

Jak ujarzmić słońce, czyli rzecz o konstrukcji reaktorów termojądrowych

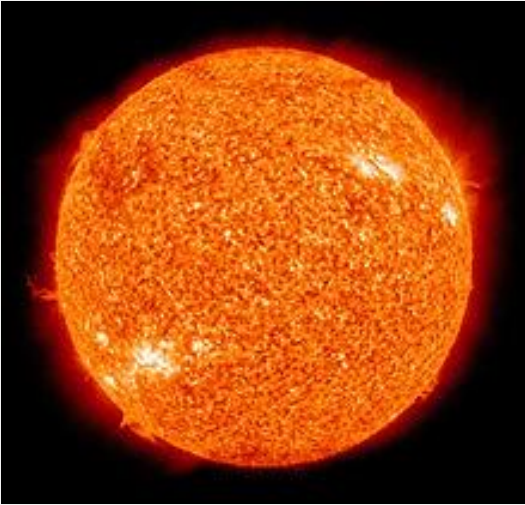
Dr inż. Piotr Marek

Politechnika Warszawska

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

Czy energia syntezy jądrowej, to przyszłość energetyki?



Obraz turbulencji na powierzchni Słońca w dalekim ultrafiolecie ([NASA-SDO](https://www.nasa.gov/SDO))

Synteza jądrowa – reakcja, która napędza Słońce

- Słońce składa się głównie z wodoru i helu
- Reakcja termojądrowa jest głównym źródłem jego energii
- Zmuszenie jąder atomowych do łączenia się (*fuzji*) wymaga ogromnych temperatur i ciśnień (w środku słońca: **15 milionów K** i **200 mld atm**)

Fuzja izotopów wodoru

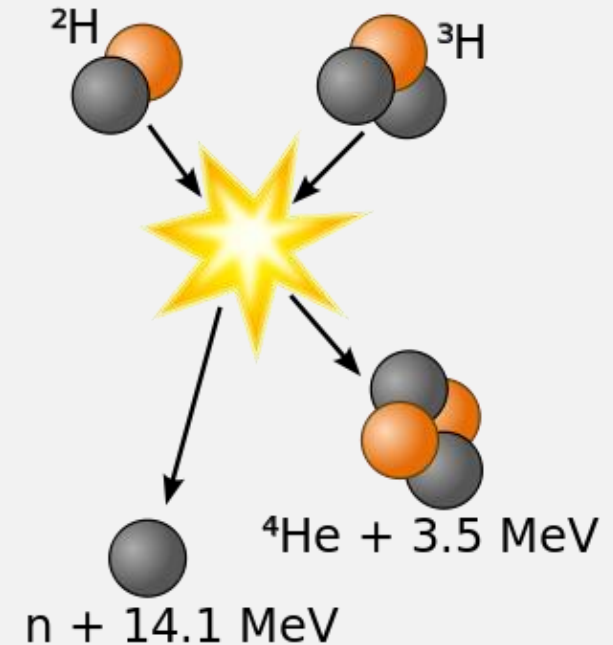
Najłatwiej wywołać syntezę jąder **deuteru i trytu**, w której **powstają: hel, neutron + energia 17.6 MeV**

1g D+T = spalenie 8 ton ropy naftowej lub 11 ton węgla kamiennego (brak CO₂)

Roczne zapotrzebowanie energetycznego całego świata to **kilkaset kilogramów izotopów wodoru (deuteru i trytu)**

Dostępność paliwa

można uzyskać z wody morskiej

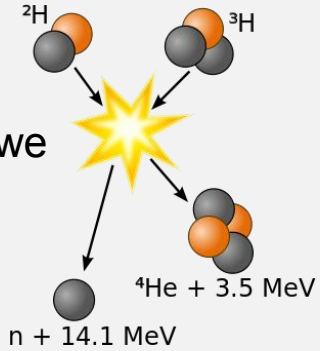


https://pl.wikipedia.org/wiki/Reakcja_termojadrowa

Jak zbudować urządzenie do kontrolowanej reakcji termojądrowej?

Reakcja fuzji termojądrowej w warunkach ziemskich

- Wymaga wyższej temperatury (do 150 milionów Kelwinów)
- Powstaje rozżarzony, zjonizowany gaz zwany plazmą, w którym mogą przebiegać reakcje termojądrowe

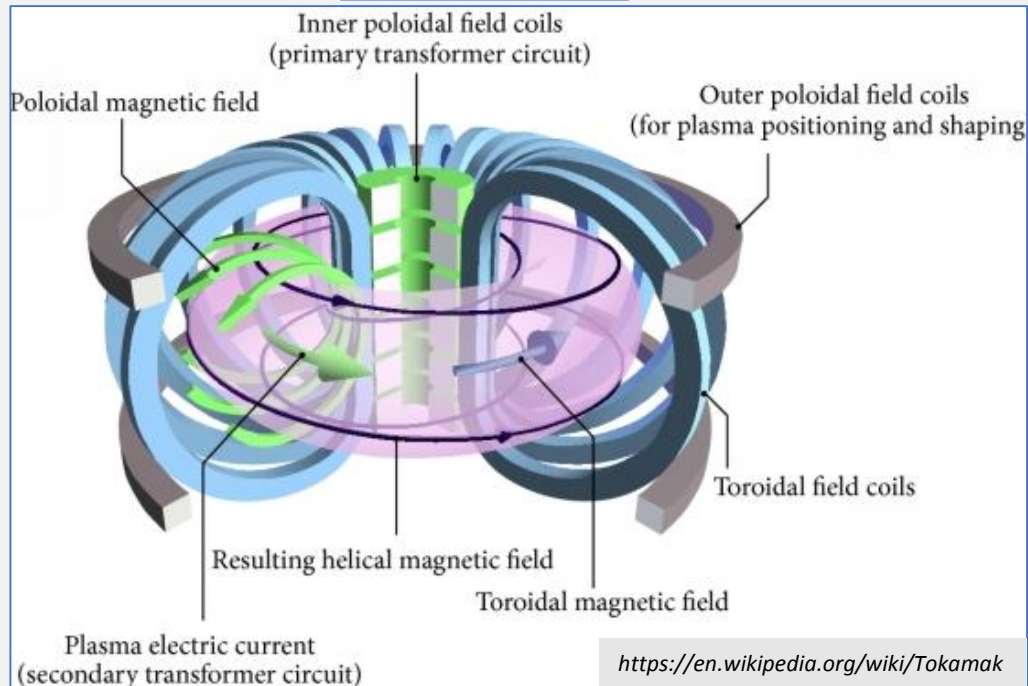


Konieczność uwięzienia plazmy w silnym polu magnetycznym

Tokamak

Znane rozwiązania

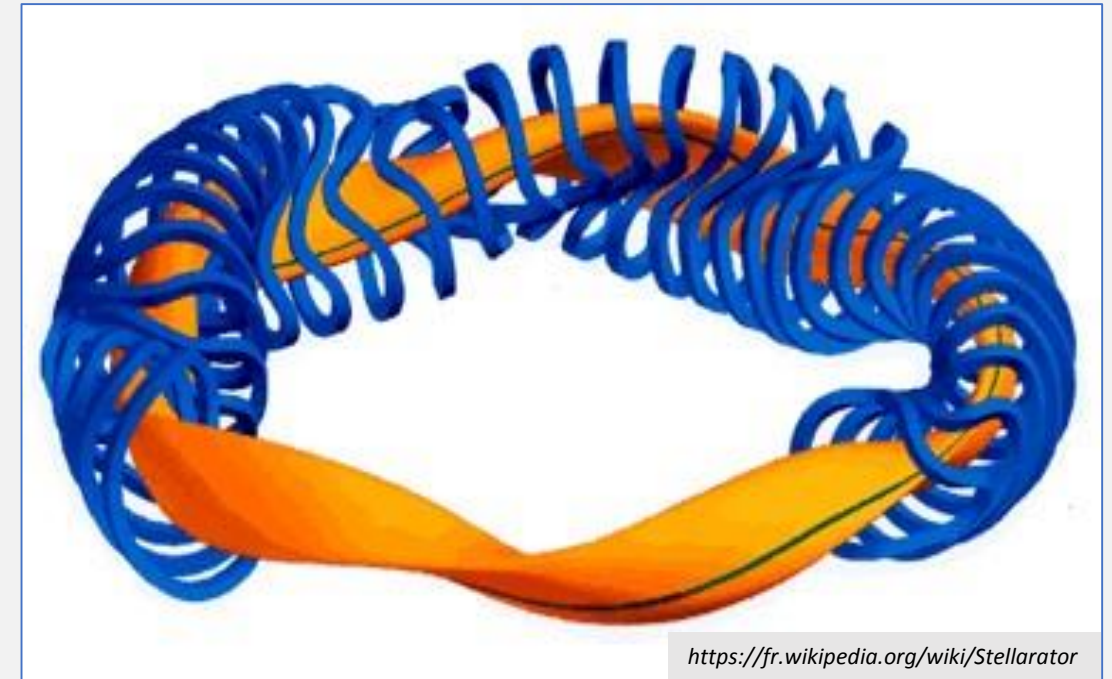
Stellarator



Pole 1: Toroidalne elektromagnesy

Pole 2: Sama plazma

Pole 3: Cewka transformatora i elektromagnesy (ułożone horyzontalnie)

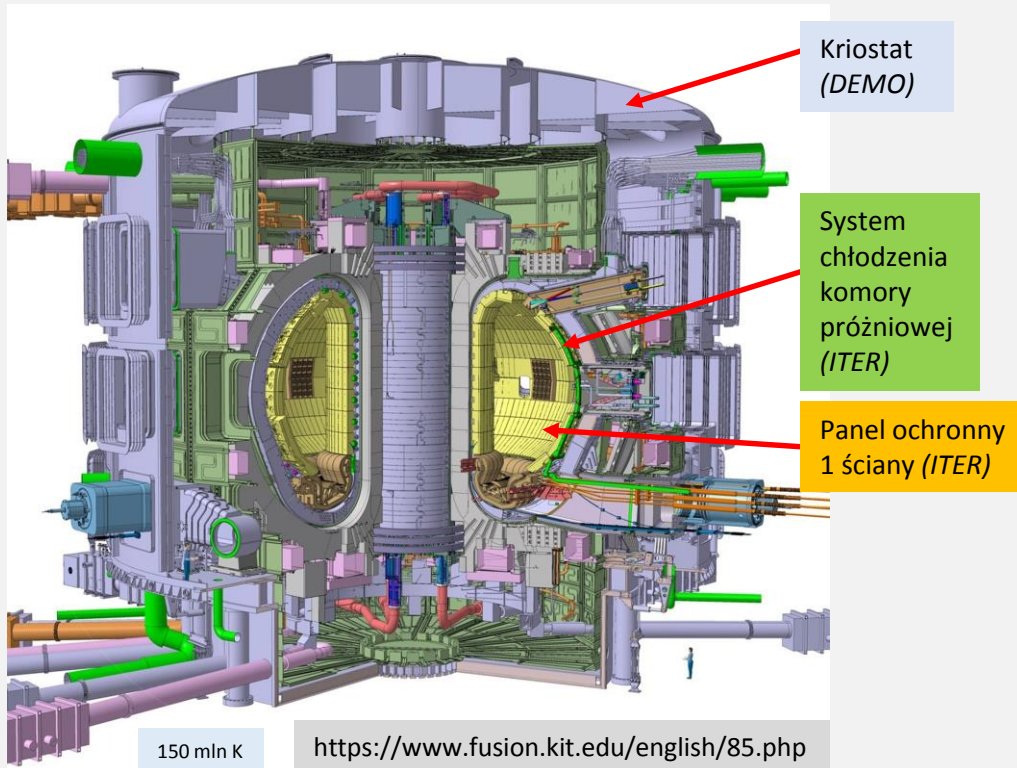


Jeden układ cewek magnetycznych o skomplikowanym kształcie (plazma -wielokrotnie skręcona wstęga Möbiusa – większa stabilność)

