

核融合からフュージョンへ

高市早苗 経済安全保障担当大臣

2023年6月 総合科学技術・イノベーション会議後の会見

「核融合エネルギー」⇒「フュージョンエネルギー」

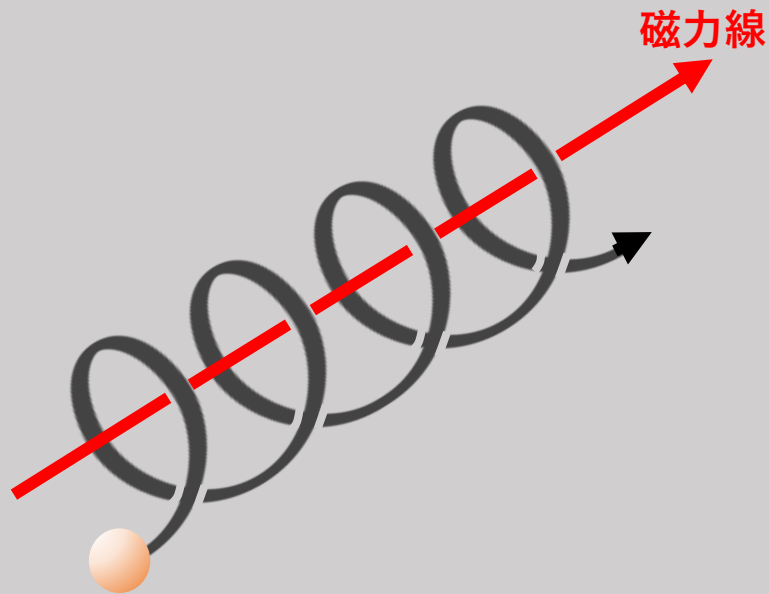
本解説でも原則「フュージョン」または「Fusion」と記載する

1) 1億度を閉じ込める方法

太陽は高温水素（プラズマ）を**重力**で閉じ込めるが、フュージョン炉は**磁場**や**慣性**を使う

磁場で捉える

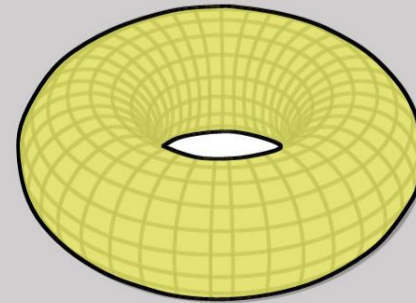
高温水素は、イオン（原子核）と電子がバラバラのプラズマになる。
イオンも電子も磁力線に巻き付く



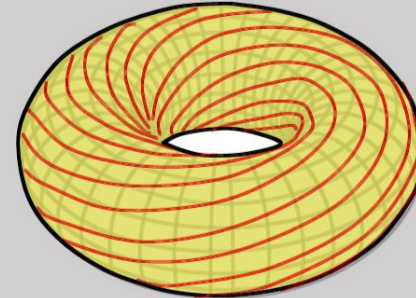
図はイオン
電子は逆回り

磁場方式のフュージョン炉

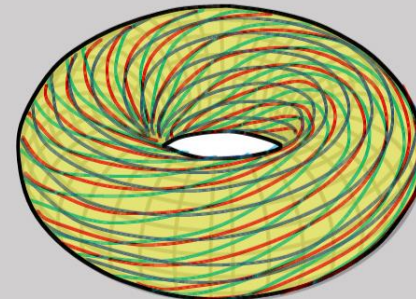
プラズマが磁力線に巻き付くのを利用
ねじれピッチが異なる磁力線の
「多重カゴ」で覆って漏れを防ぐ



