

# Elektryzująca seria PWN



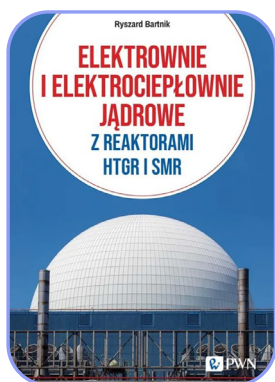


## Bezpieczeństwo radiologiczne

Krzysztof Król

---

**3**

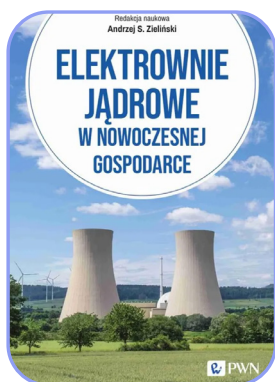


## Elektrownie i elektrociepłownie jądrowe z reaktorami HTGR i SMR

Ryszard Bartnik

---

**12**



## Elektrownie jądrowe w nowoczesnej gospodarce

Andrzej Zieliński

---

**26**

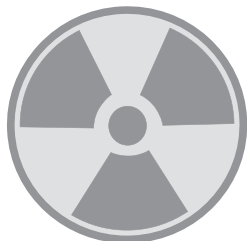
Krzysztof Król

# BEZPIECZEŃSTWO RADIOLOGICZNE



 PWN





## Podstawowe zagadnienia z fizyki atomowej i jądrowej

### Spis treści

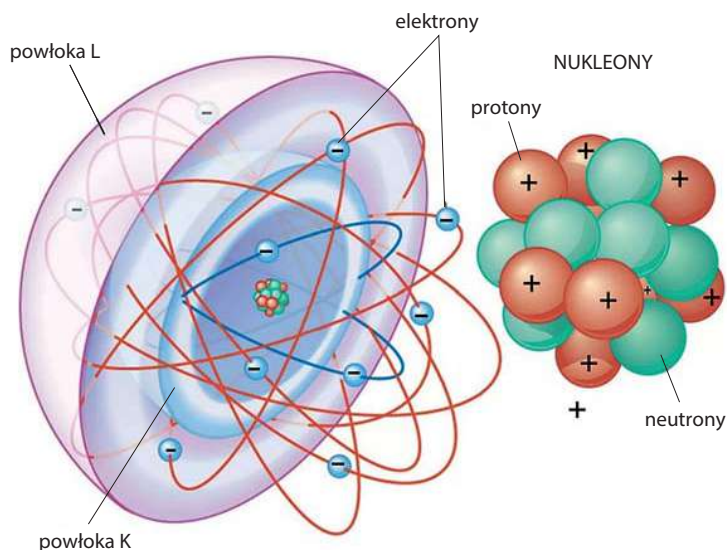
1.1. Budowa atomu . . . . .	1	1.4. Promieniowanie . . . . .	20
1.2. Izotopy . . . . .	5	1.4.1. Promieniowanie $\alpha$ (alfa) . . . . .	22
1.3. Przemiany i reakcje jądrowe . . . . .	6	1.4.2. Promieniowanie $\beta$ (beta) . . . . .	23
1.3.1. Przemiana $\alpha$ . . . . .	8	1.4.3. Promieniowanie $\gamma$ i X (gamma oraz rentgenowskie). . . . .	24
1.3.2. Przemiany $\beta^-$ i $\beta^+$ . . . . .	8	1.4.4. Promieniowanie n (neutronowe) . . . . .	25
1.3.3. Wychwyt elektronu . . . . .	10	1.4.5. Detekcja promieniowania jonizującego. . . . .	26
1.3.4. Emisja neutronu . . . . .	11	1.5. Narażenie na promieniowanie jonizujące . . . . .	29
1.3.5. Emisja kwantu $\gamma$ oraz X . . . . .	12	1.5.1. Biologiczne skutki promieniowania jonizującego . . . . .	32
1.3.6. Prawo rozpadu promieniotwórczego . . . . .	15	1.5.2. Ocena narażenia i dawki promieniowania jonizującego . . . . .	35
1.3.7. Reakcje fuzji (syntezy) . . . . .	16		
1.3.8. Reakcje rozszczepienia (podziału) . . . . .	17		
1.3.9. Reakcje wymiany. . . . .	18		
1.3.10. Szeregi promieniotwórcze . . . . .	18		

### 1.1. Budowa atomu

Współczesny model atomu, opracowany w głównej mierze dzięki badaniom Hideki Yukawy, zakłada, że w jego centrum znajduje się jądro o dużej gęstości, które składa się z nukleonów. Poza jądrem atomowym znajduje się otaczająca je chmura elektronów. Występujące w jądrze atomowym nukleony: neutrony i protony wzajemnie na siebie oddziałują na zasadzie odpychających sił elektrostatycznych (oddziaływanie kulombowskie) pomiędzy protonami oraz przyciągających sił na zasadzie oddziaływania silnego. W atomach wszystkich pierwiastków występują elektrycznie dodatnie protony oraz (z wyjątkiem wodoru  $^1\text{H}$ ) obojętne elektrycznie neutrony. Elektrony mają ładunek ujemny i leżą na powłokach oraz podpowłokach, które to tworzą chmurę elektronową. Rozmiar pojedynczego atomu nie przekracza nanometra, jest rzędu  $10^{-10}$  m, natomiast samo jądro osiąga rozmiar rzędu pikometra  $10^{-15}$  m (rys. 1.1).



W każdym obojętnym atomie liczba protonów oraz elektronów jest jednakowa. Wynika to z tego, że ładunki protonów i elektronów wzajemnie się znoszą, czyli łączny ładunek protonów i elektronów w atomie wynosi zero.



Rysunek 1.1. Budowa atomu

Atomy są podstawowymi elementami budowy materii. Każdy pierwiastek niezależnie od jego odmiany alotropowej składa się z atomów jednego rodzaju – siarka z atomów siarki, a węgiel z atomów węgla. To, co charakteryzuje atomy danego pierwiastka, to liczba protonów. Liczbę protonów w jądrze oznacza się literą  $Z$ , którą to nazywamy liczbą atomową. Atomy danego pierwiastka mogą się natomiast różnić liczbą neutronów, co bezpośrednio wpływa na ich masę atomową. Jądro atomowe składa się z nukleonów: protonów i neutronów, i to one w głównej mierze odpowiadają za masę całego atomu. Kiedy zsumujemy liczbę protonów i neutronów, otrzymamy liczbę masową, którą oznaczamy literą  $A$ .

$$\begin{array}{l} \text{liczba masowa } A \rightarrow 238 \\ \text{liczba atomowa } Z \rightarrow 92 \end{array} \text{U}$$

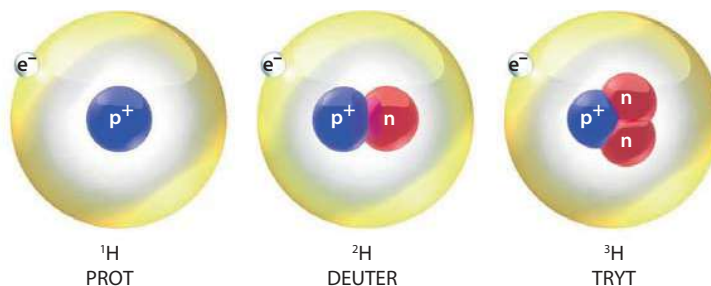
Dla przykładu potas  $^{39}\text{K}$  ma 19 protonów, 20 neutronów oraz 19 elektronów:  $A = 39$ ,  $Z = 19$ .



Atomy o tej samej liczbie protonów, a różnej liczbie neutronów nazywamy izotopami danego pierwiastka. Dla przykładu wodór występuje w postaci trzech izotopów:  $^1\text{H}$  – prot,  $^2\text{H}$  – deuter oraz  $^3\text{H}$  – tryt (rys. 1.2).

## 1.1. Budowa atomu

3



Rysunek 1.2. Izotopy wodoru

Jądro atomowe jest o 5 rzędów wielkości mniejsze od samego atomu. Znaczna część przestrzeni w atomie zajmowana jest przez elektrony. Elektrony te tworzą tak zwaną chmurę elektronową, czyli obszar, w którym występuje największa gęstość prawdopodobieństwa znalezienia elektronu. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga nie można jednocześnie podać pędu oraz położenia elektronu, dlatego też w rzeczywistości elektron należy rozpatrywać jako obszar rozmytego ładunku elektrycznego. Elektrony nie poruszają się wewnątrz całej chmury elektronowej. W zależności od ich energii znajdują się one w ograniczonych obszarach: powłokach oraz orbitalach elektronowych. Im bliżej jądra atomowego, tym elektron ma niższą energię (bardziej ujemną), a siła oddziaływania jądra na ten elektron jest wyższa.

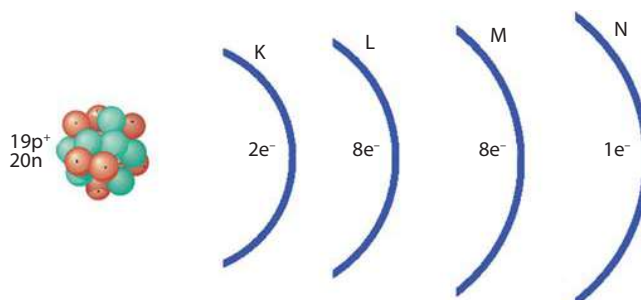
Funkcja falowa elektronu zależy od trzech liczb kwantowych:  $n$  – wyznaczającej powłokę,  $l$  – wyznaczającej tak zwane podpowłoki,  $m$  – wyznaczającej orbitale.

Za powłokę elektronową uważa się zbiór podpowłok elektronowych mających tę samą główną liczbę kwantową  $n$ . Dla ułatwienia można przyjąć, że liczba kwantowa  $n$  odpowiada okresowi, na którym leży dany pierwiastek. Wartościom liczby  $n$  przypisane są kolejne powłoki: K, L, M, N, O, P i Q (tab. 1.1).

Tabela 1.1. Powłoki oraz podpowłoki elektronowe

Symbol powłoki	Główna liczba kwantowa $n$	Maksymalna liczba elektronów na powłoce	Podpowłoki
K	1	2	s
L	2	8	s, p
M	3	18	s, p, d
N	4	32	s, p, d, f
O	5	50	s, p, d, f, g
P	6	72	s, p, d, f, g, h
Q	7	98	s, p, d, f, g, h, i

Konfiguracja elektronowa potasu  $^{39}\text{K}$  przedstawia się następująco:  $\text{K}^2 \text{L}^8 \text{M}^8 \text{N}^1$  (rys. 1.3).



**Rysunek 1.3.** Konfiguracja elektronowa potasu K-39

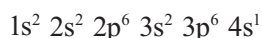
Powłoki elektronowe składają się z różnych orbitali atomowych, w ramach tak zwanych podpowłok elektronowych. Podpowłoki oznaczane są literami s, p, d, f, g, h, i. Podpowłoka s to podpowłoka o najniższej energii (najbardziej ujemnej), natomiast podpowłoka i ma energię najwyższą. Maksymalna liczba elektronów na podpowłokach określana jest wzorem:  $4l + 2$ , gdzie  $l$  to poboczna liczba kwantowa (tab. 1.2).

**Tabela 1.2.** Podpowłoki elektronowe

Podpowłoka	Poboczna liczba kwantowa	Maksymalna liczba elektronów na podpowłoce
S	$l = 0$	2
P	$l = 1$	6
D	$l = 2$	10
F	$l = 3$	14
G	$l = 4$	18
H	$l = 5$	22
I	$l = 6$	26

W celu podania pełnej konfiguracji elektronowej przed nazwą podpowłoki podaje się numer głównej liczby kwantowej (powłoki), w indeksie górnym podaje się liczbę elektronów.

Pełna konfiguracja elektronowa potasu  $^{39}\text{K}$  przedstawia się następująco:



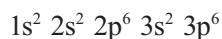
Możliwy jest również uproszczony zapis konfiguracji elektronów, w którym skraca się początkowy rdzeń konfiguracji elektronowej, zastępując go symbolem gazu szlachetnego w nawiasach kwadratowych i uzupełnia się go o pozostałe elektrony.



