



SYNERGIA WĘGLOWO-JĄDROWA

*SYNERGIA WĘGLOWO-JĄDROWA, REAKTORY WYSOKOTEMPERATUROWE I ICH POTENCJALNE
ZASTOSOWANIA W ROZWIĄZANIU PROBLEMÓW ENERGETYCZNYCH POLSKI*



Autor: Piotr Podziemski
Pod kierunkiem: prof. dr hab. Jana Pluty
Praca zaliczeniowa z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe

Rysunki zawarte w tekście – o ile nie zostało zaznaczone inaczej – są pracą własną autora.



Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
ul. Koszykowa 75 00-662 Warszawa
tel. +48 22 234 50 27

SYNERGIA WĘGLOWO-JĄDROWA

Synergia węglowo-jądrowa, reaktory wysokotemperaturowe i ich potencjalne zastosowania w rozwiązaniu problemów energetycznych Polski.

SPIS TREŚCI

1.	Wstęp – energetyka jądrowa dziś	5
2.	Reaktory wysokotemperaturowe	6
2.1.	Wybrane Reaktory IV generacji	6
2.2.	Reaktory HTR/VHTR.....	8
2.3.	Historia reaktorów wysokotemperaturowych	8
2.4.	Technologia HTR / VHTR – problemy i rozwiązania	9
2.5.	Zalety reaktorów wysokotemperaturowych	16
3.	Synergia węglowo – jądrowa	17
3.1.	Synergia – cele i zyski.....	18
3.2.	Technologiczne rozwiązania – przykłady.....	19
4.	Energetyka jądrowa w Polsce i na świecie	21
4.1.	Świat i nowoczesne technologie jądrowe	21
4.1.1.	Francja – lider energetyki jądrowej.....	21
4.1.2.	W USA ogłoszono nowy plan wsparcia dla rozwoju energetyki jądrowej.....	22
4.1.3.	Chiny – duże inwestycje w nowe technologie jądrowe.....	22
4.1.4.	Inne kraje.....	22
4.2.	Sytuacja energetyczna polski.....	22
5.	Potencjalne zastosowania synergii węglowo – jądrowej w Polsce	24
6.	Podsumowanie.....	25
7.	Bibliografia i przypisy	27

1. WSTĘP – ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ

Z energii pochodzącej z procesów rozszczepienia – czyli tego co potocznie nazywamy energią jądrową – w Unii Europejskiej wytwarza się 31% całkowitej produkcji energii elektrycznej. W roku 2006 na terenie Unii pracowały 152 reaktory jądrowe. Większość z nich to reaktory działające już średnio od 20 lat – z rozwiązaniami technologicznymi będącymi daleko w tyle w stosunku do najnowszych projektów – a wciąż bezpiecznymi dla ludzi i środowiska. Te reaktory to tzw. reaktory **drugiej generacji** – stosowane przemysłowo na szeroką skalę, budowane w oparciu o prototypowe **reaktory generacji pierwszej**. Reaktory drugiej generacji to technologia teraźniejszości, jeśli nie przeszłości. Obecna wiedza i doświadczenie pozwala na tworzenie nowych i lepszych rozwiązań. Rozwój technologii jądrowej jest wspierany przez Euratom i ramowe programy UE w zakresie badań, rozwoju technologicznego i demonstracji – a ta pomoc przekłada się na konstrukcję od 60 do 70 nowych, dużych elektrowni jądrowych. Jest to zadanie dokładnie odpowiadające możliwościom przemysłowym Europy.

Część nowych reaktorów, będących już w działaniu na świecie i w Europie, takich jak Europejski Wodny Reaktor Ciśnieniowy (EPR – European Pressurised-water Reactor), to reaktory rozwojowe, powstałe dzięki wiedzy zdobytej na prototypowych reaktorach lekko-wodnych (LWR) użytej do optymalizacji bezpieczeństwa i wydajności. Nazywamy je **reaktorami trzeciej generacji** – w Europie są one budowane w Finlandii i Francji, uruchomione zostaną około roku 2011.

Następne w kolejności to **reaktory czwartej generacji** – których projekty już istnieją, a pierwsze instalacje próbne na świecie rozpoczynają pracę (m. In. w Chinach, w RPA, w USA). . Będą one zastępować w zastosowaniach masowych reaktory drugiej, a następnie trzeciej generacji w miarę osiągania i spełniania kolejnych celów postawionych w założeniach ich projektów – minimalizacji problemu odpadów promieniotwórczych, ochrony zasobów energetycznych, efektywności.



reaktor typu EPR o mocy 1 600 MWe podczas budowy w Olkiluoto (Finlandia), stan z lipca 2007

źródło: Hannu Huovila, www.tvo.fi

Energetyka warunkuje postęp i rozwój nowoczesnej cywilizacji. Ten rozwój winien być zrównoważony, czyli „zaspokajając aktualne potrzeby bez uszczerbku dla zdolności przyszłych generacji do zaspokajania własnych

potrzeb” [2]. Takie technologie które zapewnią ten warunek będą technologiami przyszłości – a w to wpisuje się właśnie energetyka jądrowa.

2. REAKTORY WYSOKOTEMPERATUROWE

2.1. WYBRANE REAKTORY IV GENERACJI

Istnieje wiele organizacji międzynarodowych wspierających rozwój technologii jądrowych oraz tworzących plany jej rozwoju. Jedną z ważniejszych - Międzynarodowe Forum Generacji IV zajmuje się ułatwianiem rozwoju nowych jądrowych systemów energetycznych. Systemy Generacji IV będą zrównoważonymi systemami energetycznymi dostarczającymi energii po konkurencyjnych cenach, przy optymalnym wykorzystaniu surowców, o wysokim poziomie bezpieczeństwa, niezawodności i odporności na wykorzystanie materiałów i urządzeń jądrowych do produkcji broni jądrowej. Do Forum należy dziesięć państw z całego świata (a także Unia Europejska, reprezentowana przez EURATOM) oraz JRC – firma mająca zająć się implementacją opracowywanych technologii.

Cele określone przez Forum, jakie mają spełniać reaktory IV generacji są następujące:

Systemy IV generacji :

- umożliwią **zrównoważoną produkcję energii**, która będzie spełniać cele związane z **czystym powietrzem** oraz będzie sprzyjać **długoterminowej możliwości korzystania z systemu i efektywnemu użytkowaniu** paliwa dla produkcji energii na całym świecie.
- będą **minimalizować** i zagospodarowywać swoje **odpady jądrowe**, w szczególności wyraźnie zmniejszając ciężar ich obsługi w przyszłości, tym samym poprawiając ochronę dla zdrowia ludzi i środowiska.
- będą przykładowo **bezpieczne i niezawodne**.
- będzie cechować bardzo niskie **prawdopodobieństwo i stopień uszkodzenia rdzenia reaktora**.
- usuną konieczność awaryjnego działania poza obszarem elektrowni.
- będą miały **jednoznaczną przewagę ekonomiczną** w całym cyklu paliwowym nad innymi źródłami energii.
- będzie cechować **poziom ryzyka finansowego porównywalny** z innymi projektami energetycznymi.
- będzie cechować **odporność na proliferację** oraz **fizyczna ochrona** przed aktami terroru.

źródło: Systemy elektrowni jądrowych Generacji IV, ekonomicznie konkurencyjnych, bezpiecznych oraz niepodatnych na wykorzystanie dla celów produkcji broni jądrowej, S. M. Modro Idaho National Engineering and Environmental Laboratory [2]

Członkowie Międzynarodowego Forum Generacji IV wybrali sześć układów jądrowych do współpracy i rozwoju [2]:

a. REAKTOR PRĘDKI CHŁODZONY GAZEM (GFR)

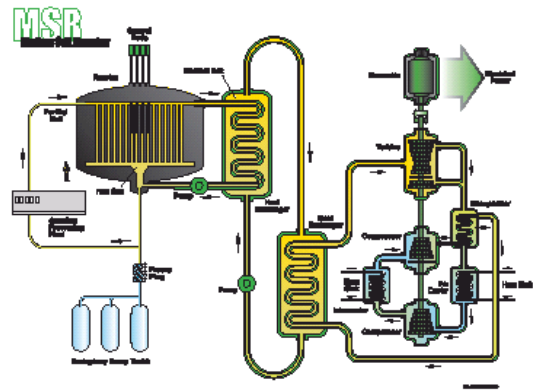
System GFR składa się z dwóch głównych podsystemów - reaktora o prędkim spektrum neutronów chłodzonego helem oraz zamkniętego cyklu paliwowego, zapewniającego pełne zagospodarowanie wtórne aktynowców. Kombinacja spektrum prędkich neutronów i pełnego odzyskiwania aktynowców w systemach GFR minimalizuje ilość wytwarzanych odpadów radioaktywnych zawierających izotopy długożyciowe. Produkcję energii elektrycznej zapewnia turbina helowa pracująca w cyklu jednobiegowym, charakteryzująca się wysoką sprawnością wytwarzania energii elektrycznej (warto zwrócić uwagę, że system ten ma wiele wspólnego z systemami reaktorów wysokotemperaturowych).

System GFR rozwijany byłby początkowo dla produkcji energii elektrycznej i zagospodarowywania odpadów. Oceniono, że GFRy mogłyby być budowane od ok. 2025 r.

b. REAKTOR CHŁODZONY STOPIONYMI SOLAMI (MSR)

W systemie MSR na paliwo składa się ciekła mieszanina fluorków sodu, cyrkonu i uranu. W postaci stopionej paliwo przepływa w rdzeniu grafitowym poprzez kanały, dając termiczne spektrum neutronów.

Ciepło, jakie jest produkowane w stopionej soli poprzez wymienniki ciepła przekazuje się do wtórnego obiegu chłodzącego, a następnie w kolejnych wymiennikach ciepła do obiegu konwersji energii. Jednolite ciekłe paliwo umożliwia dodawanie aktywności o zmiennym składzie zmieniając szybkość podawania. Parametry pracy charakteryzują się niskimi ciśnieniami i temperaturą czynnika chłodzącego dochodzącą do ponad 700°C. Stwierdzono możliwość budowy systemów MSR od ok. 2025 r.



Rysunek 1.: Schemat reaktora typ MSR [2]

c. REAKTOR PRĘDKI CHŁODZONY OŁOWIEM (LFR)

LFR to system w którym reaktor chłodzony jest samym ołowiem lub jego stopem z bizmutem o spektrum prędkich neutronów i zamkniętym cyklu paliwowym. Paliwo zawierające uran i transuranowce dla takiego reaktora ma postać metaliczną lub jest dostarczane w formie azotków. Zaletą tej technologii jest możliwość produkcji (oprócz dużych instalacji – tzw. monolitycznych) baterii o mocy 50-150 MWe, o długim okresie wymian paliwa. Takie baterie to małe instalacje produkowane fabrycznie, pracujące w cyklu zamkniętym i gotowe do natychmiastowego uruchomienia. Takie baterie mogą zostać zainstalowane w małych sieciach energetycznych np. w krajach rozwijających się, które mogą nie chcieć rozwijać krajowej infrastruktury jądrowych systemów energetycznych. Zadaniem LFR-ów byłaby głównie produkcja energii elektrycznej jak również produkcja wodoru i zagospodarowanie aktywności.

d. REAKTOR PRĘDKI CHŁODZONY SODEM (SFR)

System SFR stanowi kolejny reaktor o zamkniętym cyklu paliwowym stosującym prędkie neutrony. Głównym celem tych systemów jest zagospodarowanie odpadów wysokoaktywnych, w szczególności gospodarowanie plutonem. Wraz z rozwojem technologii prowadzącym do redukcji kosztów zadanie SFR może zostać rozciągnięte na produkcję energii elektrycznej. Ocenia się, że systemy na paliwo w postaci tlenków byłyby możliwe do budowy około 2015 r.

e. NADKRYTYCZNY REAKTOR WODNY (SCWR)

W technologii SCWR stosuje się wysokotemperaturowe, wysokociśnieniowe reaktory chłodzone wodą, pracujące powyżej termodynamicznej krytycznej temperatury wody (374 st. C, 22,1 MPa). Spektrum neutronów w tych reaktorach, w zależności od projektu rdzenia może być termiczne lub prędkie. Jego sprawność może zbliżyć się do 44%, w porównaniu z 33-35% sprawnością reaktorów II generacji. Dla rdzenia wykorzystującego neutrony termiczne cykl paliwowy jednokrotnie wykorzystuje paliwo uranowe. W przypadku opcji z neutronami prędkimi tworzy się systemy przetwarzania wypalonego paliwa oparte na zaawansowanym przetwarzaniu wodnym.

