

瞬发 射线中子活化分析的现状与发展

张兰芝,倪邦发,田伟之,黄东辉,张桂英,刘存兄,王平生,刘立坤,李德红

(中国原子能科学研究院核物理研究所,北京 102413)

摘要:概述了瞬发 射线中子活化分析(PGNAA)的现状与发展,重点介绍了PGNAA的基本原理,国际上已建的PGNAA装置概况、PGNAA方法学中的单比较器 k_0 法和高能 射线的效率刻度技术,以及PGNAA在新材料、环境样品、生物和药物以及矿物中H、B、N、Cl等轻元素分析测定方面的日益发展的应用状况。此外,还介绍了在中国原子能科学研究院重水研究堆上建立的热中子束PGNAA实验装置。

关键词:瞬发 中子活化分析; k_0 法;效率刻度

中图分类号:O571.5;TL929

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2005)03-0282-07

Status and Development of Prompt γ -ray Neutron Activation Analysis

ZHANG Lan-zhi, NI Bang-fa, TIAN Wei-zhi, HUANG Dong-hui,
ZHANG Gui-ying, LIU Cun-xiong, WANG Ping-sheng, LIU Li-kun, LI De-hong
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-50, Beijing 102413, China)

Abstract: The status and development of prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) were briefly summarized in the paper. The principle of PGNAA was introduced in detail. The international PGNAA facilities, the standardization of PGNAA k_0 method, and a wide range of high energy gamma ray efficiency calibration as well as the application of PGNAA for light elements determination, such as H, B, N, Cl etc., in new materials, environmental samples, biological and mineral samples were emphasized. In addition, a new simple thermal neutron beam facility for PGNAA spectrometer mounted on Heavy Water Research Reactor (HWRR) at China Institute of Atomic Energy was also introduced.

Key words: prompt gamma neutron activation analysis; k_0 method; efficiency calibration

中子活化分析(NAA)由于具有高准确度、高灵敏度和非破坏性分析等特点而被广泛应用于科研和工农业生产。然而,对于一些轻元素(如H、B、N、P等)的测定,常规NAA技术显

得无能为力,其他分析方法在样品处理和分析灵敏度等方面亦有很大局限。瞬发 射线中子活化分析(PGNAA)对非破坏轻元素的分析灵敏度具有优势,H的分析灵敏度目前已达 $1\mu\text{g}$,

收稿日期:2003-09-03;修回日期:2004-06-20

作者简介:张兰芝(1976—),女,山东临沂人,硕士研究生,分析化学专业

B 为 0.01 μg。对大样品中轻元素的高灵敏非破坏性分析,PGNAA 更是惟一的分析方法,可作为常规仪器中子活化分析技术的重要补充。

近年来,随着中子束流装置^[1~5]、测量装置、核电子仪器及相应 PGNAA 伽马谱、数据库^[6~9]和 k_0 法的飞速发展,PGNAA 的应用领域不断增加^[10,11]。

1 PGNAA 基本原理

1.1 基本原理

PGNAA 利用中子束流轰击靶样品中各种元素的原子核,原子核俘获中子后生成激发态复合核(A + 1, Z),并在小于 10⁻¹⁴ s 时间内退激释放出能量为 2 keV ~ 10 MeV 的 射线,通过 HPGe 探测,根据各特征峰的能量和强度(峰面积)对元素进行在线定性和定量分析。NAA 则是测量生成的放射性核素(A + 1, Z)在衰变过程中释放的各特征 射线,进行元素的定性和定量分析,是一种离线分析方法。图 1 描述了 Au 的 NAA 和 PGNAA 的过程和区别。由图 1 可看出,二者分析的 射线来源不同,存在着本质的区别。

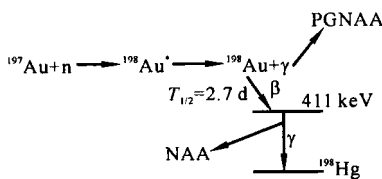


图 1 NAA 与 PGNAA 原理示意图

Fig.1 Scheme of routine NAA and PGNAA

式(1)是 PGNAA 的基本公式^[12]:

$$P_A = N \cdot t = \frac{N_A \cdot W}{M} \cdot t \quad (1)$$

其中: N 为靶核素原子数; N_A 为阿弗加德罗常数; W 为核素丰度; W 为靶元素的质量; M 为靶元素的摩尔质量(g/mol); σ 为中子俘获截面; ϕ 为中子注量率; ϵ 为全能峰的探测效率; t 为照射时间; λ 为分支比; P_A 为特征 射线峰计数。

