

YAKIN GELECEĞİN NÜKLEER YAKITI OLARAK TORYUM

Ulvi ADALIOĞLU¹, Ahmet BAYÜLKEN², Necmi DAYDAY³,
Şarman GENÇAY⁴, Ahmed Yüksel ÖZEMRE⁵, Erdinç TÜRKCAN⁶

ÖZET - Türkiye toryum rezervi bakımından Dünyâ'da ikinci sıradadır. Etkin bir Toryum/Uranyum çevrimine dayanan reaktör tiplerine öncelik vermek konusunda kararlı ve sürekli bir devlet politikası sürdürülecek olursa, elektrik üretiminde ülkemizin en az 500 yıllık bir otonomiye sâhip olma potansiyeli bulunmaktadır.

* * *

Fisyonluk ve Doğurgan İzotoplar

U-235 çekirdeğinin, üzerine sevk edilen nötronlarla *fisyon*'a uğrayabilmesi, yâni iki farklı atom çekirdeğine bölünmesi, nükleer reaktörler teknolojisinin temelini teşkil eder. U-235'in fisyonunda yalnızca yeni iki çekirdek değil, ayrıca 1) birkaç yeni nötron ile 2) 200 MeV⁷ kadarlık bir enerji de yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Her fisyonda açığa çıkan nötronlardan 1 adedinin yeni bir fisyonu sebep olmasının sağlanabilmesiyle oluşan *kararlı zincirleme reaksiyon* mekanizması nükleer reaktörler teknolojisinin bugüne kadarki gelişmelerinin başlangıcı olmuştur.

Fisyon olayının keşfinden hemen sonra Doğa'daki mevcûd uranyum ve toryumun nükleer güç santrallerinin temel yakıtları olabilecekleri anlaşılmıştır. Doğal uranyumun belligaşlı iki izotopu olan U-235 ve U-238'in bolluk oranları, sırasıyla, %

¹ Dr. Ulvi Adalıoğlu: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) "Nükleer Mühendislik Bölümü" *eski* Başkanı.

² Prof.Dr. Ahmed Bayülken: İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü "Nükleer Teknoloji Anabilimdalı" *eski* Başkanı", ÇNAEM *eski* Müdür Yardımcısı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı *eski* Danışmanı ve Nükleer Santral Proje Koordinatörü; *hâlen* İTÜ Denizcilik Fakültesi "Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü" Başkanı.

³ Dr. Necmi Dayday: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) *eski* Nükleer Tesisler Müfettişi.

⁴ Prof.Dr. Şarman Gençay: İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü "Nükleer Bilimler Anabilimdalı" *eski* Başkanı; *hâlen* İTÜ Denizcilik Fakültesi "Temel Bilimler Bölümü" Başkanı.

⁵ Prof.Dr. Ahmed Yüksel Özemre: TAEK *eski* Başkanı (1985-1987), Akkuyu Nükleer Santral İhâlesi'nde TEAŞ Genel Müdürü Danışmanı (1998-2000).

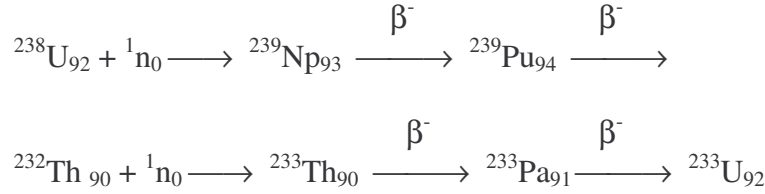
⁶ Dr. Erdinç Türkcan: Energie Centrum Nederland (ECN) *eski* Nükleer Bölüm Başkanı, IAEA Uzman Sistemleri ve Nükleer Güvenlik *eski* Uzmanı.

⁷ MeV: milyon elektronvolt.

Yakın Geleceğin Nükleer Yakıtı Olarak Toryum

0,72 ile % 99,27 dir. Üçüncü bir izotopu ise % 0,01 bolluk oranıyla U-234'dür. Toryumun ise başlıca izotopu Th-232'dir.

Kütle sayısı U-238'in ve Th-232'ninki gibi çift sayı olan izotopların fisyonu, daha çok, çarpan nötronların enerjisinin en azından 1 MeV'den büyük olması hâlinde vuku bulmaktadır. Buna karşılık U-235'in fisyonu uğraması çarpan nötronun enerjisi ne olursa olsun mümkündür. U-235'in bu özelliğini haiz izotoplara **fisyonluk** (ya da *fisil*) izotoplar denir. Fisyonu uğramaksızın kendilerine çarpan düşük enerjili bir nötronu yutan U-238 ve Th-232 **doğurgan** izotopları:



reaksiyonları uyarınca, tıpkı U-235 gibi fisyonluk izotop olan, Pu-239 ile U-233 izotoplarına dönüşürler.

Ayrıca Th-232/U-233 çevrimine dayanan **ılık** (*termal*) reaktörlerde elde edilen U-233'e ait η_{233} parametresi, yâni U-233 tarafından yutulan her nötrona karşılık açığa çıkan fisyon nötronlarının sayısı, diğer nükleer yakıtlara oranla daha yüksektir:

Parametre	Fisyonluk izotoplar			Doğurgan izotoplar	
	U-233	U-235	Pu-239	U-238	Th-232
η	2.30	2.07	2.11	0.16	0.04
σ_a (barn)	640	650	1400	4.1	9.6

Bu cetvelden görülmekte olduğu gibi, Th-232/U-233 çevrimine dayanan bir reaktörde nükleer yakıtın yanma oranı (*burnup*) diğerlerine göre çok daha yüksek olacaktır. Ayrıca, Th-232 nin absorpsiyon tesir kesidinin U-238 inkinden 2 mislinden (yâni 9,6/4,1 den) daha büyük olması dolayısıyla, Th-232 den üretilebilecek fisyonluk malzeme de U-238 den üretilebilecek fisyonluk malzemeden 2 kat daha fazla olacak demektir.