Podstawowym zadaniem SCWR byłaby produkcja energii elektrycznej z opcją gospodarowania aktywnościami. Mogłyby one być budowane od 2025 r.

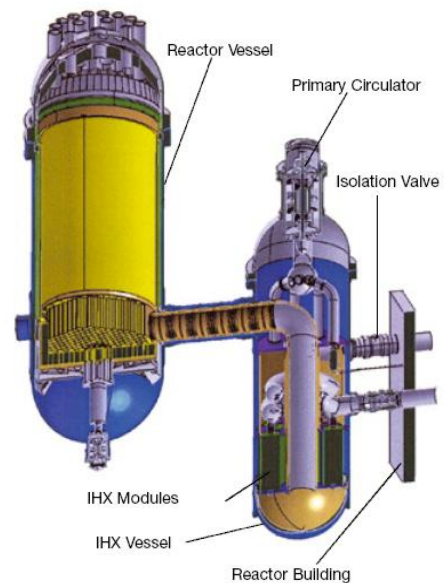
f. REAKTOR Z BARDZO WYSOKĄ TEMPERATURĄ HTR/VHTR

Reaktory HTR/VHTR są wydajnymi i elastycznymi systemami zaopatrywania w energię jądrową, które można stosować z korzyścią dla wsparcia dużych kompleksów przemysłowych oraz do celów kogeneracji.

2.2. REAKTORY HTR/VHTR

Wysokotemperaturowe reaktory to systemy chłodzone helem o termicznym spektrum neutronów, moderowane grafitem. Mogą one dostarczać ciepło jądrowe rzędu 1000 st. Celsjusza na wyjściu z rdzenia. To właśnie ta wysoka temperatura umożliwia zastosowanie ciepła jądrowego do wielu procesów przemysłowych. – w tym także do wytwarzania wodoru i – co ważniejsze z punktu widzenia przemysłowego – do wytwarzania gazu syntezowego. To co wyróżnia reaktory HTR to implementacja mikrokapsulek paliwowych otoczonych grafitem tzw. kapsulek TRISIO (technologia ta była już badana w reaktorze PBMR). Kapsułki takie zwiększają znacznie bezpieczeństwo w przypadku jakiegokolwiek przedostania się paliwa poza reaktor poprzez zablokowanie emisji gazowych pierwiastków promieniotwórczych takich jak ^{131}I .

Rdzeń reaktora VHTR może być pryzmatyczno-blokowy lub w postaci złoża usypanego granulek. W przypadku wytwarzania tylko energii elektrycznej reaktor wysokotemperaturowy może osiągać sprawnością ponad 50% przy 1000°C.



Rysunek 2.: Schemat reaktora typu VHTR (typ ANTARES) [7]

Kogeneracja ciepła i energii elektrycznej przy temperaturach tego rzędu powoduje, że VHTR staje się atrakcyjnym źródłem ciepła dla dużych kompleksów przemysłowych (takich jak rafinerie i przemysł petrochemiczny), gdzie można substytuować duże ilości ciepła przy różnych temperaturach, z uwzględnieniem wytwarzania wodoru produkowanego np. dla ulepszania ciężkiej i zakwaszonej surowej ropy.

Reaktory VHTR zostały wysoko ocenione przez Międzynarodowe Forum reaktorów IV generacji zarówno ze względu na opłacalność - dzięki ich wysokiej wydajności w produkcji wodoru – jak i ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa i niezawodności (m.in. dzięki mikrokapsułkom paliwowym).

2.3. HISTORIA REAKTORÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH

Pierwsze reaktory chłodzone gazowo powstały w USA. Pierwszy z nich - CP-1 w Chicago, chłodzony powietrzem, miał praktycznie zerową moc wyjściową. Drugi – reaktor X-10 w Oak Ridge – także chłodzony powietrzem, miał już moc wyjściową wynoszącą 3.5 MW[1].

Reaktory te zastąpił stos atomowy w Brookhaven, który zaczął pracować w roku 1949. Następne prototypy były budowane w Europie – m. in. reaktor chłodzony dwutlenkiem węgla w Anglii w Calder Hall. Całe doświadczenie związane z reaktorami chłodzonymi gazem zostało wykorzystane przy projektowaniu reaktorów MAGNOX i AGR, chłodzonych CO_2 , które do dziś działają w Anglii.

Pierwszym reaktorem wysokotemperaturowym był reaktor DAGON w Anglii, który pracował od 1965 roku do 1976 i był pierwszym reaktorem w ogóle, w którym używano paliwa w formie mikrokapsulek TRISIO. Podobne prototypy zbudowano w Niemczech (AVR) i w USA (Peach-Bottom). W oparciu o doświadczenie uzyskane w eksploatacji tych reaktorów eksperymentalnych zbudowano dwie nowe instalacje – wysokotemperaturowy reaktor torowy (Thorium HighTemperature Reactor, THTR) i The Fort Saint Vrain reaktor. Oba reaktory były systemami o średniej mocy (moc wyjściowa rzędu 300-350 MW). Zastosowano w nich także technologię PCRV – betonowych zbiorników, co uniemożliwiło pasywny odbiór ciepła z pracy reaktora. Ten – duży jak się okazało – defekt spowodował że większe instalacje – już zaprojektowane – do tej pory nigdy nie powstały.

AVR: Jülich
15 MWe Research Reactor



AVR (15MWe)
1966-1988



Hamm-Uentrop (300 MWe)
1985-1989



Peach-Bottom (40MWe (1967-1974))

Pierwsze doświadczalne reaktory HTR. Technologia HTR była już rozwijana w latach 60 i 70 w Stanach Zjednoczonych, Niemczech i Wielkiej Brytanii, gdzie uzyskano pozytywne wyniki pracy reaktorów modelowych dla temperatur do 950 °C.

*źródło: http://en.wikipedia.org/wiki/Pebble_bed_reactor [22],
www.komitetlegnica.agh.edu.pl/aktualnosci/2/Jelen.pdf [16],
<http://en.wikipedia.org/wiki/THTR-300> [21]*

Od tego momentu skupiono się na projektowaniu małych reaktorów modułowych (np. niemiecki HTR-Modul). Jednakże od 1995 roku konstrukcję reaktorów wysokotemperaturowych zaczęły kraje azjatyckie – powstał reaktor HTR w Japonii oraz reaktor HTR-10 w Chinach, który właśnie zaczyna pracować. Obecnie projektowane reaktory mają jeszcze bardziej zwiększoną temperaturę pracy – dlatego często nazywane są reaktorami bardzo wysokich temperatur (Very High Temperature Reactor – VHTR).

2.4. TECHNOLOGIA HTR / VHTR – PROBLEMY I ROZWIĄZANIA

Proces projektowania każdego urządzenia musi uwzględniać zarówno jakość tego co produkujemy, jak i opłacalność stosowania i sposób użycia – reaktory jądrowe muszą być opłacalne, a ich obsługa bezpieczna. Dlatego proces projektowania reaktorów jądrowych jest często zaburzany poprzez istnienie sprzecznych kryteriów zdominowanych z jednej strony przez względy bezpieczeństwa i przez względy ekonomiczne z drugiej. Jednoczesne bezpieczeństwo i opłacalność zakładanego projektu pozostawia bardzo wąskie możliwości przy projektowaniu rzeczywistej instalacji. Choć istnieje wiele technologii utworzenia każdego elementu niezbędnego do funkcjonowania reaktora jądrowego - zaprojektowanie opłacalnego systemu może okazać się w pewnych warunkach niemożliwe. Jednakże w przypadku reaktorów wysokotemperaturowych te wąskie możliwości okazują się być wystarczające do utworzenia realistycznej koncepcji reaktora o znaczeniu komercyjnym – i to praktycznie zawsze.

- warunki projektowania narzucane przez kwestie bezpieczeństwa

Aby zdefiniować jaki reaktor jest bezpieczny, trzeba odpowiedzieć na pytanie, kiedy reaktor jądrowy jest bezpieczny. Reaktor jądrowy będzie bezpieczny wtedy, gdy nie stanowi żadnego zagrożenia zarówno dla ludzi z bezpośredniego otoczenia (personelu w nim pracującego), jak i dalszego. Takiego zagrożenia nie ma gdy:

- nigdy nie nastąpi potrzeba ewakuacji lub schronienia się personelu
- ekspozycja personelu na promieniowanie jest zawsze mniejsza niż dopuszczalne prawnie kryterium (międzynarodowe bądź lokalne – zazwyczaj ustalane przez odpowiedni organ państwowy (w Polsce jest to Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej CLOR)).

Oczywiście – każdy operator w elektrowni powinien starać się jak najbardziej zmniejszyć przyjmowaną dawkę – choćby poprzez stosowanie reguły As Low as Reasonably Acceptable (ALARA).

Bezpieczeństwo pracy reaktora zapewniają trzy systemy:

- I. kontroli przebiegu reakcji
- II. odbioru ciepła z rdzenia
- III. uwięzienie materiału radioaktywnego

Te systemy powinny funkcjonować zarówno w warunkach pracy normalnej reaktora jak i w warunkach wyjątkowych. W elektrowniach kontroli przebiegu reakcji dokonuje się poprzez stosowanie tak zwanych prętów kontrolnych w zewnętrznych i wewnętrznych reflektorach oraz – jeśli to niezbędne – poprzez system awaryjnego wyłączenia reaktora – składającego się w przypadku reaktorów HTR z granulek B_4C wpuszczanych do rdzenia. Chłodzenie reaktora odbywa się poprzez główny system chłodzenia działający przez cały czas, oraz pomocniczy – włączający się w przypadku przegrzania systemu. Chociaż nowoczesne reaktory wysokotemperaturowe mogą rozproszyć nadmiarowe ciepło poprzez przewodnictwo cieplne i promieniowanie, pomocniczy system chłodzenia zapewnia możliwość szybkiego schłodzenia reaktora – znacznie szybszego niż jakiegokolwiek metodzie pasywnej.

Oprócz tego każdy reaktor powinien mieć systemy zapobiegające i pomagające w kontroli sytuacji wyjątkowych.



