

중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도분석정확도제고에 대한 연구

김용훈, 박영일

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《원자력에 대한 연구사업도 잘하여야 하겠습니다.》(《김일성전집》 제60권 351페이지)

중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도분석에서 중성자의 리용률을 높이는 문제와 시료큐베트를 통과하지 않은 중성자들이 계수관에 들어오는 현상을 없애는 방법에 대해서는 거의나 공개된것이 없다.

중성자투과법을 리용하여 붕소동위체분리공정에서 ^{10}B 농축도를 신속정확히 결정할수 있는 공정분석방법을 확립하기 위하여 분석장치에 중성자반사재와 중성자차폐재를 설치하지 않은 경우와 중성자차폐재만을 설치한 경우, 중성자차폐재와 중성자반사재를 동시에 설치한 경우 분석정확도를 실험적으로 고찰하고 중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도측정의 정확도를 높일수 있는 합리적인 측정조건을 결정하였다.

1. 측정방법

천연붕산수용액의 농도를 변화시키면 그것은 시료에서의 ^{10}B 동위원소함량을 변화시키는것으로 되므로 붕산수용액의 농도를 증가시키면서 중성자투과실험을 진행하여 ^{10}B 동위원소농도에 따르는 중성자흡수도의 변화곡선 즉 $C-A$ 곡선을 작성한다. 여기서 중성자흡수도 A 는 중성자가 매질에 흡수된 정도를 반영하는 물리적량으로서 다음과 같이 표시된다.

$$A = \ln\left(\frac{1}{T}\right) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

여기서 T 는 중성자투과도, I_0 은 입사중성자세기, I 는 시료층을 투과하여나오는 중성자세기이다. 표준시료를 가지고 검량선을 작성할 때와 똑같은 기하학적조건에서 미지시료의 중성자투과실험을 진행하여 중성자흡수도를 결정하며 측정된 중성자흡수도에 대응하는 ^{10}B 농축도를 검량선으로부터 결정한다. 농축된 붕산수용액의 농도를 C_1 , 검량선으로부터 측정된 농축된 붕산시료의 농도를 C_2 라고 하면 붕산의 천연농축도가 $\eta_0 = 18.83\%$ 일 때 농축시료의 농축도는 다음과 같이 계산된다.[2, 3]

$$\eta = \frac{C_2}{C_1} \eta_0 \quad (2)$$

2. ^{10}B 농축도측정실험 및 결과분석

중성자투과계구성에서 중요한것은 중성자검출기가 시료층을 투과하여나온 중성자만을 기록하도록 검출기에 대한 방사선차폐를 원만히 실현하는것이다. 이를 위하여 시료층을 투과한 중성자가 검출기로 입사하는 방향을 제외한 나머지 방향에는 일정한 두께의 차폐재

료를 설치하였다. 두께가 5cm이면 전체 에너지대역의 중성자가운데서 약 90%정도를 차폐할수 있으며 느린중성자는 거의 전부 차폐할수 있다.(표 1)

표 1. B₄C층의 두께에 따르는 중성자투과도와 느린중성자비율의 변화특성모의계산결과

탄화붕소두께/cm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
중성자투과도/%	30.02	24.40	20.24	17.82	15.79	14.17	12.73	11.99	10.94	10.01
느린중성자비율/%	6.75	3.01	1.79	1.67	1.12	0.94	0.89	0.87	0.71	0.69

모의실험결과로부터 중성자방어계는 5cm의 탄화붕소층으로 구성하였다.

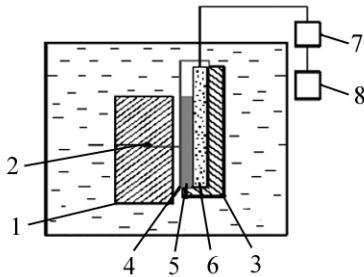


그림 1. 중성자반사재와 중성자차폐재에 의한 중성자투과실험장치구성도

1-중성자반사재, 2-중성자원천,
3-중성자차폐재, 4-고정틀, 5-큐베트,
6-중성자계수관, 7-중성자기록장치, 8-안정전원

따르는 흡수도를 계산하였다.

¹⁰B동위원소농도 C 와 중성자흡수도 A 사이관계를 최소2제곱법에 의해 $A = k \cdot C + \alpha$ 형태로 선형화할 때 비례계수 k, α 는 다음식으로 계산된다.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C}) A_i}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}, \quad \alpha = \bar{A} - k \cdot \bar{C} \quad (3)$$

이 식으로부터 중성자반사재와 중성자차폐재를 설치하지 않은 경우 검량선의 방정식은

$$A = 0.056 \, 2C + 0.005 \, 24, \quad k = 0.056 \, 2 \pm 0.003 \, 8, \quad \alpha = 0.005 \, 24 \pm 0.004 \, 22 \quad (4)$$

로 된다.(그림 2의 ㄱ))

