

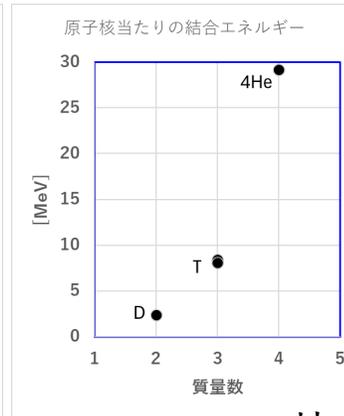
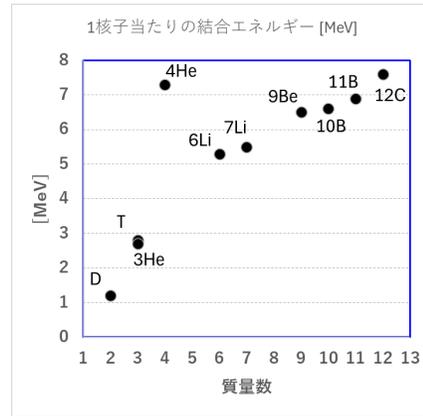
Fusion Science School 京都
核融合炉の作り方～核融合炉工学入門～
2025年2月17日

核融合反応の起こし方 ②レーザーを使う

大阪大学 レーザー科学研究所
岩本 晃史

スタートポイント：重水素と三重水素の核融合反応を考える

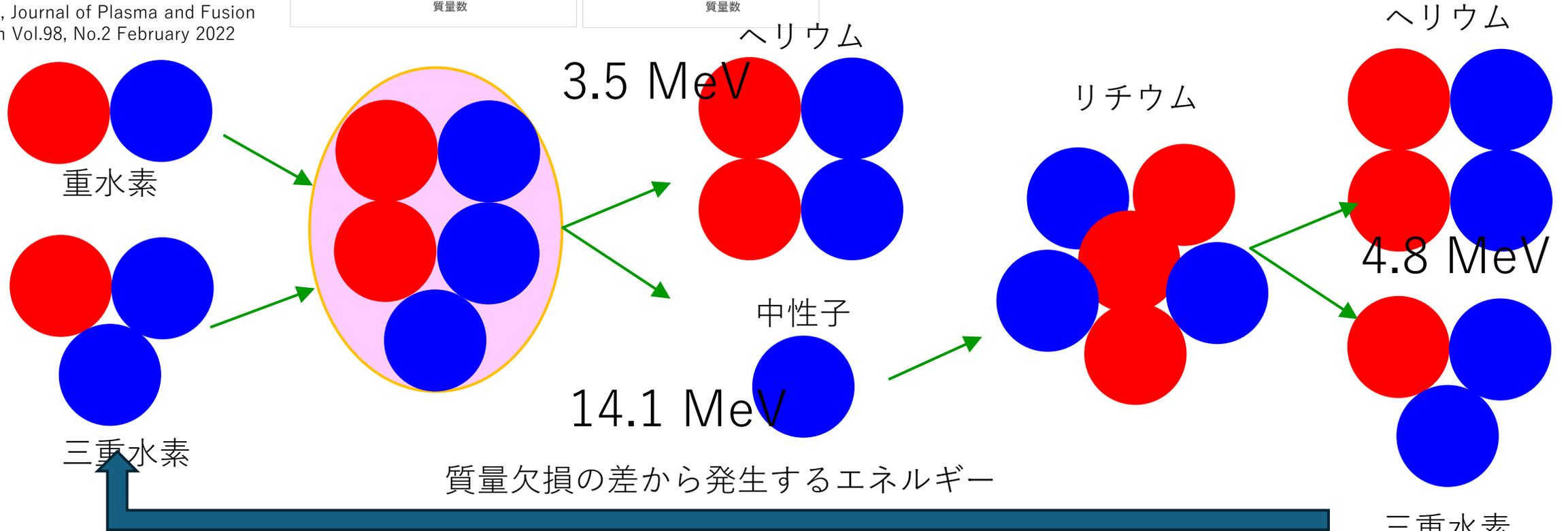
反応断面積の絵



核融合反応・反応断面積

- 核物理
- 量子力学

松浦秀明, Journal of Plasma and Fusion Research Vol.98, No.2 February 2022



磁場核融合とレーザー核融合

核融合反応に違いは無い

磁場核融合炉の絵

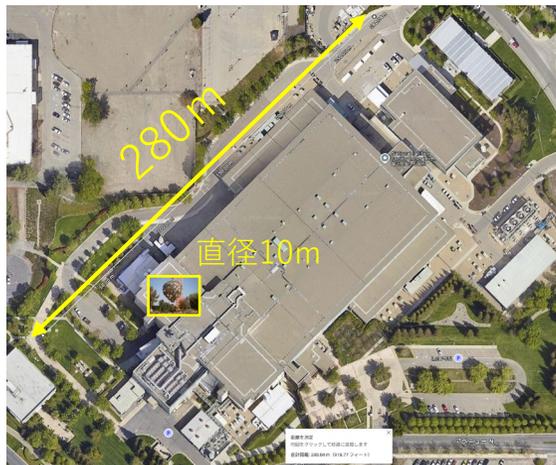
- 燃料密度：固体密度の10億分の1
- 燃料直径：10 m
- 持続的に反応
- 量子技術研究開発機構、核融合科学研究所、ITER機構、他

