



ANKARA ÜNİVERSİTESİ NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

101523-NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ LABORATUVARI FÖYÜ

Prof. Dr. Haluk YÜCEL

INSTRUMENTAL NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ (INAA) İÇİN IŞINLAMA SİSTEMİ TANITIMI

Genel Bilgi

Nötron aktivasyon analizi (NAA), bir numunedeki çok sayıda elementin aynı anda tanımlanması için kullanılan güçlü bir nükleer analitik tekniktir. Bu tekniğin uygulaması oldukça basittir. Numune, genelde tepkime tesir kesitleri daha yüksek olan yavaş (düşük enerjili) nötronlarla ışınlanarak, radyoaktif hale getirilir. Daha sonra, radyoaktif olan numunedeki nüklitlerin yayınladıkları gama ışınları veya β^- , β^+ parçacıkları ölçülerek numunedeki element bileşimleri ve bunların derişimleri tanımlanır. Endüstriyel ölçekte deneysel ölçüme dayalı NAA (Instrumental NAA) reaktörde üretilen 10^{12} - 10^{13} nötron/cm²/s akı yoğunluğundaki (flux density) veya hızlandırıcılarda üretilen 10^{10} nötron/cm²/s akı yoğunluğundaki hızlı (yüksek enerjili) nötronları kullanılarak yapılır. NAA hassasiyeti, gravimetrik, kalorimetrik, spektrografik ve kütle spektrometrisi gibi diğer enstrümental analiz yöntemlerinin hassasiyet dereceleri ile karşılaştırıldığında 10 kat daha iyidir (Ortec Application Note, AN34, p.101). Bu nedenle NAA, genellikle tıp, tarım, jeoloji, metalurji, kriminoloji, elektronik ve petrol endüstrisinde yaygınca kullanılmaktadır. Reaktör ve hızlandırıcılarda üretilen nötronların dışında daha düşük akı yoğunluklu (10^4 - 10^8 nötron/cm²/s) nötron üretimleri olan nötron jeneratörleri ($^3\text{H}(d,n)$ ve $^2\text{H}(d,n)$) ve diğer nötron kaynakları da hem laboratuvar hem de saha şartlarında NAA için kullanılmaktadır. ^{241}Am , $^{238,239}\text{Pu}$ gibi alfa yayınlayıcılar ile meydana getirilen (α,n) tepkimeleri veya ^{124}Sb gibi yüksek enerjili gama foton ($E_\gamma=1,69$ MeV) yayınlayıcılar ile meydana getirilen (γ,n) tepkimeleri sonucu son nötronunun bağlanma enerjisi daha zayıf olan ^8Be , ^7Li gibi hedef malzemelerden nötronlar üretilir. NAA amaçlı yaygınca ^{241}Am -Be, ^{238}Pu -Be,

^{239}Pu -Be, ^{241}Am -Li gibi (α, n) veya ^{124}Sb -Be gibi (γ, n) tepkime türü radyoizotop kaynakları veya ağır atom çekirdeklerinin kendiliğinden parçalanması (spontaneous fission) sonucu, her parçalanma başına ortalama 2-3 nötronun yayınlandığı ^{252}Cf (sf), ^{244}Cm (sf) gibi radyoizotop kaynakları kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan kendiliğinden fisyon yapabilen nötron kaynağı yaklaşık toplam 2,65 yıl yarı ömürle ^{252}Cf (sf)'dir. Yapay olarak üretilebilen Kaliforniyum (Cf) elementinin bilinen 5 radyoizotopu vardır ve genelde bunlar hem alfa hem de kendiliğinden fisyon parçalanması yapabilirler. Ancak bu izotopların sadece ^{252}Cf izotopu pratikte nötron kaynağı olarak kullanılabilir (Bkz. Çizelge 1).

Çizelge 1: Kaliforniyum radyoizotoplarının kısmi alfa ve kısmi fisyon yapma oranları

Nüklide	Toplam yarı ömür	Kısmi alfa parçalanması (Alpha branching ratio)	Kısmi kendiliğinden fisyon parçalanması (Spontaneous fission branching ratio)
^{249}Cf	351 yıl	-1,0	$5,2 \times 10^{-9}$
^{250}Cf	13,20 yıl	0,99921	$7,9 \times 10^{-4}$
^{251}Cf	898 yıl	-1,0	$9,0 \times 10^{-6}$
^{252}Cf	2,645	0,96904	$3,096 \times 10^{-2}$
^{253}Cf	17,81 gün	0,0031	-
^{254}Cf	61,9 gün	0,00299	0,99701

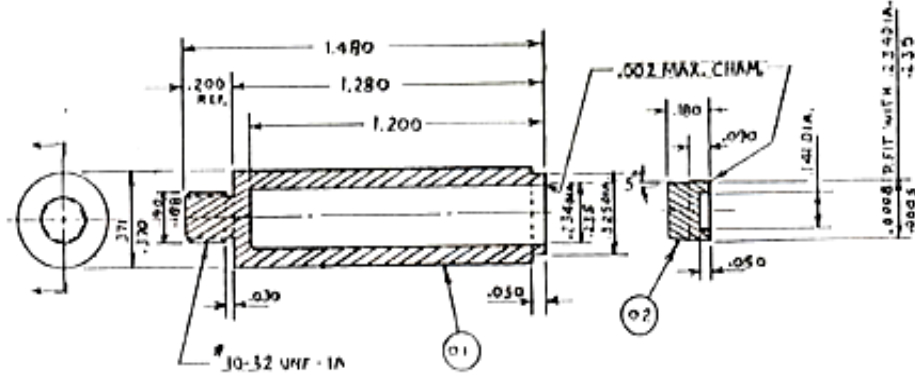
Bu kaynaktan çıkan ani (prompt) nötronlar reaktör nötron spektrumlarını temsil eder. Yayınlanan nötronların enerjisi en fazla 15 MeV, ortalama 2,14 MeV'dir. Enerji dağılımları Watt fonksiyonuna uyumludur. 1g ^{252}Cf 'nin aktivite eşdeğeri 536 Ci'dir Nötron verimi $2,34 \times 10^6$ n/s- μg 'dir. ^{252}C nötron kaynağının bazı temel karakteristikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. ²⁵²Cf nötron kaynağını bazı temel karakteristikleri

