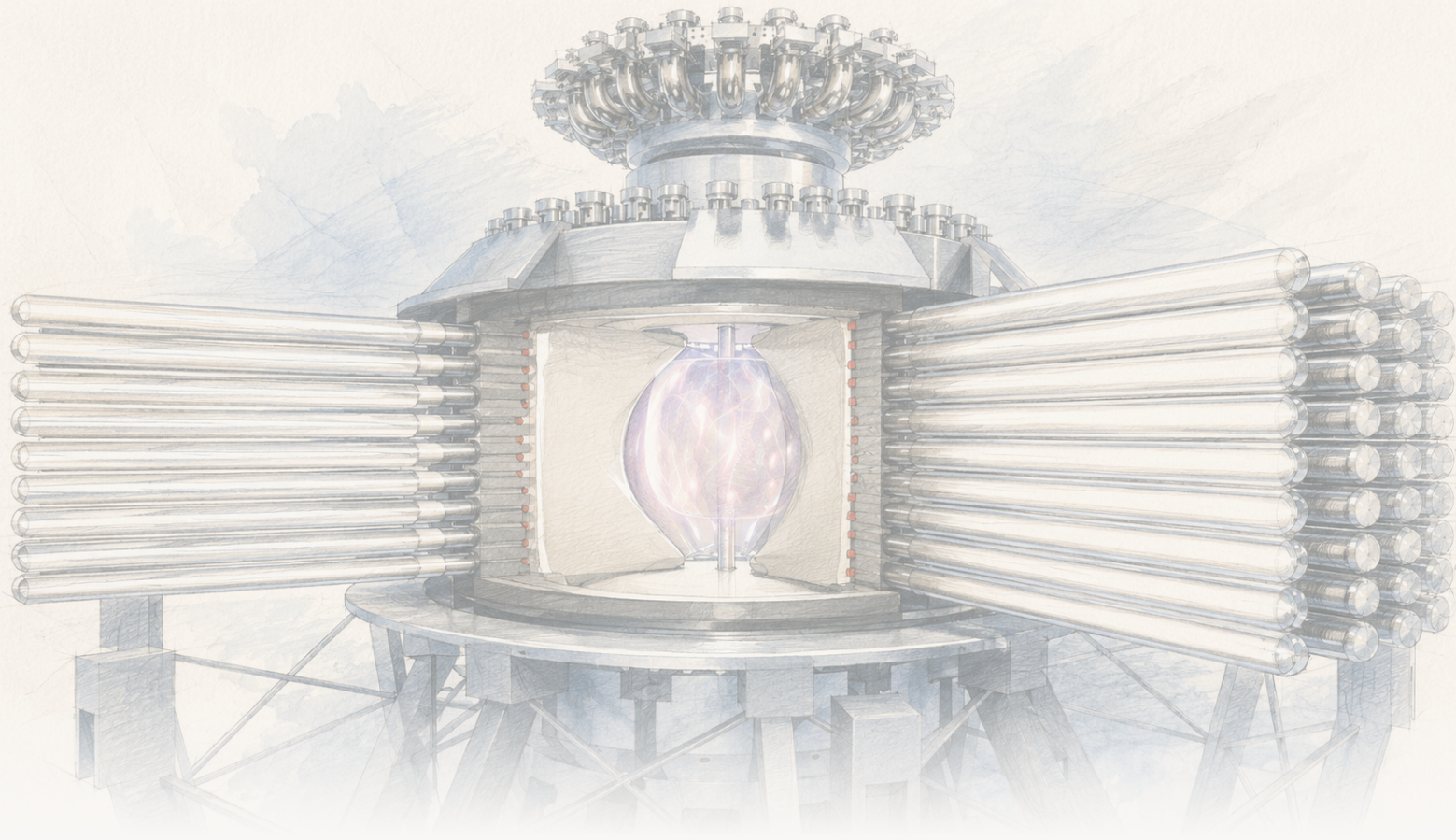




The CLEAN PAPER

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

一台聚變機器通過擠壓加熱了等離子體——真正的一步，以及它不是的發電廠

General Fusion 的 LM26 用內爆的鋰襯套壓縮了磁化氘等離子體，觀察到其被加熱——電子溫度增加超過三倍，達到測量峰值約 0.72 keV （約 $800 \text{ 萬 } ^\circ\text{C}$ ），大部分加熱被歸因於壓縮本身，即其磁化靶聚變方法所依賴的機制。對於這條聚變路線，這是一個真實的工程檢查點。它也是在一台機器上的最初 11 次射擊，在一篇未經同行評議的公司預印本中描述，溫度仍比燃燒等離子體所需低大約十倍——沒有淨能量，沒有盈虧平衡，沒有電力。一個機制被展示，不是一座發電廠被建成。