レーザー核融合炉の絵

- 燃料密度：固体密度の1000倍
- 燃料直径：4mm
- パルス的な反応
- 大阪大学、米国ローレンスリバモア国立研究所、仏国原子力庁、他

核融合実験施設

National Ignition Facility



<https://www.google.com/maps/>

大プラントなので

- 建築
- 電気工学
- 環境工学
- 土木工学
- 気象学

ITER

<https://www.iter.org/>

実験方法の違いによっても施設の規模が変わってくる

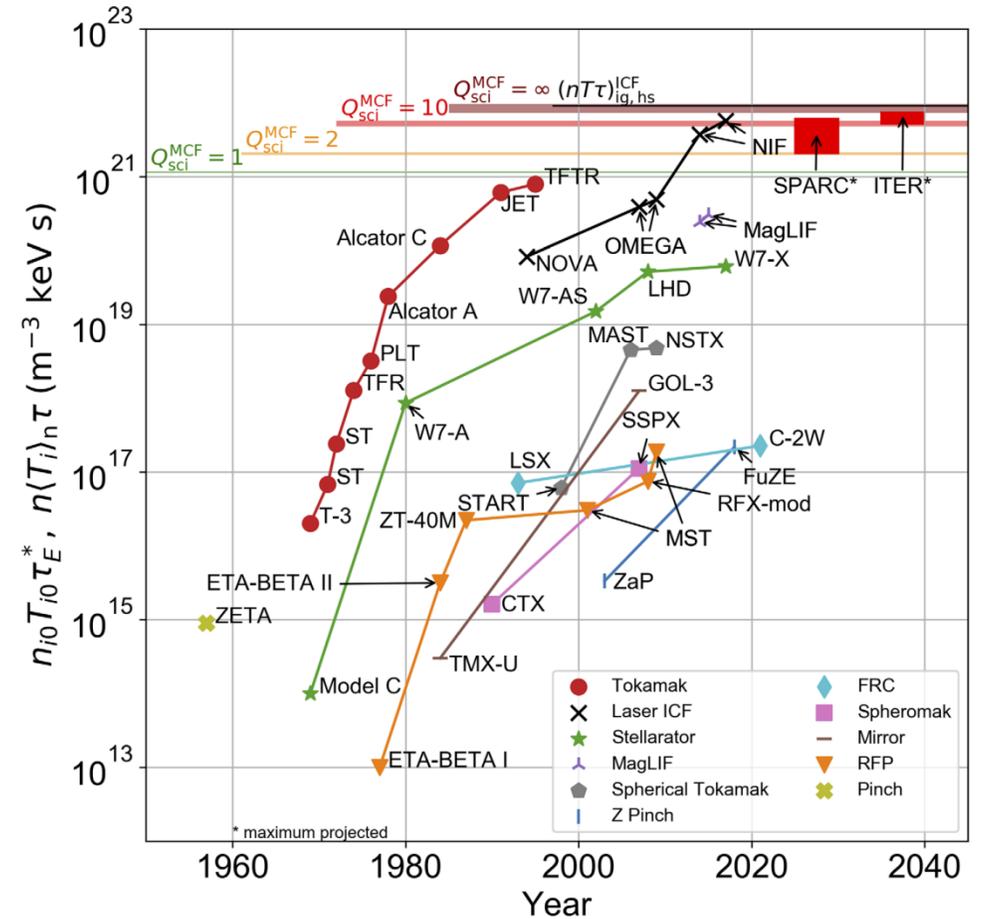
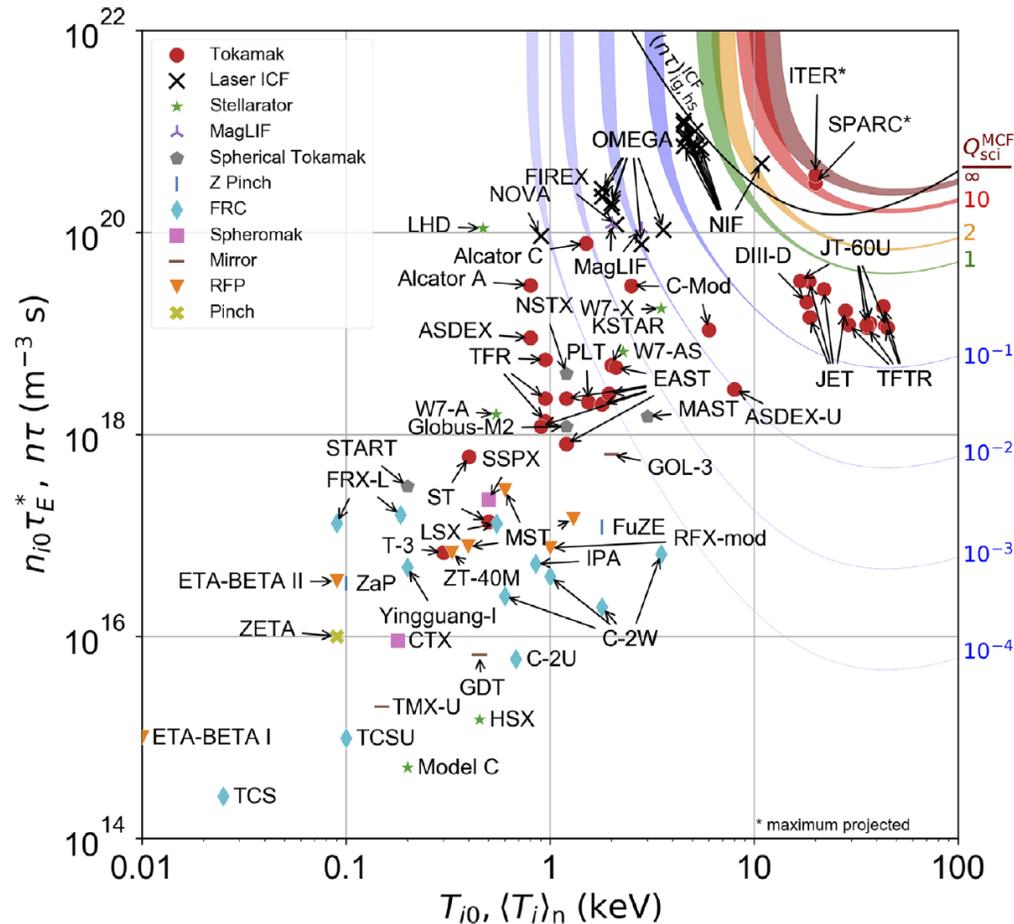
- レーザー(NIF)：蓄電して数時間に1ショット (300 MJ)
- トカマク(ITER)：磁場を常に変化させてプラズマを維持 ITERは受電容量が110 MW-620 MW (30秒間のピーク)



核融合反応に違いは無い ローソン条件に従うと考えている

J. D. LAWSON, Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor, Proc. Phys. Soc. B 70 6 (1957).

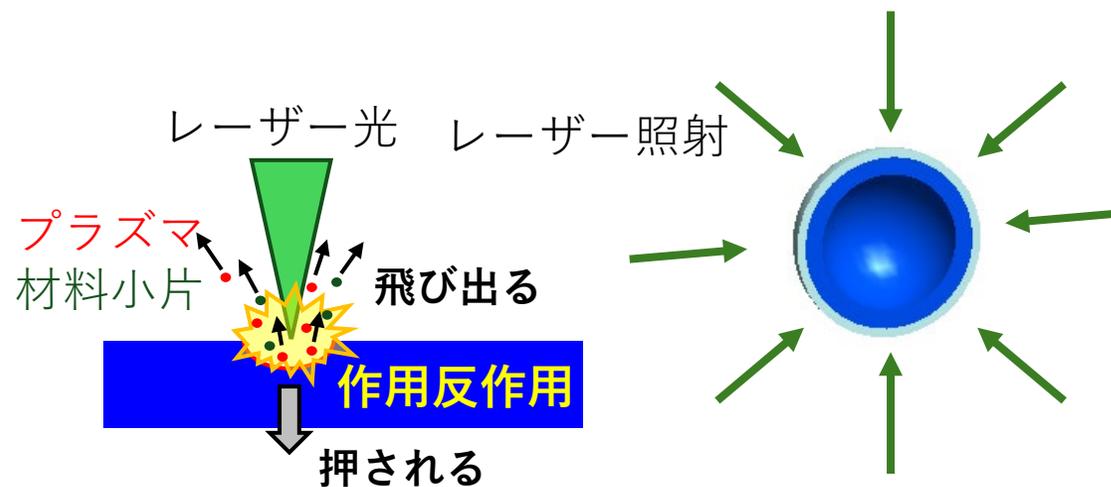
- すべての核融合方式がローソン条件によって説明可能か？
- 量子論が発展した現在ではもっと別の説明ができないか？



S. E. Wurzel, S. C. Hsu, "Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion", Physics of Plasmas, 29, 062103 (2022)(Copyright open)

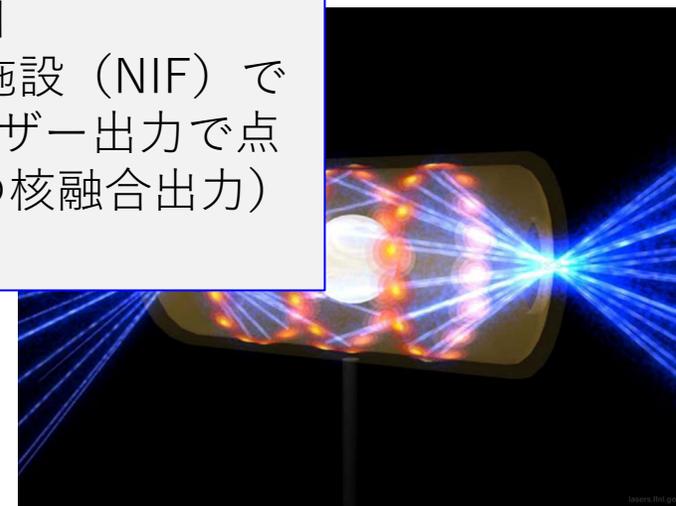
レーザーを使って核融合反応を起こす方法

1. 固体DT燃料を作る（直径数mmの球）
2. レーザー光を照射
 - レーザーを燃料に直接照射する方式（困難、高効率、日本）
 - レーザーをx線に変換して間接的に照射する方式（容易、低効率、米国）
3. 表面がプラズマ化、吹き出るプラズマの反作用によって燃料が圧縮される
4. 高温・高密度のプラズマが生成し核融合反応を起こす



