



CONFRONTATIONS  
EUROPE

ASCPE  
Les Entretiens européens

Les Entretiens européens  
in Poland :

*A civil society initiative to take  
ownership of the nuclear power issue*

*Inicjatywa społeczeństwa  
obywatelskiego na rzecz poznania  
i akceptacji energetyki jądrowej*

October 22<sup>nd</sup> and 23<sup>rd</sup> in Warsaw  
October 24<sup>th</sup> in Pomerania

With the support of

**RELACJA Z KONFERENCJI**

CZYTAJ PO ANGIELSKU:

HIGH SENSITIVITY AIR RADIOACTIVITY MONITORING SYSTEM IN POLAND

GORĄCA PLAZMA I ENERGIA TERMOJĄDROWA

EDF — DOŚWIADCZENIE I NOWOCZESNOŚĆ



ul. Świętokrzyska 14 00-050 Warszawa  
tel.22 336 14 19 fax. 22 336 14 25  
www.ekoatom.com.pl

E-mail: redakcja@ekoatom.com.pl

#### SKŁAD REDAKCJI

Redaktor Naczelny

dr inż. Krzysztof Rzymkowski,

dr inż. Marek Rabiński,

dr inż. Andrzej Mikulski,

dr inż. Piotr Czerski (PGE),

*Sekretarz Redakcji*

mgr Jerzy Szczurowski (SEP COSIW )

*Redaktor Techniczny*

Jarosław Cyrynger (SEP COSIW )

#### RADA PROGRAMOWA:

Przewodniczący

prof. dr hab. Maciej Sadowski,

Członkowie

prof. dr hab. Janusz Lewandowski (PW),

prof. dr hab. Łukasz Turski (UW)

prof. dr hab. Zdzisław Celiński,

prof. dr Andrzej Strupczewski,

prof. dr hab. Natalia Golnik (PW)

prof. dr hab. inż. Roman Domański

#### DOŁĄCZ I ZOBACZ RELACJE FOTOGRAFICZNE



Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów, korekty, edycji nadesłanych materiałów, oraz nie zwraca materiałów niezamówionych. Redakcja zastrzega sobie prawo do publikacji materiałów w dogodnym dla redakcji czasie i kolejności oraz niepublikowania materiału bez podania przyczyny.

Redakcja nie odpowiada za treść zamieszczonych reklam ogłoszeń i innych płatnych.

EKOATOM JEST PRAWNIE ZASTRZEŻONYM  
ZNAKIEM TOWAROWYM

Centralny Ośrodek Szkolenia i  
Wydawnictw

Ul. Świętokrzyska 14

00-050 Warszawa

tel.22 336 14 19 fax. 22 336 14 25

[www.cosiw.pl](http://www.cosiw.pl)

e-mail: [handlowy@cosiw.pl](mailto:handlowy@cosiw.pl)

## Szanowni Państwo,

Z satysfakcją prezentujemy jedenasty numer kwartalnika EKOATOM. Z przyjemnością odnotowujemy wzrastającą popularność czasopisma. Potwierdzeniem tej popularności i roli, jaką odgrywa czasopismo jest częstotliwość odwiedzania naszej strony. Po blisko trzech latach ukazywania się czasopisma (pierwszy numer ukazał się w marcu roku 2011) stroną EKOATOM odwiedziło około 700 000 osób. Potwierdzeniem popularności naukowej wartości czasopisma było zrejestrowanie czasopisma w międzynarodowej bazie - INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL i przyznanie mu ICV (Index Copernicus Value) 3,45 pkt.

Będziemy nadal dokładać starań, by atrakcyjność naszego pisma rosła, poprzez nawiązanie roboczych kontaktów z np. WNP (Wirtualny Nowy Przemysł - portal gospodarczy).

W ostatnim kwartale tego roku zorganizowano bardzo wiele konferencji i spotkań dotyczących energetyki i technik jądrowych. Do najważniejszych wydarzeń należała zdecydowanie konferencja CONFRONTATIONS EUROPE, która odbyła się w Warszawie w dniach 22-23 i 24 października w Krokowej na Pomorzu. Bezpośrednia transmisja z konferencji była dostępna na stronach EKOATOM. Ważniejsze materiały z konferencji przedstawiono w artykułach Panów M. Gatkowskiego, J. Chmielewskiego i ciekawej informacji o budowie elektrowni w Hinkley Point. Pełna relacja z konferencji jest dostępna w sekcji Wiadomości oraz na stronach EKOATOM.

Drugim ważnym wydarzeniem była konferencja cykliczna PLAZMA 2013 (2-6 września 2013), której główne tematy i osiągnięcia polskich uczonych przedstawiono w artykule prof. M. Sadowskiego i w wywiadzie przeprowadzonym w trakcie trwania konferencji dostępnym na stronach Kolejnym wydarzeniem, było seminarium 28/11/2013 w Instytucie Spawalnictwa dotyczące pośrednio zaangażowania i możliwości technicznych polskich firm w budowie elektrowni jądrowej. Do tych tematów nawiązuje artykuł J. Niagaja. Seminarium było pierwszą niezależną inicjatywą polskich firm pragnących uczestniczyć w budowie elektrowni jądrowej.

Czwartym wydarzeniem wartym odnotowania były warsztaty zorganizowane przez MEL PW w dniach 9-10 września 2013 dotyczące wykorzystania symulacji komputerowych do projektowania elektrowni jądrowych dla celów dydaktycznych. Omówienie problemu przedstawił M. Skrzypek ze współautorką E. Skrzypek.

Ponadto przedstawiamy kolejny artykuł J. Chmielewskiego o wykorzystaniu promieniowania jonizującego w medycynie i interesujący komentarz Pana Piotra Świdorskiego Burmistrza Gminy Różan, na której terenie znajduje się składowisko odpadów promieniotwórczych. W obecnym numerze słowo wstępne Pani wstęp do konferencji

Zgodnie z sugestiami przekazanymi nam przez międzynarodową bazę indeksową COPERNICUS by czasopismo o takim unikalnym przekroju tematycznym miało szerszy zasięg międzynarodowy proponujemy autorom przesyłanie tekstów w języku angielskim ze streszczeniem po polsku.

Redakcja EKOATOM z uwagą śledzi przygotowania do budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce. Z wystosowanej w ostatnim czasie przez Ministerstwo Gospodarki odpowiedzi na interpelację poselską w sprawie polskiego programu jądrowego wynika, że jedną z przyczyn opóźnienia były przeciągające się uzgodnienia międzynarodowe i krajowe mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ludności i ochrony środowiska oraz konieczność wprowadzenia modyfikacji w Polskim Programie Energetyki Jądrowej uwzględniającej nowelizację „prawa atomowego”. Ponadto opóźnienie spowodowane jest urealnieniem planów inwestycyjnych przez głównego inwestora (PGE) Początkowo projektowano uruchomienie pierwszego bloku w 2020 - obecnie termin przesunięto na 2024. Pozwolenie na budowę i budowa pierwszego bloku pierwszej polskiej elektrowni jądrowej ma przypaść na okres 1.01.2019 - 31.12.2024.

W dalszym ciągu oczekujemy na stanowisko Rządu RP w sprawie Memorandum dotyczącego energetyki jądrowej w Polsce, wystosowanego przez reprezentantów następujących podmiotów: Pana Prezesa Andrzeja G. Chmielewskiego z ramienia SEREN, Pana Prezesa. Jerzego Barglika z ramienia SEP, Panią Prezes Ewę Mańkiewicz-Cudny w imieniu FSNT NOT, oraz Pana Prezesa Zbigniewa Zimka w imieniu PTN, które zostało skierowane do Kancelarii Premiera w dniu 25. 07. 2012.

Oczekujemy także na stanowisko w sprawie Listu do Ministra Gospodarki dotyczącego energetyki jądrowej w Polsce, wystosowanego przez Pana Prezesa SEREN Andrzeja G. Chmielewskiego, Pana Prezesa SEP Jerzego Barglika, Panią Prezes FSNT NOT Ewę Mańkiewicz-Cudny, Pana Prezesa PTN Zbigniewa Zimka, które zostało skierowane do Pana Premiera J. Piechocińskiego w dniu 15. 04. 2013..

Jak już wspomniano w poprzednich numerach postanowiono, by czasopismo było powszechnie dostępne w Internecie bez żadnych dodatkowych opłat ze strony czytelników.

Oszczędności budżetowe powodują znaczne spowolnienie programu promocji i mogą spowodować zawieszenie lub zakończenie wydawania kwartalnika. Dlatego też zwracamy się ponownie do wszystkich zainteresowanych kontynuacją istnienia czasopisma o pomoc.

Jak zwykle, wszystkich chętnych, a przede wszystkim specjalistów, serdecznie zapraszamy do współpracy i publikowania na naszych łamach.

Redaktor Naczelny  
Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

## Spis treści

<b>Debaty europejskie w Polsce 10/2013 - Inicjatywa społeczeństwa obywatelskiego na rzecz poznania i akceptacji energetyki jądrowej. ....</b>	<b>5</b>
<b>Program polskiej energetyki jądrowej przyjęty przez Kierownictwo MG .....</b>	<b>11</b>

<b>Bezpieczne gospodarowanie odpadami promieniotwórczymi - RM przyjęła projekt MG .....</b>	<b>12</b>
---	-----------

<b>XII Szkoła Sterylizacji i Mikrobiologicznej Dekontaminacji .....</b>	<b>12</b>
---	-----------

**Eleonora Skrzypek, Maciej Skrzypek**

<b>KOMPUTEROWE KODY OBLICZENIOWE W ANALIZACH BEZPIECZEŃSTWA ELEKTROWNI JĄDROWYCH. MOŻLIWOŚCI OBLICZENIOWE NARZĘDZI CIEPLNO-PRZEPŁYWOWYCH NA PRZYKŁADZIE KODU RELAP5. ....</b>	<b>14</b>
---	-----------

Wstęp .....	14
Zasoby mocy obliczeniowej a inżynierskie kody obliczeniowe w branży energetycznej .....	15
Kody obliczeniowe .....	16
Kody neutronowe.....	17
Kody strukturalne.....	18
Kody ciepłno-przepływowe .....	19
Kody do analiz ciężkich awarii.....	22
Kod RELAP5 .....	24
Nodalizacja .....	24
Struktury ciepła.....	25

**Jerzy Niagaj Instytut Spawalnictwa**

<b>ANALIZA PARAMETRÓW TECHNICZNYCH PODSTAWOWYCH URZĄDZEŃ I KONSTRUKCJI ELEKTROWNI JĄDROWEJ W ASPEKTCIE MOŻLIWOŚCI WYTWARZANIA ICH PRZEZ PRZEMYSŁ KRAJOWY .....</b>	<b>30</b>
--	-----------

Streszczenie.....	30
Wprowadzenie .....	30
Budowa elektrowni jądrowej.....	31
Reaktor .....	37
Wytwornica pary.....	39
Pozostałe urządzenia i rurociągi w wyspy jądrowej .....	41
Podstawowe urządzenia i rurociągi w wyspy turbinowej.....	43
Podsumowanie.....	44

**Marek J. Sadowski**

<b>GORĄCA PLAZMA i ENERGIA TERMOJĄDROWA: GŁÓWNE KIERUNKI BADAWCZE I HISTORIA BADAŃ PROWADZONYCH W ŚWIERKU .....</b>	<b>47</b>
Podstawowe pojęcia .....	47
Badania nad opanowaniem kontrolowanych reakcji termojądrowych.....	49
Krótka historia badań gorącej plazmy w Świerk .....	56
Badania z dziedziny technologii plazmowych .....	68

**Jerzy Chmielewski**

<b>"ATOMOWA" TERAPIA MEDYCZNA Cz. IV Aparatura do radioterapii .....</b>	<b>71</b>
<b>INICJATYWY EDF ROZWIJAJĄCE KULTURĘ NAUKOWĄ I PRZEMYSŁOWĄ SPOŁECZEŃSTWA .....</b>	<b>78</b>

**Michał Gatkowski**

<b>ROZWÓJ ELEKTROWNI JĄDROWYCH WE FRANCJI OD EDF-1 (CHINON A1) NAD LOARĄ DO FLAMANVILLE 3 W NORMANDII.....</b>	<b>80</b>
--	-----------

**Jerzy Chmielewski**

<b>HINKLEY POINT C: FAKTY I LICZBY .....</b>	<b>87</b>
--	-----------

**Barbara Piotrowska, Krzysztof Isajenko, Marian Fajak, Andrzej Boratyński, Paweł Lipiński**

<b>HIGH SENSITIVITY AIR RADIOACTIVITY MONITORING SYSTEM IN POLAND .....</b>	<b>93</b>
---	-----------

**Piotr Świdorski, Burmistrz Gminy Różan**

<b>SKŁADOWISKO W SĄSIEDZTWIE. DOŚWIADCZENIA RÓŻANA.....</b>	<b>97</b>
---	-----------

In Europe, the choice of a low-carbon and diversified energy mix is becoming a key political challenge to support a competitive and sustainable development in solidarity. Poland, as well as numerous European countries, is questioning its energy transition and is considering the creation of a nuclear industry.

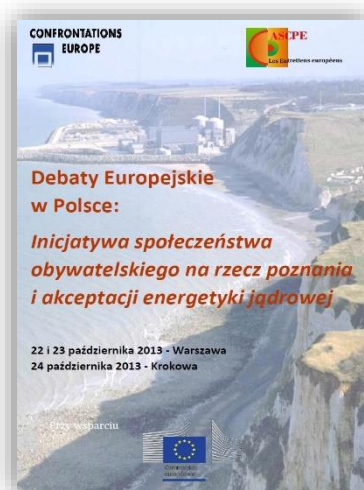
On the eve of important decisions for the country, but also for the Baltic region and for Europe, a dialogue needs to be opened with European actors in order to foster cooperation. In this framework, Les Entretiens Européens will gather stakeholders from the civil society, from the nuclear industry and from the Polish government, as well as representatives from around ten European countries, for a dialogue between them and with the European institutions.

The challenge of nuclear energy ownership will be at the heart of the debates. It is important to respond to the questions of the citizens and to share the feedbacks on societal and democratic issues, on education and training, on safety and waste management.

During Les Entretiens Européens, major issues for Poland and Europe, such as nuclear energy financing or economic competitiveness, will be discussed. The financing conditions of the Polish nuclear project will be decisive for its launch. Long-term financing issues are finally on the top of the political European agenda, and we will examine its application in the nuclear energy field.

Nuclear energy is a low-carbon industry at high added value. It is very important for the modernization of the Polish economy, its innovative potential, its competitiveness and the development of jobs in the territories. These questions concern all Europeans. Discussions during the conference, aims at helping us to measure the contribution of nuclear energy to growth and industry.

Les Entretiens Européens in Warsaw will be followed by a conference in Krokowa in Pomerania, with local stakeholders who are willing to hear expert testimonies and experiences from other European countries, in order to better understand the challenges that they are going to face in the region



## Debaty europejskie w Polsce 10/2013 - Inicjatywa społeczeństwa obywatelskiego na rzecz poznania i akceptacji energetyki jądrowej.

Na liście miast, w ponad 20 letniej historii ConfrontationsEurope, organizacji poruszającej w cyklu spotkań pod nazwą „Debaty Europejskie” (Les Entretiens européens) kluczowe dla naszego kontynentu problemy, znalazła się Warszawa.

Trwająca trzy dni konferencja pt. *Inicjatywa społeczeństwa obywatelskiego na rzecz poznania i akceptacji energetyki jądrowej*, została podzielona na dwie części. W pierwszej, przez dwa dni w Pałacu Kultury i Nauki dyskutowano o Polskim programie energetycznym i projekcie budowy pierwszej elektrowni jądrowej w naszym kraju. Zaprezentowano również doświadczenia krajów posiadających elektrownie jądrowe. W drugiej części

uczestnicy przenieśli się do Gminy Krokowa na Pomorzu, gdzie poruszono tematy związane z akceptacją społeczną obiektów jądrowych.

Niezwykle bogaty program konferencji zgromadził w gościnnej uczelni Collegium Civitas specjalistów ze wszystkich dziedzin życia gospodarczego, społecznego i politycznego. Obok korporacyjnych menedżerów, polityków, intelektualistów, naukowców i studentów znaleźli się przedstawiciele związków zawodowych,

działacze lokalnych samorządów, organizacje pozarządowych oraz zainteresowani członkowie społeczeństwa obywatelskiego.

Długą listę uczestników i partnerów konferencji otwiera:

- **Andra** — Krajowa Agencja Postępowania z Odpadami Promieniotwórczymi (Francja)
- **CEA** — Komisja Energii Atomowej i Źródeł Alternatywnych (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) (Francja)
- **CFE-CGC** — Federacja Związków Zawodowych (Francja)
- **Collegium Civitas** — niepubliczna uczelnia akademicka o kierunkach studiów społecznych i politycznych (Polska)
- **Credit Agricole** — Globalny bank inwestycyjny i kredytowanie korporacyjne (Szwajcaria)
- **demosEUROPA** — Centrum Strategii Europejskiej (Polska)
- **EDF** — (Francja)
- **EDF ENERGY** — brytyjska spółka należąca do Grupy EDF (Wielka Brytania)



22 października przed godziną 15:00 w auli Collegium Civitas zgromadziło się ponad stu uczestników zaproszonych przez organizatorów debaty.

Konferencję otworzyła **Prezeska Confrontations Europe, Claude FISCHER**, która zaprezentowała ideę aktywnego udziału społeczeństwa obywatelskiego w budowaniu Europy oraz wzmocnienia kooperacji i solidarności w oparciu o debaty organizowane w wielu miastach naszego kontynentu. W porozumieniu z agendami Unii

Europejskiej, *Confrontations Europe* oferuje analizy na tematy gospodarcze, ekonomiczne, finansowe, w kwestiach społecznych i politycznych. Organizuje debaty społeczne, angażując w dyskusję przedstawicieli środowisk o skrajnie sprzecznych poglądach. Również debata przygotowana dla Polski, poruszyła pełne spektrum zagadnień związanych z poznaniem i akceptacją energetyki jądrowej.

W imieniu polskiego gospodarza, gości i uczestników powitał **Rektor Collegium Civitas Stanisław Mocek**.

W dalszej części spotkania wystąpił **Massimo GARRIBBA**, **Dyrektor Departamentu ds. Energii, Komisji Europejskiej**. W swojej prezentacji omówił obecny stan energetyki w Europie z podziałem na jej źródła oraz perspektywy rozwoju w kierunku ograniczania emisji CO<sub>2</sub>. Nakreślił również pozycję Polski na tle energetyki europejskiej. W podsumowaniu zaprezentował politykę energetyczną, która zakłada: podniesienie do 20% efektywności energetycznej (oszczędności), zwiększenie produkcji ze źródeł odnawialnych oraz 20%



ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>. Końcowym etapem, po roku 2050 powinno być całkowite odejście od spalania węgla.

Tematem pierwszej dyskusji panelowej prowadzonej przez **Panią Dyrektora Agatę HINC** z firmy **demos Europa**, było współistnienie w gospodarce różnych źródeł pozyskiwania energii tzw. „Mix energetyczny”. Wzięli w niej udział reprezentanci środowisk decydujących o państwowej polityce energetycznej oraz przedstawiciele polskich związków zawodowych NSZZ

„Solidarność”.

Rozpoczął, Pan **Steve HARGREAVES**, **Dyrektor Strategii Korporacyjnej, EDF Energy**. Szczegółowo omówił on mix energetyczny w Wielkiej Brytanii podkreślając ważną rolę konsolidacji różnych źródeł energii w systemie energetycznym. Od odnawialnej poprzez gaz i węgiel do najnowszej inwestycji Hinkley Point C.

Wymieniony projekt budowy reaktora EPR bazuje na doświadczeniach partnerów i wykorzystuje brytyjską wiedzę w zakresie bardzo dobrze i nowoczesnie zorganizowanego przemysłu, a także regulacji prawnych. Po stronie francuskiej wykorzystuje doświadczenie EDF w budowie najnowocześniejszego reaktora energetycznego oraz historycznej wiedzy, dotyczącej nadzoru nad wieloma działającymi i projektowanymi elektrowniami.

Na zakończenie, Pan **Steve HARGREAVES** podkreślił zrównoważenie i stabilność projektu tak dla Grupy EDF jak dla Państwa Brytyjskiego. Wzajemne korzyści z projektu to bezpieczeństwo energetyczne Wielkiej



Brytanii, zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>, utrzymanie poza rok 2050 konkurencyjnej ceny w porównaniu z innymi źródłami niskoemisyjnymi. Natomiast EDF zyskuje potwierdzenie stosowania wiodącej technologii reaktorowej, stabilność dochodów z inwestycji oraz kolejne doświadczenie w tworzeniu powiązań z przodującymi partnerami. Dla obu krajów wymiernym zyskiem jest stworzenie stabilnych o wysokich kwalifikacjach miejsc pracy. Kończąc, podkreślił zgodę na te kluczowe decyzje wśród wszystkich partii politycznych i różnych środowisk społecznych w Wielkiej Brytanii

W wystąpieniu Pani **Anne GUICHARD, przedstawicielki CEA (Komisariat Energii Atomowej)** głównym wątkiem było osiągnięcie przez opinię publiczną, świadomości, że za podejmowanie decyzji o znaczeniu strategicznym, jak energetyka, nie jest odpowiedzialny tylko aktualny rząd. A poprzez dialog i akceptację wybranej drogi, można zrozumieć konsekwencje wynikające z możliwych przeszkód.

Pani **Anne GUICHARD** przytoczyła sondaże opinii publicznej z Japonii, Francji i Wielkiej Brytanii, z których wynika niewielki wpływ katastrofy w Fukushima na akceptację społeczną lub podjęcie decyzji o odejściu od programu wykorzystania źródeł jądrowych do produkcji energii.

O przedstawienie stanu polskiego programu jądrowego został poproszony Pan **Tomasz Nowacki z Ministerstwa Gospodarki**. Poinformował zebranych, o procesie konsultacji transgranicznych Polskiego Programu Energetyki Jądrowej oraz przygotowania operatów środowiskowych. Przypomniał, że proponowana lokalizacja i wielkość naszego kraju niesie za sobą wiele zapytań ze strony sąsiadów Polski, a także krajów niebędących sąsiadami, jak Austria, co wymaga odpowiedzi i przedłuża dojście do podjęcia decyzji. Zgodnie z przewidywaniami Ministerstwa Gospodarki etap budowy nie rozpocznie się wcześniej niż w 2024 r.

Kolejnym prelegentem był Pan **Kazimierz Grajcarek Przewodniczący Sekretariatu Górnictwa i Energetyki, Związku Zawodowego NSZZ „Solidarność”**. W wypowiedzi utrzymanej w tonie negacji energetyki jądrowej, zarzucił Unii Europejskiej brak solidarności i równowagi w prawach i możliwościach. Efektem budowy elektrowni jądrowej będzie utrata miejsc pracy w przemyśle wydobywczym i energetyce konwencjonalnej. Stwierdził także, że w polskiej energetyce stosuje się nowoczesne metody eliminacji zanieczyszczeń i efektywniejsze spalanie. Koszt energii nie spadnie, gdyż został narzucony przez europejskie i polskie gremia polityczne, a energetyka zawodowa oparta na węglu kamiennym i brunatnym ma dostatecznie dużo paliwa, aby „doczekać” do nowoczesnych bezemisyjnych źródeł. W następnej części wystąpienia poruszył sprawę zanieczyszczenia środowiska, odpadów radioaktywnych i katastrof jądrowych przywołując wybuch w Czarnobylu i katastrofę w Fukushima. Konkludując uznał, że Polska nie jest przygotowana do budowy elektrowni jądrowej, a społeczne, ekonomiczne i zdrowotne koszty decyzji obecnego rządu poniesie w przyszłości cały naród.

Ostatnim uczestnikiem panelu był Pan **Juha Poikola Specjalista Komunikacji Społecznej (TVO Fiński Koncern Energetyczny)** podając przykład społeczeństwa fińskiego, jako modelowego uczestnictwa w dialogu mieszkańców z władzami na poziomie lokalnym i narodowym. Przedstawił politykę informacyjną spółki TVO nastawianą na pełną otwartość i umożliwiającą wiele aktywności społeczeństwa, włącznie ze zwiedzaniem elektrowni Olkiluoto. Podsumowując, zapowiedział, że Finlandia kończąc budowę bloku 3 planuje w przeciągu pięciu lat całkowicie zaprzestać spalania węgla do produkcji energii elektrycznej. Po zakończeniu panelu dyskusyjnego w serii wystąpień i pytań słuchaczy, potwierdziły się wnioski o potrzebie dalszej dyskusji ze społeczeństwem oraz wzmożonej edukacji na podstawowym, szkolnym poziomie.

## **23 października uczestników konferencji „Inicjatywa społeczeństwa obywatelskiego na rzecz poznania i akceptacji energetyki jądrowej” przywitała Prezeska Confrontations Europe, Claude FISCHER**

W drugim panelu pod hasłem *Przyswojenie kultury energetyki jądrowej: współpraca i uczestnictwo, wzięli udział:*

- **Annabelle Comte, odpowiedzialna za debatę publiczną projektu Cigeo, Andra**
- **Garry Graham, Zastępca Sekretarza Generalnego organizacji Prospect (ze związków zawodowych Unia profesjonalistów)**
- **Daria Kulczycka, Dyrektor Departamentu Energii i Zmian Klimatu, Konfederacja Lewiatan**
- **Grzegorz Wrochna, Dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych**

- **Jozef Zlatňanský, Dyrektor nadzoru jądrowego oraz członek zarządu Słowackich Elektrowni spółki zależnej ENEL**
- **Michał Kurtyka Prezes Energy Design**

**Garry Graham** omówił znaczenie programu adresowanego do członków Prospect, (inżynierów, kadry naukowej, menedżerów), który bardzo aktywnie wspierał i wyjaśniał zadania stojące przed związkami zawodowymi po wejściu Wielkiej Brytanii na drogę rozwoju energetyki jądrowej i wymaganymi zmianami w strukturze emisji CO<sup>2</sup>.

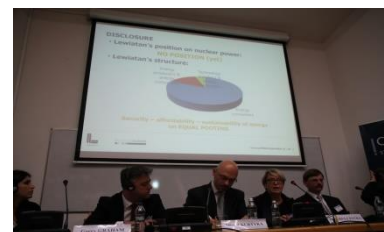
Mając silną pozycję w firmach, mogli przygotować pracowników do nowych wyzwań organizacyjnych, wymagań, jakości i bezpieczeństwa w produkcji dla przemysłu jądrowego. Przy stosowaniu całkowitej przejrzystości w operacjach jądrowych tak przy budowie jak i w fazie eksploatacji pracownicy zatrudniani w firmach osiągnęli status pracowników „zaufania publicznego” Negocjacje prowadzone przez Prospect prowadzą do podpisywania umów z pracodawcami np. Babcock International-Nuclear wzmacniających rolę związkowców, jako głos dla naukowców, inżynierów, menedżerów i specjalistów w branży.



**Jozef Zlatňanský** przedstawił sytuację na Słowacji. Po decyzji o wzmocnieniu udziału energii jądrowej w bilansie energetycznym, a szczególnie po awarii w Fukushima, przeprowadzono testy wytrzymałościowe w elektrowniach jądrowych „stress test”. Słowackie Elektrownie, jako właściciel największej części systemu energetycznego, a co za tym idzie producent energii, we współpracy z krajowym organem bezpieczeństwa jądrowego, przeprowadził inwestycje w modernizację elektrowni jądrowych Mochovce i Bohunice. Przedstawiono zmiany i poprawę bezpieczeństwa w formie raportów dla władz i mieszkańców wymienionych gmin.

**Annabelle Comte** z firmy ANDRA prowadzi debaty społeczne dotyczące projektu Cigeo ( Cigeo to nazwa projektu głębokiego składowiska geologicznego odpadów promieniotwórczych), który ma zostać zbudowane we Francji. Będzie służyć, jako repozytorium długozyciowych i wysoko-radioaktywnych odpadów generowanych przez obecne francuskie elektrownie jądrowe,. Po zatwierdzeniu, Cigeo zostanie wybudowane w departamencie Haute-Marne w północno-wschodniej Francji. Cigeo składać się będzie z obiektów powierzchniowych, które między innymi, będą wykorzystywane do odbierania i przygotowania pakietów odpadów i obiektów podziemnych. Głębokość części podziemnej ok. 500 metrów w nieprzepuszczalnej formacji skał ilastych zdolnej do utrzymania poziomu radioaktywności przez bardzo długi okres.. **Annabelle Comte przedstawiła** cykl debat ze społeczeństwem francuskim, który został przerwany z uwagi na gwałtowny i zdecydowany protest mieszkańców. Natomiast ANDRA skupia się obecnie na zbieraniu poprzez Internet opinii w ankietach i wprowadzeniu do szkół programu edukacyjnego nt. odpadów radioaktywnych.

**Daria Kulczycka** w swoim wystąpieniu przypominała znaczenie Konfederacji Lewiatan, i zaangażowanie polskich liderów biznesu w krajowej debacie na temat energii jądrowej. Lewiatan dodaje do dyskusji o energetyce kompetencję swoich fachowców szczególnie w dziedzinie aspektów ekonomicznych. Daria Kulczycka Wyraziła nadzieję, że sektor ten wykształci kadre zarządzającą.



**Grzegorz Wrochna** reprezentujący świat polskiej nauki związanej z energetyką jądrową opisał zaplecze kadrowe i system edukacji w szkołach technicznych i Politechnikach. Wygłosił konkluzje podsumowując blok tematyczny, że podstawą „kultury jądrowej” powinna zostać edukacja. A firmy i lokalne społeczności powinny otrzymywać pracowników i działaczy rozumiejących cały proces od uwarunkowań politycznych przez ekonomikę do bezpiecznej eksploatacji.

Doświadczenia krajów, w których energetyka jądrowa jest już rozwinięta pokazują, że „kultury jądrowej” nabywa się przez długi czas i dochodzi od jej osiągnięcia za pośrednictwem wielu małych kroków. Decyzja o budowie to krok wielki, natomiast osiągnięcie w społeczeństwie stałego poziomu „kultury jądrowej” wymaga przekazaniu każdemu z obywateli wiedzy dostosowanej do jego indywidualnego zrozumienia. Czyli poza kierunkami studiów, które już w Polsce istnieją i kierowane są do przyszłej kadry menadżersko inżynierskiej,



powinno się angażować zwykłych obywateli do działań edukacyjnych i szkoleniowych w gminie, mieście i województwie, w celu podniesienia kultury jądrowej.

Po krótkiej przerwie zaprezentowali swoje tematy ekonomiści. Rozpoczynając panel, pt. **Jak sfinansować energetykę jądrową?**, **Remigiusz Chlewicki specjalista EY** postawił kilka tez, które rozwinęli uczestnicy spotkania:

- Problem projektu jądrowego zaczyna się od nadania odpowiednich ram regulacyjnych;
- Dobór właściwego modelu finansowania, determinuje moment, od którego zaczyna się zwrot inwestycji i wpływ na całą gospodarkę;
- Elektrownia jądrowa jest bezpieczna, przede wszystkim dzięki pracownikom, którzy posiadają „kulturę jądrową”.

**Jean-Pol Poncelet z organizacji FORATOM** opisał problem ram prawnych koniecznych do wprowadzenia lub modyfikacji, przez decydentów kraju, który decyduje się na wejście na drogę wykorzystania i rozwoju energetyki jądrowej. Podkreślił, że tendencja zmian prawa w Komisji Europejskiej sprzyja energetyce jądrowej poprzez podkreślenie jej niskoemisyjności, ustalenia barier bezpieczeństwa, pozytywnego wpływu na gospodarkę. Zmiany prawne dotyczyć powinny nie tylko nowych przepisów jądrowych, ale i modyfikacji w krajowym systemie energetycznym.

Poruszył problem inwestycji w wykwalifikowane kadry. W energetyce jądrowej, działania szkoleniowe i ponawiany trening jest warunkiem, bez którego nie można bezpiecznie eksploatować elektrowni. Bezpieczeństwo jest priorytetem i musi być zapewnione przez cały nowy sektor gospodarki a osiągnięta „kultura jądrowa” również w dziedzinie stanowienia prawa, rozumienia cyklu paliwowego, komunikacji da gwarancje stabilnej i opłacalnej pracy. Polska ma już doświadczenia w tej dziedzinie i od 2010 roku pogłębia je w ramach francusko- polskiej współpracy, wymiany kadr i organizowanych stażów.

**Steve Hargreaves z EDF Energy** przedstawił rozwiązanie brytyjskie, gdzie kompleksowo reformuje się rynek energii elektrycznej. Trzy technologie niskoemisyjne ( OZE, energetyka jądrowa oraz ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> z konwencjonalnych źródeł) będą traktowane zgodnie z zasadą " neutralności technologicznej", bez konkurencji między tymi technologiami a długoterminowe umowy z ceną zakupu energii zapewniającą rentowność inwestycji.

**Marzena Piszczek z PGE EJ1** poinformowała, że PGEEJ1jako spółka celowa zdaje sobie sprawę z ryzyka wspólnego finansowania przedsięwzięcia z partnerem wykonawczym jednak nie wypracowała żadnego modelu finansowania, ani odpowiedzi w jakiej proporcji nakładów i zysków projekt jądrowy będzie realizowany. Polska strona zapoznaje się z wdrożonymi modelami Francji i Finlandii oraz Wielkiej Brytanii.

**Amjad Ghori z Credit Agricole CIB** omówił modele finansowe wykorzystywane w inwestycjach w energetykę jądrową realizowanych we Flamavile, Olkluoto i Hinkley Point.

W godzinach popołudniowych rozpoczęła się ostatnia część Warszawskiej Debaty, która poruszyła najważniejszą cechę posiadania elektrowni jądrowej.

Tytuł panelu **„Energia jądrowa dla wzrostu gospodarczego i zatrudnienia”** całkowicie i dobitnie oddaje potencjał tej technologii. Ostatni panel pokazał, jaki wpływ na wzrost gospodarczy ma energetyka jądrowa.

Przewodniczył, **Jean-Pol Poncelet, dyrektor generalny FORATOM** nakreślając tezy do prezentacji zaproszonych uczestników.

Kryzys roku 2009, spadek PKB krajów członkowskich UE, anemia wzrostu, wzrost bezrobocia, to cechy ostatnich kilku lat, jednak mimo kurczenia się gospodarki zapotrzebowanie na energię elektryczną stale rośnie.



**Jarosław Biały, zastępca burmistrza Krokowej na Pomorzu**, przedstawił kilka problemów związanych z lokalizacją elektrowni na Pomorzu w rejonie poprzedniej niedokończonej inwestycji Żarnowiec. Obawia się syndromu „kolejnego podejścia” gdzie poparcie stopniało z 70% do ponad 50 %. Stwierdził, że Krokowa oraz okoliczne gminy liczą na znacznie większe „zainteresowanie” ze strony decydentów na szczeblu państwowym i spółki celowej PGE EJ1. Opisał problemy mieszkańców z identyfikacją „

iluzorycznych obietnic”, określenia na ile obietnice będą realizowane. Wydaje się, że najważniejszym obecnie pytaniem mieszkańców jest obecnie termin rozpoczęcia inwestycji.

**Michel Laurent**, przewodniczący Lokalnej Komisji Informacji w przy obiektach Arey, EDF i Andry w departamencie Manche we Francji opowiedział o pracy, jaką wykonali specjaliści z EDF mającej na celu uzyskanie świadomości społecznej lokalnych mieszkańców. Współpracę określił, jako znakomitą poprzez natychmiastowe reagowanie ze strony EDF na składane postulaty lokalnej społeczności. Podał przykład powołania zespołu do badania wpływu promieniowania wokół Flamaville na otoczenie. Potwierdził, że jako lokalny samorządowiec i członek LKI jest zapraszany i informowany o zamierzeniach i postępach prac w elektrowni i innych obiektach. Podkreślił znaczenie dla regionu Manche „turystyki przemysłowej” otwarcie i fachowo prezentującej potencjał i innowacyjność wszystkich zakładów jądrowych w okolicy łącznie ze stoczną atomowych łodzi podwodnych w Cherbourg. Kończąc podkreślił dumę z faktu, że przez 30 lat współpracy z EDF mieszkańcy Manche akceptują nowoczesną technologię jądrową i z pasją prezentują jej możliwości.

Z kolei **Andrzej Chmielewski**, dyrektor Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, przypomniał osiągnięcia Polski w badaniach naukowych w dziedzinie energii jądrowej i rzeczywiste inwestycje naukowe jak reaktory badawcze w Polsce. Zaznaczył, że już istniejące polskie firmy mają doświadczenie w nowoczesnych technologiach np. spawalnictwo, a Polacy to najliczniejsza grupa pracowników średniego szczebla i podwykonawców np. w Olkiluoto. Położył nacisk na partnerstwo i solidarność w UE w wykorzystaniu lokalnych kadr.

Akcentem finalnym było wystąpienie **Pana Oliviera Orsiniego**, Dyrektora ds. Rozwoju Międzynarodowego EDF.

W liczbach przedstawił potęgę oddziaływania na gospodarkę krajową i międzynarodową sektora jądrowego we Francji :

- 2500 firm od krajowych po globalne,
- 220 000 bezpośrednio zatrudnionych w produkcji, eksploatacji, serwisie urządzeń jądrowych (nie licząc współpracujących z sektorem),
- Obroty rządu 46 mld euro
- 1,8 mld euro na badania i rozwój - nakłady dające sektorowi 4. miejsce pod względem innowacyjności
- wysokokwalifikowane miejsca pracy.

Kontynuując podkreślił, że impuls, który daje do gospodarki EDF, choćby przez podnoszenie własnych standardów bezpieczeństwa, wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań na obecnej inwestycji we Flamaville, stanowi siłę napędową regionalnej gospodarki i lokalnych firm. Posiadane przez EDF ponad 50 reaktorów daje gwarancję na doświadczenie, jakość i bezpieczeństwo.

Przechodząc do „sprawy polskiej” oszacował skutki wdrożenia programu jądrowego:

- Nowe miejsca pracy przy budowie oraz przy eksploatacji,
- przychody z działań lokalnych (turystyka, podatki),
- pozytywny wpływ na gospodarkę lokalną i krajową
- i najważniejsze, nie do oceny, postęp, innowacyjność, skok technologiczny w każdej dziedzinie i sektorze gospodarki.

W serii pytań **Olivier Orsini** potwierdził, że polityka EDF w kontaktach z partnerami krajowymi zakłada około 50% zaangażowania firm polskich w oparciu o posiadany know-how. EDF bada polskich ewentualnych poddostawców, aby określić ich poziom kompetencji oraz zaprosić je do współpracy.

Podsumowując stwierdził - droga do postępu jest, potrzeba decyzji, aby na nią wejść.

Ostatnim mówcą był Philippe Herzog, który zamknął debatę życząc Polsce dobrych decyzji, przypomniał, że energetyka jądrowa to wyzwanie dla demokracji, krajowy i globalny wzrost, poprawa klimatu. Polska jest w Europie, ma własne źródła energii, ale potrzebuje kooperacji z Europą a Europa z Polską.



Ostatni dzień międzynarodowej konferencji: Debaty Europejskie w Polsce - Inicjatywa społeczeństwa obywatelskiego na rzecz poznania i akceptacji energetyki jądrowej, został zorganizowany 24 października na Zamku w Krokowej.

Lokalizacja konferencji w tej okolicy była związana z faktem, że w pobliżu znajdują się lokalizacje badane przez PGE EJ1 pod kątem budowy pierwszej

polskiej elektrowni jądrowej. W opinii Zastępcy Wójta Gminy Krokowa, wyrażonej w trakcie wywiadu przeprowadzonego przez redakcję EKOATOM Pana Jarosława Białka konferencja przyczyniła się do uwypuklenia niezwykle istotnych dla regionu problemów. Aktywny udział w panelach dyskusyjnych konferencji samorządowców reprezentujących społeczność lokalną, można potraktować, jako początek ważnej współpracy władz lokalnych w podejmowaniu ważnych decyzji lokalizacyjnych, szczególnie w czasie rozpoczęcia badań lokalizacyjnych i środowiskowych na Pomorzu.

