

131/2001

AC8/4

**Raport Badawczy**

**RB/84/2001**

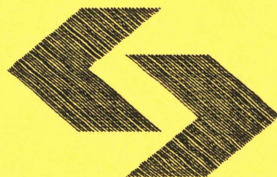
**Research Report**

**Ograniczenia perspektyw  
stosowania energii jądrowej**

**W. Ciechanowicz**

**Instytut Badań Systemowych  
Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute  
Polish Academy of Sciences**



# **POLSKA AKADEMIA NAUK**

## **Instytut Badań Systemowych**

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Pracę zgłosił: dr inż. Piotr Holnicki

Warszawa 2001

# Ograniczenia perspektyw stosowania energii jądrowej

W. Ciechanowicz

*Warunkiem wyboru źródła energii przyszłości jest nie tylko jego neutralność ze względu na emisję gazów cieplarnianych, ale także ze względu na zrównoważony rozwój w skali kuli ziemskiej i w długim horyzoncie czasu w sensie konieczności zachowania środowiska dla przyszłych pokoleń ludzkości. Treścią rozdziału są informacje, pozwalające wyjaśnić, czy energia jądrowa będzie w stanie spełniać te warunki.*

*Można wyróżnić niejako dwie koncepcje strategii rozwoju systemu energii jądrowej: z lat siedemdziesiątych i lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Celem pierwszej było, obok produkcji energii, powielanie materiałów rozszczepialnych. Celem drugiej ma być produkcja energii i materiałów rozszczepialnych oraz transmutacja radioaktywnych odpadów do mniej szkodliwych substancji, aby w ten sposób minimalizować konieczność geologicznego składowania wysoko radioaktywnych odpadów jądrowych.*

*W przypadku pierwszej koncepcji, podstawowymi elementami tworzącymi system energii jądrowej były:*

- reaktory termiczne, produkujące energię elektryczną,
- reaktory prędkie, produkujące nie tylko energię elektryczną ale także materiały rozszczepialne.

*Dруга koncepcja miałyby obejmować:*

- reaktory termiczne samozabezpieczające się,
- układ hybrydowy, którego elementami współtworzącymi byłyby:
  - akcelerator jako zewnętrzne źródło protonów (w konsekwencji przyczyniający się do produkcji nadmiaru neutronów),
  - zestaw podkrytyczny mnożący neutrony, rozumiany jako reaktor termiczny podkrytyczny lub prędkie podkrytyczne.

*Układ hybrydowy ma pracować w systemie energetycznym jądrowym, obejmującym reaktory jądrowe i akceleratory, produkując energię elektryczną i materiały rozszczepialne dla reaktorów termicznych samozabezpieczających się, oraz dokonywać transmutacji odpadów radioaktywnych termicznych reaktorów samozabezpieczających się do mniej szkodliwych substancji radioaktywnych.*

## 1. Uwagi wstępne

Istnienie świata roślinnego determinuje nie tylko energia słoneczna, ale także energia wnętrza skorupy ziemskiej. Gdyby w skorupie ziemskiej nie występowały źródła ciepła, zmarzłina nie zdatna do upraw roślinnych występowałaby na całej powierzchni ziemi. Przypuszcza się, że źródłem energii wewnętrznej skorupy ziemskiej jest bardzo powolny rozpad radioaktywny uranu, toru i potasu. Rozpadowi radioaktywnemu izotopów towarzyszy wydzielanie ciepła. Należy zauważyć, że w przypadku toru okres połowicznego rozpadu wynosi 13,9 miliardów lat, gdy okres istnienia kuli ziemskiej ocenia się na 2 miliardy lat.

Jedynym materiałem rozszczepialnym, będącym źródłem neutronów, stworzonym przez naturę, jest uran U-235. Stanowi on 0,7 % złóż naturalnego uranu U-238. Posiadanie tego

materiału pozwoliło w 1938 roku przeprowadzić pierwszą reakcję rozszczepienia jądra atomowego.

W 1941 roku wyprodukowano pluton Pu-239 z uranu U-238, silną trucizną nie tylko radioaktywną ale także toksyczną. W dalszej kolejności, w wyniku reakcji neutronowych uzyskano uran U-233 z toru Th-232. W ten sposób, człowiek, wykorzystując obecność - w postaci szczątkowej - uranu U-235 w naturalnym uranie, stworzył nie tylko możliwości uzyskiwania ogromnych mocy energetycznych, ale także plutonu Pu-239, o stałej połowicznego rozpadu wynoszącej 24000 lat. Stworzył więc wielkie zagrożenie dla istnienia życia na kuli ziemskiej.

Uzyskiwanie ogromnych mocy energetycznych na bazie reaktorów termicznych ogranicza wielkość zasobów uranu U-235. Ilość energii możliwa do pozyskania z najtańszych złóż o kosztach wydobycia poniżej 22 \$(1974) za kg  $U_3O_8$  w obecnie produkowanych reaktorach, które wypalają jedynie U-235, wynosi bowiem  $0.1 \cdot 10^{12}$  GJ, co jest równoważne 4 mld ton węgla o wartości opałowej 25 GJ/tonę [1, 2]. Przewidywane zapotrzebowanie energii pierwotnej w skali świata w 2030 roku ocenia się na  $0.6 \cdot 10^{12}$  GJ, co jest równoważne 24 mld ton węgla rocznie. Gdyby całość tych złóż (o kosztach 22 \$ za kg  $U_3O_8$ ) wykorzystywać w reaktorach prędkich powielających, uzyskałoby się równowartość 400 mld ton węgla.

Paliwem jądrowym występującym w naturze jest także tor Th-232, jako materiał rodny dla uranu U-233. Złoża toru przekraczają trzykrotnie zasoby uranu. Jednakże jedynym producentem U-233 z Th-232 mogą być tylko reaktory prędkie powielające na plutonie Pu-239. Wynika to z faktu, że spośród pierwiastków rozszczepialnych tylko pluton, i to w zakresie neutronów o wysokich energiach, poruszających się z prędkością około 1/10 prędkości światła, a więc w zakresie neutronów prędkich, może w wyniku reakcji rozszczepiania wytwarzać nadmiar neutronów wymagany w procesie powielania.

Ten typ reaktora powielającego, umożliwiającego prawie całkowite wypalanie paliw jądrowych, przewidywał już w 1942 roku Enrico Fermi, twórca pierwszego reaktora jądrowego, uruchomionego w 1942 roku w Chicago, współtwórca amerykańskiej bomby jądrowej. Nie mógł on wtedy przewidzieć konsekwencji stosowania reaktorów prędkich dla środowiska naturalnego.

Jak wynika z przedstawionych informacji, warunkiem wykorzystywania znacznych zasobów paliw jądrowych może być jedynie odpowiedni system energii jądrowej, realizujący określoną strategię jego rozwoju, a więc nie tylko wytwarzający energię, ale także będący w stanie powielać materiały rozszczepialne z materiałów rodnych. W chwili obecnej brak jest jeszcze takiego systemu. Jednakże, na przestrzeni ostatnich 50-ciu lat istniało i nadal istnieje szereg koncepcji tego typu systemów jądrowych.

W latach sześćdziesiątych, a następnie siedemdziesiątych, rozważano szereg koncepcji jądrowych systemów hybrydowych, produkujących energię i powielających materiały rozszczepialne z materiałów rodnych [4, 5].

W koncepcji strategii lat sześćdziesiątych główną uwagę zwrócono na takie materiały rozszczepialne, jak: U-235 i Pu-239. To spowodowało, że zainteresowanie koncentrowało się głównie wokół plutonu i reaktorów prędkich chłodzonych sodem. Według tej koncepcji:

- producentami plutonu na początku rozwoju systemu jądrowego miały być tylko reaktory lekkowodne termiczne, których rozwój miał mieć decydujące znaczenie dla rozwoju reaktorów prędkich powielających,
- strategia rozwoju miała dotyczyć jedynie współzawodnictwa pomiędzy różnymi typami reaktorów termicznych i reaktorami powielającymi.

W latach siedemdziesiątych koncepcja ta uległa modyfikacji. Przyczyną stał się fakt, że uran U-233 okazał się bardzo dobrym materiałem jądrowym, zdolnym wytwarzać nadmiar neutronów wymaganych w procesie powielania. Charakteryzuje się bardzo korzystną liczbą

neutronów powstałych w procesie rozszczepienia przypadającą na jeden neutron termiczny pochłonięty przez paliwo.

Pomimo wprowadzenia do koncepcji strategii lat siedemdziesiątych paliwa jądrowego w postaci toru Th-232, będącego materiałem rodzimym dla materiału rozszczepialnego U-233, i reaktorów jądrowych pracujących na uranie U-233, to nadal podstawową technologią powielania materiału rozszczepialnego z rodzego pozostał reaktor prędkości na plutonie chłodzony sodem. Przyczyną jest fakt, że reaktory na uranie U-233 są w stanie produkować tyle materiałów rozszczepialnych, ile same zużywają, a więc dla ich rozruchu wymagane są reaktory prędkie.

