



# HTGR-POLA: obecny status i przyszłe zadania

*prof. Mariusz P. Dąbrowski, NCBJ*

**Seminarium UZ3,  
25.06.2024**



**NARODOWE  
CENTRUM  
BADAŃ  
JĄDROWYCH  
ŚWIERK**



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo  
Edukacji i Nauki



Ministerstwo  
Klimatu i Środowiska

# Generacje reaktorów jądrowych

## Rozwój energetyki jądrowej

### Generacja I

Wczesne prototypy reaktorów



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

### Generacja II

Reaktory budowane komercyjnie



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

### Generacja III

Zaawansowane LWR-y



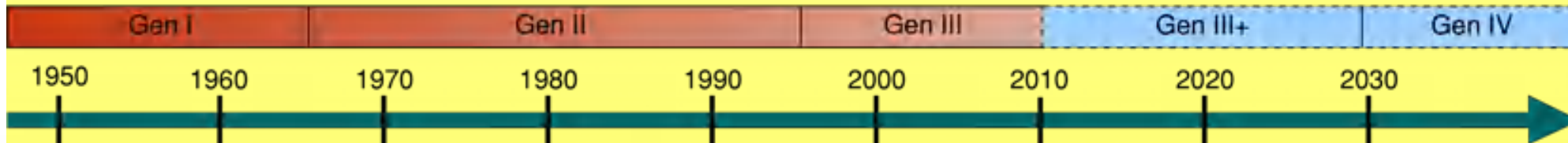
- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

### Reaktory obecnie budowane

Generacja III+  
Ewolucyjny rozwój reaktorów  
Bardziej ekonomiczne i bezpieczniejsze reaktory

### Generacja IV

- Wysoka efektywność
- Zwiększone bezpieczeństwo
- Redukcja odpadów
- Niepodatne na rozprzestrzenianie



**Generacja III i III+ to przede wszystkim reaktory dużej mocy do produkcji prądu elektrycznego. Technologia wybrana dla Polski w PPEJ: reaktor AP1000 firmy Westinghouse**



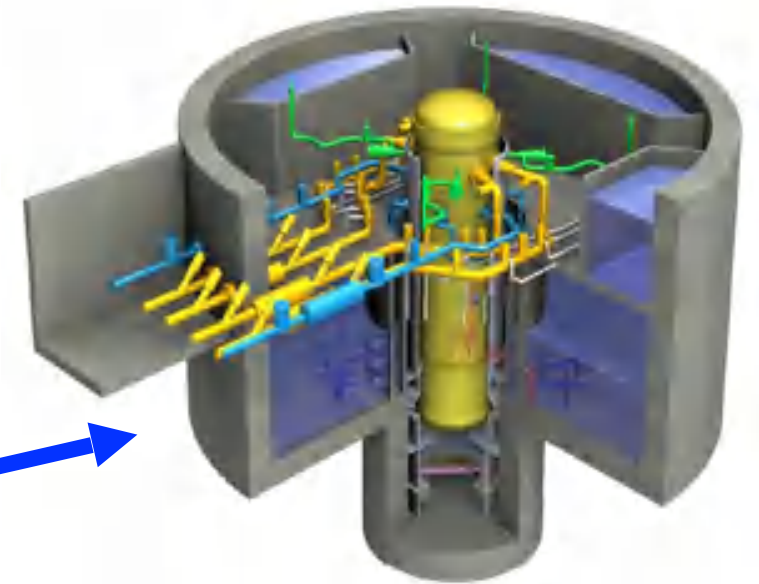
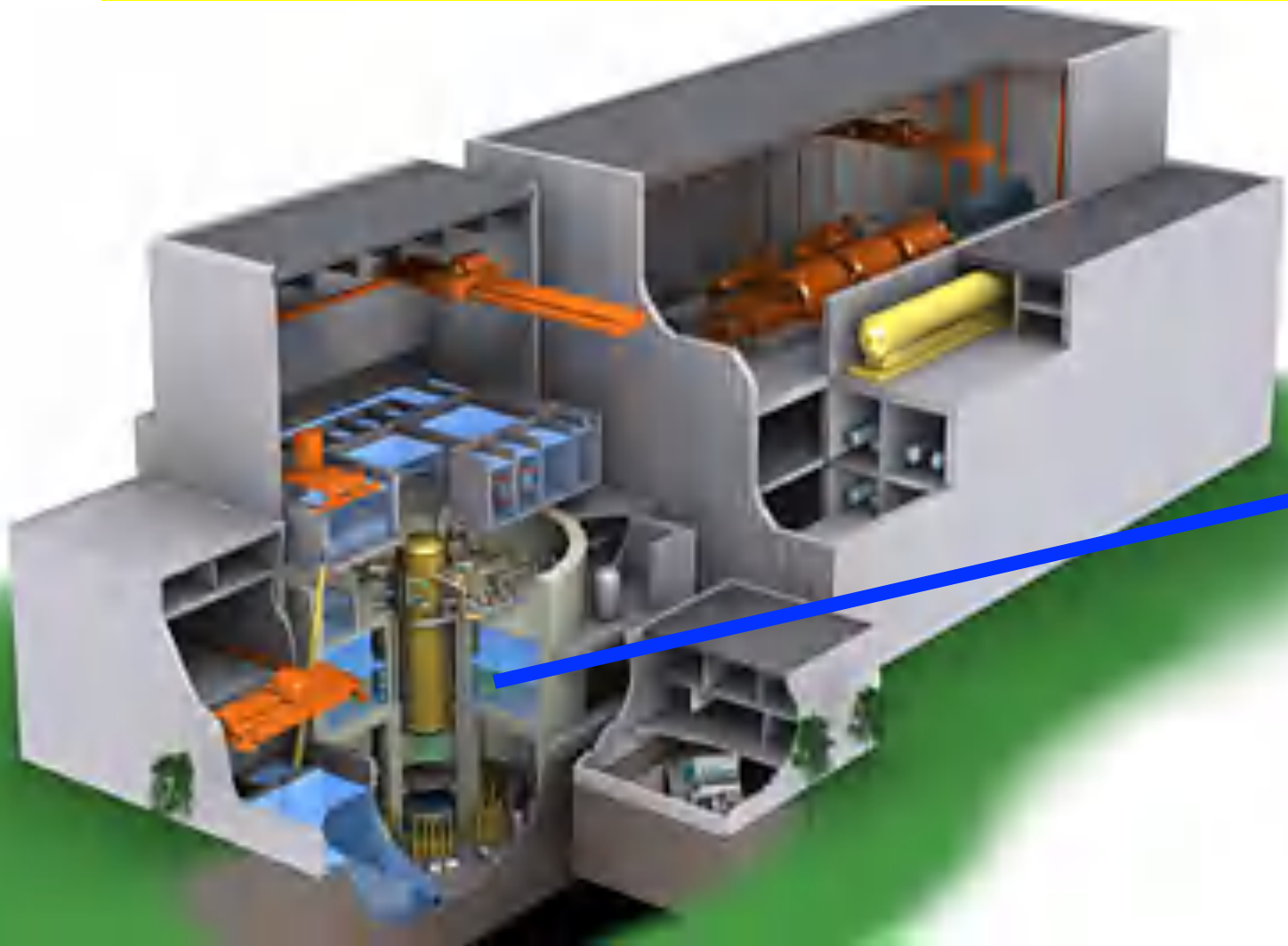
**Ale od kilku lat także Małe Reaktory Modułowe (SMR) -  
(lekkowodne PWR i BWR) - temp. maks. 300 C**



**Przykład (OSGE):**

**B W R X 3 0 0 -  
przeskalowany w  
dół do mocy 300  
 $MW_{el}$  reaktor  
wodny-wrzący  
(ESBWR) firmy  
GE HITACHI**

# ESBWR - reaktor gen. III+ ( $1600 \text{ MW}_{el}$ )



Pasywne bezpieczeństwo.  
Woda spływa w dół przez 72  
godziny bezobsługowo.

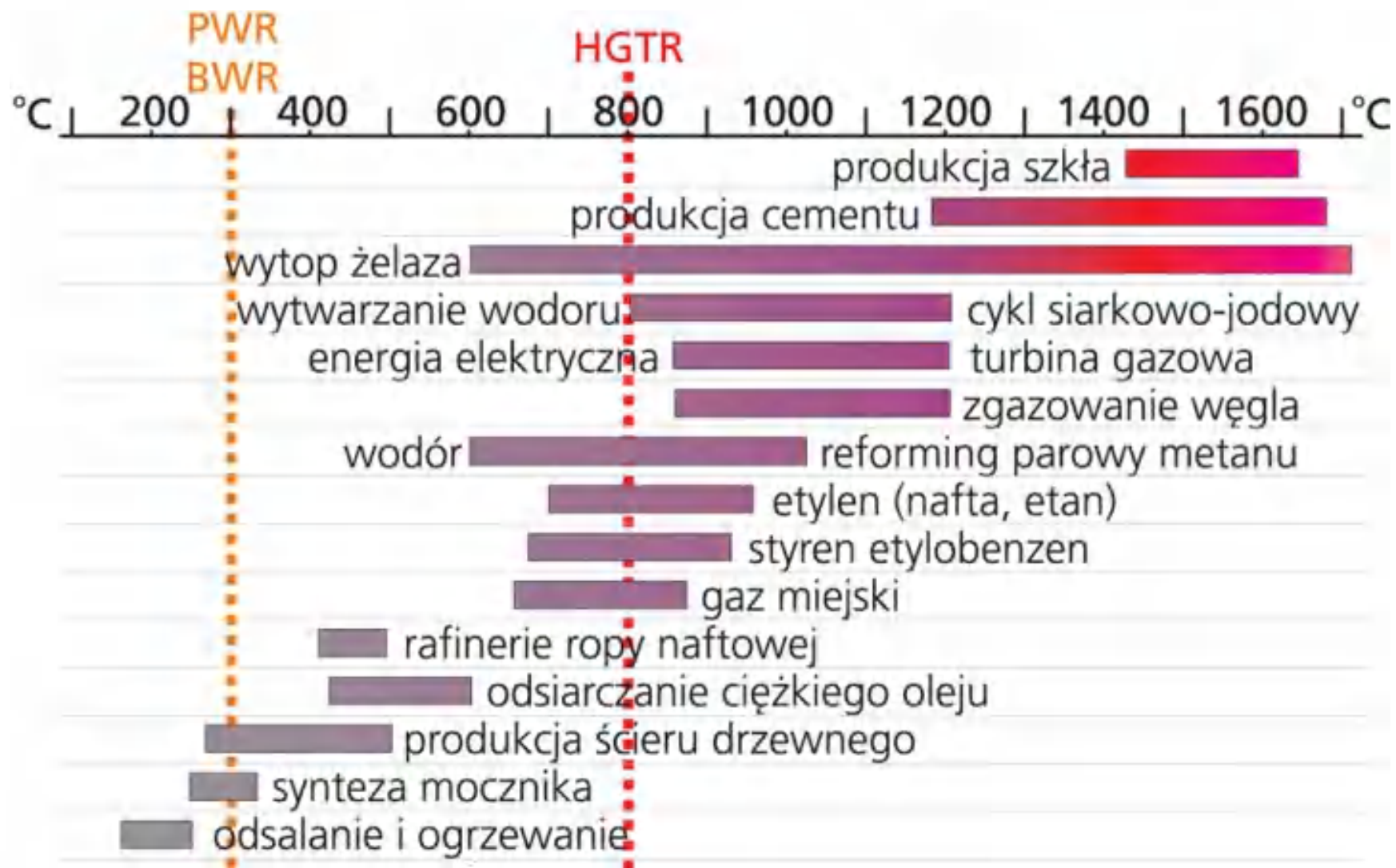
# Kogeneracja/Poligeneracja jądrowa

Reaktory jądrowe przede wszystkim **generują ciepło**, które dopiero później za pomocą pary wodnej jest **przetwarzane** na prąd elektryczny. Są bezemisyjne (brak CO<sub>2</sub>).

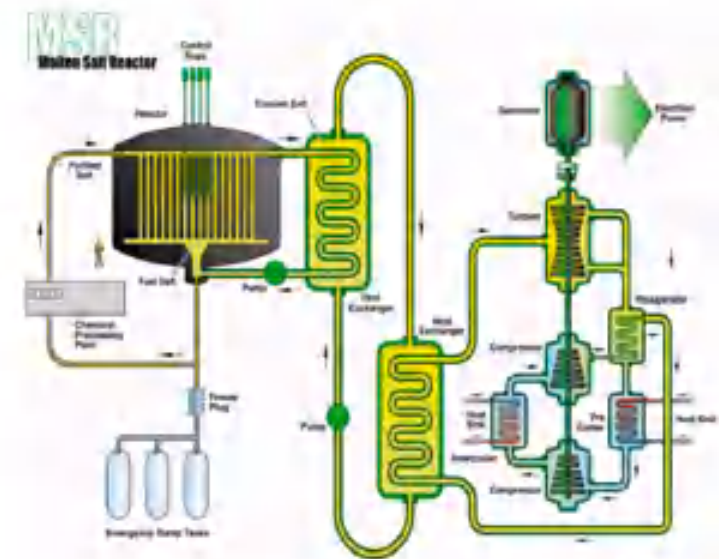
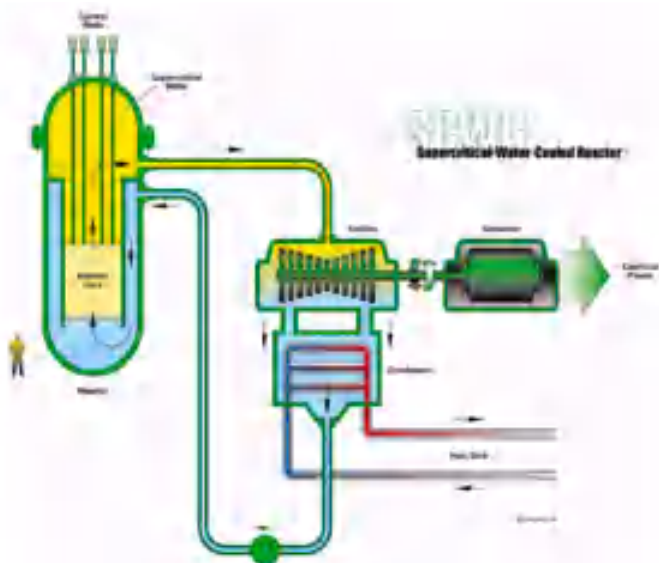
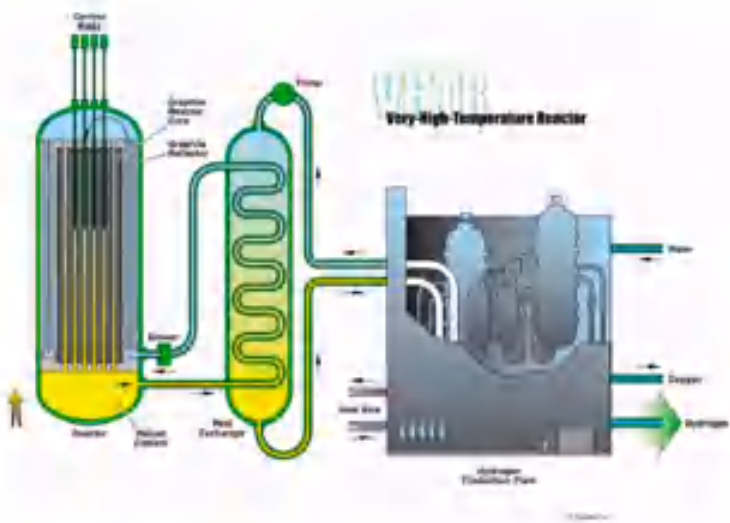
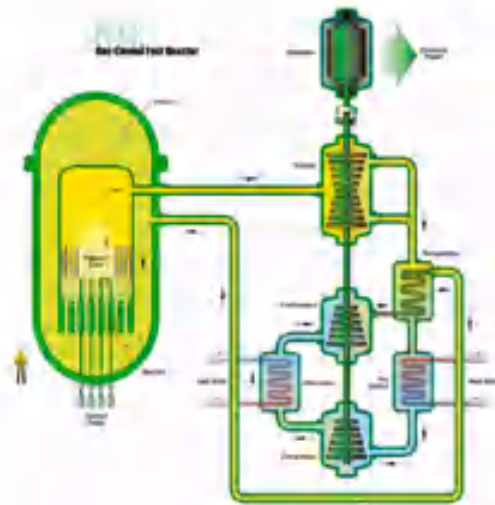
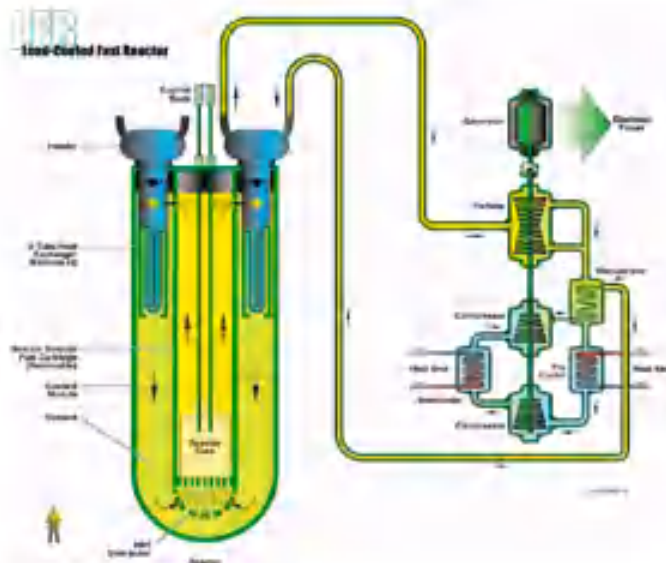
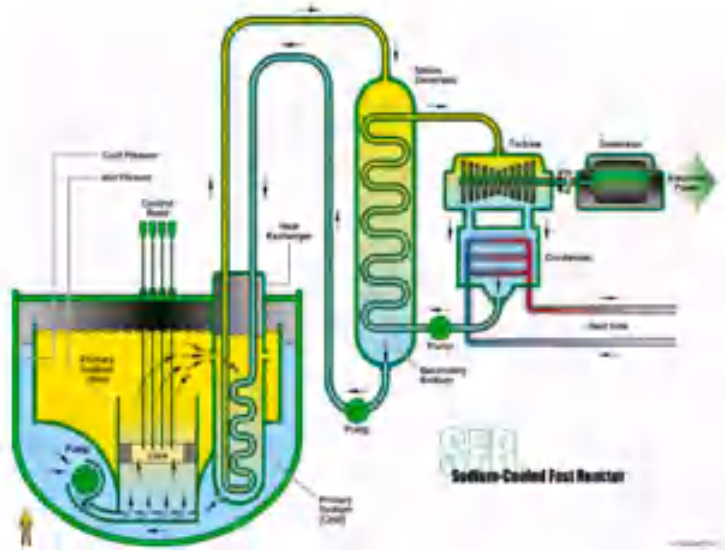
To ciepło można wykorzystywać w mniej lub bardziej bezpośredni sposób:

- A. **do celów komunalnych (ogrzewanie, ciepła woda) - temp. ok. 200 C,**
- B. **do odsalania wody morskiej - temp. ok. 200 C,**
- C. **do procesów przemysłu chemicznego - temp. 400-1000 C,**
- D. **do produkcji wodoru (min. 600 C),**
- E. **do produkcji paliw syntetycznych.**

## Reaktory gen. II i III nie sięgają temperatur chłodziwa (pary) potrzebnych przemysłowi chemicznemu:



# Reaktory IV generacji - Advanced Modular Reactors (AMR) mogą sięgnąć tych temperatur



# Dostępne technologie jądrowe IV generacji (AMR) i temperatury pary jakie mogą osiągnąć

| Technologia | Pełna nazwa   | Temp. pary [C]       | Zaawansowanie              |
|-------------|---|----------------------|----------------------------|
| VHTGR/HTGR  | Reaktor bardzo/<br>wysokotemperaturowy<br>chłodzony gazem   | 800-1000/<br>540-600 | Reaktory działające        |
| SFR         | Reaktor prędkości<br>chłodzony sodem                        | 450-550              | Reaktory działające        |
| LFR         | Reaktor prędkości<br>chłodzony ołowiem                      | 480-800              | Demonstrator<br>/w budowie |
| GFR         | Reaktor prędkości<br>chłodzony gazem                        | 850                  | Prototyp                   |
| MSR         | Reaktor na stopionych<br>solach                             | 535-800              | Prototyp                   |
| SCWR        | Reaktor na parametrach<br>nadkrytycznych pary<br>chłodzącej | 510-625              | Koncepcja                  |

## Polski projekt skupia się na reaktorach HTGR

- produkcja pary o temp.  $550^{\circ}\text{C}$  (drugi obieg) typowej dla potrzeb instalacji chemicznych (np. synteza amoniaku)
- chłodzenie (obojętnym chemicznie i radiacyjnie) helem o temp. na wyjściu z reaktora  $750^{\circ}\text{C}$
- zastosowanie odpornego na wysoką temperaturę paliwo TRISO
- inherentne/pasywne/samoczynne/naturalne bezpieczeństwo
- w wypadku awarii chłodzenie za pomocą procesów naturalnych (przewodzenie i wypromieniowanie ciepła)
- brak możliwości uszkodzenia (stopienia) rdzenia, nie wymaga strefy wykluczenia wokół reaktora
- możliwa konstrukcja modułowa (typu SMR) reaktora i instalacji konwersji energii

# Potencjalne inwestycje w reaktory HTGR w Polsce (dobrze zdefiniowany rynek)

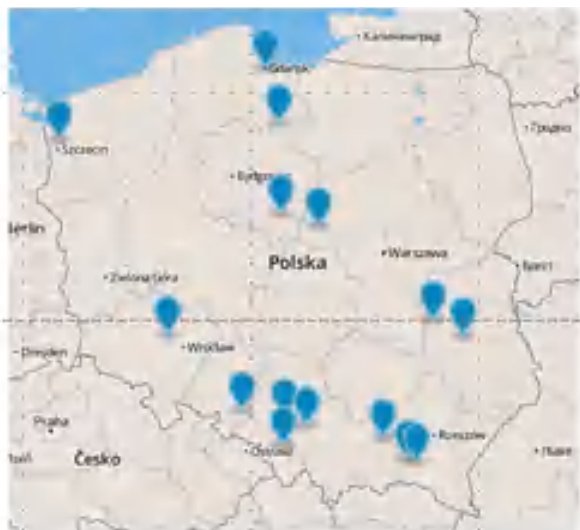
## Kogeneracja:

- 13 polskich zakładów chemicznych potrzebuje 6500 MW ciepła o temp. 400-550°C

- Zużycie 200 TJ / rok, równoważne spaleniu >5 mln t naturalnego gazu lub ropy

## Produkcja prądu:

- ok. 50 jednostek 200 MW<sub>e</sub> do wymiany po roku 2035



| Instalacja                                | kotły | MW   |
|---|-------|------|
| ZE PKN Orlen S.A. Płock                   | 8     | 2140 |
| Arcelor Mittal Poland S.A.                | 8     | 1273 |
| Zakłady Azotowe "Puławy" S.A.             | 5     | 850  |
| Zakłady Azotowe ANWIL SA                  | 3     | 580  |
| Zakłady Chemiczne "Police" S.A.           | 8     | 566  |
| Energetyka Dwory                          | 5     | 538  |
| International Paper - Kwidzyn             | 5     | 538  |
| Grupa LOTOS S.A. Gdańsk                   | 4     | 518  |
| ZAK S.A. Kędzierzyn                       | 6     | 474  |
| Zakł. Azotowe w Tarnowie Moszczicach S.A. | 4     | 430  |
| MICHELIN POLSKA S.A.                      | 9     | 384  |
| PCC Rokita SA                             | 7     | 368  |
| MONDI ŚWIECIE S.A.                        | 3     | 313  |

# Sprawdzona technologia - wybudowane i przetestowane reaktory HTGR na świecie

## ▶ Reaktory eksperymentalne



**DRAGON, U.K.**  
**20 MW**  
1963-76



**Peach Bottom, USA**  
**200 MWt**  
1967-74



**AVR, Niemcy**  
**15 MWe**  
1967-88



**HTR-10, Chiny**  
**10 MWt**  
2000 - dzisiaj



**HTTR, Japonia**  
**30 MWt**  
1998 - dzisiaj

## ▶ Prototypy przemysłowe



**Fort Saint-Vrain, USA**  
**300 MWe**  
1976-89

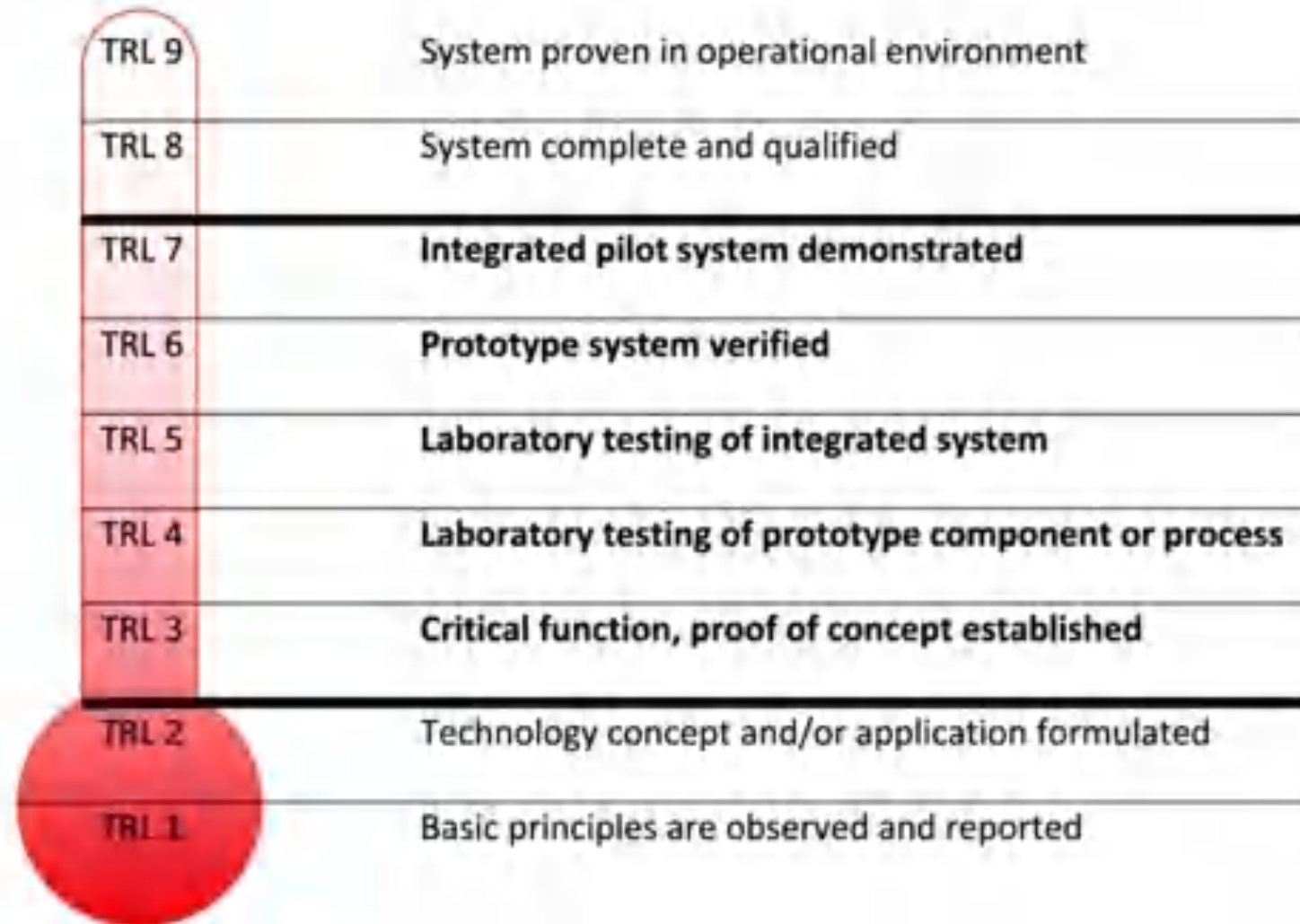


**THTR, Niemcy**  
**300 MWe**  
1986-89



**HTR-PM, Chiny**  
**2 x 106 MWe**  
09/2021; w sieci od  
6.12.2023

## Technology Readiness Level (Poziom dojrzałości technologii) maksymalny - sprawdzona w działaniu





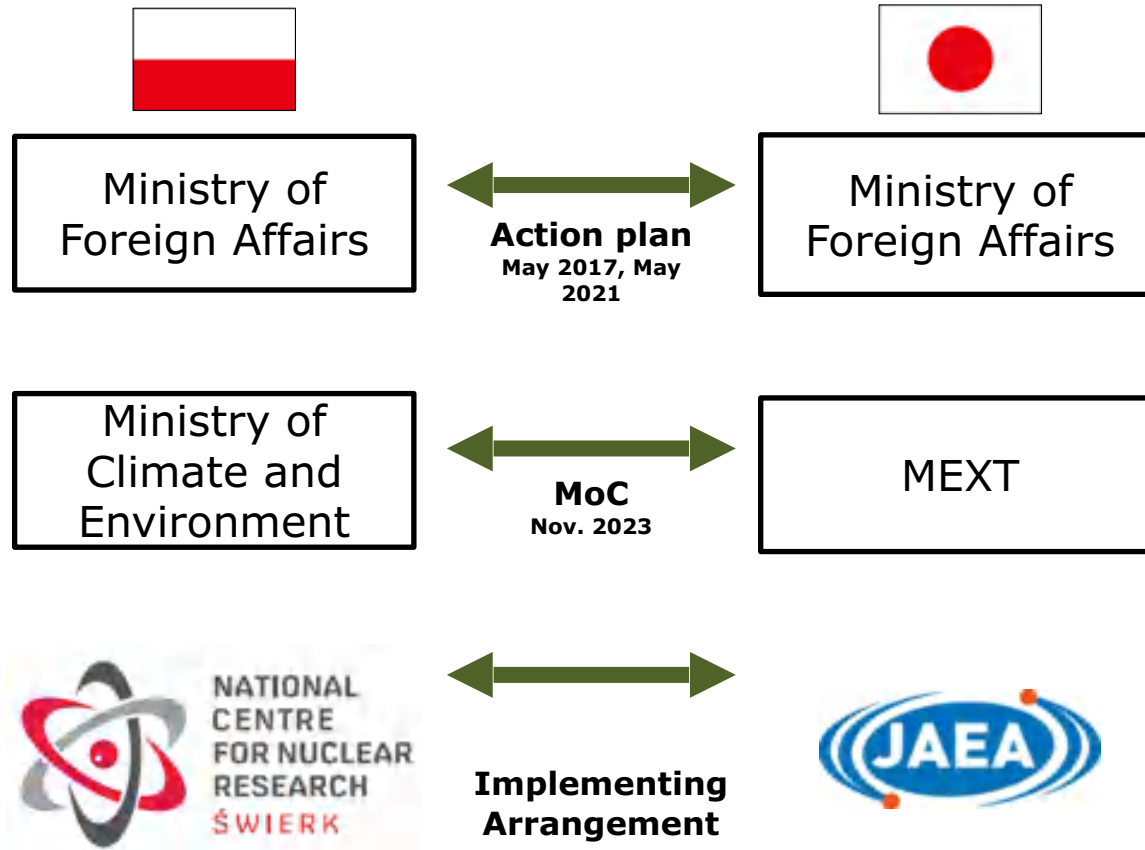
## STRATEGICZNY PARTNER - JAEA, Japonia



Strategiczne Partnerstwo pomiędzy Rządem RP a Rządem Japonii na lata 2021-2025 umożliwia współpracę w obszarze HTGR pomiędzy **NCBJ a JAEA (Japońską Agencją Energii Atomowej)**.

