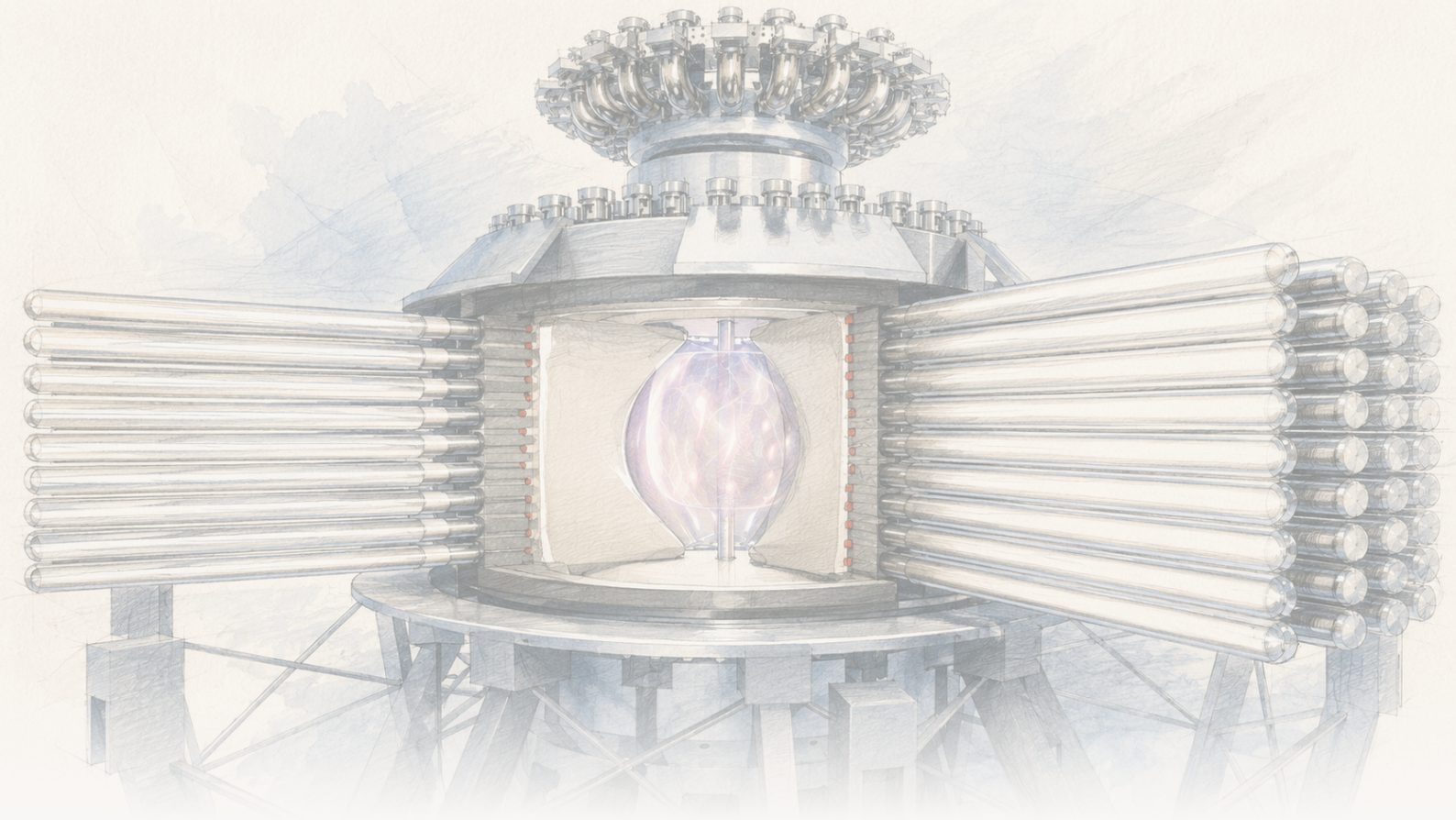


The CLEAN PAPER

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

প্লাজমাকে চেপে ধরে গরম করল একটি fusion machine — সত্যিকারের অগ্রগতি, কিন্তু power plant নয়

