รายงานการทดสอบสมมติฐาน CL-7

Spatial Profile & Plateau Resolution

การตรวจจับรอยแตกด้วยลายเซ็นการกระเจิง (SPR) — OpenGATE 10 / Geant4

รายงานเฉพาะการทดสอบ CL-7 (วิเคราะห์ข้อมูลเดิม) • July 12, 2026

บทคัดย่อ

CL-7 ตอบปมที่ CL-1 ทิ้งไว้: “ภาวะอิ่มตัว (plateau) ระหว่าง 0.54 กับ 1.0 มม. เกิดจาก ROI ขนาดคงที่ เจือจางสัญญาณ หรือเป็นการอิ่มตัวเชิงกายภาพ” โดยวิเคราะห์**โปรไฟล์เชิงพื้นที่**และ**สัญญาณรวม (integrated)** บนข้อมูล CL-0 (ไม่รันใหม่) ผลสรุป: **สัญญาณรวมก็อิ่มตัวเช่นกัน** (0.54 เทียบ 1.0 ต่างกันไม่มีนัยสำคัญ, $p = 0.73$) $\Rightarrow$ **plateau เป็นของจริงเชิงกายภาพ มิใช่สิ่งประดิษฐ์ของ ROI** — SPR ตรวจ**การมีอยู่**ของรอยแตกได้ไวมาก (ถึง 0.3 มม.) และมี dose–response ในช่วง < 0.5 มม. แต่**ความไวต่อความกว้าง**ของรอยแตกอิ่มตัวเกิน $\sim$0.5 มม.

1. สมมติฐานและขอบเขต

ปมจาก CL-1: plateau (0.54 vs 1.0) แยกไม่ออกด้วย ROI-mean และการเพิ่ม seed ไม่คุ้ม ($\sim$111 seeds) CL-1 เสนอว่าอาจเป็นเพราะ ROI ขนาดคงที่ “เจือจาง” สัญญาณของร่องที่กว้างขึ้น

สมมติฐาน CL-7: ถ้า plateau เป็นเพราะ ROI เจือจาง $\Rightarrow$ **สัญญาณรวม (integrated)** ซึ่งไม่ขึ้นกับการเฉลี่ย ควรยังโตตามขนาด; ถ้าสัญญาณรวมก็อิ่มตัว $\Rightarrow$ เป็นการอิ่มตัวเชิงกายภาพ

ข้อมูล: แผนที่ ΔSPR ต่อ seed ของ 4 ขนาดจาก CL-0 (8 seeds) — วิเคราะห์ล้วน ไม่รันใหม่

2. วิธีวิเคราะห์

1. **Radial profile:** เฉลี่ย ΔSPR ในวงแหวนรัศมี r รอบจุดร่อง (เฉพาะในลำแสงสะอาด $r < 9$) เพื่อดูรูปทรงและความลึกของแอ่ง
2. **Integrated signal:** $-\sum \Delta$SPR ในดิสก์ $r < 8$ ต่อ seed $\rightarrow$ mean $\pm$ SEM (8 seeds) — ตัวชี้วัดสัญญาณรวมที่ไม่ถูกเจือจางแบบค่าเฉลี่ย
3. **Plateau test:** เทียบ integrated ของ 1.0 vs 0.54 แบบจับคู่ต่อ seed

3. ผลการวิเคราะห์

ทั้งสองตัวชี้วัดให้รูปแบบเดียวกัน — โตในช่วง 0.306$\rightarrow$0.54 มม. แล้วอิ่มตัว

3.1 โปรไฟล์เชิงรัศมีของแอ่ง

ทุกขนาดมีแอ่ง ΔSPR ที่จุดร่อง ฟื้นสู่ 0 ภายใน $\sim$6px รูปทรงคล้ายกัน โดยลึกสุดที่ $\sim$0.5 มม.

