บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติเครื่องเร่งอนุภาค ประเภทของเครื่องเร่งอนุภาค หลักการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค ส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาค การบำรุงรักษา และการนำไปใช้ประโยชน์

2.1 เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) คือเครื่องมือชนิดหนึ่งที่อาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการเร่งให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งมีความเร็วสูง โดยให้เคลื่อนที่อยู่ภายในท่อที่เตรียมเอาไว้ โทรทัศน์แบบ CRT เป็นตัวอย่างแบบง่ายๆ อย่างหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาค มีเครื่องเร่งอนุภาคพื้นฐานอยู่ 2 แบบคือ เครื่องเร่งอนุภาคแบบ electrostatic และแบบ oscillating field การนำไปใช้ประโยชน์ลำของอนุภาคพลังงานสูงมีประโยชน์สำหรับการวิจัยพื้นฐานและประยุกต์ใช้ในทาง วิทยาศาสตร์และยังอยู่ในขอบเขตทางด้านเทคนิคและอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ไม่ เกี่ยวข้องกับการวิจัยพื้นฐาน มันได้รับการคาดว่ามีเครื่องเร่งอนุภาคอยู่ประมาณ 26,000 เครื่องทั่วโลก ในจำนวนนี้มีเพียง 1% เป็นเครื่องสำหรับงานวิจัยที่มีพลังงานสูงกว่า 1 GeV, ในขณะที่ประมาณ 44% ใช้สำหรับการรักษาโรคด้วยรังสี, 41% สำหรับขบวนการฝังไอออนที่ผิวของวัสดุ (ion implantation), 9% สำหรับอุตสาหกรรมการประมวลผลและการวิจัย, และ 4% สำหรับด้านชีวการแพทย์และการวิจัยพลังงานต่ำอื่นๆ กราฟแท่งแสดงรายละเอียดของจำนวนสะสมของเครื่องเร่งอนุภาคในอุตสาหกรรมที่สอดคล้องกับการใช้งาน โดยเครื่องเร่งอนุภาคแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องเร่งศักย์สูงไฟตรง (High voltage : DC) และ เครื่องเร่งเหนี่ยวนำ (Induction)

2.1.1 เครื่องเร่งศักย์สูงไฟตรง (High voltage : DC)

เครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูง คือเครื่องมือสำคัญของการผลิตอนุภาคกระสุนไม่ว่าจะเป็นโปรตอน แอลฟา ไอออนมวลหนักต่างๆ หรือนิวตรอน อนุภาคมีประจุที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูง

หลักการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูงคือ การยิงไอออนผ่านหลอดเร่งที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมอยู่ พลังงานของไอออนจะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างประจุบนไอออนกับศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมซึ่งมีค่าอยู่ในเรือนตั้งแต่ kV จนถึงประมาณ 7-8 MV ขึ้นอยู่กับประเภท

ของเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นแบบ electrostatic เช่น เครื่อง Van de Graaff หรือแบบ electrodynamic เช่นเครื่อง Cockcroft-Walton เป็นต้น ดังนั้นหัวใจสำคัญของเครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูงไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตาม คือการสร้างสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอนุภาคประจุให้ได้พลังงานตามที่ต้องการ

2.1.1.1 เครื่องเร่งอนุภาคแวน เดอ แกรฟฟ์ (Van de Graaff accelerator)

เป็นเครื่องเร่งอนุภาคกระแสต่ำที่นิยมใช้มากที่สุด (กระแสเร่งอยู่ในช่วงไมโครแอมแปร์) สร้างขึ้นโดย โรเบิร์ต เจมิสัน แวน เดอ แกรฟฟ์ (Robert Jemison van de Graaff) ในปีค.ศ.1931 สามารถเร่งอนุภาคได้พลังงานในช่วง 1-10 MeV อนุภาคมีประจุที่ใช้เร่งคือ ไอออนบวกเครื่องเร่งอนุภาคชนิดนี้มักถูกนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ธาตุเป็นส่วนใหญ่

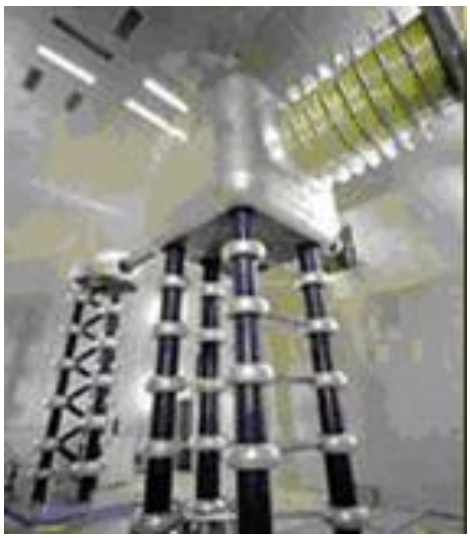
เครื่องเร่งอนุภาคแวน เดอ แกรฟฟ์ ทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าสถิต คือ การนำประจุ Q ไปเก็บไว้ด้านบนซึ่งเป็นส่วนที่มีค่าความจุไฟฟ้า C ทำให้ได้ความต่างศักย์คร่อม V เร่งอนุภาคได้ดังสมการ $V=Q/C$ ดังนี้ ประจุบวกถูกสร้างขึ้นที่แหล่งจ่ายความต่างศักย์ซึ่งอยู่ที่บริเวณฐานด้านล่างประจุบวกนั้นจะเกาะอยู่ที่สายพานซึ่งเป็นฉนวนเมื่อสายพานหมุนประจุบวกจะถูกส่งไปยังด้านบนที่มีโลหะทรงกลมหุ้มอยู่หวีโลหะ (หวีเก็บประจุ) ที่ติดอยู่ทำหน้าที่ดึงประจุออกจากสายพานให้ไปเก็บสะสมอยู่ที่ผิวในของโลหะทรงกลมและภายในโลหะทรงกลมก็มีแหล่งกำเหนิดอนุภาคประจุติดอยู่อนุภาคจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงลงมาตามท่อเร่งซึ่งสูบอากาศออกจนเหลือความดันประมาณ 10-6 ทอร์

ภาพที่ 2.1 แบบจำลองเครื่องเร่งอนุภาคแวน เดอ แกรฟฟ์

(ที่มา: ฟิสิกส์ราชมงคล, ออนไลน์. 2562)

2.1.1.2 เครื่องเร่งอนุภาคคอคครอฟต์-วอลตัน (Cockcroft-Walton accelerator)

เป็นเครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกของโลกและยังใช้งานอยู่จนปัจจุบันสร้างสำเร็จในปี ค.ศ. 1932 โดยจอห์น ดัวกลาส คอคครอฟต์ (John Douglas Cockcroft :1897-1967) และเออร์เนสต์ โธมัส สินตัน วอลตัน (Ernest Thomas Sinton Walton :1903-1995) ที่ห้องปฏิบัติการ Cavendish ประเทศอังกฤษ เป็นเครื่องเร่งแบบกระแสตรงโดยสร้างศักย์ไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันสองชุด ชุดหนึ่งต่อลงกราวด์ ส่วนอีกชุดหนึ่งต่อกับหลอดเร่งอนุภาค อนุภาคประจุที่ใช้เร่งได้แก่ ดิวเทอเรียมและไอออนมวลหนัก พลังงานอยู่ในช่วงหลายร้อย keV แต่ไม่เกิน 1 MeV. ประเทศไทยมีเครื่องเร่งอนุภาคคอคครอฟต์-วอลตันขนาด 200 กิโลโวลต์ 200 มิลลิแอมแปร์ ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ภาพที่ 2.2 เครื่องเร่งอนุภาคคอคครอฟต์-วอลตัน

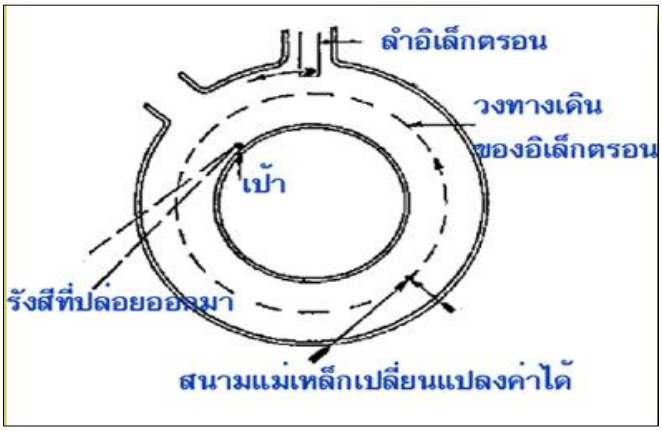
(ที่มา: ฟิสิกส์ราชมงคล, ออนไลน์. 2562)

2.1.2 เครื่องเร่งเหนี่ยวนำ (Induction)

เครื่องเร่งเหนี่ยวนำนั้นใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็ก ซึ่งฟลักซ์ของมันเปลี่ยนแปลงไปสม่ำเสมอตลอดกระบวนการเร่ง เครื่องเร่งเหนี่ยวนำที่มีใช้มากในปัจจุบันคือ betatron และ Insulating Core Transformer : ICT ซึ่งเป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวเบนทางเคลื่อนของอนุภาคให้โค้งเป็นวงปิด พลังงานของอนุภาคที่เร่งได้จะอยู่ในเรือนร้อยๆ MeV

2.1.2.1 เครื่องเร่งอนุภาคบีตาตรอน (Betatron accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคบีตาตรอนเป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน โดยการให้อิเล็กตรอนวิ่งวนหลายๆรอบในสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจนอิเล็กตรอน มีพลังงานอยู่ในช่วงหลายร้อย MeV สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1940 โดยดี ดับเบิลยู เคอร์สต (D. W.Kerst) เครื่องเร่งอนุภาคบีตาตรอนต่างจากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนตรงที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงได้ โดยให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆแต่กำหนดให้รัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนคงที่

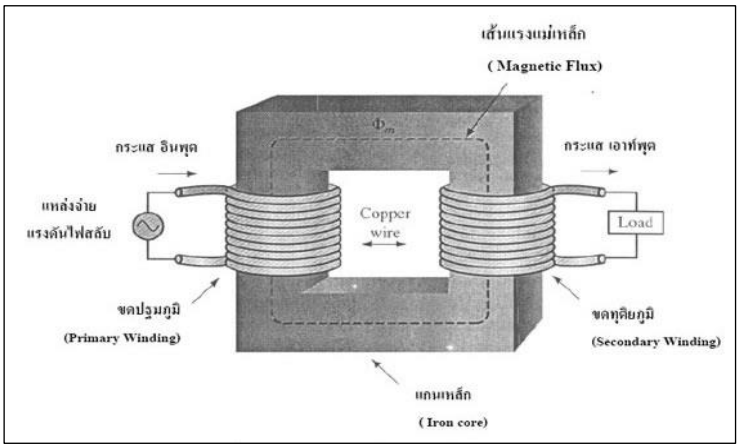


ภาพที่ 2.3 แบบจำลองเครื่องเร่งอนุภาคบีตาตรอน

(ที่มา: ฟิสิกส์ราชมงคล, ออนไลน์. 2562)

