

**Elektrownie jądrowe w nowoczesnej gospodarce : technologie, ekonomika, bezpieczeństwo / redakcja naukowa Andrzej S. Zieliński ; autorzy: Andrzej G. Chmielewski, Marcin Jaskólski, Beata Majkowska-Marzec, Tomasz Minkiewicz, Andrzej S. Zieliński. – Wydanie I. – Warszawa, copyright © 2024**

## Spis treści

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Słowo wstępne</b>  | <b>XI</b>    |
| <b>Przedmowa</b>  | <b>XIII</b>  |
| <b>Streszczenie w języku polskim</b>  | <b>XVII</b>  |
| <b>Streszczenie w języku angielskim</b>   | <b>XVIII</b> |
| <b>ROZDZIAŁ 1. Energetyczne wykorzystanie reakcji jądrowych</b>                         |              |
| - <i>Andrzej G. Chmielewski</i>   | <b>1</b>     |
| 1.1. Podstawy teorii reaktorów jądrowych  | 1            |
| 1.1.1. Atom   | 1            |
| 1.1.2. Rozszczepienie jądra atomowego   | 8            |
| 1.1.3. Pierwsze reaktory jądrowe  | 11           |
| 1.1.4. Podstawy działania reaktorów jądrowych   | 13           |
| 1.2. Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna                                     | 22           |
| 1.2.1. Przepisy   | 22           |
| 1.2.2. Ogólna charakterystyka zagrożeń związanych z bezpieczeństwem reaktorów jądrowych | 23           |
| 1.2.3. Dekalog zasad bezpieczeństwa   | 26           |
| 1.2.4. Cel bezpieczeństwa jądrowego   | 30           |
| 1.2.5. Wymagania dotyczące projektowania i eksploatacji                                 | 30           |
| 1.2.6. Zasada obrony w głąb   | 32           |
| Literatura do rozdziału 1   | 35           |
| <b>ROZDZIAŁ 2. Reaktory jądrowe - <i>Tomasz Minkiewicz</i></b>                          | <b>37</b>    |
| 2.1. Wykorzystanie reaktorów jądrowych  | 37           |
| 2.2. Reaktory energetyczne  | 37           |
| 2.2.1. Rozwój reaktorów energetycznych  | 37           |
| 2.2.2. Reaktory energetyczne na świecie   | 41           |
| 2.2.3. Budowa i zasada działania nowoczesnych reaktorów energetycznych typu PWR i BWR   | 43           |
| 2.3. Reaktory badawcze  | 52           |
| 2.3.1. Zastosowanie reaktorów badawczych  | 52           |
| 2.3.2. Konstrukcje reaktorów badawczych   | 54           |
| 2.3.3. Reaktory badawcze na świecie   | 56           |
| Literatura do rozdziału 2   | 59           |