对瞬发 射线定量分析来说,它不涉及衰变校正,也不会达到饱和,它的照射时间与测量时间是同时的,因而,PGNAA 的计算公式比

NAA 的简单。

1.2 PGNAA 的相对法和单比较器 k_0 法

目前,PGNAA 的元素定量方式有两种:相对法和单比较器 k_0 法^[13]。相对法元素含量的计算式为:

$$A_{px}/A_{ps} = W_{px}/W_{ps} \quad (2)$$

其中: A_{px} 和 A_{ps} 分别表示待测元素和其标准的分析峰强度; W_{px} 和 W_{ps} 分别表示待测元素和其标准的元素含量。

式(2)在元素含量计算形式上与 NAA 的计算方法虽相似,但计算却简单些。由于待测样品及其标准不能同时照射,需要考虑由此引入的误差源项。

k_0 法用下面两式来表示:

$$k_{0,x} = \frac{M_{c,x} \cdot x}{M_x \cdot c \cdot c} \quad (3)$$

$$k_{0,x} = \frac{A_{p,x}/x}{A_{p,c}/c} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中,脚标 x 和 c 分别代表待测元素和比较器元素。式(3)是 k_0 的理论计算公式,式(4)是 k_0 的实验计算公式。

k_0 法待测元素含量 C_x 的计算公式如下:

$$C_x = \frac{A_{p,x} \cdot c}{A_{p,c} \cdot k_{0,c}(x)} \quad (5)$$

2 国际上已建 PGNAA 设施概况

自上个世纪 60 年代以来,随着 HPGe 探测器制造技术、快电子学以及软件的迅速发展,PGNAA 也得到快速发展。迄今为止,世界上至少已在反应堆上建立了 30 个 PGNAA 设备^[14,15],中子注量率为 10⁶ ~ 10¹¹ cm⁻² · s⁻¹。

表 1 列出了部分 PGNAA 设施及其参数。

3 PGNAA 的 k_0 法研究及高能 射线探测效率刻度技术

3.1 k_0 法

PGNAA 研究一般采用 k_0 法^[16]。该方法只需要一个比较器元素就可对所有探测到的元素进行定量分析。一旦元素 k_0 值被准确测定,所有的实验室均可以使用,从而在很大程度上避免了制备标准所带来的误差,保证了数据的准确性。符合 测量技术^[17,18] 也已越来越受到重视。

表1 部分 PGNAA 设施统计一览表
Table 1 Part of reactor based PGNAA facilities

装置所在地	束流种类	$/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	建成年
Cornell Univ. , Ithaca		1.7×10^6	1966
Univ. of Washington , Seattle			1968
AEC, Orsay	弯导管	2×10^7	1969
TU Munchen		2×10^7	1973
ILL , Grenoble	冷导管	1.5×10^{10}	1973
PINST, Pakistan		1.2×10^7	1975
IVIC, Venezuela		4.8×10^7	1976
Los Alamos	内束	4×10^{11}	1976
ILL , Grenoble	导管	8×10^8	1979
Univ. of Maryland+NBSR	热中子	4×10^8	1979
JAERI, Tokai	热中子		1980
MURR, Columbia		5×10^8	1981
Univ. of Michigan , Ann/ Arbor		2.4×10^7	1982
KURR, Kyoto	热导管	2×10^6	1983
McMaster Univ. Hamilton		6×10^7	1984
N. C. State Univ. , Raleigh		1×10^7	1986
ILL , Grenoble	热导管	1.3×10^8	1987
KFA Julich	冷中子束	2×10^8	1987
Imperial College , Ascot		2×10^6	1987
AEC, Pretoria			1988
Cornell Univ. , Ithaca	冷中子束		1989
CRN , Strasbourg	冷中子束	1×10^6	1990
DINR , Vietnam	热中子束	5×10^6	1992
BNC, Budapest	导管	2×10^6	1993
JAERI, Tokai	冷和热中子束	1.4×10^8 , 2.4×10^7	1993
MIT, Cambridge	衍射中子束	6×10^6	1993
NBSR , Gaithersburg	冷导管	1.5×10^8	1993
NBSR , Gaithersburg	冷导管	8×10^8	1996
Univ. of Texas , Austin	冷导管	5×10^7	1997
SINQ , Villigen	脉冲 ;冷中子	7×10^7	1997
HANARO , KAERI	冷中子	8×10^7	2001
CARR, CIAE	冷,热中子	约 10^7	建造中