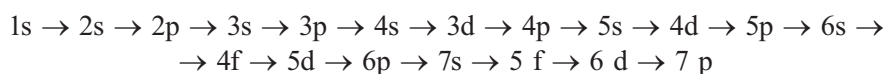
Uproszczona konfiguracja elektronowa potasu  $^{39}\text{K}$  przedstawia się następująco:



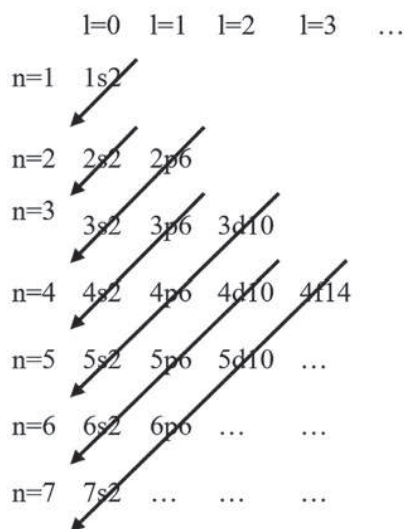
gdź pełna konfiguracja argonu wygląda następująco:



Kolejność zapełniania podpowłok elektronowych wynika z postulatów, że w kolejnych atomach orbitale elektronowe zapełniane są w kolejności rosnącej sumy liczb kwantowych  $n + l$ . W przypadku identycznej sumy  $n + l$  zapełniana jest podpowłoka o większej wartości liczby  $n$



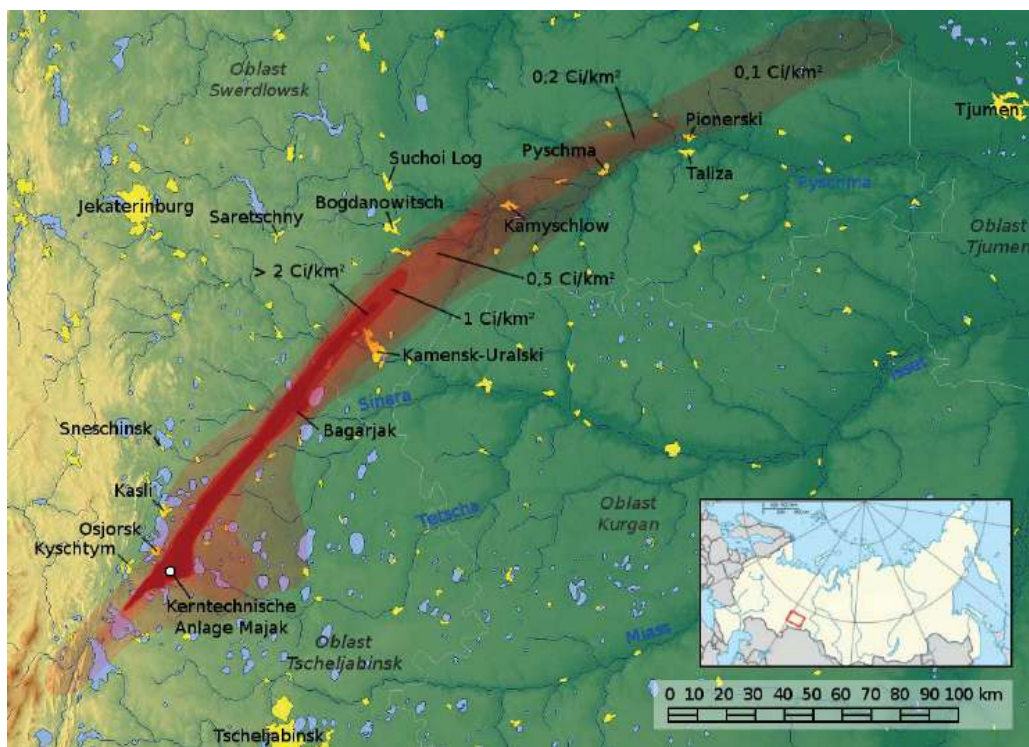
Kolejność tę można zapamiętać poprzez ukośne sczytywanie macierzy trójkątnej (rys. 1.4).



Rysunek 1.4. Matryca kolejności zapełniania podpowłok elektronowych

## 1.2. Izotopy

Izotopy tego samego pierwiastka to odmienne postacie atomów, różniące się liczbą neutronów w jądrze. Izotopy tego samego pierwiastka mają więc tę samą liczbę atomową, a różnią się liczbą masową. W niniejszej książce pisząc o izotopach, autor



Rysunek 7.1. Zasięg skażenia terenu w wyniku katastrofy kysztymskiej

Źródło: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Ostural-Spur.png> [dostęp 15.10.2019]

### 7.3. Windscale. Wielka Brytania, 1957 rok – INES 5

Do udokumentowanych awarii reaktorów wykorzystywanych do celów militarnych można natomiast zaliczyć tę, która miała miejsce 10 października 1957 roku w zakładach Sellafield, w Wielkiej Brytanii<sup>118</sup>. Reaktory Windscale można uznać za konstrukcje należące do I generacji GCR. Po drugiej wojnie światowej, kiedy USA nałożyły embargo na technologie jądrowe, Brytyjczycy pracujący przy Projekcie Manhattan zdecydowali o kontynuowaniu prac nad własną bronią jądrową. W tym celu zdecydowano się wybudować 2 reaktory, zdolne do produkcji plutonu <sup>239</sup>Pu oraz trytu <sup>3</sup>H. Reaktory Windscale 1 oraz Windscale 2 zostały zbudowane nieopodal wioski Seascale w Anglii. Ich konstrukcja była dość prosta: moderatorem był grafit w postaci oktagonalnych płyt poprzecinanych pionowymi otworami na pręty kontrolne, a chłodziwem powietrze. Paliwo, które było zarazem substratem do produkcji plutonu, było ładowane od przodu, a usuwane z tyłu reaktora. Schemat ideowy działania tego reaktora został przedstawiony na rysunku 7.2.

<sup>118</sup> A. Strupczewski, *Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej*, WNT, Warszawa 1990.

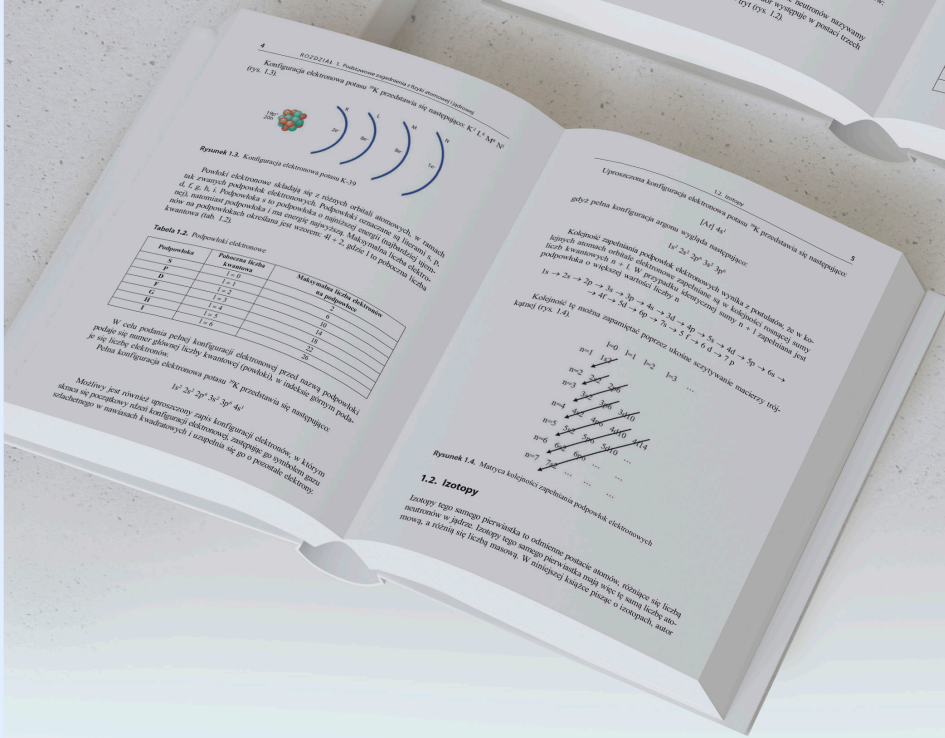
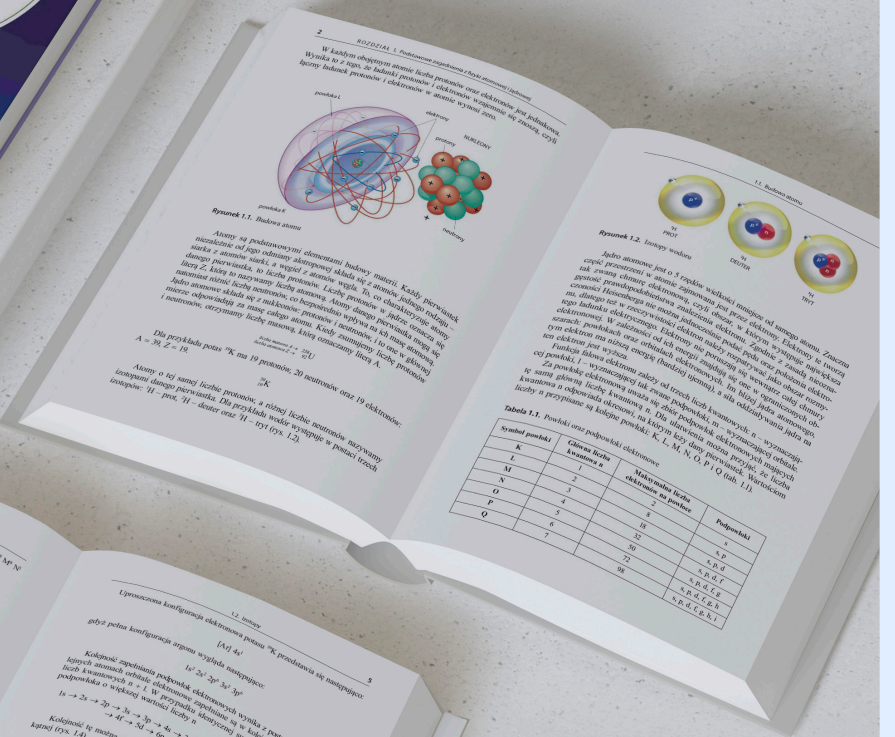
Fragment pochodzi z książki:

## Bezpieczeństwo radiologiczne

Krzysztof Król

Wydawnictwo Naukowe PWN 2024





**SPRAWDŹ**

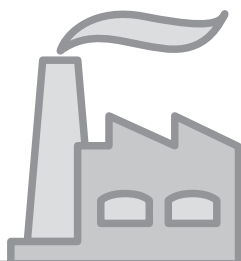


Ryszard Bartnik

# **ELEKTROWNIE I ELEKTROCIEPŁOWNIE JĄDROWE Z REAKTORAMI HTGR I SMR**



## ROZDZIAŁ 1

**Wprowadzenie**

*Niepodobna znać rzeczy tego świata,  
jeśli się nie zna ich matematycznie*

*For the things of this world cannot be made  
known without a knowledge of mathematics*

Roger Bacon (1214–1294)

Energetyka jądrowa powinna odgrywać na świecie wręcz podstawową rolę. I to z wielu powodów. Jednym z najważniejszych jest ogromna ilość uranu na Ziemi, którego wystarczy na miliardy lat. Paliwo jądrowe zapewni zatem bezpieczeństwo energetyczne światu na miliardy lat. Energetyka jądrowa jest ponadto „czystą” technologią energetyczną, nieemitującą pyłów, związków siarki, azotu ani dwutlenku węgla, za którego emisję politycy Unii Europejskiej nałożyli duży podatek. Mało tego, bardzo mocno forsują w górę jego wysokość, co w końcu spowoduje, że nawet elektrownie i elektrociepłownie w hierarchicznej technologii gazowo-parowej z turbinami gazowymi, w których spalany jest gaz ziemny, staną się ekonomicznie nieopłacalne, choć już w tej chwili są na granicy opłacalności (patrz wartości jednostkowej ceny pozwoleń na emisję dwutlenku węgla w tab. 6.1 i 6.2 – rozdz. 6). Nie można bez końca podnosić cen energii elektrycznej i ciepła, co właśnie wymusza wzrost podatku od emisji CO<sub>2</sub>! Delikatnie mówiąc, jest karygodnym błędem, że politycy unijni „niszczą” technologię, która charakteryzuje się, co szalenie ważne, największą sprawnością wytwarzania energii elektrycznej. Zielona ideologia klimatyczna [19–23] doprowadzi w końcu do ostrego kryzysu gospodarczego świata i oby tylko na tym się skończyło. Kto i dlaczego to wymyślił? *Quo Vadis* świecie polityki?

