



MINISTERSTWO ENERGII

Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce

Raport Zespołu ds. analizy i przygotowania warunków
do wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych

Przygotował Zespół pod kierunkiem:

Grzegorza Wrochny

Zatwierdził:

Józef Sobolewski

Warszawa, wrzesień 2017

SPIS TREŚCI

| | |
|---|-----------|
| Streszczenie | 4 |
| Zapotrzebowanie na ciepło | 5 |
| Wybór technologii | 5 |
| Koszty i opłacalność ekonomiczna HTGR | 6 |
| Dostępność technologii | 7 |
| Model biznesowy | 7 |
| Rekomendowany harmonogram | 7 |
| Wstęp | 8 |
| 1. Potrzeby polskiej i europejskiej gospodarki | 9 |
| 1.1. Zużycie ciepła przemysłowego w Polsce i w Europie | 9 |
| 1.2. Odbiorcy ciepła na przykładzie Grupy Azoty S.A. | 11 |
| 2. Wybór technologii i parametrów reaktora | 12 |
| 2.1. Porównanie różnych technologii | 12 |
| 2.2. Wybór reaktora dla polskiego przemysłu | 16 |
| 2.3. HTGR na świecie | 17 |
| 2.4. Charakterystyka HTGR | 18 |
| 2.5. Cykl paliwowy HTGR | 20 |
| 3. Opłacalność ekonomiczna HTGR | 21 |
| 3.1. Koszty budowy i eksploatacji reaktora HTGR 165 MW _{th} | 21 |
| 3.2. Uproszczona kalkulacja kosztu ciepła przemysłowego i opłacalności inwestycji ... | 23 |
| 4. Dojrzałość i dostępność technologii HTGR | 26 |
| 4.1. Doświadczenia w budowie i eksploatacji HTGR | 26 |
| 4.2. Dostępność paliwa TRISO | 27 |
| 4.3. Własność intelektualna technologii HTGR | 27 |
| 4.4. Współpraca międzynarodowa | 28 |
| 5. Potrzebne prace badawcze dla HTGR | 30 |
| 5.1. Laboratorium materiałowe NOMATEN | 30 |
| 5.2. Reaktor eksperymentalny HTGR 10 MW _{th} | 31 |
| 5.3. Finansowanie reaktora eksperymentalnego HTGR | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Regulacje prawne | 33 |
| 6.1. Aktualny stan prawny | 33 |
| 6.2. Analiza prawa atomowego pod kątem reaktorów HTGR..... | 34 |
| 6.3. Model licencjonowania i zakres prawa atomowego..... | 35 |
| 6.4. Współpraca z dozorami innych krajów | 36 |
| 7. Model biznesowy wdrażania HTGR | 37 |
| 7.1. Projekt, dostawy i budowa (EPC) | 37 |
| 7.2. Realizacja programu i zarządzanie ryzykiem | 40 |
| 7.3. Proponowany model biznesowy - podsumowanie..... | 42 |
| 7.4. Zaangażowanie potencjału zagranicznego | 43 |
| 7.5. Finansowanie budowy reaktora | 44 |
| 7.6. Synergia projektów HTGR 10 MW _{th} i 165 MW _{th} | 44 |
| 8. Harmonogram decyzji i działań | 45 |
| 8.1. Jądrowa mapa drogowa dla Polski | 45 |
| 8.2. Reaktor eksperymentalny HTGR 10 MW _{th} | 46 |
| 8.3. Pierwszy przemysłowy reaktor HTGR..... | 47 |
| 8.4. Nowe zastosowania innowacyjnych reaktorów jądrowych | 48 |
| 9. Korzyści z wdrożenia HTGR w Polsce | 49 |
| 10. Słownik pojęć i skrótów | 50 |

STRESZCZENIE

Zespół ds. analizy i przygotowania warunków do wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych (w skrócie Zespół ds. HTR) został powołany przez Ministra Energii 13 lipca 2016 roku. W ciągu kilkunastu miesięcy swojej pracy zebrał i przeanalizował informacje dotyczące zapotrzebowania na energię w postaci ciepła o temperaturze powyżej 250°C i możliwości jego zaspokojenia reaktorami HTR. Dokonano przeglądu dostępnych technologii reaktorowych uznając reaktory chłodzone helem (*High Temperature Gas-cooled Reactors – HTGR*) jako najlepszą opcję. Przewaga tej technologii nad innymi wynika z unikalnych cech inherentnego bezpieczeństwa uniemożliwiających stopienie rdzenia, dojrzałości technologicznej oraz parametrów technicznych optymalnych do potrzeb przemysłu. Przeprowadzono oszacowanie kosztów budowy tego typu reaktora i wstępnie przeanalizowano opłacalność inwestycji w porównaniu z technologiami konwencjonalnymi. Wykazano, że przy zapewnieniu korzystnego kredytowania inwestycji **cena pary z HTGR może być porównywalna z ceną pary z kotłów gazowych**. Paliwo gazowe jest dzisiaj obciążone dużym ryzykiem braku dostępności i wzrostu cen oraz niepewnością kosztów emisji CO₂.

TECHNOLOGIA HTGR JEST ALTERNATYWNA, KTÓRA MOŻE ZAPEWNIĆ:

Uniezależnienie Polski od importu gazu od jednego dostawcy poprzez zmniejszenie zapotrzebowania do poziomu pokrywalnego przez wydobycie własne, gazociąg północny, gazoport.

Zmniejszenie emisji CO₂, co zwiększa pulę dostępną dla energetyki opartej na węglu kamiennym.

Zapewnienie krajowemu przemysłowi źródła ciepła o przewidywalnych kosztach, odpornych na zmiany cen paliw i niezależnych od cen uprawnień do emisji CO₂

Uruchomienie w kraju produkcji reaktorów HTGR o dużym potencjale eksportowym.

W tej sytuacji Zespół rekomenduje rozpoczęcie prac nad wdrożeniem HTGR.

Proponowany model biznesowy zakłada utworzenie spółki celowej - nazwijmy ją roboczo HTR-EPC - przez podmioty zainteresowane odbiorem ciepła przemysłowego. Pierwszym jej zadaniem byłoby opracowanie studium prekonceptyjnego pogłębiającego analizę przeprowadzoną przez Zespół oraz przeprowadzenie negocjacji z potencjalnymi partnerami zagranicznymi. Pozytywny wynik studium umożliwiłby uruchomienie projektowania reaktora. Projekt reaktora pozytywnie zaopiniowany przez dozór jądrowy otworzyłby możliwość podjęcia decyzji o budowie HTGR w konkretnych lokalizacjach. **Pierwszy HTGR ruszyłby ok. 2031 r.** Jednocześnie HTR-EPC, zaraz po utworzeniu, rozpoczęłaby przygotowania i budowę reaktora eksperymentalnego HGTR małej mocy, który jest potrzebny do przyspieszenia prac projektowych i licencjonowania reaktorów komercyjnych.

ZAPOTRZEBOWANIE NA CIEPŁO

Zapotrzebowanie na ciepło w Europie rozkłada się na poziomie 600-900 GWh/rok w przedziałach temperatur poniżej 250°C, 250-550°C i powyżej 1000°C oraz z niewielkim zapotrzebowaniem pomiędzy 550°C a 1000°C. Najniższy przedział może być zaspokojony przez reaktory lekkowodne (LWR). Jednak instalacje przemysłowe wykorzystujące takie temperatury są na ogół niewielkie i rozproszone, co utrudnia zastosowanie reaktorów jądrowych. Znaczące możliwości niesie sektor ciepłowniczy (ogrzewanie), który w wybranych krajach wykorzystuje ciepło odpadowe z dużych reaktorów energetycznych. Źródłem miejskiego ciepła mogłyby być reaktory SMR typu PWR, rozwijane w kilku państwach na świecie. Reaktory typu HTGR mają jednak tę przewagę, że można je budować bliżej siedzib ludzkich dzięki ich, opisanym niżej, inherentnym cechom bezpieczeństwa.

Para o $T \approx 500^\circ\text{C}$ jest standardowym nośnikiem ciepła w wielu dużych zakładach przemysłowych, głównie chemicznych. Zastosowanie reaktorów jądrowych byłoby o tyle ułatwione, że zastąpiłyby one wyeksploatowane kotły gazowe czy węglowe z zachowaniem istniejących instalacji, łącznie z turbinami produkującymi energię elektryczną na potrzeby zakładu. Zapotrzebowanie polskiego przemysłu na parę o takich parametrach wynosi ok. 6500 MW w kilkunastu lokalizacjach. W praktyce, zapotrzebowanie na reaktory HTGR do 2050 r. wynosi w Polsce 10-20, w EU 100-200 i na świecie 1000-2000 sztuk.

Zakres najwyższy, powyżej 1000°C, ma dużą przyszłość ze względu na produkcję wodoru i paliw wodoropochodnych. Zespół rekomenduje rozpoczęcie wstępnych prac badawczych nad odpowiednimi reaktorami (jak VHTR czy DFR) gdyż obecnie nie istnieje sprawdzona technologia jądrowa w tym zakresie.

WYBÓR TECHNOLOGII

Zdaniem Zespołu **optymalną technologią dla $T \approx 500^\circ\text{C}$ są reaktory typu HTGR¹**. Do takiego wniosku prowadzą też studia prowadzone przez SNETP², OECD NEA³, IAEA⁴ i rząd brytyjski⁵. W tej technologii zbudowano już kilkanaście reaktorów badawczych i przemysłowych (m.in. $2 \times 250 \text{ MW}_{\text{th}}$ oddawane do użytku w Chinach), co potwierdza jej dojrzałość. Ciągłe nie jest ona jednak komercyjnie rozpowszechniona i **jej wdrożenie na skalę przemysłową (seryjna produkcja reaktorów) stanowiłoby przełom w energetyce światowej**.

¹ W literaturze światowej na określenie reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazowym helem używa się skrótów zarówno HTGR jak i HTR. W niniejszym raporcie skrót HTR odnosi się ogólnie do różnych technologii reaktorów wytwarzających wysoką temperaturę.

² SNETP „Deployment Strategy”, 2015, www.snetp.eu/publications

³ OECD NEA „Nuclear Innovations 2050”, www.oecd-nea.org/ndd/ni2050

⁴ “Industrial Applications of Nuclear Energy”, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.3, 2017.

⁵ “Small Modular Reactors: Techno-Economic Assessment”, 2017.

www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment

SZCZEGÓLNA ZALETĄ TECHNOLOGII HTGR JEST INHERENTNE BEZPIECZEŃSTWO - NIE MA RYZYKA STOPIENIA RDZENIA.

Paliwo TRISO, gdzie dwutlenek uranu znajduje się w powłoce SiC, przetestowano do ~1700°C.

Nawet w przypadku awarii wszystkich systemów i utraty chłodziwa, rdzeń wychładza się samorzutnie dzięki wypromieniowywaniu ciepła i konwekcji.

Umożliwia to posadowienie takiego reaktora w bezpośredniej bliskości instalacji przemysłowych czy nawet siedzib ludzkich

KOSZTY I OPŁACALNOŚĆ EKONOMICZNA HTGR

Porównano koszt pary **540°C** i **13.8 MPa** z kotłami gazowymi, węglowymi i HTGR o mocy **165 MW** i wydajności **230 t/h**. Koszt projektowania i licencjonowania HTGR oszacowano na **500 mln zł**, zaś koszt budowy jednego HTGR na **2,0±0,6 mld zł netto**. Aby uwzględnić niepewności związane z przewidywaną ceną emisji CO₂ oraz z kosztami inwestycyjnymi, analizę wykonano dla różnych wartości parametrów wejściowych. Z analizy wynika, że przy **stopie dyskonta 4%** i cenie emisji CO₂ **20-50 €/t** uśredniony w okresie życia jednostki wytwórczej **koszt (LCOE) pary z HTGR 36 zł/GJ jest porównywalny z kosztem pary z kotła gazowego 36-42 zł/GJ**.

Uruchomienie 500 mln zł na projekt reaktora (po pozytywnym wyniku studium prekonceptyjnego) w latach 2019-2023 umożliwiłoby podejmowanie decyzji o inwestycjach w konkretnych lokalizacjach po 2023 r., kiedy to uwarunkowania ekonomiczne będą znacznie lepiej określone.

Podejmując decyzję o rozpoczęciu prac nad technologią HTGR, oprócz liczbowych wskaźników ekonomicznych, należy uwzględnić wspomniane wyżej czynniki gospodarcze, takie jak:

- redukcja zależności od importu gazu
- zmniejszenie emisji CO₂
- przewidywalność kosztów eksploatacji
- potencjał eksportowy

DOSTĘPNOŚĆ TECHNOLOGII

Pomimo istnienia kilku reaktorów badawczych i komercyjnych typu HTGR - **nie istnieje projekt reaktora gotowy do powielania w skali przemysłowej**. Kompetencje i doświadczenie są rozproszone w wielu krajach na skutek zakończenia poszczególnych projektów. **Istniejąca wiedza nie jest chroniona patentami**, a wiele opracowań znajduje się w domenie publicznej. **Znaczną część kompetencji rozproszonych w UE, USA, Japonii i Korei udało się zgromadzić w projekcie Euratom Gemini+ koordynowanym przez NCBJ**. Kluczowym elementem technologii HTGR jest bezpieczne paliwo typu TRISO. Istnieje kilka linii produkcyjnych na świecie, co umożliwia kupno sprawdzonego już paliwa do pierwszych reaktorów w Polsce, przed wybudowaniem własnej fabryki paliwa.

MODEL BIZNESOWY

Obecnie żadna z wielkich firm projektujących reaktory jądrowe (poza Chinami) nie deklaruje gotowości podjęcia samodzielnie realizacji projektu HTGR. Stwarza to **możliwość utworzenia w Polsce nowej firmy zbierającej rozproszone kompetencje** (o przykładowej nazwie HTR-EPC, od „*engineering, procurement, construction*”). Możliwość ta jest jednocześnie szansą na przejęcie niemal całości potrzebnej własności intelektualnej. **HTR-EPC powinna mieć większościowy udział polskiego kapitału**, firmy zagraniczne mogłyby zaś uczestniczyć jako udziałowcy lub podwykonawcy. Obecność polskich firm chemicznych i energetycznych wśród uczestników prac nad HTGR gwarantowałaby merytoryczną poprawność studium prekonceptyjnego, a w następnym etapie, dostosowanie projektu reaktora do konkretnych potrzeb odbiorców.

REKOMENDOWANY HARMONOGRAM

- 2018 I kw: Umowa między ME i MNiSW o realizacji programu HTGR + ewentualny program rządowy
- 2018 I kw: Utworzenie spółki HTR-EPC + włączenie partnerów zagranicznych
- Reaktor eksperymentalny 10 MW_{th}:
 - 2018-20 projektowanie (150 mln zł), 2020-25: licencjonowanie i budowa (600 mln zł)
- Reaktor komercyjny 165 MW_{th}:
 - 2018: studium prekonceptyjne (10 mln zł)
 - 2019-23: projektowanie (500 mln zł)
 - 2023-26: przygotowanie budowy pierwszego HTGR (500 mln zł)
 - 2026-31: budowa pierwszego HTGR (1500 mln zł)

WSTĘP

Zespół ds. analizy i przygotowania warunków do wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych został powołany Zarządzeniem Ministra Energii z dnia 13 lipca 2016 r. W skład Zespołu weszli:

| | Imię i nazwisko | Instytucja | Status | Data powołania/ oddelegowania |
|----|----------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Grzegorz Wrochna | NCBJ | Przewodniczący | 07.2016 |
| 2 | Konrad Czernski | Uniwersytet Szczeciński | Członek | 07.2016 |
| 3 | Sławomir Jankiewicz | ENEA S.A. | Członek | 05.2017 |
| 4 | Sławomir Potemski | NCBJ | Członek | 07.2016 |
| 5 | Mirosław Skowron | PeBeKa S.A. Grupa KGHM | Członek | 05.2017 |
| 6 | Mirosław Syta | Tauron Polska Energia S.A. | Członek | 03.2017 |
| 7 | Marek Tarka | Prochem S.A. | Członek | 07.2016 |
| 8 | Marcin Wasilewski | PKN ORLEN S.A. | Członek | 11.2016 |
| 9 | Krzysztof Wilbik | Energoprojekt-Warszawa S.A. | Członek | 07.2016 |
| 10 | Adam Żurek | Grupa Azoty S.A. | Członek | 10.2016 |
| 11 | Kamil Adamczyk | DEJ ME | Członek | 07.2016 |
| 12 | Andrzej Bacía | DEJ ME | Sekretarz | 01.2017 |
| 13 | Marcin Dąbrowski | PAA | Obserwator | 08.2016 |
| 14 | Zuzanna Nowak | NCBJ | Obserwator | 08.2016 |
| 15 | Piotr Galas | PKO BP | Obserwator | 09.2016 |
| 16 | Krzysztof Strabanik | PKO BP | Obserwator | 09.2016 |
| 17 | Małgorzata Świdorska | NCBR | Obserwator | 08.2016 - 04.2017 |
| 18 | Robert Czarnecki | NCBR | Obserwator | 04.2017 |

Tabela 1. Członkowie i obserwatorzy Zespołu ds. HTR.

Zgodnie z zadaniami powierzonymi przez Ministra Energii, **Zespół skoncentrował wysiłki na pracy analitycznej**, polegającej na zgromadzeniu dostępnej wiedzy dotyczącej **wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych** (*High Temperature Reactors – HTR*), przetworzeniu tych informacji i wyciągnięciu wniosków w zakresie możliwości wdrożenia HTGR dla potrzeb polskiej gospodarki.

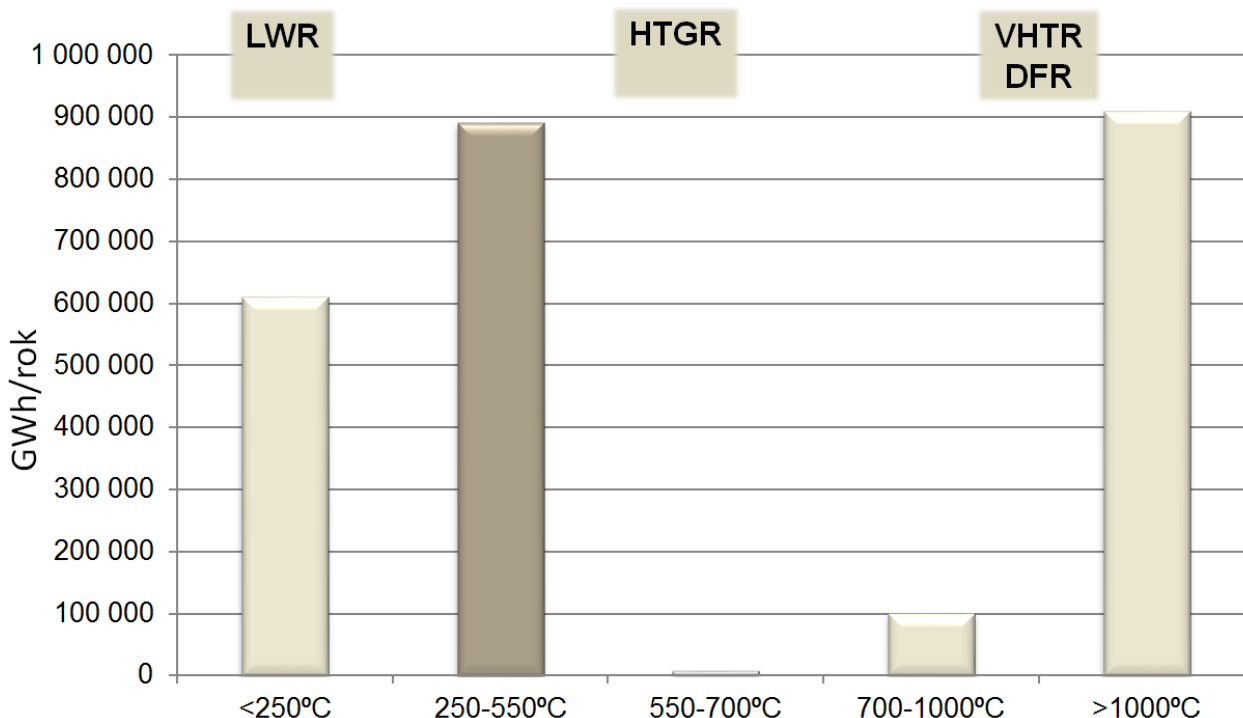
Niniejszy raport stanowi podsumowanie wyników dwunastu miesięcy prac Zespołu, w okresie od lipca 2016 roku do czerwca 2017 roku. **W opinii Zespołu przedstawione w niniejszym raporcie wyniki stanowią podstawę do podjęcia przez Ministra Energii kierunkowej decyzji dotyczącej procesu wdrażania HTGR w Polsce.**

Tekst raportu uzupełniają raporty wewnętrzne Zespołu obszerniej opisujące poszczególne elementy analizy, m.in. bogata lista opracowań (dostępnych bezpośrednio lub po uzyskaniu zgody autorów), dotyczących technologii HTGR i jej potencjalnych zastosowań.