トーラス
プラズマ



一重の
磁力線カゴ
隙間から漏れる



多重の
磁力線カゴ
この図は3重
実際は無限重

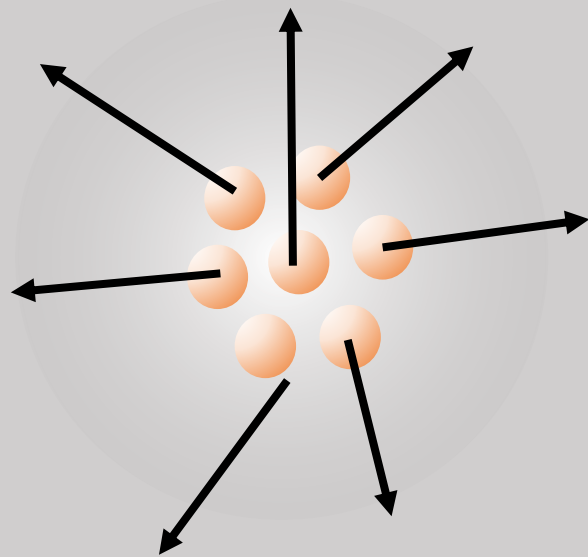
1) 1億度を閉じ込める方法

太陽は高温水素（プラズマ）を**重力**で閉じ込めるが、フュージョン炉は**磁場**や**慣性**を使う

慣性で捉える

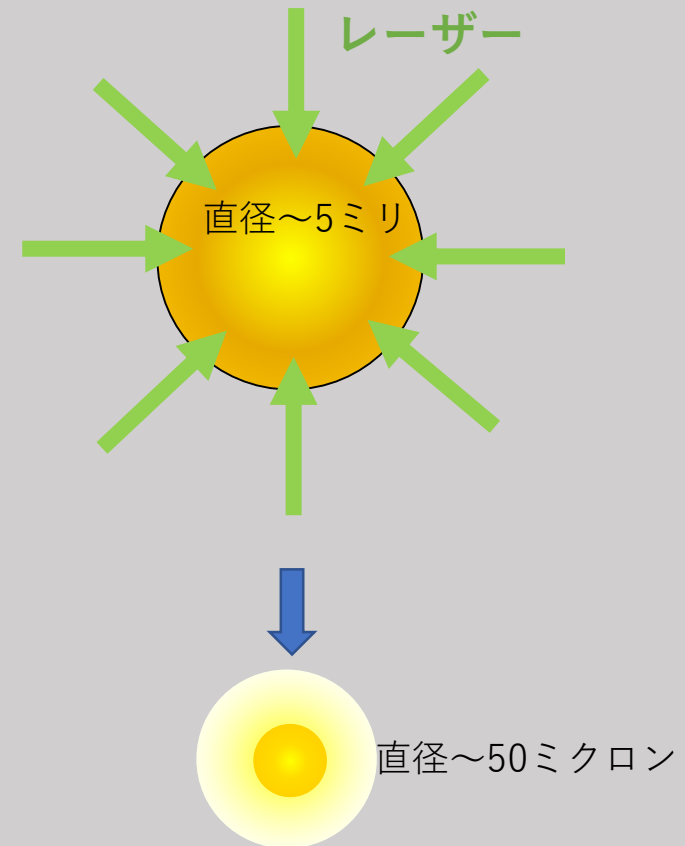
1億度に瞬間加熱

イオンは、すぐに飛び散りたいが重さ（質量）があるのでゆっくりしか動きだせない（**慣性効果**）



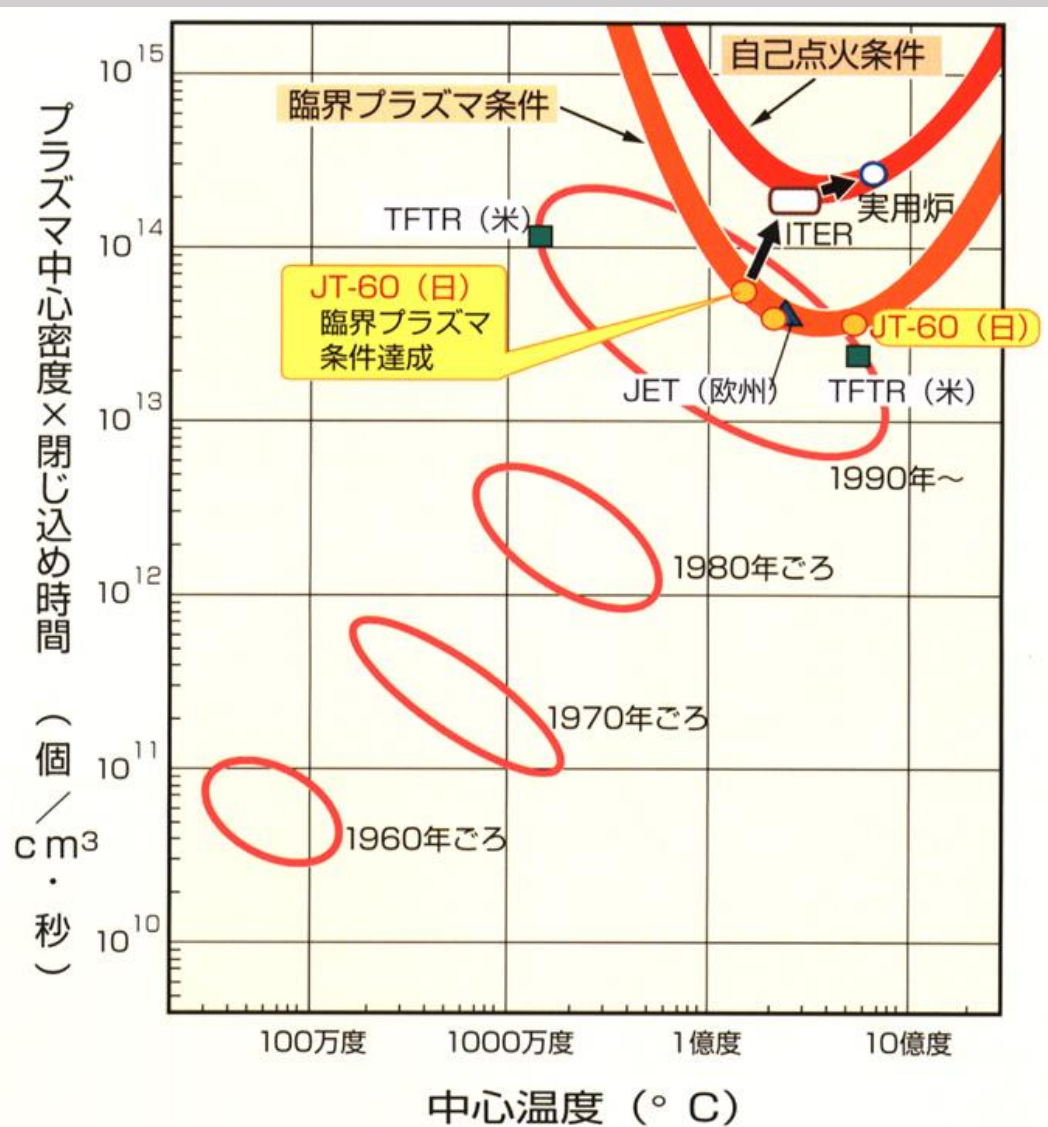
慣性方式フュージョン炉（～レーザー方式）

数ミリの燃料球をレーザー等で瞬間加熱＋圧縮
