

DÜŞÜK ENERJİLİ (< 50 MeV) SIKLOTRON TİPİ BİR HIZLANDIRICI İLE ⁵⁵Co, ⁵⁷Co, ⁶⁰Cu, ⁶¹Cu, ⁶⁴Cu ve ⁶⁷Cu RADYOİZOTOPLARININ ÜRETİLEBİLİRLİĞİ VE POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI

M. Vural , Ş. Turhan, M. Karadağ*
İ. Türk Çakır, B. Demircioğlu, A. Parmaksız, H. Yücel

Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ANAEM)
06100 Beşevler-ANKARA

*Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Bölümü
06500 Teknikokullar- ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada, ANAEM’de kurulması düşünülen siklotron tipi bir hızlandırıcı (Ep= 15 MeV-30 MeV, Ip= 350 µA; Ed= 9 MeV-15 MeV, Id= 30 µA) ile ⁵⁵Co (t_{1/2}= 17.6 h, I_{β+}= % 70), ⁶⁰Cu (t_{1/2}= 23,7 min, I_{β+}= % 93), ⁶¹Cu (t_{1/2}= 3,32 h, I_{β+}= % 60), ⁶⁴Cu (t_{1/2}=12,7 h, I_{β+}= % 19), ⁶⁷Cu (t_{1/2}=61,9 h, I_{β+}= % 100) ve ⁵⁷Co (t_{1/2}=271,3 d) radyoizotopların üretim aktiviteleri ve verimleri farklı tepkimeler göz önüne alınarak hesaplanmış ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Son yıllarda ülkemizde teşhis amacıyla nükleer tıpta kullanılmakta olan PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) görüntüleme tekniği yaygınlaşmaktadır. Bu görüntüleme tekniği özellikle tekrarlanan kanser vakalarının erken teşhisi başta olmak üzere beyin ve kalp ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Günümüzde özellikle PET uygulamaları için ¹⁸F, ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O pozitron yayan radyoizotopları üretilmektedir. Ancak, son zamanlarda ise ⁵⁵Co, ⁶⁰Cu, ⁶¹Cu, ⁶⁴Cu ve ⁶⁷Cu gibi diğer kısa yarı ömürlü radyoizotopların kullanılmasına ilişkin çalışmalar da artarak devam etmektedir. Bu izotoplardan ⁵⁵Co biliomisinin etiketlenmesinde ve ayrıca PET tekniği ile kalp ve beyin görüntülenmesinde; ⁶⁰Cu ve ⁶¹Cu radyoizotopları tümörün yapısında bulunan hipoksik dokular ile beyin ve kalbin görüntülenmesinin yanı sıra protein ve peptitlerin etiketlenmesinde; ⁶⁴Cu beyin ve kalp perfüzyon çalışmalarında PET tekniği ile görüntüleme ve ⁶⁷Cu’nin ise endoterapi amaçlı kullanılmasına ilişkin çalışmalar devam etmektedir. [1-4]. PET uygulamalarında görüntüleme amaçlı kullanılan bu izotopların hastaya verilme dozları yaklaşık olarak 300-1000 MBq arasında değişmektedir

Bunların dışında ⁵⁷Co ise gama spektrometreleri ve SPECT (tek foton emisyon tomografisi) sistemleri için kalibrasyon kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılan bir radyoizotopdur.

Bu çalışmada, ANAEM’de kurulması tasarlanan siklotron tipi bir hızlandırıcı ile söz konusu izotopların üretilmesinde kullanılan farklı tepkimelere ilişkin parametreler (E_{th}, E_c, σ, d, vb.) hesaplanmış ve uygun çekirdek tepkimesinin seçiminde hedef malzemenin bolluğu, ürün çekirdeğin yarılanma süresi, yayınlanan gama enerjisi ve üretim kapasitesi göz önünde bulundurulmuştur.

