoğu zaman cevherin $d_{80} < 75 \mu$ olacak şekilde öğütülmesi gerekmektedir. Yöntemin uygulanması için pülp %50-60 katı içerecek şekilde hazırlanmakta, özütlemelerde $\sim 40-50$ g/lit Na_2CO_3 ya da $\sim 10-20$ g/lit NaHCO_3 eriyiği kullanılmaktadır. Özütleme ortamının pH değeri 9.0-10.5 arasında kalmakta, özütleme süresi ortam sıcaklığı arttıkça ciddi şekilde azalmaktadır.

Şekil 1.24'de atmosfer basıncı altında alkali ile özütleme akışı gösterilmiştir.



Şekil 1.24: Atmosfer basıncı altında alkali ile özütleme akışı

Yöntemin uygulanışı asitle özütlemeye benzemektedir. Uranyum indirgenerek çözeltilmeye alınmakta, daha sonra da bu çözeltildeki uranyum çöktürülerek kazanılmaktadır.

Kalsit ve prit özütlemelerde aşırı alkali tüketimine neden olduğundan çoğu zaman cevher öğütüldükten sonra içerdiği sülfürlü mineraller flotasyonla alınmakta geri kalan cevher içindeki uranyum özütlenerek kazanılmaktadır.

Alkali özütlemeye örnek olarak %5 kalsit ve %0.5 prit içeren cevherin alkali özütlemesi için çözeltiler olarak 10 g/lit NaHCO_3 ve 40 g/lit Na_2CO_3 öğütme dev-

resine ilave edildiğinde öğütme sonrası cevherin içerdiği kalsit ve prit flotasyonla yüzdürülerek ortamdaki alınmıştır. Flotasyonda bastırılan uranyum içeren pülp koyulaştırıcıda %50-60 katı içerecek şekilde susuzlandırılmış, ortama CO₂ gazı verilerek pülpün bikarbonat seviyesi 20g/lt'ye, sıcaklığı da buharla 90°C'ye çıkarılmıştır.

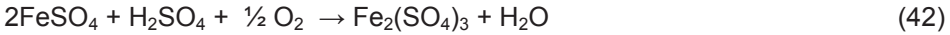
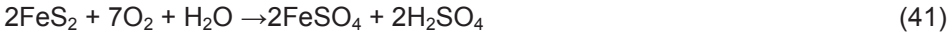
Pülp karıştırma kanatlı tanklarda yaklaşık 100 saat süre ile özütlenmiştir. Özütlenme sürecinde ortama oksitleyici olarak saf oksijen verilmiştir. Süre sonunda cevherin içerdiği uranyumun %92'si çözeltilmiş alınmıştır.

Özütlemeye çözeltilimin derişimi önemli olup derişim kireç ve kostik soda ilavesi ile kontrol edilmektedir. Ortamdaki fazla kostik soda filtreleme sürecinde sodyum diuranat çökmesine neden olmaktadır.

1.14.5.2.3 Otoklavlarda asitle özütleme

Atmosfer ortamında özütlenmesi zor ve ekonomik olmayan, özellikle refrakter tipi cevherlerdeki uranyumun kazanılması için özütleme işlemi basınç altında otoklavlarda yapılmaktadır.

Cevherin sülfür içermesi durumunda bu sülfürler basınç altında oksijenle sülfürik asit ve FeSO₄'e, FeSO₄ de oksitlenerek Fe₂(SO₄)₃'e dönüşüp U⁺⁴ değerli uranyumun indirgenmesi için çok uygun oksitleme ortamı oluşturmaktadır:



Cevherin yapısında yeteri kadar sülfür bulunması durumunda basınç altında özütlemeye ortama başlangıçta ilk tepkime için çok az miktarda sülfürik asit ve sonrası oksijenden başka bir kimyasal ilave etmeye gerek duyulmamaktadır.

Sıcaklık 200°C civarına çıkartıldığında metal tuzlarının hidrolizi nedeniyle ortamda fazladan asit oluşmaktadır. Bu sıcaklıkta Fe⁺³ da etkilendiğinden U⁺⁴ oksitlenmesinde ortamda çözülmüş halde bulunan oksijen etkili olmaktadır. Basınç altında özütlemeye sıcaklık arttıkça refrakter tipi cevherlerin özütlenmesi kolaylaşmaktadır.

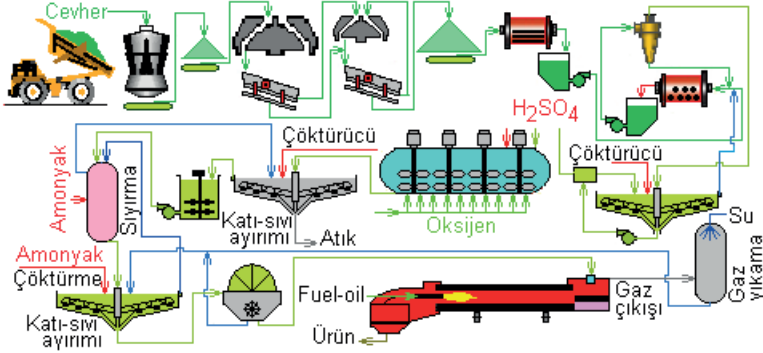
Otoklavlarda basıncı altında özütlemenin ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Kimyasal ve fiziksel olarak özütleme ortamı çok aşındırıcı olduğundan yöntemin sürekliliği için tesiste asitle temas eden kısımların özel bakımı gerekmektedir.

Otoklavlardaki özütleme sıcaklığı, kullanılacak asit ile oksitleyici miktarı, özütlenme süresi, özütlemenin kaç kademede yapılacağı gibi değerler cevhere göre belirlenmektedir.

Özütleme ortamının basıncı 6-8 bar, sıcaklığı da 70-90°C arasında değişmektedir. Asit derişimi 15 g/lt H₂SO₄ kadar olabilmektedir. Özütlemeye asit tüketimi

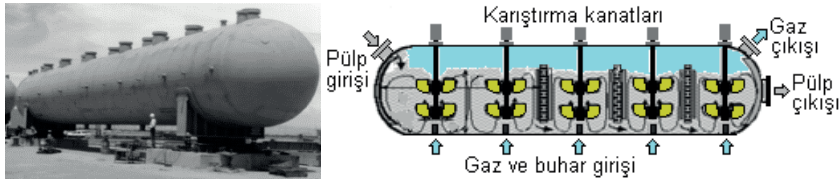
60-100 g/lt H_2SO_4 arasında değişmekte, özütleme süresi de 6-8 saat sürebilmektedir.

Şekil 1.25'de basınç altında otoklavlarda özütleme akışı gösterilmiştir.



Şekil 1.25: Basınç altında otoklavlarda özütleme

Özütlemeye kullanılan otoklavlar yatay ya da düşey olarak yerleştirilmektedir. Yaklaşık hacimleri 100 m^3 civarındadır. Yatay otoklavlarda birkaç bölme ve her bölmede yaklaşık 75-100 d/d ile dönen mekanik bir karıştırıcı mevcuttur. Şekil 1.26'da otoklav ve kesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.26: Otoklav ve kesiti

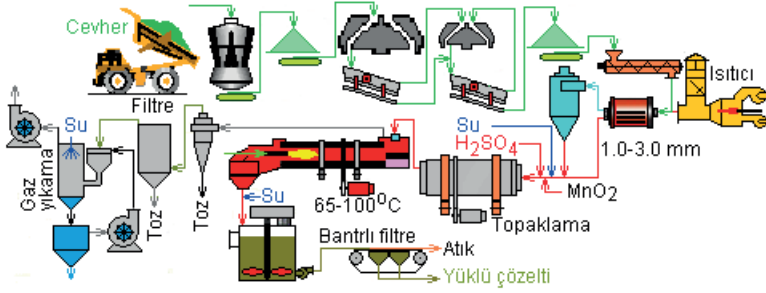
Dikey otoklavların yapısı basit, bakım maliyetleri düşüktür. Bu otoklavlarda karıştırma hava ile de sağlanmaktadır. Otoklavlar aside dayanıklı malzemeden yapılmış ya da tuğla ile kaplanmıştır.

1.14.5.2.4 Otoklavlarda alkali özütlemesi

Yöntem asitle özütlemeye benzerdir. Alkali özütleme 6-7 bar basınç, yaklaşık 150°C sıcaklıkta, 30-90 g/lt karbonat derişimli ortamda 6-8 saatte gerçekleştirilmektedir. Özütleme iki aşamada uygulandığında ikinci aşamada derişimi yüksek karbonatlı çözelti alınabilmektedir.

1.14.5.2.5 Güçlü asitle ıslatma ve yıkama

Şekil 1.27'de asitle ıslatma ve yıkama yönteminin akışı gösterilmiştir.



Şekil 1.27: Asitle yıkama ve tamburda kurutma

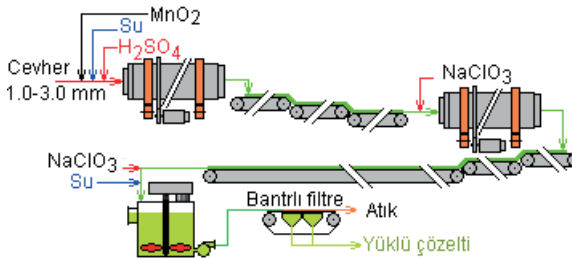
Yöntemde cevher 1-3 mm boyutunda kuru olarak öğütüldükten sonra %13-15 nem içerecek şekilde yüksek derişimli asitle karıştırılarak ıslatılmaktadır. Islatma işlemi döner tamburlarda 10-20 dakikalık bir süre içinde gerçekleştirilmektedir. Islatma için karıştırıcılar da kullanılmaktadır.

Asitle ıslatılmış cevher döner tamburlarda 3-4 saat süreyle 65-100°C sıcaklıkta tutulmaktadır. Bu süre sonunda çözülmüş uranyum, cevherin sığ bir havuzda, tankta ya da bant filtre üzerinde yıkanarak ya da koyulaştırıcılarda yüklü çözelti olarak alınmaktadır. Cevher tanka alındığında indirgenmemiş uranyumun da indirgenip tamamen çözültüye alınabilmesi için ortama oksitleyici olarak MnO_2 ilave edilmektedir.

Yöntem seyreltik asitle özütmeden daha etkili olup refrakter cevherler için uygundur.

Cevherin içerdiği silis ortamda çok az çözülmektedir. Isıtılmış derişimi yüksek asit aynı zamanda iyi bir oksitleyici olduğundan sürece ilave bir oksitleyici gerekmemektedir. Cevher boyutunu fazla küçültmeye gerek yoktur. Özütleme sonrası cevherin yıkanması için daha az su gerekmektedir. Sıvı-katı ayırımı kolaydır. Atık daha ucuz maliyetlerle bertaraf edilebilmektedir.

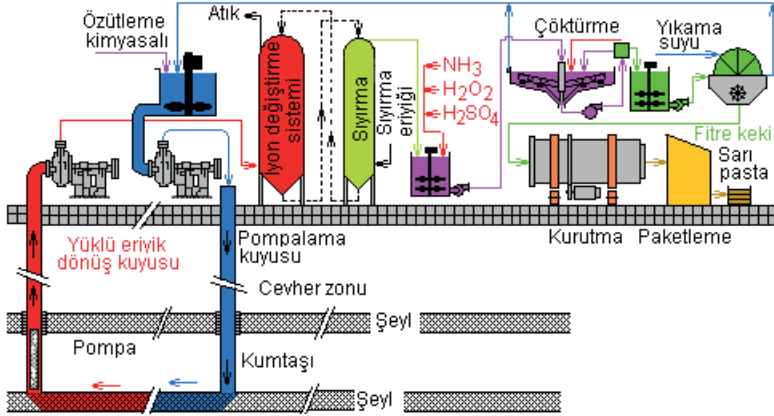
Güçlü asitle ıslatma ve yıkama yönteminin Şekil 1.28'deki gibi cevherin birkaç kademede uygun uzunlukta yavaş döndürülen yatay batılarda da uygulama olanağı vardır.



