บทที่ 2

ทฤษฎี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทางทฤษฎี คำว่า ราดิโอกราฟี จะประกอบไปด้วยสิ่ง 3 อย่างคือ

1. แหล่งกำเนิดรังสี
2. ชิ้นงานที่จะตรวจสอบ
3. สิ่งสำหรับรับรังสีเพื่ออ่านผลซึ่งโดยปกติมักใช้ฟิล์ม

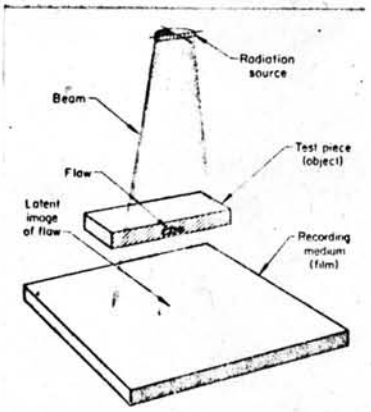


Fig. 1. Diagram of the basic elements of a radiographic system, showing method of detecting and recording an internal flaw in a plate of uniform thickness

รูปที่ 1[1] ลักษณะทั่วไปของวิธีการตรวจสอบแบบราดิโอกราฟี

จากรูปที่ 1 จะแสดงถึงรูปลักษณะทั่ว ๆ ไปของระบบราดิโอกราฟี ประกอบไปด้วยชิ้นงานที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีสิ่งบกพร่องอยู่ภายใน ซึ่งดูดซึมรังสีแตกต่างไปจากชิ้นงานที่มีอยู่ รังสีจากแหล่งกำเนิดจะถูกดูดซึมจากชิ้นงานในขณะที่รังสีผ่านไป สิ่งบกพร่องที่เกิดขึ้นและชิ้นงานจะดูดซึมรังสีแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณรังสีที่กระทบลงบนฟิล์มย่อมแตกต่างกันออกไปด้วย เมื่อเราล้างฟิล์มออกมาเรายอมเห็น "เงา" ของภาพที่มีความเข้มแตกต่างไปจากเงาทั่ว ๆ ไปที่อยู่บนฟิล์ม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิ่งประกอบสำคัญทางเรขาคณิตของราดิโอกราฟี

เนื่องจากวิธีการราดิโอกราฟีจะใช้มิติแค่ 2 มิติเท่านั้น ดังนั้นภาพที่เกิดขึ้นของชิ้นงานอาจจะมีการผิดแปลกไปจากเดิมทั้งขนาดและรูปร่าง การที่ภาพจะบิดเบือนไปมากแค่ไหนขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งกำเนิดรังสี (ขนาดของจุด focal สำหรับรังสีเอ็กซ์)

ระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสีไปยังชิ้นงานและระยะทางจากแหล่งกำเนิดรังสีไปยังฟิล์ม รวมทั้งการจัดตำแหน่งและทิศทางของชิ้นงานเมื่อเทียบกับแหล่งรังสีและฟิล์ม

แหล่งกำเนิดรังสี

ในการตรวจสอบแบบ non-destructive รังสีที่ใช้มี 2 แบบ คือ

1. Electromagnetic Radiation
2. Particulate Radiation

จากรูปที่ 2 จะแสดงถึงบางส่วนของสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่รังสีที่สามารถทะลุทะลวงโลหะหรือวัสดุต่าง ๆ อย่างได้ผลคือ รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เนื่องจากมีขนาดของคลื่นสั้น, สั้นกว่ารังสีแบบอื่น ๆ

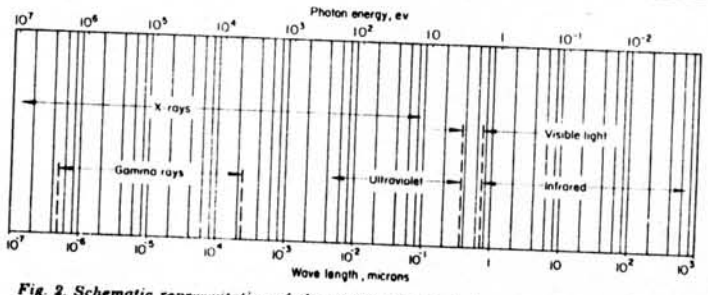


Fig. 2. Schematic representation of the portion of the electromagnetic spectrum that includes x-rays, gamma rays, ultraviolet and visible light, and infrared radiation, showing their relationship with wave length and photon energy

รูปที่ 2[1] สเปคตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วน particulate radiation หมายถึง อนุภาคต่าง ๆ ที่ทำปฏิกริยากับธาตุแล้วปล่อยพลังงานออกมา อนุภาคที่ใช้กันมากที่สุดคือ อนุภาคแอลฟา อนุภาคเบตา และนิวตรอน โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว อนุภาคเบตา และนิวตรอนเท่านั้นที่จะใช้ในราดิโอกราฟี แต่นิวตรอนมักจะใช้กว้างขวางกว่า

รังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ได้แก่ continuous X-ray และ characteristic X-ray โดยรังสีเอ็กซ์จะเกิดมาจากการที่อิเลคตรอนวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนเป้า เมื่ออิเลคตรอนถูกลดความเร็วอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ มีขนาดคลื่นหลายชนิดขึ้น เรียกว่า continuous X-ray หรือ bremsstrahlung ในบางครั้งอิเลคตรอนที่วิ่งเข้าไปชนอะตอมของเป้า

จะทำให้อะตอมนั้นอยู่ในภาวะกระตุ้น ซึ่งจะต้องมีการปรับตัวเอง เพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลย์อีกครั้ง โดยส่งรังสีเอ็กซ์ออกมา มีขนาดของคลื่นจำเพาะค่าหนึ่ง ๆ เรียกว่า characteristic X-rays ปกติ characteristic X-rays จะมีความเข้มสูงกว่า continuous X-ray ที่ขนาดของคลื่นเดียวกัน

<u>หลอดรังสีเอ็กซ์</u>

เป็นอุปกรณ์อิเลคโทรนิคที่เปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นรังสีเอ็กซ์ โดยทั่ว ๆ ไปหลอดรังสีเอ็กซ์ จะประกอบไปด้วยขั้วลบ ซึ่งมีไส้หลอดและขั้วบวกซึ่งมีเป้าอยู่ ทั้งหมดนี้จะอยู่ภายในหลอดสูญญากาศ ดังรูปที่ 3

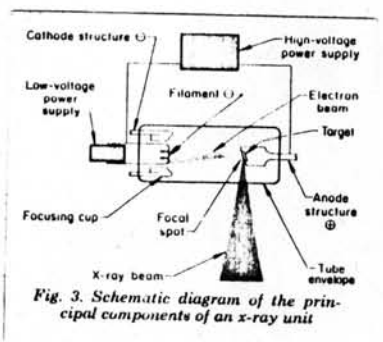


Fig. 3. Schematic diagram of the principal components of an x-ray unit

รูปที่ 3[1] ลักษณะของหลอดรังสีเอ็กซ์

ขั้วลบ (Cathode Structure) จะประกอบไปด้วยไส้หลอด ล้อมรอบด้วย focusing cup ซึ่งทำด้วยเหล็กบริสุทธิ์ หรือนิเกิลบริสุทธิ์ ทำหน้าที่เหมือนกับ electrostatic lens เพื่อบีบให้อิเลคตรอนพุ่งเป็นลำไปยังขั้วบวก (anode), ไส้หลอดโดยปกติจะทำด้วยทังสเตน ถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่มีโวลท์ต่ำ

ขั้วบวกประกอบไปด้วยเป้าฝังอยู่ภายในโลหะทองแดง ซึ่งจะเป็นตัวรับความร้อน ซึ่งเกิดจากอิเลคตรอนมากระทบเป้า โดยปกติในหลอดรังสีเอ็กซ์มักจะใช้โลหะทังสเตนเป็นเป้า เนื่องจาก

1. จะให้รังสีเอ็กซ์ออกมาประสิทธิภาพดีเพราะทังสเตนมีน้ำหนักอะตอมสูง
2. สามารถทนความร้อนสูงได้ดีเพราะมีจุดหลอมตัวสูง

ทองและแพลทินัมก็ยังสามารถใช้เป็นเป้าได้ด้วย แต่มีข้อเสียคือ ต้องการระบบระบายความร้อนที่ดีกว่าทังสเตน หลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมเป็นส่วนมากจะใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน ตัวหลอดมักทำด้วยแก้ว, เซรามิค หรือโลหะ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติคงรูปอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ เนื่องจากมีแรงกดดันจากบรรยากาศ กับหลอดสูญญากาศ และความร้อนที่เกิดขึ้นจากขั้วบวกของหลอด รูปร่างของตัวหลอดจะเปลี่ยนไปตามแบบของขั้วบวกและขั้วลบที่จัดวางไว้ และจากขนาดของโวลท์ที่จะใช้กับหลอด

หลอดรังสีเอ็กซ์ จะถูกหุ้มด้วยโลหะอีกชั้นระหว่างตัวหลอดกับโลหะ จะมีน้ำมันหรือแก๊สเป็นตัวกลางอยู่ด้วย จุดประสงค์เพื่อป้องกันการเกิด high voltage electrical shock หลอดรังสีเอ็กซ์ และ high voltage supply ที่ขายอยู่ทั่ว ๆ ไป มักจะประกอบเข้าชุดกันมาแล้ว

การเกิดรังสีเอ็กซ์

ทางด้านขั้วลบซึ่งมีโวลท์ต่ำ Rheostat จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จะทำให้ไส้หลอดร้อนมากน้อยแค่ไหน เมื่อไส้หลอดร้อนจะเกิดกลุ่มของอิเลคตรอนขึ้นบริเวณรอบ ๆ ไส้หลอด กระแสไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ จะทำหน้าที่เร่งความร้อนของอิเลคตรอนให้สูงขึ้น และอิเลคตรอนที่มีความเร็วสูงนี้จะวิ่งไปชนเป้าที่ขั้วบวก, focusing cup จะบีบอิเลคตรอนให้เป็นลำเล็ก ๆ เพื่อให้กระทบเป้าได้ จุดที่เล็กที่สุดเรียกว่า focal spot ทันทีที่อิเลคตรอนถึง focal spot อิเลคตรอนจะถูกหน่วงให้ช้าลงและถูกดูดกลืนไป จากนั้น bremsstrahlung และ characteristic X-rays จะถูกปล่อยออกมา

พลังงานส่วนใหญ่ของอิเลคตรอนที่ไปกระทบเป้าจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นในการออกแบบและเลือกชนิดของโลหะที่จะใช้เป็นเป้าและขั้วบวกนั้น จำเป็นต้องเลือกโลหะที่ทนความร้อนได้ดี การที่ขั้วบวกร้อนมากเป็นผลทำให้ต้องกำหนดขนาดของ focal spot ด้วย เพราะการที่ focal spot เล็กลง ยังทำให้ภาพที่ออกมาคมชัดยิ่งขึ้น ในหลอดรังสีเอ็กซ์เป็นส่วนมาก focal spot จริง ๆ จะมีลักษณะยาว, แคบ แต่สามารถเล็กลงได้ เมื่อลำของรังสีเอ็กซ์ฉายลงมาข้างล่าง โดยการเอียงหน้าของขั้วบวกลงมาประมาณ 20° เมื่อเทียบกับลำของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4

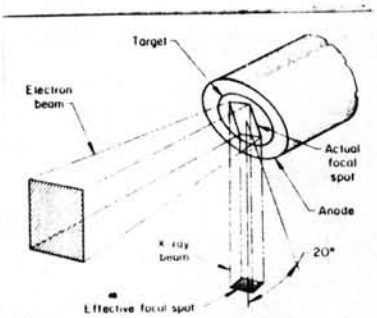


Fig. 4. Schematic diagram of the actual and effective focal spots of an anode that is inclined at 20° to the centerline of the x-ray beam

รูปที่ 4[1] ลักษณะของ focal spot ในหลอดรังสีเอ็กซ์

ทางด้านกระแสไฟฟ้า สิ่งสำคัญที่จะทำให้หลอดรังสีเอ็กซ์ดี หรือไม่ขึ้นอยู่กับ

1. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปยังไส้หลอดจะทำให้ไส้หลอดร้อนและยังทำให้อิเลคตรอนเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ ไส้หลอด

2. โวลท์เตจของหลอดหรือโวลท์ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ จะทำให้อิเลคตรอนมีพลังงานมากน้อยเท่าไร ซึ่งเป็นผลเกี่ยวเนื่องกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ จะสามารถทะลุทะลวงได้ดีแค่ไหนด้วย

3. กระแสไฟฟ้าของหลอดซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของไส้หลอด โดยปกติจะใช้เป็นมิลลิแอมแปร์

ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมา โดยปกติจะวัดเป็นหน่วยเรินเก้นท์

<u>สเปคตรัมของรังสีเอ็กซ์</u>

รังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากหลอดจะไม่ได้มีขนาดคลื่นเดียว แต่มีหลายขนาดคลื่นคล้ายกับแสง ขนาดของคลื่นที่มีค่าต่ำสุดจะเป็นส่วนผกผันกับโวลท์เตจของหลอด โดย

$$\lambda_{min} = 1239.5/V \qquad (1)$$

เมื่อ λ_{min} = ขนาดของคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าต่ำสุด หน่วย nanometers

V = โวลท์เตจของหลอดรังสีเอ็กซ์ หน่วย kilovolt

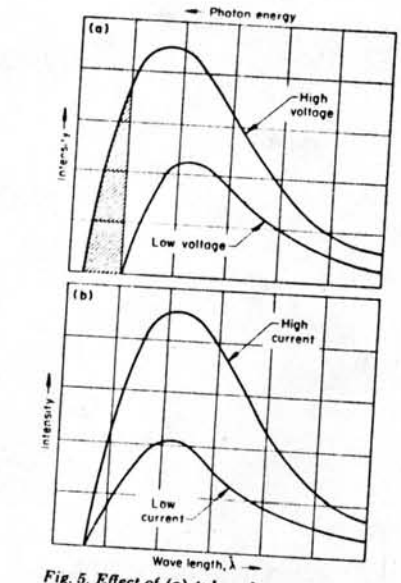


Fig. 5. Effect of (a) tube voltage and (b) tube current on the variation of intensity with wave length for the bremsstrahlung spectrum of an x-ray tube. See text for discussion.

รูปที่ 5[1] ผลของโวล์ทเตจและกระแสที่มีผลต่อความเข้มและความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 5 จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มและขนาดคลื่นของรังสี เมื่อเปลี่ยนแปลงโวลท์เตจ และกระแสของหลอด จากรูป 5 (a) จะเห็นว่าเมื่อโวลท์เตจของหลอดเพิ่มมากขึ้น ความเข้มของรังสีจะเพิ่มขึ้นและยังทำให้ขนาดของคลื่นสั้นกว่าเดิมอีกด้วย (พีคที่ทแลเงา) แต่จากรูป 5 (b) เมื่อกระแสของหลอดเพิ่มขึ้นความเข้มของรังสีจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้ทำให้ขนาดของคลื่นลดลงแต่อย่างใด

ขนาดของคลื่นของรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมาเป็นสิ่งสำคัญมาก ยิ่งรังสีมีขนาดของคลื่นสั้นมากเท่าใด ก็ยังมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงขึ้นเท่านั้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 6 จะแสดงถึงความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสี (หนวยเป็นนิ้วของเหล็ก) เมื่อโวลท์เตจของหลอดเพิ่มขึ้น เช่น โวลท์เตจ 200 กิโลโวลท์ รังสีเอ็กซ์ สามารถทะลุเหล็กได้หนา 1 นิ้ว เมื่อเพิ่มเป็น 2000 กิโลโวลท์ จะสามารถทะลุได้ 4 นิ้ว

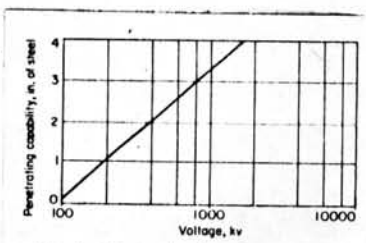


Fig. 6. Effect of tube voltage on the penetrating capability of the resulting x-ray beam

รูปที่ 6[1] โวลท์เตจของหลอดรังสีเอ็กซ์ที่มีผลต่อการทะลุทะลวงรังสี

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว พลังงานของอิเลคตรอนส่วนมากจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนมากกว่าจะเปลี่ยนไปเป็นรังสีเอ็กซ์ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานเป็นรังสี จะแสดงในรูปเปอร์เซนต์ของพลังงานของอิเลคตรอนที่จะเปลี่ยนเป็นรังสี เมื่อพลังงานของอิเลคตรอนหรือโวลท์เตจของหลอดเปลี่ยนไปจากรูปที่ 7 เมื่อพลังงานของอิเลคตรอน ค่าต่ำ ๆ (ค่าโวลท์เตจของหลอดประมาณ 100 – 200 กิโลโวลท์) มี 1 % เท่านั้นที่เป็นรังสี 99 % ที่เหลือจะเป็นความร้อนสูญเสียไป อย่างไรก็ตาม เมื่อพลังงานอิเลคตรอนสูงขึ้น (มากกวา 1 MeV.) ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นรังสีจะดีขึ้น โดยที่ 1 MeV. 7 % ขณะที่ 5 MeV. 35 % จะเปลี่ยนไปเป็นรังสี ดังนั้นเมื่อต้องการรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่จะกำเนิดรังสีสูงตามไปด้วย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูง

เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์จะได้รับพลังงานมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กับหลอดรังสีเอ็กซ์อาจจะเป็นแบบแกนเหล็ก หรือแบบ resonant ก็ได้ แต่พลังงานไฟฟ้าที่ออกมาถูกกำหนดไว้เพียง 500 KeV. หรือ 4000 KeV. ตามลำดับ ถ้าต้องใช้พลังงานมากกว่านี้ ขนาดและน้ำหนักของหม้อแปลงแบบแกนเหล็กจะไม่เหมาะสม และหม้อแปลงแบบ resonant ก็จะมีประสิทธิภาพลดลงมาก ที่พลังงานมากกว่า 4 MeV. นี้ แม้แต่เครื่องเร่งอนุภาคก็ยังทำงานไม่ดีเพราะไม่สามารถควบคุมส่งอิเลคตรอนให้เล็กได้เป็นผลให้ focal spot มีขนาดใหญ่เกินไป

อิเลคตรอนที่มีพลังงานสูง ๆ สามารถสร้างได้จากเครื่อง Vande Graaff, linear accelerator (LINAC) หรือ betatron source เครื่อง Vande Graaff สามารถสร้างโวลท์เตจตั้งแต่ 500 กิโลโวลท์ ถึง 6 ล้านโวลท์ นับเป็นเครื่องมือที่เร่งความเร็วอิเลคตรอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยใช้ความต่างศักย์, linear accelerator สามารถเร่งความเร็วอิเลคตรอนได้โดยใช้พลังงานคลื่น สามารถสร้างพลังงานของรังสีเอ็กซ์ได้ถึง 25 MeV. ส่วน betatron เร่งความเร็วอิเลคตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำสร้างพลังงานของรังสีเอ็กซ์ 20 – 30 MeV.

ถ้าพูดในเทอมของความสามารถของการทะลุทะลวงของรังสี หน่วยที่ใช้จะใช้ในรูปของความหนาของเหล็กที่ทะลุทะลวงได้ ตารางที่แสดงไว้นี้จะเปรียบเทียบระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ พลังงานสูงกับหลอดรังสีเอ็กซ์ที่สร้างขึ้น

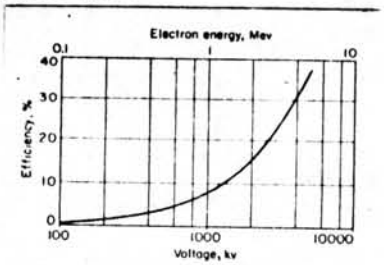


Fig. 7. Effect of tube voltage or electron energy on the efficiency of energy conversion in the target of an x-ray source

Maximum accelerating potential	Penetration range, in. of steel
X-Ray Tubes	
150 kv	Up to ⅝
250 kv	Up to 1½
400 kv	Up to 2½
1000 kv (1 Mv)	¼ to 3½
High-Energy Sources	
2.0 Mev	¼ to 10
4.5 Mev	1 to 12
7.5 Mev	2¼ to 18
20.0 Mev	3 to 24

รูปที่ 7[1] โวลท์เตจที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเป้าที่จะให้รังสีออกมา

ค่าที่มากที่สุดของเหล็กที่แสดงไว้ในตารางนี้ เป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบความหนาของเหล็กขนาดนี้เป็นประจำ โดยถ่ายรังสีเป็นเวลานาน และใช้ฟิล์มความเร็วขนาดกลาง ในกรณีที่ความหนาของเหล็กมากกว่านี้ ก็ยังสามารถตรวจได้โดยใช้ฟิล์มความเร็วสูง และใช้เวลาในการถ่ายรังสีนานขึ้นอีก แต่ถ้าในงานประจำทั่ว ๆ ไปแล้ว เมื่อจะถ่ายเหล็กหนา ๆ มักจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์พลังงานสูงมากกว่าหลอดรังสีเอ็กซ์ อย่างไรก็ตามเหล็กที่หนามากกว่าที่แสดงไว้ในตารางนี้ ก็ยังสามารถทำราดิโอกราฟได้ในแต่ละพลังงาน แต่ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร

<u>รังสีแกมมา</u> (Gamma Rays)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงในขณะที่มีความยาวคลื่นสั้น รังสีแกมมาจะถูกส่งออกมาจากสารรังสีขณะสลายตัว เมื่อเปรียบเทียบกันโดยไม่คิดถึงการเกิดแล้ว รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาจะคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันตรงหลอดรังสีเอ็กซ์จะให้รังสีออกมาหลายสเปคตรัม ส่วนรังสีแกมมาที่ออกมาจากสารรังสีจะออกมาเพียงแค่หนึ่งหรือสองพลังงาน

สารรังสีที่นิยมใช้กันมากในทางด้านราดิโอกราฟี ได้แก่ Thulium -170, Iridium -192, Cobalt -60 และ Radium -226

003303

<u>ลักษณะของรังสีแกมมาที่ส่งออกมา</u>

เนื่องจากรังสีแกมมาเกิดมาจากการสลายตัวของสารรังสี ดังนั้นรังสีที่ส่งออกมาจะมีความเข้มลดลงไปเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป การลดลงของความเข้มของรังสีนี้เป็นไปตามกฎของลอการิทึม และขึ้นกับลักษณะครึ่งชีวิตของแต่ละสารรังสี หรือจำนวนเวลาที่ใช้ในการที่จะทำให้สารรังสีมีความเข้มลดลงไป ครึ่งชีวิต 1 ครั้ง ในการคิดอย่างหยาบ ๆ จะใช้ครึ่งชีวิตเพียง 2 ครั้ง ก็เพียงพอ โดยให้ความเข้มของรังสีที่ครึ่งชีวิตครั้งที่ 2 มีค่าน้อย แต่ถ้าจะคิดให้ละเอียดแล้ว ความเข้มของรังสีของครึ่งชีวิตครั้งที่ 2 จะมีค่าเป็น ครึ่งหนึ่งของครึ่งชีวิตครั้งที่ 1, มีค่าเป็น $\frac{1}{4}$ ของการสลายตัวเริ่มต้นของสารรังสีและครึ่งชีวิตครั้งที่ 3 จะมีค่าเป็น $\frac{1}{8}$ ของการสลายตัวเริ่มต้น เป็นดังนี้ไปเรื่อย ๆ

คุณลักษณะอื่น ๆ ของสารกำเนิดรังสีแกมมา ได้แก่ ความแรงของรังสีโดยวัดเป็นความแรงรังสีของสารนั้นเรียกว่า คูรี่ (curies) 1 คูรี่ จะมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} เท่าของจำนวนอะตอมที่แตกตัวในเวลา 1 วินาที ดังนั้นถ้าทราบความแรงของรังสีในช่วงเวลาใด ๆ แฟคเตอร์ ที่ปรากฏอยู่ในตาราง การสลายตัวของสารรังสีจะใช้เป็นตัวคำนวนหาความแรงของรังสีในช่วงเวลาอื่น ๆ ได้ นอกจากนั้นความเข้มของรังสีซึ่งวัดเป็นหน่วย (rhm) เรินเก้นต่อชั่วโมงที่ระยะห่าง 1 เมตร สามารถคำนวนได้จากความแรงของรังสี คูณด้วย ปริมาณรังสีที่ส่งออกมา ปริมาณรังสีที่ส่งออกมามีหน่วยเป็น rhm per curie ซึ่งเป็นค่าคงที่อันหนึ่งของแต่ละธาตุ สารรังสีที่มีขนาดใหญ่จะให้ปริมาณรังสีต่อคูรี่น้อยกว่าสารรังสีขนาดเล็ก เนื่องมาจากเกิดการดูดซึมรังสีขึ้นภายในสารรังสีนั้น (self absorption) เพราะว่ารังสีแกมมาเกิดมาจากการสลายตัวของอะตอมในใจกลางของสาร ดังนั้นก่อนที่รังสีจะหลุดลอดออกมายอมถูกตัวสารเองดูดซึมรังสีไว้บางส่วน

Specific Activity โดยปกติจะแสดงในหน่วยคูรี่ต่อกรัม หรือ คูรี่ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นคุณลักษณะอีกอันหนึ่งของสารรังสีที่จะแสดงปริมาณรังสีในสารนั้น สารรังสีที่มี specific activity สูง ๆ จะมีขนาดเล็กกว่าสารที่มี specific activity ต่ำ ในทางราดิโอกราฟี สารรังสีที่มี specific activity สูง ๆ จะใช้งานมากกว่า เนื่องจากมี self-absorption ต่ำ และความไม่ชัดเจนจากการจัดรูปแบบมีน้อย (less geometric unsharpness)

คุณลักษณะที่สำคัญอันอื่น ๆ ของรังสีแกมมาจะรวบรวมไว้ในตารางที่ 2 แต่ความแรงของรังสี และ specific activity จะไม่บอกไว้ เนื่องจาก 2 สิ่งนี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสารรังสี, ลักษณะการออกแบบและวัสดุที่จะหุ้มห่อสารรังสีไว้ และปริมาณของสารรังสีที่มีอยู่ตอนเริ่มต้น

Table 2. Characteristics of Gamma-Ray Sources Used in Industrial Radiography

Gamma-ray source	Half-life	Photon energy, Mev	Radiation output, rhm/ci(a)	Penetrating power, in. of steel
Thulium-170	128 days	0.054 and 0.084(b)	0.003	½
Iridium-192	74 days	12 rays from 0.21 to 0.61	0.55	3
Cesium-137	33 years	0.66	0.39	3
Cobalt-60	5.3 years	1.17 and 1.33	1.35	9
Radium	1620 years	11 principal rays from 0.24 to 2.20(c)	0.84	5

(a) Output for typical unshielded, encapsulated sources. rhm/ci = roentgens per hour at one meter per curie. (b) Against strong background of higher-Mev radiation. (c) Derived primarily from radioactive decay of daughter products.

