บทที่ ๒

ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับ Thermoluminescent Dosimeter (TLD.)

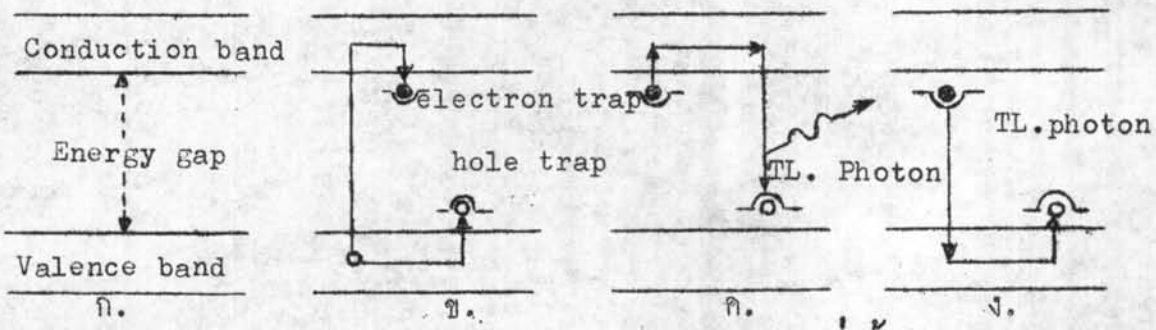
๒.๑ ประวัติของ TLD. ในหลักการทั่วไปแล้วเมื่อรังสีตกกระทบสสารจะมีการดูดกลืนพลังงานของรังสี ทำให้เกิดการไอออนไนส์ (Ionized) พลังงานส่วนใหญ่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ก็จะกลายเป็นพลังงานความร้อน มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ไปในการทำลาย chemical bond ของสสารให้แยกออกจากกัน ในสารบางประเภทเมื่อรังสีตกกระทบ พลังงานของรังสีเพียงส่วนน้อยนี้ จะถูกเก็บไว้ใน metastable energy states และเมื่อต้องการให้สารนั้นคายพลังงานที่เก็บไว้ใน metastable energy states ออกมา ก็สามารถทำได้โดยให้พลังงานความร้อนแก่สารนั้น ซึ่งพลังงานที่คายออกมา จะออกมาในรูปของ visible photons ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า Thermoluminescence

ในปี ค.ศ. ๑๙๕๐ นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Daniel ได้ทำการทดลองโดยใช้ผลึก LiF. ซึ่งเป็นสารพวก Thermoluminescence เพื่อใช้เป็นเครื่องวัดปริมาณของรังสี ปรากฏว่าใช้ได้ผลดี และเรียกเครื่องที่ใช้วัดปริมาณรังสีนี้ว่า - Thermoluminescent Dosimeter (TLD.)

ปลายปี ค.ศ. ๑๙๕๐ ได้มีการปรับปรุงเกี่ยวกับ TLD. โดยการใช้ CaF_2:Mn และแร่ CaF_2 ธรรมชาติ (Natural CaF_2 mineral) เป็น TLD. อีกด้วย ตั้งแต่ปี ค.ศ. ๑๙๖๐ เป็นต้นมา การใช้ TLD. เป็นไปอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก TLD. มีขนาดเล็กและใช้วัดรังสีได้ทุกทิศทุกทาง พร้อมทั้งได้มีการปรับปรุงวิธีการวัดให้ง่ายขึ้น จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับรังสี

๒.๒ รูปแบบจำลองอย่างง่ายของ TL. (Simple model of TL.) ทฤษฎีของ TLD. ทั้งในทางเคมีและฟิสิกส์ ยังไม่ทราบแน่ชัด แต่ปรากฏการณ์ขั้น

พื้นฐาน (basic phenomenon) ที่นำมาใช้งานเกี่ยวกับการวัดปริมาณรังสีทราบได้เป็นอย่างดี



รูป ๒.๑ energy diagram ของ ผลึกที่ใช้เป็น TLD.

รูป ๒.๑ ก. เป็นรูป energy diagram ของผลึกที่ใช้เป็น TLD. ซึ่งประกอบไปด้วย Valence band และ Conduction band โดยมีช่องว่างของพลังงาน (energy gap) คั่นกลาง ในชั้นของพลังงาน (energy trap) จะมีอิเลคตรอนอยู่ประจำในแต่ละชั้น และอิเลคตรอนจะมีพลังงานประจำชั้น ทั้งชั้นที่มีพลังงานสูงจนถึงพลังงานต่ำ

รูป ๒.๑ ข. เมื่อรังสีผ่านผลึก อิเลคตรอนใน Valence band จะได้รับพลังงานจากรังสีและข้ามไปอยู่ใน Conduction band ทำให้ Valence band เกิดช่องว่าง (hole) ขึ้น ๑ ช่องว่าง ต่ออิเลคตรอนที่หลุดออกไป ๑ ตัว ขบวนการนี้จะใช้พลังงานประมาณ ๑๐ - ๑๕ eV. ซึ่งพลังงานเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับ secondary electron ซึ่งเกิดขึ้นจาก Photoelectron (อิเลคตรอนที่วิ่งไปอยู่ใน conduction band หลังจากรังสีวิ่งผ่านผลึก) เนื่องจาก secondary electron มีพลังงานน้อยก็จะวิ่งอยู่ใน conduction band แล้วจะเข้าไปอยู่ใน electron shell ของสารที่ผสม (impurity) อยู่ในผลึก โดยใช้เวลาในการรวมตัวอย่างเร็วมาก พร้อมทั้งคายพลังงานออกมาในรูปของแสง - (fluorescence) ในทำนองเดียวกัน primary electron ก็จะถูกจับอยู่ในชั้นของพลังงาน ในกรณีของผลึกที่จะนำมาใช้เป็น TLD. ต้องมีชั้นของพลังงานมาก

พอสมควร ถ้ามีน้อยโอกาสที่อีเลคตรอนจะหลุดออกมาจากชั้นก็ง่าย และจะขึ้นอยู่ใน conduction band แล้วกายพลังงานออกมาก็มีมาก

