

**NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH**

**Świerk, 15 maj 2018 r. r.**

# **REAKTORY WYSOKOTEMPERATUROWE W POLSCE – PROBLEMY I WYZWANIA**

**Omówienie i uwagi do  
Raportu Zespołu Ministerstwa Energii  
ds. reaktora wysokotemperaturowego**

**Dr inż. Andrzej Mikulski  
wieloletni pracownik  
Instytutu Badań Jądrowych i Instytutu Energii Atomowej  
oraz Państwowej Agencji Atomistyki**

# **REAKTORY WYSOKOTEMPERATUROWE W POLSCE – PROBLEMY I WYZWANIA**

**Wprowadzenie**

**Historia reaktorów wysokotemperaturowych (HTGR)**

**Zadanie dotyczące HTRów w projekcie strategicznym NCBR**

**Raport Zespołu Ministerstwa Energii**

**ds. reaktora wysokotemperaturowego**

**Uzasadnienie podjęcia tematu**

**Ocena bezpieczeństwa i kosztów budowy reaktora HTGR**

**Zagadnienia prawne**

**Wyzwania konstrukcyjno-technologiczne budowy reaktora**

**Warunki realizacji budowy badawczego reaktora HTGR**

**Uwagi końcowe**

## Wprowadzenie

### **Cel seminarium:**

**omówienie raportu zespołu Ministerstwa Energii**

### **Reaktory HTR w IBJ/IEA**

- 1. Omówienie reaktora AVR (Jülich)**
- 2. Modelowanie ułożenia kul z złożu usypanym (BNL)**
- 3. Seminarium o prędkim reaktorze chodzonym gazem (2005)**

### **Dodatki do PTJ**

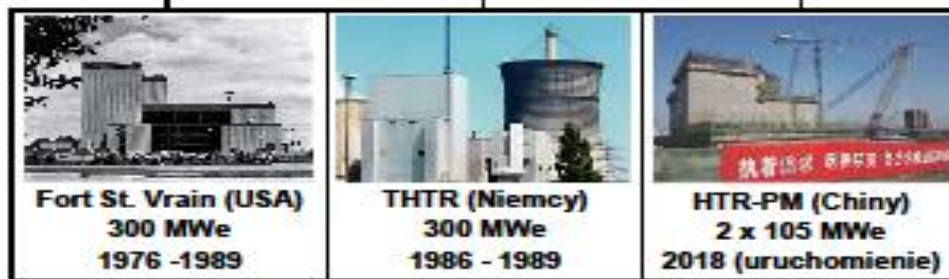
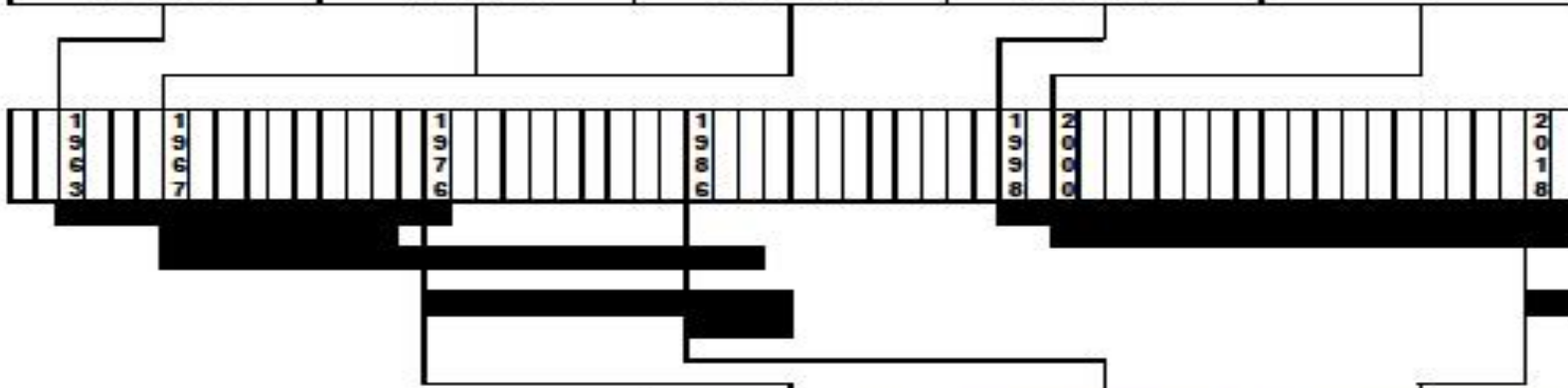
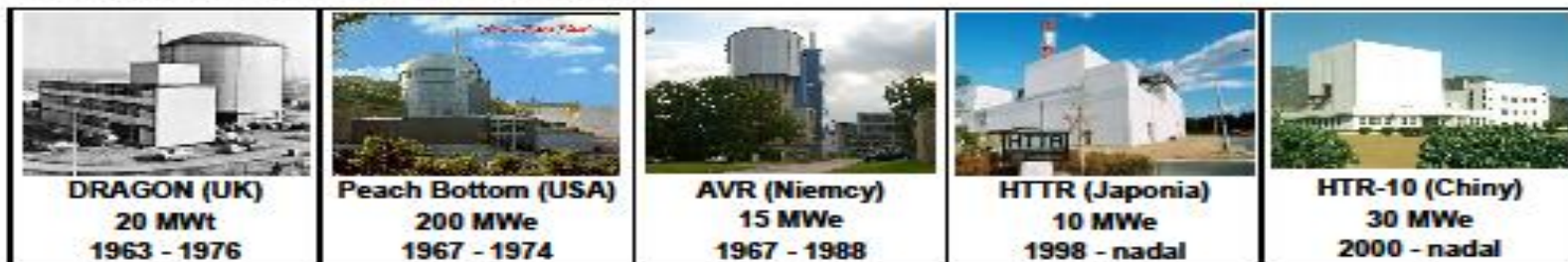
- 1. Reaktory energetyczne małej i średniej mocy (1964)**
- 2. Zastosowanie reaktorów w procesach przemysłowych (1964)**

