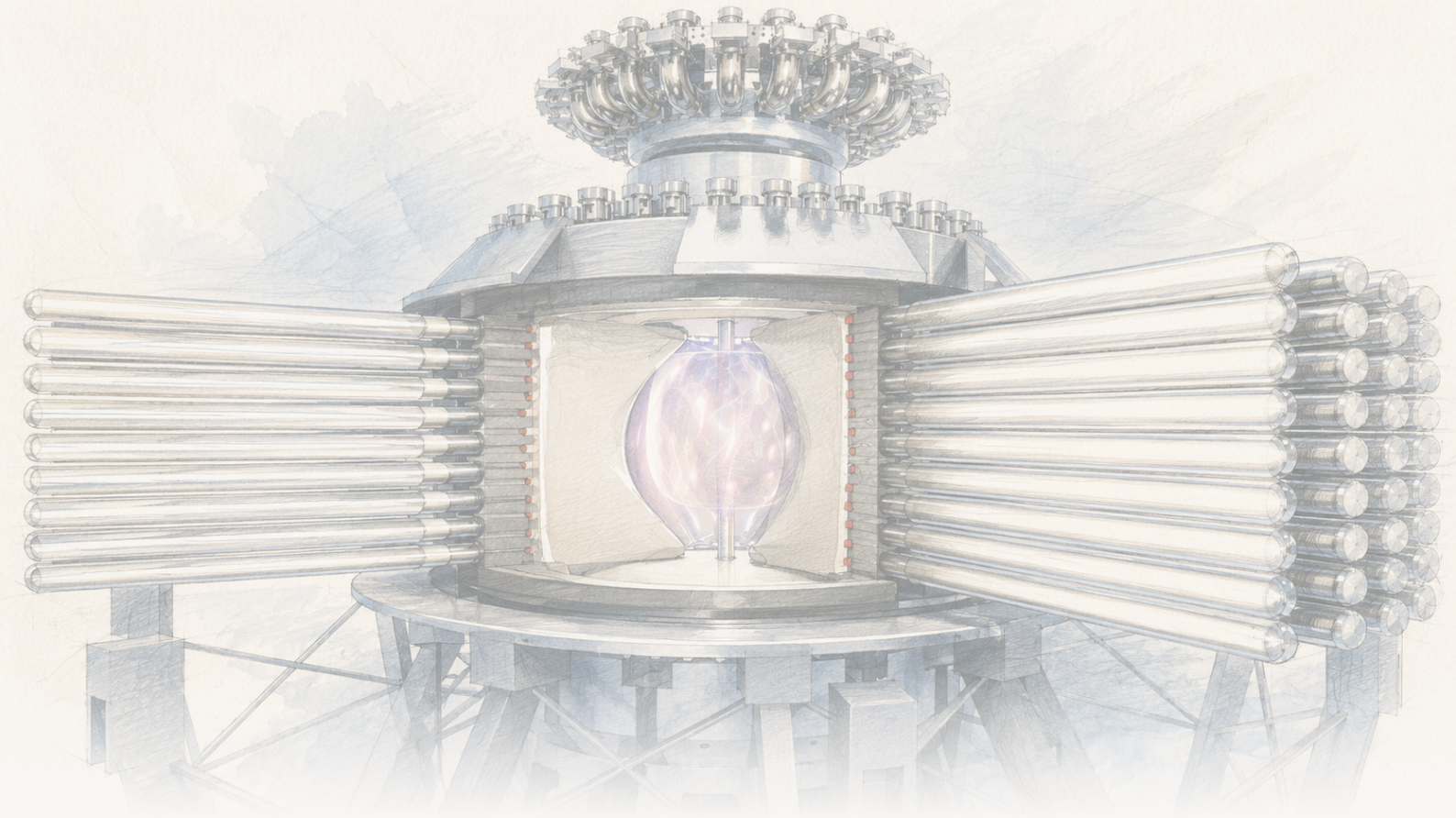


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# เครื่องฟิวชันทำให้พลาสมาร้อนขึ้นด้วยการบีบอัด — ก้าวที่เกิดขึ้นจริง และสิ่งที่ยังไม่ใช่โรงไฟฟ้า