General Fusion-এর LM26 একটি magnetized deuterium plasma-কে imploding lithium liner দিয়ে compress করে electron temperature 3×-এর বেশি বাড়িয়ে প্রায় 0.72 keV-এ নিয়ে গেছে। কোম্পানির model বলছে heating-এর অধিকাংশ এসেছে compression থেকে — MTF পদ্ধতির মূল mechanism। ফলটি বাস্তব engineering step, কিন্তু peer-review না হওয়া প্রথম ১১টি shot, burning plasma থেকে এখনও বহু দূর, এবং কোনো net energy বা breakeven নয়।

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

সংযোজন যন্ত্র প্লাজমাকে চপেে গরম করছে—এটাই বাস্তব ধাপ; ক্ষমতা উদ্ভদি নয়

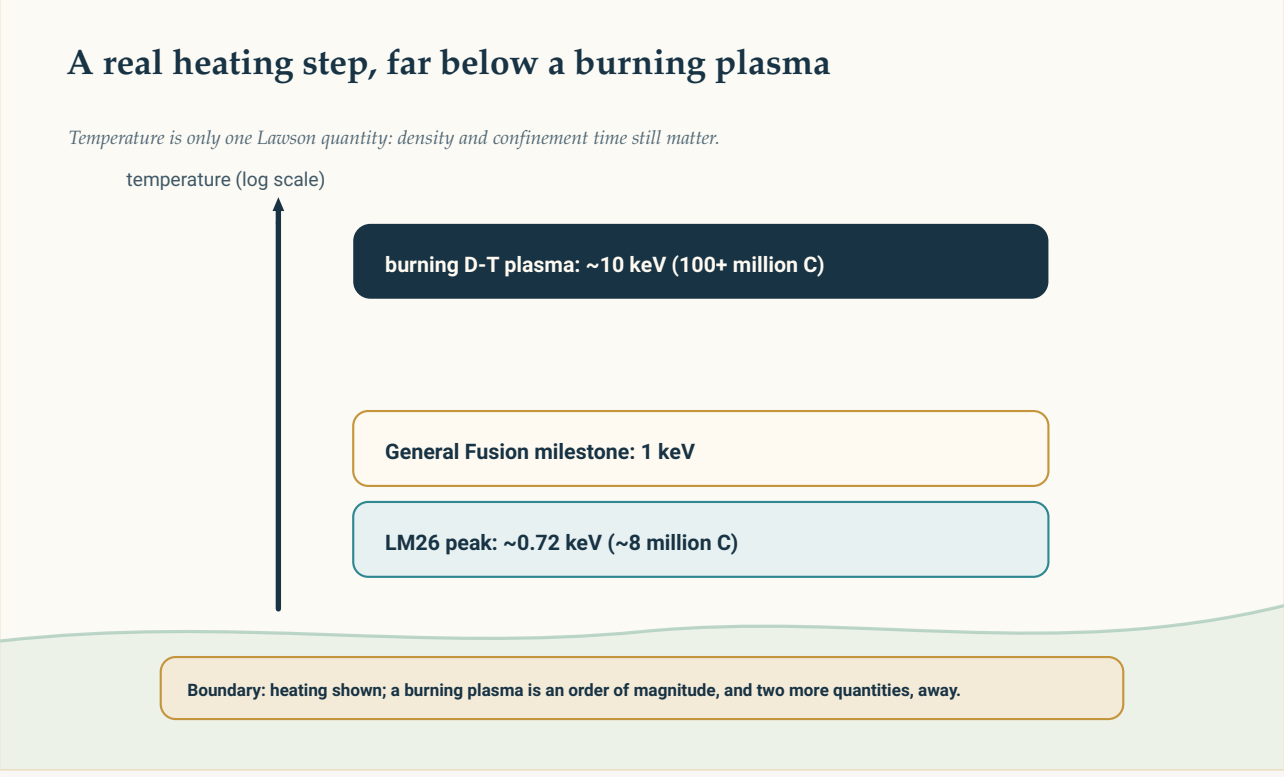
একটি fusion reactor থকেে নটি শক্তি পতেে হলে জ্বালানি-প্লাজমাকে একই সঙ্গে যথষ্টে **গরম**, যথষ্টে **ঘন** এবং যথষ্টে **দীর্ঘ সময় আবদ্ধ** রাখতে হয়। পদার্থবদিরো এই তনিটি শর্তকে **Lawson criterion**-এ একসঙ্গে ধরনে। মূলধারার একদকিে ITER-এর মতো বশিাল super-conducting magnet-নর্িভর tokamak; অন্যদকিে US National Ignition Facility-এর মতো বশিাল laser array-নর্িভর inertial confinement। ছোট একটি দল তৃতীয় পথে কাজ করছে: **magnetized target fusion (MTF)**। এতে প্রথমে উষ্ণ চুম্বকতি প্লাজমা তরৈি করে দ্রুত যান্ত্রকিভাবে সংকুচতি করা হয়, যাতে সংকোচন নজিইে প্লাজমাকে আরও গরম করে—diesel engine-এ compression ignition-এর মতো।

