

# ENERGETYKA JĄDROWA – STANDARYZACJA I BEZPIECZEŃSTWO

**X Ogólnopolskie Warsztaty Akceleracji  
i Zastosowań Ciężkich Jonów  
SLCJ-UW, 19 - 25 październik 2014**

**Ludwik Pieńkowski**

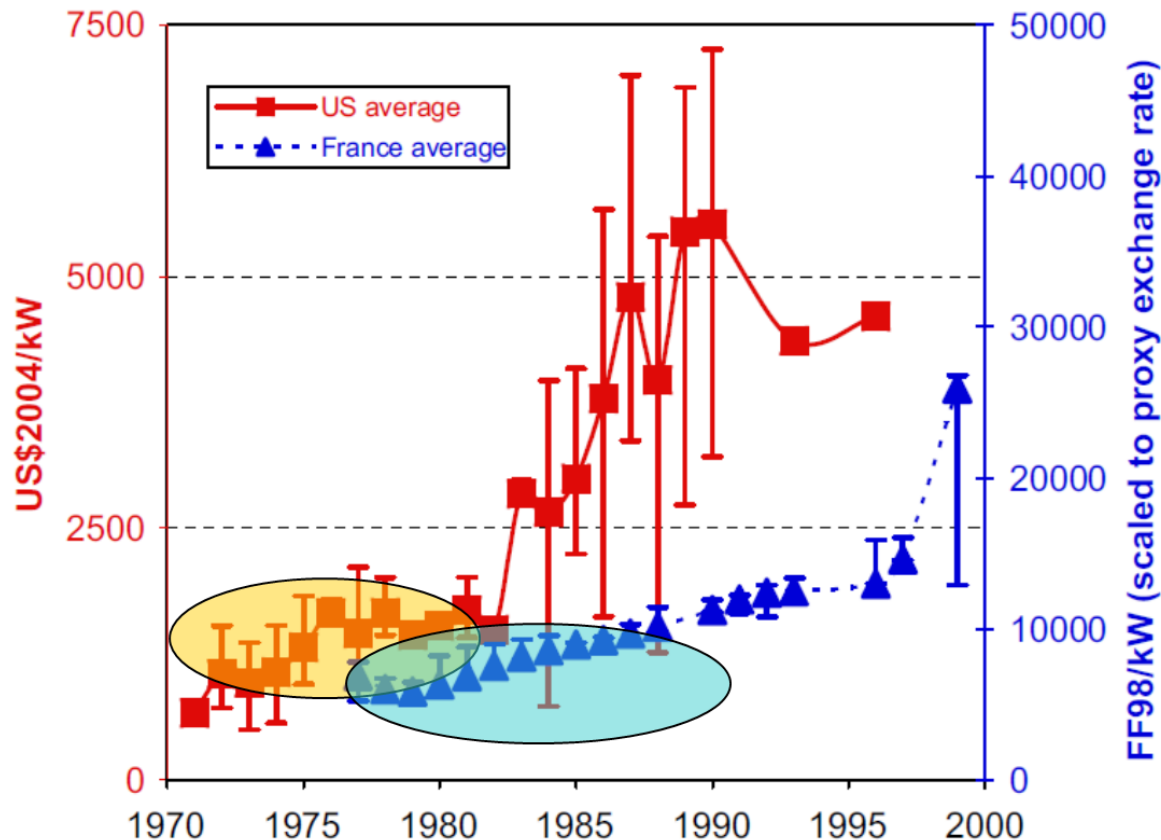
*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Energetyki i Paliw*

**Tomasz Lotz**

*Centrum im Adama Smitha*

- Koszty
  - budowy elektrowni jądrowych,
  - efekt skali
- Status wybranych projektów SMR  
**SMR – Small Modular Reactors – moc elektryczna < 300 MW**
- Wielkość reaktora a jego bezpieczeństwo
- Historia małych i dużych reaktorów
- Lekcja z katastrofy Three Mile Island w 1979 roku
- Wdrożenie **standardowych** reaktorów małej mocy