2. RADYOİZOTOPLARIN ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN ÇEKİRDEK TEPKİMELERİ VE İLGİLİ PARAMETRELER.

Tıp ve endüstride kullanılan radyoizotoplar reaktör veya hızlandırıcılar kullanılarak üretilmektedir. Ticari anlamda SPECT ve PET radyoizotoplarının üretimi için hızlandırıcı olarak siklotronlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hem PET hem de SPECT radyoizotopları katı, sıvı veya gaz formundaki hedeflerin siklotrondan hızlandırılan parçacık veya iyonlarla (p, d, ³H, ³He, ⁴He) bombardıman edilmesi sonucunda elde edilmektedir.

X(x,y)Y ile temsil edilen bir çekirdek tepkimesine ilişkin tepkime enerjisi MeV cinsinden

$$Q=931,5(m_X+m_x-m_Y-m_y) \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada m_X, m_x hedef ve gelen parçacığın, m_Y ve m_y oluşan ürün ve çekirdekten salınan parçacığın kütesidir. Isı

alan tepkime ($Q < 0$) durumunda çekirdek tepkimesinin meydana gelebilmesi için gelen parçacığın enerjisinin (2.2) denklemi ile verilen enerjiye (E_{th}) eşit veya büyük olması gerekir.

$$E_{th} = \left| -Q \left(1 + \frac{m_x}{M_x} \right) \right| \quad (2.2)$$

Isı veren tepkime ($Q > 0$) durumunda $E_{th} = 0$ 'dır. Ancak her iki durum içinde gelen parçacık enerjisinin Coulomb engelinden (E_c) büyük olması gerekir ve Coulomb enerjisi ,

$$E_c = 1.44 \frac{zZ}{R_a + R_x} \text{ (MeV)} \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada z ve Z gelen iyon ile hedef çekirdeğin atom numaraları, R_a , R_x ise iyon ve çekirdek yarıçaplarını ifade etmektedir. Çekirdek tepkimesi gelen parçacık enerjisinin Coulomb engelinden daha küçük olması durumunda tünelleme olayı ile gerçekleşir, ancak bu durumda tesir kesiti oldukça düşüktür.

^{55}Co , ^{60}Cu , ^{61}Cu , ^{64}Cu , ^{67}Cu ve ^{57}Co radyoizotopları proton ve döteron ile oluşturulan tepkimeler sonucunda elde edilirler. Bu izotopların üretimi ile ilgili mümkün tepkimelere ilişkin parametrelerden bazıları Çizelge 1'de verilmiştir.

3. RADYOİZOTOPLARI ÜRETİLEBİLİRLİĞİ İLGİLİ PARAMETRELER

Radyoizotop üretimi için hedef üzerine gönderilen parçacıkların bir çoğu çekirdek tepkimesi yapmaz. Bu yüklü parçacıklar veya iyonlar hedef atomun elektronlarını uyararak veya iyonlaştırarak enerjisini kaybederler. Parçacıkların bu şekilde enerji kaybetmesi, malzemenin durdurma gücü olarak tanımlanır ve

$$S(E) = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir. Burada ρ malzemenin yoğunluğu, dE/dx ise özgül enerji kaybıdır.

Parçacıkların hedef malzeme içinde aldığı yol,

$$d = \frac{1}{\rho} \int_{E_1}^{E_2} \frac{dE}{s(E)} \quad (2.5)$$

formülü ile verilir.

Bu çalışmada ilgilenilen enerjideki parçacıkların Fe, Ni, Zn hedeflerinin durdurma gücü ve bu parçacıkların hedef içindeki aldıkları mesafe SRIM (The Stopping and Range of Ions in

Matter) programı (6) kullanarak hesaplanmış ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Kalın ve ince hedef d kalınlığına göre belirlenir ve kalın hedef durumunda hedef kalınlığı d 'den büyük, ince hedef durumunda ise hedef kalınlığı d 'den küçüktür. Bir çekirdek tepkimesinin meydana gelme hızı

$$R = n \bar{\sigma} \phi = m \frac{N}{A} h \bar{\sigma} \frac{I_p}{eF} \quad (2.6)$$

eşitliği ile hesaplandı [7].