質量があるのですぐ飛散できない（**慣性効果**）
100億分の1秒でフュージョン⇒それを繰り返す

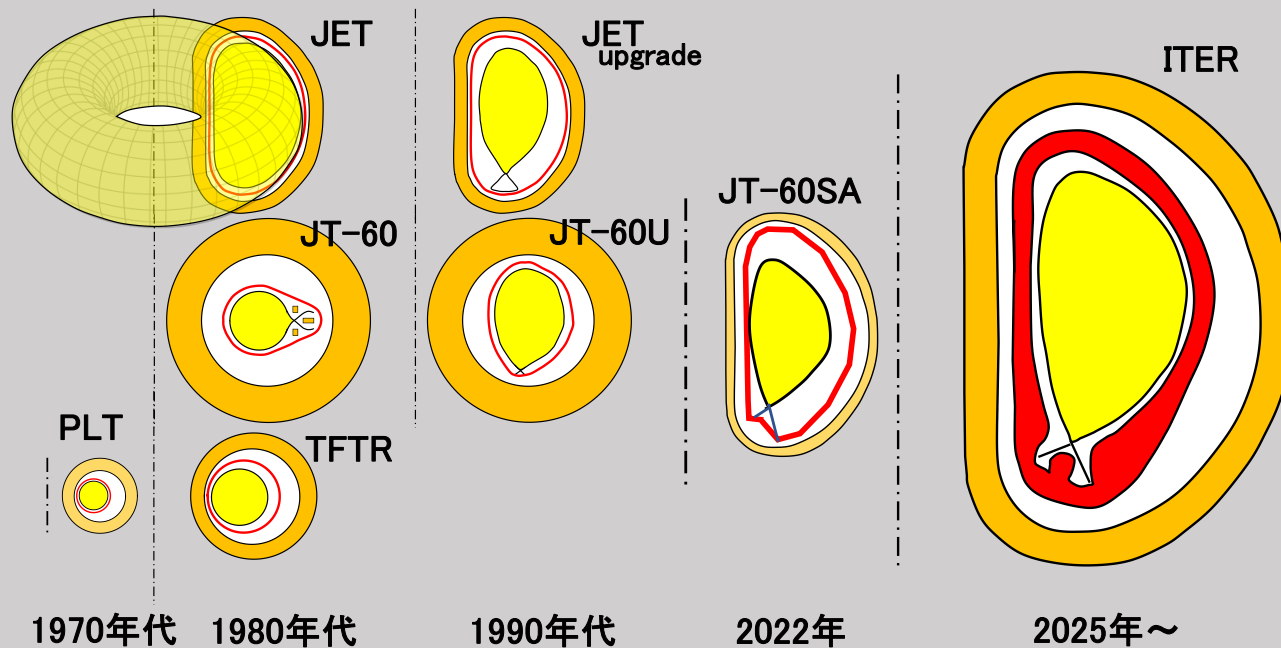


2) 磁場方式の歴史

10年で一桁ずつ、温度（横軸）と密度（縦軸）が向上してきた



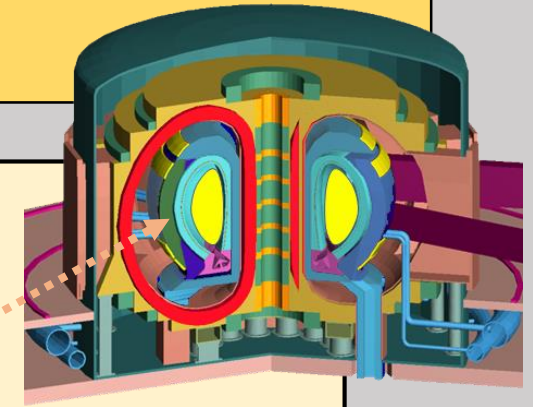
日本のJT-60Uと欧州JETは、1991年に、
臨界プラズマ条件（加熱に使ったパワーと出力が同じ）
を達成。 $Q (= \text{入力}/\text{出力}) = 1$



米国のTFTRは $Q=1$ 達成に失敗（最高 $Q=0.3$ だった）。
小型に作り過ぎたのが原因。この敗北で、TFTRは廃炉
になり、米国の磁場方式開発は、その後、ずっと低迷。