Şekil 1.28: Asitle yıkama ve bantta kurutma

1.14.5.2.6 Yerinde özütleme

Şekil 1.29'da yerinde özütleme yöntemin temel akışı gösterilmiştir.



Şekil 1.29: Yerinde özütleme

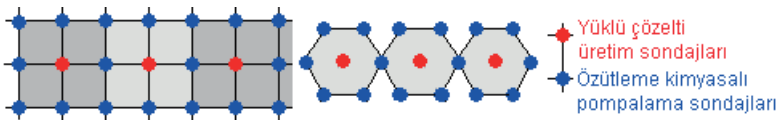
Yerinde özütleme yöntemi; yeraltı su seviyesi altındaki uranyum cevherine sondaj kuyuları ile ulaşarak bu cevherin uygun bir kimyasalla çözeltiye alınıp diğer kuyu ya da kuyulardan yeryüzüne çıkarma işlemidir.

Yerinde özütleme yöntemi açık ya da kapalı yöntemlerle işletilmesi zor olan, düşük geçirgenli şeyl ya da kil tabakaları arasında kumtaşı içinde oluşmuş uranyum yatakları için çok uygundur.

Uranyum yatağına yapılmış sondaj deliklerinden cevheri indirgeyip çözeltiye alacak özütleme kimyasalları ve oksitleyici pompalanmaktadır. Bu kimyasallar yataktaki uranyum ve metallere karmaşık tepkimelere girmekte, tepkimeler sonucu oksitlenen uranyum diğer bazı metallere çözeltiye geçmektedir. Çözeltiye geçen uranyum, üretim amaçlı sondaj kuyularından kontrollü olarak yerüstüne alınmaktadır.

Yerinde özütleme işlemi için 5-15 metre aralıklarla belirli sayıda özütleme eriyiği basmak ve üretim amacıyla sondaj kuyuları açılmaktadır. Yeraltına özütleme eriyiğinin basılması ve yüklü çözeltinin yerüstüne çıkarılması için açıklanan sondaj kuyularının yeri ve sıklığı yeraltındaki cevherin yayılım alanına ve üretim kapasitesine bağlıdır.

Şekil 1.30'da iki değişik kuyu grupları gösterilmiştir.



Şekil 1.30: Enjeksiyon ve üretim kuyuları

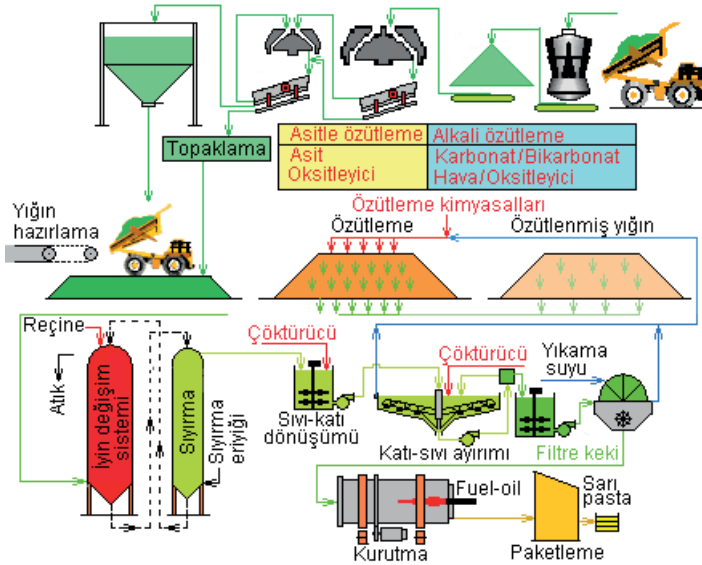
Yerinde özütlemeden iyi sonuç alınabilmesi için uranyum içeren formasyonların geçirgen, bu formasyonların civarındaki kayaların da çözeltinin sızıp ortamdan uzaklaşmaması için geçirgen olmaması gerekmektedir. Cevherin kimyasal yapısına ve yatağın fiziki oluşumuna bağlı olarak yerinde asit ya da alkali özütlemeye seyreltik amonyum, sodyum veya Ca-Mg karbonata, sülfürik asit, oksitleyici olarak da oksijen, hidrojen peroksit gibi kimyasallar kullanılmaktadır. Yeraltında uranyum oksitlenip U^{+4} değerden U^{+6} değere indirgenerek özütlemeye kimyasal tarafından çözeltiye alınmaktadır. Montmorillonit içeren uranyum yataklarında kil şişerek yatak geçirgenliğinin hemen hemen "0" olmasına neden olmaktadır. Özütleme için seçilecek kimyasalların uranyumu çözeltiyeye alırken kayacın geçirgenliğini de olumsuz yönde etkilememesi gerekmektedir.

Diğer taraftan yeraltında geçirgenliğin sağlanması için cevher, genellikle patlatmayla, gevşetilerek yerinde özütlenmesi olanağı da vardır.

1.14.5.2.7 Yiğinda özütleme

Yöntemin cevher hazırlamada özellikle altın üretiminde uygulanan yiğinda özütleme yönteminden farklı değildir. Yöntemde uranyum içeren şeyl ve kumtaşları ~20 mm boyutunda kırılıp ~10 metre yüksekliğinde yığınlar hazırlanmaktadır. Cevherin yapısına uygun asit ya da alkali özütleme kimyasalı hazırlanan yığın üzerinden verilmektedir. Özütleme kimyasalı yiğinda kırılmış cevher içinden aşağıya süzülürken uranyumu da özütleyerek içeriğine almakta, yüklü çözelti tabanda toplanmaktadır. Tabanda toplanan çözelti içindeki de değişik yöntemlerle kazanılarak sarı pasta üretilmektedir.

Şekil 1.31'de yiğinda özütleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1.31: Yiğinda özütleme yöntemi

Cevherin özelliğine göre özütlemeye asit ya da alkali özellikli kimyasallar kullanılarak uranyum çözeltiye alındığı iki değişik yığın özütleme yöntemi uygulanabilmektedir. Klasik yöntemde cevher kırılıp altı geçirimsiz, hafif meyilli bir zemin üzerinde yığın oluşturulmaktadır. Diğer yöntemde 1.0-25 mm arası kırılmış cevher tank, oluk ya da ve benzeri bir ortamda stoklanmakta, stok üzerinden özütleme kimyasalı verilmektedir. “Perkolasyon” ya da “vat özütleme” olarak da bilinen bu yöntem yığında özütlemenin bir çeşit tankta uygulanması olup maliyeti daha yüksektir. Çünkü her özütleme döngüsü sonrası özütlenmiş cevherin boşaltılıp yerine yenisinin doldurulması gerekmektedir. Çoğu zaman bu yöntemin uygulanması yerine yığın özütlemeye yığın yüksekliği düşük tutulmaktadır.

Uygun ortamlarda oluşan, bu ortamda beslenebilir çoğalan *thiobacillus ferro-oxidans* gibi bakteriler de yığında özütlemeyi desteklemektedir. Ancak kırılmış cevher boyutunun, mineralojik ve kimyasal yapısının özütlemeye uygun olması, kil gibi şişerek yığın geçirgenliğini olumsuz yönde etkileyip özütleme kimyasallarının süzülmesini engelleyecek malzeme içermemesi gerekmektedir.

1.14.5.2.8 Bakteri özütlemesi

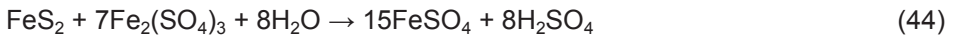
Yığın özütlemeye *thiobacillus ferro-oxidans* bakterisi demiri Fe^{+2} değerden Fe^{+3} değerli demire yükseltmektedir. Safsızlık olarak karbonat ya da bikarbonat mineralleri içeren cevherlerin özütlenmesinde daha çok asit kullanması gerekmektedir. Bu cevherlerin özütleme öncesi atmosfer ortamında klorinle kavru olarak çözülebilirliği artırılmaktadır.

Sülfürlü uranyum minerallerinin bakteri desteği ile özütleme olanağı vardır. Beslenme, yaşama ve üremeye uygun ortam bulunduğu *thiobacillus ferro-oxidans* sülfür mineralleri ile uranyumu indirgeyen asidik ferrik sülfat çözeltisi üretmektedir.

Bakteri özütleme ortamında meydana gelen tepkimeler biraz karmaşıktır. Sülfürlü ortamda prit oksitlenerek ferik sülfat ve sülfürik asit oluşturmaktadır:



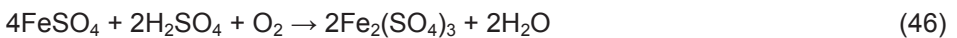
Ferrik sülfat tarafından pritin oksitlenmektedir:



Ferrik sülfat tarafından U^{+4} değerli uranyum oksitlenerek U^{+6} değerli uranyuma indirgenmektedir:



Fe^{+2} değerli ferrous demir bakteriler tarafından Fe^{+3} değerli demire oksitlenmektedir:



Özütleme ortamında bulunan NH_4^- , Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} iyonları da bakterileri beslemektedir. Bakteri özütlemeye zor olan uygun şekilde özütleme ortamındaki şartların sürekliliğini sağlamaktır.

1.14.5.3 Özütleme uygulamaları

Cevherlerde uranyum oksit uraninit ($\text{U}^{4+}_{1-x}\text{U}^{6+}_x$) O_{2+x} ile uranyum silikat olarak da kofinit $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ birinci mineral olarak bulunmaktadır. Birincil mineraller yeraltı su seviyesinin altında oluşmuşlardır. Cevherde ikincil uranyum mineralleri de birincil minerallerin değişik atmosfer, pH, sıcaklık, basınç gibi fiziksel ve kimyasal şartlar altında oksitlenmeleri ile oluşmuş ve daha karmaşık yapıdadır. Uranyum taşıyan yeraltı sularının buharlaşması ile oluşmuş yataklar da birincil uranyum yatakları olarak değerlendirilmektedir.

İkincil uranyum minerallerini karnotit, tiyamunit, metatiyamunit, salenite, sklodovskit, torbernit, metatorbernit oluşturmaktadır. Çoğu bakır yatağı uranyum da içermektedir. Terbernit ve metatorbernit mineralleri bakır-uranyum potasyum hidroksittir.

Uraninit ve kofinit dışındaki uranyum mineralleri genellikle niobium, tantalum ve titanyum ile birlikte bulunmaktadır. Karnotit, tiyumunit ve metatyumunit mineralleri sarı uranyum vanadyum hidroksit olarak bilinmekte olup suda çözeltiye geçebilmektedir.

Uranyum hidroksitlerle birlikte sülfat, karbonat veya anyonlar UO_2^{+2} ile becerelit ve gummit gibi bileşikler yapmaktadırlar

Uranyum minerallerinin özütlenmesinde:

- *Minerallerdeki uranyum alkali ya da asitle kolayca özütlenip çözeltiye alınabilmektedir.*
- *Uraninit ve kofinit gibi bazı minerallerin özütlenmesi için oksitleyici gerekmektedir. Bu mineraller pH 1.8-2.0, 40°C sıcaklık aralığında 12 saatte özütlenmektedir. Daha uzun süreklilikte özütlemeye ve ortam pH değerinin daha yüksek olması durumunda bazı safsızlıklar da çözeltiye geçmektedir.*
- *Gummit, bekerelit, autunit, saleeit, sklodovskit, torbernit, uranofan, karnotit gibi U^{+6} değerli uranyum içeren minerallerin özütlenmesinde oksitleyici gerekmemektedir.*
- *Bazı cevherlerin içerdiği uranyumun çözeltiye alınabilmesi daha zor olup cevherin içerdiği safsızlıklar özütleme sürecini belirlemektedir. Bu cevherler birkaç değişik uranyum oksit içermektedir.*
- *En önemli uranyum minerallerinden biri brannerit olup bu mineralin alkali özütleme ile çözeltiye alınması olanağı yoktur.*
- *Özütlemeye yeterli miktarda asit ve doğru oksitleyici kullanıldığında, safsızlıkları etkilemeden uranyumu çözeltiye alma olanağı vardır.*
- *Özütleme sonucunda çözeltiye geçen uranyumun çökmemesi için ortamda serbest asidin olması çok önemlidir.*

Uranyum minerallerinin içerdiği safsızlıklar özütleme süreci için önemlidir. Cevherin içerdiği kuvarsın özütlemeye fazla etkilenmemesine karşın miktar olarak cevherin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Karbonat mineralleri özütleme sürecini belirlemektedir. Uranyumun özütlediği pH değerinde karbonat mineralleri de asitle tepkimeye girmektedir. pH değeri 1.2 olduğunda manyezit ortamdan etkilenmemektedir. Dolomit ve siderit nispeten yavaş tepkimeye girmektedir. Tamamının etkilenmesi için dolomitin pH 1.8 değerinde, 40°C sıcaklıkta, 0.5-1.0 saat arasında ortamda kalması gerekmektedir. Bu davranışıyla dolomit özütleme ortamında yavaş tepkimeye girerek CaSO_4 oluşumunu geciktirmektedir.