Awaria w Czarnobylu uświadomiła ludzkości naocznie, co oznacza, że siła trująca 1 grama plutonu jest porównywalna z 10 tonami cjanowodoru

Gdyby nie następowała odpowiednia przemiana paliwa wypalonego w elektrowniach zawodowych USA, to w okresie 1997 - 2050 ilość nagromadzonego plutonu wynosiłaby 5000 t, nie licząc zasobów plutonu nagromadzonego przed 1997 rokiem. Byłaby to truczina równoważna przynajmniej 50-ciu miliardom ton cjanowodoru. Niepokój wzmacnia informacja, że takie depozyty mogą stać się kopalnią plutonu, z którego można byłoby produkować broń jądrową. Pluton Pu-240 zawarty w odpadach radioaktywnych posiada okres połowicznego rozpadu 6600 lat. Po około 13000 lat odpady plutonu energetyki zawodowej, zawierające około 24 % Pu-240, ulegałyby transformacji do plutonu zawierającego około 6 % Pu-240. Mogłoby to być bezpośrednio wykorzystywane do produkcji broni jądrowej. Oznacza to, że naturalna transformacja plutonu energetycznego do plutonu Pu-239 stosowanego w broni jądrowej byłaby ogólnie dostępna i stanowiłaby zagrożenie dla cywilizacji w skali kuli ziemskiej.

Niezależnie od obaw społeczności, okazuje się, że wykorzystywanie reaktorów prędkich powielających, w jakiegokolwiek strategii rozwoju systemu jądrowego, byłoby ekonomicznie uzasadnione tylko wówczas, gdyby ceny uranu wzrosły czterokrotnie w stosunku do cen obecnie obowiązujących na rynku światowym.

Stało się to powodem do zaniechania rozwoju reaktorów prędkich w wielu krajach. I tak:

- prace badawcze nad reaktorem o mocy 1450 MW, opracowywanym w skali Unii Europejskiej, zostały wstrzymane,
- reaktor prędkości we Francji Superphenix został wyłączony,
- japoński prototypowy reaktor prędkości Monju, podłączony do sieci w 1995 roku, w wyniku awarii, polegającej na wycieku radioaktywnego sodu, został wyłączony,
- w 2000 roku żaden reaktor prędkości w USA nie jest podłączony do sieci.

Z przedstawionych informacji wynika podstawowy wniosek, że świat - ustanawiając energię jądrową jako przyszłe podstawowe źródło energii - musiałby zaakceptować określoną ceną tworzenia bezpiecznej alternatywy dla geologicznego gromadzenia długo żyjących, w sensie 30000 do kilku milionów lat, odpadów radioaktywnych.

Taką alternatywą stają się akceleratory protonów wysokich energii wspólnie z pasywnymi reaktorami termicznymi i podkrytycznymi zestawami mnożącymi neutrony. Stanowią one jedną z technologii, składających się na strategię rozwoju systemu energii jądrowej lat dziewięćdziesiątych. Akceleratory mają stanowić zewnętrzne źródło neutronów, wykorzystywane nie tylko w procesie powielania materiałów rozszczepialnych, ale także w procesie transmutacji długo żyjących, kilka milionów lat, radioaktywnych odpadów do krótko żyjących, poniżej 1000 lat, mniej szkodliwych odpadów radioaktywnych.

W niniejszym rozdziale omawia się dwie wyżej wymienione koncepcje strategii rozwoju systemu jądrowego, a więc strategii lat siedemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku.

Czyni się to dla uświadomienia faktu, że tak długo poszukuje się pożądanego rozwiązania. Ponadto nasuwa się wątpliwość, czy takie rozwiązanie, nie zagrażające istnieniu cywilizacji na kuli ziemskiej na przestrzeni wieków, istnieje. Jeżeli zaś nie ma uzasadnionej odpowiedzi na to pytanie, to należałoby poszukiwać innych rozwiązań bardziej bezpiecznych dla przyszłych generacji.

W przypadku pierwszej koncepcji, podstawowymi elementami są reaktory jądrowe, pracujące zarówno na neutronach termicznych jak i prędkich. W przypadku drugiej koncepcji są to: akceleratorzy jako zewnętrzne źródła protonów, zestawy podkrytyczne mnożące, rozumiane jako reaktory termiczne lub prędkie podkrytyczne, i reaktory termiczne samozabezpieczające się. Mają one pracować we wspólnym systemie, produkując energię i materiały rozszczepialne dla reaktorów termicznych samozabezpieczających się oraz dokonywać transmutacji odpadów radioaktywnych termicznych reaktorów samozabezpieczających się do mniej szkodliwych substancji radioaktywnych.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie informacji, na podstawie których można byłoby wnioskować, czy ostatnio proponowane koncepcje systemu jądrowego pozwolą zachowywać środowisko naturalne dla przyszłych pokoleń.

## *2. Nowoczesne układy samozabezpieczania się reaktorów termicznych*

Ostatnio, szczególnie po awarii w Czarnobylu w 1986 roku, w wielu krajach wzmaga się opór społeczeństwa przeciwko instalowaniu reaktorów jądrowych. Z drugiej strony uważano, że energia jądrowa przynajmniej w ciągu następnych 40 - 50-ciu lat miała być konieczna dla zaspokojenia popytu na energię i zmniejszanie emisji gazów cieplarnianych. Te czynniki, a także kapitał zaangażowany w przemysł jądrowy, przyczyniły się do opracowywania projektów nowej generacji reaktorów jądrowych. Projekty te uwzględniają znaczną liczbę rozwiązań innowacyjnych wprowadzanych do systemu bezpieczeństwa reaktorów jądrowych.

Wykorzystują one naturalne zjawiska, takie jak: grawitacja, cyrkulacja naturalna, energia akumulowana i odparowywanie. Jakikolwiek przepływ czynnika chłodzącego rdzeń reaktora w przypadku awarii będzie powodowany grawitacją, naturalną cyrkulacją lub nagromadzoną energią. Dlatego też proponowane systemy nie będą wymagać awaryjnego zasilania energią elektryczną. Projektowany system określa się jako pasywny układ samozabezpieczania reaktorów jądrowych. Projekty reaktorów o pasywnym samozabezpieczeniu się opracowano lub są w trakcie opracowywania przez szereg firm w USA, Kanadzie, Europie i Japonii.

### *Wpływ na środowisko*

Niebezpieczeństwo oddziaływania siłowni jądrowej na środowisko wynika z możliwości wystąpienia skażenia radioaktywnego. Podczas normalnej eksploatacji tych siłowni skażenie radioaktywne jest minimalne, a nawet mniejsze niżeli powodowane przez elektrownie węglowe. Jednakże ze względu na duże ilości materiałów radioaktywnych zawartych w reaktorze, wymagana jest niesłychana czujność, aby nie zezwolić na ucieczkę z reaktora nawet najmniejszej ich ilości. W tym celu reaktor jest objęty szeregiem układów zabezpieczających.

Z punktu widzenia prawdopodobieństwa występowania zakłóceń lub awarii można rozróżnić cztery podstawowe grupy.

Pierwsza grupa dotyczy tych zakłóceń, które zachodzą często w czasie normalnej eksploatacji. Są to zakłócenia, którym winien przeciwdziałać układ sterowania.

Druga grupa obejmuje wszystkie stany awaryjne, nie oczekiwane w czasie normalnej eksploatacji, ale mogące mieć miejsce w czasie życia siłowni, a mianowicie:

- awarie typu reaktywnościowego jak: wyrzucenie, usunięcie lub spadek pręta sterującego lub awaria w czasie rozruchu,
- utrata obciążenia, przepływu lub zasilania w obiegu wtórnym,
- zanik mocy zasilania poszczególnych elementów siłowni; pompy, układu sterowania,
- awaria zaworów,
- awaria układu zraszania (chłodzenia) i ogrzewania stabilizatora ciśnienia.

Trzecią grupę stanowią awarie, jakie mogą zachodzić w okresie 30 - 40 lat w zbudowanych siłowniach. Do czwartej grupy należą te, które są w zasadzie bardzo mało prawdopodobne, ale ich zaistnienie mogłoby mieć poważne konsekwencje dla otoczenia.

Układ zabezpieczeń jest z reguły przewidziany dla opanowania awarii należących do grupy drugiej.

Istnieje wiele problemów związanych z oddziaływaniem reaktorów na środowisko, właściwych tylko reaktorom powielającym chłodzonym sodem, a wywołanych przez:

- bardzo duże gęstości mocy w rdzeniu,
- obecność ciekłego sodu, który pali się w atmosferze powietrza i eksploduje w obecności wody.

Największe zagrożenie może stanowić pluton uczestniczący w dużych ilościach w cyklu paliwowym reaktorów powielających. Występują także problemy bezpieczeństwa związane z bezpośrednim wykorzystywaniem ciepła w procesach przemysłowych.

