กองตรวจสอบทางนิวเคลียร์และรังสี

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

เอกสารสนับสนุน
เรื่อง
หลักการทำงานและคุณลักษณะของเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอนเพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี

Supporting document on principle and characteristic of cyclotron accelerator for the production of radioactive materials

SD-NRI-RG-1.04

(ฉบับที่ 1 ปรับปรุงครั้งที่ 0)

จัดทำโดย	**วราภรณ์ จันทร์เทศ**	
ทบทวนโดย	**นฤพนธ์ เพ็ญศิริ หกตร.**	
อนุมัติโดย	**ภานุพงศ์ พินกฤษ ผกตส.**	

สถานะปรับปรุงเอกสาร

ฉบับที่	วันที่	ข้อสรุปการปรับปรุง

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

สารบัญ

หน้า

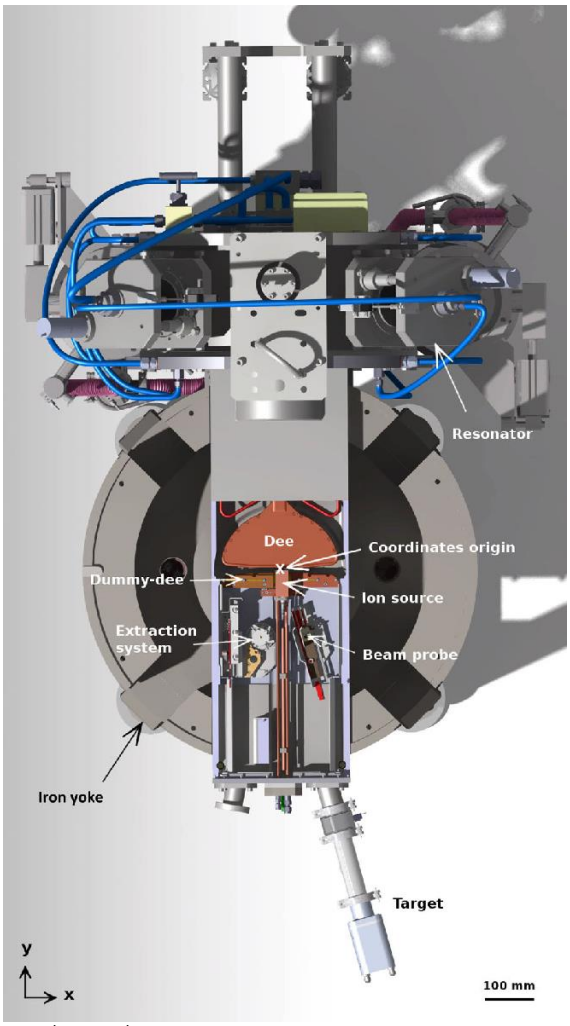
1 วัตถุประสงค์ 4
2 ขอบเขต 4
3 ประเภทของเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน 5
4 หลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคโซโคลทรอน 8
4.1 แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) 9
4.2 ส่วนเร่งอนุภาค (accelerating Chamber) 11
4.3 สนามไฟฟ้า (electric field) 12
4.4 สนามแม่เหล็ก (magnetic field) 13
4.5 สนามไฟฟ้าสลับ (alternating electric field) 13
4.6 แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF oscillator) 14
4.7 ระบบสุญญากาศ (vacuum system) 15
4.8 ระบบการแยกอนุภาค (extraction system) 15
5. หลักการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี 17
6. เป้าวัตถุดิบ (target material) 19
6.1 เป้าชนิดของแข็ง (solid target) 22
6.2 เป้าชนิดของเหลว (liquid target) 24
6.3 เป้าชนิดก๊าซ (gas target) 27
7. ระบบลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้ (radioactive marterial transfer system) 28
8. ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) 30
9. เอกสารอ้างอิง 32

1. วัตถุประสงค์

เพื่อใช้เป็นคู่มือสำหรับให้พนักงานเจ้าหน้าที่ศึกษาข้อมูลทางวิชาการ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน เพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี

2. ขอบเขต

สำหรับการตรวจสอบความปลอดภัยของเครื่องกำเนิดรังสีในการแพทย์ ซึ่งจำแนกอยู่ในกลุ่มของเครื่องกำเนิดรังสีประเภทที่ ๑ เป็นอันตรายมาก (very dangerous) กฎกระทรวงการอนุญาตเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดรังสีพ.ศ. ๒๕๖๔ ซึ่งเอกสารฉนับนี้ใช้เฉพาะสำหรับการตรวจสอบเครื่องเร่งอนุภาคโซโคลทรอน



รูปที่ 1 เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน (Cyclotron)

ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/Top-view-of-the-AMIT-cyclotron-3D-model-The-main-components-the-center-and-the-axes-of_fig2_354521737

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

3. ประเภทของเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน

เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอนใช้สำหรับผลิตสารกัมมันตรังสี โดยการเร่งประจุอนุภาค เช่น โปรตอน หรือ ดิวทีรอน (ซึ่งแทบทั้งหมดจะเป็นโปรตอน) ไปยังเป้าหมายวัตถุดิบ ส่วนใหญ่มักนำไปใช้ผลิตวัสดุกัมมันตรังสีที่ปล่อยโพสิตรอน (β+) อาทิ F-18, O-15, C-11 และ N-13 เครื่องไซโคลทรอนได้รับการออกแบบด้วยพลังงานต่าง ๆ ตามความต้องการในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี ปัจจุบันอาจแบ่งประเภทของเครื่องไซโคลทรอนได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.1 แบ่งตามแหล่งกำเนิดไอออน สามารถจำแนกตามประเภทของเครื่องไซโคลทรอนได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

1. Positive ion cyclotron เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเร่งอนุภาคบวกหรือไอออนบวก (เช่น H^+, D^+, $^3He^{+2}$ และ $^4He^{+2}$ ที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอออน) ผ่านระบบการสกัดกั้นด้วย deflector ซึ่งหลักการทำงานเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิต โดยจะเบี่ยงทิศทางให้โปรตอนเคลื่อนออกจากสนามแม่เหล็กและชนเข้ากับเป้าเพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งานเท่าใดนัก เนื่องจากมีปัญหาการสูญเสียพลังงานสูงในกระบวนการแยก (~40-90% ประสิทธิภาพของการสกัด) ทำให้อุปกรณ์ภายในไซโคลทรอนกระตุ้นเกิด ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) มากขึ้น

2. Negative ion cyclotron เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เร่งอนุภาคหรือไอออนลบ (เช่น H^- และ D^-) ซึ่งผลิตจากแหล่งกำเนิดไอออน จากนั้นให้เคลื่อนผ่านระบบสกัดโดยใช้ "stripper" ที่ดูดกลืนและเอาออกซึ่งจะเหลือเพียงโปรตอน (H+). สิ่งนี้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของพวกมันจากวงโคจรเดิม ทำให้อนสามารถหลุดออกมาจากสนามแม่เหล็กเพื่อชนกับเป้าหมายปลายทาง เพื่อสร้างวัสดุกัมมันตรังสีในขั้นต่อไป ในปัจจุบัน เครื่องจักรประเภทนี้ได้รับความนิยมมากกว่า Positive ion cyclotron เนื่องด้วยประสิทธิภาพสูงในการแยกลำอนได้ (~100% extraction efficiency) อีกทั้งยังเกิดผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) น้อย ตัวอย่างเครื่องไซโคลทรอนแบบ Negative ion cyclotron ใช้งานอยู่ในประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 2

1.2 แบ่งตามการกำบังรังสี สามารถจำแนกตามลักษณะการป้องกันรังสีได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. **เครื่องไซโคลทรอนที่มีระบบกำบังรังสีในตัว (self-shielded cyclotron)** เครื่องชนิดนี้ออกแบบโดยมีการติดตั้งฉากกำบังรังสีไว้ภายในห้องเครื่องโดยตรง เหมาะสมต่อการใช้งานเชิงปฏิบัติการที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ การปฏิบัติงานมีความสะดวกและปลอดภัยยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะสามารถลดการแผ่รังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีโอกาสเกิดการกระจายของอนุภาคกัมมันตรังสีในอากาศ (air activation products) ได้บ้าง ทั้งนี้ ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องปฏิบัติตามมาตรการความปลอดภัยด้านรังสีอย่างเคร่งครัด
2. **เครื่องไซโคลทรอนที่ไม่มีระบบกำบังรังสีในตัว (non self-shielded cyclotron)** เครื่องชนิดนี้ต้องอาศัยการก่อสร้างห้องกำบังรังสีเพิ่มเติมจากโครงสร้างอาคาร โดยทั่วไปมีการออกแบบให้มีห้องปฏิบัติการ ห้องควบคุม และห้องอุปกรณ์ไฟฟ้าแยกเป็นสัดส่วนชัดเจน เพื่อความปลอดภัย

และเพื่อรองรับการใช้งานระยะยาว การใช้งานไซโคลตรอนชนิดนี้ต้องอาศัยมาตรการด้านการป้องกันรังสีที่รัดกุมและครอบคลุมมากกว่าเครื่องชนิดแรก

เครื่องไซโคลทรอนสามารถจำแนกประเภทตามระดับพลังงานและความสามารถในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีได้ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกประเภทของเครื่องไซโคลทรอนตามระดับพลังงานและความสามารถในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี

Type of cyclotron installation	พลังงาน (MeV)	Cyclotron type	การผลิตวัสดุกัมมันตรังสี
I	9 – 19	Low energy cyclotron	ผลิตเฉพาะ F-18 สำหรับใช้งานในโรงพยาบาลและจัดจำหน่ายให้กับโรงพยาบาลใกล้เคียงเท่านั้น
II	9 – 19		ผลิต F-18 และวัสดุกัมมันตรังสีอื่น ๆ ที่ใช้กับเครื่อง PET (เช่น C-11, N-13, O-15) สำหรับใช้งานในโรงพยาบาลและจำหน่ายให้แก่โรงพยาบาลใกล้เคียง
III	13 – 19		ผลิต F-18 และวัสดุกัมมันตรังสีอื่น ๆ เช่น C-11, N-13, O-15 รวมถึง Cu-64, Yttrium 68 (YI), Iodine 123 (I-123) และ Iodine 124 (I-I24 เพื่อใช้บริการในโรงพยาบาลและจำหน่ายให้กับโรงพยาบาลที่อยู่ใกล้เคียง นอกจากนี้ยังสนับสนุนงานวิจัย
IV	~ 30	Medium energy cyclotron	ผลิต F-18 และวัสดุกัมมันตรังสีอื่น ๆ ที่ใช้กับเครื่อง PET เช่น C-11, N-13, O-15 รวมถึง Cu-64, Y-68, I-123, I-124, Tl-201 และ Ga -67 เพื่อจำหน่ายเป็นหลัก
V	30 MeV และมากกว่า 30 MeV	High energy cyclotron	เครื่องพลังงาน 30 MeV มีความสามารถในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีที่ใช้กับเครื่อง PET และ SPECT สำหรับการใช้งานในโรงพยาบาล รวมทั้งจำหน่ายให้แก่โรงพยาบาลใกล้เคียง นอกจากนี้ยังสามารถรองรับงานวิจัยเพื่อการรักษา (clinical research) ด้วย