ตารางที่ 2[1] ลักษณะของสารรังสีแกมมาที่ใช้ในราดิโอกราฟีทางอุตสาหกรรม

คุณลักษณะทางฟิสิกส์ของสารรังสีแกมมา

สารรังสีโดยปกติจะเป็นโลหะในบางกรณีอาจจะเป็นเกลือหรือแกส ซึ่งดูดซึมอยู่ในถ่านไม้และสารรังสียังถูกหุ้มอีกชั้นด้วยโลหะอีกที อาจจะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมแผ่นบาง ๆ หรืออลูมินั่มซึ่งจะต้องหนากว่าเพื่อป้องกันการผุกร่อน, การรั่วซึมของสารรังสี, ลดอันตรายในการขนส่งและยังสะดวกในการเคลื่อนย้ายอีกด้วย

จากนั้นยังต้องถูกป้องกันรังสี (shield) ด้วยสารที่มีน้ำหนักอะตอมหนักที่สามารถดูดซึมรังสีแกมมาได้ เช่น ตะกั่ว, depleted uranium เป็นต้นเรียกว่า container เพื่อป้องกันรังสีออกสู่ภายนอก container มี 2 แบบ แบบหนึ่งจะเป็นรูปกรวยถูกอุดไว้ สามารถเปิดเพื่อให้รังสีออกมาได้ แบบนี้มักจะใช้เป็นกล้องรังสี (radioisotope camera) แบบที่สอง จะมีเครื่องควบคุมระยะไกลควบคุมด้วยระบบเครื่องกลหรือระบบลม เพื่อให้สารรังสีออกมาจาก container และไปยังตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ก่อน เมื่อการถ่ายรังสีเสร็จก็จะบังคับให้กลับไปอยู่ใน container อย่างเดิม แบบนี้จะใช้ได้ดีกว่าแบบแรกและใช้ได้กว้างขวางกว่า เครื่องควบคุมระยะไกลยังช่วยให้ความปลอดภัยแก่ผู้ทำงานด้วย ในขณะเคลื่อนย้ายสารรังสีเข้าและออกจาก container

การลดความเข้มลงของรังสี

รังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา จะทำปฏิกริยากับสารใด ๆ เสมอ แม้แต่แกส เช่นอากาศ ในขณะที่รังสีผ่านไป ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ ปริมาณรังสีที่จะตรวจสอบชิ้นงานแตกต่างไปจากเดิม นอกจากนั้นเมื่อผ่านชิ้นงานไปแล้วก็ยังเปลี่ยนไปอีก สิ่งนี้มีความสำคัญมากในวิธีการราดิโอกราฟี ปริมาณรังสีที่จะลดลงจะขึ้นกับชนิดของชิ้นงาน

ความเข้มและพลังงานของรังสี รวมทั้งความหนาแน่นและโครงสร้างของอะตอมของชิ้นงานที่จะตรวจ

ความเข้มของรังสีเมื่อผ่านวัสดุไปแล้วจะลดลง เป็นแบบ exponential โดยขึ้นกับความหนาของวัสดุที่รังสีจะผ่านไป ดังแสดงในสูตร

$$I = I_o \exp.(-\mu t) \quad \text{สมการ 2}$$

I = ความเข้มของรังสีที่ผ่านวัสดุไปแล้ว หน่วย คูรี, เรินเก้นท์

I_o = ความเข้มของรังสีตอนเริ่มต้น (ก่อนผ่านวัสดุ) หน่วย คูรี, เรินเก้นท์

t = ความหนาของวัสดุชิ้นงาน หน่วย ซม., นิ้ว

μ = ค่าคงที่ของแต่ละวัสดุโดยเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุและพลังงานของรังสีที่มากระทบเรียกว่า linear-absorption coefficient

หน่วยของค่า μ นี้เป็นส่วนกลับของความยาว เช่น cm^{-1}

ค่า μ ในบางครั้งจะแสดงในรูปของ μ/ρ เรียกว่า mass absorption coefficient โดย ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ในกรณีอื่นค่า μ อาจจะแสดงในรูปของ effective absorbing area ของ 1 อะตอม เรียกว่า atomic-absorption coefficient (μa) หรือ cross section ซึ่งมีค่าเท่ากับ linear absorption coefficient หารด้วยจำนวนอะตอมต่อ 1 หน่วยปริมาตร cross section จะมีหน่วยเป็น บาร์น (barns) (1 บาร์น = 10^{-24} ตร.ซม.) เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการที่รังสี 1 โฟตอนจะทำปฏิกริยากับอะตอม

<u>ขบวนการของการลดลงของรังสี</u>

ในทางทฤษฎี โฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีจะสามารถทำปฏิกริยากับวัสดุได้ 4 แบบ ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยามีได้ 3 แบบ ดังนั้นปฏิกริยาและผลที่เกิดขึ้นจะมีได้ 12 แบบ อย่างไรก็ตามแบบที่เกิดขึ้นมากและมีผลสำคัญต่อรังสีเอ็กซ์ หรือแกมมามีอยู่ 4 แบบ ได้แก่ Photoelectric effect, Rayleigh scattering, Compton scattering & pair production

Photoelectric effect

เป็นปฏิกริยาที่อิเลคตรอนใน shell รับพลังงานจากรังสีแล้วหลุดออกมาจาก shell พลังงานที่เหลืออยู่ของรังสีจะกลายเป็นพลังงานจลน์แก่อิเลคตรอน

ปกติ photoelectric effect จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอน เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเป็น $E^{-3.5}$ ยกเว้นแต่ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนจะมีค่าเทียบกับ binding energy ของอิเลคตรอนของแต่ละ shell ในอะตอม effect นี้ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วลดลงอีก (abrupt change), (binding energy เป็นค่าพลังงานที่ยึดอิเลคตรอนให้อยู่ที่ shell นั้น ๆ) การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า absorption edge และให้ตัวอักษรสัมพันธ์กับ shell ที่อิเลคตรอนอยู่

สำหรับธาตุที่มีอะตอมมิกนัมเบอร์ต่ำ ๆ photoelectric effect สามารถตัดทิ้งได้แม้พลังงานจะมากกว่า 100 KeV. อย่างไรก็ตาม ค่า photoelectric effect จะเปลี่ยนไปตามกำลังสี่ หรือกำลังห้าของอะตอมมิกนัมเบอร์ ดังนั้นธาตุที่มีอะตอมมิกนัมเบอร์สูง ๆ absorption edge ที่เกิดขึ้นอาจจะขึ้นไปถึงพลังงานของโฟตอนที่ 2 MeV.

Rayleigh Scattering

ในบางครั้งจะเรียกว่า Coherent Scattering เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นโดยตรงระหว่างโฟตอน กับอิเลคตรอนใน shell ซึ่งโฟตรอนที่สะท้อนกลับจะไม่สูญเสียพลังงานจลน์หรือพลังงานที่อยู่ภายในโฟตอน เลย ไม่ว่าอิเลคตรอนตัวใดจะหลุดออกจากอะตอมก็ตาม มุมระหว่างทิศทางของโฟตอนที่สะท้อนกลับและโฟตอน เดิมจะเปลี่ยนแปลงไปโดยเปลี่ยนผกผันกับพลังงานโฟตอน ค่ามุมจะมาก สำหรับโฟตอนพลังงานต่ำ ๆ และจะน้อยสำหรับโฟตอนพลังงานสูง ๆ

Rayleigh Scattering จะมีความสำคัญมากกับธาตุที่มีอะตอมมิกนัมเบอร์สูง และโฟตอนมีพลังงานต่ำ อย่างไรก็ตาม Rayleigh Scattering จะไม่เกิดมากไปกว่า 20 % ของการลดลงทั้งหมด (total attenuation)

Compton Scattering

เป็นปฏิกริยาโดยตรงระหว่างโฟตอนกับอิเลคตรอนใน shell ซึ่งอิเลคตรอนจะหลุดออกมาโดยพลังงานจลน์ของโฟตอนเท่านั้น โฟตอนที่สะท้อนออกมาจะมีทิศทางต่างไปจากโฟตอนเดิม และพลังงานลดลงโดยสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าความสัมพันธ์ระหว่างโฟตอนที่สะท้อนและโฟตอนเดิม, มุมที่สะท้อนของโฟตอนและพลังงานของโฟตอนจะยุ่งยากมาก แต่ก็ยังสามารถแสดงได้ในทางคณิตศาสตร์ Compton Scattering ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับอะตอมมิกนัมเบอร์ของธาตุ และมีค่าเปลี่ยนแปลงผกผันกับพลังงานของโฟตอน

Pair Production

เป็นขบวนการที่อะตอมรับพลังงานจากโฟตอนเดิม แล้วให้โฟตอนออกมา 2 ตัว ด้วยพลังงานโฟตอนละ 0.51 MeV. Pair Production จะเกิดกับธาตุหนักเป็นส่วนมาก จะมีค่าประมาณ $Z(Z + 1)$ โดย Z คือ อะตอมมิกนัมเบอร์ของธาตุและยังแปรผันตาม $k \log P$ โดย k เป็นค่าคงที่, P เป็นค่าพลังงานของโฟตอน

ในขบวนการเกิด Pair Production โฟตอนเดิมซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวทำให้เกิดอิเลคตรอนชุดหนึ่งออกมาจากอะตอม แต่ผลอันนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนที่ใช้มากกว่า 1.02 MeV. เนื่องจากในทางทฤษฎีแล้ว พลังงาน 0.51 MeV. จะถูกใช้เพื่อสร้างมวลของแต่ละอนุภาคอิเลคตรอนหรือโพสิตรอน (positron) ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมากกว่า 1.02 MeV. พลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ออกมาจากอะตอม

โพสิตรอนที่เกิดขึ้นจาก Pair Production จะทำปฏิกริยาอิเลคตรอนที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไปทันที ทำให้มีอายุสั้นมาก การทำปฏิกริยากันนี้จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา โดยปกติจะออกมาในรูปโฟตอน 2 ตัว ทิศทางตรงกันข้าม แต่ละโฟตอนจะมีพลังงานประมาณ 0.51 MeV. อิเลคตรอนส่วนมากที่เกิดจาก Pair Production จะถูกดูดซึมโดยธาตุ

นั้นแล้วปล่อย bremsstrahlung พลังงานต่ำกว่า 0.5 MeV. ออกมา

Total Absorption

เป็นผลรวมของ absorption effect หรือ scattering effect ของขบวนการที่เกิดขึ้นทั้งสี่ ค่า atomic absorption coefficient จะสามารถแสดงได้ในรูป

$$\mu_a = \sigma_{pe} + \sigma_R + \sigma_c + \sigma_{pr} \qquad \text{สมการ 3}$$

โดย σ_{pe} เป็นค่า attenuation จาก Photoelectric effect

σ_R " " " Rayleigh scattering

σ_c " " " Compton scattering

σ_{pr} " " " Pair production

จากการคำนวน atomic absorption coefficients ค่า mass absorption coefficients สามารถหาได้โดย การคูณ μ_a ด้วย Avogadro's number (N) และหารด้วย น้ำหนักอะตอมของธาตุ (A) ดังนั้น

$$\mu/\rho = \frac{\mu_a N}{A} \qquad \text{สมการ 4}$$

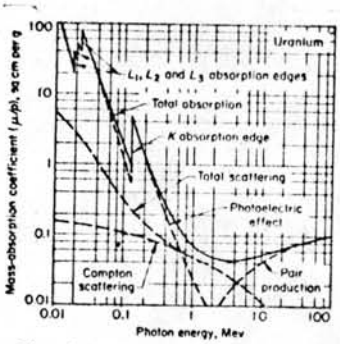


Fig. 8. Calculated mass-absorption coefficient for uranium as a function of photon energy (solid line) and contributions of various atomic processes (dashed lines). Rayleigh scattering is the difference between total scattering and Compton scattering.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 8

การแสดง mass-absorption coefficient ของยูเรเนียมมีความสัมพันธ์กับพลังงานของโฟตอน

จากรูป 8 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลง mass absorption coefficient ของยูเรเนียม โดยเทียบกับพลังงานของโฟตอน และยังแสดงถึง total absorption ที่แสดงลักษณะการเกิดขบวนการต่าง ๆ ขึ้น ตั้งแต่ในช่วงพลังงาน 10 KeV. จนถึง 100 MeV.

Effective Absorption of X-rays

ในตอนต้นได้พิจารณาถึงค่า mass absorption และค่า atomic-absorption coefficient ว่าขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตทำให้รังสีออกมาเป็นลำแคบ (narrow - beam geometry) ในทางปฏิบัติ narrow-beam geometry ทำได้โดยใช้สารดูดซึมรังสีที่มีกำลังมาก ๆ เช่น ตะกั่ว วางไว้ระหว่างวัสดุที่จะตรวจสอบและฟิล์ม และต้องมีรูเล็ก ๆ เพื่อให้รังสีที่ลดความเข้มลงแล้วผ่านตะกั่วไปกระทบลงบนฟิล์มได้ แต่ในการทดลองแบบนี้จะได้เพียงแค่ค่า total absorption เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ยังสามารถแสดงผลทางคณิตศาสตร์ของผลรวมของ absorption

coefficients ที่มีขบวนการหลายแบบเกิดขึ้น โดยสัมพันธ์กับ narrow - beam absorption coefficient ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงวัสดุและพลังงานของโฟตอนได้

Broad - Beam Absorption

ในการหาค่า absorption coefficients โดยใช้ narrow-beam geometry จะทำให้การคำนวนทางทฤษฎีง่ายขึ้น อย่างไรก็ดีถ้าความกว้างของลำรังสีสามารถวัดได้ จะพบว่าสภาพของ narrow - beam มีอยู่ไม่มากนัก ค่าของ absorption coefficient จึงขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิต ทำให้รังสีออกมาเป็นลำกว้าง (broad beam geometry) แทน ภายใต้ broad - beam geometry โฟตอนที่สะท้อนออกมาเป็นมุมแคบจะไม่สูญหายไป แต่จะทำให้การวัดปริมาณรังสีที่ลดลงกลับเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า broad - beam absorption coefficient ของธาตุใด ๆ จะต้องน้อยกว่า narrow - beam absorption coefficient เสมอ

broad - beam geometry มีอยู่หลายระดับขึ้นกับส่วนของรังสีที่ลดลง ซึ่งมาจากการสะท้อน อย่างไรก็ตาม ลักษณะของ broad - beam absorption coefficients สามารถหาได้โดยเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของลำรังสีหรือพื้นที่ชิ้นงาน ซึ่งไม่มีผลกับรังสีที่ผ่านไป ดังนั้น broad - beam absorption coefficients จะมีประโยชน์เพราะว่า ราดิโอกราฟีทั่ว ๆ ไปซึ่งมีฟิล์มวางติดกับชิ้นงานจะสามารถทำราดิโอกราฟีซ้ำในสภาพเดิมอย่างได้ผลดี

Effect of Radiation Spectrum

ในทางทฤษฎีแล้วการเกิด absorption จะคิดจากรังสีที่มีพลังงานเดียว (monoenergetic radiation) หรือรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว จากรูปที่ 5 จะแสดงถึงหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ไม่ได้มีพลังงานเดียวออกมา เช่น หลอดรังสีเอ็กซ์ ขนาด 200 กิโลโวลท์ แสดงว่ารังสีเอ็กซ์ที่ออกมามีพลังงานสูงสุด 200 KeV. และยังประกอบไปด้วยโฟตอน (รังสีเอ็กซ์) ที่มีพลังงานต่ำกว่าอีกมากมาย แม้ว่าโฟตอนที่ออกมาจะมีพลังงานเดียวก็ตาม แต่ในขณะต่อไปก็จะมีโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ

กว่าออกมาอยู่ด้วย เนื่องจากการเกิด Compton Scattering ดังนั้น เมื่อคิดถึงผลที่เกิดจาก broad - beam geometry ด้วย, ค่า absorption coefficient ของวัสดุจะต้องเปลี่ยนไปโดยคิดจากรังสีที่มีหลายพลังงาน แต่ค่า absorption coefficient ที่คำนวนได้ถูกต้องที่สุดคือ เวลาที่ใช้จริง ๆ ในการที่รังสีตกกระทบวัสดุซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถหาได้

ค่า absorption coefficients ที่คำนวนได้จากการทดลองแบบ broad - beam geometry จะเป็นค่าที่ถูกต้องที่สุดในการคำนวน เนื่องจากค่านี้ได้แก้ไขแล้วกับผลที่เกิดขึ้นของ broad - beam geometry และการเปลี่ยนแปลงความเข้มของโฟตอน ในกรณีที่ค่า absorption coefficients คำนวนจาก narrow - beam geometry และใช้ในราดิโอกราฟี ผลที่ออกมาจะไม่ถูกต้อง โดยเฉพาะกับรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำถึงกลาง ๆ รวมทั้งชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ ด้วย

Scattering Factor

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีจากการสะท้อนกับความเข้มของรังสีที่กระทบโดยตรงยังตัวรับจะเรียกว่า scattering factor ซึ่งมีความสำคัญในการพิจารณาคุณภาพของภาพที่ออกมา การที่รังสีสะท้อนออกมาไม่ได้แสดงถึงคุณลักษณะของชิ้นงาน เพียงแต่ทำให้ภาพลดความคมชัดลง, รายละเอียดที่ต้องการทราบเห็นได้ยากขึ้น และยังลดความไวในการตรวจสอบจากรังสีลง ค่า scattering factor จะเปลี่ยนไปโดยขึ้นกับความหนาของชิ้นงานที่จะตรวจและความหนาแน่น รูปที่ 9 แสดงถึง scattering factor ของเหล็กโดยเทียบกับพลังงานของรังสี

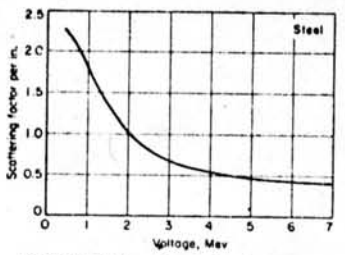


Fig. 9. Variation of scattering factor per inch of steel with radiation energy expressed as x-ray-tube voltage

รูปที่ 9 (1)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ scattering factor กับโวลท์เตจของหลอดรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากโฟตอนที่มีพลังงานต่ำจะสะท้อนมากกว่าโฟตอนที่มีพลังงานสูง ดังนั้นจึงมักใช้โฟตอนพลังงานสูงทำ ราดิโอกราฟี เพื่อให้ภาพชัดเจน การทำให้รังสีมีพลังงานสูงจะทำได้โดย

1. เพิ่มโวลท์เตจ ของหลอดรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะทำให้ bremsstrahlung ที่ออกมามีพลังงานสูง หรือ

2. ใส่ฟิลเตอร์ระหว่างแหล่งรังสีและชิ้นงานซึ่งจะทำให้โฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น โดยการเลือกการดูดซึมรังสี หรือสะท้อนโฟตอนบางส่วนของสเปคตรัม การเลือกฟิลเตอร์ที่ดีและมีความหนาขนาดไหนจะขึ้นกับหลาย ๆ สิ่งคือ ชนิดของชิ้นงาน, ความหนา, ชนิดของฟิล์ม สเปคตรัม ของ bremsstrahlung ที่เกิดขึ้นตามชนิดของหลอดรังสีเอ็กซ์ และโวลท์เตจที่ใช้ นอกจากนั้นยังรวมถึงชนิดและความหนาของฟิลเตอร์, กระแสไฟที่ใช้กับหลอดรังสีเอ็กซ์ และเวลาที่ใช้ในการทำซึ่งจะต้องหาเพื่อทำให้ภาพมีคุณภาพดี และค่าใช้จ่ายถูกที่สุด โดยทั่ว ๆ ไป ฟิลเตอร์จะทำจากโลหะที่มีอะตอมมิกนัมเบอร์สูง ๆ (เช่น ตะกั่ว) ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดเจน เนื่องจากผลของการสะท้อนลดลง แต่ข้อเสียก็คือ ฟิลเตอร์จะลดความเข้มของรังสีลงมาก ซึ่งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำราดิโอกราฟีนานขึ้น นอกจากนั้นรังสีที่มีความยาวคลื่นมากจะถูกดูดซึมไปก่อน ทำให้ความสามารถในการตรวจสิ่งบกพร่องขนาดเล็ก ๆ ลดลง