Apatit asidik ortamda alkali ortama göre daha az aktiftir. Oranına bağlı olmaksızın az asit ile tepkimeye girmektedir. pH değeri 1.5'den düşük olduğunda apatit yeteri kadar çözünmektedir. Çözeltiye alınmış fosfat demir iyonları ile karmaşık bileşikler oluşturarak ortamdaki oksitlenmeyi olumsuz yönde etkilemektedir. pH değeri 2.0'nin altında kalmadığı sürece özütleme sonrası ortamdaki fosfat uranyumun çökmesine neden olmaktadır.

Uranyum rezervleri değişik silikat mineralleri de içermektedir. Silikatlar özütleme ortamında değişik tepkimeler vererek bazı silikatlar asitle kolay çözülürken bazıları çözülmemektedir. Klorit, serisit ve değişik kil mineralleri kısmen asitle çözülmemektedir. Özütleme ortamında yüksek oranda çözülebilen mineral yoksa silikatlar özütlemeye etkin olmaktadır. Silikatlar pH değerinin 2.0'nin, özellikle de pH değeri 1.5'in altında olduğunda aktiftir. 40°C sıcaklığın üzerindeki özütleme ortamında tepkimeler daha hızlı ve etkilidir.

Silikat minerallerinin özütlemeye olumsuz etkisi asit tüketimi yanı sıra daha çok şlam oluşturmaya meyilli olmalarıdır. Şlam da koyulaştırıcıda katı-sıvı ayrımı için çökelme sürecinde ve filtrelemede sorun yaratmaktadır. Silikatların klasik katı-sıvı ayrımıyla çöktürülmesi oldukça zordur. Bu ayrımı sağlamak için koyulaştırıcılarda hidrojen bağları oluşturan yüksek molekülü polimer çöktürücüler kullanılarak askıdaki silikat taneleri bir araya getirilip daha hızlı çöktürülmektedir.

Sülfürlü minerallerin özütleme sürecinde davranışlarını tahmin etmek zordur. Prit ve kalkoprit gibi sülfürlü mineraller pH değerinin 1.5 civarında olduğu asidik ortamda çözülmezken kalkozit tamamen, bornit yavaş ve düzenli olarak çözeltiye geçmektedir. Sülfürlü mineraller alkali özütlemeye yüksek miktarlarda özütleme kimyasalı tüketimine neden olmaktadır. Cevherin içerdiği sülfürlü minerallerin özütleme öncesi flotasyonla ortamdan alınması özütleme işlemini kolaylaştırmaktadır. Flotasyondan sülfürlü mineraller atık olarak alınmakta, atıkta oluşan asit de bakteri özütlemesi için uygun iyi bir ortam yaratmaktadır.

Hematit ve manyetit mineralleri pH değerinin 1.0'dan yüksek olduğu ortamlardan etkilenmemektedir. Geotit gibi hidroksitler de yüksek pH ortamında çözülmemektedir.

Florit uranyumun özütleme ortamında çözülmeğe. Sıcaklık ve asit derişimi arttıkça floritin çözünebilirliği de artmaktadır. Floritin çözümlenmesi ve çözümlenmeyen florit minerallerinin çökmesiyle özütleme ortamı karmaşık bir hale gelmektedir.

Kalsiyum sülfat ve diğer sülfat mineralleri sodyum karbonatla alkali özütlemede çözülmektedir.

Grafit ve şeyl gibi karbon içerikli minerallerle birlikte bulunan uranyumun özütlenmesi zordur. Ortamda bulunan karbon uranyumun özütlenmesi için gerekli olan oksitleyici miktarını da artırmaktadır. Gerektiğinde cevher kavruarak mineralin içerdiği karbon kalsinasyonla ortamdan uzaklaştırılmaktadır.

Monazit, ksenotim, bastnaesit ve florensit gibi nadir yer mineralleri pH'ın 1.0'dan daha yüksek ve 55°C sıcaklıkta çözülmemektedir. Kalsiyum içeren florakarbonat ve yitrium fosfat pH değerinin 1.5 olduğu ortamda çözülmektedir.

Yitrium ve ağır nadir yer mineralleri koffinit, uraninit ve brannerit ile beraber bulunmaktadır. Bu mineraller özütlemede uranyumla birlikte çözeltilmeye geçmektedir.

1.15 Uranyumun özütleme çözeltilisinden kazanımı

Özütleme sonucu yüklü çözeltili içeriği cevherin yapısı ve özütlemede kullanılan kimyasallara bağlıdır. Bazen yüklü çözeltili içinden uranyum doğrudan çöktürülmektedir. Bunun için çözeltilinin yük derişiminin artırılması ve içerdiği safsızlıklardan temizlenmesi gerekmektedir. Uranyum yüklü çözeltiliden iki yöntemle kazanılmaktadır:

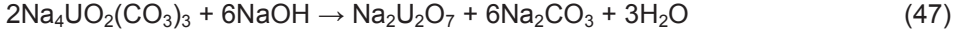
- İyon değerisi,
- Solventle kazanma.

Asitle özütleme sonucu yüklü çözeltili Fe^{+3} , Fe^{+2} , Al, Ca, Cu, Mn, Zn, K, Mg, Na, Ti, Cu, Ni, Pb, V, Mo, Th, nadir yer mineralleri, Cl^- , F^- , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , SiO_2 ve organik bileşikler içermektedir. Bu safsızlıkların bazılarının derişimi uranyumdan yüksek olabilmektedir. Böyle bir durumda doğrudan çöktürme ile temiz bir uranyum elde edilebilme olanağı yoktur. Ortamın yapısını pH ve metallerin oksitlenme dereceleri belirlemektedir.

Karbonat içerikli çözeltili Fe, Ca, Mn ve nadir yer minerallerini kısmen içermesine karşın çözeltildeki CO_3^{-2} ve HCO_3^- derişimi yüksektir.

Özütleme çözeltilisinin 0.5 g/lt'den daha düşük uranyum içermesi durumunda iyon değerisi uygulanmaktadır. Uranyum içeriğinin 1 g/lt'den yüksek, $1.2 < pH$ değerlerinde ve çözeltildeki Fe^{+3} gibi safsızlıkların derişimi de yüksek olduğu anda uranyumun solventle kazanılması daha uygundur.

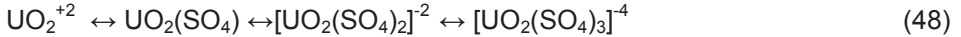
Çözeltideki U_3O_8 derişimi 3g/l'ten düşük olduğunda çözeltinin yoğunlaştırılması gerekmektedir. Derişim 3g/l U_3O_8 'den daha yüksekse çözeltideki uranyum NaOH ilavesiyle sodyum diuranat olarak çöktürülmektedir:



İlk asitlendirildiğinde ortamdaki fazla karbonatın bozulması durumunda çözeltideki uranyum magnezya ya da amonyak ile de çöktürülebilmektedir.

İyon değiştirme asidik özütleme çözeltisinden uranyumun kazanılması için uygun bir yöntemdir. Yöntemde yüklü çözelti kolonlarda reçine içinden geçirildiğinde uranyum iyonları reçine tarafından soğrulmaktadır. Reçine olarak $R_4N^+X^-$ ($X^- = NO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, OH^-$) yapılı reçineler kullanılmaktadır.

Asitle özütleme sonrası yüklü çözeltide U^{+6} değerli uranyum aşağıdaki şekilde bulunmaktadır:



Normal koşullarda bu ortamda uranyum ağırlıklı olarak $[UO_2(SO_4)_3]^{-4}$ formundadır. Uranyum klorid formunda da aşağıdaki şekilde bulunmaktadır:



Alkali özütlemde uranyum çözeltide $[UO_2(CO_3)_3]^{-4}$ şeklinde anyonik bileşik şeklindedir. Soğurma ve sıyırma işlemleri asitle özütlemde olduğu gibidir. Alkali özütlemde karbonat ve bikarbonat içeren yükü alınmış çözelti kullanılmak üzere tekrar özütleme devresinde gönderilmektedir.

Reçinenin çapı 0.3-0.9 mm arasındadır. Ortamın pH değeri arttıkça reçinenin soğurma kapasitesi de artmaktadır. pH 1.2 değerinin altında soğurma oldukça zayıftır. Örneğin 1.2g/l U_3O_8 içeren yüklü bir çözelti soğurma ortamı pH değeri 1.85 olduğunda reçinenin soğurma kapasitesi 77.7g/l U_3O_8 , pH 1.35 olduğunda bu kapasite 59.0g/l U_3O_8 değerine düşmektedir. pH 1.8 değerinin üzerinde de ortamdaki Fe^{+3} derişimi artmaktadır

Soğrulacak özütleme çözeltisinin derişimi arttıkça reçinenin soğurma kapasitesi de artmaktadır. Örneğin 0.2g/l U_3O_8 içeren bir çözeltinin soğrulmasında reçine kapasitesi 42 g/l U_3O_8 iken 3.0g/l U_3O_8 içeren bir çözelti için bu kapasite 90g/l U_3O_8 'ye kadar çıkabilmektedir.

Çözelti içindeki $[Fe(SO_4)_2]^-$, $[Fe(OH)(SO_4)_2]^{-2}$, SO_4^{-4} , H_2SO_4 , $MgSO_4$, PO_4^{-3} , $As_2O_4^{-3}$ iyonları da soğurma ve sıyırma sürecinde uranyum içeriğini etkilemektedir.

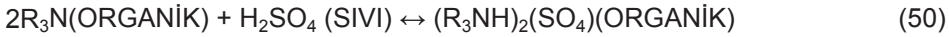
Solventle kazanma, yüksek pH değerlerinde alkali özütleme çözeltisinden uranyumu sıyırabilecek bir solvent olmadığından yalnızca asitle özütleme çözeltilerine uygulanabilmektedir.

Uygulamanın ilk aşamasında yüklü çözelti solventle karıştırılmaktadır. Bu karıştırma sonrası uranyum organik faza geçmektedir.

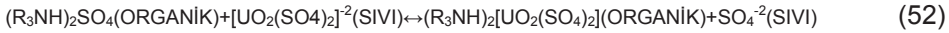
İkinci aşamada organik faza geçmiş uranyum kolanlardan geçirilerek reçine tarafından soğrulmaktadır.

Üçüncü aşamada da kolanlarda soğrulmuş uranyum sıyrılarak sıvı faza alınmaktadır. Sıyırma katyonik formdaki difosforik asit gibi dialkilfosforik asit ya da yüksek moleküllü alkilaminler kullanılmaktadır. Bu süreçte gerektiğinde uranyumun safsızlığını artırmak için birkaç aşamada çözme ve sıyırma işlemi tekrarlanmaktadır.

