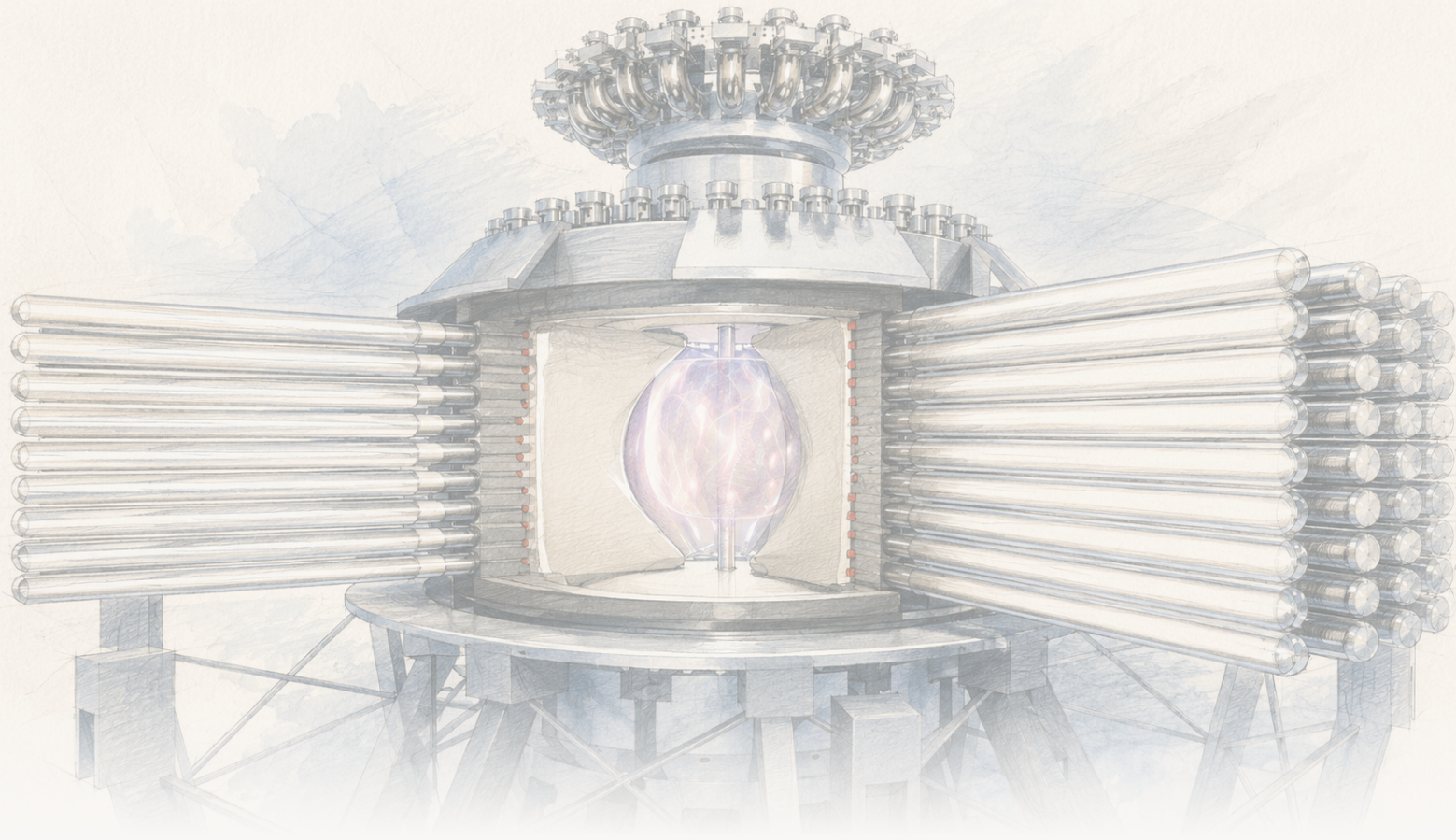




The CLEAN PAPER

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

เครื่องฟิวชั่นทำให้พลาสมาร้อนขึ้นด้วยการบีบอัด — ก้าวที่เกิดขึ้นจริง และสิ่งที่ยังไม่ใช่โรงไฟฟ้า

