



IFPiLM

INSTYTUT FIZYKI PLAZMY I LASEROWEJ MIKROSYNTEZY

IM. SYLWESTRA KALISKIEGO

# Obecny stan badań nad syntezą jądrową

Monika Kubkowska

[monika.kubkowska@ifpilm.pl](mailto:monika.kubkowska@ifpilm.pl)



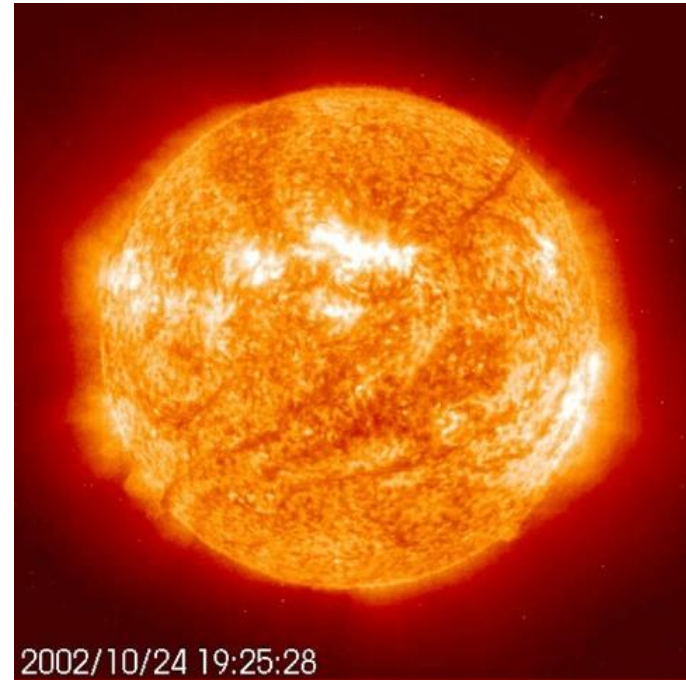
---

9.11.2023

# Plan wykładu

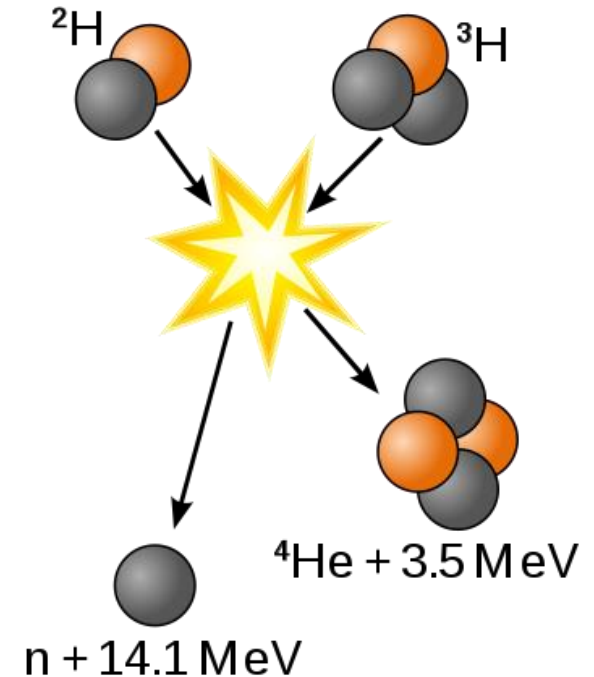
---

1. Dlaczego synteza jądrowa i koncepcje uwięzienia plazmy
2. Utrzymanie magnetyczne:
  - Ruch cząstek w reaktorach termojądrowych i co badamy
  - Metody ogrzewania plazmy
  - Tokamak JET i rekordy
  - Inne urządzenia na drodze do ITERa
3. Utrzymanie inercyjne
  - Metoda pośrednia i bezpośrednia
  - Istota targetów
  - Rekord NIF
4. Podsumowanie



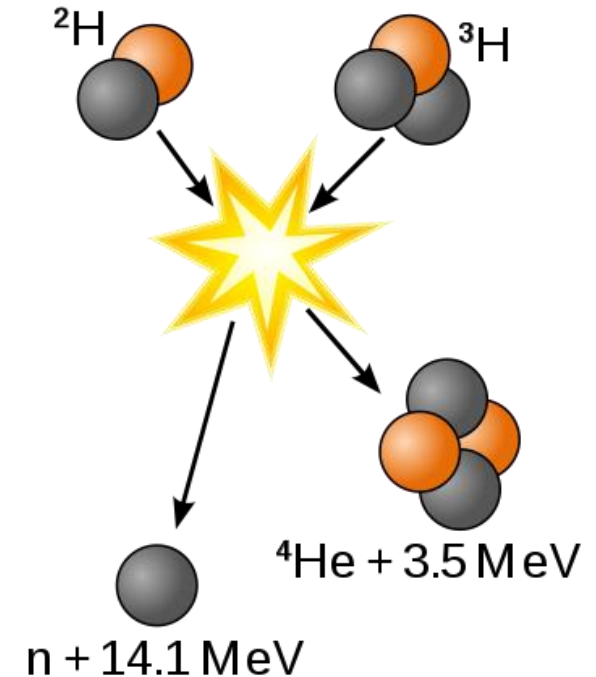
# Dlaczego synteza jądrowa?

- Fuzja to proces zasilający gwiazdy.
- Nauka/badania fuzyjne wskazują, że energia termojądrowa będzie wymagać niewielkich ilości paliwa, wytwarzać bardzo mało odpadów nuklearnych, a jej reakcje można szybko zatrzymać.
- Kryzys klimatyczny uwypukla potrzebę przyspieszenia i zintensyfikowania eksperymentów mających na celu stworzenie nowych form energii, w tym projektowania i rozwoju urządzeń termojądrowych.
- Eksperymenty są potrzebne do sprawdzenia słuszności koncepcji, przetestowania alternatywnych rozwiązań i udoskonalenia wydajności technicznej.



# Dlaczego synteza jądrowa?

- Fuzja to proces zasilający gwiazdy.
- Nauka/badania fuzyjne wskazują, że energia termojądrowa będzie wymagać niewielkich ilości paliwa, wytwarzać bardzo mało odpadów nuklearnych, a jej reakcje można szybko zatrzymać.
- Kryzys klimatyczny uwypukla potrzebę przyspieszenia i zintensyfikowania eksperymentów mających na celu stworzenie nowych form energii, w tym projektowania i rozwoju urządzeń termojądrowych.
- Eksperymenty są potrzebne do sprawdzenia słuszności koncepcji, przetestowania alternatywnych rozwiązań i udoskonalenia wydajności technicznej.

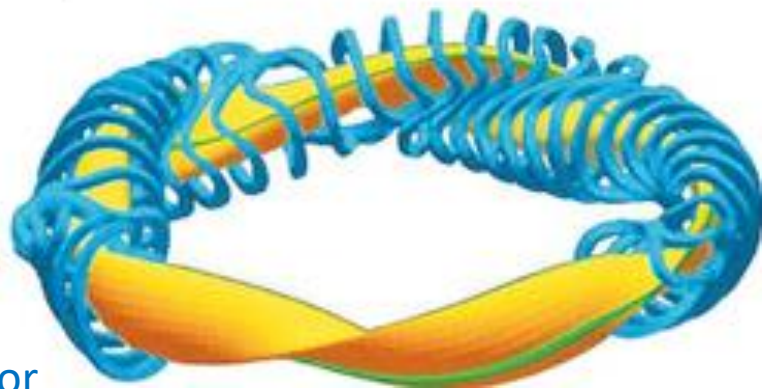
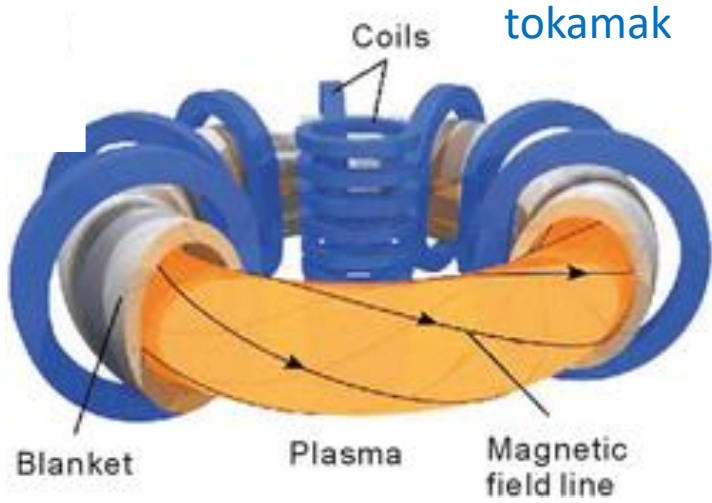


World Economic Forum 2020  
<https://www.weforum.org/agenda/2020/12/fusion-experiments/>

# Uwięzienie plazmy

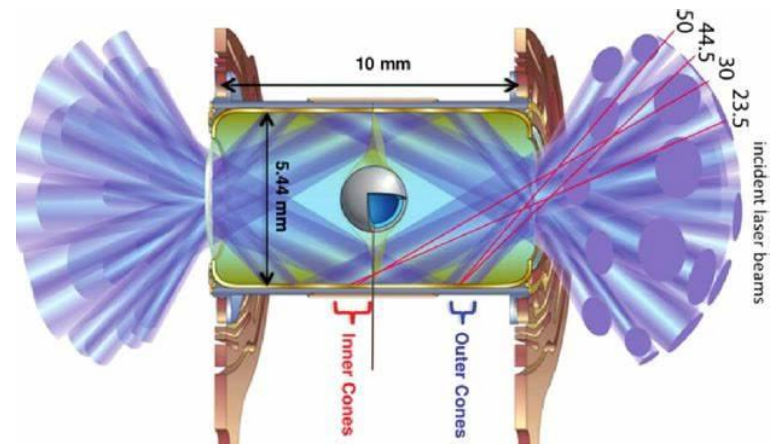
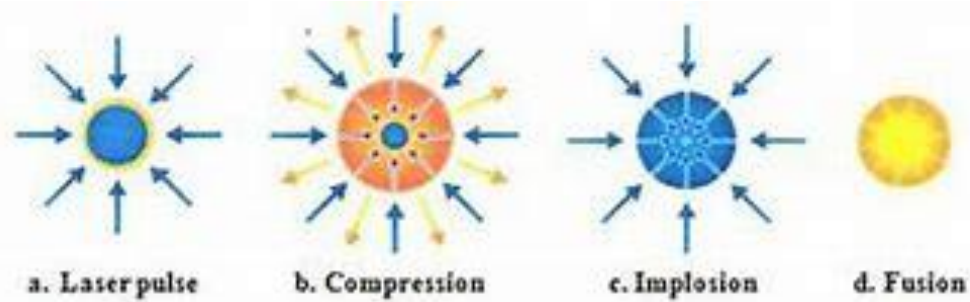
Magnetyczne

tokamak



stellarator

Inercyjne



# Reakcje fuzji

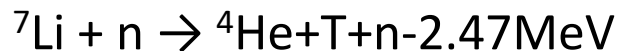
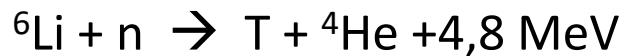
W warunkach ziemskich najbardziej interesujące reakcje to:



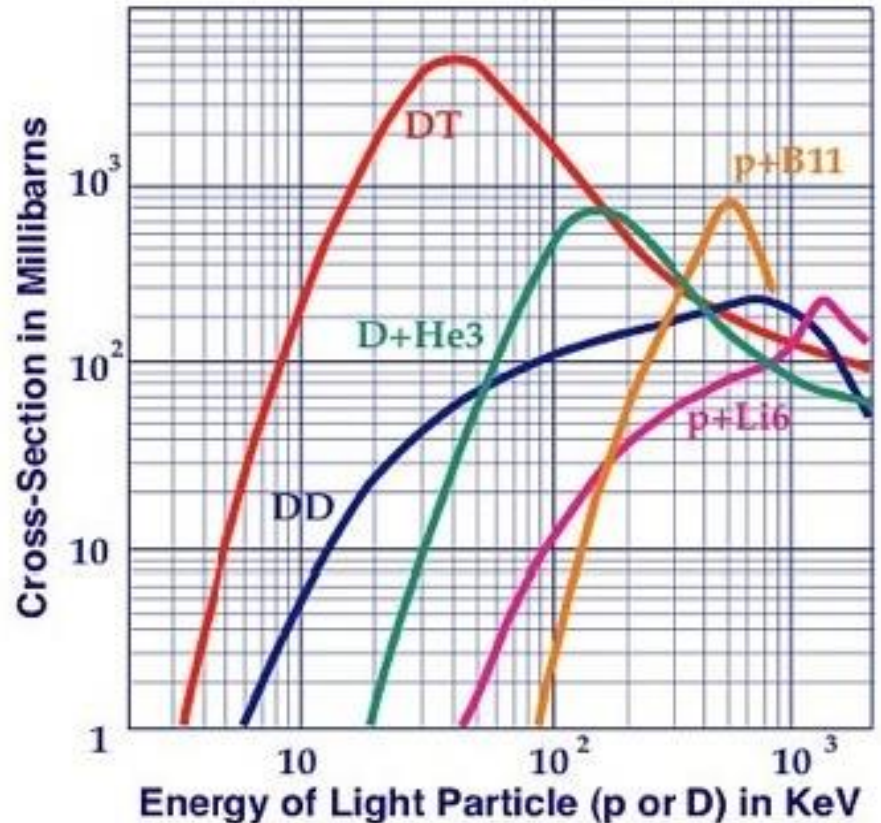
mix D:T → potrzeba  $E=30-40\text{keV} \sim 400$  million °C dla najlepszej wydajności (hot plasma)

D – z wody morskiej – 1 g = 33 mg D

T – z reakcji z Li



**Fusion Reaction Cross-Sections**  
Particles Have Equal Momentum



---

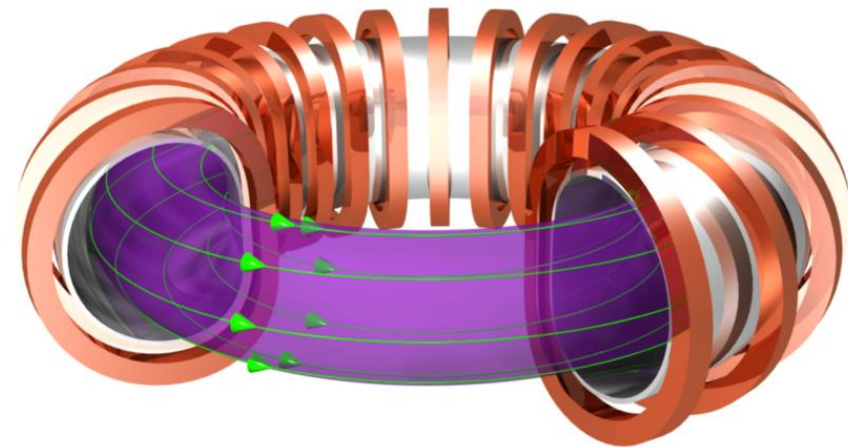
# Koncepcja z magnetycznym utrzymaniem plazmy

# Utrzymanie magnetyczne plazmy

W przypadku toroidalnego systemu utrzymywania, plazma jest ograniczana przez pole magnetyczne. Aby uzyskać równowagę pomiędzy ciśnieniem plazmy i siłami magnetycznymi, konieczna jest transformacja rotacyjna toroidalnego pola magnetycznego. Taka transformacja obrotowa może zapobiec dryfowi kształtu środka prowadzącego cząstki plazmy w kierunku ściany.

Istnieją trzy różne sposoby skręcania pola magnetycznego:

- tworzenie pola poloidalnego przez toroidalny prąd elektryczny;
- obracanie poloidalnego przekroju poprzecznego poprzez rozciąganie powierzchni strumieni wokół torusa;
- Wytworzenie „niepłaksiej” magnetycznej osi.



Y. Xu / Matter and Radiation at Extremes  
1 (2016) 192e200



# Utrzymanie magnetyczne plazmy

W przypadku toroidalnego systemu utrzymywania, plazma jest ograniczana przez pole magnetyczne. Aby uzyskać równowagę pomiędzy ciśnieniem plazmy i siłami magnetycznymi, konieczna jest transformacja rotacyjna toroidalnego pola magnetycznego. Taka transformacja obrotowa może zapobiec dryfowi kształtu środka prowadzącego cząstki plazmy w kierunku ściany.

Istnieją trzy różne sposoby skręcania pola magnetycznego:

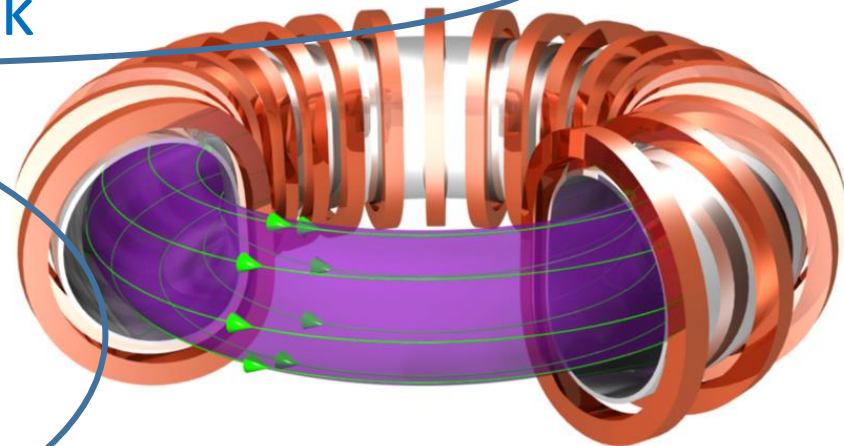
- tworzenie pola poloidalnego przez toroidalny prąd elektryczny;

**tokamak**

- obracanie poloidalnego przekroju poprzecznego poprzez rozciąganie powierzchni strumieni wokół torusa;

**stellarator**

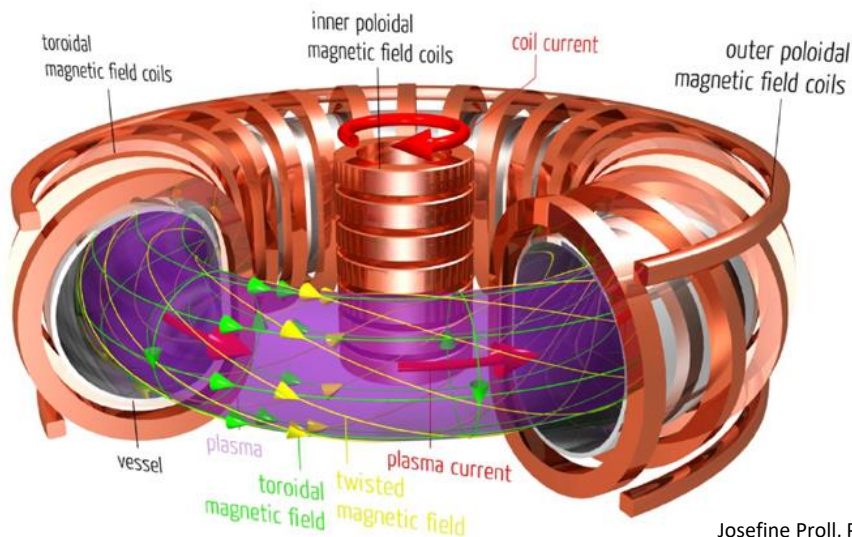
- Wytworzenie „niepłaskiej” magnetycznej osi.