*LM26 ของ General Fusion บีบอัดพลาสมาดิวเทอเรียมที่มีสนามแม่เหล็กด้วยปลอกลิเทียมที่ยุบตัวเข้าด้านใน และพบว่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มมากกว่าสามเท่าไปถึงค่าสูงสุดที่วัดได้ประมาณ 0.72 keV (718 ± 80 eV หรือราว 8 ล้าน °C) โดยการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง ซึ่งเป็นกลไกหลักของแนวทาง magnetized-target-fusion นี่เป็นจุดตรวจทางวิศวกรรมที่มีความหมายจริง แต่ก็ยังเป็นเพียง 11 การยิงแรกบนเครื่องเดียว ใน preprint ของบริษัทที่ยังไม่ผ่าน peer review ที่อุณหภูมิยังต่ำกว่าที่พลาสมาเผาไหม้ต้องการประมาณสิบเท่า — ไม่มีพลังงานสุทธิ ไม่มี breakeven และไม่มีไฟฟ้า แสดงกลไกได้ ไม่ได้สร้างโรงไฟฟ้าแล้ว*

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment*, S. J. Howard et al. (General Fusion), arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (preprint) · DOI: 10.48550/arXiv.2606.23974

# เครื่องฟิวชันทำให้พลาสมาร้อนขึ้นด้วยการบีบอัด — ก้าวที่เกิดขึ้นจริง และสิ่งที่ยังไม่ใช่โรงไฟฟ้า

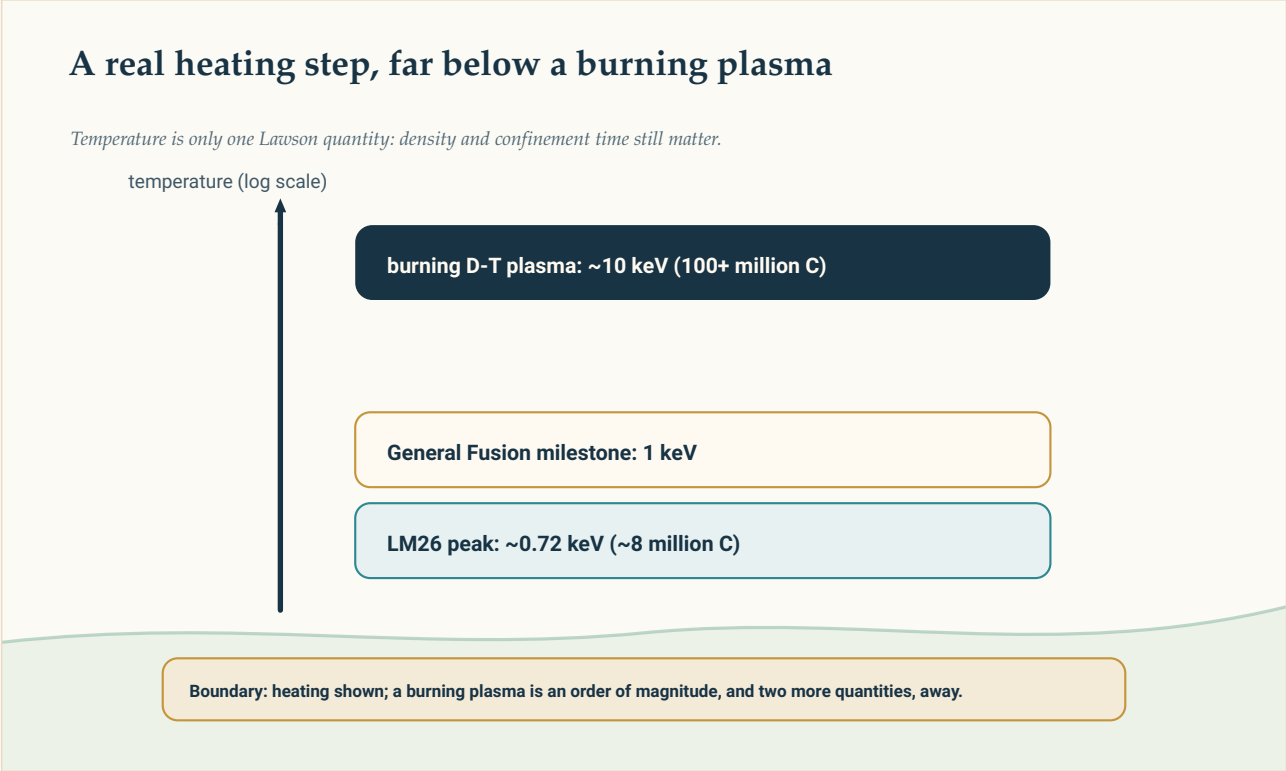
การที่เครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันจะให้พลังงานกลับมามากกว่าพลังงานที่ใช้เดินระบบ พลาสมาเชื้อเพลิงต้องร้อนพอ หนาแน่นพอ และถูกกักไว้ได้นานพอในเวลาเดียวกัน — สามปริมาณที่นักฟิสิกส์รวมไว้ในสิ่งที่เรียกว่าเกณฑ์ Lawson (Lawson criterion) งานส่วนใหญ่ในวงการพยายามไปถึงจุดนั้นด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดขนาดมหึมา (เช่น tokamak อย่าง ITER) หรือชุดเลเซอร์ยักษ์ (inertial confinement อย่างที่ US National Ignition Facility) บริษัทจำนวนน้อยกว่านั้นเลือกเส้นทางที่สาม คือ **magnetized target fusion** (MTF): สร้างพลาสมาที่อุ่นและมีสนามแม่เหล็กอยู่ก่อน แล้ว *บีบ* มันอย่างรวดเร็วด้วยแรงทางกล เพื่อให้การอัดเป็นตัวทำให้ร้อน — คล้ายเครื่องยนต์ดีเซลที่จุดเชื้อเพลิงด้วยการอัดแทนประกายไฟ