LM26 ของ General Fusion บีบอัดพลาสมาผิวเทอเรียที่มีสนามแม่เหล็กด้วยปลอกกลีเทียมที่ยุบตัวเข้าด้านใน และพบว่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มมากกว่าสามเท่าไปถึงค่าสูงสุดที่วัดได้ประมาณ 0.72 keV ($718 \pm 80 \text{ eV}$ หรือราว $8 \text{ ล้าน } ^\circ\text{C}$) โดยการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง ซึ่งเป็นกลไกหลักของแนวทาง magnetized-target-fusion นี่เป็นจุดตรวจทางวิศวกรรมที่มีความหมายจริง แต่ก็ยังเป็นเพียง 11 การยิงแรกบนเครื่องเดียว ใน preprint ของบริษัทที่ยังไม่ผ่าน peer review ที่อุณหภูมิยังต่ำกว่าที่พลาสมาเผาไหม้ต้องการประมาณสิบเท่า — ไม่มีพลังงานสุทธิ ไม่มี breakeven และไม่มีไฟฟ้า แสดงกลไกได้ไม่ได้สร้างโรงไฟฟ้าแล้ว

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

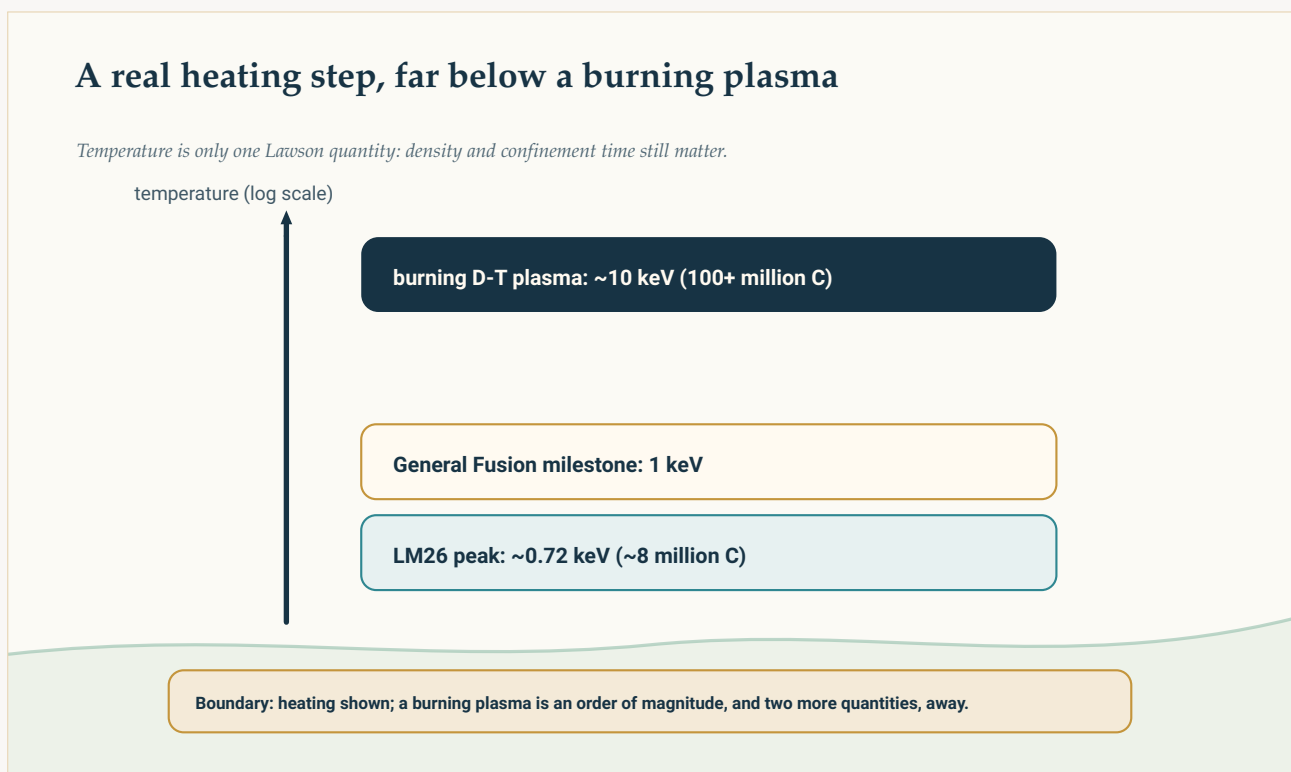
การที่เครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันจะให้พลังงานกลับมามากกว่าพลังงานที่ใช้เดินระบบ พลาสมาเชื้อเพลิงต้องร้อนพอ หนาแน่นพอ และถูกกักไว้ได้นานพอในเวลาเดียวกัน — สามปริมาณที่นักฟิสิกส์รวมไว้ในสิ่งที่เรียกว่าเกณฑ์ Lawson (Lawson criterion) งานส่วนใหญ่ในการพยายามไปถึงจุดนั้นด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดขนาดมหึมา (เช่น tokamak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

