

ENERGETYKA JĄDROWA PO UMOWIE PARYSKIEJ I WYBORACH W USA I NIE TYLKO...

Nuclear Power after Paris Agreement and American elections and more...

Dariusz Witold Kulczyński

Streszczenie: Tematem artykułu jest potencjalny wpływ Paryskiej Umowy ONZ (porozumienie paryskie - L'accord de Paris) w sprawie zmian klimatu COP 21/ CMP 11 na rozwój energetyki jądrowej oraz ocena stanu po wyborach nowego prezydenta w USA. Omówiono oddanie do eksploatacji pierwszego od 20 lat bloku jądrowego w elektrowni Watts Bar w USA, rozpoczęcie remontu kapitalnego elektrowni PHWR w Kanadzie, a także produkcję trytu na terenie obu wymienionych obiektów. Zwrócono uwagę na zmianę tonu środków masowego przekazu w odniesieniu do elektrowni atomowych i tzw. „energii odnawialnej”.

Abstract: The article tackles potential effects of the 2015 United Nations Climate Change Conference COP 21/ CMP 11 (Paris Agreement - L'accord de Paris) and the results of elections in the United States on development of nuclear power. Commercial operation of the first nuclear unit commissioned in the United States in 20 years at Watts Bar power plant and the commencement of refurbishment of PHWR generating station in Canada were described. Information on Tritium production in both aforementioned facilities was provided. Some attention was given to change in tone of Canadian mass media as it relates to renewable energy versus nuclear power.

Słowa kluczowe: Umowa Paryska, udział w emisjach dwutlenku węgla, podatek węglowy Carbon Tax, udział elektrowni jądrowych w zaspokajaniu zapotrzebowania mocy w Ontario, współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej (wiatraków energetycznych) 25%, remont kapitalny elektrowni jądrowej Darlington, instalacja usuwania trytu (DTRF).

Key words: Paris Agreement, share in CO₂ emissions, Carbon Tax, nuclear power share in Ontario Energy Mix, (Wind Turbine) capacity factor of 25%, Darlington nuclear refurbishment, Darlington Tritium Removal Facility.

Umowa Klimatyczna ONZ

Czwartego listopada, 2016 r. weszła w życie paryska umowa ONZ w sprawie zmian klimatycznych [1]. Ósme-go listopada, Amerykanie wybrali Prezydenta Trumpa, nominowanego przez Partię Republikańską, która osiągnęła także przewagę w Izbie Reprezentantów Kongresu i w Senacie USA. To jak się wydaje stawia wiele postanowień Konferencji Paryskiej ONZ pod znakiem zapytania, ale może mieć pozytywny wpływ na rozwój energetyki jądrowej. W październiku w USA oddano do eksploatacji pierwszy blok jądrowy od 20 lat, a w kanadyjskiej prowincji Ontario rozpoczęto remont kapitalny czteroblokowej elektrowni jądrowej.

Streszczając postanowienia Umowy Paryskiej graniczny poziom emisji gazów cieplarnianych ma być określany indywidualnie przez każde państwo, które podpisało umowę, ale uznany procent emisji dwutlenku węgla każdego kraju w skali światowej został wymieniony w dokumentach dotyczących podpisania i ratyfikacji porozumienia. Wypełnianie zobowiązań nie będzie poddane prawu międzynarodowemu i umowa nie przewiduje żadnych

środków przymusu wobec sygnatariuszy, którzy nie wprowadzą deklarowanych ograniczeń emisji gazów cieplarnianych. Pomimo powyższych niedostatków Umowy Paryskiej wydaje się, że środowisko światowych decydentów zaakceptowało konieczność przystosowania się do zmian klimatycznych i przeciwdziałania ich drastyczności. Projekt wprowadzenia „podatku węglowego” (ang. Carbon Tax), który wielu obserwatorów uważa za kompensację dochodów podatkowych krajów rozwiniętych po utracie bazy przemysłowej na rzecz Chin i krajów rozwijających się, pozostaje pod znakiem zapytania.

Wpływ stężenia CO₂ w atmosferze na średnią temperaturę powierzchni Ziemi zaobserwowano w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia; pierwsze międzynarodowe sympozjum miało miejsce w 1979 r. W czerwcu 1992 r., w Rio de Janeiro odbyła się światowa konferencja poświęcona sprawom ochrony środowiska i rozwoju, tzw. „Szczyt Ziemi”. Podpisano umowę ramową zmian klimatycznych ONZ, której celem było ustabilizowanie koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze (The United Nations Framework Convention on Climate Change tj. UNFCCC lub FCCC).