ในเมื่ออีเลคตรอนได้รับพลังงานจากภายนอกเพียงเล็กน้อย ทำให้ไม่สามารถเก็บอีเลคตรอนหรือในที่นี้ คือพลังงานของรังสีในผลึก เมื่อเก็บผลึกของสารที่ใช้เป็น TLD. ไว้ในอุณหภูมิห้อง อีเลคตรอนในชั้นได้รับพลังความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ก็จะหลุดออกจากชั้น ถ้าพลังงานในชั้นมีมากพอสมควร พลังงานที่ทำให้อีเลคตรอนอยู่ในชั้นไม่กระโดดออกมาสู่ Conduction band ก็มีค่ามาก เพราะฉะนั้นผลึกชนิดนี้เมื่อมีค่าพลังงานในชั้นสูง ก็จะทำให้ตัวของมันมีความคงสภาพ (Stable) ที่อุณหภูมิห้อง ถ้าต้องการให้อีเลคตรอนหลุดออกจากชั้น ก็ต้องให้พลังงานความร้อนแก่ผลึกนั้น พลังงานจะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับจำนวนมากน้อยของชั้นของอีเลคตรอนในผลึก ถ้าผลึกมีจำนวนชั้นของอีเลคตรอนมาก การให้ความร้อนแก่ผลึกเพื่อให้อีเลคตรอนที่อยู่ในชั้นของพลังงานลึก ๆ หลุดออกมา ก็ต้องใช้พลังงานความร้อนมาก

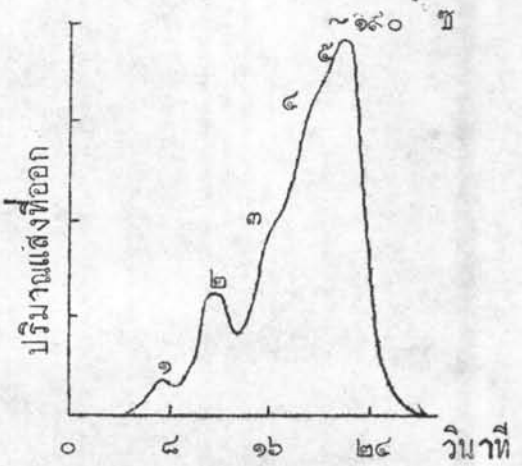
โดยการให้ความร้อนแก่ผลึก ทำให้ได้โฟตอนออกมา วิธีนี้เรียกว่า "Thermoluminescence"

รูป ๒.๑ ก. เมื่อให้ความร้อนแก่ผลึก พลังงานความร้อนจะทำให้อีเลคตรอนที่อยู่ในชั้นหลุดออกและขึ้นไปอยู่ใน Conduction band และอีเลคตรอนนี้จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพบกับช่องว่าง (hole) ก็จะรวมตัวกัน แล้วให้ Thermoluminescent Photon ออกมา

รูป ๒.๑ ง. การเกิด Thermoluminescent Photon นอกจากวิธีในรูป ๑ ก. แล้วอาจจะเกิดได้อีกกรณีหนึ่ง คือ เมื่อให้พลังงานแก่ผลึกแล้ว ถ้าช่องว่างในชั้นมีความคงสภาพ (stable) ช่องว่างในชั้นจะเป็นตัวเคลื่อนที่ไปรวมกับอีเลคตรอนในชั้น แล้วให้ Thermoluminescent Photon ออกมา การเกิด Thermoluminescence ทั้ง ๒ วิธี เป็นปฏิกริยาที่คล้ายกัน แต่จะใช้ปฏิกริยาแรกในการอธิบาย แสงที่ให้ออกมาหลังจากผลึกได้รับพลังงานความร้อน

แล้ว การเกิดแสงจะเกิดตั้งแต่ความเข้มน้อยที่สุดจนถึงความเข้มมากที่สุด แล้วจะลดลงจนถึงศูนย์ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแสงที่ให้ออกมากับเวลาหรืออุณหภูมิเรียกว่า "glow curve" ในผลึก TL. ทั่ว ๆ ไป จะมีจำนวนชั้นพลังงานของอิเลคตรอนหลายค่า เพราะฉะนั้น glow curve จะมียอด (peak) หลายค่า ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานในแต่ละชั้น ตามรูปที่ ๒.๒

๒.๓ Glow curve หมายถึงกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TL. และอุณหภูมิที่ให้แก่ผลึก หรือกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ผลึก ถ้าอัตราความร้อน (heating rate) ที่ใช้มีค่าคงที่ทุกครั้ง glow curve ที่ได้จะมีรูปร่างคล้ายกัน ผลรวมของการเกิด TL. ต่อฟังก์ชั่นของอุณหภูมิไม่มีการบ่งความหมาย (no simple interpretation) แต่ผลรวมของการเกิด TL. ต่อฟังก์ชั่นของเวลา จะขึ้นอยู่กับผลรวมของ TL. ทั้งหมด เพราะฉะนั้นเทอม glow curve จึงหมายถึงกราฟของ TL. ในรูปฟังก์ชั่นของเวลา



รูป ๒.๒ แสดง glow curve ของ TLD-๑๐๐

glow curve จะเป็นตัวแสดงคุณสมบัติของผลึก TL. แต่ละชนิด เพราะว่าในผลึกแต่ละชนิดจะมีชั้นของพลังงานไม่เหมือนกัน ยังผลให้ glow curve ไม่เหมือนกันด้วย ถ้า peak ของ glow curve เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ๆ แสดงว่าเป็นการเก็บอิเลคตรอนในชั้นที่มีพลังงานน้อย ๆ การเสียพลังงานโดยการให้

TL. ออกมา จะขึ้นอยู่กับเวลา ถ้าผลึก TL. มีคุณสมบัติแบบนี้ ก็จะไม่เหมาะในการที่จะนำมาใช้วัดรังสีที่ใช้เวลานาน ๆ

glow curve ที่ peak มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิสูง ๆ แสดงว่าผลึก TL. จะให้แสง ใต้แดง (Infrared) ออกมา ซึ่งจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือ เพราะว่าการกำหนดการนับของพื้นที่ใต้ glow curve ทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถจะหาจุดปลายของ glow curve ที่ไม่มี peak ได้ เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ผลึก TL. ที่ glow curve มีอุณหภูมิไม่สูงนัก โดยทั่วไปมักจะใช้ผลึก TL. ที่มีอุณหภูมิของ glow curve สูงกว่า - อุณหภูมิห้องพอสมควร เพื่อให้แน่ใจว่าหลังจากผลึก TL. ถูกรังสีแล้ว เมื่อนำผลึกมาเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อรอการอ่านปริมาณรังสีจากเครื่อง จะไม่มีแสงTL.ออกมาก่อนเนื่องจากอุณหภูมิของห้อง โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ผลึก TL. ปล่อย-แสงออกมาจะอยู่ประมาณ ๒๐๐ °ซ ในการใช้ TLD. เป็นประจำ ไม่จำเป็นต้องทำ glow curve นอกจากว่า ต้องการเปลี่ยนไปใช้ผลึกอย่างอื่นเป็น TLD.

