ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 66 Nr kol. 562

Kazimierz KUTARBA
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

PRZYSZŁOŚĆ ENERGETYKI JĄDROWEJ NA ŚWIECIE

Streszczenie. Omówiono rozwój energetyki jądrowej na świecie. Przedstawiono prognozy oraz trendy rozwojowe na najbliższe lata. Rozpatrzono zagadnienia bezpieczeństwa radiacyjnego i ochrony środowiska.

1. Wstęp

Postęp techniczny w dziedzinie energetyki jądrowej absorbuje wszystkie kraje uprzemysłowione. W tej dziedzinie rozwijają się priorytetowe badania naukowe, zwiększa się nakłady inwestycyjne, kształci kadry specjalistów. Energetyka jądrowa jest jedną z najbardziej przyszłościowych dziedzin nauki i techniki. Polska należy do znacznie opóźnionych w świecie krajów (z grona uprzemysłowionych) w rozwoju tej dziedziny.
Jak wynika z dotychczasowej sytuacji, uruchomienie I bloku 440 MW powinno nastąpić w 1984 r. w Żarnowcu (woj. gdańskie). Zakończenie budowy I EJ o łącznej mocy 1760 MW (4 x 440 MW) względnie 3440 MW (440 + 3 x 1000 MW) nastąpi w 1987 r.
W 1990 r. przewiduje się osiągnąć moc EJ 4280 MW, a w 2000 r. ok. 22000MW.

2. Energetyka jądrowa na świecie

W połowie 1976 r. na całym świecie (w 33 krajach) pracowało 148 elektrowni jądrowych, o łącznej mocy 74200 MW, a w projektowaniu i budowie było 336 EJ o łącznej mocy ok. 200.000 MW.
Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez elektrownie jądrowe w 1975 roku osiągnęła 380 mld kWh, co odpowiada 140 mln ton umownego paliwa konwencjonalnego. Natomiast całkowita energia wyprodukowana w EJ od początku ich istnienia osiągnęła 1250 mld kWh.

Cały świat zmierza obecnie w stronę energii jądrowej. Prognoza opracowana w 1976 r. przez "Międzynarodową Agencję Energetyki Atomowej" przewiduje wzrost mocy zainstalowanej w EJ krajów uprzemysłowionych w 1980 r. do 268.500 MW, a w końcu następnego 5-lecia - do 680.200 MW. Futurolodzy zapewniają, że w 2000 r. w krajach wysoko uprzemysłowionych 50-60% mocy będzie zainstalowanych w EJ, z tego ok. 30% z reaktorami powielającymi. Naj-

większy wzrost mocy w energetyce jądrowej notują USA, które w końcu 1975r. posiadały 54 elektrownie o mocy 37.500 MW, a produkcja energii elektrycznej w 1975 r. wyniosła ok. 200 mld kWh. W 1980 r. Stany Zjednoczone mają mieć 200 EJ. Obecnie buduje się 75 EJ o łącznej mocy 76.800 MW. Moc reaktorów w USA w elektrowniach jądrowych zazwyczaj wynosi od 1100 do 1300 MW. Kryzys i stagnacja gospodarcza przyhamowują obecnie nieco tempo rozbudowy. W 1975 r. zawarto umowy na budowę tylko 10 EJ gdy np. w 1972 r. liczba umów dochodziła do 38.

W krajach zrzeszonych w "Euratomie" pod koniec 1975 r. pracowało 38 EJ o łącznej mocy 15.330 MW; W stadium budowy było 26 EJ o mocy 24.800 MW. W 1975 r. tylko dwie nowe EJ zostały włączone do sieci energetycznej: w RFN o mocy 1.150 MW w Biblis, w Belgii o mocy 920 MW. Natomiast we Francji od maja 1974 r. próbnie eksploatowano nową EJ "Feniks" z reaktorem na neutrony prędkie i chłodzenie przy pomocy metalicznego sodu. Obecnie Francja i RFN zamierzają budować dwie EJ "Super-Fenix" z reaktorami o mocy 1.000 MW.

W Anglii w ostatnim roku nastąpiła reorientacja w budowie reaktorów. Na miejsce gazowo-grafitowych reaktorów Anglia ma zamiar wyposażać swe nowe EJ w reaktory ciężkowodne typu "SGHWR" o mocy jednostkowej 660 MW.

Japonia najpóźniej wystartowała z budową EJ. Jednak tempo było tak duże, że wyprzedziła już Włochy, Kanadę, Francję, RFN i prawie dogoniła Anglię. W końcu 1975 r. Japonia posiadała 10 EJ o mocy 5.500 MW o rocznej produkcji 13 mld kWh.