Panel dyskusyjny na temat zagrożeń i korzyści z budowy elektrowni jądrowej na Pomorzu uwidocznił niedostatek informacji na temat ewentualnych korzyści dla regionu, w którym miałyby powstać elektrownia jądrowa. Pozwolił on jeszcze raz zwrócić uwagę na konieczność wzmożenia kampanii informacyjnej w szkołach i wśród organizacji opiniotwórczych. Akcja jest ona konieczna mimo znacznego poparcia (56%) społeczności lokalnej. Powinna ona także podkreślać korzyści dla regionu. Należy zaznaczyć, że lobby antyatomowe jest w rejonie bardzo aktywne.

Nawiązując do wystąpienia Pana Francois Perniola w panelu poświęconemu tematyce procesu demokratycznego prowadzącego do decyzji budowy elektrowni jądrowej i następnie procesem kierowania projektem, podkreślił, że ten referat przedstawił zgromadzonym przykład rozwiązania współpracy operatora i budowniczego elektrowni ze społecznością lokalną wypracowany we Francji przez EDF w trakcie przygotowywania budowy elektrowni jądrowej, jej rozpoczęcia i kontynuacji we Flamanville w Normandii. Rozwiązanie to można uznać za modelowe..



## **Program polskiej energetyki jądrowej przyjęty przez Kierownictwo MG**

**11 października 2013 r. Kierownictwo Ministerstwa Gospodarki (MG) przyjęło Program polskiej energetyki jądrowej (PPEJ). Dokument, który określa zakres i strukturę organizacji działań niezbędnych do wdrożenia energetyki jądrowej w Polsce trafi teraz do uzgodnień międzyresortowych. Ostatnim etapem prac nad PPEJ będzie przyjęcie przez Radę Ministrów.**

Program PEJ został poddany kompleksowym konsultacjom społecznym, w których wzięło udział ponad 100 podmiotów, oraz transgranicznym, w których uczestniczyło siedem krajów. Formalnie proces ten został zakończony podpisaniem Protokołu z konsultacji z Austrią w maju 2013 r.

Efektywność i prawidłowość prac nad realizacją Programu PEJ potwierdzili także eksperci Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, którzy w marcu i kwietniu 2013 r. wizytowali Polskę w ramach Zintegrowanego Przeglądu Infrastruktury Jądrowej (INIR) oraz Zintegrowanego Przeglądu Dozoru Jądrowego (IRRS). MAEA dobrze oceniła całość przygotowań do wdrożenia Programu PEJ. W szczególności doceniono Polskę m.in. za wysokie standardy współpracy w ramach konsultacji na szczeblu krajowym i międzynarodowym oraz za wprowadzenie nowoczesnych regulacji prawnych.

Ponadto w ramach działań podejmowanych w obszarze rozwoju energetyki jądrowej, zgodnie z uchwałą RM, powołano Międzyresortowy Zespół ds. Polskiej Energetyki Jądrowej oraz Pełnomocnika Rządu w tym zakresie. Zmieniono też strukturę organizacyjną Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) i rozpoczęto proces dostosowania jej do potrzeb dozoru jądrowego.

W 2011 r. weszła w życie nowelizacja ustawy Prawo atomowe, jak również 20 aktów wykonawczych do tego dokumentu. MG wypracowało także ustawę o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (weszła w życie 1 lipca 2011 r.). Wspólnie z Polską Agencją Atomistyki jesteśmy także zaangażowani w opiniowanie nowych wytycznych Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej.

W latach 2009 - 2012 Ministerstwo Gospodarki, we współpracy z Commissariat l'énergie atomique et aux énergies alternatives, zorganizowało serię szkoleń i staży dla przedstawicieli polskiego świata nauki. W 2012

r. MG rozpoczęło także kampanię informacyjną „Poznaj atom. Porozmawiajmy o Polsce z energią”, której celem jest dostarczenie Polakom aktualnych i rzetelnych informacji na temat energetyki jądrowej.

Na wniosek MG Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) uruchomiło strategiczny projekt badawczy „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”. Ponadto utworzono Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), a w realizację Programu PEJ włączyły się m.in. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) oraz Instytut Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN). MG przejęło także od PAA zadania dot. przyznawania dotacji na bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną (BJiOR), której głównymi beneficjentami są organizacje badawcze w dziedzinie energii jądrowej.



## Bezpieczne gospodarowanie odpadami promieniotwórczymi - RM przyjęła projekt MG

**Określenie wymagań dotyczących bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej dla składowisk odpadów promieniotwórczych to główne zmiany w Prawie atomowym zaproponowane przez MG. Rada Ministrów przyjęła dokument 5 listopada 2013 r.**

Zgodnie z przyjętymi przepisami nowe składowiska odpadów promieniotwórczych będą powstawały z zachowaniem najwyższych standardów bezpieczeństwa, w oparciu o badania i analizy. Przy ich budowie będzie można stosować tylko takie rozwiązania i technologie, które zostały sprawdzone w praktyce lub w drodze badań i prób.

Projekt MG zakłada także opracowanie „Krajowego planu postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”. Będzie on obejmował całość zagadnień gospodarowania odpadami.

Poza tym nowe regulacje zapewniają każdemu obywatelowi dostęp do informacji o składowisku odpadów promieniotwórczych oraz jego wpływie na zdrowie ludzi i środowisko.

W Polsce odpady promieniotwórcze powstają z medycznych, przemysłowych i badawczych zastosowań energii jądrowej. Obecnie istnieje tylko jedno składowisko odpadów promieniotwórczych w gminie Różan (woj. mazowieckie). Powstało ono w 1961 r. Konieczna jest więc budowa kolejnych na odpady średnio- i niskoaktywne pochodzące z dotychczasowych zastosowań energii jądrowej w Polsce.

Ponadto, ze względu na planowane w naszym kraju powstanie elektrowni jądrowych, w perspektywie kilkudziesięciu lat potrzebne będzie również składowisko gębinowe na odpady wysokoaktywne.



## XII Szkoła Sterylizacji i Mikrobiologicznej Dekontaminacji

**Podstawową cechą wyrobów medycznych, produktów leczniczych oraz przeszczepów jest sterylność. Proces zabicia drobnoustrojów oraz ich form przetrwalnikowych można prowadzić różnymi metodami, dostosowanymi do aktualnych wymagań medycznych oraz rodzaju materiału, z którego wykonano dany wyrób.**

Na skalę przemysłową stosowane są głównie dwie metody sterylizacji: gazowa, wykorzystująca toksyczne właściwości tlenku etylenu i radiacyjna, w której bakteriobójczo działa promieniowanie jonizujące.

W dniach 17 – 18 października 2013 roku w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej odbyła się kolejna szkoła poświęcona zagadnieniom wykorzystania promieniowania jonizującego do radiacyjnej sterylizacji: wyrobów medycznych, przeszczepów, farmaceutyków, kosmetyków, ziół, przypraw ziołowych, żywności, opakowań, oraz obiektów o znaczeniu historycznym. W szkoleniu brało udział 35 osób reprezentujących firmy

# WIADOMOŚCI

farmaceutyczne, medyczne, kosmetyczne, Banki Tkanek oraz przedstawiciele Stacji Sanitarno-Epidemiologicznych. Poruszano również tematy radiacyjnej modyfikacji tworzyw polimerowych oraz identyfikacji napromieniowania żywności. Zasadniczym celem szkoły było podsumowanie dorobku krajowych instytucji naukowo badawczych i produkcyjnych w zakresie radiacyjnej sterylizacji i mikrobiologicznej dekontaminacji.

W Polsce mimo od lat prowadzonej akcji edukacyjnej i popularyzatorskiej techniki radiacyjne są nadal mało znane. Niedostatecznie promuje się unikalne zalety tej metody tj.: dużą wydajność, niezawodność, brak szkodliwych pozostałości po napromieniowaniu, możliwość wykorzystania produktu bezpośrednio po wykonanym procesie sterylizacji oraz możliwość prowadzenia procesu w zbiorczym opakowaniu handlowym.



Kursy organizowane, co dwa lata przez IChTJ dają unikalną okazję zdobycia podstawowej wiedzy w zakresie radiacyjnej modyfikacji materiałów ze szczególnym uwzględnieniem problematyki sterylizacji radiacyjnej. Zagadnienia dotyczące: podstaw oddziaływania promieniowania jonizującego na materię, konstrukcji dużych źródeł promieniowania jonizującego, podstaw dozymetrii, zasad bezpieczeństwa radiologicznego, kwestii radiacyjnej degradacji materiałów, ekonomiki procesu obróbki radiacyjnej z dowolnej dziedziny związanej z wykorzystaniem na skalę przemysłową promieniowania jonizującego. Omawiano również praktyczne kwestie dokumentacji rejestracyjnej i wymagań Dobrej Praktyki Wytwarzania, wyznaczania dawki sterylizacyjnej, walidacji itd. Słuchaczami szkoły byli być producenci wyrobów medycznych, farmaceutycznych i opakowań, pracownicy banków tkanek, szpitali, wytwórcy wyrobów z tworzyw polimerowych i konserwatorzy dzieł sztuki. Wykładowcami szkoły byli pracownicy z Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie, Międzyresortowego Instytutu Techniki Radiacyjnej Politechniki w Łodzi, Centralnego Banku Tkanek w Warszawie oraz WZF Polfa SA.

Materiały konferencyjne w tym prezentacje wszystkich wykładowców są dostępne w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie.

Eleonora Skrzypek, Maciej Skrzypek

## KOMPUTEROWE KODY OBLICZENIOWE W ANALIZACH BEZPIECZEŃSTWA ELEKTROWNI JĄDROWYCH. MOŻLIWOŚCI OBLICZENIOWE NARZĘDZI CIEPLNO-PRZEPIYWOWYCH NA PRZYKŁADZIE KODU RELAP5.

### Wstęp

W dobie wdrażania Polskiego Programu Energetyki Jądrowej większość z nas stawia sobie pytanie, czy elektrownie jądrowe są bezpieczne. Aby odpowiedzieć sobie na to pytanie należy przyrzeć się konstrukcji reaktorów jądrowych, zasadzie ich działania oraz analizom, jakim są poddawane przed uruchomieniem oraz w trakcie eksploatacji. W tak złożony i bardzo ważny aspekt zaangażowane są setki ludzi na całym świecie. Oczywiście złożoność zjawisk występujących w reaktorach jądrowych nie pozwoliłaby na wykonanie obliczeń metodami analitycznymi, dlatego w tym celu wykorzystuje się odpowiednie narzędzia obliczeniowe oraz superkomputery.

Narodowe Centrum Badań Jądrowych w ramach projektu Centrum Informatyczne Świerk w przyszłym roku zakończy budowę jednego z największych superkomputerów w naszym kraju, który będzie wykorzystywany do badań związanych z rozwojem energetyki (nie tylko jądrowej) w Polsce. Już dziś na testowej instalacji dokonano optymalizacji budowy i obciążeń sieci elektroenergetycznych czy sieci telefonii komórkowych, optymalizacji decyzji inwestycyjnych na rynkach finansowych oraz zastosowano go dla celów medycznych przy projektowaniu elementów nowego typu tomografu. Posiadanie dużej mocy obliczeniowej pozwala przyspieszyć prace badawcze i rozwojowe na terenie ośrodka i kraju. W przypadku używania kodów obliczeniowych wielkość superkomputera jest nie bez znaczenia. W przypadku zrównoleglenia obliczeń, czyli wykorzystania wielu rdzeni obliczeniowych w trakcie jednego procesu, znacząco skracamy czas obliczeń. Jednocześnie możemy sobie pozwolić na zwiększanie precyzji poprzez użycie mniejszych kroków obliczeniowych.



Rysunek 1 Budynek Centrum Informatycznego Świerk. [1]



Rysunek 2 Serwerownia przygotowana do montażu sprzętu. [1]

Moc superkomputera będzie udostępniona także naukowcom oraz instytucją rządowym i podmiotom gospodarczym. Tym, czym superkomputer w Świerku ma się wyróżniać, będzie nie tylko moc obliczeniowa, ale również szereg gotowych narzędzi oraz środowisko do uruchamiania własnych aplikacji. Obszary, w których klaster będzie zastosowany to monitoring i symulacje zagrożeń radiacyjnych, zarządzanie kryzysowe, a także obliczenia dla projektowania, instalacji i optymalizacji urządzeń energetycznych oraz dystrybucji energii.

Zasoby docelowe klastra to około 20 tysięcy rdzeni obliczeniowych, 100 TB pamięci RAM i 3000 TB pamięci dyskowej, co czyni go jednym z pięciu największych systemów w Polsce, w tym najwydajniejszym dedykowanym dla branży energetycznej na świecie. [1]

## Zasoby mocy obliczeniowej a inżynierskie kody obliczeniowe w branży energetycznej

W branży, jaką jest energetyka jądrowa priorytetem oraz głównym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa przy równoczesnym uwzględnieniu ekonomiczności inwestycji. Celem jest bezpieczeństwo, a produkcja energii elektrycznej stoi na drugim miejscu [2]. Współczesne trendy w energetyce jądrowej dążą do maksymalnego ograniczenia dawek, które mogłyby być otrzymane przez otaczającą ludność, jak i pracowników elektrowni na skutek jej pracy. Obecnie mimo faktu, że średnio otrzymana dawka przyjęta przez człowieka wskutek promieniowania tła naturalnego to 2.4 mSv/rok, zaś poziom promieniowania pochodzący z elektrowni jądrowych to 0.001 mSv/rok, wymagania bezpieczeństwa i nakładane ograniczenia dozwolonego promieniowania są coraz większe [3]. Sytuacja ta czyni niezbędnym wykonywanie szczegółowych analiz, które będą opisywały wartości emisji promieniowania do otoczenia przez elektrownie jądrowe.

Elementem kluczowym w określeniu wartości promieniowania są analizy bezpieczeństwa, którym poddawany jest projekt elektrowni jądrowej. Analizy te odbywają się na przestrzeni czasu dla określonego obiektu jądrowego w fazie projektowania, licencjonowania – uzyskania pozwolenia na budowę i eksploatację, eksploatacji oraz jego wyłączenia. Bezpieczeństwo jest określane jakościowo i ilościowo dla danego zagadnienia, np. podaje się wartości masowe pierwiastków w rdzeniu po określonym czasie wypalenia paliwa lub wartość prawdopodobieństwa zdarzenia uwolnienia promieniotwórczości do otoczenia na skutek określonej sekwencji awarii. W celu przeprowadzenia analiz bezpieczeństwa konieczne jest zastosowanie kodów komputerowych. Kody te wymagają dużych mocy obliczeniowych, ze względu na fakt, że w dużej mierze możliwe jest zrównoleglenie, a tym samym przyspieszenie obliczeń. Ilość niezbędnych symulacji komputerowych dla określonego zakresu badań wymaga przeprowadzenia paruset obliczeń, w celu określenia czy dany system spełnia wymogi bezpieczeństwa. Wymogi bezpieczeństwa w nomenklaturze określa się poprzez takie pojęcia jak: podstawy, ogólne wymogi i szczegółowe wymogi bezpieczeństwa, które zostały sformułowane przez światową organizację – Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA), stanowiąc standardy bezpieczeństwa.

# ELEKTROWNIE JĄDROWE



Rysunek 3 Standardy bezpieczeństwa wg Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej.

## Kody obliczeniowe

Narzędzia obliczeniowe stosowane podczas analiz bezpieczeństwa w reaktorach jądrowych możemy podzielić na kilka grup: kody neutronowe, strukturalne, ciepło-przepływowe oraz kody używane do analiz ciężkich awarii. Wykonywane analizy bezpieczeństwa przy użyciu tych kodów prowadzone są przez trzy niezależne instytucje: właściciela obiektu, dozór jądrowy oraz organizację wsparcia technicznego (TSO). Ilość kodów dostępnych komercyjnie jest bardzo duża, zaś powszechne jest porównywanie ich między sobą tak, aby jak najpełniej zrozumieć zachodzące w reaktorach zjawiska i tworzyć najbardziej realistyczne modele. Proces porównywania kodów między sobą nazywa się benchmarkiem, jest częścią procesu walidacji i weryfikacji narzędzi obliczeniowych. Dodatkowo procesy walidacji i weryfikacji kodu uwzględniają modelowanie instalacji eksperymentalnych i następnie porównywanie wyników z danymi pomiarowymi z rzeczywistych instalacji eksperymentalnych. Na bazie takich działań, strona odpowiedzialna za tworzenie kodu może uznać go za gotowy do komercyjnych aplikacji i udostępnić go dla światowych użytkowników. Zwyczajowo używanie kodu wiąże się z koniecznością wykupienia licencji na jego użytkowanie, zakres stosowania takiego kodu jest wtedy określony precyzyjnie w podpisywanej umowie między producentem, a użytkownikiem (instytucją) kodu. Istnieje również drugi rodzaj licencji, która jest już wewnątrz państwową licencją wystawianą przez organ dozoru jądrowego, potwierdzającą akceptowalność danego kodu do stosowania go na potrzeby analiz bezpieczeństwa.

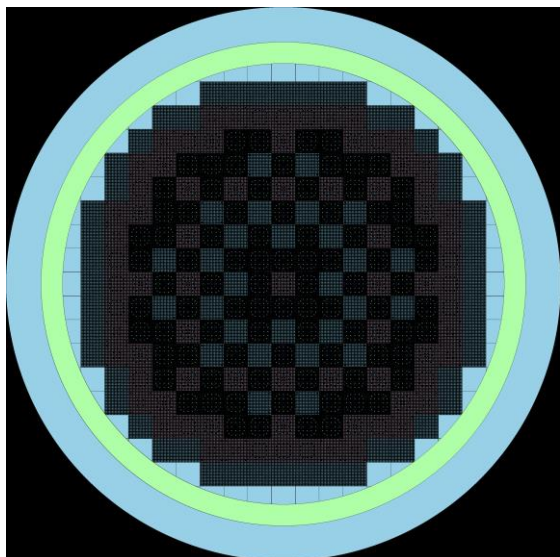


## Kody neutronowe

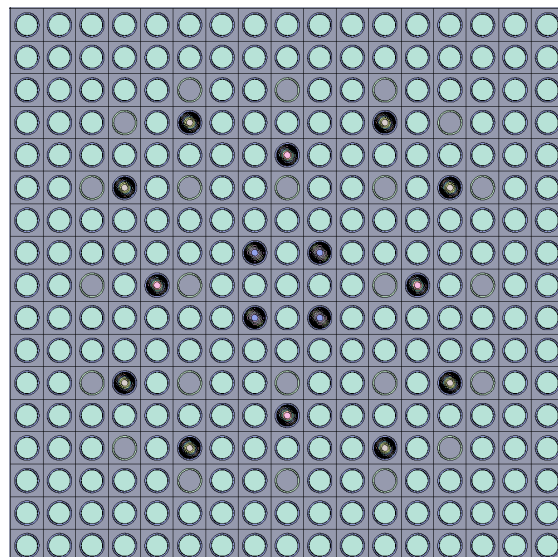
Kody neutronowe skupiają się na zjawiskach występujących w rdzeniu. Są one w stanie przewidzieć reakcje między atomami znajdującymi się w zbiorniku ciśnieniowym a neutronami oraz cząstkami promieniowania będącymi następstwem rozszczepienia ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Dzięki nim można obliczać takie parametry jak współczynnik mnożenia neutronów, strumień neutronów, zmianę składu izotopowego paliwa w rdzeniu czy wypalenie paliwa. Ze względu na bardzo złożone geometrie rdzenia (3D), złożoność procesu obliczeniowego, a z czym jest to związane, czasochłonne obliczenia często w trakcie obliczeń wykorzystuje się superkomputery.

Kody neutronowe można podzielić na kilka rodzajów ze względu na sposób rozwiązywania problemu: są to kody deterministyczne oraz oparte na prawdopodobieństwie – metoda Monte Carlo. Kody neutronowe dedykowane są różnego rodzaju aplikacjom, przykładowe zastosowanie to:

1. tworzenie jednorodnych wielogrupowych stałych dla deterministycznej symulacji pracy reaktora.
2. badanie cyklu paliwowego zawierającego szczegółową, ciągłą analizę na poziomie kaset paliwowych.
3. walidację kodów, rozwiązujących równanie transportu neutronów dla kaset paliwowych.
4. obliczenia neutronowe i wypalenia paliwa dla reaktorów badawczych na poziomie całego rdzenia.
5. cele edukacyjne i demonstracyjne, ukazujące zjawiska fizyczne mające miejsce w rdzeniu reaktora.



Rysunek 4 Przekrój rdzenia analizowanego przy użyciu kodu Monte Carlo Serpent.



Rysunek 5 Przekrój kasety paliwowej analizowanej w kodzie Monte Carlo Serpent.

Kody neutronowe mają, na bazie różnego rodzaju metod, rozwiązać równanie transportu neutronów. Równanie transportu neutronów to równanie równowagi produkcji oraz destrukcji neutronów, z różnego rodzaju członami w równaniu opisującymi pochłonięcie neutronów w materiałach bądź ucieczkę neutronów z analizowanego obszaru.

Równanie transportu neutronów można przedstawić w następującej formie:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(r, \Omega, E, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \Phi(r, \Omega, E, t) + \Sigma_t(r, E, t) \Phi(r, \Omega, E, t) = \int_{4\pi} d\Omega' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t) \Phi(r, \Omega, E, t) + S(r, \Omega, E, t),$$

gdzie  $r$  to położenie neutronu we współrzędnych kartezjańskich,  $v$  - prędkość neutronu,  $\Omega$  - wektor jednostkowy w kierunku ruchu neutronu o energii  $E$  w czasie  $t$ ,  $\Phi(r, \Omega, E, t)$  to strumień neutronów,  $\Sigma_t(r, E, t)$  to całkowity przekrój czynny na reakcję neutronu o energii  $E$  w czasie  $t$ ,  $\Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega, t) dE' d\Omega'$  to przekrój czynny na rozproszenie neutronu o energii  $E'$  i kierunku  $\Omega'$  do energii  $E$  i kierunku  $\Omega$  w  $dE'$  oraz  $d\Omega'$ , zaś  $S(r, \Omega, E, t)$  to człon źródła neutronów.

Jako przykłady kodów wykorzystujących metodę Monte Carlo można podać kod *Serpent* rozwijany w *VTT Technical Research Centre* w Finlandii, *Monte Carlo N-Particle Transport Code – MCNP* rozwinięty przez LANL (z rozwiniętymi wersjami *MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended)*) oraz *KENO* rozwijany przez ORNL, kod do obliczeń krytyczności.

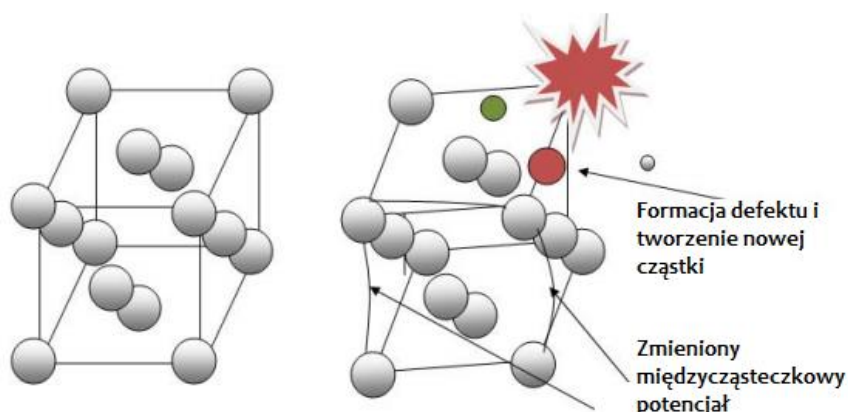
Kody deterministyczne to kod *DRAGON 4* stworzony w *Ecole Polytechnique de Montreal*, *WIMS* rozwijany w UKAEA oraz *APOLLO-2* stworzony wspólnie przez CEA, Farnatone i EDF.

## Kody strukturalne

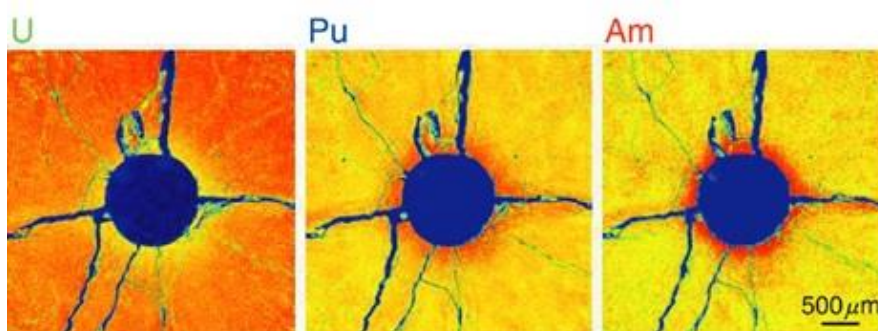
Kody strukturalne to kody zajmujące się przewidywaniem zachowania paliwa w czasie eksploatacji reaktora jądrowego w różnego rodzaju sytuacjach. Szczegółowe aplikacje tych kodów to:

1. obliczanie zachowania się prętów paliwowych podczas napromieniowania,
  - a. podczas stałego napromieniowania,
  - b. w stanach przejściowych,
  - c. wyznaczanie członów źródłowych do analizy awarii,
2. aplikacje R&D,
3. projektowanie prętów paliwowych,
4. projektowanie nowych produktów i nowych cykli paliwowych,
5. wspieranie załadunku paliwa do reaktorów energetycznych.

Najważniejsza dla kodu strukturalnego jest zdolność do przewidywania pewnego rodzaju zdarzeń i zjawisk. Zjawiska, które występują w trakcie napromieniowania paliwa w normalnej eksploatacji oraz w warunkach awarii to tworzenie się warstwy tlenku, zróżnicowana dystrybucja temperatury w pastylce paliwowej, kumulacja ciepła, dystrybucja pęknięć, porowatości i ziaren paliwa. Dodatkowo w czasie pracy reaktora tworzą się izotopy będące produktami rozpadu i mogą stanowić problem w czasie sytuacji awaryjnych. Z tego powodu należy przewidywać zawartość izotopów w paliwie, ciśnienie w prętach paliwowych oraz możliwości uszkodzenia struktury paliwa a następnie koszulki paliwowej.



Rysunek 6 Model koncepcyjny zdarzenia rozszczepienia jądrowego i wpływ na strukturę atomową. [4]



Rysunek 7 Rozkład pierwiastków w paliwie %5Am-MOX napromieniowanym przez 24 godziny. [5]

Kody stosowane do analiz zachowania się paliwa, są bardzo szczegółowe, zaś ich liczba jest znaczna. W praktyce prawie każda instytucja zajmująca się technologiami jądrowymi opracowuje własny kod strukturalny na swoje potrzeby. Kody te zwykle są stosowane do konkretnych projektów reaktorów, które różnią się konfiguracją rdzenia i samych prętów paliwowych znajdujących się wewnątrz. Przykładowe kody stosowane w instytucjach badawczych oraz w celach licencjonowania obiektów jądrowych to: ENIGMA – UK dla reaktorów PWR, FRAPCON, FRAPTRAN – rozwijanych przez US NRC dla BWR i PWR w celach licencjonowania oraz benchmarków, TRANSURANUS – ITU Niemcy stosowany do R&D paliwa oraz COSMOS – KAERI Południowa Korea do analiz wydajności paliwa jądrowego.

## Kody ciepłno-przepływowe

Kody ciepłno-przepływowe są stosowane jako jedne z podstawowych narzędzi do analiz bezpieczeństwa elektrowni jądrowych. Analizy te przygotowywane na podstawie wyników symulacji komputerowych są analizami stanów ustalonych oraz stanów przejściowych. Celem tych analiz jest wskazanie czy dany obiekt jądrowy z dostępnymi systemami bezpieczeństwa, nie ulegnie zniszczeniu lub ewentualnie jakie i w jakim czasie będą konsekwencje danej awarii. Wyniki symulacji grają kluczową rolę w projektowaniu, licencjonowaniu i eksploatacji elektrowni jądrowych. Konieczność stosowania kodów obliczeniowych wynika z faktu, że współczesne systemy elektrowni jądrowych działają na poziomie wyrafinowania przewyższającym możliwości pełnego zrozumienia funkcjonowania systemu poprzez ludzkie rozumowanie i proste, podstawowe modele teoretyczne. Celem przeprowadzania analiz jest zastosowanie zestawu konserwatywnych zasad i wymagań dla projektu lub eksploatacji systemu. Spełnienie tych wymagań, zapewnia wysoki stopień pewności, że ryzyko na jakie wystawieni są pracownicy oraz okoliczna ludność jest

odpowiednio niskie. [6] Z wzrastającą jakością modeli i danych możliwe jest stworzenie bardziej realistycznej analizy przy zastosowaniu kodów ciepłno-przepływowych, która wykorzystuje dane z kodów oszacowujących prawdopodobieństwa zdarzeń do wyboru najbardziej prawdopodobnych scenariuszy awarii.

W eksploatacji elektrowni jądrowych można rozróżnić stany pracy, uwzględniając pracę normalną, odchylenia oraz pracę w warunkach awarii i ciężkie awarie. W każdym z tych stanów pracy określone są podstawowe środki realizacji bariery, czyli sposób zabezpieczenia elektrowni w danym stanie pracy. Sposoby zabezpieczenia można podzielić na bariery fizyczne: struktura paliwa, koszulka paliwowa, zbiornik ciśnieniowy reaktora i obudowę bezpieczeństwa oraz bariery niefizyczne, które uwzględniają zarządzanie i procedury dedykowane określonemu stanowi pracy. Wspomniane bariery, są weryfikowane przy pomocy kodów ciepłno-przepływowych podczas analiz bezpieczeństwa. Determinowany jest ich stan - ewentualny stopień zniszczenia (bariery fizyczne), bądź ewaluowany jest wpływ działań zawartych w przykładowym. planie postępowania awaryjnego (bariery niefizyczne) na cały system. Tabela 1 ukazuje poziomy zabezpieczeń – bariery fizyczne lub niefizyczne w elektrowniach jądrowych oraz cele w jakich zostały stworzone.

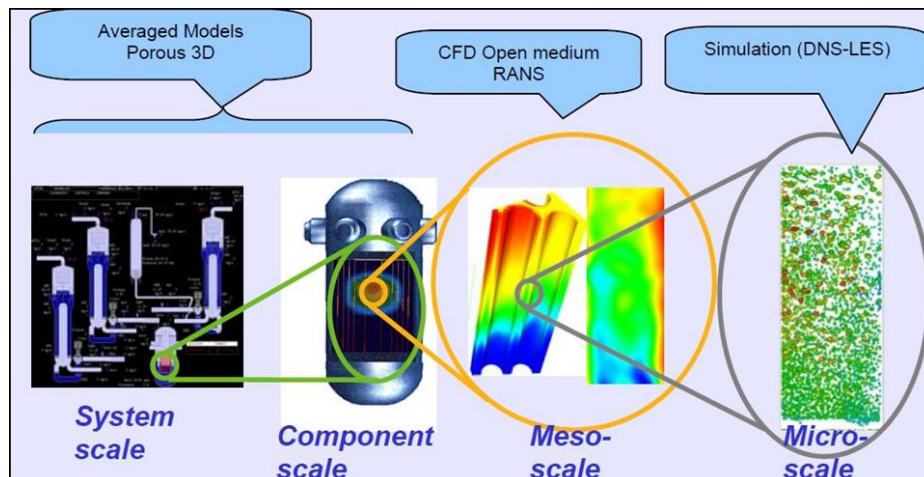
**Tabela 1 Poziomy zabezpieczeń w elektrowniach jądrowych oraz cele w jakim zostały tworzone.**

	<b>Cel</b>	<b>Podstawowe środki realizacji bariery</b>
<b>1</b>	Zapobieganie odchyleniom od normalnej eksploatacji i uszkodzeniom	Konserwatywne założenia projektowe i wysoka jakość budowy i eksploatacji obiektu
<b>2</b>	Ograniczanie zaburzeń eksploatacyjnych i wykrywanie uszkodzeń	Systemy kontrolne, ograniczające i zabezpieczające i inne środki monitorowania i nadzoru
<b>3</b>	Kontrolowanie przebiegu awarii projektowej	Inżynieryjne systemy bezpieczeństwa i procedury awaryjne
<b>4</b>	Kontrolowanie przebiegu awarii ponadprojektowych, przeciwdziałanie ich rozwojowi i ograniczanie skutków	Dodatkowe inżynieryjne środki bezpieczeństwa i system zarządzania awariami
<b>5</b>	Ograniczanie skutków dla człowieka i środowiska znacznych uwolnień niebezpiecznych substancji lub energii	Zewnętrzne plany postępowania awaryjnego

Kody zastosowane do analiz bezpieczeństwa, w tym kody ciepłno-przepływowe, powinny przejść odpowiednią weryfikację oraz walidację. Weryfikacja określa czy równania fizyczne oraz dane zostały odpowiednio przetłumaczone na język kodu komputerowego. Walidacja determinuje czy modele matematyczne są odpowiednią reprezentacją modelowanego systemu rzeczywistego przez porównywanie wyników pochodzących z modelu z danymi rzeczywistymi bądź eksperymentalnymi. Proces walidacji ukazuje niepewności oraz nieściłości w modelach i danych, które następnie muszą być uwzględnione w analizie bezpieczeństwa. [6]

# ELEKTROWNIE JĄDROWE

W kodach cieplno-przepływowych celem jest określenie parametrów modelowanego systemu, pod kątem mechaniki płynów oraz wymiany ciepła między materiałami znajdującymi się w analizowanej domenie. Ze względu na dokładność obliczeń można wyróżnić cztery podstawowe skale analizy: systemową, komponentów, CFD oraz mikro, które różnią się wielkością podziału na objętości kontrolne i ilością analizowanych komórek.



Rysunek 8 Kody cieplno-przepływowe dla różnej wielkości skali analizy.

Skala systemowa jest to skala, w której odwzorowuje się układ w parę set do tysiąca objętości kontrolnych i zawiera podstawowe komponenty elektrowni takie jak: wytwornice pary (PWR), stabilizator ciśnienia (PWR), zbiornik ciśnieniowy reaktora, pompy i systemy bezpieczeństwa przyłączone do układu chłodzenia reaktora. Kody te są w stanie przewidzieć ogólną odpowiedź systemu na zdarzenia eksploatacyjne. Wynikiem takich analiz są wartości ciśnień, temperatury chłodziwa w objętościach kontrolnych i materiałów modelowanych w systemie przedstawione jako funkcje czasu. Kody umożliwiają sterowanie zachowaniem reaktora, czyli symulację stanów awaryjnych, tak aby ocenić stopień bezpieczeństwa danego projektu elektrowni jądrowej. Symulacje przeprowadzane za pomocą kodów CFD – średniej skali, bazują na zwiększeniu dokładności podziału danego fragmentu analizowanego przestrzeni. Ze względu na fakt, że podziały na objętości kontrolne sięgają milionów, obszar analizowany jest mniejszy – tak aby umożliwić dokładne odwzorowanie rzeczywistości. Sposób podziału obszaru jest jednym z istotniejszych elementów w analizie CFD, ponieważ ma bardzo znaczący wpływ na wyniki. Dodatkowo, w kodach CFD istotnym elementem jest składnik turbulencji przy analizie mechaniki płynów. Kody tej skali zawierają zróżnicowane podejścia do modelowania oraz modele turbulentne w tym *Reynolds Averaged Navier Stokes* lub *Large Eddy Simulation*. Umożliwiają liczenie mieszania się płynów w kanale opadowym reaktora oraz wszelkiego rodzaju przepływów turbulentnych.

Przykłady kodów cieplno-przepływowych skali systemowej:

- RELAP5 – *The Reactor Excursion and Leak Analysis Program* to narzędzie do analizy uszkodzenia rurociągów – LOCA (*Loss of Coolant Accident*) i stanów przejściowych dla reaktorów PWR i BWR. Jego możliwości to modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych w objętościach kontrolnych 1-D. Był tworzony oraz rozwijany przez US NRC przed rozpoczęciem pracy nad kodem TRACE [7]. Brak możliwości obliczeń wielowątkowych.
- CATHARE – *The Code for Analysis of Thermalhydraulics during an Accident of Reactor and Safety Evaluation* to kod systemowy stosowany do analiz reaktorów PWR. Kod może być stosowany do analiz bezpieczeństwa, zarządzania postępowaniem awaryjnym,

definiowania procedury eksploatacji elektrowni oraz do badań i rozwoju technologii reaktorowych. Kod jest aplikowany również do określania konserwatywnych marginesów w analizach bezpieczeństwa i do licencjonowania projektów reaktorów jądrowych. Istnieje możliwość, wykonywania obliczeń przy użyciu wielu rdzeni komputera. Cathare jest wynikiem wspólnej pracy firmy AREVA\_NP, CEA – francuska Komisja Energii Jądrowej, EDF – właściciel elektrowni jądrowych we Francji i IRSN – Instytut Bezpieczeństwa Jądrowego. [8]

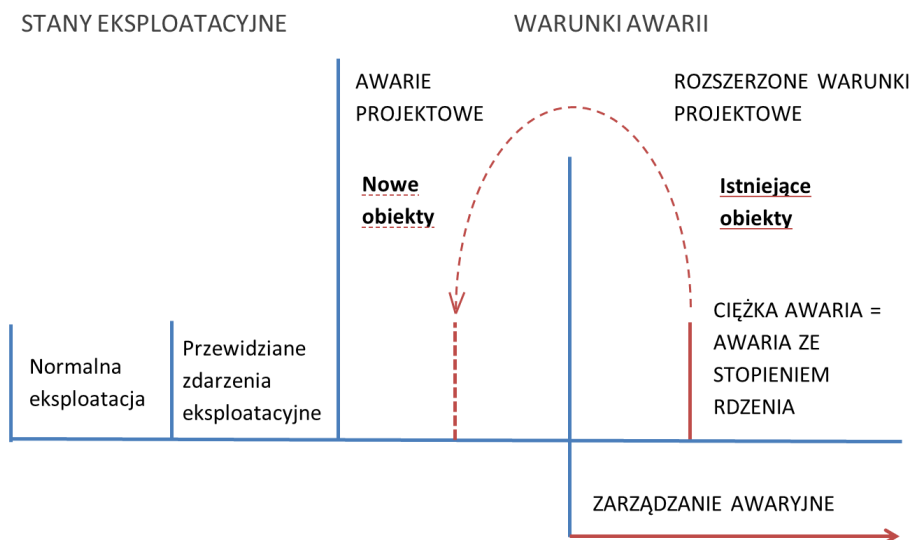
- ATHLET - *Analysis of Thermal-hydraulics of LEaks and Transients*, jest rozwijany w celu analiz całego spectrum rozerwań rurociągów i stanów przejściowych w reaktorach PWR i BWR. Kod jest również stosowany do analiz projektów wschodnich reaktorów, takich jak rosyjskie WWER oraz reaktory RBMK. [9]
- TRACE - *The TRAC/RELAP Advanced Computational Engine*, to zmodernizowany kod cieplno-przepływowy zaprojektowany aby połączyć i rozszerzyć możliwości tworzonych kodów – TRAC-P (PWR), TRAC-B (BWR) i RELAP. Kod jest w stanie modelować sekwencje dużych i małych rozerwań w układzie chłodzenia reaktora – LB/SBLOCA oraz stany przejściowe w reaktorach wrzących i ciśnieniowych. Modelowanie jest możliwe w 1 - D i 3 - D, zaś narzędzie jest obecnie sztandarowym narzędziem cieplno-przepływowym US NRC. [7]

Przykłady kodów cieplno-przepływowych skali CFD to: NEPTUNE-CFD - *A New Software Platform for Advanced Nuclear Thermal Hydraulics* – EDF, CEA, IRSN i AREVA, TRIO\_U – CEA, ANSYS Fluent, OPENFOAM – rozwijany przez OpenCFD Ltd kod open source oraz TransaT - *Transport phenomena Analysis Tool* utworzony przez ASCOMP GmbH.

## Kody do analiz ciężkich awarii

Kody do analiz ciężkich są stosowane w celu określenia pracy elektrowni jądrowej w stanie pracy wykraczającej poza awarie projektowa oraz takie podczas których miało miejsce stopienia rdzenia reaktora. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. - Prawo atomowe określa definicję ciężkiej awarii w elektrowni jądrowej jako: warunki awaryjne obiektu jądrowego, poważniejsze niż awarie projektowe, prowadzące do znaczącej degradacji rdzenia reaktora i mogące prowadzić do znaczących uwolnień substancji promieniotwórczych. Definicja uwzględnia najistotniejsze charakterystyczne elementy takiej awarii, oznacza to że podczas ciężkiej awarii materiał w rdzeniu ulega stopieniu i występuje zagrożenie uszkodzenia barier fizycznych obiektu jądrowego. Według Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, warunki ciężkiej awarii zostały przeniesione do warunków projektowych, co oznacza fakt, że w nowych powstających obiektach ewentualność stopienia rdzenia musi być uwzględniona, a konsekwencje takiego zdarzenia muszą być zniesione do minimum - Rysunek 9.