η_{233} değerinin büyük oluşu Th-232/U-233 çevriminin yüksek bir **dönüşüm oranı**'na (*conversion ratio*) sâhip olmasını sağlamaktadır. Meselâ A.B.D.nde Yüksek Sıcaklıklı Gazlı Reaktörler için (*HTGR*) yüksek dönüşüm oranlı ılık bir **üretken** reaktörün⁸ pekâlâ mümkün olabileceği Fort St Vrain⁹ reaktörlerinin ve Basınçlı Sulu

⁸ Üretken reaktör (*breeder*): enerji üretmek için tükettiği fisyonluk malzemeden daha fazlasını bu tüketim esnasında üreten reaktör.

Yakın Geleceğin Nükleer Yakıtı Olarak Toryum

Reaktörler (*PWR*) için de Shippingport reaktörünün işletimiyle te'yid edilmiş bulunmaktadır.

Dünyâ'daki Toryum Rezervleri

Dünyâ'daki toryum rezervlerinin uranyum rezervlerinin üç katı olması ve ılık nükleer reaktörlerin ortamında ılık nötronlarla etkileşen toryumun fisyonluk bir madde olan U-233'e dönüşebilmesi olguları karşısında, yeterince toryum kaynağına sâhip bulunan bir ülkenin nükleer yakıt kaynaklarını toryumdan U-233 üreterek arttırması bilimin ve sağduyunun telkin ettiği mutlak bir zarûrettir.

Dünyâ toryum rezervinin ülkelere göre dağılımı şöyledir [1, 2]:

Ülke	Tesbit edilmiş Rezerv (Ton)	Muhtemel Ek Rezerv	Muhtemel Toplam Rezerv	Toplam Muhtemel Dünyâ Rezervine Oranı
Brezilya	606.000	700.000	1.306.000	% 30,58
Türkiye	380.000	500.000	880.000	% 20,60
A.B.D.	137.000	295.000	432.000	% 10,11
Hindistan	319.000	72.000	391.000	% 9,15
Avustralya	300.000	----	300.000	% 7,02
Mısır	15.000	280.000	295.000	% 6,91
Norveç	132.000	132.000	264.000	% 6,18
Kanada	45.000	128.000	173.000	% 4,05
Güney Afrika	18.000	97.000	115.000	% 2,69
Grönland	54.000	32.000	86.000	% 2,02
Nijer		29.000	29.000	% 0,69
Dünyâ Toplamı	2.006.000	2.265.000	4.271.000	% 100,00

⁹ Fort St Vrain reaktörü A.B.D.nde toryumla takviye edilmiş tek reaktördü. 1976-1989 arasında faal olmuştur. Bu, 1300 °C derecede çalışan yüksek sıcaklıklı, grafit moderatörlü ve helyum soğutuculu bir reaktördü (HTGR). 842 MWth (330 MWe) gücünde idi. Kullanılan "Toryum-yüksek düzeyde zenginleştirilmiş Uranyum (*Th/HEU*) çevrimi" sayesinde % 39,2 gibi yüksek bir verim elde edilmişti. Yakıt, fisyon ürünlerinin tutulması için silikon oksit ve pirolitik karbon ile kaplanmış minik toryum karbid ve Th/U-235 karbid küreciklerinden oluşmaktaydı. Ve bunlar birbirlerinin üzerine yığılacak yerde düzgün altıgen sütunlar hâlinde düzenlenmiş bulunmaktaydılar. Reaktörde hemen hemen 25 ton toryum kullanılmaktaydı; ve bunun sonucu olarak da, yakıtın tonu başına 170.000 MWgün'lük bir yanma oranı (*burnup*) gerçekleşmekteydi. Dikkat edilmesi gereken husûs bu Th/U çevriminde gerçekleşen bu yanma oranının ılık reaktörlerdekinin iki katı olmasıdır..

Türkiye'nin haiz olduğu belirtilen bu muazzam toryum kaynağını görmezlikten gelmek de, bunun Türkiye'nin refahı ve geleceği için arz etmekte olduğu önemi idrâk ve temyiz edememek de mümkün değildir.

Toryum/Uranyum Çevrimli Nükleer Santrallerin Önemi

Toryumun reaktörlerde yakıt olarak kullanılmasına şu düşüncelerden gelinmiştir:

- Plutonyum'un yakıt olarak kullanılmasına karşı olan genel bir tepki teessüs etmiştir.
- Dünyâ'da toryum rezervi uranyum rezervinin üç misli kadardır. Dolayısıyla toryum yatakları çok daha uzun süre dayanabilecektir.
- Ilık (*termal*) reaktörlerde U-233 tercih edilen bir yakıttır. Bu yakıtı kullanmak sûretiyle, yakıtı fisyonluk madde kadar fisyonluk madde üreten **üretken reaktörler** gerçekleştirmek mümkündür.
- Bunun sonucu olarak Th/U yakıtlı **çevirgen** reaktörlerin yakıttan faydalanması Pu/U yakıtlı **çevirgen** reaktörlerinkinden daha fazladır. Yâni 1 kg uranyum başına Th/U yakıtlı çevirgen reaktörlerde üretilen enerji Pu/U yakıtlı çevirgen reaktörde üretilen enerjiye oranla daha fazladır.
- Th/U-233 çevrimi *Nükleer Silâhların Yayılmasını Önleme Andlaşması* (NPT) açısından daha elverişlidir. Fisyonluk maddenin çalınması zordur. Yakıtlar daha baştan NPT'ye uygun zenginlikte yapılabilir. Pu üretimi azaltılabilir.
- Toryumlu değişik çevirgen reaktör tipleri uzun vâdeli güvenilir ve ucuz enerji üretimi için bir strateji ortaya koymakta faydalı olabilir.
- Toryum yakıt çevrimlerinin uranyum kaynaklarının artmasının ötesinde bâzı ek faydaları vardır. Uranyum-oksit'inkine oranla, toryum-oksit¹⁰ ısı geçirgenliği % 50 kadar, ergime noktası da 340 °C daha yüksektir. Toryum-oksit kimyasal açıdan daha kararlı olup uranyumdan daha az aktinid üretir.

1970'lerden itibaren başta A.B.D., Almanya, Hindistan, Rusya ve Güney Afrika Cumhuriyeti olmak üzere birkaç ülke Th-232/U-233 yakıt çevrimine dayanan bâzı reaktör tasarımları gerçekleştirmişlerdir. Ancak bu tasarımların uranyum yakıtlı reaktörler kadar büyük üniteler hâlinde inşasının büyük araştırma ve geliştirme yatırımlarına gerek duyduğu anlaşılınca, gözle görülür büyük avantajlarına rağmen, uranyumlu reaktörlere paralel ve onlarla rekâbete girebilecek ikinci bir ticârî uygulama imkânı olarak Th-232/U-233 çevrimli reaktörleri geliştirmek fikrinden genellikle vaz geçilmiştir. Bugün, elindeki büyük toryum rezervini ülkesinin menfaati için

¹⁰ Toryum-oksit'in özgül kütlesi: 10 g/cm³, ergime sıcaklığı (bütün metal oksitler içinde en yüksek ergime sıcaklığı olan): 3330 °C dir.

kullanmak husûsunda *en bilinçli* ve bundan ötürü de Th-232/U-233 yakıt çevriminin *en ısrarlı ve uzun vâdeli bir millî plân ve strateji uyarınca* uygulayıcısı olan ülke yalnızca *Hindistan'dır*.

Toryumlu yakıt çevrimi için uygun, denenmiş 4 tip nükleer reaktör tipi vardır:

Hafif Sulu Üretken Reaktör (LWBR) - A.B.D.nde 1977’de devreye girmiş, Hafif Sulu Üretken Reaktör (LWBR) tipinin ilk örneklerinden biri olan Shippingport reaktörü Hızlı Üretken Reaktörler’in (FBR) tasarımında kullanılan uranyum-plutonyum karışımı yakıt ve erimiş sıvı metal soğutucu yerine soğuk suyla soğutulan ve zirkaloy ile gömleklenmiş olan Th-232/U-233 karışımı yakıt elemanları kullanmaktaydı. Nötron ekonomisini yükseltmek üzere de reaktör kalbinde “kundaklanmış kaynak” (*see/blanket*) tasarımı uygulanmıştı. Buna göre fisyonluk materyel reaktör kalbinin ortasında yer almakta ve çepeçevre ve ayrıca da hem alttan hem de üstten üretken materyel ile kundaklanmış bulunmaktaydı. Amiral Rickover’in yürüttüğü bu proje ne yazık ki, profesyonel rekâbet ve amerikan üst düzey bürokrasisinin Amiral Rickover’e karşı beslediği münâferet dolayısıyla 5 sene kadar kısa bir süre sonra 1982’de, bürokrasinin verdiği emirle reaktörün durdurulmasından sonra, iptâl edilmiştir. Bu 5 yıllık işletimde 10 milyar kWh’lik bir termal enerji üretmiş olan reaktörün durdurulmasından sonra, 1987 yılında yapılan incelemeler reaktörün kalbinin gerçekten de üretken olduğunu ve ilk yakıt yüklemesinde ihtivâ ettiği fisyonluk maddeden % 1,3 daha fazla fisyonluk materyel ihtivâ etmekte olduğunu ortaya koymuştur.

CANDU tipi reaktör – Bu reaktör tipinde kendi kendine yeterli, dengeli bir toryum çevrimi mümkün görünmektedir. Doğal uranyum ve ağır su (DO₂) moderatörlü bu PHWR tipi reaktör bizâtihi daha iyi bir nötron ekonomisi sağlamaktadır. Bu reaktörün bir özelliği de PWR tipi reaktörlerinin çıkma yakıtlarında hâlâ % 1-1,5 kadar bir zenginleştirme oranı bulunması hasebiyle PWR’ler için tüketilmiş olan bu yakıtların bir kere daha CANDU’da kullanılması potansiyelinin bulunmasıdır.

Diğer reaktör tiplerine nazaran haiz olduğu nötron spektrumu da göz önüne alındığında bu nitelikleri CANDU’yu Th-232/U-233 çevrimi söz konusu olduğunda ekonomik açıdan en uygun ticârî reaktör tipi kılmaktadır [3]. Bu çevrimin CANDU’da kullanılması reaktörün tasarımında reaktörün durdurulması (*shutdown*) ve ilk yakıt yüklemesinde alınması gereken önlemlerden başka hiçbir değişiklik gerektirmemesi açısından da diğer Basınçlı Ağır Sulu Reaktörlere (PHWR) karşı bâriz bir avantaj sağlamaktadır.

