

รายการอ้างอิง

1. นเรศร์ จันทน์ขาว. การตรวจสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี. เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ. กรุงเทพมหานคร : ชมรมตรวจสอบโดยไม่ทำลาย, 2528.
2. นเรศร์ จันทน์ขาว. ศึกษาการสำรวจยูเรเนียมโดยวิธีการแทรก-เอทซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522.
3. นิวัฒน์ ตะโพนทอง. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอทซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
4. ประสม สุขสว่าง. การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523.
5. วิเชียร รตนธงชัย, สุนันทา ภัทรชาคร และสมพร จองคำ. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ลำนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูฯ ปปว-1/1. ใน กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, รายงานวิชาการประจำปี 2539. หน้า 40-43. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2540.
6. ศศิพันธุ์ ณ สงขลา. การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
7. สุนันทา ภัทรชาคร, อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว, นิวัฒน์ ตะโพนทอง, เมฆา ชัยมานะการ และ Dimic, V. การออกแบบคอตติมเตอร์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. ใน สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, รายงานวิชาการประจำปี 2532. หน้า 141-142. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2533.
8. American Society for Testing and Materials. Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination ASTM Designation : E545-91. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1976.
9. Assuncao, M. P. M., Pugliesi, R., and de Menezes, M. O. Study of the Neutron Radiography Characteristic for the Solid State Nuclear Track Detector Makrofol-E. Apply Radiation and Isotope. 45 (Oct 1994) : pp. 851-855.
10. Baiser, A. Concepts of Modern Physics. 5th ed. New York : McGraw-Hill Inc., 1995.
11. Berger, H. Neutron Radiography. Amsterdam : Elsevier Publishing Co., 1965.

12. Berger, H., ed. Practical Application of Neutron Radiography and Gaging. ASTM Special Technical Publication 586. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1976.
13. Becker, K. Solid State Dosimetry. Ohio : CRC Press, 1973.
14. Chankow, N. A Simple Method for Viewing Track-Etch Neutron Radiographic Images Using a Scanner Proceeding of the 2nd International Topical Meeting on Neutron Radiography System Design and Characterization, Rikkyo Univ., Yokosuka, (Nov. 12-18, 1995) : pp. 290-293.
15. Crispim, V.R., Roberty, N.C., and Reis, M.L. Computerized Tomography with Neutrons. In Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G., and Barton, J. P. (eds.), Neutron Radiography (3). pp.865-872. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990.
16. Csige, I. Detection Efficiency Calculations for CR-39 Plastic Nuclear Track Detectors in Neutron Capture Radiography. In Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G., and Barton, J. P. (eds.), Neutron Radiography (3). pp.835-842. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990.
17. Davidson, J. B., Smith, H. G., and Willems, R. A. A Neutron Sensitive Image Intensifier Television System. In Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G., and Barton, J. P. (eds.), Neutron Radiography (3). pp.353-364. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990.
18. Domanas, J. C., ed. Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1992.
19. Fleischer, R. L., Price, P. B. and Walker, R. M. Nuclear Tracks in Solids. Berkley : University of California Press, 1975.
20. Francois, H., Kurtz, N., Massue, J. P., Monnin, M., Schmitt, R. and Durrani, S. A. (eds.) Solid State Nuclear Track detectors. Oxford : Pergamon Press, 1980.
21. Gardner, R. P. , and Ely, R. L., Jr. Radioisotope Measurement Applications in Engineering. New York : Reinhold Publishing Corp., 1967.
22. Harms, A. A. and Wyman, D. R. Mathematics and Physics of Neutron Radiography. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1986.