2.1.2.2 เครื่องเร่ง Insulating Core Transformer : ICT

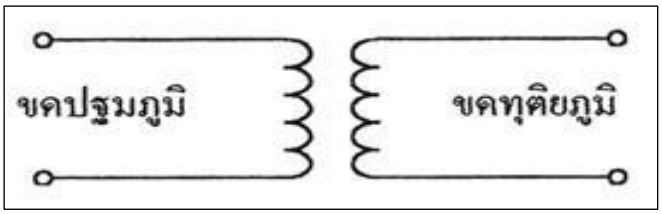
การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น อาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้กับตัวนำคือเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆตัวนำนั้น และถ้ากระแสที่ป้อนมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปมาก็จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยถ้าสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตัดผ่านตัวนำก็จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำนั้นโดยขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและความเร็วในการตัดผ่านตัวนำของสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.4 เครื่องเร่ง Insulating – Core – Transformer

(ที่มา : สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)

พิจารณาจากภาพที่ 2.4 เห็นว่าโครงสร้างของหม้อแปลงจะประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดพันรอบแกนที่เป็นสื่อกลางของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งอาจเป็นแกนเหล็ก แกนเฟอไรท์ หรือแกนอากาศ ขดลวดที่เราจ่ายไฟเข้าไปเราเรียกว่า ขดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดอีกขดที่ต่อกับโหลดเราเรียกว่า ขดทุติยภูมิ (Secondary Winding)



ภาพที่ 2.5 ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ

(ที่มา: สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)

เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับให้กับขดปฐมภูมิ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปมา โดยเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวก็จะวิ่งไปมาบนแกน และไปตัดกับขดทุติยภูมิ ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดทุติยภูมิที่ต่อกับโหลด โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของขดลวด การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อปล่อยแรงดันไฟสลับเข้าที่ขดปฐมภูมิจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กชักนำขึ้น ทำให้เกิดแรงดันไฟสลับขึ้นที่ขดทุติยภูมิโดยมีความถี่เท่าเดิม ขดทุติยภูมิจะมีขดลวดขดเดียวหรือหลายขดก็ได้ แรงดันไฟสลับที่เกิดขึ้นที่ขดทุติยภูมิจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขดลวด

ระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ สามารถคำนวณได้ว่าทางขดปฐมภูมิจะใช้ขดลวดกี่รอบต่อ 1 โวลต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของขดลวด เมื่อสามารถหาได้ว่าขดลวดกี่รอบต่อโวลต์แล้วทางขดทุติยภูมิก็สามารถที่จะพันให้ได้จำนวนรอบตามที่ต้องการถ้าจำนวนรอบของขดปฐมภูมิเท่ากับจำนวนรอบของขดทุติยภูมิ แรงดันไฟสลับที่ออกมาที่ขดทุติยภูมิจะเท่ากับแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้าไปที่ขดปฐมภูมิ นั้นคือถ้าป้อนแรงดันไฟสลับเข้าที่ขดปฐมภูมิ 220 โวลต์ แรงดันไฟสลับออกที่ขดทุติยภูมิจะเท่ากับ 220 โวลต์เช่นกัน (PSP, Tech.co.ltd. Online. 2557)

2.1.3 เครื่องเร่งเรโซแนนซ์ (Resonance)

เครื่องเร่งเรโซแนนซ์ ใช้องค์ประกอบส่วนสนามไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่าน RF ที่แปรตามเวลา สนามที่ใช้เร่งเป็นผลรวมของคลื่นฮาร์โมนิกส์ ซึ่งมีความเร็วเฟสต่างกันและเคลื่อนที่ไปตามทางเคลื่อนที่เป็นทางตรงหรือวงกลม ถ้าความเร็วของอนุภาคใกล้เคียงกับความเร็วเฟสของฮาร์โมนิกส์ตัวหนึ่งตัวใด อนุภาคจะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าของฮาร์มอนิกส์นั้นและจะเกิดเรโซแนนซ์กับคลื่น ซึ่งจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อทำให้ความเร็วเฟสของฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสมกับพลังงานของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น สามารถแบ่งออกเป็นเครื่องเร่งเชิงเส้น (Linear) และเครื่องเร่งเชิงวง (Cricular)

2.1.3.1 เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (Linear)

ในเครื่องเร่งอนุภาคแบบเชิงเส้น (linear accelerator) อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามความยาวของเครื่องเร่ง ซึ่งเป็นท่อทองแดงสุญญากาศ คลื่นที่ใช้เร่งผลิตจาก wave generator เรียกว่า klystrons ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าใช้บีบลำอนุภาคให้เป็นลำแคบๆ เมื่อลำอนุภาคเข้าชนเป้าที่ส่วนปลายของท่อ (tunnel) จะมีเครื่องวัดรังสีหลายชนิดติดตั้งอยู่เพื่อบันทึกสิ่งที่เกิดขึ้น ทั้งอนุภาคและรังสีที่ปลดปล่อยออกมา เครื่องเร่งอนุภาคแบบนี้ มีขนาดใหญ่และมักจะอยู่ใต้พื้นดินตัวอย่างของ linear accelerator คือ linac ที่ Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC) รัฐ California ซึ่งมีความยาวประมาณ 1.8 ไมล์ หรือ 3 กิโลเมตร (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2559)

1) Electron Linac เครื่อง RF linac สำหรับใช้งานกับอิเล็กตรอนประกอบด้วยโครงสร้างส่วนเร่งหนึ่งส่วนหรือหลายส่วนต่อกัน แต่ละส่วนยาวเป็นเมตรขึ้นไป เนื่องจากเป็นการเร่งหลายจังหวะจึงไม่เรียกส่วนที่ทำหน้าที่เร่งอนุภาคว่าท่อเร่งหรือ Accelerating tube แต่จะเรียกส่วนนี้ว่า Accelerating structure หรือโครงเร่งแทน สำหรับเครื่องเร่งที่ใช้กับพัลส์แคบๆโครงเร่งจะเป็นแบบ iris-loaded waveguide ใช้กับคลื่นวิ่งที่มีความถี่ประมาณ 3 GHz หรือความยาวคลื่น 10 เซนติเมตร ประเทศในทวีปเอเชียที่มีเครื่อง

linac ขนาดกำลังเร่งตั้งแต่ 1 GeV ขึ้นไปได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น จีน และเกาหลีใต้ เครื่อง linac ระดับพลังงานต่ำ (3-20 MV) มีใช้กันอยู่ทั่วไปตามโรงพยาบาลเพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ เครื่องเร่ง linac ขนาด 30-50 MV มักนิยมใช้เป็นปืนยิงอิเล็กตรอน (injector) เข้าสู่ระบบเร่งของเครื่อง Synchrotron ขนาด 1 GeV ขึ้นไปดังเช่น ที่ติดตั้งที่ประเทศไต้หวันและกำลังติดตั้งที่ศูนย์ซินโครตรอนแห่งชาติ ณ บริเวณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) Proton Linac เครื่อง Proton Linac ส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันใช้คลื่น RF ความถี่ประมาณ 200 MHz โครงเร่งจะเร่งเป็นแบบ Alvarez เรียกกันว่า drift tube linac (DTL) ความยาวของท่อปลอดสนามในช่วงที่โปรตอนถูกเร่งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 5 MeV มีค่าประมาณ 5 ถึง 15 เซนติเมตร เครื่องเร่งรุ่นใหม่จะให้ความถี่สูง เพื่อให้ได้ลำโปรตอนที่มีขนาดเล็กแต่ความเข้มสูง ภายในท่อปลอดสนามแต่ละท่อจะติดตั้งเลนส์แม่เหล็ก quadrupoles ไว้เพื่อปรับขนาดลำโปรตอน โดยท่อปลอดสนามติดตั้งเรียงกันภายในโพรงซึ่งยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตรขึ้นอยู่กับขนาดของกำลัง RF ที่จะป้อนเข้าไปโครงเร่ง Alvarez เหมาะกับโปรตอนที่มีค่า β ระหว่าง 0.05 ถึง 0.3 เครื่องเร่ง linac ชนิดนี้จึงใช้ขับเร่งโปรตอนในช่วงพลังงานไม่เกิน 100 MeV สำหรับเครื่องโปรตอน β มีค่าสูงจะใช้โพรงอีกแบบหนึ่ง

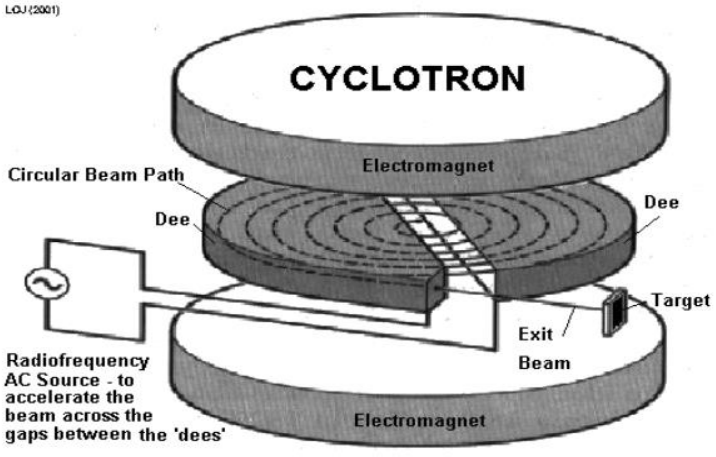
3) Heavy Ion Linac เครื่องเร่ง linac สำหรับไอออนมวลหนักมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและแตกต่างไปจากเครื่องที่ใช้เร่งโปรตอน ซึ่งเครื่องเร่ง linac แต่ละเครื่องมีโครงสร้างภายในส่วนใหญ่ที่ยึดคงที่ปรับเปลี่ยนค่าได้น้อยมาก จะมีเฟสและแอมพลิจูดของสนามเท่านั้นที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ดังนั้น เครื่อง linac จึงใช้เร่งเฉพาะไอออนที่มีค่า $\frac{q}{m}$ ที่เหมาะสม resonator ของเครื่องเร่งไอออนมวลหนักแต่ละตัวจึงออกแบบให้มีขนาดสั้นและปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวมันเองได้อย่างอิสระ

2.1.3.2 เครื่องเร่งอนุภาคเชิงวง (Circular accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคแบบวงกลม (Circular accelerators) มีการทำงานคล้ายกับเครื่องเร่งเชิงเส้น แต่แทนที่จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง อนุภาคจะถูกดึงให้เคลื่อนที่เป็นวนวงกลมหลายรอบ แต่ละรอบจะได้รับแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ลำอนุภาคถูกเร่งอย่างต่อเนื่อง เมื่ออนุภาคมีพลังงานสูงตามที่ต้องการแล้ว จะใส่เป้าลงไปในแนวของลำอนุภาค ที่ตำแหน่งของเครื่องมือวัดรังสีหรือตำแหน่งใกล้เคียง เครื่องเร่งอนุภาคแบบวงกลม เป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบแรกที่มีการประดิษฐ์ขึ้นในปี 1929 เครื่อง cyclotron อันแรกที่ประดิษฐ์ขึ้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 10 เซนติเมตร (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2559)