Burada

I_p : Gelen proton veya döteron akımı (μA)

m : Işınlanan hedef örneğin kütleisidir (g) ve

$m = d S \rho$ ile hesaplanır.

N : Avagadro sayısı ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

A : Hedef elementin atom kütlesi (g mol^{-1})

h : Hedef çekirdeğin izotopik bolluğu (% 100)

e : Birim elektrik yükü ($1.602 \cdot 10^{-19}$)

F : Hedef yüzeyine eşit kabul edilen gelen

parçacığın spot yüzeyi (cm^2)'dir. Buradaki

hedefin yüzey alanı olan S değeri 30 MeVp

enerjili siklotronunda proton demeti (6 mm

Yükseklik x 20 mm Genişlik), kesiti elips

şeklinde ($F = \pi YG/4$) yaklaşık 1 cm^2 'lik

yüzeyi ışınlar.

Işınlama süresi t_i ve bekleme süresi t_w olmak üzere elde edilen aktivite

$$A(t_i, t_w) = R \left(1 - e^{-\lambda t_i} \right) e^{-\lambda t_w} \quad (2.7)$$

olacaktır. Burada λ ($\ln 2 / T_{1/2}$): ürün çekirdeğin bozunma sabitidir. Uzun yarı ömürlü izotoplar için bekleme süresi düzeltilmesi yapılmayabilir.

Üretim verimi ise,

$$Y = A(t_i, t_w) / t_i \quad (2.8)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır [7]. Bu çalışmada PET ve ^{57}Co radyoizotoplarının aktiviteleri ve üretim verimleri Çizelge 1 ve Çizelge 2'deki veriler kullanarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

Radyoizotop üretim seçiminde, hedef malzemenin bolluğu, ürün çekirdeğin yarılanma süresi, yayınlanan radyasyonun enerjisi ve üretim maliyeti önemli parametrelerdendir.

4. SONUÇ

15-30 MeV enerji aralığındaki proton ve 9-15 MeV enerji aralığındaki döteronlar ile ışınlanan farklı hedef malzemeler ile üretilebilecek ^{57}Co

aktiviteleri ve üretim verimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Verimin en yüksek olduğu tepkime $^{58}\text{Ni} (p,2p)^{57}\text{Co}$ olmakla birlikte, $^{56}\text{Fe} (d,n)^{57}\text{Co}$ tepkimesi ^{57}Co üretiminde yaygın olarak kullanılan tepkimedir. Yaygın olarak kullanılan tepkimedeki en önemli sebep ^{56}Fe izotopunun bolluğunun % 91.7 olmasıdır. Ülkemizde nükleer tıp tesislerinde kurulu bulunan gama kameralar, araştırma laboratuvarlarında bulunan gama spektrometreleri ve çevre ülkelerde kurulu bulunan nükleer tıp tesisleri ve bunlarında sayılarının her geçen gün arttığı göz önüne alındığında döteron parçacığının bu tepkime için kullanılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

^{55}Co izotopu gibi yarı ömrü kısa olan izotopların üretim verimini etkileyen önemli bir parametre de ışınlama süresinden sonra geçen süredir. Örneğin PET izotopları için kalite kontrol işlemleri ve ışınlanan laboratuvardan başka bir yere sevk edilmesi sırasında geçen bekleme süresi üretim verimini etkilemektedir. 15-30 MeV enerji aralığındaki proton ve 9-15 MeV enerji aralığındaki döteronlar ile ışınlanan farklı hedef malzemeler ile üretilebilecek ^{55}Co aktiviteleri ve üretim verimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Çizelge 3'de verilen reaksiyonlar içinde verimi en yüksek olanı $^{56}\text{Fe} (p,2n)^{55}\text{Co}$ olmakla birlikte, $^{57}\text{Fe} (p,3n)^{55}\text{Co}$ dışındaki tepkimelerde ^{55}Co üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. ^{55}Co 'in yarı ömrü 23.7 dak olduğu için hızlandırıcılarda üretilen bu izotopun PET uygulamaları kullanılabilmesi için hızlandırıcı ve PET cihazının aynı tesis içinde bulunması gerekmektedir.