Soğurma ve sıyırma amin sülfürik asitle sülfat ve bisülfat tuzları oluşmaktadır:

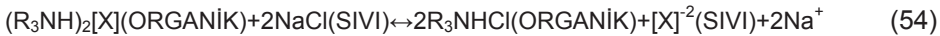


Tepkimeler karmaşık olmasına karşın bu ortamda sıvı fazda anyonik uranyum bileşikleri sülfat ve bisülfat iyonları ile yer değiştirmektedir:

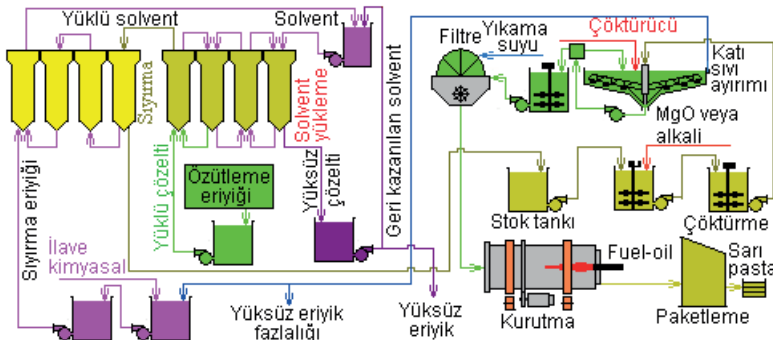


Uranyum soğurması ortamdaki sülfat ve bisülfat iyon derişimi ile doğru orantılıdır.

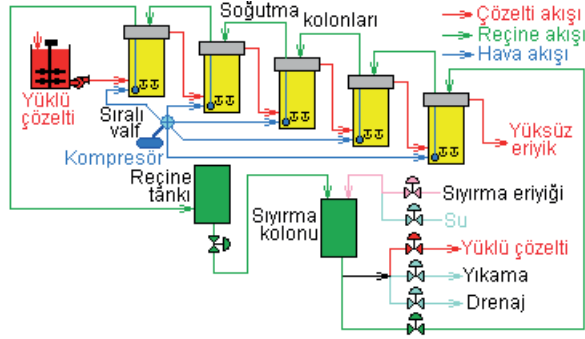
Yüklü solvent 0.05 mg H_2SO_4 içeren 1.0 mg NaCl sıyırma eriyiği ile tepkimeye girerek uranilsülfat $[UO_2(SO_4)_2 = X]$ bileşimini organik fazdan sıvı faza almaktadır:



Solventle kazanma ve sıyırma sürecinin akışı Şekil 1.32 ve Şekil 1.33'de verilmiştir.



Şekil 1.32: Solventle kazanma ve sıyırma

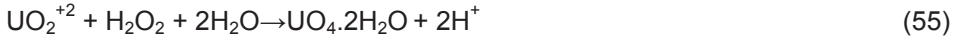


Şekil 1.33: Sıyırma işlemi

Asitle özütleme sonrası içerdiği safsızlıklardan temizlenmiş yüklü çözelti içindeki uranyumun çöktürülmesi için ortamın pH değeri, yönetimi çok kolay olan amonyak ilavesiyle 7-8'e çıkarılmaktadır.

Amonyak yerine NaOH ya da MgO kullanma olanağı da vardır. Amonyak kullanılması durumunda uranyumun kalsinasyonu sürecinde ortamdaki sıcaklığın etkisiyle tamamen uzaklaştığından daha temiz bir ürün elde edilmektedir. Çökme ortamının sıcaklığı 40-60°C civarındadır. Çöküp filtrelenen uranyum 105-200°C sıcaklıkta kurutulmaktadır.

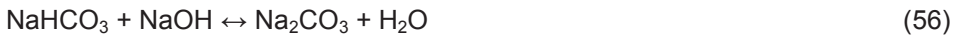
pH değerinin düşük olduğu çözülden uranyum ortama H₂O₂ ilave edilerek de çöktürülebilmektedir:



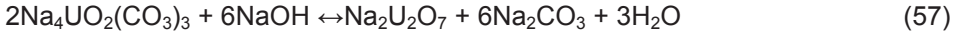
Ortam sıcaklığının 25°C'ın üzerine çıkmaması ve yöntemin uygulanması özel dikkat gerektirmektedir.

Alkali ortamda sodyum diuranatın çöktürülmesi 50-80°C sıcaklıkta yaklaşık 6-12 saat sürmektedir. Çözeltideki malzemenin tamamının çökmesi için çökmüş malzemenin de uzun süre devrede döndürülmesi gerekmektedir. Sıyırma işlemleri sodyum karbonat ile de 2-4 saat arasında gerçekleştirilmektedir. Alkali sistemde yüksüz çözelti devrede tekrar özütleme eriyiği olarak kullanıldığından, uranyumun kazanılması kadar eriyiğin özütleme özelliğinin korunmasına da dikkat edilmektedir. Bu nedenle çöktürme işlemi için NaOH nispeten fazla kullanılmaktadır.

Alkali ortamda uranyumun çöktürülmesi ve eriyiğin tekrar kullanılabilmesi sürecinde ortama ilave edilen kostik soda ortamda karbonata dönüşmektedir:



Sodyum karbonat da sodyum uranil trikarbonat ile tepkimeye girerek uranyumun sodyum diuranat ya da sodyum poliuranat olarak çökmesini sağlamaktadır:



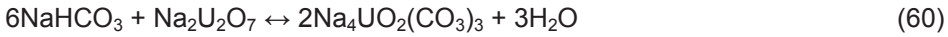
Uranyum çöktükten sonra yüksüz çözelti içinden CO₂ gazı geçirilerek ortamdaki fazla NaOH bu gazla Na₂CO₃'e dönüştürülmektedir:



Ortamda yeteri kadar karbonat ve bikarbonat oluşuncaya kadar çözelti içinde CO₂ gazı geçirilmeye, devam edilmektedir:



Son aşamada özütleme eriyiği devrede kullanılmaya gönderilmeden önce katı-sıvı ayırma aşamasında yıkama suyu olarak kullanılmaktadır.



1.16 Uranyumun kullanım amacına uygun zenginleştirilmesi

2015 yılında ABD'de 1 kg UO₂'nin reaktör yakıtı üretim maliyeti Çizelge 1.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.14: 1 kg UO₂ reaktör yakıt maliyeti

Maliyet unsuru	Birim maliyet	Maliyeti	Oranı
Uranyum	8.9 kg U ₃ O ₈ x \$97	US\$ 862	46%
Dönüşüm	7.5 kg U x \$16	US\$ 120	6%
Zenginleştirme	7.3 SWU x \$82	US\$ 599	32%
Yakıt olarak işleme	1 kg (Yaklaşık)	US\$ 300	16%
Yaklaşık toplam		US\$ 1880	

Bu yakıttan yaklaşık olarak 360.000 kWh enerji üretilmektedir. Enerji üretiminde yakıt maliyeti yaklaşık olarak 0.50-0.55 ¢/kWh olarak hesaplanmaktadır.

Uranyum cevher hazırlama tesislerinde minerallerden dengeli U₃O₈ oksit ya da peroksit olarak zenginleştirilmektedir. Zenginleştirilmiş uranyum konsantresi düşük oranda safsızlıklar da içermektedir. Cevherden zenginleşiminin son aşamasında özütlenmiş uranyum solventle organik faza alınmaktadır:



Ortamdaki solvent vakum ortamında buharlaştırılarak uzaklaştırılmaktadır. Amonyum diuranate (NH₄)₂U₂O₇ ortam nötrale edilerek çöktürülmekte, çöken kısım ısıtılarak katı formda U₃O₈ üretilmektedir. Sonuçta Resim 1.8'de gösterilen U₃O₈ içerikli "yellow cake" olarak bilinen "sarı pasta" üretilmektedir.

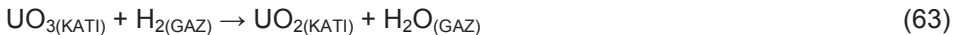


Resim 1.8: U₃O₈ içerikli sarı pasta

U₃O₈ veya uranyum peroksit UO₄.nH₂O rafine edilerek safsızlaştırılmaktadır. Bu işlemden sonra uranilnitrat veya uranyumtrioksite fırınlarda hidrojenle uranyumdioksite indirgenmektedir.

Yaş yöntemde üretilmiş konsantre nitrik asitte çözülmemektedir. Üretilen uranilnitrat UO₂(NO₃)₂.6H₂O çözeltisi ters akışlı koyulaştırıcılarda kerosen veya dodecan içinde çözündürülmüş tributilfosfat ile işleme sokulmaktadır. İşlem sonucunda uranyum organik faza alınmakta, ortamdaki safsızlıklar sıvı fazda kalmaktadır. Organik faz da seyreltik nitrik asitle yıkanarak uranyum sıyrılmaktadır. Uranyum yüklü çözelti buharlaştırılarak yoğunlaştırılmaktadır. Yoğunlaştırılmış konsantre de akışkan yataklı bir fırında kalsine edilerek UO₃, daha yüksek sıcaklıkta da UO₂ elde edilmektedir.

Kuru yöntemle saflaştırılmış U₃O₈ veya yaş yöntemle üretilmiş saf UO₃ fırınlarda H gazı ile indirgenmektedir:



Daha sonra bu malzeme diğer bir fırında HF gazı ile tepkimeye sokularak uranyum tetra florit UF₄ elde edilmektedir. Tetraflorid akışkan yataklı bir fırında florin gazı ile tekrar tepkimeye sokularak UF₆ üretilmektedir. Tetra florit sıvı HF kullanılarak uranyum dioksitten yaş olarak da üretilebilmektedir:



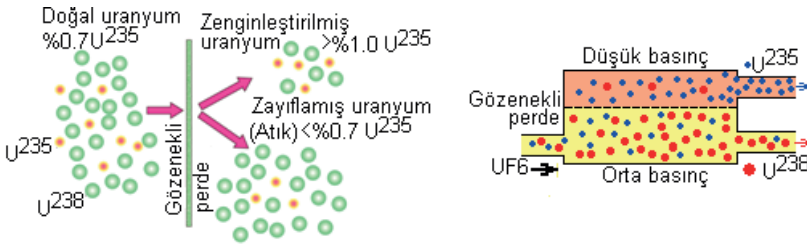
Nemli UF₆ yüksek korozyon etkisine sahiptir. Sıcakta UF₆ gaz halinde olmasına karşın düşük sıcaklık ve uygun basınç altında sıvılaşmaktadır. Sıvı UF₆, doldurulduğunda 15 ton ağırlığında olacak şekilde özel yapılmış silindirik tanklarda stoklanmaktadır. Silindir içindeki sıvı soğutulduğunda beyaz kristaller halinde katı faza geçmektedir. UF₆ de katı halde kristal formunda taşınmaktadır.

Uranyumun yakıt olarak kullanılabilmesi için UF_6 içerdiği safsızlıklardan temizlenerek daha da zenginleştirilmesi gerekmektedir.

UF_6 'nin zenginleştirilmesinde çok değişik yöntemler uygulanmaktadır. U^{235} içeren UF_6 molekülleri diğerlerine göre %1 oranında daha hafiftir. UF_6 'nin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemlerde ayırma esası bu farka dayanmaktadır.

1.16.1 Gaz difizyonu ile zenginleştirme

Şekil 1.34'deki sisteme UF_6 gazı yüksek basınçla beslenmektedir. Bu gazın basıncı hacimce geniş bir ortama girdiğinde düşmektedir. Araya konulmuş dar gözenekli ayırma perdesinden hafif moleküllü parçalar ağır moleküllere göre daha hızlı ve daha fazla geçmektedir.



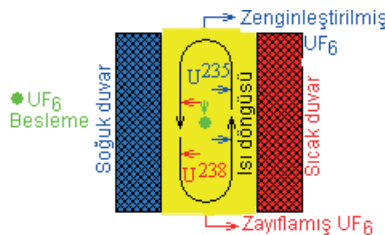
Şekil 1.34: Gaz difizyonu ile zenginleştirme sistemi

Bu yöntemle istenilen zenginlikte ayırma yapılabilmesi için uygulamanın binlerle ifade edilen ardışık şekilde tekrarlanması gerekmektedir.

Yöntemde ayırma perdesi, perdenin yapıldığı malzeme ve perdenin porozitesi çok önemlidir. UF_6 çok korozif bir malzeme olduğundan perde yapımında nikel ve alüminyum oksit kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanabilmesi için havadan izole edilmiş çok geniş alanlara gereksinim duyulmaktadır.