3) レーザーフュージョンの原理と特長

特長（まずは良い点だけ）



① レーザー方式はブランケットの設計自由度が高い

燃料増殖にブランケットが必須な点は磁場方式と同じ。

磁場炉のブランケット

超伝導コイルに取り囲まれている

レーザー炉のブランケット

磁場コイルがないので設計上の制約は減る

例えば、熱処理に余裕がある大きさに作ることが容易で、その分、燃料増殖率は高めに行える。冷却・増殖材として液体金属も流せる。

② レーザー方式は出力調整がしやすい

磁場炉では出力を変えるとプラズマ全体のバランスが変わる

⇒ 実用炉での出力調整は、できるとしてもあまり簡単ではない。

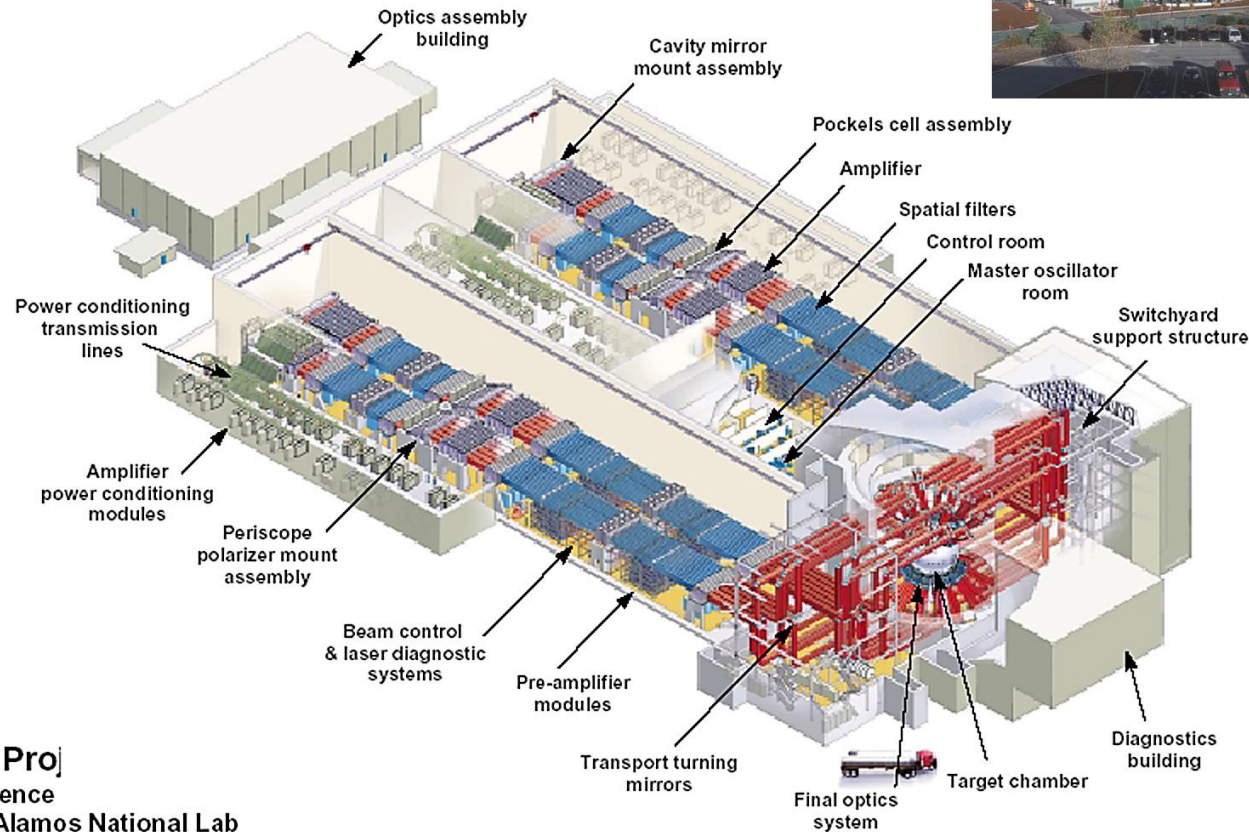
レーザー炉では、レーザーパルスの周期調整で出力の制御ができる

⇒ 電力需要への追従が容易で実用炉として使いやすい。

4) 米国におけるレーザー方式の進展

① 国立点火装置NIF 建屋は2003年に完成。全レーザーが2008年に完成。

The National Ignition Facility



NIF Proj
Lawrence
Los Alamos National Lab
Sandia National Lab
Univ. of Rochester/Lab for Laser Energetics

John Woodruff - 2



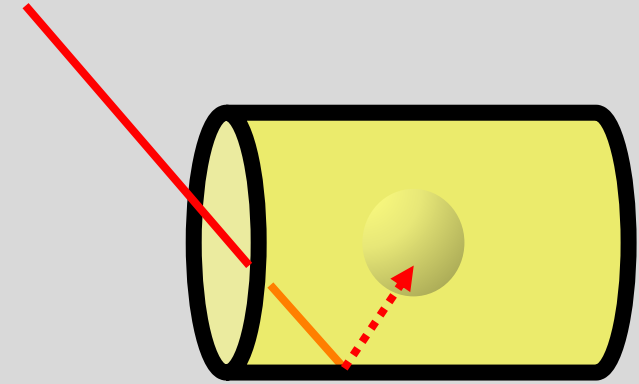
<https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>