### **Artykuł w PTJ (nr 4/2001)**

### **Przyszłościowe konstrukcje reaktorów jądrowych małej mocy**

# Historia reaktorów wysokotemperaturowych (HTGR)

## Reaktory badawcze (doświadczalne)



## Reaktory produkcyjne (komercyjne)

## Zadanie dotyczące HTRów w projekcie strategicznym NCBR

Konsorcjum powołane przez AGH w Krakowie

udział: PROCHEM, TAURON, KGHM, PSSE

NCBJ, GIG, INSz, IChPW,

AGH - WEiP, Politechnika Śląska - WISiE i UW - SLCJ

Kierownik: prof. Ludwik Pieńkowski z AGH.

**Etapy w zadaniu nr 1 dotyczące do konstrukcji reaktora (5 z 14):**

**7: Analiza społecznych uwarunkowań wdrożenia technologii HTR w Polsce**

**8: Badania nad bezpieczeństwem reaktorów wysokotemperaturowych**

**9: Rozwój badań nad fizyką rdzenia w reaktorach HTR**

**10: Budowa i walidacja wieloprocessorowego systemu modelowania reaktorów jądrowych zogniskowana na reaktorach HTR**

**11: Analiza termo-hydrauliczna układu do wytwarzania i wykorzystywania wysokotemperaturowego nośnika energii**

## Publikacje dotyczące zagadnień reaktorowych

### Zadanie nr 1 projekcie strategicznym NCBR (6 z 18)

- 1) M. Oettingen, J. Cetnar (2014) Validation of gadolinium burnout using PWR benchmark specification”
- 2) G. Kępisty, J. Cetnar (2015) Instabilities of Monte-Carlo burnup calculations for nuclear reactors - Demonstration and dependence from time step model
- 3) G Kępisty, J. Cetnar (2015) Burnup instabilities in the full-core HTR model simulation
- 4) G. Kępisty, J. Cetnar (2015) Assesment of advanced step models for steady state Monte-Carlo burnup calculations in application to prismatic HTGR;
- 5) G. Kępisty, J. Cetnar, Toward higher reliability of the full-core Monte Carlo burnup simulations, Annals of Nuclear Energy
- 6) G. Kępisty, P. Stanisław and J. Cetnar, “Monte Carlo burnup in HTR system with various TRISO packing,  
oraz później opublikowany artykuł  
J. Szczurek, Ł. Koszuc, M. Klisińska, K. Andrzejewski (2016), „Legal Obstacles to the Construction of High Temperature Reactors for Heat Generation on the Example of Polish Regulations”,