Karakteristik	Nicel değeri ve Açıklaması
Toplam yarı ömür	2,645 yıl
Alfa bozunması yar ömrü (kısmi ömür)	2,731 yıl
Kendiliğinden fisyon yar ömrü (kısmi ömür)	85,5 yıl
Nötron verimi(yayınlanma) olasılığı	2,34x10 ⁶ n/s-μg
Gama ışını yayınlanma olasılığı	1,7x10 ⁷ γ/s-μg
Alfa parçacığı yayınlanma olasılığı	1,9x10 ⁷ γ/s-μg
Ortalama nötron enerjisi	2,14 MeV
Ortalama gama enerjisi	1,0 MeV
Nötron aktivitesi	4,4x10 ⁹ n/s-μg
Spesifik aktivitesi	0,536 mCi/μg
Nötron doz hızı	2,30 mrem /h-μg (1 m mesafede)
Gamma doz hızı	0,14 mrem /h-μg (1 m mesafede)

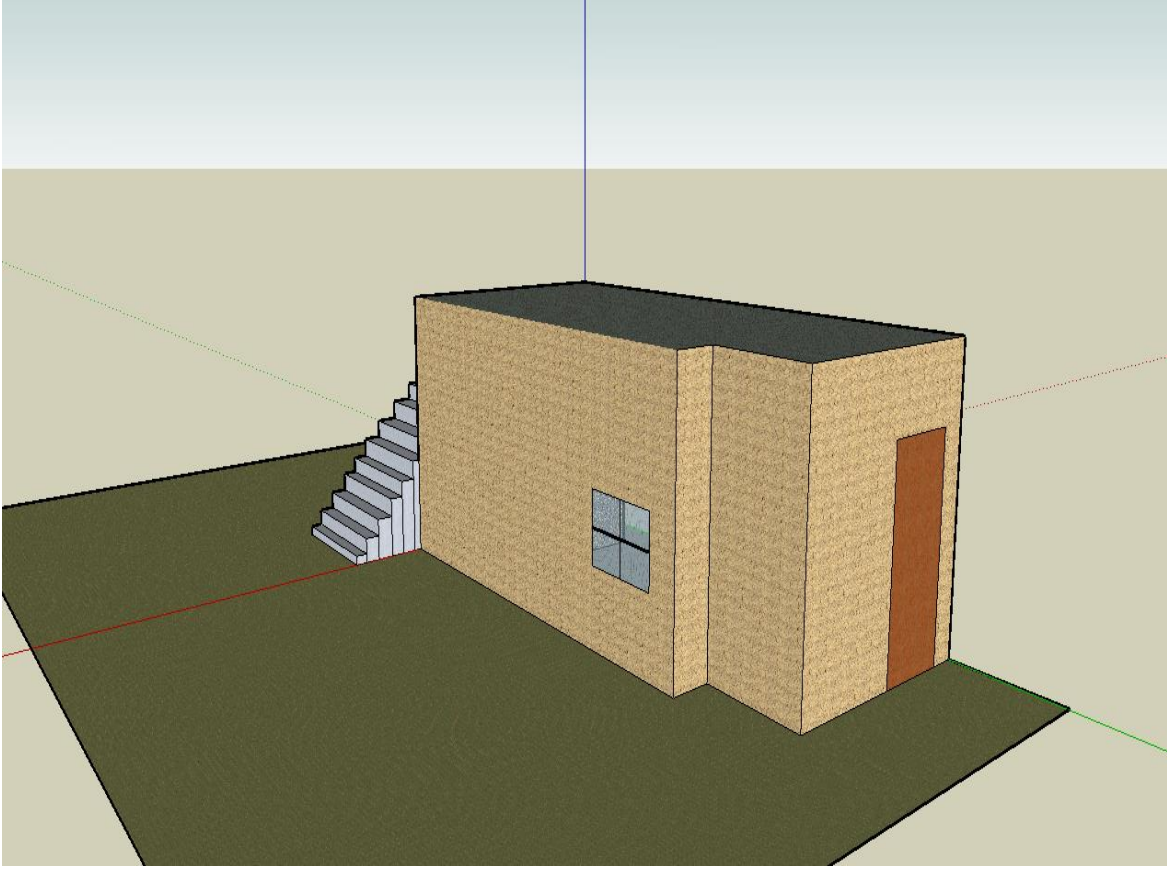
Bu

radioizotop belirli(istenen) miktarlarda üretildikten sonra, Şekil 1’de örnek olarak gösterilen çift katmanlı (304L paslanmaz çelik veya zircaloy alaşımı) bir kapsül içine konular ve sızdırmaz şekilde kapağı özel bir kaynak yöntemiyle (TIG-Tungsten Inert Gas) kapatılır. Yine uluslar arası nükleer madde taşıma kurallarına uygun olarak özel bir zırh tasarımı yapılmış nakliye kabıyla(shipping container) istenilen yerlere nakliyesi yapılır.



Şekil 1- ^{252}Cf nötron kaynak standart kapsülüne örnek

Bu deneyde, yaklaşık aktivitesi 1 Ci (37 GBq) olan ^{241}Am -Be izotopik nötron kaynağı kullanılacaktır. Şekil 2’de yerleştirme mekanına ait şematik bir resmi görülen bu kaynak, A.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü’nde kurulmuştur. TAEK tarafından doğrulanan doz ölçümleri sonucundan lisanslanmıştır. Kaynak sisteminde 2-3 saniyede numuneyi yaklaşık 30 metrede laboratuara pnömatik yolla getiren ve yollayan bir numune transfer sistemi de kurulmuştur. Böylelikle, numune ışınlama amacıyla kaynak odasına hiç kimsenin gitmesine bir gereksinim yoktur. Bu amaçın dışında, kurulan pnömatik numune transfer sistemi, pratikte hem kısa hem de uzun ömürlü radyoizotopların ölçülmesi için son derece elverişli bir imkan sunmaktadır (Bkz.Şekil 3).