๒.๔ <u>การเปลี่ยนแปลงของ glow curve</u> จะขึ้นอยู่กับ

๒.๔.๑ อัตราความร้อนที่ให้แก่ TLD. และความคงสภาพของ TLD.

๒.๔.๒ ขนาด, รูปราง และความสามารถในการนำความร้อนของ TLD.

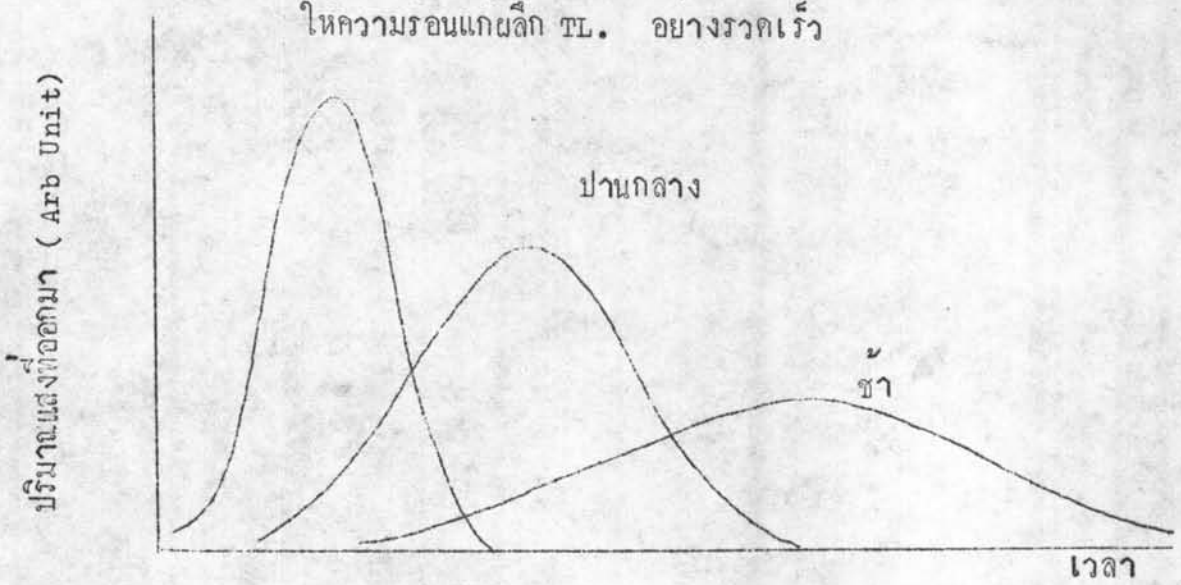
๒.๔.๓ ระดับปริมาณรังสีที่ให้แก่ TLD.

๒.๔.๔ ชนิดของรังสี เช่น แกมมา, แอลฟา, เบตา, นิวตรอนพลังงานสูง

๒.๔.๕ การ anneal TLD.

๒.๔.๖ ความเที่ยงตรงของเครื่องที่ใช้วัด

การเปลี่ยนอัตราความร้อนที่ให้แก่ TLD. ทำให้เกิดผลหลายอย่างกับ glow curve เช่น ถ้าให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ความสูงของ peak ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน แต่ความกว้างของ curve ก็จะน้อยลงกว่าเดิม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จุดสูงสุดของ peak ก็จะเคลื่อนไปในทิศทางของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วย

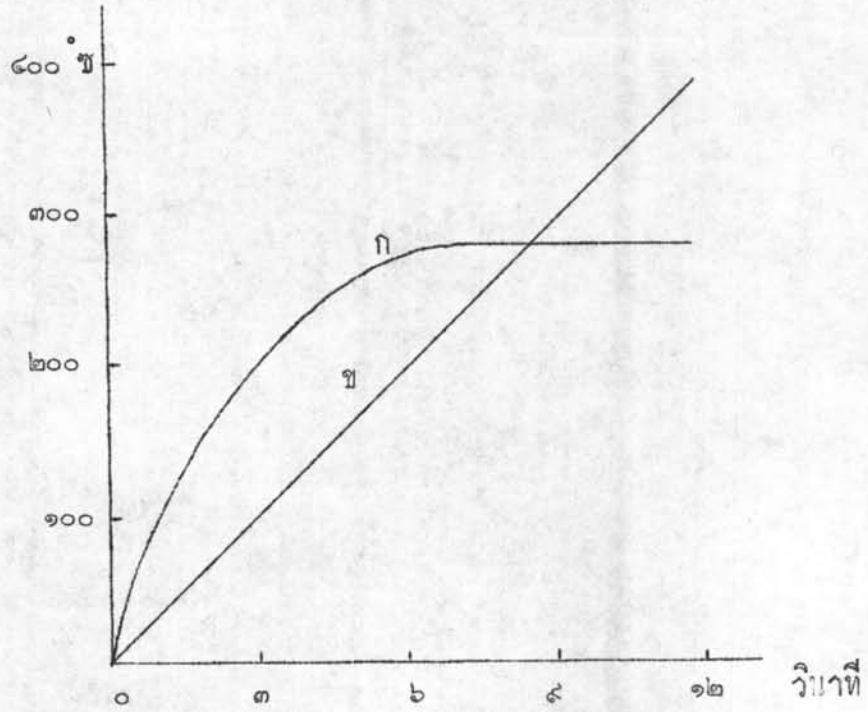


รูป ๒.๓ ผลการเปลี่ยนแปลง glow curve จุดสูงสุดของ peak จะเลื่อนไปเมื่อเปลี่ยนอัตราความร้อนที่ให้แกผลึก TL.