23. Herz, R. H. The Photographic Action of Ionizing Radiation. New York : Wiley-Interscience, 1969.
24. Ikeda, Y., Ando, A., Ohkubo, K., and Yokoi, M. A New Imaging Device for Neutron CT. In Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G., and Barton, J. P. (eds.), Neutron Radiography (3). pp.835-842. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990.
25. Krane, K. S. Introductory Nuclear Physics. Singapore : John Wiley & Sons, 1988.
26. Mark, H. F., Gaylord, N. G. and Bikales, N. M. (eds.) Encyclopedia of Polymer Science and technology vol.3. New York : Interscience Publishers, 1965.
27. Markgraf, J. F. W. The Practical Utilization of Nitrocellulose film in Neutron Radiography. In Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G., and Barton, J. P. (eds.), Neutron Radiography (3). pp.353-364. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990.
28. Matsumoto, G., et al. Track-Etch Neutron Radiography with a New Boron Carbide Converter. Nuclear Technology 72 (Feb 1986) : pp. 201-211.
29. Palmgren, A., Reijonen, H., and Leikkonen, H. Development of Capture Gamma Radiography with a Research Reactor. In International Atomic Energy Agency, Irradiation Facilities for Research Reactors. Vienna : IAEA, 1973.
30. Quinn, R.A., and Sigl, C.C. (eds.) Radiography in Modern Industry. New York : Eastman Kodak Company, 1980.
31. Ratcliffe, B. J. Investigation into the Use of Track-Etch Imaging to Produce Neutron Radiographs from a Non-reactor Neutron Source. British Journal of NDT. 80 (May 1988) : pp. 183-188.
32. Turner, J. E. Atoms Radiation and Radiation Protection. New York : Pergamon Press, 1986.
33. Tommasino, L. , Furlan, G., Khan, H. A. and Monnin, M. (eds.) Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences. Singapore : World Scientific, 1990.
34. Von der Hardt, P. and Rottger, H., ed. Neutron Radiography Handbook. D. Reidel Publishing Company, 1981.
35. Wada, N. ²⁵²Cf-based Thermal Neutron Radiography by Using Nitrocellulose Film. In Fujine, S. et al (eds.), Neutron Radiography (3). pp.259-266. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1990.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์เพื่อติดตามความเข้มของนิวตรอน

นิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีต้นกำเนิดมาจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ โดยมีท่อนำนิวตรอนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมายังตำแหน่งที่ทำการทดลอง

การทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนใช้กำลังในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู 700 กิโลวัตต์ โดยกำหนดเงื่อนไขให้การทดลองถ่ายภาพแต่ละครั้งได้รับฟลักซ์ของนิวตรอนที่เท่ากัน การติดตามฟลักซ์ของนิวตรอน (Neutron Flux Monitoring) จึงเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อติดตามความคงที่ของความเข้มของลำนิวตรอนที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ของลำนิวตรอน ใช้หลักการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน (Neutron Activation Analysis) โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นวัสดุตัวอย่าง เมื่ออาบนิวตรอนแล้วแผ่นทองแดงจะมีกัมมันตภาพรังสี ดังสมการที่ (ก1)

$$A = N\sigma\phi(1-e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d} \quad (ก1)$$

เมื่อ	A	คือ กัมมันตภาพรังสีของแผ่นทองแดง
	N	คือ จำนวนอะตอมของทองแดง
	σ	คือ ภาคตัดขวางของทองแดงในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน
	ϕ	คือ ฟลักซ์ของนิวตรอน
	t_i	คือ เวลาในการอาบนิวตรอน
	t_d	คือ เวลาในการสลายตัวหลังจากอาบนิวตรอน
	λ	คือ ค่าคงที่การสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ $0.693/T_{1/2}$ เมื่อ $T_{1/2}$ คือ ครึ่งชีวิตของไอโซโทปรังสี

ทองแดงในธรรมชาติประกอบด้วย 2 ไอโซโทป ได้แก่ ^{63}Cu และ ^{65}Cu เมื่ออาบนิวตรอนแล้ว จะกลายเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาดังรายละเอียดในตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 คุณสมบัติของไอโซโทปรังสีของทองแดงจากการอบนิวตรอน

ไอโซโทป	ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา	ไอโซโทปรังสี	ครึ่งชีวิต	พลังงานของรังสีแกมมา (keV)
^{63}Cu	2.17 b	^{64}Cu	12.701 ชั่วโมง	511, 1345.7
^{65}Cu	4.5 b	^{66}Cu	5.10 นาที	833.4, 1039.2

