สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)
เอกสารความรู้ (knowledge documents)

ประเภทเอกสาร

- ☒ TR: รายงานเชิงเทคนิค (TECHNICAL REPORT)
- ☐ TN: รายงานเชิงเทคนิค (ฉบับย่อ) (TECHNICAL NOTE)
- ☐ MN: คู่มือการดำเนินงาน (Operation Manual) / คู่มือการใช้งาน (Instruction Manual) / แผนปฏิบัติการ (Operation Plan)

หมายเลขเอกสาร(For QDS) **KM Document No.**	SLRI-TR-2026-103
ชื่อเรื่อง **Title**	รายงานการคำนวนปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุง เรย์เทรสซิ่ง และแนวทางการออกแบบกำบังรังสี สำหรับระบบลำเลียงแสงของเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2 ระดับพลังงาน 3GeV
ชื่อฝ่าย **Department**	ฝ่ายพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2
วันที่เผยแพร่ **Release date**	12 มิถุนายน 2569
ระดับการเปิดเผยข้อมูล **Level of Disclosure**	☐ ข้อมูลในรายงานเป็นความลับ (Undisclosed)
	☐ เปิดเผยข้อมูลเฉพาะภายในฝ่ายหรือส่วนงาน (Information can be disclosed within department/section)
	☑ เปิดเผยข้อมูลได้สำหรับพนักงานของสถาบันฯ และอนุญาตให้บันทึกข้อมูลเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบ Knowledge Management ภายในสถาบันฯ (Information can be disclosed for SLRI staffs and can be part of SLRI's Knowledge Management System)
	☑ เปิดเผยข้อมูลได้เพื่อเป็นองค์ความรู้สาธารณะ เช่นเว็บไซต์ของสถาบันฯ (Information is available for public)
คำสำคัญ **Keyword**	Radiation Shielding, Bremsstrahlung ray tracing

รายชื่อผู้จัดทำรายงานหรือผู้ดำเนินโครงการ (Name)	**ส่วนร่วมในการปฏิบัติงานในโครงการ Responsible tasks in the project**
นายเดชมงคล แก้วสุวรรณ์	หาข้อมูล ดำเนินการคำนวน ดำเนินการออกระบบป้องกัน การเขียนแบบ และเขียนรายงาน
นางสาวจุรีรัตน์ ประดับศรี	แลกเปลี่ยนข้อมูล ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ
ดร.สมชาย ตันชรากรณ์	แลกเปลี่ยนข้อมูล ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ และ ที่ปรึกษา
ดร.ชนรรค์ เอื้อรักสกุล	แลกเปลี่ยนข้อมูล ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ และ ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงการพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2 (SPS-II) ระดับพลังงาน 3 GeV ก่อให้เกิดรังสีเบรมส์สตราลุงที่ไม่พึงประสงค์ (Parasitic Bremsstrahlung) ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงและส่งผลกระทบโดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์โดยรอบ รายงานฉบับนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการคำนวณปริมาณรังสี จำลองทิศทางของรังสีด้วยเทคนิคเรย์เทรซซิง (Ray Tracing) และออกแบบระบบกำบังรังสี (Radiation Shielding) สำหรับระบบลำเลียงแสง SWAXS และ GIXRD/TRXRF ให้มีความปลอดภัยสูงสุด

ในการออกแบบขนาดของอุปกรณ์กำบังรังสี ได้กำหนดความหนาของกำบังรังสีชนิดตะกั่วและทังสเตนจากค่า 6 เท่าของความหนาลดทอนรังสีลงสิบเท่า (6 TVL) และกำหนดความกว้างเพื่อกักเก็บพลังงานจากรังสีโดยใช้ค่า 3.5 เท่าของรัศมีโมลิแยร์ (Molière radius) ผลการคำนวณพบว่า อัตราปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุงก่อนผ่านการกำบัง ณ ตำแหน่ง Front-end stopper มีค่าสูงถึง 1.42 Sv/hr แต่เมื่อป้องกันด้วยกำบังรังสีทังสเตนความหนา 20 เซนติเมตร และตะกั่วความหนา 30 เซนติเมตร สามารถลดปริมาณรังสีลงเหลือ 0.24 μSv/hr และ 0.89 μSv/hr ตามลำดับ

นอกจากนี้ การวาดเรย์เทรซซิงเพื่อออกแบบกำบังรังสีเฉพาะจุด (Local shielding) ภายในพื้นที่ Optical hutch ได้แสดงให้เห็นแนวทางการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญ เช่น Cu mask collimator, DCM Collimator และ VFM Collimator โดยมีการใช้ตะกั่วความหนา 12 เซนติเมตรเพื่อป้องกันรังสีเบรมส์สตราลุงทุติยภูมิ (Secondary bremsstrahlung) และมีการติดตั้งโพลีเอทิลีน (PE) เพื่อดูดซับรังสีนิวตรอนที่เกิดจากการกระเจิง ผลจากการออกแบบระบบกำบังรังสีทั้งหมดนี้ สามารถลดทอนรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และควบคุมให้ปริมาณรังสีตกค้างภายนอกพื้นที่ปฏิบัติการอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยสูงสุดที่ไม่เกิน 0.5 μSv/hr

คำสำคัญ Keyword: Bremsstrahlung, Radiation shielding

1. บทนำ

โครงการพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2 (SPS-II) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV ถือเป็นก้าวสำคัญในการยกระดับโครงสร้างพื้นฐานทางการวิจัย อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึงระดับจิกะอิเล็กตรอนโวลต์ สิ่งที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเกิดรังสีเบรมส์สตราลุงที่ไม่พึงประสงค์ (Parasitic Bremsstrahlung) รังสีเหล่านี้เกิดจากสองกลไกหลัก ได้แก่ การที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงพุ่งชนโมเลกุลของแก๊สที่ตกค้างในระบบสุญญากาศ (Gas Bremsstrahlung) ทำให้ปลดปล่อยรังสีแกมมาพุ่งตรงเข้าไปในท่อลำเลียงแสง และการที่ลำอิเล็กตรอนบางส่วนหลุดวงโคจรไปชนกับส่วนประกอบทางกายภาพของเครื่องจักร (Target Bremsstrahlung) จนก่อให้เกิดปรากฏการณ์ฝนอนุภาคทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Cascade) ที่กระเจิงรังสีออกรอบทิศทาง

เมื่อเครื่องซินโครตรอนได้รับการยกระดับพลังงานให้สูงขึ้น พฤติกรรมการปลดปล่อยรังสีเบรมส์สตราลุงก็จะมีความรุนแรงและมีอำนาจทะลุทะลวงสูงขึ้นแบบทวีคูณ รังสีพื้นหลัง (Background radiation) เหล่านี้ไม่เพียงแต่เป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบโครงสร้างและระบบลำเลียงแสง แต่ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อความปลอดภัย หากไม่มีการป้องกันที่รัดกุมและได้มาตรฐาน รังสีเหล่านี้อาจทะลุผ่านโครงสร้างออกมาเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานและอุปกรณ์ทดลองต่างๆ ได้

ด้วยเหตุนี้ การประเมินปริมาณรังสีอย่างรัดกุมและการออกแบบระบบกำบังรังสี (Radiation Shielding) จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งยวดเพื่อให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย รายงานฉบับนี้จึงถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการคำนวณปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุง พร้อมทั้งจำลองทิศทางการเคลื่อนที่ของรังสีด้วยเทคนิคเรย์เทรซซิง (Ray Tracing) การจำลองนี้มีความสำคัญในการช่วยออกแบบและกำหนดขนาด ความหนาตลอดจนตำแหน่งของอุปกรณ์กำบังรังสีต่างๆ เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าจะไม่มีรังสีเบรมส์สตราลุงในแนวสายตา (Line of sight) เล็ดลอดออกจากการกักเก็บของบล็อกกำบังรังสีออกมาสู่ภายนอกได้ ซึ่งข้อมูลจากรายงานฉบับนี้จะเป็นรากฐานสำคัญในการสร้างระบบลำเลียงแสงของเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2 ให้มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุดตามมาตรฐาน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาการวาดเรย์เทรซซิงของรังสีเบรมสตาร์ลุง

2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันรังสีเบรมสตาร์ลุงสำหรับระบบลำเลียงแสงของ SPS-II

2.3 เพื่อศึกษาการคำนวนปริมาณรังสีเบรมสตาร์ลุง

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 ศึกษาการเกิดรังสีเบรมสตาร์ลุงจากเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2 ระดับพลังงาน 3GeV

3.2 ศึกษาอุปกรณ์กำพังรังสีชนิดต่าง

3.3 ศึกษาการวาดเรย์เทรซซิงของรังสีเบรมสตาร์ลุงของระบบลำเลียงแสง Small and wide angle x-ray Scattering (SWAXS) และ Grazing Incident x-ray diffraction/ Total reflection x-ray florescence (GIXRD/TRXRF) โดยใช้โปรแกรม AutoCAD

3.4 คำนวนปริมาณรังสีเบรมสตาร์ลุงของระบบลำเลียงแสง Small and wide angle x-ray Scattering (SWAXS) และ Grazing Incident x-ray diffraction/ Total reflection x-ray florescence (GIXRD/TRXRF)

4. แนวคิด/ทฤษฎี/หลักการ

4.1 เบรมสตราร์ลุงคืออะไร?

เบรมส์สตราลุง (Bremsstrahlung) เป็นคำในภาษาเยอรมันที่แปลว่า "รังสีหน่วง" (Braking radiation) ในทางฟิสิกส์ หมายถึง รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาเมื่ออนุภาคที่มีประจุ (โดยทั่วไปคืออิเล็กตรอน) เกิดการลดความเร็วหรือเปลี่ยนทิศทางอย่างกะทันหัน จากการกระทำของสนามไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุอื่น (โดยปกติคือนิวเคลียสของอะตอม)

4.2 กระบวนการเกิดเบรมส์สตราลุง

กระบวนการเกิดเบรมส์สตราลุงโดยทั่วไปแล้วนั้นสามารถแบ่งออกเป็นได้ 4 กระบวนการดังนี้

การเคลื่อนที่ของอนุภาค: เป็นกระบวนการเกิดเบรมส์สตราลุงเมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูง (เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง) วิ่งเข้าไปในเนื้อวัสดุหรือเข้าใกล้เป้าหมาย

อันตรกิริยากับนิวเคลียส: เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งผ่านเข้าไปใกล้บริเวณนิวเคลียสของอะตอม (ซึ่งมีประจุบวกหนาแน่น) จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Coulomb force) ระหว่างอิเล็กตรอน (ประจุลบ) กับนิวเคลียส (ประจุบวก)

การหน่วงความเร็วและเปลี่ยนทิศทาง: แรงดึงดูดมหาศาลจากนิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนถูกเบี่ยงเบนทิศทางการเคลื่อนที่และมีความเร็วลดลงอย่างฉับพลัน (เกิดความหน่วง)

การปลดปล่อยพลังงาน: ตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนส่วนที่สูญเสียไปจากการถูกหน่วงความเร็ว จะถูกแปลงและแผ่ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ "โฟตอน" (Photon) ซึ่งรังสีที่แผ่ออกมานี้ส่วนใหญ่มักอยู่ในช่วงของ รังสีเอกซ์ (X-rays) หรือรังสีแกมมา (Gamma rays) ขึ้นอยู่กับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอน

4.3 ลักษณะสำคัญของรังสีเบรมส์สตราลุง

สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) เนื่องจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวที่วิ่งเข้ามาถูกหน่วงและสูญเสียพลังงานไม่เท่ากัน รังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจึงมีระดับพลังงานที่หลากหลายปะปนกันไป เกิดเป็นกราฟสเปกตรัมที่ต่อเนื่องโดยค่าพลังงานสูงสุดของรังสีเบรมส์สตราลุงจะมีค่าสูงที่สุดได้เท่ากับพลังงานจลน์เริ่มต้นทั้งหมดของอิเล็กตรอน โดยจะเกิดขึ้นในกรณีที่อิเล็กตรอนถูกนิวเคลียสหน่วงจนหยุดสนิททันทีและปลดปล่อยพลังงานออกมาในคราวเดียว

4.4 กระบวนการเกิดเบรมส์สตราลุงสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนนั้น รังสีเบรมส์สตราลุงจะถูกพิจารณาใน 2 บริบทหลัก ทั้งในแง่ของตัวกลไกการเกิดแสงซินโครตรอนเอง และในแง่ของ รังสีพื้นหลังที่ไม่พึงประสงค์ (Background/Parasitic radiation) ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้างและระบบลำเลียงแสงหรือ Beamline

4.4.1 แสงซินโครตรอนในฐานะ "Magnetic Bremsstrahlung"

ในทางฟิสิกส์แล้ว แสงซินโครตรอนที่เราผลิตมาเพื่อใช้งาน ก็คือรังสีเบรมส์สตราลุงรูปแบบหนึ่ง เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกเร่งให้มีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง แล้วถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทาง (เลี้ยวโค้ง) โดยใช้สนามแม่เหล็กจาก Bending Magnet หรือ Insertion Device การเปลี่ยนทิศทางนี้ทำให้เกิดความเร่งในแนวรัศมี ส่งผลให้อิเล็กตรอนแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ความแตกต่างคือความหน่วงหรือการเปลี่ยนทิศทางนี้เกิดจาก "สนามแม่เหล็ก" แทนที่จะเป็นสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสเหมือนทฤษฎีเบรมส์สตราลุงทั่วไป

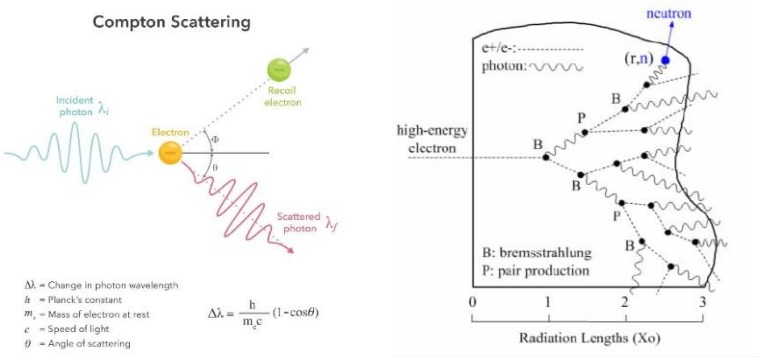
4.4.2 รังสีเบรมส์สตราลุงที่ไม่พึงประสงค์ (Parasitic Bremsstrahlung)

รังสีเบรมส์สตราลุงที่ไม่พึงประสงค์ นี้มาจาก 2 แหล่งกำเนิดหลักในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring) นั้นคือ

- Gas Bremsstrahlung แม้ว่าท่อกักเก็บอิเล็กตรอนจะเป็นระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-High Vacuum) แต่ก็ยังหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีโมเลกุลของแก๊สตกค้างอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานระดับจิกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV โดยเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของแก๊สเหล่านี้ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานจลน์อย่างฉับพลันและปลดปล่อยรังสีแกมมา (Gamma rays) พลังงานสูงมากๆ ออกมา รังสีแกมมานี้จะพุ่งเป็นลำแคบตรงไปในทิศทางเดียวกับแสงซินโครตรอนและทะลุผ่านเข้ามาในท่อของ Beamline
- Target Bremsstrahlung (Beam Loss): เกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนบางส่วนสูญเสียเสถียรภาพหลุดวงโคจร และพุ่งเข้าชนกับองค์ประกอบทางกายภาพของเครื่อง เช่น ผนังท่อสุญญากาศ คอลลิเมเตอร์ (Collimators) หรือตัวดักจับ ทำให้เกิดการสร้างรังสีเบรมส์สตราลุงแบบกระเจิงออกมารอบทิศทาง โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ "ฝนอนุภาคทางแม่เหล็กไฟฟ้า" (Electromagnetic Cascade หรือ Shower)

1. อนุภาคตกกระทบ (Incident Particle) เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูง (e^-) ซึ่งเป็นอนุภาคเริ่มต้น พุ่งเข้าสู่ตัวกลางที่เป็นสสารหรือวัสดุดูดกลืนรังสี (Absorber material) ในการทดลองทางฟิสิกส์มักนิยมใช้ธาตุที่มีมวลและเลขอะตอมสูง เช่น ตะกั่ว (Lead) เนื่องจากมีนิวเคลียสขนาดใหญ่และมีสนามไฟฟ้าเข้มข้น ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยา

กระบวนการเกิดฝนอนุภาคทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Cascade) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 กระบวนการเกิดฝนอนุภาคทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Cascade)

2. รังสีเบรมส์ชตราลุง หรือ รังสีจากการหน่วง (Bremsstrahlung / Braking Radiation) เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงเคลื่อนที่เฉียดเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอมในวัสดุ สนามไฟฟ้าที่รุนแรงของนิวเคลียสจะดึงดูดและหน่วงให้อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนทิศทางและมีความเร็วลดลง การเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างฉับพลันนี้ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจลน์ โดยพลังงานที่หายไปนั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปแบบของรังสีแกมมา หรือโฟตอนพลังงานสูง (γ)

3. การสร้างคู่อนุภาค (Pair Production):โฟตอนพลังงานสูง (γ) ที่แผ่ออกมาจากข้อ 2 จะเดินทางต่อไปในเนื้อวัสดุ เมื่อมันเคลื่อนที่ผ่านบริเวณสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสอื่น พลังงานของโฟตอนจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นมวล (ตามสมการ $E=mc^2$) ก่อให้เกิดอนุภาคคู่ใหม่ขึ้นมา คือ อิเล็กตรอน (e^-) และอนุภาคปฏิสสารของมันคือ โพซิตรอน (e^+) โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.022 MeV ซึ่งเท่ากับมวลนิ่งของอิเล็กตรอนและโพซิตรอนรวมกัน

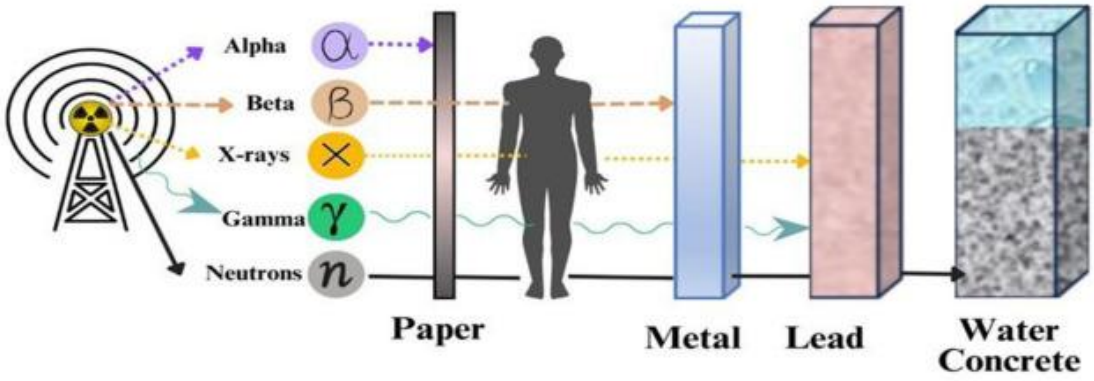
4. การเกิดฝนอนุภาคแบบลดหลั่น (Electromagnetic Cascade / The Shower) นี่คือช่วงที่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโพซิตรอนคู่ใหม่ที่เพิ่งถูกสร้างขึ้น หากยังมีพลังงานสูงพอ ก็จะวิ่งไปชนหรือเฉียดนิวเคลียสอื่นๆ และเกิดกระบวนการ Bremsstrahlung ซ้ำอีก ทำให้ปลดปล่อยโฟตอนรุ่นใหม่ออกมาเพิ่มขึ้นโฟตอนรุ่นใหม่ที่มีพลังงานสูง ก็จะไปเกิดกระบวนการ Pair Production สร้างคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอนซ้ำอีกเช่นกันการเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ วงจรการเปลี่ยนพลังงานไปมานี้ (อิเล็กตรอนสร้างโฟตอน --> โฟตอนสร้างอิเล็กตรอน/โพซิตรอน) จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential increase) กระจายตัวออกไปลักษณะคล้ายฝนตก จึงถูกเรียกว่า "ฝนอนุภาค" (Shower)

การสิ้นสุดของฝนอนุภาค (Shower Maximum and Decay) วงจรนี้จะไม่เกิดตลอดไป แต่จะดำเนินไปจนกระทั่งกระบวนการแบ่งปันพลังงานทำให้อนุภาคแต่ละตัวมีพลังงานเฉลี่ยลดลงต่ำกว่าระดับที่เรียกว่า "พลังงานวิกฤต" (Critical Energy) เมื่อถึงจุดนั้น อิเล็กตรอนและโพซิตรอนจะสูญเสียพลังงานไปกับการชนและทำให้โมเลกุลของวัสดุแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) มากกว่าการแผ่รังสีโฟตอนจะสูญเสียพลังงานผ่าน

ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton scattering) และปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เมื่อพลังงานไม่พอที่จะสร้างอนุภาคใหม่ได้อีกต่อไป กระบวนการทวีคูณจะหยุดลง และฝนอนุภาคจะค่อยๆ ถูกวัสดุดูดซับจนสลายตัวไปในที่สุด

4.5 Radiation shielding and Type of shielding

ในการออกแบบกำบังรังสีนั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง อาทิ อำนาจการทะลุทะลวงของรังสี หรือ อนุภาค วัสดุกำบังที่ใช้ในการป้องกันรังสี ความหนาของวัสดุที่ใช้ เนื่องจากหากออกแบบหรือเลือกใช้วัสดุกำบัง ไม่ถูกชนิด หรือไม่รู้ว่ารังสี หรืออนุภาคที่ต้องการป้องกันนั้นคืออะไร ก็จะไม่สามารถออกแบบวัสดุกำบังรังสีได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถสรุปวัสดุกำบังรังสี แยกตามชนิดอนุภาคหรืออำนาจการทะลุทะลวงของรังสีได้ดังรูป 2



รูปที่ 2 วัสดุกำบังรังสี แยกตามชนิดอนุภาคหรืออำนาจการทะลุทะลวงของรังสี

1) รังสีแอลฟา (Alpha - α): มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (นิวเคลียสของธาตุฮีเลียม) และมีประจุไฟฟ้าบวก ทำให้สูญเสียพลังงานเร็วเมื่อชนกับอะตอมของสสาร แค่ กระดาษ (Paper) แผ่นเดียว หรือแม้แต่ผิวหนังชั้นนอกที่ตายแล้วของมนุษย์ ก็สามารถกั้นรังสีแอลฟาได้ทั้งหมด
2) รังสีบีตา (Beta - β): เป็นอนุภาคอิเล็กตรอน (หรือโพซิตรอน) ซึ่งมีขนาดเล็กและเบากว่าแอลฟามาก จึงทะลุผ่านกระดาษและผิวหนังเข้าไปในเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ตื้นๆ แต่ก็สามารถถูกหยุดยั้งได้ด้วย แผ่นโลหะบางๆ (Metal) เช่น อะลูมิเนียม แผ่นไม้ หรือพลาสติกหนาๆ
3) รังสีเอกซ์ (X-rays - X): เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง ไม่มีมวลและไม่มีประจุ ทะลุผ่านร่างกายมนุษย์ได้ดี (จึงนิยมนำมาใช้ทางการแพทย์เพื่อถ่ายภาพกระดูก) แต่จะถูกกั้นหรือดูดซับได้โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงๆ เช่น แผ่นตะกั่ว (Lead)

4) รังสีแกมมา (Gamma - γ): เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ แต่มักมีต้นกำเนิดจากนิวเคลียส และมีพลังงานสูงกว่า มีอำนาจทะลุทะลวงสูงมาก การจะลดทอนหรือกั้นรังสีแกมมาให้ปลอดภัยต้องใช้แผ่นตะกั่วที่หนามากๆ หรือ คอนกรีตหนาๆ
5) อนุภาคนิวตรอน (Neutrons - n): เป็นอนุภาคในนิวเคลียสที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ทำให้ไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าของสสาร จึงทะลุผ่านวัสดุหนักๆ อย่างโลหะหรือตะกั่วได้สบายๆ แต่วิธีที่จะกั้นและลดความเร็วนิวตรอนได้ดีที่สุด คือการชนกับวัสดุที่มีมวลใกล้เคียงกัน นั่นคือ "ธาตุไฮโดรเจน" จึงต้องใช้ น้ำ (Water) หรือวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูง เช่น พลาสติก พาราฟิน หรือ คอนกรีต (Concrete)

4.6 The thickness of shielding

โดยปกติแล้วการคำนวนความหนาของกำบังรังสี หรือ Shielding มักจะเป็นการคำนวนความหนา Tenth-Value Layer หรือ ค่าความหนาลดทอนรังสีลง 1 ใน 10 กล่าคือความหนาของวัสดุกำบังที่สามารถลดทอนความเข้มของรังสี (Intensity) ให้ทะลุผ่านได้เพียง 1 ใน 10 ของความเข้มเริ่มต้น (หรือลดลง 90%) ค่านี้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบและคำนวณความหนาของกำบังรังสี (Radiation Shielding) เพื่อให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีความปลอดภัยตามมาตรฐาน โดยจะอาศัยสมการ Beer lambert ในการคำนวน ดังสมการ

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

โดย I = รังสีที่ทะลุผ่าน

I_0= รังสีที่ตกกระทบ

μ = Linear attenuation coefficient

x = ความหนาของกำบังรังสี (cm)

สามารถคำนวน สมการความสัมพันธ์ความหนา TVLจะได้ $\mathrm{I} = \frac{\mathrm{I_0}}{10}$ ดังนั้น

$$\frac{I_0}{10} = I_0 e^{-\mu x_{TVL}}$$

$$\ln(10) = \mu x_{TVL}$$

$$x_{TVL} = \frac{\ln(10)}{\mu}$$

สำหรับค่า Linear attenuation coefficient, μ เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับวัสดุของกำบัง ได้สามารถการคำนวนได้จากสมการ

$$\mu = \mu_m \times \rho$$

เมื่อ μ_m= Mass attenuation coefficient (cm2/g)

ρ = density (g/ cm3)

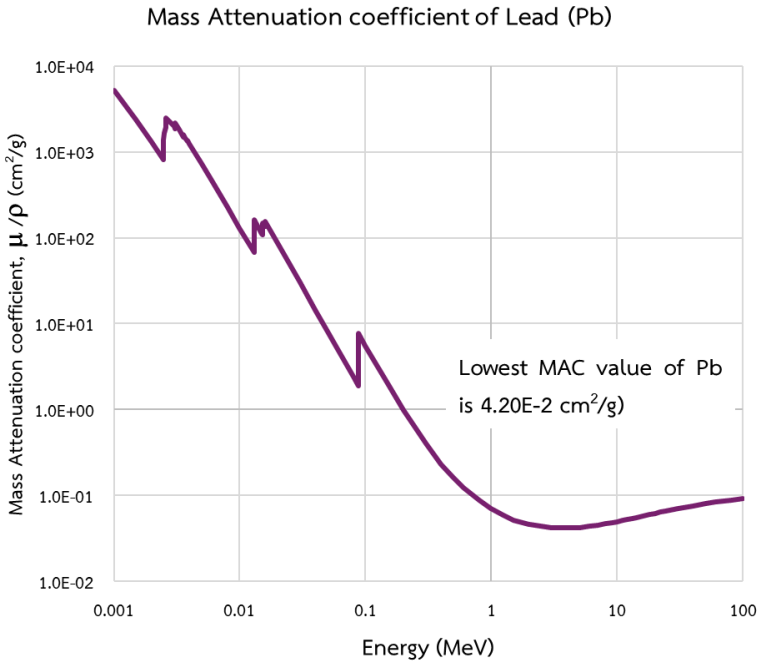
โดยค่า Mass attenuation coefficient สำหรับรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา คือ ผลรวมของความน่าจะเป็น (Cross-sections) ของกระบวนการอันตรกิริยา (Interactions) พื้นฐานทั้งหมด ที่โฟตอนของรังสีเข้าไปกระทำกับอะตอมของสสารเป้าหมายครับผลรวมนี้ประกอบไปด้วย 4 กระบวนการหลัก ได้แก่