真空チャンバー。192本のレーザーが入る穴が開いている。



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

燃料ターゲットは純金製の円筒に入っている。
192本のレーザーは内壁に反射して燃料球に向かう（この間接照射で一様性を増す）。



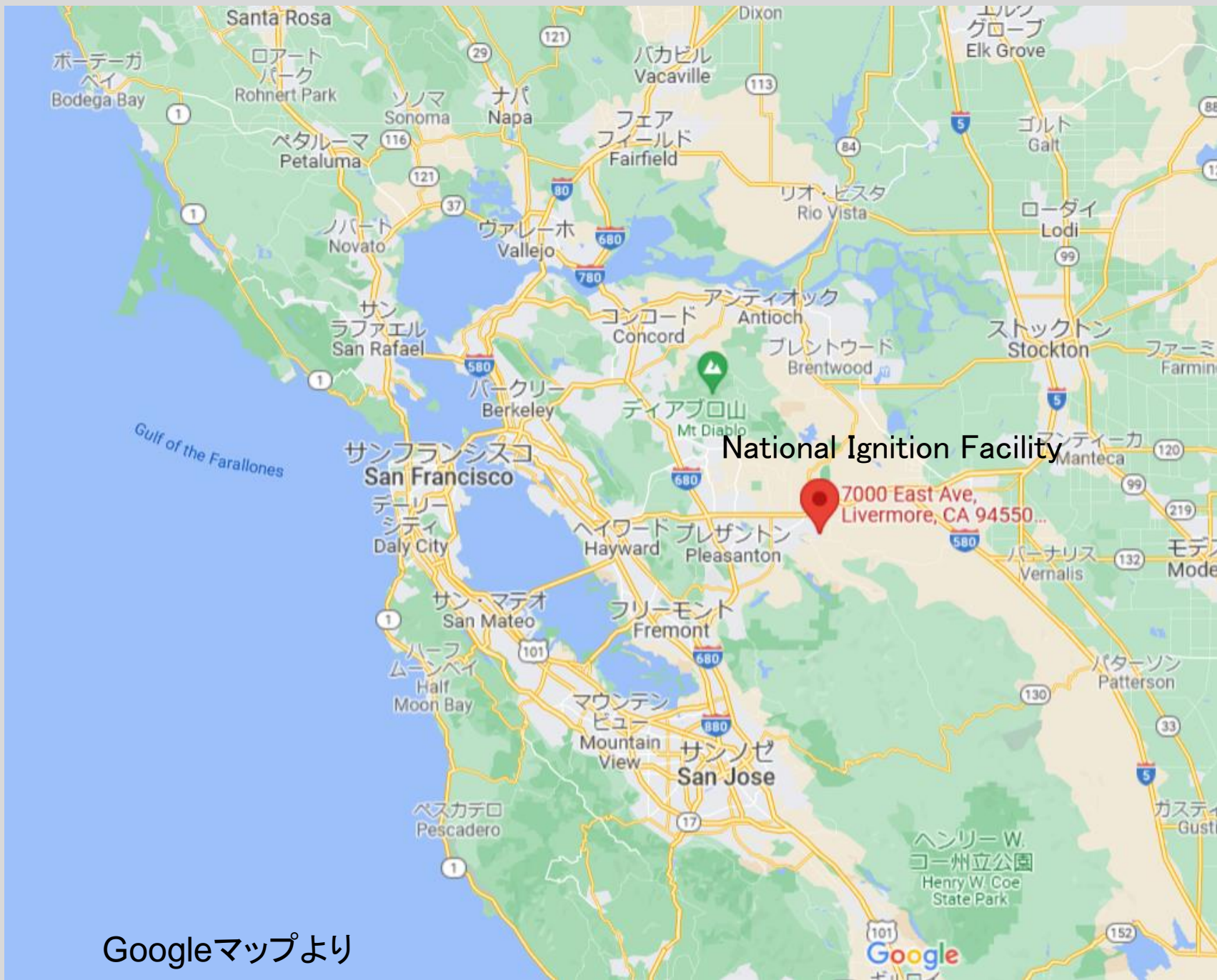
<https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>