# ELEKTROWNIE JĄDROWE

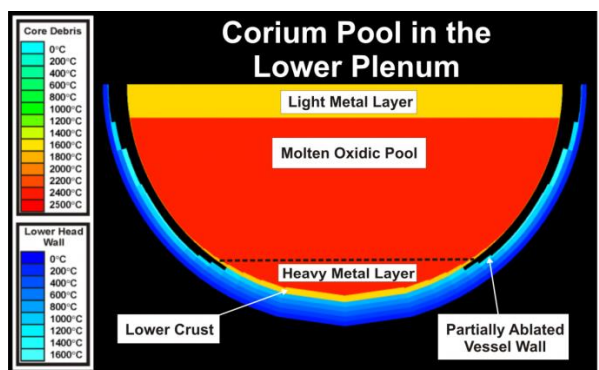


**Rysunek 9 Przegląd stanów eksploatacyjnych obiektów zgodnie ze standardami MAEA. [6]**

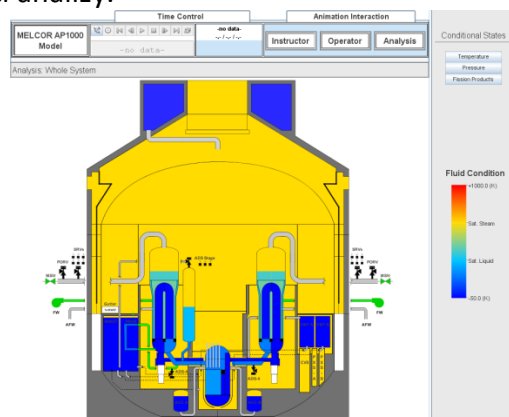
Kody, które są stosowane do analiz ciężkich awarii obejmują takie zagadnienia jak:

1. Obliczenia ciepłno-przepływowe oraz zachowanie się aerozoli w obudowie bezpieczeństwa.
2. Zachowanie się produktów rozszczepienia w obiegu chłodzenia.
3. Progresa stopienia się rdzenia.
4. Wydostanie się rdzenia poza zbiornik ciśnieniowy.
5. Interakcje między rdzeniem a betonem (MCCI).
6. Uwolnienie produktów rozszczepienia.

Analizy ciężkich awarii mogą być stosowane do różnych celów, w niektórych przypadkach są częścią analizy ryzyka elektrowni jądrowej, bądź są wymagane przez państwowy dozór jądrowy, jako element raportu bezpieczeństwa obiektu. Zjawiska mające miejsce w czasie ciężkich awarii są na tyle skomplikowane, a ich mechanika i fizyka są wciąż niezbadane, że każda z analiz niesie ze sobą niepewności. Z tego powodu nieodłączną częścią przeprowadzenia symulacji ciężkiej awarii jest oszacowanie wrażliwości i niepewności modelu. Współczesne kody do analiz ciężkich awarii mają wbudowane możliwości oszacowania właśnie tych niepewności i wrażliwości analizy.



**Rysunek 10 Model tworzenia się basenu ze stopionym materiałem rdzenia w dolnej części zbiornika reaktora. [10]**



**Rysunek 11 Symulator w graficznym interfejsie połączonym z kodem MELCOR. [11]**

Typy narzędzi obliczeniowych:

- Uproszczone szybko liczące integralne kody: MELCOR – rozwijany przez SNL, MAAP - Electric Power Research Institute, ASTEC – tworzony przez IRSN i GRS.
- Kody szczegółowe, analiza pierwotnego obiegu chłodzenia: ICARE/CATHARE, ATHLET-CD, RELAP/SCDAP:
  - Obudowy bezpieczeństwa: CONTAIN, COCOSYS.
- Szczegółowe zestawy kodów integralnych: SAMPSON, RELAP/SCDAP – CONTAIN – VICTORIA, ATHLET-CD – COCOSYS.

## Kod RELAP5

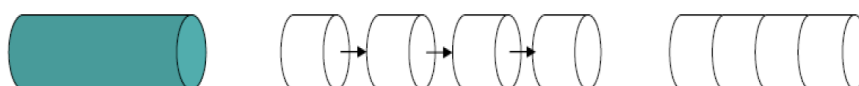
RELAP5 jest kodem systemowym przeznaczonym do obliczeń cieplno-przepływowych w reaktorach lekkowodnych (LWR). Kod pozwalający na wykonywanie symulacji stanów ustalonych oraz przejściowych takich jak rozerwanie rurociągu (LOCA), utrata zasilania energii elektrycznej (LOOP), wybite turbiny czy utratę przepływu chłodziwa (LOFA). Został stworzony w Stanach Zjednoczonych przez Idaho National Laboratories na potrzeby amerykańskiego dozoru jądrowego NRC, do licencjonowania obiektów jądrowych. Poprzez użycie kodu możemy, zasymulować większość awarii projektowych, ale nie wykraczając poza stopień rdzenia reaktora.

Przepływ i energia płynu jest obliczana za pomocą jednowymiarowego strumienia masy w rurze oraz przy użyciu modelu przewodzenia. Kod zawiera dedykowane instalacjom jądrowym takie elementy jak, punktowy model kinetyki, pompy (również pompa strumieniowa typowa dla reaktorów wrzących), zawory, struktury ciepła, turbinę, separator pary, akumulator oraz elementy logiczne. Wymienione wyżej elementy są tylko specyficznymi komponentami, jakie możemy używać w trakcie modelowania. Podstawowe z jakich może składać się model to:

- objętość lub złącze zależne od czasu (*Time Dependent Volume/Junction*),
- pojedyncza objętość lub złącze (*Single Volume/Junction*),
- rura (*Pipe*),
- rozgałęzienie (*Branch*).

## Nodalizacja

Układ połączonych ze sobą komponentów za pomocą złączy tworzy tzw. *nodalizację*. Jest to odwzorowanie ścieżki przepływu czynnika, którą możemy zwizualizować przy użyciu elementów kodu. W każdym węźle obliczane są parametry dla poszczególnej fazy czynnika, pary i wody z osobna, rozwiązując równanie momentu, masy i energii. Otrzymane wyniki z jednego węzła, służą programowi za warunki kolejnego węzła.

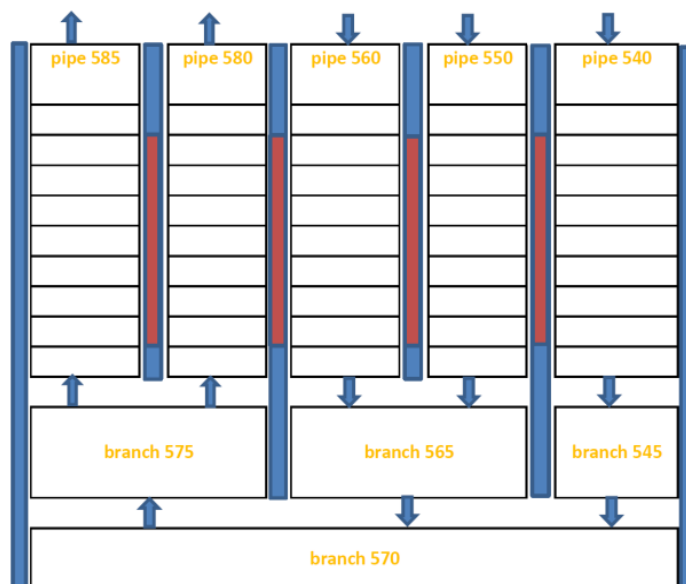


Rysunek 12 Nodalizacja kanału przepływu przy użyciu komponentu Pipe.



# ELEKTROWNIE JĄDROWE

Dobrze wykonana nodalizacja układu pozwala otrzymywać prawidłowe wyniki, dlatego warto poświęcić na jej przygotowanie więcej czasu i kierować się pewnymi wytycznymi oraz wykorzystać dotychczasowe doświadczenie w modelowaniu złożonych systemów ciepło–przepływowych. Ze względu na złożoność modelowanych systemów, trzeba dobrze przemyśleć cały schemat nodalizacji, aby geometria poszczególnych objętości była właściwie dobrana a ilość komponentów nie może przekroczyć 999. Objętości mają nie tylko dobrze odwzorowywać wymiary elementu (pola powierzchni przepływu, wysokości), ale również należy przemyśleć z jakimi zjawiskami będziemy mieć do czynienia w danej objętości i jak szybko będą zachodziły w niej zmiany. Posługiwanie się drobniejszymi objętościami, wydłuża czas obliczeń, ale pozwala dokładniej odwzorować modelowany układ. Długości sąsiadujących ze sobą objętości, należy dobierać w ten sposób, aby nie różniły się między sobą więcej niż dwukrotnie (zbyt duża objętość może być bardzo dużym uproszczeniem i może powodować błędy w trakcie obliczeń). W takich elementach jak zbiornik ciśnieniowy reaktora, wytwornica pary czy wymiennik ciepła można zauważyć równoległe przepływy (przeciw lub współprądowe) względem osi, np.:



Rysunek 13 Przykład zastosowania metody plastrów podczas modelowania przepływów w cylindrycznych kanałach.

kanal opadowy i wznoszący w wytwornicy pary. Warto te elementy podzielić stosując metodę *plastrów* czyli, dzieląc ścieżkę przepływu w ten sposób, aby sąsiadujące równoległe kanały pokrywały się ze sobą objętościami tak jak to przedstawia Rysunek 13. Również zastosowane w modelu struktury ciepła (pasywne i aktywne) zostały podzielone zgodnie z tą metodą, które pokrywają się z objętościami kontrolnymi. W przypadku modelowania złożonych instalacji jądrowych, takich jak strona pierwotna elektrowni jądrowej, wskazane jest podzielenie modelu na poszczególne elementy (zbiornik ciśnieniowy reaktora, wytwornica pary, stabilizator ciśnienia), a następnie, dobrze zamodelowane części połączyć w całość.

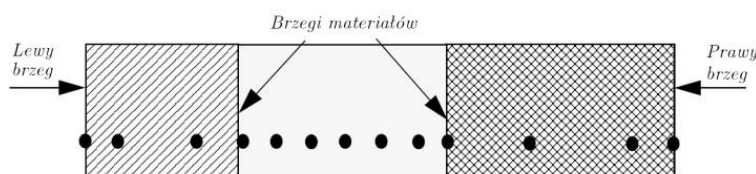
Początkujący użytkownicy powinni korzystać z doradztwa ekspertów, posługujących się narzędziem od wielu lat. RELAP5 jest programem deterministycznym i nie analizuje otrzymanych wyników.

## Struktury ciepła

Struktury cieplne są wykorzystywane zawsze wtedy, gdy chcemy zasymulować wymianę ciepła. Przy ich użyciu możemy zamodelować ścianę kanału, element grzewczy, pręt paliwowy jądrowego lub powierzchnie wymiennika ciepła. Materiał przewodzący ciepło zostaje połączony z poszczególną objętością kontrolną, odpowiednio z lewej jak i z jej prawej strony, nadając przepływowi ciepła kierunek. Kod wylicza strumień ciepła przy użyciu odpowiednich korelacji. Moc elektrycznych grzałek lub prętów paliwowych możemy zamodelować poprzez powierzchniowy strumień mocy lub jako objętościowe źródło mocy.

# ELEKTROWNIE JĄDROWE

Na Rysunek 14 widać, że modelowana ścianka może składać się z kilku materiałów, odpowiednio umieszczonych pomiędzy lewym i prawym brzegiem struktury.



**Rysunek 14 Rozkład punktów kontrolnych w strukturze ciepła.**

Gęstość rozkładu punktów kontrolnych w strukturze, deklarujemy w zależności od miejsc, w których chcemy odczytać interesujące nas parametr (temperaturę). Na brzegach struktur, w zależności od wcześniejszej deklaracji, możemy odczytać strumień ciepła, współczynnik przenikania ciepła, uśrednioną temperaturę w objętości lub jeden ze sposobów wymiany ciepła jaki zachodzi w danej objętości. Wymienione parametry domyślnie są zapisywane do pliku wyjściowego numerycznie, dlatego poszczególnym liczbą przypisano odpowiednie korelacje wymiany ciepła.

**Tabela 2 Oznaczenia korelacji podczas wymiany ciepła.**

Oznaczenie	Korelacja wymiany ciepła
0	Konwekcja do mieszaniny niekondensującego się gazu i wody
1	Konwekcja jednofazowego przepływu cieczy dla nadkrytycznego ciśnienia
2	Konwekcja jednofazowego przepływu cieczy, przechłodzona ścianka, niski udział objętościowy pary
3	Wrzenie pęcherzykowe przechłodzonej cieczy
4	Wrzenie pęcherzykowe nasyconej cieczy
5	Przejęciowe wrzenie przechłodzonej cieczy.
6	Przejęciowe wrzenie nasyconej cieczy.
7	Wrzenie błonowe cieczy przechłodzonej
8	Wrzenie błonowe cieczy nasyconej
9	Konwekcja jednofazowego przepływu pary lub nadkrytyczne ciśnienie i udział objętościowy pary większy od zera
10	Skraplanie się gdy udział objętościowy pary mniejszy niż jeden
11	Skraplanie gdy udział objętościowy pary równy jeden

Istnieje również możliwość zdefiniowania struktury cieplnej z warunkiem brzegowym symetrii lub izolowanej ścianki. Taka konfiguracja jest często wykorzystywana w przypadku modelu pręta paliwowego (modelując tylko jego połowę i wykorzystując symetrię geometrii), co skraca czas obliczeń.

## Praca z kodem

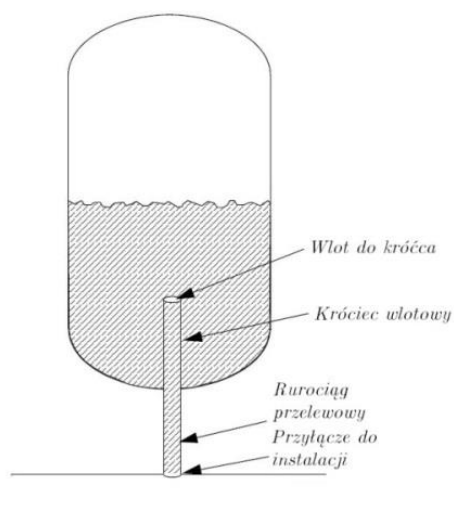
Aby zacząć pracę z kodem obliczeniowym musimy posługiwać się „językiem” kodu, który opisany jest w podręczniku Input Manual. Główna struktura jaką należy zachować w trakcie tworzenia pliku wsadowego polega na podziale inputu na karty (wiersze) i wyrazy oddzielane spacją. Możemy wyróżnić wyrazy zapisane w postaci liczby rzeczywistej, całkowitej lub alfanumerycznej. Fragment pliku wejściowego został pokazany na Rysunek 15. Pierwsze trzy litery każdej karty to numer

```
1850000 inlet tmdpjun
1850101 180010000 200000000 0.00781
1850200 1
1850201 0. 100.0 0.0 0.
1850202 500. 200.0 0.0 0.
```

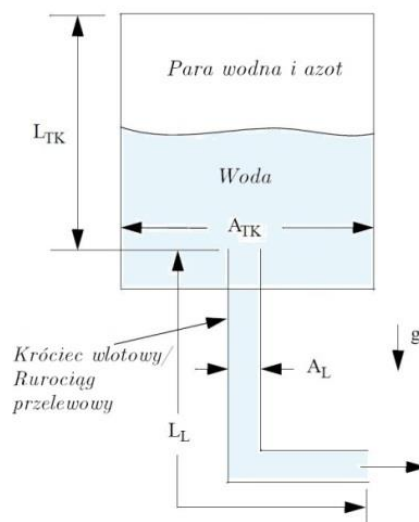
**Rysunek 15 Fragment pliku wejściowego, przedstawiający złącze zależnego od czasu, tmdpjun.**

komponentu (w tym przypadku jest to komponent 185), a cztery ostatnie opisują rodzaj karty. W pierwszym wyrazie pierwszej z nich zawarto informacje, jaką nazwę nadaliśmy elementowi, a w drugim podajemy jego rodzaj. W przypadku złącza, w kolejnej karcie w pierwszym i drugim wyrazie podajemy informacje jakie objętości (komponenty) element połączy oraz jakie jest pole przepływu czynnika w m<sup>2</sup>. Karta 1850200 odpowiada za wartości wpisane w wierszu 185020N, definiując, czy wpisane wartości będą wydatkami masowymi [kg/s] lub prędkościami przepływu [m/s]. Wybrana wartość „1” oznacza wydatek masowy, który będzie zmieniał się w czasie od 100 kg/s do 200kg/s przez 500 sekund.

Przyjrzyjmy się bliżej komponentowi, jakim jest zbiornik układu awaryjnego chłodzenia rdzenia - akumulator (accum). Z pozoru komponent wydaje się być pojedynczą objętością kontrolną, jednak kod pozwala na dokładniejsze jego opisanie. W rzeczywistości jest to dość złożony zbiornik, w którym znajduje się woda oraz gaz pod ciśnieniem około 4 MPa. Zbiornik połączony jest z obiegiem za pomocą, króćca wlotowego oraz rurociągu przelewowego, co pokazuje [Rysunek 16](#) Rysunek 16. Akumulator jest odcięty zaworem zwrotnym, dlatego woda z obiegu pierwotnego nie wpływa do zbiornika. Dopiero w przypadku spadku ciśnienia w obiegu poniżej ciśnienia wewnątrz akumulatora, woda automatycznie wypływa i dostarcza wodę do rdzenia reaktora. Tak długo jak zbiornik i rurociąg przelewowy nie opróżnią się, w kodzie, akumulator jest opisany, jako parametr skupiony. Gdy w akumulatorze nie będzie już wody, kod automatycznie zmienia właściwości komponentu z accum na pojedynczą objętość, snglvol.



Rysunek 16 Akumulator z zaznaczonymi głównymi częściami.



Rysunek 17 Schemat cylindrycznego akumulatora.

Na Rysunek 17 zostały zaznaczone wymiary, jakie charakteryzują akumulator. Należy opisać osobno zbiornik i rurociąg przelewowy (poła przepływu i długość), aby żadna ilość wody nie została pominięta. Opisujemy również złącze łączące akumulator z obiegiem chłodzenia, do którego możemy podłączyć tylko jedną objętość kontrolną. Podajemy, jaką objętość zbiornika zajmuje gaz oraz jaki kształt ma zbiornik, kulisty czy cylindryczny. Każdy komponent o zdefiniowanej objętości musi zawierać informacje o usytuowaniu. W tym wypadku możliwa jest tylko zmiana orientacji pionowej, poprzez podłączenie rurociągu przelewowego od dołu lub z góry akumulatora. Następnym etapem jest podanie warunków początkowych wewnątrz zbiornika- temperatury i ciśnienia oraz właściwości charakteryzujących ściany zbiornika (grubość, gęstość, pojemność cieplną).

Dopiero gotowy plik wsadowy w postaci tekstowej, można uruchomić za pomocą kodu i rozpocząć obliczenia. Po ich uruchomieniu otrzymujemy plik wyjściowy oraz tzw. plik restartowy. Ten pierwszy zapisany w postaci tekstowej, zawiera informacje o przetworzonym pliku wsadowym oraz wartości poszczególnych parametrów. W przypadku wykrycia błędów w pliku wsadowym, obliczenia nie rozpoczną się. Odnajdując w pliku wyjściowym odpowiednie frazy opisujące rodzaj błędu, z jakim mamy do czynienia, należy go poprawić. Istnieje również możliwość przygotowywania modelu wykorzystując narzędzie SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package), które może być pomocne w trakcie modelowania m.in. jako interfejs graficzny użytkownika (GUI). Narzędzie w dużym stopniu minimalizuje prawdopodobieństwo popełnienia błędów składni czy nieprawidłowego podłączenia objętości kontrolnych.

## Podsumowanie

Zastosowanie kodów obliczeniowych w przemyśle jądrowym odgrywa bardzo ważną rolę. Rosnące wymogi bezpieczeństwa reaktorów jądrowych i konieczność przeprowadzania coraz dogłębszych badań nad zjawiskami w nich występującymi, skłania do używania narzędzi obliczeniowych, które są w stanie rozwiązywać równolegle szeregi równań.

W analizach bezpieczeństwa elektrowni jądrowych występuje wiele obszarów, które należy uwzględnić w celu optymalnej i wyczerpującej oceny bezpieczeństwa. Wiedza potrzebna do pełnego zrozumienia zjawisk jest szeroka i obejmuje takie zagadnienia jak: fizyka reakcji neutronowych, materiałoznawstwo, mechanikę ciała stałego, mechanikę płynów i wymianę ciepła. Z tego powodu kody stosowane do analiz zwykle zajmują się częścią zjawisk występujących w reaktorach jądrowych, które mogą stanowić dane wejściowe do dalszych analiz.

Kody cieplno-przepływowe wyznaczają zachowanie się chłodziwa w reaktorach jądrowych w czasie zdarzeń awaryjnych jak i normalnej eksploatacji. Wyróżniamy narzędzia obliczeniowe różnej skali, począwszy od kodów skali mikro, obrazującej turbulencje na poziomie mikrometra do kodów systemowych, które oceniają cały projekt elektrowni z systemami bezpieczeństwa. Kody cieplno-przepływowe stosuje się do opracowywania deterministycznej analizy bezpieczeństwa, będącej częścią oceny bezpieczeństwa obiektu jądrowego.

Jednym z narzędzi do obliczeń cieplno-przepływowych jest kod RELAP5, który ma szerokie zastosowanie w badaniach i rozwoju technologii reaktorowych. Jest on stosowany do reaktorów wrzących i ciśnieniowych, może analizować sekwencje awarii utraty chłodziwa, bądź zasilania do momentu stopienia się rdzenia reaktora. Korzystanie z kodu wymaga długoletniego szkolenia, zaś najbardziej wymagającym elementem użytkownika, jest umiejętność oceny poprawności uzyskanych wyników. Obecnie RELAP5 nie jest już rozwijany, jednak w październiku 2011 roku w INL zapadła decyzja o rozpoczęciu nowego projektu RELAP-7, który stanie się głównym narzędziem do symulacji systemów reaktorowych i zastąpi dotychczasową wersję.

## Literatura

- [1] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, „Centrum Informatyczne Świerk,” [Online]. Available: [www.cis.gov.pl](http://www.cis.gov.pl).
- [2] Polska Grupa Energetyczna EJ 1 Sp.z o.o., „Świadomie o atomie - energia jądrowa w Polsce,” [Online]. Available: [www.swiadomieoatomie.pl](http://www.swiadomieoatomie.pl).
- [3] D. d. i. A. Strupczewski, Nie bójmy się energetyki jądrowej!, Warszawa: Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, 2010.
- [4] D. A. Vega, „Atomistically informed fuel performance codes: a proof of principle using Molecular Dynamics and FRAPCON simulation,” University of Florida, 2008.
- [5] Japan Atomic Energy Agency, „Investigation of irradiation behaviour of future FBR fuel. Short-term irradiation behaviour of Am-containing MOX fuel,” JAEA, 2009.
- [6] M. El-Shanawany, „IAEA Safety Standards for safety assessment,” Wiedeń, 2010.
- [7] United States Nuclear Regulatory Commission, [Online]. Available: [www.nrc.gov](http://www.nrc.gov).
- [8] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives- CEA, [Online]. Available: <http://www-cathare.cea.fr/>.
- [9] GRS - The Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, „Computer code ATHLET,” [Online]. Available: [www.grs.de](http://www.grs.de).
- [10] Fauske and Associates Llc, [Online]. Available: <http://www.fauske.com/>.
- [11] International Atomic Energy Agency, Safety standards XXX, Wiedeń: IAEA, 2000.

**Jerzy Niagaj**  
**Instytut Spawalnictwa**

## **ANALIZA PARAMETRÓW TECHNICZNYCH PODSTAWOWYCH URZĄDZEŃ I KONSTRUKCJI ELEKTROWNI JĄDROWEJ W ASPEKcie MOŻLIWOŚCI WYTWARZANIA ICH PRZEZ PRZEMYSŁ KRAJOWY**

### **Streszczenie**

Przeprowadzono analizę parametrów konstrukcyjnych podstawowych spawanych urządzeń i konstrukcji stalowych elektrowni jądrowej w aspekcie możliwości wykonania ich przez rodzime zakłady przemysłowe. Stwierdzono, że niezależnie od dostawcy technologii jądrowej wiele podstawowych urządzeń lub modułów konstrukcyjnych waży powyżej 500 ton, co w przypadku firm krajowych znacząco utrudnia zarówno ich produkcję, jak i transport.

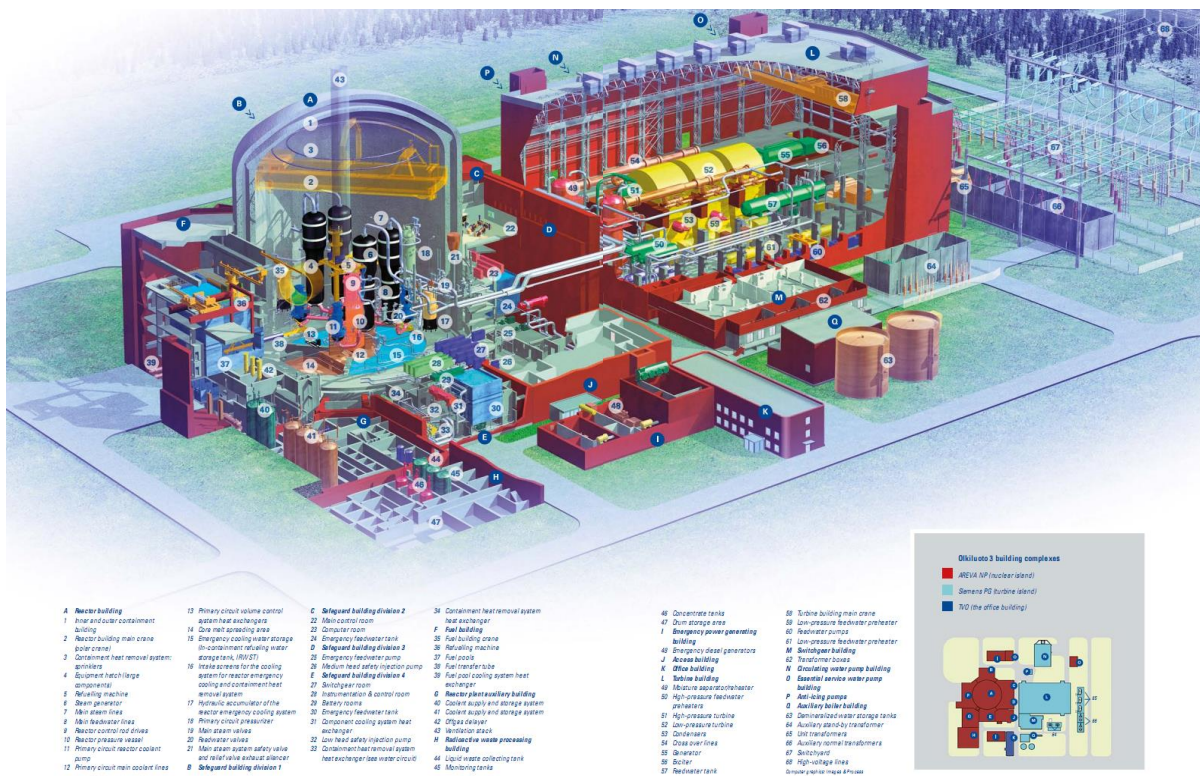
### **Wprowadzenie**

Planowana budowa i uruchomienie pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce w sposób oczywisty wywołuje szereg pytań dotyczących bezpieczeństwa, ekologii, ale również korzyści ekonomicznych dla gospodarki krajowej, w tym wynikających z udziału rodzimego przemysłu w wytwarzaniu poszczególnych urządzeń i konstrukcji. Na przestrzeni ostatnich kilku lat w artykułach prasowych oraz przy okazji różnego rodzaju spotkań, debat i konferencji ukazują się opinie zarówno ekspertów, jak i potencjalnych dostawców technologii jądrowych, które szacują udział polskiego przemysłu w budowie pierwszej elektrowni jądrowej w przedziale od 15 do 70 %, wskazując na wartość 50 % jako najbardziej realną do osiągnięcia. Wartość minimalna i maksymalna znacząco różnią się między sobą, co z pewnością wiąże się ze złożonością zagadnienia oraz brakiem na dzień dzisiejszy jasności w wielu kwestiach, w tym dotyczącej dostawcy technologii jądrowej. Jest to o tyle istotne dla rodzimego przemysłu, o ile każdy z potencjalnych dostawców technologii jądrowych ma nieco inną koncepcję budowy łańcucha dostaw (supply chain) oraz własną listę dostawców poszczególnych urządzeń i usług, która na szczęście nie jest zamknięta i może się zmieniać w zależności miejsca (kraju) budowy elektrowni jądrowej, co stwarza określone szanse dla lokalnych firm i usługodawców.

Poniżej przedstawiono analizę parametrów konstrukcyjno-technicznych podstawowych spawanych urządzeń i konstrukcji elektrowni jądrowej w aspekcie możliwości wykonania ich przez rodzimy przemysł. Pod uwagę wzięto urządzenia i elementy konstrukcyjne trzech najbardziej prawdopodobnych dostawców technologii jądrowej: AREVA, GE Hitachi oraz Westinghouse, jak również ich potencjalnych partnerów w części konwencjonalnej: ASTOM i SIEMENS.

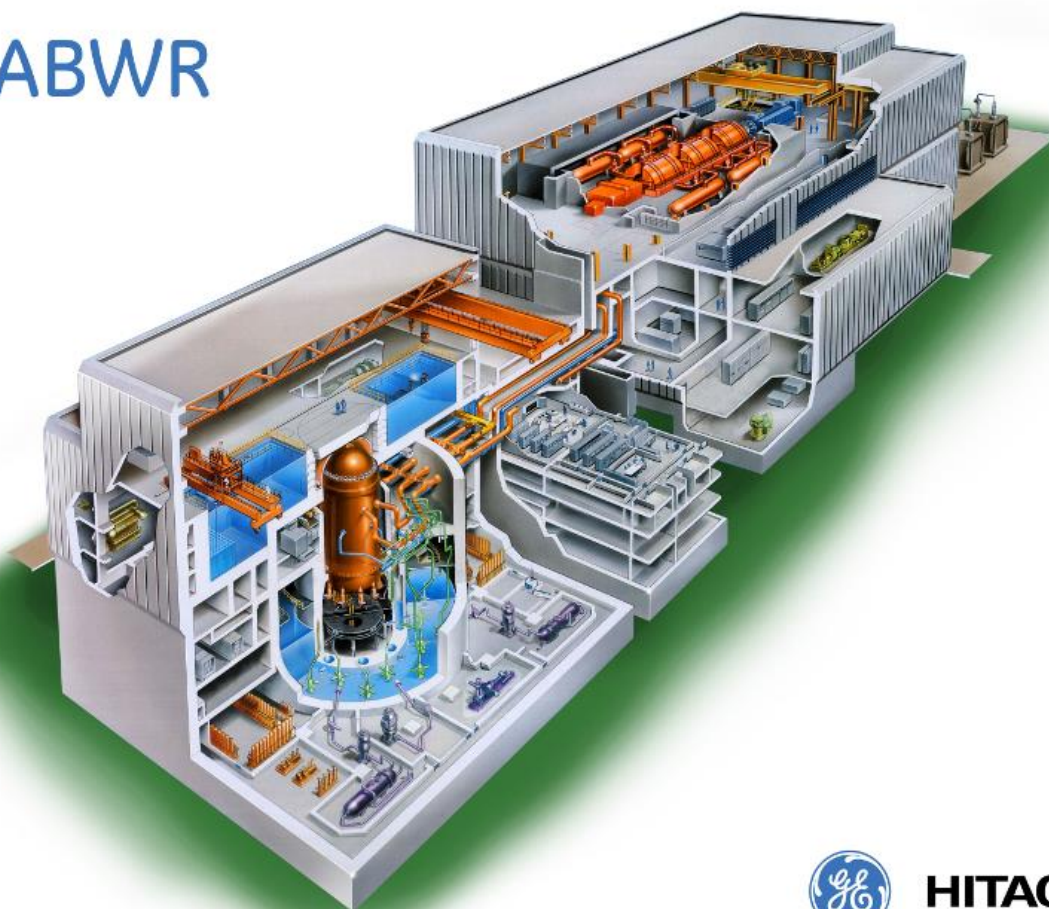
## Budowa elektrowni jądrowej

W odróżnieniu od elektrowni konwencjonalnej, elektrownia jądrowa składa się z dwóch części: jądrowej i konwencjonalnej, które w publikacjach technicznych są często określane jako wyspy – wyspa jądrowa (nuclear island) i wyspa turbinowa lub konwencjonalna (turbine or conventional island). W publikacjach można również spotkać ponadto określenie „obieg” – obieg pierwszy (jądrowy) i obieg drugi (konwencjonalny), a czasem obieg trzeci (układ chłodzenia w ramach zespołu turbinowego). Na rys. 1, 2 oraz 3 przedstawiono schematy elektrowni jądrowych trzech najpoważniejszych potencjalnych dostawców technologii: AREVA, GE Hitachi oraz Westinghouse, których jednym z najważniejszych elementów bez wątpienia jest reaktor jądrowy odpowiednio: EPRTM, ABWR i AP1000. W przypadku EPRTM (tłumaczony w Europie jako European Pressurized Reactor, a na świecie Evolutionary Power Reactor) i AP1000 są to reaktory wodne ciśnieniowe typu PWR (Pressurized Water Reactor). Z kolei reaktor ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) jest reaktorem wodnym wrzącym typu BWR (Boiling Water Reactor).



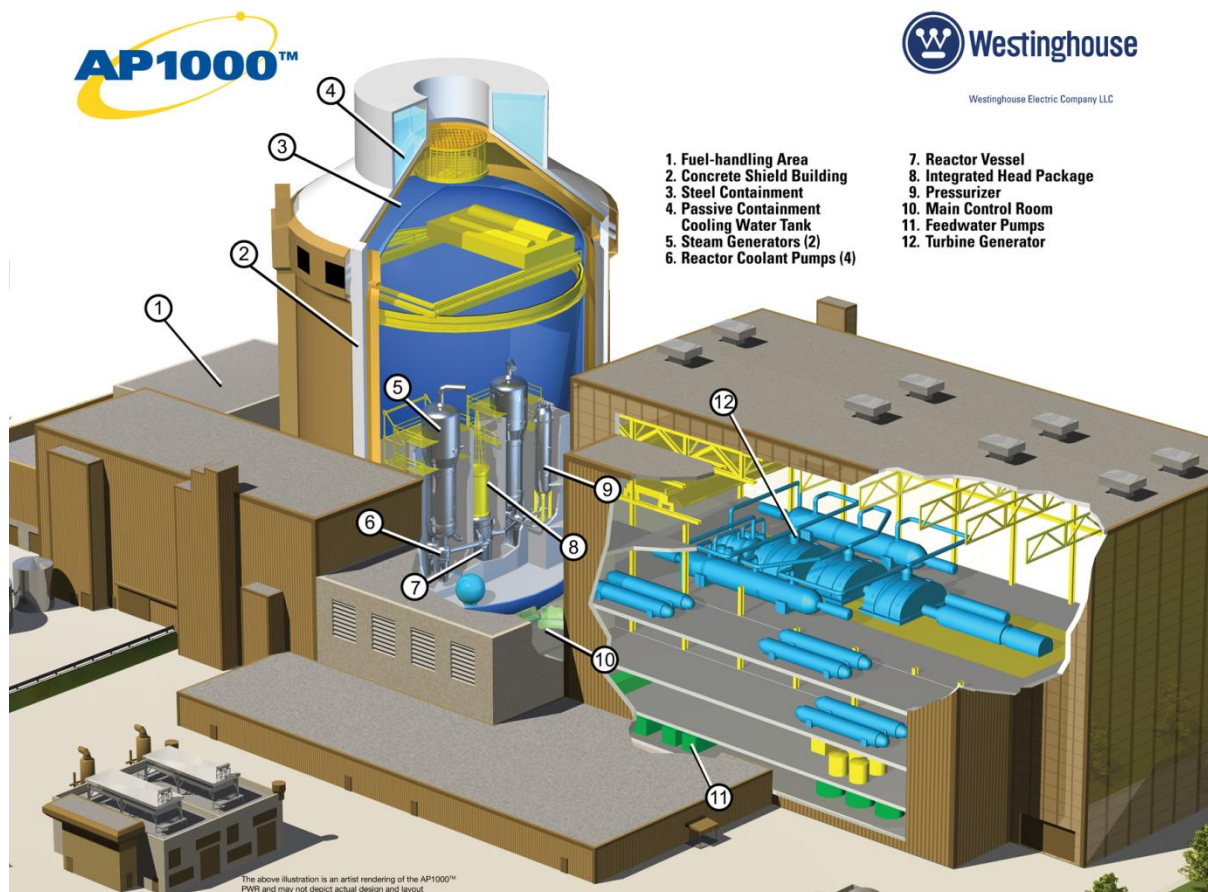
Rys. 1. Elektrownia jądrowa Olkiluoto 3 z reaktorem EPRTM firmy AREVA [1].

## ABWR



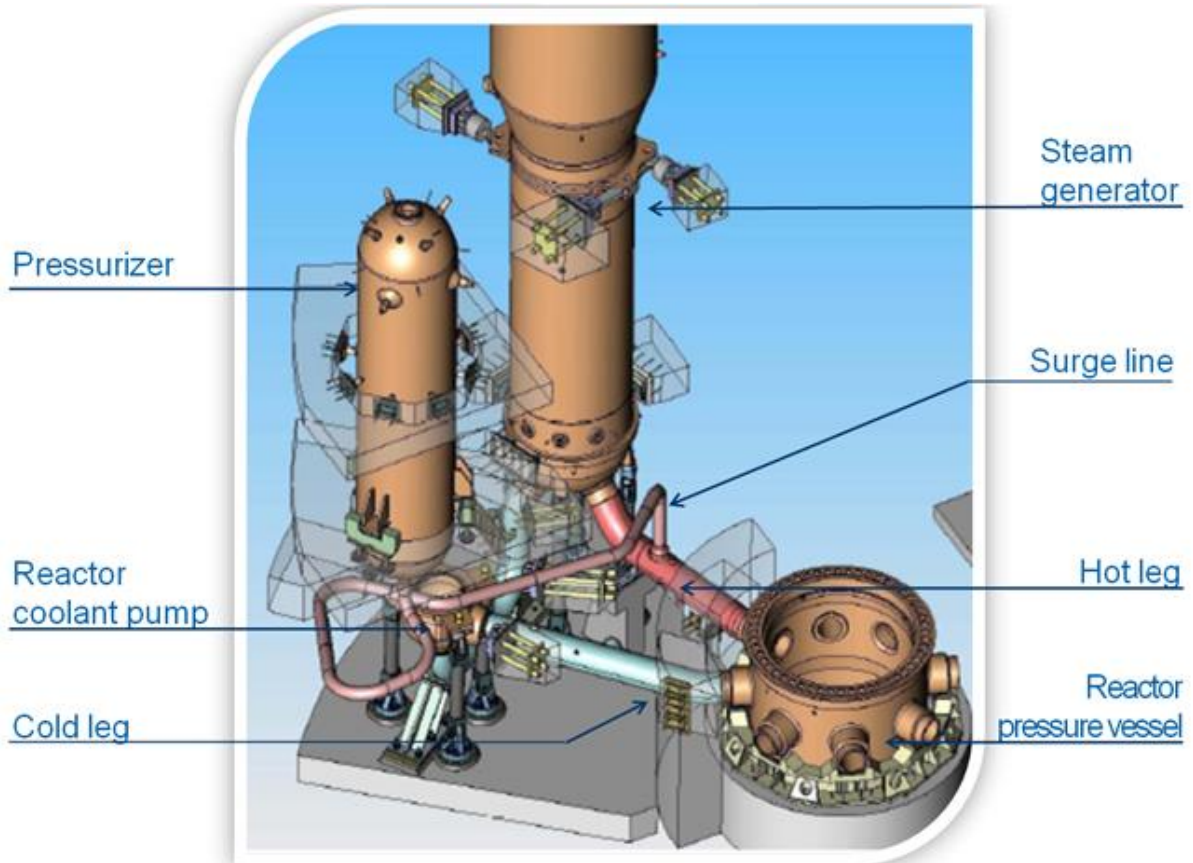
Rys. 2. Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem ABWR firmy GE Hitachi [2].