Opanowywanie nowej generacji reaktorów termicznych, posiadających zdolność samozabezpieczania się, może przyczynić się do większej akceptacji przez społeczeństwa wykorzystywania energii jądrowej rozszczepienia. Jednakże pozostaje problem gromadzenia wypalonego paliwa, zawierającego wiele radioaktywnych izotopów długo żyjących.

## 2. Paliwa jądrowe i cykle paliwowe

Kluczem do lepszego wykorzystania paliw jądrowych mogą być systemy jądrowe zdolne do jednoczesnego wytwarzania energii i paliwa jądrowego, jak Pu-239 i U-233.

W obecnie stosowanych reaktorach, w których paliwem jest U-235, cykl paliwowy obejmuje następujące etapy:

- uzyskanie rudy uranowej,
- przemiał rudy i oddzielanie części niemetalicznych,
- przemiana  $U_3O_8$  w  $UF_6$ ,
- rozdzielanie izotopów uranu w celu otrzymania uranu wzbogaconego w U-235,
- produkcja prętów paliwowych,
- wypalanie.

Wypalone paliwo może być składowane lub poddane przeróbce chemicznej. Celem przeróbki jest odzyskanie nieużytego paliwa. Proces ponownego włączenia do cyklu paliwowego nie zużytego paliwa lub materiału rozszczepialnego, uzyskiwanego w wyniku przemiany z materiału rodniego, nazywa się *recykлизacją*.

Cykle paliwowe różnią się w zależności od:

1. stosowanego paliwa w reaktorze - U-235, Pu-239, U-233,
2. powielanego materiału rodniego - U-238, Th-232.

### 3 Energia jądrowa syntezy

Energia jądrowa syntezy jako docelowe źródło energii jest atrakcyjna ekonomicznie, ale wciąż jeszcze obciążona niepewnością. Perspektywa uzyskiwania energii, której koszt ma wynosić 1 % kosztów paliwa reaktorów rozszczepieniowych, stymuluje dalsze badania. Wodór jako ogólnie dostępne paliwo dla reaktorów syntezy, mógłby znacznie zredukować współzawodnictwo w zdobywaniu światowych zasobów energetycznych i napięcia międzynarodowe. Zanim nastąpiłby rozwój technologii zapewniających wykorzystanie reaktorów syntezy do wytwarzania energii elektrycznej, mogłyby one być zastosowane jako producenci neutronów o bardzo wysokich energiach. Reaktory te mogłyby spełniać rolę powielania paliw jądrowych dla reaktorów rozszczepieniowych, przyczyniać się do rozwiązania problemu odpadów radioaktywnych.

#### 3.1 Stan rozwoju reaktorów syntezy termojądrowej

W wielu krajach świata, między innymi w USA, Rosji, Japonii, krajach Wspólnoty Europejskiej, a także w Polsce, Kanadzie, Finlandii i w Sudanie prowadzono prace naukowe nad programami badawczymi syntezy jądrowej [29]. Badania dotyczyły prac nad urządzeniami będącymi źródłami neutronów, a także nad opanowaniem naukowym i technologicznym czterech podstawowych, wyżej przedstawionych, koncepcji reaktorów syntezy jądrowej.

W USA planowano osiągnąć próg gotowości naukowej (a więc uzyskanie współczynnika wzmocnienia plazmy  $Q$  równego 1) w 1986 roku na urządzeniu TFTR (Tokamak Test Fusion Reactor). Planowano osiągnięcie progu gotowości technologicznej w latach 1991 - 1998, wykorzystując urządzenie ETR (Engineering Test Reactor). Próg gotowości ekonomicznej miałby być potwierdzony na FPD (Fusion Power Demonstration). Początek badań planowano w styczniu 1996 roku, a zakończenie badań w 2003 roku. Według dostępnej informacji nie osiągnięto dotychczas dodatniego bilansu energetycznego i nie określono kiedy mogłoby to nastąpić.

Uważa się, że najszybciej mogłyby znaleźć zastosowanie reaktory hybrydowe typu mirror, przeznaczone do praktycznego wykorzystania energii syntezy w sensie bezpośredniego wykorzystywania energii neutronów. Oczekiwano, że miało to nastąpić w latach 2000 - 2020.

Wydaje się, że brak jest odpowiedzi na pytanie, kiedy ludzkość zdobędzie nowe niewyczerpywalne źródło energii. Jednakże na drodze do tego celu powstaje wiele trudności. W związku z tym data opanowania przemysłowego reaktora termojądrowego jest trudna do przewidzenia.

#### 3.2 Znaczenie syntezy jądrowej

Energia syntezy  $D + T$  manifestuje się bezpośrednio w postaci:

- plazmy jako mieszaniny dodatnio naładowanych jonów i swobodnych elektronów,
- neutronów o bardzo wysokich energiach i promieniowaniu gamma,
- cząstek alfa.

Gdy nie występuje powielanie trytu, wówczas 80 % energii syntezy manifestuje się w postaci energii neutronów, a 20 % stanowi energia plazmy. Gdy równocześnie obok reakcji syntezy zachodzi powielanie trytu, rozkład energii jest następujący: plazma - 16 %, neutrony - 63 %, cząstki alfa - 21 %.

Wyżej wymienione postacie manifestowania się energii mogłyby być wykorzystywane:

- bezpośrednio jako energia neutronów, plazmy - cząsteczek zjonizowanych, promieniowania gamma,



- pośrednio jako ciepło ( plazma i neutrony), promieniowanie ultrafioletowe ( plazma), promieniowanie gamma (neutrony), promieniowanie alfa i protony (neutrony).

Reaktory syntezy mogłyby więc znaleźć zastosowanie w:

- reakcjach neutronowych prowadzących do powielania materiałów rozszczepialnych i transmutacji radioaktywnych odpadów do mniej szkodliwych substancji,
- reakcjach endotermicznych,
- procesach rozkładu substancji, stosując proces rozkładu radiolitycznego, dla przykładu wody dla uzyskiwania wodoru.

Produktem końcowym reaktorów syntezy mogłyby być:

- energia elektryczna,
- materiały rozszczepialne, jak Pu-239 i U-233, stosowane w reaktorach rozszczepieniowych,
- surowce, takie jak: aluminium, miedź, magnez, ozon,
- artykuły, takie jak: acetylen, amoniak, chlor, etylen, kwas fosforowy, cement, gips, hydrazyna, formaldehyd, witamina D.

Znaczenie reaktorów syntezy określają między innymi następujące fakty:

- możliwość bezpośredniego wykorzystywania wysokoenergetycznych neutronów,
- przewaga reaktorów syntezy nad rozszczepieniowymi ze względu na ochronę środowiska, bowiem występuje:
  - o wiele mniejsze zagrożenie skażeniem radioaktywnym,
  - o wiele mniejsze trudności związane z problemem cyklu paliwowego i odpadów radioaktywnych,
  - o wiele mniejszy okres połowicznego rozpadu odpadów radioaktywnych.

### 3.4 Wpływ na środowisko

Reaktor syntezy zawiera radioaktywny tryt. Ucieczka trytu w czasie ewentualnej awarii może stanowić zagrożenie życia ludzkiego. Neutrony powstałe w wyniku reakcji syntezy będą powodować skażenie radioaktywne elementów reaktora. Elementy te, wymieniane w czasie remontu, będą stanowić odpady radioaktywne.

#### *Mionowo-katalityczna synteza D-T*

Istnieje koncepcja, będąca przedmiotem badań naukowych, stwarzająca perspektywy osiągnięcia technologii stosunkowo prostej w porównaniu z obecnie opanowanymi reaktorami syntezy typu D-T.

#### **Znaczenie**

Reaktor mionowo-katalitycznej syntezy D-T może stanowić zamkniętą przestrzeń zawierającą mieszaninę D i T, do której wstrzykuje się strumień mionów, uzyskiwanych z akceleratora. Taki reaktor nie wymaga grzania plazmy i skupiania plazmy. Te ostatnie procesy są realizowane w bardzo złożonych elementach reaktorów syntezy typu Tokamak czy Mirror.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenie, jak również to, że synteza mionowo-katalityczna zachodzi przy temperaturach rzędu 1000 °K, należy sądzić, iż technologie omawianych reaktorów mogłyby być w przyszłości opanowywane przez szereg krajów o średnim potencjale przemysłowym.

Energia syntezy D-T manifestuje się między innymi w postaci neutronów o wysokich energiach. To stwarzałyby możliwość wykorzystania syntezy mionowo-katalitycznej w powielaniu materiałów rozszczepialnych i w procesach rozkładu radiolitycznego.

### 3.5 Koncepcje rozwoju systemów jądrowych lat siedemdziesiątych

#### *System jądrowy rozszczepienia*

W latach sześćdziesiątych, a następnie siedemdziesiątych, rozważano szereg koncepcji hybrydowych systemów jądrowych produkujących energię i powielających materiały rozszczepialne z materiałów rodnych. W koncepcji strategii lat sześćdziesiątych główną uwagę zwrócono na takie materiały rozszczepialne, jak U-235 i Pu-239. To spowodowało, że zainteresowanie koncentrowało się głównie wokół plutonu i reaktorów prędkich chłodzonych sodem.