目前,PGNAA 的 k_0 值来源有两种:一种是

通过实验得到的测定值,如 JAERI 的 Yonezawa^[19]、匈牙利的 Molnar^[13]、美国 NIST 的 Paul^[20] 等。所采用的比较器元素有 H(2 223 keV)、Cl(³⁶Cl, 1 951 keV)等;另一种是采用绝对伽马强度进行计算,如韩国 KAERI^[21]。1997 年,IAEA 的国际核数据委员会组织了一个 CRP 项目,对 PGNAA 的基础数据和 k_0 值进行了评价,于 2002 年建立了 PGNAA 数据库(ENSDF, Evaluated Nuclear Structure Data File)。该数据库还包含部分衰变伽马射线数据。

3.2 PGNAA 的探测效率刻度

尽管 k_0 法有很多方便之处,数据库也已建立,但在使用时还必须注意效率刻度。PGNAA 的射线不仅数量多(几万条),且能量高达 11 MeV,探测效率的准确刻度相对困难。目前的标准源的衰变伽马射线能量覆盖范围小于 4.5 MeV,这对常规 NAA 足够,但对 PGNAA 是不够的。PGNAA 现较普遍采用的技术是在低能部分采用标准源(如¹⁵²Eu、¹³⁷Cs、²⁴¹Am、¹⁸²Ta、¹³³Ba、²⁴Na、⁵⁶Co、⁸⁸Y、²²⁶Ra 等),⁶⁶Ga 是 3~4.8 MeV 范围内一个很好的效率刻度过渡源,在高能部分采用³⁵Cl(n,)³⁶Cl 或¹⁴N(n,)¹⁵N 的瞬发伽马射线。

图 2 是匈牙利 BNC 的效率刻度曲线^[22],采用了 8 次拟合曲线方程,所得到的曲线在高能部分的不确定度大于 3%。

4 PGNAA 的应用

4.1 冷中子 PGNAA 的探测灵敏度

从原理上讲,PGNAA 可以测定任何天然元素。表 2 列出了 79 种元素的 PGNAA 探测限。在实际应用中,PGNAA 主要用于 H、B、N、S、P、Cd、In、Gd、Hg 等轻元素或大截面元素的非破坏测定,涉及到各个领域各种各样的样品,如金属^[23]、环境样品^[24,25]、水泥^[26]、煤炭^[27,28]、老鼠^[29]、食品^[30]、考古^[31,32]、不锈钢^[33]、陨石中的 Si 研究^[34]以及参考物质元素定值^[35]等。

4.2 H 的测定

PGNAA 的应用近年来不断增加^[9]。材料中 H 的存在对材料的性能有极大影响,金属中的 H 可能使金属变脆,也能改变石英和半导体的性能。然而,适合于测量 H 的方法很少,热