1. POTRZEBY POLSKIEJ I EUROPEJSKIEJ GOSPODARKI

1.1. ZUŻYCIE CIEPŁA PRZEMYSŁOWEGO W POLSCE I W EUROPIE

Opisane poniżej dane przedstawiają wyniki projektów europejskich EUROPAIRS i NC21-R, projektu polskiego HTR-PL oraz dane uzyskane w ramach prac Zespołu. Nie stanowią one wyczerpującej informacji na temat zużycia ciepła przemysłowego w Polsce czy w Europie. Dotyczą przede wszystkim możliwości zastosowania reaktora jądrowego jako źródła ciepła w przemyśle.



Grafika 1. Zapotrzebowanie europejskiego przemysłu na ciepło procesowe (źródło – EUROPAIRS).
Zaznaczono adekwatne technologie reaktorowe.

Zapotrzebowanie na ciepło w Europie rozkłada się na poziomie 600-900 GWh/rok w przedziałach temperatur: do 250°C, 250-550°C i powyżej 1000°C, z niewielkim udziałem pomiędzy 550°C a 1000°C.

Najniższy zakres temperatur wykorzystywany jest na świecie w przemyśle papierniczym, ciepłowniczym czy też do odsalania wody morskiej. Może on być pokryty przez reaktory lekkowodne (LWR). Jednak instalacje przemysłowe wykorzystujące takie temperatury w Polsce są na ogół niewielkie i rozproszone, co utrudnia zastosowanie reaktorów jądrowych. Znaczące możliwości niesie sektor ciepłowniczy (ogrzewanie), który w kilku krajach wykorzystuje ciepło odpadowe z dużych reaktorów energetycznych. Źródłem miejskiego ciepła mogłyby być reaktory SMR typu PWR, które są rozwijane w kilku krajach. Reaktory typu HTGR można by jednak budować bliżej siedzib ludzkich dzięki ich inherentnym cechom bezpieczeństwa.

Zakres najwyższy, powyżej 1000°C, ma dużą przyszłość ze względu na produkcję wodoru i paliw wodoropochodnych, jednak obecnie nie istnieje sprawdzona technologia jądrowa w tym zakresie. Głównym wyzwaniem jest odporność materiałów na jednocześnie duże promieniowanie i wysokie temperatury. Nie istnieją jeszcze komercyjne reaktory jądrowe będące w stanie wytwarzać parę technologiczną o tak wysokich temperaturach z jednoczesnym zachowaniem wytrzymałości materiałowej. Wiele krajów prowadzi jednak prace badawcze w tym kierunku, rozważając różne technologie reaktorów mogących sprostać wymaganiom przemysłowym.

W zakresie środkowym, para o temperaturze bliskiej 500°C jest standardowym nośnikiem ciepła w wielu dużych zakładach przemysłowych, głównie chemicznych. Zastosowanie reaktorów jądrowych byłoby o tyle ułatwione, że zastąpiłyby one wyeksploatowane kotły gazowe czy węglowe z zachowaniem istniejących instalacji, łącznie z turbozespołami produkującymi energię elektryczną na potrzeby zakładów.

W sumie w Europie zlokalizowano 132 zakłady lub grupy przemysłowe, które mogłyby wykorzystać technologię jądrową w środkowym, nadal osiągalnym, zakresie temperatur 250-550°C. W Europie zachodniej zlokalizowano 92 z nich, w Europie wschodniej i środkowej 40, w tym 15 w Polsce.

W Tabeli 2 zestawiono dane dotyczące 13 największych polskich odbiorców ciepła przemysłowego. Łączna moc kotłów parowych tam zainstalowanych wynosi prawie 6500 MW. Do gremium potencjalnych użytkowników kogeneracji jądrowej należą także firmy energetyczne i KGHM Polska Miedź S.A.

| | Zakłady o największej mocy zainstalowanej | Kotły | MW _{th} |
|-----|---|-----------|------------------|
| 1. | PKN Orlen | 8 | 2140 |
| 2. | Zakłady Azotowe Puławy S.A. | 5 | 855 |
| 3. | Anwil S.A. / ORLEN Group | 3 | 580 |
| 4. | ZCH Police S.A. | 3 | 356 |
| 5. | Kwidzyn Sp. z o.o. International Paper | 6 | 531 |
| 6. | Grupa LOTOS | 4 | 518 |
| 7. | Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A. | 4 | 630 |
| 8. | Zakłady Azotowe Kędzierzyn S.A. | 5 | 395 |
| 9. | PCC Rokita | 3 | 160 |
| 10. | Rafineria Trzebinia S.A. | 4 | 88 |
| 11. | Lotos Czechowice S.A. - LOTOS GROUP | 3 | 89 |
| 12. | Lotos Jasło S.A. - LOTOS GROUP | 3 | 74 |
| 13. | Rafineria Nafty Jedlicze S.A. - Orlen Group | 6 | 64 |
| | SUMA | 57 | 6480 |

Tabela 2. Najwięksi polscy użytkownicy ciepła w zakresie 250-550°C wg. danych na 2015 r.

1.2. ODBIORCY CIEPŁA NA PRZYKŁADZIE GRUPY AZOTY S.A.

Grupa Azoty S.A. składa się z kilkudziesięciu podmiotów gospodarczych powiązanych kapitałowo. Dominującymi są cztery kompleksy przemysłowe:

- Zakłady Azotowe w Tarnowie (produkty: saletra, kaprolaktam, poliamid, siarczan amonu, etc.).
- Zakłady Azotowe w Puławach (produkty: mocznik, saletry, melamina, poliamid, woda utleniona, siarczan amonu, etc.)
- Zakłady Azotowe w Kędzierzynie (produkty: mocznik, saletry, alkohole oxo, plastyfikatory, etc.)
- Zakłady Chemiczne w Policach (produkty: mocznik, nawozy typu NPK, biel tytanowa, etc.)

We wszystkich tych lokalizacjach kompleksom chemicznym towarzyszy energetyka. Zaspokaja ona w całości potrzeby cieplne zakładów, a także w znacznej mierze zapotrzebowanie na energię elektryczną. Pracuje ona w skojarzeniu produkując zarówno parę technologiczną o różnych ciśnieniach, gorącą wodę do celów technologicznych jak i grzewczych oraz energię elektryczną. Energia w postaci ciepła jest sprzedawana także odbiorcom zewnętrznym, przede wszystkim jako centralne ogrzewanie. Sprzedaż energii elektrycznej jest marginalna.

Podstawowym surowcem energetycznym i chemicznym używanym bezpośrednio w procesach technologicznych jest gaz ziemny (ponad 2 mld m³ rocznie) W energetyce zakładowej podstawowym paliwem jest węgiel kamienny ze zużyciem na poziomie 1,3 mln ton rocznie. Specyfiką energetyki w Grupie jest konieczność dostosowania się do zmieniających się obciążeń zarówno sezonowych jak i wynikających ze zmieniającego się obciążenia ze strony technologii, w krótkich okresach czasu - liczonych często w minutach. Wymusza to konieczność stosowania w każdej lokalizacji kilku jednostek, tak aby była możliwa ich praca w szerokim możliwym technologicznie spektrum obciążeń. **Jednostkami dominującymi, typowymi, są kotły parowe o mocach termicznych poniżej 200 MW_{th}, produkujące parę świeżą o temperaturach rzędu 510-540°C.**

2. WYBÓR TECHNOLOGII I PARAMETRÓW REAKTORA

2.1. PORÓWNANIE RÓŻNYCH TECHNOLOGII

Reaktory jądrowe coraz częściej znajdują zastosowanie nie tylko w produkcji energii elektrycznej, ale także ciepła i mają pod tym kątem ogromny potencjał dalszego rozwoju. W zakresie produkcji energii elektrycznej światowy rynek zdominowany jest przez wielkie (~1000 MW_e) reaktory lekkowodne (LWR). Ciepło będące produktem ubocznym reakcji w LWR wykorzystywane bywa do ogrzewania miast, odsalania wody morskiej i do produkcji chemicznej. Jednak, jak pokazuje Grafika 1, niskotemperaturowa kogeneracja LWR może odpowiedzieć tylko na część zapotrzebowania przemysłu. Dla gałęzi przemysłu takich jak chemiczna, metalurgiczna, itp., niezbędne są wyższe temperatury, co wskazuje na konieczność zastosowania innych technologii reaktorowych.

Najszerszą międzynarodową inicjatywą wspierającą rozwój nowych technologii reaktorowych jest GIF - Generation IV International Forum (www.gen-4.org) skupiające kraje unijne i 13 krajów spoza UE. W ramach swoich prac GIF wybrał 6 najbardziej obiecujących technologii do dalszych prac badawczych:

| | TECHNOLOGIE REAKTORÓW WYBRANE PRZEZ GIF |
|-------------|--|
| SFR | <ul style="list-style-type: none"> • Sodium-cooled Fast Reactor • reaktor prędko chłodzony sodem |
| LFR | <ul style="list-style-type: none"> • Lead-cooled Fast Reactor • reaktor prędko chłodzony ołowiem |
| GFR | <ul style="list-style-type: none"> • Gas-cooled Fast Reactor • reaktor prędko chłodzony gazem |
| MSR | <ul style="list-style-type: none"> • Molten Salt Reactor • w odmianach MSFR (Fast) i MSThR (Thermal) • reaktor na stopionych solach, prędko i termiczny |
| SCWR | <ul style="list-style-type: none"> • Supercritical Water-cooled Reactor • reaktor nadkrytyczny, chłodzony wodą |
| VHTG / HTGR | <ul style="list-style-type: none"> • Very High Temperature Reactor • reaktor bardzo-wysoko temperaturowy • chłodzony gazem o temperaturze powyżej 1000°C • jest rozwinięciem HTGR – High Temperature Gas-cooled Reactor – reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem (500-1000°C). |

Jedną z odmian koncepcji MSR jest tak zwany reaktor dwupłynowy DFR (Dual Fluid Reactor). Koncepcja ta opisana jest w dedykowanym raporcie wewnętrznym Zespołu „Charakterystyka reaktora DFR i plany badawcze”.

Reaktory te zaliczane są do tzw. czwartej generacji. Należy zauważyć, że nazwa ta może być nieco myląca, gdyż zadaniem czwartej generacji nie jest bynajmniej zastąpienie trzeciej, ale uzupełnienie jej w nowych obszarach zastosowań. W szczególności reaktory prędkie (fast) umożliwiają powtórne wykorzystanie paliwa wypalonego w reaktorach trzeciej generacji, po jego odpowiednim przetworzeniu. Ich zastosowanie pozwoli na lepsze wykorzystanie uranu i zmniejszenie ilości odpadów.

W Europie, rozwój reaktorów jądrowych wspiera konsorcjum SNETP - *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform* (www.snetp.eu). Skupia ono kilkudziesięciu partnerów przemysłowych, organizacji badawczych i inne podmioty zaangażowane w energetykę jądrową. Stanowi oficjalny organ doradczy Komisji Europejskiej w ramach realizacji SET-Plan'u (*Strategic Energy Technology Plan*). Prace SNETP zorganizowane są w trzech filarach:

- **NUGENIA** – reaktory generacji 2, 3 i 3+
- **ESNII** – reaktory prędkie SFR, LFR i GFR
- **NC2I** (Nuclear Cogeneration Industrial Initiative) – wykorzystanie reaktorów do skojarzonej produkcji ciepła i elektryczności oraz innych zastosowań.

W ramach prowadzonych projektów, NC2I wytypowała technologię HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) jako najbardziej obiecującą. Z jednej strony inherentne cechy bezpieczeństwa tego reaktora (opisane niżej) umożliwiają umieszczenie go w bezpośredniej bliskości instalacji przemysłowych. Z drugiej, dojrzałość technologii - widoczna w kilkunastu zbudowanych do tej pory reaktorach badawczych i komercyjnych - pozwala oczekiwać wdrożenia na szeroką skalę już na początku lat trzydziestych. Znalazło to odzwierciedlenie w opublikowanej rok temu „*SNETP Deployment Strategy*”⁶, która przewiduje uruchomienie pierwszego z serii (FOAK – *first of a kind*) HTGR ok. roku 2030.

Do podobnego wniosku doszli eksperci powołani przez OECD Nuclear Energy Agency do opracowania „mapy drogowej” pt. „Nuclear Innovations 2050”⁷. Na poniższym diagramie HTGR jest przedstawiony jako jeden z typów SMR (Small Modular Reactors lub Small & Medium Size Reactors) przewidywany do wdrożenia ok. 2030 roku.

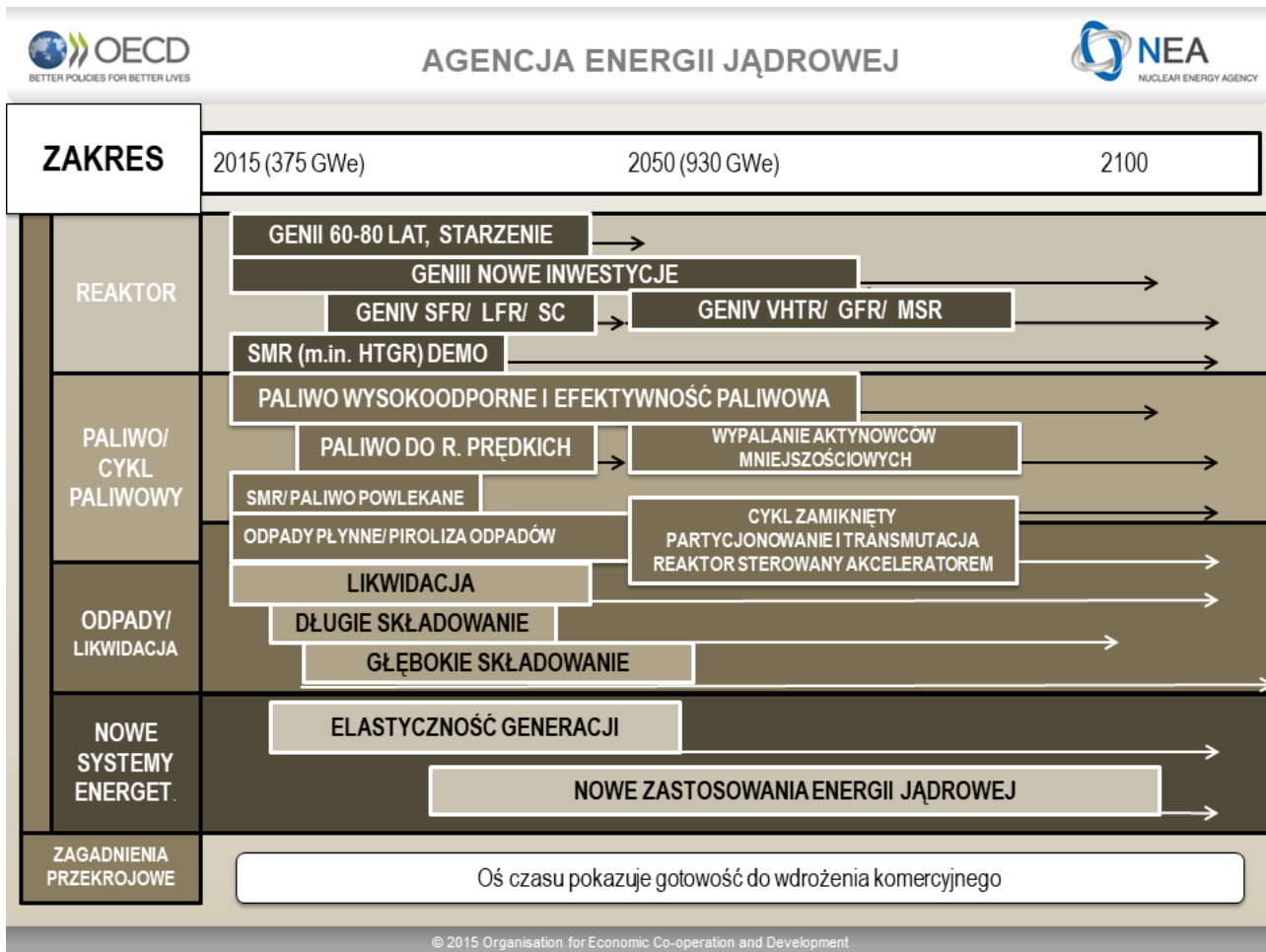
Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej IAEA opublikowała też pod koniec 2017 r. dokument „Industrial Applications of Nuclear Energy”⁸, w którym wiele miejsca poświęca reaktorom HTGR, w szczególności w zastosowaniu do produkcji ciepła przemysłowego.

⁶ SNETP „Deployment Strategy”, 2015, www.snetp.eu/publications

⁷ OECD NEA „Nuclear Innovations 2050”, www.oecd-nea.org/hdd/ni2050

⁸ „Industrial Applications of Nuclear Energy”, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.3, 2017.

WYBÓR TECHNOLOGII I PARAMETRÓW REAKTORA



Grafika 2. HTGR na mapie drogowej Agencji Energii Jądrowej OECD – Innowacje Jądrowe 2050. Oznaczenia technologii reaktorów SFR, LFR, VHTR, GFR, MSR podano na str. 12.