ที่มา IAEA Cyclotron Produced Radionuclides: Guidelines for Setting Up a Facility, 2009

(ก) GE cyclotron
ที่มา ภาพงานตรวจ พ.ศ. 2567

(ข) Sumitomo cyclotron
ที่มา ภาพงานตรวจ พ.ศ. 2568

(ค) IBA cyclotron
ที่มา ภาพงานตรวจ พ.ศ. 2567

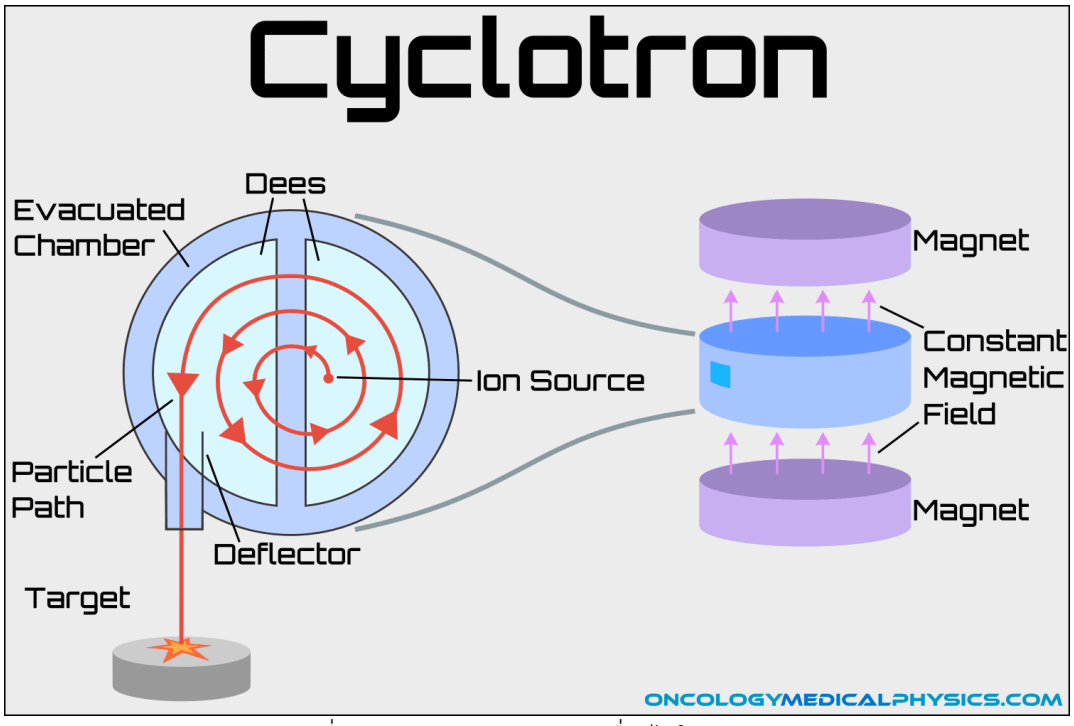
(ง) EBCO Cycrotron
ที่มา ภาพงานตรวจ พ.ศ. 2568

รูปที่ 2 ตัวอย่าง Negative ion cyclotron ที่มีการใช้งานในประเทศไทย

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

4. หลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคโซโคลทรอน

แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) จะผลิตไอออนบวกหรือไอออนลบเพื่อใช้เป็นอนุภาคตั้งต้นสำหรับการเร่งความเร็ว อนุภาคเหล่านี้จะถูกส่งเข้าสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเส้นทางโค้งในลักษณะวงกลม ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นดี (Dee) ทั้งสอง สนามไฟฟ้าสลับ (alternating electric field) จะถูกนำมาใช้เพื่อเร่งความเร็วของอนุภาค ทำให้อนุภาคมีพลังงานและความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของอนุภาคเพิ่มขึ้น รัศมีของวงโคจรก็จะขยายออกไปเรื่อย ๆกระบวนการนี้จะเกิดซ้ำต่อเนื่องจนกว่าอนุภาคจะมีพลังงานสูงตามที่ต้องการ จากนั้นอนุภาคจะถูกนำออกจากวงโคจรด้วยระบบแยกอนุภาค (extraction system) เช่น stripper หรือ deflector เพื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้ออกจากเครื่องไซโคลทรอน อนุภาคที่ถูกเร่งและนำออกจากเครื่องไซโคลทรอนจะถูกส่งไปชนเป้าหมาย (target) เพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ เช่น การผลิตวัสดุกัมมันตรังสีสำหรับการแพทย์ เป็นต้น



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเครื่องไซโคลทรอน

ที่มา : https://oncologymedicalphysics.com/cyclotron-particle-accelerators/

ส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคโซโคลทรอน มีดังต่อไปนี้

4.1 แหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น โปรตอน (proton) หรืออนุภาคชนิดอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นอนุภาคตั้งต้นสำหรับการเร่งความเร็วในเครื่องไซโคลทรอน โดยทั่วไป แหล่งกำเนิดไอออนจะใช้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2 gas) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไอออน โดยกระบวนการผลิตไอออน คือ ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา (plasma) ด้วยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งทำให้เกิดไอออนสองชนิด ได้แก่ ไอออนบวก (positive ion) หรือ H^+ และ ไอออนลบ (negative ion) หรือ H^{2-} ในพลาสมานี้จะมีทั้งไอออนบวกและไอออนลบอยู่ร่วมกันในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิใกล้เคียงศูนย์ (quasineutral) กล่าวคือ ไอออนบวกและไอออนลบมีจำนวนใกล้เคียงกัน ทำให้พลาสมามีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในเครื่องไซโคลทรอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

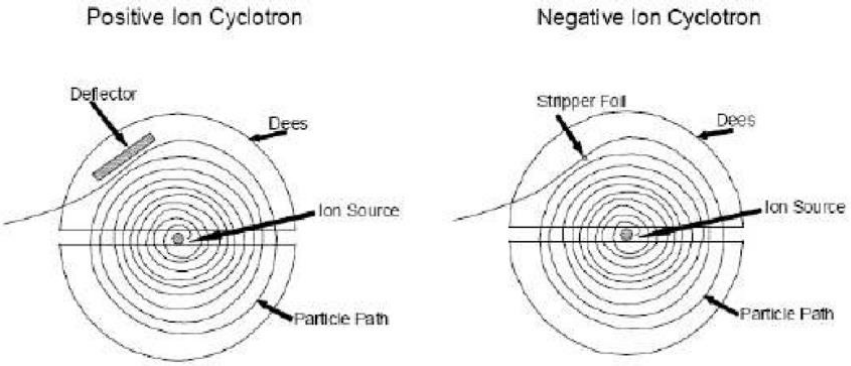
1. **Positive Ion Source** เป็นแหล่งกำเนิดที่ผลิตไอออนบวก เช่น โปรตอน (H^+) การสร้างไอออนบวก (positive Ion) อาศัยหลักการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ของก๊าซ โดยทั่วไปจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวกลาง กระบวนการทำงานเริ่มจากการให้ความร้อนแก่ไส้หลอด (filament) ซึ่งเป็นวิธีที่เรียกว่า Hot cathode method ความร้อนที่เกิดขึ้นจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากภายใต้สนามแม่เหล็ก และเมื่อมีการประยุกต์สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ส่งผลให้ก๊าซแตกตัวเกิดเป็นไอออน (ionization collision)

การชนกันนี้จะเกิดขึ้นซ้ำหลายครั้ง ทำให้เกิดสถานะพลาสมา (plasma state) ภายในแหล่งกำเนิด โดยพลาสมาประกอบด้วยไอออนบวก H^+ (proton, positive ion) และไอออนลบ H^{2-} (negative ion) อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานในเครื่องไซโคลทรอน จะเลือกนำเฉพาะ H^+ ไปเร่งความเร็วต่อไป กระบวนการผลิตไอออนบวกด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือ ความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และมีความเสถียรในการปฏิบัติการ

2. **Negative ion source** เป็นแหล่งกำเนิดที่ผลิตไอออนลบ เช่น H^- หรือ H^{2-} ใช้หลักการที่แตกต่างจากการสร้างไอออนบวก กล่าวคือ ไม่มีการใช้หลอดฟิลาเมนต์และไม่อาศัยการให้ความร้อน จึงถูกเรียกว่า Cold cathode method โดยจะอาศัยการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแคโทดสองขั้วที่เชื่อมต่อกับสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการคายประจุและก่อตัวเป็นพลาสมาในบริเวณดังกล่าว

ภายในพลาสมา จะเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน และก่อให้เกิดสถานะพลาสมาอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อดึงไอออนลบ (H^-) ออกจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่เครื่องไซโคลทรอนเพื่อเร่งความเร็วต่อไป

แม้ว่าวิธีการสร้างไอออนลบจะมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการสร้างไอออนบวก แต่กลับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในเครื่องไซโคลทรอนที่ใช้สำหรับผลิตสารกัมมันตรังสีเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับกระบวนการสกัดอนุภาคออกจากเครื่องเร่ง



(ก) (ข)

รูปที่ 4 แหล่งกำเนิดไอออน

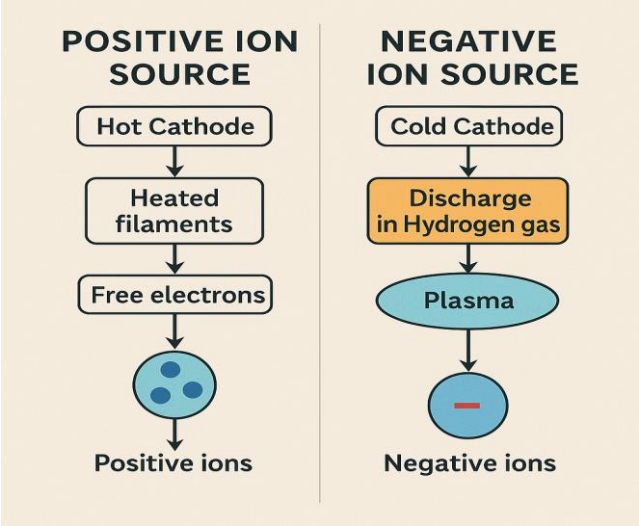
(ก) Positive ion cyclotron

(ข) Negative ion cyclotron

ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/Extraction-process-in-modern-cyclotrons-using-either-a-deflector-for-positive-ions-a-or_fig6_293816645