^{60}Cu radyoizotopunun üretim aktiviteleri ve üretim verimleri Çizelge 3'de, ^{61}Cu radyoizotopunun ise Çizelge 3'de verilmiştir. Burada dikkati çeken önemli hususlardan biri ışınlama süresi arttıkça üretim verimlerinin çok hızlı bir şekilde düşmesidir. Özellikle bu düşüşün ^{60}Cu için daha belirgin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise ^{60}Cu 'ın yarılanma süresinin ^{61}Cu 'in yarılanma süresine göre çok daha kısa olmasıdır.

Çizelge 3'de ^{64}Cu radyoizotopu için üretim aktivite ve verim değerleri verilmiştir. Burada diğerlerinden farklı olan reaksiyon doğal çinkonun döteron ile ışınlaması sonucunda $^{nat}\text{Zn}(d,\alpha)^{64}\text{Cu}$ tepkimesi ile ^{64}Cu radyoizotopunun elde edilmesidir. Qaim ve ark tarafından yapılan çalışmada bu tepkimeye ait deneysel verim 1.73 MBq/ μAh olarak belirlenmiştir (2). Bu çalışmadaki hesaplama sonucunda ise ışınlama süresine göre değişmekle birlikte 4 saatlik bir ışınlama süresi

için 3.16 MBq/ μAh olarak hesaplanmıştır. Bu tepkimenin diğer ^{64}Cu tepkimelerinden farkı, hedef malzeme olarak kullanılan doğal çinkonun ^{66}Zn 'ca veya ^{64}Ni 'ce zenginleştirilmiş hedef malzemelere göre ucuz olmasıdır.

^{67}Cu üretimi için kullanılan diğer tepkimelere bakıldığında, bunlar için gerekli olan ya yüksek akıda nötron olduğu yada yüksek enerjide ($E_p > 50$) proton demetleri olduğudur. Ancak hedef malzeme olarak ^{70}Zn 'in kullanıldığı $^{70}\text{Zn} (p, \alpha)^{67}\text{Cu}$ tepkimesi ile orta-ölçekli ($E_p < 30$) hızlandırıcılarda ^{67}Cu üretiminin gerçekleştirilebilmesidir.

Çizelge 1. Tepkimelere ilişkin bazı parametreler

Tepkime	Yarı ömür	Hedef çekirdeğin bolluğu (%)	E_{th} / E_c (MeV)	Ürün çekirdeğin E_y (MeV)	I(%)
$^{56}\text{Fe} (p,2n)^{55}\text{Co}$	17,2 saat	91,7	15,7 / 5,6	477,2	20,2
$^{58}\text{Ni} (p, \alpha) ^{55}\text{Co}$		68,3	1,4 / 6,0	931,3	75,0
$^{54}\text{Fe} (d,n) ^{55}\text{Co}$		5,8	0 / 5,0	1316,4	7,1
$^{57}\text{Fe} (p,3n)^{55}\text{Co}$		2,2	23,5 / 5,6	1408,4	16,9
$^{62}\text{Ni}(p,3n)^{60}\text{Cu}$	23,7 dak.	3,69	25,7 / 5,9	467,7	3,5
$^{60}\text{Ni}(p,n)^{60}\text{Cu}$		26,1	7,0 / 5,9	826,0	21,7
$^{61}\text{Ni}(p,2n)^{60}\text{Cu}$		1,13	15,0 / 5,9	1791,6	45,4
$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$	3.32 saat	1,1	3,1 / 5,9	282,9	12,2
$^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$		3,6	13,8 / 5,9	656,0	10,8
$^{60}\text{Ni}(d,n)^{61}\text{Cu}$		26,1	0 / 5,9	1185,2	3,8
$^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$	12.7 saat	0,9	2,5 / 5,8	1345,8	0,5
$^{66}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$		27,9	0 / 5,9	1345,8	0,5
$^{nat}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$		100,0	0 / 5,9	1345,8	0,5
$^{67}\text{Zn}(p, \alpha)^{67}\text{Cu}$	61.9 saat	4,1	0 / 5,9	93,0	16,1
				184,0	48,7
$^{60}\text{Ni}(p, \alpha)^{57}\text{Co}$	271.3 gün	26,1	0,3 / 5,9	122,0	85,6
$^{56}\text{Fe} (d,n)^{57}\text{Co}$		91,7	0 / 5,6	136,4	10,7
$^{57}\text{Fe} (p,n)^{57}\text{Co}$		2,2	1,6 / 5,6	122,0	85,6
$^{58}\text{Fe} (p,2n)^{57}\text{Co}$		0,3	11,9 / 5,5	136,4	10,7
$^{58}\text{Ni} (p,2p)^{57}\text{Co}$		68,3	15,5 / 6,0		