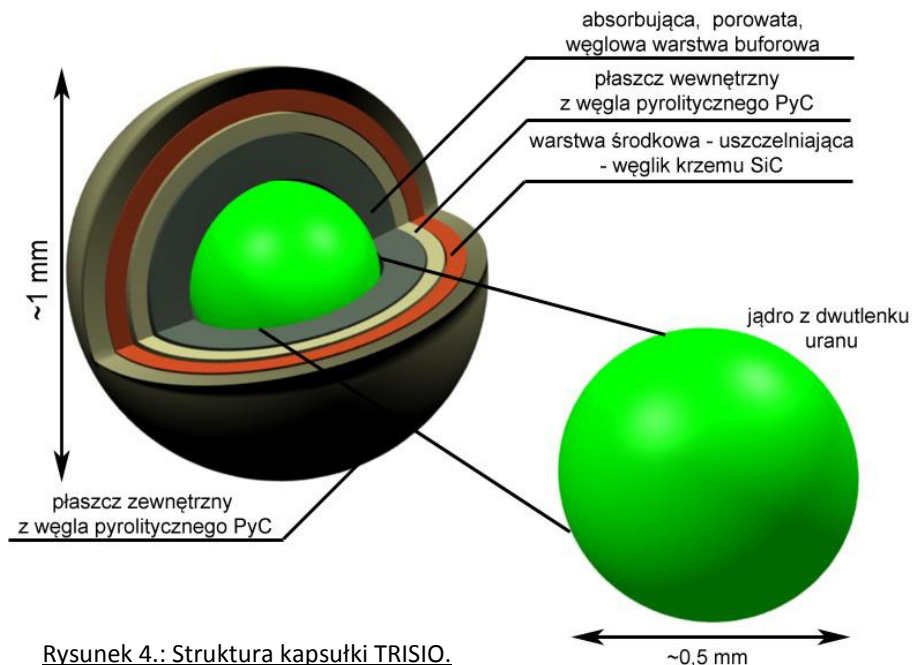
Rysunek 3. Bezpieczeństwo pracy reaktora – założenia [1]

- paliwo reaktorowe

Główną częścią reaktora jest rdzeń reaktora jądrowego – tam zachodzą przemiany jądrowe, będące źródłem energii w formie promieniowania oraz ciepła. Tam też musimy umieścić paliwo jądrowe. W tradycyjnych reaktorach umieszczane są pręty paliwowe, zawierające najczęściej związki wzbogaconego uranu - np. dwutlenek uranu. W nich zachodzą reakcje rozszczepienia, wymuszony rozpad jąder atomów uranu pod wpływem neutronów, rozpad promieniotwórczy powstałych jąder atomowych. W przypadku zniszczenia takiego pręta paliwowego – co jest możliwe – uwalniane są produkty rozpadów promieniotwórczych (także gazowe, niebezpieczne jak jod 135). Występują także problemy ze składowaniem takich prętów i ich utylizacją. Aby zwiększyć bezpieczeństwo pracy reaktorów należy szukać nowej formy dla paliwa reaktorowego.

To dlatego w reaktorach wysokotemperaturowych stosuje się mikrokapsułki paliwowe wbudowane w grafit [1]. Zaletą takiego rozwiązania jest zabezpieczenie przed wydostaniem się skażenia już na poziomie milimetrowej mikrokapsułki – w przeciwieństwie do tradycyjnych reaktorów, gdzie skażenie jest ograniczone całym zbiornikiem ciśnieniowym reaktora. I choć w Japonii w reaktorze HTR zastosowano dodatkową warstwę zewnętrzną zbiornika paliwowego – taką jak w przypadku reaktorów tradycyjnych, paliwo TRISO okazało się być na tyle bezpieczne, że osłonę taką uważa się za zbędną.

Same kapsułki są zbudowane warstwowo – jądro stanowi dwutlenek uranu skupiony w kuli o średnicy 500 mikrometrów. Jądro otoczone jest warstwą buforową mogącą absorbować gazowe produkty rozszczepienia uciekających z jądra oraz trzema węglowymi warstwami ochronnymi (wewnętrznej warstwy PyC, środkowej SiC i zewnętrznej PyC). Środkowa, będąca często pod ciśnieniem, zapewnia szczelność kapsułki – tak, by z wnętrza jądra nie wydobywały się żadne pierwiastki promieniotwórcze w formie gazowej.

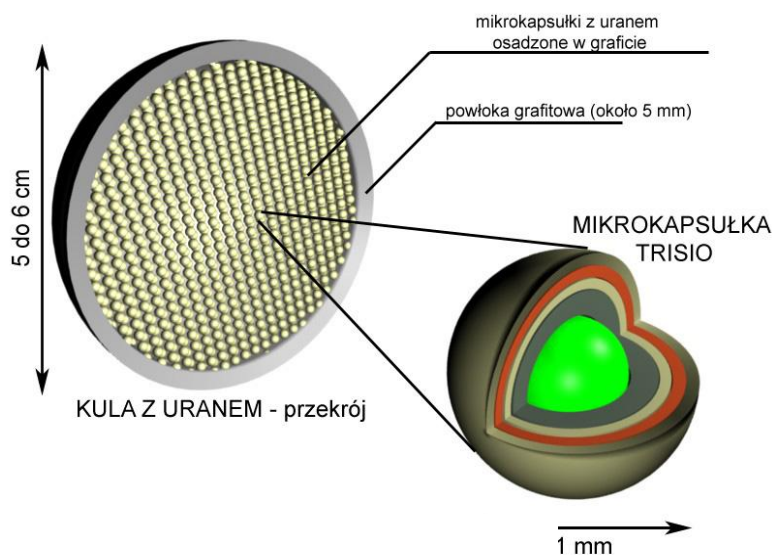


Rysunek 4.: Struktura kapsułki TRISIO.

Mikrokapsułki TRISIO są najczęściej wbudowywane w większe kule grafitowe, o średnicy 5 cm i płaszczu zewnętrznym z grafitu grubości 5 milimetrów (Typ kapsułkowy paliwa – Pebble type fuel) lub w pręty o średnicy 1 cm, wkładane w grafitowe bloki (Typ pryzmowy paliwa – prismatic fuel)

Doświadczenia pokazują, że kapsułki TRISIO aż do temperatury 1800 stopni Celsjusza zachowują wszystkie swoje właściwości, a prawdopodobieństwo uszkodzenia jest pomijalne (tak jak prawdopodobieństwo wycieku

produktów rozszczepienia). Ponieważ granica ta zależy od składu paliwa oraz stopnia jego wypalenia, przyjmuje się, że limitem stosowalności mikrokapsulek jest temperatura 1600 °C. Aby zapewnić nieprzekraczalność tak określonej bariery temperaturowej należy zabezpieczyć i ograniczyć maksymalną ilość produkowanego ciepła podczas pracy normalnej reaktora, a także podczas planowanego i nieplanowanego wyłączenia. Jedynym zagrożeniem dla takiego paliwa wydaje się być tylko takie uszkodzenie pierwotnego obiegu chłodzenia, przy którym do instalacji dostałoby się powietrze i nastąpiłby zapłon grafitu – czy to w kapsułkach, czy w reflektorach bądź moderatorach [6].



Rysunek 5.: Kula paliwowa z mikrokapsułkami

- projekt rdzenia reaktora HTR

Typowy reaktor jądrowy zbudowany jest z rdzenia – jego zadaniem jest przechowywanie paliwa jądrowego. To tu będzie następował odbiór wytworzonej energii cieplnej, tutaj też należy zainstalować systemy kontrolne, oraz systemy chłodzące.

Pierwszym założeniem przyjmowanym podczas projektowania rdzenia jest jego kształt – dla reaktorów wysokotemperaturowych najczęściej przyjmuje się kształt cylindryczny.

Rdzeń reaktora HTR zawiera zatem kapsułki paliwowe. Otacza się je odbijającą powłoką grafitową – tak zwanym reflektorem neutronów. Jest to warstwa materiału powodująca odbicie uciekających neutronów z powrotem do rdzenia reaktora. Dzięki zastosowaniu reflektora zwiększa się ilość neutronów w rdzeniu, co w konsekwencji powoduje uzyskanie mniejszej masy krytycznej materiału rozszczepialnego. Poprawia się także rozkład neutronów w rdzeniu. (np. wprowadzenie reflektora berylowego w reaktorze Ewa w Świerku pozwoliło na zwiększenie mocy z 4 do 10 MW). Aby określić grubość tej powłoki należy wziąć pod uwagę dwa ważne czynniki – ile neutronów jest traconych przy pracy reaktora („wyciekających poza rdzeń”) – co jest w gruncie rzeczy czynnikiem ekonomicznym, oraz rozkład temperatury w rdzeniu – co jest czynnikiem warunkującym bezpieczeństwo pracy.

Analizując tylko pierwszy czynnik – ilość neutronów – możemy określić optymalny rozmiar reflektora neutronów. Grubość reflektora równa dwukrotnej drodze dyfuzji neutronów jest wystarczająca, aby zmaksymalizować wzmocnienie. Grubsza osłona nie spowodowałaby odbicia większej ilości neutronów z powrotem do rdzenia – neutrony byłyby absorbowane. Dla reflektora grafitowego taka grubość wyniesie przynajmniej 1 metr (podczas gdy dla wody wystarczyłoby tylko 6 cm!).

Przyjmijmy, że rdzeń będzie cylindryczny – taki kształt wydaje się być optymalny ze względu na symetrię osiową. Obliczmy, dla jakiego stosunku promienia do wysokości uzyskamy minimalny strumień neutronów uciekających ze rdzenia.

Równanie Poisson'a dla strumienia neutronów (równanie dyfuzji):

$$\nabla^2 \phi + B_g^2 \phi = 0$$

gdzie:

B_g – parametr materiałowy (materiałem tu jest grafit), $B_g^2 = \left(\frac{v_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$

ϕ - strumień neutronów

Zatem:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + B_g^2 \phi = 0$$

$$\phi(r, z) = R(r) \cdot Z(z)$$

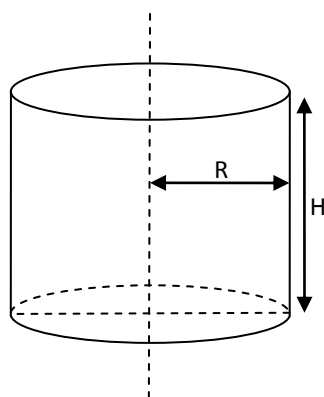
$$\phi(r, z) = A J_0 \left(\frac{v_0 r}{R} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H} \right)$$

Dla grubości reflektora równej dwukrotnej drodze dyfuzji neutronów uzyskamy minimalny strumień neutronów uciekających z reaktora dla stosunku wysokości do promienia równego 1,85.

$$\mathbf{H=1.85R}$$

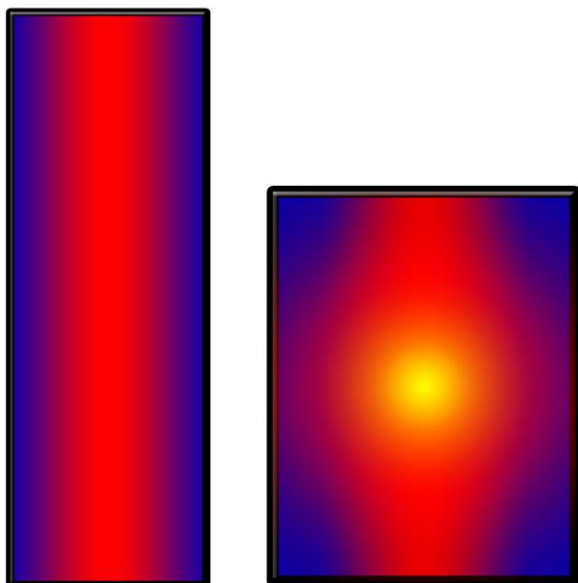
Czyli dla cylindrycznego rdzenia o wysokości nieco mniejszej niż średnica uzyskamy najmniejszy wyciek neutronów poza rdzeń. Uzyskujemy zatem projekt najbardziej ekonomicznego kształtu rdzenia.

Takie rozwiązanie ma jedną – istotną – wadę. W grubym rdzeniu szybkie przewodzenie ciepła produkowanego podczas rozszczepienia w przypadku np. awarii (najniebezpieczniejsza w takim przypadku jest tzw. awaria DLOFC – Depressurized Loss of Forced Cooling incident, czyli awaria systemu wymuszonego



chłodzenia w wyniku utraty czynnika roboczego wraz z rozszczelnieniem instalacji). W takim przypadku temperatura w środku rdzenia mogłaby z łatwością przekroczyć granicę 1600 stopni Celsjusza.

Zatem kształty rdzenia reaktora najlepsze pod względem opłacalności (i zarazem najłatwiejsze do wykonania) będą osiągalne tylko dla bardzo małych reaktorów (takich jak chiński HTR – 10 – taki projekt



Rysunek 6.: Schematyczne przedstawienie rozkładu temperatury w rdzeniu wysokim oraz w rdzeniu optymalnym w przypadku awarii systemu chłodzenia (na podstawie [1])

zastosowano właśnie w tym reaktorze [18]) – inaczej limit temperatury kapsułek będzie przekroczony.