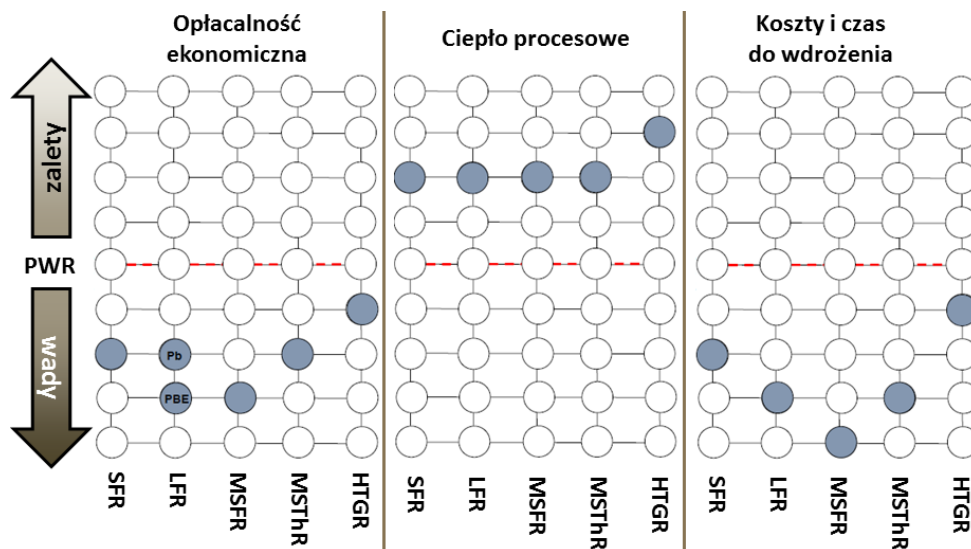
Rząd Wielkiej Brytanii także zainicjował przegląd różnych technologii SMR, które mogłyby być wykorzystane w tym kraju. Pod koniec 2015 roku rozpoczęto „Ocenę Techniczno-Ekonomiczną” (*Techno-Economic Assessment - TEA*) dostępnych technologii, a w 2016 roku rząd brytyjski ogłosił konkurs na projekt reaktora SMR (*UK SMR competition*) przeznaczając 250 mln GBP na rozwój wybranych technologii. Oficjalne wyniki TEA⁹ opublikowano dopiero po zakończeniu prac Zespołu, ale kilka ośrodków zaangażowanych w ocenę opublikowało wcześniej własne studia. Dwa z nich, zaprezentowane na konferencji *UK SMR Summit* w październiku 2016 roku, przedstawiono poniżej.

⁹ “Small Modular Reactors: Techno-Economic Assessment”, 2017.

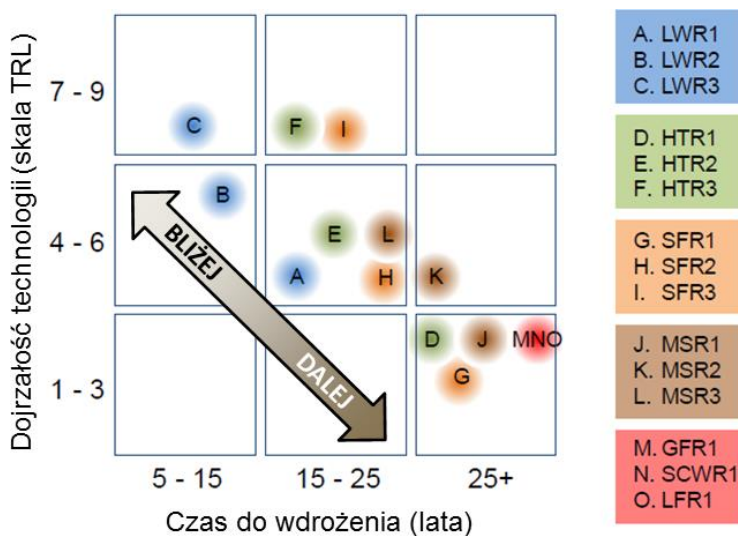
www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment

WYBÓR TECHNOLOGII I PARAMETRÓW REAKTORA

W obydwu opracowaniach, reaktory lekkowodne (LWR), w szczególności wodnociśnieniowe (PWR) postrzegane są jako SMR najbliższe wdrożeniu. Zaraz za nimi plasują się HTGR, które jednak zyskują przewagę w zastosowaniach przemysłowych.



Grafika 3. Porównanie dostępnych technologii jądrowych (wg. Gregg Butler, Manchester University).
Poszczególne cechy porównane są z referencyjnym reaktorem PWR. (Skróty opisano na str. 12)



Grafika 4. Porównanie dostępnych technologii jądrowych (Andrew H. Sherry, National Nuclear Laboratory).
Zilustrowano przykładowe projekty proponowane dla Wielkiej Brytanii.

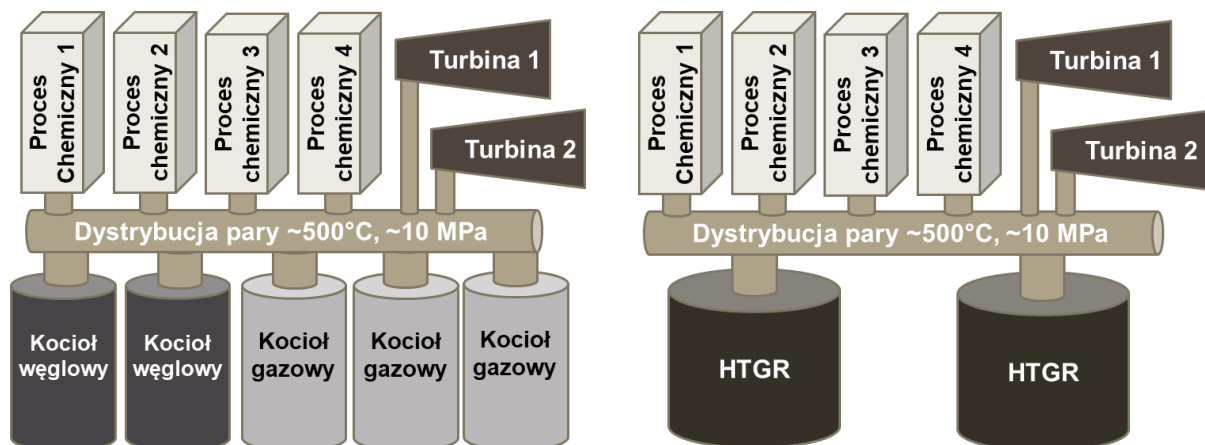
2.2. WYBÓR REAKTORA DLA POLSKIEGO PRZEMYSŁU

Przedstawiona wyżej przewaga technologii HTGR, szczególnie w zakresie 250-550°C, wynika głównie z następujących cech:

- inherentne bezpieczeństwo (niemożność stopienia rdzenia)
- dojrzałość technologii (kilkanaście HTGR już zbudowanych)
- możliwość uzyskiwania wysokich temperatur (przetestowana do 950°C, możliwa ponad 1000°C)
- łatwość postępowania z wypalonym paliwem

Cechy te zostały przedstawione i uzasadnione w rozdziałach 2.4, 0 i 4.

Pierwszym zastosowaniem HTGR w polskim przemyśle może być wykorzystanie go do produkcji pary wodnej o temperaturze rzędu 550°C. Ze względu na stopień zaawansowania technologii, reaktor taki mógłby być na czas podłączony do istniejących instalacji chemicznych w miejsce starzejących się kotłów (węglowych lub gazowych) bez konieczności przeróbek samej instalacji. Co więcej, **HTGR jest technologią inherentnie bezpieczną**, dzięki czemu można taki reaktor postawić w bezpośredniej bliskości innych instalacji na terenie zakładu przemysłowego, ogranicza to wówczas utratę ciepła w trakcie jego przesyłania. Jednocześnie część mocy reaktora mogłaby być wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej na potrzeby zakładu, podobnie jak w przypadku obecnych kotłów.



Grafika 5. Zastąpienie kotłów węglowych lub gazowych reaktorem HTGR.

Do dalszych analiz dobrano główne parametry reaktora HTGR tak, by mógł on zastąpić jeden ze standardowo stosowanych w przemyśle kotłów: gazowy OG-230, węglowy pyłowy OP-230 lub węglowy fluidalny OFz-230. Parametry takiego reaktora zebrano w Tabeli 3.

| PARAMETR | WARTOŚĆ |
|------------------------------|----------------------|
| Moc cieplna jądrowa | 165 MW _{th} |
| Rdzeń temperatura na wylocie | 750°C |
| Rdzeń temperatura wlotowa | 250°C – 450°C |
| Maksymalna temperatura pary | 570°C |
| Ciśnienie pary | 17 MPa |
| Wydajność pary | 230 t/h |

Tabela 3. Główne parametry reaktora HTGR.

Kolejnym zastosowaniem reaktorów HTGR może być **zastąpienie w przyszłości wysłużonych bloków energetycznych o mocy około 200 MW_e**. W Polsce pracują 52 takie jednostki, z których większość jest już przestarzała. Przygotowywany obecnie program ich renowacji pozwoli na przedłużenie użytkowania o kolejne 15-20 lat. Można mieć nadzieję, że wcześniejsze zastosowanie HTGR w przemyśle chemicznym pozwoli na tyle zoptymalizować produkcję tych reaktorów, że w przypadku wysokich cen gazu i kosztów emisji CO₂ staną się one konkurencyjne.

2.3. HTGR NA ŚWIECIE

Krajem najbardziej zaawansowanym we wdrożeniu technologii HTGR są Chiny. W pobliżu Shidaowan, w chińskiej prowincji Shandong, budowana jest elektrownia z bliźniaczymi reaktorami HTR-PM - o mocy 250 MW_{th} każdy - które będą zasilają jedną 210 MW_e turbinę parową. Budowa rozpoczęła się pod koniec 2012 roku, a uruchomienie elektrowni jest zaplanowane pod koniec 2018 roku.

Wstępną ocenę wykonalności na początku 2015 roku przeszedł projekt budowy dwóch reaktorów HTGR – każdy o mocy 600 MW_e - w mieście Ruijin, w chińskiej prowincji Jiangxi. Oczekuje się, że budowa reaktorów w Ruijin rozpocznie się w przyszłym roku, a ich podłączenie do sieci nastąpi w 2021 roku.

China Nuclear Engineering Corporation (CNEC) podpisała umowę z Państwową Agencją Atomistyki w Indonezji (*Batan*) w celu wspólnego opracowania reaktora HTGR w **Indonezji**. *Batan* rozważa, przed wprowadzeniem dużych reaktorów HTGR, budowę reaktora eksperymentalnego o mocy 3-10 MW_e, a mocy cieplnej 10-30 MW_{th}.

Oprócz Indonezji, CNEC nawiązał współpracę z **Arabią Saudyjską** i **RPA** promując swoją technologię HTGR. W RPA prowadzono prace nad reaktorem wysokotemperaturowym zwanym PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*). W 2010 roku przerwano je pomimo wysokiego stopnia zaawansowania.

W **USA** technologię HTGR rozwijają m.in.:

- New Generation Nuclear Plant (NGNP) na bazie koncepcji US AREVA o nazwie ANTARES (*A New Technology Advanced Reactor Energy System*),
- *Steam Cycle High-Temperature Gas-Cooled Reactor* (SC-HTGR) o mocy $625 \text{ MW}_{\text{th}}$
- X-energy – reaktor Xe-100 o mocy $125 \text{ MW}_{\text{th}}$ i ok. 50 MW_{e} , który otrzymał w styczniu 2015 roku 40 mln \$ wsparcia od DOE (*Departament of Energy*).

W **Japonii** przez kilkanaście lat, aż do katastrofy w Fukushima, pracował testowy reaktor HTTR (*High-Temperature Test Reactor*) o mocy $30 \text{ MW}_{\text{th}}$ (aktualnie jest on wyłączony). Japonia i **Korea Południowa** myślą o rozwinięciu technologii w kierunku wyższych temperatur, umożliwiających produkcję wodoru i paliw wodoropochodnych.

Wielka Brytania rozważa HTGR jako jedną z technologii małych i średnich reaktorów (tzw. SMR), w które chciałaby zainwestować. Jednym z nich może być U-Battery HTGR o mocy $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ lub 4 MW_{e} .

2.4. CHARAKTERYSTYKA HTGR

HTGR to reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem, gdzie moderatorem jest grafit, a chłodziwem gaz – zwykle hel. Paliwem jest TRISO – małe kulki z materiałem rozszczepialnym (oprócz uranu może być domieszka toru) z osłoną z węgliku krzemu lub węgliku cyrkonu.

PALIWO TRISO CHARAKTERYZUJE SIĘ WYSOKĄ ODPORNOŚCIĄ NA STOPIENIE

Przetestowano, że podniesienie temperatury do 1700°C nie powoduje uwolnienia substancji radioaktywnych z paliwa TRISO. Te cechy paliwa stanowią o inherentnym bezpieczeństwie HTGR. Ponieważ w HTGR o mocach mniejszych niż $600 \text{ MW}_{\text{th}}$ temperatura taka nie może być osiągnięta - nie ma tu ryzyka stopienia rdzenia.

Umożliwia to posadowienie reaktora w bezpośredniej bliskości instalacji przemysłowych czy siedzib ludzkich. Nawet w przypadku awarii wszystkich systemów i utraty chłodziwa, rdzeń wychładza się samorzutnie dzięki wypromieniowywaniu ciepła i konwekcji.

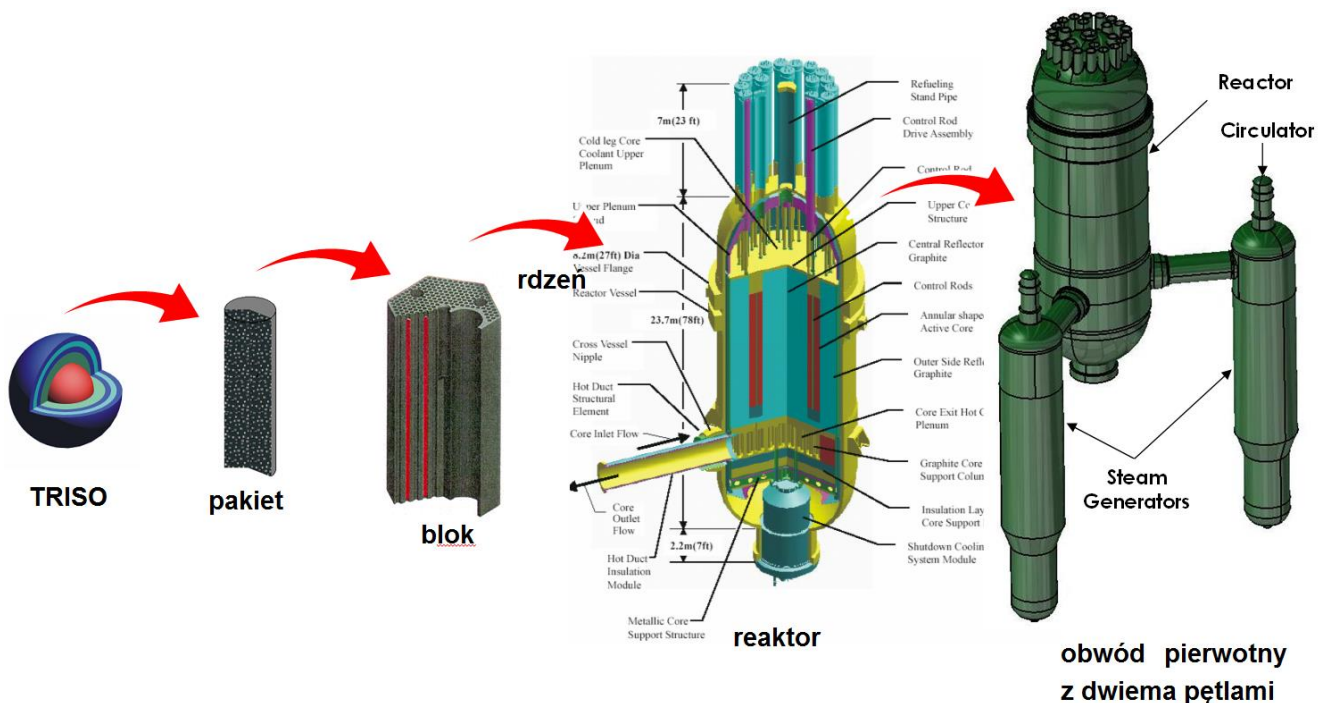
Zostało to potwierdzone obliczeniami i symulacjami, jak również eksperymentem przeprowadzonym na japońskim reaktorze HTTR. W czasie pracy z 30% obciążeniem wyłączono system chłodzenia i pręty kontrolne. Reaktor wychłodził się samorzutnie, zgodnie z przewidywaniami. Planowane są testy przy pełnej mocy reaktora.

WYBÓR TECHNOLOGII I PARAMETRÓW REAKTORA

Istnieją dwa zasadnicze typy reaktorów HTGR:

- Reaktor **ze złożem kulowym**, usypanym („*pebble bed*”) – małe kulki z paliwem są rozproszone w matrycy grafitowej, z której formowane są większe kule – te zaś umieszczane są na górze stosu tworzącego rdzeń, na dole są odbierane i w zależności od stopnia wypalenia kierowane ponownie na górę stosu albo traktowane jako odpad. Hel jest przetłaczany przez to złożo. Głównymi zaletami HTGR ze złożem kulowym jest możliwość pracy bez przerw na przeładunek paliwa oraz prostota konstrukcji. Wadą jest możliwość powstawania pyłu grafitowego przy przemieszczaniu się kul.
- Reaktor **z rdzeniem pryzmatycznym** – kulki paliwowe są rozproszone w matrycy grafitowej w formie cylindrów, które umieszcza się w otworach w dużych sześciokątnych blokach grafitowych, formując w ten sposób rdzeń. W blokach tych znajdują się pionowe kanały przez które przepływa hel. Główną zaletą tego typu reaktora jest łatwiejsza przewidywalność parametrów pracy nieruchomego paliwa. Wadą jest konieczność wyłączenia reaktora w celu wymiany paliwa.

Kolejną zaletą paliwa TRISO jest bezpieczeństwo składowania po wypaleniu. Powłoka SiC (ZrC) zabezpiecza przed uwolnieniem substancji radioaktywnych nawet w trudnych warunkach środowiskowych.



Grafika 6 Model reaktora pryzmatycznego HTGR.

2.5. CYKL PALIOWY HTGR

Używane w HTGR paliwo TRISO jest stosunkowo mało kłopotliwe po wypaleniu dzięki swoim unikalnym cechom:

- **Składowanie wypalonego paliwa z reaktorów HTGR zostało już wdrożone w kilku krajach, gdzie pracowały reaktory badawcze i komercyjne tego typu. Nie napotkano przy tym na poważniejsze, nieoczekiwane problemy technologiczne.**
- Powłoka z PyC i SiC stanowi bardzo wytrzymałą i odporną na korozję barierę zatrzymującą substancje radioaktywne, co zmniejsza potrzebę tworzenia dodatkowych barier.
- Niska gęstość energii powoduje, że pasywne chłodzenie powietrzem wystarcza do odprowadzenia energii.
- Wysokie wypalenie powoduje efektywne wykorzystanie uranu i powstającego w reaktorze plutonu.
- Skład izotopowy wypalonego paliwa stanowi małe zagrożenie proliferacyjne.

Cechy te sprawiają, że do składowania wypalonego paliwa HTGR mogą być z powodzeniem stosowane metody opracowane do składowania średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych.

Przykładowo, ciepło powyłączeniowe reaktora THTR o mocy 750 MW_{th}, który pracował w latach 1983-1988 było wydzielane z mocą poniżej 20 kW i zostało odprowadzone przez wypromieniowanie i naturalną konwekcję. Całe wypalone paliwo z reaktora AVR o mocy 46 MW_{th}, który pracował w latach 1967-1988 wydzielalo ciepło poniżej 15 kW. Po 1-2 latach wypalone paliwo opuszczało budynek reaktora i trafiało do przechowalników przejściowych, gdzie było chłodzone przez konwekcję. Podobnie w japońskim reaktorze badawczym HTTR wypalone paliwo przechowywane jest w budynku reaktora.