Partnerstwo pozwala na **transfer wiedzy** i wsparcia do NCBJ zarówno na poziomie koncepcyjnym, jak i podstawowego projektu, w oparciu o doświadczenia japońskiego zespołu HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor).

Konsultacje propozycji projektowej JAEA z NCBJ w **poszukiwaniu najlepszej opcji** odpowiadającej wymaganiom polskiego rynku.



Between MOFAs (May 2021)



Between MKiS and MEXT (Nov. 2023)



Between NCBJ and JAEA (Nov. 2022)

- May 2017: Signed "Memorandum of cooperation in the field of HTGR technologies"
- Sep. 2019: Signed "Implementing arrangement for cooperation in R&D in the field of HTGR technologies" (IA)
- Nov. 2022: Signed revised IA to include the collaboration on the basic design of the Research reactor in Poland

# Wizyty techniczne pomiędzy NCBJ a JAEA

Realizacja **kontraktu nr 1:**

6-8.02.2023 - 6 NCBJ ekspertów w **Japonii**

Realizacja **kontraktu nr 2:**

12-14.06.2023 - 9 NCBJ ekspertów w **Japonii**

21-23.08.2023 - 6 JAEA/przemysł ekspertów w **Polsce**

27-29.11.2023 - 8 JAEA/przemysł ekspertów w **Polsce**

13-16.02.2024 - 10 NCBJ ekspertów w **JP**

11-15.03.2024 - JAEA/przemysł ekspertów w **Polsce**



1st WS in Japan (Feb. 2023)



2nd WS in Japan (Jun. 2023)



3rd WS in Poland (Aug. 2023)



4th WS in Poland (Nov. 2023)



5th WS in Japan (Feb. 2024)



6th WS in Poland (Mar. 2024)

# Japoński Reaktor Eksperymentalny HTTR - przekrój

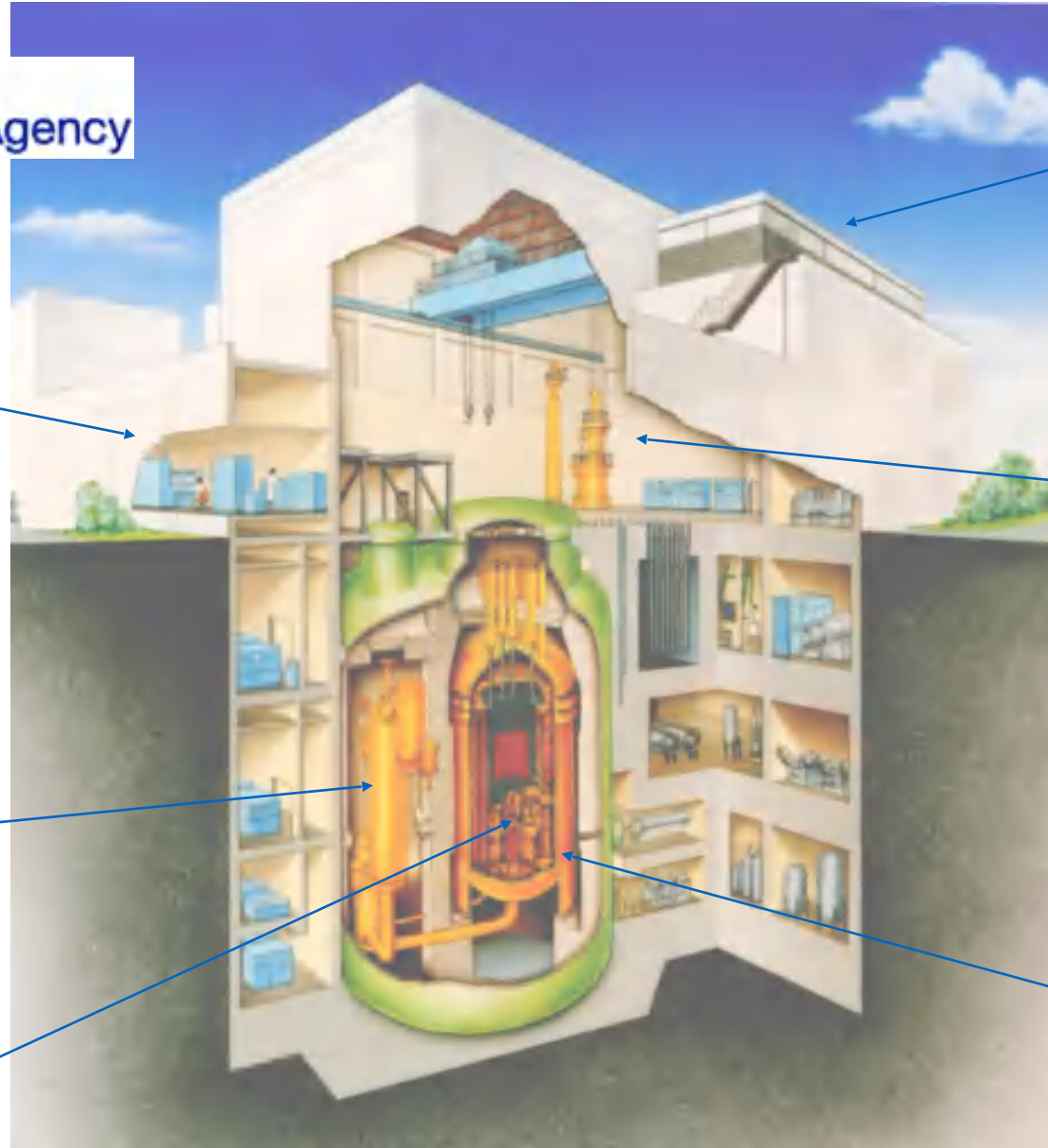


Japan Atomic  
Energy Agency

Nastawnia

Wymiennik  
ciepła

Rdzeń



Chłodnia  
sucha

Układ wymiany  
paliwa

RPV - obudowa  
reaktora

# Polski reaktor badawczo-demonstracyjny HTGR-POLA.

- **Nie ma dostępnego komercyjnie HTGRa** (“z półki”) na rynku globalnym (z wyjątkiem Chin).
- W celu zbudowania reaktora komercyjnego, wskazana jest najpierw budowa **reaktora badawczego o odpowiednio mniejszej mocy jako demonstratora technologii** po to aby przekonać regulatora (PAA) oraz przemysł o jego bezpieczeństwie, ekonomice oraz zastosowaniach praktycznych w kogeneracji (brak w Polsce doświadczenia z reaktorami komercyjnymi)
- Reaktor badawczy powinien posiadać **jak najwięcej cech reaktora komercyjnego**, tak aby można było stosunkowo łatwo przeskalować go do wyższej mocy jednostki potrzebnej w przemyśle.

# Skala inwestycji w reaktory HTGR w Polsce i na świecie

| Poziom inwestycji | Typ reaktora (faza komercjalizacji)    | Moc cieplna         | Szacunkowa liczba bloków | Jednostkowy koszt budowy    | Skala czasowa |
|-------------------|--|---------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|
| I                 | Badawczy – NCBJ Świerk                 | 10-30 MW            | 1                        | 0,6-1,5 mld zł              | 2028 - 2032   |
| IIPF              | Prototyp FOAK (Nr 1)                   | 180 MW              | 1                        | 3,0 mld zł                  | 2029 - 2035   |
| IIF               | FOAK (Nr 2,3,4,5,6) (First Of A Kind)  | 180 MW lub 2x180MW* | 5                        | 2,5 mld zł lub < 2,5 mld zł | 2034 - 2040   |
| IIN               | NOAK (Nr 7, 8, 9, 10) (Next Of A Kind) | 180 MW              | 4                        | 1,8 mld zł                  | 2040 - 2050   |
| III               | Seryjny – rynek polski                 | 180-360 MW          | 10-20                    | 1,8 – 3,0 mld zł            | 2040 - 2050   |
| IV                | Seryjny – rynek zewnętrzny             | 180-360 MW          | Europa**                 | 0,4 - 0,67 mld euro         | 2040 - 2050   |
|                   |  |                     | Świat**                  |                             |               |
|                   |  |                     | 100-200                  |                             |               |
|                   |  |                     | 1000-2000                |                             |               |

\* możliwy “duo-blok”, czyli 2x180 MW w jednej lokalizacji, co obniży koszty

\*\* przy szacowaniu ilości należy uwzględnić skalę konkurencji (liczby dotyczą potencjału istniejących instalacji wymagających ciepła procesowego)

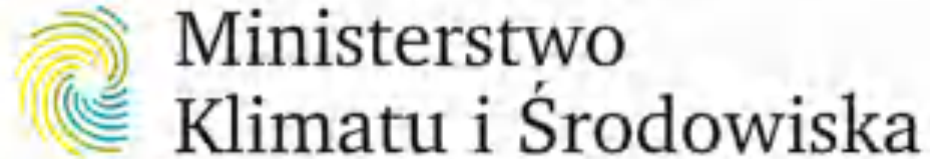


**Projekt B+R GOSPOSTRATEG-HTR (GoHTR):**  
**„Przygotowanie instrumentów prawnych, organizacyjnych i technicznych**  
**do wdrażania reaktorów HTR ”**  
**(Gospostrateg1/385872/22/NCBR/2019)**



*Konsorcjum: Ministerstwo Klimatu i Środowiska,  
NCBJ, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej*

**lata 2019-2022**



*Finansowanie:*



# Skalowanie kosztów HTGR według mocy wykonane na podstawie:

Nuclear Energy Cost Data Base, Delene et al. (1988)

MacDonald & Buongiorno, 2002

$$Cost_{new} = Cost_{ref} \left( \frac{Power_{new}}{Power_{ref}} \right)^a$$

| Account                | Exponent a |       |
|------------------------|------------|-------|
|                        | Small      | Large |
| Buildings & Structures | 0.5        | 0.59  |
| Reactor                | 0.6        | 0.80  |
| Turbine                | 0.8        | 0.83  |
| Electric               | 0.4        | 0.39  |
| Miscellaneous          | 0.8        | 1.06  |
| Heat Rejection Systems | 0.3        | 0.59  |
| Construction Services  | 0.42       | 0.66  |

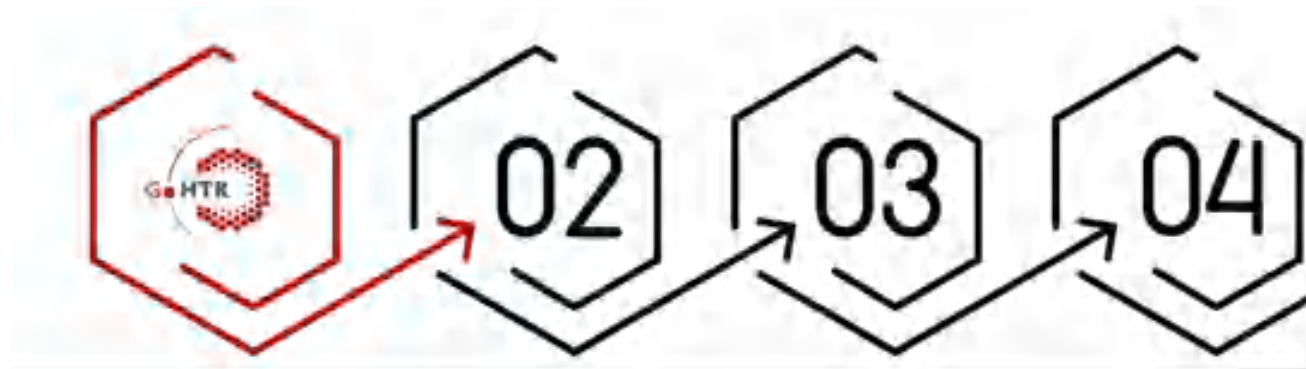
Należy zweryfikować używając CEPCI - Chemical Engineering Plant Cost Index: 1957-59, CEPCI = 100

|      |       |
|------|-------|
| 2020 | 596.2 |
| 2021 | 708.8 |
| 2022 | 816   |
| 2023 | 797.9 |

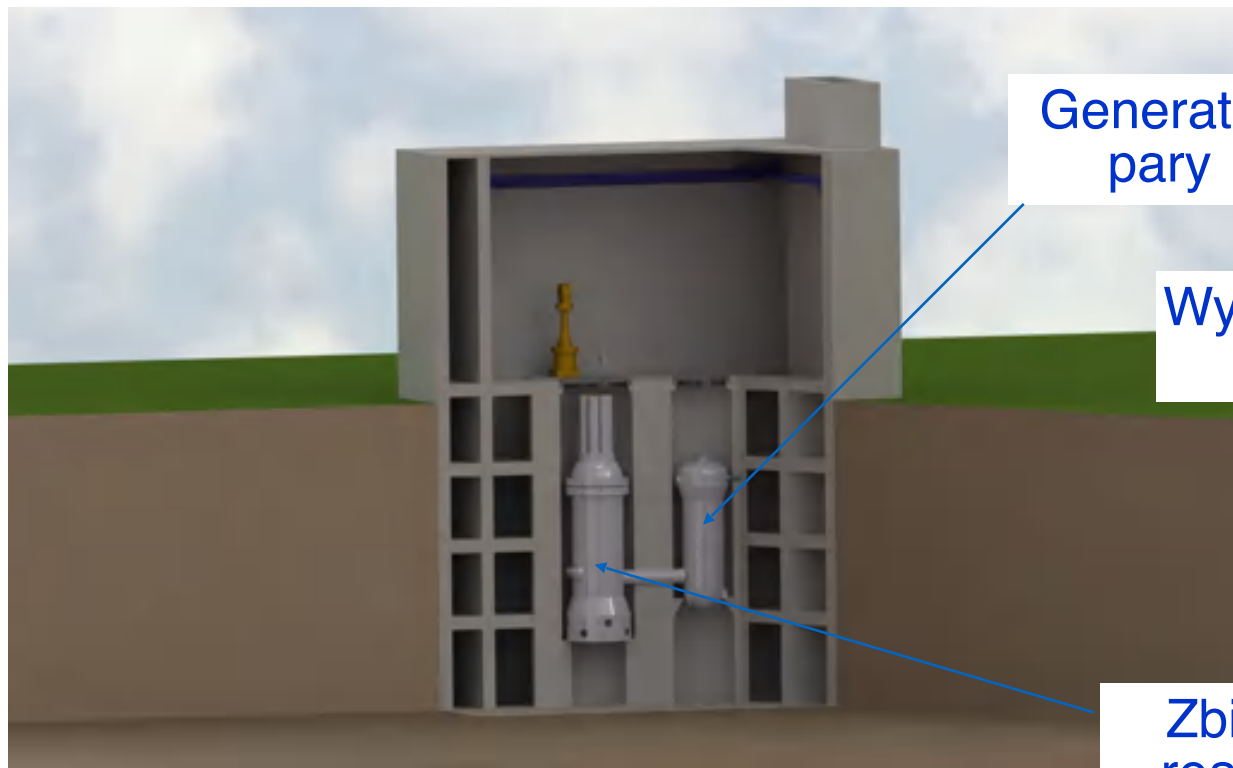
Dane z lat 2021-23: toweringskills.com, Charles Maxwell

# Projekt HTGR-POLA (projekt podstawowy reaktora)

- **Kontrakt** Nr 1/HTGR/2021/14 pomiędzy NCBJ i Ministerstwem Edukacji i Nauki (MEiN) pt. “**Opis techniczny badawczego, wysokotemperaturowego reaktora jądrowego chłodzonego gazem HTGR**” podpisany 12 Maja 2021 w Świerku.
- Umowa przewiduje, że w ciągu trzech lat powstaną w Polsce warunki pod budowę wysokotemperaturowego reaktora badawczego oraz **zostanie przygotowany projekt koncepcyjny, a następnie większość projektu podstawowego takiego urządzenia**. Reaktor będzie typu pryzmatycznego HTGR na paliwo TRISO o mocy 30-40 MWt przy temperaturze wylotowej chłodziwa 750 °C.
- 
- **Okres:** 1.06.2021 – 31.05.2024.
- **Kwota:** 60.000.000 PLN