Z tych powodów oraz z konieczności rozwijania technologii jądrowej w monografii poddano analizie elektrownie i elektrociepłownie jądrowe w hierarchicznych,

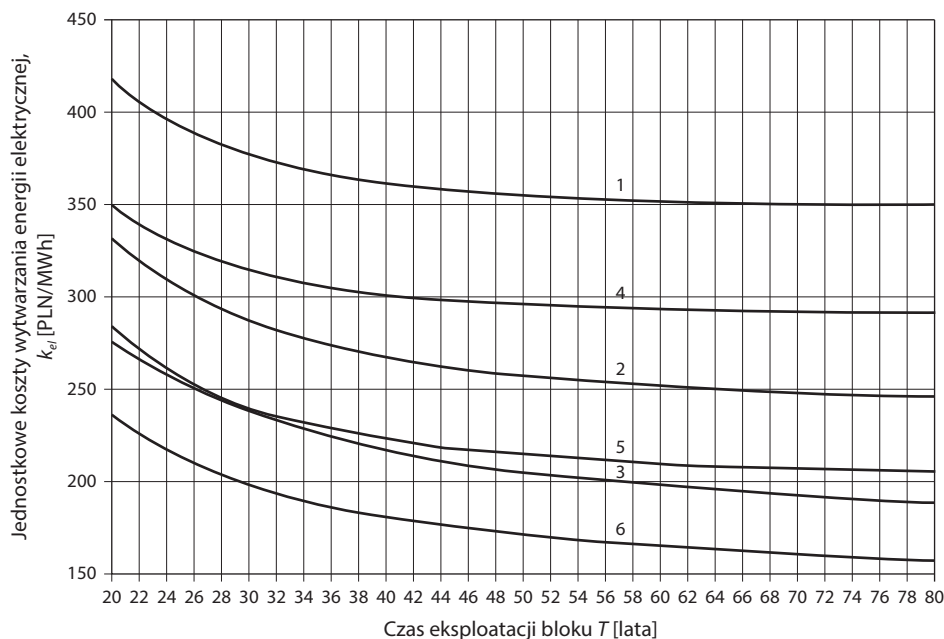


dwuobiegowych technologiach gazowo-gazowej i gazowo-parowej, w których turbinę gazową zastąpiono wysokotemperaturowym reaktorem HTGR chłodzonym helmem (ang. *High Temperature Gas-cooled Reactor*). Pozwala to zachować bardzo wysoką sprawność elektryczną tych technologii, która gwarantuje bardzo niskie jednostkowe koszty produkowanej w nich energii elektrycznej i ciepła. Przeanalizowano ponadto elektrownie i elektrociepłownie jądrowe, w których realizowany jest wyłącznie obieg Clausiusa–Rankine’a z reaktorami SMR (ang. *Small Modular Reactor*).

Być może w przyszłości rolę energetyki jądrowej przejmie fuzja termojądrowa, pod warunkiem że prace prowadzone nad jej technicznym opanowaniem zostaną uwieńczone sukcesem. Ludzkość będzie dysponowała wówczas niewyczerpanym źródłem „czystej” energii. Od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku słyszymy jednak, że jest już blisko, i ciągle nic. Czy zatem w ogóle to nastąpi, czy jest bowiem możliwa kontrolowana ingerencja techniczna człowieka w strukturę jądra atomu? W przypadku bowiem reakcji jądrowej ma miejsce jedynie kontrola liczby rozbijanych jąder i proces ten odbywa się na zewnątrz samych atomów przez ograniczanie liczby neutronów bombardujących je dzięki stosowaniu prętów regulacyjnych. Możliwość kontrolowanej ingerencji człowieka w strukturę budowy atomu dawałaby nieprawdopodobne, wręcz niewyobrażalne możliwości. Możliwości tworzenia nowej rzeczywistości, tworzenia nowego świata zarówno w wymiarze fizycznym, jak i duchowym. Jakie byłyby tego konsekwencje? Czy *dotyk Midasa* zamieniający wszystko w złoto nie stałby się wówczas rzeczywistym przekleństwem?

Na rysunku 1.1 przedstawiono wartości jednostkowego kosztu produkcji energii elektrycznej w elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym w funkcji czasu jej eksploatacji  $T$  dla szerokiego zakresu zmian wartości jednostkowych (na jednostkę zainstalowanej mocy elektrycznej) nakładów inwestycyjnych  $i$  oraz stopy oprocentowania kapitału inwestycyjnego  $r$  (rekordową wręcz wartość równą  $i = 23$  mln PLN/MW osiągnęły nakłady jednostkowe dla bloku o mocy elektrycznej 1600 MW oddanego do eksploatacji w kwietniu 2023 r. w Finlandii na wyspie Olkiluoto; tak bardzo wysokie nakłady są wynikiem prawie jego dwudziestoletniej budowy z licznymi, bardzo dużymi problemami). Obecnie można uzyskać oprocentowanie kapitału inwestycyjnego na budowę elektrowni jądrowych w wysokości już nawet od ok.  $r = 1\%$  do ok.  $r = 3\%$ . Tak nisko oprocentowane kredyty są udzielane dzięki pośrednictwu agencji kredytów eksportowych (ang. *Export Credit Agency – ECA*). Agencje takie istnieją w krajach, które posiadają technologie jądrowe, np. we Francji i w USA. Podstawowym jednak warunkiem uzyskania takich środków jest wykorzystanie pożyczki na zakup towarów i usług w krajach ojczyźstych, w których funkcjonują agencje ECA. Gwarancje rządowe dla inwestora istotnie przy tym wpływają na zmniejszenie tego oprocentowania. Jak wynika z rysunku 1.1, jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej w bloku jądrowym z reaktorem wodnym dla wartości stopy  $r = 3\%$

(oraz oczywiście i niższych) i dla czasu eksploatacji  $T = 60$  lat (czas ten jest obecnie normą dla bloków jądrowych) wynosi nawet znacznie poniżej 200 PLN/MWh, a więc jest istotnie mniejszy od kosztów uzyskiwanych w pozostałych technologiach. Gdyby natomiast należało spłacić kredyt o oprocentowaniu  $r = 3\%$  nie w okresie  $T = 60$  lat, a w okresie  $T = 20$  lat, to wówczas cena sprzedaży energii elektrycznej musiałaby wynosić powyżej ok. 280 PLN/MWh dla jednostkowych nakładów inwestycyjnych  $i = 18$  mln PLN/MW oraz powyżej ok. 240 PLN/MWh dla jednostkowych nakładów inwestycyjnych  $i = 15$  mln PLN/MW – rysunek 1.1 (dla stopy  $r = 8\%$  oraz  $i = 18$  mln PLN/MW cena ta musiałaby być wyższa od 419 PLN/MWh). Po okresie  $T$  lat, czyli gdy elektrownia jest już zamortyzowana, jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej wynosiłby już tylko 115 PLN/MWh.



**Rysunek 1.1.** Jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym w funkcji lat  $T$  jej eksploatacji dla jednostkowych nakładów inwestycyjnych  $i$  oraz stopy dyskonta  $r$  jako parametrów: 1 –  $i = 18$  mln PLN/MW,  $r = 8\%$ , 2 –  $i = 18$  mln PLN/MW,  $r = 5\%$ , 3 –  $i = 18$  mln PLN/MW,  $r = 3\%$ , 4 –  $i = 15$  mln PLN/MW,  $r = 3\%$ , 5 –  $i = 15$  mln PLN/MW,  $r = 5\%$ , 6 –  $i = 15$  mln PLN/MW,  $r = 3\%$

Wówczas, przy utrzymaniu ceny sprzedaży energii elektrycznej na poziomie z lat spłaty kredytu, inwestor osiągałby wysokie zyski, co wiązałoby się z płaceniem wysokich podatków. Aby tego uniknąć, musiałby do rozwiązania tego problemu „zaprząć” z góry metody inżynierii finansowej i tak skonstruować dla wszystkich lat budowy i eksploatacji bloku harmonogram rocznych przepływów

pieniężnych (ang. *cash flow*), tj. przychodów i wszelkich płatności związanych z kosztami finansowymi kredytu (tj. sumą odsetek od niego) oraz podatkami, by zmaksymalizować swój zysk. Należy zawsze przy tym jednak pamiętać, że wydłużanie łańcucha wszelkich płatności, tj. dokładanie do niego kolejnych ogniów, zawsze przynosi tylko straty. I jest to nie tylko fundamentalna zasada w ekonomii, ale we wszystkich dziedzinach nauki, co więcej, we wszystkich sferach życia. Posługując się kolokwializmem, należy powiedzieć, że wszelkie „kombinacje” przynoszą w konsekwencji zawsze wyłącznie złe skutki, chociaż prawdą jest też i to, że czasami zgodnie z przysłowiem zdarza się jednak, że *nie ma tego złego, co by na dobre nie wyszło*. Najgorsze w tym wszystkim jest jednak zdecydowanie to, że jest regułą, że światem, w interesie jego możliwych, zawsze rządziło, rządzi i z całą pewnością niestety będzie rządziło kłamstwo, a prawda, by nie powiedzieć dobitnie, propaganda, jest wyłącznie taka, która je uwiarygodnia.

Należy powrócić jeszcze do wysokiego podatku od zysku, o którym wspomniano powyżej. Jak należy sądzić, a nawet należy z całą pewnością stwierdzić, bo jest to oczywiste, że najkorzystniejsze jest jak najszybsze spłacenie jak najtańszego kredytu, co więcej, branego kolejnymi transzami w miarę postępu realizacji inwestycji, gdyż minimalizuje to koszt finansowy kredytu, a następnie po jego spłaceniu należy zmniejszyć cenę sprzedaży energii elektrycznej. Taki powinien być końcowy wynik analiz maksymalizujących zysk inwestora przeprowadzonych za pomocą wszelkich znanych z inżynierii finansowej sposobów uzupełniających finansowanie dowolnych inwestycji. Jest to grupa trzech sposobów: (1) rewolwing, (2) depozyty (mówiąc bez ogródek, pseudo zabezpieczenia) i (3) mechanizmy transferowe. Są to sposoby, w których stosowaniu prym wiodą korporacje ponadnarodowe wynajęte przez inwestora do realizacji inwestycji i załatwiający przy tym jednocześnie jej finansowanie. Jednak wykorzystują one te sposoby nie w interesie inwestora, a w złej wierze tylko po to, by zwiększyć swój zysk i nie płacić podatków w ogóle (straty ponosi wówczas inwestor oraz Skarb Państwa, w którym realizowana jest inwestycja, a więc i obywatele tego państwa; Skarb Państwa też może być investorem). Jak już powyżej wspomniano, sposoby te to mechanizmy tzw. cen transferowych (ang. *transfer pricing*), jest to również rolowanie części niespłaconego kredytu podstawowego za pomocą kolejnych tzw. pożyczek rewolwingowych, tj. odnawialnych kredytów obrotowych branych w wielu bankach. Kredyty te istotnie zwiększają koszt finansowy inwestycji (standardowo koszt finansowy kredytu wynosi od ok. 25% do 50% jego wartości, rewolwing może go zwiększyć nawet do 100%; jest to zatem zabójcza broń wymierzona w inwestora). Co więcej, zarabiają na tym banki mające z reguły siedziby nie w kraju, w którym realizowana jest inwestycja, a w kraju siedziby centrali podmiotu, który został do jej realizacji wynajęty. W końcu sposobami zmniejszania zysku inwestora są też różnego rodzaju zabezpieczenia, których żąda realizujący inwestycję. Z reguły jest to konieczność zdeponowania przez zamawiającego inwestycję pewnej kwoty pieniędzy, z reguły bardzo dużej, na nieoprocentowanym



(dla niego) rachunku w banku wskazanym przez podmiot wynajęty do jej realizacji (oczywiście realizujący inwestycję pobiera odsetki od tych pieniędzy). Mechanizmy cen transferowych natomiast pozwalają zagranicznym korporacjom, międzynarodowym koncernom, na transferowanie zysków za granicę. Tam, gdzie państwo jest nieudolne, a prawo „dziurawe”, sztucznie manipulują w ramach koncernu zyskami i kosztami, tak aby zyski i straty były tam, gdzie im najwygodniej. Transferują nielegalnie zyski za granicę, na przykład w postaci opłat, będących oczywiście fikcyjnymi kosztami, na rzecz swoich central, w postaci opłat licencyjnych, bardzo wysokich opłat za ekspertyzy prawne, techniczne, finansowe, eksportują z kraju, w którym realizują inwestycję tanio, importują drogo itd. Jak już zaznaczono, straty ponosi zawsze Skarb Państwa i jego obywatele. To oni przecież, odbiorcy energii, ostatecznie będą musieli płacić za elektryczność cenę, w której zawarte są wszystkie nieuzasadnione, bardzo mocno przy tym wywindowane koszty jej produkcji. Jeśli zatem coś należy zrobić dobrze, by nie powiedzieć dobitnie, że uczciwie, wydając przy tym środki finansowe w uzasadniony sposób, to należy postępować zgodnie z zasadą: *zrób to sam!* Jeżeli jednak inwestora nie stać, by samemu zrealizował inwestycję, to musi pogodzić się z faktem, że inwestycja będzie bardzo droga. Z uwagi na „kombinacje” inżynierii finansowej nawet dwa razy droższa, niż zrealizowałby ją sam, bowiem suma kosztów finansowych wszystkich kredytów będzie dorównywała nakładowi inwestycyjnemu. Wynajęcie zatem do budowy na przykład elektrowni jądrowej zagranicznego podmiotu, który jednocześnie załatwia jej finansowanie, jest najgorszym z najgorszych, bo najdroższym sposobem jej zbudowania. Dotyczy to oczywiście także każdej innej dowolnej inwestycji. Warto zatem by inwestor sam realizował inwestycję, nawet gdyby stopa oprocentowania kredytu wynosiła 5% i więcej.