表 2 冷中子 PGNAA 的探测灵敏度
Table 2 Detection limit of cold neutron PGNAA

元素	探测灵敏度/ (s ⁻¹ · mg ⁻¹)	元素	探测灵敏度/ (s ⁻¹ · mg ⁻¹)	元素	探测灵敏度/ (s ⁻¹ · mg ⁻¹)	元素	探测灵敏度/ (s ⁻¹ · mg ⁻¹)
H	3.20	Cr	0.540	Pd	1.10	Ho	5.40
Li	6.10 × 10 ⁻²	Fe	0.190	Ag	3.90	Er	19.0
Be	3.70 × 10 ⁻³	Mn	4.60 × 10 ⁻⁴	Cd	4.50 × 10 ²	Tm	2.70
B	2.00 × 10 ³	Co	6.10	In	8.00	Yb	1.50
C	1.50 × 10 ⁻³	Ni	0.450	Sn	1.70 × 10 ⁻²	Lu	4.70
N	1.20 × 10 ⁻²	Cu	0.630	Sb	0.190	Hf	8.60
O	2.20 × 10 ⁻⁴	Zn	0.160	Te	0.480	Ta	59.0
F	6.30 × 10 ⁻³	Ga	0.400	I	0.690	W	0.320
Na	0.640	Ge	0.390	Xe	1.30	Re	1.30
Mg	3.40 × 10 ⁻²	As	0.770	Cs	1.30	Os	0.610
Al	0.100	Se	1.30	Ba	0.530	Ir	36.0
Si	2.60 × 10 ⁻²	Br	0.480	La	0.290	Pt	1.20
P	0.120	Rb	2.90 × 10 ⁻²	Ce	4.00 × 10 ⁻²	Au	16.0
S	0.220	Sr	0.150	Pr	0.430	Hg	46.0
Cl	6.00	Y	0.170	Nd	5.30	Tl	4.90 × 10 ²
K	0.500	Zr	1.50 × 10 ⁻²	Sm	1.30 × 10 ³	Pb	1.50 × 10 ⁻³
Ca	9.60 × 10 ⁻²	Nb	0.140	Eu	1.10 × 10 ³	Bi	1.70 × 10 ⁻³
Sc	8.20	Mo	0.450	Gd	3.20 × 10 ³	Th	5.40 × 10 ⁻²
Ti	1.50	Ru	0.420	Tb	0.670	U	4.20 × 10 ⁻³
V	2.00	Rh	12.0	Dy	41.0	²³⁵ U *	3.80 × 10 ⁻⁵

注:假设冷中子注量为 10⁸ s⁻¹ · cm⁻²

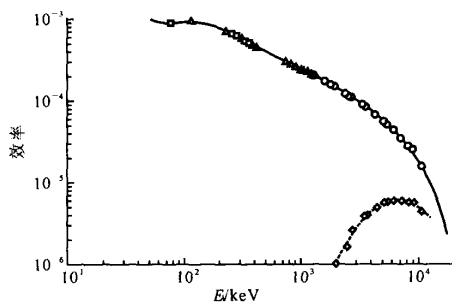


图 2 匈牙利 BNC 实验室

全能峰和单逃逸峰绝对效率刻度曲线

Fig.2 Absolute full energy(FE) and single escape(SE) peak efficiencies of the Budapest ray spectrometer in Compton suppression mode

实线——FE₂₀₀₀; ——¹³³Ba; ——¹⁵²Eu;
——²⁴Na; ——¹⁵N

虚线——SE₂₀₀₀; ——¹⁵N SE

中子活化分析常用于 H 的测量。PGNAA 与中子照相技术结合,用于钛合金喷气式发动机压缩片分析,有效地测量了氢脆是否引起了压缩片损坏。

PGNAA 与小角中子散射相结合,研究纳米晶体金属和氧化铝材料的孔径和 H 的含量。石英中的 H 含量已经测到了 10⁻⁵量级,半导体级别的 Ge 中的 H 含量低于 10⁻⁴量级。在这两种材料中,H 的含量均比所希望的要低。目前,一个热门课题是用 PGNAA 探索 H 燃料电池的潜在材料。碳纳米管和 FeTi_{1.15}O_{0.24} 合金材料一度曾被认为是潜在储 H 的材料,通过 PGNAA 的测量揭示了这些材料几乎没有 H 吸附能力。使用 PGNAA 测量蜡膏(cerates)和锆酸盐(zirconates)取得了巨大成功,表明它们为固体质子导体(solid protonic conductor),H 吸附达到了 2.5%(摩尔百分数)。

冷中子测 H 的另一个重要应用是支持中子散射研究。由于 H 的散射截面很大 ($8 \times 10^{-27} \text{ m}^2$), 材料中 H 的含量必须准确知道, 才能找到产生本底的原因。当使用中子散射研究含 H 物质时, 科学家们通常使用氘来代替 H 以降低不必要的本底。PGNAA 可用来测定含 H 物质的纯度。

4.3 B 的测定

B 是另一个难于用其它分析技术准确测定的元素。热中子 PGNAA 已经用于测定食品和其他生物材料、硅硼酸玻璃和地质标准物质中的 B。冷中子 PGNAA 对某些材料可以测到低于 10^{-6} 级的 B, 如钢材、用于标准物质的难熔合金、聚合物、巴西树木的年轮 (Brazilian tree ring)、陨石以及用于发展地质分析目的的矿物标准物质。