# Polski projekt HTGR-POLA



Generator pary

Wymiennik ciepła

Zbiornik reaktora

# Japoński reaktor HTTR



# Projekt pre+konceptyjny reaktora HTGR-POLA w literaturze

Nuclear Engineering and Design 424 (2024) 113197



Article

## Pre-Conceptual Design of the Research High-Temperature Gas-Cooled Reactor TeResa for Non-Electrical Applications

Eleonora Skrzypek <sup>\*</sup>, Dominik Muszyński <sup>\*</sup>, Maciej Skrzypek <sup>\*</sup>, Piotr Darnowski <sup>\*</sup>, Janusz Malesa <sup>\*</sup>, Agnieszka Boettcher <sup>\*</sup> and Mariusz P. Dąbrowski <sup>\*</sup>

National Centre for Nuclear Research, A. Sołtana 7, 05-400 Otwock, Poland; dominik.muszynski@ncbj.gov.pl (D.M.); maciej.skrzypek@ncbj.gov.pl (M.S.); piotr.darnowski@ncbj.gov.pl (P.D.); janusz.malesa@ncbj.gov.pl (J.M.); agnieszka.boettcher@ncbj.gov.pl (A.B.); mariusz.dabrowski@ncbj.gov.pl (M.P.D.)  
<sup>\*</sup> Correspondence: eleonora.skrzypek@ncbj.gov.pl

**Abstract:** In line with Polish national activities and research programs investigating non-electrical-reactor use, the national GOSPOSTRATEG-HTR project was launched, aiming at the development of a novel pre-conceptual design of a High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR). The 40 MW<sub>th</sub> research reactor would serve as a technology demonstrator for future industrial purposes. In the paper, the proposal of an established thermal-hydraulic and neutronic core design is presented as a result of the National Centre for Nuclear Research team studies, in the scope of the project, including the areas of fluid mechanics, heat exchange and reactor neutronic core design support analyses. The undertaken analyses were confirmed by the series of code investigations involving integral thermal-hydraulic (MELCOR (Sandia National Laboratories, USA), CATHARE (CEA, France)), neutronic (Serpent (VTT, Finland), MCB (AGH University's Department of Nuclear Energy, Poland)), Computational Fluid Dynamics (ANSYS Fluent (ANSYS, USA)) and others. The calculations performed within the preliminary safety analysis on the pre-concept showed its compliance with international safety standards for the normal operation and Design Basis Accident sequences.

**Keywords:** HTGR; core design; non-electrical nuclear applications; research reactor

### 1. Introduction

As a consequence of the ratification of the Paris Agreement in 2015 by the European Union and other countries, responsible for 55% of global greenhouse gas emissions, a set of actions were undertaken in the EU member countries, including Poland, aiming at limiting an increase in the global average temperature by decreasing greenhouse gas emissions and slowing the speed of climate change [1]. Following the Paris Agreement, actions outlined by the European Commission, in the form of the European Green Deal formulated in 2019, provide a set of policy initiatives with the overarching aim of making Europe climate neutral by 2050 [2]. Furthermore, the Glasgow Climate Pact [3], which is an agreement reached at the United Nations Climate Change Conference (COP26) in November 2021, is a climate deal that presses for even more urgent emission cuts.

This direction of the transformation of the energy sources market is the main focus of the Polish Ministry of Climate and Environment (MKiŚ) in establishing the policies, alongside supervised research and development (R&D) programs. In 2016, the Ministry established a departmental Committee, which was responsible for the elaboration on recommendations for the implementation of High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGRs) in Poland. During several months of its work, the Team conducted a detailed analysis of the use of high-temperature reactors to cater to the domestic demand for industrial heat with a temperature of up to 700 °C. Among the analyzed technologies, the recommended helium-cooled reactors were found to be optimal [4]. The final report detailing the results of the Committee's works was published in 2017 [4]. The Minister accepted



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Engineering and Design

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nucengdes](http://www.elsevier.com/locate/nucengdes)



## Concept of the Polish high temperature gas-cooled reactor HTGR-POLA

Mariusz P. Dąbrowski <sup>\*</sup>, Agnieszka Boettcher, Wojciech Brudek, Janusz Malesa, Dominik Muszyński, Sławomir Potemski, Eleonora Skrzypek, Maciej Skrzypek, Jakub Sierchula

National Centre for Nuclear Research, Andrzej Sołtana 7, 05-400 Otwock, Poland

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Nuclear cogeneration  
High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)  
Research HTGR design  
Design philosophy

### ABSTRACT

Through a series of national and international projects (HTR-PL, GEMINI Plus, GOSPOSTRATEG-HTR), the National Centre for Nuclear Research (NCBJ), Świerk, Poland, got involved into design of the small-scale High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) technology. The objective is to replace the existing fossil fueled plants working for chemical and petrochemical industry by the nuclear reactors in order to reduce CO<sub>2</sub> emission in Poland and Europe, in the near future. After a short introduction into the local Polish background and the key elements of HTGR technology such as its inherent safety properties, the basic construction components, and an ability of high temperature process heat production, we present current stage of the concept of the 30 MW<sub>th</sub> research reactor HTGR-POLA (POLish Atomic) to be built at the NCBJ site. This research reactor is going to also serve a demonstrator of HTGR/SMR technology for Polish industry. In this paper we present the main points of our design philosophy, the reactor mission, objectives (research, experimental, and utility) as well as the main technical specifications on a conceptual level.

### 1. Introduction

High Temperature Gas-cooled Reactor Technology (HTGR) takes its origins almost at the beginning of the nuclear history with the pebble-bed reactor idea of Farrington Daniels presented already in 1944 (Claxton, 1966). There have been series of HTGR reactors worldwide, working occasionally, since then. On a research side, there have been DRAGON, UK of 20 MW<sub>th</sub> (1963–76), Peach Bottom, USA of 200 MW<sub>th</sub> (1966–74), and AVR, Germany of 46 MW<sub>th</sub> (1967–88). On a commercial side, there have been Fort St Vrain of 300 MW<sub>e</sub> (1976–89) and THTR, Germany of 300 MW<sub>e</sub> (1986–89). Currently, still there are two acting research reactors: in Japan (HTR opened in 2000) (Li, 2021). The only commercial reactor which is now operating is the Chinese HTR-PM of 210 MW<sub>e</sub> (two reactors, each of 210 MW<sub>th</sub>) (Zhang et al., 2009, 2016) — entered commercial operation in December 2023 (NEI, 2023).

Designs for low-power HTGR test reactors have also been developed in USA and Canada by Ultra-Safe Nuclear Cooperation (USNC, with sites at Darlington, Canada and Urbana-Champaign, USA) (USNC, 0000) and X-Energy (X-Energy, 0000). Their licensing processes are pending. Indonesia has prepared its research HTGR design called RDE (Reaktor Daya Eksperimental) planned to be sited at the National

Nuclear Energy Agency, BATAN (Sunaryo et al., 2021). It is important to mention that there are two types of HTGR reactor cores — one is the pebble-bed type (Claxton, 1966) which composes of slowly moving balls in a container and another is the prismatic type with stable hexagonal blocks placed in a ring structure. Currently, HTR-10 and HTR-PM are pebble-bed while HTTR is prismatic.

In Poland the acceleration towards implementation of HTGRs started after the ratification of the Paris Agreement (Nations, 2015) in 2015 aiming at reduction of the global average temperature on the Earth by decreasing greenhouse gas emissions. In 2019, the European Green Deal was formulated which provided a set of policy initiatives with the overarching aim of making Europe climate neutral by 2050 (net-zero 2050 (Union, 2019)). In fact, Poland as one of the largest emitters of carbon dioxide in Europe had to start thinking about the replacement of the current carbon-emitting sources for high-temperature steam into the nuclear. As a part of the EU, Poland is obliged to reduce emissions, and so it is also investing in renewables — mainly solar and wind energy sources (Poland, 2017), aiming in the final mix of these sources with nuclear around 2050. Early discussions about implementation of HTGRs in Poland started in 2012, almost parallel to a start of the new Polish Nuclear Power Program of 2010 (Poland, 2020), with a domestic R&D project HTR-PL run throughout 2012–15.

<sup>\*</sup> Corresponding author.

**E-mail addresses:** [Mariusz.Dabrowski@ncbj.gov.pl](mailto:Mariusz.Dabrowski@ncbj.gov.pl) (M.P. Dąbrowski), [Agnieszka.Boettcher@ncbj.gov.pl](mailto:Agnieszka.Boettcher@ncbj.gov.pl) (A. Boettcher), [Wojciech.Brudek@ncbj.gov.pl](mailto:Wojciech.Brudek@ncbj.gov.pl) (W. Brudek), [Janusz.Malesa@ncbj.gov.pl](mailto:Janusz.Malesa@ncbj.gov.pl) (J. Malesa), [Dominik.Muszynski@ncbj.gov.pl](mailto:Dominik.Muszynski@ncbj.gov.pl) (D. Muszyński), [Sławomir.Potemski@ncbj.gov.pl](mailto:Slawomir.Potemski@ncbj.gov.pl) (S. Potemski), [Eleonora.Skrzypek@ncbj.gov.pl](mailto:Eleonora.Skrzypek@ncbj.gov.pl) (E. Skrzypek), [Maciej.Skrzypek@ncbj.gov.pl](mailto:Maciej.Skrzypek@ncbj.gov.pl) (M. Skrzypek), [Jakub.Sierchula@ncbj.gov.pl](mailto:Jakub.Sierchula@ncbj.gov.pl) (J. Sierchula).

<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113197>

Received 7 January 2024; Received in revised form 29 March 2024; Accepted 4 April 2024

0029-5493/© 2024 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Citation:** Skrzypek, E.; Muszyński, D.; Skrzypek, M.; Darnowski, P.; Malesa, J.; Boettcher, A.; Dąbrowski, M.P. Pre-Conceptual Design of the Research High-Temperature Gas-Cooled Reactor TeResa for Non-Electrical Applications. *Energies* 2022, 15, 2084. <https://doi.org/10.3390/en15062084>

Academic Editor: Hiroshi Sekimoto

Received: 9 February 2022

Accepted: 8 March 2022

Published: 12 March 2022

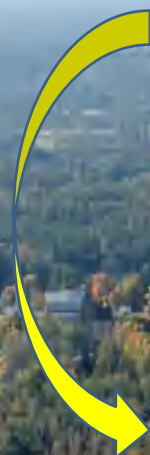
**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

[www.ncbj.gov.pl](http://www.ncbj.gov.pl)

