

168429

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TIPTA KULLANILAN RADYOİZOTOP
JENERATÖRLERİNİN İNCELENMESİ**

Fizikçi Ahu ÖZKAN

FBE Fizik Ana Bilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasemin

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yasemin Yazar

Prof. Dr. Metin Subaşı

Metin Subaşı

İstanbul, 2005

Prof. Dr. Ahmet Bayülken

Ahmet Bayülken

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
KISALTMA LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
BÖLÜM 1	1
1.GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	16
2.1 RADYOAKTİF BOZUNMA	16
2.1.1 Radyoaktif Bozunma Yasaları: Üstel Yasa.....	17
2.2 NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ.....	23
2.2.1 Nötron Aktivasyon Analizi Hesaplamaları	25
2.3 Dünya’da Çeşitli Amaçlar İçin Kullanılan Bütün Radyoizotop Jeneratörleri	30
BÖLÜM 3	34
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
3.1 TIPTA KULLANILAN RADYOİZOTOP JENERATÖRLERİNİN İNCELENMESİ....	34
3.1.1 Teşhis Amacıyla Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri	36
3.1.2 Tedavi Amacı İle Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri	57
3.1.3 Teşhis ve Tedavi Amacı İle Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri	61
3.1.4 PET Uygulamaları İçin Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri	71
3.1.5 Üzerinde Çalışılmakta Olan Radyoizotop Jeneratörleri.....	82
3.1.6 Önerilen Radyoizotop Jeneratörleri	92
3.2 W-188/Re-188 Radyoizotop Jeneratörünün Geliştirilmesi.....	96
3.2.1 Bateman Denklemleri ile Hesaplama:.....	96
3.2.2 FUKMOD ile Yapılan Hesaplama:	98
3.3 Cs-137/Ba-137m Radyoizotop Jeneratörünün Geliştirilmesi	99
3.3.1 Ba-137m’in Cs-137’den Ayrılması.....	100
3.3.2 Ön hazırlıklar	100
3.3.2.1 NaPh ₄ B hazırlanması	100
3.3.2.2 CsCl Çözeltilerinin Hazırlanması	100
3.3.2.3 BaCl ₂ Çözeltilerinin Hazırlanması	101
3.3.2.4 ZrO(H ₂ PO ₄) ₂ Kolonun Elde Edilmesi.....	102
3.3.2.5 Cu ₂ [Fe(CN) ₆]Kolonun Elde Edilmesi	110
BÖLÜM 4	112
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	112
EK 1: W-188/Re-188 Radyoizotop Jeneratörü FUKMOD Sonuçları.....	113

SİMGE LİSTESİ

(m/V)	Kütle/hacim oranı
$t_{1/2}$	Yarı ömür
A	Aktivite
N	Çekirdek sayısı
n	Nötron
α	Alfa parçacığı
β^-	Beta parçacığı (Negatron)
β^+	Pozitron parçacığı
γ	Gama ışını
λ	Bozunma sabiti

KISALTMA LİSTESİ

AMP	Amonyummolibdo fosfat
BaCl ₂	Baryum klorür
CsCl	Sezyum klorür
Cu ₂ [Fe(CN) ₆]	Bakır (II) ferrosiyanür
CuCl ₂	Bakır (II) klorür
CuSO ₄	Bakır (II) sülfat
H ₃ PO ₄	Ortofosforik asit
HCl	Hidroklorik asit
HDEHP	Dietikhegsilfosforikasit
M	Molarite
MEK	Metil Etil Keton
NaCl	Sodyum klorür
NaI(Tl)	Sodyum iyodür(Talyum)
NaPh ₄ B	Sodyum tetrafenil borat
PET	Pozitron Emisyon Tomografi
ZrO(H ₂ PO ₄) ₂	Zirkonyum fosfat

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Mo-99/Tc-99m jeneratörü.....	11
Şekil 1.2 Kolonlu radyoizotop jeneratörü	13
Şekil 1.3 Adsorpsiyon	15
Şekil 1.4 İyon değiştirme	15
Şekil 2.1 Geçici denge grafiği.....	20
Şekil 2.2 Kalıcı denge grafiği.....	21
Şekil 2.3 Denge olmama durumu grafiği	22
Şekil 3.1 Mo-99/Tc-99m jeneratörü.....	37
Şekil 3.2 Mo-99/Tc-99m çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	37
Şekil 3.3 Mo-99/Tc-99m aktivite-zaman grafiği	38
Şekil 3.4 Mo-99/Tc-99m bozunma şeması	38
Şekil 3.5 Mo-99/Tc-99m sağım aktivite-zaman grafiği.....	39
Şekil 3.6 Mo-99/Tc-99m sağım aktivite-zaman yarı logaritmik grafiği.....	40
Şekil 3.7 Mo-99/Tc-99m $f(t)$ grafiği	41
Şekil 3.8 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik $f(t)$ grafiği	41
Şekil 3.9 Mo-99/Tc-99m $g(t)$ grafiği	42
Şekil 3.10 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik $g(t)$ grafiği.....	42
Şekil 3.11 Mo-99/Tc-99m $h(t)$ grafiği	43
Şekil 3.12 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik $h(t)$ grafiği.....	43
Şekil 3.13 Y-87/Sr-87m bozunma şeması.....	44
Şekil 3.14 Y-87/Sr-87m aktivite-zaman grafiği.....	44
Şekil 3.15 Y-87/Sr-87m çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	45
Şekil 3.16 Sn-113/In-113m bozunma şeması	46
Şekil 3.17 Sn-113/In-113m aktivite-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.18 Sn-113/In-113m çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.19 Cs-137/Ba-137m Jeneratörü	48
Şekil 3.20 Cs-137/Ba-137m bozunma şeması	48
Şekil 3.21 Cs-137/Ba-137m aktivite-zaman grafiği	49
Şekil 3.22 Cs-137/Ba-137m çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	49
Şekil 3.23 Os-191/Ir-191m bozunma şeması	50
Şekil 3.24 Os-191/Ir-191m aktivite-zaman grafiği	51
Şekil 3.25 Os-191/Ir-191m çekirdek sayısı-zaman grafiği	51
Şekil 3.26 Hg-195m/Au-195m bozunma şeması	52
Şekil 3.27 Hg-195m/Au-195m aktivite-zaman grafiği	53
Şekil 3.28 Hg-195m/Au-195m çekirdek sayısı-zaman grafiği	53
Şekil 3.29 W-178/Ta-178 bozunma şeması	54
Şekil 3.30 W-178/Ta-178 aktivite-zaman grafiği	54
Şekil 3.31 W-178/Ta-178 çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	55
Şekil 3.32 Cd-115/In-115m bozunma şeması	55
Şekil 3.33 Cd-115/In-115m aktivite-zaman grafiği	56
Şekil 3.34 Cd-115/In-115m çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	56
Şekil 3.35 Pb-212/Bi-212 bozunma şeması.....	57
Şekil 3.36 Pb-212/Bi-212 çekirdek sayısı-zaman grafiği.....	57
Şekil 3.37 Pb-212/Bi-212 aktivite-zaman grafiği	58
Şekil 3.38 Sr-90/Y-90 bozunma şeması.....	58
Şekil 3.39 Sr-90/Y-90 aktivite-zaman grafiği.....	59
Şekil 3.40 Sr-90/Y-90 çekirdek sayısı-zaman grafiği	59
Şekil 3.41 Os-194/Ir-194 bozunma şeması	60

Şekil 3.42 Os-194/Ir-194 aktivite-zaman grafiği	60
Şekil 3.43 Os-194/Ir-194 çekirdek sayısı-zaman grafiği	61
Şekil 3.44 Rb-81/Kr-81m bozunma şeması	62
Şekil 3.45 Rb-81/Kr-81m aktivite-zaman grafiği	62
Şekil 3.46 Rb-81/Kr-81m çekirdek sayısı-zaman grafiği	63
Şekil 3.47 W-188/Re-188 bozunma şeması	64
Şekil 3.48 W-188/Re-188 çekirdek sayısı-zaman grafiği	64
Şekil 3.49 W-188/Re-188 aktivite-zaman grafiği	65
Şekil 3.50 Cd-109/Ag109m bozunma şeması	66
Şekil 3.51 Cd-109/Ag109m çekirdek sayısı-zaman grafiği	66
Şekil 3.52 Cd-109/Ag109m aktivite-zaman grafiği	67
Şekil 3.53 Te-132/I-132 bozunma şeması	68
Şekil 3.54 Te-132/I-132 aktivite-zaman grafiği	68
Şekil 3.55 Te-132/I-132 çekirdek sayısı-zaman grafiği	69
Şekil 3.56 Mg-28/Al-28 bozunma şeması	70
Şekil 3.57 Mg-28/Al-28 aktivite-zaman grafiği	70
Şekil 3.58 Mg-28/Al-28 çekirdek sayısı-zaman grafiği	71
Şekil 3.59 Ge-68/Ga-68 bozunma şeması	72
Şekil 3.60 Ge-68/Ga-68 aktivite-zaman grafiği	72
Şekil 3.61 Ge-68/Ga-68 çekirdek sayısı-zaman grafiği	73
Şekil 3.62 Sr-82/Rb-82 bozunma şeması	74
Şekil 3.63 Sr-82/Rb-82 aktivite-zaman grafiği	74
Şekil 3.64 Sr-82/Rb-82 çekirdek sayısı-zaman grafiği	75
Şekil 3.65 Zn-62/Cu-62 bozunma şeması	76
Şekil 3.66 Zn-62/Cu-62 aktivite-zaman grafiği	76
Şekil 3.67 Zn-62/Cu-62 çekirdek sayısı zaman grafiği	77
Şekil 3.68 Fe-52/Mn-52m bozunma şeması	77
Şekil 3.69 Fe-52/Mn-52m aktivite-zaman grafiği	78
Şekil 3.70 Fe-52/Mn-52m çekirdek sayısı-zaman grafiği	78
Şekil 3.71 Xe-122/I-122 bozunma şeması	79
Şekil 3.72 Xe-122/I-122 aktivite-zaman grafiği	79
Şekil 3.73 Xe-122/I-122 çekirdek sayısı-zaman grafiği	80
Şekil 3.74 Te-118/Sb-118 bozunma şeması	80
Şekil 3.75 Te-118/Sb-118 aktivite-zaman grafiği	81
Şekil 3.76 Te-118/Sb-118 çekirdek sayısı-zaman grafiği	81
Şekil 3.77 S-38/Cl-38 bozunma şeması	82
Şekil 3.78 S-38/Cl-38 aktivite-zaman grafiği	83
Şekil 3.79 Se-72/As-72 bozunma şeması	83
Şekil 3.80 Se-72/As-72 aktivite-zaman grafiği	84
Şekil 3.81 Ar-42/K-42 bozunma şeması	84
Şekil 3.82 Ar-42/K-42 aktivite-zaman grafiği	85
Şekil 3.83 Rb-83/Kr83m bozunma şeması	85
Şekil 3.84 Rb-83/Kr83m aktivite-zaman grafiği	86
Şekil 3.85 Ir-189/Os-189m bozunma şeması	86
Şekil 3.86 Ir-189/Os-189m aktivite-zaman grafiği	87
Şekil 3.87 Hg-194/Au-194 bozunma şeması	87
Şekil 3.88 Hg-194/Au-194 aktivite-zaman grafiği	88
Şekil 3.89 Ag-111/Cd-111m bozunma şeması	88
Şekil 3.90 Ag-111/Cd-111m aktivite-zaman grafiği	89
Şekil 3.91 Sb-125/Te-125m bozunma şeması	89

Şekil 3.92 Sb-125/Te-125m aktivite-zaman grafiği.....	90
Şekil 3.93 Ba-131/Cs-131 bozunma şeması	91
Şekil 3.94 Ba-131/Cs-131 bozunma şeması	91
Şekil 3.95 Ni-66/Cu-66 bozunma şeması	92
Şekil 3.96 Ni-66/Cu-66 aktivite-zaman grafiği.....	92
Şekil 3.97 Zn-69m/Zn-69 bozunma şeması	93
Şekil 3.98 Zn-69m/Zn-69 aktivite-zaman grafiği	93
Şekil 3.99 Pd-112/Ag-112 bozunma şeması	94
Şekil 3.100 Pd-112/Ag-112 aktivite-zaman grafiği	94
Şekil 3.101 Ba-128/Cs-128 bozunma şeması	95
Şekil 3.102 Ba-128/Cs-128 aktivite-zaman grafiği.....	95
Şekil 3.103 10^{-5} M CsCl ve 0,1 M NaPh ₄ B ile Cs tayini	101
Şekil 3.104 10^{-4} M CsCl ve 0,1 M NaPh ₄ B ile Cs tayini	101
Şekil 3.105 10^{-3} M CsCl ve 0,1 M NaPh ₄ B ile Cs tayini	101
Şekil 3.106 10^{-5} M BaCl ₂ ve 0,1 M NaPh ₄ B ile Cs tayini	102
Şekil 3.107 HCl ve NaCl ile çözünme testi	103
Şekil 3.108 Zirkonyum fosfatın elde edilişi ve zirkonyum fosfat kolon.....	103
Şekil 3.109 Zirkonyum fosfat kolon ile inaktif sağım sonuçları.....	104
Şekil 3.110 Zirkonyum fosfat kolon ile hazırlanan Cs-137/Ba-137m jeneratörü.....	104
Şekil 3.111 İlk sağım sonucundaki Ba-137m yarı ömür grafiği	105
Şekil 3.112 İkinci sağım sonucundaki Ba-137m yarı ömür grafiği	105
Şekil 3.113 Ba-137m 1. spektrum.....	106
Şekil 3.114 Ba-137m 1. spektrum (geniş alan).....	106
Şekil 3.115 Ba-137m 2. spektrum.....	107
Şekil 3.116 Ba-137m 3. spektrum.....	107
Şekil 3.117 Ba-137m 4. spektrum.....	108
Şekil 3.118 Ba-137m 5. spektrum.....	108
Şekil 3.119 Ba-137m 6. spektrum.....	109
Şekil 3.120 Ba-137m 7. spektrum.....	109
Şekil 3.121 HCl ile çözünme testi.....	110
Şekil 3.122 Bakır ferrosiyanür kolon	110
Şekil 3.123 Bakır ferrosiyanür kolon ile Cs-137/Ba-137m jeneratörü	111
Şekil 3.124 Bakır ferrosiyanür kolonun inaktif deney sonucu.....	111

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Reaktörde Üretilen Radyoizotoplar ve Kullanıldığı Alanlar.....	1
Çizelge 1.2 Özel yollarla elde edilebilen radyoizotoplar.....	4
Çizelge 1.3 Taşıyıcısız radyoizotop üretim reaksiyonları.....	5
Çizelge 1.4 Taşıyıcısız Radyoizotopların Teorik Spesifik Aktiviteleri.....	10
Çizelge 2.1: Dünya’da Çeşitli Amaçlar İçin Kullanılan Bütün Radyoizotop Jeneratörleri	30
Çizelge 3.1 FUKMOD Sonuçları.....	99



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılmasında bana her zaman destek olan, benim için öğretmenliği derslerle sınırlı olmayıp hayat hakkında da bana çok şey öğreten tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yasemin Yazar'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarında çok büyük bir yardım sağlayan ve Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nin (ÇNAEM) birçok olanağından yararlanabilmeme imkân veren ÇNAEM Radyoizotop ve Radyofarmasötik Bölüm Başkanı Sayın Dr. Ahmet Fadıl Akgün'e teşekkür ederim.

Tanıştığımız günden beri bana her türlü desteği veren, çok yoğun iş temposuna rağmen her türlü sorunuma yardımcı olan ve bu çalışmadaki deneysel çalışmaları yapmama yardım eden Sayın Fikret Büyükkaya'ya çok teşekkür ederim.

Bu çalışmamdaki radyoaktif deneyleri yapmama yardımcı olan Sayın Dr. Nilgün Bostan'a çok teşekkür ederim.

W-188/Re-188 radyoizotop jeneratörü ve FUKMOD ile ilgili çalışmaları yapmama yardım eden Sayın Dr. Gülsen Üstün'e çok teşekkür ederim.

İlk günden beri bana her konuda yardımcı olan Radyoizotop ve Radyofarmasötik Bölümü çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Bugün sahip olduğum her şeyi borçlu olduğum, her zaman maddi ve manevi arkamda olan, bana olan inançlarını ve güvenlerini hiç kaybetmeyen sevgili annem ve babam Nursel Özkan ve Tufan Özkan'a çok teşekkür ederim.

ÖZET

Radyoizotop jeneratörleri, radyoizotopların radyoaktif bulaşıklık, atık ve uzak mesafelere taşıma sorunu olmaksızın üretimini sağlayan araçlardır. Günümüzde, bu jeneratörler başta nükleer tıp, endüstri olmak üzere çeşitli alanlarda ve çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu çalışmada; radyoizotop jeneratörleri, radyoaktif bozunma ve nötron aktivasyon analizi hakkında bilgi verilmiş, nükleer tıpta kullanılan veya üzerinde çalışılan radyoizotop jeneratörleri incelenmiştir. Bu radyoizotop jeneratörlerinden W-188/Re-188 jeneratörünün elde edilmesi ve Cs-137/Ba-137m jeneratörünün geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Tıp ve endüstrinin yanı sıra okullarda radyoaktif bozunmanın deneysel gösterimi amacıyla da kullanılabilecek olan Cs-137/Ba-137m radyoizotop jeneratörünün geliştirilme aşamalarında Cs^+ iyonlarını Ba^{+2} iyonlarından ayırmak için kullanılan çeşitli kolon dolgu maddeleri, sağım çözeltileri hakkında bilgi verilmiş ve bu jeneratörün fiziksel incelemesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Radyoizotop, radyoizotop jeneratörleri, nükleer tıp

ABSTRACT

Radioisotope generators are one of the radioisotope production methods which have not problems about contamination, waste and carrying long distances. Nowadays, these generators which are mostly used in nuclear medicine and industry in various places and aims. In this study; informations were given about radioisotope generators, radioactive decay, neutron activation analysis, the generators which are used or studied in nuclear medicine had been examined. The production of W-188/Re-188 generators and the development of Cs-137/Ba-137m generators which are radioisotope generators were discussed. In the development of C-137/Ba-137m generator, it is used in medicine, industry and showing the experiment of radioactive decay in schools, informations were given about column materials which are used separating Cs^+ ions from Ba^{+2} ions and eluants and examination of this generator.

Keywords: Radioisotope, radioisotope generators, nuclear medicine

BÖLÜM 1

1.GİRİŞ

Elementlerin radyoaktif olan ve olmayan hallerinin aynı kimyasal özellikleri gösterdiğinin anlaşılmasını takiben, 1913 yılında İngiliz kimyacı Frederick Soddy bu özellikleri gösteren çekirdeklere izotop adını vermiştir. Ayrıca J.J. Thompson elementlerin radyoaktif olmayan izotoplarının da bulunduğunu kanıtlamıştır. Bir elementin atom numarası aynı fakat kütle numarası farklı olan türevlerine eski Yunanca'da <<isos=aynı>> ve <<topos=yer>> anlamlarına gelen iki sözcüğün birleşimi olan izotop denir. Bir elementin radyoaktif olan ve olmayan izotopları kimyasal özellikler bakımından özdeşler (Özden, 1993).

Chadwick'in 1932 yılında nötronu, Curie-Joliot çiftinin 1934 yılında yapay radyoaktiviteyi keşfetmelerinden sonra nükleer fizikte büyük gelişmeler meydana gelmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan itibaren, daha önce sadece askeri amaçla kullanılan radyoizotoplar, çeşitli araştırma alanları, nükleer tıp, tarım ve endüstriyel işlemlerde kullanılmak üzere elde edilmeye başlanmıştır. Özellikle son yıllarda genellikle bilimsel araştırma alanlarında radyoizotopların uygulamaları ve sayılarında çok büyük artışlar görülmüştür (Chase,1967).

Bugün kullanılmakta olan radyoizotopların büyük bir kısmı reaktörlerden elde edilmektedir. Bu radyoizotopların, tanı nükleer tıbbi (Mo-99/Tc-99m, v.s.), tedavi uygulamaları (Co-60, Sm-153, v.s.), endüstri (Ir-192, v.s.), ziraat ve araştırma (P-32, v.s.) gibi çok çeşitli kullanım alanları vardır.

Dünya'da kullanılmakta olan 70 tane nötronca zengin çok önemli radyoizotop vardır. Önemli radyoizotopların bir listesi Çizelge 1.1'de verilmiştir. Bu radyoizotoplar, ışınlanmış saf hedef olarak veya çözelti halinde, etiketli bileşikler veya radyofarmasötikler olarak veya kısa yarı ömürlü radyoizotoplar için jeneratörler şeklinde kullanılmaktadır.

Bu izotopların üretimi (n,γ) , (n,n',γ) , (n,p) gibi çeşitli reaksiyonlarla gerçekleştirilir.

Çizelge 1.1 Reaktörde Üretilen Radyoizotoplar ve Kullanıldığı Alanlar

Radyoizotop (Adı)	Radyoizotop (Simgesi)	Tıp	Endüstri	Diğer (Ziraat, Biyolojik Bilimler)
Altın	Au-198	*	*	
Altın	Au-199	*		
Bakır	Cu-64	*		
Brom	Br-82		*	
Civa	Hg-197		*	

Radyoizotop (Adı)	Radyoizotop (Simgesi)	Tıp	Endüstri	Diğer (Ziraat, Biyolojik Bilimler)
Civa	Hg-203		*	
Demir	Fe-59	*		
Disprosyum	Dy-165	*		
Disprosyum	Dy-166	*		
Erbium	Er-169	*		
Fosfor	P-32	*		*
Fosfor	P-33			*
Gadolinium	Gd-153	*		
Gümüş	Ag-111	*		
Holmiyum	Ho-166	*		
İridyum	Ir-192	*	*	
İterbiyum	Yb-169	*		
İtriyum	Y-90	*		
İyot	I-125	*		
İyot	I-131	*		
Kalay	Sn-113	*		
Kalsiyum	Ca-45			*
Karbon	C-14	*		*
Kobalt	Co-58		*	
Kobalt	Co-60	*	*	
Krom	Cr-51	*		
Kükürt	S-35	*		*
Lutesyum	Lu-177	*		

Radyoizotop (Adı)	Radyoizotop (Simgesi)	Tıp	Endüstri	Diğer (Ziraat, Biyolojik Bilimler)
Molibden	Mo-99	*		
Nikel	Ni-68		*	
Osmiyum	Os-191	*		
Osmiyum	Os-194	*		
Palladyum	Pd-103	*		
Palladyum	Pd-109	*		
Platin	Pt-195m	*		
Renyum	Re-186	*		
Renyum	Re-188	*		
Samaryum	Sm-153	*		
Skandiyum	Sc-46	*	*	
Skandiyum	Sc-47	*		
Sodyum	Na-24		*	
Stronsyum	Sr-89			
Talyum	Tl-204		*	
Tellür	Te-123m	*		
Tulyum	Tm-170	*	*	

Birçok durumda düşük termal nötron akısı ile oldukça yüksek aktivitelerde radyoizotoplar elde edilebilir. Fakat kimi radyoizotoplar için çok yüksek nötron akılarına gereksinim vardır. Birçok faydalı radyoizotop fisyon reaksiyonundan (Mo-99, I-131, Xe-133) ve çok az sayıda da güç reaktörlerinden (Co-60) elde edilebilir. Ayrıca yanmış reaktör yakıtlarının yeniden işlenmesi sırasında uzun yarı-ömürlü radyoizotoplar elde edilebilir (Cs-137, Sr-90, Pm-147, Kr-85).

Çizelge 1.2 Özel yollarla elde edilebilen radyoizotoplar

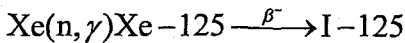
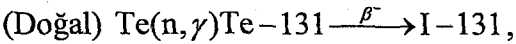
Fisyon reaksiyonu ile elde edilenler $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	Yanmış reaktör yakıtlarından kazanılanlar	Transuranikler (çok yüksek nötron akısı gerekir)	Özel Radyoizotoplar
Mo-99	Cs-137	Pu-238	H-3
I-131	Sr-90	Am-241	He-3
Xe-133	Pm-147	Cm-244	C-14
	Kr-85	Cf-252	

Dünyada yaklaşık olarak çalışan 300 araştırma reaktörü bulunmaktadır. Bu reaktörlerin büyük bir çoğunluğunda radyoizotop üretimine olanak sağlayacak kapasite vardır.

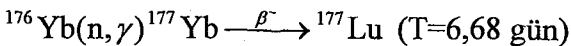
Nükleer tıptaki yeni gelişmeler ve özellikle sistematik radyonüklid tedavi, radyokimyasal ve radyonüklid saflığı yüksek olan radyoizotop preparatlarına gereksinim gösterir. Aynı zamanda bu radyoizotopların spesifik aktivitelerinin de yüksek olması istenmektedir.

Tıpta teşhis veya tedavide kullanılan radyoizotopların üretimi, reaktörlerde nötron bombardımanıyla, siklotronlarda ise yüklü taneciklerin bombardımanıyla yapılmaktadır.

Nükleer reaktörlerde (n,γ) reaksiyonuyla taşıyıcısız radyoizotop yani sadece istenilen radyoizotopu içerip bunun inaktif olanını içermeyen radyoizotop elde edilemez. Çünkü ışınlanan hedefteki elementin atom numarası değişmeyeceğinden kimyasal ayırma yapılamaz. Reaktörlerde taşıyıcısız veya taşıyıcı ilave edilmemiş radyonüklid ancak fisyon reaksiyonuyla ya da (n,p) , (n,α) reaksiyonuyla ya da üreyen radyoizotopun bozunarak atom numarası farklı olan bir radyoizotopa dönüşmesiyle mümkün olur. Örneğin, I-131 ve I-125 şu şekilde oluşur:



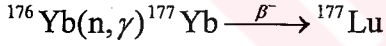
- Lutesyum-177 eldesi:



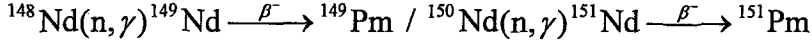
- $^{148}\text{Nd}(\text{n},\gamma)^{149}\text{Nd} \xrightarrow{\beta^-} ^{149}\text{Pm} \text{ (T=53,08 saat)}$
- $^{150}\text{Nd}(\text{n},\gamma)^{151}\text{Nd} \xrightarrow{\beta^-} ^{151}\text{Pm} \text{ (T=23,4 saat)}$

- $^{164}\text{Dy}(2n,\gamma)^{166}\text{Dy} \xrightarrow{\beta^-} ^{166}\text{Ho}$ (T=26,8 saat)
- $^{104}\text{Ru}(n,\gamma)^{105}\text{Ru} \xrightarrow{\beta^-} ^{105}\text{Rh}$
- $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta^-} ^{99\text{m}}\text{Tc}$
- $^{186}\text{W}(2n,\gamma)^{188}\text{W} \xrightarrow{\beta^-} ^{188}\text{Re}$
- $^{190}\text{Os}(n,\gamma)^{191}\text{Os} \xrightarrow{\beta^-} ^{191\text{m}}\text{Ir}$
- $^{192}\text{Os}(2n,\gamma)^{194}\text{Os} \xrightarrow{\beta^-} ^{194}\text{Ir}$
- $^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd} \xrightarrow{\beta^-} ^{161}\text{Tb}$ (T=6,88 gün)
- $^{154}\text{Sm}(n,\gamma)^{155}\text{Sm} \xrightarrow{\beta^-} ^{155}\text{Eu}$ (T=4,68 yıl)
- $^{170}\text{Er}(n,\gamma)^{171}\text{Er} \xrightarrow{\beta^-} ^{171}\text{Tm}$ (T=1,92 yıl)

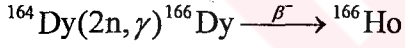
Çizelge 1.3 Taşıyıcısız radyoizotop üretim reaksiyonları



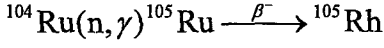
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürü- nün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{176}Yb	97,8 (12,73)	2,4 ± 0,2	8,1 ± 1,6	1,9 saat	^{177}Lu	6,71 gün	498 (79) 385 (9) 176 (12)	112,9 (6,7) 208,4(11,8)



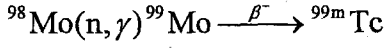
Hedef Malze me	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{148}Nd	95,4 (5,72)	$2,5 \pm 0,2$	$14 \pm 1,5$	1,72 saat	^{149}Pm	53,08 saat	1067(96)	286(3,1) ve diğerleri
^{150}Nd	97,8 (5,6)	$1,2 \pm 0,2$	$14,5 \pm 2$	12,44 dakika	^{151}Pm	28,4 saat	1019(7,9) 842(42) 741(7) 364(6) ve diğerleri	~65(3) 100(2,5) 105(3,5) 177(3,8) 340(22,5) 445(4) ve diğerleri



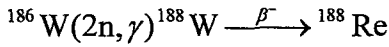
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{164}Dy	98,4 (28,14)	2700 ± 75	650 ± 100	2,33 saat	^{166}Ho	26,8 saat	1855(50) 1773(487)	80,6(6,7) 1379,4(0,9)



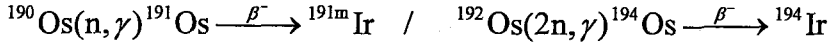
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{104}Ru	18,6	$0,32 \pm 0,02$	$5,2 \pm 0,5$	4,4 saat	^{105}Rh	35,5 saat	566(75) 248(19) 260(5)	306(5) 319(19)



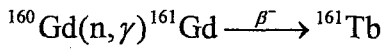
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{98}Mo	24,4	$0,13 \pm 0,006$	$7,3 \pm 1,8$	66 saat	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 saat	436(17) 1214(82) 847(1)	366(1) 140(3) 778(4) 181(6) 739(12)



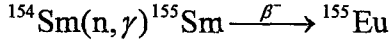
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{186}W	28,4	$37 \pm 1,5$	490 ± 15	69,4 gün	^{188}Re	16,7 saat	1486(1) 1964(25) 2119(71)	155(15) 478(1) 633(1)



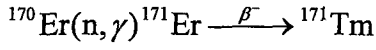
Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{190}Os	26,4	$17,1 \pm 0,9$	$58,2 \pm 3,7$	15 gün	$^{191\text{m}}\text{Ir}$	1,4 dakika		206(70) 308(31) 316(87) 468(50) 485(67)
^{192}Os	41	$1,97 \pm 0,11$	$5,4 \pm 1,3$		^{194}Ir	19 saat		328(93) 486(97) 562(70) 600(62) 688(59) 294(3) 328(13) 645(1)



Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{160}Gd	98,7(21,9)	$0,77 \pm 0,02$	7 ± 1	3,66 dakika	^{161}Tb	6,88 gün	589(5) 566(5) 522(66) 460(26)	25,6(23,1) 48,9(17) 57,2(1,8) 74,2(10,2)



Hedef Malzeme	Maksimum Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{154}Sm	98,7(22,53)	$5,5 \pm 1,1$	29 ± 7	22,3 dakika	^{155}Eu	4,65 yıl	147(47) 166(25) 192(8) 252(70)	45(1,3) 60(1,1) 86,5(30,7) 105,3(21,1)



Hedef Malzeme	Max. Uygulanabilir Zenginleştirme (doğal bolluk) (%)	Nötron yakalama tesir kesidi (barn)		İlk ürünün yarı ömrü	Son ürün	Son ürünün yarı ömrü	Radyasyonun enerjileri (keV) ve yoğunlukları (%)	
		termal	rezonans				beta	gama
^{170}Er	96,9(14,88)	$5,7 \pm 0,2$	24 ± 4	7,52 dakika	^{171}Tm	1,92 yıl	96,5(98)	66,7(0,14)

Bu reaksiyonlardaki ana ürünlerin teorik maksimum aktiviteleri Çizelge 1.4'de verilmiştir.

(Reaktör akısı; $\phi = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ ve elementteki doğal bolluk için)

Çizelge 1.4 Taşıyıcısız Radyoizotopların Teorik Spesifik Aktiviteleri

İzotop	Yarı ömür	Teorik Maksimum Spesifik Aktivite	
		GBq/g	Ci/g
Yb-177	1,9 saat	$4,38 \cdot 10^7$	$1,184 \cdot 10^6$
Nd-149	1,728 saat	$2,592 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^5$
Nd-151	12,44 saat	$2,09 \cdot 10^8$	$5,65 \cdot 10^6$
Dy-166	81,6 saat	$2,416 \cdot 10^6$	$6,53 \cdot 10^4$
Ru-105	4,44 saat	$4,675 \cdot 10^7$	$1,26 \cdot 10^6$
Mo-99	66,02 saat	$4,27 \cdot 10^6$	$1,15 \cdot 10^5$
W-188	69,4 gün	$1,0582 \cdot 10^5$	$2,86 \cdot 10^3$
Os-191	15,4 gün	$4,0344 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^4$
Os-194	6 yıl	$4,674 \cdot 10^3$	126,32
Gd-161	3,66 dakika	$2,58 \cdot 10^9$	$6,97 \cdot 10^7$
Sm-155	22,3 dakika	$4,5627 \cdot 10^8$	$12,33 \cdot 10^6$
Er-177	7,52 dakika	$8,046 \cdot 10^8$	$2,17 \cdot 10^7$

(Gryntakis vd)

Nükleer tıpta kullanılan ilk radyoizotoplar, üretim yerlerinden hastanelere gidebilecek kadar yarı ömre sahiptiler. Ancak yarı ömrü 8 gün olan I-131 gibi radyoizotopların kullanıldığı ve dolayısıyla radyofarmasötüğün biyolojik yarı ömrünün uzun olduğu testler için, bu radyoizotoplar hastaya çok yüksek dozda radyasyon verilmesine neden olmaktaydı. Kısa yarı ömürlü radyoizotoplar sadece üretim yerlerinde kullanılabilmekteydi. Bu problem radyoizotop jeneratör sistemlerinin geliştirilmesiyle çözüldü (Elliot).

İlk üretilen jeneratörlere klasik bir örnek olarak Ra-226'nın Rn-222'den ayrılmasıyla elde edilen jeneratör sistemi gösterilebilir. Diğer bir örnek ise; 2. Dünya Savaşı sırasında, La-140'ın ürün radyoizotopu olan 12,8 gün yarı ömürlü Ba-140, La-140'ın üretim yerinden çok uzak mesafelere taşınması sayesinde kullanılabildiği.

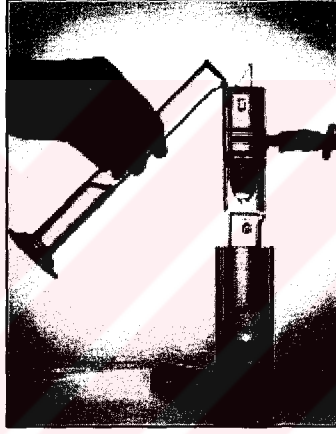
1950'li yılların başında, Oak Ridge'deki radyoizotop eldesinin gittikçe artmasıyla beraber, radyoizotopların nükleer tıptaki kullanımı da hızla artmıştır. Çeşitli amaçlar için yeni radyoizotoplarla yeni uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Uygulamada hastanın alacağı doz göz önüne alındığında kısa yarı ömürlü radyoizotopların uzun yarı ömürlülere göre daha avantajlı konumda oldukları görülmüştür. Kısa yarı ömürlü radyoizotop kullanımının diğer bir

üstünlüğü ise; kısa yarı ömürleri nedeniyle deneyler ya da testler sırasında gerçekleşebilecek bulaşıklık ya da atık problemlerinin az olmasıdır.

Radyoizotop jeneratörleri, uzun yarı ömürlü ana radyoizotop ve kısa yarı ömürlü kız radyoizotop zinciri nedeni ile üretim yerlerinden çok uzağa taşınabilirler (Richards,1966).

Klinik uygulamalarda kullanılan ilk jeneratör sistemi Failla tarafından gerçekleştirilen Rn-222/ Th-222 sistemidir. Kimyasal ayırma tekniklerinin geliştirildiği Brookhaven Ulusal Laboratuvarı, 1950 ve 1960'larda nükleer tıp uygulamalarını kökünden değiştiren Mo-99/Tc-99m (Richards, 1960) jeneratörü de dahil olmak üzere birçok jeneratör için yol göstermiştir (Elliot).

Tucker ve Greene'in ilk Mo-99/Tc-99m jeneratörünü keşfetmelerinin ardından Richards, kalıcı denge yapan bu jeneratörün teşhis amacıyla nükleer tıpta kullanılabileceğini fark etmiştir.[1]



Şekil 1.1 Mo-99/Tc-99m jeneratörü [1]

Günümüzde nükleer tıpta kullanılan radyoizotop jeneratörü Mo-99/Tc-99m jeneratörüdür. Bu jeneratörde kullanılan Mo-99, reaktörlerde hem U-235'in fisyon ürünü olarak hem de nötron aktivasyonu sonucunda elde edilir.

Fisyonda I-131, I-132, La-140, Ru-103, Te-123 gibi az miktarda fakat önemli radyoizotoplar da açığa çıkmaktadır, ancak ayırma teknikleri ile saf Mo-99 elde edebilmek mümkündür. Fisyonda Mo-99 taşıyıcısız olarak elde edilir (Sampson).

Mo-98, reaktörlerde termal nötronlarla aktivasyon sonucunda Mo-99 oluşturur (Elliot). Fisyona oranla elde edilen Mo-99'un spesifik aktivitesi daha düşüktür. Bu nedenle fisyon ürünü olarak elde edilen Mo-99 hastanelerde kullanım için ticari açıdan daha uygundur (Colombetti ,1984, 1977).

Mo-98 (n, γ)Mo-99

Mo-99, teorik olarak siklotronlarda da üretilmektedir ancak bunun pratik uygulaması ve ticari olarak üretimi bulunmamaktadır. Mo-99'un siklotronda üretiminde fisyona göre diğer radyoizotoplar az miktarda oluşur. Bu yöntemde Mo-100 siklotronda hızlandırılan protonlar ile bombalanır ve Nb-99 açığa çıkar. Nb-99'un radyoaktif bozunmaya uğraması sonucunda Mo-99 elde edilir.

Mo-100(p,2p)Nb-99→Mo-99

Siklotronda gerçekleşen diğer bir reaksiyonda ise protonlarla bombalanan Mo-100, proton ve nötron yayınlaması sonucunda Mo-99 elde edilir.

Mo-100(p,pn)Mo-99 (Elliot)

Mo-99'dan Tc-99m'i ayırmak için iki yöntem daha geliştirildiği halde hiçbiri Perrier ve Segré'nin (1937) ispat ettiği tuzlu su çözeltisi ile sağım sistemi kadar sık kullanılmamaktadır. Çoğu Mo-99/Tc-99m jeneratöründe kolon kromatografisi bulunmaktadır. Mo-99 alüminyum oksitte adsorbe edilip tuzlu su çözeltisi ile sağılır. Alüminyum oksidin seçilmesinin nedeni; Mo-99 ile bağ yapmasıdır. (Sampson)

Bir radyoizotop jeneratör sistemi, uzun yarı ömürlü bir ana çekirdeğin kısa yarı ömürlü olan kız çekirdeğe bozunmasıyla elde edilen radyoizotop çiftinden oluşur. Ana çekirdeğin bozunumu parçacık yayınımları ile olmalıdır, böylece kız çekirdek yeni bir element oluşturduğu gibi ana çekirdekten ayrılması da kolaylaşır. Kız çekirdeğin ana çekirdekten ayrılmasında en çok kullanılan teknik ise kız çekirdeği, ana çekirdeğin çözünemeyeceği bir sıvı içinde çözmektir. Bu işlem jeneratör kolonu içinde gerçekleşir.

Teshis için kullanılan hasta radyasyon dozu düşünüldüğünde, kız izomerik dönüşüm ile kararlı ve toksik olmayan toruna bozunmalıdır (Elliot).

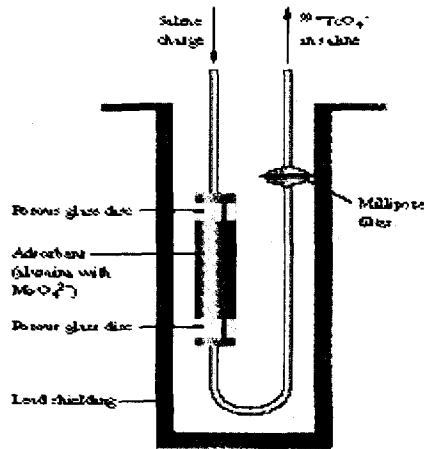
Tanı amacıyla kullanılan radyoizotopların en az dozla en yüksek foton verimini sağlaması istenir. Bu nedenle doğrudan iyonlaştırıcı radyasyonlardan olan alfa ve beta ışınlarını yayınlayan radyoizotopların tanı amacıyla kullanılması uygun değildir. Öte yandan lokalize olduğu sınırlı bölgede daha fazla radyasyon hasarına sebep olan alfa ve beta ışınları yayan radyoizotoplar nükleer tedavi amacıyla kullanılabilirler. Tanıda uygulanan radyoizotopların, iyonlaştırıcı özellikleri az ve daha girici olan 30-300 keV arasında enerjiye sahip olan gama ışınları yayması istenir. Ayrıca vücudun veya belirli organların alacağı dozun en az düzeyde olması için fiziksel yarı ömürlerinin de kısa olması gerekir (Akgün vd).

Bir ideal jeneratör sisteminde aranan ölçütler şunlardır;

- Steril ve apirojen olmalı,

- Tuz çözeltisi içermeli,
- Şiddetli kimyasal reaksiyonlar içermemeli,
- Oda sıcaklığında saklanabilmeli,
- Kız izotopun yaydığı gama ışınının yarı ömrü bir gün ya da daha az olmalı yani uygulama için kullanılabilirmeli,
- Kimyasal ayrışma iyi olmalı, yani son üründe ana radyoizotop bulunmamalı,
- Ananın yarı ömrü, kızın tekrar oluşabilmesi için yeterince kısa fakat uygulamalar için de yeterince uzun olmalı,
- Kızın kimyası, birçok radyofarmasötigi hazırlamak için, birleştirilecek kitlere uygun olmalı,
- Torun izotop uzun yarı ömürlü ya da kararlı olmalı, böylece zincirleme bozunum gerçekleşmemeli,
- Ana ve kız çekirdeklerin birlikte zırhlılabilmesi pratik olmalı,
- Ayırma ile çok fazla ürün elde edilmemeli, radyofarmasistin alacağı doz minimumda olmalı,
- Jeneratörler kolaylıkla şarj edilebilmelidir (Rhodes ve Craft, 1978).

Jeneratörler, ana ve kızın arasındaki önemli kimyasal farklılıklara dayanan birçok yolla yapılırlar. Uygulama kolaylığı açısından en çok kullanılan ayırma yöntemi, kromatografi kolonudur. Kromatografi kolonu, işlemlerin mükemmel tekrarlanabilmesinden dolayı kolaylıkla kontrol edilebilir. Kolonlu jeneratörlerin zırhlılanması, paketlenmesi ve ulaşımı diğer yöntemlere göre avantajlıdır.



Şekil 1.2 Kolonlu radyoizotop jeneratörü [2]

Model kolon, iki tarafından kapatılmış cam bir tüptür. Cam tüpün içinde, sıvının akış yönü doğrultusunda genellikle gelen sıvıyı tamamen saran ve kolon kromatografisi yapılacak ana radyoizotopu, uygun kimyasal durumda tutmak için kolon malzemesini destekleyen delikli bir disk veya bir parça sırlanmış cam bulunur (Rhodes ve Craft,1978)

İyon değiştirme tekniği en yaygın olmasına rağmen, bir izotopu diğerinden ayırmak için birçok yöntem bulunmaktadır. Aşağıda kısaca bu yöntemlere yer verilmiştir:

Çöktürme

Ananın sulu bir çözeltiye konduğu ve kızın, kimyasal olarak çözünmeyen bir bileşiğinin eklenmesiyle, kendiliğinden çöktürülmesine dayanan en basit tekniktir.