Çizelge 2 . Reaksiyonlara ilişkin bazı aktivite hesap parametreleri

Tepkime	Enerji aralığı (MeV)	Ortalama tesir kesiti (mb)	Ortalama erişim mesafesi (cm)	Etkileşilen kütle miktarı (g)
$^{56}\text{Fe} (p,2n)^{55}\text{Co}$	15-30	44,7	0,1128	0,888
$^{58}\text{Ni} (p,\alpha) ^{55}\text{Co}$	15,8-29,5	28,2	0,0928	0,827
$^{54}\text{Fe} (d,n) ^{55}\text{Co}$	9,4-15	100,3	0,0217	0,172
$^{57}\text{Fe} (p,3n)^{55}\text{Co}$	25,7-29,5	8,6	0,1521	1,202
$^{62}\text{Ni}(p,3n)^{60}\text{Cu}$	27,6-29,5	16,6	0,1511	1,345
$^{60}\text{Ni}(p,n)^{60}\text{Cu}$	15,8-30	99,8	0,0991	0,882
$^{61}\text{Ni}(p,2n)^{60}\text{Cu}$	17,7-18,6	46,3	0,0658	0,586
$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$	15,6-18,1	133,0	0,0558	0,497
$^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$	15-30	264,5	0,1021	0,914
$^{60}\text{Ni}(d,n)^{61}\text{Cu}$	9,30-12	366,7	0,0557	0,497
$^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$	15,8-29,5	158,0	0,1069	0,953
$^{66}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$	10-13,8	20,2	0,0261	0,186
$^{nat}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$	10,6-13	23,6	0,0259	0,185
$^{67}\text{Zn}(p, \alpha)^{67}\text{Cu}$	15,8-29,5	7,5	0,1361	0,972
$^{60}\text{Ni}(p, \alpha)^{57}\text{Co}$	15-30	44,8	0,0991	0,882
$^{56}\text{Fe} (d,n)^{57}\text{Co}$	9-15	178,5	0,0232	0,182
$^{57}\text{Fe} (p,n)^{57}\text{Co}$	15,8-30	65,5	0,1113	0,876
$^{58}\text{Fe} (p,2n)^{57}\text{Co}$	15-30	418,7	0,1134	0,893
$^{58}\text{Ni} (p,2p)^{57}\text{Co}$	15-30	500,8	0,0959	0,855