Y. Xu / Matter and Radiation at Extremes  
1 (2016) 192e200

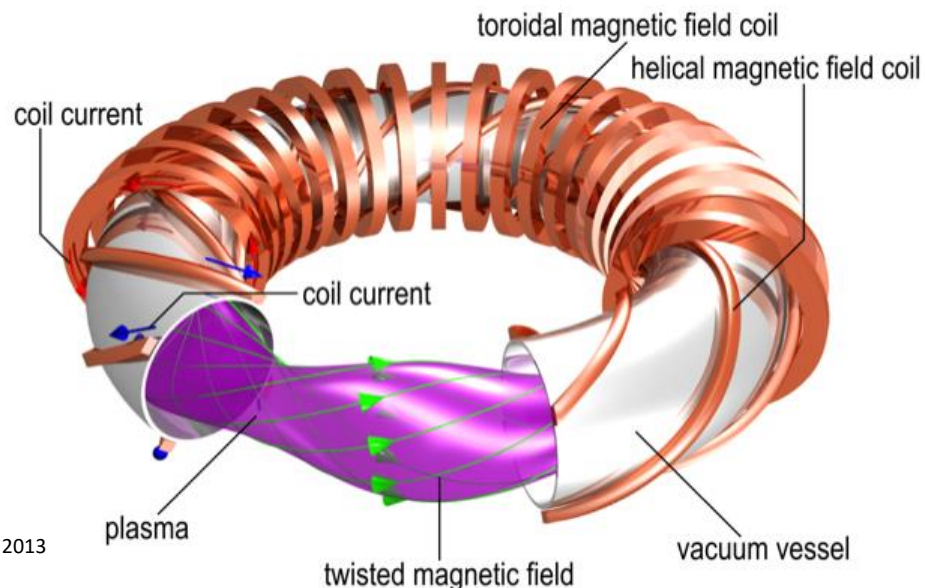
# Tokamak vs stellarator

## tokamak



Josefine Proll, PhD thesis, 2013

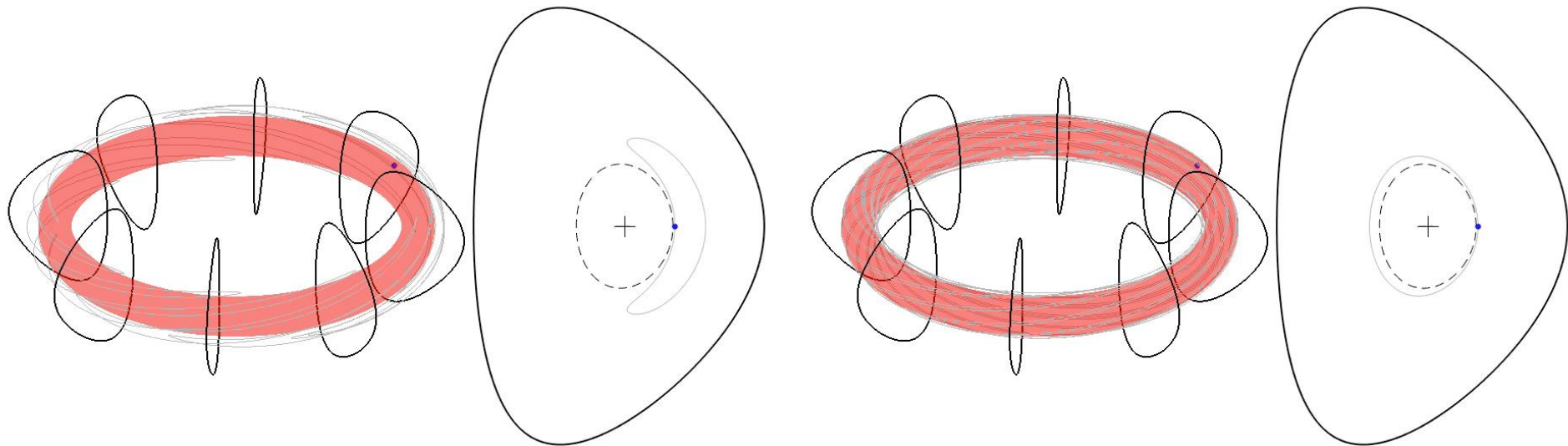
## stellarator



W tokamaku jeden zestaw cewek wytwarza intensywne pole toroidalne, podczas gdy centralny elektromagnes (magnes przewodzący prąd elektryczny) tworzy pole poloidalne, zamykające cząsteczki plazmy. Trzeci zestaw cewek magnetycznych tworzy zewnętrzne pole poloidalne, które kształtuje i pozycjonuje plazmę w torusie. Prąd toroidalny jest zwykle generowany przez transformator, co sprawia, że urządzenie jest podatne na niestabilności wywołane prądem i trudne do pracy w stanie stacjonarnym. Z drugiej strony stellaratory są z natury pozbawione prądu, a zatem mogą utrzymywać plazmę w stanie ustalonym. Jednak bardziej nieskrępowane orbity cząstek w tych urządzeniach mogą prowadzić do intensywnego neoklasycznego transportu cząstek.

# Ruch cząstek w tokamaku

- Dryfy magnetyczne i lustrzane zachowanie cząstek powodują przemieszczanie się cząstek po powierzchniach linii pola magnetycznego
- W rezultacie powstają tak zwane orbity bananowe, ziemniaczane i stochastyczne. Powstają również niestabilności MHD.

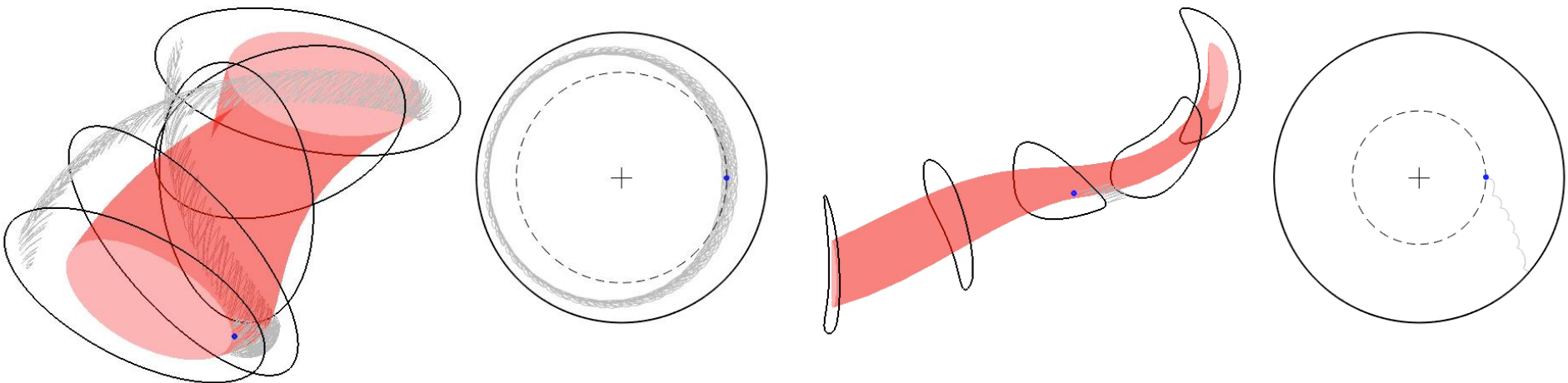


S. Lazerson, 23rd ISHW

# Ruch cząstek w stellaratorze

Stellaratory są zwykle spokojniejsze, ale ogólnie mają słabe zamknięcie

- Trójwymiarowe pole stellaratora tłumi wiele aktywności MHD obecnych w tokamakach
- Pole otwiera możliwość uwięzienia spiralnego (helikalnego) wraz z cząstkami uwięzionymi toroidalnie.
- Pole magnetyczne może powodować utratę cząstek.



S. Lazerson, 23rd ISHW

# Kryterium Lawsona

Warunkiem koniecznym dla wyprodukowania energii w reaktorze termojądrowym, aby zaszła reakcja syntezy – musi być spełnione tzw. kryterium Lawsona (triple product):

$$n \cdot \tau_E \cdot T > \dots$$

$n$  – gęstość plazmy

$\tau_E = W/P_{in}$  czas utrzymania (Energy confinement time)

$T_i$  – temperatura

➤ Break-even ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = 1$ )

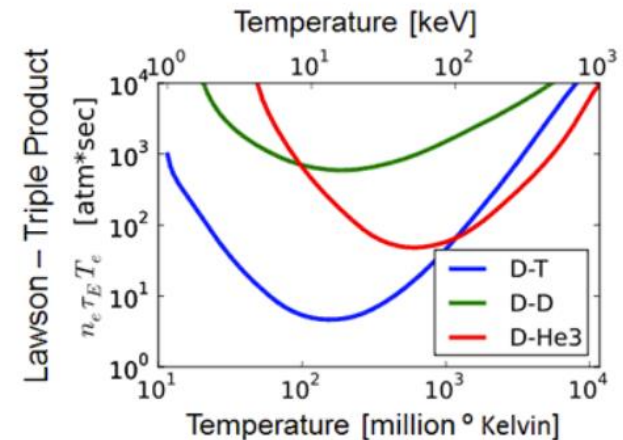
$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Straty są rekompensowane przez podgrzewanie cząstkami  $\alpha$

➤ Zapłon/Ignition ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = \infty$ )

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Podgrzewania cząstkami  $\alpha$  jest wystarczające, aby utrzymać plazmę w wysokiej temperaturze ( $P_{IN} = 0$ )



Public Domain. Author – Dstrozzi (Modified)

# Kryterium Lawsona

Warunkiem koniecznym dla wyprodukowania energii w reaktorze termojądrowym, aby zaszła reakcja syntezy – musi być spełnione tzw. kryterium Lawsona (triple product):

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > \dots$$

$n$  – gęstość plazmy

$\tau_E = W/P_{in}$  czas utrzymania (Energy confinement time)

$T_i$  – temperatura jonowa

## MCF (tokamaki)

- wysokie temperatury (10's keV)

- niska gęstość ( $\sim 10^{20}/m^3$ )

- długi czas utrzymania  $\tau_E$  (1-10s)

→ quasi-stacjonarna praca reaktora

➤ Break-even ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = 1$ )

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s}/m^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Straty są rekompensowane przez podgrzewanie cząstkami  $\alpha$

➤ Zapłon/Ignition ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = \infty$ )

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s}/m^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Podgrzewania cząstkami  $\alpha$  jest wystarczające, aby utrzymać plazmę w wysokiej temperaturze ( $P_{IN} = 0$ )

# Kryterium Lawsona

Warunkiem koniecznym dla wyprodukowania energii w reaktorze termojądrowym, aby zaszła reakcja syntezy – musi być spełnione tzw. kryterium Lawsona (triple product):

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > \dots$$

$n$  – gęstość plazmy

$\tau_E = W/P_{in}$  czas utrzymania (Energy confinement time)

$T_i$  – temperatura jonowa

➤ Break-even ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = 1$ )

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Straty są rekompensowane przez podgrzewanie cząstek

➤ Zapłon/Ignition ( $Q_{fus} = P_{fus} / P_{IN} = \infty$ )

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3 \quad (T_i \approx 10\text{-}20\text{keV})$$

Podgrzewania cząstkami  $\alpha$  jest wystarczające, aby utrzymać

temperaturze ( $P_{IN} = 0$ )

## MCF (tokamaks)

- wysokie temperatury (10's keV)

- niska gęstość ( $\sim 10^{20}/\text{m}^3$ )

- długi czas utrzymania  $\tau_E$  (1-10s)

➔ quasi-stacjonarna praca reaktora

## ICF (fuzja laserowa)

- niższa temperatura

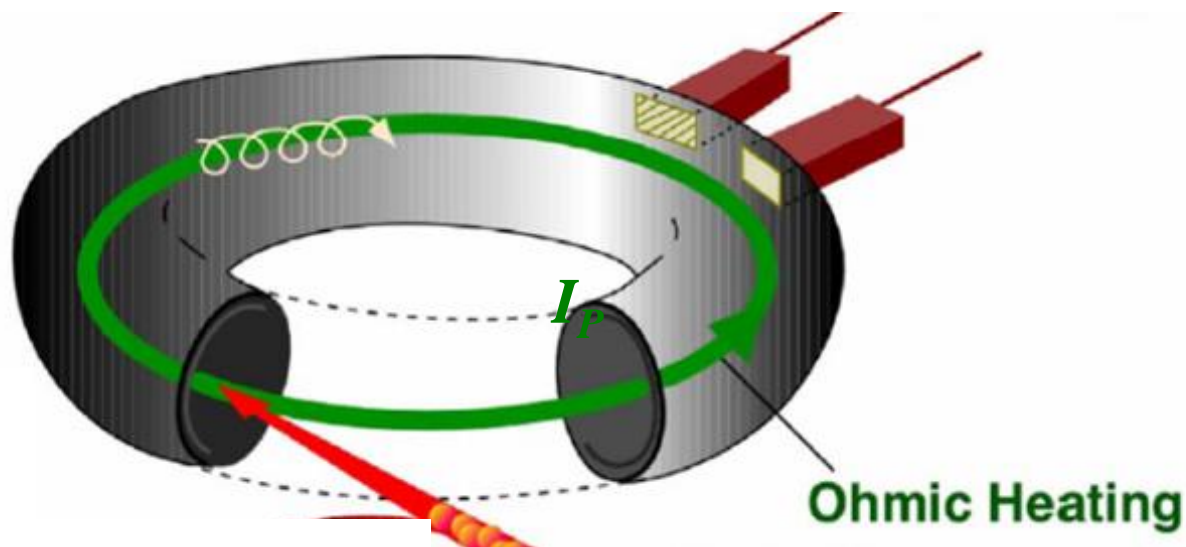
- wysoka gęstość ( $\sim 10^{31}/\text{m}^3$ )

- krótki czas utrzymania  $\tau_E$  (kilka ps =  $10^{-11}\text{s}$ )

➔ Reaktor impulsowy

# Metody grzania plazmy w MCF

**Grzanie omowe:** Plazma jest przewodnikiem elektrycznym o pewnym oporze, więc indukując w niej przepływ prądu za pomocą np. zewnętrznego transformatora, możliwe jest jej ogrzanie. Wydajność takiego grzania zależy od oporności plazmy, która jest proporcjonalna do  $T_e^{-3/2}$ . Oznacza to, że wraz ze wzrostem temperatury plazmy, ten typ grzania będzie coraz mniej wydajny, a maksymalne temperatury osiągnięte przez grzanie omowe w tokamakach są rzędu setek eV.

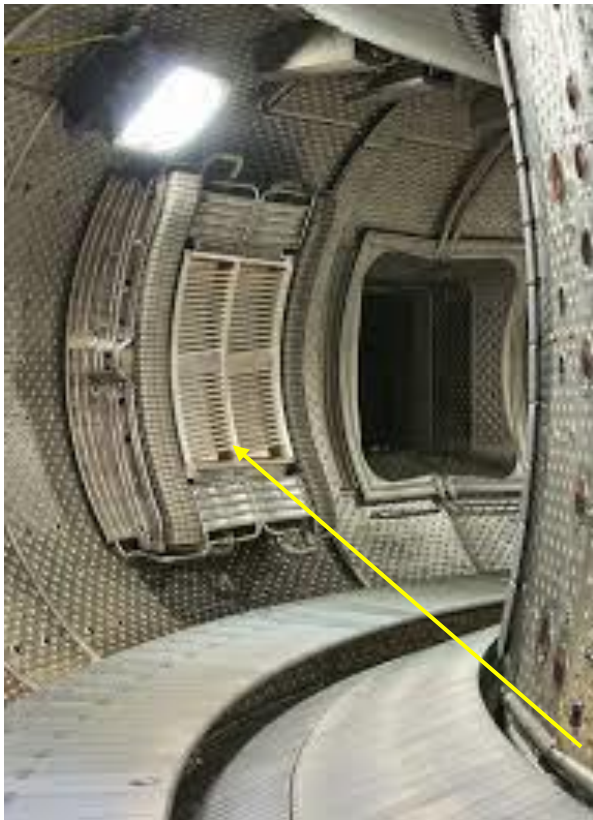




# Metody grzania plazmy w MCF

Grzanie elektronową lub jonową częstotliwością cyklotronową (Electron (Ion) Cyclotron Resonance Heating, ECRH, ICRH) - Wartości częstotliwości cyklotronowej dla elementów plazmy są rzędu MHz - GHz. Wygenerowana fala elektromagnetyczna o częstotliwości równej częstotliwości plazmy

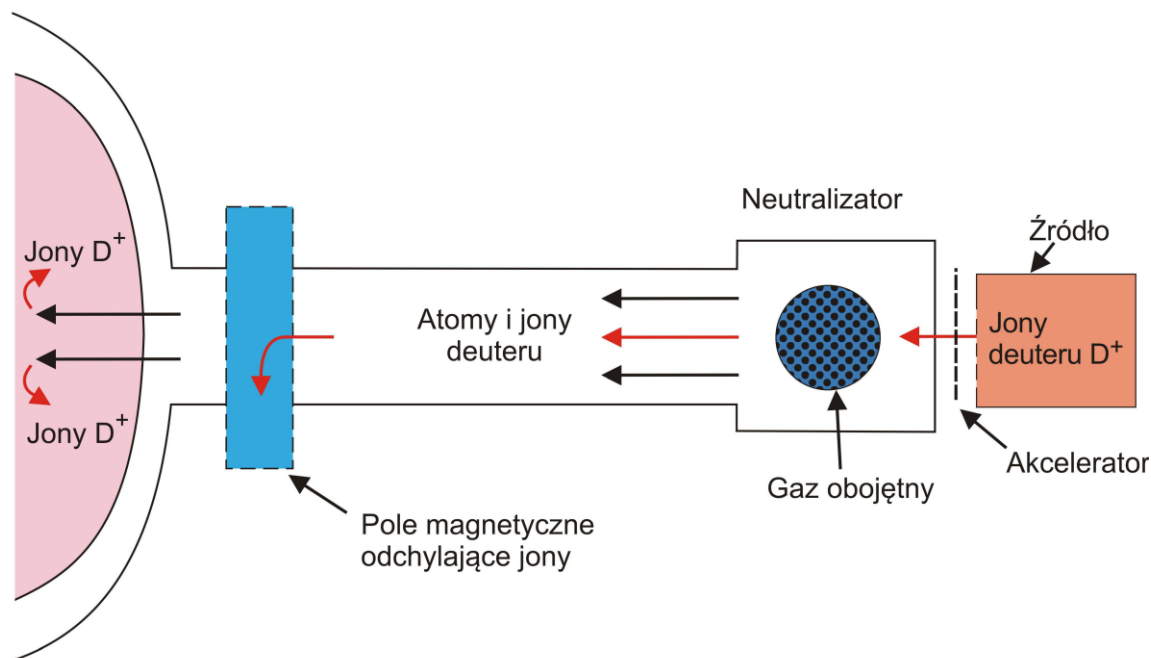
cyklotronowej wybranego składnika, spowoduje rezonans między nimi i fala przekaże cząstkom energię, które w wyniku kolizji przekażą energię sąsiednim jonom i elektronom, zwiększając w ten sposób temperaturę