# HTGR-POLA



Reaktor MARIA:  
30 MW<sub>th</sub>

**Kampus - Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk**

**HTGR-POLA**  
ok. 2,5 ha

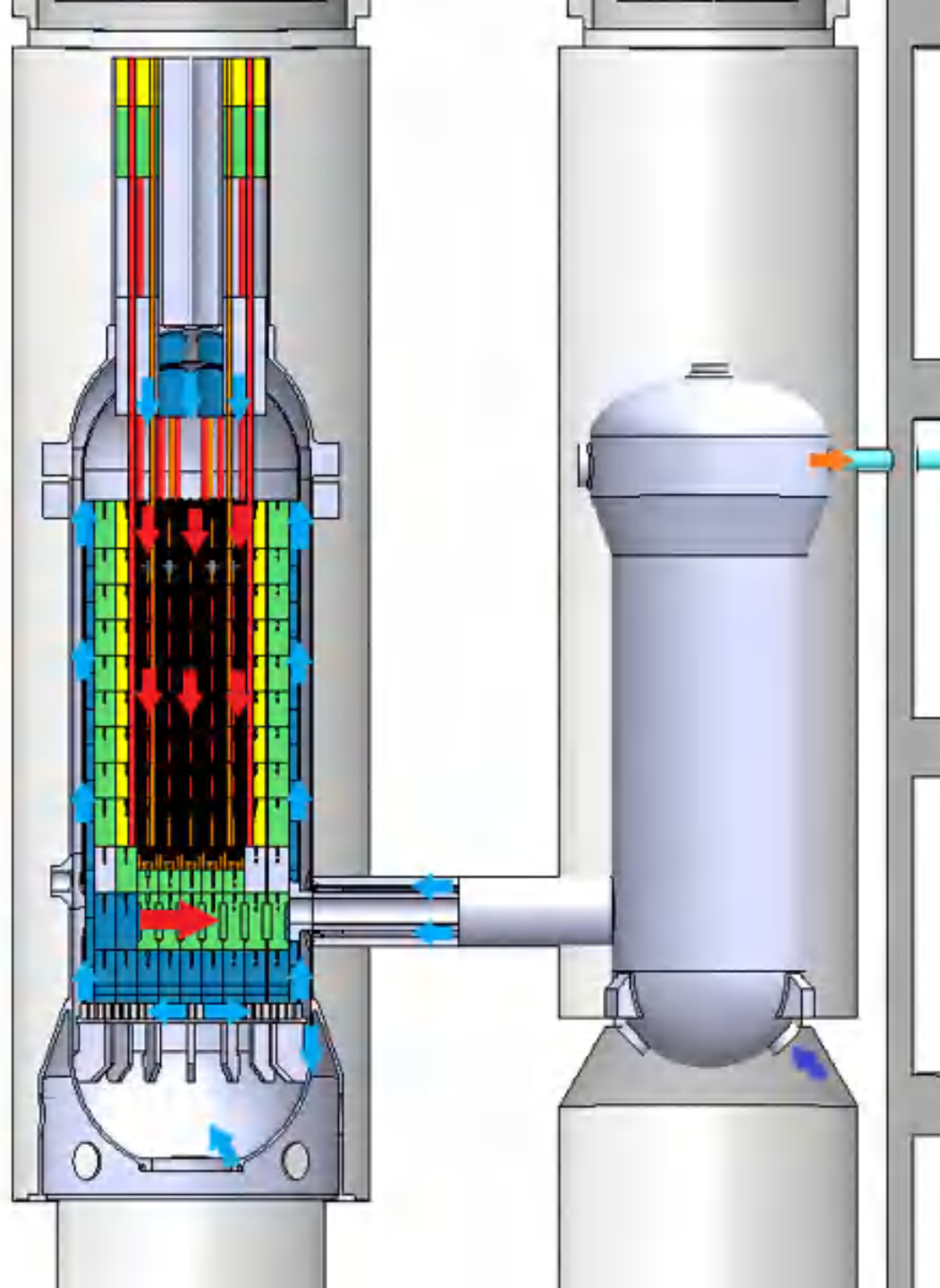
**bud. 39**



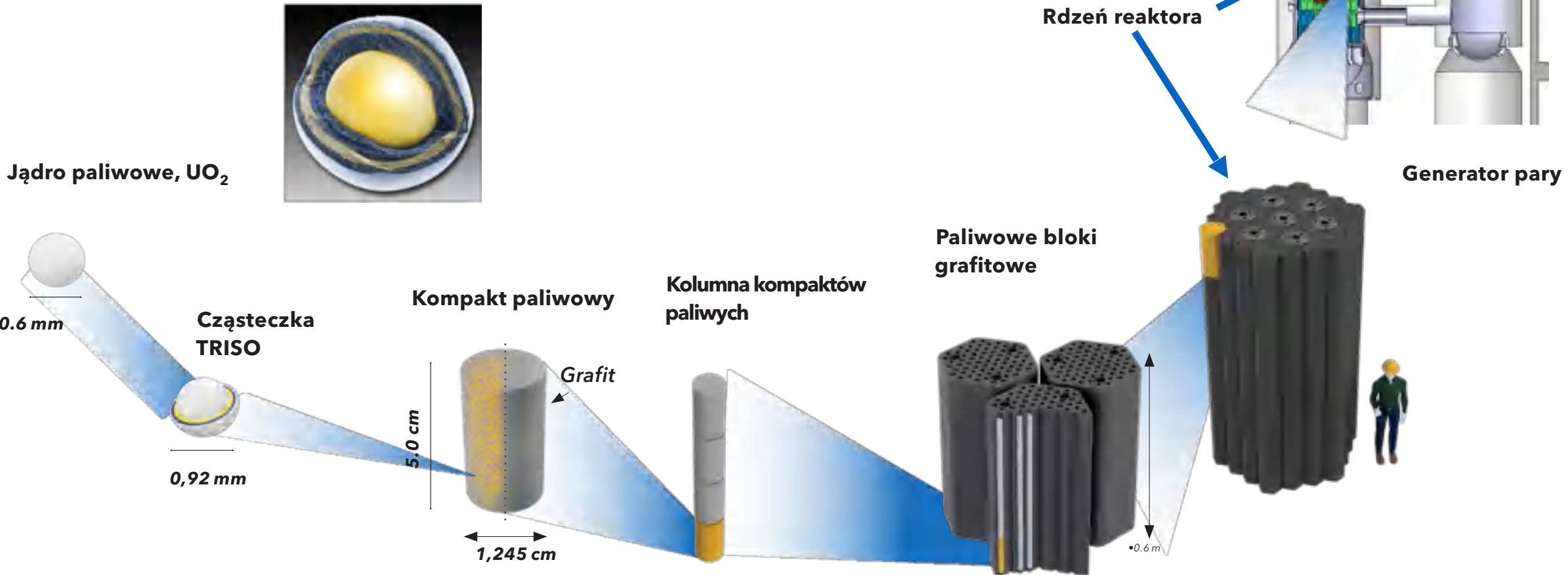
# Reaktor HTGR-POLA - charakterystyka

| Cecha  | Opis  |
|--|---|
| Opracowanie projektu                         | Narodowe Centrum Badań Jądrowych (National Centre for Nuclear Research, NCBJ), Poland   |
| Typ reaktora                                 | High-temperature gas-cooled reactor (HTGR)  |
| Rdzeń reaktora                               | Pryzmatyczny (rdzeń z bloków sześciokątnych)  |
| Moc termiczna                                | 30 MW   |
| Wzbogacenie paliwa                           | Niskowzbogacony (8-12%) dwutlenek uranu UO <sub>2</sub> , HALEU   |
| Typ paliwa                                   | Cząstki paliwa TRISO w macierzy grafitowej (kompakty paliwowe)  |
| Cykla paliwowy                               | Otwarty, paliwo przechowywane na terenie reaktora   |
| Moderator                                    | Grafit  |
| Chłodziwo/cyrkulacja                         | Hel / cyrkulacja wymuszona  |
| Ciśnienie chłodziwa                          | 4 MPa   |
| Temperatura chłodziwa na wejściu do reaktora | 325°C   |
| Temperatura chłodziwa na wyjściu z reaktora  | 750°C   |
| Obieg wtórny                                 | Woda / para   |
| Ciśnienie w obiegu wtórnym                   | 13.8 MPa  |
| Układy bezpieczeństwa                        | Pasywne i aktywne   |
| Kontrola reaktywności                        | Pręty kontrolne, wypalające się trucizny, absorbery rezerwowe   |
| Budynek reaktora                             | Konstrukcja żelbetowa, nadciśnienie obliczeniowe do 0,1 MPa, budynek wentylowany  |
| Wyproqwadzenie mocy                          | <b>Praca w kogeneracji:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>moc elektryczna maks. 10 MW brutto,</b></li><li>- <b>ciepło wysokotemperaturowe 565 C w parze max. 25 t/h,</b></li><li>- <b>niskotemperaturowa moc cieplna w wodzie max. 16,5 MW</b></li></ul> |
| Czas eksploatacji (przewidywany)             | 60 lat  |

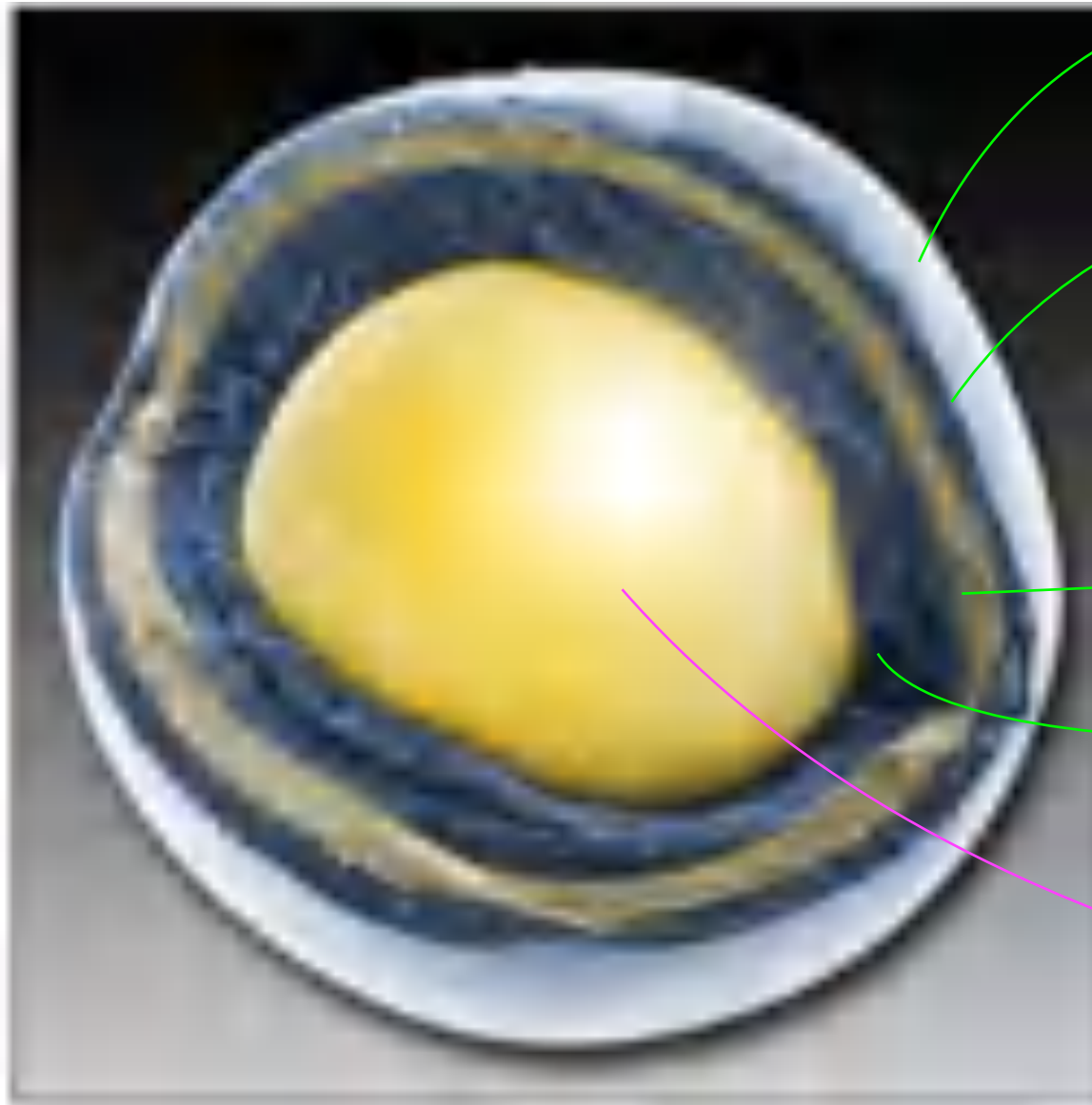
**HTGR-POLA:**  
Przepływ  
chłodziwa  
(hel) przez  
rdzeń  
reaktora (z  
lewej) oraz  
wody/pary w  
generatorze  
pary (z  
prawej)



# Główne elementy reaktora badawczego HTGR-POLA



# Cząsteczka paliwa TRISO - pierwsza bariera bezpieczeństwa reaktora HTGR



Zewnętrzna powłoka  
pyrolitycznego węgla  
(grafitu) PyC (0,045 mm)

Wewnętrzna warstwa  
węglika krzemu SiC  
(karborundu) (0,025 mm)

Wewnętrzna warstwa  
pyrolitycznego węgla  
(grafitu) PyC (0,03 mm)

Warstwa porowatego węgla  
pyrolitycznego  
(grafitu) PyC (0,06 mm)

Jądro cząstki TRISO, wzbogacony  
uran w postaci UO<sub>2</sub> lub UCO  
( $r = 0,3$  mm)

średnica cząstki 0,92 mm

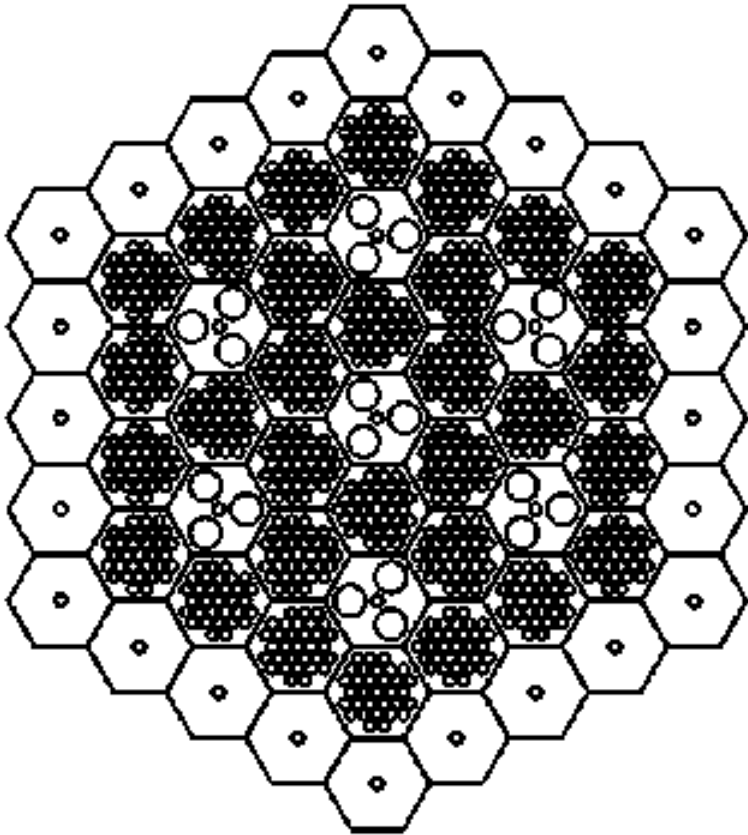
# HTGR-POLA: charakterystyka paliwa TRISO



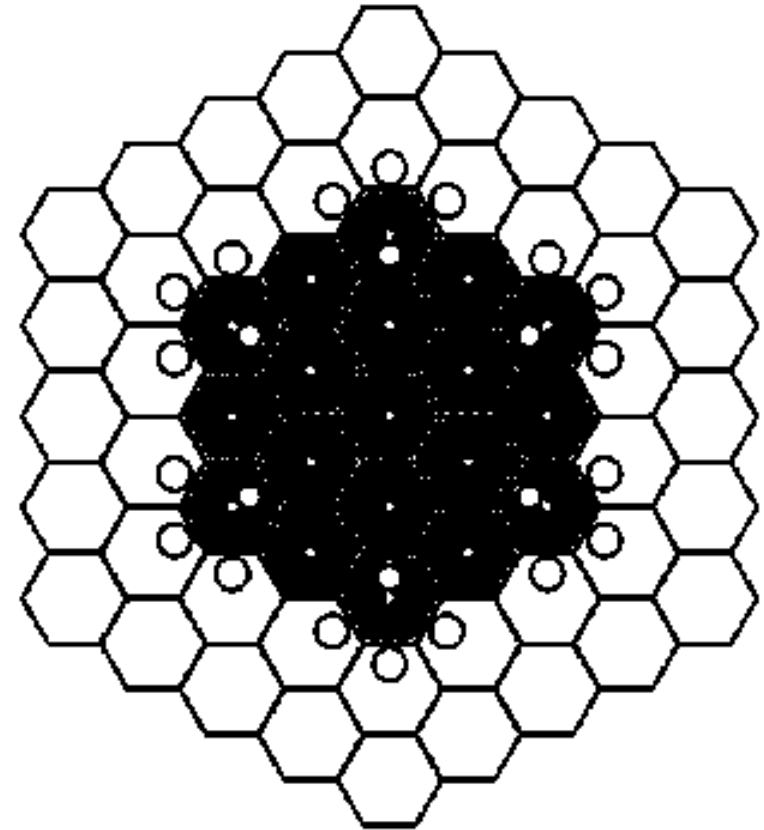
| Specyfikacja  | Paliwo japońskie (NFI) | Paliwo Gemini+      |
|---|------------------------|---------------------|
| Typ   | TRISO, HALEU           | TRISO, HALEU        |
| Materiał jądra paliwowego                               | UO <sub>2</sub>        | UO <sub>2</sub>     |
| Wzbogacenie (%w U235)                                   | zmiennie 10,0 - 12,0 % | zmiennie 10,0-12,0% |
| średnica cząstki TRISO                                  | 920 μm                 | 920 μm              |
| Promień jądra paliwowego                                | 300 μm                 | 250 μm              |
| Grubość powłoki porowatego węgla pirolitycznego         | 60 μm                  | 95 μm               |
| Grubość wewnętrznej powłoki węgla pirolitycznego (IPyC) | 30 μm                  | 40 μm               |
| Grubość powłoki węglika krzemu (SiC)                    | 25 μm                  | 35 μm               |
| Grubość zewnętrznej powłoki węgla pirolitycznego (OPyC) | 45 μm                  | 40 μm               |

