



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER PİLLER

Recep ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı

MAYIS-2023
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER PİLLER

Recep ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR

MAYIS-2023
MUŞ

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Recep ÇELİK tarafından hazırlanan “Nükleer Piller” adlı tez çalışması/.../20... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Ekrem ALMAZ
Muş Alparslan Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Hasan Ali AYGÖR
Muş Alparslan Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

Üye

Sultan ŞAHİN BAL
Bitlis Eren Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç.Dr. Sedat BOZARI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Recep ÇELİK

Tarih: .../.../20....

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NÜKLEER PİLLER

Recep ÇELİK

**Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AYGÖR

Nükleer pillerin tasarımında kullanılan radyoizotop kaynaklarının özellikleri, dönüştürücü sistemleri ve sistem verimliliği incelenmiştir. Nükleer pil literatüründeki problemler ve meseleler araştırılmıştır. Nükleer pil uygulamalarında kullanılan radyoaktif kaynakların iyonlaştırıcı radyasyonu incelenmiştir.

2023, 27 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Nükleer Piller, Betavoltaik, Alfavoltaik,

ABSTRACT

NUCLEER BETTRY

Recep ÇELİK

**Muş Alparslan University
Institute of Science
Nuclear Energy And Energy Systems**

Advisor: Assist. Prof. Hasan Ali AYGÖR

The properties of the radioisotope sources used in the design of nuclear batteries, transducer systems and system efficiency are examined. Problems and issues in the nuclear battery literature are explored. The ionizing radiation of radioactive sources used in nuclear battery applications has been investigated.

2023, 27 Pages

Keywords: Nucleer Battery, Betavoltaic, Alphavoltaic.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki önemli katkılarından dolayı danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Hasan Ali AYGÖR hocama teşekkürlerimi sunarım. Danışman hocam tez çalışması süresince ihtiyacım olan bilimsel desteği esirgememiş; çalışmamın her aşamasında çok kıymetli yardımlarıyla öğretici ve yönlendirici olmuştur. Ayrıca, benden manevi desteklerini esirgemeyen aileme, teşekkür ederim.

Recep ÇELİK
MUŞ-2023



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
SİMGELER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	1
1.1. Radyoaktif Kaynaklardan Enerji Üretimi	6
1.2. Atom Çekirdeği	10
1.3. Radyoaktivite.....	12
1.3.1. Kararsız çekirdekler	12
1.3.2. Radyoaktif Çekirdekler	13
1.3.2.1. Beta bozunması	13
1.3.2.1.1. Elektron yayınlanması (β^-).....	13
1.3.2.1.2. Pozitron bozunması ve K elektron yakalama (β^+).....	13
1.3.2.2. Alfa bozunması	14
1.3.2.3. Doğal fisyon	14
1.3.2.4. Uyarılmış çekirdekler, gama radyasyonu	14
1.3.3. Yarı Ömür	15
1.4. Radyasyonun madde ile etkileşimi	15
1.4.1. İyonlaştırıcı radyasyonlar	15
1.4.1.1 Alfa parçacıkları	16
1.4.1.2. Beta parçacıkları	16
1.4.1.3. Gama ışınları	17
1.4.1.3.1. Fotoelektrik etki	17
1.4.1.3.2. Compton etkisi.....	17
1.4.1.3.3. Çift oluşum.....	17
2. MATERYAL ve YÖNTEM	18
2.1. Nükleer Pil Tasarımı	18
2.1.1. İzotopun güç üretme kapasitesi	20
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	22
KAYNAKLAR	23

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

eV	: Elektronvolt
keV	: Kilo-elektron volt
MeV	: Mega-elektron volt
μm	: Mikrometre/mikron
nm	: Nanometre
mm	: Milimetre
E_{max}	: Maksimum enerji
E_{ort}	: Ortalama enerji
E_{spek}	: Spektrum enerji
e	: Elektron
β	: Beta parçacığı
γ	:Gama ışını
α	:Alfa Parçacığı
τ	:Radyoaktif ömür
$T_{1/2}$:Radyoaktif yarı Ömür
η	: Verimlilik
μA	: Microamper
nA	: Nanoamper
ϵ_0	: Dielektrik sabiti
k	: Boltzmann sabiti
ν_e	: Nötrino ve Antineutrino

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Nükleer piller, yakıt hücreleri ve kimyasal piller için Ragone grafiği.....	2
Şekil 1.2	Radyasyon kaynakları için enerji dönüşüm akış şeması.....	7
Şekil 1.3	Lityum Atomu.....	10
Şekil 1.4	Çekirdeklerin proton, nötron sayılarına göre dağılımı ve kararlı çekirdek haritası.....	12



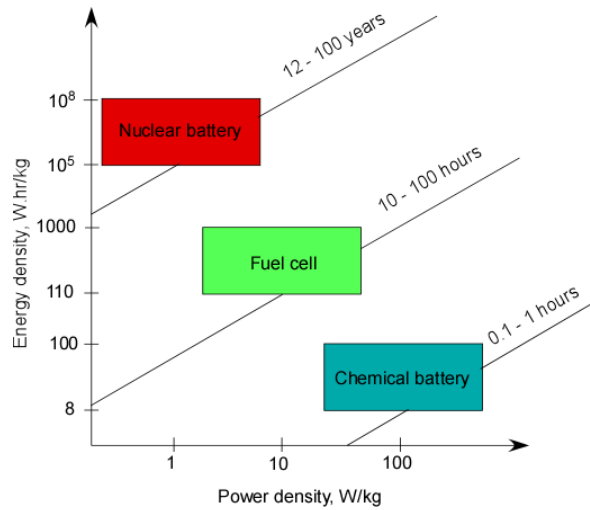
1. GİRİŞ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mikro elektromekanik teknolojideki gelişmeler tıp, uzay, denizcilik ve askeri sanayi hatta tarım ve hayvancılık gibi birçok alanda mikro boyutlu, düşük güçlü, güvenilir, uzun kullanım ömürlü, enerji üretim yöntemleri araştırmalarını hızlandırmıştır.

Yüksek kütle yoğunluğu, kısa ömrü, düşük enerji yoğunluğu, ortam koşullarından etkilenen kararlılığı nedeniyle kimyasal piller, yeni mikro teknolojilerin kullanımını kısıtlayıcı unsur olmaktadır (Wacharasindhu, 2012). Nükleer piller, atom çekirdeklerinden yayılan radyoaktif parçacıkları kullanırlar. Radyoaktif bozunum enerjisini iyonizasyon, yük toplama, termal, yöntem kullanarak elektriğe dönüştürürler (Manasse ve Pinajian, 1976).

Yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle diğer pil türlerine göre bir avantajı vardır. Enerji yoğunluğu, birim kütle başına toplam enerji içeriğidir. Bir nükleer pilin enerji yoğunluğu, kimyasal bir pilden yaklaşık 10^4 kat daha fazladır (Wu ve ark., 2011; Duggirala ve Radhakrishnan, 2010). Fakat bir nükleer pil, diğer pil türlerine kıyasla çok düşük güç yoğunluğuna sahiptir. Güç yoğunluğu, kullanılabilir gücü verebileceği orandır. Sonuç olarak, bir nükleer pil, yüksek güç çıkışı gerektiren uygulamalar için bir yakıt hücresi veya bir kimyasal pil ile şimdilik rekabet edemez. Bu nedenle nükleer pil tasarımının şimdilerdeki amacı, kimyasal pilin yerini almak değil, hibrit piller gibi kimyasal pillere yardımcı olmak ve kimyasal pillerin mümkün olmadığı uygulamalarda kullanmaktır. Bu nedenle, bir nükleer pil için hedeflenen uygulamalar, esas olarak, kimyasal piller tarafından yerine getirilemeyen, minyatürleştirilmiş düşük güç çıkışlı uygulamalardır. Nükleer pillerin diğer avantajları, güvenilirlikleri ve uzun ömürleridir. Bir nükleer pil, onlarca yıldan yüz yıla kadar güç sağlayabilir. Bir nükleer pilin bir yakıt hücresi ve bir kimyasal pil ile karşılaştırılması için şematik bir Ragone grafiği (Yakubova, G.N., 2012) Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

Nükleer piller, nükleer reaktörlerin temel prensibi olan zincirleme reaksiyonlar kullanmazlar. Doğal radyoaktif izotopların alfa, beta radyasyon kinetik enerjisini elektriğe dönüştürürler (Shultis ve Faw, 2007; Mahato ve ark., 2018).



Şekil 1.1 Nükleer piller, yakıt hücreleri ve kimyasal piller için Ragone grafiği

Son yıllarda nükleer pillere ve araştırmalarına artan bir ilgi mevcuttur. Çevre koşulları ne olursa olsun, düşük güçte ancak uzun ömürlü oldukları için çok geniş sıcaklık ve basınç aralığında kullanılabilirler; bazı elektronik aksamalarda tercih edilirler. Ayrıca düşük güçlü elektronik cihazların hızla yaygınlaşması ve verimlerinin artırılmasına ait yeni yöntem ve tekniklerin ortaya çıkması bu pillerin önemini artırmıştır (Liu ve ark., 2014; Zuo ve ark., 2013; Ronen ve ark., 2004). Nükleer piller, uzun ömür, yüksek enerji yoğunluğu ve zorlu ortamlarda dayanıklılık gibi mükemmel özelliklerinden dolayı askeri teçhizat, uzay, derin okyanus ve diğer özel ortamların bilimsel araştırmaları için güvenilir bir mikro güç kaynağı olabilir (Wang ve ark., 2010).

1913'te keşfedilmiş olmasına rağmen (Moseley ve Rutherford, 1913), sınırlı düşük güç uygulamaları, çabuk yarı iletken bozulmaları, ve uygun radyoizotopların mevcudiyetinin sınırlı ve yüksek maliyetli olması nedeniyle nükleer pillerin araştırılmalarında gelişmeler yavaş olmasına rağmen, verimliliğin artırılmasına yönelik çalışmalar sürdürülmektedir (Revankar ve Adams, 2014).