1) Photoelectric Absorption หรือ การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก โฟตอนชนกับอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจร (เช่น K-shell หรือ L-shell) และถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ในงานด้าน Tender X-ray spectroscopy (ช่วงพลังงานประมาณ 2-10 keV) กระบวนการนี้จะมีอิทธิพลมากที่สุด และเป็นกลไกหลักที่ทำให้เราเห็นโครงสร้าง Absorption edges ในสเปกตรัม
2) Rayleigh (Coherent) Scattering หรือ การกระเจิงแบบยืดหยุ่น โฟตอนชนกับอิเล็กตรอนที่ยึดเหนี่ยวกับนิวเคลียสอย่างแน่นหนา ทำให้โฟตอนเปลี่ยนทิศทางโดยไม่สูญเสียพลังงาน
3) Compton (Incoherent) Scattering หรือการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น โฟตอนชนกับอิเล็กตรอนวงนอกสุด ทำให้โฟตอนสูญเสียพลังงานบางส่วนและกระเจิงออกไปในทิศทางอื่น
4) Pair Production หรือ การสร้างคู่อนุภาค โฟตอนที่มีพลังงานสูงมาก (สูงกว่า 1.022 MeV) เคลื่อนที่เข้าใกล้สนามนิวเคลียสและสลายตัวกลายเป็นอิเล็กตรอนและโพซิตรอน มักไม่ค่อยพบในย่านพลังงานของแสงซินโครตรอนทั่วไปดังสมการ

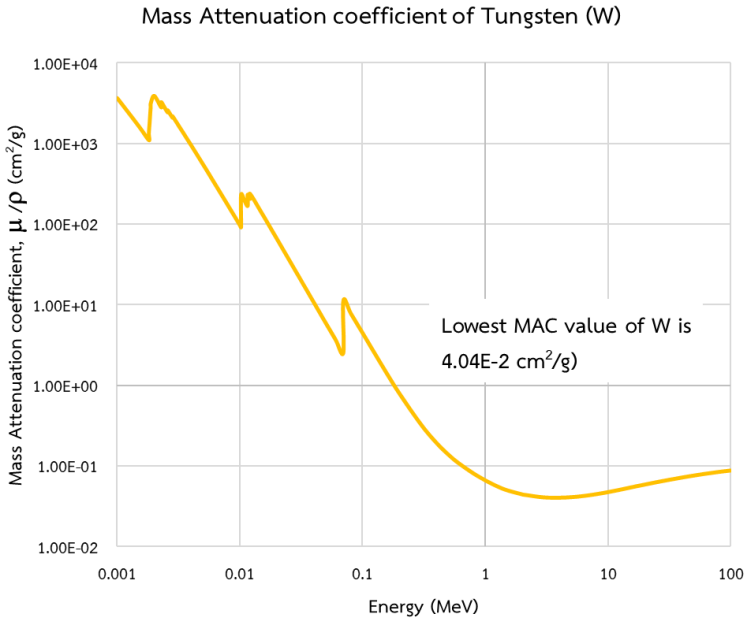
$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{compound}} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$$

$$(\frac{\mu}{\rho})_{\text{total}}(E) = (\frac{\tau}{\rho})_{\text{photo}}(E) + (\frac{\sigma_c}{\rho})_{\text{compton}}(E) + (\frac{\kappa}{\rho})_{\text{pair}}(E) + \ldots$$

รูปที่ 3 และ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ Mass attenuation coefficient กับช่วงพลังงานของ กำบังชนิดตะกั่ว และ ทังสเตน ซึ่งโดยปกติในการคำนวนหาค่าความหนาของกำบังรังสี เพื่อเป็นการคำนวน เราจะใช้ค่า Mass attenuation coefficient ที่ต่ำที่สุดในการคำนวน เพื่อจำลองเหตุการณ์ที่แย่ที่สุดในการป้องกันรังสีของกำบัง



รูปที่ 3 กราฟค่า Mass attenuation coefficient of (Top) ตะกั่ว (Bottom) ทังสเตน



รูปที่ 4 กราฟค่า Mass attenuation coefficient of (Top) ตะกั่ว (Bottom) ทังสเตน(ต่อ)

จากค่า Mass attenuation coefficient เราสามารถคำนวค่าความหนา TVL (X_{TVL}) ของ ตะกั่วและทังสเตน ได้ดังนี้

$$x_{TVL} \text{ of Pb} = \frac{\ln(10)}{\mu} = \frac{2.3026}{\mu_m \times \rho} = \frac{2.3026}{4.2E-2\ x\ 11.34} = 4.8346\ cm$$

$$x_{TVL} \text{ of W} = \frac{\ln(10)}{\mu} = \frac{2.3026}{\mu_m \times \rho} = \frac{2.3026}{4.04E-2\ x\ 19.3} = 2.9531 cm$$

ซึ่งโดยปกติแล้วการออกแบบความหนาของกำบัง เพื่อให้ลดทอนความเข้มของรังสี ให้มากที่สุดเท่ากับค่าที่ยอมรับได้ของมาตรฐาน International Atomic Energy Agency (IAEA) นั้น จะใช้ค่า 6 เท่าของ X_{TVL} หรือ ให้รังสีลดทอนไปถึง 0.0001%

1 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 10% (10^{-1})
2 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 1% (10^{-2})
3 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 0.1% (10^{-3})
4 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 0.01% (10^{-4})
5 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 0.001% (10^{-5})
6 เท่า XTVL รังสีลดทอนลง 0.0001% (10^{-6})

ดังนั้นสามารถสรุปความหนาของกำบังชนิด ทังสเตน และ ตะกั่ว คือ ประมาณ 20 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ตารางสรุปความหนาและค่าพารามิเตอร์ของกำบังชนิดต่างๆ

Material	Atomic number	Density (g/cm³)	Mass attenuation coefficient (cm²/g)	Critical energy (MeV)	Brem. attenuation length (cm)	Tenth value layer (cm)	Radiation length (cm)	Moliere length (cm)
Concrete	11.1	2.4	2.03E-02	49.7	20.53	47.21	11.06	4.71
Heavy conc.	31.5	3.5	3.12E-02	21.2	9.16	21.06	3.77	3.77
Polyethylene	5.28	0.94	1.66E-02	101.5	64.09	147.4	47.6	9.9
Aluminum	13	2.7	2.27E-02	42.7	16.32	37.53	8.9	4.4
Iron	26	7.8	3.00E-02	21.7	4.27	9.83	1.76	1.72
Copper	29	8.96	3.07E-02	19.4	3.64	8.36	1.44	1.57
Lead	82	11.35	4.20E-02	7.4	2.1	4.82	0.56	1.6
Tungsten	74	19.3	4.04E-02	8	1.28	2.95	0.35	0.93

2.5 Moliere radius

รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวในแนวขวางเมื่ออนุภาคหรือรังสีตกกระทบลงวัสดุกำบัง

เป็นพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่ใช้บอกลักษณะ "การกระจายตัวในแนวขวาง" (Transverse development) ของฝนอนุภาคแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shower) เมื่อมีอนุภาคพลังงานสูง เช่น อิเล็กตรอน หรือ โฟตอน พุ่งชนและเกิดปฏิกิริยาในเนื้อวัสดุ

โดยค่านี้มีความสำคัญมากในการออกแบบเครื่องตรวจจับอนุภาคประเภท Electromagnetic Calorimeter เพราะช่วยให้วิศวกรและนักฟิสิกส์ประเมินได้ว่า เซนเซอร์หรือตัวรับสัญญาณแต่ละพิกเซลควรมีขนาดเท่าใด จึงจะวัดพลังงานของอนุภาคได้ครบถ้วน และสามารถแยกแยะตำแหน่งของอนุภาคที่วิ่งเข้ามาใกล้ๆ กัน (Spatial resolution) ได้ดีโดยไม่เกิดการกวนกันของสัญญาณ หรืออีกนัยนึงคือ ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดความกว้างของกำบังรังสี ที่สามารถช่วยป้องกันรังสีและอนุภาคที่เกิดขึ้นได้ดครอบคุมโดยไม่มีอนุภาคหรือรังสีทะลุออกมา โดยค่า Rm เป็นค่าพารมิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นกำบัง โดยสามารถคำนวนได้จากสมการ

$$R_M = X_0 \frac{E_s}{E_c}$$

โดยที่ Rm=Moliere radius

X0=adiation Length (cm) (W=0.35, Pb=0.56)

Ec = Critical Energy

Es= Scale Energy (21.2052 MeV)

Z=Atomic number (W = 74, Pb = 82)

โดยจากสมการ Rm สามารถจัดเป็นสมการในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$R_M = 0.0265 \cdot X_0(Z + 1.24)$$

เราสามารถคำนวนค่า Rm ของ ทังสเตน และ ตะกั่วได้ดังนี้ Moliere radius ของ ทังสเตน มีค่าเท่ากับ 0.69 เซนติเมตร และค่า Moliere radius ของ ตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 1.24 เซนติเมตร

ค่า Rm นี้ โดยนิยามแล้ว ทรงกระบอกที่มีรัศมีเท่ากับ 1 Molière radius (RM) จะครอบคลุมพลังงานที่สะสมจาก shower ในวัสดุนั้นประมาณ 90%และถ้ารัศมีขยายเป็น 3.5 จะกักเก็บพลังงานได้ถึงประมาณ 99% ซึ่งเป็นใจความสำคัญในการออกแบบกำบังรังสี

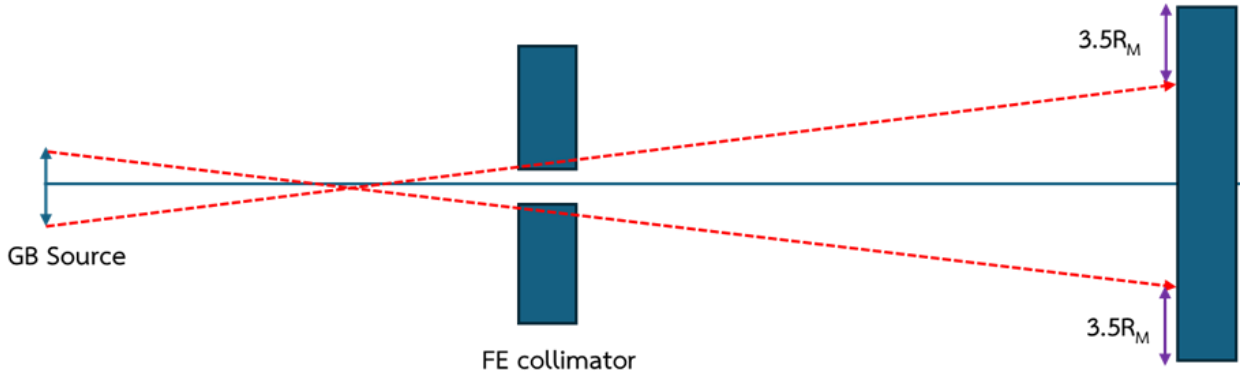
1 เท่า Rm กักเก็บพลังงานได้ถึงประมาณ 90%

2 เท่า Rm กักเก็บพลังงานได้ถึงประมาณ 95%

3.5 เท่า Rm กักเก็บพลังงานได้ถึงประมาณ 99%

4 เท่า Rm กักเก็บพลังงานได้ถึงประมาณ 99.5%

ดังนั้นการออกแบบความก้วางของกำบังรังสีจะใช้ ค่า 3.5 เท่าของ Molière radius (RM) โดยมีค่าอยู่ที่ 2.45 และ 3.71 เซนติเมตร สำหรับ ทังสเตนและ ตะกั่ว ตามลำดับ



รูปที่ 6 การออกแบบกำบังรังสีรังสีเบรมส์สตราลุง

2.6 Dose rate of bremsstrahlung

สำหรับการคำนวนค่าปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุงนั้น สามารถคำนวนได้จากสมการ ของ Ferrari A. โดยมีสมการดังนี้

$$D = 2.5 \times 10^{-27} \left(\frac{E_0}{m_0 c^2}\right)^{2.67} \frac{L}{d(L+d)} I \frac{P}{P_0}$$

โดย D = Absorbed Dose rate (Sv/hr)

E_0 = the primary beam energy (MeV)

$m_0 c^2$ = the rest-mass energy of the electron (0.511 MeV)

I = Beam current (e/s)

L = Straight section length (m) (Bending to bending)

d = the distance from the end of straight section to the point of interest (m)

P = Operated pressure

P_0 = 1 x 10^{-9} torr

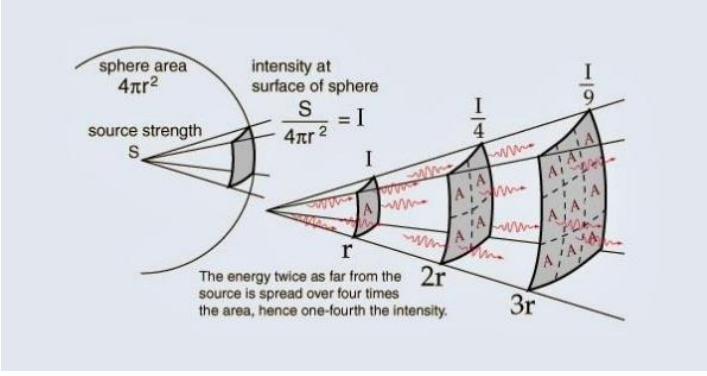
ตัวเลข 2.5 x 10^{-27} เป็นค่าคงที่ที่มาจากการปรับเทียบร่วมกับแบบจำลอง Monte Carlo หากในเอกสารบางฉบับแสดงค่าเป็น 2.5 x 10^{-25} นั่นคือการคำนวณในหน่วย rem/h เนื่องจาก 1 Sv = 100 rem

จะสามารถสังเกตพจน์ Lorentz factor ที่ยกกำลังถึง 2.67 นั้นหมายความว่า หากเครื่องซินโครตรอนรุ่นใหม่ที่ยกระดับพลังงานสูงขึ้น จะมีพฤติกรรมการปลดปล่อยรังสี Bremsstrahlung ที่รุนแรงกว่าเดิมแบบทวีคูณ การประเมินรังสีด้วยสมการนี้จึงต้องทำอย่างรัดกุมเพื่อออกแบบ Beam stopper และผนัง Hutch ให้หนาและปลอดภัยเพียงพอ

ผลกระทบของระบบสุญญากาศ สมการนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดรังสีแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับความดัน ดังนั้น หากเกิดเหตุสุญญากาศเสื่อมสภาพ (Vacuum degradation) ในบริเวณ Straight section อัตราปริมาณรังสีที่พุ่งเข้าท่อลำแสงจะพุ่งสูงขึ้นทันทีเช่นกัน [Ref]

ความเข้มของรังสี พลังงานของรังสีจะถูกลดทอนตามระยะทางเป็นไปตามกฎทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสี เมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสี ถึงตำแหน่งที่เราสนใจ หรือ ตัววัดรังสี โดยจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกำลังสอง หรือ Inverse square law โดยเมื่อรังสีที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (Point Source) จะกระจายออกเป็นทรงกลม เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวทรงกลมจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ r^2 ทำให้ความเข้มข้นของรังสีต่อพื้นที่ (Flux หรือ Dose) ลดลงแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง

$$D = \frac{1}{r^2}$$



รูป 7 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีต่อระยะทาง

ดังนั้นสามารถหาเมื่อรวมสมการข้างต้นเข้ากับสมการคำนวนค่าความหนาของวัสดุกำบังที่ลดทอนรังสี 10 เท่า หรือ XTVL จะได้สมการดังนี้

$$D = \frac{D_0 10^{-\left(\frac{X}{x_{TVL}}\right)}}{r^2}$$

โดยที่ D = ปริมาณรังสีหรืออัตราปริมาณรังสี (Dose rate) ณ จุดที่ต้องการคำนวณ (หลังแผ่นกำบังรังสี)

D0 = ปริมาณรังสีเริ่มต้น (Initial dose rate) โดยปกติจะวัดที่ระยะอ้างอิง เช่น 1 เมตรจากแหล่งกำเนิดและไม่มีวัสดุกำบัง

r = ระยะห่างจากจุดกำเนิดรังสี ถึงจุดที่ต้องการคำนวณปริมาณรังสี

X = ความหนาของวัสดุกำบังรังสี (Shielding thickness)

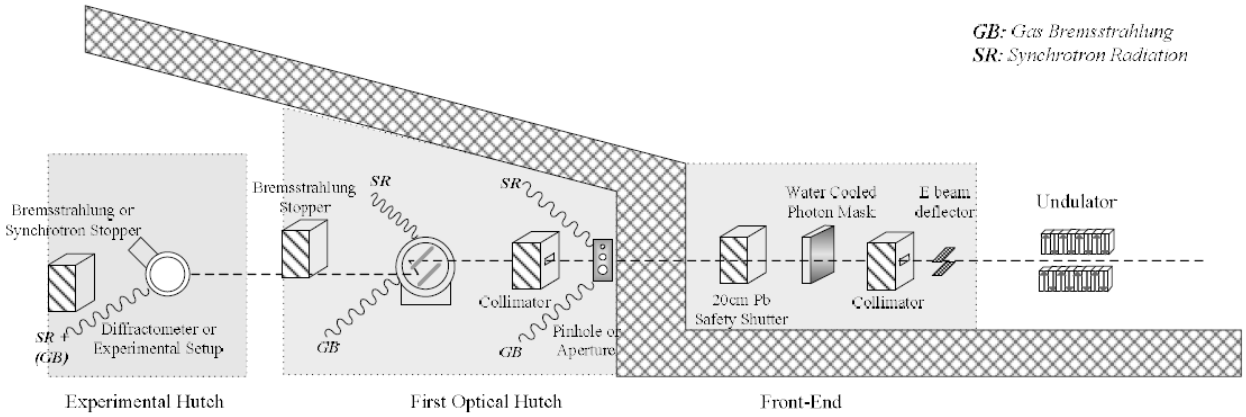
X_{TVL} = ค่า Tenth-Value Layer (TVL) ของวัสดุกำบังรังสีชนิดนั้น ๆ คือความหนาของวัสดุที่สามารถลดทอนปริมาณรังสีลงเหลือ 1 ใน 10 ของปริมาณเดิม

Cember, H., & Johnson, T. E. (2008). *Introduction to Health Physics* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

4.7 Literature Review

4.7.1 Taiwan Photon Source (TPS), TAIWAN

สำหรับการออกแบบ Radiation shielding ของ TPS นั้น จะออกแบบให้ Shielding สามารถกันรังสีให้อยู่ในระดับ 1 mSv ต่อ ปี ภายใต้เวลาการทำงาน 200 ชั่วโมง โดยค่า Dose rate ที่บริเวรผิวของ Hutch มีค่าปริมาณรังสีต่ำกว่า 0.5 μSv/hr โดย TPS ได้พิจารณา แหล่งกำเนิด 3 แหล่ง ได้แก่ รังสีเบร็มส์ตรัลลุงที่เกิดจากการสูญเสียอิเล็กตรอนภายในวงแหวนเก็บประจุระหว่างการ Injection โดยเปิด Shutter รังสีเบรมสตราร์ลุงจากแก๊สที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนชนกับโมเลกุลแก๊สในท่อ และรังสีซินโครตรอน โดยภาพรวมการออกแบบระบบป้องกันรังสีของ TPS แสดงดังรูป 7



รูปที่ 8 ภาพรวมการออกแบบระบบป้องกันรังสีของ TPS

โดยการออกแบบประกอบไปด้วย bremsstrahlung collimator โดยมีน้ำเป็นระบบระบายความร้อน มี photon absorber และ heavy-metal shutter (HMS) หรือ เรียกว่า safety shutter โดย Collimator นั้นทำจาก ตะกั่วขนาด 30 เซนติเมตร หรือทังสเตนขนาด 20 เซนติเมตร เพื่อดูดกลืนและป้องกัน Electromagnetic cascade ที่เกิดจากการสูญเสียของอิเล็กตรอนภายใน shielding wall

ชัตเตอร์โลหะหนัก (HMS) ที่มีความสามารถในการกำบังเท่ากับคอลลิเมเตอร์ ถูกออกแบบมาเพื่อปิดช่องรับแนวลำแสง รวมถึงปิดกั้นแนวรังสีเบรมส์ชตราลุงที่หลุดรอดออกมาโดยตรง จะมีการติดตั้งสวิตช์บอกตำแหน่ง (Position switches) เข้ากับชัตเตอร์โลหะหนักเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ทำงานได้ตามปกติและเพื่อส่งสัญญาณอินเตอร์ล็อก (interlock) ไปยังระบบควบคุมการเข้าถึงห้องปฏิบัติการแนวลำแสงที่อยู่ถัดไป ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าความหนาขั้นต่ำของ HMS สำหรับ TPS ต้องใช้ 6 เท่าของความหนาลดรังสีลงสิบเท่า (Tenth Value Length: TVL) เพื่อให้มีการลดทอนรังสีที่เพียงพอ ซึ่งเทียบเท่ากับตะกั่ว 30 ซม. หรือทังสเตน 20 ซม

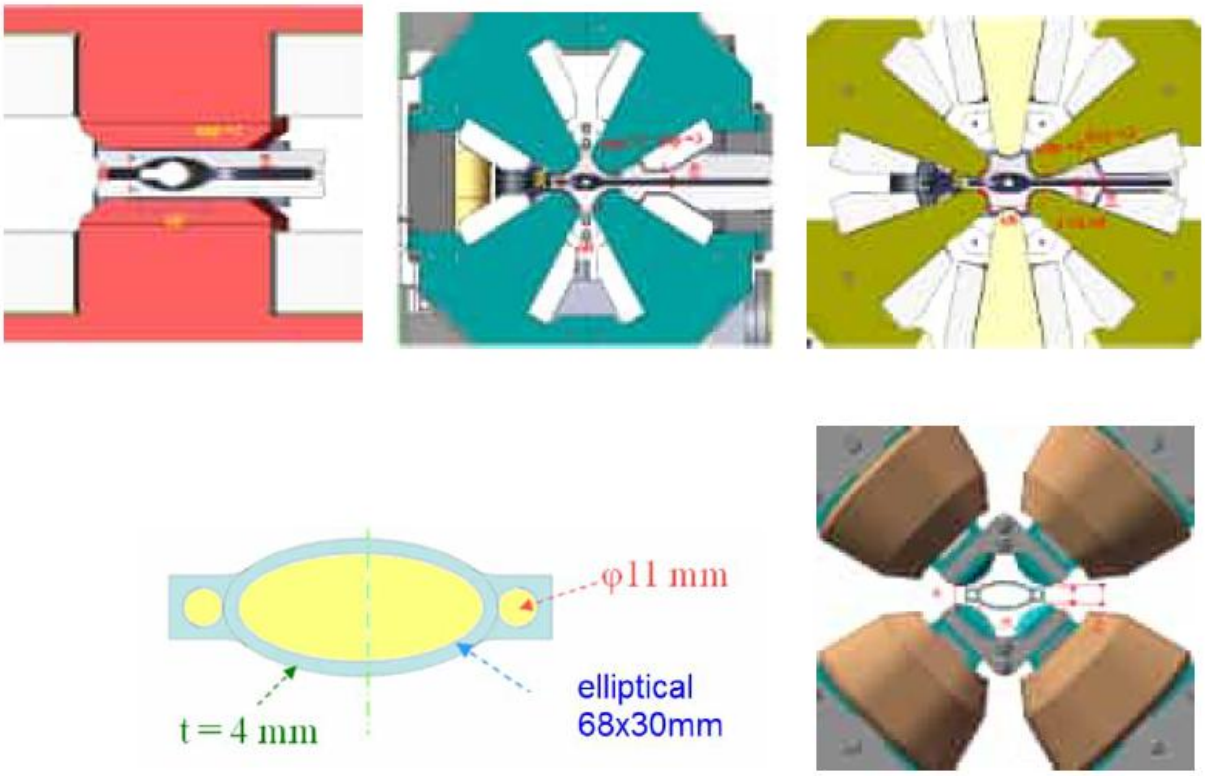
หลังจาก Ratchet wall จะเป็น Optical hutch ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วย slits, apertures, mirrors และ monochromators โดยภายใน Optical hutch ก็จะมีรังสี high-energy bremsstrahlung และ แสงซินโครตรอน โดย High-energy bremsstrahlung นั้นจะถูกสร้างจากการสูญเสียพลังงานของแสงซินโคตรตรอนเมื่อชนโมเลกุลแก๊สในท่อลำเลียงแสงหรือชนระบบทัศนศาสตร์ภายใน โดยสามารถคำนวนค่าประมาณความเข้มข้นของ bremsstrahlung ได้จากสมการของ Ferrari A. ของ ระบบลำเลียงแสงที่มีแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นอุปกรณ์แทรกแบบสั้น (Long Insertion device(ID)) แบบยาว (Shirt Insertion device) และ แม่เหล็กสองขั้ว (Bending magnet) ของ TPS ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าประมาณความเข้มข้นของ bremsstrahlung ของระบบลำเลียงแสงที่มีแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็น อุปกรณ์แทรกแบบ และ แม่เหล็กสองขั้วของ TPS

	Long ID beamline	**ID beamline**	**BM beamline**
Length of air path (m)	18.8	13	6.1
Distance from dose point to air path (m)	13.1	13.5	13.4
Bremsstrahlung dose rate at 1 nTorr (Sv/h)	3.25	2.62	1.7
Dose rate behind 30cm Pb stopper (μSv/h)	1.94	1.56	1.01
Dose rate behind 20cm W stopper (μSv/h)	0.54	0.43	0.28

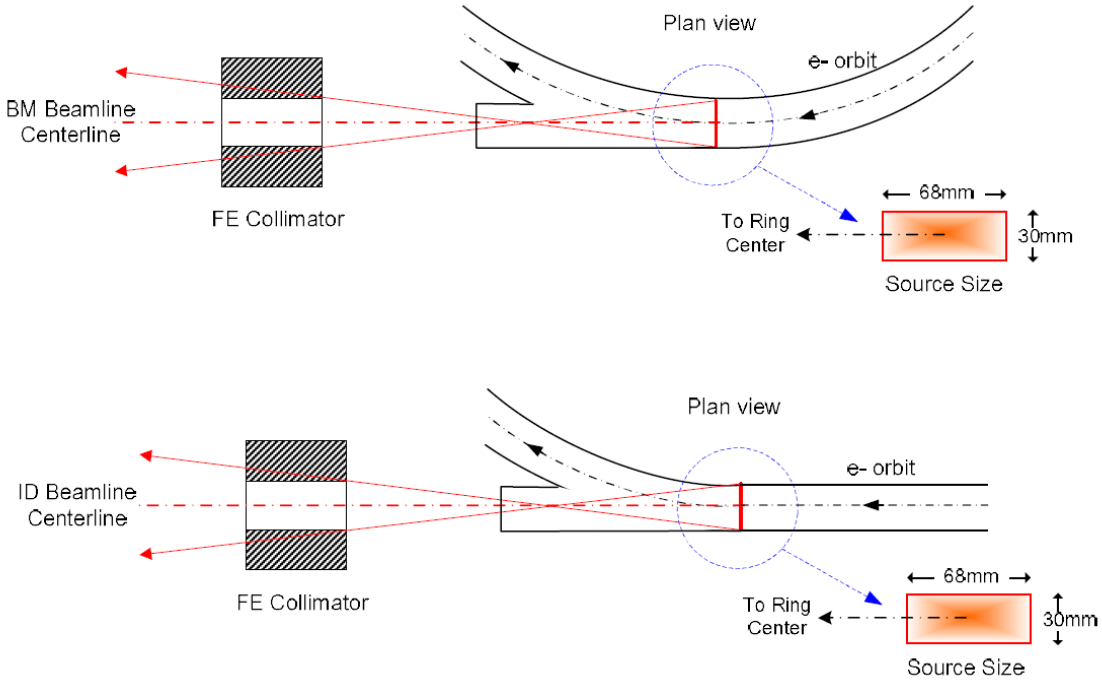
สำหรับการวาด Bremsstrahlung raytracing ของ TPS นั้น ได้มีข้อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1) *ขนาดของแหล่งกำเนิด Bremsstrahlung* : ขนาดของ แหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของ TPS นั้น ถูกกำหนดด้วย Cross section ของ วงโครจรของอิเล็กตรอน กล่าวคือ ขนาดของ Chamber ที่อิเล็กตรอนวิ่ง ซึ่งจะมีด้วยกันหลายรูปแบบขึ้นกับองค์ประกอบของเครื่องเร่ง เช่น Chamber -ของแม่เหล็กสองขั่ว (Bending magnet), chamber ของแม่เหล็กสี่ขั่ว (quadrupole) และ chamber ของแม่เหล็กหกขั่ว sextupole ดังแสดงในรูปที่ XX ดังนั้นเพื่อให้การคำนวนง่ายและเป็นการประเมินเผื่อความคลาดเคลื่อน TPS จึงใช้ค่า ขนาดของแหล่งกำเนิด Bremsstrahlung คือ 68 mm ในแนวนอน และ 30 mm ในแนวตั้ง