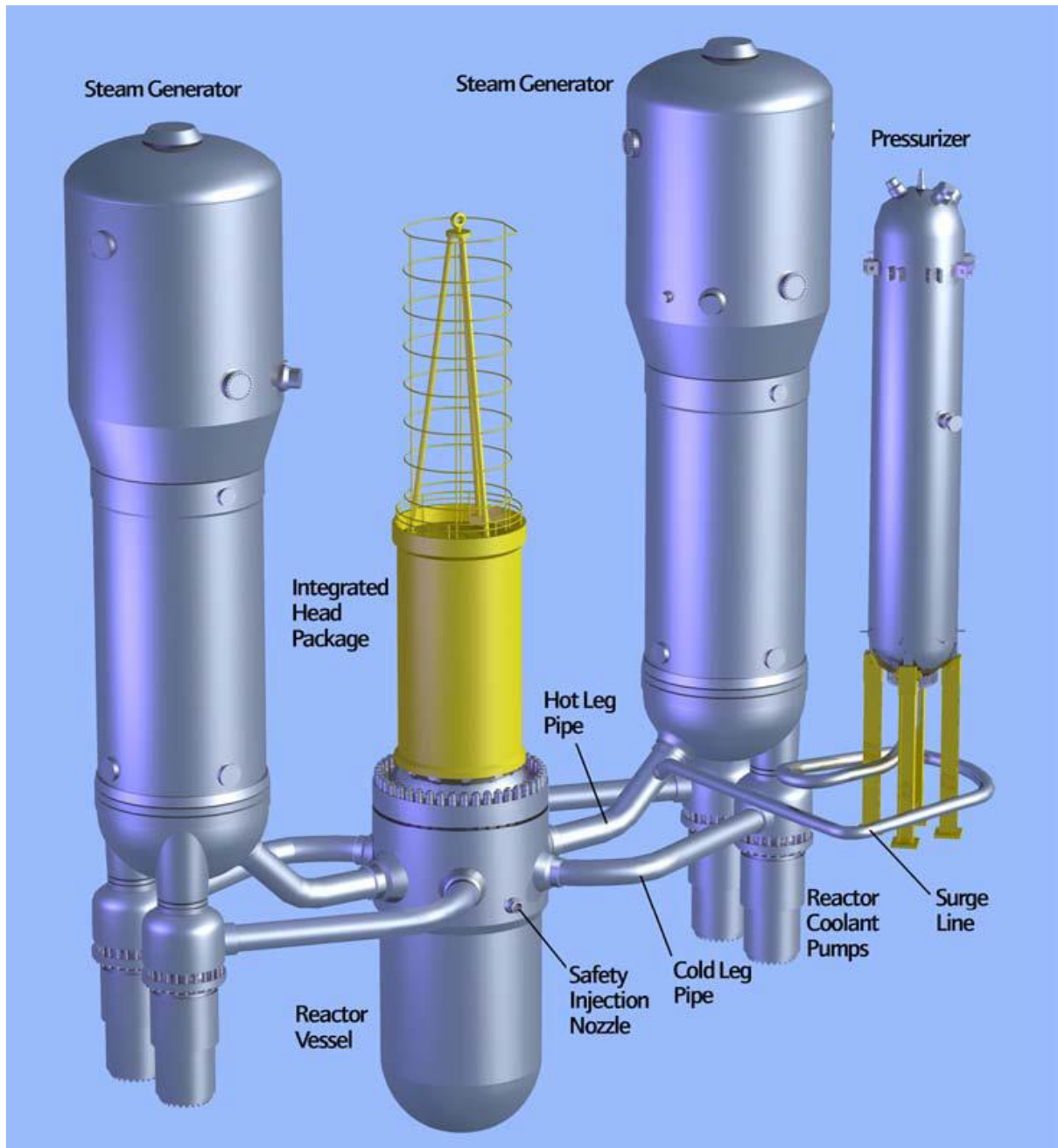


Rys. 3. Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem AP1000 firmy Westinghouse [3].

Różne typy reaktorów warunkują różny zestaw oraz ilość urządzeń elektrowni jądrowej lub długość (w przypadku rurociągów technologicznych), szczególnie w jej części jądrowej (rys. 4÷6). Wyspa turbinowa z reguły składa się z urządzeń o podobnym przeznaczeniu. Różnice występują tylko w pewnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, wydajności lub ilości niektórych jednostek, co jest uzależnione od producenta lub dostawcy zespołu turbinowego. W tabl. 1 zestawiono podstawowe urządzenia i układy elektrowni z reaktorami typu PWR i BWR, podczas wytwarzania których spawanie jest jednym z głównych procesów technologicznych. Jak wynika z przedstawionych na rys. 4÷6 schematów, reaktor ABWR posiada otwarty obieg jądrowy, a zatem nie ma w swoim składzie wytwornic pary i stabilizatora ciśnienia, jak reaktory typu PWR (EPRTM oraz AP1000). Fakt ten przyczynia się do obniżenia kosztów wytwarzania tej części elektrowni jądrowej oraz znacząco upraszcza proces produkcyjny, jednakże otwarty charakter obiegu wpływa na skażenie wszystkich urządzeń biorących udział w cyrkulacji czynnika roboczego, co utrudnia ich eksploatacji i remonty [7].

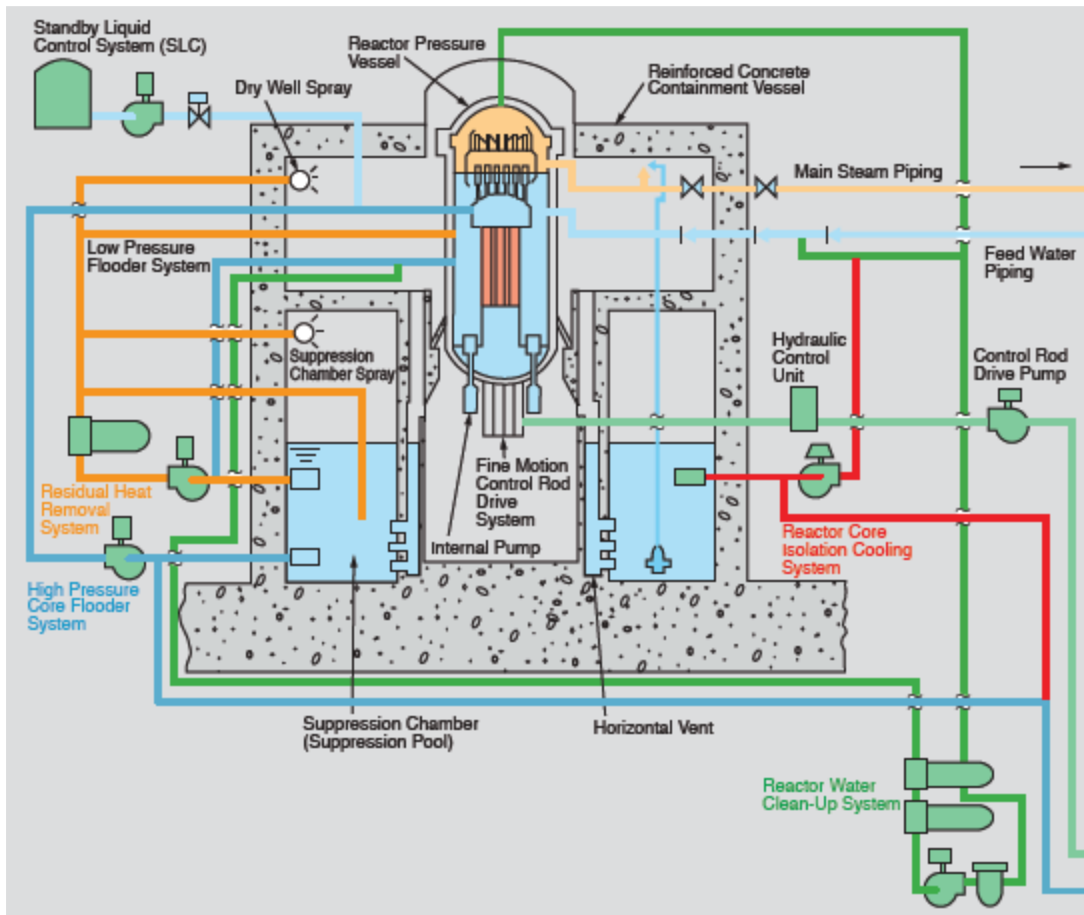


Rys. 4. Podstawowe urządzenia i rurociągi pętli jądrowej reaktora EPRTM w elektrowni Olkiluoto 3 [4].



Rys. 5. Schemat obiegu jądrowego reaktora AP1000 [5].

# ELEKTROWNIE JĄDROWE



Rys. 6. Schemat wyspy jądrowej reaktora ABWR [6].

Tablica 1

Zestawienie podstawowych urządzeń elektrowni jądrowych z reaktorami PWR oraz BWR

Lp.	Urządzenie lub zespół	PWR	BWR
1.	Reaktor	X	X
2.	Wytwornica pary	X	–
3.	Stabilizator ciśnienia	X	–
4.	Główna pompa układu chłodzenia reaktora	X	–
5.	Pompa recyrkulacyjna	–	X
6.	Napędy prętów regulacyjnych	X	X
7.	Pomocnicze zbiorniki i wymienniki ciepła	X	X
8.	Turbina	X	X
9.	Skraplacz	X	X
10.	Wymienniki ciepła w różnych układach technologicznych	X	X
11.	Zbiorniki technologiczne (ciśnieniowe i magazynowe)	X	X
12.	Rurociągi (pary, wody, chłodzenia itd.)	X	X
13.	Pompy	X	X
14.	Zawory	X	X
15.	Układy filtrowentylacyjne	X	X
16.	Konstrukcja metalowa budynku bezpieczeństwa	X	X

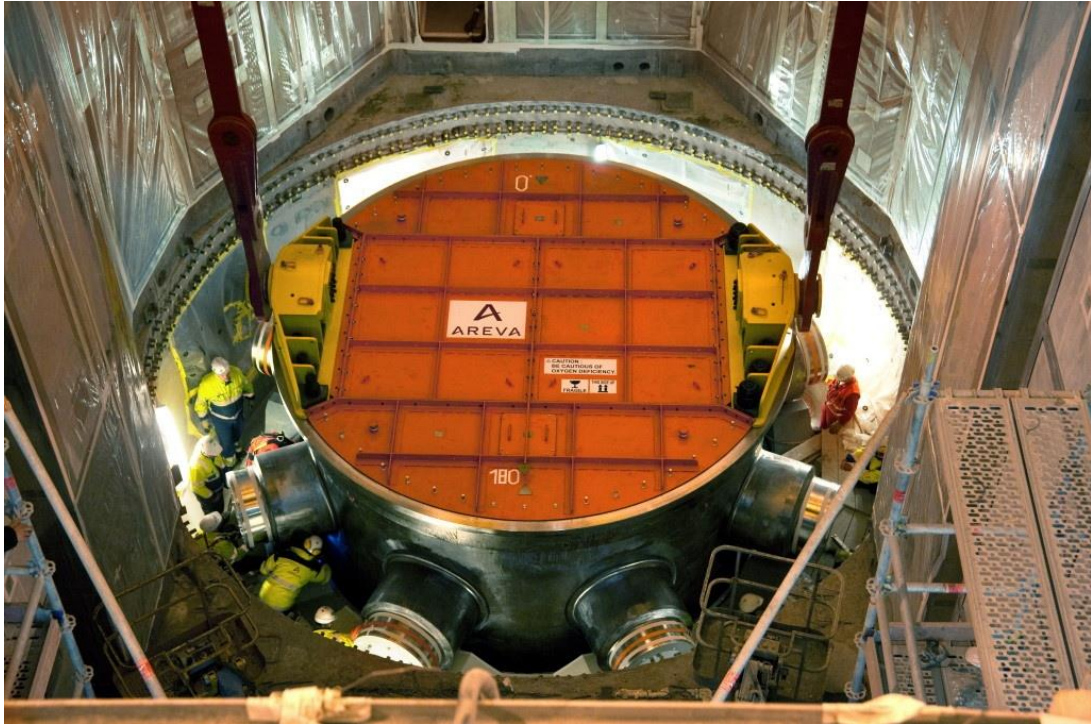
## Reaktor

Analiza podstawowych parametrów konstrukcyjno-technicznych reaktorów EPRTM, ABWR i AP1000 wskazuje (tabl. 2), że wszystkie reaktory są zbiornikami ciśnieniowymi o dużej masie. Najcięższym z ww. wymieniowych jest reaktor ABWR (rys. 7), którego masa całkowita wynosi 900 ton. Z kolei masa reaktorów EPRTM (rys. 8) i AP1000 (rys. 9) bez głowicy kształtuje się na poziomie 350÷400 ton. Proces wytwarzania dwóch ostatnich typów reaktorów polega na łączeniu za pomocą metod spawalniczych kilku kutyh pierścieni oraz dennicy ze stali węglowej, których maksymalna grubość sięga 250 mm. Spawanie elementów grubościennych zawsze jest czynnością skomplikowaną, a w przypadku reaktora jądrowego dodatkowo bardzo odpowiedzialną. Proces wytwarzania jest ponadto bardzo długotrwały, ponieważ od złożenia zamówienia na wykonanie odpowiednich odkuwek do momentu wyjechania gotowego reaktora z zakładu upływa zazwyczaj 4-5 lat. Oprócz procesów spawania, bardzo ważnym jest również proces napawania łukowego (platerowania) wewnętrznej powierzchni reaktora z zastosowaniem spoiw ze stali nierdzewnej.

W przypadku reaktora ABWR kutyh elementów jest mniej i są one nieco cieńsze (do 190 mm), ale proces wytwarzania nie staje się w związku z tym mniej skomplikowany i odpowiedzialny.



Rys. 7. Reaktor ABWR [8].



Rys. 8. Reaktor EPRTM [9].



Rysunek Rys. 9. Reaktor AP1000 [10].

Tablica 2

Podstawowe parametry konstrukcyjno-techniczne reaktorów jądrowych

Parametr	Jednostka miary	EPR™	ABWR	AP1000
<b>Waga:</b>				
- całość	ton	526	900	ok. 500
- korpus	ton	410	-	349
- głowica	ton	116	-	ok. 160
- transportowa	ton	-	1 264	-
<b>Wymiary:</b>				
- wysokość	mm	12 708	21 000	12 200
- średnica wewnętrzna	mm	4 885	7 112	3 988
- średnica	mm	-	-	4 500
- grubość ścianki	mm	250	190	-
Materiał korpusu	-	16 MND 5	low-alloy steel	-

## Wytwornica pary

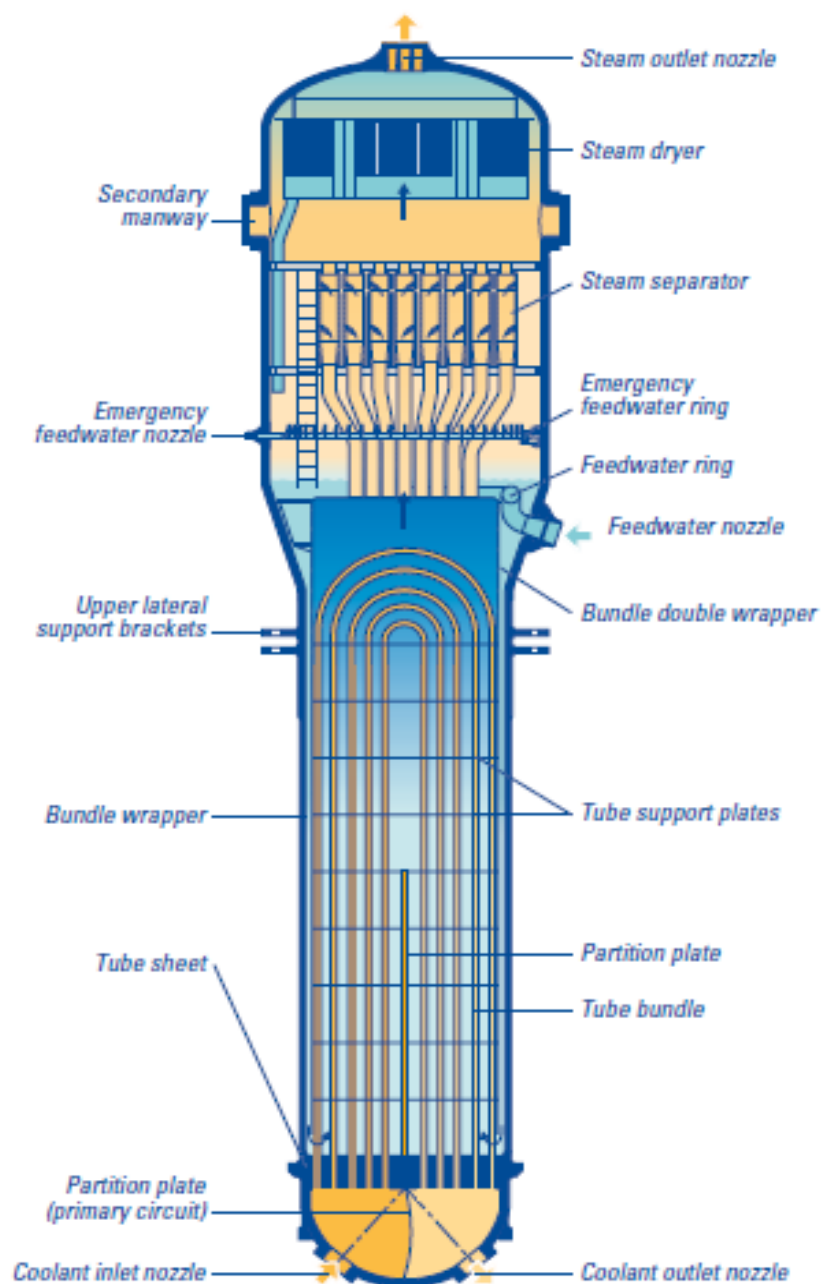
Wytwornica pary jest stosowana tylko w reaktorach typu PWR (rys. 10). W zależności od dostawcy technologii jądrowej, wytwornic może być cztery (EPRTM) lub dwie (AP1000). Podstawowe parametry konstrukcyjno-techniczne wytwornic przedstawiono w tabl. 3, z której wynika, że urządzenia te, podobnie jak w przypadku reaktora, są ciężkimi grubościennymi zbiornikami ciśnieniowymi, których waga wynosi od ok. 500 do nawet 730 ton. Jednym z ważniejszych elementów konstrukcyjnych wytwornic pary są rurki ze stopu niklu, których duża ilość ma na celu zapewnienie maksymalnie możliwej powierzchni wymiany ciepła oraz długotrwałą i niezawodną pracę (co najmniej kilkadziesiąt lat). Jakość wykonania tych rurek jest zatem nadzwyczaj istotną kwestią, a o stopniu skomplikowania zagadnienia i poziomu odpowiedzialności może świadczyć fakt, iż na całym świecie tylko kilka zakładów produkuje rurki przeznaczone do produkcji jądrowych wytwornic pary.

# ELEKTROWNIE JĄDROWE

Tablica 3

Podstawowe parametry konstrukcyjno-techniczne wytwornic pary

Parametr	Jednostka miary	EPRTM	ABWR	AP1000
Waga	ton	490	nie dotyczy	731,65
Wymiary:				
- wysokość	mm	23 000		24 238
- średnica	mm	5 168		5 575
Materiał korpusu	-	18 MND 5		-
Ilość rurek	szt.	5 980		10 025
Materiał rurek	-	Inconel 690		Inconel 690



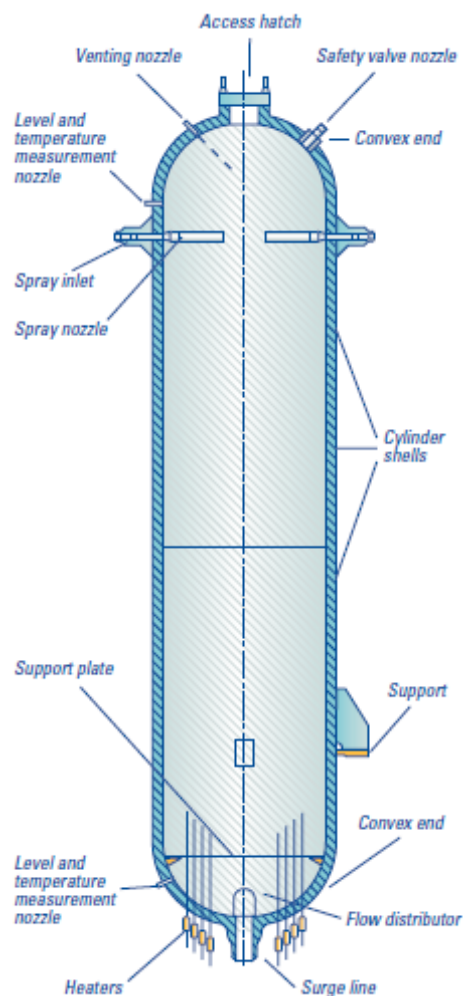
Rys. 10. Wytwornica pary reaktora EPRTM [1].



## Pozostałe urządzenia i rurociągi w wyspy jądrowej

Do pozostałych podstawowych urządzeń i głównych elementów w części jądrowej elektrowni z reaktorem typu PWR zalicza się: stabilizator ciśnienia (rys. 11), pompę główną układu chłodzenia reaktora (rys. 12) oraz główne rurociągi łączące reaktor z wytwornicą pary (rys. 4 i 5). W przypadku reaktora ABWR są to natomiast pompy recyrkulacyjne, których ilość wynosi 10 (rys. 13).

Stabilizator ciśnienia reaktora EPRTM jest zbiornikiem ciśnieniowym o masie 150 ton i wysokości ok. 14,5 m (rys. 11), którego korpus wykonano ze stali 18 MND 5. Z kolei stabilizator ciśnienia reaktora AP1000 waży 115 ton.



Rys. 11. Stabilizator ciśnienia reaktora EPRTM [1].

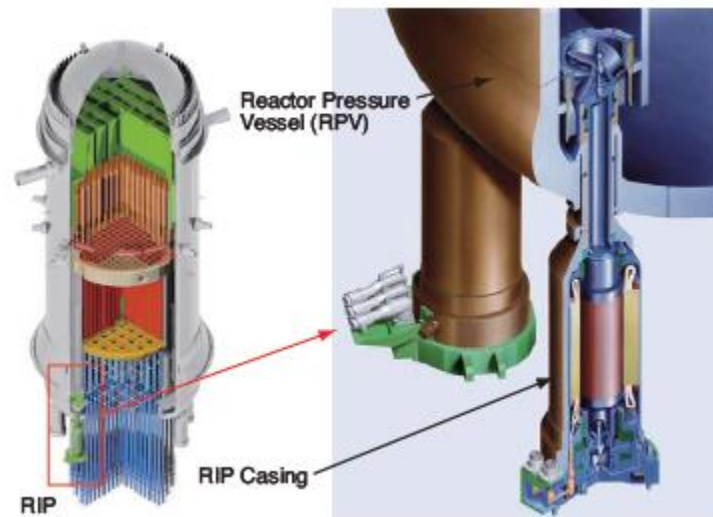
Pompa układu chłodzenia reaktorów PWR jest jednym z najbardziej odpowiedzialnych elementów obiegu jądrowego. Osobliwością jej konstrukcji jest korpus będący elementem odlewano-kutym, którego wykonanie wymaga m.in. posiadania pras o odpowiedniej mocy, specjalnych urządzeń oraz obszernej wiedzy i dużego doświadczenia. Pompa w układzie chłodzenia reaktora EPRTM waży 112 ton i ma wysokość 9,3 m. Z kolei odlew korpusu tego typu pompy w układzie chłodzenia reaktora AP1000 waży 16 ton. Pompy są montowane w każdej pętli pomiędzy reaktorem a wytwornicą pary (rys. 4 i 5).

## Cross-section of reactor coolant pump

1. Flywheel
2. Radial bearings
3. Thrust bearing
4. Air cooler
5. Oil cooler
6. Motor (stator)
7. Motor (rotor)
8. Motor shaft
9. Spool piece
10. Pump shaft
11. Shaft seal housings
12. Main flange
13. Seal water injection
14. Thermal barrier
15. Diffuser
16. Impeller
17. Pump casing
18. Outlet nozzle
19. Inlet nozzle



Rys. 12. Pompa główna układu chłodzenia reaktora EPRTM [1].



Rys. 13. Pompa recyrkulacyjna (RIP – Reactor Internal Pump) reaktora ABWR [6].

Główne rurociągi reaktorów typu PWR, podobnie jak pierścienie korpusu reaktora, są elementami kutymi wykonanymi ze stali nierdzewnej (np. Z2 CN 19-10 w przypadku EPRTM) o średnicy od 560 do 976 mm i grubości ścianki od 69 do 96 mm w zależności od typu reaktora i przeznaczenia rurociągu. Trzy ramiona rurociągów reaktora EPRTM (one cold leg, one hot leg oraz one cross-over leg) ważą nieco poniżej 40 ton, a gorące ramie rurociągu (hot leg) ma długość około 30 m i składa się z 7 sekcji scalonych ze sobą za pomocą technologii spawania.

## Podstawowe urządzenia i rurociągi w wyspy turbinowej

Podstawowym elementem wyspy turbinowej jest oczywiście turbina, której głównymi dostawcami w Europie i nie tylko, są firmy Alstom i Siemens. Siemens oferuje dostawę turbiny STT-9000 o mocy 1720 MW składająca się z jednej sekcji wysokoprężnej (HP Turbine) i trzech niskoprężnych (LP Turbine) o łącznej długości 68,8 m i maksymalnej średnicy wirnika z łopatkami 6720 mm oraz o następującej wadze poszczególnych elementów: HP Rotor = 92,5 ton, HP Turbine = 378,8 ton, LP Rotor (1) = 340 ton oraz LP Turbine (1) = 1268 ton [11]. W skład zespołu turbinowego wchodzi ponadto 6 skraplaczy o wadze ok. 250 ton każdy (rys. 14). Istotnym elementem skraplaczy są rurki, które z uwagi na szczególnie ciężkie warunki pracy są co raz częściej wykonywane z tytanu (w zamian stali nierdzewnej lub stopu miedzi z niklem), a których spawanie wymaga szczególnej dbałości i przestrzegania ustalonych zaleceń technologicznych. W tym miejscu należy nadmienić, iż w tym obszarze przemysł rodzimy ma spore doświadczenie i możliwości wykonawcze.



Rys. 14. Skraplacz LP turbiny w elektrowni Olkiluoto 3 [1].

Z kolei Alstom oferuje turbinę ARABELLETM o mocy 1750 MW [12], której wirnik waży tylko 120 ton. Turbina ta jest krótsza i lżejsza niż turbiny poprzedniej generacji dla elektrowni jądrowych, co nie oznacza, że proces jej produkcji jest łatwiejszy.

Oprócz turbiny i skraplaczy, w skład wyspy turbinowej wchodzi różnego rodzaju i wielkości wymienniki ciepła, separatory, demineralizatory, rurociągi technologiczne wraz z zaworami, pompami i mocowaniami (piping, valves, pumps and support piping), jak również układy filtrowentylacyjne i chłodzące (Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems).

## Podsumowanie

Z przedstawionej powyżej bardzo krótkiej analizy parametrów konstrukcyjno-technicznych podstawowych urządzeń spawanych elektrowni jądrowej wynika, że krajowe firmy w chwili obecnej nie są w stanie lub posiadają bardzo ograniczone możliwości techniczno-sprzętowe do wytwarzania takich elementów elektrowni jak: reaktor, generator pary, główne pompy i rurociągi, turbina. Powodów jest kilka, nawet pomijając kwestie najważniejszą, którą jest odpowiedzialność dostawcy technologii jądrowej w zakresie poprawności i niezawodności działania obiegu jądrowego, co w praktyce oznacza, że wszystkie lub prawie wszystkie najważniejsze elementy tego układu są wytwarzane przez dostawcę technologii jądrowej. Pierwszy z powodów to duża masa wymienionych wyżej urządzeń (od 350 do 900 ton), która wymaga posiadania przez zakłady suwnic w halach i miejscach załadunku o udźwigu co najmniej 500 ton. Kolejny powód to brak w kraju producenta odkuwek do wytwarzania jądrowych zbiorników ciśnieniowych oraz korpusów pomp. Wielkość elementów turbiny są również ciężkie, wielkogabarytowe i zaawansowane technicznie, do

których wytwarzania konieczne jest posiadanie odpowiednich urządzeń i technologii. Na dodatek jako potencjalni dostawcy urządzeń lub usług, przedsiębiorstwa krajowe, poza nielicznymi wyjątkami, nie mają praktycznych doświadczeń w zakresie projektowania i wytwarzania wielu urządzeń i konstrukcji dla elektrowni jądrowych oraz nie posiadają odpowiednich systemów zarządzania systemami jakości w branży jądrowej.

Podczas budowy elektrowni z reaktorami ABWR oraz AP1000 stosuje się ponadto system modułowy, polegający na budowie w warunkach warsztatowych (ewentualnie na placu budowy lub w pobliżu na specjalnie wyposażonych i uzbrojonych placach) poszczególnych komponentów elektrowni i dostarczeniu ich na plac budowy w całości lub częściach o sporej wielkości i wadze. Masa tych modułów nie rzadko przekracza 500 ton.

W przypadku reaktora AP1000, na przykład, dolny fragment obudowy bezpieczeństwa (containment vessel bottom head) waży ok. 700 ton, a górny (containment vessel top head) około 655 ton i ma średnicę około 40 m i wysokość 11,5 m. Ogólnie na plac budowy ww. elektrowni dostarcza się 25 modułów z urządzeniami mechanicznymi i rurociągami oraz 145 modułów strukturalnych, w tym konstrukcji stalowych ścian (Wall Module), niektóre z których ważą ponad 700 ton.

W przypadku budowy elektrowni jądrowej z reaktorem ABWR, masa poszczególnych modułów również jest podobna: Upper drywell – 650 ton, Central mat module – 460 ton, Top slab – 550 ton, RCCV Lower liner – 630 ton, Condenser upper body block – 270 ton, Condenser lower body block – 260 ton, Moisture separator re-heater – 360 ton itd. [13]

Transport tak ciężkich i wielkogabarytowych urządzeń i konstrukcji jest w większości przypadków możliwy tylko drogą wodną (rzeka, kanał lub morze), a zatem proces wytwarzania musi odbywać się w zakładach posiadających dostęp do odpowiedniej infrastruktury portowej (załadunek/rozładunek).

Z powyższego wynika, że z uwagi bardzo ograniczone możliwości techniczne w zakresie wytwarzania ww. wielkogabarytowych urządzeń, konstrukcji i modułów elektrowni jądrowych, krajowe przedsiębiorstwa z branży metalowej w chwili obecnej byłyby w stanie wykonać tylko niektóre konstrukcje stalowe lub ich elementy, jak również tylko niektóre zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe oraz wymienniki ciepła o niedużej i średnie masie (w zależności od typu elektrowni ich sumaryczna ilość może dochodzić nawet do 100) oraz niektóre rodzaje pomp i zaworów, których ogólna ilość w obydwu częściach elektrowni jądrowej może przekraczać 5 tysięcy i sięgać nawet 12 tys. W zakresie możliwości wykonawczych są ponadto elementy układów filtrowentylacyjnych i ich montaż, jak również prefabrykację i montaż (w tym spawanie) większości rurociągów (piping and suport piping), których ogólna długość w elektrowni jądrowej szacowana jest na od 150 do 200 km, w tym ponad połowa ze stali nierdzewnych. Należy jednak pamiętać, iż „możliwość wykonania” nie oznacza „wykonanie”. W tym celu przedsiębiorstwa krajowe powinny spełnić warunki formalne, w tym znaleźć się na liście kwalifikowanych dostawców odpowiedniego dostawcy technologii jądrowej lub konwencjonalnej, czego podstawą jest m.in. doświadczenie w produkcji urządzeń o podobnym przeznaczeniu i obszarze stosowania, jak również posiadanie odpowiedniego dla branży jądrowej systemu zarządzania jakością oraz przeszkolonej kadry o odpowiednich kompetencjach.

## Literatura

1. Nuclear Power Plant Unit Olkiluoto 3. TVO, 2010.
2. [www.ge-energy.com/products\\_and\\_services/products/nuclear\\_power\\_plants/ABWR\\_Nuclear\\_Power\\_Plant.jsp](http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/nuclear_power_plants/ABWR_Nuclear_Power_Plant.jsp)
3. [http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/ap1000\\_glance.html](http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/ap1000_glance.html)
4. [www.tvo.fi](http://www.tvo.fi)
5. Gaio P. AP1000: The PWR Revisited. IAEA International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century, 27 October 2009.
6. Advanced Boiling Water Reactor. The only generation III+ Reactor in Operation today. Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., Catalog No.: 83Z-Z1-0022 R0, 2013.
7. Zarzycki M. Jądrowe reaktory energetyczne – budowa, zasada działania, eksploatacja. Fundacja Forum Atomowe.
8. [http://i924.photobucket.com\\_albums\\_ad81\\_rdbrewer\\_rpv800.jpg](http://i924.photobucket.com_albums_ad81_rdbrewer_rpv800.jpg)
9. [www.epr-reactor.co.uk](http://www.epr-reactor.co.uk)
10. [www.china.org.cn\\_business\\_2012-01\\_15\\_content\\_24410509.htm](http://www.china.org.cn_business_2012-01_15_content_24410509.htm)
11. Siemens. The Turbine Island for Nuclear Power Plants. Warszawa, 1-2 czerwca 2006.
12. ARABELLE™ Steam Turbine for Nuclear Power Plant. ALSTOM 2012.
13. [http://www.hitachi-hgne.co.jp/en/business/plant\\_construction/time/module/index.html](http://www.hitachi-hgne.co.jp/en/business/plant_construction/time/module/index.html)

**Marek J. Sadowski**

Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku

## GORĄCA PLAZMA I ENERGIA TERMOJĄDROWA: GŁÓWNE KIERUNKI BADAWCZE I HISTORIA BADAŃ PROWADZONYCH W ŚWIERKU

### Wprowadzenie

W fizyce i technice *plazmą nazywa się zjonizowany gaz*, który w wysokich temperaturach może ulegać całkowitej jonizacji i składać się ze swobodnych elektronów i jąder atomowych, często z domieszkami ciężkich jonów. Badania wysoko-temperaturowej plazmy mają nie tylko duże znaczenie poznawcze, (bo plazma to „czwarty stan skupienia materii”), ale również ogromne znaczenie ekonomiczne. *Reakcje syntezy jądrowej (łączenia jąder lekkich)* np. izotopów wodoru mogą stanowić praktycznie niewyczerpalne źródło energii bez stwarzania zagrożeń ekologicznych, które są związane z eksploatacją zwykłych reaktorów jądrowych wykorzystujących reakcje rozszczepienia ciężkich jąder atomowych.

Badania gorącej plazmy są prowadzone intensywnie od kilkadziesiąt lat w wielu laboratoriach na całym świecie [1-5]. W Polsce takie badania podjęto w latach 50-tych ubiegłego wieku, kiedy z inicjatywy Prof. Andrzeja Sołtana zorganizowano pierwsze laboratorium plazmowe w Instytucie Badań Jądrowych (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku). Od 1976 r. badania gorącej plazmy prowadzi także Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie, a od kilku lat Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie i kilka mniejszych grup badawczych w różnych ośrodkach akademickich. Badacze zajmujący się plazmą (również w jej zastosowaniach technologicznych) współpracują naukowo z wieloma ośrodkami za granicą. Od ponad 20 lat w Polsce organizowane są, co dwa lata międzynarodowe konferencje naukowe nt. badań i zastosowań plazmy. Niedawno, w dniach od 2 do 6 września odbyła się w Warszawie International Conference PLASMA-2013, która skupiła ponad 130 badaczy z 24 różnych krajów.

Ze względu na duże zainteresowanie omawianymi badaniami warto podać kilka podstawowych pojęć, dokonać przeglądu najważniejszych kierunków badań, a dla upamiętnienia sylwetki Prof. Andrzeja Sołtana – przedstawić krótko historię badań plazmy w Świerku.

### Podstawowe pojęcia

We wstępie podkreśliśmy, że ważnym parametrem plazmy jest jej temperatura. W wypadku nierównowagi termodynamicznej *temperatura elektronowa* plazmy może być różna od jej *temperatury jonowej*. Pod względem temperatury wyróżnia się dwa główne rodzaje plazmy: *plazmę niskotemperaturową (cold plasma)* - występującą często bez równowagi termicznej (*non-equilibrium plasma*) lub w stanie częściowej równowagi termodynamicznej (*quasi-equilibrium plasma*), oraz *plazmę wysokotemperaturową (high-temperature plasma)* - występującą przejściowo bez równowagi termodynamicznej lub w stanie pełnej równowagi (*equilibrium plasma*).

W wysokotemperaturowej plazmie swobodne jądra atomowe mogą uzyskać dostateczną energię (i temperaturę), aby pokonać siły odpychania kulombowskiego i wchodzić w *reakcje syntezy jądrowej*. Jeżeli wysokotemperaturowa plazma deuterowa lub deuterowo-trytowa osiąga stan równowagi termodynamicznej mogą w niej występować reakcje syntezy nazywane *reakcjami termojądrowymi*.

Za początek badań nad możliwością realizacji reakcji syntezy jądrowej można uważać rok 1920, kiedy zaczęto podejrzewać, że źródłem energii emitowanej przez Słońce są reakcje jądrowe (A.S. Eddington). Potwierdzeniem tych przypuszczeń były obserwacje w 1929 r. - prowadzące do wniosku, że obserwowany spektroskopowo na Słońcu wodór musi uczestniczyć w tych reakcjach (H.N. Russel). Pierwszą reakcją syntezy jądrowej, polegającą na połączeniu się dwóch lekkich jąder w jedno cięższe, w laboratorium przeprowadzono dopiero w 1934 r. (E. Rutherford i M.I. Oliphant). Opis cyklu reakcji zachodzących w Słońcu przedstawił w 1938 r. H. Bethe, wyjaśniając dlaczego towarzyszy im emisja energii. Należy tu przypomnieć, że przy bardzo wysokich temperaturach i ciśnieniu materia znajduje się w stanie całkowitej jonizacji, tworząc *gorącą plazmę*, która w Słońcu (i wielu innych gwiazdach) jest utrzymywana siłami grawitacyjnymi, co umożliwia zachodzenie *reakcji termojądrowych* [1-5].

Pierwsze *reakcje termojądrowe* w warunkach ziemskich przeprowadzono 1 listopada 1952 r., realizując wybuch pierwszej *bomby termojądrowej*. Bomba ta (nazywana również *bombą wodorową*) wykorzystywała reakcje termojądrowe cięższych izotopów wodoru: deuteru i trytu.

Warto dodać, że teoretyczne podstawy tego doświadczenia zostały przygotowane przez amerykańskiego fizyka Edwarda Tellera (pochodzenia węgierskiego) oraz matematyka Stanisława Ulama (pochodzącego ze Lwowa). Fotografie wybuchu pierwszej bomby termojądrowej przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Wybuch pierwszej amerykańskiej bomby termojądrowej na atolu Eniwetok.

<http://www.youtube.com/watch?v=RHxaY36Z4tQ> (film z wybuchu USA)

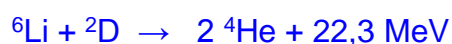
<http://www.youtube.com/watch?v=TWKHfNVZWxY> (film z wybuchu ZSRR)

[http://www..info/16\\_fakty/48\\_Teoria\\_elektronia\\_jadrowa\\_Teoria\\_elektronia\\_atomowa/8087\\_XI\\_ENER\\_GIA\\_elektronieatomowe\\_TERMOJADROWA.html](http://www..info/16_fakty/48_Teoria_elektronia_jadrowa_Teoria_elektronia_atomowa/8087_XI_ENER_GIA_elektronieatomowe_TERMOJADROWA.html)

Dziesięć miesięcy później w ZSRR dokonano również doświadczalnej *eksplozji termojądrowej*, wykorzystującej reakcje z jądrami litu: Po realizacji przez USA i ZSRR próbnych wybuchów termojądrowych, badania gorącej plazmy były podejmowane w wielu krajach jako tajne programy badawcze, pod ścisłym nadzorem wojskowym [4-5].