Nükleer pillerin verimini artırmak için; radyoaktif izotop çekirdeklerinden yayılan parçacıkların kinetik enerjisini yüksek verimde elektrik enerjisine çevirecek bir tasarım gerçekleştirilmelidir (Shinn ve ark. 2013). Bozunan izotop çekirdeklerinden çıkan radyoaktif parçacıkların kinetik enerjilerini kullanışlı hale getirilmek için radyoaktif parçacıklar, ya ortamın malzemesi ile etkileşerek ısıya çevrilir veya içinden geçtiği ortamda iyon çiftleri oluşturulur ve bu iyon çiftlerinden elektrik elde edilir (Shultis ve Faw, 2007; Ronen, (2010)).

Bir nükleer pilin verimliliğini belirleyen üç ana parametre mevcuttur: Radyoaktif parçacığın yayımlandığı radyoizotop kaynağı; içinden geçtiği ortamın elektrik akımı taşıma kapasitesi; enerji dönüşüm yöntemidir.

Nükleer pillerde dönüşümde kullanılan malzemelerden birisi yarı iletkenlerdendir. Yarı iletkenlerin spesifik özellikleri; radyoizotopların bozunmasıyla salınan radyoaktif parçacıkların radyoaktif enerjilerinin kullanılmasına izin verir (Lao, 2011). Radyasyon enerjisi bir yarı iletkende elektron-deşik çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Elektron-deşik çiftleri enerji dönüşümü için kullanılır. Alfa radyasyonunun yarı iletkenlerle etkileşmesi alfavoltaik; beta radyasyonun yarı iletkenlerle etkileşmesi betavoltaik yöntemler olarak adlandırılmıştır (Prelas ve ark. 2014).

Radyoizotop ve yarı iletken seçimi nükleer pillerin tasarımında önemlidir. Nükleer pilin gücü ve verimliliği, radyoaktif kaynakların aktivitesine ve dönüştürücü sistemde üretilen yüklü parçacık akımına bağlıdır (Kavetskiy ve ark. 2009). Radyoizotop termoelektrik üreticiler, doğrudan yük toplamalı nükleer piller, betavoltaik hücreler, elektromekanik hücreler ve termo fotovoltaik hücreler gibi, radyoizotop pillerde kullanılan çeşitli enerji dönüştürme yöntemleri vardır (Wang ve ark. 2010) .

Nükleer pil çalışmaları, radyoaktif bozunmanın keşfini takiben 1900'lü yılların hemen başlarında başlamıştır. 1913 yılında radyoaktif bozunma temelli enerji üretim metodu Mosoley tarafından kullanılmış; daha sonra ilk nükleer pil adı altında çalışma 1954 senesinde yapılmıştır (Pfann ve Van Roosbroeck, 1954). Özellikle 1950 yıllarından sonra artan bir yoğunlukta günümüze kadar birçok araştırma laboratuvarında nükleer pil çalışmaları yapılmaktadır.

Robison ve Nelson, (1963) bilimsel araştırmasında, Silikon, Germanyum, GaAs, yarı iletkenlerinin; Kr-85, Sm-151, Ni-63, TI-204, Pm-147 beta kaynaklarının karakteristikleri araştırılmıştır. Bulunan deneysel sonuçlar ve teorik hesaplamalarla, verimi yüksek nükleer pil geliştirme çalışması yapılmıştır.

Bower ve ark, (2002) kitabında, kimyasal piller, fosil yakıtlar ve nükleer piller enerji yoğunluğu açısından karşılaştırılarak, nükleer pillerin, düşük güçlü MEMS sistemlerindeki uygulamaları araştırılmıştır

Yakubova, (2012) doktora tez çalışmasında, farklı türdeki nükleer pillerin sınıflandırması, çalışma prensipleri detaylandırılmıştır. Tez çalışmasında; farklı dielektrik malzemeler ile kaplanmış metal toplayıcı plakaları karşısına, radyoaktif kaynak kaplanmış metal plaka yerleştirilerek, çok katmanlı pil düzeneği vakum içerisine yerleştirilmiştir. Beta parçacıklarının metal plakalarla çarpışmasıyla oluşan akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar, Monte Carlo simülasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sychov ve ark., (2008) çalışmasında, alfa kaynağı Pu-238 ve yarı iletken fotovoltaiik hücre olarak Al-Ga-As kullanılarak açık devre gerilimi 2.3 V, çıkış gücü 21 μ W, kısa devre akımı 14 μ A olan nükleer pil geliştirilmiştir.

Meier, (2008) doktora tez çalışmasında, sıvı ve katı yarı iletkenli betavoltaiik pillerin beta radyasyonuna mukavemetleri, malzemenin kristal yapıları deneysel olarak incelenmiştir. Pm-147, P-33 kaynakları katı yarı iletken; Sülfür-35 beta kaynağı sıvı yarı iletken eklemlerinin yüzeylerine kaplanmıştır.

Michael ve ark.,(2008) çalışmasında radyoizotop hücreleri; kimyasal piller, Sodyum Borhidrid, hidrojen peroksit yakıt hücreleri teorik ve deneysel veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Barnett ve ark, (2012) çalışmasında, Fe-55 ve Cd-109 kaynaklarından yayınlanan karakteristik X-ışınlarını kullanarak, Al-Ga-As tabanlı birleşik yarı iletkende elektron-deşik çifti oluşması için gerekli enerji deneysel olarak ölçülmüştür.

Gao ve ark, (2012) çalışmasında, nükleer pillerin enerji verimi konusunda teorik ve deneysel araştırma yapılmıştır. Radyasyonun silikon wafer'ların yapısında meydana getirdiği bozulmaları incelemiştir. Ni-63 radyoaktif kaynak kullanılmıştır. Üç boyutlu "pin" yapısı kullanılması, tüketim bölgesi enerji yoğunluğunun artırılması, kaçak akımın düşük tutulmasıyla, enerji veriminin yükseldiğini tespit etmişlerdir.

San ve ark, (2013) çalışmasında, Ni-63 radyoaktif kaynaklı ve Ni-Au film sürülmüş Schottky bariyerli, GaN nükleer pil teorik olarak incelenmiştir. 8 μ m kalınlıktaki Schottky bariyerinin, beta parçacıklarının enerjisini %95 oranında topladığı görülmüştür.

Tin ve A. Lal, (2009) adlı çalışmada, 50 μm kalınlıklı, %11.2 verime sahip SiC, Ni-63 radyoaktif madde kaplanarak tasarlanan betavoltaik pil araştırılmıştır. 30 μm 'den küçük değerlerde bile % 23.6 'ya kadar verimlilik değerleri elde edilmiş; benzer pillerden 100 kat güç yoğunluğu elde edilmiştir.

Tang ve ark., (2012) çalışmasında, Pm-147 beta kaynağı ve geniş bant aralığına sahip olan GaN yarı iletkenli betavoltaik pil tasarlanmıştır. Pil verimini arttıracak GaN ve Pm-147 kalınlığı bulunmuştur. GaN için verimli tüketim bölgesi ve eklem kalınlıkları elde edilmiştir.

Alam ve Pierson, (2016) betavoltaik pillerden maksimum veriminde; radyoaktif kaynak kaplama kalınlığı, yarı iletken katkı yoğunluğu, difüzyon uzunluğu, yüzey geometrisi ve yarı iletken eklem kalınlığı etkileri üzerine teorik ve deneysel araştırma yapılmıştır. SiC yarı iletkeni kullanılmıştır.

Revankar ve Adams, (2014) çalışmasında, uzun ömürlü fakat düşük güçlü betavoltaik radyoaktif pillerin kullanım alanlarından bahsedilerek, yüksek verimli betavoltaik pil tasarımında, GaN, SiC yarı iletken p-i-n eklemlerinin, H-3, Ni-63 beta kaynakları tercih edilmesi verimi arttırdığı bulunmuştur. Nano-trityum piller incelenmiştir.

Rahastama ve Waris, (2016) çalışmasında, Sr-90 kaynaklı betavoltaik pillerin radyasyonu elektrik ve güce dönüştürme verimleri incelenmiştir. Ni-63 ve Sr-90 nükleer piller karşılaştırılmıştır. Teorik hesaplamalarda Sr-90 kullanılan nükleer pillerin güç yoğunluğu yüksek fakat düşük verime sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca Sr-90 çekirdeğinden yayınlanan betaların enerjileri, Ni-63 çekirdeğinden yayınlanan betalardan çok yüksek olduğundan, Sr-90 kullanılan pillerde daha kalın yarı iletken kullanılması gerektiği sonucu bulunmuştur.

Science, (2014) çalışmasında, Pm-147, Ni-63 radyoaktif kaynakları kullanılarak iki farklı GaN "pin" yarı iletkenli diyot tasarlanmış ve bunlar incelenmiştir. Pm-147 kaynaklı nükleer pilin çok daha iyi elektriksel performans göstermiştir.

Ghasemi Nejad ve ark.,(2014) çalışmasında, silikon yarı iletkeni ve Ni-63 kaynağı kullanılmış betavoltaik pil tasarlanmıştır. Monte-Carlo yöntemiyle silikondaki

elektron/deşik çifti üretilme hızı teorik olarak bulunmuştur. Yarı iletken katkı yoğunluğunun pilin verimine etkisi; sıcaklık, radyoaktif kaynak film kalınlığı ve aktivitesinin, pil açık devre gerilimine etkisi incelenmiştir.

Lee ve ark., (2009) çalışmasında, üç boyutlu silikon malzemeden yarı iletken p-n eklem tasarlanarak, titanium tritide radyoaktif kaynağı silikon malzemeye nanoparçacıklar şeklinde emdirilmiştir. Böylece, radyoaktif betaların tamamı faydalı hale getirilmiş ve yüksek verimli betavoltaik pil üretilmiştir.