ขนาด	integrated $-\Delta$SPR ($\times 10^{-3}$)	ROI-mean $\lvert t \rvert$ (CL-0)
0.306 มม.	5.3 ± 2.1	3.12
0.43 มม.	8.2 ± 1.9	3.66
0.54 มม.	**10.4 ± 2.4**	4.84
1.0 มม.	9.4 ± 1.6	4.32

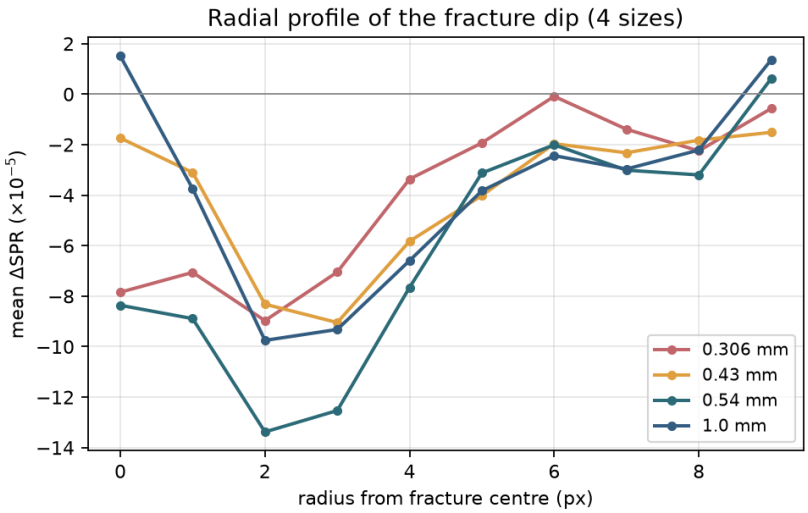

Figure 1: โปรไฟล์เชิงรัศมีของ ΔSPR รอบจุดร่อง; แอ่งลบที่ศูนย์กลาง (= สัญญาณรอยแตก) ปรากฏทุกขนาด รูปทรงใกล้เคียงกัน

3.2 สัญญาณรวมอิ่มตัว — plateau เป็นของจริง

integrated $-\Delta$SPR: $5.3 \to 8.2 \to 10.4 \to 9.4$ ($\times 10^{-3}$) — โตจาก 0.306 ถึง 0.54 มม. แล้ว**คงที่**
plateau test (1.0 vs 0.54, จับคู่): $\Delta = -0.99 \times 10^{-3}, t = -0.36, p = 0.73 \Rightarrow$ **แยกไม่ออก**
$\Rightarrow$ **สัญญาณรวมก็อิ่มตัว มิใช่แค่ค่าเฉลี่ยถูกเจือจาง** $\Rightarrow$ plateau เป็นการอิ่มตัวเชิงกายภาพจริง

4. สรุปการทดสอบสมมติฐาน CL-7

ปม plateau คลี่คลายแล้ว: ☒ ไม่ใช่ ROI เจือจาง — เป็นการอิ่มตัวเชิงกายภาพ

สัญญาณรวม (integrated) ซึ่งจะโตต่อถ้าร่องกว้างขึ้นเพียงกระจายสัญญาณไปพิกเซลมากขึ้น กลับ**อิ่มตัวที่ ∼0.5 มม. เช่นเดียวกับ ROI-mean** ($p = 0.73$ ที่ 0.54 vs 1.0) $\Rightarrow$ การเพิ่ม seed หรือขยาย ROI ก็ไม่ช่วยแยก 0.54/1.0 เพราะสัญญาณกายภาพเองอิ่มตัว