জুন 2026-এ Canadian প্রতষ্ঠিান **সাধারণ সংযোজন** তার **Lawson যন্ত্র 26 (LM26)**-এর ফল প্রপ্রিন্টিে প্রকাশ করে। কন্দ্রেীয় bet-এর প্রক্রয়িা পরীক্ষা: চুম্বকতি প্লাজমা mechanically সংকুচতি করা করলে সত্যইি কি মডলেরে মতো তাপ হয়? প্রথম **11 সংকোচন শট**-এ spherical-tokamak ডভিটরেয়িাম প্লাজমা ভতেরে ধসে পড়া **কঠনি লথিয়িাম লাইনার** দয়িে চাপ দয়িে সংকুচতি করা হয়। সরো শটে তাপমাত্রা, ঘনত্ব ও চৌম্বক ক্ষত্রের বাড়ে, এবং প্রতষ্ঠিানর সমাকলতি বশি্লষেণ বলে তাপমাত্রা বৃদ্ধরি অধকিাংশ সংকোচন থকেইে এসছে।

এটি MTF পথরে জন্য নর্িদষ্টি প্রকৌশল ফল। কন্তিু এটওি শুধু প্রথম shots, **প্রতষ্ঠিান প্রপ্রিন্টি**, সহকর্মী পর্যালোচনা হয়নি, তাপমাত্রা দহন প্লাজমার প্রয়োজনীয়তার অনকে নচি। এটি সংযোজন শক্তি, সমতা-বন্দিু বা ক্ষমতা উদ্ভদি নয়।

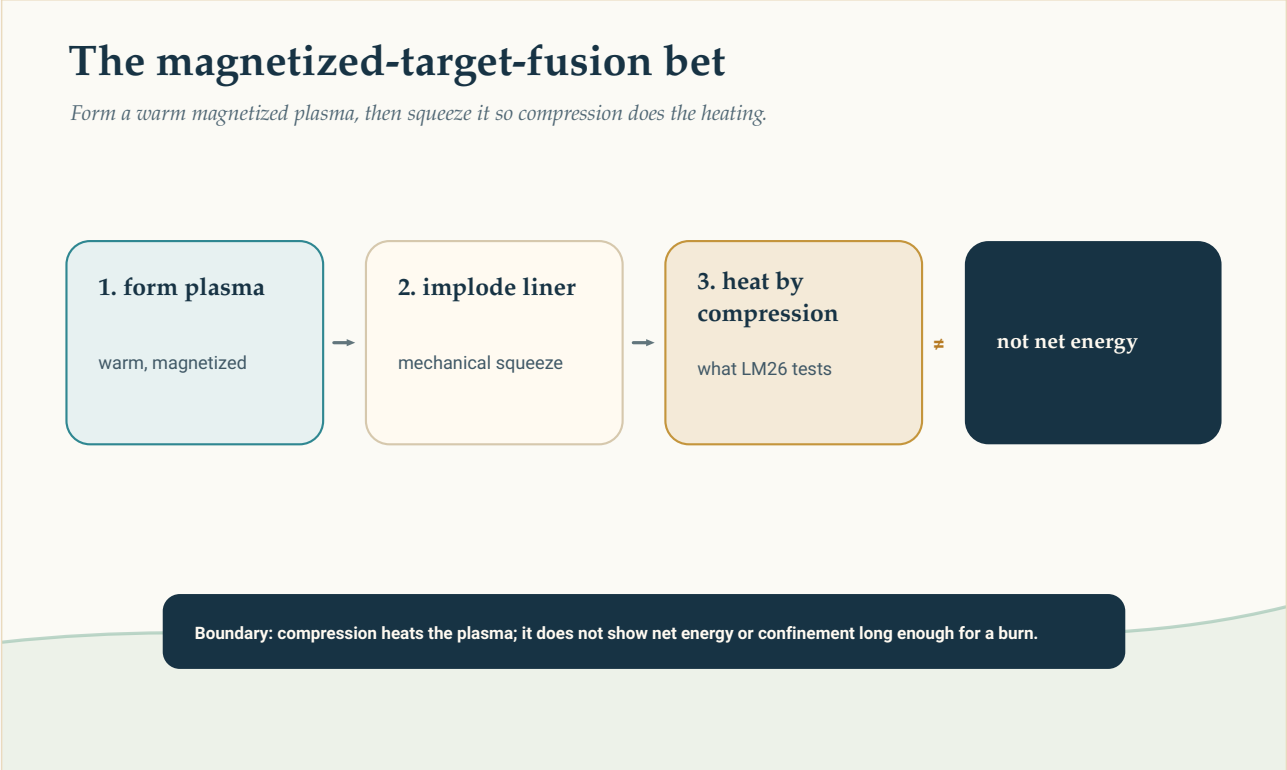
[video pending]