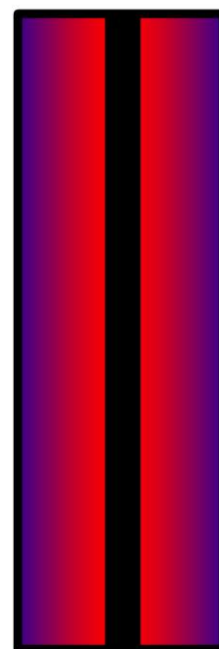
To dlatego bezpieczne rdzenie reaktorów HTR o dużej mocy wyjściowej muszą być długie i cienkie – tylko taki kształt zapewni wystarczający odbiór ciepła bez przekroczenia limitu 1600°C i wystarczającą objętość do uzyskania opłacalnej mocy wyjściowej.

Maksymalny promień rdzeni cylindrycznych jest tak naprawdę zależny od indywidualnych cech projektowanego reaktora i innych czynników praktycznych. Na przykład maksymalny promień zbiornika ciśnieniowego otaczającego reaktor (zbiornik ten utrzymuje odpowiednie ciśnienie czynnika chłodzącego – omówione poniżej) tak zwanego Reactor Pressure Vessel (RPV) wynosi około 6,5 metra – ze względu na problemy związane z transportem

większego zbiornika z fabryki do samej elektrowni. Konstruktorzy z firmy PBMR stosują na przykład zbiorniki o średnicy 6,2 m. Przy określaniu promienia rdzenia należy pamiętać, że wzrost średnicy nie przekłada się bezpośrednio na wzrost mocy. Na przykład przy zmianie promienia rdzenia od 3 do 4 metrów (co prawie podwaja objętość rdzenia) możemy zwiększyć moc wyjściową reaktora tylko o 20% (jednocześnie musi zostać zmniejszona średnia gęstość mocy, by nie przekroczyć 1600°C).

Ciekawym pomysłem wydaje się być umieszczanie wewnątrz rdzenia kolumny nie zawierającej wcale paliwa jądrowego. Jeśli – nie zmieniając objętości stosowanego paliwa – utworzymy taką warstwę wewnętrzną, możemy zwiększyć moc wyjściową takiego rdzenia pierścieniowego bez przekraczania limitu temperatury osiąganego w razie awarii. Jest to możliwe, gdyż największy procent mocy produkowany jest w zewnętrznej części rdzenia – tuż przy zewnętrznej osłonie – tam też ciepło może zostać efektywnie odebrane. Taka kolumna, najczęściej o średnicy 2 metrów, może zostać utworzona albo z litego grafitu, albo z pustych (bezuranowych) kapsułek grafitowych.

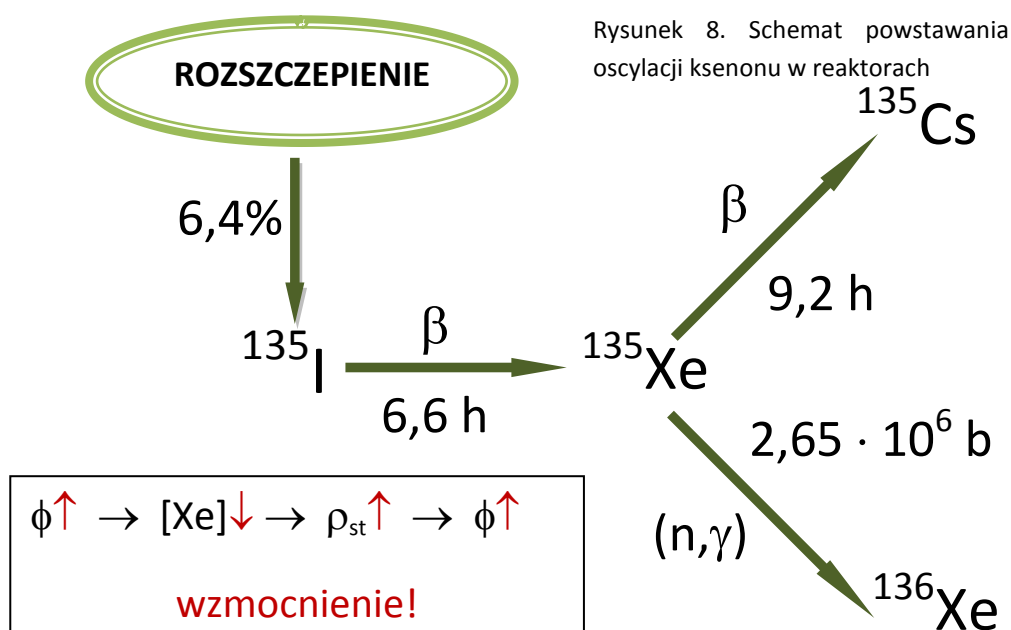
W ostatnich latach konstruktorzy np. z firmy PBMR zrezygnowali z rdzenia cylindrycznego wpierw na rzecz rdzenia pierścieniowego z kolumną wewnętrzną z pustych kapsułek paliwowych, a następnie na rzecz rdzenia pierścieniowego ze stałą kolumną grafitową. W takim rozwiązaniu kształt rdzenia nie zmienia się z czasem. Inną zaletą jest zmniejszenie ilości przepływającego chłodziwa przez rdzeń. Wadą – brak możliwości łatwej i częstej wymiany i regeneracji wewnętrznej kolumny grafitowej. Niezbędna jest zatem przynajmniej wymiana tej kolumny po pewnym, dość długim okresie eksploatacji elektrowni.



Rysunek 7.: Rozkład temperatury w rdzeniu wysokim pierścieniowym (z kolumną) w przypadku awarii systemu chłodzenia (na podstawie [1])

- oscylacje Ksenonu 135

Ważnym czynnikiem ograniczającym wysokość rdzenia reaktora jest wrażliwość dużych rdzeni na oscylacje Ksenonu 135. Ksenon jest wysoko-absorbującym produktem rozszczepiania głównie produkowanym przy rozszczepieniu jodu, który rozpada się do ksenonu z czasem połowicznego rozpadu równym 6,6 godziny. Jod jest bezpośrednio produkowany w rozszczepieniu paliwa z wydajnością 6,4%. Z drugiej strony ksenon 135 zanika podczas absorpcji neutronu (przekrój czynny na absorpcję neutronu dla Xe jest bardzo wysoki i sięga rzędu kilku milionów barnów – w wyniku absorpcji powstaje izotop ^{136}Xe) oraz poprzez rozpad beta z czasem połowicznego rozpadu równym 9,2 godziny. Jeśli gęstość strumienia neutronów wzrośnie w jednej części rdzenia, wzrośnie jednocześnie produkcja jodu. Jednakże jeszcze przez około 6 godzin produkcja Ksenonu praktycznie nie zmienia się (ze względu na okres połowicznego rozpadu Jodu). Jednocześnie absorpcja neutronów przez atomy ksenonu jest wprost proporcjonalna do gęstości strumienia neutronów. W wyniku tego stężenie ksenonu w rdzeniu zmniejsza się – co prowadzi do spadku absorpcji neutronów przez atomy Xe i lokalnego wzrostu gęstości mocy. Co w efekcie może prowadzić do oscylacji mocy we wnętrzu reaktora.



Dlatego ogranicza się wysokość rdzenia do około 30 długości migracji neutronów, co odpowiada około 10 metrom dla paliwa kapsułkowego i 8 metrom dla pryzmowego (długość migracji dla pierwszego typu paliwa wynosi 20cm, dla drugiego – 30 cm). Tę wartość można wyliczyć analizując kinetykę procesów zachodzących w reaktorze [1]:

Moc reaktora jest stopniowo „budowana” poprzez natychmiastowe łańcuchy rozszczepienia indukowane przez emisję opóźnionych neutronów. W reaktorze krytycznym, średnia liczba neutronów w natychmiastowym łańcuchu rozszczepienia wynosi 1 przez ułamek neutronów opóźnionych (i wynosi 0.0064 dla U-235.). Średnia kwadratowa droga pokonywana przez neutron od momentu utworzenia do absorpcji jest sześciokrotnie większa niż powierzchnia migracji (długość migracji neutronów podniesiona do kwadratu), średnia odległość pokonywana przez neutrony w natychmiastowym łańcuchu rozszczepienia jest równa 30 długościom migracji.

powierzchnia migracji:

$$M = L^2 + \tau = \frac{1}{6} \langle l^2 \rangle$$

gdzie:

L – długość dyfuzji

τ - wiek Fermiego

długość natychmiastowego łańcucha rozszczepienia:

$$L_{PFC} = \sqrt{\frac{6}{\beta} \langle l^2 \rangle} \approx 30M$$

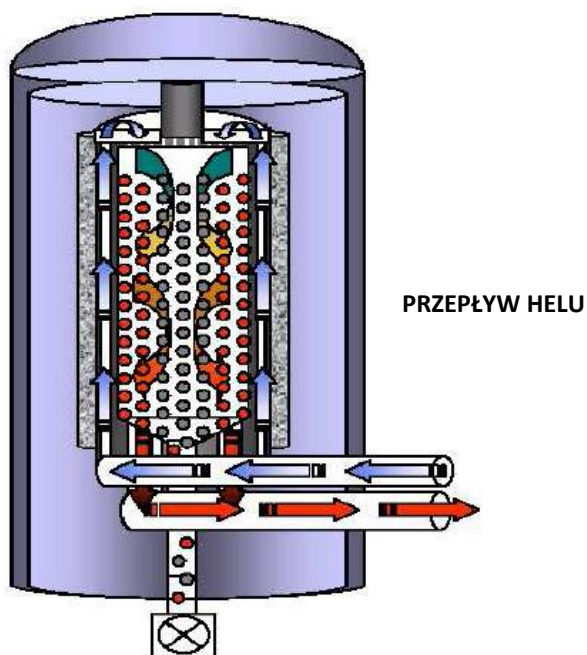
- czynnik chłodzący w reaktorach wysokotemperaturowych

Typowy układ rdzenia reaktora wysokotemperaturowego jest przedstawiony na obrazku poniżej. Zimny hel dostaje się do zewnętrznego reflektora neutronów od spodu i przepływa w górę chłodząc reflektor. Następnie jest kierowany do rdzenia przez który przepływa od góry do dołu odbierając ciepło od kapsułek (lub pryzm) paliwowych. Jeśli w reaktorze zastosowano grafitową kolumnę w środku rdzenia zbudowaną z kapsułek niezawierających paliwa, to należy zastosować także duży przepływ boczny helu poprzez środek rdzenia, na co potrzeba większej mocy pompy tłoczącej hel. Z drugiej strony takie rozwiązanie ma dużą zaletę – bezpaliwowe, grafitowe elementy kolumny mogą być w razie potrzeby cyklicznie wymieniane przez świeże i chłodne

Dla każdego nowoczesnego reaktora HTR jako element chłodzący wybiera się hel. Czemu? Optymalne chłodziwo powinno móc odebrać jak najwięcej ciepła ze rdzenia. Biorąc pod uwagę warunki pracy chłodziwa okazuje się, że taki czynnik powinien mieć dużą pojemność cieplną na jeden mol przy małej masie molowej. Pojemność cieplna cząstki gazu wynosi $kT/2$ na każdy stopień swobody (k to stała Boltzmann).

Rozważając tylko te czynniki, najlepszym chłodziwem byłby wodór – ze względu na niewielką masę i dużą pojemność cieplną (cząsteczki dwuatomowe). Drugi w kolejności byłby dwutlenek węgla – jednakże wartość odbioru ciepła na jednostkę powierzchni dla CO_2 jest 2 razy mniejsza niż dla wodoru. Biorąc pod uwagę inne czynniki, takie jak utrata ciśnienia w rdzeniu ze względu na tarcie czy przewodnictwo cieplne dla ustalonej powierzchni przepływu chłodziwa okazuje się także, iż dobrym chłodziwem byłby także hel. W połączeniu z małą reaktywnością chemiczną i jądrową, hel wydaje się być bardzo dobrym wyborem.

Chłodziwa Helowego używa się na przykład w reaktorze PBMR w południowej Afryce czy w reaktorze HTR-10 w Chinach – cykl pracy chłodziwa w tych reaktorach to cykl Braytona.