数100分の1まで圧縮

2022年12月5日
米国国立点火施設（NIF）で
2.05 MJのレーザー出力で点火（3.15 MJの核融合出力）
が起こった



爆縮：力学、流体力学

レーザー、レーザープラズマ相互作用：レーザー工学

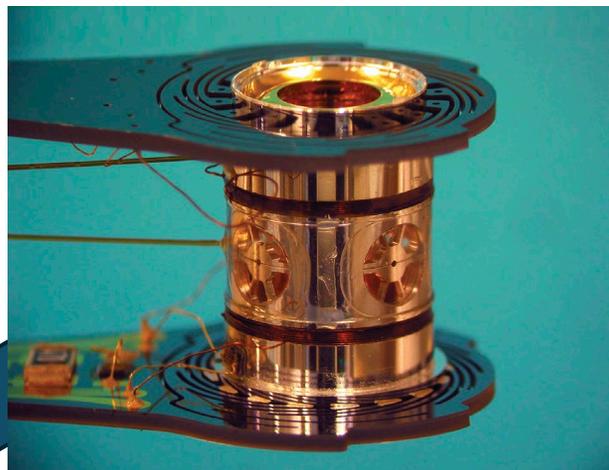
固体水素同位体（高圧）：物性

間接照射の実験用ターゲット (米国National Ignition Facility 核融合燃料)

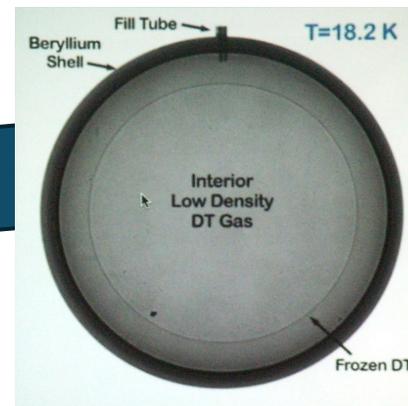
組み立て

組み立て：ロボット工学
伝導冷却：物性物理、シミュレーション

<https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo-gallery>

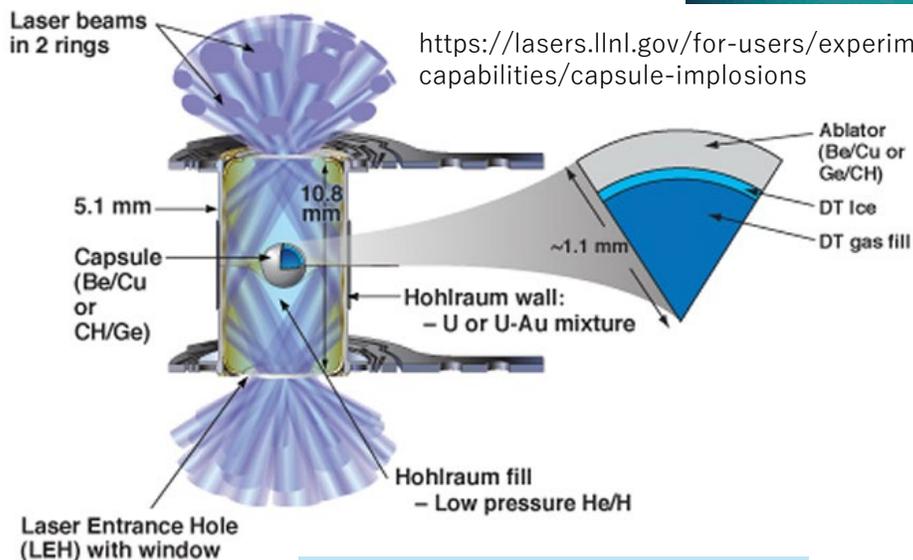


燃料層形成



冷却：低温工学
熱伝達：熱工学、真空
蒸気圧、転移熱：熱力学
収縮変形：機械工学
組み立て：ロボット工学

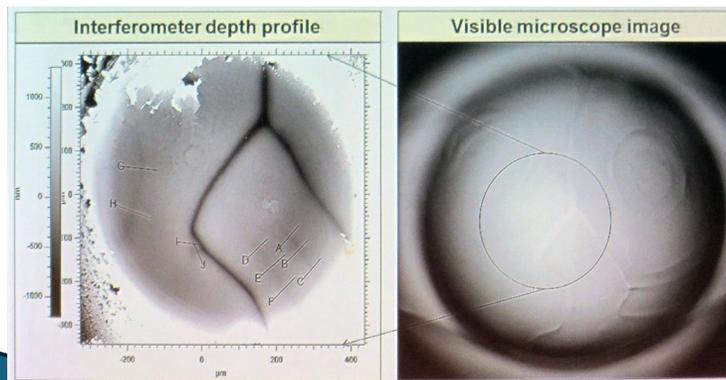
J. D. Moody,
International Conference on Inertial Fusion
Science and Application (IFSA) 2007 at Kobe