W tym okresie dla fizyków oczywiste było, że w warunkach ziemskich do najważniejszych reakcji syntezy jądrowej należą reakcje między jądrami deuteru, trytu i helu oraz litu:





Na podstawie znanych przekrojów czynnych wiadomo było, że najłatwiej można zrealizować reakcje syntezy D-T oraz D-D, których wydajność szybko rośnie ze wzrostem energii cząstek, ale uzyskanie dodatniego bilansu energetycznego przez bombardowanie wiązką jonów tarczy stałej w konwencjonalnym akceleratorze było niemożliwe. Dla uzyskania znaczących ilości energii z omawianych reakcji trzeba najpierw wytworzyć odpowiednio *gorącą plazmę deuterową lub deuterowo-trytową*. W takiej gorącej plazmie występują jednak wielkie straty energii na promieniowanie (o bardzo szerokim widmie częstotliwości). Przez porównanie strat i wydajności energetycznych określono tzw. „temperaturę zapłonu” reakcji termo-jądrowych, która dla reakcji D-T (w mieszaninie zawierającej po 50% D i T) wynosi ok. 350 mln K, a dla reakcji D-D (w czystym deuterze) - ok. 45 mln K [2-5].

### Badania nad opanowaniem kontrolowanych reakcji termojądrowych

Już w latach 50-tych ubiegłego wieku wiadomo było, że paliwo termojądrowe jest łatwo dostępne. Z 1 litra wody można wydzielić ok. 0,3 g deuteru, a całkowite zasoby deuteru na Ziemi wynoszą ok.  $10^{17}$  kg, co odpowiada zasobom energetycznym rzędu  $10^{24}$  kWh. Wiadomo było również, że *reakcje termojądrowe* w czasie wybuchów „*bomb wodorowych*” mogą wyzwalać w sposób niszczący ogromne ilości energii i zdawano sobie sprawę, że dopiero opanowanie *kontrolowanych reakcji termojądrowych* może dostarczyć ludzkości energii na miliardy lat [2-5].

Głównym celem stała się budowa kontrolowanego reaktora termojądrowego o dodatnim bilansie energii. Dla fizyków oczywiste było, że do wytwarzania gorącej plazmy można stosować różne metody [2-5]. Można np. wykorzystać bardzo silne wyładowania elektryczne między elektrodami (o różnych kształtach) lub wyładowania bez-elektrodowe (wywoływane indukcyjnie). W przeciwieństwie do metali, ze wzrostem temperatury oporność elektryczna plazmy szybko maleje (jak  $1/T^{3/2}$ ). W efekcie oporność właściwa plazmy o temperaturze kilkunastu mln K jest tak mała, że nie można jej dalej nagrzewać przez przepuszczanie nawet bardzo silnych prądów i trzeba stosować inne metody, np. naświetlanie plazmy intensywnymi wiązkami promieniowania mikrofalowego.

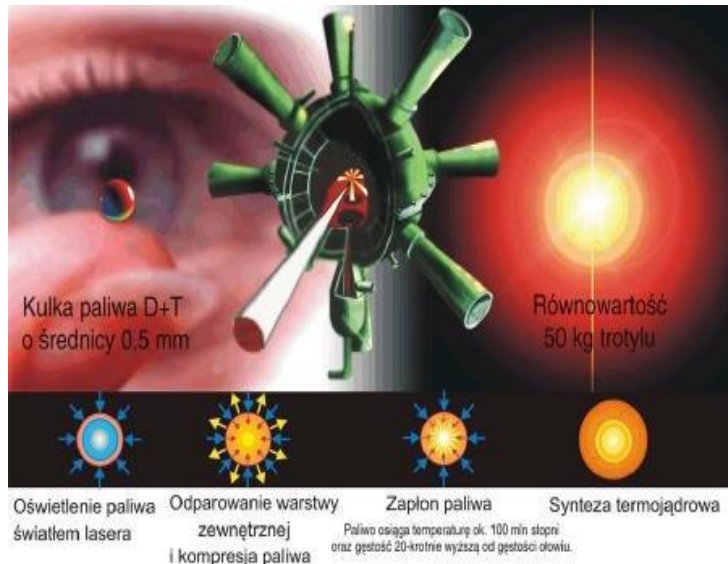
Do wytwarzania gorącej plazmy można też stosować tarcze stałe i bardzo silne wiązki promieniowania laserowego lub wysokoenergetycznych cząstek, np. elektronów, protonów, deuteronów, trytonów lub ciężkich jonów (z pewnymi ograniczeniami). Przy generacji gorącej plazmy wiązkami promieniowania należy uwzględnić, że reakcje syntezy mogą zachodzić tylko w czasie zderzeń jąder i przy mniejszej koncentracji (*n*) plazmy - czas jej utrzymywania (*t*) musi być

odpowiednio dłuższy. Warunek ten opisuje tzw. kryterium Lawsona, wg którego dla reakcji *D-D* potrzeba  $nt > 10^{16}$  cząstek  $\cdot$ s/cm<sup>3</sup>, a dla reakcji *D-T* -  $nt > 3 \times 10^{14}$  cząstek  $\cdot$ s/cm<sup>3</sup>.

Po uzyskaniu wysokiej temperatury i ciśnienia plazmy podstawowym problemem jest utrzymanie takich warunków dostatecznie długo, aby możliwe było odbieranie wyzwolanej energii w sposób quasi-ciągły. Ze względu na bardzo wysokie temperatury (i ciśnienie) plazma nie może mieć bezpośredniego kontaktu z jakąkolwiek materią stałą. Pozostaje więc opanować sposoby jej utrzymywania przez odpowiedni okres czasu.

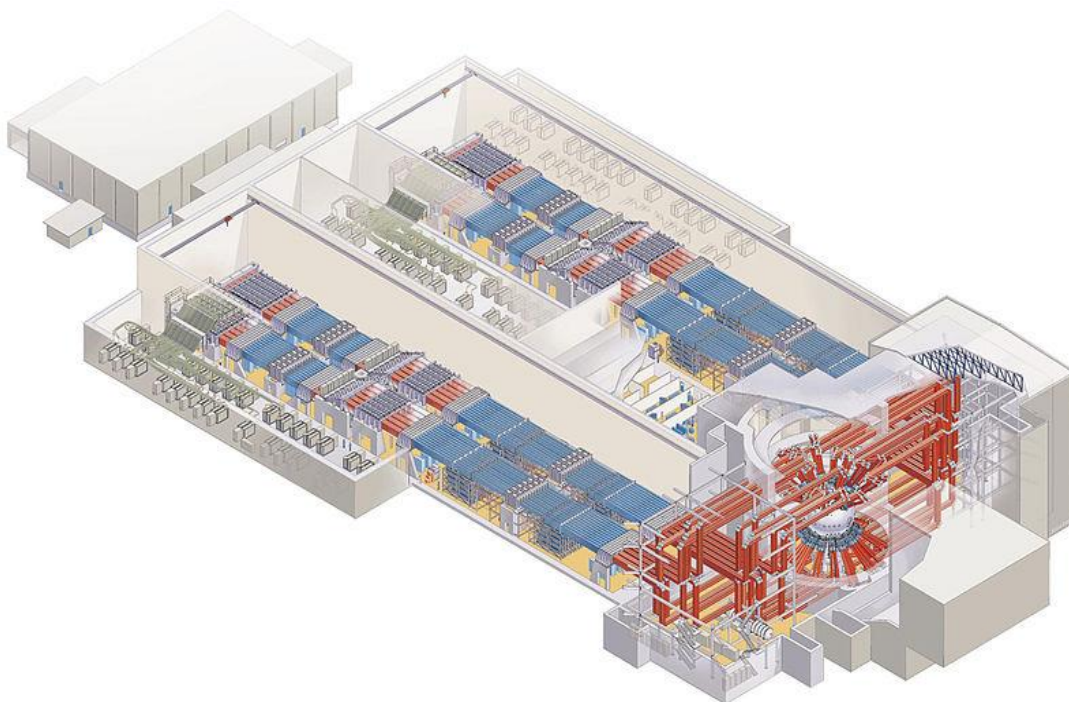
Jak wspomniano wyżej, w skali kosmosu naturalnym sposobem utrzymania plazmy jest *grawitacyjne uwięzienie plazmy* (*gravitational confinement*), które występuje w gwiazdach i naszym Słońcu, ale oczywiście nie może być wykorzystywane w warunkach ziemskich. Opracowanie metod utrzymania gorącej plazmy jest przedmiotem licznych badań teoretycznych i doświadczalnych. W ich wyniku opracowano dwie podstawowe metody uwięzienia takiej plazmy: *utrzymywanie inercyjne* (*inertial confinement*) i *utrzymywanie magnetyczne* (*magnetic confinement*) [3, 5]. Prowadzone są również badania nad metodą mieszaną (*polywell*), łączącą cechy obu wymienionych wyżej metod.

Inercyjne uwięzienie plazmy (*ICF - Inertial Confinement Fusion*) polega na ogrzaniu niewielkiej ilości „*paliwa termojądrowego*” do bardzo wysokiej temperatury (i ciśnienia) i wykorzystaniu inercji jego rozpadu. Mikro-tarcza *paliwa termojądrowego* może być podgrzewana i ściskana przez skoncentrowane na niej symetrycznie bardzo silne impulsy laserowe lub ciężkich jonów, umożliwiające wywołanie krótkotrwałej reakcji syntezy jądrowej. Przebieg reakcji syntezy z utrzymaniem inercyjnym przedstawiono ideowo na Rys. 2.



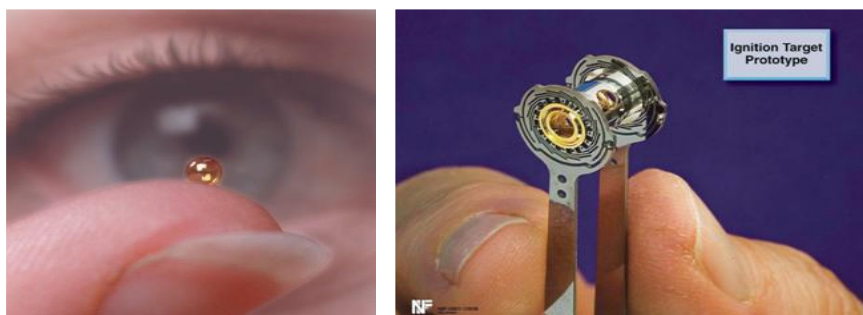
**Rys. 2. Przebieg reakcji syntezy przy wykorzystaniu silnych wiązek laserowych.**  
(<http://www.polskiatom.pl/lofiversion/index.php?t9671.html>)

Pierwsze wielkie urządzenie tego typu (układ *SHIVA*) zostało zbudowane w roku 1978 w Lawrence Livermore National Laboratory w USA. Od roku 2009 prowadzone są tam badania przy użyciu największego obecnie urządzenia (układ *NOVA*), który po przebudowie otrzymał nazwę *NIF* (*National Ignition Facility*). Schemat budowy wielkiego układu *NOVA*, wykorzystującego 192 wiązki laserowe, pokazano na Rys. 3.



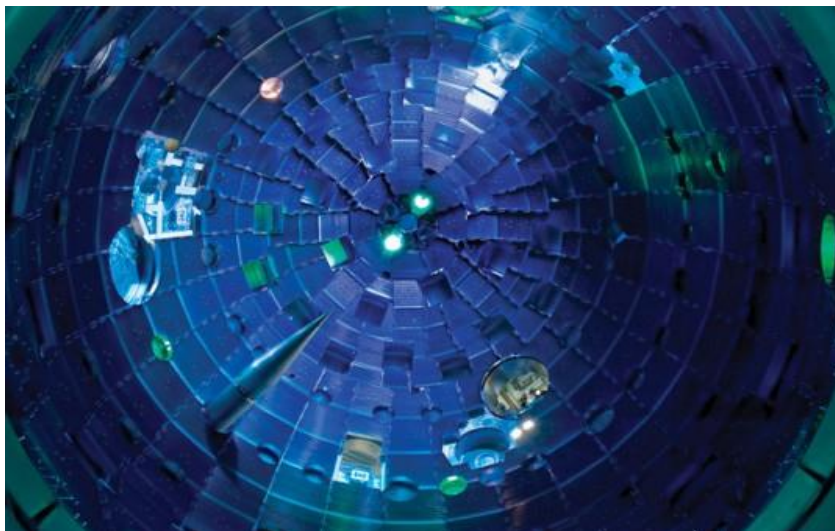
Rys.3. Schemat budowy wielkiego układu laserowego NOVA (obecnie NIF).  
[http://pl.wikipedia.org/wiki/Kontrolowana\\_synteza\\_termojadrowa](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kontrolowana_synteza_termojadrowa)

Budowa odpowiednich mikro-tarczy laserowych wymaga specjalnej technologii. Paliwo termojądrowe (mieszanka deuteru i trytu) zamknięte w szklanej kuleczce można nagrzewać (i komprimować) bezpośrednio (*direct drive*), albo pośrednio (*indirect drive*) - po umieszczeniu jej wewnątrz metalowego cylinderka, w którym następuje najpierw konwersja energii wiązek laserowych na bardzo intensywne promieniowanie X. Fotografie ukazujące takie mikro-tarcze laserowe przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Mikro-tarcza do eksperymentów laserowych i jej obudowa.  
<http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal1/pz09/Kossakowski-MiTJ1.pdf>

W obu omówionych wyżej wypadkach mikro-tarcza termojądrowa jest umieszczana wewnątrz odpowiednio dużej komory próżniowej, do której wprowadza się intensywne wiązki laserowe. Widok wnętrza komory eksperymentu NOVA (NIF) przedstawiono na Rys. 5.



Rys.5. Wnętrze kulistej komory NOVA, o średnicy ok. 10 m. Mikro-tarcza termojądrowa umieszczana jest na specjalnym ostrzu (w dole z lewej strony).

<http://www.geekweek.pl/aktualnosci/8956/male-slonce-odpalone-pomoze-odkryc-kontrolowana-fuzje>

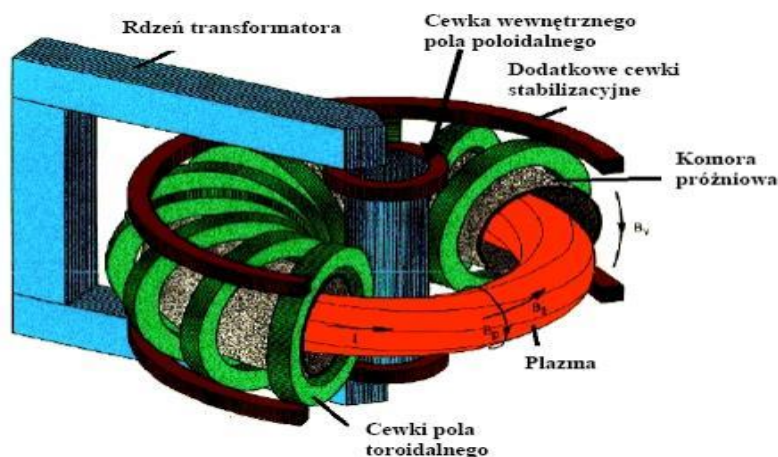
Ze względu na szybki rozwój technologii laserów wielkie instalacje laserowe zostały zbudowane także w innych krajach, np. w Rosji (DELFIN), Francji (PHEBUS, LULI), Japonii (od GEKKO-II do GEKKO-XII), Wielkiej Brytanii (VULCAN, HELEN) itd.. Kiedy okazało się, że krótko-falowe promieniowanie jest lepiej absorbowane przez materię - wiele prac zostało ukierunkowane na wykorzystanie wyższych harmoniczych.

Wykorzystując zmodyfikowane mikro-tarcze termojądrowe i 12 wiązek laserowych o łącznej mocy 50 TW już kilka lat temu w układzie GEKKO-XII uzyskano ponad  $10^{12}$  neutronów z reakcji syntezy w czasie jednego wyładowania. Eksperymenty wykonane w wielkim układzie NOVA w USA oraz symulacje komputerowe wykazały, że dla realizacji „zapłonu termojądrowego” w układzie NIF potrzebne są impulsy laserowe o mocy powyżej 500 TW i czasie trwania poniżej 4 ns. Niedawno w układzie NIF, wykorzystując 192 wiązki laserowe o energii 1.7 MJ i dostarczając 350 TW ultrafioletowego promieniowania, z implodującej mikro-tarczy uzyskano  $3 \times 10^{15}$  neutronów z wyładowania, ale nie uzyskano pełnego zapłonu i dodatniego bilansu energii [6].

W związku z omówionymi trudnościami podjęto bardziej intensywne prace nad nową koncepcją tzw. „szybkiego zapłonu” (*fast ignition*), polegającą na wykorzystaniu lasera wielkiej mocy do wstępnego podgrzania i kompresji gorącej plazmy D-T, a następnie zastosowaniu krótszego, ale bardzo silnego (rzędu  $10^{15}$  W) impulsu laserowego, który przenikając przez obłok gorącej plazmy mógłby do pełnego zapłonu termojądrowego. Taka metoda ma być stosowana w wielkich eksperymentach laserowych nowej generacji, m.in. w Europie.

Równocześnie prowadzone są prace nad skonstruowaniem nowych potężnych laserów (np. KrF) oraz opracowaniem laserów DPSSL (laserów na ciele stałym pompowanych za pomocą diód półprzewodnikowych). Kilka wielkich laboratoriów (np. ILE w Japonii oraz LLNL w USA) rozpoczęło już projektowanie wielkich systemów DPSSL na potrzeby syntezy termojądrowej.

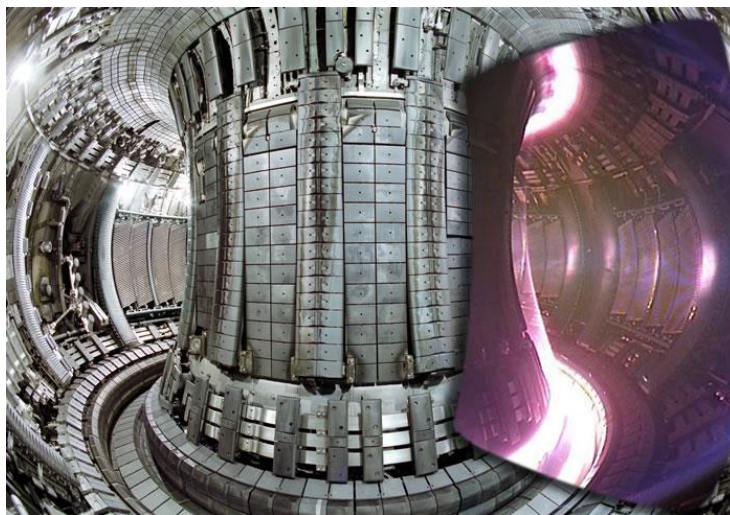
Bardzo intensywnie prowadzone są również badania nad **magnetycznym utrzymywaniem plazmy** [2-3, 5]. W tym celu wykorzystuje się głównie toroidalne pułapki magnetyczne, tzw. *tokamaki* (od rosyjskiej nazwy Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami), których budowę zaproponowali w 1950 r. dwaj rosyjscy fizycy A. Sacharow i I. Tamm. Zasadę działania *tokamaka* przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 6. Zasada działania tokamaka.

<http://www.polskiatom.pl/lofiversion/index.php?t9671.html>  
<http://www.youtube.com/watch?v=Yju-Xf33Zv8> (film z budowa KSTAR)

W tokamaku plazma jest wytwarzana w postaci zamkniętego pierścienia i utrzymywana polem magnetycznym wytwarzanym przez cewki nanizane na toroidalną komorę próżniową oraz dodatkowe cewki umieszczone w płaszczyznach horyzontalnych. Oprócz indukowania prądu przez wielki transformator stosuje się dogrzewanie plazmy, np. za pomocą intensywnego promieniowania mikrofalowego. Pierwszy *tokamak* uruchomiono w 1956 r. w Instytucie im. Kurczatowa w Moskwie. W minionych latach zbudowano i zbadano wiele różnych *tokamaków*. Największym obecnie układem tego typu jest obecnie *JET (Joint European Torus)* zbudowany w Culham w Wielkiej Brytanii jako wspólne przedsięwzięcie Unii Europejskiej. Zdjęcie wnętrza tego układu przedstawiono na Rys. 6.

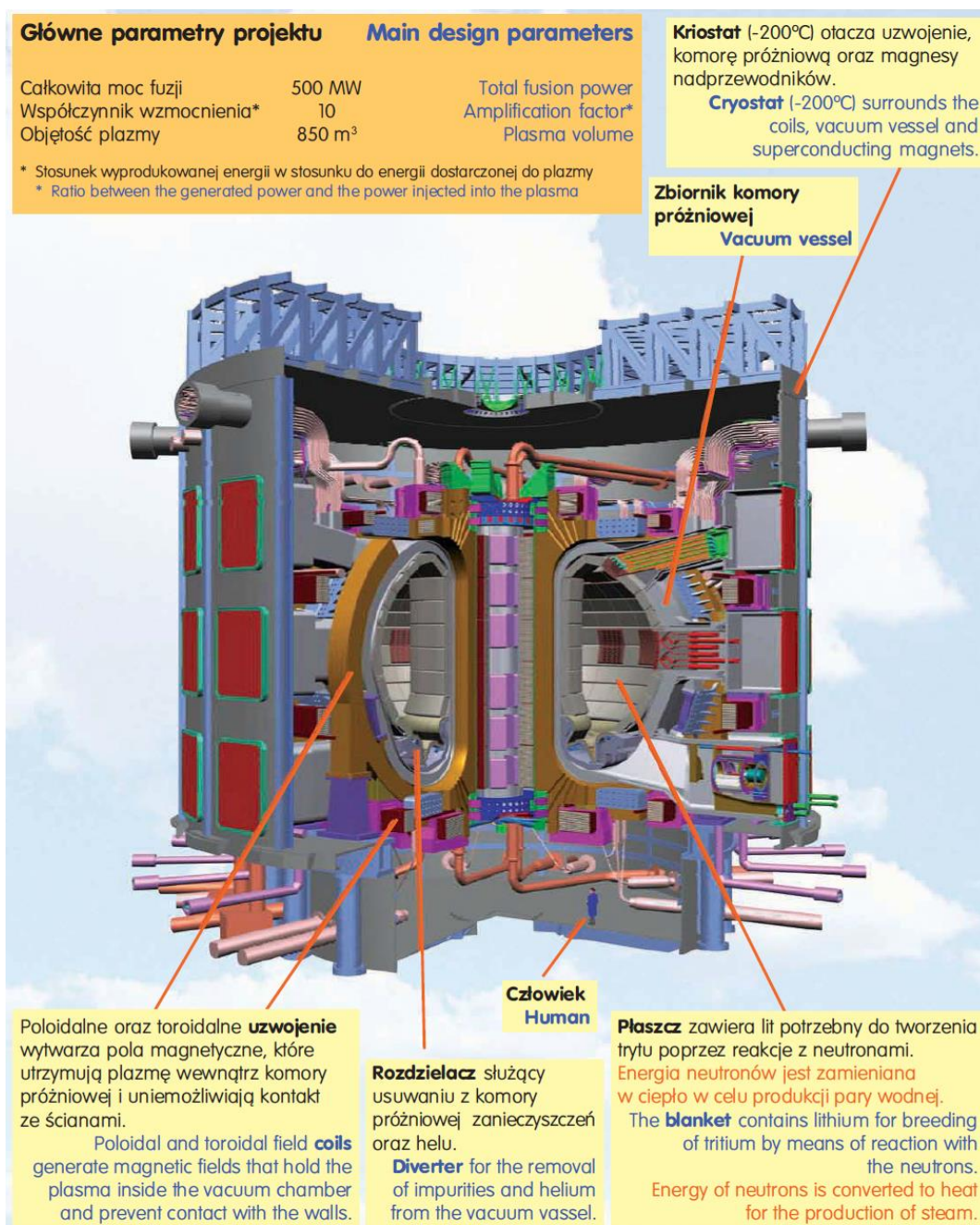


Rys. 7. Wnętrze toroidalnej komory tokamaka JET oraz fotografia wyładowania.

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:JointEuropeanTorus\\_ternal.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:JointEuropeanTorus_ternal.jpg)

W 1991 r., stosując mieszaninę D-T w układzie *JET* uzyskano z reakcji syntezy moc ok. 1,8 MW przez okres ok. 1 s. W 1994 r. w tokamaku *TFTR* w USA uzyskano moc ok. 10 MW w impulsach ok. 0,7 s. W 1997 r. w *JET* uzyskano nawet 16 MW przez ok. 2 s [7-8]. W układach tych do podgrzewania plazmy stosowano wysoko-energetyczne wiązki atomów deuteru o łącznej mocy 22 MW i promieniowanie

mikrofalowe o mocy 3 MW, a więc daleko było do osiągnięcia dodatniego bilansu energetycznego. Niemniej, dobre wyniki badań w układach **JET**, **TFTR**, **ASDEX-UPGRADE** (w Niemczech) i **TORE-SUPRA** (we Francji) przyspieszyły podjęcie decyzji o budowie wielkiego układu **ITER** (*International Termonuclear Experimental Reactor*) [9]. Schemat tego układu przedstawiono na Rys. 7.



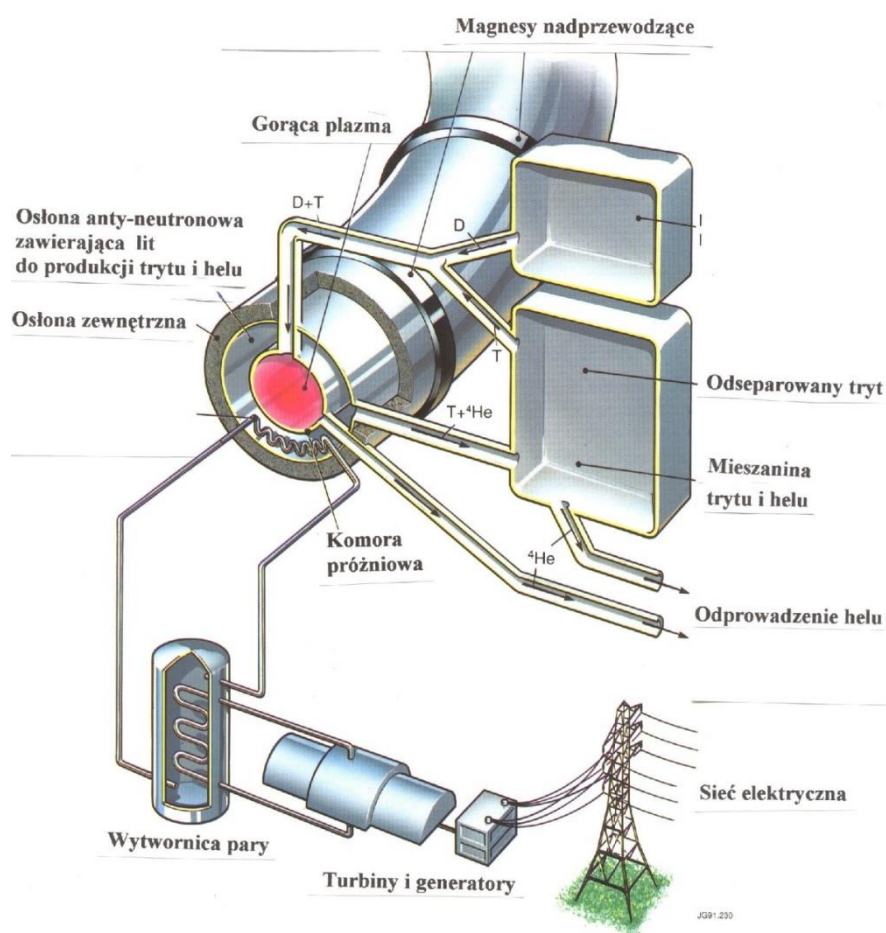
Rys. 8. Projekt tokamaka ITER (patrz Mała Encyklopedia Energii Jądrowej [www.ekoatom.com.pl](http://www.ekoatom.com.pl))

Opracowany w latach 80-tych ubiegłego wieku *międzynarodowy program energetyki termojądrowej* zakładał rozwój i badania różnych instalacji do roku 2010, a następnie rozpoczęcie budowy układu **ITER**. Do budowy tego układu przystąpiono z pewnym opóźnieniem, ale obecnie w budowie układu **ITER**, usytuowanego w Cadarache we Francji, oprócz krajów Unii Europejskiej uczestniczy kilka innych krajów: Chiny, Indie, Japonia, Korea Płd., Rosja i USA. Należy podkreślić, że budowa układu **ITER** jest poligonem doświadczalnym przed podjęciem budowy jeszcze większego

układu DEMO (*tokamaka IV generacji*), który z kolei ma umożliwić w przyszłości budowę układu PROTO, tj. prototypu pierwszej elektrowni termojądrowej.

Należy tu dodać, że badań tokamaków prowadzone są też prace związane z badaniami tzw. *stellaratorów*, w których nie stosuje się indukowania prądów transformatorem, a plazmę nagrzewa się intensywnym promieniowaniem w.cz. i wysokoenergetycznymi wiązkami cząstek neutralnych. W greifswaldzie budowy jest obecnie wielki *Stellarator Wendestein-7X* [10]. Oprócz omówionych wyżej głównych kierunków badań termojądrowych, prowadzone są również badania bardzo silnych wyładowań w różnych układach typu *Z-pinch* oraz *Plasma-Focus* (PF), w których kompresja gorącej plazmy zachodzi pod działaniem własnych pól magnetycznych pochodzących od bardzo silnych prądów przepuszczanych przez plazmę [11].

Równocześnie z badaniami reakcji syntezy jądrowej w różnych układach eksperymentalnych prowadzone są prace nad projektami przyszłych elektrowni termojądrowej. Przykładowy schemat takiej elektrowni przedstawiono na Rys. 8



Rys. 9. Schemat przyszłej elektrowni termojądrowej opartej na układzie typu tokamak.

### Krótką historia badań gorącej plazmy w Świerk

Informacje o pierwszym wybuchu termojądrowym wpłynęły m.in. na decyzje Prof. A. Sołtana przy organizacji IBJ w latach 50-tych ubiegłego wieku, który zainteresował się badaniami gorącej plazmy. Podjął on wówczas decyzję o zorganizowaniu Pracowni Fizyki Plazmy, początkowo w strukturze Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW, a od 1955 r. - w tworzonym wówczas Instytucie Badań Jądrowych (IBJ). Prof. A. Sołtan zdawał sobie doskonale sprawę z wszystkich ówczesnych uwarunkowań. Organizując grupę do badań termojądrowych, jako główne kierunki działania zaproponował: 1. Teoretyczną analizę procesów elementarnych w plazmie; 2. Eksperymentalne badania dział plazmowych, zwłaszcza ich nowych konstrukcji; 3. Eksperymentalne badania nad utrzymywaniem plazmy w pułapce toroidalnej.

Do realizacji tych zadań Prof. A. Sołtan zatrudnił w IBJ kolejno Michała Gryzińskiego, Lecha Jakubowskiego i Marka J. Sadowskiego. Do realizacji trzeciego tematu sam zaprojektował skomplikowane uzwojenia, które miały otaczać szklany torus o średnicy ok. 30 cm. Po śmierci Profesora w 1959 r. temat ten został jednak zaniechany.

Pierwszym tematem zajął się głównie M. Gryziński, który opublikował prace nt. łańcuchowych reakcji syntezy jądrowej i zderzeń atomowych [12]. W latach następnych M. Gryziński w swoich rozważaniach teoretycznych, stosując rozszerzony model atomu Bohra i metody mechaniki klasycznej, wyprowadził uproszczone wzory na przekroje czynne dla różnych procesów zderzeniowych [13]. Ze względu na trudności obliczeniowe związane ze stosowaniem mechaniki kwantowych, uproszczone quasi-klasyczne wzory były często stosowane do opisu oddziaływań elementarnych przez różnych badaczy w fizyce plazmy i astrofizyce. Ważnym krokiem w rozwoju quasi-klasycznej teorii zderzeń atomowych było uwzględnienie spinu elektronów. Analiza dopuszczalnych orbit elektronowych doprowadziła go do opracowania „modelu swobodnego spadku” (*free-fall model*). Konsekwentne stosowanie tego modelu umożliwiło dokładniejszy opis zderzeń jonizacyjnych [14], skonstruowanie quasi-klasycznego modelu molekuly  $H_2^+$  i opis rozkładu kąтового elektronów wybijanych z helu bombardowanego protonami [15]. Założenie, że ruchowi elektronu towarzyszy precesja spinu, pozwoliło wytłumaczyć zależności między przybliżeniem klasycznym i opisem kwantowym, w tym dualizm korpuskularno-falowy oraz właściwości diamagnetyczne niektórych materiałów [16]. W następnych latach M. Gryziński pracował nad ulepszeniami swojego modelu i opublikował kilka prac, z których za najważniejsze można uznać prace opisujące kolektywne ruchy elektronów w atomach [17].

Drugi z tematów wybranych przez Prof. A. Sołtana, dotyczący badań iniektorów (tzw. *dział plazmowych*), spotkał się z dużym zainteresowaniem kilku eksperymentatorów, początkowo L. Jakubowskiego, M.J. Sadowskiego, a później J. Nowikowskiego, E. Składnik-Sadowskiej, J. Appelta, i innych. W tym temacie istotną rolę odegrał także M. Gryziński, który zaproponował skoncentrowanie badań eksperymentalnych na dziale (iniektorze) koaksjalnym nowej konstrukcji. Zamiast pełnych elektrod zastosowano dwie koaksjalne elektrody ażurowe, każda złożona z wielu (32) cienkich prętów metalowych rozmieszczonych symetrycznie na obwodzie elektrody.

W celu zbadania właściwości iniektora wielo-prętowego M. Gryziński wraz ze współpracownikami zbudował pierwszy w Polsce plazmowy układ eksperymentalny w budynku IFD



UW. Układ ten w 1960 r. przeniesiono do IBJ w Świerku, gdzie był badany przez kilka lat. Widok ogólny tego układu ukazuje Rys. 9.



**Rys. 10.** Fotografia pierwszego układu do badań gorącej plazmy w Świerku w 1996 r. Komora próżniowa była umieszczona za zestawem aparatury pomiarowej.

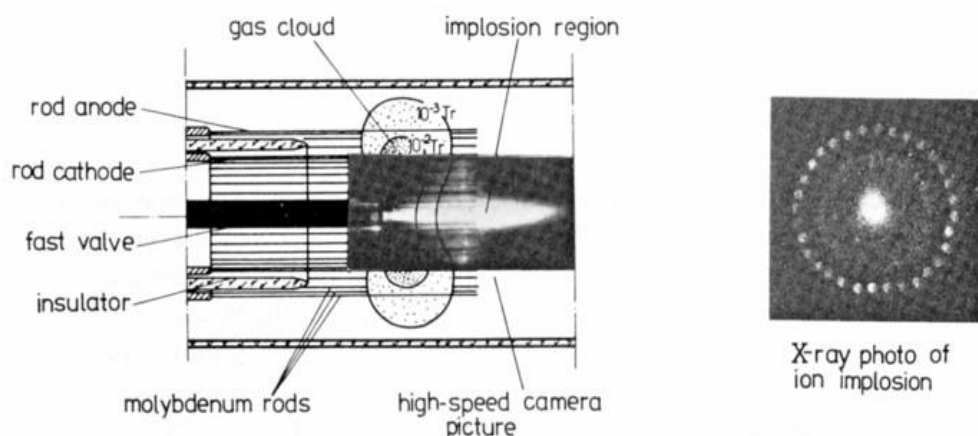
Koncepcja wielo-prętowego działu plazmowego RPI została opracowana w latach 1957-1959, ale prace eksperymentalne miały przez kilka lat charakter tajny. Pierwsza oficjalna publikacja nt. takiego działu plazmowego ukazała się dopiero w 1966 r. [18]. W międzyczasie zbudowano w Świerku drugi układ do podobnych badań, który przedstawiono na Rys. 10.



**Rys. 11.** Fotografia drugiego układu plazmowego (N-65) w Świerku, który wyposażono w działo typu RPI, silne elektromagnesy i nową aparaturę pomiarową.

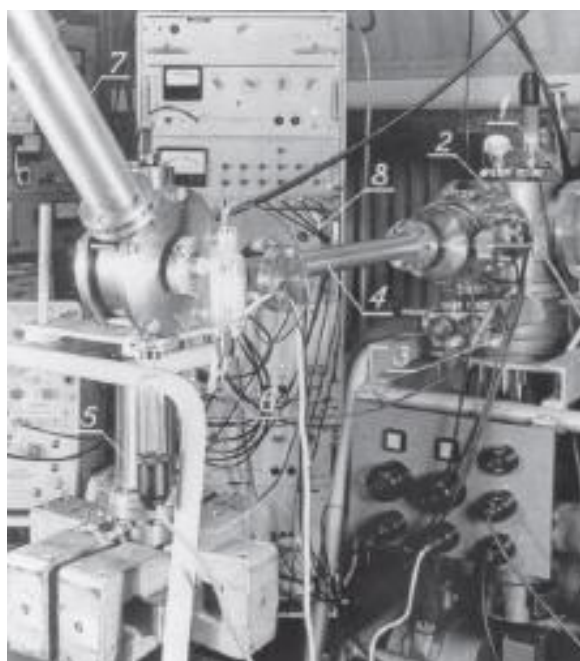
Badania eksperymentalne gorącej plazmy wytwarzanej przez iniektory typu RPI były prowadzone przy wykorzystaniu różnych metod, m.in. ultraszybkiej fotografii, spektroskopii optycznej, sond i

liczników promieniowania [19-23]. Przykładowe wyniki obserwacji strumienia plazmy, emitowanego z układu RPI, przedstawiono na Rys. 11.



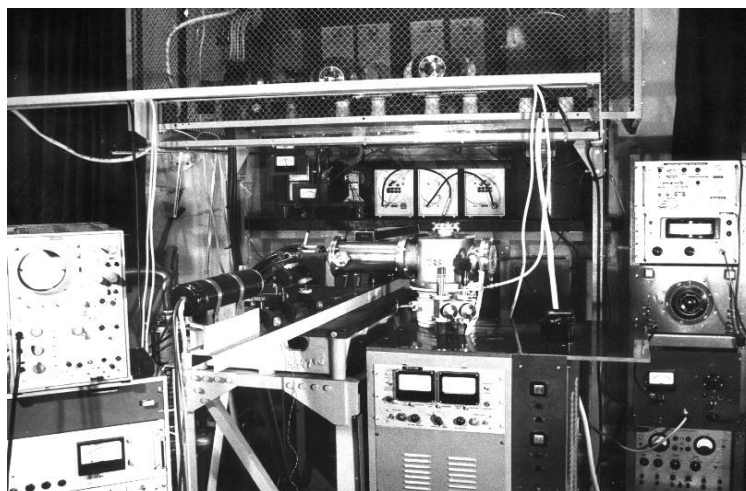
**Rys. 12.** Porównanie ultraszybkich fotografii promieniowania widzialnego wyladowania plazmowego (nałożonej na schemat układu RPI) oraz obrazu rentgenowskiego, uzyskanego kamerą typu pinhole umieszczoną na osi układu.

Równocześnie z badaniami iniektorów typu RPI prowadzone były badania zwykłych iniektorów koaksjalnych z elektrodami wykonanymi z pełnych rur miedzianych [24-25]. Szczególny wysiłek poświęcono opracowaniu i zbudowaniu nowej aparatury pomiarowej. Przykład przedstawiono na Rys. 12.



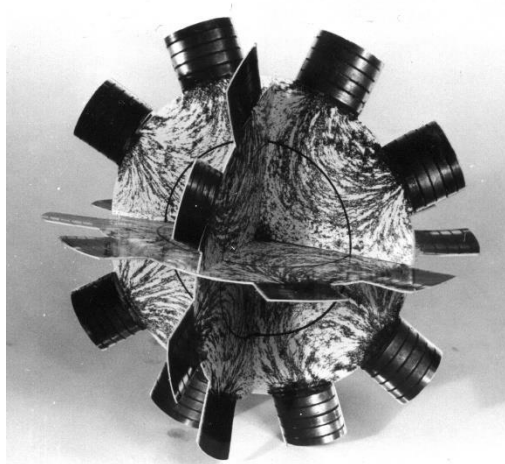
**Rys. 13.** Układ z działem koaksjalnym oraz cylindrycznym analizatorem jonów: 1 – komora próżniowa, 2 – działo koaksjalne, 3 – stanowisko pompowe, 4 – kanał ekspansyjny, 5 – pomocnicza pompa próżniowa, 6 – cylindryczny analizator jonów, 7 – układ detekcyjny.