4.4 N 的测定

PGNAA 也是材料中总 N 非破坏测定的极少方法之一。凯氏测氮法 (Kjedahl) 常常不能测定总 N, 这种方法是它的一种补充。用于标准物质定值的目的, 热中子 PGNAA 可以测定食品和农业材料中 1% 以上的 N。通过 PGNAA 测定单粒种子中 N 的含量, 进而推算蛋白质的含量以鉴定种子质量。冷中子 PGNAA 可以提高 N 的探测限, 对土壤样品可达到 0.1%。

4.5 其他元素的测定

冷中子 PGNAA 测氢的散射严重, 使分析变得复杂, 生物和农产品试样均用热中子 PGNAA 进行多元素定值。在地质样品中, 冷中子 PGNAA 结合 AMS 用于玄武岩中宇宙射线产生的 ^{36}Cl 的测定, 总 Cl 用 PGNAA 测定, ^{36}Cl 与 ^{35}Cl 之比用 AMS 测定。PGNAA 最近也用于火星陨石的测定。

PGNAA 大量用于化合物的组成测定, 如 LiC 电池、沸石催化剂、YBCaO 超导体和用于磁数据储存的 Cr/V 合金以及 YBaNiO 超导体多元素掺杂元素 Ca、Zn、Mg 等的多元素测定。Kasztovszky^[25] 用 PGNAA 测定古银圆的成分主要由 Ag-Cu 组成。1~2 世纪的, Ag 约占 65%; 16 世纪的, 约占 80%; 19~20 世纪的约占 85~90%。2~4 世纪的青铜胸针的组成可分为 3 组, Cu-Zn 组, Cu-Zn-Sn 和 Cu-Sn 组。

PGNAA 已用于物理和化学过程研究^[12], 如固体质子导体的吸氢过程研究, 固体催化反应机理等等。为了监测混凝土圆柱干燥的一致性, H 作为半圆截面位值的函数而被测定。为了证实改变反应物的量是否引起胶片化学式的改变, PGNAA 最近被用于 Nafion 胶片的合成、聚四氟乙烯衍生物作为半透明膜的大量应用研究。

5 中国原子能科学研究院重水研究堆上的热中子束 PGNAA 装置

PGNAA 对于一些特定元素和特殊领域的应用十分重要。本实验室正在进行 PGNAA 研究, 以作为常规 NAA 的补充。在将建立的中国先进研究堆 (CARR) 上设计了用于 PGNAA 的热中子孔道和冷中子孔道, 以便将来深入进行 PGNAA 研究。目前, 在中国原子能科学研究院 (CIAE) 重水研究堆 (HWRR) 0 号水平孔道上已建立了简单的热中子束 PGNAA 实验设施 (图 3)。

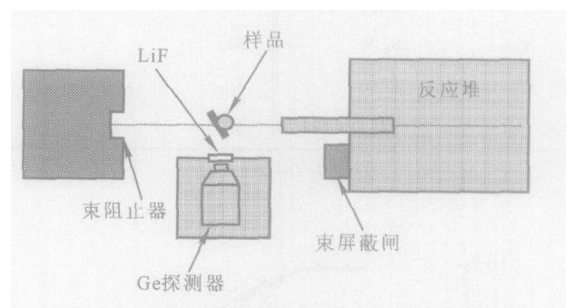


图 3 CIAE 重水研究堆简单的 PGNAA 结构

Fig. 3 A simple PGNAA facility in CIAE HWRR

PGNAA 的实验设施主要由探测系统、样品支持架、屏蔽系统及中子准直聚焦器件等组成, 样品处的中子注量率约为 $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。已在该系统上测定了一个海底多金属结核样品, 图 4 是测得的 PGNAA 谱图。从图 4 初步找到了 H、B、Mn、Na、Cl、Ni、Al、Cu、Zn、Ge、Ga、Sn、Cr、Fe 等 14 种元素, 目前尚不能进行定量分析。从图 4 可以看出: 该谱十分复杂, 总共有 418 个峰, 其中包括瞬发峰、同质异能态的峰、短寿命核素的衰变峰、高能 的单逃逸和双逃逸峰。