# **Raport Zespołu Ministerstwa Energii** **ds. reaktora wysokotemperaturowego**

**Tytuł raportu:**

**Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce”**

**Okres przygotowania: lipiec 2016 - październik 2017**

**Prezentacja w Ministerstwie: styczeń 2018**

**Dostępność: <http://www.me.gov.pl/node/28011>**

**Kierownik Zespołu: prof. Grzegorz Wrochna z NCBJ**

**Instytucje (10): Ministerstwo Energii, ENEA,  
Energoprojekt - Warszawa, Grupa Azoty,  
NCBJ, ORLEN, Prochem, PeBeKa (KGHM),  
Tauron i Uniwersytet Szczeciński**

**Obserwatorzy (6): NCBJ, NCBR, PAA i Bank PKO BP.**

**Objętość raportu: 51 stron i 3 załączniki**

# Rozdziały raportu: Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce

1. Potrzeby polskiej i europejskiej gospodarki  
(w zakresie ciepła przemysłowego)
2. Wybór technologii i parametrów reaktora  
(porównanie różnych technologii i wybór typu reaktora)
3. Opłacalność ekonomiczna HTGR  
(koszty budowy i eksploatacji reaktora HTGR 165 MWth )
- 4 .Dojrzałość i dostępność technologii HTGR
5. Potrzebne prace badawcze dla HTGR
6. Regulacje prawne  
(aktualny stan prawny i współpraca z urzędami dozorów)
7. Model biznesowy wdrażania HTGR
8. Harmonogram decyzji i działań
9. Korzyści z wdrożenia HTGR w Polsce

Rozdziały te wyczerpują wszystkie interesujące zagadnienia budowy w Polsce tego reaktora, chociaż w sposób zbyt ogólny

Rola reaktora badawczego zbyt mało eksponowana



## Uzasadnienie ekonomiczne kosztów produkcji ciepła przemysłowego – przyjmuję do wiadomości koszt wytworzenia pary poza ekonomiczne:

- (1) redukcja zależności od importu gazu,
- (2) zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>,  
bez zastrzeżeń,
- (3) przewidywalność kosztów eksploatacji,  
trudno przewidzieć kosztów eksploatacji  
oparcie się na kosztach reaktorów PWR jest nieuzasadnione
- (4) potencjał eksportowy [technologii budowy reaktorów HTGR].  
zupełnie nieznan i zależny od nie przewidywanych czynników

### dodatkowy czynnik/argument

- (5) przeznaczenia zaoszczędzonego węgla lub gazu ziemnego dla wykorzystania w przemyśle chemicznym.

## Wykorzystanie reaktora HTR tylko do produkcji energii elektrycznej

projekty koncepcyjne: GT-MHR (US) 150 MWe  
PBMR (RPA) 165 MWe  
EM2 (US) 240 MWe

# Ocena kosztów budowy reaktora HTGR

## Przeskalowane koszty dla mocy 165 MW

na podstawie dostarczonych dokumentów:

HTR-600	blokowy	600 MW	2,566 mld zł.
NGNP	blokowy	350 MW	1,519 mld zł.
NC2I-R	blokowy	2x250 MW	1,995 mld zł.
X-energy	kulowy	165 MW	1,358 mld zł.

przyjęcie kosztu 2 mld zł. w polskich warunkach

**WIELKOŚĆ NICZYM NIEUZASADNIONA**

Oszacowanie kosztów reaktora przemysłowego wymaga oszacowania poszczególnych składników

Szczegóły wyliczeń w raporcie NCBJ (nie dostępny)

# Doświadczenia eksploatacyjne reaktorów HTGR

(oficjalne lata eksploatacji ale istotna liczba godzin/dni pracy)

badawcze: Dragon (UK): 14 lat

PB (US): 8 lat

AVR (Niemcy): 22 lat

HTTR (Japonia): do 2011 - 13 lat

– od 7 lat nie uruchamiany

HTR-10 (Chiny) 17 lat (od 2000 r.)