Pomimo tego że książka nie jest poświęcona energetyce wodorowej, to jednak konieczne jest poświęcenie i jej uwagi, jako że niektórzy politycy na nią wskazują, a nie na energetykę jądrową, jako na technologię mającą mieć wiodącą rolę w powszechnej energetyce, przynajmniej w Europie. Jest to wręcz kuriozalny pogląd, jako że wodór trzeba produkować. Tak, wodór trzeba produkować (sic!), bo w przyrodzie w stanie wolnym nie występuje! Należy zatem odpowiedzieć na pytanie, czy energetyka wodorowa ma sens? Aby na nie odpowiedzieć, należy przyjrzeć się stechiometrii produkcji wodoru. Właśnie ta konieczność produkcji, ale nie tylko, każe zastanowić się nad sensem energetyki wodorowej. Wyprzedzając wyniki przeprowadzonych poniżej krótkich, ale całkowicie wystarczających analiz, bo dotyczą one sedna sprawy, należy *expressis verbis* stwierdzić, że energetyka wodorowa jest termodynamicznym, technicznym, ekonomicznym i środowiskowym absurdem, i, na szczęście, jest niemożliwa.

Wodór można produkować w procesie reformingu gazu ziemnego parą wodną (reakcja (1.1)) lub w procesie zgazowania węgla. W procesie reformingu produkuje się go z paliw zawierających metan lub inne węglowodory. Na przykład, w przypadku metanu produkcja odbywa się według endotermicznej reakcji (potrzeby

energetyczne na wysokotemperaturowe ciepło dla tej reakcji w temperaturze normalnej 25°C wynoszą 206 280 kJ na każdy kilomol CH<sub>4</sub>; entalpia dewaluacji 1 kilomola metanu CH<sub>4</sub> w temperaturze normalnej 25°C wynosi 802 870 kJ, pary wodnej H<sub>2</sub>O jest równa zero, tlenku węgla CO – 283 150 kJ/kmol, a 1 kilomola wodoru H<sub>2</sub> – 242 000 kJ):

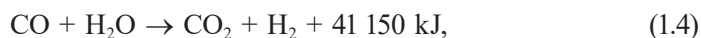


Dzięki dodaniu pary wodnej i podgrzaniu substratów reakcji do dostatecznie wysokiej temperatury, około 900–1400 K (im wyższa temperatura substratów, tym stan równowagi chemicznej przesuwają się na korzyść produktów reakcji endotermicznej), uzyskuje się zmianę składu chemicznego podgrzewanych substratów i energia chemiczna produktów reakcji, zgodnie z zasadą zachowania energii, która oczywiście obowiązuje nie tylko w przemianach fizycznych, ale i chemicznych, zostaje zwiększona o dostarczone ciepło.

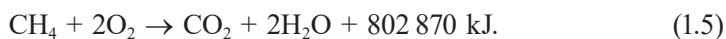
Rodzi się pytanie, co zrobić z trującym czadem CO powstającym w wyniku reakcji reformingu (1.1). Należy i do niego zastosować konwersję parą wodną. Zgodnie z reakcją egzotermiczną (wydziela się bowiem w tej reakcji 41 150 kJ ciepła z każdego kilomola CO; ilość ta odpowiada temperaturze normalnej 25°C; entalpia dewaluacji 1 kilomola dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> wynosi zero) otrzymuje się CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>:



W konsekwencji z obu powyższych reakcji:



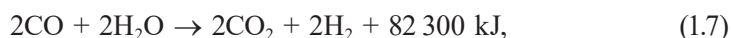
powstaje tyle samo CO<sub>2</sub> co w sytuacji, gdy CH<sub>4</sub> spala się bezpośrednio na przykład w turbinie gazowej:



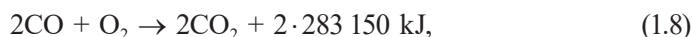
A jak wygląda reakcja reformingu metanu dwutlenkiem węgla? Zgodnie z reakcją:



nie ma on całkowicie sensu, gdyż do powstałych wówczas 2 kilomoli tlenku węgla do jego konwersji na wodór w reakcji:



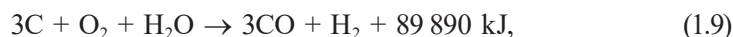
należałoby obok źródła CO<sub>2</sub> potrzebnego do zajścia reakcji (1.6) dysponować jeszcze źródłem pary wodnej, co znacznie podrożałoby koszt instalacji reformingu. Należałoby zatem spalać powstały tlenek węgla:



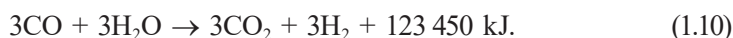
w wyniku czego, tak jak w reakcji (1.7), również powstawałoby dwa razy więcej dwutlenku węgla. Zamiast zatem ograniczać ilość CO<sub>2</sub>, w wyniku reformingu metanu dwutlenkiem węgla dwukrotnie zwiększałaby się jego ilość.

Należy ponadto *expressis verbis* zaznaczyć, że reakcja (1.1) reformingu metanu parą wodną ma sens wyłącznie wtedy, gdy dysponuje się wysokotemperaturowym ciepłem odpadowym (ze względu na stan równowagi chemicznej produktów reakcji najlepiej byłoby, gdyby była to temperatura ok. 1200–1400 K). Mogą to być na przykład wysokotemperaturowe spaliny odlotowe z instalacji przemysłowych. W ten sposób byłaby bowiem realizowana chemiczna regeneracja ciepła odpadowego, a więc miałyby miejsce oszczędność energii chemicznej paliw dzięki wykorzystaniu właśnie tego ciepła. W przypadku jego braku, aby mogła zajść endotermiczna reakcja (1.1), należałoby spalać paliwa kopalne (co generowałoby kolejne ilości dwutlenku węgla), by dostarczyć do niej ciepło w ilości 206 280 kJ na każdy kilomol CH<sub>4</sub>. Należy przy tym pamiętać, że straty energii w dwóch reakcjach są oczywiście zawsze większe niż w jednej. Wydłużanie bowiem łańcucha przemian termodynamicznych zawsze zwiększa straty. Tak więc zgodnie z zasadą zachowania energii energetyczny efekt końcowy dla jednej reakcji, tj. bezpośredniego spalania paliw kopalnych, jest większy niż przy trzech reakcjach, tj. dwóch reakcjach reformingu i trzeciej reakcji spalania w instalacjach energetycznych wyprodukowanego wodoru w tych dwóch pierwszych. Co równie bardzo ważne, jeśli nie ważniejsze, efektywność ekonomiczna produkcji energii elektrycznej za pomocą jednej reakcji jest, co oczywiste, nieporównywalnie wyższa niż w trzech. Każda bowiem reakcja wymaga nakładów inwestycyjnych na instalacje do jej realizacji, które niosą ze sobą roczne koszty kapitałowe i eksploatacyjne ich działania.

A jak wygląda sytuacja produkcji wodoru w procesie gazyfikacji węgla? Analizując stechiometrię tej reakcji (entalpia dewaluacji w temperaturze normalnej 25°C 1 kilomola węgla C wynosi 393 780 kJ, a tlenu O<sub>2</sub> jest równa zeru):



i stosując konwersję parą wodną do powstałych w tej reakcji 3 kilomoli trującego czadu CO, otrzymuje się 3 kilomole dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>:



Okazuje się zatem, co oczywiste, że ilość dwutlenku węgla powstała w procesie zgazowania węgla jest identyczna jak przy jego bezpośrednim spalaniu na przykład w kotle w elektrowni:



Tak więc i zgazowanie węgla, i wykorzystywanie wyprodukowanego wodoru, tak jak w przypadku reformingu gazu ziemnego, też wymaga trzech reakcji. Przeprowadzona zatem kilka wierszy powyżej króciutka analiza termodynamiczno-ekonomiczna produkcji energii elektrycznej z wodoru otrzymywanego z reformingu gazu ziemnego jest słuszna i dla jej produkcji z wodoru otrzymywanego ze zgazowania węgla.

Powyższe reakcje dowodzą, że energetyka wodorowa w najwyższym stopniu, mówiąc najdelikatniej jak tylko można, to absurd! Jej celem ma przecież być ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>, aby zapobiec efektowi cieplarnianemu, a tymczasem będzie on przez nią wielokrotnie większy (interesującymi artykułami o zmianach klimatu wywołanymi tzw. efektem cieplarnianym są pozycje [19–23]). Jak bowiem wynika z reakcji (1.1)–(1.11), energetyka wodorowa generuje nie tylko identyczną ilość dwutlenku węgla jak energetyka konwencjonalna bezpośrednio spalająca paliwa kopalne, ale dodatkowo generuje parę wodną powstającą ze spalania wodoru, która jest w wielokrotnie większym stopniu, ok. 6 razy, gazem cieplarnianym niż dwutlenek węgla (sic!). Należy zatem jeszcze raz bardzo dobitnie powiedzieć, że energetyka wodorowa przyczyni się wielokrotnie bardziej do efektu cieplarnianego, ponieważ będzie on spowodowany nie tylko dwutlenkiem węgla powstałym przy produkcji wodoru, ale i dodatkowo parą wodną. Nic w przyrodzie nie ginie i tak jak pozostaje dla tych reakcji słuszna zasada zachowania energii, tak i ilość pierwiastków biorących udział w tych reakcjach pozostaje niezmienna, i żadne „kuglarstwo wodorowe” tego nie zmieni!

Czemu zatem ma służyć energetyka wodorowa? Należy w tym miejscu zadać też kolejne, wręcz fundamentalne pytania, co dzieje się z nauką, co z jej rzetelnością naukową? Dlaczego została tak oderwana od prawdy? Dlaczego niektórzy ludzie nauki wbrew prawdzie o energetyce wodorowej ją popierają? Prawdy, której powinna przecież nauka poszukiwać i z całą mocą, bez żadnych kompromisów, jej służyć. A nie służyć interesom kierujących się wyłącznie chęcią ciągłych zysków przedsiębiorców, którzy są w stanie je osiągać tylko przez dostarczanie na rynek kolejnych nowości technicznych, i lobbujących na ich rzecz polityków. Bo istotą nauki jest przecież stawianie pytań o prawdy otaczającego nas świata i odpowiadanie na nie, a nie powielanie propagandy, która, jak to propaganda, z prawdą nie ma nic wspólnego. Dlaczego nauka, delikatnie mówiąc, w tak dużym stopniu została też oderwana od zdrowego rozsądku? Jest jeszcze inny wymiar energetyki wodorowej, bardzo groźny. Jest nim chęć zdominowania gospodarczego i politycznego jednych państw przez państwa posiadające duże złoża gazu

ziemnego, a także państwa nim handlujące (należy przypomnieć, że wodór miałby być produkowany z gazu – reakcja (1.1)). Należałoby zatem, by nie tylko ludzie nauki, ale i niektórzy politycy sięgnęli po wiedzę i z jej pomocą poszukiwali prawdy, a nie powielali celowe, szkodliwe kłamstwa i absurdy o energetyce wodorowej. Co więcej, nakłady inwestycyjne na energetykę wodorową są wielokrotnie większe w porównaniu z energetyką konwencjonalną. Zatem koszt wytworzenia w niej energii elektrycznej też będzie wielokrotnie większy. Kogo będzie wówczas na nią stać?

Rzeczywistość i logika jednoznacznie wskazują, że pomysł dekarbonizacji energetyki, a więc system handlu emisjami dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> EU ETS (ang. *European Union Emission Trading Scheme*) i w konsekwencji energetyka wodorowa powstały w głowach polityków i zostały wprowadzone w Europie przy ich pomocy. Dekarbonizacja, system EU ETS oraz energetyka wodorowa służą wyłącznie ich interesom. Tak samo ma się rzecz z odnawialnymi źródłami energii (OZE), w których produkcja energii elektrycznej jest znikoma i przy tym bardzo droga, wielokrotnie droższa od produkcji w elektrowniach konwencjonalnych. Kolejny raz należy *expressis verbis* powiedzieć, że forsowana dekarbonizacja energetyki, EU ETS, OZE oraz energetyka wodorowa mają zatem za cel służyć interesom przedsiębiorców i polityków. Dlatego należy jak najszybciej wrócić w energetyce do węgla i jednocześnie budować energetykę jądrową (sic!).