Elektrownie jądrowe budowane do 1979 r. będą stanowiły 43% wszystkich budowanych elektrowni (27.000 MW).

W Kanadzie wprowadzono od 4 lat z dobrym wynikiem reaktory ciężkowodne typu "Candu" z wodą pod ciśnieniem. Współczynnik wykorzystania rocznie EJ wynosi 70-90%. Ogólna moc EJ 2.650 MW a planuje się zwiększyć ich moc do 11.000 MW.

Zwiększenie mocy EJ nastąpiło również w Szwecji do 2.600 MW, w Belgii - do 1.300 MW, w Szwajcarii - do 1.040 MW, w Hiszpanii - do 1.130 MW, w Indiach - do 620 MW.

Według prognoz ogólna moc EJ w krajach kapitalistycznych do 1980 r. osiągnie 200.000 MW, a do 1990 r. - 500.000 MW.

3. Energetyka jądrowa w krajach RWPG

Według ostatnich danych w 1980 r. w krajach RWPG moc EJ osiągnie 30.000 MW, z tego około połowę w ZSRR (15.000 MW). Elektrownie jądrowe o mocy około 6.000 MW w ZSRR wyprodukowały w 1975 r. 20 mld kWh energii elektrycznej, co stanowi równowartość 7 mln ton p.u. konwencjonalnego. Największa EJ Związku Radzieckiego (jak również na świecie) to "Leningradzka Elektrownia Atomowa" o mocy 2.000 MW z 2 reaktorami kanałowymi grafitowo-uranowymi typu "REMK". Po pełnej rozbudowie elektrownia ta osiągnie moc 4000 MW. Energetyka jądrowa w ZSRR w najbliższych latach będzie rozbudowywana

w oparciu o 2 typy reaktorów: I część - reaktory typu leningradzkiego o mocy 2.000 MW, II część - będzie wzorowana na reaktorach WWER, których technologia budowy i eksploatacji jest najbardziej opanowana do 1.000 MW.

Moc EJ w krajach RWPG w MW pod koniec 1980 r. podaje tablica 1.

Tablica 1

Kraj	1970	1975	1980
ZSRR	920	5.500	21.000
NRD	80	960	4.480
Bułgaria	-	880	2.340
CSRS	-	150	1.910
Węgry	-	-	1.760

Powróćmy jeszcze do sprawy energetyki jądrowej w Polsce. Dla zrównoważenia bilansu paliwowego niezbędny jest szybki rozwój energetyki jądrowej i ewentualnie gazyfikacja węgla.

Na konferencji w Salzburgu stwierdzono, że rozwój energetyki jądrowej i oparcie bilansu paliwowo-energetycznego świata w dużym stopniu zależeć będą od rozwoju energetyki jądrowej zarówno w krajach kapitalistycznych jak i socjalistycznych. Po 1982 r. Polska może przejść z pozycji eksportera na pozycję importera, bo eksport węgla już nie wystarczy na pokrycie kosztów importu paliw płynnych i gazowych.

Obecnie nasza energetyka wytwarza około 115 mld kWh, a w 2000 r. zapotrzebowanie wyniesie ok. 500 mld kWh.

Bilans paliwowy w Polsce w 2000 r. będzie potrzebować około 440 - 500 mln t.p.u./a, w tym orientacyjnie:

ok. 270 mln t.p.u./a - węgiel kamienny,
ok. 60 -"- - węgiel brunatny,
ok. 70 -"- - ropa naftowa,
ok. 42 -"- - energia jądrowa,
ok. 40 -"- - gaz ziemny.

Rozwój energetyki jądrowej pozwoli zaoszczędzić 3/4 kosztów równoważnej ilości paliwa importowanego - ropy, da możliwość opanowania trudności transportowych i braku siły roboczej. EJ wymagają bowiem ok. 80 - 90% mniejszego zatrudnienia niż elektrownie jądrowe nie licząc zatrudnionych w kopalniach węgla i transporcie. Ponadto koszt budowy dużej EJ jest znacznie tańszy od łącznego kosztu budowy EK, odnośnej kopalni węgla i urządzeń transportowych. Sama EJ natomiast jest 2-3 razy droższa od takiej samej mocy EK. Koszt wytwarzania energii elektrycznej w siłowni jądrowej jest obecnie o ok. 12-15% niższy w porównaniu z EJ.