รูปที่ 9 ขนาดของ แหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของ TPS

2) *ตำแหน่งของ Source Bremsstrahlung:* สำหรับ bending magnet ตำแหน่งของ Source Bremsstrahlung จะอยู่ที่ ทางแยกของ synchrotron centerline และแนวโค้งของ bending magnet แต่สำหรับ Insertion device beamline ตำแหน่ง Source จะถูกกำหนดบริเวณทางเข้าของ bending magnet

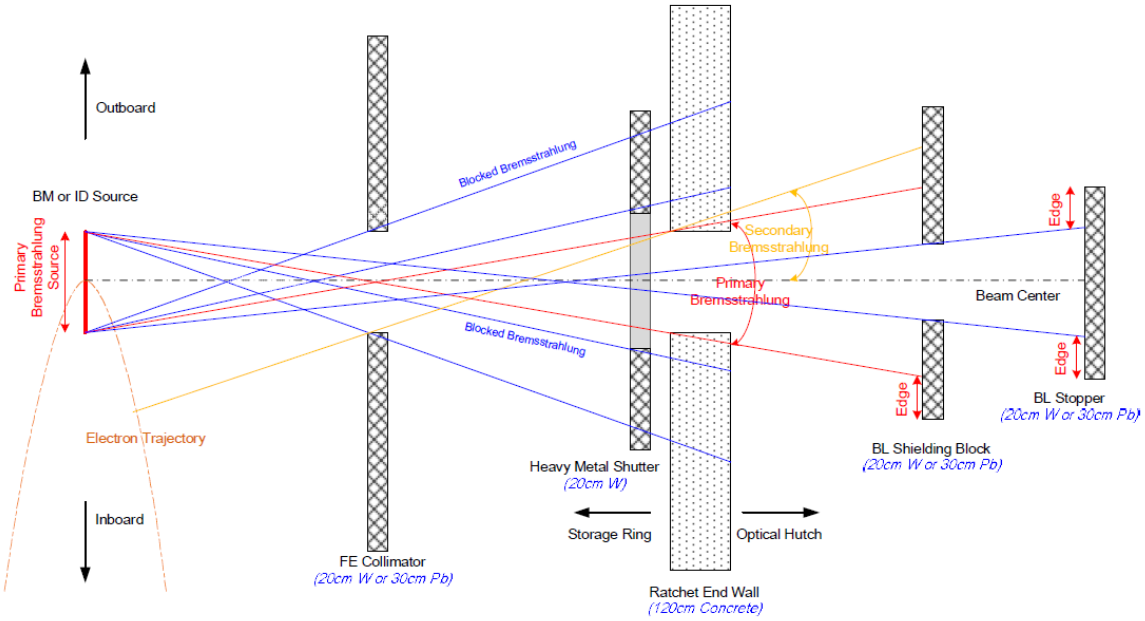


รูปที่ 10 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของระบบลำเลียงแสง bending magnet และ Insertion device ของTPS

เมื่อกำหนดขนาดและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดได้แล้ว จัดทำแผนภาพแสดงที่ระบุวิถีขอบนอกสุด (extreme trajectories) ของรังสีเบรมส์ชตราลุง (Bremsstrahlung rays) โดยการลากเส้นรังสีขอบนอกจากแหล่งกำเนิดจำลองไปยังขอบด้านในของอุปกรณ์กำบังรังสีทั้งหมด เช่น คอลลิเมเตอร์ (collimators) ชัตเตอร์ (shutters) และสตอปเปอร์ (stoppers) แผนภาพการลากเส้นรังสีเบรมส์ชตราลุงจะได้รับการตรวจสอบโดยคณะกรรมการทบทวนความปลอดภัยระบบลำเลียงแสง NSRRC (NSRRC Beamline Safety Review Committee) เพื่อยืนยันความถูกต้องและเพียงพอของการออกแบบระบบกำบังรังสี ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 11

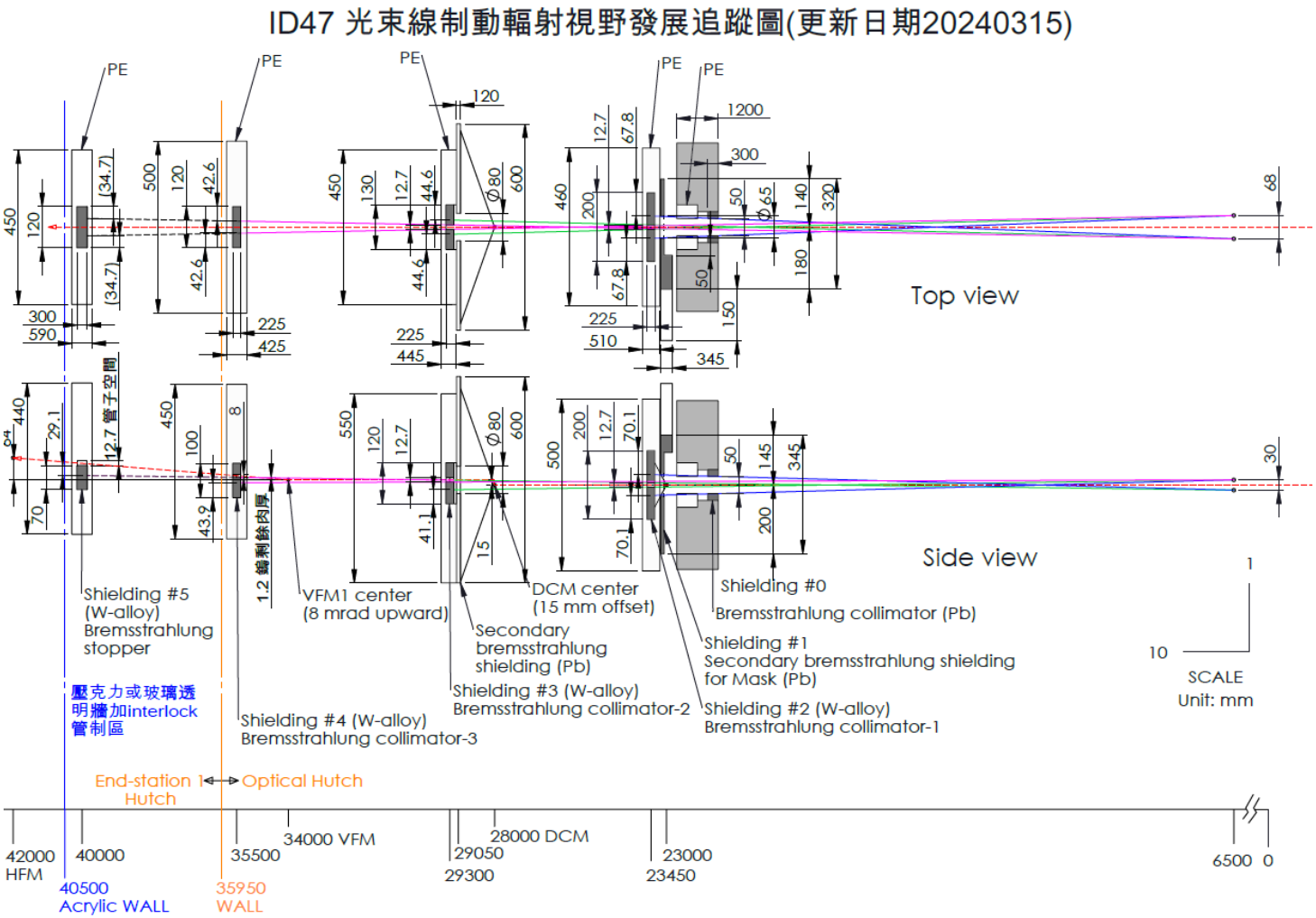
ตัวอย่างของแผนภาพแสดงให้เห็นกรวยรังสีเบรมส์ชตราลุงที่ถูกกั้น 3 รูปแบบที่ถูกจำกัดขอบเขตโดยช่องเปิดของคอลลิเมเตอร์ ชัตเตอร์โลหะหนัก และ ratchet end wall เป็นที่น่าสังเกตว่าการติดตั้งคอลลิเมเตอร์ไว้ที่ส่วนหน้าสามารถช่วยลดมุมการกระจายของรังสีเบรมส์ชตราลุงทุติยภูมิที่อาจเล็ดลอดออกจากช่องเปิดของผนังปลายสุดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบระบบกำบังรังสีสำหรับระบบลำเลียงแสงมีความซับซ้อนน้อยลง

การลดทอนสำหรับการกำบังรังสีเบรมส์ชตราลุงจากแก๊ส (gas bremsstrahlung) ตามระยะตามขวางที่มากกว่า 95% ของคาสเคด (cascade) จะถูกกักเก็บไว้ภายในบล็อกกำบังรังสีเมื่อถูกกระทบด้วยรังสีเบรมส์ชตราลุง คือ 3.5 เท่าของรัศมีโมลิแยร์ (Molière radius) โดย TPS ได้กำหนด ระยะเผื่อขอบขั้นต่ำไว้ที่ 5 ซม. สำหรับตะกั่ว และ 3.5 ซม. สำหรับทังสเตน



รูปที่ 11 ภาพแสดงแผนผังการติดตามรังสีเบร็มส์ตรัลลุง (ไม่ตามมาตราส่วนจริง)

เป้าหมายสูงสุดของการลากเส้นรังสี (ray tracing) คือการตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีรังสีเบรมส์ชตราลุงในแนวสายตา (line of sight) ที่เกิดจากขนาดของแหล่งกำเนิดจำลองสามารถเล็ดลอดออกจากการกักเก็บของบล็อกกำบังรังสีได้ กล่าวคือ ผู้ใช้งานจะต้องไม่สามารถมองเห็นส่วนใดๆ ของวงโคจรอิเล็กตรอนจากส่วนใดๆ ของระบบลำเลียงแสงในทุกทิศทาง

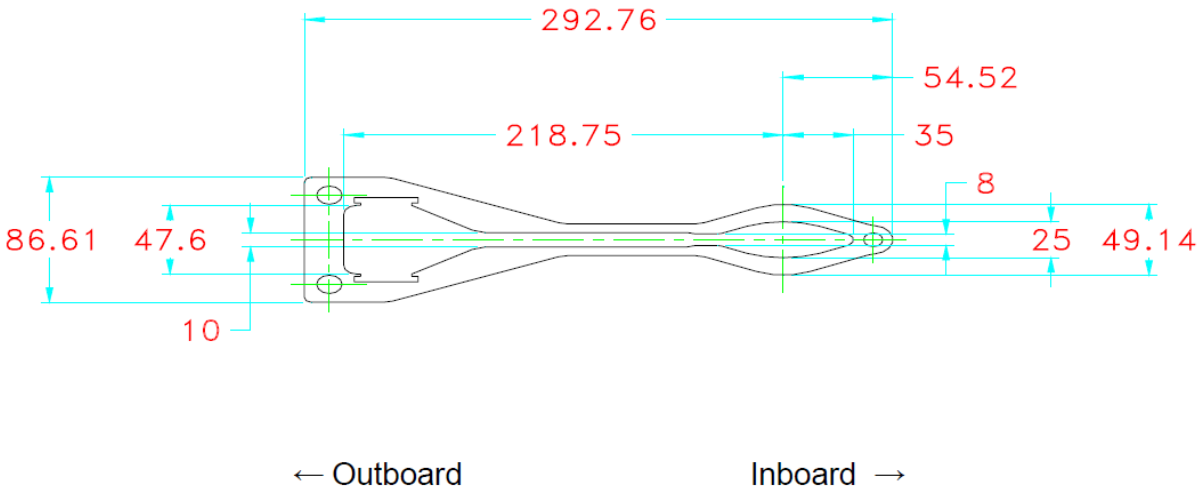


รูปที่ 12 Bremsstrahlung ray tracing ของ NSRRC

4.7.2 National Synchrotron Light Source II (NSLS II), USA

ในส่วนของ NSLS II ก็ได้มีการวาด Bremsstrahlung raytracing เช่นเดียวกัน โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆไว้ดังนี้

1) ขนาดของแหล่งกำเนิด Bremsstrahlung : ขนาดของ แหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของ NSLS II จะถูกหนดขนาดของ Storages ring vacuum chamber ดังรูป 12 โดย มีขนาด 25 mm ในแนวตั้งและแต่ในส่วนของแนวนอน ด้าน Out board จะมีขนาด + 35 mm จากกึ่งกลาง ในส่วของ inboard จะถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องเปิด Front end collimator

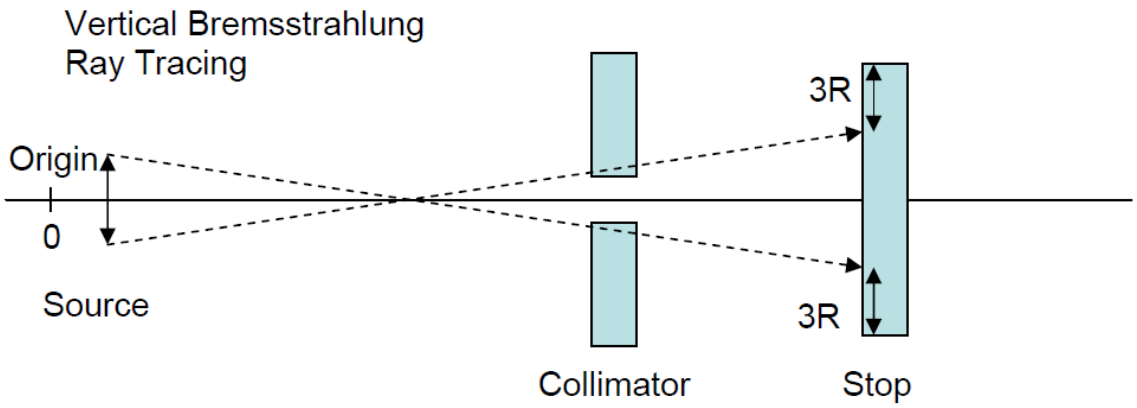


รูปที่ 13 ขนาดของ แหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของ NSLS II

2) *ตำแหน่งของ Source Bremsstrahlung:* NSLS II ใช้ตำแหน่ง Downstream ของ straight section เป็นตำแหน่งของ Source เนื่องจาก จะช่วยเรื่องของการประมาณการเผื่อ สำหรับการคำนวนเพื่อลดความเสี่ยงของการทะลุผ่านของรังสี Bremsstrahlung โดยสามารถสรุปออกมาได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าตำแหน่งของ Bremsstrahlung source ของ NSLS II

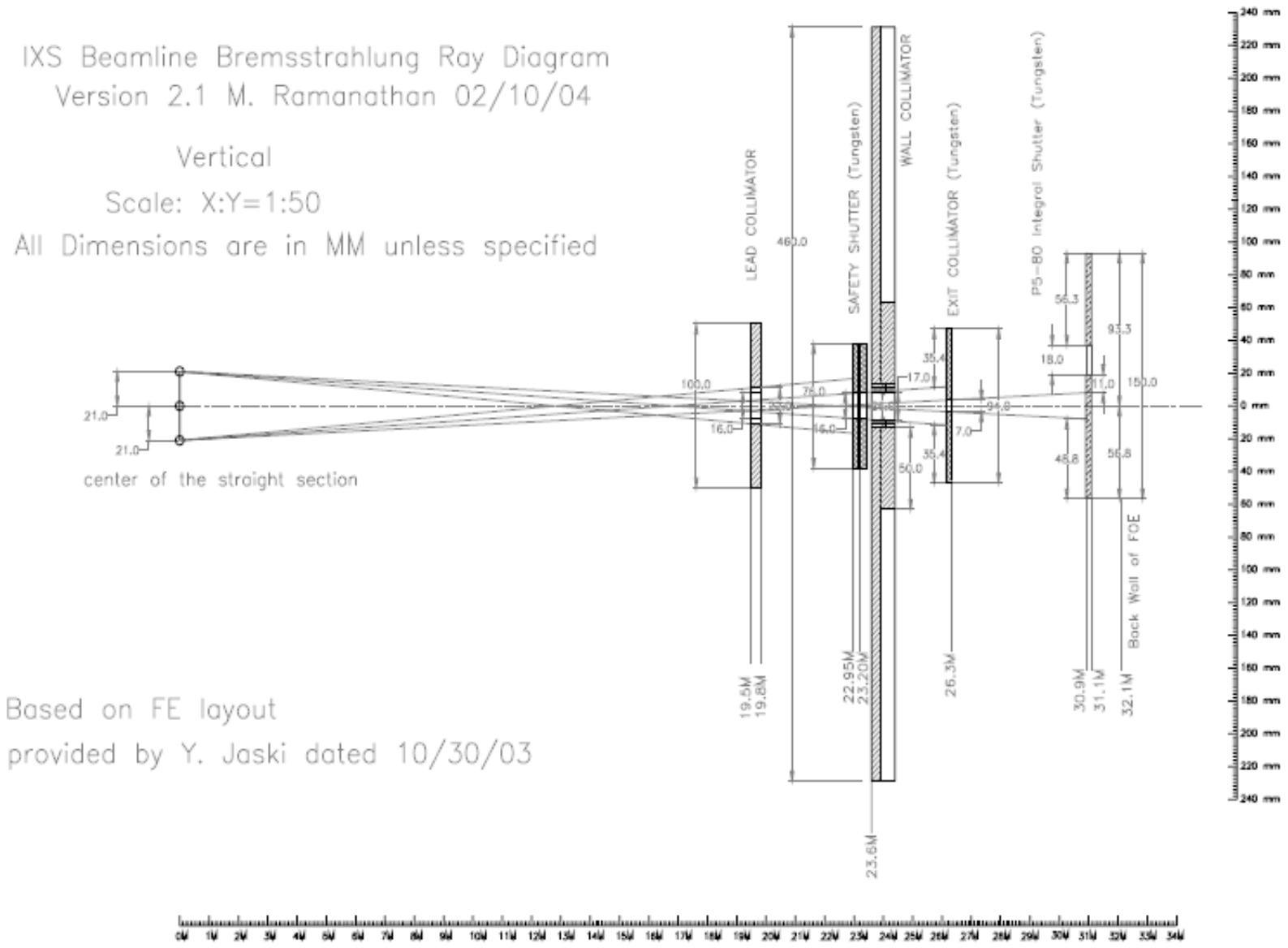
	Bremsstrahlung Source Location
ID Beamlines (8 m straight section)	+ 4 meters
ID Beamlines (5 m straight section)	+ 2.5 meters
Bending Magnet Beamlines	+1.3 meters



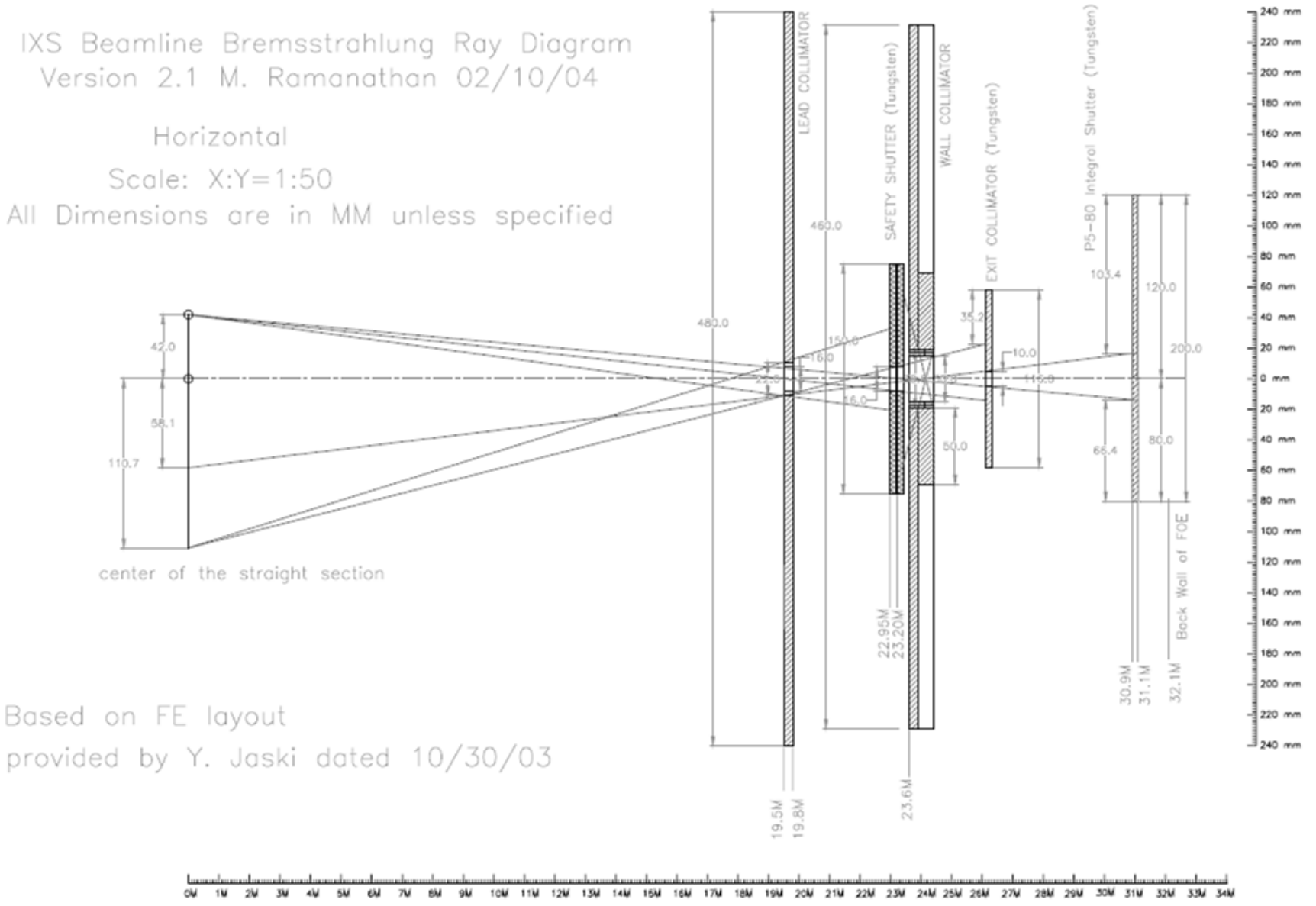
รูปที่ 14 การกำหนดความกว้างของกำบังรังสีของ NSLS II

ในการกำหนดความกว้างของกำบังรังสีของ NSLS II จะถูกกำหนดด้วยค่า Molière radius เช่นเดียวกันกับ TPS แต่ที่ NSLS II จะใช้ค่า 3 เท่าของ Molière radius เท่านั้น ในส่วนของความหนา NSLS II ก็จะใช้ค่ามาตรฐาน นั้นคือ ความหนาของตะกั่วอยู่ที่ 30 เซนติเมตร และ ความหนาของทังสเตนอยู่ที่ 20 เซนติเมตร

โดยการออกแบบกำบังรังสีของ NSLS II นั้น จะประกอบด้วย Collimator โดยทำจากตะกั่ว และ Shutter ทำจากทังสเตน ติดตั้งอยู่ภายในกำแพง Ratchet wall ด้านนอกกำแพงประกอบไปด้วย Wall collimator, exit collimator และ shutter ตามลำดับ



รูปที่ 15 Bremsstrahlung Ray Trace Diagram (Vertical) ของ NSLS II



รูปที่ 16 Bremsstrahlung Ray trace Diagram (Horizontal) ของ NSLS II

4.7.3 The Advanced Photon Source (APS) USA

Nisy E. Ipe ได้รายงานการคำนวนความหนาของ Polyethylene (PE) เพื่อดูดซับพลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากการที่ Gas bremsstrahlung วิ่งชน เป้าโลหะ ในที่นี้คือ Stopper หรือ Optical element ที่ Gas bremsstrahlung วิ่งชน โดยพลังงานของนิวตรอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ถูกวิ่งชน

โดยการคำนวนของ APS นั้น เบื้องต้น ได้คำนวนค่า Dose ของรังสี bremsstrahlung ภายใน hutch โดยใช้ FLUKA โดยพวกเขาพบว่า ค่ารังสี bremsstrahlung นอก Hutch อยู่ที่ประมาณ 6 และ 16 μSv/hr สำหรับ Hutch ทางด้านข้าง (ห่างจาก stopper 1.2 m) และ ด้านหลัง (ห่างจาก stopper 0.6 m) โดยพวกเขาได้คำนวนค่าความหนาของ PE ออกมาอยู่ที่ 7 cm โดยใช้ค่า Tenth Value Layer =13.0 cm สำหรับค่าพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่ 2.0 MeV โดยหลังจากที่ติดตั้ง PE แล้ว สามารถลดค่าความเข้ารังสีลงเหลือเพียง 1.2 μSv/hr

5. วิธีการดำเนินงาน

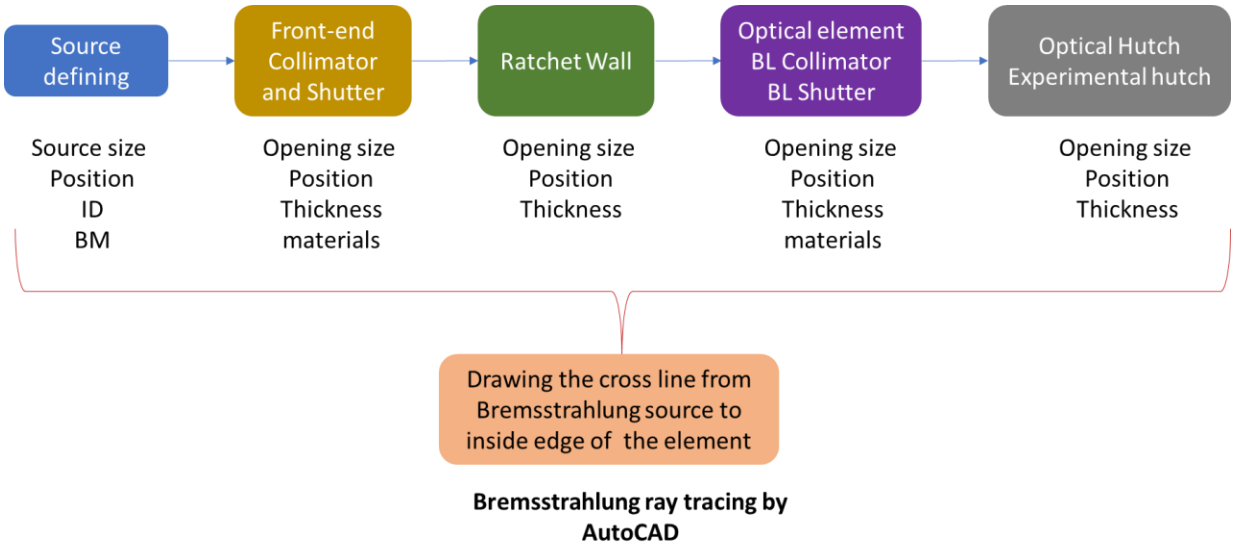
5.1 Conceptual design of beamline shielding