Çizelge 3. PET radyoizotopları ve ⁵⁷Co tepkimesine ait verim ve aktiviteler

Tepkime	t_i / t_w^* (saat)	Verim (MBq/ μ Ah)	A (MBq/hedef)			
			$I_p=1 \mu$ A	$I_p=100 \mu$ A	$I_p=250 \mu$ A	$I_p=350 \mu$ A
⁵⁸ Ni (p,2p) ⁵⁷ Co	1 / 0	2,971	2,970	297,200	742	1040
	12 / 0	2,962	35,600	3560	8890	12500
	24 / 0	2,961	71,100	7110	17840	24900
	480 / 0	2,891	1390	13900	347000	486000
⁶⁰ Ni (p, α) ⁵⁷ Co	1 / 0	0,269	0,269	26,9	67,3	94,3
	12 / 0	0,269	3,230	323	808	1130
	24 / 0	0,269	6,460	646	1610	2260
	480 / 0	0,263	126	12600	31500	44100
⁵⁶ Fe (d,n) ⁵⁷ Co	1 / 0	0,234	0,234	23,400	58,500	81,900
	12 / 0	0,234	2,810	281	702	983
	24 / 0	0,234	5,610	561	1400	1960
	480 / 0	0,228	110	11000	27400	38300
⁵⁷ Fe (p,n) ⁵⁷ Co	1 / 0	0,412	0,412	41,200	103	144
	12 / 0	0,411	4,940	494	1230	1730
	24 / 0	0,411	9,870	987	2470	3450
	480 / 0	0,401	193	19300	48200	67400
⁵⁸ Fe (p,2n) ⁵⁷ Co	1 / 0	2,681	2,68	268	670	938
	12 / 0	2,682	32,200	3220	8040	11300
	24 / 0	2,681	64,300	6430	16100	22500
	480 / 0	2,611	1250	125000	314000	439000
⁵⁶ Fe (p,2n) ⁵⁵ Co	1 / 3	92,311	92,300	9230	23100	32300
	4 / 3	87,121	348	34800	87100	122000
	8 / 3	80,811	646	64600	162000	226000
	12 / 3	75,001	900	90000	225000	315000
⁵⁸ Ni (p, α) ⁵⁵ Co	1 / 3	52,801	52,800	5280	13200	18500
	4 / 3	49,812	199	19900	49800	69700
	8 / 3	46,201	369	36900	92300	129000
	12 / 3	42,901	515	51500	129000	180000
⁵⁴ Fe (d,n) ⁵⁵ Co	1 / 3	41,602	41,600	4160	10400	14600
	4 / 3	39,210	157	15700	39200	54900
	8 / 3	36,401	291	29100	72800	102000
	12 / 3	33,801	406	40600	101000	142000
⁵⁷ Fe (p,3n) ⁵⁵ Co	1 / 3	23,801	23,800	2380	5950	8330
	4 / 3	22,502	89,800	8980	22500	31400
	8 / 3	20,802	167	16700	41700	58300
	12 / 3	19,312	232	23200	58000	81300
⁶² Ni (p,3n) ⁶⁰ Cu	1 / 1	206	206	20600	51400	7200
	2 / 1	121	241	24100	60300	84500
	4 / 1	62,100	248	24800	62000	86500
	8 / 1	31,100	249	24900	62100	87000
⁶⁰ Ni (p,n) ⁶⁰ Cu	1 / 1	791	791	79100	198000	277000
	2 / 1	464	928	92800	232000	325000
	4 / 1	239	955	95500	238000	333000
	8 / 1	120	956	95600	239000	334000
⁶¹ Ni (p,2n) ⁶⁰ Cu	1 / 1	241	241	24100	60100	84200
	2 / 1	141	282	28200	70500	98700
	4 / 1	72,600	291	29100	72600	102000
	8 / 1	36,400	292	29200	72700	103000