Rysunek 9.: przepływ helu w pierścieniowym reaktorze wysokotemperaturowym – środkowa kolumna zrobiona z pustych kapsułek paliwowych.

źródło: <http://web.mit.edu/pebble-bed/index.html> [19]

2.5. ZALETY REAKTORÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH

Reaktory wysokotemperaturowe dzięki zastosowaniu rdzenia moderowanego grafitem i chłodzonego helem przy użyciu kapsułek paliwowych stają się rozwiązaniem bardzo bezpiecznym pośród innych reaktorów. Grafit posiadający wysoką bezwładność cieplną wraz z niskoreaktywnym helem stanowią o dużej stabilności działania takiego reaktora – nawet dla bardzo wysokich temperatur. Wysoka średnia temperatura działania rdzenia w stanie normalnym (1,000°C) pozwala na czystą, bezemisyjną produkcję ciepła.

Ponadto – choć prawdopodobieństwo awarii reaktorów 4 generacji o skutkach porównywalnych z katastrofą Czarnobylską jest minimalne – a wręcz bliskie zeru – to gdyby instalacja została zniszczona, paliwo wciąż będzie zabezpieczone ze względu na strukturę kapsułek. Nawet po zniszczeniu rdzenia reaktora kapsułki po prostu rozsypałyby się w pobliżu, nie uwalniając dużych ilości groźnych i lotnych substancji radioaktywnych (np. jodu 131).

Reaktory HTR/VHTR to wydajne i elastyczne systemy reaktorów jądrowych, które mogą znaleźć zastosowanie jako źródło wysokich temperatur dla procesów przemysłowych oraz w Kogeneracji. To właśnie – obok bezpieczeństwa pracy i już obecnie zaawansowanej technologii – jest największą zaletą takich reaktorów.

Ciepło wytwarzane przez reaktory jądrowe jest obecnie głównie używane do generowania energii elektrycznej. Może jednak zostać z łatwością użyte w inny sposób. Takich sposobów i miejsc zastosowania jest bardzo wiele – od wszelkich typów dostarczania ciepła dla ograniczonego obszaru – czyli tak jak zwykła elektrociepłownia do ogrzewania budynków, ale i do dostarczania wysokiej temperatury niezbędnej w procesach petrochemicznych, w przemyśle węglowym, do wytwarzania cementu, nawozów sztucznych, do wytwarzania wodoru, w przemyśle stalowym itp.

3. SYNERGIA WĘGLOWO – JĄDROWA

Największą zaletą reaktorów typu HTR lub VHTR jest bardzo wysoka temperatura pracy. Istnieje wiele przemysłowych procesów technologicznych, gdzie taka temperatura jest wykorzystywana. Jednym z ciekawszych zastosowań - bardzo atrakcyjnym ale i trudnym technologicznie – jest wykorzystanie ciepła z reaktora o temperaturze powyżej 600°C do rozkładu wody na tlen i wodór w procesach pośrednich. Wodór i tlen są bardzo istotnymi gazami dla przemysłu węglowego [4,5,10,14]. Tlen na przykład umożliwia przeprowadzanie bardziej ekologicznych procesów spalania, wodór – gazyfikację (uwodornienie) węgla i gazowych paliw węglowodorowych bez emisji CO₂.

Wykorzystywanie wysokiej temperatury nie ogranicza także odzyskiwania średnich i niższych temperatur – także stosowanych w przemyśle. W poniższej tabeli zaprezentowano przykładowe procesy technologiczne, które mogą być przeprowadzane dzięki reaktorom wysokotemperaturowym:

Tabela 1. Porównanie temperatur procesów przemysłowych z temperaturami uzyskiwanymi w różnych typach reaktorów jądrowych (na podstawie [9])

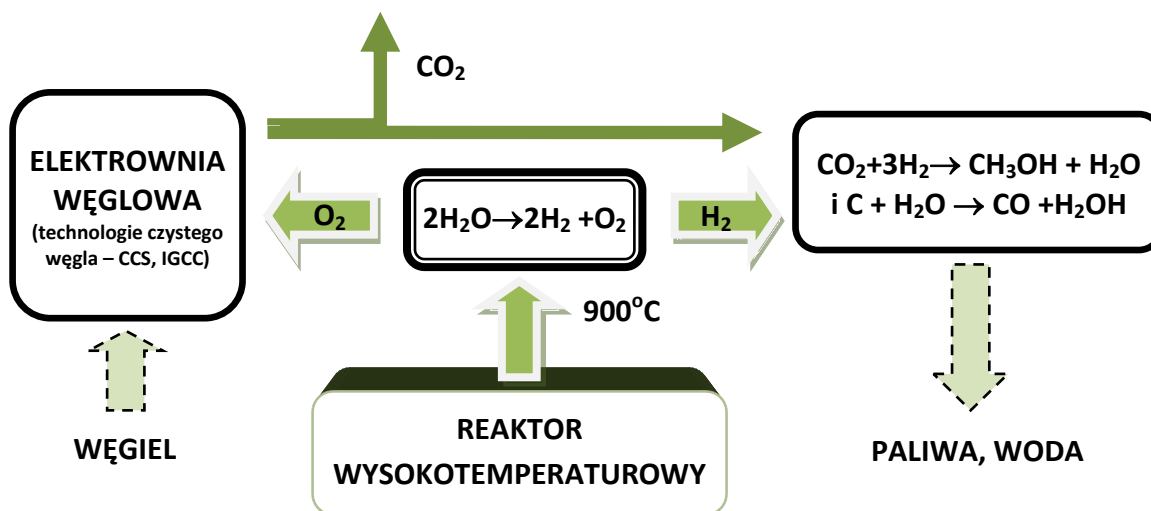
Temperatura								
200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C	1400 °C	1600 °C	
			Wytwarzanie wyrobów szklanych					
			Wytwarzanie cementu					
Metalurgia – przetwarzanie żelaza								
			(metody direction-reduction)		metoda („blast furnace”)			
wytwarzanie prądu elektrycznego					(turbiny gazowe)			
gazyfikacja węgla					(też wytwarzanie syngazu)			
wytwarzanie wodoru				(reforming pary)				
przetwarzanie etylenu				(m.in. wytwarzanie nafty, etanu)				
przetwarzanie fenyletylenu				(m.in. produkcja etylobenzenu)				
wytwarzanie gazu miejskiego								
rafinerie				naftowej			PRZYKŁADOWE PROCESY PRZEMYSŁOWE WYKORZYSTUJĄCE WYSOKIE TEMPERATURY	
		odsiarczanie		mazutu				
		przetwarzanie		miazgi drzewnej				
		synteza sztucznej żywicy						
		procesy odsalania,		ciepłownictwo miejskie			TEMPERATURY UZYSKIWANE W RÓŻNYCH TYPACH REAKTORÓW	
HTR			VHTR					
MSR (stopionych soli) - do 600 °C			800 °C					
SFR, LFR SCWR – do 500 °C								
LWR, HWR – do 250 °C								

Idea synergii węglowo – jądrowej powstała dość niedawno – podejmowane są dopiero pierwsze próby jej wdrożenia. Problem budowy reaktorów wspomagających przetwarzanie węgla jego gazyfikację został przedstawiony w styczniu 2007 roku na spotkaniu europejskiej sieci technologicznej reaktorów wysokotemperaturowych HTR-TN, gdzie uznano go za bardzo atrakcyjny dla Europy zarówno pod względem ekonomicznym, jak i możliwej szybkiej realizacji - w perspektywie do kilkunastu lat.

Opisując na czym polega idea takiej synergii, należy powiedzieć także parę słów o potrzebach i nowych rozwiązaniach w przemyśle węglowym. Obecnie poszukuje się nowych rozwiązań umożliwiających przetwarzanie węgla w sposób bardziej przyjazny środowisku niż jest to obecnie robione. Takie opracowywane technologie (wymienione w rozdziale 3.1) pozwalają na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i na uzyskanie większej wydajności samych procesów [15]. Przykładowo: obecnie stosowane w świecie metody produkcji paliw płynnych z węgla wiążą się z dużą emisją CO₂. Sprawność masowa tych metod jest niska i wynosi około 20%, przy czym nadmiar to głównie produkowany dwutlenek węgla, najczęściej emitowany do atmosfery. Wykorzystując ciepło i wysoką temperaturę reaktorów HTR/VHTR można całkowicie wyeliminować emisję CO₂ w tych procesach, a także – dzięki wychwytywaniu dwutlenku węgla z istniejących elektrowni węglowych – można zmniejszać także emisję elektrowni tradycyjnych! W tym momencie dwutlenek węgla staje się z niechcianego i nieużytecznego produktu spalania – surowcem. Zastosowanie reaktora HTR do produkcji paliw wymaga także uzyskiwania wodoru – który można otrzymać na przykład z rozkładu wody na wodór i tlen w procesie zasilanym przez ciepło z reaktora (tlen z rozkładu może też być następnie zużyty w elektrowniach węglowych do procesów spalania węgla - jako substytut powietrza - zwiększając ich efektywność przez uzyskanie wyższych temperatur spalania i zmniejszając szkodliwość, eliminując emisję bardzo szkodliwych tlenków azotu – co jest kolejnym plusem synergetycznym).

3.1. SYNERGIA – CELE I ZYSKI

Kogeneracja ciepła i prądu jest najbardziej elastyczną formą efektywnego użytkowania energii jądrowej. W zasadzie każdy reaktor może być używany w zastosowaniach kogeneracyjnych (a przynajmniej takich, które nie wymagają wysokich temperatur). Jednakże, im wyższa temperatura, tym większy zakres zastosowań takich łączonych systemów. To właśnie to tworzy z reaktorów HTR/VHTR tak opłacalne zastosowanie przy wsparciu procesów przemysłowych – szczególnie, kiedy ilość potrzebnej energii nie jest wysoka. Najlepiej cele i zyski synergii węglowo jądrowej przedstawia poniższy schemat. Warto zauważyć, że uzyskanie już 1 etapu pozwala na produkcję syngazu - gazu syntezowego, umożliwiającego przeróbkę węgla na paliwa płynne i gazowe, wytwarzanie i syntezę nawozów sztucznych itp.:



Rysunek 10.: Synergia węglowo – jądrowa – co chcemy uzyskać [4,5].

Wytwarzanie wodoru za pomocą energii jądrowej może być elementem przyspieszającym masowe zastosowanie wodoru jako masowego paliwa dla środków transportu (wodór nie zwiększa emisji zanieczyszczeń). Energia jądrowa może znaleźć zastosowanie do produkcji wodoru bez emisji gazów cieplarnianych albo w drodze elektrolizy, albo bezpośrednio z wody w wysokich temperaturach w procesie termochemicznym. Oprócz z faktycznych zysków ekonomicznych z działania takich reaktorów w synergii z technologiami węglowymi ich zastosowanie może znacznie zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych oraz zapewnić bezpieczną dywersyfikację źródeł energii. Biorąc pod uwagę obecne technologiczne zaawansowanie

przemysłu, masowa produkcja takich reaktorów mogłaby zacząć się już dziś. Nie mniej jednak łączenie technologii jądrowych z procesami przemysłowymi pozostaje wciąż wielkim wyzwaniem – choć wyzwaniem bardzo opłacalnym.