1.16.2 Isısal difüzyon

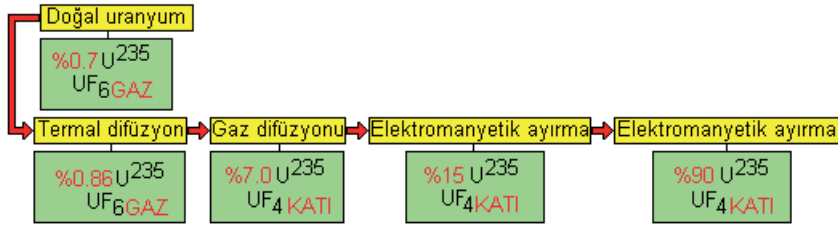
Şekil 1.35'deki gibi biri soğuk diğeri sıcak duvar arasındaki hava akışı sıcak duvarda yukarı, soğuk duvarda aşağı yöndedir. Bu ortamda hafif olan UF_6^{235} molekülleri sıcak, ağır olan UF_6^{238} molekülleri de soğuk duvara doğru yönelmektedir. Bu ayırımın sonucunda ortamdan UF_6^{235} üstten, UF_6^{238} da alttan alınmaktadır.



Şekil 1.35: Isısal difüzyon

Isısal difüzyon ince gaz ya da sıvı filmi içeriğindeki ayrı izotopların ayrılması için uygulanmaktadır. Yöntem basit olmasına karşın uygulamada birkaç bin adet 15 metre yüksekliğinde kolonlara gereksinim duyulmaktadır.

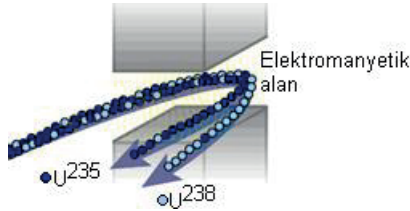
II.Dünya savaşında silah amaçlı ilk uranyum zenginleştirme uygulama çalışmaları ABD'de New Mexico Eyaletinin Los Alamos laboratuvarında yapılmıştır. Bu uygulamada Şekil 1.36'da gösterilen aşamalarla %0.7U²³⁵,dan yaklaşık 60 kg %90U²³⁵ üretilmiştir.



Şekil 1.36: İlk UF₆ zenginleştirme süreci

1.16.3 Elektromanyetik zenginleştirme

U²³⁵ ve U²³⁸ manyetik ortamda hareket ettiklerinde ağırlıkları nedeniyle Şekil 1.37'deki gibi hareket yörüngelerinde çok az farklılık oluşmaktadır. Ağır olan U²³⁸ iyonu daha hafif olan U²³⁵ iyonuna göre daha geniş çaplı bir yörünge üzerinde hareket etmektedir. Elektromanyetik zenginleştirme yöntemin uygulanmasında bu farklılık kullanılmaktadır.



Şekil 1.37:Elektromanyetik alanda U²³⁵ ve U²³⁸ iyonlarının yörüngesi

1.16.4 Merkezkaç uygulamalı zenginleştirme

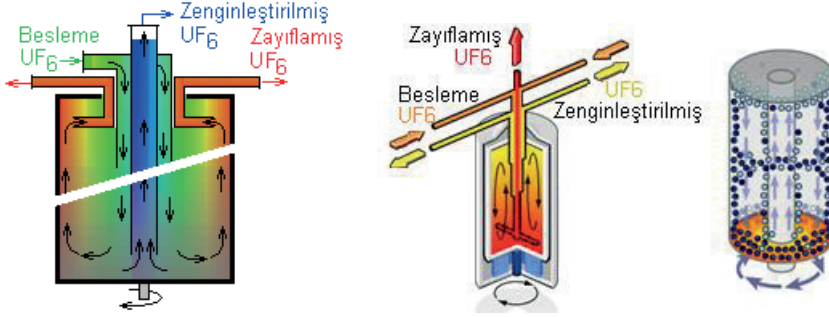
Günümüzde uranyum zenginleştirmede kısa zamanda zenginleştirme, düşük enerji tüketimi, etkin sonuç veren merkezkaç yöntemi uygulanmaktadır.

Yöntemde UF₆ gazı merkezkaç sistemine yerleştirilmekte, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle, siklondaki ayırmaya benzer şekilde, ağır U²³⁸ molekülleri cidarlara, hafif U²³⁵ molekülü de merkezde toplanarak ortamdan ayrı ayrı alınmaktadır.

Kullanılan merkezkaç cihazlarının çapları 20-50 cm, yükseklikleri de 1-15 metre arasında değişmektedir. Dönü hareket hızı 50.000-70.000 d/d arasındadır. Bu

da bir taneciğin cidarda 400-500 m/sn yol alması ve üzerine normal yerçekiminin milyon katı kuvvet uygulanması anlamına gelmektedir.

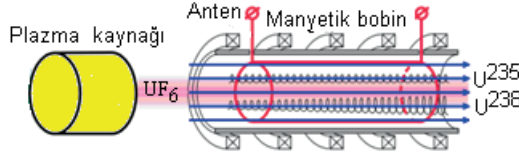
Şekil 1.38’de merkezkaç kuvvetiyle zenginleştirme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.38: Merkezkaç sistemi

1.16.5 Plazma ayırma

Plazma ayırmada Şekil 1.39’daki gibi silindirik bir vakum ortamında manyetik alandan U^{235} ve U^{238} plazma haline getirilmektedir. Bu ortamda hafif olan U^{235} iyonu daha hızlı ve daha dar çaplı, ağır olan U^{238} daha yavaş ancak daha geniş çaplı spiral şeklinde hareket etmektedir. Bu ortamda hareket yörüngeleri de değiştiğinden çıkışta iki iyon ayrılmaktadır.



Şekil 1.39: Plazma ayırma sistemi

1.16.6 Diğer yöntemler

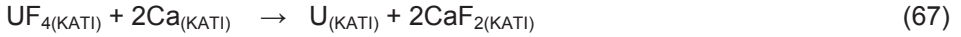
Lazer, aerodinamik yöntem, Zippe merkezkaç yöntemleri de uranyumun zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır.

1.17 Yakıt bataryalarının hazırlanması

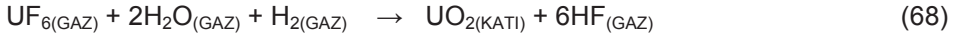
Zenginleştirilmiş UF_6 ’dan nükleer yakıt olarak kullanılacak yakıt çubuğu üretmek için bu gazın da bir dizi işlemden geçirilmesi gerekmektedir. Bunun için UF_6 önce hidrojen gazı ile UF_4 ’e indirgenmektedir:



Metal uranyum UF_4 ’ün çok iyi indirgeme elementi olan Ca ya da Mg ile indirgenmesi ile üretilmektedir:

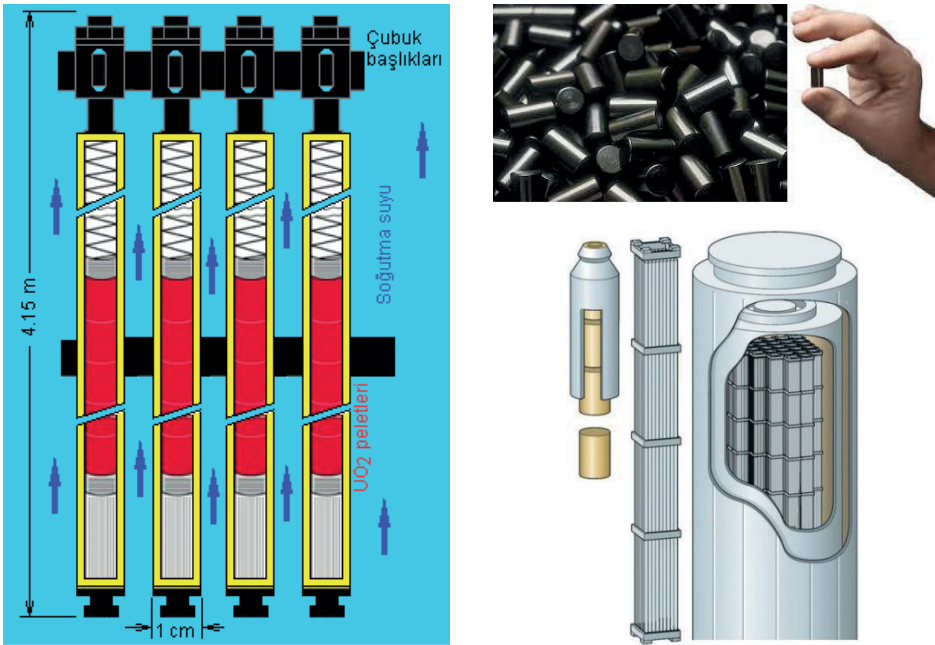


Reaktörlerde yakıt olarak kullanılan UO_2 aşağıdaki tepkime ile elde edilmektedir:



Reaktör yakıtı olarak kullanılacak UO_2 preslenip pelet haline getirilerek 1400°C sıcaklıkta sinterlenmektedir. Sinterlenmiş peletler zirkon ya da kaliteli paslanmaz çelikten yapılmış metal tüplere helyum gazı ortamında yerleştirilerek sızdırmaz şekilde ambalajlanmaktadır.

Şekil 1.40'da yakıt bataryası gösterilmiştir.



Şekil 1.40: Yakıt bataryası

1.18 Sonuç

Uranyum doğru insanların ya da doğru ülkelerin elinde doğru kullanıldığı sürece çok önemli bir enerji kaynağıdır. Hatta gelecekte araçların hareket sistemi olarak da kullanım olanağın gündeme gelmesi hiç de şaşırtıcı olmayacaktır. Ancak II.Dünya savaşında uranyumun silah olarak kullanılması insanlık tarihine düşmüş kara bir lekedir.

Nükleer güç ilk olarak II. Dünya Savaşında ABD tarafından Japonlara karşı bomba olarak kullanılmıştır. Bu bombalar savaş sırasında ABD tarafından New Mexico eyaleti Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Laboratuvarda atom fizikçisi Prof. Dr. Oppenheimer başkanlığındaki 5700 kişilik bilim insanı U^{235} ve Pu^{239} 'den iki nükleer bomba üretmişlerdir. 1945 yılı U^{235} 'ten yapılan ilk atom bombasına "Little Boy, Küçük Çocuk", 1.5 kat daha güçlü ve Pu^{239} 'dan yapılan ikinciyeye de "Fat Man, Şişmam Adam" adı verilmiştir.

İlk bomba atılmadan önce, New Mexico Alamogordo çölünde bombanın denemesi yapılmış, denemeden başarılı(!) sonuç alınmıştır.

ABD tarafından 6.Ağustos.1945 günü ilk uranyum bombası Japonların dışarıda en kalabalık oldukları zaman olarak belirlenen yerel saatle 08¹⁵'de "Enola Gay" adlı B-29 bombardıman uçağından Hiroşima'ya, plütonyumdan üretilmiş ikinci bomba da 9.Ağustos.1945'te Nagazaki'ye atılmıştır.