หลักการความคิดในการออกแบบแบบกำบังรังสีของระบบลำเลียงแสง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การออกแบบความหนาของ Shielding นั้นจะถูกกำหนดด้วยค่า 6 เท่าของความหนา TVL ซึ่งความหนาของตะกั่วจะอยู่ที่ 30 เซนติเมตร และ ทังสเตล ความหนาอยู่ที่ 20 เซนติเมตร ในส่วนของความกว้างของ Shielding จะถูกกำหนดด้วยค่า 3.5 เท่าของ ค่ารัศมี Molière radius ซึ่งมีค่า 2.5 และ 4 เซนติเมตรสำหรับทังสเตล และ ตะกั่ว ตามลำดับ
2) สำหรับ Shutter ที่อยู่ในระบบสุญญากาศ จะดำเนินการใช้ ทังสเตล ความหนาอยู่ที่ 20 เซนติเมตร
3) สำหรับ Shielding ของ Secondary bremsstrahlung นั้นจะใช้ ตะกั่ว ขนาดความหนา 12 เซนติเมตร
4) สำหรับ Shielding ของ นิวตรอน นั้นจะใช้ Polyethylene เป็น Shielding โดยจะติดตั้งหลังจาก Ratchet wall เท่านั้น ภายใน Ratchet wall นั้น จะไม่มี เนื่องจาก นิวตรอนจะถูกดูดซับด้วย Ratchet wall อยู่แล้ว
5) สำหรับอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่ทำให้มีการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ของแสงซินโครตรอนเช่น DCM VFM HFM เป็นต้น จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะแสงซินโครตรอนเท่านั้น แต่ bremsstrahlung จะยังคงมีแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงดังเดิม

5.2 The parameters of components

ในการวาด Ray tracing ของ Bremsstrahlung นั้น จะต้องมีข้อมูลช่องเปิดของ Component ต่างๆ ของ Beamline เพื่อนำมาเป็นตัวกำหนดการทะลุผ่านของรังสี โดยเริ่มตั้งแต่ อุปกรณ์ภายใน Front-end กำแพง ระบบทัศนศาสตร์ ระบบคัดเลือกพลังงาน รวมถึงขนาดของท่อสุญญากาศ ว่ามีขนาดเท่าไหร่ นอกจากข้อมูลช่องเปิดแล้ว ยังต้องการข้อมูลความหนาของอุปกรณ์ รวมถึงตำแหน่งของอุปกรณ์ แต่ละชิ้นว่ามีระยะห่างจากจุดตำแหน่ง Bremsstrhlung source เท่าใด

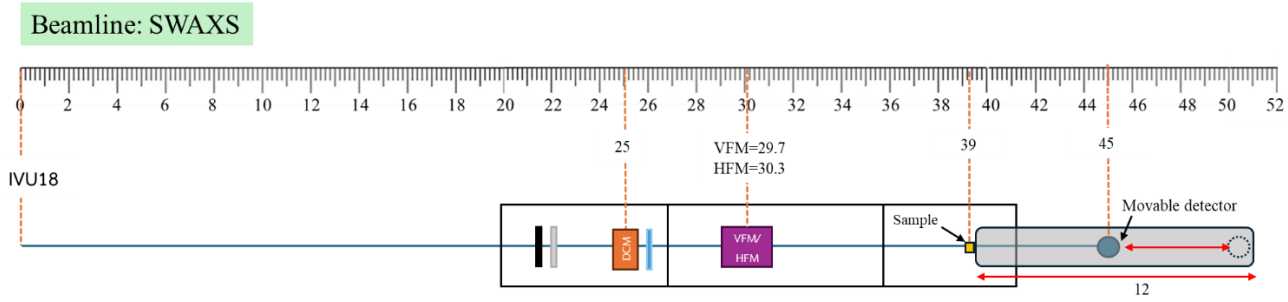


รูปที่ 17 ภาพรวมข้อมูลที่ต้องการก่อนการวาด Bremsstrahlung

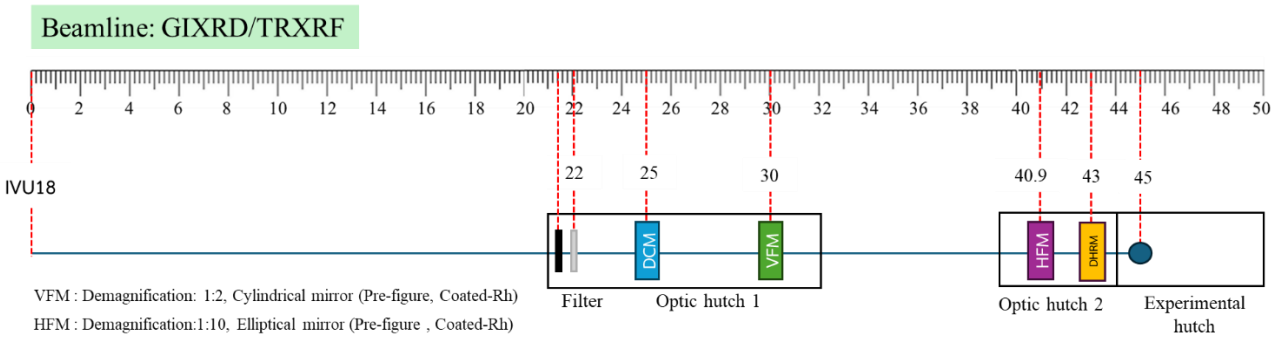
5.2.1 กำหนด Beamline

โดยปกติแล้วการทำ Bremsstrahlung ray tracing นั้นจะต้องทำทุก Beamline หรือ ระบบลำเลียงแสง เนื่องจากแต่ละระบบลำเลียงแสงจะมีข้อแตกต่างกัน ทั้งแหล่งกำเนิดแสง ช่องเปิด หรือ ระบบทัศนศาสตร์ ซึ่งทำให้ต้องมีการออกแบบระบบป้องกันรังสีที่แตกต่างกันออกไป

ดังนั้น ในรายงานเล่มนี้ เป็นการเริ่มต้นและเรียนรู้การออกแบบจึงเลือกระบบลำเลียงแสงที่มีความซับซ้อนน้อย เพื่อให้สะดวกต่อการเรียนรู้และฝึกวาด Bremsstrahlung ray tracing โดยเลือกระบบลำเลียงแสง Small and wide angle x-ray Scattering (SWAXS) และ Grazing Incident x-ray diffraction/ Total reflection x-ray florescence (GIXRD/TRXRF) โดยมีองค์ประกอบระบบทัศนศาสตร์ดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18 Layout ระบบลำเลียงแสง SWAXS



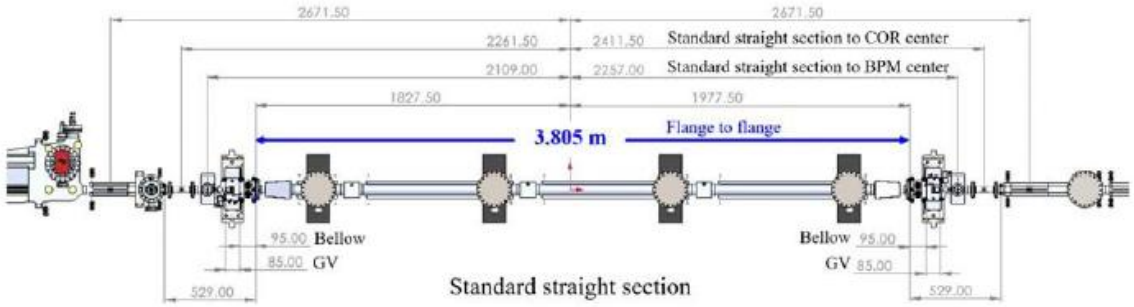
รูปที่ 19 Layout ระบบลำเลียงแสง SWAXS

5.2.2 Source defining

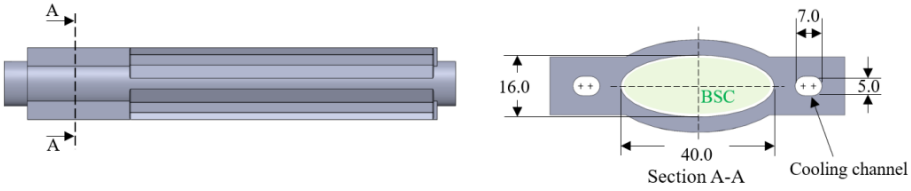
ในการกำหนดขนาดของแหล่งกำเนิด Bremsstrahlung ของ SPS-II นั้นถูกกำหนด ด้วย ขนาดของท่อสุญญากาศสำหรับในแนวนอน นั้นคือ 40 มิลลิเมตร สำหรับในแนวตั้ง นั้นจะถูกกำหนดด้วยความ Gap ของ Undulator นั้นคือ 40 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่ามากสุด ที่ อิเล็กตรอน สามารถสูญเสียวิถีวงโครจรได้

สำหรับตำแหน่งของ Bremsstrahlung ของ SPS-II นั้นเราจะกำหนด ณ ตำแหน่งของ Chamber ก่อนที่จะถึงตำแหน่งทางแยกของแม่เหล็กสองขั้ว ดังแสงในรูปที่ 20

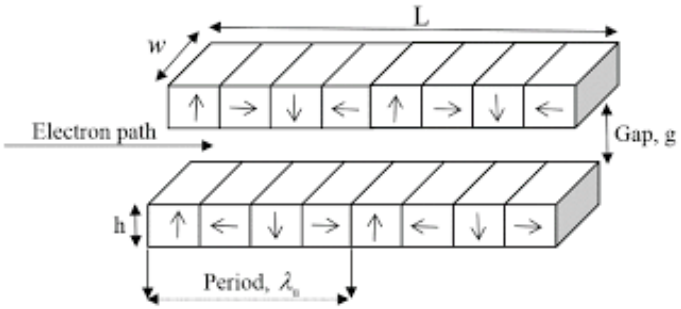
(A)



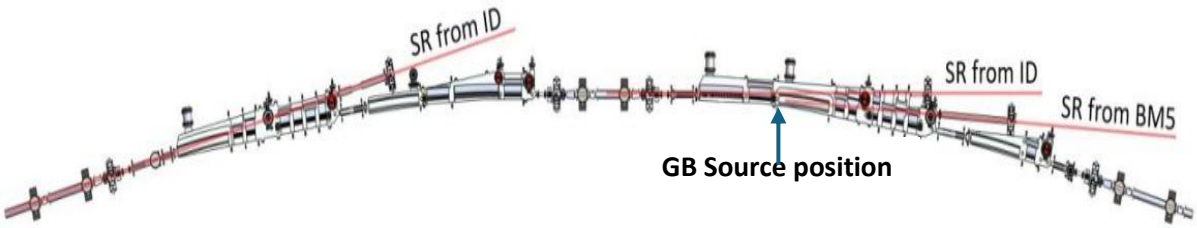
(B)



(C)



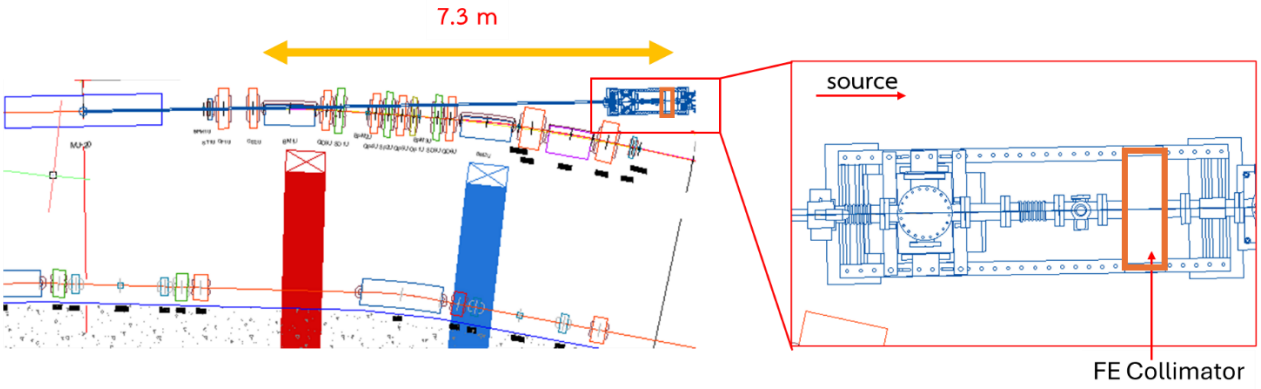
รูปที่ 20 (A) ภาพตัดขวางของ Standard Stright section (b) ภาพตัดขวางของท่อสุญญากาศ Standard Stright section (c) ภาพตัวอย่าง Gap ของ Undulator (ต่อ)



รูปที่ 21 ตำแหน่งของ Bremsstrahlung ของ SPS-II

**ข้อควรระวัง ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน และ Gas bremsstrahlung นั้นคนละความหมาย และ คนละตำแหน่ง

5.2.3 Front end Collimator



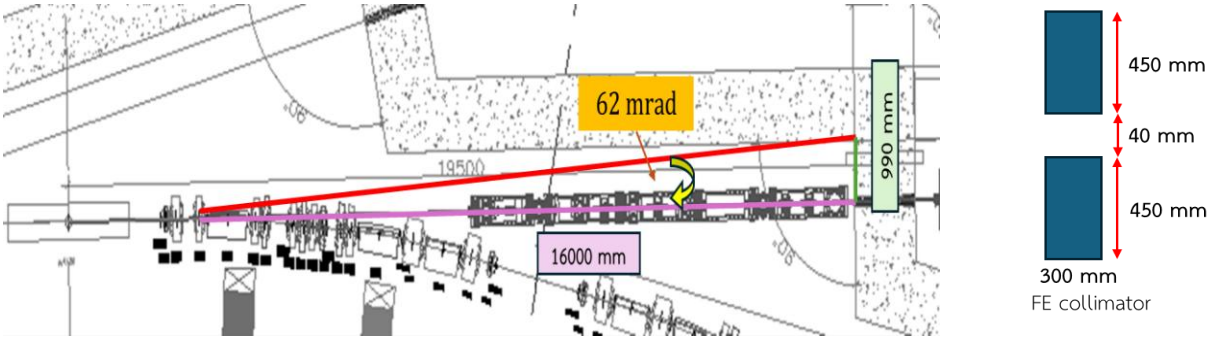
รูปที่ 22 ตำแหน่ง Front-end collimator

สำหรับความกว้างของของช่องเปิด Collimator นั้นจะถูกกำหนดด้วยขนาดของท่อ Chamber ซึ่งสำหรับ SPS-II นั้นจะใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ดังนั้น ขนาดช่องเปิดของ Front end collimator คือ 40 x 40 ในแนวตั้งและแนวนอน ในส่วนของความหนานั้นจะถูกกำหนดด้วย 6 เท่าของ TVL

สำหรับขนาดของ Front end collimator นั้นจะถูกกำหนดโดย ขนาดของ Ratchet wall โดยสามารถคำนวนได้ดังนี้ และสามารถสรุปพารามิเตอร์ของ Fron end collimator ดังแสดงในรูปที่ 19

$$\text{Opening Angle (mrad)} = \frac{990\ mm}{16\ m} \approx 61.8 \approx 62\ mrad$$

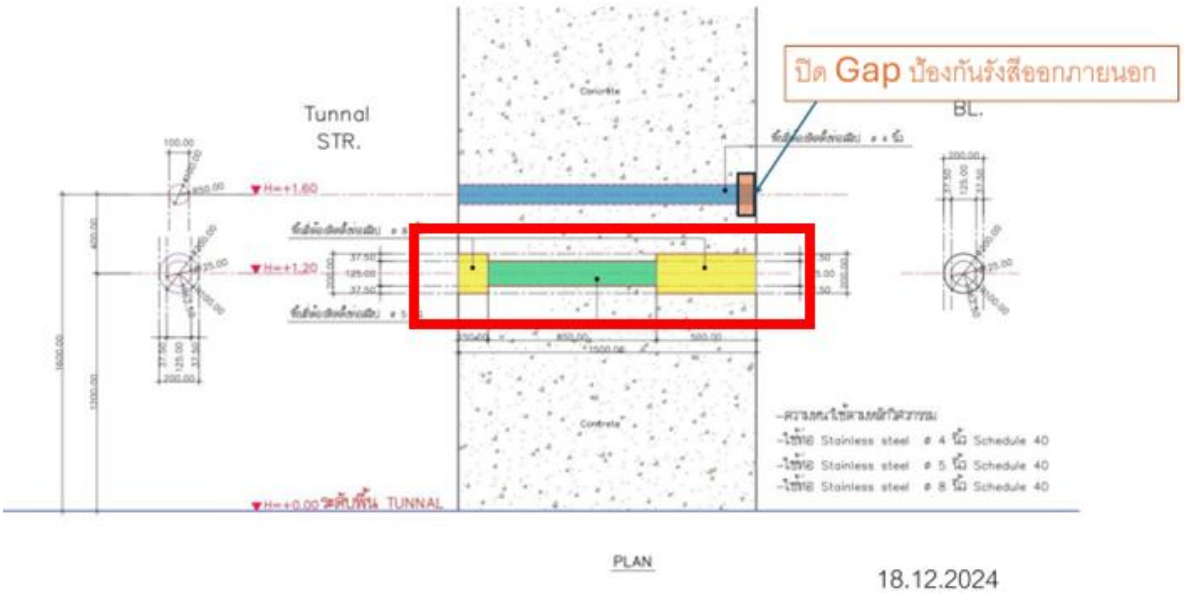
$$\text{Size of FE collimator} = 62\ mrad * 7.3 \approx 450\ mm$$



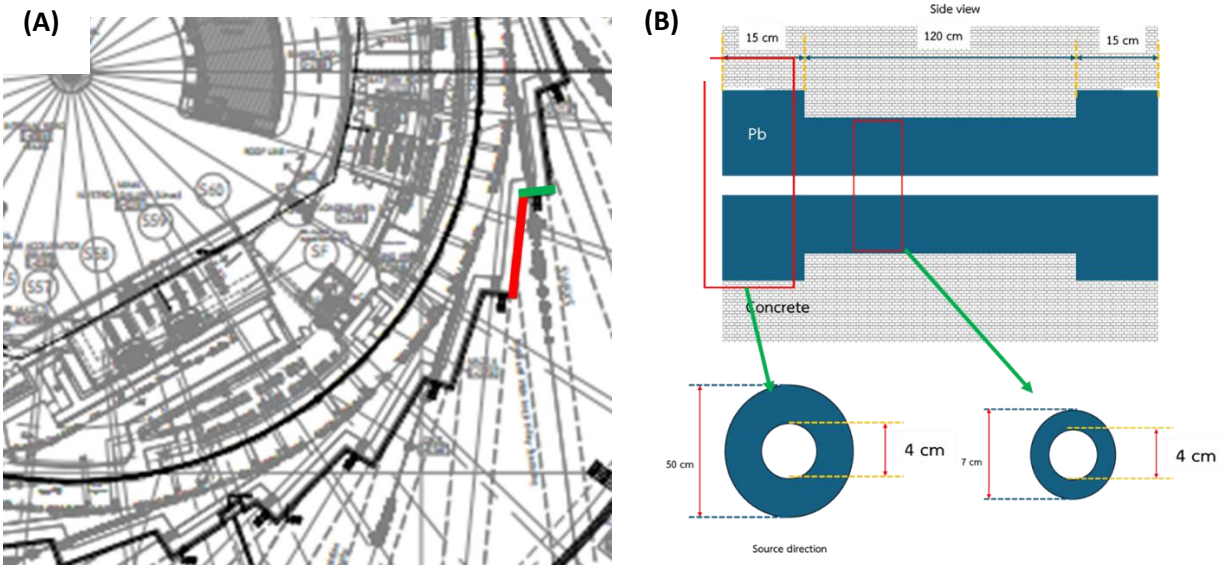
รูปที่ 23 การคำนวนขนาดของ Front-end collimator

5.2.4 Rachet wall

สำหรับ Ratchet wall ของ SPS-II นั้น ถูกออแบบมาให้ มีความหนา 1.2 m สำหรับ Wall (รูปที่ 21 เส้นสีเขียว) และ หนา 1.5 m สำหรับ Ratchet wall (รูปที่ 21 เส้นสีแดง) โดยที่ความสูงของกำแพงอยู่ที่ 3 เมตร โดยช่องเจาะอยู่สูงจากพื้น 1.2 เมตร และขนาดของช่องเจาะมีขนาด 75 mm ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 ภาพตัดขวางกำแพงคอนกรีก ของ SPS-II

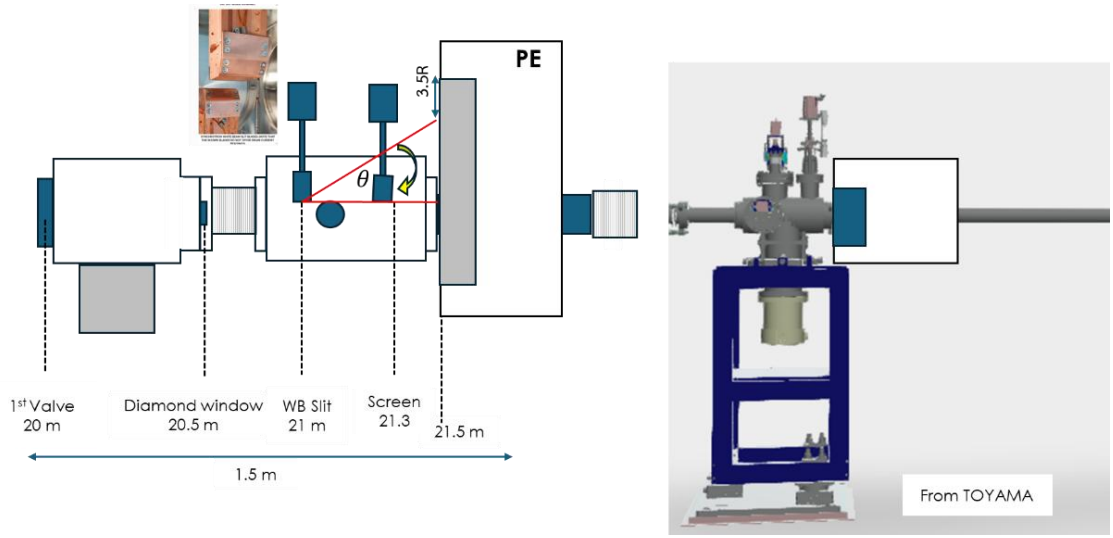


รูปที่ 25 (A) ภาพ Top view ของกำแพงคอนกรีต (B) การออกบบ Shielding ภายในกำแพงคอนกรีต

กำแพงคอนกรีตนั้นจะถูกออกแบบให้มีการเสริมตะกั่วเข้าไปโดย เว้นช่องเปิดไว้สำหรับ ท่อขนาด 40 mm โดยตะกั่วจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงนั้นคือ ช่วงขอบของกำแพงจะใช้ตะกั่วหน้า 46 เซนติเมตรในการ Shielding เพื่อช่วยป้องกันรังสีที่จะเกิดจากการสูญเสียการโคจรของอิเล็กตรอน และภายในจะใช้ตะกั่วที่มีความหน้า 3 เซนติเมตร ดังรูที่ 25 (B)

5.2.5 Window/Filter

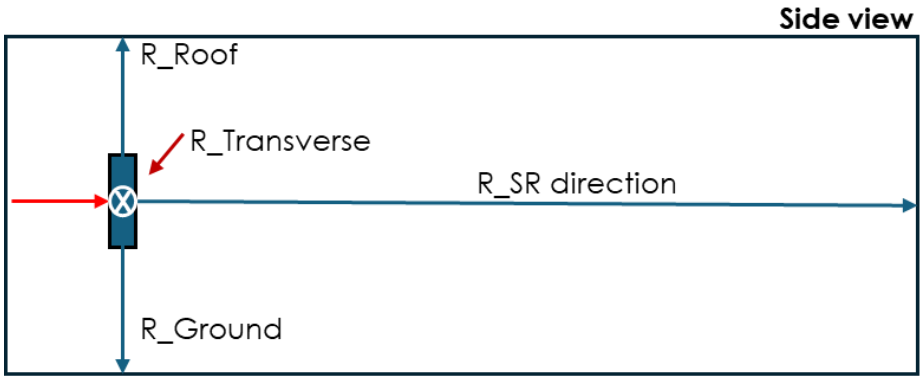
Window/Filter เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์อันแรกที่ Bremsstrahlung และ แสงซินโครตรอน นั้นตกกระทบหลังจาก ผ่าน Ratchet wall จะทำให้เกิด Secondary bremsstrahlung และนิวตรอน ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องมี Secondary bremsstrahlung shielding และ Polyethylene



รูปที่ 26 การออกแบบ Shielding หลังจาก Window/Filter

5.2.6 การคำนวนความหนา PE

การคำนวนความหนา PE นั้นจะคำนวนผ่านสมการ Inverse square law ดังที่กล่าวในบทที่ 2 ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญ ก็คือ ระยะ R ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดการกระเจิงของ Secondary bremsstrahlung และนิวตรอน ไปยังจุด ต่างๆภายใน Hutch ได้แก่ ด้านบนหลังคา ด้านข้าง 2 ข้าง ด้านล่างลงพื้น และด้านหน้าก่อนถึงหลังของ Hutch โดยค่าความเข้มข้นรังสีขาเข้านั้นจะถูกกำหนด ณ ตำแหน่งที่เกิดการกระเจิง ก่อนเข้าไปยัง Shielding ส่วนค่าความเข้าข้นของรังสีขาออก กำหนดไว้ที่ 1.2 μSv/hr ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดที่ Hutch สามารถกั้นให้บริเวณภายนอก Hutch (Experimental area) มีค่า 0.5 μSv/hr

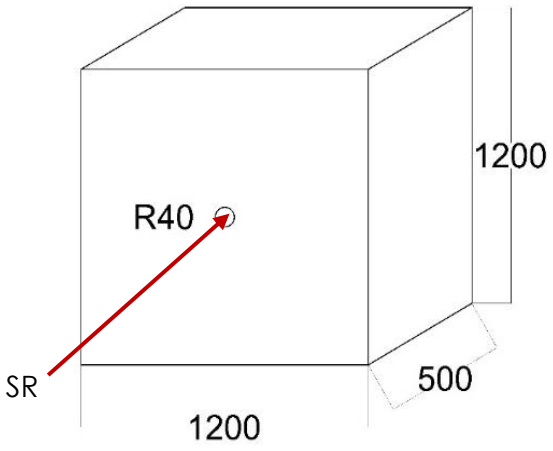


รูปที่ 27 ระยะจากจุดกระเจิงของ Secondary bremsstrahlung ไปยังจุดต่างใน Hutch

โดยผลการคำนวนค่าความหนาของ PE ในแนว ต่างๆ ภายใน Hutch แสดงดังตารางที่ 4 และสามารถวาดแบบจำลองขนาดของ PE ได้ดังรูปที่ 28

ตารางที่ 4 แสงผลการคำนวน ค่าความหนาของ PE ในแนวต่างๆ ภายใน Hutch

Parameters	SR_Direction	Transverse Direction	Ground Direction	Roof Direccion
Initial dose, D0 (Sv/hr)*	8.43E-01	8.43E-01	8.43E-01	8.43E-01
Final dose, D (Sv/hr)	1.20E-05	1.20E-05	1.20E-05	1.20E-05
Distance from source (m)	5	2	1.6	2.4
Thickness of TVL, X_TVL (cm) *	13	13	13	13
Thickness of PE (cm)	44.83	55.17	57.69	53.11