1) เครื่องเร่งไซโคลตรอน (Cyclotron)

เครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอน เพิ่มพลังงานให้กับอนุภาคมีประจุ (charged particles) ด้วยสนามไฟฟ้า โดยมีสนามแม่เหล็กเป็นตัวช่วยควบคุมให้อนุภาควิ่งเป็นวงโค้ง การใช้งานส่วนใหญ่ของไซโคลตรอน คือการเร่งอนุภาคเข้าไปชนกับเป้าเพื่อที่จะสร้างไอโซโทปรังสีเพื่อการแพทย์และอุตสาหกรรม ไซโคลตรอนมีลักษณะเป็นวงกลม ต้นกำเนิดอนุภาคของไซโคลตรอนจะอยู่บริเวณใกล้กับจุดศูนย์กลาง เมื่อไอออนหรืออนุภาคมีประจุได้ถูกปล่อยเข้าไปในเครื่อง มันจะวิ่งอยู่ภายในส่วนที่เรียกว่า ดี (dee) ซึ่งเป็นส่วนโลหะกลวงที่มีรูปร่างคล้ายตัวอักษร D ไซโคลตรอนจะมี dee นี้อยู่สองฝั่ง วางอยู่เคียงกัน ภายใน dee นี้ จะมีสนามแม่เหล็กซึ่งจะผลักให้อนุภาควิ่งเป็นวงกลม ด้วยแรงแม่เหล็ก $F = q \, v \, B$ โดยที่ q คือประจุไฟฟ้าของอนุภาค v คือความเร็ว และ B คือสนามแม่เหล็ก ซึ่ง สนามแม่เหล็กนี้เกิดจากขั้วแม่เหล็กขนาดใหญ่ซึ่งอยู่ด้านบนและล่างของไซโคลตรอน อนุภาคได้รับการเร่งความเร็วเมื่อมันวิ่งผ่านช่องว่างระหว่าง dee ทั้งสอง ซึ่งในช่องนี้ จะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งทุกครั้งที่อนุภาควิ่งผ่านก็จะถูกผลักด้วยแรงคูลอมป์ $F = q \, E$ (E คือ สนามไฟฟ้า) และมีพลังงานเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้านี้ถูกสร้างโดยแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสลับ (alternating voltage source) ส่วนภายใน dee นั้น อนุภาคจะถูกกั้นออกจากสนามไฟฟ้า และวิ่งอยู่ด้วยเป็นวงกลมด้วยแรงทางแม่เหล็กแรงเดียว



ภาพที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องไซโคลทรอน

(ที่มา : ณรงค์เวทย์ บุญเต็ม, ออนไลน์. 2557)

2) เครื่องเร่งซินโครตอน (Synchrotron)

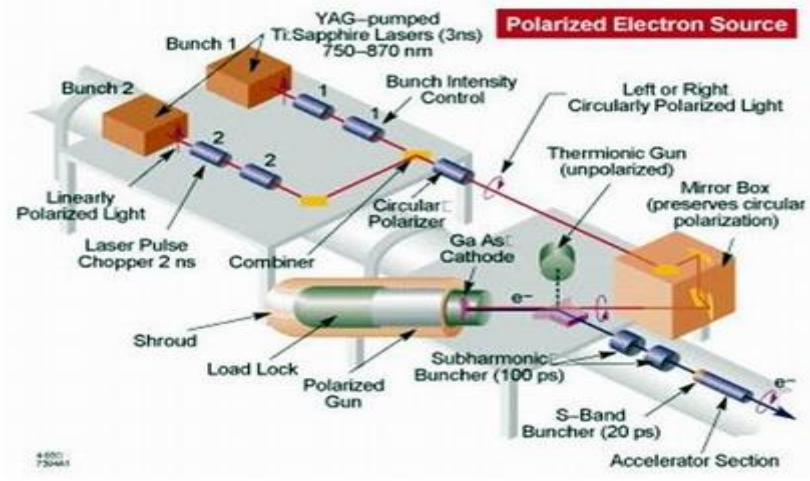
เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนจัดเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่ได้รับการพัฒนาสูงสุดสามารถเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงมากถึงระดับ GeV ด้วยหลักการเรโซแนนซ์เชิงวง. ซึ่งสนามแม่เหล็กและความถี่ของสนามอาร์เอฟเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบ ภายในเครื่องเร่งซินโครตรอนอนุภาคถูกเร่งไปตามวงโคจรที่รัศมีคงที่ อนุภาคประจุที่ถูกเร่งได้แก่ อิเล็กตรอน โปรตอน และไอออนหนัก อนุภาคประจุที่ถูกเร่งมักถูกกักไว้ให้อยู่ในบริเวณวงกลมที่มีรัศมีแน่นอนที่เรียกว่า "วงแหวนสะสมอนุภาค" (storage rings) หลักการของเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "พร้อมสัมพันธ์" (synchronize) ระหว่างความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เร่งอนุภาคเท่ากับความถี่ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกเร่งโดยเมื่อทั้งสองความถี่มีค่าเท่ากันหรือที่เรียกว่าพร้อมสัมพันธ์กันแล้วอนุภาคก็จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงใกล้ความเร็วแสงและมีพลังงานสูงได้ จากนั้นสนามแม่เหล็กจะบังคับให้อนุภาคเลี้ยวเป็นวง อนุภาคประจุเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า แสงซินโครตรอน หรือรังสีซินโครตรอน (synchrotron radiation) โดยทั่วไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกยิงออกจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) หรือไอออนถูกยิงออกจากแหล่งกำเนิดไอออน (ion source) แล้วจะถูกเร่งโดยเครื่องเร่งเชิงเส้น (linear accelerator) ซึ่งเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้หลักการเร่งอนุภาคแบบเดียวกับเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนแต่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นเส้นตรงอนุภาคจะถูกเร่งด้วยเครื่องเร่งเชิงเส้นจนมีพลังงานสูงอยู่ในช่วง 20-50 MeV ก่อนที่จะเข้าสู่วงแหวนเร่งของเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน (booster ring) เมื่ออนุภาคได้รับการเร่งจนมีพลังงานสูง 1 GeV ก็จะถูกดึงเข้าสู่วงแหวนกักเก็บอนุภาค (storage ring) ซึ่งเป็นวงแหวนสะสมอนุภาคประจุพลังงานสูงภายในเป็นสุญญากาศ มีรัศมีและสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านคงที่ เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะสูญเสียพลังงานบางส่วน โดยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาหรือที่เรียกว่าแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณลักษณะพิเศษที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความสว่างจ้ามาก ความเข้มแสงสูงและมีลำแสงที่คม มีสเปคตรัมต่อเนื่อง โดยให้แสงที่ มีความถี่ตั้งแต่ย่านอินฟราเรดจนถึงเอ็กซ์เรย์ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้งานได้ตามต้องการ หรือในแง่ของการศึกษาอนุภาคมูลฐานเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนจะมีวงแหวนกักเก็บอนุภาค 2 วงที่สะสมอนุภาคสองชนิด จากนั้นจะเร่งให้ชนกันในลำอนุภาคสำหรับชน (colliding beam) เพื่อศึกษาอนุภาคที่เกิดขึ้นต่อไปตัวอย่างวงแหวนกักเก็บอนุภาคสำหรับกักเก็บอิเล็กตรอนและโปรตอน เพื่อใช้ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคมูลฐานที่ Stanford เรียกว่า Stanford Positron

Electron Accelerator Rings (SPEAR) ซึ่งจากการทดลองทำให้ค้นพบควาร์กมีเสน่ห์ (charm quark) และทาว (tau)

2.1.4 ทฤษฎีส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาค

เครื่องเร่งอนุภาคทุกชนิดไม่ว่าแบบเชิงเส้นหรือแบบวงกลม มีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอนุภาค (Particle source) ทำหน้าที่ผลิตอนุภาคที่ต้องการเร่งอนุภาคที่ใช้ ได้แก่ อิเล็กตรอน (electron) โปรตอน (proton) โพสิตรอน (positron) ซึ่งปฏิอนุภาค (antimatter particle) ที่มีคุณสมบัติแบบเดียวกับอิเล็กตรอน แต่มีประจุบวก ไอออนและนิวเคลียสของธาตุมวลหนัก เช่น ทอง ที่ SLAC มีปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ใช้เลเซอร์ยิงให้อิเล็กตรอน หลุดออกจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จากนั้นอิเล็กตรอนจะเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคที่ส่วนของ linac ที่ SLAC สามารถผลิตโพสิตรอน (positron) โดยการยิงทังสเตน (tungsten) ด้วยลำอิเล็กตรอน ทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนกับโพสิตรอน (electron-positron pairs) จากนั้นจึงเร่งโพสิตรอน โดยการกลับขั้วของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ภายในเครื่องเร่งอนุภาค



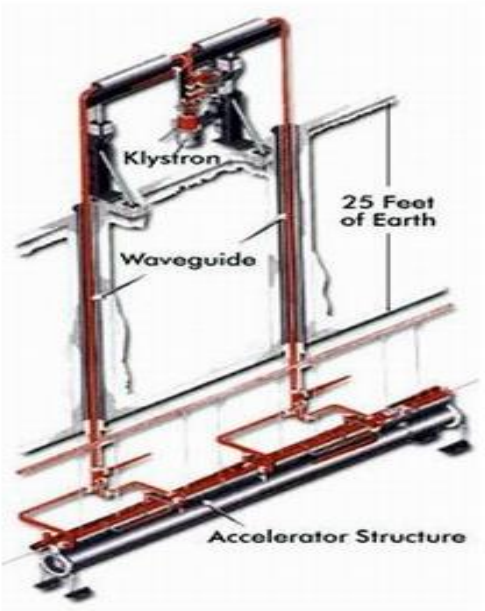
ภาพที่ 2.7 แสดง electron gun ของ SLAC's linac

(ที่มา : สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)

2. ท่อทองแดง (Copper tube) ลำอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปในท่อสุญญากาศนี้ อุปกรณ์หลักอย่างหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาคคือ ท่อทองแดง (copper tube) ภายใน copper tube จะมีสภาวะที่เป็นสุญญากาศ (strong vacuum) เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านได้ ตัวท่อทำด้วยทองแดง เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าและแม่เหล็กที่ดี ที่ SLAC linac มี copper tube มากกว่า 80,000 copper กระบอกเชื่อมต่อกันเป็นระยะทางยาวมากกว่า 2 ไมล์ หรือ 3.2