Damıtma

Bu yöntem; uçucu olan kız, çözelti halindeki anadan ayırmak için kullanılır.

Gaz Oluşumu

Eğer ana çözelti olarak hazırlanmış ve kız da gaz olarak oluşmuşsa, ürün çözeltide çözünmeyen gaz şeklinde kabarcıklar çıkararak ayrılır.

Çözücü Ayırması (Ekstrasyon)

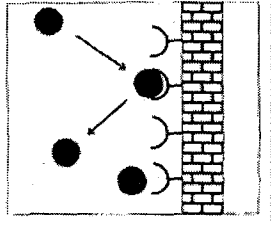
Bu durumda, ayırma ananın birinde ve kızın diğerinde çözündüğü iki karışmaz çözücüyü kullanılmaktadır. Ananın çözeltisinde oluşan kız atomlar çok yavaş bir şekilde diğer çözücüye göç ederler. Eğer karışım çalkalanırsa neredeyse tüm kız atomlar diğer çözücüye geçer. Eğer bu iki çözücü doğal ya da santrifüj yolları ile ayrılmaya bırakılırsa kızın aktivitesi açığa çıkabilir.

Süblimleşme

Bu yöntem 1937 yılında Perrier ve Segre tarafından Teknesyum'u Molibden'den ayırmak için ve Boyd ve Robson tarafından 1968 yılında geniş ölçüde jeneratör sistemi için kullanılmıştır. Ana malzeme genellikle katı halde sıcaklık kontrollü ocağa yerleştirilir ve uygun sıcaklığa kadar ısıtıldığında taşıyıcı bir gaz (oksijen) üflenir. Böylece ayırma işlemi başarıyla tamamlanmış olur. Bunun nedeni kız çekirdeğin oksidinin seçilen sıcaklıkta uçucu olup ana çekirdeğin oksidinin uçucu olmamasıdır. Bir ana filtre kız çekirdeğin aktivitesini içeren gazın geçmesine izin verirken ana maddenin geçmesine izin vermez. (Elliot).

Adsorpsiyon Kolon Kromatografisi

Adsorpsiyon kolon kromatografisi bilinen en eski kromatografi yöntemlerinden biridir. Hareketli sıvı ya da gaz bir fazın, sabit katı bir fazın yüzeyinde tutulumu ile gerçekleşir.

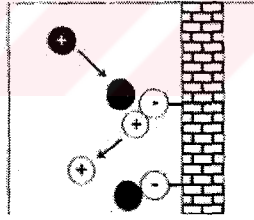


Şekil 1.3 Adsorpsiyon [3]

Sabit ve hareketli fazlar arasındaki denge sağlandığında çözeltilerin ayrışması sağlanmış olur [3]. Adsorpsiyonda bağlanma hidrojen, Van der Waals yada iyonik bağlar ile gerçekleşir [4].

İyon Değiştirme Kolon Kromatografisi

Bu tip kromatografide, sabit katı faz (reçine), anyon ve katyonların ortaklaşa fazın üzerine yapışması amacıyla kullanılır. Hareketli sıvı fazdaki zıt yüklü çözünen iyonlar reçineye elektrostatik kuvvetlerle bağlanırlar [4].



Şekil 1.4 İyon değiştirme [4]

Bu teknik hem kullanıcı hem de üretici açısından rahatlığından dolayı jeneratör teknolojisine hakimdir. Önceden kullanılan malzemeler zeolit, çoğu modern iyon değiştiriciler ise sentetiktir (Elliot).

BÖLÜM 2

2.1 RADYOAKTİF BOZUNMA

Radyoaktif bozunma, çekirdeğin kendiliğinden değişmesidir. Değişim yeni bir çekirdekle ya da sadece çekirdeğin enerjisinin değişimi ile sonlanabilir(Tsoufanidis, 1983).

Radyoaktif maddelerin bozunmasını ve oluşumunu gösteren üstel yasalar Toryum serilerinin radyoaktif ürünleri ile ilgili deneylerini açıklamak üzere ilk defa 1902 yılında Rutherford ve Soddy tarafından formüle edilmiştir. 1910 yılında kullanışlı matematiksel genellemeler Bateman tarafından hazırlanmıştır. Bu nedenle bozunma ve üremenin genel denklemlerine Bateman denklemleri denir (Evans, 1955) .

Bir çekirdeğin birim zamanda bozunma olasılığına bozunma sabiti denir ve λ ile gösterilir. Bozunma sabiti; bütün çekirdekler için aynıdır, çekirdek sayısından ve çekirdeğin yaşından bağımsızdır.

m kütleli ve λ bozunma sabitli bir radyoizotopun çekirdek sayısı;

$$N = m \frac{N_A}{A} \quad (2.1)$$

N_A =Avagadro sayısı

A =İzotopun atom ağırlığı (Tsoufanidis,1983)

Radyoaktif bir maddenin yarısının bozunması için geçen süreye yarı ömür ($t_{1/2}$) denir.

Eğer toplam bozunma sabiti λ ise;

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ olur.} \quad (2.2)$$

Curie birimi Uluslararası Radyoaktivite Standartlar, Birimler ve Katsayılar Birleşik Komisyonu tarafından bütün radyoaktif çekirdeklere uygulanmak üzere ve 1 gram Radium'un aktivitesi olarak 1950 yılında tanımlanmıştır. Bu tanım "curie, saniyede $3,7 \times 10^{10}$ bozunum yapan radyoaktif çekirdek sayısının radyoaktivite birimidir." şeklinde yapılmıştır (Evans, 1955).

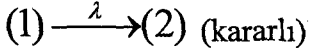
1977 yılında SI birimi becquerel olarak belirlenmiştir. Aktivite birimi becquerel (Bq) saniyede bozunan çekirdek sayısına eşittir. $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 'dir. (Tsoufanidis,1983)

2.1.1 Radyoaktif Bozunma Yasaları: Üstel Yasa

Radyoaktif bozunmayı hesaplariken, Bateman denklemlerini kullanabileceğimiz gibi Leibnitz denklemlerinden de yararlanabiliriz.

Basit Durum

(1) radyoizotopunun kararlı olan (2) elementine dönüştüğünü farz edersek;



$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = D \text{ formülünü elde ederiz.} \quad (2.3)$$

Radyoizotop bozunduğu için işareti negatif olmuştur.

$$\text{Buradan; } N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \text{ elde ederiz.} \quad (2.4)$$

$$A = \lambda N \text{ ise } A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \text{ olur.} \quad (2.5)$$

Kendiliğinden Bozunan Aktiviteler Karışımı

Eğer toplam aktivite, kendiliğinden bozunan diğer tüm aktivitelerin toplamı ise;

$$A = A_1 + A_2 + \dots \text{ şeklinde gösterilir ve üstel olarak ifadesi ise;} \quad (2.6)$$

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) = A_1(0) \exp(-\lambda_1 t) + A_2(0) \exp(-\lambda_2 t) \text{ formülüyle ifade edilir.} \quad (2.7)$$

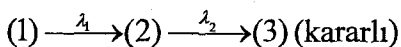
Eğer $\lambda_1 > \lambda_2$ dersek;

$$A(t) \approx A_2(0) \exp(-\lambda_2 t) \text{ olur.} \quad (2.8)$$

Radyoaktif Kız Çekirdeklerin Oluşumu

Eğer radyoaktif ana çekirdeklerden bozunan element de radyoaktif ise, o da bozunmaya devam eder ve bozunmadan meydana gelen torun çekirdek kararlı olabilir.

(1) radyoaktif maddesinin (2) radyoaktif kızına ve onun da (3) kararlı elementine dönüştüğünü farz edersek;



$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.9)$$

$$N_1(t) = N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ dersek;} \quad (2.10)$$

kızın bozunma hızı da bozunan (1) radyoaktif maddesinin bozunma hızı ile oluşan (2) radyoaktif maddesinin yani kızın oluşma hızının toplamıdır.

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.11)$$

Bu denklemde bilinenleri yerine koyarsak;

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ elde ederiz.} \quad (2.12)$$

Elde ettiğimiz bu sonuç Leibnitz Denklemi ile çözülür.

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q \text{ (Leibnitz Denklemi)} \quad (2.13)$$

$$y = \exp\left(-\int P dx\right) \int Q \exp\left(\int P dx\right) dx + C \exp\left(-\int P dx\right) \quad (2.14)$$

$$y = N_2, \quad x = t, \quad P = \lambda_2, \quad Q = \lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \quad (2.15)$$

alıp bunları denklemde yerlerine koyarsak ve

$$t=0, \quad N_2(0) = 0 + C \text{ olur. Böylece } C = N_2(0) \text{ dır.}$$

Buradan;

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + N_2(0) \exp(-\lambda_2 t) \quad (2.16)$$

sonucunu elde ederiz.

Oluşan bir radyoaktif maddenin çekirdek sayısının en fazla olduğu zamanı bulmak için $N_2(t)$ 'nin zamana göre türevi 0'a eşitlenir ve buradan zaman çekilir.

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_2 N_2(t) = 0 \quad (2.18)$$

$$\lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) = \lambda_2 N_2(t) \quad (2.19)$$

$$\lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] \quad (2.20)$$

$$t_{\max} = \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2.21)$$

Oluşan radyoaktif maddenin maksimum çekirdek sayısını ise; $t_{\max}$ 'u $N_2(t)$ 'de yerine koyarsak elde ederiz.

$$N_{2\max}(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) [\exp(-\lambda_1 t_{\max}) - \exp(-\lambda_2 t_{\max})] \quad (2.22)$$

Geçici Denge

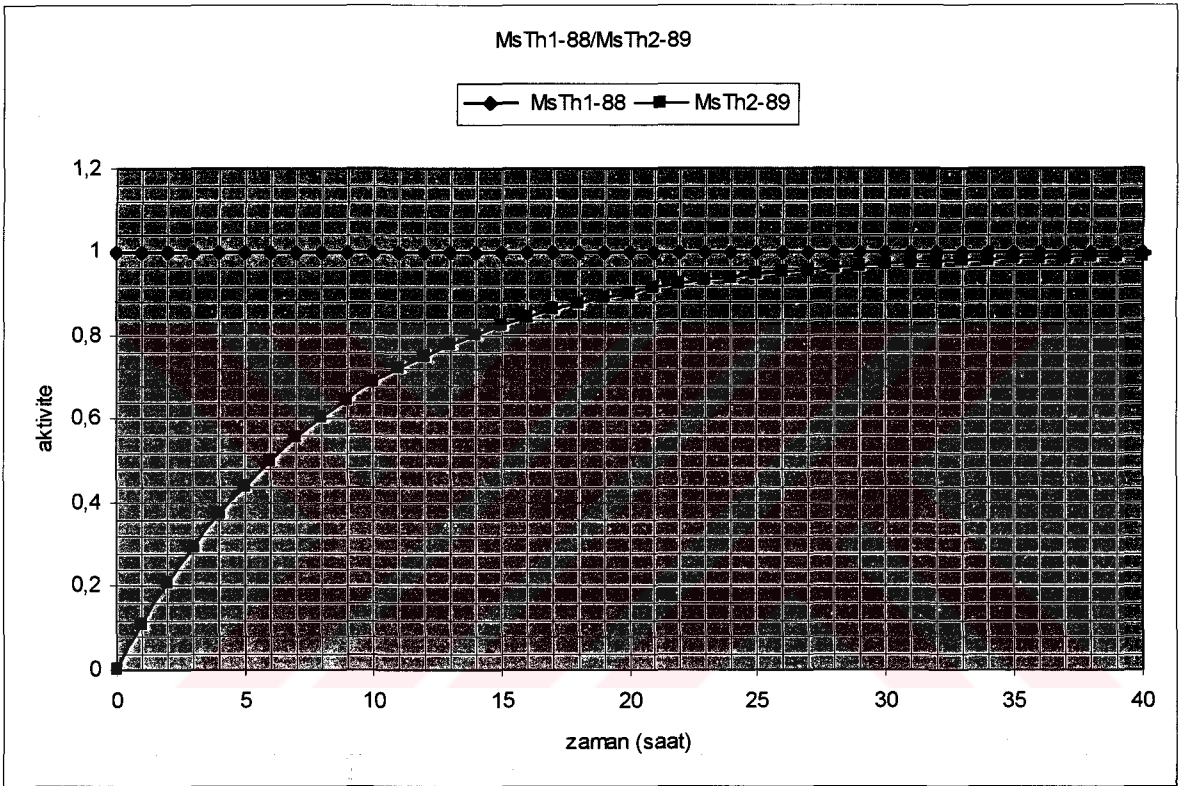
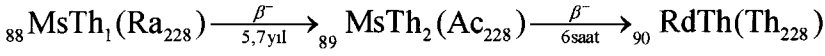
Eğer ana çekirdeğin yarı ömrü kız çekirdekten büyük ise yani $\lambda_1 < \lambda_2$ ise; geçici denge durumu söz konusudur. Geçici denge koşulunun sağlanabilmesi için; ana çekirdeğin yarı ömrü kız çekirdeğin yarı ömründen 0 ila 10 kat fazla olmalıdır.

Geçici denge durumundayken kızın çekirdek sayısı;

$$N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ olurken aktivitesi ise} \quad (2.23)$$

$$A_2(t) \approx \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ olur.} \quad (2.24)$$

Geçici dengeye örnek olarak aşağıdaki grafik (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 2.1 Geçici denge grafiği

Kalıcı Denge

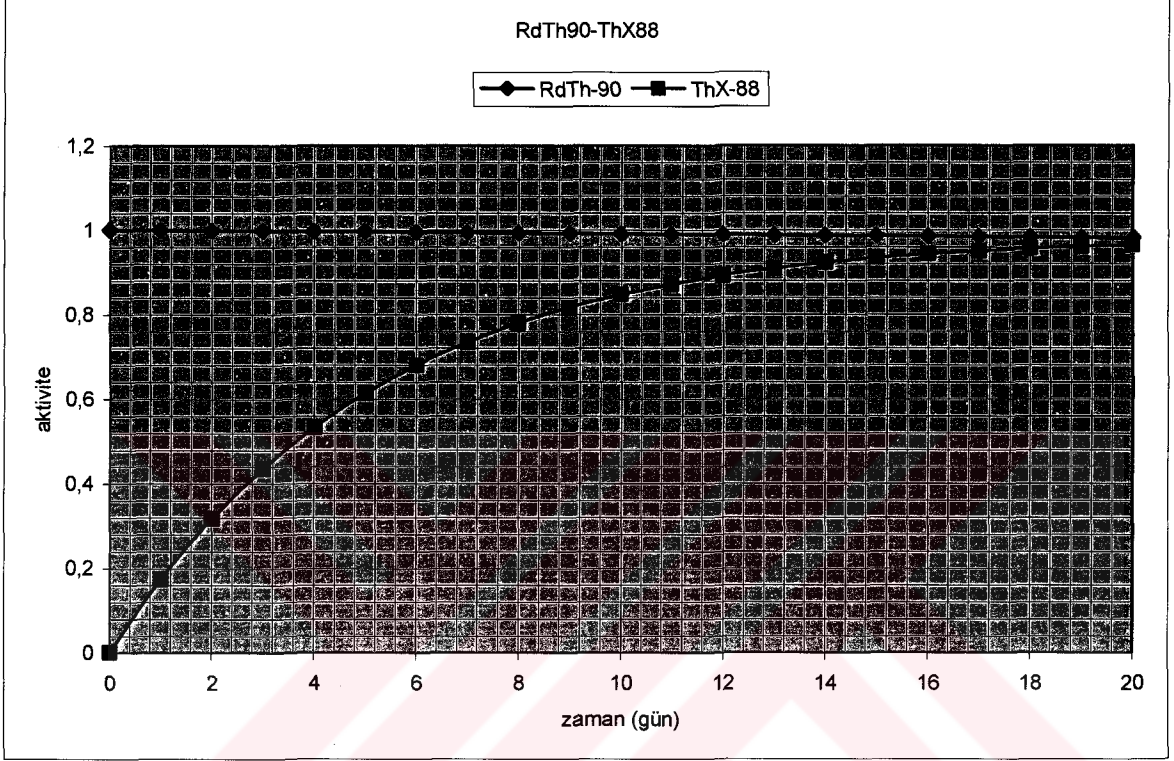
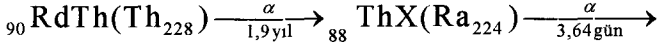
Eğer ana çekirdeğin yarı ömrünün kız çekirdeğin yarı ömrüne oranı 10 ila 100 kat arasında ise ($\lambda_1 \ll \lambda_2$ ise) kalıcı denge söz konusudur.

Kalıcı denge durumundayken ananın çekirdek sayısı;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ olur.} \quad (2.25)$$

Buradan da; $N_2(t)\lambda_2 = \lambda_1 N_1(t)$ olduğundan ana ve kız çekirdeklerin aktiviteleri birbirlerine eşit olur.

Kalıcı dengeye örnek olarak aşağıdaki grafik (2.5) ve (2.25) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 2.2 Kalıcı denge grafiği

Denge Olmama Durumu

Eğer kız çekirdeğin yarı ömrü ana çekirdekten daha büyük ise diğer bir deyişle $\lambda_1 > \lambda_2$ ise denge durumu gerçekleşmez.

Bu durumdayken ananın çekirdek sayısı;

$$N_1(t) = N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \quad (2.26)$$

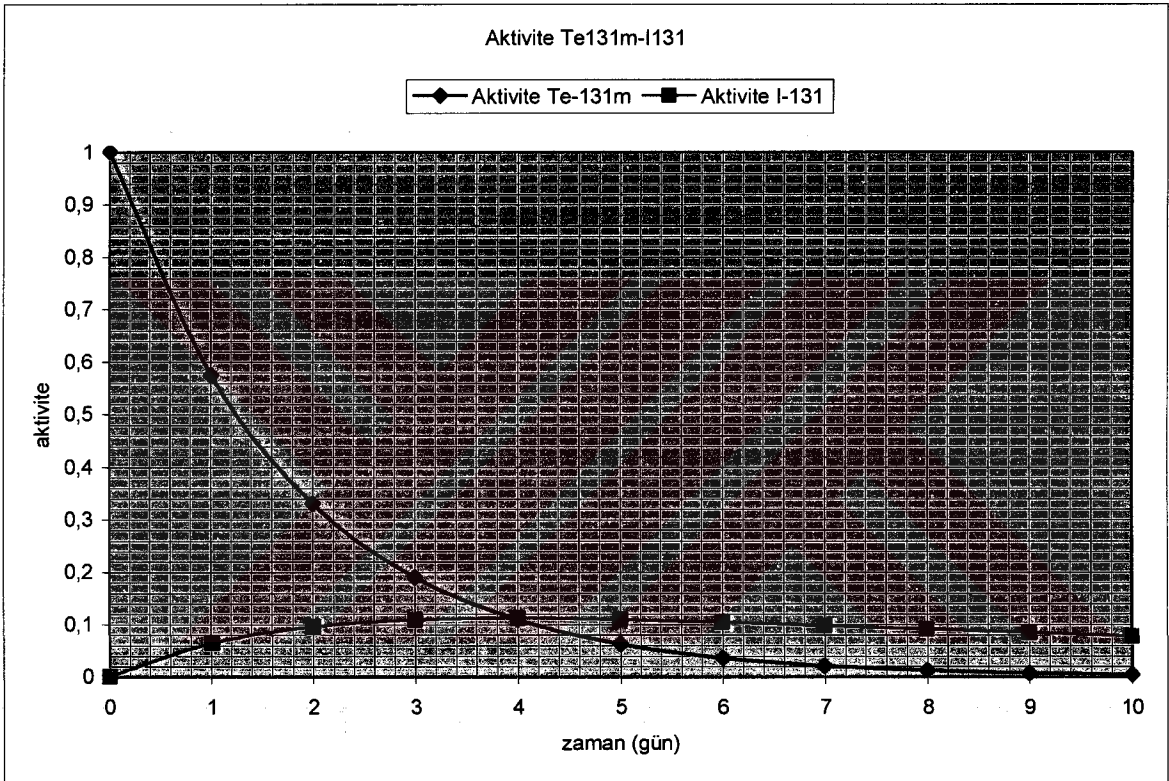
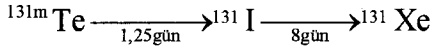
ve ana çekirdeğin aktivitesi

$$A_1(t) = \lambda_1 N_1(0) \exp(-\lambda_1 t) \text{ iken kızın çekirdek sayısı;} \quad (2.27)$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1(0) \exp(-\lambda_2 t) \text{ ve kız çekirdeğin aktivitesi;} \quad (2.28)$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1(0) \exp(-\lambda_2 t) \text{ olur.} \quad (2.29)$$

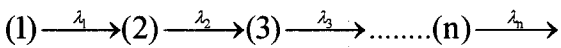
Denge olmama durumuna örnek olarak aşağıdaki grafik (2.27) ve (2.29) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 2.3 Denge olmama durumu grafiği

Zincirleme Bozunum

Bir radyoaktif madde seri olarak radyoaktif bozunmaya uğrarsa buna Zincirleme Bozunum denir.



Çekirdeğin bozunma hızlarının diferansiyel denklem olarak gösterimi şu şekildedir.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.30)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.31)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.32)$$

Bu denklemlerin Bateman denklemi olarak çözümü ise;

$$N_n(t) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n N_1(0) \sum_{i=1}^{i=n} C_i \exp(-\lambda_i t) \quad (2.33)$$

$$C_i = \prod_{j=1}^{j=n} \frac{1}{\lambda_j - \lambda_i} (i \neq j) \text{ şeklindedir.} \quad (2.34)$$

Dallanma

Bazı radyoaktif maddeler birden fazla kızı bozunabilirler. Buna Dallanma denir.

(2') → (3')

(1) $\begin{matrix} \square \\ \square \end{matrix}$

(2) → (3)

Aşağıdaki Bateman denklemi ile çözüme ulaşılır.

$$N_n(t) = \lambda_1^* \lambda_2^* \lambda_3^* \dots \lambda_{n-1}^* N_1(0) \sum_{i=1}^{i=n} C_i \exp(-\lambda_i t) \quad (2.35)$$

Burada λ^* dallanmadan kaynaklanan kısmi bozunma sabitidir (Soete vd, 1972).

2.2 NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ

Aktivasyon analizi, bir tepkime boyunca kararlı ya da radyoaktif izotoplardan oluşan bilinmeyen radyoaktif çekirdeklerin özelliklerini belirlemede kullanılan bir yöntemdir.

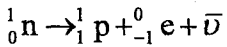
Radyoaktif çekirdekler yaydıkları radyasyonun özelliklerine göre saptanabilirler:

- Radyasyon türü
- Radyasyonun enerjisi
- Radyasyonun şiddeti
- Yarı ömür

Yöntemin temel prensipleri 1936 yılında Hevesy ve Levi'nin yaptıkları çalışmalara dayanır. Hevesy ve Levi yaptıkları çalışmada itriyum örneğinde bir miktar disporsyum belirlemişler ve bunu Ra-Be kaynağından elde ettikleri nötronlarla bombardıman ettiklerinde radyoaktif özellik gösterdiğini saptamışlardır. İki yıl sonra, Seaborg ve Livingood döteronlarla bombardıman edilen demir örneğinde galyum belirlemişlerdir. Kullanılan malzemenin farklı taneciklerle bombardıman edilmesi sonucunda oluşan tepkimelerde radyoaktif çekirdekler oluşmuştur. Bombardımanda yüklü tanecikler, gama ışınları veya farklı enerjili nötronlar kullanılabilir. Aktivite belirlenerek malzemenin özellikleri konusunda bilgi edinilebilir.

Aktivasyon analizi yüksek duyarlılığa sahip olduğundan; bilim, mühendislik ve endüstri alanlarında rahatça kullanılabilen bir tekniktir (minerallerin incelenmesinde, tıpta, çevresel incelemelerde, adli tıpta....).

Aktivasyon analizinde kullanılan en yaygın parçacık nötronlardır. Aktivasyon analizinde mermi parçacık olarak nötronların kullanılmasının nedeni; nötronların yüksüz nükleonlar oluşu ve bu nedenle Coulomb engelinden etkilenmiyor olmalarıdır. Bu özellikleri nedeniyle nötronlar atomların içlerine ilerler ve rahatlıkla nükleer reaksiyon başlatabilirler. Serbest nötronlar yarı ömürleri 10,6 dakika olan ve β ışını yayınlayarak bozunan kararsız parçacıklardır.



Nötron akısı sayesinde dönüşüm elde edebilmek için; malzeme nötron akısı ile belli bir süre bombardıman edilir. Böylece malzeme içindeki elementlerin hepsi ya da çoğu radyoaktif hale geçerler. Nötron aktivasyon analizinde en çok kullanılan (n, γ) reaksiyonudur.

Bir nötronun bir hedef çekirdeğe çarparak etkileşme yapma olasılığına tesir kesidi denir. Tesir kesidinin birimi barn (b)'dir.

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 (\text{SI})$$

Nötron tesir kesitleri gerçekleştirdikleri reaksiyonun adımı alırlar (elastik saçılma tesir kesidi, fisyon tesir kesidi gibi).

Nötron aktivasyon analizi yöntemin en büyük avantajı pek çok izotopun yüksek duyarlılıkla analiz edilebilir olmasıdır. Diğer avantajları;

- Örnek malzemeye herhangi bir zararı yoktur,
- Çok küçük kütleli örneklerle ihtiyaç duyar,

- Aynı anda birden fazla element ölçülebilir,
- Aynı elementin farklı izotopları tespit edilebilir,
- Sonuçlar süratli bir biçimde elde edilir,
- Elementin kimyasal yapısına zarar vermez,

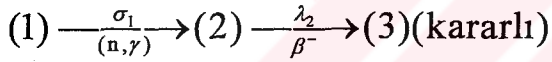
En büyük dezavantajı ise pahalı bir ekipman gerektirmesidir. Sonuçların analiz edilmesi sıradan bir olay değildir. Aktivasyon analizi kimyasal bileşikler hakkında bilgi vermez.

Yöntemin geniş kullanım alanları mevcuttur. Kimya, tıp, adli tıp, endüstri, arkeoloji ve çevresel incelemeler bunlardan sadece bir kaçıdır (Tsoulfanidis,1983).

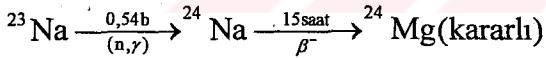
2.2.1 Nötron Aktivasyon Analizi Hesaplamaları

Basit Durum

Eğer elimizdeki malzemenin belli bir süre boyunca nötronlarla ışınladığını ve (n,γ) reaksiyonu sonucunda başka bir elemente dönüşen bu malzemenin radyoaktif bozunmaya uğradığını düşünürsek; bu hesaplamaları Leibnitz Denklemleri ve Genelleştirilmiş Bateman Denklemleri ile yapabiliriz.



Örnek:



Leibnitz Denklemleri İle Çözüm

$$\frac{dN_2(t_b)}{dt_b} = \sigma_1 \phi N_1(0) - \lambda_2 N_2(t_b) \text{ şeklinde yazılan denklemde } t_b \text{ ışınlama süresidir.} \quad (2.36)$$

$P(x) = \lambda_2 = \text{sabit}$, $Q(x) = \sigma_1 \phi N_1(0) = \text{sabit}$, $y = N_2(t_b)$ Bu değerler daha önce radyoaktif bozunmada bahsedilen Leibnitz denkleminde yerine konduğunda çözüm elde edilmiş olur.

$$N_2(t_b) = \exp(-\lambda_2 t_b) \int_0^{t_b} \phi \sigma_1 N_1(0) \exp(\lambda_2 t_b) dt_b + C \exp(-\lambda_2 t_b) \quad (2.37)$$

$$N_2(t_b) = \frac{\sigma_1 \varphi N_1(0)}{\lambda_2} \exp(-\lambda_2 t_b) [\exp(\lambda_2 t_b) - 1] + C \exp(-\lambda_2 t_b) \quad (2.38)$$

$$N_2(t_b) = \frac{\sigma_1 \varphi N_1(0)}{\lambda_2} [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] + C \exp(-\lambda_2 t_b) \quad (2.39)$$

Eğer $t_b=0$, $N_2(0)=0+C$ ise $C=N_2(0)=0$ olur.

Sonuç olarak;

$$N_2(t_b) = \frac{\sigma_1 \varphi N_1(0)}{\lambda_2} [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] \text{ elde edilir.} \quad (2.40)$$

Genelleştirilmiş Bateman Denklemleri İle Çözüm

Bu hesaplama Robinson tarafından önerilmiş olan Genelleştirilmiş Bateman Denklemleri ile de çözülebilir. Bu durumda bir yok olma sabiti tanımlanır.

Yok olma sabitinin matematiksel eşitliği; $\Lambda = \lambda + \varphi \sigma$ dır. Böylece toplam yok olma hızı $\lambda + \varphi \sigma$ $Ns^{-1} = \Lambda Ns^{-1}$ şeklindedir.

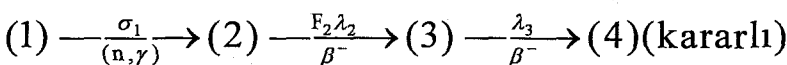
Eğer çekirdek sadece nükleer reaksiyon ile yok oluyorsa, yok olma sabiti $\Lambda = \varphi \sigma$ şeklinde; sadece radyoaktif bozunma ile yok oluyorsa, $\Lambda = \lambda$ şeklinde yazılır. Nükleer reaksiyon veya radyoaktif bozunmada dallanma söz konusu ise yok olma sabiti; $\Lambda_i^* = \varphi \sigma_i^* + \lambda_i^*$ olarak yazılır. Burada λ_i^* kısmi bozunma sabiti, σ_i^* ise kısmi reaksiyon tesir kesididir.

$N_2(0) = N_3(0) = \dots N_n(0) = 0$ olduğunu farz edersek, çözüm;

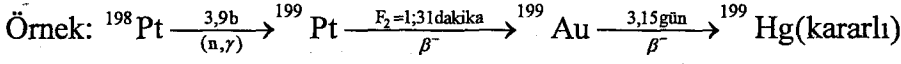
$$N_n(t_b) = \Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{n-1}^* N_1(0) \sum_{i=1}^{i=n} C_i \exp(-\Lambda_i t_b) \quad (2.41)$$

$$C = \prod_{j=1}^{j=i} \frac{1}{\Lambda_j - \Lambda_i} \quad (j \neq i) \quad \text{şeklinde olur.} \quad (2.42)$$

Bir Nötron Akısında Radyoaktif Kızın Oluşumu



Şekilde görüldüğü gibi nötron akısında bir dönüşüm söz konusu ise, F; (3) çekirdeklerini oluşturan (2) çekirdeklerinin bozunma kesridir.



Leibnitz Denklemleri İle Çözüm

$$\frac{dN_3(t_b)}{dt_b} = F_2\lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t_b) \quad (2.43)$$

genel denklemini yazar ve daha önceden bildiklerimizi bu denklemde yerine koyarsak;

$$\frac{dN_3(t_b)}{dt_b} = F_2\sigma_1\varphi N_1(0)[1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] - \lambda_3 N_3(t_b) \quad (2.44)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklemi Leibnitz Denklemine uygulamak için ;

$x = t_b$, $y = N_3(t)$, $P(x) = \lambda_3 = \text{sabit}$, $Q(x) = F_2\sigma_1\varphi N_1(0)[1 - \exp(-\lambda_2 t_b)]$ dersek ve bunları

Leibnitz Denkleminde yerine koyarsak çözümü elde etmiş oluruz.

$$N_3(t_b) = \exp(-\lambda_3 t_b) \left[F_2\sigma_1\varphi N_1(0) \int_0^{t_b} \exp(\lambda_3 t_b) dt_b - F_2\sigma_1\varphi N_1(0) \int_0^{t_b} \exp(-\lambda_2 t_b) \exp(\lambda_3 t_b) dt_b \right] + N_3(0) \exp(-\lambda_3 t_b) \quad (2.45)$$

Eğer $N_3(0)=0$ alınırsa denklem;

$$N_3(t_b) = \frac{F_2\sigma_1\varphi N_1(0)}{\lambda_3(\lambda_3 - \lambda_2)} \{ \lambda_3 [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] - \lambda_2 [1 - \exp(-\lambda_3 t_b)] \} \text{ olur.} \quad (2.46)$$

Bateman- Robinson Denklemleri İle Çözüm

Aynı sonuç, Genelleştirilmiş Bateman Denkleminde verileri yerine koyarsak bulunabilir.

$$\Lambda_1 = \Lambda_1^* = \varphi\sigma_1 \quad (2.47)$$

$$\Lambda_2 = \lambda_2 \text{ [(2) çekirdeğinin başlangıçta olmadığını farz edersek]}$$

$$\Lambda_2^* = F_2\lambda_2 \quad (2.48)$$

$\lambda_3 = \lambda_3$ [(3) çekirdeğinin başlangıçta olmadığını farz edersek]

Böylece;

$$C_1 = \frac{1}{(\lambda_2 - \varphi\sigma_1)(\lambda_3 - \varphi\sigma_1)} \approx \frac{1}{\lambda_2\lambda_3} \quad (2.49)$$

$$C_2 = \frac{1}{(\varphi\sigma_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} \approx \frac{1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_3)} \quad (2.50)$$

$$C_3 = \frac{1}{(\varphi\sigma_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \approx \frac{1}{\lambda_3(\lambda_3 - \lambda_2)} \quad (2.51)$$

Böylece $N_2(0)=N_3(0)=0$ alınırsa sonuç elde edilir.

$$N_3(t_b) = \frac{F_2\varphi\sigma_1 N_1(0)}{\lambda_3(\lambda_2 - \lambda_3)} \left\{ \lambda_2 [\exp(-\varphi\sigma_1 t_b) - \exp(-\lambda_3 t_b)] + \lambda_3 [\exp(-\lambda_2 t_b) - \exp(-\varphi\sigma_1 t_b)] \right\} \quad (2.52)$$

$\exp(-\varphi\sigma_1 t_b) \approx 1$ olacağı için sonuç Leibnitz Denklemi ile bulduğumuzla aynı olur.

Işınlamadan t süre sonraki N_3 çekirdek sayısını hesaplamak için genel radyoaktif bozunma denkleminde $t_0=t_b$, $N_3(0)=N_3(t_b)$ ve $N_2(0)=N_2(t_b)$ değişiklikleri yapılır.

Böylece;

$$N_3(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} N_2(t_b) [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t)] + N_3(t_b) \exp(-\lambda_3 t) \quad (2.53)$$

denklemini elde edilir. Burada daha önceden hesapladığımız (2.40) ve (2.52) denklemlerini yerlerine koyarsak ve $F_2=1$ alırsak $N_3(t_b, t)$ denklemini elde ederiz.

$$\begin{aligned} N_3(t_b, t) &= \frac{\varphi\sigma_1 N_1(0)}{\lambda_3 - \lambda_2} [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t)] \\ &+ \frac{\varphi\sigma_1 N_1(0)}{(\lambda_3 - \lambda_2)\lambda_3} \{ \lambda_3 [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] - \lambda_2 [1 - \exp(-\lambda_3 t_b)] \} \exp(-\lambda_3 t) \end{aligned} \quad (2.54)$$

Denklemini düzenlersek;

$$N_3(t_b, t) = \frac{\varphi \sigma_1 N_1(0)}{(\lambda_3 - \lambda_2) \lambda_3} \{ \lambda_3 [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] - \lambda_2 [1 - \exp(-\lambda_3 t_b)] \} \exp(-\lambda_3 t) \quad (2.55)$$

sonucunu elde ederiz.

Dallanma Aktivasyonu

$$(2) \rightarrow (2')$$

□ ↓

(1)

$$\square (3) \rightarrow (3')$$

Dallanma Aktivasyonunun Leibnitz Denklemi ile Çözümü

$$\frac{dN_3(t_b)}{dt_b} = F_2 \lambda_2 N_2(t) + \varphi \sigma_1' N_1(0) - \lambda_3 N_3(t_b) \quad (2.56)$$

$N_2(t)$ yerine daha önce bulduğumuz değeri yazarsak;

$$\frac{dN_3(t_b)}{dt_b} + \lambda_3 N_3(t_b) = F_2 \varphi \sigma_1 N_1(0) [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] + \varphi \sigma_1' N_1(0) \quad (2.57)$$

$$x=t_b, \quad y=N_3(t_b), \quad P(x)=\lambda_3=\text{sabit ve } Q(x)=F_2 \varphi \sigma_1 N_1(0) [1 - \exp(-\lambda_2 t_b)] + \varphi \sigma_1' N_1(0)$$

$N_2(0)=N_3(0)=0$ olduğunu kabul edip, 0 ve t_b arasından integral alırsak;

$$N_3(t_b) = \exp(-\lambda_3 t_b) \varphi N_1(0) \left[\sigma_1 F_2 \int_0^{t_b} \exp(\lambda_3 t_b) dt_b - \sigma_1 F_2 \int_0^{t_b} \exp(\lambda_3 - \lambda_2) t_b dt_b + \sigma_1' \int_0^{t_b} \exp(\lambda_3 t_b) dt_b \right] \quad (2.58)$$

$$N_3(t_b) = \exp(-\lambda_3 t_b) \varphi N_1(0) \left[\frac{\sigma_1 F_2 [\exp(\lambda_3 t_b) - 1]}{\lambda_3} - \frac{\sigma_1 F_2 [\exp(\lambda_3 - \lambda_2) t_b - 1]}{\lambda_3 - \lambda_2} + \frac{\sigma_1' [\exp(\lambda_3 t_b) - 1]}{\lambda_3} \right] \quad (2.59)$$

Dallanma Aktivasyonunun Bateman-Rubinson Denklemleri ile Çözümü

Bu yöntemi uygularken dallanmayı iki ayrı zincir gibi alıp, çözeriz.

$$(1) \xrightarrow{\sigma_1} (2) \xrightarrow{F_2 \lambda_2} (3) \xrightarrow{\lambda_3} \text{ ve } (1) \xrightarrow{\sigma'_1} (3) \xrightarrow{\lambda_3}$$

Böylece $N_3(t_b)$ her iki zincir de hesaplanıp toplanarak bulunur.

$$N_3(t_b) = \frac{F_2 \phi \sigma_1 N_1(0)}{\lambda_3} \left\{ [1 - \exp(-\lambda_3 t_b)] - \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 t_b) - \exp(-\lambda_3 t_b)] \right\} + \frac{\sigma'_1 \phi N_1(0)}{\lambda_3} [1 - \exp(-\lambda_3 t_b)] \quad (2.60)$$

denklemini elde edilir (Soete vd, 1972).

2.3 Dünya'da Çeşitli Amaçlar İçin Kullanılan Bütün Radyoizotop Jeneratörleri

Dünya'da radyoizotop jeneratörleri nükleer tıp, endüstri, tarım gibi alanlar başta olmak üzere çeşitli konularda ve çeşitli amaçlarda kullanılmaktadır. Şu anda Dünya'da çeşitli amaçlar için kullanılan radyoizotop jeneratörleri aşağıda alfabetik olarak sıralanmıştır.

Çizelge 2.1: Dünya'da Çeşitli Amaçlar İçin Kullanılan Bütün Radyoizotop Jeneratörleri

<u>ANA RADYOİZOTOP</u>		<u>KIZ RADYOİZOTOP</u>	
<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>	<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>
Ac-225	10 gün	Fr-221	4,8 dakika
Ac-225	10 gün	Bi-213	45,59 dakika
Ac-225	10 gün	Pb-209	3,25 saat
Ac-226	29 saat	Th-226	31 dakika
Ac-227	21,8 yıl	Th-227	18,72 gün
Ac-227	21,8 yıl	Fr-223	21,8 dakika
Ar-42	33 yıl	K-42	12,36 saat
Ba-128	2,43 gün	Cs-128	3,8 dakika
Ba-140	12,79 gün	La-140	40,2 saat
Bi-203	11,76 saat	Pb-203m	6,2 saniye
Bi-204	11,3 saat	Pb-204m	66,9 dakika
Br-77	56 saat	Se-77m	17,5 saniye

<u>ANA RADYOİZOTOP</u>		<u>KIZ RADYOİZOTOP</u>	
<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>	<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>
Cd-109	453 gün	Ag-109m	39,6 saniye
Cd-115	53,38 saat	In-115m	4,5 saat
Cd-115m	44,8 saat	In-115m	4,5 saat
Ce-134	72 saat	La-134	6,8 dakika
Ce-144	284,8 gün	Pr-144	17,3 dakika
Cs-137	30,1 yıl	Ba-137m	2,55 dakika
Er-160	28,6 saat	Ho-160m	5 saat
Es-254	276 gün	Bk-250	3,22 saat
Fe-52	8,2 saat	Mn-52m	21 dakika
Fe-60	10 ⁵ yıl	Co-60m	10,5 dakika
Gd-146	48,3 gün	Eu-146	4,65 gün
Ge-68	287 gün	Ga-68	68,3 dakika
Hf-172	1,87 yıl	Lu-172m	3,7 dakika
Hg-193m	11,1 saat	Au-193m	3,9 saniye
Hg-194	15 yıl	Au-194	39,5 saat
Hg-195m	40 saat	Au-195m	30,5 saniye
Hg-197m	23,8 saat	Au-197m	7,8 saniye
In-111	2,83 gün	Cd-111m	49 dakika
Ir-189	13,3 gün	Os-189m	6 saat
Kr-79	34,9 saat	Br-79m	4,9 saniye
Lu-177m	161 gün	Hf-177m	1,1 saniye
Mg-28	21,1 saat	Al-28	2,46 dakika
Mo-99	66 saat	Tc-99m	6 saat
Nd-140	3,38 gün	Pr-140	3,4 dakika
Ni-66	54,6 saat	Cu-66	5,1 dakika
Os-191	15,4 gün	Ir-191m	4,88 saniye
Os-194	6 yıl	Ir-194	19,4 saat
Pb-210	22,3 yıl	Bi-210	5,01 gün
Pd-100	3,7 gün	Rh-100	20 saat
Pd-103	17 gün	Rh-103m	56,1 dakika
Pd-109	13,46 saat	Ag-109m	39,6 saniye

<u>ANA RADYOİZOTOP</u>		<u>KIZ RADYOİZOTOP</u>	
<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>	<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>
Pd-112	20,1 saat	Ag-112	3,12 saat
Pt-188	10,2 gün	Ir-188	41,5 saat
Pt-200	11,5 saat	Au-200	48,4 dakika
Pu-245	10,48 saat	Am-245	2,05 saat
Pu-246	10,9 gün	Am-246m	25 dakika
Ra-224	3,64 gün	Rn-220	55,6 saniye
Ra-224	3,64 gün	Pb-212	10,64 saat
Ra-226	1600 yıl	Rn-222	3,824 gün
Ra-228	5,75 yıl	Ac-228	6,13 saat
Rb-83	86,2 gün	Kr-83m	1,83 saat
Re-189	24,3 saat	Os-189m	6 saat
Rn-211	14,6 saat	At-211	7,2 saat
Ru-103	39,35 gün	Rh-103m	56,1 dakika
Ru-106	368 gün	Rh-106	20 saniye
Sb-127	3,85 gün	Te-127	9,35 saat
Se-72	8,5 gün	As-72	26 saat
Sn-113	115,1 gün	In-113m	99,48 dakika
Sn-126	10 ⁵ yıl	Sb-126m	19 dakika
Sr-82	25 gün	Rb-82	1,3 dakika
Sr-90	28,5 yıl	Y-90	64,1 saat
Ta-183	5 gün	W-183m	5,3 saniye
Te-118	6 gün	Sb-118	3,5 dakika
Te-119m	4,7 gün	Sb-119	38,5 saat
Te-127m	109 gün	Te-127	9,35 saat
Te-129m	33,6 gün	Te-129	69,6 dakika
Te-132	78 saat	I-132	2,38 saat
Th-228	1,913 yıl	Ra-224	3,64 gün
Th-229	7340 yıl	Ra-225	14,8 gün
Th-234	24,10 gün	Pa-234m	1,18 dakika
Ti-44	47,3 yıl	Sc-44	3,92 saat
Tm-165	30,06 saat	Er-165	103 saat

<u>ANA RADYOİZOTOP</u>		<u>KIZ RADYOİZOTOP</u>	
<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>	<u>İzotop</u>	<u>Yarı ömür</u>

Tm-167	9,25 gün	Er-167m	2,3 saniye
U-230	20,8 gün	Th-226	31 dakika
U-240	14,1 saat	Np-240m	7,4 dakika
W-178	22 gün	Ta-178	9,25 dakika
W-188	69 gün	Re-188	16,98 saat
Xe-122	20,1 saat	I-122	3,6 dakika
Y-87	80,3 saat	Sr-87m	2,81 saat
Yb-166	56,7 saat	Tm-166	7,70 saat
Zn-62	9,13 saat	Cu-62	9,76 dakika
Zr-97	16,8 saat	Nb-97m	53 saniye

(Lieser vd, 1976)

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 TIPTA KULLANILAN RADYOİZOTOP JENERATÖRLERİNİN İNCELENMESİ

Ana radyoizotoplar ve bunların kızları arasındaki ilişki ile ilgili çalışmalar, radyoaktivitenin keşfine kadar dayanır (Rhodes ve Craft). Radyoizotop jeneratörlerinin nükleer tıbbı çok büyük bir etkisi olmuştur. Günümüzde bir çok radyoizotop jeneratörü tıpta, teşhis, tedavi veya PET (Pozitron Emisyon Tomografi) uygulamaları için kullanılmaktadır.