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบแหล่งกำเนิดไอออน

คุณสมบัติ	Positive ion source (hot cathode)	Negative ion source (cold cathode)
หลักการทำงาน	ใช้ Hot cathode โดยให้ความร้อนแก่ฟิลาเมนต์เพื่อปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ จากนั้นเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าให้ชนกับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและเกิดพลาสมา	ใช้ Cold cathode โดยไม่ใช้ฟิลาเมนต์และไม่ต้องอาศัยความร้อน แต่ใช้สนามไฟฟ้าและการคายประจุในก๊าซไฮโดรเจนเพื่อสร้างพลาสมาและผลิตไอออนลบ
ชนิดของไอออนที่ได้	ไอออนบวก H^+ (proton, positive ion) และ H^2 แต่จะเลือกนำ H^+ ไปใช้ในไซโคลทรอน	ไอออนลบ H^- (proton negative ion)
ความซับซ้อนของระบบ	โครงสร้างและหลักการค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน	มีความซับซ้อนมากกว่า ทั้งด้านการออกแบบและการควบคุม
การใช้งาน	ใช้ในงานวิจัยพื้นฐานหรือระบบที่ไม่ต้องการการสกัดไอออนที่ซับซ้อน	นิยมใช้ในไซโคลทรอนเพื่อการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีทางการแพทย์ (Radionuclide production)



รูปที่ 5 แผนภาพการทำงาน (diagram flow) ของ Positive และ Negative ion source

4.2 ส่วนเร่งอนุภาค (Accelerating Chamber)

ส่วนเร่งอนุภาคเป็นองค์ประกอบหลักของเครื่องไซโคลทรอน ทำหน้าที่เร่งความเร็วของอนุภาคที่มีประจุให้อยู่ในระดับพลังงานตามที่ต้องการ โครงสร้างส่วนนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

1. **แม่เหล็กหลัก (Magnet Pole)**

ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กคงที่ที่มีความเข้มสูง เพื่อบังคับให้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เป็นวิถีโค้งในลักษณะวงกลมภายในห้องเร่งอนุภาค สนามแม่เหล็กนี้จะช่วยให้อนุภาคคงอยู่ในเส้นทางที่แน่นอนและสามารถเร่งความเร็วได้อย่างต่อเนื่อง

2. **อิเล็กโทรดรูปตัวดี (Dees)**

เป็นอิเล็กโทรดที่มีลักษณะคล้ายตัวอักษร D สองชิ้นวางประกบกัน โดยมีช่องว่างตรงกลางระหว่าง Dees ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการสร้าง สนามไฟฟ้าสลับความถี่สูง (radio-frequency alternating electric field) สนามไฟฟ้านี้จะทำหน้าที่เร่งความเร็วของอนุภาคทุกครั้งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง Dees ทำให้ความเร็วและพลังงานของอนุภาคเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่

3. **กลไกการเร่งความเร็ว**

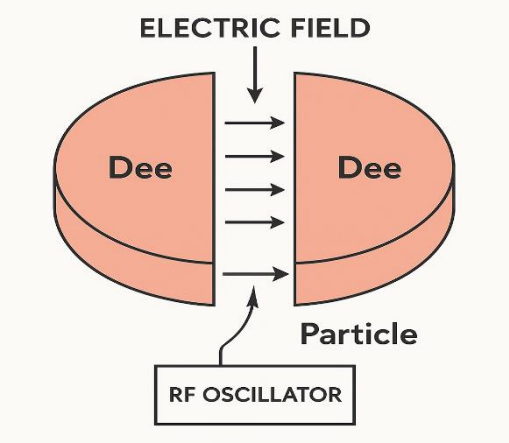
เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง Dees สนามไฟฟ้าสลับจะปรับทิศทางอย่างสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำให้อนุภาคได้รับแรงเร่งในทิศทางที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกัน สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กหลักจะบังคับให้ไอออนเคลื่อนที่เป็นวงโคจรที่มีรัศมีขยายออกเรื่อย ๆ เมื่อพลังงานเพิ่มสูงขึ้น

ส่วนเร่งอนุภาคทำงานโดยอาศัยการทำงานร่วมกันของสนามแม่เหล็กคงที่และสนามไฟฟ้าสลับความถี่สูง ซึ่งช่วยให้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุได้รับการเร่งความเร็วอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงระดับพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี

4.3 สนามไฟฟ้า (Electric field)

สนามไฟฟ้าในเครื่องไซโคลทรอนถูกสร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (Radio frequency oscillator; RF oscillator) โดยสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะรูปตัว D สองชิ้น ซึ่งเรียกว่า Dee และจัดวางในลักษณะหันหน้าประกบกัน โดยมีช่องว่างขนาดเล็กคั่นกลางระหว่าง Dee ทั้งสอง

หน้าที่หลักของสนามไฟฟ้าคือการเร่งความเร็วของไอออนหรืออนุภาค โดยในทุกครั้งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง Dee จะได้รับแรงเร่งจากสนามไฟฟ้า ทำให้พลังงานและความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีพลังงานเพียงพอต่อการนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ของเครื่องไซโคลทรอน

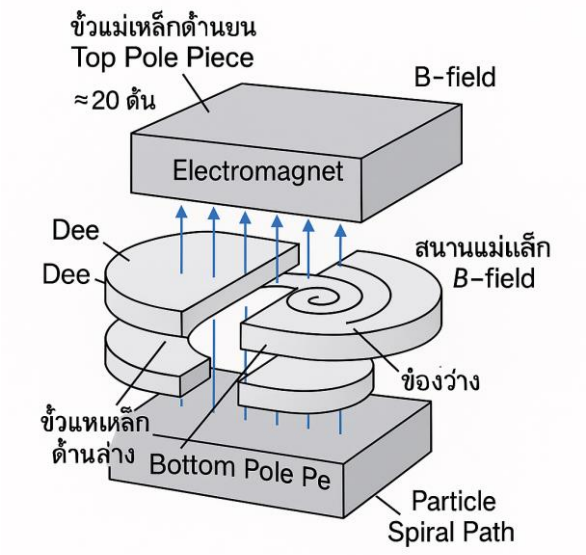


รูปที่ 6 แผนภาพสนามไฟฟ้า (Electric Field)

4.4 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

เครื่องไซโคลทรอนใช้แม่เหล็กไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีมวลประมาณ 20 ตัน ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อบังคับให้ไอออนหรืออนุภาคเคลื่อนที่ตามวิถีโค้งเป็นวงกลม (circular path) ภายในบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่น Dee ทั้งสอง สนามแม่เหล็กดังกล่าวช่วยให้อนุภาครักษาเส้นทางการเคลื่อนที่และเพิ่มรัศมีวงโค้งออกไปเรื่อย ๆ ตามพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า

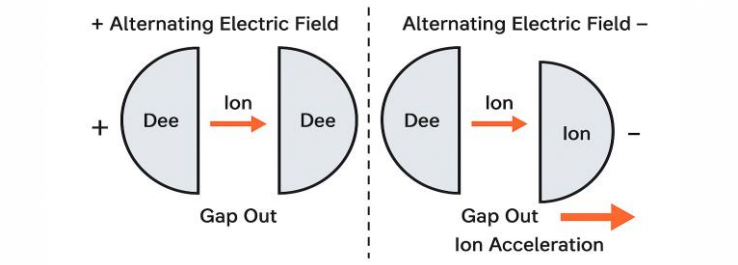
แม่เหล็กไฟฟ้าถูกติดตั้งในลักษณะประกบอยู่ด้านบนและด้านล่างของโครงสร้าง Dee ทั้งสอง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอและมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ไซโคลทรอนสามารถเร่งประจุอนุภาคได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงสนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

4.5 สนามไฟฟ้าสลับ (Alternating electric field)

ระหว่าง Dee ทั้งสอง จะมีการสร้างสนามไฟฟ้าสลับความถี่สูง (High-frequency alternating electric field) จากแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ สนามไฟฟ้านี้ทำหน้าที่เร่งความเร็วอนุภาคทุกครั้งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง Dee โดยทิศทางของสนามไฟฟ้าจะสลับไปตามความถี่ของกระแสสลับที่จ่ายเข้าไป ผลจากกลไกดังกล่าวทำให้อนุภาคได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ภายในไซโคลทรอน ส่งผลให้ความเร็วและพลังงานจลน์ของอนุภาคสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่เพียงพอต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการทำงานของสนามไฟฟ้าสลับ (alternating electric field)

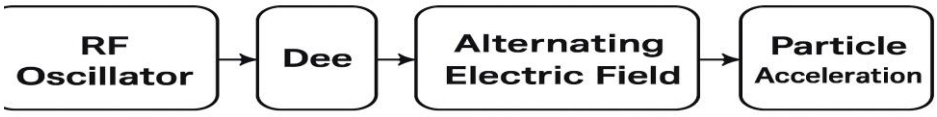
ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

4.6 แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF oscillator)

แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (radio frequency oscillator; RF oscillator) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างสนามไฟฟ้าสลับความถี่สูง (high-frequency alternating electric field) สำหรับใช้ในกระบวนการเร่งอนุภาคภายในเครื่องไซโคลทรอน โดยหลักการทำงานของ RF oscillator คือ การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่คงที่และเสถียรตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) ของ Dee

เมื่อสัญญาณความถี่วิทยุถูกส่งเข้าสู่ Dee ทั้งสอง จะก่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสลับระหว่างช่องว่าง (gap) ของ Dee ตามคาบเวลาของสัญญาณกระแสสลับ โดยศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนทิศทางทุกครึ่งรอบ (half-cycle) อย่างสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หมุนวนอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้อานุภาคได้รับแรงเร่งเพิ่มพลังงานทุกครั้งที่ผ่านช่องว่างระหว่าง Dee

ดังนั้น RF oscillator จึงเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้กระบวนการเร่งอนุภาคในเครื่องไซโคลทรอนเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยการเชื่อมระหว่างความถี่ของสนามไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของอนุภาค

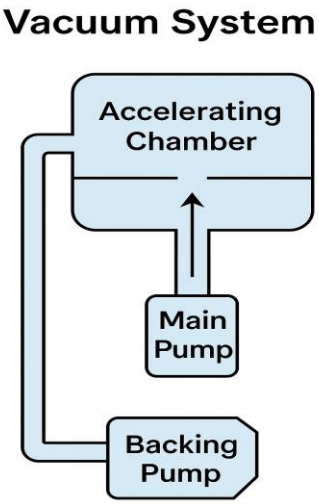


รูปที่ 9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RF Oscillator Dee Electric Field และParticle Acceleration

4.7 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

ระบบสุญญากาศ (vacuum system) ภายในเครื่องไซโคลทรอนถูกออกแบบให้มีค่าความดันอยู่ในช่วงประมาณ 1×10^{-5} ถึง 1×10^{-7} มิลลิเมตรปรอท (mmHg) เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมที่ปราศจากโมเลกุลของอากาศในระดับสูง วัตถุประสงค์หลักของการใช้สุญญากาศคือเพื่อลดความน่าจะเป็นในการชนกันระหว่างอนุภาคที่ถูกเร่งกับโมเลกุลของก๊าซที่เหลืออยู่ภายในห้องเร่ง (accelerating chamber)

การคงสภาวะสุญญากาศในระดับดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีเส้นทางที่เสถียร ลดการสูญเสียพลังงานจากการชนที่ไม่พึงประสงค์ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งอนุภาค ทำให้สามารถควบคุมการเร่งและการสกัดอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงระบบสุญญากาศ (Vacuum System)

4.8 ระบบการแยกอนุภาค (extraction system)

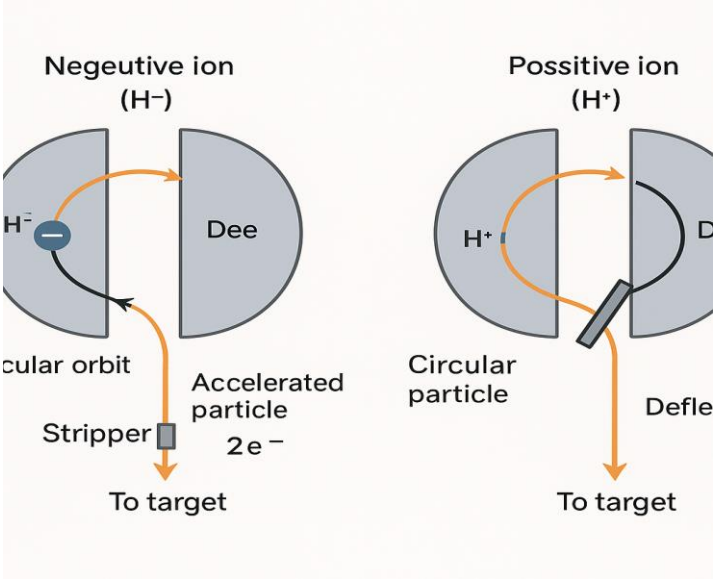
ระบบการแยกอนุภาคทำหน้าที่นำอนุภาคที่ถูกเร่งจนถึงระดับพลังงานที่ต้องการ ออกจากวิถีโคจรภายในเครื่องไซโคลทรอน และส่งต่อไปยังเป้าเพื่อการใช้งาน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งบริเวณขอบนอกของวงโคจร ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งจะถูกกำหนดให้สอดคล้องกับค่าพลังงานของอนุภาคที่ต้องการสกัดออกมา

รูปแบบของระบบการแยกอนุภาคขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่ใช้ในกระบวนการเร่งภายในเครื่องไซโคลทรอน ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้:

1. การแยกอนุภาคสำหรับ Negative Ion (H^{2-}) ใช้ stripper ซึ่งเป็นแผ่นคาร์บอนฟอยล์ (carbon foil) ทำหน้าที่ดึงอิเล็กตรอนออกจากไอออนประจุลบ โดยทั่วไป H^- จะสูญเสียอิเล็กตรอน 2 ตัว ($2e^-$) จนกลายเป็นโปรตอน (H^+) การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้อนุภาคสูญเสียเสถียรภาพในวิถีโคจรเดิม และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ออกจากสนามแม่เหล็กเข้าสู่เป้าหมาย

2. การแยกอนุภาคสำหรับ Positive Ion (H^+) ใช้ deflector โดยอาศัยหลักการของไฟฟ้าสถิต (electrostatic deflection) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนวิถีโคจรของอนุภาคออกจากวงโคจรเดิม และนำอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายตามที่กำหนด

ดังนั้น ระบบการแยกอนุภาคจึงเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เครื่องไซโคลทรอนสามารถนำพลังงานของอนุภาคที่ถูกเร่งไปใช้ประโยชน์ได้จริง ไม่ว่าจะเป็นในการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีทางการแพทย์ งานวิจัยด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ หรือการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม



รูปที่ 11 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบการแยกอนุภาคของ Negative Ion (ใช้ stripper) และ Positive Ion (ใช้ deflector)

5. หลักการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี

การผลิตวัสดุกัมมันตรังสีสามารถดำเนินการได้ 2 วิธีหลัก ได้แก่

การผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor-based production) ใช้หลักการฉายอนุภาคนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุให้ชนกับเป้าวัตถุดิบ (target material) ทำให้เกิดวัสดุกัมมันตรังสีตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การผลิต โคบอลต์-60 (Co-60) จากเป้าวัตถุดิบ โคบอลต์-59 (Co-59) โดยสามารถแสดงปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ดังนี้:

$$^{59}Co + n \longrightarrow {}^{60}Co \longrightarrow {}^{60}Ni + e^{-} + 2\,\gamma \text{ หรือ } {}^{59}Co(n,\gamma){}^{60}Co$$

การผลิตโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (accelerator-based production) เช่น เครื่องไซโคลทรอน โดยใช้อนุภาคที่มีประจุ (charged particle) ยิงไปชนเป้าวัตถุดิบ ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีทางการแพทย์ โดยเฉพาะวัสดุกัมมันตรังสีที่เป็นตัวปล่อยโพซิตรอน เช่น C-11, N-13, O-15 และ F-18 ซึ่งใช้สำหรับการตรวจวินิจฉัยด้วย PET/CT

หลักการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีด้วยเครื่องไซโคลทรอน

ในเครื่องไซโคลทรอน อนุภาคมีประจุ เช่น โปรตอน (proton, p) หรือ ดิวทีรอน (deuteron, d) จะถูกผลิตจากแหล่งกำเนิดไอออน (ion source) และถูกเร่งความเร็วให้เคลื่อนที่เป็นวงโคจรแบบโค้ง (circular path) ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

ทุกครั้งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงตัว Dee สอง จะได้รับแรงเร่งจาก สนามไฟฟ้า ทำให้ความเร็วและพลังงานของอนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงระดับพลังงานที่ต้องการ จากนั้นจะใช้ระบบแยกอนุภาค (extraction system) เพื่อให้อนุภาคหลุดออกจากวงโคจรและพุ่งชนกับเป้าวัตถุดิบ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นไอโซโทปเสถียร

เมื่ออนุภาคชนกับเป้าวัตถุดิบ จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์และแปรสภาพเป็นวัสดุกัมมันตรังสี โดยปริมาณการผลิตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พลังงานของอนุภาคมีประจุ, ค่ากระแส, ระยะเวลาในการฉายรังสี, ปริมาณของเป้าวัตถุดิบ และภาคตัดขวางของปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction cross-section)

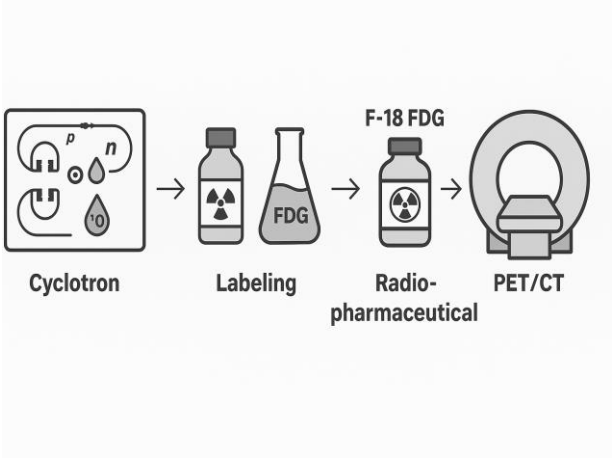
ตัวอย่างการผลิต F-18

ในกรณีการผลิต F-18 อนุภาคโปรตอนชนิดประจุลบ (Proton negative ion; H^-) จะถูกเร่งพลังงานจนถึงค่าที่เหมาะสม ก่อนเข้าสู่ Carbon foil stripper ซึ่งทำหน้าที่ดึงอิเล็กตรอนออกไป ทำให้ H^- กลายเป็นโปรตอน (H^+) และเบี่ยงทิศออกจากวงโคจรเดิมไปชนกับเป้าวัตถุดิบ เช่น O-18 Enriched water (liquid target) หรือ Ne-20 Gas (gas target)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้ดังนี้:

$$^{18}\mathrm{O}(p,n)^{18}\mathrm{F}$$

การนำวัสดุกัมมันตรังสีไปใช้ทางการแพทย์ วัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้จากไซโคลทรอน เช่น F-18 จะถูกนำไป ติดฉลาก (labeling) กับสารเภสัช (pharmaceutical compound) เพื่อให้ได้สารเภสัชรังสี (radiopharmaceutical) ซึ่งใช้เป็นสารติดตาม (tracer) สำหรับการตรวจวินิจฉัยโรค โดย F-18 FDG จะถูกนำไปฉีดให้ผู้ป่วยและใช้ตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่อง PET/CT



รูปที่ 12 แผนภาพภาพรวมของขั้นตอนการผลิต F-18 จากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน

6. เป้าวัตถุดิบ (Target material)

เป้าวัตถุดิบ คือธาตุหรือไอโซโทปเสถียร ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการรับการชนของอนุภาคโปรตอน ซึ่งจะก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear reaction) และแปรสภาพเป็นวัสดุกัมมันตรังสี ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์หรือด้านอุตสาหกรรมได้ โดยทั่วไป เป้าวัตถุดิบสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. เป้าชนิดของแข็ง (solid target) – ใช้วัสดุที่อยู่ในสภาวะของแข็ง
2. เป้าชนิดของแข็ง (liquid target) – ใช้วัสดุที่อยู่ในสภาวะของเหลว
3. เป้าชนิดก๊าซ (gas target) – ใช้วัสดุที่อยู่ในสภาวะก๊าซ

เป้าวัตถุดิบแต่ละชนิดถูกบรรจุภายในโครงสร้างห่อหุ้มที่เรียกว่า Target body ซึ่งต้องผลิตจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถทนต่อแรงดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสี มีคุณสมบัติด้านการนำความร้อนที่ดี และต้องมีความเฉื่อยทางเคมี (chemical inertness) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่พึงประสงค์

ในระหว่างกระบวนการฉายรังสี โปรตอนที่ชนกับเป้าวัตถุดิบจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในปริมาณสูง ดังนั้นระบบเป้าจำเป็นต้องมี การจัดการความร้อน (heat management system) ที่มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (water cooling) หรือก๊าซฮีเลียม (Helium cooling) เพื่อกระจายความร้อนและป้องกันความเสียหายต่อเป้า

ปัจจุบันมีวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิต Target body อยู่ 6 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) นิกเกิล (Nickel) ไนโอเบียม (Niobium) แทนทาลัม (Tantalum) และ เงิน (Silver) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งด้านสมบัติทางเคมี จุดหลอมเหลว (melting point), การนำความร้อน (thermal conductivity) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) และพฤติกรรมการเกิดผลิตภัณฑ์กัมมันตรังสีเหนี่ยวนำ (activation product)

การเลือกใช้วัสดุสำหรับ Target body จะพิจารณาตามความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เช่น