กิโลเมตร ท่อทองแดงจะเชื่อมกันเป็นชุดต่อเนื่อง (series of cells) ในแนวยาว เรียกว่า cavities ระยะระหว่าง cavities เรียกว่า spacing จะพอดีกับความยาวคลื่นของไมโครเวฟ spacing จะเป็นส่วนที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทุกๆ 3 cavities ลำอิเล็กตรอนหรือโพสิตรอนจะเคลื่อนที่ผ่าน cavities เป็นลำแบบห้วง (bunch) แต่ละห้วงจะพอดีกับเวลาที่สนามไฟฟ้าผ่าน cavities

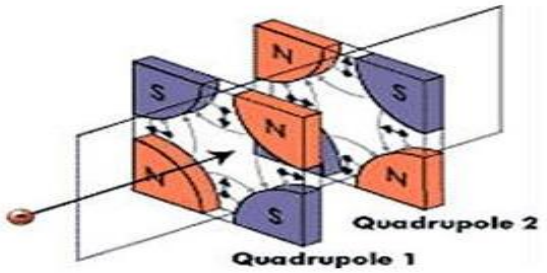
3. Klystrons เครื่องผลิตคลื่นไมโครเวฟ (microwave generators) หรือ เครื่องผลิตคลื่นไมโครเวฟ (microwave generators) สำหรับเป็นคลื่นที่ใช้พาให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปทำหน้าที่ผลิตไมโครเวฟ ซึ่งคล้ายกับเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัว ต่างกันที่กำลังของ klystron ให้ไมโครเวฟมากกว่าประมาณ 1 ล้านเท่า ผลิตไมโครเวฟโดยการใช้ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปช่องว่าง (cavities) ของ klystron ซึ่งใช้ควบคุมความเร็วอิเล็กตรอนที่ถูกลดความเร็วลงใน klystron จะคายรังสีออกมาในรูปของคลื่นไมโครเวฟ และจะถูกส่งไปยังส่วนของ copper waveguides ซึ่งเป็นท่อทองแดงในเครื่องเร่งอนุภาค Waveguides จะทำหน้าที่รักษาประสิทธิภาพของคลื่น ไม่ให้ลดความเข้มลง



ภาพที่ 2.8 แสดง klystron, waveguide และ copper tube ของ linac
(ที่มา : สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)

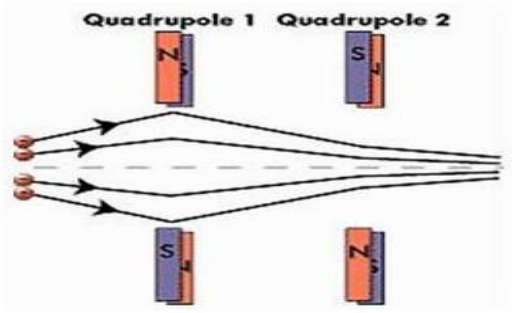
4. ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnets) แบบ conventional หรือ superconducting ใช้บีบลำอนุภาคให้เป็นลำแคบๆ หรือใช้บังคับทิศทางขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปในสุญญากาศ แม่เหล็กอาจจะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าธรรมดา (conventional electromagnets)

หรือ (superconducting magnets) วางอยู่ที่ท่อตามความยาวของเครื่องอนุภาค ในตำแหน่งตามระยะห่างที่กำหนด แม่เหล็กเหล่านี้ ทำหน้าที่กำหนดขนาดและโฟกัสลำอนุภาค ถ้านึกภาพลำอนุภาคเป็นลูกปืน แบบลูกปราย ที่ยิงออกไปจากปืนโดยปกติ ลูกปรายหรืออิเล็กตรอนมีแนวโน้มจะกระจายตัวออก และถ้าลูกปืนกระจายออก ก็จะกระทบเป้าที่มีขนาดเล็กจำนวนน้อย ถ้าลูกปืนถูกบังคับด้วยแรงภายนอก (สนามแม่เหล็ก) ให้เป็นลำแคบๆ ก็จะเกิดการชนกับเป้าได้มากขึ้น จำนวนครั้งของการชนที่มากขึ้น จะทำให้เกิดเหตุการณ์ที่สามารถตรวจวัดได้ในการทดลองได้มากขึ้น แม่เหล็กจะทำให้เกิดสนามขึ้นภายในแกน แต่จะไม่มีแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่งศูนย์กลาง ซึ่งลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน ถ้าอิเล็กตรอนเบนออกไปจากศูนย์กลาง ก็จะถูกแรงแม่เหล็กผลักกลับเข้าหาศูนย์กลาง เมื่อจัดวางชุดแม่เหล็กให้สลับขั้วกัน อิเล็กตรอนจะถูกบีบเป็นลำไปตลอดช่วงความยาวของท่อ



ภาพที่ 2.9 การใช้แม่เหล็กในการควบคุมขนาดของลำอนุภาค

(ที่มา : สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)



ภาพที่ 2.10 การจัดตำแหน่งขั้วแม่เหล็กตรงข้ามกัน เพื่อใช้บังคับลำอนุภาค

(ที่มา : สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ออนไลน์. 2547)

5. เป้า (Targets) เป็นสิ่งที่กำหนดให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าชน จะแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง บางครั้งอาจทำเป็นโลหะแผ่นบาง ในบางการทดลองอาจใช้ลำอนุภาคต่างชนิดกัน เช่น อิเล็กตรอนกับโพสิตรอน เข้าชนกันภายในเครื่องตรวจวัดอนุภาค (detectors)

6. เครื่องวัดรังสี (Detectors) เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับอนุภาคหรือรังสีที่เกิดขึ้นจากการชน เครื่องตรวจวัดอนุภาค (detectors) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดชิ้นหนึ่งในเครื่องเร่งอนุภาค เครื่องนี้จะตรวจจับอนุภาคและรังสีที่เกิดขึ้นภายหลังการชน เครื่องตรวจวัดมีหลายชนิด ตั้งแต่ bubble และ cloud chambers ไปจนถึง solid-state electronic detectors ห้องปฏิบัติการจะมีการติดตั้ง เครื่องตรวจวัดหลายชนิดในหลายตำแหน่งของเครื่องเร่งอนุภาค ตัวอย่างเช่น bubble chamber ซึ่งบรรจุด้วยกาซเหลว (liquid gas) เช่น ไฮโดรเจนเหลว (liquid hydrogen) เมื่ออนุภาคที่เกิดจากการชนผ่านเข้าไปใน chamber จะทำให้กาซเหลวบางส่วนกลายเป็นไอ (vaporize) ทำให้เกิดเป็นฟองตามเส้นทางของอนุภาค cloud chamber detector บรรจุด้วยกาซที่อยู่ในสภาวะของไออิ่มตัว (saturated vapor) ไว้ภายใน chamber เมื่อมีอนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ผ่าน จะไปไอออไนซ์ไอที่อิ่มตัวนี้ ทำให้ควบแน่น และเห็นเป็นทางตามแนวที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน แบบเดียวกับที่เครื่องบินผ่านอากาศที่มีไอน้ำอิ่มตัว

7. ระบบทำความเย็น (Cooling systems) ทำหน้าที่ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กไฟฟ้า

8. ระบบควบคุมและวิเคราะห์การทำงาน (Control and diagnostic system) ทำหน้าที่ควบคุมและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค โดยใช้คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์

9. ระบบป้องกันรังสี (Shielding) ใช้ป้องกันรังสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ให้แก่เจ้าหน้าที่ ช่างเทคนิค และประชาชน

10. ระบบตรวจสอบ (Monitoring systems) เป็นโทรทัศน์วงจรปิดและเครื่องวัดรังสี ใช้ตรวจสอบสิ่งที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเร่งอนุภาค เป็นระบบสำหรับความปลอดภัย

11. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Electrical power system) ใช้ป้อนไฟฟ้าให้เครื่องทั้งหมด

12. ระบบเก็บลำอนุภาค (Storage rings) ทำหน้าที่เก็บลำอนุภาคไว้ชั่วคราวขณะที่ยังไม่ใช้งาน

13. ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นหลอดคาโธด ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งพลังงานภายในท่อเร่งพลังงาน (Accelerating tube) ของเครื่องเร่งอนุภาคทางตรงจนมีพลังงาน 40 MeV โดยการเร่งพลังงานอิเล็กตรอน ใช้สนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟกำลังสูง (ความถี่ 2856 MHz) ซึ่งถูกผลิตจากอุปกรณ์ที่เรียกว่าไครสตรอน (Klystron) และถูกส่งเข้าสู่ท่อเร่งพลังงานของเครื่องเร่งอนุภาคทางตรงผ่านทางท่อนำคลื่น (Wave guide)

2.1.5 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนทางการแพทย์

เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนทางการแพทย์เป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาต่อเนื่องมาจากเครื่องเร่งอนุภาค (LINAC) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เพื่อให้สามารถฉายรังสีร่วมพิกัดได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเครื่องสามารถผลิต X-ray (โฟตอน) พลังงาน 6 MeV, 6FFF และ 10FFF (Flattening filter free) ซึ่งสามารถผลิตรังสีออกมาได้รวดเร็วกว่าเดิม จึงช่วยลดระยะเวลาในการฉายรังสีแต่ละครั้งลงได้ อีกทั้งยังมีชุดอุปกรณ์กำบังรังสีแบบซี่ (Multileaf collimators, MLC) ที่มีขนาดเล็กถึง 2.5 มิลลิเมตร ทำให้สามารถกำหนดรูปร่างของลำรังสีได้ละเอียดยิ่งขึ้น (คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี, ออนไลน์. 2559)

1. การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของเป้าหมาย รวมทั้งอวัยวะต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ทำได้ด้วยการใช้คอมพิวเตอร์สร้างภาพสามมิติขึ้นมาจากข้อมูล CT และ MRI ก่อนจะทำการกำหนดขนาด และทิศทางของลำรังสีเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีในส่วนต่างๆ ตามที่แพทย์ต้องการ

2. ในการฉายรังสี เตียงที่ผู้ป่วยนอนสามารถปรับแก้ความคลาดเคลื่อนได้ทุกทิศทาง (6 Degrees of freedom Couch, 6DOF Couch) รวมถึงมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการจัดตำแหน่งและตรวจจับการเคลื่อนไหวในระหว่างการฉายรังสีหลายแบบให้เลือกใช้สำหรับผู้ป่วยที่เหมาะสม ได้แก่

1) อุปกรณ์ตรวจสอบตำแหน่งพื้นผิวแบบสามมิติ (Real-time 3D surface imaging) ซึ่งช่วยให้การจัดท่าฉายรังสีของผู้ป่วยแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถตรวจจับการขยับตัวของผู้ป่วยในระหว่างทำการฉายรังสี และหยุดรังสีในทันทีที่มีความผิดพลาดเกินกว่าที่กำหนดไว้

2) เครื่อง X-ray สำหรับถ่ายภาพทางรังสีที่สามารถทำ CBCT (Cone beam computed tomography) ซึ่งให้ภาพในแบบเดียวกับภาพ CT ได้บนเตียงฉายรังสี