W grudniu 1997 r. w Kyoto w Japonii 37 państw podpisało umowę o redukcji emisji gazów cieplarnianych od 2005 r. Porozumienie podpisały i ratyfikowały 192 państwa, wśród których nie było jednak USA, a Kanada stale zwiększająca emisję gazów cieplarnianych, w 2011 r. oficjalnie wycofała się z „Protokołu Kyoto”. W latach kolejnych odbyło się 18 konferencji ONZ dotyczących zmian klimatycznych.

Wszystkie próby osiągnięcia porozumienia globalnego z udziałem i podjęciem zobowiązań przez liderów emisji CO₂ i metanu takich jak Chiny i USA zakończyły się niepowodzeniem. Przełom nastąpił dopiero podczas 21. Konferencji Klimatycznej ONZ (COP 21) w Paryżu w dniach 30 listopada-12 grudnia 2015 r. Wynegocjowano tam globalne porozumienie klimatyczne podpisane w Nowym Jorku 22 kwietnia 2016 r. podczas obchodów tzw. „Dnia Ziemi”.

Umowa Paryska (*L'accord de Paris*) wchodzi w skład Ramowej Konwencji w sprawie Zmian Klimatycznych Narodów Zjednoczonych. Ta pierwsza w skali całego świata umowa dotycząca klimatu opiera się na trzech filarach.

Po pierwsze: należy utrzymać wzrost średniej temperatury Ziemi do znacznie poniżej 2 stopni Celsjusza w porównaniu do okresu przed-przemysłowego (< 1750/1880) przy czym zalecane jest ograniczenie wzrostu temperatury do 1,5 stopnia Celsjusza.

Po drugie: Należy zwiększyć umiejętność przystosowania się do negatywnych skutków zmian klimatycznych i wspierać stabilizację klimatu poprzez ograniczanie emisji gazów cieplarnianych w sposób, który nie zagraża produkcji żywności.

Po trzecie: Wprowadzić kanały przepływu pieniądza wspierające ograniczanie emisji gazów cieplarnianych i rozwój socjologiczno-ekologicznych środków walki z nieuchronnymi zmianami klimatu.

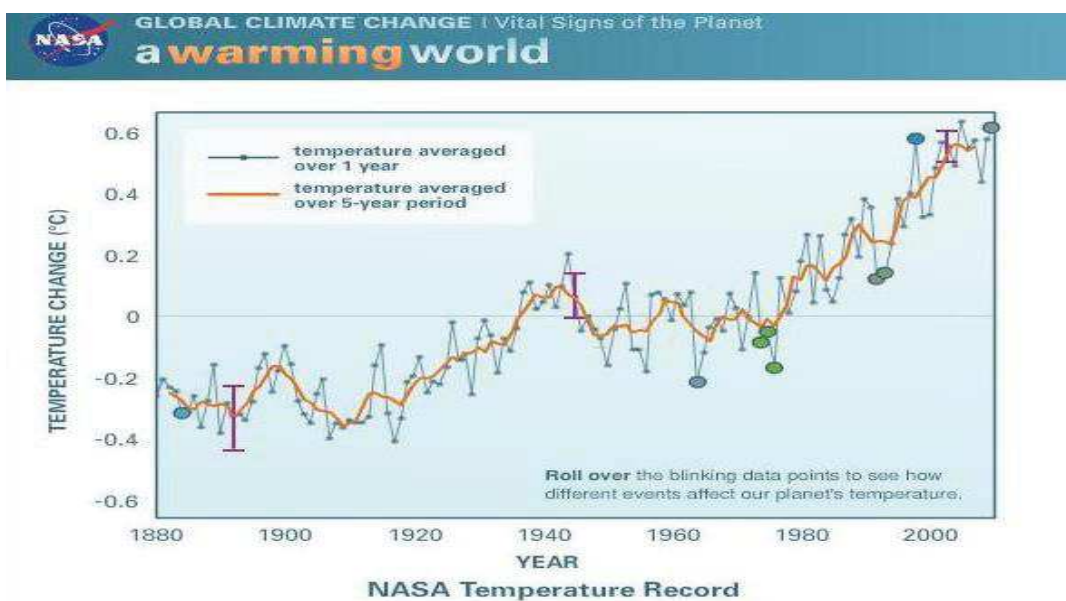
Każdy kraj powinien przy tym dążyć do osiągnięcia maksimum emisji CO₂ tak szybko, jak tylko możliwe i ustanowić tendencję spadkową wytwarzania dwutlenku węgla.