Guo ve ark., (2011) çalışmada, SiC yarı iletkenli ve Ni-63 radyoaktif kaynaklı nükleer pil tasarlanmıştır. Pil, %74 verimli, 8.0 nW/cm^2 güç yoğunluklu, 0.98 V açık devre gerilimlidir.

Honsberg ve ark., (2005) çalışmasında, GaN yarı iletkenli, Ni-63 beta kaynaklı betavoltaik pillerin tasarımı, verimi ve GaN yarı iletkeninin radyasyon mukavemeti araştırılmıştır.

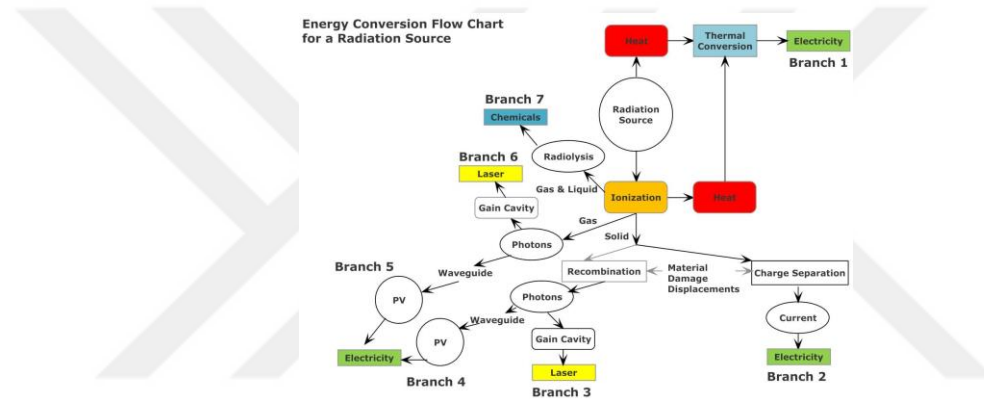
Tin ve Lal, (2016) çalışmasında, Ni-63 kaynaklı sinyal alıcı-verici devresi tasarlanmıştır. Elektriğe dönüştürme verimi %0.06 olan nükleer pilli kullanılan devreden 100MHz frekanslı 5mW güç sağlanmıştır.

1.1 Radyoaktif Kaynaklardan Enerji Üretimi

İyonlaştırıcı radyasyon, farklı radyasyon türlerinin maddede iyon çiftleri oluşturmasını ifade eden geniş bir terimdir. İyonlaştırıcı radyasyon, fisyon parçaları ve alfa parçacıkları gibi iyonları, beta parçacıklarını, gama ışınlarını, x-ışınlarını ve nötronları içerir. Her iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı tipinin karakteristik bir aralığı vardır. Örneğin: Katı fazdaki bir malzemede fisyon parçaları ve alfa parçacıkları gibi hızlı ağır iyonlar, enerjilerini mikrometrelik bir mesafe boyunca bir katı içinde biriktirirler. Elektronlar enerjilerini bir milimetre aralığında depolarlar. Gama ışınları ve nötronlar gibi yüksek enerjiye sahip olan ve durağan kütlesi veya net yükü olmayan parçacıklar, enerjilerini bir metre aralığında depolarlar. İyonlaştırıcı radyasyon nihayetinde madde ile etkileşimi yoluyla ısı ve iyonlaşma üretir. Bazı enerji dönüştürme sistemleri genellikle malzemede üretilen iyon çiftlerini doğrudan elektrik üretmek için kullanırken; bazıları da iyonlardan gelen enerjiden ısı üreterek, ısıdan elektrik üretirler. İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimlerinde, enerjinin yaklaşık %40 ila %50'si

iyonlaşmaya gider ve geri kalanı doğrudan ısıya dönüştürülür. Enerji iletimi modu, radyasyon etkileşimleri tarafından üretilen ısıyı kullanmıyorsa, iyon çifti üretimi için maksimum teorik verimlilik %40 ila %50 arasında sınırlanacaktır. Her dönüştürme mekanizmasının maksimum teorik verimliliği, sisteme özgü süreç verimsizlikleri ile daha da sınırlanacaktır.

Şekil 1.1'de radyasyon kaynakları için enerji dönüşüm akış şemasında gösterilmiştir. Katılar, sıvılar ve gazlar radyasyona maruz bırakılarak enerji üretiminde kullanılabilen çeşitli yöntemler elde edilir. Daire içinde gösterilen radyasyon kaynağı madde ile etkileşime girdiğinde temelde termal üretim ve iyon çifti üretimi yöntemleri olarak iki ana uygulama grubu mevcuttur.



Şekil 1.2 Radyasyon kaynakları için enerji dönüşüm akış şeması

Termal üretim yönteminde radyoaktif bozunum yapan atom çekirdeklerinden çıkan radyoaktif parçacıkların kinetik enerjisi önce termal enerjiye dönüştürülür, sonra bu termal enerjiden elektrik elde edilir. Bu dönüşüm yönteminde elde edilen çıkış gücü sıcaklık farkına bağlıdır. Çalışma prensiplerine göre çeşitleri vardır.

İyon üretimi yönteminde iyonlar, farklı ara yöntemler yardımıyla, elektrik, lazer ışığı veya kimyasallar gibi çeşitli yararlı ürünler üretmek için kullanılabilir (Branch 2-7) (Prelas ve Loyalka, 1981). Veya iyonların yeniden birleşmesiyle ısı üretmesine izin verilir. Bu ısı ilk aşamada radyasyon kaynağının malzeme ile etkileşmesiyle üretilen ısı ile birleştirilir. Toplam ısı enerjisi ile elektrik üretilir (Branch 1).

Branch 1'de elektrik üretmek için kullanılan ara yöntemler; radyoizotopik termoelektrik üretici (RTG) (Schmidt ve Dudzinski, 2011), termo iyonik enerji dönüşümü (Hatsopoulos ve Gyftopoulos, 1973), termo fotovoltajik (Nelson, 2003) veya Alkali Metal Termalden Elektriğe Dönüştürücü (AMTEC) (Hunt ve ark 1981) gibi ısı

dönüşümlü nükleer pil uygulamalarıdır. Ticari nükleer santraller için buhar çevriminde de kullanılırlar.

1.1.1 Radyoizotopik termoelektrik üretici (RTG)

Son kırk yıldır kullanılan baskın nükleer pil teknolojisi olmuştur (Ritz ve Peterson, 2004; Blanke ve ark., 1962). Termoelektrik cihazlar öncelikle radyoaktif parçacıkları hedef madde içindeki parçacıklarla çarpıştırarak, radyoaktif parçacıkların kinetik enerjisini Seebeck etkisi yoluyla ısı enerjisine dönüştürür; sonra ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Isı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için termokupul gibi termoelektrik dönüştürücüler kullanılır. Termokupul, farklı metallere veya malzemelerden yapılmış iki telden oluşur. Telden uzunluğu boyunca meydana gelen bir sıcaklık değişimi, telin bir ucundan diğer ucuna doğru bir voltaj değişimine neden olur. Hareketli parçası olmayan bir üretilerdir. İnsansız ve otonom araçlarda çok kullanılan enerji kaynağıdır. Etkili bir RTG için yeterli bir termal gradyan oluşturulmalıdır; bunun için de en az 1 gram radyoaktif malzeme gereklidir. Yüzlerce, binlerce keV kinetik enerjisine sahip alfa veya beta yayınlayan, özellikle Pu238 ve Sr90 radyoaktif izotopları (Corliss ve Harvey, 1964), RTG'lerde genellikle birkaç yüz miliwattan biraz fazla güç üretebilirler. RTG'ler için dönüştürme verimliliği %8-10'a ulaşabilir (Lazarenko ve ark., 1988). Modern bir RTG tipi, %20'ye kadar enerji dönüştürme verimliliği sağlayabilir ve teorik hesaplamalar, verimliliğin ancak %30'a kadar artırılabilirliğini göstermiştir (Anderson ve ark., 2005). Yeni nesil RTG'lerden olan Stirling Radyoizotop Üretilerinden %23 verim elde edilmiştir (Yakubov, 2010). Bu nedenle RTG'lerde büyük miktarlarda radyoaktif izotoplar kullanılması gereklidir. Bu ise yüksek radyasyon ve radyotoksik tehlikeler nedeniyle bu cihazların kullanımını sınırlar (Yakubova, 2010). Bu nedenle termik jeneratörler herhangi bir dış enerji kaynağının ulaşamadığı uzay ve su altı araçlarında kullanılmaktadır (Schmidt ve ark., 2011. ve genellikle 5 ile 50 yıl arasında bir ömre sahiptir.

1.1.2 Termo fotovoltaik hücreler

Bir fotovoltaik hücre ile benzer prensipte çalışırlar. Sıcak bir yüzey tarafından yayılan kızılötesi ışığı elektrığe dönüştürürler. Bu foto hücreler, termoelektrik çiftlerden biraz daha yüksek bir verimliliğe sahiptir ve termoelektrik çiftlerin üzerine yerleştirilerek potansiyel olarak verimlilikleri iki katına çıkarabilir. Radyoizotoptan

gelen alfa ve beta emisyonu kinetik enerjisi ile ısıtılan malzemenin yaydığı kızılötesi (IR) ışınlar elektrik üreten termo fotovoltaik hücrenin üzerine düşürülür.

1.1.3 Termiyonik Dönüşümlü

Bir termiyonik dönüştürücü, yüksek bir sıcaklığa ısıtıldığında termiyonik olarak elektronlar yayan iki elektrottan oluşur. Diğer elektrot bu elektronları toplar. Elektrotlar arasındaki boşluk genellikle vakumdur. Elektrotların etkinliğini artırmak için sezyum buharı ile de doldurulmaktadır.