รูปที่ 28 แบบจำลองการออกแบบของ PE

5.2.7 White beam slit

การคำนวนช่องเปิดของ White beam slit (WB slit) นั้นจะขึ้นกับแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยแต่ละระบบลำเลียงแสงนั้นจะใช้ไม่เหมือนกัน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ XX โดยการกำหนดขนาดของช่องเปิดนั้น ผู้ออกแบบระบบลำเลียงแสงจะเป็นผู้กำหนด สำหรับระบบลำเลียงแสงของ SPS-II นั้นจะกำหนดอยู่ที่ ค่า 4 เท่าของ Sigma ของ Source โดยสามารถคำนวนได้จากโปรแกรม Spectra โดยค่า 4sigma ของ IVU23 สำหรับแนว Horizontal และ Vertical มีค่าอยู่ที่ 2.85736 มิลลิเมตร และ 1.57784 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับ 4sigma ของ IVU18 มีค่าในแนว Horizontal อยู่ที่ 1.31384 มิลลิเมตร และ ใน Vertical อยู่ที่ 1.01816 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 สรุปชนิดแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนของระบบลำเลียงแสง SPS-II (ข้อมูลปี 2025)

Beamline	Insertion device
HRSXS	Elliptical polarized undulator 75 (EPU75)
TXAS	In-vacuum undulator 23 (IVU23)
HXAS	In-vacuum undulator 18 (IVU18)
SWAXS	In-vacuum undulator 18 (IVU18)
GIXRD	In-vacuum undulator 18 (IVU18)
HRXRD/MX	In-vacuum undulator 18 (IVU18)
XMCT	To be updated

5.2.8 Double crystal monochromator (DCM)/ Focusing mirror

Double crystal monochromator (DCM) และ Vertical focusing mirror นั้นจะอยู่ใน

สำหรับ Double crystal monochromator (DCM) นั้น จะเป็นจุดที่แยกระหว่างโฟตอน และ รังสีเบรมสตาร์ลุง ออกจากกัน ดังรูป xx โดยในส่วนรังสีเบรมสตาร์ลุงจะทะลุผลึก ไปยัง DCM collimator แต่ X-ray นั้น จะถูกสะท้อนตามมุมของพลังงาน ไปยังผลึกตัวที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่ในการสะท้อน Monochromatic beam ออกมา ดังนั้นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับ DCM นั้นก็คือ ค่า ความสูงของ monochromatic beam ที่ออกมาเมื่อเทียบกับ White beam ขาเข้า หรือเราเรียนกว่า ค่า Fixed exit โดยในการคำนวนครั้งนี้จะใช้ค่า Fixed exit อยู่ที่ 25 mm

ในการออกแบบกำบังรังสีหลัง DCM นั้นจะประกอบไปด้วย

1) DCM Collimator โดย จะทำหน้าที่ช่วยกำบังรังสีเบรมสตาร์ลุงที่ทะลุผ่านผลึกตัวที่ 1 พร้อมทำหน้าที่ในการให้เว้นช่องให้ Monochromatic beam หรือ X-ray ผ่านไปยังสถานีทดลองได้ โดยปกติจะมี 2 แบบ คือ แบบที่

อยู่นอก Vacuum กับ แบบที่อยู่ใน Vacuum ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้เราจะใช้ แบบใน Vacuum ซึ่งจะใช้วัสดุชนิด W ความหนา 250 mm เป็นตัวป้องกัน โดยช่องเปิดสำหรับ X-ray จะใช้ค่าคุณสมบัติจาก บริษัท TOYOMA นั้นคือ

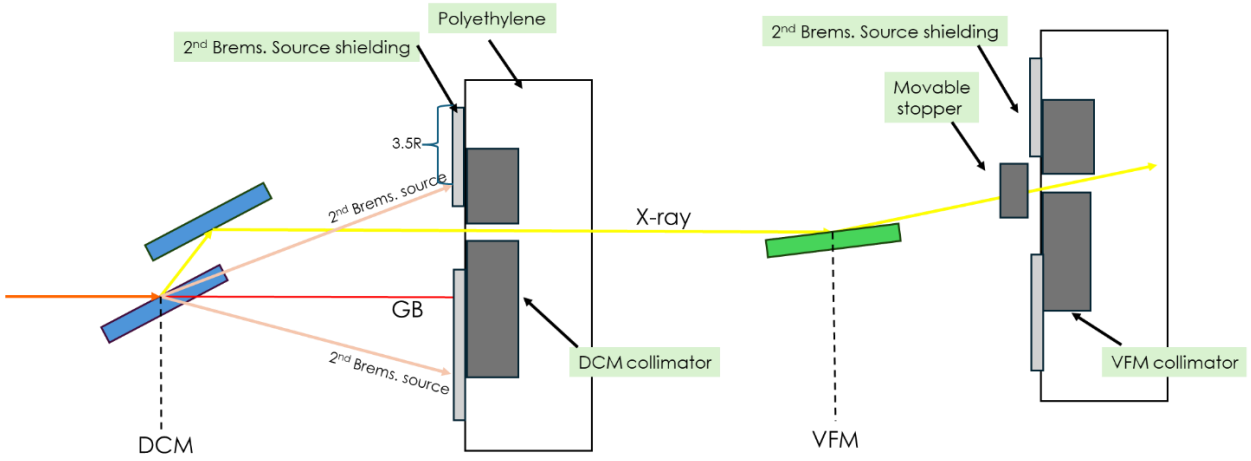
Opening size: 10(V) x 16(H) mm

Size: 120 mm

Thickness: 250 mm

2) Secondary bremsstrahlung shielding นั้นจะช่วยดูดซับรังสีทุติยภูมิที่เกิดจากการที่ รังสีเบรมสตาร์ลุงนั้นชั้นกับผลึกแล้วเกิดการกระเจิง โดยขนาดความหนาของ Shielding นั้นจะเป็นค่ามาตรฐานที่ซินโครตรอนทั่วโลกใช้ นั้นคือประมาณ 12 cm ในส่วนของขนาดนั้น จะใช้ค่า 3.5 เท่าของ Molier Radius จากตำแหน่งที่ลากเส้นรังสีทุติยภูมิ ทำมุม 15 องศา จากจุดตกกระทบของรังสีเบรมสตาร์ลุงกับผลึกตัวที่ 1 ดังรูป

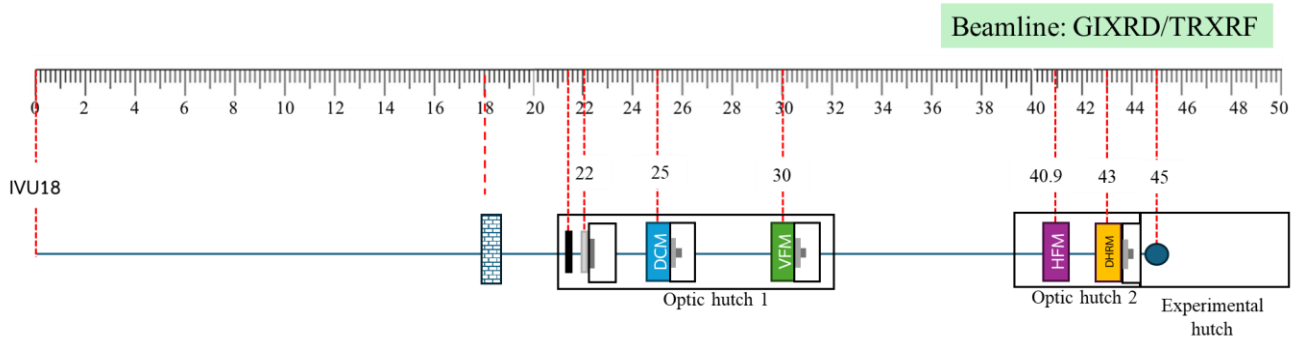
3) Polyethylene (PE) นั้นถูกออกแบบคล้ายของ TPS คือ ครอบคลุม DCM Collimator โดยใช้ความหนาที่ 500 cm โดยค่ามาจากการคำนวนในตารางที่ 4



รูปที่ 29 แบบจำลองการออกแบบของ Shielding ของ DCM และ

ตารางที่ 6 ค่าตำแหน่ง ขนาดของช่องเปิด และ ความหนาของ อุปกรณ์ต่างของระบบลำเลียงแสง

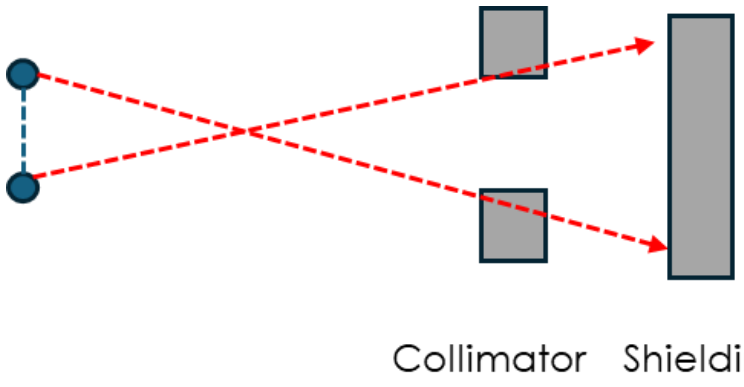
Components	Position from GB source (mm)	Horizontal opening Size, H x V (mm2)	Thickness (mm)	Noted
GB Source	0	40x40	N/A	
Tube	N/A	40x40	N/A	
FE collimator	7,853	40x40	300	Pb
FE Stoper	15,765	N/A		W
Ratchet wall	16,263	40x40	1500	
Diamond window	18,763	N/A	0.3	
WB Slit	19,263	IVU18 _H =1.31384, V: 1.01816 IVU23 _H =2.85736, V: 1.57784	10	Cu
WB collimator	19,763	40x40	200	W
Polyethylene-I	19,963	40x40	500	
DCM	21,763	Fixed Exit=25	N/A	
Secondary source shielding-I	23,643	40x40	120	Pb
DCM collimator	23,763	16x10	250	W
Polyethylene-II	23,763	40x40	500	
VFM	23,763	N/A	N/A	
VFM stopper	27,993	N/A	200	W
Secondary source shielding-II	28,593	40x40	120	Pb
VFM collimator	28,713	10x10	200	W
Polyethylene-III	28,713	40x40	500	
Hutch wall-I	29,300	40x40	100	Fe/Pb/Fe
Hutch wall-II	36,300	40x40	100	Fe/Pb/Fe
Horizontal focusing mirror	39,200	N/A	N/A	
DHRM	40,300	N/A	N/A	
Stopper	41300	12.7x12.7	300	Pb
Polyethylene-IV	41300	12.7x12.7	500	
Hutch wall-III	43,000	12.7x12.7	10	Acrylic



รูปที่ 30 ภาพตำแหน่งการวางตำแหน่งอุปกรณ์ระบบป้องกันรังสีของ GIXRD beamline

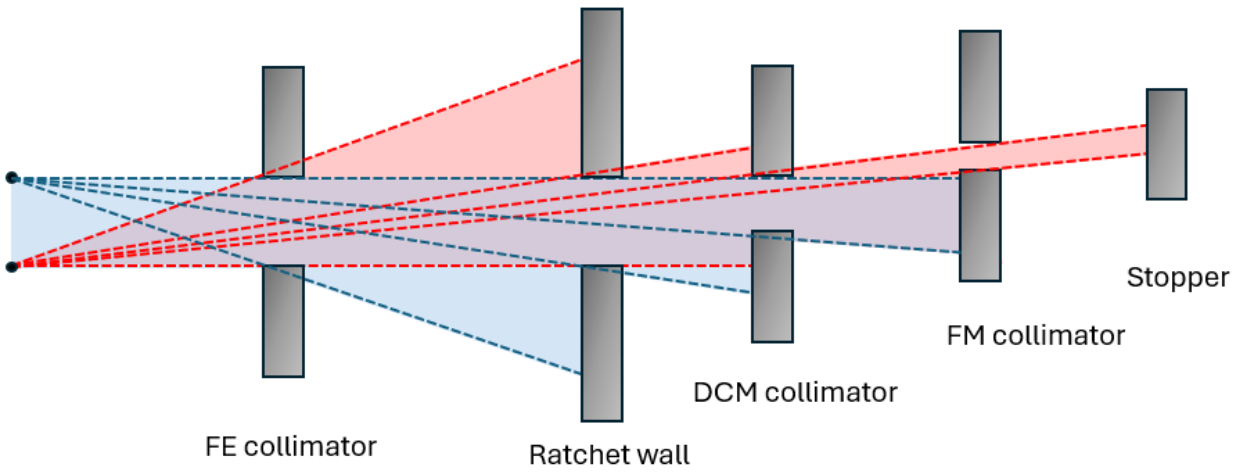
5.2.9 หลักการวาดเส้น Bremsstrahlung

ขั้นตอนที่ 1 สร้างจุด 2 จุด ที่มีระยะห่างในแนวตั้ง เท่ากับขนาดของ Source ในแนวตั้ง (ในกรณีวาด Bremsstrahlung ray tracing สำหรับแนวนอน ก็วาดเช่นเดียวกัน) จากนั้นดำเนินการวาด อุปกรณ์ป้องกันรังสีต่างๆ เช่น Collimator หรือ Shutter โดยลากเส้นจากตำแหน่ง Source ด้านล่างไปยังมุมบนของช่อง Collimator ไปตกยัง Shutter จากนั้นดำเนินการวาดเส้นจากจุด Source ด้านบนมายังมุมของ Collimator ด้านล่างเป็นลักษณะกากะบาท ดังรูปที่ 31 โดยเมื่อลากเส้นผ่าน Collimator ทุกครั้ง แนวเส้น Bremsstrahlung จะต้องตกลงบน ตัวกำบังรังสีทุกครั้ง



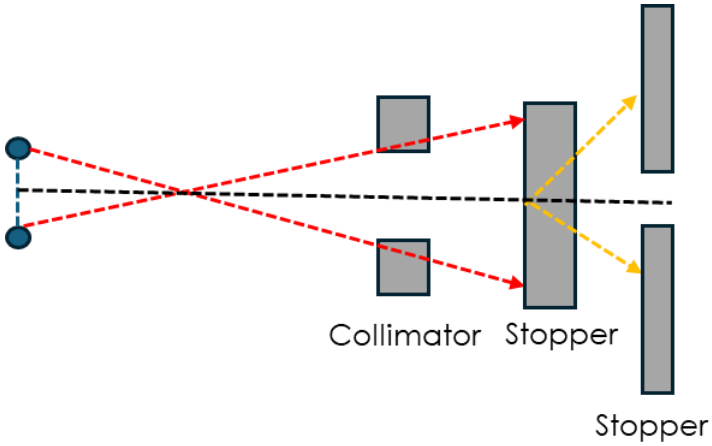
รูปที่ 31 การวาดเส้นรังสี Bremsstrahlung ผ่านช่อง Collimator

ขั้นตอนที่ 2 ในบางครั้ง Collimator ก็จะช่วยปังกันรังสีที่ทะลุผ่านมาจากตัว Collimator หรือช่องเปิดตัวก่อนหน้า



รูปที่ 32 การวาดเส้นรังสี Bremsstrahlung ผ่านช่อง Collimator หลายตัว

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อมีรังสี Bremsstrahlung หลัก ตกกระทบลงบน Shutter Stoper หรือ อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ จะทำทำให้เกิด Secondary bremsstrahlung เสมอ โดยจะทำการวาดเส้นรังสี ออกมุม 15 องศา จากจุดที่ตกกระทบ



รูปที่ 33 การวาดเส้นรังสี Secondary bremsstrahlung

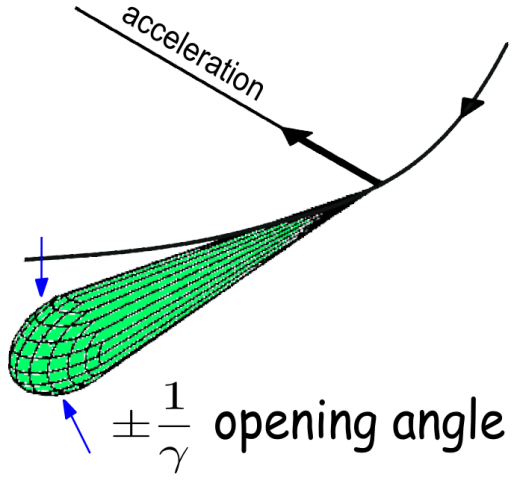
ขั้นตอนที่ 4 โดยเมื่อเราวาดเส้นรังสีครบทุกเส้นแล้ว เส้นรังสีทุกเส้นจะต้องตกกระทบลง Shielding เสมอ และไม่มีรังสีทะลุไปยังจุดสุดท้าย หรือกล่าวคือ เมื่อยืนอยู่ที่ปลายระบบลำเลียงแสงและมองเข้าไปยังแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน จะต้องไม่เห็นช่องว่างใดๆ

ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการวาดเส้น Gas Bremsstrahlung ที่เกิดจาก Electron beam วิ่งชน โมเลกุลแก๊สซึ่งถือเป็นส่วนที่ทำให้เกิด Gas Bremsstrahlung ที่มากที่สุด โดยการลากเส้นตามมุมของ Inverse of the Lorentz factor โดยสามารถคำนวนจากสมการ

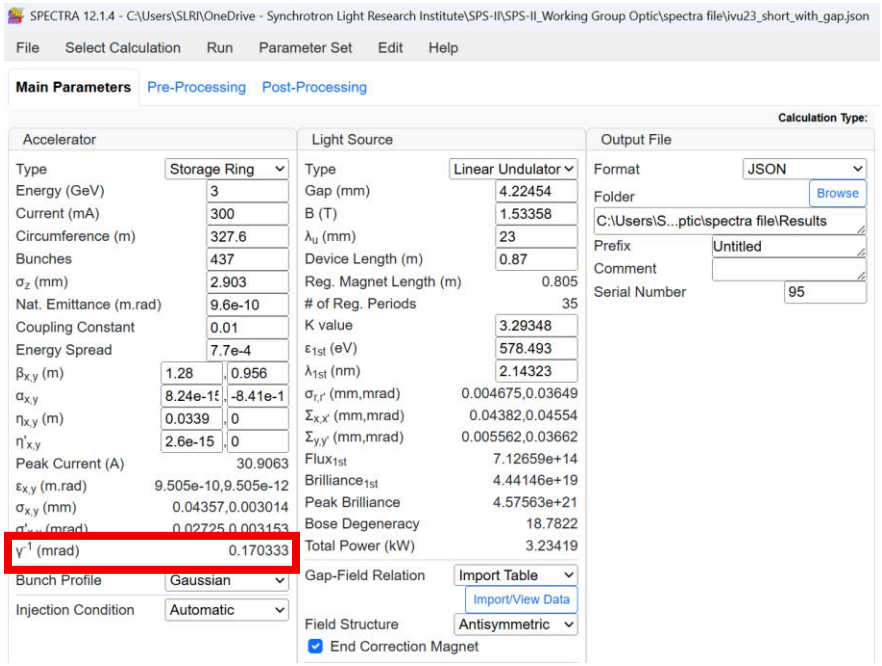
$$\gamma = \frac{E}{mc^2}$$

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma}$$

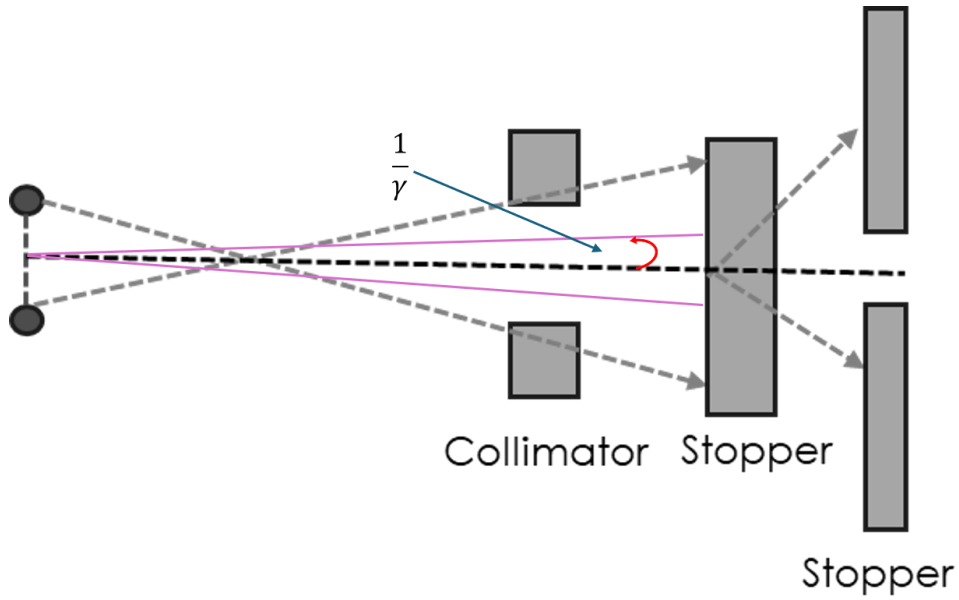
โดยค่า $\frac{1}{\gamma}$ ของเครื่องกำเนิดแสงระดับพลังงาน 3GeV มีค่าอยู่ที่ 0.170333 หรือสามารถใช้โปรแกรม SPECTRA ในการคำนวน ดังรูปที่ 35



รูปที่ 33 มุม Inverse of the Lorentz factor



รูปที่ 34 มุม Inverse of the Lorentz factor



รูปที่ 35 การวาดเส้น GB ตามมุม Inverse of the Lorentz factor

6. ผลลัพธ์ และอภิปรายผล

6.1 ผลการคำนวนค่าปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุง

สำหรับการคำนวนค่าปริมาณรังสีเบรมส์สตราลุงนั้น สามารถคำนวนได้จากสมการ ของ Ferrari A. โดยมีสมการดังนี้

$$D = 2.5 \times 10^{-27} \left(\frac{E_0}{m_0 c^2}\right)^{2.67} \frac{L}{d(L+d)} I \frac{P}{P_0}$$

โดย D = Absorbed Dose rate (Sv/hr)

E_0 = the primary beam energy (MeV)

$m_0 c^2$ = the rest-mass energy of the electron

I = Beam current (e/s)

L = Straight section length (m) (Bending to bending)

d = the distance from the end of straight section to the point of interest (m)

P = Operated pressure

P_0 = 1 x 10^{-9} torr

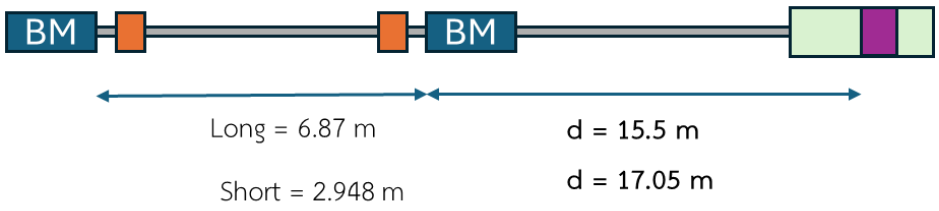
หาค่า The rest-mass energy of the electron

$m_0 c^2$ = (9.109E-31)(kg)(3E8)(m/s)

= 8.1981E-14 ($kg.m^2.s^{-2}$, J)

แปลงหน่วย J เป็น eV = 0.511741573 MeV

ในการคำนวนค่า Dose เราจะกำหนดที่ตำแหน่งที่ Front-end stoper โดยจะมีค่า L และ d ของ Long-straight section ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 ระยะ Straight section length และ ระยะห่างระหว่างจุดสุดท้าย straight section ถึงตำแหน่งที่สนใจ

สำหรับค่า ความดันของวงกักเก็บอิเล็กตรอน (Operated pressure, P) นั้น จะดำเนินการที่ 1×10^{-9} torr ดังนั้นจะได้ว่า

$$D = 2.5 \times 10^{-27} \left(\frac{3000}{0.5117}\right)^{2.67} \frac{6.87}{15.5(6.87 + 15.5)} 2.5 \times 10^{18}$$

ดังนั้นค่าความเข้มของ รังสีเบรมส์สตราลุง ณ ตำแหน่ง Front-end shutterr มีค่าเท่ากับ 1.42 Sv/hr

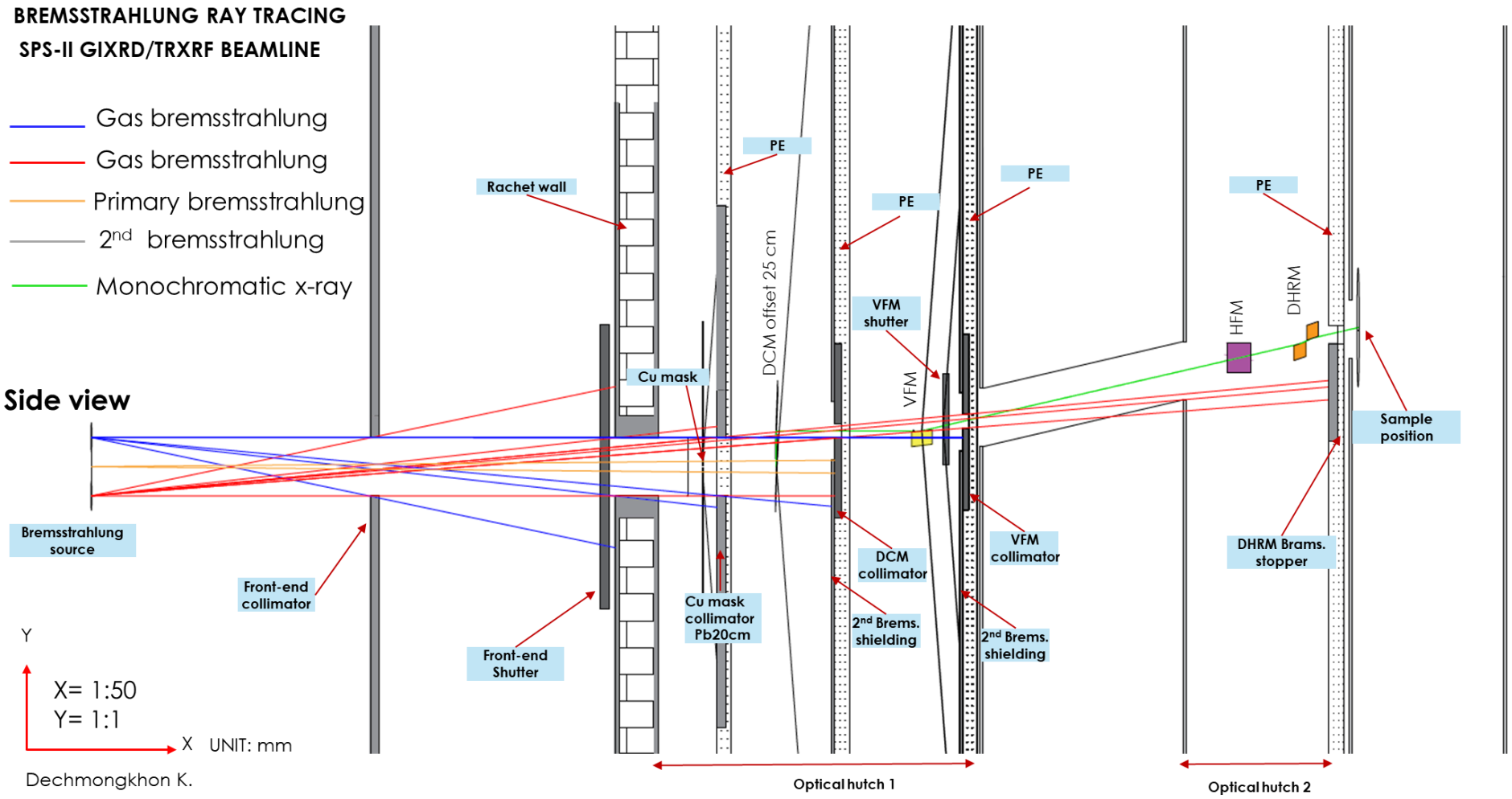
ตารางที่ 7 ผลการคำนวนค่าความเข้มรังสี Bremsstrahlung เมื่อผ่าน W และ Pb ณ ตำแหน่ง Front-end shutter