Największym jak dotąd wyzwaniem związanym z cyklem paliwowym HTGR była utylizacja wypalonego paliwa z amerykańskiego reaktora komercyjnego w Fort St. Vrain o mocy 842 MW_{th}, eksploatowanego w latach 1977-1992. Całe paliwo było najpierw sukcesywnie przewożone do Idaho National Laboratory, a następnie umieszczone w magazynie w pobliżu Platteville, 65 km od Denver. 130 m³ paliwa umieszczono w betonowym budynku o wymiarach 44×22×25 m. Paliwo jest chłodzone naturalną cyrkulacją powietrza. Planuje się przewiezienie paliwa do docelowego składowiska, kiedy takie będzie uruchomione w USA.

Próby opracowania metody kruszenia kulek TRISO i odzyskiwania uranu lub toru podejmowane były przez Oak Ridge National Laboratory w USA, Forschungszentrum Jülich GmbH w Niemczech, CEA we Francji i JAEA w Japonii. Testowano kruszarki szczękowe i młotkowe, młyny kulowe itp. Uzyskane rezultaty były mało zadowalające ze względu na wysoką odporność mechaniczną powłok SiC. Potwierdziło to, że paliwo TRISO jest bardzo bezpieczne z punktu widzenia zapobiegania proliferacji materiałów jądrowych.

Jak dotąd najefektywniejszą metodę przerobu paliwa TRISO opracowała Japońska JAEA. Jednak przy dzisiejszych stosunkowo niskich cenach uranu odzyskiwanie go z paliwa TRISO jest nieopłacalne. **Zarówno techniczne jak i ekonomiczne argumenty przemawiają jednoznacznie za wyborem opcji składowania wypalonego TRISO bez przeróbki.**

Przewiduje się, że docelowo wypalone paliwo HTGR będzie traktowane jako odpady średnioaktywne i składowane w repozytoriach geologicznych.

3. OPŁACALNOŚĆ EKONOMICZNA HTGR

3.1. KOSZTY BUDOWY I EKSPLOATACJI REAKTORA HTGR 165 MW_{TH}

Oszacowania kosztów wykorzystania reaktora HTGR do wytwarzania ciepła procesowego dokonano na podstawie danych dostarczonych przez:

- NGNP – „New Generation Nuclear Plant” Industrial Alliance: www.ngnpalliance.org
- “HTR600” - źródło poufne
- NC2I-R: www.nc2i.eu
- X-energy: www.x-energy.com

Szczegóły wyliczeń podano w raporcie NCBJ¹⁰. Poniżej przedstawiono najważniejsze założenia i wyniki:

A. Zakłada się, iż jest to **kolejny reaktor z serii** (NOAK – *Next Of a Kind*), a nie pierwszy tego typu.

B. Założone **parametry pary i mocy cieplnej**:

Wydajność produkcji pary 230 t/h, temperatura pary 540°C, ciśnienie pary 13.8 Mpa. Przekłada się to na **moc reaktora ok. 165 MW_{th}**. Założone parametry mają charakter przybliżony, gdyż korzystano z gotowych projektów koncepcyjnych HTGR. Wykonując projekt finalny możliwe będzie techniczne dopasowanie parametrów poprzez odpowiedni dobór ładunku paliwa jądrowego (wpływ na moc reaktora) oraz konstrukcję wytwornicy pary i regulację ciśnienia roboczego (wpływ na parametry i strumień pary).

C. Zakłada się, że **kogeneracja odbywa się poprzez kolektor**, a nie bezpośrednio w układzie reaktora. W obliczeniach kosztu nie uwzględnia się turbiny i układu rozdziału pary, wymienników regeneracyjnych, pomp itd. Uwzględnia się wyłącznie koszt tzw. *nuclear island*, czyli reaktor i jego układy pomocnicze oraz wytwornica pary (hel-woda), gdyż potencjalni odbiorcy na ogół już dysponują systemami dystrybucji pary, a nawet turbinami do produkcji energii elektrycznej. Przyjmujemy, że woda (skropliny) trafiają do wytwornicy pod odpowiednim ciśnieniem z rurociągu zasilanego czynnikiem od odbiorcy technologicznego. Uwzględnia się układ uzupełniania wody.

D. Założono **temperaturę helu** na wylocie z reaktora (ROT) = **750°C**

Wszystkie wykorzystane oszacowania wykonane były w oparciu o zaawansowane projekty koncepcyjne poprzez sumowanie kosztów komponentów (kilkaset na reaktor) oraz ich montażu. Stosowano metodologię opracowaną przez *The Economic Modelling Working Group Of the Generation IV International Forum*¹¹. Ponieważ dostępne projekty miały różne moce, konieczne było przeskalowanie do docelowego HTGR 165 MW_{th}. Przeskalowania dokonano w kontakcie z autorami projektów, schodząc na poziom różnych kategorii kosztów. Jedynie firma X-energy dostarczyła projekt zoptymalizowany do 165 MW_{th}.

¹⁰ *Technologia i oszacowanie kosztów źródła pary technologicznej z wysokotemperaturowym reaktorem chłodzonym gazem* (HTGR), NCBJ 2017.

¹¹ Cost estimating guidelines for generation 4 Nuclear Energy Systems, GIF/EMWG/2007/004.

OPŁACALNOŚĆ EKONOMICZNA HTGR

Szczegóły wyliczeń podano w cytowanym wyżej raporcie NCBJ, a końcowy wynik w Tabela 4.

| Źródło | HTR600 | NC2I-R | NGNP | X-energy |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Technologia | Blokowy | Blokowy | Blokowy | Kulowy |
| Projekt oryginalny | | | | |
| Ceny na rok | 2016 | 2014 | 2015 | 2016 |
| Moc | 600 MW | 2x250 MW | 350 MW | 165 MW |
| Koszt | 1357 M€ | 1010 M€ | 611 M\$ | 388 M\$ |
| Projekt przeskalowany do 165 MW | | | | |
| Źródło | HTR600 | NCBJ | NCBJ | X-energy |
| Koszt | 2566 Mzł | 1995 Mzł | 1519 Mzł | 1358 Mzł |

Tabela 4. Porównanie kosztów (overnight, bez VAT) budowy HTGR. Uwzględniono koszty przygotowawcze (500 mln zł). Nie uwzględniono kosztów projektowania (uwzględnione w analizie ekonomicznej).
Założono 1\$=3,5zł, 1€=4,2zł.

Niestety, trudno o wiarygodne dane o kosztach budowanych w Chinach reaktorów HTR-PM. Dostępne są jedynie dane porównawcze, wskazujące jednostkowy koszt HTR-PM ok. 15% wyższy niż typowego reaktora LWR, przy czym koszt części jądrowej wynosi 55% całości. Koszt elektrowni LWR w Chinach, wg OECD wynosi od 1,8 do 2,6 mln \$ / MW_e, czyli 22-31 mln zł / MW_{th}. Daje to ok. 2,0-2,8 mld zł za HTGR 165 MW_{th}, co nie jest sprzeczne z danymi w Tabela 4, zwłaszcza, że HTR-PM to reaktory prototypowe.

Całkowity koszt budowy (*Overnight Construction Cost*) zawiera koszty przygotowawcze 500 mln zł, na które składają się koszty przygotowania terenu, licencjonowania, uzyskiwania innych zgód, itp. Zawiera też 50 mln zł jako 1/10 kosztu projektowania reaktora wynoszącego 500 mln zł, zakładając że koszt projektowania rozłoży się na pierwszych 10 reaktorów. Koszt projektowania nie uwzględnia projektu części elektrycznej (gdyż ta już istnieje u odbiorcy), projektu fabryki paliwa oraz kosztu licencjonowania (ten wliczono do kosztów budowy).

Otrzymano bardzo różne koszty budowy - od 1,4 do 2,6 mld zł - co mogłoby wskazywać na dużą niepewność oceny. Trzeba jednak zauważyć, że koszt jest tym większy, im większa była moc reaktora oryginalnego. Jest to zrozumiałe, bo każdy z projektów był optymalizowany na inną moc nominalną. Zmniejszanie mocy reaktora powoduje przekraczanie różnych barier technologicznych, umożliwiających nieliniowe zmniejszenie kosztu. Przykładowo, powyżej 200 MW_{th} zbiornik reaktora musi być wykonany w częściach, które są łączone dopiero na placu budowy. Natomiast zbiornik reaktora mniejszego, który miałby średnicę 4-4,5 m, mógłby być wykonany w całości metodą walcowania i przetransportowany na plac budowy drogą lądową. W takim scenariuszu już w fabryce można by zainstalować znaczną część oprzyrządowania zbiornika, skracając czas montażu na placu budowy i tym samym redukując koszty.

Przed wykonaniem projektu koncepcyjnego trudno stwierdzić, czy reaktor o mocy 165 MW_{th} spełniałby ten warunek. Jeśli nie, to należałoby rozważyć zestaw 2×83 MW_{th}.

Z powyższych powodów koszt 1,4 mld zł, oszacowany dla reaktora zoptymalizowanego na 165 MW_{th}, powinien być najbliższy rzeczywistości. Wprawdzie jest to reaktor kulowy, a więc o innej konstrukcji niż pozostałe, jednak nie należy spodziewać się różnicy kosztów między reaktorem kulowym a blokowym przyrównanym większej niż 10%. **Do dalszych analiz przyjęto jednak opcję pośrednią, bliską 2 mld zł, traktując rozrzut oszacowań ±0,6 mld zł jako miarę niepewności oszacowania.**

3.2. UPROSZCZONA KALKULACJA KOSZTU CIEPŁA PRZEMYSŁOWEGO I OPŁACALNOŚCI INWESTYCJI

Zespół porównał koszt wytwarzania pary 540°C i 13.8 MPa z kotłów gazowych, węglowych i HTGR o mocy 165 MW i wydajności 230 t/h.

Ponadto, przyjęto następujące założenia:

- Wliczono 10% kosztów projektowania i licencji ogólnej wynoszących rzędu 500 mln zł, zakładając, że będą one w większości rozłożone pomiędzy 10 pierwszych reaktorów.
- Założono 15 dni w roku na przeładunek paliwa i inspekcje oraz 80% wykorzystania energii w pozostałym czasie ze względu na zmienne zapotrzebowanie zakładu na parę.
- Jeden HTGR w danej lokalizacji. Dwa lub więcej HTGR poprawiłoby wynik, gdyż instalacje miałyby wiele elementów wspólnych.
- Czas eksploatacji HTGR - 60 lat, zaś kotłów węglowych i gazowych po 30 lat, co wymaga ich odtworzenia w połowie analizowanego okresu.
- Ceny surowców i cena pary na obecnym poziomie.
- Brak wsparcia ze środków publicznych.

Otrzymano następujące koszty inwestycji:

| | OCC [mln] zł] | OPEX [mln] zł] | |
|--|---------------|----------------|-----|
| Cena uprawnień emisji CO ₂ [€/Mg] | | 20 | 50 |
| Kocioł węglowy pyłowy OP-230 | 275 | 118 | 174 |
| Kocioł węglowy fluidalny OFz-230 | 370 | 119 | 174 |
| Kocioł gazowy OG-230 | 166 | 184 | 215 |
| HTGR 165 MW _{th} | 1903 | 99 | |

Tabela 5. Koszty inwestycji. OCC (Overnight Construction Cost)- całkowity koszt budowy, bez VAT. OPEX – roczny koszt eksploatacji

OPŁACALNOŚĆ EKONOMICZNA HTGR

Do porównania opłacalności ekonomicznej wybrano trzy zmienne:

- **Wyrównany koszt jednostkowy (LCOE) produkcji pary w zł/GJ**
- **Finansowa wartość aktualna netto (F-NPV) w mln zł**
- **Ekonomiczna wartość aktualna netto (E-NPV) w mln zł**

| | LCOE [zł/GJ] | | | | F-NPV [mln zł] | | | | E-NPV [mln zł] | | | |
|--|--------------|----|----|----|----------------|-----|-------|-----|----------------|------|------|------|
| | 8% | | 4% | | 8% | | 4% | | 8% | | 4% | |
| Stopa dyskontowa | 8% | | 4% | | 8% | | 4% | | 8% | | 4% | |
| Cena uprawnień emisji CO ₂ [€/Mg] | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 20 | 50 | 30 | 50 |
| Kocioł węglowy pyłowy OP-230 | 27 | 37 | 25 | 35 | 412 | 158 | 1 371 | 619 | 163 | -91 | 633 | -119 |
| Kocioł węglowy fluidalny OFz-230 | 29 | 39 | 26 | 36 | 368 | 120 | 1 292 | 555 | 56 | -193 | 364 | -373 |
| Kocioł gazowy OG-230 | 37 | 43 | 36 | 42 | 159 | 20 | 561 | 144 | 144 | 4 | 515 | 98 |
| HTGR 165 MW _{th} | 55 | | 36 | | -268 | | 538 | | -268 | | 538 | |
| HTGR 165 MW _{th} budowa 8 lat | 64 | | 38 | | -494 | | 387 | | -494 | | 387 | |
| HTGR 165 MW _{th} nakłady+50% | 84 | | 48 | | -966 | | -276 | | -966 | | -276 | |

Tabela 6. Parametry ekonomiczne kotłów węglowych, gazowych i HTGR.

Największymi niewiadomymi dla technologii węglowej oraz gazowej są odpowiednio opłaty za CO₂ i cena paliwa. Dla technologii jądrowej największym ryzykiem są odpowiednio nakłady inwestycyjne, ryzyko technologiczne, czas realizacji inwestycji oraz koszt pieniądza w czasie. Niepewności te powodują, że decyzje inwestycyjne będą oparte bardziej na analizie ryzyka niż czysto liczbowym porównaniu ekonomicznym. Ponieważ jednak w momencie rozpoczynania inwestycji stopa dyskontowa będzie znana, HTGR daje największą stabilność przewidywań kosztów operacyjnych. Przemawia to na korzyść tej technologii w sytuacji porównywalnej dla różnych technologii wielkości ceny pary i F-NPV. Wskaźnik E-NPV uwzględniający koszty zewnętrzne daje dodatkową preferencję dla HTGR.

Na potrzeby niniejszego raportu przyjęto po dwie wartości stopy dyskonta: 8% i 4%. Pierwsza jest minimalną wartością używaną obecnie dla dużych inwestycji przez przemysł. Druga jest wartością realną do uzyskania na polskim rynku finansowym. Przyjęto też dwie wartości ceny uprawnień emisji CO₂: 20 i 50 €/tonę. 50€ to cena zapowiadana przez Komisję Europejską. Według większości prognoz przewidywana dolna granica ceny uprawnień emisji CO₂ wynosi 20€. Przyjęcie takich korzystnych i niekorzystnych dla HTGR wariantów określa „pole gry” - obszar wskaźników, wewnątrz którego projekt HTGR będzie realizowany z dużym prawdopodobieństwem.

Z analizy wynika, że **przy stopie dyskonta 4% koszt pary (LCOE) z HTGR jest porównywalny z kosztem pary z kotła gazowego**, a nieco wyższy niż z węglowego. Przy stopie dyskonta 8%, finansowa opłacalność ($F-NPV \geq 0$) inwestycji może być osiągnięta przy doinwestowaniu kwotą 650 mln zł. Ponieważ dotacja może być trudna do zaakceptowania zarówno przez opinię publiczną jak i Komisję Europejską, preferowanym wariantem jest zapewnienie stopy dyskonta rządu 4% poprzez minimalizację ryzyka: m.in. zapewnienie odbioru ciepła i energii elektrycznej (na wzór modelu Mankala, o którym mowa dalej w rozdziale 7.1), rządowe gwarancje kredytowe, itp.

Uruchomienie 500 mln zł na projekt reaktora (po pozytywnym wyniku studium prekonceptyjnego) w latach 2017-2022 umożliwiłoby podejmowanie decyzji o inwestycjach w konkretnych lokalizacjach po 2022 r., kiedy uwarunkowania ekonomiczne będą znacznie lepiej znane.

Podejmując dzisiaj decyzję o rozpoczęciu prac nad technologią HTGR **oprócz liczbowych wskaźników ekonomicznych należy uwzględnić inne ważne czynniki gospodarcze**. Technologia HTGR może zaoferować:

- uniezależnienie Polski od importu gazu od jednego dostawcy poprzez zmniejszenie zapotrzebowania do poziomu pokrywalnego przez wydobyte własne, gazociąg północny i gazoport;
- zmniejszenie emisji CO₂, co zwiększa pulę uprawnień dostępnych dla węgla kamiennego
- zapewnienie krajowemu przemysłowi źródła ciepła o przewidywalnych kosztach, odpornych na zmiany cen paliw i cen uprawnień do emisji CO₂;
- uruchomienie w kraju produkcji reaktorów HTGR o dużym potencjale eksportowym.

4. DOJRZAŁOŚĆ I DOSTĘPNOŚĆ TECHNOLOGII HTGR

4.1. DOŚWIADCZENIA W BUDOWIE I EKSPLOATACJI HTGR

Reaktory testowe



DRAGON, U.K.
20 MW
1963-76

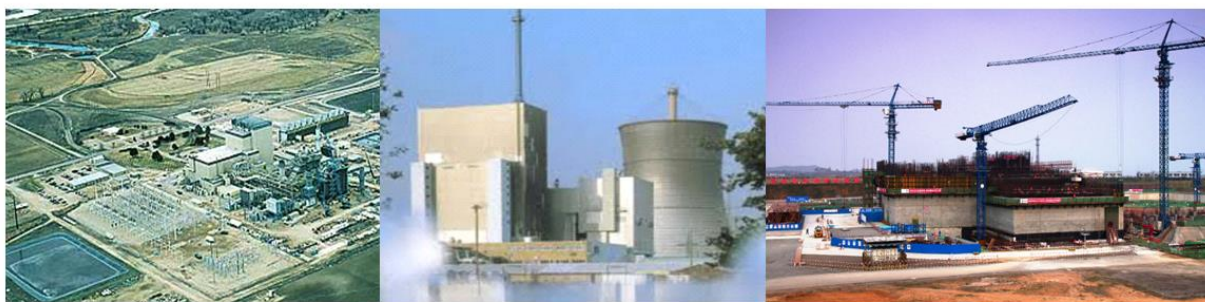
Peach Bottom, US
200 MW_{th}
1967-74

AVR, Niemcy
15 MW_e
1967-88

HTR-10, Chiny
10 MW_{th}
od 2000

HTTR, Japonia
30 MW_{th}
od 1998

Prototypy komercyjne



Fort Saint-Vrain, US
300 MW_e
1976-89

THTR, Niemcy
300 MW_e
1986-89

HTR-PM, Chiny
2 x 106 MW_e
2018?

Grafika 7. Zrealizowane projekty badawczych i komercyjnych HTGR.

Technologia HTGR została opracowana już w latach sześćdziesiątych XX w. i odąd jest systematycznie doskonalona. Powyższa plansza pokazuje reaktory badawcze i komercyjne, które zbudowano w różnych częściach świata.