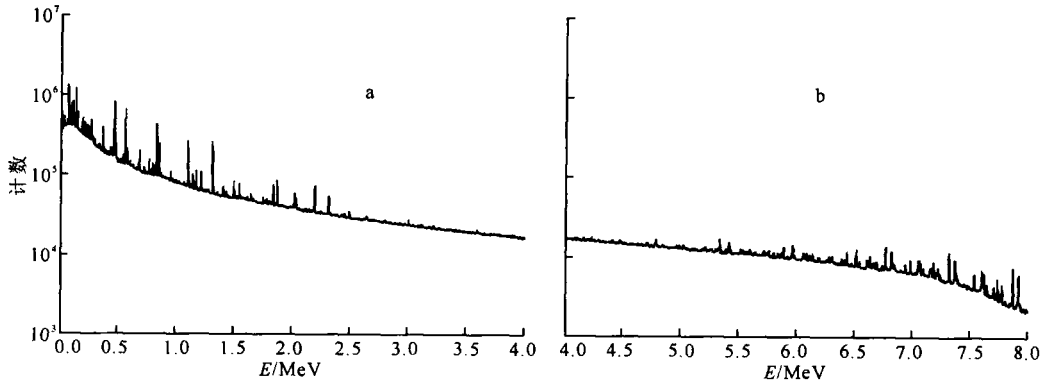


图4 海底多金属结核样品的 PGNAA 谱

Fig.4 PGNAA spectra of deep sea multi-metal nodule sample

a——80 keV ~ 3.8 MeV ; b——3.8 ~ 7.6 MeV

6 结束语

瞬发中子活化分析技术在轻元素的定性定量分析方面具有独到之处,尤其是对影响高科技材料性能的 H、B 等轻元素的分析,这是目前有关 PGNAA 研究工作活跃的一重要原因。但 PGNAA 也有一些局限,如对大多数元素的灵敏度不高(相对于 NAA),每次只能分析一个样品,且分析周期长等。另外,由于 PGNAA 是在线束流分析,本底较高,需要精心设计中子和伽马屏蔽系统,通常还需要使用反康普顿仪来进一步降低本底。

参考文献:

- [1] Byun SH, Choi HD. Design Features of a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis at HANARO[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 413 ~ 416.
- [2] Molnar G, Belgya T, Dabolczi L. The New Prompt Gamma-activation Analysis Facility at Budapest[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(1): 111 ~ 115.
- [3] Paul RL, Lindstrom RM, Heald AE. Cold Neutron Prompt Gamma-ray Activation Analysis at NIST-recent Development[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(1): 63 ~ 68.
- [4] Crittin M, Kern J, Schenker JL. First Result From the Prompt Gamma-ray Activation Facility at PSI[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 399 ~ 404.
- [5] Naqvi AA, Fazal-ur-Rehman B, Al-Jarallah MI. Performance Tests of External Moderators

of a PGNAA Setup[J]. Appl Radiat Isot, 2003, 58(1): 27 ~ 38.

- [6] Al-Jarallah MI, Naqvi AA, Fazal-ur-Rehman B, et al. Fast and Thermal Neutron Intensity Measurements at the KFUPM PGNAA Setup[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res B, 2002, 195(3-4): 435 ~ 441.
- [7] Revay Z, Molnar GL, Belgya T, et al. A New Gamma-ray Spectrum Catalog and Library for PGAA[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2001, 248(2): 395 ~ 399.
- [8] Revay Z, Molnar GL, Belgya T, et al. A New Gamma-ray Spectrum Catalog for PGAA[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 383 ~ 389.
- [9] Kishikawa T, Noguchi S. Photopeak Profile of Full Energy and Escape Peaks in Neutron Capture Prompt Gamma Ray Spectra[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(2): 211 ~ 217.
- [10] Paul RL, Lindstrom RM. Determination of Hydrogen in Metals, Semiconductors, and Other Materials by Cold Neutron Prompt Gamma-ray Activation Analysis[A]. Materials Research Society Symposium Proceedings[C]. [s. n.]: [s. l.], 1998. 185 ~ 190.
- [11] Paul RL. Characterization of High-tech Materials by Nuclear Techniques[A]. American Nuclear Society Symposium Proceedings[C]. Washington DC: American Nuclear Society, 2002. 481 ~ 478.
- [12] Sudarshan K, Acharya RN. Determination of Prompt k_0 Factors PGNAA[A]. Nair AGC. The 2nd Meeting of the IAEA CRP on PGAA[C]. Vienna: IAEA, 2001. 39 ~ 43.