# Rdzeń reaktora HTGR-POLA

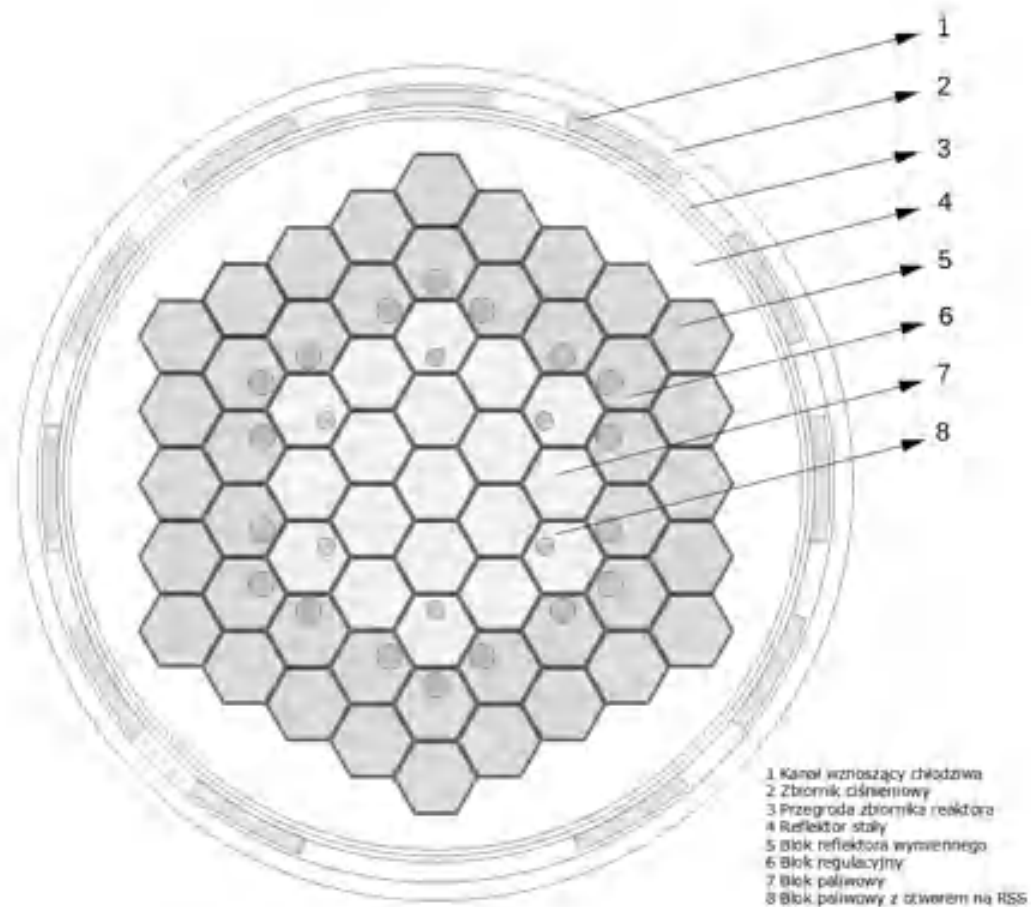
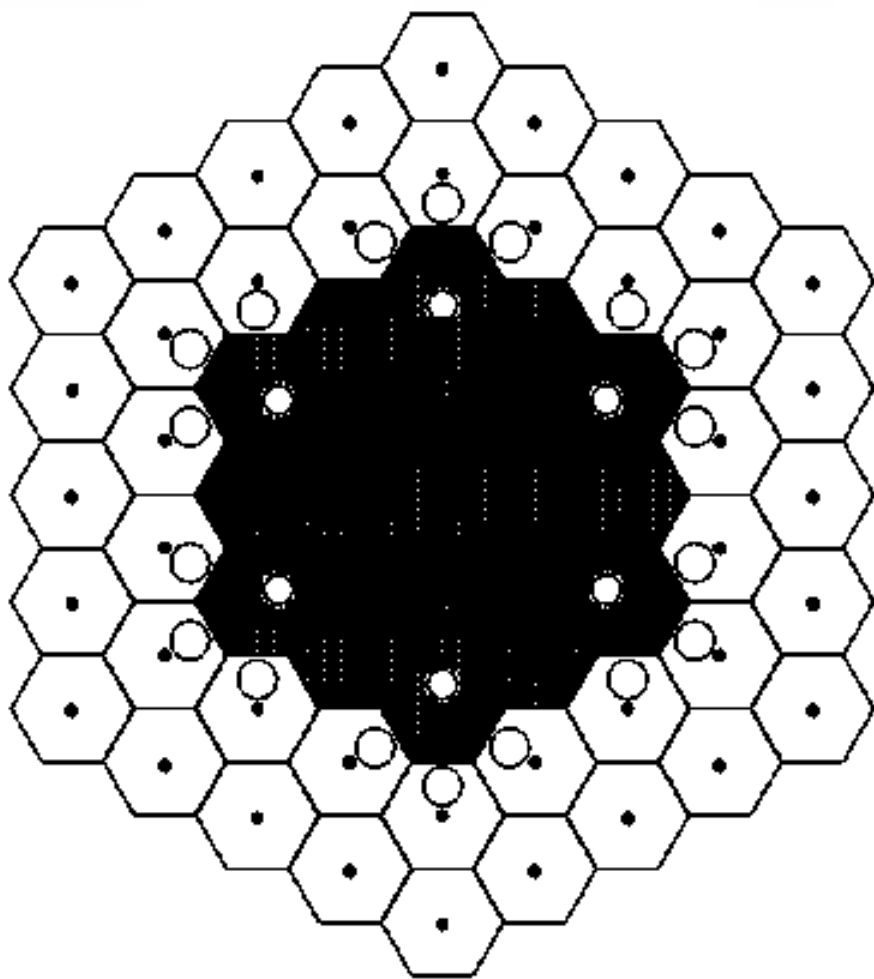
Propozycja JAEA (oparta o HTTR)



HTGR-POLA - koncepcja własna NCBJ

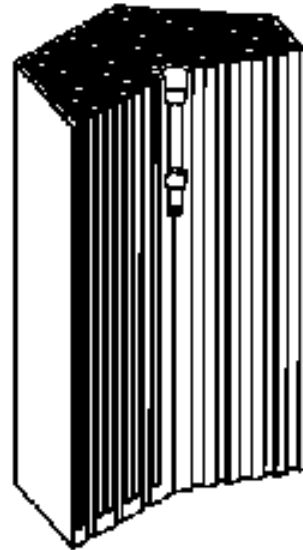
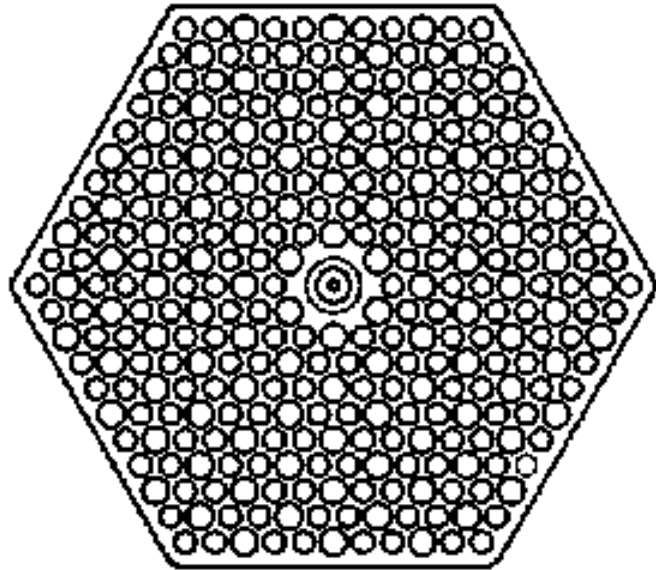


# HTGR-POLA: przekrój poprzeczny rdzenia

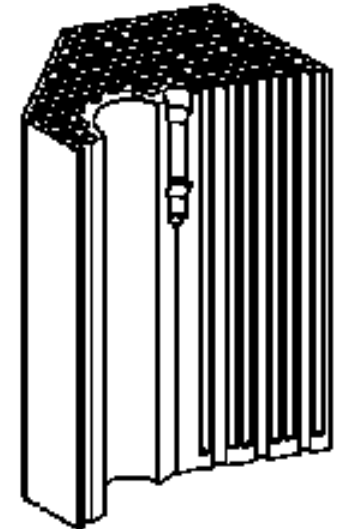
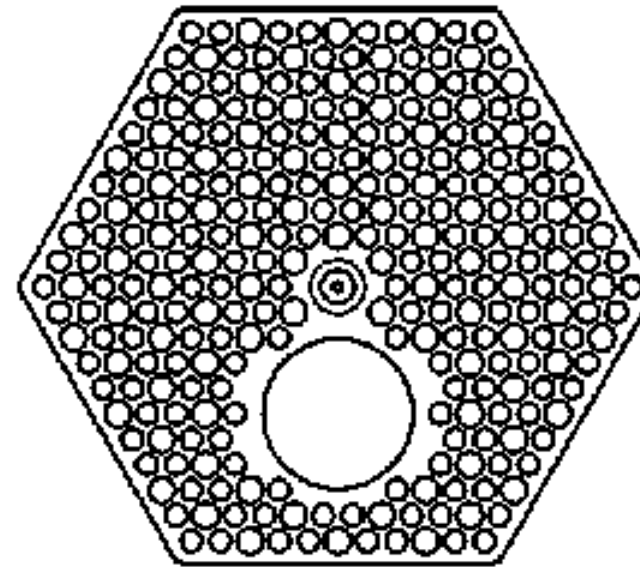


# HTGR-POLA (pryzmatyczne/heksagonalne) bloki (grafit):

bok = 20,78 cm



**Blok paliwowy**



**Blok paliwowy  
z otworem na RSS\***

*\* rezerwowy system wyłączenia reaktora*

# Kluczowy element samoczynnego bezpieczeństwa HTGR - **ujemny** współczynnik temperaturowy reaktywności

$$\text{HTGR: } \alpha = \Delta\rho/\Delta T < 0$$

**Wzrost temperatury** w reaktorze ( $\Delta T > 0$ ) → **Spadek reaktywności** ( $\Delta\rho < 0$ ) → Natychmiastowa stabilizacja mocy (czyli stabilna praca reaktora) i spadek temperatury → **Stabilizacja mocy reaktora** na poprzednim poziomie

W przypadku RBMK (Czarnobyl) inny scenariusz:  $\alpha = \Delta\rho/\Delta T > 0$

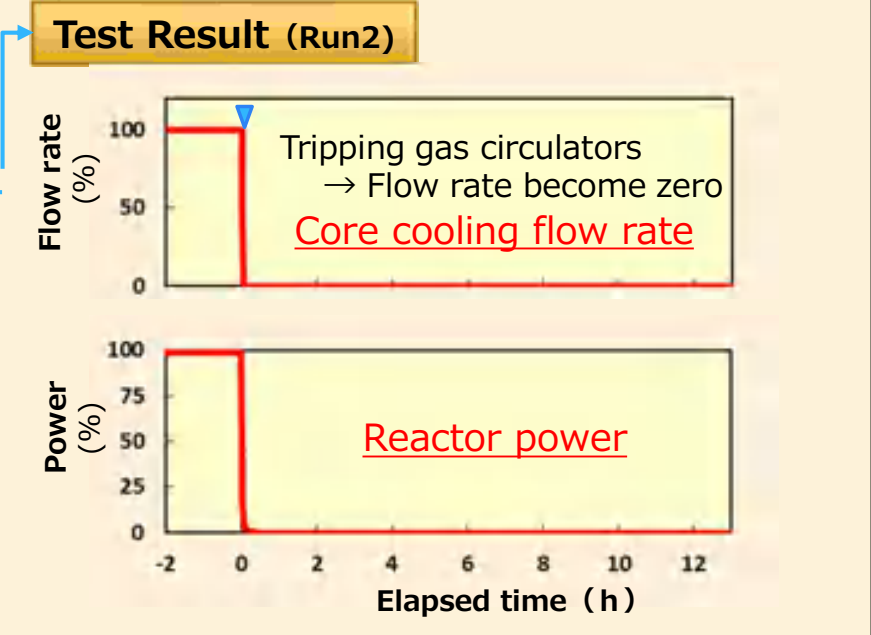
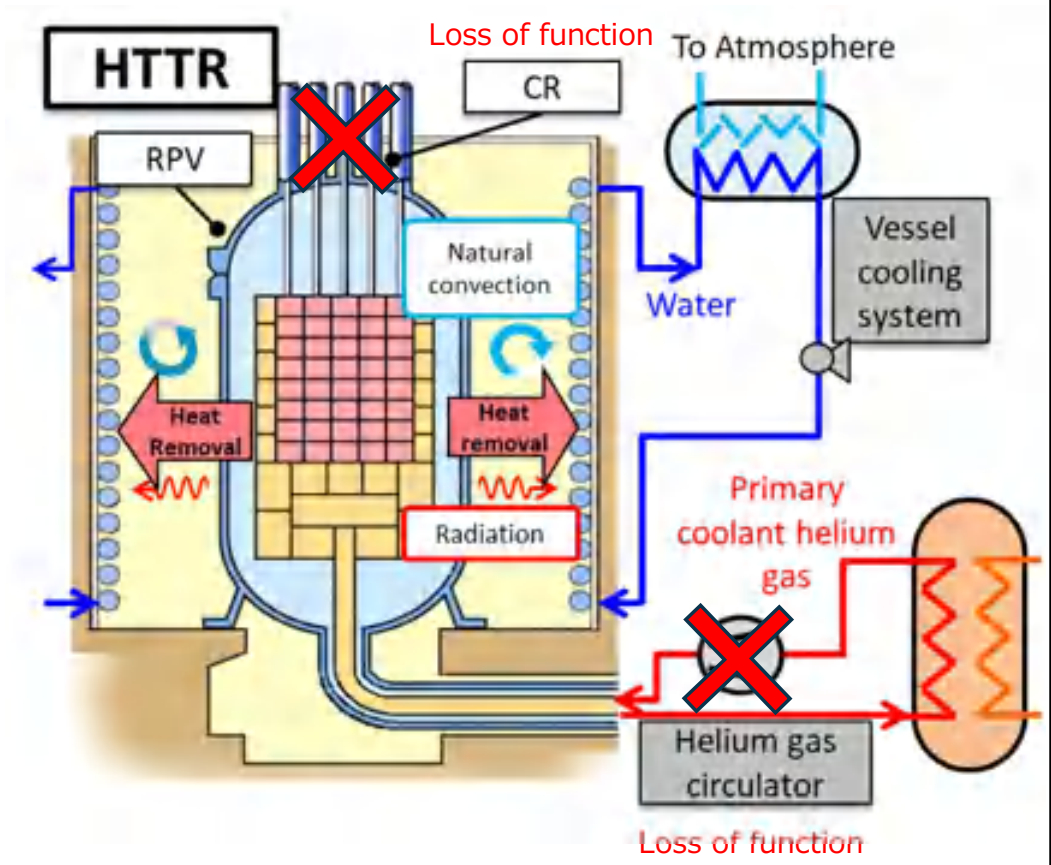
**Wzrost temperatury** ( $\Delta T > 0$ ) → **Wzrost reaktywności** ( $\Delta\rho > 0$ ) → Wzrost mocy → Dalszy wzrost temperatury → **Destabilizacja reaktora**

**Wykonane obliczenia wykazały, iż dla HTGR-POLA  $\alpha < 0$ , zawsze.**

**Awaria utraty wymuszonego chłodzenia reaktora (Loss of forced cooling - LOFC) 27-28.03.2024**

**Dowód eksperymentalny, iż  $\alpha < 0$**

- Low power (30%(9MW)) (All HGC tripped) ... Finished(2010)
- High power (100%(30MW)) (All HGC tripped) **Loss of core flow test(Run2) ...2024.3.27**
- Low power (30%(9MW)) (All HGC + VCS tripped) Loss of core cooling test(Run3) ...Finished (2022)



It was confirmed that the reactor power decreased to about zero automatically and reached to stable state without activating the reactor shutdown

**LOFC (loss of forced cooling) projects**

Safety demonstration tests are being carried out to confirm inherent safety features of HTGR utilizing HTTR under OECD/NEA framework