	Short Beamline	Long Beam line
Bremsstrahlung Dose Rate at front-end stopper (Sv/hr)	To be update	**1.42**
Bremsstrahlung Dose Rate behind 30 cm Pb stoper (μSv/hr)	To be update	**0.89**
Bremsstrahlung Dose Rate behind 20 cm W front-end stopper (μSv/hr)	To be update	**0.24**

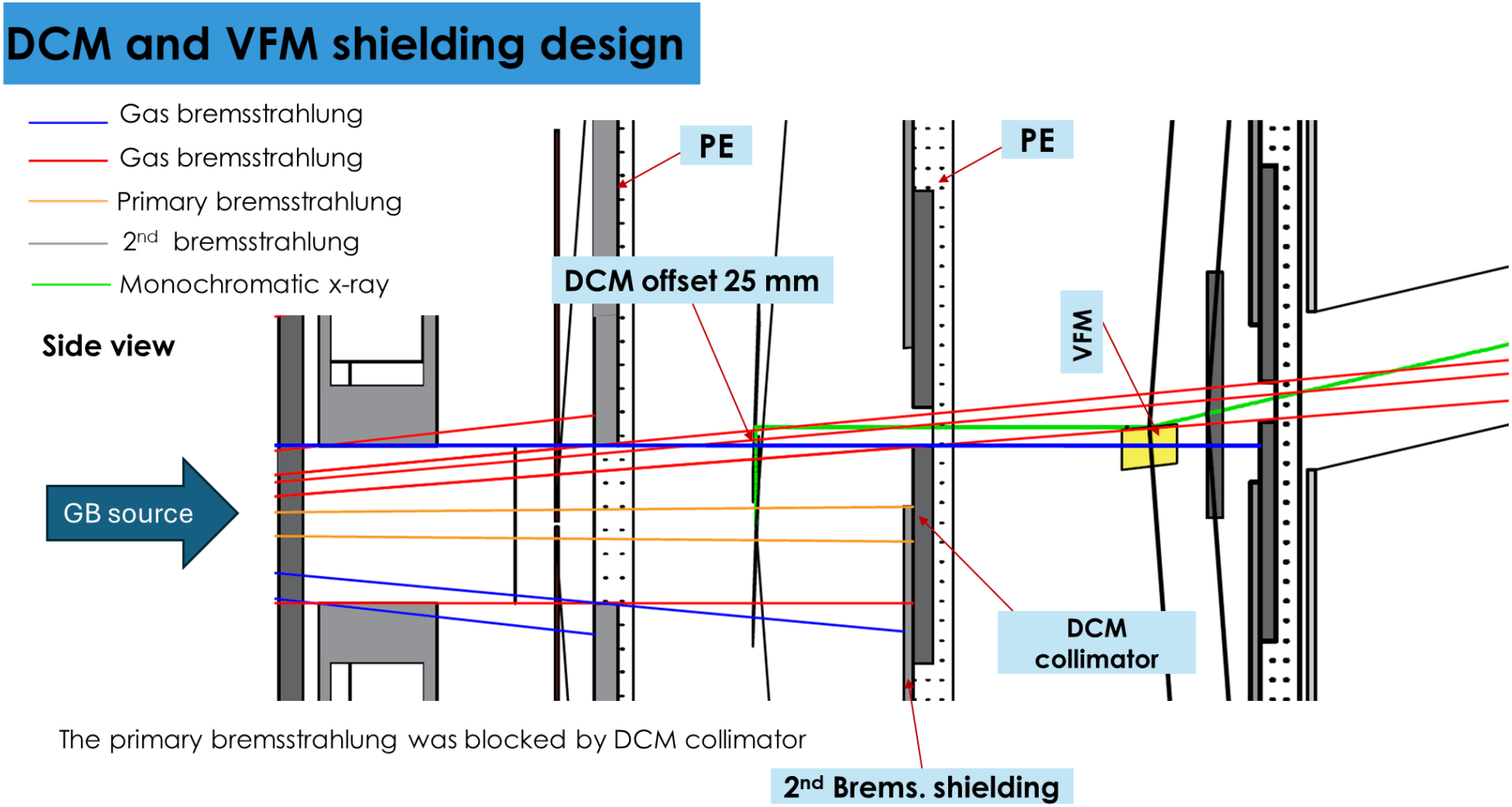
6.2 ผลการวาดเส้น Bremsstrahlung

ผลการวาดนั้น เราได้ทำการวาดทั้งหมด จำนวน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะได้รับข้อเสนอจากผู้เชี่ยวชาญ และได้มีการวาดใหม่ และแก้ไขตามคำแนะนำ โดยในครั้งนี้จะนพเสนอผลที่ได้รับการแก้ไขล่าสุด ดังรูปที่ 37 38 และ 39 ตามลำดับ

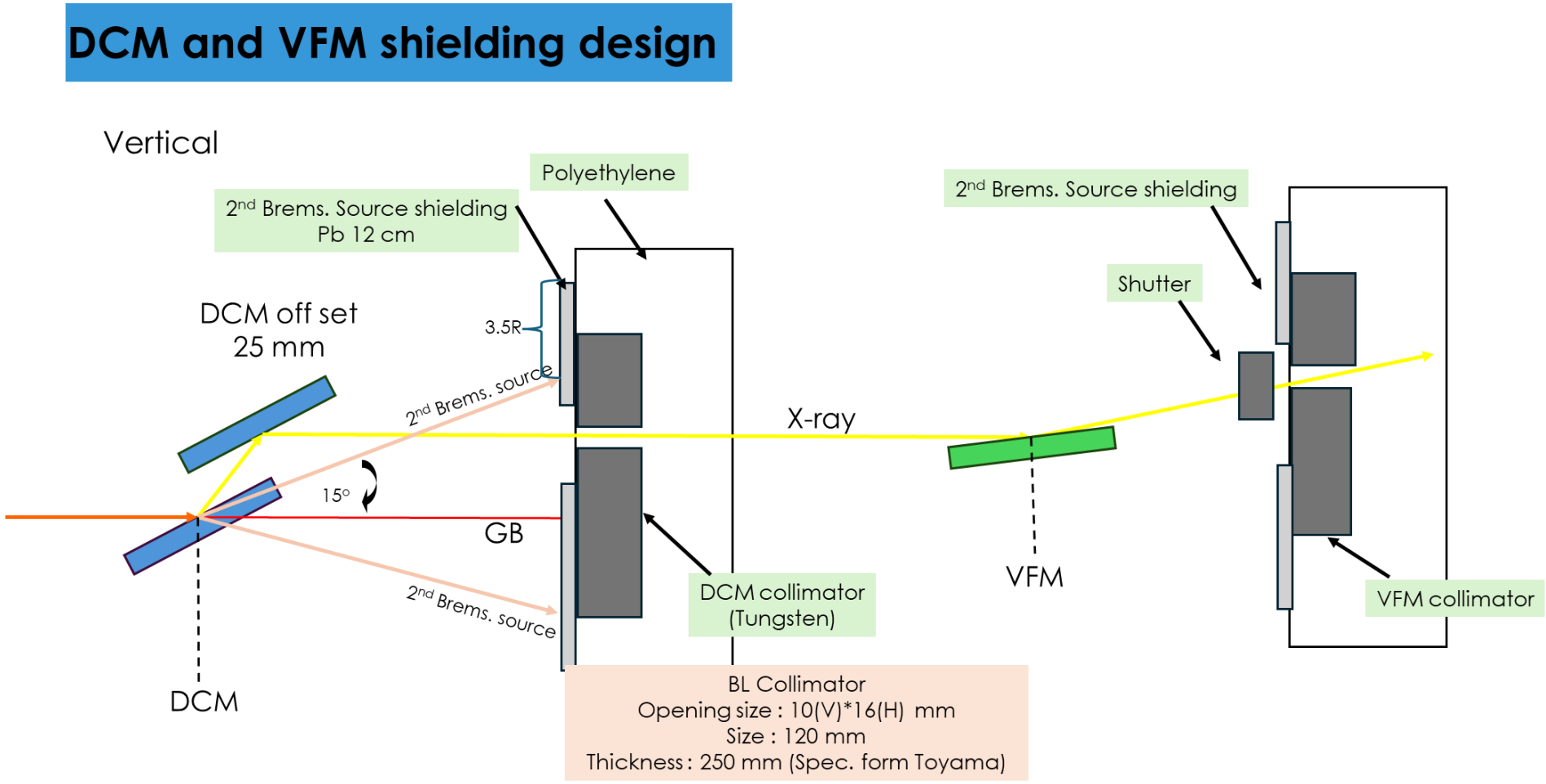
ในส่วนของผลการวาดครั้งที่ 1 และ 2 จะอยู่ในภาคผนวก



รูปที่ 37 Bremsstrahlung Ray trace Diagram (Vertical) ของ GIXRD beamline ของ SPS-II



รูปที่ 38 Bremsstrahlung Ray trace Diagram (Vertical) ของ GIXRD beamline ของ SPS-II ณ ตำแหน่ง DCM และ VFM



รูปที่ 39 การออกแบบ Local shielding ของ DCM

6. สรุปผล

จากการศึกษาพบว่า ค่าความเข้มของ รังสีเบรมส์สตราลุง ณ ตำแหน่ง Front-end stopper มีค่าเท่ากับ 1.42 Sv/hr โดยเมื่อถูกป้องกันด้วย 6TVL ของทังสเตน และ ตะกั่ว นั้นคือ 30 cm และ 20 cm ตามลำดับ พบว่า ค่ารังสีจะลดลงอยู่ที่ 0.24 และ 0.89 ตามลำดับ โดยภายในกำแพงจะไม่มีติดตั้ง Local shielding เพิ่มเติมนอกจาก Front-end collimator เนื่องจากรังสีจะถูกป้งกันด้วยกำแพงคอนกรีต

ในส่วนของ Optical hutch นั้นจะถูกออกแบบให้มี Local shielding โดยประกอบด้วย Cu mask collimator, DCM Collimator และ VFM Collimator โดยจะมีการออกแบบให้มี Secondary bremsstrahlung shielding ที่ทำจาก Pb ขนาดความหนา 12 cm ซึ่งเป็นการออกแบบตามมาตรฐาน เพื่อป้องการ Secondary bremsstrahlung ที่เกิดจาก Primary bremsstrahlung นั้นชนกับ Optical elements นอกจากนี้ยังมีการติดตั้ง Polyethylene เพื่อช่วยดูดซับ Neutron scatter โดยความหนาของ ถูกคำนวนเพื่อช่วยดูซับรังสีให้ค่าไม่เกินที่กำหนด นั้นคือ 0.5 μSv/hr

ในส่วนของ Bremsstrahlung shutter ถูกออกแบบไว้ 2 ตำแหน่ง นั้นคือ Front-end Shutter โดยทำจากทังสเตน โดย Front-end Shutter จะทำหน้าที่ในการปิดเพื่อป้งกันรังสี bremsstrahlung เมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องการเข้าไปในส่วนของ Optical hutch ส่วนของ VFM shutter จะทำหน้าที่ในการปิดเพื่อป้องกัน bremsstrahlung เมื่อผู้ใช้บริการ หรือ ผู้ปฏิบัติการ ต้องการใช้ไปในส่วนของ Experimental hutch

จากการออกการปังกันรังสี Bremsstrahlung พบว่า Shielding ที่ออกแบบสามารถ กันรังสีได้ เกือบทั้งหมด โดย Bremsstrahlung หลักที่เกิดจาก Electron beam ได้ถูกป้องกันด้วย DCM collimator แต่ยังมีรังสี Bremsstrahlung บางส่วนเกินออกมา ซึ่งสามารถดำเนินการแก้ไขในลำดับต่อไปได้ ตามข้อเสนอแนะ

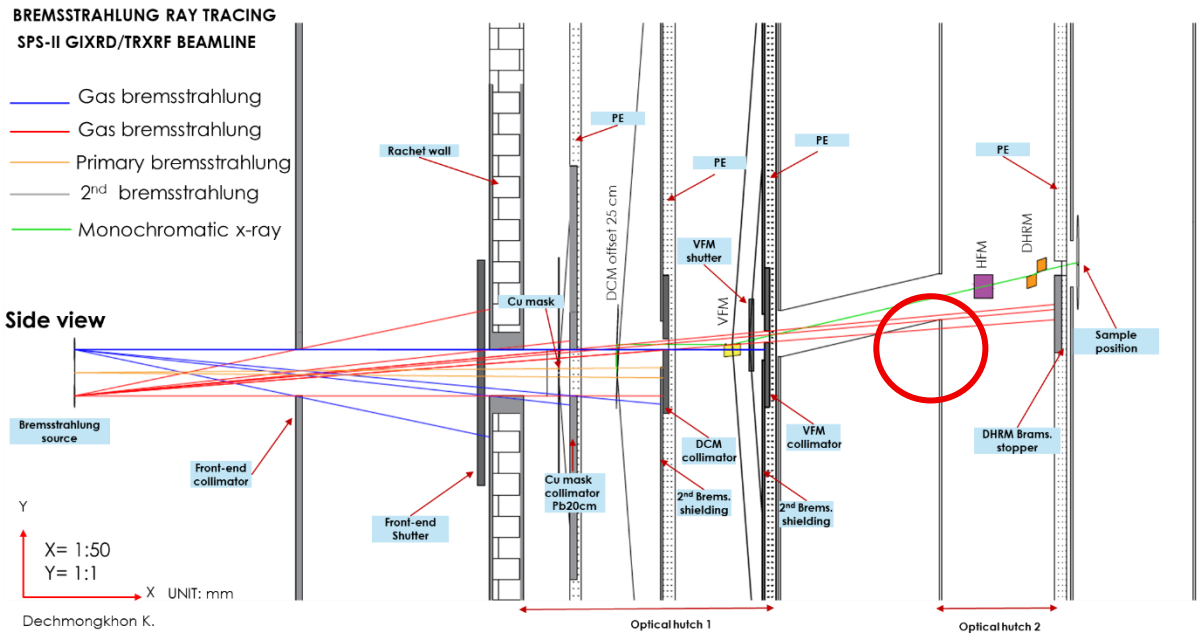
7. ข้อเสนอแนะ

7.1 จากการวาด Bremsstrahlung ray tracing ตามพารามิเตอร์ข้างต้ พบว่า มี Bremsstrahlung บางส่วนนั้นอยู่ภายนอกท่อ (บริเวณวงกลม) ดังรูป โดยสามารถมีแนวทางการแก้ไขดังนี้

1) เนื่องจากเส้นสีแดงดังกล่าวเกิดจากการวาดเส้น Bremsstrahlung ผ่าน DCM collimator ดังนั้น หากเราปรับ Off set ของ DCM ก็จะทำให้ Collimator นั้นขยับสูงตามด้วยเช่นกัน ซึ่งจะทำให้ เส้นที่เกินออกมานั้นสูงนั้นและอยู่ภายในท่อ

2) ดำเนินการออกแบบ Shielding เพิ่มเติม บริเวณด้านหลัง VFM Collimator เพื่อป้องกันรังสีเส่นที่เกินออกมา

3) ดำเนินการสร้าง Pb shielding ล้อมรอบบรแวณท่อ เพื่อป้องกันรังสีที่ล้นออกมา



7.2 ปรับ Off sett ของ DCMเพื่อลด VFM collimator: จากรูปจะเห็นได้ว่า หากมีการปรับ Off set ของ DCM นั้นจะทำให้ ช่วยปังกันรังสีส่วนที่เกินออกมา โดยหากสามารถกันรังสีเส้นนี้ได้แล้ว ก็จะสามารถลด VFM collimator ได้ เนื่องจากรังสีที่ทะลุผ่านทั้งหมดจะถูกป้องกันด้วย Pb ที่อยู่ใน Experimental hutch

8. กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์

วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย และบุคลากรที่ทำงานเกี่ยวกับกับความปลอดภัยทางรังสี

เอกสารอ้างอิง

[1] Job, P. K., & Casey, W. R. (2006). Bremsstrahlung Ray Tracing Guidelines for NSLS II Beamlines and Front Ends (No. NSLSII-ESH-TN--020; BNL--210949-2019-TECH). Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY (United States).

[2] Devienne, A., & García-Fusté, M. J. (2020). Shielding calculations for the design of new beamlines at ALBA synchrotron. Radiation Physics and Chemistry, 171, 108759.

[3] Ipe, N., Haeffner, D. R., Alp, E. E., Davey, S. C., Dejus, R. J., Hahn, U., ... & Shu, D. (1993). Guide to beamline radiation shielding design at the advanced photon source (No. ANL/APS/TB--7; SLAC-TN--93-5). Argonne National Lab., IL (United States).

[4] Job, P. K., Haeffner, D. R., & Shu, D. (1994). Bremsstrahlung scattering calculations for the beam stops and collimators in the APS insertion-device beamlines (No. ANL/APS/TB--20). Argonne National Lab., IL (United States).

[5] Matsuda, H., Hagiwara, M., Takeuchi, A., Itoga, T., & Konishi, H. (2024). Shielding design of NanoTerasu for gas bremsstrahlung and photonuclear reaction. Journal of Nuclear Science and Technology, 61(2), 218-223.

[6] Ludwik Dobrzynski (2016). Instrumentation in HEP Calorimetry

[7] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) 11th August, 2022 9:57am

[8] Ferrari, A., Pelliccioni, M., & Sala, P. R. (1993). Estimation of fluence rate and absorbed dose rate due to gas bremsstrahlung from electron storage rings. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 83(4), 518-524.

[9] Ipe, N. E., & Fassò, A. (1994). Gas bremsstrahlung considerations in the shielding design of the Advanced Photon Source synchrotron radiation beam lines. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 351(2-3), 534-544.

[10] Liu, J. C., Chen, A. Y., & Wen, P. J. (2019). Beamline shielding design and safety protection at TPS. In 10th Int. Workshop on Radiation Safety at Synchrotron Radiation Sources.

[11] Asano, Y. (1998). Shielding design calculation for SPring-8 beamlines using STAC8. Synchrotron Radiation, 5(3), 615-617.

[12] Joseph C. Liu and Methee Sophon.(2019) Shielding design for ASEAN beamline at SLRI. Consultation Project on Radiation Safety of Synchrotron Accelerator between SLRI and NSRRC.

[13] Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.

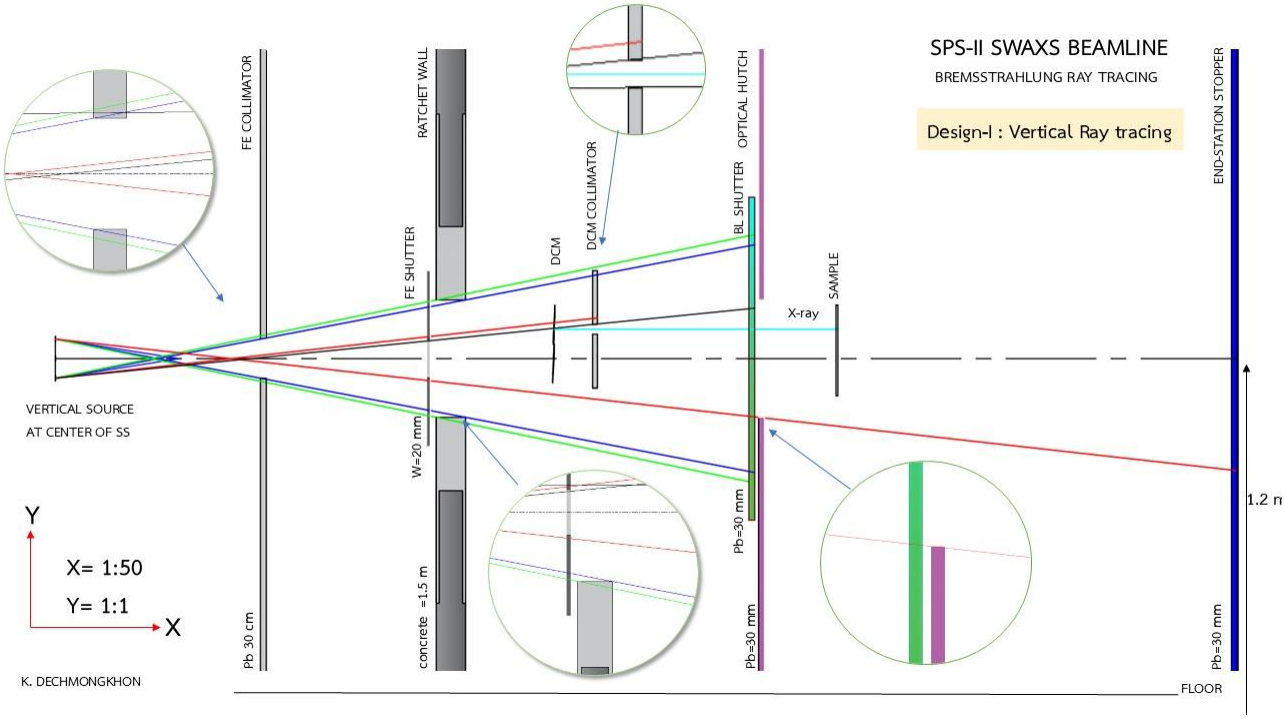
[14] R.J. Sheu, J. Liu, C.R. Chen, F.D. Chang, S.P. Kao, M.S. Chang, J.P. Wang.(2009) Taiwan Photon Source (TPS) Radiation Safety Analysis Report. Radiation and Operation Safety Division, NSRRC.

[15] Joseph C. Liu. Radiation and Operation Safety Division. July.18, 2023 Overview of Safety System at NSRRC

[16] Job, P. K., & Casey, W. R. (2006). Bremsstrahlung Ray Tracing Guidelines for NSLS II Beamlines and Front Ends (No. NSLSII-ESH-TN--020; BNL--210949-2019-TECH). Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY (United States).

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1 การนำเสนอและรับข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ Joseph C. Liu จาก TPS และการเยี่ยมชมดูการออกแบบระบบป้องกันรังสี



Source Defining

SPS-II

Figure 2-245: Schematic diagram of vacuum chamber with Synchrotron Radiation (SR) path.

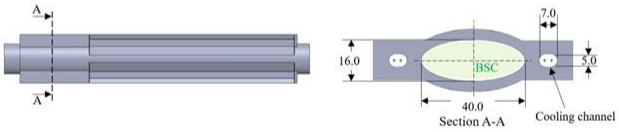
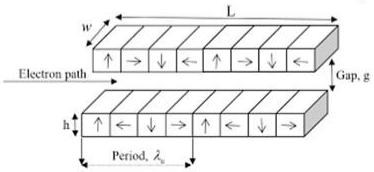
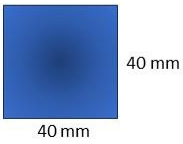


Figure 2-246: Standard cross-section of straight beam duct in bending sections.

"For SPS-II, we defined the bremsstrahlung source size as 40 mm vertically, determined by the maximum gap of the undulator, and 40 mm horizontally, determined by the size of the straight section chamber."

Comment : Okay





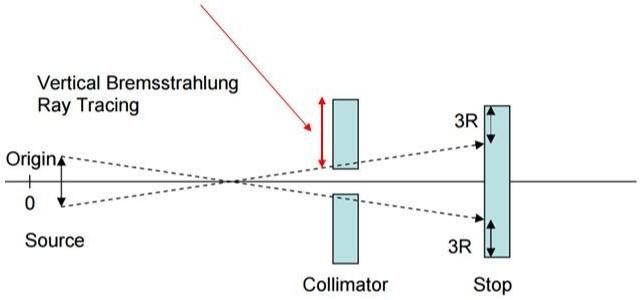
Position : At center of straight section

FE Collimator/Shutter

SPS-II

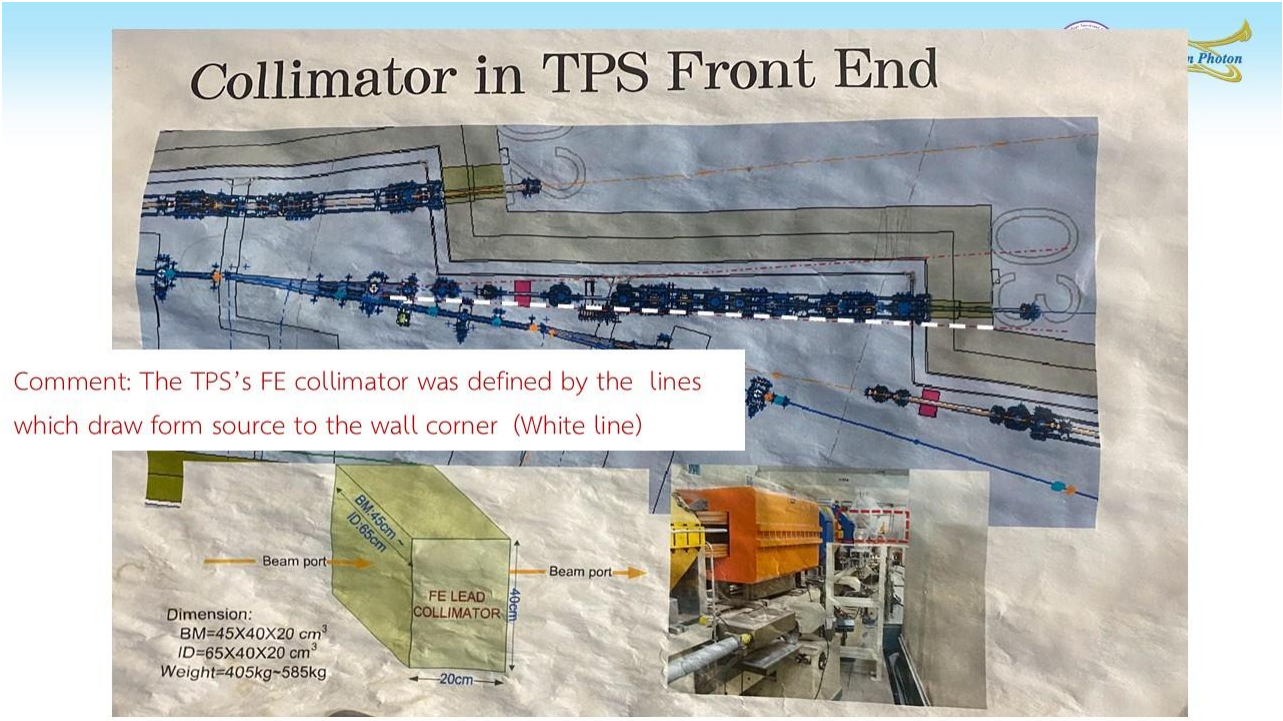
- FE Collimator
  - opening size = 40 mm defined from Vacuum tube
  - Position= 10.5 m
  - material and Thickness : 30 cm of Pb/20 cm of W
  - Size = How to define?
- FE Shutter
  - Thickness : 20cm of W
  - Position : 19 m from Center of SS
  - Size : TPS=3.5R/ NSLS-II=3R from / SPS-II:3.5R

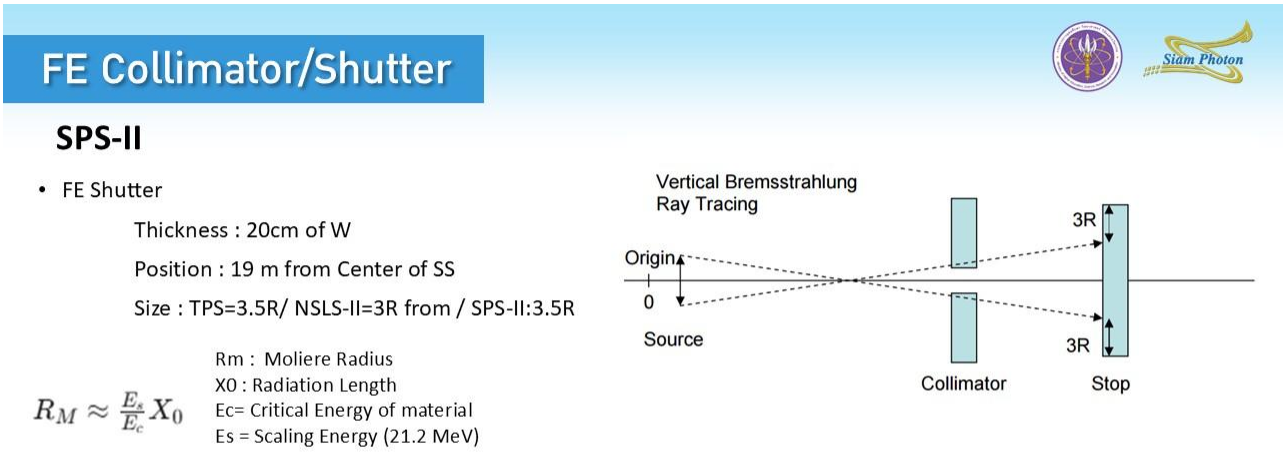
How to define size of FE collimator?