ในเครื่องอ่าน TLD. ที่ผลิตออกจำหน่าย อัตราความร้อนที่จะให้แก่ TLD. เพื่อให้ปลอยแสงออกมาจะอยู่ในช่วงประมาณ ๕๐๐ °ซ ต่อนาที เนื่องจาก glow curve ขึ้นอยู่กับอัตราความร้อน เพราะฉะนั้นในเครื่องอ่าน TLD. อย่างง่าย อุณหภูมิสูงสุดที่ peak ของ glow curve จะมีค่าโดยประมาณเท่านั้น peak ที่สูง ๆ เนื่องจากการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วต่อผลึก TL. จะทำให้อ่านปริมาณรังสีน้อย ๆ ได้ดี และในการวัดแสงที่ออกมาจากผลึก TL. โดยวิธีหาพื้นที่ใต้ curve (Integral) หรือวิธีวัดความสูงของ peak อัตราความร้อนที่ให้แกผลึก TL. ไม่จำเป็นต้องคงที่

ในเครื่องอ่าน TLD. ที่ผลิตออกจำหน่ายส่วนใหญ่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ศึกษา glow curve เนื่องจากเครื่องประเภทนี้ อัตราความร้อนที่ให้แกผลึกจะมีอัตราเร็วมาก และไม่คงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้จากรูปที่ ๒.๔

เมื่อวาง TLD. ที่อาบรังสีแล้วลงบนจานที่ให้ความร้อน (heating pan) ความร้อนจะถ่ายเทให้แกแท่ง TLD. เพราะฉะนั้นความสามารถในการนำความร้อน รูปร่าง และ ขนาด จึงมีผลต่อรูปร่างของ glow curve พอสมควร ทั้งนี้จะ-

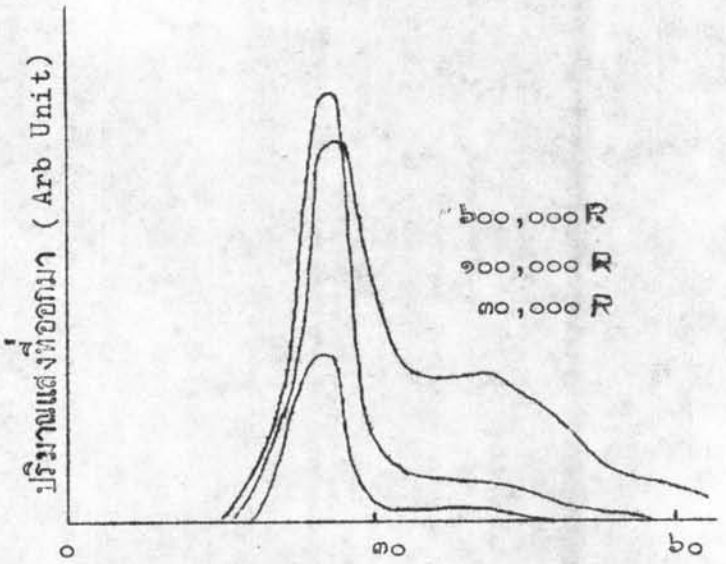


รูป ๒.๔ การให้อุณหภูมิแก่ Heating pan ๒ วิธี

ก. ให้อุณหภูมิแก่ Heating pan อย่างรวดเร็ว จนถึงจุดคงที่

ข. ให้อุณหภูมิแก่ Heating pan แบบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่

เห็นได้ว่า TLD. ที่เป็นผงความร้อนจะแทรกเข้าไปได้ช้ากว่า TLD. ที่เป็นแท่ง เพราะว่า TLD. ที่เป็นแท่งอุณหภูมิจากจานที่ให้ความร้อน จะผ่านไปยังแท่ง TLD. บริเวณที่ TLD. ติดอยู่กับผิวของจาน จะได้ความร้อนก่อนส่วนด้านบนของ TLD. ก็จะได้รับความร้อนช้ากว่าบริเวณที่ติดกับจานให้ความร้อน เพราะฉะนั้นบริเวณที่ร้อนที่สุดของแท่ง TLD. ก็จะให้ peak ที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุผลนี้ glow curve ที่ได้จากแท่ง TLD. จึงมีลักษณะ peak ไม่คมชัด ใน TLD. บางชนิด เช่น LiF (มีชื่อทางการค้าว่า TLD. - ๑๐๐) รูปร่างของ glow curve จะเปลี่ยนตามปริมาณรังสีที่ได้รับ ดังแสดงในรูปที่ ๒.๕ รังสีต่างชนิดกันเมื่อผ่าน TLD. glow curve ที่ได้จะไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ Linear Energy Transfer (LET) ของรังสีแต่ละชนิด



รูป ๒.๕ แสดง glow curve ของ TLD. - ๑๐๐ ที่ได้รับปริมาณรังสีแกมมาต่างกัน

๒.๕ <u>ชนิดของผลึก TL.</u> ผลึก TL. มีมากมาย แต่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่ว ๆ ไปมีประมาณ ๕ ชนิด และมีคุณสมบัติตามตาราง ที่ ๒.๑

006085

ตาราง ๒.๑ แสดงคุณสมบัติของผลึก TL. ชนิดต่าง ๆ

รายละเอียด	LiF	$Li_2F_4O_7$: Mn	CaF_2: Mn	CaF_2:nat	$CaSO_4$:Mn
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ซม.^{3})	๒.๖๔	๒.๓	๓.๑๘	๓.๑๘	๒.๖๑
ตัวเลขอะตอมเฉลี่ย	๘.๒	๗.๔	๑๖.๓	๑๖.๓	๑๕.๓
สเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่น (Å)	๓๕๐๐-๖๐๐๐	๕๓๐๐-๖๓๐๐	๔๔๐๐-๖๐๐๐	๓๕๐๐-๕๐๐๐	๔๕๐๐-๖๐๐๐
ความยาวคลื่นมากที่สุด (Å)	๔๐๐๐	๖๐๕๐	๕๐๐๐	๓๘๐๐	๕๐๐๐
อุณหภูมิของ glow peak หลัก (°ซ)	๑๙๕°ซ	๒๐๐ °ซ	๒๖๐ °ซ	๒๖๐ °ซ	๑๑๐ °ซ

