

Measurements of Neutron Flux in 2016 KSTAR campaign by Ni-58 Activation Foil

Hyo-Jong LEE^a, In-chang Choi^a, Jong-ku Kwak^b

^aDepartment of Nuclear Engineering in Hanyang University, Seoul, Korea

^bNational Fusion Research Institute (NFRI), Dajeon, Korea

*Corresponding author: fusionist.c@gmail.com

Abstract

KSTAR(Korea Superconducting Advanced Tokamak Research) 내에서 방출되는 중성자는 대부분 D-D 반응에 의한 중성자이다. 이 중성자를 측정하기 위해 몇 가지 방법을 사용하고 있는데, 실험 중 실시간으로 나오는 중성자를 측정하기 위해 Tokamak 외부에 측정기를 설치하는 방법과, Tokamak 내부에 시편을 두어 실험 캠페인이 끝난 후 꺼내어 시편에서 방출되는 붕괴 방사선을 측정하는 방법이다. 본 논문에서는 대표적으로 Ni^{58} 시편을 이용한 NAA(Neutron Activation Analysis)를 조사하였다.

1. Introduction

1.1 Basic Principles

일반적으로 중성자 조사 분석(NAA)를 할 때, 주로 이용하는 반응은 (n, γ) 반응이다. 입자가 중성자를 포획하여 짧은 시간 동안 복합핵(Compound nucleus) 상태로 변한 뒤 감마선을 방출하는 과정을 (n, γ) 반응이라고 한다. 이 과정에서 방출되는 감마선에 따라 NAA 를 두 종류로 구분할 수 있는데 즉발 감마선 분석 (Prompt gamma-ray neutron activation analysis, PGNAA)과 지발성 감마선 분석 (Delayed gamma-ray neutron activation, DGNAA)으로 나뉜다. 실제 실험에서는 시료의 방사성 붕괴 과정과 실험 절차를 고려하여 PGNAA 과 DGNAA 중 하나를 택해 분석에 사용한다.

1.2 Experimental procedures

본 실험에서는 1g 의 Ni-58 시료를 사용하였다. KSTAR 실험 캠페인 동안 토카막 특정 위치에 시료를 넣고 조사시킨 뒤, 실험 종료 후 꺼내어

방출되는 감마선을 측정하였다. 실험에 대한 간단한 과정은 Figure 1 에 잘 나타나 있다.

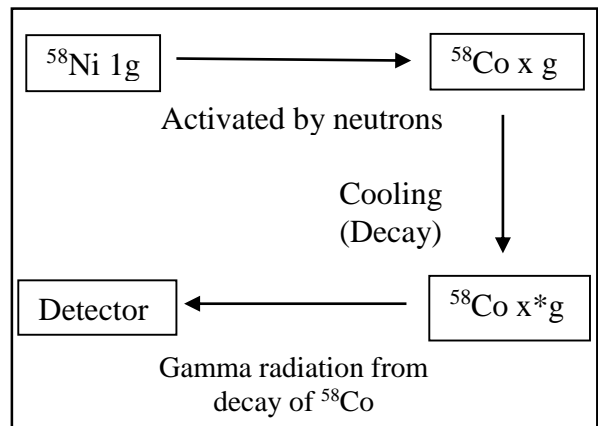


Figure 1 시료에서 방사선을 측정하는 과정

외부에 설치된 측정기는 실시간으로 중성자를 측정할 수 있다는 장점을 가지지만 Geometry 에 의해 중성자가 산란되어 실제 Flux 와는 거리가 먼 값을 얻는다. 반면 NAA 는 Tokamak 내부에 실제로 조사되는 Flux 를 보다 이론적으로 접근할 수 있는 대신, 실험 캠페인 기간 동안에는 꺼내볼 수 없어 시간에 따른 제약이 존재한다. 본 분석에서는 총 실험 캠페인 기간 동안 방출된 중성자의 양 S_{total} 을 수치적으로 계산하였다. 이를 이용하여 후에 Fission Counter 나 He Counter 와 같은, 외부에 설치된 측정기와 Flux 값을 비교하여 Geometry 의 영향이 얼마나 되는지 알아볼 수 있을 것이다.

2. theory

2.1 Decay plot

니켈-58에 중성자를 조사 시켰을 때 나타나는 연쇄 반응은 중성자의 선속, 에너지에 의존한다. 그러나 Kstar 캠페인에서 일어나는 반응은 대부분 D-D 반응이므로, D-D 반응에서 일어나는 중성자만

니켈에 조사된다고 가정할 수 있다. 또한 이 반응에서 방출되는 중성자의 에너지는 2.45MeV 로 열중성자가 아닌 Fast neutron 에 속한다. 때문에 연쇄 반응식에서 열중성자에 대한 항은 무시할 수 있을 것이다. 열중성자 항을 무시한 연쇄반응식은 아래 그림에 잘 나타나 있다.(Figure 2)

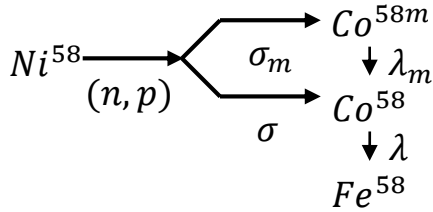


Figure 2 열중성자항을 제외한 Decay plot.