Prace konstrukcyjno-badawcze zespołu z Politechniki Warszawskiej

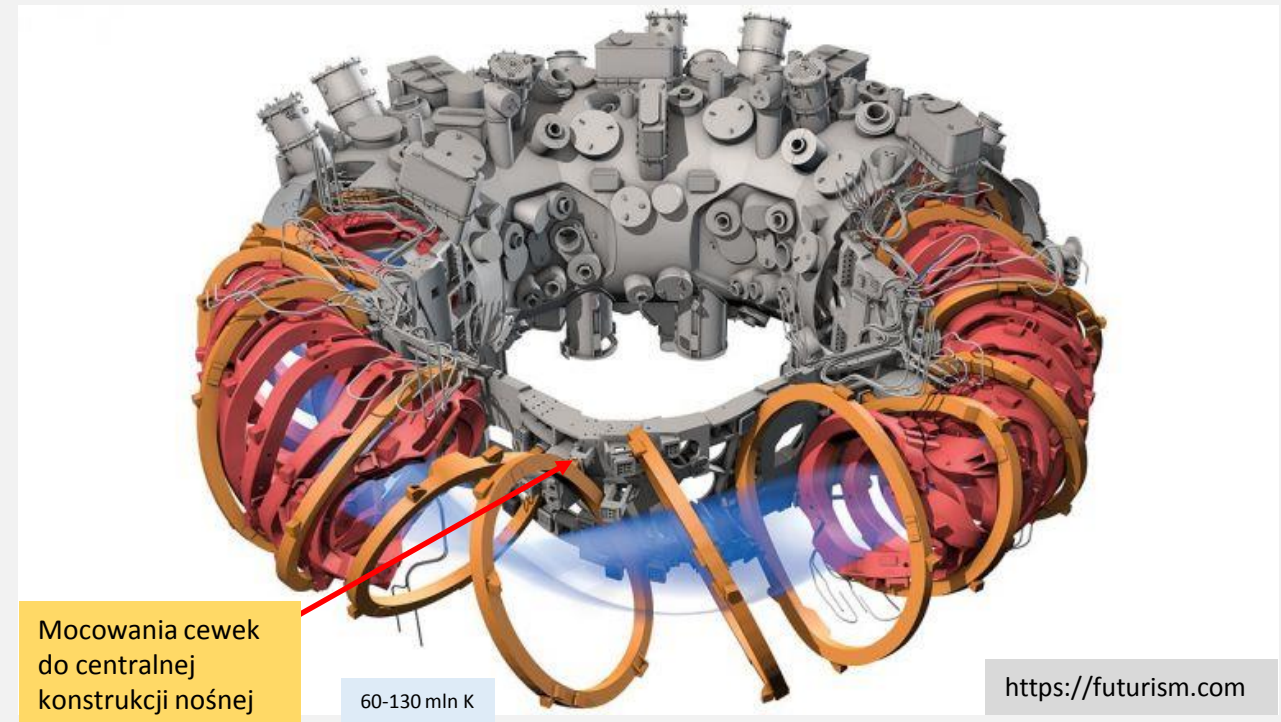
Prace badawcze w ramach programów: **EUROATOM** (2005-2012) i **EUROfusion** (2014-2018), prowadzone przez zespół z Zakładu Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji **ITLiMS** Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa wspólnie z pracownikami **Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej**

Tokamak: **ITER** i **DEMO** (Cadarache, Francja)



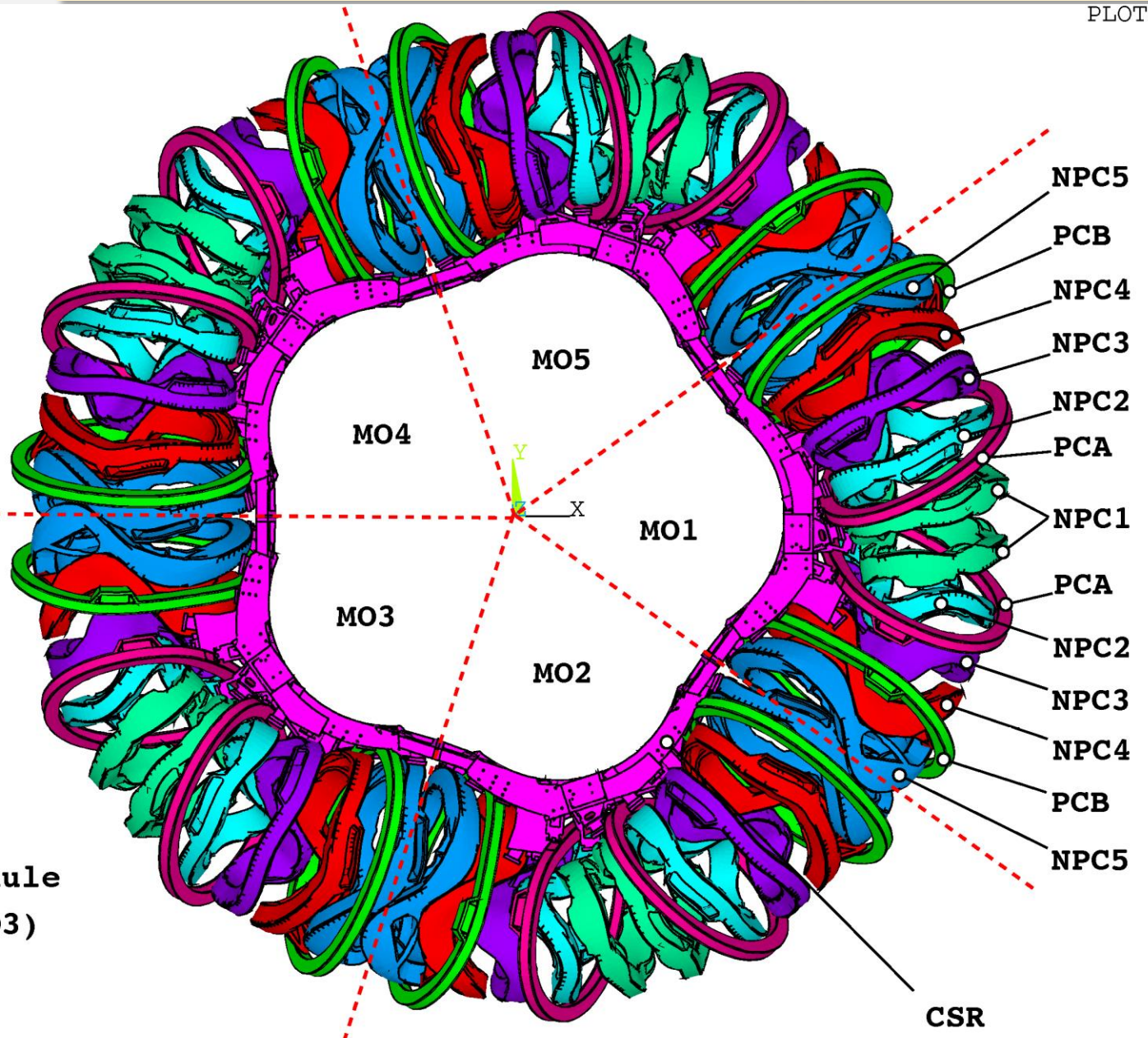
Komora w kształcie torusa, wypełniona jest zjonizowanym gazem, przez który przepuszczany jest silny prąd elektryczny

Stellarator: **Wendelstein W7-X** (Greifswald, Niemcy)



Kanał plazmowy kształtowany jest przez pole elektromagnetyczne o bardzo dużym natężeniu (**3T**), wytwarzane przez nadprzewodzące cewki o odpowiednio dobranej geometrii

Prace nad reaktorem typu stellarator - Wendelstein (W7-X)



EUROATOM (2005-2012)

Prace konstrukcyjno - wytrzymałościowe

dla IPP w Greifswaldzie

(Instytut Fizyki Plazmowej im. Maksa Plancka)

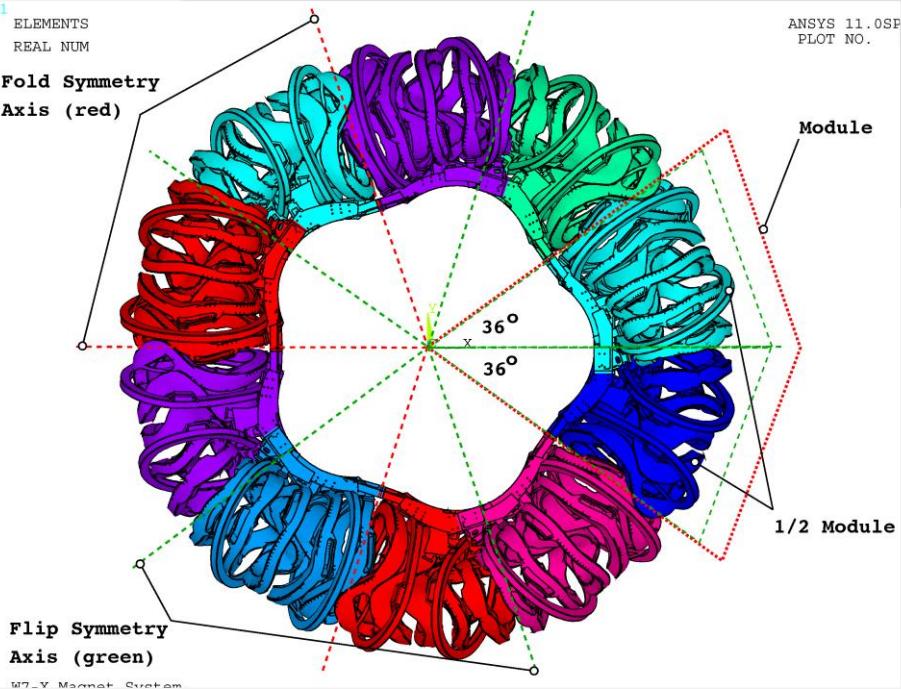
gdzie budowany był stellarator

Cel prowadzonych prac:

Projektowanie i weryfikacja numeryczna połączeń mocujących cewki, pracujących w warunkach oddziaływań:

elektromagnetycznych, mechanicznych, termicznych i montażowych

System magnetyczny reaktora W7-X

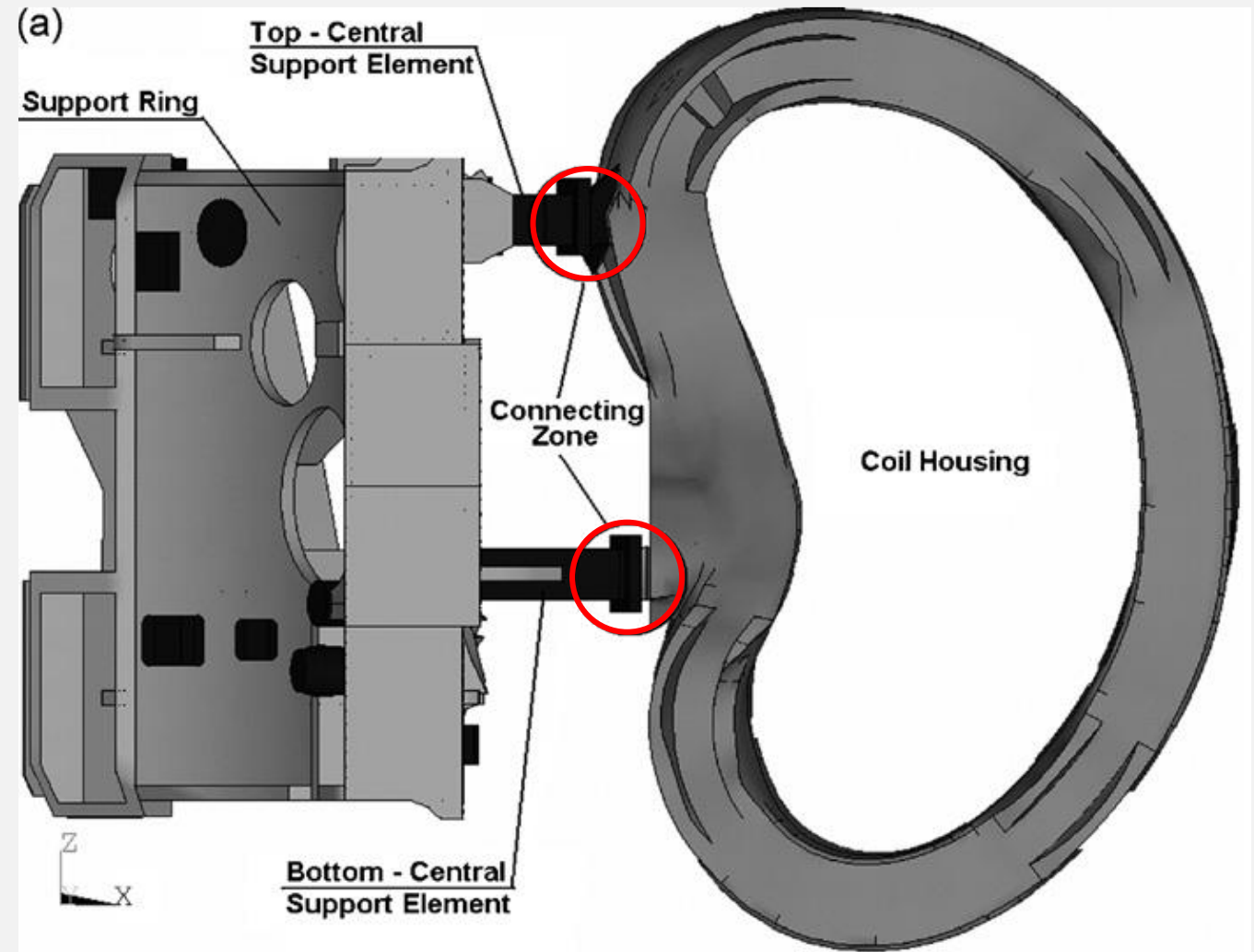


20 płaskich i 50 zakrzywionych cewek nadprzewodzących (*schładzanych ciekłym helem do temperatury bliskiej zera bezwzględnego*), ułożonych toroidalnie w pięciu identycznych modułach (*każdy składa się z dwóch pół-modułów*)

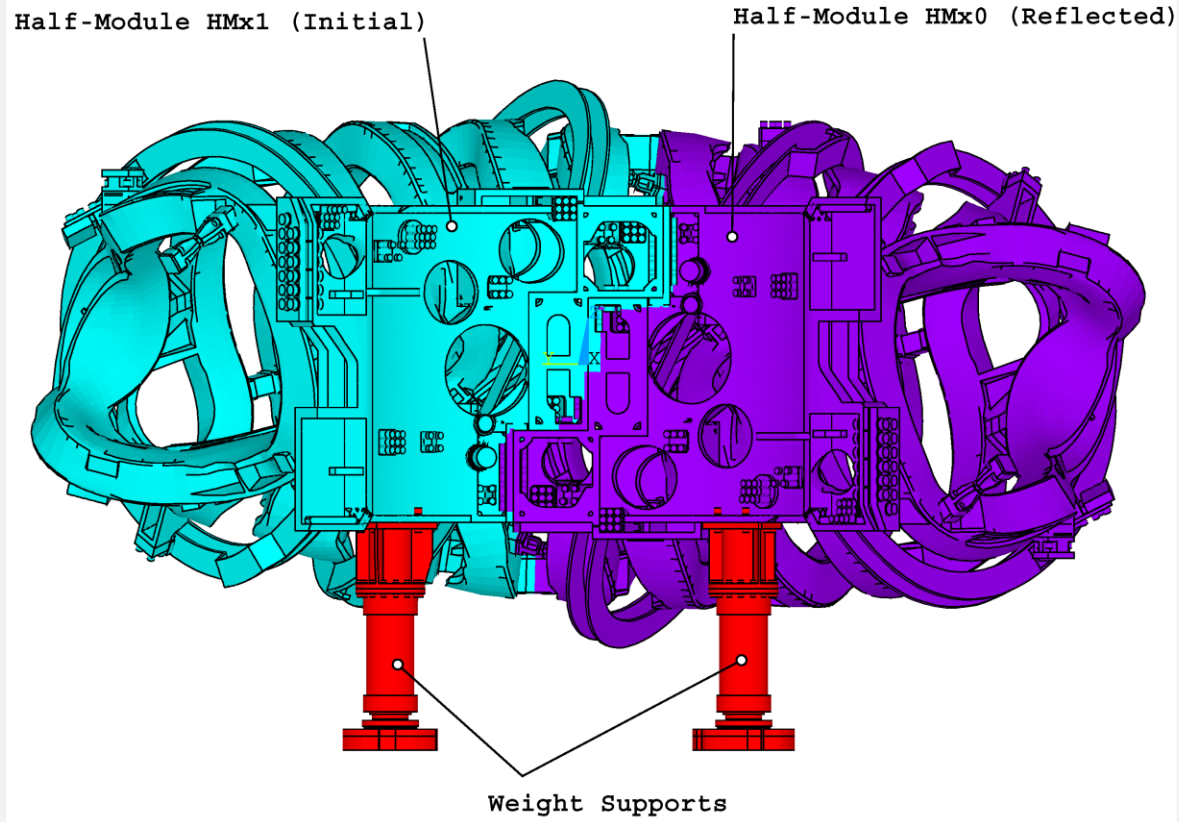
Temperatura pracy 4K

Cewki nadprzewodzące wywierają duże obciążenia na **centralną konstrukcję nośną**

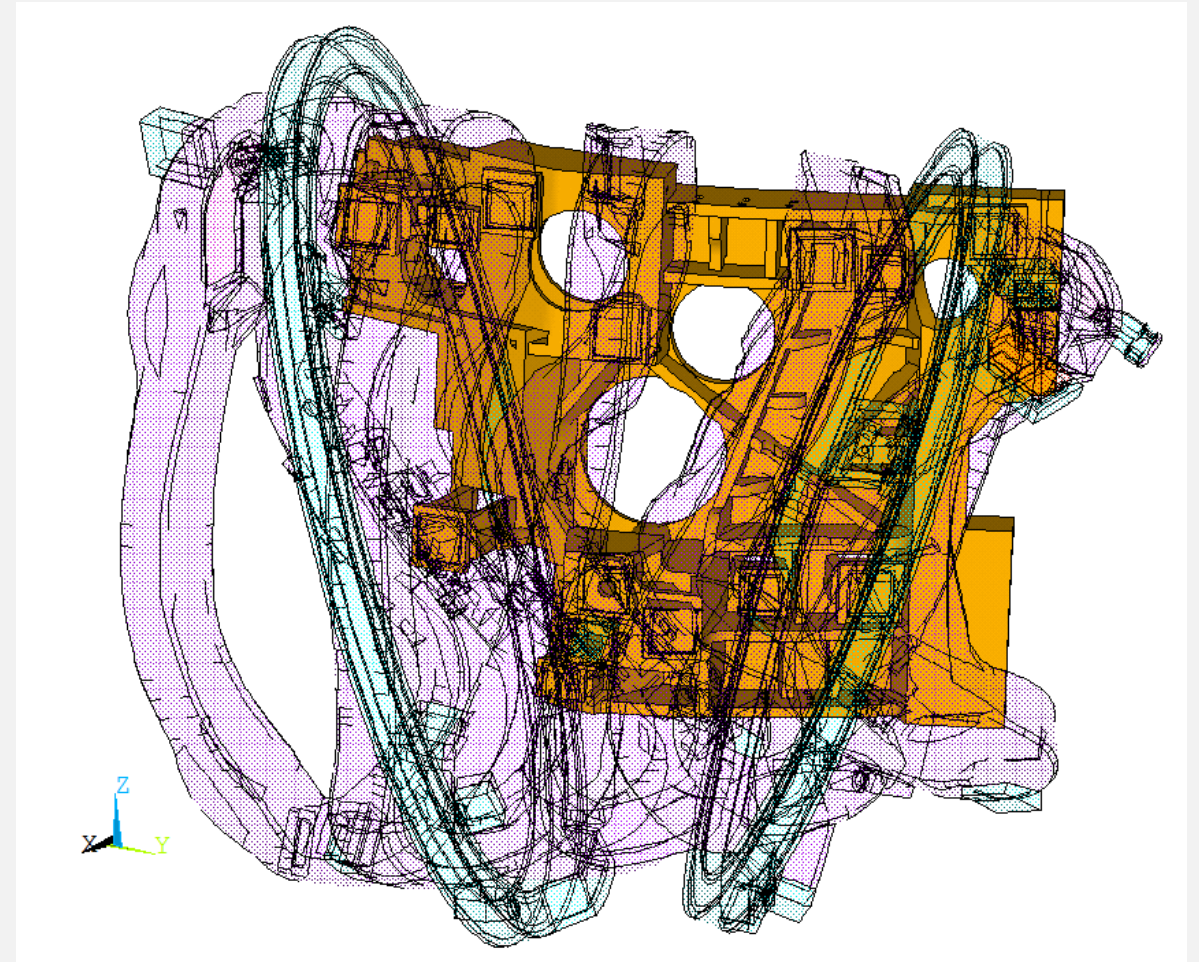
Każda cewka jest osadzona przy użyciu **dwóch elementów wsporczych** (*przenoszą obciążenia wynikające z pola elektromagnetycznego i grawitacji*)



Centralna konstrukcja nośna reaktora W7-X



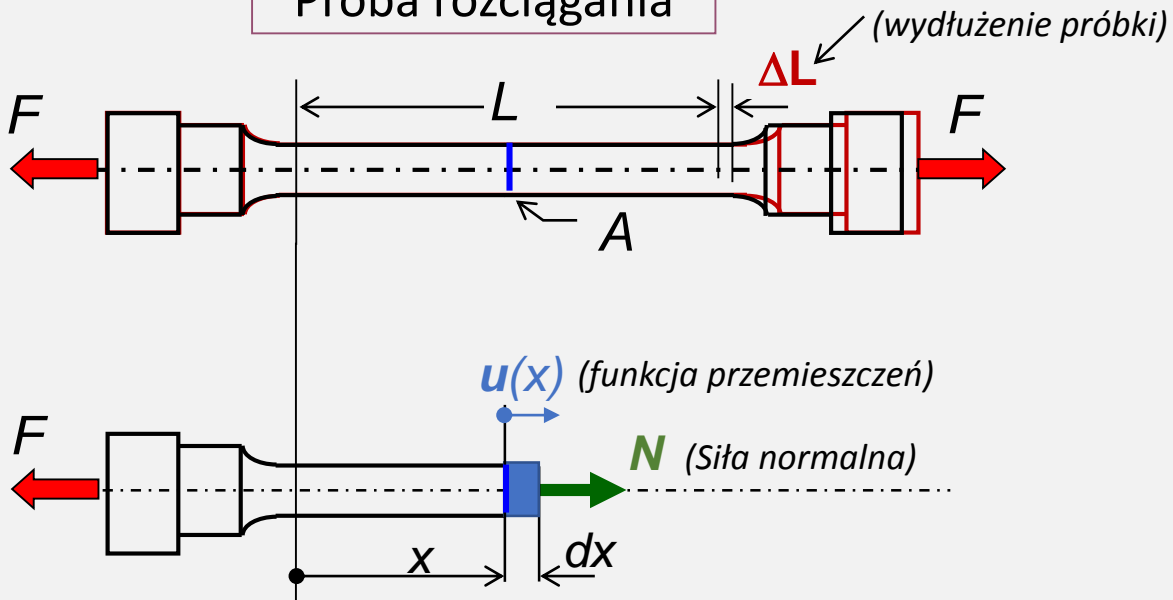
Moduł (72°)
(złożony z dwóch półmodułów)