2003-2007: pracował 569 godzin

2015: 90 dni w 5 cyklach (18-03 do 05-08)

Produkcyjne: FSV (US) : 14 lat

(1976-89 ok. 31 tys. godz., wykorzystanie 53,6%)

THTR (Niemcy): 4 lata

(1986-89 ok. 4500 godz., wykorzystanie 60,9%)

HTR-PM: uruchomienie w 2018

**wcale nie takie wielkie doświadczenie eksploatacyjne**

# Ocena bezpieczeństwa reaktora HTGR (1)

**Stwierdzenie:**

***„szczególną zaletą technologii HTGR jest inherentne bezpieczeństwo, gdyż nie ma ryzyka stopienia rdzenia”***  
**racja – nie ma części metalowych**

**ale są inne ryzyka związane z rdzeniem:**

- możliwość zapalenia się grafitu (Windscale)
- możliwość zalania wodą w THTR (teraz inna konstrukcja)
- gromadzenie energii w siatce krystalicznej (efekt Wignera)
- puchnięcie grafitu (wystąpiło np. w reaktorze MARIA)
- lokalne przekroczenie temperatury (do 1600°C)  
(stwierdzone doświadczalnie dla pojedynczych kul w AVR występowanie dużych różnic w temperaturze kul)
- sprawa pylenia kul przy ich przemieszczaniu się w rdzeniu (poważny problem w czasie eksploatacji i likwidacji)

## Ocena bezpieczeństwa reaktora HTGR (2)

### Stwierdzenie:

*„Zostało to [wysoka odporność na stopienie] potwierdzone obliczeniami i symulacjami, jak również eksperymentem przeprowadzonym na japońskim reaktorze HTTR. W czasie pracy z 30% obciążeniem wyłączono system chłodzenia i pręty kontrolne”. (s.18)*

### Odporność potwierdzona:

- jednym eksperymentem w reaktorze HTTR (pryzmatyczny).
- dwoma eksperymentami w reaktorze HTR-10 (kulowy)

Niezbędne potwierdzenie w warunkach większej mocy oraz różnych stanów wypalenia paliwa

Wymagane potwierdzenie doświadczalnie lub zweryfikowanym kodem obliczeniowym

# Założenia budowy reaktora HTGR (1)

wybór zasadniczych koncepcji konstrukcyjnych dotyczy reaktora badawczego i przemysłowego

postać rdzenia: kulowy czy blokowy

liczba obiegów:

- jeden (turbina gazowa)
- dwa (wymiennik pośredni i turbina parowa)
- trzy (dwa wymienniki gazowe i wytwornica pary)

w każdym przypadku wymiennik dla celów kogeneracji

**POWINNO TO BYĆ W TYM RAPORCIE**

jeśli nie ma to stracone 1,5 roku czasu

(albo celowo nie ujawniono takich ustaleń)

Reaktor badawczy - mniejsza skala reaktora przemysłowego

## Założenia budowy reaktora HTGR (2)

### Stwierdzenie:

*„Istnieje kilka linii produkcyjnych na świecie [paliwa typu TRISO do reaktora HTGR], co umożliwia kupno sprawdzonego już paliwa do pierwszych reaktorów w Polsce, przed wybudowaniem własnej fabryki paliwa.” (s.7).*

wymaga weryfikacji

gdzie na pewno fabryki paliwa TRISO aktualnie pracują i mogą wyprodukować paliwo pryzmatyczne do reaktora badawczego w Świerku

Wydaje się, że jedyna czynna fabryka jest w Chinach i produkuje paliwo kulowe dla tamtejszych reaktora

Wspomniana możliwość produkcji paliwa w Polsce może być w tej chwili tylko rozważana teoretycznie

## Założenia budowy reaktora HTGR (3)

**Stwierdzenie:**

*ustalono lokalizację reaktora badawczego w Świerku*

**JEST BARDZO POZYTYWNE USTALENIE**

powinno to być bardziej konkretne

i oparte o porozumienia wstępne podpisane przez NCBJ z firmami U-Battery (2016) i X-Energy (2017) oraz Japońską Agencją Energii Atomowej (2017).

Raport powinien wskazać jaki będzie reaktor badawczy.