Branch 2, yalnızca iyon çiftlerinden gelen enerjiyi kullanır ve alfavoltaikler (Laboratory, Ed., 2013), betavoltaikler (Deus, 2000), ileri geri hareketli konsol (Duggirala, 2008.) gibi türleri vardır.

1.1.4 Betavoltaikler

Radyoaktif bir kaynaktan yayınlanan beta parçacıkları kinetik enerjisini kullanan elektrik akımı üreteçleridir. Kullanılan yaygın bir radyoaktif kaynak, hidrojen izotopu olan trityumdur. Betavoltaikler, termal olmayan bir dönüşüm sürecinden elektrik üretir. Elektrik üretmek için yarı iletken bir p-n eklemi kullanırlar. Beta emisyonu elektrotta verildiğinde, elektrot ile akım akışı arasında potansiyelin artmasına neden olan elektron boşluk çiftleri oluşturur.

1.1.5 Alfavoltaikler

Alfavoltaik güç kaynakları, yüksek enerjili alfa parçacıklarından elektrik enerjisi üretmek için yarı iletken bir p-n eklemi kullanan cihazlardır. Betavoltaiklerle aynı prensipte çalışır, fakat Alfa parçacıkları yayan bir radyoizotop kullanırlar.

Branch 3, nükleer destekli bir katı hal lazeri beslemek için yalnızca iyon çiftlerinden gelen enerjiyi kullanır (Prelas, 1989).

Branch 4, bir katı hal Foton Orta Düzey Doğrudan Enerji Dönüşümü (PIDEC) sistemi (Prelas ve ark., 1990) için iyon çiftlerinden gelen enerji ile katıdaki yüklü parçacıklardan fotonlar üretilir. Fotonlar da fotovoltaik hücrelerden elektrik üretmek için kullanılır.

Branch 5, gazlı bir PIDEK sistemi için iyon çiftlerinden gelen enerjiyi kullanır (Prelas ve ark., 1990; Watermann ve Prelas, 2013).

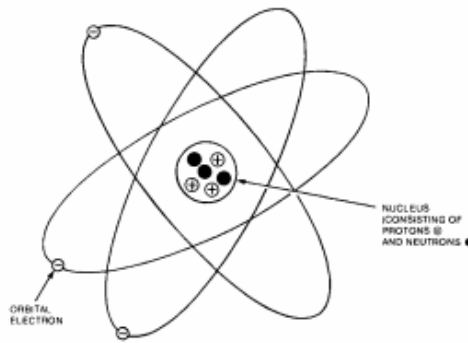
Branch 6, gaz halinde nükleer pompalı bir lazeri çalıştırmak için iyon çiftlerinden gelen enerjiyi kullanır (Prelas ve Loyalka, 1981).

Branch 7, sıvı ve gazlarda radyoliz yoluyla kimyasal üretim için iyon çiftlerinden gelen enerjiyi kullanır (Prelas ve Loyalka, 1981).

Yalnızca iyon çifti üretiminden elde edilen enerjiyi kullanan dallar, radyasyonun madde ile etkileşiminde üretilen ısı boşa harcandığından, doğal olarak maksimum teorik verim %40 ila %50 ile sınırlı olacaktır. Bu dalların her birinde ifade edilen sistemlerin verimsizlikleri, teorik maksimum verimliliği daha da sınırlayacaktır.

1.2 Atom Çekirdeği

Atomu basitçe, çevresinde elektronların yörüngelerde hareket ettiği, proton ve nötron parçacıklarından oluşan çok yoğun çekirdekte bulunduğunu kabul edilebilir. Bu atom modeli, merkezi çekirdek olarak güneş ve yörüngedeki elektronlar olarak gezegenler olan bir gezegen sistemine benzetilmiştir. Şekil 1.3'de lityum atomu gösterilmektedir. Atomun yapısının bundan çok daha karmaşık olduğu artık biliniyor, ancak model, basitliğine rağmen, nükleer enerji üretiminin başarılı bir şekilde geliştirilmesini sağladı.



Şekil 1.3 Lityum Atomu

Bir protonun ve bir nötronun kütleleri birbirine yakındır ve bir elektrondan 1840 kat daha ağırdır. Nükleon olarak isimlendirilen tüm protonlar ve nötronlar çekirdekte bulunduğu için, atomun kütlesi çekirdekte yoğunlaşmıştır. Proton 1.6022×10^{-19} coulomb'luk bir pozitif elektron yükü taşır; nötron ise elektrik olarak nötrdür. Her

elektron, bir proton üzerindeki pozitif yüke eşit büyüklükte negatif yük taşır. Yörünge elektronlarının sayısı çekirdekdeki proton sayısına eşittir, böylece yükleri dengelenir ve genel olarak atom elektriksel olarak nötrdür. Bir atom bir veya daha fazla yörünge elektronu kaybeder veya kazanırsa, atomun iyonize olduğu söylenir. Nötr bir atomun yörüngesindeki elektronların sayısı çekirdeğindeki protonların sayısı kadardır.

Atoma kimyasal özelliklerini veren elektronlar ve özellikle en dıştaki yörüngedeki elektronlardır. Kimyasal reaksiyonlar elektron etkileşimlerinden kaynaklanır. Atom son derece küçüktür; bir damla su milyarlarca atom içerir. Buna rağmen, bir atom hacim olarak büyük bir kısmı boşluktan oluşur. Elektron yörüngelerinin çapı 10^{-10} m mertebesindeyken, çekirdeğin çapı 10^{-14} m mertebesinde, yani çekirdeğin yarıçapı atomik yarıçaptan on bin kat daha küçüktür. Şekil 1.3' deki lityum atomu gösterimi ölçekli olsaydı, çekirdeğin çapının 1 cm mertebesinde olması için, elektronların çekirdeğin etrafında 100 m kadar bir mesafedeki yörüngede dönerken gösterilmesi gerekirdi

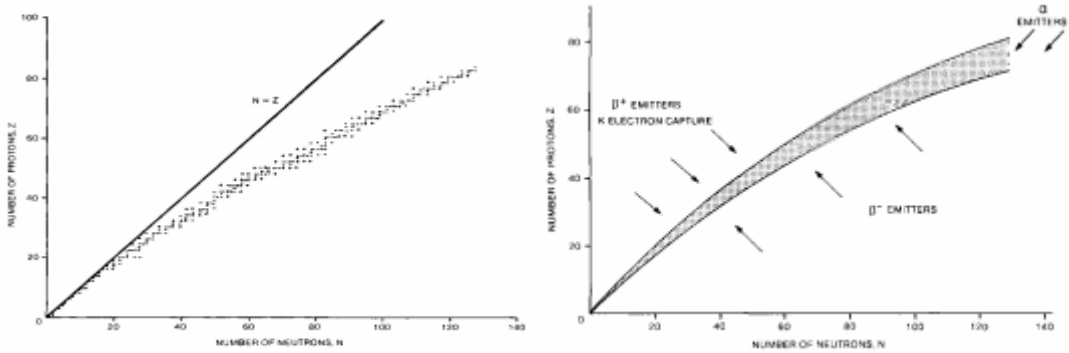
Çekirdek, protonlar ve nötronlardan yani nükleonlardan oluşur. Proton sayısına Atom Numarası denir ve Z ile gösterilir. N ise çekirdekdeki nötron sayısıdır. Belirli bir elementin tüm atomlarının elementi tanımlayan proton sayısı yani atom numarası vardır. Doğada bulunan elementler, hidrojen için 1'den, doğal en ağır element olan uranyum için 92'ye kadar değişen atom numaralarına sahiptir. Atom numarası 92'den büyük olan elementler yapay olarak üretilen transuranik elementlerdir. Atom numarası 94 olan plütonyum elementinin nükleer enerji üretiminde özel bir öneme sahiptir ve çalışan bir nükleer reaktörde üretilmektedir. Plütonyuma doğal olarak oluşan bir element olarak da atıflar mevcuttur. Dünyanın farklı yerlerinde, uranyum yataklarının bir nükleer reaktör gibi davrandığı tespit edilmiştir. Böylece çok küçük miktarlarda plütonyum doğal yollardan da üretilir.

Bir çekirdekdeki nükleonların sayısına, yani protonlar ve nötronların toplam sayısına, Kütle Numarası denir ve A harfi ile gösterilir. Yani; $A = Z + N$ dir; N, nötronların sayısıdır.

Bir çekirdek A_ZX olarak gösterilir. X, elementin sembolü. Z, atom numarası veya proton sayısıdır. A, kütle numarası veya nükleon sayısıdır.

Bir elementin bütün atomlarının çekirdeklerinde eşit sayıda proton vardır, fakat farklı sayıda nötrona bulunabilir. Örneğin, uranyum elementinin çekirdeği tanım gereği 92 protona sahiptir, ancak 142, 143 veya 146 nötrona sahip olabilir. Bu tür çekirdekler izotop olarak isimlendirilir ve ${}^{234}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ sembolleri ile gösterilirler. Şekil 1.2.2'de, düşük kütle numaralı kararlı elementler için nötron sayısının proton sayısına yaklaşık olarak eşittir. Bununla birlikte, daha ağır elementler için, uranyum çekirdeğinde protonların yaklaşık bir buçuk katı kadar nötron bulunana kadar, nötron sayısı proton sayısından çok daha hızlı artar.