# Koszt budowy elektrowni jądrowych we Francji i USA



Arnulf Grubler

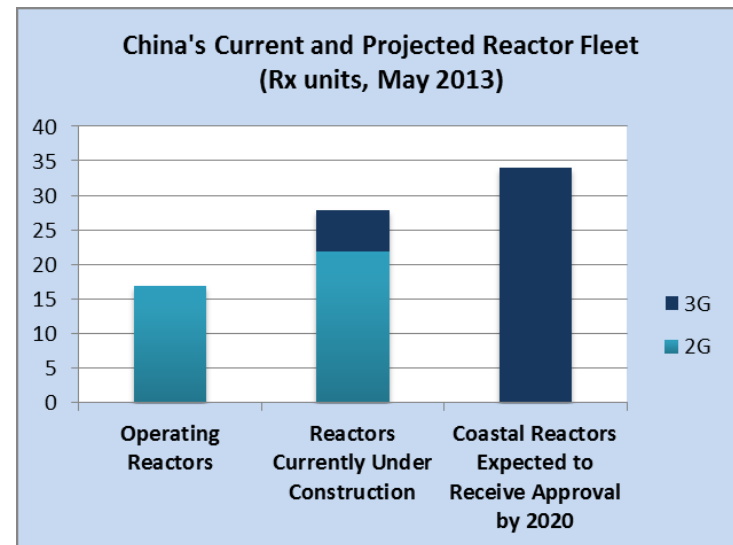
The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing  
 Energy Policy 38 (2010) 5174-5188

# Elektrownie jądrowe w Chinach

Summary: China's Expanding Nuclear Fleet		
Reactor Model	Operating Units	Under Construction Units
CNP-600	4	2
Framatome PWR-1000	4	-
CPR 1000	4	18
AECL Candu-6	2	-
VVER-1000 (AES-91)	2	1
CNP-300	1	-
EPR	-	2
AP1000	-	4
HTR-PM	-	1
<b>TOTAL</b>	<b>17</b>	<b>28</b>
Reactor Model	Coastal Units Planned (pre-2020 construction start)	Inland Units Planned (suspended)
ACPR1000 / ACP1000	14	-
AP1000*	14	12
VVER-1000 (AES-91)	3	-
CAP1400	2	-
EPR	2	-
BN-800	2	-
ACP100	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>38</b>	<b>13</b>

\*Chinese indigenous adaption

Figure 2



CPR 1000 – na bazie Framatome (AREVA)  
 AP1000\* – na bazie AP1000 Westinghouse

China's Nuclear Restart; Opportunities and Challenges in a Modernizing Market

This report is presented by Nicobar Group in Cooperation with the U.S. Department of Commerce, May 18, 2013

[http://export.gov/china/build/groups/public/@eg\\_cn/documents/webcontent/eg\\_cn\\_067072.pdf](http://export.gov/china/build/groups/public/@eg_cn/documents/webcontent/eg_cn_067072.pdf)

## ***Koszty budowy dużych elektrowni jądrowych***

- Jak budowano tanie elektrownie jądrowe?
  - Kiedyś USA i Francja, a teraz Chiny:
    - 20 i więcej **standardowych** reaktorów w 15 lat,
    - każdy blok w 5 – 7 lat;
    - Koszt inwestycji 1000 – 2500 USD<sub>2006</sub>/kW
  - Kore:
    - Seria 10 reaktorów „u siebie” plus eksport technologii

# Standardowy program w Polsce

- 6 GW to zbyt mała skala programu dla własnego standardu z blokami energetycznymi o mocy  $\sim 1$  GW (reaktorami o mocy cieplnej 3 GW)
- Wszystkie rozwiązania brane pod uwagę „ocierają się” o efekt standaryzacji
- Obecnie jedynie program chiński jest na tyle duży, że tworzy standardy
- Możliwe, że element chiński i tak się pojawi w polskim programie
  - Inżynierowie z Chin są zatrudnieni przy budowie elektrowni w USA
  - EDF odstąpił chińskiemu przedsiębiorstwu od 30 do 40% udziałów w budowie elektrowni jądrowej w Wielkiej Brytanii