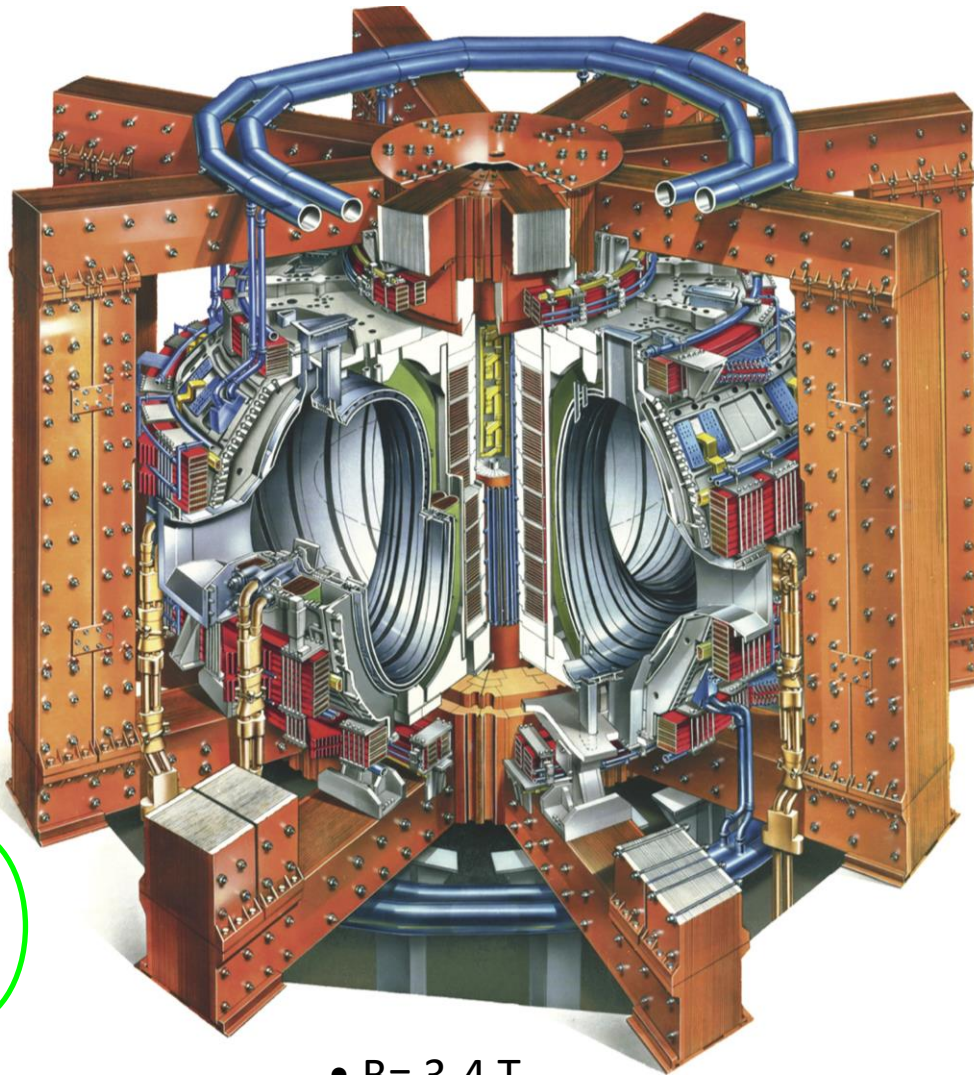
Zdjęcie anteny ICRH tokamaka WEST, CEA, Francja

# Metody grzania plazmy w MCF

Grzanie wiązkami neutralnymi (Neutral Beam Injection, NBI) - do plazmy wstrzykuje się wysokoenergetyczne neutralne atomy (wodór, deuter, tryt), które ulegają jonizacji i mają dużo większą prędkość od średniej i na skutek kolejnych zderzeń przekazują swoją energię pozostałym cząstkom, zwiększając w ten sposób temperaturę.