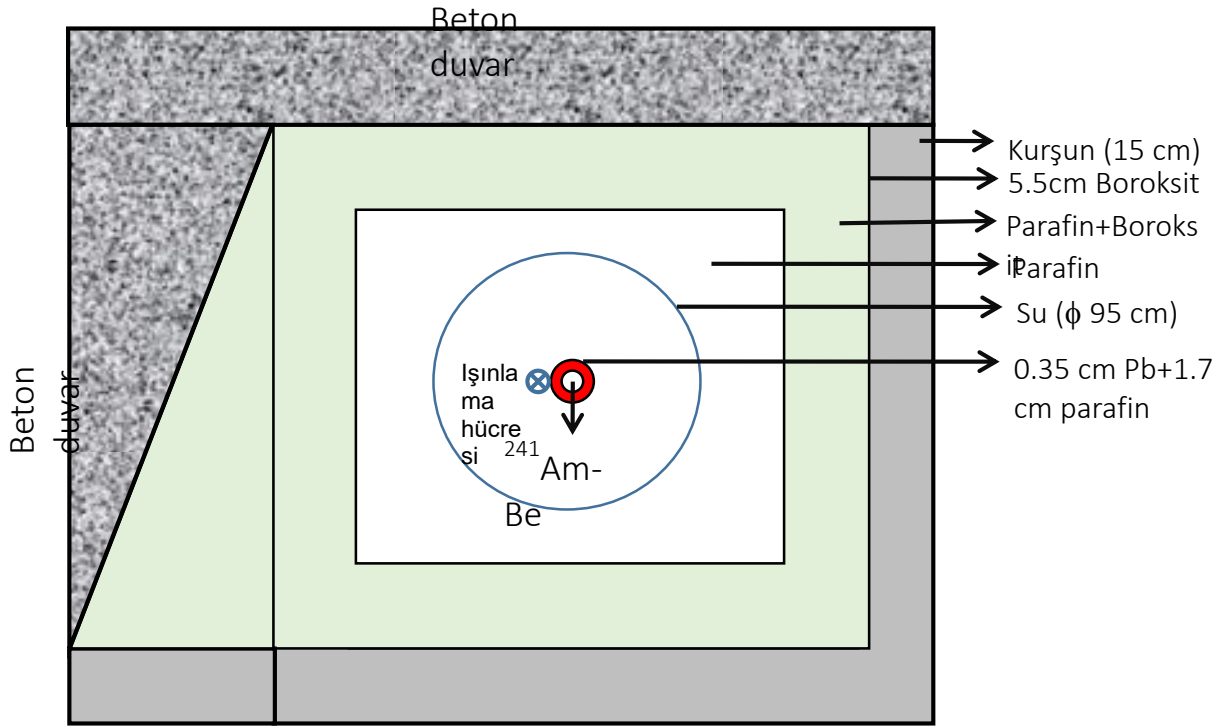
Şekil 2. TAEK tarafından lisanslanan ^{241}Am -Be nötron kaynak odası



Şekil 3. Pnömatik numune transfer sistem montajı esnasında çekilen bir resim

Bu kaynaktan yayınlanan hızlı (yüksek enerjili) nötronların ortalama enerjisi 4,43 MeV'dir, ancak 10^{-17} s gibi kısa sürede (α, n) tepkimesiyle geçici oluşan bileşik çekirdeğin $^{13}\text{C}^*$ uyarılmış durumlarından dolayı açığa çıkan nötronlar;

farklı enerji gruplarında (1,0; 3,2; 4,43; 5,4 ve 7,68 MeV) yayınlanır ve nötron çıkış şiddeti (yield) düşük olmakla birlikte, nötron enerji spektrumunda maksimum enerjisi 11-12,1 MeV'e kadar ulaşan nötronlar da salınır. Mevcut ışınlama sisteminde, bu hızlı nötronlar su ve parafınle yavaşlatılarak mümkün olduğunca termalize (ortalama nötron enerjisi: 0,025 eV) edilmişlerdir, yani ortalama hızları 2200 m.s^{-1} (7920 km/saat !)'dir. Işınlama sistemi, olası nötron ve gama ışınlarına karşı boroksit ve kurşun malzemeler kullanılarak uygun şekilde zırhlanarak özel bir tasarımla kübik bir yapıda düzenlenmiştir (Şekil-4). Işınlanacak numuneler, kaynağa uygun bir mekanizma ile iletilir ve termal akı yoğunluğu belirli bir değerdeki konumda yeterli süre ışınılandıktan sonra, tekrar laboratuara transfer edilir. Radyoaktif hale getirilen numuneler kalibre edilmiş bir gama sayım sisteminde ölçülür.



Şekil 4. $^{241}\text{Am-Be}$ nötron kaynak ışınlama ünitesinin üstten görünüşü

Kaynaklar

1. G.F.Knoll, "Radiation Detection and Measurement, 2000
 2. Debertin and Helmer, 1988, X- and Gamma-ray spectrometry
 4. AN34 Ortec Laboratory Manual, Lab. Experiments,,
 5. Canberra Inc. Catalog, 2000.
 6. G. Gilmore, J. D. Hemingway, Practical Gamma-Ray Spectrometry, 2000.
 7. American Standard, ANSI N42.14, 1999.
 8. Høgdahl, O.T., Neutron absorption in pile neutron activation analysis: Determination of copper and gold in silver. Proceedings Symp. Radiochem. Methods of Anal., Salzburg, Oct-19-23,1965, IAEA, Vienna, pp.23-40.
 9. M.Karadağ, Ph D tezi, Gazi Üniv, 2003, 144 sayfa.
 10. M.G. Budak, Ph D tezi, Gazi Üniv, 2002, 81 sayfa
 11. Standard practice for determining neutron fluence, fluence rate, and spectra by radioactivation techniques, E261-98, Annual Book of ASTM standards, Vo.12.02, pp. 40-49, (1998).
 12. Chilian, C., Chambon ,C., Kennedy, G., Neutron self-shielding with k₀-NAA irradiations , Nucl. Instrum and Methods A, 622 (2010), pp.429-432.
 13. Chilian, C., J. St-Pierre, Kennedy, G., Journal of Radioanal and Nucl. Chem. 278(2008), pp. 745-749).
- Westcott, C. H., Walker, W. H. and Alexander, T.K. "Effective Cross Sections and Cadmium Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors" Proceedings of

the International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, PIPAA, United Nations, Vol. 16, 1958, p. 70.