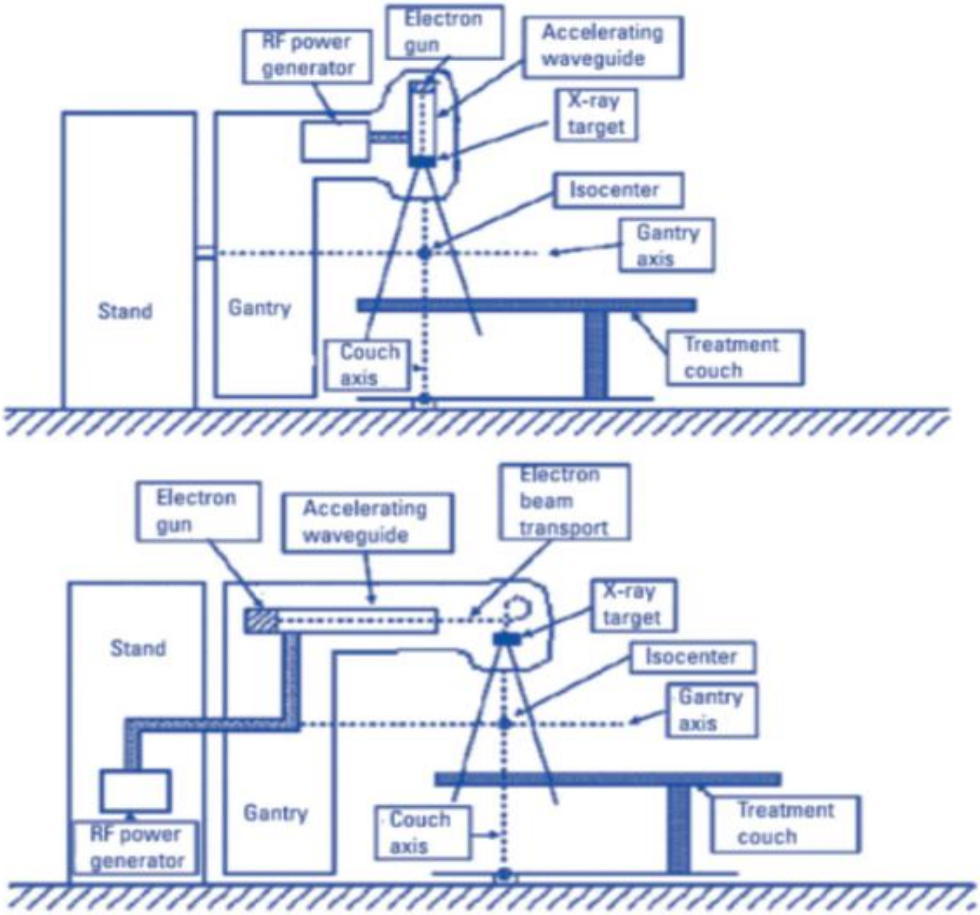
3) ระบบติดตามพิกัดตำแหน่งของเป้าหมายด้วยคลื่นวิทยุ (Radiofrequency tracking) โดยฝังอุปกรณ์ขนาดเล็กเข้าไปในร่างกาย เพื่อทำให้สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของเป้าหมายที่เกิดขึ้นในระหว่างการฉายรังสีได้ตลอดเวลา

จุดเด่นของการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสำหรับรักษามะเร็ง คือสามารถควบคุมการให้รังสีในปริมาณที่ถูกต้องและตรงจุดเป้าหมายในขณะที่เนื้อเยื่อปกติบริเวณรอบ ๆ จะได้รับความเสียหายน้อยที่สุด โดยระบบส่วนใหญ่จะใช้รังสีเอกซ์ในการรักษา แต่มีบางระบบใช้ลำอิเล็กตรอนในการรักษา หรือใช้ทั้งสองชนิดร่วมกัน ระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนสำหรับรังสีรักษานิยมใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงาน 4 ถึง 25 MeV ความยาวของเครื่องเร่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีความยาวตั้งแต่ประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับเร่งอิเล็กตรอน

พลังงาน 4 ถึง 6 MeV ถึงความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร สำหรับเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน20 MeV โดยเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นจะติดตั้งบนแกนทรี (gantry) ที่สามารถหมุนได้เกือบรอบตัวคนไข้ ดังนั้นจึงสามารถฉายรังสีเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วยในทิศทางต่างๆ ได้ (ดังแสดงในภาพที่ 2.12)

แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นสำหรับรังสีรักษาในภาพที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบหลัก คือ ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น (ในรูประบุด้วย accelerating waveguide) ซึ่งเป็นได้ทั้งแบบคลื่นเดินหน้า (travelling wave linac) หรือแบบโพรงแบบคลื่นนิ่ง (standing wave linac) โดยใช้แหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF power generator) เป็นแมกนีตรอน (magnetron) สำหรับระบบพลังงาน ในช่วง 4 ถึง 10 MeV หรือ เป็นไคลสตรอนสำหรับระบบพลังงานช่วง 10 ถึง 25 MeV และมีเป้าผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray target) ซึ่งเป็นเป้าโลหะหนัก รวมทั้งเตียงผู้ป่วย (treatment couch) ในรูปที่ 2.11 (บน) แสดงเครื่องรังสีรักษาที่ติดตั้งเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นตามแนวตั้ง ซึ่งเป็นการจัดเรียงที่ทำให้การลำเลียงลำอิเล็กตรอนทำได้ง่าย มักใช้สำหรับระบบพลังงาน 4 ถึง 6 MeV ส่วนระบบที่ใช้พลังงานสูงขึ้นจะมีเครื่องเร่งอนุภาคที่ยาวและต้องวางตามแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ล่าง) นั่นคือจะต้องมีแม่เหล็กสำหรับใช้สนามแม่เหล็กเบนลำอิเล็กตรอนในระบบลำเลียงด้วย คุณลักษณะสำคัญของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนสำหรับรังสีรักษาก็คือ ให้เอาท์พุท (output) ในรูปของลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ที่มีโดสสูงเพื่อให้การรักษาใช้เวลาสั้น ระบบมีความเสถียรและทำซ้ำใหม่ได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้การรักษาเป็นไปอย่างถูกต้องตามที่วางแผนไว้ ตำแหน่งของเอาท์พุท (ทั้งรังสีเอกซ์ และลำอิเล็กตรอน) มีความแม่นยำ โดยลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1-2 มิลลิเมตร

ภาพที่ 2.11 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนทางการแพทย์ พลังงาน 6 MeV
(ที่มา : คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี, ออนไลน์. 2559)



ภาพที่ 2.12 แผนภาพภายในของเครื่องเร่งอนุภาคฉายรังสีที่มีการติดตั้งเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในสองลักษณะที่แตกต่างกัน
(ที่มา: ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, 2560)

2.1.6 การฉายรังสีสำหรับผู้ป่วยมะเร็ง

การรักษาโรคมะเร็งประกอบด้วยวิธีการรักษาหลายวิธี เช่น การฉายรังสี การผ่าตัด ยาเคมีบำบัดและการรักษาด้วยฮอร์โมน เป็นต้น ซึ่งอาจจะให้การรักษาด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งหรือใช้หลายวิธีร่วมกัน ในกรณีที่จำเป็นต้องมีการรักษาด้วยการฉายรังสี ผู้ป่วยจะได้รับการดูแลโดยรังสีแพทย์ แพทย์จะอธิบายถึงบทบาทของรังสีรักษา ข้อดี-ข้อเสีย และผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการรักษาและภายหลังจากเสร็จสิ้นการรักษา (คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, รังสีรักษาและมะเร็งรักษา. ออนไลน์. 2559)

1. วิธีการของการรักษาด้วยรังสีเป็นอย่างไร

รังสีรักษาจะทำลายสารพันธุกรรมภายในเซลล์มะเร็งและทำให้เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายหรือตายไป ร่างกายจะกำจัดเซลล์เหล่านี้ออกจากร่างกาย ในขณะเดียวกันเซลล์ปกติก็ได้รับผลกระทบจากรังสีด้วย แต่เซลล์ปกติเหล่านี้มีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองได้ดีกว่าเซลล์มะเร็ง ปัจจุบันเทคนิคการฉายรังสีพัฒนาไปมาก แพทย์รังสีรักษาสามารถกำหนดตำแหน่งของการฉายรังสีไปยังก้อนมะเร็งได้อย่างแม่นยำ โดยเนื้อเยื่อปกติโดยรอบได้ปริมาณรังสีน้อยมาก

2. วัตถุประสงค์ของการรักษาด้วยรังสีในโรคมะเร็งและเนื้องอกต่างๆ

1) เพื่อกำจัดเนื้องอกที่ยังไม่มีการกระจายไปยังส่วนอื่นๆ ของร่างกาย

2) เพื่อลดความเสี่ยงของการกำเริบหลังการผ่าตัด หรือให้ยาเคมีบำบัด โดยสามารถฆ่าเซลล์มะเร็งที่หลงเหลืออยู่แต่มองไม่เห็นได้

3) เพื่อลดขนาดของเนื้องอกก่อนการผ่าตัด

4) ลดอาการต่างๆ ที่เกิดจากก้อนเนื้องอก และช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิต ซึ่งการรักษาแบบนี้จะเรียกว่า การรักษาแบบประคับประคอง หรือการรักษาเพื่อบรรเทาอาการ เช่น การฉายรังสีเพื่อลดอาการปวดจากก้อนเนื้องอกไปกด หรือ การฉายรังสีเพื่อลดขนาดของก้อนที่ทำให้หอบเหนื่อย

ผู้ป่วยบางรายอาจกลัวว่าการฉายรังสีจะทำให้เกิดมะเร็งชนิดอื่นตามมาหลังการรักษา แต่ในความเป็นจริงแล้ว ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งตามหลังการรักษาด้วยรังสีนั้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับประโยชน์ของการรักษาเพื่อให้หายขาดจากโรคมะเร็ง ซึ่งมีประโยชน์และสำคัญมากกว่า

3. ผลข้างเคียง (Side effects)

1) ผลข้างเคียงของการฉายรังสีเป็นผลข้างเคียงเฉพาะที่ ขึ้นกับบริเวณที่ได้รับการฉายรังสี เช่น ในการรักษามะเร็งเต้านมผู้ป่วยอาจมีรอยแดงหรือสีผิวคล้ำขึ้นตรงผิวหนังบริเวณหน้าอกตรงที่ฉายรังสี ในขณะที่ถ้าเป็นมะเร็งในช่องปากจะมีอาการเจ็บปากเจ็บคอในช่วงฉายรังสีได้ หรือผู้ป่วยที่ได้รับการฉายรังสีบริเวณช่องท้อง อาจรู้สึกปวดมวนท้อง เป็นต้น อาการเหล่านี้มักเป็นชั่วคราว และมักเริ่มในช่วงสัปดาห์ที่สองและสามของการฉายรังสี และอาจมีอาการต่อไปได้อีก 2-3 สัปดาห์หลังฉายรังสีครบ ส่วนน้อยมากเท่านั้นที่เกิดผลข้างเคียงรุนแรงภายหลังการฉายรังสี