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · 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

一台聚變機器通過擠壓加熱了等離子體——真正的一步，以及它不是的發電廠

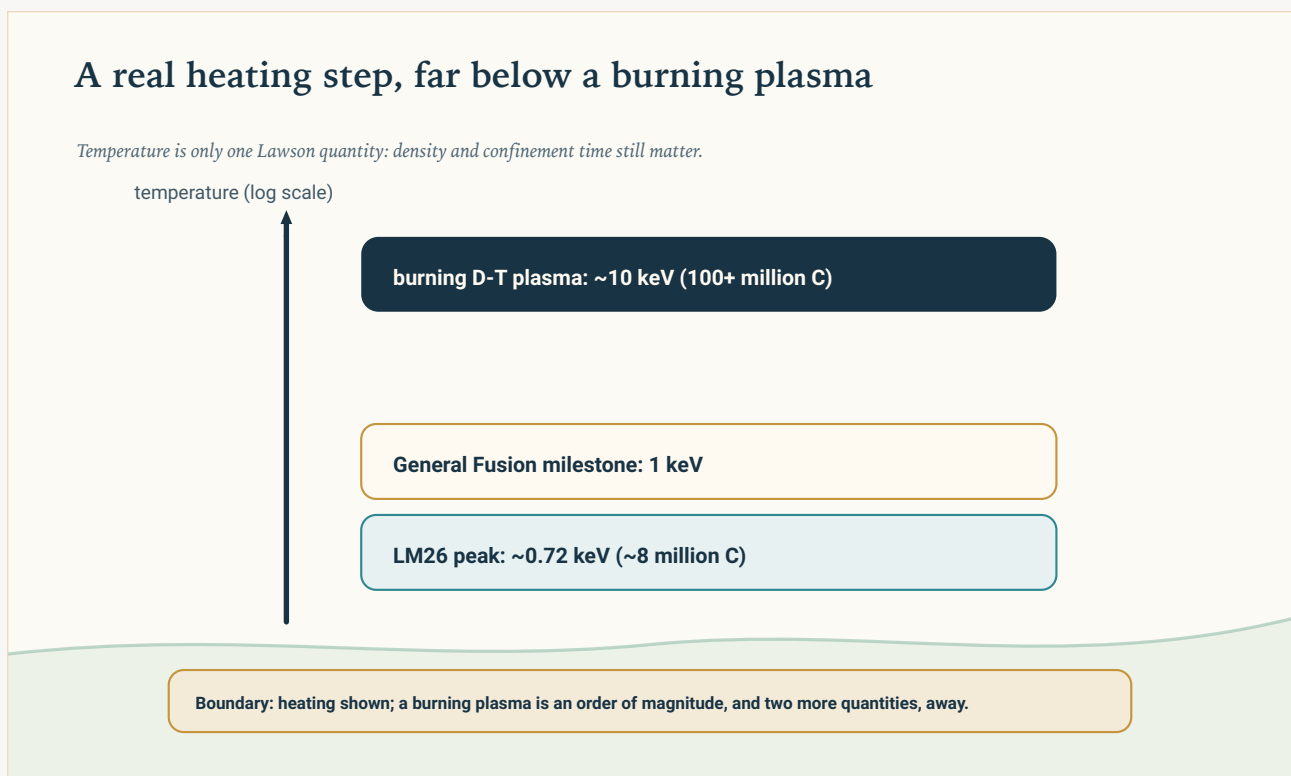
要讓聚變反應堆回饋的能量超過運行所需的能量，燃料等離子體必須同時足夠熱、足夠密、並維持足夠長時間——這三個量被捆綁在物理學家所稱的勞森判據中。這一領域的大部分研究工作以巨大的超導磁體（如 ITER 的托卡馬克）或巨型激光陣列（慣性約束，如美國國家點火裝置）來追求這一目標。一小部分公司押注於第三條路線，即**磁化靶聚變**（MTF）：形成一個溫熱的、磁化的等離子體，然後快速機械地擠壓它，使擠壓本身提供加熱——就像柴油發動機通過壓縮而非火花點燃燃料一樣。

2026 年 6 月，加拿大公司 **General Fusion** 公佈了其 **Lawson Machine 26 (LM26)** 的結果，這些結果檢驗了那個核心賭注是否真的成立：機械壓縮磁化等離子體是否真的能將其加熱，就像模型所承諾的那樣？在最初的 11 次壓縮射擊中——一個球形托卡馬克氬等離子體被內爆的固態鋰襯套壓縮——最佳射擊顯示等離子體在被壓縮時明顯變得更熱、更密、更強磁化，公司的分析將大部分加熱歸因於壓縮本身。

對於 MTF 路線來說，這是一個真實的、具體的工程結果。它也是在一台機器上的最初 11 次射擊，在一篇未經同行評議的公司預印本中描述，溫度仍遠低於燃燒等離子體所需的溫度——而且它不是聚變能量，不是盈虧平衡，也不是發電廠。

[video pending]

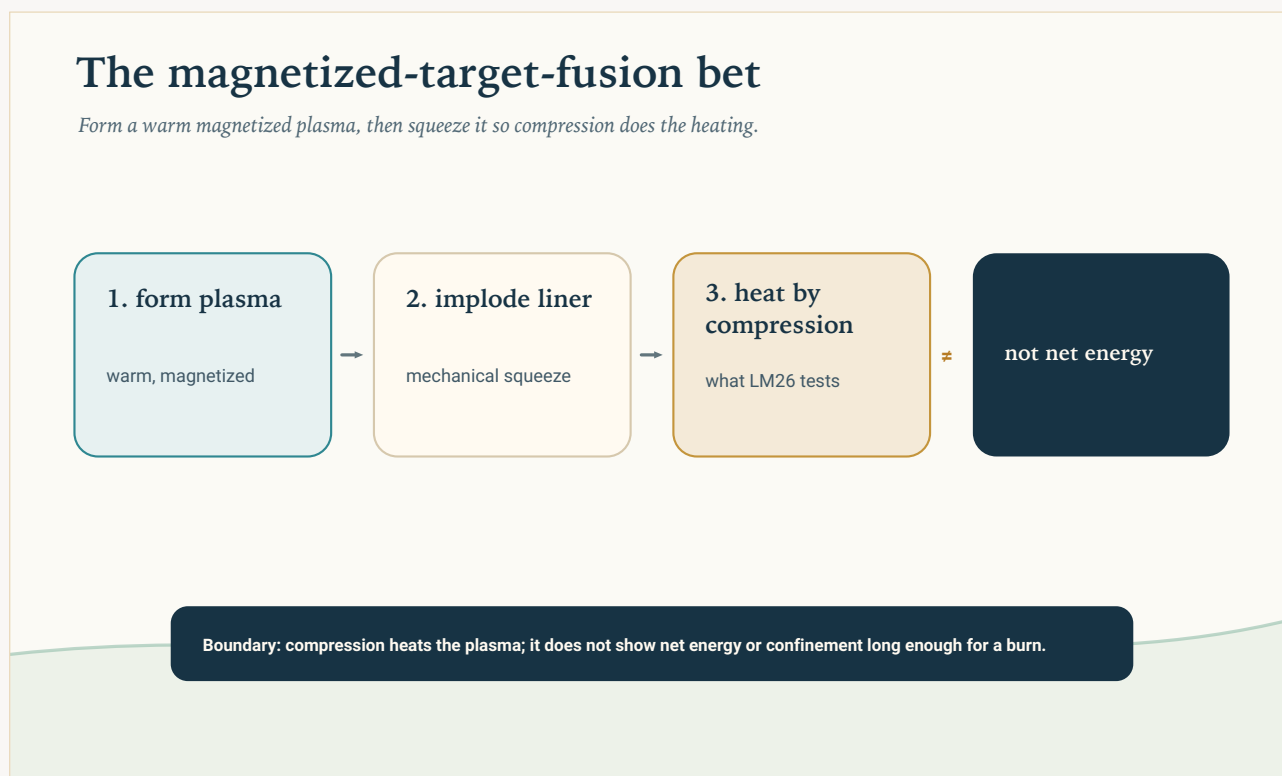
這是來自 General Fusion 的宣傳影片，用於展示 LM26 的外觀；它並非獨立證據證明該機器將滿足其未來的聚變里程碑。



一條溫度階梯：LM26 的約 0.72 keV，General Fusion 的 1 keV 里程碑，以及燃燒氘-氚等離子體所需的約 10

keV。溫度僅是三個勞森量之一。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0



磁化靶聚變：形成一個溫熱的磁化等離子體，然後用內爆的襯套壓縮它，使擠壓本身提供加熱——柴油壓縮之賭。LM26 測試了壓縮能加熱等離子體；不是淨能量或約束。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

「磁化靶聚變」、「keV」和勞森判據的含義

聚變中等離子體溫度通常以千電子伏（keV）而非度數來報出：1 keV 約為 **1,160 萬 °C**。氘-氚燃料需要達到大約 **10 keV**（超過 1 億 °C）才能有效聚變——但溫度只是必須同時滿足的三件事之一。**勞森判據**說一個反應堆還需要足夠的**密度**和足夠的**約束時間**，通常合併為一個「三重積」（溫度 × 密度 × 約束時間）。加熱等離子體是必要的，但單獨來說遠非充分。

磁化靶聚變（MTF）是兩種主流方法之間的一條中間道路。MTF 不使用巨大磁體長時間約束熱等離子體，也不使用激光幾乎瞬間加熱微小靶丸，而是形成一個磁化等離子體，然後在微秒級別上機械地壓縮它。如果有效，壓縮既加熱了等離子體又提高了其密度——有可能在沒有 ITER 級磁體或 NIF 級激光的情況下達到聚變條件。壓縮是否真的在真實機器中提供那種加熱，正是像 LM26 這樣的測試所要驗證的。

作者做了什麼

- 建造並發射了 **LM26**，General Fusion 的一台磁化靶聚變機器：一個球形托卡馬克氬等離子體被形成，然後被一個向內驅動的內爆**固態鋰襯套**壓縮——大約 **3 倍徑向壓縮**。
- 運行了**最初的 11 次壓縮射擊**，並對其進行了大量儀表測量，重建了等離子體隨時間的溫度、密度和磁場，記錄了發射的中子、X 射線和可見光，以及等離子體-壁相互作用的快速相機圖像。
- 構建了一個**集成物理模型**，將壓縮加熱與歐姆加熱（來自等離子體自身的電流）和損失到邊界的能量進行平衡，然後將其與測量數據進行比較，以確定加熱實際來自何處。

他們發現了什麼

- 等離子體在擠壓過程中加熱了。在最佳射擊中，電子溫度上升了**超過 3 倍**，電子密度上升了約 **10 倍**，極向磁場上升了約 **10 倍**，由 3 倍徑向壓縮驅動。在最佳射擊中，論文測量到**峰值電子溫度約 0.72 keV** (718 ± 80 eV，通過湯姆遜散射)——約 800 萬 °C。
- **大部分加熱被歸因於壓縮**。他們的集成模型得出結論，溫度上升的大部分來自機械壓縮本身——整個 MTF 方法所依賴的機制——而非來自歐姆加熱。
- **中子發射在壓縮過程中上升**，與一個更熱、更密的氬等離子體一致。

這沒有顯示什麼

- 它**不是**聚變能量、盈虧平衡或淨增益。這裡沒有任何東西產生的能量超過運行所需的能量。結果關乎加熱等離子體——聚變循環中的一個步驟——而非反應堆的能量平衡。
- 溫度仍然**比燃燒等離子體低大約十倍**。約 0.72 keV 大約是 800 萬 °C；氬-氬燃料需要大約 **10 keV**（超過 **1 億 °C**）以及足夠的密度 $\times$ 約束時間來維持燃燒。General Fusion 自己的下一個里程碑是 **1 keV**——本身離點火還遠。
- 「**大部分加熱來自壓縮**」是一個**基於模型的結論**，而非直接讀數。它來自一個與診斷數據擬合的集成物理模型；你對壓縮、歐姆加熱和損失之間分配的了解程度取決於你對該模型的信任程度。
- 它是一篇**公司預印本**，**未經同行評議**。結果由建造該機器並為其承諾籌集了資金的團隊自行報告；獨立評審尚未發生。
- 中子增加**不是**與能量相關的聚變產額。在這些條件下，從氬中預期會產生一些中子，遠低於任何對電力有用的水平。
- 它對另一項公司聲明——**未來的發電廠將向電網輸送電力**——沒有說明任何東西，獨立報導已對此聲明持嚴重謹慎態度。

證據有多強

- **核心主張窄小且可檢驗**。「我們壓縮了一個磁化等離子體，它變得更熱，主要是因為壓縮」正是 MTF 方法需要通過的機制測試，論文用一組高密度儀表測量的射擊和一個明確的能量平衡模型支

持了這一主張。如果它經受住同行評議，這是對該方法的一次真正的——儘管是早期的——驗證。

- **保留意見是結構性的，而非表面的。** 11 次射擊，一台機器，一個團隊，尚未評審，標題溫度比燃燒等離子體低一個數量級。負載的結論——大部分加熱來自壓縮——依賴於一個模型，因此同行評議的核心問題是該模型的分配是否穩健。
- **誠實的現狀是演示了一個機制，而非聲稱了邁向能源的里程碑。** 它將 MTF 從「壓縮應該加熱等離子體」推向了「壓縮確實加熱等離子體」，僅此而已。

為什麼重要

磁化靶聚變的有趣之處在於經濟學，而非記錄。如果機械壓縮能將等離子體加熱到聚變條件，你可能無需 ITER 級磁體或 NIF 級激光就能達到目標——一條更便宜、更快迭代的路徑，如果它有效。那個「如果」是整個遊戲的全部，它取決於諸如此刻這樣不光彩的檢查點：壓縮是否真正提供了模型承諾的加熱？LM26 在其最初的射擊上的回答是一個有保留的「是」。這值得注意，恰恰因為它是有保留的——一條長梯子上的一級台階，由正在攀爬它的人報告，尚未經任何人核實，且離頂部還有很長一段距離。

簡潔摘要

General Fusion 的 LM26 用內爆的鋰襯套壓縮了一個磁化氘等離子體，並展示了它被加熱——電子溫度增加超過三倍，達到測量峰值約 0.72 keV (718 ± 80 eV，約 800 萬 °C)——公司分析將大部分加熱歸因於壓縮本身，即其磁化靶聚變方法所依賴的機制。對於這條聚變路線來說，這是一個真實的、具體的工程步驟。它也是在一台機器上的最初 11 次射擊，在一篇未經同行評議的公司預印本中描述，溫度比燃燒等離子體所需低大約十倍，沒有淨能量，沒有盈虧平衡，沒有電力。演示了一個機制，而非建成了一座發電廠。

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-magnetized-target-fusion-machine/>

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>