## **Vogtle 3&4, US**

„Shaw (now CB&I) has agreed with China's State Nuclear Power Technology Corporation (SNPTC) to deploy engineers with experience in building China's AP1000 units to provide technical support. Following early delays, construction started in March 2013 and the units are expected on line in mid-2017 and mid-2018.”  
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/USA--Nuclear-Power/>

## **EDF Energy - Hinkley Point C and Sizewell C, UK**

EDF announced in October 2013 that two Chinese companies, CGN and CNNC, would take 30-40% of the Hinkley Point C project between them, Areva would take 10%, and other interested parties might take up to 15%.\* The French government holds 85% of EDF and 80% of Areva, the Chinese companies are wholly government-owned.

<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/United-Kingdom/>

## ***Koszty budowy dużych elektrowni jądrowych***

- W energetyce jądrowej dominują reaktory duże, z blokami energetycznymi o mocy od około 1000 do 1600 MW elektrycznych
- **2000 USD/kW** – szacunkowe koszty ~2005 roku
- **6000 USD/kW** – szacunki w roku 2014
- Koszty budowy dużych elektrowni znacznie wzrosły w ciągu ostatnich kilkunastu lat

- Najprostszy model efektu skali:
  - Moc proporcjonalna do objętości,  $P \sim R^3$
  - Koszt proporcjonalny zużytych materiałów, do powierzchni  $K \sim R^2$
  - $K_1 = K_0 * (P_1/P_0)^n$ ,  **$n=0,67$**



# Efekt skali, koszt inwestycji

## *Kiedyś małe reaktory przegrały z dużymi*

Table 6. Capital investment decomposition (single unit)  
as percentage of total overnight cost for  $1 \times 300$  MWe plant

	$1 \times 300$	$1 \times 650$	$1 \times 1\,000$	$1 \times 1\,350$
20 Land and land rights and site utilities	2.8	2.9	3.0	3.1
21 Buildings and structures	14.8	21.6	26.7	31.0
22 Steam production and discharge processing	23.5	39.4	53.5	66.8
23 Turbines and alternators	10.5	17.7	23.7	29.1
24 Electrical, instrumentation and control	5.6	8.9	11.5	13.8
25 Miscellaneous plant equipment	2.5	3.2	3.7	4.1
26 Water intake and discharge structures	1.9	3.6	5.0	6.4
<b>Sub-total for direct costs</b>	<b>61.5</b>	<b>97.3</b>	<b>127.2</b>	<b>154.2</b>
91 Engineering and design	13.3	16.4	18.9	21.1
92 Construction services	6.2	7.1	7.8	8.5
93 Other indirect costs	4.0	4.7	5.4	6.0
<b>Sub-total for indirect costs</b>	<b>23.4</b>	<b>28.2</b>	<b>32.1</b>	<b>35.6</b>
Contingencies	2.7	4.1	5.2	6.2
Owner's costs	12.3	15.4	17.5	19.1
<b>Total overnight cost</b>	<b>100.0</b>	<b>145.0</b>	<b>182.0</b>	<b>215.0</b>
<b>Specific overnight cost ratio (<math>1 \times 300 = 100</math>)</b>	<b>100</b>	<b>67</b>	<b>55</b>	<b>48</b>

Source: J. Rouillard and J.L. Rouyer [10].