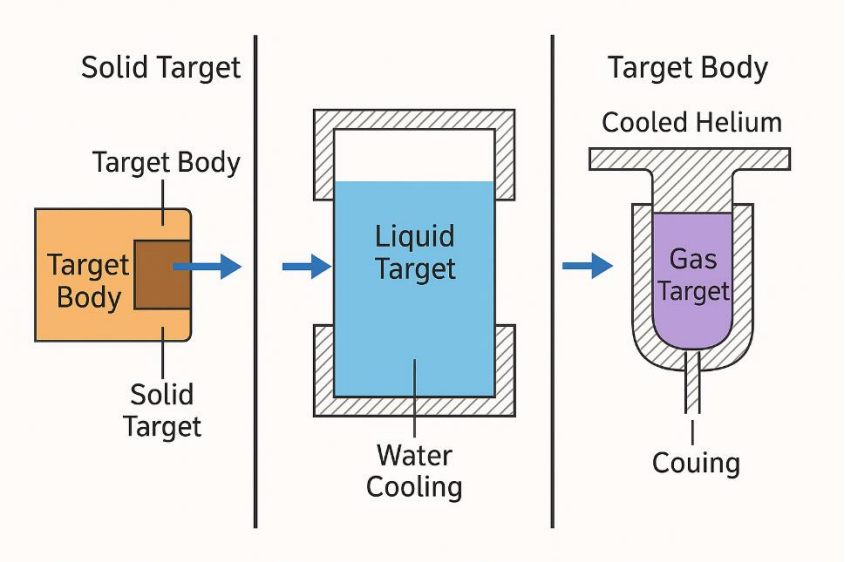
- หากเน้นจุดหลอมเหลวสูง เพื่อลดความเสี่ยงต่อการละลายของเป้า ควรเลือกวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ไนโอเบียมและแทนทาลัม
- หากเน้นการนำความร้อนสูง เพื่อช่วยกระจายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องเสริมด้วยระบบหล่อเย็นที่มีอัตราการไหลเวียนสูง เช่น ระบบหล่อเย็นก๊าซฮีเลียม หรือระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

สำหรับการผลิต F-18 จาก O-18 Enriched water target นิยมใช้ ไนโอเบียม (Niobium) เป็นวัสดุของ Target body เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง ความแข็งแรงเชิงกลดี ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิห้อง มีการบำรุงรักษาง่าย และมีการดูดกลืนนิวตรอนต่ำ ไม่ทำให้เกิดผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) ที่ไม่พึงประสงค์

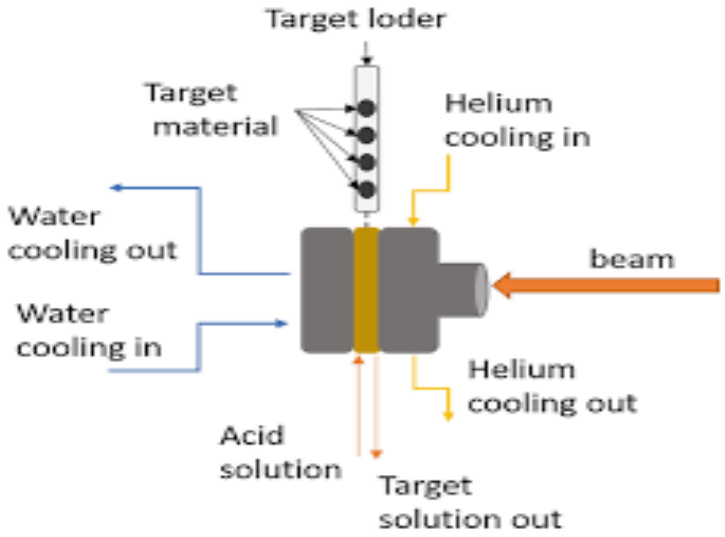
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ Target body

วัสดุ (Material)	**จุดหลอมเหลว (Melting point, °C)**	**การนำความร้อน (Thermal conductivity, W/m·K)**	**ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength)**	**ความต้านทานการกัดกร่อน / ปฏิกิริยาเคมี**	**การเกิด ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product)**
Aluminium (Al)	~660	~235	ปานกลาง	ทนต่อการกัดกร่อนดี	อาจเกิดผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) บางชนิด
Titanium (Ti)	~1,668	~22	แข็งแรง น้ำหนักเบา	ทนต่อการกัดกร่อนสูง	Activation ต่ำ
Nickel (Ni)	~1,455	~90	แข็งแรง ทนทาน	ทนต่อการกัดกร่อนปานกลาง	อาจเกิด ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product)
Niobium (Nb)	~2,468	~54	แข็งแรงมาก	ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิห้อง	Activation ต่ำมาก (นิยมใช้ผลิต F-18)
Tantalum (Ta)	~3,017	~57	แข็งแรงสูง ทนความร้อน	เฉื่อยทางเคมี	Activation ต่ำ
Silver (Ag)	~962	~429	ปานกลาง	ทนต่อปฏิกิริยาเคมีต่ำกว่าวัสดุอื่น	Activation ปานกลาง

จากตารางจะเห็นว่า ไนโอเบียม (Nb) และ แทนทาลัม (Ta) เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเทคนิคสำหรับงานที่ต้องทนความร้อนสูงและลดการเกิดผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไนโอเบียม ที่นิยมใช้เป็น Target Body ในการผลิต F-18 จาก O-18 Enriched Water



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงการจัดวาง Target Material และระบบหล่อเย็น (Cooling System)



รูปที่ 14 ลักษณะของ solid target

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

6.1 เป้าชนิดของแข็ง (solid Target)

ลักษณะทั่วไป เป้าชนิดของแข็ง โดยทั่วไปมักเป็นธาตุโลหะในรูปแบบผง (powder) หรือแผ่นฟอยล์ (foil) ซึ่งบรรจุอยู่ในช่องขนาดเล็ก โดยกระบวนการเตรียมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกดอัดผงให้แน่น (Powder Pressing) หรือการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) ผ่านเครื่องเตรียมเป้าอัตโนมัติ (automatic solid target preparation system)

เป้าชนิดของแข็งมีความหนาแน่นมากกว่าเป้าชนิดของเหลวและเป้าชนิดก๊าซ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดี จึงสามารถใช้กระแสไฟฟ้าต่ำในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี แต่ต้องอาศัยพลังงานโปรตอนสูงกว่า 18 MeV เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เพียงพอ ตัวอย่างวัสดุกัมมันตรังสีที่สามารถผลิตได้จากเป้าชนิดของแข็ง ได้แก่ Ga-67, Cu-67, Pd-103, In-111, Tl-201, I-123 และ I-124

ด้วยคุณสมบัติการนำความร้อนสูง เป้าชนิดของแข็งจึงต้องเชื่อมต่อกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเพื่อกระจายและระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการฉายรังสี

กระบวนการเตรียมและการใช้งาน

การเตรียมเป้าชนิดของแข็ง (solid target preparation) สามารถทำได้สองแนวทางหลัก ได้แก่

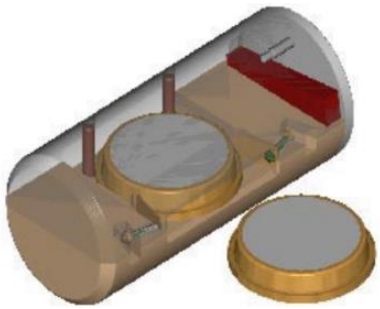
- การกดอัดผงวัตถุดิบ (powder pressing) บรรจุผงวัตถุดิบลงในช่องและกดอัดให้แน่น
- การชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) ใช้กระบวนการชุบโลหะอัตโนมัติเพื่อเคลือบวัตถุดิบลงบนแผ่นรอง

เมื่อการเตรียมเป้าเสร็จสิ้น เป้าจะถูกบรรจุในภาชนะปิดผนึกที่เรียกว่า Rabbit โดยทั่วไปวัสดุห่อหุ้มทำจาก Polyetheretherketone (PEEK) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และทนทานต่อรังสี

ก่อนการเดินเครื่องไซโคลทรอน Rabbit จะถูกลำเลียงผ่านระบบอัตโนมัติไปยังตำแหน่งฉายรังสีผ่านรางลำเลียง (conveyor System) เมื่อการฉายรังสีเสร็จสิ้น Rabbit จะถูกส่งกลับเข้าสู่ ตู้ Hot Cell ผ่านรางลำเลียงอีกครั้ง เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการละลายเป้า (dissolution process) ให้เป็นสารละลายสำหรับการสังเคราะห์สารเภสัชรังสีต่อไป

หลังการละลาย วัสดุที่ห่อหุ้ม (rabbit) จะถูกทำความสะอาดโดยอัตโนมัติและจัดเก็บภายในตู้ Hot Cell เพื่อระบายความร้อนและสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำในรอบถัดไป

การพัฒนาเทคโนโลยีปัจจุบัน ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยี Solid target โดยเปลี่ยนจากการใช้ภาชนะห่อหุ้มที่ทำจาก PEEK มาเป็นการบรรจุในโลหะปิดผนึกที่เรียกว่า Shuttle ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทาน และเหมาะสมกับสภาวะการฉายรังสีที่มีอุณหภูมิและแรงดันสูง



(ก) solid target ที่อยู่ในท่อปิดมิดชิดทำมาจาก PEEK เรียกว่า rabbit

ที่มา: https://www.researchgate.net/figure/Encapsulated-Target-and-Rabbit_fig1_224276761

(ข) solid target ที่อยู่ในโลหะปิดมิดชิด เรียกว่า shuttle

ที่มา https://www.comecer.com/alceo-solid-target-processing-system/

รูปที่ 15 ลักษณะของ solid target ที่เตรียมได้ ก่อนนำไปฉายรังสี

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของแข็ง (solid Target Maintenance)

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของแข็ง (solid target) ถือว่ามีความท้าทายและซับซ้อนมากกว่าเป้าชนิดของเหลวและเป้าชนิดก๊าซ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและกระบวนการผลิตที่แตกต่าง รวมถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยจากการแผ่รังสี โดยสามารถสรุปแนวทางการบำรุงรักษาได้ดังนี้

- **การตรวจสอบระบบควบคุมและการจัดการวัสดุกัมมันตรังสี** มีการติดตามกระบวนการเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตขึ้น โดยใช้ระบบควบคุมระยะไกล (remote handling system) เพื่อลดการสัมผัสโดยตรงและลดปริมาณรังสีที่บุคคลปฏิบัติงานจะได้รับ
- **การตรวจสอบ Solid Target Holder** ต้องมั่นใจว่าที่ยึดเป้าชนิดของแข็ง (solid target holder) อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการฉายรังสี เพื่อให้การชนของอนุภาคมีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถผลิตวัสดุกัมมันตรังสีได้ตามที่ต้องการ
- **การตรวจสอบอุปกรณ์จำกัดลำรังสี (beam collimator)** Beam Collimator ต้องถูกจัดวางอย่างถูกต้องเพื่อให้สามารถควบคุมลำรังสีได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม บริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่อนุภาคมีกระแสสูงเคลื่อนที่ผ่าน จึงมีโอกาสเกิด ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) ในระดับสูง ส่งผลให้มีอัตราปริมาณรังสีสูงและต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษ
- **การตรวจสอบความเสียหายทางกายภาพของเป้า** เป้าชนิดของแข็งอาจเกิดการเสื่อมสภาพ เช่น การกัดกร่อน การเกิดสนิม หรือการแตกร้าว จากการฉายรังสีต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของวัสดุกัมมันตรังสีกับส่วนประกอบภายในเครื่องไซโคลทรอน