การทดลองแต่ละครั้ง เมื่อกำหนดค่าตัวแปรในสมการที่ (ก1) ให้คงที่ จะได้ทำให้กัมมันตภาพรังสีของทองแดงแปรผันตามฟลักซ์ของนิวตรอน ดังนั้น

$$A = C \Phi \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่

ในการเปรียบเทียบจึงแทนฟลักซ์ของนิวตรอน ได้ด้วยกัมมันตภาพรังสีที่วัดได้

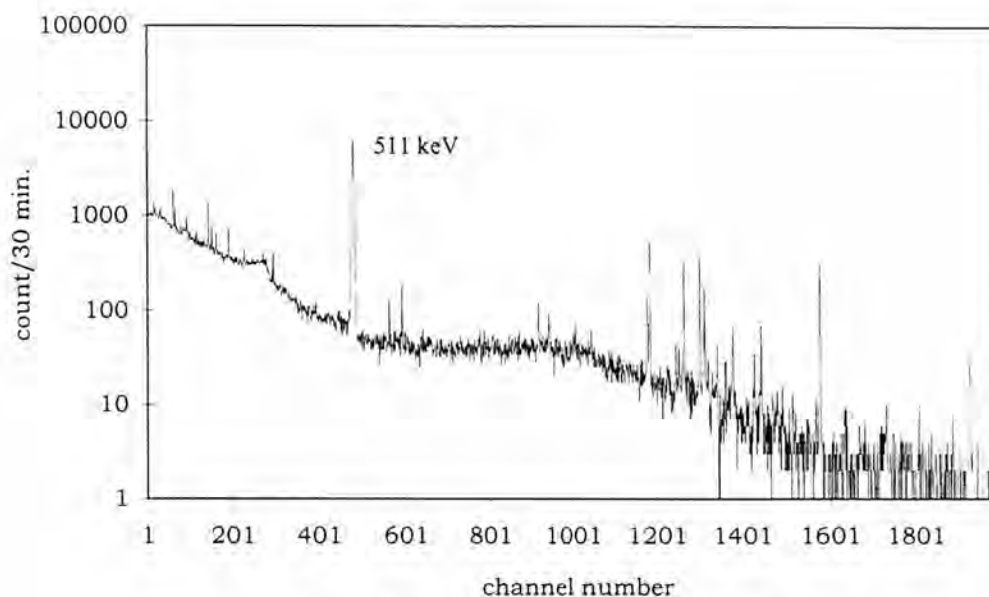
การทดลอง

การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ของนิวตรอน โดยการอบแผ่นทองแดงด้วยนิวตรอน กำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์แต่ละครั้งให้เท่ากัน ได้แก่ เวลาในการอบนิวตรอน (Irradiation time) เวลาในการสลายตัว (Decay time) และเวลาในการวัดรังสีแกมมา (Counting time) เพื่อให้สมการที่ (ก1) เหลือเพียง 2 ตัวแปรในการเปรียบเทียบ ได้แก่ ฟลักซ์ของนิวตรอน (Φ) และกัมมันตภาพรังสี(A) ดังนี้

1. ตัดผืนแผ่นทองแดงขนาด 4.0x5.5 ตารางเซนติเมตร ไว้ด้านหน้าตลับอลูมิเนียม
2. วางตลับอลูมิเนียมไว้ที่ตำแหน่งถ่ายภาพแล้วเปิดชุดเตอร์เพื่อให้แผ่นทองแดงได้รับนิวตรอนเป็นเวลา 30 นาที
3. นำตลับอลูมิเนียมออกมาและปล่อยให้กัมมันตภาพรังสีจากแผ่นทองแดงสลายตัว 6 ชั่วโมง
4. วัดรังสีแกมมาจากแผ่นทองแดง ด้วยหัววัดรังสีแกมมาแบบ GMX โดยใช้เวลาวัด 30 นาที
5. วิเคราะห์กัมมันตภาพรังสีของทองแดง จากรังสีแกมมาพลังงาน 511 keV

ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์รังสีแกมมาพลังงาน 511 keV ซึ่งปลดปล่อยจากไอโซโทปรังสี ^{64}Cu ของทองแดงซึ่งอาบนิวตรอนในวันที่ทำการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแต่ละครั้ง ได้สเปกตรัมของรังสีแกมมาดังรูปที่ ก1 และผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ ก2