Temperatura Ziemi i emisja dwutlenku węgla

Warto przytoczyć światowy udział w emisjach dwutlenku węgla kilku państw wymienionych w teście Umowy Paryskiej, których redukcję obiecali sygnatariusze. I tak na potrzeby ratyfikacji tej umowy Chiny uznały 20,09% światowych emisji CO₂, USA 17,89%, Kanada 1,95%, Rosja 7,53%, Niemcy 2,56%, Wielka Brytania 1,55%, Francja 1,34%, a Polska 1,06% [1].

Jeżeli chodzi o Kanadę, to duży niepokój wzbudziła wzmianka o modyfikacji kanałów przepływu pieniądza, co większość obserwatorów tłumaczyła jako wprowadzenie podatku od emisji dwutlenku węgla (Carbon Tax). Podatek ten dotyczy ma wszystkich paliw organicznych takich jak benzyna, ropa, mazut i gaz ziemny. O potrzebie takiego podatku mówiła od lat partia neo-socjalistyczna NDP (New Democratic Party), a w wygranych w 2015 r. wyborach temat podjęła dotychczas centrowa Partia Liberalna (Liberal Party of Canada). Po wyborze Donalda Trumpa nie jest pewne, czy USA będą subsydiować ograniczenia emisji gazów cieplarnianych za pomocą postulowanych środków finansowych pomimo, że rozpoczęła to już administracja Prezydenta Obamy. Podatku Carbon Tax od paliw organicznych nowe władze w USA nie wprowadzą. Kanada będzie zmuszona do zrewidowania własnych planów w tej dziedzinie niezależnie od tego, że obiecywał to w kampanii wyborczej obecny Premier Justin Trudeau.

Ze względu na częstotliwość huraganów i powodzi, na terenie południowo-wschodnich obszarów USA ignorować zmian klimatycznych nie sposób. Pytaniem podstawowym jest czy Prezydent Trump i Kongres zechcą całkowicie odrzucić korelację wzrostu średniej temperatury Ziemi i stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Alternatywą jest uznanie powyższej teorii za prawdziwą, ale dokonywanie ograniczania emisji gazów cieplarnianych w sposób uznawany przez Republikanów za racjonalny.