- **การตรวจสอบระบบระบายความร้อน** ต้องประเมินประสิทธิภาพของการกระจายความร้อน เพื่อป้องกันการสะสมความร้อนเกินขีดจำกัดซึ่งอาจทำให้เป้าเสียหายหรือลดทอนประสิทธิภาพการผลิต
- **การตรวจสอบการปนเปื้อนทางรังสี** เนื่องจากวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตขึ้นอาจปนเปื้อนกับโครงสร้างหรืออุปกรณ์ภายในเครื่องไซโคลทรอน การตรวจสอบและการจัดการการปนเปื้อนทางรังสีจึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องดำเนินการอย่างเป็นระบบ

มาตรการด้านความปลอดภัยในการบำรุงรักษา การบำรุงรักษา Solid target มีความเสี่ยงที่บุคลากรอาจได้รับรังสีในระดับสูงจากการแผ่รังสีของวัสดุกัมมันตรังสีและ ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product) ดังนั้นจำเป็นต้องใช้มาตรการความปลอดภัยเพิ่มเติม ได้แก่

- ใช้ ระบบควบคุมระยะไกล (remote control/remote handling) สำหรับการเคลื่อนย้ายวัสดุกัมมันตรังสี เพื่อลดการสัมผัสโดยตรง
- ใช้ Mobile lead shielding หรือโลหะกันรังสีเคลื่อนที่ เพื่อป้องกันการแผ่รังสีระหว่างการปฏิบัติงาน
- ใช้อุปกรณ์ป้องกันการปนเปื้อน (protective equipment) และมีระบบการชำระล้างการปนเปื้อน (decontamination procedure) โดยดำเนินการด้วยความระมัดระวังและเป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยด้านรังสี

6.2 เป้าชนิดของเหลว (liquid target)

ลักษณะทั่วไป เป้าชนิดของเหลว (liquid target) มีหลักการใช้งานใกล้เคียงกับเป้าชนิดของแข็ง แต่แตกต่างกันที่สถานะของวัตถุดิบซึ่งเป็นของเหลว โดยปริมาณวัตถุดิบที่ใช้มีค่อนข้างน้อย ประมาณ 0.5 – 2.5 มิลลิลิตร (ไม่เกิน 3 มิลลิลิตร) และใช้เวลาฉายรังสีไม่เกิน 3 ชั่วโมง สำหรับการผลิต F-18 จาก O-18 Enriched water

เป้าชนิดนี้นิยมใช้ในการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีที่ประยุกต์ทางการแพทย์โดยเฉพาะการตรวจวินิจฉัยด้วย PET/CT (positron emission tomography/computed tomography) ตัวอย่างวัสดุกัมมันตรังสี ได้แก่ F-18 (O-18) และ N-13 (O-16) ทั้งนี้ การใช้งาน Liquid target จำเป็นต้องพิจารณาเรื่อง การปนเปื้อนทางรังสี (radioactive contamination) ควบคู่ไปด้วย

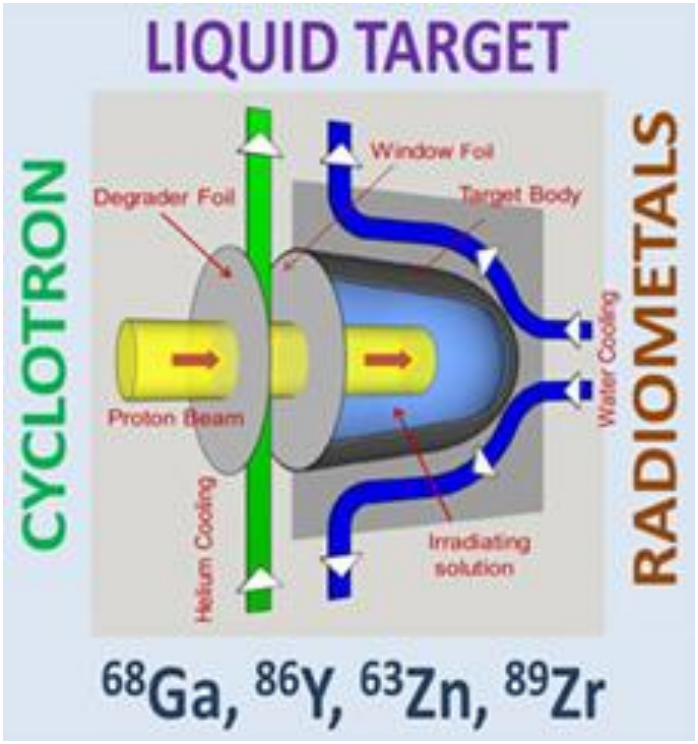
การเตรียมและการติดตั้ง วัตถุดิบที่ใช้สำหรับ Liquid target มักอยู่ในรูปของของเหลว เช่น O-18 Enriched water ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดขนาดเล็ก วางในตำแหน่งที่จัดสรรเฉพาะสำหรับ Liquid target ในเครื่องไซโคลทรอน โดยเชื่อมต่อผ่านระบบท่อส่งของเหลว เพื่อให้สามารถดูดน้ำวัตถุดิบเข้าสู่ตำแหน่งฉายรังสีได้โดยอัตโนมัติ

เมื่อสิ้นสุดการฉายรังสี วัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นภายในน้ำวัตถุดิบจะถูกส่งออกจากตำแหน่งฉายรังสีโดยใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม (Helium) หรือ ก๊าซอาร์กอน (Argon) ผ่านท่อ Teflon ซึ่งมี

คุณสมบัติทนความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อน เพื่อส่งต่อไปยัง ตู้ปฏิบัติการรังสีสูง (hot cell) สำหรับการสังเคราะห์สารเภสัชรังสี

กระบวนการแยกและสังเคราะห์สารเภสัชรังสี เมื่อฉายรังสีแล้วจะได้ F-18 อยู่ในน้ำวัตถุดิบ (O-18 enriched water) โดยการแยก F-18 ออกจากน้ำวัตถุดิบจะใช้ Ion exchange resin ทำหน้าที่จับ F-18 และคัดแยกออกจากน้ำ จากนั้น F-18 ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เป็น สารเภสัชรังสีต่อไป

ส่วนน้ำวัตถุดิบที่เหลือจากกระบวนการ (O-18 water) สามารถนำไปผ่านกระบวนการ recovery, recycling และ reuse เพื่อลดต้นทุนการผลิต แต่ในบางประเทศ ตามมาตรฐาน Good manufacturing practice (GMP) จะไม่อนุญาตให้นำกลับมาใช้ผลิตซ้ำ เนื่องจากมีความกังวลเกี่ยวกับ ความบริสุทธิ์ (purity) และคุณภาพของวัตถุดิบ



รูปที่ 16 ลักษณะของ solid target
ที่มา: https://www.eurekaselect.com/article/109388

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
นางวราภรณ์ จันทร์เทศ	นายนฤพนธ์ เพ็ญศิริ	นายภานุพงศ์ พินกฤษ

กระบวนการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีจากเป้าชนิดของเหลว (liquid target production process)

การผลิตวัสดุกัมมันตรังสีด้วยเป้าชนิดของเหลวเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบที่อยู่ในสถานะของเหลว เช่น O-18 Enriched water ซึ่งบรรจุในขวดขนาดเล็ก วัตถุดิบดังกล่าวจะถูกนำไปวางในตำแหน่งที่จัดสรรเฉพาะสำหรับ Liquid target ภายในเครื่องไซโคลทรอน และเชื่อมต่อเข้ากับระบบท่อส่งของเหลว เพื่อให้สามารถดูดน้ำวัตถุดิบเข้าสู่ตำแหน่งฉายรังสีได้โดยอัตโนมัติ

เมื่อเข้าสู่กระบวนการฉายรังสี ระบบจะเร่งโปรตอนให้ชนกับน้ำวัตถุดิบตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุกัมมันตรังสีที่ต้องการผลิต เมื่อสิ้นสุดการฉายรังสี วัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะถูกขับออกจากตำแหน่งฉายรังสีโดยอัตโนมัติ โดยใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม (Helium) หรือ อาร์กอน (Argon) ผ่านท่อ Teflon ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อนและทนการกัดกร่อนสูง จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังตู้ปฏิบัติการรังสีสูง (hot cell) เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์สารเภสัชรังสี

ภายหลังการฉายรังสี จะได้ F-18 ที่ละลายอยู่ในน้ำวัตถุดิบ (O-18 enriched water) การแยก F-18 ออกจากน้ำวัตถุดิบจะใช้กระบวนการทางเคมีด้วย Ion exchange resin ซึ่งจะทำหน้าที่จับและกักเก็บ F-18 จากนั้น F-18 ที่แยกได้จะถูกส่งต่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เป็น สารเภสัชรังสี (radiopharmaceuticals)

สำหรับน้ำวัตถุดิบ (O-18 water) ที่เหลือจากกระบวนการผ่านเรซิน สามารถนำไปผ่านขั้นตอน recovery, recycle และ reuse เพื่อประหยัดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน Good manufacturing practice (GMP) ในบางประเทศได้กำหนดข้อห้ามไม่ให้นำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากมีความกังวลเกี่ยวกับ ความบริสุทธิ์ (purity) และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ทางเภสัชรังสีที่ได้

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของเหลว (Liquid target maintenance) ในการใช้งานเป้าชนิดของเหลวเพื่อการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี จำเป็นต้องมีการตรวจสอบสภาพของเป้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินความพร้อมในการใช้งานและความปลอดภัยของระบบ โดยการบำรุงรักษาจะดำเนินการตามรอบระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งความถี่และลักษณะของการบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับชนิดของ Target body ที่ใช้ประกอบเป็นโครงสร้างหลักของเป้า

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของเหลวในแต่ละประเภทของ Target body มีจุดประสงค์เพื่อให้มั่นใจว่า

- โครงสร้างของเป้ายังคงความแข็งแรงและสามารถทนต่อแรงดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสีได้
- ระบบซีล (sealing system) และการเชื่อมต่อท่อส่งยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ป้องกันการรั่วไหลของวัตถุดิบหรือวัสดุกัมมันตรังสี
- ไม่มีการเสื่อมสภาพทางกายภาพหรือการกัดกร่อนที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิต

- ระบบระบายความร้อนยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันความเสียหายจากการสะสมความร้อน

ดังนั้น การบำรุงรักษาเป้าชนิดของเหลวจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ รักษาประสิทธิภาพการผลิต และลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยจากการปฏิบัติงานกับวัสดุกัมมันตรังสี

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของเหลว (liquid target) มักเกี่ยวข้องกับการทำความสะอาดอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงสร้างของเป้า เช่น แผ่นฟอยล์ (foil), พลาสติก O-ring หรือ C-ring ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการปิดผนึกและรักษาสภาพการทำงานของระบบให้คงประสิทธิภาพ

จากการดำเนินการตรวจสอบและทำความสะอาด พบว่าน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างอุปกรณ์อาจมีการปนเปื้อนทางรังสี โดยมีการตรวจพบไอโซโทปกัมมันตรังสี เช่น Cd-109 และ V-48 ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการฉายรังสีและการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ประกอบเป็นเป้า ดังนั้น วิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานที่ทำการบำรุงรักษาต้องคำนึงถึงประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