Çekirdekteki nükleonların bir arada tutulması; daha ağır elementlerde protonlardan daha fazla nötron bulunmasıyla izah edilebilir. Nükleonlar arasındaki kütleçekim kuvvetleri, pozitif yüklü protonlar arasındaki çekirdeği bozma eğiliminde olan elektrostatik itme kuvvetlerine kıyasla çok küçüktür ve ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte, nükleonlar arasında proton ve proton, proton ve nötron, nötron ve nötron arasında Güçlü Nükleer Kuvvet olarak bilinen güçlü bir çekici kuvvet vardır. Nötronların protonlarla karışmasının etkisiyle, protonlar arası mesafenin ortalama olarak daha artması ve dolayısıyla yükler arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olan elektrostatik itme kuvvetinin azalması anlamına gelir. Eşit derecede önemli olan, toplam çekim kuvveti, nötronların mevcudiyeti ile artar. Element ne kadar ağırsa, elektrostatik kuvvetlerin azalması ve nükleer kuvvetlerin artması o kadar gereklidir.



Şekil 1.4 Çekirdeklerin proton, nötron sayılarına göre dağılımı ve kararlı çekirdek haritası

1.3 Radyoaktivite

1.3.1 Kararsız çekirdekler

Şekil 1.4 kararlı çekirdeklerin proton ve nötron nükleer haritadaki yerini yani kararlılık bölgesini göstermektedirler. Bu alanın dışında kalan çekirdekler kararsızdır. Kararsız çekirdekler, doğal ortamda mevcuttur veya kararlı çekirdekleri nötron veya başka parçacık bombardımanına tabi tutarak yapay olarak üretilebilir. Mesela;

çekirdeğin nötron yakalaması, değişen proton nötron kombinasyonu nedeniyle çekirdeği kararsız hale getirebilir. Tüm kararsız durumlarda olduğu gibi, proton nötron kombinasyonunun tekrar değişmesi ile kararlılık sağlanabilir. Bunun için, çekirdekten kendi parçaları fırlatılır; bu emisyonlara radyasyon denir ve çekirdeğin radyoaktif olduğu ve radyoaktif bozunma geçirdiği söylenir. Bozunma işlemi birden fazla adım içeriyorsa, buna radyoaktif bozunma zinciri denir. Orijinal kararsız çekirdeğe ana çekirdek denir ve bozunma zincirindeki ürün veya ara ürün çekirdeklere kız çekirdek denir.

1.3.2 Radyoaktif Çekirdekler

Kararsız bir çekirdeğin radyoaktif bozunumunda, proton nötron kombinasyonundaki değişiklikler aşağıdaki yollardan birisi ile olabilir.

1.3.2.1 Beta bozunması

Elektron, pozitron yayınlanması ve elektron yakalama olarak üç modu vardır.

1.3.2.1.1 Elektron yayınlanması (β^-)

Bir nötron bir protona ve bir elektrona dönüşür, elektron çekirdekten fırlatılır. Bu elektronlar, atomların yörüngedeki elektronları ile her yönden aynıdır, ancak çekirdek kökenlerini belirlemek için beta (β^-) parçacıkları ve β^- radyasyonu olarak adlandırılırlar. Kararsız çekirdeğin kütle numarası değişmeden kalır, ancak atom numarası bir birim artar, farklı bir elemente dönüşür. Örneğin, bir iyot I-135 izotopu, β^- radyasyonu ile bir ksenon Xe-135 izotopuna bozunur. Beta yayıcılar, Şekil 1.4'te gösterilen kararlılık bölgesinin altında yer alan hafif ve orta elementlerdir.

1.3.2.1.2 Pozitron bozunması ve K elektron yakalama (β^+)

Bir proton, bir nötron ve bir pozitrona dönüşür. Pozitron, β^+ parçacığıyla her yönden aynıdır, ancak pozitif yüklüdür. Çekirdekten dışarı atılır ve bir elektronla karşılaştığında yok olur. + ve - işaretleri pozitif yüklü pozitron (β^+) ile negatif yüklü elektron (β^-) arasında ayırım yapmak için kullanılır. β^+ emisyonunda kararsız çekirdeğin kütle numarası aynı kalır, ancak atom numarası bir azalır, bu da farklı bir elemente dönüşür. Çekirdekte pozitron emisyonu ile aynı dönüşümlü diğer olay; K kabuğu olarak bilinen çekirdeğe en yakın yörüngedeki bir elektronun çekirdekteki bir proton tarafından yakalanmasıdır. Bir proton bir nötrona dönüşür. Buna 'K elektron yakalama' denir. Elektronlar yörüngeleri tekrar düzenlenirken X-ışınları yayılır. Pozitron emisyonu

ve K elektron yakalaması, Şekil 1.4'te gösterilen kararlılık bölgesinin üzerinde yer alan hafif veya orta elementlerde görülür.

1.3.2.2 Alfa bozunması

Çekirdek bir alfa (α) parçacığı fırlatır. Bu, iki proton ve iki nötrondan oluşan çok kararlı bir parçacıktır. Kararsız çekirdeğin kütle numarası dört ve atom numarası iki azalır, burada da farklı bir elemente dönüşür. Alfa emisyonu daha ağır elementlerde görülür.

1.3.2.3 Doğal fisyon

Başka bir radyoaktivite türü, çekirdeğin kabaca iki eşit parçaya ayrıldığı doğal fisyonudur. Doğal fisyon, ağır elementlerle sınırlıdır ve genel olarak, daha yaygın olan bir bozunma ile rekabet halinde az sayıda tespit edilebilir. Doğal fisyonla uğrayan elementlerin örnekleri, U-238 ve Pu-240'tır. Doğal fisyondan farklı olarak nükleer reaktörlerin temeli olan ve nötron kaynaklı fisyon da mevcuttur.

1.3.2.4 Uyarılmış çekirdekler, gama radyasyonu

Yukarıda bahsedilen radyoaktif bozunma süreçleri, kız ürün çekirdeğin genellikle iç enerji artışında değişmeye neden olur. Radyoaktif emisyonların enerjisi ve yapay radyoaktif çekirdekler üretmek için gerekli enerji üzerine yapılan çalışmalar, çekirdeğin iç enerjisinin anlaşılmasına yol açtı. Çekirdekler uyarılırsa, her enerji değerinde değil, yalnızca belirli ayırık enerjilerde bulunabilirler. En az enerjiye sahip durum en kararlı olanıdır ve çekirdeğin temel durumu olarak adlandırılır. Çekirdek, temel durumun üzerinde başka bir enerji seviyesindeyse, buna "uyarılmış" denir. Çekirdek daha sonra gama (γ) radyasyonu vererek temel duruma veya başka bir ara uyarılmış duruma dönebilir. Bu radyasyon, elektromanyetik spektrumun çok yüksek frekanslı, kısa dalga boylu olan elektromanyetik radyasyondur. Bu nedenle, X-ışınları radyasyonuna benzer, ancak daha nüfuz edicidir. Yayılan γ ışının enerjisi, belirli bir element için ayırt edici olarak, uyarılmış çekirdeğin ilk ve son durumları arasındaki enerji farkına eşit olacaktır. Çekirdeğin kütle numarası ve atom numarası aynı kalır. Kısaca: Radyoaktif bozunmada bir kız ürün, çoğu zaman olduğu gibi, uyarılmış yani enerji olarak kararsız durumda oluşursa, çekirdek enerji olarak daha kararlı, yani daha düşük veya temel duruma geçerken parçacık radyasyon emisyonlarına γ radyasyon eşlik eder.

1.3.3 Yarı Ömür

Kararsız çekirdeklerin radyoaktif bozunmasında belirli bir çekirdeğin ne zaman bozunacağını tahmin etmek mümkün değildir. Bununla birlikte, çok sayıda radyoaktif çekirdek olduğunda, birim zaman başına bozunma olasılığının sabit olduğu istatistiksel olarak ifade edilebilir. Yani, sonsuz küçük bir zaman aralığında bozunması muhtemel çekirdek sayısı yani aktiflik $A(t)$ denilen bozunum hızı, mevcut çekirdek sayısı N ile orantılıdır. Aktiflik $dN/dt = \lambda N$ olarak yazılır. Burada λ orantılılık sabitidir ve bozulma sabiti olarak bilinir; değeri belirli radyoaktif izotopa bağlıdır ve o izotopa özgüdür. Çekirdek bozduğundan N azalır ve dN/dt değeri daima negatiftir. İntegrasyon işlemi, $N=N_0 \text{Exp}(-\lambda t)$ sonucunu verir; burada N_0 , izotopun $t=0$ anındaki radyoaktif çekirdek sayısıdır. Çekirdek bozunma hızı genellikle bir çekirdeğin ortalama ömrü, τ veya alternatif olarak yarı değer periyodu (genellikle yarı ömür olarak kısaltılır) $T_{1/2}$ cinsinden verilir. τ , bozunma sabiti λ 'nın tersidir ve bozunmanın üstel ifadesinden şu sonuç çıkar: $T_{1/2} = \log_2(2)/\lambda = 0.693/\lambda = 0.693\lambda$. Buna göre beş yarı ömürden sonra ilk baştaki bozunmamış radyoaktif çekirdeklerin yalnızca yaklaşık %3'ü kalır. Belirli izotoplar için yarı ömür değerleri, saniyenin kesirlerinden (Be-8: 3×10^{-16} s) milyonlarca yıla (U-238: $4,5 \times 10^9$ yıl) kadar değişir. Nötron da bir radyoaktif madde örneğidir; 10.8 dakikalık yarı ömürle bir protona dönüşür. Önceleri radyoaktivite birimi Curie (Ci) idi ve incelenen ilk radyoaktif madde olan radyumun aktivite hızı cinsinden tanımlanıyordu. Daha sonra saniyede $3,7 \times 10^{10}$ nükleer parçalanma olarak yeniden tanımlandı. Curie birimi yerine saniyede 1 parçalanmaya eşit yeni bir birim olan becquerel (Bq) ile değiştirildi.