Genel olarak kalite kontrol; ürün tanımı, standartlara uygunluk ve biyolojik güvenlik sağlamak için yapılan spesifik testler ve ölçümlerdir. Mo-99/Tc-99m jeneratörünün kalite kontrolü ise klinik uygulama öncesi, gerek kaliteli (amaca uygun) klinik bilgilerin elde edilmesi gerekse hastaların potansiyel radyasyon riskinden korunması açısından Tc-99m'in, kullanıcıya gönderilmeden önce radyonüklidik saflık (Mo- kaçağı), radyokimyasal saflık ve sağım verimi testlerinin yapılması için gereklidir. Biyolojik testler radyasyon güvenliği nedeniyle spesifik aktivitenin azalmasından sonra yapılmaktadır. Teşhis amacıyla kullanılan Mo-99/Tc-99m jeneratörü için Avrupa Farmakopesi'nde verilen şartlara göre yapılan testler aşağıda belirtilmiştir.

Jeneratör Verimi

Herhangi bir sağım zamanında elde edilen Tc-99m aktivitesinin teorik olarak jeneratörden sağılması gereken Tc-99m aktivitesine oranı olarak ifade edilir.

Bu test üretilen jeneratörün ve sistemlerinin kontrolünü sağlar.

Her jeneratörden sağım zamanı kayıt edilerek Tc-99m perteknetat örnekleri alınır. Her örneğin doz kalibratöründe Tc-99m aktivitesi ölçülür (ÇNAEM, 1995).

Fizikokimyasal Testler

a) Radyonüklidik Saflık (Mo-kaçağı)

Radyonüklidik saflık, uygulanması amaçlanan radyoizotopa ait radyoaktivitenin jeneratörden sağılan toplam radyoaktiviteye oranı olarak tanımlanır. Jeneratör sisteminde potansiyel bulaşıcı ana radyoizotoptur (Babich). Radyonüklidik saflık testleri, spektrometrik yöntem veya aktivite ölçüm yöntemi ile yapılır.

Spektrometrik yöntemde, her jeneratörden aktivitesi 1 mCi olan Tc-99m perteknetat örneği alınır. Her örneğin Tc-99m aktivitesinin 50000, Mo-99 aktivitesinin 2 kat azaltılması için 4 mm kalınlığında kurşun koruyucu içinde çok kanallı gama spektrometresinde gama spektrumu alınır. 0,704 MeV' e karşılık gelen bölgede Mo-99 fotonunun sayım sayısı; daha önce aynı şartlarda ölçülen aktivitesi 1 μ Ci olan standart Mo-99 çözeltisinin sayım sayısını geçmemelidir.

Aktivite ölçüm yönteminde ise her jeneratörden 2 mL Tc-99m perteknetat örneği alınır. Alınan örneğin, aktivitesi (A_{Tc-99m}) doz kalibratöründe Tc konumunda mCi olarak ölçülür. Aynı örneğin Mo-99 aktivitesi (A_{Mo-99}) kurşun koruyucu içinde doz kalibratöründe Mo-99 okuma konumunda μ Ci olarak ölçülür. Oranları alınır (ÇNAEM, 1995).

b) Radyokimyasal Saflık

Radyokimyasal saflık, bileşikte belirtilen kimyasal yapıdaki radyoizotopun radyoaktivitesinin toplam radyoaktiviteye oranıdır. Radyokimyasal saflık, kimyasal işlemlerin çeşitli kız radyoizotop komplekslerini gerektirmesi durumunda, esastır (Babich).

Her jeneratörden 1 mL Tc-99m perteknetat örneği alınır. 15 cm uzunluğunda 2 cm genişliğinde whatman No=1 kromatografi kağıdının 2 cm yukarısına 5 μ L örnek çözeltisi damlatılır. Metanol: Su (80:20) karışımı içeren uygun bir kromatografi kabında 2 saat süre ile yürütülür, çıkarıldıktan sonra kurutulur ve gama sayım sistemi ile kromatogramdaki aktivite dağılımı tayin edilir. Rf değeri 0,6 olan bölgedeki Tc-99m perteknetat iyonunun radyoaktivite miktarı toplam radyoaktivite miktarının en az %95' i olmalıdır.

c) Kimyasal Saflık

Spektrofotometrik Alüminyum Tayini yöntemi ile gerçekleştirilen bu kalite kontrol alüminyum, alüminon ile alüminyumun meydana getirdiği kompleksin renk şiddetinden yararlanılarak tayin edilir.

Çeşitli konsantrasyonlarda hazırlanan standart alüminyum çözeltilerinin pH=5,3 de alüminon ile oluşturduğu komplekslerinin 530 nm'de absorbansı ölçülerek kalibrasyon eğrisi hazırlanır. Örnek çözeltisindeki alüminyum konsantrasyonu ise aynı şekilde oluşturulan kompleksin 530 nm'de absorbansının ölçülmesi ile kalibrasyon eğrisinden hesaplanır.

d) pH Tayini

pH=4-7 tampon çözeltileri ile kalibre edilen pHmetre cihazı kullanılarak ölçülür.

e) Kararlılık Tayini

Her üretim serisinden bir adet jeneratör kararlılık testleri için ayrılır. En az bir hafta süre ile jeneratörden her gün Tc-99m perteknetat örnekleri alınarak jeneratör verimi tayin edilir. Jeneratör veriminin standartlara uygun ve en az 5 gün süre ile kararlı olması gerekmektedir. Ayrıca, alınan örneklerde kâğıt kromatografisi yöntemi ile radyokimyasal analiz yapılır. Perteknetat formundaki radyoaktivitenin miktarının kararlı kalması ve belirlenen standart değeri sağlaması gereklidir.

f) Sr-89/90 Tayini

Perteknetat çözeltisindeki Sr miktarı kimyasal ayırma yöntemi ile tayin edilir. Sr taşıyıcı çözeltisi ilavesinden sonra, radyoaktif Sr, karbonat halinde çöktürülür ve aktivite miktarı beta sayım sistemi kullanılarak ölçülür (ÇNAEM, 1995).

g) Sterilite ve Projenite Testleri

Sterilite, standart kültür ortamında üreyen bakteri, mantar gibi canlı organizmaların bulunmaması demektir. Sterilizasyon ise bu organizmaların yok edilmesidir.

Projenler, mikroorganizmaların metabolizmasıyla ortaya çıkan ya polisakkaridler ya da proteinlerdir. 0,05-1 μm büyüklüğünde, suda çözünen ve ısıya dayanıklı moleküllerdir. Bakterilerin ürettikleri projenlere endotoksin denir. Projenler insana ve hayvana enjekte edildikleri zaman vücut sıcaklığında artışa neden olurlar.

Projenik kontaminasyondan kaçınmak için çok saf kimyasallar ve steril malzemeler kullanmak gerekir (Akgün vd).

Steril ve projenite kontrolleri Avrupa Farmakopesi'nde verilen şartlara uygun olarak yapılmaktadır (ÇNAEM, 1995).

Ayrıntılı bilgisi Bölüm 1 ve Bölüm 2'de verilen ve günümüzde nükleer tıpta kullanılmakta olan radyoizotop jeneratörlerinin, fiziksel incelemesi aşağıda yapılmıştır. Radyoizotopların bozunma ve oluşma grafiklerinde çekirdek sayısı 100 alınmış ve çekirdek sayısı ve aktivite hesapları buna göre yapılmıştır.

3.1.1 Teşhis Amacıyla Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri

Mo-99/Tc-99m Jeneratörü

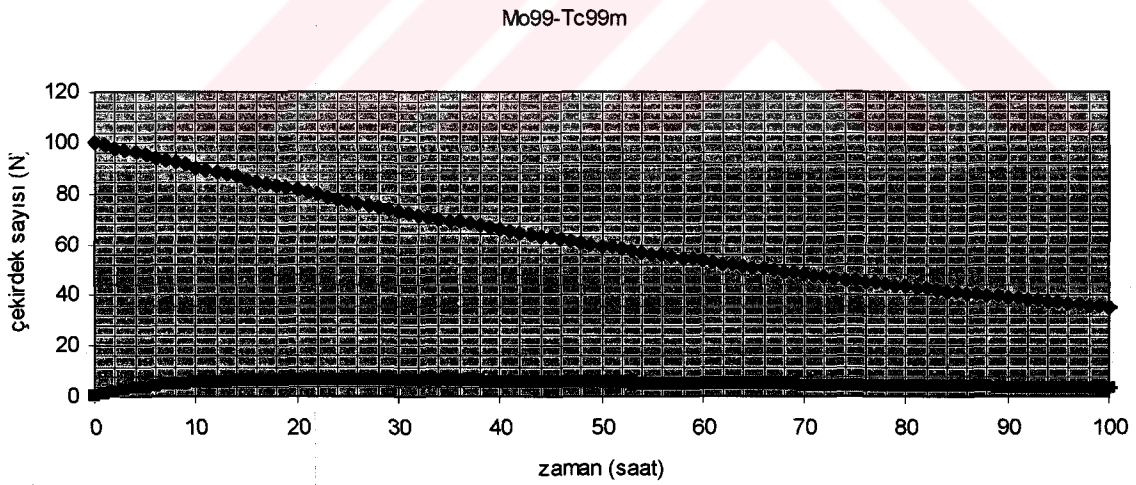
Mo-99'un 66 saatlik, Tc-99m'in 6 saatlik yarı ömrü ve 140 keV'lik enerjisi ile Mo-99/Tc-99m jeneratörü en eski ve en çok kullanılan jeneratördür.



Şekil 3.1 Mo-99/Tc-99m jeneratörü

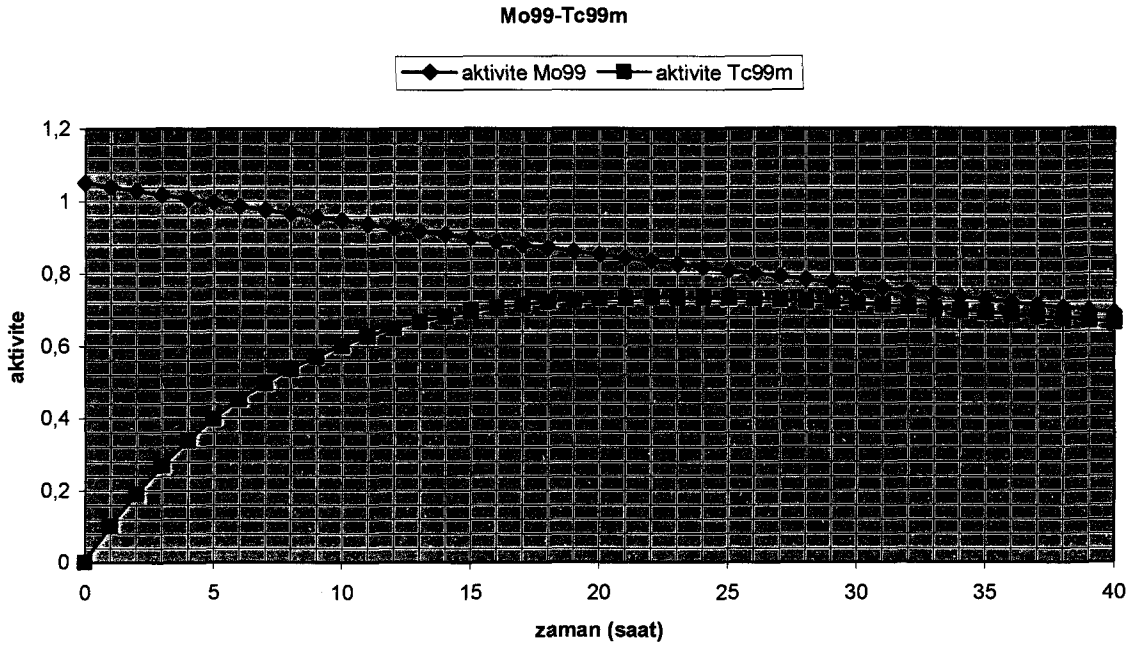
Mo-99/Tc-99m jeneratörünün bozunma ve oluşmalarının daha iyi anlaşılması amacıyla bu jeneratöre ait zamana bağlı olarak çekirdek sayısı ve aktivite grafikleri çizilmiştir.

Mo-99 /Tc-99m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.

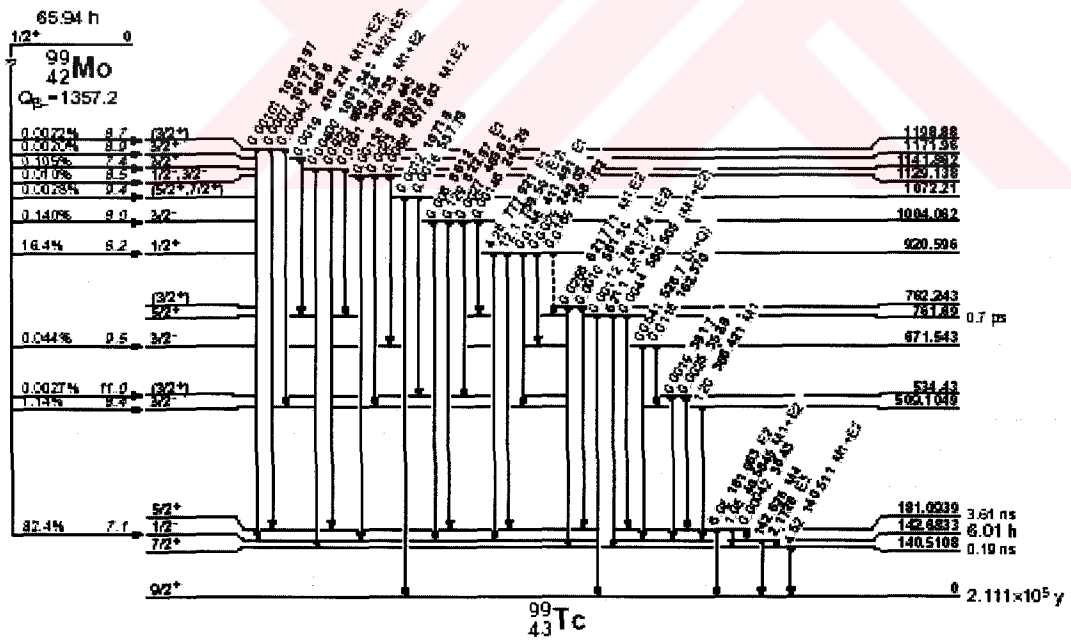


Şekil 3.2 Mo-99/Tc-99m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Mo-99/Tc-99m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.3 Mo-99/Tc-99m aktivite-zaman grafiği



Şekil 3.4 Mo-99/Tc-99m bozunma şeması (Firestone)

Bir jeneratörün gerçekleştirilen sağımlarına göre kız çekirdeğin aktivite değişimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$A_d = \frac{\lambda_d}{(\lambda_d - \lambda_p)} f_{pd} A_p(0) (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t}) + A_d(0) e^{-\lambda_d t} \quad (\text{Colombetti, 1984, 1977}) \quad (3.1)$$

$A_d(0)$ = Kız çekirdeğin son sağımdan sonra kalan aktivitesi

λ_p = Ana çekirdeğin bozunma sabiti

λ_d = Kız çekirdeğin bozunma sabiti

$A_p(0)$ = Son sağımdan sonraki ana çekirdeğin aktivitesi

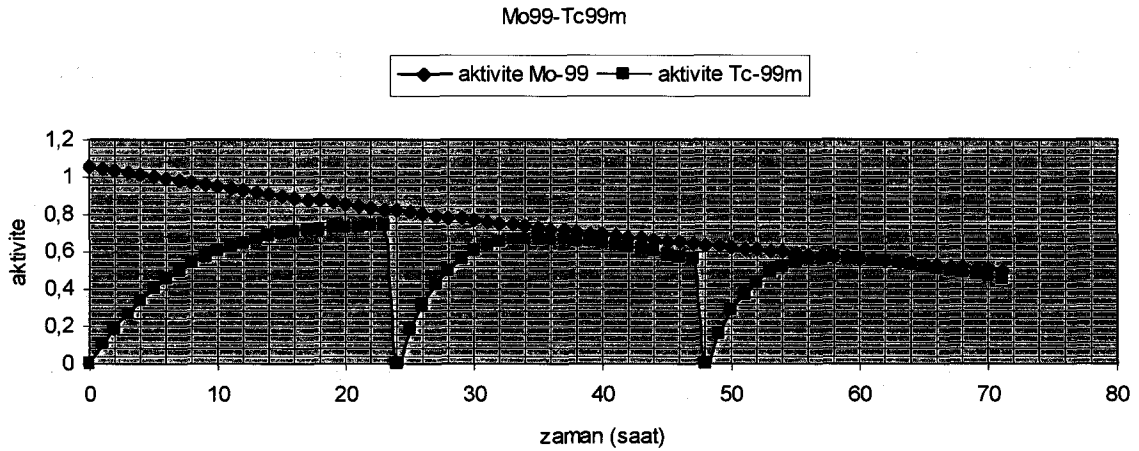
t = son sağım zamanı

f_{pd} = ana çekirdeğin kız çekirdeğe bozulan kesri

$$t_{\max} = \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{\lambda_1 - \lambda_2} = 22,76 \text{ saat} \quad (3.2)$$

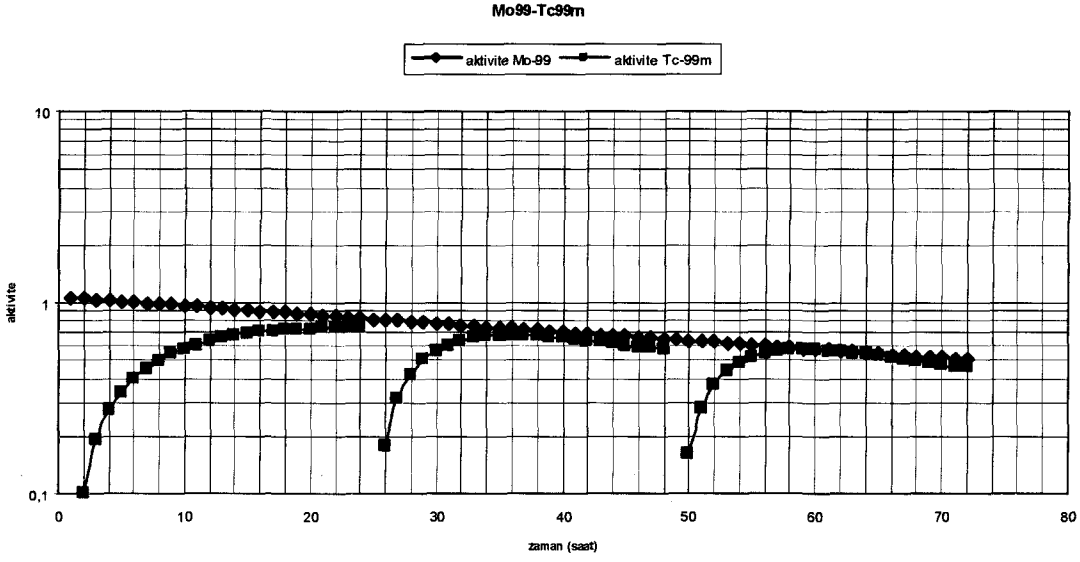
Mo-99/Tc-99m jeneratöründe Tc-99m aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edildiği üzere, her sağımdan sonra 22,76 saat beklenmelidir.

Mo-99/Tc-99m jeneratörünün gerçekleştirilen sağımlara göre aktivite-zaman grafiği (3.1) bağıntısından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.5 Mo-99/Tc-99m sağım aktivite-zaman grafiği

Mo-99/Tc-99m jeneratörünün gerçekleştirilen sağımlara göre aktivite-zaman yarı logaritmik grafiği (3.1) bağıntısından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.6 Mo-99/Tc-99m sağım aktivite-zaman yarı logaritmik grafiği

Radyoizotop jeneratörlerinden üreyen kız radyoizotopların kinetik faktörlerini anlamak için üç soru sorabiliriz.

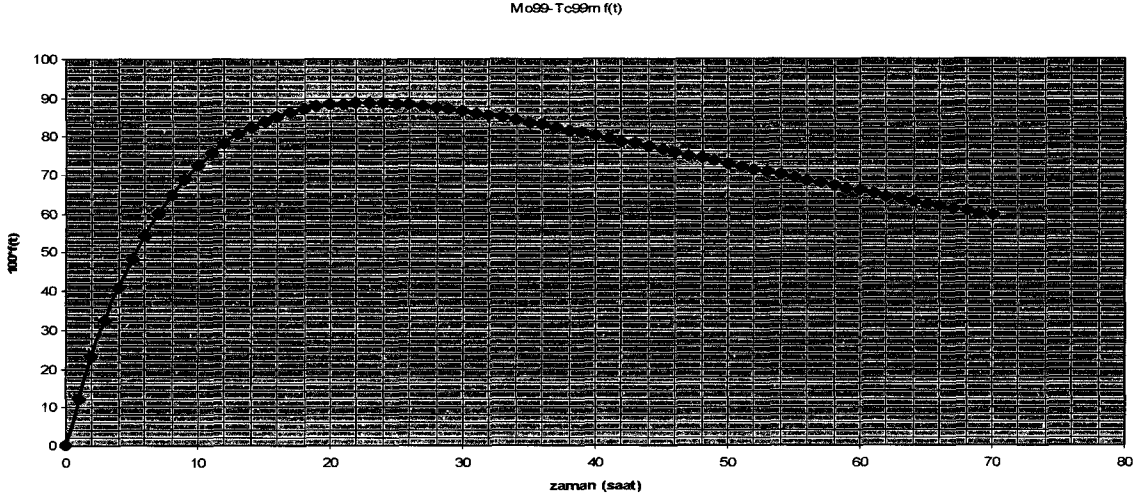
Bunlardan ilki; “Jeneratör sağıldıktan ne kadar zaman sonra radyoaktif kızın aktivite kesri maksimum olur?”dur.

Aşağıdaki denklemde verileri yerine koyarsak, bir jeneratörün sağıldıktan sonra radyoaktif kızın maksimum aktivite kesrini (f) bulmuş oluruz (Rhodes ve Craft, 1978) .

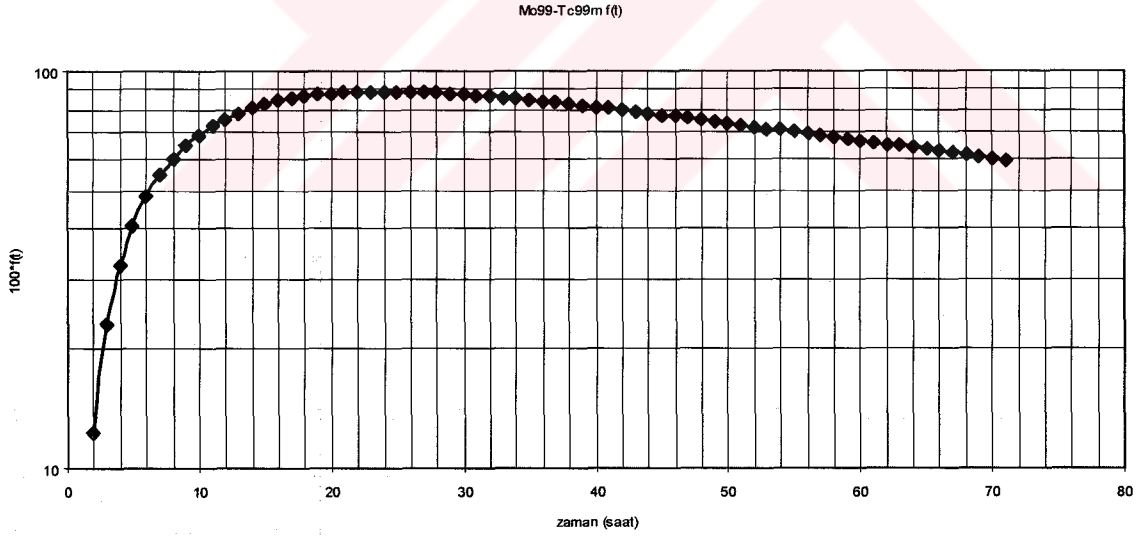
$$\lambda_2 N_2(t) = \frac{N_1(0) \lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3.3)$$

$$f(t) = \frac{A_1(0) \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{A_2(\max)(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3.4)$$

Aşağıda Mo-99/Tc-99m jeneratörü için (3.4) bağıntısına göre çizilmiş olan, jeneratörün sağıldıktan sonra radyoaktif kızın maksimum aktivite kesri, $f(t)$, grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.7 Mo-99/Tc-99m $f(t)$ grafiği

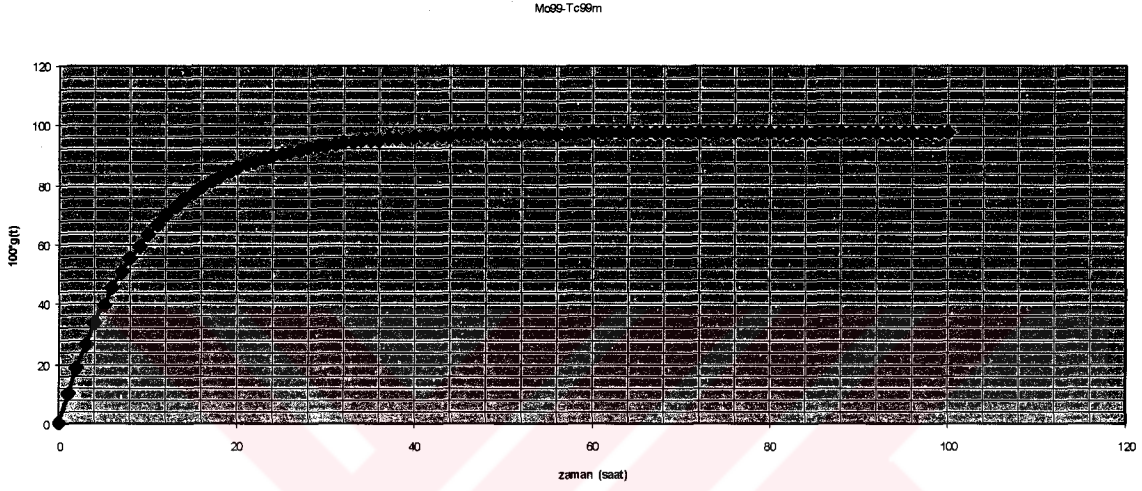


Şekil 3.8 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik $f(t)$ grafiği

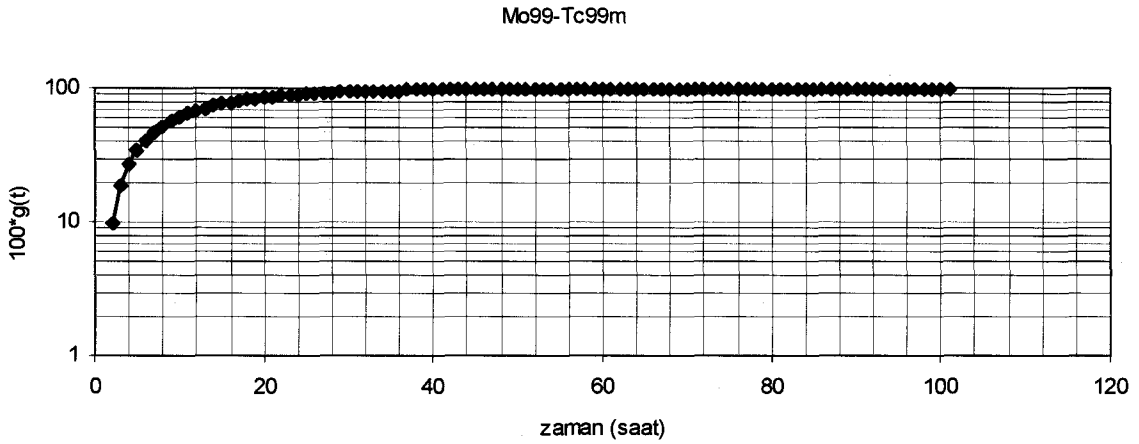
Bir radyoizotop jeneratöründeki ana ve kız radyoizotopun herhangi bir zamandaki radyoaktivite oranlarını bulmak için ise aşağıdaki formülü uygularız (Rhodes ve Craft, 1978) .

$$g(t) = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(e^{-\lambda_1 t})} \quad (3.5)$$

Aşağıda Mo-99/Tc-99m jeneratörü için (3.5) bağıntısına göre çizilmiş herhangi bir zamandaki radyoaktivite oranları, $g(t)$, grafiği bulunmaktadır.



Şekil 3.9 Mo-99/Tc-99m $g(t)$ grafiği

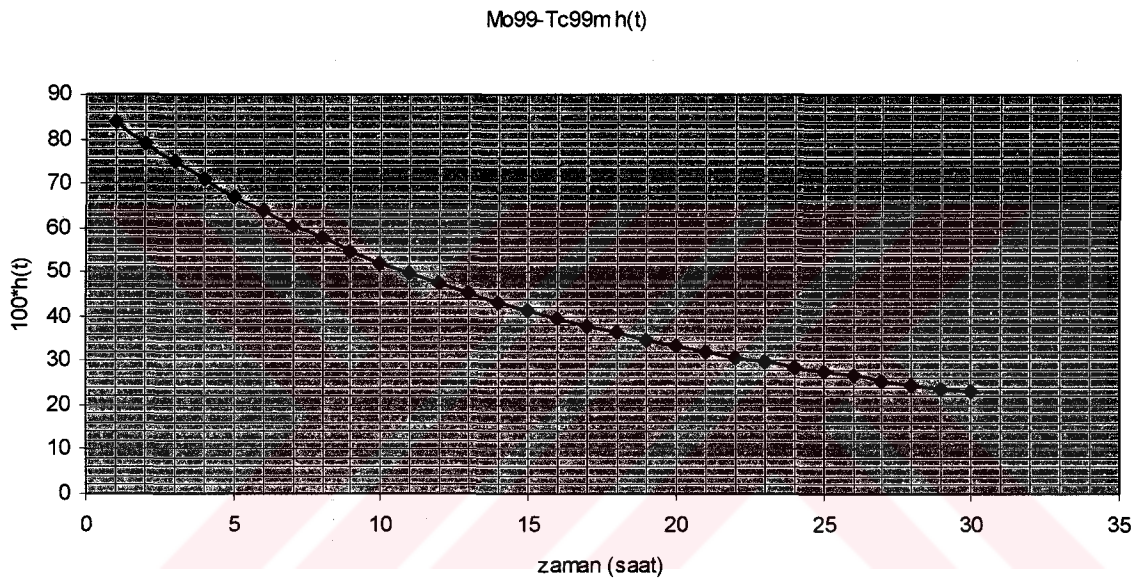


Şekil 3.10 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik $g(t)$ grafiği

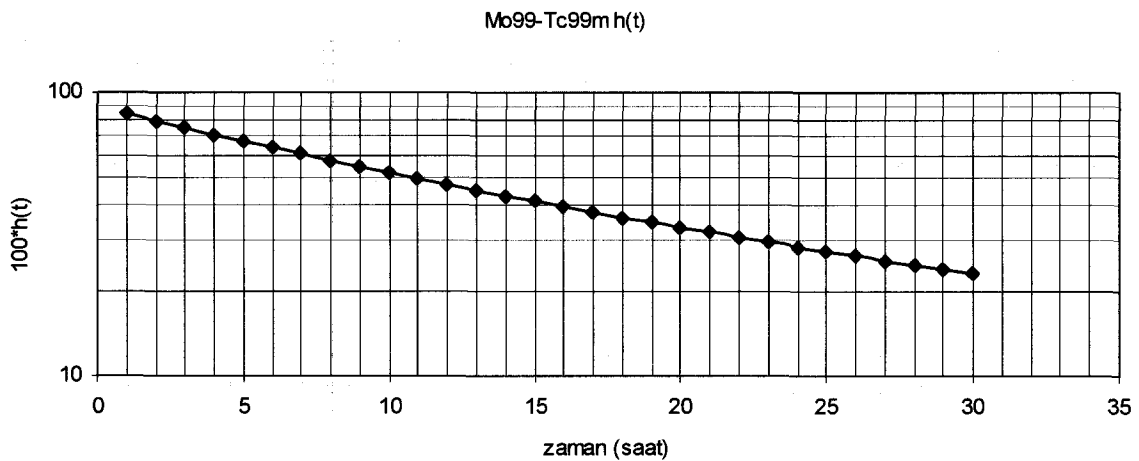
Eğer jeneratörün içindeki kız çekirdeğin ne kadarının şu anda yarı kararlı halde olduğunu öğrenmek istersek; aşağıdaki denklemde verileri yerine koyar ve jeneratörde yarı kararlı halde bulunan kız çekirdeğin mol kesrini, $h(t)$, buluruz (Rhodes ve Craft, 1978).

$$h(t) = \frac{N_2}{N_{\text{toplama}}} = \frac{\lambda_1 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_1 t})} \quad (3.6)$$

Aşağıda (3.6) bağıntısına göre çizilmiş olan Mo-99/Tc-99m jeneratöründe yarı kararlı halde bulunan kızın mol kesrinin grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.11 Mo-99/Tc-99m h(t) grafiği

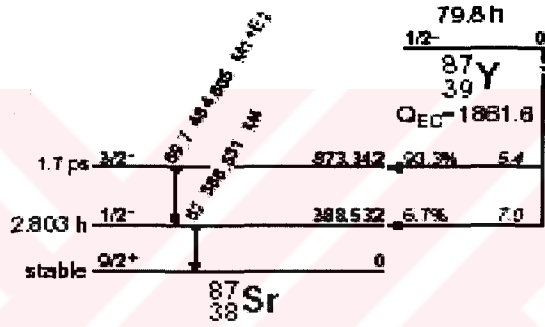


Şekil 3.12 Mo-99/Tc-99m yarı logaritmik h(t) grafiği

Y-87/Sr-87m Jeneratörü

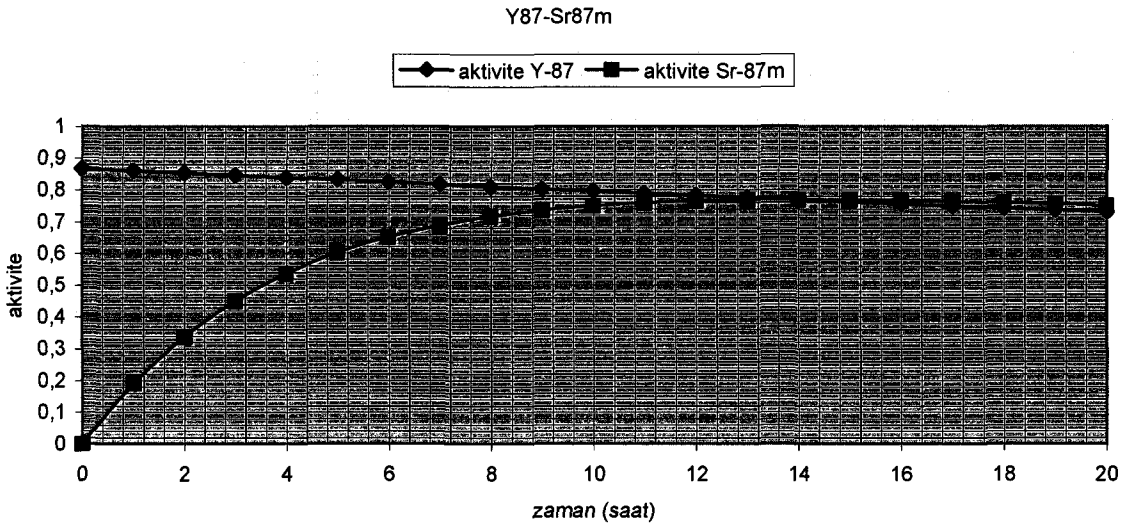
Şekil 3.12’de verilen bozunum şemasından da izlenebileceği üzere, bir hızlandırıcı ürünü olan 80 saat yarı ömürlü Y-87 ile kalıcı dengede olan 2,8 saat yarı-ömürlü bozunma ürünü Sr-87m’ den oluşan Y-87/Sr-87m jeneratör sistemi, Sr-87m’nin iç dönüşüm sonucunda yayınladığı 388 keV’lik gama enerjisi nedeniyle tıp alanında teşhis amacıyla kullanılmaktadır (Knapp Jr vd; Colombetti, 1984). Ancak, Tc-fosfat radyofarmasötiklerinin geliştirilmesi ile fazla kullanılmamaya başlanmıştır. Bu jeneratör sisteminde Dowex 1×8 reçine kolon ve 0,15M NaHCO₃ sağıım çözeltisi kullanılmaktadır (Colombetti, 1984).

Y-87/Sr-87m jeneratöründe Sr-87m aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edildiği üzere, her sağıımdan sonra 14,05 saat beklenmelidir.



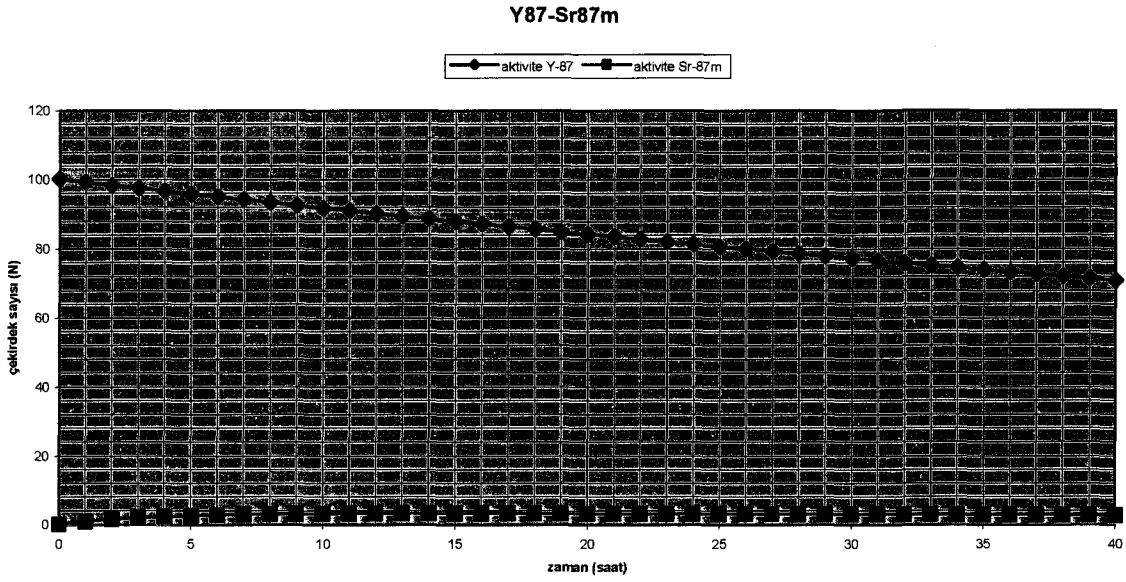
Şekil 3.13 Y-87/Sr-87m bozunma şeması (Firestone)

Y-87/Sr-87m jeneratörünün 100 çekirdek sayısına göre aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.14 Y-87/Sr-87m aktivite-zaman grafiği

Y-87/Sr-87m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak 100 çekirdek sayısına göre çizilmiştir.



Şekil 3.15 Y-87/Sr-87m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Sn-113/In-113m Jeneratörü

Hızlandırıcıda Sn-112(n,γ)Sn-113 reaksiyonuyla üretilen Sn-113, elektron yakalama yapıp 225 keV'lik foton yayınlayarak In-113m'e dönüşür (Bulletin D'informations, 1978).

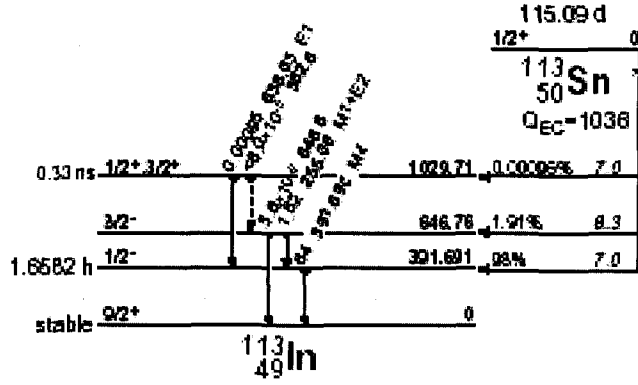
Sn-113'ün In-113m'e radyoaktif bozunma yaparak dönüşmesiyle elde edilen Sn-113/In-113m jeneratörü, neredeyse ilk geliştirilen jeneratörlerden biridir (Elliot, Knapp). Sn-113 'ün 120 günlük ve In-113m 'in 100 dakikalık yarı ömrü nedeniyle bu ana-kız kalıcı dengeye iyi bir örnektir aynı zamanda Sn-113 'ün yarı ömrü onu yılda sadece birkaç kez doldurulması gerektiği için uygun bir jeneratör sistemi yapar.

In-113m, %100 iç dönüşüm yaparak ve %64 393 keV'lik foton yayınlayarak In-113'e dönüşür (Bulletin D'informations, 1978). In-113m 'in 393keV'lik gama ışını sintilasyon kameraları için oldukça yüksek ancak çizgisel kameralar için uygun olması nedeniyle bu jeneratör teşhis için kullanılmaktadır. Sn-113 hem hidroziirkonyum oksitle hem de silika jelle bağ yapabilmektedir (Colombetti, 1984).

Colombetti tarafından geliştirilen zirkonyum oksit kolon kullanılan bu jeneratör pH'ı 1,2-1,6 arasında olan 8-10 mL'lik 0,05 M HCl ile sağlanabilir(Colombetti, 1984; Elliot). Bu kolon ve sağım sıvısı ile jeneratör verimi %80 iken Sn-113 kaçağı ise 10^{-4} 'den daha az olmalıdır (Elliot).