**najprostszy model:      100      77      66      60**

## ***Status wybranych projektów SMR***

***SMR – Small Modular Reactors – moc elektryczna < 300 MW***

<b>Projekt</b>	<b>Kraj</b>	<b>Typ</b>	<b>Moc cieplna MW</b>	<b>Moc elek. MW</b>	<b>Status</b>
HTR-PM	Chiny	HTR	2*250	210	W budowie dwa reaktory. Planowane uruchomienie w 2017 roku. Koszt: <b>2 500 USD/kW</b> mocy elektrycznej
SMART	Korea	iPWR	330	100	Standardowa licencja uzyskana w 2012 roku
mPower	USA	iPWR	530	180	Wspierany przez DOE. W maju 2014 B&W zredukował finansowanie. Planowane uruchomienie ~2025 roku. Koszt: <b>5 000 USD/kW</b> mocy elektrycznej
NuScale	USA	iPWR	160	45	Wspierany przez DOE. W maju 2014 NuScale zwiększył zatrudnienie. Planowane uruchomienie ~2025 roku. Koszt: <b>4 000 USD/kW</b> mocy elektrycznej

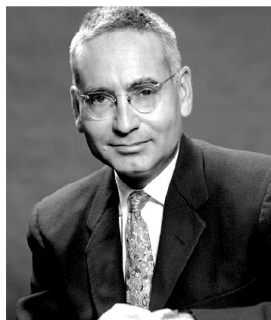
**Szacunkowe koszty budowy kilowata mocy w dużych i małych reaktorach są dziś porównywalne, ale budowę małych reaktorów łatwiej sfinansować**

## Efekt skali i efekt standaryzacji

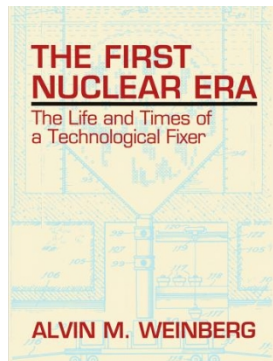
- Globalna głębokość rynku
  - ~430 reaktorów, moc elektrowni ~370 GW i elektrownie te generuje ponad 10% prądu
  - Ile jest miejsca na świecie na nowe reaktory dużej mocy?
- Istnieje gdzieś granica, gdzie **efekt standaryzacji** daje większe korzyści niż **efekt skali**

# **Rys historii energetyki jądrowej**

## ***Historia losów małych i dużych reaktorów około 1960 roku***



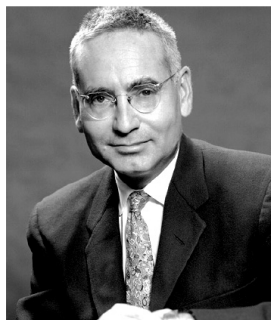
Alvin M. Weinberg



- Pierwsze elektrownie jądrowe są małe, często o mocy mniejszej niż 100 MW elektrycznych
- Buduje się coraz większe reaktory gdyż efekt skali wzmacnia konkurencyjność
- Weinberg analizuje jedną z groźnych sytuacji i stwierdza:

*"we had to argue that, yes, a severe accident was possible, but the probability of its happening was so small that reactors must still be regarded as safe. **Otherwise put, reactor safety became probabilistic, not deterministic**"*

# ***Historia losów małych i dużych reaktorów rok 1973***



Alvin M. Weinberg



Chester E. Holifield

- W USA działa lub jest w trakcie budowy, kilkadziesiąt dużych reaktorów, ~1000 MW
- Weinberg konsekwentnie promuje idee bezpieczeństwa deterministycznego
- Kongresmen Chester E. Holifield:  
***„Alvin, if you are concerned about the safety of reactors, then I think it may be time for you to leave nuclear energy”***
- **28 marzec 1979 – katastrofa Three Mile Island reaktora lekkowodnego dużej mocy, 900 MW elektrycznych**

## ***Lekcja z katastrofy Three Mile Island w 1979 roku***

- Duże reaktory lekkowodne są bezpieczne
  - W TMI nie doszło do zagrożenia ludności
- Z jakimś małym prawdopodobieństwem duże reaktory zawsze będą stwarzały zagrożenie dla ludności
  - **Eliminacja błędów, wysoka jakości, zwielokrotnienie systemów bezpieczeństwa, trening, kontrola, edukacja będą zmniejszać ryzyka**
  - **Zawsze będą grupy ludzi domagające się zwiększenia bezpieczeństwa, co będzie zwiększać koszty.**  
**Od katastrofy TMI efekt skali jest „zjadany”  
przez rosnące koszty bezpieczeństwa**