15.Stoughton, R.W. and Halperin, J., “Heavy Nuclide Cross Sections of Particular Interest to Thermal Reactor Operations: Coventions, Measurements, and Preferred Values”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 6, 1959, p.100.

16.Poole, M.J., J. Nuclear Energy, 5, 1957, p.325.

EKLER

Ek-1 NAA yönteminde elementler için analitik duyarlılık değerleri
(Ortec Application Note, AN34)

Neutron Activation Sensitivities

Atomic Number	Element	Product Nuclide	Half-Life	Measured E_{γ} (keV)	Relative Sensitivity*	Atomic Number	Element	Product Nuclide	Half-Life	Measured E_{γ} (keV)	Relative Sensitivity*
9	Fluorine	^{20}F	11.6 s	1634	60.	49	Indium	$^{116\text{m}}\text{In}$	53.7 m	1293	0.006
11	Sodium	^{24}Na	15.0 h	2754	1.5	50	Tin	$^{125\text{m}}\text{Sn}$	9.5 m	331	15.
12	Magnesium	^{27}Mg	9.46 m	844	35.	51	Antimony	^{122}Sb	64.3 h	564	0.7
13	Aluminum	^{28}Al	2.32 m	1779	1.0	52	Tellurium	^{131}Te	24.8 m	150	5.7
17	Chlorine	^{38}Cl	37.3 m	2168	8.	53	Iodine	^{128}I	25.0 m	443	0.3
19	Potassium	^{42}K	12.4 h	1525	28.	55	Cesium	$^{134\text{m}}\text{Cs}$	2.9 h	127	0.4
20	Calcium	^{49}Ca	8.8 m	3084	260.	56	Barium	^{139}Ba	83.0 m	166	3.2
21	Scandium	$^{46\text{m}}\text{Sc}$	18.7 s	143	0.03	57	Lanthanum	^{140}La	40.2 h	1597	0.8
22	Titanium	^{51}Ti	5.79 m	320	18.	58	Cerium	^{143}Ce	33.7 h	293	14.
23	Vanadium	^{52}V	3.75 m	1434	0.07	59	Praseodymium	^{142}Pr	19.2 h	1576	5.
24	Chromium	^{51}Cr	27.8 d	320	85.	60	Neodymium	^{149}Nd	104.0 m	211	5.
25	Manganese	^{56}Mn	2.58 h	847	0.015	62	Samarium	^{153}Sm	46.8 h	103	0.07
27	Cobalt	$^{60\text{m}}\text{Co}$	10.5 m	59	0.23	63	Europium	$^{152\text{m}}\text{Eu}$	9.3 h	963	0.008
28	Nickel	^{65}Ni	2.53 h	1482	130.	64	Gadolinium	^{161}Gd	3.6 m	360	–
29	Copper	^{66}Cu	5.10 m	1039	6.	65	Terbium	^{160}Tb	72.0 d	299	4.
30	Zinc	$^{69\text{m}}\text{Zn}$	14.1 h	439	23.	66	Dysprosium	^{165}Dy	2.32 h	95	0.01
31	Gallium	^{72}Ga	14.1 h	834	0.32	67	Holmium	^{166}Ho	26.8 h	81	0.2
32	Germanium	$^{75\text{m}}\text{Ge}$	48.0 s	140	5.2	68	Erbium	^{171}Er	7.52 h	308	0.36
33	Arsenic	^{76}As	26.4 h	559	0.32	69	Thulium	^{170}Tm	129.0 d	84	90.
34	Selenium	$^{77\text{m}}\text{Se}$	17.4 s	162	0.27	70	Ytterbium	^{175}Yb	101.0 h	396	1.5
35	Bromine	^{80}Br	16.8 m	616	0.8	71	Lutetium	$^{176\text{m}}\text{Lu}$	3.7 h	88	0.2
37	Rubidium	$^{86\text{m}}\text{Rb}$	1.02 m	556	5.	72	Hafnium	$^{179\text{m}}\text{Hf}$	18.6 s	214	0.05
38	Strontium	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	2.83 h	389	3.	73	Tantalum	^{182}Ta	115.0 d	1121	35.
39	Yttrium	$^{89\text{m}}\text{Y}$	16.1 s	909	23.	74	Tungsten	$^{187\text{W}}$	24.0 h	686	0.4
42	Molybdenum	^{101}Tc	14.2 m	307	8.	75	Rhenium	^{188}Re	16.7 h	155	0.07
44	Ruthenium	^{105}Ru	4.4 h	724	12.	76	Osmium	^{193}Os	31.5 h	139	35.
45	Rhodium	$^{104\text{m}}\text{Rh}$	4.3 m	51	0.03	77	Iridium	^{192}Ir	74.2 d	317	0.3
46	Palladium	$^{109\text{m}}\text{Pd}$	4.7 m	189	5.5	78	Platinum	^{199}Pt	31.0 m	543	25.
47	Silver	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	24.0 s	658	0.35	79	Gold	^{198}Au	64.7 h	412	0.027
48	Cadmium	$^{111\text{m}}\text{Cd}$	49.0 m	245	18.	80	Mercury	^{197}Hg	65.0 h	78	1.2

*The numbers in this column indicate the number of units (weight) of an element that provide a count rate equal to the count rate furnished from irradiation of one unit weight of aluminum.