合金：金属学、材料科学
テント：有機化学

<https://lasers.llnl.gov/for-users/experimental-capabilities/capsule-implosions>

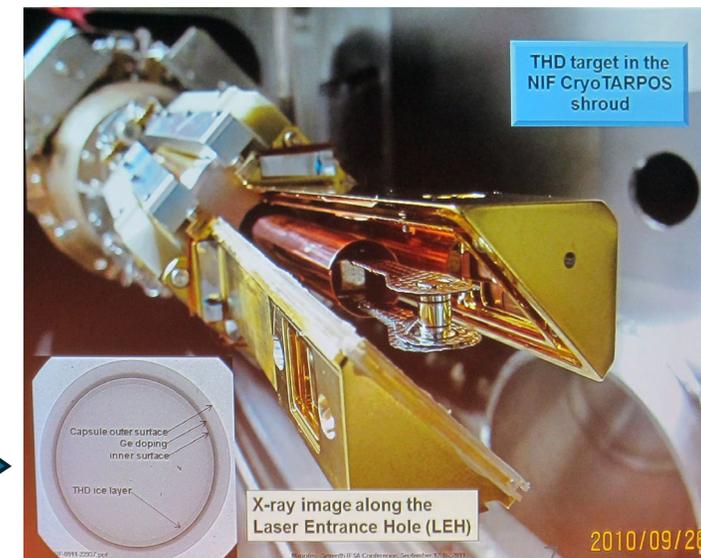
検査



A. Nikroo, "Progress in Target Fabrication for the National Ignition Facility", at IFSA 2011, Bordeaux.

干渉計測：光学
変形評価：解析学

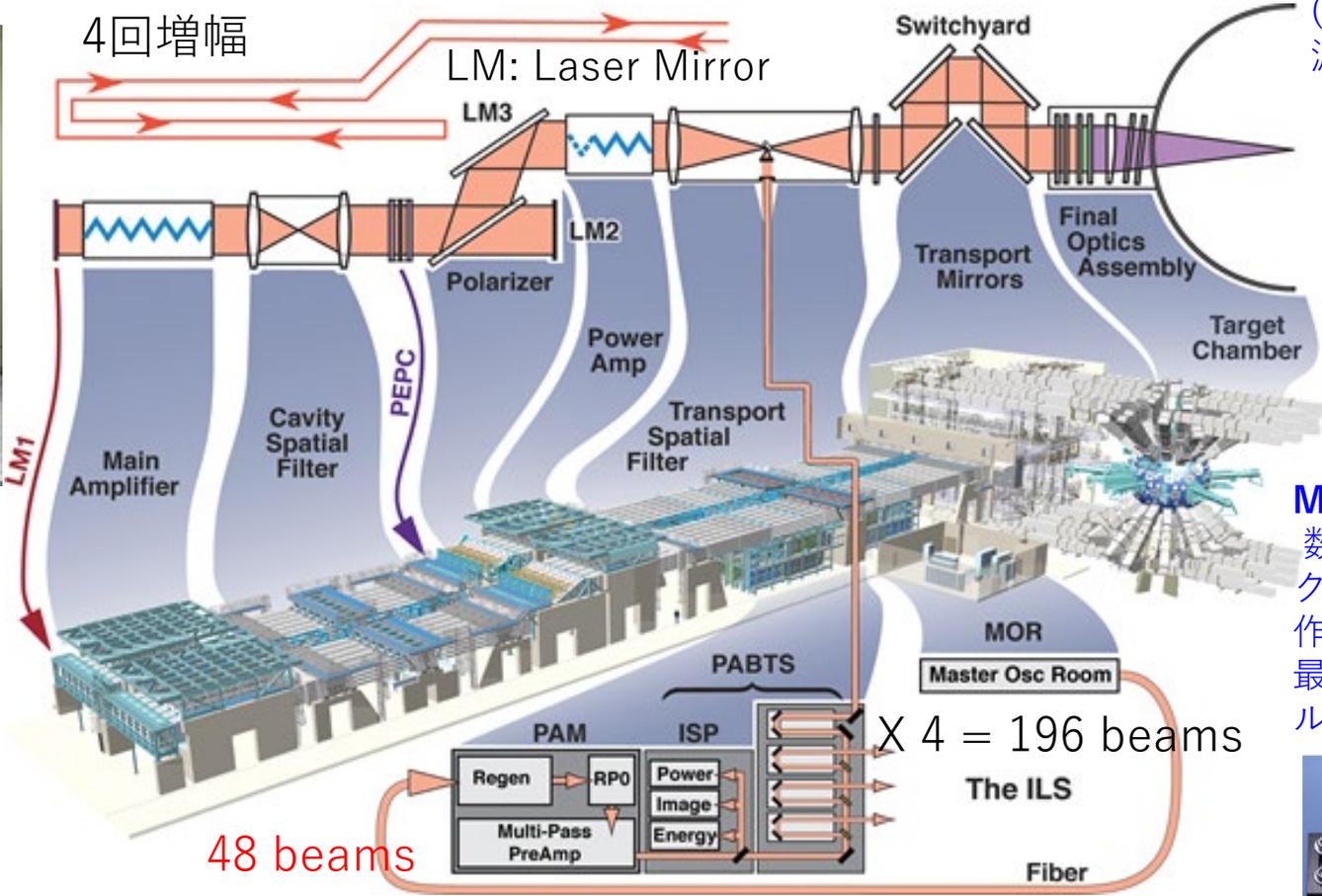
レーザー実験へ



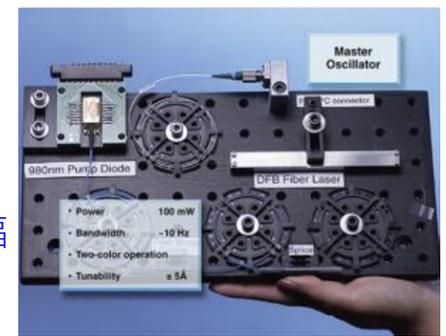
レーザーシステム (NIF)

Final optics assemblies (FOAs)
波長: 赤外 1,053 nm (1 ω)

↓
紫外 351 nm (3 ω)
短い方が吸収されやすい
↓
ターゲットへ

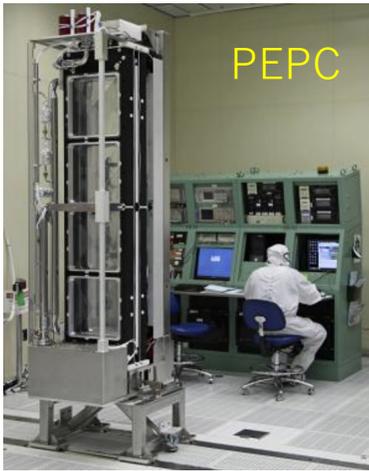


Master Osc. Room (MOR)
数ナノジュール・直径数ミクロンのレーザーパルスを作る
最終的に48本のレーザーパルスを出力

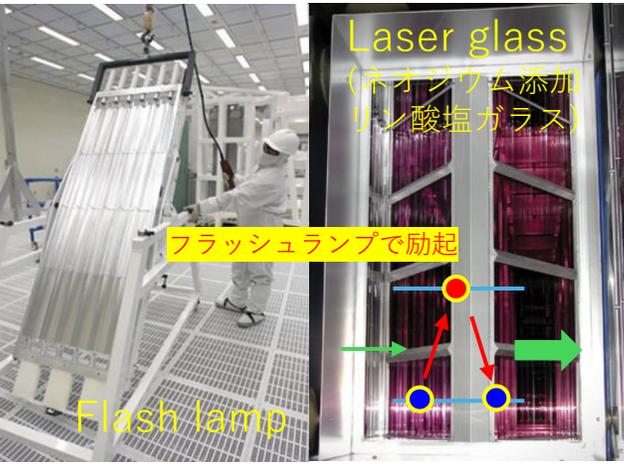


Plasma electrode Pockels cell (PEPC)