Należy też pamiętać, że ograniczenie emisji CO₂ jest obecnie zadaniem nie tylko polskiej energetyki. Ograniczenie to przejawia się w realizacji 3 postulatów [14,15]:

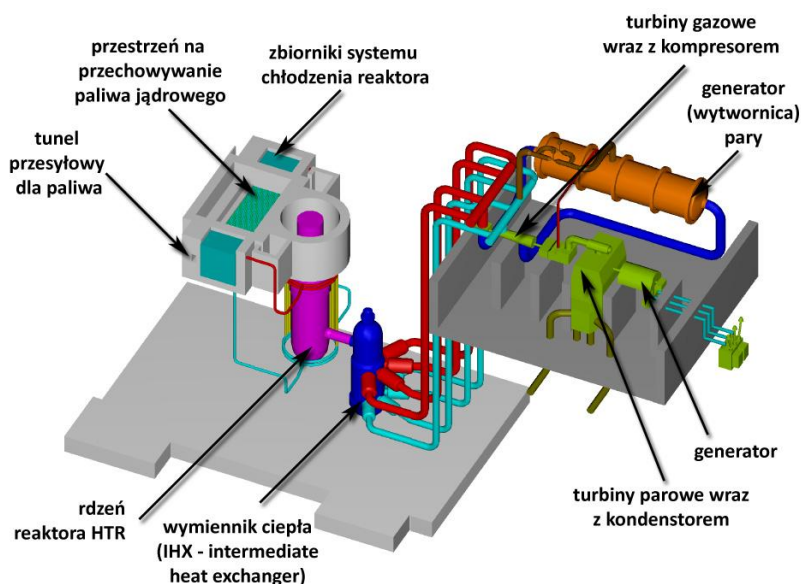
- zwiększania wydajności procesów przetwarzania węgla w energię elektryczną - umożliwi to wytworzenie większej ilości energii elektrycznej z tej samej ilości węgla poprzez wzrost sprawności samego procesu. Realizuje się to poprzez zwiększenie temperatury procesów przetwarzania węgla – czyli dzięki tak zwanej technologii CCT (Clean Coal Technology)
- Opracowanie procesów wychwytywania, transportu i składowania podziemnego CO₂ (technologia CCs – Carbon Capture and Storage).
- wprowadzenie procesów gazyfikacji węgla do zastosowań w energetyce (technologia IGCC - Coal-fueled Integrated Gasification Combined Cycle)

Efektom tych działań ma być redukcja emisji dwutlenku węgla. Ponadto każde z nich może być połączone z reaktorem jądrowym – dając silne podstawy do wytworzenia ekonomicznych i zyskownych instalacji wykorzystujących synergię węgla – atom.

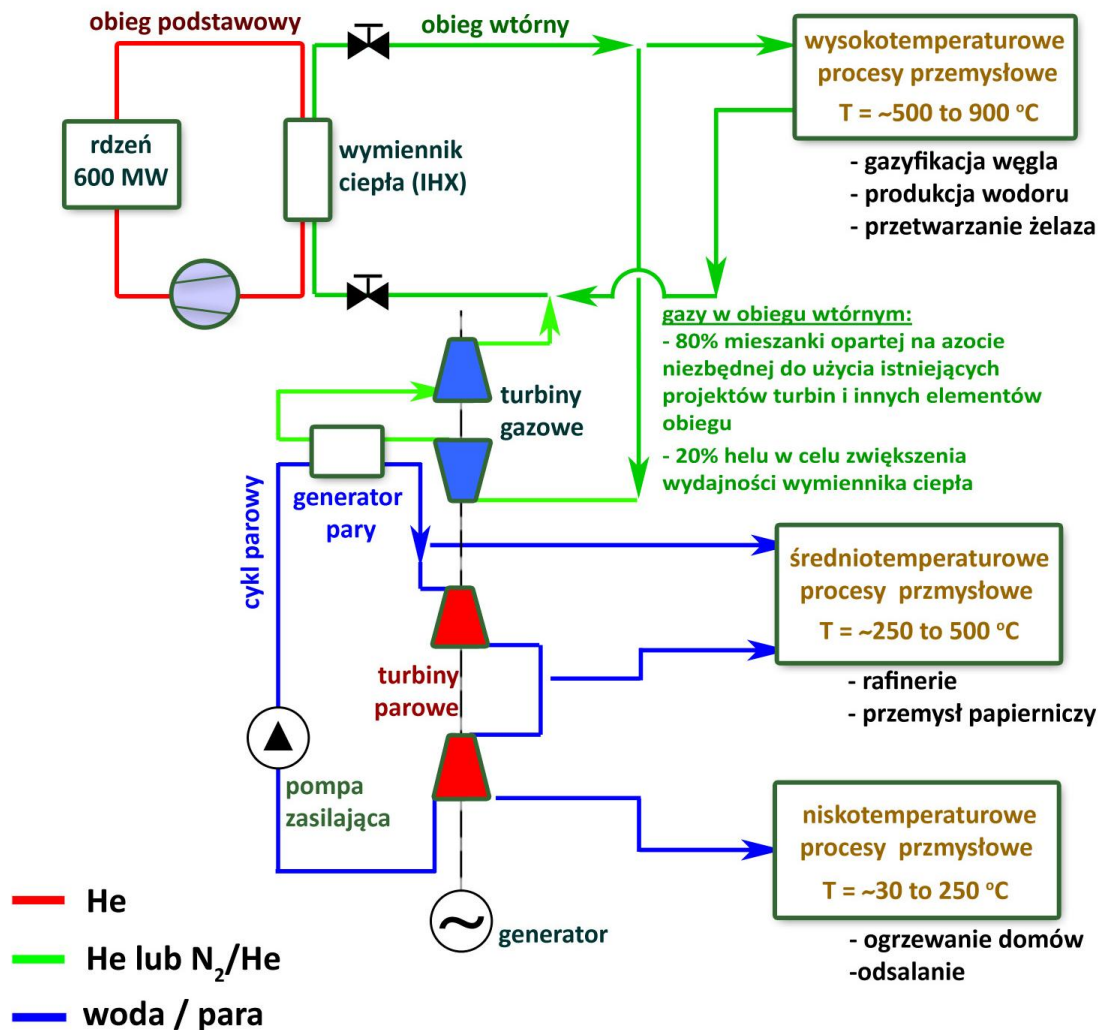
3.2. TECHNOLOGICZNE ROZWIĄZANIA – PRZYKŁADY

Aktualnie w Europie większość działań związanych z technologiami synerгии węgla – wodorowej jest skupiona wokół projektu Raphael. Projekt ten, ogłoszony początkowo w ramach 6 programu ramowego UE dotyczył zastosowania reaktorów typu VHTR jako źródła energii zarówno elektrycznej jak i ciepłej, wykorzystywanej w przemyśle – m. In. do produkcji wodoru [11,12].

Związana z tym projektem firma francuska Areva zaprojektowała przykładowy system, nazwany ANTARES, w jakim reaktor VHTR można by było sprząc z procesami przemysłowymi – co prezentują poniższe schematy (drugi to przykładowy schemat obiegów w takiej instalacji, pierwszy to wizualizacja projektu ANTARES :



Rysunek 11.: Projekt ANTARES firmy AREVA – zaznaczono kluczowe elementy instalacji. Schemat pochodzi z [12] <http://www.aveva-np.com/us/liblocal/docs/EPR/ANTARES.pdf>



Rysunek 12.: Przykład projektu instalacji przemysłowej wykorzystującej reaktor wysokotemperaturowy do wspomagania procesów zachodzących w różnych zakresach temperatur – na podstawie projektu ANTARES firmy AREVA [12] <http://www.avea-np.com/us/liblocal/docs/EPR/ANTARES.pdf>

Warto zauważyć, że w obiegu wtórnym głównym gazem roboczym jest azot, gdyż nie istnieją obecnie turbiny gazowe działające efektywnie na Hel.

Więcej takich schematów zaprezentowano w 2006 roku na spotkaniu Francuskiej Komisji Energii Atomowej. Warto zwrócić uwagę, że proponowane zastosowania wahają się od zrównoważenia produkcji energii elektrycznej i ciepła, aż do takiej specjalizacji jak np. używanie reaktora VHTR tylko do produkcji wodoru!

4. ENERGETYKA JĄDROWA W POLSCE I NA ŚWIECIE

4.1. ŚWIAT I NOWOCZESNE TECHNOLOGIE JĄDROWE

W styczniu 2007 roku na świecie działało 435 elektrowni atomowych przeznaczonych do użytku publicznego (tj. komercyjnych, nie laboratoryjnych). W 2005 roku sumaryczna moc wszystkich elektrowni wynosiła 369 GW (dane z 30 państw). W ciągu 2006 roku wytworzona w tych elektrowniach energia elektryczna stanowiła 16% całkowitej wytworzonej energii (2630 TWh). Wraz ze stałym wzrostem światowej ludności, która według przewidywań ONZ, ma wzrosnąć do 7,5 miliardów z obecnych 6 miliardów do 2020 r. oraz wraz ze wzrostem standardów życia na całym świecie wzrośnie również zapotrzebowanie na energię elektryczną. Większość scenariuszów zapotrzebowania na nią przewiduje, iż w 2050 roku wyniesie od 12 do 28 Gtoe (gigaton oil equivalent) – w porównaniu do obecnego zapotrzebowania wynoszącego 10 Gtoe [8].

W tym kontekście energia jądrowa może odegrać poważną rolę. W raporcie z 1998 roku pt. „Energia Jądrowa i Zmiana Klimatu” „Agencja Energii Jądrowej” (NEA) Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) zaprezentowała przewidywane znaczenie energii jądrowej w wypełnianiu celów określonych w protokółie z Kioto dotyczących zmniejszania ryzyka globalnej zmiany klimatu. Tak jak można przypuszczać – stopniowy wzrost sumarycznej mocy produkowanej przez elektrownie jądrowe na świecie spowoduje znaczną redukcję emisji gazów cieplarnianych. Międzynarodowe Stowarzyszenie Energii Jądrowej (WNA) ocenia, że na każde 26 ton uranu zamiast użycia węgla (U_3O_8) milion ton dwutlenku węgla jest zaoszczędzone środowisku.

Renesans w energetyce jądrowej jest widoczny już na całym świecie. Aktualnie w budowie (wyłączając instalacje planowane) znajduje się 28 reaktorów, z czego większość w Azji. Także Unia Europejska z 30-to procentową produkcją elektryczności z reaktorów jądrowych bardzo mocno rozwija tę gałąź energetyki – czynnie uczestnicząc w rozwoju reaktorów 3 i 4 generacji. Zadanie to jest ułatwione ze względu na długą i owocną historię energetyki jądrowej w Europie. Brakuje tylko pełnej, szerokiej i jednorodnej akceptacji społecznej stosowania reaktorów jądrowych – ten problem dotyczy nie tylko Europy. Dziwi fakt, iż pomimo istnienia takich organizacji jak Euratom czy IAEA (International Atomic Energy Agency) w ciągu ostatnich 2 dekad przyzwolenie społeczne spadło.

Szeroko określone kampanie informacyjne, jawność i jasność przeprowadzanych inwestycji powinna pomóc tej ciężkiej sytuacji – w 2001 roku 27 państw Unii Europejskiej zaakceptowało tzw. konwencję Arthusa mówiącą o publicznym dostępie do informacji i prawie do udziału w podejmowaniu decyzji powiązanych z ochroną środowiska – a więc i związanych z energetyką jądrową.

Bezpieczne działanie europejskich elektrowni atomowych wraz z ich zaawansowaniem technologicznym mogą zapewnić szybki rozwój energetyki jądrowej w przyszłości - szczególnie dla państw Unii Europejskiej – w tym Polski.

4.1.1. FRANCJA – LIDER ENERGETYKI JĄDROWEJ

Francja jest europejskim – a obecnie nawet światowym liderem w wykorzystaniu energetyki jądrowej. Od 2002 roku główna francuska korporacja energetyczna Électricité de France (EDF) – zarządzała 59 elektrowniami atomowymi. W 2008 roku te elektrownie produkowały 87,5% produkcji energii elektrycznej we Francji (z której znaczna część jest eksportowana do innych krajów – m.in. Włoch, Niemiec, Holandii) – co tworzy z EDF firmę produkującą najwięcej energii z technologii jądrowych na świecie w stosunku do innych technologii. W roku 2004, 425,8 TWh z 540,6 TWh energii elektrycznej sprzedawanej we Francji pochodziło z elektrowni atomowych. Warto wspomnieć, że to m.in. dzięki temu prąd elektryczny we Francji jest taki tani.