Eğer reaktörde toryum ile birlikte zenginleştirilmiş çıkma uranyum ya da çıkma plütonyumlu yakıt çevrimi uygulanırsa elde edilen *dönüşüm oranı* 1 e erişebilmektedir. Ancak bunun için tüketilmiş yakıtlardaki plütonyumun geri kazanılması için gerekli teknik hazırlıkların yapılmış olması ve tedbirlerin alınması gerekmektedir. Bir örnek olarak, CANDU reaktörlerinden şimdiye kadar çıkmış olan 780.000 ton tüketilmiş yakıt atığının içindeki plütonyumun, toryum çevrimiyle desteklendi-

ğinde, 390.000 MWe tutarında bir güce yâni yaklaşık 560 adet kadar CANDU-6 reaktörüne denk olduğu hesaplanmıştır.[4]

CANDU tipi reaktörler farklı yakıt çevrimleri açısından oldukça esnekler. Bu reaktörlerde kullanılabilir yakıt çevrimlerini kısaca gözden geçirmek gerekirse karşımıza şu imkânlar çıkmaktadır:

1) Tabii Uranyum (NU) Çevrimi

Uranyumdan faydalanma hafif sulu reaktörlere (LWR'lere ve meselâ PWR'lere) göre % 30 daha fazladır. Yakıt mâliyeti PWR'nin ancak % 50 si kadardır.

2) Hafifçe Zenginleştirilmiş Uranyum (SEU¹¹) Çevrimi

% 1,2 zenginlikte yakıt kullanılmaktadır. Yakıt imâlâtı için yılda talep edilen uranyum buna göre % 30 azalmaktadır. Yakıt mâliyeti PWR'nin ancak % 40 ı kadardır. Yakıttan faydalanma PWR'den % 100 daha fazladır. Deşarj edilen yanmış yakıt mikdârı NU çevriminin 1/3 ü kadardır.

3) Kazanılmış Uranyum Çevrimi

Reprosesden çıkan % 0,9 zenginlikteki uranyum da yakıt olarak kullanılabilir. Bu yakıtların temini hem kolay ve hem de ucuzdur. Bu durumda, uranyumdan faydalanma PWR'ye göre % 25 artmaktadır. Yakıt mâliyeti PWR'nin % 33 ü kadardır. Ayrıca bu mâliyet: 1) NU çevrimine göre % 25 ilâ % 67, 2) SEU çevrimine göre ise % 15 ilâ % 30 daha ucuzdur. Yanmış yakıt deşarj mikdârı ise NU çevriminin yarısı kadardır.

4) Tandem Yakıt Çevrimi

Yanmış LWR yakıtı reproses edildikten sonra çok iyi bir yakıt malzemesi olur. Zenginleştirme (meselâ % 1,2) için kullanılabilir. PWR'lere göre uranyum ve zenginleştirme talebini de % 40 civârında azaltır. Yanmış yakıt miktarı da, bu durumda, % 40 kadar azalmaktadır.

5) Doğrudan Çevrim

Doğrudan çevrimin iki opsiyonu vardır:

- A) PWR yakıt çubukları kısa ve uzun olarak ve kılıflı veyâ kılıfsız olarak mekanik işlemlerle CANDU yakıtına çevrilir; ya da
- B) Yanmış uranyum, mekanik ve ısıl işlemlerle, fisyon ürünlerinden kısmen temizlenir ve CANDU yakıtı yapılır.

¹¹ SEU: Slightly Enriched Uranium

Her iki opsiyon da nükleer silâh yapımını önleyici bir çevrimdir. Uranyumdan faydalanma NU çevrimine göre % 25 daha fazla olur. Doğrudan çevrimde “PWR + CANDU”nun toplam deşarj miktarı ise 1/3 e düşmektedir.

6) *Toryum Çevrimleri*

A) Reprosessiz çevrim:

Işınlanan toryum, U-233 elde edilmesi için, dışarda bekletilir. Sonra bu yakıt yüksek nötron akısı olan yerlere yüklenir.

B) Reprosesli çevrim:

U-233 reprosesle işlemleri sonucu ayrılır ve toryumla karıştırılıp yeni yakıt yapılır. Eğer nötron ekonomisi daha da iyileştirilirse çevirme oranı 1 civârında *kendi kendine yeterli toryum* (SSET¹²) çevrimleri elde edilir. Bu çevrim yılda çok az bir toryum ilâvesiyle ve dışardan hiç bir fisyonluk madde temini gerektirmeden sonsuz enerji kaynağı olarak düşünülebilir.

7) *Plutonyum Çevrimleri*

Pu-239, CANDU’larda, U-235 kadar etkindir; yâni 1 gr Pu, 1 gr U-235 e denktir. Buna karşılık PWR’lerde ise 1 gr Pu ancak 0,8 gr U-235 e denk olabilmektedir. Bu bakımdan CANDU’larda Pu yakmak daha da verimlidir. Bunun da üç çeşit opsiyonu vardır:

A) Pu + Tabiî U çevrimi:

Ağırlıkça % 0,5 fisyonluk Pu ve tabiî U karıştırılıp yakıt yapılır. Böylelikle NU çevrimindeki yanma oranlarının 3 misline erişmek mümkün olmaktadır.