i 18063640

รายละเอียด	LiF	$Li_2F_4O_7$: Mn	CaF_2: Mn	CaF_2: nat	$CaSO_4$: Mn
ประสิทธิภาพในการวัดรังสีจาก Co-๖๐ (เทียบกับ LiF)	๑.๐	๐.๓	๓	~๒๓	~๓๐
ปฏิกิริยาตอบสนองต่อพลังงานในช่วง ๓๐ KeV เมื่อเทียบกับ Co -๖๐ โดยไม่ใส่ filter	๑.๒๕	๐.๔	~๑๓	~๑๓	~๑๐
วัดปริมาณรังสีได้ในช่วง	mR -๑๐^{5}R	mR-๑๐^{5}R	mR-๓x๑๐^{5}R	mR -๑๐^{5}R	mR-๑๐^{5}R
ความจางลงของแสงจาก TLD. (fading)	<๕% ต่อ ๑๒ สัปดาห์	~๑๐% ในเดือนแรก	~๑๐% ในเดือนแรก	ไม่มีความจาง	๕%-๖% ใน๒๔ชม. แรก
ความไวต่อแสงสว่างสภาพทางกายภาพ	ไม่มีผล ผง, ผงหุ้มด้วย Teflon, ผงหุ้มด้วย Silicon, ผงใส่ในหลอดแก้ว Capillaries	ไม่มีผล ผง, ผงหุ้มด้วย Teflon	ไม่มีผล ผง, ผงหุ้มด้วย Teflon ผงใส่ในหลอดแก้ว Capillaries	มีผลใช้เครื่องวัดพิเศษ	มีผล ผง, ผงหุ้มด้วย Teflon

๒.๖ <u>คุณสมบัติของผลึก LiF</u> LiF เป็นผลึกรูปลูกบาศก์ มีหมายเลขอะตอม (Z) ต่ำ ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อเป็น TL. Phosphor ซึ่งใช้เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีแบบ solid-state ที่ดีที่สุดแบบหนึ่ง ผลึก LiF เตรียมโดยบริษัท Harshaw Chemical ในรูปของผลึกผสม (Mysterious crystal)

คือเป็น LiF : Mg, Ti โดยที่ Mg และ Ti เป็นตัวเข้าไปผสมเพียงเล็กน้อย (Impurity) เนื่องจากผลึก LiF บริสุทธิ์แสดงคุณสมบัติในการปล่อยแสง (phosphor) ไม่ดี โดยที่ผลึก LiF บริสุทธิ์มีชั้นของอีเล็คตรอนต้นเกินไป เมื่อรังสีตกกระทบผลึกแล้วพลังงานของรังสีจะถูกดูดกลืนไว้ในชั้นของอีเล็คตรอน แต่เนื่องจากชั้นของอีเล็คตรอนอยู่ต้นเกินไป ถ้าเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง (๒๕° - ๓๐° ซ) ความร้อนขนาดนี้ก็สามารถทำให้ผลึก LiF บริสุทธิ์คายพลังงานที่เก็บเอาไว้ออกมา ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดรังสี เพราะฉะนั้นจึงต้องเติมธาตุบางธาตุลงไปในผลึก LiF บริสุทธิ์ เพื่อให้ชั้นของอีเล็คตรอน อยู่ลึกลงไปจากเดิม เพื่อจะได้เก็บพลังงานจากรังสีไว้ได้ในขณะที่เก็บผลึกนี้ในอุณหภูมิห้อง ธาตุที่เติมลงไปนี้เรียกว่า ตัวกระตุ้น (activator) เช่น พวก Mg และ Ti เป็นต้น ส่วนการเติมนั้นจะเติมเพียงเศษหนึ่งส่วนล้านของโมเลกุลของผลึก LiF เท่านั้น ในกรณีที่ต้องการให้ LiF:Mg, Ti มีความไวในการรับรังสีสูงสุด (Optimum Sensitivity) จะใส่ ๐.๐๐๑๓ โมลเปอร์เซ็นต์ของ Mg และ ๐.๐๐๑ โมลเปอร์เซ็นต์ของ Ti ลงใน LiF บริสุทธิ์

การวิจัยนี้ใช้ LiF:Mg, Ti เป็นตัววัดปริมาณของรังสี (Dosimeter) มีชื่อทางการค้าว่า Thermoluminescent Dosimeter เรียกชื่อย่อว่า TLD. ซึ่งแยกออกเป็น TLD-๑๐๐, TLD-๖๐๐ และ TLD-๗๐๐ ซึ่งทั้งหมดนี้ผลิตออกจำหน่ายโดยบริษัท Harshaw Chemical และแต่ละชนิดมีส่วนผสมของ ^{6}Li และ ^{7}Li ไม่เท่ากัน ส่วนปริมาณ F, Mg และ Ti ไม่เปลี่ยนแปลง ตามตาราง ๒.๒

