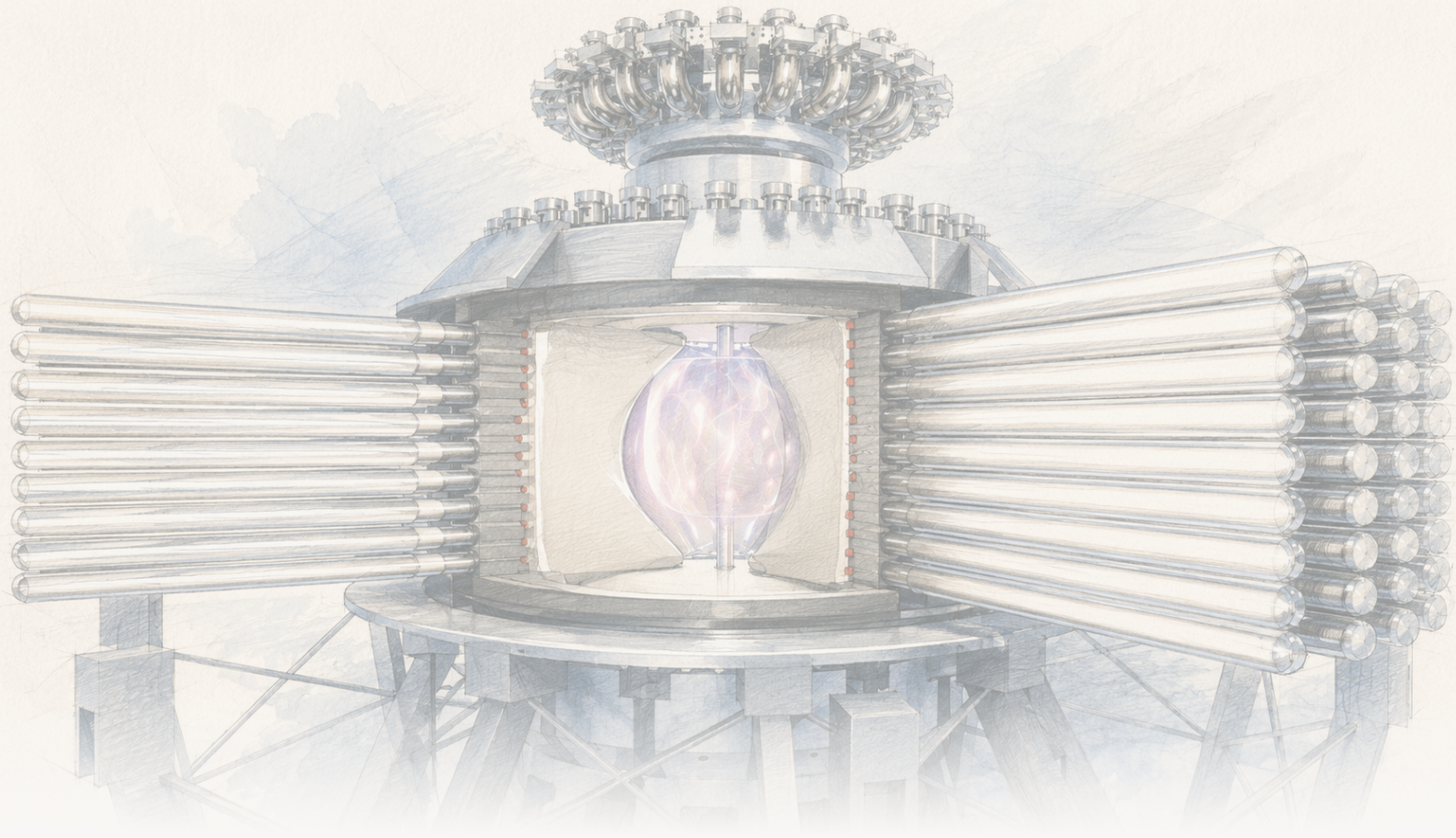




The CLEAN PAPER

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

一台核融合裝置靠壓縮把電漿加熱了——真正的一步，以及它還不是什麼電廠

General Fusion 的 LM26 用向內塌縮的鋰內襯壓縮磁化氘電漿，並觀察到電漿升溫：電子溫度增加超過三倍，量到的峰值約 0.72 keV ($718 \pm 80 \text{ eV}$ ，約 800 萬 $^{\circ}\text{C}$)，而公司分析把大部分升溫歸因於壓縮本身——這正是其磁化靶核融合路線依賴的機制。對這條核融合路線而言，這是一個真正的工程檢查點。但它也只是同一台機器最初 11 次實驗，寫在尚未同儕審查的公司預印本中；溫度仍比燃燒電漿所需低約十倍，沒有淨能量、沒有效益平衡點，也沒有發電。展示的是機制，不是建成一座電廠。