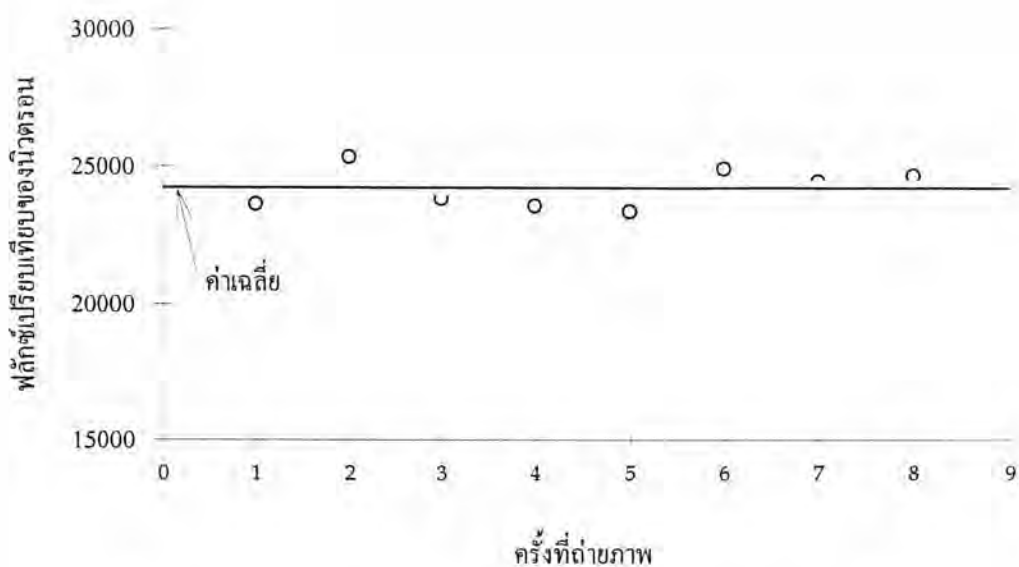


รูป ก1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของทองแดงจากการอาบนิวตรอน

ตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมาของทองแดงจากการอาบนิวตรอน

ครั้งที่	รังสีแกมมา (count/30 min.)
1	23641
2	25357
3	23845
4	23585
5	23384
6	24932
7	24482
8	24689
เฉลี่ย	24239

จากตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมาจากแผ่นทองแดง ซึ่งแสดงเป็นค่าเปรียบเทียบฟลักซ์ของนิวตรอนที่ใช้ทำการถ่ายภาพแต่ละครั้ง คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้ร้อยละ 3 และเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ ก2 แสดงว่า ฟลักซ์ของนิวตรอนที่ใช้ทำการถ่ายภาพแต่ละครั้ง มีค่าใกล้เคียงกัน ความแตกต่างของฟลักซ์ของนิวตรอนในการทดลองแต่ละครั้งจึงมีผลต่อการถ่ายภาพค่อนข้างน้อย



รูปที่ ก2 แสดงการเปรียบเทียบนิวตรอนฟลักซ์ในการถ่ายภาพแต่ละครั้ง

ภาคผนวก ข.

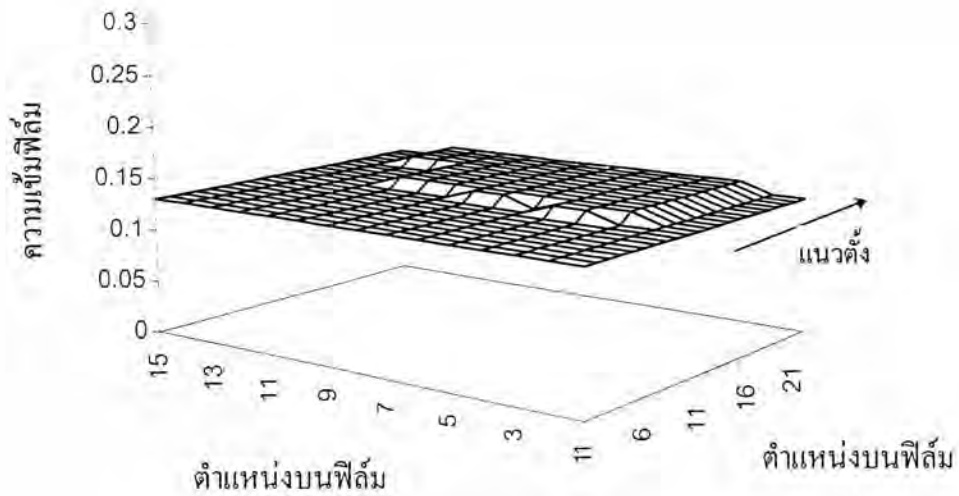
การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของนิวตรอน

นิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพได้รับจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โดยมีท่อนำนิวตรอนมายังตำแหน่งที่ทำการทดลอง ลักษณะของท่อนำนิวตรอนเป็นแบบปลายบานออก ทำให้ตำแหน่งที่ถ่ายภาพมีขนาดของลำนิวตรอน 20X17 ตารางเซนติเมตร ลำนิวตรอนที่มีการกระจายความเข้มของนิวตรอนสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด จะทำให้แต่ละจุดบนวัตถุตัวอย่างที่ถ่ายภาพได้รับปริมาณนิวตรอนที่เท่ากัน การทดสอบความสม่ำเสมอของความเข้มนิวตรอน ใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่มีวัตถุตัวอย่าง ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโลหะแกโดลิเนียม 2 แผ่น เพื่อให้ได้พื้นที่ในการวิเคราะห์มากขึ้นในการถ่ายภาพครั้งเดียว บันทึกภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิดโกดัก SR แล้ววัดความเข้มของฟิล์ม ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. ประกอบฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิด SR กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนโลหะแกโดลิเนียม 2 แผ่น แล้วบรรจุลงในดรัมบอลูมิเนียม
2. วางดรัมบอลูมิเนียมที่ตำแหน่งถ่ายภาพ แล้วเปิดลำนิวตรอนเพื่อถ่ายภาพโดยใช้เวลา 20 นาที
3. ล้างฟิล์มแล้ววัดความเข้มบนแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอ่านความดำของฟิล์ม โดยทำการวัดทุกระยะ 0.5 เซนติเมตร
4. เขียนกราฟความเข้มของฟิล์มแต่ละตำแหน่ง

ผลการทดลอง

จากการวัดความเข้มฟิล์มบนพื้นที่ 14 x 22 ตารางเซนติเมตร โดยทำการวัดทุกระยะ 0.5 เซนติเมตร พบว่า ฟิล์มมีความเข้มระหว่าง 0.13 ถึง 0.14 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.36 % ซึ่งเขียนกราฟของความเข้มฟิล์มได้ดังรูปที่ ข1



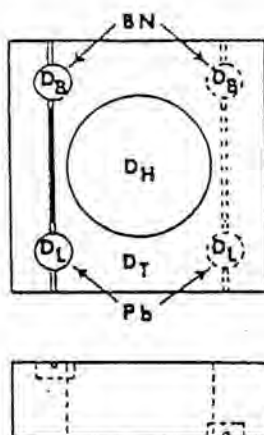
รูป ข1 กราฟความเข้มฟิล์มจากการวัดความสม่ำเสมอของนิวตรอน

จากกราฟในรูปที่ 1 ฟิล์มด้านบนขวามีความเข้มมากกว่าด้านอื่น 0.01 ซึ่งคิดเป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล 0.36% แสดงว่าฟลักซ์ของนิวตรอนแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันน้อยมาก โดยเฉพาะเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มแต่ละบริเวณได้ จึงอาจถือได้ว่าถ้านิวตรอนมีความเข้มของนิวตรอนตลอดแนวหน้าตัดค่อนข้างสม่ำเสมอ

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอน

ปริมาณรังสีในลำนิวตรอน ได้แก่ เทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพ และรังสีชนิดอื่นที่รบกวนระบบการถ่ายภาพ สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Beam Purity Indicator แล้วคำนวณปริมาณรังสีแต่ละชนิด จากความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของวัสดุตามรูปที่ 1 และสมการที่ (ค1) ถึง สมการ (ค4)



รูปที่ ค1 ตำแหน่งที่วัดความเข้มของ Beam Purity Indicator

การวิเคราะห์ทำโดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูปที่ 1 โดย

- D_B คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
- D_L คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
- D_H คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- D_T คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- ΔD_L คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- ΔD_B คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ ดังนี้

1. ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน(effective thermal neutron content, NC)

$$NC = [D_H - (\text{high}D_B + \Delta D_L)] / (D_H) \times 100 \quad (\text{ค1})$$