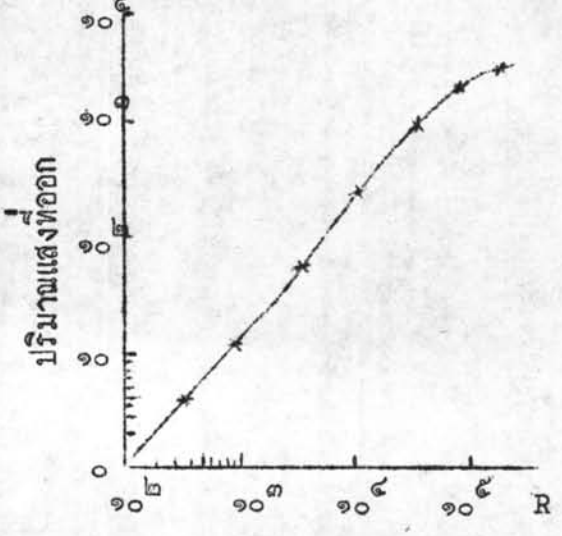
ตาราง ๒.๒ ส่วนผสมของ Li ใน LiF:Mg,Ti

ไอโซโทป	TLD-๑๐๐	TLD-๖๐๐	TLD-๗๐๐
^{6}Li	๗.๕%	๔๕.๖%	๐.๐๗%
^{7}Li	๙๒.๕%	๔.๔%	๙๙.๙๓%

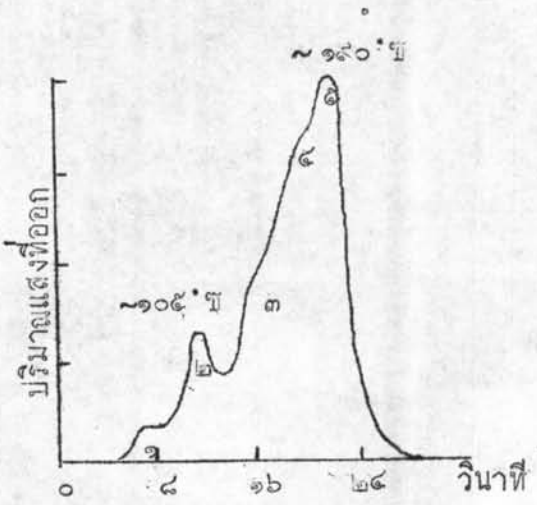
TLD -๑๐๐ เหมาะสำหรับการวิจัยทางด้านรังสีรักษา ซึ่งมีปริมาณรังสีที่ใช้อยู่ในช่วง ๕๐R -๖๐๐ R ปริมาณรังสีขนาดนี้อัตราส่วนของปริมาณแสงเมื่อนำเข้าเครื่องวัดแล้วปล่อยแสงออกมา เป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ตกกระทบ TLD-๑๐๐ ได้รับ และจะเป็นปฏิภาคโดยตรงไปจนถึงปริมาณรังสีประมาณ ๑๐๐๐ R เมื่อเกิน ๑๐๐๐ R ไปแล้ว ปริมาณรังสีกับปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจะไม่เป็นปฏิภาคโดยตรง ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า " Supralinearlity" ตามรูป ที่ ๒.๖

glow curve ของ TLD -๑๐๐ จะมียอดด้วยกันทั้งหมด ๕ ยอด (๕ peaks) ตามรูปที่ ๒.๗ หลังจากนำเอา TLD-๑๐๐ ไปอาบรังสี (exposed) แล้วปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ยอดต่าง ๆ จะลดลงครึ่งหนึ่ง ในช่วงเวลา ๕ นาที, ๑๐ ชั่วโมง ๐.๕ ปี ๗ ปี และ ๘๐ ปี ตามลำดับ ยอดที่เหมาะสำหรับวัดรังสี คือ ยอดที่ ๔ และ ๕ เท่านั้น เพราะในบางกรณีต้องใช้เวลานานในการวัดเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามที่ต้องการ เช่น ในการวัดรังสีสะท้อนต่าง ๆ ซึ่งมีปริมาณน้อย

การวัดจะวัดโดยการหาพื้นที่ใต้ curve ของยอดที่ ๔ และ ๕ เท่านั้น โดยการให้อุณหภูมิแก่ TLD-๑๐๐ ที่ประมาณ ๑๔๐ °ซ ยอดที่ ๑ ถึง ๓ จะหายไป



รูป ๒.๖ แสดง Supralinearity ของ TLD -๑๐๐ ที่นำไปอาบรังสีแกมมา



รูป ๒.๗ glow curve ของ LiF. (TLD-๑๐๐) หลังจากนำไป anneal ที่ ๔๐๐ °ข เป็นเวลา ๑ ชม. ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปอาบรังสีแกมมา จำนวน ๑๐๐ R แล้วอ่านทันที

ปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมาโดยผลึกเรืองแสง (phosphor) ต่อการอ่านรังสี ๑ ครั้ง ของผลึก เราเรียกว่า Thermoluminescent - Sensitivity ความไวของผลึกขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวของผลึกนั้น ๆ และยังขึ้นกับคุณสมบัติของเครื่องอ่านปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมาจากผลึก ว่ามีความไวขนาดไหน เครื่องอ่านปริมาณของแสงที่ทำขายส่วนมากจะมีความไวในการอ่านปริมาณรังสีตั้งแต่ ๑ mR นี้ ไปจนถึงประมาณ ๑๐^{๕} R

๒.๗ <u>ปฏิกิริยาตอบสนองต่อพลังงานของรังสี</u> (Energy Response) รังสีเมื่อตกกระทบวัตถุ จะทำให้เกิดปฏิกริยา ๓ ชนิด

๒.๗.๑ ปฏิกิริยาแบบ Photoelectric absorption

๒.๓.๒ ปฏิกิริยาแบบ Compton Scattering

๒.๓.๓ ปฏิกิริยาแบบ Pair Production

ปฏิกิริยาแบบ Photoelectric absorption จะมีโอกาสเกิดมากเมื่อรังสีที่ตกกระทบวัตถุมีพลังงานต่ำ (น้อยกว่า ๑๐๐ KeV) ปฏิกิริยานี้จะเกิดโดยรังสีวิ่งเข้าชน (interaction) อิเล็คตรอนวงในสุด และจะขึ้นอยู่กับหมายเลขอะตอม (Z) ของวัตถุนั้นด้วย ในกรณีของ radiation detector ซึ่งมีผลึกที่มีหมายเลขอะตอมสูงสำหรับรังสี จะแสดงปฏิกิริยาตอบสนองต่อรังสีที่มีพลังงานต่ำได้ดีกว่ารังสีที่มีพลังงานสูง เพราะฉนั้น ปฏิกิริยาตอบสนองต่อรังสีของ radiation detector ในช่วงของพลังงานต่าง ๆ สามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาตอบสนองของ detector ที่พลังงานของรังสีต่าง ๆ จะแปรไปตามช่วงของพลังงานของรังสีระหว่าง ๑ ถึง ๓ MeV ปฏิกิริยา Photoelectric absorption แทบจะไม่เกิดขึ้นเลย และเครื่องมือวัดรังสี (Dosimeter) ที่จะแสดงปฏิกิริยาตอบสนองต่อพลังงานของรังสีโดยค่าของปริมาณรังสีที่ตกกระทบ กับปริมาณรังสีที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดรังสี มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย [๓]จากการทดลองพบว่า เครื่องวัดที่มีผลึกที่มีหมายเลขอะตอมเกือบเท่าหรือเท่ากับอากาศ (Z = ๗.๖๔) จะแสดงค่าการวัดปริมาณรังสีได้ดีที่สุด ใน TLD - ๑๐๐ มีหมายเลขอะตอมเท่ากับ ๘.๒ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับหมายเลขอะตอมของอากาศ เพราะฉะนั้น TLD - ๑๐๐ ก็จะแสดงค่าวัดปริมาณรังสีได้ดีเช่นกัน ส่วนปฏิกิริยาแบบ Compton และ pair production จะไม่เกิดขึ้นเลย

