



Przyszłość Energii Jądrowej w Niskowęglowym Świecie

INTERDYSCYPLINARNE STUDIUM MIT

Streszczenie

Przyszłość Energii Jądrowej w Niskowęglowym Świecie

INTERDYSCYPLINARNE STUDIUM MIT

Streszczenie

Translation by Dr Józef Sobolewski (former Director, Department of Nuclear Energy, Ministry of Energy, Poland) and Mr. Pawel Jerzy Zimoch (MIT Ph.D. student)

Other Reports in the MIT *Future of Series:*

The Future of Nuclear Power (2003)

The Future of Geothermal Energy (2006)

The Future of Coal (2007)

Update of the Future of Nuclear Power (2009)

The Future of Natural Gas (2011)

The Future of the Nuclear Fuel Cycle (2011)

The Future of the Electric Grid (2011)

The Future of Solar Energy (2015)



Copyright © 2018 Massachusetts Institute of Technology.
All rights reserved.

Cover art by Sara Ferry, Nuclear Science and Engineering, MIT.

Study Participants

STUDY CO-CHAIRS

Jacopo Buongiorno, Co-Chair

Associate Department Head and TEPCO Professor,
Department of Nuclear Science and
Engineering, MIT

Michael Corradini, Co-Chair

Professor Emeritus, Engineering Physics, University
of Wisconsin-Madison

John Parsons, Co-Chair

Senior Lecturer, Sloan School of Management, MIT

David Petti, Executive Director

Laboratory Fellow, Nuclear Science and Technology
Directorate, Idaho National Laboratory; Visiting
Research Scientist, MIT

STUDY GROUP

Rasheed Auguste

Undergraduate Student, Department of Nuclear
Science and Engineering, MIT

Patrick Champlin

Master's Student, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Karen Dawson

PhD Candidate, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Ze (Jenny) Dong

Undergraduate Research Opportunities Program
Student, Department of Nuclear Science and
Engineering, MIT

Charles Forsberg

Principal Scientist, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Andrew Foss

Energy Options Network

Eric Ingersoll

Energy Options Network

Joseph Lassiter

Senator John Heinz Professor of Management Practice
in Environmental Management, Harvard Business
School, Retired

Richard Lester

Associate Provost and Japan Steel Industry Professor,
Office of the Provost, MIT

Jessica Lovering

Breakthrough Institute

Lucas Rush

Master's Student, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Nestor Sepulveda

PhD Candidate, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Amy Umaretiya

Master's Student, Technology and Policy Program, MIT

Robert Varrin

Dominion Engineering

Patrick White

Master's Student, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Dennis Whyte

Department Head and Hitachi America Professor,
Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT

Ka-Yen Yau

Undergraduate Student, Department of Nuclear
Science and Engineering, MIT

Advisory Committee

Philip Sharp (Chair)

*Former President, Resources for the Future
Former U.S. Congressman*

Jean-Pierre Benque

*President Emeritus, EDF Development Inc.
and EDF North America*

Robert Budnitz

*Project Scientist, Retired, Lawrence Berkeley
National Laboratory*

James Del Favero

Co-Founder, Ardea Partners LLC

John Deutch

*Institute Professor, MIT
Director Emeritus, CIA*

Marvin Fertel

*Retired President and Chief Executive Officer,
Nuclear Energy Institute*

Susan Landahl

Senior Vice President, Exelon Corporation

William Magwood

*Director, Nuclear Energy Agency
Former Commissioner, U.S. Nuclear Regulatory
Commission
Director Emeritus, U.S. Department of Energy,
Nuclear Energy Office*

Kathryn McCarthy

*Vice President for Research and Development,
Canadian National Laboratories*

Richard Meserve

*President Emeritus, Carnegie Institution for Science
Former Chairman, U.S. Nuclear Regulatory
Commission*

Akira Omoto

*Professor, Tokyo Institute of Technology
Advisor, Nuclear Risk Research Center
Former Director, Division of Nuclear Power,
International Atomic Energy Agency*