Bombaların etkisi ile 300.000'den fazla insan ölmüş, 250.000 kişi yaralanmış ve radyoaktif serpintilerden zarar görmüştür. Bombaların insan ve doğaya etkisi uzun yıllar devam etmiştir. ***Bu iki bombardıman olayı tarihte emperyalizmin sürdüğü kara bir leke olarak ilelebet kalacaktır.***

Ülkemizde 2016 yılı itibarı ile kurulmuş bir nükleer santral bulunmamaktadır. Ancak 2010 yılında Akkuyu'da bir santralin kurulması için bir ülke ile anlaşma yapılmıştır. Bun anlaşma TBMM'de kabul edilerek 6 Ekim 2010 gün ve 27721 sayılı Resmi Gaztede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/10/20101006-6.htm>

Ülkemizin enerji gereksiniminin karşılanmasında dışa bağımlık her geçen yıl artmaktadır. Ülkemiz sanayisi, dolayısıyla ekonomisi dışa bağımlı hale gelmiştir. Dış ticaret açığı sürekli artmaktadır. Bu ortamda ülkemizde kurulabilecek bir nükleer santral için yapılacak sözleşmelerde temel ilkeler; yapılacak nükleer santrallerin Türk mühendis, uzman ve teknisyenlerinin denetim ve kontrolünde kurulması, çalıştırılması, santralimizin yakıtını kendi kaynaklarımızdan üretebilecek teknolojiye ülkemizin sahip olması, ülkemiz bilim insanlarının nükleer enerji konularında yapacakları araştırmalara engel ve sınırlama getirilmemesi olmalıdır. Nükleer santral atıklarının bilimsel olarak bertarafına da çözüm üretilmelidir. Santral yapımında yer seçimi, proje yönetimi, mali yönetim, teknik kontrol, işletme ve güvenlik altyapısı için doğru kararlar verilmelidir. Aksi taktirde nükleer teknolojiye de dışa bağımlı olmaktan kurtulmamızın şansı yoktur. Sonuçta bu konularda karar vermeden önce çok iyi düşünülmesi gerekmektedir. Bu bakış açısına değerlendirildiğinde 2010 yılında TBMM'de onaylanmış sözleşmenin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Not: Bu çalışmada 2014 yılında yayınlanan "Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme" kitabı (ISBN 978-975-96779-5-4, 1500 sayfa) II. Cildinin Uranyum başlığı altındaki 61. bölümü de (sayfa 1431-1478) kullanılmıştır.

1.19 Kaynaklar

- ✚ Coulson, J.M., Richardson, J.F., Chemical Engineering, Vol. 2, Pergamon Press, Oxford and New York (1968).
- ✚ Duchamp, C , Danigo, C , Gilo, C , Polgaire, J.-L., Savin, B., "The uranium mill of the Compagnie Miniere Dong-Trieu: Project preparation and implementation", Development of Projects for the Production of Uranium Concentrates (Proc. IAEA Tech. Committee Mtg Vienna, 1985), IAEA, Vienna (1987) 113-124.
- ✚ Floter, W., "The Key Lake project", Development of Projects for the Production of Uranium Concentrate (Proc. IAEA Tech. Committee Mtg Vienna, 1985), IAEA, Vienna (1987) 79-91.
- ✚ Hester, K.D., "Liquid-solid separation", Lecture Notes, Short Course on Extractive Metallurgy of Uranium, University of Toronto, Toronto (1978).
- ✚ http://www.chemcases.com/nuclear/nc_16.html
- ✚ <http://www.world-nuclear.org/>
- ✚ <http://www.world-nuclear.org/>
- ✚ <http://www.worldnuclearreport.org/-2015-.html>, The World Nuclear Industry Status Report 2015,, By "Mycele Schneider, Independent Consultant, Paris, France", "Antony Froggatt, Independent Consultant, London, U.K.", "Julie Hazemann, Director of Ener WebWatch, Paris, France", "Tadahiro Katsuta, Associate Professor, School of Law, Meiji University, Tokyo, Japan", "M.V. Ramana, Nuclear Futures Laboratory & Program on Science and Global Security Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, U.S.", "Steve Thomas, Professor for Energy Policy, Greenwich University, U.K."
- ✚ Ifill, R.O., Cooper, W.C., Mineralogical and process controls on the oxidative acid leaching of radioactive phases in Elliot Lake, Ontario, uranium ores. I uraninite, uranothorite and monazite, CIM Bull. 82 925 (1989) 65-74.
- ✚ Innovation and Trends in Uranium Ore Treatment, By Alan Taylor ALTA Metallurgical Services, Presented by Alan Taylor, 2006 ISBN 92-0-145190-3, ISSN 0074-1914
- ✚ International Atomic Energy Agency, Manual on Laboratory Testing for Uranium Ore Processing, Technical Reports Series No. 313, IAEA, Vienna (1990) 49-50.
- ✚ Ives, K.J. (Ed.), The Scientific Basis of Flocculation, NATO Advanced Study Institutes Series, Series E: Applied Science, No. 27, Sijhoff and Noordhoff, Alpen aan den Rijn, Netherlands (1978) 369.
- ✚ Kirk, R.E., Othmer, D.F. (Eds), Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd edn, Vol. 10, Wiley, New York (1982) 289-293.
- ✚ Lyaudet, G., Michel, P., Moret, J., Winter, J.M., "A new unit for purification of uranium solution in the Lodeve mill", Development of Projects for

- the Production of Uranium Concentrates (Proc.IAEATech.Committee Mtg Vienna,1985), IAEA, Vienna (1987)55-67.
- ✚ Manual of Acid In Situ Leach Uranium Mining Technology, International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA-TECDOC-1239, August 2001.
 - ✚ Mccready, R.G.L., GOURL, W.D., "Bioleaching of uranium at Denison Mines", Biohydrometallurgy (Proc. Int. Symp. Jackson Hole, 1989), Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Ontario (1990) 477-485. Chapter 5. Leaching 135
 - ✚ Merritt, R.C., The Extractive Metallurgy of Uranium, Johnson Publishing Co., Boulder, CO (1971) 121-125.
 - ✚ Merrill Ford, Paladin Energy Limited, The Evolution of Uranium Extraction Technology, MINTEK's 75th Anniversary Conference, 4 June 2009
 - ✚ Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York (1985) 13-26 to 13-29.
 - ✚ Molebogeng Nkobane, Rudzani Sigwadi, Ambali Abdulkareem and Ayo Afolabi, Scoping and Leaching Studies of Uranium from its Phosphate Ores International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences (ICCEES'2011) Pattaya Dec. 2011
 - ✚ Moret, J., Morin, J., "On-line analysis of free acidity during the acid leaching of uranium ores", Proc. Deuxieme Congres du Groupe Francais de Genie, 1989, Librairie Technique Lavoisier, Paris, Vol. 3, No. 7 (1989) 111-115.
 - ✚ Nuclear Energy Institute, <http://www.nei.org/>
 - ✚ Production of Yellow Cake and Uranium Fluorides, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1980, Proceedings of an Advisory Group Meeting Paris, 5 - 8 June 1979
 - ✚ Prof. Dr. Hasan Saygın, Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli Büyük Nükleer Kazalar ve Nükleer Enerji Teknolojisinin Evriminde Doğurdukları Sonuçlar, II. Bölüm.
 - ✚ Pugliese, J.M., Larson, W.C., "Uranium in situ mining research by the US Bureau of Mines A review", In Situ Leaching of Uranium: Technical, Environmental and Economic Aspects (Proc. IAEA Tech. Committee Mtg Vienna, 1987), IAEA-TECDOC-492, IAEA, Vienna (1989) 37-62.
 - ✚ Snodgrass, W.J., "The chemistry of 226Ra in the uranium milling process", The Environmental Behaviour of Radium, Technical Reports Series No. 310, Vol. 2, IAEA, Vienna (1990) 5-26.
 - ✚ Türkiye'de Uranyum Madenciliği Ve Nükleer Yakıt Üretiminin Ekonomik Etkisinin Değerlendirilmesi", Şubat 2015
 - ✚ Uranium Extraction Technology, Technical Report Series, No. 359, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1993, ISSN 0074-1914, 359, STI/DOC/10/359, ISBN 92-0-103593-4

- ✦ Uranium Extraction, by D. Lunt, GRD Minproc Limited Perth, P. Boshoff, GRD Minproc Limited, Johannesburg, M. Boylett, RD Minproc Limited, and Z. El-Ansary, GRD Minproc Limited, Perth. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007. This paper was first published at the SAIMM Conference, Uranium in Namibia, 14–16 May 2007.
- ✦ Uranium Heap Leaching Gaining Popularity, By Alan Taylor ALTA Metallurgical Services Australia Presented by Alan Taylor
- ✦ Uranium Project Development- Adopting The Right Approach, Presented by Alan Taylor, ALTA Metallurgical Services
- ✦ Uranium Recovery From Acid Leach Liquors: IX or SX?, By Deon van Tonder Bateman Engineering, South Africa, Marthie Kotze MINTEK, South Africa, Presented by Bert Van Hege Bateman Engineering, South Africa At the Alta 2007 Uranium Conference
- ✦ Uranium, Volume 5, Technical Resource Document Extraction and Beneficiation of Ores and Minerals, January 1995, EPA530-R-94-032, NTIS PB94-2008987, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste Special Waste Branch, 401 M Street, SW, Washington, DC 20460.
- ✦ Vetter, D.A., Barker, I.S., Turner, G.A., A dynamic uranium-leaching model for process-control studies, J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 89 11 (1989) 347-354.
- ✦ Weiss, N.L. (Ed.), SME Mineral Processing Handbook, American Institute of Mining, metallurgical, and Petroleum Engineers, New York (1985) 13-26 to 13-29.
- ✦ Wills, B.A., Mineral Processing Technology, 4th edn, Pergamon Press, Oxford and New York (1988) 645-650.

2.Toryum

Toryum, uranyuma benzer şekilde doğada serbest halde olmayıp, 60 civarında mineralin içeriğinde bulunabilen bir elementtir. Bunlardan monazit [(Ce,La,Nd,Th,Y)PO₄], torianit (ThO₂) ve torit [(Th,U)SiO₄] toryum üretiminde kullanılmaktadır. Monazit aynı zamanda önemli bir nadir yer element mineralidir.

Resim 2.1: Monazit



Resim 2.2: Torit



Monazit mineralleri lantanitleri içeren kırmızı-kahverengi renkli bir fosfat mineralidir. Bu mineral önemli bir toryum, lantan ve seryum kaynağıdır. Genellikle küçük ayrılmış kristallerden oluşmaktadır. İçeriğindeki göreceli element bütünlüğüne göre dört çeşidi bulunmaktadır:

- **Monazit-Ce (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO₄**
- **Monazit-La (La, Ce, Nd, Pr)PO₄**
- **Monazit-Nd (Nd, La, Ce, Pr)PO₄**
- **Monazit-Pr (Pr, Nd, Ce, La)PO₄**

Monazit, sertliği 5-5.5, özgül ağırlığı 4.6-5.4 gr/cm³, kırmızımsı kahverengi, kahverengi, sarımsı kahverengi, pembe, sarı, yeşilimsi grimsi beyaz renklerinde bir mineraldir. Zirkondan daha yumuşak olması ile ayrılır.

Saf toryum birkaç ay boyunca parlaklığını koruyan gümüş renginde bir metaldir. Yavaş oksitlendiğinde gümüş rengi önce griye sonra da siyaha dönüşmektedir. Toryum metali normal ortamda beyaz parlak bir ışıkla yanmaktadır.

Toryum oksidin ThO₂ ergime sıcaklığı 3.300°C'dir. Bu özelliği ile ThO₂ ampul üretiminde, fener gömleği, ark ışık lambaları, kaynak elektrotları ve ısı dirençli seramiklerde kullanılmaktadır. Cam içeren toryum oksitten, yüksek kırılma indeksi ve dalga boyu dağılımı ile kameralar ve bilimsel cihazlarda kullanılan yüksek kaliteli mercekler üretilmektedir.

2.1 Toryumun kullanım alanları

Yıllardan bu yana toryumun tek başına birincil enerji kaynağı olarak kullanımı araştırılmış, ancak bu araştırmalar yaklaşık 200-250 yıl nükleer santralleri besleyebilecek uranyum rezervlerinin ve ArGe maliyetlerinin gölgesinde kalmıştır.

Bunun yanı sıra toryum içeren kaliteli metal ve malzeme üretimine yönelik araştırma ve çalışmalar daha çok önemsenmiştir.

