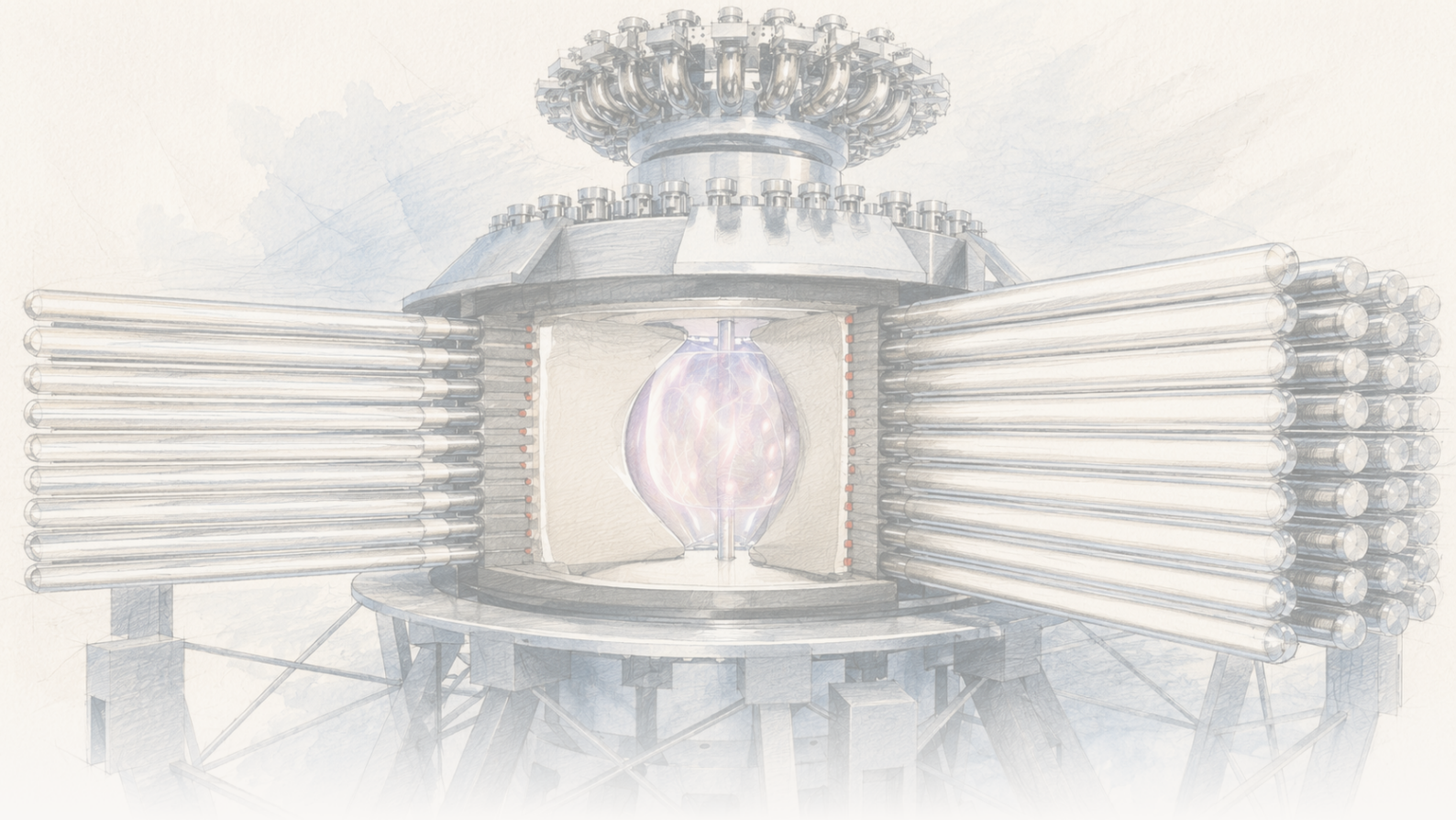


The Clean Paper

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

Egy fúziós berendezés összenyomással fűtötte fel a plazmát — ez a valódi lépés, és nem erőmű