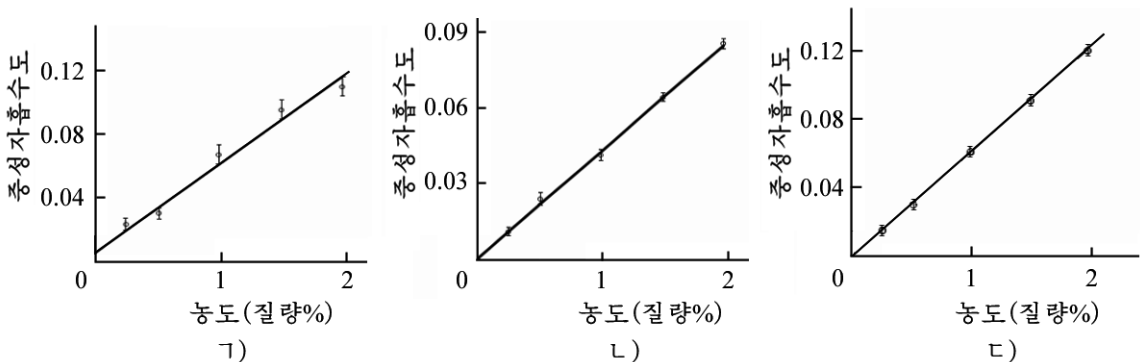


그림 2. ¹⁰B동위원소농도에 따르는 중성자흡수도측정결과

ㄱ) 중성자반사재와 중성자차폐재를 설치하지 않았을 때, ㄴ) 중성자차폐재를 설치하였을 때,
ㄷ) 중성자반사재와 중성자차폐재를 설치하였을 때

검량선으로부터 얻은 미지 농축시료의 농도를 C_2 라고 하면 식 (2)로부터 계산된 ^{10}B 농축도는 $\eta_1 = 48.5 \pm 2.1\%$ 이며 이때 상대오차는 $\varepsilon = 4.41\%$ 이다.

탄화붕소중성자차폐재를 설치한 경우 검량선의 방정식은

$$A = 0.0427C + 0.000341, k = 0.0427 \pm 0.000738, \alpha = 0.000341 \pm 0.00082 \quad (5)$$

로 된다.(그림 2의 L))

탄화붕소중성자차폐재를 설치한 경우 식 (2)로부터 계산된 ^{10}B 농축도는 $\eta_2 = 53.1 \pm 0.7\%$ 이며 이때 상대오차는 $\varepsilon = 1.26\%$ 이다.

탄화붕소중성자차폐재와 흑연중성자반사재를 설치한 경우 검량선의 방정식은

$$A = 0.0613C - 0.000375, k = 0.0613 \pm 0.000331, \alpha = -0.000375 \pm 0.000368 \quad (6)$$

로 된다.(그림 2의 C))

탄화붕소중성자차폐재와 흑연중성자반사재를 설치한 경우 식 (2)로부터 계산된 ^{10}B 농축도는 $\eta_3 = 54.8 \pm 0.2\%$ 이며 이때 상대오차는 $\varepsilon = 0.36\%$ 이다.

중성자차폐재와 중성자반사재를 설치하지 않은 경우, 탄화붕소중성자차폐재만 설치한 경우, 탄화붕소중성자차폐재와 흑연중성자반사재를 동시에 설치한 경우 검량선의 방정식으로부터 계산한 ^{10}B 농축도 분석결과를 표 2에 주었다.

표 2. 중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도 분석결과		
실험조건	^{10}B 농축도/%	상대오차/%
반사재와 차폐재를 설치하지 않은 경우	48.5 ± 2.1	4.41
차폐재만 설치한 경우	53.1 ± 0.7	1.26
반사재와 차폐재를 동시에 설치한 경우	54.8 ± 0.2	0.36

표 2에서 보는것처럼 탄화붕소중성자차폐재와 흑연중성자반사재를 설치한 경우 분석 정확도가 가장 높으므로 중성자반사재와 중성자차폐재를 설치한 중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도 분석방법이 가장 효과적이라는것을 알수 있다.

맺는 말

중성자투과법에 의한 ^{10}B 농축도 분석실험을 통하여 중성자차폐재와 중성자반사재를 동시에 설치한 경우 ^{10}B 농축도 분석감도를 나타내는 비례계수는 $k = 0.0613$ 이며 ^{10}B 농축도 분석오차가 제일 작은 값을 가진다는것을 실험적으로 입증하였다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 56, 8, 87, 주체99(2010).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 58, 10, 87, 주체101(2012).
- [3] P. A. de Groot; Handbook of Stable Isotope Analytical Techniques 1, Elsevier, 142~150, 2004.
- [4] R. E. Criss; Principles of Stable Isotope Distribution, Oxford University Press, 23~35, 2000.

Raising of Accuracy for Analysis of ^{10}B Enrichment Degree by Neutron Transmission Method

Kim Yong Hun, Pak Yong Il

We considered effect of neutron reflector and shielding material on accuracy for analysis, and determined the reasonable measurement condition to establish process analysis method that could decide ^{10}B enrichment degree rapidly and accurately in boron isotope separation process.

Key words: neutron transmission method, ^{10}B enrichment degree, boron isotope separation