Toryum ThO_2 olarak 3300°C gibi yüksek ısı dayanımına sahiptir. Böyle bir bileşik:

- Havacılık ve uzay araştırmalarında,
- Lamba fitili/gömlükleri, fener, lüks, piknik lambalarında,
- Pota ve seramik parça üretiminde,
- Yüksek kaliteli mercek üretiminde,
- Petrol damıtmada,
- Sülfürik asit üretiminde,
- Amonyakın nitrik aside dönüştürülmesinde katalizör,

Th metal olarak:

- Tungsten lamba filamentleri kaplamasında,
- Elektronik cihazlarda ve TV'lerde,

Th-Mg alaşımı olarak:

- %2-3 Th içerikli hafif Th-Mg alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda dayanımı ve çatlamaya karşı direnci yüksektir. Bu özelliği ile hava taşıtlarının üretiminde,

Toryum nitrat olarak:

- Toryum ergime sıcaklığı ve bu sıcaklıklarda dengeli bir ark oluşturması nedeniyle gaz altında tungsten ark kaynaklarında,
- Magnetron katot tüpleri ve hareketli dalga tüpleri (TWT) üretiminde kullanılmaktadır. Bu tüpler mikro dalga frekansında elektron yaydıklarından hava trafik kontrolü, gözlem, hava tahmini radar sistemlerinde, silah sistemlerinde ve mikro dalga fırınlarda kullanılmaktadır.

2.2 Nükleer yakıt olarak toryum kullanımı

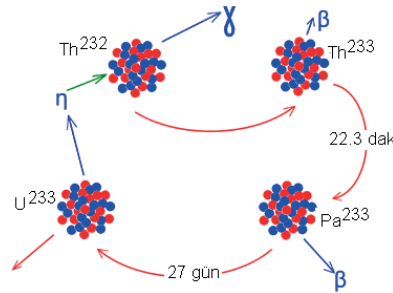
Toryum kendiliğinden bölünebilme yeteneğine sahip değildir. Yapılmış araştırmalarda da toryumun tek başına nükleer yakıt olarak kullanılması olanaklı görülmemiştir.

Sürdürülen araştırma sonuçlarının ne getireceğini zaman gösterecektir. Almanya, Hindistan, Japonya, Rusya, Romanya, Arjantin, İngiltere ve ABD'de toryumun yakıt olarak kullanımına yönelik ArGe çalışmaları sürdürülmektedir. Bu ülkelerde küçük pilot boyutta deneme ve araştırmalara yönelik birkaç tesis bulunmaktadır. Günümüzde tek başında toryumun yakıt olarak kullanıldığı ticari ölçekli nükleer santral de bulunmamaktadır.

Toryumun doğadaki tek izotopu Th^{232} olup yarılanma ömrü çok yüksek olduğundan çok yavaş bozunmaktadır. Toryumun bölünüp yakıt olarak kullanım süreci uranyumla karşılaştırıldığında daha zordur. Th^{232} izotopunun bir nötron absorbe ederek fisil olan U^{233} 'e dönüştürülmesi gerekmektedir.

Th^{232} düşük enerjili nötronları absorbe ederek önce kararlılığı daha az olan Th^{233} 'e dönüşmektedir. Yarılanma süresi 23 dakika olan Th^{233} bir beta parçacığı yayarak yarılanma süresi 27 gün olan Pa^{233} 'a dönüşmektedir. Pa^{233} bir beta ve gama parçacığı yayarak bölünebilen ve yarılanma süresi 163 bin yıl olan U^{233} 'a dönüşmektedir. Böylece Th^{232} , U^{235} veya Pu^{239} gibi fisil bir maddeyle birlikte kullanılabilir.

Şekil 2.1'de Th^{232} fisil olan U^{233} 'e dönüşüm süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Th^{232} 'nin fisil olan U^{233} 'e dönüşümü

Toryum yakıt döngüsünde uranyumdan daha az plütonyum ve diğer geçiş-uranyum elementleri üretildiğinden, toryum, nükleer santrallerin temiz bir yakıtı olacağı kabul edilmektedir.

Toryumun tek başına nükleer yakıt olmamasına karşın toryum kullanımı ile nükleer santrallerde %20-30 civarında uranyum tasarrufu sağlanacağı düşünülmektedir. Toryum-uranyum karışımı yakıtlar uranyum yakıtına göre daha az plütonyum üretmektedir. Ayrıca yüksek yanma oranına sahip karışım, yakıtın rektörlere daha geniş zaman aralıklarında yüklemesini gerektirdiğinden nükleer tesisin etkinliği artmaktadır.

Toryumun değişik formlarda ve uranyumla belirli oranda araştırılarak yakıt olarak aşağıdaki nükleer reaktörlerde kullanılabilir:

- Ağır su reaktörü, "Heavy Water Reactors, PHWRs",
- Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler "High Temperature Gas Cooled Reactors, HTRs",
- Kaynar sulu reaktörler "Boiling (Light) Water Reactors, BWRs",
- Hızlı nötron reaktörleri "Fast Neutrons Reactors, FNRs",
- Ergimiş Tuz Reaktörleri " Molten Salt Reactors, MSR",
- Hızlı reaktörler "Acceleration Driven Reactors, ADS",

2.3 Dünya toryum rezervleri

Dünya toryum rezervleri ve % olarak dağılımı Çizelge 2.1'de verilmiştir.

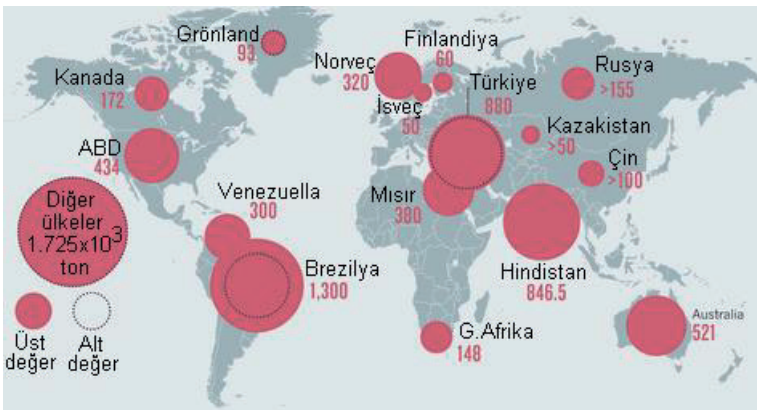
Çizelge 2.1: Dünya toryum rezervleri

Ülke	Ton	Dağılım, %
Hindistan	846.000	13.31
Brezilya	632.000	9.94
Avustralya	595.000	9.36
ABD	595.000	9.36
Mısır	380.000	5.98
Türkiye	374.000	5.89
Venezüella	300.000	4.72
Kanada	172.000	2.71
Rusya	155.000	2.44
Güney Afrika	148.000	2.33
Çin	100.000	1.57
Norveç	87.000	1.37
Grönland	86.000	1.35
Finlandiya	60.000	0.94
İsveç	50.000	0.79
Kazakistan	50.000	0.79
Diğer ülkeler	1.725.000	27.14
TOPLAM	6.355.000	100.00

Kaynak: <http://www.world-nuclear.org/>, 2015

Dünya toryum rezerv dağılımı Harita 2.1'de gösterilmiştir.

Harita 2.1: Dünya toryum rezervleri



Toryum enerji amacıyla üretilmemektedir. Genellikle üretilen toryum alaşımlı çelik üretimi ve ArGe çalışmalarında kullanılmaktadır. Bunun için dünyada önemli bir toryum pazarı oluşmamakta, toryum fiyatları genellikle alıcı-satıcı arasında yapılan pazarlıklarla belirlenmektedir.

2.4 Türkiye'nin toryum rezervi

“Bugün için uranyum ve toryum nükleer enerji hammaddeleri kapsamına girmektedir. Ancak, toryuma dayalı nükleer santrallerin henüz ekonomik boyutta devreye girmemeleri nedeniyle, toryum, halen sırasını bekleyen bir nükleer yakıt hammaddesi durumundadır.”(ETKBk)

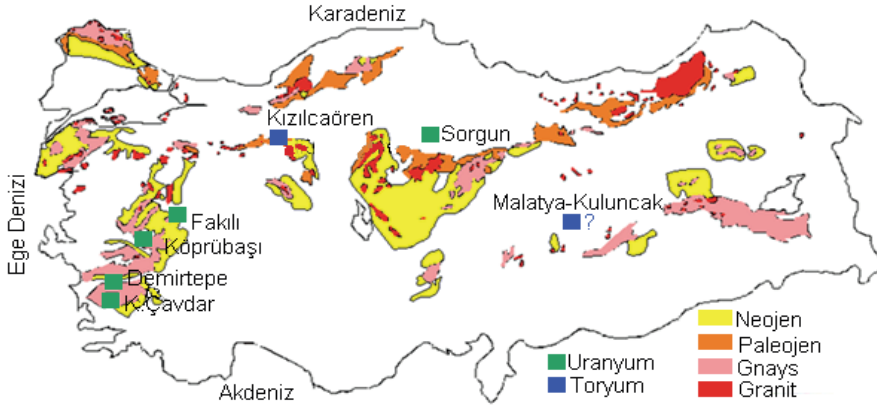
1959 yılı sonlarına doğru MTA tarafından uçakla yapılan araştırmalarla bulunan radyoaktif anomali üzerinde uranyum ve toryum için çalışmalar yapılmış ve Sivrihisar ilçesinin kuzey batısında Kızılcaören, Karkın ve Okçu Köyleri arasında 15 km²'lik bir sahanın toryumun yanı sıra Nadir Yer Elementleri de içerdiği belirlenmiştir.

MTA tarafından yapılan çalışmalar sonunda 1977 yılında, "Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören Köyü Yakın Güneyi Bastnazit-Barit-Florit Kompleks Cevher Yatağı" ile ilgili hazırlanmış rapor sonuçlarına göre bölgedeki cevherin ortalama tenörü %0.2 ThO₂ olup, toplam rezerv yaklaşık 380.000 ton civarındadır.

Ülkemizde toryumla ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar sonunda aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- Sahadaki ekonomik mineraller; florit, barit ve bastnazit'tir. Toryum, kompleks bünyesindeki monazit ve bastnazit minerallerinin kafes yapısında yer almaktadır.
- Kompleks cevhere yatağındaki sadece toryumun kazanılmasına yönelik uygulanacak özütleme işlemiyle toryumun yüksek verimle kazanılabileceği, ancak işletme maliyetinin çok yüksek olması nedeniyle cevherdeki NYE'lerin elde edilmesi sonucu toryumun yan ürün olarak kazanılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.
- Eskişehir-Sivrihisar sahasında yaklaşık 380.000 ton görünür ThO₂ ve önemli miktarda NYE rezervi belirlenmiştir. Toryum tenörü, seçme numunelerde %3'e kadar çıkarsa da yatağın ortalama tenörü %0.2'dir. Bu rezervde tespit edilmiş olan ortalama tenörün düşüklüğü ve rezervin kompleks olması durumu toryumun tek başına ekonomik olarak çıkarılabilir olmaktan uzak olduğu sonucunu çıkarmaktadır.
- Toryum içeren Eskişehir-Sivrihisar cevher yatağındaki, Yaylabaşı ve Kocayayla sektörlerinde yeterli sayıda sondaj yapılmadığından bu bölgelere ait kesin rezerv tespiti yapılamamıştır.
- Malatya-Hekimhan-Kuluncak gibi diğer bölgelerde de gerekli çalışmaların yapılması sonucunda ülkemiz toryum rezervinin artacağı tahmin edilmektedir. Ancak bu konu ile ilgili kesin sonuca götürecek herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Harita 2.2'de Türkiye'deki toryum rezervinin konumu gösterilmiştir.