B) Pu + Fakir U çevrimi:

Ağırlıkça % 1 fisyonluk Pu ile % 0,23 oranında U-235 ihtivâ eden fakir U’dan yakıt yapılır. Gene NU çevrimindeki yanma oranlarının 3 mislinden biraz fazla yanma oranına erişilebilir.

C) Pu + Toryum çevrimleri:

¹² SSET: Self sufficient equilibrium thorium.

Yakın Geleceğin Nükleer Yakıtı Olarak Toryum

Bir toryum çevrimini başlatmak için kullanılabilir. Şu opsiyonları vardır:

- A) Ağırlıkça % 2 fisyonluk Pu + Th-232 den yakıt yapılabilir. NU çevrimindeki yanma oranının yaklaşık 3 katına erişilebilir.
 - B) Ağırlıkça % 2,5 fisyonluk Pu + Th-232 den yakıt yapılır. Yanma oranı, NU çevrimindeki değerlerinin 4 misline çıkabilir.
3. **Hızlı Üretken Reaktör (FBR)** – Toryum ile alaşımlanmış uranyum metali birleşimine dayanan bir yakıt çevrimi Hızlı Üretken Reaktörler’de kullanılmaktadır. Metal alaşımlarının ısı iletim özellikleri oksidli yakıtlardan çok daha yüksek özgül güçlere erişebilmeye müsaidir. Metallerin yüksek atomik yoğunluğu da standart üretken reaktörlere oranla çok daha yüksek bir üretkenlik oranı sağlamaktadır. Bu Th-232/U-233 çevrimi için olduğu kadar U/Pu çevrimi için de geçerlidir.
4. **Gaz Soğutmalı Yüksek Sıcaklıklı Reaktör (HTGR)** – Th-232/U-233 çevrimi bu reaktör tipine de fevkalâde uygundur. Bu tip reaktörlerde 0,8 lik bir dönüşüm oranına erişilebilmektedir.

1985-1986 arasında Almanya’da Hamm Uentrop’da hizmet vermiş olan Toryumlu Yüksek Sıcaklı Reaktör (THTR) de bu kategoriye giren grafit moderatörlü, helyum soğutmalı bir reaktördü. Fevkalâde yüksek bir zâtî (*intrinsic*) güvenliğe sâhip olduğu iddia edilmekteydi. 760 MWth ısı gücüne karşı (PWR tipi reaktörlerdeki verimin % 32-33 olduğu göz önünde tutulacak olursa) % 40,5 gibi çok yüksek bir verimle 308 MWe gibi bir elektrik üretim gücüne sâhipti. Reaktörün yakıt elemanları, içine, çapları 0,5 ilâ 0,7 mm arasında değişen 35.000 adet minik kürenin serpiştirilmiş olduğu 6 cm çapında küresel grafit matrislerden ibâretti. Belirli bir konfigürasyon uyarınca, her minik küre belirli bir miktarda U-235 ve bunun 10 katı kadar da Th-232 ihtivâ etmekteydi. Reaktörü soğutan helyumun reaktör kalbine giriş sıcaklığı 250 °C, çıkış sıcaklığı ise 750 °C idi. Reaktör işlerken her gün yaklaşık 620 yakıt elemanı küre yenileriyle değiştirilmekteydi. Yakıt elemanları reaktörde 3 sene kalmakta ve bu zaman zarfında reaktör kalbinde 6 kere geçmiş olmaktadır. Bu reaktöre has yakıt elemanlarının üretimi zor ve mâliyeti de yüksektir. THTR 4 Mayıs 1986’da operatörlerin, yüklenme borusunda sıkışıp kalan yakıt kürelerinden birini kurtarmak isterken bunu zedelemeleri sonucu açığa çıkan radyoaktivitenin çevreyi kirletmesi sonucu ve 26 Nisan 1986’da vuku bulmuş olan Çernobil kazâsının kamuoyunda ihdâs ettiği ağır baskı yüzünden Alman Hükûmeti tarafından kapatılmak zorunda kalmıştır.[5]

HTGR’nin ve onun bir alt-sınıfı olan THTR’ın bir başka versiyonu da “Çakıltaşlı Modüler Reaktör” ya da “Yığma Yakıtlı Modüler Reak-

tör"dür (PBMR¹³ ya da MPBR¹⁴). 120 MWe gücünde tasarlanmış bulunan bu reaktörü, ilk inşa edilen ünitesinin aynısı olan ünitelerle modüler bir biçimde tevsî etmek mümkündür. Bugün özellikle Güney Afrika Cumhuriyeti'nde *Eskom Enterprise (Pty) Ltd* tarafından daha önceki HTGR tipi reaktörlerin tecrübelerinin (ve özellikle de Fort St Vrain ve THTR'nin) kötü sonuçlarından ders alınarak **geliştirilmekte olan** bu reaktörün¹⁵ [*diğer reaktör tiplerine oranla: 1) daha etkin bir güvenliğe, 2) daha büyük bir verimliliğe, 3) daha ucuz bir mâliyete, 4) kullanılmış yakıtının daha az radyoaktivite ihtivâ etmesi ve kolay depolanması imkânlarına sâhip olduğu konularında oldukça iddialı olmasına rağmen*] tam anlamıyla ticârî meta hâline gelebilmesi (**ve en azından Türkiye açısından kabûl edilebilir olması**) için önce nükleer ülkelerde lisanslanmış olması ve sonra da en az 5 yıllık başarılı bir işletim tecrübesinin birikmesi gerekmektedir.