W 2006 roku Francuski rząd zobowiązał firmę EDF oraz producenta Areva [12] do zbudowania reaktora EPR (European Pressurised Reactor) III generacji. W 2008 natomiast ogłoszono budowę kolejnej takiej instalacji ze względu na rosnące ceny ropy naftowej i gazu ziemnego – jej konstrukcja winna zacząć się w roku 2011.

Tak wysoki procent wytwarzanej energii ze źródeł jądrowych bardzo odróżnia program atomowy we Francji od programów w innych krajach. Na przykład, aby sprostać codziennym zapotrzebowaniom na prąd elektryczny niektóre elektrownie atomowe muszą pracować jako elektrownie wspomagające, uruchamiane w razie wysokiego zapotrzebowania na prąd, inne stanowią elektrownie podstawowe, a elektrownie tradycyjne – np. węglowe – dostosowują swoją produkcję do aktualnych potrzeb.

4.1.2. W USA OGŁOSZONO NOWY PLAN WSPARCIA DLA ROZWOJU ENERGETYKI JĄDROWEJ

Do 2007 roku w Stanach Zjednoczonych działały 104 reaktory jądrowe (69 reaktorów PWR – pressurised water reaktor i 35 BWR – boiling water reactor) – nie licząc reaktorów laboratoryjnych – o sumarycznej mocy produkcyjnej 100 GW, co stanowi 20% zapotrzebowania na energię elektryczną w USA. Pod względem ilości MWh USA są największym producentem energii jądrowej.

W ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania energetyką jądrową w USA. Stało się tak między innymi dzięki ogłoszeniu programu „Nuclear Power 2010” który wyznacza i koordynuje prace nad budową nowoczesnych reaktorów jądrowych. Jeszcze do 2005 roku nie budowano żadnej nowej elektrowni atomowej bez jednoczesnego zamknięcia starej przez ponad 20 lat. We wrześniu 2005 roku ogłoszono budowę 2 nowych reaktorów, oraz przedstawiono plany budowy kilku innych.

4.1.3. CHINY – DUŻE INWESTYCJE W NOWE TECHNOLOGIE JĄDROWE

Chiny zdecydowały się na znaczne przyspieszenie rozwoju energetyki atomowej – aktualnie w budowie są 4 jednostki, zaakceptowano plany budowy 23, a ogłoszono budowę w sumie 50. Co ciekawe, jeden z budowanych aktualnie reaktorów (w Shidaowan) to pierwszy reaktor wysokotemperaturowy pracujący na cyklu Braytona przeznaczony do użytku komercyjnego. W 2004 w Instytucie Nowych Technologii energetycznych i Nuklearnych Uniwersytetu Tsinghua w Pekinie przeprowadzono eksperyment na takim właśnie reaktorze (tzw. HTR-10), wyłączając go bez chłodzenia. Temperatura paliwa osiągnęła 1600 stopni Celsjusza i nie nastąpiła żadna awaria. W elektrowni zostanie zainstalowanych 18 modułów o łącznej mocy 2800 MW [18].

4.1.4. INNE KRAJE

- Indie, używające obecnie 16 reaktorów, budują sześć nowych, planują budowę 4 kolejnych.
- Japonia, posiada aktualnie 55 reaktorów atomowych, przystąpiła do budowy 2 nowych, planuje budowę dodatkowych 11
- Korea Południowa posiadająca 20 reaktorów jądrowych buduje kolejny oraz planuje budowę 7
- Rosja planuje budowę 8 reaktorów, aktualnie buduje 5, a ogłosiła utworzenie w sumie 18 nowych instalacji. Aktualnie Rosja posiada 31 reaktorów.

4.2. SYTUACJA ENERGETYCZNA POLSKI

Elektroenergetyka w Polsce od paru lat przeżywa trudne chwile [3]. Wiele firm związanych z sektorem energetycznym ma problemy z utrzymaniem płynności finansowej ze względu na rozbieżności między przychodami (które ograniczają taryfy regulujące) a wydatkami na zakup paliw i usług po wciąż rosnących cenach rynkowych. Co więcej – poziom operacyjnych rezerw mocy co jakiś czas spada poniżej dopuszczalnych poziomów minimalnych. Także przyjęte limity uprawnień do emisji CO₂ wymagane przez Komisję Europejską powiększają problemy z dostępnością mocy. Obecny kryzys, hamujący szybki rozwój gospodarczy (za którym idzie wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną i wzrost wymaganej mocy szczytowej elektrowni) może akurat w tym przypadku przytłumić te problemy – jednakże nadal sytuacja taka nie będzie przekładała się na pozytywne sygnały ekonomiczne, mogące inicjować niezbędne działania inwestycyjne. W związku z tym przez

najbliższe lata może Polsce grozić utrata ciągłości dostaw energii – chyba że podjęte zostaną szybkie działania dla odwrócenia trendów – takie jak budowa nowych źródeł wytwórczych.

Polska posiada duże zasoby paliw tradycyjnych – węgla kamiennego i węgla brunatnego. To one stanowią naturalne źródło energii pierwotnej, czyniąc z Polski państwo o wysokiej niezależności energetycznej. w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym udział mocy od elektrowni i elektrociepłowni spalających węgiel przekracza 90%, ok. 6% mocy pochodzi z hydroelektrowni, ok. 2,5% elektrowni jest opartych o gaz, zaś reszta mocy, czyli ok. 1% pochodzi z energetyki odnawialnej [3].

W związku z tym prawidłowy i szybki rozwój energetyki polskiej wymaga także dużych inwestycji w przemysł węglowy – aby był on czystszy i wydajniejszy. I choć węgiel kojarzony jest z energetyką dawną, szkodzącą środowisku, to surowiec ten obecnie można przetwarzać tak, by emisja CO₂ była minimalna. Ponadto jest on gwarantem bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej w kraju. Stąd też w Polsce istnieje duże zainteresowanie nowymi technologiami wykorzystania węgla, które nie tylko są bezpieczne dla środowiska i zwiększają ich sprawność, a także na przykład umożliwią przetworzenie węgla w paliwa węglowodorowe przy ograniczonej emisji CO₂.

Należy też pamiętać, że zasoby węgla są ograniczone – w większej perspektywie czasowej bardziej opłacalne jest zaangażowanie Polski w technologie jądrowe w celach wytwarzania energii elektrycznej i skupienie się na przetwarzaniu węgla w mniejszych ilościach – do celów przemysłowych. W związku z tym – obecnie, przejściowo, bardzo korzystne byłoby wykorzystanie możliwości synergii technologii węglowej i jądrowej.

Jak podaje [3] oczekuje się szybkiego rozwoju energetyki odnawialnej, posiadającej dość dobre warunki do inwestowania. „Zasadne wydaje się pilne podjęcie skutecznego programu budowy elektrowni atomowych, przy czym pierwszych mocy nie należy się spodziewać przed rokiem 2025, a zauważalnego udziału przed rokiem 2030. Za podjęciem takiego programu przemawiają względy ekologiczne, jak również pozytywne nastawienie rządów i społeczeństw niektórych krajów europejskich, w tym Skandynawii, czy Wielkiej Brytanii”[3]. Stwierdzenie to pochodzi sprzed ogłoszenia przez rząd polski budowy 2 elektrowni jądrowych [17]

Pamiętając o synergii węglowo jądrowej musimy mieć na uwadze, że, choć węgiel jest naszym bogactwem narodowym, to korzystanie z tego bogactwa jest coraz trudniejsze i droższe. Wynika to głównie z europejskich regulacji i ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Jednakże, jak podaje [3]:

„Nie ulega wątpliwości, że przyszłość węgla w energetyce musi uwzględniać 2 etapy:

- *wdrażanie wysokosprawnych technologii na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne,*
- *spalanie bezemisyjne w powiązaniu z usuwaniem CO₂ ze spalin i jego geologicznym składowaniem.*

Ze względu na swą strukturę zużycia paliw Polska musi priorytetowo przygotować i realizować oba powyższe programy z uwzględnieniem uwarunkowań ekonomicznych i społecznych.”

Ogromną pomoc we wdrażaniu technologii czystego węgla można uzyskać stosując do celów przemysłowych instalacje elektrowni wysokotemperaturowych – to one będą dostarczać niezbędnych temperatur do przetwarzania węgla, zwiększając zarazem jego atrakcyjność ekonomiczną. Synergia taka dla Polski może być najbardziej opłacalna, ze względu na dużą ilość potencjalnych miejsc zastosowania (w Polsce istnieje duża ilość fabryk i zakładów petrochemicznych, chemicznych i innych, w których takie technologie mogłyby znaleźć zastosowanie).

Obecnie, po ogłoszeniu budowy w Polsce 2 elektrowni jądrowych [17], nastąpił czas na niezbędne przygotowania do wdrożenia programu rozwoju energetyki atomowej. Obejmuje to cztery główne obszary działań, które szybko muszą zostać podjęte (wg. [3]):

- a) ustalenie regulacji prawnych organizujących rozwój energetyki atomowej,
- b) rozwój infrastruktury technicznej wspomagającej pracę reaktorów jądrowych (ustanowienie systemu gospodarowania wypalonym paliwem, zmiany w systemie przesyłowym energii itp.),
- c) prace przedinwestycyjne,
- d) budowa i uruchomienie elektrowni.

Patrząc na historię innych krajów uruchomienie pierwszej elektrowni atomowej zajmuje co najmniej 13 lat. Należy też pamiętać że w Polsce istnieje jeszcze jedna bariera wprowadzenia energetyki jądrowej – brak wykwalifikowanych kadr (jest to związane z luką powstałą po rozproszeniu specjalistów przygotowujących budowę Elektrowni Jądrowej Żarnowiec).

5. POTENCJALNE ZASTOSOWANIA SYNERGII WĘGLOWO – JĄDROWEJ W POLSCE

Najbardziej opłacalnym zastosowaniem synergii węglowo – jądrowej w Polsce jest budowa takiej instalacji w pobliżu dużych przedsiębiorstw przemysłowych, które mogłyby wykorzystywać ciepłoz wysokotemperaturowych reaktorów w procesach przemysłowych – do takich miejsc należą np. Zakłady Azotowe w Kędzierzynie, Zakłady w Puławach, Policach, Płocku. Budowa reaktora wysokotemperaturowego mogła by być także rozważona w pobliżu kopalni węglowych – takie rozwiązanie spotkało się z zainteresowaniem Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze i Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach.

Początkowo należałoby rozważyć budowę instalacji demonstracyjno – eksperymentalnej, w połączeniu np. z układami do przeróbki węgla. Budowa pilotażowych instalacji do zbadania możliwości przemysłowego wykorzystania helu jest często wymieniana w istniejących programach badawczych, jest też np. przewidziana w europejskim programie budowy reaktorów wysoko-temperaturowych RAPHAEL.

Innym ciekawym zastosowaniem byłaby budowa reaktora wysokotemperaturowego w pobliżu rafinerii – nowoczesne procesy rafinacji ropy naftowej wykorzystują duże ilości H_2 , który obecnie pozyskiwany jest z gazu ziemnego – importowanego z Rosji – do przerabiania pozostałości po procesach rafinacji w celu uzyskania pełnowartościowych produktów. Zmniejszyłoby to także krajowe zapotrzebowanie na gaz ziemny.

Podsumowując, w Polsce reaktory jądrowe mogłyby pracować w synergii z przemysłowymi procesami przetwarzania węgla (i nie tylko) wraz z:

- przemysłem węglowym, tj. kopalniami, instytutami przetwarzającymi węgiel – np. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze i Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach, Śląsk Klaster Czystych Technologii Węglowych
- przemysłem petrochemicznym – jako wsparcie dla procesów
- przy zakładach przetwarzających gaz syntezowy (do produkcji m. in. amoniaku, metanolu, nawozów sztucznych, biopaliwa) – np. zakłady Azotowe w Puławach, Kędzierzynie, itp.