ในบางครั้งไม่สามารถเพิ่มโวลท์เตจของหลอดได้เนื่องจากมีขีดจำกัดของอุปกรณ์ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาคุณภาพของภาพและค่าใช้จ่าย ทั้ง ๆ ที่ความจริงรังสีเอ็กซ์ที่มีโวลท์เตจสูง ๆ จะทำให้การทำราดิโอกราฟีมีคุณภาพดีและค่าใช้จ่ายถูกลง นอกจากนั้นการทำให้ภาพชัดเจนยิ่งขึ้นยังสามารถทำได้โดยลดความหนาแน่นของฟิล์มอย่างเป็นสัดส่วนซึ่งจะมีผลโดยตรงกับการสะท้อนของรังสี ยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นของฟิล์มประมาณ 80 % หรือมากกว่าจะทำให้เกิดการสะท้อนของรังสีมากจนภาพไม่ชัดเจน เมื่อใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ หรือในกรณีชิ้นงานเป็นเหล็กหนา 4 นิ้ว รังสีพลังงาน 1.3 MeV. ความหนาแน่นของฟิล์มแค่ 40 % ก็ทำให้เกิดการสะท้อนได้ แต่ถ้ารังสีพลังงาน 20 MeV. ความหนาแน่นของฟิล์มเพียง 15 % ก็จะเกิดการสะท้อนแล้ว

Radiographic Equivalence

โลหะแต่ละชนิดย่อมสามารถดูดซึมรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาได้ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดสามารถเทียบความหนาซึ่งกันและกันได้ ในแต่ละพลังงาน เช่น ที่พลังงาน 150 กิโลโวลท์, ตะกั่วหนา 1 นิ้ว จะเท่ากับเหล็กหนา 14 นิ้ว แต่ที่ 1000 กิโลโวลท์, ตะกั่วหนา 1 นิ้ว จะเท่ากับเหล็กหนา 5 นิ้ว เท่านั้น ค่า absorption equivalence factor ของโลหะหลายชนิดจะแสดงไว้ในตารางที่ 3 ตารางนี้จะใช้ได้ดีกับโลหะพื้น ๆ ทั่วไป เช่น เหล็ก หรือ อลูมิเนียม เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีของโลหะอื่น ๆ สามารถหาได้โดยพิจารณาเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีของพื้น ๆ ทั่วไปเทียบกันโดยใช้ความหนาเท่ากันคูณด้วย radiographic equivalence factor ที่ได้จากทดลองโลหะชนิดนั้นจริง ๆ (ค่า radiographic equivalence factorจะได้อธิบายต่อไป)

Table 3. Approximate Radiographic Absorption Equivalence for Various Metals

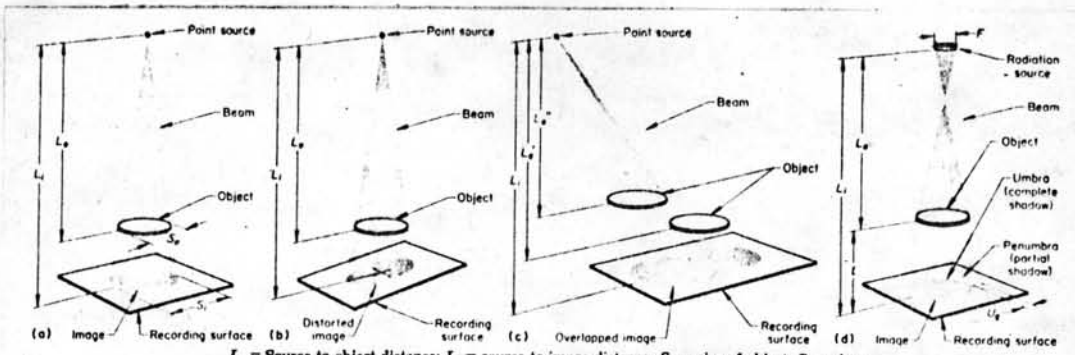
Material	X-rays, kv					X-rays, Mev			Gamma rays			
	50	100	150	220	400	1	2	4 to 25	Ir-192	Cs-137	Co-60	Ra
Magnesium	0.6	0.6	0.05	0.08	...	...	...	...	...	...	...	...
Aluminum	1.0	1.0	0.12	0.18	...	...	...	...	0.35	0.35	0.35	0.40
Aluminum alloy 2024	2.2	1.6	0.16	0.22	...	...	...	...	0.35	0.35	0.35	...
Titanium	...	...	0.45	0.35	...	...	...	...	...	...	...	...
Steel	...	12.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
18-8 stainless steel	...	12.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Copper	...	18.0	1.6	1.4	1.4	...	...	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1
Zinc	...	...	1.4	1.3	1.3	...	...	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0
Brass (a)	...	...	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1
Inconel alloys	...	16.0	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Zirconium	...	...	2.3	2.0	...	1.0	...	...	...	...	...	...
Lead	...	...	14.0	12.0	...	5.0	2.5	3.0	4.0	3.2	2.3	2.0
Uranium	...	...	...	25.0	...	...	...	3.9	12.6	5.6	3.4	...

(a) Containing no tin or lead; absorption equivalence is greater than these values when either element is present.

ตารางที่ 3(1) ค่า Radiograpgic Absorption Equivalence โดยประมาณของโลหะหลายชนิด

ทฤษฎีของการเกิดภาพ

ภาพที่เกิดขึ้นจากการทำราดิโอกราฟีจะคล้ายกับภาพที่ปรากฏบนจอโดยนำเอาวัตถุทึบไปบังแสงไว้ แต่รังสีที่ใช้ในราดิโอกราฟีสามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุได้ ในขณะที่แสงไม่สามารถ กฎของการเกิดเงา ตามหลักเรขาคณิตยังเหมือนกัน โดยรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และแสงจะเดินเป็นเส้นตรง สิ่งนี้เป็นสิ่งสำคัญในอันที่จะทำให้ภาพคมหรือไม่ ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งรังสี, ชิ้นงาน และฉาก จะพิจารณาได้จากลักษณะใหญ่ ๆ 3 ประการของภาพที่เกิดขึ้น คือ อัตราการขยายของภาพ ความบิดเบือนของภาพ และความไม่คมชัดของภาพ ดูรูปที่ 10



L_o = Source-to-object distance; L_i = source-to-image distance; S_o = size of object; S_i = size of image; U_g = geometric unsharpness; F = size of focal spot; t = object-to-image distance.

Fig. 10. Schematic representation of the effect of geometric relationships on radiographic image from point sources and actual radiation source. (a) *Image size,* (b) *image distortion and* (c) *image overlap for point sources of radiation;* (d) *degree of image unsharpness from an actual radiation source. See text for discussion.*

รูปที่ 10[1] ผลของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตเมื่อเกิดภาพของราดิโอกราฟ

<u>การขยายของภาพ</u>

ภาพที่เกิดขึ้นของชิ้นงานจะต้องห่างจากแหล่งรังสีมากกว่าระยะทางจากแหล่งรังสีไปยังชิ้นงานเสมอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 (a) ขนาดของภาพที่เกิดขึ้นจะใหญ่กว่าขนาดของชิ้นงาน ดังนั้น ขนาดของภาพหรืออัตราการขยายของภาพจะสามารถคำนวนได้จาก

$$M = Si/So = Li/Lo \qquad \text{สมการ 5}$$

เมื่อ M = อัตราการขยายของภาพ (degree of enlargement or magnification)

Si = ขนาดของภาพ หน่วย ฟุต, นิ้ว, ซม.

So = ขนาดของชิ้นงาน หน่วย ฟุต, นิ้ว, ซม.

Li = ระยะทางจากภาพไปยังแหล่งรังสี หน่วย ฟุต, นิ้ว, ซม.

Lo = ระยะทางจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี หน่วย ฟุต, นิ้ว, ซม.

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นงาน โดยสัมพันธ์กับแหล่งรังสีและฟิล์มจะมีผลกับขนาดของภาพที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ระยะทางจากภาพไปยังแหล่งรังสี (Li) ลดลงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างชิ้นงานและภาพแล้ว ขนาดของภาพ (Si) จะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าระยะทางจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี (Lo) เพิ่มขึ้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระยะทางจากภาพไปยังแหล่งรังสี หรือ Li คงที่แล้ว ขนาดของภาพ (Si) จะลดลง

โดยปกติ ผลของอัตราการขยายของภาพที่เกิดขึ้นจะมีน้อยในราดิโอกราฟี เนื่องจากฟิล์มมักจะต้องวางติดชิ้นงานเสมอ เพื่อที่จะทำให้ความไม่คมชัดของภาพน้อยที่สุด แต่ถึงแม้จะใช้วิธีการแบบนั้นแล้ว ภาพที่เกิดขึ้นก็ยังมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานอยู่ ผลของอัตราการขยายของภาพนี้จะเกิดมากที่สุดเมื่อระยะทางระหว่างภาพและแหล่งรังสีสั้นที่สุด

ประโยชน์ของอัตราการขยายของภาพจะได้แก่ เมื่อนำชิ้นงานมาชิดแหล่งรังสีมาก ๆ รายละเอียดบางอย่างที่มองไม่เห็นก็สามารถเห็นได้ เทคนิคนี้จะถูกใช้ในไมโครราดิโอกราฟี แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีผลจากความไม่คมชัดของภาพ แหล่งรังสีจึงต้องมีขนาดของ focal spot เล็ก ๆ จึงจะสามารถให้อัตราการขยายของภาพได้ดี ยกตัวอย่าง เช่น ขนาดของ focal spot จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ไมครอน จึงจะใช้ได้ในไมโครราดิโอกราฟี

<u>ความบิดเบือนของภาพ</u>

เมื่อฟิล์มที่ใช้อยู่ในแนวขนานกับชิ้นงานที่จะถ่าย ภาพที่เกิดขึ้นจะไม่มีการบิดเบือนเลยไม่ว่าจะเปลี่ยนมุมของรังสีที่จะกระทบชิ้นงานเป็นมุมใดก็ตาม และอัตราการขยายของภาพที่เกิดขึ้นก็จะไม่แตกต่างกันด้วย เนื่องจากระยะ Li/Lo ไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 b. ถ้าแนวของชิ้นงานไม่ขนานกับแนวของฟิล์มแล้ว ภาพจะเกิดการบิดเบือนขึ้น เนื่องจากอัตราการขยายของภาพแตกต่างกันระหว่างรังสีที่ผ่านไปยังจุดสองจุดในชิ้นงานเดียวกัน นี่เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ภาพที่เกิดจากราดิโอกราฟีบิดเบือนไปจากของจริง ดังนั้นรูปร่างที่ดีของชิ้นงานจึงควรจะมีแนวที่ไม่ขนานกับฟิล์มน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ ความบิดเบือนของภาพที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากการ

ไม่ขนานกันของชิ้นงานและฟิล์มโดยตรง ถ้าการไม่ขนานกันมีน้อยความบิดเบือนก็น้อยในทางกลับกัน ถ้ามากความบิดเบือนก็มากตามไปด้วย

ดังนั้นจะไม่มีภาพที่บิดเบือนใดเลยที่ขนานกับแนวของชิ้นงาน ความบิดเบือนที่เกิดขึ้นจะมีผลเนื่องจาก cosine ของมุมระหว่างลำรังสีกับผิวของชิ้นงานโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น มีชิ้นงานรูปวงกลมสองชิ้นงานขนานกันและมีฟิล์มรองรับอยู่ด้านล่าง แต่ระยะทางระหว่างชิ้นงานถึงฟิล์มไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดภาพวงกลมที่แยกจากกันสองวง หรือภาพของชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่คงเกี่ยวเนื่องจากภาพวงกลมสองวงเกยกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 10 (c) และยังขึ้นกับทิศทางของรังสีด้วย ในการใช้งานจริง ๆ ภาพที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะปรากฏเป็นขอบเขตที่แสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นของฟิล์มมากกว่าหรือน้อยกว่าบริเวณอื่น โดยขึ้นกับบริเวณนั้นจะดูดซึมรังสีไว้มากหรือน้อยกว่าบริเวณอื่น ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่เกิดขึ้นจากช่องว่างที่อยู่ในชิ้นงาน (void or cavities) จะดำกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากดูดซึมรังสีไว้น้อยกว่าบริเวณอื่น

<u>ความไม่คมชัดของภาพ</u>

ในทางปฏิบัติแล้วแหล่งรังสีใด ๆ ก็ตามจะใหญ่เกินไปจนไม่สามารถเรียกเป็นจุดได้ หลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้กันมากจะมีขนาด focal spot อยู่ระหว่าง 2 x 2 มม. จนถึง 5x5 มม. แม้แต่แหล่งรังสีที่มีพลังงานสูงมาก ๆ ก็มีขนาด focal spot ในช่วงนี้ ดังนั้น focal spot ที่มีโดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2 มม. ส่วนแหล่งรังสีแกมมาจะมีขนาดแตกต่างกันใช้กันอยู่มากมายขึ้นกับความแรงของรังสีและ specific activity โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2.5 มม.

ตามนิยามของราดิโอกราฟี ความสัมพันธ์ทางด้านเรขาคณิตจะเปลี่ยนไปตามขนาดของแหล่งรังสี, ระยะทางจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี และระยะทางจากภาพไปยังชิ้นงาน จากรูปที่ 10 (d) เมื่อแหล่งรังสีทำให้ภาพเกิดขึ้นบนฟิล์มแล้ว ส่วนของภาพที่ชัดเจนเรียกว่า Umbra ส่วนของภาพที่

ไม่ชัดเจนอยู่วงนอกจะเรียกว่า Penumbra อัตราของความไม่คมชัดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับความกว้างของ Penumbra ซึ่งสามารถแสดงได้ในทางคณิตศาสตร์ จากหลักของสามเหลี่ยมคล้าย คือ

$$Ug = Ft/Lo \quad \text{สมการ 6}$$

เมื่อ Ug = ความไม่คมชัดที่เกิดขึ้น

F = ขนาดของ focal spot หรือขนาดของแหล่งรังสีแกมมา

t = ระยะทางจากภาพไปยังชิ้นงาน

Lo = ระยะทางจากชิ้นงานไปแหล่งรังสี

ค่า t เป็นความแตกต่างระหว่างระยะจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสี (Li) และระยะจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี (Lo) ดังนั้น สมการ 7 อาจจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$Ug = F(Li-Lo)/Lo \quad \text{สมการ 7}$$

ขนาดของ Penumbra หรือขนาดของความไม่คมชัดจะสามารถทำให้ลดลงได้โดยเพิ่มระยะจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสีให้มากขึ้น ลดขนาดของ focal spot หรือลดระยะทางจากภาพไปยังชิ้นงานลง ในทางปฏิบัติขนาดของแหล่งรังสีจะคิดจากลักษณะของแหล่งรังสีเอ็กซ์ หรือขนาดของเม็ดสารรังสีแกมมา และระยะทางจากฟิล์มไปยังชิ้นงานจะทำให้น้อยที่สุดโดยการติดฟิล์มให้ชิดกับชิ้นงาน ดังนั้นจะเหลือสิ่งเดียวที่ยังเปลี่ยนแปลงได้คือ ระยะทางจากชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี ซึ่งจะมีผลมากกับเวลาที่ใช้ในการทำราดิโอกราฟี ดังนั้นผู้ทำราดิโอกราฟีจะต้องเลือกวิธีการที่จะทำให้ภาพคมชัดที่สุด โดยเสียค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องน้อยที่สุดด้วย

ความไม่คมชัดของภาพที่เกิดขึ้นจากลักษณะทางเรขาคณิต เป็นองค์ประกอบอันหนึ่งในหลาย ๆ อันของความไม่คมชัดของภาพ และโดยปกติแล้วจะเป็นตัวทำให้เกิดความไม่คมชัดมากที่สุด เมื่อไม่คำนึงถึงระยะทางระหว่างผิวของฟิล์มและผิวของชิ้นงานนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกันตามขนาดของชิ้นงานแล้ว ค่าความไม่คมชัดทางเรขาคณิตจะสามารถคำนวนได้กับทุก ๆ แหล่งรังสีและยังสามารถแสดงได้เป็นกราฟระหว่างความไม่คมชัด (Ug) ต่อความหนาของชิ้นงาน (t) โดยเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างชิ้นงานไปยังแหล่งรังสี (Lo) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 11 โดยใช้แหล่งรังสีมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม. และจะเป็นประโยชน์มากถ้าได้เตรียมกราฟดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 11 สำหรับทุก ๆ สูตรรังสีที่ใช้

ในการใช้งานจริง ๆ ค่าความไม่คมชัดที่มากที่สุดจะต้องทำให้น้อยกว่าค่าที่เราได้รู้แล้ว เพื่อที่จะหาขนาดและแบบของสิ่งบกพร่องได้แน่นอน ผู้ทำราดิโอกราฟีจะพิจารณาระยะทางระหว่างชิ้นงานไปยังแหล่งรังสีให้น้อยที่สุด จากสมการ 6 ที่ค่า Lo นี้ Ug จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะใช้พิจารณาแบบและขนาดของสิ่งบกพร่อง ถ้าสิ่งบกพร่องของชิ้นงานที่อยู่ไกลที่สุดจากฟิล์มสามารถเห็นได้ สิ่งบกพร่องที่อยู่ใกล้กับฟิล์มก็ยิ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

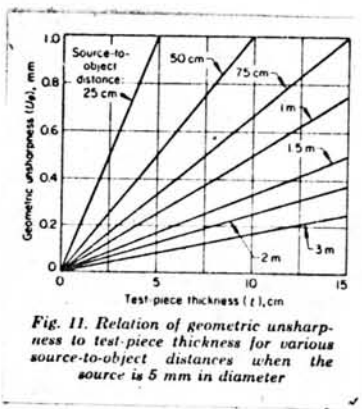


Fig. 11. Relation of geometric unsharpness to test-piece thickness for various source-to-object distances when the source is 5 mm in diameter

รูปที่ 11[1] ความสัมพันธ์ของความไม่คมชัดทางเรขาคณิตกับระยะทางจากแหล่งรังสีไปยังชิ้นงาน

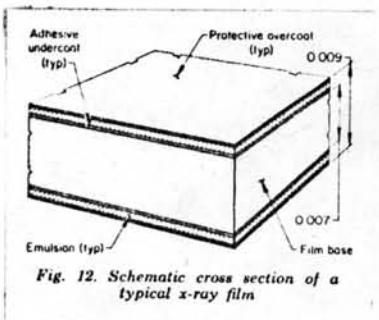


Fig. 12. Schematic cross section of a typical x-ray film

รูปที่ 12[1] รูปหน้าตัดของฟิล์มรังสีเอ็กซ์

ตัวบันทึกภาพ

รังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา เมื่อผ่านชิ้นงานไปแล้วสามารถบันทึกไว้ได้โดยใช้ (1) ตัวบันทึกภาพถาวร, (2) ตัวบันทึกภาพชั่วขณะ, (3) เครื่องวัดอ่านออกมา และ (4) เครื่องมือวัดออกมาเป็นกราฟ โดยนิยามแล้วการทำราดิโอกราฟี จะใช้ตัวบันทึกภาพถาวรซึ่งได้แก่ ฟิล์มสำหรับรังสีเอ็กซ์ กระดาษสำหรับราดิโอกราฟี หรือกระดาษที่มีความไวต่อประจุไฟฟ้า ซึ่งใช้ในวิธีการ Xeroradiographic process ส่วนตัวบันทึกภาพชั่วขณะได้แก่ จอภาพฟลูออเรสเซนต์ หรือตัวขยายภาพ (fluorescent screen or image amplifier) จะให้ภาพที่แตกต่างจากตัวบันทึกภาพถาวรและยังบันทึกภาพชั่วขณะ ภาพที่เกิดแบบนี้เรียกว่า Fluoroscopic images อุปกรณ์บันทึกอีกอย่างหนึ่งจะวัดประมาณรังสีออกมาเป็นเส้นหรือเป็นกราฟไม่ได้ออกเป็นภาพ ดังนั้นฟิล์มสำหรับรังสีเอ็กซ์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดในด้านตัวบันทึกภาพ

ฟิล์มสำหรับรังสีเอ็กซ์

ฟิล์มทำด้วยพลาสติคใส บาง มีสารเคลือบทั้ง 2 ด้าน (ในบางกรณีอาจมีสารเคลือบด้านเดียว) สารที่เคลือบส่วนใหญ่จะเป็นเกลือเงินที่อยู่เจลาติน ดังรูปที่ 12 เกลือเงินที่ใช้นี้จะมีความไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก โดยเฉพาะรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมาและแสงสว่าง ฟิล์มที่ใช้โดยปกติจะมีสีน้ำเงินอ่อน หนาประมาณ 0.007 นิ้ว เคลือบด้วยอิมัลชั่นที่ติดแน่น และยังเคลือบด้วยเจลาติน บางแต่เหนียวซ้ำอีกชั้นเพื่อป้องกันการขีดข่วนเล็ก ๆ น้อย ดังนั้น ความหนาของฟิล์มทั้งหมดจะประมาณ 0.009 นิ้ว อิมัลชั่นที่เคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้านของฟิล์มจะช่วยทำให้ฟิล์มมีความไวต่อรังสียิ่งขึ้น นอกจากนั้น ยังทำให้การล้างฟิล์มทำได้สะดวกและใช้เวลาสั้นยิ่งขึ้น ในกรณีที่ใช้อิมัลชั่น 2 ชนิดที่แตกต่างกันเคลือบฟิล์มคนละด้าน เมื่อล้างแล้วใช้ตาเปล่าดูโดยไม่มีเครื่องขยายจะไม่เห็นภาพที่แตกต่างกัน แต่เมื่อมีเครื่องขยายแล้วจะเห็นการซ้อนกันของภาพซึ่งจะทำให้การอ่านยุ่งยากขึ้น

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรังสีไปทำปฏิกริยากับ อิมัลชั่น บนฟิล์มรังสีเอ็กซ์ จะทำให้เกิดภาพออกมาต้องใช้ขบวนการทางเคมีกับฟิล์มซึ่งได้แก่ ขบวนการ develop ซึ่งจะเปลี่ยนซิลเวอร์เฮไลด์ที่ทำปฏิกริยากับรังสีไปเป็นโลหะเงินสีดำอยู่ใน เจลาติน อีกที ขบวนการฟิกเซอร์ต่อจาก develop ซึ่งจะเปลี่ยนซิลเวอร์เฮไลด์ที่ไม่ได้ปฏิกริยาไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำ ขบวนการล้างฟิล์มด้วยน้ำและทำให้แห้ง

แม้ว่าฟิล์มรังสีเอ็กซ์จะมีความไวต่อแสง แต่อิมัลชั่นที่ใช้ก็ยังมีลักษณะที่แตกต่างกับอิมัลชั่นที่ใช้กับการถ่ายภาพทั่วไป ฟิล์มรังสีเอ็กซ์ที่ใช้กันทั่วไปมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่โคนรังสีได้โดยตรง (ไม่ต้องมีฉาก) และแบบที่ต้องใช้ฉากชนิดฟลูออเรสเซนท์ด้วย

ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้ฟิล์มแบบโคนรังสีได้โดยตรง ฟิล์มที่ใช้มีหลายความเร็ว, หลายขนาดเกรน แบบของฟิล์มที่ใช้จะขึ้นการทำราดิโอกราฟี แบบไหน

ฟิล์มแบบต้องมีฉากด้วยมักจะใช้ในงานแพทย์เป็นส่วนมาก จะมีใช้ในงานอุตสาหกรรมน้อยมาก เช่น ใช้กับรังสีเอ็กซ์ ที่มีพลังงานต่ำและต้องใช้เวลาในการถ่ายรังสีนานมาก ฟิล์มชนิดนี้จะมีความไวต่อแสงมากกว่ารังสีและไวที่สุดกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากฉากฟลูออสเรสเซนต์ ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากฟิล์มรังสีเอ็กซ์ที่ใช้จะเคลือบด้วย อิมัลชั่น ชนิดไวต่อแสงสีน้ำเงิน แต่อิมัลชั่นแบบอื่นที่มีความไวต่อแสงอุลต้าไวโอเลตและแบบที่ไวต่อแสงสีเขียวก็ยังมีใช้ด้วย