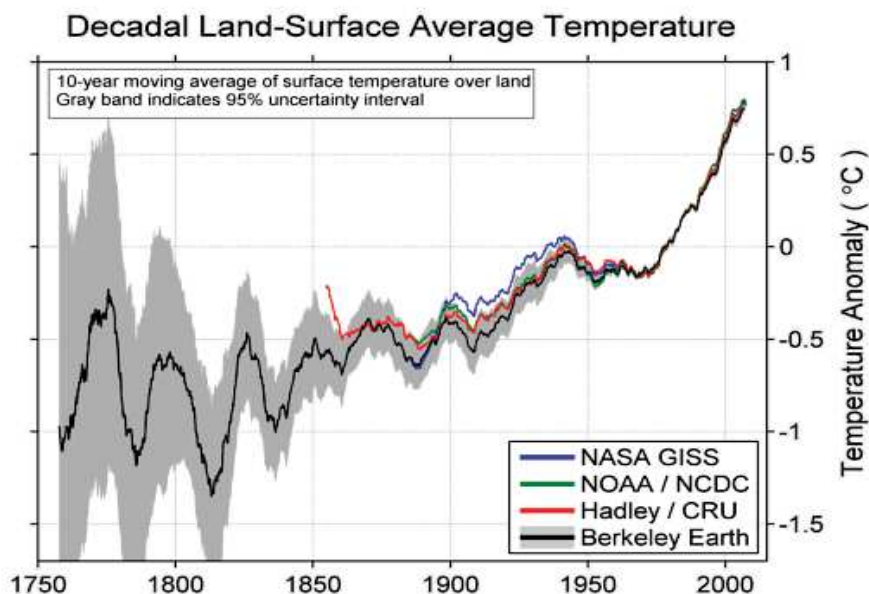


Rys.1. Według NASA temperatura Ziemi wzrasta

Fig. 1. According to NASA Earth's temperature continues to rise

W przekonaniu 90% naukowców na całym świecie badania dowodzą, że w ciągu ostatnich 250 lat temperatura Ziemi wzrosła o 1,5 stopnia Celsjusza. W ciągu ostatnich 55 lat wzrost temperatury Ziemi osiągnął mniej więcej 1 stopień. Jak można zaobserwować na zamieszczonym powyżej wykresie opublikowanym przez NASA uśrednienie pomiarów temperatury w okresach pięcioletnich daje wyraźny trend wzrostu. Przy pomiarach uśrednianych rocznie obserwuje się skoki temperatury w górę i w dół, co jest

często wykorzystywane przez przeciwników teorii ogrzewania się Ziemi. Poniżej zamieszczono wykres porównujący wyniki pomiarów temperatury Ziemi czterech wiodących centrów naukowych opublikowany przez BEST (The Berkeley Earth Surface Temperature project). Zakończone w 2012 r. przedsięwzięcie naukowe BEST przeanalizowało 1,6 mld raportów pomiarów temperatury pochodzących z 16 archiwów biorąc pod uwagę aktywność Słońca, erupcje wulkanów oraz dystans punktów pomiaru temperatury od miast i uwzględniając korelację temperatury ze stężeniem dwutlenku węgla w atmosferze [1a].



Rys. 2. Zbieżność wyników pomiarów wiodących centrów naukowych (publikacja BEST – pozwolenie na przedruk: prof. Rich Muller)
Fig. 2. Convergence of temperature measurements of four leading scientific centres (BEST graph publication courtesy of Prof. Rich Muller)

Środki masowego przekazu o energetyce jądrowej i przeciwdziałaniu emisji CO₂

Po podpisaniu Umowy Paryskiej, tak w Kanadzie, jak w Stanach Zjednoczonych daje się zaobserwować „cieplejszy” stosunek do energetyki jądrowej. Nowy blok jądrowy w USA jak i rozpoczęcie remontu kapitalnego w elektrowni atomowej w Kanadzie zostały pozytywnie opisane przez wiele ważnych gazet. Szczegóły tych inwestycji będą podane w dalszej części artykułu. Wydaje się, że w jurysdykcjach północno-amerykańskich środowiska decyzyjne przygotowują się do odstąpienia od kosztownych i nieekonomicznych prób ograniczenia emisji CO₂, takich jak wiatraki energetyczne na rzecz energetyki jądrowej.

Novum w kanadyjskich środkach masowego przekazu stanowi inna jakość dyskusji o różnych aspektach metod wytwarzania energii elektrycznej i związanymi z tym emisjami gazów cieplarnianych. Po raz pierwszy od dziesięcioleci dopuszczono głosy bardzo krytyczne wobec tzw. „energetyki odnawialnej” za to przychylnie energetyce jądrowej [3a]. W demokracjach parlamentarnych panuje oczywiście wolność słowa, ale redaktorzy naczelni należą do szeregu ugrupowań opiniotwórczych. W Kanadzie jest to przede wszystkim Forum Polityki Publicznej (Public Policy Forum) [3b], które wypracowywało opinie na

temat wolnego handlu z USA, prywatyzacji elektrowni państwowych, wiatraków energetycznych, a także energetyki jądrowej. W październiku 2016 r., w programie „The Agenda with Steve Paikin” telewizji publicznej kanadyjskiej prowincji Ontario (TVO - Television Ontario) poruszono temat roli, jaką w kontekście emisji CO₂ spełnia energetyka jądrowa. Prowincję Ontario zamieszkuje 14 mln Kanadyjczyków. W 2015 r. średnie zapotrzebowanie w szczycie w Ontario wyniosło 22 516 MW. Bardzo niskie emisje CO₂ w prowincji Ontario wynikają z wysokiego udziału elektrowni jądrowych i wodnych w zaspakajaniu zapotrzebowania mocy, odpowiednio 59% i 24% [3c]. Potwierdzono zasadność remontu kapitalnego elektrowni jądrowej Darlington (4 x 930 MW brutto) i decyzji o moratorium na wprowadzanie dalszych wiatraków energetycznych do systemu, który od kilku lat ma nadmiar mocy [4], [4a]. Przypomniano, że elektrownie atomowe emitują praktycznie zero ton CO₂ poza okresami krótkotrwałych prób dyspozycyjności generatorów zasilania awaryjnego. Generatory te są napędzane turbinami spalającymi ropę naftową. Wyraźnie powiedziano, że wiatraki energetyczne (tzw. „elektrownie wiatrowe”) pracują mniej więcej przez ¼ czasu (współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej 25%). Powyższe oznacza, że przez ¾ czasu moc zainstalowanych elektrowni wiatrowych jest zaspakajana przez