Bugün A.B.D., Almanya, İngiltere ve Fransa HTGR tipi reaktörlere karşı bütün ilgilerini kaybetmiş bulunmaktadırlar. Bu ilgi yalnızca Japonya'da ve Güney Afrika Cumhuriyetinde canlı kalabilmiştir. En son olarak da 1998 yılında Çin *HTR GmbH* ile Çin'de HTGR tipi reaktör üretebilmek üzere bir lisans anlaşması imzâlamış bulunmaktadır¹⁶.

Carlo Rubbia'nın Enerji Yükselticisi (EA¹⁷) [6, 7]

1989-1993 arasında Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi'nin (CERN'in) Direktörü olmuş olan 1984 yılı Nobel Fizik Ödülü sâhibi Carlo Rubbia'nın 1994'den itibâren geliştirmiş olduğu Enerji Yükselticisi diye isimlendirilen reaktör tasarımı da Th-232/U-233 çevrimine dayanmaktadır.

Tasarımın temel fikri, içine Th-232/U-233 yakıt elemanları yerleştirilen 10.000-30.000 ton kadar erimiş kurşundan müteşekkil bir kütlede, bir hızlandırıcıdan çıkan protonlar aracılığıyla kurşunu **spallasyona** uğratarak nötron üretmek¹⁸ ve bu nötronların yakıt elemanlarında gerçekleştirecekleri zincirleme reaksiyonu kontrol altında tutmaktan ibârettir. Böylece açığa çıkan toplam fisyon enerjisi, hızlandırıcıyı işletmek için gerekli olan enerjiden fazla olduğu andan itibâren bu süreç kendi kendini desteklemektedir.

¹³ PBMR: Pebble Bed Modular Reactor.

¹⁴ MPBR: Modular Pebble Bed Reactor.

¹⁵ *Eskom Enterprise (Pty) Ltd* bu teknolojiyi Almanya'da Siemens ve ABB'nin ortaklaşa kurdukları *HTR GmbH*'dan satın almıştır.

¹⁶ Steve Thomas, *Arguments on the Construction of PBMR Reactors in South Africa*, University of Sussex 1999.

¹⁷ EA: Energy Amplifier'ın kısaltılmışı.

¹⁸ Böyle bir ortamda her 1 protona karşılık ortalama 14 nötron üretilebilmektedir.

Konvansiyonel reaktörlerin aksine EA ancak, hızlandırıcının kurşun içinde hâsıl ettiği nötronların katkısıyla kritik olabilen bir ortamdır. Eğer hızlandırıcı durursa reaktörün kendisi de durmaktadır. Bu bakımdan bu tasarımda, Çernobil kazâsında vuku bulmuş olduğu gibi, reaktörün amballe olması ve kalbinin erimesi söz konusu değildir. Ayrıca, bu tasarıma göre nükleer atıklar diğer konvansiyonel reaktörlerden çıkanlara oranla çok daha az ve çok daha düşük bir radyoaktif düzeyde olacaklardır.

Zincirleme reaksiyon sonucu hâsıl olan ısı ise konvansiyonel reaktörlerdeki sürece benzer bir süreç uyarınca elektriğe dönüştürülecektir. Yapılan ön teorik değerlendirmeler üretilen elektriğin kWh'inin konvansiyonel reaktörlerdekinden daha ucuza gelebilmesi için reaktör gücünün en az 800 MWe olması gerektiğine işâret etmektedir. Böyle bir tasarımın büyük avantajı yalnızca Th/U çevrimine değil her çeşit nükleer çevrime uygun olmasında ve konvansiyonel reaktörlerden çıkan ***kullanılmış, ve çıktığı reaktör açısından artık tükenmiş her türlü nükleer yakıttan elektrik üretilmesindedir.***

Bu reaktör projesi üzerinde CERN'de, Almanya'da, İtalya'da, İspanya'da ve Fransa'da ciddi çalışmalar vardır. Tasarımın babası olan Carlo Rubbia yeterli mâlî destek bulunduğu takdirde bu reaktörün ilk prototipinin on sene içinde hizmete girebileceğini ümit etmektedir.

Toryum/Uranyum Çevriminin Sağladığı Avantajlar

Şimdiye kadar Th-232/U-233 çevrimi bakımından gerçekleştirilmiş olan uygulamalar ve teorik hesapların ışığı altında bu çevrimin avantajlarını kısaca aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür. Bu çevrim:

- Türkiye gibi ülkelerin ***uzun vâdede*** elektrik üretiminde kaynak açısından bağımsızlığını sağlayacak yegâne potansiyeldir. Türkiye'nin nükleer enerjiden elektrik üretimi ***stratejisi*** ve toryum rezervi isâbetli ve kararlı bir devlet politikasına dayalı olarak birlikte ele alınır ve uygulanırsa ülke, dış enerji kaynaklarına muhtâc olmadan, en az ***500 yıl*** otonom bir biçimde elektriğini üretebilecektir.
- Nükleer reaktörlerin çoğunda ana tasarımlarında bâzı önemli ve masraflı değişiklikler yapmak sûretiyle uygulanabilmektedir ki bu Lisans Otoritesi'nin yeni bir lisans verme prosedürüne yol açmaktadır. Buna karşılık PHWR tipi CANDU reaktörlerinde ise Th-232/U-233 çevrimi reaktörün ana tasarımını değiştirmeden doğrudan doğruya uygulanabilmektedir.
- Nükleer reaktörlerin yakıt kaynaklarını arttırmakta ve mâliyetini düşürmektedir.
- Uranyuma dayalı çevrimlerde elde edilen yanma oranından çok daha yüksek bir yanma oranı sağlamakta; ve dolayısıyla da yakıt çevrimi masraflarını azaltmaktadır.