Ek-2. Termal ve epitermal nötron akılarının belirlenmesinde kullanılan bazı monitörlerin nükleer özellikleri

Monitör	M (g/mol)	İzotop	θ (%)	Reaksiyon	$T_{1/2}$	$\sigma_0^{(a)}$ (b)	$g^{(b)}$	I_0 (b)	$F_{Cd}^{(c)}$	$\bar{E}_r^{(c)}$ (eV)	E_γ (keV)	P_γ (%)
In	114,8183(3)	^{115}In	95,71(5)	$^{115}\text{In} (n, \gamma)$ ^{116m}In	54,29(17) dak.	166,4 13(6)	1,019 4	2700	1,075	1,51	416,86 1097,3 1293,5 4	27,7(1,2) 56,2(1,2) 84,4(1,8)
Mn	54,938049(9)	^{55}Mn	100	$^{55}\text{Mn} (n, \gamma)$ ^{56}Mn	2,5789(1) saat	13,3(2)	1,000 4	14,0(3)	1,0	412	846,75 1810,7 2	98,9(3) 27,2(8)
Au	196,96655(2)	^{197}Au	100	$^{197}\text{Au} (n, \gamma)$ ^{198}Au	2,69517(2) gün	98,65(9)	1,005 1	1550(28)	1,009	5,47	411,80 2	95,58(1,2)
Co	58,933200(9)	^{59}Co	100	$^{59}\text{Co} (n, \gamma)$ ^{60m}Co	10,567(6) dak.	20,4(8)	1,0	39(2)	1,0	133	58,603	2,0359(7)
V	50,9415	^{51}V	99,750(2)	$^{51}\text{V} (n, \gamma)$ ^{52}V	3,743(5) dak.	4,88	1,0	2,684	1,0	7230	1434,0 6	99,75(25)
Al	26,981538	^{27}Al	100	$^{27}\text{Al}(n, \gamma)$ ^{28}Al	2,2414(12) dak.	2,3	1,0	1,633	1,0	11,80 0	1778,9	100

(a) $\sigma_0=2200$ m/s nötron hızı için tesir kesiti

(b) $T=293,6$ K için

(c) $E_{Cd}=0,55$ eV için verilen değer

Ek-3. Düşük nötron akılı izotopik nötron kaynaklarıyla (n, γ) reaksiyonu oluşturabilecek elementler ve bazı nükleer özellikleri

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]
11-Na	^{23}Na (n, γ) ^{24}Na	0,53	100	15,03 saat	1368,6 [100] 2754,1 [100]
13-Al	^{27}Al (n, γ) ^{28}Al	0,23	100	2,24 dakika	1778,0 [100]
17-Cl	^{37}Cl (n, γ) ^{38}Cl	0,43	24,23	37,29 dakika	1642,2 [31,0] 2167,4 [42,0]
19-K	^{41}K (n, γ) ^{42}K	1,46	6,73	12,36 saat	1524,6 [18,8]
23-V	^{51}V (n, γ) ^{52}V	4,88	99,75	3,76 dakika	1434,1 [100]
25- Mn	^{55}Mn (n, γ) ^{56}Mn	13,30	100	2,58 saat	846,8 [98,9]

					1810,7 [27,2] 2113,1 [14,3]
27-Co	$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60\text{m}}\text{Co}$	19,00	100	10,47 dakika	58,6 [2,0] 1332,5 [0,24]
29-Cu	$^{63}\text{Cu} (n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$	4,40	69,20	12,70 saat	511,0 [36,0] 1345,9 [0,6]
	$^{65}\text{Cu} (n, \gamma) ^{66}\text{Cu}$	2,17	30,80	5,10 dakika	1039,2 [8,0]
30-Zn	$^{68}\text{Zn} (n, \gamma) ^{69\text{m}}\text{Zn}$	0,07	18,80	13,76 saat	438,7 [94,8]
31-Ga	$^{71}\text{Ga} (n, \gamma) ^{72}\text{Ga}$	4,60	39,90	14,12 saat	629,9 [24,4] 834,0 [95,6] 2201,6 [26,1]
	REAKSİYON	TESİR KESİTİ	İZOTOPIK BOLLUK	YARI ÖMÜR	E_{γ} (keV) [ŞİDDET(%)]

ELEME NT		(Barn)	(%)		
32-Ge	$^{74}\text{Ge} (n, \gamma) ^{75}\text{Ge}$	0,52	36,50	82,78 dakika	198,6 [1,14] 264,6 [11,1]
33-As	$^{75}\text{As} (n, \gamma) ^{76}\text{As}$	4,40	100	26,32 saat	559,1 [45,0] 657,1 [6,1]
34-Se	$^{78}\text{Se} (n, \gamma) ^{79m}\text{Se}$	0,30	23,50	3,91 dakika	95,9 [9,5]
	$^{80}\text{Se} (n, \gamma) ^{81m}\text{Se}$	0.07	49.80	57.28 dakika	103.1 [9.7]
	$^{80}\text{Se} (n, \gamma) ^{81}\text{Se}$	0,60	49,80	18,50 dakika	275,9 [0,85] 290,1 [0,73]
35-Br	$^{79}\text{Br} (n, \gamma) ^{80}\text{Br}$	10,80	50,69	17,60 dakika	616,2 [7,0]
	$^{81}\text{Br} (n, \gamma) ^{82}\text{Br}$	2,70	49,31	35,34 saat	554,3 [71,0]

					619,0 [43,0] 776,5 [83,0]
37-Rb	$^{85}\text{Rb} (n, \gamma) ^{86}\text{Rb}$	0,45	72,17	18,82 gün	1077,2 [8,79]
	$^{87}\text{Rb} (n, \gamma) ^{88}\text{Rb}$	0,12	27,83	17,80 dakika	898,0 [14,0] 1836,0 [22,0]
38-Sr	$^{86}\text{Sr} (n, \gamma) ^{87\text{m}}\text{Sr}$ + $^{87}\text{Sr} (n, n\gamma) ^{87\text{m}}\text{Sr}$	0,84 [♠]	9,80 7,00	2,80 saat	388,4 [82,0]
42-Mo	$^{98}\text{Mo} (n, \gamma)$ $^{99}\text{Mo}(\beta^-)^{99\text{m}}\text{Tc}$	0,13	24,10	2,751 gün	140,5 [89,0]

♠ (n, γ) reaksiyonu için

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]