๒.๔ <u>ความคงสภาพในการเก็บพลังงานของผลึก TL.</u> (Stability of TL - crystal) หลังจากผลึก TL. ได้รับความร้อนก็จะปลอยแสงออกมาในช่วงที่ตามนุษย์สามารถแลเห็นได้ (visible light) พลังงานที่ปลอยออกมาใน

---

[๓]J.R. Cameron, N. Suntharalingarm, G.N. Kenny, <u>Thermoluminescent Dosimetry</u>. pp. 32-35

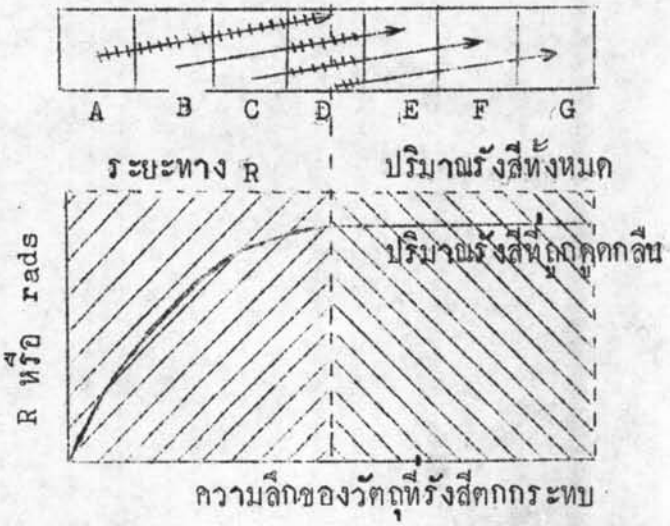
รูปแสงนี้ ออกมาจากชั้นของพลังงานภายในผลึก โดยก่อนหน้านั้นผลึกได้รับพลังงานจากรังสี แล้วจึงเก็บพลังงานไว้ พลังงานในรูปของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับ - อุณหภูมิที่ให้กับผลึก TL. ให้แสงสว่างออกมา แสดงว่าผลึกนั้นมีความคงสภาพในการเก็บพลังงานไม่ดี ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้อุณหภูมิสูง ๆ ผลึก TL. จึงให้แสงออกมา แสดงว่าผลึกนั้นมีความคงสภาพในการเก็บพลังงานดี ซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้เป็น - เครื่องวัดปริมาณรังสี เพราะสามารถเก็บผลึกไว้ได้นาน ๆ โดยผลึกนั้นไม่คายพลังงานออกมา

๒.๔ การจางหายของพลังงานหลังจากนำผลึก TL. ไปอาบรังสี

(Fading After Irradiation) เมื่อผลึก TL. เช่น LiF (TLD -๑๐๐) ถูกนำไปอาบรังสี พลังงานของรังสีจะถูกเก็บอยู่ในชั้นของอีเล็คตรอน ถ้าเก็บ - TLD -๑๐๐ ไว้ โดยไม่นำไปเข้าเครื่องอ่านเพื่ออ่านปริมาณของรังสี โดยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อาจจะเป็น ๑ เดือน ถึง ๑ ปี เมื่อนำ TLD -๑๐๐ มาเข้าเครื่องอ่าน ปริมาณรังสีที่เครื่องอ่านจะอ่านได้น้อยกว่าปริมาณรังสีที่แท้จริง กล่าวคือ TLD -๑๐๐ ถ้าเก็บไว้นาน ๑๒ สัปดาห์ ปริมาณรังสีจะลดลงจากเดิมประมาณ ๕ % ซึ่งแสดงว่าพลังงานสามารถหลุดออกมาจากชั้นของอีเล็คตรอนได้ ถ้าเก็บผลึกไว้นาน ๆ โดยไม่ได้ทำการวัดทันทีในผลึก TL. แต่ละชนิด การจางหายของพลังงานไม่เหมือนกัน ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตาราง ๒.๑

๒.๑๐ ความสมดุลย์ทางอีเล็คทรอนิคส์ (Electronic Equilibrium)

เมื่อผลึก TL. เช่น TLD-๑๐๐ ถูกนำไปอาบรังสีแกมมาปริมาณหนึ่ง แล้วนำ TLD-๑๐๐ มาเข้าเครื่องอ่านปริมาณรังสี ปรากฏว่าปริมาณรังสีที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริง ปรากฏการณ์นี้เป็นปัญหาที่เกี่ยวเนื่องมาจาก ความสมดุลย์ทางอีเล็คทรอนิคส์



รูป ๒.๘ แสดงความสมดุลย์ทางอีเล็คทรอนิคส์

จากรูป ๒.๘ วัตถุชนิดหนึ่งสมมติแบ่งออกเป็นบล็อค เริ่มจาก A, B, C, D, E, F และ G ให้ photon วิ่งผ่านวัตถุนี้โดยเริ่มจากบล็อค A ระยะทางของการเคลื่อนที่ (R) จะเป็นฟังชั่นก์โดยตรงกับพลังงานของ photon ที่วิ่งชนบริเวณกึ่งกลางของบล็อค D จะเป็นความลึกที่เท่ากับระยะทาง R พอดี บล็อค D เป็นบริเวณที่ photon เสียพลังงานให้แก่วัตถุมากที่สุด และบริเวณนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการสูญเสียพลังงานของ photon ให้แก่วัตถุโดยการสูญเสียด้วยอัตราที่คงที่ ความหนาที่เริ่มจาก บล็อค A ถึงกึ่งกลางของบล็อค D ซึ่งจะทำให้เกิด Electronic Equilibrium นี้ เรียกว่า "build up region" และจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