- Plütonyumun yeni baştan herhangi bir muameleye tâbi' tutulmasına (*reprocessing'e*) gerek kalmadan yakıt olarak kullanılmasını sağlamaktadır.
- Plütonyum üretimini kısmakta, işletim esnâsında oluşan plütonyumu ve diğer aktinidleri yakmakta ve bu sebeplerden ötürü de Nükleer Silâhların Yayılmasını Önleme Andlaşması'na (NPT) da dolaylı olarak müsbet katkıda bulunmaktadır¹⁹.
- Uzun ömürlü nükleer atıkların miktarını azaltmakta ve böylece atıkların radyoaktivite düzeylerinin çok daha düşük olmasını sağlamaktadır.

Türkiye gibi bir ülkenin bu avantajları **millî nükleer endüstrisinin temel taşları ve motivasyonları** olarak kabûl etmeyip de göz ardı etmesi kadar fâhiş bir hatâ olamaz!

Türkiye'nin Nükleer Enerji Millî Stratejisi Nasıl Olmalıdır?

1. Türkiye nükleer enerjiye geçerken, *orta vâdede kendisinin de hâkim olabileceği*

- 1) bir reaktör teknolojisi²⁰ ile
- 2) yakıt çevrimi stratejisini

seçmek ve bu her iki alanda da gereken hazırlanma ve inceleme önlemlerini şimdiden almak zorundadır.

Buna göre:

- Ham madde kaynaklarının mevcûd durumu [10.000 ton uranyum ve 380.000 ton toryum] ve yapılan projeksiyonların verdiği tablo [150.000 ton uranyum, 1.000.000 ton toryum] bu rezerv yapısına uygun bir yakıt çevriminin seçilmesini zorunlu kılmaktadır.

¹⁹ Ayrıca, U-233 elementi NPT için bir başka açıdan da değerli bir elementtir. Çünkü bir nükleer reaktörle üreyen U-233'ün yanında ister istemez U-232 de üremektedir. U-232 ise bir α tâneciği yayınlamak sûretiyle Th-228 üretmekte ve bu da bozunarak, bozunum zinciri, yüksek enerjili gama ışınları yayan Bi-212 ve Ti-208 de son bulmaktadır. Bu gama ışınlarının varlığı nükleer yakıtta üreyen U-233 ü ayırım muamelesine tâbi' tutmayı olağanüstü zorlaştırmaktadır.[1]

²⁰ Birimizin (A.Y.Özemre'nin) TAEK Başkanı iken (1985 yılında) yaptırttığı bir çalışma, **PHWR teknolojisini temel olarak seçmesi hâlinde**, 1) bu tipten bir reaktörün ilk ünitesinde millî katkımızın % 25, ve [ülkenin endüstriyel potansiyelinin o günkü durumunun imkânlarıyla değerlendirildiğinde de] 2) 25 yıl sonra da 5. üniteyi kurarkenki katkımızın ise % 93,5 civârında olacağını ortaya koymuştu.

- Bu çevrimin yakıtları zenginleştirmeye ihtiyaç duymayacak ve imâlinin de kolay olduğu bir yakıt tipinden olması gerekir.
- Bu teknoloji çok değişik yakıt ve çevrim tiplerini mümkün olduğunca problemsiz kullanabilecek tipte olmalıdır.
- Bu çevrimleri kullanırken reaktör tasarımının çok fazla bir değişikliğe ihtiyaç duymaması gerekir.
- Seçilen reaktör teknolojisinin ülkenin ekonomik ve teknolojik düzeylerine maksimum katkı sağlayacak bir tipte olması gerekir.
- Reaktör teknolojisi gelişmelere açık ve AR&GE çalışmaları için çok büyük masraflara ihtiyaç duyurmayacak tipten olmalıdır.
- Ülkeye teknoloji transferine de müsaade edecek bir teknoloji olmalıdır.

Bu mülâhazalar Türkiye'nin nükleer enerjiye geçerken, mutlakâ:

- A) *Doğal uranyum, ve*
- B) *Th-232/U-233*

çevrimlerini hedef almasını zorunlu kılmaktadır.

2. Bu iki çevrime en uygun olduğu görünen reaktör tipi (doğal uranyumlu yakıtla da çalışsa, hafifçe ya da daha yüksek oranda zenginleştirilmiş uranyumlu yakıt da kullanılsa) *hâlen* PHWR tipi CANDU reaktörüdür. CANDU tipi reaktör son Akkuyu Nükleer Santral ihâlesine verilmiş olan 3 tekliften biriydi²¹. Bu reaktör tipinin avantajlarını kısaca özetleyecek olursak:

- Aslında, zenginleştirilmiş uranyuma gerek duymamaktadır.
- Doğal uranyum ve Th-232/U-233 çevrimlerini *uygulama potansiyeli* açısından *hâlen* en uygun reaktör tipidir.
- PWR tipi reaktörlerden çıkan yakıtlarda hâlâ daha % 1 ilâ 1,5 kadar zenginleştirilmiş uranyum bulunduğundan aynı kullanılmış yakıtın bir kere de bu reaktörde kullanılabilme potansiyeli vardır.
- Üretici firma Akkuyu Nükleer Santral ihâlesindeki teklifinde “*basınç tüplerinin know-how’ı hâriç olmak üzere*” bu reaktörle ilgili bütün know-how’ı transfer etmeğe hazır olduğunu bildirmiştir. Bu konw-how’ı ayrıca: Güney Kore, Hindistan veyâ Pakistan’dan elde etmek de mümkün olabilir.