Zack Pate

*Chief Executive Officer and Chairman Emeritus,
Institute for Nuclear Power Operations and
World Association of Nuclear Operators
Former U.S. Navy submarine commander*

Bernard Salha

*Senior Executive Vice President and President
of Research and Development, EDF*

Michael Shellenberger

Founder and President, Environmental Progress

Dirk Smit

*Vice President Research Strategy, Chief Scientist
Geophysics, Shell*

Reviewers

Phillip Hildebrandt

Consultant

Sue Ion

*Chairman, UK Nuclear Innovation Research
Advisory Board*

Scott Kemp

*Associate Professor, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT*

Andrew Klein

*Professor Emeritus, Nuclear Science and Engineering,
Oregon State University*

Mark Peters

Laboratory Director, Idaho National Laboratory

Andrew Sherry

*Chief Science and Technology Officer, UK National
Nuclear Laboratory*

Neil Todreas

*Professor Emeritus, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT*

SUBJECT MATTER EXPERT REVIEWERS

George Apostolakis

*Professor Emeritus, Department of Nuclear Science
and Engineering, MIT
Former Commissioner, U.S. Nuclear Regulatory
Commission*

Robert Armstrong

*Director, MIT Energy Initiative; Chevron Professor of
Chemical Engineering, Department of Chemical
Engineering, MIT*

Rebecca Henderson

*John and Natty McArthur University Professor,
Harvard Business School*

Robert Hill

*National Technical Director, Advanced Reactors,
Argonne National Laboratory*

Dale Klein

*Associate Vice Chancellor for Research for the UT
System and Reese Endowed Professorship in
Engineering, University of Texas
Former Chairman, U.S. Nuclear Regulatory
Commission*

Christopher Knittel

*George P. Shultz Professor of Applied Economics, Sloan
School of Management; Director, Center for Energy
and Environmental Policy Research, MIT*

Paul Joskow

*Elizabeth & James Killian Professor of Economics
and Management, Emeritus, Department of
Economics, MIT*

François Lévêque

Professor of Economics, MINES ParisTech

Steven Zinkle

*Governor's Chair Professor, Department of Nuclear
Engineering and Department of Materials Science
and Engineering, University of Tennessee / Oak
Ridge National Laboratory*

Table of Contents

Foreword and Acknowledgments

Executive Summary

Background and Overview

Chapter One: Opportunities for Nuclear Energy

Chapter Two: Nuclear Power Plant Costs

Chapter Three: Advanced Reactor Technology Evaluation

Chapter Four: Nuclear Industry Business Models and Policies

Chapter Five: Nuclear Reactor Safety Regulation and Licensing

Appendices

Abbreviations and Technical Terms

Foreword and Acknowledgments

The MIT *Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World* study is the eighth in the MIT Energy Initiative's "Future of" series, which aims to shed light on a range of complex and important issues involving energy and the environment. A central theme is understanding the role of technologies that might contribute at scale in meeting rapidly growing global energy demand in a carbon-constrained world. Nuclear power could certainly play an important role, and it was the subject of the first of these interdisciplinary studies at MIT—the 2003 *Future of Nuclear Power* report. More recent studies have looked at the roles of CO₂ sequestration, natural gas, the electric grid, and solar power. Following a 2009 update to the original nuclear study, now is an appropriate time to take a fresh look at nuclear, given advances in inherently safer technologies, a sharpened focus on the need to reduce CO₂ emissions in the energy sector, and challenges of cost and public perceptions of safety.

The study is designed to serve as a balanced, fact-based, and analysis-driven guide for stakeholders involved in nuclear energy. Policy makers, utilities, existing and startup energy companies, regulators, investors, and other power-sector stakeholders can use this study to better understand the challenges and opportunities currently facing nuclear energy in the U.S. and around the world. The report distills results and findings from more than two years of primary research, a review of the state of the art, and quantitative modeling and analysis.