Harita 2.2: Türkiye'deki toryum rezervi

Nadir yer elementlerinin (NYE) önemi ve kullanım alanı her geçen gün artarak genişlemektedir. Ülkemizde mevcut rezervlerden NYE kazanımına yönelik çalışma yapılarak toryumun yan ürün olarak kazanılması olanağı vardır. Dünyada toryumla ilgili gelişmeleri takip etmek yerine araştırmaların içinde olunabilmesi için nükleer enerjiye yönelik çalışma yapılabilir bir araştırma merkezinin kurulması, yada kurulu olanların geliştirilerek çalışmalara gereken önemin verilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.2: Türkiye'nin toryum dış ticareti

2015 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Monazit, urano; torianid (toryum >% 20) ve diğer toryum cevherleri	24 kg	2.212
Toryum; diğer, işlenmiş	1 kg	1.755
Toryum bileşikleri; diğer, işlenmiş	1 kg	291
Diğer radyoaktif elementler, toryum, bileşik, alaşım, dispersiyon, karışımlar	4 kg	5.350
2014 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Toryum izotopları; ham; döküntü ve hurdalar	2 kg	6.579
Toryum; diğer, işlenmiş	1 kg	121
Toryum bileşikleri; diğer, işlenmiş	1kg	352
Diğer radyoaktif elementler, toryum, bileşik, alaşım, dispersiyon, karışımlar	16 kg	10.276
2013 yılı ithalatı	İthalat	İthalat \$
Diğer radyoaktif elementler, toryum, bileşik, alaşım, dispersiyon, karışımlar	3 kg	8.553
2013 yılı ihracatı	İhracat	İhracat \$
Toryum; çubuk, profil, tel, levha, tabaka, yaprak ve şeritler	445 kg	2.011

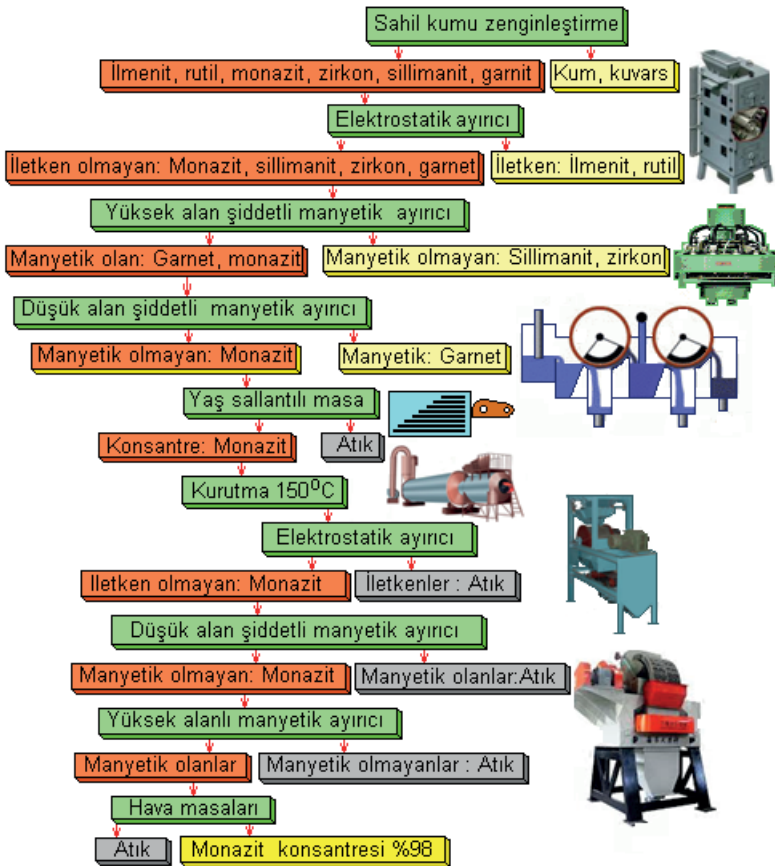
2.5 Toryum üretimi

Toryum yer kabuğunda fosfat, silikat, karbonat, oksit minerallerinin içeriğinde ortalama 100 ppm kadar bulunmaktadır. Toryum genel olarak uranyum ve NYE mineralleri ile birlikte thorit, thorianit, uranothorit damarları, granit, siyenit, pegmatit ve diğer asidik sokulumlar içinde monozit şeklinde yataklanmıştır. Aynı

zamanda monazit kum taşlarında, kuvars çakıllarında ve sahil kumlarında da bulunmaktadır. Toryum nadir toprak elementleri olan karbonit minerali bastnazitin içeriğinde de olabilmektedir.

Toryum dünyada genellikle monazitin zenginleştirme sürecinden yan ürün olarak alınmaktadır. Monazitin toryum oksit içeriği %4 ile %12 arasında değişmektedir. NYE'leri üretilmeden doğrudan toryum amaçlı monazit üretimi yapılmamaktadır. Toryum monazit mineralinden ya da NYE element minerallerinin zenginleştirilmesi sonrası kalan atıklardan üretilmektedir.

Şekil 2.2'de sahil kumlarından monazit üretimi akışı gösterilmiştir. Bu yöntemle %98 monazit içerikli konsantre üretilmektedir.



Şekil 2.2: Sahil kumlarından monazit üretimi akışı

Mineralin içeriğine bağlı olarak zenginleştirilmiş monazit konsantreleri, %15 oranlarında ThO_2 içerebilmektedir. Bu konsantreler içindeki NYEO oranları da %60 civarındadır. Monazit konsantrenin içerdiği P_2O_5 oranı da %30'lara yakındır.

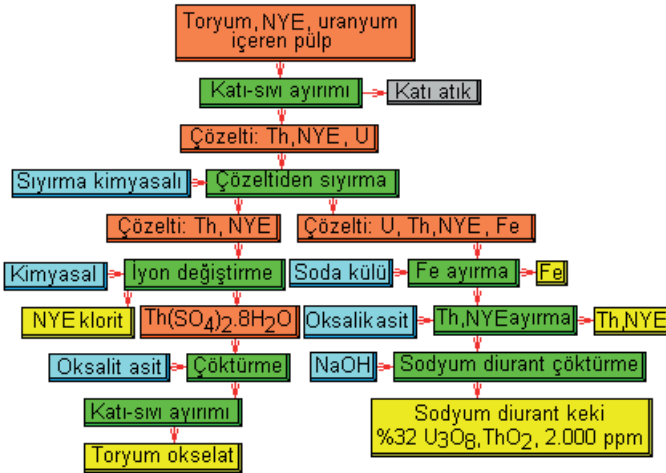
En geniş toryum yatakları kimyasal formülü (RE/Th/U)PO₄ olan sahil kumlarında ve plaserlerde fosfat minerali karışımı olan monazitler şeklinde bulunmaktadır.

Toryum fiziksel yöntemlerle kazanıldıktan sonra H₂SO₄, HNO₃, HCl veya NaOH ile özütlenerek ThO₂ üretilmektedir.

Monazit konsantresi %50-70 derişimli NaOH ile ~140°C sıcaklıkta özütlenerek çözeltiye alınmaktadır. Çözelti, sıyırma, iyon değiştirme gibi bir dizi hidrometalurjik işlemlerden geçirilerek saf toryum nitrat üretilmektedir. Toryum nitrat da toryum okselat olarak çöktürüldükten sonra kalsine edilip ThO₂'e dönüştürülmektedir.

Uygulanan alkali özütlemeye, monazitin içerdęi NYE klorid bileşikleri halinde ayrılmakta ve toryum hidroksit elde edilmektedir. Toryum hidroksit %35ThO₂, %7 NYEO, %0.6U₃O₈ ve yaklaşık %28 civarında da çözeltiye geçmeyen katı içermektedir.

şekil 2.3'de akım şemasında gösterilen zenginleştirme işleminin uygulanmasıyla monazitten %99 saflıkta toryum okselat üretilmektedir. Bu da toryum nitrat ya da nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanım amacına yönelik toryum oksit üretimini kolaylaştırmaktadır. Yöntemde monazitin içerdęi uranyum da kazanılabilmektedir.



şekil 2.3: Monazitten toryum okselat üretimi

Not: Bu çalışmada 2014 yılında yayınlanan "Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme", kitabı (ISBN 978-975-96779-5-4, 1500 sayfa) II. Cildinin Toryum başlığı altındaki 57. bölümü de (sayfa 1385-1390) kullanılmıştır.

2.6 Kaynaklar

- ✚ Ali Akar, Levent Özdemir, Maden Yük Müh. MTA, Ankara Toryum, MMO Dergisi, Cilt: XIII Sayı: I
- ✚ DPT, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu Raporu Nükleer Enerji Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, Ankara 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, DPT: 2587 – ÖİK: 599.
- ✚ Dünya Uranyum Kaynakları, Yeterliliği ve Türkiye'nin Uranyum potansiyeli, TAEK Başkanlığı Teknik Rapor, Nevzat Birsen, Ankara, 1988.
- ✚ Janubia CBS Amaral, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Carlos A Morais, Av.Presidente Antonia Carlos, Brezjal ,“Thorium and uranium extraction from rare earth elements in monazite sulfuric acid liquer through solvent extraction” , Mineral Engineering 23(2010) 498-503.
- ✚ Prof.Dr. Muammer Kaya, Toryum Nükleer Yakıtının Perspektifi, Ve Ülkemizde Enerji Üretimi Açısından Önemi, Eskişehir-Osmangazi Üniversitesi Teknoloji Araştırma Merkezi (TEKAM) Müdürü ve Mad. Müh. Bölümü Öğretim Üyesi
- ✚ Prof.Dr.Zeki Çimenoğlu, “Solvent Ekstraksiyonu”, (İyon Değişimi) YTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü.
- ✚ Sema Zararsız, Dr. Ali Tanrıku, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Türkiye'nin Nadir Toprak Elementleri Ye Toryum Kompleks Cevheri Üzerine Yapılan Çalışmalar Ye İleriye Yönelik Öneriler, MMO, Mart 2003.
- ✚ The Use of Thorium as Nuclear Fuel Position Statement November 2006 American Nuclear Society, Outreach Program (708-352-6611),Federal Affairs (708-352-6611), www.ans.org
- ✚ Thorium Fuel Cycle-Potential Benefits And Challenges, IAEA, Vienna, 2005 laea-Tecdoc-1450, ISBN 92-0-103405-9, ISSN 1011-4289 Printed By The International Atomic nergy Agency, İn Austria, May 2005 The originating Section of this publication in the IAEA was: Nuclear Fuel Cycle and Materials Section.
- ✚ Thorium Energy Futures, Peggs (BNL/ESS), W. Horak, T. Roser (BNL), G. Parks (Cambridge U.), M. Lindroos (ESS), R. Seviour (ESS/Huddersfield U.), S. Henderson (FNAL), R. Barlow, R. Cywinski (Huddersfield U.), J.-L. Biarrotte (IPN), A. Norlin (IThEO), V. Ashley, R. Ashworth (Jacobs), A. Hutton (JLab), H. Owen (Manchester U.), P. McIntyre (TAMU), J. Kelly (Thor Energy/WNA), Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA MOOBA01
- ✚ www.mta.gov.tr

3. Türkiye’de toryum ve uranyum ile ilgili yasal düzenlemeler

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı “International Atomic Energy Agency IAEA” (IAEA), sözde nükleer enerjinin barışçıl amaçlı kullanımı, askeri amaç için kullanılmasını engellemek için 1957 yılında kurulmuş uluslararası bir organizasyondur. Merkezi Viyana’dadır. Ayrıca New York ve Cenevre şehirlerinde iki bürosu, Viyana, Seibersdorf ve Monoca’da üç laboratuvarı vardır.

Her ne kadar IAEA barışçıl amaçla kurulmuş da olsa bu kuruluşun üyesi çoğu ülke nükleer silahlara sahiptir. Bu nedenle IAEA’nın faaliyetlerini güçlü olan bu ülkeler belirlemektedir.

Dünyadaki çoğu ülkede radyoaktif minerallerin aranıp üretilmesi ve özellikle pazarlanması konusunda ülke menfaatleri doğrultusunda yasal yollarla kontrol altına almışlardır. Bu ülkemiz için de geçerli olup 1985 yılında yürürlüğe giren 3213 sayılı maden kanununun 50.maddesi aşağıdaki gibidir:

“Madde 50 – Bu Kanunun yürürlük tarihinden sonra toryum ve uranyum madenlerinin aranması ve işletilmesi bu Kanun hükümlerine tabidir.

Üretilen cevher Devlete veya Bakanlar Kurulunca tespit edilecek yerlere satılır.”

Kanunun yürürlük tarihi 15.06.1985 olup bu tarihten sonra toryum ve uranyumun özel ya da tüzel kişiler tarafından aranıp işletilmesi ile ilgili yasal engel kaldırılmıştır. Ancak üretilen madenin pazarlanması konusunda, pazarlanacağı kişi, kuruluş ya da ülke için devletten izin alınması gerekmektedir.