A General Fusion LM26 berendezése egy befelé omló lítiumbéléssel összenyomott egy mágnesezett deutériumplazmát, és a plazma közben felmelegedett — elektronhőmérséklete több mint háromszorosára nőtt, mért csúcsa körülbelül 0,72 keV (718 ± 80 eV, nagyjából 8 millió °C) volt —, a fűtés nagy részét pedig a vállalat elemzése magának a kompressziónak tulajdonítja, vagyis annak a mechanizmusnak, amelyre a mágnesezett céltárgyas fúziós megközelítés épül. Ez valódi mérnöki ellenőrzőpont ezen a fúziós úton. Ugyanakkor egyetlen gép első 11 lövéséről van szó, szakmai lektorálás előtt álló vállalati preprintben, még mindig körülbelül tízszer az égő plazmához szükséges hőmérséklet alatt — nettó energia, nullszaldó és villamosenergia-termelés nélkül. Egy mechanizmust mutattak meg, nem erőművet építettek.

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

Egy fúziós berendezés összenyomással fűtötte fel a plazmát — ez a valódi lépés, és nem erőmű

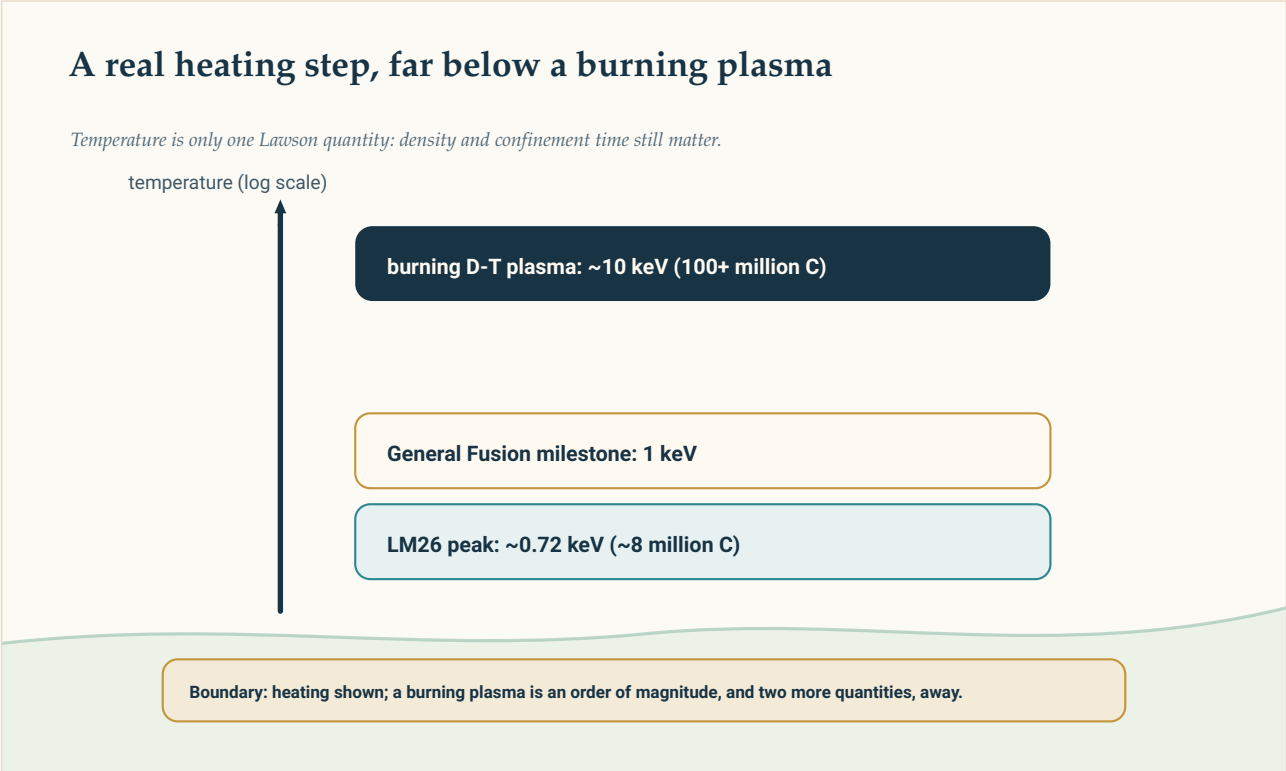
Ahhoz, hogy egy fúziós reaktor több energiát adjon vissza, mint amennyi a működtetéséhez kell, az üzemanyag-plazmának egyszerre kell elég forrónak, elég sűrűnek lennie, és elég sokáig egyben maradnia — ezt a három mennyiséget foglalja össze az, amit a fizikusok Lawson-kritériumnak neveznek. A terület nagy része ezt óriási szupravezető mágnesekkel (tokamakok, például az ITER) vagy hatalmas lézerrendszerekkel (inerciális összetartás, például az amerikai National Ignition Facility) próbálja elérni. Néhány cég azonban egy harmadik útra, a **mágnesezett céltárgyas fúzióra** (magnetized target fusion, MTF) fogad: először létrehoznak egy meleg, mágnesezett plazmát, majd gyorsan, mechanikusan *összenyomják*, hogy maga a kompresszió fűtse fel — ahogy a dízelmotorban is a sűrítés gyújtja be az üzemanyagot, nem egy gyújtógyertya.