1.4 Radyasyonun madde ile etkileşimi

1.4.1 İyonlaştırıcı radyasyonlar

Radyasyonlar madde içinden geçerken karşılaştıkları atomlarla reaksiyona girebilirler. Reaksiyonlar genellikle atomların iyonlaşmasına ve yapıdaki normal konumlarından yer değiştirmelerine yol açar. Gelen radyasyonun enerjisinin tamamı veya bir kısmı bu atomlara aktarılabilir. Bu şekilde radyasyon geçtikleri yapılara, özellikle de canlı dokuların yapısına zarar verebilir. Bu tür hasarların etkileri ve bunlara karşı korunma çalışmaları yoğunlukla yapılmaktadır. Radyasyon tespit cihazlarının çalışması ve koruyucu malzemelerin seçimi de radyasyonun madde ile etkileşiminin anlaşılmasına bağlıdır.

α , β ve γ radyasyonlarının atomları iyonlaştırma etkisi çalışmaları, radyasyonların ne olduğundan habersiz olarak radyoaktivite üzerine çalışan ilk çalışanlara kadar uzanmaktadır.

1.4.1.1 Alfa parçacıkları

Helyum atomunun çekirdeğidirler ve kararsız çekirdeklerden hesaplanabilen bir hızla yayınlanır. Nispeten ağırdırlar, çarpıştıkları yörünge elektronlarından yaklaşık 7000 kat daha ağırdırlar ve β parçacıklarına kıyasla nispeten yavaş hareket ederler. Alfa parçacığı iki pozitif yük taşır; bu nedenle atomun yörünge elektronları α parçacığı tarafından elektrik kuvvet ile çekilerek ana atomlarından uzaklaştırılır yani iyonlaştırılır. Böylece bir α parçacığı bir malzemeyi geçerken enerjileri hızla dağılır. Düz çizgilerde hareket ettikleri ve çok sayıda iyonlaştırıcı çarpışmada sürekli olarak etkileşerek enerji kaybettikleri için, belirli bir enerjiye sahip α parçacıkların belirli bir malzemede belirli bir hareket aralığı vardır. Tipik olarak bir α parçacığı havada birkaç santimetre yol alır ve bir kağıt parçası veya insan cildinin dış katmanları tarafından durdurulur.

1.4.1.2 Beta parçacıkları

Sıfırdan belirli bir maksimum değere kadar değişen enerjilere sahip kararsız çekirdeklerden çıkan ve yayılan elektronlardır. Bir α parçacığından çok daha hafif olan β parçacıkları genellikle çok daha hızlı hareket eder ve malzeme içinden geçerken atomlarla reaksiyona girmek için daha az zamanları vardır. Ayrıca, yalnızca tek bir negatif elektrik yüküne sahip olduklarından, elektrik kuvvetleri bir α parçacığa göre daha zayıftır. Böylece bir parçacıkla karşılaştırıldığında malzeme içinden geçerlerken daha az iyonlaştırırlar, enerjilerini daha yavaş kaybederler ve daha uzun mesafe katederler. Tipik olarak β parçacıkları havada sıfırdan birkaç metreye ve suda veya canlı dokuda yaklaşık bir santimetreye kadar gidebilir.

α ve β parçacıklarının emisyon enerjileri arasında önemli bir başka fark daha vardır. Belirli α bir yayan radyoaktif izotop için α parçacıklarının tümü tamamen aynı enerjiyle yayınlanır. β emisyonunun da aynı enerji büyüklüğüne sahip olmaması beklenirken, sıfırdan maksimum bir enerji aralığındaki bütün değerlerde olabilir. Sürekli enerji aralığını izah etmek için 1931'de W. Pauli, β emisyonuna ikinci bir parçacığın eşlik ettiğini teorik olarak öne sürdü ve 1956 senesinde deneysel olarak doğrulandı. β^+ bozunumuna nötrino ve β^- bozunumuna antinötrino eşlik etmekte olduğu gösterildi. Emisyon enerjisi iki parçacık arasında paylaşılır, böylece β radyasyonunda gözlenen

sürekli enerji dağılımını şöyle açıklanır: β parçacığı enerjisi; Bozunum enerjisinin hepsi β parçacığında olduğunda maksimum değerden, hepsi nötrino/antinötrinoda olduğunda sıfıra kadar değişir. Nötrino ve antinötrino, sıfır kütle ve sıfır yüke sahip parçacıklardır ve dolayısıyla yalnızca enerjiye sahiptirler. Dünyanın kütesinden neredeyse etkileşmeden geçerler, yaklaşık 10^{10} da biri etkileşir.

1.4.1.3 Gama ışınları

γ ışını çok yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyondur. Son derece nüfuz edicidirler. Örneğin 1 MeV γ ışınını başlangıç yoğunluklarının onda birine kadar azaltmak için 10 cm kurşun gerekir. γ ışın da dahil olmak üzere tüm elektromanyetik radyasyonun, enerjisi E radyasyon frekansı ν ile orantılı olan fotonlar adı verilen ayrı enerji paketleri halinde geldiği kabul edilir: $E = h\nu$ burada h sabiti Planck sabiti olarak bilinir. Fotonlar birçok yönden bir parçacık gibi davranırlar, ancak madde ile etkileşime girdiklerinde kademeli olarak yavaşlayan α ve β radyasyonunun aksine, fotonlar her zaman ışık hızıyla hareket etmelidir. γ ışınları madde ile üç şekilde etkileşime girerler ve neticede fotonlar ya yok olur ve kaybolur ya da daha düşük enerjili fotonlara dönüşür.

1.4.1.3.1 Fotoelektrik etki

Gama ışınları, soğuran malzemenin atomlarının yörünge elektronları ile etkileşime girer. Bir foton, tüm enerjisini bir elektrona aktararak atomu iyonlaştırarak kaybolur. Fotoelektrik etki ve dolayısıyla γ radyasyonunun zayıflaması, daha ağır elementlerde ve 1 MeV'ye kadar olan γ ışınlarında meydana gelme olasılığı çok daha yüksektir.

1.4.1.3.2 Compton etkisi

Bu aynı zamanda yörünge elektronları ile bir etkileşimdir, ancak burada foton enerjisinin sadece bir kısmını bir elektrona aktarır ve daha düşük enerjili bir fotona dönüşür. γ ışını ışık hızında ama öncekinden farklı bir açı ve frekansta yoluna devam eder. Böylece tek enerjili bir γ ışını Compton etkisi ile saçılır ve daha düşük enerjiye sahip bir γ ışınına dönüştürülür.

1.4.1.3.3 Çift oluşum

Madde ile etkileşime giren bir γ ışını, bir elektron pozitron çifti üretilerek kaybolabilir. Bunu yapmak için fotonun üretilen kütleyle eşdeğer bir minimum enerjiye

sahip olması gerekir: $h\nu \geq 2 m_e c^2 \geq 1.022 \text{ MeV}$, burada m_e elektronun durgun kütlesidir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Nükleer Pil Tasarımı

Nükleer pil teknolojisini, daha küçük cihazlarda kullanabilmek için, nükleer pillerin boyutlarının küçültülmesi ve enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması gereklidir. Bu nedenle, çeşitli mikro nükleer pil konseptleri geliştirildi. Seebeck etkisinden çok farklı dönüştürücüler kullanılabilir.

Tüm nükleer pil sistemleri, aynı tasarım esaslarının çoğunu kullanır, ancak artan verimlilik ve daha küçük boyut gibi hedefler, tasarım sürecine yeni yöntemler gerektirir. Bir nükleer pil teknolojisinin verimliliği, radyoizotop kaynağı, radyasyon iletim ve enerji dönüştürücü tarafından belirlenir. Radyoizotopların enerji yoğunluğu (J/kg), nükleer bozunum enerjisinin büyük olasılığın dolayısı kimyasal enerji kaynaklarından daha yüksektir. Bununla birlikte, belirli bir pil gücü uygulaması için bir radyoizotop kaynağında güç yoğunluğuna da (W/kg) önemlidir. Belirli bir radyoaktif bozunma türü (alfa, beta, fisyon, vb.) içinde, enerji yoğunluğu izotopun yarı ömrü ile ters orantılı olarak değişir; yarı ömür ne kadar kısa olursa, güç yoğunluğu o kadar yüksek olur. Bu temel ilke, bir nükleer pilden istenen iki özelliğin, uzun raf ömrü ve yüksek güç yoğunluğunun çelişkili olmasına neden olur.

Nükleer pillere özgü diğer bir tasarım hususu, sistem bileşenlerinin birbiriyle tam uyumudur. Belirli bir malzeme içinden geçen bir radyoaktif parçacığın menzili, radyasyonun taşınım ölçeği uzunluğu ($\lambda_{\text{RadTş}}$) olarak; dönüştürücüdeki enerji dönüşüm hacminin ilgili fiziksel boyutu, dönüştürücü ölçek uzunluğu ($L_{\text{Dnş}}$) olarak adlandırılır. Bu iki ölçek uzunluğu, $\lambda_{\text{RadTş}}$ ve $L_{\text{Dnş}}$, yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Bu temel ilke, bir nükleer pilin verimliliğinde çok önemlidir. Bu iki uzunluk ölçüsü uyumlu bir sistem daha yüksek bir maksimum teorik verimliliğe sahipken, uyumlu olmayan bir sistem daha düşük bir maksimum teorik verimliliğe sahiptir. Uyumlu ölçek uzunluklarına ulaşmak, nükleer pil tasarımında karşılaşılan en önemli zorluklardan biridir. $\lambda_{\text{RadTş}}$ 'yi etkileyen değişkenler şunları içerir: radyoaktif kaynaktan çıkan parçacıkların kütlesi, yükü, açılma dağılımı ve enerji dağılımı; hedef malzemenin atom numarası, yoğunluğu ve iyonlaşma potansiyeli; ve parçacığın hedef malzemesiyle etkileşme

mekanizmalarıdır. Bütün bu farklı özelliklerdeki değişim, mesela radyoizotoplar arasındaki farklılık, aynı hedef malzeme için bile $\lambda_{\text{RadTş}}$ 'nin büyük ölçüde değişmesine neden olur. $L_{\text{Dnş}}$ 'ı belirleyen faktörler, pilin enerji dönüşüm mekanizmasını, hedef malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerini ve radyasyonun hedef üzerindeki hasarının etkisini içerir. Son faktör, nükleer piller için çok önemlidir. Buna karşılık, RTG'nin ölçek-uzunluk eşleştirmesiyle ilgili sorunları yoktur; RTG'nin büyüklüğü, tüm radyoizotop enerjisinin dönüştürücü içinde birikmesini ve ısıya dönüştürülmesini sağlar. Radyasyon aralığını potansiyel dönüştürücülerin ölçek uzunluğuna uyumunu sağlamadaki zorluklar, nükleer pil tasarımında değerlendirilmesi gereken birçok faktörden ilkidir.