レーザー光の偏光方向を回転させる
偏光子を反射・透過させる制御の役割



Main Amp.
レーザー光を増幅

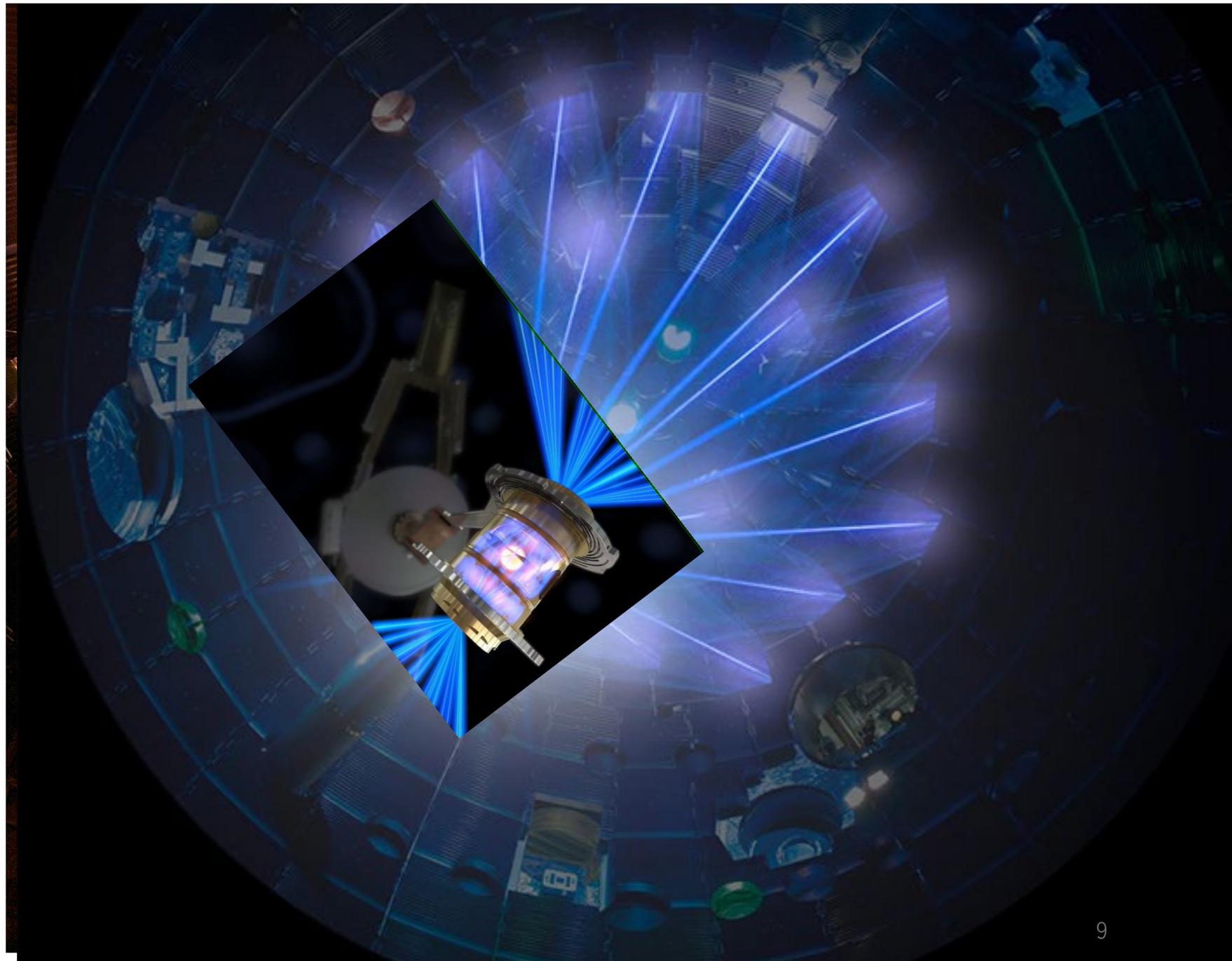


Pre-amplifier module (PAM)
nJ級レーザーパルスを15mJへ増幅
レーザー光の形を丸から四角へ

Pre-amplifier Beam Transport System (PABTS)
1ビームを4ビームへ

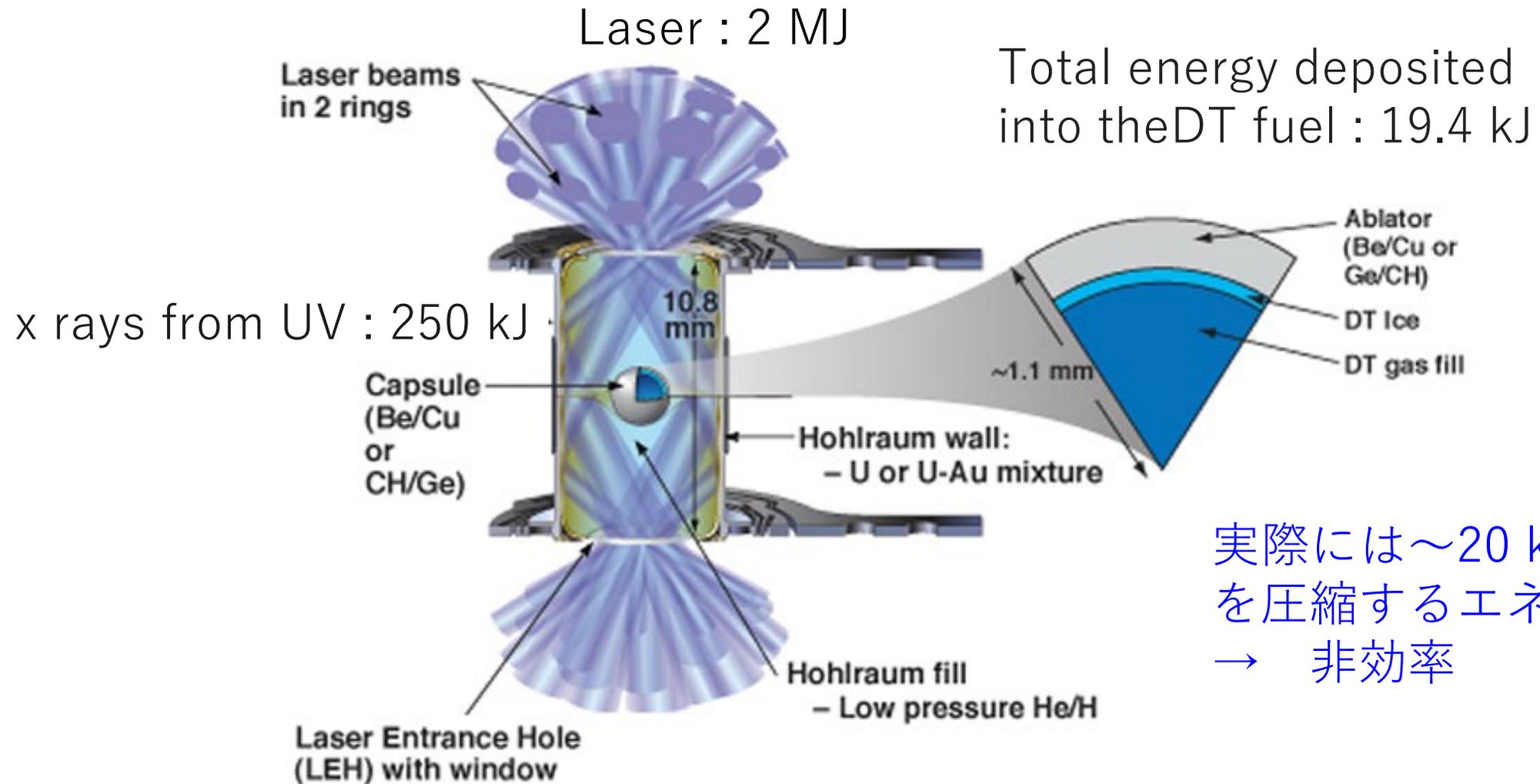
192本のレーザー光は
ターゲット
チャンバーへ

そしてターゲットへ



Laser energy is converted to kinetic energy via x-ray conversion

O. A. Hurricane, "Energy Principles of Scientific Breakeven in an Inertial Fusion Experiment," PHYSICAL REVIEW LETTERS 132, 065103 (2024)