2026 júniusában a kanadai **General Fusion** közzétette **Lawson Machine 26 (LM26)** berendezésének eredményeit, amelyek ennek a központi feltevésnek a tesztjét jelentik: valóban felmelegszik-e a mágnesezett plazma mechanikus összenyomáskor úgy, ahogyan a modellek jósolják? Az első 11 kompressziós lövésben — amelyek során egy gömbtokamak-deutériumplazmát befelé omló *szilárd lítium-bélés* nyomott össze — a legjobb lövésekben a plazma az összenyomás során látványosan forróbbá, sűrűbbé és erősebben mágnesezetté vált, a vállalat elemzése pedig a felmelegedés nagy részét magának a kompressziónak tulajdonítja.

Ez valós, konkrét mérnöki eredmény az MTF-megközelítés számára. Ugyanakkor egy **vállalati preprintben, szakmai lektorálás előtt** leírt első lövéssorozatról van szó, még mindig jóval az égő plazmához szükséges hőmérséklet alatt — és ez nem fúziós energia, nem nullszaldó és nem erőmű.

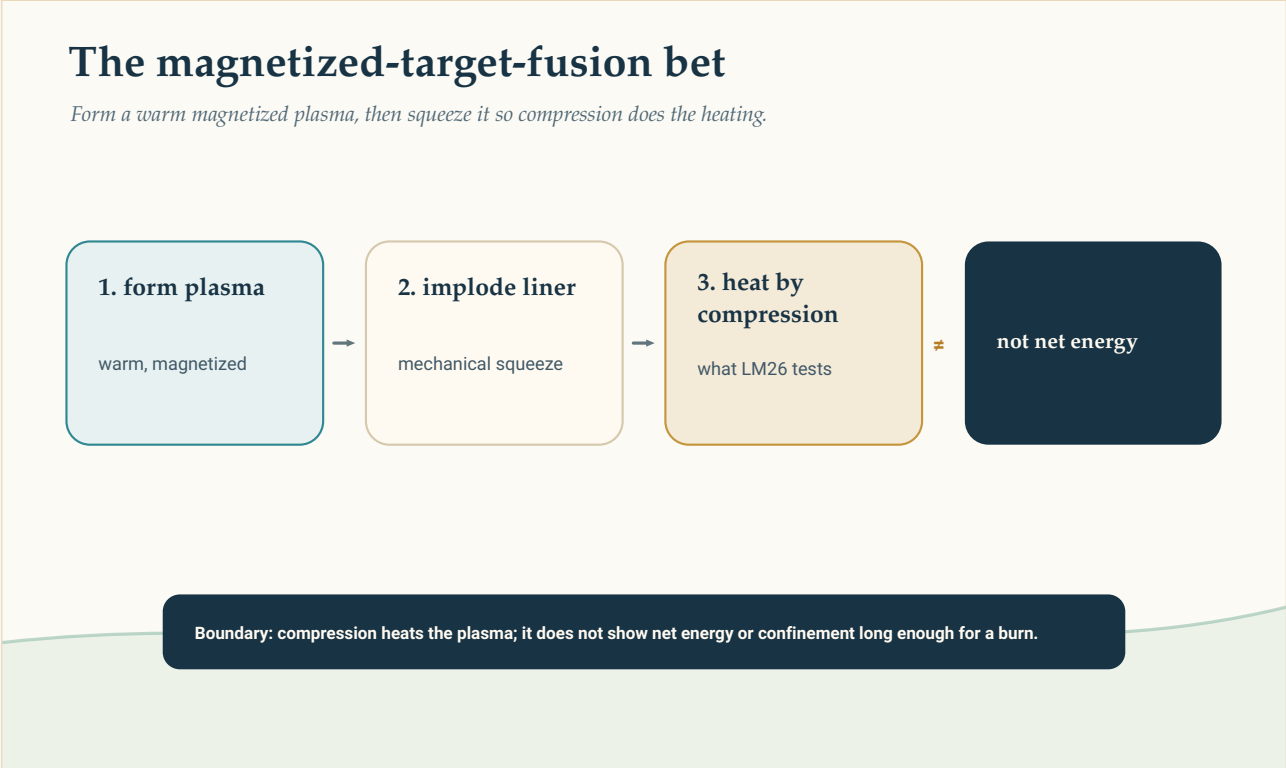
[video pending]

Ez a General Fusion promóciós felvétele, amelyet azért szerepeltetünk, hogy megmutassuk, hogyan néz ki az LM26; nem független bizonyíték arra, hogy a berendezés eléri majd a vállalat jövőbeli fúziós mérföldköveit.



Hőmérsékleti létra: az LM26 ~0,72 keV-os csúcsa, a General Fusion 1 keV-os mérföldköve és az égő deutérium–trícium plazmához szükséges ~10 keV. A hőmérséklet a három Lawson-mennyiség közül csak az egyik.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Mágnesezett céltárgyas fúzió: meleg, mágnesezett plazma létrehozása, majd összenyomása egy befelé omló