W następnych latach zmodernizowano układ do badań iniektorów typu RPI i wykonano na nim wiele różnych pomiarów optycznych i korpuskularnych [26-27]. Widok tego układu przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 14. Widok zmodernizowanego układu eksperymentalnego N-65 z działem plazmowym i laserowym interferometrem do pomiaru koncentracji plazmy.

Ważnym tematem badań, który podjęto w Świerku w połowie lat 60-tych, było opracowanie i budowa specjalnej pułapki magnetycznej do utrzymywania gorącej plazmy. W ramach pracy doktorskiej M. Sadowski opracował koncepcję pułapki nowego typu, tzw. układu SM (Spherical Multipole) [28]. Konfigurację takiej pułapki przedstawiono na Rys. 14.



Rys. 15. Pułapka magnetyczna typu SM, którą można zrealizować przez symetryczne rozmieszczenie odpowiedniej liczby skierowanych radialnie dipoli magnetycznych, a w praktyce silnych elektromagnesów [29].

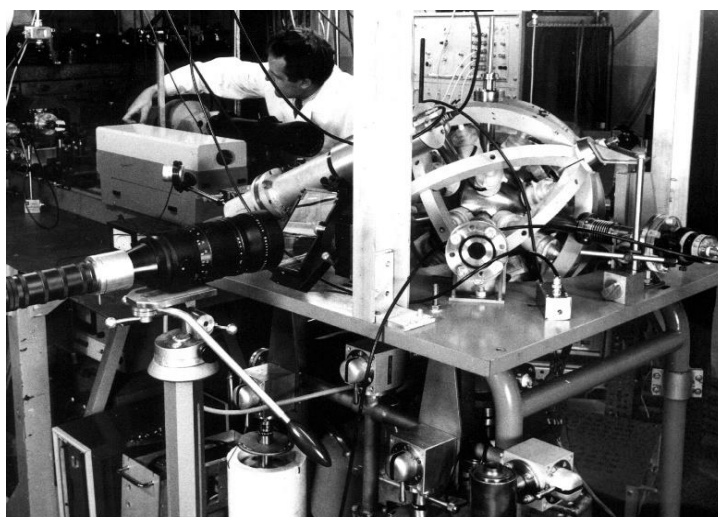
W odróżnieniu od innych pułapek magnetycznych konfiguracja typu SM zapewniała stabilność z punktu widzenia magneto-hydrodynamiki i nie miała tzw. „szczelin ucieczki cząstek”, a tylko określoną liczbę wąskich „stożków ucieczki”. Dla przeprowadzenia badań eksperymentalnych autor zaprojektował i zbudował układ KAKTUS, wyposażony w sferyczną pułapkę z 32 cewkami chłodzonymi ciekłym azotem i zasilanymi przez silne generatory impulsów prądowych,

dwustopniowy system pomp próżniowych oraz zespół iniektorów koaksjalnych (do napełniania pułapki plazmą) [29]. Widok tego układu przedstawiono na Rys. 15.



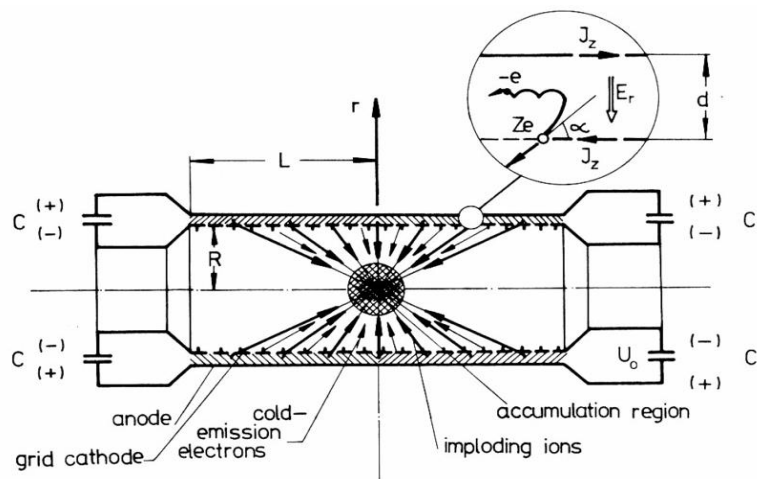
**Rys. 16. Widok układu KAKTUS, w którym gorącą plazmę wytwarzało 6 małych iniektorów koaksjalnych, rozmieszczonych symetrycznie wokół centrum pułapki. Dodatkowo zastosowano 2 silne cewki, umieszczone po obu stronach pułapki [31].**

Badania nad wytwarzaniem i utrzymywaniem gorącej plazmy w układzie **KAKTUS** o konfiguracji typu SM wykazały, że czas życia plazmy (wynoszący w warunkach eksperymentu ok. 85  $\mu\text{s}$ ) był w przybliżeniu 3-krotnie większy niż w stosowanych wcześniej pułapkach magnetycznych typu „**cusped configuration**” [30]. Powodzenie omawianego eksperymentu zachęciło do dalszych badań. Na początku lat 70-tych autor zaprojektował i razem z nowym zespołem zbadał pułapkę **KAKTUS II**, która była napełniana plazmą wytwarzaną z tarczy bombardowanej silną wiązką laserową [31]. Widok tego układu przedstawiono na Rys. 16.



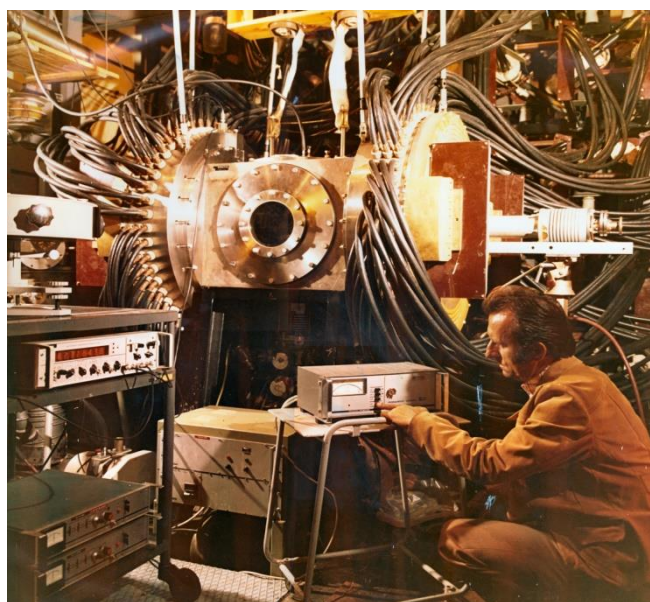
**Rys. 17. Widok układu KAKTUS II, który wyposażonego w sferyczną komorę eksperymentalną, 32 impulsowe elektromagnesy i system laserowy do wytwarzania plazmy w środku pułapki.**

Badania plazmy w pułapce **KAKTUS II** trwały kilka lat i przyniosły wartościowe wyniki [32-33], ale ograniczenie finansowania zmusiło do zaniechania tego kierunku badań i skoncentrowania na nowych zadaniach badawczych, które otrzymały odpowiednie wsparcie finansowe. Udało się wówczas uzyskać środki na kontynuację badań nad układami typu RPI, a w szczególności na badania tzw. „implozji cylindrycznej” [34], której zasadę ukazuje Rys. 17.



**Rys. 18.** Schemat układu z dwoma przeciwnie skierowanymi iniektorami typu RPI, które miały umożliwić cylindryczną implozję strumieni plazmowych i zwiększenie wydajności reakcji D-D.

Dla zrealizowania koncepcji cylindrycznej implozji plazmy zaprojektowano i zbudowano stosunkowo duży układ eksperymentalny **SOWA-150** o całkowitej energii rzędu 150 kJ, którego zdjęcie przedstawiono na Rys. 18.



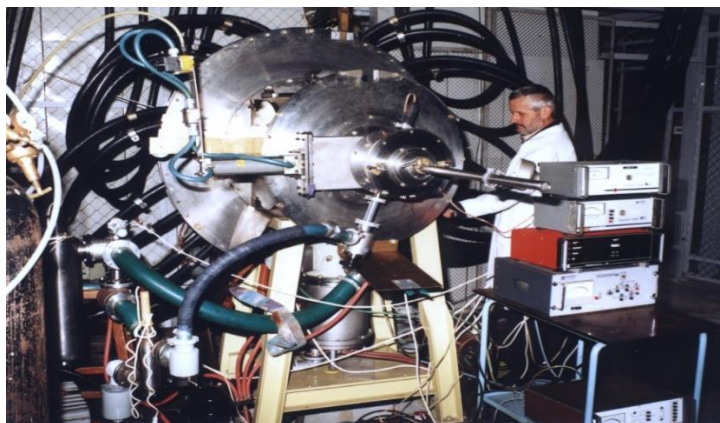
**Rys. 19.** Widok komory eksperymentalnej układu SOWA-150 wyposażonego w dwa skierowane przeciwnie działa typu RPI oraz dwa synchronizowane generatory impulsów prądowych.

Dalsze badania iniektorów typu RPI i implozji plazmy w układzie **SOWA-150** wykazały, że w układach tych można wytwarzać intensywne strumienie plazmy deuterowej, ale wydajność reakcji syntezy D-D nie była zadowalająca [35]. Równocześnie podjęto prace nad wykorzystaniem takich strumieni plazmowych do celów technologicznych, m.in. do wytwarzania fotoogniw przez implantację odpowiednio dobranych jonów w podkłady z krzemu [36]. W tym celu zaprojektowano i zbudowano układ **RPI-15**, a następnie przemysłową wersję iniektora typu RPI - układ **IONOTRON-SW30**, którego zdjęcie pokazano na Rys. 19.



**Rys. 20. Widok układu IONOTRON SW-30, który wyposażono w działo typu RPI (o osi pionowej) oraz poruszaną pneumatycznie tarczę do wymiany próbek. W głębi widoczne są urządzenia do zasilania i sterowania całego układu.**

Następnym urządzeniem przeznaczonym do badań technologicznych był układ RPI-IBIS, zasilany z baterii kondensatorów o energii do 40 kJ, który przedstawiono na Rys. 20.

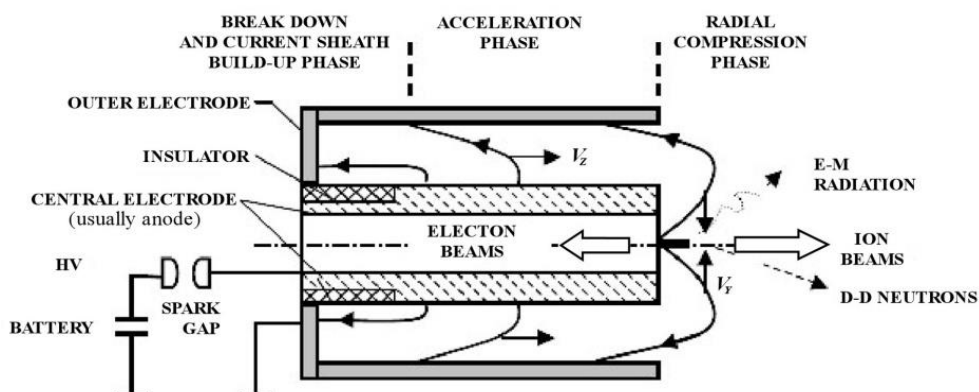


**Rys. 21. Widok komory eksperymentalnej układu RPI-IBIS, w której umieszczono iniektor typu RPI oraz wyposażenie do wymiany próbek z różnych materiałów.**

W ubiegłych latach układ RPI-IBIS wykorzystywano wielokrotnie do badań podstawowych, np. do pomiarów charakterystyk silnych strumieni plazmowych, ale obecnie służy on nadal głównie do badań z dziedziny inżynierii różnych materiałów.

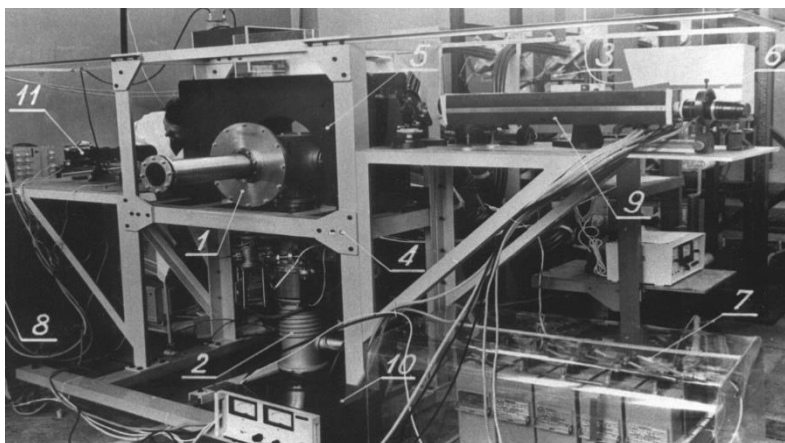
W latach 80-tych dla zwiększenia wydajności reakcji syntezy D-D w układach typu RPI, po zagospodarowaniu nowej hali eksperymentalnej w Świerku, zbudowano układ SOWA-400, zwiększając energię kumulowaną w baterii kondensatorów do ok. 400 kJ. Po wykonaniu wstępnych badań na tym układzie rozpoczęto także prace projektowe nad budową jeszcze większego układu SOWA-1000. W kontynuacji tych prac przeszkodziły jednak inne pilne zadania badawcze.

Warto tu nadmienić, że z upływem lat formy organizacyjne badań nad gorącą plazmą w Świerku ulegały wielu zmianom. W ramach programu zainicjowanego przez Prof. S. Kaliskiego, który w latach 70-tych zorganizował grupę do badań plazmy w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) w Warszawie, zespół wydzielony z IBJ w Świerku został zobowiązany do zaprojektowania i zbudowania układów typu PF (Plasma-Focus) o różnej energetyce. Schemat układu typu PF przedstawiono na Rys. 21.



Rys. 22. Układ typu PF z cylindrycznymi elektrodami typu Mathera i zaznaczonymi fazami wyładowania i formowania kolumny gęstej gorącej plazmy na osi symetrii, która po pewnym czasie ulega rozpadowi na skutek rozwoju różnych niestabilności.

Do badań wyładowań typu PF zaprojektowano i zbudowano w Świerku najpierw układ PF-20, który wyposażono w generator impulsów prądowych o energii do 25 kJ oraz nową aparaturę pomiarową, jak pokazano na Rys. 22.



**Rys. 23. Widok układu PF-20 z laserowym interferometrem do pomiarów gęstości plazmy: 1 – komora, 2 – stanowisko pompowe, 4 – rama**

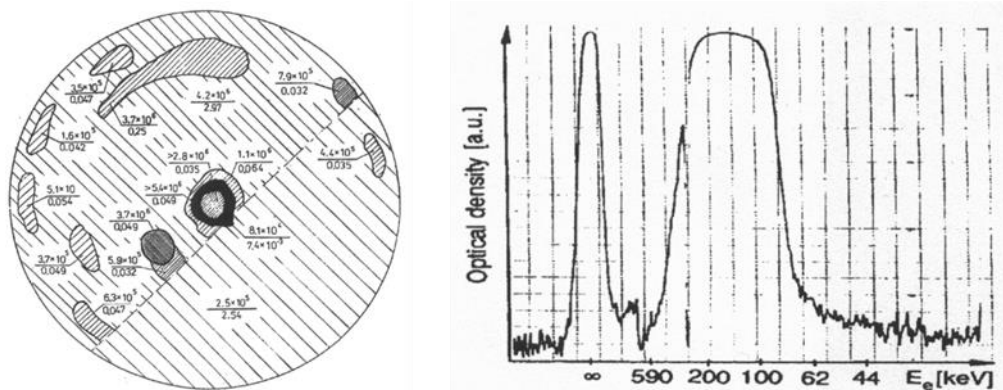
W następnym etapie zaprojektowano i zbudowano drugi układ PF-20 oraz większy układ PF-150, oba przeznaczone dla laboratorium plazmowego WAT. Badania tych układów wykonane samodzielnie przez zespół z IBJ, a później wspólnie z zespołem z WAT, zostały przedstawione w wielu pracach, z których do najważniejszych można zaliczyć [37-39]. Eksperymenty na układzie PF-150, w którym zastosowanie dodatkowego impulsu laserowego o energii 100 J pozwoliło uzyskać zwiększenie emisji neutronów z reakcji syntezy D-D [38], zachęciło prof. S. Kaliskiego do zaprojektowania znacznie większego eksperymentu o energii rzędu 1000 kJ. W ramach oficjalnej umowy zespół z IBJ został zobowiązany do budowy prototypowego układu PF-360, a następnie do zaprojektowania układu PF-1000. Widok układu PF-360 przedstawiono na Rys. 23.



**Rys. 24. Widok komory eksperymentalnej układu PF-360 i części wyposażenia pomiarowego. Po lewej stronie widoczna kamera do ultraszybkiej fotografii. U góry – kamera do zdjęć rentgenowskich i aktywacyjny licznik szybkich neutronów**

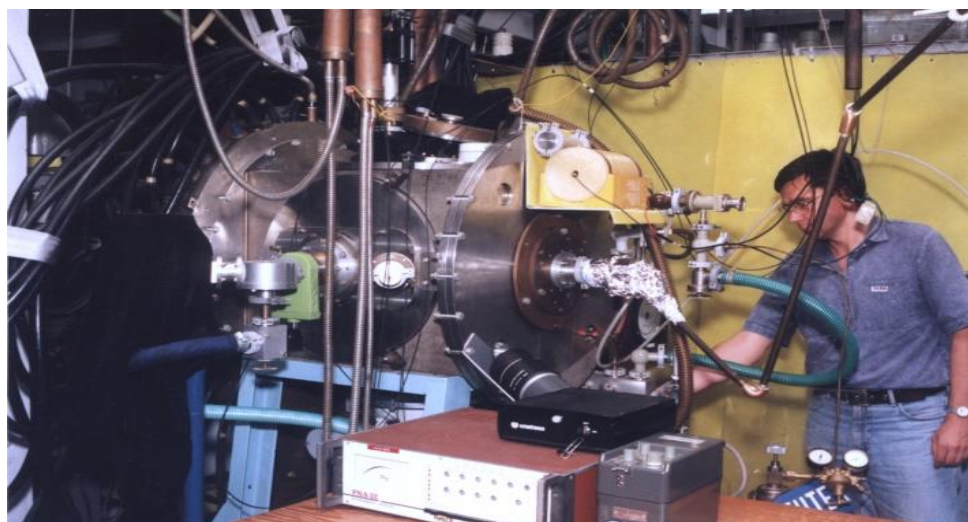


W układzie PF-360 wykonano wiele badań, m.in. dokładne pomiary wiązek wysokoenergetycznych deuteronów, badania rozkładu energii szybkich elektronów i pomiary neutronów z reakcji D-D [40-42]. Przykładowe wyniki pokazano na Rys. 24.



**Rys. 25.** Mapa gęstości strumienia szybkich deuteronów emitowanych wzdłuż osi z (mierzonych bez filtra i za cienkim filtrem absorpcyjnym – strona prawa dół)

Równocześnie z omówionymi wyżej badaniami, w Świerku prowadzono prace związane z budową i badaniami mniejszego układu MAJA-PF o energii ok. 50 kJ (przeznaczonego głównie do badań wiązek elektronów i promieniowania X). Widok tego układu wraz z nowym wyposażeniem diagnostycznym pokazano na Rys. 25.



**Rys. 26.** Komora eksperymentalna układu MAJA-PF z podstawowym wyposażeniem pomiarowym. Po lewej stronie widać spektrometr rentgenowski, który stosowano do badania linii widmowych gazów domieszek i zanieczyszczeń.

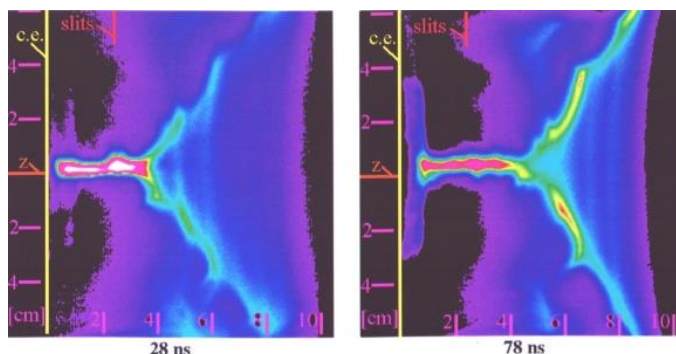
W układzie MAJA-PF wykonano wiele badań eksperymentalnych, m.in. zbadano wpływ konfiguracji elektrod i napuszczania gazu roboczego [43], zmierzono wiązki szybkich deuteronów i elektronów [44] oraz wykryto różnice w polaryzacji rentgenowskich linii widmowych [45]. Układ ten jest eksploatowany do dzisiaj, głównie do badań podstawowych z dziedziny fizyki plazmy.

Oprócz badań układów PF-360 i MAJA-PF w Świerku prowadzone były prace projektowe związane z budową największego układu PF-1000, który miał pierwotnie służyć do realizacji wielkiego eksperymentu PF+Laser w Instytucie Fizyki i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) w Warszawie. Na skutek ograniczeń finansowych i opóźnień w budowie hali IFPiLM budowa układu PF-1000 została zakończona dopiero w latach 90-tych, a jego pełne uruchomienie przy energii zasilania rzędu 1000 kJ nastąpiło dopiero w roku 2000, jak pokazano na Rys. 26.



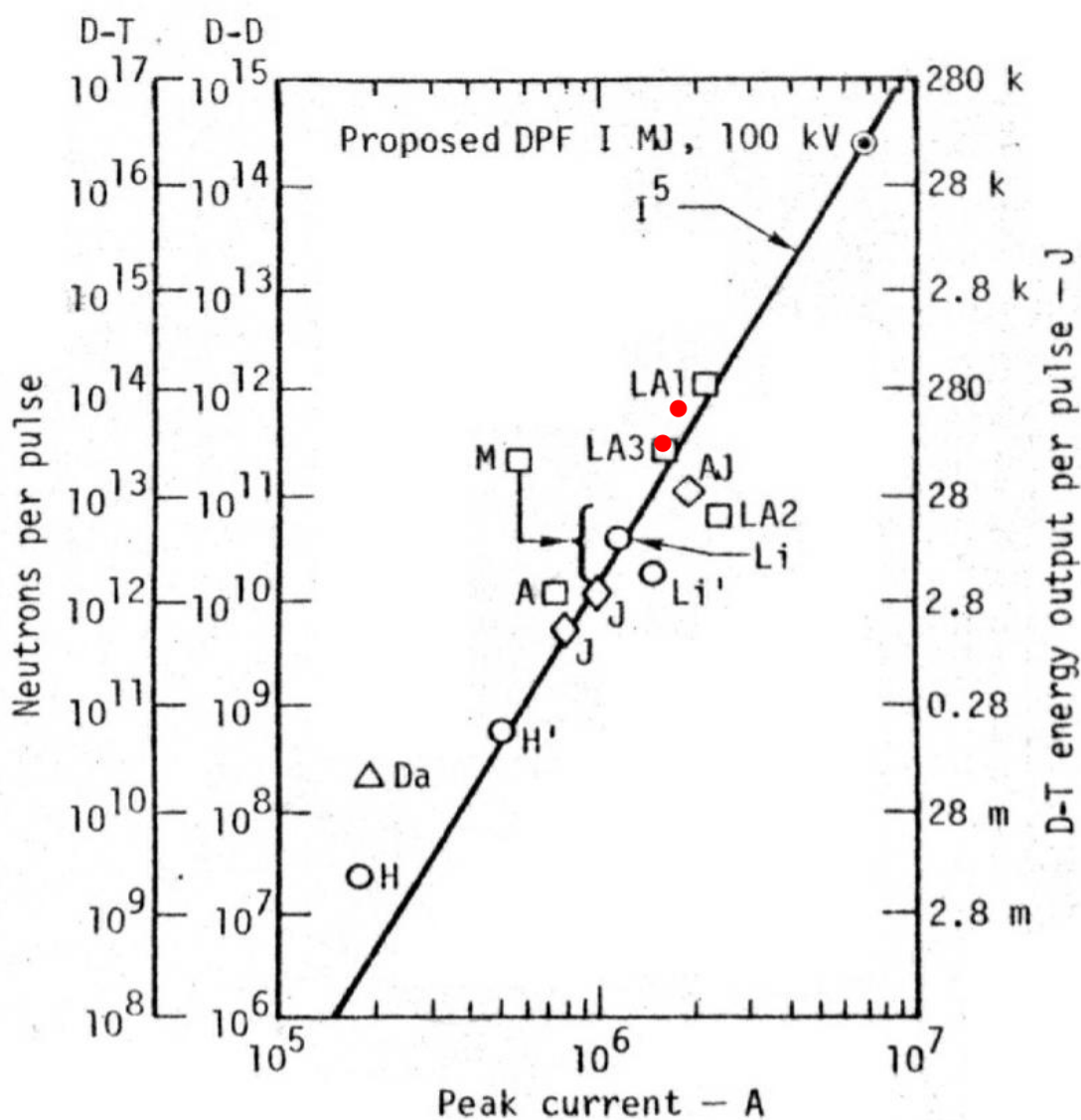
Rys. 27. Widok komory wielkiego układu PF-1000, zaprojektowanego przez badaczy z IPJ w Świerku, a zbudowanego i uruchomionego w IFPiLM w Warszawie (2000 r.)

Na układzie PF-1000, który jest dotychczas największym na Świecie układem badawczym z elektrodami typu Mathera, przeprowadzono w ciągu ostatnich 10 lat wiele badań. Połączone zespoły z IFPiLM oraz IPJ wykonały m.in. badania dynamiki wyładowań typu PF metodami ultraszybkiej fotografii [46], pomiary szybkich neutronów z reakcji syntezy D-D [47], pomiary wiązek szybkich jonów i elektronów [48], badania emisji promieniowania rentgenowskiego [49], itd. Bardzo wiele uwagi poświęcono badaniom fazy maksymalnej kompresji, której przykłady przedstawiono na Rys. 27.



Rys. 28. Ultraszybkie fotografie wyładowania przy końcu elektrod układu PF-1000, które wykonano z ekspozycją rzędu 1 ns, dla czasów 28 i 78 ns po maksymalnej kompresji plazmy.

Bardzo ważne było również porównanie wydajności neutronowej układu PF-1000 z innymi eksperymentami typu PF, które przeprowadzono w wielu laboratoriach zagranicznych. Uzyskiwane obecnie wydajności są bardzo zbliżone do rekordowych wyników eksperymentu zrealizowanego w Los Alamos [50], co pokazano na Rys. 28.

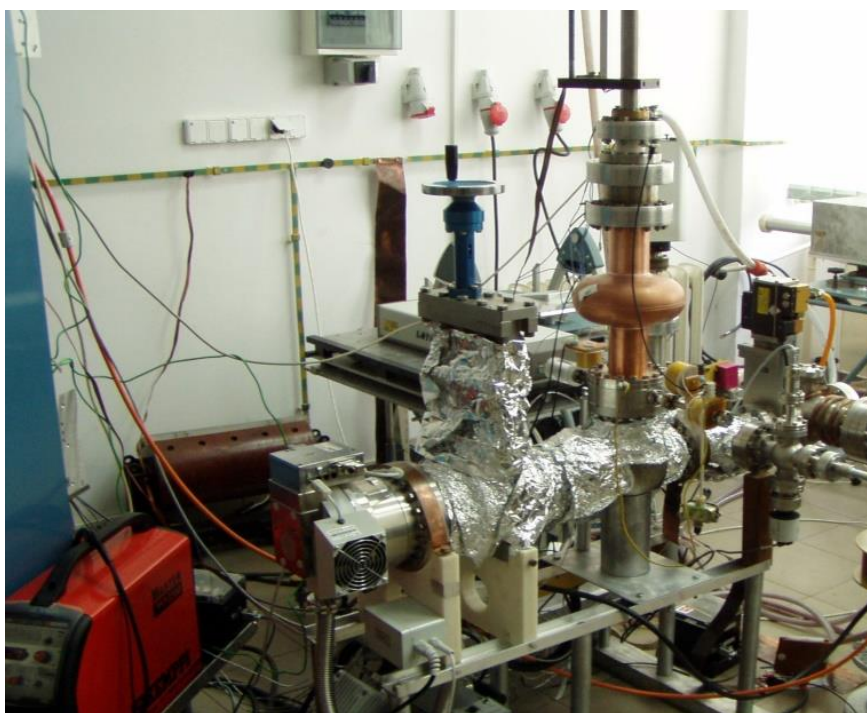


**Rys. 29. Porównanie wydajności neutronowej PF-1000 z innymi eksperymentami i skalowaniem. Czerwone kółka to najlepsze wyniki z eksperymentu PF-1000:  $Y_n = 3 \times 10^{11}$  neutronów z wyładowania o energii 480 kJ i prądzie maksymalnym 1,8 MA oraz  $6 \times 10^{11}$  neutronów z**

Badania na układzie PF-1000 prowadzone są nadal przez zespoły naukowców z IPJ (teraz NCBJ) i IFPiLM w ramach porozumienia o współpracy między obu instytucjami, a ich wyniki przedstawiane są we wspólnych publikacjach [11, 46-62].

### Badania z dziedziny technologii plazmowych

Badania związane z rozwojem technologii plazmowych, które realizowano w Zakładzie P-V, obejmowały oprócz omówionych wyżej spektroskopowych badań plazmy z różnych materiałów, także prace nad opanowaniem nowych technologii wytwarzania cienkich warstw z nadprzewodników. W celu wytwarzania takich warstw J. Langner zaproponował wykorzystanie wyładowań łukowych w ultra-wysokiej próżni (UHV-arc) [63]. Prace prowadzono w latach 2004-2008 w ramach programu CARE. Po śmierci J. Langnera, obowiązki kierownika pracowni przejął P. Strzyżewski, a następnie R. Nietubyc. Współpracą IPJ z zespołem z Uniwersytetu Tor Vergata w Rzymie (tj. realizacją zadania JRA1-WP4-Thin film cavity production) kierował Prof. M.J. Sadowski. W ramach projektu zbudowano kompletne stanowisko do nakładania warstw Nb na ścianki wnęk rezonansowej [64], pokazane na Rys. 29.



**Rys. 30. Widok wysoko-próżniowego układu z cylindryczną katodą Nb do nakładania cienkich warstw nadprzewodzących we wnękach wykonanych z miedzi (Cu) [80].**

Wyniki badań, przeprowadzonych w ramach projektu CARE-JRA1-WP4, zostały przedstawione w 23 referatach konferencyjnych i 12 publikacjach, których spis podano w raporcie końcowym [64]. W trakcie realizacji tego projektu zaproponowano także wykorzystanie wyładowań łukowych (w układzie z płaską katodą) do nakładania warstw czystego ołowiu, które mogą być wykorzystane, jako fotokatody do nowoczesnych iniektorów wiązek elektronowych [65]. Zadanie to jest nadal realizowane przez zespół R. Nietubycia w ramach europejskiego programu EuCARD.

W 2009 r. do Zakładu P-V, który otrzymał nową nazwę Zakładu Fizyki Plazmy i Inżynierii Materiałów, zostały włączone dwa zespoły z byłego Zakładu P-IX, które zajmowały się badaniami z dziedziny technologii materiałów nie związanymi z badaniami termojądrowymi. Po utworzeniu [Narodowego Centrum Badań Jądrowych](#) (NCBJ) w Świerku w 2011 r. - z Zakładu P-V wydzielono

nowy **Zakład Badań Plazmy** (TJ5), ukierunkowany głównie na badania plazmy wysokotemperaturowej.

## Podsumowanie

Powyższy przegląd, poświęcony omówieniu najważniejszych kierunków badań termojądrowych i historii badań plazmowych w Świerku, można podsumować w sposób następujący:

1. Opanowanie syntezy jądrowej może zapewnić dostęp do ogromnych zasobów energii i zmniejszyć zanieczyszczenie środowiska przez eliminację emisję, CO i obniżenie ilości radioaktywnych odpadów.
2. Badania zmierzające do budowy reaktora termojądrowego prowadzone są w wielu kierunkach i licznych ośrodkach badawczych na całym Świecie, a najważniejsze programy badawcze dotyczą eksploatacji wielkich układów laserowych (np. **NIF**) i tokamaków (np. **JET**) oraz budowy wielkiego układu **ITER**.
3. Inicjatywa Prof. A. Sołtana dotycząca badań nad syntezą jądrową w Polsce, którą w latach 50-tych ubiegłego wieku podjęła mała grupa badaczy w IBJ, doprowadziła do zbudowania kilku urządzeń badawczych i uzyskania wartościowych wyników naukowych, które przedstawiono w wielu publikacjach.
4. Badacze ze Świerka (poprzednio IBJ i IPJ, a obecnie NCBJ) od wielu lat prowadzą aktywną współpracę naukową z innymi instytucjami w kraju (zwłaszcza z IFPiLM w Warszawie i IFJ PAN w Krakowie) oraz ośrodkami za granicą (należy tu wymienić: Niemcy, Francję, Czechy, Portugalię, Wielką Brytanię, Włochy i Ukrainę). Badacze ze Świerku mają udokumentowany i ceniony na Świecie dorobek naukowy, zwłaszcza w dziedzinie metod diagnostyki plazmy.

Opisy najważniejszych prac i wyników z ostatnich lat można znaleźć na stronach internetowych NCBJ [66] i IFPiLM [67], ale o udziale Polaków w dużych eksperymentach w dziedzinie badań MCF oraz ICF należałoby napisać oddzielne artykuły.

## Spis literatury

1. D.A. Frank-Kamieniecki, *Plazma – czwarty stan materii* (PWN, Warszawa 1963).
2. W.F. Kalinin, *Termojądrowy reaktor przyszłości* (WNT, Warszawa 1968).
3. F.L. Ribe, *Rev. Modern Phys.* **47** (1975) 7.
4. R. Rhodes, *Dark Sun: the making of the hydrogen bomb* (Simon&Schuster, NY 1995).
5. M.J. Sadowski, *Nukleonika* **50** (2005) S41.
6. <https://www.sciebcenews.org/article/ignition-failed>
7. M. Keilhacker, M. Watkins and the JET Team, *Europhys. News* **29** (1980) 230.
8. <http://www.efda.org/2013/05/jet-the-joint-european-torus/>
9. <http://www.iter.org>
10. <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x/>
11. M.J. Sadowski, M. Scholz, *Plasma Sources Sci. & Technol.* **17** (2008) 024001.
12. M. Gryziński, *Phys. Rev.* **107** (1957) 1471, *Phys. Rev* **115** (1959) 374.
13. M. Gryziński, *Phys. Rev.* **A138** (1965) 305, *J. Phys.* **B36** (1973) 2292, *Phys. Lett.* **A76** (1980) 28.
14. M. Gryziński, J. Kunc, *J. Phys. B: Atom Mol. Phys.* **19** (1986) 2479.
15. M. Gryziński, *Phys. Lett.* **A123** (1987) 170, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **20** (1987) 4741.
16. M. Gryziński, *Int. J. Theor. Phys.* **26** (1987) 967, *J. Magnet. Mater.* **71** (1987) 53.
17. M. Gryziński, M. Kowalski, *Fizika* **19** (1987) 135, *Fizika* **19** (1987) 361.

18. M. Gryziński, J. Nowikowski, M. Sadowski, Raport INR Nr 713/XVIII/PP (W-wa 1966).
19. J. Nowikowski, Raport INR Nr 714/XVIII/PP (Warszawa 1966).
20. M. Sadowski, E. Składnik-Sadowska, Raport INR Nr 716/XVIII/PP (Warszawa 1966).
21. S. Suckewer, Raport INR Nr 717-718/XVIII/PP (Warszawa 1966).
22. M. Gryziński, et al., Raport INR Nr 719/XVIII /PP (Warszawa 1966).
23. M. Sadowski, E. Składnik-Sadowska, Raport INR Nr 720/XVIII/PP (W-wa 1966).
24. M. Sadowski, E. Składnik-Sadowska, Nukleonika **13** (1968) 257 & 269.
25. Z. Kozłowski, M. Sadowski, Nukleonika **13** (1968) 645.
26. M. Gryziński, et al., Plasma Phys. **10** (1968) 450, Nukleonika **14** (1970) 145.
27. M. Sadowski, E. Składnik-Sadowska, Nukleonnika **15** (1970) 145.
28. M. Sadowski, Phys. Lett. **25A** (1967) 695, Phys. Lett. **27A** (1968) 435.
29. M. Sadowski, Phys. Lett. **28A** (1969) 626, Rev. Sci Instrum. **40** (1969) 1545.
30. M. Sadowski, J. Plasma Phys. **4** (1970) 1.
31. M. Sadowski, et al., Proc. 6<sup>th</sup> EC CFPP, Moscow 1973, Vol. I, p. 393.
32. J. Baranowski, et al., Proc. 8<sup>th</sup> EC CFPP, Prague 1977, Vol. I, p.106.
33. M. Gryziński, et al., Proc. 7<sup>th</sup> IC PPCNF, Innsbruck 1978, Vol. III, p. 225.
34. E. Składnik-Sadowska, et al., J. Physique **43** (1982) 715.
35. J. Piekoszewski, et al., J. Physique **43** (1982) 1353.
36. J. Appelt, M. Sadowski, Nukleonika 18 (1973) 277.
37. S. Kaliski, et al., J. Techn. Phys. 16 (1975) 387.
38. S. Denus, et al., J. Techn. Phys. 18 (1977) 381.
39. A. Jerzykiewicz, et al., Proc. 11th EC CFPP, Aachen 1983, Pt. I, pp. 485-488.
40. M. Sadowski, et al., Proc. 3rd Int. Workshop on PF, Stuttgart 1983, pp. 39-42.
41. M. Sadowski, et al., Proc. AIP CP **299** (1994)244.
42. M. Sadowski, et al., Proc. Z-Pinch & PF Res. Workshop, Nice 1988, pp. 25-31.
43. M. Sadowski, et al., Proc. 17th SPPT, Prague 1995, Vol. I, pp.138-140.
44. L. Jakubowski, et al., AIP CP **409** (1997) 443.
45. M. Scholz, et al., Nukleonnika **51** (2006) 79.
46. M. Scholz, et al., Rus. Phys. Journ. **49** No. 11 (2006) 161.
47. A. Malinowska, et al., Physica Scripta **T123** (2006) 104.
48. J. Żebrowski, et al., AIP CP **812** (2006) 229.
49. M.J. Sadowski, Proc. 8th Kudowa Summer School, Kudowa 2009, Invited 10.
50. A. Malinowska, et al., Rad. Measur. **43** (2008) S295.
51. M.J. Sadowski, et al., Proc. 29th ICPIG, Cancun 2009, PA5-6.
52. E. Składnik-Sadowska, et al., Proc. Workshop ICDPM, Warsaw 2009, CD issue.
53. E. Składnik-Sadowska, et al., J. Nucl. Mat. **390-391** (2009) 847.
54. E. Składnik-Sadowska, et al., Radiat. Eff. & Defects in Solids **165** No. 6 (2010) 1.
55. M.J. Sadowski, M. Scholz, PAST Ser. Plasma Phys. **16** No. 6 (2010) 194.
56. E. Składnik-Sadowska, et al., Contrib. Plasma Phys. **51** (2011) 288.
57. P. Kubes, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **39** (2011) 562.
58. R. Kwiatkowski, et al., Nukleonika **56** (2011) 119.
59. M. Scholz, et al., Nukleonika **57** (2012) 183.
60. P. Kubes, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **40** (2012) 1075.
61. M.J. Sadowski, et al., PAST Ser. Plasma Phys. **83** No.1 (2013) 253.
62. J. Langner, et al., Czech. J. Phys. **54** (2004) C91.
63. M.J. Sadowski, CARE Final Report on JRA1/WP4.1, IPJ Swierk, January 2009.
64. J. Langner, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **35** (2007) 1000.
65. <http://www.ncbj.gov.pl>
66. <http://www.ifpilm.pl>

Jerzy Chmielewski

## "ATOMOWA" TERAPIA MEDYCZNA Cz. IV

### Aparatura do radioterapii

Opisywaliśmy już metody i aparaturę wykorzystywaną w celach diagnostyki medycznej. Warto, zatem poświęcić nieco miejsca zagadnieniom związanym z wykorzystywaniem różnego rodzaju promieniowania, przede wszystkim w terapii schorzeń nowotworowych.