Półmoduł (36°)
(zawiera 14 elementów wsporczych)

Pojęcia podstawowe

Próba rozciągania



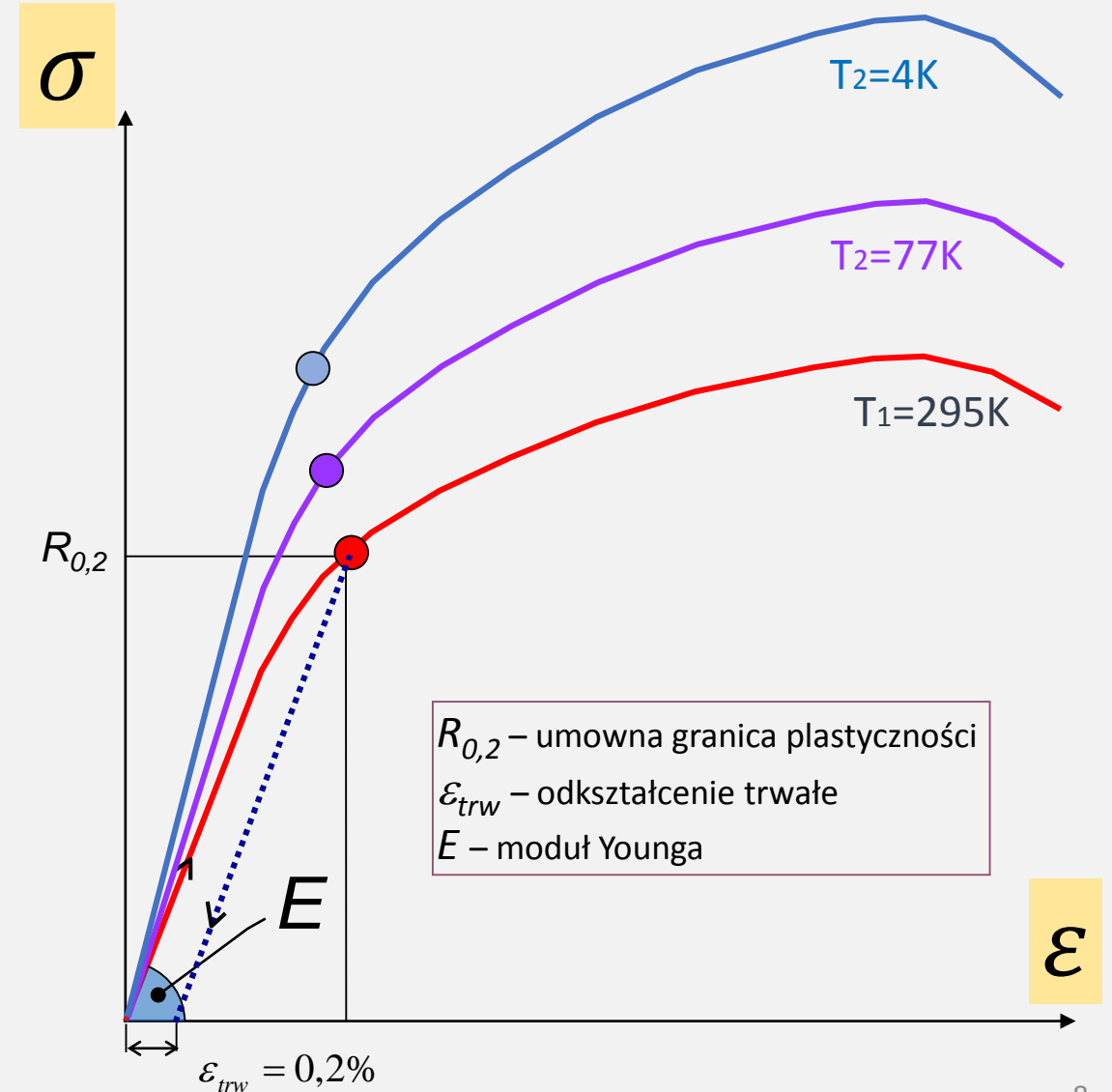
Naprężenie normalne: $\sigma = \frac{N}{A} = \frac{dN}{dA}$



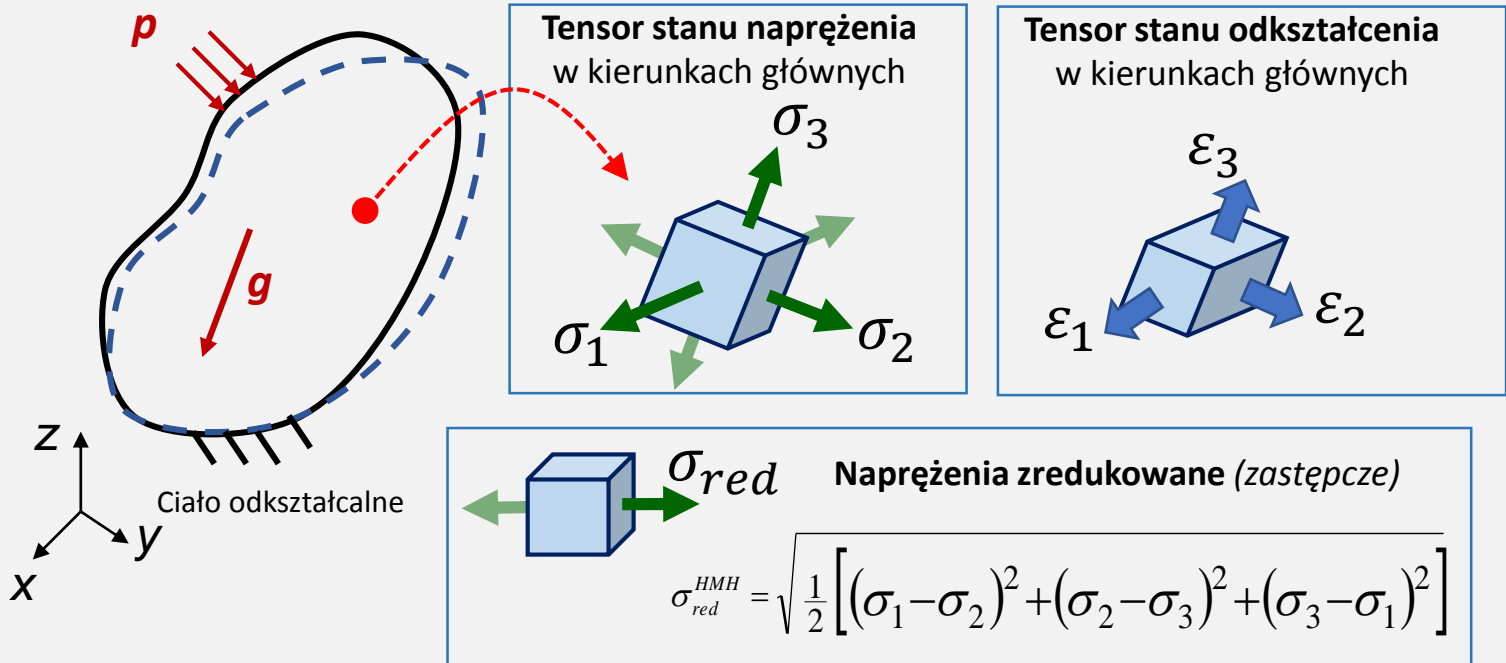
Odształcenie liniowe: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{du}{dx}$



Dla materiału bez wyraźnej granicy plastyczności:



Pojęcia podstawowe



Zasada prac przygotowanych \rightarrow Układ równań:

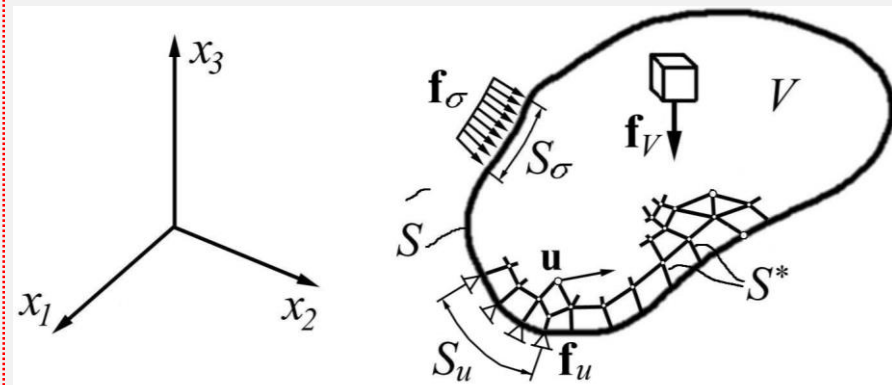
$$[K(q)] \{q\} = \{F\}$$

Macierz sztywności
(*Nieliniowości: kontakt, plastyczność, duże deformacje*)