Jak wspomniano poprzednio, zasadnicze cechy strategii sprowadzały się do tego, że:

- producentami plutonu na początku rozwoju systemu jądrowego miały być tylko reaktory lekkowodne termiczne, których rozwój miał mieć decydujące znaczenie dla rozwoju reaktorów prędkich powielających,
- strategia rozwoju miała dotyczyć jedynie współzawodnictwa pomiędzy reaktorami termicznymi i powielającymi.

Istniało szereg czynników, które przyczyniły się do zmiany koncepcji strategii rozwoju systemu jądrowego lat sześćdziesiątych i powstania koncepcji w latach siedemdziesiątych. Oto one:

1. Ciągły wzrost instalowanych mocy siłowni jądrowych. Oczekiwano, że w końcu lat 80-tych w całym świecie miało być zainstalowanych 230 000 MW.
2. Rozwój reaktorów powielających opóźnił się w stosunku do przewidywań.
3. Ceny surowców wzrosły niekiedy drastycznie.
4. Wystąpiły trudności w zaspakajaniu zapotrzebowania na paliwa kopalne.
5. Coraz większego znaczenia nabierało wykorzystywanie energii jądrowej do produkcji substytutów ropy i gazu, wodoru i węglowodorów, będących substytutami paliw kopalnych.

Przyjęto, że *paliwem docelowej generacji reaktorów będzie uran U-233*. Wybór U-233 jako paliwa wynika z dwóch przyczyn. Zasoby światowe toru Th-232, z którego uzyskuje się U-233, są około trzykrotnie większe od zasobów uranu U-238. Drugą przyczyną jest fakt, że U-233 okazał się bardzo dobrym materiałem jądrowym, charakteryzującym się wysoką wartością współczynnika przemiany  $\eta$ .

Wstępne studia we wczesnych latach pięćdziesiątych wykazały, że powielanie w reaktorach lekkowodnych nie jest możliwe. Dalsze badania wykazały możliwość powielania w reaktorach termicznych. Na podstawie tych wyników, uzyskanych dla reaktorów lekkowodnych, parametr  $\eta$  wynosi 2,3 w zakresie termicznych i pośrednich energii neutronów. U-233 okazał się bardzo dobrym paliwem i w reaktorach typu HTGR.

W tego typu reaktorach największą wartość  $\eta$  uzyskuje się dla plutonu, co powoduje, że właśnie pluton stał się paliwem reaktorów prędkich powielających. Ponadto przedstawione wartości  $\eta$  wskazują, że powielanie uranu U-233 jest możliwe w reaktorach termicznych pod warunkiem zachowania odpowiedniego bilansu neutronów, a więc zmniejszenia do minimum ucieczki neutronów i wychwytu pasożytniczego. Oznacza to, że wszystkie neutrony, nie wykorzystywane do podtrzymywania reakcji łańcuchowej, powinny być możliwie najlepiej zużyte w procesie przemiany. W tym celu należałoby:

- zmniejszyć wypalanie paliwa,
- stosować niższe gęstości mocy,
- dokonywać ciągłego przeładunku paliwa.

Redukcja miałaby na celu zmniejszanie udziału generowanych neutronów w reakcjach neutronowych, które nie prowadzą do rozszczepiania. W reaktorze typu HTGR o mocy 1160 MW redukcja wypalania z 95 MW d/kg do 31 MW d/kg pozwoliłaby zmniejszyć ten udział z 9,2 % do 4,5 %.

Niższa gęstość mocy to większy rdzeń, co w konsekwencji zmniejsza ucieczkę neutronów. W wyniku ciągłego przeładunku paliwa zmniejszałoby się nadmiar reaktywności między rocznymi przeładunkami paliwa i zmniejszałoby się strata neutronów w truciznach, regulujących krytyczność w okresie między przeładunkami.

Aby dla *docelowej generacji* uzyskać w wystarczającej ilości paliwo w postaci U-233, które nie występuje w naturze, należałoby wprowadzić do systemu jądrowego:

- *generację rozruchową* reaktorów na uranie U-235, produkujących Pu-239 z U-238 i U-233 z Th232.

Następnie w zależności od zakładanej szybkości wzrostu mocy generacji docelowej, a więc zapotrzebowania na U-233, wprowadzać dodatkowo

- *generację pośrednią* reaktorów prędkich powielających, także produkujących U-233.

Jedną z pierwszych proponowanych struktur systemu energii jądrowej rozszczepienia, która obejmowała trzy generacje reaktorów: rozruchową, pośrednią i docelową, miałyby wykorzystywać następujące typy reaktorów:

- reaktory lekkowodne,
- reaktory wysokotemperaturowe na uranie U-233,
- reaktory powielające na plutonie Pu-239.

Generację rozruchową miały stanowić reaktory lekkowodne i wysokotemperaturowe, uruchamiane przy wykorzystywaniu U-235. Pluton, produkowany przez reaktory lekkowodne, zamierzano magazynować do wymaganej ilości przez reaktory generacji pośredniej.

Zadaniem generacji pośredniej planowano powierzać reaktorom powielającym, produkującym Pu-239 i U-233, do uruchomienia których miał być wykorzystywany poprzednio zmagazynowany Pu-239.

Generację docelową miały tworzyć reaktory termiczne samopodtrzymujące się, uruchamiane przy wykorzystaniu U-233 i reaktory wysokotemperaturowe z recykлизacją i uzupełnianiem U-233.

Realizacja jakiegokolwiek systemu jądrowego rozszczepienia rodzi wiele punktów kontaktowych zagrożeń radiologicznego, w których obok uranu U-235 i U-233 paliwem jest także pluton Pu-239. W przypadku systemu jądrowego rozszczepienia istnieje pięć takich punktów radiologicznego zagrożenia. Są to:

- kopalnie materiałów rodnych jak U-238 i Th-232,
- produkcja elementów paliwowych,
- wypalanie paliwa jądrowego i produkcja radioizotopów,
- przeróbka paliwa wypalonego i oddzielanie izotopów,
- składowanie odpadów paliwa jądrowego.

W najgorszym przypadku w czasie awarii może następować wykładniczy wzrost mocy reaktorów. W tej sytuacji największe zagrożenie dla środowiska stanowiłby reaktor prędkiej,

którego paliwem jest pluton. Ulega on rozpadowi emitując cząstki  $\alpha$  o energii 5 MeV, a czas jego połowicznego rozpadu wynosi 24000 lat. Promieniowanie to jest absorbowane przez szpik kostny. Innymi produktami rozszczepienia, stanowiącymi zagrożenie dla zdrowia ludzkiego, są: argon 41, kobalt 60, cez 137, jod 131, krypton 85 i stront 90.

Osobny problem stanowi konieczność magazynowania przez wiele tysięcy a nawet milionów lat odpadów radioaktywnych. Koncepcja systemu jądrowego rozszczepienia lat dziewięćdziesiątych, obejmującego układy powielające i transmutujące długo żyjące radioaktywne odpady do mniej szkodliwych, stawia sobie za cel rozwiązanie tego problemu.

### *Uwagi*

Koncepcje systemów jądrowych energia syntezy - energia rozszczepienia bazowały na technologiach, które w latach siedemdziesiątych były na etapie badań eksperymentalnych lub na koncepcjach teoretycznych, takich jak mionowo - katalityczna synteza D-T. Celem tych rozważań było poszukiwanie technologii, pozwalających w przyszłości najefektywniej wykorzystywać paliwa jądrowe.

Motywacją do dalszych prac nad syntezą kontrolowaną jest przekonanie, że mogłaby ona w przyszłości pomniejszać szkodliwe oddziaływanie na środowisko naturalne, wynikające z rosnącego zapotrzebowania na energię w skali świata. Jednakże, chociaż odpady radioaktywne energii syntezy żyją krótko, to wytwarzaniu energii nadal towarzyszyłaby radioaktywność neutronów wysokich energii. Oznacza to, że zanim energia syntezy mogłaby stać się „czystym” źródłem energii, należałoby rozwiązać wiele zagadnień związanych między innymi ze: skupianiem magnetycznym, grzaniem plazmy, produkcją paliwa, nadprzewodzących magnesów. Wymagałoby to kontynuacji dotychczasowych wysiłków badawczych.

W zaistniałej sytuacji prowadzi się prace w ramach poszczególnych laboratoriów lub w współpracy międzynarodowej, mające na celu wykorzystywanie dotychczasowych osiągnięć w dziedzinie nauki i technologii energii syntezy między innymi w wytwarzaniu plazmy, diagnostyce, zastosowań wysokich temperatur w układach nadprzewodzących, wytwarzaniu strumieni jonów i neutralnych cząstek.