2. ปริมาณนิวตรอนกระเจิง(effective scatter neutron content, S)

$$S = (\Delta D_B / D_H) \times 100 \quad (\text{ค2})$$

3. ปริมาณรังสีแกมมา(effective gamma content, γ)

$$\gamma = (D_T - \text{low}D_L) / (D_H) \times 100 \quad (\text{ค3})$$

4. ปริมาณของรังสีจาก pair production (effective pair production content, P)

$$P = (\Delta D_L / D_H) \times 100 \quad (\text{ค4})$$

การถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอน ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโลหะ แกโดลิเนียมและบันทึกภาพด้วยฟิล์ม โคดัก SR ดังนี้

1. ติดฉนวนวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน BPI ด้านหน้าดักบอลูมิเนียม
2. ถ่ายภาพด้วยเวลา 20 นาที
3. ล้างฟิล์ม แล้วอ่านและบันทึกความเข้มฟิล์มแต่ละตำแหน่งตามตำแหน่งในรูปที่ ค1
4. คำนวณปริมาณรังสีแต่ละชนิดตามสมการที่ (ค1) ถึง สมการที่ (ค4)

ผลการทดลอง

จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนและวัดความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของวัสดุตามรูปที่ ค1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ ค1

ตารางที่ ค1 ความเข้มของฟิล์มบนวัตถุตัวอย่าง BPI

ตำแหน่ง	ความเข้มฟิล์ม
D_H	2.02
D_{B1}	1.01
D_{B2}	1.01
D_{L1}	1.74
D_{L2}	1.70
D_T	1.84

จากสมการที่ (ค1) ปริมาณนิวตรอน

$$\begin{aligned} NC &= (2.02 - (1.01 + 0.04)) \times 100 / 2.02 \\ &= 48.02 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ค2) ปริมาณนิวตรอนกระเจิง

$$S = 0$$

จากสมการที่ (ค3) ปริมาณรังสีแกมมา

$$\begin{aligned} \gamma &= (1.84 - 1.70) \times 100 / 2.02 \\ &= 6.93 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ค4) ปริมาณ pair production

$$\begin{aligned} P &= (0.04/2.02) \times 100 \\ &= 1.98 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง.

ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากระบบการถ่ายภาพ

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ความไม่คมชัดของภาพ(Unsharpness) ประกอบด้วย ความไม่คมชัดเนื่องจากการจัดระบบของอุปกรณ์การถ่ายภาพ(Geometric unsharpness, U_g) และความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากอุปกรณ์บันทึกภาพ ได้แก่ ฟิล์มและฉากเปลี่ยนนิวตรอน(Film and foil inherent unsharpness, U_i) จากสมการ (2.8) สมการ (2.10) และ สมการ (2.11)

$$U_g = \frac{D}{L_s} L_f$$

เมื่อ	U_g	คือ ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์
	D	คือ ขนาดของต้นกำเนิดนิวตรอน = 6 cm
	L_s	คือ ระยะระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับวัตถุตัวอย่าง = 315 cm
	L_f	คือ ระยะระหว่างวัตถุตัวอย่างและฟิล์มบันทึกภาพ = $a + 0.10$ cm
	a	คือ ความหนาของวัตถุตัวอย่าง (สลับลูมิเนียมมีความหนา 0.10 cm)

ดังนั้น

$$U_g = (6 \times a + 0.10) / 315 \quad \text{cm}$$

$$U_i = \left(b + \frac{d}{2}\right) \tan \theta$$

เมื่อ	U_i	คือ ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนและฟิล์ม
	θ	คือ มุมของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน
	b	คือ ระยะห่างระหว่างผิวของฟิล์มกับน้ำยาเคลือบฟิล์ม = 0.00127 cm
	d	คือ ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน = 0.010 cm
		ให้มุม $\theta = 45^\circ$ ทำให้ $\tan \theta = 1$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} U_i &= (0.00127 + 0.010/2) \times 1 \\ &= 0.00627 \quad \text{cm} \end{aligned}$$