béléssel, hogy a kompresszió végezze a fűtést — a dízelmotorhoz hasonló alapfeltevés. Az LM26 azt tesztelte, hogy a kompresszió felmelegíti-e a plazmát; nem a nettó energiatermelést vagy az összetartási időt.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mit jelent a „mágnesezett céltárgyas fúzió", a „keV" és a Lawson-kritérium?

A fúziós plazma hőmérsékletét általában **kiloelektronvoltban (keV)**, nem Celsius-fokban adják meg: 1 keV körülbelül **11,6 millió °C**. A deutérium–trícium üzemanyagnak nagyjából **10 keV**-ot (több mint 100 millió °C-ot) kell elérnie ahhoz, hogy hatékonyan fuzionáljon — de a hőmérséklet csak egy a három egyszerre teljesítendő feltételből. A **Lawson-kritérium** szerint a reaktornak megfelelő **sűrűségre** és megfelelő **összetartási időre** is szüksége van; ezeket gyakran egyetlen „hármas szorzatban" foglalják össze (hőmérséklet × sűrűség × összetartási idő). A plazma felmelegítése szükséges, de önmagában közel sem elegendő.
A **mágnesezett céltárgyas fúzió (MTF)** köztes út a két fő megközelítés között. Ahelyett, hogy óriási mágnesekkel sokáig tartana össze egy forró plazmát, vagy lézerekkel szinte pillanatszerűen fűtene fel egy apró céltárgyat, az MTF mágnesezett plazmát hoz létre, majd mikroszekundumos időskálán mechanikusan összenyomja. Ha működik, a kompresszió egyszerre növeli a plazma hőmérsékletét és sűrűségét — elvileg ITER-méretű mágnesek vagy NIF-méretű lézerek nélkül közelítve a fúziós feltételekhez. Hogy a kompresszió valóban biztosítja-e ezt a fűtést egy valós berendezésben, pontosan az a kérdés, amelyet az LM26-hoz hasonló tesztek vizsgálnak.