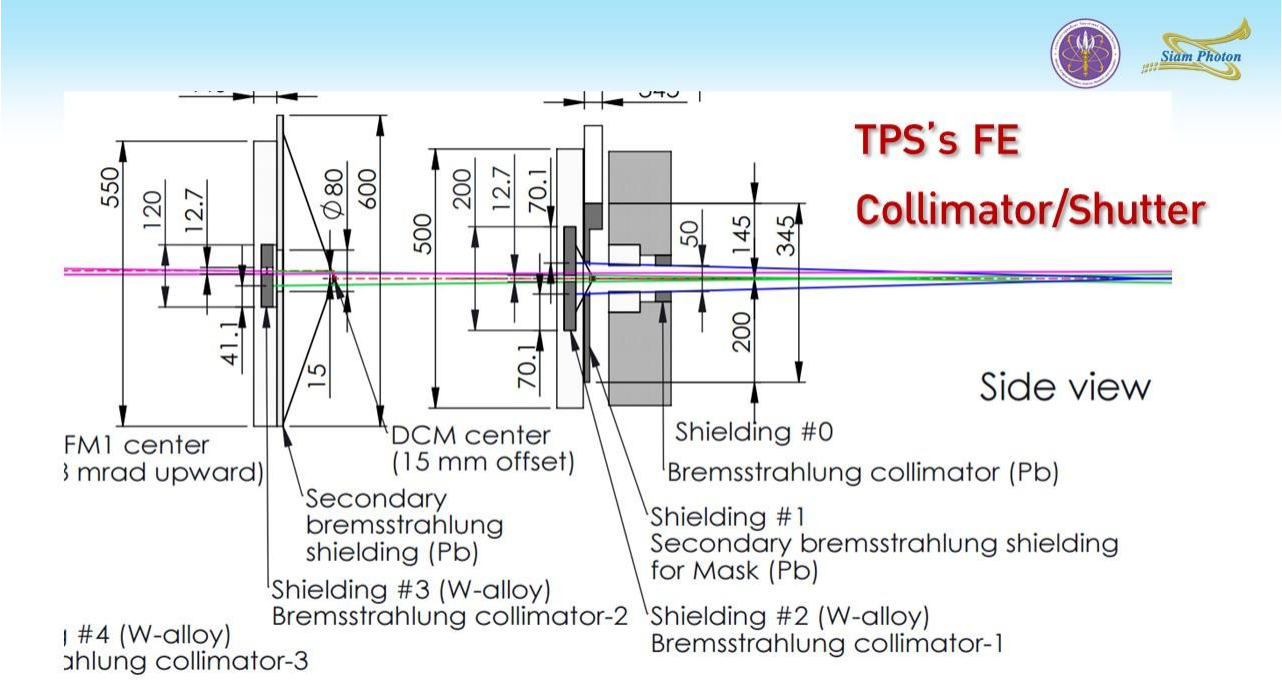


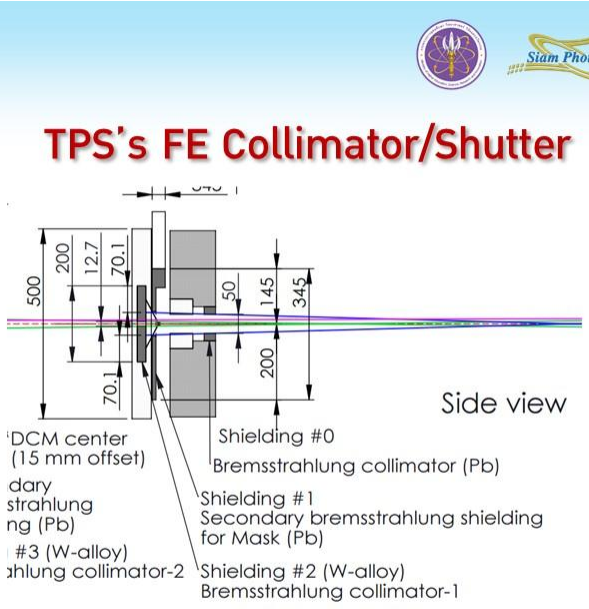
$$R_M \approx \frac{E_s}{E_c} X_0$$

Rm : Moliere Radius
X0 : Radiation Length
Ec= Critical Energy of material
Es = Scaling Energy (21.2 MeV)

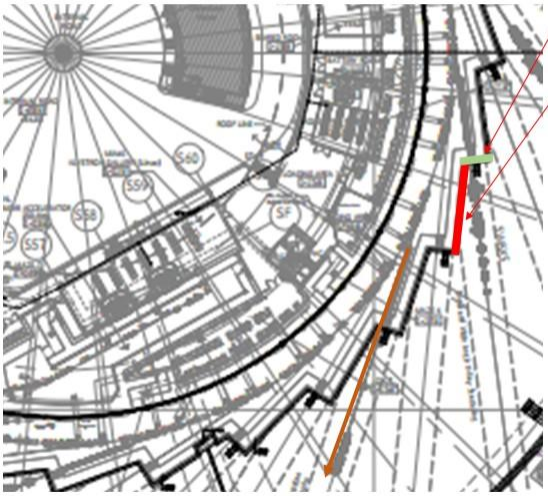

Collimator in TPS Front End
Comment: The TPS's FE collimator was defined by the lines which draw form source to the wall corner (White line)
BM:45cm
ID:65cm
Beam port
Beam port
FE LEAD COLLIMATOR
40cm
20cm
Dimension:
BM=45X40X20 cm3
ID=65X40X20 cm3
Weight=405kg~585kg


FE Collimator/Shutter
SPS-II
• FE Shutter
Thickness : 20cm of W
Position : 19 m from Center of SS
Size : TPS=3.5R/ NSLS-II=3R from / SPS-II:3.5R
$R_M \approx \frac{E_s}{E_c} X_0$
Rm : Moliere Radius
X0 : Radiation Length
Ec= Critical Energy of material
Es = Scaling Energy (21.2 MeV)
Vertical Bremsstrahlung Ray Tracing
Origin
0
Source
3R
3R
Collimator
Stop
Comment :
1) ทุกครั้งที่มี Stopper หรือมีการกระเจิง ของ GB จะต้องมี PE และ Shielding เสมอ เช่น Crystal, Beam Stoper, Fix mask, เนื่องจากจะเกิด Secondary bremsstrahlung (PE ต้องมีทุกครั้ง GB เกิดการกระเจิง แต่หลัง Collimating แล้วแต่เรา)

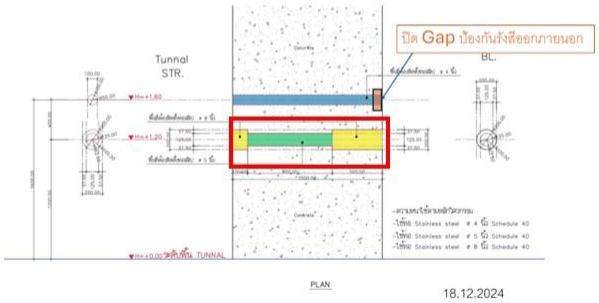

TPS's FE
Collimator/Shutter
Side view
550
120
12.7
41.1
15
Ø80
600
500
200
12.7
70.1
70.1
50
145
345
200
FM1 center
mrad upward)
DCM center
(15 mm offset)
Shielding #0
Bremsstrahlung collimator (Pb)
Secondary
bremsstrahlung
shielding (Pb)
Shielding #1
Secondary bremsstrahlung shielding
for Mask (Pb)
Shielding #3 (W-alloy)
Bremsstrahlung collimator-2
Shielding #2 (W-alloy)
Bremsstrahlung collimator-1
#4 (W-alloy)
ahlung collimator-3


TPS's FE Collimator/Shutter
Side view
500
200
12.7
70.1
70.1
50
145
345
200
DCM center
(15 mm offset)
Shielding #0
Bremsstrahlung collimator (Pb)
dary
strahlung
ng (Pb)
Shielding #1
Secondary bremsstrahlung shielding
for Mask (Pb)
#3 (W-alloy)
ahlung collimator-2
Shielding #2 (W-alloy)
Bremsstrahlung collimator-1

Ratchet wall

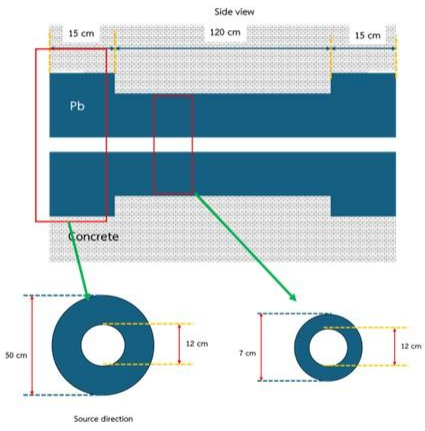


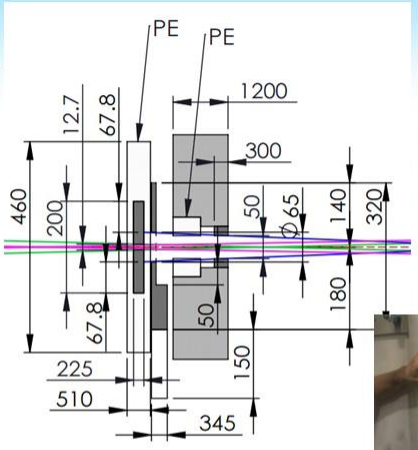
- Ratchet Wall (Green line)
  Thickness = 1.5 m
- Wall (Green line)
  Thickness = 1.2 m



- Vacuum tube = Diameter 114 mm

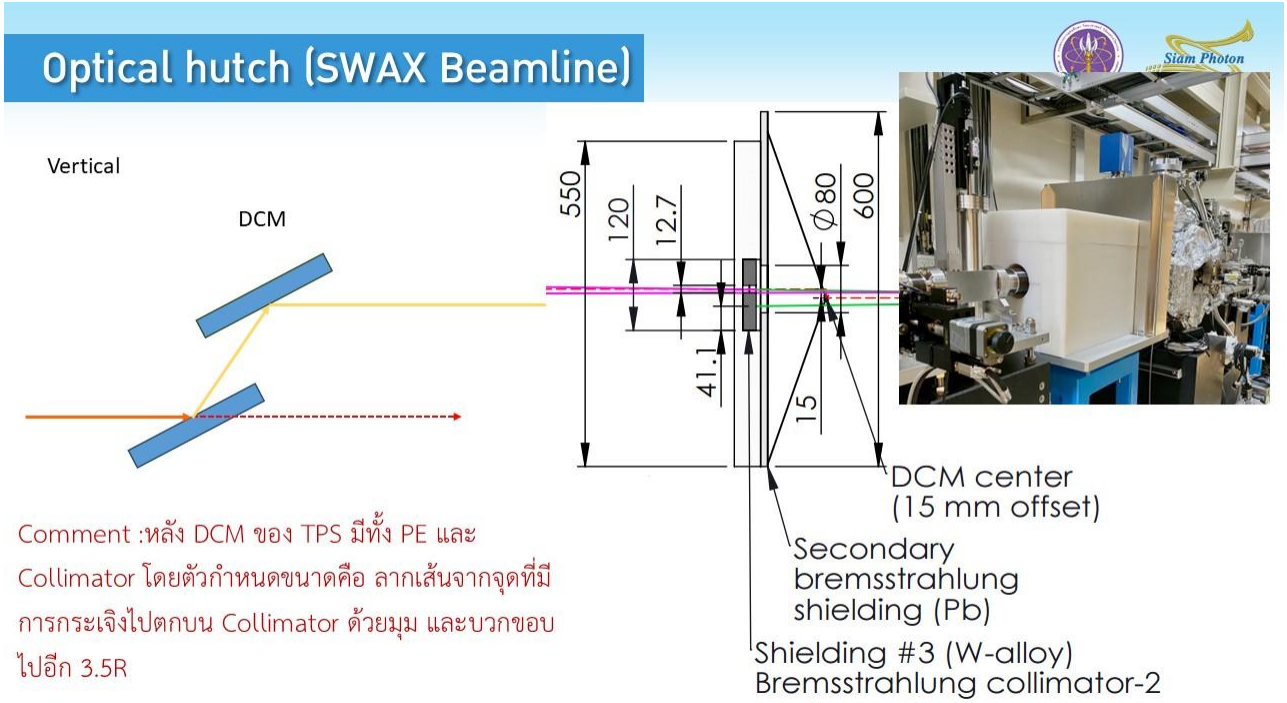
Ratchet wall



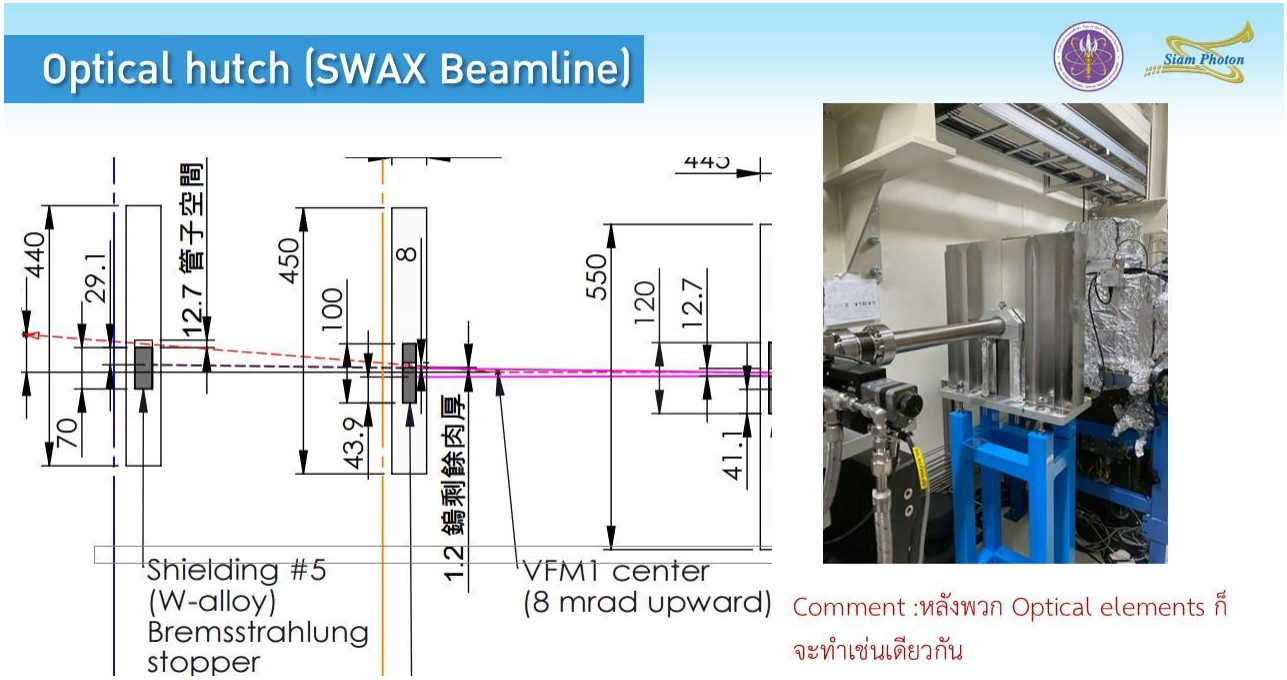


Dr.Pawitra Aimo

Comment : ช่องเปิดของเราใหญ่มาก ประมาณ 2 เท่าของ TPS ซึ่งจะส่งผลให้ใช้ พวก Shielding ใหญ่ตามซึ่งนั้นก็คืองบประมาณที่เพิ่มขึ้น ให้เราปรับขนาดช่องเปิดของกำแพงให้เล็ลง แล้วใน Designของเค้าก็จะมี PE อยู่ด้วย แต่ของเราไม่มี?



Comment :หลัง DCM ของ TPS มีทั้ง PE และ Collimator โดยตัวกำหนดขนาดคือ ลากเส้นจากจุดที่มีการกระเจิงไปตกบน Collimator ด้วยมุม และบวกขอบไปอีก 3.5R



Comment :หลังพวก Optical elements ก็จะทำเช่นเดียวกัน

Question and Discussion

- Could you please double-check this drawing?
- Is it okay to define the source size for SPS-II this way? Okay
- How do we determine the size of the FE collimator (3.5R?) (Same FE shutter?) Define by corner wall
- Could you please show us your design for the FE shutter (with or without a hole)? (No)
- For vertical bremsstrahlung raytracing, which design (I or II) is better? (Considering factors like radiation safety, price, etc.) (Recheck and Revised opening size of wall)
- After the ray tracing process is finished, what is the next step? (Is it a safty committee review? An internal or external committee?) Both 15 people
- How do we design PE shielding? ()
- What material is the hutch made of? (Is it only Pb, or an Fe-Pb sandwich?) (Yes)

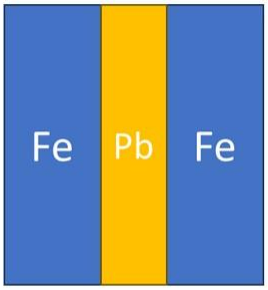
Hutch

ระบบทุกอย่างที่เกียวกับ ความปลอดภัย จะมี Status บอกว่าปิดหรือยัง ถ้าปิดไม่ครบ ไม่สามารถเปิดแสงได้

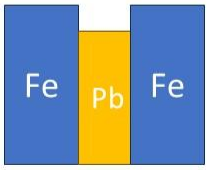
ประตูจะเป็นแบบ Slide เลื่อน เพื่อให้สามารถทำช่องลึกลงไปประมาณ 10 cm เพื่อไม่ให้มีช่อง ให้รังสีทะลุออกมา

การเก็บสายไฟ เค้าก็ไม่มีวิธีการเก็บ ไม่ได้เจาะและเอาออกตรงๆ

Hutch



Hutch เค้าจะออกแบบเป็น Fe-Pb sandwich โดยใช้บริษัทในไตหวัน ซึ่งโจเซฟให้ความเห็นว่า ต้องใช้บริษัทที่มีประสบการณ์ในการทำเนื่องจาก ถ้าทำไม่ได้อาจจะทำให้ ชั้น Pb เกิดการยุบตัวได้และจะทำให้เกิดช่องว่างทำให้รังสีทะลุผ่านออกมาได้ โดยความหนาของ Fe อยู่ที่ 3 cm และ ความหนาของ Pb อยู่ที่ 3 mm



Hutch

แบบเสาของ Hutch เนื่องจากค้าจะเลี่ยงการเจาะรูที่ตะกั่วดังนั้นตอนออกแบบ Hutch จะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย โดยเค้ามีการเจาะยึดกับพื้น หรือใช้การเชื่อมกับเสาหลักที่ยึดกับพื้น Hutch สูง 3 เมตร

Hutch

บีมไลน์นี้ มีส่วนของท่อที่ย่อนอก Hutch เป็นท่อแสงซินโครตรอน หลังผ่าน DCM ก็จะต้องคำนึงถึงเรื่อง Pressure ว่าควรให้อยู่ในระดับ 10-5 torr

รางไฟใน Hutch

List of question

- How to estimate the secondary source shielding
- Could you please check our calculation and design of PE for nurshielding

ภาคผนวก 2 ดำเนินการแก้ไขตามข้อเสนอแนะครั้งที่ 1 พร้อมนำเสนอในงานประชุม IAC 2026 ของสถาบันฯ เพื่อรับข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

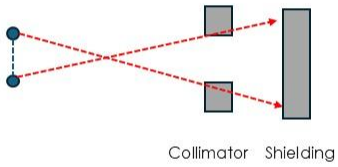
Conceptual design of shielding

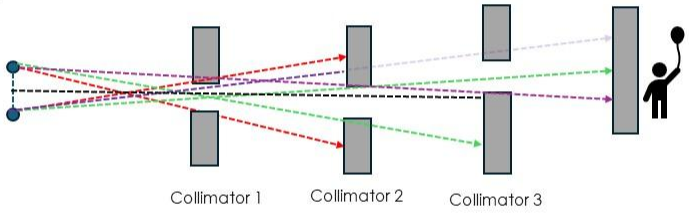
- 6TVL is used to define thickness of shielding while The 3.5 of Moliere radius is used to define width of shielding.
- W 20 cm thickness is utilized as a in-vacuum collimator and stopper while Pb 30cm is performed as a bremsstrahlung shielding without vacuum.
- Whenever main bremsstrahlung strikes with stopper, collimator, or beamline components(e.g. DCM, FM, WB slit) will generate secondary bremsstrahlung and gramma neutron scattering.
- The secondary bremsstrahlung will be suppressed by 12 cm thick Pb*.
- For neutron scattering, it also will be absorbed by Polyethylene (PE) as well.
- Polyethylene(PE) is not allocated upstream of rachet wall (Only downstream)*

*To be discussed

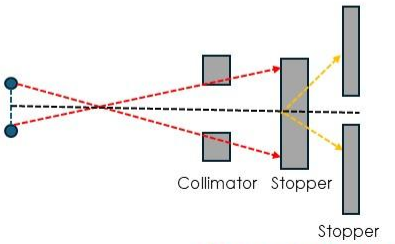
The concept of ray tracing

- Drawing the cross line from Bremsstrahlung source to inside edge of the components
- After bremsstrahlung passes through the opening of beamline components (e.g., collimator, wall, hutch), It must be stop at the shielding.





- Some case the collimator can also be shielding.
- All of bremsstrahlung ray must be incident on shielding.
- The 2nd bremsstrahlung source will be drawn after main bremsstrahlung strike with stoper (or filter, crystals)*.
- No bremsstrahlung rays pass through the experimental hutch.



*To be discussed

Source Defining

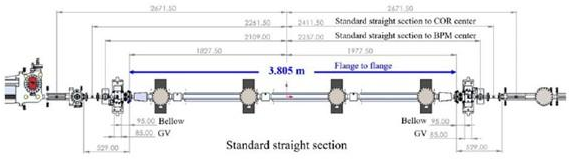


Figure 2-250: Available length of standard straight section.

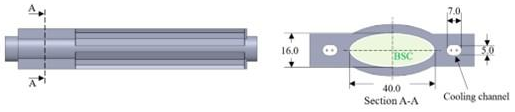
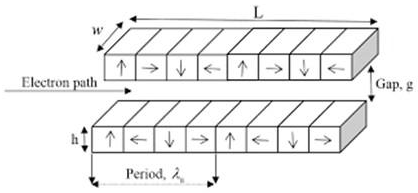
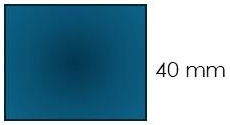


Figure 2-246: Standard cross-section of straight beam duct in bending sections.



"For SPS-II, we defined the bremsstrahlung source size as 40 mm vertically, determined by the maximum gap of the undulator, and 40 mm horizontally, determined by the size of the straight section chamber."



Bremsstrahlung source size: 40 x 40 mm²

Source position : At downstream of straight section

Thickness of Pb and W

From Beer lambert eq ;

$I = I_0 e^{-\mu x}$

I = Transmitted radiation
I_0= Incident radiation
μ = Linear attenuation coefficient at lowest mass attenuation coefficient value
x = Thickness of matter (cm)

$$x_{TVL} = \frac{\ln(10)}{\mu}$$

$$x_{TVL} \text{ of Pb} = \frac{\ln(10)}{\mu} = \frac{2.3026}{\mu_m \times \rho} = \frac{2.3026}{4.2E{-}2 \; x \; 11.34} = 4.8346 \; cm$$

$$x_{TVL} \text{ of W} = \frac{\ln(10)}{\mu} = \frac{2.3026}{\mu_m \times \rho} = \frac{2.3026}{4.04E{-}2 \; x \; 19.3} = 2.9531 \; cm$$

Normally, the thickness of radiation protection will be estimate from 6 of TVL thickness (From IAEA);

1 x_{TVL} reduce to 10% (10^{-1})
2 x_{TVL} reduce to 1% (10^{-2})
3 x_{TVL} reduce to 0.1% (10^{-3})
4 x_{TVL} reduce to 0.01% (10^{-4})
5 x_{TVL} reduce to 0.001% (10^{-5})
6 x_{TVL} reduce to 0.0001% (10^{-6})

Lead (Pb) will use 4.8346*6 = 28.92 ≈ 30 cm

Tungsten (W) will use 2.9531*6 = 17.71 ≈ 20 cm

Dose rate of brems. calculation

$$D = 2.5 \times 10^{-27} \left(\frac{E_0}{m_0 c^2}\right)^{2.67} \frac{L}{d(L+d)} I \frac{P}{P_0}$$

D = Absorbed Dose rate (Sv/hr)
E_0= the primary beam energy (MeV)
m_0c^2= the rest-mass energy of the electron (0.511 MeV)
I = Beam current (e/s)
L = Straight section length (m) (Bending to bending)
d = the distance from the end of straight section to the point of interest (m)
P = Operated pressure
P_0 = 1 x 10^{-9} torr

L = Straight section length (m) (Bending to bending)

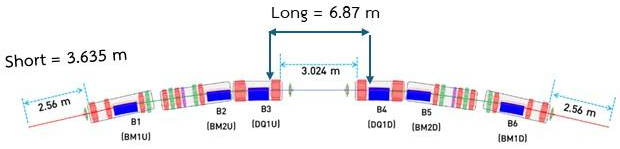
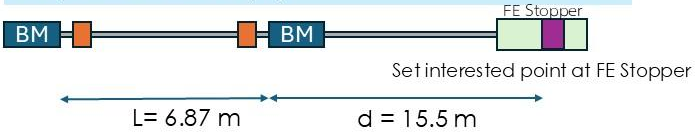


Figure 2-243: Schematic diagram of DTBA unit cell.

d = the distance from the end of straight section to the point of interest (m)



I = Beam current (e/s)

Electron current of SPS-II is 400 mA
1 mA = 6.2415 x 10^{15} e/s
400 mA = 500 x 6.2415 x 10^{15} = 2.5 x 10^{18} e/s

Dose rate at Front-end stopper is 1.42 Sv/hr

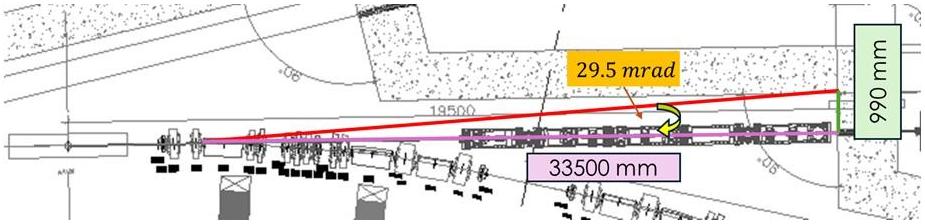
Brem. dose rate after passed shielding

	Short Beamline	Long Beam line	Bending Magnet
Bremsstrahlung Dose Rate at front-end stopper (Sv/hr)	To be update	**1.42**	To be update
Bremsstrahlung Dose Rate behind 30 cm Pb stoper (μSv/hr)	To be update	**0.89**	To be update
Bremsstrahlung Dose Rate behind 20 cm W front-end stopper (μSv/hr)	To be update	**0.24**	To be update

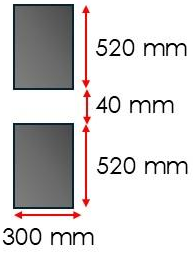
The maximum dose rate in experimental hall is controlled at 0.5 μSv/hr