Nierozwiązywalne problemy z opanowaniem przemysłowym reaktorów powielających, względy ekonomiczne, a w końcu konsekwencje awarii w Czarnobylu stały się przyczyną zaniechania dalszych prac nad przedstawionymi powyżej koncepcjami systemu energii jądrowej rozszczepienia.

Osobny problem to konieczność magazynowania przez wiele tysięcy a nawet milionów lat odpadów radioaktywnych. W tablicy 1 przedstawiono dane charakteryzujące produkcję radioaktywnych odpadów powstających w czasie rocznej eksploatacji reaktora o mocy 3000 MW<sub>th</sub>, gdzie jeden kiur Ci jest to aktywność, przy której zachodzi  $3,7 \cdot 10^{10}$  rozpadów na sekundę. Z zamieszczonych danych wynika, że Pluton Pu-240 po około 13 tysiącach lat przemienia się w wyniku rozpadu radioaktywnego w pluton Pu-239, który może stanowić materiał do budowy bomby jądrowej.

Koncepcja systemu jądrowego rozszczepienia lat dziewięćdziesiątych, obejmującego układy powielające i transmutujące długo żyjące radioaktywne odpady do mniej szkodliwych substancji, stawia sobie za cel rozwiązanie problemu magazynowania tych odpadów. Różni się ona od koncepcji lat siedemdziesiątych tym, że - obok problemu efektywnego wykorzystania paliw jądrowych - głównym wymaganiam staje się dążenie do zapewnienia bezpieczeństwa dla środowiska naturalnego obecnie i w przyszłości.

Tablica 1. Charakterystyka długo żyjących radioaktywnych odpadów reaktora jądowego

Lp	Izotop	Roczna produkcja (atomów/rok) x 10 <sup>25</sup>	Okres połowicznego rozpadu, lata	Aktywność promie- niotwórczości - kiury
1	selen Se-79	0.13	65 000	11.9
2	stront Sr-90	9.00	29.1	1 860 000
3	cyrkon Zr-93	15.00	1 500 000	60
4	technet Tc-99	15.00	213 000	426
5	pallad Pd-107	4.10	6 500 000	3.8
6	cyna Sn-126	0.46	100 000	27
7	jod I-126	2.70	15 700 000	1.0
8	cez Cz-136	4.20	2 300 000	8.4
9	cez Cz-137	14.00	30.2	2 800 000
10	samar Sm-151	0.16	90	11 000
11	krypton Kr-85	1.00	10.7	560 000
12	pluton Pu-238	1.13	88	75 000
13	pluton Pu-239	41.60	24 100	10 000
14	pluton Pu-240	19.20	6 560	17 000
15	pluton Pu-241	6.40	14.4	2 700 000
16	pluton Pu-242	3.90	375 000	61
17	neptun Np-237	3.70	2 140 000	11
18	ameryk Am-241	4.10	433	55 000
19	ameryk Am-243	0.73	7 370	590

#### 4 Koncepcja rozwoju systemu jądowego lat dziewięćdziesiątych

##### 4.1 Uwagi wstępne

Jak podkreślano w poprzednich punktach, jednym z głównych zagrożeń związanych z wykorzystywaniem energii jądowej są odpady radioaktywne długo żyjące o wysokich energiach. Są one generowane w czasie eksploatacji reaktorów jądowych podczas wypalania paliwa jądowego. Jeżeli energia jądowa ma stanowić jedno z głównych źródeł energii w przyszłości, nie może stwarzać zagrożeń dla obecnej i przyszłych generacji ludzkości.

W ciągu ostatnich lat prowadzono wiele studiów w dziedzinie strategii zarządzania odpadami radioaktywnymi, polegającej na oddzielaniu i eliminowaniu radioaktywnych substancji z odpadów radioaktywnych. Wysiłki te podejmowano w wielu krajach, a także w skali międzynarodowej. Ostatnio proponuje się innowacyjną koncepcję budowy systemu hybrydowego, będącego połączeniem podkrytycznego reaktora jądowego i akceleratora cząstek elementarnych o wysokich energiach. System hybrydowy dokonywałby przemiany wysoko radioaktywnych substancji, charakteryzujących się okresem połowicznego rozpadu rzędu jednego miliona lat do substancji nie radioaktywnych lub do substancji o wiele krótszym okresie połowicznego rozpadu. Transmutacji odpadów towarzyszyłaby dodatkowa produkcja energii.

Technologie wykorzystywania akceleratorów do transmutacji substancji radioaktywnych w USA, określanych mianem „Accelerator-Driven Transmutation Technology” (ADTT), są rozpatrywane z trzech względów.

Pierwszym zagadnieniem jest redukcja nadmiaru plutonu powstałego w wyniku zmniejszania stanu broni jądowej, redukcja nagromadzonych długo żyjących radioaktywnych substancji i redukcja niskiej jakości plutonu jako odpadów towarzyszących produkcji bomb atomowych.

Drugim zagadnieniem jest unieszkodliwianie plutonu i innych długo żyjących substancji radioaktywnych, stanowiących odpady eksploatacji zawodowej energetyki jądrowej. Całkowita moc elektrowni jądrowych w USA w sierpniu 1996 roku wynosiła 361000 MWe (mocy elektrycznej a nie cieplnej). W warunkach normalnej eksploatacji, roczna produkcja paliwa wypalonego wynosiłaby w tych elektrowniach 11400 ton. Gdyby nie następowała odpowiednia przemiana paliwa wypalonego w elektrowniach zawodowych, to w okresie 1997 - 2050 ilość nagromadzonego plutonu wynosiłaby 5000 ton, nie licząc zasobów plutonu nagromadzonego przed 1997 rokiem [8].

Trzecim nie mniej istotnym zagadnieniem jest powielanie materiału rozszczepialnego U-233 z toru Th-232 jako materiału rodniego (a więc zastępowanie plutonu), z równoczesnym unieszkodliwianiem odpadów radioaktywnych reaktorów, których paliwem ma być U-233. Dzięki temu nie występowałaby konieczność gromadzenia odpadów w odpowiednich formacjach geologicznych, stanowiących niejako osłony przed promieniowaniem radioaktywnym. W ten sposób osłabiałoby się zagrożenie środowiska przez energię jądrową.

Niepokój wynikający z konieczności gromadzenia odpadów radioaktywnych przemysłu broni jądrowej i zawodowej energetyki jądrowej, urosł ostatnio w USA do takich rozmiarów, że stał się zasadniczym czynnikiem w przemyśle energii jądrowej. Dominującym rozwiązaniem problemu w ostatnich 30 latach było geologiczne gromadzenie odpadów. Niesłuchanie trudno przekonywać bowiem lokalne społeczeństwa, aby wyraziły zgodę na gromadzenie odpadów na ich terenie. Przeważająca większość społeczności traktuje te odpady jako najbardziej niebezpieczne dla życia ludności USA. Fakt, że odpady te będą stanowić zagrożenie przez wiele dziesiątków tysięcy lat pogłębia niepokój społeczeństwa. Niepokój wzmacnia informacja, że takie depozyty mogą stać się kopalnią plutonu, z którego można by produkować broń jądrową. Pluton Pu-240 zawarty w odpadach radioaktywnych posiada okres połowicznego rozpadu 6600 lat. Po około 13000 lat odpady plutonu w energetyce zawodowej, zawierające około 24% Pu-240, ulegałyby transformacji do plutonu zawierającego około 6 % Pu-240, który mógłby być bezpośrednio wykorzystywany do produkcji broni jądrowej [9, 10, 11]. Oznacza to, że naturalna transformacja plutonu energetycznego do plutonu stosowanego w broni jądrowej byłaby ogólnie dostępna i stanowiłaby zagrożenie dla cywilizacji w skali kuli ziemskiej.

Z przedstawionych informacji wynika podstawowy wniosek: jeżeli energia jądrowa ma stanowić przyszłe podstawowe źródło energii, to należy akceptować określoną cenę tworzenia bezpiecznej alternatywy dla geologicznego gromadzenia długo żyjących odpadów radioaktywnych.

Międzynarodowa Agencja Energii Jądrowej w Wiedniu organizowała szereg programów badawczych, celem których była budowa wyżej wymienionych systemów hybrydowych. Działania te zostały zapoczątkowane w 1994 roku na 38 Generalnej Konferencji Międzynarodowej Agencji Energii Jądrowej. Głównymi uczestnikami tej konferencji byli przedstawiciele następujących krajów: Francji, Japonii, Federacji Rosyjskiej, Szwecji, USA i Instytutu Badawczego CERN w Szwajcarii. Następnie, w 1995 roku miało miejsce spotkanie konsultacyjne dotyczące podsumowania dotychczasowych osiągnięć w pracach badawczych nad omawianym systemem hybrydowym. Należy podkreślić, że akceleratory mogłyby spełniać dodatkowe zadanie w przyszłym systemie energii jądrowej, a mianowicie mogłyby dokonywać powielania materiałów rozszczepialnych z materiałów rodnych, przede wszystkim z toru Th-232.