Mówiąc o promieniowaniu mamy na myśli przekazywanie energii w postaci fal elektromagnetycznych, lub strumieni cząstek. I tak warto przypomnieć, że rodzaje promieniowania dzielimy na dwie podstawowe grupy: - fotony (fale elektromagnetyczne) oraz promieniowanie korpuskularne.

W pierwszej grupie mamy do czynienia z:

- promieniowaniem rentgenowskim X ("miękkim" o długości fali od 0,1 nm do 10 nm, "twardym" o długości fali od 5 pm do 100 pm) oraz
- promieniowaniem  $\gamma$  o energii kwantów powyżej 50 keV.

Do drugiej grupy - promieniowania korpuskularnego - zalicza się w szczególności:

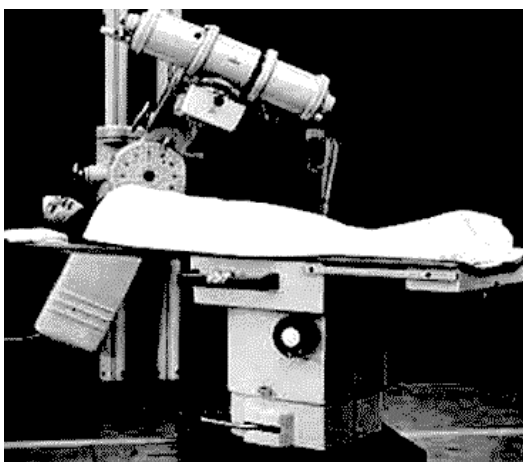
- - cząstki  $\beta$  (elektrony lub pozytony),
- - protony (także antyprotony),
- - neutrony,
- - cząstki  $\alpha$  (atomy  $^4\text{He}$ ),
- - jony węgla,
- - inne jony.

Ze względu na częściowe pokrywanie się zakresów długości fal promieniowania rentgenowskiego i promieniowania gamma przyjmuje się obecnie - jako kryterium klasyfikujące rodzaj wykorzystywanego promieniowania - sposób jego powstawania. I tak o promieniowaniu rentgenowskim mówimy wtedy, kiedy powstaje ono podczas hamowania elektronów w materiale o dużej liczbie atomowej (np. w lampach rentgenowskich), natomiast za promieniowanie gamma uważamy promieniowanie powstające w wyniku samorzutnego rozpadu promieniotwórczego jąder atomowych pierwiastków. Im wyższa energia promieniowania, tym głębiej w tkankę może ono wnikać.

Promieniowanie jonizujące działa niszcząco na wewnątrzkomórkowe łańcuchy DNA w genach, które kontrolują podział i rozwój komórek. Uszkodzenie łańcuchów w komórkach nowotworowych przez promieniowanie powoduje zahamowanie rozwoju tych komórek. Pod wpływem promieniowania komórki nowotworowe nie mogą się dzielić i dalej rozwijać, a z czasem obumierają. Dzięki temu promieniowanie jonizujące może być wykorzystywane do zwalczania tkanek nowotworowych i zmniejszania guzów czy narośli. Specjalista onkolog dobiera w tym celu odpowiedni rodzaj promieniowania i planuje sposób jego aplikacji. Dzięki pojawianiu się co raz łatwiej dostępnych i doskonalszych urządzeń diagnostycznych oraz terapeutycznych w ostatnich latach nastąpił ogromny rozwój dziedziny nazywanej radioterapią.

Pierwsza wzmianka dotycząca wykorzystania promieni X do celów terapeutycznych dotyczy zabiegu naświetlenia raka piersi, jaki w dniu 29 stycznia 1896 roku przeprowadził w Chicago Emil Herman Grubbe przy pomocy skonstruowanego w tym celu aparatu rentgenowskiego. Można uznać, że to wydarzenie zapoczątkowało żywiołowy rozwój radioterapii.

Zasadniczym elementem urządzenia do terapii promieniami X jest lampa rentgenowska o dużej mocy, umieszczona wewnątrz kołpaka, zapewniającego niezbędną osłonę przed promieniowaniem rozproszonym. Konstrukcja lamp rentgenowskich (zbliżona do lamp stosowanych w diagnostyce) często przewiduje specjalny system chłodzenia anody, na którą pada wiązka elektronów. Do kołpaka są doprowadzone kable z oddzielnie stojącego zasilacza wysokiego napięcia. Promienie X wyprowadzane są przez otwór w kołpaku przy pomocy tubusa z kolimatorem formującym właściwą wiązkę promieni.



Rys. 1a - Klasyczny terapeutyczny



Rys. 1b - Współczesny aparat terapeutyczny

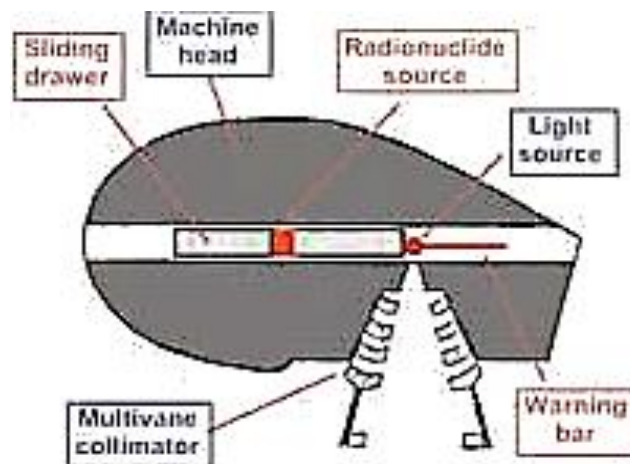
Typowe wartości napięcia zasilającego lampę rentgenowską wynoszą od 50 kV do 250 kV. Parametry pracy, takie jak wielkość napięcia i prądu zasilającego lampę rentgenowską są dobierane podczas planowania terapii. W starszych modelach aparatów terapeutycznych czas naświetlania był ustalany przy pomocy prostych, mechanicznych układów czasownikowych. Kolejne generacje terapeutycznych aparatów rentgenowskich były doskonalone stosownie do pojawiających się nowych możliwości technicznych. Doskonalone były również rozwiązania konstrukcyjne samych aparatów, jak i współpracujących z nimi urządzeń pomocniczych - takich jak np. stoły dla pacjentów - tak, aby ułatwić i usprawnić procedurę przeprowadzania zabiegów naświetlania stosownie do wskazań lekarza-specjalisty.

Revolucja w radioterapii została zapoczątkowana w Kanadzie, kiedy to 27 października 1951 roku w szpitalu Victoria Hospital w miejscowości London (prowincja Ontario) dokonano po raz pierwszy naświetlenia pacjenta przy pomocy aparatu wykorzystującego naturalne promieniowanie izotopu  $^{60}\text{Co}$ . Podczas rozpadu tego izotopu zostają wyemitowane dwa kwanty gamma o energii 1,17 i 1,33 MeV. Produkcję takich urządzeń, znanych powszechnie jako "Bomba Kobaltowa", zainicjowała firma Atomic Energy of Canada Limited (AECL), wykorzystując przy tym źródła kobaltowe produkowane w kanadyjskim reaktorze NRU (National Research Universal Reactor).





Rys. 2a - "Bomba kobaltowa" produkcji Atomic Energy of Canada (lata 1970-te)

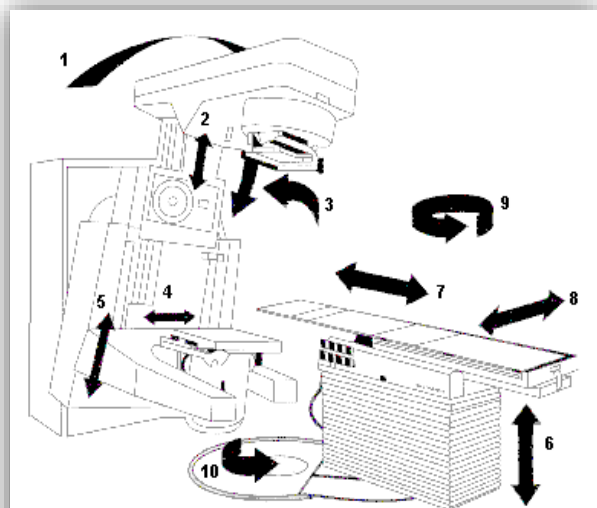


Rys. 2b - Schemat budowy "bomby kobaltowej":  
Przesuwana szufladka Głowica "bomby", Źródło izotopowe, Źródło światła, Kolimator wielopłatkowy, Wskaźnik ostrzegawczy

Głowica "bomby", wykonana z ołowiu, ma zapewnić niezbędną ochronę przed promieniowaniem rozproszonym źródła. Typowe źródło promieniowania ( $^{60}\text{Co}$ ) ma kształt cylindra o średnicy 2 cm i wysokości 5 cm. Jest ono umieszczone w przesuwnej szufladce, która na czas procedury naświetlania jest przesuwana tak, aby samo źródło znalazło się nad wewnętrznym otworem stożkowego kanału wyprowadzającego promieniowanie  $\gamma$  na zewnątrz. Wewnątrz tego kanału znajduje się specjalny kolimator, umożliwiający ustawienie wymaganego profilu wiązki promieniowania. Umieszczone w głowicy źródło światła ze znacznikami ułatwia pozycjonowanie głowicy nad naświetlanym obszarem. Źródła kobaltowe wykorzystywane w takich aparatach mają aktywność rzędu  $10^{13} - 10^{14}$  Bq. Uproszczony schemat budowy głowicy "bomby kobaltowej" pokazano na rysunku 2b.

Bomby kobaltowe szybko znalazły zastosowanie w licznych klinikach onkologicznych i ośrodkach medycznych na całym świecie, stopniowo wypierając z użytku terapeutyczne aparaty rentgenowskie. Dość duże wymiary źródła kobaltowego powodują jednak, że wymiary wiązki promieniowania gamma są stosunkowo duże. Należy zwrócić uwagę na fakt, że istotnym mankamentem eksploatacyjnym tych urządzeń jest czas połowicznego rozpadu izotopu kobaltu-60 wynoszący 5,3 roku. Wymaga to z upływem czasu systematycznego korygowania parametrów zabiegu naświetlania (dawki promieniowania), a także wymiany źródła na nowe po upływie kilku lat (5 - 7 lat). Wymiana źródła jest - z uwagi na jego wysoką aktywność - zabiegiem dość trudnym i kosztownym. Konieczne jest także spełnienie ostrych wymagań ochrony radiologicznej przy operowaniu źródłami o tak dużej aktywności. Względny ekonomiczny powodują, że czasami użytkownicy "bomb kobaltowych" zwlekają z wymianą źródeł, choć zmniejszenie ich aktywności powoduje konieczność systematycznego wydłużania czasu trwania zabiegu.

Istotną cechą konstrukcyjną jest to, że głowica ze źródłem promieniowania jest zamontowana na dużym ramieniu, które może się obracać wokół osi poziomej o 180 stopni. Często określa się taki układ, jako "izocentryczny". Jest to niezbędne do skoncentrowania wiązki możliwie tylko w miejscu naświetlanym. Tym sposobem można zmniejszyć dawkę promieniowania działającego na powierzchnię skóry oraz wewnętrzne tkanki i organy otaczające nowotwór. W praktyce nowoczesny zestaw aparatu terapeutycznego wraz ze stołem dla pacjenta wykorzystywany do radioterapii daje radiologowi przy doborze procedury możliwość korzystania z wielu stopni



**Rys. 3 - Stopnie swobody ruchów zespołu wykorzystywanego przy radioterapii.**

swobody. Precyzja ustawiania wszystkich elementów mechanicznych takiego zestawu ma na celu zapewnienie maksymalnego bezpieczeństwa pacjenta. Na załączonym schemacie przedstawiono przykładowo możliwe ruchy samego aparatu, jak i stołu.

Kolejny etap rozwoju terapii radiacyjnej zawdzięczamy wykorzystaniu doświadczeń teoretycznych i praktycznych z dziedziny akceleratorów budowanych dla potrzeb fizyki cząstek elementarnych. Efektem tego są liniowe akceleratory dla celów medycznych nazywane "Linac". Nazwa związana jest z liniową strukturą elektroniczną falowodu, która elektrony wytwarzane przez "działo elektronowe" przyspiesza

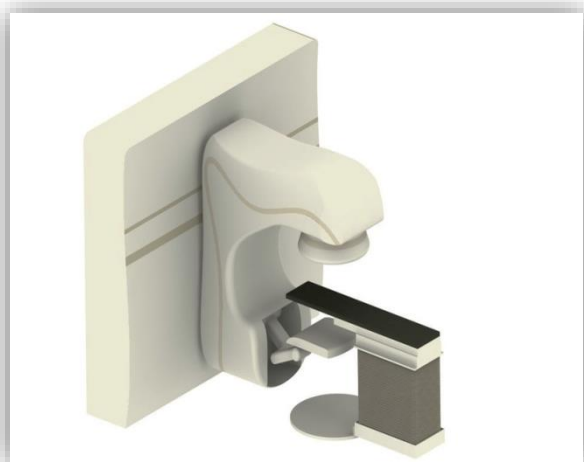
do wymaganej energii. Struktura ta jest pobudzana napięciem wielkiej częstotliwości wytwarzanym przez klitron. Pierwszy medyczny akcelerator skonstruowany został w 1953 roku w Londynie, zapoczątkując tym samym nowe pokolenie urządzeń dla potrzeb radioterapii.

Dobrze nam znanym przykładem takiego "Linac'a" jest akcelerator Neptun, którego produkcję uruchomiła francuska firma CGR MeV. W połowie lat siedemdziesiątych w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku podjęto produkcję akceleratorów Neptun 10p na licencji CGR MeV, dzięki czemu wiele ośrodków

medycznych w Polsce mogło być wyposażone w nowoczesne urządzenia terapeutyczne.



**Rys. 4- Akcelerator Neptun 10p w Opolskim Centrum Onkologicznym (1979 r.)**



**Rys. 5 - Wizualizacja nisko-energetycznego akceleratora medycznego "Coline 6"**

Aparaty te były systematycznie doskonalone, a doświadczenie zgromadzone przy produkcji "Neptunów" pozwoliło specjalistom Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku (będącym następcą IBJ) opracowywać całą rodzinę akceleratorów medycznych dla potrzeb radioterapii o nazwie "Coline". Jeden z najnowszych modeli "Coline 6" wytwarza wiązkę elektronową o energii 6 MeV, którą może przetwarzać na promieniowanie  $\gamma$ .

Zalety "Linac'ów" w porównaniu z "bombami kobaltowymi" spowodowały ogromny rozwój produkcji takich urządzeń w najrozmaitszych odmianach. Generalną tendencją rozwoju tej aparatury było zwiększanie jej funkcjonalności pod kątem prowadzenia skuteczniejszej radioterapii. W wielu rozwiązaniach ramię ze źródłem akceleratorowym kojarzone jest z układem diagnostycznym tomografu komputerowego. Dzięki temu radiolog przygotowujący program terapii radiacyjnej może

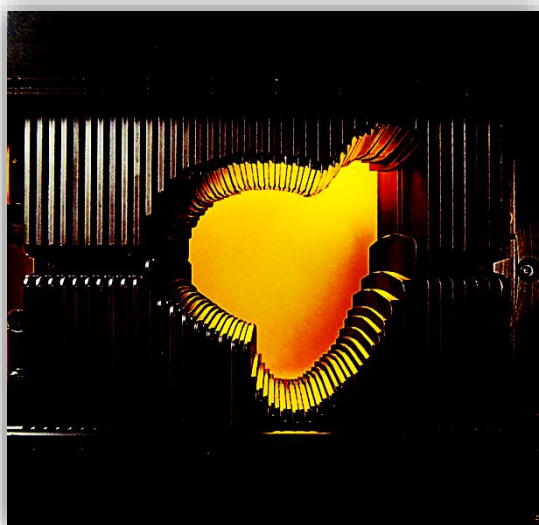
bardzo precyzyjnie określić miejsce, w którym znajduje się nowotwór i jego kształt, aby następnie naświetlać go wiązką akceleratorową.



**Rys. 6 - Schemat budowy głowicy liniowego akceleratora dla potrzeb radioterapii**

Na załączonym rysunku pokazano schemat budowy głowicy liniowego akceleratora Varian Clinac®. Wiązka elektronów z liniowej struktury akcelerycyjnej, umieszczonej poziomo w górnej części ramienia, jest odchylana przy pomocy zespołu elektromagnesów w kierunku okna wylotowego z blokiem kolimatora wielolistkowego, (który omówimy nieco dalej).

W medycznych akceleratorach liniowych można w szerokich granicach regulować energię i intensywność wytwarzanej wiązki elektronowej, względnie promieniowania  $\gamma$ . W przypadku akceleratora Clinac można uzyskiwać wiązki elektronowe o energii 4 - 21 MeV oraz fotonowe do 25 MeV. Znacznie dokładniej - aniżeli w przypadku bomb kobaltowych - można też dobierać rozmiar i kształt wiązki terapeutycznej. W tym celu wykorzystywane są specjalne kolimatory wielolistkowe (MLC - Multi-Leaf Collimator). Takie kolimatory mają zazwyczaj ponad 100 ruchomych "listków" ("łopatek"), ułożonych równolegle obok siebie. Położenie każdego listka można dowolnie ustawiać. Wielolistkowy kolimator pozwala radioterapeucie planującemu zabieg precyzyjnie dobierać profil wiązki do kształtu naświetlanego obszaru (nowotworu, guza etc.) . Można też w szerokich granicach regulować jej intensywność, co jest konieczne do precyzyjniejszego planowania zabiegów terapeutycznych.



**Rys. 7 - Kolimator wielolistkowy i przekrój formowanej wiązki**

Nowoczesne liniowe akceleratory medyczne są niezwykle rozbudowanymi systemami, często wyposażonymi we wspomagane komputerowo tomografy diagnostyczne. Taka kombinacja w połączeniu z możliwością automatycznego dynamicznego ustawiania kolimatora MLC stwarza ogromne możliwości planowania zabiegów terapeutycznych. Dzięki takiej kombinacji radiolog może w trakcie zabiegu terapeutycznego kontrolować prawidłowość lokalizacji wiązki, a tym samym sprawdzać, czy odpowiada ona zaplanowanej procedurze i wprowadzać ewentualne korekty.

Gama urządzeń wykorzystywanych we

współczesnej radioterapii jest bardzo szeroka. Możliwości urządzeń istniejących obecnie w specjalistycznych ośrodkach onkologicznych są imponujące. Kluczowe znaczenie przy tworzeniu nowoczesnych systemów odegrały osiągnięcia w dziedzinie elektroniki, informatyki, algorytmów przetwarzania danych i obrazów, automatyki systemów sterowania, mechaniki precyzyjnej, a także współczesnych materiałów i technologii.

Jednym z wielu przykładów nowoczesnego rozwiązania może być akcelerator liniowy Clinac iX firmy Varian Medical Systems, przystosowany zarówno do radioterapii, jak i do radiochirurgii. Dla wyjaśnienia należy z pewnym uproszczeniem podać, że "radioterapia" odbywa się drogą przeprowadzania wielu naświetlań mniejszymi, odpowiednio zaplanowanymi dawkami, natomiast "radiochirurgia" polega na zastosowaniu jednego, precyzyjnie zlokalizowanego zabiegu (w niektórych przypadkach zabiegów takich jest kilka), podczas którego intensywna wiązka promieniowania spełnia jak gdyby rolę skalpela. Zabieg radiochirurgiczny jest oczywiście zabiegiem "bezkrwawym". Warto podać, że minimalna średnica wiązki podczas wielu zabiegów może wynosić jeden lub kilka milimetrów.



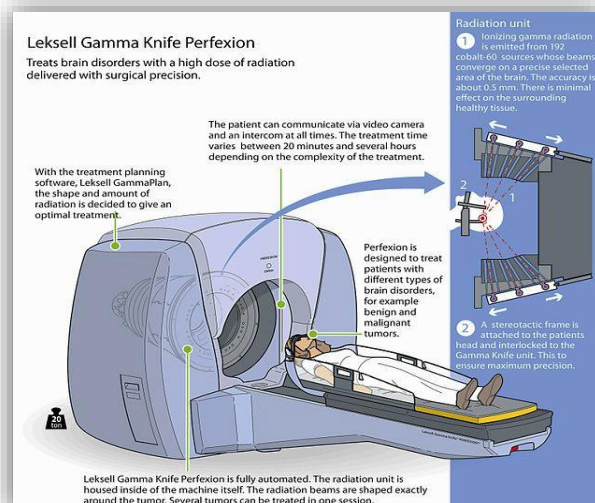
**Rysunek 18**Rys. 8 - Nowoczesny akcelerator liniowy Clinac iX firmy Varian Medical Systems.

Clinac iX jest przeznaczony specjalnie do przeprowadzania stereotaktycznych (to znaczy precyzyjnie zlokalizowanych w przestrzeni trójwymiarowej) zabiegów radioterapeutycznych z modulacją intensywności wiązki "IMRT" (Intensity Modulated Radio-Therapy) a także radioterapii kierowanej obrazem "IGRT" (Image Guided Radio-Therapy). Przy tej ostatniej technice wykorzystuje się przestrzenne obrazy organów wewnętrznych, uzyskiwane metodami komputerowej tomografii "CAT". Ogromną rolę odgrywa tutaj rozbudowany system

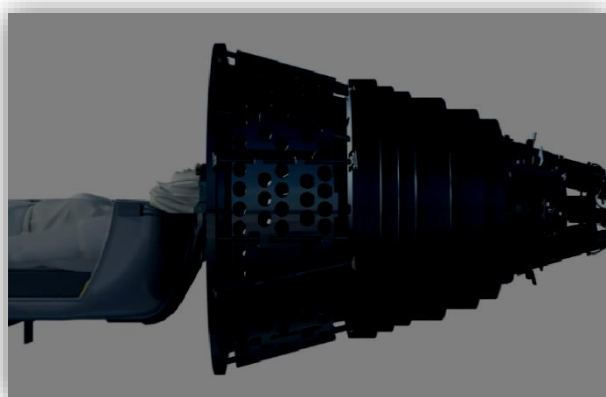
informatyczny i specjalne algorytmy przetwarzania danych. Na przykład: regulacja ustawienia listków może odbywać się dynamicznie w trakcie prowadzonego zabiegu, dopasowując przekrój wiązki zgodnie z zaplanowaną procedurą zależną od kształtu naświetlanego obszaru. Standardową jest obecnie technika przeprowadzania zabiegów zsynchronizowanych z oddechem, pracą serca, czy też mimowolnymi ruchami pacjenta. W tym celu gabinety zabiegowe dysponują wieloma pomocniczymi akcesoriami odpowiednio unieruchamiającymi osobę poddawaną zabiegowi.

Rozwój medycznej techniki akceleratorowej spowodował także podjęcie prób modernizacji "bomb kobaltowych". Szwedzka firma Elekta AB opracowała urządzenie Gamma Knife, przewidziane specjalnie do walki z guzami mózgu przy pomocy wielu, skupiających się w jednym punkcie wiązek promieniowania gamma. Wynalazek ten powstał w 1967 roku w Karolinska Institute w Sztokholmie, a jego autorami byli: Lars Leksell, Ladislau Steiner (neurochirurg pochodzący z Rumunii) oraz Börje Larsson (radiobiolog z Uniwersytetu w Uppsali).

Leksell Gamma Knife Perfection zawiera 201 źródeł kobaltu-60, każde o aktywności około 30 Ci (1,1 TBq), przy czym są one rozmieszczone pierścieniowo w solidnej konstrukcji, zapewniającej niezbędną ochronę przed ich promieniowaniem rozproszonym. Każde źródło kobaltowe ma oddzielny kolimator z blokadą. Wiązki promieniowania mogą być skoncentrowane z dokładnością 0,5 mm, dzięki czemu wpływ na tkanki otaczające naświetlany guz jest minimalny. Działanie systemu jest w pełni zautomatyzowane, co zapewnia optymalny przebieg zabiegu. Pacjent może porozumiewać się z prowadzącym zabieg za pomocą systemu łączności i wideokamery.



**Rysunek 19 Rys. 9a - Informacja o urządzeniu "Leksell Gamma Knife Perfection"**



**Rys. 9b - Głowica urządzenia "Gamma Knife"**

głowicy, co pozwala na precyzyjne sterowanie położeniem i ruchami wiązki promieniowania. Gamma Knife jest wyposażony w serię kolimatorów o średnicy od 4 mm do 16 mm. Dokładność pozycjonowania wiązki określa się na mniejszą od milimetra. Jest to urządzenie, które może być atrakcyjne dla mniejszych pracowni terapii onkologicznej, ponieważ - w odróżnieniu od klasycznych medycznych Linac'ów - nie wymaga mocowania na stałe do ścian pomieszczenia.

W powyższym artykule podjęto próbę zwięzłego przedstawienia metod i aparatury wykorzystywanej głównie do radioterapii nowotworowej. Warto jednak dodać, że w wielu ośrodkach akceleratorowych na całym świecie od szeregu lat prowadzone są prace nad wykorzystaniem wiązek protonowych, a także innego rodzaju promieniowania korpuskularnego - cząstek alfa, atomów węgla etc. w celach terapii nowotworowej. Na istniejących systemach akceleratorowych są instalowane specjalne tory wyprowadzenia wiązek do odpowiednio wyposażonych stanowisk, gdzie można przeprowadzać zabiegi radioterapeutyczne. Jest to jednak oddzielny, szeroki temat, którego omawianie wychodziłoby poza ramy niniejszego artykułu.

W radioterapii, co raz częściej spotykane jest inne urządzenie o podobnej nazwie - "CyberKnife® M6™". W zasadzie jest to produkowany przez kalifornijską firmę Accuray, Inc. robot przemysłowy, na którym została zainstalowana głowica, wewnątrz której znajduje się akcelerator liniowy o energii 6 MeV. Precyzyjna robotyka, podobna do stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym, zapewnia ogromną swobodę ruchów przy ustawianiu



**Rys. 10 - Linac do zabiegów radioterapeutycznych "CyberKnife" firmy Accuray, Inc.**



## INICJATYWY EDF ROZWIJAJĄCE KULTURĘ NAUKOWĄ I PRZEMYSŁOWĄ SPOŁECZEŃSTWA

EDF zawsze dbał o utrzymywanie bliskich więzi z lokalnymi społecznościami, na terenie których zlokalizowane są jego elektrownie. Na obszarze całego kraju, przy elektrowniach jądrowych, wodnych i konwencjonalnych działają popularne 44 ogólnodostępne punkty informacyjne. Ponadto, EDF stale i systematycznie informuje okolicznych mieszkańców o bieżącym funkcjonowaniu elektrowni. Celem EDF jest informowanie o zasadach działania elektrowni, o realizowanych pomiarach w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska, o zawodach i specjalnościach w energetyce.

Ogół społeczeństwa, a szczególnie mieszkańcy rejonów wokół elektrowni jądrowych, wodnych czy konwencjonalnych ma uzasadnioną potrzebę otrzymywania informacji o przebiegu procesu wytwarzania energii w tych zakładach. EDF zapewnia rzetelność i dostęp do aktualnych informacji dzięki stronie internetowej [edf.com](http://edf.com). Dodatkowymi źródłami informacji są: czynna 24 godziny na dobę infolinia oraz regularnie wydawane biuletyny informacyjne.

Kierownictwo elektrowni spotyka się regularnie z członkami Lokalnych Komisji Informacyjnych (stworzonych przy każdym obiekcie jądrowym), aby wysłuchać pytań i oczekiwań oraz przekazać informacje na temat działania, produkcji, remontów i innych wydarzeń z życia elektrowni. Informacje i odpowiedzi na ważne tematy związane z kwestiami wytwarzania energii elektrycznej i ochrony środowiska, udostępniane są dla każdego zainteresowanego w punktach informacyjnych znajdujących się przy każdej elektrowni.



W 2008 r. EDF odświeżył swoją ofertę edukacyjną i nakładem 11 mln euro wyremontował 31 punktów informacyjnych zlokalizowanych przy swoich elektrowniach. Pozostałe punkty zostaną po unowocześnieniu oddane do użytku do 2015 r. Dzięki nowoczesnej i interaktywnej wystawie zwiedzający mogą poznać złożony proces produkcji prądu elektrycznego. Punkty informacyjne łączą

funkcje poznawcze z prokonsumenckimi, zwiększając zaangażowanie i świadomość społeczeństwa w zastosowaniu rozwiązań dotyczących efektywności energetycznej.

EDF zaproponował nowoczesne podejście do prezentowanych treści, wykorzystując wizualizacje multimedialne oraz interaktywne prezentacje, których tematyka jest zorganizowana wokół podstawowych zagadnień:

- historii elektryczności i energetyki
- paliwa stosowanego w produkcji energii elektrycznej
- ochrony środowiska
- zastosowanej technologii
- działań EDF stymulujących i wzmacniających przemysł

Goście mogą odwiedzać punkty informacyjne przez cały rok, bez rezerwacji i opłat, a kadra wysoko wyspecjalizowanych przewodników może dodatkowo wzbogacić trasę zwiedzania o dodatkowe informacje i poprowadzić program dostosowany do różnych grup odbiorców. Przewodnicy udzielają odpowiedzi na szczegółowe pytania techniczne i naukowe, a szereg eksperymentów i pokazywanych doświadczeń pozwala dokładnie zrozumieć obszerną ekspozycję.

Zwiedzający zapoznają się na wstępie z kluczowymi kwestiami produkcji energii na świecie: wyczerpywaniem się paliw kopalnych, konsekwencjami zmian klimatu i wzrostem liczby ludności. Wiele tematów i doświadczeń adresowanych jest szczególnie do dzieci i młodzieży, wykorzystując ich ciekawość i potrzebę odkrywania. Różne sposoby wytwarzania energii elektrycznej są przedstawiane na przykładzie funkcjonowania pobliskiej elektrowni. Animacja 3D pokazuje sterownię elektrowni, procesy jądrowe, proces produkcji energii oraz przesyłu do linii energetycznych.

W innym eksperymencie można za pomocą kamery termowizyjnej dobrać i poprawić przykładowe współczynniki przenikalności cieplnej. Można dobrać okna, drzwi, energooszczędne oświetlenie i ogrzewanie, aby przekonać się i zrozumieć, jaka jest zależność, między jakością wykonania i wyposażenia budynku, zastosowanymi materiałami a oszczędnością energii.

Cała wystawa jest dostępna dla osób niepełnosprawnych, a jej opisy są w językach francuskim i angielskim.

Punkty informacyjne to wizytówka EDF, gdzie zwiedzający może odkryć różnorodność Grupy. W 2012 r. punkty informacyjne EDF gościły 370.000 zwiedzających. EDF utrzymuje ścisłe kontakty ze szkołami różnego szczebla, również z zagranicy. W 2012 roku, 62 700 uczniów i studentów odwiedziło zakłady EDF.

*Fotografie i grafika ©EDF*

**Michał Gatkowski**

## **ROZWÓJ ELEKTROWNI JĄDROWYCH WE FRANCJI OD EDF-1 (CHINON A1) NAD LOARĄ DO FLAMANVILLE 3 W NORMANDII.**

Po II wojnie światowej Francja była krajem importującym zarówno paliwa jak i energię elektryczną. Sytuacja polityczna, która w Europie była wciąż napięta, nie gwarantowała stabilnych dostaw paliw dla odbudowywanego kraju. Podjęto śmiałą decyzję wznowienia badań nad energią jądrową – zapoczątkowanych na długo przed wojną dzięki pracom Henriego Becquerela, Marii Curie-Skłodowskiej, Piotra Curie, czy Irène Joliot-Curie. Prace nad nową gałęzią wiedzy i techniki podjęto CEA – specjalnie w tym celu utworzone centrum badawcze, natomiast budowa bloków elektrowni jądrowych przypadła EDF, spółce utworzonej ze znacjonalizowanych firm zajmujących się produkcją energii i jej dystrybucją. Początki były trudne, w związku z niezajomością techniki wzbogacania uranu pierwsze projekty opierały się o reaktory gazowe chłodzone CO<sub>2</sub>, moderowane grafitem zdolne pracować na uranie naturalnym. UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) (rys.1) był pierwszym energetycznym reaktorem opracowanym we Francji, poprzedzały go prace nad badawczym reaktorem G-1 wybudowanym w Marcoule.

Niezależnie i zarazem równolegle prowadzono pracę w Wielkiej Brytanii, gdzie podobny reaktor nazwano Magnox, ze względu na stop magnezu i aluminium stosowany do koszulek paliwowych ( - w UNGG stosowano stop magnezu z cyrkonem). Problemy z reakcją koszulek przy obecności wody oraz wynikającą z tego potrzebę bardzo szybkiego przerobu wypalonego paliwa po wyjęciu z reaktora sprawiły, że tego typu reaktory nie zdobyły zbyt dużej popularności. We Francji powstało tylko osiem reaktorów energetycznych tego typu (trzy w Chinon, jeden w Bugey, dwa w St. Laurent, dwa w Marcoule o oznaczeniach G-2 i G-3).

W celu obniżenia kosztów budowy elektrowni jądrowych wprowadzono ich standaryzację. Korzyści płynące ze standaryzacji projektu budowy siłowni mogą być z łatwością wskazane na przykładzie udanych doświadczeń prowadzonych zgodnie z francuskim programem energetyki jądrowej. Program ten opierał się na planie premiera Pierre Messmera, zwanego „planem Messmera”, zakrojonego na szeroką skalę planu produkcji energii elektrycznej, w elektrowniach jądrowych. Dokument zakładał budowę 80 reaktorów do roku 1985, a całkowita liczba miała wynieść 170 do roku 2000. Postanowienie zostało podpisane w roku 1973 przez rząd Francji, a wykonane przez EDF. Preferowanym rodzajem reaktora stał się PWR, zaś w celu ograniczenia kosztów projektowania i inwestycyjnych poddano standaryzacji ogólne cechy projektowe, a także wymagania techniczne stawiane komponentom i systemom. Pierwsza grupa standaryzowanych bloków składała się z serii CP0, CP1 i CP2 — trzech wersji trzypętlowych bloków o mocy 900 MWe (rys.2). Po nich wprowadzono dwie wersje bloku czteropętlowego o mocy 1300 MWe serie P4 i P'4 (rys.3) oraz czteropętlowe bloki o mocy 1450 MWe serii N4 (rys.4). Jednak siłownie te nie były identyczne. Konieczne jest bowiem przystosowanie projektu do warunków konkretnej lokalizacji, obserwuje się również różnice w postępowaniu z paliwem. Ogólnie doświadczenia wynikające ze standaryzacji były pozytywne — wytwarzanie komponentów w długich seriach prowadzi do znaczącego obniżenia kosztów.



Po ponad 20 latach od budowy ostatniego reaktora jądrowego, w 2007r. Francja wróciła do budowy kolejnych siłowni dzięki projektowi budowy reaktora EPR (*rys.5*). Jego projekt spełnia wymogi energetyków europejskich oraz wspólne warunki bezpieczeństwa niemieckich i francuskich władz. W pracach projektowych wykorzystano doświadczenia eksploatacyjne z ponad 100 siłowni jądrowych, opracowanych i wybudowanych przez firmy Siemens i Framatome (Areva). Projekt podstawowy ukończono pod koniec roku 1997. W rezultacie przeprowadzonej w roku 1998 fazy optymalizacji projektu, mającego na celu osiągnięcie konkurencyjności ekonomicznej, moc znamionowa została zwiększona do 1650 MWe, by wykorzystać oszczędności płynące ze skali obiektu. Najważniejszymi cechami projektowymi EPR, nastawionymi na dwa kluczowe cele, są: zwiększenie bezpieczeństwa i podniesienie redukcji kosztów. Wysoki poziom bezpieczeństwa osiąga się głównie w wyniku wykorzystania dobrze wypróbowanych czynnych układów bezpieczeństwa oraz zróżnicowanych układów rezerwowych. Jedną z cech ewolucyjnych, które łagodzą skutki poważnych awarii, jest zapobieganie oddziaływaniom między stopionym rdzeniem i betonem za pomocą zastosowanej wykładziny ochronnej oraz zapewnienie czynnego chłodzenia dna i biernego zalewania pomieszczeń wodą po awarii rdzenia. Ponadto obudowa bezpieczeństwa zbudowana jest z dwóch niezależnych warstw, dzięki czemu odporna jest na zderzenia z samolotami. Środki zapewniające konkurencyjność ekonomiczną obejmują: wyższą moc znamionową, projektowane zwiększenie dyspozycyjności siłowni (do 92%) i sprawności cieplnej (według przewidywań do 36%), skrócenie czasu budowy oraz projektowy czas eksploatacji, wynoszący 60 lat. Przewiduje się znaczne zmniejszenie kosztu cyklu paliwowego dzięki wykorzystaniu rdzenia o wysokim stopniu wypalenia oraz zmniejszenie objętości wysoko aktywnych odpadów. Obecnie w budowie znajduje się 4 bloki z reaktorem EPR, z czego po jednym we Francji i Finlandii oraz dwa w Chinach, planowana jest także budowa 4 bloków w Wielkiej Brytanii. Niestety koszty i czas budowy pierwszych dwóch bloków zostały znacznie przekroczone, jednakże wspomniana wcześniej standaryzacja procentuje - bloki budowane w Chinach są obecnie (grudzień 2013) na etapie końcowych prac betonowych i są prowadzone zgodnie z harmonogramem.

Francja pracowała nie tylko nad reaktorami gazowymi i wodnymi, wybudowano w tym kraju kilka reaktorów prędkich chłodzonych ciekłym sodem. Pierwszy reaktor badawczy osiągnął krytyczność w 1967 roku, był to Rapsodie o konstrukcji pętlowej i mocy 40 MWt. Kolejnym krokiem było zaprojektowanie i zbudowanie reaktora basenowego o zdecydowanie większej mocy, czyli Phénix (*rys.6*) o mocy 233MWe. Reaktor pracował przez 37 lat, a doświadczenie zdobyte przez CEA i EDF, (który również uczestniczył w projekcie) są bezcenne, obecnie reaktor jest w fazie permanentnego wyłączenia, sama rozbiórka takiego obiektu jest niewątpliwie jedyna w swoim rodzaju. Kolejnym krokiem, część komentatorów uważa że przedwczesnym była budowa reaktora Superphénix (*rys.7*) . Była to konstrukcja wywodząca się z poprzednika - Phenix-a, jednakże moc maksymalną zwiększono do 1200MWe, konstrukcja która w swoich założeniach wyprzedzała epokę była nękana przez ciągłe problemy techniczne (przecieki ciekłego sodu oraz korozję), a także protesty społeczne i polityczne. Gdy w końcu problemy zostały rozwiązane i osiągnięto 90% mocy, postanowiono zamknąć elektrownię, która przez 11 lat od uruchomienia przez większość czasu była remontowana, bądź czekała na decyzję polityczne.

Należy zauważyć, że u podwalin francuskiej energetyki jądrowej leży doświadczenie, jakim dysponuje EDF który zajmuje się budową elektrowni i jest właścicielem i operatorem bloków - Areva, – dysponująca technologią a także sprawnie działający dozór jądrowy i dział

badawczy – CEA. Najciekawszym z tej trójki jest bez wątpienia francuski operator, ze względu na olbrzymie doświadczenie zdobyte w kierowaniu 58 obecnie pracującymi blokami. Firma największym producentem energii elektrycznej z atomu na świecie, obsługuje również największą liczbę reaktorów jądrowych i ma w tym względzie największe doświadczenie. W tabeli zostały pokrótce porównane parametry najważniejszych reaktorów francuskich.