ในเดือนมิถุนายน 2026 บริษัทแคนาดา **General Fusion** เผยแพร่ผลจาก **Lawson Machine 26 (LM26)** เพื่อทดสอบว่าหลักเดิมพันสำคัญนี้ใช้ได้จริงหรือไม่: การบีบอัดพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กด้วยแรงทางกลทำให้มันร้อนขึ้นตามที่แบบจำลองคาดไว้จริงหรือไม่? ในการยิงบีบอัด 11 ครั้งแรก — ซึ่งพลาสมาดิวเทอเรียมแบบ spherical tokamak ถูกบีบด้วย *ปลอกลิเทียมแข็งที่ยุบตัวเข้าด้านใน* — การยิงที่ดีที่สุดแสดงให้เห็นว่าพลาสมาร้อนขึ้น หนาแน่นขึ้น และมีสนามแม่เหล็กเข้มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างการอัด และการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง

นี่เป็นผลทางวิศวกรรมที่เฉพาะเจาะจงและมีความหมายจริงสำหรับแนวทาง MTF แต่ก็ยังเป็นเพียงชุดการยิงแรก อธิบายไว้ใน **บทความก่อนตีพิมพ์ ของบริษัทที่ยังไม่ผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ** ที่อุณหภูมิยังต่ำกว่าที่พลาสมาเผาไหม้ต้องการมาก — และมันไม่ใช่พลังงานฟิวชัน ไม่ใช่ breakeven และไม่ใช่โรงไฟฟ้า