Konstrukcje wymienionych firm różnią się przykładowo:

- pod względem mocy
- zastosowanego paliwa
- układu obiegu wtórnego

Koncepcja zestawu krytycznego wymaga przemyślenia

**ZMIENIŁEM ZDANIE**

Może być przydatny dla weryfikacja kodów stacjonarnych



# Zagadnienia prawne

Dwa artykuły:

(1) J. Szczurek, Ł. Koszuc, M. Klisińska, K. Andrzejewski (2016):  
„Legal Obstacles to the Construction of High Temperature Reactors for Heat Generation on the Example of Polish Regulations”,

(2) T. R. Nowacki (2017):

„On Legal Requirements for Construction of High Temperature Reactors (HTR) in Poland”

ukazały się w niemieckim czasopiśmie AtomWirtschaft

Pierwszy postuluje wiele zmian w polskim Prawie atomowym

Drugi stwierdza, że reaktor przemysłowy może być budowany jak reaktor badawczy

Regulacje prawne uważam za zagadnienia wtórne względem problemów technicznych

dozór jądrowy i dobrze wykształceni inspektorzy potrafią właściwie ocenić zagadnienia konstrukcyjne i eksploatacyjne

# Wyzwania konstrukcyjno-technologiczne

Próba określenia wyzwań na podstawie własnego doświadczenia w odniesieniu do reaktora badawczego:

Założenie: reaktor pryzmatyczny (blokowy)

- badanie elementów paliwowych  
(można przeprowadzić w reaktorze MARIA)
- metody pomiarów neutronowych (opracowanie)
- metody pomiarów technologicznych (temperatura)
- system sterowania i zabezpieczeń (opracowanie)
- metody badania szczelności elementów paliwowych
- technologia wymiany/tasowania paliwa
- zbudowanie maszyny załadowniczej
- opracowanie technologii budowy zbiornika

# Warunki realizacji budowy reaktora badawczego HTGR

- 1) nie kwestionowana konieczność przed budową reaktora przemysłowego
- 2) nawiązanie współpracy międzynarodowej (z jednym/dwoma partnerami)
- 3) dokonanie precyzyjnego podziału zadań wśród uczestników współpracy
- 4) wykonanie analiz bezpieczeństwa z współwykonawcą
- 5) przygotowanie wspólnego raportu bezpieczeństwa (wstępny i ostateczny)
- 6) współpraca z urzędem dozoru jądrowego w Polsce i u partnera zagranicznego

## Uwagi końcowe

Trudno zgodzić się ze stwierdzeniem:

*„W opinii Zespołu przedstawione w niniejszym raporcie wyniki stanowią podstawę do podjęcia przez Ministra Energii kierunkowej decyzji dotyczącej procesu wdrażania HTGR w Polsce.” (s.8.)*

gdyż uważam, że na podstawie tego materiału można jedynie i odpowiedzialnie tylko podjąć decyzję o przygotowaniach do budowy reaktora badawczego w Polsce.

Natomiast wdrażanie reaktora HTGR (mając na myśli reaktor przemysłowy) można podjąć dopiero po uzyskaniu pozytywnych doświadczeń z eksploatacji reaktora badawczego.

Budowa reaktora badawczego powinna być sfinansowana przez ministerstwa zaangażowane w rozwój różnych technologii w Polsce mając na względzie przyszłe korzyści ale i oceniając właściwie podejmowane ryzyko powodzenia tego projektu.

## Uwagi końcowe - rekomendacje

- dobry pomysł na rozwój technologii jądrowej w kraju
- budowa reaktora badawczego zupełnie nowej technologii niesie wiele korzyści rozwojowych dla Polski
- możliwość innego wykorzystania zdobytych doświadczeń

### Zasadnicze niedostatki opracowania:

- brak podania kosztów budowy reaktora badawczego (działania w pierwszej kolejności)
- brak etapu wykorzystania doświadczeń z eksploatacji reaktora badawczego (jak długo powinien być eksploatowany?)
- brak powołania do Zespołu wykonawców zadania w projekcie NCBR (nie zachowana ciągłość pracy)
- wątpliwa wiarygodność oceny kosztów reaktora przemysłowego

**BRAK KOREFERENTA RAPORTU PRZY JEGO AKCEPTACJI**