<u>กระดาษสำหรับราดิโอกราฟี</u>

โดยทั่ว ๆ ไปกระดาษอัดรูปธรรมดาสามารถใช้บันทึกภาพของรังสีเอ็กซ์ได้ แม้ว่าคุณสมบัติของมันจะไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากกระดาษอัดรูปมีความไวแสงต่ำ ทำให้ภาพไม่ค่อยคมชัด อย่างไรก็ตาม กระดาษอัดรูปยังมีหลายแบบซึ่งบางแบบสามารถนำมาใช้งานทางรังสีได้

กระดาษสำหรับราดิโอกราฟี จึงต้องมีการออกแบบเป็นพิเศษให้มีลักษณะทึบแสงและเคลือบด้วยอิมัลชั่นชั้นเดียว อิมัลชั่นทำด้วยเจลาตินและเกลือเงินเหมือนกับฟิล์มรังสีเอกซ์ แต่ใส่สารเคมีบางตัวลงไปอีก หลังจากโดนสารรังสีแล้วกระดาษจะถูกล้างในสารละลายที่เป็นด่าง เรียกว่า activator หลังจากล้างแล้วแทนที่จะมีการฟิกเซอร์เหมือนฟิล์มสารเคมีในอิมัลชั่นจะทำหน้าที่หยุดปฏิกริยา activate เอง เรียกว่า stabilization processing ภาพที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับฟิล์มรังสีเอกซ์ และจะไม่เสื่อมสลายไปภายใน 2 – 3 เดือน แต่ถ้าต้องการเก็บไว้นานจำเป็นต้องมีการทำฟิกเซอร์ ล้างและทำให้แห้งเหมือนฟิล์มทั่ว ๆ ไป

แม้ว่ากระดาษสำหรับราดิโอกราฟีจะใช้รับรังสีเอกซ์โดยตรงได้ แต่การใช้ฉากฟลูออเรสเซนต์เข้ามาช่วยจะนิยมมากกว่า เนื่องจากฉากจะทำให้เกิดแสงอุลตร้าไวโอเลตขึ้น การถ่ายรังสีจะใช้เวลาน้อยลงและภาพจะคมชัดมากยิ่งขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าไม่ใช้ฉากเวลาที่ใช้จะมากขึ้นและภาพจะไม่ค่อยชัด

ภาพที่เกิดขึ้นเกิดจากการหักเหของแสงเหมือนการเกิดภาพธรรมดา ซึ่งรายละเอียดที่ต้องการจะเห็นจะดีที่สุดเมื่อแสงทำมุม 30° กับกระดาษ ความหนาแน่นของกระดาษเรียกว่า reflection density จะแตกต่างไปจากความหนาแน่นของฟิล์มรังสีเอกซ์ แต่ไม่มีผลในการอ่านผลที่เกิดขึ้น

กระดาษสำหรับราดิโอกราฟี จะมีความไวในการรับแสงมากเทียบได้กับฟิล์มรังสีเอกซ์ที่มีความไวต่อแสงมาก ๆ ได้หลายแบบ สามารถใช้งานได้ทั่วไปแต่ไม่นิยมใช้กับงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง

<u>คุณลักษณะของฟิล์มรังสีเอกซ์</u>

ลักษณะทั่วไปของฟิล์มได้แก่ ความไวของฟิล์ม ความกระจ่างชัดของฟิล์ม ความละเอียดของเกรนของฟิล์ม จะเป็นผลทำให้การถ่ายรังสี การล้างและคุณภาพของภาพที่เกิดขึ้นดีมากน้อยแค่ไหน คุณลักษณะทั้งสามจะสัมพันธ์กันนั่นคือ ฟิล์มที่ความไวแสงมากเกรนจะใหญ่ความกระจ่างชัดจะต่ำ ในทาง

i 17099478

ทรงข้ามฟิล์มที่มีความไวแสงน้อยเกรนจะละเอียดความกระจ่างชัดจะมาก ความไวของฟิล์มและความกระจ่างชัดของฟิล์มจะหาได้จาก characteristic curve ของน้ำยาของฟิล์ม โดยเขียนความหนาแน่นของฟิล์มกับระยะเวลาที่ใช้ ส่วนขนาดของเกรนจะขึ้นอยู่กับน้ำยาที่เคลือบฟิล์ม

ยังมีคุณลักษณะอื่น ๆ ของฟิล์มรังสีเอกซ์ที่จะทำให้เกิดผลขึ้นมา อย่างไรก็ตามจะพิจารณาเพียงแค่ความไวของฟิล์ม ความกระจ่างชัดของฟิล์ม ความละเอียดของเกรนและองค์ประกอบอื่น ๆ ที่จะมีผลต่อสามสิ่งนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ความหนาแน่นของฟิล์ม</u>

การวัดปริมาณความมืดของภาพที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเรียกว่า ความหนาแน่นของฟิล์มสามารถวัดได้โดยตรงจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า เดนซิโตมิเตอร์ (densitometer)

ความหนาแน่นของฟิล์มมี 2 ชนิด ได้แก่ (1) ความหนาแน่นของฟิล์มที่มีอยู่ในฟิล์มที่มีลักษณะใส เรียกว่า transmission density เช่น ในฟิล์มสำหรับราดิโอกราฟีทั่ว ๆ ไป (2) ความหนาแน่นที่เกิดอยู่ในภาพที่มีลักษณะทึบ เช่น ในกระดาษสำหรับราดิโอกราฟี เรียกว่า reflection density

Transmission Density สามารถหาได้จากสมการ

$$D = \log (Io/It) \qquad 8$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นของฟิล์ม

Io = ความเข้มของแสงจะตกกระทบบนฟิล์ม

It = ความเข้มของแสงที่ผ่านออกจากฟิล์ม

ทำนองเดียวกัน reflection density สามารถหาได้จากสมการ

$$Dr = \log (Io/Ir) \quad \text{สมการ 9}$$

เมื่อ Dr = Reflection Density

Io = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนภาพ

Ir = ความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาจากภาพ

แม้ว่าสมการทั้งสองจะคล้ายคลึงกันแต่ความหนาแน่นจะแตกต่างกันมาก

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงที่ตกกระทบ (Io) ต่อความเข้มของแสงที่ผ่านออกจากฟิล์ม (It) ในสมการ 8 เรียกว่า opacity ส่วนกลับของอัตราส่วนนี้ (It/Io) เรียกว่า transmittance แสดงถึงความสามารถของแสงที่ผ่านฟิล์มออกมา ความสัมพันธ์ระหว่าง opacity และ transmittance จะแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

Density, log (Io/It)	Opacity, Io/It	Transmittance, It/Io
0	1	1.00
0.3	2	0.50
0.6	4	0.25
1.0	10	0.10
2.0	100	0.01
3.0	1,000	0.001
4.0	10,000	0.0001

ตารางที่แสดงไว้นี้แสดงถึงความสามารถที่แสงผ่านฟิล์มได้ ถ้าแสงที่ผ่านฟิล์มออกมามีค่าครึ่งหนึ่งของแสงที่ตกกระทบ (transmittance = 0.5) ความหนาแน่นของฟิล์มจะเท่ากับ 0.3 เมื่อความหนาแน่นเท่ากับ 1.0 จะมีแสงผ่านออกมาจากฟิล์มเพียง $\frac{1}{10}$ ของแสงที่ตกกระทบ ในทางปฏิบัติจริง ๆ แสงที่ผ่านออกจากฟิล์มจะมีเพียง $\frac{1}{100}$ ของแสงตกกระทบซึ่งความหนาแน่นของฟิล์มจะเท่ากับ 2.0 ดังนั้นเวลาตรวจดูฟิล์มที่ถ่ายเสร็จจึงต้องมีไฟส่องให้เห็นชัดยิ่งขึ้นเมื่อฟิล์มมีความหนาแน่นมากกว่า 2.0

Exposure

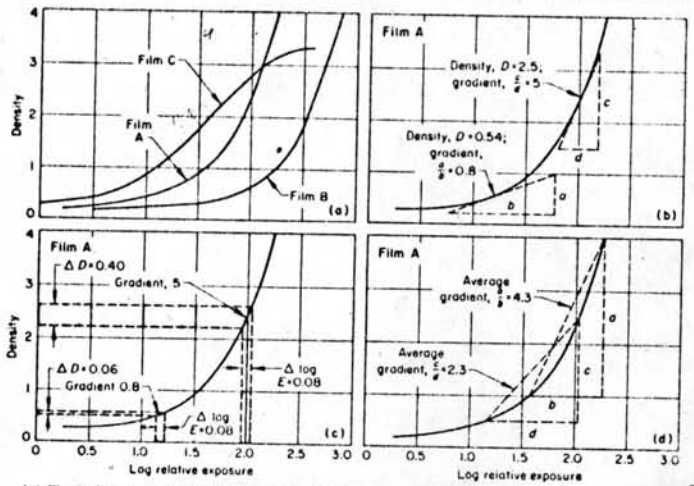
มีค่าเท่ากับปริมาณรังสีคูณด้วยเวลาที่รังสีฉายออกมา ซึ่งก็คือ ปริมาณพลังงานซึ่งจะตกลงบนฟิล์มและทำให้เกิดความหนาแน่นเฉพาะขึ้นบนฟิล์มเอ็กซ์โพเชอะ อาจจะกำหนดเป็นหน่วยทั่ว ๆ ไป (เช่น เอิร์กต่อการางเซนติเมตร หรือเรินเก้นท์) หรือหน่วยสัมพันธ์ (เช่น การเอ็กซ์โพเชอะ 1 ครั้ง จะมีหน่วยที่อ้างอิงไว้สิ่งอื่น ๆ จะต้องกำหนดในเทอมของหน่วยที่อ้างอิงไว้) ถ้าอุปกรณ์และเวลาที่ใช้ไม่ต้องการ การวัดปริมาณรังสีที่แน่นอนเอ็กซ์โพเชอะ ควรจะใช้หน่วยสัมพันธ์จะสะดวกกว่าหน่วยทั่ว ๆ ไป และประโยชน์ยังเท่ากัน

Characteristic Curves

ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็กซ์โพเชอะ ผลของความหนาแน่นของฟิล์ม ชนิดของฟิล์มจะแสดงอยู่บนกราฟที่เรียกว่า Characteristic Curve ซึ่งยังมีชื่อเรียกอื่น ๆ อีกว่า H and D curve, D log E curve or sensitometric curve ทำได้โดยใช้เอ็กซ์โพเชอะหลาย ๆ ค่ากับฟิล์มแต่ละชนิด ล้างฟิล์มแล้วอ่านความหนาแน่นของฟิล์มที่เกิดขึ้น กราฟที่ได้จะพลอตระหว่างความหนาแน่นและลอการิทึมของเอ็กซ์โพเชอะ ที่ใช้หน่วยสัมพันธ์ ตามรูปที่ 14 (a) จะแสดง characteristic curve ของฟิล์มที่ใช้ในงานทั่วไป 3 ชนิด โดยมีแผ่นตะกั่วกั้นระหว่างฟิล์มและรังสี

เอ็กซ์โพเชอะ แบบหน่วยสัมพันธ์จะใช้บางส่วน เนื่องจากหน่วยที่ใช้ไม่เหมาะสมกับทุก ๆ กิโลโวลท์เตจ และการสะท้อนของรังสีที่เกิดขึ้น แต่ในบางส่วนก็มีผลดี เช่น เนื่องจากการใช้ลอการิทึมของเอ็กซ์โพเชอะ แบบหน่วยสัมพันธ์แทน เอ็กซ์โพเชอะ แบบหน่วยสัมพันธ์จะทำให้เกิดประโยชน์หลายประการ ได้แก่ สเกลของกราฟที่ยาวก็สามารถหดสั้นลงได้ และอัตราส่วนของความเข้มของรังสี หรือเอ็กซ์โพเชอะ (ซึ่งได้จากการลบ ลอการิทึม) จะใช้งานมากกว่าความเข้มของรังสี หรือเอ็กซ์โพเชอะจริง ๆ

รูปที่ 14[1] กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของฟิล์มรังสีเอ็กซ์



(a) Typical curves for three industrial x-ray films exposed to x-radiation between lead screens. (b) Evaluation of gradients at two points on the curve for film A in (a). (c) Density differences (ΔD) corresponding to a 20% difference in relative exposure ($\Delta \log E = 0.08$) determined for the two values of gradients evaluated in (b). (d) Average gradients for film A determined over two density ranges.

Fig. 14. Characteristic curves for x-ray film that determine type of film and film gradient, speed and density. See text for discussion.

Characteristic Curve จะใช้ในการพิจารณาความไวและความกระจ่างชัดของฟิล์ม เพื่อเลือกชนิดของฟิล์ม เช่น ตามรูปที่ 14 (a) กราฟของฟิล์ม เอ และ บี จะเป็นรูปตัว เจ ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์มรังสีเอ็กซ์ ทางอุตสาหกรรมแบบ 1, 2 และ 3 กราฟของฟิล์ม ซี. จะเริ่มเป็นเส้นตรงที่ความหนาแน่นในช่วง 3.0 ถึง 3.5 ทำให้กราฟกลายเป็นรูปตัว เอส ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์มแบบ 4 ซึ่งใช้ฉากชนิดฟลูออเรสเซนต์

<u>ความไวของฟิล์ม</u>

เป็นส่วนกลับของเวลาที่ใช้ฉายรังสีลงบนฟิล์ม เวลาที่ใช้ยิ่งสั้นความไวของฟิล์มยิ่งมาก ในหน่วยสัมบูรณ์ความไวของฟิล์มจะเป็นส่วนกลับกับพลังงานทั้งหมด (เรินเก้นท์) ของแถบรังสีที่จะทำให้เกิดความหนาแน่นบนฟิล์ม ในทางปฏิบัติความไวของฟิล์มมักใช้หน่วยสัมพันธ์ ในการใช้หน่วยสัมพันธ์ความไวของฟิล์ม

จะแสดงในหน่วยของตัวเลขจำนวนเต็มหนึ่ง ๆ เช่น 100 ดังนั้นถ้ากำหนดฟิล์ม บี มีความไวของฟิล์มเท่ากับ 100 ต้องการให้ฟิล์ม เอ ใช้เวลาในการถ่ายรังสีเป็นครึ่งหนึ่งของฟิล์ม บี ซึ่งก็คือ มีความไวของฟิล์มเป็น 2 เท่า ดังนั้นความไวของฟิล์ม เอ เท่ากับ 200

เพื่อหลีกเลี่ยงการวัดความไวของฟิล์มแบบสัมบูรณ์จะพิจารณาความไวของฟิล์มโดยการเปรียบเทียบกัน เช่น ในรูป 14 (a) เส้นกราฟทางด้านซ้ายของรูปจะใช้เวลาน้อยในการถ่ายรังสีเพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามต้องการ เส้นกราฟทางด้านขวาจะใช้เวลามากกว่า ดังนั้นที่ความหนาแน่น 2.0 ฟิล์ม ซี รูป 14 (a) จะมีความไวของฟิล์มมากกว่าฟิล์ม เอ และทั้งคู่จะไวกว่าฟิล์ม บี ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของ ลอการิทึม ของเวลาที่ใช้ ขณะที่ความหนาแน่นเดียวกัน ฟิล์ม บี จะเป็นฟิล์มที่มีความไวช้าที่สุดและต้องการ ลอการิทึม ของเวลาที่ใช้เท่ากับ 2.5 ทำให้ความหนาแน่นเท่ากับ 2.0 ดังนั้นฟิล์ม บี จะกำหนดเป็นมาตรฐานให้มีความไว 100 ฟิล์ม เอ จะมีค่าลอการิทึม ของเวลาในการถ่าย 1.9 ที่ความหนาแน่นเดียวกัน เมื่อเอาค่า 1.9 ลบ 2.5 ค่าที่ต่างกัน 0.6 เปิด แอนตี้ลอการิทึม จะได้ค่าประมาณ 4 แสดงว่าฟิล์ม เอ มีความไวกว่าฟิล์ม บี 4 เท่าคือ 400 ทำนองเดียวกัน ฟิล์ม ซี จะอ่านค่า ลอการิทึม ของเวลาในการถ่าย 1.6 เปิดแอนตี้ลอการิทึม จะได้ค่าประมาณ 8 ดังนั้นฟิล์ม ซี จะมีความไวเท่ากับ 800 ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.0

ผลดีอย่างอื่นในการใช้กราฟแบบนี้ก็คือ สามารถเปรียบเทียบความไวของฟิล์มได้อย่างง่าย เช่น ฟิล์ม เอ และ บี มีลักษณะของกราฟคล้ายกัน ส่วนฟิล์ม ซี กราฟจะต่างออกไปดังที่ทราบ ฟิล์ม ซี มีความไว 800 ที่ความหนาแน่น 2.0 ถ้าความหนาแน่นของ ซี มากกว่า 2.0 ความไวจะน้อยกว่า 800 ถ้าความหนาแน่นของ ซี น้อยกว่า 2.0 ความไวจะมากกว่า 800 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อทราบความไวของฟิล์มจะทำให้ทราบความหนาแน่นของฟิล์มด้วย

ความกระจ่างชัดของฟิล์ม

มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า film contrast คือ ค่าความหนาแน่นของฟิล์มที่แตกต่างกันในระหว่างพื้นที่ที่ติดกัน ถ้าแตกต่างกันมากความกระจ่างชัดจะสูง ถ้าแตกต่างกันน้อยความกระจ่างชัดจะต่ำ ความกระจ่างชัดในราดิโอกราฟีจะเรียกว่า radiographic contrast ซึ่งประกอบไปด้วย (1) subject contrast เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีซึ่งถูกดูดซึมโดยชิ้นงานและเป็นผลทำให้ปริมาณรังสีที่จะตกกระทบบนฟิล์มแตกต่างกันด้วย (2) film gradient or film contrast ซึ่งวัดความสามารถของน้ำยาเคลือบฟิล์มที่มีความไวต่อแสงและคุณลักษณะของฟิล์มที่ใช้

ความกระจ่างชัดของฟิล์มจะพิจารณาหาได้จากcharacteristic curve โดยหาความเอียงของกราฟตรงจุดที่กำหนดความหนาแน่นไว้ ความเอียงของกราฟจะเปลี่ยนไปตลอดความยาวของกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 14 (a) ยิ่งความสูงของความเอียงต่อเวลาที่ใช้มีมากจะทำให้ความหนาแน่นแตกต่างกันมากไปด้วย และจะทำให้รายละเอียดในฟิล์มชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นความกระจ่างชัดยิ่งสูงยิ่งทำให้ราดิโอกราฟีมีผลดี

ในรูป 14 (b) แสดงเส้นสัมผัสต่อกราฟของฟิล์มรังสีเอ็กซ์แบบหนึ่ง 2 จุด ทำให้หาความเอียงของทั้ง 2 จุดได้ (a/b และ c/d) สังเกตว่าเมื่อกราฟไม่ชันสูงความหนาแน่นของฟิล์มจะไม่มาก

ชิ้นงานชิ้นหนึ่งที่มีความหนาแตกต่างกันเล็กน้อยจะทำให้ความเข้มของรังสีที่ตกลงบนฟิล์มแตกต่างกันเล็กน้อยไปด้วย จาก characteristic curveยกตัวอย่างเช่น ความหนาของด้านบางแตกต่างจากด้านหนาไป 20 % ความแตกต่างของลอการิทึมของเวลาที่ใช้ รังสีจะเท่ากับ 0.08 ค่านี้ไม่ขึ้นกับกระแสของหลอด ระยะทางระหว่างหลอดไปยังฟิล์มจะเห็นว่าบริเวณที่กราฟมีความเอียงไม่มาก ความกระจ่างชัดของฟิล์มในกราฟจะมีเพียงแค่ 0.8 ความแตกต่างของความหนาแน่นแค่ 0.06 ดังที่แสดงในรูปที่ 14 (c) อย่างไรก็ตาม เมื่อความเอียงมีมากขึ้นความกระจ่างชัดจะมีค่าถึง 5 ความแตกต่าง

ของความหนาแน่นจะเท่ากับ 0.40 จากผลที่เกิดขึ้นทำให้เห็นว่า การทำงานจะได้ผลดีเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน เพราะทำให้เกิดความหนาแน่นของฟิล์มสูง การตรวจฟิล์มเพื่อดูสิ่งบกพร่องเล็ก ๆ จะกระทำได้ง่ายขึ้น

โดยปกติการบอกความกระจ่างชัดของฟิล์มจะสะดวกเมื่อบอกเป็นช่วงแทนที่จะบอกเป็นค่าเดียว ซึ่งคำนวนได้ง่าย ๆ จากกราฟ โดยหาความแตกต่างระหว่างความหนาแน่น 2 จุด หารด้วยความแตกต่างระหว่างลอการิทึมของเวลาที่ใช้ถ่ายรังสีที่ความหนาแน่นนั้น ค่าที่ได้เรียกว่าความกระจ่างชัดเฉลี่ย ดังรูปที่ 14 (d)

ความละเอียดของเกรน

เม็ดของซิลเวอร์เฮไลด์ที่มีอยู่ในน้ำยาเคลือบฟิล์ม จะมีขนาดเล็กมากสามารถเห็นได้โดยใช้กล้องขยายกำลังสูงมาก ๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน แม้ว่าความหนาของน้ำยาเคลือบแต่ละชั้นจะหนาเพียงแค่ 0.0005 นิ้ว เม็ดของสารนี้ก็ยังมีมากจนนับไม่ได้ เมื่อโดนแสงและล้างแล้วเม็ดของสารจะปรากฏกลุ่มละเอียดเล็ก ๆ ซึ่งสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือกล้องกำลังขยายต่ำ ๆ เรียกว่าความละเอียดของเกรน

ฟิล์มทุกชนิดต้องมีความละเอียดของเกรนอยู่เสมอ โดยทั่วไป ฟิล์มที่มีความไวต่ำจะมีความละเอียดของเกรนน้อยกว่าฟิล์มที่มีความไวสูง ดังนั้นฟิล์มแบบ 1 จะมีความละเอียดน้อยที่สุด ฟิล์มแบบ 3 ละเอียดมากที่สุดและฟิล์มแบบ 2 ความละเอียดจะอยู่ระหว่างกลาง

เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงรังสีเพิ่มขึ้น (โดยพลังงานของโฟตรอนมากขึ้น ความยาวคลื่นลดลง) ความละเอียดของเกรนของฟิล์มจะต้องเพิ่มขึ้น แต่อัตราของการเพิ่มขึ้นนี้อาจจะต่างกันเมื่อฟิล์มคนละชนิด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ฟิล์มชนิดหนึ่งจะแสดงว่ามีความละเอียดของเกรนมากที่ความยาวคลื่นสูง ส่วนอีกชนิดหนึ่งแสดงว่ามีความละเอียดของเกรนมากที่ความยาวคลื่นต่ำ ความละเอียดของเกรนของภาพที่เกิดจากโฟตรอน พลังงานสูงต้องใช้ฟิล์มเกรนละเอียดเช่น แบบ 1 และแบบ 2 โดยเฉพาะใช้กับโฟตรอนพลังงานมากกว่า 1 MeV.