## ***Katastrofy reaktorów***

- Trzy największe katastrofy w elektrowniach jądrowych
  - **Czarnobyl** - niekontrolowany wzrost mocy reaktora przewyższający możliwości systemów chłodzenia
    - **WADLIWY PROJEKT REAKTORA**
  - **TMI** - brak możliwości odprowadzanie do otoczenia ciepła powyłaczeniowego z powodu utraty dużej ilości wody chłodzącej reaktor
  - **Fukushima** – zniszczenie przez tsunami systemów odprowadzających ciepło powyłaczeniowe
- Każdy reaktor po wyłączeniu nadal wytwarza ciepło, którego źródłem są rozpady radioaktywne



# ***Wielkość reaktora a jego bezpieczeństwo problem odprowadzenia ciepła powyłaczeniowego***

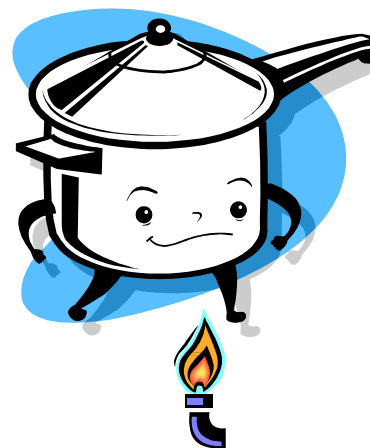
## ***Analogia do szczelnie zamkniętego szybkowaru***

**Duży gaz**



**Po jakimś czasie  
będzie eksplozja**

**Odpowiednio mały gaz**



**Ustali się stan równowagi  
i eksplozji nie będzie**

## ***Reaktory HTR mogą same się wyłączyć i bezpiecznie wychłodzić***

***Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone helem, nazywane też HTGR***

Dowodły tego eksperymenty z reaktorami testowymi AVR, HTR-10, a ostatnio HTTR:

***„Spontaneous stabilization of HTGRs without reactor scram and core cooling — Safety demonstration tests using the HTTR: Loss of reactivity control and core cooling”***

Nuclear Engineering and Design 271 (2014) 379–387

## ***Reaktory PWR małej mocy mogą same się wyłączyć i bezpiecznie wychłodzić***

Dowiódł tego między innymi tragiczny los okrętu podwodnego Kursk w 2000 roku: „*The bulkheads of the fifth compartment withstood both explosions, **allowing the two reactors to automatically shut down and preventing nuclear meltdown and widespread contamination of the sea.***”

[http://en.wikipedia.org/wiki/Kursk\\_submarine\\_disaster](http://en.wikipedia.org/wiki/Kursk_submarine_disaster)



# ***Inherentne bezpieczeństwo***

## ***Ochrona fizyczna przed atakiem terrorystycznym***

**2 GW, 2 duże reaktory**



Odciełiśmy im prąd, wodę,  
uszkodziłiśmy systemy  
awaryjne. **Jest szansa,  
że niedługo dojdzie do  
katastrofy!!!**

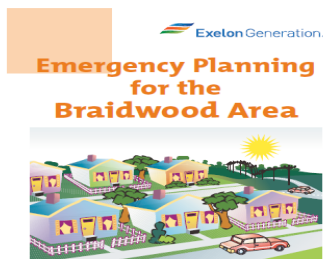
**2 GW, 10 małych reaktorów**



Odciełi nam prąd, wodę,  
systemów awaryjnych nie  
uszkodzili, bo ich nie  
mamy. **Nadal nic nam nie  
grozi!!!**

# Strefy bezpieczeństwa w USA

**16 km** wokół reaktorów dużej mocy



**Important Safety Information For Your Community 2013/2014**

Please read the entire brochure, discuss this information with members of your family, and then keep the brochure in a convenient place for future use. The brochures are updated and distributed annually.



Merytoryczne argumenty za **kilkuset metrową strefą** wokół SMR

Regulator (NRC) opracowuje procedury, warunki, których spełnienie umożliwi wyznaczenie tak małych stref bezpieczeństwa

Table 1 describes an example of using a scalable EPZ.