Komercyjny reaktor w Fort Saint-Vrain pracował przez 13 lat. Reaktor THTR w Niemczech zamknięto niestety już po 2 latach. Dość elementarne błędy konstrukcyjne reaktora THTR nie powodowały wprawdzie zagrożenia uwolnieniem substancji radioaktywnych, ale częste przestoje reaktora podważyły jego ekonomiczną opłacalność. Stagnacja przemysłu jądrowego spowodowana negatywną atmosferą wokół energetyki jądrowej w latach 90-tych XX w. zahamowała także rozwój technologii HTGR. **Przemysł jądrowy**

nie był w stanie samodzielnie zaryzykować finansowania projektu. Z drugiej strony potencjalni użytkownicy bali się podjąć ryzyko zainwestowania w projekt reaktora przed sprawdzeniem prototypu. To błędne koło udało się przerwać w Chinach i po udanych testach reaktora badawczego HTR-10 przystąpiono do konstrukcji dwóch reaktorów HTR-PM o mocy $250 \text{ MW}_{\text{th}}$ każdy. Mają one zasilać wspólny turbospół o mocy $210 \text{ MW}_{\text{e}}$. Obecnie budowa dobiega końca i reaktory rozpoczną działanie prawdopodobnie w 2018 roku.

4.2. DOSTĘPNOŚĆ PALIWA TRISO

Kluczowym i najbardziej zaawansowanym technologicznie elementem reaktora HTGR jest paliwo TRISO. Wynaleziono je już ponad 25 lat temu - wygasły więc wszystkie związane z nim patenty.

Istniejące linie produkcyjne są wyliczone poniżej.

- BWXT w **USA** – paliwo kompaktowe wszechstronnie przetestowane w warunkach napromienienia; paliwo kulowe testowane obecnie w ramach kontraktu firmy X-energy finansowanego przez DoE. Wydajność linii produkcyjnej BWXT powinna wystarczyć dla reaktora eksperymentalnego, ale nie dla komercyjnego.
- NFI w **Japonii** – paliwo kompaktowe do istniejącego reaktora HTTR.
- ESKOM w **RPA**, Pelindaba – fabryka paliwa kulowego do reaktora PBMR, którego budowę przerwano; rozważane jest ponowne uruchomienie fabryki.
- **Rosja** – zdobyła prawa od niemieckiej firmy NUKEM, ale linię produkcyjną paliwa kulowego sprzedano do Chin.
- **Chiny** – linia produkcji paliwa kulowego firmy NUKEM dla reaktora HTR-10; uruchamiana nowa linia dla reaktorów HTR-PM; testy paliwa na ukończeniu. Obecnie jest to jedyna działająca linia produkcyjna TRISO o wydajności wystarczającej do reaktorów przemysłowych.
- CEA we **Francji** – produkcja na skalę laboratoryjną, paliwo testowane mechanicznie, ale bez napromieniania.

Należy dodać, iż nie ma zasadniczych przeszkód aby paliwo TRISO nie mogłoby być wytwarzane w Polsce. W szczególności nie ma ograniczeń licencyjnych na zakup linii produkcyjnej.

4.3. WŁASNOŚĆ INTELEKTUALNA TECHNOLOGII HTGR

Technologia HTGR nie jest już chroniona patentami, ale w wielu miejscach na świecie zgromadzono dużą wiedzę chronioną prawami własności intelektualnej. Istnieje kilka gotowych projektów, niektóre gotowe do licencjonowania. Jedynie chiński reaktor HTR-PM przeszedł pełną procedurę licencyjną.

HTR-GmbH Gesellschaft für Hochtemperaturreaktoren w Mannheim to europejska firma, której właścicielami są AREVA-G (50%) i Westinghouse (50%). Firma posiada bogate archiwum projektów o różnych mocach i obszerną dokumentację przydatną do licencjonowania. Jeden z projektów został sprzedany (nie na wyłączność) firmie ESKOM w RPA.

W Europie powstało wiele opracowań dotyczących m.in. grafitu, materiałów strukturalnych, różnych komponentów, analiz, licencjonowania, budowy, a nawet likwidacji reaktorów HTGR. Są one jednak rozproszone pomiędzy małymi firmami, jak np. „hot gas duct” w firmie Becker Technologies. Część jest jeszcze możliwa do odzyskania, ale wskazany jest pośpiech. Część prawdopodobnie już została utracona, jak np. projekt generatora pary firmy SULZER.

Częściowa informacja na ten temat została zebrana w raportach projektu NC2I-R:

- **R&D and Industrial Infrastructures**, Deliverable D2.21 for the FP7 NC2I-R Project, 9 Sep. 2015. M.A.Fütterer (JRC), C.Auriault (LGI), O.Baudrand (IRSN), G.Brinkmann (AREVA), D.Hittner (AREVA), S.Knol (NRG), Th.Mull (AREVA), K.Stehlik (CVR), D.Vanvor (BriVaTech), K.Verfondern (FZJ),
- **Report on Gap Analysis**. Deliverable D2.31 for the FP7 NC2I-R Project, 11 November 2015. S.Knol (NRG), F.Roelofs (NRG), M.A.Fütterer (JRC-IET), P-M.Plet(EON), D.Hittner (AREVA)

W USA znajduje się najwięcej wiedzy i dokumentacji dotyczących technologii HTGR. Firma **Ultrasafe Nuclear & Technology Insights** jest w posiadaniu kilku projektów **General Atomic** (m.in. **GT-MHR**). Dysponuje też doświadczeniem zebrany w czasie eksploatacji reaktora w **Ft. St. Vrain**.

Konsorcjum **NGNP Industrial Alliance** wykonało szeroki zakres prac przygotowawczych do licencjonowania we współpracy z US NRC. Przeprowadziło także kilka zaawansowanych studiów techniczno-ekonomicznych. Ponieważ prace te były istotnie współfinansowane przez US DoE ze środków publicznych (łącznie ok. 600 mln \$), ich wyniki są ogólnie dostępne pod adresem www.ngnpalliance.org.

AREVA NP Inc., amerykański oddział firmy AREVA NP zaprojektował reaktor **Antares** o mocy 625 MW_{th} i reaktor **SC-HTGR** o mocy 350 MW_{th} wykonany w ramach konsorcjum NGNP Industrial Alliance.

Ostatnio prace nad kulowym reaktorem o mocy 100-200 MW_{th} podjęła założona w tym celu **firma X-energy**. Wygrała ona ostatni konkurs DoE i otrzymała dofinansowanie w wysokości 40 mln \$.

W Kanadzie firma **Starcore Nuclear** rozpoczęła prace nad reaktorem blokowym o mocy 36-180 MW_{th}.

RPA na przełomie wieku rozpoczęło program budowy reaktora kulowego **PBMR** (Pebble Bed Modular Reactor), korzystając w dużej mierze z doświadczeń niemieckich i wsparcia amerykańskich ekspertów. Projekt został jednak zawieszony w 2010 roku. Ostatnio firma energetyczna ESKOM wyraziła zainteresowanie możliwością ponownego uruchomienia projektu.

Chiny. Należy się spodziewać, że jeśli powiedzie się uruchomienie wspomnianych wcześniej dwóch pierwszych reaktorów HTR-PM, kraj ten będzie oferował takie reaktory na eksport.

4.4. WSPÓŁPRACA MIĘDZYNARODOWA

Jak opisano w rozdziale 2.3., HTGR projektowane i budowane są w wielu krajach i nie ma zasadniczych barier technologicznych związanych z wdrażaniem tej technologii. Co więcej, technologia HTGR nie jest już chroniona patentami i istnieje kilka gotowych projektów wymagających unowocześnienia, które można nabyć po przystępnej cenie. Problemem jest jednak to, że, poza Chinami i częściowo Japonią, żadna firma nie dysponuje samodzielnie zespołem zdolnym zaprojektować i zbudować HTGR. **Wiedza ekspercka jest rozproszona po całym świecie, między różnymi firmami i ośrodkami badawczymi.** Jednym

z poważniejszych wyzwań dla projektu HTGR jest zatem zarządzanie wiedzą i konsolidacja kapitału intelektualnego niezbędnego do budowy reaktora tego typu.

Problem braku firmy projektowej oraz rozproszenia wiedzy i ekspertów jest równocześnie szansą dla Polski, która - chcąc wdrożyć technologię HTGR - już aktywnie uczestniczy w przedsięwzięciach i porozumieniach partnerskich mających na celu mobilizację know-how:

| | |
|---------------------------|---|
| <p>NC2I</p> | <p>Jednym z filarów platformy SNETP jest Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I), której celem jest promowanie HTR i innych technologii do celów innych niż produkcja energii elektrycznej. W pracach NC2I uczestniczą m.in. Areva, E-ON, Fortum, NRG, a z Polski AGH, NCBJ i Prochem. W ramach NC2I zrealizowano szereg projektów, które dokonały przeglądu technologii, analiz zapotrzebowania, analiz ekonomicznych, etc. Silnie powiązany z NC2I był polski projekt NCBR HTRPL, który dokonał podobnych analiz specyficznie dla Polski.</p> |
| <p>GEMINI</p> | <p>NC2I nawiązała współpracę z amerykańskim Next Generation Nuclear Plant (NGNP) tworząc porozumienie GEMINI. Celem jest wspólny projekt reaktora HTR w wariantach amerykańskim 600 MW_{th} i europejskim 300 MW_{th}. Podział kosztów R&D daje obu stronom wzajemny dostęp do IP. Odbyło się kilka warsztatów GEMINI, na przemian w Waszyngtonie i Brukseli. NGNP nawiązuje też współpracę z Koreą i Japonią.</p> |
| <p>Grupa Wyszehradzka</p> | <p>Instituty jądrowe z grupy V4, w tym NCBJ, utworzyły stowarzyszenie V4G4 (Visegrad-4 for Generation-4 Reactors). Celem jest wspólne podnoszenie kompetencji w zakresie projektowania i budowy reaktorów IV generacji. Głównym projektem jest demonstrator ALLEGRO – reaktor prędkiej, chłodzony gazowym helem. Ponieważ ALLEGRO ma to samo chłodziwo co HTGR, można mówić o synergii obu projektów.</p> |
| <p>GEMINI+</p> | <p>W odpowiedzi na konkurs Horyzont 2020 Komisji Europejskiej, konsorcjum oparte o NC2I i NGNP przygotowało projekt „GEMINI+”, który został wybrany do finansowania przez KE jako jedyny spośród wszystkich projektów SMR (<i>Small Modular Reactors</i>). Projekt dotyczy wypracowania założeń do projektowania, wyboru lokalizacji i licencjonowania reaktorów HTGR. Osiągniętym już na etapie przygotowawczym celem projektu było również skupienie wszystkich europejskich i światowych ekspertów powiązanych z technologią HTR – w konsorcjum bierze udział łącznie 27 partnerów pochodzących z 9 państw UE (w tym z Polski - Energoprojekt, Prochem, Tauron i NCBJ), USA, Japonii i Korei. Konsorcjum otrzymało decyzję o przyznaniu finansowania w lutym 2017 r.</p> |

Jak pokazują wyniki badań, w Polsce oraz innych krajach V4 i UE istnieje potencjał do zaprojektowania i wykonania niemal każdego podzespołu HTGR. Dobrze rozpoznani są eksperci zajmujący się tą tematyką, a – jak pokazują powyższe przedsięwzięcia – **społeczność międzynarodowa gotowa jest wspierać Polskę we wdrażaniu technologii HTGR.**

5. POTRZEBNE PRACE BADAWCZE DLA HTGR

Reaktory HTGR już istnieją, nie ma więc zasadniczych barier technologicznych i nie ma potrzeby prac badawczych nad technologią jako taką. Żaden z producentów nie oferuje jednak gotowego rozwiązania „seryjnego” więc projektowanie reaktora niewątpliwie napotka na problemy techniczne, które będą wymagały przeprowadzenia badań. Ale badania te będą ograniczone do wyboru najlepszego rozwiązania technologicznego danego szczegółowego problemu.

Oprócz prac projektowych, drugim powodem prowadzenia badań jest procedura licencjonowania. Udzielenie odpowiedzi na pytania dozoru jądrowego będzie zapewne wymagać przeprowadzenia określonych prac badawczych.

Generalnie podstawowe kierunki badań badawczych dotyczyć powinny następujących zagadnień:

- deterministyczne analizy bezpieczeństwa dla reaktorów HTGR, obejmujące obliczenia ciepło-przepływowe oraz neutronowe, w tym:
 - opracowanie modeli zintegrowanych do analiz ciepło-przepływowych i neutronowych,
 - budowa modeli obliczeniowych wysokiej wierności dla reaktora HTGR,
 - walidacja numerycznych narzędzi projektowych do HTGR obejmujących szereg zagadnień neutroniki i termo-hydrauliki (np. rozkłady mocy, strumieni neutronów, temperatury);
 - weryfikacja opracowywanych kodów poprzez udział w benchmarkach;
- probabilistyczne analizy bezpieczeństwa dla reaktora HTGR z uwzględnieniem jego działania jako części systemu procesowego instalacji chemicznej;
- zintegrowane analizy ryzyka całej instalacji chemiczno-jądrowej, obejmującej wzajemne oddziaływania obu części (chemicznej i jądrowej);
- badania materiałowe dotyczące właściwości mechanicznych, termicznych, korozyjnych w określonych warunkach radiacyjnych w celu określenia limitów bezpiecznej pracy reaktora;
- badania dotyczące określenia podstawowych charakterystyk reaktora HTGR, jak reaktywność (intensywność reakcji łańcuchowej), rozkłady temperatur rdzenia, zmiany gradientu ciśnienia;
- badania obejmujące opracowanie i testowanie instrumentacji reaktora HTGR;
- prace studialne nad nowymi koncepcjami paliwa i rdzenia.

5.1. LABORATORIUM MATERIAŁOWE NOMATEN

Aby zrealizować te spośród wymienionych wyżej prac badawczych, które mają charakter eksperymentalny, Narodowe Centrum Badań Jądrowych przewiduje uruchomienie laboratorium do badań materiałowych NOMATEN. NCBJ, wspólnie z francuskim instytutem CEA i fińskim laboratorium VTT złożył wniosek do Komisji Europejskiej o dofinansowanie projektu z funduszy strukturalnych w ramach konkursu TEAMING. NOMATEN wygrał pierwszy etap konkursu i otrzymał 400 000 € na przygotowanie szczegółowego projektu wraz z planem biznesowym. NCBJ bada też możliwości wystąpienia wspólnie z partnerami przemysłowymi o regionalne fundusze strukturalne.

Laboratorium stanowiłoby też bazę do badań dla przyszłych generacji reaktorów, zapewniających temperatury rzędu 1000°C, jak VHTR i DFR (zob. raport wewnętrzny Zespołu „Charakterystyka reaktora DFR i plany badawcze”).

5.2. REAKTOR EKSPERYMENTALNY HTGR 10 MW_{TH}

Projekt HTGR, ze względu na swoją złożoność może napotkać opóźnienia we wdrażaniu, tym bardziej, że **obecne przepisy oraz procedury licencjonowania przystosowane są do reaktorów wodnych**. Konieczna jest zatem zmiana przepisów i wypracowanie odpowiednich dla HTGR procedur, co szczegółowo dyskutowane jest w rozdziale 6.

W tej sytuacji, najlepszym sposobem na mitygację ryzyka w realizacji projektu HTGR jest budowa europejskiego reaktora eksperymentalnego małej mocy. Umożliwiłoby to podbudowanie analiz bezpieczeństwa dużego HTGR bezpośrednimi pomiarami oraz symulacjami walidowanymi na małym reaktorze. Prace nad takim reaktorem byłyby też znakomitym polem do przygotowania kadr i łańcucha dostaw do dużych reaktorów. Krokiem wstępnym, przed budową reaktora eksperymentalnego, mogłoby być też zbudowanie zestawu krytycznego z paliwem TRISO oraz stanowiska eksperymentalnego do badań cieplno-przepływowych.

Zasadniczym celem budowy takiego reaktora – oprócz prowadzenia badań wynikających z potrzeb projektowych oraz procesu licencjonowania – jest budowa kompetencji oraz know-how. W przyszłości reaktor eksperymentalny mógłby być wykorzystany do rozwoju innowacyjnych technologii dotyczących nowych koncepcji paliwa oraz rdzenia (np. cykle mieszane, nowe postacie paliwa).

Lokalizacja reaktora w ośrodku NCBJ w Świerku, obok reaktora Maria, miałaby szereg zalet:

- lokalizacja już przystosowana do obiektów jądrowych,
- niższe koszty dzięki już istniejącej infrastrukturze (bezpieczeństwa i energetycznej),
- wykorzystanie potencjału kadrowego NCBJ do projektowania, licencjonowania i budowy,
- docelowe wykorzystanie HTGR do zasilania ośrodka w energię elektryczną i ciepło.

Wieloletni program badawczy reaktora obejmowałby m.in.

- badanie starzenia się materiałów poddawanych promieniowaniu, wysokiej temperaturze i dużej prędkości przepływu helu,
- eksperymentalne wsparcie rozwoju oprogramowania do obliczeń i symulacji reaktorów HTGR,
- testy nowych rozwiązań technologicznych, w szczególności nowych rodzajów paliwa.

Jako demonstrator można wykorzystać brytyjski projekt U-Battery firmy URENCO we współpracy z Wood (d. Amec Foster Wheeler) i Atkins. Jest to HTGR o mocy 10 MW_{th} wykorzystujący paliwo TRISO w układzie bloków pryzmatycznych. Reaktor wyposażony jest w turbinę produkującą 4 MW_e. Koszt budowy reaktora szacuje się na 500 mln zł. Budowa powinna być sfinansowana z funduszy strukturalnych kolejnego okresu programowania UE. Projekt jest na tyle zaawansowany, że już w 2019 roku można by przystąpić do jego licencjonowania i oddać do użytku w roku 2025.

Jeszcze szybszym, choć prawdopodobnie nieco droższym rozwiązaniem byłoby skopiowanie japońskiego reaktora eksperymentalnego HTTR, ewentualnie opracowując mniejszą (10 MW_{th} zamiast 30 MW_{th}) i unowocześnioną wersję.

Jednocześnie NCBJ prowadzi wstępne rozmowy z konkurencyjnymi firmami projektującymi podobne reaktory. Jednak zawarte umowy o zachowaniu poufności nie pozwalają na ujawnienie nazw firm i szczegółów rozmów na tym etapie.

Równoległe z budową reaktora eksperymentalnego należałoby rozpocząć projektowanie dużego HTGR, co umożliwiłoby rozpoczęcie jego licencjonowania ok. 2022 roku. Wcześniejsze przygotowanie Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) przez prace nad małym HTGR dają szansę na przyspieszenie licencjonowania dużego HTGR nawet o 2 lata.

5.3. FINANSOWANIE REAKTORA EKSPERYMENTALNEGO HTGR

Nie rozstrzygając o wyborze konkretnego projektu reaktora eksperymentalnego, można rozważyć kwestie finansowania na przykładzie U-Battery. Koszty projektowania U-Battery szacowane są na ok. 150 mln zł. Z tego ok. 90 mln zł zainwestowało już konsorcjum U-Battery. Pozostała kwota mogłaby być w ustalonej proporcji współfinansowana np. ze środków będących w dyspozycji NCBR, przeznaczonych na finansowanie prac badawczo-rozwojowych. Kwota finansowana ze środków NCBR byłaby wykorzystana do zaprojektowania przez NCBJ i podmioty współpracujące niektórych komponentów reaktora bądź wykonania odpowiednich symulacji i analiz. Powstała w ten sposób własność intelektualna stanowiłaby wkład do spółki U-Battery, zamieniony na ok. 10-15% udziałów.