Japan USA France Germany Korea Czech Republic Hungary

**Projekt HTGR-POLA jest jest jednym z  
docenianych projektów  
SMR/AMR-owych  
przez środowisko energetyki jądrowej**

Advance Copy

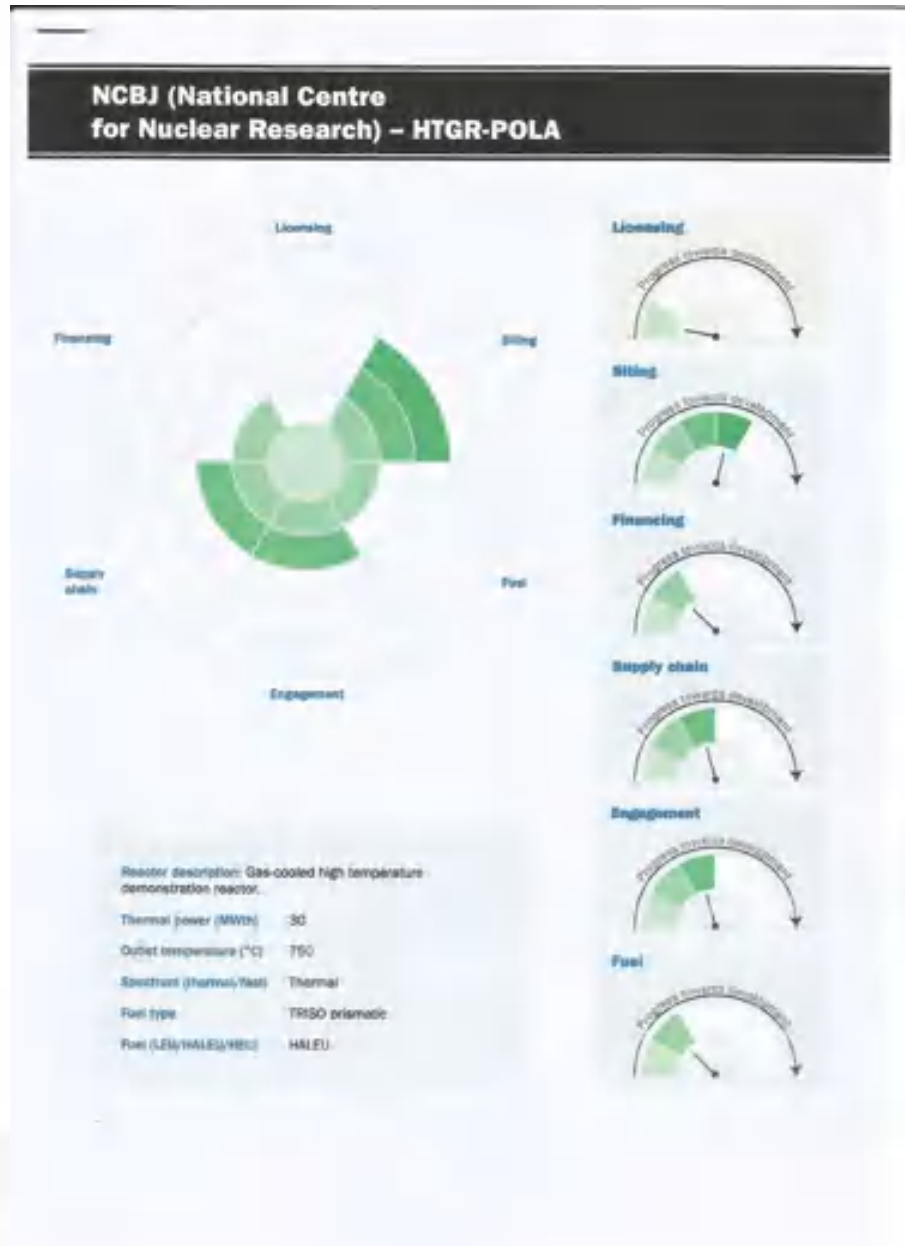
Preliminary IAEA Expert Opinion

Technical Description of the Conceptual Design of the Polish  
Research High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>Title of Document:</b>         | Agency's Response to the request from the National Centre for Nuclear Research of Poland (NCBJ) for technical consultation and issuance of a preliminary IAEA expert opinion on the Polish research High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) conceptual design.   |
| <b>IAEA Activity Lead:</b>        | <b>Mr Dolore Hahn</b><br>Coordinator, IAEA's SMR Platform<br>Department of Nuclear Energy, IAEA<br><a href="mailto:D.Hahn@iaea.org">D.Hahn@iaea.org</a>   |
| <b>Agency's in-house experts:</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>Ms Ana Gomez Cobo</b>, Section Head, Safety Assessment Section, Division of Nuclear Installation Safety, Department of Nuclear Safety and Security, <a href="mailto:A.GomezCobo@iaea.org">A.GomezCobo@iaea.org</a></li><li>- <b>Mr M. Dawid Subki</b>, Technical Lead, SMR and HTGR Technology Development, Nuclear Power Technology Development Section, Division of Nuclear Power, Department of Nuclear Energy, <a href="mailto:M.Subki@iaea.org">M.Subki@iaea.org</a></li><li>- <b>Ms Anzhelika Khaperskaya</b>, Technical Lead, Fuel Engineering and Fuel Cycle, Division of Nuclear Cycle and Waste Technology, Department of Nuclear Energy, <a href="mailto:A.Khaperskaya@iaea.org">A.Khaperskaya@iaea.org</a></li><li>- <b>Ms Amparo Gonzalez Espartero</b>, Technical Lead, Spent Fuel Management, Division of Nuclear Cycle and Waste Technology, Department of Nuclear Energy, <a href="mailto:A.GonzalezEspartero@iaea.org">A.GonzalezEspartero@iaea.org</a></li><li>- <b>Mr. Frederic Stephan</b>, Emergency Preparedness Officer, Incident and Emergency Centre, Department of Nuclear Safety and Security, <a href="mailto:F.Stephan@iaea.org">F.Stephan@iaea.org</a></li><li>- <b>Mr Ki-Seob Sim</b>, Nuclear Fuel Engineering Specialist, Division of Nuclear Cycle and Waste Technology, Department of Nuclear Energy, <a href="mailto:k.s.sim@iaea.org">k.s.sim@iaea.org</a></li></ul> |
| <b>NCBJ Officers:</b>             | <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>Prof. Mariusz Dabrowski</b>, Director, NCBJ, Poland, Email: <a href="mailto:mariusz.dabrowski@ncbj.gov.pl">mariusz.dabrowski@ncbj.gov.pl</a></li><li>- <b>Dr. Agnieszka Boettcher</b>, Head of Section, Neutronic Analyses and New Technologies, Nuclear Energy and Environmental Analyses Division, NCBJ, Email: <a href="mailto:Agnieszka.Boettcher@ncbj.gov.pl">Agnieszka.Boettcher@ncbj.gov.pl</a></li></ul>   |
| <b>Release:</b>                   | 5 December 2023   |

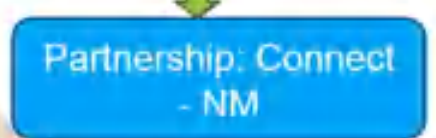
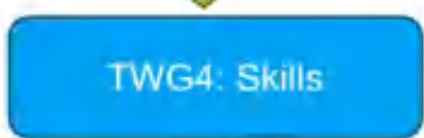
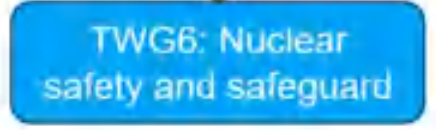
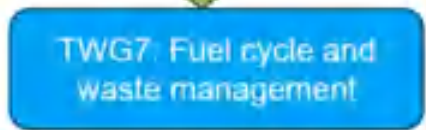
**HTGR-POLA:  
pozytywna  
opinia IAEA  
nt. koncepcji  
- grudzień  
2023**

# NEA SMR Dashboard 2024 – HTGR-POLA (wydawany przez NEA/OECD)



# European Industrial Alliance on Small Modular Reactors (SMRs) - powstał 29-30.05.2024 w Brukseli (ponad 300 podmiotów: nauka, przemysł, inne)

- **TWG 1: Industrial Applications**
- **TWG 2: Technology and R&D&I**
- **TWG 3: Supply Chain**
- **TWG 4: Skills**
- **TWG 5: Public Engagement**
- **TWG 6: Nuclear Safety and Safeguards**
- **TWG7: Fuel Cycle and Waste Management**
- **TWG 8: Financing**








# Gdzie jesteśmy z realizacją celów projektu HTGR-POLA?

1. Przygotowanie **zaplecza laboratoryjnego** wraz z koniecznymi akredytacjami i systemem zarządzania jakością, niezbędnego do wykonywania prac badawczych **w procesie licencjonowania materiałów** dla technologii HTGR
2. **Wykonanie badań materiałów**, które mogą być wykorzystane do konstrukcji HTGR, pod kątem zgodności z wymogami technologii HTGR.
3. **Opracowanie projektu podstawowego reaktora HTGR** (podstawowy/koncepcyjny zgodnie z IAEA-TECDOC-881, Rys. 4.1, str. 36, LOD = Level Of Details zgodnie z BIM = Building Information Modeling; PN-EN ISO 19650 standard) – LOD minimum 200.
4. **Wykonanie symulacji** sprawdzających na potrzeby projektu i wstępnego raportu bezpieczeństwa HTGR zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. (Dz. U. Poz. 1043).
5. **Przygotowanie wybranych elementów wstępnego raportu bezpieczeństwa (WRB)** dla HTGR zgodnych z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego (Dz. U. poz. 1043).



# LOD - Level of Detail (Poziom Szczegółowości) - zgodnie z BIM = Building Information Modeling; PN-EN ISO 19650 standard

| LOD 100<br>Conceptual  | LOD 200<br>Approximate geometry  | LOD 300<br>Precise geometry   | LOD 400<br>Fabrication   | LOD 500<br>As-built  |
|--|--|---|--|--|
|   |    |    |   |   |
| <p>The Model Element <b>may be</b> graphically represented in the Model with a <b>symbol or other generic representation</b>, but does not satisfy the requirements for LOD 200. Information related to the Model Element (i.e. cost per square metre, etc.) can be derived from other Model Elements.</p> | <p>The Model Element is graphically represented in the Model as a <b>generic</b> system, object, or assembly with <b>approximate</b> quantities, size, shape, location, and orientation.</p> <p>Non-graphic information may also be attached to the Model Element.</p> | <p>The Model Element is graphically represented in the Model as a <b>specific</b> system, object, or assembly <b>accurate</b> in terms of quantity, size, shape, location, and orientation.</p> <p>Non-graphic information may also be attached to the Model Element.</p> | <p>The Model Element is graphically represented in the Model as a <b>specific</b> system, object, or assembly that is <b>accurate</b> in terms of quantity, size, shape, location, and orientation with <b>detailing, fabrication, assembly, and installation information</b>.</p> <p>Non-graphic information may also be attached to the Model Element.</p> | <p>The Model Element is a <b>field verified</b> representation <b>accurate</b> in terms of size, shape, location, quantity, and orientation.</p> <p>Non-graphic information may also be attached to the Model Element.</p> |

**Projekt podstawowy  
w opracowaniu (wg.  
DCD - Design  
Control Document) -  
podwykonawca  
“Energoprojekt  
Katowice” - do  
31.10.2024**

|    |  |                                 |                   |
|----|--|---------------------------------|-------------------|
| 1  | Introduction and general considerations        | Wacław Gudowski                 | All team          |
| 2  | Site characteristics and plant layout          | Wojciech Brudek                 | 5                 |
| 3  | Structure, systems and components (SSC)        | Sławomir Potemski               | 10                |
| 4  | Reactor  | Mariusz Dąbrowski               | 8                 |
| 5  | Reactor coolant systems and associated systems | Maciej Skrzypek i Janusz Malesa | 7                 |
| 6  | Engineering safety systems                     | Eleonora Skrzypek               | 6                 |
| 7  | Instrumentation & control                      | Grzegorz Mrugała                | 2                 |
| 8  | Electrical systems                             | Karol Kowal                     | 4                 |
| 9  | Auxiliary systems                              | Dominik Muszyński               | 3                 |
| 10 | Fuel managements                               | Agnieszka Boettcher             | 5                 |
| 11 | Radioactive waste management                   | Zuzanna Marcinkowska            | 3                 |
| 12 | Radiation protection                           | Sławomir Potemski               | 5                 |
| 13 | Internal and external hazard protection        | Andrzej Strupczewski            | 4                 |
| 14 | Exploitation                                   | Janusz Malesa                   | 4                 |
| 15 | Project safety analyses                        | Jakub Sierchuła                 | 7                 |
| 16 | Energy conversion systems (IKE)                | Wojciech Brudek                 | 7                 |
| 17 | Probabilistic Safety Assessment                | Sławomir Potemski               | 4                 |
| 18 | Decomissioning                                 | Agnieszka Boettcher             | 3                 |
| 19 | Building project                               | Wojciech Brudek                 | 2 + Energoprojekt |
|    | 2D & 3D models                                 | Marcin Januchta                 | RT, GP            |

# Jakie przyszłe zadania?

# Zadania: badania lokalizacyjne, projekt techniczny (LOD > 300), współpraca z PAA nad licencjonowaniem, budowa, rozruch

| Faza realizacji                 | Okres   | Status                               | Komentarz                                  |
|---------------------------------|---------|--------------------------------------|--|
| Projektowanie - przedkoncepcja* | 6 mies. | zakończony 30.03.2022                | W ramach funduszy NCBR                     |
| Projektowanie - koncepcja**     | 1 rok   | zakończony 31.12.2022                | W ramach funduszy MEiN - współpraca z JAEA |
| Projekt podstawowy              | 2 lata  | <u>w przygotowaniu do 31.10.2024</u> | Także Wstępny Raport Bezpieczeństwa (WRB)  |
| Projekt techniczny/ wykonawczy  | 2 lata  | 2025-26                              |  |
| Licencjonowanie                 | 1 rok   | 2027                                 |  |
| Konstrukcja                     | 4 lata  | 2028-2032                            |  |