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

一台核融合裝置靠「擠壓」把電漿加熱了——真正的一步，以及它還不是什麼電廠

要讓核融合反應爐回收的能量超過自身運轉所需，燃料電漿必須同時夠熱、夠密，而且維持在一起夠久——這三個量合在一起，就是物理學家所說的 Lawson 判據。這個領域大多數人用兩條主流路線追這個目標：一種是巨大的超導磁鐵，例如 ITER 這類托卡馬克；另一種是大型雷射陣列，例如美國 National Ignition Facility 的慣性侷限。

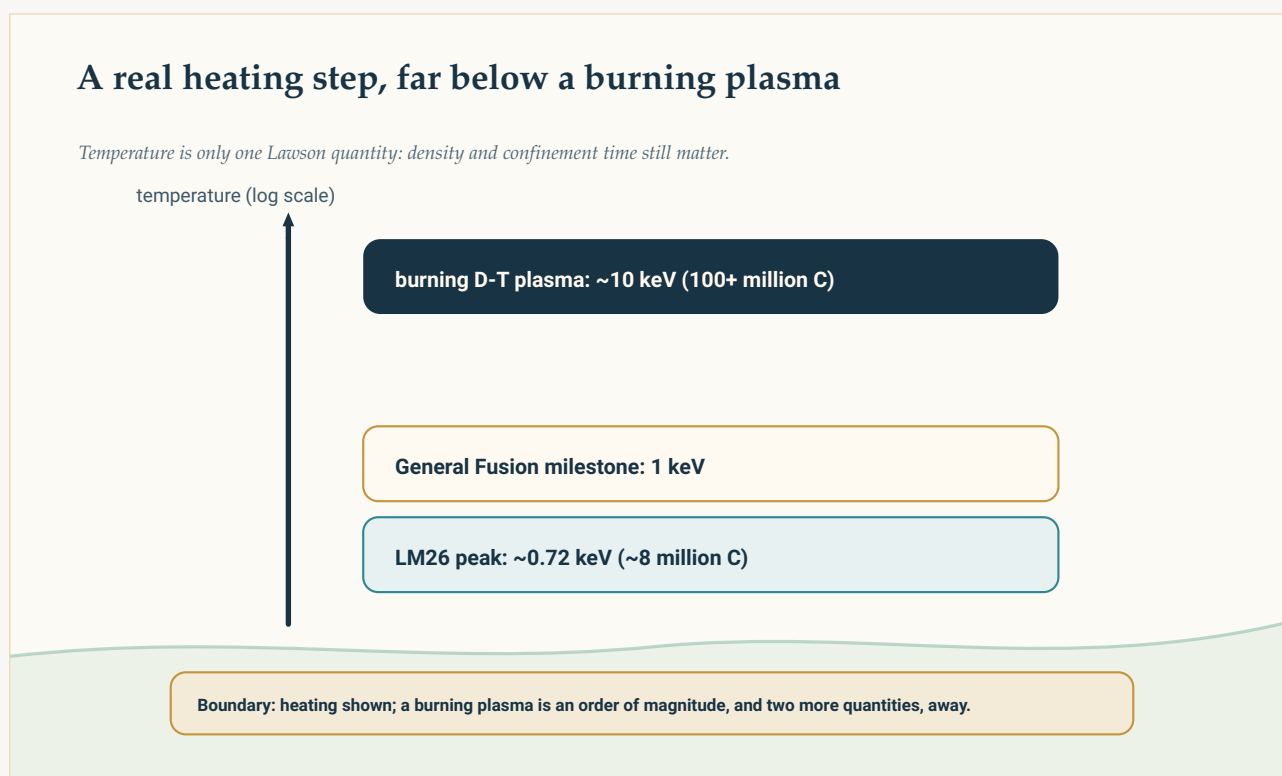
另有一小群公司押注第三條路：**磁化靶核融合（magnetized target fusion, MTF）**。做法是先形成一團溫暖、磁化的電漿，再快速用機械方式把它壓縮，讓擠壓本身提供加熱——有點像柴油引擎不是靠火星塞，而是靠壓縮把燃料點燃。

2026 年 6 月，加拿大公司 **General Fusion** 公布其 **Lawson Machine 26（LM26）** 的結果，測試這個核心賭注是否真的成立：機械壓縮一團磁化電漿，是否真的會像模型預測那樣升溫？在最初 11 次壓縮實驗中，一團球形托卡馬克的氘電漿被向內塌縮的固態鋰內襯擠壓。最好的幾次實驗裡，電漿在壓縮過程中明顯變得更熱、更密、磁化也更強；而公司分析認為，大部分加熱來自壓縮本身。

對 MTF 路線而言，這是一個真正、明確的工程結果。但它也只是最初一批實驗，寫在一篇**尚未經同儕審查的公司預印本**中；溫度仍遠低於燃燒電漿所需，而且這不是核融合發電、不是效益平衡點，也不是電廠。

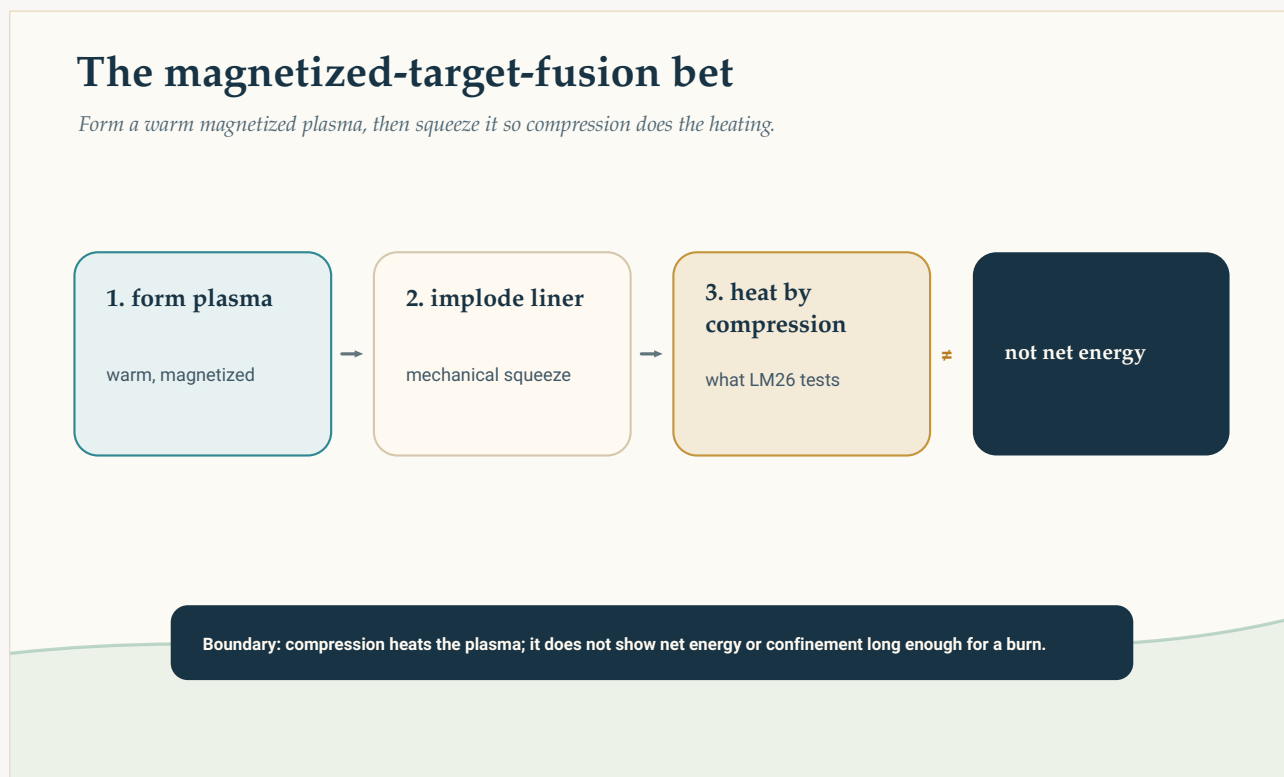
[video pending]

