บทที่ 2

กากฟิสชัน

2.1 กากฟิสชันที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง

ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู นิวเคลียสของยูเรเนียมจะถูกนิวตรอนเข้าไว้ แล้วกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (compound nucleus) ซึ่งไม่เสถียร (unstable) และจะแตกออกเป็น 2 ส่วน มีมวลไม่เท่ากัน เรียกว่ากากฟิสชัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารกัมมันตรังสี มีการสลายตัวแบบต่อเนื่องกัน (series decay) โดยเฉลี่ย 3 ขั้น แล้วจึงกลายนิวเคลียสที่เสถียร (stable) ในการสลายตัวนั้นจะมีการปล่อยอนุภาคเบตาลบ (negative beta particle) และรังสีแกมมา (gamma radiation) ออกมาด้วย และอัตราการสลายตัวก็ต่างกัน

2.2 กากฟิสชันชนิดกาซ

กากฟิสชันที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงมีทั้งของแข็งและกาซ ในที่นี้เราสนใจศึกษาเฉพาะกากฟิสชันชนิดกาซ คือคริปตอนกับซีนอน รวมทั้งไอโซโทปของมัน มีคริปตอนและซีนอนที่เป็นกัมมันตรังสีที่จะกล่าวถึงอย่างละ 5 ชนิดคือ คริปตอน-83m[1], คริปตอน-85m, คริปตอน-85, คริปตอน-87, คริปตอน-88, ซีนอน-133m, ซีนอน-133, ซีนอน-135m, ซีนอน-135, ซีนอน-138 ทั้งคริปตอนและซีนอนมีการสลายตัวแบบต่อเนื่องกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-1

---

[1] m หมายถึง metastable state

ตารางที่ 2-1

แสดงการสลายตัวแบบต่อเนื่องของกากฟิสชันนิวเคลียส[2]

Isotope	Atomic number	Mass number	Fission yield (%)	Half-life
Br → Kr → Kr	35	83	0.48	2.3 hr
	36	83m	0.48	114 min
	36	83	0.48	stable
Kr → Kr → Rb	36	85m	1.5	4.36 hr
	36	85	0.3	9.4 yr[3]
	37	85	1.3	stable
Br → Kr → Rb → Sr	35	87	2.7	55 sec
	36	87	2.7	78 min
	37	87	2.7	$4-5\times10^{10}$ yr
	38	87	2.7	stable

---

[2]H. Etherington, Nuclear Engineering Handbook (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1958)

[3]J.F. Hogerton ed., Reactor Handbook Physics (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1955)

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

แสดงการสลายตัวแบบต่อเนื่องของกากฟิสชันชนิดกาซ

Isotope	Atomic number	Mass number	Fission yield (%)	Half-life
Kr	36	88	3.7	2.77 hr
Rb	37	88	3.7	17.8 min
Sr	38	88	3.7	stable
I	53	133	6.5	20.5 hr
Xe	54	133m	0.16	2.3 d
Xe	54	133	6.5	5.27 d
Cs	55	133	6.5	stable
I	53	135	6.0	6.68 hr
Xe	54	135m	2.1	15 min
Xe	54	135	0.3[4]	9.2 hr
Cs	55	135	6.2	2.1×10^6 yr
Ba	56	135	6.2	stable

[4] Ibid

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

แสดงการสลายตัวแบบต่อเนื่องของกากฟิสชันชนิดกาซ

Isotope	Atomic number	Mass number	Fission yield (%)	Half-life
I	53	138	5.8	5.9 sec
↓ Xe	54	138	5.8	17 min
↓ Cs	55	138	5.8	32 min
↓ Ba	56	138	5.8	stable

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

2.3 คุณสมบัติบางอย่างของกากฟิสชันชนิดกาซ

2.3.1 ฟิสชันยีลด์ (Fission yield)

ฟิสชันยีลด์ หมายถึงโอกาส (probability) ที่จะเกิดกากฟิสชัน แบ่งเป็น 2 แบบคือ

2.3.1.1 ฟิสชันยีลด์โดยตรง (Independent fission yield) กากฟิสชันใดมีฟิสชันยีลด์โดยตรง แสดงว่ากากฟิสชันนั้นเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียมโดยตรง

2.3.1.2 ฟิสชันยีลด์โดยอ้อม (Dependent fission yield) กากฟิสชันใดมีฟิสชันยีลด์โดยอ้อม แสดงว่ากากฟิสชันนั้นเกิดจากการสลายตัวของกากฟิสชันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียม

สำหรับซีนอน มีฟิสชันยีลด์สูงมาก กล่าวคือ ใน 100 อะตอมที่เกิดฟิสชันจะมีซีนอนเกิดขึ้น 20–25 อะตอม

สำหรับคริปตอน มีฟิสชันยีลด์ต่ำ กล่าวคือ ใน 100 อะตอมที่เกิดฟิสชันจะมีคริปตอนเกิดขึ้น 1 อะตอม

ทั้งซีนอนและคริปตอน อาจเกิดจากการสลายตัวของกากฟิสชัน หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวก็ได้

ในตารางที่ 2-1 ในช่องที่แสดงค่าฟิสชันยีลด์ ถ้ามีค่าเหมือนกันหมด แสดงว่ากากฟิสชันตัวที่ 2,3,... เกิดจากการสลายตัวของกากฟิสชันตัวที่ 1,2,...

เช่น $Br^{83} \longrightarrow Kr^{83m} \longrightarrow Kr^{83}$

ค่าฟิสชันยีลด์ที่ได้เป็นฟิสชันยีลด์โดยอ้อม ถ้ามีค่าต่างกัน แสดงว่ากากฟิสชันแต่ละตัวเกิดจาก ปฏิกิริยาการแตกตัวของนิวเคลียสของยูเรเนียมโดยตรง และเกิดจากการสลายตัวของกากฟิสชันตัวต้นๆด้วย เช่น

$$I^{133} \longrightarrow Xe^{133m} \longrightarrow Xe^{133} \longrightarrow Cs^{133}$$

ฟิสชันยีลด์ของกากฟิสชันแต่ละตัวเป็นฟิสชันยีลด์โดยตรง

2.3.2 จุดเดือด (Boiling point)
ที่ความดัน 1 บรรยากาศ
คริปตอน มีจุดเดือดที่ 121.3 °K
ซีนอน มีจุดเดือดที่ 163.9 °K

2.3.3 จุดหลอมเหลว (Melting point)
คริปตอน มีจุดหลอมเหลวที่ 104 °K
ซีนอน มีจุดหลอมเหลวที่ 133 °K

2.3.4 ภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้า (Thermal-neutron absorption cross section) กากฟิสชันแต่ละชนิดมีภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าต่างกัน สำหรับซีนอน-135 มีภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้า $(2.72\pm0.11)\times10^6$ บาร์น[5](barn) ซึ่งสูงกว่าของกาซชนิดอื่นๆมาก ที่จุดสูงสุด (peak) ซีนอน-135 มีภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าเท่ากับ 3.5×10^6 บาร์น ดังนั้นการคำนวณปริมาณซีนอน-135 ที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง ต้องคำนึงถึงภาคตัดขวางการดูดนิวตรอนช้าด้วย

---

[5]เป็นค่าที่วัดได้เมื่อนิวตรอนช้ามีความเร็ว 2200 เมตร/วินาที