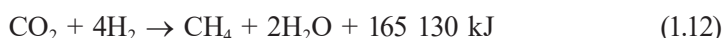
Jeszcze większym, wręcz przeogromnym absurdem jest produkcja wodoru w procesie elektrolizy wody. Fundamentalną bowiem wadą produkcji wodoru w bardzo drogich elektrolizerach (jednostkowe, na jednostkę mocy elektrycznej, nakłady inwestycyjne na elektrolizery wynoszą co najmniej ok. 8,5 mln PLN/MW, są więc znacząco wyższe nawet od wysokich jednostkowych nakładów wynoszących ok. 6,5 mln PLN na elektrownie na nadkrytyczne parametry pary świeżej) jest to, że z ilości ok. 180 MJ energii elektrycznej, najszlachetniejszej postaci energii w każdym tego słowa znaczeniu, uzyskuje się tylko kilogram wodoru (wartość opałowa wodoru wynosi  $W_d = 121 \text{ MJ/kg}_{\text{H}_2}$ ), z którego na powrót można otrzymać zaledwie ok. 60 MJ energii elektrycznej, tj. tylko 33% energii elektrycznej wykorzystanej do jego produkcji ( $60 \text{ MJ} = 0,33 \cdot 180 \text{ MJ}$ ). Pozostałe 67% energii jest zatem bezpowrotnie tracone (sic!). Produkcja taka jest zatem „termodynamicznym barbarzyństwem”, jest absurdem nad absurdami! Wkładamy bowiem 180 MJ energii elektrycznej, by za bardzo duże pieniądze otrzymać z nich zaledwie 60 MJ energii elektrycznej. Ponadto, aby z tego wodoru produkować energię elektryczną, należałoby dodatkowo zainwestować znaczne środki finansowe na elektrownie go spalające. Obecnie wodór pozyskiwany jest głównie w procesie reformingu gazu ziemnego parą wodną zgodnie z reakcją endotermiczną (1.1) (w Polsce produkuje się tak ok. 1 mln ton wodoru rocznie). Potrzeby energetyczne na ciepło (ciepło charakteryzuje się, w przeciwieństwie do energii elektrycznej, niską jakością, tj. niską egzergią) dla tej reakcji, jak już wyżej wspomniano, wynoszą ok. 206 MJ/kmol CH<sub>4</sub>. Są więc ponad 5 razy mniejsze na kilogram otrzymanego



wodoru od potrzeb energetycznych w procesie elektrolizy wody, w którym są one ponadto zaspokajane nie ciepłem, a energią elektryczną. Energią tożsamą z energią, a więc energią o najwyższej termodynamicznej jakości, a więc drogiej, gdy tymczasem ciepło charakteryzuje się niską jakością, tj. niską egzergią, a więc jest relatywnie tanie. Ponadto nakłady inwestycyjne na instalacje reformingu są małe w porównaniu z nakładami na elektrolizery i źródła energii elektrycznej. Tym samym jednostkowy koszt pozyskanego w ten sposób wodoru jest zdecydowanie niższy. Według szacunkowych obliczeń nie przekracza 13–15 PLN/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Jeszcze tańszym źródłem produkcji wodoru powinien być gaz koksowniczy (trwają nad tym prace) i gaz z odmetanowania kopalń (cena tych gazów to ok. 200 PLN za 1000 m<sup>3</sup><sub>n</sub>; w przeliczeniu na jednostkę energii to ok. 8 PLN/GJ; gazy te są zatem 4 razy tańsze od rosyjskiego gazu ziemnego; obecnie te relacje przez wywołaną przez Rosję wojnę zostały bardzo mocno zachwiane). Roczna sumaryczna ilość tych gazów w Polsce dostępna dla reformingu wynosi ok. 2,5 mld m<sup>3</sup><sub>n</sub>, w tym ok. 1,5 mld to gaz koksowniczy. Jest to gaz sprzedawany przez koksownie odbiorcom zewnętrznym po zaspokojeniu potrzeb własnych wynikających z produkcji koksu.

Obecnie wodór jest produkowany wyłącznie na potrzeby branży chemicznej, petrochemicznej, metalurgicznej (i np. do napędu statków kosmicznych) i tak powinno zostać. Produkcja ta odbywa się głównie w procesie reformingu gazu ziemnego parą wodną zgodnie z reakcją endotermiczną (1.1). Co więcej, by produkować tyle wodoru, który byłby w stanie zaspokoić potrzeby energetyczne świata, zabrakłoby na nim wszystkich razem wziętych elektrowni, gdyby chciał go produkować w procesie elektrolizy wody. Nawet gdyby dodatkowo pokryć całą kulę ziemską turbozespołami wiatrowymi i panelami fotowoltaicznymi, to i tak produkcja wodoru z wykorzystaniem wyprodukowanej w nich energii elektrycznej byłaby znikoma w porównaniu do potrzeb energetycznych świata. Należy przy tym ponadto pamiętać, co szalenie ważne, że zużycie energii w rachunku ciągłym, tj. zużycie całkowitej energii począwszy od wydobycia surowców potrzebnych do wyprodukowania i zainstalowania OZE, szczególnie paneli fotowoltaicznych, jest większe niż są one w stanie same wytworzyć w czasie swojej pracy [23]. A jeszcze należy doliczyć energię potrzebną do ich utylizacji. Co równie bardzo ważne, zarówno te na lądzie, jak i na morzu nie mają również sensu ekologicznego, zaśmiecają bowiem i niszczą w wysokim stopniu środowisko naturalne. Zaśmiecają także krajobraz. Na przykład zużyte łopaty turbozespołów wiatrowych po ich zakopaniu w ziemi nigdy się nie rozłożą, będą zaśmiecały środowisko raz na zawsze.

Są też, co należy *expressis verbis* powiedzieć, absurdalne pomysły, by wykorzystywać wodór do produkcji metanu zgodnie z reakcją egzotermiczną:



(bardzo duża ilość ciepła wydzielanego w czasie reakcji równa jest różnicy wartości opałowych wodoru i metanu; wartość opałowa 1 kilomola wodoru

$MW_d = 242 \text{ MJ/kmol}_{\text{H}_2}$ ;  $1 \text{ kmol}_{\text{H}_2} = 2 \text{ kg}_{\text{H}_2}$ , wartość opałowa metanu równa się  $MW_d = 802,87 \text{ MJ/kmol}_{\text{CH}_4}$ ,  $W_d = 50,15 \text{ MJ/kg}_{\text{CH}_4}$ ;  $1 \text{ kmol}_{\text{CH}_4} = 16 \text{ kg}_{\text{CH}_4}$ ). Są niestety „mędracy”, którzy twierdzą, że taka produkcja jest dobrodziejstwem, gdyż dzięki niej wiązany jest dwutlenek węgla powstały ze spalania węgla w elektrowniach w procesie produkcji energii elektrycznej, a więc automatycznie znika jego problem. Świadczy to o całkowitym braku pojmowania zachodzących reakcji i zjawisk termodynamicznych. By pozbyć się  $\text{CO}_2$ , „niszczy” się bowiem energię elektryczną z poziomu  $1440 \text{ MJ} = 4 \text{ kmol}_{\text{H}_2} \cdot 2 \text{ kg}_{\text{H}_2} / \text{kmol}_{\text{H}_2} \cdot 180 \text{ MJ/kg}_{\text{H}_2}$  do poziomu ok.  $400 \text{ MJ}$ , a więc niemalże w 75% (z 1 kilomola metanu można otrzymać ok.  $400 \text{ MJ}$  energii elektrycznej). Niemalże na to samo wyszłoby przecież, gdyby jej nie produkować w ogóle. Nie trzeba by ponadto wydawać wówczas dużych pieniędzy na budowę elektrowni. Mało tego, aby „likwidować”  $\text{CO}_2$  należy budować znacznie droższe inwestycyjnie na jednostkę zainstalowanej mocy instalacje niszczące wyprodukowaną energię elektryczną, tj. instalacje do produkcji wodoru i metanu. „Genialny” pomysł, produkuje się elektryczność za duże pieniądze tylko po to, by za jeszcze większe móc ją następnie „zniszczyć”. Absurd nad absurdami, kuriozum nad kuriozami! Absurd ten potęguje dodatkowo fakt, że po spalaniu (patrz reakcja (1.5)) metanu otrzymanego w reakcji (1.12) powstaje identyczna ilość dwutlenku węgla jak ta, która wzięła w niej udział. Powraca się zatem w konsekwencji do punktu wyjścia, gdyż z 1 kilomola  $\text{CO}_2$  (reakcja (1.12)) otrzymuje się na końcu ponownie 1 kilomol  $\text{CO}_2$  (reakcja (1.5))! A wódór przecież po to miałby być produkowany, by nie dopuszczać do powstawania  $\text{CO}_2$ . Tymczasem powstaje go dokładnie tyle samo i przy tym za ogromne pieniądze oraz kosztem utraconej przeogromnej ilości energii elektrycznej, najcenniejszej postaci energii, do której otrzymywania ze wszech miar się dąży. To ona jest głównym celem, gdyż bez niej współczesny świat nie może istnieć! Jeszcze raz należy zatem z całą mocą stwierdzić, że produkcja metanu w reakcji (1.12) to wręcz przeogromny termodynamiczny, ekonomiczny i ekologiczny absurd! Co gorsze, są w tym przedmiocie realizowane granty! Kto na to pozwolił, kto do tego dopuścił! *O tempora! O mores!* Czemu to służy? Służy to nachalnemu kłamstwu o rzekomym globalnym ociepleniu w wyniku emisji  $\text{CO}_2$  [19–24] i wynikającej z niego rzekomej konieczności budowy OZE (należy ponownie dobitnie zaznaczyć, że powstała para wodna ze spalania wodoru jest w wielokrotnie większym stopniu gazem cieplarnianym niż  $\text{CO}_2$ ). Źródła OZE są wyłącznie źródłem odnawialnych rok w rok przeogromnych dopływów pieniędzy dla ich właścicieli, rzędu setek miliardów euro (należy w tym miejscu ponownie napisać, że OZE produkują wyłącznie znikome ilości energii elektrycznej), dewastując przy tym, wręcz niszcząc na ogromną skalę środowisko, co odbywa się, co najgorsze, w majestacie prawa i rzekomo dla dobra ludzkości! Aby bowiem elektryczność z OZE mogła istnieć na rynku energii elektrycznej, wymaga przeogromnych, kilkudziesięciu miliardowych rocznych dotacji ze skarbów państw. Na przykład, w Niemczech kilka lat temu dotacje te wynosiły rocznie 30 miliardów euro (sic!), gdy moc

zainstalowanych turbozespołów wiatrowych wynosiła 36 000 MW, a fotowoltaiki 38 000 MW (dopłaty do każdej megawatogodziny wyprodukowanej energii elektrycznej w turbozespołach wiatrowych wynosiły 160 euro, w źródłach fotowoltaicznych 430 euro; obecnie w Niemczech moc turbozespołów to już 56 GW). W Polsce w latach 2006–2020 subwencje wyniosły 76 mld PLN, a obecnie wynoszą ponad 10 mld PLN rocznie. Za te już wypłacone ze Skarbu Państwa pieniądze można by wybudować w Polsce elektrownie jądrowe z reaktorami wodnymi pracujące według obiegu Clausiusa–Rankine’a (rozdz. 7) o mocy rzędu 5 tys. MW.

Jak już zaznaczono wyżej, OZE są zatem wyłącznie źródłem nieuzasadnionych, przeogromnych corocznych korzyści finansowych dla ich właścicieli. W Polsce są to w głównej mierze właściciele niemieccy [25]. Trzeba ponadto zaznaczyć, że OZE nie są w stanie wyprodukować energii elektrycznej, by zniwelować skutki jej „niszczenia” w elektrowniach konwencjonalnych. Aby pokryć straty spowodowane przez OZE, aby otrzymać na powrót te 1040 MJ (= 1440 – 400) energii elektrycznej, trzeba w dwójnasób spalać węgiel! Należy do tego dodać miliony ton węgla spalanego podczas setek uruchomień bloków po ich wyłączeniach z ruchu w wyniku „działalności” OZE. Podczas rozruchu bloków energia elektryczna nie jest przy tym oddawana do sieci. Jak to wszystko zatem się ma do rzekomo koniecznej dekarbonizacji energetyki rzekomo dla dobra ludzkości?! Co więcej, emisja dwutlenku węgla przez energetykę krajów europejskich to zaledwie ok. 5% emisji światowej pochodzącej ze spalania paliw kopalnych. Ta światowa emisja paliwowa stanowi natomiast zaledwie 3,3% emisji globalnej CO<sub>2</sub> (5% emisji energetyki europejskiej stanowi zatem 0,16% = 0,05 · 0,033 emisji globalnej, a więc prawie zero!). Gdzie zatem reszta? Oceany produkują 41,4% dwutlenku węgla, a biosfera 55,3% (np. człowiek wydycha codziennie 1 kg CO<sub>2</sub>, przy wysiłku 4 kg CO<sub>2</sub>). Nawet zatem całkowita likwidacja przez zamknięcie nie tylko polskich, ale wszystkich światowych elektrowni na paliwa kopalne (oczywiście bez elektrowni jądrowych) zmieni tyle, co nic. Mało tego, tak jak człowiekowi do życia niezbędny jest tlen, tak biosferze poza istotami żywymi do istnienia niezbędny jest dwutlenek węgla. Bez niego świat, jaki znamy i w jakim żyjemy, zginie.