๒.๑๐.๑ ชนิดของรังสี

๒.๑๐.๒ พลังงานของรังสี

๒.๑๐.๓ ความหนาแน่นของวัตถุที่รังสีตกกระทบ

Build up region ส่วนมากจะมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อตาราง ซ.ม. หรือในเทอมของความหนาของ ๑ หน่วย ความหนาแน่นของสาร (ρ = ๑) ดังแสดงไว้ในตาราง ๒.๓

ตาราง ๒.๓ Build up region ที่พลังงานต่าง ๆ กันของรังสี

ชนิดของรังสี	พลังงานที่ peak(MeV)	พลังงานเฉลี่ย (MeV)	Build up region	
			mg/cm^2	m.m.(ρ=1)
ซีเซียม - ๑๓๗	๐.๖๖๒	๐.๖๖๒	๒๕๐	๒.๕
โคบอลท์ - ๖๐	๑.๒๕	๑.๒๕	๔๕๐	๔.๕
เอกซเรย์	๐.๓	๐.๒	๑๐๐	๑.๐
เอกซเรย์	๒.๐	๐.๖๗	๓๕๐	๓.๕
เอกซเรย์	๓.๐	๑.๐๐	๔๒๕	๔-๔.๕
เอกซเรย์	๒๕	๗-๘	๔๐๐๐	๔๐-๕๐

เนื่องจาก TLD-๑๐๐ ที่ใช้เป็นเครื่องมือวัดรังสี มีความหนาเพียง ๑ มม. เมื่อนำไปอาบรังสีที่เกิดจาก ซีเซียม-๑๓๗, โคบอลท์-๖๐ หรือเอกซเรย์พลังงานสูง ๆ จะได้ปริมาณรังสีที่น้อยกว่าที่เป็นจริง เนื่องมาจาก build up region ถ้าต้องการให้ได้ปริมาณรังสีที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องใช้สารบางอย่างมาหุ้ม TLD-๑๐๐ ไว้ เพื่อ - เป็น build up และทำให้เกิดความสมดุลย์ทางอีเล็คทรอนิคส์ที่ผิวของ TLD -๑๐๐ พอดี สารที่ใช้เป็นตัว build up ส่วนมากจะเป็นสารพวกพลาสติก เช่น เทฟลอน (Teflon) ไนลอน (Nylon) และลูไซต์ (Lucite)

๒.๑๑ การ Anneal TLD. เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ TLD. ที่อาบรังสี และนำไปเข้าเครื่องอ่านแล้ว ก่อนที่จะนำ TLD. กลับมาใช้ใหม่ ต้องนำไปใส่ตู้อบ (Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิต่าง ๆ ภายในให้คงที่ได้ เพื่อที่จะให้อิเล็คตรอนที่ยังเหลือตกค้างอยู่ในชั้นของพลังงานหลุดออกมาให้หมด ซึ่งเรียกว่าการ anneal ซึ่งจะทำให้วัดปริมาณรังสีครั้งใหม่ได้ถูกต้อง

ในปี ๑๙๕๔ [๔] Daniels และ Rieman พบว่าอุณหภูมิสูงสุด (Optimum Temperature) ที่ใช้กับ TLD-๑๐๐ ในการ anneal เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าประมาณ ๔๐๐ °ซ จากรูป ๒.๗ เป็น glow curve ของ TLD -๑๐๐ เมื่อนำไปอาบรังสีแล้วเข้าเครื่องอ่านทันที โดยทำการ anneal TLD -๑๐๐ ที่ ๔๐๐ °ซ เป็นเวลา ๑ ช.ม. และอาบรังสีด้วยปริมาณรังสี ๑๐๐ R แต่ถ้าทิ้ง TLD -๑๐๐ ไว้ ๓๐ นาที แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องอ่าน ปรากฏว่ายอดที่ ๑ หายไป ทิ้งไว้ ๒ วัน ยอดที่ ๒ หายไป ทิ้งไว้ ๐.๕ ปี, ๗ ปี และ ๘๐ ปี ยอดที่ ๓, ๔ และ ๕ จะหายไปตามลำดับ ในการวัด TLD-๑๐๐ วัดที่ยอดที่ ๔ และ ๕ เท่านั้น ยอดที่ ๑ ถึง ๓ สามารถทำให้หายไปได้โดยไม่ต้องทิ้งไว้ตามเวลาดังกล่าว แต่ให้ความร้อนแก่แท่ง TLD. ค่าหนึ่งคือประมาณ ๑๔๐ °ซ ยอดที่ ๑ ถึง ๓ ก็จะหายไป ในเครื่องวัดค่า preheat - temperature จะมีค่าประมาณ ๑๔๐ °ซ ส่วนยอดที่ ๔ และ ๕ จะปล่อยพลังงานออกมาที่อุณหภูมิประมาณ ๒๖๐ °ซ เพราะฉะนั้น Integrate temperature ในเครื่องวัดจะมีค่าประมาณ ๒๖๐ °ซ เพื่อที่จะวัดปริมาณรังสีที่อยู่ในชั้นของพลังงานภายในแท่ง - TLD -๑๐๐

ในปัจจุบัน การ anneal TLD. มีใช้อยู่ ๒ วิธี

๒.๑๑.๑ anneal โดยใช้อุณหภูมิ ๔๐๐ °ซ เป็นเวลา ๑ ช.ม. และ ๘๐ °ซ เป็นเวลา ๒๔ ช.ม. แล้วนำเอา TLD. ออกจากเตาอบทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

---

[๔] JR. Cameron, N. Suntharalingum, EN.Kenny, Thermoluminescent Dosimetry p.131

๒.๑๑.๒ anneal โดยใช้อุณหภูมิ ๔๐๐ °ซ เป็นเวลา ๑๕ นาที แล้วปิดสวิทช์เตาอบทั้งหมด ทิ้ง TLD. ไว้ในเตาอบจนกระทั่ง TLD. มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

การ anneal ทั้ง ๒ วิธีนี้คล้ายกัน มีจุดมุ่งหมายที่จะลบยอด ๑, ๒ และ ๓ ของ glow curve ออก และเมื่อเอา TLD. ไปอาบรังสีแล้ว พลังงานของรังสีจะได้ไปอยู่ที่ชั้นของพลังงานลึก ๆ (ยอดที่ ๔ และ ๕)