FE Collimator design

- **Top view**



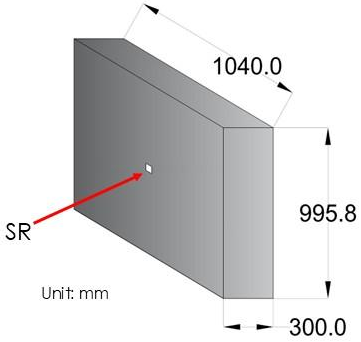
FE collimator



Openning Angle (mrad) $= \frac{1000\ mm}{16.263\ m} \approx 60.92\ mrad$

Width of FE collimator $60.92\ mrad * 8\ m * 2 \approx 960\ mm$*

FE collimator opening = 40 mm

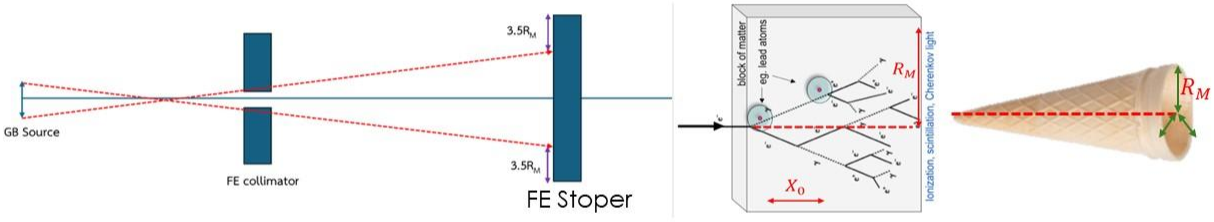


*To be discussed

Stopper design

We will use 3.5 Rm to defined size of stoper (Vertical and Horizontal)

R_M =Lateral spread(Cylindrical shape)of electromagnetic shower



$$R_M = X_0 \frac{E_s}{E_c}$$

$$R_M = 0.0265 \cdot X_0(Z + 1.24)$$

R_M= Moliere radius
X_0= Radiation Length (cm) (W=0.35, Pb=0.56)
E_c= Critical Energy
E_s= Scale Energy (21.2052 MeV)
Z = Atomic number (W = 74, Pb = 82)

$3.5\ R_M\ of\ W = 2.45\ cm$

$3.5\ R_M\ of\ Pb = 3.71\ cm$

1*R_m can contain electromagnetic shower 90%
2* R_m can contain electromagnetic shower 95%
3.5*R_m can contain electromagnetic shower 99%
4 * R_m can contain electromagnetic shower 99.5%

Neutron scattering shielding design

TVL of PE

$$x_{TVL} = \frac{\ln(10)}{\Sigma_R}$$

X_{TVL} of PE at average energy 2 MeV is around 13 cm *.[Ref]

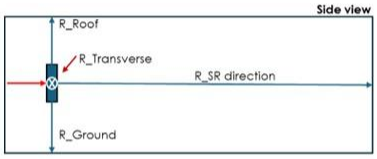
Σ_R = Macroscopic Removal Cross-Section" (PE=0.10-0.12 cm-1)

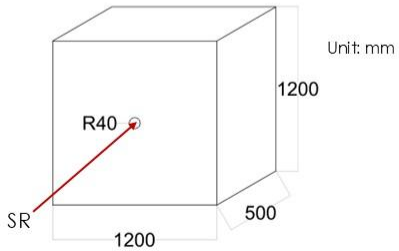
$$D = \frac{D_0 10^{-\left(\frac{X}{x_{TVL}}\right)}}{r^2}$$

D= Final dose
D_0 = Initial dose
X = PE Thickness
x_{TVL} = TVL thickness of PE
r= Distance from source

$$x = -\left[x_{TVL} \log_{10}\left[\frac{Dr^2}{D_0}\right]\right]$$

- Initial dose rate is defined by the maximum bremsstrahlung dose rate at scattering position(filter position), which is 0.84 Sv/hr, while the maximum dose rate within the optical hutch is used to determine the final dose rate(12 μSv/hr).
- Distance from source, r is determined the distance from source to hutch wall





*To be discussed

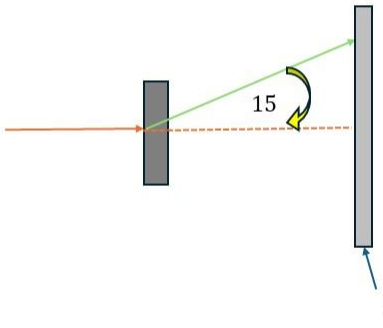
PE Thickness calculation

Parameters	SR_Direction	Transverse Direction	Ground Direction	Roof Direcction
Initial dose, D0 (Sv/hr)*	8.43E-01	8.43E-01	8.43E-01	8.43E-01
Final dose, D (Sv/hr)	1.20E-05	1.20E-05	1.20E-05	1.20E-05
Distance from source (m)	5	2	1.6	2.4
Thickness of TVL, X_TVL (cm) *	13	13	13	13
Thickness of PE(cm)	44.83	55.17	57.69	53.11

[Ref] Ipe, N. E., & Fassò, A. (1994).

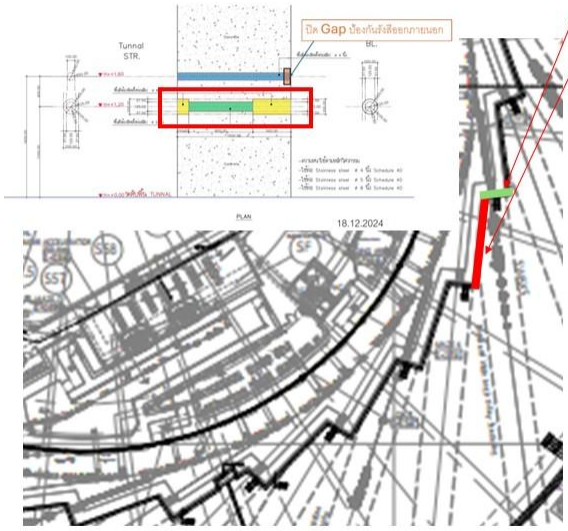
2nd bremsstrahlung shielding design

Green line is secondary bremsstrahlung

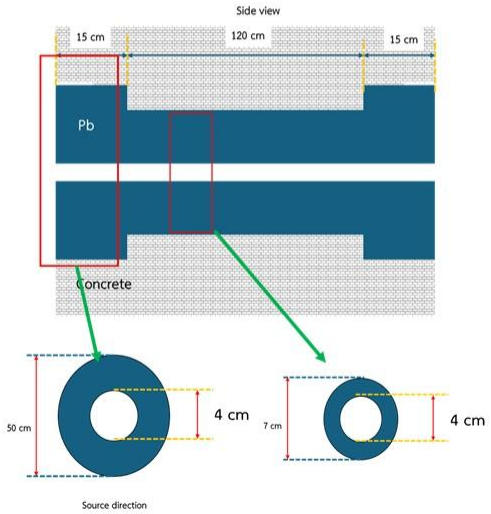


1) How to define the angle of scattering bremsstrahlung (θ) (Maximize the scattering dose?) 15 degree from scattering point
2) How to calculate secondary bremsstrahlung shielding (general value = 10 cm)
3) We will use 12 cm of 2nd bremsstrahlung shielding design same as TPS *To be discussed

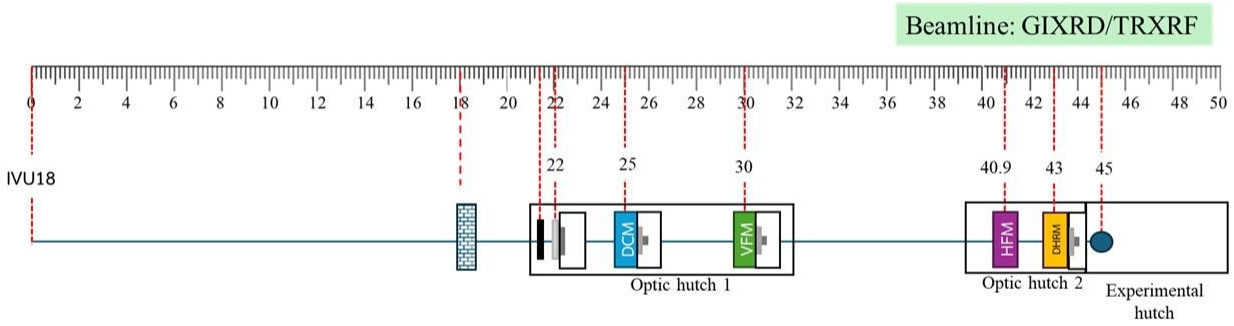
Rachet wall



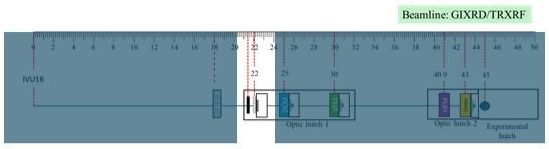
- Rachet Wall (Green line) Thickness = 1.5 m
- Wall (red line) Thickness = 1.2 m
- The height of the roof from the floor is 400 cm.
- Vacuum tube = Diameter 40 mm ± 1 mm

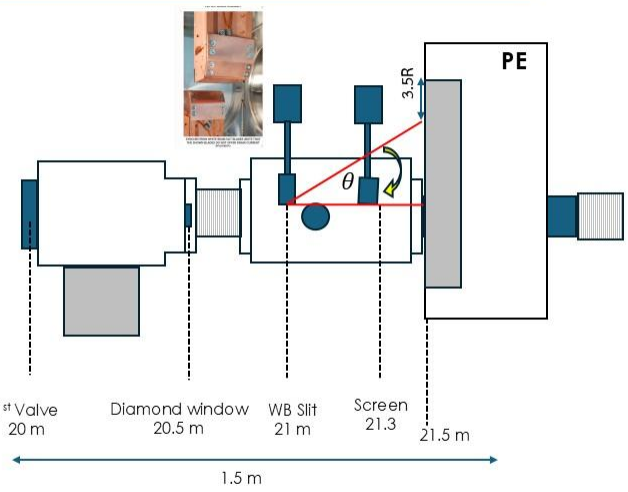


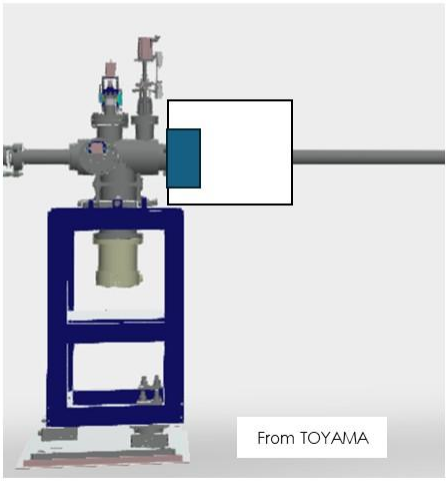
Brems. Ray tracing

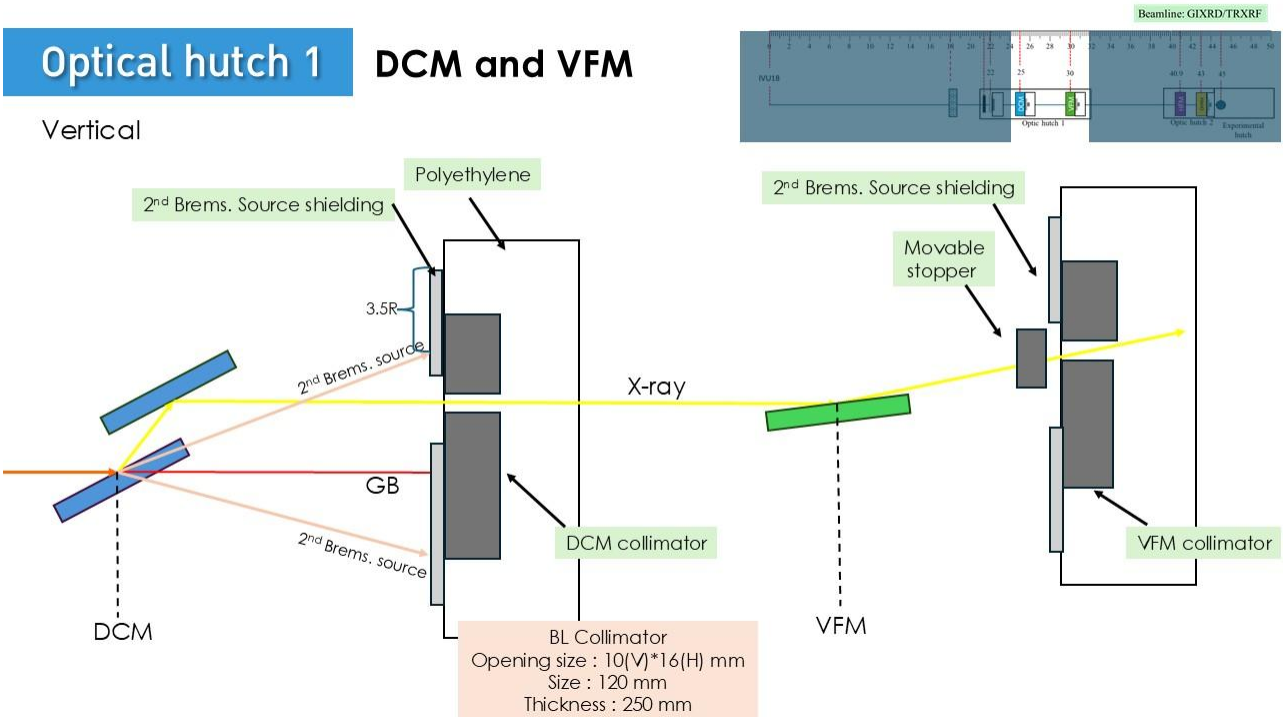


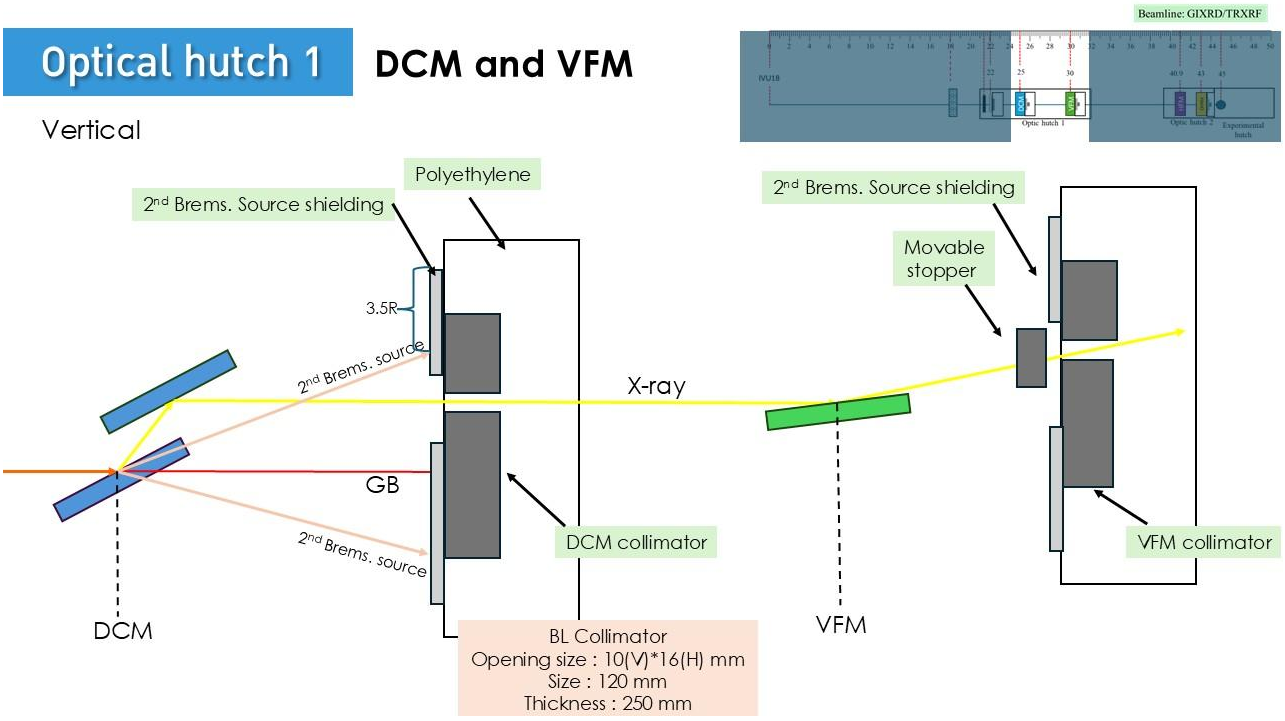
Diamond window and WB Slit

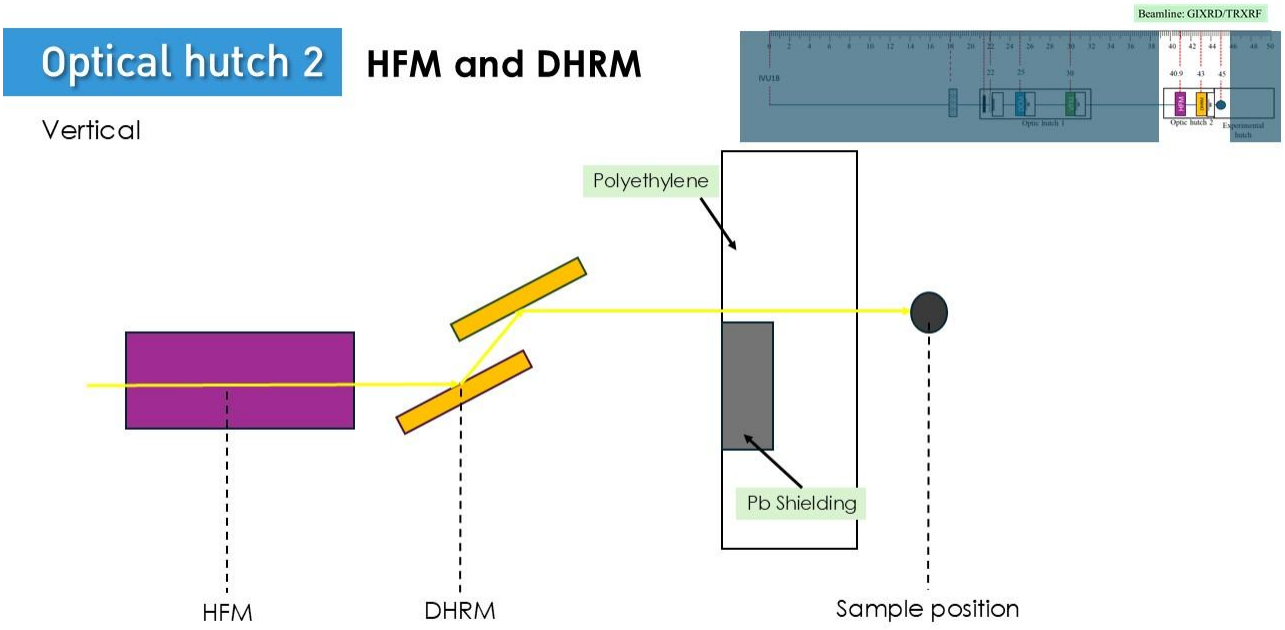




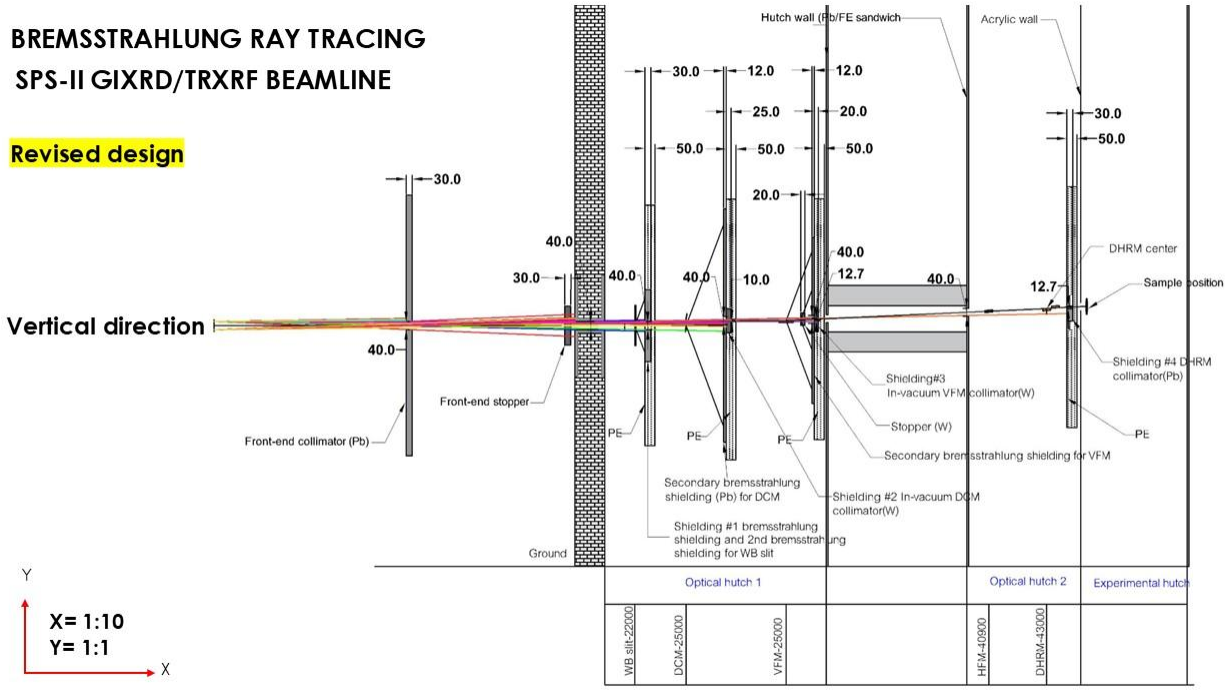


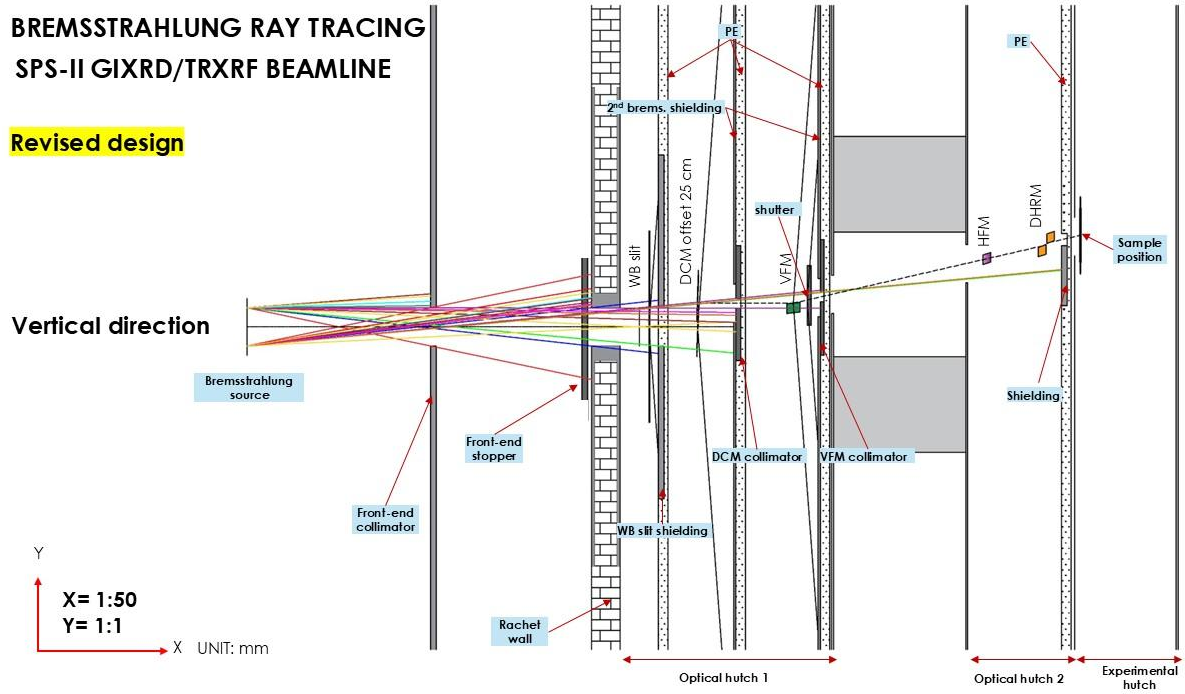

Optical hutch 1
DCM and VFM
Vertical
Beamline: GIXRD/TRXRF
Polyethylene
2nd Brems. Source shielding
3.5R
2nd Brems. source
X-ray
GB
2nd Brems. source
DCM collimator
DCM
BL Collimator
Opening size : 10(V)*16(H) mm
Size : 120 mm
Thickness : 250 mm
2nd Brems. Source shielding
Movable stopper
VFM collimator
VFM


Optical hutch 1
DCM and VFM
Vertical
Beamline: GIXRD/TRXRF
Polyethylene
2nd Brems. Source shielding
3.5R
2nd Brems. source
X-ray
GB
2nd Brems. source
DCM collimator
DCM
BL Collimator
Opening size : 10(V)*16(H) mm
Size : 120 mm
Thickness : 250 mm
2nd Brems. Source shielding
Movable stopper
VFM collimator
VFM



Components	Shielding materials	Thickness(mm)	Opening (mm)	position
Upstream				
Front-end collimator	Pb	300	40	
Front-end In-vacuum FE stopper	W	200	40	
Ratchet wall	Concrete	1500	40	
WB slit collimator	Pb	300	40	
PE1	PE	500	40	
In-vacuum DCM collimator	W	200	10	
2nd brems. source for DCM	Pb	120	40	
PE2	PE	500	40	
In-vacuum VFM collimator	W	300	10	
2nd brems. source for VFM	Pb	120	40	
PE3	PE	554	40	
Optical hutch 1	Fe/Pb	XX	40	
Optical hutch 2	Fe/Pb	XX	40	
HFM	N/A	N/A	N/A	
DHRM collimator	Pb	300	12.7	
PE4	PE	500	12.7	


BREMSSTRAHLUNG RAY TRACING
SPS-II GIXRD/TRXRF BEAMLINE
Revised design
Vertical direction
Hutch wall (Pb/FE sandwich
Acrylic wall
DHRM center
Sample position
Front-end stopper
Front-end collimator (Pb)
Shielding#3 In-vacuum VFM collimator(W)
Shielding #4 DHRM collimator(Pb)
Stopper (W)
Secondary bremsstrahlung shielding for VFM
Secondary bremsstrahlung shielding (Pb) for DCM
Shielding #2 In-vacuum DCM collimator(W)
Shielding #1 bremsstrahlung shielding and 2nd bremsstrahlung shielding for WB slit
Ground
PE
Optical hutch 1
Optical hutch 2
Experimental hutch
WB slit-22000
DCM-25000
VFM-25000
HFM-40900
DHRM-43000
X= 1:10
Y= 1:1


BREMSSTRAHLUNG RAY TRACING
SPS-II GIXRD/TRXRF BEAMLINE
Revised design
Vertical direction
PE
2nd brems. shielding
DCM offset 25 cm
WB slit
shutter
VFM
HFM
DHRM
Sample position
Bremsstrahlung source
Front-end stopper
Front-end collimator
DCM collimator
VFM collimator
Shielding
WB slit shielding
Rachet wall
Optical hutch 1
Optical hutch 2
Experimental hutch
X= 1:50
Y= 1:1
UNIT: mm

List of questions

- Could you comment about conceptual design of beamline shielding
- How to calculate the secondary source shielding ?
- How to define scattering angle of bremsstrahlung while it strikes shielding. 15 degrees
- Could you please check our calculation and design of PE for neutron shielding
- What TVL value of PE did you use to calculate the thickness? (Xtvl= 10 cm)
- How to design a shielding of vacuum tube that is installed between separated hutch?
- Can you recommend any companies that build optical hutches?
- Should we have stopper in optical hutch 2 (upstream sample position)?
- Is it okay to use an acrylic wall for the partition between Optical Hutch 2 and the Experimental Hutch?