The MIT *Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World* study was supported by a number of sponsors and was complemented by a distinguished Advisory Committee and Review Team. We gratefully acknowledge the support of our major sponsor The Alfred P. Sloan Foundation and important contributions from Shell, Électricité de France (EDF), The David and Lucile Packard Foundation, General Atomics, the Anthropocene Institute, MIT's International Policy Laboratory, Mr. Zach Pate, Mr. Neil Rasmussen, and Dr. James Del Favero. We also thank the Idaho National Laboratory, Dominion Engineering Inc., Blumont Engineering Solutions (Paul Meier and his JuiceBox work for Chapter 1), Professor Giorgio Locatelli from the University of Leeds (for his work on Megaprojects in Chapter 2), the Breakthrough Institute, and Lucid Strategy for their generous in-kind contributions. We also wish to acknowledge Professor Jessika Trancik and Dr. James McNerny from the Institute for Data, Systems, and Society at MIT for their valuable input to the analysis of the cost breakdown of nuclear power plants.

Our Advisory Committee members dedicated a significant amount of their time to participate in meetings and to comment on our preliminary analysis, findings, and recommendations. We would especially like to acknowledge the efficient conduct of Advisory Committee meetings under the able and experienced direction of Chairman Philip R. Sharp. Our review team under the leadership of Professor Andrew Klein provided valuable insight on our analysis, findings, and recommendations.

The Study Team also wants to thank the following list of individuals who provided valuable input from interviews and workshops conducted during the study:

Kev Adjemian	Marco Cometto	Simon Irish	Matthew McKinzie	Arthur Samberg
Laurent Amice	Jim Costedio	Ramzi Jammal	Paul Meier	Frank Saunders
Henry Aszklar	David Darwin	Rick Jefferys	Tom Miller	Chris Schuh
Scott Bailey	Franck David	Zabrina Johal	Phil Mills	Jacob Selzer
William Banholzer	Michael Davidson	Lars Jorgensen	Alexander Mishkin	Daniel Shamblin
Rita Baranwal	Paul DeLuca	Jake Jurewicz	Mike Myers	Farshid Shahrokhi
Jeff Bartelme	Jacques de Toni	John Kelly	Steve Nance	Santhosh Shankar
Elizabeth McAndrew-Benavides	Dave Dilling	Jan-Horst Keppler	Mark Nelson	David Shropshire
Gary Bergstrom	Sean Donnelly	Efe Kurt	Robert Nielsen	James Stouch
Michael Bielman	Bradley Dunkin	Albert Lafleur	Marcus Nichol	Garrett Sonnenberg
Richard Bradford	Paul Erb	Bob Langer	Mike O'Connell	Finis Southworth
Jonathan Brown	Ashley Finan	Philippe Larochelle	Frank O'Sullivan	Andrew Sowder
Harlan Bowers	Michael Ford	Christophe Levy	Rory O'Sullivan	Marc Tannenbaum
Bob Boyd	Ben Frazier	Ning Li	Charlie Painter	Mathia Trojer
Vlad Bulović	Vince Gilbert	Frank Ling	Bojan Petrovic	Jack Tuohy
Marcia Burkey	Mike Goff	Robert Littles	Jonathan Pellish	Franz-Josef Ulm
Nicolle Butcher	Charles Gordon	Giorgio Locatelli	Mark Peres	Eric Van Abel
Jean-Marc Capdevila	Dustin Greenwood	Eric Loewen	Pedro Pereyra	Jan Van Der Lee
Charles Chase	Daniele Giuffrida	William Luyties	Andrew Pinneke	Chris Vandervort
Doug Chapin	Abhinav Gupta	Audray Lyke	Bruce Phillips	Jason Wang
Ismail Cheng	Puja Gupta	Ed Lyman	Neil Rasmussen	Kevan Weaver
Armond Cohen	Kathryn Held	Iain Macdonald	Ray Rothrock	Brian Whitley
Christopher Colbert	Ronald Henry	Michel Maschi	Tony Roulstone	Don Wolf
Justin Coleman	Bronwyn Hyland	Regis Matzie	Jayant Sabnis	Oscar Zamorano
	Dan Ingersoll	Jan Mazurek	Tim Saeger	Yaoli Zhang

We wish to thank Carolyn Carrington for her administrative support for all of the events, meetings, and workshops as part of this study; Marika Tatsutani for editing this report with great skill and patience; Professor Robert C. Armstrong for supporting this study in his role as Director of the MIT Energy Initiative and as a reviewer; and MITEI Executive Director Martha Broad for providing additional support and review.