Perspektywicznym typem bloku energetycznego jest reaktor powielający. Ma on szczególną zaletę - oprócz energii wytwarza pluton, który można następnie wykorzystać w tym samym lub innym reaktorze. Wadą obecnie stoso-

wanych reaktorów powielających chłodzonych sodem, poza komplikacjami wynikającymi z trudności w eksploatacji jest to, że okres podwojenia paliwa czyli czas, w którym elektrownia wytworzy z uranu U_{238} razy więcej paliwa Pu_{239} niż go sama spaliła, wynosi kilkanaście lat.

Reaktory powielające w pełni będą konkurować z EK w ciągu najbliższych kilkunastu lat. Warto zaznaczyć, że porównanie korzyści z ich zastosowania:

- 1 t węgla kamiennego daje prawie 3.000 kWh energii elektrycznej
- natomiast 1 t uranu w reaktorze klasycznym (termiczno-lekkowodnym) odpowiada - 100 mln kWh,
- a w reaktorze powielającym - 7 mld kWh.

Czas realizacji bloku 500 MW w EJ zajmuje średnio 66 miesięcy, a cykl takiego bloku w konwencjonalnej elektrowni ok. 50 miesięcy. Taką różnicę czasu powodują wymagania techniczne, technologiczne, organizacyjne, kontrola jakości materiałów, urządzeń, robót budowlanych i montażowych, zwiększone wymagania odbiorów.

4. Kontrolowana reakcja termojądrowa

Rozwój wielkiej energetyki jądrowej będzie w przyszłości zabezpieczony po rozwiązaniu trudnego problemu kontrolowanej energii termojądrowej. Kontrolowana reakcja termojądrowa - synteza lekkich jąder wodoru, deuteru, krylu lub litu następuje w temperaturze nie mniejszej niż 100 mln ^{o}C. W ciągu 20 kilku lat pracy nad uzyskaniem kontrolowanej reakcji termojądrowej powstał model reaktora "Tokamak" który gromadzi i utrzymuje plazmę w temp. 200 mln ^{o}C.

W ZSRR w Instytucie Fizyki im. Lebiediewa Akademii Nauk ZSRR kierowanego przez prof. Basowa powstała inna koncepcja uzyskania kontrolowanej reakcji termojądrowej za pomocą światła lasera. W Polsce w WAT pod kierunkiem prof. S. Kaliskiego opracowano specjalną metodę laserowej kompresji plazmy z poprzedzającą ją prekompresją wybuchową przy użyciu ładunków chemicznych. Ostatnio w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie po raz pierwszy na świecie za pomocą czystego wybuchu uzyskano neutrony reakcji termojądrowej. Z porcji wynoszącej 1.10^{-7} grama deuteru otrzymano 30 mln neutronów. Polska metoda jest już obecnie znacznie tańsza od laserowej, nie wymaga bowiem kosztownych laserów wielkiej mocy. Synteza jądrowa może stać się rzeczywiście tanim i praktycznie niewyczerpalnym źródłem energii dla ludzkości.

W czasie syntezy helu i deuteru przekształcenie jednego grama deuteru przyniosłoby do 10 mln więcej energii niż spalanie. 1 g węgla.

Deuteru starczy ludziom co najmniej na 25 mld lat (deuter z morza i oceanu), węgla starczy zaledwie na około 300 lat. Uranu przy wydajnościach reaktorów termicznych I generacji (70 tys. kWh z 1 kg uranu) - na 35 lat, przy użyciu reaktorów powielających (na szybkich neutronach) - na 6000 lat.

Zdaniem specjalistów w 2000 r. świat zależeć będzie od pracy kilku tysięcy reaktorów atomowowych,w tym około 5000 reaktorów powielających.Reaktory powielające ze względu na brak uranu muszą się rozwijać i będą w pełni konkurować z elektrowniami tradycyjnymi. W elektrowniach z reaktorami powielającymi koszt paliwa w początkowym okresie będzie co najmniej 4 razy niższy,a w dalszej przyszłości po udoskonaleniu reaktorów powielających prawie 10-krotnie niższy. Według prognoz M.A.E.A w 1985 r. we wszystkich reaktorach na świecie będzie ok. 15 tys. ton uranu naturalnego, 70 tys.ton uranu wzbogaconego, a zapasy plutonu wzrosną do 700 ton. Prowadzone są prace badawcze nad reaktorami powielającymi innych typów chłodzonymi gazem, które produkowałyby pluton szybciej. Postępem w tej dziedzinie mogą się okazać np. reaktory chłodzone gazem - dysocjujące N_2O_4 (ZSRR - Mińsk i Świerk w Polsce).