turbiny spalające gaz ziemny (natural gas), a te produkują mniej więcej 50% CO₂ w stosunku do elektrowni opalanych węglem oskarżanych o główny udział w emisji gazów cieplarnianych. W rzeczywistości spalanie nie węgla, lecz gazu ziemnego już w 1990 r. stanowiło największe źródło emisji CO₂ w Kanadzie. We wspomnianym programie, telewizyjnie w Ontario dowiedzieli się, że udział elektrowni spalających gaz ziemny wynosi 8,2% co znacznie przyćmiło korzyści z permanentnego odstawienia elektrowni węglowych Naticoke i Lampton, które przez ostatnie 10 lat pracowały zasadniczo w reżimie podszczytowym, a nawet szczytowym. Najciekawsze jednak było stwierdzenie, że elektrownie wiatrowe polegają zasadniczo na subsydiach rządowych, bez których nie mogą się utrzymać na rynku. W omawianym programie brali oczywiście również udział przeciwnicy energii jądrowej. Ich reakcja na obniżenie słabości ekologicznej wiatraków ze względu na ich wspomaganie blokami gazowymi była bardzo charakterystyczna. Stwierdzili mianowicie, że ... emisja CO₂ jest... mniej szkodliwa od odpadów jądrowych! Należy przypuszczać, że niezależnie od wyniku kolejnych wyborów w prowincji Ontario przyszły rząd zatwierdzi również remont kapitalny elektrowni jądrowej Bruce B (4 x 840 MW brutto) eksploatowanej od 2001 r. przez prywatną firmę Bruce Power.

„Mały renesans” jądrowy w Ameryce Północnej

W październiku 2016 r. w Stanach Zjednoczonych oddano do użytku blok 2 w elektrowni Watts Bar o mocy 1,165 MW [2]. Był to pierwszy blok jądrowy uruchomiony w USA w ciągu ostatniego dwudziestolecia. Elektrownia Watts Bar należy do największej w USA państwowej (publicznej) firmy energetycznej TVA (Tennessee Valley Authority) [2a]. TVA posiada 34 000 MW mocy zainstalowanej w tym 8000 MW w trzech elektrowniach jądrowych. Energia dostarczana przez Watts Bar 2 zaspokoi zapotrzebowanie na elektryczność 650. tys. domów położonych w dolinie Tennessee (Tennessee Valley). Jest to siódmy blok jądrowy należący do TVA.



Fot. 1. Elektrownia jądrowa Watts Bar (Tennessee Valley Authority)
Phot. 1. Watts Bar Nuclear Power Plant (Tennessee Valley Authority)

Blok Watts Bar 2 został oddany do eksploatacji terminowo i bez przekroczenia kosztów (4,7 mld USD). Jest to jednostka o mocy netto 1167 MW posiadająca reaktor lekko-wodny (PWR) firmy Westinghouse na uran wzbogacony. Ponieważ

Watts Bar 2 został oddany do użytku prawie dziesięć lat po pierwszym bloku tej elektrowni jego konstrukcja została zmodernizowana w wyniku przeglądu systemów elektrowni jądrowych pod egidą WANO (World Association of Nuclear Operators). Miało to miejsce po awarii w elektrowni Fukushima (2011) o czym było już wspomniane na tych łamach [2b].

Elektrownie atomowe mają w USA wymiar tak ekologiczny jak i wojskowy. Jest to ważne dla konserwatystów, którzy będą rządili Ameryką przez najbliższe kilka lat i na pewno po bloku Watts Bar 2 niedługo pojawią się następne. Od 2004 r. pierwszy blok tej elektrowni (Watts Bar 1) poza wytwarzaniem energii elektrycznej wypala również specjalne pręty absorpcyjne TPBARs (Tritium Producing Absorber Rods). Z jednego pręta TPBAR uzyskuje się 10 000 Curies trytu, super ciężkiego izotopu wodoru [5]. Tryt ma wiele zastosowań pokojowych, ale w USA jest przede wszystkim używany do produkcji broni termojądrowej. Produkcja, transport i wykorzystanie trytu odbywa się pod ścisłą kontrolą agencji rządu federalnego NNSA (National Nuclear Security Administration) [5a].