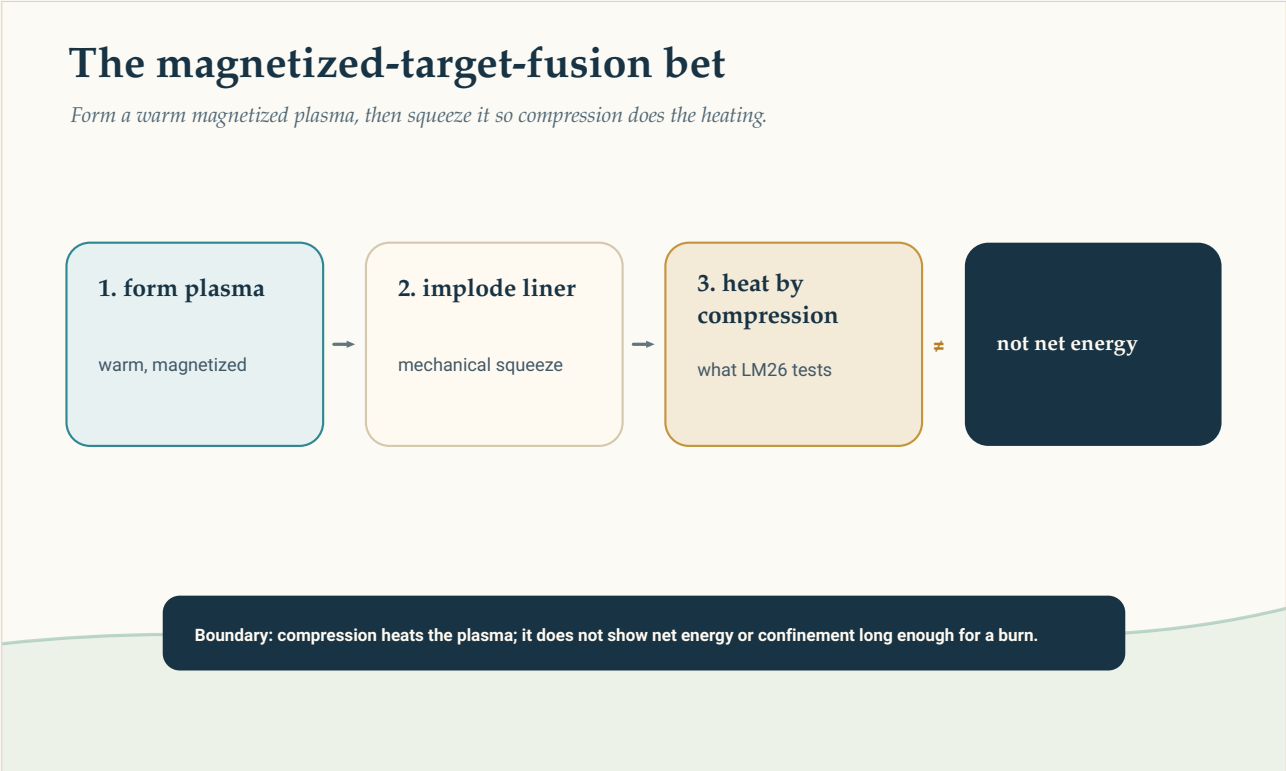
[video pending]

นี่คือวิดีโอประชาสัมพันธ์จาก General Fusion ใส่ไว้เพื่อให้เห็นว่า LM26 มีลักษณะอย่างไร ไม่ใช่หลักฐานอิสระว่าเครื่องจะบรรลุเป้าหมายฟิวชันในอนาคต



บันไดอุณหภูมิ: LM26 ที่ประมาณ 0.72 keV, เป้าหมาย 1 keV ของ General Fusion และประมาณ 10 keV ที่พลาสมาดิวเทอเรียม–ทริเทียมแบบเผาไหม้ต้องการ อุณหภูมิเป็นเพียงหนึ่งในสามปริมาณของเกณฑ์ Lawson

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0




Magnetized target fusion: สร้างพลาสมาที่อุ่นและมีสนามแม่เหล็ก แล้วบีบด้วยปลอกที่ยุบตัวเข้าด้านในเพื่อให้แรงอัดเป็นตัวทำความร้อน — นี่คือการเดิมพันแบบ “การอัดของเครื่องยนต์ดีเซล” LM26 ทดสอบว่าการบีบอัดทำให้พลาสมาร้อนขึ้นหรือไม่ ไม่ได้ทดสอบพลังงานสุทธิหรือการกักพลาสมา