Spectral Sensitivity

ในทางปฏิบัติลักษณะของ characteristic curve ของฟิล์มรังสีเอ็กซ์แต่ละชนิดจะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมาที่ใช้ อย่างไรก็ตามความไวของฟิล์มในเทอมของเรินเก้นท์เพื่อที่จะทำให้เกิดความหนาแน่นตามที่กำหนดจะมีผลโดยพลังงานของรังสีเป็นอย่างมาก

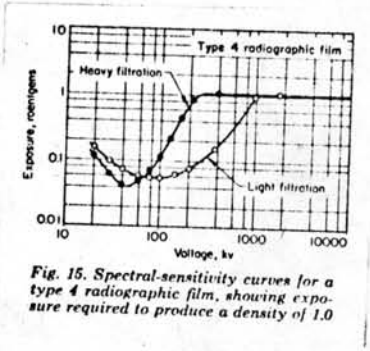


Fig. 15. Spectral-sensitivity curves for a type 4 radiographic film, showing exposure required to produce a density of 1.0

รูปที่ 15 (1)

กราฟแสดงความไวของแสงของฟิล์มรังสีเอ็กซ์แบบที่ 4

รูปที่ 15 แสดงถึงเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีกับฟิล์มแบบ 4 เพื่อที่จะทำให้มีความหนาแน่นของฟิล์มเท่ากับ 1.0 ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาของฟิล์มชนิดนั้นเป็นเวลา 5 นาที ที่ 20 องศาเซลเซียส การถ่ายรังสีกับฟิล์มจะทำโดยตรงโดยไม่มีฉากระหว่างฟิล์ม

ลักษณะกราฟของ spectral sensitivity ที่เกิดขึ้นของฟิล์มรังสีเอ็กซ์ทุกแบบจะคล้ายคลึงกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 15 อย่างไรก็ตามรายละเอียดจริง ๆ ของแต่ละฟิล์มย่อมแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น อัตราส่วนของความไวสูงสุดต่อความไวต่ำสุด ในขณะที่เวลาที่ใช้เปลี่ยนไป นอกจากนั้นลักษณะของกราฟของรังสีที่ใช้วิธีการกรองต่างกัน ก็จะแตกต่างกันด้วย (ดูรูปที่ 15)

Spectral Sensitivity ของฟิล์มที่กำหนดหรือฟิล์มต่างชนิดกันจะใช้เป็นตัวกำหนด พิจารณาตารางความไวของฟิล์มแบบต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ในตารางความไวของฟิล์มแบบต่าง ๆ ความไวของฟิล์มแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงตามโวลท์เตจของหลอด นอกจากนั้นยังใช้คำนวณหาเวลาที่จะใช้ถ่ายรังสีแกมมาได้ซึ่งจำเป็นเพื่อที่จะให้ได้ความหนาแน่นที่ถูกต้อง ดังนั้นผู้ผลิตฟิล์มจะต้องเตรียมตาราง Spectral Sensitivity เพื่อชี้บอกเวลาที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นต่าง ๆ กัน เมื่อโวลท์เตจของหลอดและพลังงานของรังสีแกมมาเปลี่ยนไป

<u>ผลของคุณลักษณะของฟิล์มเมื่อทำการล้าง</u>

แม้ว่า characteristic curveของฟิล์มจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อพลังงานของโฟตรอนเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อทำการล้างฟิล์มกราฟของฟิล์มจะเปลี่ยนไปซึ่งขึ้นกับ (1) ชนิดของน้ำยาล้างฟิล์ม (2) อุณหภูมิของน้ำยา และ (3) ระยะเวลาที่ล้างนานเท่าไร การเพิ่มองค์ประกอบพวกนี้ให้มากขึ้นจะทำให้ความไวและความกระจ่างชัดของฟิล์มมากขึ้นไปด้วย ถ้าเพิ่มมากเกินไป (นั่นคือ ฟิล์ม overdeveloped) ความไวของฟิล์มซึ่งขึ้นกับความหนาแน่น (ความหนาแน่นของฟิล์มที่อยู่เหนือบริเวณสีเทาของฟิล์ม) จะไม่เพิ่มขึ้นอีก และอาจจะลดลงด้วย นอกจากนั้นบริเวณสีเทาของฟิล์ม (fog) ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำยาเคมีทำปฏิกริยากับบริเวณฟิล์มที่ไม่ได้ถูกรังสีมากเกินไปจะเพิ่มขึ้นและความกระจ่างชัดของฟิล์มจะลดลง

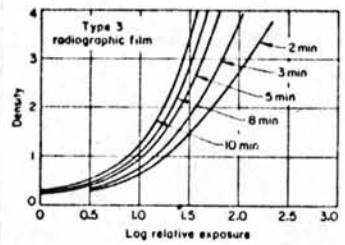


Fig. 16. Effect of various developing times on the characteristic curve of a type 3 radiographic film developed at 20 C (68 F) in a manual process

รูปที่ 16

ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการล้างฟิล์มแบบที่ 3

รูปที่ 16 แสดง characteristic curve ของฟิล์มรังสีเอ็กซ์ แบบ 3 ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาที่ใช้ล้างเปลี่ยน โดยอุณหภูมิขณะล้าง 20 องศาเซลเซียส (68 องศาฟาเรนไฮ) น้ำยาล้างได้มาจากการละลายผงของน้ำยา ขณะที่ระยะเวลาล้างเพิ่มขึ้นจะเห็นว่ากราฟจะมีความชันเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งทำให้เส้นกราฟเลื่อนไปทางซ้ายเรื่อย ๆ เป็นผลให้ความกระจ่างชัดเพิ่มขึ้นและความไวของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นความไวสัมพัทธ์ ความกระจ่างชัดเฉลี่ย และวิธีการล้างฟิล์มหาได้จากกราฟนี้

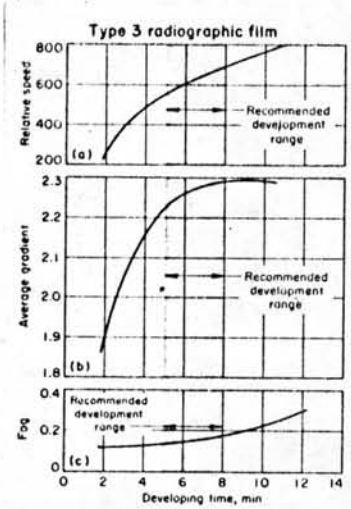


Fig. 17. Effect of developing time on (a) relative speed, (b) average gradient, and (c) fog, for a type 3 radiographic film. These graphs were derived from the same data as was Fig. 16.

รูปที่ 17[1]

ผลของระยะเวลาในการล้างฟิล์มที่มีต่อฟิล์มแบบที่ 3

รูปที่ 17 แสดงค่าความไวสัมพัทธ์ ความกระจ่างชัดเฉลี่ย และ fog สัมพัทธ์กับระยะเวลาล้างของฟิล์มแบบเดียวกัน จากกราฟแสดงว่า ระยะเวลาการล้าง 8 นาที จะทำให้ความกระจ่างชัดเฉลี่ยมีค่าสูงสุดและเริ่มลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ฟิล์มที่ใช้เป็นแบบที่ 3 แต่ฟิล์มแบบอื่น ๆ คือ 1, 2, 4 ก็จะให้ลักษณะของกราฟคล้ายคลึงกัน

องค์ประกอบของการล้าง ยังมีผลต่อความละเอียดของเกรนด้วย ยกตัวอย่างเช่น ระยะเวลาการล้างเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความไวของฟิล์มมากขึ้นซึ่งคล้ายกับความละเอียดของเกรนจะเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกัน องค์ประกอบของการล้างลดลงจะทำให้ความไวของฟิล์มลดลง โดยปกติอุณหภูมิและปฏิกริยาของน้ำยาขณะใช้งานจะมีผลน้อยต่อความละเอียดของเกรน

ความกระจ่างชัดของฟิล์ม ความไว ความละเอียดของเกรน และ fog ที่เปลี่ยนไปที่ระยะเวลาและอุณหภูมิของการล้างหนึ่ง ๆ ของฟิล์มแต่ละชนิดควรทำเป็นมาตรฐานไว้ ซึ่งจะทำให้ง่ายในการหาความหนาแน่นที่เวลาการถ่ายรังสีหนึ่ง ๆ

ชนิดของฟิล์มและการเลือก

ในการเลือกฟิล์มเพื่อที่จะทำราดิโอกราฟี ครั้งหนึ่ง ๆ จะต้องพิจารณาคุณภาพของภาพที่เกิดขึ้นและราคาที่ใช้ในการเดินเครื่อง เพื่อทำราดิโอกราฟี คุณภาพของภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความหนาแน่นของฟิล์ม ความกระจ่างชัดของฟิล์ม ความละเอียดของเกรน และ fog ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของฟิล์มแต่ละชนิดและยังรวมทั้งวิธีการล้างด้วย เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีขึ้นกับความเร็วของฟิล์มเป็นส่วนใหญ่ และความเข้มของรังสีที่ตกลงบนฟิล์มซึ่งความเข้มของรังสีนี้ขึ้นกับ (1) ความเข้มของรังสีที่แหล่งรังสี (2) คุณลักษณะการดูดซึมรังสีของชิ้นงานที่ตรวจสอบ (3) ลักษณะการจัดรูปทรงทางเรขาคณิตของแหล่งรังสี ชิ้นงานและฟิล์ม และ (4) คุณลักษณะของฉากที่ใช้

ชนิดของฟิล์ม

การแบ่งลำดับของฟิล์มทางราดิโอกราฟี เป็นสิ่งยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามการแบ่งลำดับที่ง่ายที่สุดได้แก่ มาตรฐานของ ASTM ตามมาตรฐาน ASTM E9 ฟิล์มราดิโอกราฟีจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คุณลักษณะทั่ว ๆ ไปของฟิล์มทั้ง 4 ชนิด จะแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4[1] ลักษณะโดยทั่วไปของฟิล์มราดิโอกราฟี

Table 4. General Characteristics of Four Types of Radiographic Film (ASTM E94)

Film type	Film characteristic: Speed	Gradient	Graininess
1..	Low	Very high	Very fine
2..	Medium	High	Fine
3..	High	Medium	Coarse
4(a)	Very high(b) Medium(d)	Very high(b) Medium(d)	(c) Medium(d)

(a) Normally used with fluorescent screens. (b) When used with fluorescent screens. (c) Graininess is mainly a characteristic of the fluorescent screens. (d) When used for direct exposure or with lead screens.

ตามมาตรฐานของ ASTM คุณลักษณะของฟิล์มจะเปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟิล์มที่ผลิตขึ้น ซึ่งเป็นผลจากโรงงานผลิตและเครื่องหมายการค้าต่างกันและยังเนื่องมาจากวิธีการล้างฟิล์ม ซึ่งเป็นผลอย่างมากกับความเร็วและความหนาแน่นของฟิล์ม การเปลี่ยนแปลงนี้จำเป็นต้องทำให้ถูกต้องมาตรฐานของวิธีการล้างฟิล์มขึ้น และเมื่อจะใช้และล้างฟิล์มชนิดหนึ่งต้องทราบ characteristic curve ของฟิล์มชนิดนั้นจากบริษัทผู้ผลิตด้วย

<u>การเลือกฟิล์ม</u>

ในการเลือกฟิล์มสำหรับการทำราดิโอกราฟี จำเป็นต้องพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีและคุณภาพของภาพตามที่ออกมาให้ดีที่สุด ค่าใช้จ่ายถูกที่สุด โดยปกติในทางปฏิบัติมักจะเลือกใช้ฟิล์มแบบ 2 หรือดีกว่า

โดยทั่วไปฟิล์มแบบ 1 จะเป็นฟิล์มที่ให้คุณภาพของภาพที่ออกมาดีที่สุด เนื่องจากมีเกรนละเอียด ความกระจ่างชัดของฟิล์มสูง แต่เนื่องจากมีความไวฟิล์มต่ำ รังสีที่ใช้จึงต้องมีความเข้มสูงหรือต้องใช้เวลาถ่ายรังสีนาน ฟิล์มแบบ 4 จะต้องใช้กับฉากฟลูออสเรสเซนต์ และฟิล์มแบบ 3 จะใช้เวลาถ่ายรังสีสั้นที่สุด (เนื่องจากมีความไวฟิล์มสูง) แต่มีข้อเสียคือ ฟิล์มมีเกรนหยาบและยังมีความกระจ่างชัดของฟิล์มปานกลาง เป็นผลให้คุณภาพของภาพที่ออกมาต่ำ

ความกว้างของฟิล์มซึ่งความหนาของชิ้นงานจะต้องถูกบันทึกไว้ในการถ่ายเพียงครั้งเดียว ยังมีผลในการเลือกฟิล์มด้วย โดยทั่วไปฟิล์มที่มีความกระจ่างชัดสูงจะมีความกว้างของฟิล์มแคบนั่นคือ ชิ้นงานที่มีความหนาไม่มากจึงจะทำให้ความหนาแน่นของฟิล์มดีที่สุดเพื่อที่จะตรวจดูผล ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องมีการถ่ายรังสีหลายครั้ง โดยใช้ความเข้มรังสีต่างกันหรือเวลาที่ใช้ในการถ่ายต่างกัน จำนวนครั้งของการถ่ายและระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายสามารถลดลงได้โดยใช้ฟิล์มที่มีความไวสูง มีความกระจ่างชัดต่ำ ความกว้างของฟิล์มมาก แม้ว่าความสามารถในการตรวจสิ่งบกพร่องจะลดลงก็ตาม

ฟิล์มสำหรับราดิโอกราฟีจำนวนมากโดยเฉพาะที่ออกแบบมาเพื่อใช้การล้างแบบออโตเมติกจะไม่สามารถแบ่งลำดับตามมาตรฐาน ASTM E94 แต่อย่างไรก็ตามหลักการของการเลือกฟิล์มยังขึ้นอยู่กับมาตรฐานของ ASTM อยู่

คุณภาพของภาพที่เกิดขึ้นบนฟิล์มย่อมหมายถึงความไวของราดิโอกราฟีเอง ความไวของราดิโอกราฟีสามารถหาได้จากการใช้ พีนีตรามิเตอร์ เนื่องจากความไวของราดิโอกราฟีจะขึ้นกับชนิดของชิ้นงานและความหนา รวมทั้งพลังงานของรังสีที่ใช้ จากตารางที่ 5 ที่แสดงไว้จะใช้เป็นสิ่งช่วยแนะแนวทางการเลือกฟิล์มที่ถูกต้อง เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของโลหะ ชนิดของแหล่งรังสีและพลังงานที่ใช้ อย่างไรก็ดีควรเลือกแบบของฟิล์มนัมเบอร์ต่ำที่สุดที่จะทำได้เพื่อลดค่าใช้จ่ายและวิธีการอื่น ๆ ลง

Table 5. Guide to Selection of Radiographic Film for Steel, Aluminum, Bronze and Magnesium in Various Thicknesses (ASTM E94)

Thickness, in.	Type of film(a) for use with these x-ray-tube voltages, or radioactive isotopes: 50 to 80 kv	80 to 120 kv	120 to 150 kv	150 to 250 kv	Ir-192	250 to 400 kv	1 Mev	Co-60	2 Mev	Ra	6 to 31 Mev
Steel											
0 to ¼	3	3	2	1	..	..	..	..	..	..	..
¼ to ½	4	3	2	2	..	1	..	..	..	..	..
½ to 1	..	4	3	2	2	2	1	..	1	2	..
1 to 2	..	..	..	3	2	2	1	2	1	2	1
2 to 4	..	..	..	4	3	4	2	2	2	3	1
4 to 8	..	..	..	..	..	4	3	3	2	3	2
Over 8	..	..	..	..	..	..	..	..	3	..	2
Aluminum											
0 to ¼	1	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..
¼ to ½	2	1	1	1	..	..	..	..	..	..	..
½ to 1	2	1	1	1	..	1	..	..	..	..	..
1 to 2	3	2	2	1	1	1	..	..	..	..	..
2 to 4	4	3	2	2	1	2	..	..	..	..	..
4 to 8	..	4	3	3	2	3	..	..	..	..	..
Over 8	..	..	..	..	4	..	..	..	..	..	..
Bronze											
0 to ¼	4	3	2	1	1	1	1	..	..	..	..
¼ to ½	..	3	2	2	2	1	1	..	1	..	..
½ to 1	..	4	4	3	2	2	1	2	1	2	..
1 to 2	..	..	4	4	3	3	1	2	1	2	1
2 to 4	..	..	..	..	3	4	2	3	2	3	1
4 to 8	..	..	..	..	..	..	3	3	2	..	2
Over 8	..	..	..	..	..	..	..	..	3	..	2
Magnesium											
0 to ¼	1	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..
¼ to ½	1	1	1	..	..	..	..	..	..	..	..
½ to 1	2	1	1	..	1	..	..	..	..	..	..
1 to 2	2	1	1	1	1	..	..	..	..	..	..
2 to 4	3	2	2	1	2	..	..	..	..	..	..
4 to 8	..	3	2	2	3	..	..	..	..	..	..
Over 8	..	..	..	4	..	..	..	..	..	..	..

(a) These recommendations represent a usually acceptable level of radiographic quality. Optimum radiographic quality will be promoted by use of the lowest-number film type that economic and technical considerations will allow. The recommendations for type 4 film are based on the use of fluorescent screens.

ตารางที่ 5[1] การเลือกชนิดของฟิล์มกับโลหะชนิดต่าง ๆ หลายความหนา

เนื่องจากมีองค์ประกอบมากมายในการแบ่งลำดับฟิล์มซึ่งไม่สามารถลงรายละเอียดได้ในมาตรฐาน ASTM E94 ดังนั้น บริษัทผู้ผลิตฟิล์มจึงต้องบอกแบบของฟิล์มไว้ด้วยในบางยี่ห้อ ผู้ผลิตฟิล์มส่วนมากจะผลิตฟิล์มที่มีความไวฟิล์มต่ำ ความกระจ่างชัดสูงมากและมีเกรนฟิล์มละเอียดมากด้วย ซึ่งไม่ค่อยตรงกับมาตรฐานของ ASTM แต่สามารถพิจารณาได้ว่าดีกว่าแบบที่ 1 เล็กน้อย

องค์ประกอบของการถ่ายรังสี

ปริมาณรังสีที่จะไปกระทบชิ้นงานและเกิดภาพขึ้นบนฟิล์มนั้นจะเกิดขึ้นได้ มีองค์ประกอบหลายอย่างคือ ความเข้มและคุณภาพของรังสี ระยะทางจากแหล่งรังสีไปยังฟิล์มและเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี ในทางปฏิบัติคุณภาพของรังสีที่เกิดขึ้นกับโวลท์เตจของหลอดของเครื่องหรือขึ้นกับไอโซโทปของสารรังสีแกมมา ซึ่งต้องคิดแล้วว่ามีความสามารถพอที่จะทะลุทะลวงวัสดุและความหนาที่จะตรวจได้ ตัวกลางที่จะใช้บันทึกจะถูกเลือกตามความไวที่มีต่อรังสีและภาพที่เกิดขึ้นง่ายต่อการทำนายผล เมื่อสององค์ประกอบนี้ไม่เปลี่ยนแปลง องค์ประกอบที่เหลือที่เกี่ยวข้องคือ ความเข้มรังสี (พิจารณาจากกระแสของหลอดเป็นมิลลิแอมแปร์ สำหรับหลอดรังสีเอ็กซ์ หรือความเข้มเป็นคูรีสำหรับรังสีแกมมา) ระยะทางจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสีและเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี การที่ปริมาณรังสีจำนวนหนึ่งกระทบลงบนฟิล์มจะเรียกว่า การถ่ายรังสี (radiographic exposure)

กฎกำลังสองย้อนกลับ

โดยหลักการเกี่ยวกับแสงรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมาจะมีลักษณะถ่างออกเมื่อออกมาจากแหล่งรังสี ทำให้บริเวณที่รังสีตกมีขนาดกว้างขึ้นเรื่อย ๆ ขณะที่ความเข้มรังสีจะลดลงเมื่อระยะทางห่างจากแหล่งรังสีเพิ่มขึ้น ความเข้มหรือปริมาณรังสีที่ตกลงบนหนึ่งหน่วยพื้นที่จะแปรผกผันตามกำลังสองของระยะทางจากแหล่งรังสีซึ่งแสดงได้ในทางคณิตศาสตร์ คือ

$$IL^2 = \text{Constant} \qquad \text{สมการ 11}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีตามระยะทางที่กำหนด หน่วย คูรี, เรินเก้นท์

L " ระยะทางที่จุดห่างจากแหล่งรังสีที่มีปริมาณรังสีออกมาสม่ำเสมอ หน่วย ซม., นิ้ว

นอกจากนั้นกฎกำลังสองผกผันนี้สามารถแสดงได้ในรูปของอัตราส่วน คือ

$$I_1/I_2 = L_2^2/L_1^2 \quad \text{——สมการ 12}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยสัญญลักษณ์ 1 และ 2 จะแทนตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวลำรังสีที่ออกมา ดังนั้นตามคุณลักษณะของรังสี ความเข้มที่ระยะ 1 เมตร จากแหล่งจะมีค่าเป็น $\frac{1}{4}$ เท่าที่ระยะ 0.5 เมตร แต่มีค่าเป็น 4 เท่าที่ระยะ 2 เมตร และเป็น 9 เท่าที่ระยะ 3 เมตร

จากสมการที่ 10 เมื่อนำมาใช้กับสมการที่ 12 จะเขียนได้เป็น

$$i_1t_1/L_1^2 = i_2t_2/L_2^2 \quad \text{——สมการ 13}$$

เมื่อ i คือ ค่ากระแสของหลอด

t " เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี

L " ระยะทางจากฟิล์มมายังแหล่งรังสี โดยสัญญลักษณ์ 1 และ 2 ยังแทนตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรังสีออกมา

เมื่อแหล่งรังสีเป็นรังสีแกมมาจะเขียนได้ว่า

$$a_1t_1/L_1^2 = a_2t_2/L_2^2 \quad \text{——สมการ 14}$$

โดย a ความแรงของรังสีหน่วยคูรี่

ในการใช้งานจริง ๆ เมื่อใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานเดียวกัน (กิโลโวลท์เดจเดียวกัน) หรือแหล่งรังสีแกมมาเดียวกัน สมการ 13 หรือ 14 จะสามารถใช้ได้ดังนี้

เมื่อทำราดิโอกราฟีของชิ้นงานอันหนึ่ง โดยระยะทางจากแหล่งรังสีมายังฟิล์ม 1 เมตร ค่ากระแสของหลอด 20 มิลลิแอมป์ ระยะเวลาการถ่ายรังสี 10 วินาที ภาพที่จะมีลักษณะเหมือนกันทำได้โดยใช้เวลา 6.4 วินาที กระแสหลอด 20 มิลลิแอมป์ หรือเวลา 8 วินาที กระแสหลอด 16 มิลลิแอมป์ เมื่อระยะทางลดลงเหลือ 0.8 เมตร อย่างไรก็ตาม ถ้าระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 2 เมตร เวลาที่ใช้จะเป็น 40 วินาที กระแสหลอด 20 มิลลิแอมป์ หรือ 32 วินาที ที่กระแสหลอด 25 มิลลิแอมป์ หรือ 16 วินาที ที่กระแสหลอด 50 มิลลิแอมป์ เพื่อจะทำให้ภาพที่ออกมามีความหนาแน่นเท่ากัน

ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้รังสีแกมมา โคบอลท์ –60 ขนาด 12 คูรี่ ระยะทาง 1 เมตร เวลาที่ใช้ 20 นาที ถ้าต้องการภาพที่มีความหนาแน่นเท่ากันเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เมตร เวลาที่ใช้จะเป็น 45 นาที ขณะที่ความแรงรังสียังเท่าเดิม