Watts Bar 2, jak i kanadyjska elektrownia Darlington znajdują się obecnie w centrum uwagi analityków śledzących opłacalność energetyki jądrowej. Rozpoczął się właśnie remont kapitalny elektrowni jądrowej Darlington (4 x 930 MW), który umożliwi jej pracę do 2055 r. Elektrownia Darlington należy do państwowej (Publicznej) firmy Ontario Power Generation (OPG) [3], która eksploatuje przeszło 17 tys. megawatów mocy zainstalowanej w tym 6606 MW w dwóch elektrowniach jądrowych Darlington i Pickering (łącznie 10 bloków). W 2015 r. OPG zaspokoiło 50% zapotrzebowania sieci w Ontario dostarczając 78 TWh energii elektrycznej.



Fot. 2. Elektrownia jądrowa Darlington (Ontario Power Generation)
Phot. 2. Darlington Nuclear Generating Station (Ontario Power Generation)

Remont elektrowni Darlington rozpoczyna się od Bloku D2 o mocy brutto 930 MW (około 860 MW netto). Jest to blok ciśnieniowy, ciężkowodny PHWR (CANDU) używający uranu naturalnego jako paliwa i ciężkiej wody D₂O, tak w pierwotnym obiegu chłodzenia (97,5%) jak i w układzie moderatora (99,8%). Wszystkie zalecone po awarii w elektrowni Fukushima modyfikacje zostały wprowadzone na długo przed odstawieniem bloku do remontu kapitalnego. Tak się złożyło, że zarówno wspomniana poprzednio amerykańska elektrownia jądrowa Watts Bar jak i kanadyjska elektrownia jądrowa Darlington produkują tryt, chociaż zupełnie z innych powodów.

Jednakże Kanada nie sprzedaje materiałów radioaktywnych na potrzeby wojskowe, w szczególności nie dostarcza trytu na potrzeby produkcji broni termojądrowej. Pokojowe użycie trytu to na przykład niewymagające zasilania elektrycznego świecące w ciemności znaki i markery stosowane w medycynie jądrowej. W elektrowniach CANDU tryt jest produktem ubocznym. Powstaje on samorzutnie w wyniku bombardowania neutronowego ciężkiej wody w układzie moderatora i w pierwotnym systemie chłodzenia. Emitujący nisko-energetyczne promienie beta, tryt stanowi wewnętrzne zagrożenie radiologiczne dla personelu elektrowni i środowiska naturalnego. Inaczej: jest szkodliwy w przypadku wchłonięcia do organizmu poprzez drogi oddechowe albo wskutek absorpcji przez skórę [6]. Dlatego zawartość trytu w płynach roboczych elektrowni typu CANDU należy redukować.

Instalacja DTRF (Darlington Tritium Removal Facility), która usuwa tryt z ciężkiej wody z systemu moderatora i z pierwotnego systemu chłodzenia reaktorów CANDU stosuje wymianę katalityczną atomów trytu i deuteru przy przeciwnieprądowym przepływie pary zanieczyszczonej trytem ciężkiej wody i deuteru w stanie gazowym. W dalszej kolejności następuje rozdzielanie izotopów podczas destylacji kriogenicznej w temperaturze niewiele ponad 30 Kelwinów. Chłodziwem jest skroplony wodór - prot). Usunięty tryt jest stabilizowany/unieruchamiany za pomocą tytanu. Bez wymuszonych przestoju instalacja jest w stanie usunąć i unieruchomić około 25 mln Curies trytu (czyli nieco poniżej miliarda giga bekereli) rocznie.

Remont wszystkich czterech bloków elektrowni Darlington będzie wymagał usunięcia wielu ton ciężkiej wody, oczyszczenia jej z trytu i podniesienia zawartości D_2O w instalacji usuwania trytu DTRF i skojarzonym z nią uzdatniaczem ciężkiej wody SUP (Station Upgrader). Po zakończeniu remontu, reaktory otrzymają pozbawioną trytu ciężką wodę o zawartości 99,9% D_2O .