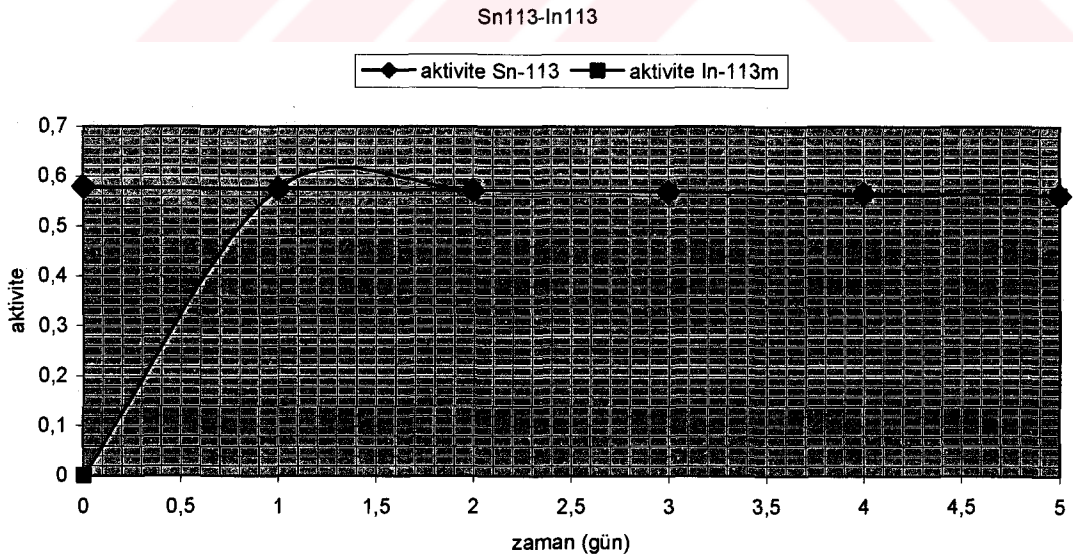
Tc-99m'de kullanılan birçok radyofarmasötik In-113m'de de kullanılabilir. (Colombetti, 1984)

Bu jeneratörde In-113m'in en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalara göre her sağımdan sonra 17,9 saat beklenmelidir.



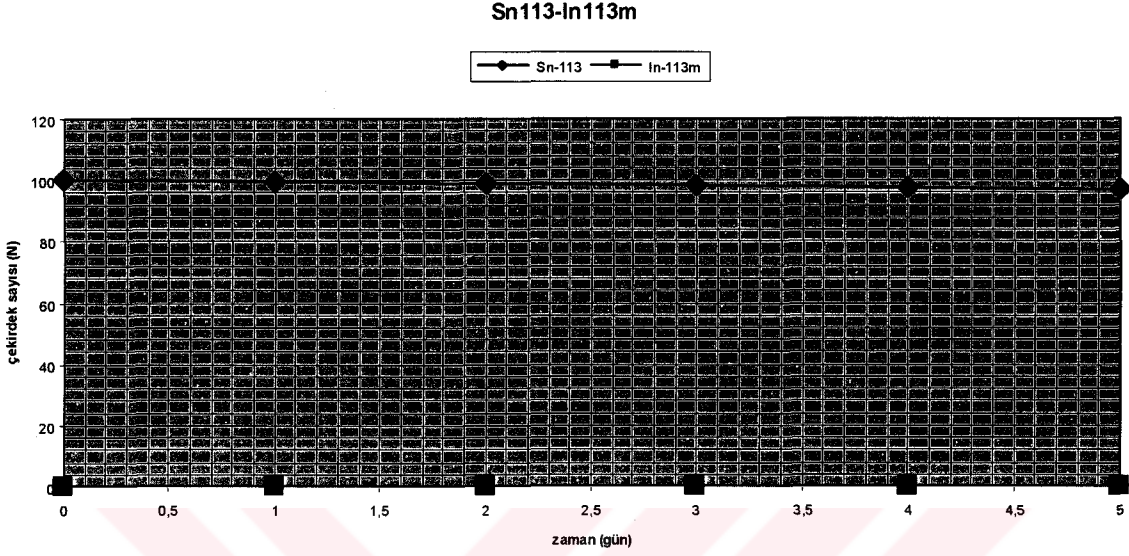
Şekil 3.16 Sn-113/In-113m bozunma şeması (Firestone)

Sn-113/In-113m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.17 Sn-113/In-113m aktivite-zaman grafiği

Sn-113/In-113m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.18 Sn-113/In-113m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Cs-137/Ba-137m Jeneratörü

U-235'in fisyon ürünü olan Cs-137'nin yarı ömrü 30,17 yıldır ve yarı ömrü 2,6 dakika olup nükleer tıp alanında kullanılan radyoizotoplara göre uzun fakat dinamik çalışmalar için kullanılan Ba-137m'e bozunur. Ba-137m iç dönüşüm ile 662 keV'lik gama ışınları yayarak kararlı Ba-137'ye dönüşür.

Cs-137/Ba-137m jeneratörü için bakır ferrosiyanür, zirkonyum fosfat, amonyum molibdofosfat gibi çeşitli kolonlar kullanılır (Colombetti, 1984; Rhodes ve Craft, 1978). Bunların içinde en çok kullanılan kolon sistemi Bio-Rad AMP-1, askılı reçinenin taş yünü pudrası içinde yıkanması ile elde edilir.

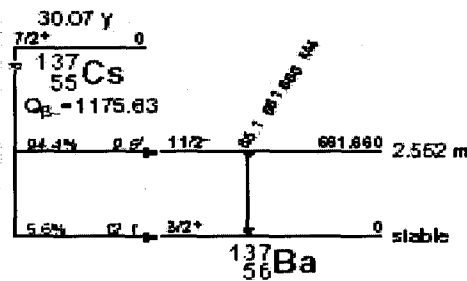


Şekil 3.19 Cs-137/Ba-137m jeneratörü [5]

Bio-Rad AMP-1 ile gerçekleştirilen jeneratör üretimlerinde, birkaç mCi taşıyıcısız Cs-137 kolona eklenip 0,1 M NH_4Cl içeren 0,1 M HCl sağımlı çözeltisi ile yıkanır. Cs-137 kaçağı olasılığına karşın, Bio-Rad AMP-1 reçinesi içeren ikinci bir kolon jeneratör kolonunun alt kısmına yerleştirilir. 10 mL sağımlı çözeltisi için jeneratörün verimi %20 civarındadır ve Cs-137 kaçağı, uygun güvenlik şartlarından çok yüksek bir değer olan $3,5 \mu\text{Ci}$ 'lik sabit bir değere yaklaşır.

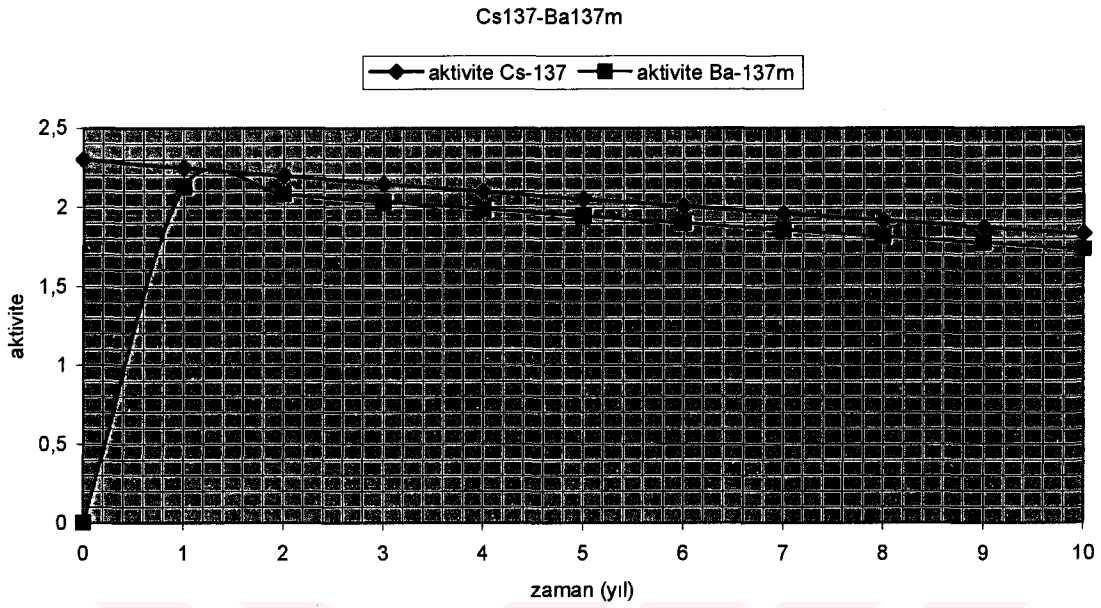
Cs-137/Ba-137m jeneratörü Blau ve Vernejoul tarafından kalp çalışmalarında kullanılmıştır. Şu anda insan ve köpeklerde kalp kan havuzu çalışmalarında kullanılır (Colombetti,1984) Ayrıca okullarda radyoaktif bozunmanın deneysel gösterimi için eğitim amacıyla ve endüstriyel amaçla da kullanılmaktadır.

Cs-137/Ba-137m jeneratöründe Ba-137m'in en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalara göre her sağımdan sonra 57,81 dakika beklenmelidir.



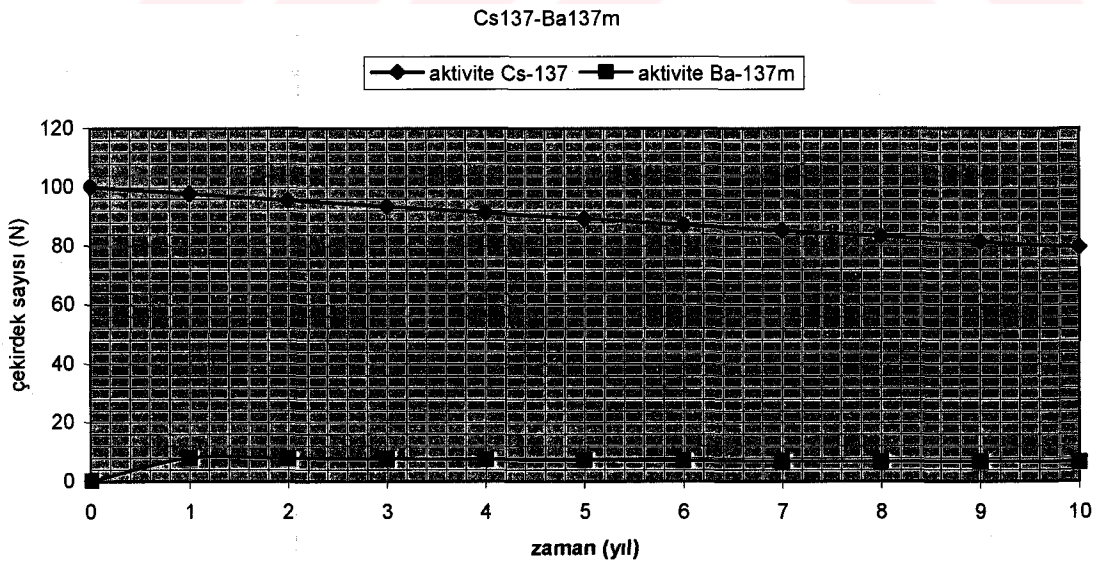
Şekil 3.20 Cs-137/Ba-137m bozunma şeması (Firestone)

Cs-137/Ba-137m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.21 Cs-137/Ba-137m aktivite-zaman grafiği

Cs-137/Ba-137m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.22 Cs-137/Ba-137m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Os-191/Ir-191m Jeneratörü

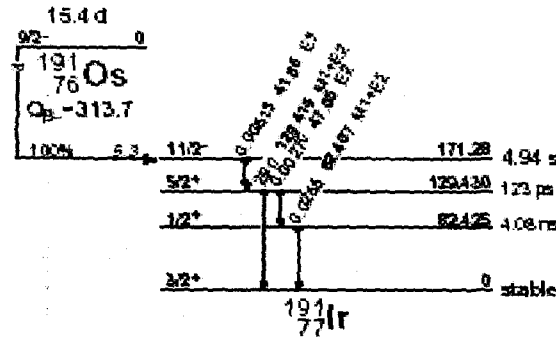
Reaktörde, %98 zenginleştirilmiş Os-190 ile $Os190(n,\gamma)Os191$ reaksiyonu sonucunda üretilen Os-191; 15,4 günlük yarı ömrü ile 4,9 saniyelik yarı ömrü nedeniyle çok kısa yarı ömürlü radyoizotoplara örnek olan 40 keV ve 129 keV'lik iki gama ışını yayarak iç dönüşüm ile Ir-191'e dönüşen Ir-191m'e bozunur. Ir-191m'in yayınladığı 129 keV'in yaklaşık %70'i iç dönüşüm yapmaktadır (Colombetti, 1984)

Bu jeneratör; 1968 yılında Yano ve Anger tarafından, Campbell ve Nelson'un 1958 yılında Ir-191m'i Os-191'den ayırmak için keşfettikleri yöntemi kullanarak geliştirilmiştir (Colombetti, 1984; Knapp).

Os-191/Ir-191m jeneratöründe Bio-Rad AG1 reçine kolon kullanılıp, %4'lük NaCl çözeltisi ile sağımlı yapılır.

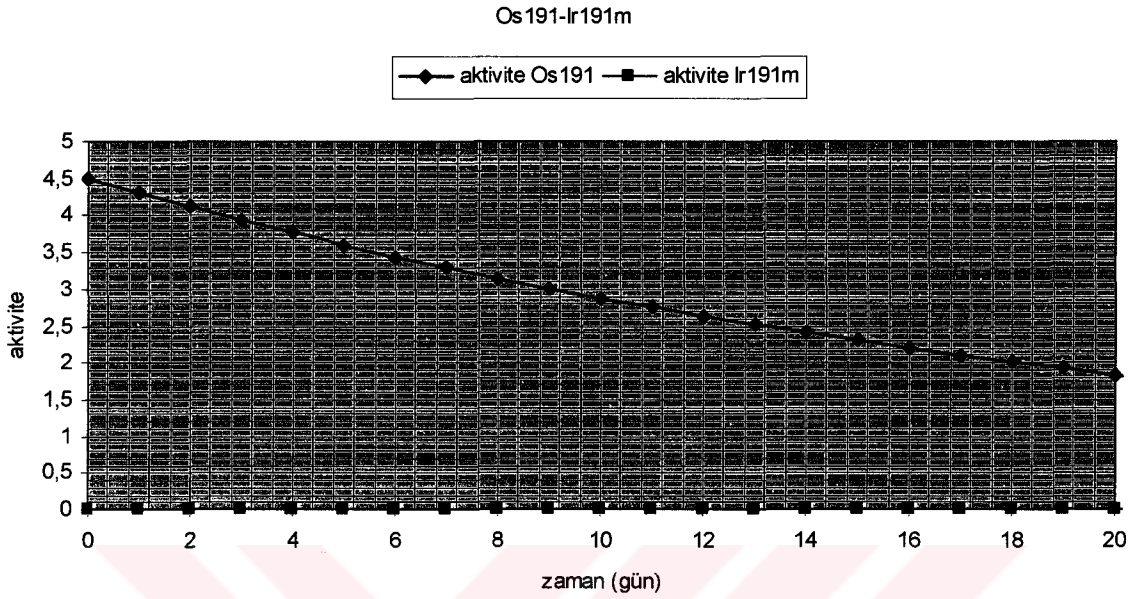
250-300 mCi'lik jeneratörden 1,5 mL sağımlı çözeltisi kullanılarak yaklaşık 15 mCi Ir-191m kullanılır. Ir-191m'im kısa yarı ömrü nedeni ile görüntülemeye başarı şansı az ancak bu kısa yarı ömür yeni doğmuş bebeklere anjiyografi yapılması imkanını sağlar (Colombetti, 1984).

Bu jeneratörde kızın en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalara göre her sağımdan sonra 66,2 saniye beklenmelidir.



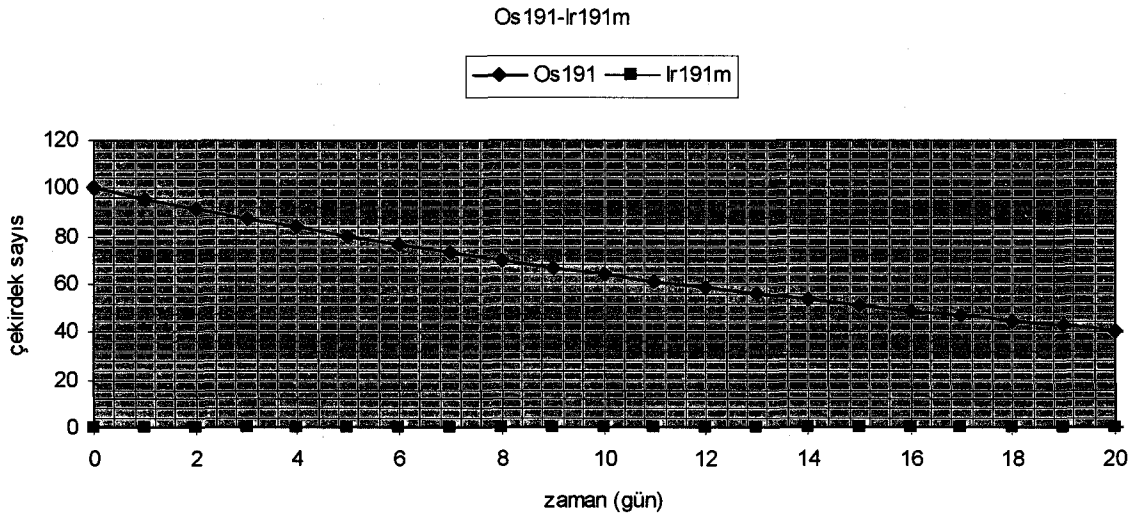
Şekil 3.23 Os-191/Ir-191m bozunma şeması (Firestone)

Os-191/Ir-191m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.24 Os-191/Ir-191m aktivite-zaman grafiği

Os-191/Ir-191m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.25 Os-191/Ir-191m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Hg-195m/Au-195m Jeneratörü

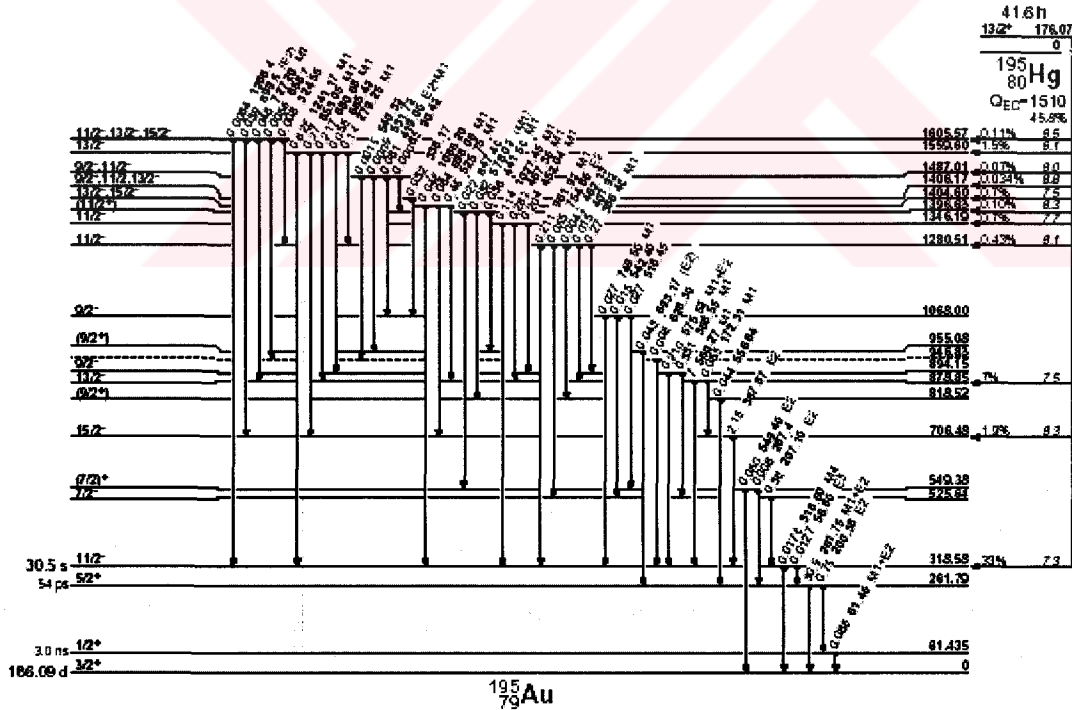
Hızlandırıcı ürünü olan Hg-195m metalik altın hedefin (p,3n) reaksiyonu sonucu elde edilir (Colombetti ,1984, Knapp). 1,7 günlük yarı ömre sahip olan Hg-195m radyoaktif bozunma ile Au-195m'e dönüşür (Colombetti ,1984, Bulletin D' informations,1978) .

Hg-195m/Au195m jeneratöründe Zn-S ile kaplanmış pH=5 olan silika jel kolon kullanılır ve 30mg/mL tiosülfat çözeltisi ile sağılır. Dakikada 12 mL akış hızına sahip Au-195m için jeneratör verimi yaklaşık %30'dur. %20 sağımlı veriminde, Hg-195m kaçağı mL'de 3×10^{-3} de 2×10^{-3} tür.

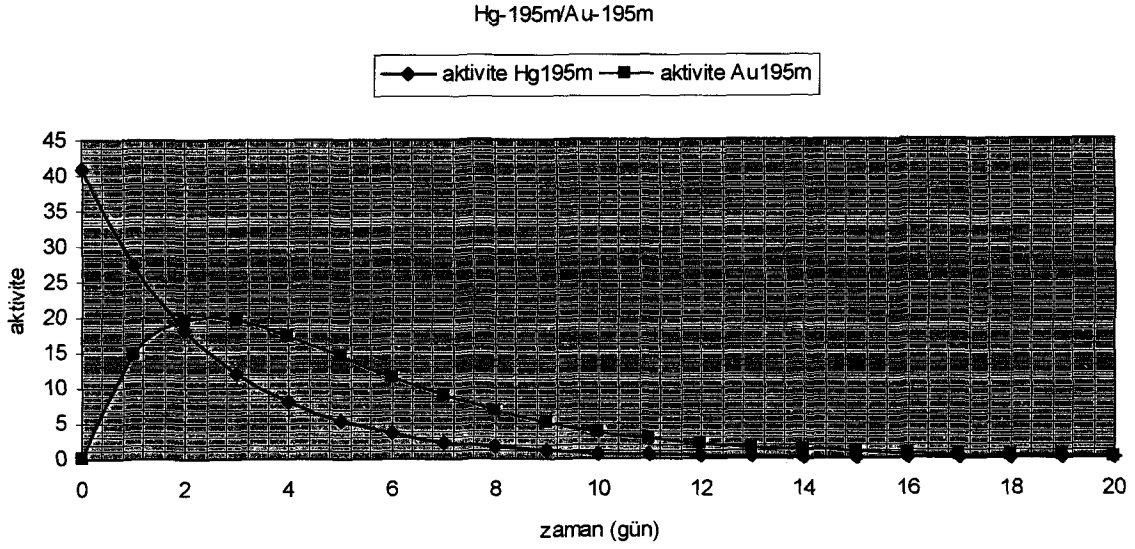
Üretilen Hg-195m/Au-195m jeneratör modelleri yaklaşık 200mCi Hg-195m içerir.

Bu jeneratör sistemi kalp ve kan havuzu çalışmalarında teşhis amacıyla kullanılır (Colombetti ,1984) .

Hg-195m/Au-195m jeneratöründe kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplara göre her sağımdan sonra 36,86 saniye beklenmelidir.

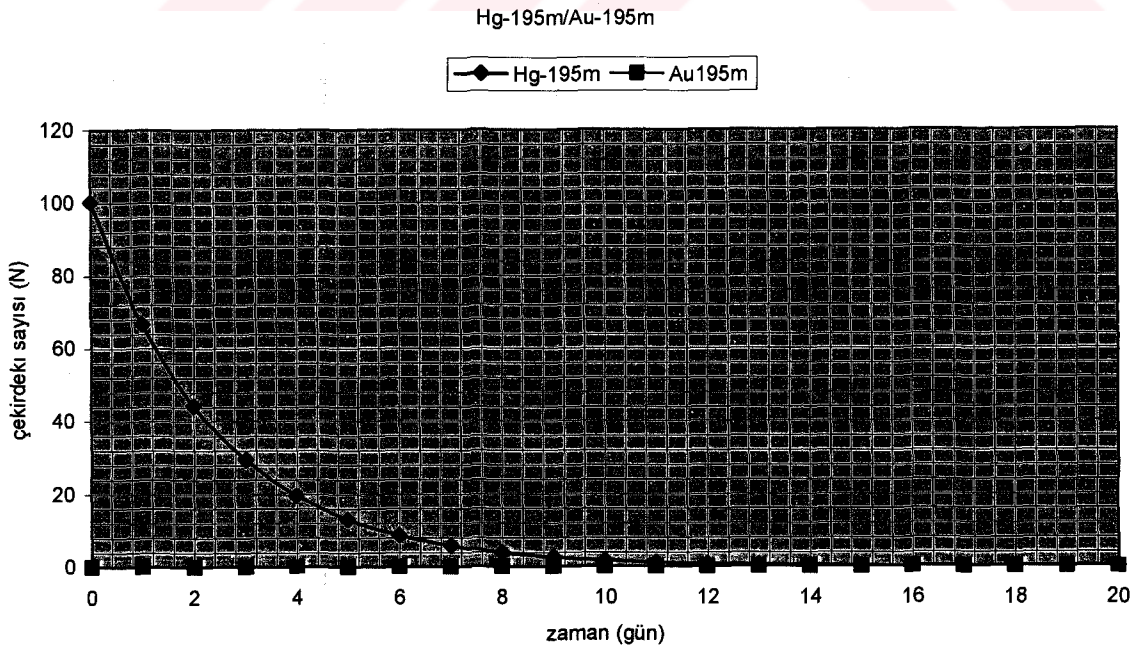


Hg-195m/Au-195m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.27 Hg-195m/Au-195m aktivite-zaman grafiği

Hg-195m/Au-195m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.28 Hg-195m/Au-195m çekirdek sayısı-zaman grafiği

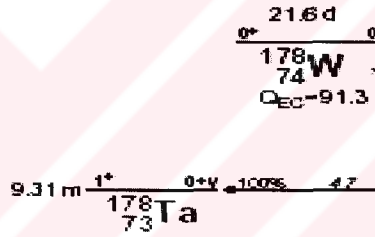
W-178/Ta-178 Jeneratörü

Hızlandırıcıda Ta181(p,4n)W178 reaksiyonu sonucunda elde edilen W-178, 21,5 günlük yarı ömrü ile bozunurken enerjileri 55 keV (K_{α} , %67,4) ve 67,4 keV (K_{β} , %17,7) olan $\times$ ışınları yayınlar.(Knapp, Bulletin D' informations,1978) W-178'in radyoaktif bozunmaya uğraması sonucu 9,3 dakika yarı ömre sahip taşıyıcısız 93 keV'lik pozitron yayınlayıp 511 keV'lik elektron yakalama yapan Ta-178 oluşur. (Knapp, Bulletin D' informations,1978)

W-178/Ta-178 jeneratörünün kolonu, klorür formdaki Dowex AG1- $\times$ 8 anyon değiştirme kolonuna 0,1 M HCl çözeltisi içeren % 0,1 H₂O₂ katılması ile elde edilir. Bu jeneratörden Ta-178'in hızlı sağımı için sodyumdifosfatın tampon çözeltisi pH=7'ye getirilir.

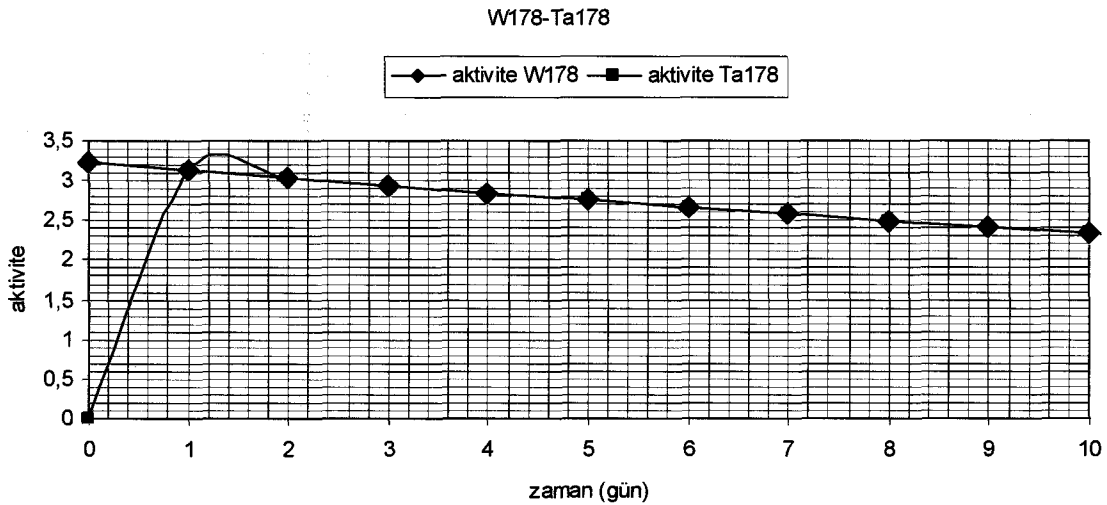
Nükleer tıpta teşhis amacıyla kullanılan bu jeneratörün 60 günlük periyodunda ortalama verim %45-50 civarındadır. W-178 kaçağı ise $\%1-1,5 \times 10^{-3}$ civarında olmaktadır.(Knapp)

Bu jeneratörde Ta-178'in en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplara göre her sağımdan sonra 108,89 dakika beklenmelidir.



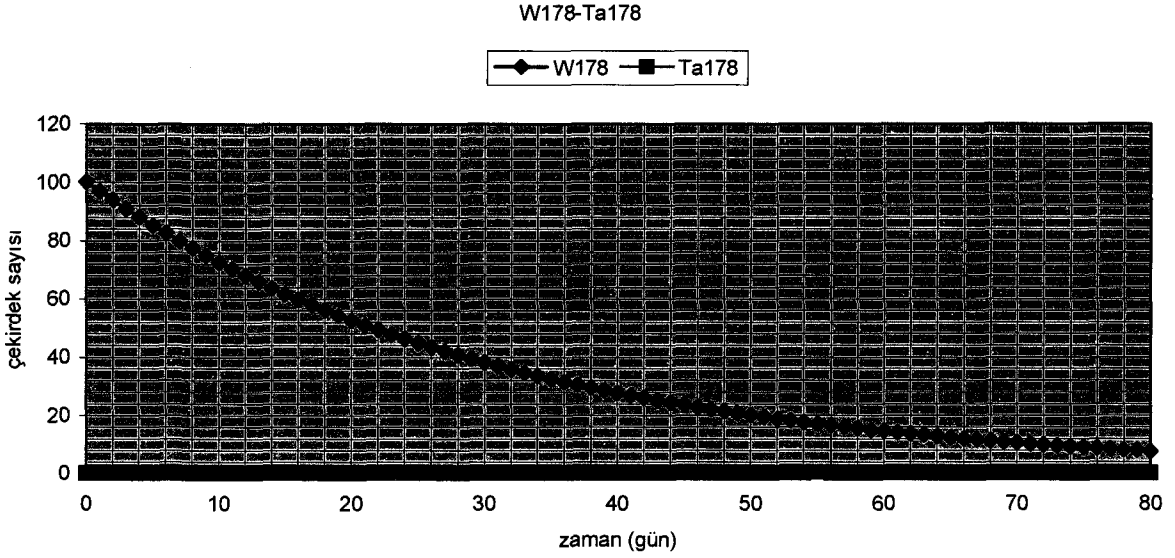
Şekil 3.29 W-178/Ta-178 bozunma şeması (Firestone)

W-178/Ta-178 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.30 W-178/Ta-178 aktivite-zaman grafiği

W-178/Ta-178 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



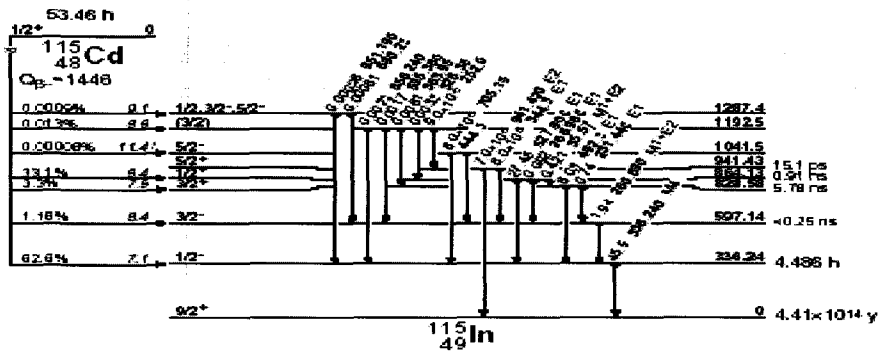
Şekil 3.31 W-178/Ta-178 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Cd-115/In-115m Jeneratörü

Reaktörde üretilen ve 53,46 saat yarı ömrü olan Cd-115, beta bozunması yaparak %100 4,5 saat yarı ömrü olan In-115m'e bozunur. In-115m iç dönüşüm yapıp %46, 336keV'lik ve %49, 300keV'lik foton yayınlamaya kararlı In-115'e bozunur.

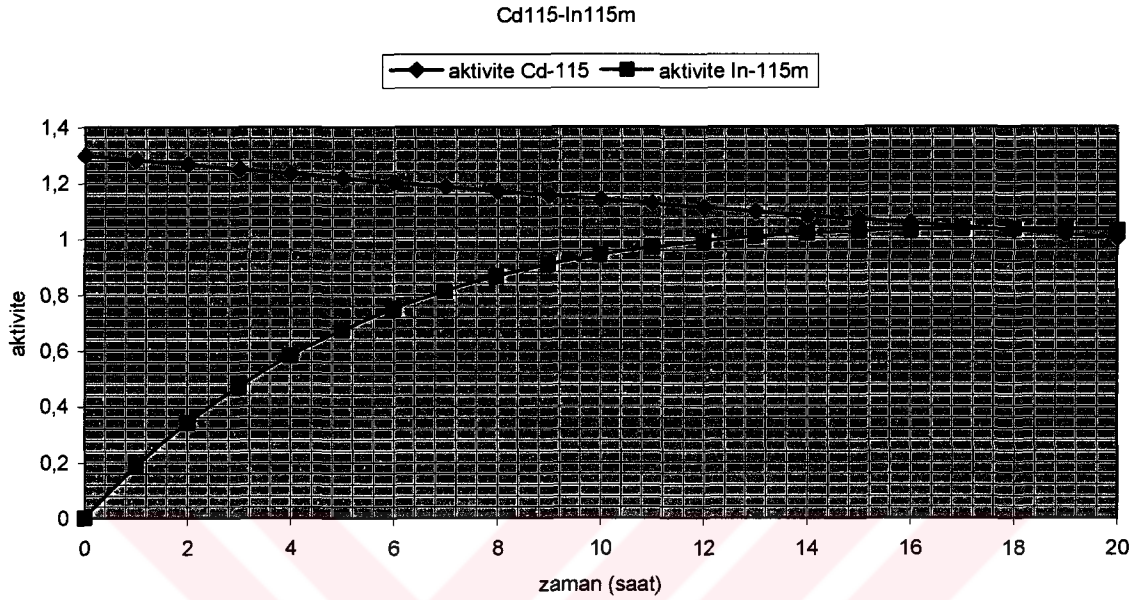
Bu ana-kız özelliklerinden dolayı teşhiste kullanılan Cd-115/In-115m jeneratöründe ticari olarak üretilen AG1 ×8 kolon kullanılmaktadır (Knapp).

Bu jeneratörde kızın en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 17,5 saat beklenmelidir.



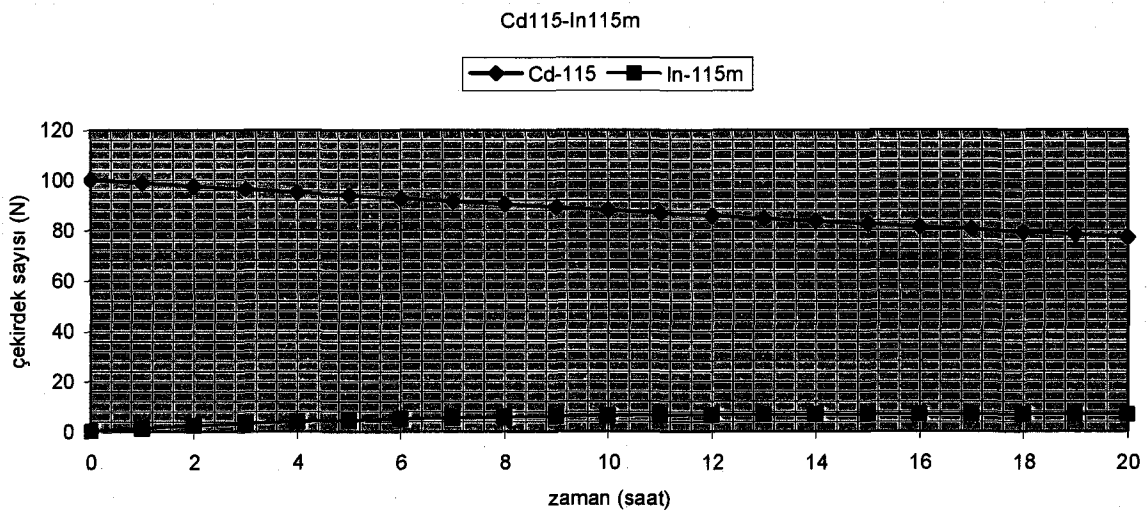
Şekil 3.32 Cd-115/In-115m bozunma şeması (Firestone)

Cd-115/In-115m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.33 Cd-115/In-115m aktivite-zaman grafiği

Cd-115/In-115m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.34 Cd-115/In-115m çekirdek sayısı-zaman grafiği

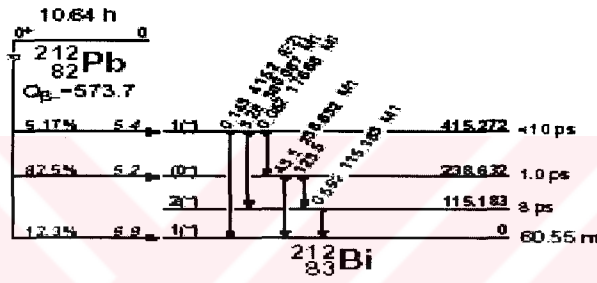
3.1.2 Tedavi Amacı İle Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri

Pb-212/Bi-212 Jeneratörü

Hızlandırıcı ürünü olan Pb-212 10,6 saatlik yarı ömrü ile 568 keV'lik maksimum enerji ile β^- bozunumu yaparak 60,5 dakika yarı ömre sahip olan Bi-212'ye bozunur. Bi-212, 6,09 MeV'lik (%27) α ve 2,25 MeV'lik (%63) β^- yayınlayarak bozunur.

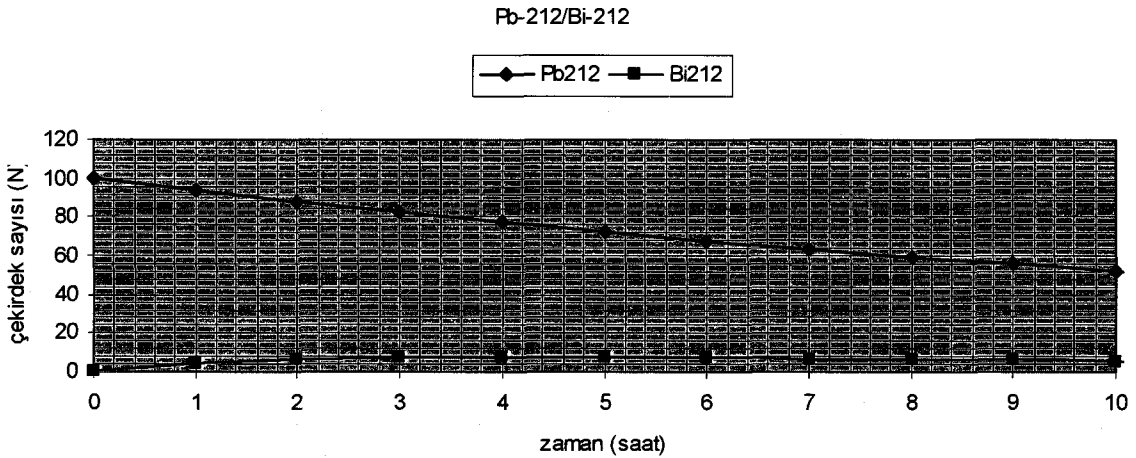
Bi-212'nin yayınladığı bu enerjiler nedeniyle Pb-212/Bi-212 jeneratörü tedavi için uygundur. Bu jeneratörde 3 ayrı kolon kullanılabilir. Bunlar AGMP-50, Bio-Rad D50, Dowex I/Dowex 50'dir (Knapp).

Bu jeneratörde Bi-212'nin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamaya göre her sağımdan sonra 3,78 saat beklenmelidir.



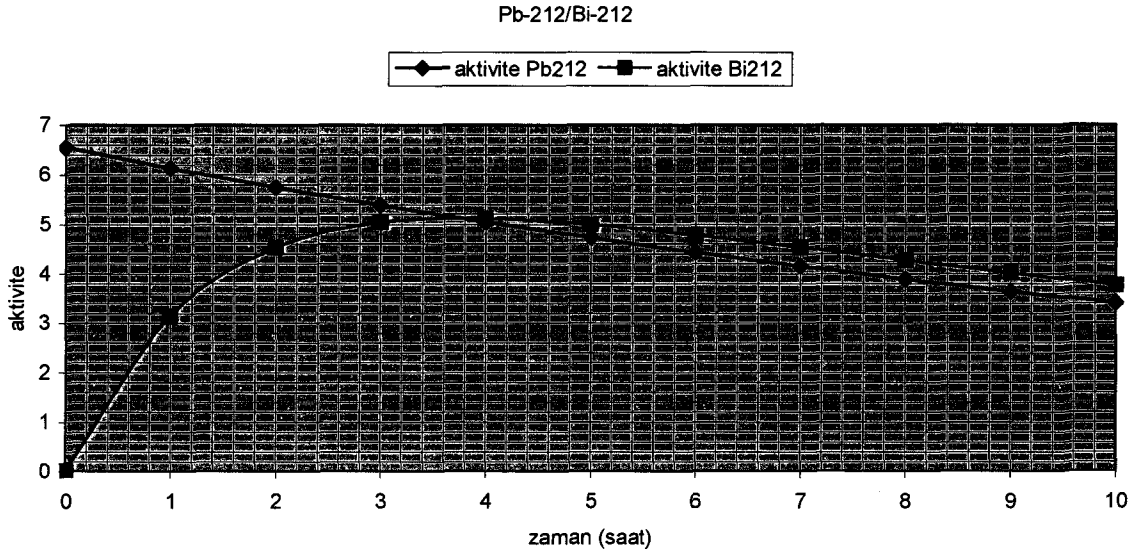
Şekil 3.35 Pb-212/Bi-212 bozunma şeması (Firestone)

Pb-212/Bi-212 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.36 Pb-212/Bi-212 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Pb-212/Bi-212 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



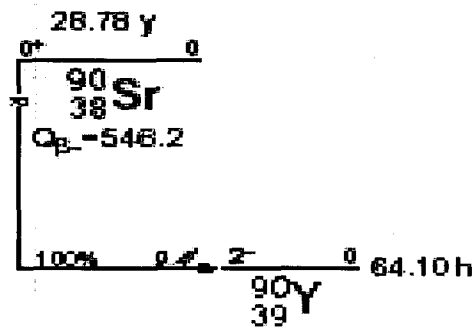
Şekil 3.37 Pb-212/Bi-212 aktivite-zaman grafiği

Sr-90/Y-90 Jeneratörü

Fisyon ürünü olan Sr-90 2,8 yıllık yarı ömre sahiptir ve β^- bozunumu yaparak 64 saat yarı ömrü olan Y-90'a dönüşerek kalıcı denge yapar.