সাধারণ সংযোজনরে promotional ভডিওি; LM26 দখেতে কমেন তা দখোনোর জন্য, ভবষ্যিৎ সংযোজন মাইলফলক পূরণ করবে—এমন স্বাধীন প্রমাণ নয়।



তাপমাত্রা ধাপক্রম: LM26 ~0.72 keV, সাধারণ সংযোজনরে 1 keV মাইলফলক, এবং দহন D–T প্লাজমার ~10 keV। তাপমাত্রা Lawson মানদণ্ডরে মাত্র একটি রাশি।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



MTF-এ উষ্ণ চুম্বকতি প্লাজমা তরৈি করে ভতেরে ধসে পড়া লাইনার দয়িে সংকুচতি করা হয়, squeezing থকেে উত্তাপ/ঘনত্ব বৃদ্ধি পাওয়ার উদ্দশ্যে।
LM26 সংকোচন উত্তাপ পরীক্ষা করছে; নটি শক্তি বা আবদ্ধতা মাইলফলক নয়।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

MTF, keV এবং Lawson মানদণ্ড কী

সংযোজন প্লাজমা তাপমাত্রা সাধারণত ডগ্রিনি য়, **kiloelectronvolt (keV)**-এ লখো হয়। 1 keV প্রায় **11.6 মলিয়িন °C**। D–T জ্বালানি দক্ষভাবে মশিে যাওয়া করতে প্রায় **10 keV** (>100 মলিয়িন °C) দরকার, কন্তিু তাপমাত্রা একা যথষ্টে নয়। যথষ্টে **ঘনত্ব** এবং **আবদ্ধতা সময়**-ও একই সঙ্গে দরকার; তাপমাত্রা × ঘনত্ব × আবদ্ধতা সময়কে প্রায়ই "ত্রগিুণ উৎপাদ" বলা হয়।
চুম্বকতি লক্ষ্য সংযোজন চৌম্বক আবদ্ধতা ও inertial আবদ্ধতার মাঝামাঝি কৌশল: প্লাজমা magnetize করা হয়, তারপর মাইক্রোসেকেন্ডে timescale-এ যান্ত্রকি সংকোচন। যদি কাজ করে, সংকোচন একসঙ্গে তাপমাত্রা ও ঘনত্ব বাড়াতে পারে—ITER-পরসির চুম্বক বা NIF-পরসির লজোর ছাড়া। LM26-এর মতো পরীক্ষার প্রথম প্রশ্ন তাই খুব মৌলকি: চাপ দয়িে সংকুচতি করা সত্যইি উত্তাপ দয়ে কনি া।