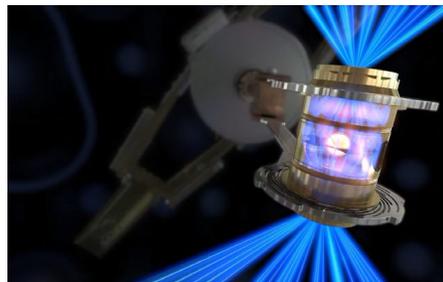


実際には～20 kJ が燃料を圧縮するエネルギー
→ 非効率

燃料が均一に圧縮され燃焼するまで

課題：流体不安定性の抑制

1. レーザー照射の強度やその変化
2. レーザーの照射精度
3. x線変換容器の形状
4. ターゲット表面材料
5. ターゲット表面や燃料層の均一性

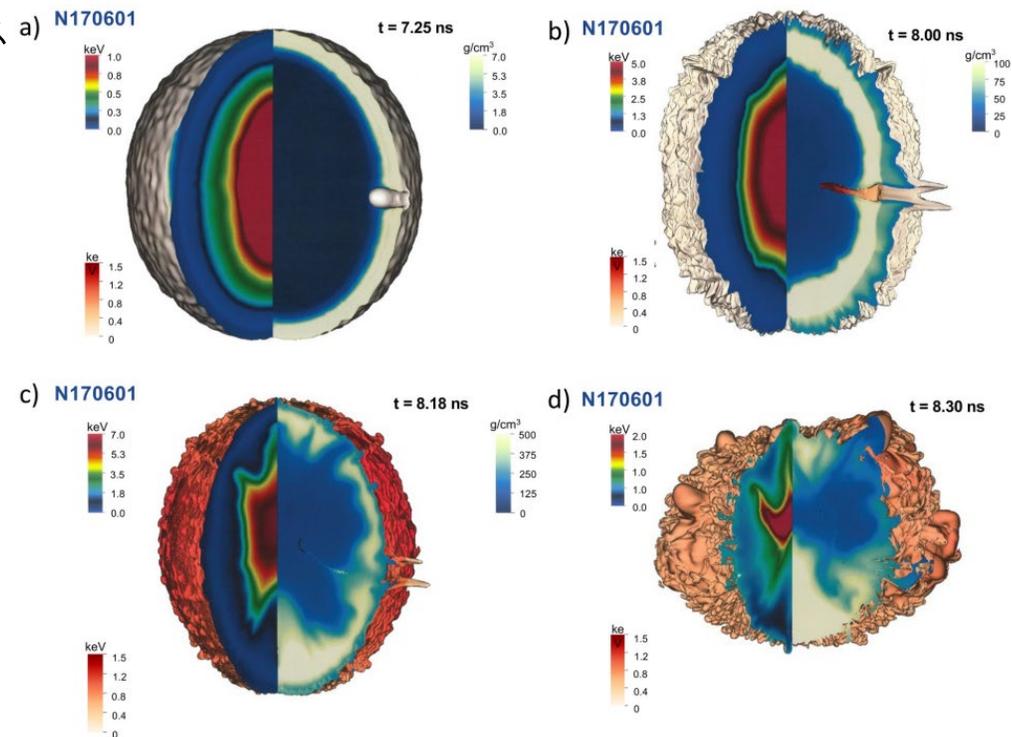


<https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo-gallery>

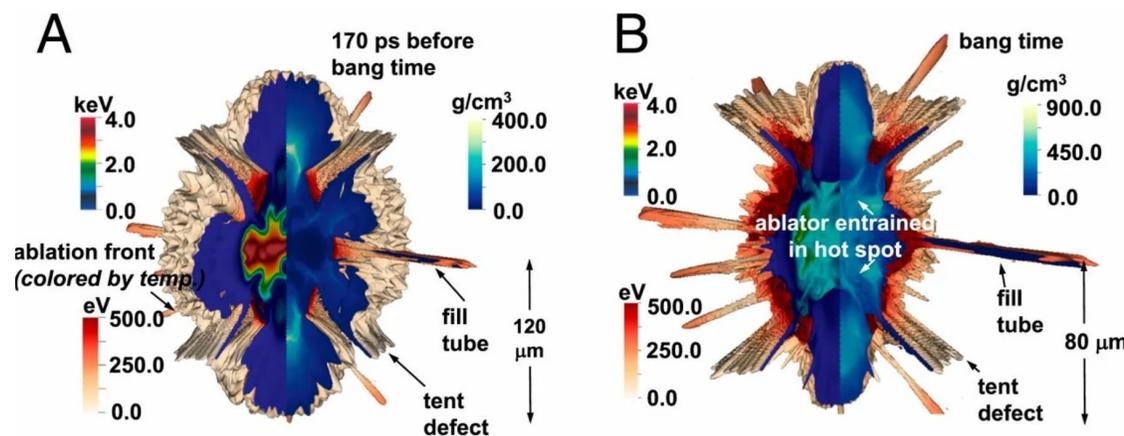
レーザー科学
プラズマ科学
高圧物性
乱流：流体力学
計測：放射線計測、光学（高速度）

実験条件などを決定するために機械学習を採用している
シミュレーションで試して実験を実施

情報工学（シミュレーション、AI）



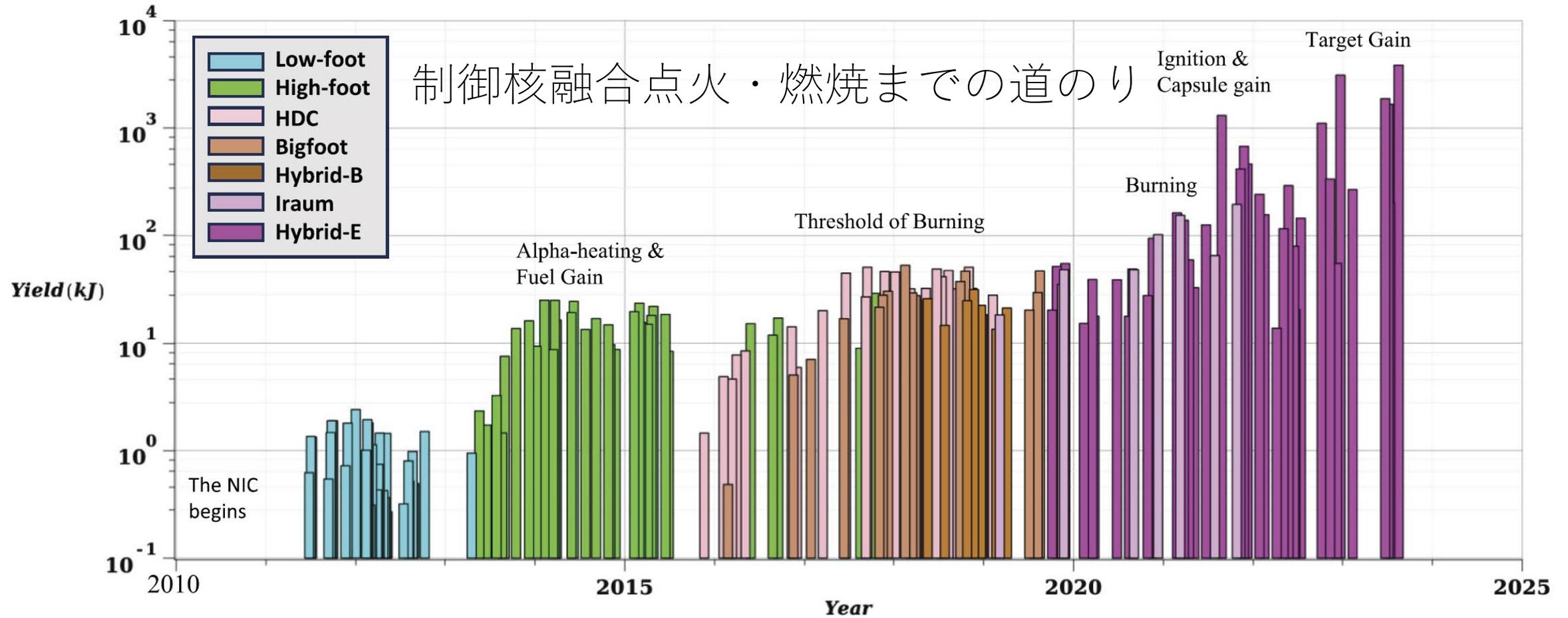
M. M. Marinak, et al., “How numerical simulations helped to achieve breakeven on the NIF”, PHYSICS OF PLASMAS, 31, 070501 (2024). (Copyright OK)



B. A. Remington, et al., Rayleigh–Taylor instabilities in high-energy density settings on the National Ignition Facility,” *The Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), Vol. 116 (2019), 18233.

NIFは世界初の“制御”核融合点火を実証した

O. A. Hurricane, et al., “Energy Principles of Scientific Breakeven in an Inertial Fusion Experiment”, PHYSICAL REVIEW LETTERS 132, 065103 (2024). (Copyright OK)



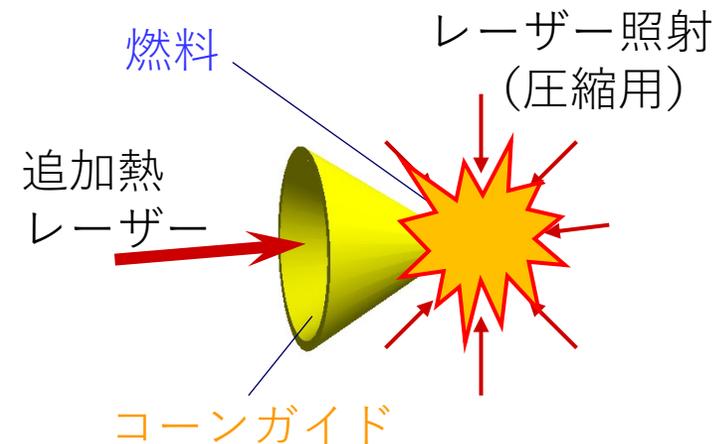
How NIF Works

<https://lasers.llnl.gov/multimedia/video-gallery>

大阪大学レーザー科学研究所では高繰り返し・高効率化研究

- 直接照射・高速点火方式

- Fast Ignition Realization Experiment (FIREX)
- Numerical Experiment Optimization (NEO)



- 高繰り返しハイパワーレーザーの開発

- Japan Establishment for Power-laser Community Harvest (J-EPoCH)