MITEI staff provided administrative and financial management assistance to this project. We would particularly like to thank project manager Jennifer Schlick; Francesca McCaffrey and Ivy Pepin for

editing support; Debi Kedian, Carolyn Sinnes, and Kayla Small for events support; and Emily Dahl, MITEI Director of Communications. We would also like to thank Allison Associates for layout and figure design.

This report represents the opinions and views of the researchers, who are solely responsible for its content, including any errors. The Advisory Committee and the Reviewers are not responsible for the findings and recommendations it contains, and their individual opinions and views may differ from those expressed herein.

Dedicated to the memory of our friend and colleague Mujid Kazimi.

Streszczenie

Wykorzystanie energii jądra atomowego do celów pokojowych było jednym z najbardziej zadziwiających naukowych i technologicznych osiągnięć XX wieku. Jest ono wykorzystywane w medycynie, bezpieczeństwie i energii. Jednak po kilku dekadach szybkiego wzrostu inwestycje w energię jądrową utknęły w martwym punkcie w wielu rozwiniętych krajach, a energia jądrowa stanowi obecnie zaledwie 5% globalnej pierwotnej produkcji energii.

W XXI wieku świat stoi przed nowym wyzwaniem drastycznego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych przy równoczesnym zwiększeniu dostępu do energii i związanych z tym ekonomicznych możliwości dla miliardów ludzi. MIT przeanalizowało to wyzwanie w sektorze energii elektrycznej, który został powszechnie wskazany jako pierwszy sektor do głębokiej dekarbonizacji. W większości regionów zapewnienie dostaw energii odpowiadających przewidywanemu na 2050 r. obciążeniu przy jednoczesnym ograniczaniu emisji będzie wymagało różniących się od obecnych kombinacji metod generacji energii elektrycznej. Podczas gdy różne technologie niskowęglowe lub bezwęglowe mogą być stosowane w różnych kombinacjach, analiza MIT pokazuje potencjalną rolę energii jądrowej jako w pełni dyspozycyjnej technologii niskoemisyjnej. Bez energetyki jądrowej koszt dekarbonizacji znacznie wzrasta (Rysunek E.1., lewa kolumna). Kombinacje o najniższych kosztach zawierają istotny komponent jądrowy, którego znaczenie wzrasta wraz z malejącym kosztem technologii jądrowych (Rysunek E.1., prawa kolumna).

Pomimo powyższych faktów perspektywy ekspansji energii jądrowej pozostają w wielu częściach świata słabe. Podstawowym problemem są koszty. W ciągu ostatnich dziesięcioleci technologie innych sposobów generacji energii elektrycznej stały się tańsze, podczas gdy nowe elektrownie jądrowe stały się bardziej kosztowne. Ten trend utrudnia potencjalny wkład energii jądrowej i zwiększa koszt przeprowadzenia dekarbonizacji. Raport MIT wskazuje, co jest potrzebne do zatrzymania i odwrócenia tego trendu.

Poddano analizie niedawne projekty reaktorów lekkowodnych (LWR) realizowane na całym świecie, oraz oceniono postępy w rozwoju interdyscyplinarnych technologii, które mogą być zastosowane zarówno w konstrukcji nowych typów elektrowni jądrowych, jak i w projektach obecnie w fazie planowania. Rozwiązanie problemów związanych z kosztami wymagać będzie m.in. działań takich, jak:

- (1) *Skupienie na korzystaniu ze znanych praktyk zarządzania projektami/budowami dla powiększenia prawdopodobieństwa sukcesu w wykonaniu i dostawie nowych elektrowni jądrowych.*
Ostatnie doświadczenia projektów budowy elektrowni jądrowych w Stanach Zjednoczonych i Europie wykazały powtarzające się błędy zarządzania budowami elektrowni jądrowych skutkujące opóźnieniami i przekroczeniami budżetów. Dla ich usunięcia potrzebnych jest pilnie kilka działań naprawczych: (a) przygotowanie większej części projektu szczegółowego przed przystąpieniem do budowy; (b) korzystanie w czasie budowy ze sprawdzonego łańcucha dostaw i wykwalifikowanych pracowników; (c) włączenie producentów i konstruktorów do zespołów projektowych na wczesnych etapach procesu projektowego, aby zapewnić, że systemy, konstrukcje i elementy instalacji zostały zaprojektowane z uwzględnieniem wymogów budowy i produkcji zgodnie z odpowiednimi normami; (d) mianowanie jednego głównego menedżera kontraktu z potwierdzoną wiedzą fachową w zarządzaniu wieloma niezależnymi podwykonawcami; (e) ustanowienie struktury kontraktowej zapewniającej, że wszyscy wykonawcy mają żywotny interes w powodzeniu projektu; oraz (f) zapewnienie takiego otoczenia regulacyjnego, które w porę reaguje na małe, nieprzewidywalne wcześniej zmiany projektu i procesu budowy.
- (2) *Odejście od budowy na miejscu, wysoce zależnej od lokalizacji, na rzecz seryjnej produkcji standaryzowanych elektrowni jądrowych.*

Istnieją możliwości znacznego obniżenia kosztów kapitałowych i skrócenia harmonogramu budowy nowych elektrowni jądrowych. Po pierwsze, rozmieszczenie kilku takich samych jednostek, zwłaszcza w jednej lokalizacji, oznacza możliwość uczenia się w trakcie budowy każdej kolejnej jednostki. W Stanach Zjednoczonych i Europie, gdzie produktywność na budowach jest niska, warto szerzej korzystać z produkcji fabrycznej, którą cechuje wyższa efektywność jeśli chodzi o wytwarzanie złożonych systemów, struktur i komponentów. Zastosowanie szeregu przekrojowych technologii, w tym modułowych konstrukcji w fabrykach i stocznicach, zaawansowanych rozwiązań betonowych (np. kompozyty z blachy stalowej, wysokowytrzymała stal zbrojeniowa, beton o ultra wysokiej wydajności), technologii izolacji sejsmicznej i zaawansowanych systemów elektrowni jądrowej (np. osadzanie fundamentów reaktorów, lokalizacja na morzu), mogą mieć pozytywny wpływ na koszty i harmonogram budowy nowej elektrowni jądrowej. W przypadku mniej złożonych systemów, struktur i komponentów lub w lokalizacjach, gdzie wydajność budowy jest wysoka (np. w Azji), konwencjonalne podejście może być rozwiązaniem najtańszym.

Należy podkreślić szerokie stosowanie się tych zaleceń do wszystkich koncepcji i projektów reaktorów. Możliwości ograniczenia kosztów odnoszą się do ewolucyjnych reaktorów lekkowodnych generacji III, małych reaktorów modułowych (SMR) i reaktorów IV generacji. Bez standaryzacji projektów i innowacji w podejściu do budowy autorzy raportu nie wierzą, że typowe cechy technologiczne każdego z zaawansowanych reaktorów doprowadzą do obniżenia kosztów niezbędnych do zapewnienia konkurencyjności energii elektrycznej generowanej w elektrowniach jądrowych z innymi rodzajami generacji energii elektrycznej.