Po podpisaniu Umowy Paryskiej ONZ rządy wielu państw przygotowują się do bardziej namacalnego wdrażania rzeczywistych ograniczeń emisji, co wydaje się zwiększać popularność energetyki jądrowej. Przystano wreszcie przedstawiać tzw. „energetykę odnawialną” (wiatrak, bio-paliwa, panele słoneczne) i oszczędzanie (konserwację) elektryczności jako podstawowe środki zmniejszenia produkcji gazów cieplarnianych.

*mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński,
emerytowany pracownik elektrowni jądrowej Darlington,
Kanada*

mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński jest absolwentem VI L.O. im. Tadeusza Reytana. Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1977 r. Od 1981 r. przebywa w Kanadzie, gdzie przez 33 lata pracował w pionie technicznym elektrowni jądrowych z ciężko-wodnymi reaktorami CANDU (przez 6 lat w szkoleniu i w elektrowni jądrowej NPD w Rolphton, a przez kolejne 27 lat w elektrowni jądrowej Darlington: 4 x 930 MWe). O energetyce jądrowej pisał w artykułach opublikowanych w „Wiadomościach Elektrotechnicznych”, „Gazecie Wyborczej”, „Postępiech Techniki Jądrowej”, „Biuletynie Radiologicznym”, wityrynie CIRE i w Nuclear Engineering International (UK).”

Autor artykułu należy do osób czynnie włączających się w dyskusję o energetyce jądrowej w Polsce. Wygłosił w Polsce szereg wykładów; był m.in. prelegentem na konferencji NOT „Rozwój energetyki atomowej w Polsce” w grudniu 2007 r. i na II Kongresie Energetyki Jądrowej na Politechnice Warszawskiej 22-24 maja, 2012. Dwukrotnie wygłaszał także referaty na Konferencjach Gospodarczych Polonii (2004 i 2012). Jest autorem przeglądu Programu Polskiej Energetyki Jądrowej dla Nuclear Engineering International Magazine (artykuł „Planning for a Nuclear Poland” NEI, April, 2014).

Literatura:

- [1] United Nations Climate Change conference https://en.wikipedia.org/wiki/United_Nations_Climate_Change_conference
- [1a] Berkeley Earth Surface Temperature <http://berkeley-earth.org/summary-of-findings/>
- [2] Watts Bar 2 Nuclear Power Plant, Tennessee, United States of America <http://www.power-technology.com/projects/wattsbartwo/>; <http://nuclear-power-plants.findthedata.com/1/262/Watts-Bar-Unit-2>; <http://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/WATTS%20BAR-2>
- [2a] Tennessee Valley Authority <https://www.tva.gov/About-TVA/TVA-at-a-Glance>
- [2b] Post - Fukushima WANO changes https://www.iaea.org/INPRO/9th_Dialogue_Forum/04_SessionPresentations/Day1_Planery1/2_Chudakov-WANO-Day1-Plenary-1.pdf
- [3] Ontario Power Generation <http://www.opg.com/Pages/home.aspx>
- [3a] Nuclear Refurbishment in the Media <http://tvo.org/video/programs/the-agenda-with-steve-paikin/nuclear-refurbishment>
- [3b] Public Policy Forum <http://www.ppforum.ca/>
- [3c] Ontario Energy Mix 2015-Q4 (by IESO) http://www.ontarioenergyreport.ca/pdfs/5806_IESO_OntarioEnergyReportQ42016_Electricity_EN_FA.pdf
- [4] Nuclear Refurbishment transcript <http://tvo.org/transcript/2394669/video/programs/the-agenda-with-steve-paikin/nuclear-refurbishment>
- [4a] Ontario Power Generation Darlington Refurbishment <http://www.opg.com/generating-power/nuclear/stations/darlington-nuclear/darlington-refurbishment/Pages/default.aspx>
- [5] <https://www.tva.gov/Environment/Environmental-Stewardship/Environmental-Reviews/Production-of-Tritium-in-a-Commercial-Light-Water-Reactor>
- [5a] National Nuclear Security Administration <https://nnsa.energy.gov/>
- [6] CNSC: Tritium Fact Sheet <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/tritium.cfm>
- [7] A. Busigin, S.K. Sood: Optimization of DTRF Performance (<https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=21094408> download at <https://canteach.candu.org/Content%20Library/NJC-1-4-12.pdf>)