- ปริมาณรังสี (radiation dose): ต้องประเมินและควบคุมปริมาณรังสีที่บุคลากรจะได้รับในระหว่างการทำงานให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานความปลอดภัยทางรังสี
- การปนเปื้อนทางรังสี (radioactive contamination): ต้องมีการตรวจสอบ ป้องกัน และควบคุมการแพร่กระจายของการปนเปื้อนจากน้ำล้างและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
- การจัดการกากกัมมันตรังสี (radioactive waste management): น้ำล้างและวัสดุที่ปนเปื้อนต้องได้รับการเก็บ รวบรวม และจัดการตามมาตรฐานการจัดการกากกัมมันตรังสี เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของบุคลากร

การบำรุงรักษาเป้าชนิดของเหลวไม่เพียงแต่ต้องเน้นความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์ แต่ยังต้องให้ความสำคัญกับการควบคุมรังสี การจัดการปนเปื้อน และการกำจัดกากกัมมันตรังสีอย่างเป็นระบบและปลอดภัย

6.3 เป้าชนิดก๊าซ (Gas target)

ลักษณะทั่วไป เป้าชนิดก๊าซมีลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอกสำหรับบรรจุก๊าซภายใต้ความดันสูง โดยด้านหน้าของเป้าจะมีแผ่นฟอยล์บาง ๆ ที่เรียกว่า Window ทำหน้าที่เป็นส่วนรับลำรังสี โดยสามารถรับลำรังสีได้ลึกประมาณ 1 เซนติเมตร และยังคงทำหน้าที่กักเก็บก๊าซภายในเป้าไม่ให้รั่วไหลออกมา

เมื่อเปรียบเทียบกับ Solid target และ Liquid target เป้าชนิดก๊าซมีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากต้องรองรับปริมาณก๊าซในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุกัมมันตรังสี อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของเป้าชนิดก๊าซคือ การระบายความร้อน (heat dissipation) เนื่องจากก๊าซมีคุณสมบัติในการนำความร้อนไม่ดี ตัวอย่างวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้จากเป้าชนิดนี้ ได้แก่ F-18 (จาก F_2 gas) และ C-11 (จาก N_2 gas)

กระบวนการผลิตวัสดุกัมมันตรังสีจากเป้าชนิดก๊าซ ขั้นตอนการเตรียมและการส่งก๊าซวัตถุดิบเข้าสู่ตำแหน่งฉายรังสีมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตจากเป้าชนิดของเหลว โดยเริ่มจากการเตรียมก๊าซวัตถุดิบ เช่น

- C-11 production ใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2 gas) เป็นวัตถุดิบ โดยเชื่อมต่อผ่านระบบท่อส่งก๊าซเข้าสู่ตำแหน่งที่จัดสรรเฉพาะสำหรับ Gas Target ภายในเครื่องไซโคลทรอน จากนั้นทำการฉายรังสีเพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี C-11 ตามที่กำหนด
  กระบวนการแยกและถ่ายโอนวัสดุกัมมันตรังสีหลังจากการฉายรังสี จะได้วัสดุกัมมันตรังสี C-11 ที่เกิดขึ้นในก๊าซวัตถุดิบ (N_2 gas) ซึ่งอยู่ในรูปของ $^{11}CO_2$ ภายในท่อโลหะขนาดเล็ก กระบวนการแยกและถ่ายโอนประกอบด้วย
- ใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) ทำการแช่แข็ง $^{11}CO_2$ ที่อยู่ภายในท่อโลหะเพื่อทำการกักเก็บ
- เมื่อต้องการถ่ายโอน $^{11}CO_2$ ไปยัง Hot Cell จะทำการอุ่นท่อโลหะดังกล่าว ก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นวัตถุดิบจะสลายออกไปเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ
- เหลือเฉพาะ $^{11}CO_2$ ที่ต้องการ ซึ่งจะถูกผลักดันออกไปโดยใช้ ก๊าซฮีเลียม (Helium gas) ผ่านท่อโลหะเข้าสู่ Hot Cell เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เป็น สารเภสัชรังสี

การบำรุงรักษาเป้าชนิดก๊าซ (Gas target maintenance)การบำรุงรักษาเป้าชนิดก๊าซ (Gas Target) มุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบและดูแล แผ่นฟอยล์ด้านหน้า (window foil) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรับลำรังสีและกักเก็บก๊าซภายใน โดยแนวทางการบำรุงรักษาสามารถสรุปได้ดังนี้:

การตรวจสอบและการเปลี่ยนฟอยล์

- การตรวจสอบลักษณะฟอยล์ว่ามีการนูนหรือไม่ หากพบการนูนควรเปลี่ยนฟอยล์ใหม่ทันทีเพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ
- แผ่นฟอยล์ที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 ชนิด ได้แก่
  1. อะลูมิเนียม (Aluminium foil): มีการเสื่อมสภาพช้า โดยมักเริ่มจากรอยรั่วขนาดเล็กซึ่งจะค่อย ๆ ขยายจนฟอยล์เสียหาย
  2. ฮาวาร์ (Havar foil): มีแนวโน้มที่จะเสียหายโดยไม่แสดงสัญญาณเตือนล่วงหน้า

การทำความสะอาดเป้า (cleaning of gas target body)

- สำหรับเป้าที่ใช้แผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม มักต้องทำความสะอาดเป็นประจำทุก 1–2 ปี ขั้นตอนการทำความสะอาดประกอบด้วย

1. ล้างด้วยแอลกอฮอล์
2. ล้างซ้ำด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดไอออน (deionized water) หลายรอบ
3. ทำการอบให้แห้งก่อนนำกลับมาใช้งาน

ข้อควรระวังด้านรังสี (Radiation safety considerations)

- แผ่นฟอยล์ที่ผ่านการฉายรังสีจะเกิดเป็นผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี ซึ่งมีการแผ่รังสีออกมา
- ก่อนการบำรุงรักษาจำเป็นต้องหยุดการเดินเครื่องไซโคลทรอนเพื่อรอให้แผ่นฟอยล์สลายตัว จนปริมาณรังสีลดลงอยู่ในระดับปลอดภัย
- ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการบำรุงรักษา คือวันแรกของการทำงานหลังวันหยุดสุดสัปดาห์ เพื่อให้มีเวลาพักฟอยล์เพียงพอ

7. ระบบลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้ (Radioactive Material Transfer System)

เมื่อมีการเดินเครื่องไซโคลทรอนเพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสี จำเป็นต้องมีระบบสำหรับการลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีจากตำแหน่งเป้าเข้าสู่ ตู้ปฏิบัติการรังสีสูง (hot cell) เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ต่อไปเป็นสารเภสัชรังสี การกำหนดเส้นทางลำเลียง (transfer line) ต้องพิจารณาปัจจัยด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพ ได้แก่ อัตราปริมาณรังสีของวัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้, พื้นที่ที่วัสดุเคลื่อนผ่านและพื้นที่โดยรอบ, ระยะทางและระยะเวลาที่ใช้ในการลำเลียง ตลอดจนมาตรการกำบังรังสีตลอดเส้นทางการลำเลียง

7.1 การลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีจากเป้าชนิดของเหลวและก๊าซ

วัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตได้จะถูกส่งผ่าน ท่อลำเลียง (transfer tube) ซึ่งประกอบด้วยท่อเทฟลอนขนาดเล็กหลายเส้น ทำหน้าที่ลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีจากตำแหน่งเป้าเข้าสู่ Hot cell เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์สารเภสัชรังสี โดยการขนส่งอาศัย ก๊าซเฉื่อย (inert Gas) เช่น ฮีเลียม (He) หรือ อาร์กอน (Ar) เป็นตัวผลัก เนื่องจากก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุกัมมันตรังสี

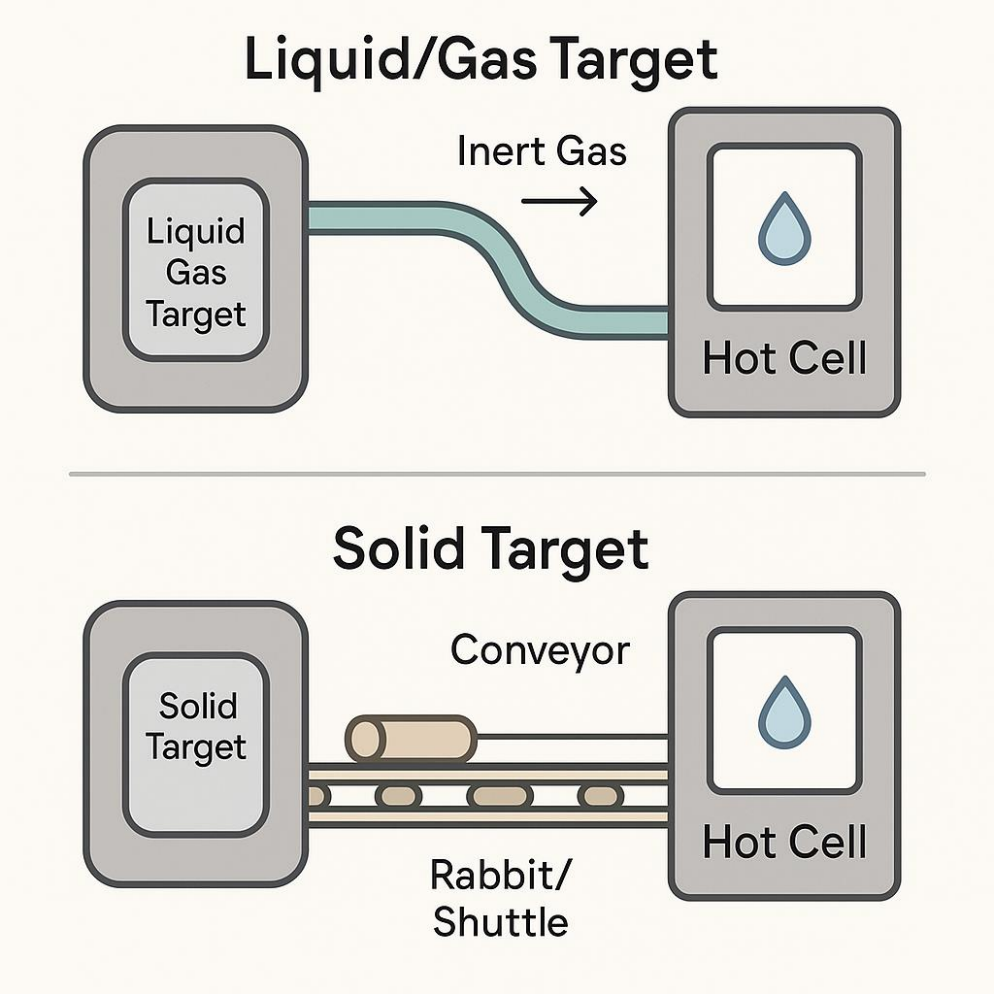
7.2 การลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีจากเป้าชนิดของแข็ง