Koszty budowy eksperymentalnego HTGR w Świerku szacowane są na ok. 600 mln zł. Do sfinansowania tej inwestycji mogłyby służyć **środki z funduszy strukturalnych następnego okresu finansowania UE** tj. 2021-2027. W ciągu najbliższych 3 lat należałoby więc wynegocjować z Komisją Europejską warunki umożliwiające takie finansowanie.

W przypadku wyboru dostawcy innego niż U-Battery, koszty projektowania i budowy oraz możliwości ich sfinansowania byłyby podobne, być może nieco wyższe w przypadku HTTR. Wybór konkretnego instrumentu ewentualnego dofinansowania przez NCBR lub inne agencje zależeć będzie od ostatecznego modelu realizacji projektu. Dla przykładu, z dostępnych dzisiaj instrumentów najbardziej odpowiednie są:

- ✓ Dla etapu projektowania:
 - Wspomniane programy bilateralne NCBR z agencjami zagranicznymi
 - Program Operacyjny Innowacyjny Rozwój 1.1.1 „Szybka ścieżka”
- ✓ Dla etapu budowy:
 - Program Operacyjny Innowacyjny Rozwój 4.2 „Infrastruktury badawcze”.

6. REGULACJE PRAWNE

6.1. AKTUALNY STAN PRAWNY

Działalność związaną z licencjonowaniem, budową, rozruchem i eksploatacją potencjalnego reaktora typu HTGR reguluje **Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2017 r. poz. 576 i 935)** i **Ustawa z dnia 29 czerwca 2011 r. o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (Dz.U. z 2017 r. poz. 552)** wraz z odpowiednimi Rozporządzeniami Rady Ministrów, w tym m.in.:

- Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 11 lutego 2013 r. w sprawie wymagań dotyczących rozruchu i eksploatacji obiektów jądrowych (Dz.U. z 2013 r. poz. 281);
- Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego (Dz.U. z 2012 r. poz. 1048);
- 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. z 2012 r. poz.1043);
- Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego, przypadków wykluczających możliwość uznania terenu za spełniający wymogi lokalizacji obiektu jądrowego oraz w sprawie wymagań dotyczących raportu lokalizacyjnego dla obiektu jądrowego (Dz.U. z 2012 r. poz. 1025);
- Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 30 czerwca 2015 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku i wydanie zezwolenia działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz. U. z 2015 r. poz. 1355).

Wymienione wyżej przepisy stworzone zostały głównie z myślą o reaktorach lekkowodnych, skierowanych do produkcji energii elektrycznej i obecnie stosowanych technologiach z zakresu energetyki jądrowej. W ww. przepisach nie przewidziano możliwości tego, że końcowym produktem obiektu jądrowego może nie być energia elektryczna, ale ciepło, które można wykorzystać na potrzeby przemysłu. **W związku z tym wiele wymagań należy zmienić z uwzględnieniem charakterystyki reaktora typu HTGR, a wiele przepisów wymaga interpretacji prawnej w celu zdecydowania czy przepis ten dotyczy również reaktora typu HTGR.**

Należy uwzględnić w przyszłości, w przepisach prawa, kwestie bezpieczeństwa związane z wzajemnym oddziaływaniem zakładu przemysłowego i reaktora typu HTGR stanowiącego źródło ciepła przemysłowego. W związku z tym przeformułowania lub reinterpretacji mogą wymagać także inne regulacje, w szczególności przepisy prawa o ochronie środowiska.

6.2. ANALIZA PRAWA ATOMOWEGO POD KĄTEM REAKTORÓW HTGR

Po analizie ww. polskich ustaw i rozporządzeń pod kątem dostosowania ich do projektu reaktora typu HTGR przedstawionej dokładniej w dokumencie „Licencjonowanie reaktorów HTGR”¹² opracowanym jako produkt projektu HTR-PL¹³ można stwierdzić, że jedną z koniecznych zmian jest ponowne zdefiniowanie obiektu jądrowego. Obecnie w ustawie - Prawo atomowe wymienione są tylko dwa rodzaje obiektów jądrowych wykorzystujących paliwo jądrowe do produkcji energii: elektrownie jądrowe oraz reaktory badawcze, nie wskazując jaka jest między nimi różnica. I tak w przypadku chęci budowy małego reaktora o niskiej mocy cieplnej (np. proponowanego w ramach projektu U-Battery reaktora o mocy 10 MW_{th}) posiadającego turbinę generującą prąd nie można przy istniejących przepisach jednoznacznie stwierdzić czy będzie to reaktor badawczy czy elektrownia jądrowa. Również reaktora typu HTGR o większej mocy nie można obecnie zakwalifikować jako elektrowni jądrowej ponieważ już sama nazwa „elektrownia jądrowa” oznacza, że produktem finalnym obiektu jest energia elektryczna, a nie ciepło przemysłowe. Jednym z przykładów wskazującym, że w momencie tworzenia polskich wymagań prawnych nie przewidziano, że obiekt jądrowy może wytwarzać jako produkt finalny ciepło przemysłowe jest artykuł 38d ust. 2 ustawy - Prawo atomowe, gdzie wskazano konieczność płacenia przez elektrownię jądrową podatku na fundusz likwidacyjny tylko za każdą wyprodukowaną megawatogodzinę energii elektrycznej.

Drugą konieczną zmianą w celu dostosowania polskich wymagań prawnych do reaktorów typu HTGR przy zachowaniu najwyższego wymaganego poziomu bezpieczeństwa musiałaby być zmiana ww. rozporządzeń. Powstały one przeważnie w oparciu o normy bezpieczeństwa MAEA oraz poziomy referencyjne Stowarzyszenia Zachodnioeuropejskich Organów Nadzoru Instalacji Jądrowych (WENRA) dla istniejących i nowych reaktorów. Przepisy te zostały stworzone z myślą o reaktorach lekkowodnych oraz ciężkowodnych i nie uwzględniały małych reaktorów modułarnych oraz reaktorów typu HTGR. Możliwe by było zaprojektowanie reaktora typu HTGR spełniającego te wymagania, ale zastosowanie ich groziłoby przewymiarowaniem tego reaktora, a w konsekwencji znacznym podniesieniem kosztów projektu i budowy bez wpływu na poziom jego bezpieczeństwa jądrowego. Przykładem takich wymagań jest artykuł 67 Rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego. Nakazuje on elektrowni jądrowej - niezależnie od wpływu na bezpieczeństwo jądrowe - zainstalowanie dwóch obudów bezpieczeństwa (wewnętrznej i zewnętrznej), a reaktorowi badawczemu jednej obudowy, równocześnie nie określając jaki obiekt budowlany może być nazywany obudową bezpieczeństwa i jakie szczegółowe wymagania musi spełniać ta obudowa. Ze względu na to, że projekt reaktora typu HTGR ma zapewnić możliwość wykluczenia poważnego uszkodzenia rdzenia przy jakiegokolwiek hipotetycznej awarii, powinno się rozważyć przededefiniowanie tradycyjnego podejścia tzw. obrony w głąb dla tej technologii.

¹² „Licencjonowanie reaktorów HTR”, wersja uaktualniona: Raport NCBJ B-10/2017.

¹³ Projekt konsorcjum pod kierownictwem AGH, finansowany przez NCBR.

Powyższe dwa problemy można by rozwiązać poprzez zmianę w ustawie - Prawo atomowe definicji obiektu jądrowego albo poprzez:

- 1) poza m.in. elektrownią jądrową i reaktorem badawczym dodanie obiektu, który odpowiadałby charakterystyce reaktora typu HTGR i w konsekwencji uzupełnienie wymagań szczegółowych zawartych w rozporządzeniach o wymogi odnośnie bezpieczeństwa jądrowego dla tego obiektu,
- albo
- 2) zmianę nazwy elektrowni jądrowej na nową nazwę obiektu, który obejmowałby swoim zakresem elektrownie jądrowe, jak również obiekty produkujące ciepło przemysłowe, a w konsekwencji zmianę wymagań szczegółowych dla tego obiektu zawartych w rozporządzeniach, tak aby jednolite przepisy przy zachowaniu najwyższych standardów bezpieczeństwa umożliwiały spełnianie tych wymagań zarówno przez tradycyjny reaktor lekkowodny lub ciężkowodny, jak i reaktor HTGR bez ograniczania ich.

Po rozwiązaniu kwestii definicji obiektu jądrowego w odniesieniu do reaktora typu HTGR można by stwierdzić, że przepisy dotyczące spełnienia wymagań lokalizacyjnych oraz dokumentów niezbędnych do składania wniosku o wydanie zezwolenia na budowę, rozruch, eksploatację albo likwidację obiektów jądrowych nie wymagają większych zmian. Większość wymienionych, wymaganych w tych przepisach, dokumentów nie wskazuje dokładnie jaka ma być treść tego dokumentu i co dokładnie ma zawierać, a przez to nie jest ukierunkowana pod szczególny typ technologii reaktora.

6.3. MODEL LICENCJONOWANIA I ZAKRES PRAWA ATOMOWEGO

Oprócz szczegółowych kwestii opisanych wyżej, problem stanowi zakres prawa atomowego i model licencjonowania. Poniżej opisano trzy podstawowe kwestie.

KRYTERIA BEZPIECZEŃSTWA ZAWARTE W AKTACH PRAWNYCH

Obecnie kryteria dopuszczenia reaktorów jądrowych do użytku zapisane są w ustawie - Prawo atomowe i w rozporządzeniach Rady Ministrów. Rozwiązanie takie ma dwie poważne wady. Umieszczenie szczegółowych kryteriów bezpieczeństwa w ustawach i rozporządzeniach Rady Ministrów wpływa negatywnie na ich neutralność technologiczną oraz powoduje konieczność ich częstej nowelizacji w miarę rozwoju technologii. Tymczasem technologiczna neutralność prawa atomowego jest zasadą przyjętą w niemal wszystkich krajach. Decyzje ws. w/w kryteriów powinny być domeną Prezesa PAA. W przeciwnym razie zachodzi ryzyko nie merytorycznego zaostrzania lub rozluźniania kryteriów bezpieczeństwa w celu osiągnięcia celów politycznych.

PROPOZYCJA WPROWADZENIA DO PRAWA CERTYFIKACJI ZGODNOŚCI TYPU REAKTORA

Obecne prawo atomowe wymaga przeprowadzenia pełnej procedury licencjonowania dla każdego obiektu jądrowego, nawet jeśli obiekt tego samego typu był już licencjonowany. Podejście to, sprawdzone dla wielkich reaktorów o mocy rzędu 1000 MW_e, zupełnie nie przystaje do małych reaktorów modułowych (SMR), produkowanych seryjnie. Do tej klasy zaliczyć należy także rozważane w tym raporcie reaktory HTGR, ze względu na ich stosunkowo niewielką moc oraz przewidywaną dużą ich liczbę. Wskazane byłoby

wprowadzenie w ustawie – Prawo atomowe rozwiązań wzorowanych na brytyjskim *Generic Design Assessment*, która stanowi rodzaj potwierdzenia przez dozór jądrowy, że projekt danego typu reaktora spełnia ogólne wymagania dotyczące bezpieczeństwa i w konsekwencji może być wdrażany.

LICENCJONOWANIE PROSKRYPCYJNE I DOWODOWE

Modele licencjonowania obowiązujące w różnych krajach można podzielić na dwa rodzaje: proskrypcyjne i dowodowe.

Licencjonowanie proskrypcyjne, stosowane np. przez US NRC, nakłada na licencjobiorcę obowiązek spełnienia z góry określonej listy kryteriów. Lista taka ułatwia proces licencjonowania w przypadku standardowych reaktorów lekkowodnych. Stanowi natomiast istotną barierę dla innych technologii, gdyż lista ta nie może być technologicznie neutralna.

Alternatywną metodą, stosowaną np. przez UK ONR, jest **licencjonowanie dowodowe**. Daje ono licencjobiorcy swobodę wyboru metod udowodnienia bezpieczeństwa reaktora. Metoda ta jest bardziej wymagająca dla dozoru jądrowego, ale jest ze swej natury otwarta na nowe technologie. **Perspektywa wdrożenia reaktorów HTGR w Polsce silnie wskazuje na potrzebę wprowadzenia licencjonowania dowodowego w polskim prawie atomowym.**

6.4. WSPÓŁPRACA Z DOZORAMI INNYCH KRAJÓW

Wskazana jest współpraca z US NRC, ze względu na jej doświadczenie przede wszystkim w zakresie kwalifikacji paliwa TRISO. Bardziej „seryjna” produkcja reaktora typu HTGR wskazuje też na potrzebę licencji ogólnej, dla danego typu reaktora. Taki model obowiązuje m.in. w Wielkiej Brytanii i Kanadzie. Brytyjski ONR ma też olbrzymie doświadczenie z używanymi tam komercyjnie reaktorami chłodzonymi gazem (CO₂) z moderatorem grafitowym. **Rozwijając regulacje w zakresie HTGR, Polska znalazłaby się w europejskiej czołówce krajów projektujących tego typu rozwiązania.**

7. MODEL BIZNESOWY WDRAŻANIA HTGR

7.1. PROJEKT, DOSTAWY I BUDOWA (EPC)

WŁAŚCICIEL I OPERATOR REAKTORA

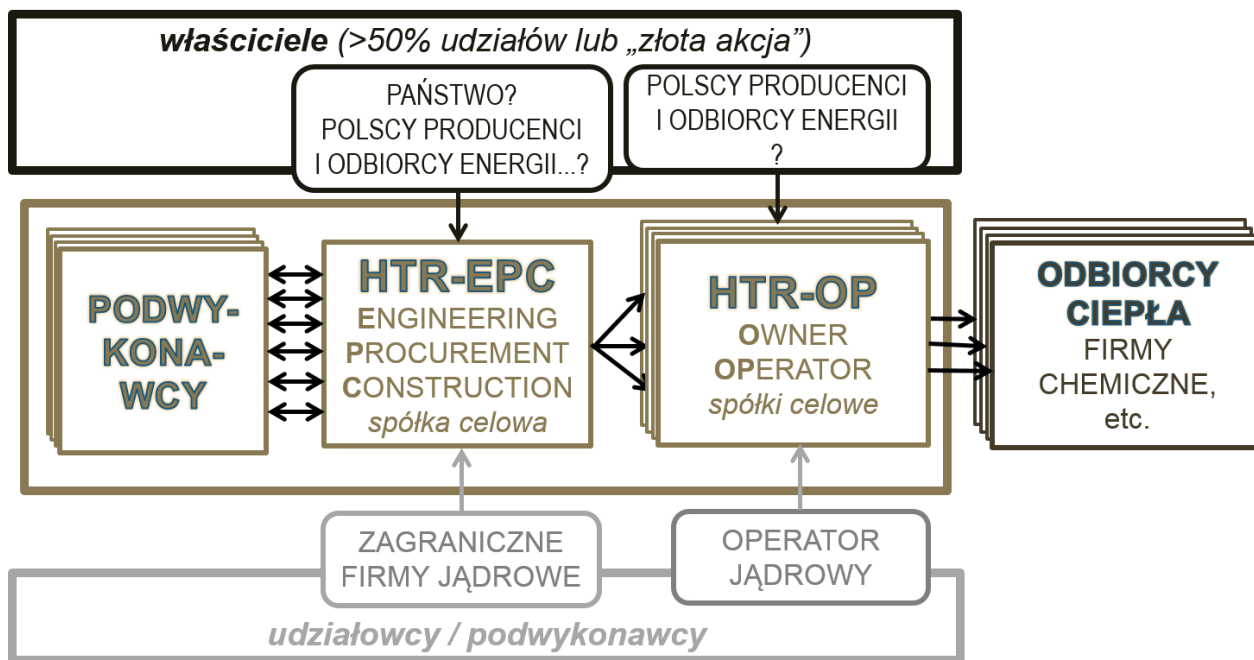
Ze względu na specyfikę instalacji jądrowej oraz skalę inwestycji jedyny - w praktyce możliwy - model realizacji inwestycji to scenariusz, gdzie **właścicielem i operatorem reaktora jest spółka celowa**, nazwijmy ją na roboczo HTR-OP. Zakład chemiczny kupowałby od HTR-OP energię (parę) wytwarzaną przez HTGR. Otwartą pozostaje kwestia struktury właścicielskiej HTR-OP. W modelu Mankala (skutecznie wdrożonym w Finlandii) spółka taka nie generuje zysku, a jej udziałowcami są główni odbiorcy, którzy kupują energię po kosztach produkcji. Funkcję operatora, przynajmniej przez pierwsze kilka lat, spółka HTR-OP powinna powierzyć podwykonawcy z doświadczeniem jądrowym.

STRUKTURA REALIZACJI PROJEKTU, DOSTAW I BUDOWY (EPC)

W przypadku reaktorów energetycznych dużej mocy dotychczas dominował model zintegrowanego **EPC (Engineering, Procurement, Construction)**, gdzie wszystkie trzy elementy pokrywał jeden dostawca lub model dwuelementowy, gdzie EP i C pokrywało dwóch dostawców. Obecnie nie ma jednak na rynku żadnej dużej firmy, która byłaby w stanie pokryć samodzielnie nawet tylko projekt inżynierski reaktora. Z jednej strony stanowi to dodatkowe duże wyzwanie, z drugiej jednak daje szansę na lepsze **zakorzenie projektu w Polsce i objęcie większości wygenerowanej w projekcie własności intelektualnej**.

W celu wdrożenia HTGR należy więc powołać spółkę celową, którą nazwijmy roboczo **HTR-EPC**. Byłaby ona odpowiedzialna zarówno za projektowanie, jak i budowę reaktorów, koordynując prace łańcucha podwykonawców. W procesie budowy konkretnych reaktorów **pełniłaby rolę inwestora zastępczego**. Ilustruje to schemat na Grafice 9. **Spółka HTR-EPC stałaby się właścicielem projektu koncepcyjnego i inżynierskiego HTGR oraz czerpałaby zyski z jego realizacji w różnych lokalizacjach krajowych i zagranicznych**.