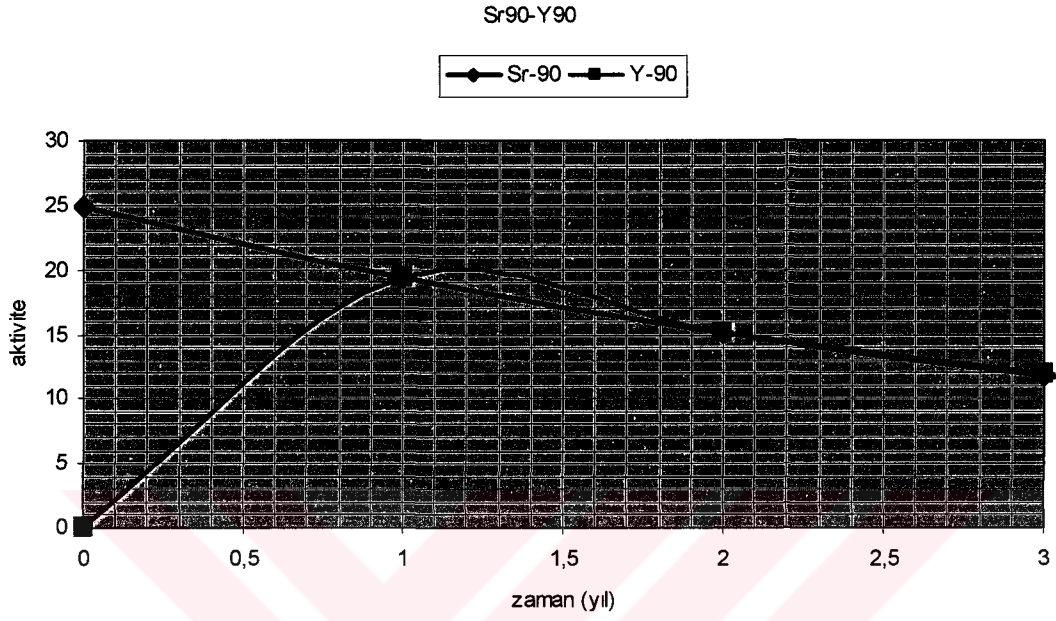
Tedavi amacıyla kullanılan Sr-90/Y-90 jeneratöründe kolon dolgu maddesi olarak Dowex 50×8 reçine kullanılıyor. Parafinde 1M di-(2-etilheksil)fosforik asit (HDEHP) sağımlı çözeltisi kullanarak sağımlı yapılır (Knapp).

Sr-90/Y-90 jeneratöründe Y-90'ın en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalara göre her sağımdan sonra 14,05 saat beklenmelidir.



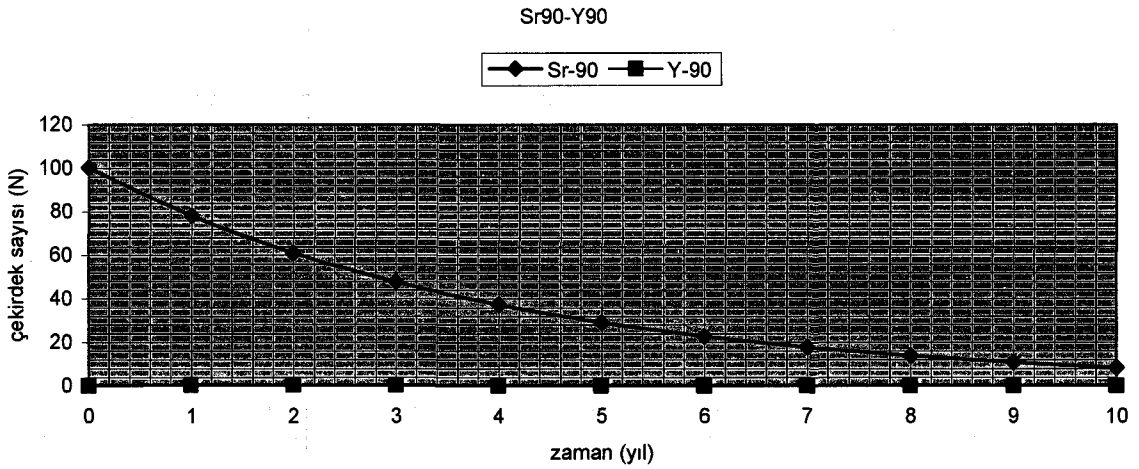
Şekil 3.38 Sr-90/Y-90 bozunma şeması (Firestone)

Sr-90/Y-90 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.39 Sr-90/Y-90 aktivite-zaman grafiği

Sr-90/Y-90 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



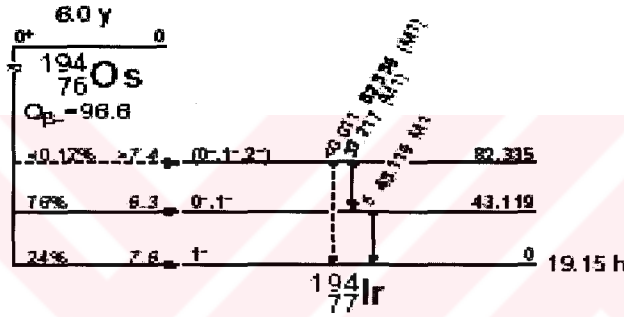
Şekil 3.40 Sr-90/Y-90 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Os-194/Ir-194 Jeneratörü

Reaktörde Os-192'nin çift nötron yakalamasıyla elde edilen ve 6 yıl yarı ömre sahip olan Os-194, beta bozunumu ile Ir-194'e dönüşür. Ir-194, 19 saat yarı ömrü ile 790 keV'lik beta bozunumu yaparak ve 319 keV'lik foton yayınlamaya bozunur. Bu özelliklerinden dolayı Os-194/Ir-194 jeneratörü tedavide kullanılmak için uygun bir jeneratördür.

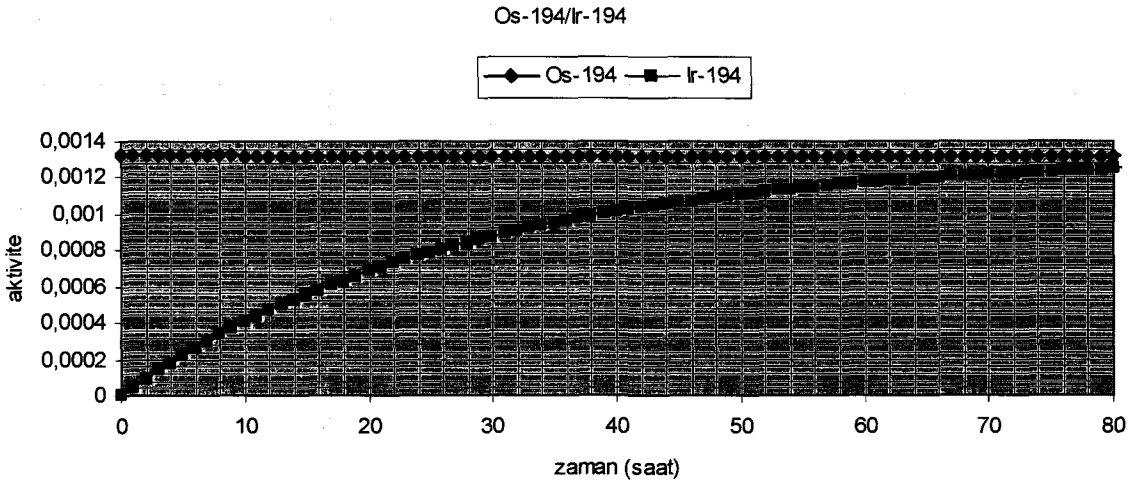
Os-194/Ir-194 jeneratöründe ısı banyosu yapılmış hindistan cevizi ağaç kömürü kolonu kullanılıp pH=2 olan tuzlu su çözeltisi ile sağımlı yapıldığında %75-85 civarı verim elde edilir ve Os-194 kaçağı da çok düşüktür (Knapp).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 9,07 gün beklenmelidir.



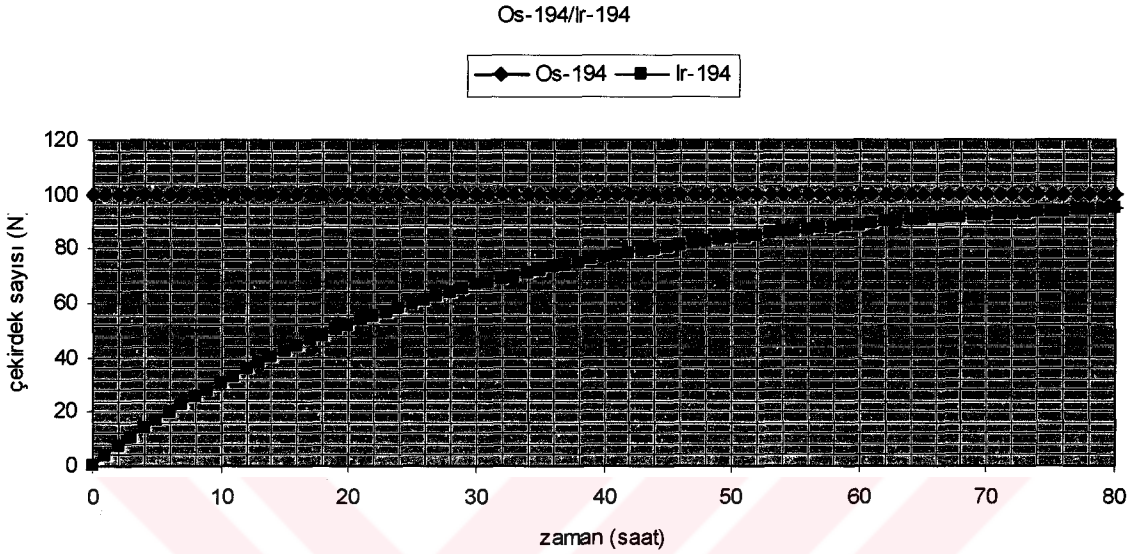
Şekil 3.41 Os-194/Ir-194 bozunma şeması (Firestone)

Os-194/Ir-194 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.42 Os-194/Ir-194 aktivite-zaman grafiği

Os-194/Ir-194 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.43 Os-194/Ir-194 çekirdek sayısı-zaman grafiği

3.1.3 Teşhis ve Tedavi Amacı İle Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri

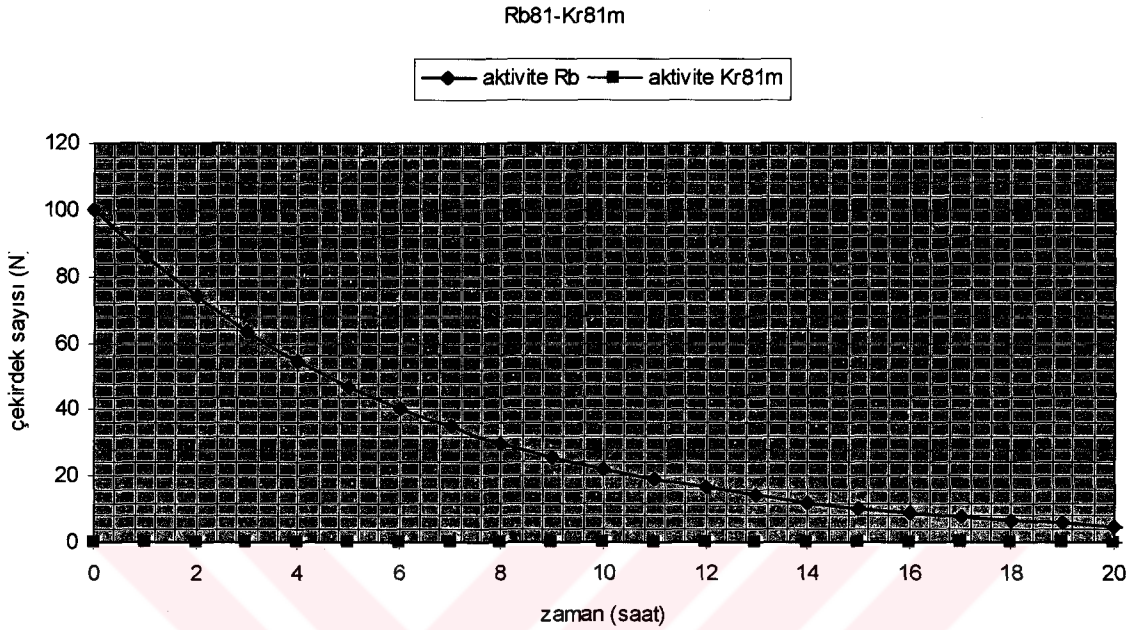
Rb-81/Kr-81m Jeneratörü

Siklotronda $\text{Br-79}(\alpha, 2n)\text{Rb-81}$ reaksiyonu ile üretilen ve 4,58 saatlik yarı ömre sahip olan Rb-81; %13'lük pozitron yayınlamak ve 511 keV'lik foton yayınlamak 13 saniyelik yarı ömre sahip olan ve %100 iç dönüşüm ile %65 190 keV'lik gama yayınlamak Kr-81'e bozulan Kr-81m ile kalıcı denge yapmaktadır (Bulletin D'informations, 1978; Colombetti, 1984). Rb-81/Kr-81m jeneratör sistemi teşhis ve tedavide kullanılmaktadır.

Jones, Clark ve Yano tarafından geliştirilen Rb-81/Kr-81m jeneratörünün bazı dezavantajları Colombetti tarafından düzeltilmiştir. Ana dezavantaj hedef malzemedeki sodyum iyonlarının varlığıydı, ancak bu problem hedef malzeme olarak Cu_2Br_2 kullanılarak çözülmüştür.

Halen Rb-81/Kr-81m jeneratör sisteminin iki ana problemi bulunmaktadır. İlki, ana radyoizotop olan Rb-81 sadece 4,58 saatlik yarı ömre sahiptir. İkincisi ise; Kripton bir soygazdır, bu nedenle de herhangi bir molekül ile işaretlenemez (Colombetti, 1984). Bu

Rb-81/Kr-81m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.46 Rb-81/Kr-81m çekirdek sayısı-zaman grafiği

W-188/Re-188 Jeneratörü

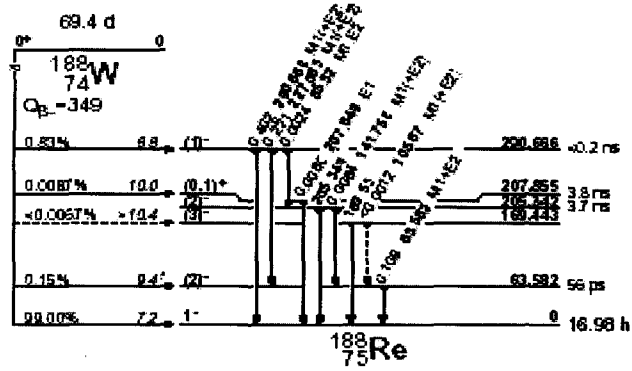
Reaktörde yüksek akıda zenginleştirilmiş W-186 oksit veya metal hedeflerin çift nötron yakalaması ile elde edilen W-188; 69,4 gün yarı ömre sahip olup 200 ve 290 keV'lik foton yayınlamaya 16,98 saat yarı ömre sahip olan Re-188'e bozunarak kalıcı denge yapar. Re-188 bozunurken 764 keV'lik beta ve 115 keV'lik gama yayınlamaya. Re-188'in yayınladığı 764 keV'lik beta ve 115 keV'lik gama W-188/Re-188 jeneratörünün teşhis ve tedavi için kullanımına olanak sağlar (Knapp). Taşıyıcısız radyoizotop olan W-188'in 69 günlük yarı ömrü nedeniyle W-188/Re-188 jeneratörünün kullanım süresi uzundur. Bu sayede Re-188 ucuza mal edilmiş olur. Re-188 ayrıca kemik kanserlerinde ağrı giderici olarak da kullanılır [1].

W-188/Re-188 jeneratörünü ilk geliştirenler Hayes, Rafter ve Lewis; hidrat zirkonyum oksit kolondan organik metil etil keton (MEK) ile sağımlı yapmışlardır.

Diğer kullanılan jeneratör kolon sistemi ise Bio-Rad alüminyum oksit katılan tungstenin asitli çözeltisi ile hazırlanmış kolondur ve sodyum perrenat ve normal tuzlu su çözeltisi ile sağımlı yapılır. Normal tuzlu su çözeltisi kullanıldığında %50-70 arası verim elde edilir.

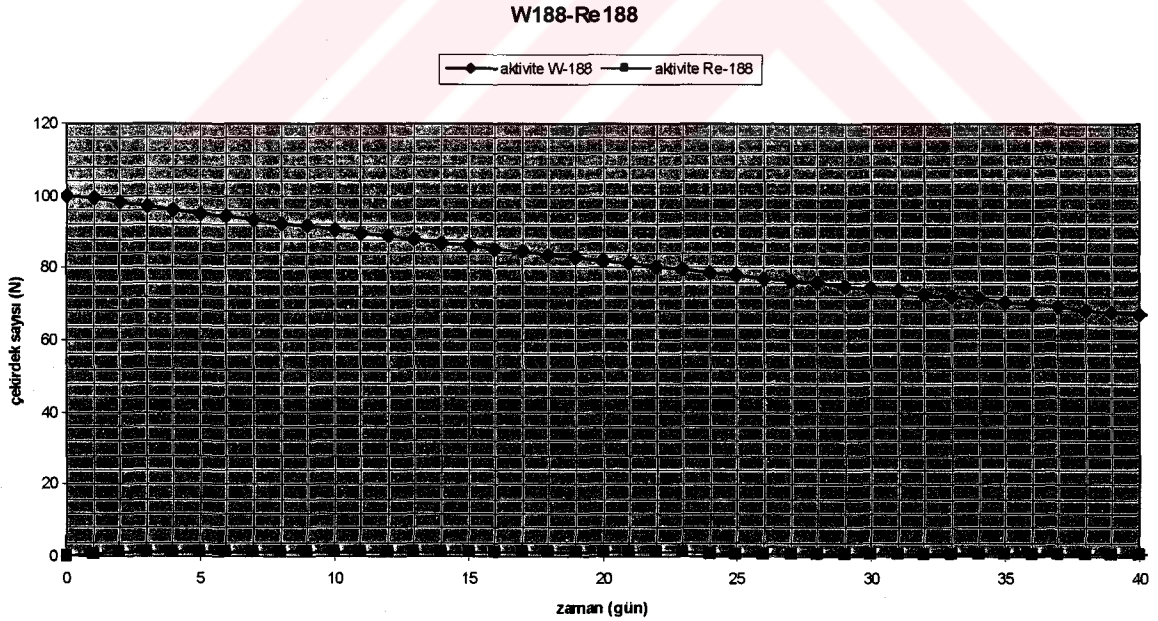
Düşük spesifik aktivitedeki W-188 için wolframlı zirkonyum jel kullanılabilir (Knapp).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 4,73 gün beklenmelidir.



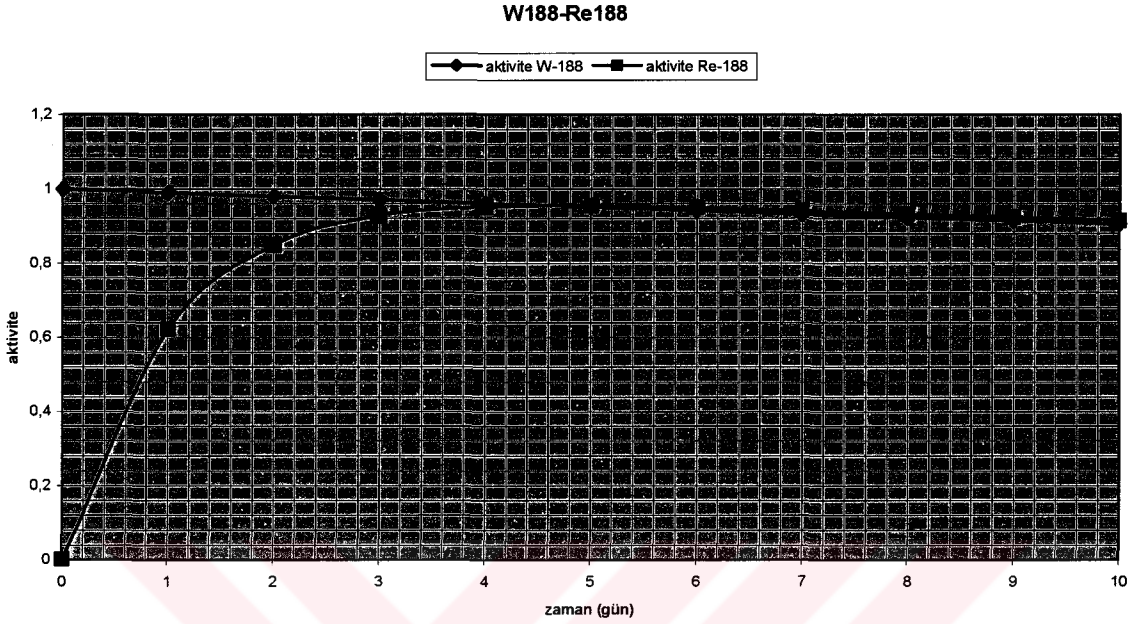
Şekil 3.47 W-188/Re-188 bozunma şeması (Firestone)

W-188/Re-188 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.48 W-188/Re-188 çekirdek sayısı-zaman grafiği

W-188/Re-188 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.49 W-188/Re-188 aktivite-zaman grafiği

Cd-109/Ag109m Jeneratörü

$Cd108(n,\gamma)Cd109$ reaksiyonuyla reaktörde, $Ag109(d,2n)Cd109$ reaksiyonuyla da hızlandırıcılarda üretilen $Cd109$; 462,6 günlük yarı ömrü ile %100 elektron yakalama yaparak 39 saniyelik yarı ömre sahip olan ve izomerik dönüşüm yapıp %91'si Auger elektronlarına dönüşen 88 keV'lik foton yayınlıyarak $Ag109$ 'a bozunan $Ag-109m$ 'e radyoaktif bozunma yapar. (Bulletin D'informations, 1978; Colombetti, 1984; Knapp)

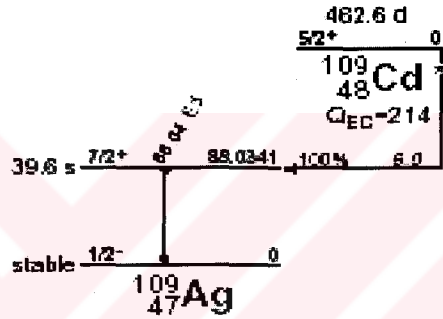
Bu ana-kızın radyoaktif özelliklerinden dolayı $Cd-109/Ag-109m$ teşhis amacıyla kullanılmak için ideal bir jeneratördür (Colombetti, 1984; Knapp). Bu jeneratörde üç ana problem vardır. $Ag-109m$ 'in gama ışınlarının enerjisi düşük (89 keV) olmasına rağmen çok sayıdaki iç dönüşümlerin foton verimleri düşüktür. $Cd-109$ kaçağı uzun yarı ömründen dolayı istenmeyen derecede yüksek ve $Cd-109$ 'un $Ag-109m$ 'den ayrılması düşük olabilir. %3'lük NaI çözeltisi kullanıldığında verim yaklaşık %34 civarındadır ki bu istenilen düzeyde değildir.

Klinik uygulamalar açısından karşılaştırıldığında; bu radyoizotop jeneratörünün verimi nedeniyle, Tc-99m'in 10mCi'lik aktivitesinin vücutta yaptığı etki, Ag-109m'in 30 mCi'lik aktivitesinin vücutta yaptığı etkiye denk gelmektedir (Colombetti ,1984).

Yano tarafından 1960'ların sonlarında üretilmiş ancak vücut içinde hiç test edilmemiş olan bu jeneratör, gümüş sağım sisteminin keşfi ile klinik uygulamalar için uygun hale gelmiştir (Colombetti ,1984).

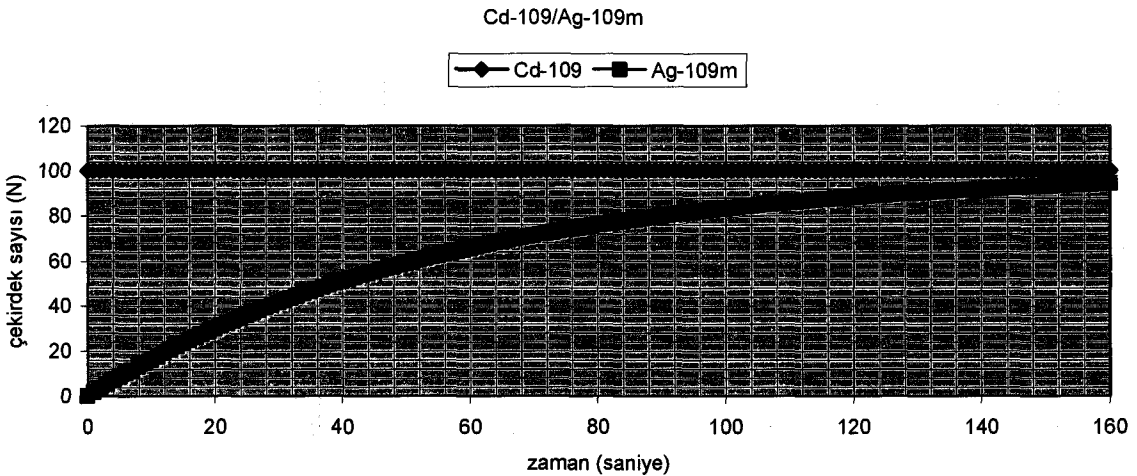
Bu jeneratörde kullanılan kolonlar alüminyum oksit ve ticari olarak üretilen Dowex 50 ×8, Dowex AG×8'dir(Knapp).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplarmaya göre her sağımdan sonra 12,97 dakika beklenmelidir.



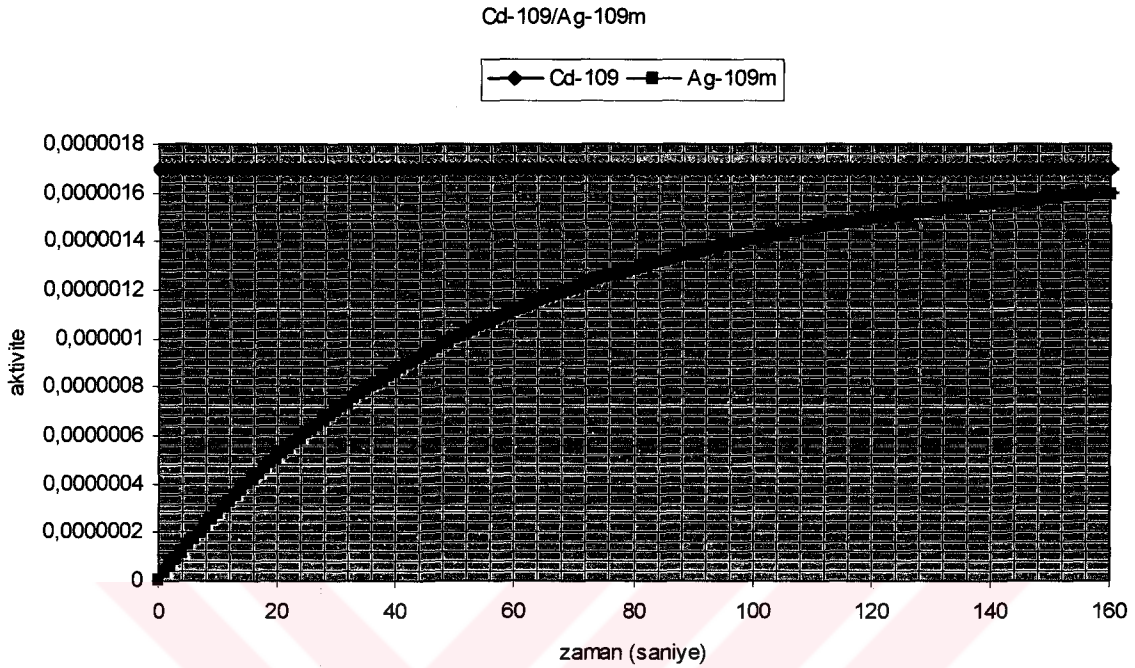
Şekil 3.50 Cd-109/Ag109m bozunma şeması (Firestone)

Cd-109/Ag109m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.51 Cd-109/Ag109m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Cd-109/Ag109m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



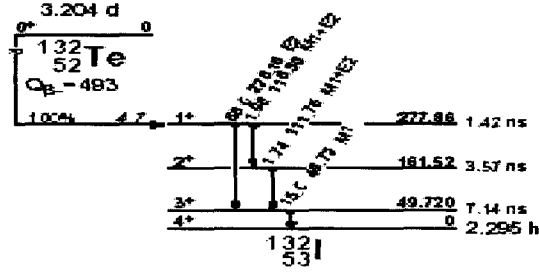
Şekil 3.52 Cd-109/Ag109m aktivite-zaman grafiği

Te-132/I-132 Jeneratörü

Fisyon ürünü olan Te-132 78,2 saatlik yarı ömre sahip olup %100 beta bozunumu yapıp 53keV ve 230 keV'lik foton yayınlayarak I-132'ye bozunur. I-132; 2,3 saatlik yarı ömre sahip olup beta bozunması yapıp 670 keV'lik foton yayınlayarak bozunur. Bu özelliklerinden dolayı Te-132/I-132 jeneratörü teşhis ve tedavide kullanılır.(Bulletin D' informations, 1978)

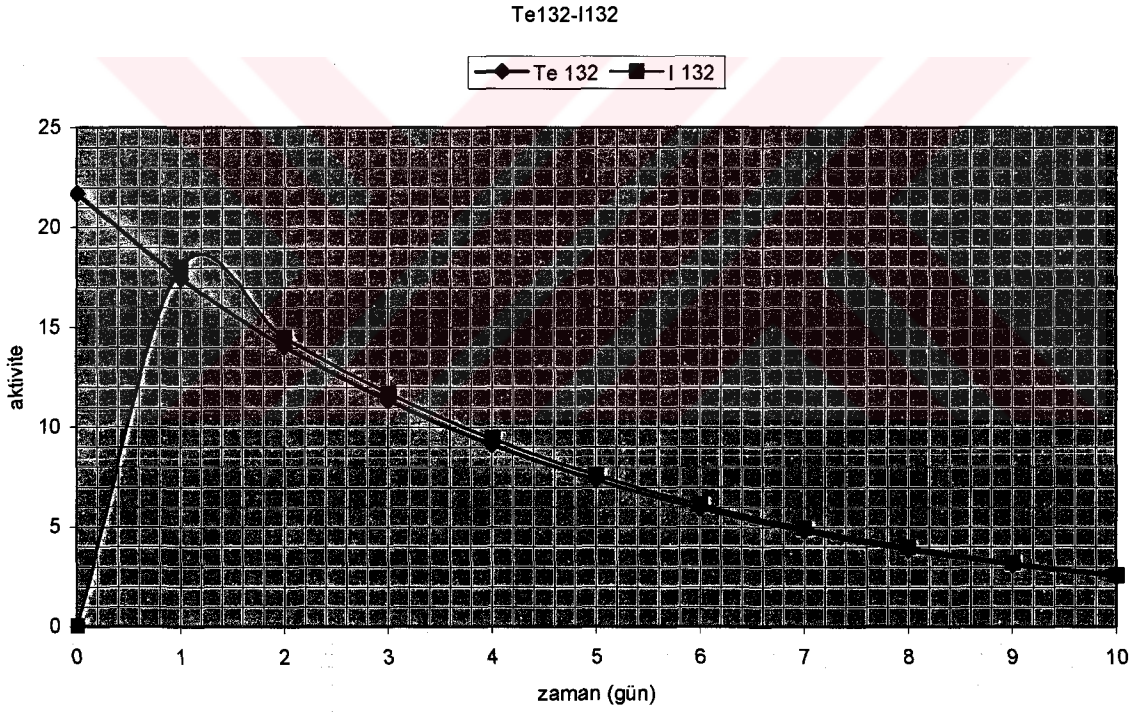
Bu jeneratörde alüminyum oksit kolon kullanılıp %0,9 NaCl çözeltisi ile sağım yapılır (Colombetti, 1984).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 12,02 saat beklenmelidir.



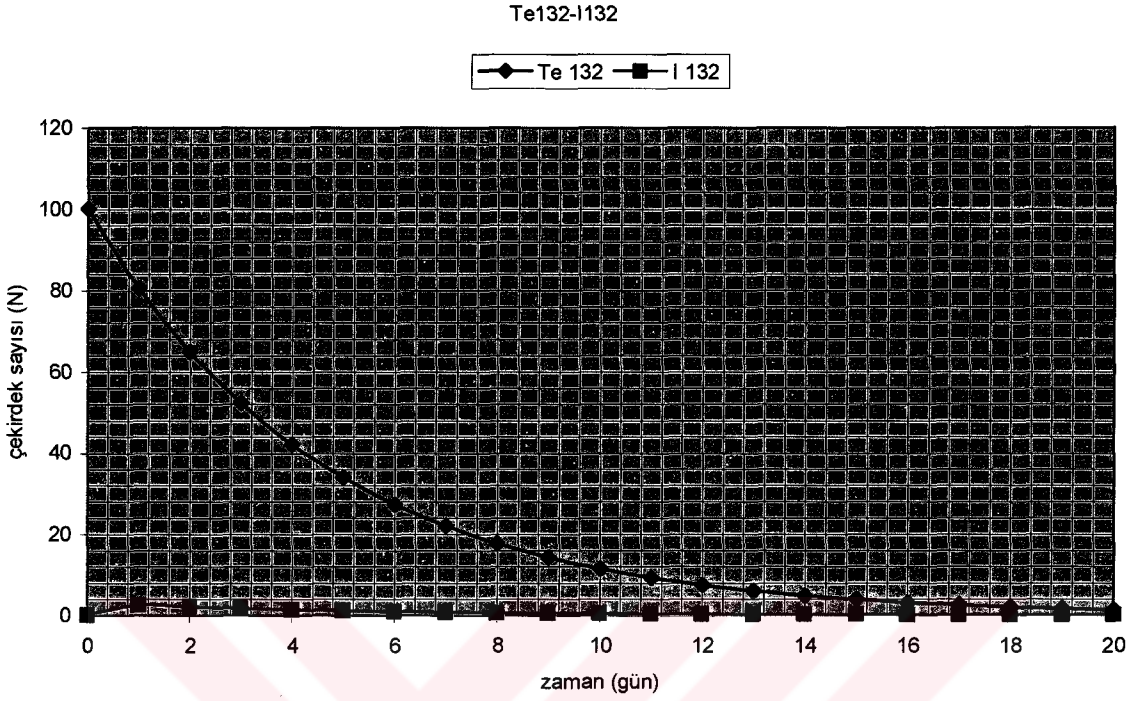
Şekil 3.53 Te-132/I-132 bozunma şeması (Firestone)

Te-132/I-132 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.54 Te-132/I-132 aktivite-zaman grafiği

Te-132/I-132 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



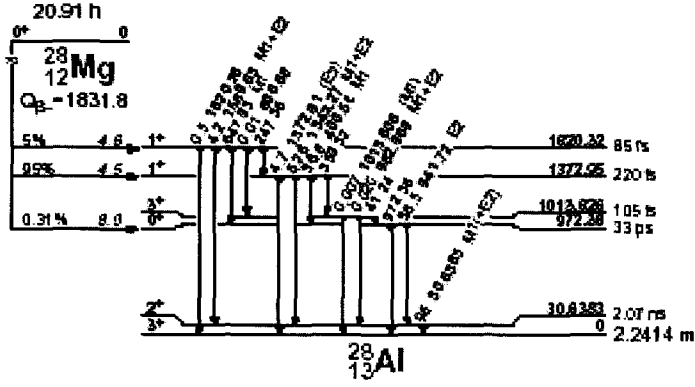
Şekil 3.55 Te-132/I-132 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Mg-28/Al-28 Jeneratörü

Hızlandırıcıda $^{26}\text{Mg}(t,p)\text{Mg}28$ veya $^{26}\text{Mg}(\alpha,2p)\text{Mg}28$ reaksiyonlarıyla üretilen Mg-28, 20,91 saatlik yarı ömrü ile %100 olasılıkla β^- ve %96 olasılıkla 31 keV'lik, %70 olasılıkla 1350 keV'lik foton yayınlamaya Al-28'e bozunur. Al-28 2,3 dakika yarı ömre sahip olup %100 olasılıkla 1242 keV'lik β^- ve %100 olasılıkla 1778 keV'lik foton yayınlamaya (Bulletin D' informations, 1978).

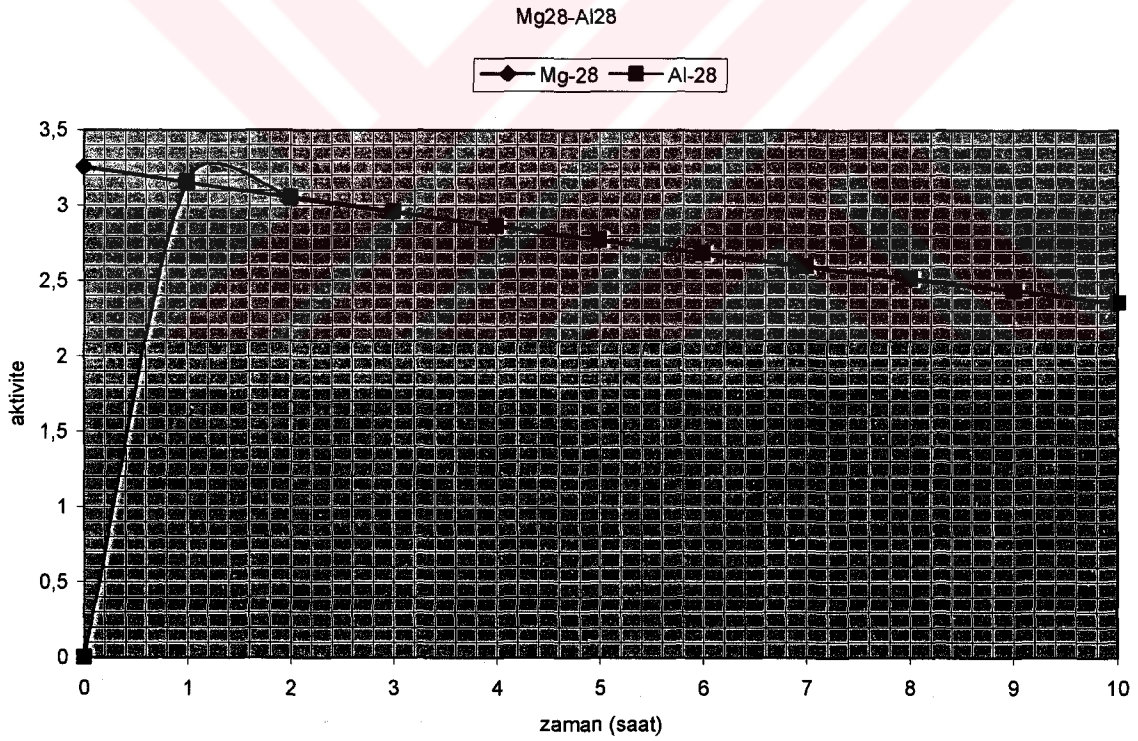
Bu ana çekirdek- kız çekirdek ilişkisinden dolayı Mg-28/Al-28 jeneratörü teşhis ve tedavi amacıyla kullanılabilir.

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 21 dakika beklenmelidir.



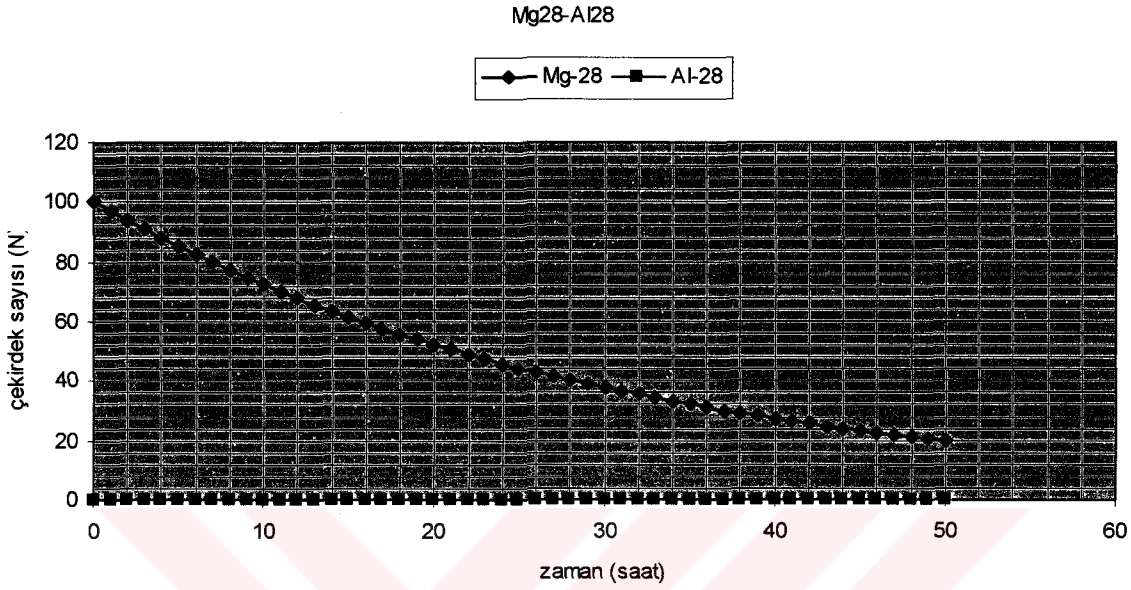
Şekil 3.56 Mg-28/Al-28 bozunma şeması (Firestone)

Mg-28/Al-28 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.57 Mg-28/Al-28 aktivite-zaman grafiği

Mg-28/Al-28 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.58 Mg-28/Al-28 çekirdek sayısı-zaman grafiği

3.1.4 PET Uygulamaları İçin Kullanılan Radyoizotop Jeneratörleri

Ge-68/Ga-68 Jeneratörü

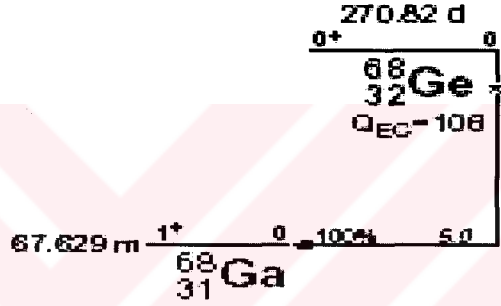
Ge-68 'in 275 günlük ve Ga-68'in 68 dakikalık yarı ömrü ile Ge-68/Ga-68 jeneratörü kalıcı denge ile radyoaktif bozunma yapmaktadır. $Zn-66(\alpha,2n)Ge-68$ reaksiyonuyla hızlandırıcıda üretilen Ge-68, %100 elektron yakalama yaparak Ga-68'e dönüşür (Bulletin D' informations, 1978). %88 511 keV'lik pozitron yayınlayan ve %12 1080keV'lik elektron yakalama yaparak bozunan Ga-68, bu nedenlerden dolayı iyi bir pozitron kaynağıdır (Bulletin D' informations,1978, Colombetti ,1984). Ancak nükleer tıpta pozitron yayınlayıcıların sınırlı kullanılması nedeni ile, pozitron yayınlayıcı izotopların ideal olduğu tomografiler geliştirilene kadar bu izotop pek sık kullanılmamıştır (Colombetti ,1984).