วัสดุกัมมันตรังสีที่ผลิตจากเป้าชนิดของแข็งจะถูกบรรจุอยู่ใน Rabbit หรือ Shuttle ระบบการลำเลียงใช้ รางลำเลียง (conveyor system) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลวงอัดอากาศ โดยแรงดันภายในท่อสูงกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งได้ระยะทางไกล (สูงสุดประมาณ 30 เมตร) เมื่อสิ้นสุดการฉายรังสี Rabbit หรือ Shuttle จะถูกลำเลียงกลับเข้าสู่ Hot cell เพื่อเข้าสู่กระบวนการละลายเป้า (dissolution) และเตรียมเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์สารเภสัชรังสี

7.3 การกำบังรังสีและความปลอดภัยของเส้นทางลำเลียง

เส้นทางลำเลียงวัสดุกัมมันตรังสีเป็นบริเวณที่มีการแผ่รังสีตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการป้องกันรังสี โดยทั่วไปจะฝังเส้นทางลำเลียง ไว้ใต้พื้นคอนกรีตที่ระดับความลึกประมาณ 30–40 เซนติเมตร และติดตั้งแผ่นตะกั่ว (lead shielding) ครอบด้านบนเพิ่มเติมเพื่อลดการรั่วไหลของรังสีสู่พื้นที่โดยรอบ

ทั้งนี้ ระยะทางของเส้นทางลำเลียงควรกำหนดให้สั้นที่สุดเพื่อจำกัดระยะเวลาในการลำเลียง โดยปกติไม่ควรเกิน 2 นาที สำหรับเส้นทางระยะสั้น เพื่อควบคุมปริมาณรังสีที่บุคลากรอาจได้รับ นอกจากนี้ ควรมีการตรวจสอบสภาพของเส้นทางลำเลียงเป็นประจำเพื่อป้องกันการแตกร้าวหรือการอุดตันอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ตามการใช้งาน



รูปที่ 17 แผนภาพเปรียบเทียบเส้นทางการลำเลียง

8. ผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสี (activation product)

ในการฉายรังสีเพื่อผลิตวัสดุกัมมันตรังสีโดยใช้เครื่องไซโคลทรอน จะเกิดกระบวนการกระตุ้น (Activation) ของวัสดุหลัก ๆ สองส่วน ได้แก่

8.1 ส่วนเป้า (Target Material)

เป็นวัสดุที่ได้รับการชนโดยตรงจากอนุภาคโปรตอนพลังงานสูง ทำให้เกิดวัสดุกัมมันตรังสีตามที่ต้องการผลิตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์หรืออุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังอาจมีการเกิดวัสดุกัมมันตรังสีพลอยได้ (By-product Radionuclides) ซึ่งมิได้มีประโยชน์โดยตรง

8.2 ส่วนองค์ประกอบอื่น (Structural and Environmental Components)

ได้แก่ อากาศ คอนกรีต โครงสร้างภายในเครื่องไซโคลทรอน รวมถึงโครงสร้างของเป้าเอง วัสดุเหล่านี้สามารถดูดกลืนนิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องและถูกกระตุ้นให้กลายเป็นวัสดุกัมมันตรังสี โดยทั่วไป วัสดุที่เป็นคอนกรีตและเหล็กจะมีความไวต่อการเกิดกระบวนการนี้สูง

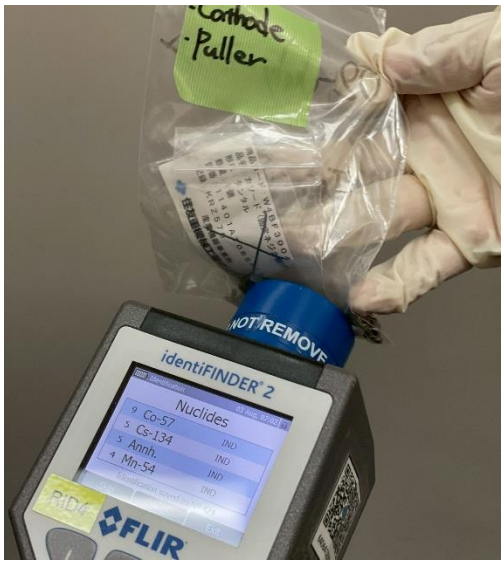
รังสีนิวตรอนที่ทำให้เกิดกระบวนการกระตุ้นดังกล่าวมีแหล่งกำเนิดจากการชนของโปรตอนพลังงานสูงกับโครงสร้างภายในเครื่อง เช่น เป้า, Deflector และ Dee ซึ่งส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยนิวตรอนออกมา

ลักษณะของวัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น (Activation Products)

- ส่วนใหญ่เป็นวัสดุกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น (Short-lived Radionuclides) เช่น Mn-56, Na-24, K-42, K-43 และ Fe-59 โดยมีค่าครึ่งชีวิตระหว่าง 3 ชั่วโมงถึง 44 วัน
- ส่วนน้อยเป็นวัสดุกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตยาว (Long-lived Radionuclides) เช่น Eu-152, Eu-154, Co-60, Cs-134, Zn-65 และ Ba-133 ดังแสดงใน ตารางที่ 4

ตัวอย่างวัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดจากการกระตุ้นในวัสดุต่าง ๆ

- คอนกรีต (Concrete): Eu-152, Cs-137
- โครงสร้างของเป้า (Target Holder): Co-57, Mn-54
- โครงสร้างภายในเครื่องไซโคลทรอน (Cyclotron Structure): Zn-65, Co-60
- นอกจากนี้ การตรวจวัดอัตราปริมาณรังสีในเป้ายังสามารถใช้เพื่อยืนยันการเกิด Activation Product ได้ ดังแสดงใน รูปที่ 18



รูปที่ 18 การตรวจวัดอัตราปริมาณรังสีของ activation product
ที่มา: ภาพงานตรวจ พ.ศ. 2568

ตารางที่ 4 วัสดุกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวจากการถูกกระตุ้นในคอนกรีต

วัสดุกัมมันตรังสี	ปฏิกิริยานิวเคลียร์	Cross-section	พลังงานรังสีแกมมา (MeV)	ค่าครึ่งชีวิต
Eu-152	$^{151}Eu(n,\gamma)^{152}Eu$	5900 barn (thermal)	0.122, 0.344, 0.779, 0.96, 1.087, 1.11, 1.408	13.33 ปี
Eu-154	$^{153}Eu(n,\gamma)^{154}Eu$	390 barn (thermal)	0.12, 0.72, 1.00, 1.278	8.8 ปี
Co-60	$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$	37 barn (thermal)	1.17, 1.33	5.3 ปี
Cs-134	$^{133}Cs(n,\gamma)^{134}Cs$	29 barn (thermal)	0.57, 0.605, 0.796	2.06 ปี
Sc-46	$^{45}Sc(n,\gamma)^{46}Sc$	26.5 barn (thermal)	1.12, 0.889	83 วัน
Ba-133	$^{132}Ba(n,\gamma)^{133}Ba$	7.2 barn (thermal)	0.356, 0.303, 0.384	10.5 ปี
Mn-54	$^{55}Mn(n,2n)^{54}Mn$ / $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	0.91 barn (18 MeV) / 0.59 barn (10 MeV)	0.835	312 วัน
Na-22	$^{23}Na(n,2n)^{22}Na$	0.017 barn (15 MeV)	1.275	2.6 ปี

การเกิดผลผลิตจากการก่อกัมมันตรังสีในอากาศและน้ำ

นอกจากคอนกรีตและโครงสร้างภายในแล้ว อากาศรอบเครื่องยังสามารถเกิดการกระตุ้นได้เช่นกัน เช่น

- H-3 (Tritium): ค่าครึ่งชีวิต 12.3 ปี
- Ar-41: ค่าครึ่งชีวิต 109.43 นาที

รวมถึงในน้ำ เช่น น้ำใต้ดิน ที่ได้รับอิทธิพลจากนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่เป้า ทำให้เกิดวัสดุกัมมันตรังสี H-3 เช่นกัน

โดยทั่วไป การเกิด H-3 ไม่มีนัยสำคัญสำหรับเครื่องไซโคลทรอนพลังงานต่ำ แต่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษในเครื่องไซโคลทรอนที่มีพลังงานสูงกว่า

9. เอกสารอ้างอิง

1. พระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559. (2559). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 133 ตอนที่ 41 ก, 15 เมษายน 2559.
2. กฎกระทรวงกำหนดประเภทเครื่องเร่งอนุภาคที่ต้องได้รับใบอนุญาต พ.ศ. 2561. (2561). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 135 ตอนที่ 57 ก, 15 มิถุนายน 2561.
3. กฎกระทรวงกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขในการอนุญาตให้ผลิต ครอบครอง ใช้ หรือมีไว้ในครอบครองซึ่งวัสดุกัมมันตรังสี พ.ศ. 2561. (2561). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 135 ตอนที่ 57 ก, 15 มิถุนายน 2561.
4. กฎกระทรวงกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขเกี่ยวกับการจัดการความปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561. (2561). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 135 ตอนที่ 79 ก, 10 สิงหาคม 2561.
5. กฎกระทรวงกำหนดมาตรการความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์และรังสี พ.ศ. 2562. (2562). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 136 ตอนที่ 49 ก, 1 พฤษภาคม 2562.
6. กฎกระทรวงว่าด้วยการจัดการกากกัมมันตรังสี พ.ศ. 2563. (2563). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 137 ตอนที่ 49 ก, 1 พฤษภาคม 2563.
7. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2565). *คู่มือการขออนุญาตและการตรวจสอบเครื่องไซโคลทรอนสำหรับการแพทย์.* กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.
8. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2562). *ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการขออนุญาตใช้เครื่องไซโคลทรอนเพื่อการแพทย์.* กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.
9. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. (2563). *ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง การแต่งตั้งและหน้าที่ความรับผิดชอบของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสี (RSO).* กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

10. Coenen, H. H., et al. (2017). Fluorine-18 radiopharmaceuticals beyond [18F] FDG for PET applications. *Nuclear Medicine and Biology, 55,* 4–16. https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2017.09.002
11. International Atomic Energy Agency. (2001). *Good practice for the operation of a medical cyclotron* (IAEA-TECDOC-1211). IAEA.
12. International Atomic Energy Agency. (2009). *Cyclotron produced radionuclides: Physical characteristics and production methods* (Technical Reports Series No. 468). IAEA.
13. International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (GSR Part 3). IAEA.
14. Levkovski, V. N. (1987). *Production of short-lived radioisotopes in small cyclotrons.* CRC Press.
15. Qaim, S. M. (2017). Nuclear data for production and medical application of radionuclides: Present status and future needs. *Nuclear Medicine and Biology, 44,* 31–49. https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2016.10.004
16. Ruth, T. J. (2009). The uses of cyclotrons in isotope production. *Applied Radiation and Isotopes, 67*(7–8), 1106–1112. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.020
17. Saha, G. B. (2017). *Fundamentals of nuclear pharmacy* (7th ed.). Springer.
18. Wolber, J., & Clarke, L. (2019). *Cyclotron produced radionuclides and radiopharmaceuticals.* Springer.