Oprócz wysokich kosztów, rozwój energii jądrowej jest hamowany przez obawy społeczeństwa dotyczące konsekwencji poważnych wypadków (takich jak miało to miejsce w Fukushima, Japonia w 2011 r.) w tradycyjnych projektach elektrowni jądrowych generacji II. Obawy te spowodowały w niektórych krajach całkowitą rezygnację z energii jądrowej. Aby rozwiązać problemy związane z bezpieczeństwem, raport rekomenduje:

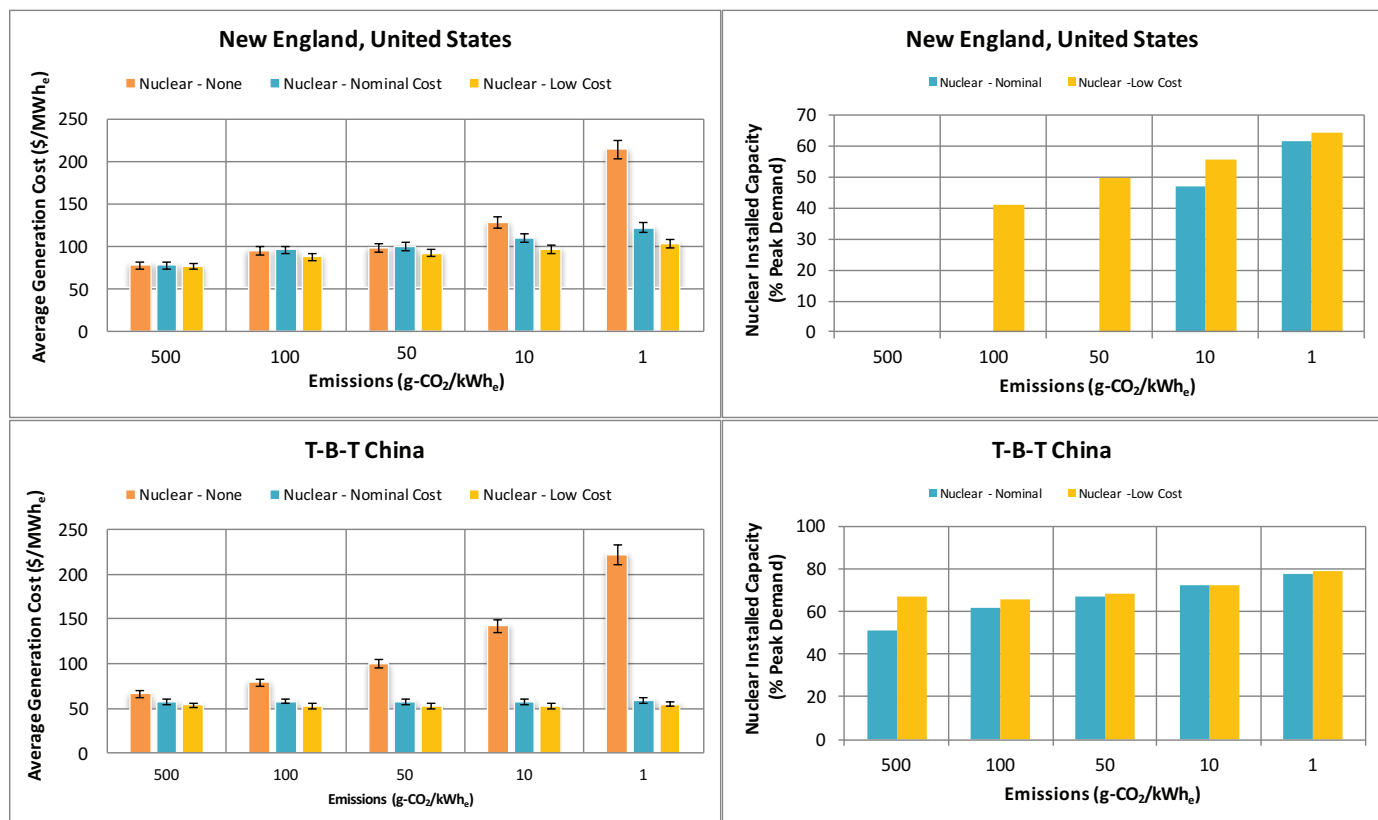
(3) *Wybór konstrukcji reaktorów zawierających integralne i pasywne systemy bezpieczeństwa.*