Ge-68/Ga-68 jeneratörü şu anda en çok kullanılan pozitron jeneratör sistemidir ve PET (Pozitron Emisyon Tomografi)'de kullanılmaktadır.

Ga-68 üreten eski sistemlerde radyofarmasötikler için fazladan bir basamak gerekmektedir. Loc'h 1980 yılında iyonik galyum üreten bir jeneratör keşfetmiş, bu jeneratörde kalay dioksit (SnO_2) kolon dolgu maddesi, sağıim çözeltisi olarak da 1 M HCl kullanmıştır. Bu jeneratör sisteminde verim %75-80 civarında ve sadece %0,0002 Ge-68 kaçağı elde edilmiştir (Elliot). Bu jeneratörde organik reçineler kadar inorganik reçineler de kolon dolgu maddesi olarak kullanılabilir (Colombetti, 1984).

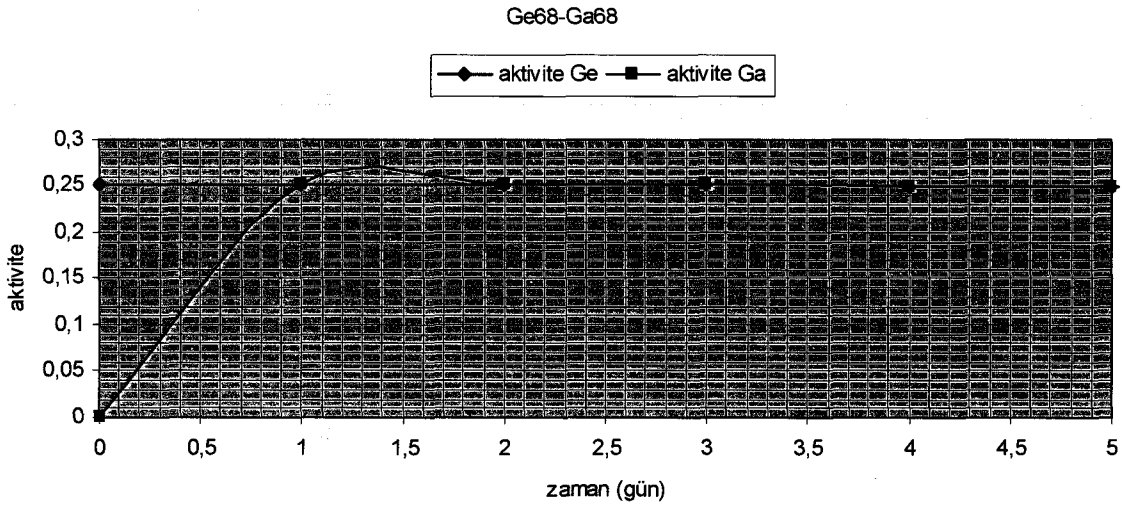
Greene ve Tucker tarafından 1961 yılında geliştirilen jeneratör sisteminde ise Al_2O_3 kolon ve 0,005M EDTA sağıim çözeltisi kullanılmıştır (Babich).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplara göre her sağıimdan sonra 14,16 saat beklenmelidir.



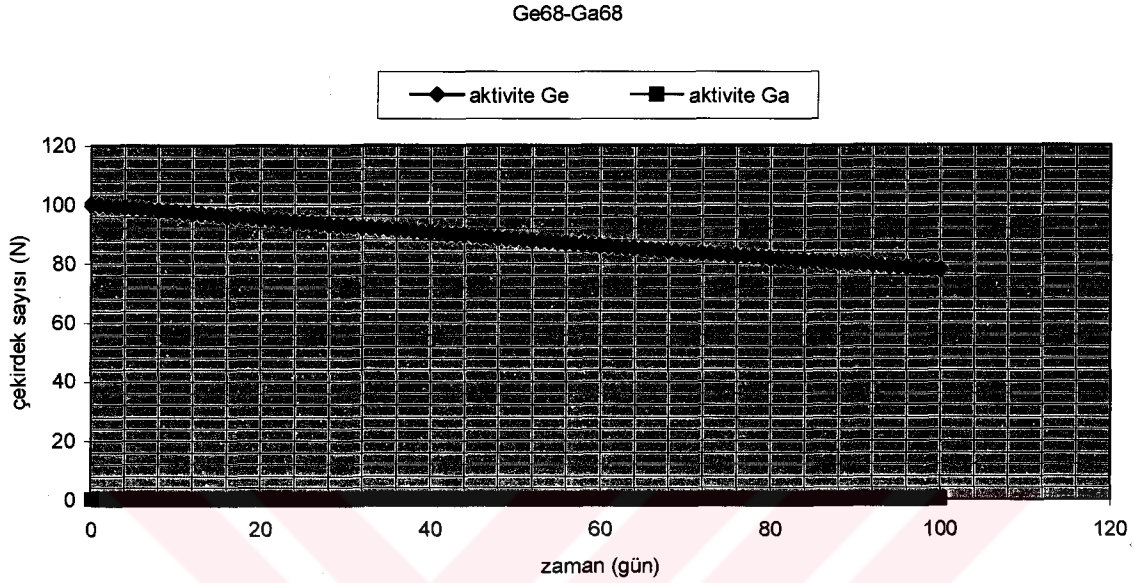
Şekil 3.59 Ge-68/Ga-68 bozunma şeması (Firestone)

Ge-68/Ga-68 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.60 Ge-68/Ga-68 aktivite-zaman grafiği

Ge-68/Ga-68 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.61 Ge-68/Ga-68 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Sr-82/Rb-82 Jeneratörü

Sr-82'nin 25 günlük ve Rb-82'nin 1,2 dakikalık yarı ömrü bu sistemi çok kısa ömürlü radyoizotop üretimi için ideal yapar.

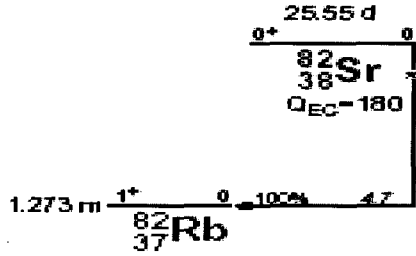
Sr-82 iki şekilde elde edilir. İlki protonlarla bombalanan Rb-85'in 4 tane nötron yayınlarak Sr-82'ye dönüşmesidir (Colombetti, 1984). İkinci yol ise Molibden hedeflerinin 600-800 Mev aralığındaki yüksek enerjili fotonlarla bombalanmasıyla Sr-82'nin elde edilmesidir (Knapp).

Rb-82; 0,511 Mev'lik pozitron, 0,777 Mev'lik foton yayınlarak kararlı Kr-82'ye bozunur. Pozitron yayınlaması nedeni ile Rb-82, PET (Pozitron Emisyon Tomografi) 'de kullanılmaktadır (Colombetti, 1984).

Sr-82/Rb-82 jeneratöründe kolon için Biorex 70 ve Chelex 100 gibi organik reçine adsorblayıcılar ya da zirkonyum di oksit ve alüminyum oksit gibi organik dönüştürücüler kullanılabilir. Ancak en iyi dönüştürücü hidratlı α -kalay dioksittir. Bu dönüştürücü ile kullanılacak sağım çözeltisi %0,9'luk NaCl çözeltisidir. Bu kolon ve sağım çözeltisi ile %26-66'lık verim alınır (Knapp).

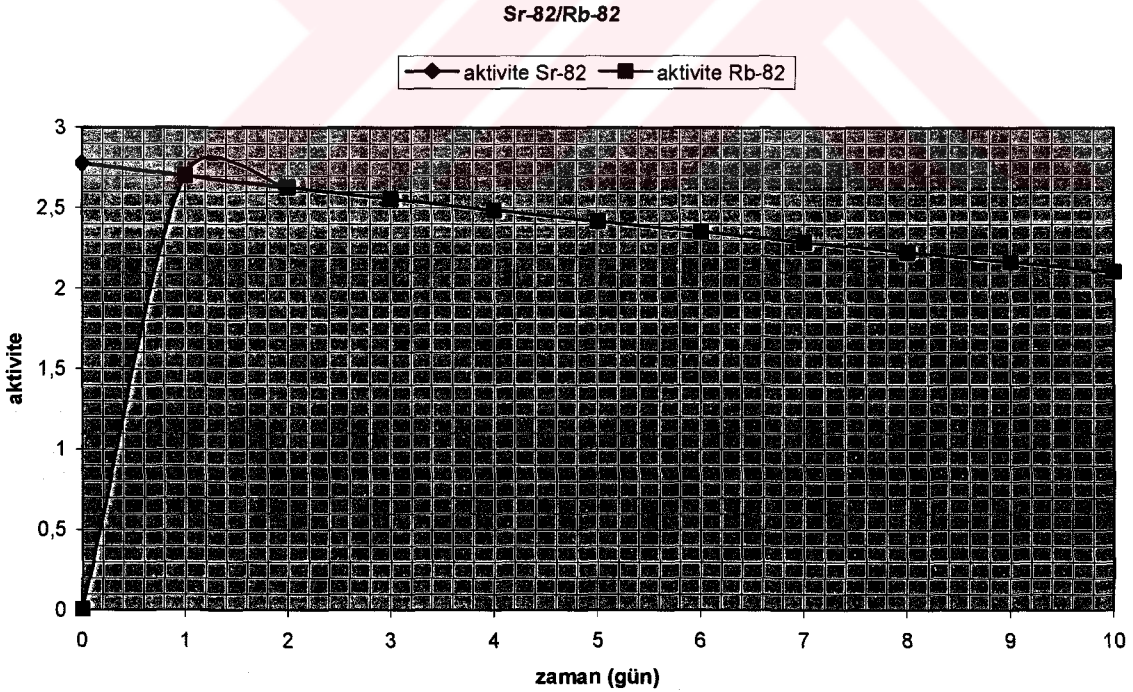
Bu jeneratörde her 5-10 dakikada 7-8 mL sağıım çözeltisi ile yaklaşık 800 μCi Rb-82 elde edilir. Görüntüler enjeksiyon yapıldıktan 1 dakika sonra elde edilebilmektedir (Colombetti, 1984).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağıımdan sonra 17,85 dakika beklenmelidir.



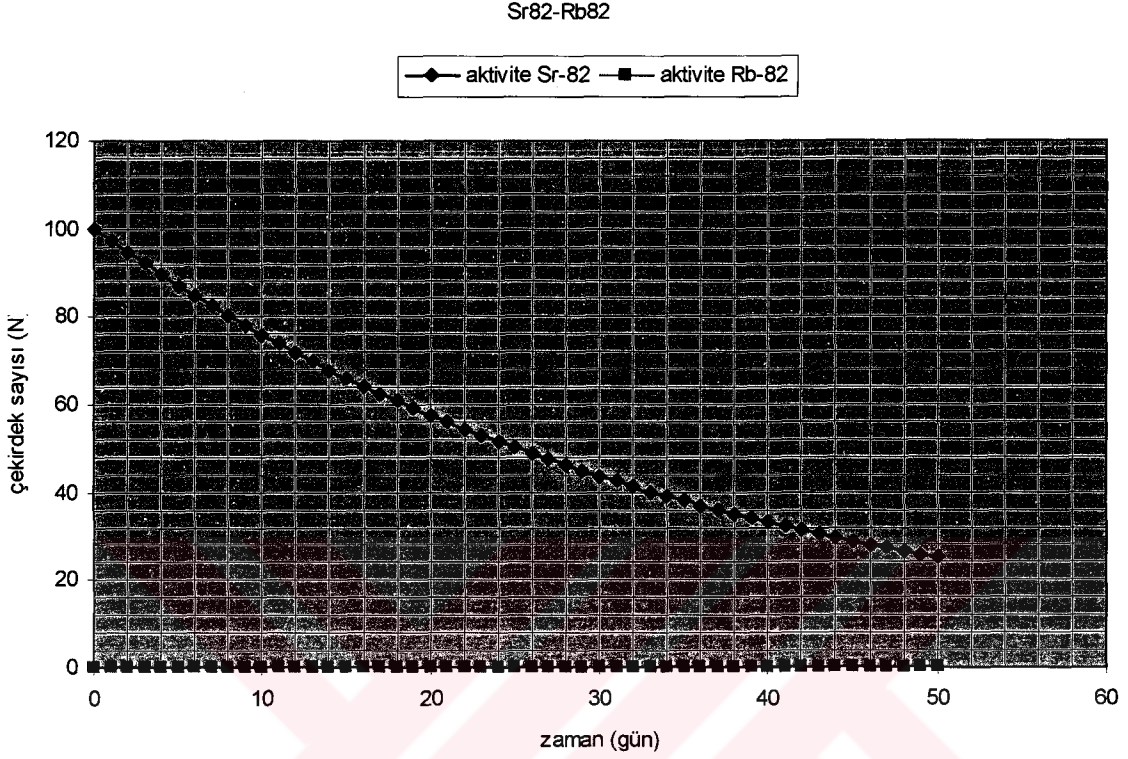
Şekil 3.62 Sr-82/Rb-82 bozunma şeması (Firestone)

Sr-82/Rb-82 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.63 Sr-82/Rb-82 aktivite-zaman grafiği

Sr-82/Rb-82 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



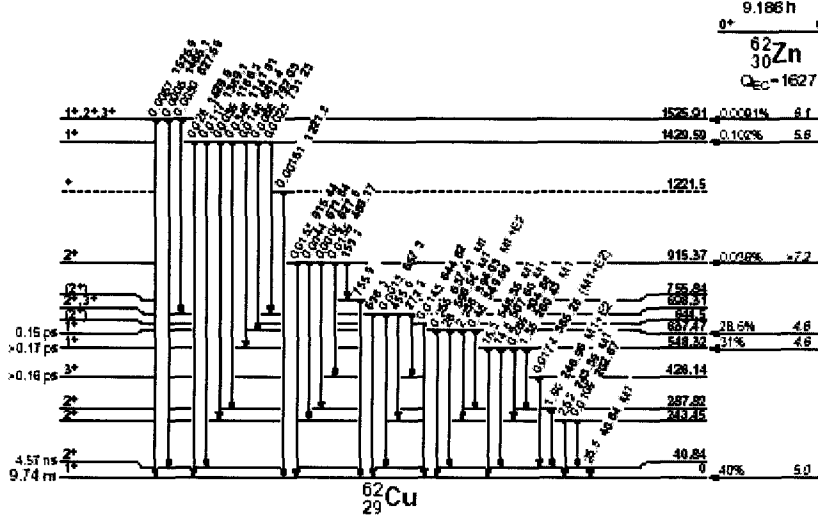
Şekil 3.64 Sr-82/Rb-82 çekirdek sayısı-zaman grafiği

Zn-62/Cu-62 Jeneratörü

Hızlandırıcıda Cu-63(p,2n)Zn-62 reaksiyonu ile elde edilen Zn-62'nin 9,3 saat yarı ömrü vardır ve 9,7 dakika yarı ömre sahip olan Cu-62'ye bozunarak kalıcı denge yapar (Colombetti, 1984). %97,8'i pozitron yayınlıyarak bozunan Cu-62'nin bu özelliği nedeni ile Zn-62/Cu-62 jeneratörü PET çalışmalarında kullanılır.

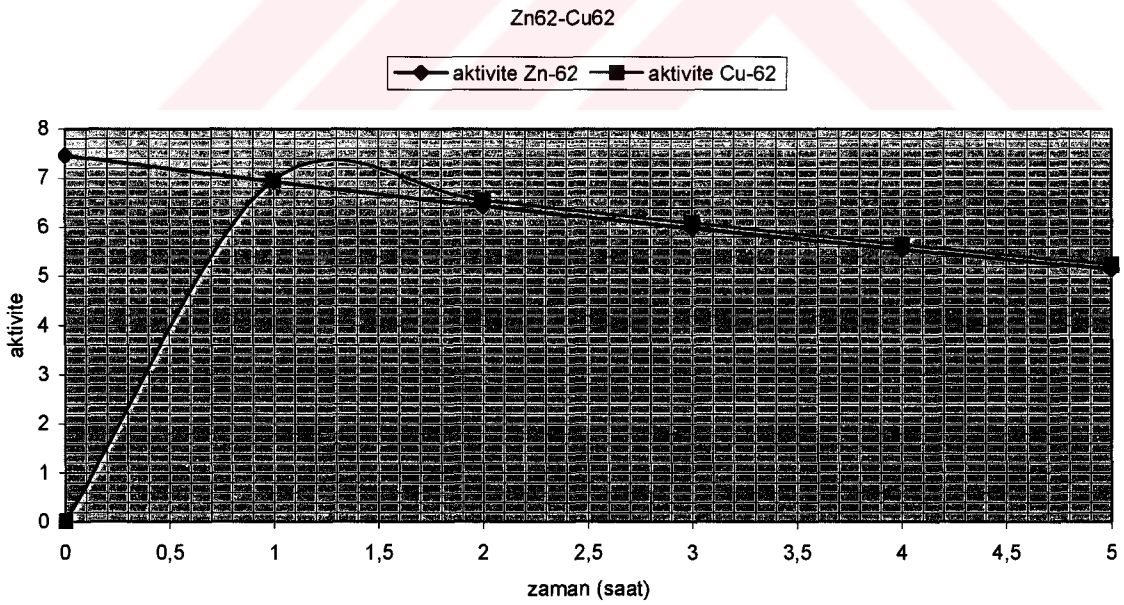
Zn-62/Cu-62 jeneratöründe klorür formdaki Dowex 1×8 anyon değiştirici kolon kullanılır ve 2 M HCl ile jeneratör sağılır (Knapp).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 57,6 dakika beklenmelidir.



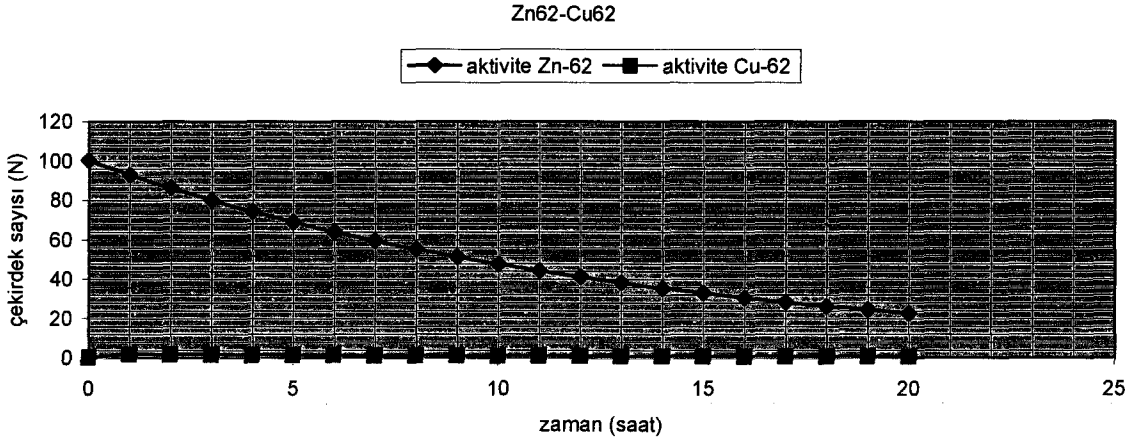
Şekil 3.65 Zn-62/Cu-62 bozunma şeması (Firestone)

Zn-62/Cu-62 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.66 Zn-62/Cu-62 aktivite-zaman grafiği

Zn-62/Cu-62 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



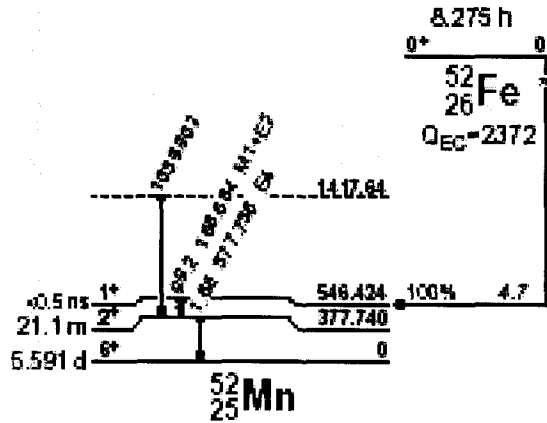
Şekil 3.67 Zn-62/Cu-62 çekirdek sayısı zaman grafiği

Fe-52/Mn-52m Jeneratörü

Hızlandırıcıda $\text{Cr-50}(\alpha, 2n)\text{Fe-52}$ reaksiyonuyla üretilen Fe-52, elektron yakalama ve pozitron yayınlama ile Mn-52m'e bozunur (Bulletin D' informations, 1978). Mn-52m 21 dakikalık yarı ömre sahip olup %98 pozitron yayınlayıp, %2 iç dönüşüm yaparak 1430 keV'lik foton yayınlayarak Cr-52'ye bozunur (Bulletin D' informations, 1978, Knapp).

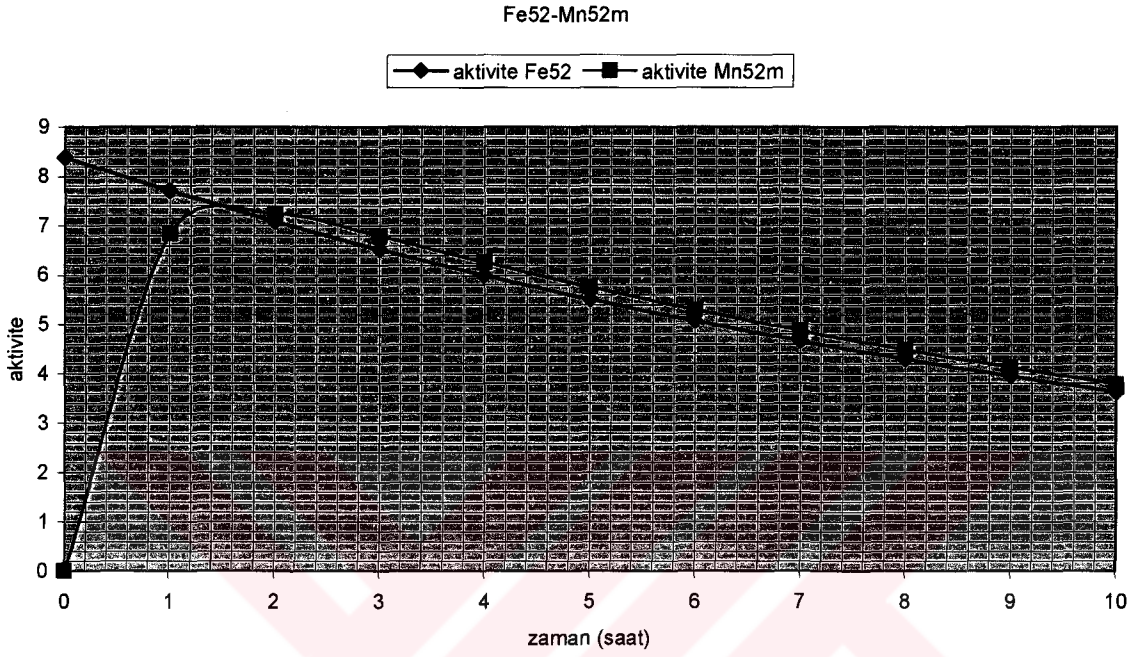
Bu ana çekirdek-kız çekirdek özellikleri nedeniyle PET' de kullanılan Fe-52/Mn-52m jeneratöründe ticari olarak üretilen Dowex-1 veya AG1×8 kolon kullanılmaktadır (Knapp).

Bu jeneratörde kızın en fazla olması için, her sağımdan sonra 100,1 dakika beklenmelidir.



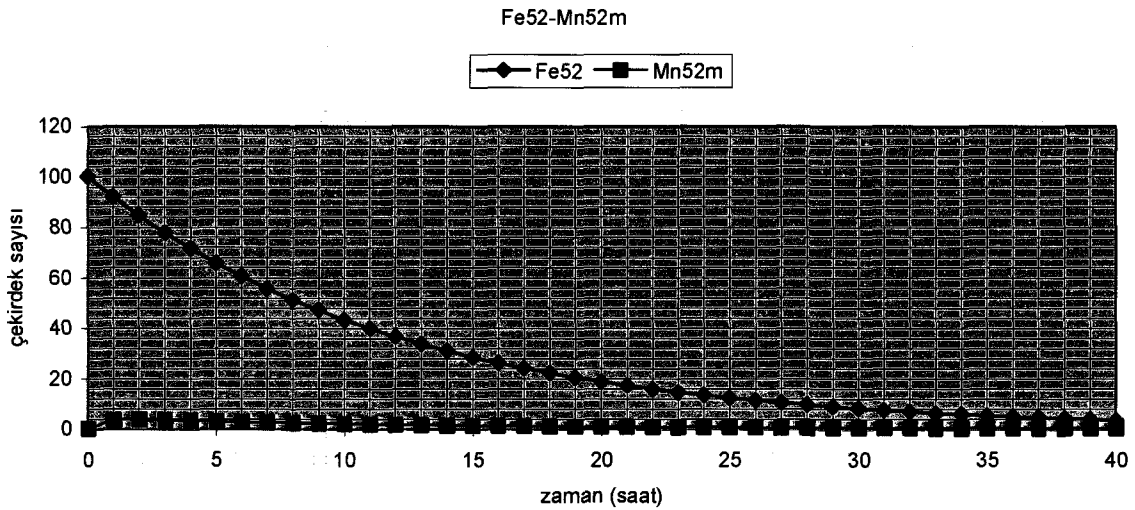
Şekil 3.68 Fe-52/Mn-52m bozunma şeması (Firestone)

Fe-52/Mn-52m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.69 Fe-52/Mn-52m aktivite-zaman grafiği

Fe-52/Mn-52m jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



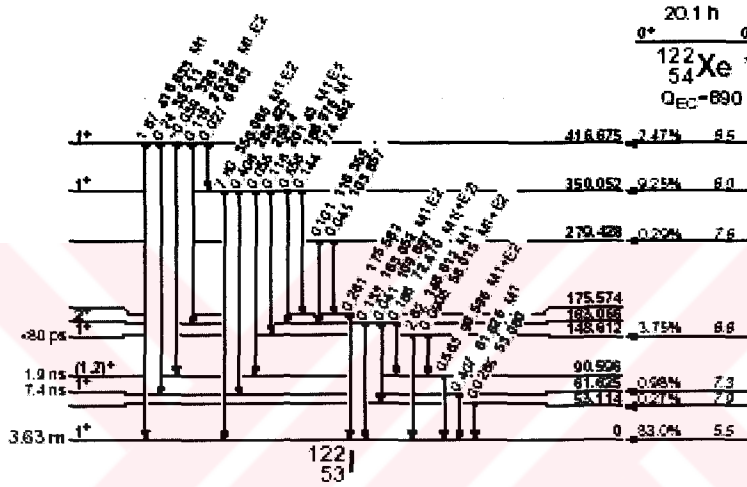
Şekil 3.70 Fe-52/Mn-52m çekirdek sayısı-zaman grafiği

Xe-122/I-122 Jeneratörü

Hızlandırıcıda I-127(p,6n)Xe-122 reaksiyonuyla oluşan Xe-122; 20,1 saatlik yarı ömrü ile elektron yakalama yaparak yarı ömrü 3,6 dakika olan ve %65 pozitron yayını ve elektron yakalama yapıp 564 keV'lik foton yayınlıyarak bozunan I-122'ye dönüşür.

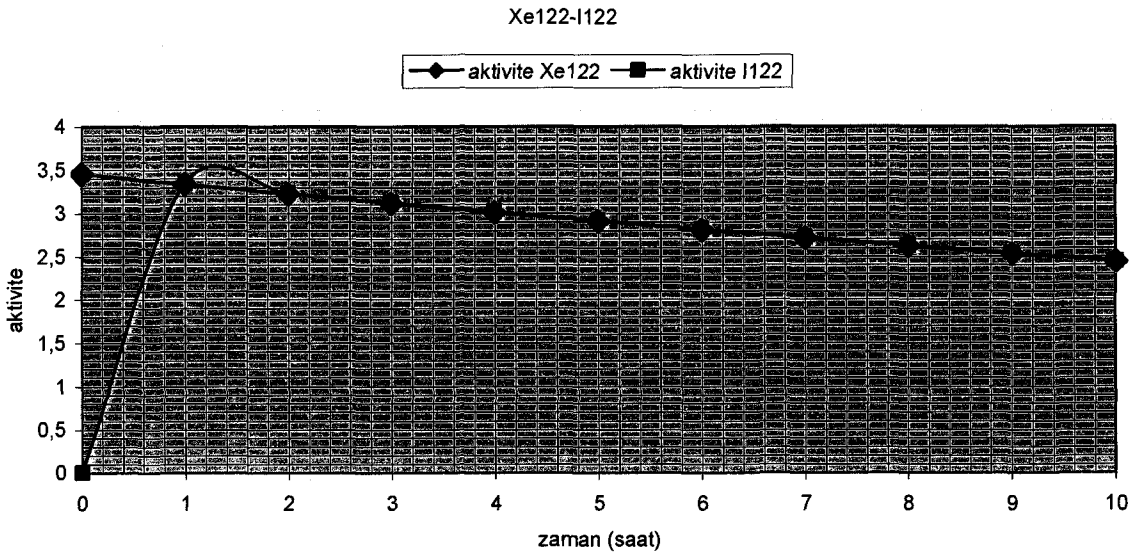
Bu ana çekirdek-kız çekirdek ilişkisinden dolayı Xe-122/I-122 jeneratörü PET çalışmalarında kullanılabilir (Bulletin D' informations,1978).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 30,3 dakika beklenmelidir.



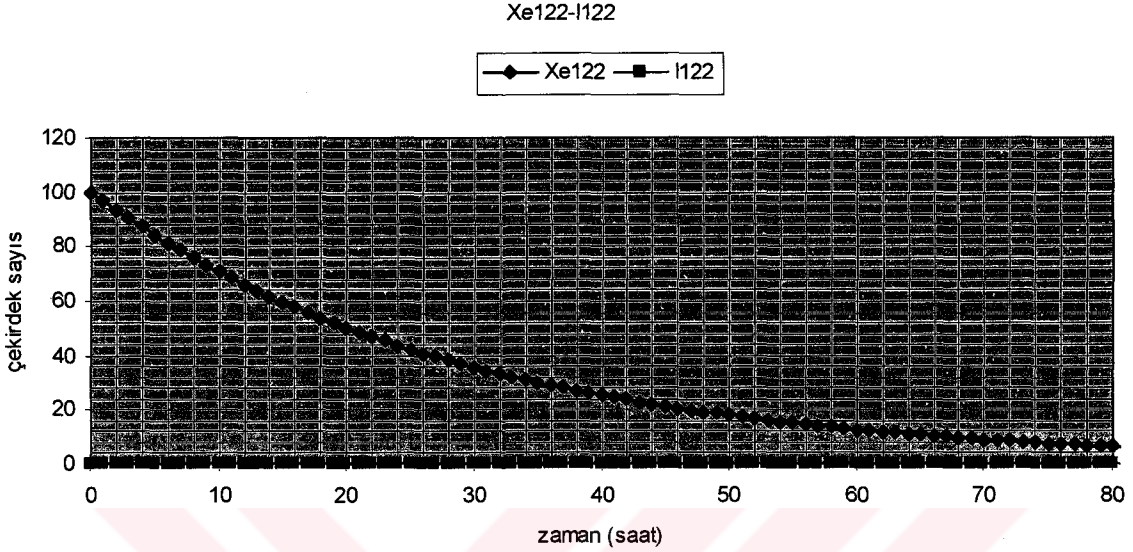
Şekil 3.71 Xe-122/I-122 bozunma şeması (Firestone)

Xe-122/I-122 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.72 Xe-122/I-122 aktivite-zaman grafiği

Xe-122/I-122 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.

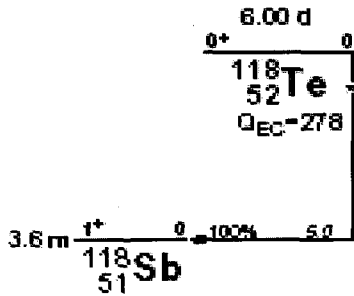


Te-118/Sb-118 Jeneratörü

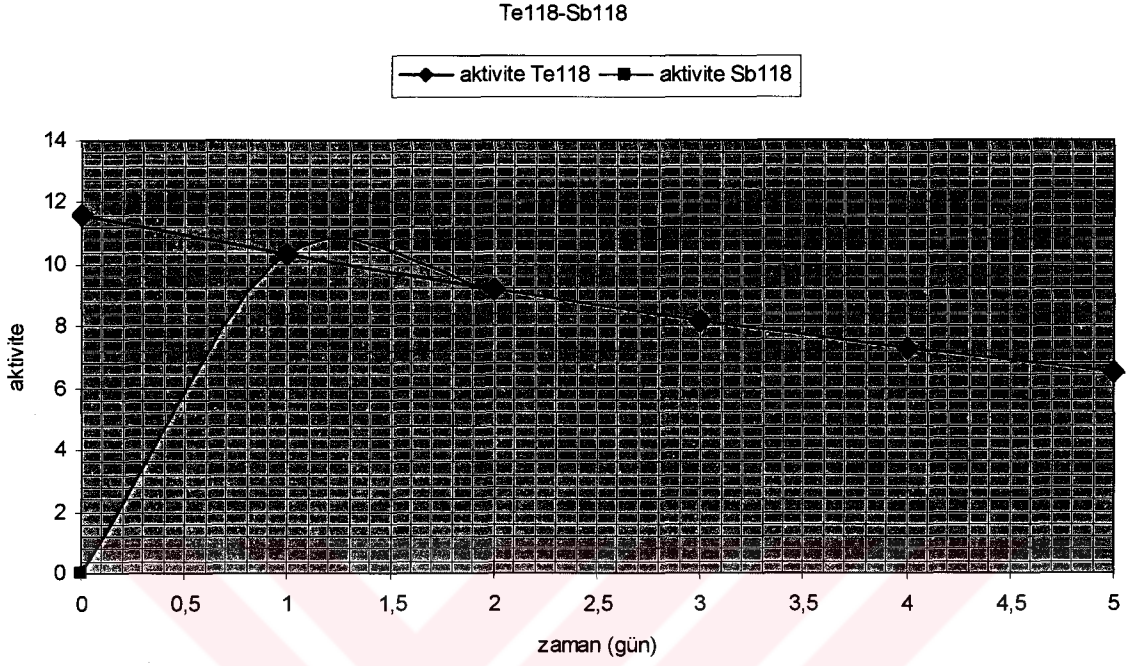
Hızlandırıcıda Sb-121($d,5n$)Te-118 reaksiyonuyla üretilen Te-118; 6 gün olan yarı ömrü ile elektron yakalama yaparak yarı ömrü 3,5 dakika olan Sb-118'e dönüşür. Sb-118, %75'lik pozitron yayınlayarak ve %25'lik elektron yakalama yapıp 564 keV'lik foton yayınlayarak bozunur.

Bu ana çekirdek-kız çekirdek özelliklerinden dolayı Te-118/Sb-118 jeneratörü PET çalışmalarında kullanılabilmektedir (Bulletin D' informations,1978).

Bu jeneratörde kız çekirdeğin en fazla olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamaya göre her sağımdan sonra 39,46 dakika beklenmelidir.

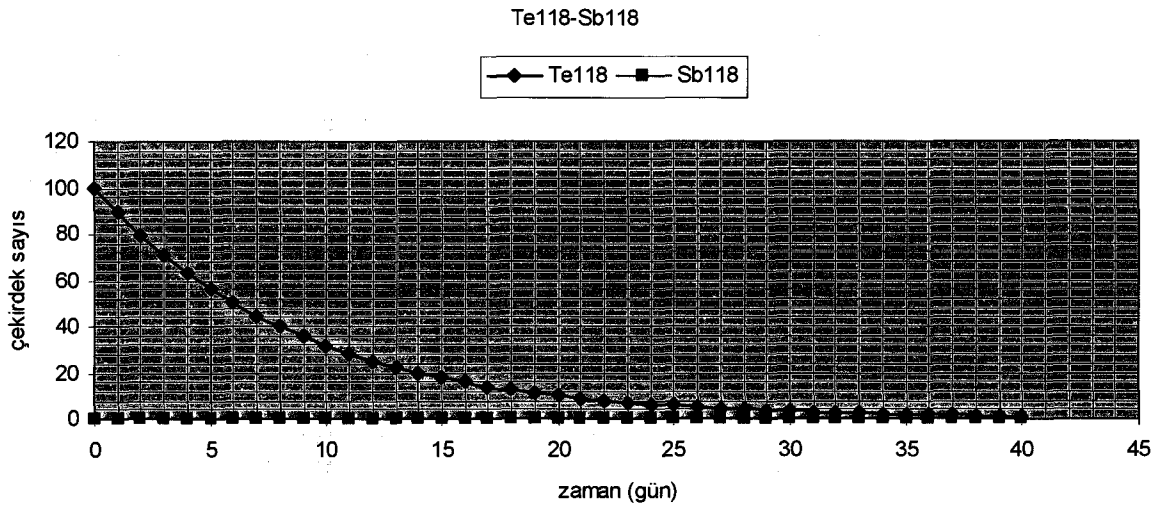


Te-118/Sb-118 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.75 Te-118/Sb-118 aktivite-zaman grafiği

Te-118/Sb-118 jeneratörünün çekirdek sayısı-zaman grafiği (2.10) ve (2.16) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.76 Te-118/Sb-118 çekirdek sayısı-zaman grafiği

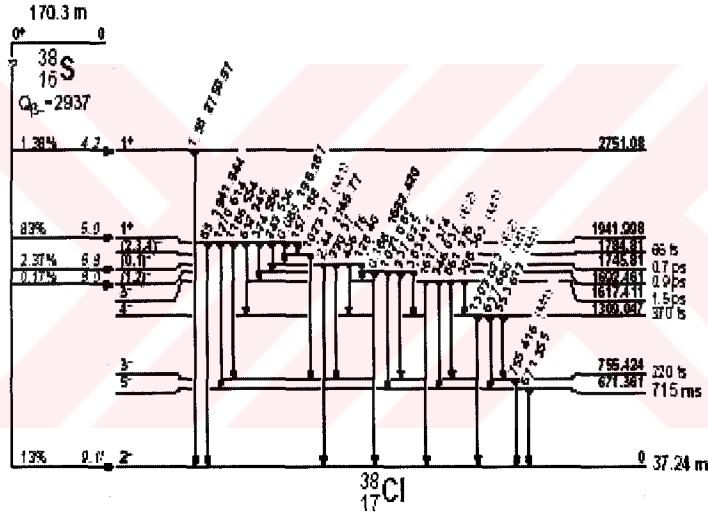
3.1.5 Üzerinde Çalışılmakta Olan Radyoizotop Jeneratörleri

Şu anda Dünya'da, nükleer tıpta kullanılması amacı ile, çeşitli radyoizotop jeneratörleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bunların birkaçı aşağıda fiziksel olarak incelenmiştir.

S-38/Cl-38 Jeneratörü

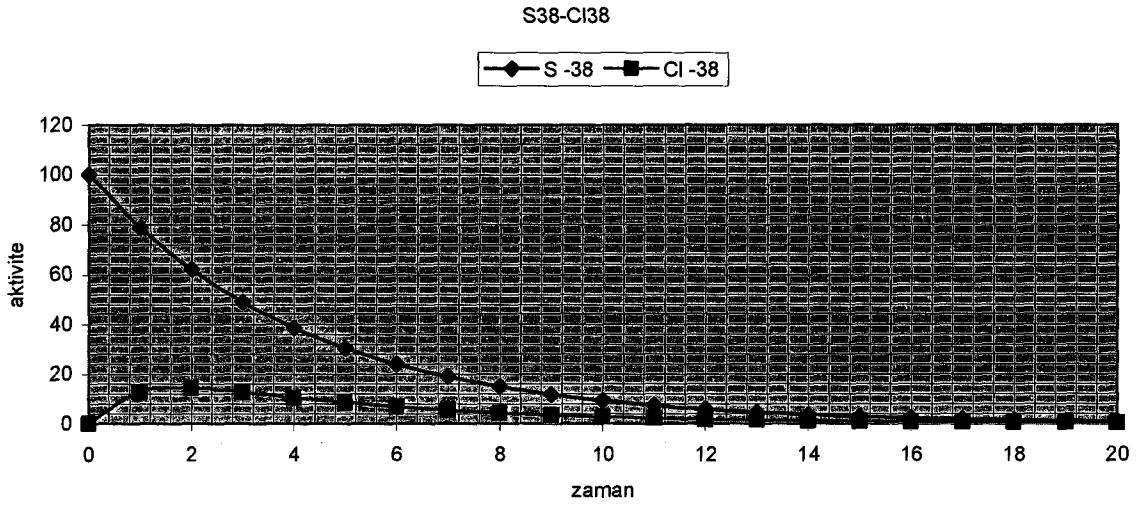
Hızlandırıcıda Cl-37($\alpha,3p$)S-38 reaksiyonuyla üretilen S-38; 2,9 saatlik yarı ömrü ile beta bozunumu yapar ve %95'lik 1880 keV'lik foton yayınlar. S-38'in radyoaktif bozunma ürünü olan Cl-38; 38 dakika yarı ömre sahiptir ve beta bozunması yaparak %38'lik 1600 keV'lik ve %47'lik 2170 keV'lik foton yayınlamaktadır (Bulletin D' informations,1978).

S-38/Cl-38 jeneratöründe Cl-38 aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 1,76 saat beklenmelidir.



Şekil 3.77 S-38/Cl-38 bozunma şeması (Firestone)

S-38/Cl-38 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.