2) อาการที่มักเจอบ่อยๆ ช่วงฉายรังสีไม่ว่าจะรักษาบริเวณไหนก็ตาม คือ รู้สึกอ่อนเพลีย ซึ่งระดับความมากน้อยขึ้นกับตัวบุคคล บริเวณที่ฉายรังสี และการได้รับการรักษาอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ยาเคมีบำบัด หากท่านมีอาการดังกล่าวควรพยายามพักผ่อนให้มากและผ่อนคลายความเครียด

3) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการใส่แร่เป็นแบบ 3 มิติร่วมกับภาพสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) ซึ่งถือเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำสูง และมีประสิทธิภาพมากที่สุดในปัจจุบัน ตั้งแต่ก่อนการรักษาซึ่งมีส่วนช่วยให้แพทย์เลือกวิธีการและเทคนิคการรักษาได้อย่างเหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละคน และในระหว่างการรักษาที่ช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งก้อนมะเร็งได้อย่างชัดเจน และคำนวณปริมาณรังสีได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถลดผลข้างเคียงจากรังสีไปยังอวัยวะข้างเคียง

4) สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย เป็นศูนย์รังสีรักษาแห่งแรกในประเทศไทยที่เริ่มใช้ภาพสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) ร่วมกับการใส่แร่ 3 มิติตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติให้เป็นศูนย์การฝึกอบรมการรักษาด้วยรังสีระยะใกล้ 3 มิติ เนื่องจากเป็นสถาบันที่มีบุคลากรที่มีประสบการณ์ในการรักษาผู้ป่วยจำนวนมากและมีเครื่องมือในการรักษาที่ทันสมัยที่สุดในภูมิภาคเอเชีย

4. ขั้นตอนการจำลองการฉายรังสี

1) เพื่อให้การรักษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การฉายรังสีต้องฉายไปที่ก้อนมะเร็งในทุกครั้ง จึงจำเป็นต้องมีการจำลองการฉายรังสีและกำหนดจุดการฉายรังสี เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถวางขอบเขตการฉายรังสีได้ตรงกันทุกครั้ง

2) ในระหว่างการจำลองการฉายรังสี จะให้ผู้ป่วยอยู่ในท่าทางเหมือนเวลาฉายรังสีจริงๆ หลังจากนั้นเจ้าหน้าที่จะนำลวดมาวางบนตัวผู้ป่วยหรือบนเครื่องมือยึดตรึง เครื่องมือยึดตรึงผู้ป่วยอาจเป็นหน้ากาก ที่วางศีรษะ ที่วางแขน แผ่นโฟม เพื่อให้ผู้ป่วยอยู่ในตำแหน่งเดิมในทุกๆ วันของการฉายรังสี หลังจากนั้นจะสแกนภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) และอาจใช้ภาพสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) ร่วมด้วย เพื่อนำภาพมาวางแผนการฉายรังสี จากนั้นเจ้าหน้าที่จะวาดขอบเขตการฉายรังสีด้วยหมึกบนหน้ากากหรือบนตัวผู้ป่วย ซึ่งสามารถลบออกได้ในภายหลังจากการฉายรังสีเสร็จสิ้นแล้ว

5. ในระหว่างการฉายรังสี

1) การฉายรังสีแต่ละครั้งผู้ป่วยจะไม่รู้สึกเจ็บ หรือแสบร้อนที่ผิว แต่รังสีจะผ่านเข้าไปยังก้อนมะเร็ง การฉายรังสีแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 5-15 นาที ในการจัดท่าทางและใส่อุปกรณ์เครื่องมือยึดตัว และจัดตำแหน่งการฉายรังสี เมื่อจัดท่าทางได้ตามที่กำหนดไว้แล้ว นักรังสีการแพทย์จะออกจากห้องและไปยังบริเวณห้องควบคุม เพื่อทำการฉายรังสี และดูผู้ป่วยผ่านกล้องวงจรปิดนอกจากนี้ยังมีไมโครโฟนและลำโพง ซึ่งผู้ป่วยสามารถสื่อสารโดยตรงกับเจ้าหน้าที่ห้องควบคุมได้ ในระหว่างการฉายรังสีหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นสามารถหยุดการฉายรังสีและเข้าไปช่วยเหลือผู้ป่วยได้ทันที

2) โดยทั่วไประยะเวลาในการฉายรังสีแต่ละครั้งจะประมาณ 10-40 นาที ผู้ป่วยไม่จำเป็นต้องนอนโรงพยาบาลสามารถกลับบ้านได้หลังฉายรังสีเสร็จ ดังนั้นผู้ป่วยจึงไม่ต้องหยุดงานและสามารถให้ร่วมกับการรักษาวิธีอื่นได้

3) ระหว่างการฉายรังสี หัวเครื่องฉายรังสีจะเคลื่อนที่ไปมาเพื่อให้ลำรังสีพุ่งตรงไปยังก้อนมะเร็งและจะมีเสียงในระหว่างที่เครื่องปล่อยรังสีออกมา

4) แพทย์รังสีรักษาอาจส่งการตรวจวินิจฉัย เพื่อดูการตอบสนองต่อการรักษา เป็นระยะๆ หากก้อนมะเร็งยุบลงมากๆ อาจต้องมีการจำลองการรักษาอีกครั้งเพื่อวางแผนการรักษาใหม่ ในบางครั้งอาจต้องหยุดฉายรังสี ถ้าผู้ป่วยเกิดผลข้างเคียงจากการฉายรังสีมาก แต่สามารถชดเชยวันหยุดเหล่านี้ ในช่วงหลังการฉายรังสีได้ อย่างไรก็ตามถ้าไม่มีปัญหา ผู้ป่วยควรได้รับการฉายรังสีอย่างต่อเนื่อง โดยปกติทั่วไปการฉายรังสีจะฉาย 5 วัน ต่อสัปดาห์ หยุด 2 วัน และต้องฉายติดต่อกันตั้งแต่ 1 ถึง 10 สัปดาห์ ซึ่งจำนวนครั้งของการฉายรังสีขึ้นอยู่กับขนาด ชนิดของโรคมะเร็ง สภาพร่างกายของผู้ป่วย แผนการรักษาหรือมีการรักษาอื่นๆ ร่วมด้วยหรือไม่

5) ในบางครั้งมีการฉายรังสีเพิ่มเติม (Boost) ที่ก้อนมะเร็ง เพื่อเพิ่มปริมาณรังสี ผู้ป่วยบางรายอาจจำเป็นต้องได้รับยาเคมีบำบัดและการฉายรังสีร่วมกัน ซึ่งยาเคมีบำบัดอาจให้ทุกสัปดาห์หรือทุก 3 สัปดาห์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้เซลล์มะเร็งไวต่อการฉายรังสีมากขึ้น

6. การปฏิบัติตัวก่อน – หลังการฉายรังสี

1. ผู้ป่วยต้องได้รับการตรวจร่างกาย และซักประวัติอย่างละเอียด รวมทั้งการตรวจเลือดทางห้องปฏิบัติการก่อนการฉายรังสี

2. แนะนำเรื่องเสื้อผ้าเครื่องแต่งกาย เมื่อมารับการฉายรังสี ควรสวมเสื้อผ้าที่สะดวกต่อการถอดและการสวมใส่

3. แนะนำการให้รับประทานอาหารที่มีประโยชน์ และมีคุณค่าต่อร่างกาย ดื่มน้ำสะอาดอย่างน้อยวันละ 6-8 แก้ว และควรงด สุรา บุหรี่ หมาก พลู เพื่อให้ร่างกายแข็งแรงพร้อมที่จะฉายรังสี

4. ดูแลความสะอาดของร่างกาย ปากและฟัน

5. กรณีมีโรคประจำตัว และมียาประจำที่ต้องรับประทาน สามารถรับประทานได้ต่อเนื่องแต่ต้องแจ้งแพทย์ที่ดูแลทางรังสีรักษารับทราบด้วย

6. การฉายรังสี ต้องใช้เวลานานดังนั้น ต้องมีการเตรียมตัวเกี่ยวกับการเดินทางและที่พักอาศัยขณะมารับการฉายรังสี

7. การปฏิบัติตัวขณะรับการฉายรังสี และหลังการฉายรังสี

8. ระมัดระวังอย่าให้เส้นลบ ถ้าเส้นลบให้แจ้งเจ้าหน้าที่ทันทีที่มารับการฉายในวันถัดมา

9. หลีกเลี่ยงการใช้ครีมหรือยาทาผิวหนังบริเวณที่ฉายรังสี

10. การทำความสะอาดร่างกาย แนะนำให้อาบน้ำได้ปกติ แต่ต้องระวังไม่ขัดถู ขี้ไคล หรือใช้สบู่ถู บริเวณที่ฉายรังสี

11. ห้ามวางกระเป๋าน้ำร้อน หรือน้ำเย็น บริเวณที่ฉายรังสี

12. ป้องกันการระคายเคืองต่อผิวหนังบริเวณที่ฉายรังสี โดยไม่ใส่ เสื้อผ้า ที่คับ หรือเนื้อผ้าหยาบกระด้าง หรือใช้เครื่องผูกรัด

13. ห้ามใช้แป้งทาบริเวณที่ฉายรังสี เนื่องจากแป้งอาจมีโลหะหนักผสมอยู่ เมื่อฉายรังสีจะทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อผิวหนังรุนแรง

14. หลีกเลี่ยงการโกนขนหรือผมบริเวณที่ฉายรังสีเพราะอาจทำให้เกิดแผล

7. ความเสี่ยงและผลข้างเคียงของการรักษาด้วยการฉาย LINAC

1. การเปลี่ยนแปลงของผิวหนังบริเวณที่ฉายรังสี เมื่อฉายได้ 1-2 สัปดาห์ ผิวหนังอาจมีลักษณะ บวม แดง แห้ง เป็นขุย คัน และ อาจลอก หรือ ตกสะเก็ดได้

2. อาการอ่อนเพลีย เป็นอาการปกติที่อาจพบได้ระหว่างการฉายรังสี ซึ่งอาจเกิดจากการรับประทานอาหารได้น้อย หรือเบื่ออาหาร

3. ความต้านทานโรคต่ำ ซีด และเลือดออกง่าย ซึ่งเกิดจากการฉายรังสีจะกดการทำงานของไขกระดูก

4. ซึ่งมักจะเกิดจากการฉายบริเวณที่มีการสร้างเม็ดเลือดมาก เช่น กระดูกอุ้งเชิงกราน กระดูกซี่โครงและหน้าอก เฝ้าระวังโดยการ เจาะเลือด ดู CBC

5. การเกิดภาวะแทรกซ้อนเฉพาะที่ เช่น การเกิด Mucositis , diarrhea

6. อาการปากแห้ง กรณีฉายบริเวณ ศีรษะ ลำคอ และ ต่อมน้ำลาย

7. อาการทางระบบทางเดินอาหาร กรณีฉายรังสีบริเวณช่องท้อง

8. อาการทางสมอง กรณีมีการฉายบริเวณ ศีรษะ ซึ่งอาจเกิดสมองบวมได้

9. อาการของอวัยวะสืบพันธ์ กรณีมีการฉาย บริเวณ อุ้งเชิงกราน เช่น ในเพศชายอาจเกิดการไม่แข็งตัวของอวัยวะเพศ ส่วนเพศหญิงอาจเกิดการตีบตันของช่องคลอด และ การเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมน

2.1.7 การใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆจากเครื่องเร่งอนุภาค

1. ด้านการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี การประยุกต์ลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์จากลำอิเล็กตรอนในการปรับปรุงคุณภาพของอัญมณี เช่น ให้มีสีสวยงามขึ้นเป็นที่ต้องการของตลาด อันเป็นการเพิ่มมูลค่าของอัญมณี ซึ่งกระบวนการที่ใช้กันแพร่หลายกระบวนการหนึ่งคือ การใช้ลำอิเล็กตรอนในการเปลี่ยนสีของโทแพซ (topaz) ซึ่งเป็นพลอยเนื้ออ่อนตัวอย่างการใช้งานใน

ด้านนี้ในประเทศไทยคือ เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ณ ศูนย์ฉายรังสีอัญมณีของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทน. ที่ให้บริการใช้ลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น 10-20 MeV ในการเปลี่ยนโทแพซธรรมชาติที่ไม่มีสี ให้เป็นสีน้ำเงินท้องฟ้า (sky blue) และ สีน้ำเงินสวิส (swiss blue)

ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างอัญมณีฉายรังสีด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอน 20 MeV, 10 MeV สีฟ้าอ่อน (Sky blue Topaz)
(ที่มา : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, ออนไลน์. 2555)

ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างอัญมณีฉายรังสีด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย ฉายรังสีนอกแกนเครื่อง (นิวตรอนพลังงานสูง) บวกด้วยการฉายด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนสำหรับ สีน้ำเงินสวิส (Swiss blue Topaz)
(ที่มา : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, ออนไลน์. 2555)

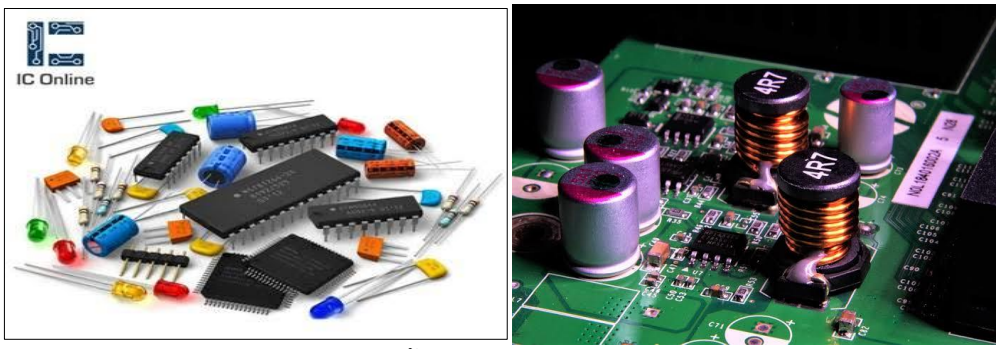
2. ด้านการฆ่าเชื้อ (sterilization) ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น เข็มฉีดยาถุงมือและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์อื่นๆ ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่เป็นมลพิษ โดยใช้ระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีพลังงานประมาณ 8-10 MeV โดยสามารถใช้ได้ทั้งลำอิเล็กตรอน

โดยตรงหรือรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากเป้าโลหะหนักที่ถูกชนโดยลำอิเล็กตรอน และสามารถฆ่าเชื้ออุปกรณ์ที่อยู่ในหีบห่อได้ ทั้งนี้การฆ่าเชื้อด้วยลำอิเล็กตรอนจะเป็นที่นิยมมากกว่า ตัวอย่างของเครื่องฉายลำอิเล็กตรอนเพื่อการฆ่าเชื้อ

ภาพที่ 2.15 การฆ่าเชื้ออุปกรณ์การแพทย์

(ที่มา : สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2553)

3. ด้านอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกล ได้นำเครื่องเร่งอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องบิน เพื่อให้สามารถทนต่อความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งสามารถนำมาใช้พัฒนาเพื่อผลิตหน้าจออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์มือถือ หน้าจอโทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 การเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สามารถทนต่อความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูง

(ที่มา : สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2553)

4. ด้านอุตสาหกรรมอาหาร การอาบลำอิเล็กตรอนบนอาหาร ผักและผลไม้เพื่อถนอมอายุและรักษาความสด เพื่อที่จะสามารถเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องได้เป็นระยะเวลานานกว่าปกติ รวมทั้งการฆ่าเชื้อโรคหรือแมลงโดยไม่มีสารพิษตกค้าง ใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น

พลังงาน 8 -10 MeV ปัจจุบันดำเนินการโดยสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) การฉายรังสีอาหารมีวัตถุประสงค์ เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (pathogen) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อชะลอการสุก เพื่อลดปริมาณปรสิต เพื่อยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา เพื่อทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง หรืออื่นๆ ทั้งนี้การฉายรังสีอาหารต้องมีปริมาณรังสีดูดกลืนต่ำสุดที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีและมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค ไม่ทำลายคุณภาพอาหาร สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร โดยไม่ทำลายโครงสร้างสมบัติเชิงหน้าที่ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร

ภาพที่ 2.17 การฉายรังสีอาหาร

(ที่มา : สุรศักดิ์ สัจจบุตร, ออนไลน์. 2553)

5. ด้านอุตสาหกรรมเกษตร รังสีอิเล็กตรอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน วัตถุประสงค์ในการฉายรังสีอาหารมีหลายอย่างเช่น เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์และกำจัดจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อชะลอการสุกของผลไม้ เพื่อยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา เพื่อทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง เพื่อชะลอการงอก เป็นต้น

ภาพที่ 2.18 การยับยั้งการงอกของมันฝรั่งด้วยการฉายรังสี

(ที่มา : จารุณี ไกรแก้ว, ออนไลน์. 2554)

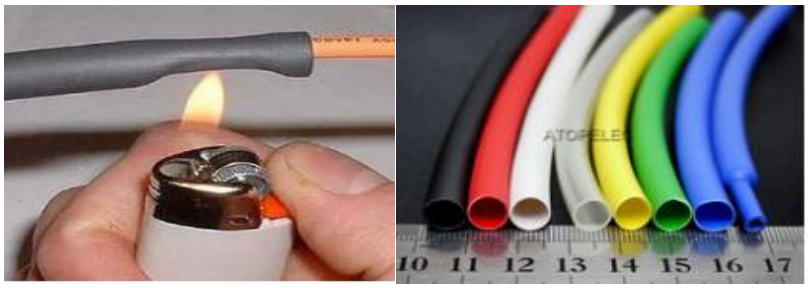
ภาพที่ 2.19 การชะลอการบานของเห็ดด้วยการฉายรังสี

(ที่มา : จารุณี ไกรแก้ว, ออนไลน์. 2554)

6. การประยุกต์ลำอิเล็กตรอนในกระบวนการเชื่อมปฏิพันธ์ (cross-linking) ในพอลิเมอร์ อันจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การใช้ลำอิเล็กตรอนในการทำให้ฉนวนไฟฟ้าของสายไฟหรือสายเคเบิลทนต่อความร้อนได้สูงขึ้นและมีความหน่วงไฟ (flame retardation) การใช้ลำอิเล็กตรอนในอุตสาหกรรมยางรถยนต์เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่น และ ความเหนียวของยาง หรือการใช้ลำอิเล็กตรอนอาบน้ำยางพาราดิบในกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) โดยไม่ต้องใส่กำมะถัน

ภาพที่ 2.20 การใช้ลำอิเล็กตรอนในอุตสาหกรรมยางรถยนต์เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่น และความเหนียวของยาง

(ที่มา : สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2553)



ภาพที่ 2.21 การใช้ลำอิเล็กตรอนในการทำให้ฉนวนไฟฟ้าของสายไฟหรือสายเคเบิลทนต่อความร้อนได้สูงขึ้นและมีความหนาวไฟ

(ที่มา : สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2553)

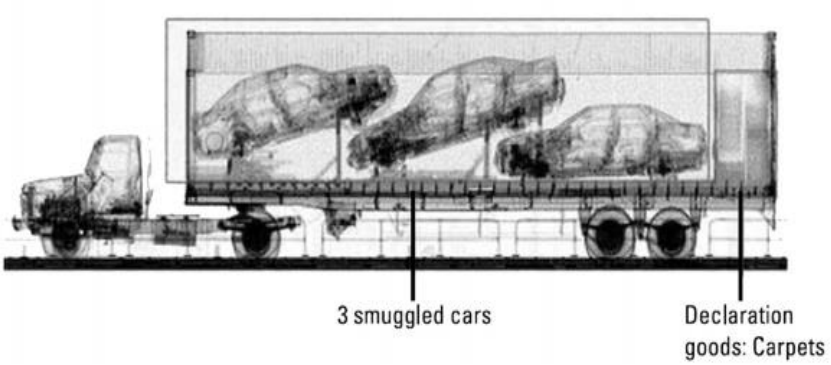
7. การใช้ลำอิเล็กตรอนสำหรับบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่ใช้เวลาสั้น มีตัวอย่างการใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับบำบัดน้ำเสียในประเทศรัสเซียเกาหลีใต้ อเมริกา และบราซิล เป็นต้น ภาพที่ 4.12 แสดงระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในประเทศเกาหลีใต้ นอกจากนี้ยังมีการใช้ลำอิเล็กตรอนช่วยกำจัดมลพิษในอากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินที่ทำให้เกิดฝนกรด ดังเช่นระบบเครื่องเร่งกำจัดมลพิษในอากาศที่ประเทศโปแลนด์ เป็นต้น

ภาพที่ 2.22 แสดงระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในประเทศเกาหลีใต้

(ที่มา **:** ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, 2560)

8. การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น สำหรับการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ เช่น รอยรั่วจากการเชื่อม และการประยุกต์ใช้สำหรับการรักษาความปลอดภัย เช่น การใช้รังสีเอกซ์หรือรังสีอินฟราเรดที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนในการตรวจจับอาวุธ วัตถุระเบิด ยาเสพติด หรือวัตถุต้องห้ามอื่นๆ ภายในวัสดุห่อหุ้มภาพที่ 4.13 แสดงการใช้งานรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากระบบเครื่องเร่ง

อิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงาน 3-9 MeV สำหรับการตรวจสอบสินค้า ซึ่งมีทั้งระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่แล้วให้รถบรรทุกสินค้าแล่นผ่านหรือระบบเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถเคลื่อนไปตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์บนเรือสินค้าที่จอดเทียบท่าได้



ภาพที่ 2.23 แสดงการใช้รังสีเอกซ์ที่ผลิตจากระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น สำหรับตรวจสอบสินค้าภายในตู้คอนเทนเนอร์ของรถบรรทุกสินค้า
(ที่มา : ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, 2560)