42-Mo	$^{98}\text{Mo} (n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$	0,13	24,10	2,751 gün	181,1 [6,29] 739,4 [12,6] 777,8 [4,40]
	$^{100}\text{Mo} (n, \gamma)$ $^{101}\text{Mo}(\beta^-)^{101}\text{Tc}$	0,20	9,60	14,60 dakika	306,8 [88,0]
44-Ru	$^{96}\text{Ru} (n, \gamma) ^{97}\text{Ru}$	0,25	5,50	2,88 gün	215,7 [86,0] 324,6 [10,2]
	$^{104}\text{Ru} (n, \gamma) ^{105}\text{Ru}$	0,47	18,70	4,44 saat	262,8 [6,67] 469,4 [17,8] 676,4 [15,9] 724,5 [48,0]
	$^{104}\text{Ru} (n, \gamma)$ $^{105}\text{Ru}(\beta^-)^{105\text{m}}\text{Rh}$	0,47	18,70	4,44 saat	129,4 [20,0]
	$^{104}\text{Ru} (n, \gamma)$ $^{105}\text{Ru}(\beta^-)^{105}\text{Rh}$	0,47	18,70	35,47 saat	306,1 [5,07] 318,9 [19,0]

45-Rh	$^{103}\text{Rh} (n, \gamma) ^{104\text{m}}\text{Rh}$	11,00	100	4,41 dakika	51,44 [48,3]
47-Ag	$^{107}\text{Ag} (n, \gamma) ^{108\text{m}}\text{Ag}$	37,00	51,83	2,37 dakika	434,0 [0,5] 618,9 [0,26] 633,0 [1,75]
	$^{109}\text{Ag} (n, \gamma) ^{110}\text{Ag}$	88,00	48,17	24,42 saniye	658,8 [4,5]
48-Cd	$^{110}\text{Cd} (n, \gamma) ^{111\text{m}}\text{Cd}$	0,10	12,50	48.60 dakika	150,8 [31,1] 245,4 [94,2]
	$^{114}\text{Cd} (n, \gamma) ^{115}\text{Cd}$	0,30	28,70	2,228 gün	527,9 [29,0]

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]
48-Cd	$^{114}\text{Cd} (n, \gamma)$ $^{115}\text{Cd}(\beta^-)^{115\text{m}}\text{In}$	0,30	28,70	53,4 saat	336,2 [45,9]

	$^{116}\text{Cd} (n, \gamma)$ $^{117}\text{Cd}(\beta^-)^{117\text{m}}\text{In}$	0,05	7,50	2,4 saat	158,6 [14,0]
49-In	$^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116\text{m1}}\text{In}$	161	95,70	54,12 dakika	417,1 [27,8] 1097,2 [57,5] 1293,5 [85,0]
51-Sb	$^{121}\text{Sb} (n, \gamma) ^{122}\text{Sb}$	6,16	57,30	2,68 gün	564,1 [70,0] 692,8 [3,90]
	$^{123}\text{Sb} (n, \gamma) ^{124}\text{Sb}$	4,04	42,70	60,20 gün	602,7 [98,3] 645,8 [7,23]
52 Te	$^{126}\text{Te} (n, \gamma) ^{127}\text{Te}$	0,90	18,70	9,35 saat	417,9 [0,95]
	$^{128}\text{Te} (n, \gamma) ^{129}\text{Te}$	0,20	31,70	69,50 dakika	459,6 [7,10] 487,4 [1,35]

	$^{130}\text{Te} (n, \gamma) ^{131}\text{Te}$	0,20	34,50	25,00 dakika	149,7 [69,0] 452,3 [18,0]
53-I	$^{127}\text{I} (n, \gamma) ^{128}\text{I}$	6,10	100	24,99 dakika	442,9 [16,0] 526,6 [1,54]
55-Cs	$^{133}\text{Cs} (n, \gamma) ^{134\text{m}}\text{Cs}$	2,50	100	2,914 saat	127,5 [12,5]
56-Ba	$^{138}\text{Ba} (n, \gamma) ^{139}\text{Ba}$	0,40	71,70	82,90 dakika	165,8 [22,0]

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]
57-La	$^{139}\text{La} (n, \gamma) ^{140}\text{La}$	9,20	99,91	40,27 saat	328,8 [18,5] 487,0 [43,0] 815,8 [22,4]

					1596,5 [95,5]
58-Ce	$^{140}\text{Ce} (n, \gamma) ^{141}\text{Ce}$	0,56	88,50	32,55 gün	145,4 [48,4]
	$^{142}\text{Ce} (n, \gamma) ^{143}\text{Ce}$	0,95	11,10	33,00 saat	57,37 [11,8] 293,3 [42,0] 664,6 [5,3]
59-Pr	$^{141}\text{Pr} (n, \gamma) ^{142}\text{Pr}$	11,50	100	19,20 saat	1575,8 [3,68]
60-Nd	$^{148}\text{Nd} (n, \gamma) ^{149}\text{Nd}$	2,50	5,70	1,73 saat	114,3 [21,5] 211,3 [31,2] 270,2 [12,3] 654,8 [8,4]
	$^{150}\text{Nd} (n, \gamma) ^{151}\text{Nd}$	1,20	5,60	12,44 dakika	116,7 [46,8] 255,8 (16,9) 1180,6 (15,3)

62-Sm	$^{152}\text{Sm} (n, \gamma) ^{153}\text{Sm}$	204	26,60	46,80 saat	69,6 [5,0] 103,2 [28,0]
	$^{154}\text{Sm} (n, \gamma) ^{155}\text{Sm}$	5,00	22,60	22,40 dakika	104,3 [69,7]
63-Eu	$^{151}\text{Eu} (n, \gamma) ^{152m1}\text{Eu}$	3200	47,90	9,30 saat	121,8 [6,3] 344,3 [2,14] 841,7 [12,5] 963,4 [10,5]

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]
64-Gd	$^{158}\text{Gd} (n, \gamma) ^{159}\text{Gd}$	2,40	24,80	18,56 saat	58,00 [2,1] 363,3 [10,0]