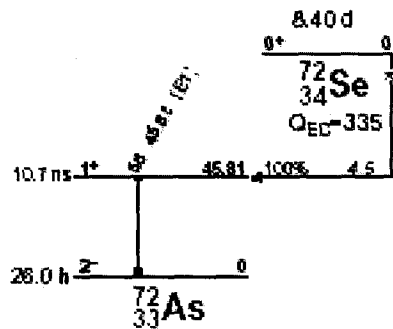


Şekil 3.78 S-38/Cl-38 aktivite-zaman grafiği

Se-72/As-72 Jeneratörü

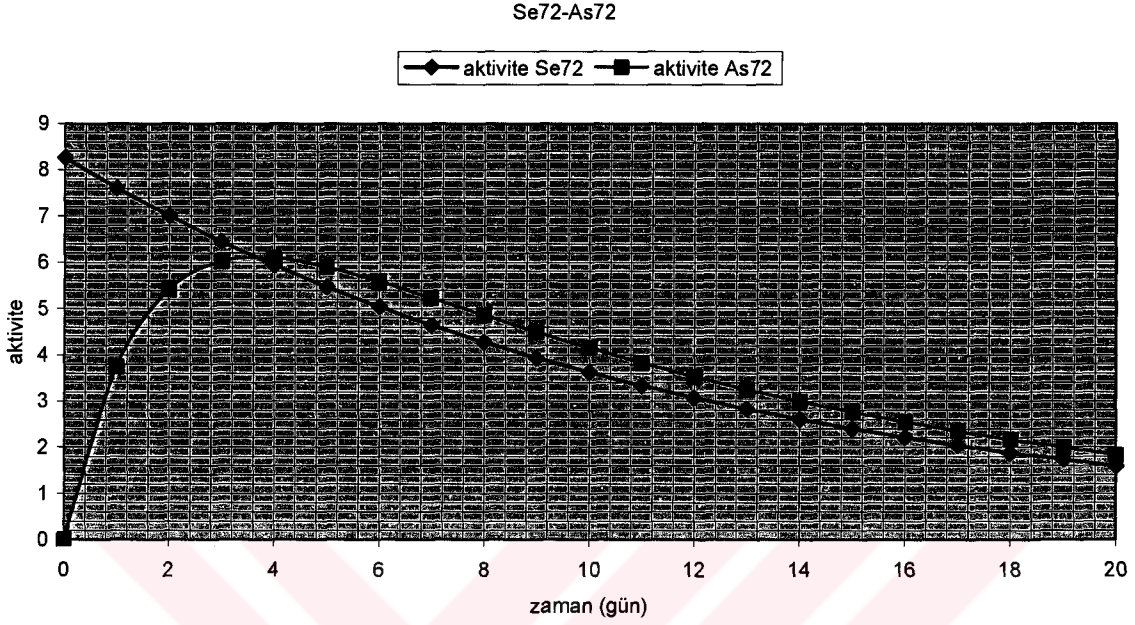
Hızlandırıcıda As-75($d,5n$)Se-72 ve Ge-70($\alpha,2n$)Se-72 reaksiyonlarıyla üretilen Se-72; 8,4 gün yarı ömre sahip olup elektron yakalama yapıp %59 46keV'lik foton yayınlarken radyoaktif bozunma yapar. Se-72'nin radyoaktif bozunma ürünü olan As-72; 26 saat olan yarı ömrü ile %75 pozitron yayınlarken Ge-72'ye bozunur (Bulletin D' informations,1978).

Bu ana-kız özelliklerinden dolayı Se-72/As-72 jeneratörü PET çalışmalarında kullanılabilir. Kolon olarak ticari olarak üretilen Dowex 50 $\times$ 8 bu jeneratöre uygundur (Knapp). Se-72/As-72 jeneratöründe As-72 aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 3,67 gün beklenmelidir.



Şekil 3.79 Se-72/As-72 bozunma şeması (Firestone)

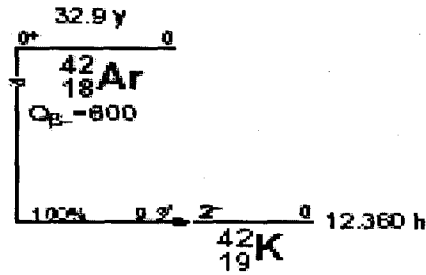
Se-72/As-72 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.80 Se-72/As-72 aktivite-zaman grafiği

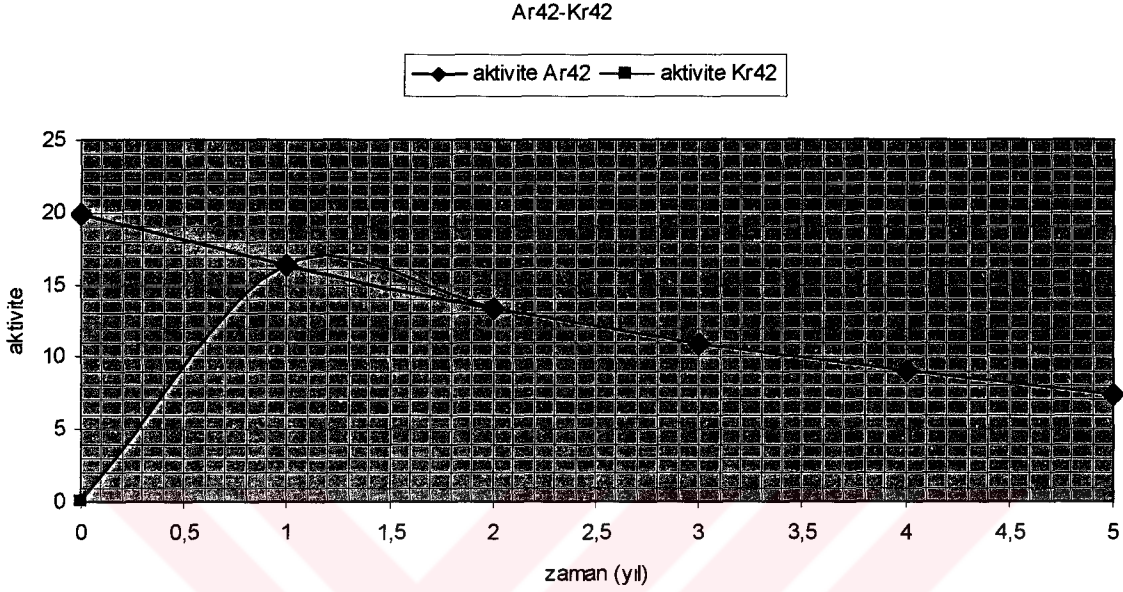
Ar-42/K-42 Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Ar-42, kız radyoizotop olan K-42'ye 3,5 yıl yarı ömürle bozunmaktadır. K-42 ise 12,4 saat yarı ömürle beta yayınlı olarak bozunur (Lieser vd, 1976). Ar-42/K-42 jeneratöründe K-42'nin aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplara göre her sağımdan sonra 7,49 gün beklenmelidir.



Şekil 3.81 Ar-42/K-42 bozunma şeması (Firestone)

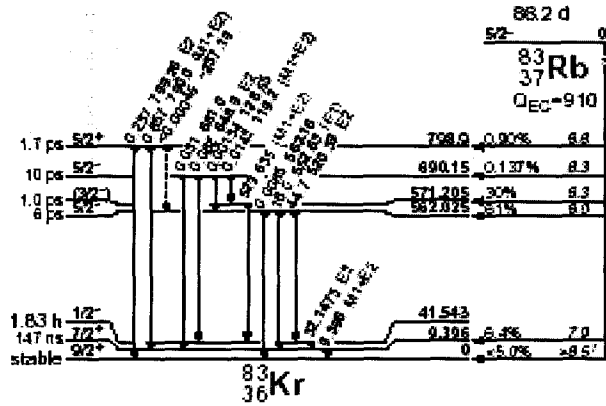
Ar-42/K-42 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.82 Ar-42/K-42 aktivite-zaman grafiği

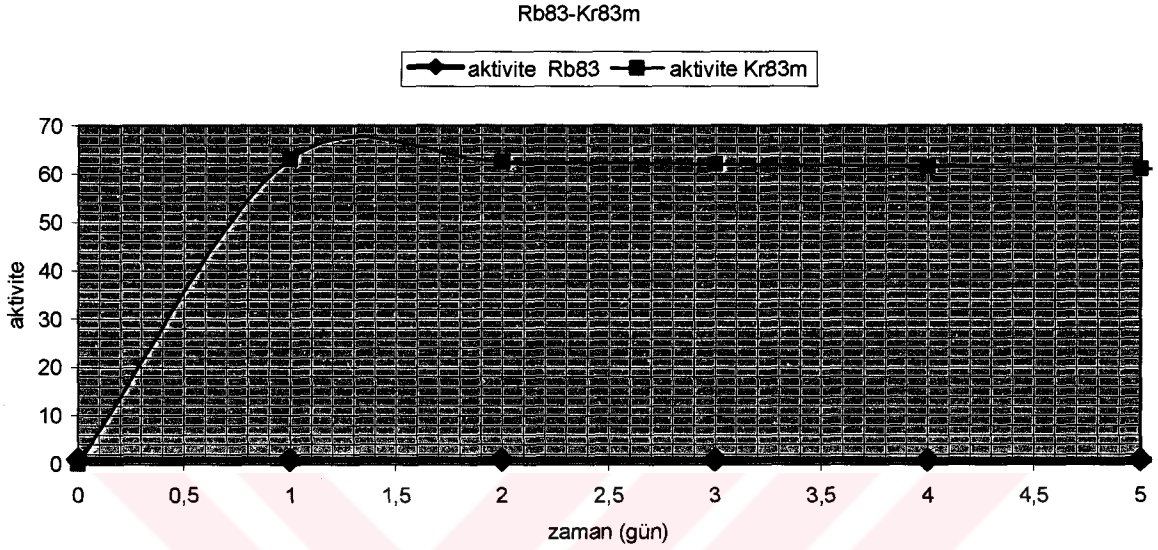
Rb-83/Kr83m Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Rb-83, kız radyoizotop olan Kr-83m'e 86,2 gün yarı ömürle bozunmaktadır. Kr-83m ise 1,83 saat yarı ömürle iç dönüşüm yapıp 32 keV'lik foton yayınlamaya bozunur (Lieser vd, 1976). Rb-83/Kr-83m jeneratöründe Kr-83m'nin aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edildiği üzere, her sağımdan sonra 19,1 saat beklenmelidir.



Şekil 3.83 Rb-83/Kr83m bozunma şeması (Firestone)

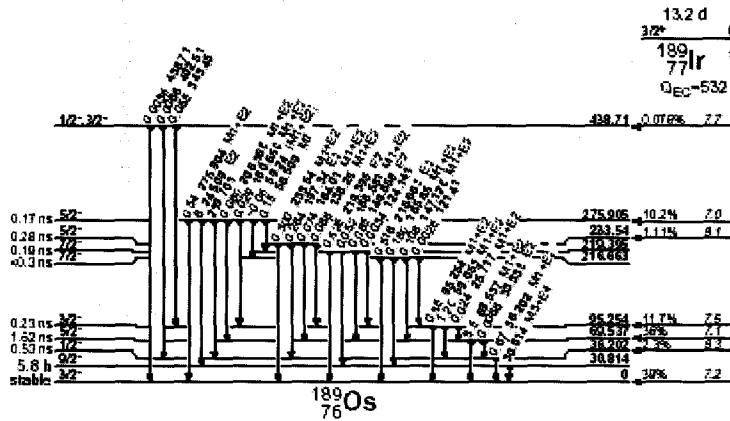
Rb-83/Kr83m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.84 Rb-83/Kr83m aktivite-zaman grafiği

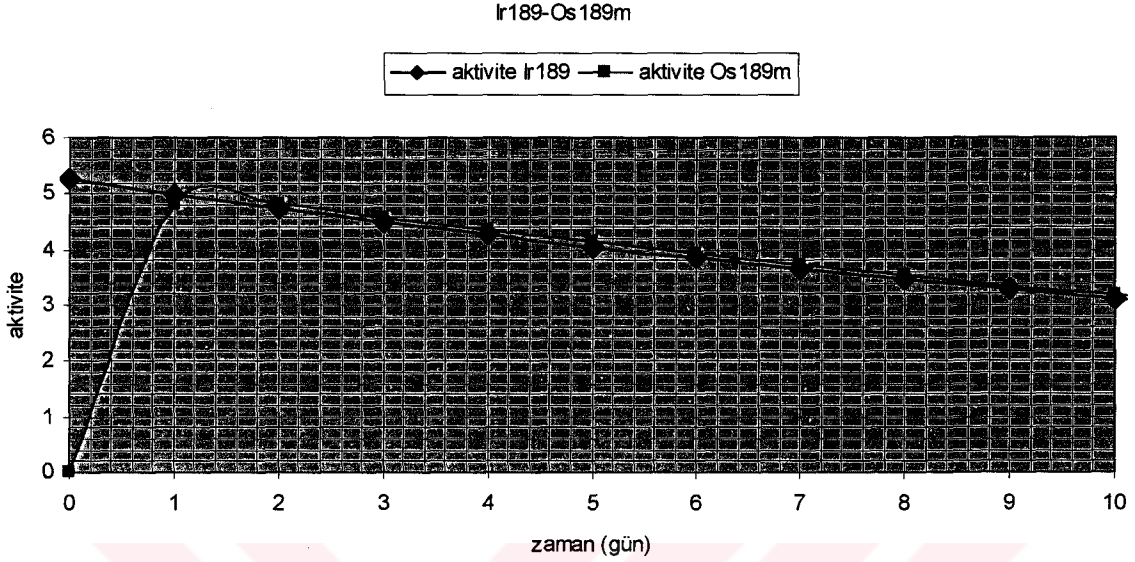
Ir-189/Os-189m Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Ir-189, kız radyoizotop olan Os-189m'e 13,3 gün yarı ömürle bozunmaktadır. Os-189m ise 6 saat yarı ömürle iç dönüşüm yapıp 30,8 keV'lik foton yayınlamaya bozunur (Lieser vd, 1976). Ir-189/Os-189m jeneratöründe Os-189m'in aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplara göre her sağımdan sonra 1,4 gün beklenmelidir.



Şekil 3.85 Ir-189/Os-189m bozunma şeması (Firestone)

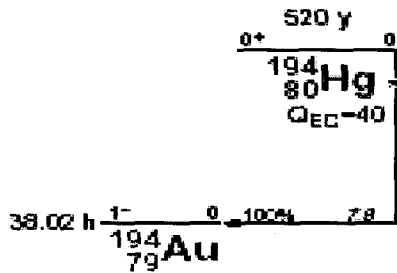
Ir-189/Os-189m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.86 Ir-189/Os-189m aktivite-zaman grafiği

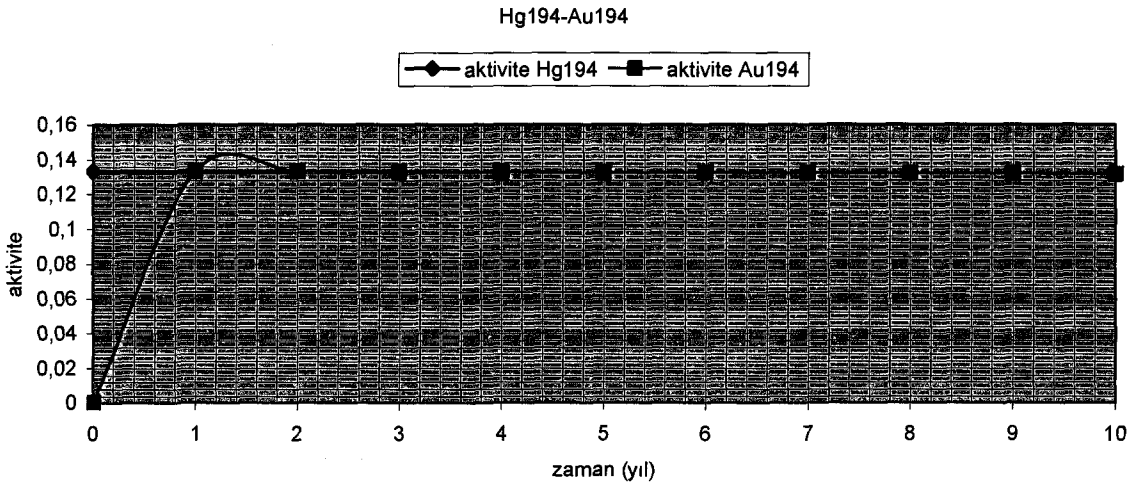
Hg-194/Au-194 Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Hg-194, kız radyoizotop olan Au-194'e 520 yıl yarı ömürle bozunmaktadır. Au-194 ise 38 saat yarı ömürle pozitron yayınlıyarak bozunur (Lieser vd, 1976). Hg-194/ Au-194 jeneratöründe Au-194'ün aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamaya göre her sağımdan sonra 26,7 gün beklenmelidir.



Şekil 3.87 Hg-194/Au-194 bozunma şeması (Firestone)

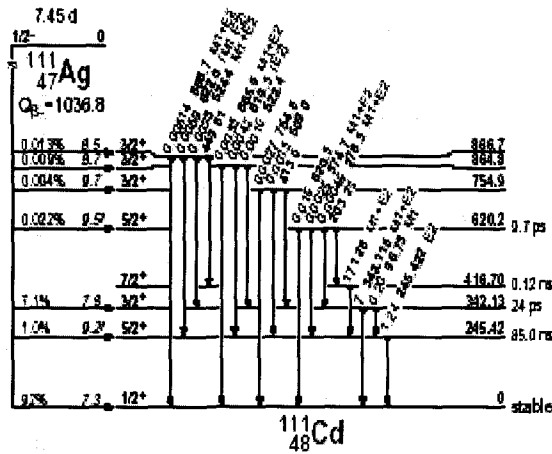
Hg-194/Au-194 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.88 Hg-194/Au-194 aktivite-zaman grafiği

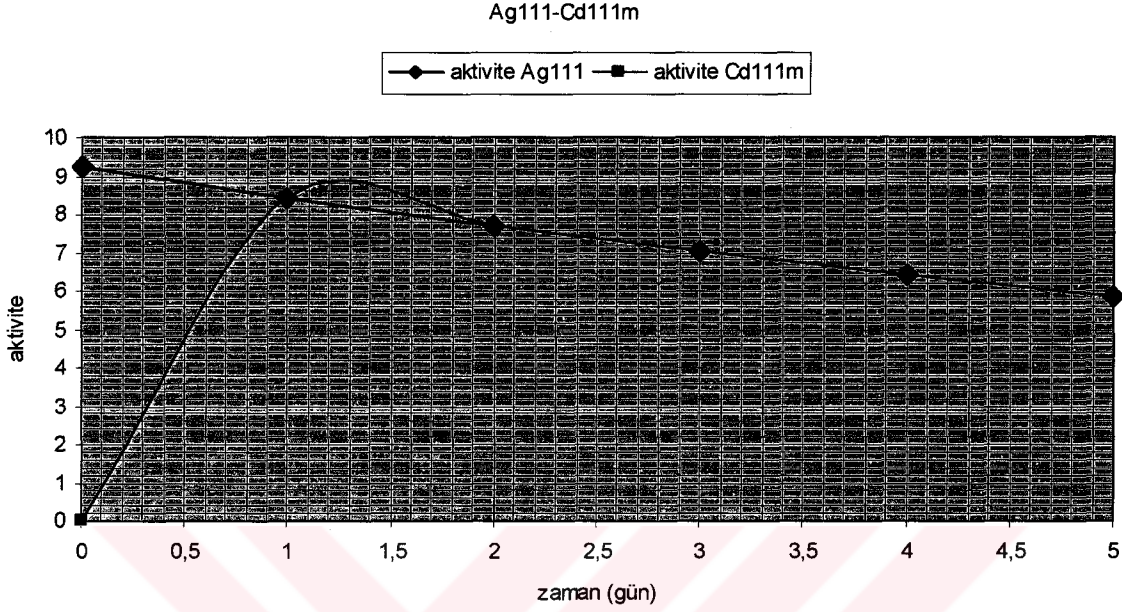
Ag-111/Cd-111m Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Ag-111, kız radyoizotop olan Cd-111m'e 7,5 gün yarı ömürle bozunmaktadır. Cd-111m ise 49 dakika yarı ömürle iç dönüşüm yapıp 245 keV'lik foton yayınlamaya bozunur (Knapp). Ag-111/Cd-111m jeneratöründe Cd-111m'nin aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamaya göre her sağımdan sonra 6,408 saat beklenmelidir.



Şekil 3.89 Ag-111/Cd-111m bozunma şeması (Firestone)

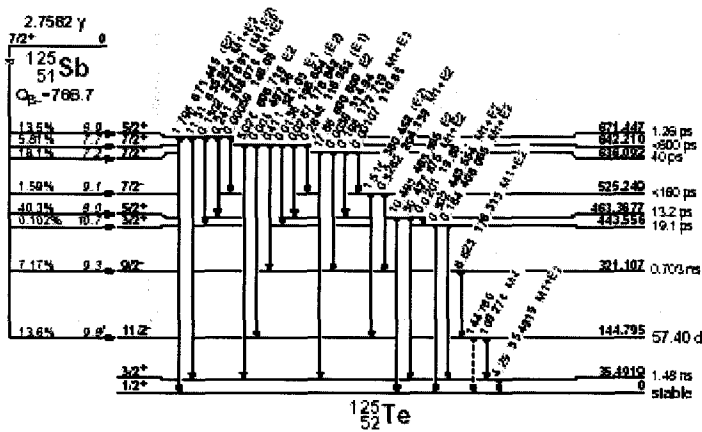
Ag-111/Cd-111m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.90 Ag-111/Cd-111m aktivite-zaman grafiği

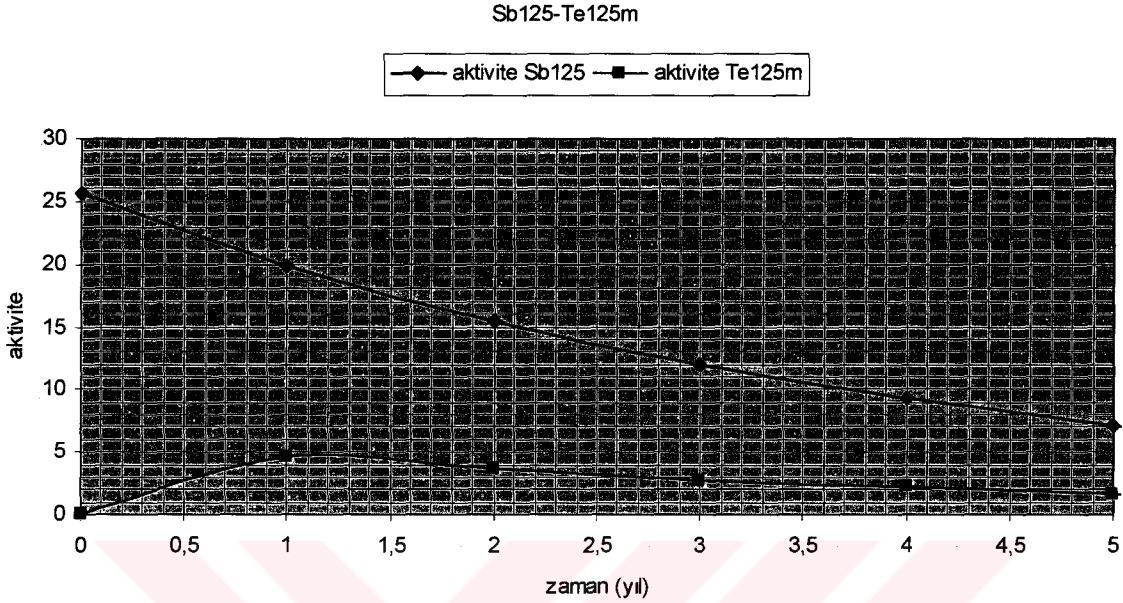
Sb-125/Te-125m Jeneratörü

Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Sb-125, kız radyoizotop olan Te-125m'e 2,7 yıl yarı ömürle bozunmaktadır. Te-125m ise 58 dakika yarı ömürle iç dönüşüm yapıp 35keV'lik foton yayınlarken bozunur (Knapp). Sb-125/Te-125m jeneratöründe Te-125m'nin aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplama göre her sağımdan sonra 14 saat beklenmelidir.



Şekil 3.91 Sb-125/Te-125m bozunma şeması (Firestone)

Sb-125/Te-125m jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.

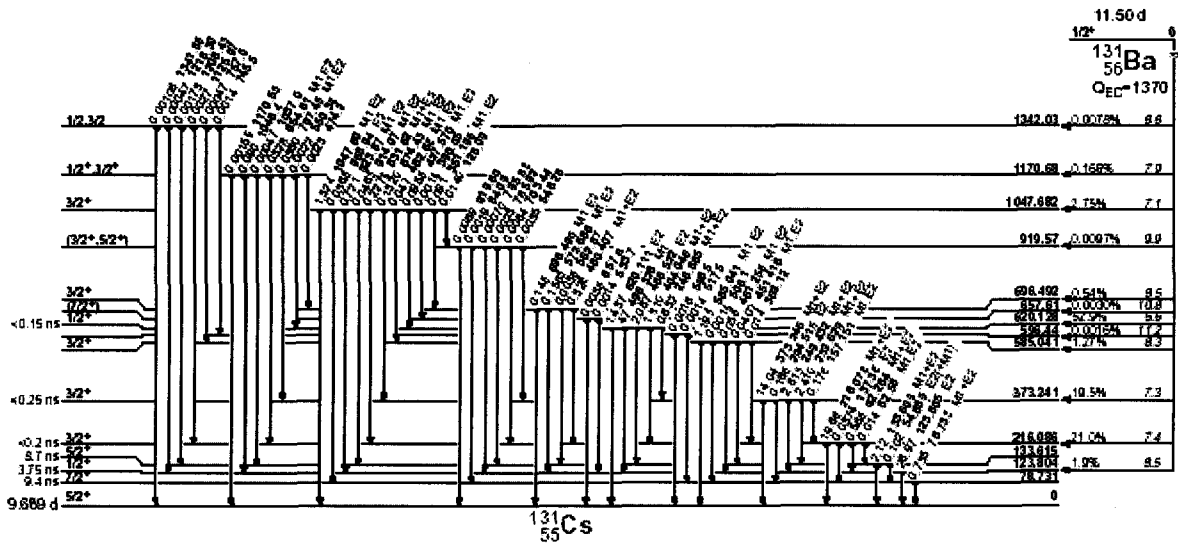


Şekil 3.92 Sb-125/Te-125m aktivite-zaman grafiği

Ba-131/Cs-131 Jeneratörü

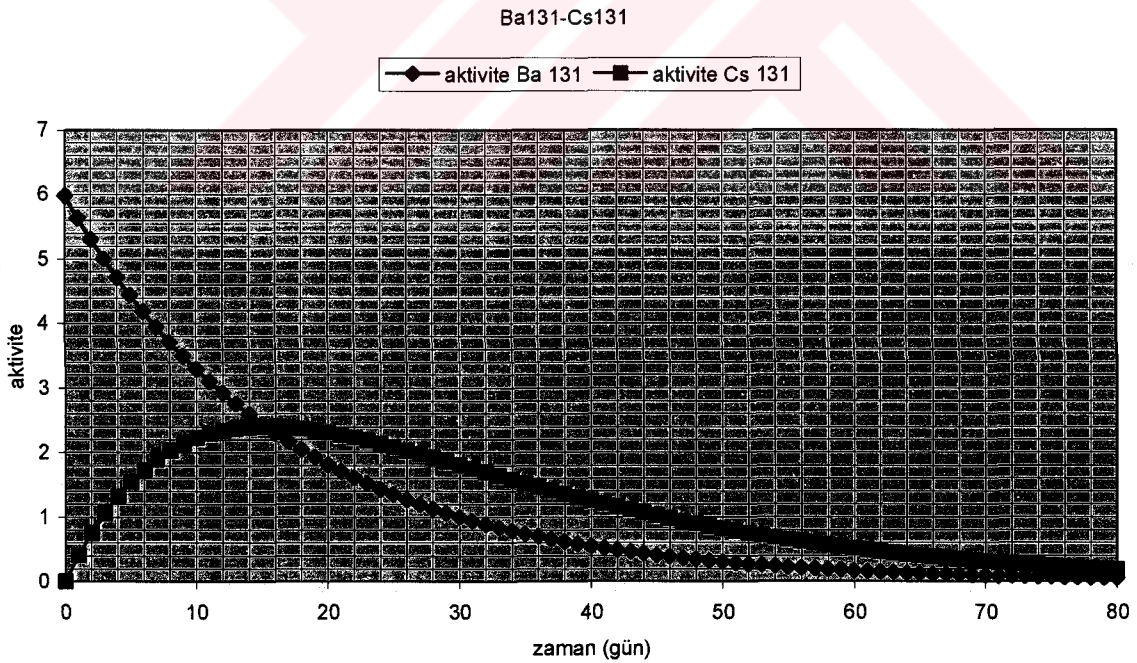
Bu jeneratörde ana radyoizotop olan Ba-131, kız radyoizotop olan Cs-131'e 11,6 gün yarı ömürle bozunmaktadır. Cs-131 ise 9,7 gün yarı ömürle pozitron yayınlayarak bozunur (Knapp).

Ba-131/Cs-131 jeneratöründe Cs-131'in aktivitesinin maksimum olması için, (3.2) bağıntısı ile yapılan hesaplamaya göre her sağımdan sonra 15,95 gün beklenmelidir.



Şekil 3.93 Ba-131/Cs-131 bozunma şeması (Firestone)

Ba-131/Cs-131 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



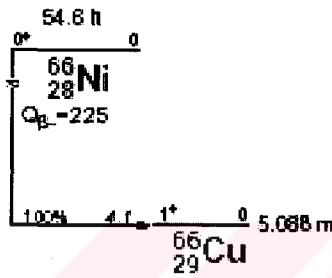
Şekil 3.94 Ba-131/Cs-131 bozunma şeması (Firestone)

3.1.6 Önerilen Radyoizotop Jeneratörleri

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında edinilen bilgi ve tecrübelerden yararlanarak gelecekte çeşitli amaçlar için kullanılabilecek radyoizotop jeneratörleri önerilmiştir. Bu jeneratörler fiziksel olarak aşağıda incelenmiştir.

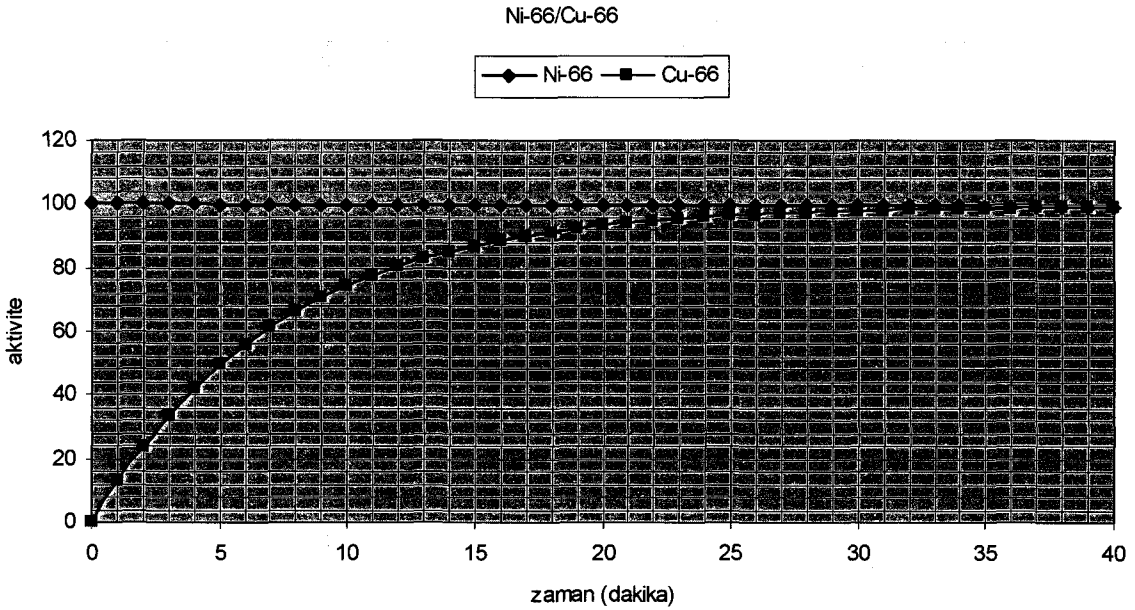
Ni-66/Cu-66 Jeneratörü

Ni-66'nın 2,3 gün yarı ömrü ile 5,1 dakika yarı ömre sahip olan Cu-66'ya bozunmasıyla elde edilebilecek olan bu jeneratör, beta bozunması yapması nedeni ile tedavi amaçlı kullanılabilir.



Şekil 3.95 Ni-66/Cu-66 bozunma şeması (Firestone)

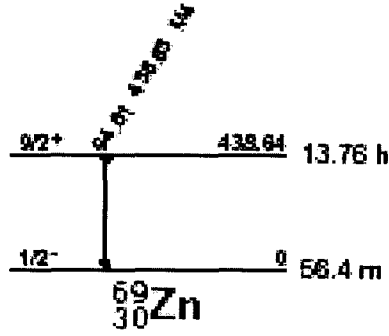
Ni-66/Cu-66 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.96 Ni-66/Cu-66 aktivite-zaman grafiği

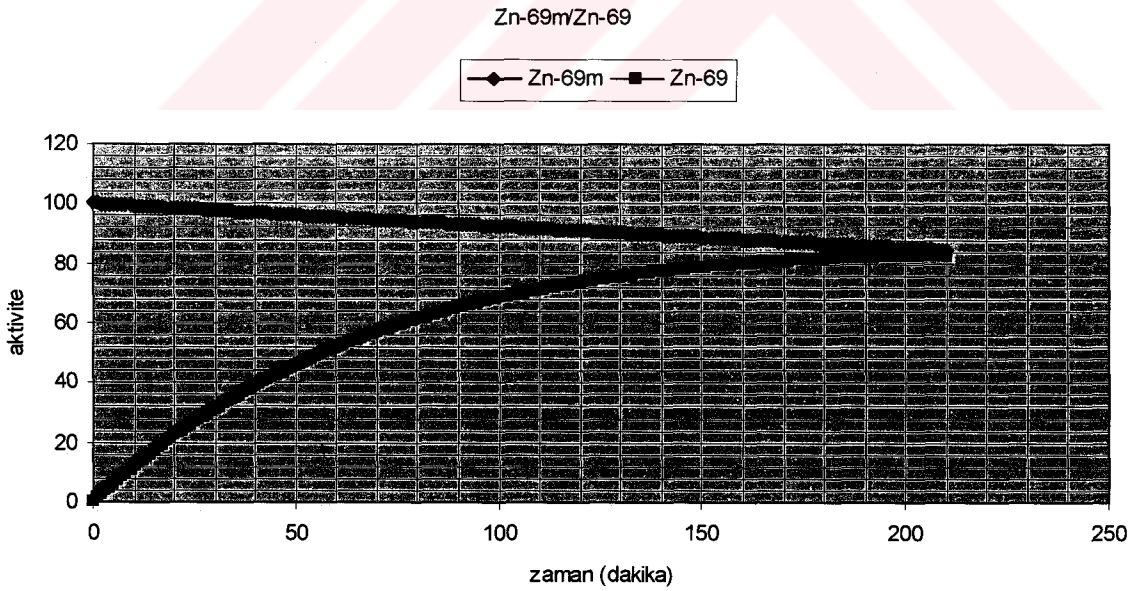
Zn-69m/Zn-69 Jeneratörü

Bu jeneratör teklifinde Zn-69m 13,76 saat yarı ömürle, Zn-69 ise 55 dakika yarı ömürle bozunmaktadır.



Şekil 3.97 Zn-69m/Zn-69 bozunma şeması (Firestone)

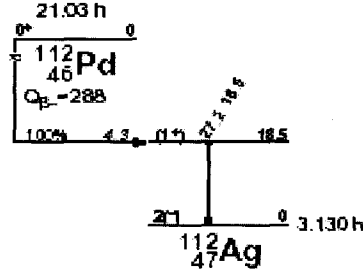
Zn-69m/Zn-69 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.98 Zn-69m/Zn-69 aktivite-zaman grafiği

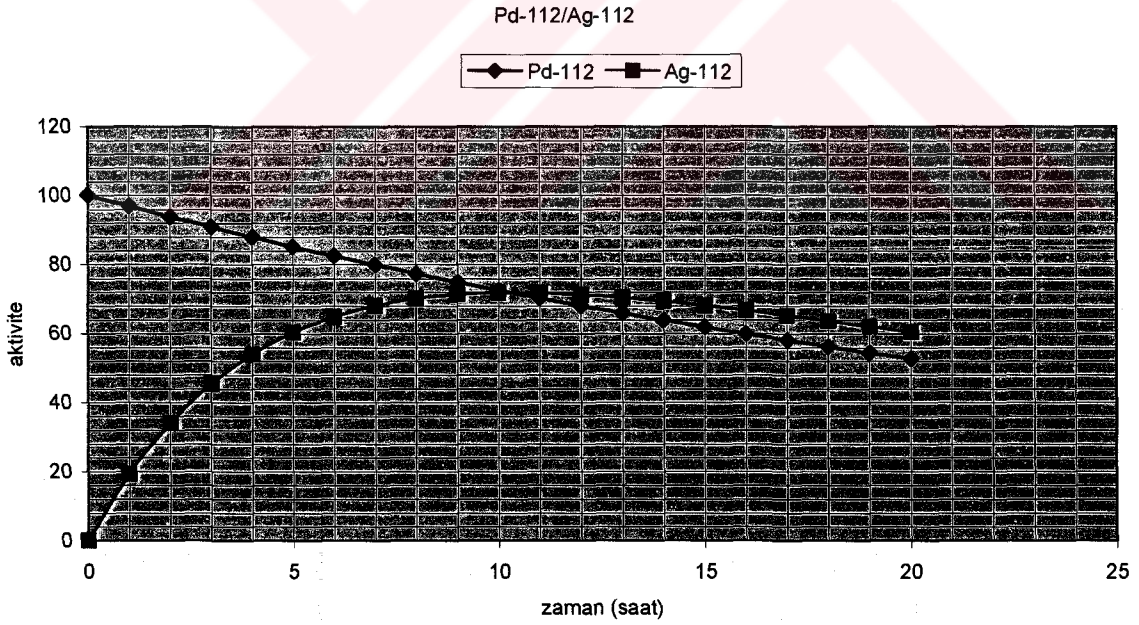
Pd-112/Ag-112 Jeneratörü

Bu jeneratör teklifinde, Pd-112 21,03 saat yarı ömürle, Ag-112 ise 3,2 saat yarı ömürle bozunmaktadır.



Şekil 3.99 Pd-112/Ag-112 bozunma şeması (Firestone)

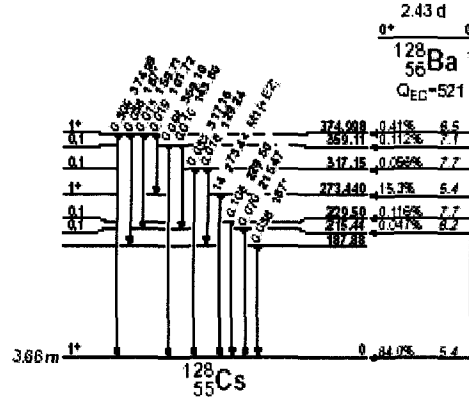
Pd-112/Ag-112 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.100 Pd-112/Ag-112 aktivite-zaman grafiği

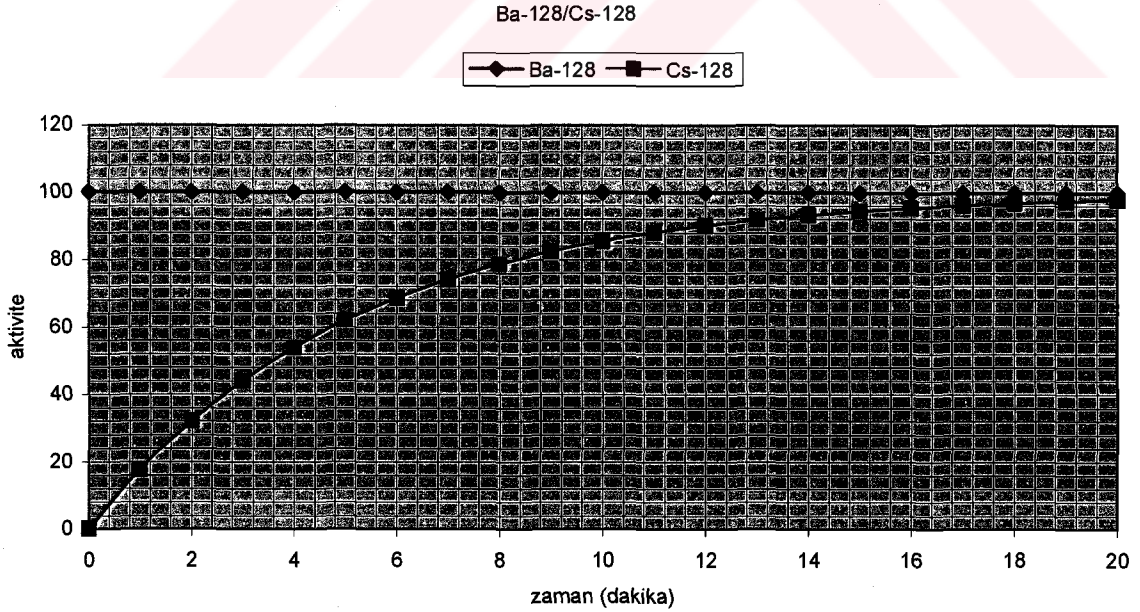
Ba-128/Cs-128 Jeneratörü

Bu jeneratör teklifinde, Ba-128 2,4 gün yarı ömürle, Cs-128 ise 3,6 dakika yarı ömürle bozunmaktadır.



Şekil 3.101 Ba-128/Cs-128 bozunma şeması (Firestone)

Ba-128/Cs-128 jeneratörünün aktivite-zaman grafiği (2.5) ve (2.24) bağıntılarından yararlanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.102 Ba-128/Cs-128 aktivite-zaman grafiği

3.2 W-188/Re-188 Radyoizotop Jeneratörünün Geliştirilmesi

Re-188; birçok tedavi uygulamalarında kullanılan, tedavi ve görüntüleme için uygun olan 764 keV'lik beta parçacıkları ve 155 keV'lik gama ışını yaydığından dolayı diğer beta yayınlayan radyoizotoplara oranla daha avantajlı ve kullanışlı bir izotoptur.

Re-188'in kolay elde edilebilmesi ve düşük maliyeti de W188/Re188 jeneratörlerinin geliştirilmesine de destek olmuştur (Knapp;Colombetti, 1984).

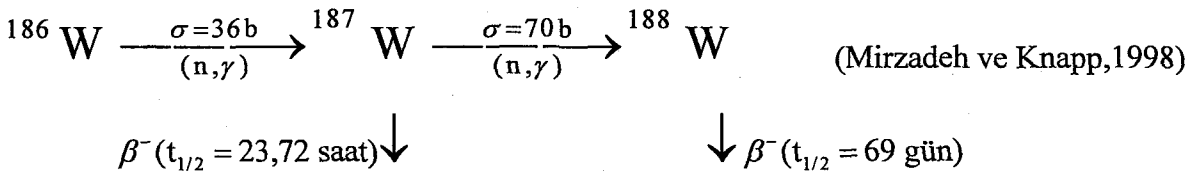
3.2.1 Bateman Denklemleri ile Hesaplama:

Aşağıda W-186'nın 10 saat boyunca reaktörde ışınlanması ile gerçekleşen radyoaktif bozunmalar sonucu elde edilen aktivite ve çekirdek sayısının Bateman Denklemleri ile hesaplanması görülmektedir.