<u>กราฟที่ช่วยในการถ่ายรังสีสำหรับการทำราดิโอกราฟีแบบรังสีเอ็กซ์</u>

ในหัวข้อนี้การเริ่มต้นได้แสดงการคำนวนไว้จากกราฟที่ช่วยในการถ่ายรังสี รูปที่ 25 แล้ว โดยปกติผู้ผลิตเครื่องมือจะให้เอ็กซ์โพเซอะกราฟของแต่ละเครื่องที่ผลิตด้วย แต่กราฟที่ให้เป็นค่าประมาณเท่านั้น ความหนาแน่นของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีผลมาจากรังสี การล้างฟิล์ม เทคนิคการเดินเครื่อง จำนวนและแบบของการกรองรังสี ฉาก และรังสีที่สะท้อนกลับ

แม้ว่าเอ็กซ์โพเซอะกราฟที่แจกมาพร้อมเครื่องจะช่วยในการทำงานได้ แต่กราฟที่ถูกต้องจริง ๆ ซึ่งทำได้จากการทำงานของหลอดรังสีเอ็กซ์ในเวลาปกติก็ควรจะทำไว้โดยวิธีง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

1. ทำแบบชิ้นงานให้มีความหนาต่าง ๆ กัน ทำการราดิโอกราฟีไว้โดยใช้การถ่ายรังสีหลาย ๆ ค่า และโวลท์เตจของหลอดต่าง ๆ กัน

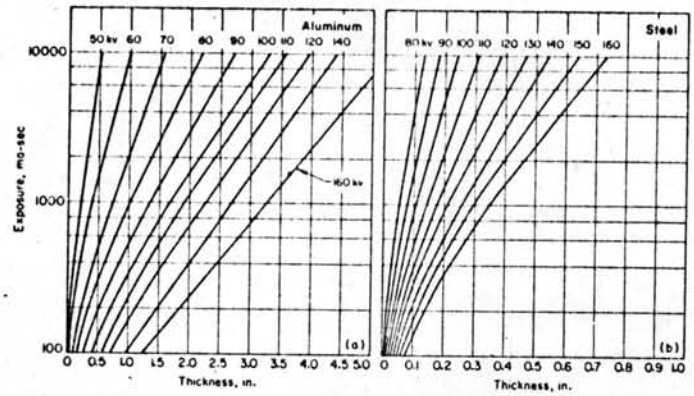
2. ทำการล้างฟิล์มโดยให้มีสภาพของการล้างเหมือนกันเพื่อจะใช้ประจำต่อไป

3. จากความหนาแน่นที่แตกต่างกันที่ได้จากความหนาต่าง ๆ พิจารณาความหนาแน่น (และความหนา) ซึ่งมีค่าถูกต้องที่สุดกับความหนาแน่นที่จะใช้งานประจำ ในขั้นนี้จำเป็นต้องใช้เดนซิโตมิเตอร์ วัดหาความหนาแนนออกมาเพราะไม่มีเครื่องมือชนิดอื่นที่จะวัดได้ถูกต้องยิ่งกว่า แต่ถ้าความหนาแน่นที่จะใช้งานประจำไม่มีค่าอยู่ในกราฟ การจะหาความหนาที่ความหนาแน่นที่จะใช้นี้ทำได้โดยการ Interpolation Chart ที่มีอยู่

4. ใช้ความหนาที่หาได้จากในข้อ 3 โวลท์เตจของหลอด (กิโลโวลท์เตจ) และเอ็กซ์โพเชอะ (มิลลิแอมป์–วินาที หรือ มิลลิแอมป์–นาที) ของฟิล์มที่ได้ พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาบนกระดาษเซมิลอกกับเอ็กซ์โพเชอะบนกระดาษล็อก

5. ลากเส้นเชื่อมจุดต่าง ๆ โดยมีโวลท์เตจคงที่บนแต่ละเส้นสำหรับเครื่องแต่ละเครื่องชนิดของฟิล์ม และเทคนิคในการล้างฟิล์ม ถ้าชนิดของฟิล์มแตกต่างไป การมีฉากหรือไม่มีฉากจะต้องทำกราฟขึ้นมาใหม่อยู่เสมอ

กราฟที่เตรียมขึ้นจะใช้ได้ดีกับชิ้นงานที่มีความหนาสม่ำเสมอ เมื่อมีชิ้นงานหนาไม่สม่ำเสมออาจจะต้องมีการแก้ไขเอ็กซ์โพเชอะ หรือระยะทางจากฟิล์มไปยังชิ้นงานใหม่เพื่อให้ได้ภาพที่ดี



Charts for aluminum and steel were prepared specifically for an Andrex 160-kv directional x-ray machine, using a source-to-film distance of 36 in. and industrex AA film (Eastman Kodak) developed in a manual process for 7 min in PIX developer (Picker).

Fig. 25. Typical radiographic-exposure charts for (a) aluminum and (b) steel for a film density of 2.0 without screens that relate exposure to thickness of test pieces for several values of tube voltage

รูปที่ 25 (1)

ลักษณะของเอ็กซ์โพเชอะกราฟรังสีเอ็กซ์อลูมินั่มและเหล็กกล้า

ในบางครั้ง Latitude Chart จะต้องมีไว้เพื่อช่วยหาเอ็กซ์โพเชอะที่ถูกต้อง เมื่อความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปแต่ยังอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ latitude คือช่วงความหนาของโลหะที่จะให้ความหนาแน่นจำเพาะออกมาของการล้างฟิล์มหนึ่ง ๆ เพื่อกำหนดปริมาณรังสี ระยะทางจากฟิล์มมายังแหล่งรังสีและเอ็กซ์โพเชอะ แถบของเงาที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 26 เป็น latitude curve ของการตรวจชิ้นงานที่เป็นเหล็กโดยใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ ขนาด 250 กิโลโวลท์ ตามรูปที่ 26 (a) เมื่อเพิ่มโวลท์เทจของหลอดไม่เพียงแต่ลดความต้องการเอ็กซ์โพเชอะลง แต่ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจชิ้นงานได้หนามากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ความหนาของเหล็กที่ใช้ตรวจในงานปกติจะหนา $\frac{5}{8}$ นิ้ว เอ็กซ์โพเชอะจะประมาณ 2200 มิลลิแอมป์–วินาที เพื่อทำให้เกิดภาพที่ดีโดยใช้ฟิล์มแบบที่ 2 โวลท์เทจ 150 กิโลโวลท์ ภาพที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นที่พอเหมาะกับความหนาระหว่าง 0.57 ถึง 0.70 นิ้ว ในกรณีอื่น เมื่อรังสีเอ็กซ์ 250 กิโลโวลท์ จะให้ภาพที่มี

ความหนาแน่นเท่ากัน บนฟิล์มแบบ 2 จะใช้เอกซ์โพเชอะเพียง 220 มิลลิแอมป์-วินาที เท่านั้น โดยความหนาจะอยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.78 นิ้ว จะทำให้เกิดความหนาแน่นบนฟิล์มที่ดี

ในด้านอื่นการใช้ฟิล์มต่างชนิดรวมกันเพื่อพิจารณาหาช่วงความหนาที่แต่ละฟิล์มสามารถตรวจพบได้ (ตามรูปที่ 26 b) การที่ฟิล์มแต่ละชนิดมี latitude chart ที่ต่างกันเป็นผลอันหนึ่งที่สามารถใช้เทคนิคนี้ได้ ยกตัวอย่างเช่น รังสีเอกซ์ 250 กิโลโวลท์ ถูกทำราดิโอกราฟีซึ่งซองใส่ฟิล์มเบอร์ 1, 2 และ 3 อย่างละแผ่น เอกซ์โพเชอะที่ใช้ 600 มิลลิแอมป์-วินาที ดังนั้นความหนาของชิ้นงานที่จะถูกบันทึกได้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.6 นิ้ว ต่อการถ่าย 1 ครั้ง แต่ละฟิล์มจะถูกล้างและตรวจสอบแยกกัน สำหรับช่วงของความหนาที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟิล์มที่ดีที่สุด สำหรับความหนาที่อยู่ระหว่างช่องว่างของความหนาแน่นของฟิล์มที่แตกต่างกัน ความกระจ่างชัดและรายละเอียดที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในฟิล์มใดหรือทั้งสองฟิล์มก็ได้

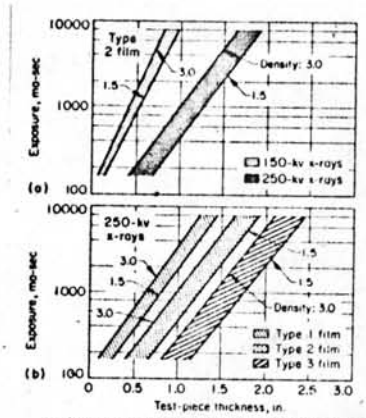
เมื่อมีการใช้ฟิลเตอร์หรือเทคนิคอื่น ๆ มาช่วยจะต้องมีการเปลี่ยนเอกซ์โพเชอะ หรือระยะทางระหว่างฟิล์มไปยังแหล่งรังสีด้วย ถ้าชิ้นงานที่จะทำการตรวจมีจำนวนมากควรเลือกชิ้นงานบางชิ้นและทำการตรวจเป็นชุด ๆ โดยเปลี่ยนโวลท์เตจของหลอดและเอกซ์โพเชอะเพื่อหาจุดที่ดีที่สุดในการเซทเครื่องมือและเอกซ์โพเชอะ

ในกรณีที่ชิ้นงานบางชิ้นไม่สามารถทำตามเทคนิคมาตรฐานหรือไม่สามารถทำตามเส้นรอบวงได้ จำเป็นต้องมีการเลือกเทคนิคใหม่ในหลาย ๆ แบบที่มีอยู่เช่น การทำราดิโอกราฟีซ้ำ ๆ กันโดยการเปลี่ยนสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ โวลท์เตจของหลอด กระแสของหลอด เวลาที่ใช้ในการวัดรังสี ระยะทางจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสีหรือความไวของฟิล์มหรือวิธีการอื่นคือ ซองใส่ฟิล์มอาจใส่ฟิล์มไว้มากกว่า 2 แผ่น อาจเป็นชนิดเดียวกันหรือคนละชนิดก็ได้ ผลที่ได้จากการทำราดิโอกราฟีอาจดูจากฟิล์มแผ่นเดียวหรือดูประกอบกันทั้ง 2 แผ่นก็ได้ วิธีการนี้เมื่อใช้ฟิล์มมากกว่า 2 แผ่นขึ้นไปและใช้ตรวจชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ จะมีประโยชน์มาก ในบางครั้งวิธีการพวกนี้จะช่วยในการปรับปรุงเทคนิคของการใช้งานประจำวัน

ได้ นอกจากนี้วิธีการแบบอื่นคือ การทำราดิโอกราฟซ้ำ โดยมีหรือไม่มีฟิลเตอร์ มีหรือไม่มีฉากตะกั่ว ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการถ่ายรังสีหรือกระแสของหลอดเพื่อชดเชยการที่รังสีลดความเข้มลง เนื่องจากมีฟิลเตอร์หรือฟิลเตอร์และฉากตะกั่วรวมกัน

เอ็กซ์โพเชอะกราฟ จะใช้งานในกรณีที่มี step wedge เข้ามาร่วมด้วยเท่านั้น ซึ่งจะใช้กับโลหะมาตรฐานทั่วไปเช่น เหล็กกล้าหรืออลูมินั่ม อย่างไรก็ตาม เอ็กซ์โพเชอะกราฟสำหรับโลหะมาตรฐานพวกนี้สามารถใช้หาเอ็กซ์โพเชอะแฟคเตอร์ สำหรับโลหะชนิดอื่น ๆ ได้โดยหาEquivalence Factor เช่นที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 อันดับแรกเอ็กซ์โพเชอะจะหาจาก เอ็กซ์โพเชอะกราฟ โดยคิดว่าทำจากโลหะมาตรฐาน ค่าเอ็กซ์โพเชอะที่ได้จะคูณด้วยEquivalence Factorจากตารางที่ 3 ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่ทำด้วย ติตาเนี่ยมหนา $\frac{1}{2}$ นิ้ว ถูกทำราดิโอกราฟี ด้วยหลอดรังสีเอ็กซ์ 150 กิโลโวลท์ โดยไม่มีฉากค่าเอ็กซ์โพเชอะของเหล็กกล้าหนา $\frac{1}{2}$ นิ้ว หาได้จากเอ็กซ์โพเชอะกราฟ รูปที่ 25 (b) มีค่าเท่ากับ 400 มิลลิแอมป์-วินาที เมื่อระยะทางจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสี 36 นิ้ว จากตารางที่ 3 Equivalence Factor ของติตาเนี่ยม สำหรับรังสีเอ็กซ์ 150 กิโลโวลท์ เท่ากับ 0.45 ดังนั้นเอ็กซ์โพเชอะของติตาเนี่ยมจะเท่ากับ 0.45 x 4000 = 1800 มิลลิแอมป์-วินาที ซึ่งในการทำงานจริง ๆ หลอดควรใช้กระแส 15 มิลลิแอมป์ เวลาในการถ่าย 120 วินาที

นอกจากเอ็กซ์โพเชอะกราฟแล้ว โนโมแกรม หรือสไลด์รูล ที่สร้างพิเศษจะช่วยในการคำนวนหาเอ็กซ์โพเชอะได้เร็วยิ่งขึ้นเพื่อลดเวลาในการเซทเครื่องและค่าใช้จ่ายให้น้อยที่สุด



(a) Effect of tube voltage on latitude of a type 2 radiographic film; (b) effect of film type on latitude for radiography using 250-kv x-rays. Curves were prepared from data obtained using a 250-kv x-ray machine, 36-in. source-to-film distance, and 0.010-in.-thick lead screens. Films were processed using a standardized technique.

Fig. 26. Latitude curves for radiographic inspection of steel at film densities ranging from 1.5 to 3.0

รูปที่ 26(1)

กราฟของ latitude สำหรับการทำราดิโอกราฟีแบบรังสีเอ็กซ์กับเหล็กกล้า

<u>เอ็กซ์โพเชอะกราฟของรังสีแกมมา</u>

เอ็กซ์โพเชอะกราฟของรังสีแกมมามีลักษณะคล้ายคลึงกับรังสีเอ็กซ์ แต่หน่วยที่ใช้แทนที่จะเป็นมิลลิแอมป์–วินาที กลับเป็น คูรี่–ชั่วโมง หรือ คูรี่–นาที เมื่อจะใช้เอ็กซ์โพเชอะกราฟ จะต้องทราบความแรงของรังสีก่อน ความแรงของรังสีจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล เมื่อเทียบกับเวลา แต่ละสารรังสีจะมีครึ่งชีวิตไม่เหมือนกัน ทำให้ความแรงของรังสีต่างกันไปด้วย (โดยปกติผู้ผลิตสารรังสีจะกำหนดวันเริ่มต้นของสารรังสีไว้เสมอ) กราฟของความแรงรังสีกับเวลาจะสามารถสร้างได้ดังนี้

ใช้กระดาษกราฟเซมิลอกพลอตค่าความแรงของรังสีลงบนสเกลลอก (เพื่อความสะดวกวันที่คิดความแรงของรังสีควรจะกำหนดไว้ด้วย) ส่วนสเกลธรรมดาเป็นค่าหนึ่งหน่วยเวลา (ความแรงของรังสีคิดที่เวลาศูนย์) ขยายสเกลออกไปอย่างน้อยครึ่งชีวิต 1 ครั้ง พลอตจุดความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของรังสีกับเวลาที่ทราบ (ครึ่งชีวิตและเวลาเริ่มต้น) ลากเส้นสัมพันธ์ระหว่างจุดก่อจุดและต่อออกไป เส้นตรงนี้จะแทนค่าความแรงรังสีที่เวลาใด ๆ

ตามรูปที่ 27 แสดงเอ็กซ์โพเซอะกราฟของสารรังสีแกมมาโคบอลท์ –60 ทำกับเหล็กกล้าและเหล็กหล่อเหนียว ในรูปที่ 27 (a) เป็นกราฟระหว่างเอ็กซ์โพเซอะ (หน่วยคูรี–นาที) และความหนาของชิ้นงาน โดยเส้นกราฟจะทำให้ความหนาแน่นบนฟิล์มเท่ากับ 2.0 เมื่อระยะทางระหว่างฟิล์มไปยังแหล่งรังสีเปลี่ยนไป ระยะเวลาที่ใช้ถ่ายรังสีจะหาได้จากนำเอาค่าความแรงของรังสีไปหารเอ็กซ์โพเซอะที่ได้จาก chart มา จากรูปที่ 27 (b) เป็นกราฟของเอ็กซ์โพเซอะแฟคเตอร์ กับความหนาของชิ้นงานโดยมีความหนาแน่นของฟิล์มหลายค่า เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสีจะหาได้จากสูตร

$$t = E \times L_i^2 / S \quad \text{_____สมการ 15}$$

เมื่อ t = เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี (นาที)

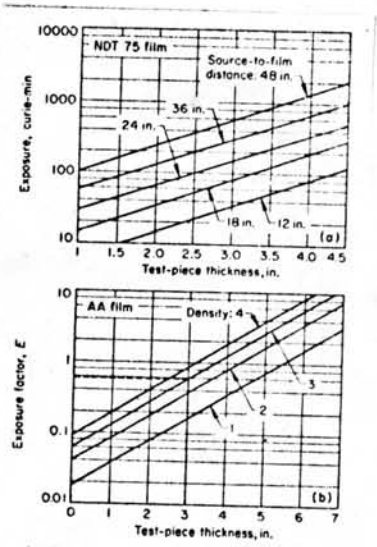
E = เอ็กซ์โพเซอะแฟคเตอร์

L_i = ระยะทางจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสี (นิ้ว)

S = ความแรงของรังสี (คูรี)

ยกตัวอย่างเช่น เมื่อจะทำราดิโอกราฟีกับเหล็กหนา 3 นิ้ว ใช้โคบอลท์ –60 ความแรง 15 คูรี ต้องการให้ฟิล์ม เอเอ มีความหนาแน่น 3.0 ระยะทางจากแหล่งรังสีไปยังฟิล์ม 12 นิ้ว ดังนั้นเอ็กซ์โพเซอะแฟคเตอร์ ที่หาได้จากกราฟตามตัวอย่างจะเท่ากับ 0.58 และจากสมการ 15 เวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี (t) จะ = $0.58 \times 12^2/15 = 5.6$ นาที

นอกจากนั้น latitude chart ของรังสีแกมมาที่แสดงในรูปที่ 28 จุดประสงค์ก็ยังเหมือนรังสีเอ็กซ์ คือ ใช้หาช่วงความหนาของชิ้นงานที่สามารถทำราดิโอกราฟีได้ในค่าเอ็กซ์โพเชอะหนึ่ง ๆ เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 28 และรูปที่ 26 จะเห็นว่า latitude ของฟิล์มชนิดที่ 2 เมื่อใช้โคบอลท์ -60 จะเป็น 4 เท่าของฟิล์มชนิดที่ 2 เมื่อใช้รังสีเอ็กซ์ 250 กิโลโวลท์ อย่างไรก็ตาม สไลด์รูล หรือโนโมแกรมของรังสีแกมมาก็ควรทำไว้ด้วยเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการคิดเอ็กซ์โพเชอะ

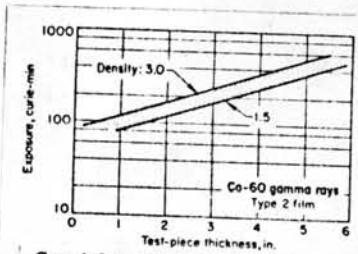


(a) Exposure in curie-minutes to produce a photographic density of 2.0 on Cronex NDT 75 film (du Pont), as a function of test-piece thickness for various source-to-film distances. (b) Exposure factor, *E*, for Industrex AA film (Eastman Kodak) as a function of test-piece thickness; four lines of constant photographic density are shown.

Fig. 27. Two types of exposure chart for computing gamma-ray exposures that apply to Co-60 radioisotopes and steel, gray iron or ductile iron test pieces

รูปที่ 27

ลักษณะของเอ็กซ์โพเชอะกราฟ 2 แบบของรังสีแกมมา



Curve is for type 2 film exposed at a source-to-film distance of 32 in. and with 0.010-in.-thick lead screens both front and back.

Fig. 28. Latitude curve for radiographic inspection of steel using Co-60 gamma rays to produce a film-density range of 1.5 to 3.0

รูปที่ 28

กราฟของ latitude สำหรับการทำราดิโอกราฟีแบบรังสีแกมมากับเหล็กกล้า

ความกระจ่างชัดของราดิโอกราฟี

ความกระจ่างชัดระหว่างสองบริเวณที่ปรากฏบนฟิล์มหนึ่ง ๆ จะวัดได้โดยดูจากความแตกต่างของความหนาแน่นของฟิล์มที่บริเวณนั้น ความกระจ่างชัดของวัตถุและของฟิล์มเป็น 2 องค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาความกระจ่างชัดของวัตถุและของฟิล์มเป็น 2 องค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาความกระจ่างชัดของราดิโอกราฟี

ความกระจ่างชัดของวัตถุคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีที่ส่งออกมาตอบริเวณ 2 บริเวณของชิ้นงาน โดยขึ้นกับความหนา รูปร่าง และส่วนประกอบของชิ้นงาน ความเข้มของรังสีที่สะท้อนและแถบของรังสีขณะใด ๆ แต่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการถ่ายรังสี ระยะทางจากฟิล์มไปยังแหล่งรังสี ชนิดของฟิล์ม วิธีการล้างฟิล์ม และความเข้มของรังสีขณะใด ๆ (โดยวัดความแรงรังสี หรือกระแสของหลอด)

ความกระจ่างชัดของฟิล์มเป็นความสามารถของฟิล์มที่จะบันทึกความแตกต่างของความหนาของชิ้นงานเป็นความแตกต่างของความหนาแน่นบนฟิล์ม โดยขึ้นกับชนิดของฟิล์ม วิธีการล้างและความหนาแน่นของฟิล์ม ในทางปฏิบัติจริง ๆ จะไม่ขึ้นกับคุณภาพและการกระจายของรังสีที่ออกมา องค์ประกอบต่าง ๆ ที่ทำให้ความกระจ่างชัดแตกต่างกันออกไปจะแสดงไว้ในตารางที่ 6

โดยทั่วไปการทำราดิโอกราฟีจะทำที่รังสีพลังงานต่ำที่สุด เพื่อให้เกิดความหนาแน่นของฟิล์มที่เพียงพอเพราะว่ารังสีที่ความยาวคลื่นมากจะมีแนวโน้มทำให้ความกระจ่างชัดดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าโวลท์เตจของหลอดต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการสะท้อนของรังสีมาก เป็นผลให้ฟิล์มเป็นฝ้าและบังรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ ในทางกลับกันถ้าโวลท์เตจของหลอดสูงเกินไป แม้ว่าการสะท้อนของรังสีจะลดลง แต่ความกระจ่างชัดของฟิล์มก็จะน้อยไปจนไม่สามารถเห็นสิ่งบกพร่องขนาดเล็ก ๆ ได้ ดังนั้น ในแต่ละช่วงย่อมมีรังสีที่มีพลังงานเหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดความกระจ่างชัด ความไวของการทำราดิโอกราฟีดีที่สุด

Table 6. Factors That Affect Subject Contrast and Film Gradient and Their Effect on Radiographic Contrast

Factor	Quality of factor that causes radiographic contrast to:- Increase	Decrease
Factors That Affect Subject Contrast		
Thickness range of test piece	Large range	Small range
Radiation quality	Low energy (longer wave lengths)	High energy (shorter wave lengths)
Scattered radiation	Small amount	Large amount
Factors That Affect Film Gradient		
Characteristic curve	High average gradient	Low average gradient
Degree of development	Adequate	Underdevelopment or overdevelopment
Film density:		
Film type 1, 2 or 3	High density	Low density
Film type 4	Intermediate density (1.5 to 2.0)	High or low density