গবষেকরো কী করছেনে

- সাধারণ সংযোজনরে **LM26** build/fire করছেনে। Spherical-tokamak ডউিটরেয়িাম প্লাজমা রূপ করে ভতেরে ধসে পড়া কঠনি লথিয়িাম লাইনার দয়িে প্রায় 3× **radial সংকোচন** করা হয়ছে।
- **প্রথম 11 সংকোচন শট**-এ ভারী diagnostics: প্লাজমা তাপমাত্রা, ঘনত্ব, চৌম্বক ক্ষত্রে সময়-resolved পুনর্গঠন করা; emitted নউিট্রন, X-রশ্মি, দৃশ্যমান আলো নথি; দ্রুত-ক্যামরো-তে প্লাজমা–প্রাচীর মথিস্ক্রয়িা।
- একটি **সমাকলতি পদার্থবদ্যিা মডলে** বানানো হয়ছে যা সংকোচন উত্তাপ, Ohmic উত্তাপ (প্লাজমা বর্তমানরে কারণে) এবং সীমানা

ক্ষয় ভারসাম্য করে। পরমিাপতি তথ্যরে সঙ্গে তুলনা করে উত্তাপ উৎস বভিক্ত করা অনুমান করা হয়ছে।

তাঁরা কী পয়েছেনে

- **সংকে াচনরে সঙ্গে প্লাজমা আরও গরম হয়ছে।** সরো shot-এ electron temperature **>3**×, electron density প্রায় **10**× এবং poloidal magnetic field প্রায় **10**× বড়েছে, প্রায় 3× radial compression-এর সঙ্গে। সর্বোচ্চ পরমিাপতি electron temperature ছলি **~0.72 keV**—Thomson scattering-এ **718 ± 80 eV**, অর্থাৎ প্রায় 8 মলিয়িন °C।
- **মডলে অধকিাংশ উত্তাপ সংকে াচনকে attribute করে।** MTF-এর কন্দ্রেীয় প্রক্রয়িা—যান্ত্রকি চাপ দয়িে সংকুচতি করা—তাপমাত্রা বৃদ্ধরি অধকিাংশ ব্যাখ্যা কর, Ohmic উত্তাপ নয়।
- সংকে াচন চলাকালে **নউিট্রন নঃিসরণ বড়েছে**, hotter/denser ডউিটরেয়িাম প্লাজমার সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ।

এটি কী দখোয় না

- **সংযে াজন শক্তি, সমতা-বন্দিু বা নটি লাভ নয়।** যন্ত্র চালাতে যত শক্তি লাগে তার চয়েে বশেি ফরেত আসনে। এটি প্লাজমা উত্তাপ প্রক্রয়িা পরীক্ষা।
- তাপমাত্রা burning-plasma লক্ষ্য থকেে এখনও **প্রায় এক order of magnitude নচিে**। 0.72 keV প্রায় 8 million °C; D–T fuel-এর জন্য প্রায় 10 keV-এর পাশাপাশি যথষ্টে density × confinement time দরকার। প্রতষ্ঠিানরে পরবর্তী milestone 1 keV—সটেওি ignition থকেে অনকে দূরে।
- "অধকিাংশ উত্তাপ সংকে াচন থকেে" **সরাসরি তাপমাপক রডিআউট নয়**; সমাকলতি পদার্থবদ্যিা মডলে diagnostics-এর সঙ্গে মানানসই করে অবদান বভিক্ত করছে। কন্দ্রেীয় সহকর্মী-পর্যালোচনা প্রশ্ন তাই মডলে দৃঢ়তা।
- **প্রতষ্ঠিান প্রপি্রনি্ট, সহকর্মী-পর্যালোচতি নয়।** দল নজিইে যন্ত্র বানয়িছে এবং বাণজি্যকি প্রতশি্রুতরি ওপর funding তুলছে; স্বাধীন পর্যালোচনা হয়নি।
- নউিট্রন বৃদ্ধি **শক্তি-প্রাসঙ্গকি সংযে াজন ফলন নয়।** এই ডউিটরেয়িাম শর্তে কছিু নউিট্রন প্রত্যাশতি; ক্ষমতার জন্য অনকে নর্দিশে দূরে।
- ভবষি্যৎ grid electricity দাবি এই পরীক্ষা প্রতষ্ঠিা করে না।

প্রমাণ কতটা শক্তশিালী?