Mit csináltak a szerzők

- Megépítették és működtették a **LM26** mágnesezett céltárgyas fúziós berendezést a General Fusion-nél: egy gömbtokamak-deutériumplazmát hoznak létre, majd egy befelé mozgó **szilárd lítium-bélés** nyomja össze — nagyjából **3×-os radiális kompresszióval**.
- Elvégezték az **első 11 kompressziós lövést**, sok diagnosztikai műszerrel követve az eseményeket: időben rekonstruálták a plazma hőmérsékletét, sűrűségét és mágneses terét, mérték a kibocsátott neutronokat, röntgen- és látható fényt, valamint nagysebességű kamerával figyelték a plazma és a fal kölcsönhatását.
- Felépítettek egy **integrált fizikai modellt**, amely a kompressziós fűtést az Ohm-fűtéssel (a plazma saját áramából) és a határon fellépő energiaveszteségekkel veti össze, majd a modellt a mért adatokhoz hasonlították, hogy megállapítsák, honnan származott a fűtés.

Mit találtak

- **A plazma felmelegedett az összenyomáskor.** A legjobb lövésekben az elektronhőmérséklet **több mint háromszorosára**, az elektronsűrűség körülbelül **tízszeresére**, a poloidális mágneses tér pedig szintén körülbelül **tízszeresére** nőtt a 3×-os radiális kompresszió hatására. A legjobb

lövésben a tanulmány **körülbelül 0,72 keV-os csúcselektron-hőmérsékletet** mért (Thomson-szórással 718 ± 80 eV) — nagyjából 8 millió °C-ot.
- **A fűtés nagy részét a kompressziónak tulajdonítják.** Integrált modelljük arra jut, hogy a hőmérséklet-emelkedés *többsége* magából a mechanikai összenyomásból származott — abból a mechanizmusból, amelyre az egész MTF-koncepció épül —, nem az Ohm-fűtésből.
- **A neutronkibocsátás nőtt az összenyomás alatt**, összhangban egy forróbb és sűrűbb deutériumplazmával.

Mit nem mutat ez az eredmény

- **Nem** fúziós energiatermelés, nullszaldó vagy nettó energianyereség. Semmi itt nem termelt több energiát, mint amennyibe a működtetés került. Az eredmény a *plazma felmelegítéséről* szól — a fúziós ciklus egyik lépéséről —, nem egy reaktor energiamérlegéről.
- A hőmérséklet **még mindig nagyjából tízszer alacsonyabb**, mint egy égő plazmához szükséges érték. A 0,72 keV körülbelül 8 millió °C; a deutérium–trícium üzemanyagnak nagyságrendileg **10 keV (több mint 100 millió °C)** kell *és* elég nagy sűrűség × összetartási idő a fúzió fenntartásához. A General Fusion saját következő mérföldköve **1 keV** — ez is messze van a begyulladástól.
- A **„fűtés nagy része kompresszióból származik" modellalapú következtetés**, nem közvetlen műszerleolvasás. Egy, a diagnosztikai adatokhoz illesztett integrált fizikai modellből következik; hogy mennyire bízhatunk a kompresszió, az Ohm-fűtés és a veszteségek közötti felosztásban, attól függ, mennyire megbízható maga a modell.
- Ez **vállalati preprint, nem szakmailag lektorált közlemény.** Az eredményeket az a csapat jelenti, amely a gépet építette, és amelynek vállalata a technológia ígéretére tőkét vont be; független szakmai ellenőrzés még nem történt.
- A neutronnövekedés **nem energetikailag releváns fúziós hozam**. Ilyen körülmények között deutériumból várhatók neutronok, de a mennyiség messze van attól, ami energiatermeléshez hasznos lenne.
- Semmit nem mond a vállalat külön állításáról, hogy egy **jövőbeli erőmű villamos energiát táplál majd a hálózatba** — ezt a kijelentést a független beszámolók erős óvatossággal kezelik.