Celem spowodowania, że funkcjonowanie reaktorów będzie prostsze i bardziej tolerancyjne dla ludzkich błędów stosuje się m.in. materiały o wysokiej stabilności chemicznej i fizycznej oraz wysokiej pojemności cieplnej, wrodzonej stabilności jądrowej oraz wysokiej zdolności zatrzymania produktów rozkładu jądrowego, systemy bezpieczeństwa wymagające ograniczonego lub zerowego zasilania awaryjnego i minimalnej interwencji zewnętrznej. Takie rozwiązania zastosowano już w niektórych lekkowodnych elektrowniach jądrowych trzeciej generacji budowanych w Chinach, Rosji i Stanach Zjednoczonych. Pasywne systemy bezpieczeństwa zmniejszają prawdopodobieństwo wystąpienia poważnej awarii, a także łagodzą skutki zewnętrzne w przypadku jej wystąpienia. Powinno to także ułatwić licencjonowanie nowych elektrowni jądrowych i przyspieszyć ich wdrożenie w krajach rozwiniętych i rozwijających się. Zgodnie z raportem, zaawansowane reaktory, takie jak małe modułowe lekkowodne reaktory SMR (np. NuScale) oraz dojrzałe koncepcje reaktorów IV generacji (na przykład reaktory gazowe o wysokiej temperaturze i reaktory prędkie chłodzone sodem) również posiadają powyższe cechy bezpieczeństwa i są już teraz gotowe do komercyjnego wdrożenia.

Co więcej, ocena raportu na temat amerykańskich i międzynarodowych środowisk regulacyjnych sugeruje, że obecny system regulacyjny jest wystarczająco elastyczny, aby uwzględnić licencjonowanie tych zaawansowanych konstrukcji reaktorów. Pewne modyfikacje obecnych ram regulacyjnych mogłyby poprawić wydajność i skuteczność przeglądów licencji.

¹ Projekty reaktorów są często klasyfikowane na cztery generacje. Pierwsze komercyjne reaktory jądrowe zbudowane pod koniec lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku są klasyfikowane jako systemy generacji I. Systemy generacji II obejmują reaktory komercyjne, które zostały zbudowane w latach 1970-1990. Reaktory generacji III są projektami komercyjnymi, które zawierają ulepszenia ewolucyjne w stosunku do systemów generacji II. Generacja IV to klasyfikacja używana do opisanego zestawu zaawansowanych konstrukcji reaktorów, które wykorzystują chłodziwa inne, niż wodne i są obecnie w fazie rozwoju

Rysunek E.1: (po lewej) Średni systemowy koszt energii elektrycznej (w USD/MWh_e) i (po prawej) zainstalowana moc jądrowa (% szczytowego zapotrzebowania) w regionie Nowej Anglii w Stanach Zjednoczonych i w regionie Tianjin-Beijing-Tangshan (T-B-T) w Chinach w odniesieniu do różnych ograniczeń węglowych (gCO₂/kWh_e) i trzech scenariuszy różnych dostępnych technologii w 2050 r: (a) energetyka jądrowa niedozwolona, (b) energetyka jądrowa dozwolona po nominalnym koszcie kapitału (5 500 USD za kW_e dla Nowej Anglii i 2 800 USD za kW_e dla T-B-T), oraz (c) energetyka jądrowa dozwolona z lepszymi kosztami kapitału (4 100 USD za kW_e dla Nowej Anglii i 2 100 USD za kW_e dla T-B-T)