## 4.2 Rozwój akceleratorów

Istotnym zagadnieniem energii jądrowej jest ekonomia neutronów reakcji łańcuchowej rozszczepienia. Nadmiar neutronów, jeżeli jest osiągalny, może być wykorzystywany do przemiany nierozszczepialnych materiałów, tak zwanych rodnych, w paliwa jądrowe, jak również transmutacji długo żyjących radioaktywnych substancji do krótko żyjących radioaktywnych substancji, względnie nawet do substancji pozbawionych radioaktywności. Ten nadmiar neutronów może także być wykorzystywany do intensywnego wypalania paliwa jądrowego.

Jednym ze sposobów uzyskiwania dodatkowych neutronów jest system hybrydowy obejmujący podkrytyczny reaktor i akcelerator. W takim systemie, akcelerator bombarduje tarczę protonami o wysokich energiach, tworząc w ten sposób bardzo intensywne źródło neutronów. Neutrony te mogą być mnożone w podkrytycznym reaktorze otaczającym tarczę.

W latach 1975-88 prace dotyczące powielania materiałów rozszczepialnych były prowadzone na akceleratorach o energii 800 MeV.

Gdy Administracja Stanów Zjednoczonych podjęła decyzję o zaprzestaniu rozwoju prędkich reaktorów, zgodnie z polityką nierozprzestrzeniania materiałów wykorzystywanych w broni jądrowej, Brookhaven National Laboratory przedstawiło szereg propozycji budowy akceleratorów do powielania materiałów rozszczepialnych.

W ostatnich latach zaproponowano szereg koncepcji budowy systemów hybrydowych jako urządzeń powielających materiały rozszczepialne i transmutujących odpady radioaktywne do mniej szkodliwych substancji. Dotyczy to szczególnie projektu PHOENIX opracowywanego w Brookhaven National Laboratory, programu OMEGA podjętego w Japonii i programu realizowanego w Los Alamos National Laboratory.

Uruchomienie wyżej wymienionych projektów wynika z faktu zaprzestania geologicznego gromadzenia odpadów radioaktywnych w takich formacjach geologicznych, jak Góry Yucca w Dolinie Śmierci w USA. Istnieje niepokój, że geologiczne formacje i klimat mogą ulegać nieprzewidywalnym zmianom w okresie milionów lat. Ponadto fakt, że gromadzone odpady pozostają niebezpieczne przez wiele dziesiątek tysięcy lat, a także że mogą stanowić kopalnię plutonu, wzmacnia wspomniany niepokój [9].

### *Koncepcja „Accelerator-Driven Transmutation Technology” (ADTT)*

Ciekła sól nigdy nie opuszcza zbiornika, za wyjątkiem przeladowywania paliwa i usuwania odpadów. W związku z tym brak okoliczności ucieczki paliwa ze zbiornika. Jednakże istnieje problem gromadzenia mniej aktywnych odpadów układu ADEP. Dzieli się je na trzy klasy, A, B i C.

**Klasa A.** Do tej klasy zalicza się te odpady, które są najmniej szkodliwe i mogą być gromadzone na powierzchni ziemi. Jednakże przynajmniej przez 100 lat muszą być zabezpieczone przed oddziaływaniem powodzi i trzęsienia ziemi.

**Klasa B.** Do tej klasy zalicza się odpady, które mogą być szkodliwe dla otoczenia przez około 300 lat. Z tej przyczyny winny być składowane w kontenerach.

**Klasa C.** Ta klasa jest zarezerwowana dla opadów o wysokiej radioaktywności, które również wymagają składowania w kontenerach. Winny być składowane przynajmniej 5 metrów pod ziemią przez okres nie mniejszy niż 500 lat.

Zakłada się, że realizowany w Los Alamos projekt pod nazwą Accelerator-Driven Transmutation Technology Project, (ADTT), pozwoli unieszkodliwić zasoby plutonu

zbrojeniowego zawartego w broni jądrowej, a także być może wyeliminuje konieczność gromadzenia geologicznie wypalonego paliwa jądrowego.

Zasoby plutonu zbrojeniowego zawartego w broni jądrowej ocenia się na około 100 ton [11]. Istnieją trzy możliwe sposoby unieszkodliwienia tych zasobów:

1. wypalanie do stanu, jakim charakteryzuje się pluton handlowy stosowany w reaktorach prędkich,
2. gromadzenie geologiczne,
3. całkowite wypalanie plutonu zbrojeniowego.

Zasoby plutonu handlowego w skali świata oceniane są na 10-ciokrotnie większe w porównaniu do zasobów plutonu zbrojeniowego, a ponadto zasoby plutonu handlowego szybko wzrastają. W tej sytuacji USA sprzyja wypalaniu plutonu zbrojeniowego do stanu wypalanego paliwa w reaktorach.

Destrukcja wypalonego paliwa jądrowego reaktorów wymaga źródła zewnętrznego neutronów, którym może być akcelerator. Takim źródłem może być także wypalanie materiału jądrowego zawartego w broni jądrowej. Szczególnie, jeżeli weźmie się pod uwagę, że ten materiał stanowi bardzo wydajne źródło neutronów. Mając to na uwadze, w Los Alamos sugeruje się budowę układu hybrydowego, w którym zewnętrznym źródłem neutronów byłby nie tylko akcelerator, ale także neutrony pochodzące z rozszczepienia plutonu zbrojeniowego [10].

Podprojektem ADTT, realizowanym w pierwszej kolejności, jest projekt budowy akceleratora transmutacji odpadów ATW (Accelerator Transmutation of Waste) dla reaktorów termicznych. Jego zadaniem jest unieszkodliwienie długo żyjących radioaktywnych odpadów zawartych w wypalonym paliwie reaktorów jądrowych.

Kompleks ATW mają tworzyć następujące zakłady:

- przygotowania paliwa dla ATW (z wypalonego paliwa reaktorów lekkowodnych, wysokotemperaturowych i reaktorów ciężkowodnych na uranie naturalnym CANDU),
  - procesu separacji, w którym wydziela się produkty rozszczepienia wykorzystywane jako paliwo w układzie podkrytycznym i produkty rozszczepienia przeznaczone na składowanie geologiczne,
  - wytwarzania mocy elektrycznej.
- Tarcza układu ATW winna spełniać między innymi następujące wymagania:
- duża moc układu, do 200 MW,
  - wysoka przemiana proton - neutrony (duża liczba neutronów powstałych przypadająca na jeden proton uderzający w tarczę),
  - możliwie mały udział w konieczności składowania geologicznego odpadów.

Składowaniu geologicznemu na około 200 lat miałyby podlegać izotopy krótko żyjące radioaktywne odpady o bardzo wysokiej aktywności promieniotwórczej: cezu Cs-137, strontu Sr-90, kryptonu Kr-85 i plutonu Pu-241, spośród wszystkich izotopów występujących w wypalonym paliwie (tablica 1).

Zawodowa siłownia jądrowa, o typowej mocy termicznej 3000 MW<sub>th</sub>, produkuje rocznie, jako odpady, 300 kg plutonu i innych wysokoenergetycznych radioaktywnych izotopów zużywając 1200 kg materiałów rozszczepialnych w ciągu roku. Jeden układ hybrydowy typu ATW mógłby wypalać odpady z czterech takich reaktorów jądrowych, pod warunkiem, że techniczny czas życia układu ATW byłby identyczny jak reaktora lekkowodnego, a więc wynoszący 30 lat. Unieszkodliwianie odpadów ze 100 reaktorów lekkowodnych w USA, na 316 000 MW<sub>e</sub> zainstalowanej mocy, wymagałoby budowy około 25



układów hybrydowych typu ATW. Jednakże układy ATW musiałyby równocześnie likwidować odpady własne.

Obecnie USA i Federacja Rosyjska dokonują redukcji zapasów broni jądrowej. Tym samym uwalniają duże ilości wysoko wzbogaconego uranu i plutonu. Obydwa te materiały są znakomitymi źródłami neutronów, a więc idealnymi materiałami dla produkcji broni jądrowej. Neutrony są także potrzebne w procesie powielania materiałów rozszczepialnych i transmutacji długo żyjących izotopów wysokoenergetycznych. W długim okresie byłoby więc niebezpiecznie magazynować te materiały. Dlatego z pewnością będą musiały być unieszkodliwiane poprzez rozszczepianie w układach podkrytycznych mnożących. To może przyczynić się do zwiększenia efektywności układów hybrydowych transmutacji, zmniejszając prawie dwukrotnie ich rozmiary. W konsekwencji, zostaną stworzone bardziej ekonomicznie korzystne perspektywy ich rozwoju, a tym samym zastosowanie ich stanie się bardziej realne. Należy nadmienić, że koszt budowy jednego układu hybrydowego transmutacji oceniono na 2590 milionów \$.

Oczywiste jest, że technologie stosowane w układzie ATW nie były dotychczas opracowywane i nie są opanowane handlowo, tak jak technologie reaktorów jądrowych. Opanowanie ich przemysłowe będzie wymagało od USA wiele wysiłku i około 15 - 20 lat, nie mówiąc już o innych krajach, ponieważ technologie te nigdy przez nikogo nie były wykorzystywane, nie licząc małych układów eksperymentalnych.