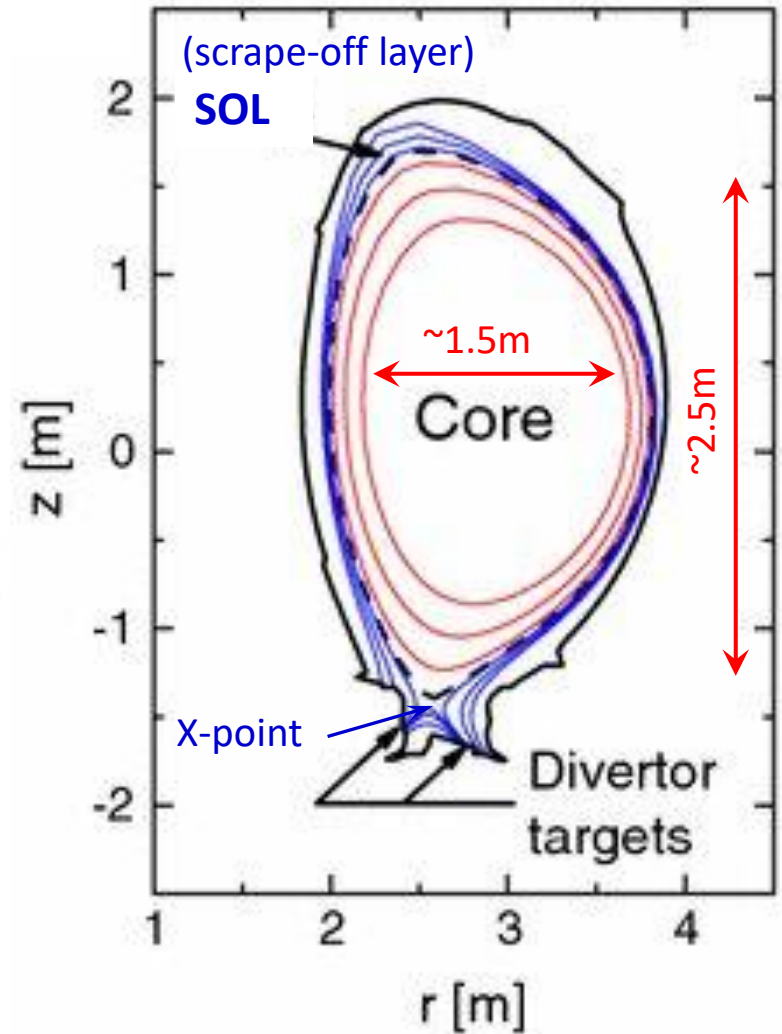


# Tokamak JET (Culham, UK)

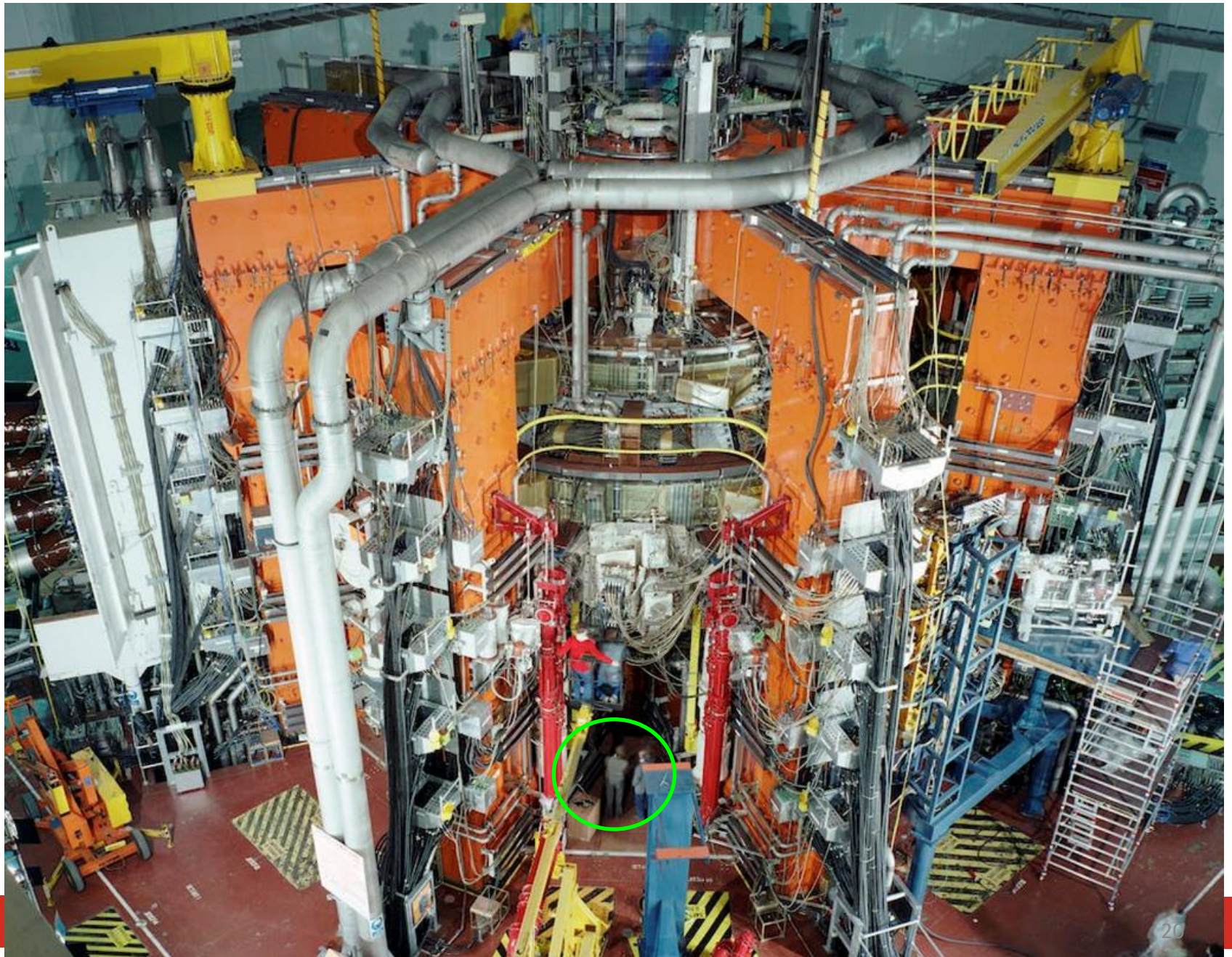


- $B = 3-4 \text{ T}$
- $I = 2-4 \text{ MA}$

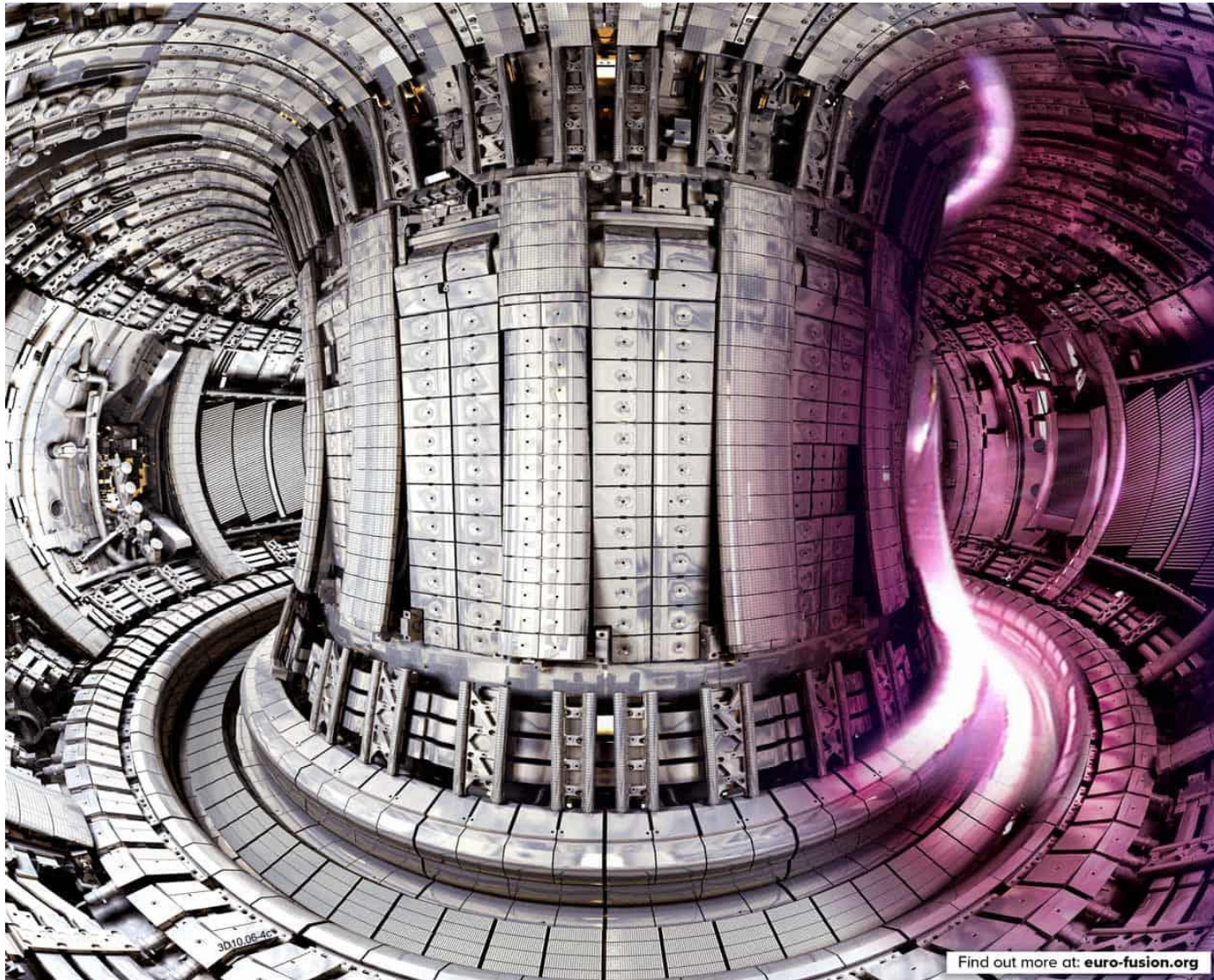
Volume =  $80 \text{ m}^3$



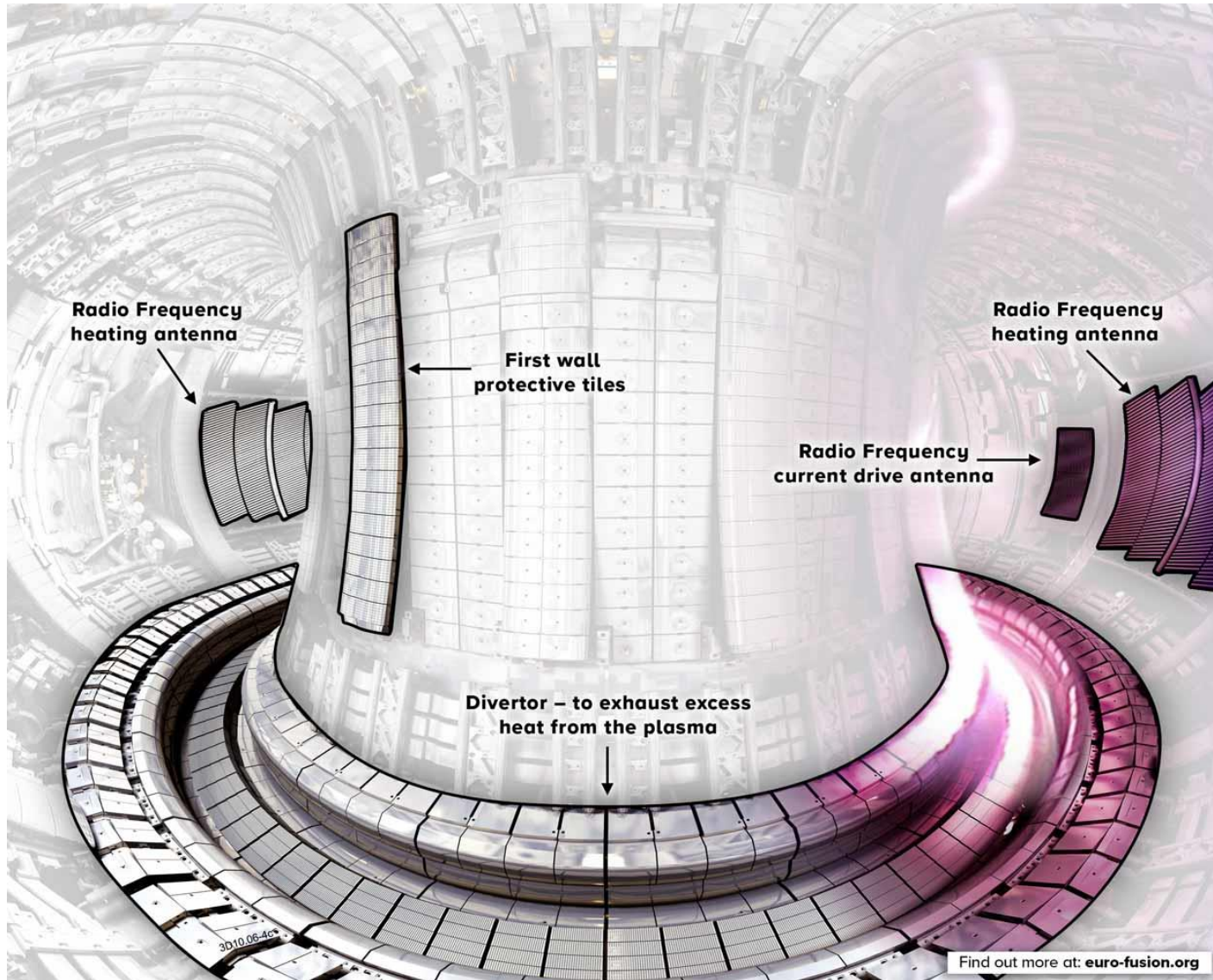
# Tokamak JET



# Tokamak JET

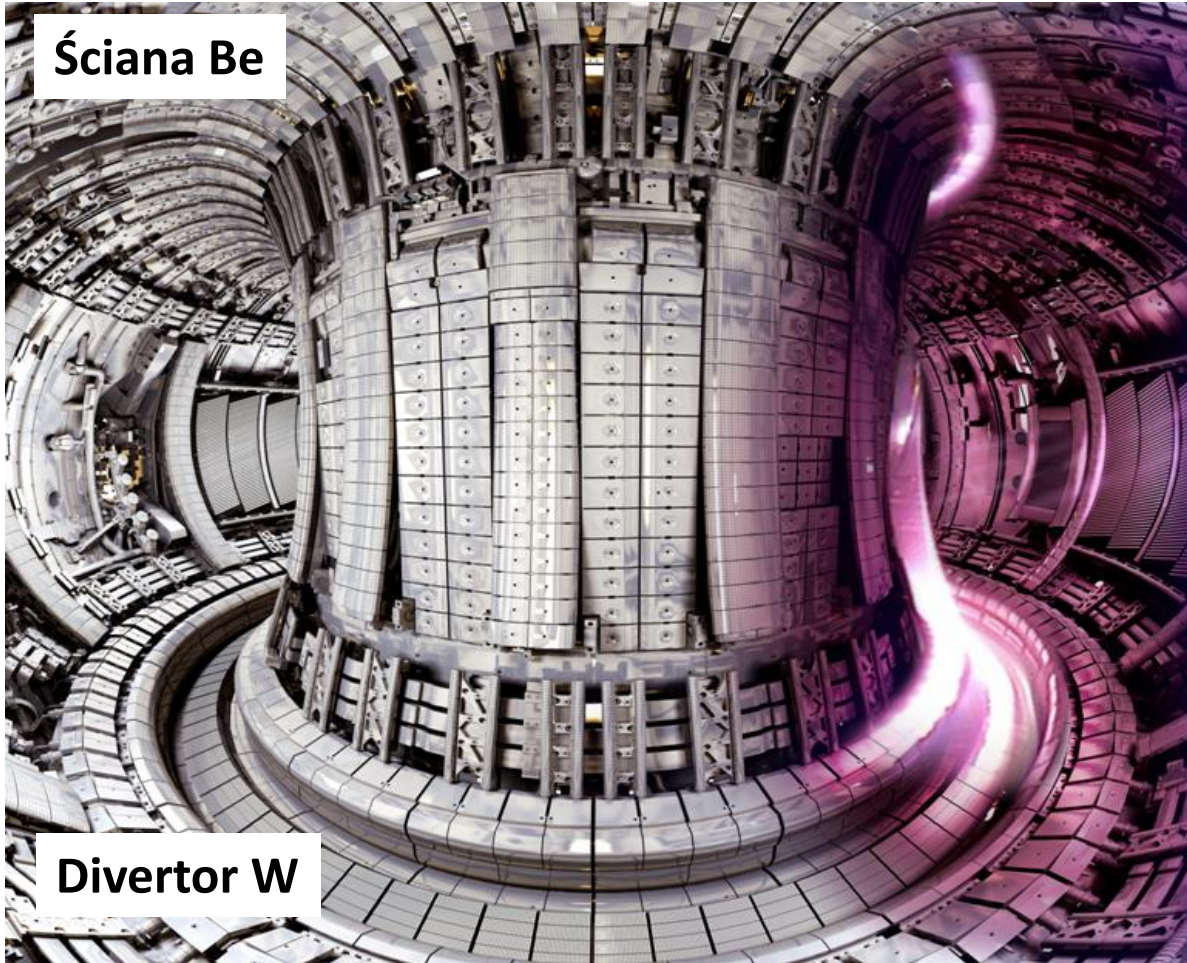


# Tokamak JET



# Tokamak JET

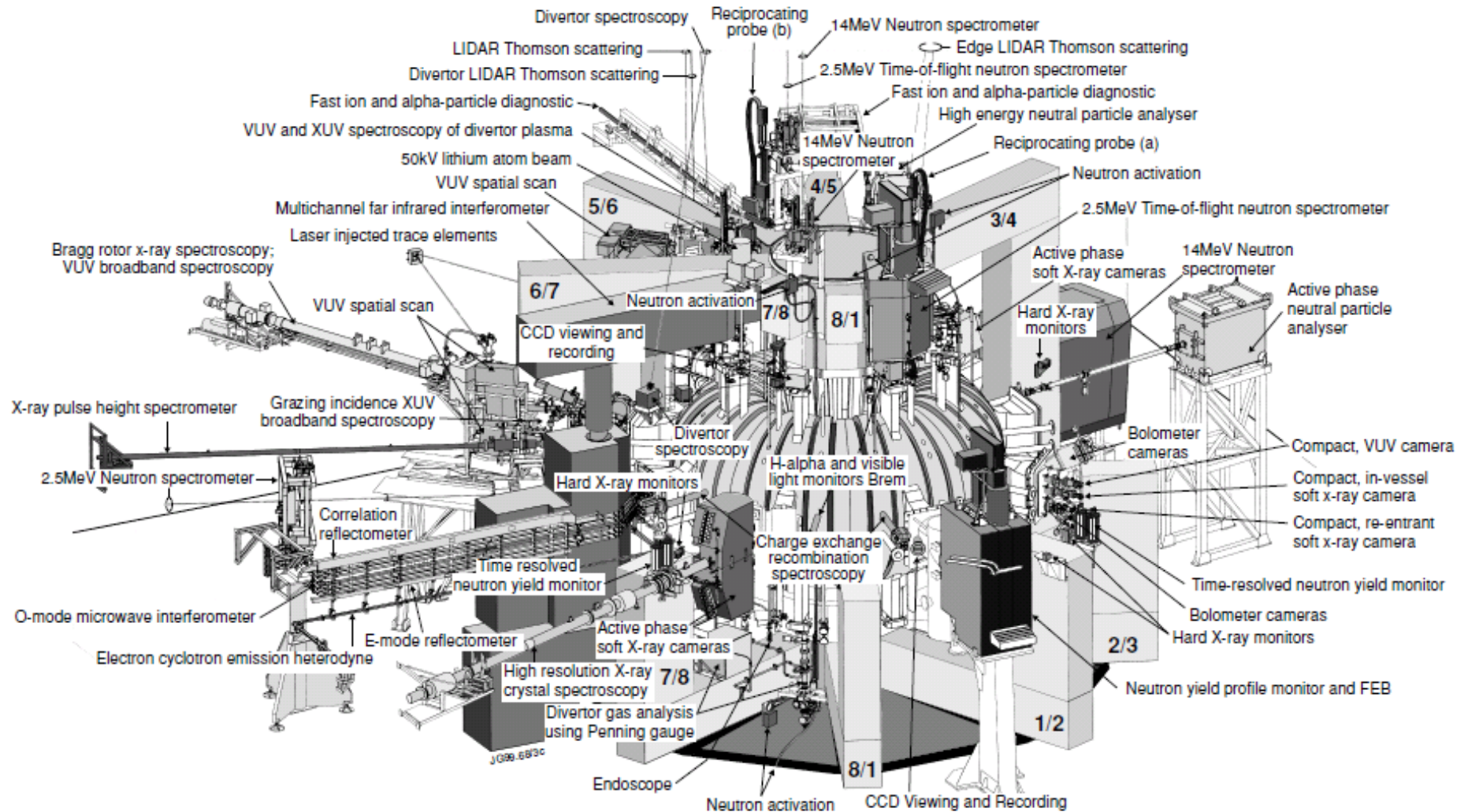
Ściana Be



Divertor W

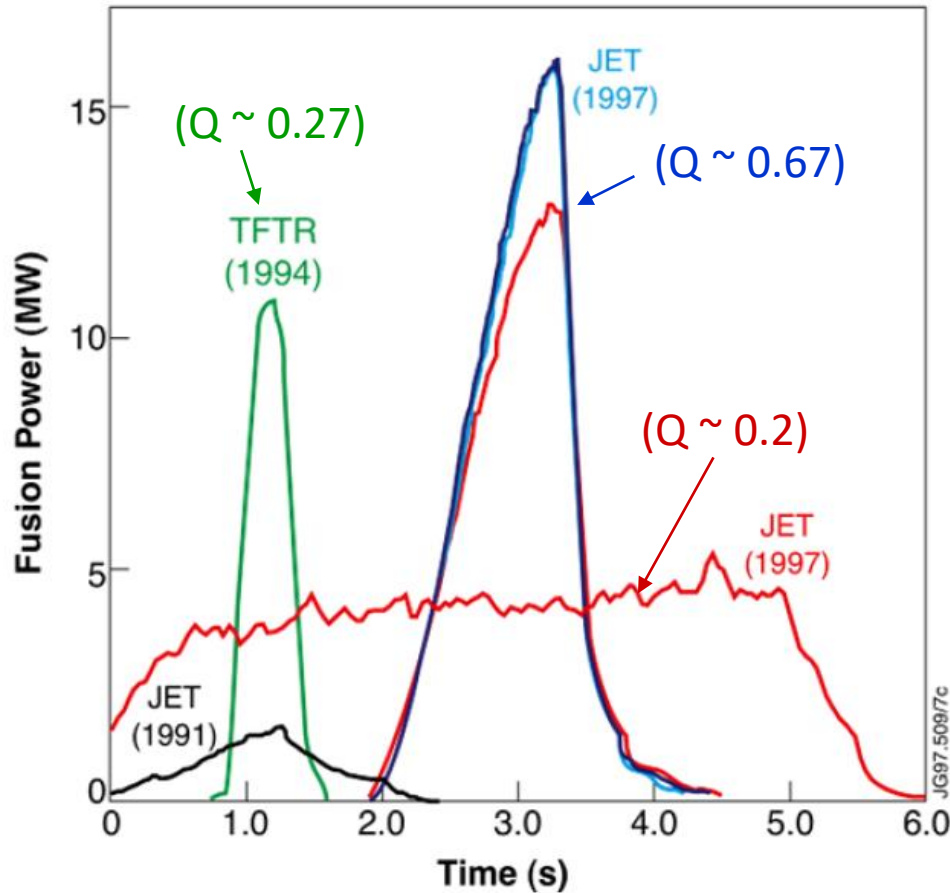
- Do lat 90, większość tokamaków było węglowych, w tym JET
- wady węgla – retencja paliwa, erozja
- Obecnie JET jest urządzeniem z elementami wykonanymi z Be i W:
  - wytrzymałość termiczna,
  - minimalizacja produkcji zanieczyszczeń z uwzględnieniem ich masy atomowej w celu ograniczenia strat radiacyjnych,
  - modyfikacja powierzchni materiałów pod wpływem oddziaływania z plazmą,
  - właściwości mechaniczne i konstrukcyjne,
  - trwałość oraz bezpieczeństwo pracy.

# Diagnostyki JET





# Eksperymenty D-T na różnych urządzeniach - pierwsze rekordy



- 1994-96 (TFTR – Princeton USA)  
10.7 MW / 40 MW

- 1997 (DET1 on JET)  
16 MW/24 MW

- 1997 (DTE1 on JET)  
4 MW / 20 MW

Urządzenia ze ścianami C!

Głównym celem eksperymentów JET podczas DTE2 było uzyskanie ciągłej mocy z fuzji, cel: **10MW przez co najmniej 5 s.**

# Najlepsze wyładowanie stacjonarne podczas DTE2 w JET

→ Uzyskano światowy rekord !

## T-rich hybrid plasma

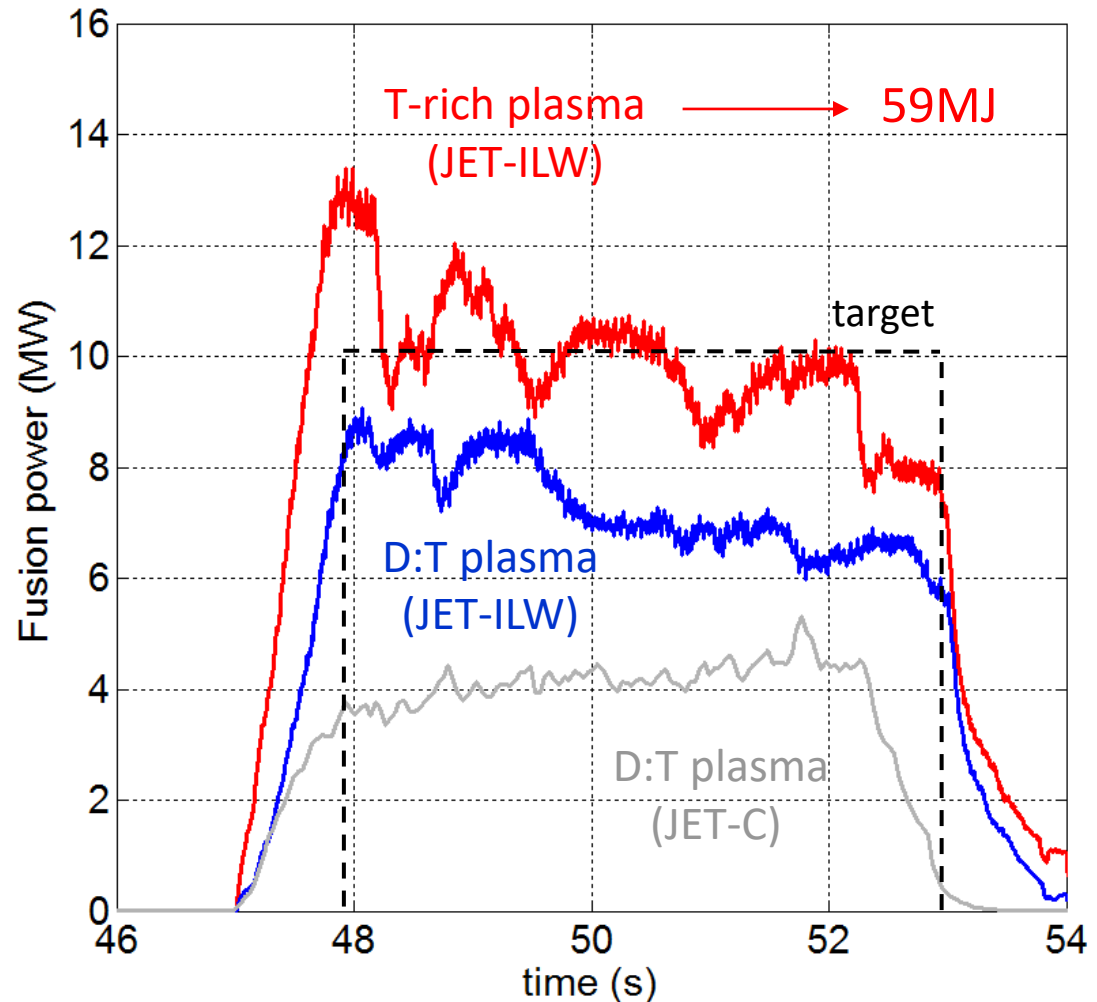
- $P_{IN} = 33\text{MW}$
- $P_{fus} = 10\text{MW}$  (5s)
- $Q_{fus} = P_{fus}/P_{IN} = 0.3$  (5s)  
(\*700-800 MW pobierane przez cewki)

## 50:50 D:T hybrid plasma

- $P_{IN} = 33\text{MW}$
- $P_{fus} = 7.4\text{MW}$  (5s)
- $Q_{fus} = P_{fus}/P_{IN} = 0.23$  (5s)

## 50:50 D:T baseline plasma

- $P_{IN} = 24\text{MW}$
- $P_{fus} = 4\text{MW}$  (4s)
- $Q_{fus} = P_{fus}/P_{IN} = 0.17$  (4s)



(Oscillations due to non-constant input power)

# Rekordowe wyładowanie #99971

- Rekordowe wyładowanie zostało wykonane 21.12.2021 r. ok. 14:30 CET
- $B_T = 3.85 \text{ T}$ ,  $I_p = 2.5 \text{ MA}$
- NBI=28-30 MW
- ICRH=4 MW,  $f=29 \text{ MHz}$  dla  $N=1 \text{ D}$
- $n_{e, dl} = 13 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$
- Temperatura w samym centrum plazmy wynosiła **150 mln ° C**
- D:T 15:85 - Plazma była bogata w tryt o stężeniu około 85 %.
- 0.1 mg Trytu, 0.07 mg Deuteru (aby uwolnić te same 59 MJ, należałoby spalić ponad 1kg gazu ziemnego lub 2kg węgla kamiennego)

Źródło: the EUROfusion consortium

# Wyładowanie z największą mocą reakcji podczas DTE2 na JET

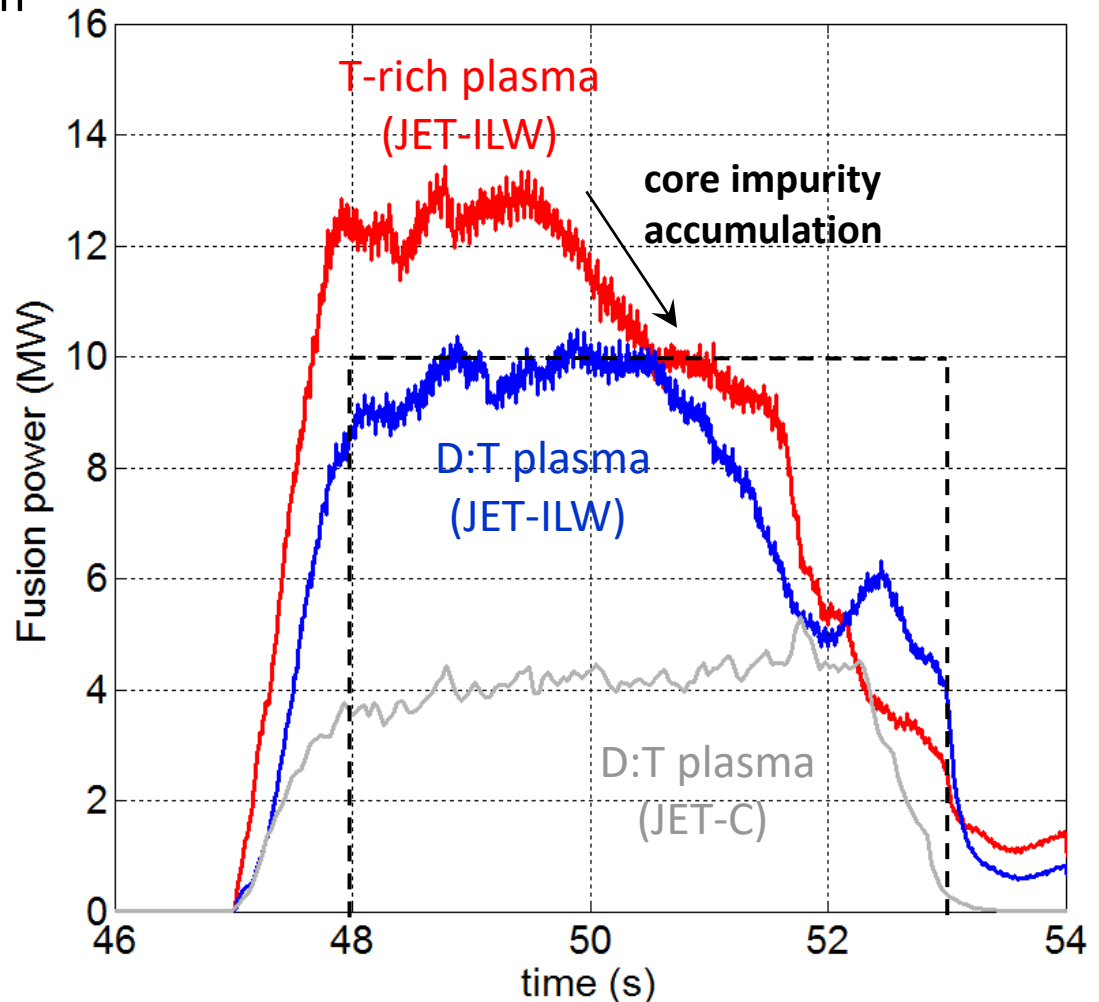
→ Niektóre wyładowania przekraczały  $P_{\text{fus}}=10$  MW na kilka sekund, jednak nie mogły zostać utrzymane na dłużej niż 5 s, ze względu na niestabilne zasilanie, czy akumulacje zanieczyszczeń w centrum plazmy