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

### “magnetized target fusion”, “keV” และเกณฑ์ Lawson หมายถึงอะไร

อุณหภูมิพลาสมาในงานฟิวชันมักระบุเป็น **กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV)** แทนองศา: 1 keV เท่ากับประมาณ **11.6 ล้าน °C** เชื้อเพลิงดิวเทอเรียม–ทริเทียมต้องมีอุณหภูมิราว **10 keV** (มากกว่า 100 ล้าน °C) จึงจะฟิวส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ — แต่อุณหภูมิเป็นเพียงหนึ่งในสามเงื่อนไขที่ต้องเกิดพร้อมกัน **เกณฑ์ Lawson** ระบุว่าเครื่องปฏิกรณ์ยังต้องมี **ความหนาแน่น** เพียงพอและ **เวลากักพลาสมา** นานพอ ซึ่งมักรวมกันเป็น “triple product” เดียว (อุณหภูมิ × ความหนาแน่น × เวลากักพลาสมา) การทำให้พลาสมาร้อนเป็นสิ่งจำเป็น แต่เพียงอย่างเดียวยังห่างไกลจากความเพียงพอ

**Magnetized target fusion (MTF)** เป็นทางสายกลางระหว่างสองแนวทางหลัก แทนที่จะกักพลาสมาร้อนไว้นานด้วยแม่เหล็กขนาดใหญ่ หรือทำให้เป้าหมายขนาดเล็กร้อนแทบจะทันทีด้วยเลเซอร์ MTF จะสร้างพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กแล้วอัดด้วยแรงทางกลในช่วงเวลาไมโครวินาที หากใช้ได้จริง การอัดจะทั้งเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมา — อาจไปถึงเงื่อนไขฟิวชันได้โดยไม่ต้องใช้แม่เหล็กระดับ ITER หรือเลเซอร์ระดับ NIF การบีบอัดในเครื่องจริงจะให้ความร้อนได้ตามนั้นหรือไม่ ก็คือสิ่งที่การทดสอบอย่าง LM26 มีไว้ตอบ

# ผู้วิจัยทำอะไร

- สร้างและเดินเครื่อง **LM26** ซึ่งเป็นเครื่อง magnetized-target-fusion ของ General Fusion: สร้างพลาสมาดิวเทอเรียมแบบ spherical tokamak แล้วบีบด้วย **ปลอกลิเทียมแข็ง** ที่ถูกขับให้ยุบตัวเข้าด้านใน — เทียบเท่าการบีบอัดรัศมีประมาณ **3 เท่า**
- ทำ **การยิงบีบอัด 11 ครั้งแรก** พร้อมเครื่องมือวัดจำนวนมาก เพื่อสร้างค่าตามเวลาของอุณหภูมิ ความหนาแน่น และสนามแม่เหล็กของพลาสมา รวมถึงบันทึกนิวตรอน รังสีเอกซ์ แสงที่มองเห็นได้ และภาพจากกล้องความเร็วสูงของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลาสมากับผนัง
- สร้าง **แบบจำลองฟิสิกส์แบบบูรณาการ** ที่หาสมดุลระหว่างความร้อนจากการบีบอัด ความร้อนแบบ Ohmic (จากกระแสไฟฟ้าของพลาสมาเอง) และพลังงานที่สูญเสียไปยังขอบเขต แล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้เพื่อแยกว่าความร้อนมาจากไหน