NIF建屋外觀

Building of NIF

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

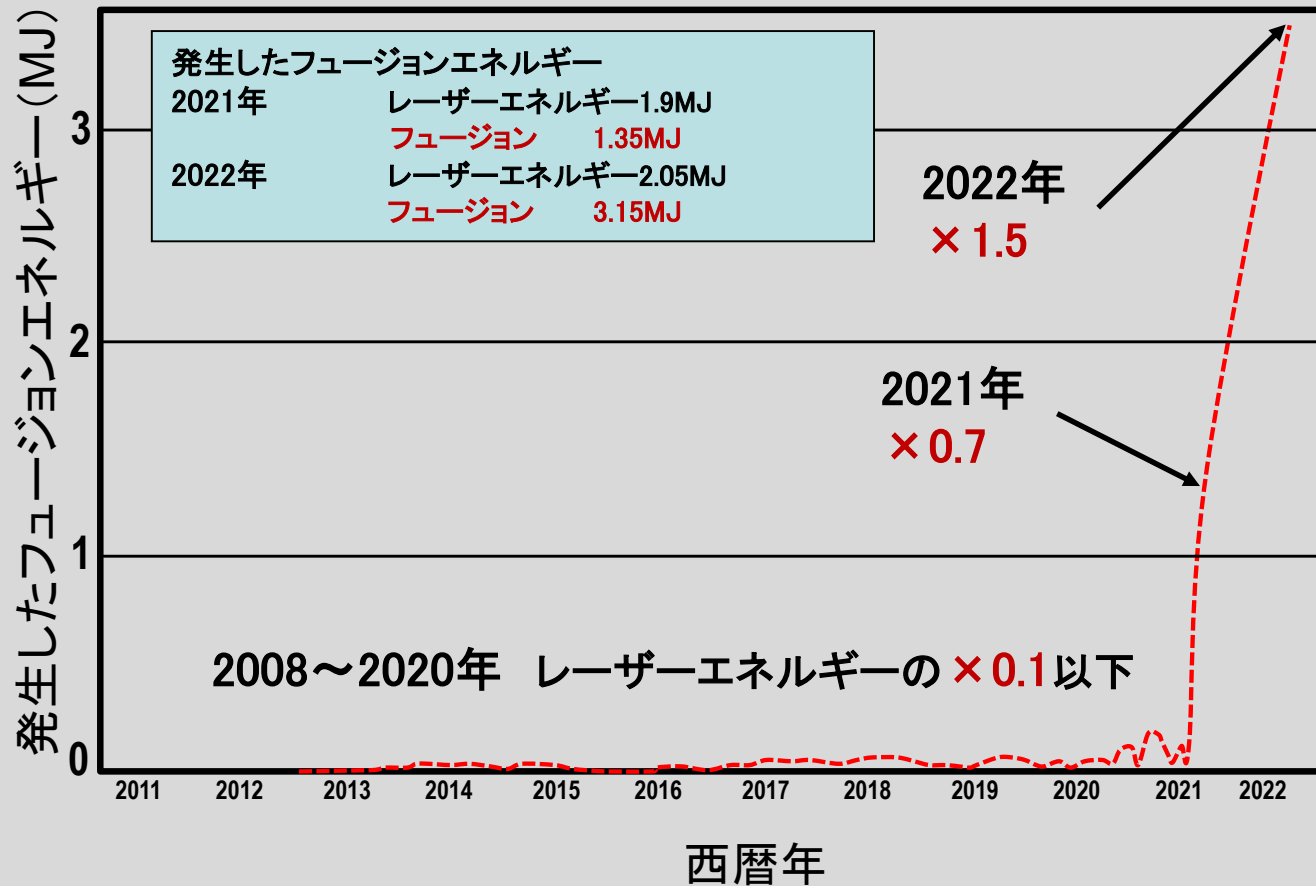




Googleマップより

4) 米国におけるレーザー方式の進展

- ② 2008年完成以後、結果が出ず。改良を重ね2021年から出力の急上昇に成功。
レーザーの増強(1.2MJ→2.05MJ)が最も効いていたようだ。



2020年まで、出力がレーザーエネルギーの0.1倍にも満たなかった
(計画失敗のピンチが続いた)

2022年、ついにレーザーエネルギーの1.5倍のフュージョンエネルギーを発生！

よくやった！とは言いたいものの……

4) 米国におけるレーザー方式の進展 消えた目標

③ 建設時の本来の目標は、増倍率**10**倍だったはず。

NIFの本来の目標

内閣府原子力委員会 核融合会議計画小委員会
1998年10月24日 プレス発表

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/kakuyugo/siryo/siryo129/siryo7.htm>

NIF建設中の1998年に開催されたIAEA第17回核融合エネルギー会議(横浜)で、米国が発表した内容として、以下のように報告されている:

米国の国立点火実験施設(NIF)の建設は順調に進展しており、レーザー出力1 MJにより**エネルギー増倍率10**が達成される見通しが強まりつつある。

はっきり言えば、
**1 MJで10倍を目指していたはずが、
2 MJで1.5倍が現状**

米国は「10」にはまったく触れなくなった。

1.5で「大成功」といわれても、ずっと応援してきた者としては複雑な心境。

仮にITERがQ=1.5でも大成功になる？

ただし、大変な困難を乗り越えてきたことは評価するし、1.5までくれば、10も見えてきた、とは言える。

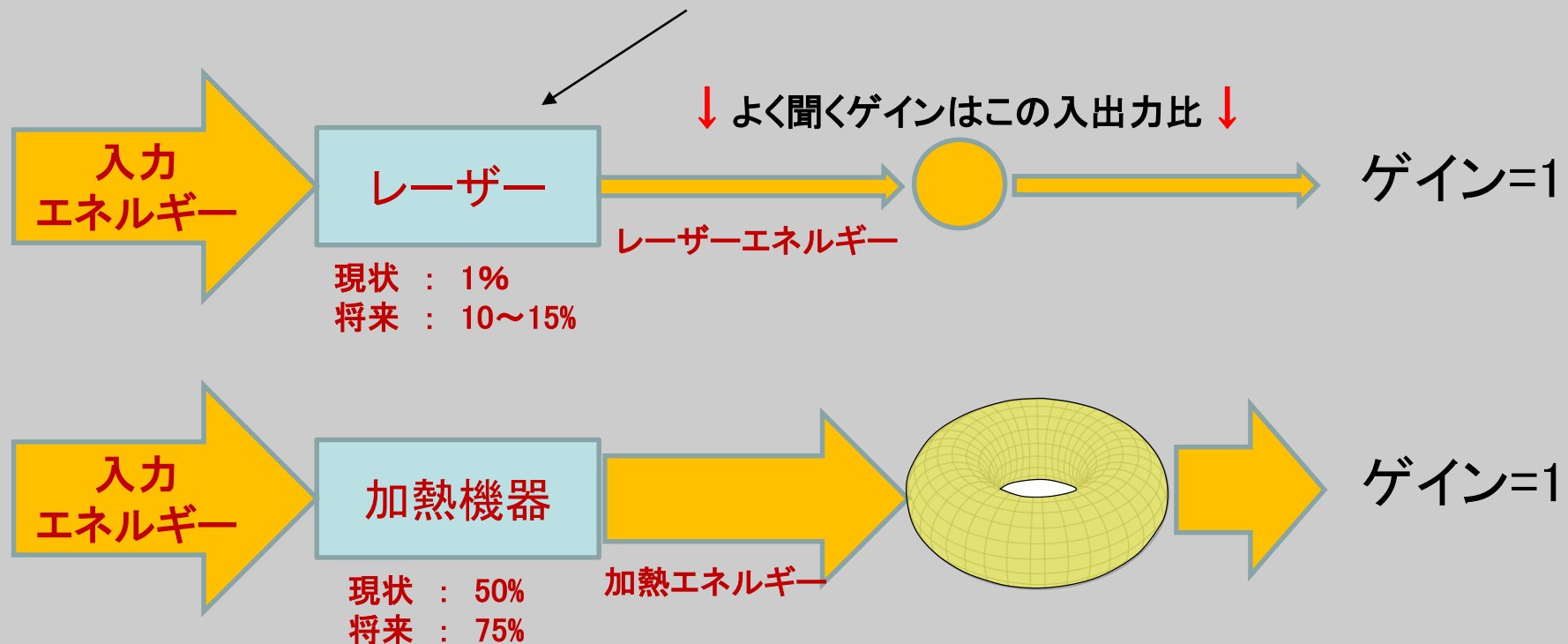
4) 米国におけるレーザー方式の進展

④ 磁場方式のQ値（パワー比）とは比較できるのか？

核融合の利得（以下ゲイン）

レーザー方式はパルス、磁場は連続的だが、瞬間エネルギーで比較することになれば、ゲインとして比較は可能。

それでも磁場方式のQと同等に比較するのに無理があるのは、電気効率の差による



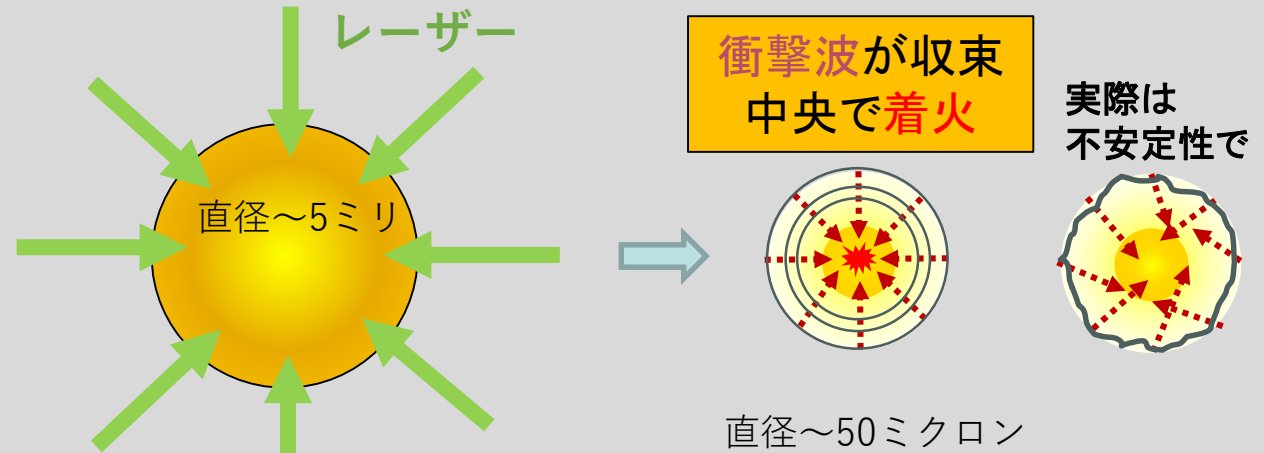
この効率の差から、実用炉に向けたゲイン目標は
磁場方式: 30程度 レーザー方式: 100~200。

5) 日本の発明 高速点火法 別の超短パルスレーザーで着火

① 中心点火法の1/10のエネルギーのレーザーで利得100が達成できるかも

中心点火法 NIFの方式
衝撃波により着火

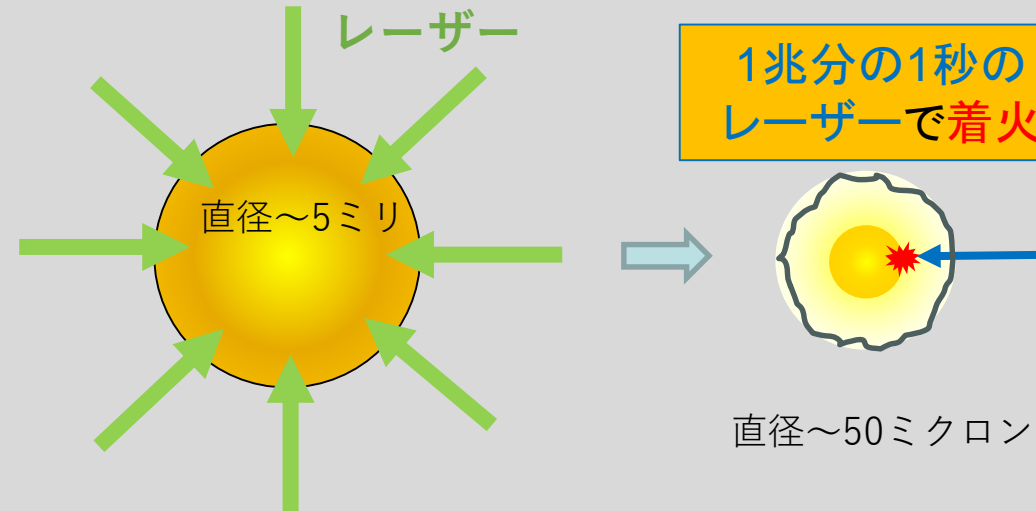
NIFの性能が上がらないのは、
衝撃波の収束がうまくいかない
から。(不安定性が起こる)



1億の1秒のレーザーで爆縮。燃焼は100億の1秒

高速点火法
大阪大学が進む新方式
超短パルスレーザーで着火

まだ発展途上だが実現すれば画
期的。衝撃波点火に失敗しても、
点火できる。レーザーエネル
ギーも減らせるかも。



6) レーザー炉の概念設計

- ①日本は、熱出力720万kWから120万kWまで、色々なレーザー炉を検討してきた
1 パルスの出力が40MJを超えると金属壁容器は使えない。
⇒中心点火では金属壁は不可能。高速点火なら可能かもしれない。

	KOYO	KOYO-Fast	FALCON-D
点火方式	中心点火	高速点火	高速点火
1パルスのエネルギー[MJ]	600	200	40
レーザー周期[毎秒]	12	16	30
核融合熱出力[万kW]	720	320	120
炉壁方式	液体金属壁	液体金属壁	固体壁