## T-rich hybrid plasma

- $P_{\text{IN}}=33\text{MW}$
- $P_{\text{fus}} = 12.5\text{MW}$  (2s)
- $Q_{\text{fus}} = P_{\text{fus}}/P_{\text{IN}} = 0.38$  (2s)

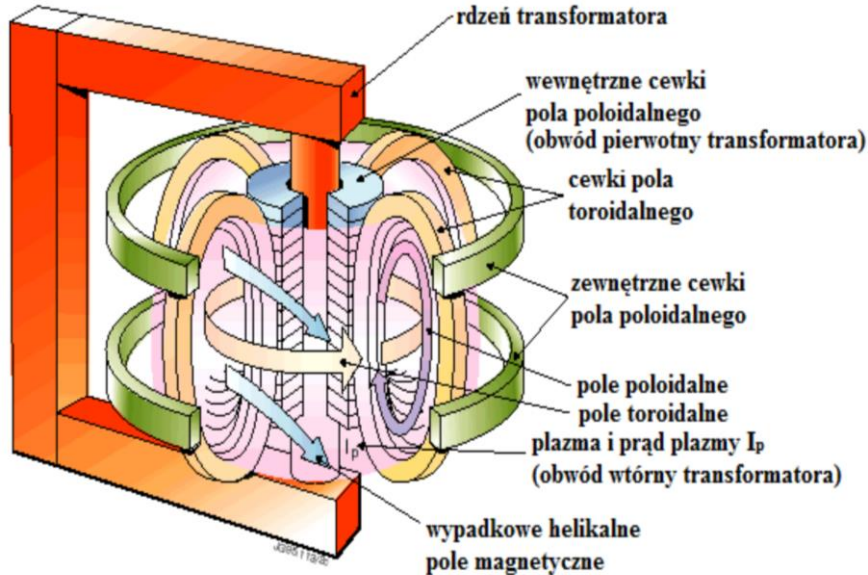
## 50:50 D-T hybrid plasma

- $P_{\text{IN}}=33\text{MW}$
- $P_{\text{fus}} = 10\text{MW}$  (2s)
- $Q_{\text{fus}} = P_{\text{fus}}/P_{\text{IN}} = 0.3$  (2s)



# Dlaczego nie dłużej niż 5 s?

W układzie JET cewki pola magnetycznego wykonane są z miedzi chłodzonej wodą.

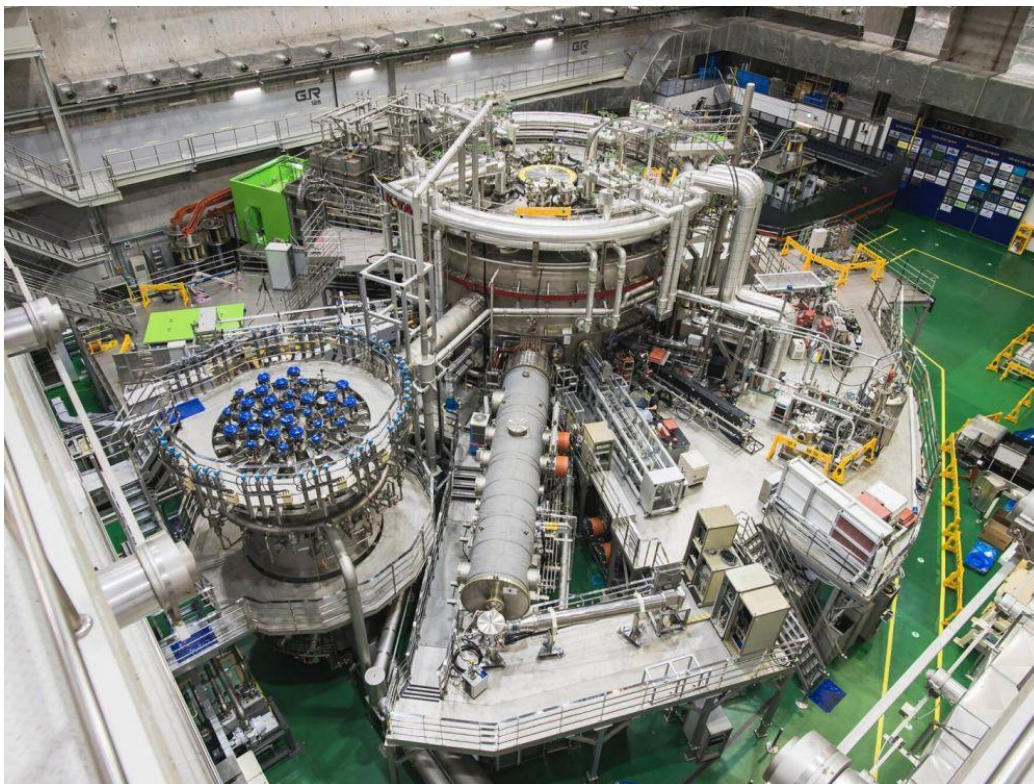


Miedziane elektromagnesy na JET, nagrzewają się podczas swojego funkcjonowania.

5 s to już  $\times 10$  razy dłużej niż typowa skala czasowa procesów transportu ciepła wewnątrz plazmy, dlatego przyglądamy się warunkom stacjonarnym.

**ITER i przyszłe elektrownie termojądrowe będą wykorzystywać magnesy nadprzewodzące, chłodzone ciekłym helem, co wydłuży czas utrzymywania plazmy.**

# Jak te wyniki mają się do ostatniego rekordu koreańskiego KSTAR?



PFC: C (grafit lub CFC)  
stal 316L  
stop CuCrZrMg

W grudniu 2020 r. KSTAR ustanowił rekord utrzymując plazmę przez 20 s, jednak:

- w temperaturze 100 mln °C
- dzięki nadprzewodnikowym magnesom
- KSTAR nie ma możliwości pracy z D-T jako mieszkanką paliwową,
- nie można zbadać wpływu reakcji fuzji na plazmę w takim stopniu jak JET.

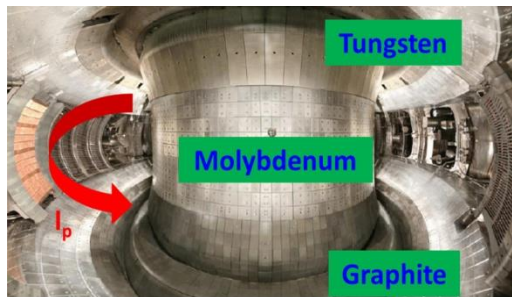
# Jak te wyniki mają się do ostatniego rekordu czasu trwania na chińskim tokamaku EAST?



W grudniu 2021r w EAST osiągnięto czas utrzymywania plazmy 17 min 36 s

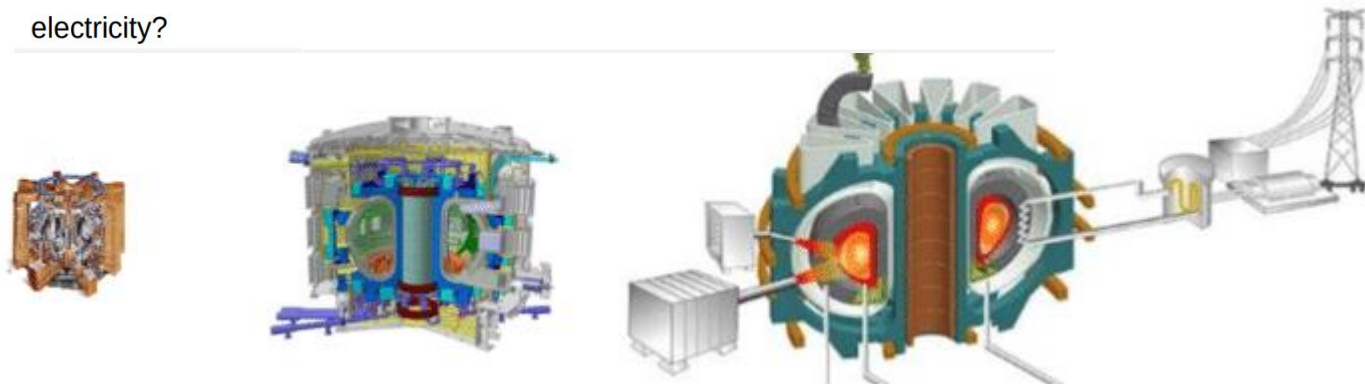
jednak:

- w temperaturze 70 mln °C
- dzięki nadprzewodnikowym magnesom
- EAST nie ma możliwości pracy z DT jako mieszanką paliwową,
- w EAST gęstość była około trzy razy niższa niż w JET
- czas ograniczenia energii w EAST jest o około 10 razy krótszy niż w JET



# Jakie są kolejne kroki w kierunku energii syntezy termojądrowej?

Parameter	JET (2021)	ITER	EU-DEMO
Plasma radius	2.96 meters	6.2 meters	9 meters
Plasma volume	79 m <sup>3</sup>	840 m <sup>3</sup>	2519 m <sup>3</sup>
Maximum plasma pulse duration	30 seconds, of which 5 seconds** at high power	1000 seconds	2 hours
Magnetic field	3.45 Tesla	5.3 Tesla	5.9 Tesla
Fusion power	10-15 MW heat for 5 seconds**	500 MW* heat for more than 300 seconds (objective)	2000 MW of heat, 500 MW of electricity*** (objective)
External plasma heating	40 MW heat	50 MW heat	50 MW heat
Performance ( <i>fusion power / external heating</i> )	0.25 to 0.375 for 5 seconds** (targeted)	10 (objective)	40 (objective)
Produce electricity?	No	No	Yes

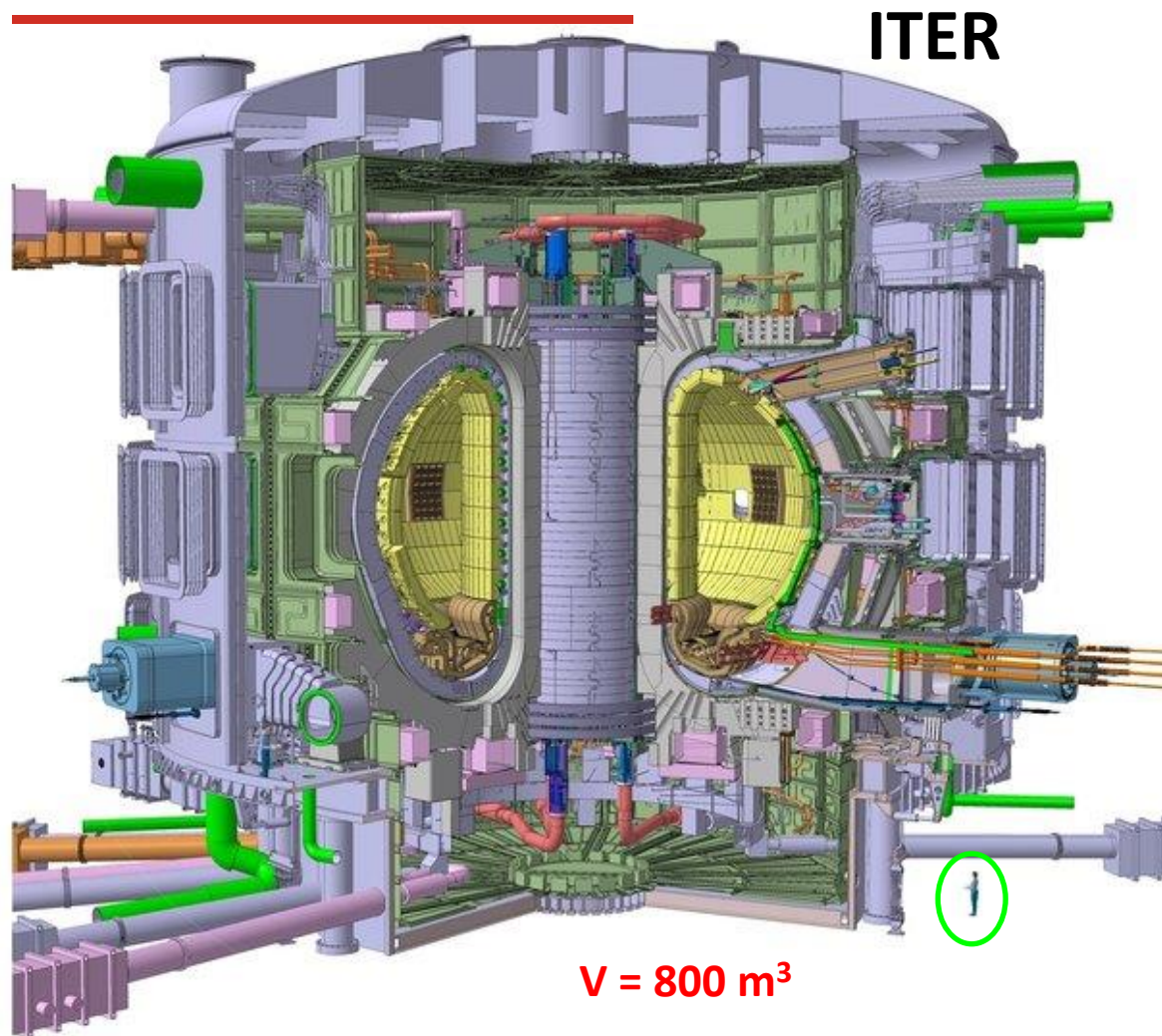




# Następne urządzenie D-T: ITER



Cewki Cu bez aktywnego chłodzenia  
→ Wyładowania < 10-20s



Cewki nadprzewodzące + aktywne chłodzenie  
→ długie wyładowania (10's min.)

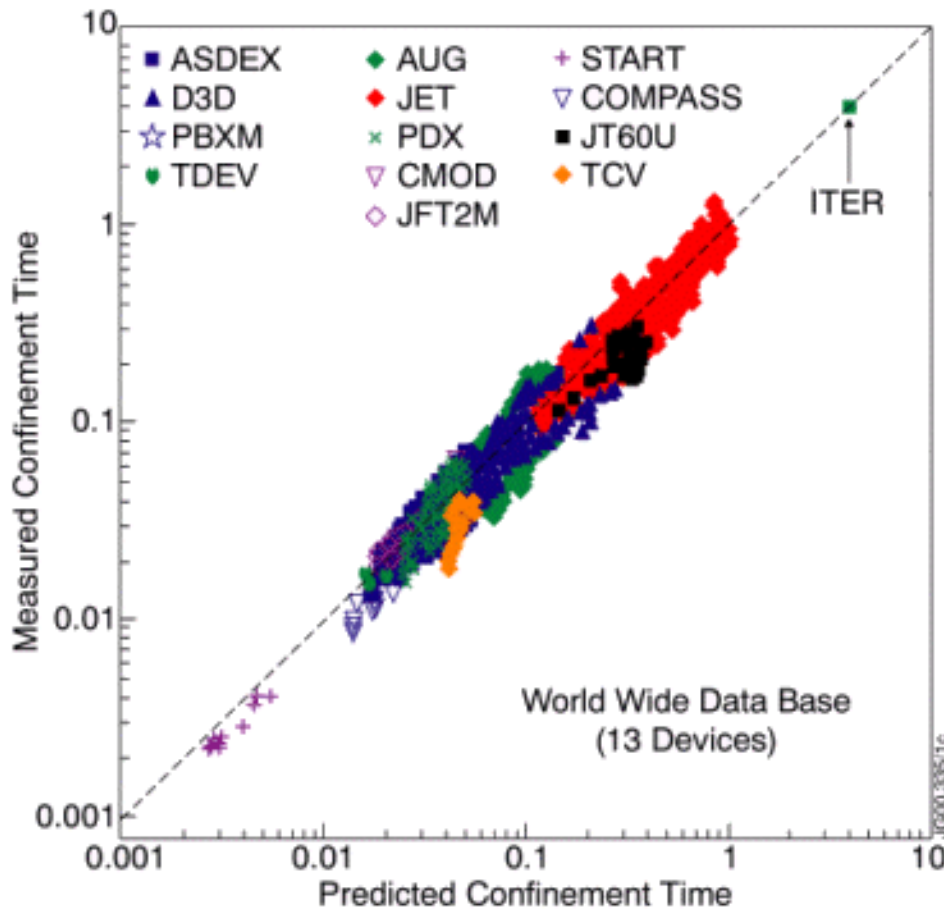
# Prawo skalowania

$$\tau_{E \text{ IPB98}} = 0.056 I_p^{0.93} B^{0.15} P_{heat}^{-0.69} n^{0.41} M^{0.19} R^{1.39} a^{0.58} k^{0.78}$$

Prąd plazmy

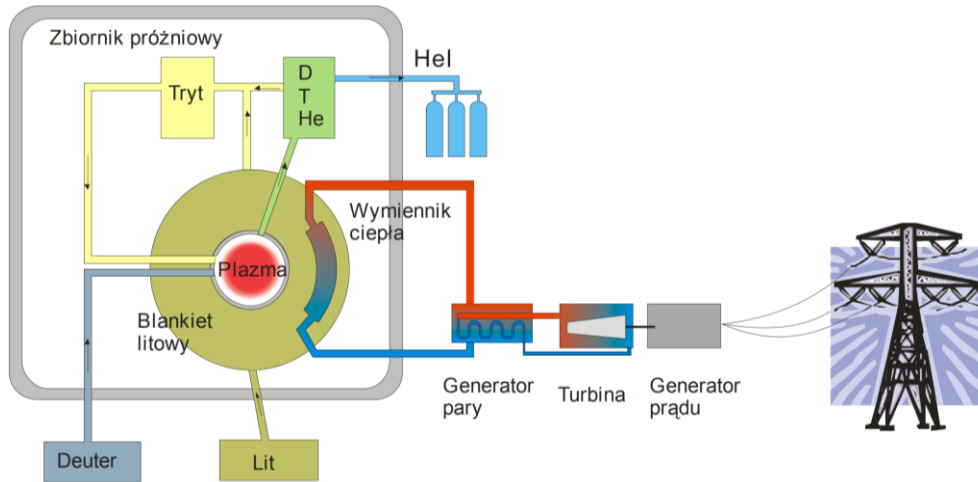
Masa jonowa

Rozmiar urządzenia  
(objętość plazmy)