## 5 Uwagi końcowe

W czasie technologicznego opanowywania reaktorów jądrowych było wiadomo, że myśląc o przyszłym rozwoju energetyki jądrowej należy poszukiwać alternatywy dla naturalnego paliwa jądrowego, jakim jest uran U-235. Alternatywę tę w postaci plutonu Pu-239 przewidywał w 1942 roku Enrico Fermi, twórca pierwszego reaktora jądrowego, uruchomionego w 1942 roku w Chicago. W końcu lat pięćdziesiątych tor Th-232 okazał się bardzo dobrym materiałem jądrowym jako materiał rodny dla uranu rozszczepialnego U-233. Stał się drugą potencjalną alternatywą dla naturalnego uranu U-235, pod warunkiem posiadania źródła neutronów, koniecznego dla produkcji U-233 z Th-232, a więc dla rozruchu reaktorów na uranie U-233.

W latach sześćdziesiątych, w początkowych latach rozwoju energetyki jądrowej, zainteresowanie koncentrowało się głównie wokół plutonu, jako materiału powielanego z uranu naturalnego U-238, i reaktorów prędkich chłodzonych sodem, uruchamianych na plutonie i produkujących pluton. Wiedzano, że istnieje możliwość powstawania dodatniego współczynnika próżniowego reaktywności w wyniku powstawania pęcherzyków próżniowych w ciekłym sodzie, co mogłoby zaistnieć przy odpowiednim wzroście temperatury w rdzeniu reaktora prędkiego chłodzonego ciekłym sodem. Konsekwencją takiego zjawiska mogłaby być awaria, w wyniku której pluton mógłby przedostać się do środowiska. Fakt ten nie przyczynił się w tym czasie do zaprzestania eksploatacji reaktorów prędkich, ale jedynie powodował wzmocnienie osłon biologicznych reaktora kolejnymi zbrojeniami betonowymi.

Problem skażenia środowiska plutonem nie był czynnikiem opóźniającym rozwój energetyki jądrowej. Rozwiązaniem problemu miało być składowanie geologiczne paliwa wypalonego, zawierającego między innymi pluton. Nie podawano do publicznej wiadomości, że wśród tego paliwa są zawarte długo żyjące wysoko radioaktywne izotopy o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym kilka milionów lat. Były sugestie wysyłania szkodliwych dla środowiska odpadów reaktorowych na Słońce.

Kryzys energetyczny w 1973 roku dał dalszy impuls do rozwoju nowych technologii reaktorów jądrowych, których koncepcje omawiano na międzynarodowej konferencji w Londynie w listopadzie 1974 roku. Zamierzano rozwiązać kryzys na rynku paliw ciekłych i

gazowych poprzez wykorzystywanie reaktorów wysokotemperaturowych i bardzo wysokotemperaturowych do produkcji substytutów ropy i gazu ziemnego. Powstało pojęcie „Ekonomii Wodoru” bazującej na termochemicznych cyklach produkcji wodoru wykorzystujących ciepło wysokotemperaturowe uzyskiwane z reaktorów bardzo wysoko temperaturowych chłodzonych helem. We Francji, badania nad wykorzystywaniem wysokotemperaturowego ciepła do produkcji wodoru zostały objęte projektem „Hydre”. Jak wiadomo, do czasu dzisiejszego, nie zrealizowano problemu substytucji ropy i gazu ziemnego, jednak głównie ze względów ekonomicznych.

Jednakże, w latach siedemdziesiątych perspektywy możliwości produkcji substytutów przy wykorzystywaniu ciepła jądrowego i wykorzystywania toru jako materiału rodnego do produkcji paliwa w reaktorach termicznych, mogących powielać paliwo jądrowe dla samych siebie, stało się przyczyną tworzenia nowych koncepcji systemów jądrowych. Powiększył się park możliwych technologii reaktorów jądrowych o reaktory prędkie powielające chłodzone gazem, reaktory termiczne prawie powielające na uranie U-233. Zaczęto rozróżniać dwa rodzaje systemów jądrowych powielających i prawie powielających [4].

Awaria w Czarnobylu i mniej groźne w skutkach awarie reaktorów chłodzonych ciekłym sodem w USA i Japonii przyczyniły się do weryfikacji stanowiska, czy energia jądrowa nie zagraża:

- obecnej generacji i
- przyszłym generacjom ?

Aby zapewnić opinie publicznej o braku zagrożeń dla obecnej generacji zaczęto opracowywać reaktory termiczne samozabezpieczające się, osiągalne handlowo dopiero około 2000 roku. Zaprzesano eksploatacji reaktorów prędkich. Ale do tego czasu w USA oddano do eksploatacji ponad 300 reaktorów termicznych, każdy o mocy 1000 MW<sub>e</sub>. We Francji, udział energetyki jądrowej w systemie energetycznym wyniósł 70 %. Ilość gromadzonych odpadów i zawartego plutonu w tych odpadach zaczęto liczyć w tysiącach ton.

Okazało się, że izotop plutonu Pu-240, zawarty w wypalonym paliwie reaktorowym składowanym geologicznie, po około 13 000 latach w wyniku rozpadu radioaktywnego przemieni się w pluton Pu-239. Stanie się więc ogólnie dostępnym materiałem stosowanym do budowy broni jądrowej.

Ten fakt i to, że w wypalonym paliwie reaktorowym zawarte są takie krótko żyjące izotopy jak:

- stront Sr-90 o aktywność promieniotwórczości wynoszącej 186000 kiur,
- cez Cs-137 o aktywność promieniotwórczości wynoszącej 280000 kiur,
- krypton Kr-85 o aktywność promieniotwórczości wynoszącej 56000 kiur,

a także, oprócz plutonu Pu-239, długo żyjące izotopy radioaktywne jak:

- jod I-129 o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym 15 700 000 lat,
- cez Cs-135 o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym 2 300 000 lat,
- pluton Pu- 242 o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym 375 000 lat,
- neptun Np-237 o okresie połowicznego rozpadu wynoszącym 2 140 000 lat.

spowodowały, że warunkiem poszukiwania odpowiedzi na pytanie, czy energia jądrowa nie będzie zagrażać przyszłym generacjom, stało się **wymaganie zaprzestania geologicznego składowania wypalonego paliwa reaktorów jądrowych.**

Wspomniane wymaganie jest jednym z celów poszukiwania rozwiązania problemu w USA, w Japonii, Francji, w niektórych krajach Europy i w Federacji Rosyjskiej. Z publikacji

CERN z roku 1993 i 1994, a także Międzynarodowej Agencji Energii Jądrowej z roku 1995, dowiadujemy się, że jednym z kryteriów koncepcji projektowanego w CERN „wzmacniacza energii” jest minimalna produkcja długo żyjących odpadów radioaktywnych i **eliminowanie potrzeby ich geologicznego składowania**.

W ostatnich latach zaproponowano [9] wiele koncepcji budowy systemów hybrydowych jako urządzeń powielających materiały rozszczepialne i transmutujące odpady radioaktywne do mniej szkodliwych substancji. Dotyczy to szczególnie projektu PHOENIX opracowywanego w Brookhaven National Laboratory, programu OMEGA podjętego w Japonii i programu realizowanego w Los Alamos National Laboratory.

Uruchomienie wyżej wymienionych projektów wynika z faktu zaprzestania konieczności geologicznego gromadzenia odpadów radioaktywnych nawet w takich bezpiecznych formacjach geologicznych jak Góry Yucca w Dolinie Śmierci w USA. Istnieje niebezpieczeństwo, że geologiczne formacje i klimat mogą ulegać nieprzewidywalnym zmianom w okresie milionów lat. Ponadto fakt, że gromadzone odpady stanowią zagrożenie przez wiele dziesiątek tysięcy lat, a także mogą przerodzić się w kopalnie plutonu, wzmacnia wspomniani niepokój [9].

A więc, obok zaprzestania gromadzenia geologicznego odpadów radioaktywnych zaczęto opracowywać koncepcje technologii transmutacji długo żyjących (około milionów lat) wysoko radioaktywnych odpadów jądrowych do:

- krótko żyjących (poniżej 1000 lat), mniej szkodliwych substancji radioaktywnych lub
- wymagających składowania geologicznego na około 200 lat izotopów cezu Cs-137, strontu Sr-90 i kryptonu Kr-85 (krótko żyjących radioaktywnych odpadów o bardzo wysokiej aktywności promieniotwórczej spośród wszystkich izotopów występujących w wypalonym paliwie).