66-Dy	$^{164}\text{Dy} (n, \gamma) ^{165}\text{Dy}$	2700	28,10	2,33 saat	94,7 [3,6] 279,8 [0,50] 361,7 [0,85] 633,4 [0,57] 715,3 [0,54]
67-Ho	$^{165}\text{Ho} (n, \gamma) ^{166}\text{Ho}$	62,00	100	26,83 saat	80,57 [6,2] 1379,4 [0,93]
68-Er	$^{170}\text{Er} (n, \gamma) ^{171}\text{Er}$	5,70	14,90	7,52 saat	111,7 [20,5] 295,9 [28,9] 308,2 [64,3]
70-Yb	$^{174}\text{Yb} (n, \gamma) ^{175}\text{Yb}$	19,00	31,60	4,19 gün	113,8 [1,8] 282,5 [2,8] 396,3 [6,0]
71-Lu	$^{175}\text{Lu} (n, \gamma) ^{176\text{m}}\text{Lu}$	16,00	97,39	3,684 saat	88,35 [8,7]

	$^{176}\text{Lu} (n, \gamma) ^{177}\text{Lu}$	2000	2,60	6,71 gün	113,0 [6,71] 208,3 [11,0] 249,7 [0,20] 321,3 [0,24]
74-W	$^{186}\text{W} (n, \gamma) ^{187}\text{W}$	38,00	28,60	23,85 saat	134,2 [8,5] 479,5 [21,0] 685,8 [26,3]
75-Re	$^{187}\text{Re} (n, \gamma) ^{188}\text{Re}$	75,00	62,60	16,90 saat	155,0 [15,0]

ELEME NT	REAKSİYON	TESİR KESİTİ (Barn)	İZOTOPIK BOLLUK (%)	YARI ÖMÜR	E_γ (keV) [ŞİDDET(%)]
76-Os	$^{190}\text{Os} (n, \gamma) ^{191m}\text{Os}$	9,00	26,40	13,10 saat	74,38 [0,07]
	$^{192}\text{Os} (n, \gamma) ^{193}\text{Os}$	2,00	41,00	30,60 saat	

					138,9 [4,3] 460,6 [3,95]
77-Ir	$^{191}\text{Ir} (n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$	940	37,30	74,17 gün	308,5 [29,7] 316,5 [82,9] 468,1 [48,1]
	$^{193}\text{Ir} (n, \gamma) ^{194}\text{Ir}$	110	62,70	19,15 saat	328,5 [13,0]
78-Pt	$^{196}\text{Pt} (n, \gamma) ^{197}\text{Pt}$	0,75	25,30	18,30 saat	77,35 [17,0] 191,4 [3,49]
79-Au	$^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$	98,80	100	2,697 gün	411,8 [95,5]
90-Th	$^{232}\text{Th} (n, \gamma) ^{233}\text{Th}$ $(\beta^-) ^{233}\text{Pa}$	7,40	100	26,95 gün	300,1 [6,3] 311,9 [37,0] 340,5 [4,3]

92-U	^{238}U (n, γ) ^{239}U (β^-) ^{239}Np	2,70	99,23	2,35 gün	106,1 [24,3] 228,1 [11,4] 277,6 [15,0]
------	---	------	-------	----------	---

Ek-4: Termal Nötron öz soğurma faktörünün hesabı

Çizelge. Işınlanan nükleer malzemelerin fiziksel ve nötron soğurma özellikleri

Malzeme	Miktar/Kalınlık, t (cm)	Çap, D(cm)	Atom veya Molekül ağırlığı, A (g/mol)	ρ (g/cm ³)	σ_a (b)	σ_s (b)	Σ_a (cm ⁻¹)
İndiyum	0,0127	0,127	114,818	7,31	191	2,2	
Vanadyum	0,0127	0,127	50,9415	6,1	4,88		
Disprosyum			162,50	8,551	950	100	
Dy ₂ O ₃	?		372,92	7,81	2200	214	
In ₂ O ₃	?	-	277,633	?			
Au			196,96655	19,32	98,8	9,3	
Al			26,981538	2,6989	0,241	1,4	
Mn			54,938049	7,21	13,2	2,3	

$1b=10^{-24}$ cm², $N_{Av}=6,022 \times 10^{23}$ atom/mol.

Foil için nötron öz soğurma katsayısı hesabı:

Etkin kalınlık, $\tau = \frac{2V}{S} \cdot \Sigma_a = 2 \cdot t \cdot \Sigma_a$, Burada V= hacim, S= Yüzey alanı.

$$G_{th}(foil) = \frac{1}{2\tau} \cdot (1 - \exp(-2\tau))$$

Saçılma etkisinin de hesaba katıldığı düzeltilmiş nötron öz soğurma katsayısı,

$$G'_{th} = \frac{G_{th}}{1 - (1 - G_{th}) \times \frac{\Sigma_s}{\Sigma_t}}$$

Burada, toplam makroskopik tesir kesiti $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$ yukarıdaki çizelgedeki verilerden hesaplanır.

Not- Deneylede düzeltilmiş nötron öz soğurma katsayısının kullanılması daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

Başka bir yaklaşıma göre, silindirik bir tüp için termal nötron öz soğurma

$$\text{katsayısı, } G_{epi} = \frac{1}{1 + \left(\frac{N_{Av} \cdot k_{th}}{r \cdot (r + h)} \times \sum_i \frac{w_i \sigma_{a,i}}{A_i} \right)^{0,964}}$$

Eşitliğinden hesaplanır. Burada, $w=i$ -nci ışınlanan elementi miktarı (g), N_{Av} =Avogadro sayısı, k_{th} =termal öz soğurma sabiti ve $k_{th}=0,91$ alınız. $\sigma_{a,i}$ = i -nci elementin termal nötron soğurma tesir kesiti ve $A=i$ -nci elementin atom ağırlığı, r = silindir (veya foil) yarıçapı ve h = silindir (veya foil kalınlığı) yüksekliği, burada $k_{epi}=1$ alınız (Chilian ve ark., JRNC 278(2008), pp. 745-749).

Ek-5: Epitermal Nötron öz soğurma faktörünün hesabı

Çizelge. Işınlanan nükleer malzemelerin fiziksel ve nötron soğurma özellikleri

Malzeme	Miktar/Kalınlık, t (cm)	Çap, D (cm)	Atom veya Molekül ağırlığı, A (g/mol)	ρ (g/cm ³)	I_{abs} (b)	Σ_{res} (cm ⁻¹)
Indiyum	0,0127	0,127	114,818	7,31	2700 veya 2630±133	
Vanadyum	0,0127	0,127	50,9415	6,1	3,8±0,9 veya 3,3±0,8	
Dysprosiyum			162,50	8,551	1390±220 veya 1240	
Dy ₂ O ₃	?		372,92	7,81		
In ₂ O ₃	?	-	277,633	?		
Au			196,9665	19,32	1550	
Al			26,98153	2,6989	<0,18	
Mn			54,93804	7,21	14,0 veya 14,2±0,6	

$$I_b = 10^{-24} \text{ cm}^2, N_{Av} = 6,022 \times 10^{23} \text{ atom/mol}, \Sigma_{res} = N \times I_{abs}$$

Foil için epitermal nötron öz soğurma katsayısı hesabı:

Etkin kalınlık, $X = \mu_a \delta = \left(\frac{\Sigma_{res}}{\rho} \right) \cdot \left(\rho \frac{2V}{S} \right) = \frac{2V}{S} \Sigma_{res}$ hesaplanır. Burada V= hacim,

S= Yüzey alanı. Epitermal nötron öz soğurma katsayısı:

$$G_{epi}(foil) = \frac{1}{\sqrt{1+2X}} \text{ Veya}$$

Hesaplanır. Başka bir yaklaşıma göre, silindirik bir tüp için epitermal nötron

$$\text{öz soğurma katsayısı, } G_{epi} = \frac{0,94}{1 + \left(\frac{w \cdot N_{Av} \cdot k_{epi} \cdot I_{abs}}{r \cdot (r+h)A} \right)^{0,82}} + 0,06$$

Eşitliğinden hesaplanır. Burada, w=ışınlanan element miktarı (g), N_{Av} =Avogadro sayısı, k_{epi} =Epitermal öz soğurma sabiti, I_{abs} = epitermal nötron öz soğurma tesir kesiti ve A= elementin atom ağırlığı, r= silindir (veya foil) yarıçapı ve h= silindir(veya foil kalınlığı) yüksekliği, burada $k_{epi}=1$ alınır (Chilian ve ark., NIMA622(2010), pp. 429-432).

Ek-6: Analizörlerin Çoklu Sayıcı (Multiscaling) Modunda Çalışma İlkesi

Günümüzde, radyasyon dedeksiyonunda enerji spektroskopisi yaygın olarak kullanıldığından, çok kanallı analizör(MCA) üniteleri sıkça puls yüksekliği analizi (pulse height analysis=PHA) modunda çalıştırılır ve genellikle gelen sinyalin biçim ve genlik bilgisi işlenerek, MCA hafızasında kaydedilirler. Ancak MCA üniteleri PHA modunun dışında, nükleer olayların zamanla değişebilen özelliklerini ölçmede (zaman spektroskopisi) çok kanallı sayıcı/çoklu sayaç (Multichannel Scaler=Multiscaling=MCS) modunda da kullanılmaktadırlar. MCS modunda analizörün her kanalı(hafıza kayıt adresi) bağımsız bir sayaç (independent counter) görevi yapar. Analizöre giren tüm pulslar, genliğine bakılmaksızın integral olarak sayılırlar. Analiz başlangıcında, belirlenen kanalda oturma süresi (dwell time) boyunca önce MCS'nin birinci kanalında sayılır ve sayım olarak depolanır. İlk kanaldaki oturma zamanı tamamlanınca bu kez analizör ikinci kanala (sayıcıya) atlar ve yine aynı süreyle tüm pulslar (hangi genlikte gelirse gelsin) sayılır ve ikinci kanal sayımı olarak depolanır. Bu şekilde her kanal sırayla belirlenen oturma periyodunda (dwell time) olmak üzere sayımları biriktirir ve daha önceden ayarlanmış MCS kanallarının tümünü (hafıza adresleri) tarar ve sayımlar her kanalda bağımsız olarak biriktirilir. Örneğin oturma zamanı(dwell time) 1 dakika ve MCS kanalı 512 seçilirse, toplam deney süresi 8 saat 32 dakika olacaktır. MCS modunda tüm kanalları bir kz gezmeye (one sweep) denilir. İstendiğinde bu gezinti sayısı başlangıçta belirlenebilir. Her kanaldaki ölçüm süresini gösteren oturma zamanı (dwell time) ise MCS'de haricen TTL sinyali gönderilerek kontrol edilebileceği gibi, dahili olarak da, genelde 1 μ s ile 5000 s arasında bir aralıkta kullanıcı tarafından belirlenerek ayarlanabilir. Böylelikle hem kısa ve hem de uzun ömürlü nükleer olayları zaman ekseninde izleme imkanı elde edilir. MCS modunda çalışmanın en net sonucu, analiz için seçilen MCS kanal sayısı (MCS Input size), bir tek dedektörden gelen sinyali kullanarak, eşit sürelerle ölçüm alan bağımsız sayaçları (counters), yani tek kanallı analizörler (SCA) gibi kullanma sağlamasıdır. Analizörün MCS modu, birbiri ardı sıra zaman aralıkları ile her kanalda kaydedilen pulsların sayısı, radyoaktif bozunma yapan nüklitlerin özellikle de hızlı bozunan radyoaktif izotopların zamana bağlı davranışını incelemek veya diğer zamana bağımlı değişen nükleer olayların kaydetmek için oldukça elverişlidir. Bu ayarlarda, ayrıca kullanılacak ADC ayarları ile alt eşik (LLD) ile düşük

gürültü sinyallerinin girişi ve üst sınır ayarı (ULD) istenmeyen yüksek genlikli sinyaller kesilerek MCS analizör girişine izin verilmez.