ในเดือนมิถุนายน 2026 บริษัทแคนาดา **General Fusion** เผยแพร่ผลจาก **Lawson Machine 26 (LM26)** เพื่อทดสอบว่าหลักเดิมพันสำคัญนี้ใช้ได้จริงหรือไม่: การบีบอัดพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กด้วยแรงทางกลทำให้มันร้อนขึ้นตามที่แบบจำลองคาดไว้จริงหรือไม่? ในการยิงบีบอัด 11 ครั้งแรก — ซึ่งพลาสมาผิวเทอเรียแบบ spherical tokamak ถูกบีบด้วย *ปลอกกาวเทียมแข็งที่ยุบตัวเข้าด้านใน* — การยิงที่ดีที่สุดแสดงให้เห็นว่าพลาสมาร้อนขึ้น หนาแน่นขึ้น และมีสนามแม่เหล็กเข้มข้นอย่างชัดเจนระหว่างการอัด และการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าการร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง

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

[video pending]

นี่คือวิดีโอประชาสัมพันธ์จาก General Fusion ใส่ไว้เพื่อให้เห็นว่า LM26 มีลักษณะอย่างไร ไม่ใช่หลักฐานอิสระว่าเครื่องจะบรรลุเป้าหมายฟิวชันในอนาคต

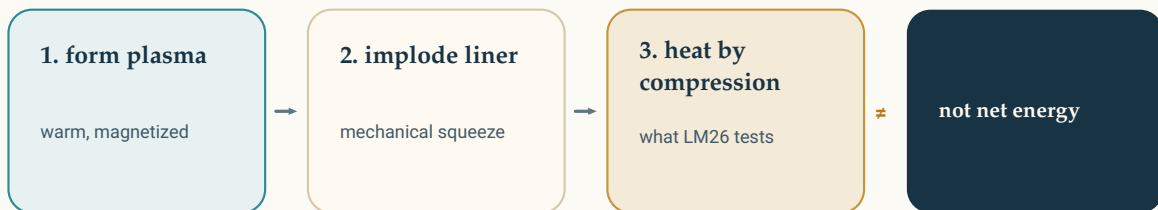


บันไดอุณหภูมิ: LM26 ที่ประมาณ 0.72 keV, เป้าหมาย 1 keV ของ General Fusion และประมาณ 10 keV ที่พลาสมาผิวเทอริยม-ทริเทียมแบบเผาไหม้ต้องการ อุณหภูมิเป็นเพียงหนึ่งในสามปริมาณของเกณฑ์ Lawson

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

The magnetized-target-fusion bet

Form a warm magnetized plasma, then squeeze it so compression does the heating.



Boundary: compression heats the plasma; it does not show net energy or confinement long enough for a burn.

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

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

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

อุณหภูมิพลาสมาในงานฟิวชั่นมักระบุเป็น กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) แทนองศา: 1 keV เท่ากับประมาณ 11.6 ล้าน °C เซลล์เพลิงผิวเทอริยม-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 — อาจไปถึงเงื่อนไขฟิวชั่นได้โดยไม่ต้องใช้แม่เหล็กระดับ ITER หรือเลเซอร์ระดับ NIF การบีบอัดในเครื่องจริงจะให้ความร้อนได้ตามนั้นหรือไม่ ก็คือสิ่งที่การทดสอบอย่าง LM26 มีไว้ตอบ

ผู้วิจัยทำอะไร

- สร้างและเดินเครื่อง **LM26** ซึ่งเป็นเครื่อง magnetized-target-fusion ของ General Fusion: สร้างพลาสมาผิวเทอเรียมแบบ 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 แล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้เพื่อแยกความร้อนมาจากไหน

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** ซึ่งสอดคล้องกับพลาสมาผิวเทอเรียมที่ร้อนและหนาแน่นขึ้น

สิ่งที่ผลนี้ยังไม่ได้แสดง

- นี่ **ไม่ใช่** พลังงานฟิวชั่น breakeven หรือกำไรพลังงานสุทธิ ไม่มีอะไรในผลนี้ผลิตพลังงานมากกว่าที่ใช้เดินเครื่อง ผลนี้เป็นเรื่องของ **การทำให้พลาสมาร้อน** — หนึ่งขั้นในวงจรฟิวชั่น — ไม่ใช่สมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์
- อุณหภูมิยัง **ต่ำกว่าพลาสมาเผาไหม้ประมาณสิบเท่า** ประมาณ 0.72 keV คือราว 8 ล้าน °C ขณะที่เชื้อเพลิงผิวเทอเรียม-ทรีเทียมต้องอยู่แถว **10 keV (มากกว่า 100 ล้าน °C)** และ ต้องมีผลคูณความหนาแน่น $\times$ เวลาที่เพียงพอเพื่อรักษาการเผาไหม้ 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** ผลผลิตฟิวชั่นที่มีความหมายด้านพลังงาน ผิวเทอเรียมสามารถให้นิวตรอนได้บ้างในสถานะเหล่านี้ แต่ยังต่ำกว่าระดับที่เป็นประโยชน์ต่อการผลิตพลังงานมาก
- ผลนี้ไม่ได้บอกอะไรเกี่ยวกับคำกล่าวแยกต่างหากของบริษัทว่า **โรงไฟฟ้าในอนาคตจะจ่ายไฟเข้าสู่โครงข่าย** — ซึ่งสื่ออิสระได้รายงานอย่างระมัดระวังมาก

หลักฐานเชิงแรงกดดัน

- **ข้ออ้างหลักแคบและตรวจสอบได้** “เราบีบอัดพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็ก แล้วมันร้อนขึ้น โดยความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด” คือการทดสอบกลไกที่แนวทาง MTF จำเป็นต้องผ่านพอดี และงานนี้สนับสนุนด้วยการยิงที่มีเครื่องมือวัดจำนวนมากพร้อมแบบจำลองสมดุลพลังงานที่ระบุชัด หากผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ได้ นี่จะเป็นการยืนยันแนวทางในระยะต้นที่มีความหมายจริง
- **ข้อจำกัดเป็นเรื่องโครงสร้าง ไม่ใช่รายละเอียดเล็กน้อย** มีเพียง 11 การยิง เครื่องเดียว ทีมเดียว ยังไม่ผ่านการทบทวนและอุณหภูมิพาดหัวต่ำกว่าพลาสมาเผาไหม้หนึ่งลำดับขนาด ข้อสรุปสำคัญที่สุด — *ความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัด* — ฟังแบบจำลอง ดังนั้นคำถามหลักใน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ คือการแบ่งสัดส่วนของแบบจำลองนั้นแข็งแกร่งเพียงใด
- **สถานะที่ตรงไปตรงมาคือ แสดงกลไกได้แล้ว ไม่ใช่บรรลุลักษณะด้านพลังงาน** ผลนี้ขยับ MTF จาก “การบีบอัด ควรจะทำให้พลาสมาร้อน” ไปสู่ “การบีบอัด ทำให้ พลาสมาร้อนจริง” และไม่ควรถีความให้ใหญ่กว่านั้น

ทำไมจึงสำคัญ

สิ่งที่น่าสนใจใน magnetized target fusion คือเศรษฐศาสตร์ ไม่ใช่สถิติ หากการบีบอัดเชิงกลสามารถทำให้พลาสมาร้อนเข้าใกล้สภาวะฟิวชั่นได้ ก็อาจไปถึงจุดนั้นโดยไม่ต้องใช้แม่เหล็กกระดก 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 บีบอัดพลาสมาผิวเทอเรียมที่มีสนามแม่เหล็กด้วยปัลลadium ที่ยุบตัวเข้าด้านใน และแสดงให้เห็นว่าพลาสมาร้อนขึ้น — อุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มมากกว่าสามเท่าไปถึงค่าสูงสุดที่วัดได้ประมาณ 0.72 keV (718 ± 80 eV หรือราว 8 ล้าน °C) — โดยการวิเคราะห์ของบริษัทระบุว่าความร้อนส่วนใหญ่มาจากการบีบอัดเอง ซึ่งเป็นกลไกที่แนวทาง magnetized-target-fusion ของบริษัทพึ่งพา นี่เป็นก้าวทางวิศวกรรมที่จริงและเฉพาะเจาะจงสำหรับเส้นทางฟิวชั่นนี้ 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>