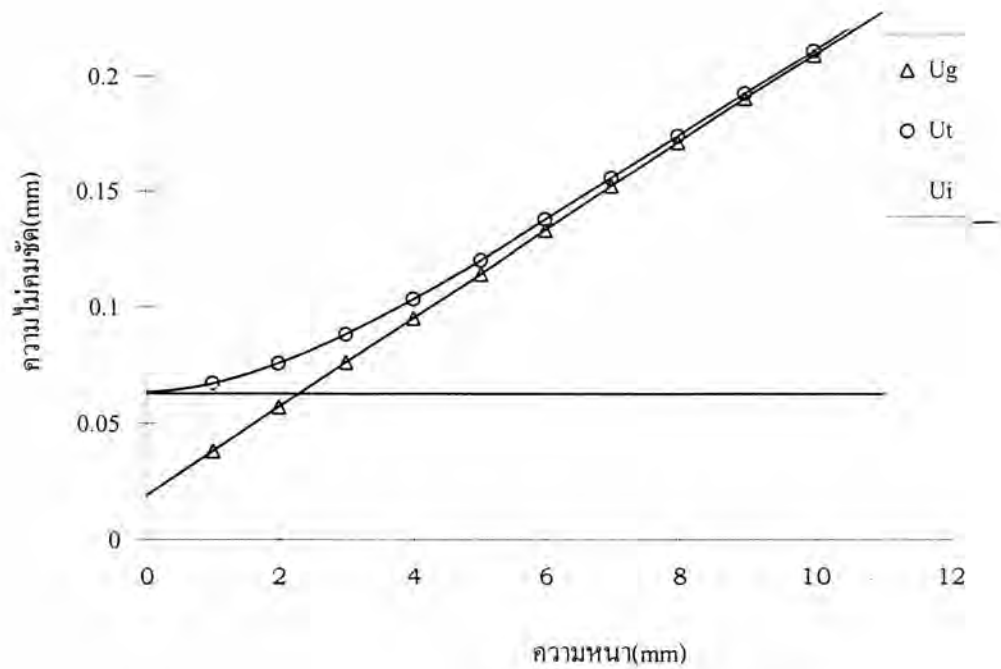
$$U_t = (U_g^3 + U_i^3)^{1/3}$$

เมื่อ U_t คือ ความไม่คมชัดของภาพถ่าย

จากระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้ในการทดลอง สำหรับการถ่ายภาพแต่ละวิธี จะเห็นว่าตัวแปรของความไม่คมชัดส่วนใหญ่มีค่าคงที่ ทำให้ความไม่คมชัดของภาพมีค่าแปรผันตามขนาดของวัตถุตัวอย่าง สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพบนที่ภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ วัตถุตัวอย่างที่มีความหนาระหว่าง 1 ถึง 10 มิลลิเมตร จะได้ผลการคำนวณค่าความไม่คมชัดของภาพดังตารางที่ ง1 และเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัตถุตัวอย่างกับความไม่คมชัดของภาพได้ดังรูปที่ ง1

ตารางที่ ง1 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากความหนาของวัตถุตัวอย่าง

ความหนาของวัตถุตัวอย่าง (mm)	ความไม่คมชัดจากการจัดอุปกรณ์ U_g (mm)	ความไม่คมชัดของภาพ (mm)
1	0.038	0.067
2	0.057	0.075
3	0.076	0.088
4	0.095	0.103
5	0.114	0.120
6	0.133	0.137
7	0.152	0.155
8	0.171	0.174
9	0.190	0.192
10	0.209	0.211



รูปที่ 1 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากความหนาของวัตถุตัวอย่าง

จากกราฟซึ่งแสดงผลของความหนาของวัตถุตัวอย่างต่อความไม่คมชัดของภาพ จะเห็นว่า ความไม่คมชัดของภาพมีค่าต่ำสุด เมื่อวัตถุตัวอย่างมีความหนาน้อยที่สุด โดยเท่ากับความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากฟิล์มและฉากเปลี่ยนนิวตรอน(U_i) เมื่อวัตถุตัวอย่างมีความหนามากขึ้น ความไม่คมชัดของภาพมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าแปรผันตามกันในเชิงเส้นตรง

การกำหนดค่าตัวแปรในการคำนวณความไม่คมชัดของภาพ เป็นการประเมินในเบื้องต้น ผลการทดลองอาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าจากการคำนวณ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากชนิดของฟิล์มหรือความละเอียดของเม็คสารไวแสงบนฟิล์ม ชนิดและพลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ประวัติผู้เขียน

นายวิเชียร รตนธงชัย เกิดวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2505 ที่ อำเภอผักไห่ จังหวัด พระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาชีวฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2526 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2537 ปัจจุบันรับราชการ ตำแหน่งนักนิเวศลิษฐ์ฟิสิกส์ 5 ที่ กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ สิ่งแวดล้อม