2.1.8 ทฤษฎีการบำรุงรักษาเครื่องเร่งอนุภาค

การบำรุงรักษา (Maintenance) หมายถึง การพยายามรักษาสภาพของเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ให้มีสภาพที่พร้อมจะใช้งานอยู่ตลอดเวลา” การบำรุงรักษานั้นครอบคลุมไปถึงการซ่อมแซม (Repair) เครื่องด้วย

2.1.8.1 จุดมุ่งหมายของการบำรุงรักษา

การบำรุงรักษามีจุดมุ่งหมายสรุปได้ 6 ประการ ดังนี้

1. เพื่อให้เครื่องมือเครื่องใช้ทำงานอย่างมีประสิทธิผล (Effectiveness) คือ สามารถใช้เครื่องมือเครื่องใช้ได้เต็มความสามารถและตรงกับวัตถุประสงค์ที่จัดหามามากที่สุด

2. เพื่อให้เครื่องมือเครื่องใช้มีสมรรถนะการทำงานสูง (Performance) และช่วยให้เครื่องมือเครื่องใช้มีอายุการใช้งานยาวนาน เพราะเมื่อเครื่องมือได้ใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจะเกิดการสึกหรอ ถ้าหากไม่มีการปรับแต่งหรือซ่อมแซมแล้ว เครื่องมืออาจเกิดการขัดข้อง ชำรุดเสียหาย หรือทำงานผิดพลาด

3. เพื่อให้เครื่องมือเครื่องใช้มีความเที่ยงตรงน่าเชื่อถือ (Reliability) คือ การทำให้เครื่องมือเครื่องใช้มีมาตรฐาน ไม่มีความคลาดเคลื่อนใดๆเกิดขึ้น

4. เพื่อความปลอดภัย (Safety) ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายที่สำคัญ เครื่องมือเครื่องใช้จะต้องมีความปลอดภัยเพียงพอต่อผู้ใช้งาน ถ้าเครื่องมือเครื่องใช้ทำงานผิดพลาด ชำรุด

เสียหาย ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ อาจจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุและการบาดเจ็บต่อผู้ใช้งานได้ การบำรุงรักษาที่ดีจะช่วยควบคุมไม่ให้เกิดความผิดพลาด

5. เพื่อลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อม เพราะเครื่องมือเครื่องใช้ที่ชำรุดเสียหายเก่าแก่ ขาดการบำรุงรักษา จะทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น มีฝุ่นละอองหรือไอของสารเคมีออกมา มีเสียงดัง เป็นต้น ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่เกี่ยวข้อง

6. เพื่อประหยัดพลังงาน เพราะเครื่องมือเครื่องใช้ส่วนมากจะทำงานได้ต้องอาศัยพลังงาน เช่น ไฟฟ้า น้ำมันเชื้อเพลิง ถ้าหากเครื่องมือเครื่องใช้ได้รับการดูแลให้อยู่ในสภาพที่ดี เดินราบเรียบ ไม่มีการรั่วไหลของน้ำมัน การเผาไหม้สมบูรณ์ ก็จะสิ้นเปลืองพลังงานน้อยลง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้

2.1.8.2 ประเภทของการบำรุงรักษา

ในทางปฏิบัติสามารถแยกประเภทของการบำรุงรักษาได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การบำรุงรักษาตามแผน (Planned Maintenance) หมายถึง การบำรุงรักษาตามกำหนด ตามแผนงาน ตามระบบที่วางไว้ทุกประการ งานที่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า สามารถเตรียมการไว้ล่วงหน้าได้ สามารถกำหนดระยะวัน เวลา สถานที่และจำนวนผู้ปฏิบัติงานที่จะเข้าไปดำเนินการได้ แนวทางการบำรุงรักษานั้นอาจเลือกใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งได้ เช่น การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาเพื่อแก้ไข เข้ามาดำเนินการ ส่วนระยะเวลาเข้าไปทำการบำรุงรักษา อาจจะกำหนดหรือวางแผนเข้าซ่อมแซมขณะเครื่องกำลังทำงานอยู่หรือขณะเครื่องชำรุด (Break down Maintenance) หรือหยุดการใช้เครื่องเพื่อทำการบำรุงรักษา (Shut down) การซ่อมบำรุงประเภทนี้จะมีปัญหาน้อย เพราะมีเวลาเตรียมการล่วงหน้าได้ทุกขั้นตอน

2. การบำรุงรักษานอกแผน (Unplanned Maintenance) เป็นการบำรุงรักษานอกระบบงานที่วางไว้เนื่องจากเครื่องเกิดการขัดข้อง ชำรุดเสียหายอย่างกระทันหัน ต้องรีบเร่งทำการซ่อมแซมทันทีให้เสร็จเรียบร้อยทันการใช้งาน การบำรุงรักษาประเภทนี้จะเกิดปัญหามากกว่าการบำรุงรักษาตามแผน เนื่องจากไม่สามารถทราบล่วงหน้าล่วงหน้ามาก่อน ไม่สามารถกำหนดวัน เวลา สถานที่ ที่แน่นอนได้ ทำให้ไม่สามารถเตรียมจัดหาผู้ปฏิบัติงานอุปกรณ์อะไหล่ ที่จะใช้บำรุงรักษาได้ทันที

2.1.8.3 ชนิดของการบำรุงรักษา

การจำแนกประเภทการบำรุงรักษาเป็น 2 ประเภทดังกล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าแนวทางของการบำรุงรักษาจะแตกต่างกันไป ดังนั้น จึงสามารถจำแนกเป็นชนิดของการบำรุงรักษาได้เป็น 6 ชนิด คือ

1. การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) คือ การบำรุงรักษาที่ดำเนินการเพื่อป้องกันเหตุขัดข้อง หรือการชำรุดของเครื่องมือเครื่องใช้โดยฉุกเฉิน สามารถทำได้ด้วยการตรวจสภาพเครื่อง การทำความสะอาด และการหล่อลื่นอย่างถูกวิธี การปรับแต่งให้เครื่องทำงานตามวัตถุประสงค์ตามคำแนะนำของคู่มือ รวมทั้งการตรวจสอบและเปลี่ยนอะไหล่ตามกำหนดเวลา

2. การบำรุงรักษาหลังเกิดเหตุขัดข้อง (Break down Maintenance) คือ การบำรุงรักษาเมื่อเครื่องมือเครื่องใช้เกิดการชำรุดและต้องหยุดโดยฉุกเฉิน วิธีการนี้ถึงแม้จะเป็นวิธีการดั้งเดิมในการบำรุงรักษา แต่ยังจำเป็นต้องนำมาใช้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากเครื่องมือเครื่องใช้ทั้งหลาย แม้ว่าจะได้รับการบำรุงรักษาป้องกันเยี่ยมเพียงใด ก็ยังมีโอกาสเกิดเหตุขัดข้องต้องหยุดใช้เครื่องโดยฉุกเฉินได้ตลอดเวลา

3. การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง (Corrective Maintenance) คือ การดำเนินการเพื่อดัดแปลง ปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือเครื่องใช้หรือส่วนประกอบของเครื่อง เพื่อขจัดเหตุขัดข้องเรื้อรังของเครื่องให้หมดไป และปรับปรุงสภาพของเครื่องให้สามารถทำงานได้อย่างมีคุณภาพ

4. การป้องกันเพื่อการบำรุงรักษา (Maintenance Prevention) คือ การดำเนินการใดๆ ก็ตามที่จะให้ได้มาซึ่งเครื่องมือเครื่องใช้ที่ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา หรือมีแต่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดย

- ออกแบบเครื่องให้มีความแข็งแรงทนทาน บำรุงรักษาง่าย
- ใช้เทคนิคและวัสดุที่จะทำให้เครื่องมีความเชื่อถือได้สูง
- รู้จักเลือกและซื้อเครื่องมือเครื่องใช้ที่ดี ทนทาน บำรุงรักษาง่าย และมีราคาที่เหมาะสม

5. การบำรุงรักษาทวีผล (Productive Maintenance) คือ กรรมวิธีการบำรุงรักษาที่นำเอาการบำรุงรักษาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มาประกอบเข้าด้วยกันโดยกำหนดวัตถุประสงค์หลักเพื่อส่งเสริมการปฏิบัติงานขององค์กรให้เกิดผลสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม การบำรุงรักษาที่ดีย่อมจะไม่อาศัยการบำรุงรักษาชนิดหนึ่งชนิดใดเพียงอย่างเดียว แต่ควรที่จะใช้ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดการ “ทวีผล” และมีสัมฤทธิ์ภาพสูงสุด

6. การบำรุงรักษาทวีผลรวม (Total Productive Maintenance) คือ การระดมคนทุกคนที่เกี่ยวข้อง (เจ้าของเครื่อง , ผู้รับผิดชอบเครื่อง , ผู้ใช้เครื่อง) และผู้ที่ที่หน้าที่บำรุงรักษาโดยตรง ให้มีส่วนรับผิดชอบในการบำรุงรักษาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบ หรือตามที่กำหนดไว้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉันทนา วัยนิพิฐพงษ์ และคณะ. (2559). การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการศึกษาด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนิติวิทยาศาสตร์ แสงซินโครตรอนจะเป็นแสงที่มีพลังงานและความเข้มของแสงที่สูงกว่าพลังงานแสงที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆทั่วไป จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยด้านต่างๆ เช่น ในด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และงานด้านนิติวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการยุติธรรม ในบทบาทนี้จะกล่าวถึงการนำแสงซินโครตรอนมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านนิติวิทยาสาสตร์ ซึ่งต้องมีความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์ในระดับสูง โดยการนำไปใช้งานร่วมกับเทคนิคต่างๆ เช่น X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), X-ray absorption structure (XAS) และ fourier transform infrared microspectroscopy (FTIRMS) เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำแสงซินโครตรอนไปใช้งานร่วมกับเทคนิคต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิผล

ณรงค์เวทย์ บุญเต็ม. (2552). แนวปฏิบัติในการพิจารณาคำขออนุญาตและการตรวจสอบความปลอดภัยทางรังสีสำหรับสถานปฏิบัติการที่ใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอนในทางการแพทย์ แนวปฏิบัติในการพิจารณาคำขออนุญาตฯและการตรวจสอบความปลอดภัยทางรังสีสำหรับสถานปฏิบัติการที่ใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอนในทางการแพทย์ เครื่องไซโคลทรอน หมายความว่า “เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลทรอน” ซึ่งแนวปฏิบัตินี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาคำขออนุญาตและตรวจสอบความปลอดภัยทางรังสีสำหรับสถานปฏิบัติการที่จะขออนุญาตใช้งานเครื่องไซโคลทรอนในทางการแพทย์ ทั้งนี้เพื่อให้การใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคดังกล่าวมีความปลอดภัยทางรังสีต่อผู้ปฏิบัติงาน ประชาชน และผู้ที่เกี่ยวข้องโดยทั่วไป