MODEL BIZNESOWY WDRAŻANIA HTGR



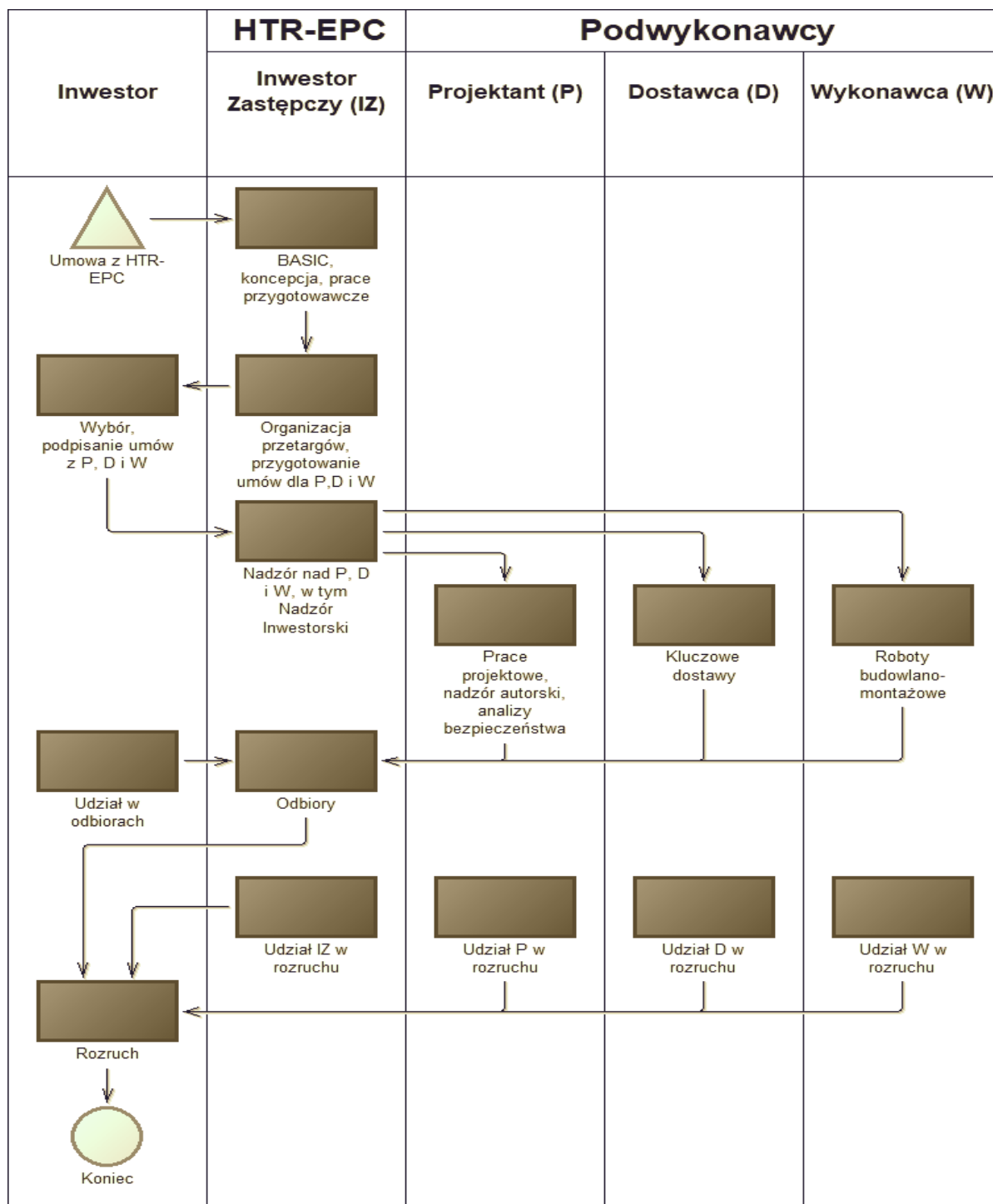
Grafika 8. Model biznesowy wdrażania HTGR.

STRUKTURA WŁAŚCIELSKA HTR-EPC

Otwarta pozostaje kwestia struktury właścicielskiej HTR-EPC. Właścicielem (rozumianym jako udziałowcem większościowym lub posiadającym „złotą akcję” zapewniającą przewagę w głosowaniach) mógłby być bezpośrednio skarb państwa. Zaletą takiego rozwiązania byłaby koordynacja działań na rzecz całej polskiej gospodarki. Wadą – konieczność dokapitalizowania spółki ze środków budżetowych kwotą rzędu 500 mln zł w pierwszych kilku latach jej działalności. Możliwe jest też rozwiązanie pośrednie – właścicielem mógłby być nie bezpośrednio skarb państwa, ale **podmiot państwowy**, jak np. NCBJ. Takie rozwiązanie funkcjonuje np. we Francji, gdzie instytut badawczy CEA jest istotnym udziałowcem spółki AREVA NP. I w takim przypadku konieczne byłoby zasilenie środkami budżetowymi, gdyż NCBJ nie dysponuje odpowiednim kapitałem.

Najbardziej optymalnym rozwiązaniem byłoby utworzenie spółki celowej HTR-EPC przez 4-6 polskich inwestorów. Obecność polskich firm chemicznych i energetycznych wśród uczestników prac nad HTGR gwarantowałaby merytoryczną poprawność studium prekonceptyjnego, a w następnym etapie, dostosowanie projektu reaktora do konkretnych potrzeb odbiorców. Szczegóły takiego modelu opisano w kolejnych podrozdziałach.

MODEL BIZNESOWY WDRAŻANIA HTGR



Grafika 9. Model inwestora zastępczego w procesie budowy HTGR.

7.2. REALIZACJA PROGRAMU I ZARZĄDZANIE RYZYKIEM

Ze względu na nowatorski charakter przedsięwzięcia **konieczny jest wyraźny podział realizacji programu na poszczególne etapy zakończone kamieniami milowymi, których pomyślna realizacja byłaby warunkiem koniecznym do uruchomienia kolejnego etapu.**

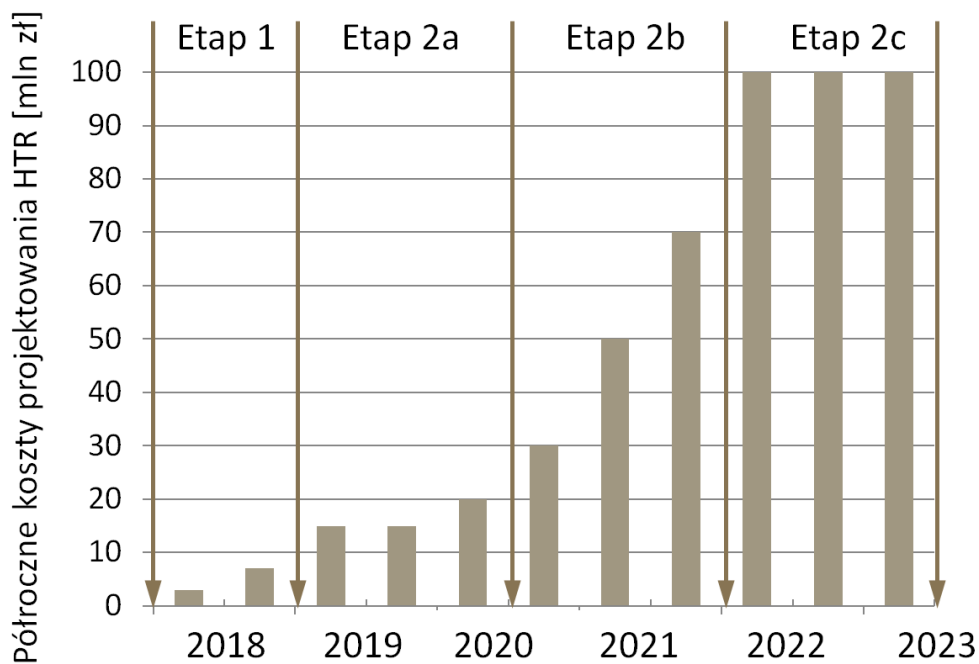
Poniżej przedstawiono proponowany podział na etapy z uwzględnieniem kosztów ich realizacji.

| Etap | Czas | Prace / kamienie milowe | Zespół | Koszt [mln zł] |
|----------|----------------|---|------------------------|----------------|
| 1 | 2018 | Studium prekonceptyjne | 10-20 osób | 10 |
| 1a | | <ul style="list-style-type: none"> • Mobilizacja • <i>Due dilligence</i> partnerów zagranicznych • Kontrakty z partnerami zagranicznymi • Prace prekonceptyjne, kosztorys • Poglębiona analiza ekonomiczna | | |
| 2 | 2019-23 | Projekt reaktora komercyjnego | | 500 |
| 2a | 2019-20 | <ul style="list-style-type: none"> • Projekt koncepcyjny <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Raport opcji bezpieczeństwa</i> | 40-70 osób | 50 |
| 2b | 2020-21 | <ul style="list-style-type: none"> • Projekt wstępny <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Wstępny raport analizy bezpieczeństwa</i> | 50-80 osób +podwyk. | 150 |
| 2c | 2022-23 | <ul style="list-style-type: none"> • Projekt finalny <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Końcowy raport analizy bezpieczeństwa</i> | 60-90 osób +podwyk. | 300 |
| 3 | 2023-31 | Budowa pierwszego HTGR | | 2000 |
| 3a | 2023-26 | <ul style="list-style-type: none"> • Przygotowanie terenu, uzyskanie zgód | | 500 |
| 3b | 2026-31 | <ul style="list-style-type: none"> • Budowa i uruchomienie reaktora | | 1500 |

Tabela 7. Podział realizacji programu na etapy.

MODEL BIZNESOWY WDRAŻANIA HTGR

Zaproponowany podział na etapy minimalizuje ryzyko inwestycji, gdyż zwiększenie finansowania projektu następuje każdorazowo po zakończeniu sukcesem poprzedniego etapu. Ilustruje to poniższy wykres półrocznych kosztów realizacji poszczególnych etapów.



Grafika 10. Półroczne koszty projektowania HTGR w rozłożeniu na etapy. Strzałki oznaczają decyzje o uruchomieniu finansowania kolejnych etapów.

7.3. PROPONOWANY MODEL BIZNESOWY - PODSUMOWANIE

Rekomendowany model biznesowy ilustruje Tabela 8. Zakłada on **utworzenie spółki celowej HTR-EPC przez 4-6 polskich inwestorów**. Inwestorami mogą być podmioty zainteresowane w przyszłości wykorzystaniem reaktorów HTGR, a więc firmy chemiczne, energetyczne itp. Umowa wspólników powinna zakładać stopniowe dokapitalizowywanie HTR-EPC w miarę postępu prac. Środki na realizację etapów 1 i 2 mieszczą się w budżetach badawczo-rozwojowych potencjalnych inwestorów. Uruchomienie etapu 2 uwarunkowane byłoby pozytywnym wynikiem studium prekonceptyjnego.

W etapach 1 i 2, ze względu na wysoce innowacyjny charakter przedsięwzięcia **pożądane jest dofinansowanie ze strony NCBR**. Najefektywniejszym sposobem wykreowania takiego dofinansowania byłoby **porozumienie Ministra Energii z Ministrem Nauki i Szkolnictwa Wyższego** w sprawie realizacji programu HTGR. Uzasadnia to strategiczny charakter programu, udokumentowany umieszczeniem go w Strategii Odpowiedzialnego Rozwoju.

| | Etap 1 Studium pre- konceptyjne | Etap 2 Projektowanie reaktora | Etap 3 Budowa reaktora | Etap 4 Eksploatacja reaktora |
|-------------------------|--|--|--|--|
| Realizacja | 2018 | 2019-23 | 2023-26: uzyskanie zgód 2026-31: budowa reaktora | 2031-90 |
| Struktura inwestorska | HTR-EPC (<i>engineering, procurement, construction</i>) | | HTR-EPC / HTR-OP (owner & operator) | HTR-OP |
| Struktura właścicielska | ok. 5 inwestorów, głównie polscy wytwórcy i odbiorcy energii | | ok. 5 inwestorów / spółki celowe polskich wytwórców i odbiorców energii | spółki celowe polskich wytwórców i odbiorców energii |
| Wydatki | 10 mln zł | 500 mln zł | 2000±500 mln zł Gros wydatków 2026-31 | Pokrywane z przychodów |
| Produkt komercyjny | - | Projekt reaktora (IP w formie licencji) | Reaktor HTGR | Para technologiczna |
| Zwrot inwestycji | - | Sprzedaż co najmniej 10 licencji na budowę. Rynek do 2050: PL=10-20, UE=100-200, świat=1000-2000 | NPV > 0 po 20-30 latach użytkowania | |

Tabela 8. Schemat wdrażania reaktorów HTGR w Polsce

Umowa wspólników powinna też przewidywać możliwość odsprzedaży <50% udziałów podmiotom zagranicznym, które wniosłyby istotny wkład merytoryczny w projektowanie reaktora.

7.4. ZAANGAŻOWANIE POTENCJAŁU ZAGRANICZNEGO

Ze względu na mocno ograniczoną pulę ekspertów w kraju **konieczne jest skorzystanie z potencjału firm zagranicznych**. Mogłyby one być mniejszościowymi udziałowcami lub podwykonawcami HTR-EPC. Duże zainteresowanie udziałem w takim przedsięwzięciu wyraziły amerykańskie firmy zrzeszone w NGNP Industrial Alliance (m.in. Southern Company, Atkins, Areva NP Inc., Ultrasafe Nuclear, Excel Services, SGL) oraz firma X-energy, a także szereg podmiotów japońskich, z JAEA na czele. Wstępnie wyraziły też zainteresowanie firmy europejskie jak Wood (d. Amec Foster Wheeler), Areva NP, Mott McDonald i kilka mniejszych.

Rozmowy na szczeblu rządowym z Japonią, Wielką Brytanią i USA pokazały zbieżność spojrzenia na nowe technologie jądrowe. Współpraca w tym zakresie otwierałaby możliwość (prawie) jednoczesnej budowy prototypowych HTGR w Polsce i USA bądź w Wielkiej Brytanii. Zaletą takiego podejścia byłby podział kosztów pomiędzy partnerów i przyspieszenie prac. Wadą – podział własności intelektualnej. Wada ta mogłaby być jednak skompensowana znacznym zwiększeniem potencjału eksportowego.

Wykorzystanie struktury, personelu, wiedzy i IP zagranicznych firm miałyby następujące zalety:

- istotnie zmniejszenie ryzyk technologicznych,
- przyspieszenie realizacji projektu o 2-3 lata,
- stabilizacja biznesowa projektu – zwiększenie odporności na ryzyko polityczne,
- zmniejszenie kosztu projektu dla polskich inwestorów,
- łatwiejszy dostęp na rynki światowe.

Miałyby też wady, które jednak można mitygować:

- istotna część IP w obcych rękach - mitygacja poprzez strukturę własnościową (>50% w polskich rękach);
- część łańcucha dostaw poza Polską - ale redundancja w łańcuchu dostaw jest pożądana;
- konieczność podzielenia się zyskami - może być skompensowana zwiększeniem rynku.

W opinii Zespołu przedstawione zalety przewyższają wady, dlatego **Zespół rekomenduje istotne zaangażowanie potencjału zagranicznego we wszystkich trzech formach: zatrudnienia, podwykonawstwa i udziałów. Pożądany zakres udziałów zagranicznych to około 25-45%.**

7.5. FINANSOWANIE BUDOWY REAKTORA

Koszt inwestycji w budowę każdego reaktora powinien być ponoszony przez jego przyszłego właściciela, spółkę HTR-OP. Jak oszacowano w rozdziale 3.1, dla HTGR o mocy 165 MW_{th} wyniósłby on ok. 2 mld zł netto (włączając zakup licencji i koszty przygotowawcze). Tak duża inwestycja powinna być sfinansowana z kredytu, z umiarkowanym udziałem środków własnych.

ŚRODKI WŁASNE

Oczekiwany udział środków własnych to min. 20% planowanych nakładów. Środki na wkład własny mogą pochodzić z następujących źródeł:

- kapitał założycielski Spółki,
- pożyczki podporządkowane udzielone przez udziałowców,
- emisja akcji i wprowadzenie Spółki na GPW pozwalająca na zachowanie kontroli nad Spółką,
- dotacja.

ZEWNETRZNE ŹRÓDŁA FINANSOWANIA

Możliwe jest wykorzystanie następujących źródeł:

- kredyt konsorcjalny z polskich banków komercyjnych,
- kredyt z banków międzynarodowych: EBI, EBOR, Bank Światowy, etc.
- emisja obligacji skierowana do: funduszy inwestycyjnych, firm korporacyjnych, osób fizycznych.

Ze względu na długi okres zwrotu z inwestycji, koszt pieniądza stanowi istotną część kosztów przedsięwzięcia. Dlatego potrzebne jest wykorzystanie dostępnych instrumentów zmniejszających ten koszt, np. poprzez obniżenie poziomu ryzyka gwarancjami rządowymi, wykorzystanie preferencyjnych kredytów itp.

7.6. SYNERGIA PROJEKTÓW HTGR 10 MW_{TH} I 165 MW_{TH}

Aby maksymalnie wykorzystać doświadczenia z budowy reaktora eksperymentalnego 10 MW_{th} do przygotowania wdrożenia komercyjnych HTGR, powinna ją prowadzić spółka HTR-EPC. Równoległe finalizowanie projektu 10 MW_{th} i rozpoczynanie projektowania HTGR 165 MW_{th} przez HTR-EPC będzie miało szereg zalet:

- szybkie zaznajomienie się z technologią HTGR,
- możliwość przenoszenia rozwiązań technologicznych z projektu 10 MW_{th} do projektu 165 MW_{th},
- przetestowanie i rozwój narzędzi do obliczeń, symulacji i analiz bezpieczeństwa HTGR,
- optymalizacja współpracy z dozorem jądrowym na wczesnym etapie,
- wczesne utworzenie i przetestowanie łańcucha podwykonawców.

8. HARMONOGRAM DECYZJI I DZIAŁAŃ

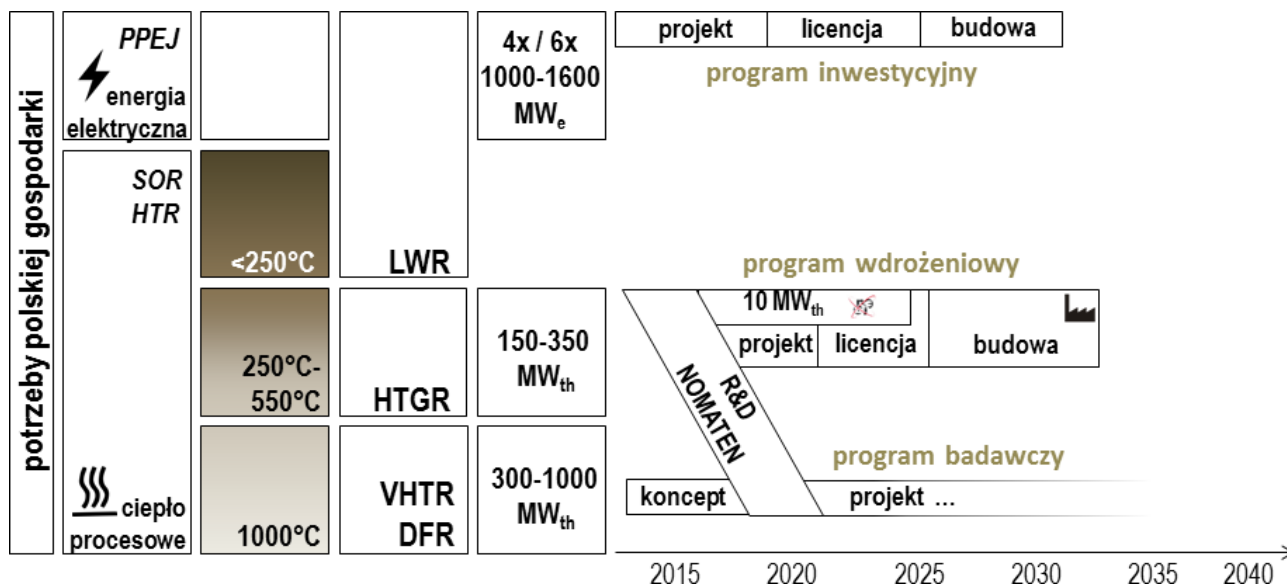
8.1. JĄDROWA MAPA DROGOWA DLA POLSKI

Zrównoważony rozwój energetyki jądrowej, podobnie jak każdej innej dziedziny gospodarki, wymaga właściwej hierarchii programów inwestycyjnych, wdrożeniowych i badawczych. Schematycznie przedstawia ją poniższa tabela. Poziom gotowości do wdrożenia podano w międzynarodowej skali TRL (*Technology Readiness Level*).

| Rodzaj programu | Inwestycyjny | Wdrożeniowy | Badawczy |
|---------------------|--------------|-------------|-----------|
| Wyjściowy TRL | 8-9 | 5-7 | 1-4 |
| Wkład intelektualny | 0-20% | 20-80% | 80-100% |
| Czas do wdrożenia | ≈10 lat | 10-15 lat | 20-30 lat |

Tabela 9. Hierarchia programów inwestycyjnych, wdrożeniowych i badawczych.