Symulacje przeprowadzono przy użyciu narzędzia MIT do optymalizacji systemowej o nazwie GenX. Dla danego rynku energetycznego wymagane dane wejściowe obejmują godzinowe zapotrzebowanie na energię elektryczną, godzinowe modele pogodowe, koszty ekonomiczne (kapitał, operacje i paliwo) dla wszystkich rodzajów elektrowni (energia jądrowa, wiatrowa i słoneczna z akumulatorem, kopalne z wychwytem i składowaniem dwutlenku węgla lub bez nich) i ich wskaźniki wzrostu. Symulacje GenX zostały użyte do identyfikacji miksu systemów generacji energii elektrycznej, który minimalizuje średnie koszty energii elektrycznej na każdym z tych rynków. Eskalacja kosztów widoczna w scenariuszach niejądrowych z drastycznymi ograniczeniami węglowymi wynika głównie z dodatkowej rozbudowy i kosztów magazynowania energii, co jest konieczne w scenariuszach opartych wyłącznie na technologiach energetyki odnawialnej o zmiennej produkcji. Obecne średnie natężenie emisji węgla w sektorze energetycznym na świecie wynosi około 500 gramów równoważnika CO₂ na kilowatogodzinę (g/kWh_e); zgodnie ze scenariuszami stabilizacji zmian klimatycznych opracowanymi przez Międzynarodową Agencję Energetyczną w 2017 r., cele emisji węgla w sektorze energetycznym niezbędne dla ograniczenia globalnego średniego ocieplenia do 2° C wynoszą od 10 do 25 g/kWh_e do 2050 r. i poniżej 2 g/kWh_e do 2060 r.

Wreszcie, skorzystanie z zalet energetyki jądrowej wymaga kluczowych działań politycznych decydentów:

- (4) *Polityki dekarbonizacji powinny tworzyć takie same warunki wszystkim nisko-węglowym technologiom wytwarzania energii elektrycznej, pozwalając im na konkurowanie biorąc pod uwagę pełen zakres ich korzyści.*

Inwestorzy inwestujący w innowacje jądrowe muszą widzieć możliwość zysku ze sprzedaży swoich produktów z uwzględnieniem ich pełnej wartości, czyli powinno się uwzględniać takie czynniki, jak wartość redukcji emisji CO₂, które nie znajdowały się na rynku. Polityki, które wykluczają rolę energetyki jądrowej, zniechęcają do inwestowania w technologię jądrową. Może to spowodować wzrost kosztów dekarbonizacji i spowolnienie postępu osiągania celów łagodzenia zmian klimatu. Włączenie kosztów emisji CO₂ do ceny energii elektrycznej może w bardziej sprawiedliwy sposób docenić wartość wszystkich przyjaznych dla klimatu technologii energetycznych. Elektrownie jądrowe, zarówno istniejące, jak i nowe, znalazłyby się wtedy wśród beneficjentów porównywalnych, konkurencyjnych systemów wsparcia.

- (5) *Rządy powinny stworzyć lokalizacje jądrowe, na których innowacyjne firmy mogłyby budować prototypy reaktorów do badania i eksploatacji, zorientowane na licencjonowanie regulacyjne.* Takie lokalizacje powinny być otwarte na różne koncepcje reaktorów wybrane przez firmy, które są zainteresowane testowaniem prototypów. Rząd powinien zapewnić odpowiedni nadzór i wsparcie - w tym protokoły bezpieczeństwa, infrastrukturę, zatwierdzenia środowiskowe i usługi związane z cyklem paliwowym - a także powinien być bezpośrednio zaangażowany we wszystkie realizowane badania.

- (6) *Rządy powinny ustanowić programy finansowania testów prototypów i komercyjnego wdrażania zaawansowanych projektów reaktorów za pomocą czterech dźwigni: (a) finansowanie części kosztów uzyskania licencji regulatora, (b) finansowanie części kosztów badań i rozwoju, (c) finansowanie dla osiągnięcia określonych kluczowych celów technologicznych, oraz (d) finansowanie kredytów produkcyjnych w efekcie pomyślnej demonstracji nowych projektów jądrowych.*

W trakcie badań przeprowadzonych w związku z tym raportem pojawiło się dużo więcej wniosków. Szczegółowa dyskusja na temat tych wniosków zawarta jest w streszczeniu i głównej części raportu, który jest podzielony na pięć głównych obszarów tematycznych (z odpowiednimi tytułami rozdziałów): możliwości dla energii jądrowej, koszty elektrowni jądrowych, ocena zaawansowanych technologii reaktorowych, modele biznesowe i polityki dotyczące przemysłu jądrowego oraz regulacje i licencjonowanie bezpieczeństwa reaktorów jądrowych.