- Uwięzienie energii wzrasta wraz z prądem plazmy i jej objętością
- Słaba zależność od masy głównego jonu (efekt izotopowy)

# Ile paliwa potrzeba do elektrowni termojądrowej?



Duża elektrownia termojądrowa wytwarzająca **1500 megawatów (1,5 GW)** energii elektrycznej

dziennie zużywałaby:

**~600 gramów trytu**

**~400 gramów deuteru.**

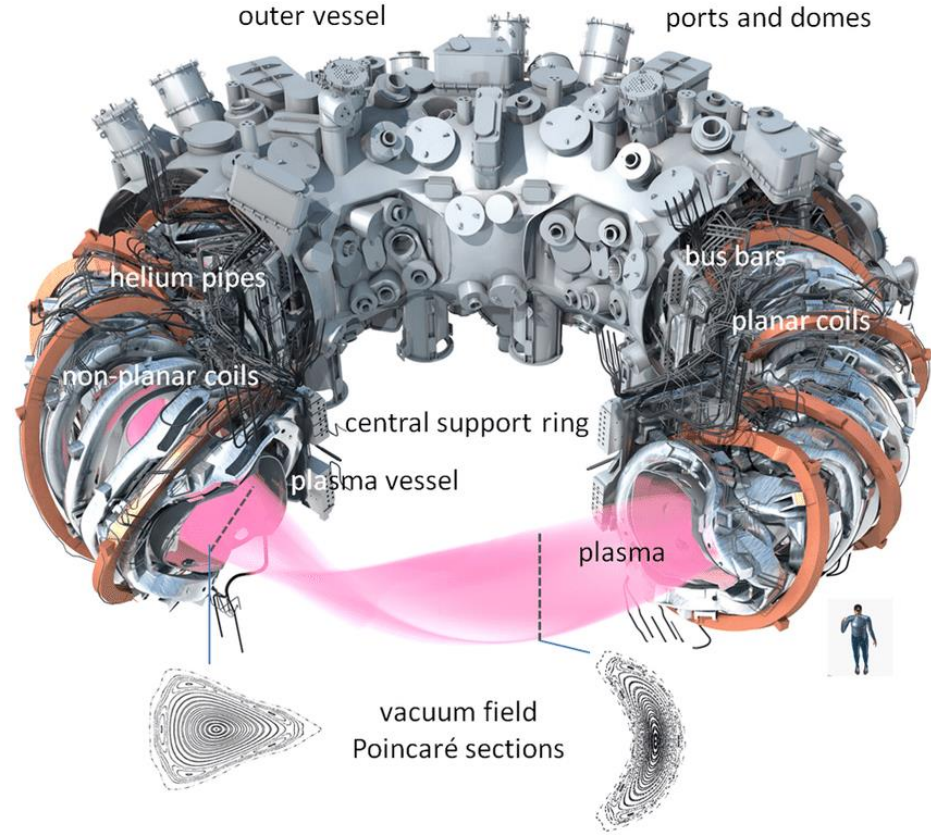
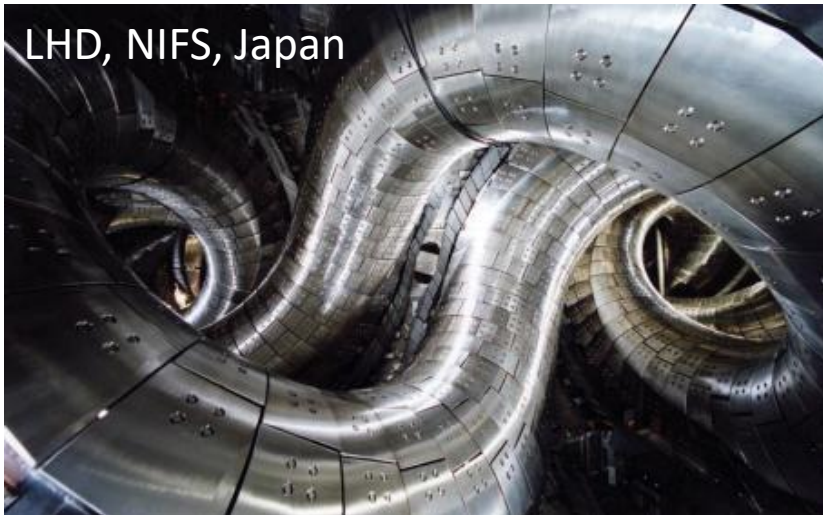
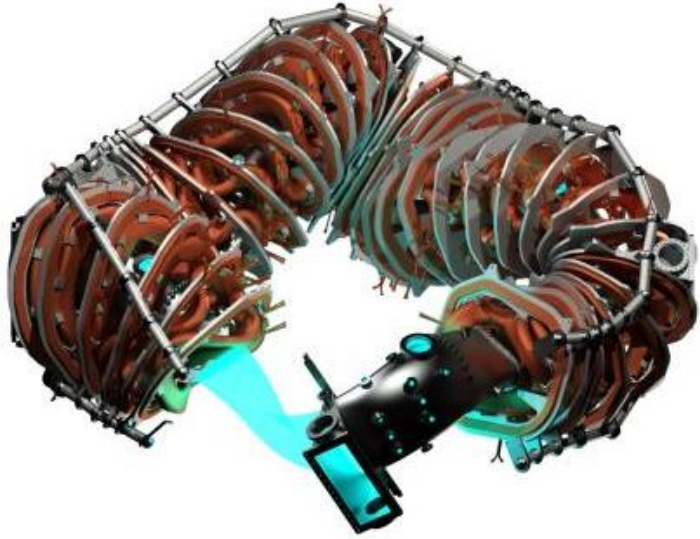
Porównuje się to z dziennym zużyciem około **10 000 ton paliwa w elektrowni węglowej** o podobnej wielkości.



(Energia właściwa metanu 55,6 MJ/kg, węgla brunatnego 15 MJ/kg)  
(Źródło [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_density](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density))

# Stellarator

HSX, Madison, US



W7-X, Germany

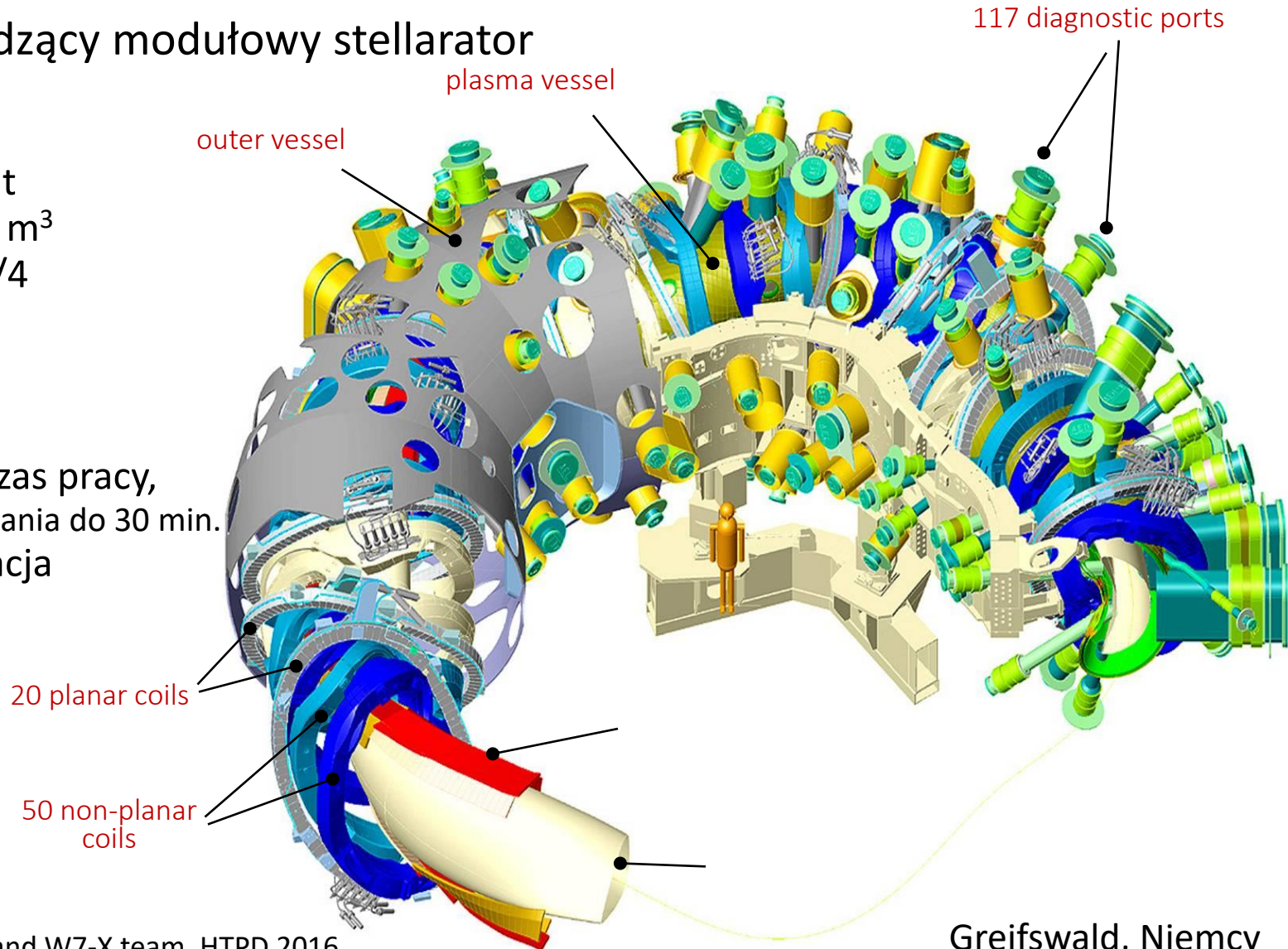
# Stellarator Wendelstein 7-X

## ➤ Nadprzewodzący modułowy stellarator

- $R = 5.6 \text{ m}$
- $a = 0.5 \text{ m}$
- Mass: 725 t
- $V_{\text{plasma}} = 30 \text{ m}^3$
- $\iota = 5/6 - 5/4$
- $B \leq 3 \text{ T}$

## ➤ Misja

- Ustalony czas pracy,
  - Wyładowania do 30 min.
- optymalizacja

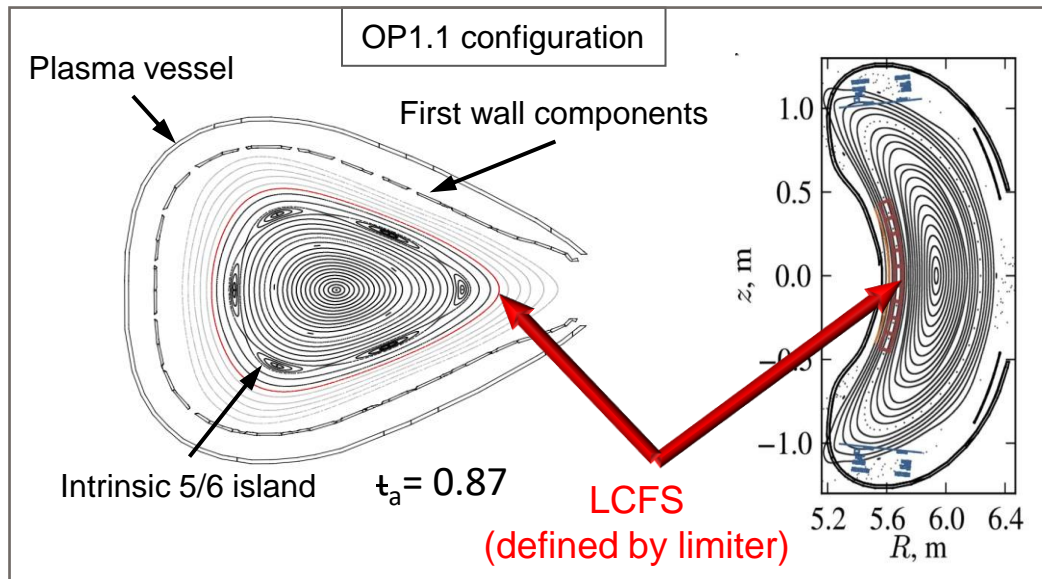
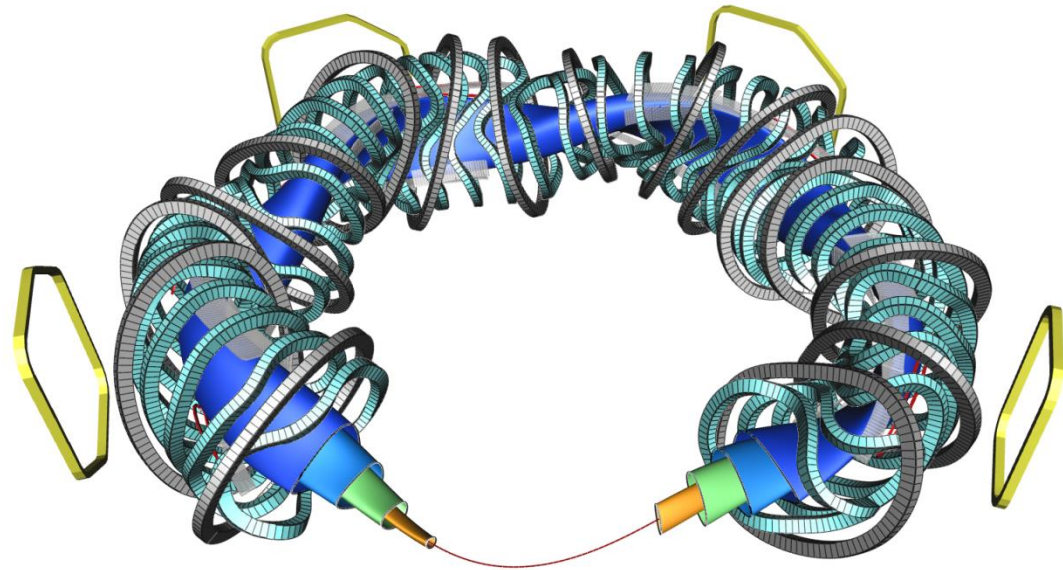


From M. Krychowiak and W7-X team, HTPD 2016

Greifswald, Niemcy

# Stellarator Wendelstein 7-X

- Main helical field: 50 non-planar coils (18 kA, superconducting)
- Adjusting iota: 20 planar coils (12 kA, superconducting)
- Move island position at divertors: 10 control coils (water cooled)
- Correction of 1/1 field error: 5 trim coils (2 kA, water cooled)



From M. Krychowiak and W7-X team, HTPD 2016

# W7-X: stabilne, długie wyładowanie

OP1.1/  
Limiter C

**2015 / 2016**

- 5 MW
- 4 MJ
- 6 s

Chłodzenie  
inercyjne



OP1.2/  
Divertor C

**2017 / 2018**

- 8 MW
- 200 MJ
- 100 s

Chłodzenie  
inercyjne



OP2/  
Divertor C

**2022 - 2026**

- 10 MW
- 1GJ, → 18 GJ
- 30 min.

Chłodzenie wodą



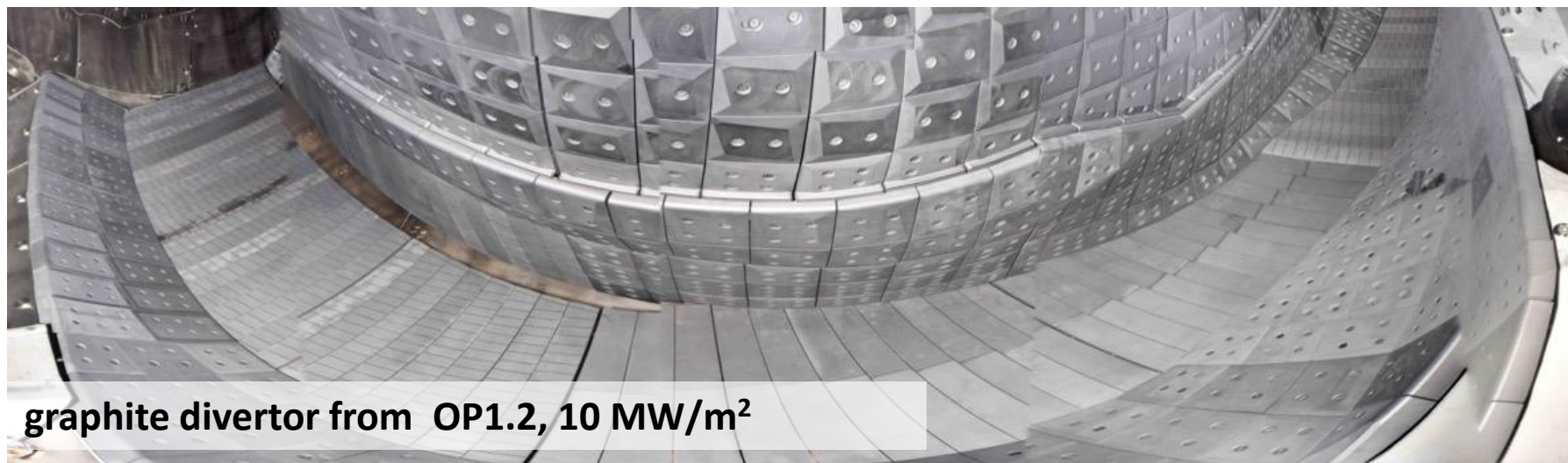
OP3

202x ...

- Heating upgrades
- 18 GJ
- 30 min.

...

Urządzenie metaliczne ?