**Table 1 Example of a Scalable EPZ**

EPZ Category	Dose Limits	Plume Exposure EPZ	Ingestion Exposure EPZ	EP Plan Required	Offsite EP Plan
I	Projected dose at site boundary <1 rem	Site boundary	No; however, EPZ can expand based on event, if determined to be necessary	Yes	All hazards—license condition*
II	Dose at site boundary $\geq 1$ rem, <1 rem at 2 miles	2 miles**	Yes; dosed-based distance, ad hoc basis***—Food and Drug Administration (FDA) food PAGs	Yes	Yes
III	Dose at 2 miles $\geq 1$ rem, <1 rem at 5 miles	5 miles**	Yes; dosed-based distance, ad hoc basis***—FDA food PAGs	Yes	Yes
IV	Dose at 5 miles $\geq 1$ rem	10 miles**	Yes; per current regulations, ad hoc basis***	Yes	Yes

\* The NRC would issue a license condition that will require the licensee to ensure that a certified offsite all-hazards plan exists (which provides the basic framework for responding to a wide variety of disasters).

\*\* The staff will also consider the area needed to ensure an adequate planning basis for local response functions and the area in which acute health effects could occur.

\*\*\* Per NUREG-0396, actions that would provide dose savings for any such accident can be taken on an ad hoc basis using the same considerations that went into the initial action determinations.

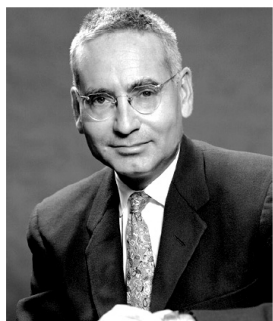
SECY-11-0152, October 28, 2011:

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1125/ML112570439.pdf>

## Zasady licencjonowania co jest bezpieczne, a co nie jest?

- Obecnie:
  - Licencja pierwotna
    - Kosztowne, wiele miliardów dolarów
    - Wymaga niezwykle kompetentnego, doświadczonego regulatora
  - Licencje wtórne
    - kopiowanie wzorów
    - „ułożenie” licencji w ramach obowiązującego w danym kraju porządku prawnego
- Wizja:
  - możliwość zakupu ***standardowej*** licencji

## ***Bezpieczne reaktory rok 1989***



Alvin M. Weinberg

### ***The Second Fifty Years of Nuclear Fission***

**Can we develop nuclear reactors whose safety is deterministic, not probabilistic**, and which, if developed, would meet the public's yearning for **assurance of safety, not simply assurance of the probability of safety?** This is the task that has engaged many nuclear engineers in a search, now ten years old, for an inherently safe reactor.

**Now, in some sense, a device that produces 200 megawatts of afterheat and is immune from meltdown under every circumstance, conceivable and inconceivable, is a contradiction in terms.** But a device whose safety depends on the working of immutable laws of nature, with a minimum of interventions either mechanical, electrical, or human - a device in short whose safety is so transparent that the skeptical elite, as well as the informed public, will regard it as safe - this I regard as eminently possible and worthwhile.



## ***Wdrożenie reaktorów małej mocy***

- Nakreślenie wizji wdrożenia w Polsce reaktorów małej mocy jest jednym z celów programu HTRPL
- Wdrożenie w Polsce w ciągu dekady jest możliwe i celowe
  - Dwie technologie są dojrzałe: HTR, iPWR
  - Niski koszt budowy standardowego modułu
  - SMR-y wzmocnią bezpieczeństwo energetyczne kraju i firm
    - Przy zakładach przemysłowych będą źródłem ciepła procesowego
    - W układzie rozproszonym będą stabilizować sieć
- Istotne bariery wynikają z braku wizji wdrożenia SMR-ów w polityce energetycznej państwa
  - Informacja dla Komisji Nadzwyczajnej do spraw energetyki i surowców energetycznych, Sejm RP, 24 lipiec 2014 r.