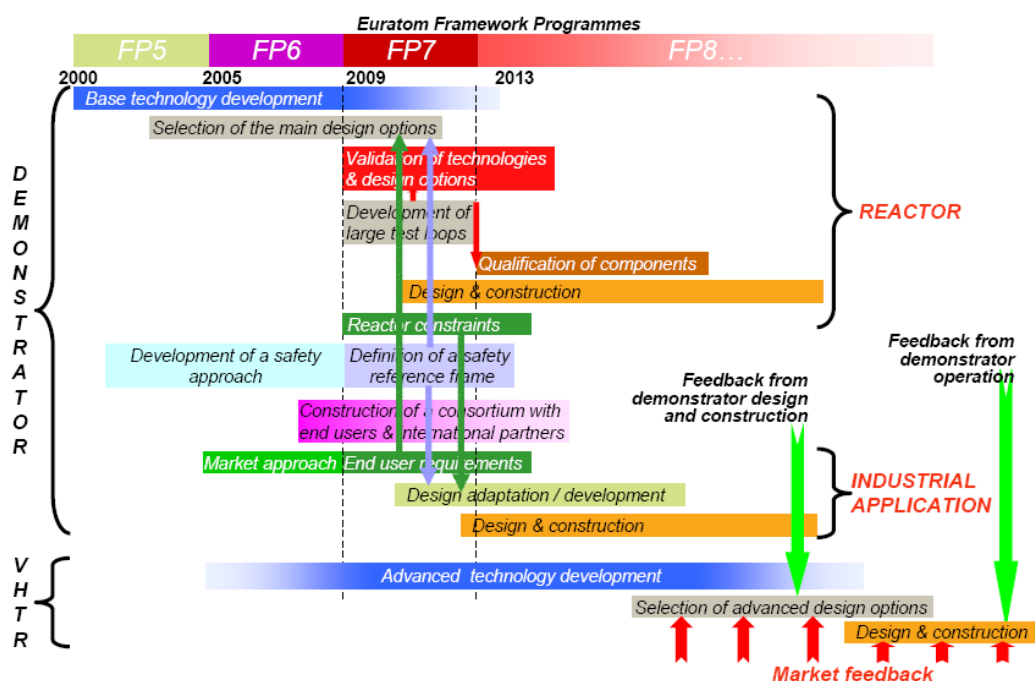
Obecnie wiele ośrodków naukowych, w tym instytutów i uczelni, skupionych jest wokół projektu synergii węglowo – jądrowej (m.in. Politechnika Warszawska, Politechnika Śląska oraz – szczególnie silnie – Akademia Górniczo – Hutnicza) jest zaangażowanych w wiele programów rozwijających technologie sekwestracji CO_2 – w tym wychwyty, transport i składowanie. Podczas gdy instalacje umożliwiające transport i wychwyty dwutlenku węgla w skali przemysłowej są już dziś możliwe do budowy, to badania nad składowaniem go są wciąż w fazie

rozwojowej (przeszkodą jest brak wielkoskalowych pokładów geologicznych umożliwiających składowanie CO₂ w zakresie przemysłowym. Zatem – posiadając w Polsce ośrodki prowadzące zaawansowane prace nad systemami przechwytywania i transportowania dwutlenku węgla oraz nie posiadając jeszcze możliwości składowania go – można to wykorzystać do utworzenia programu badawczego recyklingu dwutlenku węgla – opartego właśnie o technologie synergii węglowo – jądrowej i reaktor wysokotemperaturowy. Zwiększy on – oprócz rozwoju technologii synergii – szansę, wykorzystania istniejących badań nad sekwestracją CO₂ nawet w przypadku załamania programu składowania dwutlenku węgla.

Podsumowując – energetyka jądrowa w synergii z technologiami czystego węgla wskazuje alternatywne źródło poszukiwanych paliw węglowodorowych, ale także i konkurencyjnym rozwiązaniem dla obecnych technologii stosowanych w przemyśle chemicznym i węglowym.

6. PODSUMOWANIE

Aby możliwe było wprowadzenie synergii węglowo – jądrowej w Polsce muszą wprawdzie zostać zbudowane pierwsze instalacje demonstracyjne reaktorów wysokotemperaturowych. Poniżej znajduje się schemat przedstawiający fundusze Euratom, jakie były i będą przeznaczane na poszczególne etapy wprowadzania technologii VHTR – o te fundusze, przy dobrze przemyślanej strategii rozwoju – Polska może się starać nawet dziś (aktualnie otwarty jest 7 program ramowy)



Rysunek 13 Strategia rozwoju technologii HTR/VHTR w Europie [23]

Powyższa ilustracja pokazuje, że budowa demonstracyjnego reaktora VHTR zależy nie tylko od rozwoju samych technologii jądrowych, ale także rozwoju technologii wykorzystania ich możliwości. W przypadku rozważanej synergii węglowo – jądrowej są to technologie czystego przetwarzania węgla. Ważny jest także rynek nabywców. Ponieważ w Polsce taki rynek istnieje, prace nad czystym przetwarzaniem węgla trwają – Polska staje się odpowiednim kandydatem do utworzenia w niej ośrodka badawczo – demonstracyjnego. Zadaniem takiego ośrodka (w przypadku niskich nakładów finansowych można by było nawet rozważyć zasilanie klasycznym źródłem ciepła) byłoby opracowanie i wdrożenie najefektywniejszych metod sprzęgnięcia reaktora wysokotemperaturowego z procesami przemysłowymi.

Patrząc bardziej globalnie – w perspektywie całej Europy – obecnie zostało powołanych wiele grup roboczych zajmujących się rozwiązaniem między innymi w/w zagadnień dotyczących synergii węglowo-jądrowej. Grupy te pracują w ramach platformy technologicznej Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, SNE-TP [11]. Uczestniczą w nich także przedstawiciele polskich instytucji na czele z konsorcjum badawczym HTRP (High Temperature Reactor in Poland). Grupa, zajmująca się tematem synergii węglowo-jądrowej - „Working group for industrial process heat applications of nuclear energy” ma między innymi zająć się utworzeniem w Europie ośrodka skupiającego badania technologii wysokotemperaturowych, powyżej 600°C.

Powołanie takiego ośrodka w Polsce powinno zatem stać się priorytetem w działaniach dokonywanych na arenie międzynarodowej nie tylko przez władze, ale także przez polskie firmy i kompanie przemysłowe, gdyż tylko we współpracy z nimi – „synergii rządowo – industrialnej” byłoby możliwe przedstawienie oferty najbardziej konkurencyjnej.

Jeżeli program synergii węglowo – jądrowej zostałby w Polsce wdrożony, pozwoliłby to na:

- poprawienie sytuacji energetycznej kraju,
- wsparcie energetyki węglowej w redukcji emisji CO₂,
- wsparcie zakładów przetwarzania węgla poprzez utworzenie nowych możliwości jego wykorzystania,
- wsparcie dla projektu budowy tradycyjnych elektrowni jądrowych typu LWR,

Podjęcie działań w kierunku rozwoju aplikacji technologii atomowych w połączeniu z przemysłem stawiałoby Polskę automatycznie jako partnera dla zagranicznych projektów, w tym:

- programu NGNP powstającego przy dużym udziale USA
- programu PBMR w Południowej Afryce,
- programu ANTARES firmy Areva we Francji,

„W historii naszej cywilizacji kryzysy energetyczne już się zdarzały i w ich pokonaniu zawsze istotną rolę odgrywały nowatorskie technologie. Dzięki silnej pozycji naszego węgla i dla tworzenia jego siły w przyszłości program badawczy sprzęgający węgiel z energią jądrową jest i celowy, i możliwy do zrealizowania w Polsce (..)” [10]

Realizacja programu synergii węglowo - jądrowej zapewniłaby zrównoważony rozwój energetyki polskiej stanowiąc kolejny krok na technologicznej drodze postępu Europy i świata.

7. BIBLIOGRAFIA I PRZYPISY

- [1]. *Design Criteria for the HTR Core*, Jan Leen Kloosterman, Physics of Nuclear Reactors, TU Delft 20.11.2008,
- [2]. *Systemy elektrowni jądrowych Generacji IV, ekonomicznie konkurencyjnych, bezpiecznych oraz niepodatnych na wykorzystanie dla celów produkcji broni jądrowej*, S. M. Modro Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Tłumaczenie dostępne na: http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/strona_konferencja_2003/EPS2003_07pl.pdf,
- [3]. *Najważniejsze Zagadnienia Dotyczące Funkcjonowania Sektora Elektroenergetycznego W Polsce*, Stefania Kasprzyk, Katarzyna Muszkat, Henryk Majchrzak, Kazimierz Szynol, Jacek Kaczorowski, Stanisław Poręba, Hanna Trojanowska, 02.2008 Raport dostępny w Centrum Informacji o Rynku Energetycznym i na stronie www: http://www.cire.pl/pdf.php?plik=/pliki/2/najwaz_zagad.pdf,
- [4]. *Synergia węgla i atomu*, dr Ludwik Pieńkowski, Rurociągi Nr 4/45/2006,
- [5]. *Synergia Węglowo-Jądrowa - perspektywa technologiczna dla wielkiej syntezy chemicznej w Polsce*, dr Ludwik Pieńkowski, CHEMIK nauka-technika-rynek, 2008, 61, nr 11,
- [6]. *Energia jądrowa – mit i rzeczywistość. O zagrożeniach związanych z energią jądrową i jej perspektywach w przyszłości*, Felix Christian Matthes et al. Fundacja im. Hienricha Bolla, wyd. WISE, Warszawa 2006,
- [7]. *A new impetus for developing industrial process heat applications of HTR in Europe* – materiały z konferencji Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR-2008 September 28-October 1, 2008, Washington, D.C., USA,
- [8]. *The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – A vision report*, European Commission Directorate-General for Research, Euratom - EUR 22842, http://www.snetp.eu/home/liblocal/docs/snetp_vision_report_eur22842_en.pdf,
- [9]. *Synthesis of information on non-electricity applications of nuclear energy: data collection on available non-nuclear processes and coupling with nuclear reactors*, K. Verfondern, W. von Lensa, Michelangelo Network Project of the Euratom FP5, Work Package 4, MICANET-02/06-D-4.12.0, Rev.2 (2003),
- [10]. *Energetyka Jądrowa w Polsce. Synergia przemysłu węglowego i energii jądrowej*, dr hab. Ludwik Pieńkowski, Polityka Energetyczna, Tom 9 Zeszyt specjalny 2006 PL ISSN 1429-6675, http://www.min-pan.krakow.pl/se/pelne_teksty20/k20_pienkowski.pdf,
- [11]. *Materiały HTR-TN: High Temperature Reactor – Technology Network* <https://odin.jrc.nl/htr-tn/>, <http://www.raphael-project.org>,
- [12]. *Materiały promocyjne*, firma Areva, Francja, <http://www.areva.com>, <http://www.areva-np.com/us/liblocal/docs/EPR/ANTARES.pdf>,
- [13]. *Reaktory wysokotemperaturowe – historia*, Stefan Tanczanowski SLCJ UW, www.slcj.uw.edu.pl/htrp/PrezentacjePAA-RdSA-28-Jun-2006/Taczanowski-histhtr.pdf,
- [14]. *Polish Clean CoalTechnology Initiatives*, Andrzej Siemiaszko, National Contact Point For European Research Programmes www.kpk.gov.pl/pliki/plik.html?id=9344,
- [15]. Konsorcjum HTRP – informacje <http://www.slcj.uw.edu.pl/htrp/>,
- [16]. www.komitetlegnica.agh.edu.pl/aktualnosci/2/Jelen.pdf,
- [17]. Uchwała Rady Ministrów z dnia 12 stycznia 2009 <http://www.kprm.gov.pl/s.php?doc=1753>,
- [18]. <http://nextbigfuture.com/2008/06/worlds-first-commercial-high.html>,
- [19]. <http://web.mit.edu/pebble-bed/index.html>,
- [20]. <http://www.asmeconferences.org/HTR08/>,
- [21]. <http://en.wikipedia.org/wiki/THTR-300>,
- [22]. http://en.wikipedia.org/wiki/Pebble_bed_reactor,
- [23]. <http://www.snetp.eu>,