ตารางที่ 6[1] แฟคเตอร์ที่มีผลต่อความคมชัด, ความหนาแน่นของฟิล์ม

ฉากที่ใช้ในราดิโอกราฟี

ฉากที่ใช้ในราดิโอกราฟี ซึ่งจะติดกับฟิล์มระหว่างการถ่ายรังสีมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ฉากโลหะ (โดยปกติจะเป็นฉากตะกั่ว) และฉากแบบฟลูออเรสเซนต์ ในบางครั้งฉากทั้งสองชนิดใช้รวมกันจะเรียกว่า ฉากฟลูออโรเมทัลลิก ฉากที่ใช้จุดประสงค์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและความกระจ่างชัดของฟิล์ม โดยการเพิ่มความเข้มของรังสีที่ตกลงบนฟิล์ม ฉากโลหะยังช่วยกรองรังสีที่เกิดจากการสะท้อนด้วย ซึ่งทำให้ความกระจ่างชัดเพิ่มมากกว่าเดิม

ฉากตะกั่ว

หน้าที่สำคัญของฉากตะกั่วซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากคือ ช่วยเพิ่มความเข้มและกรองรังสี ตะกั่วจะทำหน้าที่ดูดซึมรังสีที่มากเกินไปได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ปริมาณการดูดซึมจะมากหรือน้อยขึ้นกับคุณภาพของรังสีที่จะทะลุทะลวงวัสดุได้ (พลังงานของโฟตรอน หรือความยาวคลื่น) รังสีพลังงานสูง (ความยาวคลื่นสั้น) จะผ่านตะกั่วได้ดีกว่ารังสีพลังงานต่ำ หรือในทางกลับกันรังสีพลังงานต่ำจะถูกตะกั่วดูดซึมได้ดีกว่าพลังงานสูง เนื่องจากรังสีที่เกิดจากการสะท้อนของชิ้นงานจะมีพลังงานต่ำกว่ารังสีที่ตกกระทบ ตะกั่วจะทำหน้าที่ดูดซึมรังสีส่วนที่ไม่ต้องการนี้ออกไป (รังสีส่วนที่สะท้อน) และยังดูดซึมรังสีบางส่วนที่จะทำให้เกิดภาพด้วย ผลอันนี้เรียกว่า การกรองรังสี

การกรองรังสีที่เกิดจากการสะท้อน

รังสีที่สะท้อนจะเกิดมาจากการสะท้อนโดยชิ้นงานเป็นส่วนใหญ่ (เป็นการสะท้อนภายใน) และจากโต๊ะ หรือพื้นซึ่งฟิล์มนั้นวางอยู่ขณะทำการถ่ายรังสี (เป็นการสะท้อนกลับ) ดังนั้นจึงต้องมีการกรองเอารังสีทั้งสองแบบออกไปโดยใช้ฉาก 2 อัน ฉากที่อยู่ระหว่างชิ้นงานและแหล่งรังสีจะเรียกว่า ฉากด้านหน้า ฉากที่อยู่หลังฟิล์มจะเรียกว่า ฉากด้านหลัง ฉากทั้งสองจะทำหน้าที่ดูดซึมรังสีที่เกิดจากการสะท้อน

ในทางปฏิบัติบางครั้งฉากด้านหน้าจะบางกว่าฉากด้านหลัง เนื่องจากรังสีส่วนที่จะทำให้เกิดภาพจะผ่านฉากนี้ก่อน โดยปกติฉากตะกั่วด้านหน้าจะหนาประมาณ 0.005 หรือ 0.010 นิ้ว แต่อาจจะหนากว่าหรือบางกว่าได้โดยขึ้นกับชนิดของวัสดุที่จะถูกตรวจสอบและพลังงานของโฟตรอนของรังสี หน้าที่หลักของฉากด้านหลังคือ ดูดซึมรังสีที่สะท้อนกลับ ฉากด้านหลังจะมีขนาดเท่าใดก็ได้เพื่อให้ผลนี้เพียงพอ แต่โดยปกติแล้วความหนาของฉากด้านหน้าและด้านหลังจะเท่ากัน

ในการทำราดิโอกราฟีกับวัสดุที่บางหรือมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งจะต้องใช้โฟตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นการทำจึงต้องมีการระมัดระวังเป็นอย่างมากเพื่อไม่ให้ฉากด้านหน้ากรองรังสีมากเกินไป การที่รังสีถูกกรองมากเกินไปจะมีผลกับความกระจ่างชัดของชิ้นงานและมีแนวโน้มที่จะลดความไวของการทำราดิโอกราฟีลง ยกตัวอย่างเช่น ฉากตะกั่วที่ใช้จะต้องมีความหนาน้อยกว่า 0.005 นิ้ว (ปกติจะใช้หนาประมาณ 0.002 หรือ 0.001 นิ้ว หรือน้อยกว่า) สำหรับวัสดุที่หนาหรือมีความหนาแน่นมากซึ่งต้องใช้โฟตรอนที่มีพลังงานสูง ฉากด้านหน้าจะต้องมีความหนามากกว่า 0.005 นิ้ว และอาจจะสูงถึง 0.040 นิ้ว เมื่อใช้ Betatron หรือ Linear Accelerator ที่มีพลังงานสูง ๆ ในกรณีนี้ ฉากด้านหลังอาจจะหนา 0.020 ถึง 0.040 นิ้ว

<u>การเพิ่มความเข้ม</u>

เมื่อตะกั่วถูกกระตุ้นโดยรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา ตะกั่วจะให้อิเลคตรอนออกมา จำนวนของอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของโฟตรอนของรังสีที่ผ่านชิ้นงานและตกลงบนฉากอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกริยากับผลึกของซิลเวอร์เฮไลด์บนฟิล์ม ดังนั้นหลังจากการล้างฟิล์มแล้ว ความหนาแน่นของฟิล์มจะมากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เกิดปฏิกริยาจากตะกั่ว การเพิ่มความเข้มไม่เพียงแต่เพิ่มความเข้มทั้งหมดของฟิล์มซึ่งทำให้ต้องการเวลาในการถ่ายรังสีลดลง ยังทำให้ความกระจ่างชัดของฟิล์มมีมากขึ้นซึ่งทำให้ความสามารถในการตรวจสิ่งบกพร่องขนาดเล็ก ๆ ดีขึ้น

เนื่องจากฉากตะกั่วมีคุณสมบัติทั้งการกรองและการเพิ่มความเข้มรังสี เมื่อใช้งานจะมีอยู่จุดหนึ่งที่การกรองและการเพิ่มความเข้มรังสีจะเท่ากันซึ่งจะไม่มีประโยชน์อะไรต่อการถ่ายรังสี เมื่อชิ้นงานที่ตรวจสอบเป็นเหล็ก จุดที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดเมื่อชิ้นงานหนา $\frac{1}{2}$ นิ้ว รังสีเอ็กซ์ 140 กิโลโวลท์ ความหนาของฉากด้านหน้า 0.005 นิ้ว และความหนาของฉากด้านหลัง 0.010 นิ้ว เมื่อโวลท์เตจของหลอดลดลงหรือชิ้นงานบางลง การกรองรังสีจะมีผลมากกว่าทำให้ต้องใช้เวลาในการถ่ายรังสีนานขึ้น เมื่อโวลท์เตจของหลอดเพิ่มสูงขึ้นหรือชิ้นงานหนาขึ้น การเพิ่มความเข้มของรังสีจะมีผลมากกว่าทำให้ลด

เวลาในการถ่ายรังสี (เมื่อไม่มีฉาก) ลงไป 1/3 ของเวลาเดิมที่ 200 – 300 กิโลโวลท์ เมื่อใช้รังสีแกมมา โคบอลท์ –60 และชิ้นงานเป็นเหล็ก ระยะเวลาในการถ่ายรังสีเมื่อใช้ฉากตะกั่วจะน้อยกว่าถึงครึ่งหนึ่งของเวลาเดิม

ในกรณีที่เป็นโลหะเบา เช่น อลูมินั่ม จุดที่การกรองและการเพิ่มความเข้มรังสีจะเท่ากันเกิดขึ้นที่ความหนามากกว่าเหล็ก แต่ถ้าโลหะที่หนักกว่าเหล็กจุดที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ความหนาน้อยกว่าเหล็กและจุดที่เกิดขึ้นนี้พลังงานของรังสีจะแตกต่างไปจากรังสีเอ็กซ์ 140 กิโลโวลท์ แม้ว่าอิเลคตรอนที่เกิดจากตะกั่วเมื่อมีรังสีมากระตุ้นจะเกิดไปทั่วผิวหน้าของฉาก แต่ถ้ารังสีพลังงานน้อยกว่า 1 MeV. อิเลคตรอนที่เกิดจะมีพลังงานต่ำเป็นส่วนใหญ่ อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าฉากที่ติดกับฟิล์มเท่านั้นที่จะให้ความเข้มเพิ่มขึ้นบนฟิล์ม ดังนั้นยิ่งฟิล์มติดกับผิวหน้าฉากมากเท่าไรก็ยิ่งทำให้อิเลคตรอนทำปฏิกริยากับฟิล์มมากยิ่งขึ้นเท่านั้น

อิเลคตรอนที่มีพลังงานต่ำจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำ ซึ่งจะมีผลต่อน้ำยาล้างที่ติดกับฉากเท่านั้นไม่สามารถทะลุฟิล์มไปทำปฏิกริยากับน้ำยาล้างตรงข้ามได้แต่อิเลคตรอนที่เกิดนี้จะสามารถทะลุกระดาษที่อาจสอดอยู่ในฟิล์มได้ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดเงาของกระดาษบนฟิล์ม ในทำนองเดียวกัน ผงสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่อยู่ระหว่างฟิล์มและฉากก็ควรจะเอาออกไปเพื่อป้องกันภาพที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นบนฟิล์ม

<u>ข้อควรระวัง</u>

แผ่นตะกั่วที่ใช้เป็นฉากจะมีความหนาซึ่งสามารถบิดงอได้ง่าย ดังนั้นฉากตะกั่วจึงต้องมีแผ่นแข็งหรือวัสดุอื่นประกบหลังเพื่อให้เคลื่อนย้ายได้สะดวก ถึงกระนั้นการระมัดระวังและการเคลื่อนย้ายก็ยังเป็นสิ่งสำคัญไม่ควรให้เกิดรอยขีดข่วนหรือสิ่งอื่นปรากฏอยู่บนฉากซึ่งจะเป็นผลทำให้ไม่เกิดภาพที่ไม่พึงประสงค์บนฟิล์ม การบิดงอของฉากก็จะปรากฏแนวบนฟิล์มด้วย สารเคมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ จะต้องเอาออกจากฉากก่อนจะใช้งาน ฉากที่มีอยู่จะเกิดออกไซด์ขึ้นได้ เมื่อใช้ไปนาน ๆ และจะปรากฏเป็นสีเทาซึ่งโดยปกติดูเหมือนว่าจะไม่มีผลอะไรกับการใช้งาน บางฉากจะมีการเคลือบด้วย

วัสดุพิเศษเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ แม้ว่าฉากที่มีการเคลือบจะลดความสามารถของการเพิ่มความเข้มลงแต่ก็ทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาดและปราศจากสิ่งสกปรก การใช้แลคเกอร์หรือน้ำยาเคลือบต่าง ๆ จะทำให้ความสามารถในการใช้งานของฉากลดลง

ส่วนผสมของทะกั่วที่ทำเป็นฉากจะมีความสำคัญด้วย ทะกั่วบริสุทธิ์จะอ่อนและอาจจะติดฟิล์มได้ง่าย ฉากทะกั่วควรเป็นโลหะผสมของทะกั่ว มีทะกั่ว 94 % พลวง 6 % เนื่องจากโลหะชนิดนี้มีความแข็งมากกว่าและป้องกันการขีดข่วนได้ดีกว่าทะกั่วบริสุทธิ์

ฉากจะต้องเรียบและปราศจากรอยของการรีด การที่ฉากมีความหนาไม่สม่ำเสมอจะทำให้ผิวหน้าของฉากสัมผัสกับฟิล์มไม่ดีซึ่งจะทำให้ภาพที่ออกมาไม่ดีไปด้วย

โดยทั่ว ๆ ไปฉากทะกั่วจะใช้ก็ต่อเมื่อต้องการเพิ่มความสามารถของการทำราดิโอกราฟีให้ดีขึ้น แม้จะทำให้การใช้เวลาในการถ่ายรังสีมากขึ้นก็ตาม การใช้ฉากด้านหลังอันเดียว จุดประสงค์เพื่อเพิ่มความเข้มของรังสี แต่ถ้าไม่มีฉากด้านหน้าอยู่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนของรังสีขึ้นได้บนฟิล์ม ในบางครั้งเทคนิคการใช้ฉากด้านหลังอันเดียวจะใช้เมื่อทำราดิโอกราฟีกับวัสดุที่บางมาก ๆ ซึ่งต้องใช้รังสีพลังงานต่ำ ถ้าการสะท้อนของรังสียังเป็นปัญหาก็ควรจะใช้วิธีอื่น เช่น ใช้ทองแดงเป็นฟิลเตอร์ติดไว้ที่หลอดจะช่วยแก้ปัญหาได้ ฉากทะกั่วโดยปกติจะใช้กับรังสีพลังงานสูง ๆ เสมอ (รังสีเอ็กซ์มากกว่า 300 กิโลโวลท์ หรือรังสีแกมมาเป็นส่วนมาก) เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการสะท้อนของรังสีของซองใส่ฟิล์ม

กลักใส่ฟิล์มบางอันจะติดฉากทะกั่ว (ความหนา 0.001 หรือ 0.002 นิ้ว) ไว้ทั้ง 2 ด้าน พร้อมทั้งมีช่องสำหรับใส่ฟิล์มไว้พร้อมกับซอง กลักแบบนี้จะสะดวกในการใช้งานมากและยังไม่ต้องมีการใส่ฟิล์มจากในห้องมืดรวมทั้งไม่มีสิ่งสกปรกอื่นใดมาปนอันเป็นผลทำให้ไม่เกิดภาพที่ไม่พึงประสงค์ออกมา

ฉากชนิดฟลูออเรสเซนต์

ประสิทธิภาพของการทำราดิโอกราฟีจะเพิ่มขึ้นได้โดยใช้ฉากฟลูออเรสเซนต์ซึ่งจะให้แสงอุลตร้าไวโอเลต แสงสีน้ำเงินหรือแสงสีเขียวออกมา เมื่อมีรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมามากระตุ้น สารประกอบที่มีอยู่แน่นอนในฉากได้แก่ แคลเซี่ยมทังสเตท หรือ แบเรี่ยมตะกั่วซัลเฟต เป็นปริมาณเล็กน้อยอยู่ในสารเคมีหรือฟอสฟอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติให้แสงออกมาเมื่อมีการกระตุ้นจากรังสีความยาวคลื่นสั้น ผลึกของสารเคมีพวกนี้จะเป็นผงละเอียดผสมกับสารเคลือบเพื่อให้จับกันแน่น จากนั้นเคลือบลงบนกระดาษแข็งหรือพลาสติคเพื่อที่จะทำเป็นฉากฟลูออเรสเซนต์ อย่างไรก็ตามควรมีสารที่บางเหนียว และใสเคลือบทับฉากอีกทีเพื่อป้องกันผลึกของสารเคมีไม่ให้เสียหายขณะใช้งาน

ความไวของฉาก

ฉากฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการแพทย์จะมีความไวของฉากต่าง ๆ กัน บางที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางได้แก่ ฉากที่ให้แสงสีน้ำเงินออกมาซึ่งมีลักษณะความไวของฉากดังนี้ ช้ามาก, ช้า, ปานกลาง, ปานกลาง–ไว, ไวมาก ในวงการอุตสาหกรรมฉากที่ใช้กันอยู่เสมอ ๆ (โดยใช้ฟิล์มที่เหมาะสมกับฉากที่ให้แสงสีน้ำเงินด้วย) ได้แก่ ฉากชนิดความไวปานกลาง โดยการใส่ฟอสฟอร์ที่มีแรเอิร์ทที่สมควรลงในผลึกที่จะให้แสง จะทำให้เกิดแสงสีเขียวออกมา (เมื่อใช้กับฟิล์มที่มีความไวกับแสงสีเขียวแล้ว) ฉากจะมีความไวดังนี้ ไว, ไวมาก, ไวมาก ๆ

เมื่อใส่แบเรี่ยมตะกั่วซัลเฟตและธาตุที่เหมาะสมอีกเล็กน้อยผลึกจะให้แสงอุลต้าไวโอเลตออกมา (โดยการใช้ฟิล์มที่ไวแสงอุลต้าไวโอเลต หรือกระดาษราดิโอกราฟี) ฉากจะมีความไวดังนี้ ช้า, ปานกลาง–ไว เมื่อเทียบกับฉากที่ให้แสงสีน้ำเงินออกมา

เพื่อจะให้ผลทางราดิโอกราฟีได้ดีที่สุดฉากฟลูออเรสเซนต์ควรจะใช้กับฟิล์มที่มีความไวต่อแสงช่วงความยาวคลื่นที่ออกมาจากฉากนั้นโดยเฉพาะ โดยทั่ว ๆ ไป (แม้ว่าจะไม่จริงเสมอไป) การที่ฟิล์มและฉากรวมกันมีความไวช้าลงเท่าไรก็ยิ่งทำให้วิธีการของราดิโอกราฟีดีขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการรวมกันนี้จะสามารถลดเวลาการถ่ายรังสีลงระหว่าง 20 – 98 % เมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีความไวในการถ่ายรังสีเร็วที่สุดแต่ก็ยังขึ้นกับพลังงานของโฟตรอน ชนิดของฉาก ชนิดของฟิล์ม และชนิดของชิ้นงาน

ข้อเสียของฉาก

เหตุผลสำคัญในการใช้ฉากฟลูออเรสเซนต์ ในทางอุตสาหกรรมเพื่อจะลดเวลาในการถ่ายรังสีลง อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับฉากตะกั่วแล้วฉากฟลูออเรสเซนต์จะมีข้อเสียดังนี้

1. แสงจากฉากไปยังฟิล์มจะเป็นรูปกรวยจากแต่ละผลึกของฉากซึ่งจะมีแนวโน้มทำให้ภาพไม่ชัดเจนได้ ดังนั้นฉากตะกั่วจะใช้ได้ดีกว่า

2. การเปลี่ยนแปลงจำนวนของรังสีเอ็กซ์ทั้งหมดจริง ๆ ในทางสถิติจะถูกดูดซึมจากฟิล์มที่เล็ก ๆ อันหนึ่งไปยังอีกอันหนึ่งบนฉากเป็นผลให้เกิดความสว่างไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้เกิดเป็นจุดขึ้นบนฟิล์ม โดยเกิดในช่วงโฟตรอนพลังงาน 150 – 300 กิโลโวลท์ แต่ฉากตะกั่วไม่มีปัญหานี้

3. ขณะที่ฉากตะกั่วกรองเอาการสะท้อนของรังสีออกและยังเพิ่มความเข้มรังสีอีกด้วย ฉากฟลูออเรสเซนต์กลับมีความสามารถในการกรองรังสีน้อยหรือไม่มีเลย และยังช่วยเพิ่มความเข้มของรังสีที่เกิดจากการสะท้อนอีกด้วยโดยเป็นสัดส่วนกันกับปริมาณรังสีที่ตกลงมา

ข้อควรระวังในการใช้งาน

เมื่อมีการใช้ฉากฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับฟิล์มจะทำให้ใช้เวลาในการถ่ายรังสีน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามฉากฟลูออเรสเซนต์ยังสามารถใช้กับฟิล์มปกติที่ใช้ในการทำราดิโอกราฟีได้เมื่อฉากฟลูออเรสเซนต์ใช้กับฟิล์มแบบนี้ อัตราการเพิ่มความเข้มของรังสีจะอยู่ในช่วง 2 – 25 เท่า แต่ผลจากฉากที่ทำให้ฟิล์มเป็นจุดและลำแสงที่ถ่างออกจากฉากจะมีน้อยเนื่องจากเมื่อฟิล์มกับฉากใช้งานร่วมกันจะทำให้มีความเร็วต่ำลง

โดยทั่วไปฉากฟลูออเรสเซนต์จะติดถาวรอยู่ภายในซองใส่ฟิล์ม ซองใส่ฟิล์มแบบนี้จะต้องออกแบบให้ฉากและฟิล์มสัมผัสกันอย่างสนิทที่สุดขณะใช้งาน ถ้าการสัมผัสกันไม่ดีจะเป็นการทำให้ความไม่คมชัดของภาพเกิดขึ้น หรือฉากอาจจะไม่ติดถาวรอยู่ในซองใส่ฟิล์ม โดยติดอยู่ขณะใช้งานเท่านั้น แต่การทำให้ฟิล์มสัมผัสกับฉากอย่างดีจะทำได้ยาก

ผลึกฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่บนฉากจะเสียหายได้ง่าย จากการขนส่งและไม่สามารถซ่อมแซมได้ด้วย เนื่องจากฉากฟลูออเรสเซนต์มีราคาแพงมากจึงต้องมีการระมัดระวังอย่างดีไม่ให้เกิดการชื้นชวนโดนน้ำยาเคมีซึ่งเป็นอันตรายต่อฉากและยังมีผลต่อภาพที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นสิ่งสำคัญอื่น ๆ ที่ต้องระมัดระวังคือ รอยนิ้วมือ, ไขมัน, สิ่งสกปรก และฝุ่นไม่ให้มีอยู่บนผิวหน้าฉากเนื่องจากสิ่งเหล่านี้จะดูดซึมแสงของฉากและภาพของสิ่งเหล่านี้จะปรากฏอยู่บนฟิล์มด้วย ในกรณีที่ฉากสกปรกอาจจะทำความสะอาดได้ แต่ควรทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ผิวของฉากและผิวของสารเคลือบเสียหาย

เนื่องจากในการทำราดิโอกราฟีทางอุตสาหกรรมจะใช้รังสีความเข้มสูงจึงต้องการความระมัดระวังมากเพื่อไม่ให้ฉากฟลูออเรสเซนต์โดนรังสีนี้เต็มที่ เนื่องจากจะทำให้ฉากเกิดแสงฟลูออเรสเซนต์ต่อไป หลังจากเอาออกจากแนวลำรังสีแล้วผลอันนี้เรียก Screen Log ซึ่งจะเกิดผลเสียต่อภาพของราดิโอกราฟีที่ทำอยู่หรือจะทำต่อไป

ฉากแบบฟลูออเรสเซนต์มักจะใช้กับราดิโอกราฟีของชิ้นงานหนา ๆ เมื่อขนาดของรังสีเอ็กซ์มีขอบเขตจำกัดในการทะลุทะลวงโดยใช้ฉากแบบให้แสงสีน้ำเงิน ความไวปานกลาง (และใช้ฟิล์มที่เหมาะสมด้วย) จะสามารถทำราดิโอกราฟีของเหล็กหนา 3 นิ้ว ได้โดยรังสีเอ็กซ์ขนาด 250 กิโลโวลท์ และเวลาในการถ่ายรังสีที่เหมาะสม ฉากฟลูออเรสเซนต์ไม่ค่อยจะใช้กับรังสีแกมมาหรือโฟตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 1 MeV. เนื่องจากเกิดจุดขึ้นบนฟิล์มและมีอัตราการเพิ่มความเข้มของรังสีต่ำ เมื่อใดที่ฉากแบบนี้ใช้งานกฎของการผกผันจะใช้ไม่ได้แต่กับฉากตะกั่วหรือไม่ใช้ฉากกฎนี้ยังคงใช้ได้อยู่