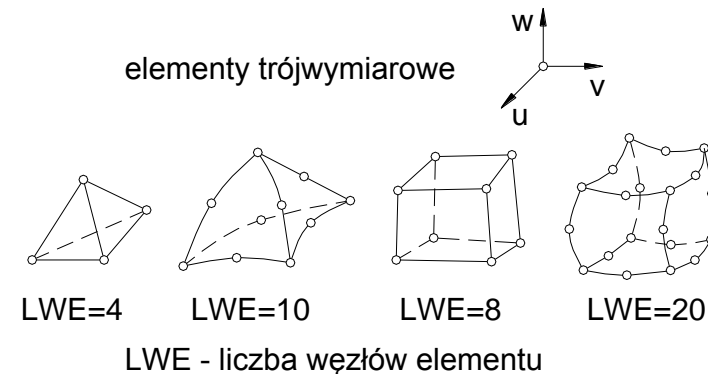
Wektor parametrów węzłowych

Wektor sił

Metoda elementów skończonych



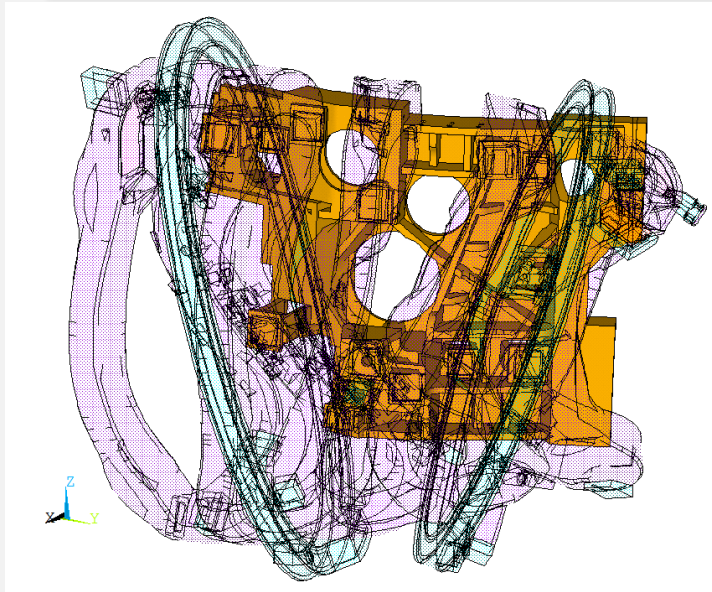
Dyskretyzacja i warunki brzegowe



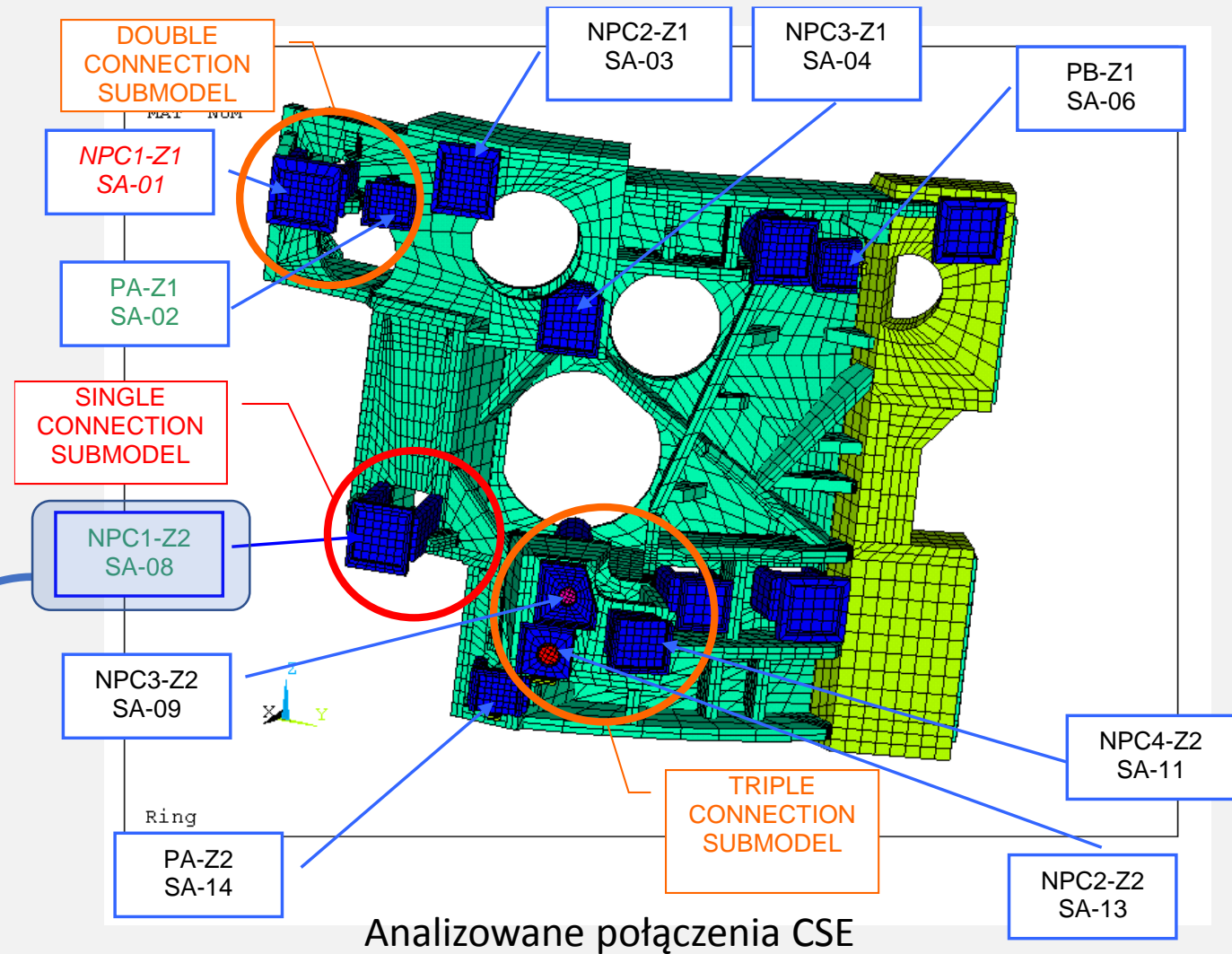
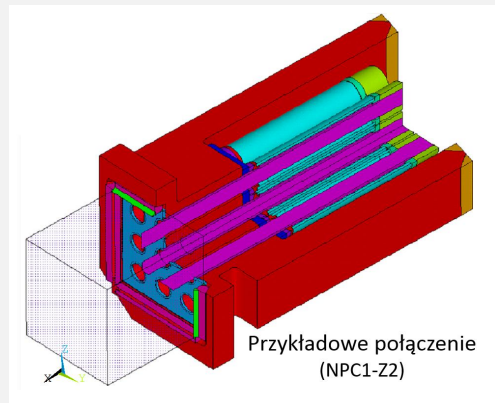
Aproksymacja:

$$u(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^{LWE} N_i(x_1, x_2, x_3) u_i$$

Półmoduł centralnej konstrukcji nośnej reaktora W7-X

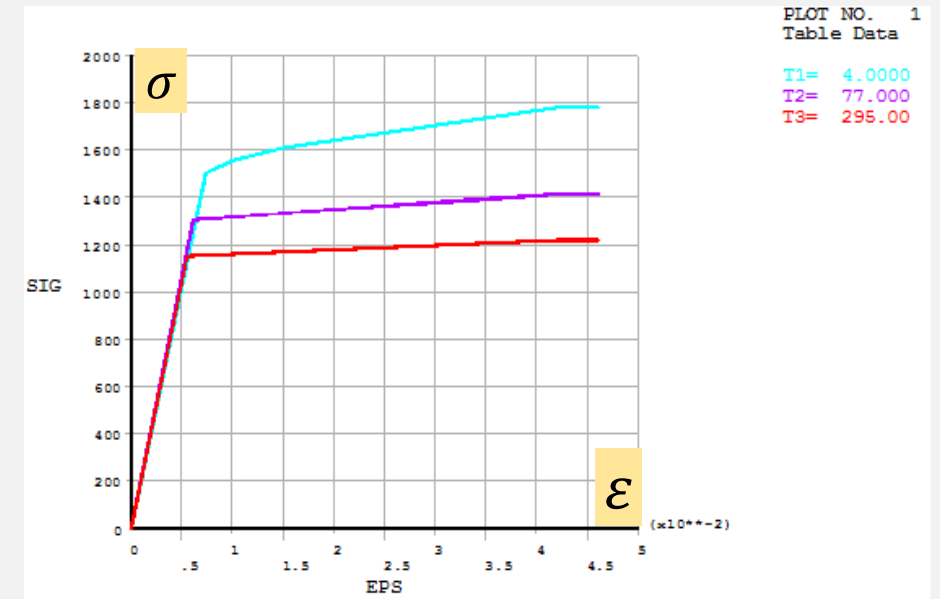
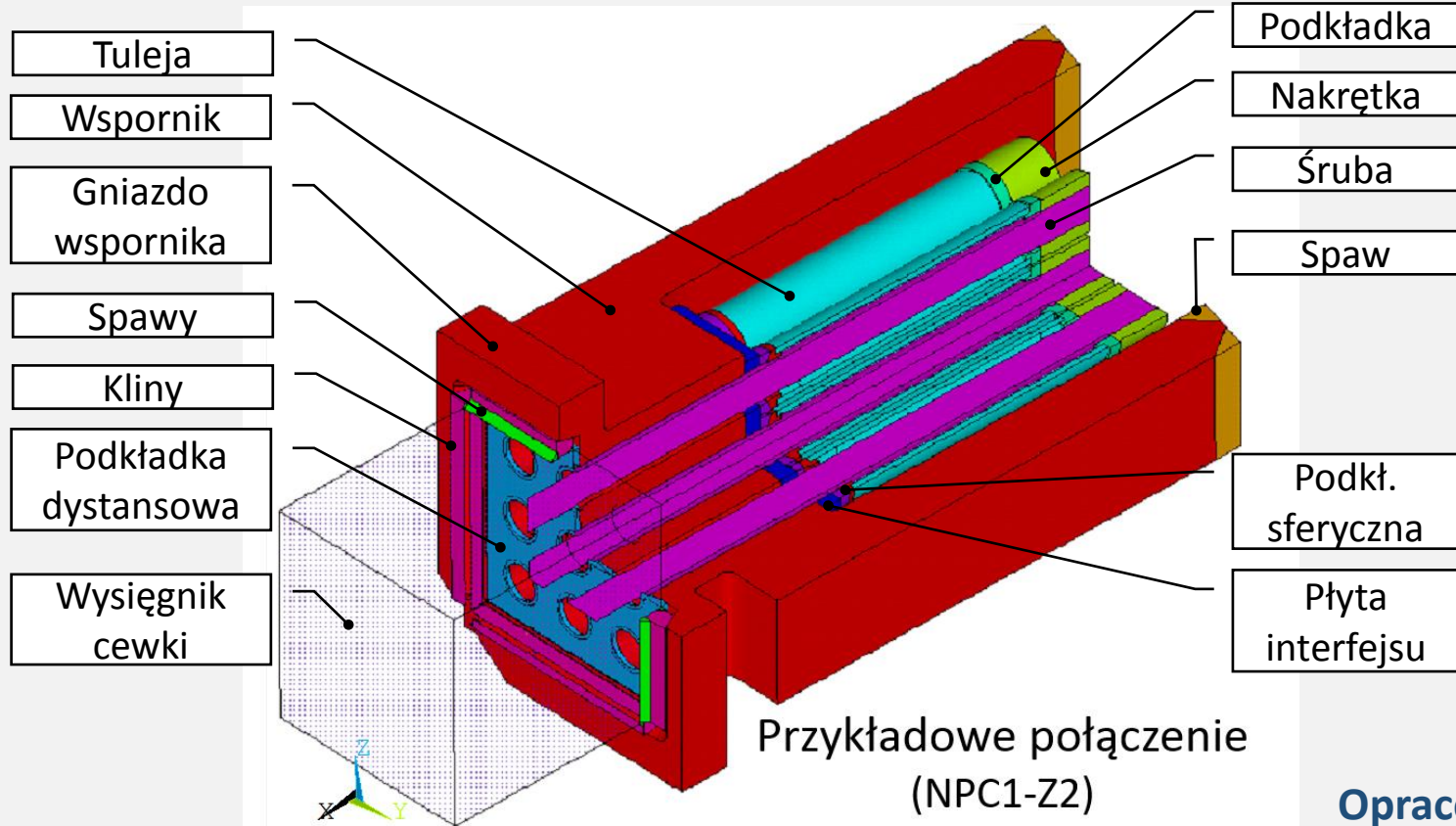


Półmoduł (36°)



Budowa i analiza modeli MES dla wszystkich 14 połączeń (modele standardowe)

Typowy element wsporczy



Materiały:

- Śruby, tuleje, nakrętki i podkładki **inconel 718**
- Pozostałe elementy - **stal**