7) レーザー炉特有の技術課題 代表例2つ

①大出力なのに毎秒10回も繰り返せるレーザーは開発できるのか

現在の装置で高速の繰り返しができない主な理由は、毎パルスごとの発熱が大きく、冷えるのを待って再調整する必要があるから。

高効率な半導体レーザーの適用で無駄な発熱を大幅に減らせることがわかっており、毎秒10回前後はできない目標ではない。

②今は燃料球を固定してレーザーを当てる。実用炉では、燃料球を弾丸のように入射し、レーザーを当てる。命中精度が出せるのか

ガイドレーザーを使って燃料球の軌道を追跡しつつ、狙いを定めて撃つことが検討された結果がある。

研究そのものがまだ少ないが、技術的に実現可能と考えられている。

7) レーザー炉特有の技術課題

③光学系の寿命が最大の懸念

最大の懸念は、レーザーではなく、**最終光学系**(レンズ、プリズム、ミラーなど、最後に炉心に向けた光学素子)の**寿命**。
レーザーを通す以上、炉心からの放射線を遮る方法はなく、かなり短寿命。

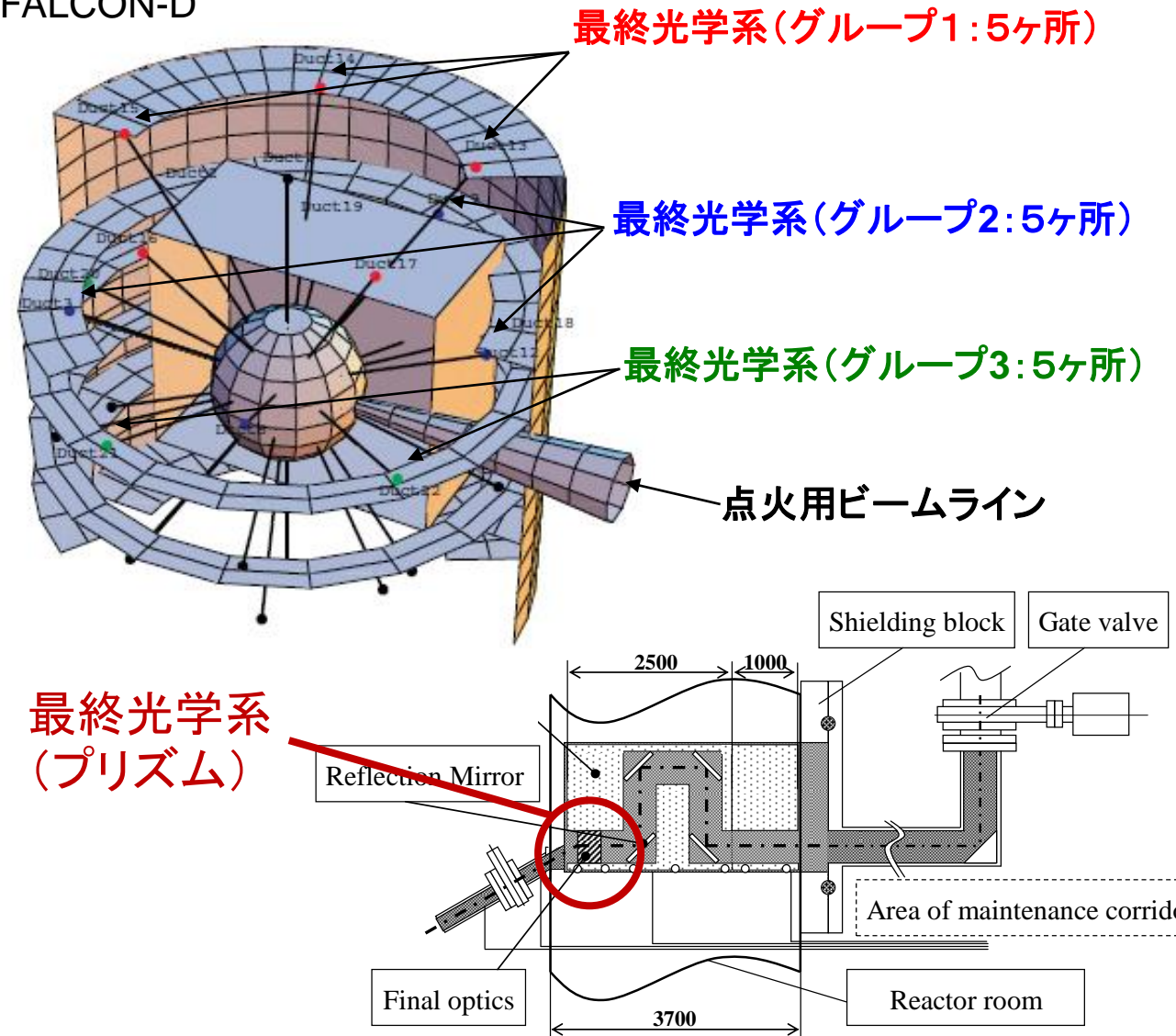
米国NIFは1日数ショット。
実用炉は、1秒に10ショット、
1日に86万ショット、年間に3億ショット

決定打となる解決策はまだ見つからない。

レーザー方式は良い点が多いが、最終光学系の実現性が最大の懸念。これができなければ、すごいレーザーができて、実用化できない。

最終光学系のビッグ・イノベーションが必須。それができればレーザー方式の実用化は近づく。

FALCON-D



レーザー方式フュージョン まとめ

ブランケット設計自由度が高い、出力調整が容易
NIFは利得1.5を14年かかって達成（初期目標は10）
レーザー効率が低いので利得100以上が必要
（磁場方式では30以上）
高速点火法が未来を変える可能性がある
実用化には最終光学系のイノベーションが必須