Nükleer pillerin fiziğinde teknoloji kullanımını sınırlayan bazı zorluklar vardır.

Başlıcaları şunlardır:

İzotopun seçilme nedeni.

İzotopun pil içine gömülme yöntemi ve nedeni.

Gömülü izotopun dönüştürücüye arayüzlenme yöntemi. Bir yüzey veya hacim arayüz tercihi.

İzotopun yaydığı iyonlaştırıcı türü.

İyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi, enerji spektrumu.

İzotopun gömülü olduğu malzemedeki izotoptan yayılan iyonlaştırıcı radyasyonun aralığı.

Pil hücrelerini oluşturan malzemelerde, özellikle dönüştürücüde izotoptan yayılan iyonlaştırıcı radyasyonun aralığı.

Dönüştürücünün ölçek uzunluğu.

İyonlaştırıcı radyasyonun aralığı ile dönüştürücünün ölçek uzunluğu eşleşme uyumu.

İzotropik iyonlaştırıcı radyasyon ile dönüştürücünün uyum oranı.

Kullanılan dönüştürücü tipi.

Pilin potansiyel güç yoğunluğu.

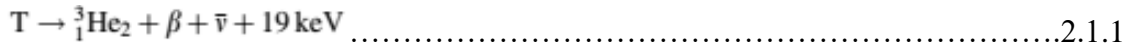
Dönüştürücü üzerindeki radyasyon hasarının etkileri.

Bu başlıkların her biri, bir nükleer pilin tasarımını etkileyen belirli bir parametreyi temsil eder. Bu parametrelerde bir nükleer pilin tasarımını zorlaştıran karmaşık bağımlılıklar ve karşılıklı bağımlılıklar vardır. Çoğu zaman, bir sorunu çözmek için bir parametre değiştirildiğinde, başka bir yerde eşit veya daha büyük bir sorun başgösterme eğilimi gösterir.

2.1.1 İzotopun güç üretme kapasitesi

Pil tasarımındaki ilk ve en önemli aşama, izotopun güç üretme kapasitesinin hesaplanması ve anlaşılmasıdır. Bir nükleer pilde, bir dönüştürücüye arayüzlenmiş trityum radyoizotopunun kapasitesi hesaplanacaktır. Trityum radyoizotopunun bozunma hızları, belirli bir miktarındaki trityum izotoptan güç çıkışını hesaplamak için kullanılır.

Trityumun yarı ömrü 12,33 yıl ve maksimum beta (β) enerjisi, yani beta bozunum reaksiyonunda salınan enerji olan Q değeri, 19 keV'dir. Trityumun beta bozunumu,



dir. Antinötrino ve beta parçacığı 19 keV enerjisiyi paylaşır ve momentumun korunumu ve enerjinin korunumu ilkelerine uyar. Ortalama beta enerjisini tahmin etmek için kullanılan pratik bir kural, Q değerini 1/3 ile çarpmaktır (Moseley ve Harling 1913) (Prelas ve ark., 2014). İzotoplardan yayınlanan beta parçacıkları enerjileri sürekli bir spektrum olması nedeniyle bu pratik kuralı kullanmaktan meydana gelen ve bazı izotoplar (Prelas ve ark., 2014) için %10'a kadar çıkabilen hata dikkate alınmaz. Böylece, bir beta parçacığı tarafından taşınan tahmini ortalama enerji,

$$\bar{E} = \frac{19 \text{ keV}}{3} = 6.33 \text{ keV} \dots\dots\dots 2.1.2$$

olacaktır. 1 Curie (Ci) herhangi bir radyoizotop için, saniyede $3,7 \times 10^{10}$ bozunum hızında radyasyon yayınlama miktarını temsil eden bir radyoaktivite birimidir. Radyoaktivite için bir ölçü olarak yaygın olarak kullanılır. İlk adım olarak, bir Ci trityum tarafından yayılan güç miktarı hesaplanacaktır. Ayrıca, 1 Ci'lik trityumdaki enerji tahmin edilecektir. İzotopun deneyin başında veya pil cihazına montesinin başlangıcında yaydığı güç için bir hesaplama yapılır ($P(0)$ W/Ci). Bu değer, reaksiyonda yayılan bir beta parçacığının ortalama enerjisinin, 1 Ci'lik bir izotopun saniyedeki toplam bozunma sayısı ile çarpılarak bulunur. Ayrıca keV'yi Joule'ye dönüştürmek için dönüştürme faktörü ile çarpılır.

$$P(0) \frac{W}{Ci} = 6.33 \frac{keV}{Decay} \times 3.7 \times 10^{10} \frac{Decay}{s \cdot Ci} \times 1000 \frac{eV}{keV} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{J}{eV}$$

$$= 3.75 \times 10^{-5} \frac{W}{Ci} \dots\dots\dots 2.1.3$$

Güç zamanla azalacaktır. Bu zamana bağlı güç azalması, trityumun bir Ci'sinde depolanan enerjiyi hesaplamak için gereklidir.

$$k = \frac{0.693}{12.33yr \times 365 \frac{d}{yr} \times 24 \frac{hr}{d} \times 3600 \frac{s}{hr}} = 1.782 \times 10^{-9} s^{-1} \dots\dots\dots 2.1.4$$

Denklem'i kullanılarak bozulma sabiti bulunur.

Zamana bağlı güç azalması, mevcut izotop miktarı ile doğru orantılıdır,

$$P(t) \frac{W}{Ci} = P(0) e^{-kt} \frac{W}{Ci} = 3.75 \times 10^{-5} \frac{W}{Ci} e^{-1.782 \times 10^{-9} s^{-1} t} \dots\dots\dots 2.1.5$$

Yaklaşık beş yarı ömürden (t_5) sonra güç, başlangıç gücünün yaklaşık %3'üne düşer. Trityum için beş yarı ömür,

$$t_f = 5 \times 12.33 yr \times 365 \frac{d}{yr} \times 24 \frac{hr}{d} \times 3600 \frac{s}{hr} = 1.94 \times 10^9 s \approx 61 yr \dots\dots\dots 2.1.6$$

İzotopun 1 Ci'sinde depolanan enerji (E_{total}/Ci),

$$E_{total}/Ci = \int_0^{t_f} 3.75 \times 10^{-5} \frac{W}{Ci} e^{-1.782 \times 10^{-9} s^{-1} t} dt = 2.04 \times 10^4 \frac{J}{Ci} \dots\dots\dots 2.1.7$$

Benzer bir yolla izotopun bir gramından yayılan gücü hesaplamak için, İzotopun deneyin başında veya pil cihazına montesinin başlangıcında 1 gram izotoptan yayılan güç ($P(0)$ W/gm),

$$\begin{aligned}
P(0) \frac{\text{W}}{\text{gm}} &= 6.33 \frac{\text{keV}}{\text{Decay}} \times 1.782 \times 10^{-9} \text{s}^{-1} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \frac{\text{atoms}}{\text{mol}}}{3 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}} \\
&\times 1000 \frac{\text{eV}}{\text{keV}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \\
&= 0.363 \frac{\text{W}}{\text{gm}}
\end{aligned}$$

$$P(t) \frac{\text{W}}{\text{gm}} = P(0) e^{-kt} \frac{\text{W}}{\text{gm}} = 0.363 \frac{\text{W}}{\text{gm}} e^{-1.782 \times 10^{-9} \text{s}^{-1} t}$$

$$E_{\text{total/gm}} = \int_0^t 0.363 \frac{\text{W}}{\text{gm}} e^{-1.782 \times 10^{-9} \text{s}^{-1} t} dt = 1.97 \times 10^8 \frac{\text{J}}{\text{gm}} \dots\dots\dots 2.1.8$$

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Görüldüğü gibi, radyoizotoplar muazzam miktarda enerji depolar. Pil dizaynında aşılması gereken faktörlerden biri, izotopun radyoaktif parçacıkları nispeten yavaş bir oranda yayınlamasıdır. Bu, nükleer pillerin sınırlamalarından biri olan düşük güç yoğunluğu etkisidir. Örnek hesaplama için trityum seçilmiştir çünkü trityumun düşük menzili nedeniyle nükleer pillerde sıklıkla kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 531(3), 639-644.
- Alam, T., Pierson, M., 2016. Principles of Betavoltaic Battery Design, J. Energy Power Sources, vol. 3, no. 1, pp. 11–41.
- Anderson, D. J., Wong, W. A., et al., 2005. An Overview and Status of NASA's Radioisotope Power Conversion Technology NRA, NASA/TM- 2005-213980.
- Aydın, S., 2019. Nikel-63 ve prometyum-147 radyoizotopları ile güçlendirilmiş betavoltaik ve doğrudan şarjlı nükleer pillerin deneysel incelenmesi., Ph. Tez.
- Barnett, A. M., Lees, J. E., Bassford, D. J., Ng, J. S. 2012. Determination of the electron-hole pair creation energy in Al_{0.8}Ga_{0.2}As, J. Instrum., vol. 7, No: 6.
- Blanke, B.C. , Birden, H., Jordan, J., and Murphy, E. L., 1962. Nuclear Battery Thermocouple Type, Summary Report, U. S. A. E. Comission, Ed., 16 ed: U.S. Department of Commerce.
- Bower, K. E., Barbanel, Y. A., Shreter, Y.G., Bohnert, G. W., 2002, Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries, CRC Press.
- Conference on.. IEEE
- Corliss, W. R. and D. G. Harvey, 1964. Radioisotopic Power Generation (Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Deus S., 2000. Tritium-powered betavoltaic cells based on amorphous silicon, in Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, , pp. 1246-1249.
- Duggirala, R., Lal,A., Radhakrishnan, S., 2010. Radioisotope thin-film powered microsystems. Vol: 6. New York: Springer.
- Duggirala, R., Li, H., and Lal, A., 2008. High efficiency radioisotope energy conversion using reciprocating electromechanical converters with integrated betavoltaics," Appl. Phys. Lett., vol. 92.
- Gao, H., Shun-Zhong, L., Zhang, H., Wang, H., 2012. Investigation of a energy conversion silicon chip based on ⁶³Ni radio-voltaic effect, Acta Phys.Sin. 61 (17), 176101.
- Ghasemi Nejad, G. R., Rahmani, F., Abaeiani, G. R., 2014. Design and optimization of beta-cell temperature sensor based on ⁶³Ni-Si, Appl. Radiat. Isot., vol. 86, pp. 46–51.