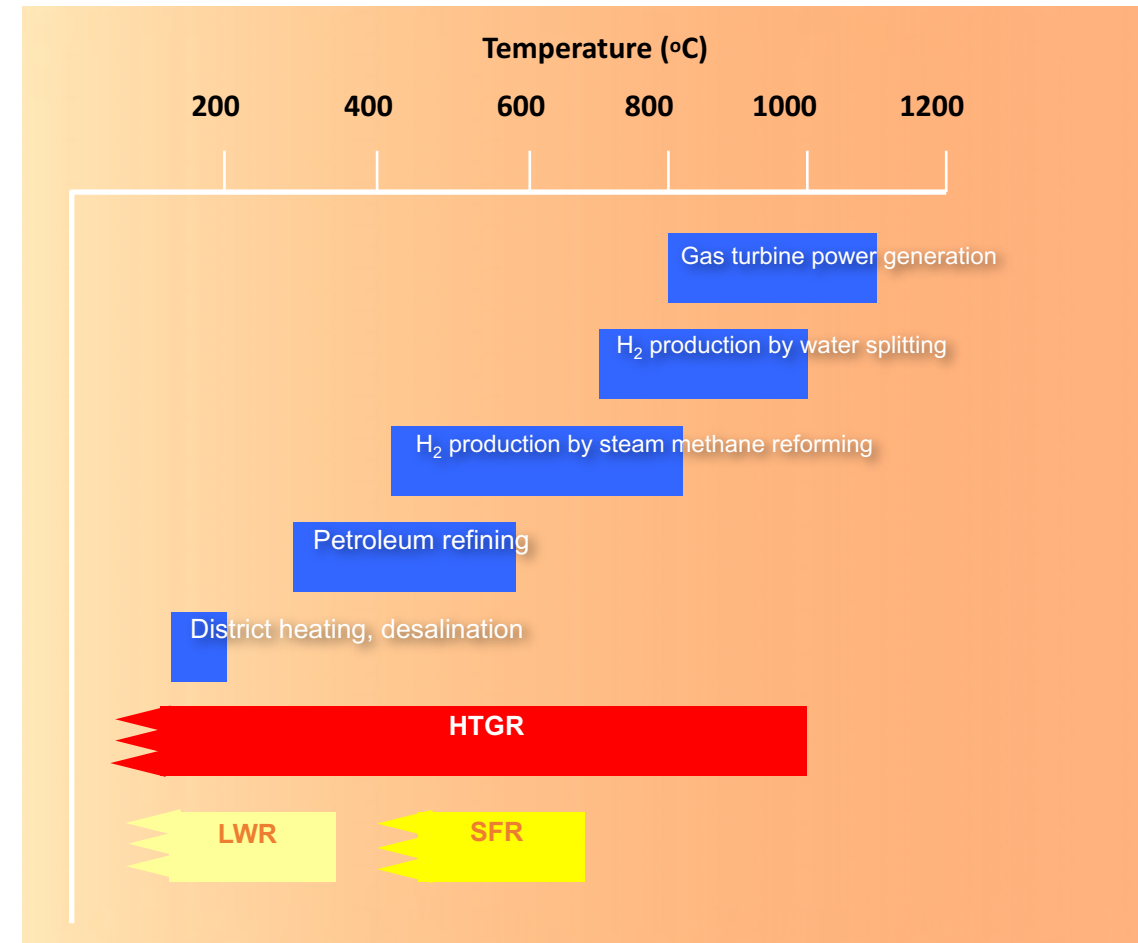
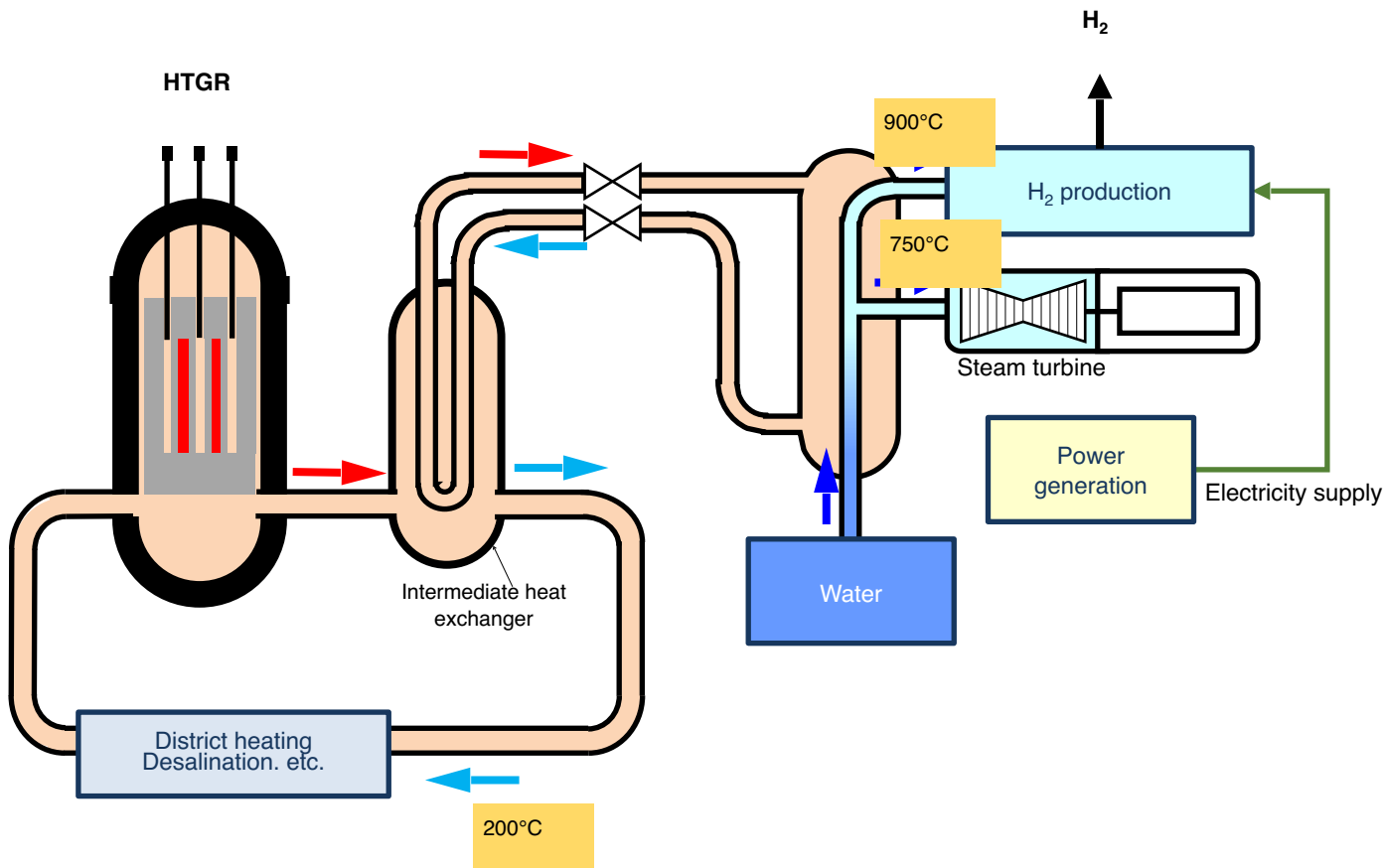
\*E. Skrzypek et al. Pre-Conceptual Design of the Research High-Temperature Gas-Cooled Reactor TeResa for Non-Electrical Applications [Energies, 15, 2084 \(2022\)](#)

\*\* Po ocenie eksperckiej Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu; M.P. Dąbrowski et al. Concept of the Polish High Temperature Gas-cooled Reactor HTGR-POLA, Nuclear Engineering and Design 424, 113197 (2024).

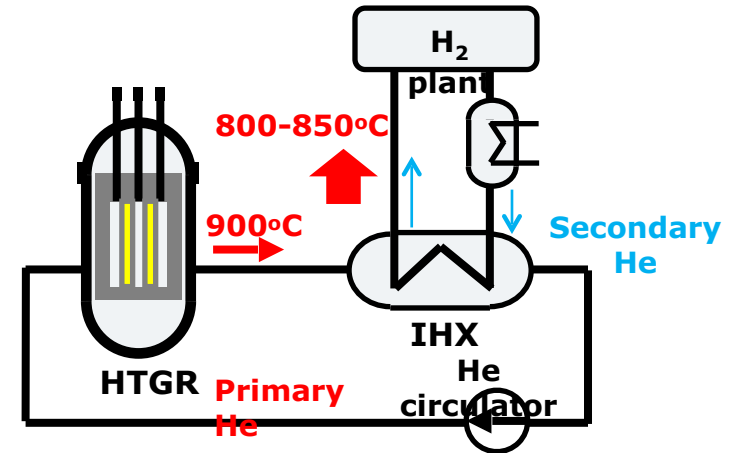
# Rozszerzenie zastosowania HTGR w poligeneracji.

# Większa dywersyfikacja zastosowań - JAEA współpracuje z brytyjskim NNL

HTGR z podwójnym obiegiem helowym z zastosowaniem do produkcji prądu, wodoru, ciepła komunalnego itp.



- Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) wybrany przez METI w lipcu 2023
- MHI rozpoczął pracę nad projektem podstawowym
  - Moc 150MW-250MW\*1.
  - Temperatura na wyjściu do produkcji H<sub>2</sub> to 800°C\*2.



| Steam methane reforming   | High temperature steam electrolysis                         | Methane pyrolysis                                   | IS process  |
|---|---|---|---|
|   |   |   |   |
| $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ | $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ | $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C(s)}$ | $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ |

\*1 Y. Usui, et al., Development of High Temperature Gas-cooled Reactor by Mitsubishi Heavy Industries, The 19th Lecture Meeting of the Japan Society of Maintenance, C-1-1-4 (2023).

\*2 METI, [www.enecho.meti.go.jp/appli/submission/2022/0222\\_01.html](http://www.enecho.meti.go.jp/appli/submission/2022/0222_01.html), accessed on January 19, 2024.

\*3 K. Asano, et al., Development of Large-scale Hydrogen Production Technology utilizing Very High Temperature Part1 (2) Feasibility Study of Hydrogen Production Technology utilizing Very High Temperature, 2022 Fall Meeting of AESJ, September 9, 2022, Ibaraki, Japan

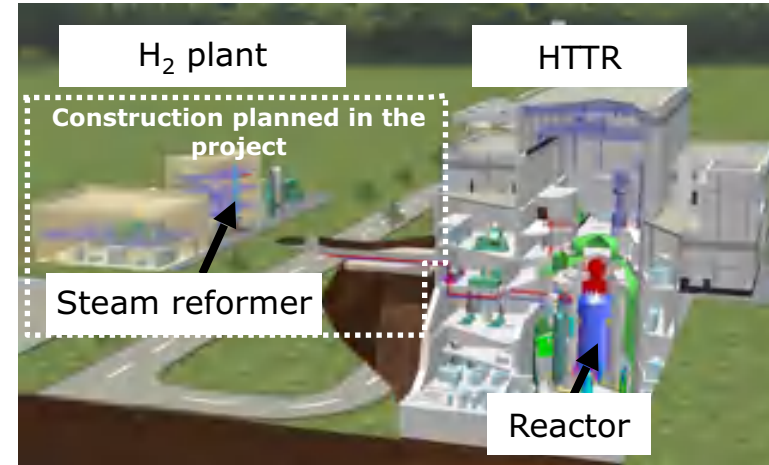
## 【Tasks】

- Use the HTTR as a heat source which demonstrated 950°C heat supply capability
- Establish safety design and evaluation technologies for coupling between HTGR and H<sub>2</sub> plant
- Demonstrate performance of components required for coupling between HTGR and H<sub>2</sub> plant



## 【Expected results】

Develop safe coupling technologies between HTGR and H<sub>2</sub> plant



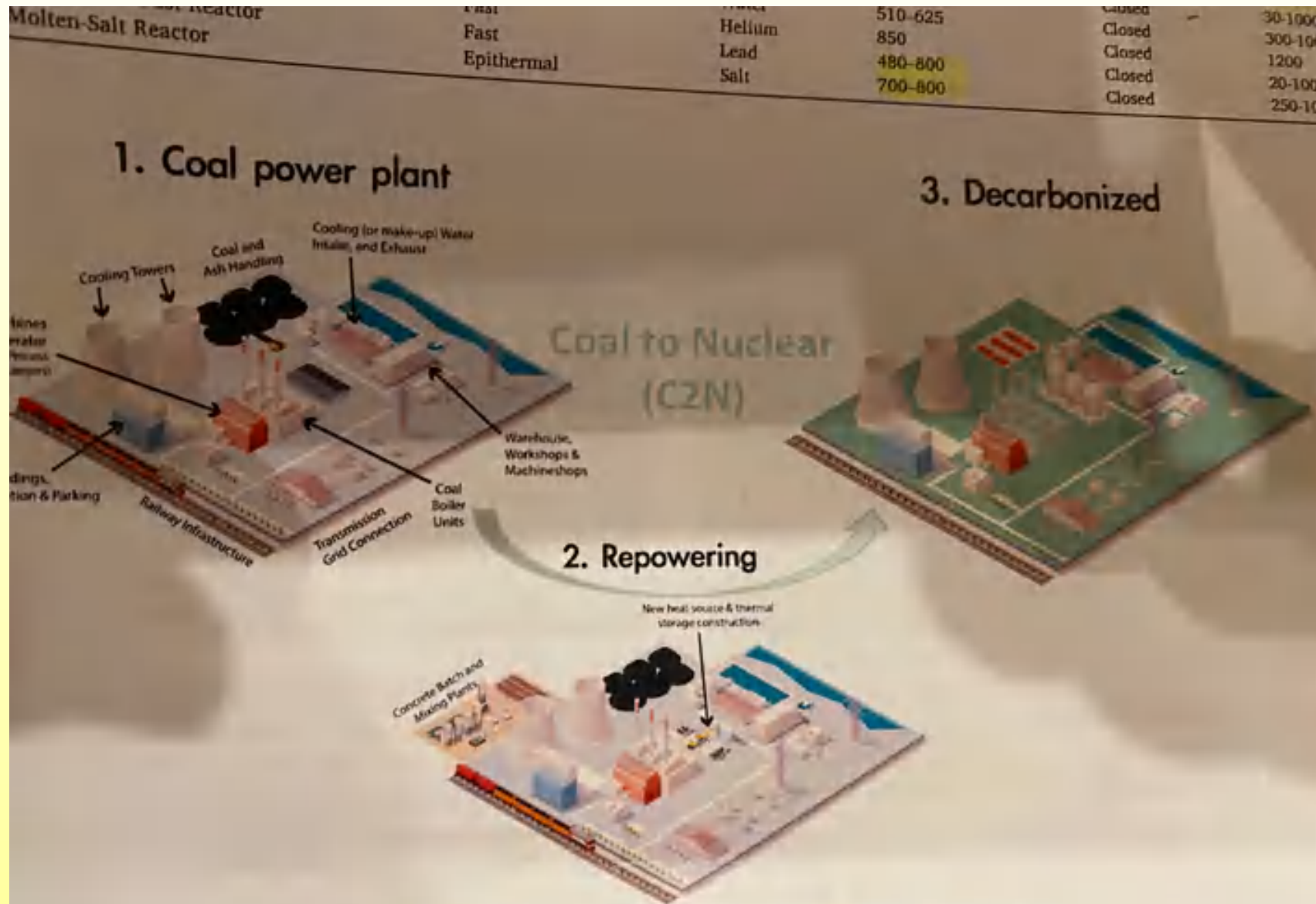
Bird's eye view of the test

- ✓ Develop coupling technologies by connecting a steam methane reforming H<sub>2</sub> plant to the HTTR
- ✓ H<sub>2</sub> plant with carbon-free H<sub>2</sub> process will be connected to the HTTR in the future

## Draft test schedule

|                            | R4<br>2022  | R5<br>2023 | R6<br>2024            | R7<br>2025 | R8<br>2026   | R9<br>2027 | R10<br>2028 | R11<br>2029                    | R12<br>2030 |
|----------------------------|---|------------|-----------------------|------------|--|------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| HTTR-heat application test | Safety design · evaluation  |            | Application Licensing |            |  |            |             |                                |             |
|                            | HTTR modification/H <sub>2</sub> plant design (steam methane reforming process) |            |                       |            | HTTR modification/H <sub>2</sub> plant manufacturing, installation |            |             | H <sub>2</sub> production test |             |
|                            |   |            |                       |            |  |            |             |                                |             |
|                            |   |            |                       |            |  |            |             |                                |             |

# Polski program - "Coal to Nuclear" C2N (sem. 4.06.2024)



N. Haneklaus *et al.*, *Energies* 14, 120 (2021)

# Charakterystyka bloków węglowych w Polsce (dają temperaturę pary w zakresie HTGR)\*

| Oznaczenie | Rodzaj                                  | Charakterystyka                                     | Dane techniczne   |
|------------|---|---|---|
| A          | Elektrociepłownie (CHP)                 | < 200 MWe<br>ciepło procesowe i komunalne           | Moc: 1546 MWe<br>Liczba bloków: 15<br>Temp. pary: 510-550 C |
| B          | Średnie elektrownie:<br>ok. 200-360 MWe | np. 11 bloków Bełchatowa,<br>Kozienice, Pątnów itp. | Moc: 8824 MWe<br>Liczba bloków: 31<br>Temp. pary: 535-560 C |
| C          | Duże bloki                              | > 400 MWe<br>np. Turów 11 (496 MWe)                 | Moc: 6723 MWe<br>Liczba bloków: 10<br>Temp. pary: > 560 C   |

*\*N. Haneklaus i inni, Energies 14, 120 (2021)*

# **Charakterystyka bloków węglowych - ciśnienie pary**

- **podkrytyczne:  $p < 22.1$  MPa (głównie A, B) - ok. 11 GW**
- **nadkrytyczne:  $22,1$  MPa  $< p < 25.0$  MPa (C) - ok. 1 GW**
- **super nadkrytyczne:  $p > 25.0$  MPa (C) - ok. 4,5 GW**

**Oszacowane oszczędności na kosztach inwestycji  
w przypadku modernizacji C2N wobec budowy od  
“czystego pola”\***

- **koszty kapitałowe (CAPEX) - 26-35 %**
- **koszty porównawcze produkcji energii (LCOE) - 9-28 %**

*\*N. Haneklaus i inni, Energies 14, 120 (2021)*

# Co oprócz zidentyfikowanego ciepła procesowego może jeszcze potrzebować polski przemysł?

- Produkcji wodoru: np. w termochemicznym procesie rozkładu wody (min. 850°C) lub w procesie elektrolizy stało-tlenkowej (Solid Oxide Electrolyzes - SOE) (min. 720°C),
- Produkcji paliw syntetycznych z wykorzystaniem procesu ko-elektrolizy do produkcji gazu syntezy (bezemisyjna produkcja e-paliw),
- Ciepło z HTGR może służyć do dekarbonizacji rafinerii poprzez bezpośrednią produkcję pary lub zastępcze paliwa kopalne,
- ...

Dziękuję za uwagę!

*Kontakt:*  
*mariusz.dabrowski@ncbj.gov.pl*



NARODOWE  
CENTRUM  
BADAŃ  
JĄDROWYCH  
ŚWIERK

[www.ncbj.gov.pl](http://www.ncbj.gov.pl)

Finansowanie:



Ministerstwo  
Edukacji i Nauki

Nadzór merytoryczny:



Ministerstwo  
Klimatu i Środowiska