這是 General Fusion 的宣傳影片，用來讓讀者看看 LM26 長什麼樣子；它不是這台機器未來一定能達成核融合里程碑的獨立證據。



一條溫度階梯：LM26 約 0.72 keV、General Fusion 的 1 keV 里程碑，以及燃燒中的氘氚電漿大約需要的 10 keV。溫度只是 Lawson 判據三個條件之一。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0



磁化靶核融合：先形成溫暖、磁化的電漿，再用向內塌縮的內襯壓縮，靠機械擠壓來加熱——也就是柴油式壓縮的賭注。LM26 測試的是壓縮是否真的能加熱電漿；不是淨能量，也不是侷限條件是否足以燃燒。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

「磁化靶核融合」、「keV」與 Lawson 判據是什麼

核融合研究通常用千電子伏特（keV）表示電漿溫度，而不是攝氏度：1 keV 約等於 **1,160 萬 °C**。氘氚燃料大約要到 **10 keV**（超過 1 億 °C）才會有效率地融合——但溫度只是三個必須同時滿足的條件之一。**Lawson 判據**還要求足夠的**密度**與足夠長的**侷限時間**，常把三者合成一個「三乘積」（溫度 × 密度 × 侷限時間）。把電漿加熱是必要條件，但單獨做到這件事遠遠不夠。

磁化靶核融合（MTF）位在兩條主流路線中間。它不是靠巨大磁鐵長時間侷限高溫電漿，也不是用雷射瞬間加熱極小靶材；而是先形成磁化電漿，再在微秒尺度內用機械方式壓縮。如果可行，壓縮會同時提高溫度與密度，理論上可能不需要 ITER 等級磁鐵或 NIF 等級雷射就碰到核融合條件。真正機器中的壓縮是否真的能提供這種加熱，正是 LM26 這類實驗要回答的問題。

作者做了什麼

- 建造並操作 **LM26**：在 General Fusion 的磁化靶核融合機器中先形成球形托卡馬克的氘電漿，再由向內驅動的**固態鋰內襯**壓縮，徑向壓縮約為 **3 倍**。
- 執行**最初 11 次壓縮實驗**，布置大量診斷儀器，重建電漿溫度、密度與磁場隨時間的變化；同時記錄中子、X 光、可見光，以及高速攝影中的電漿—壁面交互作用。
- 建立一套**整合物理模型**，比較壓縮加熱、Ohmic 加熱（來自電漿自身電流）以及邊界能量損失，再與實測資料比對，以估算真正的加熱來源。

他們發現了什麼

- **電漿在被壓縮時真的升溫**。最好的實驗中，電子溫度增加**超過 3 倍**，電子密度約增加 **10 倍**，poloidal 磁場也約增加 **10 倍**，這些變化都伴隨 3 倍徑向壓縮。最佳一次實驗量到的**峰值電子溫度約 0.72 keV**（Thomson scattering 為 718 ± 80 eV），約 800 萬 °C。
- **大部分加熱被歸因於壓縮**。整合模型認為，溫度上升的大部分來自機械壓縮本身，而不是 Ohmic 加熱；這正是整條 MTF 路線賴以成立的機制。
- **中子發射在壓縮期間增加**，與更熱、更密的氘電漿相符。

這並沒有證明什麼

- 這**不是**核融合發電、效益平衡點或淨能量增益。沒有任何地方顯示產生的能量超過整台機器運轉所需。這個結果談的是把電漿加熱——核融合循環中的一步——而不是反應爐的能量收支。
- 溫度**仍然**大約差十倍才到燃燒電漿。約 0.72 keV 大約是 800 萬 °C；氘氚燃料要達到約 **10 keV**（**超過 1 億 °C**），而且還要有足夠的密度 × 侷限時間，才能維持燃燒。General Fusion 自己的下一個目標只是 **1 keV**，仍離點火很遠。
- 「**大部分加熱來自壓縮**」是模型導出的結論，不是儀器直接讀出來的數字。它來自整合物理模型對診斷資料的擬合；你多相信壓縮、Ohmic 加熱與損失之間的分配，就取決於你多相信那套模型。
- 這是一篇**公司預印本**，**尚未同儕審查**。結果由建造機器、也需要為其前景募資的團隊自行報告；目前還沒有獨立審查。
- 中子增加**不是具有能源意義的核融合產額**。在這種條件下氘本來就可能產生一些中子，但離能用來發電的程度非常遠。
- 它也沒有支持公司另外提出的「**未來電廠將向電網供電**」等說法；那是另一個主張，獨立報導對此一直高度保留。

證據有多強

- **核心主張很窄，也可檢查**。「我們壓縮一團磁化電漿，它變熱了，而且主要因壓縮而變熱」正是 MTF 必須通過的機制測試。預印本以大量診斷資料與明確能量平衡模型支持這一點。如果能通過

同儕審查，這會是對這條路線真正但仍早期的驗證。

- **限制是結構性的，不是裝飾性的。**只有 11 次實驗、一台機器、一個團隊、尚未審查，而且標題溫度仍比燃燒電漿低一個數量級。最承重的結論——大多數加熱來自壓縮——依賴模型，因此同儕審查真正需要問的是：這個分解到底穩不穩健。
- **最誠實的狀態是：機制被示範，而不是能源里程碑已完成。**它把 MTF 從「壓縮應該能加熱電漿」往「壓縮確實能加熱電漿」推了一小步，除此之外不必加更多宏大含義。

為什麼重要

磁化靶核融合真正吸引人的地方不是紀錄，而是經濟性。如果機械壓縮真的能把電漿加熱到接近核融合條件，就有可能不用 ITER 規模的磁鐵，也不用 NIF 規模的雷射，走一條更便宜、迭代更快的路——前提是它能成功。

而那個「如果」就是全部。它取決於這類很不華麗的檢查點：壓縮在真實機器中到底有沒有提供模型承諾的加熱？LM26 在第一批實驗給出的答案是：有條件的「有」。正因為這個答案有條件，它才值得被精確記錄——長梯子上的一級，由正在爬的人自己報告，還沒經別人核驗，而且離頂端仍很遠。

重點摘要

General Fusion 的 LM26 以向內塌縮的鋰內襯壓縮磁化氫電漿，並觀察到它升溫——電子溫度增加超過三倍，量到的峰值約 0.72 keV (718 ± 80 eV，約 800 萬 °C) ——而公司分析把大部分加熱歸因於壓縮本身，也就是其磁化靶核融合路線所依賴的核心機制。這對這條核融合路線是一個真正、具體的工程步驟。但它也只是同一台機器最初 11 次實驗，寫在尚未同儕審查的公司預印本中；溫度仍比燃燒電漿所需低約十倍，沒有淨能量、沒有效益平衡點，也沒有發電。展示的是一個機制，不是建成一座電廠。

來源

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>