ฉากแบบฟลูออโรเมทัลลิก

ฉากแบบนี้จะประกอบไปด้วยฉากตะกั่ววางอยู่ด้านใดด้านหนึ่งประกบคิดกับฉากฟลูออเรสเซนต์ จุดประสงค์เพื่อ (1) ตะกั่วจะทำหน้าที่ดูดซึมรังสีที่เกิดจากการสะท้อนไว้ (ขณะที่ฉากฟลูออเรสเซนต์ทำไม่ได้) (2) ฉากฟลูออเรสเซนต์จะช่วยเพิ่มความเข้มรังสีไปยังฟิล์มเพื่อทำให้ระยะเวลาในการถ่ายรังสีสั้นลง

ประโยชน์ของฉากแบบนี้ช่วยให้เวลาในการถ่ายรังสีสั้นลงกว่าฉากตะกั่วและภาพที่ออกมาจะมีคุณภาพดีกว่าฉากฟลูออเรสเซนต์ เมื่อฟิล์มที่ใช้ถ่ายกับรังสีโดยตรงมาใช้ร่วมกับฉากแบบนี้ระยะเวลาในการถ่ายรังสีจะลดลงถึง 7 เท่า เมื่อใช้ฉากตะกั่วที่ความไวเดียวกันแต่ถ้าใช้ฟิล์มที่ผลิตมาเพื่อใช้กับฉากฟลูออโรเมทัลลิกแล้ว เวลาจะลงถึง 9 เท่า เมื่อเทียบกับวิธีอื่นความเร็วที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับ (1) ชนิดของฟิล์ม (2) ชนิดของฉากฟลูออโรเมทัลลิก (3) พลังงานของโฟตรอนของรังสี เมื่อใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานสูง ๆ หรือรังสีแกมมาโคบอลท์ –60 แฟคเตอร์ของความไวจะเท่ากับ 2

Identification Markers and Penetrameters (Image-Quality Indicators)

เป็นสิ่งสำคัญมากในการที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาพของราดิโอกราฟีกับทิศทางของรังสีที่ใช้ ชนิดของชิ้นงานที่ถูกทำราดิโอกราฟีหรือชิ้นงานที่เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดถูกทำราดิโอกราฟีซึ่ง Identification Markers จะใช้สำหรับวัตถุประสงค์เหล่านี้

นอกเหนือไปจากการชี้บอกแล้วภาพที่ทำขึ้นควรจะมีบางสิ่งซึ่งแสดงวิธีการทำราดิโอกราฟีไว้โดยคิดว่าเป็นความไวของวิธีการที่ทำซึ่งเรียกโดยทั่วไปว่าคุณภาพของภาพเป็นความสามารถโดยตรงของภาพที่จะตรวจจับสิ่งบกพร่องขนาดเล็กได้แค่ไหน โดยปกติจะใช้ Penetrameter เป็นตัวพิจารณาหรือยังเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Image-Quality Indicators (IQI)

Identification Markers

Identification Markers จะทำจากตะกั่วหรือโลหะผสมของตะกั่ว โดยทำเป็นตัวเลขและตัวหนังสือเรียงตามลำดับ มาร์คเกอร์จะวางอยู่บนชิ้นงานหรืออยู่บนฟิล์มที่ติดกับชิ้นงานเมื่อชิ้นงานถูกทำราดิโอกราฟี ภาพของมาร์คเกอร์ก็จะปรากฏลงบนฟิล์มในเวลาเดียวกัน มาร์คเกอร์จะวางไว้ในตำแหน่งที่จะไม่ไปรบกวนหรือบังส่วนใด ๆ ของชิ้นงานที่จะถูกตรวจสอบ

ทั้งภาพของมาร์คเกอร์และภาพของชิ้นงานจะปรากฏอยู่ในรูปโค้งเสมอ ภาพของมาร์เกอร์จะแสดงอยู่ในรูปโค้งง่าย ๆ เช่น เอ, บี, ซี หรือ 1, 2, 3 ซึ่งสัมพันธ์กับชิ้นงานหรือตำแหน่งเฉพาะของชิ้นงานที่มาร์คเกอร์ใช้อยู่ โดยปกติตำแหน่งของมาร์คเกอร์จะเขียนด้วยชอล์กหรือดินสอเทียนกับชิ้นงานโดยตรง ในบางครั้งตำแหน่งของมาร์คเกอร์จะปั๊มลงบนชิ้นงานอย่างถาวร มาร์คเกอร์นี้ควรจะมีไว้บนชิ้นงานเสมอเพราะว่าอาจจะต้องมีการเช็ควิธีการทำกับข้อกำหนดที่มีอยู่ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Penetrameters

พีนีตรามิเตอร์ หรือ image-quality indicator จะต้องมีลักษณะคูณสมบัติรังสีเหมือนชิ้นงานที่จะตรวจสอบทุกประการ มีขนาดและรูปร่างแน่นอน พีนีตรามิเตอร์จะวางอยู่บนชิ้นงานหรืออยู่บนบล็อกของวัสดุที่เหมือนกับชิ้นงานถูกทำราดิโอกราฟีกับชิ้นงานในเวลาเดียวกัน โดยปกติพีนีตรามิเตอร์มักจะวางอยู่ในตำแหน่งของชิ้นงานที่มีความหนามากที่สุดและมีระยะทางระหว่างชิ้นงานไปยังฟิล์มมากที่สุดและวางอยู่ที่มุมนอกสุดของลำรังสีที่ฉากลงมา จากตำแหน่งนี้ความคมชัดที่เกิดขึ้นของพีนีตรามิเตอร์จะเป็นการวัดคุณภาพของภาพที่เกิดขึ้น ภาพของพีนีตรามิเตอร์ที่ปรากฏอยู่บนฟิล์มจะถูกประเมินค่าอยู่เสมอระหว่างการอ่านผลเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าภาพที่เกิดขึ้นมีความไว ความกระจ่างชัดถูกต้อง

พีนีตรามิเตอร์ จะออกแบบไว้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 39 โดยปกติพีนีตรามิเตอร์ จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่จะทำพีนีตรามิเตอร์จะต้องเป็นชนิดเดียวกับชิ้นงานหรือมีลักษณะการคูดซึมทางรังสีเหมือนกับชิ้นงาน

2. ในการใช้งานปกติพีนีตรามิเตอร์จะติดไว้ตรง ๆ ที่ผิวหน้าชิ้นงานด้านโดนรังสี ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดเล็กหรือมีรูปร่างไม่เหมาะสมที่จะติดพีนีตรามิเตอร์ พีนีตรามิเตอร์จะถูกวางอยู่บนบล็อกหรือถูกหมุนให้มีระดับเดียวกับชิ้นงานโดยใช้วัสดุที่มีส่วนผสมและความหนาเหมือนชิ้นงานแต่เมื่อจะทำราดิโอกราฟีกับท่อพีนีตรามิเตอร์อาจจะติดอยู่บนผิวของท่อด้านที่ติดกับฟิล์มได้

3. ตำแหน่งที่จะวางพีนีตรามิเตอร์จะต้องไม่ไปบังพื้นที่ที่จะตรวจสอบของชิ้นงาน

4. ภาพของพีนีตรามิเตอร์จะถูกถ่ายออกมาพร้อมกับภาพของชิ้นงานบนฟิล์ม การพิจารณาพีนีตรามิเตอร์จะแยกออกจากภาพของชิ้นงานเพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นมีคุณภาพดี

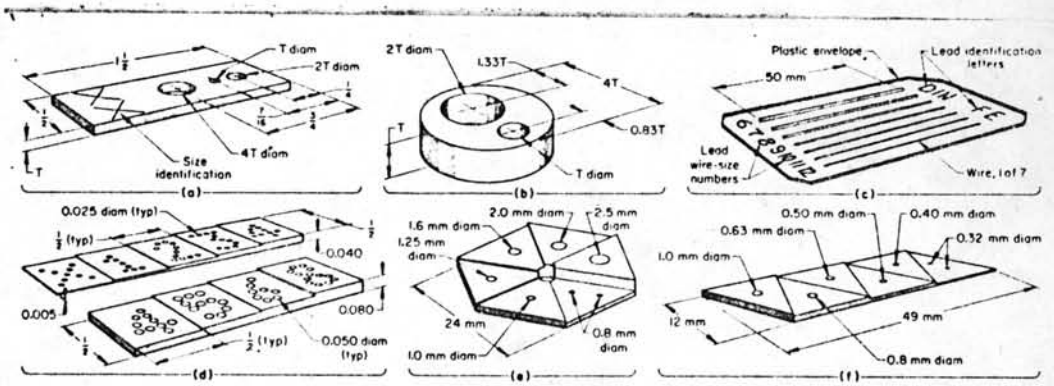
5. ระดับที่แสดงคุณภาพของภาพโดยปกติจะแสดงด้วยขนาดที่เล็กที่สุดของสิ่งที่อยู่ในพีนีตรามิเตอร์ (เช่น ขนาดของรู หรือ ขนาดของเส้นลวด) ที่จะเห็นอยู่ในฟิล์ม

6. พีนีตรามิเตอร์จะไม่เคยใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบขนาดของสิ่งบกพร่อง

โดยปกติแล้วแม้จะไม่มีข้อกำหนดให้ใช้พีนีตรามิเตอร์ แต่ในการทำงานจริง ๆ ก็ควรจะมีพีนีตรามิเตอร์ไว้เพื่อจะให้แน่แก่ใจในคุณภาพของภาพ พีนีตรามิเตอร์ที่ใช้เป็นมาตรฐานบางชนิดที่แสดงไว้ในรูปที่ 39 จะมีรายละเอียดดังนี้

Plaque-Type Penetrameters

จะเป็นวัสดุแผ่นเล็ก ๆ ความหนาสม่ำเสมอโดยเจาะรูผ่านตลอดพีนีตรามิเตอร์แบบนี้ออกแบบเป็นมาตรฐานโดย ASTM และ ASME (American Society for Testing Material & American Society of Mechanical Engineer) สำหรับพีนีตรามิเตอร์ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.005 – 0.050 นิ้ว จะแสดงไว้ในรูปที่ 39 (a) เส้นผ่าศูนย์กลางของรูที่อยู่ในแผ่นจะมีขนาด T, 2T และ 4T โดยที่ T คือ ความหนาของแผ่นพีนีตรามิเตอร์ เมื่อความหนาของพีนีตรามิเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 0.060–0.160 นิ้ว ลักษณะก็ยังเป็นแผ่นเหมือนเดิม แต่ถ้าหนามากกว่า 0.180 นิ้ว พีนีตรามิเตอร์จะออกแบบให้เป็นรูปวงกลมดังที่แสดงในรูปที่ 39 (b)



(a) Rectangular plaque-type penetrameter (ASTM-ASME standard) for plaque thicknesses of 0.005 to 0.050 in. (b) Circular plaque-type penetrameter (ASTM-ASME standard) for plaque thicknesses of 0.180 in. or more. (c) Typical wire-type penetrameter (Deutsche Industrie Norm standard DIN 54109). (d) Square step stepwedge penetrameter used by British Welding Research Association (BWRA standard). (e) Hexagonal and (f) linear triangular-step stepwedge penetrameters used by the French Navy (AFNOR standard).

Fig. 39. Designs of several widely used penetrameters (image-quality indicators)

รูปที่ 39 (1)

แบบต่าง ๆ ของพีนีตรามิเตอร์

คุณภาพของภาพที่มีอัตราความไวแตกต่างกัน จะวัดได้โดยใช้พีนีตรามิเตอร์ที่เป็นแผ่นมีความหนาต่าง ๆ กัน ความไวในการตรวจสิ่งบกพร่องโดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปความหนาของพีนีตรามิเตอร์ (ซึ่งเป็น % ของความหนาชิ้นงาน) และการหาค่าจะพิจารณาจากรูที่เล็กที่สุดที่จะเห็นได้บนฟิล์ม ยกตัวอย่างเช่น คุณภาพของภาพระดับ 2 – 2 T จะทำให้ทราบว่า ความหนาของพีนีตรามิเตอร์จะเท่ากับ 2% ของความหนาชิ้นงาน และรูขนาด 2T จะสามารถเห็นได้ ถ้าต้องการคุณภาพของภาพขนาด 1 – 1 T แสดงว่าความหนาของพีนีตรามิเตอร์จะเท่ากับ 1% ของความหนาชิ้นงาน และรูขนาด 1 T จะสามารถเห็นได้ในด้านอื่น คุณภาพของภาพอาจจะแสดงเป็น % โดยเฉพาะก็ได้ ในระบบของ ASTM และ ASME ความไวในการตรวจสิ่งบกพร่องที่เหมาะสมกันเป็น % จะเทียบกับการเห็นรูขนาด 2 T ตารางที่ 7 จะแสดงความไวของภาพในระดับต่าง ๆ กัน

Table 7. Equivalent Sensitivities of Various Standard ASTM or ASME Sensitivity Levels(a)

Image-quality level	Penetrameter thickness, % of test-piece thickness	Smallest visible hole size	Equivalent sensitivity, %
1-1T	1	1T	0.7
1-2T	1	2T	1.0
2-1T	2	1T	1.4
2-2T	2	2T	2.0
2-4T	2	4T	2.8
4-2T	4	2T	4.0

(a) Equivalent sensitivity is a percentage equivalent for penetrameter thickness in which 2T is the smallest distinguishable hole size. For instance, 1-1T is equivalent to 0.7-2T.

ตารางที่ 7[1] ความไวในการตรวจวัดระดับต่าง ๆ ของพีนีตรามิเตอร์แบบของ ASTM และ ASME

Table 8. Specification of Deutsche Industrie Norm (DIN) for Minimum Image Quality and Equivalent-Sensitivity Range for Each Range of Test-Piece Thickness(a)

Test-piece thickness, mm	High-sensitivity level (category 1) Wire No., BZ	High-sensitivity level (category 1) Equivalent sensitivity, %	Normal-sensitivity level (category 2) Wire No., BZ	Normal-sensitivity level (category 2) Equivalent sensitivity, %
>0, ≤6	16	1.7 min	14	2.7 min
>6, ≤8	15	2.0-1.6	13	3.3-2.5
>8, ≤10 ...	14	2.0-1.6	12	3.1-2.5
>10, ≤16 ..	13	2.0-1.3	11	3.2-2.0
>16, ≤25 ..	12	1.6-1.0	10	2.5-1.6
>25, ≤32 ..	11	1.3-1.0	9	2.0-1.6
>32, ≤40 ..	10	1.3-1.0	8	2.0-1.6
>40, ≤50 ..	9	1.3-1.0	7	2.0-1.6
>50, ≤80 ..	8	1.3-0.8	6	2.0-1.3
>80, ≤200 .	7	1.0-0.4	..	...
>80, ≤150 .	..	...	5	1.6-0.8
>150, ≤170	..	...	4	1.1-0.9
>170, ≤180	..	...	3	1.2-1.1
>180, ≤190	..	...	2	1.4-1.3
>190, ≤200	..	...	1	1.7-1.6

(a) Minimum image quality is expressed as wire number (BZ) of thinnest wire distinguishable in radiograph.

ตารางที่ 8[1] การกำหนดคุณภาพของภาพของพีนีตรามิเตอร์แบบ DIN

Wire-Type Penetrameters

พีนีตรามิเตอร์แบบนี้ใช้กันกว้างขวางในยุโรป พีนีตรามิเตอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดนี้เป็นมาตรฐานของ Deutsche Industrie Norm (DIN 54109) ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นลวด 16 เส้นของโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็ก อลูมินัม และทองแดง เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดจะลดลงจาก 3.20 มม. (ลวดเบอร์ 1) ถึง 0.10 มม. (ลวดเบอร์ 16) พีนีตรามิเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นลวดอยู่ในแผ่นพลาสติคใส 3 ชุด ในแต่ละแผ่นจะมีเส้นลวดอยู่ 7 เส้น แผ่นแรกจะมีเส้นลวดเบอร์ 1 – 7 (ϕ 3.20 มม. – 0.80 มม.) แผ่นที่สองดังที่แสดงในรูปที่ 39 (c) จะมีเส้นลวดเบอร์ 6 – 12 (ϕ 1.00 มม. – 0.25 มม.) แผ่นที่สามจะมีเส้นลวดเบอร์ 10 – 16 (ϕ 0.40 มม. – 0.10 มม.)

ในระบบของ DIN นี้ คุณภาพของภาพจะกำหนดจากเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเส้นที่เล็กที่สุดที่เห็นในฟิล์มหลังจากการทำราดิโอกราฟี คุณภาพของภาพจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 ความไวสูง และประเภทที่ 2 ความไวปกติ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 8 แสดงถึงเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของลวดที่สามารถปรากฏลงบนฟิล์มของแต่ละช่วงความหนาชิ้นงาน (กำหนดขนาดเส้นลวดเป็น BZ) จนถึงความหนา 200 มม. และยังแสดงถึงความไวในการตรวจสิ่งบกพร่อง โดยหาได้จากเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของลวดหารด้วยความหนาของชิ้นงานที่เหมาะกับขนาดของลวดนั้น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบของ ASTM แล้ว ระบบของ DIN จะไม่ค่อยให้ความไวในการตรวจสิ่งบกพร่องคงที่นัก ความไวจะแปรเปลี่ยนไปตามความหนาของชิ้นงานในแต่ละช่วง และช่วงของความไวที่เกิดขึ้นจะไม่คงที่สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

Stepwedge Penetrameters

เป็นพีนีตรามิเตอร์ที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดจะใช้เป็นประโยชน์เฉพาะการพิจารณาความสามารถของการทำราดิโอกราฟีกับชิ้นงานที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงไปไม่สามารถใช้หาผลของความไม่คมชัดทาง

เรขาคณิตซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาคุณภาพของภาพได้ อย่างไรก็ตามถ้าแผ่น stepwedge ถูกดัดแปลงโดยเจาะรูบนแผ่นแต่ละชิ้นจะทำให้ stepwedge มีความไวต่อความไม่คมชัดของภาพทางเรขาคณิตได้ พีนีตรามิเตอร์ออกแบบ British Welding Research Association (BWRA)และ French Navy (AFNOR) ในการออกแบบของ BWRA (รูปที่ 39 d) รูที่ปรากฏอยู่บน stepwedge จะมีขนาดเดียวกันคือ 0.025 นิ้ว สำหรับ stepwedge ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.005 – 0.040 นิ้ว และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.050 นิ้ว สำหรับ stepwedge ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.040 – 0.080 นิ้ว stepwedgeของ AFNOR (รูปที่ 39 e และ 39 f) จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเท่ากับแต่ละความหนา stepwedge ของ AFNOR จะมีอยู่ 4 ขนาด ดังต่อไปนี้

series	step thicknesses, mm.
1	0.125, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32, 0.40
2	0.32, 0.40, 0.50, 0.63, 0.80, 1.00
3	0.80, 1.00, 1.25, 1.60, 2.00, 2.50
4	2.00, 2.50, 3.20, 4.00, 5.00, 6.30

พีนีตรามิเตอร์ทั้ง 4 ขนาดจะใช้ตรวจชิ้นงานที่มีความหนาตั้งแต่ 4 – 300 มม. ขนาดที่ 3 เป็นรูป 6 เหลี่ยม แสดงไว้ในรูปที่ 39 (e) และขนาดที่ 2 เป็นรูปตรงแสดงไว้ในรูปที่ 39(f)

ทั้งพีนีคราฟิเตอร์ของ BWRA และ AFNOR จะให้ความไวต่อภาพได้ดีเท่ากับความคมชัด ซึ่งจะต้องเห็นรูของ step บนฟิล์ม เนื่องจากภาพที่ปรากฏบนฟิล์มจะพิจารณาจากการมองเห็นขั้นและรูที่อยู่ในพีนีคราฟิเตอร์ เมื่อความคมชัดของภาพดีแต่ความไวในการตรวจไม่ดี ภาพที่เกิดบนฟิล์มจะเห็นจำนวนขั้นมากกว่ารู ข้อจำกัดอันหนึ่งของ AFNOR Penetrameter คือ ขนาดของรูที่เล็กที่สุดสามารถเปรียบเทียบกับขนาดของเกรนของฟิล์มได้ ในบางครั้งจะไม่ง่ายนักที่จะมองเห็นรูที่มีอยู่ในพีนีคราฟิเตอร์นั้น การแก้ทำได้โดยเจาะรูในพีนีคราฟิเตอร์ที่บางที่สุดเพิ่มขึ้นเป็น 2 รู

การตรวจสอบแบบมัคโคร (Macro-Examination)

เป็นวิธีการที่จะดูโครงสร้างของชิ้นงาน โดยไม่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ เพียงแต่ใช้สายตาตรวจหรือกล้องขยายที่มีกำลังขยายเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอแล้ว การตรวจสอบแบบมัคโครจะใช้ตรวจสิ่งบกพร่องต่าง ๆ ที่อยู่ภายในชิ้นงานได้อย่างหยาบ ๆ รวมถึงยังสามารถดูขนาดของเกรนของชิ้นงานบางชนิดได้ โดยเฉพาะที่มาจากการหล่อ เช่นโลหะอลูมิเนียม

โดยปกติแล้ว การเจียรผิวชิ้นงานพอสมควร ก็เพียงพอในการตรวจสอบโดยวิธีนี้แล้ว เนื่องจากเป็นการตรวจสอบชิ้นงานอย่างคร่าว ๆ ไม่จำเป็นต้องขัดผิวชิ้นงานให้เรียบที่สุดเหมือนกับการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์

หลังจากเจียรผิวชิ้นงานแล้ว ควรจะล้างชิ้นงานเพื่อเอาผงโลหะออกไป แต่ไม่จำเป็นจะต้องถึงขนาดเอาไขมันที่ติดอยู่ออกไป เนื่องจากการตรวจสอบด้วยวิธีมัคโครจะต้องแช่อยู่ในกรดเป็นเวลานาน และกัดผิวโลหะจนถึงชั้นในเพื่อจะเห็นแนวเส้นหรือขนาดของเกรน ยกตัวอย่าง เช่น โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นของชิ้นงานที่มาจากการตี จะสามารถเห็นได้โดยการต้มในกรดเกลือ 50% เป็นเวลาไม่เกิน 15 นาที หลังจากการต้มหรือแช่ด้วยกรดแล้ว ล้างชิ้นงานด้วยน้ำและทำให้แห้ง น้ำยาที่ใช้ในวิธีการแบบมัคโครของโลหะชนิดต่าง ๆ จะอยู่ในตารางข้างล่างนี้

—Etching Reagents for Macroscopic Examination

Material to be etched	Composition of etchant	Working details
Steel	50 cm^3 hydrochloric acid; up to 50 cm^3 water	Use boiling for 5–15 minutes. Reveals flow lines; the structure of fusion welds; cracks; and porosity; also the depth of hardening in tool steels.
	25 cm^3 nitric acid; 75 cm^3 water	Similar uses to above, but can be used as a cold swabbing reagent for large components.
	1 g cupric chloride; 4 g magnesium chloride; 2 cm^3 hydrochloric acid; 100 cm^3 alcohol	*Stead's Reagent.* The salts are dissolved in the smallest possible amount of hot water along with the acid. Shows dendritic structure in cast steel. Also phosphorus segregation—copper deposits on areas *low* in phosphorus.
Copper and its alloys	25 g ferric chloride; 25 cm^3 hydrochloric acid; 100 cm^3 water	Useful for showing the dendritic structure of α solid solutions.
	50 cm^3 ammonium hydroxide (0·880); 50 cm^3 ammonium persulphate (5% solution); 50 cm^3 water	Useful for alloys containing the β-phase.
Aluminium and its alloys	20 cm^3 hydrofluoric acid; 80 cm^3 water	Degrease the specimen first in carbon tetrachloride and then wash in *hot* water. Swab with etchant.
	45 cm^3 hydrochloric acid; 15 cm^3 hydrofluoric acid; 15 cm^3 nitric acid; 25 cm^3 water	A much more active reagent—care should be taken to avoid contact with the skin.

ตารางที่ 9[2] สารเคมีสำหรับใช้ในวิธีการมัคโคร