Śruby są wstępnie naciągnięte

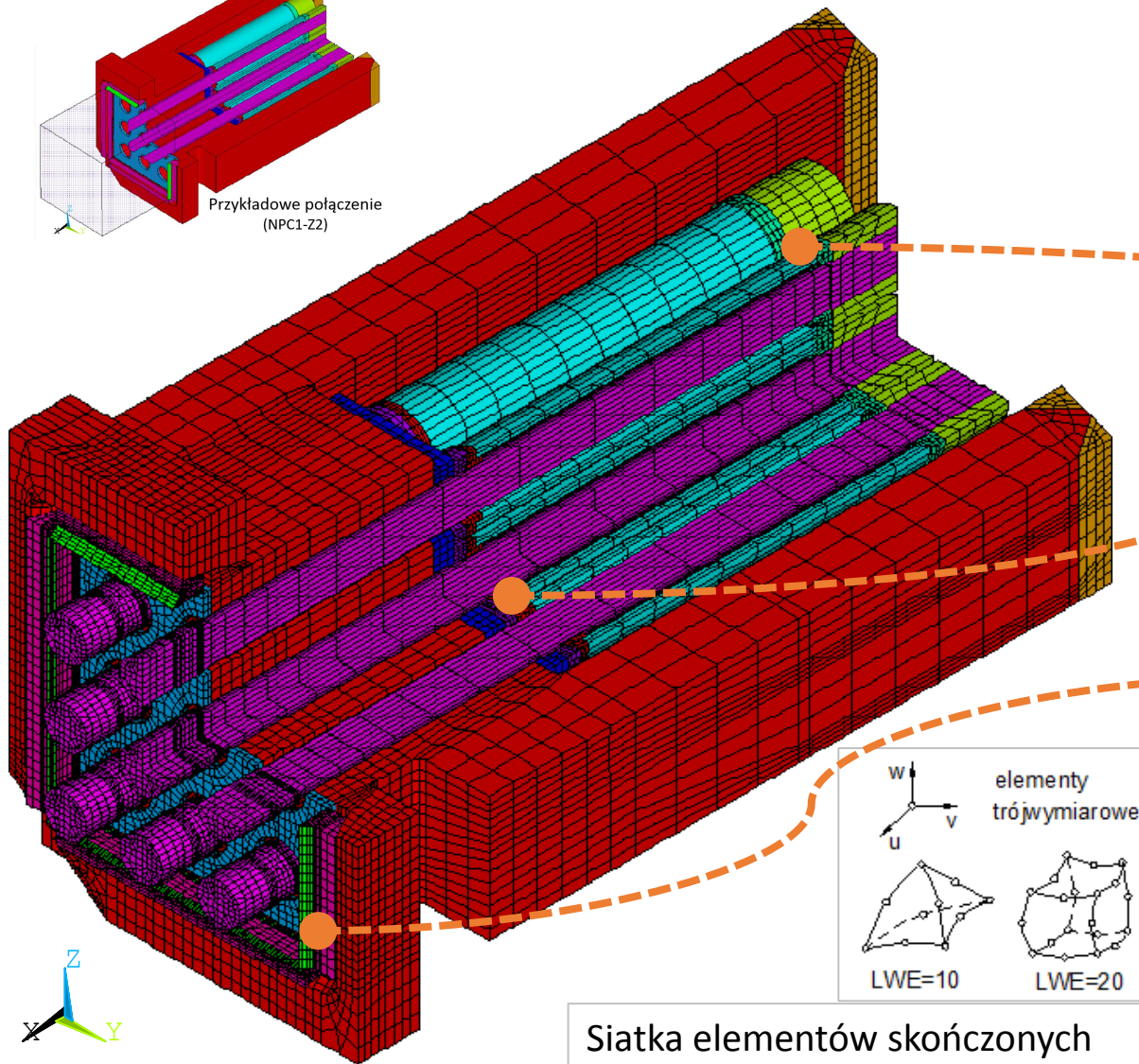
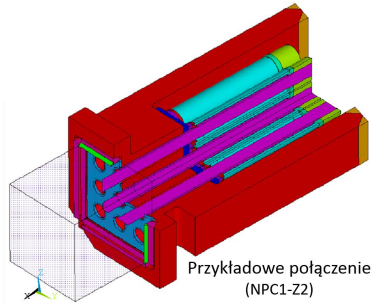
Mechanizm przenoszenia sił i momentów od cewki:

- **tarcie na powierzchni złącza kołnierzowego**
- **poprzez kliny** (między gniazdem i wysięgnikami cewki)

Opracowanie i analiza modeli numerycznych połączeń

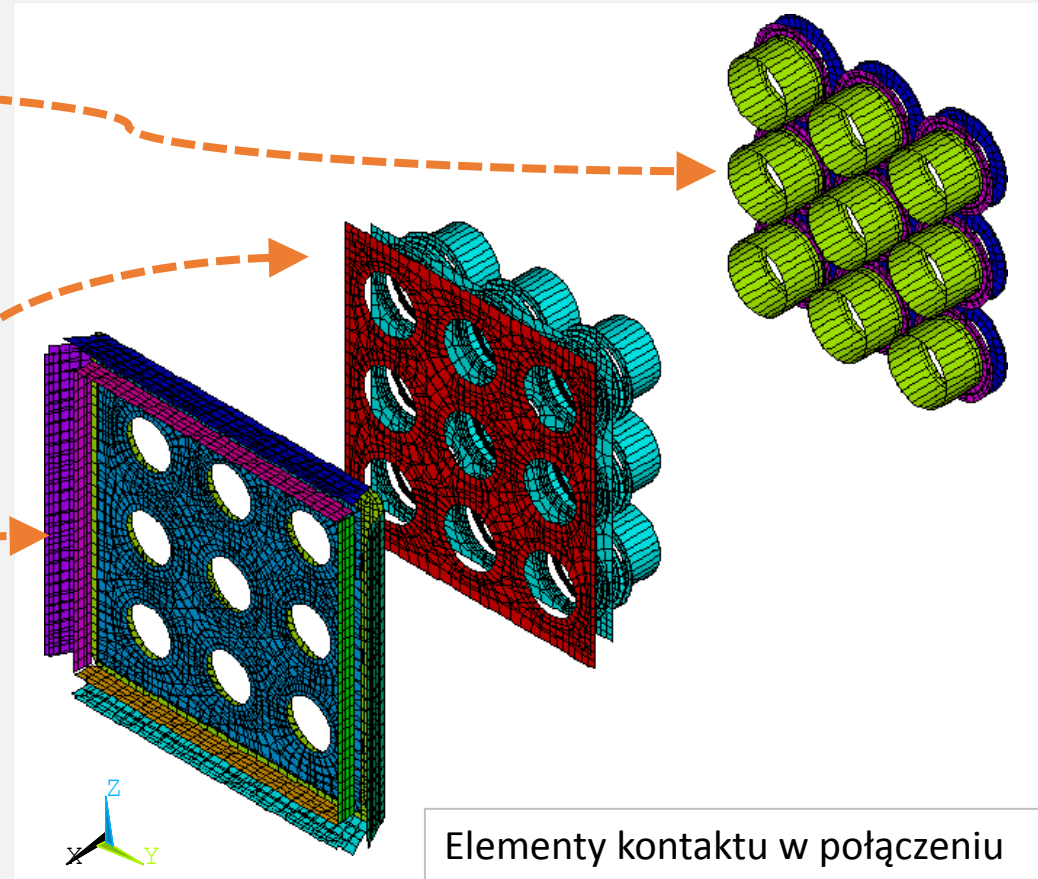
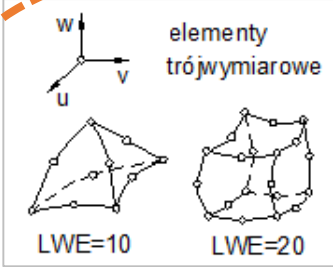
- *naciąg połączeń śrubowych*
- *sprężysto-plastyczny kontakt na powierzchniach docisku*
- *spawy mocujące kliny osadcze*
- *obciążenia wynikające z oddziaływań elektromagnetycznych*

Dyskretyzacja w elemencie wsporczym



Siatka elementów skończonych

System metody elementów skończonych **ANSYS**
+ autorskie procedury wspomagające obliczenia



Przykładowe efekty prac etapu 1 dla W7-X

Siły i momenty

działające w połączeniu

$$F_{xx} = -3,3172e6$$

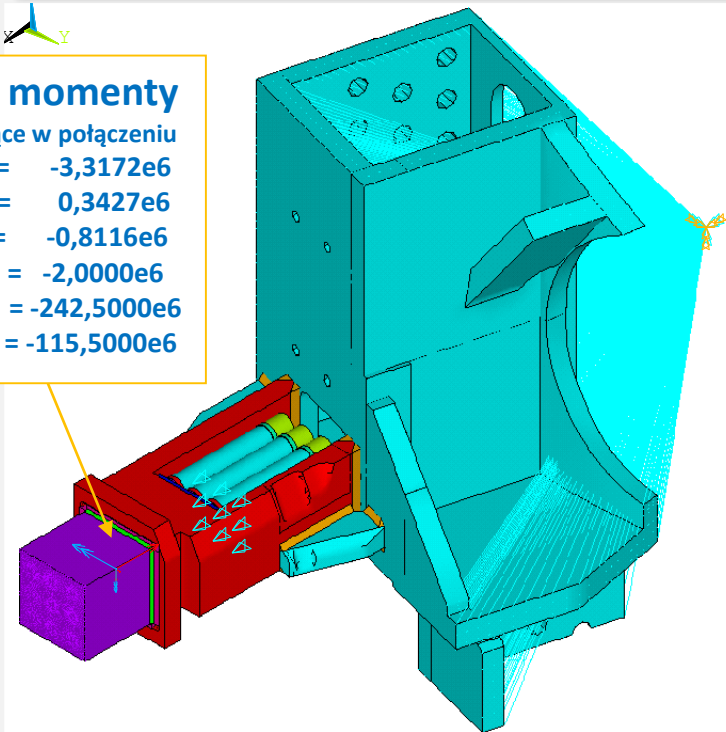
$$F_{yy} = 0,3427e6$$

$$F_{zz} = -0,8116e6$$

$$M_{xx} = -2,0000e6$$

$$M_{yy} = -242,5000e6$$

$$M_{zz} = -115,5000e6$$

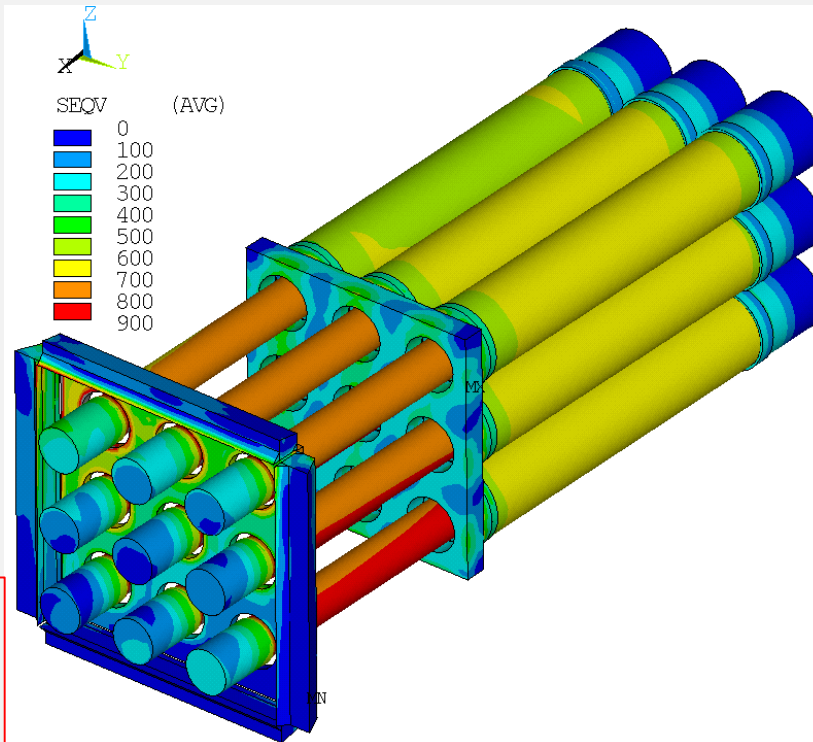


Warunki obciążenia w modelu NPC1-Z2

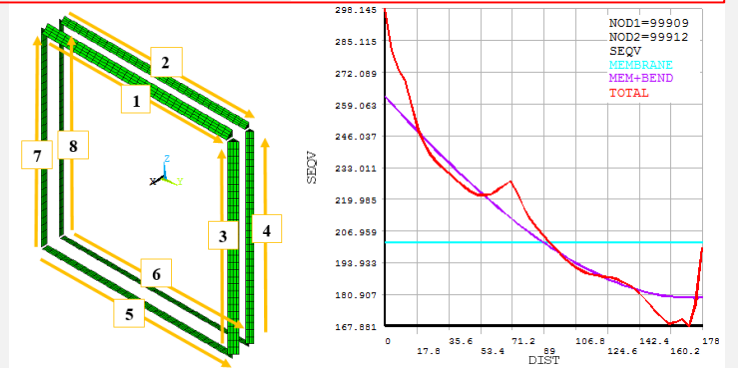
Kroki obciążenia:

1. Naciąg śrub (293K),
2. Schłodzenie do temperatury 4 K,
3. 85 % obciążenia pracy (EM) w temp. 4 K,
4. Wzrost obciążenia pracy z 85 % do 100 %,
5. Wzrost obciążenia pracy z 100 % do 120 %

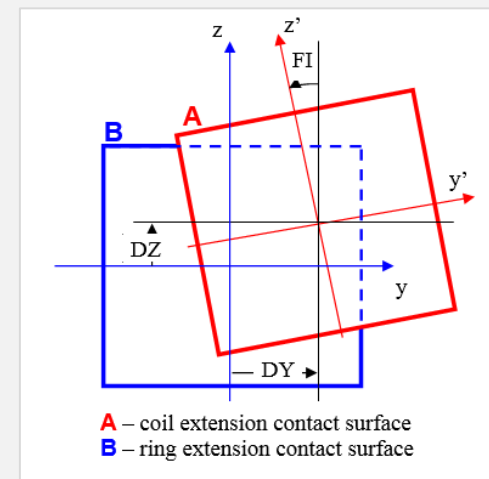
Wypracowanie skutecznej metodyki wiarygodnej oceny stanu wyężenia elementów połączeń cewkowych



Napężenia zredukowane [MPa] w połączeniu



Linearyzacja naprężen zreduk. wzdłuż spawu



Przeskalowane przemieszczenia względne w połączenia gniazdo-wysięgnik

Przykładowe efekty prac etapu 2 dla W7-X

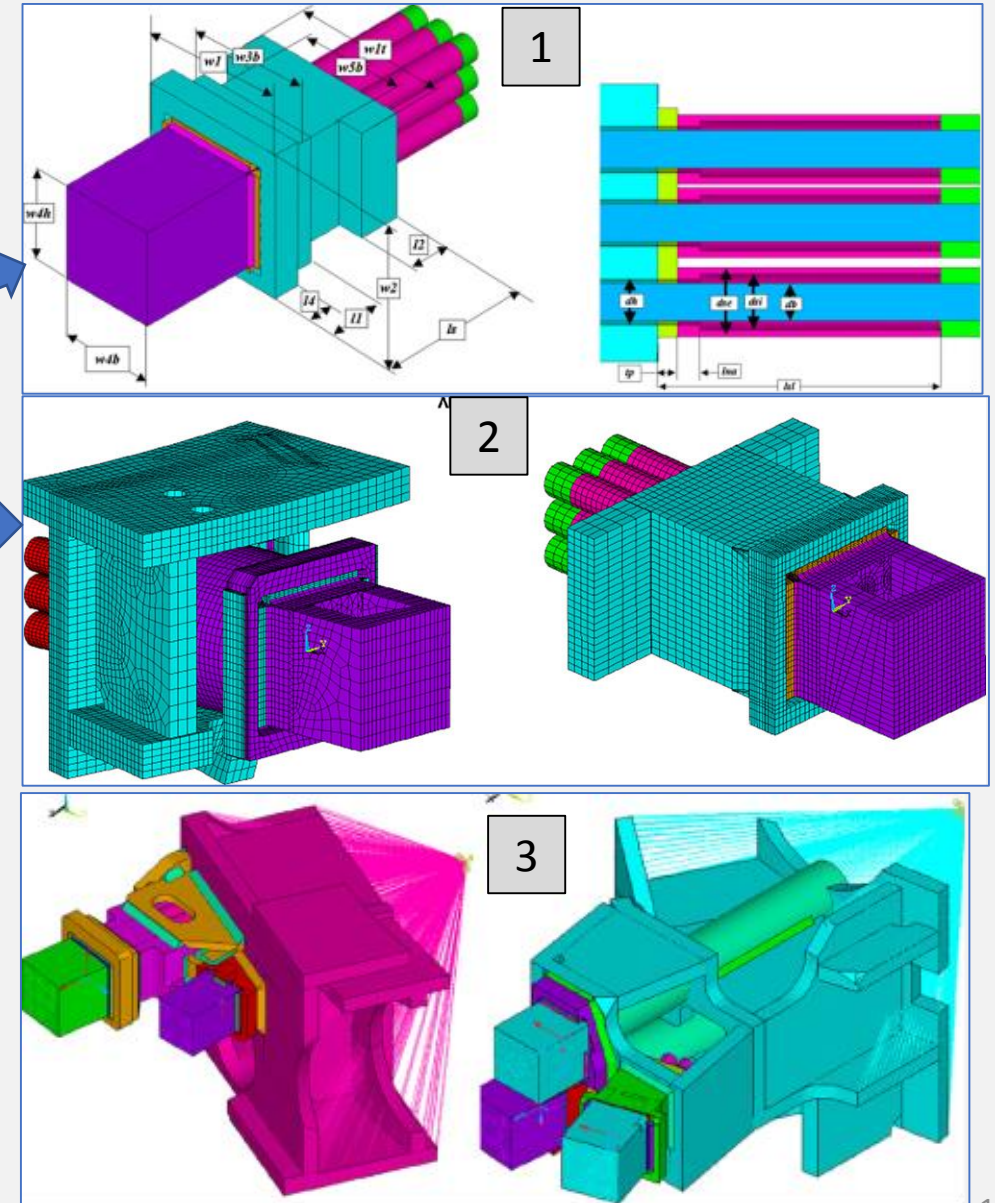
Zbudowano oryginalne, złożone modele sparametryzowane

Trzy rodzaje parametrycznych modeli MES:

1. Standaryzowany model sparametryzowany
2. Półparametryczne modele MES pojedynczych połączeń
3. Półparametryczne modele grup połączeń

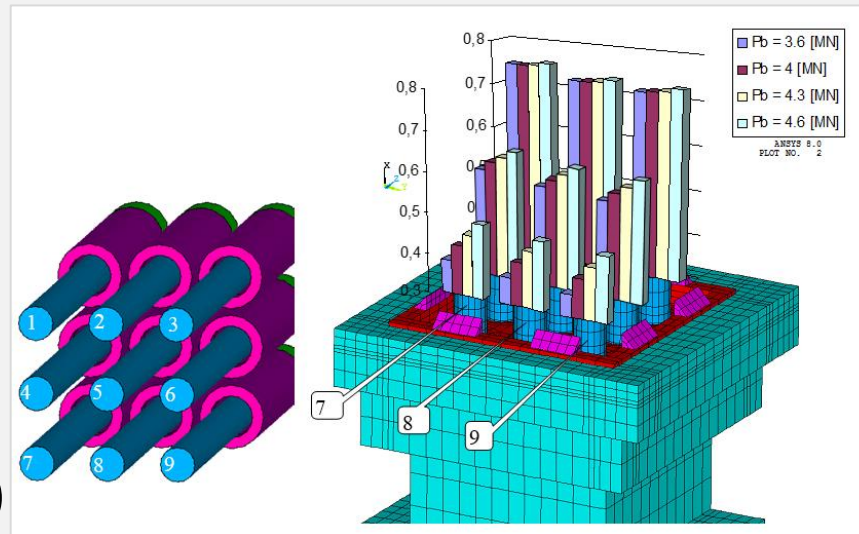
Sparametryzowane zostały:

- długości tulei i śrub, obecność klinów
- właściwości materiału jako funkcje temperatury
- warunki na powierzchniach kontaktu
- obciążenia zewnętrzne

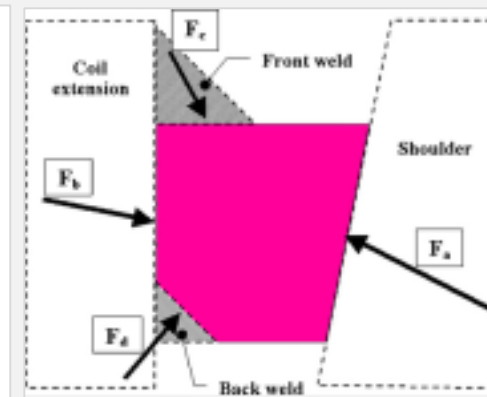


Przykłady wyników etapu 2 dla W7-X

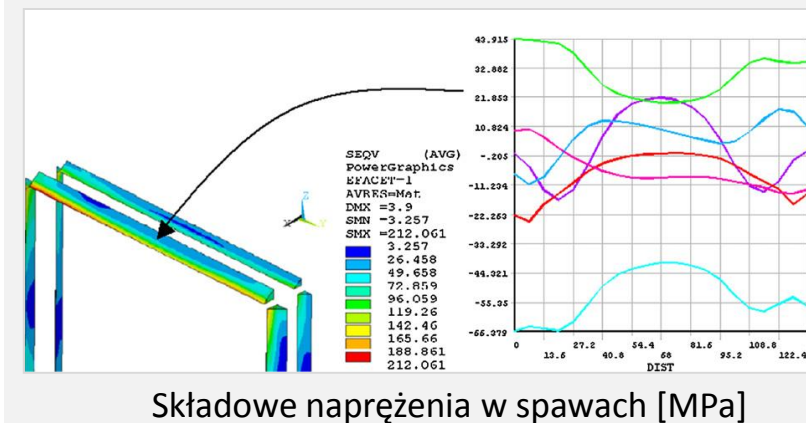
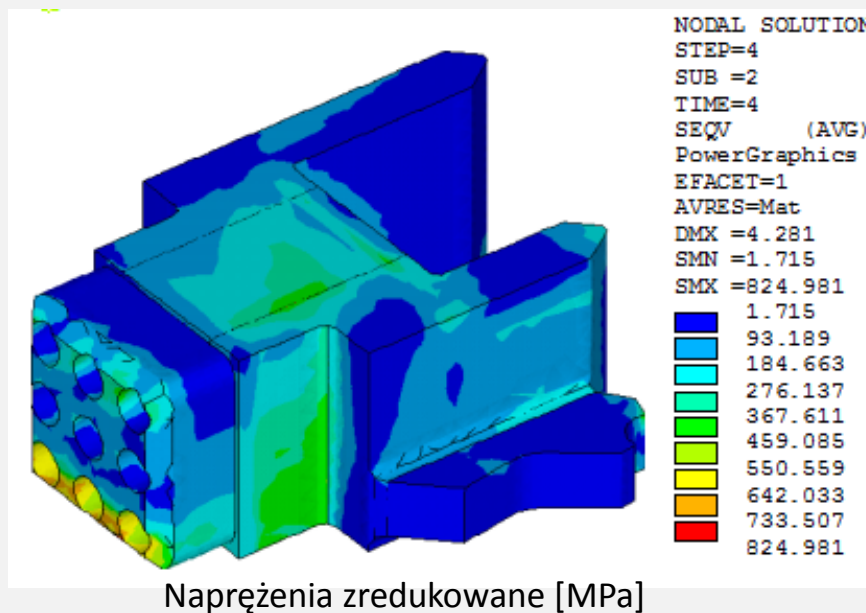
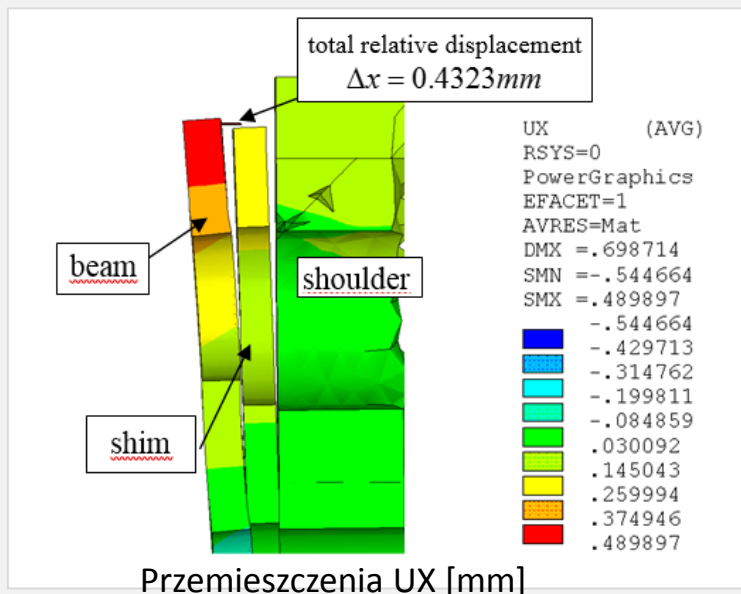
- siły i wyężenie w **śrubach**,
- siły działające na **kliny**,
- przemieszczenia, składowe naprężenia i odkształcenie plastyczne,
- wykresy składowych naprężenia w obrębie **spoin klinów i spoin strukturalnych**,
- **warunki kontaktu** (dylatacja i przesunięcie)