8kJ/ns 12-beam Symmetry + 5PW/ ps

Area 1

16Hz

96Hz

80Hz

Area 3

Area 2

20PW-30fs/8kJ ns single side

fssec-μsec/100-kJ/PW
Thz EM-EUV, X-ray, γ-ray
Electron, /Ion/
Neutron beam

大阪大学大学院

理学研究科 物理学専攻

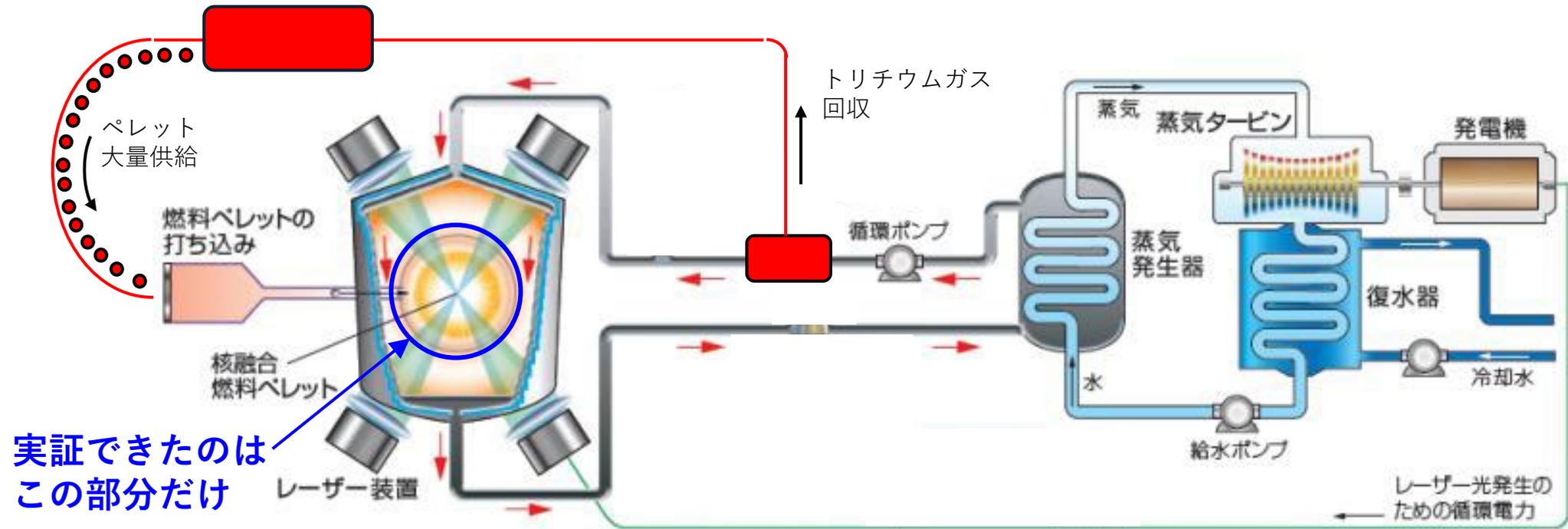
工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

環境エネルギー工学専攻

核融合反応の起こし方が分かった！

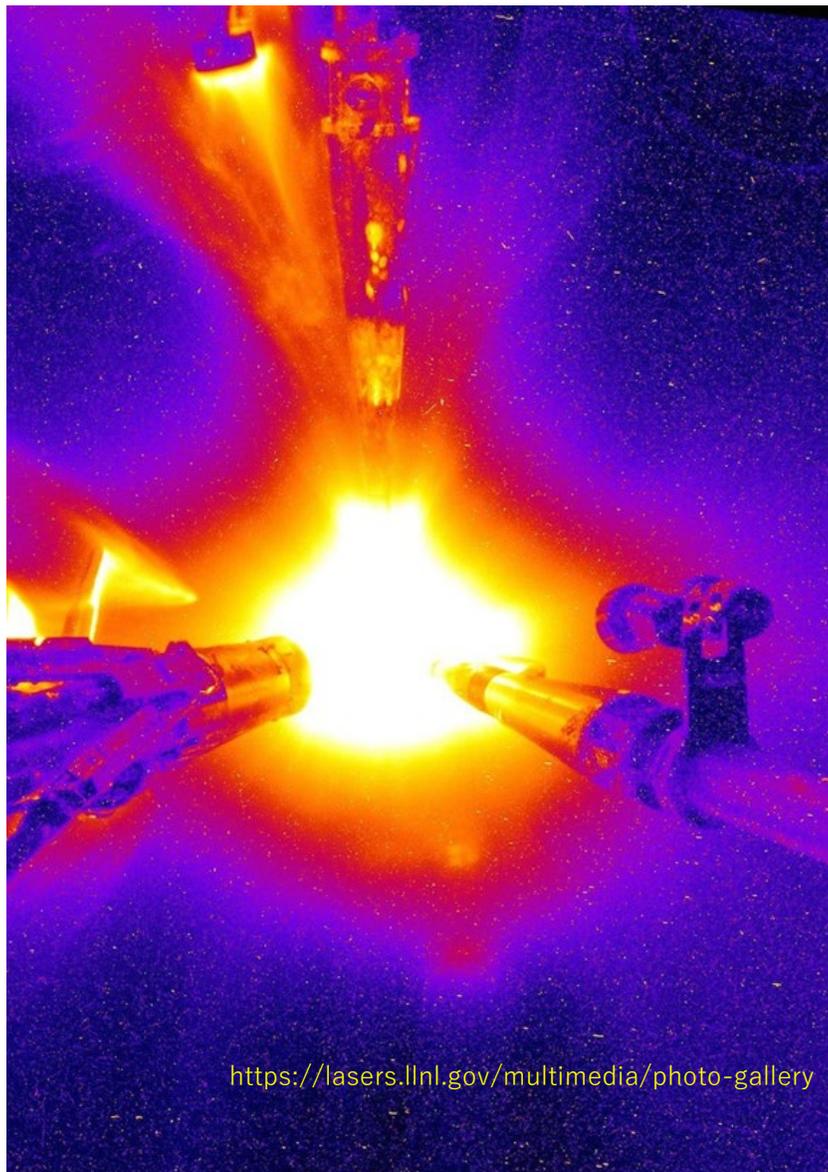
- 核融合炉の実現に向けて研究を進めて行きます。
 - レーザーを使って核融合反応の起こし方が分かっただけでは核融合炉はできません。
 - レーザー核融合炉開発の出発点にようやく立った。
 - では次に考えることは？

レーザー核融合炉とは？



- 大量のDT燃料を準備する（D資源の開発、Tの製造方法の開発）
 - 炉内に燃料ペレットを打ち込み、レーザー光を照射（ペレットを作る費用やエネルギー、レーザー装置の消費電力）
 - これを一秒間に数回繰り返す。（発電する電力を決める）
 - この反応により生じたエネルギーでタービンを回転させ電力を得る。
- 少し考えるだけで課題が見え₆てくる

核融合反応後に何が起こる？



<https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo-gallery>

- プラズマ化したターゲット材料 → どこで回収？
- 燃えなかった燃料 燃料として再利用
 - ✓ トリチウム
 - ✓ 重水素→ その方法？
- 爆縮に使われなかったレーザー光
- 核融合反応により発生した
 - ✓ 中性子 → トリチウム増殖へ → その方法？
 - ✓ アルファ線 → 核融合エネルギーとして利用する

などが

ブランケットの壁に打ち込まれたり炉心内に残る

ここからが本当の核融合反応の起こし方
②レーザーを使う の出発点

実用化へのキーワードは「システム化」と「工業製品化」

- 高効率 直接照射
 - ◆ 燃料ターゲットの再設計も可能性あり
- 高繰り返しハイパワーレーザー
- エネルギーの取り出し方法
- 燃料の調達
- 放射線対策
- 耐用年数
- 候補地のアセスメント

これらすべてを同時に成立させる一つの系を組み立てることができるか？

お願いしたら
メーカーが作ってくれるか？

アセスメント：環境工学
放射線：医学
市民への説明：心理学、法律

一例として核融合燃料の使用量を考えてみましょう

- 重水素
- トリチウム

プラント：機械工学、材料工学、制御工学、
情報セキュリティ、原子力工学
高圧ガス：熱力学、法律、安全工学
燃料回収：無機化学（触媒）

- 運転に必要な燃料の量は？
- 原子力発電所（軽水炉）は約100万kW/基（電気出力）です。
- 例えば
 - 核融合出力 40万kW (400 MW)
 - 核融合出力の半分の電気出力20万kW (200 MW)
として仮定。

この設定が正しいかどうかは今の段階では不明

必要なDT量の計算

➤400 MWを発生させるために必要なトリチウム数は？

• 1ショット当たりの発生エネルギー

• 1回のDT核融合反応で17.58 MeV (28.2×10^{-3} J)