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3 e^{-\lambda_3 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (7.1)$$

$$C_1 = \frac{\lambda_1^* \lambda_2^* \dots \lambda_{n-1}^*}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1(0) \quad (7.2)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1^* \lambda_2^* \dots \lambda_{n-1}^*}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1(0) \quad (7.3)$$



$$N_{188} = \lambda_{186}^* \lambda_{187}^* N_{186}(0)$$

$$\left[\frac{e^{-\lambda_{186} t}}{(\lambda_{187} - \lambda_{186})(\lambda_{188} - \lambda_{186})} + \frac{e^{-\lambda_{187} t}}{(\lambda_{186} - \lambda_{187})(\lambda_{188} - \lambda_{187})} + \frac{e^{-\lambda_{188} t}}{(\lambda_{186} - \lambda_{188})(\lambda_{187} - \lambda_{188})} \right] \quad (7.4)$$

$$t=10 \text{ saat}=36 \times 10^3 \text{ saniye}$$

$$\phi_n = \text{TR-2 Reaktörünün Akısı } (10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s})$$

$$m=1 \text{ gr W-186}$$

$$\sigma_{186} = 36 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{187} = 70 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$N_{186}(0) = \frac{1 \times 6,02 \times 10^{23}}{186} = 3,23 \times 10^{21} \text{ tane W-186 çekirdeği} \quad (7.5)$$

$$\lambda_{186}^* = \lambda_{186} = \phi \sigma_{186} = 36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{187}^* = \phi \sigma_{187} = 7 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{187} = \lambda_{187} + \phi \sigma_{187} = 8,12 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{188} = \lambda_{188} = 1,16 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

$$N_{188} = \lambda_{186}^* \lambda_{187}^* N_{186}(0)$$

$$\left[\frac{e^{-\lambda_{186}^* t}}{(\lambda_{187} - \lambda_{186}^*)(\lambda_{188} - \lambda_{186}^*)} + \frac{e^{-\lambda_{187}^* t}}{(\lambda_{186} - \lambda_{187}^*)(\lambda_{188} - \lambda_{187}^*)} + \frac{e^{-\lambda_{188} t}}{(\lambda_{186} - \lambda_{188})(\lambda_{187} - \lambda_{188})} \right]$$

$$= 36 \times 10^{-11} \times 7 \times 10^{-10} \times 3,23 \times 10^{21} \left[\frac{e^{-36 \times 10^{-11} \times 36 \times 10^3}}{(8,12 \times 10^{-6} - 36 \times 10^{-11})(1,16 \times 10^{-7} - 36 \times 10^{-11})} + \right.$$

$$\frac{e^{-8,12 \times 10^{-6} \times 36 \times 10^3}}{(36 \times 10^{-11} - 8,12 \times 10^{-6})(1,16 \times 10^{-7} - 8,12 \times 10^{-6})} +$$

$$\left. \frac{e^{-1,16 \times 10^{-7} \times 36 \times 10^3}}{(36 \times 10^{-11} - 1,16 \times 10^{-7})(8,12 \times 10^{-6} - 1,16 \times 10^{-7})} \right]$$

$$N_{188} = 4,78913 \times 10^{11} \text{ tane W-188 çekirdeği}$$

$$A_{188} = \lambda_{188} N_{188} = 1,50146 \times 10^{-6} \text{ Ci}$$

3.2.2 FUKMOD ile Yapılan Hesaplama:

Nükleer reaktörlerde kalp içindeki izotop yoğunluklarının zamanla değişimi hem reaktör işletimi hem de reaktör kazalarında çevreye intikal edecek aktivite ve doz hesapları yönünden önemlidir.

FUK koduyla herhangi bir fisyon ürünü zincirindeki fisyon ürünlerinin zamanla değişimi reaktörün belli bir süre belli bir güç seviyesinde çalışması durumunda bir gruplu olarak hesaplanmaktadır. Reaktörün devamlı çalışması ya da belli bir zaman çalışıp belli bir zaman durması hallerinde herhangi bir fisil izotop ve/veya fisyon ürünü zincirindeki izotopların zamanla değişen sayısal yoğunluklarının hesabı için genel bir koda ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla FUK' da bazı değişiklikler yapılarak kod genel bir hesaplama aleti haline getirilmiştir. FUK' un değiştirilmiş yeni şekli olan FUKMOD kodunda:

- İstenilen fisil izotop veya fisyon ürünü zinciri verilerek çözüm bulunmaktadır.
- Grup sayısı beşe çıkarılmıştır.
- Değişik zaman adımlarında değişik akı seviyeleri için hesap yapılabilmektedir.
- Reaktörde ışınlanan malzemelerde üreyen izotoplar hesaplanabilmektedir.

Reaktörün çalışması durumunda, zaman adımı başında girilen grup akılarına göre önce fisil izotop zincirlerindeki izotopların sayısal yoğunlukları hesaplanmakta ve varsa bir sonraki zaman adımında kullanılmak üzere bir üniteye yazdırılmaktadır. Zaman adımı başındaki grup akılarına ve fisil izotopların sayısal yoğunluklarına bağlı olarak fisyon yoğunlukları bulunmakta, fisyon ürünü zincirlerindeki fisyon ürünlerinin zamanla değişimi bu fisyon yoğunluklarına göre hesaplanmakta ve bunlar bir sonraki adım için bir başka üniteye yazdırılmaktadır. Reaktörün durması halinde ise akılar sıfır alınarak zincirlerdeki izotopların bozunmalar yoluyla değişen sayısal yoğunlukları hesaplanmaktadır. Bu şekilde reaktörün çalışması ve durması hallerinde istenilen zaman boyunca ve istenildiği kadar zaman adımı için hesap yapılmaktadır (Üstün vd,1989)

Aşağıda FUKMOD kodu ile yapılan çeşitli W-186' ların çeşitli süreler için ışınlanma sonucunda elde edilen aktiviteler görülmektedir.

Çizelge 3.1 FUKMOD Sonuçları

1 g Wolfram 30 saat ışınladı	W-187	$0,5321544 \cdot 10^4$ mCi
	W-188	$0,3280831 \cdot 10^{-2}$ mCi
1 g W-186 30 saat ışınladı.	W-187	$0,1839624 \cdot 10^5$ mCi
	W-188	$0,1134162 \cdot 10^{-1}$ mCi
1 g Wolfram reaktör 6 saat çalışıp 18 saat durup, 6 saat çalışıp 18 saat durup, 6 saat çalışıp 18 saat durup, 6 saat çalışarak ışınladı.	W-187	$0,1465872 \cdot 10^4$ mCi
	W-188	$0,1631608 \cdot 10^{-3}$ mCi
1 g Wolfram 24 saat ışınladı.	W-187	$0,4594582 \cdot 10^4$ mCi
	W-188	$0,2212076 \cdot 10^{-2}$ mCi
1 g Wolfram 10 saat ışınladı.	W-187	$0,2309676 \cdot 10^4$ mCi
	W-188	$0,4363045 \cdot 10^{-3}$ mCi

Yapılan hesaplamalar sonucunda yaklaşık 1,5 μ Ci kadar W-188 elde edilebilmiştir. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarları'nda yapılan çalışmalara göre, bu ışınlama için $8-10 \times 10^{14}$ n/cm²sn'lik reaktör akısı gerekmektedir (Mirzadeh ve Knapp,1998). Bu durumda , TR-2 reaktörünün 10^{13} n/cm²sn olan akısının W-186 elementinin ışınlaması için yetersiz kalmış olduğu kanaatine varılmıştır. Böylece, W-188/Re-188 jeneratörünün elde edilmesine yönelik çalışmadan vazgeçilmiştir.

3.3 Cs-137/Ba-137m Radyoizotop Jeneratörünün Geliştirilmesi

Dünya'da gerek deneysel gerekse nükleer tıp amaçlı kullanılan Cs-137/Ba-137m jeneratörünün geliştirilmesi amacıyla Ba-137m'in Cs-137'den ayrılması araştırılmış ve bunu gerçekleştirmek üzere 3 farklı kolon ismine rastlanmıştır.

- Amonyum molibdofosfat (AMP) kolonu
- Bakır (II) ferrosiyaniür ($\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) kolon
- Zirkonyum fosfat [$\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] kolon

3.3.1 Ba-137m'in Cs-137'den Ayrılması

Ba-137m, Cs-137'den iyon değiştirme kolon kromatografisi yöntemi ile ayrılır. İyon değiştirme kolonu, değiştirme reçinesi ile doldurulmuş cam silindirden oluşur. Reçinenin yüzeyi Cs^+ iyonlarının bağ yaptığı, PO_4^{-2} grubu gibi, negatif yüklü moleküllerden oluşur. Cs^+ iyonları sürekli olarak Ba^{+2} iyonlarına bozunur. Sağım çözeltisi denen çözelti, kolonu yıkayarak sadece Ba^{+2} iyonlarını kolondan aşağıya geçirir, Cs^+ iyonları ise kolonda kalır. Yüksek pozitif yüklü küçük iyonlar, 6 ya da daha fazla su molekülünden oluşan hidrasyon küresi şeklindeki dipolar su moleküllerinin negatif ucunu çekerler. Hidratlanmış Ba^{+2} iyonu, Cs^+ iyonu kadar güçlü bağ yapmayıp, sağım çözeltisi ile birlikte sağılır [6].

3.3.2 Ön hazırlıklar

Bu çalışmada aşağıdaki çözeltiler hazırlanmış ve amaçları alt başlıklarda belirtilmiştir.

- NaPh_4B hazırlanması
- CsCl ve BaCl_2 çözeltilerinin hazırlanması
- $\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ hazırlanması
- $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ hazırlanması (CuCl_2 ile , CuSO_4 ile)

3.3.2.1 NaPh_4B hazırlanması

NaPh_4B kompleksi ile potasyum, rubidyum, sezyum, amonyum ve gümüş iyonları sulu ortamlarda çöker (Dölen, 1988). Bu deneylerde NaPh_4B , Cs^+ tanımlayıcı olarak kullanılmıştır.

Cs^+ iyonlarını ayırt edebilmek amacıyla 10 mL balon jojede 0,1 M NaPh_4B hazırlandı.

3.3.2.2 CsCl Çözeltilerinin Hazırlanması

0,1 M'dan başlayarak 10^{-5} M'a kadar CsCl çözeltileri hazırlandı. CsCl çözeltilerinin NaPh_4B ile hassaslığının ölçülmesi amacıyla; 1'er mL 0,1 M, 0,01 M, 0,001 M, 0,0001 M ve 0,00001 M CsCl çözeltileri ile ayrı ayrı 1 mL NaPh_4B çözeltisi karıştırıldı ve çökme olup olmadığı gözlemlendi.

- 1 mL 10^{-5} M CsCl ile 1 mL 0,1 M NaPh₄B karıştırıldığında çökme olmadığı gözlemlendi.



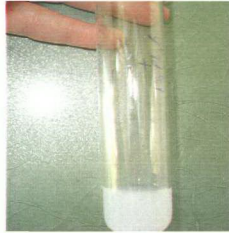
Şekil 3.103 10^{-5} M CsCl ve 0,1 M NaPh₄B ile Cs tayini

- 1 mL 10^{-4} M CsCl ile 1 mL 0,1 M NaPh₄B karıştırıldığında çökme olduğu ancak bu çökmenin deney için yetersiz olduğu gözlemlendi.



Şekil 3.104 10^{-4} M CsCl ve 0,1 M NaPh₄B ile Cs tayini

- 1 mL 10^{-3} M CsCl ile 1 mL 0,1 M NaPh₄B karıştırıldığında çok miktarda çökme gözlemlendi deneyin 10^{-3} M CsCl ile yapılmasına karar verildi.



Şekil 3.105 10^{-3} M CsCl ve 0,1 M NaPh₄B ile Cs tayini

3.3.2.3 BaCl₂ Çözeltilerinin Hazırlanması

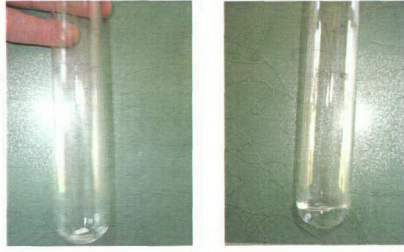
0,1 M'dan başlayarak 10^{-5} M'a kadar BaCl₂ çözeltileri hazırlandı. Bu çözeltilere de 0,1 M NaPh₄B çözeltilisinden 1'er mL karıştırıldı ancak hiçbirinde çökme gözlenmedi. Böylece NaPh₄B'in iyi bir sezyum ayırıcı olduğuna karar verildi.



Şekil 3.106 10^{-5} M BaCl₂ ve 0,1 M NaPh₄B ile Cs tayini

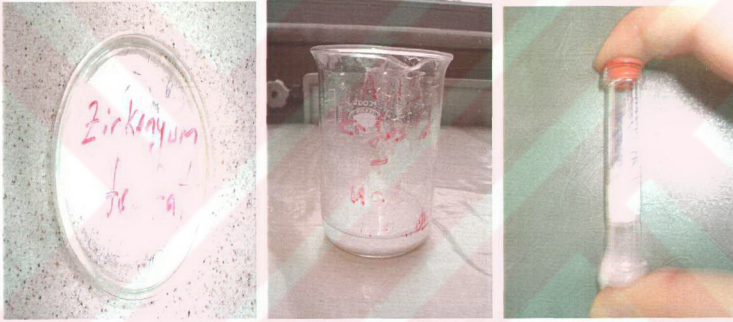
3.3.2.4 ZrO(H₂PO₄)₂ Kolonun Elde Edilmesi

$\text{ZrCl}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrOCl}_2 + 2\text{HCl}$ reaksiyonuyla ZrOCl₂ elde edildi. Elde edilen ZrOCl₂ yine HCl'li ortamda H₃PO₄ ile reaksiyona sokuldu. Reaksiyon sonucunda beyaz çökelek halinde ZrO(H₂PO₄)₂ oluştu. Fakat oluşan kompleks kuvvetli asidik ortamda çözündüğü için ortam pH'ı 3,5'dan büyük olana kadar saf su ile yıkandı. Daha sonra elde edilen çökelek filtre edilerek bir gece 40°C'de etüvde kurutuldu. Elde edilen ZrO(H₂PO₄)₂'tan bir parça, sağım çözeltilisi olarak kullanılacak olan % 0,9 (m/V) NaCl ve 0,04 M HCl çözeltileri içine kondu. Burada ZrO(H₂PO₄)₂'in bu çözeltiler içinde çözünmediği yani kolonun altına geçmeyeceği gözlemlendi [6] .



Şekil 3.107 HCl ve NaCl ile çözünme testi

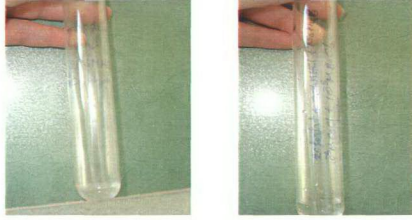
Etüvden alındıktan sonra havanda homojen hale gelinceye kadar dövüldü ve aktifleştirmek amacıyla bir gece 1 M HCl içinde bekletilip kolona dolduruldu (Pinajian, 1967).



Şekil 3.108 $ZrO(H_2PO_4)_2$ 'ın elde edilişi ve $ZrO(H_2PO_4)_2$ kolon

3.3.2.4.a $ZrO(H_2PO_4)_2$ Kolon ile İnaktif Deneyin Yapılışı

Bu çalışmada $ZrO(H_2PO_4)_2$ kullanılmasının nedeni; $ZrO(H_2PO_4)_2$ değerliklerinin yanı sıra, sentetik inorganik iyon değıştirici madde olmasıdır (Amphlett, 1958). $ZrO(H_2PO_4)_2$ kolondan 1mL 10^{-3} M CsCl, 1 mL 10^{-3} M BaCl₂ ve %0,9 (m/V) NaCl çözeltileri geçirilip vakum pompasıyla sağım yapıldı. Sağım sonucunda elde edilen çözeltiliye 1mL 0,1 M NaPh₄B karıştırıldı ve çökme olmadığı gözlemlendi. Böylece burada Cs⁺ kaçağının olmadığı görölmüş oldu.



Şekil 3.109 $\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ kolon ile inaktif sağım sonuçları

Sağım sonucunda elde edilen çözeltiye içinde Ba^{+2} olup olmadığını tayin etmek amacıyla bir parça CuSO_4 katıldı.

$\text{Ba}^{+2} + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{BaSO}_4$ reaksiyonunun gerçekleştiği yani BaSO_4 'den ibaret beyaz, lapa şeklinde bir çökelti meydana geldiği gözlemlendi. Bunun nedeni ise; BaSO_4 suda çok güç çözünmekle beraber derişik sülfat asidinde kompleks vererek çözünür (Baykurt, 1970). Böylece burada Ba^{+2} olduğu görülmüş oldu.

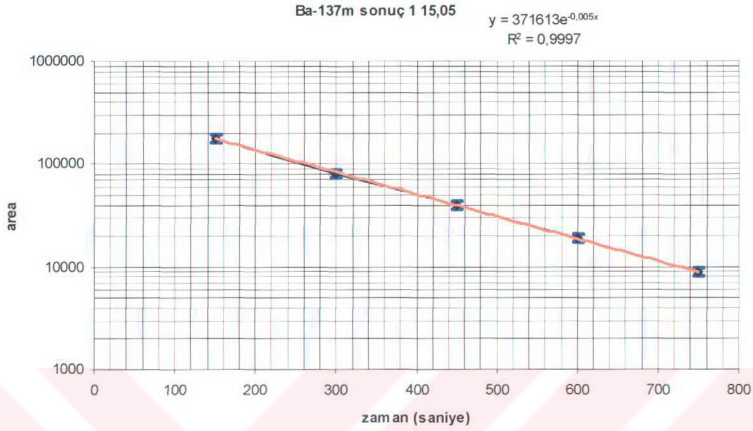
3.3.2.4.b $\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ Kolon ile Radyoaktif Deneyin Yapılışı

Yaklaşık $10\mu\text{Ci}$ CsCl alındı ve % 0,9 (m/V) NaCl kullanılarak sağım yapıldı. Bu deney iki kez yapıldı ve elde edilen sağım çözeltisinin $\text{NaI}(\text{Tl})$ dedektöründe 150 saniye boyunca ilkinde 5 kez olmak üzere birkaç kez ölçümü yapıldı. Çıkan sonuçlardan grafikler çizildi ve yarı ömür tayini yapıldı. Sonuç olarak sağım çözeltisinde sadece Ba-137m olduğu, Cs-137 kaçağı olmadığı anlaşıldı.



Şekil 3.110 $\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ kolon ile hazırlanan Cs-137/Ba-137m jeneratörü

Aşağıda Cs-137/Ba-137m jeneratörünün çeşitli zamanlarda sağım yapılması sonucunda elde edilen sonuçlardan hazırlanan grafikler ve Ba-137m spektrumu görülmektedir.



Şekil 3.111 İlk sağıım sonucundaki Ba-137m yarı ömür grafiği



Şekil 3.112 İkinci sağıım sonucundaki Ba-137m yarı ömür grafiği

Bu spektrumlar Cs-137/Ba-137m jeneratörü sağıldıktan hemen sonra ve ertesi gün alınmıştır. Spektrumlarda Ba-137 artışı olmadığı görülmüş, böylece geliştirdiğimiz bu jeneratörün Cs^+

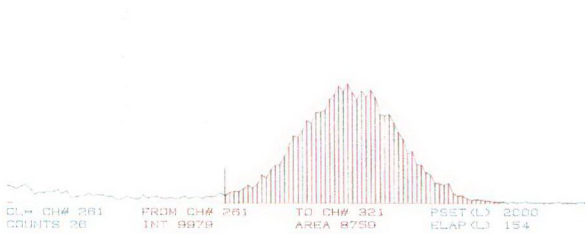
kaçağı yapmadığı sonucuna varılmıştır. Bu durumda $\text{ZrO}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ile yapılan Cs-137/Ba-137m jeneratörünün geliştirilmesi başarıyla tamamlanmıştır.

TAB NO. = 12 SERIES 35+ V=2.00 15:20 4 MAY 1949
CH# 0 MEMORY = 2/2 VFS = 1K CH# 2042
CANBERRA



Şekil 3.113 Ba-137m 1. spektrum

TAB NO. = 11 SERIES 35+ V=2.00 15:20 4 MAY 1949
CH# 313 MEMORY = 2/2 VFS = 1K CH# 310
CANBERRA



Şekil 3.114 Ba-137m 1. spektrum (geniş alan)

TAG NO. = 16 SERIES 33+ V=3.00 16:49 5 MAY 2005
 CH# 247 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 374
 CANBERRA

CL# CH# 285 FROM CH# 261 TO CH# 321 PSET (L) 3000
 COUNTS 3 INT 225 AREA 12 ELAP (L) 152

Şekil 3.115 Ba-137m 2. spektrum

TAG NO. = 16 SERIES 35+ V=3.00 09:27 6 MAY 2005
 CH# 232 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 359
 CANBERRA

CL# CH# 280 FROM CH# 251 TO CH# 321 PSET (L) 3000
 COUNTS 4 INT 208 AREA 23 ELAP (L) 157

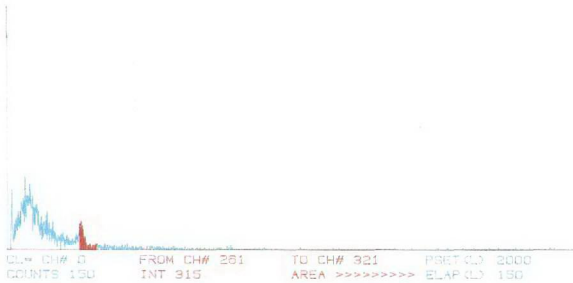
Şekil 3.116 Ba-137m 3. spektrum

TAG NO. = 19 SERIES 95+ V-P. 00 09:34 6 MAY 2005
 CH# 232 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 358
 CANBERRA

CL= CH# 260 FROM CH# 261 TO CH# 321 PSBT (L) 2000
 COUNTS 0 INT 190 AREA >>>>>>>> ELAP (L) 152

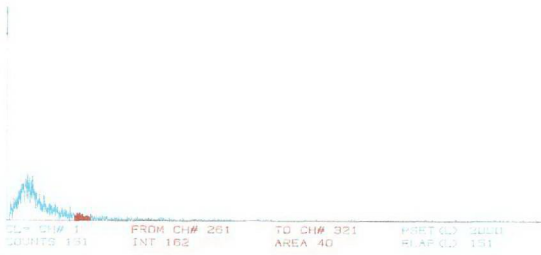
Şekil 3.117 Ba-137m 4. spektrum

TAG NO. = 35 SERIES 95+ V-P. 00 11:00 12 MAY 2005
 CH# 0 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 2047
 CANBERRA



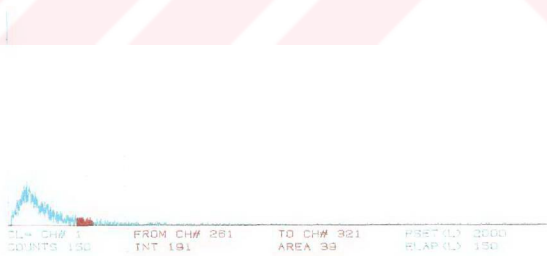
Şekil 3.118 Ba-137m 5. spektrum

TAC NO. = 34 GERTEK 35+ V-S.00 11.04 18 MAY 2025
 CH# 0 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 2047
 CANBERRA



Şekil 3.119 Ba-137m 6. spektrum

TAC NO. = 35 GERTEK 35+ V-S.00 11.04 18 MAY 2025
 CH# 0 MEMORY = 2/2 VFS = 256 CH# 2047
 CANBERRA



Şekil 3.120 Ba-137m 7. spektrum

3.3.2.5 $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ Kolonun Elde Edilmesi

Bu çalışmada $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, CuCl_2 ve CuSO_4 olmak üzere iki kimyasal madde ile yapılmaya çalışılmıştır.

3.3.2.5.a CuCl_2 ile $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ Eldesi

$2\text{CuCl}_2 + \text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \rightarrow \text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 4\text{KCl}$ reaksiyonuyla $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ elde edildi. Elde edilen $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ etüvde bir gece boyunca kurutuldu. Sağım çözeltisi olarak kullanılacak % 0,9 (m/V) NaCl ve 10^{-3} M HCl içine ayrı ayrı bir parça $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ atıldı. % 0,9 (m/V) NaCl içinde çökme olurken, 10^{-3} M HCl içinde $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 'ün çözündüğü gözlemlendi.



Şekil 3.121 HCl ile çözünme testi

Böylece sağım çözeltisi için NaCl'ün uygun olduğu ancak HCl'in uygun olmadığı kanaatine varıldı. Havanda dövülerek homojen hale getirilen $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolona dolduruldu.



Şekil 3.122 $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolon

3.3.2.5.b CuCl_2 'den Elde Edilen $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ Kolon ile İnaktif Deneyin Yapılışı

$\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolonun üzerine 1 mL 10^{-3} M CsCl , 1 mL 10^{-3} M BaCl_2 ve %0,9 NaCl çözeltileri konulup vakumlu pompa ile sağım yapıldı.



Şekil 3.123 $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolon ile Cs-137/Ba-137m jeneratörü

Elde edilen sağım çözeltilisine 1 mL 0,1 M NaPh_4B döküldü ve çökme olduğu gözlemlendi. Bu sonuç $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolonun Cs kaçacağı yaptığı ve bu nedenle bu kolon dolgu maddesinin Ba-137m'i Cs-137'den ayırmak için uygun olmadığı kanaatine varıldı.



Şekil 3.124 $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ kolonun inaktif deney sonucu

3.3.2.5.c CuSO_4 ile $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ Eldesi

Çalışmanın bu aşamasında CuSO_4 'den yararlanarak $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ elde edilmesine çalışılmıştır.

$2\text{CuSO}_4 + \text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \rightarrow \text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 2\text{K}_2\text{SO}_4$ reaksiyonu ile $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ elde edilmeye çalışıldı ancak CuSO_4 tam reaksiyon vermediği ve beherin dibinde CuSO_4 kristalleri kaldığı gözlemlendi. Bu nedenle bu kolonun yapımı uygun görülmedi.

BÖLÜM 4

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada özellikle nükleer tıpta kullanılmakta olan radyoizotop jeneratörleri incelenmiştir. Bu jeneratörlerin üretim şekli, bozunma şemaları, çekirdek sayılarına ve aktivitelerine göre üreme-bozunma grafiklerinin yanı sıra bu jeneratörlerden en fazla verim alınacak zaman ve bu jeneratörlerde kullanılabilecek kolon dolgu maddeleri ve sağımlı çözeltileri de incelenmiştir.

Özel olarak incelenen W-188/Re-188 radyoizotop jeneratöründe ise W-188 elde etmek için reaktörde gerçekleştirilecek ışınlama hesapları Bateman Denklemleri ile yapılmış ve TR-2 reaktörü için ışınlama hesapları yapması için özel olarak FUK bilgisayar programından uyarlanan FUKMOD bilgisayar programı ile de bu hesaplar tekrarlanıp sonuçlar karşılaştırılarak doğruluğu ispat edilmiştir. Ancak sonuçlardan, reaktörün düşük akısı nedeni ile ışınlama sonucunda elde edebileceğimiz aktivitenin çok düşük olacağı görülmüştür. Bu nedenle bu jeneratörün geliştirilmesinden vazgeçilmiştir.

Özel olarak incelenen diğer bir radyoizotop jeneratörü olan Cs-137/Ba-137m jeneratörünün geliştirilmesi için çeşitli kolon dolgu maddeleri incelenmiştir. Bunlardan biri olan AMP kolon dolgu maddesi, fiyatının çok pahalı olması ve yurtdışından üç ay sonunda gelebilmesi dolayısıyla incelenememiştir.

İkinci kolon dolgu maddesi olan ve sentezlediğimiz $ZrO(H_2PO_4)_2$ ile yapılan radyoaktif çalışmalar sonucunda NaI(Tl) dedektörü ile ölçümler alınmıştır. Elde edilen bu ölçümler ve spektrumlar sayesinde Cs^+ kaçağı olmadığı yani $ZrO(H_2PO_4)_2$ 'ın Cs-137/Ba-137m radyoizotop jeneratörü için ideal bir kolon dolgu maddesi olduğu görülmüştür.

Son kolon dolgu maddemiz olan $Cu_2[Fe(CN)_6]$ 'ün elde edilmesinde ayrı ayrı $CuCl_2$ ve $CuSO_4$ kullanılmıştır. $CuCl_2$ 'den yola çıkarak elde edilen $Cu_2[Fe(CN)_6]$ ile yapılan inaktif deneylerimizin sonucunda Cs^+ kaçağı olduğu görülmüş ve bu nedenle radyoaktif deney yapılmasına gerek görülmemiştir. $CuSO_4$ 'tan yola çıkarak $Cu_2[Fe(CN)_6]$ sentezi sırasında ise reaksiyon tam sonuç vermemiştir.

EK 1: W-188/Re-188 Radyoizotop Jeneratörü FUKMOD Sonuçları

***** ISINLANAN MALZEMEDeki İZOTOP KONSANTRASYONLARININ *****

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAK ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADINI SAYISI= 0 ALINDI

GRUP AKISI (NOTRON/CH2.SEC)

0.000000E+14

30h

REAKTORUN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.10000E+06 SEC ALINDI

1

1. ZİNCİRDEKİ

***** ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI *****

BASLANGIÇTA ISINLANAN MALZEMEDeki İZOTOPLARIN

ÇEKİRDEK SAYISI

ÇEKİRDEK

0.93695E+21 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

GİRİŞ DATASI:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	M	İZOM	İZOM	IA	LANDA	LANDA2	LANDA3
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.116E-06	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

IG	N	M	SIGMA	SIGMA3
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK SAYISI	İZOMER ÇEKİRDEK SAYISI	NORMAL ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi	İZOMER ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi
74 186	0.9369118E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.2426037E+17	0.0000000E+00	0.5321544E+04	0.0000000E+00
74 188	0.1044671E+13	0.0000000E+00	0.3280831E-02	0.0000000E+00
75 187	0.1216642E+17	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.4673202E+19	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

Isıl Z. cih

1gr Wolfram 30 saat
isilanda

****- İSİNLANAN MALZEMEDeki İZOTOP KONSANTRASYONLARININ -****

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAM ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADINI SAYISI= 0 ALINDI

GRUP AKISI (NOTRON/CM2.SEC)

1.000000E+14

gok

REAKTORUN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.10000E+06 SEC ALINDI

1. ZİNCİRDEKİ

****- ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI -****

fadil3.sih

1gr W-186 30 saat
işinlendi.

BASLANGIÇTA İSİNLANAN NÜMUNEDeki İZOTOPLARIN

ÇEKİRDEK SAYISI

390E+220.00000E+000.00000E+00
000E+000.00000E+000.00000E+00

GİRİŞ DATASI:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	M	İZOM	İDUR	IA	LANDA	LANDA#	LANDA##
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.116E-06	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

İG	N	M	SİGMA	SİGMA#
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK SAYISI	İZOMER ÇEKİRDEK SAYISI	NORMAL ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ	İZOMER ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ
	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	mCi	mCi
74 186	0.3238844E+22	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.8386655E+17	0.0000000E+00	0.1839624E+05	0.0000000E+00
74 188	0.3611360E+13	0.0000000E+00	0.1134162E-01	0.0000000E+00
75 187	0.4205853E+17	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.1616188E+11	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

18872- ISINLANAN MALIYETDEKİ İZOTOPLARIN KONSANTRASYONLARININ -18872

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAM ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADIMI SAYISI= 4 ALINDI

GRUP AKISI (NOTRON/CH2.BEC)

0.1000000E+14

REAKTORUN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.21600E+05 SEC ALINDI

1. ZİNCİRDEKİ

18872- ÇEKİRDEKLERİN YONSANTRASYONLARI -18872

BASLANDICTA ISINLANAN NUKLEUSDEKİ İZOTOPLARIN

ÇEKİRDEK SAYISI

0.93695E+21 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

SIRISI DATASI:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	M	İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.116E-06	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

İZOMER	N	M	SİGMA	SİGMA
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER
SAYISI	SAYISI	SAYISI	SAYISI	SAYISI
ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK
74 186	0.9369407E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.6682757E+16	0.0000000E+00	0.1465872E+04	0.0000000E+00
74 188	0.319310E+11	0.0000000E+00	0.1431508E-03	0.0000000E+00
75 187	0.4028705E+15	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.4410310E+08	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

REAKTOR ÇALIŞMIYOR

REAKTORUN DURMA ZAMANI T= 0.64800E+05 SEC ALINDI

1. ZİNCİRDEKİ

18872- ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI -18872

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER	İZOMER
SAYISI	SAYISI	SAYISI	SAYISI	SAYISI
ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK	ÇEKİRDEK
74 186	0.9369407E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.3949598E+16	0.0000000E+00	0.8563477E+04	0.0000000E+00
74 188	0.315537E+11	0.0000000E+00	0.1431508E-03	0.0000000E+00
75 187	0.3374059E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

V.I.VVVVVVLTAT

REAKTORUN CALISMA ZAMANI T= 0.21600E+05 SEC ALINDI

1. ZINCIRDEKİ

####- CEKIRDEKLERIN KONSANTRASYONLARI -####

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	IZONER CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK AKTIVITESI mCi	IZONER CEKIRDEK AKTIVITESI mCi
74 186	0.9349334E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.9997159E+16	0.0000000E+00	0.2192890E+04	0.0000000E+00
74 188	0.1580921E+12	0.0000000E+00	0.4964947E-03	0.0000000E+00
75 187	0.4573983E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000E+00
75 188	0.6778781E+09	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000E+00

REAKTOR CALISIYOR

REAKTORUN DURMA ZAMANI T= 0.64800E+05 SEC ALINDI

1. ZINCIRDEKİ

####- CEKIRDEKLERIN KONSANTRASYONLARI -####

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	IZONER CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK AKTIVITESI mCi	IZONER CEKIRDEK AKTIVITESI mCi
74 186	0.9349334E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.5908454E+16	0.0000000E+00	0.1796027E+04	0.0000000E+00
74 188	0.1587062E+12	0.0000000E+00	0.4927702E-03	0.0000000E+00
75 187	0.6662688E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.1863803E+10	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

GRUP AKISI (NUTRON/CM2.SEC)

0.1000000E+14

REAKTORUN CALISMA ZAMANI T= 0.21600E+05 SEC ALINDI

1. ZINCIRDEKİ

####- CEKIRDEKLERIN KONSANTRASYONLARI -####

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	IZOMER CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK AKTIVITESI mCi	IZOMER CEKIRDEK AKTIVITESI mCi
74 136	0.9369261E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.1164098E+17	0.0000000E+00	0.2933459E+04	0.0000000E+00
74 188	0.2903023E+12	0.0000000E+00	0.7117062E-03	0.0000000E+00
75 187	0.1021562E+17	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.2406982E+10	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

REAKTOR CALISMIYOR

REAKTORUN DURMA ZAMANI T= 0.64800E+05 SEC ALINDI

1

1. ZINCIRDEKI

****- CEKIRDEKLERIN KONSANTRASYONLARI -****

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	IZOMER CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK AKTIVITESI mCi	IZOMER CEKIRDEK AKTIVITESI mCi
74 136	0.9369261E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.1877962E+16	0.0000000E+00	0.1509129E+04	0.0000000E+00
74 188	0.2681246E+12	0.0000000E+00	0.9048670E-03	0.0000000E+00
75 187	0.1497662E+17	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.4504680E+10	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

GRUP AKISI (NUTRON/CM2.SEC)

0.1000000E+14

REAKTORUN CALISMA ZAMANI T= 0.21600E+05 SEC ALINDI

1

1. ZINCIRDEKI

****- CEKIRDEKLERIN KONSANTRASYONLARI -****

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	IZOMER CEKIRDEK SAYISI CEKIRDEK	NORMAL CEKIRDEK AKTIVITESI mCi	IZOMER CEKIRDEK AKTIVITESI mCi
74 186	0.9369188E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.1245618E+17	0.0000000E+00	0.2732200E+04	0.0000000E+00
74 188	0.4346476E+12	0.0000000E+00	0.1365028E-02	0.0000000E+00
75 187	0.1668576E+17	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.5474181E+10	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

Jadil 5. aile

***** İSTİMLANAN MALZEMEDeki İZOTOP KONSANTRASYONLARININ *****

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAM ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADIMI SAYISI= 0 ALINDI

GRUP AKISI (NOTRUM/CM2.SEC)

.1000000E+14

REAKTÖRÜN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.86400E+05 SEC ALINDI

1. ZİNCİRDEKİ

***** ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI *****

BASLANGIÇTA İSTİMLANAN NUMUNEDeki İZOTOPLARIN ÇEKİRDEK

ÇEKİRDEK SAYISI

3695E+210.00000E+000.00000E+00
0000E+000.00000E+000.00000E+00

GİRİŞ VERİLERİ:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	M	İZOM	İZOMUR	IA	LAMDA	LAMDA1	LAMDA2
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.116E-06	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

İZOM	N	M	SİGMA	SİGMA1
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	İZOMER ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi	İZOMER ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi
74 186	0.9367187E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.2074622E+17	0.0000000E+00	0.4594582E+04	0.0000000E+00
74 188	0.7043617E+12	0.0000000E+00	0.2212076E-02	0.0000000E+00
75 187	0.8195447E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.7490533E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

****- ISIMLANAN MALZEMEDeki İZOTOP KONSANTRASYONLARININ -****

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAN ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADINI SAYISI= 0 ALINDI

GRUP AKISI (NOTRON/CMZ.SEC)

0.1000000E+14

REAKTORUN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.36000E+05 SEC ALINDI

1. ZİNCİRDEKİ

****- ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI -****

BASLANGIÇTA İSİMLANAN NÜKLEONDEKİ İZOTOPLARIN

ÇEKİRDEK SAYISI

ÇEKİRDEK

0.93695E+210.00000E+000.00000E+00

0.00000E+000.00000E+000.00000E+00

SİRİS DATASI:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	N	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM	İZOM
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.116E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

IS	N	N	SİGMA	SİGMA
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	İZOMER ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi	İZOMER ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi
74 186	0.9369359E+21	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.1052957E+17	0.0000000E+00	0.2309676E+04	0.0000000E+00
74 188	0.1389266E+12	0.0000000E+00	0.4363045E-03	0.0000000E+00
75 187	0.1613055E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.1984153E+09	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

****- ISINLANAN MALZEMEDeki İZOTOP KONSANTRASYONLARININ -****

ANALİTİK HESABI

BU HESAPTA:

TOPLAM ZİNCİR SAYISI= 1

GRUP SAYISI= 1 ZAMAN

ADIMI SAYISI= 0 ALINDI

GRUP AKISI (NUTRON/CM2.SEC)

0.1000000E+14

REAKTORUN ÇALIŞMA ZAMANI T= 0.34000E+05 SEC ALINDI

1

1. ZİNCİRDEKİ

****- ÇEKİRDEKLERİN KONSANTRASYONLARI -****

BASLANGIÇTA İSİNLANAN MÜMÜNEDeki İZOTOPLARIN

ÇEKİRDEK SAYISI

ÇEKİRDEK

0.32390E+220.00000E+000.00000E+00

0.00000E+000.00000E+000.00000E+00

GİRİŞ DATAI:

ÇEKİRDEK DURUMU

N	N	İZOM	İZOM	IA	LAMDA	LAMDA%	LAMDA**
1	1	0	4	186	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	2	0	4	187	0.812E-05	0.000E+00	0.000E+00
1	3	0	4	188	0.114E-06	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0	4	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2	0	4	187	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	3	0	4	188	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ÇEKİRDEK DURUMU

IG	N	M	SİGMA	SİGMA%
1	1	1	0.360E+02	0.000E+00
1	1	2	0.700E+02	0.000E+00
1	1	3	0.000E+00	0.000E+00
1	2	1	0.000E+00	0.000E+00
1	2	2	0.000E+00	0.000E+00
1	2	3	0.000E+00	0.000E+00

HESAPLANAN KONSANTRASYONLAR:

ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	İZOMER ÇEKİRDEK SAYISI ÇEKİRDEK	NORMAL ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi	İZOMER ÇEKİRDEK AKTİVİTESİ mCi
74 186	0.3239928E+22	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
74 187	0.3440007E+17	0.0000000E+00	0.7984405E+04	0.0000000E+00
74 188	0.4802603E+12	0.0000000E+00	0.1508277E-02	0.0000000E+00
75 187	0.5376228E+16	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
75 188	0.6859091E+09	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00

1gr W-186

10 saat ısınlatıyor.

tedil 7. a.k

KAYNAKLAR

Akgün, A.F., Yıldız, H., Ergün, A., Bostan, N., Bodur, N., Saygı, N., Aydın, N. ve Büyükkaya, F., (2003), "Radyofarmasötiklerin Kalite Kontrolü", Stajyer Ders Notları, ÇNAEM, İstanbul.

Amphlett C.B., McDonald, L.A. ve Redman, M.J., (1958), Synthetic Inorganic Ion-Exchange Materials-1 Zirconium Phosphate, J. Inorg. Nucl. Chem. Vol.6, Pergamon Pres Ltd, London.

Babich, J.W., Radionuclide Generators.

Baykurt, F., (1970), Analitik Kimya Praktikum, İÜ No:1563, Kimya Fakültesi No:6, İstanbul.

Chase, G.D. ve Rabinowitz, J.K., (1967), Principles of Radioisotope Methodology, Burgess Publishing Company, Minneapolis.

Colombetti, L.G., (1977), Quality Control in Nuclear Medicine, Radiopharmaceuticals, Instrumentation, and In Vitro Assays, The C.V. Mosby Company.

Colombetti, L.G., Harbert, J.ve Rocha, A.F.G., (1984), Textbook of Nuclear Medicine Vol.1: Basics Science, Lea&Febiger Publishing, Philadelphia.

ÇNAEM, (1995), Tc-99m Jeneratörü Raporu, İstanbul.

Dölen, E., (1988), Analitik Kimya Volumetrik Yöntemler, Marmara Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Elliot, A.T., (1990), Textbook of Radiopharmacy: Theory and Practice, Gordon&Breach Science Publications, Amsterdam.

Evans, R.D., (1955), Atomic Nucleus, McGraw-Hill Book Company, New York.

Firestone, R.B., (1996), Table of Isotopes CD-ROM, John Wiley&Sons, New York.

Gryntakis, E., Cullen, D.E. ve Mundy, G., "Thermal Neutron Cross-Sections and Infinite Dilution Resonance Integrals", IAEA, Vienna.

Knapp, Jr.F.F., Brihaye, C. ve Callahan, A.P., Generators.

Lieser, K.H., (1976), "Chemische Gesichtspunkte für die Entwicklung von Radionuklidgeneratoren", Radiochimica Acta 23,78, Akademische Verlagsgesellschaft, Wiesbaden.

Mirzadeh ve Knapp, R.R., (1998), IAEA Report, Vienna.

Pinajian, J.J., (1967), "A Cesium-137/Barium-137m Isotope Jenerator", Journal of Chemical Education, Vol.44.

Radionucleides Ademi-vie Courte Par Generateur, Utilisables En Medecine Nucleaire, (1978), Bulletin D'informations Scientifiques Et Techniques Du Commissariat A L'energie Atomique Revue Bimestrielle.

Rhodes, B.A. ve Craft, B.Y., (1978), Basics of Radiopharmacy, The C.V. Mosby Company, Saint Louis.

Richards, P., (1966), "Nuclide Generators In Radioactive Pharmaceuticals", Symposium No.6, Conf 651111, Oak Ridge.

Özden, N., (1993), Nükleer Çağın İlk 40 Yılı Cilt 2, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü Genel Yayınları No.17, İstanbul.

Sampson, C.B.,(1994), Textbook of Radiopharmacy, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.

Soete, D.D., Gijbels, R. ve Hoste, J., (1972), Neutron Activation Analysis, Wiley-Intersciences, New York.

Tsoufanidis, N., (1983), Measurement and Detection of Radiation, McGraw-Hill Book Company, New York.

Üstün, G., Turgut, M.H. ve Adalıoğlu, U., (1989), FUKMOD: Radyoaktif İzotop Zincirleri Hesabı İçin Çok Amaçlı Bir Kod, Nükleer Mühendislik Bölümü, ÇNAEM. A.R-272, İstanbul.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.bnl.gov/bnlweb/history/Tc-99m.asp

[2] <http://chemistry.binghamton.edu/ilc/labs/radiochem/sims/RadMedApp.html>

[3] www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/CHROMO/be_types.htm

[4] www.cyberlipid.org/fraction/frac0004.htm

[5] www.spectrumtechniques.com/isotope%20generator.htm

[6] <http://faculty.kutztown.edu/vitz/lmsport/LabManual/HalflifeWeb/HALFLWIN.htm>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.09.1980
Doğum yeri	İstanbul
Lise	1991-1998 Kırklareli Anadolu Lisesi
Lisans	1998-2003 Yıldız Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak. Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü

