

تعیین درصد غنای اورانیوم با استفاده از انرژی‌های پائین پرتوهای گاما و ایکس

فرید اصغری زاده و محمد قنادی مراغه

آزمایشگاه جابربین حیان

سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

برای تعیین درصد ایزوتوپی معمولاً از طیف‌سنج جرمی استفاده می‌شود. در صورت عدم دسترسی به این دستگاه و همچنین لزوم اندازه‌گیری‌های محلی، می‌توان روش اندازه‌گیری انرژی‌های پائین پرتوهای ایکس و گاما با استفاده از آشکارسازهای دستی را بکار برد.

این مقاله گزارشی است از اجرای یک روش دقیق و غیرمخرب برای تعیین درصد غنای اورانیوم (درصد ایزوتوپی اورانیوم - ۲۳۵) که با استفاده از دستگاه طیف‌سنج گاما مجهز به آشکارساز ژرمانیوم بسیار خالص انجام گرفته است.

اساس کار، مقایسه پیک پرتو ایکس ^{235}U با انرژی $89/96$ کیلو الکترون‌ولت ناشی از فروپاشی اورانیوم - ۲۳۵، با پیک دوگانه گامای توریم - ۲۳۴ با انرژی 92 کیلو الکترون‌ولت ناشی از فروپاشی اورانیوم - ۲۳۸ است. به علت نزدیک بودن انرژی‌های مورد استفاده، در این تجزیه و تحلیل اثر خود جذبی قابل توجه نیست.

مقدمه

نیاز مبرم به تعیین درصد ایزوتوپی اورانیوم در شکلهای و قالبهای متفاوت و در مراحل مختلف فرایند کار با اورانیوم، ما را بر آن داشت که روشی دقیق و غیرمخرب برای این اندازه‌گیری جستجو کنیم. انتخاب روش اندازه‌گیری انرژی‌های پائین پرتوهای ایکس و گاما [۲] و نحوه بکارگیری آشکارساز ژرمانیوم خالص موجود در آزمایشگاه طیف‌سنجی هسته‌ای و نرم‌افزارهای مربوط به آن به نتایج مطلوبی

منجر شد.

نظریه

اورانیوم - ۲۳۸ دارای یک رادیوایزوتوپ دختر به نام توریم - ۲۳۴ است که دارای یک پیک 63 کیلو الکترون‌ولت (keV) و یک پیک دوگانه $(92/35) (\%2/72)$ و $(89/96) (\%2/69)$ در طیف گاما است. این پیک دوگانه در عمل به صورت پیکی با انرژی $(92/5) (\%5/41)$ کیلو الکترون‌ولت در نظر گرفته

شده است.

جدول ۱- انرژی پرتوهای ایکس و گاما در ناحیه ۸۰-۱۰۰

کیلوالکترون ولت

انرژی	ایزوتوپ
۸۷/۳	$Pb_{K\alpha 2}$
۸۹/۹۶	$Th_{K\alpha 2}$
۹۲/۳۷	$Pa_{K\alpha 2}$
۹۲/۳۸	^{234}Th
۹۲/۸۰	^{234}Th
۹۳/۳۵	$Th_{K\alpha 1}$
۹۴/۶۶	$U_{K\alpha 2}$
۹۵/۸۵	$Pa_{K\alpha 1}$
۹۸/۴۴	$U_{K\alpha 1}$
۹۹/۲۷	^{231}Th

از طرف دیگر پرتوهای ایکس توریم ناشی از واکنش تبدیل الکترون فروپاشی اورانیوم - ۲۳۵ دارای دو پیک با انرژیهای ۸۹/۹۶ کیلوالکترون ولت ($Th_{K\alpha 2}$) و ۹۳/۳۵ کیلوالکترون ولت ($Th_{K\alpha 1}$) است. در این روش اندازه گیری از پیک ۸۹/۹۶ کیلوالکترون ولت استفاده شده است. طیف گاما به وسیله آشکارساز ژرمانیوم خالص از نوع هم محور با قدرت تفکیک بالا (حداکثر ۱/۸ کیلوالکترون ولت برای پیک گامای ۱۳۳۲/۵ کیلوالکترون ولت کبالت - ۶۰) دریافت می شود. این کار به وسیله آشکارساز دستی نیز ممکن است انجام گیرد. طیفی که از نمونه مورد آزمایش دریافت می شود کفایت بین ۸۰ تا ۲۰۰ کیلوالکترون ولت باشد. در جدول ۱، فهرستی از انرژیهای پرتوهای ایکس و گاما برای ناحیه مورد نظر این آزمایش (۸۰ - ۱۰۰ کیلوالکترون ولت) عرضه شده است.

روش اندازه گیری غنای اورانیوم که در اینجا به شرح آن پرداخته ایم، مزایای چندی نسبت به روشهای دیگر دارد: روش استفاده از پرتوهای گامای ۱۰۰ کیلوالکترون ولت مربوط به اورانیوم - ۲۳۸ و ۱۸۵/۷ کیلوالکترون ولت مربوط به اورانیوم - ۲۳۵، بدلیل اختلاف زیاد در میزان خود جذبی نمونه بین این دو پرتو گاما، بسیار پیچیده است. همچنین احتمال تابش کم و پائین بودن بازده آشکارساز برای پیک ۱۰۰ کیلوالکترون ولت نیاز به زمان شمارش بیشتر دارد تا اطلاعات لازم بیشتری در دسترس باشد زیرا آمارهای شمارش دارای خطاهای قابل ملاحظه ای است.

جذب اشعه گاما بوسیله قالب نمونه تأثیر مختصری در محاسبه درصد غنای اورانیوم نمونه دارد. عملاً، خود اورانیوم دارای نقش اصلی در خود جذبی نمونه است. اگر نمونه ای حاوی ۱۰ گرم اورانیوم باشد و سطح زیر پیکها برای این خود جذبی تصحیح نشده باشند، نسبت سطح زیر پیک محاسبه شده ۶٪ بیشتر خواهد بود، که این امر در درجات غنی سازی کمتر چندان مؤثر نیست.

دو با سرعت ثابتی کاهش می‌یابند.

در این نوع تعادل [۴]:

$$\frac{N_p}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_p} = \frac{\tau_p}{\tau_1} = \text{Constant} \quad (1)$$

$$A_p = \lambda_p N_p = \lambda_1 N_1 = A_1 \quad (2)$$

اکتیویته کل پس از تعادل برابر خواهد بود با:

$$A_{\text{total}} = A_1 + A_p = 2A_1 \quad (3)$$

از این تعادل دو نتیجه حاصل می‌شود:

(الف) مقادیر نسبی مادربه دختر N_p/N_1 ثابت مانده و

مستقل از زمان و برابر نسبت نیمه‌عمرها است.

(ب) پس از تعادل، سرعت فروپاشی دختر تا زمانی که

گونه مادر وجود دارد معادل سرعت فروپاشی مادر

خواهد بود.

با وجود این، تعادل رادیوآکتیویته بطور ناگهانی

حاصل نمی‌گردد بلکه با از بین رفتن $e^{-\lambda_1 t}$ بطور

پیوسته حاصل می‌شود. عبارت $e^{-\lambda_1 t}$ از نظر ریاضی

زمانی به صفر میل می‌کند که $\lambda_1 t = \infty$ باشد ($e^{-\infty} \cong 0$).

$$t_{\text{زمان تعادل}} \cong \frac{\infty}{\lambda_p} \quad \text{بنابراین}$$

$$t_{\text{زمان تعادل}} \cong \frac{\infty}{\lambda_1} \quad t_h$$

این بدان معنی است که زمان تعادل حدود ∞ برابر

نیمه عمر دختر (t_h) است که در مورد ^{232}Th (دختر)

یکی از ویژگی‌های این روش عدم نیاز به آرایش

خاص شمارش، از قبیل محفظه مخصوص شمارش یا

گردآورنده است [۳]. در این روش نیازی به پرتو دهی

نمونه و در نتیجه اندازه‌گیری محصولات شکافت و

نپتونیم - ۲۳۹ نمی‌باشد [۴]. علاوه بر این، بعلت

غیرمخرب بودن روش، نیازی به هیچگونه کار

شیمیائی یا فیزیکی بر روی نمونه نیست.

در این روش چند محدودیت نیز وجود دارد:

توریم - ۲۳۴ (دختر) باید با اورانیوم - ۲۳۸

(مادر) در حال تعادل باشد. چون نیمه عمر

توریم - ۲۳۴ برابر ۲۴ روز است، این تعادل در

صورتی برقرار می‌شود که پس از پایان کار شیمیائی

روی نمونه، مدت لازم سپری شده باشد، ولی در مورد

نمونه‌های طبیعی یا قدیمی چنین مشکلی وجود

ندارد. این تعادل از نوع تعادل بین هسته مادر با

نیمه‌عمر بلندتر از هسته دختر ($\tau_p > \tau_d$) است که پس

از گذشت زمانی کوتاه بین هسته‌های مادر و دختر

برقرار می‌شود. پس از تعادل، مقادیر نسبی دختر و

بقیه اولاد متعاقب سری تجزیه، با توجه به اینکه همه

دارای نیمه عمری کوتاه‌تر از مادر اصلی هستند، ثابت

مانده و کلیه گونه‌های نسلی با نیمه عمر مادر اصلی

فروپاشی می‌نمایند. تعادل رادیوآکتیویته مانند یک

معادله شیمیائی برگشت پذیر مورد بررسی قرار

نمی‌گیرد زیرا فروپاشی‌های رادیوآکتیو

برگشت ناپذیرند. در اینجا تعادل تنها به برقرار بودن

نسبت ثابت مقادیر مادر و دختر اتلاق می‌شود، که هر

حاصل از فروپاشی ^{238}U (مادر) تقریباً برابر است با:

$$\text{روز } 120 = (\text{روز } 24) \times 5 \cong \text{زمان تعادل } t$$

خواهیم داشت:

$$(4) \quad E = \frac{100 \times W.F.U - 235}{W.F.U - 234 + W.F.U - 235 + W.F.U - 236 + W.F.U - 238}$$

با توجه به تقریب زیر:

$$(5) \quad W.F.U - 234 + W.F.U - 236 = -/0.1 \times W.F.U - 235$$

و جایگذاری آن در معادله (4) نتیجه می شود:

$$(6) \quad E = \frac{100}{1/0.1 + \frac{W.F.U - 238}{W.F.U - 235}}$$

و یا:

$$(7) \quad E = \frac{100}{1/0.1 + KR}$$

K ، یک ضریب ثابت تجربی است که تابعی از بازده آشکارساز، نیمه عمرها، نسبت وزنی و شدت پرتوهای گاما می باشد. R نسبت $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ است که از نسبت سطوح زیرپیکهای ۹۲ و ۸۹/۹۶ کیلوکترن ولت بدست می آید.

روش کار

الف) تجهیزات:

- آشکارساز ژرمانیوم خالص گاما - ایکس از نوع

محدودیت دیگر این روش، وجود توریوم در نمونه است. بنابراین، پرتو ایکس اضافی در ۸۹/۹۶ کیلوکترن ولت حاصل از فلورسانس آلفای فرودی وجود خواهد داشت، در نتیجه نسبت محاسبه شده کمتر خواهد بود. در چنین حالتی می توان پیک گامای ^{231}Th را بعنوان جایگزین بکار برد.

ناحیه مجاز دیگر طیف که در حال بررسی است ناحیه بین ۵۷ تا ۶۵ کیلوکترن ولت است. پیک های ^{238}U ۶۳/۲۸ کیلوکترن ولت ناشی از دختر ^{238}U (یعنی ^{234}U) و ^{235}U ۵۸/۵۵ کیلوکترن ولت مربوط به دختر ^{235}U در این ناحیه قرار دارند. اختلاف تقریبی ۴/۷ کیلوکترن ولت بین این دو پیک گاما قابلیت جداسازی بین انرژی ها را برای هر درصد غنا بالا می برد. حتی در غناهای حدود ۹۳٪، پیک ۶۳/۲۸ کیلوکترن ولت به آسانی نسبت به زمینه تشخیص داده می شود. اثرات خودجذبی در این ناحیه انرژی باید بطور دقیق تصحیح گردد.

تعیین رابطه مورد نیاز

اگر E نمایش مقدار درصد غنی شدن و $W.F.$ نمایش درصد وزنی ایزوتوپهای اورانیوم باشد

حاصل از شمارش نمونه اورانیوم طبیعی (شکل ۱) و تجزیه و تحلیل پیکهای مربوط، طبق جدول ۲، نشان دهنده توان تفکیک آشکارساز ژرمانیوم خالص و کارایی این روش اندازه‌گیری است.

برای محاسبه غنای اورانیوم، از سطح زیرپیک انرژیهای ۹۲/۵ و ۸۹/۹ کیلوالکترون‌ولت، به صورت زیر استفاده شده است:

$$R = \frac{15/920}{0/579} \approx 27/5$$

با قرار دادن $K = 5/1$ و مقدار حساب شده R در رابطه ۷، غنای ایزوتوپی نمونه مجهول محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{100}{1/01 + (5/1 \times 27/5)} = \frac{100}{141/26}$$

با تکرار آزمایش و در نظر گرفتن خطای حاصل از شمارش نتیجه نهایی بصورت زیر گزارش می‌شود:

$$E = 0/70 \pm 0/08$$

یافته‌ها و نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اندازه‌گیری درصد غنای ایزوتروپی نمونه‌های اورانیوم (یا بعبارت دیگر درصد ایزوتروپی ^{235}U به ^{238}U) با استفاده از

هم‌محور دارای قدرت تفکیکی (برحسب FWHM) برابر ۲ کیلوالکترون‌ولت برای پیک گامای ۱۳۳۲/۵ مربوط به کبالت - ۶۰.

- تقویت‌کننده اصلی مدل ۵۷۰ (EG&G ORTEC)، تجزیه‌کننده چندکاناله (MCA) دارای ۴۰۹۶ کانال که به صورت کارت داخلی به همراه مبدل قیاسی - عددی (ADC) بر روی برد اصلی کامپیوتری با پردازشگر ۸۰۴۸۶ نصب شده است.

ب) چگونگی جمع‌آوری اطلاعات:

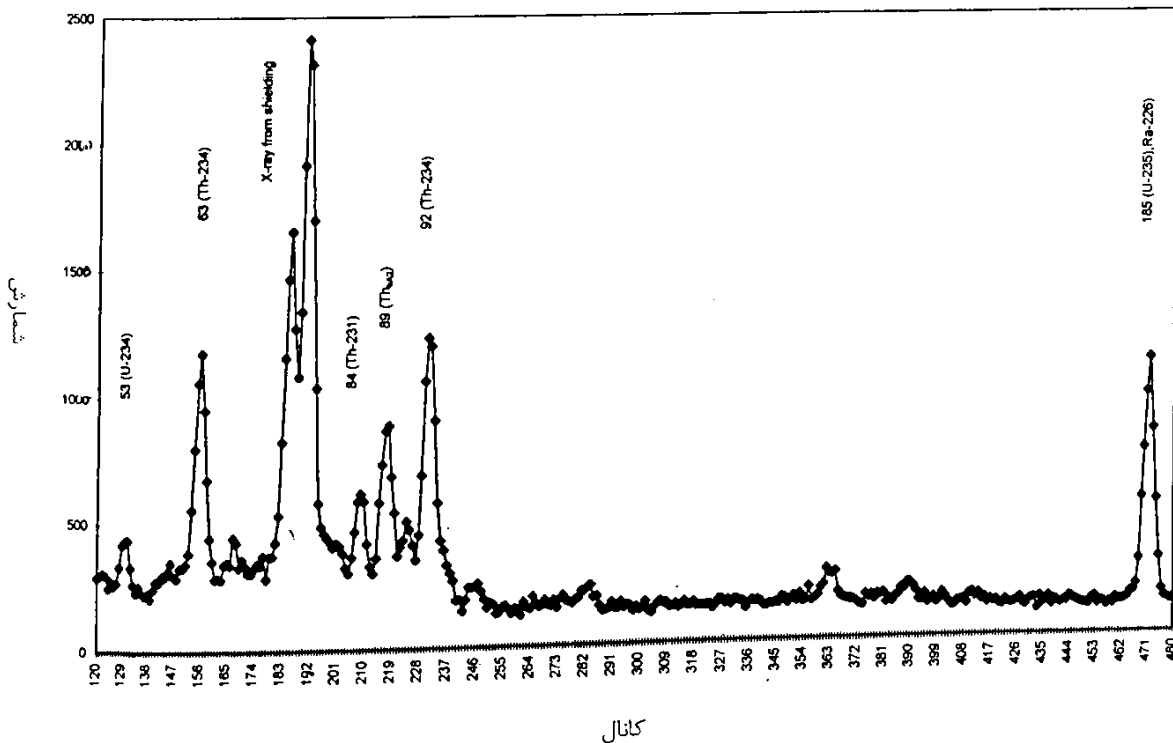
در عمل، چندین نمونه گوناگون تحت آزمایش و بررسی قرار گرفتند: نمونه‌های جامد شامل اورانیوم فلزی و نمونه معدنی اورانیوم به وزن ۳۰۰ گرم درون ظروف پلاستیکی در فاصله ۶/۵ سانتیمتری آشکارساز مورد شمارش قرار گرفتند. پس از گردآوری شمارشها و بدست آوردن طیف گاما، مرحله پردازش (Fitting) پیک‌ها به توسط برنامه GANAAS [۵] انجام گرفت. سطح زیرپیکهای ۹۲ و ۸۹/۹۶ کیلوالکترون‌ولت برای تعیین نسبت $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ حساب شد.

برای تعیین جذب K (در رابطه ۷) نمونه‌های متفاوت حاوی اورانیوم طبیعی شمارش شدند. با محاسبه نسبت $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = R$ از طیفهای بدست آمده و به ازای $E = 0/70$ ، مقدار K برای نمونه‌های جامد برابر ۵/۱ بدست آمد.

ناحیه ایکس و انرژیهای پایین گاما در طیف

شیمیائی بر روی نمونه‌های تحت آزمایش، ویژگی‌های برجسته این روش را نشان می‌دهد. ویژگی مهم دیگر این روش که در طی مراحل تجزیه و تحلیل داده‌ها و محاسبات بخوبی مشهود بود، عدم نیاز به محاسبات بسیار پیچیده مخصوصاً هم‌پوشانی‌ها، حذف اثرهای خودجذبی بود. به هم نزدیک بودن انرژی‌های استفاده شده در طیف، سبب می‌شود که نوع و مقدار و شکل هندسی نمونه در تعیین نسبت سطح زیر پیک‌های مورد نظر خطای قابل ملاحظه‌ای وارد نکنند.

انرژیهای پایین اشعه گاما و ایکس کاملاً عملی است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که با زمان‌های شمارش نزدیک به ۱۰۰۰۰ ثانیه پیکهای مورد نظر از لحاظ آماری قابل شناسائی و تفکیک هستند. کالیبره کردن انرژی در محدوده ۸۰ تا ۲۰۰ کیلو الکترون ولت، با توجه به ناحیه مورد بررسی انجام گرفت. بنابراین شمارش مورد نظر را می‌توان حتی با یک تحلیل‌گر چندکانالی ۱K نیز انجام داد. استفاده از آشکارساز GMX دستی با دستگاه طیف سنج کوچک قابل حمل برای اندازه‌گیری‌های محلی، بدون نیاز به هیچگونه عمل خاص فیزیکی یا



شکل ۱- طیف گامای نمونه اورانیوم طبیعی

جدول ۲: نتایج بدست آمده از شمارش یکی از نمونه‌های مورد آزمایش (اورانیوم فلزی)

حد آشکارسازی شمارش بر ثانیه	سطح زیر پیک خالص (شمارش بر ثانیه)	کیفیت برازش**	انحراف استاندارد (درصد)	انحراف استاندارد (شمارش)	سطح زیر پیک خالص (شمارش)	رادیونوکلاید	انرژی (keV)	قدرت تفکیک *(keV)
۰/۱۸	۰/۱۸۴۴۶۲	۱	٪۲۵/۹	۴۴۵	۱۷۱۹	U-234	۵۳/۰۸	۱/۹۷
۰/۵	۴/۸۸۰۸۸۹	۸	٪۲/۳	۱۰۶۸	۴۵۴۸۵	Th-234(U-238)	۶۳/۳۱	۱/۹۸
۰/۵	۱/۱۹۶۶۹۵	۱	٪۸/۳	۹۳۳	۱۱۱۵۲	Th-228(U-235)	۸۴/۰۵	۲/۰۰
۰/۳	۰/۵۷۹۱۳۹	۲	٪۱۰/۵	۵۶۶	۵۳۹۷	Th-231(U-235)	۸۹/۸۳	۲/۰۱
۱/۰	۱۵/۹۲۰۳۷۰	۱۲	٪۱/۳	۱۹۹۷	۱۴۸۳۶۱	Th-234(U-238)	۹۲/۵۰	۲/۰۱
۱/۱	۱۱/۲۳۳۷۷۶	۱۶	٪۲/۱	۲۱۸۱	۱۰۵۰۵۱	Ra-226	۹۴/۵۸	۲/۰۱
۰/۵	۸/۵۶۹۱۶۰	۳	٪۱/۴	۳۱۱۳۶	۷۹۸۵۶	Pa-234	۱۱۱/۰۱	۲/۰۳
۰/۳	۳/۴۸۹۸۵۹	۲	٪۱/۸	۵۸۷	۳۲۵۲۲	Pa-234	۱۱۴/۵۲	۲/۰۳
۰/۳	۱/۳۶۴۲۰۲	۲	٪۴/۱	۵۲۱	۱۲۷۱۳	U-235	۱۲۳/۶۲	۲/۰۶
۰/۲	۰/۷۳۳۷۷۰	۱	٪۴/۷	۳۱۸	۶۸۳۸	Th-234(U-238)	۱۶۳/۱۸	۲/۰۷
۰/۸	۱۰/۳۰۱۹۶۴	۲۱	٪۱/۷	۱۶۶۶	۹۶۰۰۴	Ra-226	۱۸۵/۵۲	۲/۰۹
۰/۱	۱/۰۱۰۰۸۷	۱	٪۳/۳	۳۱۰	۹۴۱۳	U-235	۲۰۵/۱۲	۲/۱۱
۰/۱	۰/۳۲۲۶۷۴	۱	٪۹/۱	۲۷۴	۳۰۰۷	Pa-234(U-238)	۲۵۸/۰۶	۲/۱۶
۰/۱	۱/۱۱۷۶۵۶	۱	٪۱/۹	۲۰۰	۱۰۴۲۵	Pa-234(U-238)	۷۶۶/۵۴	۲/۵۶
۰/۱	۰/۱۸۳۷۱۱	۱	٪۸/۵	۱۴۶	۱۷۱۲	Pa-234(U-238)	۷۸۶/۴۰	۲/۵۷
۰/۱	۲/۳۹۵۲۲۹	۱	٪۰/۸	۱۸۴	۲۲۳۲۳	Pa-234(U-238)	۱۰۰۱/۳۷	۲/۸۲

*: FWIIM(Full Width Half Maximum)

** Fitting Quality

نمونه: اورانیوم فلزی

مدت شمارش } Real Time : ۹۴۰۸ ثانیه

} Live Time : ۹۳۱۹ ثانیه

برنامه برازش پیک : GAMANAL(GANAAS)

اسپکترومتري هسته‌ای، که در امر آماده‌سازی و شمارش
نمونه‌ها ما را یاری کرده‌اند تشکر و سپاسگزاری می‌کنیم.

تشکر و قدردانی
بدینوسیله از همکاری آقایان محمد مهدی امیدي و
غلامرضا کوشکستانی، کارشناسان آزمایشگاه

References

- ۱- اصول و مبانی شیمی هسته‌ای (H. J. Arnika), ترجمه دکتر محمد قنادی مراغه (۱۳۷۲).
- 2- Richard Hagenauer, "Nondestructive Determination of Uranium Enrichment Using Low Energy X and Gamma Rays", Nuclear Materials Management, INMM Proceeding, pp. 216-220, (1982).
- 3- L.A. Kull, R.O. Ginaven, J.e. Glancy, "A Simple Gamma-Spectrometric Technique for Measuring Isotopic Abundances in Nuclear Materials", Atomic Energy Review 144 (1976).
- 4- M.B.A. Vasconcellos, M.J. A. Armelin, A.M.G. Figueiredo, "A Comparative Study of Some Nuclear Methods For $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ Isotopic Ratios Determination", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 113, No. 2, pp. 357-370, (1987).
- 5- GANAAS, "Gamma And Neutron Activation Analysis System", IAEA, A Program for Gamma spectrum Analysis. Ver.2.0.
- 6- R. Gunnink, "Determination of Plutonium Isotopic Abundances by Gamma-Ray Spectrometry", UCRL-52879 (1980).
- 7- T. N. Dragnev and B. P. Damjanov, "Methods for Precise Absolute Gamma-Spectrometric Measurements of Uranium and Plutonium Isotopic Ratios", IAEA-SM-231/130, p. 739-752, (1978).
- 8- F. Asgharizadeh, "The Application of Gamma-Spectrometry To NPP and Environment", IAEA - AEOI, (1995).
- 9- IEEE Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Ray Detectors (ANSI/IEEE std 325 -(1986).
- 10- Digital Methods of Photopeak Integration in Activation Analysis, Philip A. Badecker, Analytical Chemistry, page 405, vol.43 No. 3. (March 1971).

- 11- Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Second Edition, Wiley.
- 12- Lloyd A. Currie, Application to Radiochemistry Division, National Bureau of Standards, Washington D.C. 20234.
- 13- R.R. Greenberg, B.S. Carpenter, "High Accuracy Determination of U-235 in Nondestructive Assay Standards By Gamma Spectrometry". Center for Analytical Chemistry National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD 20899(USA), Jurnal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, vol. 111, No. 1, 177- 197, (1987).
- 14- N. Bachvarov, T. Dragnev, S. Georaiev, J. Karamanova, T. Ruskov, T. Tomov., "Quantitative Determination of U Content and Its U-235 Enrichment By Combined Gamma X-Ray Fluorescent Measurements", Radiochem. Radioanal. Letters /14/1 1-8 (1973).
- 15- T.N. Dragnev, Zh.S. Karamanova, B.P. Damyanov, "Several New Nuclear-Physical Methods For The Determination Of The Isotopic Composition And Amounts Of Thorium".

DETERMINATION OF URANIUM ENRICHMENT USING LOW ENERGY X AND GAMMA RAYS

*F. Asgharizadeh, M. Ghannadi Maragheh
Jaber Ibn Hayan Research Laboratories
Atomic Energy Organization of Iran*

Abstract

For determination of uranium isotopic fraction, generally, Mass Spectrometry is used. When this system is not available and in the case of need to local measurements, by using of transportable detectors, the technique of measurement low-energy X and gamma rays, could be employed.

This paper is a nondestructive and accurate method for determination of uranium enrichment (isotopic fraction of U-235) using Gamma-Spectrometry system equipped with a High-purity Germanium detector.

The basis is, comparing the 89.96 keV thorium X ray from U-235 decay with a 92-keV gamma ray doublet from a U-238 daughter.

Because the gamma ray and X ray used for the determination are close in energy, the self-absorption corrections are minimized.