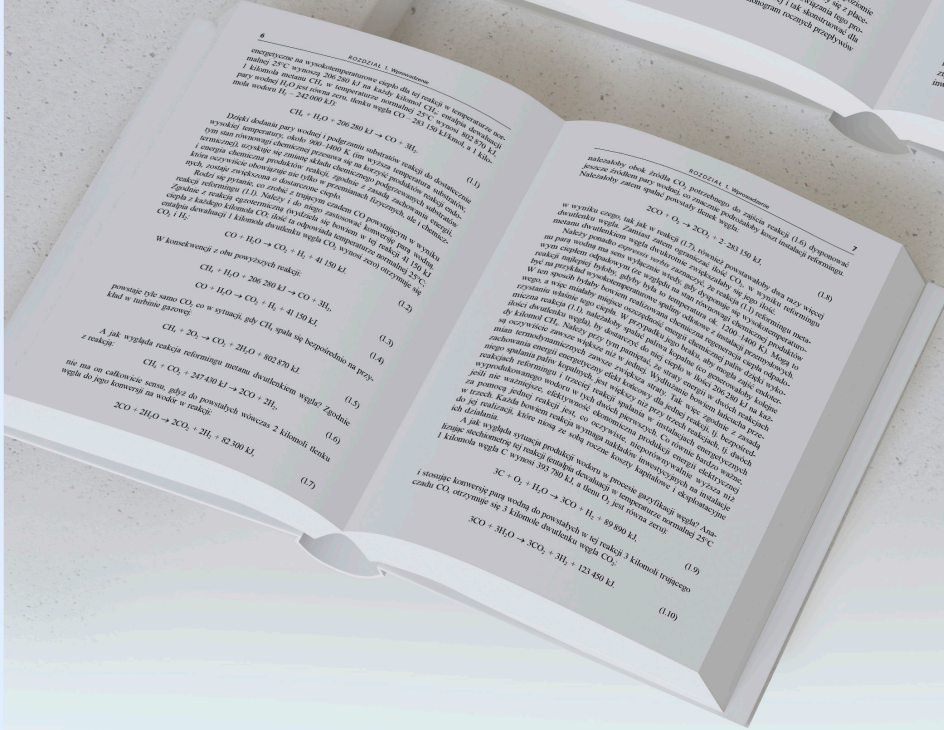
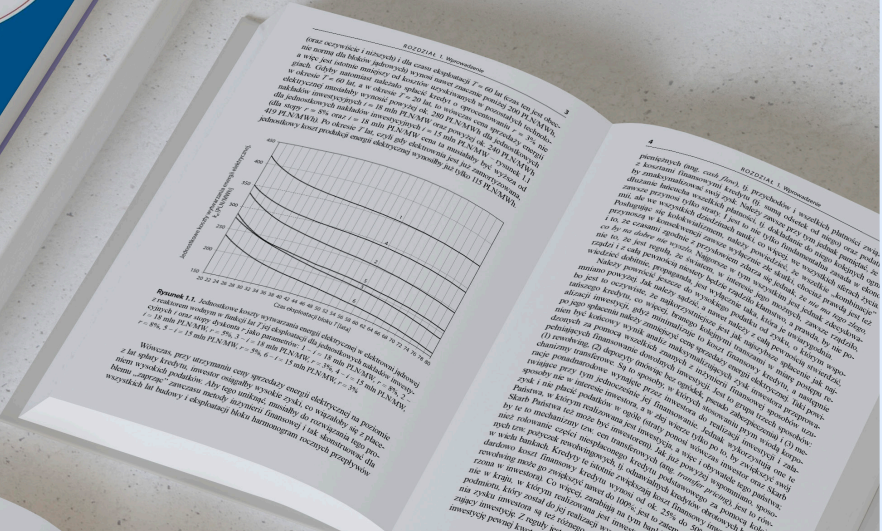
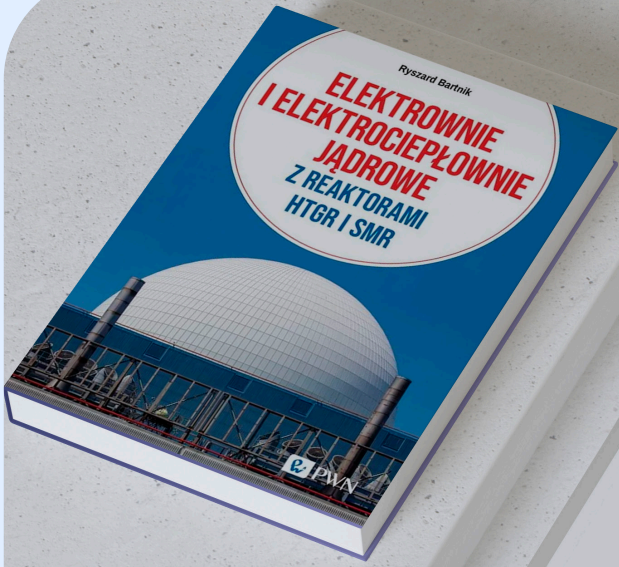
Fragment pochodzi z książki:

## Elektrownie i elektrociepłownie jądrowe z reaktorami HTGR i SMR

Ryszard Bartnik

Wydawnictwo Naukowe PWN 2018



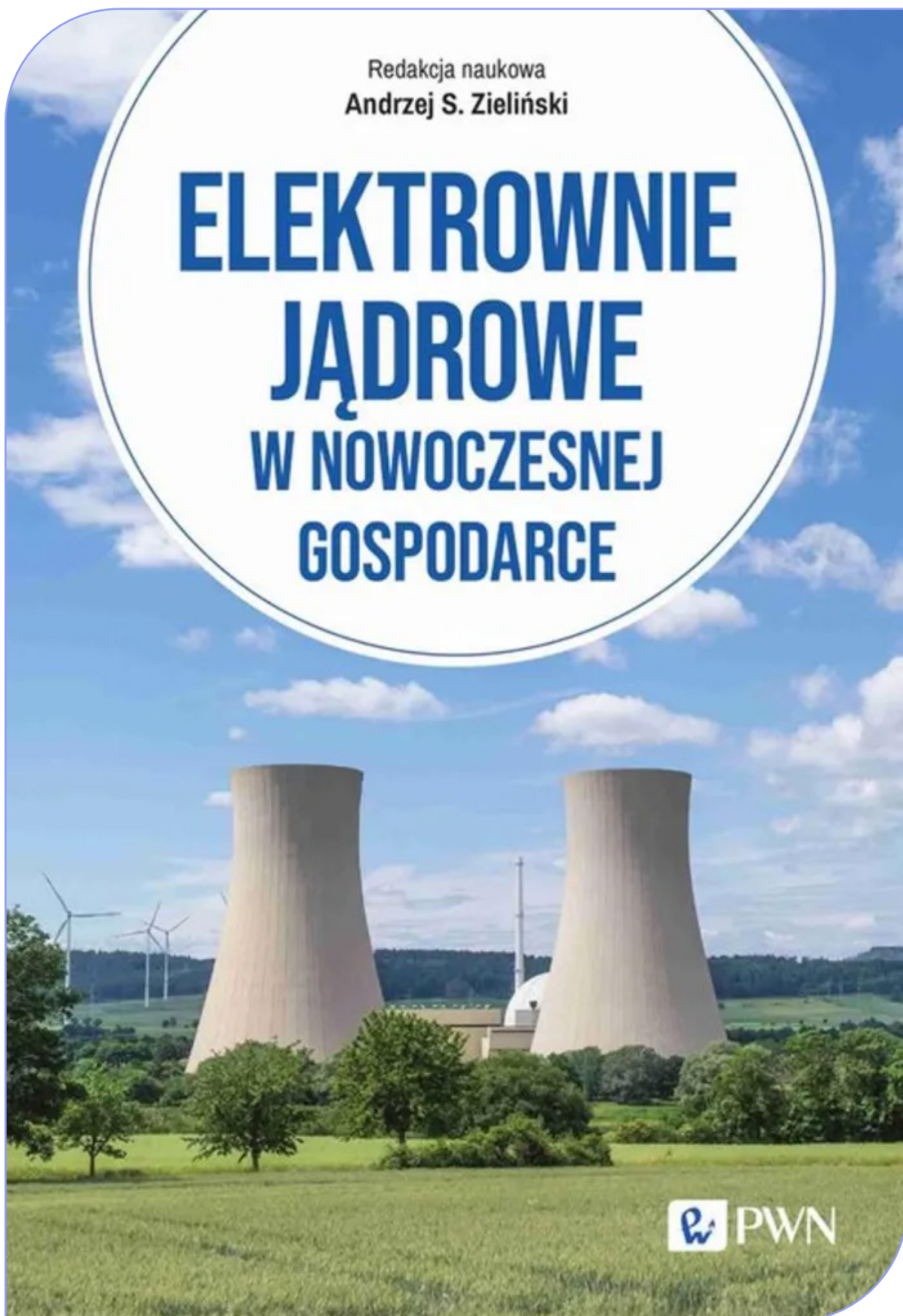


**SPRAWDŹ**

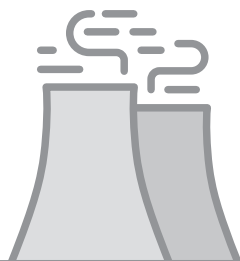


Redakcja naukowa  
Andrzej S. Zieliński

# ELEKTROWNIE JĄDROWE W NOWOCZESNEJ GOSPODARCE







## Energetyczne wykorzystanie reakcji jądrowych

Andrzej G. Chmielewski

### Spis treści

1.1. Podstawy teorii reaktorów jądrowych . . .	1	1.2.2. Ogólna charakterystyka zagrożeń związanych z bezpieczeństwem reaktorów jądrowych . . . . .	23
1.1.1. Atom . . . . .	1	1.2.3. Dekalog zasad bezpieczeństwa . . . . .	26
1.1.2. Rozszczepienie jądra atomowego . . . . .	1	1.2.4. Cel bezpieczeństwa jądrowego . . . . .	30
1.1.3. Pierwsze reaktory jądrowe . . . . .	11	1.2.5. Wymagania dotyczące projektowania i eksploatacji . . . . .	30
1.1.4. Podstawy działania reaktorów jądrowych . . . . .	13	1.2.6. Zasada obrony w głąb . . . . .	32
1.2. Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna . . . . .	22	Literatura do rozdziału 1 . . . . .	35
1.2.1. Przepisy . . . . .	22		

## 1.1. Podstawy teorii reaktorów jądrowych

### 1.1.1. Atom

Historia atomu rozpoczęła się ponad 2400 lat temu. Wtedy to grecki filozof Demokryt, który rozpoczął poszukiwania opisu materii, zadał pytanie, czy materia może być podzielona na coraz mniejsze kawałki w sposób nieskończony, czy też istnieje granica liczby podziałów. Zgodnie z teorią atomizmu materia nie może być dzielona na coraz mniejsze kawałki bez końca. Najmniejszy, już dalej niepodzielny element materii nazwano „atomos”, co oznacza „nie do pocięcia”. Dla Demokryta atomy były małymi, twardymi cząstkami, które były wykonane z tego samego materiału, ale miały różne kształty i rozmiary. Liczba atomów była nieskończona, były cząstkami w ciągłym ruchu i zdolnymi do łączenia się ze sobą. Jednakże ta teoria była ignorowana i zapomniana przez ponad 2000 lat! A to dlatego, że wybitni filozofowie tamtych czasów, Arystoteles i Platon, stworzyli bardziej szanowaną (i ostatecznie błędną) teorię. Arystoteles i Platon faworyzowali inne podejście opisu istniejącej materii. Dla nich składowymi materii były: ziemia, ogień, powietrze i woda. Ich idee dominowały ze względu na wybitność ich twórców, cenionych jako wielkich filozofów przez następną epokę. Przez to idea „atomos” została

pogrzebana na około 2000 lat. Pewne odrodzenie nauk Demokryta nastąpiło w wieku XVI i XVII, kiedy Galileusz, który intuicyjnie był atomistą, swoje teorie o budowie materii zawarł w dwóch opublikowanych księgach. Ostatnia książka badacza, zdaniem niektórych współczesnych historyków nauki, zawiera jego ostateczne poglądy na temat natury najmniejszych cząstek. Galileusz redukuje w niej pojęcie atomu do matematycznych, abstrakcyjnych punktów, które nie mają żadnych wymiarów, są niepodzielne i pozbawione jakichkolwiek kształtów. Jednak później, w XVII wieku powszechnie uznawanym w nauce było twierdzenie Arystotelesa o tym, że każda materia zbudowana jest ze wszystkich istniejących pierwiastków (ciał prostych), w charakterystycznych dla siebie proporcjach. Od czasów tego filozofa liczba składowych materii uległa jednak zwiększeniu i tak do grona już istniejących – ziemi, wody, powietrza i ognia – zaliczone zostały rtęć, siarka i sól.

Dopiero w roku 1800 John Dalton zaproponował nowoczesny model atomu oparty na wynikach eksperymentu, a nie na czystym rozumie. Zgodnie z tą teorią:

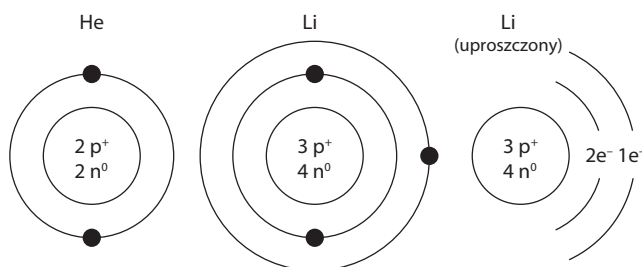
- wszelka materia składa się z atomów;
- atomy pierwiastka są identyczne;
- atomy różnych pierwiastków są różne;
- atomy różnych pierwiastków łączą się w stałych proporcjach, tworząc związki chemiczne;
- związki powstają przez połączenie atomów dwóch lub więcej pierwiastków;
- atomy są przegrupowywane w trakcie reakcji chemicznych.