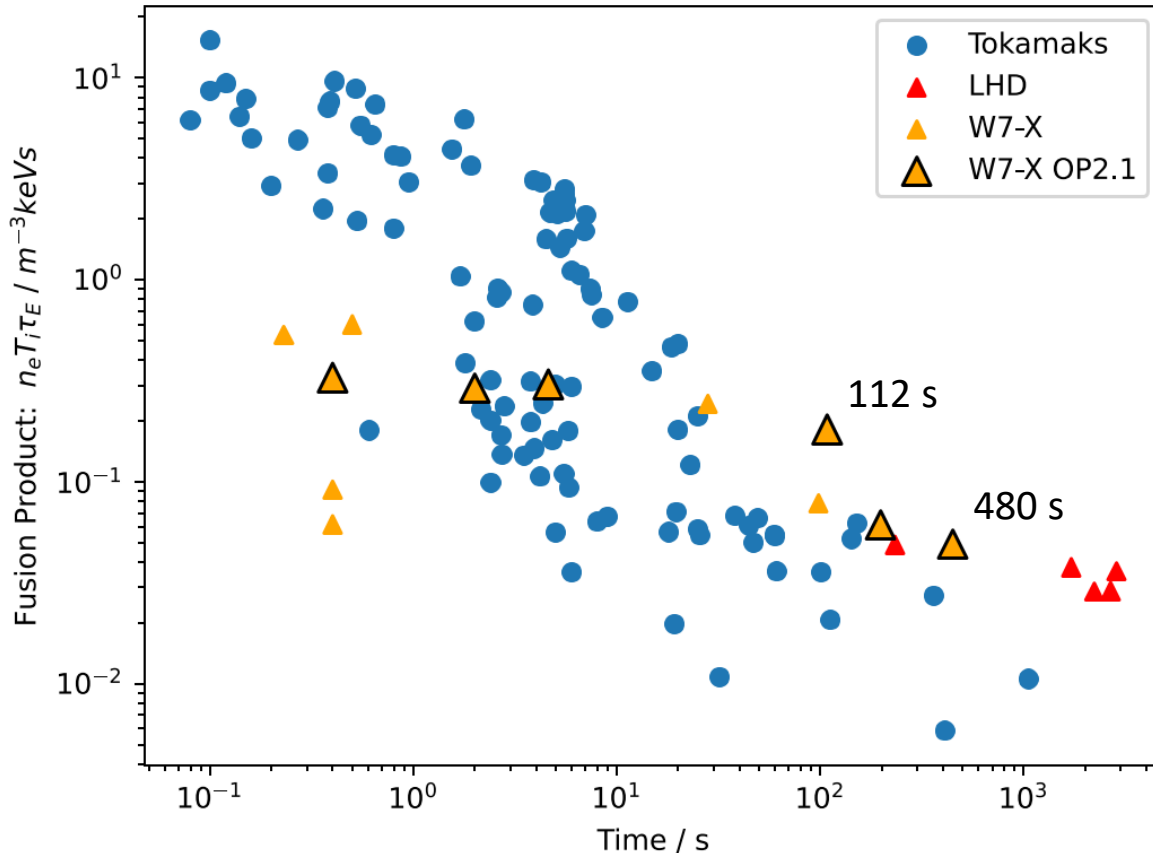


graphite divertor from OP1.2, 10 MW/m<sup>2</sup>

# Rekordy W7-X

Podczas pierwszej kampanii eksperymentalnej W7-X z aktywnie chłodzonym divertorem OP2.1 udało się uzyskać długie minutowe wyładowania

IAE-CICLOP database, X. Litaudon, et al., to be published



Wyładowanie ponad 30 min  
na LHD:

$$N_e = 0.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$$

$$T_{i0} = 2.0 \text{keV}$$

$$P_{\text{ICH}} = 0.55 \text{MW}$$

$$P_{\text{ECH}} = 0.1 \text{MW}$$

$$P_{\text{NBI}} = 0.06 \text{MW}$$

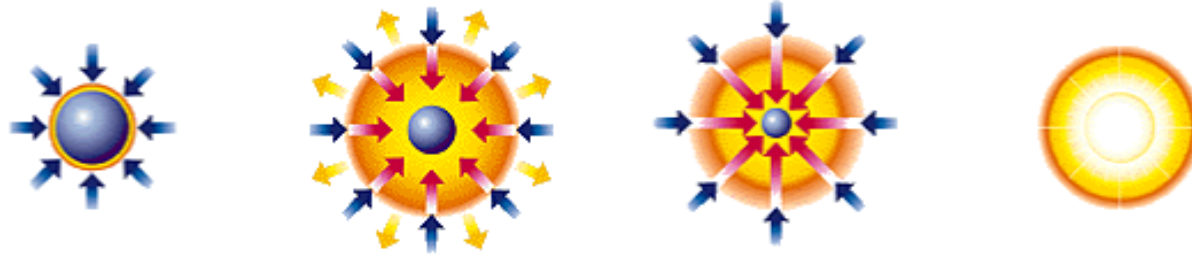


---

# Fuzja laserowa

# Fuzja laserowa

## ➤ Inercyjne utrzymanie plazmy



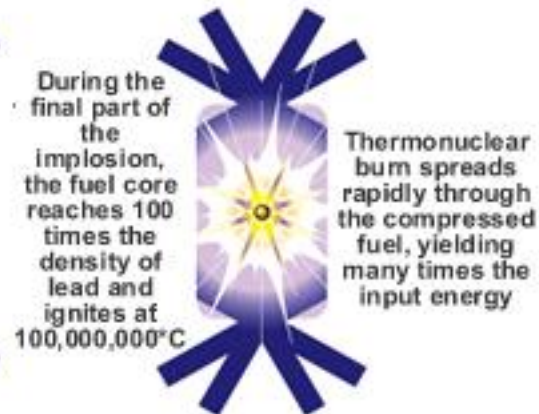
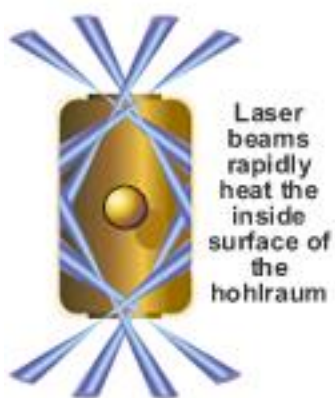
1) Atmosphere formation: Laser beams rapidly heat the surface of the fusion target forming a surrounding plasma envelope.

2) Compression: Fuel is compressed by the rocket-like blowoff of the hot surface material.

3) Ignition: During the final part of the laser pulse, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at 100,000,000 degrees Celsius.

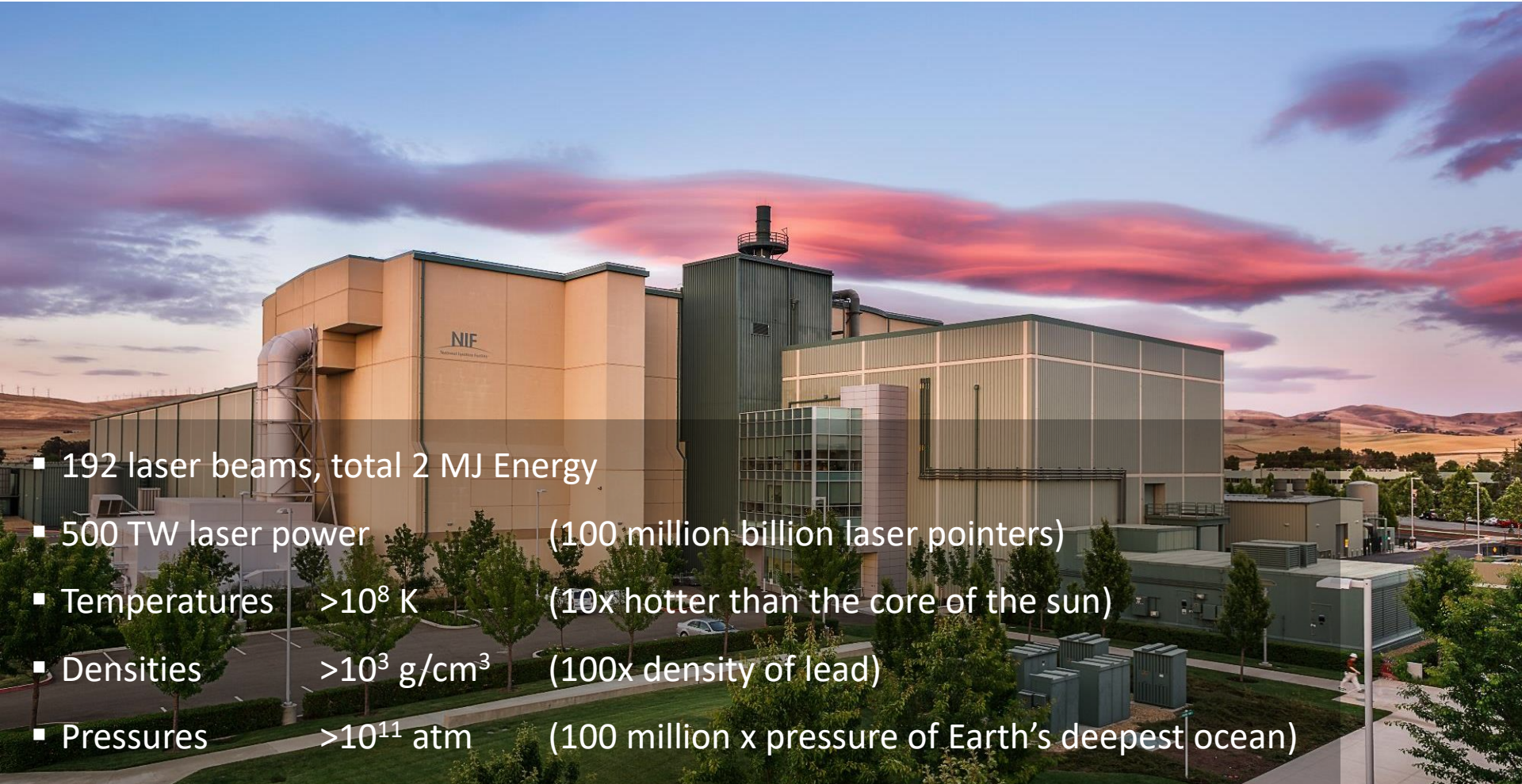
4) Burn: Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy.

➡ Laser energy   ➡ Blowoff   ➡ Inward transported thermal energy



# Laser NIF – National Ignition Facilities

---



- 192 laser beams, total 2 MJ Energy
- 500 TW laser power (100 million billion laser pointers)
- Temperatures  $>10^8$  K (10x hotter than the core of the sun)
- Densities  $>10^3$  g/cm<sup>3</sup> (100x density of lead)
- Pressures  $>10^{11}$  atm (100 million x pressure of Earth's deepest ocean)

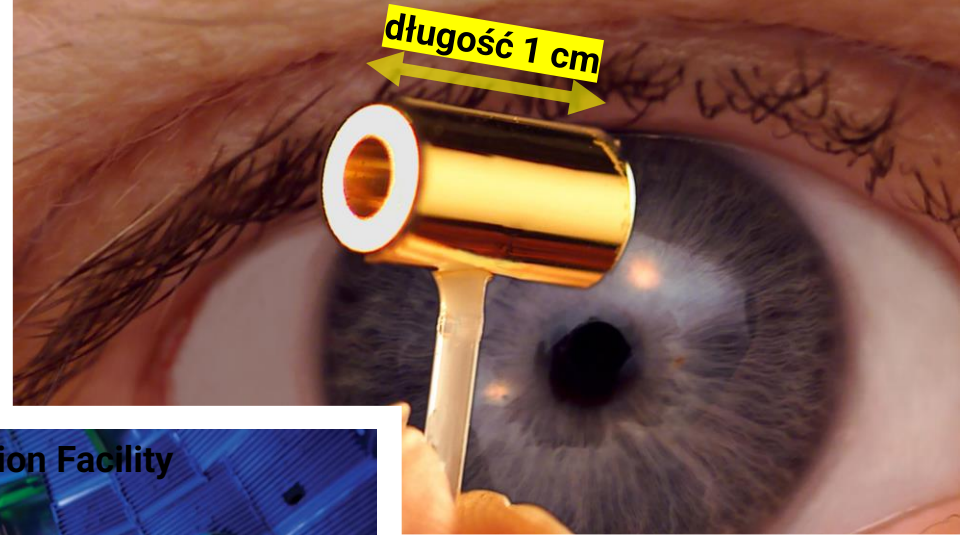
Pozwala na badanie ekstremalnych warunków

# Fuzja laserowa

Mikrokapsułka paliwowa



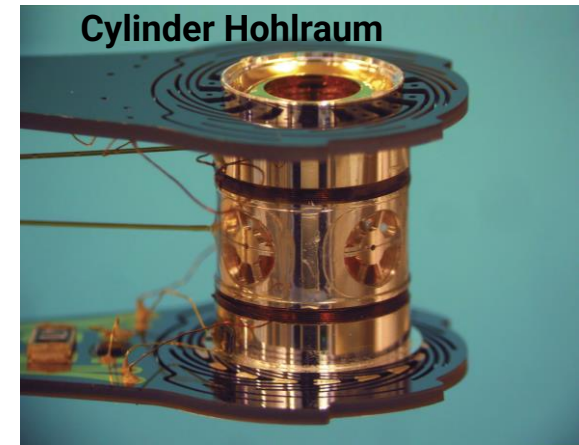
Cylinder Hohraum



Komora National Ignition Facility



Cylinder Hohraum



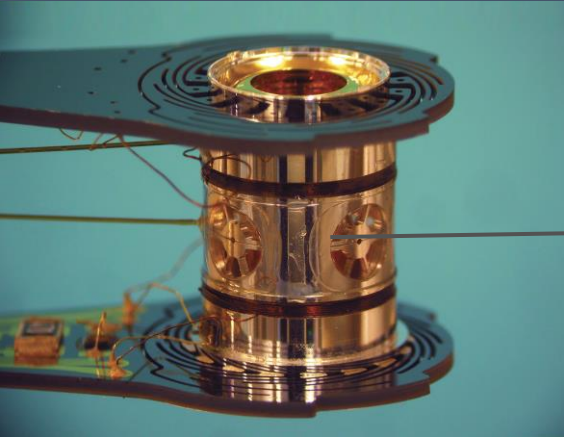
(źródło <https://lasers.llnl.gov/media>)

# Laser NIF – National Ignition Facilities

---

# Kapsułki z paliwem w ICF

Cylindryczna kapsuła  
Hohlraum  
(połączony Uran)

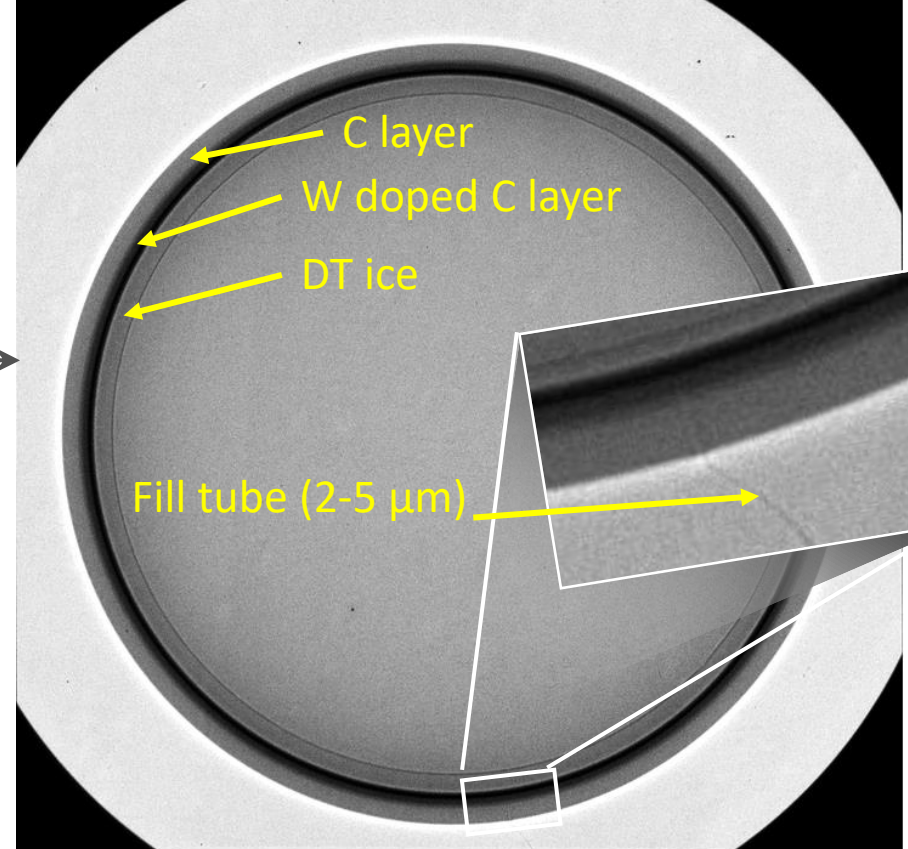


Diamond Nanocrystalline  
Capsule  
(High Density Carbon –  
HDC)



$\varnothing = 2 \text{ mm}$ ,  
smooth to 10 nm

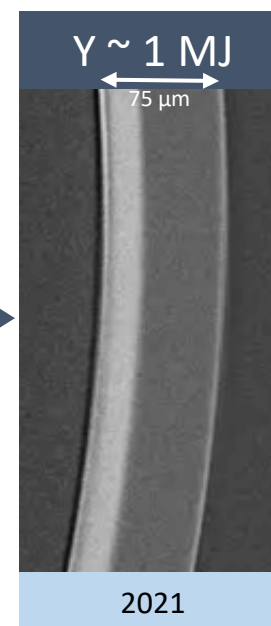
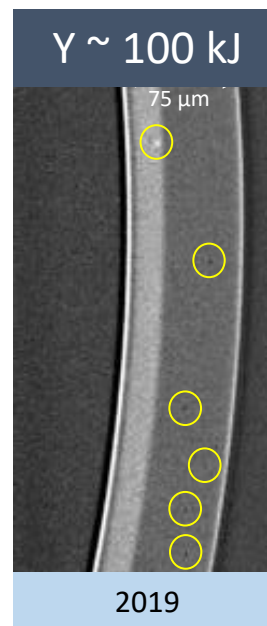
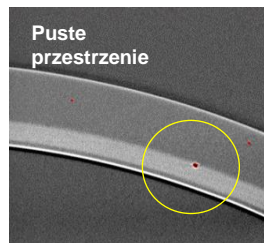
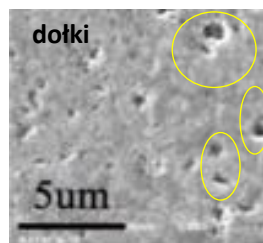
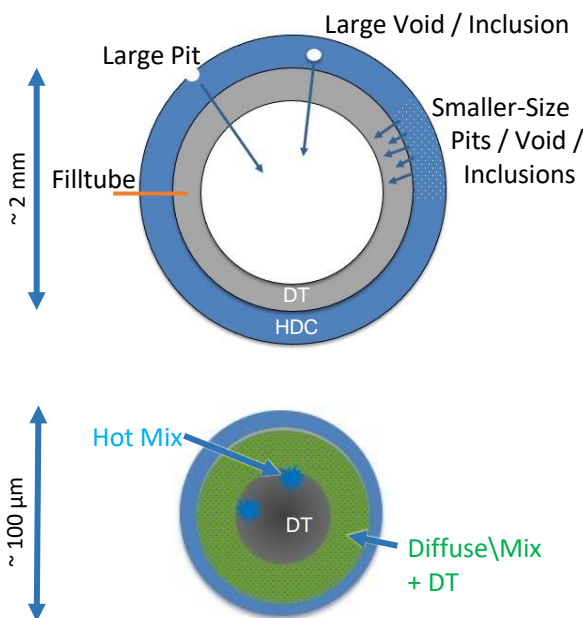
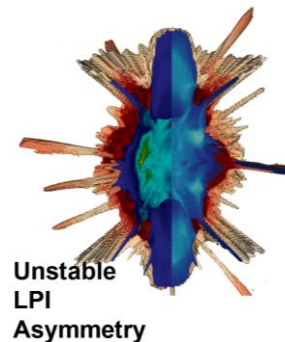
Capsule with DT layer @ 19 K



Niezwykle ważna precyzja wykonania!