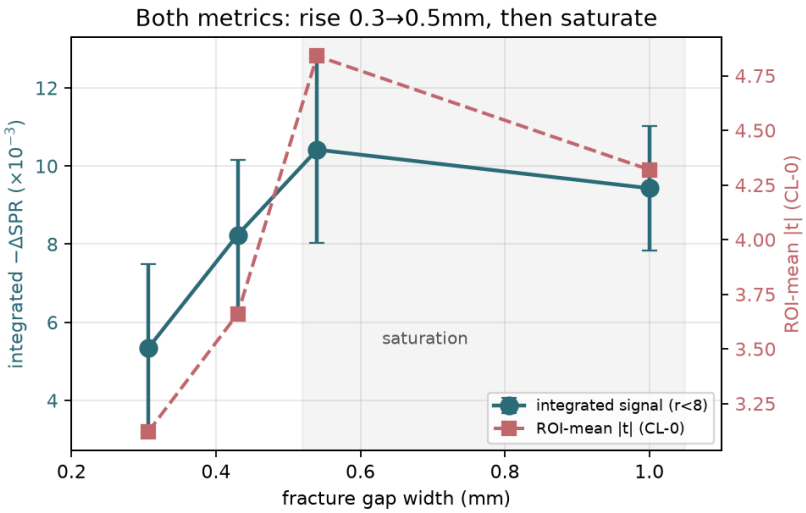

Figure 2: สัญญาณรวม (แกนซ้าย, มี error bar) และ ROI-mean $|t|$ จาก CL-0 (แกนขวา) — ทั้งคู่ขึ้นในช่วง 0.3–0.5 มม. แล้วเข้าสู่แถบอิ่มตัว (เทา) เหมือนกัน

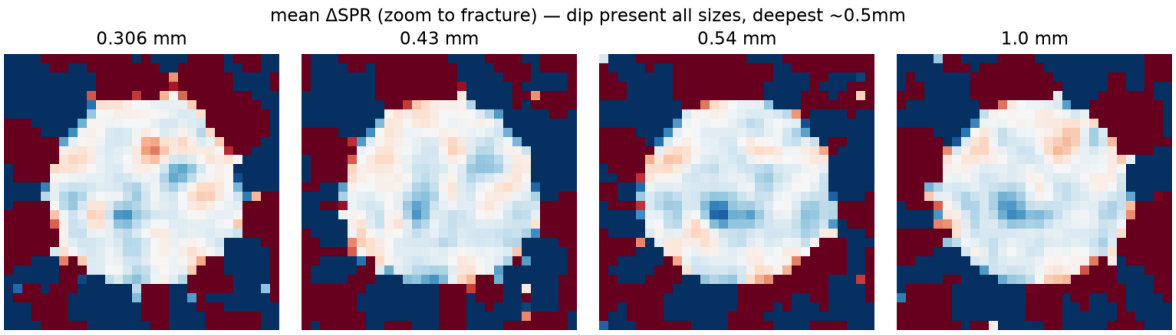

Figure 3: แผนที่ ΔSPR เฉลี่ย (zoom ที่ร่อง) ทั้ง 4 ขนาด — แอ่งสีน้ำเงินปรากฏทุกขนาด เข้มสุดที่ $\sim$0.5 มม.

5. นัยเชิงกายภาพและต่อโครงการ

- **ขอบเขตความสามารถของ SPR:** ตรวจ**การมีอยู่**ของรอยแตกได้ไว (threshold $\sim$0.3 มม.) พร้อม dose–response ที่ชัดในช่วง < 0.5 มม. แต่**ความไวต่อความกว้าง**อิ่มตัวเกิน $\sim$0.5 มม.
- **ตีความเชิงฟิสิกส์:** เมื่อช่องอากาศ “เปิด” พอตามแนวรังสีแล้ว การกว้างขึ้นอีกไม่เพิ่ม การทะลุของ primary อย่างเป็นสัดส่วน $\Rightarrow$ อัตราส่วน scatter/primary อิ่มตัว
- **ปิดปม CL-1 อย่างซื่อตรง:** plateau มิใช่จุดอ่อนของระเบียบวิธี แต่เป็น**คุณสมบัติจริง ของสัญญาณ** — เป็นผลลัพธ์เชิงปริมาณที่มีค่าสำหรับ Phase 1 (SPR เหมาะกับการ*ตรวจพบ* มากกว่าการ*วัดความกว้าง*ของรอยแตกใหญ่)
- **dose–response ยังยืนยันความเป็นสัญญาณจริง** ในช่วง 0.3–0.5 มม. (ทั้งสองตัวชี้วัดโตตามขนาด)

รายงานเฉพาะ CL-7 ประกอบ `report/methodology.pdf`. วิเคราะห์บนข้อมูล CL-0 (8 seeds). ดู CL-1 = `report/cl1_report.pdf`, CL-2 = `report/cl2_report.pdf`, ผลฐาน = `report/report.pdf`.