Jego koncepcje były podstawą sformułowania prawa zachowania masy (atomy nie mogą być ani stworzone, ani zniszczone) oraz prawa stałego składu (pierwiastki łączą się ze sobą w ustalonych proporcjach). A zatem według jego założeń wszystkie pierwiastki składają się z atomów, które są niepodzielnymi i niezniszczalnymi cząstkami. Teoria ta stała się jednym z fundamentów współczesnej chemii.

Następnym krokiem w rozwoju modelu atomu było wprowadzenie do niego elektronu. Po raz pierwszy elektron zaobserwowano i opisano pod koniec wieku XIX jako cząstkę mniejszą niż niepodzielny dotychczas atom. William Thomson (Lord Kelvin) wykorzystał nowo odkrytą cząstkę – elektron – do stworzenia modelu budowy atomu. Według Kelvina centralną część atomu polonu, którego promieniotwórczość badał, stanowiły cztery elementarne ładunki ujemne, a funkcję spoiwa łączącego atomy tego samego pierwiastka pełnił ładunek dodatni, położony w równej odległości od ładunków ujemnych. Na teorii Lorda Kelwina oparł swe prace Joseph John Thomson. Opisał on atom jako równomiernie naładowaną dodatnio kulę, wewnątrz której po orbitach poruszają się elektrony. Model Kelvina–Thomsona tłumaczył wiele zjawisk chemicznych i fizycznych, w tym jonizację, jako wytrącanie poza obręb atomu jednego lub kilku elektronów, oraz emisję światła – jako skutek drgań elektronów. Pomimo tych początkowych sukcesów model „ciasta z rodzynkami”, jak jest dziś nazwany, dość szybko został podważony przez wyniki dalszych badań.

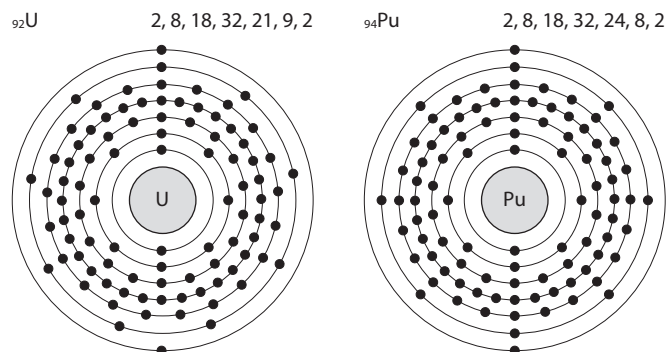
I nagle, po swym sławnym doświadczeniu, wykonanym w roku 1909, Ernest Rutherford zadziwił innych. Okazało się, że atomy są w większości pustą przestrzenią, ujemnie naładowane elektrony znajdują się wokół dodatnio naładowanego jądra. Rutherford doszedł do wniosku, że atom ma mały, gęsty, dodatnio naładowany środek, który odpycha jego dodatnio naładowane „pociski”, którymi w jego doświadczeniu były dodatnio naładowane cząstki alfa. Centralne skupisko materii nazwał „jądrem”. Stwierdził też, że jądro jest małe w porównaniu z atomem jako całością. Rutherford doszedł do wniosku, że wszystkie dodatnio naładowane cząstki atomu są zawarte w jądrze. Ujemnie naładowane cząstki zostały rozproszone poza jądrem wokół krawędzi atomu. W 1913 roku duński naukowiec Niels Bohr zaproponował ulepszenie tej struktury przestrzennej. W swoim modelu umieścił każdy elektron na określonym poziomie energii. Zgodnie z modelem atomowym Bohra elektrony poruszają się po określonych orbitach wokół jądra, podobnie jak planety okrążają Słońce. Te orbity lub poziomy energii znajdują się w pewnych odległościach od jądra. A zatem istnieją trzy rodzaje cząstek subatomowych. Wiemy już o elektronach ( $e^-$ ) i protonach ( $p^+$ ). W latach trzydziestych ubiegłego wieku wykazano również, że istnieją neutrony ( $n^0$ ). Te ostatnie charakteryzuje brak ładunku, mają masę podobną do protonów.

A zatem pierwiastki składają się z atomów o różnych jądrach, w skład których wchodzi powyższe cząstki elementarne. Pierwiastki są często symbolizowane przez podanie ich liczby masowej i liczby atomowej. Wartości te są podane w układzie okresowym pierwiastków i mówią wiele o atomach. Liczba protonów równa liczbie elektronów daje nam liczbę atomową. Liczba neutronów to liczba masowa minus liczba atomowa. Znając te liczby i zasadę wypełniania kolejnych powłok elektronowych, można utworzyć diagramy Bohra–Rutherforda. Przykładowe diagramy atomów helu i litu są pokazane na rysunku 1.1.



**Rysunek 1.1.** Przykłady diagramów Bohra–Rutherforda przedstawiających uproszczone modele atomów helu i litu

Dla czytelnika dalszej części rozdziału interesująca będzie zapewne struktura atomów uranu i plutonu (rys. 1.2), a co ważne, tylko pierwszy z tych pierwiastków powszechnie występuje w przyrodzie.

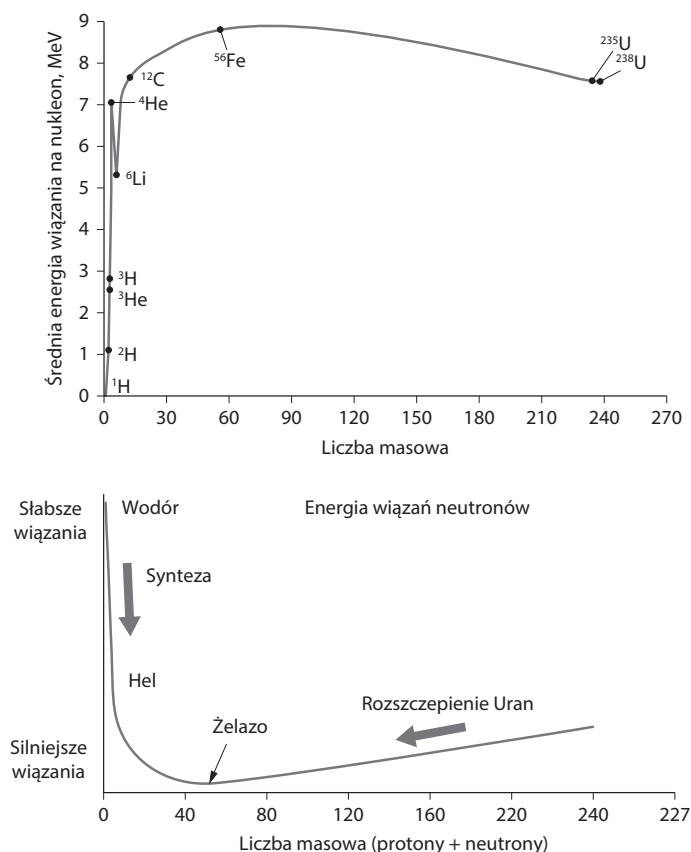


**Rysunek 1.2.** Diagramy Bohra–Rutherforda atomów uranu i plutonu

Współczesny model atomu jest zwięźczeniem eksperymentów i badań przeprowadzonych przez wielu naukowców. Obecnie uznawanym modelem budowy atomu jest tzw. model korpuskularno-falowy, który uwzględnia falowe właściwości elektronów i umożliwia zarówno dokładniejsze, jak i zgodne z danymi doświadczalnymi opisanie struktury elektronowej atomu. Zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej elektrony nie poruszają się wokół atomu po określonej ścieżce, jak planety wokół Słońca. Werner Heisenberg i Erwin Schrödinger są uznanymi odkrywcami probabilistycznej natury opisu położenia elektronu i zastosowania go do modelu atomu. Opisali atom jako jądro z protonami i neutronami otoczone chmurą elektronów. Zgodnie ze współczesnym modelem atomowym atom ma małe, dodatnio naładowane jądro otoczone dużym obszarem, w którym jest wystarczająco dużo elektronów, aby atom miał neutralny ładunek. W rzeczywistości niemożliwe jest określenie dokładnej lokalizacji elektronu, zależy ona od tego, jaką energię ma dany elektron. Elektrony o najmniejszej energii znajdują się na poziomie energetycznym najbliższym jądra. Elektrony o największej energii znajdują się na najbardziej zewnętrznych poziomach energetycznych, dalej od jądra. Elektrony wirują wokół jądra miliardy razy w ciągu jednej sekundy.

Nowoczesna fizyka jądrowa nie zadawała się również prostym opisem cząstek elementarnych, z których zbudowane jest jądro atomowe. Fizycy nieustannie poszukują nowych cząstek. Kiedy je znajdują, kategoryzują je i próbują znaleźć wzorce, które mówią o tym, jak podstawowe elementy składowe wszechświata oddziałują na siebie. Odkryto już około dwustu cząstek (z których większość nie jest fundamentalna). Są one nazywane literami alfabetu greckiego i łacińskiego. W Modelu Standardowym istnieją dwie szerokie kategorie cząstek: leptony i kwarki. Leptony obejmują elektrony, miony oraz neutrino, i oprócz grawitacji oddziałują między sobą tylko poprzez oddziaływania słabe. Oddziaływania słabe są około  $10^{10}$  słabsze od oddziaływania elektromagnetycznego, a ich zasięg jest bardzo mały, rzędu  $10^{-18}$  m. Są one jednym z czterech podstawowych (grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne i słabe), fundamentalnych oddziaływań, które występuje pomiędzy leptonami

i hadronami. Cząstkami przenoszącymi oddziaływania słabe są bozony pośredniczące. Zastanawiające jest to, że jądra atomów są trwałe, choć składają się jedynie z neutronów o zerowym ładunku oraz protonów, które są opatrzone jednoimiennym ładunkiem, dodatnim. Jest tak, ponieważ neutrony wiążą się z protonami i ze sobą nawzajem w jądrze poprzez oddziaływanie silne, skutecznie moderując siły odpychające między protonami i stabilizując jądro. Oddziaływanie silne przyciąga nukleony w odległości ok.  $0,8 \cdot 10^{-15}$  m, ale jego wielkość szybko staje się nieistotna – już w odległości powyżej ok.  $2,5 \cdot 10^{-15}$  m. W odległościach mniejszych niż  $0,7 \cdot 10^{-15}$  m siła jądrowa staje się odpychająca. To zjawisko jest odpowiedzialne za wielkość jąder ( $\sim 10^{-15}$  m), ponieważ nukleony nie mogą zbliżyć się bardziej, niż pozwala na to oddziaływanie silne. Siły jądrowe odgrywają zasadniczą rolę w magazynowaniu energii wyzwolanej w reaktorach lub broni jądrowej. Zmagazynowana w jądrze energia związana jest z pracą, którą należy wykonać, tworząc jądro, tak aby połączyć ze sobą naładowane protony, pokonując siły odpychania elektrycznego. Znajduje ona odbicie w postaci energii wiążącej nukleony w jądrze (rys. 1.3).



**Rysunek 1.3.** Energia sił wiążących nukleony w jądrze w funkcji liczby masowej pierwiastków



Masa jądra jest mniejsza niż suma mas protonów i neutronów. Różnica mas jest znana jako defekt masy, który można wyrazić jako ekwiwalent energii. Energia ta jest elektromagnetyczną energią potencjalną, która jest uwalniana, gdy siły jądrowe nie utrzymują już razem naładowanych fragmentów, a ciężkie jądro atomowe rozpada się na dwa lub więcej lżejszych jąder.

Atomy tego samego pierwiastka, które mają różną liczbę neutronów, nazywane są izotopami. Ze względu na izotopy liczby masowe nie są okrągłymi wartościami. Na przykład, występujący w przyrodzie lit zawiera izotopy:  ${}^6\text{Li}$  oraz  ${}^7\text{Li}$ , i dlatego jego liczba masowa wynosi 6,9. Znane są częste przykłady, że co najmniej jeden izotop pierwiastka jest niestabilny. Emituje on fotony lub cząstki elementarne, co jest nazywane radioaktywnością. Takie odmiany izotopów nazywane są izotopami promieniotwórczymi. Frederick Soddy zasugerował, że produkty końcowe szeregu uranowego „rad G”, „tor D” i „aktyn D” nie były trzema nowymi pierwiastkami, jak pierwotnie sądzono, ale trzema różnymi stabilnymi izotopami ołowiu:  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$  i  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ , różniącymi się jedynie masą. Do takiego wniosku doszli jednocześnie w 1913 roku Kasimir Fajans (urodzony w 1867 roku w Warszawie, gdzie ukończył szkołę średnią) i Frederick Soddy. Fajans nazwał chemicznie identyczne atomy o różnych masach izotopowych plejadami, a Soddy – izotopami, nazwą, której obecnie używamy. Było to ciekawe odkrycie, ponieważ w tym czasie neutrony były nieznanne, a atomy uważano za pary cząstek dodatnio i ujemnie naładowanych.

Początkowe 80 pierwiastków w układzie okresowym ma stabilne izotopy. Istnieje ponad 3000 znanych radioizotopów, są one niestabilną postacią pierwiastka i zazwyczaj są wytwarzane sztucznie z wykorzystaniem reaktorów jądrowych lub akceleratorów cząstek, głównie naładowanych, lub neutronów. Jednak również w przyrodzie wszechobecne są izotopy promieniotwórcze.