- Guo, H., Shi, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Han, J., 2011. Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with ^{63}Ni irradiation source, 2011 IEEE Int. Conf. Electron Devices Solid-State Circuits, EDSSC 2011.
- Hatsopoulos, G. N., and Gyftopoulos, E. P., 1973. Thermionic Energy Conversion, Vol.1: Processes and Devices: The MIT Press.
- Honsberg, C., Doolittle, W.A., Allen, M., Wang, C., 2005. GaN betavoltaic energy converters, Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- Hunt, T. K., Weber, N., and Cole, T., 1981. High Efficiency Thermoelectric Conversion with Beta-Alumina Electrolytes, The Sodium Heat Engine, Solid State Ionics, vol. 5, pp. 263-266.
- Kavetskiy, A., et al., 2009. Promethium-147 capacitor. Applied Radiation and Isotopes. 67(6), 1057-1062.
- Laboratory, Ed Department_of_Energy, 2013. Summary of Plutonium-238 Production Alternatives Analysis Final Report," I. N., ed: DOE,],
- Lao, R., 2011 . A modular design for nuclear battery technology (Thesis), California Polytechnic State University.
- Lazarenko, Y. V., Gusev, V. V. and Pystovalov, A. A., 1988. Basic parameters of a radionuclide thermoelectric generator, Atomic Energy 64 (2), 131.
- Lee, S.K., Son, S., Kim, K., Park, J., Lim, H., Lee, J., Chung, E., 2009. Development of nuclear micro-battery with solid tritium source, Appl. Radiat. Isot., vol. 67, no. 7-8, pp. 1234-1238.
- Liu, Y., et al. 2014. Optimization and temperature effects on sandwich betavoltaic microbattery. Science China Technological Sciences. 57(1), 14-18.]
- Mahato, A., et al., 2018. Nuclear battery. International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR). 3(4), 71-76.]
- Manasse, F., Pinajian, J., Tse, A., 1976. Schottky barrier betavoltaic battery. IEEE Transactions on Nuclear Science. 23(1), 860-870.
- Meier, D., 2008, Radionuclide Production For Radioisotope Micro-Power Source Technologies, PhD Dissertation, University of Missouri-Columbia.
- Michael, R., George M., Miley, H., Nie Luo, Gimlin, Richard J., 2008. Ragone Plot Comparison of Radioisotope Cells and the Direct Sodium Borohydride/Hydrogen Peroxide Fuel Cell with Chemical Batteries, IEEE Transactions on Energy Conversion.

- Moseley HGJ, Harling J, 1913. The attainment of high potentials by the use of radium. Proc RSoc (Lond) A 88:471
- Moseley, H.G.J., Rutherford, E., 1913. The attainment of high potentials by the use of radium. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 88, 471-476.
- Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2011 IEEE International
- Nelson, R. E., 2003. A brief history of thermophotovoltaic development, Semiconductor Science and Technology, vol. 18, pp. S141–S143.
- Performance of the betavoltaic cell. Applied Radiation and Isotopes. 68(12),2214-2217.
- Prelas MA, Weaver CL, Watermann ML, Lukosi ED, Schott RJ, Wisniewski DA, 2014. A review of nuclear batteries. Prog Nucl Energy 75:117–148, Aug 2014
- Prelas, M. A., 1989. Nuclear-Driven Solid-State Lasers, in International Conference on Lasers '89, New Orleans, LA,.
- Prelas, M. A., and Loyalka, S. K., 1981. A review of the utilization of energetic ions for the production of excited atomic and molecular states and chemical synthesis, Progress in Nuclear Energy, vol.8,pp. 35-52.
- Prelas, M., Charlson, E., Boody, F., and Miley, G., 1990. Advanced nuclear energy conversion using a two step photon intermediate technique, Prog. In Nuclear Energy, vol. 23, pp. 223-240,
- Prelas, M.A., et al., 2014. A review of nuclear batteries. Progress in Nuclear Energy. 75, 117-148
- Rahastama, S., Waris, A., 2016. Analytical Study of ⁹⁰Sr Betavoltaic Nuclear Battery Performance Based on p-n Junction Silicon, J. Phys. Conf. Ser., vol. 739, no. 1.
- Revankar, S. T., Adams, T. E., 2014. Advances in Betavoltaic Power Sources, J. Energy Power Sources, vol. 1, no. 6, pp. 321–329.
- Revankar, S.T., Adams, T.E., 2014. Advances in betavoltaic power sources. J. Energy Power Sources. 1(6), 321-329.
- Ritz, F., and Peterson, C. E., 2004. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) program overview, in Aerospace Conference, Proceedings. 2004 IEEE, 2004, p. 2957 Vol.5.
- Robison, W C, and Nelson, 1963. M D. Electron-Voltaic Cell Study. United States: N. p.,. Web. doi:10.2172/4102647.
- Ronen, Y., 2010. Some remarks on the fissile isotopes. Annals of Nuclear Energy. 37(12), 1783-1784.

- Ronen, Y., Hatav, A., Hazenshrung, N., 2004. 242mAm fueled nuclear battery. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:
- San, H., Yao, S., Wang, X., Cheng, Z., Chen, X., 2013. Design and simulation of GaN based Schottky betavoltaic nuclear micro-battery, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 80, pp. 17–22.
- Schmidt, G. R., Sutliff, T. J., and Dudzinski, L. A., 2011. Radioisotope Power: A Key Technology for Deep Space Exploration, in *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences*, P. N. Singh, Ed., ed: INTECH.
- Schmidt, G. R., Sutliff, T. J., and Dudzinski, L. A., 2011. Radioisotope Power: A Key Technology for Deep Space Exploration, in *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences*, P. N. Singh, Ed., ed: INTECH.
- Science, N., 2014. Demonstration of Pm-147 GaN betavoltaic cells, vol. 020403, no. 1, pp. 1–4.
- Shinn, E., et al. 2013. Nuclear energy conversion with stacks of graphene nanocapacitors. *Complexity*. 18(3), 24-27.
- Shultis, J. K., Faw, R. E., 2007. *Fundamentals of nuclear science and engineering*. 2nd(Second) edition. CRC Press.
- Sychov, M., Kavetsky, A., Yakubova, G., Walter, G., Yousaf, S., Lin, Q., Chan, D., Socarras, H., Bower, K., 2008. Alpha indirect conversion radioisotope power source, *Applied Radiation and Isotopes* Volume 66, Issue 2, S: 173-177.
- Tang, X., Liu, Y., Ding, D., Chen, D., 2012. Optimization design of GaN betavoltaic microbattery, *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, no. 3, pp. 659–664.]
- Tin, S. and Lal, A., 2009. Ultra-High Efficiency High Power Density Thinned-Down Silicon Carbide Betavoltaics, *PowerMEMS*, pp. 189–192.
- Tin, S., and Lal, A., 2016. Radioisotope Micropower For Semi- Active RFID, *Proceedings of the PowerMEMS*.
- W. Pfann, W. Van Roosbroeck, 1954. Radioactive and photoelectric p-n junction power sources, *Journal of Applied Physics* 25 1422-1434.
- Wacharasindhu, T., 2012. Composite-semiconductor-based micro power source (PhD Thesis), University of Missouri-Columbia.
- Wang, G., et al., 2010. The effect of temperature changes on electrical performance of the betavoltaic cell. *Applied Radiation and Isotopes*. 68(12), 2214-2217.
- Wang, G., et al., 2010. The effect of temperature changes on electrical

- Watermann, M.L. and Prelas, M.A., 2013. Integrated Solid State Nuclear Pumped Laser/Reactor Design for Asteroid Redirection, Transactions of the American Nuclear Society, November.
- Wu, K., C. Dai, and H. Guo, 2011. A theoretical study on silicon betavoltaics using Ni-63. in
- Yakubov, G., 2010. Nuclear Batteries with Tritium And Promethium-147 Radioactive Sources, Doctoral Thesis, University of Illinois at UrbanaChampaign,
- Yakubova, G.N., 2012. Nuclear Batteries with Tritium and Promethium-147 Radioactive Sources: Design, Efficiency, Application of Tritium and Pm- 147 Direct Charge Batteries, Tritium Battery with Solid Dielectric, ISBN: 9783659276200, LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Zuo, G., Zhou, J., Ke, G., 2013. A Simple theoretical model for ^{63}Ni betavoltaic battery. Applied Radiation and Isotopes. 82, 119-125.