²¹ Bk. Prof.Dr. Ahmet Bayülken ve Prof.Dr. Ahmet Yüksel Özemre: **GİZLİ “Akkuyu Nükleer Santral İhâlesi Değerlendirme Komisyonları” Raporlarını, ve Muhâlefet Şerhlerini DEĞERLENDİRME RAPORU**, Haziran/Eylül 1999-Ankara. Bu raporun gizliliği, Mayıs 2000 târihinde, TEAŞ üst kademe yöneticiler tarafından Nükleer Santraller Dairesi elemanlarına raporun sızdırılması ve bu dairenin elemanlarından birinin de Murat Kara takma adıyla raporu 16 Aralık 2000 târihinde Bilkent Üniversitesi'nin “Enerji Listesi”nde [ENERJİ: 1261] numaralı mesaja ekli AyoRap.ZIP dosyası olarak yayınlamasıyla ortadan kalkmıştır. İsteyen, ihâle ile ilgili 20.500 sayfa tutarında dokümanın incelenmesi sonucu hazırlanmış olan A4 ebadında 220 sayfalık bu raporu, İnternet’te: <http://sunsite.bcc.bilkent.edu.tr/listeler/enerji/2000/Dec/0071.html> adresinden inceleyebilir.

Yakın Geleceğin Nükleer Yakıtı Olarak Toryum

- Teknolojisi, *bugünkü millî sanâyîmizin* hâkim olabileceği kadar basit bir teknolojidir.
- Bu reaktörde tükenmiş yakıtların yerine taze yakıtları reaktörü durdurmaksızın yüklemek mümkün olduğu için bir yıl boyunca kullanılma oranı çok yüksektir.
- Fiyatı PWR tipi reaktörlere nisbetle % 15-20 kadar daha ucuzdur.
- Üretilen elektriğin kWh'inin mâliyeti PWR tipi reaktörlere oranla çok daha ucuzdur.
- Reaktörün gücü millî enterkonekte şebeke ile uyumludur.

Bu avantajları göz önünde tutulduğunda Türkiye'de nükleer santrallerin *önemli bir bölümünün* PHWR tipi CANDU reaktörlerden oluşmasında mantıkî bir zarûret vardır. Bununla birlikte nükleer santrallerin tümünün yalnızca CANDU tipinden oluşması isâbetli olamaz. Belli oranda hafif sulu reaktörlerinde devreye girmesi gereklidir.

3. Türkiye, *kendi nükleer reaktörlerini seri hâlinde inşâ edecek teknolojik düzeye erişinceye kadar, ikinci bir kol olarak* PWR reaktörlerine de itibâr etmelidir. Bu önlem, tek bir reaktör inşaatçısının tekeline engel olacağı gibi ileride Th-232/U-233 çevrimine geçildiğinde de PWR'ların kullanılmış yakıtlarını bir kere daha kullanmayı da mümkün kılacaktır.

4. Orta ve uzun vâdede çok vaatkâr gözüktükleri için Türkiye'nin şimdiden üzerilerinde önemle durması gereken iki proje daha vardır ki bunlar: 1) “Çakıltaşlı Modüler Reaktör” ya da “Yığma Yakıtlı Modüler Reaktör” (PBMR) ile 2) Carlo Rubbia'nın “Enerji Yükselticisi”dir (EA).

PBMR'nın 1) lisanslanmış, 2) güvenli ve güvenilir bir ticârî meta olabilmesi için en azından 8-10 senelik bir zamana ihtiyacı vardır. Bu evrede bununla ilgili gelişmelerin dikkatle izlenmesi, bu konuda çalışan, Hacettepe Üniversitesi Nükleer Mühendislik Bölümü gibi gruplarımızın ve nükleer mühendislerimizin de teşvik edilip desteklenmesi isâbetli olacaktır.

Buna karşılık EA'nın ilk prototipinin hizmete girmesinin 15-20 yıldan önce ve 1) lisanslanmış, 2) güvenli ve 3) güvenilir olduğu kanıtlanmış ticârî meta olarak yaygınlaşmağa başlamasının da 30 yıldan önce vuku bulması beklenmemektedir. Ancak, bu reaktör tipinin geliştirilmesi de çok yakından izlenilmeli ve bu konuda araştırmalara katılmaları husûsunda nükleer mühendislerimiz teşvik edilip desteklenmelidir.■

KAYNAKLAR:

[1] IAEA-TECDOC-1155: *Thorium Based Fuel Options For The Generation of Electricity Developments in 1990s*, IAEA, Viyana 2000.

[2] Mineral Commodities Summaries, *US Geological Survey*, January 1999.

[3] Jeremy Whitlock, *The Evolution of CANDU Fuel Cycles and Their Potential Contribution to World Reace*, International Youth Nuclear Congress 2000, Bratislava/Slovakia; April 9-14, 2000.

http://www.magma.ca/~whitlock/cnf/brat_fuel.htm

[4] A.J. Mooradian, *Fuel Cycle and Fuel Resources/AECL Seminar on Plutonium Recycle and the Thorium Cycle in Canada*,

http://www.ccnr.org/aecl_plue_seminar.html

[5] Karl Grossman, *Push to Revive Nuclear Power*,

<http://web.greens.org/s-r/28/28-21.html>

[6] *CERN Courier*, April/May 1995.

[7] Carlo Rubbia, *L'atomo che piace ai verdi*, *Galileo*, Settembre-Ottobre 1998.

* * *