5. Zagadnienia bezpieczeństwa radiacyjnego i ochrony radiologicznej w EJ i jej otoczeniu

W ostatnich 2 latach w wielu uprzemysłowionych krajach kapitalistycznych rozwój energetyki jądrowej został przyhamowany i natrafił na sprzeciw opinii publicznej. Działały tu różne przyczyny:

- protesty ludności (względy natury psychologicznej - szok Hiroszimy),
- zorganizowane akcje różnych grup przemysłowych mających na celu interesy ekonomiczne (walka konkurencyjna),
- ruch ekologów - ochrona środowiska,
- Klub Rzymski - raport zerowego wzrostu.

W czasie normalnej pracy EJ w przypadku awarii reaktora energetycznego niesłychanie ważne są 2 zagadnienia:

- ochrona radiologiczna (OR) - ochrona człowieka i środowiska przed działaniem promieniowania jonizującego,
- bezpieczeństwo radiacyjne (BR) - całokształt zagadnień związanych z zabezpieczeniem osób i środowiska przed działaniem promieniowania jonizującego, w razie ewentualnej awarii reaktora lub współpracujących urządzeń.

Poziom wiedzy i techniki jak również zebrane w skali światowej doświadczenia w budowie i eksploatacji EJ pozwalają stwierdzić, że EJ należą obecnie do zupełnie bezpiecznych obiektów przemysłowych z punktu widzenia zagrożenia ludności jak i naturalnego środowiska.

Występowanie radioizotopów w EJ wiąże się z koniecznością stosowania:

- specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych (osłony, budowle dwupowłokowe, specjalne filtry, szczelne obiegi, wentylacja itp.),
- materiałów o najwyższych współczynnikach bezpieczeństwa,
- zdalnych metod pracy

oraz z koniecznością usuwania i magazynowania odpadów radioaktywnych.

W zakresie organizacji pracy i jej technologii redukcję stopnia zagrożenia uzyskuje się np. poprzez:

- podział obiektu EJ na rejony((niedostępny, dostępny czasowo, pod nadzorem służby dozymetrycznej, ogólnie dostępny),
- ustalenie dróg i zasad ruchu źródeł promieniowania w obiekcie takich jak paliwo, odpady ciekłe, odpady stałe,
- ustalenie dróg i zasad ruchu personelu na terenie obiektu,
- niezamieszkałe strefy ochronne o promieniu kilkuset metrów.

Według ocen teoretycznych dla tysiąca równocześnie eksploatowanych reaktorów jądrowych zachodzi prawdopodobieństwo wystąpienia awarii raz na dziesięć tysięcy lat. Oblicza się, że mogłoby to spowodować zwiększenie liczby zgonów na raka tarczycy o jeden przypadek na 10 mln ludności w ciągu całego roku.

Dotychczas nie było jeszcze na świecie takich ciężkich awarii EJ które spowodowałyby śmierć osób znajdujących się poza murami elektrowni.

Faktem jest jednak, że nie wszystkie zagadnienia naukowe i potencjalne konsekwencje związane z funkcjonowaniem central nuklearnych zostały do końca zbadane. Wśród nich znajdują się między innymi:

- zagadnienia radiacji,
- zagadnienia odpadów radioaktywnych,
- zagadnienia transportu odpadów,
- zagadnienia przerobu odpadów,
- podnoszenia temperatury wód rzecznych (degeneracja fauny i flory w rzekach).

6. Technologia budowy EJ

Budynek 2-powłokowy szczelny reaktora stanowi pod względem bezpieczeństwa największą i najtrudniejszą konstrukcję inżynierską, zwłaszcza że wykonany jest z betonu sprężonego. Trudności polegają na:

- opanowaniu technologii sprężania ścięgnami mocy do 1000 ton siły użytkowej (kable ze stali o wytrzymałości na rozciąganie 150-180 kg/mm^2 i wydłużeniu przy zerwaniu A_{100} = 4,5%),
- stosowaniu wykładziny stalowej z twardej stali austenitycznej chromowo-manganowo-wanadowej wewnątrz budynku,
- odlewaniu i odkuwaniu elementów o znacznych gabarytach, ciężarach i grubościach ścianek do 250 mm,
- stosowaniu odpowiednich betonów osłonowych odpornych na promieniowanie (gęstości ponad 2.600 kg/m^3, dobór kruszyw specjalnych do tych betonów itp.).

Osobne wielkie zagadnienie to produkcja maszyn i urządzeń automatyki do budowy EJ.