Ważnym parametrem charakteryzującym izotop promieniotwórczy jest czas połowicznego rozpadu (lub zaniku). Jest to czas, w którym jego aktywność promieniotwórcza zmniejsza się do połowy. Wartość ta nie zależy od czynników zewnętrznych. Dla naturalnych pierwiastków promieniotwórczych czas połowicznego rozpadu mieści się w bardzo szerokim przedziale, od  $10^{-17}$  s do  $10^{17}$  lat. Przykładem jest betapromieniotwórczy izotop węgla  ${}^{14}\text{C}$ . W przyrodzie występują trzy naturalne izotopy węgla: dwa stabilne:  ${}^{12}\text{C}$ , który stanowi 99% całego węgla na Ziemi, i  ${}^{13}\text{C}$ , który stanowi 1%, oraz promieniotwórczy  ${}^{14}\text{C}$ , który występuje w śladowych ilościach i ma czas połowicznego rozpadu  $5700 \pm 30$  lat. Izotop  ${}^{14}\text{C}$  powstaje w górnych warstwach troposfery i w stratosferze jako wynik oddziaływania promieniowania kosmicznego na azot (pochłonięcie neutronu przez jądro atomu azotu  ${}^{14}\text{N}$ ). Jego stężenie utrzymywało się na stałym poziomie do czasu powierzchniowych testów broni nuklearnej, ale wzrost jego aktywności nie był wielki. Innym źródłem izotopów promieniotwórczych w środowisku są kopalnie węgla. Węgiel jak większość minerałów zawiera w niewielkim stężeniu uran i tor, zazwyczaj od 1 do 4 mg/kg, a w niektórych przypadkach odnotowano nawet wartość sięgającą 20 mg/kg.

Z uwagi na długi czas rozpadu izotopów promieniotwórczych mają one niewielką aktywność właściwą, ale niestety izotopy powstające w trakcie ich rozpadu nie są już bezpieczne. Szereg, który rozpoczyna izotop uranu  $^{238}\text{U}$  o czasie połowicznego rozpadu wynoszącym 4,5 miliarda lat, kończy się na stabilnym ołowiu  $^{206}\text{Pb}$ , a należy do niego 16 nuklidów, między innymi:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$ . Szereg, który rozpoczyna się izotopem uranu  $^{235}\text{U}$  o czasie połowicznego rozpadu wynoszącym 700 milionów lat, kończy się na stabilnym ołowiu  $^{207}\text{Pb}$ ; należy do niego 14 nuklidów, między innymi:  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ . Dla toru  $^{232}\text{Th}$  o czasie połowicznego rozpadu wynoszącym 14 miliardów lat, szereg kończy się stabilnym ołowiem  $^{208}\text{Pb}$ ; należy do niego 12 nuklidów, między innymi:  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ . Spośród nich  $^{228}\text{Ra}$ , o czasie połowicznego rozpadu 5,75 lat, emituje promieniowanie beta. Spośród wymienionych izotopów radonu, który jest gazem, izotop  $^{222}\text{Rn}$  ma zdecydowanie najdłuższy czas połowicznego rozpadu wynoszący 3,82 dni. Stanowi on praktycznie 100% radonu spotykanego naturalnie i ma możliwość migracji oraz gromadzenia się w przestrzeniach zamkniętych.

W trakcie spalania węgla powstaje lotny pył, w którym stężenie tych pierwiastków rośnie dziesięciokrotnie. Jest on wychwytywany z dużą efektywnością w elektrofiltrach, ale część małych pylinek jest emitowana do atmosfery. Zebrany pył po pomiarze jego aktywności jest wykorzystywany jako wypełniacz betonów budowlanych stosowanych w konstrukcjach drogowych. Izotopy promieniotwórcze krótko i długo żyjące są m.in. składnikami zużytego paliwa oraz odpadów promieniotwórczych.

Promieniowanie jonizujące jest rodzajem promieniowania o wysokiej energii, tak że może odrywać elektrony od atomów lub cząsteczek, co powoduje zmiany na poziomie atomowym podczas interakcji z materią, w tym z żywymi organizmami. Prowadzi do powstawania w materii jonów lub wolnych rodników, bardzo reaktywnych cząsteczek, które nie są jonami, ale mają niesparowane elektrony (np. wiemy, że tlen występuje w postaci stabilnej cząsteczki  $\text{O}_2$ , a pod wpływem promieniowania może tworzyć silnie utleniające cząsteczki  $\text{O}$  lub  $\text{O}_3$ ). Typowe promieniowanie jonizujące obejmuje subatomowe cząstki alfa (zjonizowane atomy helu  $^4\text{He}^{2+}$ ) i cząstki beta ( $e^-$ ), a także wysokoenergetyczne promieniowanie gamma (fotony). W przypadku tego ostatniego typu promieniowania zjawisko polega na wytwarzaniu w materiale elektronów, które oddziałują z atomami ośrodka. Radioaktywność materiału zależy od stężenia izotopu promieniotwórczego, ale podaje się je w postaci aktywności właściwej lub aktywności próbki. Jednostką aktywności właściwej jest Bq/g, gdzie  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$ . Skażenie powierzchni podaje się w jednostkach Bq/m<sup>2</sup>.

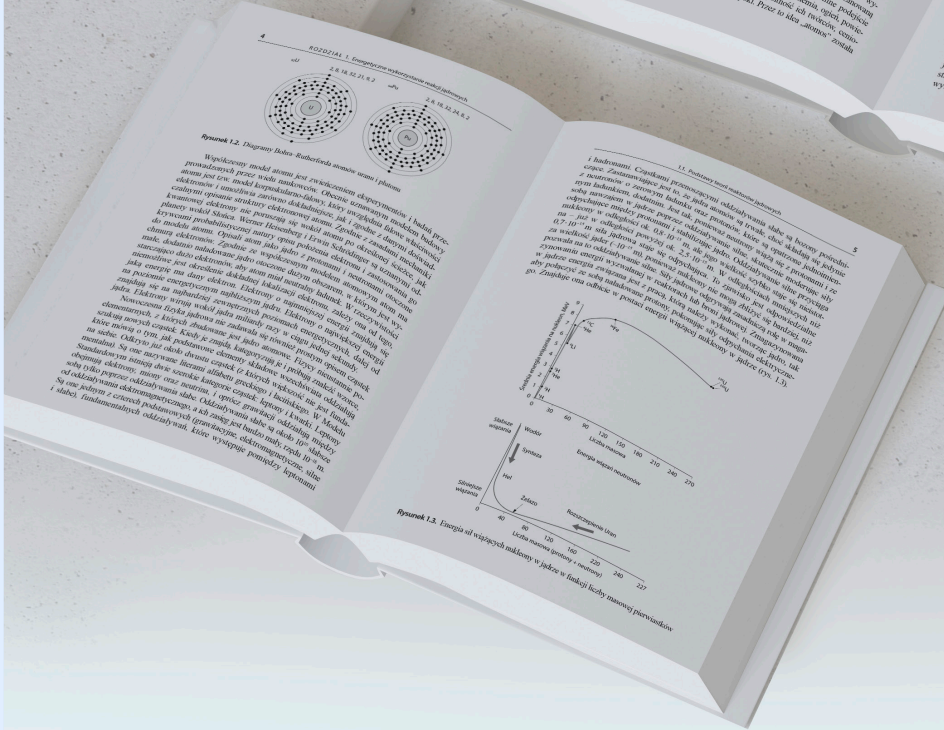
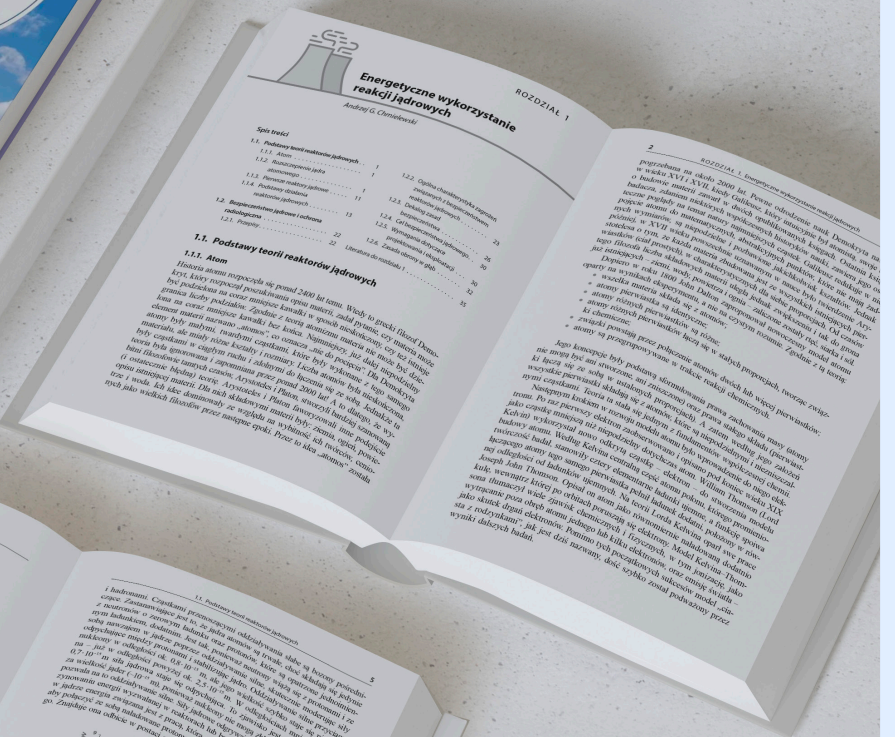
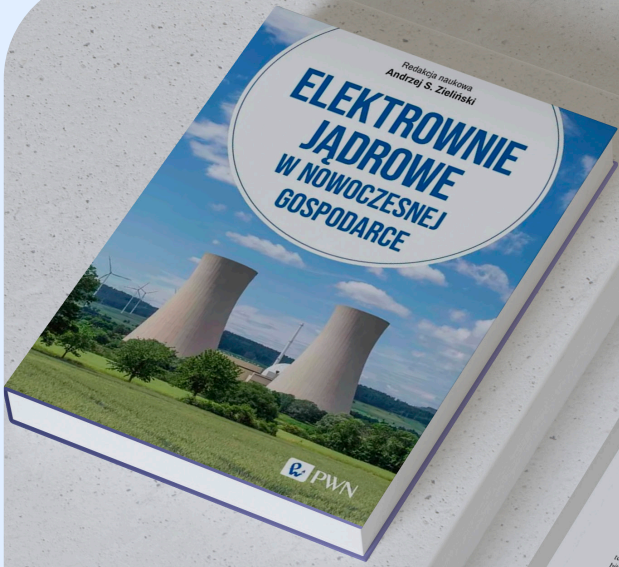
Nawet nasze ciało zawiera izotopy promieniotwórcze, głównie węgla ( $^{14}\text{C}$ ) i potasu ( $^{40}\text{K}$ ), co przekłada się na ok. 100 Bq/kg. Warto może wiedzieć, że popularną i historyczną jednostką pozaukładową jest kiur,  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ . 1 Ci został zdefiniowany jako aktywność jednego grama radu-226. Przy leczeniu nowotworów tarczycy pacjentowi podaje się od 30÷200 mCi izotopu jodu  $^{131}\text{I}$ .

Fragment pochodzi z książki:

**Elektrownie jądrowe  
w nowoczesnej gospodarce**

Redakcja naukowa: Andrzej Zieliński

Wydawnictwo Naukowe PWN 2024



**SPRAWDŹ**





# Zainteresowały Cię nasze książki?

Znajdziesz je w:

IBUK LIBRA  PWN

[Przejdź do IBUK Libra](#)

IBUK Libra to czytelnia on-line czynna całą dobę. Dostępne w niej są tysiące e-booków oraz e-czasopism z niemal każdej dziedziny. Do IBUKA Libry możesz załogować się z dowolnego miejsca, o każdej porze. Korzystanie z IBUKA Libry jest bezpłatne – poproś o dostęp w swojej bibliotece.

 IBUK

[Przejdź do IBUK.pl](#)

IBUK.pl jest platformą pozwalającą kupować i wypożyczać e-booki. Można je wypożyczać zarówno pojedynczo – już od 4,92 PLN za dobę oraz w abonamentach – ceny zaczynają się od 19,90 PLN miesięcznie. W ofercie dostępne są także audiobooki

 PWN KSIĘGARNIA  
INTERNETOWA

[Przejdź do ksiegarnia.pwn.pl](#)

Księgarnia Internetowa PWN oferuje szeroki zakres publikacji: podręczniki akademickie, książki naukowe i popularnonaukowe, słowniki języka polskiego i słowniki języków obcych. Znajdziesz w niej zarówno publikacje papierowe, jak i książki w wersji elektronicznej – e-booki i audiobooki.

Śledź nas na Facebooku





---

Niniejszy e-book jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, które im przysługują. Nie publikuj go w Internecie. Cytując jego fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. Kopiując jego część, rób to jedynie na użytek osobisty.

© **Wydawnictwo Naukowe PWN S.A.**

02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2