# พบอะไร

- **พลาสมาร้อนขึ้นเมื่อถูกบีบ** ในการยิงที่ดีที่สุด อุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น **มากกว่า 3 เท่า** ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ **10 เท่า** และสนามแม่เหล็กเชิง poloidal ประมาณ **10 เท่า** จากการบีบอัดรัศมี 3 เท่า ในการยิงที่ดีที่สุด งานวิจัยวัด **อุณหภูมิอิเล็กตรอนสูงสุดประมาณ 0.72 keV** (718 ± 80 eV จาก Thomson scattering) — ราว 8 ล้าน °C
- **การวิเคราะห์ระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด** แบบจำลองแบบบูรณาการของทีมสรุปว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น *มากกว่าครึ่ง* มาจากการบีบอัดทางกลเอง — กลไกที่แนวทาง MTF ทั้งหมดพึ่งพา — ไม่ใช่จากความร้อนแบบ Ohmic
- **การปล่อยนิวตรอนเพิ่มขึ้นระหว่างการอัด** ซึ่งสอดคล้องกับพลาสมาดิวเทอเรียมที่ร้อนและหนาแน่นขึ้น

# สิ่งที่ผลนี้ยังไม่ได้แสดง

- นี่ **ไม่ใช่** พลังงานฟิวชัน breakeven หรือกำไรพลังงานสุทธิ ไม่มีอะไรในผลนี้ผลิตพลังงานมากกว่าที่ใช้เดินเครื่อง ผลนี้เป็นเรื่องของ *การทำให้พลาสมาร้อน* — หนึ่งขั้นในวงจรฟิวชัน — ไม่ใช่สมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์
- อุณหภูมิยัง **ต่ำกว่าพลาสมาเผาไหม้ประมาณสิบเท่า** ประมาณ 0.72 keV คือราว 8 ล้าน °C ขณะที่เชื้อเพลิงดิวเทอเรียม–ทริเทียมต้องอยู่แถว **10 keV (มากกว่า 100 ล้าน °C)** *และ* ต้องมีผลคูณความหนาแน่น × เวลากักที่เพียงพอเพื่อรักษาการเผาไหม้ เป้าหมายถัดไปของ General Fusion เองคือ **1 keV** ซึ่งก็ยังห่างจาก ignition มาก
- ข้อความว่า "**ความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด**" เป็น **ข้อสรุปจากแบบจำลอง** ไม่ใช่ค่าที่อ่านได้โดยตรง มันมาจากแบบจำลองฟิสิกส์แบบบูรณาการที่ปรับให้เข้ากับข้อมูลวินิจฉัย ความน่าเชื่อถือของการแยกสัดส่วนระหว่างการบีบอัด ความร้อนแบบ Ohmic และการสูญเสีย จึงขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนั้น
- นี่เป็น **บทความก่อนตีพิมพ์ ของบริษัทที่ยังไม่ผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ** ผลทั้งหมดรายงานโดยทีมที่สร้างเครื่องและระดมทุนจากคำสัญญาของเทคโนโลยีนี้เอง การประเมินอิสระยังไม่เกิดขึ้น
- การเพิ่มขึ้นของนิวตรอน **ไม่ใช่** ผลผลิตฟิวชันที่มีความหมายด้านพลังงาน ดิวเทอเรียมสามารถให้นิวตรอนได้บ้างในสภาวะเหล่านี้ แต่ยังต่ำกว่าระดับที่เป็นประโยชน์ต่อการผลิตพลังงานมาก
- ผลนี้ไม่ได้บอกอะไรเกี่ยวกับคำกล่าวแยกต่างหากของบริษัทว่า **โรงไฟฟ้าในอนาคตจะจ่ายไฟเข้าสู่โครงข่าย** — ซึ่งสื่ออิสระได้รายงานอย่างระมัดระวังมาก

# หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน

- **ข้ออ้างหลักแคบและตรวจสอบได้** "เราบีบอัดพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็ก แล้วมันร้อนขึ้น โดยความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด" คือการทดสอบกลไกที่แนวทาง MTF จำเป็นต้องผ่านพอดี และงานนี้สนับสนุนด้วยการยิงที่มีเครื่องมือวัดจำนวนมากพร้อมแบบจำลองสมดุลพลังงานที่ระบุชัด หากผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ได้ นี่จะเป็นการยืนยันแนวทางในระยะต้นที่มีความหมายจริง
- **ข้อจำกัดเป็นเรื่องโครงสร้าง ไม่ใช่รายละเอียดเล็กน้อย** มีเพียง 11 การยิง เครื่องเดียว ทีมเดียว ยังไม่ผ่านการทบทวน และอุณหภูมิพาดหัวต่ำกว่าพลาสมาเผาไหม้หนึ่งลำดับขนาด ข้อสรุปสำคัญที่สุด — *ความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด* — พึ่งแบบจำลอง ดังนั้นคำถามหลักใน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ คือการแบ่งสัดส่วนของแบบจำลองนั้นแข็งแรงเพียงใด
- **สถานะที่ตรงไปตรงมาคือ แสดงกลไกได้แล้ว ไม่ใช่บรรลุหลักชัยด้านพลังงาน** ผลนี้ขยับ MTF จาก "การบีบอัด *ควร*จะ ทำให้พลาสมาร้อน" ไปสู่ "การบีบอัด *ทำให้* พลาสมาร้อนจริง" และไม่ควรตีความให้ใหญ่กว่านั้น

# ทำไมจึงสำคัญ

สิ่งที่น่าสนใจใน magnetized target fusion คือเศรษฐศาสตร์ ไม่ใช่สถิติ หากการบีบอัดเชิงกลสามารถทำให้พลาสมาร้อนเข้าใกล้สภาวะฟิวชันได้ ก็อาจไปถึงจุดนั้นโดยไม่ต้องใช้แม่เหล็กระดับ ITER หรือเลเซอร์ระดับ NIF — เป็นเส้นทางที่ถูกกว่าและทดลองซ้ำได้เร็วกว่า *หาก* มันใช้ได้จริง คำว่า "หาก" นี่เองคือหัวใจของเรื่อง และมันขึ้นกับจุดตรวจที่ไม่หวือหวาอย่างนี้: การบีบอัดให้ความร้อนตามที่แบบจำลองสัญญาจริงหรือไม่? คำตอบจากการยิงแรกของ LM26 คือ "ใช่ แต่มีเงื่อนไข" และควรค่าแก่การบันทึกก็เพราะมันมีเงื่อนไข — เป็นเพียงขั้นหนึ่งของบันไดยาว รายงานโดยคนที่กำลังปีนบันไดนั้นเอง ยังไม่มีใครอื่นตรวจสอบ และยังอยู่ไกลจากยอดมาก

# สรุป

LM26 ของ General Fusion บีบอัดพลาสมาดิวเทอเรียมที่มีสนามแม่เหล็กด้วยปลอกลิเทียมที่ยุบตัวเข้าด้านใน และแสดงให้เห็นว่าพลาสมาร้อนขึ้น — อุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มมากกว่าสามเท่าไปถึงค่าสูงสุดที่วัดได้ประมาณ 0.72 keV (718 ± 80 eV หรือราว 8 ล้าน °C) — โดยการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง ซึ่งเป็นกลไกที่แนวทาง magnetized-target-fusion ของบริษัทพึ่งพา นี่เป็นก้าวทางวิศวกรรมที่จริงและเฉพาะเจาะจงสำหรับเส้นทางฟิวชันนี้ แต่ก็ยังเป็นเพียง 11 การยิงแรกบนเครื่องเดียว อธิบายใน บทความก่อนตีพิมพ์ ของบริษัทที่ยังไม่ผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ที่อุณหภูมิประมาณสิบเท่าต่ำกว่าพลาสมาเผาไหม้ โดยไม่มีพลังงานสุทธิ ไม่มี breakeven และไม่มีไฟฟ้า แสดงกลไกแล้ว ไม่ได้สร้างโรงไฟฟ้าแล้ว

---

## แหล่งข้อมูล

S. J. Howard et al. (General Fusion), The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment, arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (2026)
`https://arxiv.org/abs/2606.23974`

General Fusion, 'General Fusion Achieves Compressional Plasma Heating with LM26 Magnetized Target Fusion

Machine' (company announcement, June 2026)
https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-lm26-magnet

Nature news, 'Nuclear-fusion firm says plant will deliver electricity to grid - but big questions remain' (2026)
https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z