W pobliżu Wołgodońska nad brzegiem zalewu Cymiljańskiego w ZSRR buduje się unikalne na świecie zakłady budowy reaktorów "ATOMASZ" do seryjnej produkcji reaktorów. Technika kosmiczna połączyła się tu z atomową. Ten gigant rozpocznie produkcję w 1980 r. Również w 11 krajach kapitalistycznych działa obecnie 25 firm wytwarzających reaktory i urządzenia energetyki jądrowej. Zdobyły one zamówienia na budowę 420 bloków o łącznej mocy około 351.000 MW. W szczególności należy podkreślić, że w USA czołowe miejsce zajmuje General Electric i Westinghouse, w RFN - Siemens i AEG.

7. Elektrociepłownie jądrowe (ECJ)

Wykorzystanie energetyki jądrowej ma miejsce nie tylko do wytwarzania energii elektrycznej w EJ ale również i energii cieplnej w EJC. Dostarczenie ciepła dla dużych aglomeracji miejskich z elektrociepłowni węglowych jest coraz bardziej uciążliwe z następujących powodów:

- w obrębie miast trudno jest zlokalizować elektrociepłownie z wysokimi kominami 250-300 m,
- ze względu na zanieczyszczenia atmosfery nie można koncentrować dużych mocy EC,
- dowóz ogromnych ilości węgla i wywóz odpadów,
- brakuje miejsca na składowiska odpadów,
- na źródła ciepła i składowiska odpadów zajmowane są tereny rolnicze.

Budowa ECJ obok dużych aglomeracji miejskich i przemysłowych nie powinna budzić większych zastrzeżeń z punktu widzenia bezpieczeństwa przy właściwym jej zlokalizowaniu i zapewnieniu wszystkich możliwych technicznie do zastosowania zabezpieczeń. Np. około 1995 r. ECJ powinny być w Polsce wyposażone w jądrowe bloki ciepłownicze składające się z reaktora, turbozespołu ciepłowniczego o mocy elektrycznej około 500 MW i mocy cieplnej 115 MW.

W okresie późniejszym (około 2000 r.) ECJ będą wyposażone w bloki 1000 MW. Jako optymalną dla naszych warunków można by proponować ECJ wyposażoną w 4 bloki o mocy cieplnej 3340 MW (2870 Gcal/h) i mocy elektrycznej ok. 2.000 MW. W późniejszym okresie celowe będzie zbudowanie ECJ z 3 blokami o mocy po 1000 MW. Zwiększone moce elektryczne uzyskiwane w ECJ w okresie letnim w stosunku do mocy przy niskich temperatura zewnętrznych mogł wpłynąć już obecnie na ograniczenie budowy urządzeń chłodzących EC opalanych węglem.

Poza obniżeniem nakładów inwestycyjnych budowa ECJ zmniejszy zanieczyszczenia miast i okolic.

БУДУЩЕЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ

Р е з ю м е

Международным агенством атомной энергии была организована конференция в Зальцбурге и Стамбуле. Уже не физики и не химики, но инженеры-энергетики рассматривали разные аспекты строительства АЭС.

В конференции приняло участие 3000 человек из 60 стран. Было прочитано около 350 докладов. Обсуждено развитие ядерной энергии на 1977-2000 гг. Были проведены очень важные исследовательские и конструкционные работы по строительству реакторов и АЭС.

Однако много ещё невыясненных вопросов по эксплуатации АЭС: обогащение урана, регенерация топлива, складирование радиоактивных отбросов, транспортировка материалов и оборудования. Многие учёные и политики возражают, а общество разных капиталистических стран (ФРГ, Швеция, Франция, США) демонстрируют против строительства АЭС.

В некоторых странах наблюдается возвращение к строительству угольных электространций (Великобретания, США).

Спорным вопросом является также строительство воспроизводящих реакторов и оперирование плутонием.

В докладе были обсуждены также вопросы ядерной энергетики в Польше.

FUTURE OF THE WORLD NUCLEAR POWER INDUSTRY

S u m m a r y

The International Agency of Atomic Energy organized the conferences in Salzburg and Stambul. Not only physicists and chemists but also power specialists were considering various aspects of building nuclear power plants 3000 scientisis from 60 conutries took past in the conference and 350 papers were presented.

The nuclear energetics development in the years 1977-2000 was discussed. The essential research and constructional work on building various reactors and nuclear power plants has been done. However, there still exist many unexplained things as regards the operation of a power plant e.g. uranium enrichment, fuel regeneration,radioactive waste storing, the transport of materials and equipment.

Numerous scientists and politicians have various objections to building a neclear power plant, and the people of various capitalistic countries (West Germany, Sweden, France the USA) are manifesting against it. There is also a certain "come-back" of coal power stations (England, the USA).

The problems of building breeder reactors and plutonium operations are also controvertional ones. The problem of nuclear energetics in Poland has also been discussed in the paper.