# Kapsułki z paliwem w ICF - problemy

Dominującym mechanizmem degradacji są mikroskopijne niedoskonałości kapsułki wzmocnione przez niestabilności hydrodynamiczne



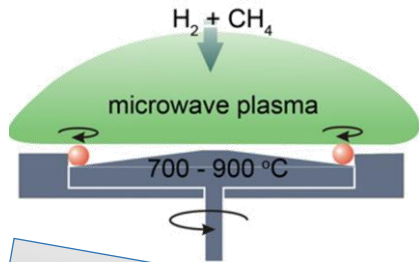
Braun, et al, Nuc. Fusion (2022)

Zrozumienie problemów z jednorodnością tarcz oraz zwiększenie mocy lasera NIF było początkiem na drodze do osiągnięcia  $Q > 1$

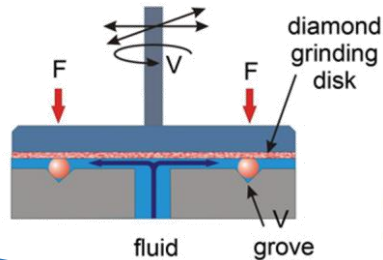
# Kapsułki z paliwem w ICF

Produkcja kapsuł jest procesem wielo-etapowym i średnio trwa ok. 3 miesiące !

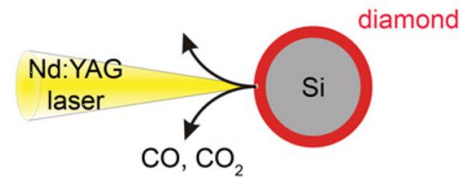
Chemiczna depozycja  
(Plasma chemical vapor  
deposition)



Etap polerowania  
(V-groove polishing)



Wiercenie laserowe  
(Laser drilling)



Usuwanie trzpienia  
metodą trawienia  
na mokro



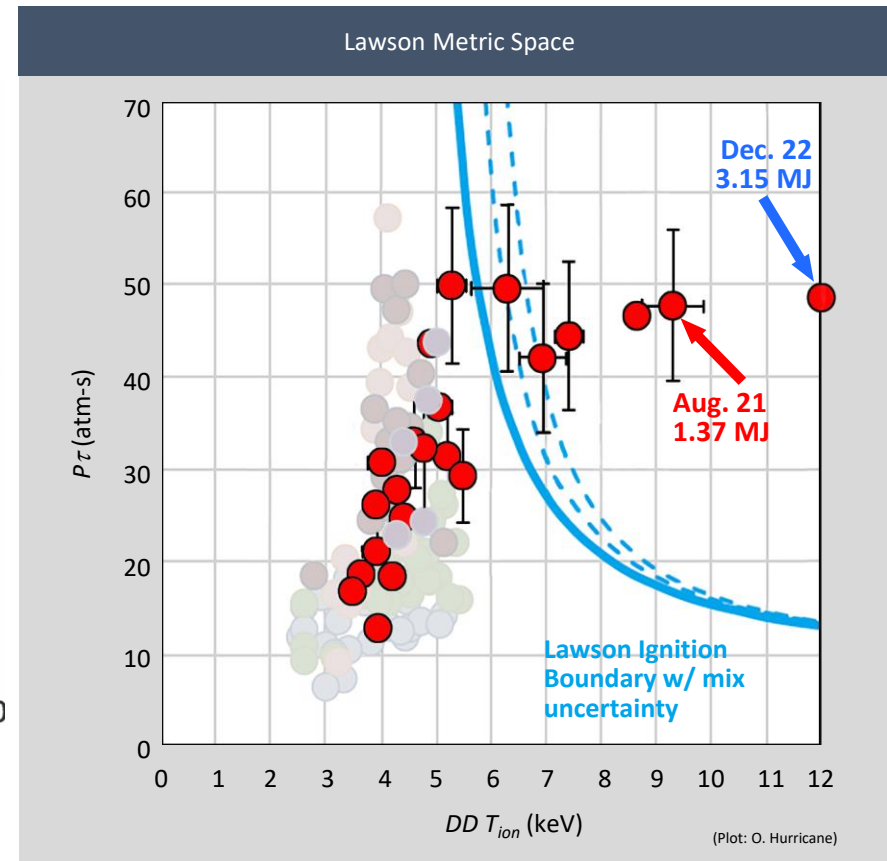
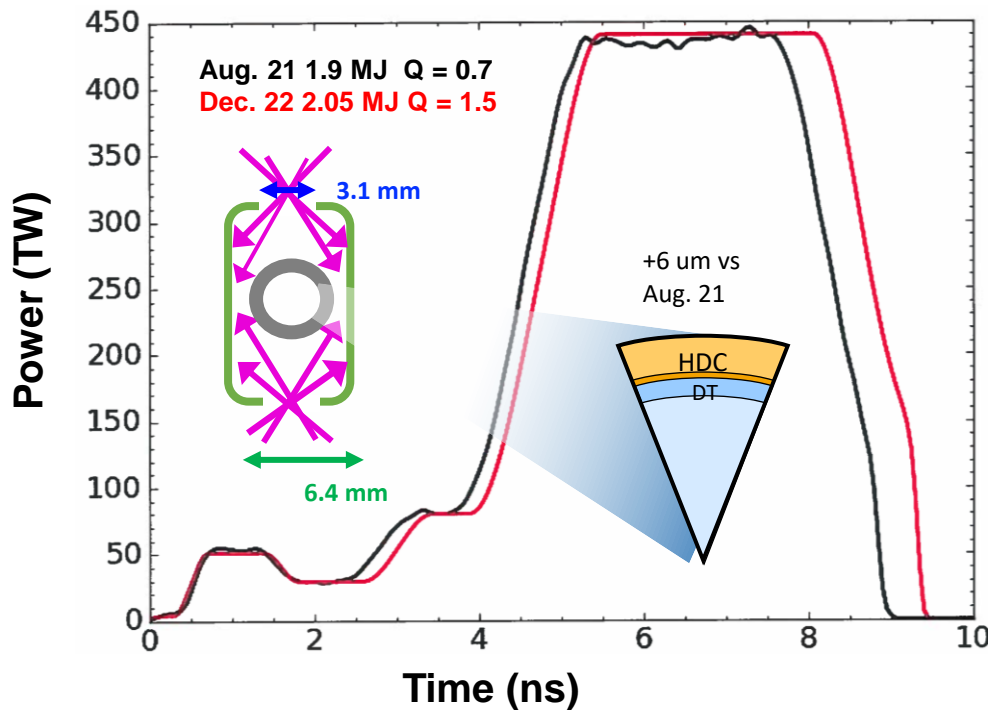
Pokrycie i polerowania - 3 warstwy

C. Trosseille, PLASMA2023



# Najlepsze wyniki na NIF

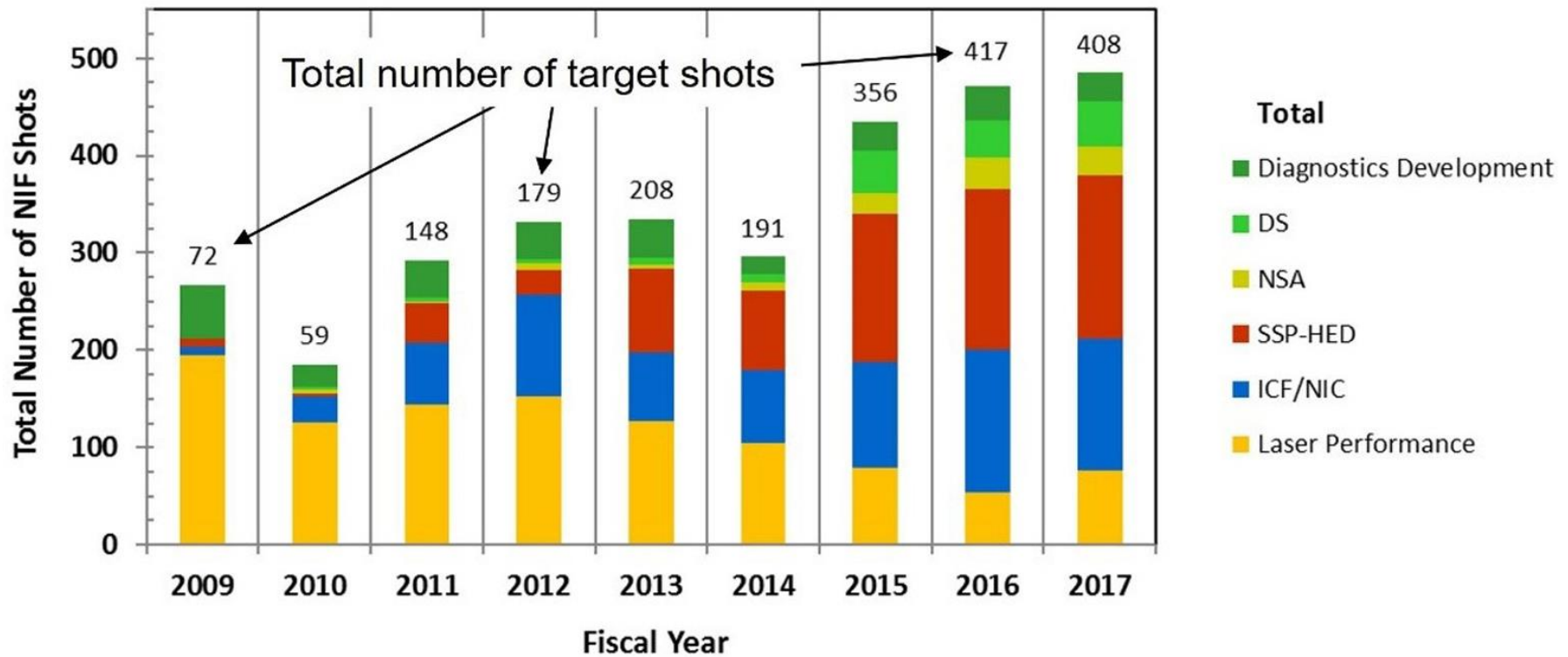
Modyfikacja tarczy (zmniejszenie średnicy wejściowej lasera) pozwoliła w 2021 r. przekroczyć kryterium Lawsona, natomiast wzrost energii lasera z 1.9MJ w 2021 do 2.05 MJ w 2022 miał wpływ na uzyskanie  $Q > 1$



\*H. Abu-Shawareb *et al.*, PRL  
129, 075001 (2022).

C. Trosseille, PLASMA2023

# Eksperymenty na NIF



DS: dynamic shell formation

NSA: National Security Applications

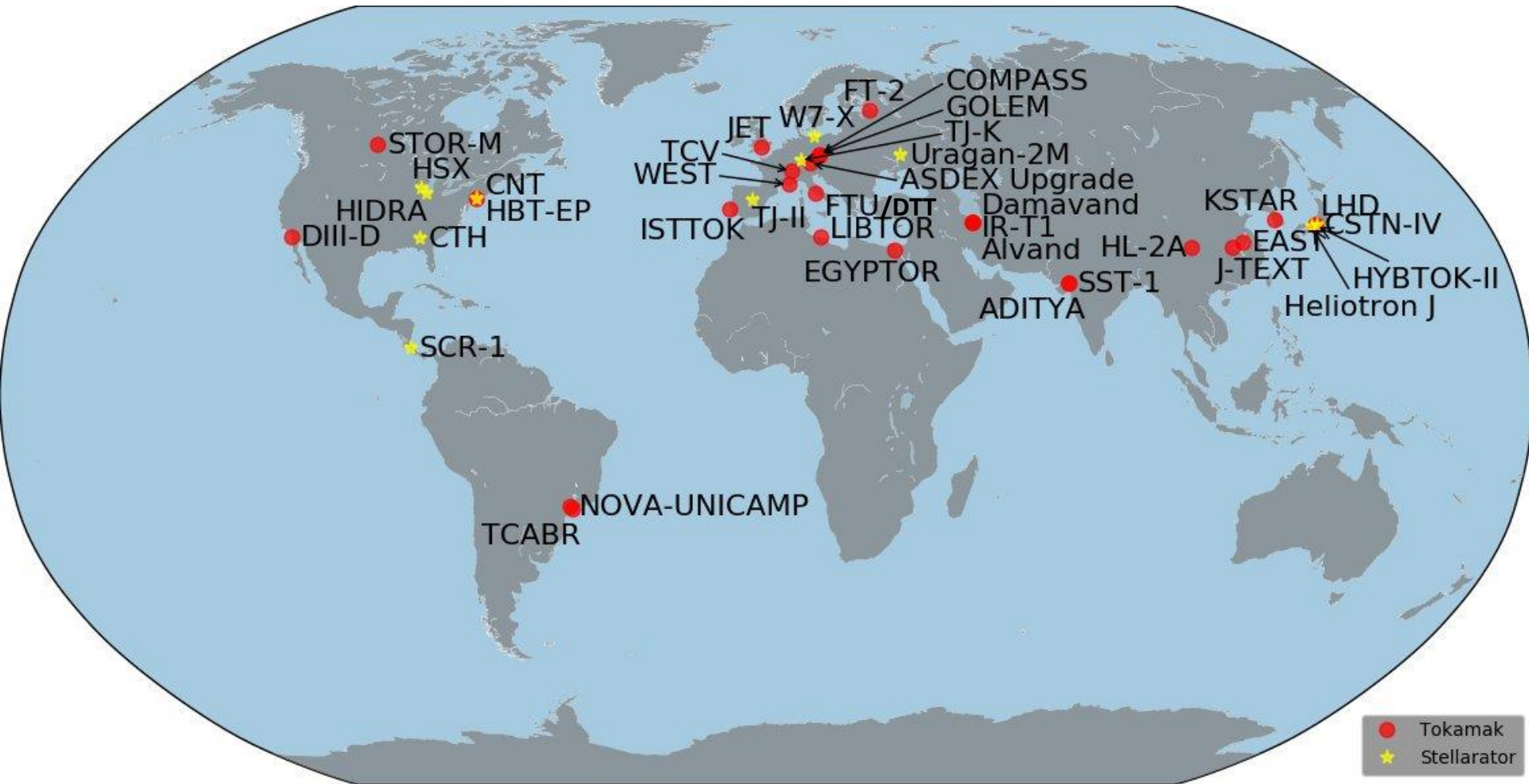
SSP-HED: Stockpile Stewardship Program (SSP)-High-Energy-Density

Nucl. Fusion 59 (2019) 032004

---

# Podsumowanie

# Reaktory MCF na świecie



# Lasery wielkiej mocy na świecie

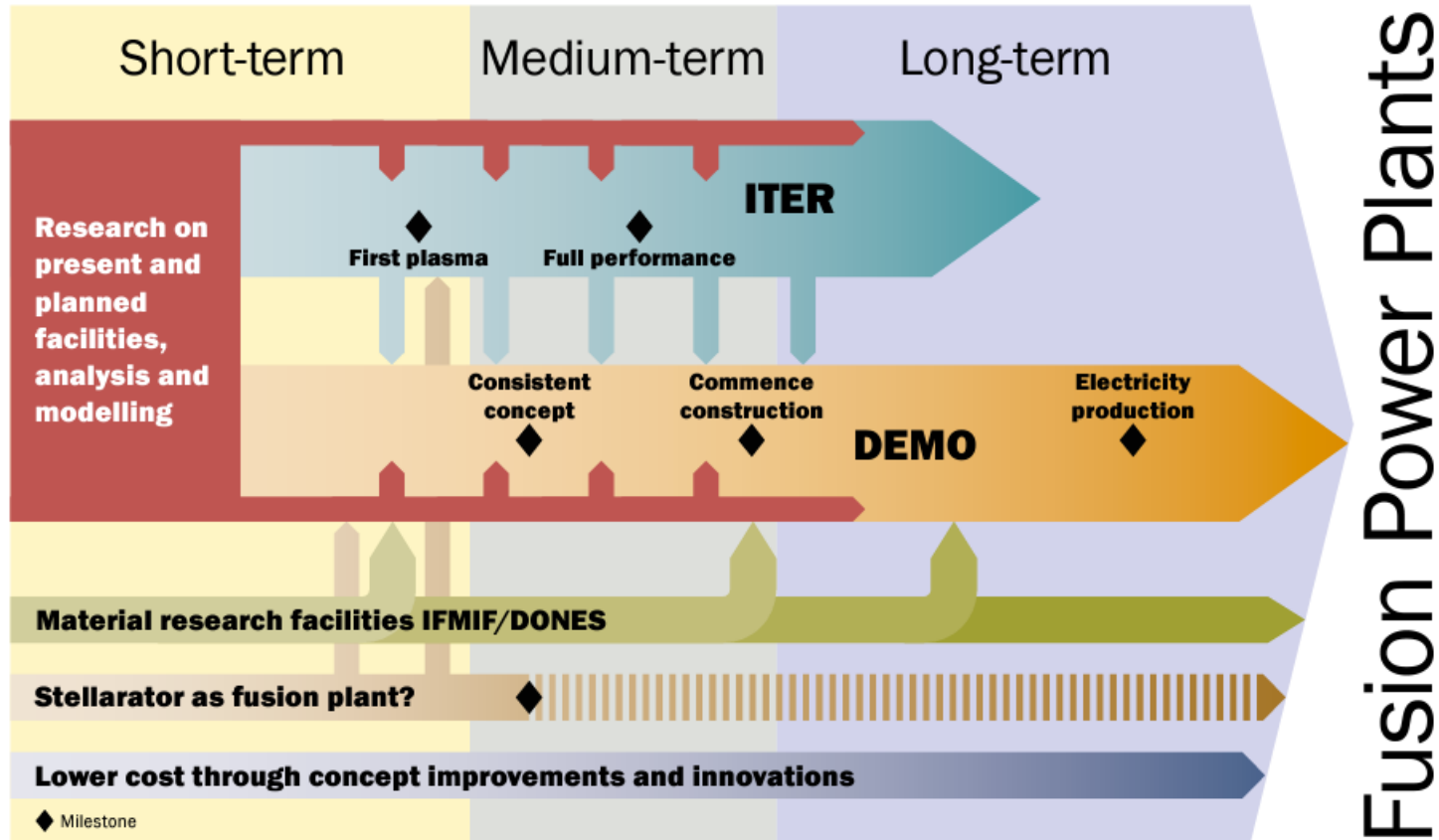
ESFRI



D. Margarone, PLASMA 2023

# Program badań nad syntezą jądrową

W Europie w ramach programu badawczo-szkoleniowego EURATOM prace prowadzone przez konsorcjum EUROfusion ([www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org)), które opracowało Europejską mapę drogową fuzji



# Program badań nad syntezą jądrową

---



Prace na rzecz ITERa koordynuje w UE instytucja mająca osobowość prawną o nazwie F4E (*Fusion for Energy*)

<http://fusionforenergy.europa.eu/>



Konsorcjum zrzeszające wiodące jednostki realizujące badania z wykorzystaniem dużych infrastruktur laserowych w Europie



Extreme Light Infrastructure infrastruktura laserowa budowana w Czechach, na Węgrzech i w Rumuni.

Otwarte konkursy na propozycje eksperymentów na dużych urządzeniach laserowych

---

Dziękuję za uwagę!