Siły w śrubach



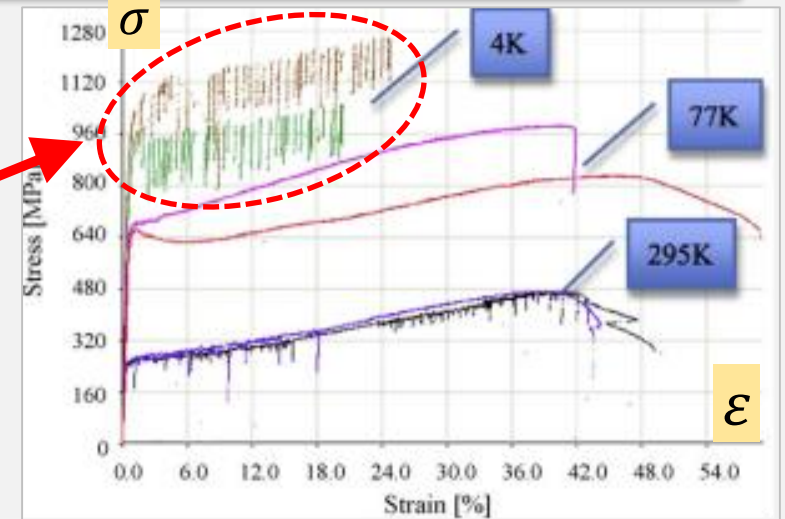
Siły w klinach



Przykładowe efekty prac etapu 3 dla W7-X

Uwzględnienie niestabilnego plastycznego płynięcia materiału (*serration effect*)

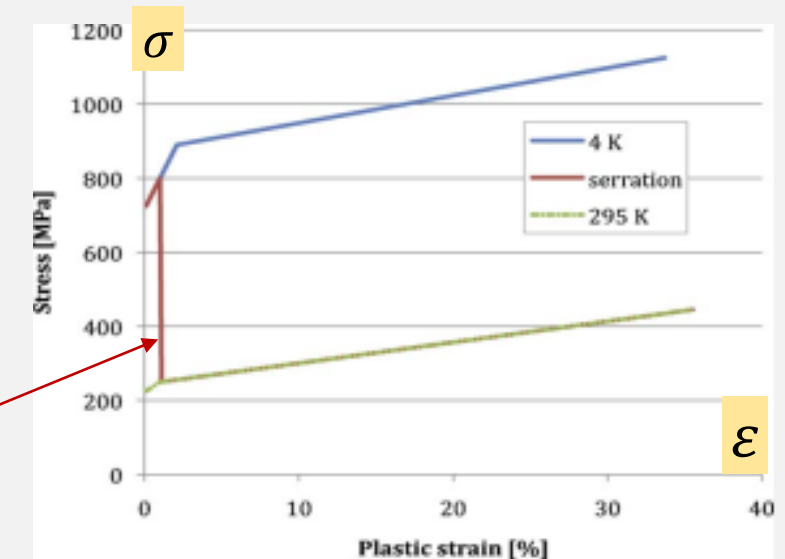
- Wzrost temperatury (*ciepło generowanego w rejonach lokalnych deformacji*)
→ zmniejszenia naprężenia płynięcia
- Lokalne płynięcie materiału (*przy zmniejszającym się naprężeniu*)
→ obciążenie zrelaksowane do mniejszej wartości
(*następnie materiał ponownie ulegnie schłodzeniu*)
- Spadek wytrzymałości → bezpośrednie uszkodzenie



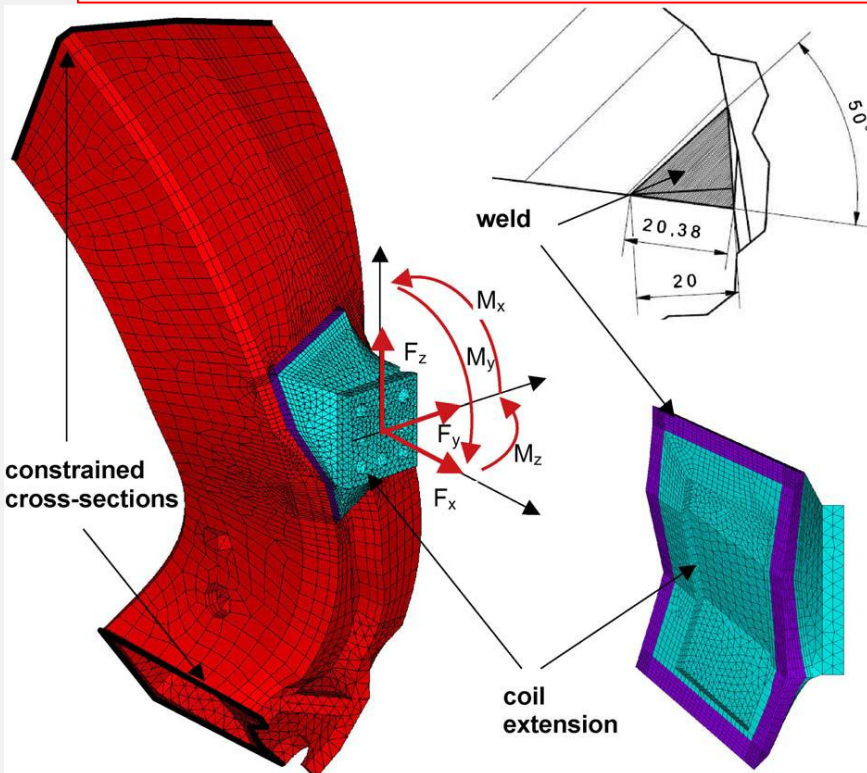
Charakterystyka σ - ϵ dla stali nierdzewnej 1.3960

**Sprawdzenie odporności
na niestabilne
plastyczne płynięcie**

Do 1% odkształcenia umocnienie plast.
według krzywej dla 4K
Powyżej 1% odkształcenia podąża
według krzywej dla 295K



Procedura modyfikacji granicy plastyczności



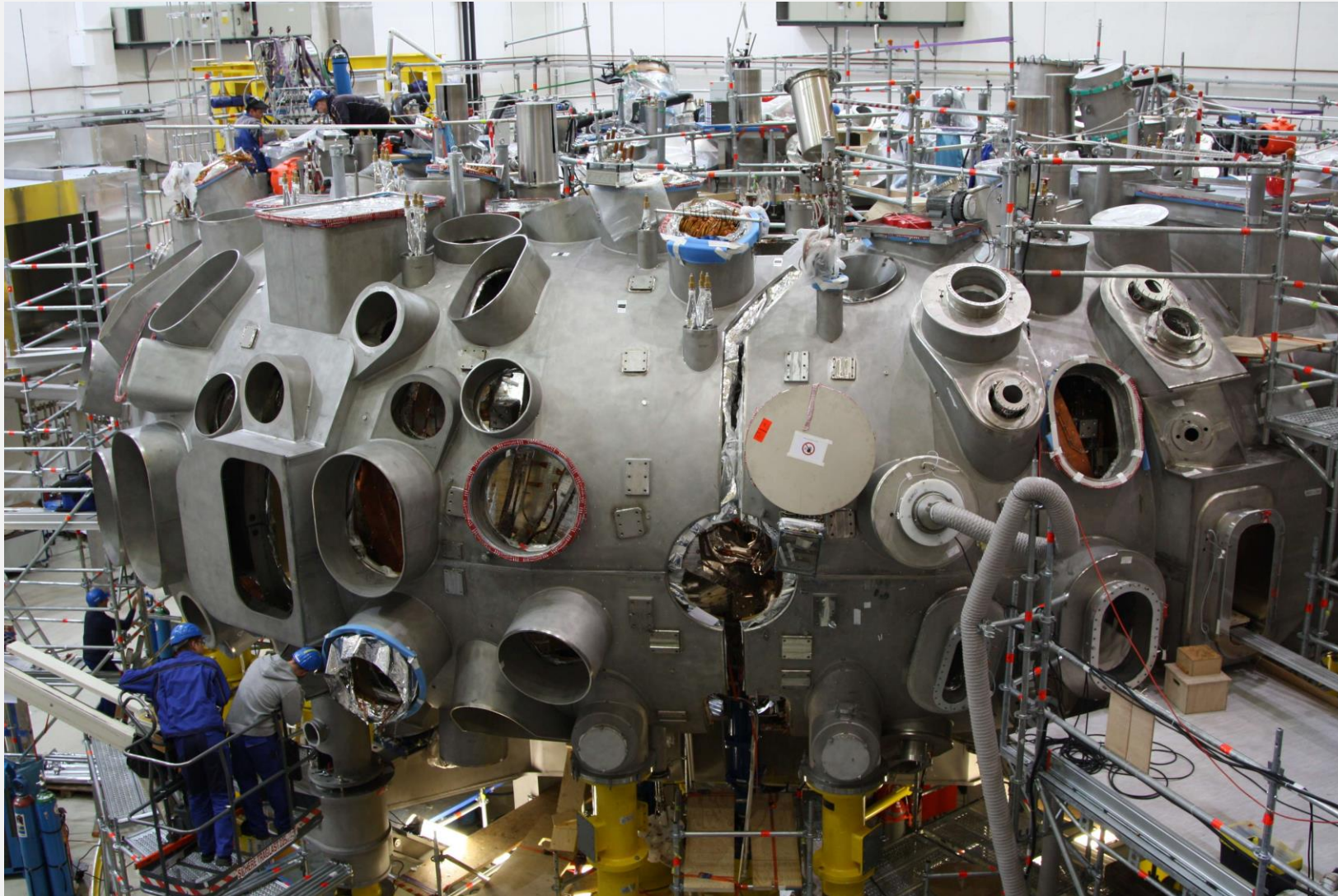
Wykorzystanie modeli MES w budowie reaktora W7-X

- **Podczas projektowania** (*niewspółosiowości, współczynników tarcia, odchyień, skurczu spawalniczego, integralności spoin*)
- **W fazie montażu urządzenia** (*możliwość skrócenia śrub i tulei oraz zmian liczby i długości klinów*)
- **Do analiz cyklicznych** (*ocena ruchów względnych komponentów*)
- **Zakończenie budowy reaktora** w kwietniu 2014 roku

Zbudowane modele numeryczne i wypracowane procedury obliczeń okazały się skutecznym narzędziem przy projektowaniu i montażu reaktora



Wykorzystanie modeli MES w budowie reaktora W7-X



Pierwsza operacja plazmowa (uruchomienie reaktora) 10 grudnia 2015 roku



Dziękuję za uwagę