- [13] Molnar GL, Revay Z, Paul RL, et al. Prompt Gamma Activation Analysis Using the k_0 Approach[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1998, 234 (1-2): 21 ~ 26.
- [14] Paul RL, Lindstrom RM. Prompt-gamma Activation Analysis: Fundamental and Application [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 243 (1): 181 ~ 189.
- [15] Choi D, Sun GM, Byun SH, et al. Progress and Plan of the PGNAA Facility at HANARO [A]. The 2nd Meeting of the IAEA CRP on PGNAA [C]. Vienna:IAEA, 2001. 29 ~ 32.
- [16] Acharya RN, Sudarshan K, Nair AGC. Measurement of k_0 -factors in Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2001, 250(2): 303 ~ 307.
- [17] Ember PP, Belgya T, Molnar GL. Improvement of the Capabilities of PGAA by Coincidence Techniques[J]. Appl Radiat Isot, 2002, 56:535 ~ 541.
- [18] Ember PP, Belgya T, Weil JL, et al. Coincidence Measurement Setup for PGAA and Nuclear Structure Studies [J]. Appl Radiat Isot, 2002, 57:573 ~ 577.
- [19] Mastue H, Yomezawa C. k_0 Standardization Approach in Neutron-induced Prompt Gamma-ray Analysis at JAERI [J]. Radioanal Nucl Chem, 2000, 245(1): 189 ~ 194.
- [20] Paul RL, Lindstrom RM. Proc 2nd Intern k_0 Users Workshop [R]. Ljubijana, Slovenia:Institute Josef Stefan, 1997.
- [21] Choi HD, Sun GM. Development of a Database for PGNAA [R]. Vienna:IAEA, 1999.
- [22] Revay Z, Molnar GL. Characterization of Neutron Beam and Gamma Spectrometer for PGNAA [A]. The 2nd Research Co-ordination Meeting on PGNAA [C]. Vienna:IAEA, 2001. 62.
- [23] Kasztovszky Z, Revay Z, Belgya T, et al. Non-destructive Analysis of Metals by PGAA at Budapest Research Reactor [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 379 ~ 382.
- [24] Yonezawa C, Matsuo H, Hoshi M. Multi-element Analysis of Environmental Samples by Cold and Thermal Guided Neutron Induced Prompt Gamma-ray Measurement [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(1): 81 ~ 85.
- [25] Kuno A, Matsuo M, Takano B, et al. Neutron Induced Prompt Gamma-ray and Instrument Neutron Activation Analysis of Urban Estuarine Sediment [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 218 (2): 169 ~ 176.
- [26] Lima CS, Tickner JR, Sowerby BD. An Orbelt Elemental Analyzer for the Cement Industry [J]. Appl Radiat Isot, 2001, 54: 11 ~ 19.
- [27] Orsaru MB, Jecny Z. Application of PGNAA for Bulk Coal Samples in a 4 Geometry [J]. Appl Radiat Isot, 2001, 54: 519 ~ 526.
- [28] Borsaru M, Biggs M, Nicholsc W, et al. The Application of Prompt-gamma Neutron Activation Analysis to Borehole Logging for Coal [J]. Appl Radiat Isot, 2001, 54: 335 ~ 343.
- [29] Oura Y, Enomoto S, Nakahara H, et al. Prompt Gamma-ray Activation Analysis of Rats [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 311 ~ 315.
- [30] Anderson DL. Neutron Capture Prompt Gamma-ray Activation Analysis of Meat Homogenates [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244 (1): 225 ~ 229.
- [31] Nakahara C, Oura Y, Sueki K, et al. Some Basic Studies on Nondestructive Elemental Analysis of Bulky Sample by PGAA [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 244(2): 405 ~ 411.
- [32] Oura Y, Saito A, Sueki K, et al. Prompt Gamma-ray Analysis of Archaeological Bronze [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1999, 239(3): 581 ~ 585.
- [33] Rajput MU, Ahmad M, Ahmad W. Prompt Gamma Neutron Activation of 316L Stainless Steel [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 243 (3): 719 ~ 722.
- [34] Latif SK, Oura AY, Ebihara M, et al. Prompt Gamma-ray Analysis (PGA) of Meteorite Samples, With Emphasis on the Determination of Si [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1999, 239 (3): 577 ~ 580.
- [35] Yoshikawa H, Yonezawa C, Kurosawa T, et al. Measurement of ^{30}Si as a Tracer by Neutron-induced Prompt Gamma-ray Analysis [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1997, 215(1): 95 ~ 101.