위 그림을 토대로 연쇄반응식을 표현하면 2 개의 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dCo^{58m}}{dt} = Ni\phi\sigma_m - \lambda_m Co^{58m} \quad (1)$$

$$\frac{dCo^{58}}{dt} = Ni\phi\sigma - \lambda Co^{58} + \lambda_m Co^{58m} \quad (2)$$

미분방정식을 풀어 일반식으로 표현하면 t_1 시간 동안 조사했을 때 Ni^{58} 에서 생성된 Co^{58}, Co^{58m} 의 양을 구할 수 있다. 해는 아래와 같다.

$$Co^{58m}(t_1) = \frac{Ni\phi\sigma_m}{\lambda_m} [1 - e^{-\lambda_m t_1}] \quad (3)$$

$$Co^{58}(t_1) = Ni\phi \left[\frac{(\sigma + \sigma_m)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) + \frac{\sigma_m}{\lambda_m - \lambda} (e^{-\lambda_m t_1} - e^{-\lambda t_1}) \right] \quad (4)$$

어느 shot 에서 조사되어 생성된 코발트는 남은 캠페인 기간 동안 냉각되어 방사성 붕괴를 한다. 냉각된 후 남은 Co^{58} 에서 방출되는 감마선 (811Kev) 을 이용하여 시료가 어느 정도의 중성자 조사를 받았는지 역으로 계산할 수 있다. 생성된 코발트가 냉각되어 붕괴될 때 미분방정식은

$$\frac{dCo^{58}}{dt} = -\lambda Co^{58} + \lambda_m Co^{58m} \quad (5)$$

$$Co^{58m} = Co^{58m}(t_1) e^{-\lambda_m t} \quad (6)$$

으로 나타나고 t_2 의 시간동안 냉각시켰을 때 남은 Co^{58} 의 양은

$$Co^{58} = \frac{Ni\phi\sigma_m}{\lambda_m - \lambda} [1 - e^{-\lambda_m t_1}] [e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda_m t_2}] +$$

$$Ni\phi \left[\frac{(\sigma + \sigma_m)}{\lambda} (e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda(t_1+t_2)}) + \frac{\sigma_m}{\lambda_m - \lambda} (e^{-\lambda_m t_1 - \lambda t_2} - e^{-\lambda(t_1+t_2)}) \right] \quad (7)$$

으로 표현된다. 그러나 실제 측정에서는 각 shot 마다 시료에 조사된 시간 t_1 과, 그로부터 실험이

종료되어 측정될 때까지 냉각된 시간 t_2 를 일일이 따져보기 힘든 면이 있다. 때문에 실험 캠페인에서 유효한 일련의 가정을 사용하여 식을 간략화해야 한다.

중성자 조사 후 이루어지는 냉각은 수십일이 넘게 걸린다. 즉, $e^{-\lambda_m t_2} \sim 0$ 으로 가정할 수 있다. 매 shot 마다 중성자 조사시간은 기껏해야 수 분 ~ 수십분에 불과하므로 $\lambda_m t_1 \ll 1$ 이라고 생각할 수 있다. 이 두 가정을 이용하여 식을 간략화하면

$$Co^{58} = Ni\phi (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda(t_1+t_2)}) \left(\frac{\sigma_m}{\lambda_m - \lambda} - \frac{\sigma + \sigma_m}{\lambda} \right) \quad (8)$$

로 나타난다. 여기서 λ 은 매우 작은 물리량을 가지고 있으므로 (0.0009782/day) $\lambda t_1, \lambda t_2 \ll 1$ 으로 가정할 수 있다. 마지막으로, $\lambda \ll \lambda_m$ 의 관계를 이용하여 식을 간소화하면

$$Co^{58} = [\phi t_1] Ni(\sigma + \sigma_m) \quad (9)$$

$$Activation = \lambda [\phi t_1] Ni(\sigma + \sigma_m) \quad (10)$$

위 식을 통해 어느 Shot 동안 조사된 fluence 를 얻을 수 있게 되었다. 실험이 끝난 뒤, 이 시료를 꺼내어 t_3 (180000 sec) 동안 측정하여 누적된 Activation S 를 계산한다.

$$S = [\phi t_1] \epsilon \lambda t_3 Ni(\sigma + \sigma_m) \quad (11)$$

여기서 ϵ 은 Count 당 측정기의 효율을 나타낸다. ($\epsilon = 1.11\%$) 모든 토카막 면적에 대해 누적 Activation 을 구해야 한다면 다음과 같이 적분한다.