|   |            |
|---|------------|
| <b>ROZDZIAŁ 3. Gospodarka paliwowa - Andrzej G. Chmielewski</b>                       | <b>63</b>  |
| 3.1. Zasoby oraz wydobycie uranu i toru   | 63         |
| 3.2. Produkcja paliwa jądrowego   | 73         |
| 3.2.1. Otrzymywanie ditlenku uranu z surowców i wzbogacanie uranu                     | 73         |
| 3.2.2. Produkcja paliwa uranowego   | 79         |
| 3.3. Proces wypalenia paliwa jądrowego  | 82         |
| 3.4. Transport i gospodarka wypalonym paliwem jądrowym                                | 84         |
| 3.5. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi   | 86         |
| Literatura do rozdziału 3   | 92         |
| <br>  |            |
| <b>ROZDZIAŁ 4. Elektrownie jądrowe w systemie energetycznym</b>                       | <b>95</b>  |
| - Tomasz Minkiewicz, Marcin Jaskólski   |            |
| 4.1. Budowa obecnych elektrowni jądrowych   | 95         |
| 4.2. Elektrownie jądrowe w systemie elektroenergetycznym                              | 113        |
| 4.3. Energia jądrowa w systemie ciepłowniczym   | 120        |
| 4.3.1. Systemy ciepłownicze - charakterystyka   | 120        |
| 4.3.2. Wykorzystanie energii jądrowej w systemach ciepłowniczych                      | 123        |
| 4.4. Przyszłościowe rozwiązania reaktorów jądrowych dla elektroenergetyki i przemysłu | 133        |
| 4.4.1. Reaktory jądrowe generacji IV  | 133        |
| 4.4.2. Reaktory jądrowe małej i średniej mocy (SMR)                                   | 140        |
| Literatura do rozdziału 4   | 145        |
| <br>  |            |
| <b>ROZDZIAŁ 5. Materiały konstrukcyjne - Beata Majkowska-Marzec</b>                   | <b>153</b> |
| 5.1. Wymagania stawiane materiałom do budowy elektrowni jądrowych                     | 153        |
| 5.2. Stale węglowe  | 159        |
| 5.3. Stale niskostopowe ferrytyczne, ferrytyczno-martenzytyczne i martenzytyczne      | 160        |
| 5.3.1. Stale ferrytyczne  | 160        |
| 5.3.2. Stale ferrytyczno-martenzytyczne (F/M)   | 160        |
| 5.3.3. Stale martenzytyczne   | 162        |
| 5.4. Stale austenityczne i austenityczno-ferrytyczne duplex                           | 163        |
| 5.5. Stale utwardzane wydzieleniowo tlenkami (stale ODS)                              | 165        |
| 5.6. Stopy cyrkonu  | 166        |
| 5.7. Stopy niklu i stopy wieloskładnikowe   | 170        |
| 5.8. Inne metale i stopy  | 171        |
| 5.8.1. Molibden   | 171        |
| 5.8.2. Wolfram  | 171        |
| 5.8.3. Aluminium  | 171        |
| 5.8.4. Miedź  | 171        |
| 5.8.5. Stopy wysokoentropowe  | 172        |
| 5.9. Ceramiki i węgiel pierwiastkowy  | 172        |
| 5.9.1. Węgiel krzemu  | 172        |
| 5.9.2. Azotki   | 173        |
| 5.9.3. Grafen i nanorurki węglowe   | 173        |
| 5.10. Cementy i betony  | 173        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.11. Polimery i kompozyty polimerowe  | 174        |
| 5.12. Powłoki  | 174        |
| 5.13. Materiały dodatkowe do prętów paliwowych   | 175        |
| Literatura do rozdziału 5  | 176        |
| <b>ROZDZIAŁ 6. Ekonomia i zagadnienia prawne - Marcin Jaskólski</b>                    | <b>181</b> |
| 6.1. Ekonomia  | 181        |
| 6.1.1. Wprowadzenie  | 181        |
| 6.1.2. Nakłady inwestycyjne na elektrownię jądrową                                     | 182        |
| 6.1.3. Koszty roczne i jednostkowy koszt energii                                       | 185        |
| 6.1.4. Czynniki decydujące o opłacalności elektrowni jądrowej                          | 187        |
| 6.2. Zagadnienia i regulacje prawne  | 191        |
| Literatura do rozdziału 6  | 197        |
| <b>ROZDZIAŁ 7. Bezpieczeństwo energetyki jądrowej</b>                                  |            |
| - Andrzej S. Zieliński   | <b>201</b> |
| 7.1. Bezpieczeństwo przemysłowe  | 201        |
| 7.2. Bezpieczeństwo przy doborze lokalizacji   | 202        |
| 7.3. Bezpieczeństwo przy doborze materiałów  | 212        |
| 7.4. Bezpieczeństwo eksploatacji elektrowni jądrowej                                   | 223        |
| 7.5. Bezpieczeństwo ludzi i środowiska naturalnego                                     | 227        |
| 7.6. Systemy bezpieczeństwa elektrowni jądrowych                                       | 230        |
| 7.6.1. Sposoby osiągania bezpieczeństwa elektrowni jądrowych                           | 230        |
| 7.6.2. Definicje poziomów bezpieczeństwa, fizycznych barier i kryteriów bezpieczeństwa | 231        |
| 7.6.3. Poziomy zabezpieczeń  | 234        |
| 7.6.4. Człowiek w systemie bezpieczeństwa elektrowni jądrowej                          | 235        |
| 7.6.5. Modelowanie bezpieczeństwa elektrowni jądrowej                                  | 236        |
| 7.6.6. Diagnostyka zagrożeń  | 238        |
| Literatura do rozdziału 7  | 241        |
| <b>ROZDZIAŁ 8. Podsumowanie - Andrzej S. Zieliński</b>                                 | <b>251</b> |