Mennyire erős a bizonyíték?

- **A központi állítás szűk és ellenőrizhető.** „Összenyomtunk egy mágnesezett plazmát, és az forróbb lett, főként a kompresszió miatt" pontosan az a mechanizmusteszt, amelyen az MTF-nek át kell mennie. A tanulmány sok diagnosztikával ellátott lövéssorozattal és explicit energiamérleg-modellel támasztja alá ezt. Ha az eredmény megállja a helyét a szakmai lektorálásban, valódi — bár korai — igazolása a megközelítésnek.
- **A fenntartások szerkezeti jelentőségűek, nem kozmetikaiak.** Tizenegy lövés, egy gép, egy csapat, még nincs lektorálás, és a fő hőmérséklet egy nagyságrenddel az égő plazma alatt van. A teherhordó következtetés — hogy *a fűtés többsége kompresszióból ered* — modellre épül, ezért a szakmai ellenőrzés egyik központi kérdése az lesz, mennyire robusztus ez a felosztás.

- **Az őszinte állapot: egy mechanizmust demonstráltak, nem energiatermelési mérföldkövet.** Az MTF-et kissé közelebb tolja a „a kompressziónak fel *kellene* fűtenie a plazmát” állítástól a „a kompresszió *fel is fűti* a plazmát” felé — és nem állít ennél többet.

Miért fontos

A mágnesezett céltárgyas fúzió érdekessége nem a rekordokban, hanem a gazdaságosságban rejlik. Ha mechanikus kompresszióval valóban fúziós feltételek felé lehet fűteni a plazmát, elvileg elkerülhetők lehetnek az ITER-léptékű mágnesek vagy a NIF-léptékű lézerek — olcsóbb, gyorsabban iterálható út nyílhat, *ha* működik. Ez a „ha” az egész kérdés, és éppen az ilyen nem látványos ellenőrzőpontokon múlik: valóban biztosítja-e a kompresszió azt a fűtést, amelyet a modellek ígérnek? Az LM26 első lövései erre feltételes igennel válaszolnak. Éppen azért érdemes ezt pontosan rögzíteni, mert feltételes: egy fok egy hosszú létrán, amelyről azok számolnak be, akik éppen másznak rajta; még senki más nem ellenőrizte, és messze van a tetejétől.

Röviden

A General Fusion LM26 berendezése egy befelé omló lítiumbéléssel összenyomott egy mágnesezett deutériumplazmát, amely közben felmelegedett — elektronhőmérséklete több mint háromszorosára nőtt, mért csúcsa körülbelül 0,72 keV (718 ± 80 eV, ~8 millió °C) volt —, a vállalat elemzése pedig a fűtés nagy részét magának a kompressziónak tulajdonítja, annak a mechanizmusnak, amelyre a mágnesezett céltárgyas fúziós megközelítés épül. Ez valós, konkrét mérnöki lépés ezen a fúziós úton. Ugyanakkor egyetlen gép első 11 lövéséről van szó, szakmai lektorálás előtt álló vállalati preprintben, nagyjából tízszer az égő plazmához szükséges hőmérséklet alatt, nettó energia, nullszaldó és villamosenergia-termelés nélkül. Egy mechanizmust mutattak meg, nem erőművet építettek.

Források

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