**Tabela 3 Porównanie różnych technologii reaktorowych stosowanych we Francji.**

Parametry		Jedn.	EDF-1 (EDF-3)	PHENIX (SUPERPHENIX)	Flamanville-2 (Flamanville-3)	Uwagi
0	1	2	3	4	5	6
1	Moc elektryczna netto	MW	82 (488)	250 (1200)	1600 (1750)	[1] –[5] lata pracy
2	Chłodziwo reaktora		CO <sub>2</sub>	Na	H <sub>2</sub> O	elektrowni już wyłączonych:
3	Temp. Chłodziwa na wyjściu reaktora	°C	365 (410)	560 (545)	330	1)1963-73 2)1966-90 3)1973-2009 4)1986-97
4	Podgrzew chłodziwa w reaktorze	°C	215 (170)	160 (153)	34,2	
5	Ciśnienie w reaktorze	bar	15,6 (26,5)	atm	155	
6	Ciśnienie pary przed turbina	bar	21,6 (35,3)	164 (177)	75,5 (75)	
7	Temp. Przed turbiną	°C	342 (400)	510 (487)	nasycona ~ 290°C	
8	Sprawność netto elektrowni	%	22,7 (31)	41,4	36-37	
9	Wypalenie	MWd/u	3·10 <sup>3</sup> 3,5·10 <sup>3</sup> )	100·10 <sup>3</sup> (100·10 <sup>3</sup> )	60·10 <sup>3</sup>	
10	Okres pracy	lat	10 <sup>1</sup> (24) <sup>2</sup> )	36 <sup>3</sup> 11 <sup>4</sup> )	60	

Opracował Michał Gatkowski

Fotografie:  *Wikimedia Commons*



**Rysunek 20** Widok na budynki reaktorów EDF-1, EDF-2, EDF-3 w Chinon.



**Rysunek 2** Elektrownia w Saint-Laurent składająca się z dwóch reaktorów CP2, 900MW



**Rysunek 3** Elektrownia Cattenom składa się z czterech bloków o mocy 1300 MWe serii P4.



**Rysunek 4 Elektrownia Civaux, dwa bloki klasy N4 po 1450 MWe każdy.**



**Rysunek 5 Widok na budowę elektrowni Flamanville 3 opartej o reaktor EPR.**



**Rysunek 6 Budynek reaktora Fast Breeder Reactor Phenix zbudowanego w Marcoule.**



**Rysunek 7 Widok na budynek reaktora Superphenix, znajdującego się w Creys-Malville.**

Jerzy Chmielewski

## HINKLEY POINT C: FAKTY I LICZBY



Hinkley Point C jest planowaną elektrownią jądrową w miejscowości Somerset, w południowo-zachodniej Anglii, odległej od Londynu około 260 km. Jej teren przylega do istniejącej elektrowni jądrowej Hinkley Point B, należącej do EDF Energy. W elektrowni Hinkley Point C będą budowane dwa bloki z reaktorami EPR o mocy 1,6 GW każdy. Będzie to pierwsza elektrownia jądrowa budowana w Zjednoczonym Królestwie po upływie ponad 20 lat.

### Hinkley Point C w liczbach

- Planowana elektrownia jądrowa o mocy 3,2 GW z dwoma reaktorami EPR (każdy o mocy 1,6 GW) będzie wytwarzać 7% energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii - ilość wystarczającą dla 5 milionów domostw. Elektrownia będzie działała, przez co najmniej 60 lat. Dla porównania: elektrownia Hinkley Point B z dwoma reaktorami ma moc 880 MW - wynika stąd, że nowy zakład energetyczny będzie wytwarzał prawie czterokrotnie więcej energii elektrycznej.
- Reaktory EPR stanowią ewolucję technologii wysokociśnieniowych reaktorów wodnych – takich jak wykorzystywane w Sizewell B oraz w 58 reaktorach jądrowych należących do EDF we Francji. Mają one ulepszone cechy bezpieczeństwa z poczwórnym systemem zabezpieczeń. Są też bardziej wydajne, wytwarzają mniej długożyciowych odpadów promieniotwórczych, potrzebują mniej uranu.
- Teren budowy Hinkley Point C zajmuje powierzchnię 175 hektarów.
- Główne roboty ziemne będą wymagały wykopania 4 milionów metrów sześciennych ziemi - jest to równoważne objętości 1,300 basenów olimpijskich.
- Będzie użyte 3 mln ton betonu – 75 razy więcej niżeli na Stadionie Millennium w Cardiff.
- Będzie potrzebne 230.000 ton stali zbrojeniowej, jest to ilość wystarczająca dla ułożenia linii kolejowej o długości 1.900 km, która mogłaby połączyć Londyn z Rzymem.
- Wykonano szczegółowe analizy aby zmaksymalizować możliwy udział brytyjskich firm w projekcie. Badania wykazują, że wkład tych firm może stanowić 57% wartości budowy.
- Na świecie jest wiele projektów w trakcie realizacji, a dalsze są planowane. Zwiększanie potencjału przemysłowego za pośrednictwem Hinkley Point C otworzy przed brytyjskimi przedsiębiorstwami szerokie możliwości działania na świecie.
- W 2012 roku energetyka jądrowa zaspokajała około 18% zapotrzebowania na energię elektryczną Wielkiej Brytanii. 18 reaktorów na całym jej obszarze jest obsługiwanych przez EDF Energy. Elektrownia jądrowa jest niskoemisyjnym źródłem energii - nawet uwzględniając prace budowlane składowa CO<sub>2</sub> jest mniej więcej taka sama, jak w przypadku lądowych elektrowni wiatrowych - zapewniającym niezawodne i bezpieczne dostawy energii. Hinkley Point C pozwoli uniknąć emisji 10 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie - co jest równoważne emisji ponad 40 % wszystkich ciężarówek na drogach Wielkiej Brytanii.
- Oczekuje się, że ponad 40% starych elektrowni jądrowych w Wielkiej Brytanii zostanie zamkniętych do roku 2025, gdy tymczasem przewiduje się globalny wzrost zapotrzebowania na energię, a wydobycie ropy i gazu na Morzu Północnym ma tendencję spadkową. A zatem Hinkley Point C

- pomoże zaspokoić przyszłe potrzeby energetyczne .
- Hinkley Point C byłaby pierwszą nową elektrownią jądrową, jaka zostałaby zbudowana w UK od czasu uruchomienia elektrowni Sizewell B w 1995 roku.
- Przy budowie powstanie 25 000 nowych miejsc pracy oraz 900 w czasie eksploatacji elektrowni. Ponad 1 200 firm z hrabstwa Somerset oraz 550 krajowych zgłosiło formalne zainteresowanie swoim uczestnictwem.
- W szczytowym okresie budowy wkład projektu w miejscową gospodarkę wyniesie 100 mln £ rocznie oraz około 40 mln £ rocznie po rozpoczęciu normalnej pracy.

## Dlaczego Hinkley Point C jest potrzebna

Wielka Brytania stoi w obliczu trudnych czasów ze względu na swoją energetyczną przyszłość. Przewiduje się, że do 2025 roku ponad 40 % starych elektrowni zostanie zamkniętych, podczas gdy popyt na elektryczność będzie wzrastał.

Zasoby własne ropy naftowej i gazu Wielkiej Brytanii maleją. Dlatego też pojawia się z jednej strony luka energetyczna, a z drugiej potrzeba zapewnienia wystarczających dostaw do brytyjskich gospodarstw domowych i zakładów przemysłowych niskoemisyjnej energii elektrycznej wytwarzanej po przystępnej cenie.



Okolo 40% energii w brytyjskim miesie energetycznym w 2030 r. moze pochodzić z elektrowni jądrowych.

Hinkley Point C (HPC) będzie dysponowała mocą wystarczającą do wyprodukowania - przy niskiej emisji, CO<sub>2</sub> - bezpiecznej, niezawodnej energii elektrycznej wystarczającej dla 5 milionów klientów.

Energetyka jądrowa niesie ze sobą trzy główne korzyści:

- jest to technologia wytwarzania energii o obniżonej emisji CO<sub>2</sub>, a więc skutecznym pod względem kosztów sposobem redukcji emisji.
- energetyka jądrowa przyczynia się do długotrwałej stabilności cen, przynosząc tym samym korzyści zarówno konsumentom jak i przemysłowi.
- energetyka jądrowa pomaga ograniczać zależność od importowanego gazu, w sytuacji malejących jego zasobów na Morzu Północnym.



## Polityka rządu brytyjskiego

Potrzebę wykorzystania energii jądrowej, jako części przyszłego niskoemisyjnego mixu energetycznego, uznała zarówno koalicja rządowa jak i opozycja parlamentarna.

- W National Policy Statement - opublikowanym w lipcu 2011 roku uznano pilną potrzebę budowy nowych mocy.
- rząd uznaje ważną rolę energii jądrowej w przyszłym mixie energetycznym, jako niskoemisyjnego źródła energii.
- prywatni inwestorzy sfinansują, zbudują i będą eksploatować nowe elektrownie jądrowe.

## Konsultacje społeczne i uzyskanie zezwoleń

Projekt jądrowy stał się przedmiotem konsultacji zgodnie z dokumentem "Planning Act 2008" co wzmocniło trwałe powiązania z miejscowymi władzami i lokalnymi społecznościami hrabstwa Somerset.

Oficjalne konsultacje społeczne objęły przebiegły w dwóch etapach w okresie od listopada 2009 r. do sierpnia 2011 r.:

- w konsultacjach udział wzięło blisko 6 500 osób.
- udzielono ponad **2 000 odpowiedzi**.
- w Somerset odbyły się **34 wystawy informacyjna**.
- odbyło się **67 spotkań** z miejscowymi radnymi i innymi grupami.
- Na poświęconej projektowi stronie internetowej odnotowano ponad **109 000 odwiedzin**.

Wniosek o wydanie zgody na zagospodarowanie terenu (DCO - Development Consent Order) został złożony do Komisji Planowania Infrastruktury w październiku 2011 r. Zgoda na zagospodarowanie terenu została wydana przez sekretarza stanu ds. energii i zmian klimatu w dniu 19 marca 2013 r.

## Dotychczasowe zaawansowanie projektu

- zezwolenie na lokalizację elektrowni jądrowej zostało wydane przez Urząd Dozoru Jądrowego 26 listopada 2012 r.
- licencja reaktora EPR została wydana przez dozór jądrowy w dniu 12 grudnia 2012 r. - proces ten wymagał 850 000 godzin pracy specjalistów.
- w marcu 2013 r. zostały udzielone przez Agencję Ochrony Środowiska trzy podstawowe zezwolenia środowiskowe.
- Zgodnie z dokumentem „Energy Act 2008” wymagane jest sfinansowanie planu likwidacji elektrowni. W związku z tym operatorzy elektrowni jądrowych są zobligowani do dysponowania planem, mechanizmami oraz funduszami na likwidację elektrowni i gospodarkę odpadami promieniotwórczymi. Projekt HPC został dotychczas dobrze oceniony pod tym względem.

## Nowe miejsca pracy

Hinkley Point C będzie silnym impulsem do rozwoju kompetencji, tworzenia nowych miejsc pracy. Brytyjskie przedsiębiorstwa będą mogły konkurować przy podobnych projektach na świecie.

W okresie budowy elektrowni powstanie 25 000 nowych miejsc pracy, przy czym 5 600 pracowników zostanie zatrudnionych w szczytowym okresie budowy oraz 900 pracowników po jej zakończeniu.

Szacujemy, że dla samego projektu Hinkley Point C będziemy potrzebowali ponad 400 uczniów w dziedzinie budownictwa oraz 200 uczniów w zakresie obsługi.



EDF Energy czuje się zobowiązana do otwierania możliwości przed miejscową ludnością, uruchamiając usługi w zakresie zdobywania kompetencji i pośrednictwa pracy, aby przyuczyć miejscową ludność do specyficznych zawodów, na które

istnieje zapotrzebowanie w firmach wykonawczych. Poczujemy się również do stworzenia w HPC stabilnego zatrudnienia oraz będziemy działać z jej budowniczymi i partnerami szkoleniowymi w celu podnoszenia umiejętności ludzi w okresie budowy i eksploatacji elektrowni.

EDF Energy stawia na uczącą się młodzież jako swoich przyszłych ewentualnych pracowników.

- EDF Energy uruchomiła program edukacyjny "Inspire", od nauki, poprzez praktyki do ewentualnego zatrudnienia w elektrowni.
- W 2012 roku ogłosiliśmy, że inwestujemy 2 mln £ w Bridgewater College w Somerset, aby pomóc studentom i miejscowej ludności w utrwalaniu nowych umiejętności, szkoleniu i pracy w Hinkley Point C. Większa część tej inwestycji - 1,5 mln £ - została przeznaczona na Ośrodek Umiejętności Budowlanych w Bridgewater College, który zapewni usługę typu "one-stop-shop", aby sprostać potrzebom szkoleniowym Hinkley Point.
- Dalsze 1,6 mln £ zostało zainwestowane w West Somerset Community College w ramach projektów "Hinkley Ready" oraz "Enterprise", umożliwiających miejscowej ludności pełniejsze wykorzystanie możliwości, jakie daje im projekt Hinkley Point C.

**Tłumaczenie: Jerzy Chmielewski**

**Fotografie i diagram ©EDF**



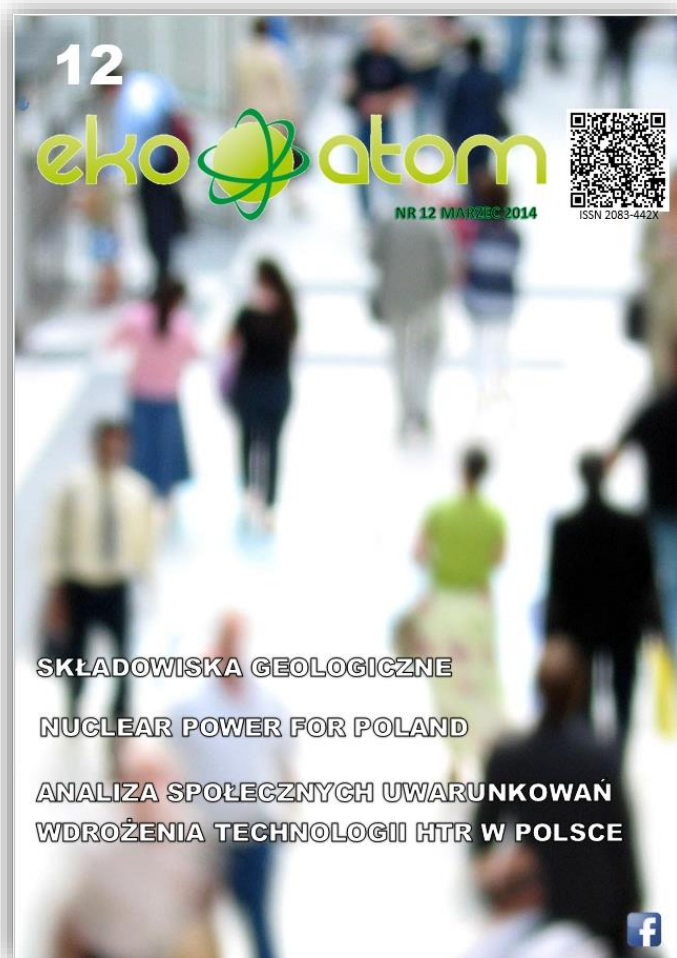
## Key

A Reactor building  
 B Four safeguard buildings  
 C Fuel building  
 D Nuclear auxiliary building

E Radioactive waste processing building  
 F Emergency diesel generator building  
 G Turbine building  
 H Power transmission platform

I Operator building  
 J Pumphouse building  
 K Outfall structure  
 L Conventional electrical building

- A - budynek reaktora
- B - budynki systemów bezpieczeństwa
- C - budynek z paliwem
- D - budynek pomocniczy
- E - budynek przetwarzania odpadów
- F - budynek z awaryjnym generatorem z silnikiem Diesla
- G - maszynownia
- H - transformatory
- I - budynek eksploatacji
- J - stacja pomp
- K - zrzut wody chłodzącej
- L - budynek urządzeń elektrycznych



## W NASTĘPNYM NUMERZE:

### *Rola komunikacji społecznej we wdrażaniu nowoczesnych technologii jądrowych w Polsce*

Artykuł prezentuje wyniki badań realizowanych w ramach strategicznego projektu badawczego "Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej", który jest odpowiedzią na postulat zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju w warunkach wdrożenia w Polsce energetyki jądrowej.

### *Wyniki europejskiego testu wytrzymałościowego*

W następstwie wypadków w elektrowni Fukushima Dai-ichi Rada Europy wystąpiła w dniach 24-25 marca 2011 r. z propozycją przeprowadzenia testów wytrzymałościowych (odpornościowych) we wszystkich europejskich elektrowniach jądrowych. Rada zaprosiła Europejską Grupę Dozorów Jądrowych (ENSREG - European Nuclear Safety Regulators Group), Komisję Europejską oraz Zachodnioeuropejskie Stowarzyszenie Regulatorów Jądrowych (WENRA - Western

European Nuclear Regulators Association) do opracowania zakresu i sposobów wykonania testów wytrzymałościowych.

### *Nuclear Power for Poland*

The present situation in Poland and Europe, regarding electric power generation by source, is discussed in the paper. The results of the implementation of EU competitive-low-carbon economy policy in some most developed countries in the continent, have given already good experimental data for evaluation of this strategy. Analysis of the reports provided by official sources for Germany, Denmark and Finland is a base for EU energy policy evaluation. The combustion technologies will be a main energy sources for many years from now. Therefore effects of fossil fuels and biomass combustion on the environment are presented briefly. Finally, the developments regarding Polish Nuclear Energy Programme are overviewed.

### *Projekt CIGEO*

Reaktory atomowe wykorzystują paliwo zawierające uran i czasami pluton. Z upływem czasu paliwo staje się mniej wydajne i musi zostać wymienione, stając się albo bezpośrednio odpadem promieniotwórczym lub też może zostać poddane recyklingowi.

Barbara Piotrowska, Krzysztof Isajenko, Marian Fujak, Andrzej Boratyński, Paweł Lipiński

## HIGH SENSITIVITY AIR RADIOACTIVITY MONITORING SYSTEM IN POLAND

### Streszczenie

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej skonstruowało w 2011 r. mobilne urządzenie do poboru i pomiarów on-line stężeń radionuklidów w aerozolach powietrza (Mobile Aerosol Sampling Station, MASS-1000), a także udoskonało istniejącą stację ASS-500 (Aerosol Sampling Station). Urządzenia te służą do rutynowego monitoringu przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego. W czasie awarii jądrowej w Fukushimie w 2011 r. –system sieci stacji ASS-500 był w stanie wykryć stężenia promieniotwórcze radionuklidów na poziomie poniżej  $1.0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (pomiar off-line), co odpowiadało wzrostowi mocy dawki od radionuklidów sztucznych o 0.0001 % powyżej tła. Przewoźna stacja MASS-1000 była prezentowana w dniach 17-21 czerwca 2013 podczas konferencji w Wiedniu noszącej tytuł „ Science and Technology CTBTO”. Wzbudziła tam ogromne zainteresowanie gości odwiedzających wystawę towarzyszącą konferencji.

### Summary

In 2011, the Central Laboratory for Radiological Protection (Poland) developed both stationary and mobile stations for the collection of aerosols from ground-level air. The Aerosol Sampling Station is used for the routine monitoring of the ground-level atmosphere. During the Fukushima accident - in March 2011 - the network of stations were able detected the radionuclides on the level lower than  $1.0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ , which corresponds with the rise of the committed dose obtained from the natural background by 0.0001%.

### Introduction

The new stationary station is named NASS-500 (New Aerosol Sampling Station – Fig. 1) after widely known and used ASS-500 station. The station is a stand-alone, all-weather instrument for continuous collection of air aerosols. The stabilized and programmable high airflow rate of 100 – 900  $\text{m}^3/\text{h}$  (nominal 500  $\text{m}^3/\text{h}$ ) through a Petrianov (polyvinylchloride) filter allows representative samples to be taken, enables accurate laboratory  $\gamma$ -spectrometric measurements of natural and artificial airborne radionuclides, covering a wide range of activity concentrations, starting from  $0.1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (weekly sampling). Optionally, the gamma-ray spectrometer installed above the filter allows the on-line radioactivity control [1]. In Poland, there are located in 12 sites in the country, and the network of ASS-500 stations belongs to the Polish Early Warning System. The gamma spectra and other parameters, e.g. the air flow rate through the filter, are transmitted to the station computer and sent to CLOR. More than 60 ASS-500 stations are installed worldwide.



Fig. 1. New Aerosol Sampling Station – 500[1]

### Parameters:

- Petrianov filter type- FPP-15-1.5 (0.44 x 0.44 m),

# PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

- Air flow with stabilization 100 - 900m<sup>3</sup>/h (nominal 500 m<sup>3</sup>/h),
- Voltage 220/230 V,
- Control of the weather conditions,
- Directional ceramic infrared heaters,
- Laboratory LLD as low as 0.1 μBq/m<sup>3</sup> (weekly sampling),
- Power consumption – max. 2500 W [1].

## Operation principles

The Petrianov filter type FPP 15-1.5, used for the collection of the aerosols, was tested for aerosols with diameters between 0.3 and 1.25 μm, at linear air velocities through the filter varying from 0.25 to 4 m/s per cm<sup>2</sup> with the pressure drop through the filter Δp from 0.5 – 9.3 kPa, and its efficiency proves to be between 96.4% and 99.9%. Two infrared heaters are installed above the filter to keep it dry during sampling. Optionally, the NaI(Tl) detector mounted on a special frame placed directly over the center of the filter enables the monitoring of the content of the radionuclides being collected on the filter. The measurement of the activity concentration of the radionuclides deposited on the filter is performed at low-background laboratory by means of the HPGe spectrometer of good resolution. The preparation procedure of the filter for further measurements in the laboratory is shown in Figure 2 [1].

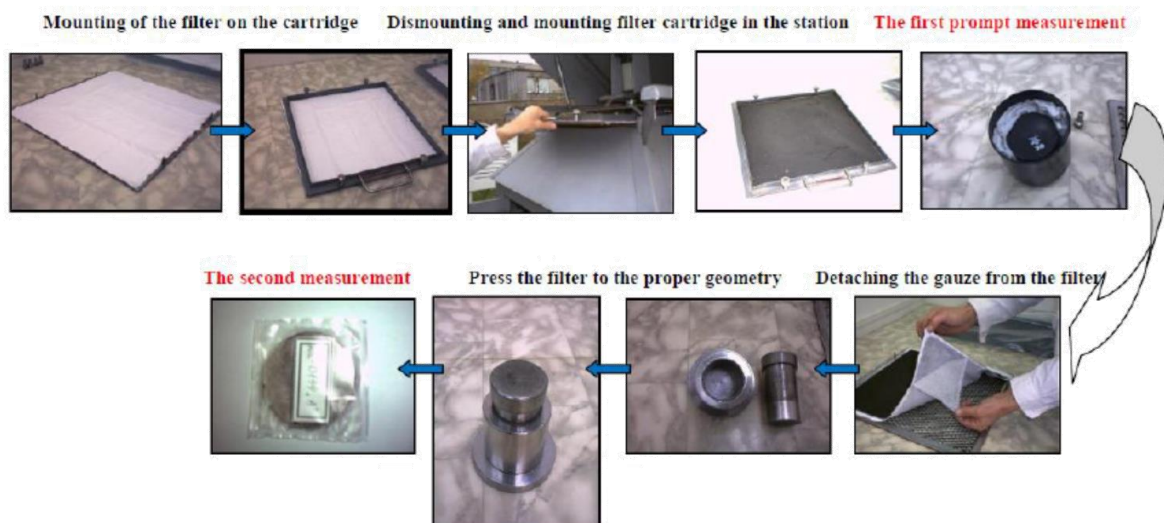


Fig. 2. The filter preparation procedure for the laboratory measurement.

The station operates in two modes:

**off-line mode** – sampling and subsequent laboratory measurements

- the aerosols are collected on a filter (with nominal air flow: ~500 m<sup>3</sup>/h),
- filter is exchanged once a week (in normal situation),
- high performance gamma spectrometry (**HPGe**) in the laboratory,
- detection limits: **about 0.1 μBq/m<sup>3</sup>**,

**on-line mode** – continuous monitoring of the radioactivity on the filter (Figs. 3 and 4)

- **NaI (2x2") detector placed** above the filter
- gamma spectrum (2048 channels) collected hourly
- detection limits: **about 0.8 Bq/m<sup>3</sup> (Cs-137)**

# PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

- **7 energy windows** (especially for I-131,Cs-137): number of total counts and their ratios
- data transmission to the central server [1].



Fig. 3. NaI(Tl) detector and heating of the filter [1]

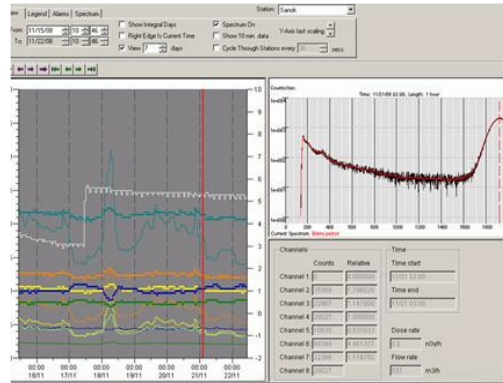


Fig. 4. The on-line filter measurement [ 1]

## Results of the measurements following the Fukushima accident

During the accident in the Fukushima NPP the air masses reached over Poland around 23 March 2011. The network of ASS-500 stations is the only one in Poland that detected the radioactive contamination from accident the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. All of the stations found I-131, I-132, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Te-132, Te-129m and some of the stations detected La-140, Nb-95 as well (Tables 1 and Fig 5.) [2].

Table 1. Results of the measurements of aerosols for selected radionuclides

Results during the Fukushima accident	
Detected isotope:	range [ $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ]
I-131	0.4 – 5400
I-132	0.4 – 120.4
Cs-134	0.3 – 618.5
Cs-136	0.9 – 23.4
Cs-137	0.5 – 732.2
Te-132	1.0 – 111.0

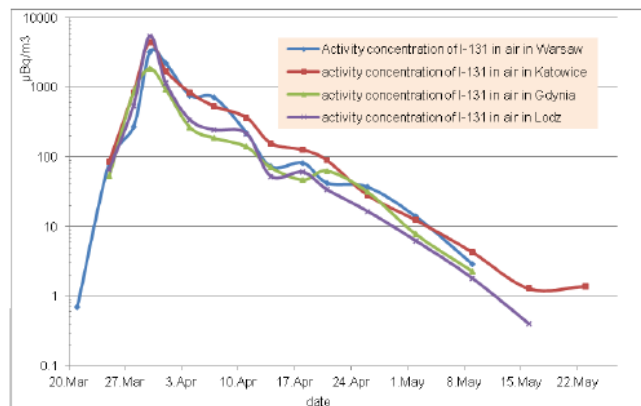


Fig.5. Results of the measurements of I-131 during the Fukushima accident [2].

## The mobile aerosol sampling station

In 2011 the Central Laboratory for Radiological Protection introduced the mobile station for prompt sampling of the atmospheric aerosols from large volumes of the air and controlling the radionuclide content in the ground-level atmosphere. The mobile station substantially increases the response capabilities in case of the nuclear and radiological emergencies, as well as the malevolent use of the radioactive substances. The radioactivity of the collected aerosols is measured using two

modes: **on-line mode** – the real-time measurement of the radioactivity on the filter during the sampling of the aerosols and **off-line-mode** – after the sampling the filter is pressed and measured



**Fig. 6. The mobile aerosol sampling and measuring station at work**

in the laboratory using the HPGe semiconductor detector. The on-line  $\gamma$ -spectrometer consists of the LaBr<sub>3</sub> (1.5"x1.5") detector and the computer system for collection and analysis of the spectra. The air-flow through the filter can be programmed and stabilized throughout the entire sampling period in the range between 100 and 1000 m<sup>3</sup>/h simultaneously measuring the concentration of the radionuclides present in the collected atmospheric aerosols. The detection limit for the artificial radionuclides at 1-hour sampling period and the airflow of 1000 m<sup>3</sup>/h is estimated to be as low as 0.1 Bq/m<sup>3</sup> (Cs-137) and recommended sampling time is about 5 h. The mobile station uses Petrianov filter having the dimensions 50 x 50 cm. The data collected by the station are transferred in real time to the computer by means of the radio (WiFi with the range of up to 500 meters).

The station is equipped with the comfortable, ergonomic tetrapod allowing to collect the aerosols and perform the measurements in any terrain. The mobile station is characterized by the simple usage, shock and weather resistance, high reliability and full mobility. The station assembly time in the field is less than 10 minutes [3].

The mobile station was presented during the conference „ Science and Technology CTBTO”, Hofburg, Vienna, 17-21 June 2013.

**Fujak Marian, Isajenko Krzysztof, Boratyński Andrzej, Piotrowska Barbara, Andrzej Boratyński**  
*Central Laboratory for Radiological Protection, Warszawa, Poland*

**Lipiński Paweł**

*National Atomic Energy Agency, Warszawa, Poland*

## References:

- [1] K. Isajenko, P. Lipiński, M. Fujak, A. Boratyński - ASS-500 Manual – ver. 2.0, 2013, Central Laboratory for Radiological Protection Warsaw, TECDOC.
- [2] M. Fujak, K. Isajenko, P. Lipiński, B. Piotrowska, I. Kwiatkowska, 2013 „ Radioactivity of the atmospheric aerosols measured in Poland following the accident in the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant in 2011”, NUKLEONIKA 2013, 58(4).
- [3] M. Fujak, K. Isajenko, B. Piotrowska, 2012, Network radiological air monitoring stations in Poland (stations ASS-500) ECOATOM 09-10/2012.



**Piotr Świdorski, Burmistrz Gminy Różan**

## **SKŁADOWISKO W SĄSIEDZTWIE. DOŚWIADCZENIA RÓŻANA.**

Różan to miasto położone w północno-wschodniej części województwa mazowieckiego w powiecie makowskim, na wysokiej skarpie stanowiącej fragment Wysoczyzny Ciechanowskiej. Jedno z najstarszych miast na Mazowszu (nadanie praw miejskich – 1378 r.). Miasto jest siedzibą gminy obejmującej również teren 18 sołectw. Powierzchnia gminy – 8410 ha (w tym miasto – 667 ha). Liczba mieszkańców wg stanu na dzień 31/12/2012 r. – 4548 osób (w tym miasto – 2757 osób).



Różan to bogata historia, wspaniały klimat, dogodnie położenie u zbiegu szlaków komunikacyjnych, ośrodek turystyczny z blisko tysiącem działek rekreacyjnych w okolicy miasta. Różan to niskie podatki, dobry klimat dla biznesu, rozbudowana infrastruktura techniczna (drogi, wodociągi, kanalizacja itp.). Różan to nowoczesne placówki oświatowe, doskonała baza sportowa (pełnowymiarowa hala sportowa, nowy stadion wraz z obiektami towarzyszącymi). I w końcu, Różan to miejskie lokalizacji Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w zabytkowym carskim Forcie nr 3.

Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie funkcjonuje nieprzerwanie od 50 lat. Jego usytuowanie w granicach administracyjnych miasta, w nieodległym od zabudowań carskim forcie, w bardzo atrakcyjnej turystycznie Dolinie Dolnej Narwi, skutecznie ogranicza możliwości rozwoju całej Gminy Różan. Mowa tu zarówno o ograniczeniach dotyczących zabudowy mieszkaniowej, jak i obawach ewentualnych inwestorów zainteresowanych prowadzeniem działalności gospodarczej w Różanie. Obaw tych nie uspokajają racjonalna polityka podatkowa Gminy, ułatwienia dla inwestorów, doskonale rozwinięta infrastruktura techniczna (w tym przede wszystkim drogowa), oraz położenie na szlaku dwóch dróg krajowych nr 60 i 61.

Gmina Różan od lat współpracuje z dysponentem Składowiska – Zakładem Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Otwocku-Świerku. Jest to współpraca oparta na zaufaniu, pełnej transparentności podejmowanych działań, informowaniu się i udziale społeczeństwa w sprawowaniu kontroli nad działalnością Składowiska. Udało się nam zbudować platformę wzajemnych pozytywnych relacji, dzięki której mieszkańcy są w stanie zaakceptować radioaktywne sąsiedztwo.

Budowanie wspomnianych relacji nie było łatwe. Różaniacy, ale też zapewne pracownicy ZUOP w Świerku, pamiętają początek lat dziewięćdziesiątych i bardzo głośne protesty mieszkańców związane z lokalizacją jedyne w Polsce „wysypiska odpadów radioaktywnych”. Nie pomagały w tym ówczesne doniesienia mediów (szczególnie prasy), o zagrożeniach płynących ze strony Składowiska, plotki na temat rodzaju przechowywanych w nim odpadów i brak jakiegokolwiek

# PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

rekompensaty dla Gminy z tytułu jego lokalizacji. W wyniku gwałtownych protestów mieszkańców, począwszy od 1990 roku pomiędzy Gminą Różan a Instytutem Energii Atomowej były zawierane porozumienia i umowy o partycypacji w rozbudowie infrastruktury komunalnej i społecznej Gminy. Na podstawie tych dokumentów otrzymywaliśmy niewielką rekompensatę z tytułu utraconych przez Gminę korzyści związanych z lokalizacją składowiska.

Ostatecznie sprawa rekompensaty znalazła swój finał w zapisie ustawowym, który zagwarantował gminie, na terenie której znajduje się Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, coroczną opłatą z budżetu państwa. Obecnie zapis całego art. 57 ustawy – Prawo atomowe brzmi:

„Art. 57. 1. Gminie, na terenie której znajduje się Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, przysługuje coroczna opłata z budżetu państwa:

1) od dnia przyjęcia pierwszego odpadu do składowiska do dnia podjęcia decyzji o zamknięciu składowiska - w wysokości 400% dochodów z tytułu podatku od nieruchomości znajdujących się na terenie gminy, uzyskanych w roku poprzednim, jednak nie większa niż 8.550 tys. zł;

2) po podjęciu decyzji o zamknięciu składowiska - w wysokości 50% dochodów z tytułu podatku od nieruchomości znajdujących się na terenie gminy, uzyskanych w roku zamknięcia składowiska, przez okres odpowiadający okresowi eksploatacji składowiska.

2. Opłata, o której mowa w ust. 1, jest przekazywana gminie z budżetu państwa w równych ratach kwartalnych, w terminie do 14 dni od upływu ostatniego miesiąca kwartału.

3. Rata kwartalna nie przysługuje gminie, jeżeli w następstwie decyzji organów gminy albo powiatu, na którego obszarze położona jest gmina, nie było możliwe w dowolnym okresie w danym kwartale przyjmowanie odpadów promieniotwórczych do składowiska.”

Od momentu uchwalenia ustawy – Prawo atomowe i jej wejścia w życie z dniem 1 stycznia 2002 r., opłata o której mowa wyżej była rokrocznie waloryzowana o wskaźnik uzyskanych przez Gminę dochodów podatkowych w roku poprzednim i wynosiła w latach 2004 – 2009:

Rok	Uzyskany podatek od nieruchomości	Opłata
2004	1.988.563,20	7.529.796,58
2005	2.015.597,83	7.954.252,00
2006	2.104.711,74	8.062.392,00
2007	2.082.123,71	8.418.846,96
2008	2.135.467,44	8.328.494,84
2009	2.227.406,09	8.541.869,76

Począwszy od roku 2010 Gmina Różan otrzymuje z budżetu państwa maksymalną stawkę opłaty tzn. 8.550.000 zł. Stanowi to blisko 40% dochodów budżetowych samorządu. Pieniądze te są w zasadzie jedyną wartością dodaną dla lokalizacji Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych, które funkcjonuje w Różanie. Są rekompensatą za społeczną akceptację tego faktu, która z uwagi na swoje ograniczenie ustawowe przestaje być kartą przetargową dla podtrzymywania świadomości o korzyściach płynących z lokalizacją składowiska. Przyczyny tego stanu rzeczy są oczywiste.

W związku z wypłacaną z budżetu państwa opłatą, przez lata został w Gminie rozbudowany system wsparcia dla mieszkańców, który z jednej strony ograniczył jej możliwości dochodów, przy jednoczesnym wzroście wydatków na różne świadczenia. Gmina Różan dotuje sprzedaż wody,

# PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

odbiór nieczystości płynnych i stałych od mieszkańców. Podatki i opłaty lokalne, podatek rolny i leśny są w Różanie najniższe w województwie mazowieckim i prawdopodobnie jednymi z najniższych w Polsce. Rokrocznie Gmina finansuje wyjazdy swoich najmłodszych mieszkańców na kolenie nad morze, wspiera programy zdrowotne, niepełnosprawnych, osoby niezaradne życiowo i najbiedniejsze. Wszystko w imię przekonania mieszkańców, że Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych jest dla Różana dobrem, a nie złem, jak się powszechnie uważa w innych regionach kraju. Dzięki temu mieszkańcom żyje się łatwiej.

Przede wszystkim jednak Gmina Różan aktywnie inwestuje w infrastrukturę poprawiającą, jakość życia swoich obywateli. Lwią część budżetu przeznaczają na inwestycje w drogi, wodociągi, kanalizację, sport, kulturę itp. Plasujemy się wysoko w rankingach udziału wydatków inwestycyjnych w ogólnej sumie wydatków budżetu. Niestety, począwszy od 2010 roku zaczęły nas dotyczyć ograniczenia w wydatkowaniu niezbędnych środków finansowych.

Od trzech lat nie wzrasta opłata za lokalizację KSOP, która, gdyby nie ograniczenie ustawowe wynosiłaby:

Rok	Uzyskany podatek od nieruchomości	Opłata
2010	2.265.816,52	8.909.624,36
2011	2.376.748,93	9.063.266,08
2012	2.460.670,52	9.506.995,72
2013	-	9.842.682,08

Tymczasem wydatki bieżące Gminy z roku na rok są coraz wyższe. Coraz więcej kosztuje utrzymanie gminnej infrastruktury i dotychczasowego zabezpieczenia socjalnego mieszkańców, przekonanych nie bez racji, że należy im się to ze względu na „radioaktywne sąsiedztwo”. Gmina stała się zakładnikiem lokalizacji KSOP, ponieważ z jednej strony wysokość opłaty od kilku lat pozostaje na takim samym poziomie, z drugiej nie ma możliwości zwiększania swoich dochodów poprzez wyższe obciążenia dla mieszkańców, choćby w postaci wzrostu podatków, czy opłat za usługi komunalne. Społeczeństwo tego nie zaakceptuje, bo cena jaką płaci za sąsiedztwo KSOP, jest zbyt wysoka. Brakuje pracy, bo nikt nie chce inwestować w miejscu składowania odpadów promieniotwórczych, działkowicze chętnie pozbywają się swoich atrakcyjnych i pięknie położonych nieruchomości nad Narwią, i przenoszą w „bezpieczniejsze” miejsca, co redukuje dostępność pracy sezonowej. Można wymienić cały szereg powodów, które składają się na utracone i tracone rokrocznie przez Gminę Różan korzyści z tytułu lokalizacji KSOP.

Biorąc powyższe pod uwagę, w toku prac nad nowelizacją ustawy – Prawo atomowe, zaproponowałem zmianę zapisu art. 57. Zmiana polega na usunięciu górnego limitu należnej Gminie opłaty z tytułu lokalizacji KSOP. Należy przy tym zwrócić uwagę, że Gmina Różan zachowuje się racjonalnie i, jak pokazują powyższe tabele, nie winduje podatków, aby w sposób radykalny zwiększyć dochody z tytułu opłaty. Zresztą od 2010 roku nie ma to większego sensu.

Warto zauważyć, że ze względu na brak postępów w zakresie wskazania lokalizacji nowego Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych, jak wynika z deklaracji ZUOP, Ministerstwa Gospodarki i Państwowej Agencji Atomistyki, Składowisko z Różanie będzie funkcjonowało w obecnym stanie, co najmniej do 2023 roku. Będzie, jeśli da się do tego dalej przekonywać mieszkańców. Bez bodźca w postaci zmiany ustawy i usunięcia ograniczenia w wysokości opłaty,

# PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

która wynosi w chwili obecnej 8.550.000 zł nie będzie to możliwe. Różaniacy, co pokazała historia są zdecydowani na różne formy protestu, bo od tego zależą nasze życie, zdrowie i przyszłość naszych dzieci. To niewiele w porównaniu z kilkoma milionami złotych dodatkowej opłaty. W Różanie żyje się dobrze i chcielibyśmy utrzymać obecny poziom satysfakcji mieszkańców. Mam nadzieję, że przy pomocy organów państwa będzie to zadanie możliwe do zrealizowania.

*Piotr Świdorski*  
*Burmistrz Gminy Różan*

# Mała encyklopedia energii jądrowej

## Mini Encyclopedia of Nuclear Energy