• $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

• 400MW分では？

• 1.42×10^{20} DT反応/sec

• D: 0.48 mg

• T: 0.71 mg

• 球形シェルに入れ固体DTとして供給する

• 0.051×10^6 moles/m³ at 19.71 K

• Report from LLNL, C. K. Briggs, et al., "Estimated refractive index and solid density of DT with application to hollow microsphere laser targets", (1975)

• $4.63 \times 10^{-9} \text{ m}^3 = 4.63 \text{ mm}^3$

• ターゲット1個あたり1.16 mm³ の燃料を供給 (at 4 Hz)

• 20%の燃焼効率だと仮定すると

• 球状ターゲット $r=0.954 \text{ mm}$

仮定だけでは
工業製品にはならない

どうやって燃料を供給する？

- 4 Hz供給を仮定したが、
 - 1日当たり $60 \text{ sec} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ hours} = 345,600$ 個
 - 1年間では 126.144×10^6 個 (37.5 kg DTガス)
 - 年間使用量 (トリチウム22.4 kg、重水素15.1 kg)
- ターゲットを射出して供給する案が有力
- レーザー光と同期が必要
- 核融合燃焼を起こすためにレーザー光がターゲットに当る精度がミクロンオーダー
- 極低温環境

同期：制御工学

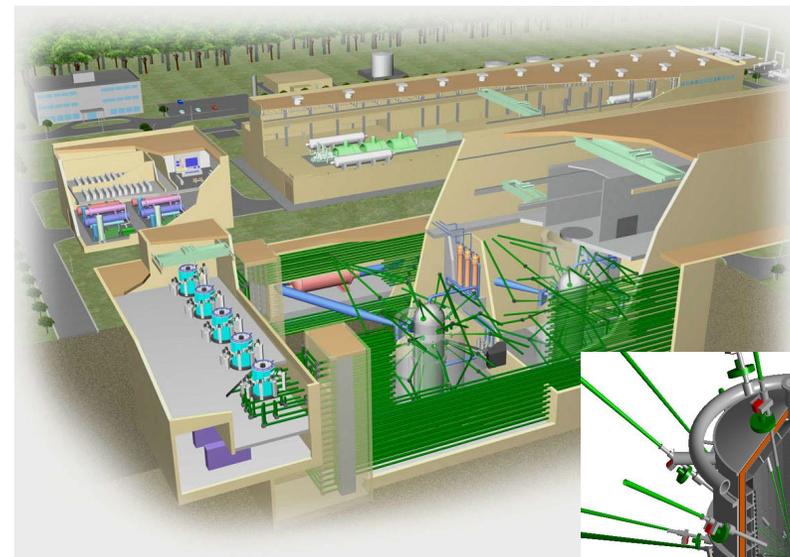
極低温環境：低温工学、熱学、材料学

ガス・コイルガン：熱力学、電磁気学

軌跡計測：光学

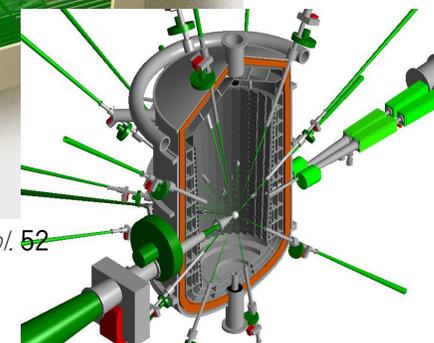
トップダウン的研究の始まりは 炉設計から

▶ レーザー研でも炉工学研究やってます



Koyo-Fast
(IFE Forum)

T. Norimatsu, et al., *Fusion Sci. Technol.* 52 (2007) 893.



Candyの絵

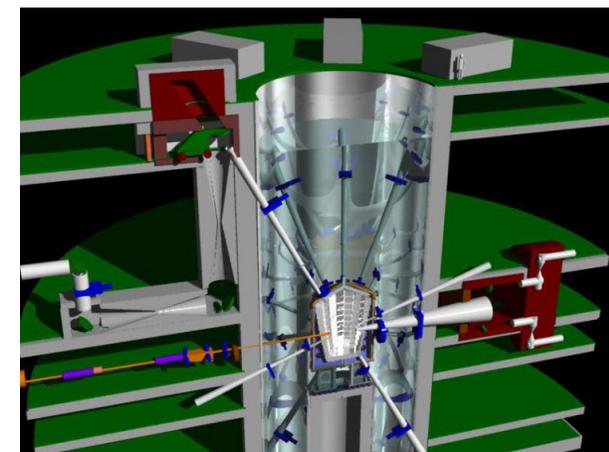
Falcon-Dの絵

Falcon-D(東大)

T. Goto, et al, *Nuclear Fusion*, 49 (2009), 075006.

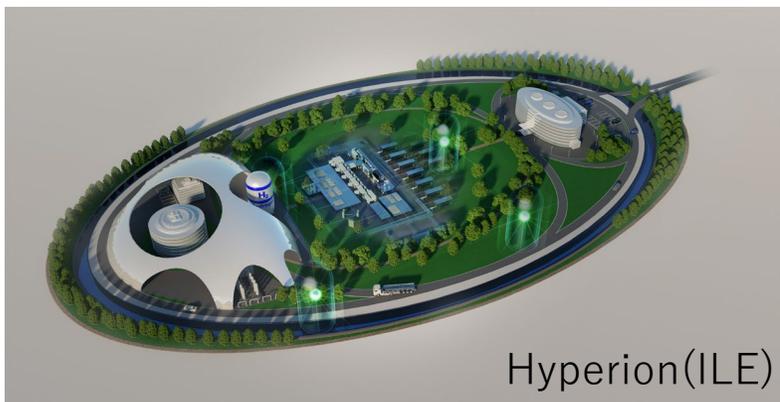
Candy (GPI)

Y. Kitagawa, et al., *Plasma and Fusion Research* 8 (2013), 3404047.



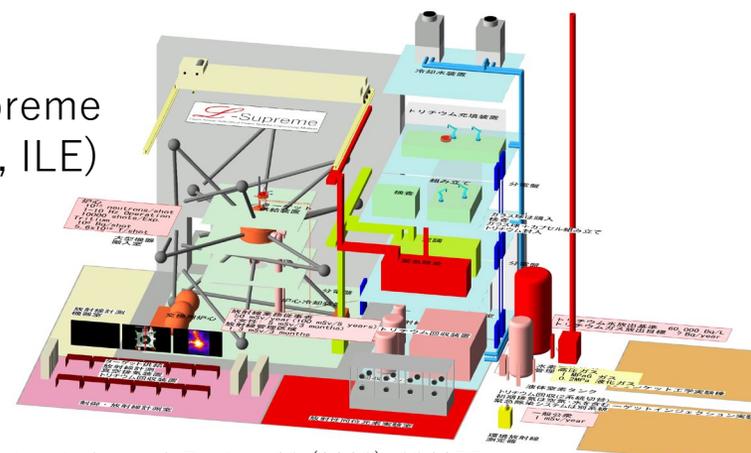
LIFT(IFE Forum)

T.. Norimatsu, et al., *Nucl. Fusion* 57 (2017) 116040.



Hyperion(ILE)

L-Supreme
(NIFS, ILE)



A. Iwamoto, et al., *Nucl. Fusion*, 61 (2021), 116075.

核融合炉を作る。すなわち全ての課題を解決する！

- トップダウンの研究・開発
- 社会の要請から役割と出力を決める
- 核融合反応によるエネルギー増倍率の設定が必要
 - 必要なレーザー出力や繰り返し頻度
 - 必要な燃料量の算出
 - 核融合炉の規模が分かる
- 矛盾がある部分などを修正する
または研究・開発する

重要：研究のボトムアップでない

**核融合炉の開発はこれからが重要です。
いろいろな研究・開発課題が埋まっている。
あなたも一緒に
それを探し出し、研究・開発を進め、核融合炉を創りましょう。**