Çizelge 3 'ün devamı

$^{61}\text{Ni} (p,n)^{61}\text{Cu}$	3 / 2	421	1260	126000	316000	442000
	6 / 2	323	1940	194000	484000	678000
	9 / 2	255	2300	230000	575000	804000
	12 / 2	208	2490	249000	623000	872000
$^{60}\text{Ni} (d,n)^{61}\text{Cu}$	3 / 2	1180	3530	353000	883000	1240000
	6 / 2	904	5420	542000	1360000	1900000
	9 / 2	715	6430	643000	1610000	2250000
	12 / 2	581	6970	697000	1740000	2440000
$^{62}\text{Ni} (p,2n)^{61}\text{Cu}$	3 / 2	1510	4530	453000	1130000	1590000
	6 / 2	1160	6960	696000	1740000	2440000
	9 / 2	917	8250	825000	2060000	2890000
	12 / 2	745	8950	895000	2240000	3130000
$^{64}\text{Ni} (p,n)^{64}\text{Cu}$	4 / 24	118	471	47100	118000	165000
	8 / 24	106	850	85000	212000	297000
	12 / 24	96,200	1150	115000	288000	404000
	24 / 24	73,100	1750	175000	438000	614000
$^{\text{nat}}\text{Zn} (d, \alpha)^{64}\text{Cu}$	4 / 24	3,160	19	1900	3260	4960
	8 / 24	3,000	24	2400	6010	8410
	12 / 24	2,720	32,600	3260	8160	11400
	24 / 24	2,070	49,600	4960	12400	17400
$^{66}\text{Zn}(d, \alpha)^{64}\text{Cu}$	4 / 24	2,870	11,500	1150	2870	4020
	8 / 24	2,590	20,700	2070	5180	7260
	12 / 24	2,350	28,200	2820	7040	9860
	24 / 24	1,780	42,800	4280	10700	15000
$^{70}\text{Zn} (p, \alpha)^{67}\text{Cu}$	6 / 1	3,820	22,900	2290	5730	8020
	12 / 5	3,560	42,700	4270	10700	1500
	24 / 10	3,190	76,700	7670	19200	26800
	48 / 15	2,710	130	13000	32600	45600

*Diğer izotoplara göre daha uzun yarı ömürlü olan ^{57}Co ($T_{1/2}=271.3$ gün) izotoplar için t_w bekleme süresi alınmamıştır. Geriye kalan izotoplar için ise bekleme süreleri radyoizotopların yarılanma süreleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] S. Spellerberg, P.Reimer, G. Blessing, H.H. Coenen ve S. M. Qaim, "Production of ^{55}Co and ^{57}Co via Proton Induced Reactions on Highly Enriched ^{58}Ni " Appl Radiat Isot. 49 (12) 1519-1522
- [2] Deborah W. Mccarthy, Laura A. Bass, P. Duffy Cutler, Ruth E. Shefer, Robert E Klinkowstein, Pilar Herrero, Lason S. Lewis. Cathy S. Cutler, Carolyn J. Anderson and Micheal J. Welch "High Purity production and Potential Application of Copper-60 and Copper-61" Nuclear Medicine & Biology 26, 351-358.
- [3] K. Hilgers, T. Stoll, Y. Skakun, H.H. Coenen, S.M. Qaim "Cross-section Measurements of the Nuclear Reactions $^{\text{nat}}\text{Zn} (d,x)^{64}\text{Cu}$, $^{66}\text{Zn} (d,\alpha)^{64}\text{Cu}$ and $^{68}\text{Zn} (p,n)^{64}\text{Cu}$ for Production of ^{64}Cu and Technical Developments for Small-scale Production of ^{67}Cu via the $^{70}\text{Zn} (p,\alpha)^{67}\text{Cu}$ process." Appl. Radi. And Isot. 59 (2003) 343-351
- [4] Mauro L. Bonardi, Claudio Birattari, Flavia Groppi, Hae Song Mainardi Copper -64 Production Studies with Natural Zinc Targets at Deuteron Energy from 141 down to 31 MeV
- [5] www-nds.iaea.or.at/exfor
- [6] www.srim.org
- [7] Mustafa Karadğ, Haluk Yücel, Şeref Turhan, M.Atif Çetiner, Atilla Özmen " Brakiterapide Kullanılan Palladyum-103 Radyoizotopunun 30 MeV_p-15MeV_d Enerjili Bir Siklotrona Üretilirliği" I. UPHUK ANKARA