Równoległe prowadzenie tych trzech rodzajów projektów zapewnia stałe podnoszenie poziomu technologicznego, przygotowanie kadr w projektach badawczych i ich transferu do przyszłych projektów wdrożeniowych. Umożliwia też rozwijanie przyszłych projektów inwestycyjnych z dużym własnym wkładem intelektualnym. W przypadku polskiego programu jądrowego taką synergię zapewnia jednocześnie prowadzenie prac badawczych nad przyszłościowymi technologiami VHTR i DFR, wdrażanie HTGR do zastosowań przemysłowych i inwestycja w duże reaktory energetyczne LWR.



HARMONOGRAM DECYZJI I DZIAŁAŃ

Grafika 11. Jądrowa mapa drogowa dla Polski.

8.2. REAKTOR EKSPERYMENTALNY HTGR 10 MW_{TH}

Dotychczas podjęto następujące działania:

- NCBJ dokonał wstępnego przeglądu technologii.
- NCBJ podpisał porozumienia o współpracy nad reaktorem U-Battery z firmą URENCO reprezentującą brytyjskie konsorcjum oraz o współpracy z JAEA, właścicielem reaktora eksperymentalnego HTTR.
- Wstępnie opracowano model biznesowy współpracy.
- Zidentyfikowano możliwe źródła finansowania projektu (opisane w rozdziale 5.3).
- NCBJ wstępnie wybrał szczegółową lokalizację reaktora na terenie ośrodka w Świerku.
- Na szczeblu rządowym prowadzono rozmowy między Ministerstwem Energii i DECC/BEIS. Strony wyraziły wolę współpracy w rozwoju technologii HTGR, w szczególności reaktora U-Battery.

Szczegółowy harmonogram prac nad eksperymentalnym HTGR przedstawia poniższy diagram (Tabela 10).

| Etap | Proces / kamień milowy | 2018 | | 2019 | | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | | 2024 | | 2025 | |
|------|---------------------------------------|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|
| | | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II |
| 1 | Studium prekonceptyjne | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Projekt reaktora | | ■ | | ■ | | | | | | | | | | | | |
| 2a | Projekt koncepcyjny | | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| | Raport opcji bezpieczeństwa | | | ◆ | | | | | | | | | | | | | |
| 2b | Projekt wstępny | | | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| | Wstępny raport analizy bezpieczeństwa | | | | ◆ | | | | | | | | | | | | |
| 2c | Projekt finalny | | | | ■ | | | | | | | | | | | | |
| | Końcowy raport analizy bezpieczeństwa | | | | | | ◆ | | | | | | | | | | |
| 3 | Budowa reaktora | | | | | ■ | | | | | | | | | | | |
| 3a | Przygotowanie terenu, uzyskanie zgód | | | | | ■ | | | | | | | | | | | |
| | Pozwolenie na budowę | | | | | | | | | ◆ | | | | | | | |
| 3b | Budowa reaktora | | | | | | | | | | ■ | | | | | | |
| | Uruchomienie reaktora | | | | | | | | | | | | | | | | ◆ |

Tabela 10. Harmonogram prac nad eksperymentalnym HTGR 10 MW_{th} w Świerku.

W przypadku podjęcia pozytywnej decyzji co do rozwoju technologii wysokotemperaturowej w Polsce **zespół proponuje podjęcie w najbliższym czasie następujących działań:**

- Uruchomienie finansowania przez NCBR prac rozwojowych NCBJ w zakresie technologii HTGR.
- Wybór strategicznego partnera technologicznego.
- Rozpoczęcie projektowania eksperymentalnego HTGR.
- Negocjacje z Komisją Europejską ws. wykorzystania funduszy strukturalnych okresu 2021-28 do finansowania budowy eksperymentalnego HTGR w Świerku.

8.3. PIERWSZY PRZEMYSŁOWY REAKTOR HTGR

Orientacyjny harmonogram prac związanych z projektowaniem, licencjonowaniem i budową pierwszych przemysłowych HTGR pokazuje poniższy diagram. Pierwszy reaktor mógłby być oddany 13 lat po uruchomieniu inwestycji, czyli ok. roku 2031.

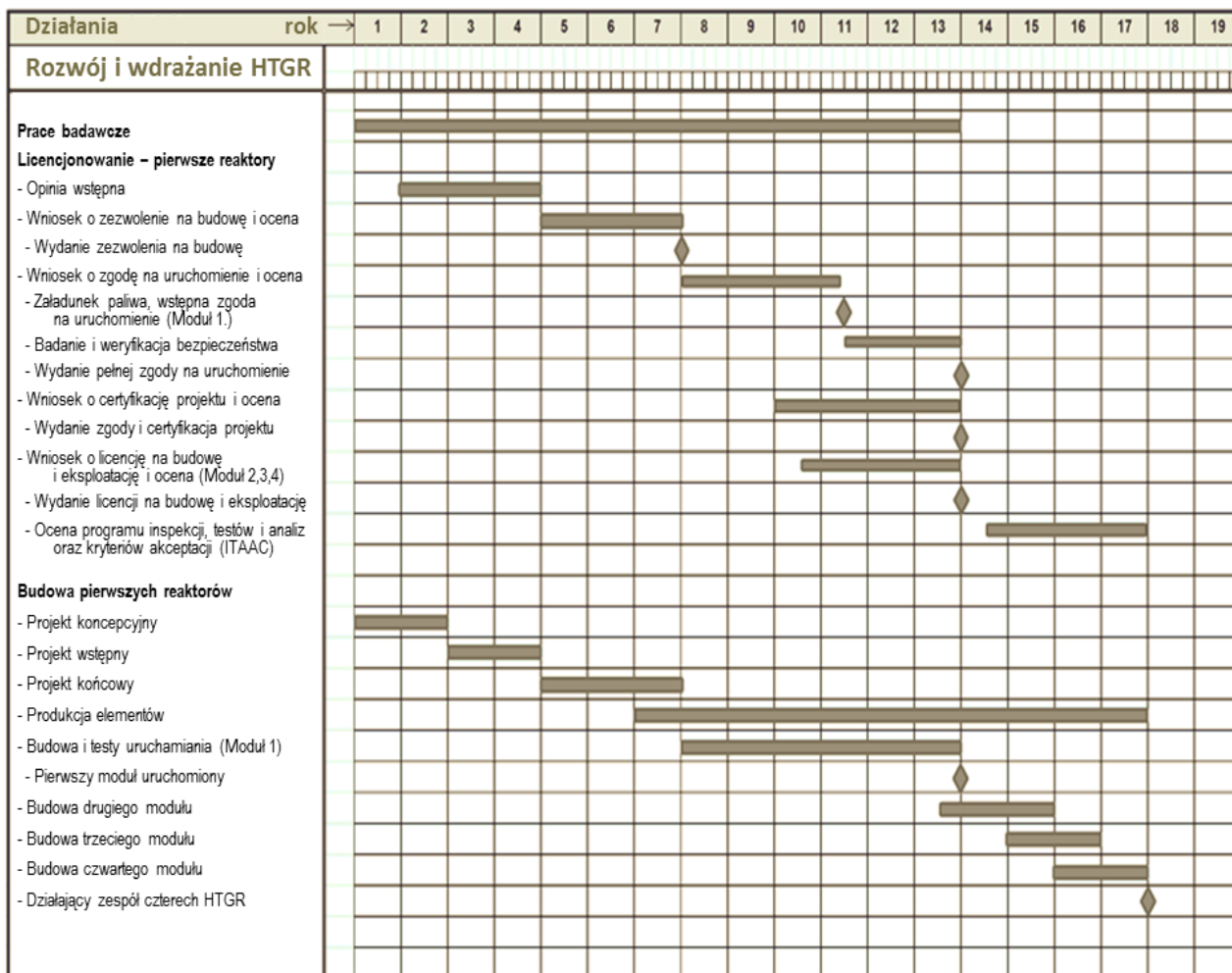


Tabela 11. Harmonogram wdrażania pierwszych przemysłowych HTGR (Źródło: NC2I)

Prace studialne nad możliwością wdrożenia HTGR w Polsce prowadzone są już od kilku lat. W szczególności realizowany był program HTR-PL finansowany przez NCBR. Ponadto polskie podmioty uczestniczyły w kilku inicjatywach europejskich opisanych w rozdziale o współpracy międzynarodowej. Korzystając z wyników tych prac oraz dodatkowych analiz przeprowadzonych przez macierzyste organizacje członków **Zespół ds. HTR osiągnął następujące rezultaty:**

- Oceniono zapotrzebowanie na ciepło przemysłowe w Polsce i Europie.
- Rozpoznano instalacje, w których nośnikiem ciepła jest para wodna o temperaturze 250-550°C jako najbardziej odpowiedni obszar do zastosowania technologii jądrowych.
- Potwierdzono, że najbardziej dojrzałą, a więc najszybszą do wdrożenia w tym obszarze jest technologia reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazem (HTGR).
- Zidentyfikowano podmioty będące w posiadaniu wiedzy i urządzeń przydatnych do wdrożenia HTGR, z większością z nich nawiązano współpracę (projekt Gemini+, porozumienia bilateralne).
- Na podstawie danych z istniejących w Polsce instalacji określono optymalne parametry reaktora.
- We współpracy z podmiotami zagranicznymi oszacowano koszty budowy i eksploatacji HTGR.
- Zbudowano model ekonomiczny do badania opłacalności ekonomicznej HTGR.
- Na podstawie modelu porównano opłacalność HTGR z kotłami węglowymi i gazowymi o podobnych parametrach. Zbadano wrażliwość wyników na założenia projektowe i czynniki zewnętrzne.
- Przedyskutowano warianty modelu biznesowego wdrażania HTGR i zarekomendowano optymalny.
- Zidentyfikowano główne niekompatybilności obecnego prawa atomowego z technologią HTGR.

W opinii Zespołu zebrane i przedstawione w niniejszym raporcie wyniki mogą stanowić podstawę do podjęcia przez Ministra Energii decyzji o rozpoczęciu procesu wdrażania HTGR w Polsce.

Zakładając podjęcie takiej decyzji kolejne kroki powinny obejmować:

- Utworzenie spółki HTR-EPC i rozpoczęcie jej działalności opisanej w rozdziale 7.
- Podpisanie porozumienia pomiędzy Ministrem Energii a Ministrem Nauki i Szkolnictwa Wyższego o realizacji programu HTGR.
- Przygotowanie programu rządowego.
- Uruchomienie dofinansowania przez NCBR projektowania reaktora HTGR 165 MW_{th}.
- Podjęcie przez PAA współpracy z dozorami US, Wielkiej Brytanii i Kanady w zakresie licencjonowania HTGR.
- Przygotowanie do niezbędnej modyfikacji prawa atomowego i rozporządzeń wykonawczych.

8.4. NOWE ZASTOSOWANIA INNOWACYJNYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH

W dalszej perspektywie rozważyć można:

- Możliwości wdrożenia HTGR do innych zastosowań, jak np.:
 - zastępowanie jednostek wytwórczych o mocy rzędu 200 MW_e i mniejszych tam, gdzie nie jest możliwe lub ekonomicznie uzasadnione stosowanie wielkich reaktorów LWR,
 - elektrociepłownie miejskie i włączenie się w programy likwidacji niskiej emisji.
- Rozszerzenie zakresu pracy HTGR powyżej 1000°C i prace nad alternatywnymi technologiami, jak np. DFR (zob. raport wewnętrzny Zespołu „Charakterystyka reaktora DFR i plany badawcze”).
- Możliwości wykorzystania innych rodzajów reaktorów jądrowych do wytwarzania skojarzonego energii elektrycznej i ciepła oraz do zastosowań nielektrycznych.

9. KORZYŚCI Z WDROŻENIA HTGR W POLSCE

Wybór technologii HTGR i wdrożenie wysokotemperaturowej kogeneracji jądrowej w Polsce przyniesie wiele korzyści gospodarczych:

Zmniejszenie zależności gospodarki od importu paliw

HTGR jest jedyną alternatywą dla paliw kopalnych przy produkcji ciepła. Polski przemysł (ze względu na swoją energochłonność) jest wrażliwy na ewentualne przerwy w dostawach oraz poziom cen surowców. Produkcja ciepła w reaktorach HTGR pozwoliłaby zmniejszyć uzależnienie polskiej gospodarki od importu gazu oraz zapewniłaby większą przewidywalność i kontrolę nad poziomem cen ciepła systemowego.

Zwiększenie odporności przemysłu na nowe regulacje środowiskowe

w szczególności w zakresie CO₂ czy śladu węglowego produktów. Wytwarzanie ciepła systemowego w oparciu o węgiel powoduje, że systematycznie zaostrzanie wymagań środowiskowych przez UE oraz możliwy w przyszłości wzrost cen uprawnień do emisji CO₂ będzie stawiał polskie podmioty w gorszej pozycji niż konkurentów z innych państw. Częściowa wymiana gazowych i węglowych źródeł ciepła na HTGR przyczyni się do utrzymania konkurencyjności przez polskie podmioty. Odejście od wytwarzania energii z węgla na rzecz HTGR w wypadku 13 największych instalacji chemicznych pozwoli zmniejszyć emisję CO₂ rocznie o prawie 19 mln ton.

Impuls dla wzrostu gospodarczego

opartego o rozwój produktów o wyższej wartości dodanej. Wdrażanie dużego, ambitnego projektu o charakterze naukowo-infrastrukturalnym uruchomi szereg interakcji w całej gospodarce i stanie się jednym z kół zamachowych reindustrializacji.

Wartość dodana dla projektu dużych elektrowni jądrowych

Rozwój HTGR będzie wiązał się z budową potencjału w zakresie energetyki jądrowej zarówno po stronie instytutów, jak i przemysłu. Pozwoli na podniesienie poziomu kadr oraz stworzy szanse rozwoju dla poddostawców komponentów dla energetyki jądrowej, co zaprocentuje przy budowie dużych bloków jądrowych.

Zwiększenie polskiego potencjału w obszarze eksportu technologii energetycznych

Reaktor HTGR ze względu na bardzo wysokie standardy bezpieczeństwa, relatywnie nieduży rozmiar oraz wielorakość potencjalnych zastosowań w sposób naturalny stanie się towarem eksportowym.

10. SŁOWNIK POJĘĆ I SKRÓTÓW

- ANTARES - A New Technology Advanced Reactor Energy System – koncepcja HTGR firmy US Areva
- BEIS - Department for Business, Energy & Industrial Strategy, - brytyjski odpowiednik dawnego Ministerstwa Gospodarki
- CEA - Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives – francuski Komisariat ds. Energii Atomowej i Alternatywnych Źródeł Energii
- CNEC - China Nuclear Engineering Corporation
- DECC - Department of Energy & Climate Change - brytyjski odpowiednik Ministerstwa Energii, od 2016 r zastąpiony przez BEIS
- DEJ ME - Departament Energii Jądrowej Ministerstwa Energii
- DFR - Dual Fluid Reactor – reaktor dwupłynowy
- DOE - Department of Energy – Departament Energii w USA
- EBI - Europejski Bank Inwestycyjny
- EBOR - Europejski Bank Odbudowy i Rozwoju
- EPC - Engineering, Procurement, Construction – projekt, wykonanie i budowa
- EUROPAIRS - End user requirement for process heat applications with innovative reactors for sustainable energy supply – projekt finansowany przez Euratom
- FOAK - First Of A Kind – pierwszy danego typu
- GEMINI - Platforma współpracy transatlantyckiej między NC2I i NGNP Industrial Alliance
- GEMINI+ - Projekt Euratomu zaproponowany przez Gemini, którego celem jest przygotowanie budowy reaktora eksperymentalnego HTGR
- GFR - Gas-cooled Fast Reactor – reaktor prędko chłodzony gazem
- GIF - Generation IV International Forum (www.gen-4.org)
- GPW - Giełda Papierów Wartościowych
- HTGR** - **High Temperature Gas-cooled Reactor** – reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem
- HTR** - **High Temperature Reactor** – reaktor wysokotemperaturowy
- HTR-PL - Rozwój wysokotemperaturowych reaktorów do zastosowań przemysłowych – projekt finansowany przez NCBR
- HTTR - High-Temperature Test Reactor – wysokotemperaturowy reaktor testowy z Japonii
- IAEA - International Atomic Energy Agency – Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej
- LCOE - Levelized Cost of Energy – wyrównany koszt jednostkowy energii
- LFR - Lead-cooled Fast Reactor – reaktor prędko chłodzony ołowiem

SŁOWNIK POJĘĆ I SKRÓTÓW

| | |
|----------|---|
| LWR | - Light Water Reactor – reaktor lekkowodny |
| MSR | - Molten Salt Reactor – reaktor na stopionych solach |
| NC2I | - Nuclear Cogeneration Industrial Initiative - Inicjatywa Przemysłowa Kogeneracji Jądrowej, jeden z trzech filarów SNETP |
| NC2I-R | - Nuclear Cogeneration Industrial Initiative – Research - projekt Euratomu, którego celem były badania nad HTR |
| NCBJ | - Narodowe Centrum Badań Jądrowych |
| NCBR | - Narodowe Centrum Badań i Rozwoju |
| NEA | - Nuclear Energy Agency – Agencja Energii Jądrowej OECD |
| NGNP | - Next Generation Nuclear Plant Industrial Alliance – platforma współpracy przemysłu jądrowego w USA pracująca nad reaktorem wysokotemperaturowym |
| NOAK | - Next Of A Kind – kolejny tego typu |
| NPV | - Net Present Value – wartość bieżąca netto, E-NPV – ekonomiczna, F-NPV - finansowa |
| OCC | - Overnight Construction Cost – całkowity koszt budowy, bez kosztu kredytu („w jedną noc”) |
| OECD | - Organization for Economic Co-operation and Development - Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju |
| PAA | - Państwowa Agencja Atomistyki |
| PBMR | - Pebble Bed Modular Reactor - modułowy reaktor z rdzeniem usypanym |
| PWR | - Pressurized Water Reactor – reaktor wodny ciśnieniowy |
| SC-HTGR | - Steam Cycle High-Temperature Gas-Cooled Reactor – reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem, z obiegiem pary |
| SCWR | - Supercritical Water-cooled Reactor – nadkrytyczny reaktor wodny |
| SET-Plan | - Strategic Energy Technology Plan - strategiczny plan w dziedzinie technologii energetycznych Komisji Europejskiej |
| SFR | - Sodium-cooled Fast Reactor – reaktor prędko chłodzony sodem |
| SMR | - Small Modular Reactor lub Small & Medium Size Reactor – mały reaktor modułowy lub mały i średni reaktor |
| SNETP | - Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – europejska Platforma Technologiczna na rzecz Zrównoważonej Energetyki Jądrowej |
| TRISO | - Tristructural-isotropic - izotropowe trójwarstwowe paliwo jądrowe |
| TRL | - Technology Readiness Level – poziom gotowości technologicznej |
| V4 | - Grupa Wyszehradzka – Czechy, Polska, Słowacja, Węgry |
| V4G4 | - Visegrad-4 for Generation-4 Reactors – stowarzyszenie instytutów jądrowych państw V4 |
| VHTR | - Very High Temperature Reactor – reaktor bardzo wysokotemperaturowy, rozszerzenie technologii HTGR |