মূল দাবি সংকীর্ণ এবং পরীক্ষাযোগ্য: চুম্বকতি প্লাজমা সংকুচতি করা হয়ছে, তাপমাত্রা/ঘনত্ব/ক্ষত্রে বড়েছে, সমাকলতি ভারসাম্য মডলে সংকে াচনকে প্রধান উত্তাপ উৎস বলছ। প্রক্রয়িা যাচাই হসিবেে heavily instrumented তথ্য অর্থবহ। সহকর্মী পর্যালোচনা টকিে থাকা করলে MTF পদ্ধতরি বাস্তব প্রাথমকি যাচাই হব।

সতর্কতা cosmetic নয়: 11 শট, একটি যন্ত্র, একটি প্রতষ্ঠিান, অ-সহকর্মী-পর্যালোচতি, দহন প্লাজমা থকেে far নচিে। ভার-bearing "অধকিাংশ থকেে সংকে াচন" মডলে-নর্ভিরশীল। তাই কাঁচা উত্তাপ পর্যবক্ষেণ ও কারণ নর্ধিারণ একই আস্থা স্তরে পড়া ঠকি নয়।

সতর্ক ভাষায় ফলটি হলে া: **প্রক্রয়িাটি দখোনো হয়ছে, শক্তি উৎপাদনরে মাইলফলক নয়।** আগে ছলি "সংকে াচনে প্লাজমা গরম হওয়ার কথা"; এখন দখোনো গছে "এই যন্ত্রে সংকে াচনে সত্যইি প্লাজমা গরম হয়ছে।" দাবি এর বশেি নয়।

কনে এটি গুরুত্বপূর্ণ

MTF-এর আকর্ষণ শুধু তাপমাত্রার রকের্ডে নয়—সম্ভাব্য অর্থনীতিতে। যান্ত্রকি সংকোচন যদি সত্যিই প্লাজমাকে fusion-এর উপযোগী অবস্থার দিকে নিতে পারে, তবে ITER-পরিসরের magnet বা NIF-পরিসরের laser ছাড়াই তুলনামূলক সস্তা ও দ্রুত পরীক্ষা-চক্র সম্ভব হতে পারে। কিন্তু "যদি" শব্দটাই বড়। সেটি যাচাই হয় খুব সাধারণ এক প্রশ্নে: compression model যতটা উত্তাপের প্রতিশ্রুতি দেয়, বাস্তব যন্ত্রে কি সত্যিই ততটা পাওয়া যায়? LM26-এর প্রথম shot-গুলো সেই প্রশ্নে শর্তসাপেক্ষ **হ্যাঁ** দিয়েছে।

এই qualified ফল-ই সার্থক noting: দীর্ঘ ধাপক্রমের একটি rung, climber-দের নিজের প্রতিবেদন, স্বাধীন যাচাই এখনো নেই, এবং top অনেক দূরে।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

সাধারণ সংযোজনের LM26 ভেতরে ধসে পড়া লিথিয়াম লাইনার দিয়ে চুম্বকতি ডিউটেরিয়াম প্লাজমা সংকুচিত করে ইলেকট্রন তাপমাত্রা **>3×** বাড়িয়েছে; সেরা পরিমাপিত peak **~0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 মিলিয়ন °C)**। প্রতিষ্ঠান মডেল তাপমাত্রা বৃদ্ধির অধিকাংশ যান্ত্রিক সংকোচনকে attribute করে—MTF পথের কেন্দ্রীয় প্রক্রিয়া। এটি বাস্তব প্রকৌশল ধাপ, কিন্তু শুধু প্রথম 11 shots, প্রতিষ্ঠান প্রিপ্রিন্ট, সহকর্মী পর্যালোচনা নেই, দহন প্লাজমার ~10 keV লক্ষ্য থেকে প্রায় দশ গুণ নিচে, নিট শক্তি/সমতা-বিন্দু/electricity কিছুই নেই। প্রক্রিয়া shown; ক্ষমতা উদ্ভিদ তৈরি নয়।

উৎস

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