$$\int [\phi t] da = \int \frac{S}{\epsilon \lambda t_3 Ni(\sigma + \sigma_m)} da \quad (12)$$

고로 모든 shot 에 대한 누적 Activation 은

$$\frac{S_{total}}{\epsilon \lambda t_3 Ni(\sigma + \sigma_m)} = \sum [A \phi T] \quad (13)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 S_{total} 은 특정 지점에서 꺼낸 시료의 누적 Activation 값을 토카막 면적에 대해 Fitting 한 다음, 전부 더한 값이다. 오른쪽 값을 통해 캠페인 기간 동안 총 조사된 중성자의 양을 구할 수 있으며 평균 shot 당 나온 중성자의 양을 어림할 수 있게 된다.

3. Result analysis

2016 년 KSTAR 실험 후 각 시료의 위치에서 측정한 방사선 측정값은 다음과 같다. ($t_3 = 1.8 * 10^4$ sec)

A point = (1.3, 1.078) 4000 Count
 B point = (1.741, 1.078) 10000 Count
 C point = (2.3, 0) 15000 Count
 D point = (1.741, -1.078) 10000 Count
 E point = (1.3, -1.078) 4000 Count
 F point = (1.3, 0) 12000 Count

(측정은 HPGE 검출기를 사용하였으며 측정 효율은 1.11%이다.)

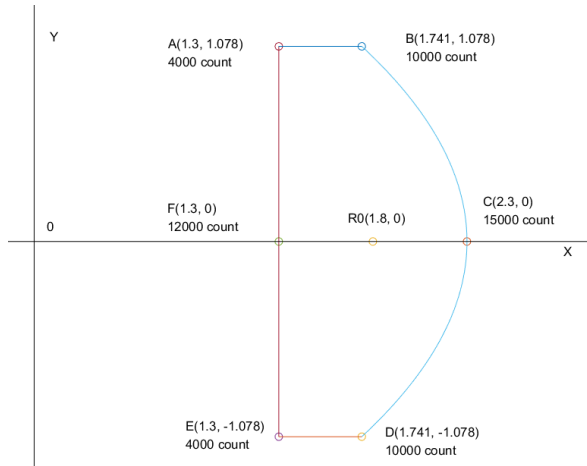


Figure 3 토카막 내에서의 시료 위치와 측정값

측정된 Count 값이 Y 축에 관해 완전히 대칭 된 모양을 이루기 때문에 면적 Line 을 어림할 때 어려운 가정을 대입할 필요는 없다. 본 분석에서는 위치와 Count 둘 다 2 차식을 이용한 Fitting 곡선을 사용하였다. 감마 Count 를 위치에 따른 식으로 Fitting 한 값은 다음과 같다.

$$S(\text{right line}) = -4302.3y^2 + 15000 \quad (14)$$

$$S(\text{left line}) = -6884.2y^2 + 12000 \quad (15)$$

$$S(\text{upper, lower line}) = 13605.4x - 13687.1 \quad (16)$$

또한 위치에 관한 Fitting 식은

$$x(\text{right line}) = -0.481y^2 + 2.3 \quad (17)$$

으로 계산에 필요한 모든 식을 구한 셈이다. 누적 activation S 를 계산하기 위한 식은 다음을 따른다.

(Cross Section 값은 [2]를 따른다고 가정)

$$S_{total} = \oint S da = 609706 \text{ count} * m^2 \quad (18)$$

$$\sum [A\phi T] = \frac{S_{total}}{\epsilon \lambda t_3 Ni(\sigma + \sigma_m)} = 2.46 * 10^{17} \text{ Count}$$

이 값이 시료를 통해 측정한 실험 캠페인 전체에서 조사되는 중성자의 개수이다. Shot 의 개수로 나누어 평균 Shot 당 나오는 중성자 조사는 약 $1.01 * 10^{14}$ 개로 계산된다. (2016 Shot range = 14939 ~ 17362)

4. Conclusions

지금까지 이론적인 계산을 통해 토카막에서 방출된 평균 Shot 당 나오는 중성자의 개수를 어림해 보았다. 이 값은 내부에서 이루어진 측정이므로, 외부에서 측정된 값과 어느 정도 교정을 해야 할 필요가 있다. 더 많은 측정을 통해 교정값을 정확히 계산한다면, 여러 번 반복 측정을 할 필요 없이 보다 편리하게 실험을 진행할 수 있을 것이라고 기대한다.

REFERENCES

- [1] Lylia Hamidatou, Hocine Slamene, Tarik Akhal and Boussaad Zouran, *Concepts, Instrumentation and Techniques of Neutron Activation Analysis*, InTech, 2013
- [2] W. C. Morgan, *Long-Term Neutron Activation Products of Nickel-58*, General Electric, 1963