Z informacji zawartej w publikacjach wynika, że układ hybrydowy transmutacji odpadów jądrowych może być osiągalny w USA nie wcześniej jak około 2030 roku. W opracowaniu, stanowiącym część podsumowania Międzynarodowej Agencji Energii Jądrowej, podano informację, że nakłady ponoszone na realizację i eksploatację urządzenia obejmującego akcelerator i generator elektrojądrowy, jako zastawu podkrytycznego, ma wynosić 7437 mln US\$. Przytoczone rozwiązania pokazują, że nie prędko będą stosowne technologie czyniące energię jądrową rozszczepienia bardziej bezpieczna. A ponadto, na ich wdrożenie będą mogły pozwolić sobie gospodarki o dużych możliwościach finansowych.

Powyżej przedstawiono zdarzenia istotne w rozwoju energii jądrowej od chwili jej wykorzystywania. Obecnie postaramy się wyjaśnić kwestie w jakim stopniu energia jądrowa, jako globalne podstawowe źródło energii, mogłaby spełniać uwarunkowania, przedstawione we wstępie, takie jak:

*sprzyjanie zrównoważonemu rozwojowi w sensie zachowanie środowiska dla kolejnych generacji,*

a także odpowiedzieć na pytanie:

*czy technologie wykorzystywania paliw jądrowych mogłyby stanowić przyszłe długoterminowe strategiczne rozwiązania energetyczne docelowe.*

*Czy energia jądrowa może sprzyjać zachowaniu środowiska dla kolejnych generacji ?*

Odpowiedź nie może być pozytywna. Uzasadnienie jest następujące.

Zanim zacząć pracować układy unieszkodliwiające odpady, ruda uranu lub toru musi być pozyskana, a następnie materiał jądrowy musi być odpowiednio przygotowany. Obydwu procesom będzie towarzyszyć znaczna emisja radioaktywności, przedostająca się do biosfery.

Realizacja jakiegokolwiek systemu jądrowego rozszczepienia będzie rodzić wiele punktów kontaktowych zagrożenia radiologicznego, w których, obok uranu U-235 i U-233,

paliwem jest także pluton Pu-239. W przypadku systemu jądrowego rozszczepienia, oprócz kopalni paliw jądrowych jak U-238 i Th-232 oraz produkcji elementów paliwowych, dodatkowymi zagrożeniami będą:

- wypalanie paliwa jądrowego i produkcja radioizotopów,
- przeróbka paliwa wypalonego i oddzielanie izotopów,
- składowanie odpadów paliwa jądrowego,
- przygotowania paliwa dla układu hybrydowego transmutacji ATW z wypalonego paliwa reaktorów,
- proces separacji, w którym wydziela się produkty rozszczepienia wykorzystywane jako paliwo w układzie podkrytycznym transmutacji i produkty rozszczepienia przeznaczone na składowanie geologiczne.

Produktem końcowym transmutacji będą nadal odpady radioaktywne o krótszym okresie połowicznego rozpadu, a więc izotopy cezu Cs-137, strontu Sr-90 i kryptonu Kr-85, o bardzo wysokiej aktywności promieniotwórczej, które będą musiały być składowane geologicznie.

Można zrozumieć, że w krajach o znacznym udziale energii jądrowej w systemie energetycznym, a także o dużym potencjale przemysłowym, technologie transmutacji są jedynym rozwiązaniem zaistniałej sytuacji. Nie jest możliwe, aby w USA wyłączono w krótkim czasie elektrownie jądrowe o sumarycznej mocy 316 000 MW, które wymagały inwestycji rzędu 600 miliardów US\$. W podobnej sytuacji znajduje się Francja czy Japonia. Dodatkowym problemem USA i Federacji Rosyjskiej jest problem plutonu zbrojeniowego, którego zasoby narastają w konsekwencji demilitaryzacji i unieszkodliwiania broni jądrowej, a więc wykorzystywania plutonu zbrojeniowego do celów pokojowych.

Ponadto należy nadmienić, że jako wysoce skoncentrowane źródło energii, energia jądrowa nie może przyczyniać się do tworzenia miejsc pracy w wielu regionach, w tym na obszarach wiejskich, co jest szczególnej wagi dla rozwoju kraju takiego jakim jest Polska w ciągu najbliższych dziesięcioleci.

*Czy technologie energii jądrowej rozszczepienia mogą być uważane za technologie strategiczne ?*

Strategiczną technologią energetyczną w sensie globalnym nie może być technologia, która w jakikolwiek sposób zagraża ekosferze. Wynika to z faktu, że w odpadach jądrowych występują wysoko radioaktywne i długo żyjących izotopy. Nikt nie jest w stanie przewidzieć konsekwencji gromadzenia tych izotopów dla zrównoważonego rozwoju przyszłych pokoleń [18]. Ponadto:

1. nie wolno dopuścić to tego aby substancje pozyskiwane z litosfery (zewnątrznej najbardziej sztywnej warstwy kuli ziemskiej, sięgającej do głębokości około 80-150 km) były systematycznie akumulowane w ekosferze (strefie, której warunki fizyczne i chemiczne umożliwiają rozwój i życie organizmów),
2. nie wolno dopuścić to tego aby substancje wytwarzane przez ludność, a więc odpady radioaktywne, były systematycznie akumulowane w ekosferze [19].

Szczególnie dotyczyłoby to Polski, która nie posiada złóż paliw jądrowych i nie ma żadnego doświadczenia w dziedzinie technologii jądrowych. W takim kraju bezprzedmiotowe staje się pytanie czy rozwój energii jądrowej może sprzyjać zrównoważonemu rozwojowi kraju, szczególnie obszarów wiejskich, co jest tak istotne dla rozwiązania problemu rolnictwa w Polsce. Natomiast technologie transmutacji, dla krajów o dużym potencjale istniejących mocy energetyki jądrowej, mogą jedynie być lekarstwem na mniejsze zło dla przyszłych pokoleń.

Należy nadmienić, że na konferencji poświęconej ochronie środowiska w Hadze, w listopadzie 2000 roku, Przewodniczący Organizacji Narodów Zjednoczonych, wspólnie z niektórymi przedstawicielami Europy, nie wyraził zgody na propozycję USA i Japonii, aby energię jądrową uważać jako alternatywę na osłabianie efektu cieplarnianego [19]. Przekreśla to ostatecznie traktowanie energii jądrowej jako źródła energii neutralnego wobec efektu cieplarnianego.

## Literatura

- [1] Ciechanowicz W., Systemy jądrowe, Badania systemowe w gospodarce paliwoenergetycznej, Ossolineum 1977.
- [2] Ciechanowicz W., Energia, Środowisko i Ekonomia, Instytut Badań Systemowych PAN, Wyd. 1 - 1995, Wyd. 2 - 1997.
- [3] Hafele W., Schikorr W., Reactor Strategies and the Energy Crisis, IASA, Austria, 1973.
- [4] Maintenance and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, National Academy Press, Washington, DC 1994.
- [5] Bowman C.D., Weapons and Commercial Plutonium Ultimate Disposition Choices Destroy Completely or Store Forever, in *Managing the Plutonium Surplus: Applications and Technical Options*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1994.
- [6] Glasstone S., Edlund M. C., Podstawy teorii reaktorów jądrowych, PWN, Warszawa, 1957.
- [7] Glasstone S., Podstawy techniki reaktorów jądrowych, PWN, Warszawa, 1958.
- [8] Ciechanowicz W., Modelowanie matematyczne procesów siłowni z reaktorami wodnymi w warunkach prowadzących do zadziałania układu zabezpieczeń, P.T.J. No 20, 1976.
- [9] Jakubowski L., Sadowski M., Energia termojądrowa - Encyklopedia Fizyki Współczesnej, PWN, Warszawa, 1983.
- [11] Kluciński G.L., Fusion reactor design: on the road to commercialization, Atomkernenergie, Vol.44, N 1, 1984.
- [12] Abdel Khalik S.I., i inni, Impact of fusion-fission hybrids on world nuclear future, Atomkernenergie, Vol.38, No 1, 1981.
- [13] Białkowski G., Energia termojądrowa - Encyklopedia Fizyki Współczesnej, PWN, Warszawa, 1983.
- [14] Gutman H. i inni, Proceedings of: The European Nuclear Conference, Paryż 1975.
- [15] Fusion & Environment,  
<http://www.foe.org.uk/energy/environment.html>, 06.11.2000.
- [16] Krakowski R.A., „Accelerator Transmutation of Waste Economics”, Nucl. Tech. 1994.
- [17] Kagesson, P., Growth versus the environment - is there a trade-off?, Department of Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Lund Sweden, 1997.
- [18] Holmberg J., Robert K.H., Eriksson K.E., Socio-ecological principles for a sustainable society, *Getting down the Earth*, Island Press, Washington, D.C., USA, 1996.
- [19] Environment News Network, U.N. official blasts nuclear option for global warming, [http://www.enn.com/news/wire-stories/2000/11/11212000/reu\\_unblast40352.asp/site=ε](http://www.enn.com/news/wire-stories/2000/11/11212000/reu_unblast40352.asp/site=ε), 24.11.2000.
- [20] Ciechanowicz W., Bioenergia a energia jądrowa, WSISiZ, 2001

